

中国履行《基加利修正案》减排 HFC-23 对策研究

执行摘要



北京大学环境科学与工程学院

生态环境部对外合作与交流中心

2021 年 8 月 31 日

报告编写人员：

北京大学环境科学与工程学院

胡建信 赵星辰 香雪莹 白富丽 姜鹏南 张剑波

许伟光 安民得

生态环境部对外合作与交流中心

王开祥 尚书文 王媛 龚兴明 赵新光

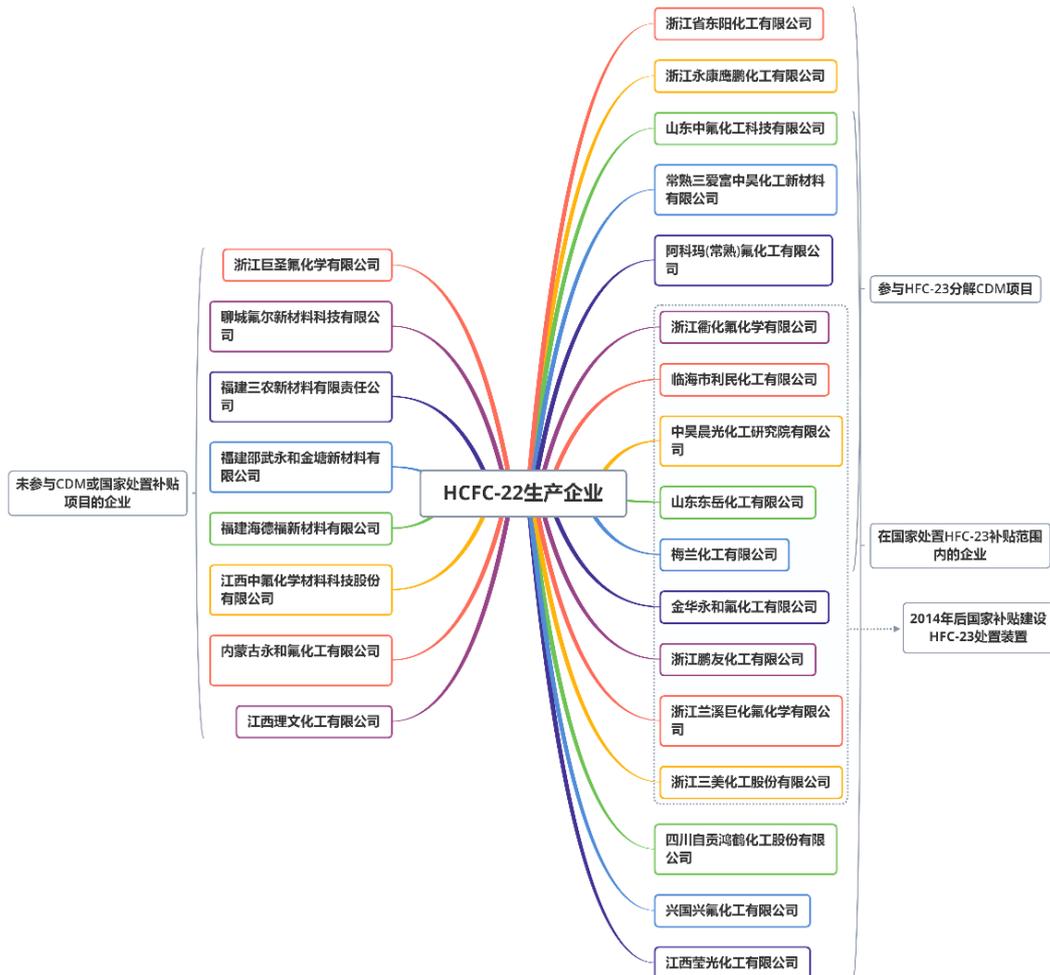
执行摘要

2016 年《蒙特利尔议定书》缔约方大会上达成了《基加利修正案》，加入修正案的缔约国从 2020 年 1 月 1 日起，必须采用缔约国大会认可的处置技术尽可能销毁 HFC-23。中国已经接受《基加利修正案》，将于 2021 年 9 月 15 日开始正式履行《基加利修正案》，最重要的首要任务就是所有的 HCFC-22 生产企业必须采用缔约国大会批准的处置技术销毁 HFC-23，并依据公约要求进行排放数据报告。

中国已经实施不同管控程度的 HFC-23 减排超过十五年。在《京都议定书》生效后，国际社会开展了一系列 HFC-23 减排项目以减缓温室效应。2005-2014 年期间，全球通过 HFC-23 清洁发展机制(CDM)项目累计减排 HFC-23 约 5.33 万吨，折合二氧化碳当量 7.89 亿吨；其中，中国贡献了 75.8%的 HFC-23 减排量。HFC-23 分解 CDM 项目停止执行后，发达国家按照其既定减排方式持续减排，中印等发展中国家则开始了自愿自主减排行动。中国政府开展了资助企业减排 HFC-23 的行动。依据中国气候变化管理部门的信息，2014—2019 年，中国自主减排 HFC-23 累计约 6.49 万吨（9.61 亿吨 CO₂-eq）。

据初步统计，截止 2020 年底中国在册共有 21 家 HCFC-22 生产企业，已建成 HCFC-22 生产线共 19 家企业，年产能达 88.95 万吨；2 家企业 HCFC-22 生产线在建，预计将在 2021 或 2022 年建成投产。19 家建成企业中 18 家企业在产，1 家（江西莹光）企业长期处于停产状态。HCFC-22 生产企业主要集中在中国的东南部地区，其中浙江省下属的 HCFC-22 企业数量最多共 7 家，其次江西省下属 4 家，江苏省、福建省分别下属 3 家，山东省有 2 家，四川省和内蒙古自治区

各有1家；其中，浙江、山东和江苏三省的HCFC-22总产能分别占全国总产能的27%、24%和22%。



摘要图 1 HCFC-22 生产企业参与 HFC-23 处置项目情况汇总

上述企业中，共有 10 家企业先后参加 HFC-23 分解 CDM 项目，建立了 11 套 HFC-23 处置装置。2014-2019 年，中国开展温室气体自主减排行动，共有 9 家企业新建 12 套 HFC-23 处置装置，11 家企业自愿开展 HFC-23 处置并获得财政补贴。2020 年底，先后有 6 家企业 HCFC-22 建成投产，并配套建设有 HFC-23 焚烧处理装置，但没有相关 HFC-23 处置的公开信息。

对 21 家 HCFC-22 生产企业中 20 家发放了调查问卷，对企业 2020 年 HFC-23 副产、处置以及现有处置、存储、监测设施和能力等情况进行函调。调查显示，2020 年仍有 1 家企业（福建邵武）在建，在产企业共 18 家。17 家企业共建有 30 套 HFC-23 处置装置，具备充足的处置能力。

HFC-23 副产将长期存在

HCFC-22 生产用途分两种：ODS 用途和原料用途。2021-2030 年间，中国 ODS 用途 HCFC-22 的产量按《议定书》规定的淘汰时间表继续削减，同时原料用途产量逐步增长，HCFC-22 总产量在该时间段波动变化。按照《议定书》的要求，2030-2040 年仅允许保留 HCFCs 生产基线水平的 2.5%用于维修，ODS 用途的 HCFC-22 产量在此期间维持在较低的水平，HCFC-22 总产量受原料用途产量主导，2030 年之后呈现增长趋势。假设 2060 年全部中国企业降低 HFC-23 的副产率到 1%的水平，按照现有技术（不转化），预计 2060 年产生的 HFC-23 在 1.2 万吨（1%副产率）到 2.65 万吨（2019 年副产率）之间。

HFC-23 副产相关工艺过程排放值得关注

从文献和企业调查结果来看，HCFC-22 生产过程部分环节存在 HFC-23 的产生或排放，比如水洗和碱洗、维修等环节；此外，一些其它来源也是客观存在，如 HFC-32、TEF 和 HFP 的生产过程可能产生 HFC-23，需要加大研究力度掌握 HFC-23 排放。

HFC-23 减排技术路径选择可以采用最普遍的污染物“三化”方式，即减量化、资源化和无害化的减排技术途径。

减量化——降低 HFC-23 副产率

从 HCFC-22 生产工艺过程控制降低 HFC-23 的副产率是可行的。降低 HFC-23 的副产率,可通过提高催化剂五氯化锑(SbCl_5)的寿命;优化反应压力、反应温度、催化剂浓度、HF 给料速率、 Cl_2 给料速率;调整 HCFC-22 生产过程中的原料供给配比和进料方式等实现。调查发现,中国少数 HCFC-22 生产企业将 HFC-23 的副产率一般控制在 1.5%以下水平。国内多数企业由于工艺设备或管理等因素的制约,HFC-23 副产率仍处于 2-3%左右的较高水平。目前国内已进行产业化装置技术改进和过程优化的企业,可使其反应设备寿命由原来的 2 年延长至 10 年以上,同时将 HFC-23 的副产率从 3%降低至 1%以下。

资源化——作为化工原料利用

HFC-23 的排放源相对集中,纯度较高,十分有利于对其进行资源化利用,将其转化为具有经济价值的含氟中间体和含氟单体等含氟化合物,实现氟资源的有效利用。资源化处置将是未来 HFC-23 减排的新途径和技术选择趋势,但目前国内对 HFC-23 资源化利用处置技术的研究多处于实验室研究阶段,尚未进行商业化生产应用。

综合 HFC-23 转化反应条件、转化产物市场需求、转化技术成熟度、二次污染状况以及经济效益等考虑,HFC-23 与 CH_4 共裂解制备 VDF、与 CHCl_3 反应合成 HCFC-22 以及 HFC-23 与 I_2 反应合成 CF_3I 具有一定比较优势。其中,HFC-23 与 CH_4 反应高温合成 VDF 已取得技术性突破,HFC-23 转化率可达 95%,VDF 选择性达 83%,该技术已进入工业试验阶段;HFC-23 与 CHCl_3 反应合成 HCFC-22,具有较好的经济效益和社会效益,且产物中,HCFC-22 经过分离可以回收利用,剩余尾气无需处理,仍可以循环至反应器中作为与 HFC-23 共同反应的气体,提高了反应物的转化率,实现零排放。

目前由北京大学牵头实施的科技部“大气污染成因与控制技术研究”重点专项中的项目“公约受控卤代烃减排成效评估和预测预警研究”的第四课题（浙江化工研究院承担）针对 HFC-23 减排的国际要求和我国焚烧技术面临的成本和环保压力，研究开发适合工业化的 HFC-23 转化路线；拟通过构建高效的氟氯交换催化体系，在较温和条件下诱导稳定的 C-F 键的活化，将 HFC-23 转化为具有规模化应用价值的含氟化学品，为 HFC-23 可持续的资源化利用提供技术解决方案。

无害化——高温焚烧处置

根据 IPCC 2014 年的报告，当今可用的热销毁技术可以使 HFC-23 的排放量减少高达 99%，在最佳条件（即 HFC-23 排放流相对浓缩，而且流速低）下可达到 99% 以上。《京都议定书》下的 CDM 项目和中国国家发展改革委出台的《关于组织开展氢氟碳化物处置相关工作的通知》（发改办气候[2015]1189 号）针对 HFC-23 的减排，采用的措施均为销毁处置。

目前国内外销毁 HFC-23 绝大多数采用高温焚烧技术，热氧化分解 HFC-23 的原理基本是一样的。然而高温焚烧过程不仅耗费能源，产生新的废弃物；也会造成氟资源的浪费，不利于我国战略性氟资源的可持续利用。

战略目标和技術路线

应对气候变化是中国国家战略，是国家可持续发展的内在需要，也是推动构建人类命运共同体的责任担当。中国将继续把 HFCs 减排纳入国家气候变化战略和行动；尽可能地采取资源节约和环保技术消除 HFC-23 的排放，推行可持续的减排 HFC-23 措施，努力消除所有

HFC-23 排放。国际公约履约要求与国家气候变化战略目标相一致，即尽可能减少 HFC-23 的排放。

根据现有数据测算，在当前 HCFC-22 生产工艺不变的情况下，预计 2060 年之前中国将焚烧（无害化处置）约 **121.0 (97.5-149.3) 亿吨二氧化碳当量**（约 81.7（65.9-100.9）万吨实物）HFC-23。

从经济性和环境友好性来说，减排 HFC-23 的技术路线通常认为降低副产率>转化 HFC-23>焚烧。但是《基加利修正案》生效之日起，是要求企业竭尽全力处置 HFC-23 避免排放。预期焚烧、降低副产率和转化等减排技术将在不同的 HCFC-22 生产企业同时存在。通过优化生产工艺降低副产率能减少 HFC-23 产生量以减少焚烧量；更进一步，推动转化技术的研发并尽快投入转化装置处置 HFC-23，不仅会提高有效利用氟资源，而且转化产物的收益能抵消技术研发及其应用的成本，转化 HFC-23 将获得正经济收益。

实现这一排放控制目标则主要可以开展以下行动。

- （1）减少 HCFC-22 生产企业生产过程中 HFC-23 的产生量（也就是降低副产率）；
- （2）捕获副产 HFC-23 将其转化为其他产品（也就是将其资源化）；
- （3）减少整个 HCFC-22 生产工艺过程的不同环节 HFC-23 的排放量（泄露量），实现清洁生产；
- （4）通过环境友好的方式焚烧任何能够捕获的欲排放的 HFC-23，满足公约的要求。

上述行动(4)是中国部分企业自 2005 年以来实施十余年的措施，而降低副产率及转化为其他产品，依赖技术的进步。

考虑到企业从经济效益出发，会自觉将 HFC-23 副产率降低到各自合理的最低水平，建议国家减排 HFC-23 战略分为如下两个阶段：

第一阶段：履约初期。以无害化为主，发布强制性政策，要求企业对其副产 HFC-23 进行高温焚烧处置；从政策和管理上，鼓励和支持行业、企业、科研机构研究和开发以 HFC-23 作为化工原料的工业化生产工艺和产品，力争 3-5 年内取得突破。

第二阶段：中长期（2025 年以后）。以资源化利用 HFC-23 为主，指导和支持企业逐步并最终全部采用以 HFC-23 作为化工原料的成熟生产技术和工艺，使副产 HFC-23 在得到资源化循环利用的同时实现减排目标。

减排 HFC-23 对策与行动建议

基于减排 HFC-23 战略设想，建议采取的对策和行动如下。

制订和颁布强制减排 HFC-23 部门规章

在中国正式加入《基加利修正案》后，应尽早制订和颁布对副产 HFC-23 实施强制减排管理的部门规章，要求所有 HCFC-22 企业按规定对副产 HFC-23 进行排放控制和减排，并进行相应的 HFC-23 数据报告。

部门规章作为实施管理的重要依据，在明确强制减排总体要求的同时明确相关管理要求的细节，具有可操作性，具体包括企业对副产 HFC-23 排放控制、对产生 HFC-23 的收集、监测、处置规范、数据报

告以及监督管理等。对重要技术管理要求可以技术性文件形式进行规范，相关技术文件建议见以下建议。

研究制定 HFC-23 处置技术规范

根据《议定书》缔约国大会核准的处置技术以及国家有关危险废物处置的有关规定，参考 CDM 和财政补贴 HFC-23 处置项目采用的相关技术标准，研究制定 HFC-23 处置技术规范，包括技术、设计、设施、效率、排放以及运行管理与维护等相关要求。

企业须遵从技术规范，对其 HFC-23 处置装置技术符合性提供证明材料和支持性文件，在年度数据报告中对其 HFC-23 处置装置运行、维护、管理等符合性提供说明和支持性材料。

制定监测、排放核算与报告制度

为履行《议定书》规定的 HFC-23 数据报告义务，需要每个 HCFC-22 生产企业提供 HFC-23 及相关数据信息，因此，建议研究制定关于 HFC-23 的企业数据报告制度。数据报告的核心包括 HFC-23 的产生量、捕获量、销毁量、排放量等数据信息，这些数据信息通常需要通过必要的测算或核算获得，而数据计算的基础主要来源于监测。CDM 和财政补贴 HFC-23 处置项目均对此有相关规定和实践操作。基于此，本研究建议中国政府履约管理部门制定并出台针对 HCFC-22 生产企业关于 HFC-23 的监测、排放核算和报告制度，细化和明晰相关管理规定。

鉴于各企业生产技术、装置、设施及操作（主要指是否进行 HFC-23 收集）等均不同，因此，建议有关监测规定可作原则性要求，各企业需根据本企业具体情况，按照原则性规定和要求制定本企业详细监测方案、监测计划并加以落实。

建议企业数据报告中应明确说明具体监测结果及相关数据信息核算方法。提交的数据信息应同时满足履约数据报告的要求和国家关于温室气体排放报告的相关要求。

建立完善监管机制

对减排处置 HFC-23 的监督管理是每个签约政府的应有职责。CDM 和财政补贴项目对 HFC-23 处置项目实现的温室气体减排量采用独立第三方核查机制。2021 年 3 月 29 日，生态环境部发布的《企业温室气体排放报告核查指南（试行）》明确了对企业温室气体，包括 HFC-23 排放报告的核查要求和工作机制。从履约监管角度，探讨和吸收 CDM 与财政补贴 HFC-23 处置项目的成功经验，将企业 HFC-23 减排的监督管理有机衔接和纳入国家温室气体排放报告的监督核查体系是最为有效的监管路径。建议政府相关管理部门进行协商沟通，建立有效且高效的相关监管机制和具体的监管办法。

同时，建议管理要求应包括，企业完整保存有关生产经营活动和处置 HFC-23 相关的原始资料至少 3 年，并按照生态环境主管部门的规定，每年 3 月底前报送相关数据报告，以满足监管核查与公约数据报送的时限要求。

根据目前掌握的信息，企业 HFC-23 排放量是基于装置设施上的相关监测和一定的核算方法计算得出，对 HCFC-22 生产企业 HFC-23 实际排放量，包括无组织排放的监测和研究很少，企业上报的排放量数据和实际排放量的符合性及偏差值得关注和研究。建议选择适当企业，开展企业厂界或工业园区的 HFC-23 研究性监测与分析工作，探索开展企业厂界、工业园区监测的可行性和分析方法，以提高企业数据报告和监督管理的合理性和可靠性。

研究制定 HFCs 管理政策

建议研究制定并尽早出台 HFCs 管理政策和实施办法，可参照现行 ODS 管理方式，对 HFC-23 作为原料转化、收集、销售、库存、使用以及有意生产的 HFC-23 等实施有效管理。

鼓励减少 HCFC-22 生产过程中 HFC-23 的产生量

为鼓励企业开展技术改造降低 HFC-23 副产率，建议将副产率低于 2% 的 HCFC-22 生产技术纳入《产业结构调整目录》的鼓励类中。

鼓励和支持 HFC-23 原料用途研发

作为化工生产原料用途资源化循环利用 HFC-23 是可持续减排 HFC-23 的最佳途径，从现有研究进展来看，资源化利用 HFC-23 是可行的。建议国家有关主管部门增加对 HFC-23 生产原料用途科研的投入；在政策和资金上对 HFC-23 转化示范工程予以支持；鼓励企业开发和采用 HFC-23 转化技术。同时，将成熟的 HFC-23 转化技术增加到《产业结构调整目录》的鼓励类中。

研究制定 HFC-23 排放标准的可行性

中国已有机构开展了关于 HFC-23 排放标准的研究工作，非常具有参考价值，有关研究报告见附件 4。HFC-23 作为强温室气体，减排其核心是减少对大气中的排放量，在以往的减排行动和管理上重点主要在减排方式和减排量，对排放量没有量化的要求和标准。项目组建议继续开展 HFC-23 排放标准研究，探讨对 HCFC-22 生产企业 HFC-23 排放进行量化管控的可行性，研究制定科学、合理的分阶段排放标准，以对企业 HFC-23 实际排放总量进行有效管控，进一步减少 HFC-23 排放。

公众宣传和教育

国家履约主管部门应组织编制关于气候变化、国际公约履约以及 HFC-23 减排技术与措施的宣传和培训材料，利用不同媒介和方式，有针对性的对公众、地方有关主管部门管理人员、相关行业企业等开展宣传和培训活动。

建议相关管理部门对主动自愿并认真实施 HFC-23 处置减排工作的企业、对积极投入和开展 HFC-23 转化技术研发并卓有成效的企业予以宣传和表彰。

减排 HFC-23 的费用需求和环境效益分析

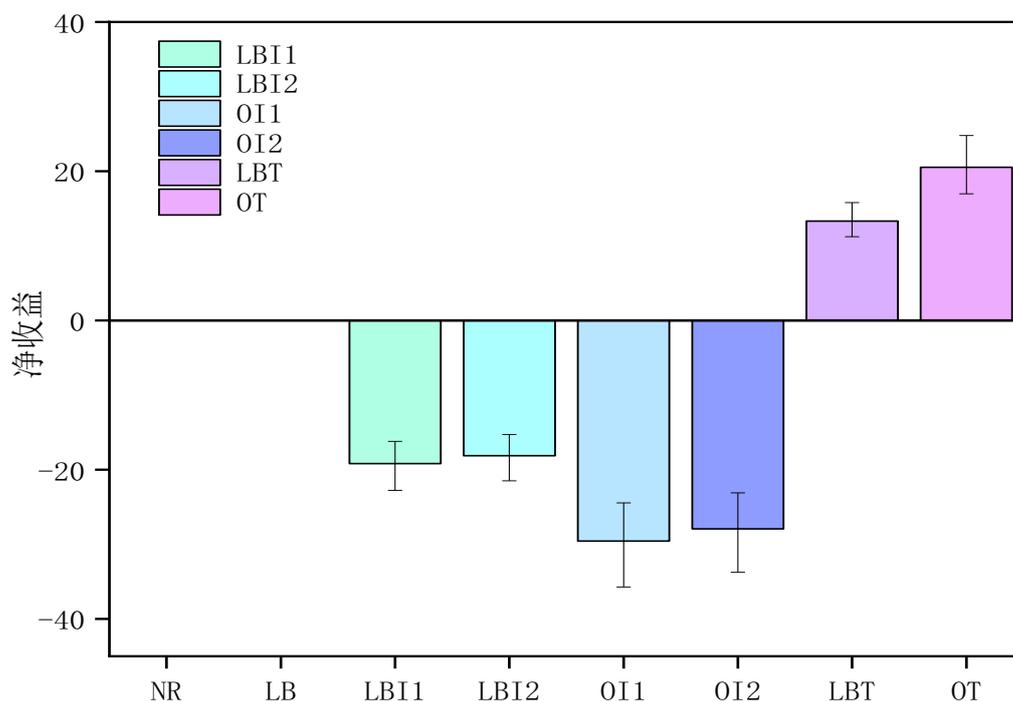
HCFC-22 企业处置 HFC-23 需要购置安装焚烧装置，并且需要配套安装监测系统用于测量处置过程中的相关参数，以便核证减排量获得补贴。从成本发生源角度看，HCFC-22 生产企业是 HFC-23 焚烧装置和监测系统的用户，本研究计算的 HFC-23 处置成本为企业购入设备及之后发生的购买、运行和维护管理成本。事实上，企业需要的规划场地和配备能源供应等投资，因为回收 HFC-23 而错过其他副产物回收的收益，都不在本研究成本估算范围中。

本研究分别估算了两种 HFC-23 焚烧技术的单位 HFC-23 减排成本，辅助燃料焚烧工艺和等离子体焚烧工艺的单位 HFC-23 焚烧减排成本分别为 6321 和 6695 元/吨 HFC-23，单位 CO₂-eq 减排成本分别为 0.43 和 0.45 元/吨 CO₂-eq。

使用氟氯交换 HFC-23 转化技术减排单位 HFC-23 的成本是转化投入和产品收益。分析可知，每吨 HFC-23 转化可产生 4646 元的净收益。

“各技术减排单位 HFC-23 成本-效益分析”的计算可知单位质量 HFC-23 焚烧和转化的成本及收益，结合预测的 HFC-23 未来产生量

即可估算 2021-2060 年中国各 HFC-23 排放控制情景下的净收益（3% 贴现率）。NR 表示没有控制措施的情景，因此该情景下控制 HFC-23 排放的成本和收益均为 0。LB 情景下，假设计算时间段内降低 HFC-23 副产率的投资和收入平衡，因此降低 HFC-23 副产率单位的净收益为 0。LBI1 和 LBI2 情景，由于 HFC-23 副产率降低，HFC-23 总焚烧成本下降，分别为 19（16-23）和 18（15-21）亿元。OI1 和 OI2 情景下，仅采取焚烧方式处置 HFC-23，没有收益，2021-2060 年处置 HFC-23 的总成本分别为 30（24-36）和 28（23-34）亿元，相对于 LBI1 和 LBI2 情景焚烧成本增加约 54%。LBT 情景下，HFC-23 转化净收益约 13（11-16）亿元。OT 情景下，副产的 HFC-23 全部转化，收益大于成本，2021-2060 年累积收益约 21（17-25）亿元，较 LBT 情景净收益增加约 54%。



摘要图 2 2021-2060 年各 HFC-23 排放控制情景下累计净收益 (亿元)

HFC-23 焚烧和转化不能完全消除 HFC-23 的排放，根据 HFC-23 排放源分析，焚烧处置 HFC-23 情景下主要存在两部分排放源：HCFC-

22 生产装置泄露排放（泄漏率 2%），HFC-23 处置装置尾气排放（装置 99.9%的处置效率）；HFC-23 转化排放源主要是 HCFC-22 生产装置泄露（泄漏率 2%）。在 NR 情景下，2021-2060 年中国 HFC-23 排放总量为 81.7 (65.9 -100.9)万吨，相当于 121.0 (97.5 -149.3)亿吨二氧化碳当量。LB、LBI、OI、LBT 和 OT 情景下 HFC-23 排放量分别为 NR 情景下排放量的 58.8%、1.2%、2.1%、1.2%、2.0%。

综合成本-效益（环境、经济）分析结果可知，OT 情景为未来控制 HFC-23 排放最佳的路线。该情景下，2021-2060 年中国可实现 HFC-23 减排量约 80.1 (63.9 -99.5)万吨，相当于 118.6 (94.5 -147.3) 亿吨二氧化碳当量。同时，使用氟氯交换 HFC-23 转化技术减排单位质量 HFC-23 可产生 4646 元净收益；OT 情景下，2021-2060 年中国转化 HFC-23 累积收益约 21（17-25）亿元。