甲烷控排系列报告

面向能源转型与碳中和的污废水资源化利用路径



2026.11



关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所 (Rocky Mountain Institute, RMI) 成立于 1982 年，是一家立足市场、独立运作的专业智库，致力于通过经济可行的市场化解决方案推动全球能源转型，构建繁荣、韧性、清洁的低碳未来。落基山研究所与企业、政策制定者、科研机构、创业者及跨领域伙伴广泛协作，推动战略性投资，以扩大清洁能源解决方案的规模化部署、减少能源浪费、并提升可负担清洁能源的可及性，在保障能源安全和经济效益的同时，携手共创可持续的美好愿景。目前，落基山研究所的研究和实践已覆盖全球 50 余个国家和地区。

作者与鸣谢

作者

高敏惠、郝一涵、李婷、汪维、谢璨阳、夏志坚

作者姓名按姓氏首字母排列。除非另有说明，所有作者均来自落基山研究所。

联系方式

汪维，wwang@rmi.org

引用建议

落基山研究所，甲烷控排系列报告：面向能源转型与碳中和的污废水资源化利用路径，2026，
https://rmi.org.cn/insights/industrial-and-municipal-wastewater-resource-recovery-in-china-report/

鸣谢

本报告作者特别感谢以下专家对报告撰写提供的洞见与建议（以下排名不分先后，按姓名首字母排序）。

高庆先 中国环境科学院大气所研究员
贺珊珊 中国市政工程中南设计研究总院有限公司教授级高级工程师
侯德印 中国科学院生态环境研究中心研究员
蒋红与 中国水务集团有限公司研究院高级工程师
刘舒乐 中国环境科学研究院副研究员
李　爽 首创生态环保集团创新研究院副院长、教授级高级工程师
李华圣 中国环境科学研究院研究生
马占云 中国环境科学研究院研究员
吴云生 北控水务（中国）投资有限公司技术工程中心总工办负责人

特别感谢 Global Methane Hub 对本报告的支持。
本报告所述内容不代表以上专家和所在机构，以及项目支持方的观点。

目录

前言 5

1、污水：从温室气体排放源到资源化利用枢纽 6

1.1 全球污水行业快速发展，气候影响日益凸显 6

1.2 污水行业正成为我国气候治理的关键领域 8

1.3 污水污泥的资源化利用兼具气候、能源等多重效益 9

1.4 “双碳”目标推动污水治理进入减排与资源化利用新阶段 11

2、资源化利用：现状、挑战与机遇 14

2.1 甲烷减排与资源利用的现状 14

2.2 加速推进资源化利用的挑战与机遇 17

3、价值实现：资源化利用模式与市场机制 20

3.1 促进产业协同，推动资源化利用项目提质增效 20

3.2 完善市场机制，释放污水污泥资源的绿色低碳价值 27

4、展望与行动建议 32

4.1 发展趋势和路径展望 32

4.2 行动建议 36

参考文献 38

前言

甲烷是一种短寿命、强效温室气体，在 100 年尺度下的全球增温潜势是二氧化碳的 28 倍。联合国环境署指出，控制甲烷排放对于减缓近期全球变暖具有重要意义，要实现 1.5°C目标，2030 年全球甲烷排放需要在 2020 年基础上降低 30%–60%[1]。甲烷排放主要来自煤炭、油气、农业和垃圾填埋、污水处理等行业，其中工业废水和市政污水处理（如未特别说明，本报告后续将两者统称为“污水”）是甲烷排放的主要来源之一，从行业上游的化粪池、管网，到工业废水、市政污水，以及污泥的处理处置过程均会产生甲烷，上述多个环节累计贡献了全球 5%–8% 的甲烷排放[3]。

过去二十年来，随着经济社会发展和生态环境保护要求不断提高，我国持续推进污水收集处理基础设施建设，工业废水及市政污水处理规模显著扩大，污水处理能力和污染物削减水平不断提升，已形成全球规模最大的污水处理体系。在保障污水稳定达标处理的同时，行业也在积极探索绿色低碳发展路径，通过优化处理工艺、提升设施能源利用效率、推进污水源热泵、光伏应用、污水污泥资源化利用等措施，持续降低污水处理过程的能源消耗和环境影响。污水行业的转型已不再局限于污染物去除，而是逐步向污染治理、温室气体减排与能源资源回收并重的方向发展。

在上述技术路径中，污水及污泥的资源化利用不仅是推动污水行业发展的重要方向之一，也为甲烷减排、能源转型和循环经济发展提供了新的空间。工业废水及其市政污泥含有可利用的有机质资源，通过厌氧消化、能源回收、干化焚烧等路径，可将其中的有机质转化为沼气、电力及其他可利用资源，并协同实现甲烷减排和化石能源替代，兼具气候与能源价值。“十二五”时期以来，我国持续完善污水资源化利用相关政策，在管网建设、污水处理以及污泥处理处置等环节提出了一系列发展要求，为污水系统向资源化、低碳化转型奠定了政策基础。

在政策引导和企业积极实践探索的基础上，我国污水系统甲烷控排与资源化利用已具备较为丰富的技术基础和项目经验，正逐步进入从示范向规模化、系统化发展的关键阶段。然而，要进一步释放污水污泥的减排与资源利用价值，行业仍面临一些现实挑战，包括甲烷排放底数和资源化潜力尚不清晰、部分资源化项目经济性不足、以及市场化价值实现机制尚不健全等。因此，如何在已有政策和实践的基础上，进一步识别污水甲烷减排潜力、进一步探索发展方向和市场化实现机制，是推动污水行业资源化利用、实现系统性降碳减排所需要关注的重点问题。

本报告由落基山研究所撰写，同时参考相关研究单位和行业专家的看法，重点聚焦市政污水污泥，以及工业废水处理处置过程的甲烷排放与资源化利用问题，梳理了我国污水行业的甲烷排放来源和资源化利用现状，分析了污水行业开展甲烷减排面临的主要瓶颈与潜在机遇。在此基础上，报告进一步分析了污水资源化利用的可行市场机制，并对未来发展路径和重点布局进行展望，提出相关行动建议，以期为相关市场主体和政策制定提供参考。

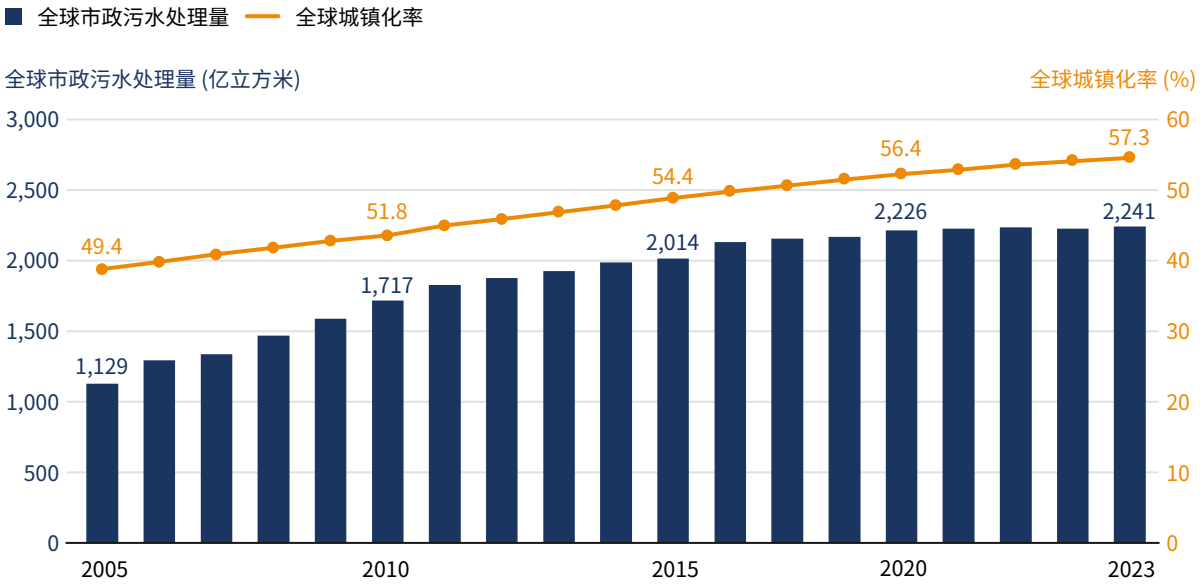
1、 污水：从温室气体排放源到资源化利用枢纽

1.1 全球污水行业快速发展，气候影响日益凸显

过去 20 年，随着全球人口增长和城市化持续推进，全球污水处理规模持续扩大，温室气体排放也逐年增加。2005 年以来，全球城镇化率提高了约 8 个百分点，市政污水处理量翻了一番（图表 1），污水处理体系已成为全球城市基础设施的重要组成部分。与此同时，随着全球工业生产规模不断扩大，工业废水产生量也持续增长，进一步增加了污水收集处理体系的规模和环境管理压力。污水规模的快速扩张也伴随着温室气体排放的持续增加，有研究估算，全球市政污水处理厂每年产生约 2.8 亿至 3.6 亿吨 CO_2e 的温室气体排放，进一步考虑工业废水，全球污水系统相关排放量将超过 10 亿吨 CO_2e[2]。其中，甲烷是污水行业排放的主要温室气体，污水行业是仅次于农业、油气、垃圾填埋和煤炭行业的全球第五大甲烷排放源[3]，且排放呈逐年上升的趋势（图表 2）。除甲烷排放外，污水处理还伴随着一定的氧化亚氮排放，以及较大的能源消耗。有研究指出，在不同的经济路径和全球减排情景下，到本世纪末，全球污水处理系统对全球温室气体排放的贡献将是目前水平的 2 至 17 倍[4]。随着全球污水处理规模持续扩大，降低污水行业的甲烷排放、推动处理过程能源效率提升，对于控制污水行业整体气候影响、加速全球甲烷控排具有重要意义。

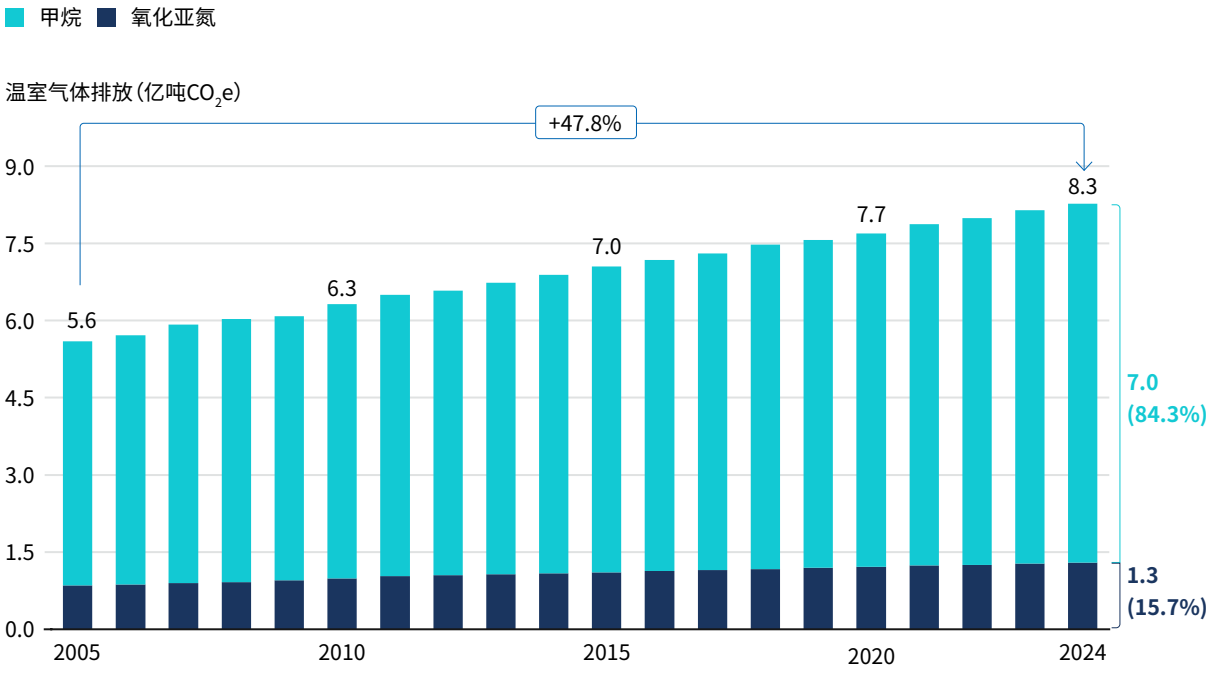


图表 1　全球城镇化率和市政污水处理情况（2005 至 2023 年）



来源：联合国粮食及农业组织 [5]，世界银行 [6]

图表 2　全球污水行业温室气体直接排放（2005 至 2024 年）

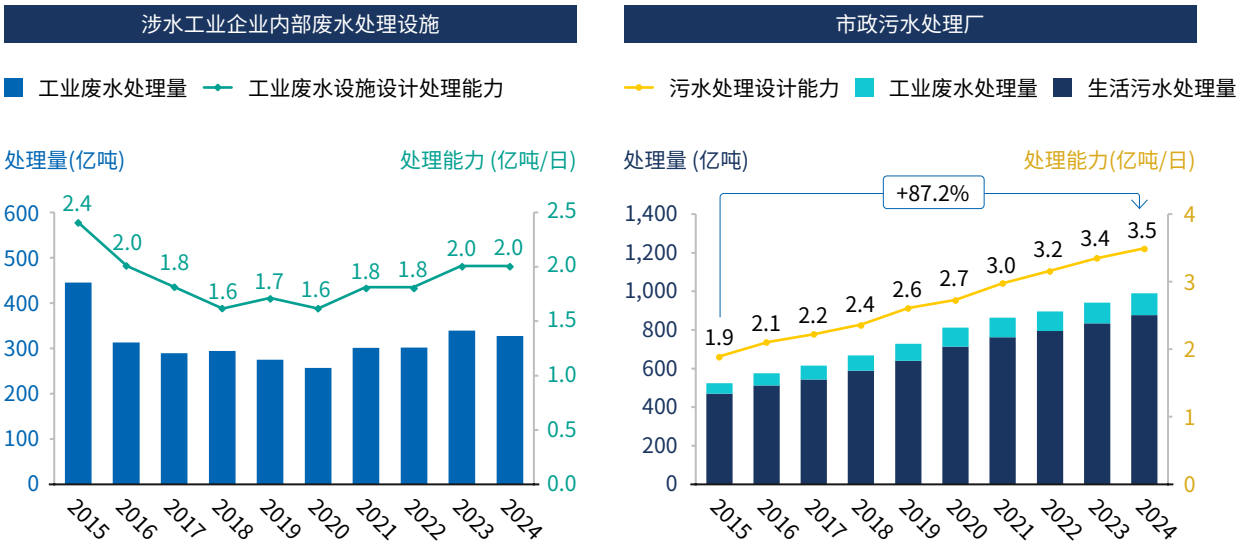


来源：EDGAR GHG database[7]，注：该情景同时包括工业废水和市政污水处理。

1.2 污水行业正成为我国气候治理的关键领域

我国污水处理体系伴随着城镇化和工业化快速发展，形成了庞大的市政污水和工业废水处理规模。改革开放以来，我国经历了快速城镇化进程，全国常住人口城镇化率由 1982 年的 21.1% 增长到了 2025 年的 67.9%，超过一半的人口在过去四十年里从农村迁移到了城市[8]，市政污水处理体系也实现了大规模扩张。从 2015 年到 2024 年，我国污水处理厂数量从 6,910 座增长到了 15,259 座，年处理污水量从 532 亿立方米增加到了 988 亿立方米，增长近 87%，污水处理厂数量和处理规模均居全球第一[9]。与此同时，随着我国工业化进程推进和工业园区、重点行业污染治理设施持续完善，工业废水处理量总体维持在较大规模，2024 年我国纳入环境统计调查的涉水工业企业共有 83,367 家，企业内部废水处理设施设计处理能力高达 2 亿吨 / 日，全年共处理工业废水超过 327 亿吨[10]（图表 3）。

图表 3　我国市政污水处理厂和工业废水处理设施设计能力和运行情况（2015 至 2024 年）

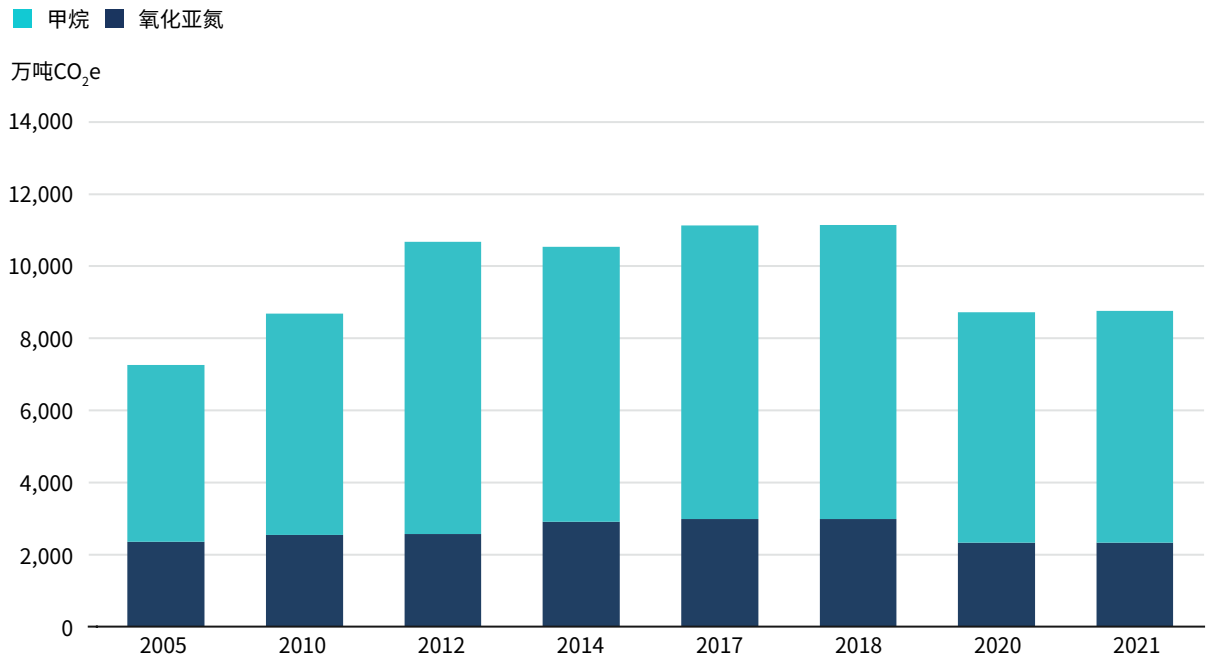


来源：中国生态环境统计年报[11]，课题组分析。

注：我国工业废水需先经企业或园区污水处理设施处理达标，而后排放到自然水体，或进一步纳入市政污水处理体系进行集中处理，因此市政污水厂也存在一定规模的工业废水处理量。

污水处理正逐渐成为我国温室气体减排的关键领域之一。随着我国污水处理能力的不断提升，污水行业承担的污染物处理负荷持续增加 ，温室气体排放管理的重要性日益凸显。 与此同时，污水行业的温室气体排放还受到处理工艺、运行条件及排放因子等多种因素影响，其变化趋势并不完全与污水处理规模同步，仍面临持续的减排压力。根据我国温室气体清单，污水行业产生的甲烷和氧化亚氮排放已从 2005 年的 7,259 万吨 CO_2e 增长到了 2021 年的 8,764 万吨 CO_2e，涨幅超过 20%（图表 4）[12]，其中甲烷排放的占比一直维持在较高水平，2021 年达到 73.4%。排放数据显示，2005 至 2018 年排放量总体呈上升趋势，2020 至 2021 年均较 2018 年有所下降，这与工业废水处理量及 COD 去除量和排放量的变化有关。除污水处理过程产生的直接排放外，污水处理作为高耗能过程会消耗大量外购电力并产生间接温室气体排放。按照我国市政污水和工业废水处理平均能耗 0.36 kWh/m^3、0.5 kWh/m^3，保守估算，我国污水处理年耗电量超过 520 亿 kWh，间接排放高达 2,700 万吨 CO_2e。综合考虑直接与间接排放，污水系统的温室气体排放总量超过 1 亿吨 CO_2e。在“双碳”目标以及“十五五”规划纲要等重要目标和国家战略引领下，污水处理行业需加速转型，减少甲烷等非二氧化碳温室气体直接排放，并采用能效提升、可再生能源替代等举措，助力实现系统性温室气体减排。

图表 4　　我国污水处理甲烷与氧化亚氮排放变化趋势



来源：我国历年国家温室气体清单数据

注：甲烷 GWP100=28，氧化亚氮 GWP100=265，2005 年数据为我国第一次双年透明度报告回算数据。

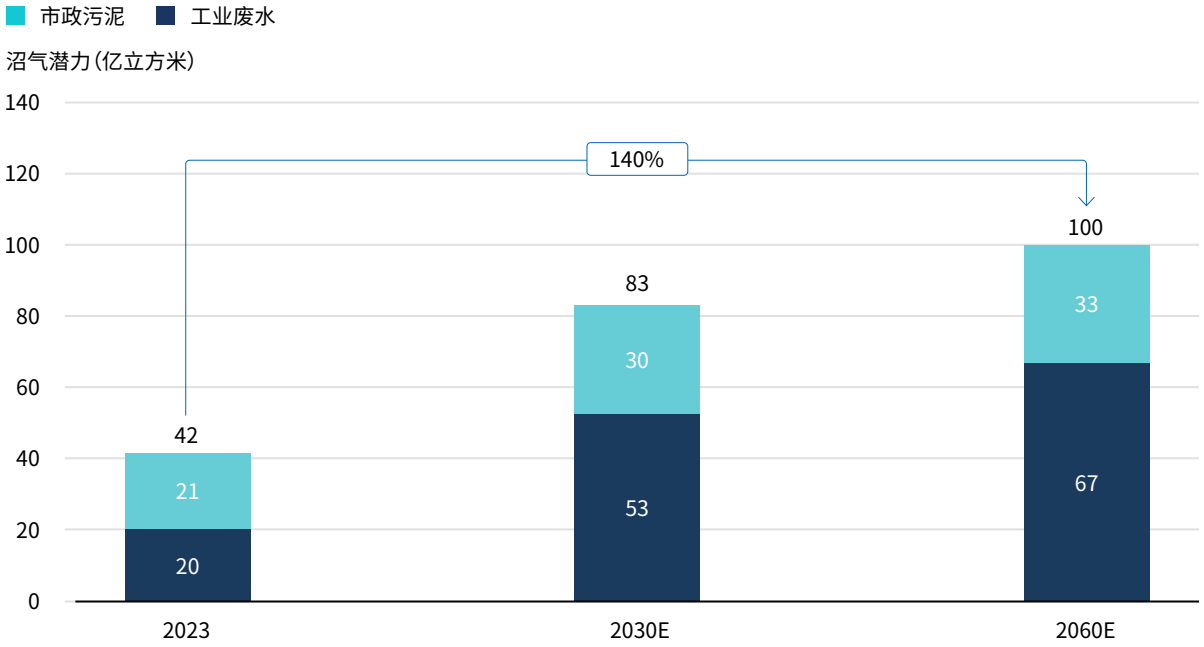
1.3　污水污泥的资源化利用兼具气候、能源等多重效益

污水行业不仅是温室气体排放源，也是关键的资源化利用枢纽。污水和污泥中均含有大量可降解有机质，既是需要削减的污染物，也是具有利用价值的生物质资源。污水污泥开展资源化利用可以生产能源，同时具备环保治理、资源回收、气候友好等多重收益。

（1）能源效益

充分利用污水污泥中的有机物质，可以在降解污染物的过程中实现能源回收和利用，增加绿色能源供给。工业废水和市政污泥经过厌氧处理后产生富含甲烷的沼气，在适宜的厌氧处理条件下，平均每 1 吨湿污泥（含水率 80%）能够产生 40 立方米沼气，高浓度工业有机废水每去除 1 吨化学需氧量（Chemical Oxygen Demand，以下简称 COD）能够生产 400 至 500 立方米的沼气。沼气经过回收净化后，可以用于发电、供热，满足污水系统的能源消耗，从而减少外购电力以及煤炭、天然气消费，提高能源自给能力。我国的工业废水和市政污泥具备较好的沼气回收利用潜力，据估算，2023 年我国市政污泥和工业废水的沼气生产潜力约为 42 亿立方米，随着城镇化推进和工业发展，预计到 2030 年我国市政污泥和工业废水的沼气潜力将超过 80 亿立方米，到 2060 年将超过 100 亿立方米。

图表 5　　我国污水系统沼气生产潜力



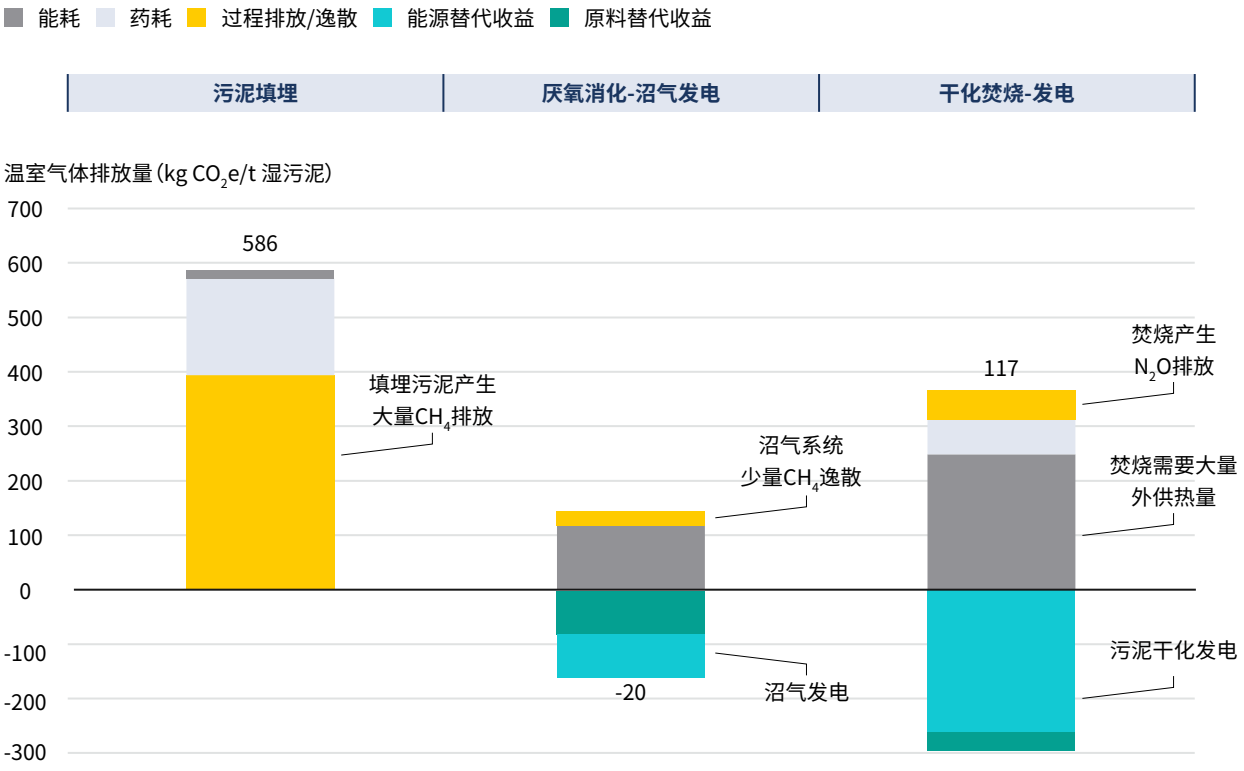
来源：课题组分析

（2）气候效益

污水和污泥的资源化利用能够协同减少甲烷和二氧化碳排放，形成直接温室气体减排与能源替代的双重气候价值。其中，沼气回收是污水和污泥资源化过程中实现甲烷减排的重要路径。通过对厌氧消化产生的沼气进行收集和利用，可以减少甲烷直接逸散，并将甲烷转化为可利用的能源；同时，沼气后续进行发电、供热或提纯生物天然气可以替代污水厂的外购电力和化石燃料消费，进一步减少能源消费环节的二氧化碳排放。厌氧消化反应器通常为密闭系统，沼气经收集后可用于发电、供热或进一步提纯利用。在实际运行过程中，部分沼气可能因收集利用效率不足而通过放空、火炬燃烧等方式处置，并产生一定的甲烷逸散；此外，部分甲烷可溶解于液相并随消化液或出水带出，在后续处理和排放过程中释放。因此，提高沼气收集和利用效率，能够在回收能源的同时进一步减少甲烷逸散。

对于市政污泥，资源化利用还能够通过改变污泥处置路径，从源头减少甲烷排放，并形成能源替代收益。污泥有多种处理处置方式，传统方式主要是脱水后填埋。由于污泥中仍含有一定量的可降解有机质，在进入填埋场后，有机质在厌氧环境下持续降解会形成大量甲烷排放。将污泥从填埋转向厌氧消化、焚烧发电等资源化利用路径，既能够减少进入填埋场的有机质及其后续甲烷排放，也能够回收其中的能源价值。根据课题组分析，以处理 1 吨湿污泥（含水率 80%）为例，若污泥脱水后直接填埋，每吨湿污泥将产生约 586 kg CO_2e 的温室气体排放，其中约三分之二为甲烷。相比之下，采用污泥焚烧路径时，综合排放约为 117 kg CO_2e/ 吨湿污泥，考虑到污泥脱水和焚烧过程需要大量外供能源，该路径无法实现负碳，但相较于污泥直接填埋可以避免甲烷排放；污泥采用厌氧消化并利用沼气时，综合排放约为 -20kg CO_2e/ 吨湿污泥，是现阶段能够实现负碳的减排路径（图表 6）。

图表 6　　各类市政污泥处理方式的温室气体排放情况



来源：课题组分析

注：本情景同时考虑直接和间接排放，假设污泥含水率 80%，厌氧消化采用热水解工艺，干化焚烧路径的外供热主要用于干化污泥。

（3）再生资源效益

在能源与气候价值的基础上，污水系统还具备水资源、养分与原料价值。污水经过深度处理后可转化为再生水，用于工业生产、市政和生态补水等场景，缓解生产生活的水资源压力。污水和污泥中的氮、磷等营养元素也具有回收利用价值，经厌氧发酵后，污水污泥剩余的沼渣可作为土壤添加剂，进入生态系统实现养分循环。污泥焚烧后的剩余灰渣也可以作为建材替代原料，进一步拓展在工业、建筑等领域的价值。通过能源回收、温室气体减排和资源循环，污水污泥的资源化利用能够推动污水系统从单一污染治理向能源与资源综合利用转变。

1.4　“双碳”目标推动污水治理进入减排与资源化利用新阶段

我国污水治理统筹考虑降碳减排、资源化利用、循环经济等发展目标，污水行业正加快向绿色低碳、资源循环和协同增效等方向发展。我国早期的污水处理政策侧重于推动污水处理设施建设和污染物治理。2020 年，随着我国“双碳”目标的提出和加速推进，推动系统性降碳减排、开展资源化利用也逐渐成为行业的重要发展方向，污水、污泥资源化利用的相关支持政策不断出台（图表 7）：

2023 年生态环境部联合有关部门发布《甲烷排放控制行动方案》，将污水处理列为重要行动领域之一，以资源化利用为关键抓手推动甲烷减排。《方案》要求加强污水处理领域甲烷收集利用，全面提升城镇生活污水收集处理效能，稳步提高污泥无害化、资源化利用水平，并鼓励有条件的污水处理项目采用污泥厌氧消化等方式产生沼气并加强回收利用。《方案》还鼓励对废水有机物含量高、可生化性较好的行业依法依规与城镇污水处理厂协商水污染物纳管浓度，减少甲烷产生；推广使用高浓度有机工业废水高效产甲烷技术并配套高效处理技术；支持符合条件的甲烷利用和减排项目开展温室气体自愿减排交易，鼓励甲烷排放控制工程项目开展气候投融资。**今年 7 月由国务**

院印发的《“十五五”碳达峰行动方案》也对污水资源化利用做出明确指示，提出“大力推广资源循环型生产模式，强化废弃物综合利用、能量梯级利用、水资源循环使用，推进废水、废气、废液、废渣等资源化利用”。此外，在《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》《“十四五”循环发展规划》《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》等政策文件中也提出要显著提升污水污泥资源化利用水平、鼓励污泥能量资源回收利用、推进工业废水资源化利用、压减污泥填埋规模、鼓励污泥焚烧灰渣建材利用等目标。

在“双碳”目标、甲烷减排、循环经济和污水资源化等多重政策驱动下，污水系统的发展目标正由单一的污染治理逐步转向减污、降碳与资源回收协同推进，推动污水系统加快由末端治理设施向低碳化、资源化的综合系统转变。

图表 7　　我国污水行业资源化利用相关政策

文件名称	发布机构	发布时间	主要内容
《“十五五”碳达峰行动方案》	国务院	2026 年	• 强化废弃物综合利用、能量梯级利用、水资源循环使用。 • 推进废水、废气、废液、废渣等资源化利用。
《循环经济发展“十五五”规划》	国家发展改革委	2026 年	• 促进循环经济产业升级，降低资源消耗和碳排放，提高资源利用效率。 • 到 2035 年，循环经济高质量发展体系基本建立，主要资源利用效率达到国际先进水平。
《节约用水条例》	国务院	2024 年	• 县级以上地方人民政府应当统筹规划、建设污水资源化利用基础设施，促进污水资源化利用。 • 高耗水工业企业应当逐步推广废水深度处理回用技术措施。
《甲烷排放控制行动方案》	生态环境部、国家发展改革委、能源局等	2023 年	• 加强污水处理领域甲烷收集利用。 • 鼓励有条件的污水处理项目，采用污泥厌氧消化等方式产生沼气并加强回收利用。
《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》	国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部	2023 年	• 科学开展污水管网清淤管护，减少甲烷排放。 • 开展节能降碳改造，加大可再生能源应用，推动污水（污泥）处理厂自建可再生能源设施、参与绿证交易。 • 压减污泥填埋规模，积极采用资源化利用等替代处理方案。 • 加强污泥沼气回收利用，推广沼气热电联产，推广污泥土地利用、推动污泥焚烧灰渣建材化和资源化利用。 • 提出到 2025 年建成 100 座能源资源高效循环利用的污水处理绿色低碳标杆厂。
《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》	国家发展改革委	2022 年	• 压减污泥填埋规模，推广能源和物质利用。 • 推荐污泥堆肥、沼气热电联产、污水源热泵技术，鼓励污泥焚烧灰渣建材利用。
《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》	国家发展改革委、住房城乡建设部	2021 年	• 到 2035 年，全面实现污泥无害化处置，污水污泥资源化利用水平显著提升。 • 鼓励污泥能量资源回收利用，推广将污泥焚烧灰渣建材化利用。

接下页

接上页

文件名称	发布机构	发布时间	主要内容
《“十四五”循环经济发展规划》	国家发展改革委	2021 年	• 推进污水厂污泥与厨余垃圾、园林废弃物协同处置。 • 推进工业废水资源化利用，实现绿色低碳循环发展。
《关于推进污水资源化利用的指导意见》	国家发展改革委、科技部、工业和信息化部等	2021 年	• 着力推进重点领域污水资源化利用。 • 实施污水资源化利用重点工程。 • 健全污水资源化利用体制机制。
《“十四五”节能减排综合工作方案》	国务院	2021 年	• 推进污水资源化利用和污泥无害化处置。 • 开展重点行业清洁生产和工业废水资源化利用改造。
《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》	国家发展改革委、住房城乡建设部	2020 年	• 开展污水处理厂提升改造，积极推动污水资源化利用。 • 在土地资源紧缺的大中型城市鼓励采用“生物质利用 + 焚烧”污泥处置模式，推广将生活污泥焚烧灰渣作为建材原料加以利用。

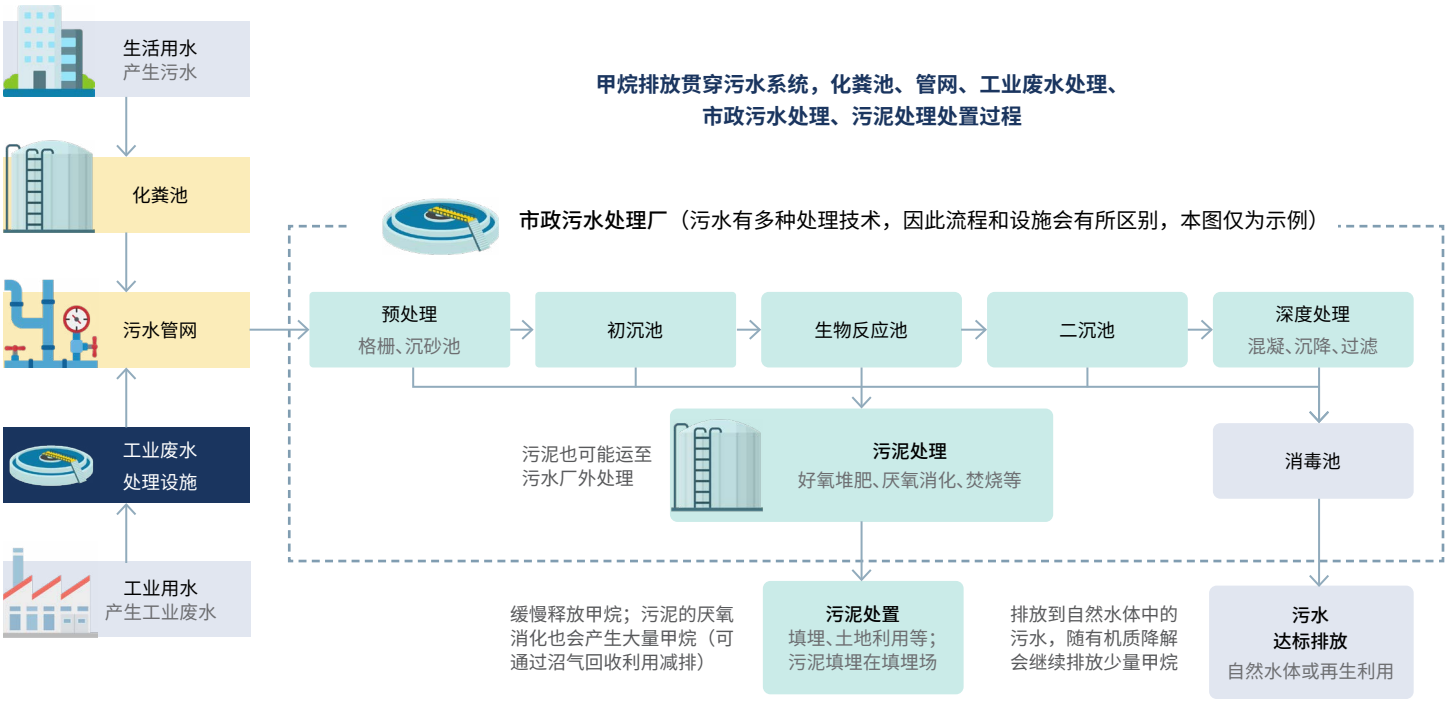
来源：课题组基于公开资料收集整理

2、 资源化利用：现状、挑战与机遇

2.1 甲烷减排与资源利用的现状

我国污水行业的甲烷排放贯穿工业废水和生活污水产生至达标排放的全流程，资源化利用正在成为甲烷控排的关键行动方向。我国污水分为工业废水和市政污水两大类，其中生活污水一般先流经化粪池而后经由污水管网汇入污水处理厂做集中处理，经过复杂的处理工艺流程后，实现达标排放或再生利用；工业废水由于污染物浓度更高，一般先在厂区内废水处理设施进行深度处理后，再经过污水管网汇入市政污水处理厂进行处理，或达标后直接排放。污水中的有机物和厌氧、缺氧的环境是形成甲烷的关键条件，甲烷排放可发生于污水系统的各个环节（图表 8）。“十二五”时期以来，我国持续加大污水处理及再生利用设施建设投入，污水处理及再生利用年投资额由 521 亿元增长至 677.4 亿元，累计固定资产投资已超过 9,100 亿元（图表 9）。经过多年持续投入，我国污水收集、处理及资源化利用体系已初具规模，正加速通过再生水利用、工业废水资源化利用，以及加强污泥处理处置等举措持续提升污水系统的减排与资源循环能力。

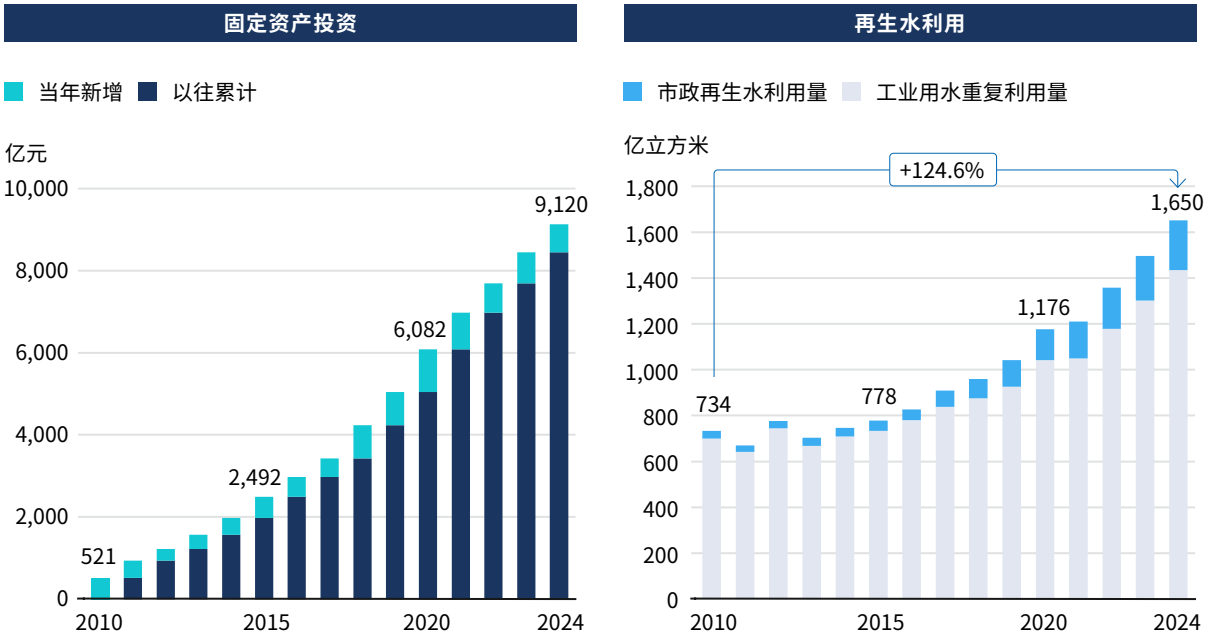
图表 8　**我国工业废水和市政污水系统的处理处置流程**



来源：课题组整理
注：与市政污水处理厂类似，工业废水处理设施也会采用一系列工序减少污染物，本图中未拆解处理流程。

我国以节水和再生水利用为代表的源头减量和水资源循环措施发展较快，已成为当前较为成熟的发展方向。再生水能够减少新增污水产生量，实现水资源循环利用。近年来，我国持续推进节水型社会建设和非常规水资源利用，再生水利用规模不断扩大，2024 年我国工业和市政再生水利用量达到 1,650 亿立方米，较 2010 年增长超过 124%，已广泛用于工业生产、城市杂用和生态补水等场景。

图表 9　城市污水处理及再生利用固定资产投资情况及再生水利用情况



来源：中国城乡建设统计年鉴

市政污水行业正加速推动低碳技术的部署和应用，绩效评价标准等支撑体系正逐步建成。近年来，污水处理行业积极开展了面向绿色低碳目标的工程探索，并取得了一定成效。以北京排水集团、北控水务集团、首创集团、中国水务投资集团等为代表的市政污水处理企业，在污泥资源化利用方面已积累了非常丰富的实践经验，为相关技术的推广应用奠定了坚实的基础。政府部门也出台了一系列政策和标准推动行业低碳发展，推动建成了 45 个污水处理绿色低碳标杆厂。与此同时，行业正在逐步形成从核算方法、排放数据到绩效评价和示范应用相衔接的技术支撑体系。国家标准《协同降碳绩效评价 城镇污水处理》已正式发布，从污染控制、节能降耗、能源优化、资源循环和管理协同等多维度建立污水处理厂的绩效评价框架；《 碳排放核算与报告要求 第 55 部分：生活污水处理企业》目前已进入报批阶段，生活污水处理设施的甲烷排放数据报送等相关技术文件也在持续推进中。

工业企业也积极推动工业废水的沼气回收利用。工业废水的行业间水质差异很大，水处理工艺存在差别，甲烷排放主要产生于采用厌氧工序处理废水的过程。目前造纸、食品、酿酒等行业已经形成较为成熟的厌氧处理和沼气回收实践（图表 10）。部分企业通过厌氧工艺处理高浓度有机废水，并将产生的沼气用于发电、供热或替代天然气，实现污水处理与工业生产能源需求的协同。对于这些项目而言，沼气回收已经能够同时带来污染物削减、能源替代和一定的甲烷减排效益。不过，目前相关实践更多体现为节能降本和污染治理过程中的协同效益，尚未形成聚焦甲烷减排的系统性实践和行业普遍做法。

图表 10　市政污水与工业废水甲烷资源化利用的企业实践

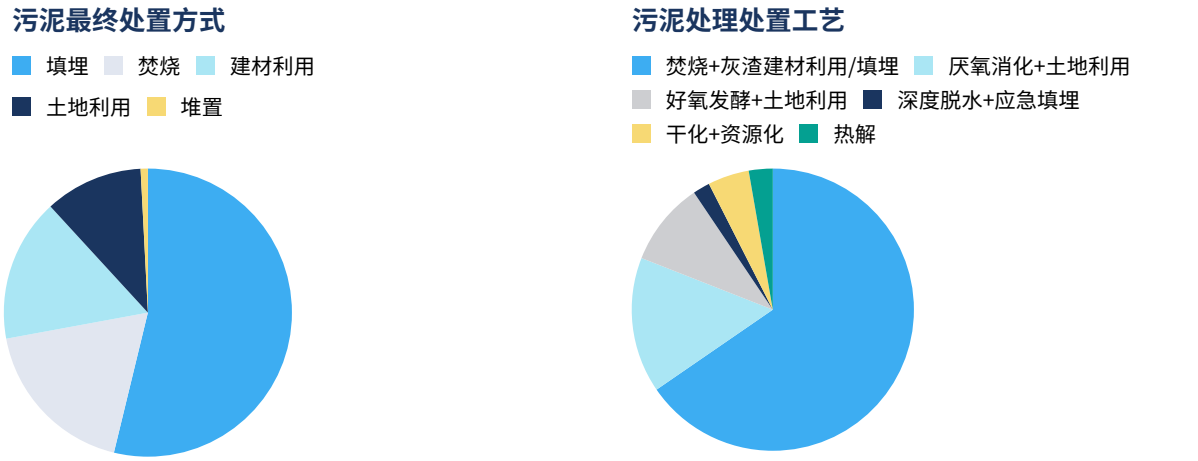
所属领域	企业名称	减排和资源化利用行动
市政污水	北京排水集团	建成高安屯、高碑店、槐房、小红门、清河二厂 5 座污泥处理中心，日处理能力 6,128 吨，年产沼气量达 8,000 万立方米，通过沼气发电、沼气锅炉生产蒸汽供热、沼气拖动鼓风机等方式进行最终利用。
市政污水	北控水务集团	北戴河新区污泥处理厂采用分级 / 分相厌氧消化工艺，处理后产生的沼渣经深度脱水可用作园林绿化、农业利用、土壤改良的营养土，产生的沼气经提纯后，一部分用于预处理单元的原泥预热，剩余部分可用作车用燃气。
市政污水	中国水务投资集团	钱江水利宁海兴海污泥处理处置业务一期工程采用分级分相厌氧消化加深度脱水工艺，厌氧消化产生的沼气经脱硫后进行发电，发电过程中产生的余热循环到消化过程的高温、中温反应罐，沼气发电接入城北污水处理厂供生产利用。
酿酒	青岛啤酒	与青岛水务集团团岛污水处理厂合作，将高浓度啤酒热凝固物与市政污泥协同厌氧产沼，年产沼气超 200 万立方米，碳减排量超 3,800 吨 CO_2e。
酿酒	泸州老窖	在黄舣、罗汉两大酿酒生态园废水处理系统配套沼气回收模块，将沼气输送至能源中心供热，全年沼气回收量约 350 万立方米，减少碳排放 5.1 万吨。
造纸	浙江山鹰纸业	将造纸废水产生的沼气通过净化、提纯，生产高品质生物天然气并入城市燃气管网，年产生物天然气约 2,450 万标准立方米。
食品	河北玉锋淀粉集团	建有 10 座 1,000 立方米高效厌氧反应器，日处理废水 1 万立方米，沼气年产量为 1,221 万立方米，沼气综合利用年收入为 1,551 万元。

来源 : 课题组依据公开资料收集整理



污泥处理处置是市政污水系统资源化利用的重要发展方向之一。近年来，我国已初步形成厌氧消化、焚烧、好氧发酵等多种处理处置路径，污泥处置结构持续调整，填埋占比逐步下降，焚烧、土地利用和建材利用等路径不断发展（图表 11）。上述技术路径主要以减量化和无害化为目标，污泥中的能源和资源价值尚未得到充分释放，甲烷减排的成效也暂未充分体现，这与我国长期以来“重水轻泥”的建设模式有关。过去污水处理设施建设主要聚焦污水收集和达标处理，部分设施在规划建设阶段未充分考虑污泥集中处理、沼气利用和余热回收等资源化需求，导致后续设施改造面临空间、投资和系统衔接等约束。“十三五”期间，污泥无害化处理处置设施规划投资约 294 亿元，仅占城镇污水处理及再生利用设施总投资的约 5%，污泥资源化处理设施的建设仍有待加强。

图表 11　　我国污泥处理处置项目工艺占比及污泥最终处置方式占比



来源：城镇污水厂污泥处理技术与工程案例，书中统计截至 2022 年 3 月

总体来看，我国污水系统的资源化利用正在从较为成熟的再生水利用，向能源回收、污泥资源化和甲烷减排等方向拓展，但不同环节的发展阶段仍存在明显差异。工业废水已经具备一定的厌氧处理和沼气回收基础，但甲烷减排尚未形成系统性实践；市政污水处理体系较为成熟，但污泥资源化利用仍相对滞后。更重要的是，现有污水治理体系仍主要围绕污染物削减、达标排放和末端处置展开，能源、资源和气候价值尚未充分纳入污水系统的规划、投资和运营评价。推动污水行业进一步向低碳和资源化利用转型，可在现有基础上，进一步提升经济性并实现减排价值。

2.2　加速推进资源化利用的挑战与机遇

要进一步推动废水和污泥的资源化利用并带动甲烷减排，行业仍需要面对如下挑战：排放和资源潜力尚需进一步识别，部分项目的项目经济性仍有待提升，甲烷减排、能源回收和资源循环产生的多重价值也需要被市场认可。

排放底数与回收利用潜力尚不清晰

准确识别污水系统不同处理环节的排放和资源化潜力，是判断行业减排空间、推动项目规模化发展的基础。目前，我国相关认识仍主要停留在国家和区域尺度，不同类型污水、污泥及处理环节的实际排放和资源化潜力缺乏数据支撑。受水质、处理工艺、设施规模和运行条件等差异影响，不同地区和设施的甲烷排放、沼气产量及资源回收条件存在较大差异，重点排放环节、重点资源化区域及实际可开发规模仍不够清晰。同时，行业甲烷减排目标仍有待进一步明确。上述因素使企业难以形成对区域资源规模、项目机会和未来市场需求的稳定预期，示范项目向可复制、可推广模式转化仍面临一定障碍。

资源化利用项目的经济性仍有待提升

我国污水资源化路径在实际应用中仍受到资源集中度不足、项目投资成本高昂和收益水平不足等因素制约，部分项目难以形成稳定的经济回报。

污水污泥资源总量较大，但有机质含量偏低，单位资源产出水平有限，是影响项目经济性的关键因素之一。我国以往城市建设遗留的排水管网存在雨污合流的现象，且管网存在结构性损伤、效率偏低。同时，生活污水经由化粪池预处理消耗了部分有机质，导致我国污水处理厂的进水有机物负荷普遍较低，我国约 45% 的污水厂进水 COD 浓度低于 200 mg/L，而发达国家往往在 350–800mg/L 之间[13]，较低的进水浓度不仅增加了污水处理过程的运行成本，也限制了沼气等能源资源的产出效率。污泥存在相同的问题，我国污泥有机质含量通常约为 40%–60%，且含砂量较高，部分水厂产生的污泥干基高位热值均值在 12MJ/kg 左右，而欧美及日本等发达国家污泥有机物含量普遍处于 70%–85% 的范围，干基高位热值均值达 19.02MJ/kg[14]。对污水处理厂而言，较低的有机物负荷直接限制了可回收能源的规模和项目收益。

污水厂作为公共服务部门收益空间有限，而资源化利用又需要在现有处理体系基础上增加较大的投资和运行成本。我国污水处理行业具有较强的公共服务属性，单位污水处理收入在 1 元至 2 元每立方米，只能基本覆盖污水处理和运营成本，有时还需兼顾污泥处置成本。虽然污水污泥的资源化利用项目在具备稳定条件时能够取得较好的能源和经济效益，但完整的回收利用体系有较高的资本和运行门槛，项目建设通常需要增加气体收集净化、能源利用、尾气处理等等一系列设备，也需要占用土地资源，前期资本投入相对较高。而我国污水处理厂中，日处理能力 5 万吨以下的中小型污水处理厂占比接近 90%[15]，企业依靠传统业务获得的现金流通常较难支撑资源化利用项目的前期投入，现有已建成的项目集中在大中型污水处理企业，尚未形成具有普遍经济吸引力、能够持续复制的商业模式。

产业协同不足，减排与能源价值体现不充分

污水污泥的资源化利用能够同步调动污水处理、能源、工业、农业等多个领域的行动参与，但当前仍较多局限于单一行业和单个设施，跨行业协同和资源价值衔接不足。当前，污水污泥资源化利用仍较多以污水处理厂为单一主体开展，与其他行业之间既有的设备产能和资源利用需求尚未充分连接：例如，污泥可以进入工业、固废等既有处理设施，成为资源化利用的协同资源，但目前这类跨行业衔接仍较为有限。其次，资源化利用项目产生的沼气、电力、热力，以及沼液、营养土、焚烧灰渣等产品，均需要与下游需求和市场相匹配，但受到产出规模、运输距离、安全性等因素影响，大部分产品都于厂内自用，或需要补贴才能实现外销。

市场机制对资源和减排价值的支撑仍不充分。资源化项目产生绿色电力、可再生燃气等多种产品和甲烷减排效益，但价值未反映在产品溢价和减排收益上。现有污水厂收益主要体现为自身节电、节煤产生的收益。相比之下，绿电、绿色燃料和碳减排项目已经逐步形成相应的市场机制。全国温室气体自愿减排市场正在逐步扩大对甲烷减排项目的支持，2025 年已发布多项相关方法学，但城镇污水污泥和工业废水领域目前仍缺少直接适用的方法学，资源化项目的减排属性仍未得到相匹配的市场价值。

发展机遇

尽管污水行业开展资源化利用仍面临上述挑战，但随着相关政策、技术和市场环境逐步完善，行业资源化利用的基础和条件也在不断改善，进一步挖掘减排与资源价值具备了新的发展空间。我国污水行业的温室气体排放监测、核算和评价体系逐步完善，甲烷减排和资源化利用的项目识别基础也在不断改善（图表 12）。部分地区和设施已开始积累实测数据，相关标准和核算体系持续建设。例如，城镇污水处理厂甲烷厂内监测团体标准以及《协同降碳绩效评价 城镇污水处理》（GB/T 46725—2025）相继实施；《碳排放核算与报告要求 第 55 部分：生活污水处理企业》目前处于报批阶段，并基于北京、上海、山东、江苏等地实测数据建立了本地化甲烷排放因子。国家温室气体排放因子数据库的持续扩容，也将进一步丰富行业数据基础。

图表 12　我国污水系统甲烷排放数据基础体系建设情况及未来展望



来源：课题组整理

随着资源化利用技术不断成熟、产业协同模式逐步丰富以及绿色能源和碳减排市场机制持续发展，污水系统资源化利用正迎来新的发展空间。 我国污水污泥资源规模较大，不同类型污水和污泥在资源禀赋、产生规模和利用条件方面各具特点，为因地制宜探索资源化利用模式提供了基础。其中，部分高浓度工业废水具有有机物含量高、来源集中、产生稳定等特点，具备较好的厌氧产气和能源回收基础；市政污泥则在污水处理过程中实现了有机质富集，并具有相对稳定的产生规模，为能源回收和协同处置提供了条件。在此基础上，通过加强与工业生产、固废处理等领域的协同，可以进一步拓展沼气、电力、热力及其他资源化产品的利用场景；同时，绿色燃料和碳减排等市场机制的发展，也为能源替代、甲烷减排等环境价值提供了新的实现渠道。在本报告的后续章节中，课题组将对污水和污泥的重点资源化利用模式和价值实现机制进行讨论。

3、 价值实现：资源化利用模式与市场机制

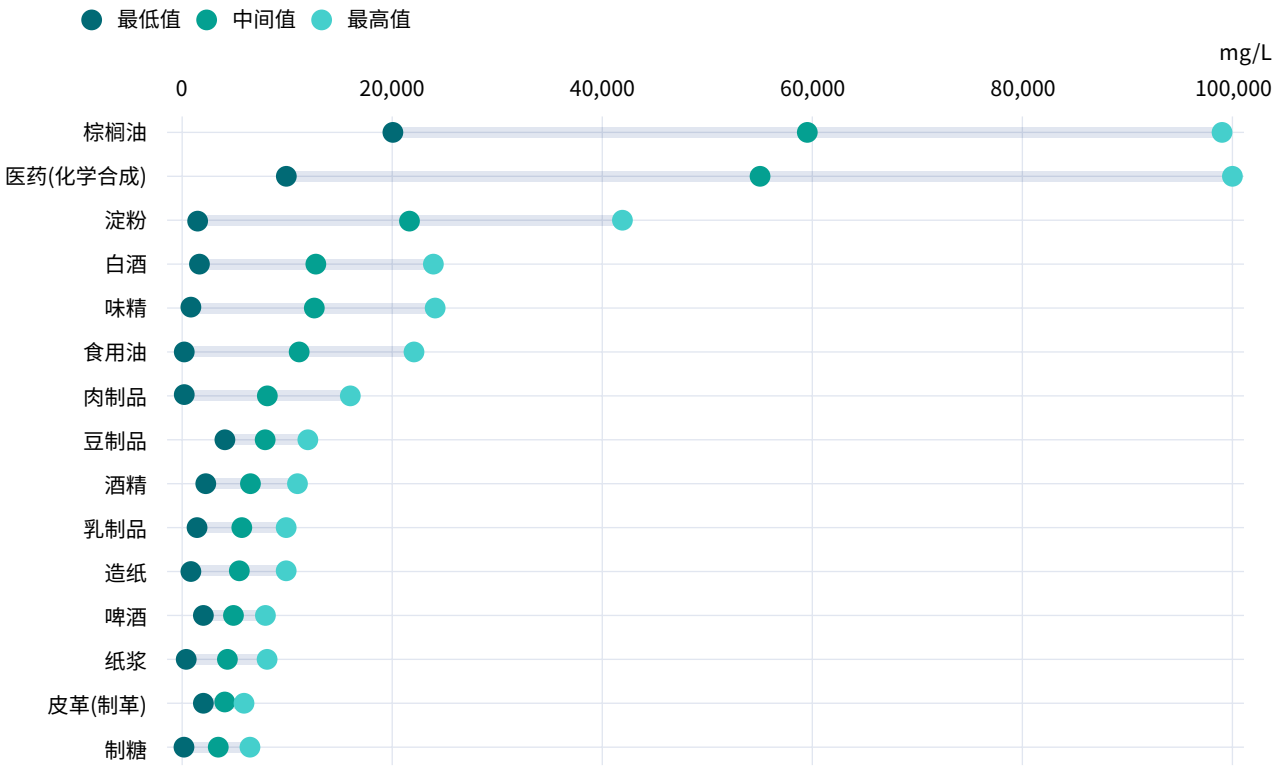
3.1 促进产业协同，推动资源化利用项目提质增效

3.1.1 工业废水助力生产侧节能降碳

工业废水处理过程不仅是工业生产系统中能耗和甲烷排放的关键来源之一，也蕴含着可进一步开发的绿色能源价值。工业生产过程中产生的废水通常需要经过预处理、生化处理等环节实现污染物去除，其中部分高浓度有机废水含有大量可生化有机物，只采用好氧处理工序会产生大量能源消耗，运行成本极高，在适宜条件下通过厌氧—好氧多段联合工序处理污水可降低成本并提升系统效率。厌氧工序会产生富含甲烷的沼气，沼气经收集、净化后可直接作为能源利用，减少废水处理设施的外购能源需求，实现工业废水处理过程的节能降碳。

高浓度、可生化性好的工业废水是开展能源化利用的重点领域。工业废水来源广泛、水质差异显著，进水 COD、BOD、可生化性、盐分及有毒有害物质等均会影响处理工艺的选择和厌氧系统的运行效果。其中，有机负荷较高、可生化性较好且水量相对稳定的废水更适合采用厌氧处理工序。在其他处理条件基本一致的情况下，进水有机负荷越高，厌氧系统可利用的有机物越多，理论产沼潜力通常也越大。因此，进水 COD 浓度可作为判断工业废水能源化利用潜力的重要指标之一，图表 13 展示了部分行业废水的进水 COD 浓度范围。

图表 13 **不同行业工业废水进水 COD 浓度范围**

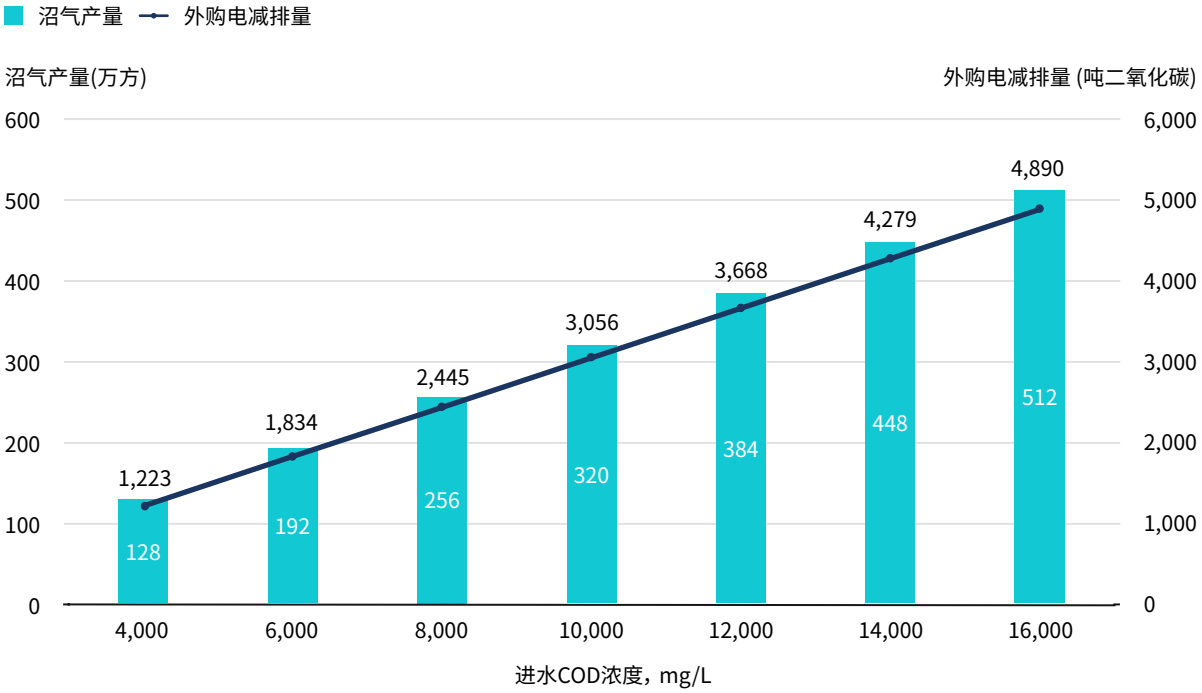


来源：公开资料收集整理

行业协会及相关研究表明，我国具有较好沼气回收潜力的工业废水主要集中于轻工业，如酿酒、制糖、淀粉、造纸、乳制品等行业，以及部分制药、屠宰、石化等非轻工行业[16]。对于已经采用厌氧处理生产沼气的企业，可进一步挖掘沼气能源回收价值；对于尚未采用厌氧处理但具有较高能源化价值的废水，则可结合新建、扩建或既有设施改造，评估增加厌氧处理工序的技术和经济可行性。

沼气发电是当前较为成熟的工业废水沼气利用路径，产出的电力主要用于满足企业生产和污水处理设施用能，降低企业范围二温室气体排放。在已有的污水厌氧处理系统基础上配置沼气回收和利用设施，考虑投资和运营成本，度电成本约为 0.3 元 /kWh 至 0.4 元 /kWh，低于企业外购电成本，具有较好的经济性和能源替代价值。在废水处理规模、厌氧工艺及运行条件基本一致的情况下，处理更高浓度的有机废水可获得更多沼气和减排收益（图表 14）。以年处理量 100 万 m^3 的轻工业有机废水为基准，当进水 COD 浓度由 4,000 mg/L 提高至 16,000mg/L 时，年沼气产量由 128 万 m^3 增加至 512 万 m^3，单位废水沼气产量则由 1.3m^3/m^3 提高至 5.1m^3/m^3，均提高 4 倍；与此同时，沼气发电的能源替代作用逐步增强，单位工业废水外购电减排量由 12 吨 CO_2/ 万 m^3 上升至 48 吨 CO_2/ 万 m^3，酿酒、食用油、医药等行业因而具有更高的能源回收空间和减排潜力。

图表 14　厌氧发酵系统进水有机质含量对废水产沼能力和外购减排的影响



来源：课题组分析；注：本研究情景假设处理 100 万方轻工业有机废水（进水 COD 浓度 4,000 至 16,000mg/L）经厌氧发酵工艺回收沼气发电，系统 COD 去除效率 80%，单位 COD 沼气产率 0.4m^3 沼气 /kgCOD，沼气发电效率 1.7–2.2kWh/m^3 沼气。

在厌氧反应工序配置沼气回收设施的基础上，进一步提高系统甲烷回收效率、降低甲烷出水流失，对于减少甲烷排放具有重要意义。工业废水经厌氧处理产生的甲烷并不能全部以气态形式进入沼气收集系统。除被回收利用的沼气外，仍有部分甲烷以溶解态存在于厌氧出水中，并随出水进入后续处理环节，在减压、曝气及与空气接触等过程中逐步逸散至大气，形成甲烷排放。相比传统 UASB 等厌氧反应器，IC 反应器具有更高的有机负荷承载能力和更强的气液分离及沼气收集能力，在高浓度工业废水处理中更有利于提高甲烷回收效率，减少溶解态甲烷随出水流失。

工业废水资源回收利用还可进一步向园区多源废弃物协同利用拓展。工业园区内通常同时产生多种有机废弃物，如酿酒行业酒糟、食品加工残渣、造纸行业废纸浆及造纸污泥等，可与高浓度有机废水协同进行厌氧处理。上述协同处理模式能够充分利用不同废弃物之间的有机质互补性，提高整体产沼效率和能源供给量。产生的消化液和剩余污泥也可根据资源属性进一步开展肥料化、材料化等利用，从而将企业污水处理逐步拓展为园区层面的多源废弃物协同利用项目，进一步提升园区资源利用效率、增强降碳效果。

除企业内部厌氧处理和沼气回收外，工业废水还可通过与市政污水处理系统协同，实现有机碳资源的跨行业利用。对于啤酒、淀粉、柠檬酸等行业产生的部分高浓度、可生化性较好的有机废水，若单独处理，尤其对于规模较小、产气量有限的企业，沼气收集、净化及利用设施可能难以形成经济性，部分项目产生的沼气只能直接燃烧，能源未能得到利用。相比之下，在满足水质要求和管网接纳条件的前提下，企业可对废水进行预处理，然后输送至市政污水处理厂，作为补充碳源提高下游市政污水的可生化性，从而降低污水处理药剂成本及相关碳排放。

目前，已有部分企业和地区正在探索高浓度工业废水与市政污水协同处理的模式。例如，青岛啤酒集团与当地水务企业建立了系统处理机制，将啤酒热凝固物作为市政污水厂补充碳源，同时低浓度废水经预处理后排入污水处理厂。截止至 2026 年，上述模式已经推广至青岛啤酒 38 家企业，啤酒企业节省污水处理费用 8,300 万元，市政污水厂节省外购碳源费用 2,000 万元，实现互利共赢。长三角地区也于 2026 年启动制定《废水碳源综合利用管理与技术指南》，计划从管理要求、技术评估、碳减排和经济效益核算等方面建立规范，有助于推动降低工业废水和市政污水厂的综合处理成本，并进一步挖掘废水中有机碳的利用价值。

3.1.2　市政污泥与城乡废弃资源协同处置

我国市政污泥资源化利用主要包括厌氧消化、好氧发酵和干化焚烧三类路径。受污泥含水率高、有机质含量相对较低以及终端产品利用渠道有限等因素影响，只采用污泥为单一原料的处理模式在资源化效率和项目经济性方面存在一定局限。因此，可探索构建“污泥 +”协同处置模式，将市政污泥与城市生活垃圾、餐厨垃圾以及农村畜禽粪污、秸秆等城乡有机废弃物进行协同处理，通过优势互补提高资源化利用效率和项目规模效应。

厌氧消化和干化焚烧是推动市政污泥与城乡废弃资源协同利用的关键发展方向。其中，厌氧消化能够将污泥中的有机质转化为沼气，在实现污泥减量稳定化的同时形成能源产品，更适合与餐厨垃圾、畜禽粪污等高有机质废弃物开展协同处置；干化焚烧则可通过协同城市生活垃圾等高热值固体废弃物改善整体燃料特性，提高能源利用效率。污泥好氧发酵的主要产物为肥料，但根据农业农村部发布的《有机肥料》（NY/T 525—2026），有机肥生产应遵循安全、卫生、稳定、有效等原则，污泥不能作为原料生产有机肥，现阶段污泥好氧发酵产品主要用于市政园林绿化、林地利用以及垃圾填埋场覆盖等场景，难以直接进入农用地利用体系，在替代化肥、实现养分资源化方面存在一定局限，本小节主要讨论污泥厌氧消化和焚烧的协同处理路径优势。

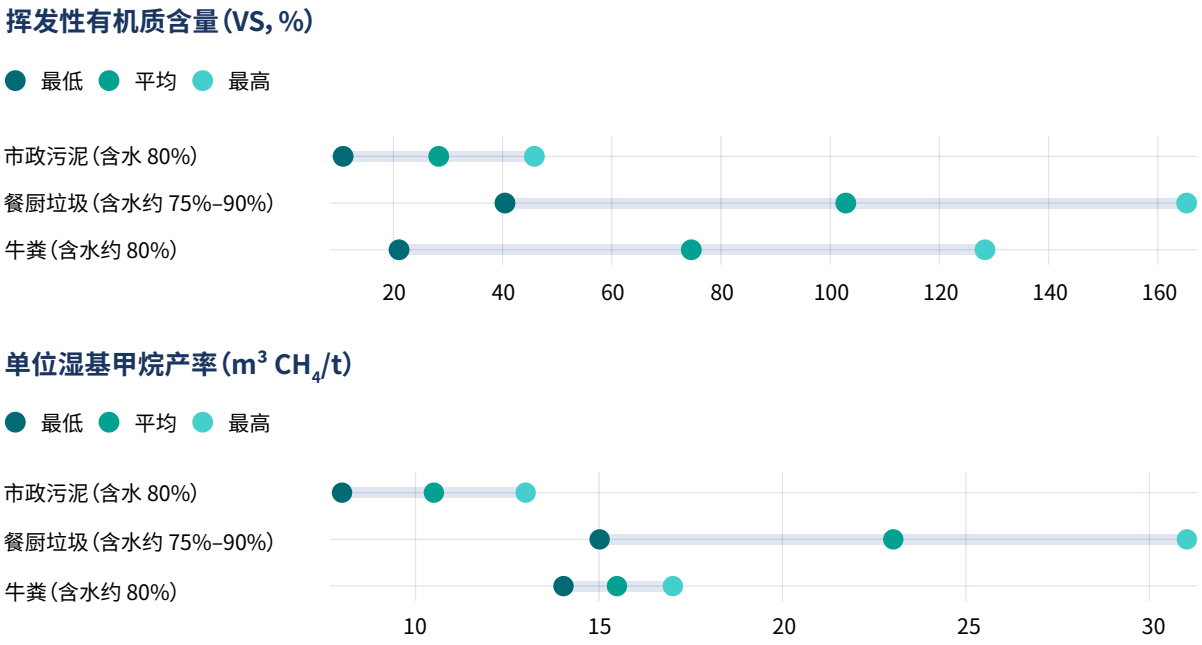
（1）污泥 + 餐厨垃圾 / 粪污厌氧消化路径

污泥厌氧消化在我国尚未形成大规模、稳定的商业化应用模式，经济性不足是关键原因之一。根据水务行业专家分析，目前我国已建成的污泥厌氧消化项目约 60 个，但正常运行的项目不足一半，且主要应用于中大型污水处理厂[17]，课题组粗略估算单个项目的湿污泥处理规模大于 3.5 万吨 / 年，投资成本较大，且对工艺的运行管理要求较高。在此基础上，污泥自身的原料特性也是制约因素之一。厌氧消化系统对进料有机质含量、挥发性固体含量及污染物水平较为敏感，而我国部分市政污泥存在杂质、砂石含量较高和有机质含量偏低等问题，导致单独消化时，有机质降解和沼气产出能力有限，收益难以覆盖前期投入。

“污泥 + 城乡废弃物”协同处置有望成为提升厌氧消化经济性的重要路径。市政污泥含水率高，有机质含量和单位湿原料能源产出相对有限。市政污泥（含水率约 80%）的挥发性固体（Volatile Solids，VS）含量约为 8%–13%，单位甲烷产率约为 10–45 m^3 CH_4/t，产气能力相对有限。相比之下，餐厨垃圾和牛粪的 VS 含量均在 14% 以上，单位湿原料的平均甲烷产率为 75–100 m^3 CH_4/t（如图表 15 所示）。将市政污泥与秸秆、餐厨垃圾、畜禽粪污等高有机质废弃物进行协同厌氧消化，可利用不同原料在有机质含量、营养元素和降解特性方面的互补性，提高混

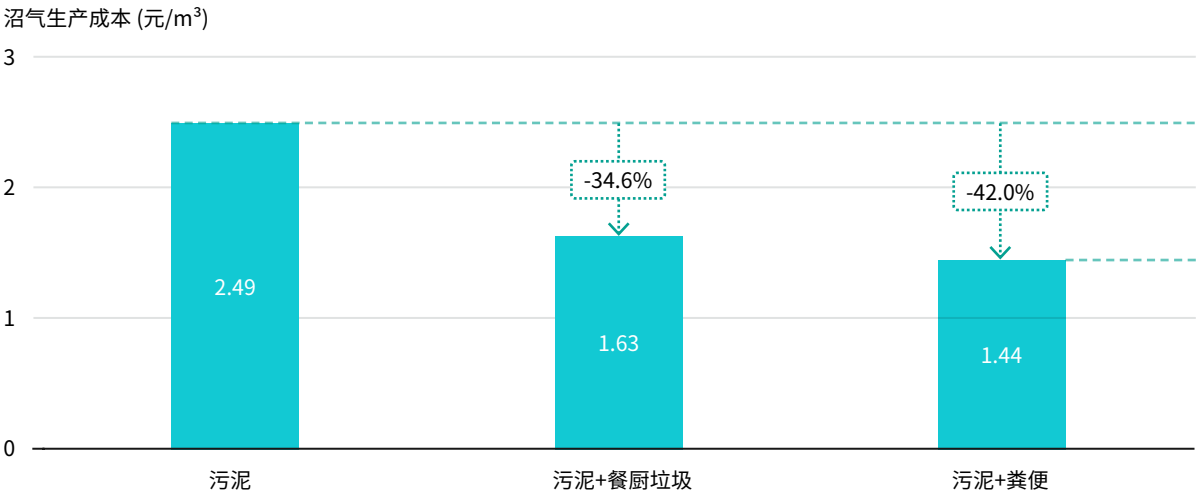
合进料的有机负荷和产气效率，从而提升单位湿原料的沼气产量和能源产出，提高系统稳定性[18]。同时，多来源废弃物集中进入同一处理设施，可提高厌氧消化设施的规模效应，减少不同废弃物单独建设处理设施所需的土地、设备和运营投入[19]。课题组针对污泥单独发酵路径，以及“污泥协同”路径的单位沼气生产成本进行了估算。情景假设三类情景的湿污泥投入量均为 1 万吨，其中“污泥 + 餐厨垃圾”情景按 4:1 的比例混入餐厨垃圾，“污泥 + 粪便”情景按照 3:1 的比例混合粪便。在污泥作为单一原料的情景内，沼气的单位生产成本约为 2.5 元 / 立方米，而协同处置项目可使单位沼气生产成本下降 30% 以上，主要受益于增产、副产品油脂和营养土的额外收入，以及处理粪污和厨余垃圾的处置费收入（图表 16）。

图表 15　各类城乡废弃物有机质含量及甲烷产率



来源：公开资料收集整理

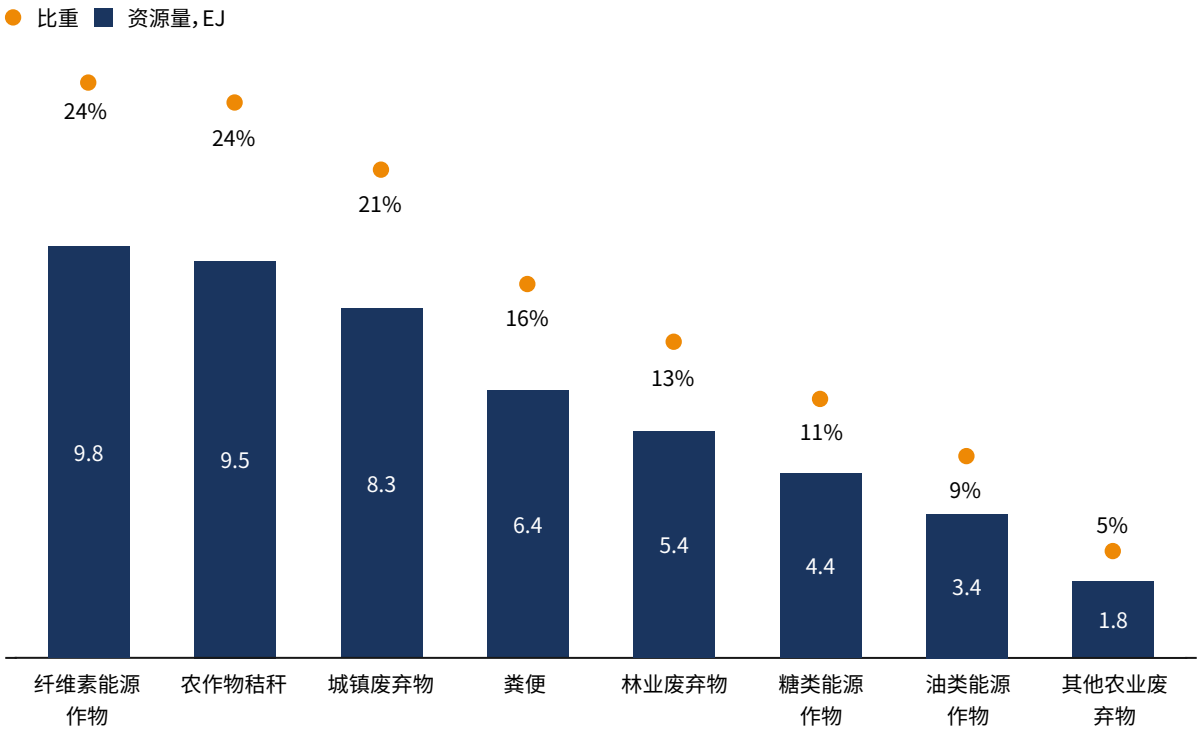
图表 16　污泥与城乡废弃物协同厌氧消化项目的经济性



来源：课题组分析。注：本图表仅为协同厌氧消化项目的经济性示意。在实际工程项目中，由于系统设计不同，原料品质差异等原因，餐厨垃圾、粪便等废弃资源的掺混比例与沼气附加产量并不呈直接的线性增加趋势，本研究选用有限的工程实践作为示意，未针对掺混比例进行敏感性分析。

我国已有多家企业成功建设并运营污泥和城乡废弃物协同处置项目，发展前景广阔。例如，深圳市生物质垃圾处理处置工程每日可处理 300 吨污泥和 200 吨餐厨垃圾，总投资约 2.5 亿元，厌氧消化年产沼气 876 万 m^3，并通过发电、余热回用和工业油脂回收形成多元收益[20]。位于江苏省镇江市的餐厨废弃物及生活污泥协同处理项目每日可处理 300 吨市政污泥和 320 吨餐厨垃圾，总投资约 3.58 亿元，通过沼气发电、粗油脂、碳酸氢铵和生物碳土回收形成多元收益[21]。我国秸秆、畜禽粪污、厨余垃圾等城乡有机废弃物资源丰富，按照能量单位折算，我国年产农作物秸秆约 9.5 EJ、城镇废弃物约 8.3 EJ、粪污资源约 6.4 EJ[22]，可以为污泥协同化利用提供充足的原料基础。

图表 17　我国可收集生物质资源量及构成



来源：Wang et al.[23]

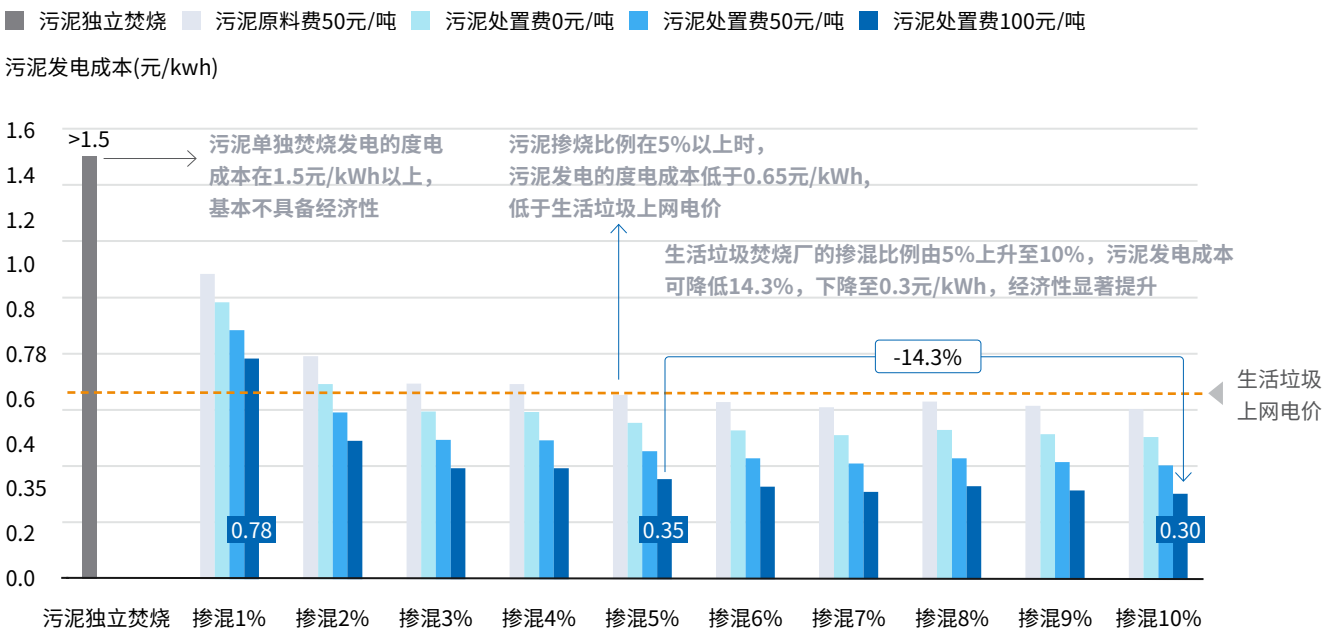
(2) 污泥 + 生活垃圾焚烧路径

市政污泥单独建设焚烧设施的经济性相对有限。我国市政污泥经过简易脱水后的含水率通常在 80% 左右，同时有机质含量和热值相对较低、灰分较高，在直接焚烧前通常需要进行深度脱水和干化，以满足稳定燃烧要求。单独建设污泥干化焚烧项目还需配置污泥干化、烟气净化及灰渣处置等设施，不仅投资需求较大，也可能面临较高的干化能源消耗和运行成本。根据业内专家调研，按照日处理能力计算，我国含水率约 80% 的污泥单独干化焚烧的投资成本在 30 万元 –100 万元 / 吨污泥，运行成本普遍约为 200 元 –300 元 / 吨污泥[23]。

与单独焚烧相比，将污泥与生活垃圾协同焚烧可改善污泥燃烧条件，并充分利用已有的固废处置设施。生活垃圾具有较高的有机质含量和热值，与经过适当预处理的污泥混合后，可在一定程度上弥补污泥含水率高、热值低对焚烧过程造成的不利影响。有研究指出，我国污泥和生活垃圾的掺烧比例控制在 10% 以内，对锅炉运行效果产生的影响可控，且能够符合污染物排放要求[24]。我国生活垃圾焚烧设施已经形成较为成熟的处理体系，焚烧炉、轮机发电、烟气净化等核心设施均可直接用于处置污泥，只需要额外投资污泥接收、储存、干化和输送等环节的新建设施即可。

污泥协同焚烧具备较强的经济性，主要来自既有设施利用、发电上网以及废弃物处置收益等。污泥与生活垃圾协同焚烧在我国已具备技术和经济可行性，投资成本在 20 万元 / 吨污泥，运行成本在 100 元 –200 元 / 吨污泥，相比单独焚烧可节约一半以上的成本。在具体的项目运营层面，发电和污泥处置费可进一步为项目带来额外收益。课题组以中等规模的垃圾焚烧厂（年处理生活垃圾 50 万吨）为例，按照市政污泥的掺烧比例（1%–10%）分别配置小型、中型和大型污泥预处理设施（投资成本在 300 万元至 1,500 万元），对污泥发电的单位成本进行了估算，结果如图表 18 所示。污泥独立焚烧的发电成本在 1.5 元 /kWh， 经济性不足。如果改为协同焚烧，当污泥掺烧比例达到 5% 以上时，污泥发电的度电成本可以下降至 0.65 元 /kWh，基本实现盈亏平衡。如果进一步落实污泥处置费，度电成本可实现大幅下降。在保证污泥处置费用 100 元 / 吨的基础上，随着掺烧比例从 1% 提升至 10%，单位污泥发电成本（含处置费与发电收益）由约 0.78 元 /kWh 降至 0.30 元 /kWh；掺烧比例超过 5% 后，成本低于 0.65 元 /kWh 的垃圾焚烧上网标杆电价，项目可实现盈利。

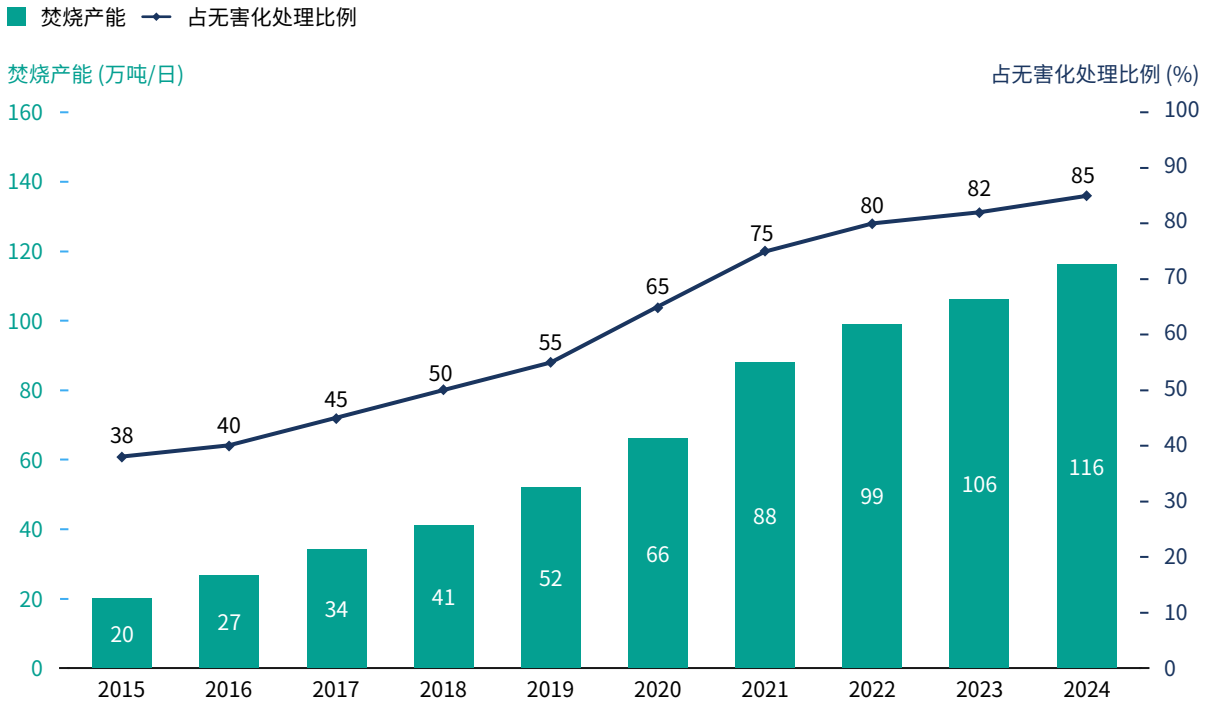
图表 18　　污泥独立焚烧和生活垃圾协同焚烧路径的发电成本估算



来源：课题组分析。注：本情景假设中等规模垃圾焚烧发电设施，年处理量 50 万吨生活垃圾，污泥掺烧对应需要新增小、中、大型污泥预处理和输送系统，投资成本在 300 万元 –1,500 万元不等。此外，掺烧将增加系统运行成本，包括药耗和系统运维费用，同时考虑增加灰渣无害化处理设施。

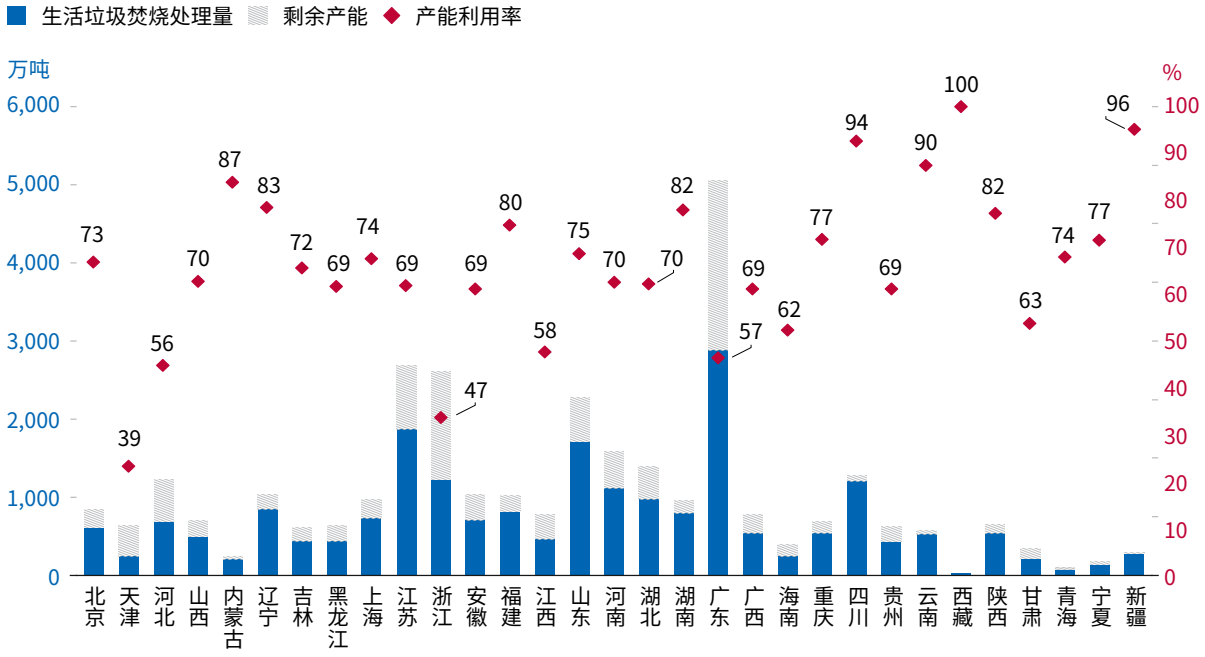
我国生活垃圾焚烧处理能力不断提升，为污泥进入既有焚烧体系创造了机遇。截至 2024 年底，全国在运行生活垃圾焚烧厂达 1,137 座，城市及县城生活垃圾焚烧日处理能力约 116 万吨 / 日，焚烧占无害化处理比例提升至约 85%[25]，较 2015 年的约 20 万吨 / 日增长近 5 倍，超过“十四五”规划提出的 80 万吨 / 日目标[26]。随着生活垃圾焚烧设施快速建设，我国已经形成较为充足的焚烧处理能力（图表 19）。目前，部分设施面临生活垃圾收运量增长放缓、实际运行负荷下降等问题，全国生活垃圾焚烧产能利用率在 60% 左右，逐步进入存量设施优化利用阶段，为市政污泥进入既有焚烧体系提供了广阔空间（图表 20）。按照我国现有城市和县城湿污泥产生量 16 万吨 / 天计算，假设现有的生活垃圾焚烧设施配备 5% 的掺烧能力，则垃圾焚烧设施能够帮助解决 5.8 万吨 / 日的市政污泥，占污泥产生总量的 36.3%；若进一步提升掺烧能力至 10%，现有生活垃圾焚烧设施能够协同处理 11.6 万吨 / 日的市政污泥，占污泥产生总量的 70% 以上。

图表 19　我国生活垃圾焚烧产能变化



来源：中国城乡建设统计年鉴，课题组整理

图表 20　我国各省生活垃圾焚烧产能利用情况 (2024 年)



来源：中国城乡建设统计年鉴，课题组分析

3.2 完善市场机制，释放污水污泥资源的绿色低碳价值

3.2.1 实现温室气体减排的气候价值

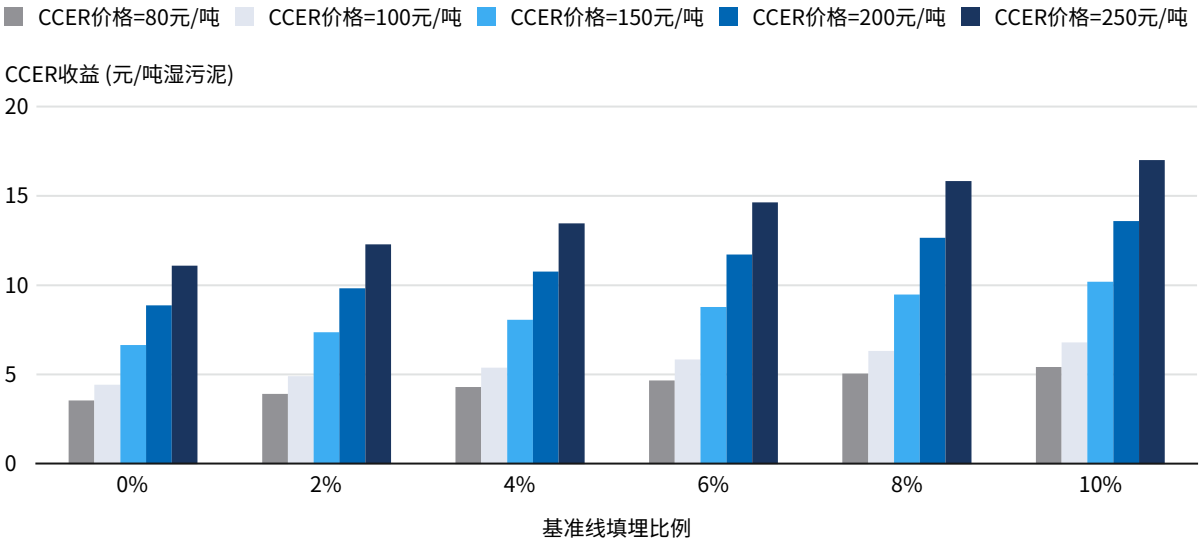
市政污泥资源化利用具备较强的气候价值，例如减少化石能源燃烧的二氧化碳排放、避免污泥填埋的甲烷排放等。然而目前污泥资源化利用的减排价值尚未充分转化为项目收益，碳市场、CCER、市场机制仍有进一步发挥作用的空间。本小节重点讨论不同资源化利用路径的减排价值及其气候价值实现方式，分析碳资产收益对污泥处置成本和项目经济性的影响。涉及的主要路径包括：（1）市政污泥厌氧消化沼气利用；（2）水泥窑协同处置市政污泥。

(1) CCER 赋能市政污泥厌氧消化

市政污泥厌氧消化沼气利用可探索 CCER 机制的支持作用。目前，现有污泥厌氧消化项目产生的能源收益已经通过污水厂能源成本的下降体现出来，而温室气体减排的价值尚未充分发掘。我国污水系统未纳入全国碳市场，减排没有硬性指标约束，行业普遍缺乏市场激励。我国《甲烷排放控制行动方案》中提出“支持符合条件的甲烷利用和减排项目开展温室气体自愿减排交易”，为甲烷减排项目提供了新的发展空间。目前，我国生态环境部已经针对煤炭、油气、农业领域发布了甲烷减排 CCER 方法学，污水污泥领域暂时处于空白状态，厌氧消化项目可能作为未来的重点应用方向，为污水厂减排提供直接的经济激励。

CCER 价格和污泥填埋比例是影响污泥利用项目减排收益的关键因素。市政污泥厌氧发酵项目产生的减排收益分为三类：1）沼气能源化利用产生电热，替代污水厂外购能源产生的二氧化碳排放；2）减少污泥直接填埋产生的甲烷排放；3）减少污水厂消费化石能源产生的温室气体排放。其中，污泥直接填埋产生的甲烷排放是 CCER 项目中测算基准线项目情景排放的关键部分之一，考虑到我国污泥处置方式正逐步由填埋向焚烧、资源化利用等方向转变，污泥填埋比例总体呈下降趋势，基准线情景下的污泥填埋比例将直接影响项目减排量及其经济性。同时，CCER 交易价格也是影响项目减排收益的重要因素。课题组以污泥热水解厌氧消化沼气发电项目为例，分析污泥填埋比例与 CCER 价格对项目经济性的影响（图表 21）。参考我国 CCER 市场在 2025 年的成交价范围 50.8 元 / 吨 CO_2e 至 107.4 元 / 吨 CO_2e[27]，情景假设未来 CCER 成交均价保守取值为 80 元 / 吨 CO_2e，按照符合政策趋势的基准线情景（即污泥填埋比例为 0%）测算，单位湿污泥产生的 CCER 收益为 3.6 元 / 吨，仅占我国单位污泥处置费的 1.8%（以 200 元 / 吨湿污泥计算），减排收益较为有限。未来随碳价逐步提升，单位收益可增加至 11.1 元 / 吨湿污泥，具备一定的经济激励作用。

图表 21 **基准线情景污泥填埋比例对污泥沼气项目经济性的影响**



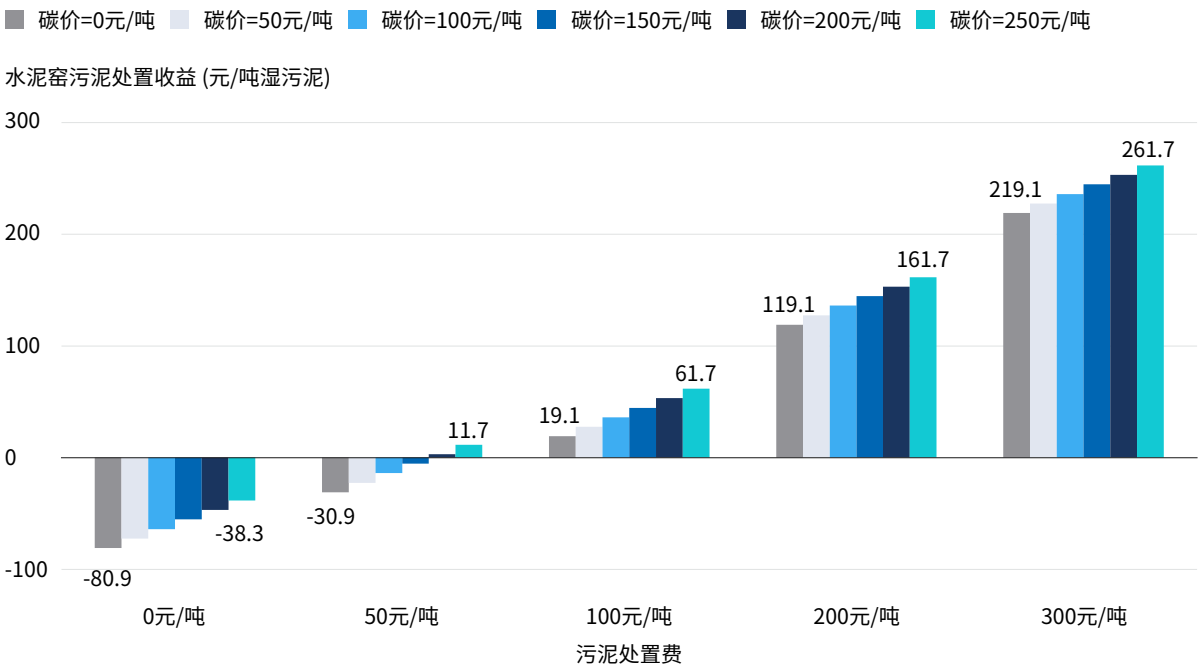
来源：课题组分析。注：本研究情景假设污泥采用热水解厌氧发酵配套沼气发电设施，沼气发电量全部供给污水厂替代外购电，产生的二氧化碳排放全部为生物源碳，不记录在项目总排放中；厌氧发酵过程产沼效率 48m^3/t 湿污泥，沼气浓度 60%，沼气发电效率为 2kWh/m^3 沼气，系统甲烷逸散率 0.5%。

(2) 碳交易赋能水泥窑协同处置污泥

市政污泥与水泥窑协同处置可依托现有碳市场机制，将减排价值转化为经济收益。市政污泥经干化后能够大幅降低含水率，并可作为替代燃料进入水泥窑，替代煤炭等化石能源，从而减少水泥生产过程中的温室气体排放。根据课题组测算，假设按照水泥熟料日产能 10% 的比例协同处置湿污泥（含水率 80%），每协同处置 1 吨污泥可产生约 170kg 的二氧化碳减排效果，以一家日产能 5,000t/d 的熟料生产线测算，水泥窑协同处置污泥的年减排量超过 3 万吨。水泥行业目前已经纳入碳市场并遵循配额制，减排量能够通过碳交易获得相应收益，从而进一步改善水泥窑协同处置污泥的经济性。除碳市场体现的二氧化碳减排量外，水泥窑协同处置能够带动减少污泥填埋并减少甲烷排放，按污泥填埋比例 15% 估算，水泥窑每协同处置 1 吨湿污泥可相应减少 8.4kg 甲烷（相当于 235.6kg 二氧化碳），附加减排价值远超水泥行业单位减排量。水泥窑协同处置污泥不仅能够促进水泥行业实现降碳转型，还能够带动污水系统降低污泥处置的气候风险。

完善污泥处置收益是保证现有项目稳定运行的关键前提。在污泥处置费基础上，碳市场能够进一步释放水泥窑协同处置污泥的减排价值，为项目经济性提供额外支撑。我国采用水泥窑处置市政污泥属于较为成熟且成本可控的技术手段，按照污泥日处理能力计算，项目投资成本约为 15 万元 –20 万元 / 吨湿污泥，考虑运维，综合处置成本约为 150 元 –250 元 / 吨湿污泥。在收益层面，水泥窑每处置 1 吨湿污泥的节能收入仅为 55 元 –70 元，污泥处置费是关键的项目收入来源。目前我国污泥处置费通常在 200 元 / 吨以上，叠加节能收入，水泥窑企业可基本实现盈亏平衡。在此基础上，碳市场能够进一步将污泥协同处置产生的减排价值转化为经济收益。在水泥行业参与履约的情景下，按照我国碳市场配额价格 100 元 / 吨 CO_2 估算，碳价可使项目增加 17 元 / 吨湿污泥的收益，较无碳市场情景提升约 14.3%；若按照 2030 年碳价 200 元 / 吨 CO_2 进行测算，碳交易收入可进一步提高至 35 元 / 吨湿污泥，项目经济性提升近三分之一（图表 22）。

图表 22 碳价和污泥处置费对于水泥窑协同处置污泥项目经济性的影响



来源：课题组分析。注：本情景假设湿污泥协同处置比例为水泥熟料日产能的 10%，即产能 5,000t/d 的熟料生产线，协同处置 500t/d 的市政湿污泥（含水量 80%），污泥经干化后降低含水率至 30% 左右，而后与煤进行混合后送入炉膛进行燃烧。

我国水泥行业具备较大的原料和燃料需求，也为污泥处置提供了较为广阔的应用基础。我国是全球最大的水泥生产和消费国，水泥熟料年产能超过 20 亿吨[28]，二氧化碳年排放总量高达 13.7 亿吨，燃料年需求总量高达 1.7 亿吨标准煤[29]，为污泥协同处置创造了应用空间。RMI 以往研究分析指出，我国水泥窑协同处置固体废弃物技术已经具备一定基础，约 17% 的熟料生产线已经具备固体废弃物协同处置能力[30]，其中配备污泥协同处置设施的生产线约 45 条，年处置能力约 350 万吨[31]，占我国市政污泥产生量的 6%。课题组估算按照现有处置能力，水泥窑每年可协同带动减少污泥填埋甲烷排放 3 万吨（折 92.5 万吨二氧化碳）。随着碳价水平逐步提升，污泥替代化石燃料所产生的减排价值将逐渐提升，为水泥行业扩大污泥协同处置规模提供额外的市场激励。

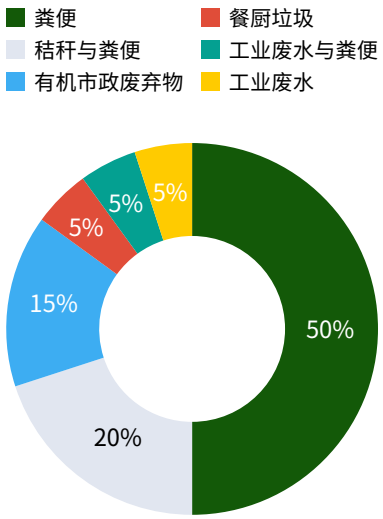
3.2.2 打通绿色燃料销售壁垒，创新交易机制

工业废水中的沼气经提纯升级后可进一步转化为生物天然气，拓展资源化利用的市场收益，且依托现有污水处理基础设施，该路径已具备较强的成本竞争力。落基山研究所以往研究指出，目前国内以畜禽粪污、秸秆、餐厨垃圾等为原料生产生物天然气的单位成本约为 4.4 元 /m^3 至 11.5 元 /m^3，相较于 2 元至 5 元 /m^3 的天然气民用和商业价格而言，市场竞争力非常有限[32]。上述生产路径较高的生产成本不仅来自原料获取，还受到设备投资和土地等固定成本的影响。相比之下，工业废水处理设施通常已配备厌氧处理装置，其作为污染物去除的关键设施，在污水处理厂建设阶段即已投入使用；部分项目还已配套沼气回收利用设施，从而显著降低了生物天然气生产所需的新增固定资产投入。根据课题组分析，采用工业废水制备生物天然气的平均生产成本在 1.5 元至 2 元 /m^3，有望成为现阶段最具成本竞争力的生物天然气开发路径。

绿色燃料认证机制的发展，为工业废水生物天然气拓展市场价值提供了新的路径。在全球范围内，以国际可持续发展与碳认证体系（ISCC）为代表的绿色燃料认证机制正逐步发展并扩大应用，为可持续原料来源、温室气体减排绩效等绿色属性提供第三方认证和追踪；与此同时，我国相关认证体系和市场机制也在不断发展，多项生物天然气国家和行业标准不断颁布，体系日趋完善。在国际认证层面，我国已有 19 个生物天然气项目获得 ISCC 认证，但主要以农林废弃资源为原料，工业废水资源化生产生物天然气的认证实践仍较为有限（图表 23）。随着更多工业废水生物天然气项目开展绿色燃料认证，其原料来源、生产过程及减排属性可得到标准化识别和追踪，为后续参与绿色燃料市场和探索属性交易机制奠定基础。

图表 23　我国获得国际生物天然气认证的项目及原料类别

原料类型	企业名称	所在地
餐厨垃圾	瀚蓝（佛山）新能源运营有限公司	广东省佛山市
畜禽粪污	标发生态（鄄城）有限公司	山东省菏泽市
	标发生态（巨野）有限公司	山东省菏泽市
	成都宏基博润环保科技有限公司	四川省成都市
	江苏淮安国丰清源沼气有限公司	江苏省淮安市
	上海神机朗能环保科技有限公司	上海市
	沈阳辽中山大生物质科技有限公司	辽宁省沈阳市
	望奎聚能生物天然气有限公司	黑龙江省绥化市
	维尔利（海盐）生物能源有限公司	浙江省嘉兴市
	周口诚志生物质能源有限公司	河南省周口市
有机城市固体废弃物	重庆艾绲富绿能有限公司	贵州省遵义市
	上海环境集团再生能源运营管理有限公司奉贤分公司	上海市
	上海老港固废综合开发有限公司三期	上海市
秸秆、粪便	安徽万博能源科技有限公司	安徽省蚌埠市
	黑龙江博能绿色能源科技有限公司	黑龙江省大庆市
	黑龙江博能绿色能源科技有限公司	黑龙江省绥化市
	上海神机朗能环保科技有限公司	上海市金山区
酿酒废水	泸州航发能源投资有限公司	四川省泸州市
食品工业废水、粪便	阜南林海生态科技有限公司	安徽省阜阳市

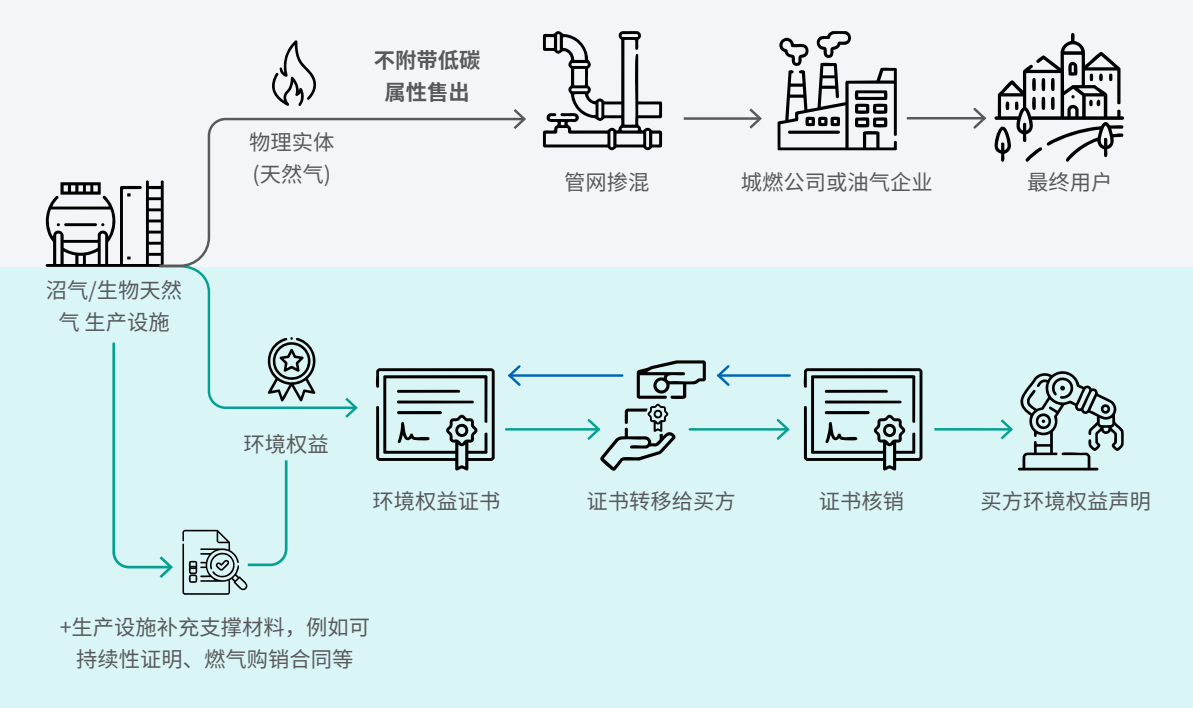


来源：ISCC，课题组整理。注：本表仅展示在有效期范围内的项目，不含已到期认证。

环境权益认证和交易机制的不断完善，有助于进一步释放生物天然气的绿色价值，拓展下游消费市场，并进一步提升工业废水沼气提纯项目的经济性。相较于沼气发电主要在厂内消纳，提纯后的生物天然气可以进入工业生产、城市燃气等更多终端用能场景。但在实际应用中，生物天然气生产项目与能源消费企业往往分布在不同地区，完全依赖物理天然气交易可能受到输配成本和管网供应条件的限制。

近年来，随着绿色燃料需求不断增长，在全球层面相关环境属性认证和交易机制也在持续发展，为绿色燃料跨区域消费提供了新的实现路径。其中，登记与确权机制（Book & Claim 机制）通过将绿色燃料的物理产品与其经认证的环境权益分离，并对环境权益进行追踪、转移和核销，使异地消费企业无需实际使用特定项目生产的绿色燃料，也能够购买并核销相应的绿色属性。目前，Book & Claim 机制已在航空领域得到实践。落基山研究所参与发起的可持续航空买家联盟（SABA）推动企业通过购买可持续航空燃料环境属性证书（SAFc）参与航空燃料市场，将 Book & Claim 机制应用于 SAF 的跨区域消费。未来，这一机制有望突破生物天然气物理供应的地域限制，扩大生物天然气的潜在消费市场，并为工业废水沼气提纯项目获取绿色溢价创造条件。

图表 24　生物天然气登记与确权机制概念图



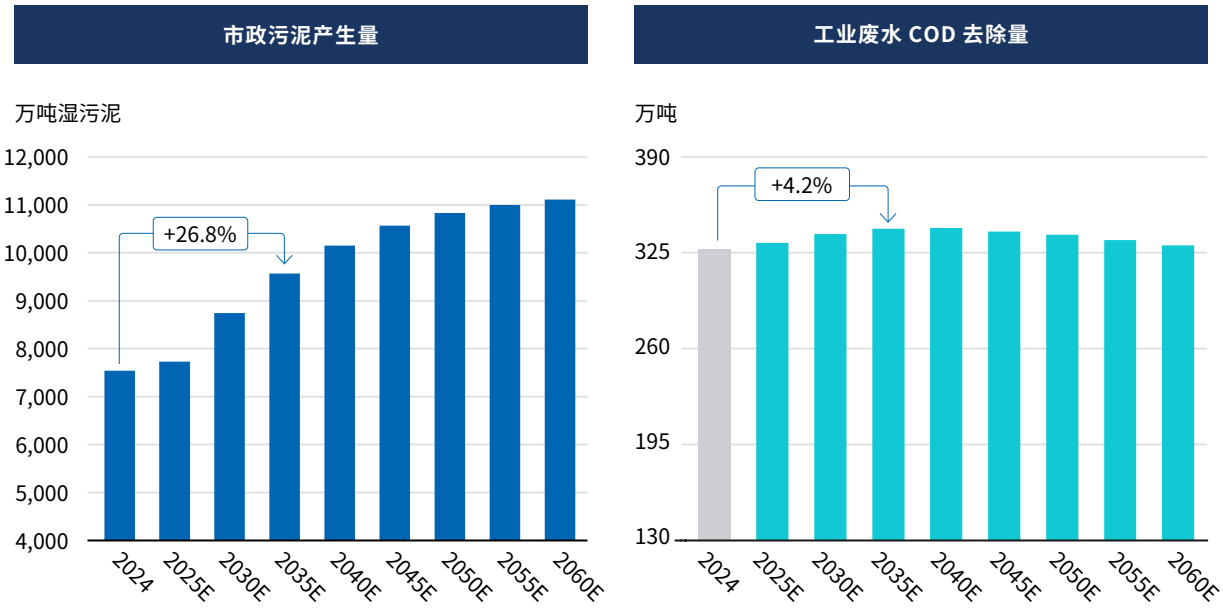
来源：落基山研究所

4、 展望与行动建议

4.1 发展趋势和路径展望

我国未来市政污泥和工业废水仍将维持较大规模，在带来持续甲烷减排压力的同时，也为资源化利用创造了发展空间。根据课题组分析，短期内我国生活污水产生量和工业废水处理量仍将不断增长。到 2035 年，市政湿污泥年产生量将超过 9,500 万吨，较 2024 年增加 26.8%，工业废水处理量将增加 4.2%，达到 341 亿吨每年（图表 25）。到 2060 年，我国市政污泥产生量将超过 1.1 亿吨每年，随着工业节水技术的提高，工业废水处理量将逐渐下降至 330 亿吨每年。在废水与污泥总体规模较大的背景下，资源化利用需要进一步从单一设施、单一资源的利用，转向产业链各环节的协同，这也将成为未来污水系统资源化利用的重要发展方向。

图表 25 **我国市政污泥与工业废水 COD 处理量预测**



来源：中国城乡建设统计年鉴，课题组分析

从产业链整体看，污水系统首先需要改善可利用资源的供给条件和系统的甲烷管理水平。在源头收集和处理过程中，应提高污染物有效收集水平，并加强甲烷排放监测与过程控制。通过完善污水管网、减少外水渗入和有机物损失，将更多有机物富集至污泥或浓缩有机物中，为后续厌氧消化提供稳定的物质基础。对于处理过程中产生的甲烷，则应进一步加强收集和控制，降低无组织排放。

在资源供给条件改善的基础上，可进一步聚焦于资源集中且具备稳定利用场景的技术路径，探索行业协同、资源协同等耦合发展路径。轻工业行业产生的工业废水具有较高的有机质浓度和较好的可生化性，且处理边界位于工业企业内部，便于集中处理和与生产端能源需求衔接，具备较好的能源回收条件；市政污泥则产生量较大、来源稳定，可利用水泥窑、垃圾焚烧等既有设施开展集中处理和协同利用，避免新增设备的资金投入和设施锁定。

图表 26　污水系统甲烷减排与资源化利用协同发展路径

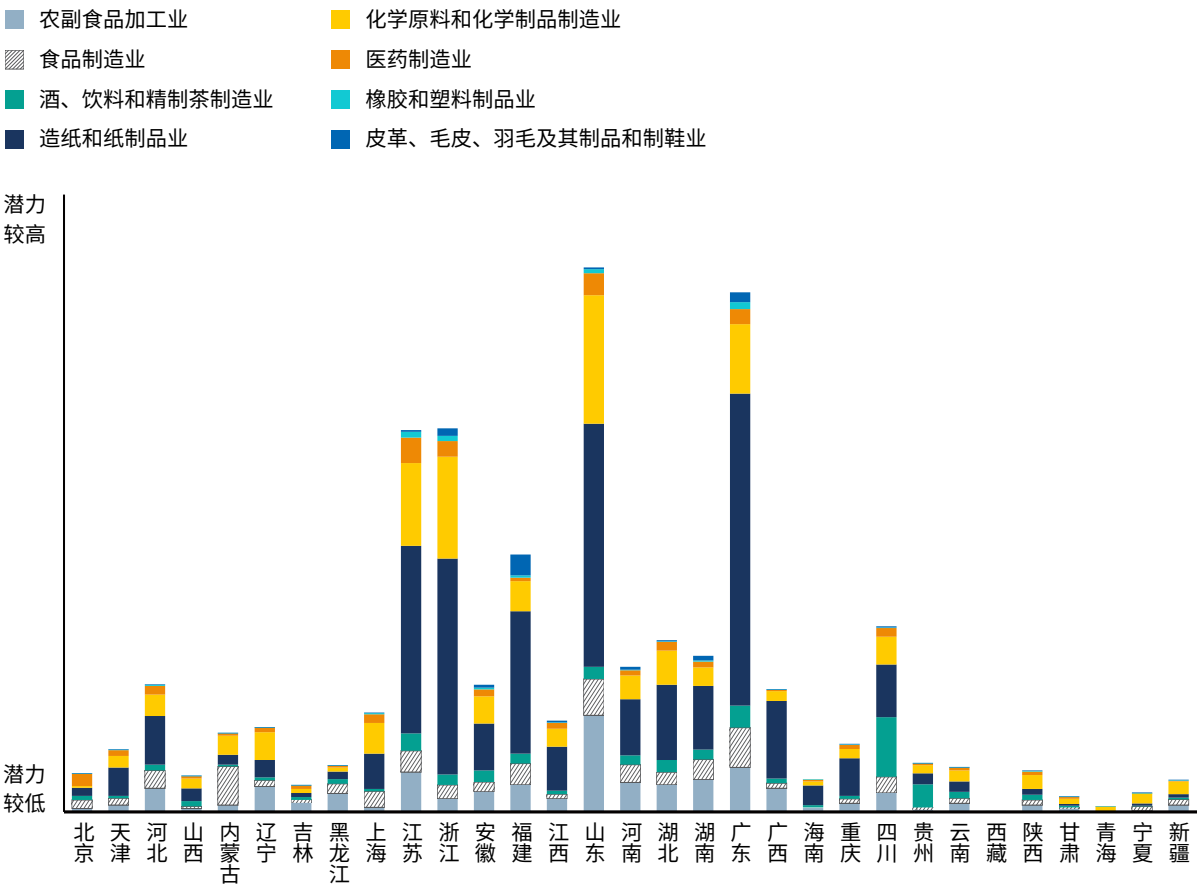


来源：课题组分析

工业废水甲烷资源化利用宜充分结合区域产业基础和资源集聚程度，优先在资源规模大、回收条件好、下游利用需求明确的地区形成示范。课题组基于全国分行业废水处理情况、各省工业经济活动规模以及不同行业废水产沼能力测算，2024 年我国工业有机废水的甲烷资源化利用潜力约为 20 亿立方米（图表 27）。其中，广东、山东、江苏、浙江和福建五省合计占全国潜力的 51.6%，华东、华南两大区域合计占比达到 63.5%，是我国工业废水沼气资源开发的核心区域。山东、江苏、浙江、福建等省工业园区密集，造纸、化工、农副食品加工等高有机负荷行业集中，具备较好的废水集中收集、厌氧处理和沼气利用条件，应作为近期规模化开发的重点区域。华中地区河南、湖北、湖南以造纸、农副食品加工和食品制造业为主，可依托产业集群推进园区级项目。西南地区虽然总体潜力低于东部，但四川、贵州依托白酒产业形成鲜明的行业特色，酿酒废水 COD 浓度较高、具有较高的资源化价值，应采取与当

地产业结构相匹配的精准开发模式，促进酒糟与废水协同发酵。东北、西北地区总体潜力相对较低，适宜结合食品及化工产业，选择具备规模化废水产生量的企业或园区开展示范工程。

图表 27　我国分省工业废水资源化利用潜力



来源：课题组分析。

注：本图表中资源化潜力主要包括国民经济行业分类中的 8 个行业，以废水沼气理论生产能力为主要评估指标，不代表各行业工业废水的甲烷减排潜力。

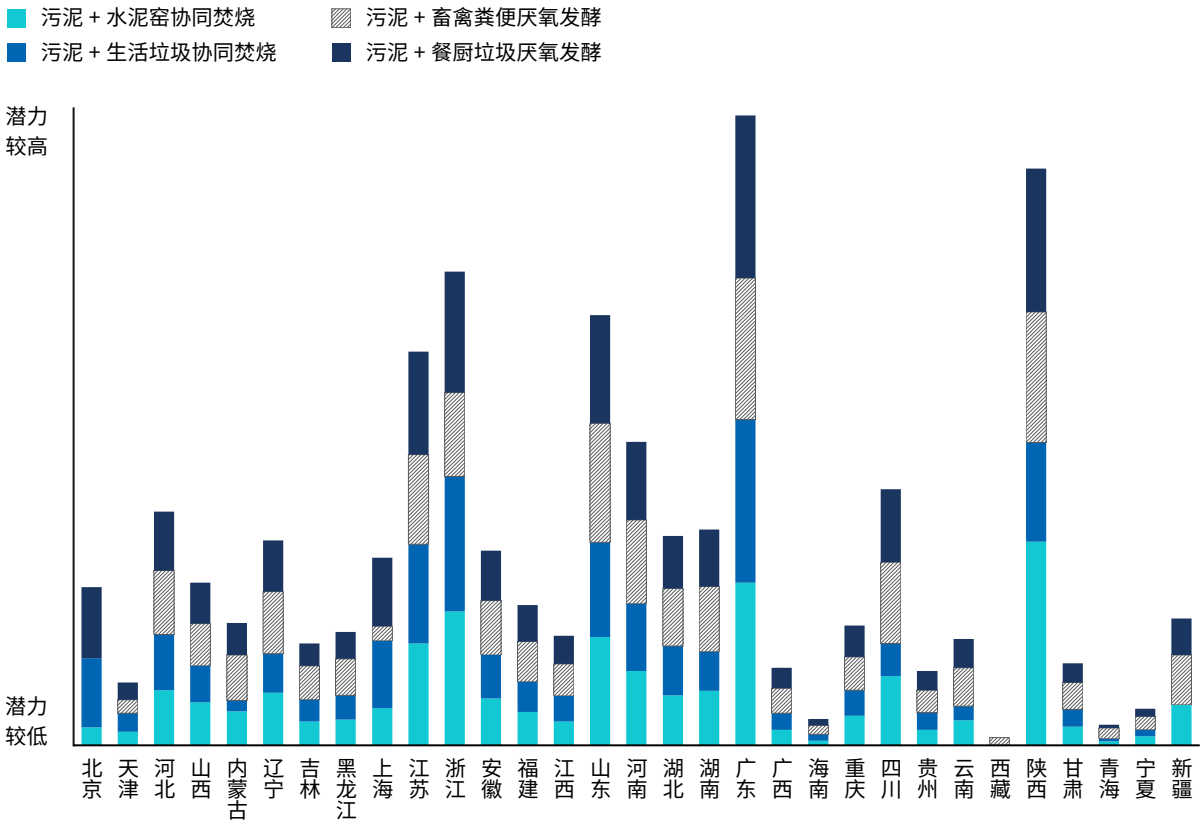
造纸、食品和酒饮料等高有机负荷行业是工业废水甲烷资源化利用的优先切入领域，可结合行业特点探索差异化利用路径。造纸行业在广东、山东、江苏、浙江、福建、广西等省份均具有较高潜力，且企业和生产园区集聚度较高，可依托现有废水处理设施推动厌氧回收，并进一步探索与废浆、造纸污泥等有机废弃物协同利用；食品行业在山东、辽宁、黑龙江、河南、湖北等省份潜力突出，屠宰、淀粉、食品加工等企业可优先推动沼气就地利用；四川、贵州等地白酒产业集中，酿酒废水有机物浓度较高，可结合酒糟等有机废弃物开展协同厌氧发酵，提升系统效率。对于大型园区和单体企业，应优先推动沼气替代企业自用化石能源和外购电力；对于日产沼气达到 1 万 m^3 及以上、具备稳定气源和下游需求的项目，可进一步提纯制备生物天然气，拓展工业燃料、交通燃料和燃气管网等利用场景，并通过绿色燃料登记与确权机制降低下游销售壁垒、提升项目经济性。

我国污泥资源化利用潜力总体呈现明显的区域差异，东部沿海和人口经济活动较为集中的地区具有更大的资源规模和协同利用基础（图表 28）。从区域分布看，污泥产生量较大的省份主要集中在经济活动密集、城镇污水处理设施较为完善的东部和中部地区，这些地区同时具备较为成熟的污水处理和污泥处置设施，为进一步推动污泥能源化和资源化利用提供了基础。与单纯扩大污泥处理能力相比，未来污泥资源化利用应更加关注存量设施与周边

有机废弃物、生活垃圾处理设施以及工业窑炉等资源的匹配程度，优先选择污泥规模较大、协同处置条件较好且下游消纳需求明确的地区开展规模化示范。

我国市政污泥资源化利用潜力呈现显著的区域集聚特征，东部沿海及部分中西部经济与人口密集省份应作为规模化资源化开发的重点区域。从全国范围看，污泥产生规模与经济发展水平、城镇化程度及污水处理设施规模密切相关，广东、浙江、山东、江苏等东部沿海省份，以及陕西等中西部人口和产业相对集中的省份，构成我国污泥资源化利用的重点区域。这些地区污泥产生基数较大，同时具备较完善的污水收集处理体系和较强的基础设施承载能力，为污泥规模化资源化利用提供了较好的资源和设施基础。相比之下，部分人口密度较低、产业规模较小的西部及海岛省份，污泥资源总量相对有限，规模化开发空间相对较小。因此，未来产业布局不宜采取全国均质化推进模式，而应优先聚焦污泥资源规模较大、下游消纳条件较好的重点省份，通过因地制宜选择协同处置和能源化利用路径，形成具有规模效应的示范项目和区域性产业集群，并逐步向其他地区推广成熟模式。

图表 28　我国各省市政污泥资源化利用潜力及关键技术路径



来源：课题组分析。

注：本图表中资源化潜力以各省污泥产生量、水泥熟料产能、生活垃圾焚烧未利用产能、畜禽粪便和餐厨垃圾资源量为主要评估指标，通过附加权重和打分的形式确定各类协同路径的推广潜力。

污泥与水泥窑、生活垃圾焚烧设施协同处置，是工业化和城镇化水平较高地区拓展污泥消纳能力的重要路径。对于污泥产生规模较大的省份，资源化开发的关键并不仅在于污泥资源本身，更在于能否与周边已有的水泥窑、生活垃圾焚烧等设施形成有效的空间匹配和产能衔接。**广东、浙江、江苏、山东等东部沿海省份**兼具较大的污泥产生规模和较完善的水泥窑、生活垃圾焚烧设施基础，在两类协同路径上均具有较好的开发条件，可优先探索区域化、规模化的污泥协同处置模式。部分中西部省份虽然生活垃圾焚烧设施基础相对有限，但水泥熟料产能规模较大，因此更适合依托现有工业窑炉拓展污泥协同处置空间。污泥焚烧协同不宜简单复制单一技术路线，而应根据当地水泥窑和垃圾焚烧设施的规模、负荷水平及空间分布，优先利用已有工业基础拓展污泥消纳能力，

在避免大规模新增专用处置设施投资的同时，提高存量基础设施利用效率，实现污泥减量化、资源化与能源替代的协同效益。

污泥与城乡有机废弃物协同厌氧消化适宜结合区域农业生产和城市消费特征，形成差异化的有机废弃物能源化利用模式。对于山东、河南、四川、河北等畜禽养殖规模较大的省份，畜禽粪便资源丰富，可重点探索“污泥 + 畜禽粪便”协同厌氧消化，通过不同有机废弃物之间的组分互补提升厌氧消化效率，并拓展沼气、生物天然气等能源产品的规模化供应。对于广东、江苏、浙江等人口和城市消费高度集中的沿海省份，餐厨垃圾产生量大、收运和集中处理体系相对完善，则更适合发展“污泥 + 餐厨垃圾”协同厌氧消化。未来应从省域资源禀赋出发，系统匹配污泥与周边高有机质废弃物资源，优先在资源集中、设施基础较好且能源产品具有明确消纳需求的地区布局示范项目，推动单一废弃物处置向多源有机废弃物协同资源化利用转变。

4.2 行动建议

实现污水污泥的资源化利用，不仅可以创造经济价值、推动循环经济发展，也能减少甲烷排放、助力“双碳”目标实现。我国已建设规模庞大的污水处理能力，但污水处理系统甲烷控排与资源化利用仍处于起步阶段，存在排放底数不清、部分项目投资成本过高、上下游衔接不畅、绿色价值难以体现等制约因素，相关实践目前局限于各地试点示范项目，距离规模化应用依然遥远。为推动污水处理由传统末端治理向减污、降碳和资源循环协同发展的综合系统转变，宜在现有政策和技术基础上进一步完善制度安排、强化行业协同、健全市场机制并培育完整产业生态，逐步打通从排放核算、技术应用到资源价值实现的关键环节。为此，我们提出五大行动建议：

1. **筑牢政策基础：打造污水处理行业政策标准体系。**我国目前已出台多份推动污水处理系统甲烷排放控制与资源化利用的政策文件，为行业转型奠定了政策基础。下一步，建议完善污水系统甲烷监测与核算的相关标准，形成核算、监测、报告和核查相衔接的管理闭环；同时，完善覆盖污水管网、化粪池、污水处理、污泥处置及资源利用全过程的绿色低碳政策和标准体系，将减排绩效与资源化利用水平纳入污水处理企业表现评价标准，明确污水污泥甲烷减排与资源化利用技术路径和目标，推动减排效果和资源利用效率成为设施运行与改造的重要依据。对达到政策标准要求的污水处理企业，尤其是中小型污水处理企业，给予适当资金补贴，推动企业转型投资与政策落地。此外，建议加强甲烷减排、污水资源化、循环经济和能源利用等相关政策之间的衔接，在此基础上，结合不同地区污水处理规模、资源禀赋和利用条件，制定差异化的甲烷控排与资源化利用目标，为行业由末端治理向全过程低碳和资源化管理转变提供制度支撑。

2. **强化行业协同：构建跨部门和行业协同机制。**污水污泥的资源化利用涉及污水处理、能源、工业、农业等多个领域的行动参与，不同行业间的合理配合可以实现跨行业降本增效的协同效应。建议推进工业园区内的高浓度有机废水与同园区内的有机废弃物协同处理，提升园区资源利用效率、增强降碳效果。对于市政污泥，建议推动污泥与秸秆、餐厨垃圾、畜禽粪污等高有机质含量废弃物协同处置，提高沼气产量和能源产出。鼓励污水处理企业与垃圾焚烧企业联动，利用现有生活垃圾焚烧设施的闲置产能，将生活垃圾与污泥按比例掺烧发电，可显著降低污泥处置成本，实现项目盈利。由于污水污泥处理与处置涉及不同政府管理部门，建议建立发展改革、生态环境、住房城乡建设、能源、水务、农业等部门间的协同机制，加强污水处理、污泥处置及资源利用等环节的跨部门数据共享和统筹管理，推动污水处理企业与其他相关行业合作，将污水处理绿色低碳转型与城市基础设施建设、能源利用和循环经济发展统筹推进。

3. **完善市场机制：释放绿色价值，激发资源化利用内生动力。**市场机制是引导投资、激励技术创新，推动污水处理系统甲烷减排与资源化利用的重要手段。目前，污水污泥资源化利用项目产生的产品与下游市场需求之间仍存在流通不畅的问题，价值未得到充分彰显，收益往往难以覆盖项目较高的前期投资和运行成本。下一步，建议完善相关产品合格标准，破除产品流通限制，推动绿色产品认证，形成绿色溢价。此外，加快开发适用于污水处理行业的 CCER 方法学，将甲烷减排、化石能源替代等环境效益转化为可识别、可交易的绿色价值，拓宽污水处理系统甲烷控排与资源化利用的变现路径，提升项目经济回报，激励企业主动转型。

4. **培育产业生态：打通上下游产业链，推动资源化利用规模化发展。**污水资源化利用的规模化发展关键在于资源产品能否形成稳定、持续的下游应用市场，应逐步突破以污水处理厂为边界的传统发展模式，围绕沼气、污泥和营养物等资源，推动形成回收、加工转化到终端利用的完整产业链。我国污水污泥资源存在显著的地域差异，东部沿海地区资源化潜力较为突出，上下游产业聚集度较好，同时市场化程度更高，利于发挥产业集群优势。建议优先聚焦污泥资源规模大、下游消纳条件较好的重点省份，因地制宜选择协同处置和能源化利用路径，加强污水处理企业与能源、农业、工业园区及资源循环利用企业之间的长期合作，通过产品标准、供需对接和稳定采购机制解决污水污泥产品难以消纳的问题，形成具有规模效应的示范项目和区域性产业集群，并逐步向其他地区推广成熟模式。

5. **完善金融支持：利用绿色金融工具，降低企业投资成本。**污水污泥资源化利用项目前期投资规模大、回报周期较长，但其低碳与循环经济的属性符合可持续发展方向，建议通过绿色信贷、绿色债券、碳金融及其他创新金融工具，引导银行等金融机构参与污水处理行业转型升级，降低污水处理企业转型成本。同时，鼓励污水污泥资源化利用项目纳入绿色金融支持目录，通过完善项目评估与风险分担机制，建立多层次金融支持体系，降低企业融资成本与风险，促进行业健康可持续发展。



参考文献

1 联合国环境署, Facts about Methane，**https://www.unep.org/explore-topics/energy/facts-about-methane**

2 Song C, Zhu J J, Yuan Z, et al. Defining and achieving net-zero emissions in the wastewater sector[J]. Nature Water, 2024, 2(10): 927–935. DOI: 10.1038/s44221-024-00318-2.

3 Chen, Y., Li, H. & Lu, L. Methane emissions from industrial wastewater treatment systems decoupling from industrial growth in China over the past two decades. *npj Clim Atmos Sci* 8, 181 (2025). **https://doi.org/10.1038/s41612-025-01074-0**

4 Moore, D.P., Li, N.P., Song, C. *et al.* Comprehensive assessment of the contribution of wastewater treatment to urban greenhouse gas and ammonia emissions. *Nat Water* 3, 1114–1124 (2025). **https://doi.org/10.1038/s44221-025-00490-z**

5 FAO AQUASTAT, **https://www.fao.org/aquastat/en/databases/maindatabase/,** 2026年9月访问

6 世界银行，Urban Population Indicator, **https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS**，2026年9月访问

7 Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M. et al., GHG emissions of all world countries - 2025 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, doi:10.2760/9816914, JRC143227.

8 CEIC，中国人口城镇化率数据，**https://www.ceicdata.com/zh-hans/china/population-urbanization-rate**

9 王峰,高陆令,万明辉,等.“双碳”背景下城镇污水处理厂绿色发展[J].土木工程与绿色建筑,2025,1(5):1-7. **https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-6488.2025.05.002**

10 生态环境部，2024年中国生态环境统计年报，**https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/202511/t20251128_1135226.shtml**，2025年12月

11 生态环境部，中国生态环境统计年报，**https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/**，2015-2026年

12 生态环境部，中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告, **https://unfccc.int/documents/645296**，2025年

13 李爽、章林伟：我国城镇污水价格机制初探与建议，2023年，**https://www.cuwa.org.cn/category/hangyeredian/2533.html**

14 瞿林燕.江苏省典型污水处理厂污泥资源化利用潜力评估[D].东南大学,2022.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2022.001132.

15 徐科,任楠,罗松. 公用事业专题报告：排污许可证摸底全国污水处理厂 一级A超80%. 2020年,长江证券股份有限公司, **https://stock.finance.sina.com.cn/stock/go.php/vReport_Show/kind/lastest/rptid/634879894800/index.phtml**

16 王凯军、董仁杰、罗娟、郭建斌等，中国沼气行业的双碳贡献，清华大学出版社， ISBN：978-7-302-64200-8

17 安莹玉、吴云生、陈云等，城镇污水厂污泥处理技术与工程案例，2024年，化学工业出版社，ISBN 978-7-122-42789-2

18 张玮钰，2025年，餐厨垃圾与剩余污泥混合厌氧发酵的研究，DOI：10.26990/d.cnki.gsltc.2025.000833

19 聂菊，城镇污水处理厂剩余污泥协同餐厨垃圾厌氧消化产沼及资源化利用技术，中国资源综合利用，2026年3月，10.3969/j.issn.1008-9500.2026.03.084

20 生态环境部，《“无废城市”建设试点先进适用技术汇编》（第一批），**https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/2020/wfcsjssdgz/dcsj/ztyj/201912/W020191203564453552984.pdf**

21 环卫科技网. 江苏省人居环境奖揭晓：扬州、镇江两垃圾资源化项目入选[EB/OL]. (2025-12)[2026-08-21]. **https://www.cn-hw.net/article/detail/1277212183700176897**
22 Wang et al., 2023, **https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100423**
23 柴宝华等，我国市政污泥处理处置现状研究，新能源进展，2023年2月，DOI：10.3969/j.issn.2095-560X.2023.01.006
24 邓玲等，掺烧比对污泥与垃圾协同焚烧的影响，河北冶金，2024年，DOI: 10.13630 /j.cnki.13 —1172.2024.0112
25 人民网，15省市实现原生生活垃圾“零填埋”，2026年6月，**https://paper.people.com.cn/rmrb/pc/content/202606/01/content_30160078.html**
26 国家发展改革委，住建部等，《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》，2021年，**https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/wap/iteminfo.jsp?id=18093**
27 北京绿交所，2025年全国温室气体自愿减排（CCER）交易市场运行情况最新数据一览，**http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2026/0304/117141.html**，2026年3月
28 中国建筑材料联合会，2026年，加快开展水泥熟料产量监测 促进行业规范有序可持续发展，**https://www.cbmf.org/c/2026/07/31/23914.shtml**
29 中国水泥协会、中国建筑材料科学研究总院有限公司、生态环境部环境规划院 ，水泥行业碳排放现状与达峰路径，2021，**https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.19**
30 落基山研究所 , 中国水泥协会 , 加速工业深度脱碳：中国水泥行业碳中和之路 , 2022，**https://rmi.org.cn/insights/the-road-to-net-zero-decarbonization-in-chinas-cement-industry/**
31 中国硅酸盐学会工程技术分会，市政污泥在水泥行业的替代原燃料化应用概况，2024年，**http://www.ccscet.com/2687.html**
32 落基山研究所，中国产业发展促进会生物质能产业分会，碳中和目标下的生物天然气行业展望：减排潜力、成本效益及市场需求，2023，**https://rmi.org.cn/insights/biomethane-industry-outlook-report/**，

落基山研究所，甲烷控排系列报告：面向能源转型与碳中和的污废水资源化利用路径，2026，
https://rmi.org.cn/insights/industrial-and-municipal-wastewater-resource-recovery-in-china-report/

RMI 重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。 因此，我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 **https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/**



除特别注明，本报告中所有图片均来自 iStock。



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2026 年 11 月，落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute 和 RMI 是落基山研究所的注册商标。