

《机场排放管控和可持续发展的国际经验》

项目报告

英环（上海）咨询有限公司

2021 年 8 月

本项目为能源基金会资助的 32335 号项目

致谢

感谢能源基金会和北京市生态环境局对本项目的慷慨支持。感谢项目开题会、中期会、结题会各位领导和专家对本课题提出的宝贵意见和建议。

目录

致谢 2

目录 3

1.	项目介绍	8
1.1	项目背景	8
1.1.1	航空业及航空业空气污染物排放	8
1.1.2	中国的航空业及机场排放	9
1.1.3	机场空气质量评估及减排措施制定手段	11
1.1.4	国际机场减排政策法规	12
1.1.5	机场的可持续发展	14
1.2	项目内容及技术路线图	15
2.	机场空气质量分析方法概述	17
2.1	机场空气质量分析常用方法及工具	17
2.1.1	常用方法	17
2.1.2	常用工具	17
2.2	机场排放清单	20
2.2.1	机场排放源分类	20
2.2.2	重要定义	21
2.2.3	建立机场排放清单时的主要考量要素	22
2.2.4	机场各排放源排放计算方法概述	28
2.3	扩散模型	53
2.3.1	基本方法	53
2.3.2	机场部分	55
2.3.3	道路部分	56
2.3.4	扩散模型中的排放源	57
2.4	机场的空气质量监测	59
3.	机场减排策略概述	64

3.1 地面支持设备（GSE）减排策略概述	65
3.1.1 修建替代基础设施和硬件系统	67
3.1.2 安装排放控制设备	68
3.1.3 使用可替代燃料/电动化	68
3.1.4 改进操作/运营流程	74
3.1.5 其他措施	75
3.1.6 适用不同 GSE 类型的减排策略	75
3.2 地面连接机动车辆（GAV）减排策略概述	77
3.2.1 使用可替代燃料/电动化	78
3.2.2 通过政策或运营手段实现减排	81
3.2.3 适用不同 GAV 类型的减排策略	81
3.3 典型案例	83
3.3.1 美国环保署自愿性机场低排放项目（VALE）和零排放机场车辆和基础设施试点项目（ZEV）	83
3.3.2 洛杉矶国际机场（LAX）的 GSE 减排政策	85
4. 机场可持续发展	88
4.1 可持续发展的概念	88
4.1.1 机场碳管理与可持续发展	89
4.2 国际机场环境可持续发展案例	91
4.2.1 世界代表性机场的环境可持续发展规划总结	91
4.2.2 典型环境可持续发展案例	96
4.3 国内机场可持续发展的探索	109
5. 结论和建议	116

图表目录

表 1.2013 年 10 个代表性机场大气污染物排放量估算	10
表 2.四种常用空气质量模拟工具的对比	19
表 3.机场主要排放源及描述	20
表 4. ICAO 标准 LTO 循环下的模式工作时间	21
表 5.GHG 排放清单中排放源与相应空气污染物排放源的对照	25
表 6.三种不同复杂程度的排放清单的编制方法及其特点	27
表 8.飞机操作输入数据源	31
表 9.飞机/引擎组合举例	32
表 10.滑行时间输入数据源	32
表 11.不同飞机操作 APU 排放的代表值	34
表 12.负荷真实时间举例	34
表 14.苏黎世国际机场飞机操作标准排放因子	35
表 13. AEDT 模型中每个 LTO 循环中标准的 GSE 使用时间	37
表 15.履带装卸机在不同模型中的默认参数比较	38
表 17.运用不同方法建立 GSE 排放清单所需数据信息比较	39
表 18. 不同复杂程度方法对 GAV 数据的要求	42
表 19. GAV 数据收集来源-机动车组成（中级或者进阶方法）	43
表 18.国外常用机动车排放因子模型/计算工具比较	45
表 19.建设设备数据实例	53
表 20.机场区域常用扩散模型	55
表 21.AEDT 和 AERMOD 模型中源类型对应关系	57
表 22.AERMOD 模型输入参数和数据要求	58
表 23. ICAO 对于监测站点选择的通用方法和判断依据	60
表 24.不同类型机场的常见 GSE 类型	65
表 25.不同类型机场的 GSE 数量	66
表 26.机场各类型 GSE 的占比	67
表 27.常见的可替代燃料及其特点	69
表 28.常见燃料的价格（2021 年 1 月）	71
表 29.考虑含能量后的燃料成本（2021 年 1 月）	72

表 30.传统短距离窄体客机拖车成本与电动化拖车的年支出对比.....	72
表 31.常见可替代燃料的减排潜力.....	73
表 32.机场常见 GAV 类型	77
表 33.机场常见 GAV 类型	82
表 34.VALE 项目 2020 年资助情况.....	84
表 35.LAX 2017 年各类型 GSE 数量及燃料类型	86
表 36.LAX 2017 年基准 GSE 污染物排放量（以燃料类型区分）	86
表 37.LAX 实行 GSE 排放政策的减排潜力	87
表 38.机场四个可持续发展方向的主要概念和分目标（EONS）	88
表 39. ACA 统计数据- 2009 至 2018 年每年的 CO ₂ 减排当量	90
表 40.世界代表性机场可持续发展规划/报告名称	91
表 41. 12 个代表性国际机场环境可持续发展策略总结	93
表 42. 苏黎世国际机场 2018 年到 2020 年关键环境可持续发展数据	97
表 43. 东京成田国际机场 LED 照明系统更新节点	104
表 44. 东京成田国际机场可持续发展主要目标和完成情况	105
表 45. 目前国际主流可持续航空燃料技术.....	107
表 46. 国内部分机场的节能减排可持续发展措施总结.....	113
 图 1.全美 2011 年交通运输行业总排放	9
图 2.中国航空器排放量及排放增长率估算.....	10
图 3.空气质量要素及其相互关系.....	12
图 4.机场可持续发展的主要考量要素	15
图 5.项目目标和工作路线	15
图 6.机场碳排放的计算边界及贡献	24
图 7.“围裙”抽样调查法中的“近机位停靠围裙”	38
图 8.洛杉矶国际机场的地面交通图	41
图 9. 机场小时/天/月度时间因子示例（时间因素对 GAV 数据的影响）	44
图 7.AERMOD 进行扩散模型模拟的步骤流程图	56
图 8. 通用机场监测点位选择方案	59
图 9. 香港国际机场三个监测站点的位置	61
图 10. 苏黎世国际机场及附近的空气质量监测站点和对于当地空气质量的影响	61
图 11. 北京首都机场不同季节周边区域 PM _{2.5} 地面平均浓度贡献	62

图 12. 天津滨海机场不同季节周边区域 PM _{2.5} 地面平均浓度贡献	63
图 13. 美国各机场 GAV 使用可替代燃料的情况	79
图 14. GAV 不同可替代燃料的比较	80
图 15. 自 1997 年来，苏黎世国际机场的 Scope 1 和 Scope 2 的二氧化碳排放量	96
图 16. 苏黎世国际机场“圆环”顶部安装的太阳能电池板阵列	97
图 17. 达拉斯国际机场碳减排的各项利用措施	99
图 18. 达拉斯国际机场 2006 年和 2020 年能源消耗量饼图	100
图 19. 达拉斯国际机场 2020 年不同机场点位碳足迹饼图	100
图 20. 达拉斯国际机场 2011 年到 2020 年二氧化碳排放量变化趋势图	101
图 21. 达拉斯国际机场从 2011 年到 2020 年的减排变化趋势图	101
图 22. 东京成田国际机场 2030 年和 2050 年可持续发展目标路线示意图	103
图 23. 东京成田国际机场 LED 照明系统示意图	104
图 24. 东京成田国际机场飞机追踪地图和空中走廊示意图	105
图 26. 香港国际机场的电动化 GSE 设备	108
图 27. 北京大兴机场绿色化进程示意图	112

1. 项目介绍

1.1 项目背景

1.1.1 航空业及航空业空气污染物排放

在不同模式的运输行业中，民用航空业已成为世界上最快捷、最安全、可达距离最远的运输模式。目前，世界航空运输业为全世界超过 30 亿人提供服务，并带来了超过 5,600 万个就业机会。货运方面，尽管飞机仅仅运输了世界上 0.5% 的货物，但这些货物的价值超过了所有货物总价值的 35%，且仅仅消耗了世界 2.2% 的能源¹。

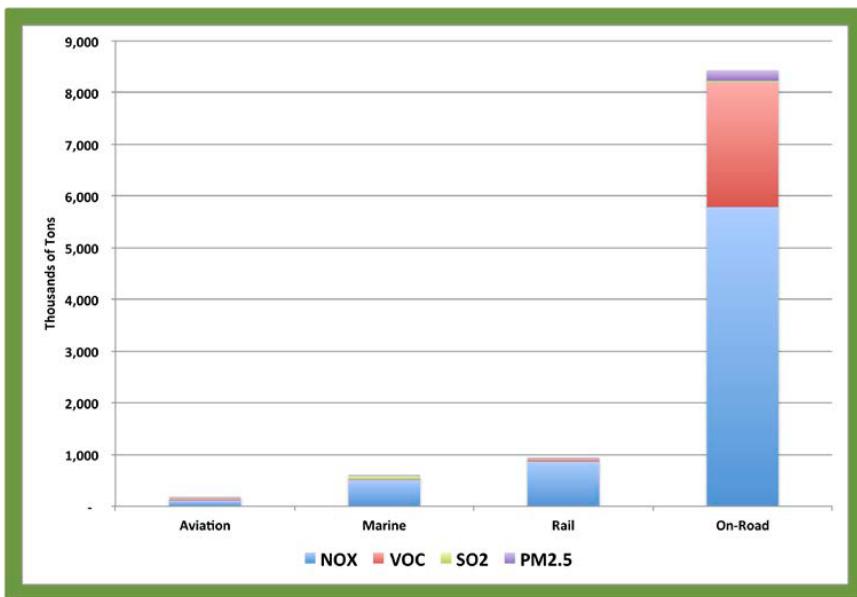
随着世界航空业的快速发展，飞机及机场产生的污染也受到了更多的关注。一般而言，飞机及机场各项活动所产生的主要空气污染物包括如下几种：

- 二氧化碳（CO₂），由各类引擎或设备的完全燃烧过程产生，主要温室气体之一；
- 氮氧化物（NO_x），由空气中高温/高压燃烧过程产生，主要空气污染物之一，对臭氧生成有影响；
- 碳氢化合物（HC），由不完全燃烧过程产生，其中的某些化合物属于挥发性有机物（VOC）或有害空气污染物（HAPs），主要空气污染物之一，对臭氧生成有影响；
- 一氧化碳（CO），由不完全燃烧过程产生，主要空气污染物之一；
- 硫氧化物（SO_x），燃料中低含量的硫与氧在燃烧过程中产生，主要空气污染物之一，对二次颗粒物生成也有影响；
- 颗粒物（PM），由不完全燃烧过程产生的细小颗粒或灰尘，主要空气污染物之一。

相比其他的运输模式，航空业和机场所产生的空气污染占比相对较小。来自美国联邦航空总署（US FAA）的数据显示（下图 1）¹，2011 年全美与交通运输相关的主要空气污染物排放仍然主要来自于道路交通，来自航空业的主要空气污染物排放在各个运输模式中排行最末。但需要注意的是，虽然航空器的总排放在运输行业中不算显著，但其增长速度非常惊人。2011 年，来自航空业的 NO_x 排放量的增长率就已经超过了道路交通 NO_x 排放量的增长率。随着对其他运输模式排放，尤其是对道路交通排放的进一步控制，航空业的排放将越来越显著。国际民用航空组织（ICAO）认为，与机场相关的排放源可能会对机场周边的空气质量产生负面影响。尽管各个国家和地区已经采取了很多措施来减少排放，但这些措施取得的成效仍然有可能被航空业相关活动水平的快速增长所抵消。因此，对机场及航空器的排放进行进一步的研究和管控是重要且必要的。

¹ Federak Aviation Administration (US FAA). Aviation Emissions, Impacts & Mitigation: A Primer. 2015.

图 1.全美 2011 年交通运输行业总排放



1.1.2 中国的航空业及机场排放

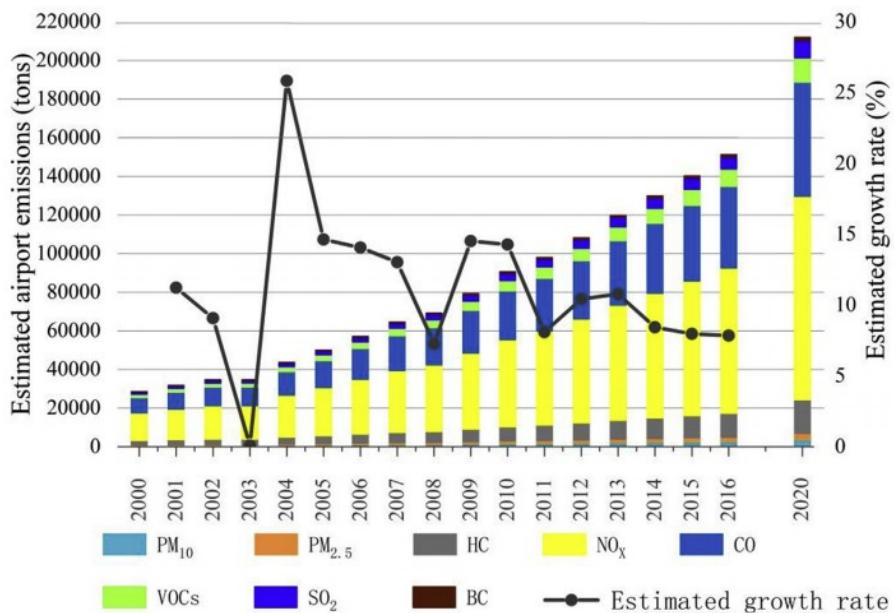
近年来，中国民用航空同样迎来高速发展时期，航空业务规模快速增长，基础设施能力大幅提高。根据《2019 年民航行业发展统计公报》²，2019 年，中国全行业完成旅客运输量 65993 万人次，完成货运运输量 753.14 万吨，航空公司完成运输飞行小时 1231 万小时，在册飞机 3818 架，均比 2018 年有明显增长；按机场数量来看，截至 2019 年底，我国共有颁证运输机场 238 个，全行业全年新开工、续建机场项目 126 个。这些数字表明，中国民航的高速发展势头还未停止。可以预见的是，在未来的一段时间，航空业将在运输行业中占有越来越重要的位置。

由于对航空器和机场进行排放计算相对困难，目前国内对航空业和机场排放的研究仍较少。根据伯鑫等的研究结果³，从 2000 至 2016 年，中国民用航空器排放主要空气污染物的总量从 28,588 吨增长至 151,369 吨，年排放增长率在 0.08% 至 25.84% 之间。其中，NO_x 是最主要污染物，2016 年总排放量为 75,246 吨，占总污染物排放的 49.71%；CO 为第二大污染物，2016 年总排放量为 42,219 吨，占总排放的 27.89%；HC 为第三大污染物，2016 年总排放量为 12,379 吨，占总排放量的 8.18%。这个趋势与表 1 中的污染物贡献趋势是一致的。按照作者的预计，2020 年的航空器总排放相比 2016 年将再提升约 1.4 倍，如下图 2 所示。

² 中国民用航空局，《2019 年民航行业发展统计公报》，2020。

³ Bo et al. Aviation's Emission Contribution to the air quality in China. 2019. *Atmospheric Environment*.

图 2.中国航空器排放量及排放增长率估算



2019 年的《<环境影响评价技术导则 民用机场建设工程>编制说明（征求意见稿）》中包括了一个对 2013 年我国 10 个代表性机场大气污染物的排放量估算⁴，如下表所示。

表 1.2013 年 10 个代表性机场大气污染物排放量估算

机场	CO	THC	TVOC	NO _x	SO _x	PM _{2.5}
首都机场	2676.41	467.95	544.60	4199.67	304.65	23.37
广州白云机场	1695.5	300.46	350.15	2553.72	192.95	14.53
深圳宝安	1004.76	181.32	211.58	1460.27	115.54	8.56
郑州机场	490.06	86.21	100.93	662.14	55.23	3.99
三亚凤凰机场	293.905	53.63	62.82	387.69	34.00	2.43
宁波栎社机场	167.835	31.15	36.38	228.01	19.08	1.37
徐州观音机场	31.55	5.75	6.74	41.54	3.68	0.26
临沂沭埠岭	26.74	4.80	5.63	33.98	3.05	0.22
武夷山机场	25.64	4.68	5.48	33.85	3.00	0.22
盐城机场	11.62	2.12	2.49	15.35	1.36	0.10

⁴ 《环境影响评价技术导则 民用机场建设工程》编制组. 《<环境影响评价技术导则 民用机场建设工程>编制说明（征求意见稿）》. 2019.

由表可见，目前机场的首要空气污染物主要是 NO_x，其次是 CO 和 TVOC。如果将北京首都机场的 NO_x 排放量与北京市 2013 年 NO_x 总排放量进行比较，则首都机场的年 NO_x 排放量约为北京市 2013 年总 NO_x 排放的 2.5%⁵。

伯鑫等的另一项研究对北京市首都机场的大气污染进行了模拟⁶，该研究表明北京市首都机场 2012 年污染物排放总量分别为，NO_x 3119.5 吨，CO 2497.36 吨，VOC 259.83 吨，SO₂ 191.37 吨，PM₁₀ 27.73 吨。尽管由于估算方法不同，该数据与上表 1 中的数据略有不同，但各个污染物的总体量级和贡献是类似的。

对于温室气体排放，航空运输也是重要的排放源之一。根据 2020 年的《中国移动源环境管理年报》⁷，2014 年，航空运输占总交通运输温室气体排放的 6.1%，低于道路运输的 84.1%，和水路运输的 8.5%，位列第三。考虑到航空业的发展趋势，未来这一比例可能还会上升。

1.1.3 机场空气质量评估及减排措施制定手段

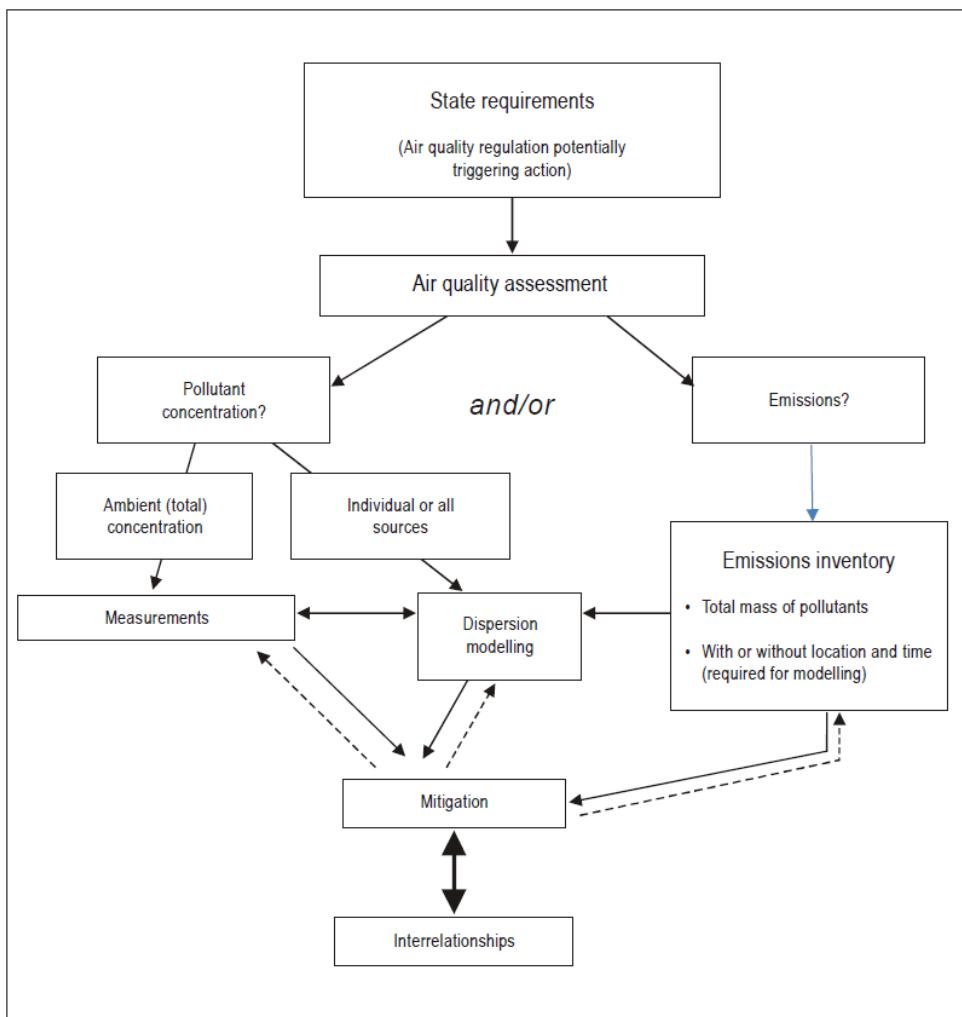
评估机场排放及其对周边空气质量的影响涉及到多个方面的因素。下图展示了与机场空气质量相关的各个要素及其相互关系。

⁵ 北京市 2013 年 NO_x 年排放量为 16.63 万吨，数据来自北京市 2013 年环境公报。

⁶ 伯鑫等. 《首都国际机场大气污染模拟研究》. 2017. 环境工程.

⁷ <https://www.vecc.org.cn/jdcwrfznb/1870.jhtml>

图 3. 空气质量要素及其相互关系



如图所示，对机场的周边空气质量进行评估的主要手段是建立污染物排放清单和进行空气扩散建模。建立污染物排放清单是评估大气污染、进行空气质量模拟、制定相应污染控制措施及法律法规的基础和有效途径之一。机场涉及的污染源类型较多，污染物种类比较复杂，大气污染物排放水平的计算涉及到多种方法和模型的运用。空气扩散建模则主要是通过空气扩散模型获取机场周边各污染物的浓度信息及其在时间、空间上的分布。除以上两种手段外，对周边空气质量进行实际测量也可以获取有效的空气治理信息。这三种手段，无论是单独使用，还是联合使用，都可以为机场后续报告、合规、以及减排策略的规划等提供有效的数据支撑。

1.1.4 国际机场减排政策法规

对机场和航空业排放产生影响的政策法规一般有两种类型，一种是针对机场附近的局部空气质量的法规，另一种则是针对机场各个排放源，如航空器、非道路机械、机动车等的法规。地方空气质量法规要求当地达到国家或地方的空气质量标准，例如美国环保署（US EPA）颁布实施的《清洁空气法案》明确要求美国各州的空气质量达到《国家环境空气质量标准》（NAAQS）中的要求，而中国也有相应的《大气污染防治法》和《环境空气质量标准》，以及其他法规标准。这些法规主要针对几种主要空气污染物，例如在 1.1.1 节提到的氮氧化物、碳氢化合物、一氧化碳等等。

针对机场不同排放源的法规也多种多样，例如机动车和非道路机械需要遵守相应的尾气排放标准，而固定源则需要遵守固定源排放标准等等。然而，正如 1.1.2 节中提到的，机场的主要排放来自于航

空器的排放。相比其他已经被管控多年的排放源，对航空器排放进行管控的法规还相对较少，且主要的排放要求来自 ICAO 等国际组织。1981 年，ICAO 发布了航空器引擎排放标准，该标准要求航空器引擎减少 HC、CO、NO_x 和烟尘的排放，并采取措施防止燃油挥发⁸。同时，ICAO 还开发了航空器引擎排放标准认证程序，通过国际合作给予推力在 26.7 千牛顿（kN）以上的涡轮式引擎和涡扇式引擎相应的排放认证⁸。此外，大部分针对非航空器引擎的法规为面向所有同类型的排放源的法规，但很多国家和地区也会对机场的具体污染源排放控制提出专项政策和法规。例如，美国加州的南海岸空气质量管理局（SCAQMD）在其最新版的《大气质量管理规划（AQMP）》⁹中为了 8 小时臭氧达标而提出的一揽子措施中就包括了机场排放控制。此项机场排放控制措施包含在《场地相关移动源计划》中，具体实施方式是由南海岸空气域的五个机场联合签署合作备忘录（MOU），每个机场承诺实施一定的减排措施。中国民航局于 2018 年 9 月制定印发了《民航贯彻落实<打赢蓝天保卫战三年行动计划>工作方案》¹⁰，明确要求机场采用新能源车辆和辅助动力单元（APU）替代设施等任务，并取得了良好的减排成果。

随着气候变化进入全球视野，减少航空器的碳排放也逐渐成为了国际关注的重点。2009 年，国际航空运输协会（IATA）在哥本哈根举行的联合国气候变化框架公约会议上，代表民航业正式提出在将 2050 年二氧化碳排放量相比 2005 年减少 50%。2016 年，ICAO 在第 39 届大会上正式通过了国际航空碳抵消和减排计划（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA）¹¹，这是世界上第一个全球性的行业减排市场机制，也标志着航空业成为世界上第一个由各国民政府协定实施全球碳中和增长措施的行业。在 CORSIA 计划下，全球航空业需要在 2050 年逐步达到以下目标：

- 2035 年的二氧化碳排放量不超过 2020 年的水平，即实现碳达峰；
- 2050 年的二氧化碳排放量应达到 2005 年排放水平的 50% 及以下，最终实现碳中和，将全球航空净排放量稳定在 2019 年的水平。

各个国家和地区积极相应来自 IATA 和 ICAO 的要求。例如，欧盟在 2016 年签署了“Bratislava Declaration”¹²，承诺从试点阶段开始全面实施 CORSIA 计划。2019 年，欧盟委员会公布了应对气候变化、推动可持续发展的“欧洲绿色协议”¹³。该协议要求欧洲到 2050 年成为全球首个“净零排放区”。欧盟为此制定了详细的路线图和政策框架。2021 年 7 月，欧盟提出“Fit for 55”法规与政策一揽子提案¹⁴，确保欧盟温室气体净排放量在 2030 年减少 55%，并在 2050 年实现碳中和，具体要求包括鼓励使用可持续航空燃油（Sustainable Aviation Fuel, SAF）及低污染飞机、逐渐取消航空免费碳排放配额，以及修订航空排放规则等。与之相似的，美国国家环境署（US

⁸ <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2012-06-18/pdf/2012-13828.pdf>

⁹ <http://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/2022-aqmp-mobile-source-working-groups>

¹⁰ http://caacnews.com.cn/1/201809/t20180918_1256176.html

¹¹ <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/market-based-measures/corsia>

¹² https://ec.europa.eu/transport/modes/air/news/2016-09-09-bratislava-declaration_en

¹³ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

¹⁴ <https://energypost.eu/the-eus-fit-for-55-package-a-primer-on-the-eu-ets-and-other-main-policy-levers/#:~:text=On%20July%202014%2C%202021%2C%20the%20European%20Commission%20will,2030%20compared%20to%201990%20level~s%20%28source%3A%20European%20Commission%29.>

EPA) 也在 2020 年底宣布将开始对进入市场的新航空器实施温室气体排放标准考核¹⁵，这意味着美国在政府正式开始执行 CORSIA 的减排目标。以此为标志，FAA 将可以正式地把碳排放标准作为其新的飞机适航认证的标准之一，同时也将带领美国自己的飞机引擎和机身制造商进入到与其它已经采取该国际标准的国家的制造商相同的政策和标准环境中¹⁶。同时，US FAA 也同步启动了新减排法规的制定程序。

中国也非常重视机场和航空器的减碳。民航局在“十三五”期间印发实施了《民航节能减排“十三五”规划》，明确“十三五”期间民航业绿色发展的指导思想、基本原则、工作目标及主要任务。

2018 年，民航局进一步制定实施了《关于深入推进民航绿色发展的实施意见》，明确民航中长期绿色发展的总体思路、工作体系和重点领域，统筹安排了重点工作。2021 年 3 月发布的《国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》¹⁷就对航空业的绿色发展提出了指导性意见：

- 深入实施智能制造和绿色支招工程，推动制造业高端化智能化绿色化。推动航空航天等产业创新发展。
- 深入推进交通等领域低碳转型，加大问题气体排放控制力度，并积极参与和引领应对国际气候变化的国际合作，推动落实联合国气候变化框架公约及其巴黎协定，积极开展气候变化南南合作。
- 深化交通运输等领域节能和能效提升。同时构建资源循环利用体系，构建绿色发展政策体系，大力发展绿色金融相配合实现绿色转型目标。
- 推进空中交通管理等改革，促进国防实力和经济实力同步提升。

2021 年，民航局印发《关于“十四五”期间深化民航改革工作的意见》¹⁸。作为行业纲领性文件，该意见要求航空业通过多方面行动推动绿色发展，形成民航绿色发展的机制制度，并制定低碳发展中长期路线图和绿色民航标准体系，同时鼓励航空公司积极使用可持续航空燃油，并建立基于市场的民航节能减排机制。

综上所述，尽管相比其他传统排放源，针对航空业的专项减排/减碳法规、标准、政策还有待完善，但各国已明确表明对航空减排/减碳的支持和推动。可以预见的是，随着航空业的发展和对空气质量/碳排放的重视，更多与机场减排/减碳相关的法规将会陆续出台，法规和政策体系将逐步得到完善和加强。

1.1.5 机场的可持续发展

机场的可持续发展最早集中在环境保护，之后逐渐延伸至经济、资源、人口、社会等方面。机场通过制定和实施可持续发展策略、开展可持续发展行动来将该理念贯彻至机场的日常运营之中。按照 US FAA 的描述，机场的可持续发展主要包括环境可持续发展、经济可持续发展、运营可持续发展和社区

¹⁵ <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-proposes-first-greenhouse-gas-emissions-standards-aircraft>

¹⁶ <http://news.carnoc.com/list/567/567913.html>

¹⁷ http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

¹⁸ http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/02/content_5589646.htm

可持续发展四个部分，最终目标是降低机场的环境影响、维持高而稳定的经济增长率、以及实现“社会进步”。机场可持续发展的主要考量要素如下图所示。

图 4. 机场可持续发展的主要考量要素

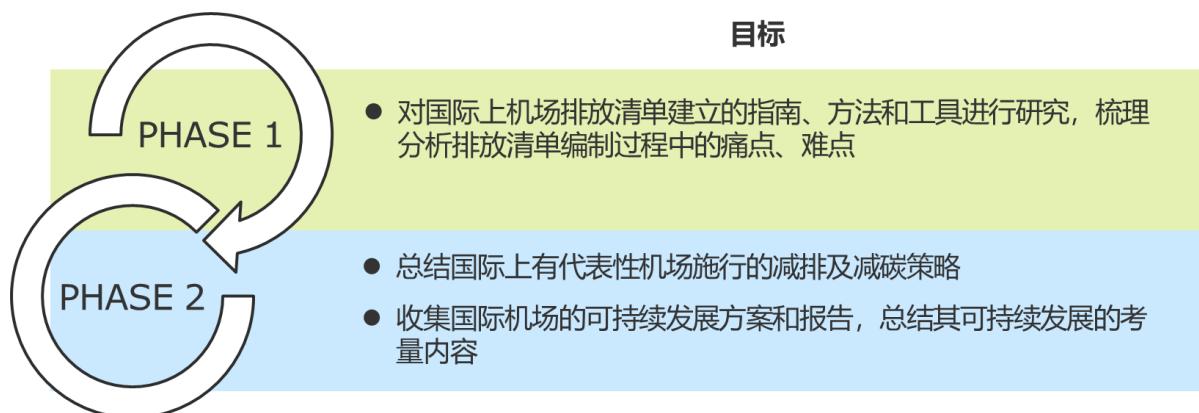


世界各国以及各大机场已经进行了很多与可持续发展相关的研究与实践，推出和实行了许多可持续发展的项目、策略和计划。

1.2 项目内容及技术路线图

如上文所述，目前中国航空业和机场运营的空气污染物排放量可能从总量上占比相对较小，但随着旅客出行量和货物运输量的增加，其影响意义可能会随之增加。北京尤其如此，原因有二：一是北京首都国际机场已跻身全球 20 个最繁忙的机场之一；二是北京大兴国际机场于 2019 年 9 月运营，未来年旅客保有 1 亿人次，可与北京首都国际机场相媲美。因此我们认为，北京的两大国际机场应适时建立一套系统的策略，来进一步降低其空气质量/气候影响，并保证其长期的可持续发展。参考国际上其他大型机场在空气质量/气候和可持续发展上所做的工作，同时考虑到北京机场的实际情况，此项目旨在为北京两大国际机场建立起一套可行和有效的空气质量/气候和可持续发展策略提供国际经验的支持。本项目的目标和工作路线如下图所示。

图 5. 项目目标和工作路线



2. 机场空气质量分析方法概述

如前章节所述，对机场的周边空气质量进行评估的主要手段包括：建立污染物排放清单、进行空气扩散建模、以及对机场周边空气质量进行监测。本章对机场空气质量分析的常用方法、工具和特点进行了总结和概括。

2.1 机场空气质量分析常用方法及工具

2.1.1 常用方法

目前，已经有很多国家、地区和国际组织推出了进行机场空气质量分析的方法和指南。这其中最广泛使用的有三种，分别是 ICAO 发布的《机场空气质量手册》、US FAA 发布的《航空排放和空气质量手册》，以及欧盟环境署（EMEP/EEA）¹⁹发布的《空气污染物排放清单指南》。这三本手册/指南均提供了机场排放清单的编制方法以及对机场空气质量进行评估的方法。此外，ICAO 的《机场空气质量手册》还推荐了对机场周边的空气质量进行实时测量的方式方法。

以上三种方法虽来自不同国家/地区，但其对空气质量进行分析评估的核心逻辑以及基本方法都是一致的，仅在使用的工具、参数等具体细节上有所不同。因此，本课题在进行研究时，以 ICAO 指南介绍的方法为主，并根据 US FAA 和 EMEP/EEA 的内容对其中一些方法进行了补充和对比。

2.1.2 常用工具

机场排放源众多且组成复杂，从零开始进行排放清单编制和空气质量分析是较为困难的。在实际机场进行空气质量分析时，往往会借助现有的工具，节约时间和人力，达到较好的分析效果。目前，时间上常用的进行空气质量分析的工具包括如下几类：

- **EDMS/AEDT:** 航空环境设计工具（AEDT）由 US FAA 下属的环境与能量办公室（AEE）研发，用于对飞机性能进行动态建模来计算排放、燃料使用、噪音并且评估他们相互关系的新软件系统。AEDT 有能力在单个机场或者区域机场群实现“全行段”和“登机口到登机口”的分析，并且可以更进一步评估更大区域范围内甚至全国和跨国的机场设施与飞机运行的排放情况。AEDT 的前身是 US FAA 的排放和扩散模型系统（EDMS），是由 US FAA 在上世纪八十年代中期研发的用来评估机场发展项目大气质量影响的模型。EDMS/AEDT 可以评估机场所有排放源的大气质量影响。1998 年 US FAA 将 EDMS 认定为航空源大气质量分析的唯一指定模型²⁰，并延续至今。EDMS/AEDT 中集成了对不同排放源进行排放计算的工具（MOVES、OFFROAD），以及 US EPA 开发的空气质量模型 AERMOD，是目前世界上最权威的机场空气质量分析工具之一。
- **LASPORT:** LASPORT 是由德国的 Janicke Consulting 公司研发的机场空气质量评估工具，最早于 2002 年发布，也是被 ICAO 下属的航空环境保护委员会（CAEP）批准的工具之

¹⁹ 由欧盟环境署及欧洲空气污染物远程传播监控和检测合作计划合作发布

²⁰ US FAA, Emissions and Dispersion Modeling System Policy for Airport Air Quality Analysis; Interim Guidance to US FAA Orders 1050.1D and 5050.4A, 18068 Federal Register/Vol. 63, No. 70/Monday, April 13, 1998/Notices, http://www.USFAA.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/edms_model/media/EDMS%20Requirement%20for%20Airport%20Air%20Quality%20Analysis.pdf.

—²¹。LASPORT 可以对机场不同排放源及其参数进行定义、编制排放清单，并根据清单进行机场的空气质量分析。LASPORT 最大的特点是使用了自行研发的基于拉格朗日扩散模式的 LASAT 模型进行空气扩散模拟。

- **ADMS-Airport:** ADMS-Airport 是由剑桥环境研究咨询（CERC）公司开发的机场空气质量评估工具²²。与以上两个模型相似，ADMS-Airport 也能够通过其中的 EMIT 模块进行排放清单的计算，并进行空气扩散模拟。ADMS-Airport 同样经过了 ICAO-CAEP 的批准。
- **ALAQS-AV:** ALAQS 是由 EUROCONTROL 负责开发维护的机场空气质量模拟工具，是欧洲常用的机场空气质量分析工具。其模型同 EDMS/AEDT 中集成的 AERMOD 相同，使用的是双高斯分布模型。

以上工具是经过 ICAO-CAEP 批准，并在世界范围内广泛使用的工具。各工具的基本特点比较如下表所示：

²¹ 来源：<http://www.janicke.de/data/lasport/lasport-2.0.pdf>

²² 来源：<https://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-Airport-model.html>

表 2. 四种常用空气质量模拟工具的对比

模型名称	开发组织	主要用途	可计算的排放源	数据库	污染物	机动车排放模型	扩散模式	是否公开
AEDT/EDMS	US FAA	US FAA 要求使用的机场空气质量/噪音模拟工具，适用于所有与 NUS EPA 相关的排放和空气质量评估	飞机/引擎、APU、GSE、GAV、固定源	有所有源的排放因子	SO _x , CO, THC, NMHC, VOC, TOG, NO _x , CO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀	MOVES	双高斯分布(AERMOD)	可购买
ADMS-Airport	CERC	主要用于英国，机场空气质量模拟和分析结果可满足政策要求	该工具主要进行空气质量模拟，可外联至 EMIT 模型进行排放计算	用户输入(EMIT 模型输入)	EMIT (NO _x , PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , CO, Pb, 苯, CO ₂ , CH ₄ , VOC, Hg)	从英国交通部和环境部而来	双高斯分布	可购买
ALAQS-AV	EURO-CONTROL	主要用于欧洲，机场空气质量模拟和分析结果可满足欧洲政策要求	飞机/引擎、APU、GSE、GAV、一部分固定源	有所有排放源的排放因子，以及飞行档案数据(SAE1845)，质量与 EDMS 类似	CO, NO _x , HC	COPERT	双高斯分布(AERMOD)/拉格朗日(LASAT)/CFD	必须向EURO-CONTROL申请
LASPORT	Janicke Consulting	主要用于欧洲，根据德国的 VDI 3945 指南第三部分编译	飞机/引擎、APU、GSE、GAV	有所有源的排放因子	CO, HC, NO _x , PM ₁₀ , SO _x , 苯, CO ₂	HEBFA	拉格朗日(LASAT)	可购买

以上四种工具中，EDMS/AEDT 是最为成熟，也最为常用的工具。因此在介绍各排放源的排放计算方法时，也会将 EDMS/AEDT 对于计算方法的应用和相关的输入参数进行介绍。

当然，由于这些工具的内置参数、排放因子和活动水平等都来自欧美机场的数据，中国机场在使用时可能需要进行一些本地化调整，但这些工具仍然可以作为机场进行空气质量分析的重要参考。

2.2 机场排放清单

机场排放清单建立的目标包括：

1. 收集排放信息的同时观测其趋势并且进行未来预测；
2. 根据法律规定对排放进行基准化测试；
3. 生成扩散模型的输入数据，用以估算污染物浓度；
4. 奠定简历机场减排项目的基础。

排放清单的计算一般采用自下而上的过程以提高准确性。建立排放清单的主要步骤如下：

1. 定义通用的清单参数，如：目的、空间尺度、功能尺度和更新频率等；
2. 决定需要研究的排放种类；
3. 识别已有的排放源；
4. 从这些源中量化其排放量；
5. 考虑相关范围内宏观问题（区域排放清单）；
6. 实施质量保证和控制措施（分析数据的不确定度和限制）。

2.2.1 机场排放源分类

机场包括多种不同类型的排放源，不同的排放清单编制方法对排放源的分类不尽相同。表 3 展示了与机场及航空业相关的排放源。可以看出，这些排放源绝大部分是燃料燃烧源。此外，最近有一些其他排放源由于其与 GHG 排放的相关性而受到重视，这些源包括：电的使用，冷却剂的使用，固体废物管理。

表 3.机场主要排放源及描述

排放源	描述
飞机主发动机	使用航空汽油或航空煤油驱动飞机飞行的发动机
飞机辅助动力系统 (APU)	帮助主发动机启动，及飞机进近（对准跑道准备降落），滑行，或在停机坪处调整位置时提供动力；同时为飞机的仪表、照明、供暖、供冷、和其他设备供电
地面支持设备 (GSE)	飞机拖车、空气启动机、叉车、拖拉机、空调机组、地面动力装置、行李拖车皮带装载机、燃料或消防卡车、餐饮卡车、客舱卡车、除冰车、水车、厕所卡车和货物装载机等
地面交通车辆 (GAV)	私家车、出租车、网约车、通勤车、大巴等
其他点/面源	锅炉、供热装置、发电机、融雪器、焚化炉、飞机发动机测试、储油罐、冷却塔、涂装和喷漆操作、除冰和防冰作业、溶剂脱脂剂和沙/盐堆

机场建设	建设机械、运输机械及车辆、建筑工人通勤车辆
------	-----------------------

2.2.2 重要定义

2.2.2.1 起飞着陆循环（LTO）

根据 ICAO 的定义，起飞着陆循环中，四个模态阶段分别代表了四种飞机运行操作：进近（Approach）、滑行/低速或怠速运行（Taxi/Idle）、起飞（Take-off）和爬升（Climb）。这是飞机实际运行操作的一个简化，例如：其假设在飞机运行中，起飞过程的动力会在起飞过程结束时突然变化至爬升过程的动力水平，并在随后爬升至 3000 英尺的过程中保持不变。虽然与飞机实际运行操作有所不同，但是 ICAO 排放认证的 LTO 循环也被用作进行技术比较的参考标准 LTO 循环。

US FAA 定义的 LTO 循环包含了六个阶段：进近（Approach）、滑进（Taxi in）、启动（startup）、滑出（Taxi out）、起飞（Take-off）和爬升（Climb）。各阶段的定义如下：

- 进近：飞机降落过程中启动降落程序到接触机场跑道的过程。
- 滑进：接触到降落跑道到离开跑道，包括反推进和从跑道到登机口的滑行。
- 启动：在登机口时飞机主引擎的启动（仅适用于 VOC）。
- 滑出：从登机口到起飞跑道尽头的滑行阶段。
- 起飞：从开始在跑道上加速到轮胎离开地面，包括在空中使用最大推进的升高阶段。
- 爬升：从减小引擎推进度到起飞程序结束或者达到混合高度（3000 英尺）。

US FAA 将 ICAO 定义中的滑行/低速与怠速运行阶段拆解为了滑进和滑出两个阶段，并增加了飞机在登机口的启动阶段。

2.2.2.2 模式工作时间（TIM）

模式工作时间（Time-in-mode, TIM）是指在明确的动力条件下，起飞着陆循环中的每个工作模式下飞机引擎的工作时间，一般以分钟为单位。

出于排放认证的目的，ICAO 定义了明确的标准起飞着陆（LTO）循环，标准 LTO 循环适用于高度为 915m（3000 英尺）以下的飞机运行与操作，如上所述。ICAO 设定的参考标准 LTO 循环的模式工作时间如下表所示。

表 4.ICAO 标准 LTO 循环下的模式工作时间

运行阶段	模式工作时间（mins）	推进力设定（额定推力的百分比）
进近	4.0	30
滑行和地面低速运行	26（滑进 7.0，滑出 19.0）	7
起飞	0.7	100
爬升	2.2	85

这个参考标准 LTO 循环适用于大气混合高度或者逆温层下的飞机运行。虽然实际的混合高度或因地而异，但其平均高度约为 915m（3000 英尺），并且模式工作时间是由这个高度推导而得出的。

这个高度下的污染物排放会对当地大气质量造成潜在的影响，离地面越近的排放越有可能造成地面污染物浓度水平的升高。此处的混合高度指的是对流层底部的垂直混合高度。

对北京来说，北京处于北半球中高纬度地区，冬季（12月、1月和2月）的太阳辐射相对较弱，使混合层高度降低，因而导致飞机在爬升和进近阶段相对较短。韩博等人对京津冀地区的实际情况包括日最大混合高度的实际数据做了研究²³。US EPA 也提出了一个修正方法来修正本地化的混合高度进而修正 ICAO 规定的进近和爬升阶段的参考时间，其修正公式如下：

$$T_{j,app} = t_{j,app} \times \frac{H_{ML}-152}{762} \quad 2-1$$

$$T_{j,c/o} = t_{j,c/o} \times \left(\frac{H_{ML}}{914} \right) \quad 2-2$$

其中：

$T_{j,app}$ 和 $T_{j,c/o}$ 分别表示搭载 j 型发动机的飞机进近和爬升阶段实际运行时间（mins）；

$t_{j,app}$ 和 $t_{j,c/o}$ 分别表示 ICAO 规定的航空器进近和爬升参考时间，即 4.0 mins 和 2.2 mins；

H_{ML} 表示京津冀机场群实际日最大混合高度（m）。

2.2.2.3 排放指数（EI）或排放因子（EF）

排放指数或排放因子定义为某种特定引擎单位质量燃料燃烧产生的污染物质量。不同的指南和工具可能会使用不同的排放因子。对于 ICAO 认证的引擎，ICAO 的发动机排放数据库提供了它们的排放指数，单位为每千克燃料排放的污染物克数（g/kg），其适用的污染物种类包括氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）和碳氢化合物（HC）。

EDMS/AEDT 中包含了不同品牌和型号的引擎在起飞着陆循环四种工作模式下，一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO_x）、颗粒物（PM）、二氧化硫（SO₂）和挥发性有机物（VOCs）的排放因子。这些排放因子数据一般是基于 ICAO 的引擎排放数据库（EEDB）、生产商数据以及适用于老旧机型的美国环保署 US EPA 的 AP-42 排放因子手册，卷 II，第一章而得来的。

US EPA AP-42 中的排放因子是污染物排放到大气中的量与排放活动联系起来的代表值。在大多数情况下，这些排放因子是可接受质量的数据的平均值，并且假设是每个污染源种类中设施长期平均数据的代表值。AP-42 中的排放因子既不是 US EPA 推荐的排放限值也不是排放标准。该排放因子可以用于排放清单中特定排放源的排放估算，也可用于部分排放许可的应用，例如判定许可证费用的适用性。

2.2.3 建立机场排放清单时的主要考量要素

2.2.3.1 建立排放清单的目的

确定建立排放清单的目的是项目立项时首先需要考虑的问题。这主要是因为排放清单的编制方法很大程度上取决于排放清单的用途。例如，如果建立排放清单仅仅是为了计算机场的总污染物排放量，则在编制时可采用更直接或简单的方法；如果建立排放清单是为了评估机场及周边的空气质量，则编制方法可能更加复杂。不同的方法所需要的数据精度、人力和物力投入、以及清单的精细程度和准确度都大

²³ 韩博，孔魏凯，姚婷玮，王愚. 京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单. 环境科学，2020, 41(3): 1143-1150.

不相同。因此，在准备建立排放清单时，一定要首先确认目的，再根据目的选择合适的编制方法和工具。

2.2.3.2 排放边界

根据清单编制目的的不同，机场的排放边界也有所不同。例如，机场为评估减排效果而自行编制的排放清单可能只包括机场边界内的排放源；而政府机构为评估机场排放对臭氧生成的影响而编制的排放清单则可能包括机场边界外更广泛的领域，如周边的社区、道路等。

不同的机场排放源的排放边界不同。对于航空器产生的排放，根据《环境影响评价技术导则民用机场建设工程（征求意见稿）》²⁴所规定的，机场大气污染物排放是指“指飞机降落、起飞循环（LTO）过程排放的大气污染物，高度为地表到大气边界层顶部 915m 高度的区域。”，大气影响评价范围中“一级评价根据飞机起降及相关辅助设施排放源中主要污染物的最远影响距离（D10%）确定大气影响评价评价范围。即以跑道、滑行道为中心区域，自边界外延 D10%的矩形区域作为大气环境影响评价范围。D10%小于 2.5 km 时，外延距离取 2.5 km，矩形边长最大应低于 50 km。二级评价评价范围为以跑道、滑行道为中心区域，自边界外延 2.5 km 的矩形区域。三级评价不需设置评价范围。”其中一级、二级和三级的界定是依据机场建设所在地对自然和生态环境的影响大小来设定的。

对于在机场内活动的其他排放源，如各类地面支持设备、固定源、场内机动车等，按机场企业边界进行排放估算即可。

机场空气污染最难界定的范围则是道路交通相关的排放。对于会进出机场的机动车来说，其行程一般可以分为数个阶段：

1. 从某地前往机场（例如职员从家前往机场，或旅客从某地前往机场）
2. 进入机场边界后行驶至目的地（例如至职员停车楼，或进站口，这中间可能包括 1 段或数段短途行驶）
3. 从目的地离开至机场边界
4. 从机场边界前往某地

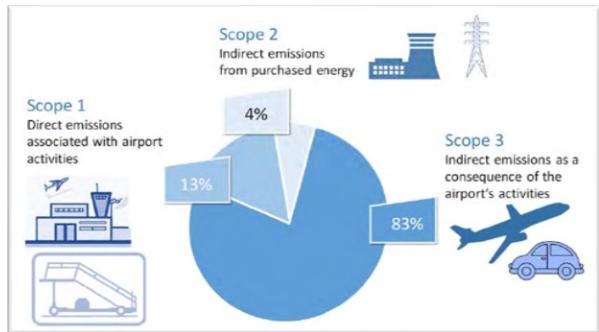
在讨论以上机场机动车的排放边界时，主要需注意的点是避免重复计算。以北京首都机场为例，1) 如果编制的首都机场排放清单将成为北京总污染物排放清单的一部分，那么机场的排放清单的边界就适合仅限于机场的边界范围之内，即行程 2 和行程 3，甚至所有非空侧机动车均不包括在内。这是因为会进出机场边界的机动车可能已经被包括在机动车排放清单之中（取决于该排放清单的编制方法），如果两个清单均对这部分车辆的排放进行计算，则会造成重复计算。2) 如果排放清单是为了对机场及附近敏感区域进行空气质量分析，那么应该至少包括机动车的行程 2 和行程 3，可能还需要包括行程 1 和行程 4 中一些影响范围内的短途行程。3) 如果排放清单的目的是讨论首都机场对北京市排放的贡献，或者预估机场对北京市未来排放的影响，或者作为机场减排策略的数据基础，那么排放清单就可以包括所有进出机场的道路机动车的全程排放。当然，由于行程 1 和行程 4 的组成非常复杂，实际操作时可采用简化版模型，例如对于旅客从北京市来往首都机场的行程，可根据旅客分布的数据，将起点和终点分成片区，进行近似计算。

而对于机场的碳排放，一般可根据排放源的性质分为三个范围（Scope）。范围一包括由机场运营者负责的排放，例如机场机动车和发电站；范围二包括机场运营者购买的非机场内产生的能源；范围三

²⁴ <http://hps.mee.gov.cn/zhxx/201910/W020191009538548300811.pdf>

包括所有由非机场直接控制的利益相关方（如航空公司、物流公司等）拥有或控制的排放，包括：机场区域内的飞机活动排放、设备排放、机动车排放等，范围三排放通常会达到总碳排放的 80%以上，如下图所示。

图 6.机场碳排放的计算边界及贡献



此外，根据《中国民用航空企业温室气体排放核算方法与报告指南》²⁵的定义，“机场企业”是指“民用机场具有实际运营权的具有法人（或视同法人）资格的社会经济组织”，因此企业层面的核算边界应包括以企业法人为边界的所有与生产经营相关的排放。民用航空企业（机场航站楼）的核算边界是指机场企业正在运营的航站楼固定设施（不含自备电厂或能源中心）产生的二氧化碳排放，包括化石燃料燃烧导致的二氧化碳排放、消费电力对应的二氧化碳排放、消费热力对应的二氧化碳排放。其中，航站楼包含楼内商户，不包含 APU 的桥载设备以及电动汽车充电设施消费电力对应的二氧化碳排放。如有自备电厂（或能源中心）自行发电需要同时填报自备电厂补充数据表。这个定义基本包括范围一和范围二的排放，也包括一部分范围三（如机场商户）的排放，但不包括绝大部分由航空公司、三方车辆等带来的范围三碳排放。

除进行环境影响评价之外，碳排放清单与空气污染物排放清单一般是分别编制的。但是如果需要协同编制，则需要考虑不同清单中不同排放源的特点，及不同清单的排放边界的区别。对于大部分空气污染物的排放源，比如 GSE、GAV、飞机 LTO 排放、固定源排放等，碳排放和空气污染物排放计算的原理是相同或相似的，一般仅需要替换排放因子即可。这种情况下，可以较为轻松的进行协同计算。但碳排放清单有部份对全生命周期 GHG 的考量，比如电力消耗、飞机巡航段排放、场外废水、固废处置等，不在空气污染物排放清单的编制边界之内，因此需要单独进行计算。

下表总结了不同 GHG 排放源和对应的空气污染物排放源，可作为协同编制的参考。

²⁵ <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/W020190905508187976253.pdf>

表 5.GHG 排放清单中排放源与相应空气污染物排放源的对照

GHG 排放 清单范围	排放源	排放源归属	GHG 清单排 放源类型	空气污染物 清单排放源 类型	是否可 协同考 量?
Scope 1: 机场直接排 放	机动车（空侧道路机动车、机 械、GSE）	机场运营 方	空侧移动源	GSE	是
	建筑（汽油、柴油、煤炭消 耗）	机场运营 方	固定源	固定源/面源	是
	紧急发电机	机场运营 方	固定源	固定源/面源	是
	消防训练	机场运营 方	固定源	固定源/面源	是
	除冰	机场运营 方	过程排放	固定源/面源	是
	现场固废处理设施	机场运营 方	过程排放	固定源/面源	是
	现场废水处理设施	机场运营 方	过程排放	固定源/面源	是
	其他由机场控制的排放源	机场运营 方	过程排放	固定源/面源	是
	制冷剂	机场运营 方	过程排放	固定源/面源	是
Scope 2: 机场购买能 源	机场直接购买的电力	机场运营 方	能源	无	否
	机场直接购买的热能	机场运营 方	能源	无	否
Scope 3: 与第三方活 动相关的排 放	飞机 LTO 排放	租户/第 三方	航空器	飞机主引擎	是
	飞机巡航段排放	租户/第 三方	航空器	无	否
	飞机 APU 排放	租户/第 三方	航空器	APU	是
	飞机引擎启动排放	租户/第 三方	固定源	飞机主引擎	是
	机动车（空侧道路机动车、机 械、GSE）	租户/第 三方	空侧移动源	GSE	是
	建筑（汽油、柴油、煤炭消 耗）	租户/第 三方	固定源	固定源/面源	是
	第三方/租户购买的电力	租户/第 三方	Energy	无	否
	电力传输和分配损失	租户/第 三方	Energy	无	否

GHG 排放清单范围	排放源	排放源归属	GHG 清单排放源类型	空气污染物清单排放源类型	是否可协同考量?
	第三方/租户购买的热能	租户/第三方	Energy	无	否
	紧急发电机	租户/第三方	固定源	固定源/面源	是
	消防训练	租户/第三方	固定源	固定源/面源	是
	除冰	租户/第三方	过程排放	固定源/面源	是
	场外/三方固废处理设施	租户/第三方	过程排放	无	否
	场外/三方废水处理设施	租户/第三方	过程排放	无	否
	其他由三方控制的排放源	租户/第三方	过程排放	固定源/面源	是
	制冷剂	租户/第三方	过程排放	固定源/面源	是
	机场建设	租户/第三方	过程排放	建设源	否
	机动车（三方/租户员工及访客通勤）	租户/第三方	陆侧移动源	GAV	是
	机动车（机场员工通勤）	机场运营方	陆侧移动源	GAV	是
	私家车/出租车	公共	陆侧移动源	GAV	是
	巴士/转运机动车	公共	陆侧移动源	GAV	是
	铁路	公共	陆侧移动源	其他	是
	渡轮	公共	陆侧移动源	其他	是

如上所述，确定排放边界最重要的首先确定排放清单的编制目的，只有根据目的确定边界，才能做到不遗漏、不重复，最大限度地发挥排放清单的作用。

2.2.3.3 清单的复杂程度

一般而言，编制排放清单有三种复杂程度不同的方法，如下表所示：

表 6.三种不同复杂程度的排放清单的编制方法及其特点

特点	简单方法	进阶方法	复杂方法
复杂性	仅需要机场的基础知识和数据；大量参考现有的经验排放因子和活动水平进行估算；计算方法简单直接	需要掌握进阶的机场知识和数据；需要机场特定的活动水平和排放因子来进行计算；计算方法相对复杂	需要对机场有全面和细致的知识；需要大量与机场和机场所有航空器相关的活动水平数据和排放因子；计算水平复杂，可能需要模型等的支持
准确性	一般比较保守	准确性好	准确性非常好
置信水平	低	适中	高

实际确定清单复杂程度时，除考虑清单编制的目的外，还需要考量可用的数据以及清单编制能够投入的资源。对于不同类型的污染源，根据以上条件的不同，可以采用不同复杂程度的编制方法。例如，某机场对航空器的活动水平的记录较全面，而对道路车辆的数据较少，则可考虑使用进阶方法计算航空器的排放，而使用简单方法进行道路车辆排放的计算。当然，由于简单方法基于经验数据，可能与实际活动和排放水平误差较大，因此如果想要获得较为准确的排放清单，建议机场至少采用进阶方法以上的复杂程度进行排放清单的编制。

2.2.3.4 污染物种类

机场产生多种不同的空气污染物，但并非所有污染物都需要被排放清单覆盖。排放清单中包括的污染物种类一般由清单的编制目的而确定。常见的清单污染物种类包括：NO_x, VOC, CO, PM（一般包括PM₁₀ 和 PM_{2.5}），以及SO_x。有些排放清单也会包括特定的有害空气污染物（HAPs），例如苯系物、甲醛、铅等等，这些排放清单往往用于评估机场排放对周围社区人体健康和环境生态的影响。此外，CO₂作为首要的温室气体也常常被包括在排放清单中。

2.2.3.5 清单质量控制

由于编制机场排放清单需要进行大量的工作，最终的清单往往会有其局限性。为保证最终清单数据的可靠性，在清单编制过程中和编制完成后需要对清单进行质量控制。质量控制过程一般包括如下几个部分：

- 记录缺失信息：清单编制过程中有时会由于数据不足而采用简化手段或进行假设。这种情况下，需要对这些条件进行记录，并评估这些手段的合理性；
- 评估误差：根据数据的获得方式（实际测量、计算值、估算值）对数据的误差进行评估，一般通过计算误差棒（Error Bar）等方式呈现；
- 评估透明度和可追溯性：为了保证排放清单的质量，以及避免清单之间的数据重叠，清单编制所使用的数据源和方法需要被准确的记录和引用；
- 验证数据：最终的计算结果应该通过一个合理的质量控制系统进行验证或交叉检查，例如将计算结果与类似的规模的机场的排放清单数据进行对比。

2.2.3.6 编制未来年的排放清单

有时，排放清单也会对未来年份的排放进行预估。编制未来年的排放清单时，需要以基准年的排放清单数据为基础，仔细的评估未来年机场各排放源活动水平和排放因子的变化。这些评估往往要求编制方对机场运营、市场变化、政策趋势等有全面的理解和掌握，难度较高，因此在本报告中不再过多描述。

2.2.4 机场各排放源排放计算方法概述

2.2.4.1 航空器/引擎排放

航空器的排放主要来源于引擎中燃料的燃烧，其产生的主要污染物包括二氧化碳（CO₂）、水（H₂O）、氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）、硫氧化物（SO_x）、未燃烧或部分燃烧的碳氢化合物（即 VOC）、颗粒物（PM）以及其他示踪物（TC）²⁶。有一小部分的挥发性有机物和颗粒物被视为有毒大气污染物（HAPs），根据 US FAA 的估算，飞机引擎的排放大约有 70% 左右的 CO₂，略少于 30% 的 H₂O，分别少于 1% 的 NO_x、CO、SO_x、VOC、PM 和 TC。除去 CO 和 HC 之外，大约 10% 的飞机引擎排放时产生于机场的排放和飞机起飞着陆循环过程，而剩下的 90% 则是来源于更高高度的排放。HC 和 CO 的排放比例在上述两者中分别占 30% 和 70%。其中，二氧化碳是碳氢化合物燃料如汽油、航空煤油和柴油等完全燃烧的产物。水蒸气是另一个燃料完全燃烧的产物。氮氧化物是当空气通过高温/高压的燃烧环境时，空气中的氮与氧结合产生的二氧化氮³。碳氢化合物和一氧化碳的排放主要来源于引擎燃料的不完全燃烧。硫氧化物的来源则是由碳氢化合物燃料中的硫燃烧生成。此外，不完全燃烧还会产生颗粒物，细小的颗粒物（包括液体和固体）可以被吸入从而威胁到人体健康。臭氧是二次污染物，由空气中的 VOC 和 NO_x 在光照和热量的条件下反应所生成，是光化学烟雾的主要成分。

宏观来说，建立排放清单的计算方法可以概括为飞机活动乘以相应的排放因子。首先计算一个 LTO 循环中一种飞机/引擎组合的排放，再依据总的飞机/引擎组合数和总的 LTO 循环数进行加和。然而，如 2.2.3.3 节所述，实际计算飞机主引擎排放时有三种不同复杂程度和准确程度的方法。其中，简单方法是估算飞机引擎排放的最基本的方法，需要的数据输入量最少，不确定度也最高，一般使用可以轻易得到的公开信息和数据。进阶方法反映了有关飞机类型、引擎类型、排放指数的计算和模式工作时间所需的更高的精度水平，这种方法机场需要相关信息或者合理的假设，部分数据更难获得。该方法反映了当地条件与飞机性能计算的结合，使得飞机主引擎的排放计算更加准确，但是总的计算结果还是偏保守。最准确的方法是复杂方法，反映了真实的飞机排放，需要大量的数据并且可以提供最高的准确度。该方法使用真实的飞机/引擎操作性能数据而不仅仅是 LTO 循环的认证数据。使用该方法通常会需要非公开数据和模型并且需要用户进行高级别的分析。

根据 ICAO 的建议，当排放清单涉及到特定机场影响飞机操作的政策时，应尽量避免使用简单方法，而应根据最完善的可得数据选择进阶方法或复杂方法进行计算。

下面列出 ICAO 的三种计算飞机主引擎排放的方法。

ICAO 计算引擎排放的简单方法，如公式 3-1 所示：

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (E_{ijk}) * (Ne_j) \quad 3-1$$

其中：

E_{ij} 为机型 j 在一个起飞着陆循环产生的污染物 i（如：NO_x、CO 和 HC）的总排放量，单位为 g；

²⁶ US FAA. Aviation & Emissions A Primer, 2005

E_{ijk} 为机型 j 在模式 k 下污染物 i (如: NO_x、CO 和 HC) 的排放指数, 单位为 g/kg;

FF_{jk} 为机型 j 上每个引擎在模式 k 下的燃料流量, 单位为 kg/s;

TIM_{jk} 为机型 j 在模式 k 下的工作时间, 单位为 mins;

Ne_j 为机型 j 上引擎数量;

ICAO 计算引擎排放的进阶方法, 如公式 3-2 所示:

$$E_j = \sum(TIM_{jk} * 60) * f(FF_{jk}, E_{ijk} \text{ or } Thrust_{jk}, Cond_j, Ne_j) \quad 3-2$$

其中:

E_j 为由机型 j 在一个起飞着陆循环产生的污染物 i (如: NO_x、CO 和 HC) 的总排放量, 单位为 g;

E_{ijk} 为机型 j 在模式 k 下污染物 i (如: NO_x、CO 和 HC) 的排放指数, 单位为 g/kg;

FF_{jk} 为机型 j 上每个引擎在模式 k 下的燃料流量, 单位为 kg/s;

TIM_{jk} 为机型 j 在模式 k 下的工作时间, 单位为 mins;

$Thrust_{jk}$ 为机型 j 在模式 k 下的推进等级;

Ne_j 为机型 j 上引擎数量, 考虑在滑行操作下不使用全部引擎的情况;

$Cond_j$ 为机型 j 运动过程中的环境条件 (如: 前进速度、高度、压力、温度、湿度);

ICAO 计算引擎排放的复杂方法, 如公式 3-3 所示:

$$E_j = \sum(TIM_{jk} * 60) * f(FF_{jk}, E_{ijk} \text{ or } Thrust_{jk}, Cond_j, Ne_j) \quad 3-3$$

复杂方法的计算公式和进阶方法一样, 但是复杂方法需要采用真实的且提炼过的数据, 这些数据一般来自实时的测量、性能信息报告或者复杂的电脑模型的输出结果。更进一步的, 这些信息可以用来明确飞机舰队真实组成信息, 包括飞机类型和引擎的组合、模式工作时间、推力水平、燃料流量, 以及在地面运行和起飞的所有阶段的操作的内燃机运行状况。复杂计算方法中常需的信息包括:

- 不同飞机和引擎组合在不同负载、路径、和气象条件下的模式工作时间;
- 不同飞机和引擎组合在不同气象条件下反向推进部署的测量;
- 机场气象条件, 特别是飞机和引擎组合的性能受到气象条件的影响时;
- 引擎测试的频率和类型;
- 飞机拖车牵引操作的频率;
- 机场基础建设和限制 (如飞机跑道长度)
- 反向推进操作中的节流阀设置的典型的或者真实的数据;
- 真实的飞机\引擎组合配置数据;
- 真实的燃料流量数据;
- 真实的引擎类型低速和怠速运行速度;
- 进近、起飞和爬升阶段中节流阀设置的典型的或者真实的数据;

- 进近与爬升阶段的描述；
- 非全引擎滑行操作的频率。

US FAA 方法与 ICAO 的进阶/复杂方法的计算方式是一致的，如公式 3-4 和 3-5 所示。

$$E_{ij} = \frac{1}{1000} * NE_j * \sum (TIM_{jk} * FF_{jk} * EF_{ijk}) \quad 3-4$$

其中：

E_{ij} 为机型 j 在一个 LTO 循环中污染物 i 的总排放，单位为 lb；

NE_j 为机型 j 上引擎数量；

TIM_{jk} 为机型 j 在模式 k 下的工作时间，单位为 mins；

FF_{jk} 为机型 j 上每个引擎在模式 k 下的燃料流量，单位为 lb/min；

EF_{ijk} 为机型 j 在模式 k 下污染物 i 的排放因子，单位为 lb/klb；

公式 3-4（每种机型在一个起飞着陆循环中的排放计算）用来计算每个飞机和引擎组合在每个起飞着陆循环中的每种模式下 NO_x、CO 和 VOC 的排放。如果一架飞机有多个引擎，那么就用该公式乘以这种机型上使用的引擎数量。

$$E_i = \sum_j (E_{ij} * LTO_j) \quad 3-5$$

其中：

E_i 为所有飞机所产生的污染物 i 的排放量，单位为 lb；

E_{ij} 为机型 j 在一个 LTO 循环中污染物 i 的总排放，单位为 lb；

LTO_j 为机型 j 的总循环数；

公式 3-5（所有机型所有飞机的排放计算）用每种机型每个 LTO 循环的排放量乘以总循环数而得到所有机型所有飞机的总排放量。

对于铅的排放计算，可以参考 US FAA 手册中提到的方法，该方法一般适用于通用航空活塞驱动飞机的加铅航空燃料，每个起飞着陆循环的铅排放用公式 1-3 计算。

$$E_{Pb} = LTO * 3.46 * 2.12 * \frac{1}{907180} * 0.95 \quad 3-6$$

其中：

E_{Pb} 为所有活塞引擎飞机的铅的总排放，单位为短吨 (short tons)；

LTO 为所有活塞引擎飞机的总起飞着陆循环数；

3.46 为预设的每个 LTO 循环所使用的航空煤油的加仑数；

2.12 为预设的每加仑航空煤油所含铅的克数；

$\frac{1}{907180}$ 为短吨与克的转换系数；

0.95 为航空煤油铅含量的排放百分比。

由于 ICAO 的发动机排放数据库（EEDB）中并不包括颗粒物的排放指数等数据，因此飞机引擎颗粒物排放的估算方法一般推荐使用一阶近似方法第 3.0 版（FOA 3.0）。FOA 3.0 的估算方法并不涉及颗粒物尺寸的相关信息，但目前大多数的喷气发动机的排放的颗粒物为超细颗粒物（UFPM，即直径小于 0.1 微米的颗粒物）。其中非挥发性颗粒物直径一般为 0.02-0.06 微米，挥发性颗粒物直径一般为 0.001-0.015 微米。US FAA 的估算方法与 ICAO 的《机场大气质量手册》²⁷中所述的方法相同。

以上是对各种复杂程度不同的计算方法的介绍。这些方法为排放清单编制工具和模型提供了基础框架，而实际排放则通过模型内置的排放因子/活动水平数据库或用户自身输入进行计算。以 AEDT 为例，AEDT 方法中飞机引擎的排放计算类似于 ICAO 的进阶方法。即：飞机主引擎的排放取决于操作的数量（如：起飞和着陆）；飞机/引擎组合的特征（如：飞机类型、引擎数量和起飞重量）；飞机引擎运行特征（如：燃料流量和排放因子）以及飞机的模式工作时间。在机场进行排放计算时，可以直接使用现有的模型和工具，也可以根据计算公式自行计算。

活动水平

飞机主引擎的活动水平数据一般参考现有的模型、工具和数据库。以飞机操作数据为例，在 AEDT 中，飞机的操作根据使用目的分为以下四类：（1）空中运输；（2）空中出租车；（3）通用航空；

（4）军用航空。其中通用航空是指是指使用民用航空器从事公共航空运输以外的民用航空活动，包括从事工业、农业、林业、渔业和建筑业的作业飞行以及医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学实验、教育训练、文化体育等方面的飞行活动。每个类别的飞机的类型和数量都不一样，而且都和所在地机场的情况息息相关。下表中列举了以机场为单位的现行和历史上的飞机操作数据。

表 7. 飞机操作输入数据源

数据来源	描述
Terminal Area Forecast (TAF) 航站楼区域预报	对国家机场集成系统计划（NPIAS）中的在用机场航空活动进行预报。 http://aspm.faa.gov/main/taf.asp
The Operations Network (OPSNET) 操作网络	提供机场活跃等级（不同类别），US FAA 拥有所有权，需注册用户方可使用。 https://aspm.faa.gov/opsnet/sys/Default.asp
Air Carrier Statistics Database (T-100 database) 空运数据库 (T-100 数据库)	自 1990 年以来的数据，可提供月度、季度和年度数据。包括 NPIAS 中的全部机场和额外的 313 个航空运输站点。只收集了报告了数据。 http://www.transtats.bts.gov/tables.asp?db_id=111&DB_Name=
Airport IQ5010TM Airport Master Records and Reports 机场主要记录与报告	这些报告中的《飞机与操作基础》部分提供了操作数据，也可以用来建立一个通用的混合舰队。 http://www.gcr1.com/5010web/ .
Airport Noise & Operations Monitoring System (ANOMS) 机场噪音与操作检测系统	报告包括了飞机类别的飞机操作，但 ANOMS 不是机场必需的，因此使用范围受限。
JP Airline Fleet JP 航空舰队	提供机场活跃程度。 http://www.buchair.com/JPAF.htm
Traffic Flow Management System Counts (TFMSC)	记录所有由航空管制 (ATC) 检测的符合仪表飞行规则 (IFR) 的站点或者飞行员提交的飞行计划，TFMSC 只有部

²⁷ ICAO. Airport Air Quality Manual. First Edition 2011 [DOC 9889].

database 交通流动管理统计数据库	分通用航空和军用航空操作的记录。 https://aspm.faa.gov/tfms/sys/
----------------------	---

对于无法在上表中找到数据的案例，可以参考近期的一项关于机场的研究，表 5010 机场主记录（ARM）或者由州或地方运输部门所准备的机场系统规划（ASP）。其他可参考的数据来源包括现行机场主规划（AMP）、联邦航空法规（FAR）第 150 部噪声研究、环境影响声明/评估（EIS/EA）。

表 8.飞机/引擎组合举例

类别	机型	引擎
空中运输	空客 A32--200 系列	V2527-A5
	波音 767-200 系列	CF6-80A
	空客 A319-100 系列	CFM56-5B6/P
空中出租车	萨博 340-A	CT7-5A2
	庞巴迪 CRJ-100	CF34-3A1 LEC II
	湾流 G500	BR700-710A1-10
通用航空（GA）	塞纳 750 CitationX	AE3007C Type 2
	庞巴迪 Learjet25	CJ610-6
	派铂 PA-31 Navajo	TIO-540-J2B2
军用航空	波音 F/A-18 Hornet	F404-GE-400
	诺思罗普 F-5E/F TigerII	J85-GE-21
	T-38 Talon	J85-GE-5H (w/AB)

表 9.滑行时间输入数据源

数据来源	描述
Aviation System Performance Metrics (ASPM) 航空系统性能矩阵	提供了关于从 ASPM 机场起飞与到达航班的详细信息；ASPM 运营商的所有航班。包括所有 IFR 和部分目视飞行规则（VFR）的航班。ASPM 还包括机场天气、跑道配置、到达与起飞速率。这些数据提供了关于机场和飞机运营商空中交通活动一个完善的设定。US FAA 拥有这些数据的所有权，需 US FAA 注册用户可使用。 https://aspm.USFAA.gov/aspm/entryASPM.asp?lite=y
Bureau of Transportation Statistics (BTS) On-Time Statistics 交通数据统计局事实数据	提供了飞机的统计，包括 287 个机场不同航空公司的滑进和滑出数据。可提供自 1995 年起的年度数据。 http://apps.bts.gov/xml/ontimesummarystatistics/src/dstat/OntimeSummaryDep atures.xml

当然，以上数据都是基于美国机场的数据。实际国内机场在进行排放计算时，在可能的情况下，最好以这些数据为基础，进行本地化的调整。例如根据气候情况调整混合层高度和模式运行时间，以及使用机场特定的 LTO 数据。此外，如果需要编制精确的排放清单，也可以和航空公司和民航系统协作，获取航班的快速存取记录器（QAR）数据。QAR 数据中包含了飞机实际的燃油流量、飞行时间，以及表征飞行员操纵状态、发动机状态等诸多参数，可以为复杂方法下的活动水平数据提供支撑²⁸。

排放指数

飞机主引擎的排放指数一般参考 ICAO 的飞机引擎排放数据库（EEDB）²⁹，欧洲 EMEP/EEA 的《空气污染物排放清单指南》和 AEDT 中的数据。ICAO 的 EEDB 记录了所有认证发动机在标准大气条件下的排放数据，其是根据 ICAO 第 16 号附件卷 2 中所建立的流程来测定的。该数据库包含了排放需要被管控的引擎类型，即静态推进力大于 26.7 千牛顿的涡轮喷气发动机和涡轮风扇发动机，发动机的相关信息一般由引擎生产商提供并负责其准确性。该数据库由欧盟航空安全署（EASA）代表 ICAO 进行维护。EMEP/EEA 的《空气污染物排放清单指南》中提供了基于欧洲各飞机/引擎组合的排放指数数据，并提供了基于 Excel 的排放计算表。AEDT 包含了涵盖一氧化碳、氮氧化物、颗粒物，二氧化硫和挥发性有机物的飞机引擎排放指数的数据库，这些排放指数是依据引擎的型号和四种工作模式而设定的。这些排放指数数据是基于 ICAO 的引擎排放数据库、生产商数据以及适用于老旧机型的美国环保署 US EPA 的 AP-42, 卷 II, 第一章。但是如上文所述，AEDT 只针对 ICAO 认证引擎的机型采用一阶近似方法进行飞机主引擎颗粒物排放的估算。

2.2.4.2 辅助动力单元（APU）

辅助动力单元（APU）主要是是在飞机进近、滑行或者在登机口处时给飞机供能的小型涡轮引擎。用于飞机设备，电路，空调和加热，以及启动主引擎的供能。辅助动力单元主要使用航空煤油，在大型商用飞机、军用飞机、部分空中出租车和通用航空上均有使用。除非有额外动力源提供，飞机停泊在登机口时辅助动力单元会保持开启。一般会在飞机主引擎启动后，起飞前关闭辅助动力单元。与主引擎不同，ICAO 并不提供辅助动力单元引擎的认证，生厂商拥有 APU 的排放信息的所有权，因此用于计算 APU 排放的公开数据较少。此外，由于世界上很多机场都已经采取了 APU 替代措施，因此实际 APU 的使用频率和排放都在逐步下降。

ICAO 对于 APU 排放的计算也采用了简单、进阶和复杂三种方法。在简单方法中，ICAO 提供了包括 APU 运行时间、燃料用量、氮氧化物、碳氢化合物、一氧化碳和颗粒物排放量的标准值。以上为生产商提供的 APU 数据的平均值，包括短途和长途两种类型的数据。航空运输协会（ATA）也提供了窄体和宽体飞机的 APU 运行时间，可以提供略准确的 APU 排放估算。FAA 方面，1995 年 US FAA 发布了《Technical Data to Support US FAA Advisory Circular on Reducing Emissions from Commercial Aviation》，提供了不同机型主要使用的 APU 型号和相应的 APU 排放指数和燃料流量。

²⁸ <http://html.rhhz.net/hjkxxb/html/20181204009.htm>

²⁹ <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

表 10. 不同飞机操作 APU 排放的代表值

飞机群组	短途	长途
APU 工作时间	45 分钟	75 分钟
燃料燃烧	80 kg	300 kg
NO _x 排放	700 g	2400 g
HC 排放	30 g	160 g
CO 排放	310 g	210 g
PM 排放	25 g	40 g

如上表所示，ICAO 列出了短途和长途的 APU 排放。举例来说，短途飞机 APU 操作时间为 60 分钟时，氮氧化物的排放量为：

$$NOx \left(\frac{g}{LTO} \right) = (60 \text{ mins per LTO}) * \left(\frac{700g}{45mins} \right) = 933 \frac{g}{LTO} \quad 4-3$$

在进阶方法中，包括 APU 的三种负荷运行模式：1) 启动（无负荷）；2) 普通运行（最大环境控制系统（ECS））；3) 高负荷（主引擎启动）。ICAO 提供了不同飞机活动下不同模式的耗时（s/mins）。氮氧化物、碳氢化合物和一氧化碳的排放均为速率乘以负荷模式时间。ICAO 还提供了针对不同机型三种运行模式下不同污染物的排放速率（kg/h）。

如果负荷的真实时间无法准确计算，可以用下表作为计算参考值：

表 11. 负荷真实时间举例

活动	模式	双引擎飞机	四引擎飞机
APU 启动和稳定	启动	3 mins	3 mins
飞机准备，机组和乘客登机	正常运行	3.6 mins	5.3 mins
主引擎启动	高负荷	35 secs	140 secs
乘客下机和飞机关闭	正常运行	15 mins 或测量值	15 mins 或测量值

在复杂方法中，每种污染物的在各操作模式下的排放质量为各个动力负荷条件下排放质量的加和；污染物的总排放量为各操作模式下排放量的加和；目前只有部分生产商公开了部分机场和机型的 APU 的排放指数，因此复杂方法只适用于小部分的排放清单计算。

US FAA 的方法类似于 ICAO 的进阶方法，根据一个完整的起飞降落循环进行估算。排放取决于飞机型号和排放因子、燃料流量和 APU 使用时间。APU 总排放为每种机型一定工作时间内每个起飞着陆循环中的排放乘以总的循环数。其计算公式如 4-1 和 4-2 所示：

$$E_{ij} = \frac{1}{1000} * T * FF_j * EF_{ij} \quad 4-1$$

$$ET_i = \sum_j [E_{ij} * LTO_j] \quad 4-2$$

其中：

T 为单个起飞降落循环的总时间（mins）；

FF 为 APU 燃料流量; EF 为 APU 排放因子;

E 为每个机型每个 LTO 循环的 APU 排放;

ET 为总的 APU 排放。

在 AEDT 中，大多数客运和货运飞机都根据该机型使用的 APU 情况自动分配一个 APU 的代表型号。要计算 APU 的排放必须要知道 APU 在飞机到达或起飞时的工作时间。这包括了飞机停泊在登机口或者停机坪上 APU 工作的时间、飞机或者 APU 维修时间和飞机滑行时间等。AEDT 的每个 LTO 循环中 APU 运行标准时间为 13 分钟（无额外地面动力源），3.5 分钟（有额外地面动力源）。一般包括在登机口或停机坪上停泊时间、飞机或 APU 维修时间以及飞机滑行时间。可根据真实机场情况自定义。

2.2.4.3 地面支持设备 (GSE)

地面支持设备的一般定义为：飞机到达后或者飞机起飞前，用于飞机服务的机动车辆（例如飞机装载和卸货，乘客登机和下机）。常见的 GSE 类型包括地勤设备、摆渡巴士、运载皮卡、检修车等等。

GSE 的排放计算基于为飞机服务的设备的数量和类型、飞机的模式工作时间以及所使用的燃料类型。同主引擎和 APU 排放的计算一样，ICAO 也对 GSE 设备的排放设定了简单、进阶和复杂三种计算方法。ICAO 的简单方法包含了两种选项：第一个选项无需考虑地面支持设备的车队和操作，用飞机的起降数（宽体和窄体）乘以相应的污染物排放因子即可得该污染物的总排放量。该方法无需调查 GSE 的类型和活动数据，一般仅使用经验数据即可，但需要注意所使用数据是否能够代表所在机场的平均活动水平。例如，下表展示了瑞士苏黎世国际机场的 GSE 排放因子。

表 12. 苏黎世国际机场飞机操作标准排放因子

		1990-2005 GSE 技术		2000-2015 GSE 设备	
污染物	单位	窄体机型	宽体机型	窄体机型	宽体机型
NO _x	kg/循环	0.400	0.900	0.260	0.510
HC	kg/循环	0.040	0.070	0.020	0.045
CO	kg/循环	0.150	0.300	0.100	0.225
PM ₁₀	kg/循环	0.025	0.055	0.015	0.030
SO _x	kg/循环	18.000	58.000	20.000	48.000

举例来说，一个机场有 23450 次窄体飞机起降和 9600 次宽体飞机起降，假设氮氧化物排放因子为 0.4kg/循环和 0.9kg/循环，则总的氮氧化物排放为：

$$\frac{0.4\text{kg}}{\text{循环}} * 23450[\text{窄体}] + \frac{0.9\text{kg}}{\text{循环}} * 9600[\text{宽体}] = 9010 \text{ kg} \quad 4-3$$

简单方法的第二个选项则更为简单，将不同种燃料的用量乘以平均排放因子再进行加和即可得到该污染物的总排放。

进阶方法需要获取每种 GSE 设备的数量、工作时间或燃料用量 (hr/year 或燃料用量/year)。GSE 排放根据每个设备种类下的每一个设备进行加和而得到整个 GSE 群体的排放。相应的计算公式 4-4 如下。

$$E_{pollutant} \left[\frac{g}{GSE} \right] = fuel\ flow \left[\frac{kg}{h} \right] * EF_{pollutant} \left[\frac{g}{kg\ fuel} \right] * time[h] * (DF) \quad 4-4$$

$$E_{pollutant} \left[\frac{g}{GSE} \right] = power[kW] * load[%] * EF_{pollutant} \left[\frac{g}{kW} \right] * time[h] * (DF)$$

$$E_{pollutant} \left[\frac{g}{GSE} \right] = fuel\ flow \left[\frac{kg}{a} \right] * EF_{pollutant} \left[\frac{g}{kg\ fuel} \right] * time[h] * (DF)$$

其中：

$EF_{pollutant}$ 为根据 GSE 的引擎类型、燃料类型、使用年份、反射设计和排放控制技术而设定的污染物排放因子；

DF 为劣化系数。

而复杂方法则是对于每个飞机操作进行 GSE 排放的计算，GSE 排放根据每个设备种类下的每一个设备的每一项飞机操作（包括维修）进行加和而得出。复杂方法的计算公式如下：

$$E_{pollutant}[g] = power[kW] * load[%] * EF_{pollutant} \left[\frac{g}{kWh} \right] * time_{A/C-ops}[h] * (DF) \quad 4-5$$

其中：

power 为引擎的功率，单位为 kW 或 bhp；

$time_{A/C-ops}[h]$ 为 GSE 单元的平均操作时间，取决于操作的类型（到达、起飞或维修）、硬件属性和飞机尺寸。

US FAA 对地面支持设备的排放基本类似于 ICAO 的进阶或复杂方法，依据机场自身的设备类型、使用时间与每种设备的特征参数（如制动马力、负荷因子、排放因子等）计算每个 GSE 类型的排放，再将所有排放进行加和而得到总排放清单。此处的设备使用时间既可以是单独的设备使用时间，也可以是该 GSE 所服务的机型的特征模式工作时间。第二种方法的灵活度更高，可以依据研究时间段、飞机的数量和 LTO 数进行调整。因此，这种“LTO 方法”一般是更优选的方法。公式 4-4 可以用来计算对于给定机型的 LTO 循环中某一种类型的设备的排放：

$$E_{it} = (BHP_t * LF_t * U_t * EF_{it}) * CF \quad 4-4$$

其中：

E_{it} 为地面支持设备 t 所产生的污染物 i 的排放量

BHP_t 为设备 t 引擎的平均制动马力；

LF_t 为设备 t 的负荷因子；

U_t 为设备 t 的工作时间（小时）；

EF_{it} 为污染物 i 的排放因子，依据特定的引擎尺寸和燃料类型；

t 为设备类型；

CF为从克到磅的转换因子=0.0022046。

地面支持设备的主要不确定度来自于活动水平和排放因子。机场涉及的地面支持设备车辆的种类繁多，用途广泛，每种类型车辆的具体参数很难精确统计，对于机场内使用的特种车辆，实际工作过程中的负荷因子难以确定。因此再确定活动水平和排放因子时，需要选择合适、合理的方案，尽量贴进本地的实际情况。

活动水平

对于简单方法，一般使用总 LTO 数或总燃料消耗量，可以从航空公司或相关部门得到。

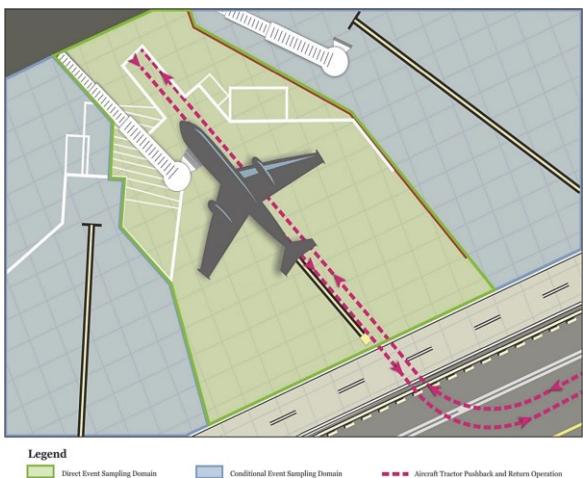
对于进阶方法/复杂方法，则需要针对每种类型 GSE 的活动水平数据。以“LTO 方法”为例，一般需要的是某型号飞机每 LTO 循环中的 GSE 工作时间数据。以波音 767-200 系列为例，下表列出了 AEDT 模型中每个 LTO 循环中标准的 GSE 使用量。

表 13. AEDT 模型中每个 LTO 循环中标准的 GSE 使用时间

地面支持设备种类	离开（分钟）	到达（分钟）
空气启动	7.00	0.00
飞机牵引	8.00	0.00
行李牵引	60.00	60.00
履带装货	18.00	17.00
给养卡车	10.00	10.00
消防卡车	20.00	0.00
卫生清洁卡车	0.00	25.00
飞机服务卡车	8.00	7.00

这些数据可以从现有的模型和工具中得到（如上表提到的 AEDT），但更推荐的方法是 1) 从设备运营商、航空公司等处获得真实活动水平数据；或 2) 通过调研和采样获取本地化的活动水平。这主要是因为每个机场有不同的活动特征，即使设备相同，在每个 LTO 循环中的 GSE 的使用时间也有可能不同，而使用本地化的数据可以大大提高排放清单的准确性。对 GSE 活动水平进行调查的一个典型有效的方法是“围裙”抽样调查法，意即对飞机活动过程中的某一个特定的“围裙”区域的 GSE 类型和操作时间进行记录和取样。“围裙”的界定可以有很多种：如近机位停靠围裙、远机位停靠围裙、维护围裙、除冰围裙等，视飞机活动类型而定。在调查时应尽量选择规模较大的航空公司的常驻航线进行调查，保证数据的代表性。此外在正式收集数据前，应先进行数据的预收集，并据此调整观察对象和观察时间，确保数据的稳定性和可靠性，而在正式收集数据时需要进行多组平行取样，尽量较少取样误差。一个典型的“近机位停靠围裙”如下图所示。

图 7. “围裙”抽样调查法中的“近机位停靠围裙”



排放因子

简单方法中，排放因子一般来源于各指南和工具中的经验数据。

进阶和复杂方法需要每种 GSE 的特征排放因子，这要求机场首先收集每种 GSE 的特征参数，一般这些信息可以从设备运营商或相应的政府监管机构（如交通运输部门）获得。得到特征参数后，相应的排放因子可从各种非道路移动机械模型和数据库中获得。例如，US EPA 负责维护的 NONROAD 和 MOVES 有全美非道路机械的特征排放因子，美国的加州也有 OFFROAD 数据库，US FAA 的 AEDT 模型中也有详细的 GSE 设备的数据信息。排放因子的选择优先以本地化因子为主，但如本地化因子不可得，则可使用以上工具中提供的排放因子。

需要注意的是，不同模型中所采用的 GSE 的排放因子会有所差异。根据 EUROCONTROL 实验中心（EUROCONTROL Experimental Centre）在 2002 年进行的《苏黎世国际机场不同方法的排放清单》（EEC/SEE/2004/010）研究，ALAQS 和 LASPORT 两种模型估算的 GSE 设备的排放有着大约 14% 的差异，而 EDMS 模型相较于 ALAQS 和 LASPORT 的计算结果的差异更是显著，所计算出的 GSE 排放比 ALAQS 和 LASPORT 都要高出许多。这主要是因为 LASPORT 模型对于一个特定的飞机组别和飞机停机位设定了一个排放因子的平均值，这个平均值包括了所有不同的 GSE 设备并且数据来源于不同的欧洲机场（如苏黎世国际机场、杜塞尔多夫机场、法兰克福机场）的估算；而 EDMS 模型则采用了整个 GSE 群体的方法，对于每种 GSE 设备都设定了设备数量和年度运行时间，然后使用了默认的排放因子和登机口分布设定。这导致两者最终计算时使用的排放因子有所不同。举例来说，对于履带装载机，两种模型的区别如下表所示：

表 14. 履带装卸机在不同模型中的默认参数比较

GSE 设备举例	参数	欧洲	EDMS
履带装载机	引擎	33 kW	71hp (52.3kW)
	负荷因子	25%	25%
	NO _x (g/hr)	68.31	107.69
	HC (g/hr)	5.36	12.19
	CO (g/hr)	26.81	51.92

	排放因子	EC EUNRMM Stage1 ³⁰	EDMS 默认数值
--	------	-----------------------------------	-----------

由此可以看出，如果需要使用模型中的排放因子，需要首先了解各模型的特点，再选择更适合本地的方案。

总而言之，三种方法建立 GSE 排放清单所需要的具体数据信息的区别如下表所示：

表 15.运用不同方法建立 GSE 排放清单所需数据信息比较

数据	描述	方法			数据获取方式	
		基本	中级	进阶	基本	中级/进阶
飞机类型	根据型号划分的飞机类型	√	√	√	简单分类：宽体客机 / 窄体客机 / 小型飞机等	根据机场实际飞机型号进行分类
GSE 类型	根据型号划分的 GSE 类型	√	√	√	1) 模型默认数据 (AEDT) 2) 其他机场现有数据	1) 模型默认数据 (AEDT) 2) 实施机场抽样调查 3) GSE 数据库数据 (政府、运营商等等)
燃料类型	GSE 引擎燃料类型	√	√	√		
运行时间 (TIM)	引擎开启的时间		√	√		1) 模型默认数据 (AEDT) 2) 实施机场抽样调查 3) 运营方记录/数据
动力 (HP)	马力			√	不需要	1) 模型默认数据 (AEDT) 2) 实施机场抽样调查
负荷因子 (LF)	0-100%			√	不需要	3) GSE 数据库数据 (政府、运营商等等)
车型年 (MY)	生产日期或车龄			√	不需要	
排放因子 (EF)		√	√	√	1) 车队平均排放因子 (Zurich Airport) 2) 模型数据 (AEDT)	使用非道路排放因子数据库数据 (MOVES、OFFROAD、EMEP/EEA) 中级：按 GSE 类型的整合 EF 进阶：按 GSE 类型/HP Bin/LF/MY 的细分 EF，且可考虑劣化系数

³⁰ EU Nonroad Mobile Machinery (EC Directive 97/68/EG) plus correction factors SAEFL.

2.2.4.4 地面连接机动车辆（GAV）

地面连接机动车辆（GAV）包括包括出租车、货车、公共汽车和私人拥有的汽车、轻型和重型货车、以及在机场内部道路网络和机场停车设施内行驶的摩托车等。与 GAV 相关的活动类型一般有三种：在机场内外公路上行驶、在机场停车场中低速或怠速行驶，以及在机场航站楼路边运载乘客（正常行驶和低速/怠速行驶的结合）。GAV 的排放计算与道路机动车排放计算的方法完全相同。按照活动水平和排放因子复杂程度的不同，也可分为三种方法，如下所示：

- 简单方法：不考虑单段道路，将所有道路视为一个整体，采用相同的道路特征。根据车辆的“总行驶距离”（或“机动车行驶里程数（VMT）”）和一系列关于车队组成、车龄和速度的假设进行排放计算，一般不考虑机场外交通。
- 进阶方法：将道路按特征划分为不同类型，并根据各自的道路特征、行驶距离、车队组成等进行排放计算。
- 复杂方法：对所研究的道路网络中的每条道路尽可能提供详细的特征数据进行计算。

三种方法仅在数据精度上有区别，计算方法是一样的。GAV 正常行驶时的排放计算方法如 4-6 所示：

$$E_{Travel} = CF * \sum_j [VMT_j * ER_j] \quad 4-6$$

其中：

E_{Travel} 为机动车辆在一定时间内的总排放，单位为 lb；

VMT_j 为车辆类型 j 在一定时间内运行的里程数，单位为 miles；

ER_j 为考虑速度和车辆类型 j 的排放速率，单位为 g/mile。

GAV 在停车场中的排放取决于进入和离开进场停车设施（例如：停车楼和地面停车场）的车辆数量、到停车场入口和出口的行驶距离和车辆排队时的低速或怠速行驶的时间。其排放可以用公式 4-7 进行计算：

$$E_{Idling} = CF * \sum_j [AADT_j * IT_j * ER_j] \quad 4-7$$

其中：

E_{Idling} 为机动车辆在一定时间段内低速或怠速运行的总排放，单位为 lb；

CF 为 g 和 lb 的转化因子（0.0022046）；

$AADT_j$ 为停车场中某种车型的平均年化日计数；

IT_j 为车辆类型 j 低速或怠速运转时间，单位为 mins；

ER_j 为考虑速度和车辆类型 j 的低速或怠速运转时的排放速率，单位为 g/min。

而 GAV 在航站楼路边区域的排放为正常行驶排放和怠速排放的加和，如下所示：

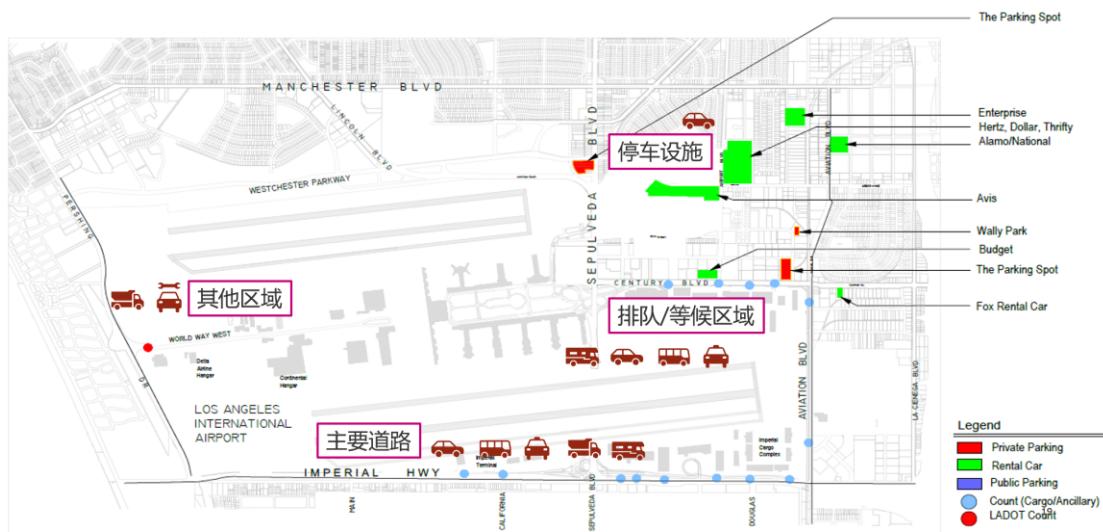
$$E_{Total} = E_{Travel} + E_{Idling} \quad 4-8$$

计算 GAV 排放的要点是采用合适的复杂程度和排放因子，这需要机场对现有活动水平数据的类型和数量有所掌握。

活动水平

进行机场 GAV 排放计算所需的活动水平数据种类较多，这主要是由于在机场不同路段，车辆会表现出不一样的行驶特征。以洛杉矶国际机场的地面交通图为示例来看，机场道路可分为如下几种类型：停车设施、排队/等候区域、主要道路和其他区域。不同的区域经过的车型、车数、汽车燃料类型、车速等均有不同。如前所述，对于简单方法，一般不需要考虑区域之间的区别，使用平均活动水平即可；但对于进阶方法或复杂方法，获取分区域，甚至分路段的特征活动水平数据则是必须的。

图 8. 洛杉矶国际机场的地面交通图



毫无疑问，获取所有道路的特征活动水平是最精确的，但这可能需要付出巨大的人力、物力和财力。此外，并非所有特征因子都对排放有相同量级的影响，某些因子的影响会更显著。因此，实际编制道路排放清单时，可以根据特征因子对排放的影响程度和获取高精度特征因子所需的成本来为特征因子排序。以伦敦希思罗国际机场为例，其编制 GAV 排放清单时，将道路特征因子按重要程度分为以下 7 个等级：

- 等级 1 – 道路类型/路网范围
- 等级 2 – 车流量
- 等级 3 – 车队组成
- 等级 4 – 车速
- 等级 5 – 拥堵时间
- 等级 6 – 离开道路的车数 (trip end)
- 等级 7 – 其他要素

对于优先级低的特征因子，可以采用经验数值；而对于优先级高的特征因子，则可优先采用实际测量或调查的方式获取真实数据。下表总结了不同复杂程度方法对不同 GAV 数据的要求和可参考的经验数值。

表 16. 不同复杂程度方法对 GAV 数据的要求

数据	数据要求和获取方式															
	基本				中级				进阶							
	机场道路	停车设施	排队/等候区域	其他区域	机场道路	停车设施	排队/等候区域	其他区域	机场道路	停车设施	排队/等候区域	其他区域				
车数	使用进入某地区的平均车数			每条主要道路/每个主要设施分别计算平均车数				使用峰值因子调整不同时间各地区的平均车数								
车型（车队组成）	LDV/HDV 50/50		接送客区： LDV/HDV 50/50 巴士站：巴士 100 货物区： HDV 100		根据道路类型选择不同的默认车型组成及燃料类型	LDV/HDV 50/50	接送客区： LDV/HDV 50/50 巴士站：巴士 100 货物区： HDV 100		每条道路分别记录实际车型组成和燃料类型	LDV/HDV 50/50	接送客区： LDV/HDV 50/50 巴士站：巴士 100 货物区： HDV 100					
燃料类型	城市平均值或默认值					城市平均值或默认值				城市平均值或默认值						
车速 (mph)	20	10		使用机场的速度限值		10		每条道路分别测量车速		10						
怠速/缓行时间	-	-	使用经验怠速时间		-	-	使用经验怠速时间		使用机场调研结果	-	使用经验怠速时间					
排放因子	经验排放因子（如 ACRP/机场工具）或模型			道路机动车排放模型				道路机动车排放模型（考虑蒸发排放、冷热启动、轮胎磨损/刹车磨损、扬尘等）								

由上可见，对于非机场主要道路的活动水平数据，如怠速/缓行时间、车速、车队组成和燃料类型等，可以采用经验数值进行估算。但对于机场主要道路的车队组成和车流量/车数，则往往采用实际测量的方法获取数据。车数和车型的统计有许多方法，最简单的方法是为记录人员配备手持式、电子或者纸质表格来手动记录数据。这种方法对于简单道路的研究可能相对高效，但是随着道路车流量的增加和车型的复杂，该方法会变得非常费时费力。先进一些的数据收集方法是使用例如自动交通记录仪（ATRs）等电子技术。ATRs 可以被永久嵌入道路上的重要位置，或者临时设立一段时间并在数据收集结束后移除。更高级别的交通管理系统被称为智能交通系统（ITSs），这些管理系统可以监测交通流量和其他参数，提供实时数据，ITSs 包括红外、雷达、视频和声学技术等。另外，针对不同的道路类型，往往有不同的数据获取渠道，如下表所示。

表 17. GAV 数据收集来源-机动车组成（中级或者进阶方法）

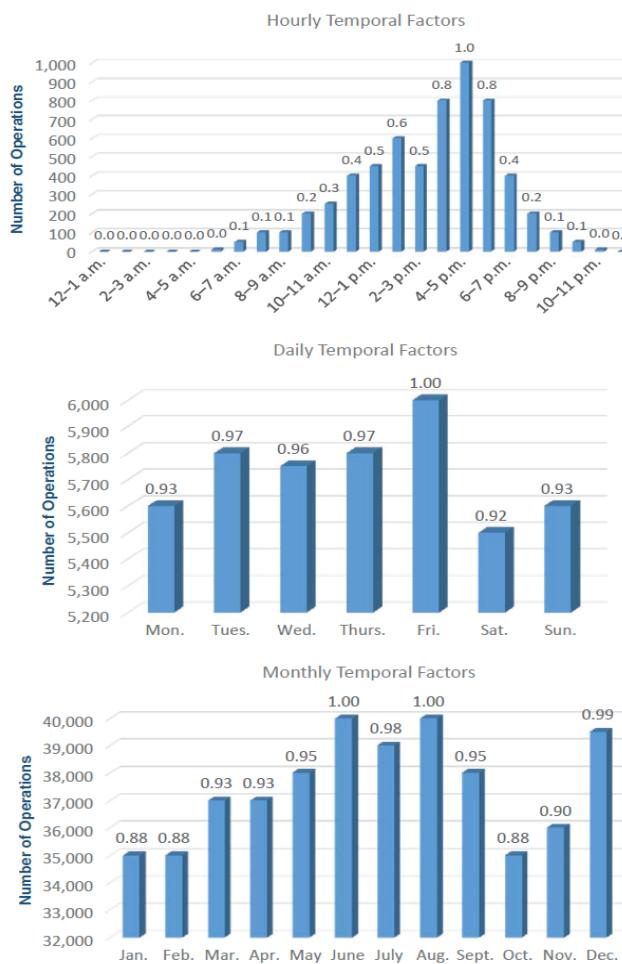
GAV 基础建设		收集的数据	来源
通用	机动车辆		
道路	路边车辆、厢式货车、巴士等	机动车流量和组成	路边观察/计数
停车场 (地表和多层 停车楼)	机场内轿车和货车	机动车驶入和驶出	交易/出入口数据或者车道计数
	机场外轿车、厢式货车、巴士等	机动车驶入和驶出	停车交易/出入口数据，车道计数，或 免费巴士的乘坐计数
	租用车辆	机动车驶入和驶出	租车交易数据，车道计数，或免费巴士 的乘坐计数
汽车等候/排队区域	按需出租车、豪华轿车	机动车流量	路边观察/计数，出租车调配数据或者 出租车车道计数
	点到点/拼车和货车	机动车流量或者每 个巴士的乘客数量	路边观察/计数，巴士的乘坐计数或者 预约数据
	酒店和旅馆摆渡巴 士	机动车流量或者每 个巴士的乘客数量	路边观察/计数，巴士的乘坐计数或者 摆渡巴士排班表
	停车场摆渡巴士 (机场内/外)	机动车流量或者每 个巴士的乘客数量	路边观察/计数，巴士的乘坐计数
其他	公共交通巴士和货 车	机动车流量或者每 个巴士的乘客数量	路边观察/计数，机动车的乘坐计数， 站台计数或者交通排班表和频率
	租赁巴士	机动车流量或者每 个巴士的乘客数量	路边观察/计数，巴士的乘坐计数

在采集 GAV 数据的时候，往往需要考虑额外因素以保证数据的代表性。其中最重要的就是时间因素，例如

- 每日活动水平变化。一天中机场机动车的活动水平是随时间变化的，在一天中进行数据采集的时间段不同，会对最终结果产生很大影响。一般而言，GAV 的排放分析会考虑对道路的高峰期和平时期分别进行数据采集。一般来说，机场出发层的道路最繁忙的时候是在一天航班高峰期的前一个小时或者更早。而到达层的道路最繁忙的时候是在一天航班到达高峰期的晚一个小时或者更晚。

- 每周活动水平变化。不同的机场在一周中不同日的活动水平也是不同的。对于商业机场，一周中最繁忙的时间是周一到周五，而通用航空机场最繁忙的时候往往是周末。
- 每季/年活动水平变化。机场活动水平也同样会随季节/年的变化而在根据小时或者日活动数据外推年度数据时尤其需要注意。除季节的影响外，一些机场或机场所在的城市的特殊活动，比如航空表演、大型会议等也会导致该季节/该年的活动水平与正常水平不同。其他的特殊因素，如疫情等，也会导致活动水平出现较大变化。

图 9. 机场小时/天/月度时间因子示例（时间因素对 GAV 数据的影响）



除了时间因素之外，还有一些其他因素需要考虑，例如：

- 提前和滞后的时间：旅客乘坐 GAV 提前于航班时间到达的时间称为提前时间，旅客在航班落地后乘坐 GAV 离开的时间称为滞后时间。提前时间和滞后时间受到诸多因素的影响，比如乘客的习惯特征和机场的运行特征等。
- 冷启动和热启动：一般来说冷启动的机动车会比热启动的机动车产生更多的排放，一般停几个小时以内的车可以认为是热启动车辆，时间更久的则认为是冷启动车辆。

排放因子

模拟或者计算机场 GAV 排放的的排放因子时，一般会使用或参考现有的机动车排放因子数据库或排放计算工具。这其中最著名的是 US EPA 开发的 MOVES 模型，和加州空气资源管理局（CARB）开发的 EMFAC 模型，和 EMEP/EEA 开发的 COPERT 模型。MOVES 一般适用于除加州之外的美国全境，既提供了依据机动车类型、燃料类型和其他因子整体的排放清单，也提供了排放因子的数据。EMFAC 模型一般适用于美国加州。常用的 EMFAC 所使用的排放因子数据可以在 CARB 的网站数据库中查询得到³¹，但是复杂的计算需要按小时划分的排放速率数据或者需要不同温度、湿度等气象条件下的排放速率数据则需要使用 EMFAC 模型进行计算。COPERT 模型主要适用于欧洲的道路交通排放计算，可以对不同车型、三种排放类型（热排放、冷启动排放、非尾气排放）过程中产生的数十种污染物的排放进行计算。COPERT 模型也是 EMEP/EEA 大气污染物排放清单指南的一部分，与 2006 IPCC 指南中的温室气体排放计算相一致。此外，道路交通排放因子手册（HBEFA）是由包括德国、瑞士、奥地利、法国等国家的环保管理机构合作开发并予以支持，能够提供欧洲所有车辆类别的排放因子。其最大的特点是，所采用工况为给定的交通工况，而非基于平均速度或瞬时速度。

国外使用不同的主流机动车排放计算工具的比较如下表所示。

表 18.国外常用机动车排放因子模型/计算工具比较

³¹ <https://arb.ca.gov/emfac/2017/>

模型名称	开发组织	污染物	车型	时间尺度	空间尺度	排放类型	排放因子	其他特点
MOVES3	US EPA	主要大气污染物、温室气体（CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O）、重金属、支持NO/NO ₂ 、有机碳等细分物种	小型乘用车（细分）、中型/重型机动车（细分）、巴士、摩托车、摩托自行车、房车	1990, 1999-2060 (年均-小时)	国家尺度~郡尺度	发动机排放（尾气、冷/热启动、怠速）、扩散排放（轮胎/刹车磨损、蒸发排放、扬尘）	基于车型、车龄、车速、燃料类型和道路类型的排放	整合了MOBILE 和 OFFROAD，支持非道路机械的排放计算，支持不同政策情景的排放评估
EMFAC2017	CARB	主要大气污染物、温室气体（CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O）	小型乘用车（细分）、中型/重型机动车（细分）、巴士、摩托车、摩托自行车、房车	2000-2050 (年均\夏季\冬季)	州尺度~郡尺度	发动机排放（尾气、冷/热启动、怠速）、扩散排放（轮胎/刹车磨损、蒸发排放、扬尘）	基于车型、车龄、车速和燃料类型的排放因子	内置了完整的加州机动车排放源清单，有单独的温室气体估算模块
COPERT5	EMEP/EEA	主要大气污染物、温室气体（CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O）、重金属、支持NO/NO ₂ 、有机碳等细分物种	小型乘用车、中型/重型机动车、巴士、摩托车、摩托自行车	1970-2050 (年均-小时)	国家尺度~街道尺度	发动机排放（尾气、冷/热启动）、扩散排放（轮胎/刹车磨损、蒸发排放）	基于车型、车龄、车速和燃料类型的排放因子	非常细致的输入参数，可对燃料细节、环境温湿度等进行调整
HBEFA4.1	多个组织共同维护	主要大气污染物、CO ₂ 、燃料消耗量	小型乘用车、中型/重型机动车、巴士、摩托车、	1990-2030	-	发动机尾气、冷启动排放、蒸发排放	基于车型、车龄、车速、交通状况和道路类型的排放因子，可进行整合和细分	主要输出排放因子，不直接计算排放

以上工具是国际上主流的机动车排放计算工具。但由于各国国情不同，在进行排放计算时最好使用本地现有的排放因子数据。例如，生态环境部发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南》中提供了针对不同国标车型的综合基准排放因子和环境修正因子³²。清华大学开发的中国城市机动车排放因子模型（EMBEV）是根据各城市特点开发的本地化城市机动车排放因子模型。生态环境部的《指南》中的核心数据即来自此模型。由于北京市为模型开发时车况和排放数据的采集点之一，因此该模型与北京市机动车排放计算的契合度是很高的。

对于温室气体排放计算，除以上模型工具外，还可参考美国阿贡国家实验室开发的交通温室气体、常规污染物排放及能源利用模型（GREET）。该模型最主要的特点是以全生命周期为基础进行温室气体排放评估，并且可以评估先进汽车技术和新型交通燃料的能源效率和排放影响，非常适用于为机场进行技术和燃料评估提供数据支持。

2.2.4.5 固定源和面源

固定源和面源在 US FAA 的定义中包括燃烧源和非燃烧源。其中燃烧源包括锅炉和加热炉、发电机、融雪机、焚烧炉、消防训练设施和飞机引擎测试；非燃烧源包括燃料储罐、冷却塔、涂层和漆面操作、除冰和防冰操作、溶剂脱脂、沙堆和盐堆。为了定量固定源和面源的排放需要定点的数据，这些数据可来自机场操作员、独立的机场承租人、州和地方大气质量监管部门。燃烧源产生的污染物包括 CO、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、VOC 和 NO_x。非燃烧源不用的排放源产生的污染物则不尽相同。

关于各个固定源的排放，其计算方法都可以总结为燃料的消耗量和排放因子的乘积。具体涉及到每种固定源设备，其具体的计算方法和所使用参数会有所区别。下列各固定源的计算方法皆以 FAA 的计算方法为基准。

锅炉和加热炉是用来满足热能其他能源的需求。锅炉和加热炉会采用多种不同的燃料，主要有馏出燃料油、残余燃料油、柴油、天然气和航空煤油，其排放依赖于燃料类型、使用率和工作时长。

锅炉和加热炉

锅炉和加热炉的排放计算公式如 4-5 和 4-6 所示，其中 4-6 为排放因子计算：

$$E = F * EF \quad 4-5$$

$$EF = UEF * \left(1 - \frac{CF}{100}\right) * FM \quad (\text{排放因子计算}) \quad 4-6$$

其中：

E 为给定时间段内固定源污染物的总排放，单位为 lb;

F 为给定时间段内燃料的总消耗，液体燃料单位为 k-gal，天然气单位为 Mft³，煤的单位为 tons;

EF 为污染物的排放因子，单位为 lb/k-gal 或 lb/Mft³ 或 lb/tons;

UEF 为无控制条件下排放因子，单位同 EF;

CF 为大气污染控制因子，百分比;

FM 为燃料转化（只考虑二氧化硫和颗粒物，燃料重%）。

³² <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>

虽然 US EPA 提供了很多中锅炉的排放因子，但是只有很少量的加热炉的相关信息。因此假设锅炉的排放因子也适用于相近尺寸和是使用燃料类型的加热炉。排放因子的数据可以在 US EPA 的《大气污染物排放因子汇编》的第一章《外部燃烧源》中找到。

发电机

机场发电机的位置基本是固定不变的，并且分布于整个机场以提供必要的和紧急情况下的能源。这些发电机一般由使用汽油或者柴油的往复式内燃机供能。计算发电机的排放有两种方法：第一种为 US EPA 的 AP-42 方法，根据发电机引擎的额定功率计算其排放；第二种为美国空军方法，根据燃料使用量计算其排放。

US EPA AP-42 方法发电机的排放计算公式如 4-7 所示，通过将每个发电机的额定功率乘以发电机工作的小时数、每种污染物的排放因子和大气污染控制因子。发电机大气污染控制的方法包括蒸汽喷射、注水和氮氧化物控制的催化减排。

$$E = GC * T * UEF * \left(1 - \frac{CF}{100}\right) \quad (\text{US EPA AP-42 方法}) \quad 4-7$$

其中：

E 为指定时间段内紧急发电机污染物的总排放，单位为 lb;

GC 为发电机功率，单位为 hp 或 kW;

T 为指定时间段内发电机的工作时间，单位为 h;

UEF 为无控制条件下排放因子，单位 lb/hp-hr 或 lb/kW;

CF 为大气污染控制因子，百分比。

也可以使用燃料消耗数据进行紧急发电机排放的计算，如 4-8 所示。通过将燃料用量乘以每种污染物的排放因子和大气污染控制因子，污染控制的方法同上。

$$E = F * UEF * \left(1 - \frac{CF}{100}\right) \quad (\text{美国空军方法}) \quad 4-8$$

其中：

E 为指定时间段内紧急发电机污染物的总排放，单位为 lb;

F 为给定时间段内燃料的总消耗，液体燃料单位为 k-gal，天然气单位为 Mft³;

UEF 无控制条件下排放因子，单位为 lb/k-gal 或 lb/Mft³;

CF 为大气污染控制因子，百分比。

融雪机

机场的融雪机是用来从机场场地上移除积雪。可以是便携式源或者固定源，通常以汽油、柴油或者天然气为动力。融雪机的排放量取决于燃料的类型和研究时段内燃料的使用量。融雪机的排放计算公式如 4-9 所示：

$$E = F * EF \quad 4-9$$

其中：

E 为指定时间段内融雪机污染物的总排放，单位为 lb;

F 为给定时间段内燃料的总消耗，液体燃料单位为 k-gal，天然气单位为 Mft³;

EF 为污染物的排放因子，单位为 lb/k-gal 或 lb/Mft³。

焚烧炉

机场的焚烧炉类似于工业用或商业用燃烧炉来处理食物废物或者其他废物。大型城市垃圾燃烧器一般不会用在机场。排放依赖于研究时段内燃烧的废物总质量。

焚烧炉的排放计算公式如 4-10 所示：

$$E = F * UEF * \left(1 - \frac{CF}{100}\right) \quad 4-10$$

其中：

E 为指定时间段内焚烧炉污染物的总排放，单位为 lb；

F 为给定时间段内燃料的总消耗，液体燃料单位为 k-gal，天然气单位为 Mft³；

UEF 无控制条件下排放因子，单位为 lb/k-gal 或 lb/Mft³；

CF 为大气污染控制因子，百分比。

消防训练设施

大部分主要机场都有飞机营救和消防训练设施。在这些训练设施中，燃料在凹陷处或者飞机模型上燃烧来模拟机场可能发生的紧急情况。机场训练设施的排放是周期性排放源，消防训练设施的排放由每次起火燃料的使用量乘以排放因子来计算每次起火事件的总排放。

消防训练设施的排放计算公式如 4-11 所示：

$$E = QF * EF \quad 4-11$$

其中：

E 为指定时间段内焚烧炉污染物的总排放，单位为 lb；

QF 为消防训练设施燃料的总消耗，单位为 k-gal；

EF 为污染物的排放因子，单位为 lb/k-gal。

飞机引擎测试

部分机场将飞机引擎测试作为常规飞机维护的一部分。一般来说，商业飞机的测试仅限于未安装的引擎在封闭的测试单元内进行。测试一般在彻底检修或者引擎维修之后进行来判定其适航性、引擎安全性能和燃油效率。飞机引擎测试的污染物排放对于每种需要测试的引擎才不同工作模式下的排放分别计算。在测试中，引擎会经历一系列的动力水平来模拟真实的飞行情况。飞机引擎测试的排放计算公式如 4-12 所示：

$$E = N * TT_{mode} * \frac{FF_{mode}}{1000} * EF \quad 4-12$$

其中：

E 为污染物的总排放；

N 为测试循环数；

TT_{mode} 为每个测试模式的平均测试时间，单位为 mins；

FF_{mode} 为每个测试模式的燃料流量速率，单位为 lb/mins；

EF 为污染物排放因子，单位为 lb/klb。

燃料储罐

燃料储罐为非燃烧排放源。燃料储存和使用活动会产生挥发性碳氢化合物的排放，这些排放包括呼吸排放和工作排放。呼吸排放是由于自然状态下的热胀冷缩而造成燃料的挥发性排放。工作排放来自于填充和清空燃料储罐的过程，填充会造成储罐内气压升高，从而将气体驱赶出来，而在清空过程中，空气进入储罐与碳氢化合物蒸汽混合达到饱和状态而膨胀超出了蒸汽空间容量而排出气体。排放的等级取决于储罐的类型、燃料的储量和类型、运输和补充方式、蒸汽恢复效率和大气条件（例如：温度和相对湿度）。

燃料储罐的排放计算公式：

$$E_{HC} = EB + EW \quad 4-13$$

其中：

E_{HC} 为指定时间段内一个储罐的碳氢化合物总排放；

EB 为储罐的呼吸排放；

EW 为储罐的工作排放。

冷却塔

部分机场有发电设施也因此会有冷却塔。冷却塔是同来将大量热负荷排放到大气中的热交换器。主要可分为干冷却塔、湿冷却塔和干-湿混合冷却塔。干冷却塔用空气替代水来冷却蒸汽。冷却塔的排放计算公式：

$$E_{PM} = CWFR * \frac{TDS}{10^6} * \frac{DR}{100} * 60 * 8.34 \quad 4-14$$

其中：

E_{PM} 为指定时间段内一座冷却塔的颗粒物总排放，单位为 lb/hr；

CWFR 为循环水流速，单位为 gal/min；

TDS 为固体的总溶解浓度，单位为 ppm；

DR 为漂水率，表达式为 CWFR%；

60 为小时与分钟的转化系数；

8.34 为水的加仑和磅转化系数。

涂装和漆面操作

涂层和漆面操作的排放计算公式：

$$E_{VOC} = \sum [Q_i * VOC_i * \left(1 - \frac{CF}{100}\right)] \quad 4-15$$

其中：

E_{VOC} 为喷涂操作中挥发性碳氢化合物的总排放，单位为 lb；

Q_i 为研究时段内某种涂料的使用总量，单位为 gal；

VOC_i 为该涂料的 VOC 含量，单位为 lb/gal;

CF 为大气污染控制因子，百分比。

除冰和防冰操作

除冰和防冰操作的排放计算公式：

$$EVOC = Q_f * D * \left(\frac{C}{100}\right) * EF \quad 4-16$$

其中：

$EVOC$ 为除冰操作（跑道或飞机除冰）中挥发性碳氢化合物的总排放，单位为 lb;

Q_f 为每项除冰操作每年除冰剂的使用量，单位为 gal;

D 为除冰剂的密度，单位为 lb/gal;

C 为每种特定除冰操作所用除冰剂化学成分浓度，表达式为 weight%;

EF 除冰操作中化学品的排放因子，单位为 lb/lb。

$$D = D_w * \left(\frac{C}{100}\right) * SG \quad 4-17$$

其中：

D_w 为水的密度，等于 8.345lb/gal;

C 为除冰溶液中成分（水、乙二醇、丙二醇、尿素、聚合物添加剂等）的浓度，百分比；

SG 为除冰溶液中化学成分与水重量的比值。

溶剂使用/脱脂

溶剂脱脂的排放计算公式：

$$EVOC = D * (QC - QD) \quad 4-18$$

其中：

$EVOC$ 为溶剂脱脂剂单元的碳氢化合物排放，单位为 lb;

D 为溶剂的密度，单位为 lb/gal;

QC 为溶剂脱脂剂中溶剂的使用量，单位为 gal;

QD 为溶剂废液量，单位为 gal。

盐堆和沙堆

盐堆和沙堆的排放计算公式：

$$E_{PM} = 2 * TH * EF \quad 4-19$$

其中：

E_{PM} 为堆栈装填和卸货的颗粒物总排放;

2 为代表物料投放过程的因子，一次是装填，一次是卸货；

TH 为为特定时段内堆栈内储存的材料，单位为 tons;

EF 为颗粒物排放因子，单位为 lb/ton。

2.2.4.6 机场建设排放

虽然机场建设排放的持续时间一般较短，但是机场建设排放不仅对当地空气质量有所影响，也对区域空气域产生影响。因此，在很多国家都会将其归在直接排放源的定义之中。例如，美国清洁空气法案（CAA）的通用一致性规则就将建设源定义为直接排放源。机场建设排放主要来源于重型设备（反铲挖掘机、推土机、平地机等）和运输卡车（水泥卡车、自卸车等）和建筑工人乘用车；场地扬尘、场地清理、材料处理、未铺砌路面上的设备移动、风蚀和拆除活动。建设排放一般限于建筑工地和连接的道路，也可包括原材料的储存和运输，建筑残骸的处理、沥青和混凝土的生产。

AEDT 中没有明确的囊括机场建设排放，可供估算该排放源的数据也非常少。机场建设排放的估算可依据规划的建设活动日程、车辆/设备的数量、设备类型/燃料类型、车辆/设备使用率和建设活动的时间等，按照环境影响评价的相关标准和规定来执行。机场建设排放评估的污染物通常包括 CO、VOC、NO_x、SO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5}。

(1) 建设设备日程规划可以用 RS Means Productivity Standards for Construction 和 US FAA 咨询通告 150-5320-6G Airport Pavement Design and Evaluation 来进行估算。建设设备日程规划明确了车辆/设备的预期、何时使用、数量和使用时长。规划也会考虑到人力（设备数量的 1.25 倍）。

(2) 对于轻型道路机动车的排放，其排放因子来源于 US EPA MOVES 模型或其子模型。计算道路机动车年排放需要预期的车辆运行里程数，并可用以下公式 4-20 进行计算：

$$\text{排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) = \text{排放因子} \left(\frac{\text{g}}{\text{mile}} \right) * \frac{\text{miles}}{\text{day}} * \text{每年的天数} * \frac{1\text{pound}}{453.59\text{g}} * \frac{1\text{ton}}{2000\text{pounds}} \quad 4-20$$

(3) 重型设备的排放因子来源于 US EPA NONROAD2008 排放模型。当排放因子确定了以后，设备马力参数会被分配给每个类型的建设设备。每种类型设备的排放因子和马力随后会用来预测设备的输出功。对于非道路设备，需要预期的设备马力、运行时长、负荷因子来估算其年排放，并可用以下公式 4-21 进行计算：

$$\text{排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) = \text{全节流排放因子} \left(\frac{\text{g}}{\text{hp-hour}} \right) * \text{马力(hp)} * \text{每年的小时数} * \text{负荷因子} * \text{使用因子} *$$

$$\frac{1\text{pound}}{453.59\text{g}} * \frac{1\text{ton}}{2000\text{pounds}} \quad 4-21$$

其中使用因子代表了日常操作的百分比，负荷因子代表了相对于全马力评级的平均马力设置。数据来源于 NONROAD 模型。例如：使用因子 0.75 代表一天 10 个小时中有 7.5 小时在运行；负荷因子 0.62 代表运行马力相当于全马力评级的 62%。

表 19.建设设备数据实例

设备	马力	负荷因子	使用因子
反铲挖掘机	100	0.21	0.55
小型压缩机 (185 cfm)	40	0.43	0.39
中型压缩机 (300 cfm)	75	0.43	0.39
大型压缩机 (1600 cfm)	100	0.43	0.39
小型发电机	40	0.43	0.16
中型发电机	175	0.43	0.16
大型发电机	300	0.43	0.16
起重机 (45 ton)	175	0.43	0.48
起重机 (100 ton)	300	0.43	0.48
灯塔	25	0.43	0.26
拖船	600	0.21	0.02

(4) 无组织排放

无组织扬尘的排放的建设排放源清单需要用美国环保署 AP-42《大气污染物排放因子汇编》和其他一些出版物中的排放因子进行计算。无组织扬尘可能来自于：陡坡缓和、土壤迁移、卡车的挖掘、负荷和卸载、未铺设路面上的移动和储备的风蚀等。如 AP-42 所建议的，无组织扬尘的排放因子可以设定为 1.2 tons/acre/month，假定每个建设月中约 25% 的建设项目用地面积受到影响。PM_{2.5} 的浓度假定为 PM₁₀ 的 10%。根据日常洒水和其他活动估算扬尘控制效率为 75%。无组织扬尘 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放速率分别用公式 4-22 和 4-23 进行计算。

$$\text{无组织扬尘 PM10 排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) = \text{受影响区域总面积(acre)} * 0.25 * 1.2 \frac{\text{tons}}{\text{受影响面积 acre * 月数}} * \frac{12 \text{ 月}}{\text{年}} * (1 - 0.75) \text{ 控制效率}$$

4-22

$$\text{无组织扬尘 PM2.5 排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) = \text{无组织扬尘 PM10 排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) * 0.10 \text{ PM2.5 占PM10 百分比}$$

4-23

沥青路面的无组织 VOC 排放可以用公式 4-24 进行计算，

$$\text{沥青挥发性有机物排放速率} \left(\frac{\text{ton}}{\text{year}} \right) = 0.053 \frac{\text{tons}}{\text{沥青铺设面积 acre}} * \text{每年沥青铺设面积 (acre/year)}$$

4-24

2.3 扩散模型

2.3.1 基本方法

1895 年 Reynolds 首次提出管道中平流与湍流的概念，被认为是扩散模型发展的起点。Taylor 于 1915 年提出了大气中湍流的概念，并于 1921 年建立了“湍流扩散的泰勒理论”成为了用常数涡流扩散系数描述扩散行为的基础。1962 年里程碑式的《大气扩散》出版，扩散模型在随后得到了快速的发

展。目前最常用的扩散模型为拉格朗日模型（采用移动坐标系）和欧拉模型（采用固定坐标系），如今扩散模型已经成为预测机场范围内污染物浓度的主要方法之一，并且与公众健康与社会福利直接相关联。

高斯公式是如今最常用的扩散模型，采用的是拉格朗日方法，假定下风向扩散依赖于稳定性等级和下风向距离。并且利用高斯概率密度函数来考量烟羽传输与扩散。高斯公式适用于点、线和面源。它最基本的点源形式，烟羽的浓度可以用公式 5-1 进行计算：

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \{\exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right)\} \quad 5-1$$

其中：

Q 为源强度；

μ 为风速；

H 为烟筒高度；

σ_y 和 σ_z 为水平和垂直扩散系数。

最近的研究发现垂直方向的双高斯分布可以更好地表现垂直混合的对流情况，结果更准确。

另一种常用模型利用了基于质量守恒的涡流扩散系数，采用的是欧拉方法。该方法采用了简化的假设将湍流通量 $\langle u' c' \rangle$ 和浓度梯度 $\frac{\partial c}{\partial x_i}$ 联系起来：

$$\langle u' c' \rangle = -K_i \left(\frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad 5-2$$

这种方法适用于没有单一烟羽主导的，较为平均的污染物（如一氧化碳）分布。其计算方程如公式 5-3 所示：

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + R_i(c_1, c_2, \dots, c_n) + E_i(x, y, z, t) - S_i(x, y, z, t) \quad 5-3$$

其中：

u_x, u_y, u_z 为速率；

c 为物种的浓度；

R 为化学生成速率；

E 为排放通量；

S 为分出通量。

除了如上所述两种方法，扩散建模方法还包括盒子模型、轨迹模型、质量和动量模型、拉格朗日分子模型、格栅烟羽方法和闭合模型。

表 20. 机场区域常用扩散模型

机场大气质量模型	扩散模型基本类型	模型信息
AEDT/EDMS	双高斯分布	来源: 美国; 研发者: US FAA
ADMS-Airport	双高斯分布	来源: 英国; 研发者: CERC
Open-ALAQS	双高斯分布/拉格朗日	来源: 法国; 研发者: EUROCONTROL
LASPORT	拉格朗日	来源: 德国、瑞士; 研发者: Janicke Consulting

考虑到使用成本、实用性和模型的复杂程度，没有单独一种模型可以满足所有的研究需要。这就需要简化模型参数和输入数据，或者具体情况具体分析将多种模型组合使用。在实际使用中需要选择合适的扩散模型时，使用者需要仔细研究法律规定、需要建模的排放源、模型需要的输入数据和模型的限制。

扩散模型的基本概念包括：模型的确定和选项选择；排放源排放特征；气象数据；空间分布；时间分布；地形数据；建筑物下洗；接收点位置；氮氧化物向二氧化氮转化和背景浓度。

2.3.2 机场部分

扩散模型是在一定气象和地形条件下模拟并且评估大气污染物传播扩散的模型。美国气象协会和美国环保署研发的管控模型（AERMOD）和 AEDT 耦合使用，可以用来预测污染物浓度并且将结果与国家空气质量标准（NAAQS）对比。

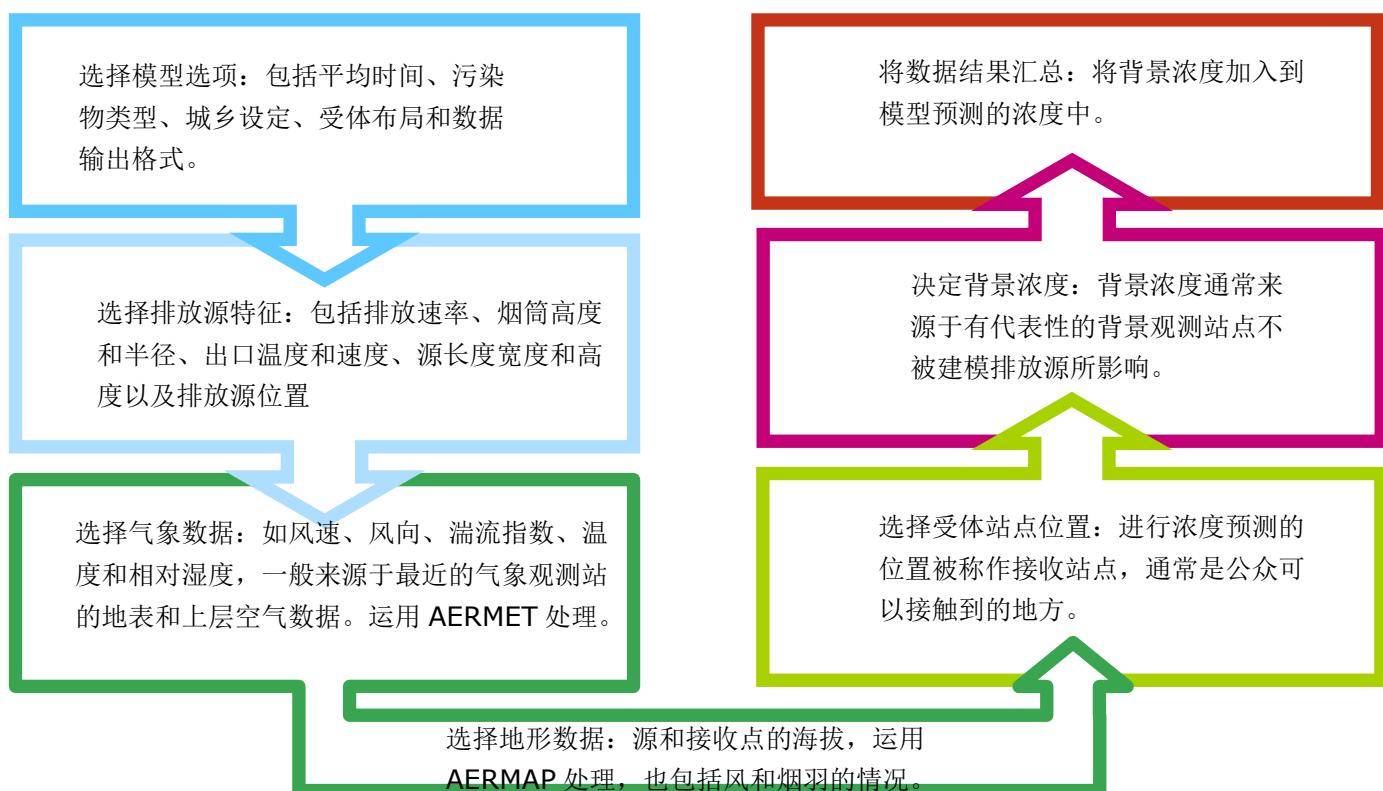
美国环保署在扩散建模上的主要指导文件为《大气质量模型指南》的 51 章附录 W。AERMOD 可以用来模拟不同地理环境下点、线、面和空间排放源，也可以用来预测短期（1-24 小时）最大浓度和长期（季度或年度）平均浓度。AERMOD 包括附加程序如 AERMET、AERMAP 和 AERSURFACE 来处理气象和地理数据。

对于美国环保署设定的主要污染物，一氧化碳，氮氧化物，PM₁₀ 和 PM_{2.5} 是扩散模型中最常见分析的污染物。

- (1) 一氧化碳浓度在机动车辆流量较高的区域更高，例如主航站楼的连接道路，路边和停车场。
- (2) 二氧化氮浓度在飞机跑道终点附近最高。
- (3) 颗粒物在机场范围内普遍存在，但在活动高频处或排放源密集处更高。
- (4) 二氧化硫和铅的排放因大气浓度较低很少涵盖在扩散模型中。铅一般在大量使用航空汽油的机场附近较高。
- (5) 臭氧是区域性污染物，来源于挥发性有机物和氮氧化物在光照条件下的作用，因此对于小范围的扩散模型作用很小。

使用 AERMOD 进行扩散模型模拟的步骤如下图所示。

图 10.AERMOD 进行扩散模型模拟的步骤流程图



2.3.3 道路部分

道路交叉口分析也被称作“热点”分析。主要污染物包括一氧化碳，PM₁₀ 和 PM_{2.5}。这些污染物在机场主要来源于机动车辆在机场内外的行驶和低速运行。美国净化空气行动（CAA）和国家环境政策行动（NUS EPA）指导。

局部一氧化碳和颗粒物的热点分析遵循交通运输一致性法规 40 CFR 第 93 部 A 子部、23CFR 第 771 部。CAA 的法规有一定区域限制而 NUS EPA 则没有。NUS EPA 大气质量分析通常聚焦一氧化碳作为车辆大气质量影响的主要标志。美国环保署与联邦高速管理局（FHWA）和联邦运输管理局（FTA）合作出台了以下文件来评估项目层级大气质量要求的一氧化碳热点分析：《道路交叉口一氧化碳建模指导》和《运用 MOVES 进行项目层级一氧化碳分析》。颗粒物的热点分析对于局部涉及大气质量的项目（包括部分高速公路和大量使用柴油机动车的运输项目等牵涉颗粒物执行标准的项目）。美国环保署与美国交通部合作出台了《PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在未达标和维护区域量化热点分析的交通一致性指南》来评估颗粒物的热点分析。

道路部分扩散模型的建立主要包括以下几个步骤：

- (1) 判定：依据 40 CFR 93.123 (a) (1)、40 CFR 93.123 (a) (2)、40 CFR 93.123 (b) (1) 和 40 CFR 93.123 (b) (2) 来判定项目是否需要一氧化碳或颗粒物的热点分析。
- (2) 特殊情况下需要特殊考量和特殊指示的项目需咨询州或地方大气质量法规和交通规划部门。即使项目无法达到一氧化碳和颗粒物的规定标准而无法获得批准进行热点分析，仍应考虑实行量化热点分析以证明达到了 40 CFR 93.116 的标准。
- (3) 流程：
 - (a) 决定分析方法；

- (b) 取得项目相关数据;
- (c) 估算道路机动车排放;
- (d) 选择接收站点位置;
- (e) 选择扩散模型并计算指定路口的污染物浓度;
- (f) 决定背景浓度;
- (g) 将结果汇总。

2.3.4 扩散模型中的排放源

AEDT 使用美国环保署的大气扩散模型系统 AERMOD 来进行机场相关污染物的分析。用户在 AEDT 中提交输入数据并收到来自 AERMOD 的输出数据并由此生成机场附近的污染物浓度地图。

AEDT 中定义的各种操作的排放会被分配到 AERMOD 中空间上固定的排放源中。AERMOD 中各个源的排放按模型小时进行收集，并且得到小时排放速率。每个飞机操作排放与不同的飞机运动相对应。对于 GSE、APU 和其他启动阶段非飞机操作需要和 AEDT 中登机口或航站楼的操作进行关联。由于固定源的几何和物理特性，AERMOD 中对应操作的排放会被分配到空间、矩阵面和点源。AEDT 目前依赖于用户对道路、停车场和建设排放进行估算。

排放源的主要排放特征包括：根据源的种类，AERMOD 会构建点、面、线和空间源；点源，和热能与动量导致的浮动烟羽用来进行锅炉、涡轮机、发电机和冷却塔的烟囱的建模；面源用来对飞机在登机口停机坪上的操作和离开停机坪后滑行、排队、跑道加速、爬升和进近等模式进行建模。道路交通划分为线源或者一系列的面源；空间源用来对有一定面积和高度的排放源进行建模。

根据排放源类型，会需要一些额外的信息包括：包括位置与高度的源布局；包括位置、气体温度、出口速度、半径、高度等参数出的烟筒排放；移动源路径的长度与宽度；面源定义了形状与高度的坐标。AEDT 在空间上分配了 APU 和 GSE 的排放来定义机场的停机坪的排放。这些操作被设计成面源，高度 1.5m，初始垂直分布 3m。停车场的每一层都被视为一个面源，叠加而得到整个停车场的排放，长宽高尺寸根据实测数据或者区域摄像估算而来。固定源的位置依据地图或者区域摄像。烟筒排放的参数根据许可证、标准数据或者工程判断。道路交通排放可以被定义成一系列由端点连接的连续的线排放或者由线和宽度剥离出的面排放，需要每条道路的坐标、海拔、宽度和排放高度。道路宽度的标准值为 20m，但实际宽度需要现场测量或者地图或者区域摄像估算。初始垂直扩散为 3m。

表 21.AEDT 和 AERMOD 模型中源类型对应关系

	AEDT 源类型	AERMOD 源类型
飞机操作	空中部分	1 个或多个面源
	着陆滑跑部分	
	滑行部分	
非飞机操作	固定源	点、空间或矩阵面
	登机口	空间
	航站楼	矩阵面
	停车场	1 个或多个矩阵面
	道路	1 个或多个面
	背景浓度	背景浓度

表 22.AERMOD 模型输入参数和数据要求

模型输入	数据参数
模型选项	平均时间
	污染物
	城市与郊区
排放源排放参数	位置坐标
	区域度量
	道路长度与宽度
	烟筒高度
	烟筒直径
	出口温度
	出口速率
气象条件	地表和上层空气条件
	风速和风向
	环境温度
	混合高度
	地面粗糙度、反射率和鲍文比率
空间分布	跑道坐标
	跑道利用率
	滑行通道
	登机口分配
	机场容量和配置
时间分布	刻和小时
	每天
	每月
地形数据	源和接收点高度
建筑物下洗	建筑物高度和度量
	固定源位置
接收点位置	位置坐标
	旗杆高度
一氧化氮和二氧化氮转化	烟筒内排放率
	臭氧浓度
	初始臭氧浓度
背景浓度	附近环境监测数据

2.4 机场的空气质量监测

飞机作为主要的交通工具之一，大量消耗的航空燃料会带来相应的空气污染物，此外，在飞机下降、滑行的过程中产生的各种空气污染物，以及机场及附近各种设备所带来的空气污染是非常复杂和值得重视的。虽然不同机场的规模和所处地域不同，空气质量的水平也不相同，但是污染的种类是相同的。举例来说，飞机尾气中排放的二氧化碳，一氧化碳，二氧化氮、二氧化硫等气体以及 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 微小颗粒物，不仅对大气造成污染也危害着人们的健康。具研究显示，机场环境污染影响的半径可达 22 公里，在而且规模越大的机场，污染越严重。

2020 年环保部发布了《机场建设项目环境影响评价文件审批原则》，对年旅客吞吐量超千万人次的机场，提出了设置机场环境空气质量自动监测系统，以及在机场和主要声环境敏感区设置噪声实时监测系统的要求。

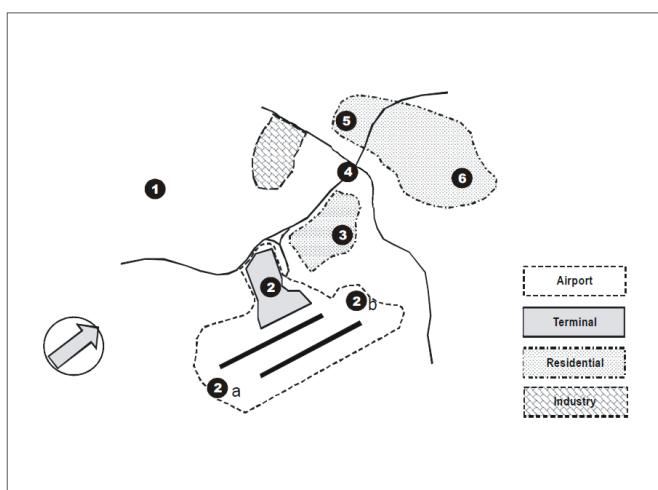
对于机场空气质量的监测最常见的是室外空气质量检测，可以通过环境空气质量微站的合理布点来较好地实现全方位地监测和连续性监测。合理的监测点位布局，可以使监测区域形成了一个覆盖范围较广的监测面。在这个监测面的环境及空气污染状况，空气质量管理均可以通过在线或者离线数据处理来实现及时的追踪与管理，同时空气质量监测对于排查污染源，及时做好应急处理有着重要的作用。

一个完善的监测方案应当考虑诸多因素，ICAO 给出了几个重要的监测方案的组成元素：

- 立法或者执政机构的要求；
- 公众关注、志愿者项目和科学考量；
- 目标与要求；
- 外部因素（例如：已有潜在的监测标准与条例、空气质量监测的成本与责任人）；
- 监测点位与监测系统；
- 管理规划。

ICAO 对于监测站点的位置选择也提供了一些指导意见。如下图所示，对于监测点位的选择应考虑以下的一些因素。空气质量监测应当在机场的上风处和下风处，同时争取得到机场排放源的空间分布。对于所选测量站点的描述参见表 24³³。

图 11. 通用机场监测点位选择方案



³³ ICAO, DOC9889, Airport Air Quality Manual.

表 23. ICAO 对于监测站点选择的通用方法和判断依据

编号	站点描述	判断依据
1	背景浓度站点，未受任何污染活动的干扰。	该站提供了机场所在地区的背景和基准数据。
2	所有站点（包括 2a 和 2b）都位于机场区域内，机场活动密集。可以选择站点直接位于跑道的上风和下风（和边界），通常位于机场边界。	预测这些站点将最有可能反映出机场活动的情况（飞机和/或装卸和基础设施）。这些活动将决定污染浓度，重要的浓度变化可能是由这些排放源引起的。
3	该站点位于一个机场下风向的住宅区，但是在该站点的范围内没有主要的排放源。	该站将给出最靠近机场和下风向的永久性住宅区的平均污染物浓度。也可以借此推断污染源分类。
4	该站位于主要交通路线旁边，但仍然靠近机场。	一般来说，道路交通是一个重要的排放源。该站点反映了道路交通对机场附近当地空气质量的影响。与机场有关的交通监测和其他交通监测相比是一致的。
5	该站位于另一个居民区，但位于有排放源的工业区的下风口。	居民区仍可能受到污染物浓度增加的影响。在这种情况下，重要的是要区分那些与机场无关但会对机场附近地区产生影响的排放源。
6	该站位于离机场更远的地方，但同样位于机场下风向的住宅区。	可以预计，如果没有其他重要的排放源，在离机场更远的下风向，浓度会下降。

机场空气质量监测和管理可以借鉴香港的有关经验，香港国际机场管理局（Hong Kong Airport Authority）自从 2004 年起就在香港国际机场（HKIA）监测空气质量，并从 2012 年开始在网站上提供空气质量监测数据

（<https://www.hongkongairport.com/en/sustainability/environment/air-quality/>）。香港国际机场的空气质量管理的宗旨是：机场管理局旨在利用直接管控手段（例如 AA 车辆的排放），以及促进机场内飞机和机场商业合作伙伴的减排策略。

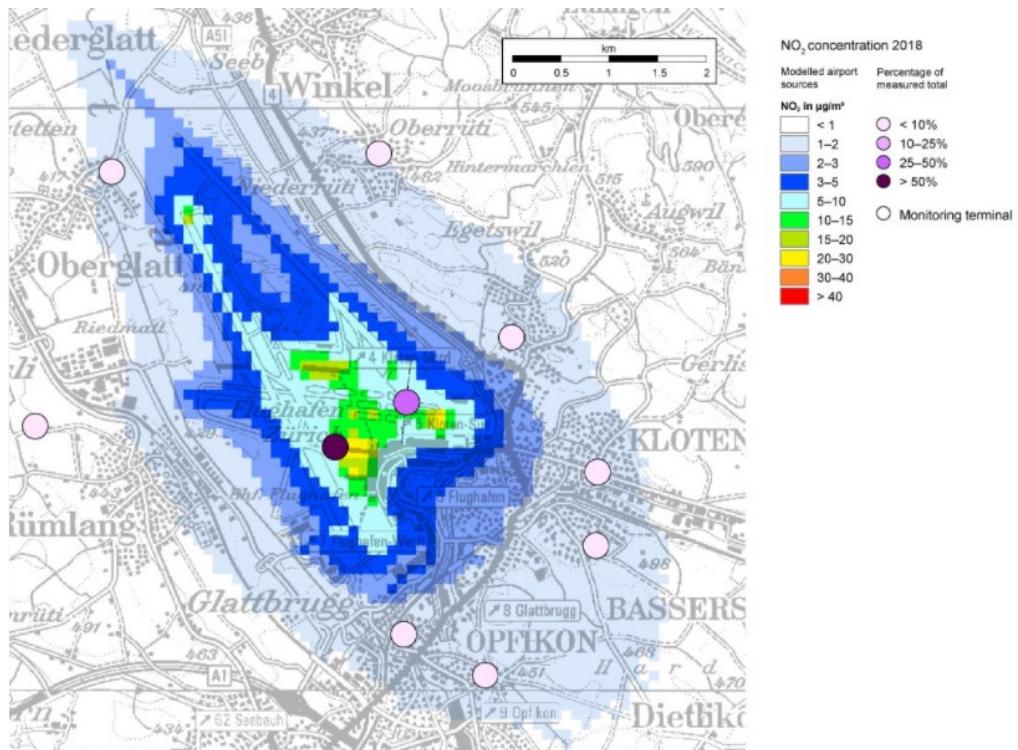
作为世界上最繁忙的机场之一，香港国际机场管理局 AA 在 HKIA 设立了两个机场内的空气质量监测站点，并且在沙洲设立了控制站点，其站点位置如图 8 所示。监测空气污染物包括 NO₂、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、CO 和 O₃，并且在网站上实时更新平均小时浓度数据，并从 2016 年开始涵盖了空气质量健康指数（AQHI）数据。香港国际机场的监测站点的选择和 ICAO 指导的站点设立原则是一致的，通过监测机场活动最密集之处和背景浓度站点的空气质量，可以针对机场的空气质量做出有针对性地空气质量管理计划。

图 12. 香港国际机场三个监测站点的位置



苏黎世国际机场也针对机场周边的空气质量进行了长期的监测和研究。苏黎世国际机场附近的监测站点分布和机场对于当地空气质量的影响（2018 年）如图 9 所示，2018 年，苏黎世国际机场排放源的氮氧化物数量再次增加，与前一年相比增加了 10%。这主要是由于使用大型飞机的飞行次数增加，产生了相应的更多排放。但是与之相反的是，空气质量监测的结果却在下降，虽然在停机坪和该地区的的主要道路上，在某些时候 NO_x 的浓度超过了限值，但来自机场的污染物水平迅速下降，离机场越远。在其周边地区，来自机场的污染物排放最多只占当地测量的空气污染总量的 10%。

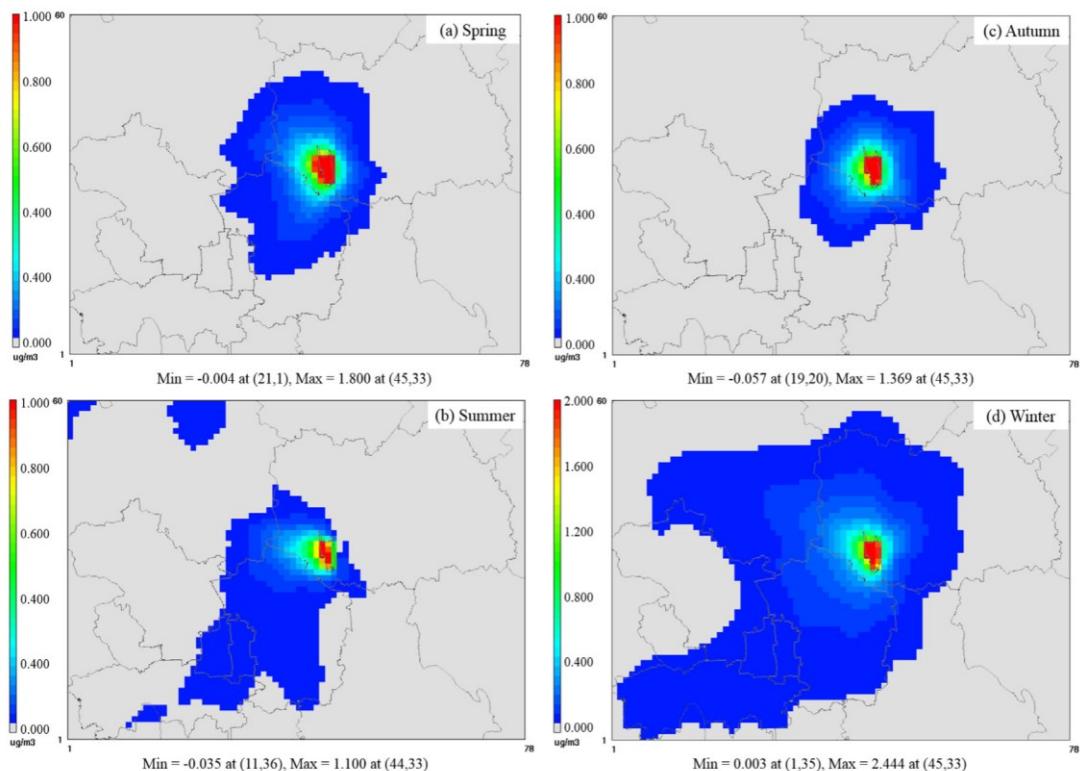
图 13. 苏黎世国际机场及附近的空气质量监测站点和对于当地空气质量的影响



我国也有一些对于机场对周边区域空气质量影响的研究，比如 2018 年杨孝文等人的《Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international

airport》³⁴对于北京首都机场的研究，结果如图 10 所示。研究发现 $\text{PM}_{2.5}$ 对于机场周边 1km 的范围的平均浓度影响约为 $1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最大小时浓度为 $6.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，机场的西侧和西南区域相对于北侧和东侧受到 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响较大。当距离延伸到 5km 时，平均浓度影响约为 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最大小时浓度为 $5.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 14. 北京首都机场不同季节周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 地面平均浓度贡献

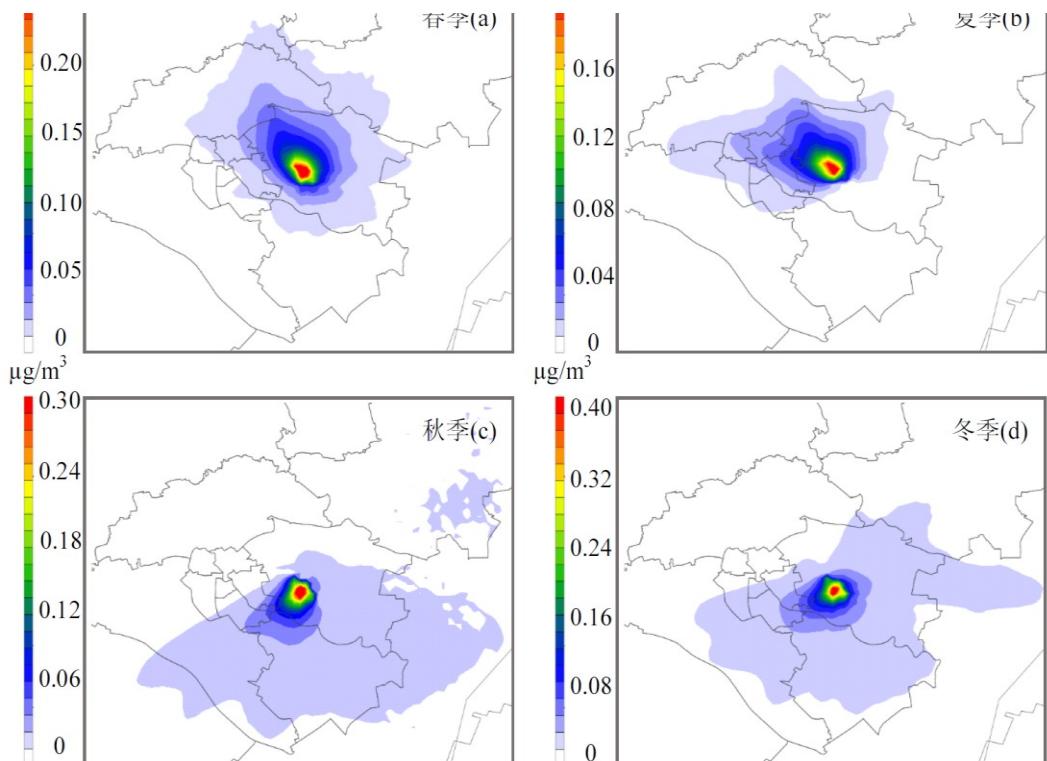


另外一项对于天津滨海机场的研究也表明不同季节机场排放的污染物对周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响存在较为显著的季节差异，结果如图 11 所示³⁵。但是同北京首都机场情况类似，一样是冬季，由于污染物不易扩散，机场周边区域整体贡献浓度高于其他季节，机场区域网格最大贡献浓度为 $3.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但是浓度贡献率相对其他几个季节较低，只有 3.7% （春季 3.8% ，夏季秋季均大于 6.5% ），距离机场 5km 处 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度与小时最大贡献浓度分别为 0.11 和 $2.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

³⁴ Yang X W, Cheng S Y, Lang J L, et al. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 72(10):200-209.

³⁵ 王瑞鹏, 周颖, 程水源, 段文娇, 吕喆, 沈泽亚, 《华北地区典型机场清单建立及空气质量影响》, 中国环境科学, 2020, 40 (4)

图 15. 天津滨海机场不同季节周边区域 **PM_{2.5}** 地面平均浓度贡献



尽管已经有一些针对国内机场对于区域空气质量影响的研究，但是针对性仍然较弱，相关研究所使用的站点并不是专门为机场建设的站点，而是分布在较为分散的广阔区域内，是区域范围内通用的监测站点。并不能很好的反映 ICAO 所建议的诸如机场上风向和下风向，其他排放源影响范围，道路交通排放影响等因素，如果想要更准确地评估机场地排放和污染物对于周边空气质量地影响，则可以考虑学习香港和苏黎世等机场地经验，在机场范围内和边界附近建设空气质量监测站点。北京大兴国际机场建有 1 座空气质量监测主站，15 座检测子站，可实时对环境信息进行全面监测与管理³⁶。北京首都国际机场尚未建立空气监测站，可以考虑按照前述经验进行建设，更好的掌握机场对周边空气质量的影响。

³⁶ <http://www.caacnews.com.cn/special/5706/2020sxjccgzs/2020sxjccgzslm3/202011/W020201105563701618303.pdf>

3. 机场减排策略概述

针对机场的减排策略有很多种形式。在 US FAA 于 2015 年 1 月发布的“航空排放、影响以及减排策略”一文中，提出了“五柱”（Five-Pillar）减排策略³⁷。这五个支柱分别代表不同维度、不同类型、不同方式的减排方案，相互独立却又互相支持，形成一套完整的减排策略体系，帮助实现减排效益的最大化：

- 支柱一：提升科学知识&集成式建模。通过对航空业产生的排放及其环境影响进行分析、建立排放源清单和空气质量模型，为减排措施的设计及减排技术的发展打下基础。
- 支柱二：空中流量管理现代化。发展一体化的先进操作程序，并提升基础设施水平，以实现空中流量管控的优化，提升运行效率和能源效率。
- 支柱三：新航空器与机场减排技术。推动低排放/零排放技术发展，鼓励机场和业者使用低排放/零排放技术和设备。
- 支柱四：可持续的替代航空燃油。支持新型可持续可替代性航空燃油的开发，从全生命周期的角度减少飞机起降过程和飞行过程的排放。
- 支柱五：政策、环境标准及基于市场的措施。通过制定合理有效的政策、环境标准以及市场措施，要求/鼓励/推动地方和相关从业者降低机场排放。

以上是较为宏观的减排策略描述，这五个支柱往往需要包括中央政府、地方政府、机场运营方、航空公司、科研机构、非政府组织（NGO）、公众等的利益相关方共同合作，达成整体性的减排。对于单个机场而言，减排策略一般可以分为两种：技术型和运营型。技术型策略指的是通过改变特殊排放源的设备、设计等来实现减排，例如购买新型的更清洁的机动车、或增加建筑的保温性能等等。运营型策略则一般指通过改变运营流程、参数设置等实现减排，例如提升航站楼的空调温度、或者优化飞机的起降循环等等。而从策略类型上，又可分为基础建设项目、激励性政策、自愿性政策、强制性政策等，每种类型的政策有不同的针对对象、减排潜力和成本，因此在制定减排策略时需要进行综合考量。当然，所有的减排策略的制定都需要有基础数据和研究作为支撑，因此很多时候，减排策略制定之前会先进行详细的前期可行性研究或调研。有时候，减排策略中也会包括对空气质量、排放清单、减排措施等进行研究的政策。

在过去的 20 至 30 年间，世界的各个机场和航空公司已经为减排和减碳付出了许多努力，也取得了许多成果。机场设计减排/减碳策略一般分为三步：

- 识别可行的减排方案，一般是针对范围一和范围二排放（即机场可直接控制、影响的排放）；
- 对各减排方案的优先级进行评估，从技术可行性和经济可行性的方向思考，选择合适的减排方案；
- 除机场自有排放外，进一步考虑范围三（Scope 3）排放。

需要注意的是，在评估减排措施的减排效果时，需要根据机场自身特点、排放情况/排放清单、空气质量状况等来进行综合考虑。此外，有时候采用组合式的策略可能会达到最佳减排收益。

本章将从不同排放源的角度对机场的减排策略进行讨论。由于课题规模所限，本报告讨论的排放源主要包括 GSE 和 GAV 两类。这两类排放源同属移动式车辆/设备/机械，主要排放方式是引擎工作状

³⁷ US FAA. Aviation Emissions, Impact & Mitigation: A Primer.

态下的尾气排放，在各种减排策略的设计和实施上都有许多共通之处，可以联合进行。同时，相比减少飞机主引擎的排放和固定源的排放，针对这两类排放源的减排措施成本相对较低，实施相对容易，也更容易达到空气污染物与二氧化碳的协同减排。正因如此，世界上的许多机场都会将这两类排放源作为首要的减排对象。

3.1 地面支持设备（GSE）减排策略概述

如报告 2.2.4.3 节中所述，大部分 GSE 用于飞机在机场停稳后的飞机维护作业。按照用途，GSE 可按用途大致分为以下几类：

- 向飞机提供地面能源和空调，包括空气启动单元、地面供能单元、空调单元；
- 移动飞机，主要是拖车；
- 向飞机提供服务，包括食品装运车、客舱服务车、卫生间服务车、供水卡车、航空燃料车、维护车、除冰车等等；
- 运载乘客，主要包括登机云梯、机场载客巴士；
- 运载行李及货物，主要包括行李拖车、带式装载机、大宗货物/集装箱装卸机、货物运输拖车、叉车、行李传送带等等；
- 服务于机场的跑道、坡道或其它地区，如除雪设备、草坪维护设备等。

以上各类设备的使用数量和活动水平，根据机场类型、规模、所在地区、可用的基础设施等不同会有较大区别。下表归纳了各 GSE 类型在不同机场的使用频率及特点。

表 24. 不同类型机场的常见 GSE 类型

GSE 类型	机场类型		机场所在气候类型		特点
	大型	小型	炎热/温暖	寒冷	
空调单元	常见	常见	常见	不常见	寒冷地区使用较少；如果机场配备有登机口空调单元，则也可减少使用
空气启动单元	常见	常见	常见	常见	有登机口供电的机场使用较少，通勤飞机常用
行李/货物拖车	常见	常见	常见	常见	机场最常见的 GSE 类型，可使用可替代燃料
皮带式装卸机	常见	常见	常见	常见	最常使用于窄体或中等体型客机
机场载客巴士	常见	不常见	常见	常见	最常用于需要大量转运旅客的大型机场或无公共旅客运输设施的机场
客舱服务卡车	常见	不常见	常见	常见	一般为道路机动车
小型运货卡车	常见	常见	常见	常见	一般为道路机动车
小型载客车	常见	常见	常见	常见	小型的汽油或电动非道路载客车辆
食品装运车	常见	不常见	常见	常见	一般为道路机动车

集装箱装卸机	常见	常见	常见	常见	用于货机或宽体客机
除冰车	常见	常见	不常见	常见	用于寒冷地带的机场
叉车	常见	常见	常见	常见	用于货机或宽体客机
燃料卡车	常见	不常见	常见	常见	在有加油栓的机场使用较少
地面供能单元	常见	常见	常见	常见	有登机口供电的机场使用较少，通勤飞机常用
加油栓/卡车	常见	常见	常见	常见	在有加油栓的机场替代燃料卡车使用
卫生间服务车	常见	不常见	常见	常见	一般为道路机动车
载人升降机	常见	常见	常见	常见	最常用于货机或转运飞机
清扫机	常见	常见	常见	常见	一般为柴油驱动
飞机拖车	常见	常见	常见	常见	机场最常见的 GSE 类型，可使用可替代燃料
供水卡车	常见	不常见	常见	常见	一般为道路机动车

需要注意的是，机场地面支持设备（GSE）和机场通行机动车（GAV）中的某些类型有重合的部分。例如，机场载客巴士在类型上属于道路机动车，既可算为 GSE，也可算为 GAV。在实际进行 GSE 和 GAV 的数量统计时，需要加以区分，避免重复。本文为方便区分，将在机场空侧（airside）运行的机动车统一归在 GSE 一类中，而将在机场路侧（landsid）运行的机动车归在 GAV 一类中³⁸。

有研究通过调查问卷对 2011 年美国的几个典型机场的 GSE 数量和种类进行了调查³⁹，结果如下表所示：

表 25. 不同类型的 GSE 数量

机场名称	缩写	规模	气候类型	GSE 总数
Boise	BOI	小型枢纽机场	寒冷	321
Boston Logan	BOS	大型枢纽机场	寒冷	1704
Dallas-Ft Worth	DFW	大型枢纽机场	温暖	2323
Detroit Wayne County	DTW	大型枢纽机场	寒冷	890
Fresno-Yosemite	FAT	小型枢纽机场	温暖	124
Front Range	FTG	非枢纽机场	寒冷	48
Manchester	MHT	中型枢纽机场	寒冷	235
Minneapolis-St. Paul	MSP	大型枢纽机场	寒冷	1952
Sacramento International	SMF	中型枢纽机场	温暖	513

³⁸ 机场的地界可分为航空侧（airside）和陆侧（landsid）两部分。航空侧是受机场当局控制的区域，包括飞行区、站坪及相邻地区和建筑物，进入该区域是受控的；陆侧是为航空运输提供各种服务的区域，是公众能自由进出的场所和建筑物。

³⁹ US National Academy of Sciences. GSE: Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial.

Seattle-Tacoma	SEA	大型枢纽机场	温暖	1026
Tampa Bay	TPA	大型枢纽机场	温暖	734
Tucson International	TUS	中型枢纽机场	温暖	155

从机场类型来看，美国不同类型机场的 GSE 数量有很大区别：大型枢纽机场的 GSE 总数一般在接近一千甚至数千台，而小型机场往往只需要 200-300 台；寒冷地区所需的 GSE 数量相比温暖地区有明显增加。

表 26. 机场各类型 GSE 的占比

GSE Type	No. of GSE	Percentage of Fleet
Air Conditioners/Heaters	312	3.1%
Air Start Units	160	1.6%
Aircraft Tractors/Tugs	705	7.0%
Belt Loaders	1,102	11.0%
Baggage Tugs	2,575	25.7%
Buses	69	0.7%
Cars/Pickups/Vans/SUVs	1,132	11.3%
Carts	330	3.3%
Cargo Loaders	281	2.8%
Cabin Service/Catering Trucks	320	3.2%
Deicing Trucks	399	4.0%
Forklifts	314	3.1%
Fuel Trucks	151	1.5%
Ground Power Units/Generators/GPU-ACs	487	4.9%
Hydrant Carts/Hydrant Trucks	62	0.6%
Lavatory Carts/Lavatory Trucks	177	1.8%
Light Carts	111	1.1%
Lifts	344	3.4%
Maintenance Trucks	56	0.6%
Other	843	8.4%
Passenger Stairs	95	0.9%
Total	10,025	100.0%

从 GSE 类型上看，占比最高的是行李拖车，其次是各式场内道路机动车和带式装载机，再其次是空调单元、小车、叉车、地面动力单元和升降梯。某些 GSE 类型，例如载客云梯，仅有少数大型枢纽机场需要使用，因此总数占比较少。

北京的首都国际机场和大兴国际机场均属于大型枢纽机场，且处于四季分明的地区，因此各个 GSE 类型可能均有使用。因此，在制定减排策略时，也应该根据机场的实际情况以及不同类型 GSE 的使用情况和特点，对不同类型的 GSE 制定不同的减排策略。

3.1.1 修建替代基础设施和硬件系统

某些时候，某些类型的 GSE 的功能可以通过在登机口修建特定的固定基础设施进行替代，例如：

- 固定的电力驱动的空调系统，用于替代 GSE 中由柴油机驱动的空调单元；
- 400 Hz 的电力系统，用于替代 GSE 中由柴油机驱动的地面供能单元和空气启动单元。

这些固定的基础设施除了能够替代相应的 GSE 之外，还可以减少飞机 APU 的使用，因此十分实用。

除了修建在登机口的电力系统外，其他的固定设施也能够减少柴油/汽油驱动的 GSE 的使用，例如用地面加油栓代替燃料卡车。不过这类设备往往还需要一个将地面设施与飞机进行相互通联的装置，如使用燃料泵卡车或者无需引擎的加油车等等。

以上是两类常见的机场基础设施。值得注意的是，新建设施的成本一般要小于改建设施。比如，对一个现有的机场的登机口进行电动化改造可能会需要对整个航站楼的电力供应系统进行升级；在现有机场安装加油栓则可能会影响机场的日常运营。因此，进行基础设施改造时需要对改造成本和成本有效性进行仔细的思考。目前，某些机场也在探索使用更加新型和高级的系统（如使用中央控制的传送带来转移行李）来减少 GSE 的使用。但是目前这些技术的成本和成本有效性还难以被衡量，不适合大范围推广，仍然需要未来的探索和实践。

3.1.2 安装排放控制设备

安装排放控制设备是 GSE 和 GAV 的常用排放控制手段。一般来说，排放控制设备主要是将尾气中的废气转化为对环境更加友好的气体，从而达到减排的目的。常见的排放控制设备包括：

- 催化氧化：将未充分燃烧的碳氢化合物和一氧化碳转化为二氧化碳和水。
- 三相催化：在将碳氢化合物和一氧化碳转化为二氧化碳和水的同时，将氮氧化物还原为氮气和氧气。三相催化装置只能用于点燃式发动机，目前主要应用于道路机动车。
- 颗粒物捕集：颗粒物捕集装置主要用于捕集柴油尾气中的可溶和含碳颗粒物。由于燃料中的硫会影响装置的运行效率，因此这项技术要求 GSE 使用超低硫柴油。

对于安装有非道路发动机的 GSE 来说，其燃烧系统一般为“开环”（Open Loop），这意味着系统中没有燃烧控制/回馈功能来实时调整空气/燃料比。这种 GSE 只能安装催化氧化设备。如果将 GSE 改造为“闭环”燃烧控制系统，则 GSE 可使用三相催化装置来降低排放。此外，对于低负载系数的 GSE 来说，有时系统温度可能很难达到使设备高效运行的温度，此时颗粒物捕集装置的效率也会受到影响。

安装排放控制设备还有一个需要考虑的因素就是设备的体积要求。很多 GSE 可能未保留足够的改装空间，对这类 GSE 进行改装时，需要确保安装的设备不会影响 GSE 的正常运行。

3.1.3 使用可替代燃料/电动化

3.1.3.1 常见的可替代燃料及其特点

目前 GSE 可使用的主要可替代燃料包括压缩天然气（CNG）、液化石油气（LPG）、含乙醇燃料（E85）、生物柴油、氢气等等。这其中，CNG 和 LPG 相对应用较广，而其他可替代燃料则有一定的使用局限性。此外，电动化也是目前 GSE 减排的主要方向。

下表归纳了几种常见可替代燃料的特点。

表 27.常见的可替代燃料及其特点

种类	获取难易度	能量效率	寒冷地区适应性	对引擎/维护的要求	对储存的要求
乙醇/乙醇汽油	在美国相对容易（美国约有 200 余家工厂生产），在中国目前已暂停推广。	跟纯汽油相比能量效率略低，乙醇的比例越高则效率越低。E85 大概是纯汽油的 70% 至 85%。	E85 有可能会在寒冷天气下结冻。因此在寒冷地区应使用乙醇掺比更低的品类。	乙醇是一种强力的清洗剂，会对引擎的一些配件，例如橡胶、塑料甚至金属造成腐蚀，因此使用乙醇汽油替代常规燃料时需要先对引擎进行改装。	乙醇汽油的保存期限一般在数月至数年之间。一般而言，乙醇汽油最好在 2 到 3 周内被使用。
生物柴油	美国约有 600 余家工厂生产生物柴油，国内还未见大规模应用。	与乙醇类似，生物油部份含量越高，能量效率越低，纯的生物柴油（B100）的效率大概是普通柴油的 93% 至 99% 左右。	低温会使生物柴油结块并难以使用。B20 在零下 13 度左右就会开始变得粘稠。但这很大程度上取决于制油的原料，例如由菜油、葵花籽油等制成的生物柴油就不太容易结块。	由于生物柴油带有溶解性的特点，直接使用生物柴油可能会导致零件或管道的阻塞，从而损坏引擎。因此，使用生物柴油需要频繁的日常检查和维护，以发现和清理任何可能出现的结块。	生物柴油比普通柴油更容易与氧气发生反应并形成凝胶状物质，因此需要储存在干燥、半密闭、凉爽的容器或储罐中。此外，生物柴油的储存时间不宜过长。
压缩天然气 (CNG)	CNG 一般通过管道或者以超低温液体形式进行运输。天然气占美国能源消耗的四分之一，但用于运输行业的天然气仅占总能源消耗的千分之一。国内已有广泛应用。	与传统石油燃料在马力、加速性能、巡航速度等关键参数上没有明显区别，但是由于 CNG 仅含有汽油的四分之一的能量，因此单次行驶里程会大大缩短	无影响	相比传统石油燃料，CNG 更加清洁，产生更少油渣，因为维护成本相对较低。	CNG 使用地下管网运输，需要用大型储罐或容器保存，补充 CNG 时需要保持操作温度在零下 40 摄氏度以下，因此储罐需要配备余压控制系统。
液化石油气 (LPG)	LPG 车辆在世界上均有广泛使用。	LPG 的密度比汽油略低，因此能量效率也略低，但差别不明显，燃料经济性也与汽油相似。与	无影响	LPG 也较为清洁，使用 LPG 的引擎寿命往往可达汽油引擎的两倍以上。	LPG 使用高压储罐储存，燃料补充速率与汽油相仿。LPG 的燃料站占地较大。

		CNG 相同, LPG 的单次行驶里程也不如汽油。			
电动化 (EV)	2011 年, 全美大约有 10% 左右的 GSE 为电动。随着电动化的大力推广, 该比例还在增加。	EV 的加速性能、速度等与普通 GSE 相仿。EV 运行的噪音更小, 但是对于远距离的拖拽 (例如将飞机从登机口拖至维护厂房) 等操作较为吃力。EV 也很难进行高负荷的载人或载物操作。此外, EV 不需要预热引擎, 因此能源效率较高, 尤其在“走走停停”的操作中效率更高。	无影响	EV 的维护要求一般更低, 因为无需加油、清洗燃油系统, 或进行排放测试。如果将传统烧石油燃料的 GSE 改造为电力驱动, 一次性改造成本会比较高, 但后续的维护费用和运行费用会降低。	使用电力, 需要充电桩等基础设施, 且充电桩的设置需要考虑不同 GSE 的电池类型和充电要求 (例如功率, 直流电/交流电等)。
氢气	尚未商业化, 仍处于探索阶段。	能量效率极高, 一磅氢气所包含的能量大约为同等汽油的三倍。	无影响	氢燃料电池的生命周期比传统的化石燃料引擎短很多 (大约为 1900 小时左右), 因此需要更频繁地维修和更换。此外, 氢燃料电池相比传统油箱需要更大的体积, 对 GSE 的设计提出了要求。	氢气一般通过地下管网运输, 并以超低温储存在大型地面高压储罐或隔离容器中。

除单独使用一种可替代能源外，也可以使用混合动力车（HEV）。HEV 指的是将电力与汽油/柴油、或其他可替代能源混合使用。车辆/设备低速运行时，使用电力驱动；高速运行时则以其他燃料驱动。与纯 EV 不同，HEV 一般不需要对电池进行充电，因为其电力来自引擎燃烧时驱动车辆内部的发电机的供电。HEV 相对较好的结合了两种类型车辆的特点，提高了能源效率，但可能会要求更高的维护费用。

另外，使用可替代燃料往往需要对现有的基础设施进行改造，或增加新的基础设施，这往往需要机场从技术、设备、相关方等各方面进行综合的统筹考虑。以电动 GSE 为例，为电动 GSE 补充电力需要安装相应的充电设施，而充电设施的点位、数量、使用直流电/交流电、攻略、接口数等都需要进行仔细的考量，兼顾可靠性、实用性和便捷性。与此同时，机场的电力分布和电源输送管理系统可能也要进行相应的优化和调整，以适应新的供电需求。此外，为保证电动 GSE 车队的稳定、有效运行，可能还需要实时监测电源系统的状态，并识别各种异常状态，如温度异常、绝缘故障或电源扰动等。使用电动 GSE 还需要对人员进行培训，令其掌握新的操作流程、维护需求等，避免出现如充电时间不足或使用方法不正确而导致设备无法及时启用或产生故障的情况。

3.1.3.2 可替代燃料的成本

考虑使用可替代燃料替换传统燃料车辆时，主要考虑的成本因素有如下几项：

- 固定成本：基础设施建设/改建的成本，改装车辆/购置新车辆的成本
- 运营成本：燃料成本，运行和维护成本，人员培训成本等

从燃料成本来说，各种常见燃料的 2021 年 1 月的价格⁴⁰如下表所示：

表 28. 常见燃料的价格（2021 年 1 月）

燃料类型	价格（美元）
生物柴油（B20）	\$ 2.42/gallon
生物柴油（B99-B100）	\$ 3.18/gallon
乙醇（E85）	\$ 2.04/gallon
天然气（CNG）	\$2.19/GGE ⁴¹
液化石油气（LPG）	\$2.85/gallon
汽油	\$2.32/gallon
柴油	\$2.64/gallon
电力	\$0.13/kWh

由上可见，除 CNG 单位不同难以比较外，其他的能源类型的每加仑价格差距不大，其中价格最高的为高比例生物柴油，价格最低的为 E85 乙醇，而汽油和柴油，作为传统能源，价格居中。

⁴⁰ 来源：U.S. DUS EPArment of Energy (US DOE) . Available at: <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html>

⁴¹ Gallon of Gasoline Equivalent

由于各种燃料的含能量不同，直接比较价格可能不直观。考虑含能量后，各燃料的成本如下表所示：

表 29. 考虑含能量后的燃料成本（2021 年 1 月）

燃料类型	转换因子 ⁴²	转换后单位 GGE 价格（美元）
生物柴油 (B20)	1.11 GGE/gallon	\$ 2.18/GGE
生物柴油 (B99-B100)	1.05 GGE/gallon	\$ 3.03/GGE
乙醇 (E85)	0.71 GGE/ gallon	\$ 2.87/GGE
天然气 (CNG)	1.00	\$2.19/GGE
液化石油气 (LPG)	0.74 GGE/ gallon	\$3.85/GGE
电力		\$1.45/GGE
汽油	1.00	\$2.32/GGE
柴油	1.12 GGE/ gallon	\$2.36/GGE

如上所示，从单纯的提供能量的成本的角度讲，生物柴油和 CNG 最为便宜，传统的汽油和柴油价格仍然居中，LPG 相对单位成本较高。当然，各种燃料的价格会随市场情况波动，尤其是油价，因此燃料的成本也会随之波动。对于电力来说，由于电动化引擎的能量转化效率高，损失少，因此一般电动化 GSE 的燃料成本相比传统汽油或柴油 GSE 可以降低 80% 左右。

当然，在实际考虑使用可替代燃料时，除考虑燃料本身的价格外，还应该考虑获取燃料的难易程度。此外，燃料的运输方式、购买方式、税费等也与燃料成本息息相关。除燃料成本外，固定成本和其他运营成本也应列入考量。一般而言，使用可替代燃料代替传统的汽油和柴油，会带来比较高的初期固定成本（换机/改造费用+基础设施费用），但后期的燃料成本和维护成本会有所下降。下面是一个电动化与传统窄体客机拖车的年营运成本对比的例子。

表 30. 传统短距离窄体客机拖车成本与电动化拖车的年支出对比

支出项	传统	电动化	成本节约额
设备成本	\$ 5,280	\$ 5,280	\$ -
电动化基础设施成本	\$ -	\$ 800	\$ (800)
维护/劳动力成本	\$ 3,296	\$ 2,991	\$ 305
维护/零件成本	\$ 3,914	\$ 1,410	\$ 2,504
引擎/电池更换成本	\$ 2,781	\$ 3,200	\$ (419)
燃料成本	\$ 8,891	\$ 1,424	\$ 7,468
总年支出	\$ 24,162	\$ 15,105	\$ 9,058

⁴² 来源：US DOE. Alternative Fuels Data Center – Fuel Properties Comparison. Available at:

https://afdc.energy.gov/files/u/publication/fuel_comparison_chart.pdf

如上表所示，电动化的短距离窄体客机拖车每年能节省约 1 万美元的支出成本，这其中主要的成本节约项是燃料的支出，然后是由于更换零件减少带来的成本节约。当然，很多电动化 GSE 的设备成本相比传统类型要高一些，但总的来说，同时考虑固定成本和运营成本的话，电动化 GSE 是能够在中长期实现成本节约的。

3.1.3.3 可替代燃料的减排潜力

不同的可替代燃料，由于生产方式、使用方式不同，带来的减排收益也不同。下表对各种可替代燃料的减排潜力进行了总结。

表 31. 常见可替代燃料的减排潜力

燃料类型	CO	HC	PM	NO _x	SO _x	HAPs	说明
生物柴油	下降	下降	下降	上升/下降	下降	上升/下降	1
电力	下降	下降	上升/下降	下降	下降	上升/下降	2
乙醇 (E85)	下降	下降	下降	上升	上升	上升/下降	3
天然气 (CNG)	下降	下降	下降	上升/下降	下降	上升/下降	4
液化石油气 (LPG)	上升/下降	上升/下降	下降	下降	上升	上升/下降	5
氢气	下降	下降	下降	下降	下降	不明	

说明：

- 生物柴油的生产过程会导致其含有 10% 左右的氧（传统柴油不含氧），这些氧会对燃烧过程产生影响，导致 CO、HC 和 PM 的下降，但有可能会带来 NO_x 的上升（25%-30%）。NO_x 可通过安装额外的排放控制设施，如废气再循环系统（EGR）来进行控制。另外，不同种类的生物柴油的减排潜力可能不同。例如，研究指出，如果用食用油的废油做生物柴油，则 CO 的减少量大概在 9% 至 17%，但如果使用大豆油，则 CO 的减少量可达 18% 至 33%。对于有害空气污染物（HAPs）来说，研究结果表明，甲醛、苯等 HAPs 的排放量相比超低硫柴油（ULSD）可能会有所增加。对于 CO₂，生物柴油的使用会大大降低全生命周期的碳排放。数家研究机构的研究结果表明，纯生物柴油（B100）的全生命周期减碳比例可达 74%⁴³。
- EV 通常被认为是环境友好的，因为 EV 不直接排放尾气。考虑 EV 的排放时，一般是考虑全生命周期的排放，即电力是通过何种途径产生的。此外，由于不同种类 EV 的电力性能和能量密度不同，EV 的种类也会对排放有所影响。根据美国环保署（US EPA）的研究，相比 4 缸汽油发动机、LPG 以及柴油车，EV 的 CO、HC、NO_x、CO₂ 排放均大幅降低，但 PM 根据电力的产生方式可能会上升或下降（例如：天然气发电时 PM 相对降低，而煤炭发电时 PM 大幅升高），另外 HAPs 的排放也很大程度上取决于发电方式。
- 对于氢能源机动车/机械，由于氢气中不含碳原子，因此不会产生直接的 CO、HC 和 CO₂ 排放，但会有少量间接排放（例如来自润滑油在燃烧过程中的降解）。如果比较氢燃料电池机动车（FCEV）和 EV 的全生命周期排放，则 FCEV 的 CO₂ 排放大约比 EV 低 46% 左右（假设 EV 的电力来自 GHG 排放高的煤炭发电厂）。对于 NO_x 排放，氢能源机动车产生的 NO_x 大概是汽油车的 1/10，相比柴油车也会有约 20% 的下降。

⁴³ 来源：https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html

4. 更低的燃料密度和更高的辛烷值让 CNG 可以在更高的压缩比和更高的温度下燃烧，因此可以大幅减少 CO 和 HC 的排放量。与汽油相比，使用 CNG 的 CO 减排可达 80%，而 HC 的减排潜力大致在 30%-50%。CO₂ 的排放量也有所减少，大约为 10%-45%。然而，使用 CNG 可能导致甲烷的排放量上升，甲醛等 HAPs 的排放量可能也会上升。对于 NO_x，有研究结果表明 CNG 相比汽油会产生更多的 NO_x，但是，如果是使用 CNG 替换柴油发动机，则 NO_x 排放量相比柴油也有显著减少，可达 55%-80%。CNG 产生的总 PM 量相比柴油大幅减少，但细颗粒物的排放水平相近。
5. 液化石油气由丙烷和/或丁烷组成，密度比柴油低二至三倍。根据 US EPA 的数据，相比四缸汽油发动机，使用 LPG 驱动的 GSE 的 HC 排放可减少 45%-60%；相比两缸汽油发动机，HC 减排甚至可达 97%。然而，相比柴油 GSE，LPG 的 HC 排放则会增加，最高可达 155%。CO 也是类似的情况。相比汽油发动机，LPG 驱动的 GSE 的 CO 排放大幅减少，但相比柴油发动机，CO 排放则有巨幅增加（可达 5000%）。对于 NO_x 来说，无论是比较汽油还是柴油发动机，NO_x 排放均有减少，分别为 25% 和 80% 左右。PM 排放也有所减少，但 PM 的粒径略微增大。对于 CO₂ 来说，CO₂ 的排放降低仅在高负荷工作时有明显体现，约为 15% 左右。此外，LPG 中丙烷和丁烷的比例也会影响到实际的排放量。对于 HAPs，实验发现 LPG 车辆会产生更多的金属汞、锰、钒等。
6. 乙醇中含有大量的氧原子，因此拥有更高的燃烧效率。当与传统柴油混合使用时，CO 和 PM 的排放会降低，NO_x 的排放则有所上升。与汽油混合时，CO 和 HC 的下降非常明显，但 CO₂ 排放会有所上升（25%）。也有研究表明，运行负荷对排放有很大影响。对于 HAPs，甲醛等的排放会增加，并会随负荷增加持续上升。

综合来讲，EV 和氢能源是可替代燃料中相对环境友好的选择。当然，实际的减排能力需要考虑其全生命周期的排放。如果电力来源于天然气发电或可持续能源发电，减排潜力会相对比较高；如果电力仍然来源于煤炭/火力发电厂，则减排潜力会有所下降。

就北京的情况来说，从目前已知的消息来看，北京机场的电力清洁化程度很高，大兴机场甚至达到了 100% 使用绿色电力⁴⁴。因此，在电力负荷允许的情况下，尽量使用电力作为可替代能源是相对减排/减碳潜力更大的选择。

3.1.4 改进操作/运营流程

除硬件改造外，机场的运营者也开发了许多特定的操作/运营项目或流程来降低 GSE/GAV 的使用支出和运行延迟，这些项目往往对减排和减碳也有所帮助。这里面最具代表性的两类是：1) 限制怠速运行时间；2) 优化维护作业流程。

3.1.4.1 限制怠速运行时间

目前，大部分 GSE 的运行模式是短时间的高负荷运行加上长时间的怠速或关停。怠速主要是让 GSE 的引擎保持温度，并随时可以进行启动。根据机场条件和 GSE 使用方式的不同，其怠速运行时间可能会很长。例如，寒冷地区的机场可能就会使 GSE 保持怠速状态来避免长时间的暖机过程。长怠速时间会显著的增加污染物的排放，因此，合理的限制 GSE 的怠速运行时间（例如每次怠速时间在 5 分钟以内），从长期角度上可以有效的减少空气污染物的排放和碳排放。

⁴⁴ 来源：<http://www.nengyuanjie.net/article/30613.html>

限制怠速运行时间有多种操作方式。最简单的操作方式是对 GSE 的操作人员进行培训，令他们在使用完 GSE 后立刻关闭引擎。另外，也可以为 GSE 额外安装一个“反-怠速”装置，该装置可以在检测到一定的怠速时间后关闭引擎。对于寒冷地区的 GSE，为保证引擎处于待机状态，可以将反怠速装置和一个小型辅助单元联用，确保引擎温度，同时降低排放。

3.1.4.2 优化维护作业流程

一般而言，日常维护作业主要是用来减少 GSE 的损坏概率和停运维修时间。这种软性政策尽管不像硬件减排一样可以大幅度的提升减排能力，但对提升作业效率，优化作业流程很有帮助，往往能起到意想不到的减排效果。

3.1.5 其他措施

除以上措施外，还有一些管理上的软性措施可以减少机场 GSE 的排放，例如：

- 征收排放费：通过向 GSE 增收排放费来鼓励运营方更换更清洁的 GSE
- 在租赁合同中加入相关减排要求：目前有些机场开始在与运营商签订的合同中加入相关的减排目标。

3.1.6 适用不同 GSE 类型的减排策略

一般而言，采用可替代燃料是降低机场 GSE 排放的主要方式，但并非所有 GSE 类型都适合采用这一策略实现减排。在机场设计减排计划和方案时，考虑 GSE 的电动化可行性是非常重要的。根据可替代燃料技术的发展水平，可以将 GSE 分为以下几类：

- 第一类：已有成熟电动化技术的 GSE
 - 这一类 GSE 已有成熟电动化技术且已在各大机场广泛使用。这一类 GSE 主要包括：行李拖车、带式装载机、轻型小车（如高尔夫车）、洗手间清洗车、水车、清扫机等等。
 - 适合的减排策略：电动化，短期优先级最高。
- 第二类：已有商用电动化技术的 GSE
 - 这一类 GSE 有可商用的电动化技术，其应用还在推广过程中。这一类 GSE 主要包括：叉车、中型货物拖车、窄体客机拖车、旅客摆渡车等等。需要注意的是，电动化的飞机拖车只适用于将飞机移动较短的距离，例如从一个登机口移向另一个登机口，不适用于长距离的飞机拖拽。与此类似，中型货物拖车也只适用于短距离、容量较小的货物运输，不适用于长距离或大容量的货物运输。
 - 适合的减排策略：电动化，短期优先级第二高。
- 第三类：电动化技术仍处于探索/试点领域的 GSE
 - 这一类 GSE 已经有电动化技术研发出来，但还未商用或获得广泛使用。这一类 GSE 主要包括：宽体飞机拖车、货物装卸机、升降梯等等。与第二类相同，此类别中的宽体飞机拖车也仅适用于短距离的飞机拖拽。
 - 适合的减排策略：电动化，中长期规划。
- 第四类：属于道路机动车的 GSE

- 这一类 GSE 虽然在停机坪上从事各项服务，但从设备类型上属于道路机动车。这一类 GSE 主要包括各类飞机服务卡车（食品车、水车、卫生间服务车、燃料卡车等等）。这一类 GSE 可以电动化，也可以使用其他低排放燃料，如 CNG 或超低排放柴油等等。
- 适合的减排策略：使用 CNG，中长期规划。
- 第五类：电动化技术/可替代燃料目前技术上不可行的 GSE
 - 这一类 GSE 目前尚未有商用的电动化技术或可替代燃料，且短期内有可行技术的可能性也比较低。这主要是因为这类型的 GSE 需要进行高负荷的作业，目前的电池技术无法支撑如此高的负荷，或很容易导致电池过热而损坏。这一类 GSE 主要包括：长距离飞机拖车、高负荷货物/行李拖车、大容量燃料卡车、除冰车、应急救援车等等。另外，由于 CNG/LPG 的能量值相对较低，该类型的 GSE 也不适合使用这些可替代燃料。因此，这一类 GSE 目前仍只能由大功率柴油发动机驱动。
 - 适合的减排策略：使用更清洁的柴油发动机。
- 第六类：不适合（移动）电动化的 GSE
 - 这一类 GSE 可能有可行的电动化技术，但往往有更佳的替代选项可供选择，飞机空调单元和地面动力单元皆属于此类。相比移动电动化技术，更合适的替代方案是对登机口进行改造，通过固定式空调单元/动力单元的建设而消除这类 GSE 的使用需求。即使有基础设施改造不适用的情况，使用移动电动化技术在可行性上也不如直接降低柴油发动机的排放。
 - 适合的减排策略：使用更清洁的柴油发动机。

如上所示，考虑到技术可行性及各个 GSE 类型的需求，优先进行第一类、第二类 GSE 的电动化，以及对第六类 GSE 进行基础设施替代是更实际且效果好的选择。如果机场有能力，也可适当开展第三类和第四类 GSE 的电动化试点。以洛杉矶国际机场（LAX）为例，其设想的未来典型 GSE 运行场景如下：

- 宽体飞机（如波音 767 或更大的飞机）
 - 登机口处的 GSE
 - 1 台电动化短距离飞机拖车
 - 2 台电动化集装箱/货物装卸机
 - 1 台电动化带式装卸机
 - 4 台电动化行李/货物拖车
 - 电力供给/充电桩需求：

80kw 以上的快速充电桩，10 个充电接口
- 窄体客机（如波音 737、757 或其他）
 - 登机口处的 GSE
 - 1 台电动化短距离飞机拖车
 - 2 台电动化带式装卸机
 - 2 台电动化行李拖车
 - 电力供给/充电桩需求：

40kw 以上的快速充电桩，4 个充电接口

除机场自身要制定减排计划和策略之外，政府和相关部门也应该在政策、技术和资金上给予相应支持了，如制定排放标准，发布减排指南与工具，以及提供激励项目等都是很好的协助机场进行减排的手段。

就北京两个机场的情况来看，首都机场和大兴机场在使用地面电力替代移动动力单元和空调单元上的进度均比较领先，首都机场目前新能源车辆设备的占比率约为 14%，而大兴机场的新能源占比率已达到 77%，全球领先⁴⁵。首都机场在 GSE 电动化上还有一定空间，可以优先引进比较成熟的电气化技术，将第一类和第二类的 GSE 电动化；但大兴机场的 GSE 电气化空间则相对较小，应根据机场的设备种类、数量和排放情况，寻找合适的减排策略。

3.2 地面连接机动车辆（GAV）减排策略概述

如报告 2.2.4.4 节中所述，GAV 指行驶在机场陆侧的机动车。一般来说，机场空侧的区域是限制区域，只有机场相关人员和已经通过安全检查的旅客可以进入（通过指定的路线前往飞机），而陆侧区域则是向公众开放的。也正因如此，机场陆侧涉及到的机动车类型多种多样。下表展示了常见的机场 GAV 种类⁴⁶。

表 32. 机场常见 GAV 类型

GAV 类型	描述	包括车型	燃料类型	途径区域
私家乘用车	私人拥有/运营的车辆	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、停车设施、排队/等候区
		面包车/SUV	汽油、柴油、E85、电动	
		小型载货卡车	汽油、柴油、E85、电动	
		摩托车	汽油	
租用车	租车公司提供的车辆	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、租车设施
		面包车/SUV	汽油、柴油、E85、电动	
		小型载货卡车	汽油、柴油、E85、电动	
出租车	一般能够乘坐 5 人的出租车	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、停车设施、排队/等候区
		面包车/SUV	汽油、柴油、E85、电动	
网约车	私人拥有/运营的车辆	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	

⁴⁵ 来源：http://news.cnr.cn/dj/20201113/t20201113_525329179.shtml

⁴⁶ 参考：National Academy of Sciences. Guidebook for Quantifying Airport Ground Access Vehicle Activity for Emissions Modeling

GAV 类型	描述	包括车型	燃料类型	途径区域
		面包车/SUV	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、停车设施、排队/等候区
		小型载货卡车	汽油、柴油、E85、电动	
豪华轿车	一般能够乘坐 5 人的豪华轿车或加长版豪华轿车	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、停车设施、排队/等候区
拼车	一般能够乘坐 8 至 10 人	面包车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、停车设施、排队/等候区
礼宾车	负责从租车机构、停车场、酒店等地接送旅客到机场，一般为小型巴士或巴士	面包车	汽油、柴油、E85、电动	机场道路、排队/等候区
		小型巴士	汽油、柴油	
		巴士	汽油、柴油、CNG	
机场巴士	负责从指定地点接送旅客的巴士	巴士	汽油、柴油、CNG	机场道路、排队/等候区
服务和运送车辆	负责运送商品、货物、邮件、燃料等相关物品的车辆	卡车	汽油、柴油	机场道路、停车设施、货运设施
		面包车	汽油、柴油、E85、电动	
		重型卡车	汽油、柴油	
		轻型卡车	汽油、柴油	
机场车辆	由机场或机场职员拥有/运营的车辆	小客车/轿车	汽油、柴油、E85、电动	所有区域
		面包车/SUV	汽油、柴油、E85、电动	
		小型载货卡车	汽油、柴油、E85、电动	

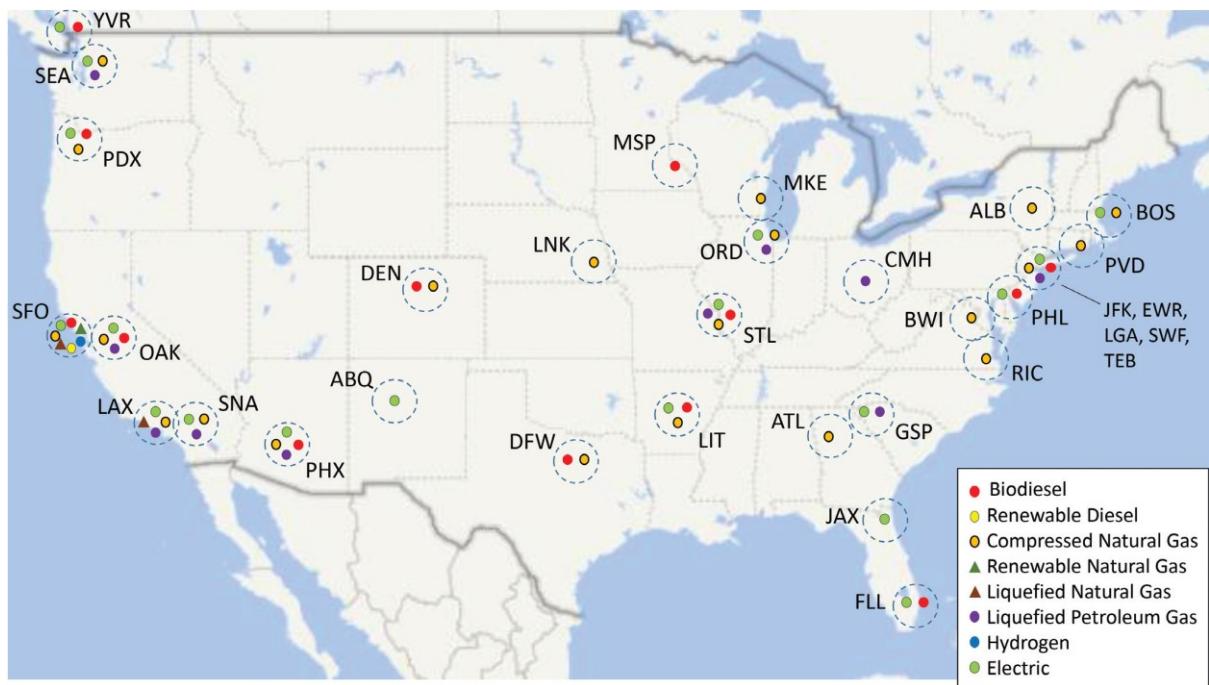
3.2.1 使用可替代燃料/电动化

与 GSE 类似，对于机场自有车辆来说，使用可替代燃料是实现 GAV 减排/减碳的最主要方式。自 1990 年起，机场所使用的可替代燃料 GAV 的数量就一直稳步提升。机场考虑可替代燃料使用的主要驱动力有如下几个：

- 各种可替代燃料的可及性
- 机场至可替代燃料补给设施的距离
- 对于 CNG 等气态燃料，是否有相应的管道和基础设施
- 极端天气出现的频率（尤其是暴雪天气）
- 当地相关政策要求
- 当地相关激励政策及项目

- 利益相关方和社区的意向

图 16. 美国各机场 GAV 使用可替代燃料的情况



GAV 能够使用的可替代燃料及其特点与 GSE 是一致的。随着技术的发展和政策的推进，可替代燃料 GAV 已经在各大机场逐渐普及。一项针对美国各大机场的网络调查显示，所有受调查机场都使用了至少一种以上的可替代燃料（见上图）⁴⁷。这其中，CNG/电力是最广泛使用的可替代燃料。根据一项针对美国各大机场的调查，71% 的受调查机场使用了 CNG，而 64% 的机场使用了电力，且使用电力的机场所占比例还在快速增长。此外，很多机场也热衷于使用混合动力机动车，例如 CNG/柴油机动车，或者电力/汽油机动车。这一类机动车可以在减少排放的同时，保持车辆燃料的灵活性。

⁴⁷ 来源：US National Academy of Science. Alternative Fuels in Airport Fleets.

图 17.GAV 不同可替代燃料的比较

Passenger Car		Fuel Cost	Vehicle Cost	Fuel Availability	Vehicle Availability	GHG Emissions (kg/mi)	Air Quality (Tailpipe Emissions Only)			
							NOx (g/mi)	PM2.5 (mg/mi)	PM10 (mg/mi)	CO (g/mi)
	Gasoline ¹					0.31	0.12	4.78	5.41	2.7
	Hydrogen ²			*		0.26	0	0	0	0
	Electric ³					0.21	0	0	0	0

Heavy-Duty Pickup Truck		Fuel Cost	Vehicle Cost	Fuel Availability	Vehicle Availability	GHG Emissions (kg/mi)	Air Quality (Tailpipe Emissions Only)			
							NOx (g/mi)	PM2.5 (mg/mi)	PM10 (mg/mi)	CO (g/mi)
	Diesel ⁴					0.62	1.15	21.89	25.22	0.46
	BD20 ⁵					0.53	0.94	10.89	11.84	0.37
	RD100 ⁶					0.44	0.94	10.89	11.84	0.37
	CNG					0.55	0.46	10.16	11.48	7.49
	LPG					0.55	0.46	10.16	11.48	7.49
	RNG ⁷	No data		**		0.09	0.46	10.16	11.48	7.49

Transit Bus		Fuel Cost	Vehicle Cost	Fuel Availability	Vehicle Availability	GHG Emissions (kg/mi)	Air Quality (Tailpipe Emissions Only)			
							NOx (g/mi)	PM2.5 (mg/mi)	PM10 (mg/mi)	CO (g/mi)
	Diesel ⁴					3.12	1.17	21.29	23.14	0.52
	BD20 ⁵					2.68	1.17	21.29	23.14	0.52
	RD100 ⁶					2.21	1.17	21.29	23.14	0.52
	CNG					3.31	0.59	21.29	23.14	23.00
	LNG					3.30	0.59	21.29	23.14	23.00
	RNG ⁷	No data		**		0.55	0.59	21.29	23.14	23.00
	Electric ³					1.50	0.00	0.00	0.00	0.00

Sources: Fuel cost: DOE 2017c; vehicle cost: ANL 2016b; fuel availability: DOE 2017b; vehicle availability: DOE 2017a; emissions: ANL 2016a; renewable natural gas GHG emissions: CARB n.d.

Key:

Worse than reference		Slightly worse than reference	Similar to reference	Slightly improved over reference		Improved over reference

上图展示了不同 GAV 类型的可替代燃料的可及性及排放因子。黄色代表该燃料与传统燃料（汽油/柴油）相比有明显劣势，而绿色代表该燃料与传统燃料相比有明显优势。从图中可以看出，对于一般使用汽油作为燃料的小型乘用车，电动化基本是目前唯一且有效的燃料替代手段。尽管电动化在车辆本身的支出以及可选的车型种类上还不及传统汽车，但其发展迅速，且减排能力显著，是未来减排的主要趋势。相比使用电力，氢燃料虽然也不产生尾气，但技术尚不完全成熟，在燃料的储运和可及性上也还有待发展，现在还未进入大规模实用阶段。

对于重型载货卡车来说，其对动力和高负载的要求较高，而目前的车用电池很难做到长时间持续维持高负载状态，因此卡车的可替代燃料选项一般是生物柴油、CNG、LPG 等。这些燃料虽然仍然会产生尾气排放，但相比传统柴油仍然清洁很多。这其中使用最多的是 CNG，主要是因为其燃料成本低、车辆改造容易。不过需要注意的是，无论是 CNG 还是 LPG，都会带来较高的 CO 排放。

对于载客巴士来说，CNG 和电力都是较好的选项。CNG 可以维持更长时间的高负载运行，前期成本低，而电动巴士则更加清洁，在实际选择时应该综合考虑各个因素进行选择。

从优先级的角度上说，载客巴士一般是最优先使用可替代燃料的车型。这主要是因为 1) 载客巴士的特点导致其经常有长时间的怠速运行，且大部分时间离旅客和人行道较近；2) 载客巴士往往有设定

好的行驶路线，方便进行充电设施的规划；3）载客巴士在公众面前的出镜率很高，可以为机场带来良好的公共形象。许多维护和服务用车辆也容易电气化或使用可替代燃料。而应急用车辆（例如消防车、救护车等等）使用可替代燃料则相对较少，这主要是因为这些车辆的第一需求是业务范围内稳定性和可靠性，例如能够保持长距离的形势，能够做到即充即用等等。目前的可替代燃料，包括电力，在这些方面相比传统燃料还是有一些劣势。

许多政府机构以及科研机构已经开发了评估工具，帮助机场和相关方更好的评估各种可替代燃料的优缺点、减排收益和成本。例如，美国能源部（DOE）的可替代燃料数据中心提供了可替代燃料特点、价格、可选车型、燃油经济性等各种信息；美国芝加哥大学的 ANL 研究中心开发的 GREET 模型可以从全生命周期的角度评估各种可替代燃料的碳排放⁴⁸；而 ANL 研究中心开发的另一个 AFLEET 工具则可以评估可替代燃料对不同车型的成本和减排收益⁴⁹。

随着未来可替代燃料以及相关技术的发展，可以预见可替代燃料车辆的比例还会不断上升。

3.2.2 通过政策或运营手段实现减排

对于机场自有的 GAV 来说，直接用可持续能源车辆加以替代是较好的方法。但对机场内由第三方运营的车辆或私家车，机场更多时候会出台相关政策或项目来要求或鼓励他们实现减排。目前常见的策略有以下几种：

- 要求/鼓励第三方运营商（航空公司、运输企业等）使用低排放车辆/可替代燃料车辆
 - 可通过惩罚性政策，例如向高排放车队/车辆征收排放费；也可通过激励性政策，例如和第三方运营商合作购置可持续能源车辆，或向第三方运营商提供补贴等等。
- 减少车辆怠速行驶
 - 要求车辆减少在航站楼前的停留时间和怠速时间；
 - 通过设立专门的停车区域减少车辆怠速停留的时间。例如，某些机场会提供空调区域供出租车司机等待，减少出租车的怠速等待时间。
 - 以上两种政策结合使用效果最佳，因为仅强制要求车辆减少停留时间，有可能会导致车辆在机场道路内绕圈行驶，反而增加排放。
- 减少空驶
 - 开展针对机场职员的“共享车辆上班”项目；
 - 向乘客提供拼车服务。
- 减少行驶里程
 - 修建公共运输系统（地铁、轻轨）等大众运输工具替代私家车、出租车等的使用频率。

3.2.3 适用不同 GAV 类型的减排策略

针对不同的 GAV 类型，机场往往会倾向于使用不同的减排策略。下表展示了美国 11 个机场所使用的针对不同 GAV 类型的减排政策。由表可见，对于出租车，机场会倾向于要求出租车公司更换可替代燃料汽车，或通过降低停车费、提供优先接客权等方式鼓励出租车使用可替代燃料。对于豪华车，由

⁴⁸ <https://greet.es.anl.gov/index.php?content=greetdotnet>

⁴⁹ <https://afleet.es.anl.gov/afleet/>

于车型特殊，活动水平相对低，且客人一般对车辆要求较高，因此机场一般不倾向于要求其减排。对于酒店的接客巴士、礼宾车或租车机构的接驳车，机场往往使用增加收费或减少收费的手段要求其实现减排。而对于网约车，由于车型复杂，且难以管理，一般机场会要求网约车尽量减少空驶率、怠速时间和行驶里程。

表 33.机场常见 GAV 类型

Ground Transportation Fleet Type	AFV Requirement	Emission Standard	MPG Requirement	Lower Fees for Clean Vehicles	Higher Fees for Non-compliant Vehicles	VMT Reduction
Taxicabs	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply
Limousines	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply			
Shared van rides	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply			
Hotel/parking shuttles	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply
Rental cars	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply
Rental car shuttles	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply
Scheduled airport service	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply
Transportation network companies	Policy Applies	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply	Policy Does NOT Apply

目前，机场针对 GAV 减排面临主要的困难和挑战集中在以下几点：

- 使用可替代燃料 GAV 的前期投入较高，需要政府出台相关政策/项目予以支持；
- 可替代燃料 GAV 发展速度快、更新换代速度快，需要提供更多指南和工具帮助机场和运营商进行规划和选择；
- 针对可替代燃料的公共基础设施（如充电设施）相对较少；
- 对于网约车等新型运输模式，尚缺少信息来指定有效的减排政策。

总的来说，与 GSE 减排类似，采用可替代燃料也是降低机场 GAV 排放的主要方式，但是对于 GAV 减排策略的规划来说，需要考虑的不仅有技术和成本，更包括对第三方车队的约束能力和影响水平。据此，可以将 GAV 分为以下几类：

- 第一类：机场可控且已有成熟电动化技术的 GAV。这一类别包括机场自有或可控制的小型乘用车、穿梭巴士等。这一类机动车最适合短期内的电动化转型。
- 第二类：机场可影响且已有成熟电动化技术的 GAV。这一类别包括航空公司、巴士公司、酒店等运营的巴士或穿梭巴士，以及其他服务公司的小型乘用车和穿梭巴士等。这一类机动车也可以成为优先电动化或使用可替代能源的目标。
- 第三类：机场较难以影响，但已有电动化技术的 GAV。这一类别主要包括出租车、网约车、租车、私家车等小型乘用车辆。这一类机动车适合使用激励政策或强制性政策优化车队组成，鼓励使用可替代能源车辆，并通过软性政策优化行驶效率，减少机场内的怠速和空驶。
- 第四类：机场可控/影响，但尚未有成熟电动化技术的 GAV。这一类别主要是中型和重型货车。目前不易电动化，因此现阶段更加可行的策略是根据燃料可行性优先鼓励低排放柴油/发动机或其他替代性燃料（如 CNG），并加速淘汰老旧车辆。
- 第五类：份额较小/有特殊用途/不适合电动化的 GAV。这一类别主要包括豪华轿车、特种车辆等。这一类车辆往往因特殊用途不适合进行电动化，且相对排放贡献较小，因此可优先进行其他 GAV 类型的减排，再根据技术可行性和需求制定中长期的减排方案。

3.3 典型案例

目前，世界上已有很多国家、地区和机场实施了各式 GSE 和 GAV 减排项目，本节选取两个具有代表性的案例，分别来自政府机构和机场自身，希望能给予北京机场减排一些参考。

3.3.1 美国环保署自愿性机场低排放项目（VALE）和零排放机场车辆和基础设施试点项目（ZEV）

美国环保署的自愿性机场低排放项目（VALE）和零排放车辆和基础设施试点项目（ZEV）是美国航空署发起的支持机场进行 GSE 和 GAV 减排的支持性项目。两个项目的支持对象有所不同，但目标相同，均为支持机场提升机场及周边的空气质量，以及协助地区在美国国家大气空气质量标准上实现达标。这两个项目是美国政府部门设立的最大的机场减排激励性项目，也是最有代表性的项目，在项目创立之后给予了美国各个机场大量的资金支持和政策支持，也取得了很好的减排效果。

3.3.1.1 VALE 项目

VALE 最初设立于 2005 年，主要是内容是提供资金和政策，支持机场或地区政府机构通过投资低排放的技术降低机场的空气污染物排放⁵⁰。同时，该项目也协助美国的能源公司和机构研发可替代燃料。该项目主要由 US FAA 负责，但也涉及数个美国其他的政府部门：包括 US EPA, US DOE, US FAA 的环境与能源办公室（AEE），以及地区的空气质量管理机构等。该项目的资金有两个来源：一个是航空信托基金（Aviation Trust Fund），另一个是旅客设施收费项目（PFC），该项目批准机场向乘坐飞机的旅客收取一定量的费用来支持机场的发展。除资金支持外，VALE 还向机场提供政策激励手段。如果机场的项目被 VALE 选中，机场将可以获得相应的机场减排绩效点（AERCs），这些点数可用于在未来的于美国清洁空气法（CAA）相关的政策中获得权益。

VALE 支持如下几类减排项目⁵¹：

- 可替代能源机动车/设备及其对应的基础设施
- 登机口电动化
- 远机位地面电力供给
- 低排放 GSE
- 地热系统
- 太阳能供热系统
- 地下燃油供给系统

VALE 项目为年度项目。每年的 11 月，如果项目方符合 VALE 的支持项目范围，就可以向 US FAA 联系并提出预申请。之后，US FAA 会审阅预申请文件并告知项目方该项目是否可以提交项目计划书。项目方提交项目计划书的同时，对应机场可向地方的空气质量管理机构提出 AERC 申请。US FAA 审阅最终项目计划书后，会决定是否提供资金支持，整个流程大致需要半年至一年的时间。项目获得通过后，项目方最多可获得项目成本 75%-90% 的资金补贴，这部分成本也包括相关的项目准备和设计费用。因此，VALE 项目的补贴力度是很大的，这也是多年来机场一直踊跃参与的原因之一。

⁵⁰ US FAA. US FAA VALE Program Technical Report. Available at: https://www.USFAA.gov/airports/environmental/vale/media/vale_techreport_v7.pdf

⁵¹ 来源：<https://www.USFAA.gov/airports/environmental/vale/media/VALE-brochure-2020.pdf>

自 2005 年项目启动以来，VALE 已经支持了来自 56 个机场的 121 个不同的机场减排项目，总资金支持力度达到了 3 亿美元。下表展示了 VALE 项目 2020 年提供支持的项目情况：

表 34.VALE 项目 2020 年资助情况

机场名称	ID	机场规模	项目描述	VALE 支持金额
Boston General Edward Lawrence Logan International	BOS	大型枢纽机场	为 19 台电动 GSE 购买和安装 10 个双充电口充电桩	\$ 1,365,716
Denver International	DEN	大型枢纽机场	在三个航站楼的登机口购买和安装 27 台地面动力单元和 20 台空调单元	\$ 2,624,935
Dallas-Fort Worth International	DFW	大型枢纽机场	为 20 台电动 GSE 购买和安装 10 个双充电口充电桩	\$ 812,473
Indianapolis International	IND	中型枢纽机场	为 85 台电动 GSE 购买和安装 19 个双充电口充电桩	\$ 1,874,000
Missoula International Airport	MSO	非枢纽机场	购买和安装 4 台地面动力单元和 4 台空调单元	\$ 756,996
Philadelphia International	PHL	大型枢纽机场	为 24 台电动 GSE 购买和安装 13 个双充电口充电桩	\$ 1,037,450
Pittsburgh International Airport	PIT	中型枢纽机场	在两个航站楼的登机口购买和安装 13 台空调单元	\$ 3,565,947
Reno-Tahoe International Airport	RNO	小型枢纽机场	为 35 台电动 GSE 购买和安装 20 个双充电口充电桩	\$ 1,238,910

如上所示，在受到新冠肺炎疫情影响的 2020 年，US FAA 仍然支持了来自 8 个机场的 8 个 GSE 电动化项目，总年资助金额达到 1300 万美元。在 2020 年受到资助的机场中，很多都已经多次申请 VALE 项目的资助。以费城国际机场（PHL）为例，费城市政府与美国航空（US Airways）和美国联合航空（United Airlines）达成伙伴协议，在 2008 年和 2009 年间将 PHL 的 228 台传统能源 GSE 更换为电动 GSE，而 VALE 项目在两年间一共提供了多达 790 万美元的资助。该项目完成之后的预计 NO_x 减排量超过 730 吨。

3.3.1.2 ZEV 项目

机场零排放机动车（ZEV）和基础建设试点项目由 US FAA 于 2012 年创立，旨在提升机场的空气质量，以及激励机场和相关运营方推进零排放技术的使用⁵²。与 VALE 项目相比，ZEV 项目的资助范围较小，目标更明确，是 VALE 项目的一个很好的补充。ZEV 项目支持的零排放技术范围包括：

⁵² 来源：https://www.US FAA.gov/airports/environmental/zero_emissions_vehicles/media/ZEV-brochure.pdf

- 机场新购买的零排放道路机动车，该项目的“零排放”范围仅限于纯电动或氢燃料驱动，且仅限于由机场或相关运营方持有的在机场范围内进行活动的道路机动车，例如：机场安全车辆、维护车辆、巴士等等，非道路机动车或混合动力机动车不在资助范围内
- ZEV 基础设施，例如充电桩、燃料站、燃料储罐等等

该项目的申请步骤与 VALE 项目类似。首先，机场需要与 US FAA 讨论项目构想，之后提交项目预申请计划书。预申请通过后，机场再提交完整的项目申请文件，US FAA 审阅并通过后给予相应的资金支持。该项目的资助只能用于购买新的 ZEV 和安装新的 ZEV 基础设施，对机动车和现有设施进行改造等内容不受到资助。此外，所有接收资金支持的 ZEV 和设备均必须保持持续使用，不能转租或卖出，机动车的运营并保留相关记录。

自启动以来，ZEV 项目已经资助了来自 13 个机场的 14 个项目，每年资助的项目在 2 至 5 个不等，总资助金额达接近四千万美元⁵³。仅在 2020 年一年，ZEV 项目就资助了 5 个项目，资助金额在九百万美元。大部分受到资助的项目为购买电动巴士和安装相应的充电桩，也有少部分项目为购买其他种类的 ZEV 及基础设施。

3.3.2 洛杉矶国际机场（LAX）的 GSE 减排政策

美国洛杉矶国际机场（LAX）是世界上最繁忙的国际机场之一。同时，LAX 也是世界上最早开始探索使用可替代能源减少 GSE 排放的机场之一。在 2006 年，LAX 就实现了 23.7% 的 GSE 电动化，另有 16.7% 的 GSE 采用其他可替代能源（主要为 LPG）⁵⁴。下表展示了 LAX 2017 年的 GSE 数量及燃料类型⁵⁵。

⁵³ 来源：https://www.US FAA.gov/airports/environmental/zero_emissions_vehicles/media/Summary-ZEV-Airport-Projects-Contacts-2015-2020.pdf

⁵⁴ 来源：<https://www.lawa.org/~media/lawa-web/environment/files/lax-eletgse-feasibility-study-report.ashx>

⁵⁵ 来源：<http://www.aqmd.gov/docs/default-source/clean-air-plans/air-quality-management-plans/facility-based-mobile-source-measures/technical-support-document-lax.pdf?sfvrsn=13>

表 35.LAX 2017 年各类型 GSE 数量及燃料类型

Equipment Type	Fuel Type					Totals
	Diesel	Gasoline	LPG/Propane	Electric		
Air Conditioner	27	0	0	14	41	
Air Start	29	0	0	0	29	
Aircraft Tractor	125	3	5	52	185	
Baggage Tractor	65	185	163	331	744	
Belt Loader	38	46	21	193	298	
Bobtail	5	34	1	0	40	
Cargo Loader	124	0	0	3	127	
Cargo Tractor	3	47	7	111	168	
Cart	0	14	0	183	197	
Catering Truck	34	56	0	1	91	
Fork Lift	15	2	150	51	218	
Fuel Truck	29	4	0	0	33	
Generator	3	1	0	0	4	
Ground Power Unit	108	1	0	29	138	
Hydrant Truck	4	5	0	0	9	
Lavatory Cart	0	2	0	0	2	
Lavatory Truck	2	24	0	0	26	
Lift	34	27	16	61	138	
Other	17	25	2	2	46	
Other ORE	9	42	23	1	75	
Passenger Stand	8	16	0	17	41	
Service Truck	1	46	0	0	47	
Sweeper	2	7	4	3	16	
Water Truck	0	4	0	0	4	
Totals	682	591	392	1,052	2,717	

由上表可见，2017 年，LAX 的总可替代能源 GSE 的比例已经达到了全部 GSE 的 53%，其中 38.7% 的 GSE 实现了电动化，种类涵盖行李/货物拖车、皮带装卸机、货物拖车、升降梯等等；而一些负荷较重的 GSE，例如叉车等，则采用 LPG 作为柴油的替代能源。2017 年 LAX 的 GSE 的总污染物排放量如下表所示。

表 36.LAX 2017 年基准 GSE 污染物排放量（以燃料类型区分）

Fuel Type	Equipment Count	Pollutant Emissions, tons per year					CO2 Tonnes/yr
		CO	VOC	NOx	SO ₂	PM ₁₀	
Diesel	682	45.77	6.67	71.02	0.10	3.87	3.55
Gasoline	591	843.76	19.16	71.96	0.13	0.94	0.70
LPG/Propane	392	251.87	0.10	41.94	0.00	0.02	0.01
Electric	1,052	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
TOTALS	2,717	1141.40	25.93	184.93	0.23	4.83	4.27
Source: CDM Smith 2019							

如上所示，尽管数量只有总 GSE 数量的不到四分之一，但汽油 GSE 排放的 CO、VOC 和 CO₂ 都遥遥领先；而柴油 GSE 则贡献了相当部分的 NO_x、大部分的 PM，以及超过五分之一的 CO₂ 排放。LPG 作为相对清洁的可替代能源，产生了一部分 CO 和 NO_x 排放，但在 VOC、SO₂、PM 和 CO₂ 上的贡献较少。可以看出，使用可替代能源 GSE 带来的减排/减碳效果是显而易见的。需要注意的是，上表仅考虑了来自 GSE 使用的直接排放，未考虑全生命周期排放，因此电动化 GSE 的各项排放都是 0。

为了促进 GSE 的减排，2013 年，LAX 发布了针对 GSE 减排的可行性研究报告。该报告通过各种调查问卷以及编制 GSE 清单，确定了目前 LAX 各种 GSE 的情况，并对各个可能的 GSE 减排措施的可行性进行了评估。根据以上研究结果，LAX 在 2015 年制定了“GSE 排放政策”（Ground

Support Equipment Emissions Policy），其目标是在 2023 年和 2031 年之前进一步将现有的传统能源 GSE 替换为可持续能源 GSE，达到更好的减排效果。该政策要求机场内的各 GSE 运营商，在 2023 年和 2031 年要分别达到该政策中设立的两个排放因子目标。其中，2023 年之前为第一阶段，排放因子目标值为车队的 HC+NO_x 小于等于 1.8 g/hp-hr；2023 年至 2031 年为第二阶段，排放因子目标值为车队的 HC+NO_x 小于 1.0 g/hp-hr。GSE 厂商可以通过多种方式实现达标，除了将设备电动化之外，厂商也可以选择使用符合超低排放标准的燃油，或使用其他的可替代燃料。

除排放因子达标外，该政策还要求各 GSE 运营商定期提交报告，方便 LAX 的管理者进行监管和支持，报告的类型包括年度报告、阶段性报告和行动计划。

为鼓励和支持各运营商达到两个阶段目标，LAX 提供了数种支持政策。首先，LAX 会分析机场内的各项基础设施，如充电桩等的需求，并尽量予以满足；LAX 会承担这些基础设施的维护费用；如果这些基础设施由 GSE 运营商承担，则 LAX 会通过调整航线费率和费用的方式对该费用进行补偿。此外，LAX 还设立了一个 50 万美金的专项基金，用于鼓励 GSE 运营商实现减排。运营商如果使用“零排放”GSE，则可以向 LAX 申请该补贴。

按照 LAX 的预计，该政策的第一阶段将会大幅推动 GSE 的电动化，尤其是一些容易电动化的 GSE 类型，包括：行李拖车、带式装载机、货物拖车、燃料卡车、水车、服务卡车等等。而在第二阶段，除以上 GSE 类型外，该政策还会进一步推动其他 GSE 类型的电动化，包括：飞机拖车、服务卡车、清扫车、升降机、空调单元等等。第二阶段结束后，诸如飞机拖车、行李拖车、带式装载机、货物拖车等 GSE 有望实现接近 100% 的电动化。该项目的减排潜力如下表所示：

表 37.LAX 实行 GSE 排放政策的减排潜力

情景	空气污染物排放 (t/y)						CO ₂ 排放 (MT/yr)
	CO	VOC	NO _x	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	
2023 – 项目第一阶段							
2023 基准	1307.15	20.62	150.69	0.25	3.58	3.1	25222
2023 项目	707.96	11.53	94.32	0.18	2.53	2.2	17256
减排比例	46%	44%	37%	28%	29%	29%	32%
2031 – 项目第二阶段							
2031 基准	1436.47	16.41	121.26	0.28	2.27	1.88	27761
2031 项目	352.7	5.29	35.15	0.1	0.8	0.64	10642
减排比例	75%	68%	71%	64%	65%	66%	62%

由上表可见，该项目具有很大的减排潜力。在第一阶段，各种主要空气污染物以及二氧化碳的减排量在 28%-46% 之间；而第二阶段各种主要空气污染物及二氧化碳的减排量则可进一步达到 62% 至 75%，相当于在现有基础上进一步削减三分之二的来自 GSE 的排放，这个减排潜力是比非常显著的。

4. 机场可持续发展

4.1 可持续发展的概念

可持续发展的概念早在 1987 年就已经提出，但这个概念真正引入到航空业是二十一世纪之后。US FAA 将机场的可持续发展归纳为环境（Environment）、经济（Economy）、社区（Community）和运营（Operations）四个方向⁵⁶，而这四个方向又可细分为多个不同的组成部分，每个部分都有其对应的可持续发展目标。国际机场委员会（ACI）将其归纳为经济可持续性、运营效率、自然资源保护和社会责任四个大项（取四个单词的首字母简称 EONS），如下表所示⁵⁷。

表 38. 机场四个可持续发展方向的主要概念和分目标（EONS）

经济可持续性	运营效率	自然资源保护	社会责任
经济发展活力	以具有成本效益的方式提供服务	空气质量提升/应对气候变化	社会经济效益
	基于生命周期进行成本核算	能源节约/使用可再生能源	社区推广和公众参与
		减少噪音	
		水质保护/节约用水	
		土地及自然资源管理	
		合理的土地规划和利用	
		路面管理	
		合理的材料利用/减少固废/废物回收	
		减少危险材料使用/加强危险材料管理	
		地表交通管理	
		绿色建筑/设施	

驱动机场进行可持续发展规划的原因有很多，包括全球趋势、国际/地方法规和政策要求、行业协会要求、经济需求或经济补贴、以及来自企业社会形象和公众的压力等等。机场的可持续发展，是实现资源节约、环境友好并适航、服务人性化、按需有序发展、社会经济效益良好能且与周边区域协同发展；是以人为核心，能动地调控机场运营容量，最优配置资源，实现经济、社会、环境效益均衡、持续和协调发展；是机场容量在一定时间和空间内既然满足自身发展地需要，又能满足区域发展的需要；也是运用可持续发展寻找机场发展和与环境之间的最佳关系，实施相应的资源环境综合管理战略⁵⁸。一个完整而详尽的可持续发展概念不仅包括减少环境方面的影响，还要保持稳定而高速的经济增长，更要追求“社会的进步”，是一个多种行动来保证社区和社会的价值得到实现的综合方案。

⁵⁶ 来源：<https://www.US FAA.gov/airports/environmental/sustainability/>

⁵⁷ 来源：<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb42a>

⁵⁸ 绿色机场-上海机场可持续发展探索。上海科学技术出版社，2010.

世界上很多机场都已经进行了可持续发展规划，并采取了相应的政策和措施。以美国为例，US FAA 为促进机场开展可持续发展规划，设立了“机场提升计划”。该计划通过向美国机场提供激励政策（如资金支持），来帮助机场进行可持续发展规划和策略的开发⁵⁹。目前，美国已有 44 个机场参与了该项目，并开发了各自的可持续发展规划文件。

机场环境可持续发展是机场可持续发展的一个重要方向，也是机场进行可持续发展规划时最优先关注的方向。一般而言，机场环境可持续发展又可具体分为五大主题：能源和大气、人体健康和舒适性、水资源和废水、场地和栖息地、以及材料和自然资源利用。由于本课题主要聚焦于机场的减排和减碳，因此研究也集中于对能源和大气这一主题的国际经验的总结和概括。

4.1.1 机场碳管理与可持续发展

气候变化将成为未来数十年全球所面临的最大挑战之一，二氧化碳和其他温室气体的排放将会对全球气候变化产生重要的影响。机场能源和大气的可持续发展主要指使用可再生能源、减少能源消耗、提升空气质量和减少碳排放。如报告第 1.1.4 节所述，众多国际组织以及国家、地区已经出台了相关政策和法规，来促进航空业的减碳，其中最为重要的是 ICAO 于 2016 年提出的 CORSIA 计划，该计划目标从 2021 年开始，稳定 CO₂ 的净排放以达到碳达峰和净零排放，这对世界各机场实施碳管理和可持续发展提出了要求。按照 IATA 提出的“四柱策略”，机场实现减碳需要从以下四方面入手：

- 改进技术，包括可持续航空燃料的使用；
- 更高效的飞机操作；
- 改进基础设施建设，包括现代化的空中交通管理系统；
- 建立基于全球市场的单一指标来填补剩余的排放空白。

这些减排策略的实施需要所有的利益相关方共同协作来达成，并且需要开发新的市场机制和合作机制。2020 年 1 月 30 日，Xpansiv CBL Holding Group 与 IATA 合作开发了航空碳交换（ACE）协议⁶⁰，该协议在 CORSIA 框架下，为航空公司达到碳排放的要求提供了新的方法。ACE 将会作为 CORSIA 框架下各个单位进行碳排放交易的集中市场，通过该协议可以获取实时价格并且交易价格有着完全的价格透明度。CBL 市场与 IATA 已经联合了一些航空公司进行了试点阶段的试行，此前预计这次的合作将会于 2020 年第四季度开始试行，试行内容为集成了 CBL 交易平台和 IATA 协议系统的包含不同交易选项的分阶段计划。

机场碳排放认证是衡量碳管理水平的重要指标。由欧洲国际机场理事会（ACI）开发的机场碳排放认证（Airport Carbon Accreditation（ACA））项目始于 2009 年，是唯一获各大机构的机场碳管理认证标准，旨在帮助机场运营商测算、管理和减少其碳足迹。对于已经确立碳排放管理计划的机场运营商，碳排放认证为机场提供了实现碳中和状态的可能方案。项目实施的第一年，有 17 在碳管理方面最领先的机场加入了该项目。2011 年 11 月，项目推广至亚太区，并于 2014 年底扩展到全世界范围。ACA 的顾问委员会负责监督项目运行，其成员包括 ICAO、《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）、联合国环境规划署（UNEP）、欧盟委员会（EC）、US FAA、曼彻斯特都市大学等。

2020 年，ACA 将评估分级进行了调整，原有的 4 级调整为 3+ 级，并且新加入了 4 级和 4+ 级作为支持机场实现零碳净排放的长期目标的过渡步骤。目前，ACA 碳排放认证最新设定的六级标准为：

⁵⁹ <https://www.US FAA.gov/airports/environmental/sustainability/>

⁶⁰ <https://www.iata.org/en/programs/environment/ace/>

- 1 级（量化）：碳足迹核查；
- 2 级（减排）：碳足迹核查、碳排放管理、碳减排；
- 3 级（优化）：碳足迹核查、碳排放管理、碳减排、碳足迹、引入利益相关方；
- 3+级（碳中和）：碳足迹核查、碳排放管理、碳减排、碳足迹、引入利益相关方、碳中和；
- 4 级（变革）：碳足迹核查、碳排放管理、碳减排、碳足迹、引入利益相关方、碳中和、长期碳管理策略与引导第三方碳减排；
- 4+级（转变）：碳足迹核查、碳排放管理、碳减排、碳足迹、引入利益相关方、碳中和、长期碳管理策略与引导第三方碳减排、剩余碳排放的抵消。

其中机场碳足迹核查的范围应至少包括以下内容：

- 机场实施碳认证的规模、范围和边界；
- 机场碳认证的级别；
- GHG 排放过程和排放源；
- GHG 类型和覆盖时间段；
- 后续核查的频次等。

目前，全世界共有 119 座机场得到了 1 级认证，97 座机场得到了 2 级认证，67 座机场得到了 3 级认证，61 座机场得到了 3+ 级认证，1 座机场得到了 4 级认证，4 座机场得到了 4+ 级，也就是最高级认证。得到 4+ 级认证得四座机场分别是：意大利罗马国际机场、美国达拉斯国际机场、印度德里国际机场以及荷兰鹿特丹国际机场。

在亚太地区，达到了 4+ 级标准的机场只有印度德里国际机场 DEL。中国一共有 8 座机场参与了 ACA 项目，包括获得 1 级认证的郑州国际机场，获得 2 级认证的成都双流国际机场和澳门国际机场，以及获得 3 级认证的香港国际机场、深圳宝安国际机场、广州白云国际机场、台湾桃园国际机场以及高雄国际机场。由此可见，在碳排放认证上，国内的机场还有不少的进步空间。

自 2009 年项目实施以来，ACA 项目已经取得了较为显著的碳减排成果，如表 39 所示。

表 39. ACA 统计数据- 2009 至 2018 年每年的 CO₂ 减排当量

时间	CO ₂ 减排当量 (tons)
2009.7-2010.6	56633
2010.7-2011.6	51501
2011.7-2012.6	77782
2012.7-2013.6	110003
2013.7-2014.6	129330
2014.7-2015.6	212460
2015.7-2016.6	206090
2016.7-2017.6	202184
2017.7-2018.6	347026
2018.7-2019.6	322297

4.2 国际机场环境可持续发展案例

4.2.1 世界代表性机场的环境可持续发展规划总结

为了解目前各国机场所进行的可持续发展规划和活动，本课题选取了国内和国际上总共 12 个世界代表性机场，包括国内（3 个）、亚太（2 个）、北美（4 个）、欧洲（2 个）和大洋洲（1 个），对其可持续发展规划/方案进行了总结和对比，如下表所示。这其中包括了 ICAO 统计的客流量前三的亚特兰大机场、北京首都机场和洛杉矶机场以及货流量第一和第三的香港国际机场和上海浦东机场，香港机场自 2010 年起已经连续多年保持了货运量第一的排名，浦东机场自 2008 年以来也已经多年保持世界第三的货运量，2021 年这个排名仍然保持不变⁶¹。下表展示了本课题关注的世界典型机场及其基本情况。

表 40.世界代表性机场可持续发展规划/报告名称

机场名称及代号	国家	可持续发展规划/报告名称	年份
洛杉矶国际机场 (LAX)	美国	可持续行动计划*	2019
达拉斯国际机场 (DFW)	美国	可持续管理方案*	2014
旧金山国际机场 (SFO)	美国	可持续发展方案*	2014
亚特兰大国际机场 (ATL)	美国	可持续管理方案*	2011
北京首都国际机场 (PEK)	中国	企业社会责任报告	2019
上海浦东国际机场 (PVG)	中国	企业社会责任报告	2020
香港国际机场 (HKG)	中国	可持续发展报告	2019/2020
东京成田国际机场 (NRT)	日本	环境报告	2020
新加坡国际机场 (SIN)	新加坡	可持续发展报告	2019/2020
伦敦希斯罗国际机场 (LHR)	英国	希斯罗 2.0 可持续发展战略进度报告	2019
苏黎世国际机场 (ZRH)	瑞士	企业社会责任报告	2020
悉尼国际机场 (SYD)	澳大利亚	悉尼机场环境战略 2019-2024*	2019

注：
打*为可持续发展规划或方案，其余为可持续发展年度报告或企业社会责任报告

下表 41 总结了各机场的环境可持续发展策略。由表中可见，这 12 个代表性的国际机场均以实施了与环境相关的可持续发展战略。其中：

- 在能源管理方面，大部分机场倾向于推广可再生能源的使用，并通过技术改造和建筑改造减少能源消耗。

⁶¹ <https://www.id1.de/2021/08/18/the-worlds-biggest-cargo-airports-2021-edition/>

- 在水资源管理方面，机场倾向于采取各种各样的节约用水政策（如减少厕所用水），以及增加雨水和中水的利用。很多机场还会安装智能水表来精确监控用水，并及时发现设备故障和管道泄漏事件。
- 对于大气排放管理，所有机场均使用了 GSE/GAV 电动化策略，并大力推广 APU 替代。同时，很多机场都已经开始探索飞机主引擎的减排策略，目前策略集中在三方面：可持续航空燃油、低排放航空引擎和流量优化。此外，很多机场还会通过种树的方式来增加碳汇水平。对于减碳目标，基本所有机场均设立了相应的减碳目标，且大部分目标为碳中和或净零排放目标；绝大部分国际机场都进行了 ACA 碳排放认证，且达到了 3 级以上的认证水平，这表现出机场对减碳和碳管理的重视。
- 对于材料资源管理，垃圾分类是所有机场均会采用的基础措施，尤其香港国际机场还开发了自动分类机器人用于垃圾分类。鼓励废物回收利用也是减少固废的一大方式。另外，很多机场会出台政策，减少一次性材料的使用，并推广可再生材料的使用，在建设过程中也是如此。
- 对于噪音管理，几乎所有机场均会进行不同点位的噪音监测，并通过各种方式（如 APP 等）将噪音信息告知周边社区。对于减少噪音的策略，除了修建隔音设施、收取噪音费之外，有些机场还会通过调整航班时间等方法尽量减少夜间噪音。
- 对于自然资源管理，大部分机场都会投入行动，保护机场周边的生态和生物多样性。某些机场还会制定风险管理项目，提高机场应对气候变化和气候灾害的能力。
- 对于环境保护的宣传，所有机场都会采取各式各样的宣传和教育项目，增加公众的环境知识和环保意识。此外，所有机场都会发布年度报告，有些机场（如 SFO）甚至会针对气候、水资源等重点类别发布专项报告。
- 北京和上海的两个机场都已经制定了各式各样的环境可持续发展策略并开展了相应行动。但略显遗憾的是，尚未看到两个机场有独立的可持续发展规划，且两机场也还未参与碳排放认证。建议国内机场参考国际机场的经验和进度，积极进行环境可持续发展规划，进一步提升可持续发展水平。

表 41. 12 个代表性国际机场环境可持续发展策略总结

机场名称及代号	LAX 洛杉矶	DFW 达 拉斯	SFO 旧金山	ATL 亚 特兰大	PEK 北京	HKG 香港	PVG 上海	LHR 伦敦	SYD 悉 尼	SIN 新加 坡	NRT 东京	ZRH 苏黎世
环境管理系统 (ISO14001)			√			√		√	√	√	√	√
能源管理												
可再生能源使用目标	2045 年实现 100% 可再生 能源使 用		2030 年实现 净零能 源消耗									
能源监测和管理系统			√		√	√	√	√	√	√		
现场可再生能源（太 阳能、地热）	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√
购买绿电		√ (100%)	√(水 力发 电)						√ (75%)		√	
技术节能（蓄冷设施、 LED 照明等）			√	√	√	√	√		√	√	√	
建筑节能（如 LEED 认 证，动态玻璃、隔热屋 顶等）	√	√	√	√	√		√		√	√	√	
水资源管理												
节约用水措施（如卫生 间省水）	√	√	√	√	√	√			√	√	√	
智能水表	√		√							√	√	
推进再生水使用		√	√		√		√		√	√	√	
雨水综合利用	√	√		√	√		√		√	√	√	√
水源/河道保护和治理		√		√	√		√		√			
大气排放管理												

机场名称及代号	LAX 洛杉矶	DFW 达 拉斯	SFO 旧金山	ATL 亚 特兰大	PEK 北京	HKG 香港	PVG 上海	LHR 伦敦	SYD 悉 尼	SIN 新加 坡	NRT 东京	ZRH 苏黎世
碳排放认证 (ACA)	3	4+	3		暂无	3	暂无	3	3	3	3	3
碳排放目标	2045 年实现机场运营净零排放	2030 年实现净零排放	2025 年实现碳排放相比 1990 年下降 40% ; 2050 年下降 80%		暂无	2019 年碳排放强度相比 2015 年下降 3.6%	暂无	2020 年实现碳中和, 2050 年实现净零排放	2025 年实现碳中和	2029/30 年度碳排放强度相比 2017/2018 年度下降 20%	2050 年实现企业净零排放, 且机场自身碳排放相比 2015 年下降 50%	2050 年实现净零排放
GSE/GAV 电动化	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
充电桩建设	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
其他可替代燃料	CNG、可再生 RNG	可再生丙烷和 RNG	CNG					氢能源			CNG、氢能源	
低排放 GSE/GAV	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	
APU 替代	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√
交通流量优化	√	√	√					√	√		√	√
共乘政策 (如职员共乘激励)	√		√	√				√	√			
低排放航空引擎								√	√		√	
可持续航空燃油			√								√	√
本地碳汇 (如植树)		√	√				√ (规模较小)	√		√		√
材料资源管理												
垃圾分类处理	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

机场名称及代号	LAX 洛杉矶	DFW 达 拉斯	SFO 旧金山	ATL 亚 特兰大	PEK 北京	HKG 香港	PVG 上海	LHR 伦敦	SYD 悉 尼	SIN 新加 坡	NRT 东京	ZRH 苏黎世
食物捐赠	√			√								
有机废物再利用		√ (沼 气)	√			√		√	√	√	√	√
建筑废物回收	√	√	√	√	√	√			√	√	√	√
废旧建筑再利用	√									√		
减少一次性材料消耗			√	√		√		√				
可持续建设实践（如使 用可再生材料）	√	√	√							√	√	
噪音管理												
噪音监测、管理和公开		√	√		√			√	√		√	√
隔音设施建设	√		√								√	√
噪音费											√	√
减少飞机噪音（技术改 造、减少夜间飞机起降 等）								√	√		√	√
自然资源管理												
生态栖息地建设	√		√			√		√	√		√	
生物多样性保护	√	√	√			√		√	√		√	
气候变化适应/景观建设	√		√				√	√	√		√	
社区活动/环保宣传												
公众教育/推广/宣传	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
年度可持续发展报告	可持续 发展报 告	可持续发展 报告	分类专 项报告	可持续 发展报 告	企业社 会责任 报告	可持续 发展报 告	企业社 会责任 报告	可持续 发展报 告	可持续发 展报告	可持续发展 报告	环境专 项报告	可持续 发展报 告

4.2.2 典型环境可持续发展案例

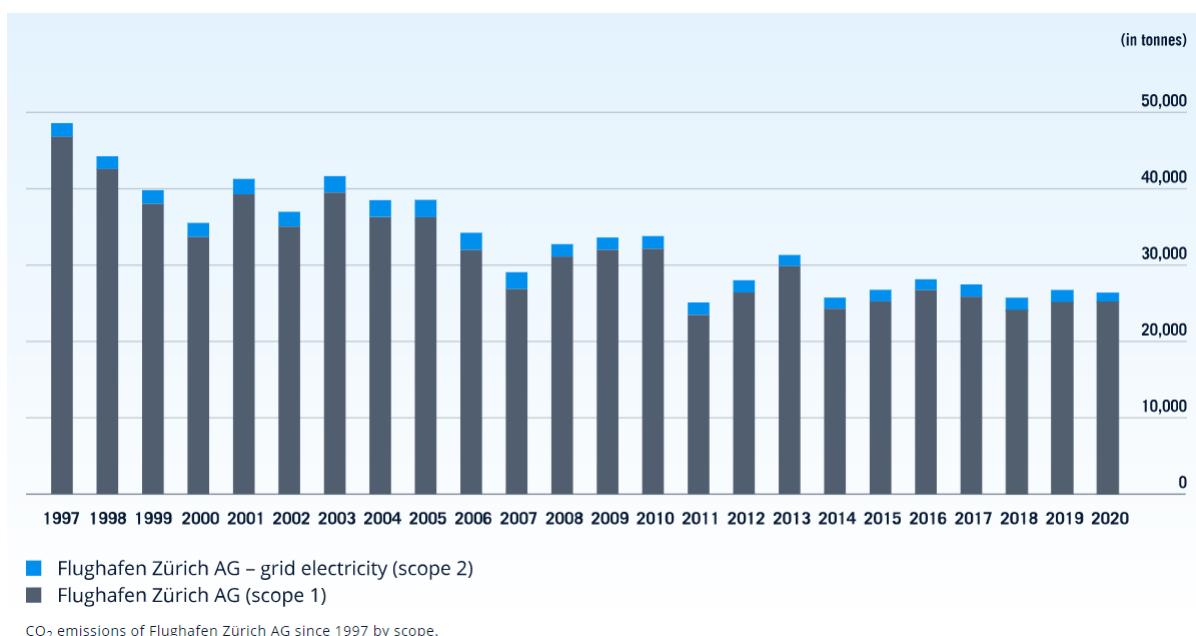
4.2.2.1 苏黎世国际机场

世界上最早开始使用可持续概念管理机场建设运营活动的是瑞士苏黎世国际机场，其在 2011 年就获得了 ACI 颁发的欧洲生态创新奖，旨在表彰其在降低碳排放、促进可持续发展方面的卓越表现。

苏黎世国际机场从 2001 年开始就运行环境管理系统，并获得了 ISO14001:2015 认证。对于机场建设项目的生态环境影响（建设期和运行期）苏黎世国际机场都会进行详尽的分析和管理。1997 年就开始引入的飞行器排放费，为飞机配备地面固定电源，和现代化的供热系统，以及推行公共交通都为改善空气质量提供了助力。自 1991 年以来，根据温室气体协议苏黎世国际机场详细计算了 CO₂ 的排放量，苏黎世国际机场采取了多种节能减排措施，于 2018 年将 CO₂ 的排放量相较于 1991 年削减了 50%。目前苏黎世国际机场的 CO₂ 排放水平大约为 27500 吨/年，苏黎世国际机场也制定了碳减排路线图，也提出了自愿减排 CO₂ 目标为，2030 年排放为 2 万吨/年，2040 年排放量为 1 万吨/年，2050 年达到零排放，路线图包括三个重点工作：

- 减少用户端的消耗；
- 提高供应端的效率；
- 停止使用化石燃料。

图 18. 自 1997 年来，苏黎世国际机场的 Scope 1 和 Scope 2 的二氧化碳排放量



2020 年由于疫情的影响，苏黎世国际机场 Scope 2 和 Scope 3 的二氧化碳排放均低于 2019 年水平，根据估算 2020 年 Scope 2 排放为 1212 吨（同比下降 26%），Scope 3 排放为 1517055 吨（同比下降 64%）。而 Scope 1 的二氧化碳排放量变化不大，2020 年为 26284 吨（同比增长 0.3%），这是由于供暖的排放相较于 2019 年水平变化不大，而供暖的排放是 Scope 1 中占比最大的排放源，由于疫情的影响部分建筑设施的排放大幅度下降，而另一些建筑则大幅度上升。

此外，苏黎世国际机场在建设新基础设施和场馆时，充分考虑能源可持续发展。“圆环（The Circle）”是苏黎世国际机场最新建成的大型商业中心，于 2020 年完工运行，内部包含商场、酒店等

等。在“圆环”的设计上，苏黎世国际机场采用太阳能和地热能源，并通过技术创新提高能源利用效率。在夏天的时候，冷却单元的散热被转移到地下的地热能源堆中，到了冬季，这些能源堆可以作为热泵的热源。因此整个综合设施可以几乎不依赖于化石燃料而供能。

图 19. 苏黎世国际机场“圆环”顶部安装的太阳能电池板阵列⁶²



除了上述能源相关可持续发展措施外，其他与环境相关的可持续发展措施也在苏黎世国际机场得到有效的开展。机场的雨水收集率逐年提高，用来冲洗厕所。飞机维修产生的废水会经过工业污水预处理才排放至城市管网，含有除冰剂的废水则通过喷淋系统喷在绿地上，经过微生物过滤进行净化。此外土壤保护，化学品污染管理等都在机场的可持续发展工作范围之内。苏黎世国际机场的废物管理是从源头开始管理，但尽管如此，还是产生了大量的废弃物。在收集废物时，苏黎世国际机场将可再利用的材料进行分离并循环利用，不可回收的废物在垃圾焚烧厂进行焚烧，所产生的热能用来发电，供区域内供暖系统使用。大部分的废物都可以通过这两种方法进行处理。下表展示了苏黎世国际机场 2018 年至 2020 年的一些关键环境可持续发展数据。

表 42. 苏黎世国际机场 2018 年到 2020 年关键环境可持续发展数据

类别	2020	2019	2018
NO _x 排放 (吨)	535	1,396	1,381
来自于飞机的 NO _x 排放 (吨) ¹	469	1,293 ²	1,273 ²
VOC 排放 (吨)	134	274	284
来自于飞机的 VOC 排放 (吨)	79	190 ²	205 ²
CO 排放 (吨)	544	1,297	1,360
来自于飞机的 CO 排放 (吨)	491	1209 ²	1,267 ²
PM 排放 (吨)	8	19	21
来自于飞机的 PM 排放 (吨)	6	15 ²	16 ²
机场 CO ₂ 排放 (Scope 1) ³	26,284	26,218	25,143
机场 CO ₂ 排放 (Scope 2) ⁴	1,212	1,632	1,657
机场 CO ₂ 排放 (Scope 3) ⁵	1,544,551	4,261,934 ²	4,148,819 ²

⁶² <https://report.flughafen-zuerich.ch/2020/ar/en/energy/>

类别	2020	2019	2018
主要能源消耗 (MWh)	411,709	497,595	498,026
年度用水量 (立方米)	515,242	851,407	836,826
总产生废物量 (吨)	8,623	18,439	20,960
废物中可再生部分 (例如: 纸、卡板、玻璃、木材等) (%)	55.2	45.9	48.9
安检中没收的液体 (吨)	56	202	219

注:

1. LTO 循环的航班运营 (至多 915m)，考虑真实引擎功率、APU、引擎启动和飞机主体
2. 对过去进行追溯和调整的计算方法
3. 与温室气体议定书一致: 苏黎世国际机场自有数据源 (机动车、机械和供暖)
4. 与温室气体议定书一致: 苏黎世国际机场外部数据源提供电能数据
5. 与温室气体议定书一致: 飞机 LTO 循环和完整路线 (仅包括离港航班)，根据 Eurocontrol 计算; 机场的其他排放源 (操作、其他供暖) 和区域内 (大约 3km) 所有机场外侧交通的排放 (计算所有的交通方式)

苏黎世国际机场在空气质量监测和研究上也走在世界前列。其机场内部和周边设有多个空气监测站点，苏黎世国际机场会定期研究相关的监测数据，并分析机场各排放源排放对机场及其周边社区空气质量的影响。苏黎世国际机场的各种大气污染物中最重要的是氮氧化物和颗粒物，主要来源于以下四个污染源: 飞机、运营操作、机场基建和地面交通。根据其研究，飞机主引擎排放占据了苏黎世国际机场大部分的排放和 90% 的 NO_x。2020 年由于全球疫情的影响，运营航班数量骤减，机场的 NO_x 排放也减少了 62%。然而研究发现，尽管相对于 2019 年航班运行量下降了 91%，氮氧化物的排放也相应减少了 87%，但区域内的监测站点 NO_x 的浓度却仅下降了 44%。据机场推测，运行和航班量和该区域的污染并没有线性的关联，其他的污染排放源一样有着重要的作用。随着距离机场越远，所记录的污染浓度也在快速下降；气象条件对于污染物的扩散和稀释也有着重要的影响⁶³。

苏黎世国际机场在碳排放管理和可持续发展上的一系列努力也取得了丰硕的成果，作为欧洲机场在节能减排方面的领导者，苏黎世国际机场早在 2010 年就加入了 ACA 的碳排放认证项目，并被认证为 Level 3 级别的机场。

4.2.2.2 达拉斯国际机场

达拉斯国际机场位于美国南部的德克萨斯州，拥有 5 座航站楼、1288 英里的跑道、7400 万平方英尺的机场铺装路面和超过 5200 万平方英尺的办公、零售和商业用地⁶⁴。达拉斯国际机场是美国南部最重要的交通枢纽之一。达拉斯国际机场一直致力于碳减排和可持续发展的建设，设立有专门的环境事务部门以监督保护达拉斯国际机场的自然系统，包括土地、空气和水资源，并确保遵守联邦和地区的环境法规。达拉斯国际机场在碳管理上取得了卓越的成就。早在 2016 年，达拉斯国际机场就成为了北美第一座碳中和机场，并且于 2020 年 10 月 27 日获得了联合国全球气候行动奖，作为对其在减少碳

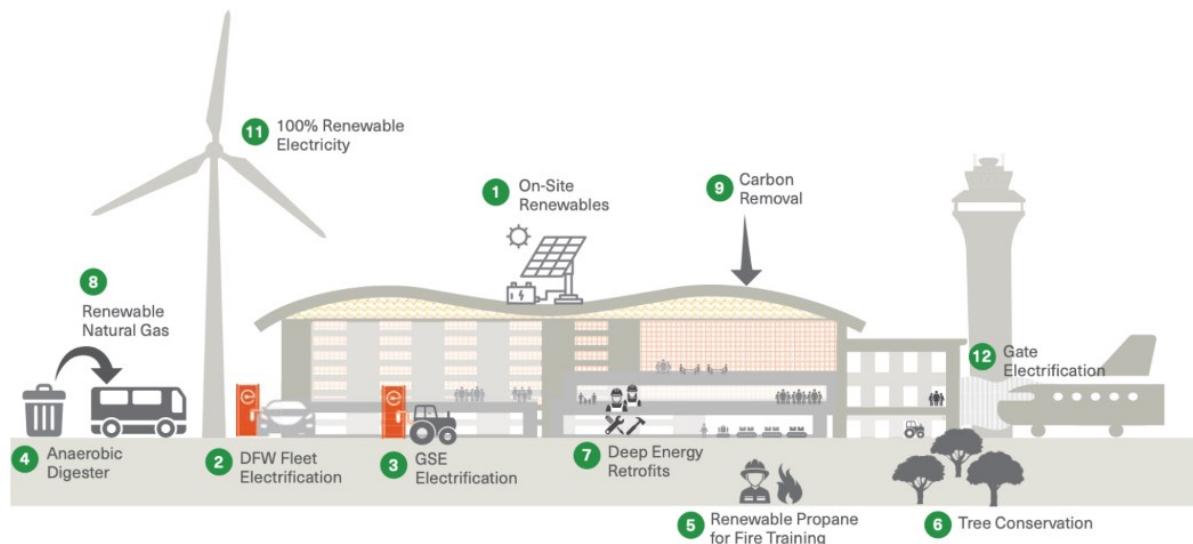
⁶³ <https://report.flughafen-zuerich.ch/2020/ar/en/air-quality/>

⁶⁴ “Our Path Forward: Resiliency. Innovation. Leadership.” DFW 2020 Environmental, Social and Governance Report.

<https://online.fliphtml5.com/rfyxe/fdvb/#p=1>

足迹的目标上持续不断的创新行动的嘉奖，并在数周之后的 11 月 17 日成为了全球第一个达到 ACA 项目的 4+ 级碳排放机场。下图展示了达拉斯国际机场进行碳管理和减排的各项措施。

图 20. 达拉斯国际机场碳减排的各项利用措施



注：

1. 现场可再生能源：安装现场可再生能源生产设备，例如光学太阳能板；
2. DFW 车队电气化：轻型和重型载货车队的电气化；
3. GSE 电气化：将汽油和柴油驱动设备替换为电动设备；
4. 厌氧消化池：从航站楼收集有机食品垃圾来生产燃料或者发电；
5. 可再生丙烷：探索可再生能源用于消防演练的选项；
6. 植被保存：采用植被保存和植被种植来增加自然碳汇；
7. 深度能源改造：升级现有设备和设施来提高能源效率（例如：LED 照明，动态玻璃、冷却屋顶、高性能围护结构和高效率加热和冷却设备）；
8. 可再生天然气（RNG）：对于区域土地中产生或捕集的 RNG 进行持续投资；
9. 积碳清除：未来对于积碳清除技术的投资，包括碳捕集混凝土等；
10. 电力平滑中央电厂：中央航站楼区域由电能供应加热和制冷；
11. 100%可再生电能：继续从德克萨斯的风力发电农场购买 100%可再生电能；
12. 登机口电气化：与航空公司合作减少来自于 APU 使用时怠速滑行的排放。

上图的第 8 项，即 RNG 的利用是达拉斯国际机场的亮点减排项目。机场在 2017 年施行了可再生天然气倡议行动（RNGI），行动的主要内容为将机场车队使用的 CNG 转化为由当地的垃圾填埋气生产的 RNG。通过 RNGI 行动，达拉斯国际机场大幅度减少了其车队的碳排放。到 2020 年 6 月，达拉斯国际机场车队 70% 的天然气来自于 RNG，减少了将近 17,000 吨的 CO₂ 排放，相对于 2010 年的碳排放水平减少了 79%，帮助机场提前两年达到早先设立的 2020 年战略计划目标（每位旅客的碳排放减少 15%）。此外，该举措每年还大约减少了一百万美元的操作和维护成本。

达拉斯国际机场在其年度环境、社会和管理（ESG）报告中详细列出了众多数据对比。例如，尽管 2020 年由于新冠疫情的影响，达拉斯国际机场的旅客数量和能源消耗量都有所减少，但机场可再生能源的占比仍然有大幅度增加，从 2006 年的 10% 提升到了 2020 年的 82%。能源结构继续调整，大量使用绿电，天然气和柴油燃料的占比进一步降低，如图 18 所示。而图 19 则展示了 2020 年达拉斯

国际机场的碳足迹，其中电力仍然是占比最大的部分，达到了 77%，设施供暖（14%）和机动车（6%）分列第二和第三。

图 21. 达拉斯国际机场 2006 年和 2020 年能源消耗量饼图

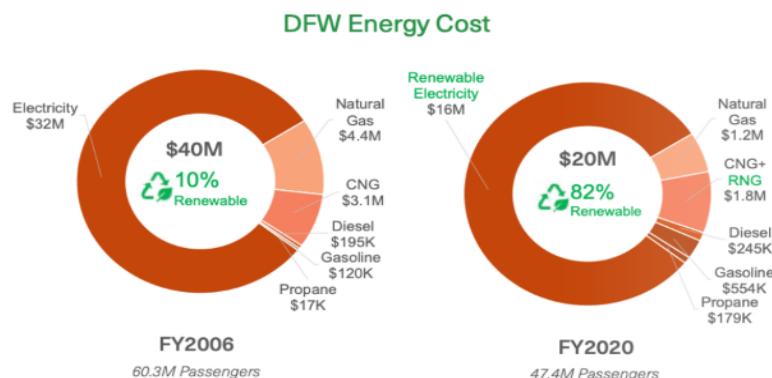
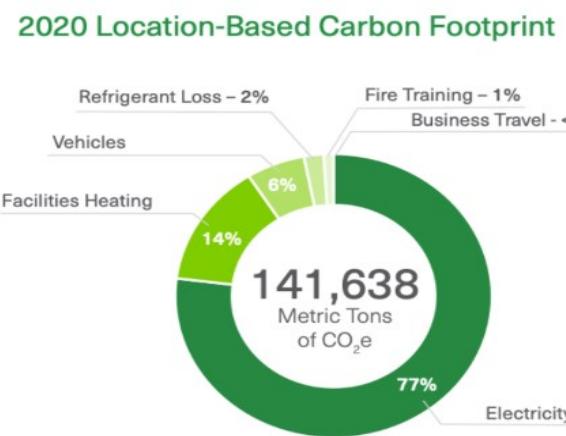


图 22. 达拉斯国际机场 2020 年不同机场点位碳足迹饼图



根据达拉斯国际机场环境事务部门的统计，机场二氧化碳的总体排放量从 2016 年开始相较于之前大幅度减少，从 2015 年的 14.3 万吨减少到 2016 年的将近 3.8 万吨，并在之后数年整体缓慢减少，2020 年的碳排放为 3 万吨左右。碳减排的累积量也逐年增加，到 2020 年达到了总计 86.7 万吨。

图 23. 达拉斯国际机场 2011 年到 2020 年二氧化碳排放量变化趋势图

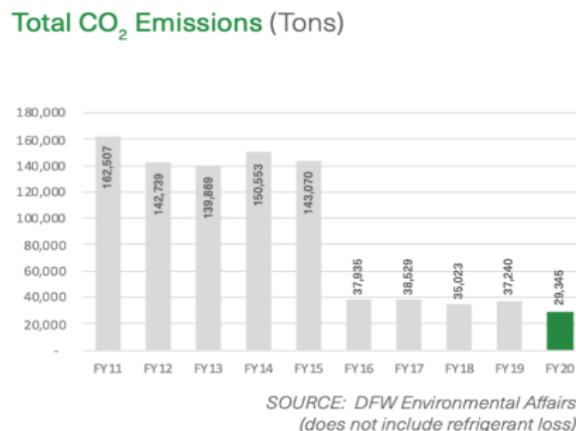
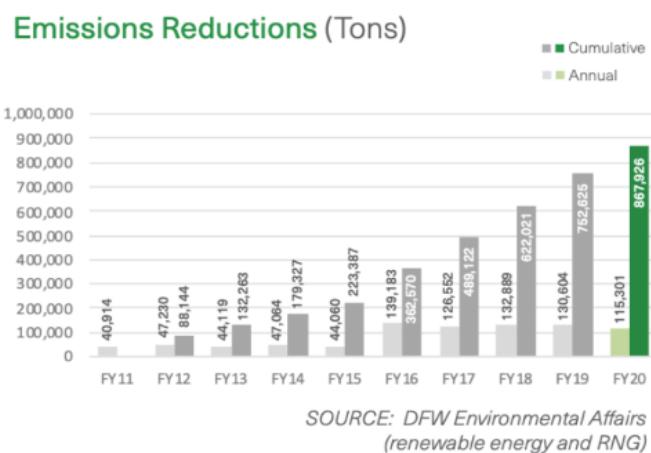


图 24. 达拉斯国际机场从 2011 年到 2020 年的减排变化趋势图



2020 年，达拉斯国际机场重新评估了其目标和北极星可持续发展倡议行动，并且现已设立新的目标到 2030 年达到碳净排放量为零，以支持联合国的零碳竞赛运动，比国际政府委员会关于气候变化的应对目标早 20 年。北极星可持续发展倡议行动将未来的发展重点设定为循环经济、气候行动、能量水平、健康与安全、多样化和平等化以及水和生物多样性。达拉斯国际机场的战略计划、可持续发展和多样性项目对应了联合国 17 个可持续发展目标（SDGs）中的 16 个。

即使从全世界范围内来看，达拉斯国际机场 2030 年的碳减排目标也是非常有雄心的创举，绝对排放量的目标也意味着将不会使用碳补偿额度，达拉斯国际机场计划进行下列投资以达到 2030 年的目标：

- 通过新的能源效率基础设施建设和现有基建的改进来减少电能和燃料的使用；
- 投资建设新的使用可再生能源的中央电厂；
- 研发创新途径将建筑和运输中的能源利用最优化；
- 用电动车替换柴油车、压缩天然气车和轻型载货汽油车；
- 安装电动化地面支持设备和机场外侧车队的充电站；
- 继续购买 100% 可再生的电能；
- 将可再生天然气的使用比例提升至 100%；

- 与伙伴合作移除广泛使用可持续航空燃料的壁垒；
- 拥护州政府和联邦政府关于碳减排的政策；
- 为零排放机动车和设备建设全包含基础设施；
- 识别碳移除技术和方案来永久性捕集和储存碳排放。

除了在环境和能源的可持续发展方面做出的努力，在社会和管理的可持续发展上，达拉斯国际机场也取得了很多成就：达拉斯国际机场花费了 2 亿 2 千六百万美元用于小型企业的发展；平均每个员工 30 个小时的培训；有 96% 的员工加入了 LiveWell 的健康项目，所有员工都完成了工作场所防止暴力训练；董事会成员中 33% 为女性，75% 为有色人种；共发行了超 20 亿美元的债券；节约了九千五百万美元的成本开支等。⁶⁵

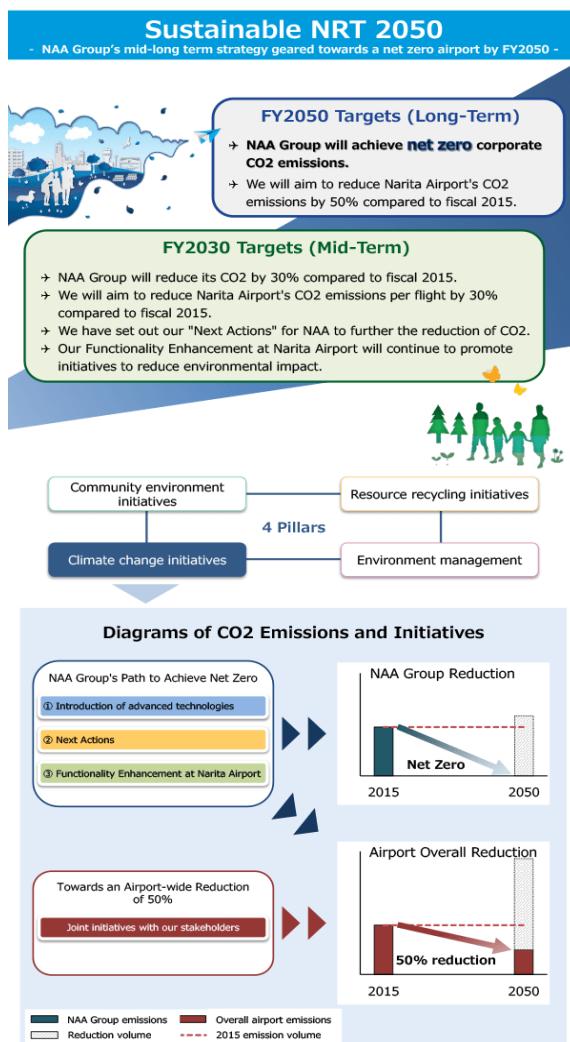
4.2.2.3 东京成田国际机场

在亚太区域，日本的东京成田国际机场在可持续发展上也采用了一系列独特的环境保护与能源节约举措，并取得了值得瞩目的成就。东京成田国际机场以《东京成田国际机场环境倡议》为主体，通过中期和长远目标的规划，逐步实现全面的可持续发展。该环境倡议是一个涵盖众多措施的整体计划，是基于 2030 生态机场远景和生态机场总体规划（FY2016-2020）的分步战略计划，主要由以下四个类别组成⁶⁵：

- 社区环境倡议；
- 资源回收利用倡议；
- 气候变化倡议；
- 环境管理。

⁶⁵ https://www.naa.jp/en/environment/ea_vision.html

图 25. 东京成田国际机场 2030 年和 2050 年可持续发展目标路线示意图



东京成田国际机场在环境可持续发展上的主要措施和行动包括：

- “绿色能源认证”：从 2017 年以来，机场购买了具有“绿色能源认证”的太阳能共计 125,000 千瓦时。这一数额相当于持续实时监测飞机噪音、空气质量、和水质一年的能耗。
- 通用垃圾分类：在航站楼大厅将垃圾分类划分为 6 个类别，在办公区域划分为 10 个类别；
- 太阳能板：在旅客航站楼和东京成田国际机场公司（NAA）大楼铺设太阳能电池板，用来给这些建筑提供电能照明；
- 厨余废水处理设施/灰水生产设施：对航站楼餐厅的废水进行处理并且进行再利用，用于机场卫生间的冲厕水流；
- LED 照明：安装高能效 LED 灯泡用于机场滑道和部分旅客航站楼的照明；
- 快速充电桩：在机场停车场的部分区域提供快速充电桩以方便电动车的驾驶人员进行充电；
- 氢燃料补充站：用以支持氢燃料电池车辆补充燃料；
- 噪音减弱机库：类似机库的噪音减弱设施，显著减少飞机引擎测试噪音；
- 回收工厂：将沥青、水泥和其他建筑废料粉碎，并再利用于铺路；

- 雨水处理设施：对蓄水池中的雨水进行处理，用于中央供暖和制冷工厂的冷却水和航站楼卫生间的冲厕水流；进行全年和短期的环境监测，包括噪音、空气质量和水质量的测量来确定对于环境的影响；以及给所有固定站台和旅客航站楼安装 GPUs 来进行 APU 替代等等。

图 26. 东京成田国际机场 LED 照明系统示意图⁶⁶



表 43. 东京成田国际机场 LED 照明系统更新节点

时间	位置	LEDs 数量	节能比例
2016 年 3 月	2 号航站楼国际到达大厅	1270	40%
2017 年 12 月	1 号和 2 号航站楼外的霓虹灯	9	50%
2019 年 6 月	2 号航站楼国际出发大厅	600	40%
2021 年 4 月	1 号 2 和 2 号航站楼的众多位置	3500	50%

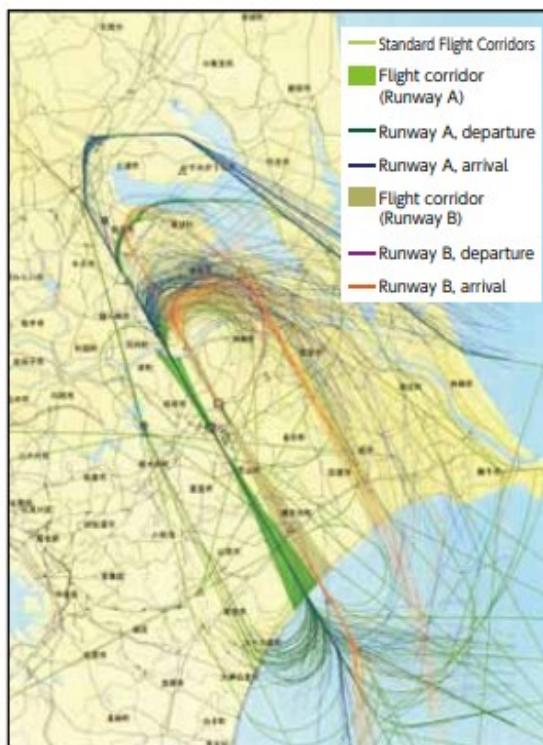
除以上所描述的措施之外，东京成田国际机场还采取了许多其他环境可持续发展措施，其中一个亮点措施为噪音的监测和管理。成田机场建立了航空走廊（监测区域）来监测起飞和降落的航班路径，从

⁶⁶ https://www.naa.jp/en/environment/pdf_2020/environment2020eng.pdf

利根川河到九十九里町海岸，来确保飞机航线不会偏离航空走廊。如果航班没有必需的理由（天气或者安全原因）而偏离了航空走廊，成田机场会将该航班的航班号和偏离原因向公众公布。同时，日本的国土交通省也会向涉事航空公司签发行政指令。2018 年这样的案例有 10 例，占总航班数 0.004%，2019 年为 4 例，占总航班数 0.002%。同时，机场向国际航班根据成田飞机噪音指数设立着陆收费系统，鼓励航空公司使用更安静的机型并减少二氧化碳排放。

图 27. 东京成田国际机场飞机追踪地图和空中走廊示意图⁶⁷

Aircraft Tracking Map with Flight Corridors



成田机场的生态机场主计划中关于气候变化倡议行动的细节，设定的目标和截至到疫情之前的成果总结如下表所示：

表 44. 东京成田国际机场可持续发展主要目标和完成情况

行动名称	描述	目标（ 2020）	结果（ 2019）
减少机场的二氧化碳排放	鼓励低排放飞机的引入和使用	相对于基 准年 (2015 年) 每个 航班减少 7%的机 场二氧 化碳排 放 (2015	机场二氧 化碳排 放相较于 2015 年 水平减少 了 4.9% (4.09t/ 航班)
	减少飞机滑行的时间		
	减少 APU 的使用，鼓励 GPU 的使用		
	推进可持续航空燃油试点		
	鼓励使用低排放/零排放机动车（安装 EV 充电 站、天然气站和氢燃料站）		
	鼓励低排放机动车和生态驾驶的引入		

⁶⁷ https://www.naa.jp/en/environment/pdf_2020/environment2020eng.pdf

行动名称	描述	目标 (2020)	结果 (2019)
	通过热回收焚烧垃圾时产生电能 购买低碳电能 鼓励使用可再生能源	年水平为 4.30t/航班)	
减少能源消耗	增加机场滑道 LED 光源的安装 通过能源管理鼓励使用节能措施 实施节能项目（提高节约能源的意识、WARM BIZ 和 COOL BIZ） 在建设新设施和翻修更新现有设施时鼓励使用节能设备	相对于基准年（2015 年）每个航班减少了 5% 的机场设施能源消耗（2015 年水平为 15.1GJ/航班）	机场设施能源消耗相较于 2015 年水平减少了 11.3% (13.4GJ/航班)
气候变化与全球变暖的适应性对策	采取适当的预防措施来解决暴风和其他非正常自然灾害的问题	对由于全球变暖引起的气候变化采取应对措施	修订《东京成田国际机场商业持续计划》来确保在发生主要自然灾害时与利益相关方合作采取及时有效的措施

东京成田国际机场的诸多减排和可持续发展措施也取得了非常不错的效果，成田机场是日本第一座取得 ACA Level 3 碳排放认证的机场。成田机场 2018 年 1 月加入 ACA 项目并被认定为 Level 2 机场，同年 11 月就取得了 Level 3 碳排放认证。

在下一阶段的发展计划中，东京成田国际机场设立了长期和中期的目标。NAA 的长期目标是在 2050 年达到净零碳排放的标准，这也和联合国国际政府委员会关于气候变化的应对目标一致。他们预期届时将机场的二氧化碳排放量相较于 2015 年水平减少 50%。NAA 的中期目标设定到 2030 年，目标是相较于 2015 年的二氧化碳排放水平减少 30%，并且将成田机场每个航班的二氧化碳排放相较于 2015 年水平减少 30%。同时，NAA 还为进一步促进二氧化碳减排设立了“下一步行动（Next Actions）”，旨在持续推进各种减少环境影响的倡议和行动。此外，机场的 2030 生态机场愿景为：追求社区和机场的可持续发展、解决全球环境问题、以及与利益相关方合作推广生态机场。

4.2.2.4 西雅图国际机场

美国华盛顿州的西雅图国际机场是世界上在可持续航空燃料（SAF）的推广上最具代表性的机场。可持续航空燃料是一类由可持续材料，如使用过的食用油和非粮食作物制成的航空燃料。其全生命使用周期的碳排放相较传统航空煤油可降低高达 80%。此外，可持续航空燃料的使用方法比较灵活，无需

改装发动机，随着供应量的增加，可与煤油混合使用。下表列出了目前国际航空业中比较主流的可持续航空燃料技术。

表 45. 目前国际主流可持续航空燃料技术

技术	最大混合比例 (%v/v)	生物质来源
FT & FT-SKA	50	废弃物、煤、汽油、木屑
HEFA	50	植物油、棕榈树、亚麻籽、麻风树、使用过的食用油
HH-SPK 或 HCHEFA	10	藻类提取出的油
Synthesized IsoParaffin	10	甘蔗、甜菜
ATJ (Isobutanol and Ethanol)	50	甘蔗、甜菜、木屑、木质纤维素的残渣
Catalytic Hydrothermolysis Jet fuel (CHJ)	50	废油或能源油

西雅图国际机场是世界上最早实践 SAF 应用的机场之一。西雅图港口委员会（机场管理机构）于 2011 年提出并进行了 SAF 项目的研究，并于 2017 年 12 月提出了 SAF 项目的发展目标：采用本地生产的可持续燃料并在十年内将至少 10% 的燃料替换为可持续燃料，至 2050 年将这一比例提高到 50%。2018 年 5 月 1 日，西雅图国际机场与 13 家航空公司达成协议，使用 SAF 来代替航空煤油的使用。西雅图的航空公司大约每年使用 7 亿加仑的航空煤油，10% 的使用率削减相当于减少 682,500 公吨的温室气体排放。

除了减碳上的创新举措，西雅图国际机场在能源、交通、适应气候变化、水质、节约水资源、社会责任、经济可持续发展、绿色建筑、废物管理，渔业和野生动物以及噪音管理等方面也进行了探索和实践。在生态保护方面，西雅图国际机场于 2016 年 11 月设立了机场社区生态基金（ACE 基金），通过小额对等捐款计划为社区组织提供了申请资助改善当地环境的机会。同时，西雅图港口委员会通过 Forterra 的绿色城市伙伴关系来支持西雅图国际机场周边主要城市进行长期森林管理⁶⁸。西雅图国际机场还设立了一个全面的野生动物管理计划，通过栖息地管理使机场对某些野生动物物种的吸引力降低，不仅可以保护野生动物，还可以确保航空和乘客的飞行安全⁶⁹。机场早在 1976 年就成为了美国第一个雇佣全职生物学家的机场，并制定了维护航空安全和保护野生动物的生态学方法，也促进了一些非危险性物种的野生动物保护⁷⁰。

4.2.2.5 香港国际机场

自 2008 年开始推行香港国际机场减碳计划以来，香港国际机场已在碳管理和可持续发展上获得了诸多成就。在 GSE 和 GAV 的电动化上，香港国际机场已于 2017 年 7 月将机场空侧所有轿车更换为电动车，第二阶段的空侧更换电动车计划于 2019 年开始推行，预期于 2022 年底前将机场禁区内所有总重量少于 3 吨的小型乘用车更换为电动车。同时，电动旅客专车已于 2018 年前在机场禁区内完成试

⁶⁸ Airport community ecology (ACE) fund. Portseattle.org.

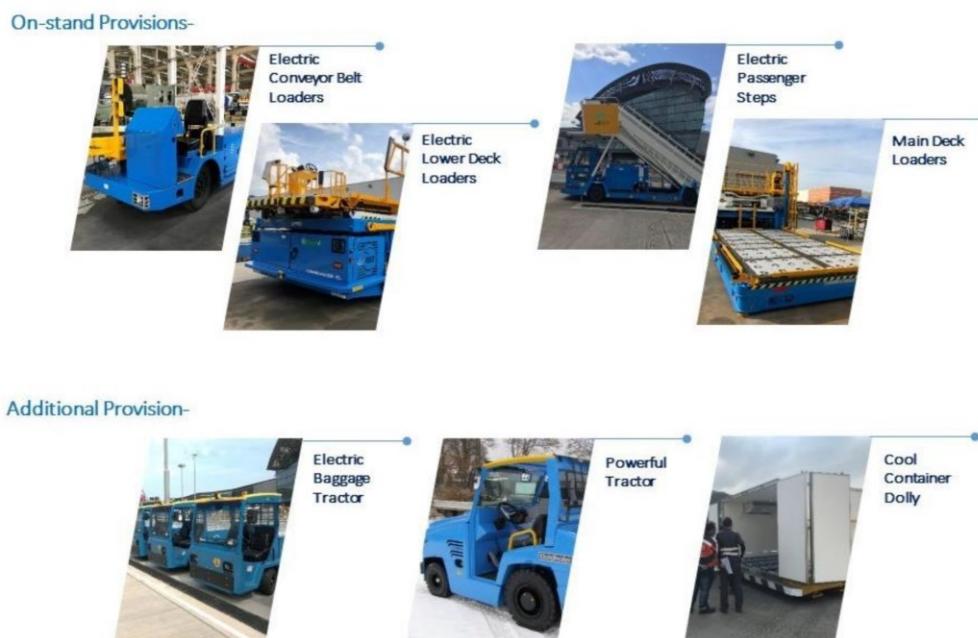
⁶⁹ https://www.portseattle.org/sites/default/files/2019-06/2008%20SEA%20WHMP_Fnl.pdf

⁷⁰ Our comprehensive wildlife management programs. Portseattle.org

运行，并在 2019-2020 年度交付。香港国际机场已经引入了超过 230 台电动 GSE，并计划开展更广泛的 GSE 共用计划。为支援第二阶段的空侧更换电动车计划及 GSE 共用计划，香港国际机场将于 2021/22 年度安装超过 370 个充电站，供电动车、电动旅客专车及电动地勤设备使用。此外，机场还将在飞行区安装智能充电设备，提高充电效率。

图 26 展示香港国际机场目前的电动化 GSE 设备，其中包括电动履带装载机、电动底舱板装载机、电动乘客登机梯、电动主舱板装载机、电动行李牵引机、强力牵引机和冷库移动台架。其中，95% 的设备为电动或者零排放设备。所有的电动 GSE 设备也皆需符合 IATA 的 **IATA Airport Handling Manual** 中所推荐的预防飞机损害的要求。另外对于 GSE 的管理，香港国际机场也采取了一套先进的车队管理系统，能够实现实时监测、控制权限、区域限定、电池充电警告和维修计划等功能。香港国际机场还签约了拥有专业行业知识和技术经验的第三方来进行 GSE 日常管理和维护，并且进行 24/7 的巡逻和救援服务。

图 28. 香港国际机场的电动化 GSE 设备



除了在电动化方面的探索之外，在废物管理上香港国际机场采用了三管齐下的废物管理方法，包括减少废物产生量，促进废物源头分类以促进回收，以及探索替代性处置方案。机场与政府部门合作推行都市固体废物收费试点计划，旨在透过收费改变旅客行为习惯，减少废物产生。同时，机场通过香港国际机场环保基金资助了数个关于循环经济以及厨余转化的项目，未来将进一步将研究成果加以利用。在生物多样性的保护上，香港国际机场在发展和运营过程中，也尽力避免和减少对生物多样性的不利影响，以及发挥航空业在阻止非法贩运野生动物方面的作用。

香港国际机场同时也致力于构建具有创新性的智慧机场。技术的进步为香港的创新的解决方案提供了机会，以有效地增加容量，提高效率，改善安全、安保和乘客的体验。根据香港国际机场的智慧机场战略，机场管理部门正与商业伙伴和技术伙伴密切合作，开发和采用创新的解决方案，重新定义未来的旅行体验。香港智慧机场的主要措施有：

- 物联网（IoT）监测系统 – 香港国际机场已部署物联网传感器网络，以监测各种机场系统。通过结合人工智能和数据分析等技术，这些系统可以帮助机场预测和诊断机场的行李处理系统、

水管和污水处理系统的问题。当检测到异常情况时，实时警报可以使机场迅速做出反应，从故障中恢复，并最大限度地减少对运营的干扰。

- 数字双胞胎（Digital Twin） - 与部署在 1 号航站楼（T1）的物联网传感器配对，1 号航站楼的数字双胞胎是一个复制其物理基础设施和系统的虚拟代表技术来收集整个机场的实时数据。通过在数字中模拟不同的预测结果，有利于机场做出与运营和维护有关的更好决策。香港国际机场也正在将这项技术的应用扩展到 4 号停车场扩建和天桥的设计和施工阶段。

4.3 国内机场可持续发展的探索

国内许多机场也已经开始了在可持续发展上的探索，这其中很大的驱动力来自政府的相关政策和要求。2015 年 3 月，作为中国民航局节能减排重点工作之一的机场地面特种车辆“油改电”专项试点工作正式启动，该工作确定了六个试点机场，北京首都机场为其中之一。该项目通过将机场区域内运行的特种车辆和专用设备由传统化石能源驱动改造或替换为电能等清洁能源驱动，促进机场节能降耗，提升机场区域空气质量⁷¹。2018 年 9 月，民航局印发《民航贯彻落实<打赢蓝天保卫战三年行动计划>工作方案》（工作方案）⁷²后，机场车辆“油改电”项目进入推广阶段。多种机场特种车辆包括散装货物装载机、集装货物装载机、机场旅客摆渡车、行李牵引车、旅客登机梯等都在逐步进行从以柴油为能源到以电能为能源的过渡工作。

在《工作方案》的指导下，经过三年的努力，民航蓝天保卫战圆满收官，取得了积极成效。在设备设施应用方面，全国机场的桥载电源使用率已经达到 100%，凡是机场有桥载电源的，飞机都可以靠廊桥运用地面的电源，不再使用飞机自带燃料。机场新能源车辆占比接近 1/5，特别值得一提的是，北京大兴国际机场新能源车辆占比超过了 4/5。在空气质量提升方面，共节省航油 40 万吨，相当于减少二氧化碳排放约 130 万吨，减少各种空气污染物约 4800 吨，机场的汽柴油消费强度已经显著下降。根据《中国应对气候变化的政策与行动-2020 年度报告》，在过去的两年里，民航加快提升机场运行电动化水平，2019 年底我国机场新能源车辆占比 7.5%，机场柴油消费增速得到有效控制。飞机 APU 替代设备基本实现“应用尽用”，2019 年以来累计节约航油 40 余万吨，减少二氧化碳排放近 130 万吨，2019 年约有 37.3 万架次航班使用临时航线，缩短飞行距离 1570 万公里，节省燃油消耗 8.5 万吨，减少碳排放 26.7 万吨⁷³。

2020 年，我国温室气体自愿减排交易机制（CCER）已成为国际民航组织认定的 6 种合格的碳减排机制之一。下一步，我们将推动我国温室气体自愿减排交易机制发展成为全国碳市场的抵消机制⁷⁴。此外，民航局还会同国家认可委员会完成了 6 家具备航空排放核查资质机构认可工作。

北京市也对机场减排/减碳提出了要求。根据《北京市 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》⁷⁵，北京市采取了一些节能减排的可持续发展措施，其中涉及到机场的措施包括：

- 发展新能源车：2019 年 12 月底前除消防、救护、除冰雪、加油车辆设备及无新能源产品车辆设备外，机场内运营新增和更新车辆设备 100% 使用新能源；

⁷¹ <http://scitech.people.com.cn/n/2015/0316/c1057-26696325.html>

⁷² <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201809/P020180919352217946937.pdf>

⁷³ <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/syqhbh/202107/W020210713306911348109.pdf>

⁷⁴ 生态环境部 2020 年 10 月例行新闻发布会实录

⁷⁵ <http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/201910/W020191016341951593056.pdf>

- **排放检验:** 2019 年 12 月底前以施工工地、机场、物流园区、高排放控制区等为重点, 全年开展非道路移动机械检测 1 万台次以上, 做到重点场所全覆盖;
- **机场岸电:** 2019 年 12 月底前推进首都、大兴机场岸电设施建设;
- **机场空气质量检测:** 2019 年 12 月底前在机场建设空气质量监测站。

北京首都国际机场根据国家和北京市要求以及自身发展需求, 在过去的几年里已经采取了一些可持续发展策略, 先后制定了《绿色机场专项规划》、《“油改电”专项规划》等一系列规划文件, 编制了《绿色机场建设实施方案》, 为建设绿色机场指明了方向。同时也制定了《碳排放管理规定》、《首都机场垃圾分类实施方案(试行版)》、《电动车入场标准》等可持续发展相关管理制度, 为更加全面地可持续发展提供了政策基础。同时, 北京首都国际机场按照可持续发展规划的理念, 致力于在整体运营过程中联合相关方对所涉及的问题采取系统性措施。首都机场飞行区内各类运行车约为 4000 辆, 其中特种车辆占六成以上。在 2020 年确保在飞行区内的地面保障车辆中, 特种新能源车比例不低于 10%, 通用新能源车比例不低于 20%。此外, 为解决北京长期缺水的问题, 首都机场还在提高用水效率方面作出了不懈努力, 取得了机场人均用水量逐渐减少的成果。从 2012 年人均用水量 23.75 升减少至 2015 年 21.24 升, 实现了 10.6% 的减量目标。而且在室内空气污染和污水处理方面, 首都机场实现了 100% 污染达标处理, 并采取创新措施, 鼓励旅客进行垃圾分类, 从而做到回收再利用。联合国环境署在 2017 年发布的名为《绿色机场: 通往可持续发展之道——北京首都国际机场绿色机场评估》报告(以下简称“报告”)中高度评价了机场在使用电动汽车、可再生能源、和更完善的交通枢纽所做出的努力和取得的成绩, 并建议机场在未来着重继续提高可再生能源比例, 并在减少垃圾总量和提高能效等方面采取进一步措施。

同时, 首都机场也在努力推进绿色机场的建设, 通过提高用水效率来解决区域水资源短缺问题。首都机场目前已建设市政供水、雨水回用和中水利用的供水系统, 通过替代性水源减少机场对淡水资源的需求。同时, 首都机场通过微喷带改造、加强管线设施管理、防止跑冒滴漏、采购并使用节水器具、开展节水宣传活动等措施, 深度挖掘节水工作潜力。同时, 首都机场也主动与国际接轨, 展开诸多的同行业和不同行业之间的合作交流, 在国际平台上展示中国企业在环保领域的不懈努力, 多次组织开展环保主题宣传。首都机场自 2011 年开始与联合国环境规划署开展战略合作, 并于 2013 年、2015 年、2019 年与联合国环境规划署 3 次签署《战略合作谅解备忘录》, 共同就绿色机场建设、可持续发展、环境公益、公众参与等方面交流意见并开展相关活动。双方携手在航站楼、停车楼开展环保主题宣传, 承担宣讲环境保护知识的责任。到 2019 年底, 北京首都机场已开展 20 余次环保主题宣传, 累计时间达 50 个月⁷⁶。

北京大兴机场在建设之初就将“资源节约、环境友好、运行高效和人性化服务”的绿色理念贯彻落实到机场规划、设计、建设和运行的生命周期之中, 全面实践可持续化的建设与运行理念。以《北京大兴国际机场临空经济区总体规划(2019—2035 年)》为指导, 疏解北京非首都功能、优化京津冀世界级城市群发展格局、促进区域全面协调可持续发展。大兴区委、区政府会同北京市规划和自然资源委员会组织编制了《北京大兴国际机场临空经济区(北京部分)控制性详细规划(截取层面)》, 作为下一层规划编制以及近期建设项目规划管理的基本依据。大兴机场在设计建设的时候涵盖了一些绿色发展的理念包括⁷⁷:

⁷⁶ 中国民航网: 建设绿色机场: 首都机场一直在路上

⁷⁷ 北京大兴国际机场: 实现多能互补 打造绿色新国门, <https://www.china5e.com/news/news-1057061-1.html>

- 在功能优先的前提下，航站楼绿色实施路径通过“减少、替代、提升”的三步策略，重点从建筑围护结构、暖通系统、设备与照明、可再生能源利用、自然采光、自然通风、非传统水源利用、室内环境等方面进行综合优化提升；
- 可再生能源主要应用在停车楼顶、货运区屋顶、公务机库、能源中心的太阳能光伏发电设施建设；在蓄滞洪区周边、公务机楼、飞行区服务设施建设浅层地热利用设施；在污水处理厂配置污水源热泵等区域；
- 大兴国际机场航站楼 C 型柱既是支撑的构件，又是室内采光的窗口，在每条指廊的顶面铺设一条带状天窗，贯穿整个 600 米的五条指廊，并且通过对屋面、外墙、幕墙、开窗等外围护结构的集成优化设计，幕墙遮阳系数提高 12.5%；
- 北京大兴国际机场在机场货运区、东跑道、公务机区三块区域建设了分布式光伏发电系统，年均发电量达到 610 万度，飞行区北一跑道铺设的光伏系统，是国内首个民航系统跑道周边的光伏系统，对未来民航领域进一步推进光伏系统建设和可再生能源应用的创新具有指导作用；
- 构建能够实现“渗、滞、蓄、净、用、排”的绿色排水系统，借鉴了“海绵城市”的环保理念，先后在机场飞行区和公共区建设了 6 个收集雨水的调节池，和总长 9760 米的调蓄明渠，在公共区域修建了湖体面积 10 万平方米的人工景观湖，全场雨水收集设施总容积将达到 280 万立方米；
- 在地源能源的利用上，也具有创新性，大兴机场地源热泵项目位于永定河蓄滞洪区内，创造性地将景观湖区作为集中埋管区，通过耦合设计实现地源热泵与集中燃气锅炉系统、锅炉余热回收系统、常规电制冷、冰蓄冷等的有机结合，形成稳定可靠的复合式系统，可以实现年减排 1.81 万吨标煤；
- 结合冰蓄冷和电制冷技术，辅以区域燃气锅炉调峰，有效解决了机场 257 万平方米配套建筑的供热制冷问题。

由此可见，北京大兴国际机场也探索并实践了很多创新型的可持续发展措施，在建设过程中将光伏、绿色排水、地源热泵与常规能源等进行了有机结合，可再生能源建设在保障机场供能安全可靠的前提下，实现多能互补，将环保、节能的社会效益与降低能源成本的经济效益的有效统一，探索和开拓了机场未来的绿色能源新模式⁵⁷。北京大兴国际机场在绿色机场规划、设计、建设上，以及在绿色理念、科技、管理等方面运用了多项国内、国际首创的新技术、新手段、新方法，积累了丰富的经验，创造了非凡的成绩，领跑我国乃至全球机场建设。可以为国内其他机场的可持续发展规划提供有益的参考。

图 29. 北京大兴机场绿色化进程示意图⁷⁸

除北京的两个机场之外，在京津冀地区，随着蓝天保卫战在民航业内全面打响，天津滨海机场也采取了不少创新模式，在工程承包管理模式、APU 替代设施运行模式上都取得了突破，天津机场的主要减排措施包括⁷⁹：

- APU 替代设施在天津机场全部 44 个在用近机位和 37 个具备实施条件的远机位配备率均为 100%。随着 APU 替代设施的逐步建成投用，截至 2020 年 9 月 30 日，共提供服务 20903 小时，节约航油量约 2195 吨，减少二氧化碳排放约 6921 吨；
- 机场辖区场内新能源车共计 288 辆，新能源车占比达到 27.5%，高于 13% 的行业平均值，在国内机场中处于领先，其中天津机场购置 258 台，在机场权属全部场内车辆中占比达到 46.4%。按照 288 台新能源车辆全年使用核算，每年可节约 539 吨燃油，减少二氧化碳排放 749 吨，削减油耗成本 377 万元；
- 天津机场还建立了燃油车辆尾气检测、治理与准入机制。场内燃油车辆尾气排放自测覆盖率 100%，自测不合格车辆改造率 100%，场内燃油车辆尾气达标率 100%；
- 天津机场机坪车辆运行监控系统实现了亚米级定位，可在高精度电子地图上立体化、可视化地反映所有车辆信息及状态，车内摄像头还可监测驾驶员安全行为，系统具有智能监控及语音报警功能，可实现车辆 OBD 行驶数据监测以及车辆生命周期全过程监管。

除此之外，国内还有很多别的机场也在积极采取各项节能减排措施，对国内代表性机场已有政策总结如下表 46 所示。

⁷⁸ 清华同衡助力新机场绿色生态化建设，清华同衡规划播报。

⁷⁹ 天津机场有序开展 APU 替代设施、充电设施建设、新能源车辆引进和尾气检测与治理

表 46. 国内部分机场的节能减排可持续发展措施总结

措施	北京首都机场	天津机场	南昌机场	深圳机场	广州机场	哈尔滨机场	杭州机场
可替代能源 GSE/GAV	除消防、救护、除冰雪加油车辆设备及无新能源产品车辆设备外，新设备 100%采用新能源	机场辖区内新能源车。共计 288 辆，占比 27.5%，减少二氧化碳排放 749 吨		2018 年采购车辆 124 台，其中清洁能源车 79 台，超 78%	29 台纯电动大客车替代柴油大巴，耗能约为 30%		
充电桩建设				共建充电桩 832 座，超过停车场车位数 20%			
APU 替代设施	2018 年首都机场地面电源及地面空调的机位 APU 替代率达到 93%以上，全年可减少 737 吨污染物排放	截至 2020 年 9 月，共提供服务 20903 小时，节约航油量 2195 吨，减少 CO ₂ 排放 6921 吨	2018 年 10 月至 2019 年 9 月，APU 替代装置累计使用时长 27292 小时，累计减少污染物排放量近万吨				
机场排放检验	全年开展非道路移动机械检测	燃油车尾气检测、治理与准入机制					
机动车尾气改造			2020 年 3 月完成 155 台车辆尾气改造				
车辆监控系统		车辆行驶数据检测以及车辆生命周期全过程监管。	线下车载显示终端，线上网络监控平台实时监测		航班就近分配摆渡车		

措施	北京首都机场	天津机场	南昌机场	深圳机场	广州机场	哈尔滨机场	杭州机场
协同决策系统			充电数据、廊桥信息、尾气检测、车辆检测、桥载设备检测“五合一”				
老旧锅炉、配电设备改造						改造老旧水炉和锅炉，改造蒸汽锅炉省煤器、30余套配电柜变压器等设备	
清洁能源发电	2020年建成西湖水面光伏+储能+应用项目，预计全年发电量可达9万千瓦时			光伏发电超过1400万度，全国最大自建光伏发电站，累计减少二氧化碳排放5.7万吨			天然气分布式能源，采用清洁能源天然气发电,发电预热供制冷和采暖。项目达产后，预计二氧化碳年减排量为31485吨
照明系统节能					供电按需开启，分区改造照明	替换照明灯和LED等每年可节约35万余度	

如上所述，北京的两个机场已经在环境可持续发展上有所尝试，也取得了很多成果。未来，在进一步深化环境可持续发展的各项措施的基础上，北京的两个机场还可以尝试开展社区公益活动、举办公益展览和各种绿色宣传和可持续发展教育活动，提高大众的可持续发展意识，敦促大众的节能减排行动。此外，我国目前对于机场可持续发展的方向主要是集中在通过节能减排和绿色机场建设来提高机场的能源利用效率和减少环境污染，但这只是可持续发展的一个方面。未来北京首都机场和大兴机场可以进一步将经济、社会和环境要素综合考虑，编制综合性的可持续发展规划并实施，最终实现机场、人和自然的和谐发展。

5. 结论和建议

航空运输业是移动源中重要的排放源，且其排放会随着航空运输业的不断发展而持续增长。目前，北京市的空气质量经过多年的治理已有明显改善。在碳排放上，已经实现了碳达峰的目标，将往碳中和迈进。此外，北京市对传统的大污染源（例如交通源中的机动车、工业固定源）等已经进行了多年的排放管控，成效明显。但随着这些污染源的排放水平得到控制，进一步减排的空间将会越来越小。因此，机场及航空源的减排将会越来越受到关注。控制航空运输业和机场的排放，将是未来我国以及北京市进一步改善空气质量，及实现碳中和的重要目标之一。国际上的很多机场都已采取了各种各样的减排措施和可持续发展规划，来更好的保证机场的良性发展，降低来自航空运输业和机场的排放。本课题通过对排放清单编制、减排措施和可持续发展得而国际经验进行梳理、总结和比较，希望可为北京市两大国际机场制定排放清单、减排策略、和进一步完善可持续发展规划有所助益。针对北京市两大机场的排放清单的编制和减排/减碳策略的开发，基于总结的国际经验与实践，本课题对北京市两大机场提出以下建议：

排放清单编制：

排放清单是了解机场排放水平、制定机场减排和可持续发展策略的重要基础。北京的两大机场尚未有完整的空气污染物排放清单和碳排放清单编制完成。因此，建议北京两大机场参考目前国际机场进行排放清单编制的方法、工具和经验，系统的开展排放清单编制工作。对于清单编制的具体建议如下：

- **排放清单的复杂程度**与其编制目的息息相关。由于机场排放源组成复杂，且可能成为下一步减排减碳的重点目标，可考虑编制一个较为精细的排放清单。该清单不仅可以成为北京两个机场减排策略制定的理论基础，也可成为北京市移动源排放清单/总排放清单的组成部分，更可为之后的空气质量模拟、区域空气质量模拟等研究提供支持。同时，编制较精细的排放清单也会降低之后对排放清单进行更新的难度。
- **排放清单的边界**在排放清单的精细程度确定后，考虑与现有排放清单的重合及区别，以及对协同减排/减碳的需求进行确定。如果需要纳入机场外延车辆部分的排放，需要对现有移动源排放清单中已包括的机动车排放源进行识别，避免重复的同时，也可获取一部分有用数据。此外，如果需要同时编制碳排放清单和空气污染物排放清单，可以参考前文给出的对照表，对 **GSE**、**GAV**、飞机排放等进行统一计算，再单独计算碳排放清单中的全生命周期考量部分（如电力消耗），降低工作量。
- **GSE 排放清单**可根据排放清单的精度需要进行考量，建议选择进阶方法进行计算。鉴于国内尚没有本地化的 **GSE** 活动水平数据，可以考虑在清单编制过程中适当开展活动水平的采样调查，获取第一手的 **LTO** 活动水平数据；其余数据可根据机场/第三方现有的数据进行收集，再用模型数据加以补充。如无本地化的排放因子库，推荐使用美国的 **MOVES** 模型中的排放水平数据。
- **GAV 排放清单**可根据排放清单的精度需要和数据获取的复杂程度，建议选择中级/进阶方法进行计算。建议采取机场主要道路路口（如收费站）的车流和车型数据，以及停车场数据，作为场内 **GAV** 车数的基础，货运部分可以收集运营商的记录，酒店巴士/机场巴士可按酒店/航空公司的日程表计算，另外可适当在场内不同位置设置采样装置（摄像机、交通记录仪等）收集机场实际数据。如机场已有一定的硬件基础（例如大兴国际机场的飞行区车辆检测线），则可进一步使用这些硬件进行活动水平的统计。如果需要对外延车辆的排放进行考量，除需参考现有移动源排放清单外，活动水平的统计可以使用 **Gravity Model**，根据每个片区（如北京各行政区）的人数和片区中心至机场的公里数进行计算。排放因子优先采用国内模型的数据，如有无法覆盖的部分，推荐使用美国加州的 **EMFAC** 或者欧洲的 **COPERT**。
- **数据验证**是对排放清单可靠性和准确性进行验证的重要步骤。排放清单编制完成后，建议与国际主流机场（尤其是体量相似的机场）的排放清单进行对比，也可考虑使用国际主流的排放清单工具（推荐 **AEDT**）、碳排放工具（推荐 **ACERT V6.0**）进行数据的模拟和验证。

空气质量监测：

空气质量监测是进一步开发与制定减排、减碳策略的来源与基础，北京首都机场和大兴机场目前尚未建立独有的空气监测站点和完善的空气监测网络。因此，建议北京两大机场参考目前国际机场实施空气质量监测的方法和经验，尽快开展全面而系统的空气质量监测工作。对于空气质量监测的具体建议如下：

- **对两个机场建设空气质量监测站点的可行性分别进行分析并设计建设方案。**北京两个国际场所处地域分别位于北京东北部的顺义地区和南部的大兴大区，两个区域的地理条件和气象条件差别较大，尤其是地形、植被覆盖、温度、湿度、风速与风向等因素。气象条件对飞机飞行安全有着重大的影响。而气象局所提供的气象数据信息具有广域性，无法满足航空天气预报时效短、精度高的要求。在空气监测站点的位置选取和数量上也需要分别进行考量，制定出适合两个机场具体情况的设计方案。
- **空气质量监测应兼顾到机场内部排放情况和机场边界范围内的排放情况以及对机场周边空气质量的影响。**北京首都机场建设时间较早，附近的各项功能服务设施与区域更为齐全，大兴机场直到去年才全面完工，附近的功能服务设施与区域尤其是商业区域和居民区还有待发展，因此，首都机场对于周边空气质量的影响也更大，首都机场区域空气监测在现阶段可以在充分兼顾机场边界内空气质量监测的基础上，更加注重对于周边空气质量的影响。大兴机场空气质量监测在现阶段可以以机场的排放监测和空气污染物监测为主，并且预留将来可能的对于机场周边空气质量监测需求的方案。
- **空气质量监测系统的建立应当以完善全面为重点诉求。**考虑到气象条件变化的即时性和短期特性，监测系统应当对机场大气环境中的空气温湿度，风速，风向，噪声，降雨量，大气压力等气象因素进行监测。此外还需要对大气中的物质例如氧气、二氧化碳、一氧化碳、二氧化氮、二氧化硫、硫化氢、臭氧、氨气等气体浓度及颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度变化进行实时监测，以便于后续的数据分析与管理。
- **作好空气质量监测数据的采集与管理。**采集空气质量监测数据可以考虑进行系统化管理和平台化管理，通过手工录入或者在线监测的方式将采集的数据录入到管理系统或者管理平台，与北京市现有的空气质量监测系统进行整合，作好空气质量监测数据的公开和运用。对于空气污染物的监测数据和温室气体的监测数据可以进行相关性分析，以便于之后的工作开展减排/减碳策略的开发。并定期对所得数据进行分析研究，对减排策略进行进一步的调整。

减排/减碳策略开发：

对于机场减排/减碳策略的开发，建议根据目前机场各排放源的排放情况，首先按各排放源的排放量和减排难易度进行排序，再列出各个排放源可行的减排策略，按技术可行性、经济可行性、减排潜力等要素进行评估，最终完成分阶段的减排/减碳策略规划。对于减排/减碳策略开发的具体建议如下：

- **对两个机场的减排/减碳策略应该分别进行考量，但两机场应保持良好合作。**北京两个国际机场的建设时间相差较大，在基础设施（如能源供给、航站楼、硬件设备）和机场规划等方面都有较大不同，不同排放源的排放情况和减排潜力和成本也不同，因此应该分别制定减排/减碳策略。但是，两个机场可以进行合作和知识共享，在技术和运营策略上保持同步，达到更好的减排/减碳效果。
- **对于北京首都国际机场，建议优先推进 GSE 的电动化和对重型货车的排放管控，再在中长期规划中考虑其他排放源的减排。**对于北京首都国际机场，目前旅客吞吐量和货运吞吐量均位居世界前列。由于机场投入使用较早，目前场内新能源车辆的占比（29.3%）还有提升空间，可以根据场内 GSE 的类型逐步提高电动化率。在 APU 替代方面，北京首都国际机场近年来大力推动设备电动化，近机位 100% 实现地面电力供给，远机位 APU 替代设备设施覆盖 62%，可继续推动远机位 APU 替代。机动车方面，由于货运吞吐量较大，货车在机场排放中所占比例应该较高。首都机场可与有关部门合作，出台低排放区、淘汰老旧车辆等政策，鼓励或要求中型和重型货车采用低排放车型，同时进一步推进机场巴士、穿梭巴士等的电动化。如果电动化技术尚不可及，则可考虑使用其他可替代燃料进行过渡，如巴士可采用 CNG 等。在考虑不同的可替代燃料时，建议使用全生命周期评价工具（如 AFLEET）对该燃料车型的全生命周期排放进行评估。

- 对于北京大兴国际机场，建议在持续推进车辆电动化的同时，探索新型可替代能源和对飞机主引擎的减排策略。大兴国际机场投入使用时间较短，各项基础设施的设计都融入了对可持续发展的考量，在能源的清洁化程度上也非常领先。但是这也意味着大兴国际机场使用目前主流减排策略继续减排的空间更小。例如，大兴国际机场场内车辆电动化率已达 75%，而剩下的 25%，可能大部分是有特殊功能不适合电动化或尚未有成熟电动化技术的车型，减排空间较小。因此，大兴国际机场应该充分利用其绿色水平领先于国内机场水平的优势，开展对新型可替代能源（如氢燃料）、新型减排技术的试点项目。同时，考虑到飞机引擎排放是机场第一大排放源，可与利益相关方合作，探索合适的飞机主引擎减排策略（可持续航空燃油、流量优化）。相关成果不仅能够进一步提升大兴机场的减排能力，也可以分享给其他国内机场，实现共赢。在 GAV 减排方面，可设置激励项目，鼓励由第三方运营的 GAV（如出租车、网约车）等采用清洁能源车型，进一步实现减排。

可持续发展策略开发：

机场可持续发展是一个综合概念，包括环境、经济、社会等多个方面。对于环境可持续发展来讲，前述讨论的减排减碳只是其中的一个部分，其余包括保护自然资源、水资源利用、废物综合利用、能源管理等也是机场可持续发展关注的对象。进行可持续发展规划不仅确定为各方面确立目标与规划，更能从整体的角度促进各方面措施的协同进行，达到更好的效果并降低成本，综合降低机场对生态环境的影响。因此，对于北京两大机场来说，设定可持续发展策略是必要的。本课题相关建议如下：

- 在现有基础上，组建专职的可持续发展规划及管理团队。
- 与政府部门和其他利益相关方广泛交流，根据政策要求、规划需求、机场发展等因素制定愿景和中长期可持续发展目标，确定可持续发展方向。
- 参考国际可持续发展案例（如体量相似的洛杉矶国际机场、达拉斯国际机场、东京成田国际机场等），结合自身现状和已有规划，将空气质量管理、碳排放管理、能源管理等内容综合考虑，首先确定减排目标和可再生能源目标，并编制大气与能源可持续发展规划。
- 在空气质量管理上，将排放清单、基础研究、减排策略、空气质量监测和模拟等各部分结合起来，实施综合的空气质量管理策略，制定完整的空气质量管理方案。
- 在碳排放管理上，建议两机场积极进行碳排放认证，分阶段确定减碳目标。许多国际和国内机场都已经进行了碳排放认证。碳排放认证不仅可以帮助机场了解自身排放水平、制定减碳策略，也可以借由认证提升机场形象，促进机场可持续发展。首都机场曾于 2016 年通过 ACA Level 1 认证，建议继续保持并争取取得更高认证。大兴机场也建议取得相应碳排放认证。
- 在大气与能源可持续发展规划的基础上，进一步拓展规划内容，进行环境可持续发展规划；最终将社会、经济、运营因素等纳入考量，实现综合型机场可持续发展规划。