减少固体废弃物领域甲烷排放

加利福尼亚州的经验

2023年3月

决策者摘要

BERKELEY LAB

Berkeley Law | California-China Climate Institute

作者

Rixin Zhu,* Nina Khanna,† Jessica Gordon,* Kaifeng Huo,◊ Fan Dai,* and Jiang Lin†◊

* 加州中国气候研究院，加利福尼亚大学伯克利分校
† 劳伦斯伯克利国家实验室
◊ 加利福尼亚大学伯克利分校

关于加州中国气候研究院

加州中国气候研究院于 2019 年 9 月成立，是由加州大学伯克利分校法学院法律、能源和环境中心和 Rausser 自然资源学院联合设立的加州大学项目。它由加利福尼亚州前州长杰里·布朗担任主席，加利福尼亚州空气资源委员会前主席玛丽·尼科尔斯担任副主席。该研究所与加州大学的其他校区、部门密切合作。通过加州和中国之间的联合研究、能力建设和政策对话，该研究所旨在为决策者提供参考，促进中国与加州的气候变化合作与伙伴关系，并在各个层面推动气候解决方案。

关于劳伦斯伯克利国家实验室

劳伦斯伯克利国家实验室（伯克利实验室）是美国能源部下属的 17 个国家实验室之一。伯克利实验室的使命是拓展知识前沿，为科学和人类提供解决方案。伯克利实验室成立于 1931 年，多年来实验室的科学家共获得过 16 项诺贝尔奖。

决策者摘要

甲烷是一种短寿命的温室气体，其排放后 20 年内的增温效应可以达到二氧化碳的 80 倍以上。因此，短期内减缓气候变化的一大要点在于甲烷减排。目前，固体废弃物填埋所产生的甲烷占全球人为甲烷排放量的 20％。同时，这也是美国第三大人为甲烷排放源。

然而，固体废弃物填埋的甲烷减排并不简单。目前来看，解决这一痛点主要有三个可行方案：大幅减少废弃物产生、推行切实有效的法律法规、以及针对基础设施进行大量投资。这些行动所带来的好处也是显著的：甲烷减排不但可以在短期内有效减缓气候变化，也能够推广清洁能源和缓解粮食危机。

加利福尼亚州是美国最早制定固体废弃物甲烷综合减排战略的州。固体废弃物一直是加州甲烷排放的其中一个主要来源，占 2020 年全州甲烷总排放量 3885 万吨二氧化碳当量的 22%。认识到减少固体废弃物填埋甲烷排放的重要性后，加州于 2010 年首次出台了《填埋甲烷管理法规》。自此之后，加州继续颁布并实施了一系列后续政策和规划以减少城市固体废弃物填埋的甲烷排放。

这一系列政策主要侧重于两个途径以达到城市固体废弃物填埋甲烷减排的目的：1）避免有机废弃物进入垃圾填埋场；2）减少现有填埋场的甲烷排放。

目前，加州已经实施了多种举措和财政激励以支持这两种减排方案。然而，尽管在填埋甲烷减排方面取得了重大进展，加州尚未能完成其填埋甲烷减排目标。本文分析了加州在减少废弃物甲烷排放方面的政策、实施机制和经验教训。这些加州经验将为其他地区提供值得借鉴的最佳举措，以及废弃物填埋甲烷减排所面临的现有挑战。

避免有机废弃物进入垃圾填埋场

加州实施的首要策略是避免有机废弃物进入垃圾填埋场。此举是为了减少和避免有机废弃物通过生物分解转化为甲烷。早在 2008 年，加州关于避免固体废弃物进入填埋场的法规就已开始强制要求回收城市固体废弃物，随后从 2014 年开始强制要求回收有机废弃物。2016 年 9 月，加州通过了 1383 号参议院法案，旨在在 2014 年的基础上，到 2020 年和 2025 年分别将有机废弃物填埋量降低 50%和 75%，同时要求到 2025 年回收至少 20%的可食用食物。基于这一重要法案，加州政府已经建立了一个全面的规则体系以减少有机废弃物填埋。该体系包含了各种财政和金融手段，包括采购计划、相关费用、信用额度和市场扩张方案。

尽管加州已经采取了一系列行动以避免有机废弃物进入垃圾填埋场，但其并未能实现法定的 2020 年目标（见表 SPM-1）。这可能将导致该州 2030 年的甲烷年排放量高于 2017 年颁布的《短期气候污染物减少战略》中的预期排放量。

表 SPM-1 | 加州有机废弃物治理的总体进展		
指标	**目标**	**实际进度**
固体废弃物回收率	2020 年：75%	2020 年：42%
有机废弃物填埋减少率	2020 年：50% (与 2014 年相比)	2021 年：11% (与 2014 年相比)

未能实现这些 2020 年目标的主要原因是在 2020 年秋季前，1383 号法案下的法规并未被采纳。不仅如此，该法案下的法规直到 2022 年 1 月才正式生效，而且地方司法机构在 2024 年 1 月之前不能执行这些规定。现实是，在 1383 号法案实施的最初几年，州政府机构纯粹依靠自愿和激励机制来实现 2020 年的目标。尽管时间上有所拖延，加州在建设有机废弃物处理设施和拓展有机废弃物产品市场方面已取得了重大进展。过去几年间，有机废弃物处理基础设施一直在发展，其处理能力增加了约 36 万吨，这意味着未来可以避免更多的有机废弃物进入填埋场。预计到 2025 年，加州将有能力处理 907 万吨目前尚属垃圾填埋场处置的有机废弃物。与此同时，堆肥、生物甲烷等有机废弃物产品的市场也在逐步发展。

然而，加州的有机废弃物治理行动仍然存在挑战。这些挑战包括在建立废弃物收集和回收系统方面进展缓慢、基础设施不足 [1]、堆肥和生物甲烷市场受限等（见表 SPM-2）。

表 SPM-2 | 避免有机废弃物进入填埋场所面临的挑战总结		
方法	**挑战**	**原因**
建立废弃物收集和回收系统	● 进展较慢	● 1383 号法案下的法规直到 2022 年 1 月才正式生效
基础设施扩张	● 缺少满足需求的有机废弃物处理基础设施	● 缺乏资金 ● 缺乏长期原料合同 ● 来自低价可替代品的竞争 ● 设施发展所带来的环境成本增加 ● 受污染原料所带来的高成本
有机废弃物产品市场发展	● 发展堆肥市场	● 农民获得堆肥途径受限 ● 受污染的原料
	● 发展生物甲烷市场	● 甲烷输送和联通系统的高资本投入 ● 生物甲烷项目的市场不确定性 ● 低效的定价机制

[1] 到 2025 年，加州将需要在堆肥、厌氧消化、切碎和研磨或其他有机废物处理设施中处理大约 1633 万吨有机废物，以实现 1383 号法案的目标。然而，根据目前的产能预测，加州的基础设施只能处理 1633 万吨中的约 907 万吨。

减少现有填埋场的甲烷排放

减少现有垃圾填埋场的甲烷排放也很重要。若不加以有效控制，垃圾填埋场的甲烷可以逃逸并形成逸散性排放。自 2010 年颁布《填埋甲烷管理法规》以来，加州已经制定了一个全面的政策框架以减少现有城市固体废弃物填埋场的甲烷排放，并采取了三种主要措施：

- 法规：《填埋甲烷管理法规》设定了多方面的标准，包括安装和运行气体收集和控制系统、地表甲烷浓度、系统泄漏监测、排放超标校正、信息报告和记录保存等。
- 财政机制：加州采用财政奖励、执法设备贷款和收费等多种机制支持当地执法机构并鼓励垃圾填埋气体回收项目。
- 量化并了解垃圾填埋场甲烷排放：运用模型估算、包含遥感和地面验证的“分层观测系统”以及区域清单分析方法测量不同规模的甲烷排放量并确定排放源。

在控制现有填埋场甲烷排放方面，进展喜忧参半。一方面，加州的垃圾填埋场甲烷排放量略有增加，从 2010 年的 7.79 亿吨二氧化碳当量增加到 2020 年的 8.44 亿吨二氧化碳当量。另一方面，尽管城市固体废弃物处理量不断增加，但加州每吨城市固体废弃物的填埋场甲烷排放量呈下降趋势。这是甲烷治理取得了重大进展的标志（图 SPM-1）。这一进展得益于加州相当一部分的垃圾填埋场已经安装了垃圾填埋气体收集和控制系统。此外，加州还采用先进技术监测全州的重要甲烷排放源，确保《填埋甲烷管理法规》的顺利执行。

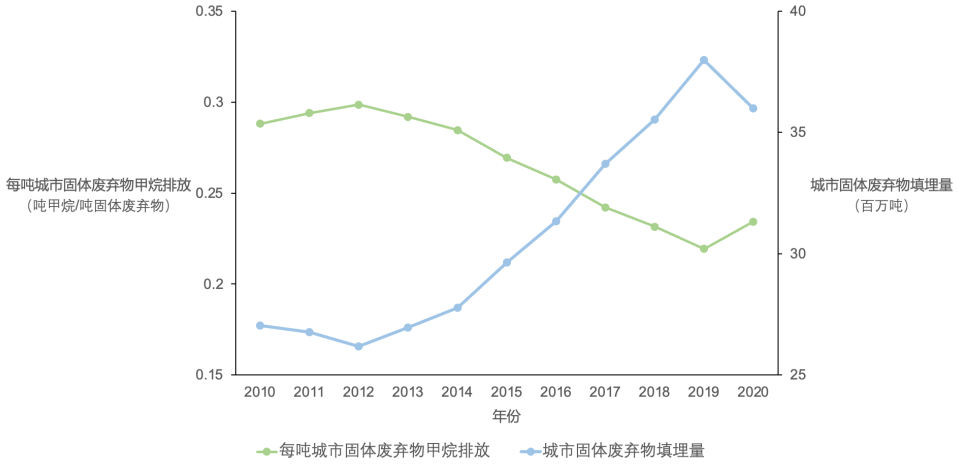

图 SPM-1：加利福尼亚州城市固体废弃物填埋量及每吨废弃物在填埋场的甲烷排放量 [2]

尽管加州取得了一定进展，但在量化和进一步支持减少垃圾填埋场甲烷排放方面仍存在挑战。其主要原因在于缺乏持续的甲烷泄漏监测、仅经过有限的排放估算验证的简化模型，以及填埋场甲烷排放控制的技术创新进展缓慢。

[2] CARB, 2022a; Department of Resources Recycling and Recovery, n.d.-g

政策建议

为了达成 2045 年温室气体减排目标并实现碳中和，加州现在需要更加重视废弃物填埋甲烷减排。现有政策和计划在避免有机废弃物进入填埋场和限制填埋场甲烷排放方面取得了一些进展，但重点目标仍未实现。

为了有效地避免有机废弃物进入垃圾填埋场，州政府应该专注于提升地方政府的废弃物管理系统，以及通过加州空气资源委员会或加州资源回收和再利用部提供更多资金以支持基础设施的扩建。地方政府也可考虑堆肥和厌氧消化以外的其他有机废弃物处理方案。此外，应广泛开展公民教育行动并进行行为引导以达到减少食物浪费和降低有机废弃物治理成本的目的。最后，有机废弃物产品市场的发展也很重要。扩大有机废弃物产品的需求可以推动生产并将能够加快基础设施的发展。

除了发展有机废弃物处理设施外，还应更加注重治理现有填埋场的甲烷排放。此举可以收集更多垃圾填埋场甲烷以用于清洁发电。目前，填埋场甲烷控制的主要障碍在于检查成本、设备安装、填埋场甲烷估算模型不准确，以及甲烷控制技术创新进展缓慢。这需要地方执政机构提供更多的财政支持，开发新的监察工具。与此同时，也需要对填埋场甲烷捕获和收集技术进行更多的研究以激发创新并降低填埋场甲烷控制的成本。

作为美国首个制定全方位固体废弃物甲烷减排战略的州，加州正在领导全球行动以应对固体废弃物行业所带来的重大气候影响。加州现有的全面的填埋甲烷减排框架可以为全球其他地区提供一个可行模式。这其中包括法规、财政激励和许多其他政策工具。其他政府在未来制定减少固体废弃物甲烷的政策时，应充分考虑和应对加州目前面临的挑战。

以下是根据加利福尼亚州的经验教训为其他地区提出的五项政策建议：

- 全面的甲烷政策包应包括政策、法规、财政激励和行为引导方案。
- 有机废弃物回收和可食用食物回收是固体废弃物甲烷减排战略的重要组成部分。这不但减少了废弃物管理系统的财政和基础设施压力，同时也减少了潜在的甲烷排放。
- 随着有机废弃物的不断增加，需要更多的基础设施来避免废弃物进入填埋场。地方政府必须考虑并解决部分有机废弃物处理方案（如堆肥和厌氧消化）的负面环境影响，并探索新的有机废弃物处理方案。
- 需要先进的监测系统、准确的清单模型和对技术创新的财政支持以追踪并促进现有填埋场的甲烷减排。
- 鉴于城市在许多地方政府（如州和省）废弃物管理中的作用，确保城市遵守地方法规与国家规定对于实施甲烷减排战略至关重要。