

# 加州低碳燃料标准解读 及中国可行性研究



能源与交通创新中心

2021 年 10 月



## 致 谢

感谢能源基金会为本报告提供资金支持,也感谢为本报告提出宝贵意见的所有业内专家与同事。

## 报告作者

李越、秦兰芝、安锋

## 报告声明

本报告由能源基金会资助,报告内容不代表资助方及支持方观点。本报告所有结果仅供研究参考,不承担任何法律责任。

能源与交通创新中心 (iCET)

**Innovation Center for Energy and Transportation**

北京市朝阳区东三环中路7号财富公寓A座27H室

邮编: 100020

电话: 0086 10 65857324

传真: 0086 10 65857394

邮件: [info@icet.org.cn](mailto:info@icet.org.cn)

网址: [www.icet.org.cn](http://www.icet.org.cn)

## 目录

执行摘要 .....	1
一、 研究背景 .....	5
二、 加州低碳燃料标准法规介绍.....	8
2.1 政策背景 .....	8
2.2 加州 LCFS 法规的运行机制.....	9
2.3 加州 LCFS 的修订与发展.....	21
2.4 加州 LCFS 的实施效果评估.....	27
2.5 不同机制之间的关联性 .....	35
三、 中国低碳燃料发展现状.....	39
3.1 中国交通低碳燃料发展现状、趋势与目标 .....	39
3.2 中国激励交通低碳燃料发展的市场机制 .....	45
四、 中国引入加州 LCFS 的关键问题 .....	48
4.1 中国实施低碳燃料法规的 MRV 体系构建 .....	48
4.2 低碳生物燃料是否仍是中国交通低碳化发展的重要选项 .....	49
4.3 低碳生物燃料在中国的应用前景 .....	53
五、 加州 LCFS 法规的借鉴意义及引入中国的政策建议 .....	55
5.1 加州 LCFS 对中国的借鉴意义.....	55
5.2 实施低碳燃料法规对零排放汽车的促进作用 .....	56
5.3 中国引入类似法规的政策建议 .....	57
参考资料.....	61

---

## 执行摘要

交通领域是重要的温室气体排放源，在欧美等发达经济体内，交通温室气体排放占比约为 1/4，在中国这一比例虽不足 10%但有很大增长空间。交通电动化转型是该领域碳减排的重要措施，并且展现了良好的发展势头，尤其在道路交通领域，主要汽车市场都将零排放汽车作为未来产业发展的最终方向。但传统能源汽车有着坚固庞大的产业和消费基础以及丰富的应用场景，实现零排放转型绝不可能一蹴而就。除道路交通外，航空、水运等非道路交通运输形式也难以在短期内形成以电力为核心的能源消费结构。因此，推动交通碳减排需要考虑多种技术路线并加以论证。

全球经验表明，在实现能源碳减排方面，低碳燃料具有很大优势和潜力。低碳燃料是指在生命周期内，相比于目前普遍应用的高碳化石燃料，如汽油和柴油，单位能量基础上能产生更少生命周期温室气体排放的燃料，既包括传统的生物乙醇、生物柴油等液体燃料，也包括清洁电力、绿氢等后起之秀，从而削减由能源消费带来的温室气体排放，持续降低总碳排放量。

在交通电动化转型过程中，业内普遍认为乘用车的电动化技术较为成熟，规模化发展实际较为成熟，但在重卡、船舶、航空等交通部门，电动化还有很长的路要走。通过低碳燃料应用不仅能为交通碳减排进行保底，还能通过与其他政策的结合实现联动效应。

低碳燃料应用在美国、欧洲等国家和地区具有很好的实践案例，这些地区也有较为系统和科学的低碳燃料应用目标，如美国加州的《低碳燃料标准》（Low Carbon Fuel Standard, LCFS）。受限于原料供应和市场规模等因素，中国的低碳燃料在经历短暂的繁荣后逐渐回落。在中国发展低碳燃料有必要借鉴先进地区的宝贵经验和教训，在充分识别本土问题的基础上，构建具有中国特色的低碳燃料政策体系，持续引导交通去碳化并最终实现脱碳。

本研究对美国加州《低碳燃料标准》体系进行了系统的解读，并结合中国低碳燃料发展现状，对标准的可借鉴性和中国引入低碳燃料政策所面临的问题进行了分析，主要结论如下：

1. 加州《低碳燃料标准》显著降低了交通温室气体排放，新修订版本增加了零排放汽车基础设施等受益主体，有利保障了交通能源的持续低碳化和多元化。

数据显示，截至 2018 年，加州出售的交通燃料平均碳强度相比 2010 年下降了 5%，减少温室气体排放 3800 万吨，2020 年加州交通燃料平均碳强度相比 2010 年下降了 7.42%，基本达成了 2018 年修订版中提到的目标。

LCFS 自 2009 年出台以来，经历了 2011、2015、2018 三次重大修订，其目的在于 1）调整碳强度下降目标，以适应不断技术发展与市场变化；2）增加积分生成路径，确保充足的积分供应；3）优化监管流程，提升便利性与灵活性。在 2018 年的修订后，LCFS 证

---

实升级为 2.0 版本，提出了 2030 年燃料平均碳强度在 2010 年基础上下降 20% 的目标，同时更新了减排项目路径，增加了 ZEV 加注基础设施“容量”路径获得 LCFS 积分的条款。新版在鼓励低碳燃料发展及其应用之外，还通过激励机制鼓励化石能源产业上的创新，提高创新积极性，从而保障了交通燃料的多元化。

## 2. 中国交通燃料高碳特征明显，低碳燃料激励政策体系不完善但市场化机制初步建立。

中国交通运输行业使用的燃料中绝大多数仍是化石能源，据统计，汽油、柴油和煤油在交通运输燃料消费中的比重超过 80%，电力仅占 4%。

中国低碳燃料发展面临多重挑战。除电能外，生物燃料与可再生燃料在交通燃料中的比重可以忽略不计。一方面是由于产业规模未能扩大，根本原因在于一代燃料的生产原料不足，新兴技术又面临成本高昂等问题，限制了生物燃料和可再生燃料的大规模应用。另一方面，中国尚未开发建立低碳燃料领域的系统性标准、法规和激励机制。现有的激励政策大多针对特定的产业或技术路线，缺乏全盘考虑和统筹协调。例如，在过去十到二十年，中国低碳燃料政策主要集中在生物乙醇和生物柴油行业，近几年政策大力激励氢能，尤其是可再生绿氢的发展，不过氢能产业仍处在发展初期。除此之外，生物航煤的发展定位尚未明晰，进而影响了产业的整体发展和技术创新的步伐。

可喜的是，近年来随着碳减排形势日益严峻，中国也初步尝试并建立了若干市场化机制。在交通领域出台了乘用车燃料消耗量和新能源汽车积分并行管理办法（即“双积分政策”），该政策允许新能源汽车积分在体系内自由交易，通过该方法鼓励新能源汽车的使用和生产，进而降低交通碳排放水平。此外，中国碳市场发展从试点省市也已逐步过渡至全国碳市场，碳交易市场在短期内虽不太可能涵盖交通燃料领域，但北京、上海等城市已经做了有益的尝试，将城市公共交通和民用航空运输企业，以及航空港口及水运企业纳入进来。未来，这些市场化运作机制将能带动交通燃料不断去碳。

## 3. 加州 LCFS 对零排放汽车发展的促进作用明显，可与交通电动化战略联动，共同推进交通领域脱碳。

低碳燃料与交通电动化不是竞争关系，也不是电动化战略的辅助，它是在电动转型之外提供的另一个碳减排思路。加州低碳燃料标准法规对电、氢能源及其基础设施提供了获益途径，如在中国实施类似的低碳燃料标准法规，将在多个方面促进包括电动汽车和氢燃料电池汽车在内的零排放汽车的推广应用。

首先，可以为 EV 使用者提供可持续的奖励和补贴。加州低碳燃料标准法规 2.0 通过清洁燃料奖励项目直接对 EV 使用者提供补贴，根据电池容量 EV 使用者可获得 500-1400 美元不等的奖励，该举措可作为政府财政补贴的替代手段。更为关键的是，基于低碳燃料标准法规对 EV 使用者提供的奖励和补贴不会占用公共财政资源，是可持续的。由国家财政直接提供补贴需要考虑的边界因素很多，容易造成“骗补”等不良行为。依靠一套基于市场机制的法规机制则可以尽量减低这种风险，在这一层面上，低碳燃料标准



---

法规也不失为一个较好的选择。

其次，可以鼓励基础设施项目建设和使用。在电动汽车推广前期，制约其发展的一个重要因素即是充电基础设施数量不足和分布不合理，随着基础设施的不断布局，提高充电设施利用率又成为一个新的挑战。燃料电池汽车推广也应遵循类似的发展模式。在加州低碳燃料标准法规中，关于基础设施的容量积分设计，便是为了鼓励投资者加大对直流快充和加氢站的投建，尽可能解决由于基础设施不足造成的零排放汽车发展受限问题。此外，基础设施拥有者还可以通过燃料路径获取低碳燃料积分，通过积分交易市场进一步获益。另一方面，电网公司也可以通过燃料路径获得低碳燃料积分，获得的部分收益有可能用来降低部分时段的电价，进一步鼓励了零排放汽车的使用，并提高基础设施的利用率。

再次，电力从 LCFS 机制中的获益潜力巨大。从 CARB 公布的分燃料类型的 LCFS 积分情况来看，2020 年四个季度电力 LCFS 积分占比均已超过 20%。2020 年，加州 LCFS 积分交易共完成 217.28 万吨二氧化碳当量的交易，每个积分的平均价格为 199 美元<sup>1</sup>，积分现金流共计 4.3 亿美元。假设这些积分从积分池中按比例进行交易，那么按照电力积分比例，2020 年电力从 LCFS 机制中的获益超过 8600 万美元。如果在中国实施低碳燃料标准法规，电力可获得的收益将更加巨大，一是中国市场体量巨大，二是中国的电动汽车保有量是加州的 15 倍左右，且近几年电动汽车的增长速度还将显著加快。

#### 4. 中国引入低碳燃料政策需在方法学和工具设计、MRV 体系与平台构建，以及政策体系设计上统筹推进。

加州 LCFS 法规是在对加州当地交通能源充分调研的前提下，以燃料生命周期碳强度为评价参数，开发的一套完整的以模型核算为基础，以法规命令托底实施的政策体系。LCFS 法规对高碳油气企业实行强制合规管理，与中国体系下标准文件的性质不同。LCFS 法规具有很高的精细度和复杂度，在引入中国时，我们建议：

首先，建立交通能源消费统计制度与平台，并群策群力制定科学的燃料生命周期温室气体核算方法。

其次，集中研究力量开展交通燃料碳强度的预测研究，并结合前面提到的燃料生命周期温室气体核算工具，开发交通燃料碳强度预测工具，保证碳强度目标的严格性和可实现性。

第三，在保证科学和公平的前提下，对标准体系进行精简设计，可精简的具体元素包括纳入标准体系的低碳燃料类型、化石燃料供应商规模的认定标准以及初期的积分生成路径与规则。

再次，考虑到中国体系下标准与政策落实难度的巨大差异，建议设计一套中国特色的低碳燃料积分(LCFC)交易机制，类似于乘用车“双积分”政策中的 NEV 积分管理政策。LCFC 既可解决单纯标准在中国难以推行落实的困境，也符合精简标准体系的原则。

---

最后，在引入时首先在若干省市进行试点试行，既可为全国范围的运行积累宝贵经验，又能给更加健全的政策体系的制定争取时间。

总之，低碳燃料在交通能源领域仍有巨大的应用空间和减排潜力，是推动交通低碳化发展的重要选项与路径。后续应量化低碳燃料对交通碳减排的贡献，为低碳燃料法规的制定和政策体系的构建提供参考。

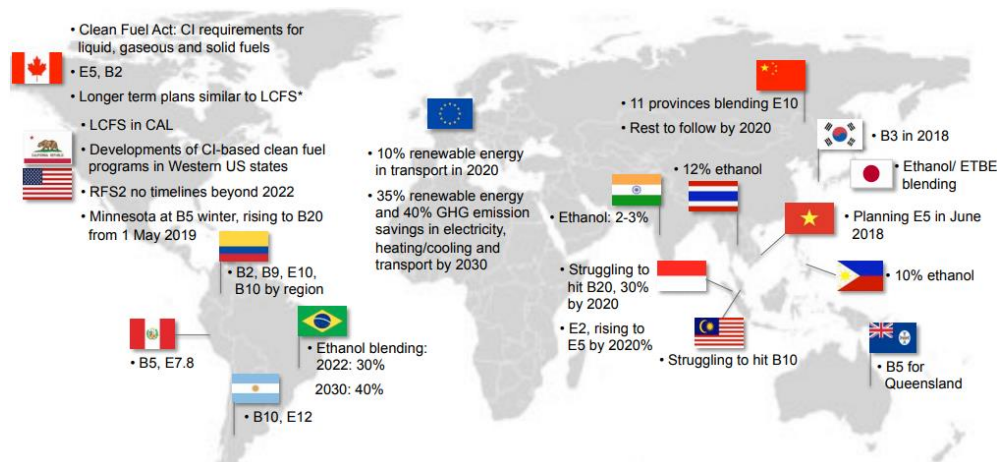
## 一、 研究背景

中国作为一个负责任的发展中大国，积极承担应对气候变化的国际责任。2020 年 9 月 22 日，习近平总书记在第 75 届联合国大会期间郑重宣布，“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。这一重要宣示为中国的应对气候变化工作提供了方向指引和宏伟目标，也使各部门的节能减排、低碳化发展的工作更加紧迫，特别是在交通领域。

统计资料显示，2018 年中国交通运输行业能源消费总计 5.76 亿吨标煤（Mtce），占中国终端能源消费总量的 18%<sup>2</sup>。交通行业温室气体排放量约占中国排放总量的 10% 左右<sup>3</sup>，其中道路交通是最大的排放源。从美国（28%）等发达国家的经验来看，交通温室气体排放占比还有很大增长空间。交通燃料的低碳化势在必行，然而中国目前交通用能几乎完全依赖液体化石能源。随着中国交通运输需求的持续增长，未来交通部门实现净零排放挑战巨大。与此同时，中国石油对外依存度已超 70%，交通部门的石油消耗占中国石油消费总量的一半以上，因此交通燃料多源化与低碳化也是保障国家能源安全的必然要求。

交通领域碳排放体量大，实现脱碳化的难度大、成本高，技术创新迭代所需的时间、资本投入均高于其它行业，且很难通过简单的碳排放权交易等市场手段在短期内激励交通行业的低碳化发展。脱碳化目标的达成需要更强有力的实施方案和更创新的激励机制，有必要借鉴先进国家和地区的成功经验。

低碳燃料种类多，包含范围广。如加州已将生物乙醇，生物柴油，可再生汽油，可再生柴油，天然气，及电力和氢能等均包含在低碳燃料里面。截至目前，生物燃料仍是交通领域比重最高的低碳燃料类型。据不完全统计，全球有超过 30 个国家和地区正在实施激励生物燃料发展的相关措施（如图 1）。其中，生物乙醇，生物柴油和可再生柴油是最主要的汽柴油添加掺烧物。



资料来源：Dr. Jan Henke, ISCC presentation, 2018

图 1 截至 2018 年全球实施低碳燃料相关标准及政策的国家（部分）



---

在法规和政策层面，目前比较成功的低碳燃料政策主要包括在欧盟境内实施的《可再生能源指令》RED，在美国境内实施的《可再生燃料标准》RFS，在美国加州实施的《低碳燃料标准》LCFS 以及在英国境内实施的《可再生交通燃料规范》RTFO，具体见表 1。

其中，加州作为发展低碳交通和应对气候变化的先行者，于 2009 年出台了低碳燃料标准（Low Carbon Fuel Standard, LCFS）法规，有力地推动区域性交通低碳化进程。据官方统计，在低碳燃料标准法规的推动下，截至 2020 年加州境内销售的交通燃料平均碳强度相比 2010 年下降了 7.4%<sup>4</sup>。由于多种历史因素，加州在低碳燃料领域非常重视生物柴油、可再生柴油、燃料乙醇等液体生物燃料。2018 年低碳燃料法规进行了一次重大修订，升级为 2.0 版本。新版本对碳强度设定了更先进的下降目标，增强了对电力和氢能的重视，也对法规的运行机制、监管范围等内容做了多处重要更新，成为支持加州 2045 年实现碳中和的有力保障。

与欧盟等其他地区的低碳燃料标准和法规相比，LCFS 对低碳燃料的定义和覆盖范围更广，尤其是在最新一次的修订版本中，LCFS 法规极大强化了对电力和氢能的引导，更加符合目前全球交通领域零排放的发展进程。此外，加州低碳燃料标准法规在设计、推行和修订过程中也积累了许多先进经验，值得中国学习和借鉴。

本研究旨在梳理分析加州低碳燃料标准法规的运行机制和监管经验，同时分析该法规机制对中国的适用性与借鉴意义。基于中国现有的政策、法规及机制，提出以市场化手段推动交通燃料低碳化的政策建议。

表 1 国际主要低碳燃料政策简介

	RED-Renewable Energy Directive	RFS-Renewable Fuel Standard	LCFS-Low Carbon Fuel Standard	RTFO-Renewable Transport Fuel Obligation
实施范围	欧盟成员国	美国联邦	美国加州	英国
管理机构	欧盟委员会	美国环保署	加州空气资源委员会	英国交通部
出台时间	2009	2005	2009	2008
制定依据	• Clean energy for all Europeans package-RED II	• 《能源政策法案》-RSF • 《能源独立与安全法案》-RSF II	AB32 法案	修订版本依据欧盟 RED 和 FQD (Fuel Quality Directive, 燃料质量指令) 政策
政策性质	强制性	强制性	强制性	强制性
政策目标	RED 2020 目标 • 最终能源消费中可再生能源比例 20% • 各成员国目标 RED II 2030 目标 • 最终能源消费中可再生能源比例 32%	可再生燃料在交通燃料中的添加比例逐年增加, 2022 年达到 360 亿加仑	• 2020 年比 2010 年基准水平下降 10% (2018 年修订后将这一比例改为 7.5%) • 2030 年比 2010 年基准水平下降 20%	2032 年, 合规主体供应的燃料中生物燃料掺烧比例达到 12.4%
涵盖的替代燃料种类	• 食物基生物燃料 (RED II 不包括) • 先进生物燃料 • 生物基可再生液体和气体交通燃料 • 可再生电力 • 废弃物基化石燃料 (RED II)	• 常规生物燃料 • 先进生物燃料 • 生物柴油 • 纤维素燃料	• 生物乙醇 • 生物柴油 • 可再生汽油 • 可再生柴油 • 天然气 • 电力和氢能	• 生物乙醇 • 生物柴油 • 生物甲醇 • 其他生物燃料 • 非生物基可再生燃料 (如氢能)
强制合规主体	交通运输、电力、制冷及供热行业燃料供应商, 各成员国	炼油商、汽油和柴油进口商	化石燃料的生产商和经销商	年供应量超过 45 万升的交通及非道路移动机械燃料供应商

资料来源: 1) <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>; 2) <https://afdc.energy.gov/laws/RFS>; 3) <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard/about>; 4) <https://www.gov.uk/guidance/renewable-transport-fuels-obligation>

---

## 二、 加州低碳燃料标准法规介绍

### 2.1 政策背景

#### 2.1.1 加州整体的气候变化政策

低碳燃料标准（LCFS）法规是加州应对气候变化政策机制的有机组成部分。该法规得以有效减少交通燃料碳强度，离不开整体政策框架的坚实基础和其他法规政策的积极配合，因此有必要简要地介绍加州整体的气候变化应对政策。

加州应对气候变化的政策框架主要由 3 大法案和 1 个行政命令构建起来，它们分别是：

- 2000 年的 SB 1771 法案 (Senate Bill 32)建立了加州应对气候行动注册计划（California Climate Action Registry, CCAR），目的是鼓励和推动企业早期对温室气体的管理和减排行动。加州通过该法案建立了温室气体排放清单与报告机制，CCAR 的成员单位也对推动加州后续应对气候变化法案和政策的出台发挥了关键作用。<sup>5</sup>
- 2006 年的 AB 32 号法案（Assembly Bill 32），也称全球变暖解决方案法案（Global Warming Solutions Act），授权加州空气资源委员会（California Air Resources Board, CARB）对温室气体排放源进行监管，以确保 2020 年加州温室气体排放降回到 1990 年水平的目标，长期目标是到 2050 年温室气体排放比 1990 年水平下降 80%。该法案成为低碳燃料标准法规出台的基础和动因。
- 2016 年的 SB 32 号法案（Senate Bill 32）进一步提高了温室气体减排目标，要求加州 2030 年的排放量比 1990 年水平至少下降 40%。低碳燃料标准法规在该法案框架下得以延续。
- B-55-18 号行政命令（Executive Order B-55-18）设定了到 2045 年实现全州碳中和的目标。为了支持这一目标的实现，低碳燃料标准法规于 2018 年和 2019 年先后出台了两次修正案。

#### 2.1.2 加州低碳燃料标准法规出台过程

随着煤电在加州的退出，交通部门成为加州最主要的温室气体排放源和大气污染源。目前，交通部门在加州碳排放总量占比超过 50%，氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放量的 80%，以及 PM 排放量的 90%。<sup>6</sup>推动交通部门的低碳化、清洁化成为加州实现应对气候变化目标最有力的抓手。

美国加州空气资源委员会（CARB）董事会 2009 年通过了全球首个低碳燃料标准法规（California Low Carbon Fuel Standard, CA-LCFS），目的是支持加州的《全球变暖解决方案法案》（2006），降低加州交通燃料整体的碳强度，拓宽低碳、可再生的交通燃料选择，

---

减少交通领域的气候影响。LCFS 法规在出台之初提出的目标是，到 2020 年将加州的交通燃料全生命周期碳强度（Carbon Intensity, CI）降低 10%（与 2010 年基准水平相比）。

LCFS 法规机制于 2011 年全面启动，在实施初期并不被看好，加之化石能源游说团体的强烈抵制，CI 下降目标几次被法院冻结。经历了两次重大修订（2011 年和 2018 年）、一次重新启用（2015 年）和多次司法挑战，LCFS 法规最终经受住了时间的考验，为节能减排和替代燃料多元化做出的贡献日益显现，成为利用市场化机制实现减排目标的成功范例。据统计，截至 2018 年，加州出售的交通燃料平均碳强度相比 2010 年下降了 5%，减少温室气体排放 3800 万吨。<sup>7</sup>

随着交通领域的清洁减排降碳任务成为重中之重，LCFS 法规的价值逐渐得到认可。2018 年，加州行政法办公室通过修正案，设定了更宏伟的目标——确保加州交通领域燃料全生命周期的碳强度（CI）到 2030 年相比 2010 年的基准水平下降 20%，折合每年下降 1.25%，以支持 2030 年温室气体排放比 1990 年减少 40% 和 2045 年碳中和目标。2018 年的 LCFS 修正案被称为 LCFS 的 2.0 版本，这次修订不但给生物燃料创造更大的增长空间，还首次给予氢能加注和电动汽车快充等基础设施“容量”积分激励，最新版法规已于 2020 年 7 月 1 日正式生效。

## 2.2 加州 LCFS 法规的运行机制

加州 LCFS 法规强制要求高碳化石燃料的生产者或进口商每年申报不同种类交通燃料的销售量和全生命周期碳强度，其他燃料生产者/经销商可选择性申报。CARB 作为主管部门，给交通燃料设定年度全生命周期碳强度基准值（Carbon Intensity Benchmarks），申报燃料的碳强度与同类燃料的年度基准值比较，会产生相应的积分或赤字——碳强度低于基准值的清洁燃料生产者获得相应的积分，碳强度超标的传统化石燃料生产者获得相应的负积分（以下称“赤字”）。

为了履行合规义务，持有赤字的申报主体需要向其他主体购买积分来抵消赤字，于是形成了 LCFS 积分交易市场。随着基准值逐年下降，化石燃料生产者的合规压力会越来越大，不断增长的合规成本激励传统油气企业逐渐转型，发展更清洁的替代性燃料。与此同时，积分交易实现了利益从化石燃料生产者及进口商向清洁燃料生产者及运营商的转移，变相补贴激励替代性燃料产业的发展（如图 2 所示）。

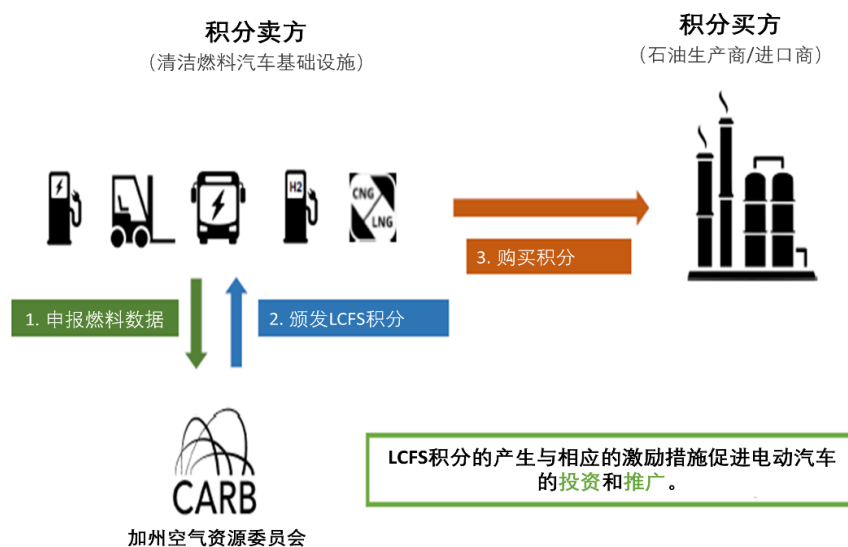


图 2 LCFS 市场运作原理

### 2.2.1 约束主体及燃料种类

LCFS 市场运行的基础和前提是建立完善的数据申报和管理系统 (LRT-CBTS)，各市场主体或强制或主动地申报交通燃料的种类、销售量和全生命周期碳强度。CARB 在此基础上核算平均碳强度、预测各产品线的发展情景、设定基准参数、监管市场交易，激励交通燃料持续低碳化。



## 专题一

### 1. LCFS 适用的燃料种类

LCFS 法规适用的交通燃料包括：汽柴油、CNG、LNG、L-CNG、电能、氢能、混合/纯生物柴油、乙醇占比超 10% 的混合燃料、变性燃料乙醇、替代性航空燃料、丙烷等。

其中，高碳化石燃料的生产者/经销商必须在 LCFS 数据管理系统开设账户，定期申报其出售燃料的种类、销售量和全生命周期碳强度。电能、生物 CNG、生物 LNG、生物 L-CNG、替代性航空燃料和可再生丙烷等一些新兴低碳替代性燃料（英文称“Opt-in fuels”）的生产者及运营商则可以选择性加入 LCFS 系统，自愿申报全生命周期碳足迹，获取积分。

### 2. LCFS 标准豁免燃料及不适用的情况

- 符合以下条件的替代型燃料：
  - 非生物质基的燃料
  - 在加州境内供应但总量低于 4.2 亿 MJ/年
- 常规的航空煤油及航空汽油
- 用于及支撑军用车使用的产生赤字的燃料
- 在州际机动车上使用的燃料
- 在远洋轮船上使用的燃料
- 在一个加注站年吞吐量不超过 15 万加仑汽油当量的产生积分的化石 CNG 或丙烷（豁免截止日期分别为 2021 年和 2024 年）
- 用于 2020 年 1 月 1 日前购买的校车上的产生赤字的化石丙烷和 CNG

### 3. LCFS 法规约束主体（Regulated Entity）

LCFS 政策体系中涉及到的主体较为复杂，具体见图 4。这里重点要讨论的是指有强制性合规要求的化石燃料相关主体。根据 CARB 的说明，LCFS 的约束主体是指在该地区（加州）进行化石燃料精炼生产或进口及复混化石燃料的主体（经销商），而非独立经营的油气加注站。

根据 CARB 公布的 2019 年度 LCFS 积分合规情况，加州地区共有 374 家企业进行 LCFS 系统申报，其中 59 家企业主体产生了 LCFS 赤字。

## 2.2.2 积分的产生

在 LCFS 市场中，参与主体通过交易积分实现履约与获利。1 个 LCFS 积分代表 1 吨二氧化碳当量的减排量。产生积分的方式主要有以下三种：

### A. 基于燃料路径生成积分

基于燃料路径产生 LCFS 积分的过程如图 3 所示。LCFS 积分根据碳强度（CI）值、车用燃料组合的能源效率与能源消费量参数进行计算，积分以季度为单位进行上报，经审核后，最终核算全年度的积分值和 CI 值。

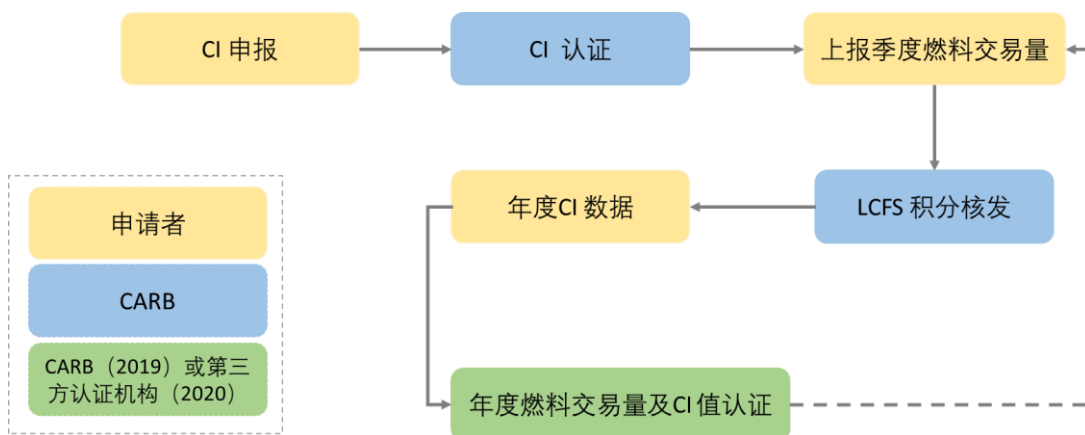


图 3 基于燃料路径的 LCFS 积分获得过程

LCFS 法规给传统汽、柴油，航空燃料及其替代性燃料分别设定了相应的**碳强度基准值**，基准值从 2011 年到 2030 年逐年下降。表 2 展示了各种燃料的年度碳强度基准值，从 2019 年到 2030 年下降了 10%-15%。

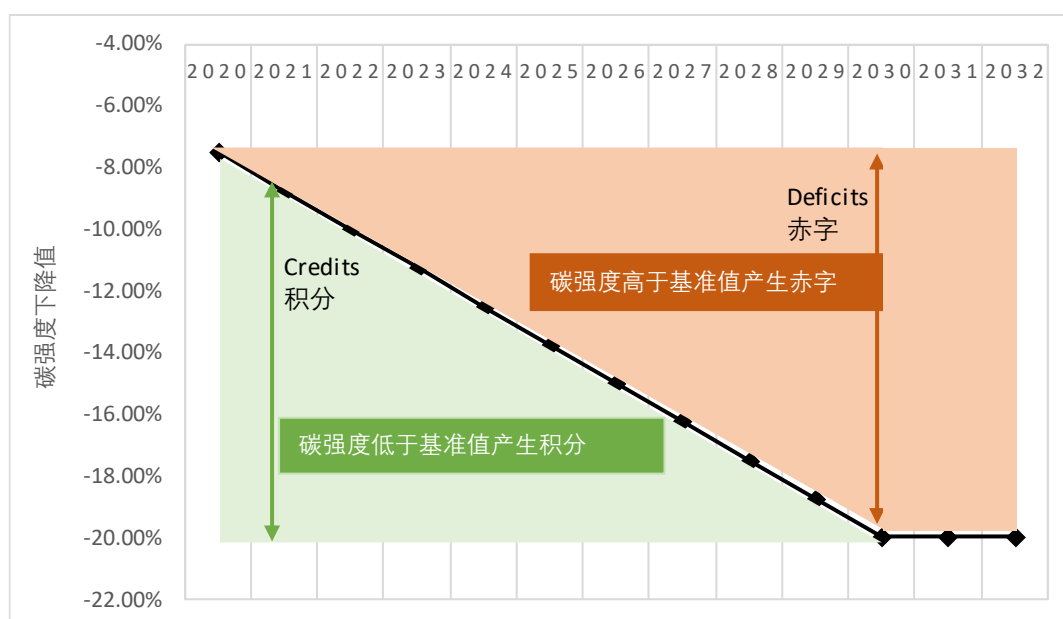
表 2 汽油、柴油、航空燃料及其替代燃料的碳强度基准值（2019-2030 年）

（单位：gCO<sub>2</sub>e/MJ）

年份	汽油及其替代燃料的碳强度基准值	柴油及其替代燃料的碳强度基准值	航空燃料及其替代燃料的碳强度基准值
2019	93.23	94.17	89.37
2020	91.98	92.92	89.37
2021	90.74	91.66	89.37
2022	89.50	90.41	89.37
2023	88.25	89.15	89.15
2024	87.01	87.89	87.89
2025	85.77	86.64	86.64
2026	84.52	85.38	85.38
2027	83.28	84.13	84.13
2028	82.04	82.87	82.87
2029	80.80	81.62	81.62
2030-	79.55	80.36	80.36

数据来源：LCFS 法规

申报的碳强度低于基准值则产生积分，高于基准值产生赤字（如图 4 所示）。市场主体需要先在 LRT-CBTS 系统上进行燃料路径申报，利用最新的 OPGEE 和 CA-GREET 模型对申报燃料的碳强度进行测算，经 CARB 批准后即可生成 LCFS 积分或赤字。



数据来源：CARB

图 4 LCFS 碳排放对标值（2019-2030）

申报燃料的实际碳排放与产生同等热值的基准碳排放之差为积分值。积分的具体计算方法如下：

$$\text{积分（或赤字）} = (\text{年度基准碳强度} - \text{申报燃料碳强度}) * \text{申报燃料总量}$$

其中，燃料的申报碳强度值主要受到如下因素的影响：

- 1) 生产燃料所用原料；
- 2) 燃料和原料的生产工艺；
- 3) 原料和最终燃料产品的产区；
- 4) 原料和燃料产品的运输方式和每种方式的运输距离；
- 5) 原料和燃料产品生产过程中消耗的热能和电能（包括上游能源消耗）。

## 专题二：LCFS 年度碳强度基准值的设定

LCFS 法规的核心是对化石燃料及其替代燃料设定碳强度（CI）的年度基准值，即 benchmark，不同燃料种类的碳强度值均以该值作为参考基准。以加州为例，某一年的交通燃料实际碳强度是指以所有用于交通领域的燃料池（fuel pool）为基准，使用 1MJ 燃料所排放的温室气体总量，单位为 gCO<sub>2e</sub>/MJ，其中，在核算温室气体排放量时采用生命周期（LCA）计算方式，即包括各类燃料从生产、运输到使用的全过程温室气体排放，各类燃料 LCA 温室气体排放基于 GREET 模型的本地化版本 CA-GREET 核算。

LCFS 法规最新的目标是要求到 2030 年，加州交通燃料碳强度在 2010 年基础上下降 20%。以 2010 年为基准，首先分析该年度加州交通燃料池的组成和实际碳强度，然后预测相应时间节点内包括生物燃料、电能、氢能等低碳燃料的供给和使用情况并设定不同情景，这其中需要充分考虑所有相关产业的发展和资源的可及性，通过模型分析上述不同情景下的燃料池碳强度。决策部门根据不同情景下的结果，选择较为合适的碳强度基准值。LCFS 碳强度基准值设定的原则是，既要保证 LCFS 目标实现成本不会间接对消费者造成过大负担，也要保证 LCFS 法规能够形成对低碳燃料发展的鼓励。

咨询公司 Cerulogy 对 LCFS 法规 2030 年目标进行了情景分析发现，在温和情景下，到 2030 年碳强度可较 2010 年下降 21%，在高效能情景下，则可下降 26%（Cerulogy, 2018. California's Clean Fuel Future: Update.）。

在 LCFS 法规 2.0 中，要求每种路径用于计算积分/赤字值的燃料申报碳强度值都需经官方核证，主要有 3 类：

### 1. 查表燃料路径（Lookup Table Pathway）

这是最简单的路径方式，可使用查表路径的燃料品类生产过程相对标准化，其碳强度可以直接查表获得。其中，几种标准燃料品类的碳强度值不会随生产商、经销商变化，可使用平均参数在 CA-GREET3.0 模型中计算得出，也不需要替代燃料门户（AFP）上进行燃料路径申请，这几种燃料品类包括：加州氧化混调型精制汽油（CARBOB）、加州超低硫柴油（ULSD）、压缩天然气（CNG）、丙烷和电能（加州电网平均碳强度值）。

还有几种燃料品类的碳强度值也可查表获得，但参与主体仍需在 AFP 上进行注册申请燃料路径，包括：零碳电能、用于给 EV 智能充电和智能电解制氢的电能、北美化石甲烷和生物甲烷重整制的氢气、加州平均碳强度电能和零碳电能电解制的氢气。<sup>8</sup>

### 2. 第 1 层级路径(Tier 1 Pathway)

第 1 层级路径适用于绝大多数的低碳燃料，CARB 对第 1 层级路径下燃料品类拥有

比较丰富的核算与核证经验。其碳强度值有相对标准化的核算方法，通过一个简化的 CI 计算器来确定 CI 值，但受产地相关参数影响而变化，需在简化 CI 计算器中填入燃料生产的月度运营数据，和 CA-GREET 3.0 模型中的标准排放因子相结合进行计算。第 1 层级路径的燃料品类包括：淀粉和纤维乙醇、蔗糖提炼乙醇、生物柴油、可再生柴油、北美天然气制成的 LNG 和 L-CNG 以及特定生产条件下的生物甲烷等。<sup>9</sup>

### 3. 第 2 层级路径(Tier 2 Pathway)

第 2 层级路径适用于创新性或下一代燃料，CARB 对第 2 层级路径下燃料品类进行核算与核证的经验相对有限，其中很多燃料品类尚未实现大范围的商业化生产，还有一些品类属于第 1 层级路径但采用了创新性生产工艺（包括碳捕捉与隔离技术）。因此，第 2 层级路径下的燃料品类需要碳强度值的一些计算方法和参数需要另行申请与核证，具体计算则使用 CA-GREET 3.0 模型。

## B. 基于减排项目获得积分

减排项目包括对使用创新工艺生产原油、对化工工艺和设施采取的减排措施，以及碳捕捉与封存(CCS)等项目。项目运营者基于这类项目产生的温室气体减排量获得相应积分。

其中，值得一提的是碳捕捉与封存（CCS）项目。凡是在燃料生产及加工过程中捕捉二氧化碳或将二氧化碳封存隔离于地层<sup>①</sup>的项目方都可获得相应的 LCFS 积分，将捕捉到的二氧化碳再次用于燃料生产的项目除外。在 CARB 对加州 2045 实现碳中和的情景预测中，CCS 相关应用是保障交通燃料零碳排甚至负碳排的重要技术手段。<sup>10</sup>

## C. 基于零排放汽车（ZEV）基础设施容量获得积分

2018 年修正案新增规定，除了通过申报燃料路径产生积分，氢能加注设施和电动汽车快充设施还可基于未使用的加注容量获得积分。具体计算方法如下：

**ZEV 基础设施积分=（汽油的年度基准碳强度-氢能或电力的申报碳强度）\*（基础设施满负荷运行状态下的燃料消耗量-实际燃料消耗量）**

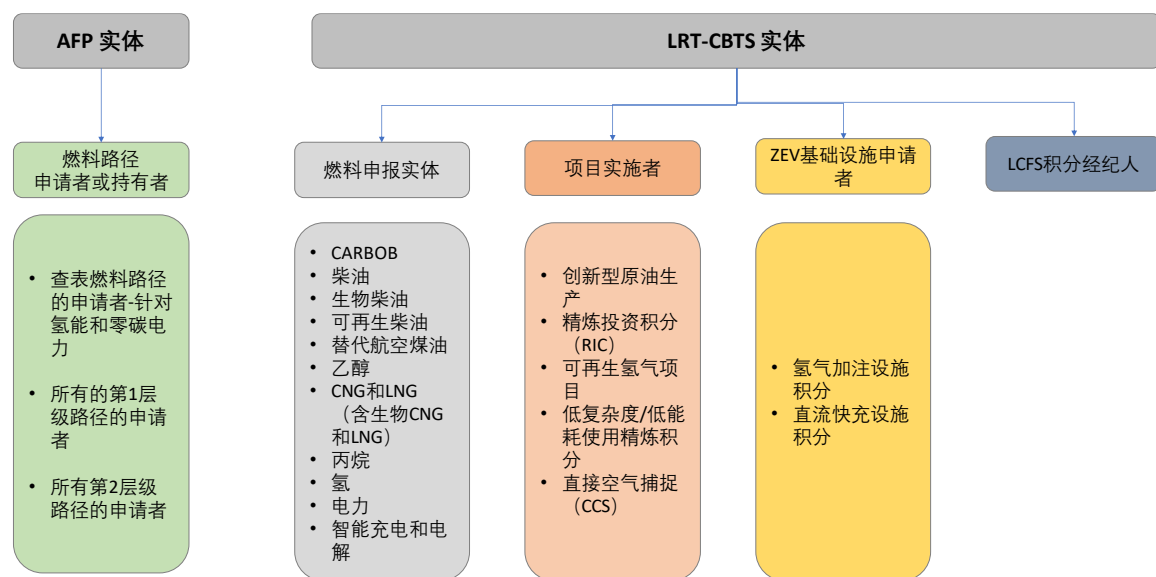
ZEV 容量积分总量不得高于上一季度赤字总量的 5%，其中氢能加注设施与直流快充设施各占 2.5%。

图 5 显示了 LCFS 数据管理体系的两个主要模块。替代燃料门户（AFP）实体适用于基于路径 1 和路径 2 的申报主体来获得碳强度值，这两种路径需要特定的站点数据。在 2019 年之前，所有基于查表路径的碳强度值是通过 LCFS 积分存储和交易系统(LRT-CBTS)获得的，2019 年起所有氢能查表路径申请主体和零碳电力查表路径申请主体也可通过 AFP 进行申报。

---

<sup>①</sup> 封存隔离的二氧化碳不必须来自燃料的生产加工过程。





注：AFP, Alternative Fuel Portal, 替代燃料门户  
LRT-CBTS, LCFS Banking and Transfer System, LCFS储存及转账系统

图 5 LCFS 政策体系中的主体划分

### 专题三：LCFS 法规中关于 ZEV 基础设施和 EV 消费者及运营方激励措施

#### 1. ZEV 基础设施容量积分

此处的 ZEV 基础设施包括氢气加注设施（HRI）和直流快充设施（FCI）。在 2018 年对 LCFS 标准的修订中，增加了 ZEV 基础设施**基于容量**的积分，而此前 ZEV 基础设施拥有者或运营者只能通过加注完成的氢气或电力来获得积分。这一措施制定的目的在与鼓励 ZEV 基础设施的快速布局，以解决“鸡和蛋”的难题。政策制定者认为，ZEV 应用缓慢的重要原因在于基础设施不足，而基础设施投建者也因为过低的 ZEV 保有量而不愿意投建。尽管如此，LCFS 标准中对申请获得 ZEV 基础设施容量积分的设施也进行了严格要求，包括必须对公众公开和提交每天的运营时长等。

截止到 2021 年 4 月 1 日，CARB 通过了 61 座 HRI 和 975 座 FCI 关于 ZEV 基础设施容量积分的申请。

#### 2. 对 EV 消费者及运营方的激励

2018 年 CARB 在 LCFS 标准的修订中还制定了清洁燃料奖励项目（Clean Fuel Reward Program），要求公共事业公司从 LCFS 积分交易所获的收益中按照比例抽出来资助该项目，并回馈给 EV 消费者及运营方，以鼓励 EV 的购买和租赁。在该项目中，对 EV 使用者的鼓励主要基于 EV 的电池容量，因为电池容量越大更容易高频和远距离使用 EV，从而使用更多的电力。不过，在 LCFS 标准中，并未指出是否会对 EV 消费者的实际使用情况进行回访或提出申报要求。

---

### 2.2.3 积分的合规与交易

需要说明的是，CARB 规定 LCFS 积分没有失效日期，也就是说，只要 LCFS 法规仍在实施，之前结余的所有积分都可用于交易和抵偿赤字。

- **合规义务**

LCFS 账户中赤字多于积分的主体需要先用已有积分抵扣赤字，再购买积分抵扣剩余的赤字以履行当年的合规义务。主管部门会在每年年底核算所有强制参与主体的合规义务，计算方法如下：

**合规义务**=当年的赤字余额+往年延续的赤字余额

- **积分交易**

为了履行合规义务，高碳化石燃料的生产商及经销商需要向新兴替代燃料的生产者或运营商购买积分。通常情况下，积分的买方和卖方通过签订协议的方式实现交易，并将协议录入 LRT-CBTS 账户。近几年的交易数据分析显示，越来越多的第三方机构开始参与到积分交易过程中。

市场规律以及过去的经验显示，积分供应量越充足，交易价格会越低；供应量越少，交易价格越高，但不会超过当年的价格上限。主管部门给积分交易设置了**价格上限**（Maximum Price），主要目的是减少交易价格过高致使消费者间接承受压力的风险。2016 年的 LCFS 积分价格上限为每个积分 200 美元，之后每年随通胀率调整。2020 年的价格上限调整为 217.9 美元。价格上限的设定需要在消费者利益与减碳目标之间寻求平衡——既不能过高，避免燃料价格飙升，伤害普通消费者的利益；也不能过低，影响企业投资研发创新性低碳燃料产品的积极性。

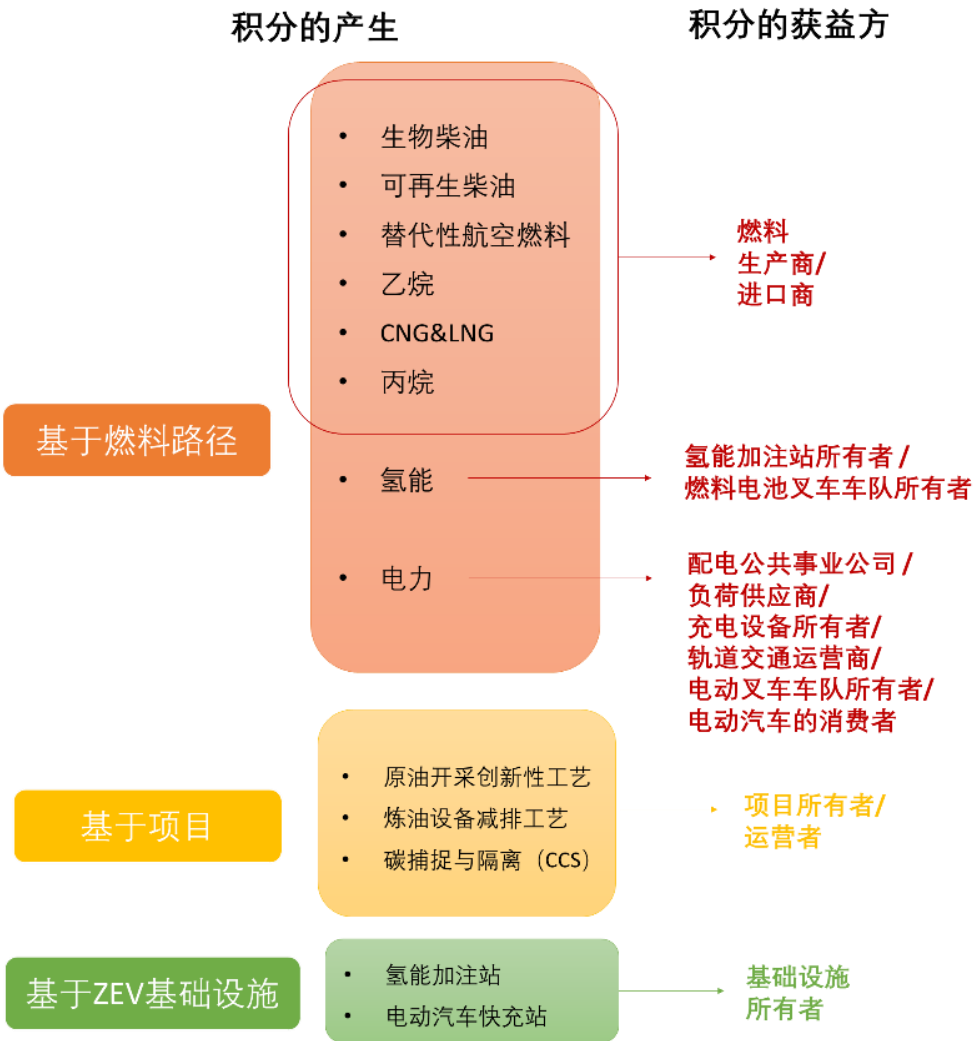
当强制申报主体 LCFS 账户中的积分不足以抵扣赤字导致合规出现困难时，他们可以在来年的**积分出清市场**（Credit Clearance Market, CCM）上购买积分。从 CCM 购买的积分只能用于履行前一年的合规义务，而不能用于交易获利。账户中尚有赤字的主体无权出售积分，但新兴替代燃料的生产者或运营商则可以在 CCM 上出售积分获利。主管部门根据当年的合规状况判断是否需要开启 CCM。如果当年合规情况良好，则来年不需要开启 CCM。

为了应对参与 CCM 交易积分数量不足、无法全部抵扣赤字的情况，2018 年修正案新增了一项规则：如果当年申报出售的积分总量不足以满足合约所需，主管部门会发行**预支积分**（Advanced Credits），补齐供需差额，保证充足的积分供应。这部分积分会按比例预支给那些有稳定基础积分收入的大型配电公共事业公司。预支积分只能在当年的 CCM 上以最高交易价格出售。这些大型公共事业公司需要在接下来 6 年的窗口期内，按一定比例的积分逐年偿还预支积分。

### 2.2.4 积分交易的受益主体

清洁替代燃料的生产商和基础设施的所有者通过出售积分获得收益。化石燃料生产商/进口商为了合规，需要购买积分来抵消赤字，从而实现了收益从化石燃料产业向低碳燃料产业的流转。

LCFS 积分的产生方式与相应的受益方说明如图 6 所示：



数据来源：iCET 根据 LCFS 法规整理

图 6 LCFS 积分的受益方

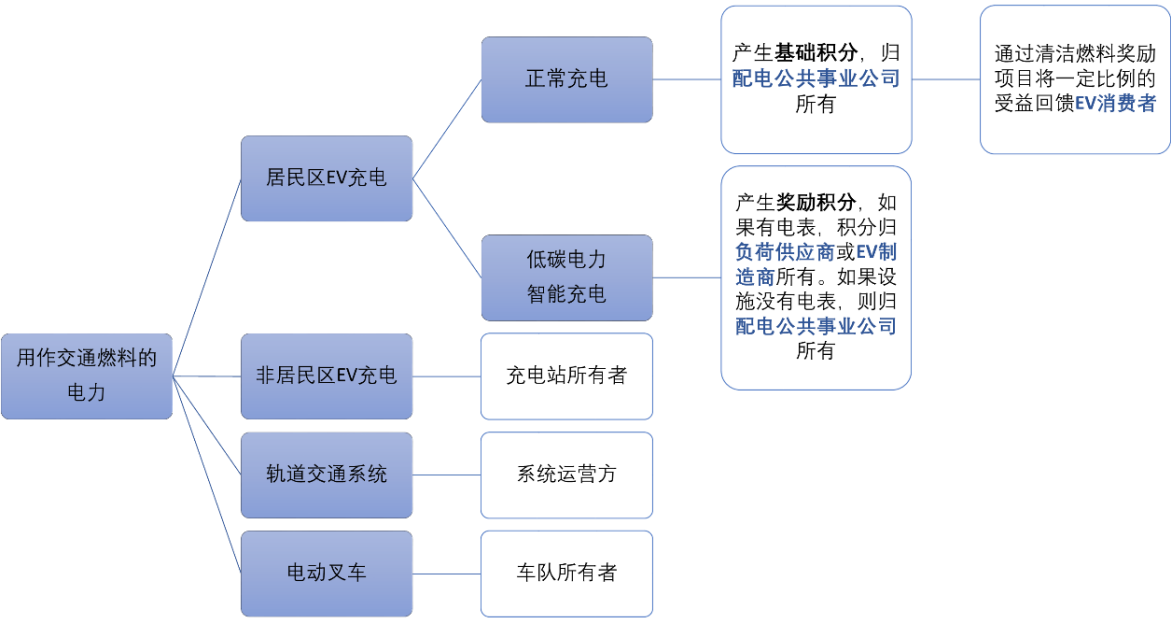
电力作为交通燃料的情景较多，积分产生方式与利益分配也较为复杂。其中，使用场景主要分为居民区电动汽车（EV）充电（私人充电桩）、非居民区电动汽车（EV）充电（公共及商用充电桩/充电站）、轨道交通系统用电及电动叉车充电。

在居民区电动汽车充电场景下，根据充电方式（普通充电或智能充电）和电力清洁度（普通电力或低碳电力）不同，又会分别产生基础积分 (Base credit) 和奖励积分

(Incremental Credit)，分别归属不同的参与主体。居民区 EV 充电产生的 LCFS 积分通常归当地的配电公共事业公司所有，公共事业公司需通过清洁燃料奖励项目将积分收益部分回馈给 EV 购买者及租赁者。

非居民区充电桩场景下，EV 充电产生的 LCFS 积分通常归充电桩/站的所有者或运营商，特别是很多电动营运车队通常自建充电设施，可以直接产生 LCFS 积分，交易积分所得收入基本能跟电费持平，实现运营成本接近于零。这大大激励了 EV 在营运车辆中的普及。

电力积分的生成路径和利益分配路径如图 7 所示：



数据来源：iCET 根据 2020 年 LCFS 法规整理

图 7 电力作为交通燃料的 LCFS 积分产生路径与利益分配

• 清洁燃料奖励项目（Clean Fuel Reward Program）

为了支持电动汽车的推广，2018 年法规修正案规定，公共事业公司获得居民电动汽车充电产生的基础积分，这部分收益的一定比例必须回馈给清洁燃料奖励项目（Clean Fuel Reward Program）。规模越大的公共事业公司回馈的比例越高，最高可达 67%。（如表 3 所示）

表 3 配电公共事业公司给清洁燃料奖励项目的回馈比例

配电公共事业公司分类	最小贡献比例 (2019-2022 年)	最小贡献比例 (2023 年-)
------------	-------------------------	---------------------

大型投资人所有公司	67%	67%
大型公有公司	35%	45%
中型公有与投资人所有公司	20%	25%
小型公有与投资人所有公司	0%	2%

数据来源： LCFS 法规

清洁燃料奖励项目专门用于补贴在加州购买或租赁的轻型电动汽车，奖励的额度基于电动汽车电池容量，容量越大，奖励的额度越高（如表 4 所示）。

表 4 清洁燃料奖励项目基于电池容量确定奖励比例

电池容量 (kWh)	最大奖励比例
$C < 5$	0%
$C = 5$	38.9%
$5 < C < 16$	$(38.9 + \frac{(C-5)}{11} * 61.1) \%$
$C \geq 16$	100%

例如，南加州爱迪生公共事业公司给予 2019 年 1 月 1 日之后购买或租赁的电动汽车最高可达 1000 美元的奖励，一辆电动汽车最多可申请三次补贴。<sup>11</sup>按照 LCFS 修正案中的计算方法，一辆电池容量 10kWh 的电动汽车最多可申请获得 2000 美元的奖金<sup>②</sup>。

## 2.2.5 违规处理

未能在合规周期内消除的赤字可判处每个赤字不超过 1000 美元的罚款。赤字余额会自动转结到下一年，产生赤字利息，且须在五年内清零。赤字利息是指从每年的 9 月 1 日起，对上一年度未消除的所有赤字给予每年 5% 的利息复算。强制参与主体若存在不按时、不完整、不准确提交申报材料的情况，也会受到相应的违规处罚。

连续两年未完成合规义务的企业需要向 CARB 提交合规计划书（Compliance Plan），详细汇报未来五年计划采取的合规措施。主管部门审查合格后方能生效。

合规计划书主要内容：

- 1) 企业实现未来五年 LCFS 积分盈余的企业战略和业务措施清单；

<sup>②</sup> 计算方法：奖励金额 = \$1000 \* (38.9 + (10 - 5) / 10 \* 61.1) % \* 3



- 
- 2) 企业未来五年 LCFS 积分收入的量化预测和不确定性分析；
  - 3) 企业未来五年 LCFS 积分短缺情况的量化预测和不确定性分析；
  - 4) 商业战略和业务措施的执行时间表；
  - 5) 量化预测所用的数据和计算方法；
  - 6) 相关政策的引用。

一年后企业还需要提交合规计划书的执行报告（Compliance Plan Implementation Report），对合规计划的执行情况做详细的汇报。

如果参与主体瞒报谎报燃料源、CI 值等信息以减少赤字或生成更多积分，一旦被发现，则会面临高额处罚。例如，CARB 执法处发现 BP 北美公司在某一季度的 LCFS 燃料交易报告中瞒报了燃料全生命周期中新增的天然气消费，从而导致其申报的 CI 值低于实际测量值。经协商，BP 北美公司需退役近 1912 个非法生成的 LCFS 积分（价值约 20 万美元），并支付了接近积分价值的现金罚款。<sup>12</sup>

## 2.3 加州 LCFS 的修订与发展

LCFS 法规经历了数次修订，主要调整内容见表 3，从中不难看出 LCFS 历次修订的逻辑，目的主要有三个：

### 第一，调整碳强度下降目标，以适应不断技术发展与市场变化

碳强度基准值的设定需要充分考虑政治与技术两方面的因素。政策制定者需要在减碳目标和消费者利益之间做出平衡——既要足够有政策野心，能够真正推动交通燃料去碳化进程，同时也要保证民生，避免普通消费者承受过大的压力。

为了做好平衡，CARB 和一些独立的第三方研究机构分别建立了分析模型，基于对产业增长率和资源可得性的判断，预测未来低碳燃料的供给量，目的是构建一系列情景，测试出政策目标的效用区间，以便选择更适合的碳强度基准值。例如，CARB 在 2018 年修订 LCFS 的过程中开发并同步发布了合规情景视觉化计算器<sup>13</sup>，这个工具考虑不同参数组合，例如：新能源汽车高/低渗透率、交通需求高/低增长，构建了一系列情景，并基于情景预测不同燃料路径的发展状况。CARB 还对外免费开放计算器的使用权，让广泛的利益相关方都能借助工具评估更新的目标对市场 and 自身经营活动产生的影响。

CARB 非常注重保持机制的灵活性，会定期进行 LCFS 合规情景分析，并随时调整基准值以应对积分严重过剩或短缺的情况。值得注意的是，对目标的调整应放眼中远期，要给市场和参与主体留出更多时间来响应，切不可轻易调整临近几年的目标，影响参与主体对政策的信心<sup>③</sup>。

---

<sup>③</sup> 主要观点来自笔者对加州大学戴维斯分校能源、环境与经济政策研究所副主任 Colin W. Murphy 的采访

---

事实证明，市场对政策的适应力良好，CARB 每次目标调整都是进一步加严碳强度下降目标，绝大多数市场主体都能找到应对策略，较好完成合规义务。

## 第二，增加积分生成路径，确保充足的积分供应

随着碳强度下降的目标逐渐加严，CARB 会通过修订将更多燃料种类和主体纳入 LCFS 市场，积极开辟新的积分生成路径。不断更新的情景分析会根据技术发展和市场变化对替代燃料产品及技术路线的假设和判断做出方向性的调整，成为新增积分路径的基础和依据。

修正案中的相应条款会针对燃料市场预判的更新做出相应调整，以适应新技术的发展需求。具体案例包括：2011 年 CARB 预测巴西蔗糖乙醇会成为主要的替代燃料，于是将州外燃料生产商纳入 opt-in 范畴，然而巴西蔗糖进入加州市场的速率不及预期，因此 2015 年和 2018 年的预测调整为主要依赖玉米乙醇；同样，2015 年预测可再生天然气消费将快速上涨，于是将可再生天然气纳入 opt-in 燃料类型；CARB 从 2015 年的预测开始认可电力和氢能路线的重要性，这一判断延续至今，2018 年修正案依据此判断给电力开辟了很多创新性的积分生成路径。历次修订的合规情景及主要替代燃料的预测变化可参见图 8-10。

## 第三，优化监管流程，提升便利性与灵活性；

CARB 在法规修订中通过简化审批流程的方式鼓励更多替代燃料生产者参与并生成积分，维持市场稳定健康发展。不仅如此，CARB 还通过修正案不断完善燃料 CI 核算方法与第三方核证机制，使 LRT-CBTS 系统能更准确地反映燃料实际的碳排情况；通过设立有价格上限的积分出清市场，并不断加强对积分交易情况的汇报与监管，确保市场能更精准地反映供需状况，以便 CARB 能及时做出政策调整。

综上所述，通过分析加州 LCFS 法规历次修订，特别是 CARB 基于不完全信息对合规情景做出预判并不断调整，我们能更深入地了解 LCFS 法规机制设计过程中的思考与取舍，收获很多经验。这些经验表明，以三到四年为间隔对法规进行修订是重要且必要的，不但能提升法规效力，对受控主体的顾虑做出及时回应，还能更好适应技术和产业发展的变化，提升整体的系统表现。

表 5 LCFS 法规的主要修订内容

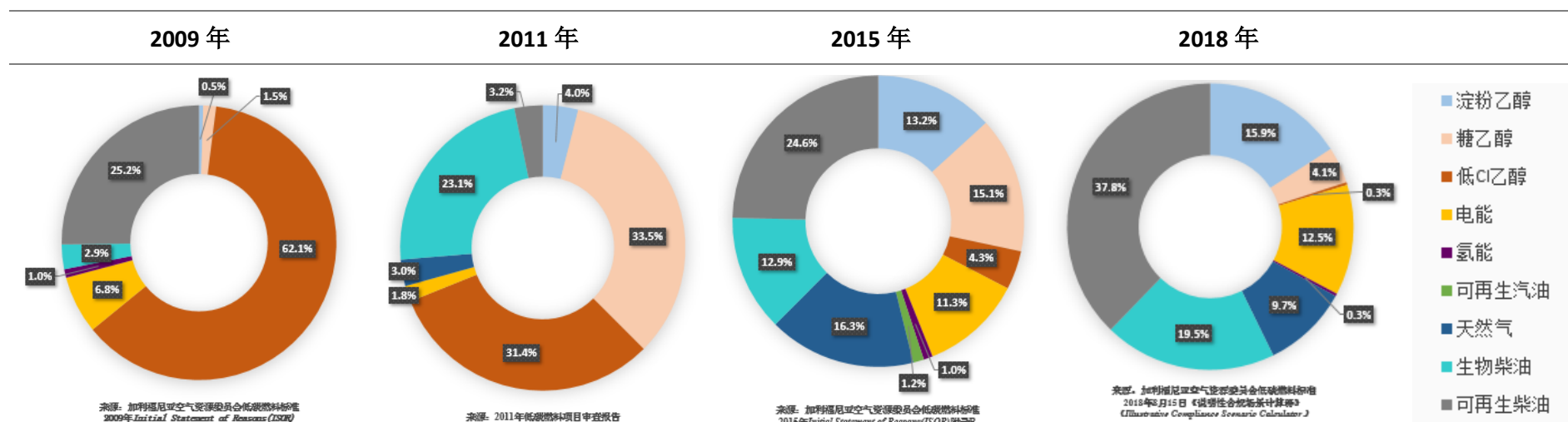
	2009 年初版	2011 年修正案	2015 年重新启动	2018 年修正案
<b>CI 目标设定</b>	到 2020 年比 2010 年基准水平下降 10%	与 2009 年一致	由于生物燃料带来 NO <sub>x</sub> 排放增长，法院判决 2014-2015 年 LCFS 目标冻结在 2013 年水平，直到 2015 年 CARB 出台柴油替代燃料法规 (AFD) 将 NO <sub>x</sub> 纳入环境分析，才重新启动 <sup>⑤</sup> 。	延续到 2030 年，比 2010 年基准水平下降 20%； 2019、2020 年 CI 下降目标分别从 7.5% 和 10% 降到 6.25% 和 7.5%。
<b>对 2020 年合规技术路线的重要假设与判断</b>	构建 4 个汽油替代情景，3 个柴油替代情景，重要判断： -低 CI 纤维素乙醇是主要的汽油替代； -可再生柴油是主要的柴油替代； -天然气汽车到 2020 年达到 2.5 万辆。 <sup>14</sup>	构建 11 个汽油替代情景，5 个柴油替代情景，重要判断： -2009 年情景高估了对未来低 CI 乙醇技术路线的依赖程度； -巴西蔗糖乙醇将迅速在加州市场占据一席之地； -灵活燃料车辆 (FFV) 使用乙醇的比例将达 50-80%，E15 <sup>⑥</sup> 将于 2016 年合法进入市场； -降低了对可再生柴油替代比率的预期； -降低了 EV 和天然气汽车渗透率的预期。 <sup>15</sup>	-可再生汽油将呈指数级增长，到 2025 年达到 2.5 亿加仑； -E85 的使用量比 2011 年情景显著下降； -首次强调电力和氢能的替代作用； -可再生天然气到 2020 年比 2014 年增长四倍，常规天然气消费下降。 <sup>16</sup>	-EV 渗透率与先进清洁卡车项目的要求保持一致； -电力积分近期会显著增长； -生物柴油和可再生柴油将到 2020 年占据替代燃料的一半； -巴西蔗糖乙醇没有如预想的速度占领市场，淀粉乙醇将成为汽油替代的主要路线； -CI 值为负的可再生天然气将全面替代常规天然气。 <sup>17</sup>

<sup>⑤</sup> 2017 年，法院再次判决 CARB 未能有效解决生物柴油带来的 NO<sub>x</sub> 排放问题，将 2018 年 CI 下降指标再次冻结在 2017 年水平。

<sup>⑥</sup> E15 是指乙醇比例达 15% 的调配汽油

<b>规范燃料种类与主体</b>	选择性加入燃料（Opt-in fuel） 只有电力、氢能和 CNG	选择性加入主体囊括加州境外的生物燃料生产者	选择性加入燃料增加了可再生天然气	选择性加入燃料增加了可再生航空燃料和可再生丙烷，取消了化石 CNG、化石氢能（灰氢）； 取消了对 LPG 的豁免。
<b>核算方法</b>	CA-GREET 模型，只能对生物燃料的间接土地使用影响进行粗略估计	与 2009 年一致	CA-GREET2.0 模型，要求对所有燃料的 CI 值重新核证，使用更新的 GTAP 模型对间接土地使用影响进行评估	与 2015 年一致
<b>第三方核证</b>	非强制	非强制	非强制	强制要求
<b>积分生成路径与合规义务管理</b>	-	简化新增燃料路径的审批流程，取消了之前的正式法规修订流程，使许多新燃料路径得以获批	进一步明确了燃料生产者与下游供应链在交易中的合规义务转移	-更新了减排项目路径； -增加了 ZEV 加注基础设施“容量”路径； -更新了电能条款，增加了可以生成积分的车型（如货物装卸设备），增加了对智能充电等项目的奖励积分，还降低了电网的 CI 值； -增加了对公共事业公司回馈 ZEV 消费者的要求（清洁燃料奖励项目）。
<b>CCM</b>	尚未设立	尚未设立	正式设立	-同时发放替代性燃料的积分以提升市场公平； -加快积分交易报告速度，加强对市场的跟踪

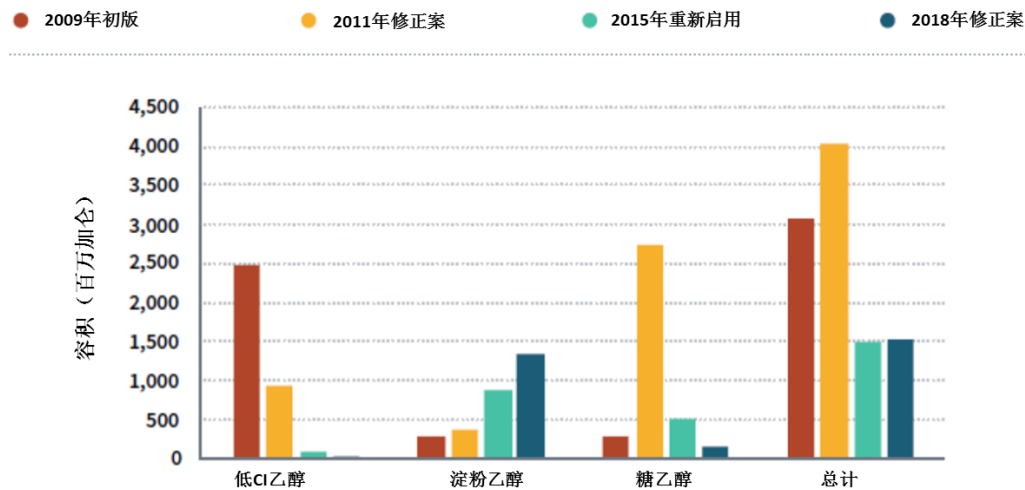
数据来源：iCET 根据 CARB 公开信息总结，Fuel Institute, Market Reactions to Low Carbon Fuel Standard Programs. February 2019.



数据来源: 加州低碳燃料标准, CARB, (2009, 2011, 2015, 2018)

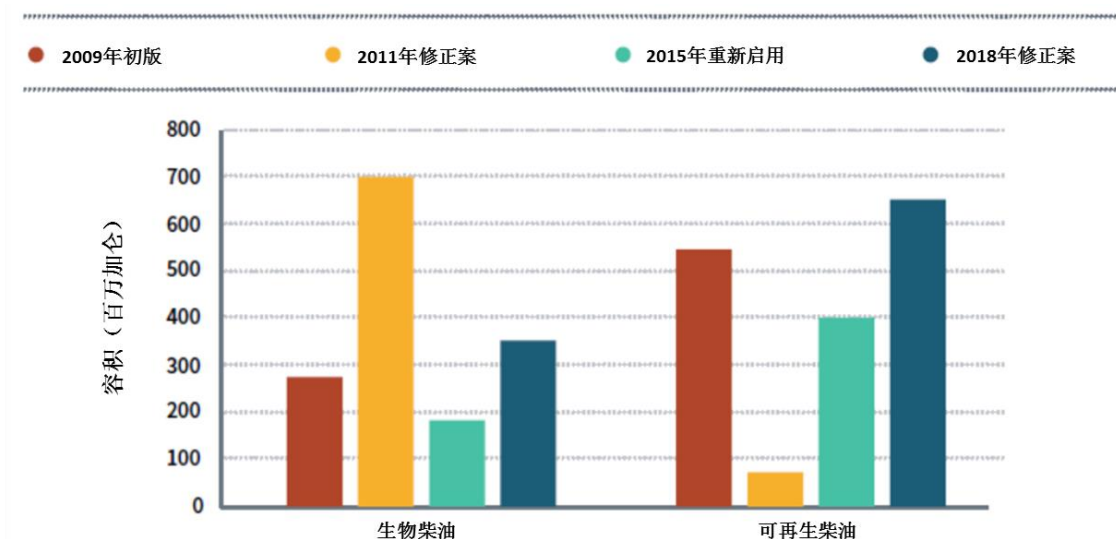
图 8 LCFS 历次修订的合规情景





资料来源：Fuel Institute, Market Reactions to Low Carbon Fuel Standard Programs. February 2019.  
iCET 翻译

图 9 CARB 对 LCFS 历次合规预测中乙醇燃料体量的变化



资料来源：Fuel Institute, Market Reactions to Low Carbon Fuel Standard Programs. February 2019.  
iCET 翻译

图 10 CARB 对 LCFS 历次合规预测中生物柴油和可再生柴油体量的变化

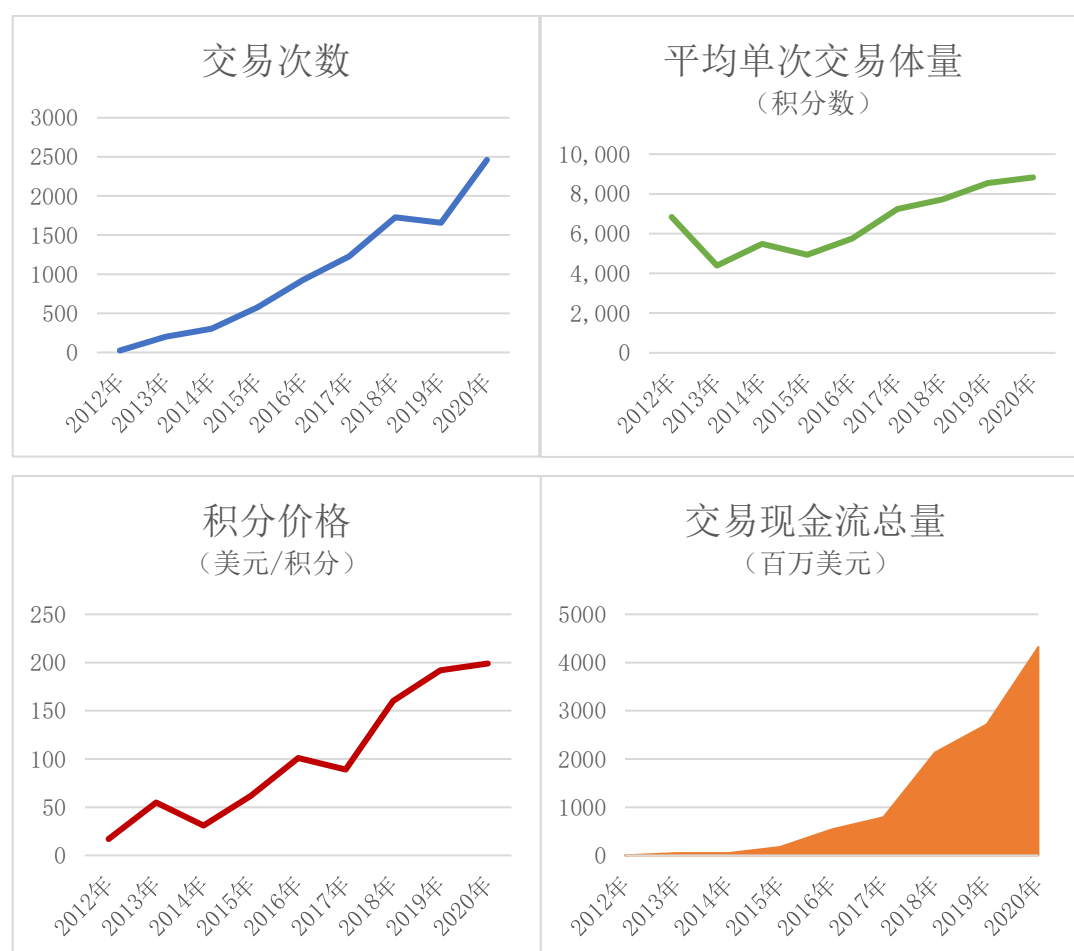
## 2.4 加州 LCFS 的实施效果评估

### 2.4.1 LCFS 积分交易机制的运行效果

目前，从交易体量和参与主体数量来看，LCFS 积分交易市场的活跃度呈现逐渐上升的趋势，而且从 2019-2020 年的积分交易价格与价格上限逐渐接近，但仍有波动，说明交易机制运行正常，价格上限的有效性良好。

#### ◆ LCFS 积分交易体量

通过分析 LCFS 积分的交易活动，我们发现交易活跃程度呈逐年增加的趋势。交易次数、单次交易体量及积分价格都呈现波动上升的趋势，因此 LCFS 积分交易现金流总量从 2012 年不足 3 百万美元发展到 2020 年超 43 亿美元的体量，增长超过 1500 倍。LCFS 积分的交易体量也从 2012 年 16.4 万积分增长到 2020 年的 2172.8 万积分（图 11）。



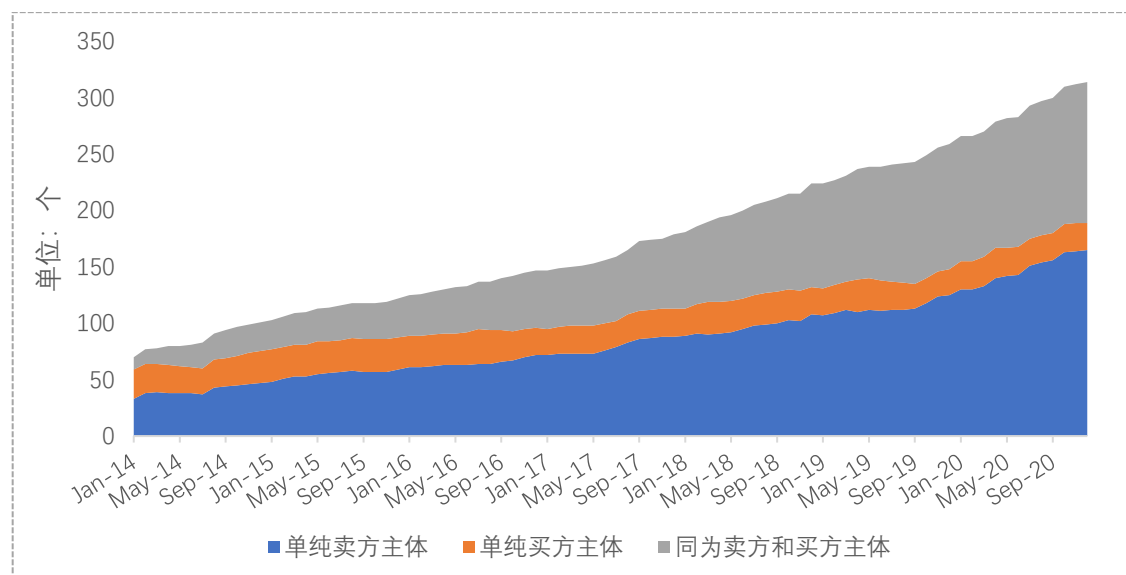
数据来源：iCET 根据 CARB 公开的 LCFS 积分交易活动月度报告整理

图 11 LCFS 积分交易体量（2012-2020）

#### ◆ LCFS 积分交易主体数量

如图 12 所示，LCFS 积分的单纯买方数量基本稳定在 25-30 家化石燃料生产商和进口商。单纯卖方数量 2014 年只有 33 家，2020 年 12 月则增加至 165 家，增长了 4 倍。这说明随着 LCFS 提供的积分生成路径增多，参与积分交易的替代燃料生产商也越来越

多。与此同时，既是买方又是卖方的主体数量也有非常显著的增加，这主要是由于第三方经纪商越来越多地参与到了 LCFS 的积分交易中。实际上，第三方参与的增加恰好说明了 LCFS 积分市场运营良好且具有不错的增长空间和潜力，是更趋于市场化机制的一个佐证。



数据来源：iCET 根据 CARB 公开的 LCFS 积分交易活动月度报告整理

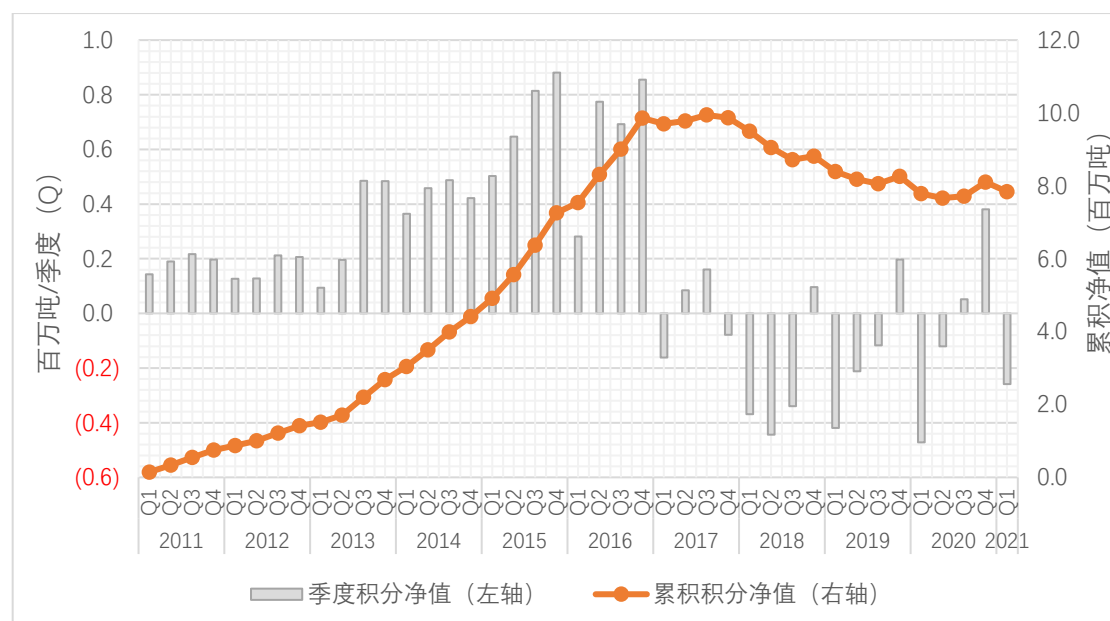
图 12 LCFS 积分交易主体的数量变化（2014-2020 年）

## 2.4.2 LCFS 积分储备与价格的变化及影响

### ◆ LCFS 积分储备的变化

从 2011 年正式启动交易以来，LCFS 积分储备总体呈现先上升后下降的趋势，2017 年达到峰值 994 万吨二氧化碳当量，到 2020 年下降到 810 万吨左右。积分储备的变化主要受到各年度的 CI 下降目标、积分生成路径及总量的影响（如图 13 所示）。

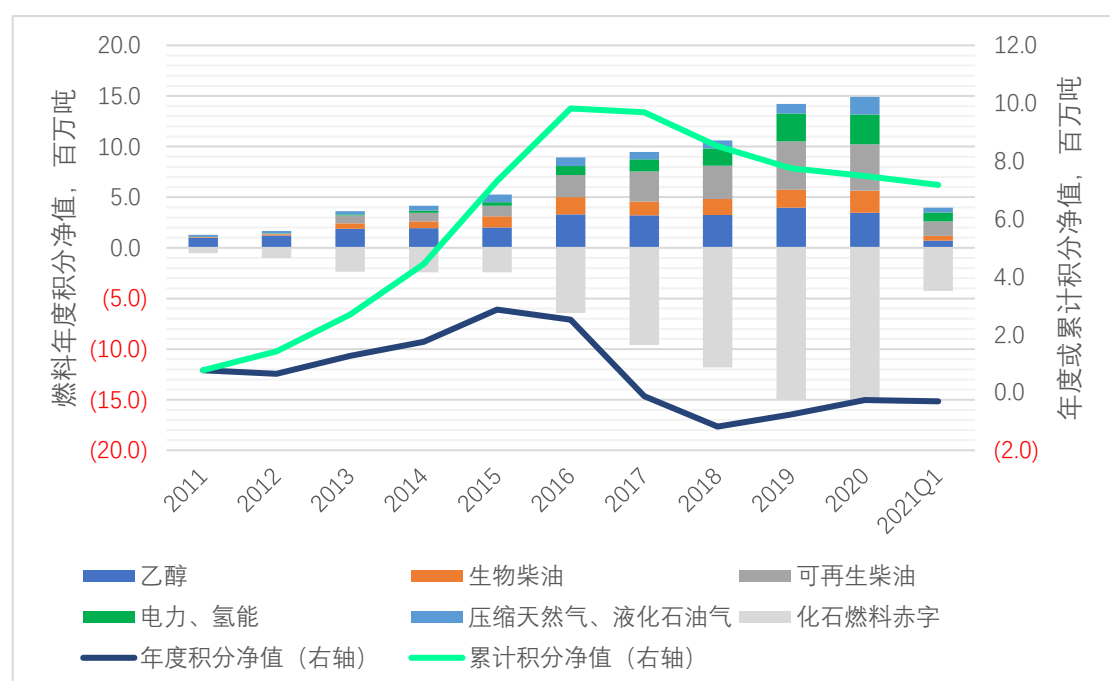
LCFS 市场初期，CI 基准值较高，生成的积分大于赤字，年度 LCFS 积分净值呈正值，逐年上升，特别是 2013 年和 2014 年 CI 下降目标被法院冻结，年度积分净值也呈现上涨趋势。然而 2015 年 LCFS 重新启动，CI 下降目标逐渐收紧，造成年度积分净值达峰，然后迅速下降，2017 年度 LCFS 积分净值由正转负，导致积分储备达峰后不断下降。



数据来源：CARB

图 13 LCFS 积分季度净值与积分储备的变化（2011-2021Q1）

从 LCFS 积分储备的来源来看，乙醇是市场初期最主要的替代燃料；可再生柴油的角色变得越来越重要，已成为体量最大的替代燃料；电力和氢能的替代作用近两年才逐渐突显出来（如图 14 所示）。

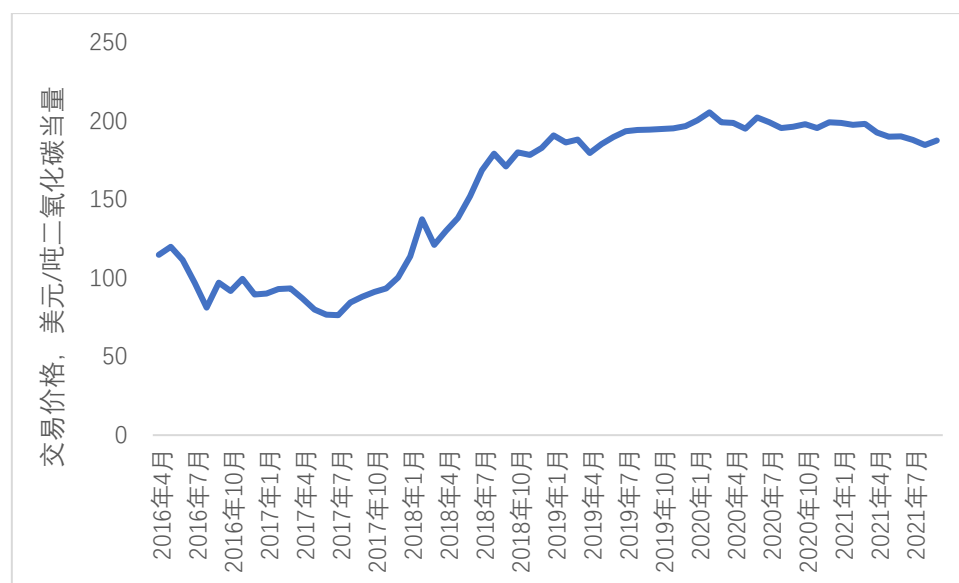


数据来源：CARB

图 14 不同燃料生成的积分或赤字净值（2011-2021Q1）

积分价格受到积分储备的影响较大：2016 和 2017 年的交易价格基本在 100 美元上下波动，远低于价格上限；2018 年前三个季度交易价格陡然上涨，之后逐渐接近最高交

易价格，2019 年以来交易价格基本维持在 180-200 美元上下，表明 LCFS 积分市场运行更加趋于平稳（如图 15 所示）。

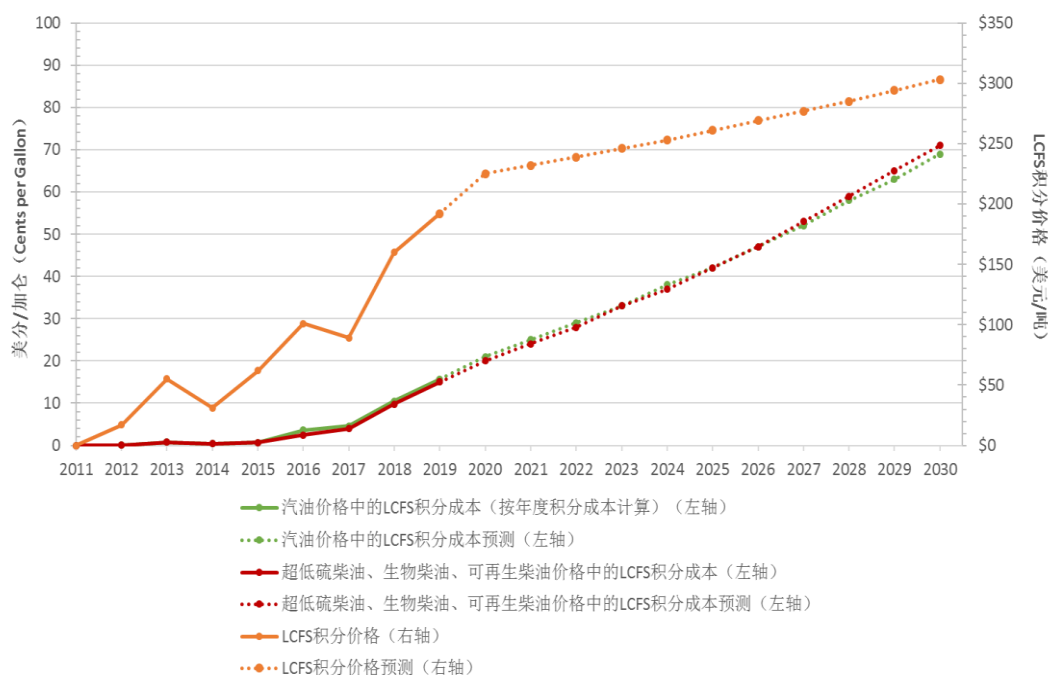


数据来源：加州空气资源委员会（CARB）

图 15 LCFS 积分的月度加权平均价格（2016-2021）

#### ♦ 积分价格对燃料价格的影响

传统化石燃料生产商/进口商为 LCFS 积分买单，积分价格的增减也会传递到消费端，进而影响燃料价格，并最终引导消费者的选择。由于 LCFS 机制设计，最终消费者承担的 LCFS 成本是积分价格和 CI 下降目标共同作用的结果，这也就意味着即便 LCFS 积分价格保持不变，消费者承担的成本仍会持续上升。如图 16 所示，除了 CI 目标被冻结的 2013-14 年，汽柴油中的 LCFS 成本基本上呈持续上升趋势，到 2017 年达到每加仑约 4.6 美分，约占 2017 年汽柴油均价的 1.5%。根据预测，这一成本仍将持续上升，到 2030 年，汽油中的 LCFS 成本可高达每加仑 69 美分，柴油中的 LCFS 成本也可达到每加仑 71 美分。



注：假定汽油池中混有 10%的乙醇，柴油池中混有 13%的生物或可再生柴油。  
 数据来源：Fuel Institute, Market Reactions to Low Carbon Fuel Standard Programs. February 2019.  
 iCET 整理制作

图 16 加州汽、柴油价格中的 LCFS 积分成本历史数据（2011-17）与预测（2020-30）

同时也需要考虑到的是，当前加州常规的零售汽油中混有的乙醇比例约为 10%，零售柴油中的生物或可再生柴油比例约为 12-13%。然而，随着燃油中混有的低碳燃料比重越来越高，每加仑燃料中为 LCFS 机制付费的燃料比重会越来越少，被 LCFS 机制补贴支持的部分会越来越高。总体来讲，LCFS 机制对燃油价格产生的两种效应会在一定程度上相互抵消，对消费者的压力相对有限，而对传统化石燃料的生产者则会持续加重<sup>⑦</sup>。

#### ◆ 对新兴低碳技术的支持效果

相比碳排放交易和碳税等机制，LCFS 对创新技术和示范项目的支持力度格外显著。主要因为碳价会影响各个行业，碳交易机制的目的是激励边际成本最低的减排行动。实践经验表明，边际成本最低的减排项目主要发生在电力行业（清洁/可再生电力）和建筑能效领域。相比之下，交通燃料领域的减排，除了提升燃油经济性措施，其他手段普遍依赖技术创新，减排成本远高于最低边际成本。如果单纯依赖碳价激励，未来十年内可能都无法触及到实现减碳目标所必须改变的关键技术领域。交通领域的低碳化恰恰需要电动汽车、先进替代燃料等关键技术的创新和升级，需要巨额投资实现规模化以降低成本。通常情况下，乘用车的迭代以 10-20 年为周期，电网的规划和升级以 5-10 年为周期，大规模生物燃料项目从规划到投产需要 3-4 年。LCFS 可以很好地弥补碳交易机制，

<sup>⑦</sup> 主要观点来自笔者对加州大学戴维斯分校能源、环境与经济政策研究所副主任 Colin W. Murphy 的采访。



用高价积分激励燃料生产商投资新兴技术示范项目。

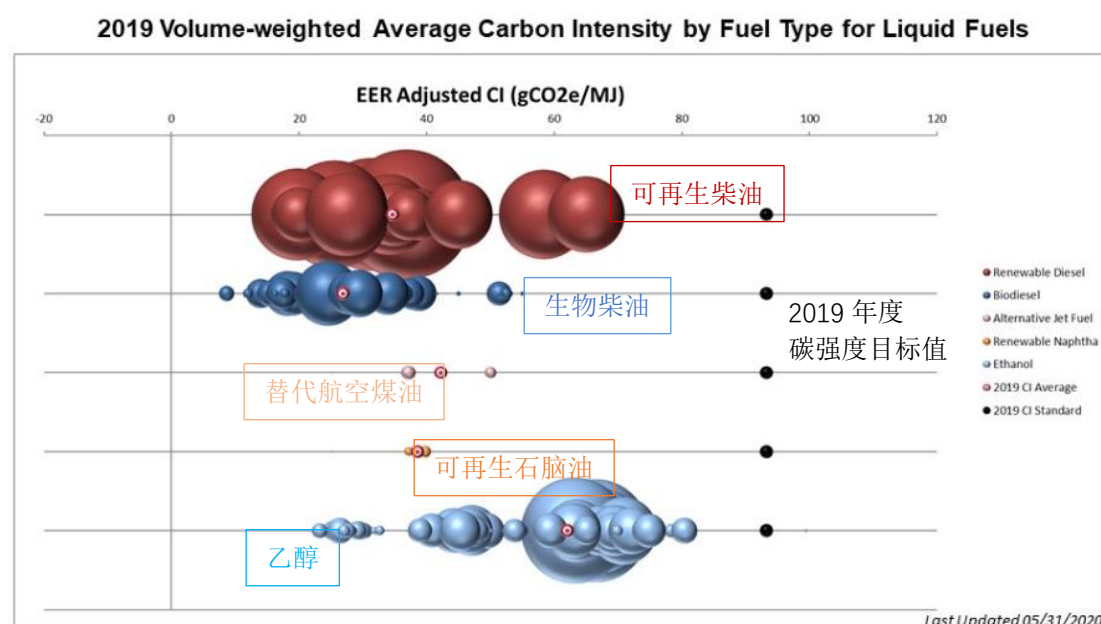
LCFS2.0 增加了减排项目和基础设施容量两条积分产生路径,允许碳捕捉与封存(CCS)项目和石油生产加工过程中的减碳项目通过减排量获得积分,特别是允许电动汽车快充站和加氢站通过“容量”获得积分。这些明显的倾向性遭到了其他替代燃料生产者的反对,他们认为 CARB 的做法是“把政府的手放在了天平的一端”,违背了 LCFS“中立地利用市场手段发现最低成本减排措施”的初衷和原则。CARB 的相关负责人委婉地承认了 LCFS 2.0 对交通电动化的倾向性,并优先支持零尾气排放技术。

LCFS 2.0 的中立性虽然在一定程度上被削弱,但却有效提升了相关减排项目和基础设施项目的融资能力。随着 LCFS 目标延续到 2030 年以及 LCFS 积分价格的不断上涨,投资者对 LCFS 积分的未来价格持乐观态度,对积分变现和项目盈利性也更有信心。特别是原本不具备融资条件的 CCS 项目,通过减排量兑换的 LCFS 积分,叠加联邦 45Q 税收积分的收益后,便可获得投资者的青睐。<sup>18</sup>

### 2.4.3 LCFS 中各类替代燃料的减排潜力

LCFS 标准中覆盖的替代燃料种类较多,各类燃料的碳强度值差别很大,即便是同一类替代燃料也会由于产地和生产工艺等因素的不同而产生一定的碳强度差异。CARB 公布了 2019 年度各类替代燃料的体积加权平均碳强度值,如图 17 所示。

数据显示,各类液体替代燃料的碳强度均远远低于 2019 年度的碳强度基准值,其中,乙醇的平均碳强度约为 60 gCO<sub>2</sub>e/MJ,生物柴油和可再生柴油的相对平均碳强度值最低,这也解释了 LCFS 法规中对这两类替代燃料的重视原因。

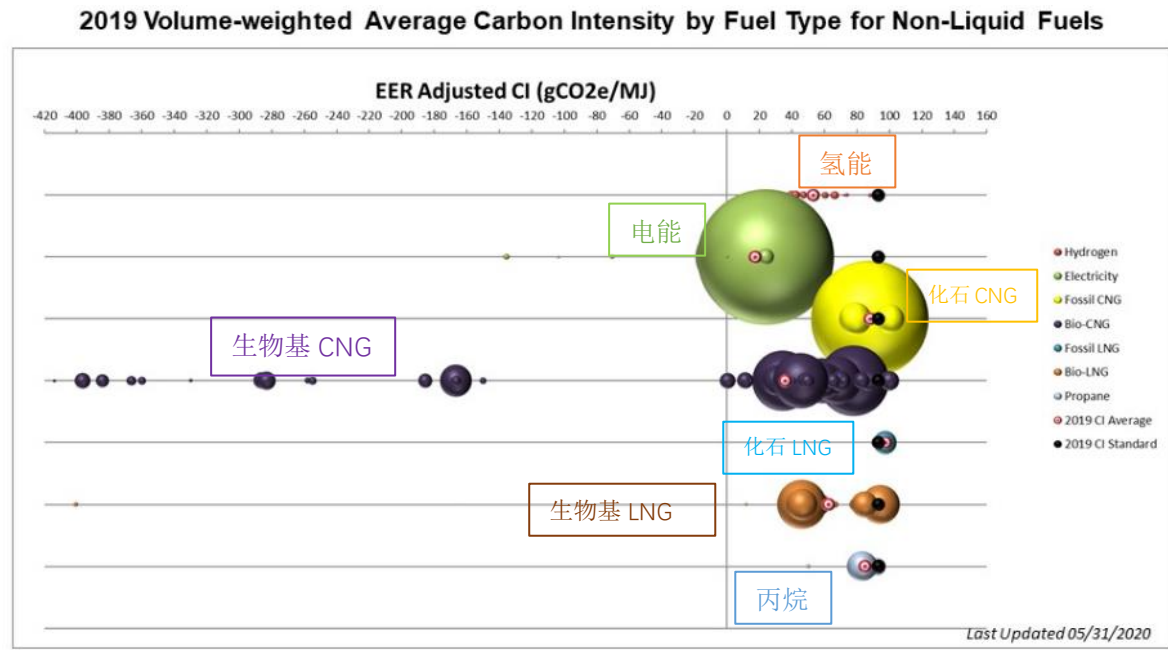


注: 每种燃料由于生产工艺、路径等条件的不同,会产生多个碳强度值,红色小圆点对应的横坐标值代表该种燃料在 2019 年度的体积加权平均碳强度。

图 17 2019 年度加州地区液体替代燃料的体积加权平均碳强度

在非液体类燃料中,也只有化石 LNG 和化石 CNG 的平均碳强度值高于或接近 2019

年度的碳强度基准值（图 18）。值得注意的是，部分来源的电力和生物基 CNG 甚至实现了负碳强度，即在这些燃料的生产过程中还可以回收或利用某些源头排放的二氧化碳。不过，对这些负碳燃料的相关技术信息 CARB 并未进行说明。

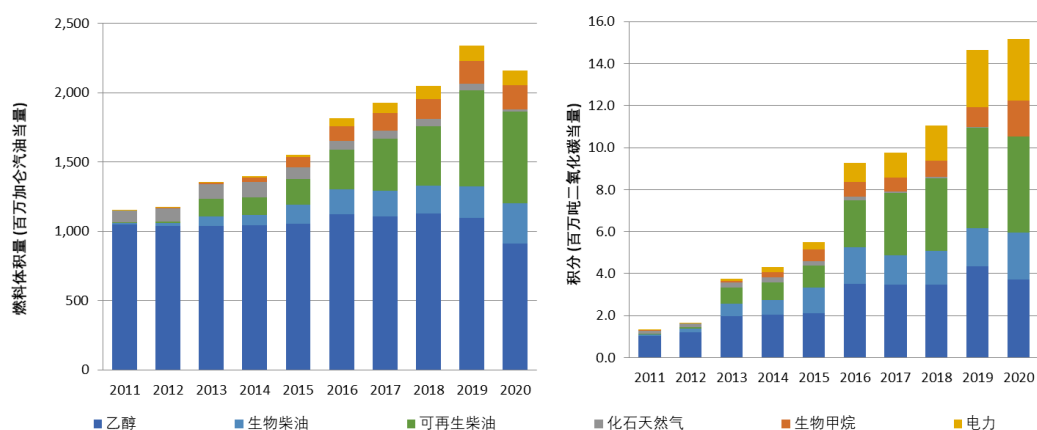


注：1）每种燃料由于生产工艺、路径等条件的不同，会产生多个碳强度值，红色小圆点对应的横坐标值代表该种燃料在 2019 年度的体积加权平均碳强度；  
2）此处所指的非液体燃料是指在常温常压下为非液体状态的燃料类型，因此 LNG 也算在非液体燃料中。

**图 18 2019 年度加州地区非液体燃料的体积加权平均碳强度**

**2.4.4 LCFS 实施对加州低碳燃料行业的影响**

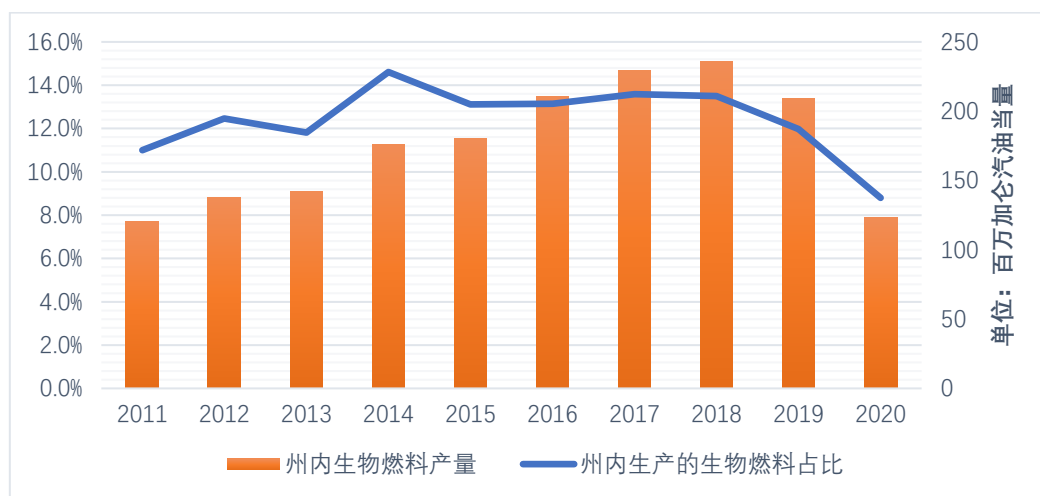
基于加州实际情况，LCFS 标准起初主要是鼓励生物燃料的应用和创新。在 2018 年 LCFS 标准修订给出的合规情景中，可再生柴油和生物柴油是最主要的两类生物燃料，合计占比接近 60%。根据 CARB 的统计，替代燃料在交通燃料总量中的占比已由 2011 年的 6.1% 提高到 2017 年的 8.5%，这其中绝大多数增量来自于乙醇掺烧、生物柴油和可再生柴油（图 19）。



数据来源：CARB, iCET 整理

图 19 LCFS 法规实施以来加州替代燃料的使用变化

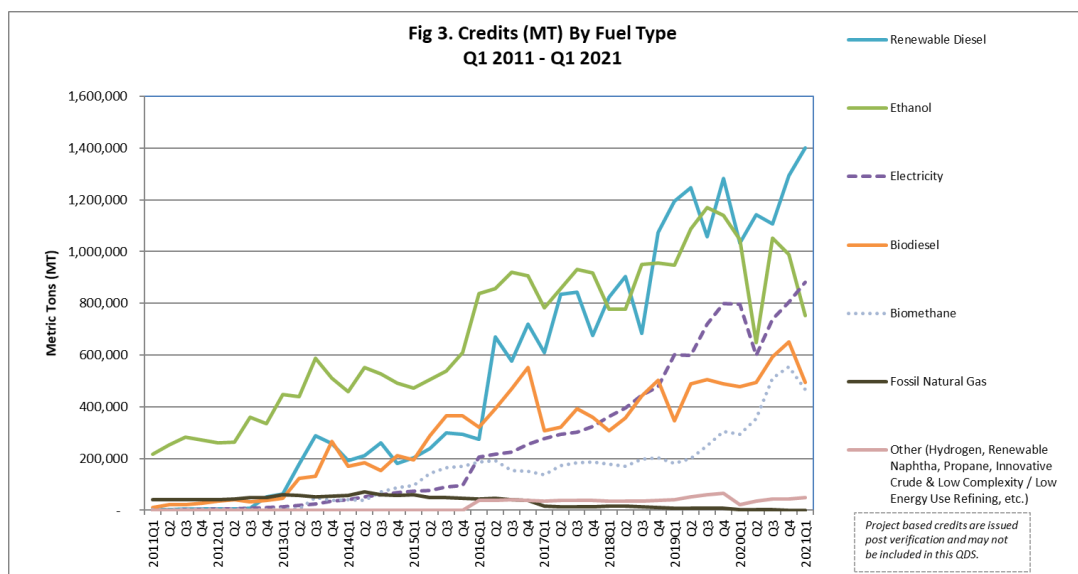
LCFS 法规的实施也将全球最清洁的燃料吸引到了加州，同时也促进了加州州内生物燃料产业的发展。据统计，自 2011 年以来，加州本地的生物燃料产量呈现稳定增长趋势，在所有申报的生物燃料总量中的占比也基本保持较为稳定的状态（见图 20）。2020 年受新冠肺炎疫情影响，加州州内生物燃料产量明显下降，在总量中的占比也下降至 8.8%。



数据来源：CARB, iCET 整理

图 20 LCFS 法规对加州州内生物燃料产业的影响

图 21 显示，截至 2021 年第一季度，乙醇和可再生柴油仍是是加州 LCFS 积分产生的主体，但与电力使用相关的积分正在快速增加。尤其是 2018 年三季度以来，电力已经超越生物柴油成为 LCFS 积分产生的第三大主体。



资料来源：CARB Data Dashboard

图 21 LCFS 积分产生主体及相应的积分量

## 2.5 不同机制之间的关联性

在交通部门，CARB 规划了一个互补型、多管齐下的方案，鼓励清洁燃料和清洁汽车的发展与部署，以实现 2045 年碳中和目标。三大以市场为导向的政策机制在推动加州低碳交通发展中发挥了战略性作用，它们分别是：碳排放总量控制与交易项目（Cap-and-Trade Program - C&T）、低碳燃料标准（CA-LCFS）以及零排放汽车（ZEV）积分交易项目。本小节将着重介绍 LCFS 之外的两个政策机制，以及它们与 LCFS 的补充配合作用。

### 2.5.1 碳排放总量控制与交易机制

为了确保《全球变暖解决方案法案》（2006）减排目标的实现，加州碳排放总量控制与交易项目于 2013 年正式启动，起初仅涉及电力及相关行业，2015 年纳入了燃料供应商及相关行业，目前覆盖全州约 85% 的温室气体排放量。<sup>19</sup>C&T 项目为加州温室气体排放设置了一个总量限额（Cap），总量限额逐年下降 2-3%，激励受控实体通过经济活动寻找最低成本的提效减排解决方案。

在交通领域，燃料供应商、经销商、制造商和进口商对燃料生产和使用产生的温室气体排放均负有责任，他们需要每年报告其销售到终端市场的燃料种类、体量及其燃烧产生的温室气体排放量，并经第三方机构核证。天然气供应商可以获得免费分配的排放配额，且每年得到相同的排放限额，通过碳交易获得的收入，最终补偿给终端用户。其他化石燃料（例如 RBOB 汽油、燃料油和混合燃料）供应商则无法获得免费配额，主要在“配额拍卖”和“配额价格控制储备”购买，他们也是加州碳市场最大的买家。

C&T 机制虽然在执行过程中获得更多关注和曝光，但其最初的定位是作为减排的最后一道防御机制，而非动力机制。它的主要作用是给全州碳排放设定硬性的总量限制，利用灵活的市场交易机制发现最低成本的减排路径，实现资源的最佳优化配置。即使其他更加直接推动减排的措施失效，C&T 仍能确保排放总量逐年下降。<sup>20</sup>然而，随着加州

不断更新加严温室气体减排目标，C&T 也开始向更加主动的角色转变，在直接推动减排行动中发挥作用。在 2017 年更新的气候变化范围界定方案中，CARB 明确提出 C&T 机制在 2021-2030 年需要确保 2.36 亿吨 CO<sub>2e</sub> 的减排量。<sup>21</sup>

C&T 对低碳燃料的支持相对间接。C&T 通过设置碳价，让低碳燃料在开放性市场中相比于传统化石燃料更具竞争力，但不能保证这些低碳燃料一定能被分销或获得直接的补贴。与之相比，LCFS 对低碳燃料的支持更加直接。低碳燃料必须被消费才能产生积分，低碳燃料的生产者可以直接通过出售积分获得现金收入，这无疑是更强更有效的市场激励。

LCFS 是 CARB 倚重的减排动力机制，目的是加速替代性燃料的商业化推广。LCFS 通过提出严格的碳强度下降目标，释放明确的投资信号，鼓励交通部门使用多种燃料类型，以及低碳燃料技术及其基础设施的长期持续发展，推广生物燃料、电力、氢能等低碳燃料的使用，特别是为电动汽车提供可再生能源电力。

低碳燃料标准（LCFS）和碳排放总量控制与交易（C&T）是同等重要的减排措施，两者拥有共同目标，但各自独立运营并发挥作用，本质上是相辅相成、相互补充的。在 C&T 机制下，大部分低碳燃料供应商没有合规义务，燃料的碳强度指标不受考量，因此若没有 LCFS 的辅助，C&T 很难对低碳燃料形成激励机制。然而，若没有 C&T 限定排放总量，单靠 LCFS 也难以实现碳中和目标。

让两大机制并行的另一个考量是让它们对各种经济状态的响应力和抵御力最大化。如果一个政策机制的目标设定出现偏差，很有可能影响该经济体按时实现减排目标，但在两个机制动态平衡的过程中，这种风险能被最大程度地控制。例如，受到 2008-2011 年经济危机的影响，加州过去十年的排放配额都供大于求，风力、光伏发电的增长速度在此期间也超出预期，新冠疫情的出现又使碳排放大大低于预期，这些因素的叠加导致一整年的核证减排量囤积，过去五年加州的碳价都在法定下限徘徊。在这样的极端市场情况下，LCFS 机制的存在确保了交通燃料领域仍有较强的去碳化动力，保持了持续的资本投入和技术进步。

## 2.5.2 零排放汽车积分交易机制

为了促进低碳交通工具的推广和商业化，加州从 1990 年开始设计零排放汽车（ZEV）法规，最初是作为低排放汽车（LEV）项目的一部分，目的是减少烟雾组分的汽车尾气排放。2012 年出台新的“先进清洁汽车项目”（Advanced Clean Car Program），通过四个彼此独立又相互关联的方案推动清洁汽车的发展，以支持加州温室气体减排目标的实现，它们分别是：轿车和轻型卡车的温室气体标准、清洁燃料加油站计划、减少烟雾组分气体排放以及新的 ZEV 政策。其中，最后两项是加州独有的政策。

新的 ZEV 政策强制要求，汽车制造商每年在加州市场上销售的汽车中，ZEV 需达到一定比例，这一比例每年都会升高。为了确保目标的实现，CARB 构建了加州现有的 ZEV 积分交易体系，借助市场化手段加速交通工具的转型发展，通过积分交易市场激励 ZEV



的商业化。ZEV 积分交易的原理与 LCFS 类似，制造商每出售一辆 ZEV 可获得相应的积分，每年需要完成一定的积分任务，积分余额可以出售给其他制造商获利，或存储起来以满足未来的合规要求。不同的车型根据续航里程、快充能力等指标会获得的积分数额不同，性能越好的 ZEV 生成的积分越多。每年 CARB 会提升对制造商 ZEV 积分比例的要求，从而实现不断提升 ZEV 销售比例的目标。

ZEV 机制和 LCFS 机制都是利用市场化手段，以加速交通部门的低碳化为目标。本质上也是相互促进、互为保障的关系。ZEV 机制通过增加 ZEV 的市场占比，推动了电动汽车充电量的增长，从而为 LCFS 机制生成了更多积分；LCFS 机制通过容量积分路径间接补贴了建设 ZEV 基础设施网络的固定成本，从而鼓励了 ZEV 的推广，反过来又促进了电力作为低碳交通燃料的增长。

从核算口径来看，LCFS 从燃料的口径进行核算，ZEV 则从交通工具的口径进行核算；从利益转移路径来看，LCFS 机制实现了利益从传统化石能源生产商向低碳燃料生产商与基础设施运营商转移，ZEV 机制则实现了利用从传统汽车制造商向新能源汽车制造商转移；从全生命周期影响来看，LCFS 主要影响车辆使用及燃料的生产、储运与加注环节，ZEV 主要影响车辆的制造和使用环节（如图 22 示）。

### 2.5.3 不同市场机制下的多重计算风险

多个气候政策机制覆盖同一类产品或活动并不一定造成多重计算的问题，但需要避免气候政策不给某一群体施加过多负担，也要避免同一份减排量从不同政策机制重复兑换积分、获得收益。

根据加州大学戴维斯分校能源、环境与经济政策研究所的估算，LCFS 积分交易机制和 C&T 机制并行不会带来负担过重或双重获利的问题。LCFS 和 C&T 机制共同给加州的汽、柴油带来的价格涨幅约为零售价格的 8% 左右，对价格的影响在合理范围之内，不会给普通消费者带来过重的负担。

研究证明，在碳交易系统和 LCFS 机制共同涵盖交通燃料的市场中，LCFS 的存在有助于帮助燃料生产者降低总计合规成本。也就是说，LCFS 通过激励燃料生产者减少化石能源消费、增加低碳替代选项，有效降低了 C&T 的合规成本。虽然降低的成本无法完全抵消 LCFS 的合规成本，但两个政策机制叠加的减排成本远低于其分别独立运行的成本<sup>22</sup>。

LCFS 核算的是燃料全生命周期的碳强度，因此某种燃料获得的积分可能来自非交通部门的减排量。例如，很多可再生天然气的生产减少了动物排泄物分解产生的甲烷排放，通过这种方式获得 LCFS 积分具有科学上的正当性，但如果交通系统和农业系统都申报同一个项目的减排量，则构成了双重计算。

总而言之，三大机制相互关联、各有侧重、共同配合，共同发挥作用，从车辆、燃料和排放总量三个层面，层层保障交通领域温室气体减排目标的实现。



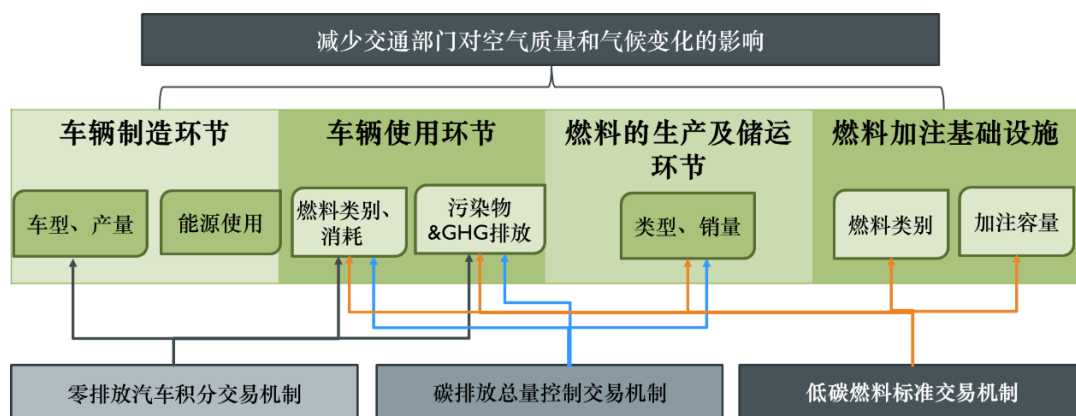


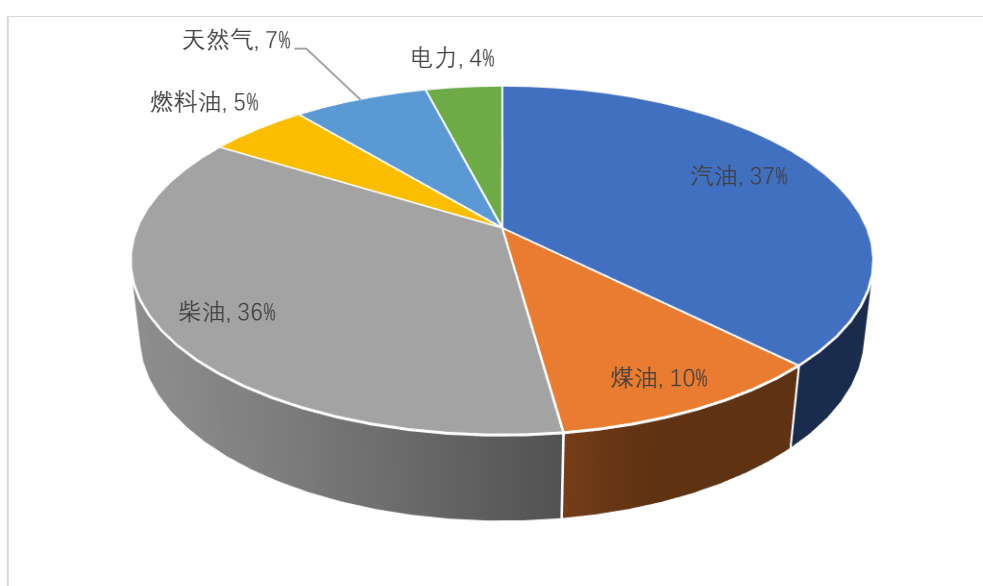
图 22 加州推动交通低碳化的三大机制关联示意

### 三、中国低碳燃料发展现状

#### 3.1 中国交通低碳燃料发展现状、趋势与目标

中国交通燃料中绝大多数仍是化石能源，距离交通燃料零碳化仍有很长的路要走。中国尚未开发建立低碳燃料领域的系统性标准、法规和激励机制。现有的激励政策大多针对特定的产业或技术路线，缺乏全盘考虑和统筹协调。当前涉及排放权和用能权的市场交易机制也尚未涵盖交通燃料领域。

统计数据<sup>23</sup>显示，在交通运输行业能源消费中，汽油、柴油和煤油的占比排在前三位，合计达到交通总用能的 83%，其余为天然气、燃料油和电力，其中电力的消费主体来自高铁等大宗交通模式。将范围缩小至汽车用能领域，燃料消费结构更为简单，最主要的燃料种类仍是汽油和柴油（图 23）。



数据来源：中国统计年鉴 2020，iCET 整理，均已折算成标煤当量后核算。

图 23 2018 年度中国交通运输行业能源消费结构

同时低碳燃料政策体系仍需完善。在实际应用领域，中国低碳燃料政策主要集中在生物乙醇和生物柴油行业，近几年政策大力激励氢能，尤其是可再生绿氢的发展，不过氢能产业仍处在发展初期。除此之外，生物航煤的发展定位尚未明晰，进而影响了产业的整体发展和技术创新的步伐。

#### 专题四：我国主要低碳燃料政策一览

- **生物乙醇**

2001 年，国家五部委颁布了《陈化粮处理若干规定》，规定陈化粮的用途主要为生产酒精、饲料等。2002-2004 年主要实行成本加利润的补贴方法，对生物燃料的原料统一按照出库价格计算，而非市场价，对相应的试点企业实行 5% 的消费税补贴。2005-2007 年，生物燃料的发展纳入国家发展战略，鼓励发展非粮燃料乙醇。2008 年至今，国家明确了生物燃料“不与人争粮，不与粮争地”的发展原则，坚持发展非粮作物燃料，实行与油价挂钩的弹性补贴机制。2010 年，国家能源局正式批准中粮集团设立国家能源生物液体燃料研发中心，主要推动纤维素乙醇发展。2017 年 9 月，国家发展改革委、国家能源局等十五部门联合印发《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》，力争到 2025 年纤维素乙醇实现规模化生产，先进生物液体燃料技术、装备和产业整体达到国际领先水平，形成更加完善的市场化运行机制。

- **生物柴油**

《可再生能源法》明确规定石油销售企业应将符合国家标准生物液体燃料纳入其燃料销售体系。2014 年，《生物柴油产业发展政策》从原料、布局、监管等方面，明确了产业规范要求。2016 年，《生物质能发展“十三五”规划》提出健全生物柴油产品标准体系，推进生物柴油在交通领域的应用。近年来，为满足大气污染防治需要，陆续修订发布第六阶段《车用柴油》和《B5 柴油》国家强制性质量标准，其中《车用柴油》标准允许添加不超过 1% 的 BD100 生物柴油，《B5 柴油》标准要求添加 1~5% 的 BD100 生物柴油。国家还对符合国家标准生物柴油执行免征消费税和 70% 增值税即征即退政策。

- **氢能**

2006 年《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》中要求重点研究可再生能源制氢技术、经济高效氢储存和输配技术、燃料电池基础关键部件制备和电堆集成技术、燃料电池发电及车用动力系统集成技术，形成氢能和燃料电池技术规范与标准。2011 年《节能与新能源汽车产业发展规划》提出发展高效天然气制氢、化工、冶金副产氢气、高压容器储氢、氢加注设备和加氢站技术。2016 年《能源技术创新行动计划（2016-2030）》以及《能源技术创新重点创新行动路线图》提到，发展氢能和燃料电池技术创新、先进储能技术创新，并提出在先进燃料电池、燃料电池分布式发电、氢的制取储运及加氢站等方面开展研发。2017 年《能源发展“十三五”规划》强调几种攻关新型高效电池储能、氢能和燃料电池技术。2019 年《绿色产业指导目录（2019 版）》和 2019 年新能源汽车标准化工作要点中将燃料电池装备制造、氢能利用设施建设和运营列入清洁能源产业。2020 年《关于加快建立绿色生产和消费法规政策体系的意见》表示将在 2021 年研究制定氢能、海洋能等新能源发展的标准规范和支持政策。《2020 年能源工作指导意见》表明“从改革创新和推动新技术产业化发展角度推动氢能产业发展”。《新能源汽车产业发展规划（2021-2035）》提出对氢能产业链各环节进行技术攻关并强化标准管理。

## ◆ 生物柴油

从技术更迭角度看，生物柴油分为三代：第一代生物柴油本质是通过动植物油脂与甲醇进行酯化或酯交换反应制得，按照反应原理，原料与生物柴油的产出比例为 1:1。一代生物柴油是全球生物柴油的主要组成，产量占比超过 85%；第二代生物柴油则是通过对动植物油脂加氢脱氧或降凝改质，过程中氢取代了包括氧、硫、氮等元素，产率上来看，植物油与可再生柴油的产出比约为 1:0.9<sup>24</sup>，这种生物柴油可以任意比例与普通柴油掺混。第二代生物柴油主要分布在欧洲和美国，加州 LCFS 法规中所提到的“可再生柴油”主要是指这类；第三代生物柴油是在二代生物柴油氢化技术和异构化技术的基础上，采用高纤维含量的非油脂类生物质和微生物油脂为主要原料制得，三代生物柴油的提取和分离难度较大，且成本高昂，目前全球占比不足 2%<sup>25</sup>。

我国比较常见的是含有 5%生物柴油和 95%石油柴油的 B5 柴油，在美国等地区用户选择较多的是含 20%生物柴油和 80%石油柴油的 B20 柴油。B100 生物柴油是纯生物柴油，存在寒冷天气的性能和材料兼容性问题，应用并不广泛。我国目前以第一代生物柴油为主，主要生产原料是废弃油脂，2019 年生物柴油实际产量约为 120 万吨<sup>26</sup>。

据统计，我国目前有 30 多家生物柴油企业，产能共计超过 250 万吨/年。推广方面，国家对生物柴油添加尚没有强制要求，目前对生物柴油推广力度比较大的地区是上海，从 2013 年起上海开始在公交等车辆上试点使用 B5 柴油，2018 年上海石油启动了生物柴油调和设施建设项目，在闵行油库新建 B5 柴油调和基地。截止 2020 年 12 月底，上海石油已经在旗下 243 个加油站布点销售 B5 柴油，约 1402 万辆车次加注了 B5 柴油<sup>27</sup>。2021 年初，海南省第六届人民代表大会第四次会议上有代表提出，在海南全岛重启推动生物柴油的建议<sup>28</sup>。

## ◆ 生物航煤

生物航煤是以可再生资源为原料生产的航空煤油，主要原料包括椰子油、棕榈油、麻风子油、亚麻油等植物性油脂，以及餐饮废油、动物脂肪和微藻油等。与传统石油基航空煤油相比，生物航煤生命周期碳排放可减少 50%以上<sup>29</sup>。目前，生物航煤的主要生产路线有五种，如表 6 所示。

表 6 生物航煤主要生产技术路线

生产路线	简称	初始原料	应用现状
生物质热解+加氢改质	HDJ	木质纤维素	中试阶段
醇制航煤	ATJ	木质纤维素	规模投产
糖制航煤	DSHC	木质纤维素	工业示范
生物质气化+费托合成+加氢改质	BTL	木质纤维素	工业示范
油脂加氢脱氧+加氢改质	HEFA	非食用油脂	规模投产

资料来源：乔凯，傅杰，周峰等，国内外生物航煤产业回顾与展望.生物工程学报，2016,32（10）：

中国是世界第二航空大国，2019 年民航飞机加油量约为 3500 万吨<sup>30</sup>，从旅客和货运周转量趋势来看，未来国内民航行业仍有较大增长空间。航空产业实现低碳发展离不开生物航煤等低碳燃料的贡献，生物航煤未来发展可期。

中石油、中石化两大石油巨头在 2007-2009 年间纷纷开始展开生物航煤相关的研究。目前，我国自主炼制的生物航煤已完成试飞，相关产业进一步发展。但也应认识到，在目前的技术水平和市场条件下，采用已有技术路线制得的生物航煤产品价格均高于石油基航煤价格。直接利用生物航煤对石油基航煤进行替代，产量难以保证，经济上也不允许。生物航煤的低碳环保属性应得到重视，它是未来航空产业降低碳排放的重要选项。

#### ◆ 生物乙醇

中国生物燃料产业发展始于 2001 年，为了解决大量“陈化粮”处理问题，改善大气及生态环境质量，调整能源结构，启动了生物燃料乙醇试点。从“十一五”起，根据形势变化暂停了粮食燃料乙醇发展，陆续在广西、内蒙古、山东、河南等地建成多个非粮燃料乙醇示范项目或产业化装置。截至目前，中国已有黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽和天津 6 个省市全境和河北、山东、江苏、内蒙古、湖北和广东 6 个省的部分地区开展乙醇汽油推广试点。<sup>31</sup>

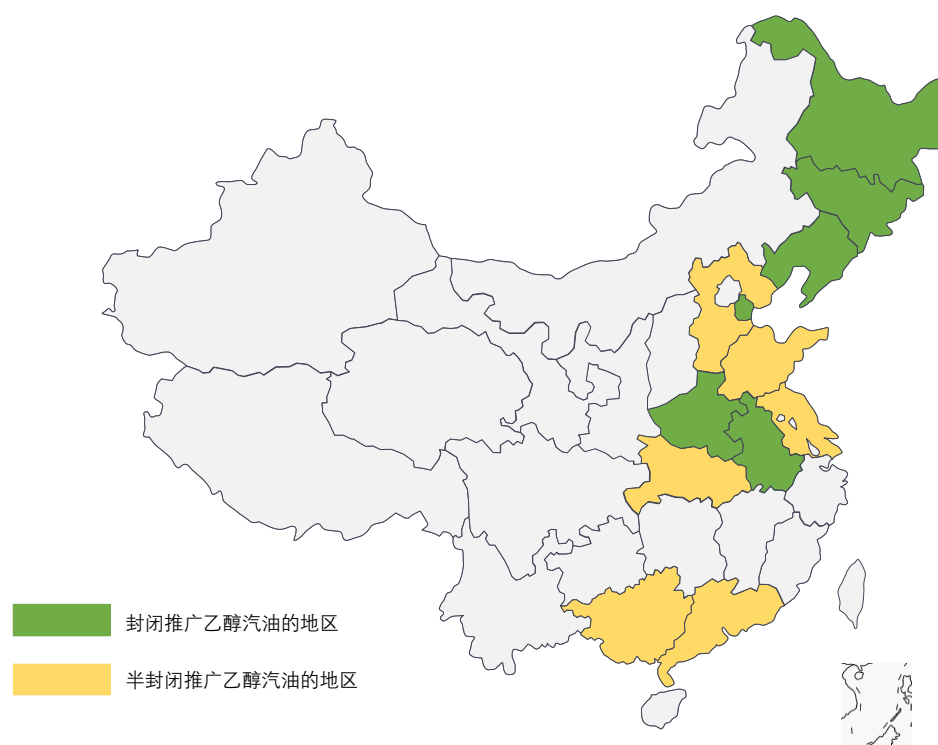


图 24 中国推广乙醇汽油的地区

中国石油和化学工业联合会的统计数据显示，目前中国生物液体燃料产能约为 900 万吨，其中包括 600 万吨的生物乙醇、250 万吨的生物柴油和约 10 万吨的航空燃料。2020 年交通领域生物液体燃料消费量约为 260 万吨油当量，占交通燃料消费总量的 1%。

截止目前，中国尚未实现全国范围内车用燃料乙醇汽油全覆盖的目标，包括生物燃料乙醇在内的生物燃料产业与国际先进水平尚存在差距。中国对生物燃料生产及在交通领域的推广使用支持政策虽然在过去 20 年不断完善，但覆盖生物燃料全品类、全产业链的整体性发展战略仍是缺位的，特别是缺少激励产业持续创新的市场化机制。

#### ◆ 低碳电力与充电基础设施

低碳电力的内涵较为丰富，覆盖电力从产生到使用以及对周围生态的影响等多个方面。狭义上是指采用综合资源战略规划的方法，在电力供应侧鼓励发展清洁能源发电，采用各种新技术、新工艺减少污染物排放，主要形式为可再生能源发电。

中国可再生能源发电规模世界第一。截至 2020 年底，可再生能源发电装机规模达到 9.3 亿千瓦，占总装机的比重达到 42.4%，较 2012 年增长 14.6%。2020 年可再生能源发电量达到 2.2 万亿千瓦时，占全社会用电量的 29.5%<sup>32</sup>。

低碳电力之路的实现，是一个短期措施和长期机制相协调的、技术手段和管理手段相配合的、涉及到电能生产、传输和消费等各个环节的、综合系统的建设和发展之路。中国特色的低碳电力系统的建设，需要一个能够让可再生能源发电技术及其他低碳发电技术参与市场竞争的电力批发电力市场，依托智能电网和智能用电这两个智能平台的大力发展，优化管理模式、转变管理思路，建设包括关停高排放源、提高终端能效和政策引导等三类短期减排措施，以及构建低碳能源发展规划、低碳电力技术发展、智能电网运行和低碳智能用电等四项长效低碳机制<sup>33</sup>。

在充电基础设施方面，“十三五”期间，中国电动汽车充电基础设施产业取得积极进展，具备产品技术创新能力，建立充换电设施服务体系，基本形成完整的产业链，有效支撑了新能源汽车的推广应用，成为全球充电设施保有量第一的国家。2015 年国家发改委、能源局、工信部、城乡建设部四部委联合发布了《电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020 年)》，其中明确提出了充电桩的建设目标：到 2020 年新增集中式充换电站超过 12100 座，分散式充电桩超过 480 万个，以满足超过 500 万辆电动汽车充电需求。各省市也分别出台了各自的充电桩规划和相应的补贴政策。但充电基础设施的发展在产业发展环境、政策制度体系、供给侧发展质量等方面还有诸多亟待解决的问题。

充换电基础设施的建设推广主要依靠财政补贴，前期高额的建设补贴吸引大量市场主体一拥而上、“跑马圈地”，导致大量劣质、安全性差、缺乏运维的充电桩站占用了优质地块。后期财政奖补资金整体额度缩小，地方配套中央奖补资金缺失，大批充电桩企业遭遇经营困难，市场换血洗牌。根据财政部经建司 2020 年 4 月发布信息，中央财政历年已安排奖励资金 45 亿元，但平均到每年不足 10 亿元。目前全国共有 23 个省份出台充电设施补贴政策，其中北京、上海、广东、江苏等省份地处东部沿海经济发达区域，财政补贴力度大、电动汽车推广应用良好，充电基础社会建设效果显著；地处中部发展区域和西部欠发达区域的省份，补贴力度相对较小，充电设施规模建设取得了一定的成果，但与当地电动汽车规模匹配仍存在差距。



---

目前地方发放的奖补资金基本是根据新能源汽车推广规模数量申报的中央奖励资金，地方很少配套资金，更没有按照既有政策要求将新能源汽车地方奖补资金转移至充电设施运营、新能源汽车使用环节上来。目前尚没有针对充电设施行业的税收优惠政策<sup>⑧</sup>。长期来看，仅依靠奖补政策支持充换电基础设施的发展是不够的，促进电动汽车基础设施的健康发展需要建立长效的市场化机制。

电力来源方面，目前只有少数省市开展了光储充一体化试点，绝大多数充电设施使用的电力直接来自电网。

### ◆ 绿氢与加氢站

氢能在未来的能源体系中扮演着越来越重要的角色。中国氢能联盟预测<sup>34</sup>，在 2060 年碳中和目标下，到 2030 年，中国氢气的年需求量将达到 3715 万吨，在终端能源消费中占比约为 5%。到 2060 年，氢气的年需求量将增至 1.3 亿吨左右，在终端能源消费中的占比约为 20%。

绿氢是依据生产来源划分的氢能的一种，指利用风能、太阳能等可再生能源发电，再电解水生产的氢气，绿氢从源头上杜绝了碳排放，是真正意义上的清洁能源，也是氢能产业发展的方向和目标。而实际上，虽然中国是世界第一制氢大国，但当前的氢能源主要为通过化石能源制得的灰氢，绿氢供应量仅占市场消费量的 1% 左右<sup>35</sup>，制氢路线仍需进一步改进。不过这其中既包含绿氢规模化生产所面临的技术问题，更重要的是绿氢的制备成本居高不下，氢气制备的路线转型挑战重重。

根据已颁布的政策，中国的制氢工艺路线已经明确。2020 年 9 月，财政部、工信部等五部门专门发布《关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》，提出要建立燃料电池汽车示范应用的城市群，强调要为燃料电池汽车示范应用提供经济安全的氢源保障，探索发展绿氢，有效降低车用氢成本。2020 年 11 月，国务院办公厅也发布了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》，明确提出要提高氢燃料制储运的经济性，因地制宜开展工业副产氢及可再生能源制氢技术应用。

不过，绿氢发展也存在着支持与管理政策方面的问题。目前，电解水制氢项目的身份仍不够清晰，因此需要完善绿氢政策保障体系，开放发电企业开展电解水制氢业务的行业准入，明确电解水制氢用户电力市场主体身份。对于配置电解制氢的新能源电力项目，在竞争性配置、并网时序、系统调度运行安排、保障利用小时数、电力辅助服务补偿考核等方面给予倾斜。

相比于氢气制备环节，燃料电池汽车及加氢站的补贴和扶持政策则要明确得多。截至 2020 年底，我国累计推广燃料电池汽车超过 7000 辆，建成加氢站 128 座，氢能已经成为我国能源战略重要组成部分<sup>36</sup>。2009 年以来，中央财政一直采取对消费者给予购置补贴的方式，支持燃料电池汽车发展。2014-15 年，国家层面出台过加氢站补贴政策，

---

<sup>⑧</sup> 观点来自对中国电动汽车充电基础设施促进联盟相关负责人的采访。



对规模不低于 200 公斤/天的新建燃料汽车加氢站单站奖励 400 万元。广东、山东、浙江、江苏等地方政府也出台了对燃料电池汽车和加氢站的一系列补贴政策<sup>37</sup>。在对燃料电池汽车补贴了十余年后，我国燃料电池汽车产业仍面临核心技术和关键零部件缺失、企业创新能力不强、加氢设施建设难等突出问题。

2020 年 9 月，财政部、工信部等五部委联合发布了《关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》，示范期间将采取“以奖代补”的方式，对入围示范的城市群按照其目标完成情况给予奖励。示范期间暂定为四年，示范城市群在此期间需要完成的基础目标包括：燃料电池汽车搭载的基础材料、关键零件技术取得突破并产业化；氢能经济性明显提高；应用新技术的车辆加快推广应用。每个基础目标都包含具体的量化指标，例如：氢能供应及经济性提升的具体目标是车用氢气年产量超过 5000 吨，每公斤氢气的二氧化碳排放量小于 15 公斤。示范城市群达成特定目标获得相应数量的积分，每个积分可获得约 10 万元奖励，奖励上限为 17 亿元。

“以奖代补”有助于激励示范城市群全方位提升氢燃料电池汽车的产业环境、技术水平、基础设施配套和燃料供给能力，而不是单纯追求推广应用的数量。然而该政策并没有给示范城市群提出实现目标的具体政策手段，各城市群仍需摸索到适合自身发展情况的政策，特别是借助市场化创新机制实现目标，推动燃料电池汽车更健康地过渡到产业化阶段。

## 3.2 中国激励交通低碳燃料发展的市场机制

### 3.2.1 中国碳市场的发展与现状

中国建设和运营碳市场已有近 10 年的经验。2011 年，根据“十二五”规划纲要关于“逐步建立碳排放交易市场”的要求，中国在北京、天津、上海、重庆、湖北、广东及深圳 7 个省市启动了碳排放交易权试点，并于 2014 年全部启动线上交易。截至 2020 年 9 月，中国试点碳市场已成长为配额成交量规模全球第二大的碳市场<sup>38</sup>。各试点碳市场的配额分配与交易情况见表 7。

表 7 2019 年七个试点碳市场的配额分配与交易情况

地区	配额（亿吨）	总交易量（万元）	总交易额（万元）	平均成交价（元/吨）
北京	0.45	301.37	25563.38	77.08
天津	1.5	4.34	54.52	13.05
上海	2.5	268.33	11233.82	39.66
湖北	2.4	302.56	12517.74	32.84
广东	4.65	1220.71	26774.78	22.8
深圳	0.29	78.49	1194.79	19.39
重庆	1.17	11.28	58.84	10.04

数据来源：中国碳排放交易网、前瞻产业研究院

为推进全国碳市场建设，有关部门先后制定了《碳排放权交易管理暂行办法》（2014

年)和《全国碳排放权配额总量设定与分配方案》(2016年),陆续发布了多个行业企业排放核算报告指南和行业企业碳排放核算国家标准。起初全国碳市场计划涵盖石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸、电力、航空八大行业,但由于绝大多数行业的数据基础较差,碳排放数据核算、报告与核查工作进展不及预期,最终决定全国碳交易在数据基础较好的电力行业率先开展。2017年底,原国家发改委气候司印发了《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》,标志着全国碳交易市场建设正式启动。2021年7月16日,全国碳市场正式启动线上交易。全国碳市场第一个履约周期为2021全年,纳入发电行业重点排放单位2162家,覆盖约45亿吨二氧化碳排放量,是全球规模最大的碳市场<sup>39</sup>。

按照全国碳市场当前的发展规划,预计未来五年内不会涵盖交通燃料领域。然而,一些试点碳市场已经在交通领域做出尝试。例如,2020年北京市的重点碳排放单位范围涵盖了城市公共交通运输企业和民用航空运输企业<sup>40</sup>;上海市涵盖航空港口及水运企业<sup>41</sup>。中国尚未有碳排放交易市场完全涵盖交通燃料燃烧产生的温室气体排放,特别是非营运车辆产生的碳排放。

### 3.2.2 乘用车“双积分”管理办法

中国政府从2013年开始执行乘用车企业油耗管理,该政策在提升机动车燃油经济性中发挥了积极作用。为了适应新能源汽车发展,2017年9月,工业和信息化部、财政部、商务部、海关总署、质检总局等五部门联合发布《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》,设立了“乘用车企业平均燃料消耗量积分(CAFC积分)”和“新能源汽车积分(NEV积分)”并行管理的“双积分”政策。“双积分”政策在借鉴参考加州ZEV机制的基础上有所创新,其核心目标是建立一个长效的市场化机制,既提升汽车节能,也促进新能源汽车产业的健康快速发展。CAFC积分和NEV积分虽然是“双轨制”,但有两项挂钩:一是在2025年前的CAFC积分核算时,新能源汽车的油耗按照零计算,且可以获得产量倍数(2025年后如何核算新能源汽车的能耗尚未公布),新能源汽车产量越高,越能拉低企业平均油耗。二是如果企业产生CAFC负积分,可以用本企业的NEV正积分或者购买其他企业的新能源正积分抵偿。

“双积分”政策自2018年4月1日实施以来,极大促进了新能源汽车产业的发展,新能源汽车产销量大幅增加。不过,新能源汽车销量大涨一方面造成了市场NEV积分大量过剩,积分价值得不到充分体现;另一方面,新能源汽车在CAFC核算中的倍数优惠使得传统燃油车节能置换,部分企业传统车油耗甚至出现反弹。<sup>42</sup>为了应对上述问题,工信部等有关部门于2019年启动了“双积分”政策的修订工作并于2020年6月发布了“双积分”修正案。修订后的“双积分”政策在有利于提高传统车燃油经济性、促进低油耗车型发展的同时,进一步推动新能源汽车的理性、优质发展。据悉,工信部等有关部门正在研究制定适用于商用车领域的积分政策。

随着机制设计的进一步完善、目标逐步提升,“双积分”政策将在激励交通部门的能效提升和推动汽车电动化进程中发挥越来越重要的地位。“双积分”还将从汽车生产和使

---

用的维度助力交通燃料的低碳化发展。LCFS 法规如能引入中国，将会与“双积分”政策互补配合，一方面加速推动传统车燃油经济性提升和低碳燃料替代；另一方面，进一步降低新能源汽车使用阶段的成本，支持氢能加注、充电等基础设施的投资建设。两个政策的结合有助于进一步放大政策的效力，为道路交通低碳化注入强心针。

---

## 四、中国引入加州 LCFS 的关键问题

尽管加州低碳燃料标准法规体系已经展现了较为成功的实施效果，在考虑将该法规引入到中国来的过程中仍需先进行深入的可行性研究。从时间上来看，加州 LCFS 早在 2009 年就已经出台，彼时交通领域尚未达成电动化、智能化、网联化和自动化转型的路线；从本地化情况来看，加州和中国在交通燃料结构上也存在很大差异。以下对中国引入加州 LCFS 可能面临的关键问题进行了梳理，这些问题需要相关部门在制定类似政策时反复论证，并提出解决方案。

### 4.1 中国实施低碳燃料法规的 MRV 体系构建

低碳燃料标准法规实施的核心之一是构建一套透明、可信度高且易于实施的 MRV 体系。所谓 MRV，是指“可监测（Monitoring）、可报告（Reporting）、可核查（Verification）”，也简称“三可”机制，是碳交易机制建设运营的基本要素，也可拓展至其他相关领域。

#### 4.1.1 燃料数据的申报与核证

LCFS 成功运行的基础是燃料数据。燃料生产者、经销商按 CARB 的要求申报每种燃料路径下的销售量以及全生命周期碳强度，由第三方机构进行核证。这些数据不仅是核算市场主体合规情况和积分生成的依据，也是政策制定者预测未来燃料消费量和低碳燃料替代路径，以及设定碳强度下降目标和基准值的基础。

在加州，大部分石化燃料和替代燃料的生产商在参与 LCFS 机制之前就已经受到空气质量、大宗商品交易、安全生产、税务等法规的监管，已成立了相关合规部门，具备与各种监管机构对接配合的丰富经验。为了应对其他法规的监管，很多企业已经积累了计算燃料全生命周期碳强度所需的数据，合规所需的成本均在可承受范围内。不过，相关模型开发人员在接受采访时也表示，GREET 和 OPGEE 模型的开发过程很复杂，且需要持续的维护和修补才能确保模型相对准确地估算不同燃料的碳强度。

中国在燃料全生命周期碳强度核算方面仍缺失系统的方法学和标准，如果引入 LCFS，首先需要建立相关标准，开发计算模型；其次需要帮助企业进行能力建设，开展收集和积累相关数据的工作。在 LCFS 的实施初期，需要投入较多时间和资源在方法学的开发、校准以及数据的积累上，后期仍需要注意根据技术进步和市场发展不断调整参数。交通燃料全生命周期的碳排放涉及到能源采掘、石化、电力、农业等多个行业，可与碳排放权交易重叠行业的碳核查工作协同开展。LCFS 的计算模型和数据积累也可在碳排放权交易纳入低碳燃料部门时为相关的碳核查工作奠定基础。

#### 4.1.2 碳强度基准值的设定

LCFS 碳强度基准值的设定需要与国家或地区应对气候变化的总目标相协同，交通燃料全生命周期碳强度下降的中长期目标应确保交通部门在 2060 年前实现碳中和。政策目标的设定应结合对现阶段燃料消费情况的分析以及未来发展趋势的预测做出综合判断。将中长期目标分解到年度目标时，可在最初几年将目标设得相对宽松，给企业更多

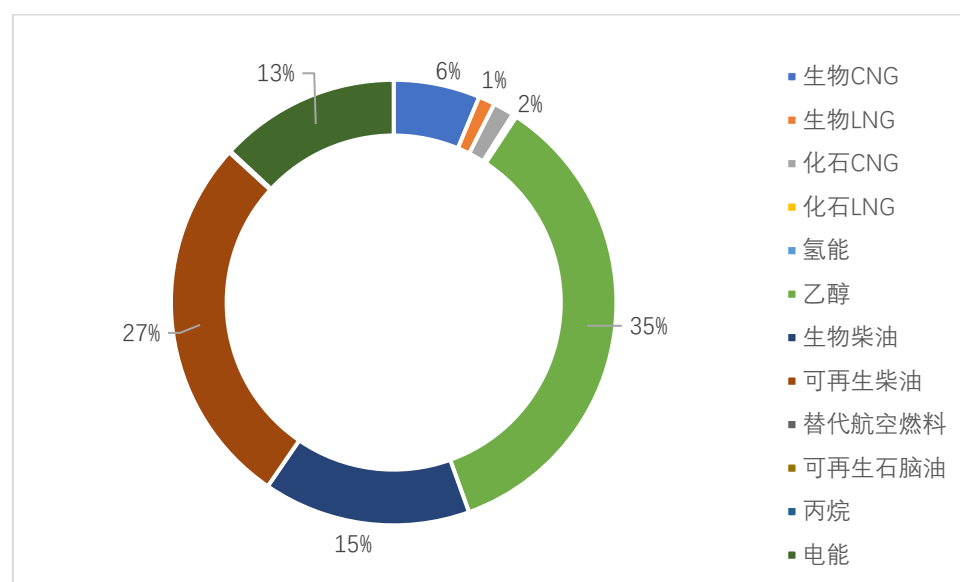
准备和适应的时间。随着技术创新由量变到质变、产业发展带来规模化效益，替代性燃料可能会在中后期出现爆发式增长，因此中后期的年度目标可以逐步加严，激励企业持续进行技术创新。相关主管部门也需要持续更新对于低碳燃料发展和 LCFS 合规的情景分析，并基于产业的新变化对中长期政策目标做出微调。

在加州，设定基准值的另一个重要考量是 LCFS 给传统油气企业带来的合规负担是否会造成燃料价格大幅上涨，从而大大加重普通消费者的生活成本负担。在中国国情下，LCFS 对消费者的影响会相对较弱，因为中国的油气和电力市场都没有完全放开，油气价格和电价仍然主要受政府调控，在设定基准值的过程中需要更多考虑国有能源企业的运营情况和低碳转型路线。

## 4.2 低碳生物燃料是否仍是中国交通低碳化发展的重要选项

提出这一问题的核心原因在于：在加州乃至美国联邦、巴西及欧洲等生物燃料利用比例较高的地区，生物燃料用途主要以车用燃料为主。目前，全球汽车行业均纷纷向电动化转型，中国的汽车电动化发展尤为迅速，而且中国在生物燃料发展方面存在诸多挑战，那么中国是否可以跨越依靠生物燃料加速交通低碳化转型的阶段？

生物燃料是加州低碳燃料标准法规中最重要的组成部分，根据 CARB 最新公布的数据，截止 2020 年底，生物乙醇、生物柴油、可再生柴油三类燃料产生的 LCFS 积分累计占 2011-2020 加州 LCFS 积分总量的比例达到 77%，如图 25 所示。假设该比例与 LCFS 积分交易的比例一致，那么自低碳燃料标准实施以来约有超过 23 亿美元的收益流向上述三个生物液体燃料领域，对这些燃料的发展起到了积极的促进作用。



数据来源：CARB，iCET 整理

图 25 2011-2020 年各类燃料 LCFS 累计积分占比

目前中国主要的生物燃料种类包括生物乙醇、生物柴油和生物航煤。接下来主要从原料来源、减排潜力和成本因素三个方面对这一问题进行分析。



#### 4.2.1 原料来源

中国发展生物燃料的基本原则是“不与人争粮，不与粮争地”，目前主要的原料来自于植物原料、废弃油脂、动物油脂等，具体见表 8。据相关专家介绍，目前我国生物燃料发展受阻的主要原因之一是原料不足，理论上来看原料的供给问题不大，但实际操作层面上，原料的收集仍存在不少困难。

表 8 中国主要生物燃料生产原料现状

	生物柴油	生物航煤	生物乙醇
主要原料	废弃油脂	<ul style="list-style-type: none"> <li>• G1-淀粉、可食用油脂等</li> <li>• G2-废弃油脂、木质纤维素等</li> <li>• G3-微藻</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• G1-玉米</li> <li>• G1.5-木薯、甜高粱茎秆等非粮原料</li> <li>• G2-纤维素等生物质原料</li> </ul>
挑战	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 废弃油脂来源分散，渠道众多，大量油脂未得到有效收集</li> <li>• 废弃油脂用途广泛，行业竞争激烈</li> <li>• 其他国家购买稀释了中国的废弃油脂存量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• G2-废弃油脂挑战参见生物柴油栏</li> <li>• G3-大规模微藻资源获取困难，以目前技术来看，大规模培养基投资高，加工能耗大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• G1-玉米缺口不断增大，进口配额有限，价格优势可能受到挑战</li> <li>• G1.5-木薯等原料主要依赖进口，成本价格存在不确定性</li> <li>• G2-原料来源丰富，但对生物催化酶要求较高，现有技术水平较为落后，成本偏高</li> </ul>
备注		目前生物航煤主要以废弃油脂、棕榈油等原料进行生产	目前我国生物乙醇正处在由 G1 代产品向 G1.5 过渡的阶段

资料来源：1) [http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/201809/t20180903\\_5062185.html](http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/201809/t20180903_5062185.html)

2) [http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202007281394714568\\_1.pdf](http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202007281394714568_1.pdf)

3) 乔凯, 傅杰, 周峰, 等. 国内外生物航煤产业回顾与展望. 生物工程学报, 2016, 32(10): 1309-1321

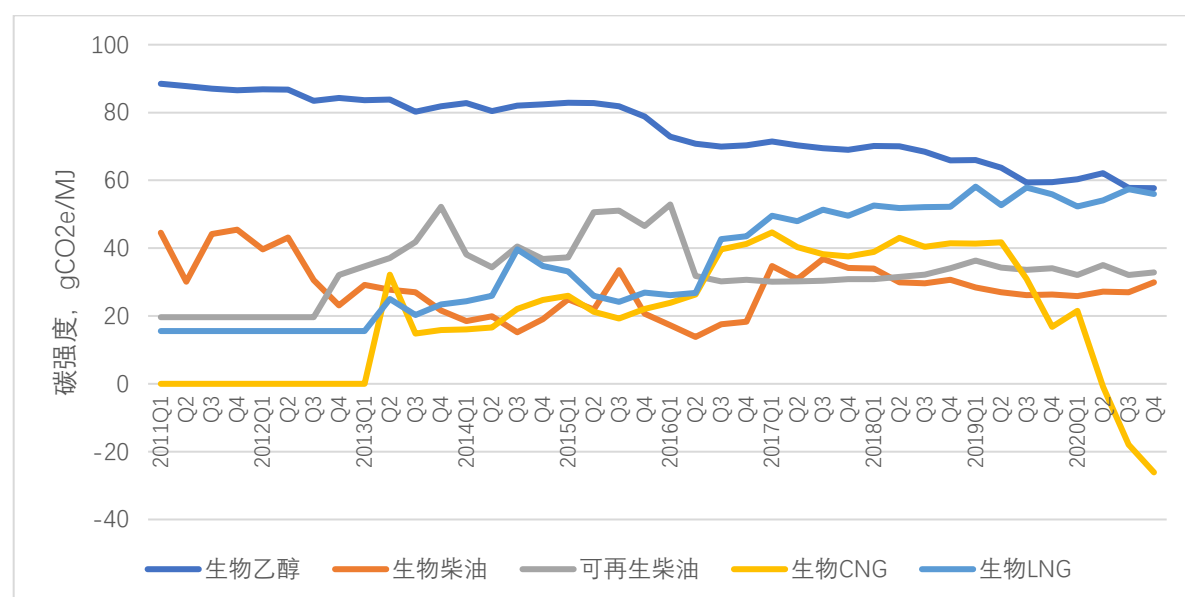
以生物乙醇为例，我国生物乙醇目前主要的来源仍是玉米乙醇，该工艺可以消化大量的玉米库存，不过隐患也在于，受制于粮食供应和价格问题，玉米乙醇产能有限，全国铺开推广必然面临产能不足的问题。G1.5 代产品是以国家提倡的非粮作物为原料通过发酵工艺生产，以木薯乙醇为主，从目前的总体形势看，木薯乙醇的发展仍存在一些不确定因素，且不断受玉米乙醇的挤压，木薯干进口量已经从 2015 年历史高位 920 万吨持续下降至 2019 年的 274 万吨，2020 年反弹至 330 万吨<sup>43, 44</sup>。G2 代纤维素乙醇产业中，目前规模较大的包括吉林松原市年产 160 万吨农业废弃物生物炼制项目、吉林白山市年产 30 万吨纤维素乙醇项目。不过，纤维素乙醇的成本仍然较高，短期内实现大规模

模推广仍存在一定难度。

### 4.2.2 减排潜力

替代燃料的减排潜力一般是以燃料生命周期为边界进行核算获得，在前面介绍加州低碳燃料标准法规时也涉及到了加州各类替代燃料的减排潜力。要计算中国各类替代燃料的减排潜力，首先需要确定一套中立、权威的本地化评价体系，目前国内并无公认这类体系。在加州低碳燃料标准法规中，各类燃料生命周期碳强度可通过加州本地化的 CA-GREET 模型进行测算。据了解，在中国清华大学、中国汽车技术研究中心等机构均有各自的 LCA（生命周期）评价标准体系，不同标准体系之间的差异如何尚未见详细报道。

下面以美国加州的情况来做分析，根据 CARB 公布的数据，包括生物乙醇、生物柴油、可再生柴油等在内的五类主要替代燃料的平均碳强度变化见图 26。自低碳燃料标准实施以来，生物乙醇的平均碳强度不断下降，2020 年第四季度的平均碳强度值约为 56 gCO<sub>2</sub>e/MJ，与生物 LNG 相当。生物柴油和可再生柴油的平均碳强度在 2020 年第四季度约为 32 gCO<sub>2</sub>e/MJ，生物 CNG 在生命周期内则具有吸碳能力，最新的平均碳强度数据为 -26 gCO<sub>2</sub>e/MJ。



数据来源：CARB，iCET 整理

图 26 加州地区主要替代燃料生命周期碳强度变化

诚然，燃料的生命周期碳强度与其生产路径紧密相关，中国的各类燃料碳强度值仍需通过本地化的模型进行核算。资料数据显示，中国汽油和柴油的生命周期碳强度分别为 92 gCO<sub>2</sub>e/MJ 和 90 gCO<sub>2</sub>e/MJ<sup>45</sup>。以图 27 显示的加州主要替代燃料生命周期碳强度数值测算，生物燃料相对于化石燃油的减排潜力在 39-128%之间。

### 4.2.3 成本因素

包括生物柴油、生物航煤和生物乙醇在内的生物液体燃料，按照原料来源均可以划分为三代产品，第一代一般是以可食用生物质资源为原料，第二代则以非可食用生物质

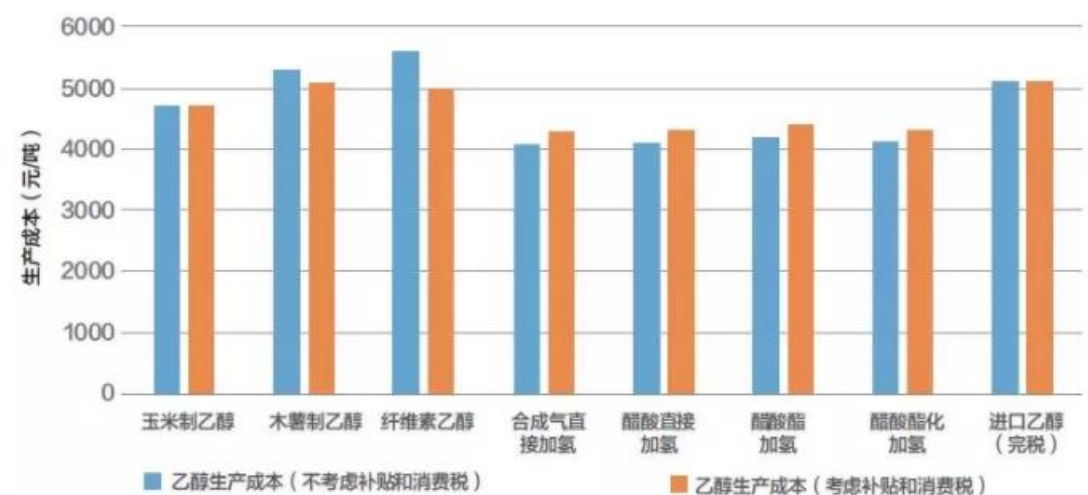


资源为原料，第三代往往以可再生的生物质资源为初始原料来生产。第一、二代产品在原料供应充足或者原料作为其他产业的废弃材料时，原料成本并不高昂，但容易出现原料短缺的问题，如生物柴油生产所使用的地沟油收集就相对困难，进而抬高生产成本。第三代产品往往面临技术规模应用的过高成本问题，如大规模培养和利用微藻需要巨大资金投入来建设基础设施。

就乙醇产品来说，目前成本最低的是工业催化工艺生产的乙醇，约为 4000 元/吨，生物乙醇中成本最低的是玉米乙醇，成本约在 4500-5000 元/吨之间。纤维素乙醇的生产成本最高，据估算在 5600 元/吨左右，见图 27。相对于进口乙醇而言，目前仅有玉米乙醇具有一定的价格优势。

目前我国乙醇汽油的价格与普通汽油价格相同，燃料乙醇的价格与油品价格保持联动，其价格制定基本参照国内成品油定价机制并以 0.911 的系数进行调价<sup>46</sup>。按照目前北京地区的汽油价格来算，一吨汽油的价格约为 8500 元，那么一吨燃料乙醇的价格约为 7740 元。不过，国内汽油价格受到国际油价波动的影响有一定起伏，而燃料乙醇的成本则主要受原料和生产成本影响，上述定价机制难以反映燃料乙醇的供需关系。有业内人士认为，当前的生物燃料乙醇定价机制已经不能适应市场发展的要求，需要借鉴国际经验，积极研究制定新的燃料乙醇定价机制<sup>47</sup>。

此外，生物燃料的成本也受国内相关企业规模影响而难以继续下降。目前我国燃料乙醇的需求量不是很高，相关部门在推广燃料乙醇方面也受到多重因素影响导致推进缓慢，企业生产规划相对保守，难以实现规模化效益。以河南天冠为例，这是目前国内最大的生物乙醇生产企业之一，现有产能约为 50 万吨/年<sup>48</sup>，美国最大的生物乙醇企业 Archer Daniels Midland Co.-Decatur<sup>49</sup>，其玉米乙醇的年产能达到 375 百万加仑/年，折合约 112 万吨/年。



资料来源：隆众资讯、华泰期货研究院

图 27 不同工艺路线的乙醇生产成本对比

### 4.3 低碳生物燃料在中国的应用前景

综合上述因素，我们认为未来在中国交通领域应用潜力较大的生物燃料主要为生物柴油和生物航煤，生物乙醇虽然具有较好的产业基础和应用案例，但在交通领域生物乙醇主要应用在汽油车上，更确切一点，主要应用在乘用车上。从目前的情况来看，乘用车领域电动化普及正在加速，生物乙醇在短期内可以带来一定的减碳效益，但长期和大规模应用的潜力并不大。

生物柴油则可以广泛应用在长途重卡、远洋和内河运输等领域。重卡的电动化仍处在起步阶段，规模化仍需要一到两个产品周期，而且由于使用场景的需求，长途重卡领域更有潜力维持多种能源并行的局面，此时应用生物柴油将能促使重卡碳排放持续降低。远洋和内河运输具有长距离、无法中途充电等特点，短期内实现电驱动化还有相当难度，生物柴油在这些领域也具有良好的应用前景。

以生物柴油在重卡方面的需求简单估算，目前中国重卡保有量约 800 万辆，以百公里油耗 40 升，年均行驶里程 5 万公里计算，年消耗柴油约 1600 万升，按照 B5 的添加标准，需要生物柴油 80 万升，折合约 70 万吨。而我国重卡保有量仍处于增长趋势，未来对生物柴油的需求量还将进一步提高。与此同时，随着“公转水”“公转铁”的进一步深化，远洋和内河运输的强度也将有一定幅度的提升，对生物柴油的需求也将随之上升。

生物航煤方面，在我国汽车电动化进程不断加速推进的情况下，很多业内专家认为我国发展生物燃料的一个重要切入领域是航空用油。首先，我国交通出行方式正处于过渡阶段，公路客流不断流向高速铁路和民航，航空用油至少有一倍的增长空间。其次，国际航协于 2019 年提出了国际航空碳抵消和减少计划（CORSIA），按照原计划，将从 2021 年开始使用二氧化碳抵消付款，采用 2019 年和 2020 年的平均排放量为基准水平，目标是在 2020-2040 年间保持国际航空旅行的净二氧化碳排放量不变。由于 COVID-19 疫情影响，2020 年航空业碳排放量大幅下降，包括欧盟各国在内的航空公司提出了对该计划的修改提议<sup>50</sup>，希望仅以 2019 年的排放量为基准，据测算，该修改一旦被采纳将造成 CORSIA 实现的总体减排量减少 25-75%。尽管如此，我国航空企业也应积极做好规划，航空行业的碳减排压力不小，生物航煤则是实现碳减排的重要手段之一。

甲醇也是未来交通领域很有潜力的燃料，不仅在商用车领域，在船舶等非道路运输中也具备使用条件。考虑到碳减排问题，利用可再生能源制备低碳甲醇是近几年比较受关注的方向。可再生甲醇是由生物质或由绿氢和二氧化碳合成生产，有助于实现工业和运输燃料的碳中和。在中国探索较多的是利用太阳能的制备方式合成甲醇，这一产品又被称为“液态阳光”。但目前中国甲醇生产仍主要是以煤炭工业为基础，2020 年煤制甲醇产能为 7000 万吨，占比达到 76%，天然气和焦炉气制甲醇均比各为 12%左右<sup>51</sup>，利用可再生能源制备甲醇仍不具备规模化生产条件。IRENA 的报告显示<sup>52</sup>，目前可再生甲醇的成本很高，而产量很低，但通过采用争取的政策，到 2050 年之前，可再生甲醇有望具备成本竞争力。

---

总之，一方面低碳燃料标准能够助力零排放汽车发展，另一方面还能通过鼓励生物柴油、生物航煤等多种低碳生物燃料以帮助短期内电动化难度较大的交通领域实现低碳转型，对交通行业的低碳发展具有重要意义。

---

## 五、加州 LCFS 法规的借鉴意义及引入中国的政策建议

LCFS 法规作为加州一整套气候变化解决方案的重要组成部分，为确保加州 2030 年总体碳排放比 1990 年的水平下降 40% 目标的总目标发挥了关键性作用。LCFS 法规已经在美国俄勒冈州和加拿大不列颠哥伦比亚省得到成功复制。巴西的一些地区也已经注意到了 LCFS 的成功，正在开发类似的交易体系。

在这里需要说明的是，低碳燃料法规与其他气候变化相关政策相辅相成，共同发挥作用，各个机制之间相互作用，并不存在此消彼长的关系。这也是目前中国相关行业参与者关注的重要问题。由于中国的低碳燃料标准体系尚未构建，市场发展也存在一些挑战和障碍，在交通全面电动化推进的方向指导下，对低碳燃料的应用和发展存在质疑，此中包括担忧构建政策体系的时效性及成本、对低碳燃料市场发展缺乏信心以及认为低碳燃料政策与电动化之间存在竞争关系等方面。交通零排放转型是一个长期的过程，电动化发展已成为不可逆转的趋势，但电动化推广也绝不是一蹴而就的事情，尤其是在重卡和非道路交通领域。低碳燃料作为碳减排的防御机制，将能持续促进交通排放不断降低，并为交通转型乃至社会的能源转型提供更多选择和保障。

### 5.1 加州 LCFS 对中国的借鉴意义

LCFS 机制如果能因地制宜地在中国部分城市和地区应用，有助于解决当前几个迫切的问题，具有较强的借鉴意义。

- (1) 可与全国碳排放权交易市场相辅相成，在地方试点平行推进，促进交通领域温室气体稳步减排

中国已承诺 2030 年前二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰，单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%，并在 2060 年之前实现碳中和的目标。随着工业、能源、建筑等部门能耗管理升级，这些领域均取得了较好的减排效果。与此同时，机动车保有量快速上升，交通部门的温室气体减排压力越来越大。LCFS 通过设定逐年下降的交通燃料碳强度目标，能抵消交通需求增长带来的排放增量，有利于稳步降低交通部门的温室气体排放，助力碳中和目标的实现。

- (2) 鼓励燃料多元化创新，控制减少石油消费总量

中国是石油消费大国，近年来石油消费增速迅猛，对外依存度已超过 70%，面临国家能源安全挑战。LCFS 能有效促进低碳交通燃料的多元化及技术创新，从供给侧推动交通燃料从石油向低碳燃料转型，同时，还可以降低开采加工过程中的能耗，减少石油消费。根据 ICF 的预测，到 2030 年，当 LCFS 的碳强度下降 20% 时，加州的石油消费量将下降 26%<sup>53</sup>。

- (3) 与“双积分政策”相互配合，促进新能源汽车的推广

在“双积分政策”下，传统燃油车企购买积分，新能源汽车企和消费者以直接或间接的方式获得补贴。在 LCFS 法规下，石油公司购买积分，不仅新能源汽车基础设施和车队

获得补贴，积分收益的一定比例通过清洁燃料奖励项目也可以间接补贴电动汽车消费者，与“双积分政策”相配合，有利于进一步促进新能源汽车的推广。

#### (4) 成为财税手段的重要补充

目前中国促进石油消费减量化主要依靠财税手段，例如成品油消费税，增加消费者的负担，因此施行的阻力较大。LCFS 可成为财税手段的重要补充，减排的成本由石油公司分担，积分收益既补贴了低碳燃料供应商，又通过容量积分补贴了新能源汽车配套的充电（加注）基础设施，同时给予快充和智能充电等基础设施的积分奖励，激励新技术的应用和推广。

## 5.2 实施低碳燃料法规对零排放汽车的促进作用

加州低碳燃料标准法规对电、氢能源及其基础设施提供了获益途径，如在中国实施类似的低碳燃料标准法规，将从以下几个方面促进包括电动汽车和氢燃料电池汽车在内的零排放汽车的推广应用。

### ◆ 为 EV 使用者提供可持续的奖励和补贴

加州低碳燃料标准法规 2.0 通过清洁燃料奖励项目直接对 EV 使用者提供补贴，根据电池容量 EV 使用者可获得 500-1400 美元不等的奖励，该举措可作为政府财政补贴的替代手段。

以电动乘用车为例，目前中国针对此类车型的补贴政策将在 2022 年底全面取消。按照 2020 年的标准，续航里程超过 400 公里的电动乘用车最高可获得 2.25 万元的补贴，2021 年补贴在此基础上退坡 20%，为 1.8 万元，2022 年在 2021 年基础上退坡 30%，为 1.26 万元。理论上，续航里程在 400 公里以上的车辆电池容量一般都超过 16kWh，按照加州标准，这类车可获得 1400 美元折合约 9100 元的奖金，这笔资金对一般消费者而言仍然具有较大的吸引力。

更为关键的是，基于低碳燃料标准法规对 EV 使用者提供的奖励和补贴不会占用公共财政资源，是可持续的。由国家财政直接提供补贴需要考虑的边界因素很多，容易造成“骗补”等不良行为。依靠一套基于市场机制的法规机制则可以尽量减低这种风险，在这一层面上，低碳燃料标准法规也不失为一个较好的选择。

### ◆ 鼓励基础设施项目建设和使用

在电动汽车推广前期，制约其发展的一个重要因素即是充电基础设施数量不足和分布不合理，随着基础设施的不断布局，提高充电设施利用率又成为一个新的挑战。燃料电池汽车推广也应遵循类似的发展模式。在加州低碳燃料标准法规中，关于基础设施的容量积分设计，便是为了鼓励投资者加大对直流快充和加氢站的投建，尽可能解决由于基础设施不足造成的零排放汽车发展受限问题。此外，基础设施拥有者还可以通过燃料路径获取低碳燃料积分，通过积分交易市场进一步获益。另一方面，电网公司也可以通过燃料路径获得低碳燃料积分，获得的部分收益有可能用来降低部分时段的电价，进一



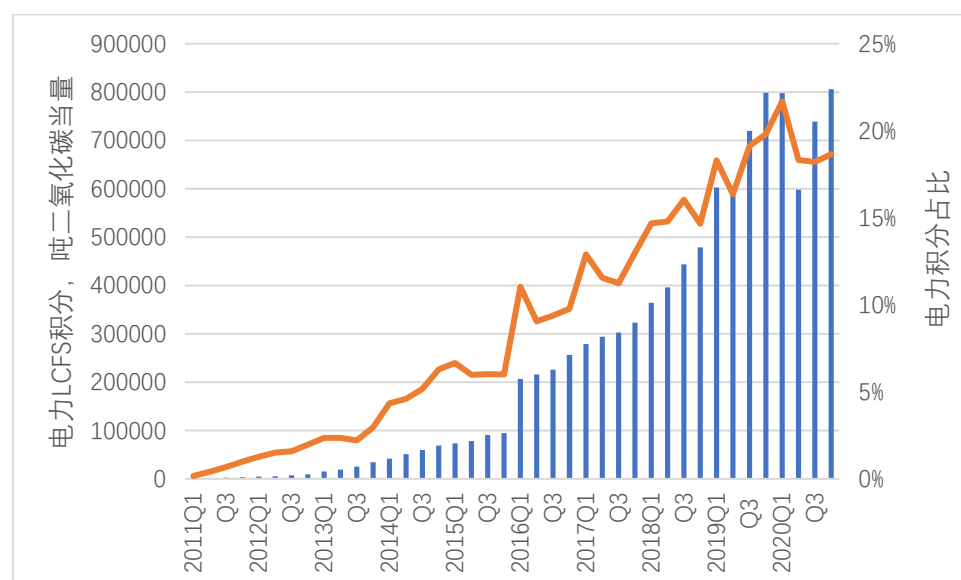
步鼓励了零排放汽车的使用，并提高基础设施的利用率。

### ◆ 电力从 LCFS 机制中的获益潜力

毫无疑问，随着交通行业的整体转型，电力将在加州低碳燃料标准法规中扮演越来越重要的角色。从 CARB 公布的分燃料类型的 LCFS 积分情况来看，2020 年四个季度电力 LCFS 积分占比均已超过 20%，如图 28。

2020 年，加州 LCFS 积分交易共完成 217.28 万吨二氧化碳当量的交易，每个积分的平均价格为 199 美元<sup>54</sup>，积分现金流共计 4.3 亿美元。假设这些积分从积分池中按比例进行交易，那么按照电力积分比例，2020 年电力从 LCFS 机制中的获益超过 8600 万美元。如果在中国实施低碳燃料标准法规，电力可获得的收益将更加巨大，一是中国市场体量巨大，二是中国的电动汽车保有量是加州的 15 倍左右，且近几年电动汽车的增长速度还将显著加快。

因此，电力将从 LCFS 机制中将获得巨大收益，这有助于促进电力相关领域产业的发展，而电动汽车则是其中的主要部分。



数据来源：CARB，iCET 整理

图 28 电力在加州 LCFS 机制中的地位

## 5.3 中国引入类似法规的政策建议

加州 LCFS 法规是在对加州当地交通能源充分调研的前提下，以燃料生命周期碳强度为评价参数，开发的一套完整的以模型核算为基础，以法规命令托底实施的政策体系。LCFS 法规对高碳油气企业实行强制合规管理，与中国体系下标准文件的性质不同。LCFS 法规具有很高的精细度和复杂度，在引入中国时，我们建议：

### ■ 建立交通能源消费统计制度与平台

LCFS 是一套基于定量核算机制的政策体系，完整、翔实且可靠的数据统计是政策实施的核心和关键。基于可靠的数据，合规主体上报的数据才能被追踪和核查，政策的公



平性和公正性也才能得以保证。而中国目前尚未建立专门服务于交通领域的能源消费统计制度与平台。除了服务于 LCFS 政策外,该统计平台还能在未来的碳市场及交易、碳达峰及碳中和研究和实施过程中发挥重要作用。考虑到中国的具体情况,建议交通能源消费统计制度与平台由发改委牵头,会同交通部、公安部和海关总署等相关部委共同负责制定。

而科学的燃料生命周期碳强度核算方法体系是建立上述制度和平台的基础。在之前的关键问题探讨中也已经指出,目前中国缺乏一套具备公信力的燃料生命周期温室气体核算工具。建立健全燃料生命周期温室气体核算标准是当务之急,前期试点可以由地方主管部门提出核算方法或指南,但是长期来看,需要以标准的形式加以规范。燃料生命周期温室气体排放的核算则可通过多种途径实现,包括支持高校和研究机构合力开发,以及推动和认可第三方认证渠道等。

#### ■ 开展交通燃料碳强度预测研究并提供相应工具

CARB 对低碳燃料强度基准值的预测是基于交通燃料的详细数据,通过核算平均碳强度,并在此基础上预测未来的情景,从而给出中长期的基准参数。目前,中国在燃料生命周期温室气体排放核算方面缺乏完备的数据库和相应标准,对交通燃料池碳强度缺少准确的定量判断,在此基础上的预测能力也亟待建设和加强。建议在引入低碳燃料政策过程中,集中研究力量开展交通燃料碳强度的预测研究,并结合前面提到的燃料生命周期温室气体核算工具,开发交通燃料碳强度预测工具,保证碳强度目标的严格性和可实现性。

#### ■ 精简标准体系

LCFS 较高的精细度确保了法规的科学性和公平性,同时也对法规实施管理提出了较高要求。目前中国交通低碳转型需求和压力都高于加州开始实施 LCFS 法规时期,为尽快落实低碳燃料系列政策,建议在引入时,在保证科学和公平的前提下,对标准体系进行精简设计。可精简的要素包括:

- 纳入标准体系的低碳燃料类型:在充分调研的基础上,纳入在中国具有高应用潜力的低碳燃料类型,初期暂不纳入技术实现难度高、难以大规模应用的低碳燃料。
- 对化石燃料供应商规模的认定:在标准设计初期,建议放宽化石燃料供应商的规模,即暂时仅对超过一定规模的供应商进行强制管理。后期随着经验的累积,认定标准可适度加严。
- 积分生成路径和规则:加州 LCFS 体系中目前包含了三种积分生成路径,在引入初期,建议先纳入规模较大、市场较为成熟的积分路径,同时积分生成规则尽可能设计得科学又不失简化,后期在市场逐渐成熟的基础上再对其他路径进行放开。

## ■ 设计适用于中国实施的低碳燃料积分（LCFC）交易机制

考虑到中国体系下标准与政策落实难度的巨大差异，我们建议设计一套中国特色的低碳燃料积分（LCFC）交易机制，类似于乘用车“双积分”政策中的 NEV 积分管理政策。LCFC 既解决了单纯标准在中国难以推行落实的困境，也符合精简标准体系的原则。下表对 LCFC、LCFS 与乘用车“双积分”政策三者之间的异同进行了简单梳理。

表 9 LCFC 机制与 LCFS 和 NEV 积分机制对比

	Low Carbon Fuel standard (LCFS)	Low Carbon Fuel Credits (LCFC)	NEV Credit
性质	<ul style="list-style-type: none"> <li>一套政策及标准体系，按燃料碳强度实施交易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>借鉴 NEV 积分办法，按 LCFC 积分体系进行交易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>“双积分”政策的重要组成部分，按照 NEV 积分进行交易</li> </ul>
积分获得依据	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料碳强度绝对值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料碳强度的关联函数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新能源汽车相关技术参数的关联函数</li> </ul>
对标基准	<ul style="list-style-type: none"> <li>统一设定的年度碳强度目标值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>统一设定的低碳燃料积分比例目标</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>统一设定的 NEV 积分比例目标</li> </ul>
参与主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>化石燃料供应商</li> <li>替代燃料供应商</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>化石燃料供应商</li> <li>替代燃料供应商</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>传统车企</li> <li>新能源车企（或二者兼具的车企）</li> </ul>
优势	<ul style="list-style-type: none"> <li>严格以碳强度绝对值为参照</li> <li>定量评价 LCFS 对温室气体减排的影响</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>政策灵活执行</li> <li>可对需要鼓励的低碳燃料或路径进行积分赋值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>灵活根据市场发展设定车型的积分获得办法</li> <li>可实施性高</li> </ul>
劣势	<ul style="list-style-type: none"> <li>方法学较为复杂</li> <li>需要严格按照方法学执行</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>并不与燃料碳强度及减排潜力一一对应</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不与新能源汽车的真实减排潜力一一对应</li> </ul>

例如：当前汽油燃料周期碳强度约为 92 gCO<sub>2</sub>e/MJ，假设在汽油碳强度基础上下降 1% 可获得 1 个 LCFC 积分（精确到小数点后一位）。如果某种燃料的碳强度绝对值为 80 gCO<sub>2</sub>e/MJ，那么每兆焦该燃料可获得 13 个 LCFC 积分，总积分为该燃料的单位积分与销售总量的乘积。每个年度设定不同的 LCFC 积分比例目标，核算基准为高碳化石燃料的销售总量（以兆焦计）。如果某种替代燃料具有较好的应用前景和减排潜力，但发展进度较慢，LCFC 政策还可对这种燃料提供额外的积分优惠核算。

采用 LCFC 机制的优势在于，可以及时识别出具有减排潜力的低碳燃料并及时判断是否需要对该燃料进行政策倾斜，同理还可以在某种燃料已充分发展之后取消对它的政策优惠。而且，LCFC 直接作为一套完整的政策出台，配合相关措施便可以落地实施，从而加快低碳燃料相关政策在中国的推进进度。

## ■ 建立和加强第三方核证体系

低碳燃料标准的实施必须依靠准确的数据监测、报告和核查系统。2018 年加州空气资源委员会通过修正案要求企业在申报数据时必须经过第三方审核机构的核正，以保证数据的完整度、精确度和与法规的一致性。为落实这一措施，加州空气资源委员会对第

---

三方核证系统工作人员提出了严格的资质要求且不允许与 LCFS 合规主体之间存在利益冲突。同时，加州空气资源委员会员工还会为第三方核正人员提供免费的技术培训及资料，通过批准被认可的第三方核证机构名单可以在 CARB 网站上进行查询。

低碳燃料市场的数据监管和监测与碳市场基本相同，碳市场的部分经验可以利用，教训也值得反思和借鉴。中国的全国碳市场交易从 2021 年 7 月才正式启动交易，但碳排放数据的检测和监管边界比较模糊，普遍存在数据偏差，数据核正尚未形成标准规范化操作，可能会出现人为操作的漏洞。另一方面，由于系统性培训不足，各地的核查机构和人员水平参差不齐。2021 年 7 月 6 日通报的“内蒙古鄂尔多斯高新材料有限公司虚报碳排放报告案”是全国范围内首次公开披露的碳排放报告造假案件，原因在于第三方核查机构的工作进程受多种因素影响因此对检测时间进行了更改。这一方面说明中国碳市场第三方核证机构及人员的资质有待提升，侧面也反映了第三方核证机构数量的短缺，另一方面也说明数据的监管和监测标准不够完善。

在低碳燃料政策构建的过程中，要同步建立和完善数据监测和核查标准，构建第三方机构核正体系，同时积极培育一批专业技术人员，加强第三方机构和人员的业务水平。

#### ■ 建立试点省市或地区

首先要充分识别低碳燃料政策在中国本地化过程中需要克服的问题，根据地方需求与积极性，建立地方试点。地方试点应满足以下几个条件：

第一，强有力的政府部门牵头，多部门协同配合。

第二，根据该地区的能源禀赋、发展需求和所偏重的技术路线，可建立相对独立的省级/区域性试点交易市场。

第三，研究构建多种多样的燃料路径发展及合规情景，并基于预测结果不断调整目标设置。情景分析的主要结论应包括不同技术路线发展情景下，对生成积分的数量、储量、市场交易量和价格的预测。

第四，保持机制的灵活性，对机制不断调整更新，间隔以两到四年为宜，同时保持规则的连贯性、统一性，保护参与主体对政策的信心和正向预期。例如：为了应对技术的创新发展和日渐严格的合规要求，可逐渐增加燃料品类或积分生成路径。在此过程中，应充分考虑新增路径对积分增量、储量、价格的影响，甚至对其他碳市场的间接影响。既要考虑到新路径对某类替代燃料发展的激励和促进作用，也要考虑到新路径是否会因生成积分的体量过大，导致降低整体低碳燃料积分价格，从而降低传导到终端燃料价格中的碳价。

---

## 参考资料

---

- <sup>1</sup> CARB, <https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/credit/lrtmonthlycreditreports.htm>
- <sup>2</sup> iGDP, 2020 能源数据 <https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lcege-20210430-3/2020%E8%83%BD%E6%BA%90%E6%95%B0%E6%8D%AE.pdf>.
- <sup>3</sup> WRI,  
[https://www.wri.org.cn/en/publication/toward\\_net\\_zero\\_emissions\\_road\\_transport\\_sector\\_china\\_EN](https://www.wri.org.cn/en/publication/toward_net_zero_emissions_road_transport_sector_china_EN)
- <sup>4</sup> CARB, LCFS dashboard, <https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/dashboard/dashboard.htm>
- <sup>5</sup> Climate Action Reserve. California Climate Action Registry.  
<http://www.climateactionreserve.org/about-us/california-climate-action-registry/>
- <sup>6</sup> California Energy Commission, <https://www.energy.ca.gov/about/core-responsibility-fact-sheets/transforming-transportation>
- <sup>7</sup> Caliofrnia Delivers, <http://www.cadelivers.org/low-carbon-fuel-standard/>
- <sup>8</sup> CARB. Lookup Table Pathways. [https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/ca-greet/lut.pdf?\\_ga=2.79493527.2012975654.1610508873-180490670.1587719210](https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/ca-greet/lut.pdf?_ga=2.79493527.2012975654.1610508873-180490670.1587719210)
- <sup>9</sup> CARB. LCFS Life Cycle Analysis Models and Documentation.  
<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-life-cycle-analysis-models-and-documentation>
- <sup>10</sup> Energy and Environmental Economics, Inc. Achieving Carbon Neutrality in California. PATHWAYS Scenarios Developed for the California Air Resources Board. Aug. 2020.
- <sup>11</sup> 南加州爱迪生公司官方网站。 <https://evrebates.sce.com/>
- <sup>12</sup> CARB, <https://ww2.arb.ca.gov/bp-products-north-america-inc-settlement-2020>
- <sup>13</sup> CARB, [https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/2018-0815\\_illustrative\\_compliance\\_scenario\\_calc.xlsx?\\_ga=2.194873133.1680890640.1612844594-1606319933.1542747112](https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/2018-0815_illustrative_compliance_scenario_calc.xlsx?_ga=2.194873133.1680890640.1612844594-1606319933.1542747112)
- <sup>14</sup> CARB, <https://www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf>
- <sup>15</sup> CARB, [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/workgroups/advisorypanel/20111208\\_LCFS%20program%20review%20report\\_final.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/workgroups/advisorypanel/20111208_LCFS%20program%20review%20report_final.pdf)
- <sup>16</sup> CARB, <https://ww3.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15appb.pdf>
- <sup>17</sup> CARB, <https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/rulemakingdocs.htm>
- <sup>18</sup> LexisNexis. Pratt's Energy Law Report. Vol. 19-1. pp.6. Internal Revenue Cods 45Q 是指对二氧化碳隔离所给予的抵税额制度。
- <sup>19</sup> CARB. Cap-and-Trade Program. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program/about>
- <sup>20</sup> LexisNexis. Pratt's Energy Law Report. Vol. 19-1. pp.3
- <sup>21</sup> CARB. California's 2017 Climate Change Scoping Plan.  
[https://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/scoping\\_plan\\_2017.pdf](https://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf).
- <sup>22</sup> ICF. <https://caletc.com/assets/files/Final-Report-Cap-and-Trade-LCFS.pdf>
- <sup>23</sup> 国家统计局, 中国统计年鉴 2020.
- <sup>24</sup> Biodiesel Program at University of Idaho,  
[https://biodieseleducation.org/More/brochures/BD\\_VS\\_RD.pdf](https://biodieseleducation.org/More/brochures/BD_VS_RD.pdf)
- <sup>25</sup> 国信证券, [http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN\\_RES/INDUS/2020/12/30/2a6a588b-26d8-462a-b4a3-e8de2fb59b82.pdf](http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2020/12/30/2a6a588b-26d8-462a-b4a3-e8de2fb59b82.pdf)
- <sup>26</sup> 吉林省人民政府, [http://www.jl.gov.cn/szfzt/tzcyj/zdxm/syhg/202101/t20210119\\_7917048.html](http://www.jl.gov.cn/szfzt/tzcyj/zdxm/syhg/202101/t20210119_7917048.html)
- <sup>27</sup> 新华网, [http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/18/c\\_1127223970.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/18/c_1127223970.htm)
- <sup>28</sup> 海南省第六届人民代表大会第四次会议专题报道,  
<http://www.hainanpc.net/hainanpc/ztzl/ljsc63/yajy70/1010433/index.html>
- <sup>29</sup> 新华网, [http://www.xinhuanet.com/energy/2017-11/22/c\\_1121993250.htm](http://www.xinhuanet.com/energy/2017-11/22/c_1121993250.htm)

- 
- <sup>30</sup> Reuters, <https://www.reuters.com/article/us-china-health-oil-aviation-idUSKBN1ZZ0F5>
- <sup>31</sup> 国家能源局科技司负责人就《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案问答》. 2017 年 9 月 13 日. [http://www.nea.gov.cn/2017-09/13/c\\_136606048.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-09/13/c_136606048.htm)
- <sup>32</sup> 中国新闻网, <https://www.chinanews.com/cj/2021/03-30/9443384.shtml>
- <sup>33</sup> 中国能源网, <https://www.china5e.com/encyclopedia/news-104383-1.html>
- <sup>34</sup> 中国经济网, [http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202107/30/t20210730\\_36764587.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202107/30/t20210730_36764587.shtml)
- <sup>35</sup> 氢启未来, <https://www.h2weilai.com/cms/index/shows/catid/88/id/2402.html>
- <sup>36</sup> 新浪财经, <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-04-26/doc-ikmyaawc1850561.shtml>
- <sup>37</sup> <http://www.mei.net.cn/qcgy/202103/1714661256.html>
- <sup>38</sup> 第一财经. 环境部: 中国碳市场已成为全球配额成交量第二大碳市场. 2020 年 9 月 25 日, <https://www.yicai.com/news/100784513.html>
- <sup>39</sup> 中华人民共和国中央人民政府, [http://www.gov.cn/guowuyuan/2021-07/16/content\\_5625574.htm](http://www.gov.cn/guowuyuan/2021-07/16/content_5625574.htm)
- <sup>40</sup> 《北京市重点排放单位二氧化碳核算和报告指南》. 2020 年 10 月 10 日. <https://www.bjets.com.cn/article/zcfg/202010/20201000001776.shtml>
- <sup>41</sup> 上海市生态环境局关于印发《上海市纳入碳排放配额管理单位名单 (2019 版)》及《上海市 2019 年碳排放配额分配方案》的通知. 2020 年 6 月 22 日. <https://www.cneeex.com/c/2020-06-22/490538.shtml>
- <sup>42</sup> 能源与交通创新中心. 《2019 中国乘用车双积分研究报告》. 2020 年 3 月.
- <sup>43</sup> 搜狐, [https://www.sohu.com/a/387384183\\_100115667](https://www.sohu.com/a/387384183_100115667)
- <sup>44</sup> 国家木薯产业技术体系信息平台, <http://www.cassava.org.cn/article.aspx?id=375>
- <sup>45</sup> Peng T, Zhou S, Yuan Z, Ou X\*. Life Cycle Greenhouse Gas Analysis of Multiple Vehicle Fuel Pathways in China. Sustainability. 2017; 9(12):2183
- <sup>46</sup> 中华人民共和国商务部, <http://www.licence.org.cn/article/spxyxyj/201709/8168.html>
- <sup>47</sup> 中国化工报, <http://www.ccin.com.cn/detail/64c568631c6a5c04e146c26e42f25391/news>
- <sup>48</sup> 天冠集团, <http://www.tianguan.com.cn/jituan/lslnys.asp>
- <sup>49</sup> Thomas, <https://www.thomasnet.com/articles/top-suppliers/ethanol-plants/>
- <sup>50</sup> 碳道小编, [https://ideacarbon.org/news\\_free/51870/](https://ideacarbon.org/news_free/51870/)
- <sup>51</sup> 天风期货研究所, <https://www.thanf.com/uploadfile/2021/0519/20210519014332443.pdf>
- <sup>52</sup> IRENA, <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol-ZH>
- <sup>53</sup> ICF, Post-2020 Carbon Constraints. 2017.02.
- <sup>54</sup> CARB, <https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/credit/lrtmonthlycreditreports.htm>