



中国产业发展促进会生物质能产业分会
Biomass Energy Industry Promotion Association

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





关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所(RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的国际智库。我们与企业、政策制定者、科研机构及创业者协作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，推动全球能源系统转型，践行1.5°C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰，华盛顿特区及印度尼西亚巴厘岛设有办事处。



中国产业发展促进会生物质能产业分会

Biomass Energy Industry Promotion Association

关于中国产业发展促进会生物质能产业分会（BEIPA）

中国产业发展促进会生物质能产业分会（BEIPA）于2018年6月由中国产业发展促进会及其常务理事单位联合发起成立，是国内生物质能领域企事业单位自愿组成的全国性、行业性、非营利性社会组织。分会充分发挥桥梁纽带作用，为政府、企业和社会提供行业资讯、产业政策等咨询服务，与国际、国内相关机构通力合作，促进生物质能产业高质量发展。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所

高敏惠

郝一涵

李 婷

汪 维

谢璨阳

中国产业发展促进会生物质能产业分会

张大勇

刘洪荣

王乐乐

张 峰

付春阳

联系方式

汪维, wwang@rmi.org

引用建议

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

鸣谢

本报告作者特别感谢以下专家及企业对报告撰写提供的洞见与建议。

崔宗均 中国农业大学教授

袁宝荣 中节能咨询有限公司原副总经理、教授级高级工程师

李 剑 中国华电科工集团有限公司高级工程师

吴宪文 华晨宝马生物天然气项目负责人

中电建兰考生物质制气有限公司

河北省三河市盈盛生物能源科技股份有限公司

黑龙江博能生态环保股份有限公司

山西华新生物质能源开发有限公司

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
第一章 生物天然气助力实现碳中和.....	6
生物天然气发展的独特优势	6
生物天然气发展的重要意义	7
第二章 生物天然气行业现状和挑战.....	11
生物天然气行业发展现状.....	11
生物天然气行业发展挑战.....	13
第三章 生物天然气市场展望与机遇.....	15
生物天然气供需展望	15
生物天然气项目经济性展望	16
生物天然气行业投资需求展望	22
生物天然气市场动态	23
第四章 生物天然气发展模式展望.....	25
区域发展格局:因地制宜推进产能布局	25
完善产业链构建:打造成熟市场模式.....	30
第五章 生物天然气发展行动建议.....	33
参考文献	35

前言

应对气候变化已成为全球的广泛共识。《巴黎协定》确定了将本世纪末全球平均升温幅度控制在 2°C 以内、力争 1.5°C 以内的目标，我国也提出了碳达峰、碳中和目标愿景。能源绿色低碳转型是关键行动领域之一，这要求各类可再生能源的大规模、迅速发展。生物天然气作为生物质能的利用形式之一，在能源消费脱碳进程中扮演重要角色。2019 年，国家发展改革委等 10 部门联合印发的《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》提出，以实现生物天然气工业化商业化可持续发展、形成绿色低碳清洁可再生燃气新兴工业为目标，将生物天然气纳入国家能源体系，加快生物天然气专业化市场化规模化发展。2023 年 11 月，生态环境部等 11 部门联合印发的《甲烷排放控制行动方案》也提出鼓励建设规模化生物天然气工程，探索生物天然气终端利用激励约束机制，从而推动农业领域甲烷排放控制。

生物天然气以农作物秸秆、畜禽粪污、餐厨垃圾等有机废弃物为原料进行生产，可减少农业和废弃物领域的甲烷排放，此外兼具替代农村散煤、保护城乡生态环境、优化天然气供给结构、发展现代新能源产业等多重功能，对于我国在碳中和目标下加速能源转型、保障能源安全、推进乡村振兴和助力生态文明建设具有独特意义。

本报告由落基山研究所与中国产业发展促进会生物质能产业分会共同撰写，针对生物天然气产业化发展的现状和面临的挑战开展深入探讨。分析表明，我国生物天然气需求增长空间广阔，其发展能产生可观的气候、能源、经济和环境效益。生物天然气产业化、市场化发展需要政策引导、技术创新、基础设施完善和金融支持，在产业链上、中、下游各环节共同发力。此外，报告还展望了我国生物天然气行业的未来发展，提出了下一步行动建议，以期为相关市场主体和政策制定提供参考。

第一章

生物天然气助力实现碳中和

生物天然气是以各类城乡有机废弃物为原料，经厌氧发酵和净化提纯产生的绿色、低碳、可再生的天然气，是现代生物质能的利用形式之一。充分认识到我国生物天然气发展的独特优势和重要作用，是推动生物天然气产业化发展的前提。本章将首先阐述我国生物天然气的发展基础和优势，并且分析生物天然气发展助力我国实现碳中和目标的重要意义。

生物天然气发展的独特优势

生物天然气在我国并非新生事物。得益于沼气行业数十年的发展，我国生物天然气在生产技术、工程项目和应用模式上已有了一定积淀。近年来，我国频繁出台产业政策支持沼气和生物天然气工业化规模化专业化发展，城乡废弃物管理和循环经济政策也随着生态环境治理行动的深化而不断完善。这些成果使我国生物天然气发展具备了独特优势。

沼气行业为生物天然气发展奠定坚实基础

我国沼气行业发展始于上世纪 70 年代。1979 年，国务院成立全国沼气建设领导小组。随着研究、技术和管理体系的成熟以及政策的大力支持，我国农村户用沼气在上世纪末到本世纪初迎来了发展高峰，南北方农村探索出了各自的户用沼气发展模式，也推动了养殖场和生活污水净化沼气工程的建设。2018 年，我国沼气产量占约占全球产量的 20%¹。截至 2020 年，全国已推广户用沼气 3900 万户²，是世界上最大的农村户用沼气池保有国。

在农村户用沼气的基础上，沼气工程技术和应用模式开始快速发展。我国沼气生产技术和工艺逐步成熟。一方面，我国沼气工程可利用各类有机废弃物，包括农作物秸秆、畜禽粪污、市政污泥、城镇生活垃圾等传统原料，近年来原料又拓展到餐厨垃圾、工业有机废水、果蔬垃圾、绿化垃圾等废弃物。另一方面，我国也探索出了一些成功的沼气利用模式，包括发电、供热、净化提纯接入天然气管网等，应用领域实现了农业农村、城市和工业的全覆盖。截至 2020 年底大、中、小型各类沼气工程超过 10 万处，其中包括 64 处规模化生物天然气示范工程³。由于沼气可进一步提纯为生物天然气，因此从生产技术、装备制造再到末端应用，生物天然气的产业化发展大大受益于沼气行业的发展成果和经验。

政策支持生物天然气产业化发展

在加强生态环境保护、促进乡村振兴、推动能源低碳转型等背景下，我国出台支持生物天然气发展的规划和政策，提出发展目标和行动领域。2019 年国家发展改革委等 10 部门联合发布了《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》，提出到 2030 年生物天然气产量超过 200 亿 m³ 的发展目标，要求强化生物天然气发展与国家规划衔接并且编制省级、地市或县级、重点企业发展规划，提出加快生物天然气工业化商业化开发建设，建立健全生物天然气产业体系，并明确一系列保障措施。在《“十四五”可再生能源发展规划》《“十四五”生物经济发展规划》等国家战略规划中，我国提出了加快生物天然气发展的关键行动领域，包括以县域为单元建立产业体系、积极开展生物天然气示范、统筹规划建设年产千万立方米级的生物天然气工程、形成多元应用模式、加快关键技术研发和设备制造等。

城乡废弃物管理和污染治理政策不断完善，有利于保障生物天然气原料供应。近年来，餐厨垃圾付费处理、“无废城市”试点建设、生活垃圾分类等废弃物管理政策促进了城市废弃物的能源化资源化利用；在农村领域，2016年中央财经领导小组第十四次会议高度认可了畜禽养殖废弃物处理和资源化在改善农村居民生产生活环境、推动农村能源革命、改善土壤地力、治理农村面源污染等方面的作用，并指出应以沼气和生物天然气为主要处理方向。此外，农作物秸秆的收储运体系不断健全，综合利用规模扩大。综合来看，这些政策加强了生物天然气的原料供应。

生物天然气发展的重要意义

碳中和目标愿景下，我国能源转型需要大力发展可再生能源，而生物天然气作为一种可再生燃气，既能补充能源供应、加强能源安全，又能在能源脱碳进程中发挥独特作用。同时，生物天然气作为现代生物质能的一种利用形式，可在产业转型升级、减污降碳协同、乡村振兴等多个领域贡献力量，助力我国碳中和目标下的能源绿色低碳转型。

生物天然气是推动能源转型、保障能源安全的有效解决方案

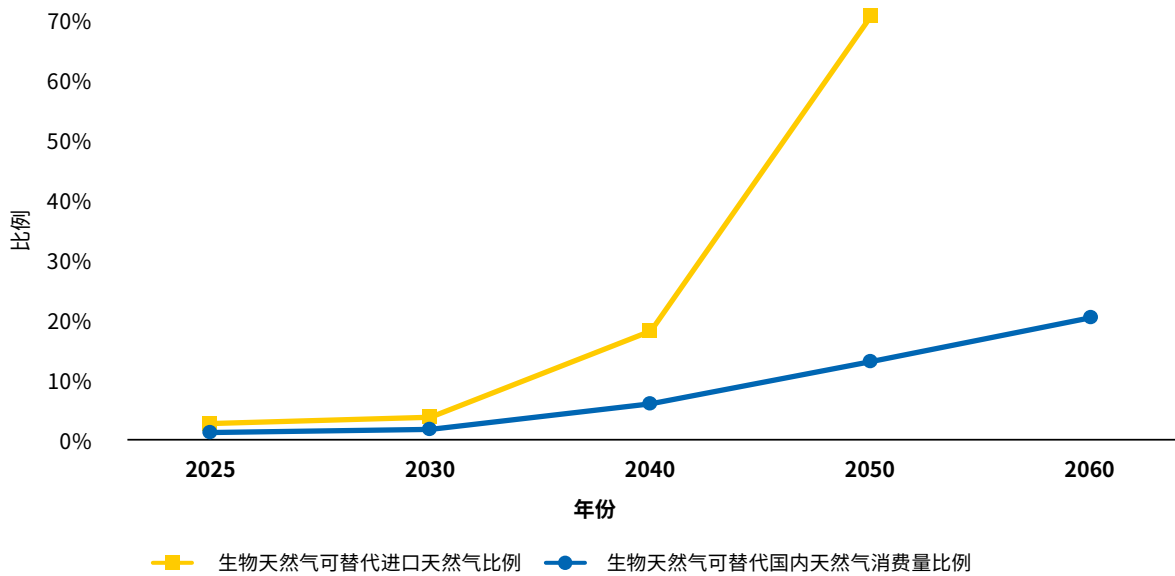
生物天然气可加速我国能源绿色低碳转型。我国积极推动能源生产和消费革命，能源绿色低碳转型是我国的重要发展战略，也是实现碳达峰、碳中和目标愿景的关键。能源转型进程中，生物天然气等生物质能源扮演着不可替代的重要角色。作为一种绿色、低碳、可再生的燃气，生物天然气通过在电力、工业、交通、建筑等部门替代传统化石能源，可进一步提升可再生能源比重，从而优化能源消费结构。根据课题组测算，到2060年生物天然气需求量可达近7800万吨标准煤，相当于2022年我国能源消费总量的1.4%和非化石能源消费总量的8.1%。

生物天然气可进一步保障我国能源安全。2000—2021年，我国天然气消费量从245亿 m^3 上升至3773亿 m^3 ，增长超过14倍。天然气的消费需求激增导致我国天然气供应从自给自足迅速过渡到依赖进口的状态，2007年国内消费量首次超过国内产量，对外依存度ⁱ从2010年的14%上升到2021年的44%⁴。能源低碳转型需坚持“先立后破”的原则，确保能源供应安全。发展生物天然气能在一定程度上满足我国经济社会持续发展带来的天然气消费需求，从而进一步保障我国能源安全。特别是在近年来全球能源危机的背景下，发展生物天然气在保障能源安全方面的效益更加凸显。

根据课题组测算，到2050年，生物天然气预计可替代传统天然气消费量的比例近13%，这一数字到2060年有望上升至近20%，显著缓解国内天然气生产压力；从天然气进口的角度看，到2030年，生物天然气产量可替代进口天然气的比例将达到4%，这一比例在2040年和2050年进一步增加到17%和68%。2050年后，随着国内供应能力的提升，我国有望实现天然气自给自足，生物天然气在保障能源安全方面的角色将从降低对外依存度逐步转向加强国内供应转变（图表1）。

ⁱ 天然气对外依存度定义为天然气进口量与消费量的比值。

图表 1 发展生物天然气的能源安全效益



资料来源：课题组测算

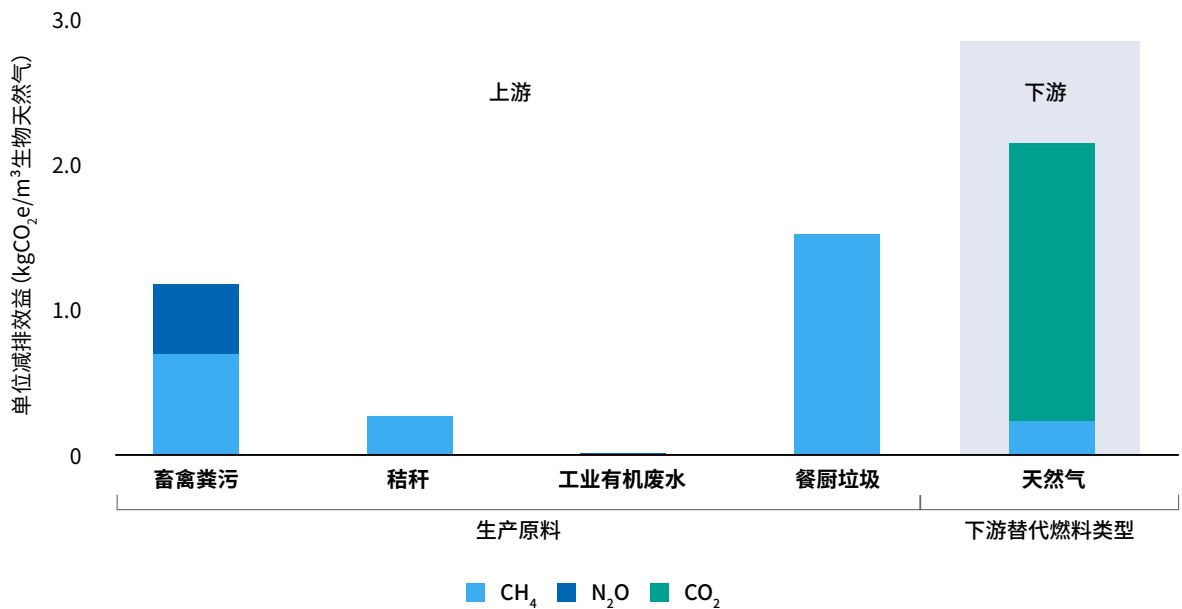
生物天然气能显著减少温室气体排放，减缓气候变化

生物天然气作为一种清洁、低碳的可再生能源，其生产和消费过程均可产生温室气体减排效益。在生产侧，生物天然气的减排效益主要源于减少其生产原料作为废弃物在处理过程中产生的温室气体排放。由于生物天然气的生产原料包括农作物秸秆、畜禽粪污、餐厨垃圾、工业有机废水等废弃物，这些废弃物的处理过程会产生甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）等温室气体排放。在消费侧，生物天然气的减排效益则来自替代化石燃料消费相关的排放。从终端消费的角度出发，生物天然气可在电力、工业、交通、建筑等部门应用，因生物质能的“二氧化碳中和”属性ⁱⁱ，生物天然气作为燃料或原料消费可避免同等传统化石天然气燃烧导致的二氧化碳（CO₂）排放。此外，由于天然气在开采、生产和运输的全过程中存在 CH₄ 逃逸，生物天然气可避免化石天然气产业链上游的 CH₄ 排放。消费侧的减排效益还来自于副产品的使用，在厌氧发酵过程中产生的沼渣沼液，经过腐熟剂腐熟生产成肥料后，可以部分替代化肥施用，不仅能降低化肥生产过程中的 CO₂ 排放以及化肥施用后产生的 N₂O 排放，同时还能增加土壤中有机碳的存储量。

然而生物天然气的温室气体减排效益因生产原料的不同而差异较大。根据课题组测算，在生产侧，利用畜禽粪污、工业有机废水、餐厨垃圾或秸秆四种原料生产，每立方米生物天然气可避免的温室气体排放放在 0.001~1.59 kgCO₂e 之间，其中利用餐厨垃圾进行生产的减排效益最高。而不论原料类型，减排效益主要来自于 CH₄ 减排。在消费侧，每立方米生物天然气替代传统天然气的减排效益约为 2.25 kgCO₂e，减排效益主要来自于终端消费替代的 CO₂ 直接减排，少量来自于上游生产过程的 CH₄ 减排。需要说明的是，本研究并未量化消费侧副产品有机肥替代化肥的潜在减排效益（CO₂ 和 N₂O 减排以及固碳效益）。综合考虑生物天然气的上游生产和下游消费，并且扣除生物天然气价值链中的甲烷泄漏量，每立方米生物天然气的温室气体减排效益在 2.21~3.80 kgCO₂e 之间（图表 2）。

ii 由于生物源 CO₂ 是自然碳循环的一部分，植物在生长时通过光合作用吸收 CO₂，并在腐败或燃烧时释放 CO₂。如果这个循环中碳吸收和释放的量和速度保持均衡一致，那么在这个循环中并没有新的 CO₂ 释放到大气中，因此对大气的影 响是“中和”的。而矿物能源中存储的碳在很久以前就脱离了全球碳循环，因此由燃烧矿物能源而释放的 CO₂ 增加了在大气和生物圈内循环的碳总量。

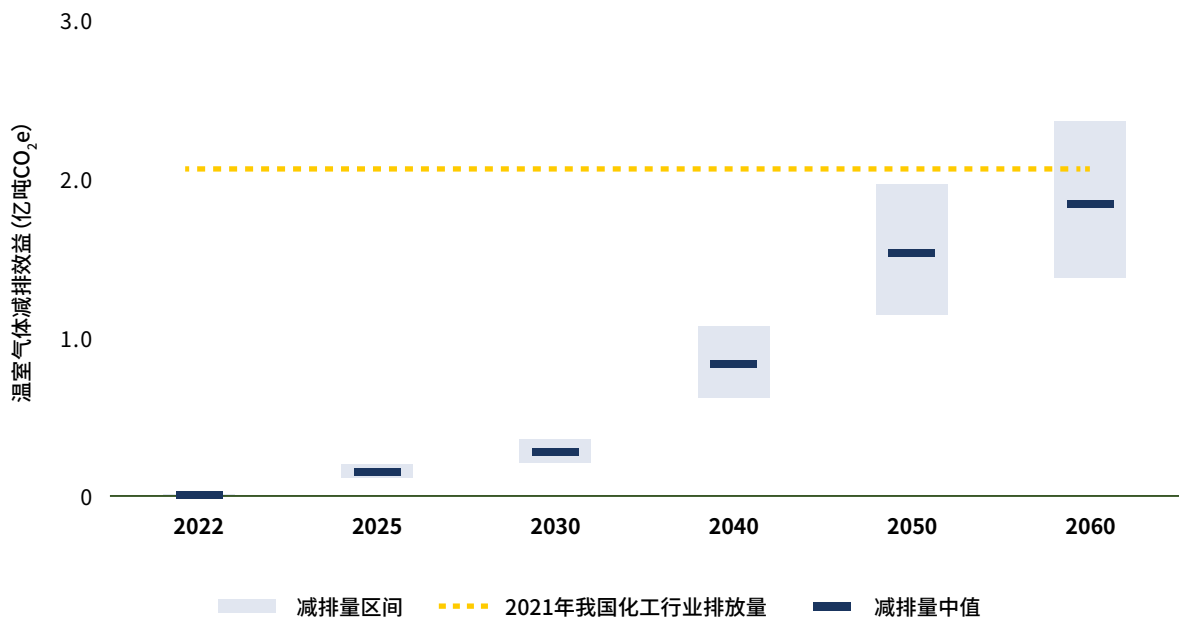
图表 2 生物天然气的温室气体单位减排效益



资料来源：课题组测算

长期来看，生物天然气对我国碳中和进程的贡献将不断增强。结合我国生物天然气长期供需预测（详见第三章），到 2040 年生物天然气发展可实现 0.63~1.09 亿 tCO₂e 的年度减排量，到 2060 年年度减排量将进一步增加至 1.40~2.40 亿 tCO₂e（图表 3）。作为比较，2021 年我国化工行业碳排放总量约为 2.1 亿 tCO₂e⁵，则生物天然气的年度减排量在 2050 年之后便有望与当前化工行业的年度排放量相当。从累计减排效益来看，到 2040 年累计减排效益将达到 5.6~9.5 亿 tCO₂e，到 2060 年将达到 27.8~47.7 亿 tCO₂e。

图表 3 2022-2060 年生物天然气发展的温室气体总体减排效益



资料来源：EDGAR 数据库，课题组测算

生物天然气能推动乡村振兴与公平转型，加强生态文明建设

生物天然气可助力实现乡村振兴战略目标、促进乡村碳中和公平转型。碳中和目标的实现需要兼顾乡村振兴战略，实现乡村公平转型。在碳中和目标下，农业农村生产生活方式也需实现绿色低碳转型，而协同推进农业农村气候行动与现代化建设符合乡村振兴战略的要求。落基山研究所提出，乡村碳中和公平转型行动需要在经济、环境和社会等方面创造广泛效益，改善民生福祉，从而促进乡村全面振兴⁶，而生物天然气的经济社会效益在乡村碳中和公平转型的框架下更加突出。在推进生物天然气分布式生产消费、形成城乡有机废弃物资源化利用循环发展模式的政策引导下，支持有机废弃物资源丰富的乡村地区发展“原料收储运—生物天然气生产—燃气和副产品消费”的完整产业体系，可为乡村地区投资生物天然气项目、发展相关基础设施带来需求增长，从而为县域和乡村经济发展、增加就业、提高家庭收入和财政收入创造新机遇。

发展生物天然气也是治理农村环境污染、构建循环经济、加强生态文明建设的有效措施。生物天然气可改善农村地区空气质量，传统农村常使用散煤、秸秆和薪柴等低品质的能源，而生物天然气能够在烹饪、用电、供暖等方面多途径替代农村传统能源消费，从而减少大气污染物的排放、提升室内外空气质量，改善农村人群健康。此外，秸秆废弃物若用于生物天然气的生产原料，也可避免秸秆露天焚烧导致的大气污染。生物天然气也有助于治理农业面源污染，农牧业畜禽粪污未经处置排放以及化肥的不当施用将造成土壤、水体和大气的污染，危害自然环境和人类健康。而将畜禽粪污作为生物天然气生产原料，能无害化处理农业废弃物，从源头避免面源污染的发生；副产品有机肥的合理施用可替代传统化肥消费，提升土壤肥力，并保护土壤和水生态环境。此外，生物天然气可推动农业循环经济的发展，因为生物天然气的生产在减少废弃物排放的同时提供了可再生能源，其生产过程的有机肥等副产品也具有较高的经济价值，从而实现对有机废弃物的资源化、能源化、高值化利用，是推动农业循环经济发展的良好模式。

第二章

生物天然气行业现状和挑战

尽管我国发展生物天然气优势明显，意义重大，但是目前生物天然气行业仍处于发展初期，对碳中和目标的贡献有较大的增长空间。本章将首先梳理国内外生物天然气行业发展的现状，并结合我国实际，从技术、产业体系和政策等角度分析生物天然气行业发展的挑战。

生物天然气行业发展现状

生物天然气的上游生产流程

在我国，生物天然气主要通过厌氧发酵产沼气后净化提纯得到ⁱⁱⁱ。经净化提纯后的生物天然气与常规天然气成分、热值完全一致。如图表 4 所示，生物天然气的制备主要包括厌氧发酵和净化提纯两步。在厌氧发酵环节，畜禽粪污、农作物秸秆、餐厨垃圾、工业有机废水等废弃物作为原料产生沼气，一般含有 50~70% 的 CH₄、30~50% 的 CO₂ 以及其他微量气体。此后沼气进入净化提纯环节，其中净化工艺主要包括干法脱硫、湿法脱硫或生物脱硫，目的是去除硫化氢（H₂S）杂质；提纯技术主要包括变压吸附、膜分离、物理吸收、化学吸收和低温分离，目的是去除 CO₂ 杂质。沼气经过净化提纯后，最终得到 CH₄ 体积分数 95% 以上的最终产品，即生物天然气。厌氧发酵产沼气过程还会产生沼液和沼渣，用于有机肥料的生产。

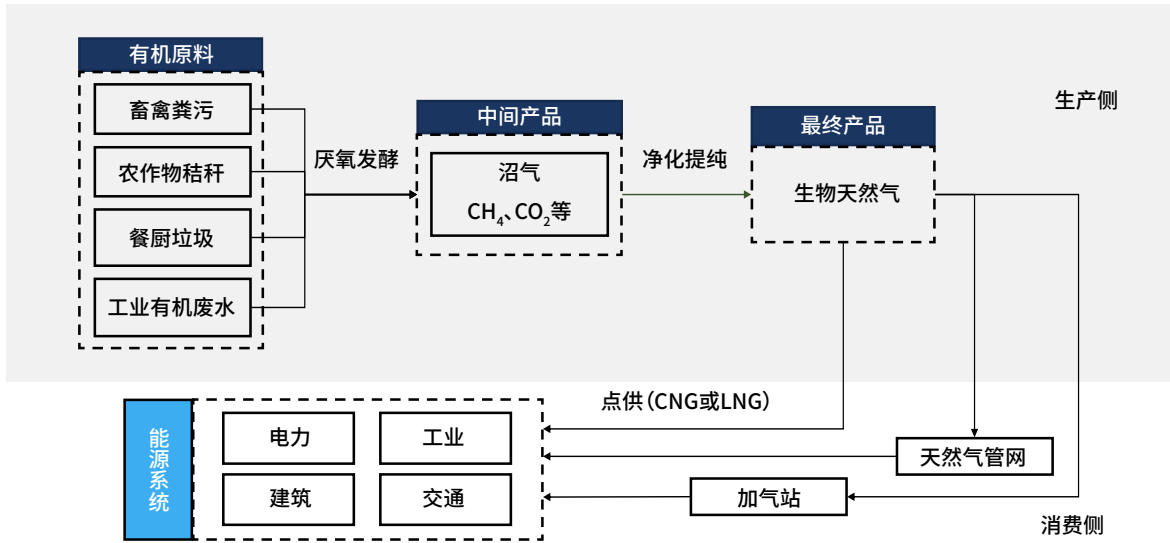
生物天然气的下游消费去向

目前，全球生物天然气的下游应用场景主要包括交通燃料消费和并入天然气管网。在交通部门，生物天然气可作为车用燃气，即利用有机废弃物原料生产沼气，再经过净化、提纯和压缩成压缩天然气（CNG），为公共汽车、卡车、私家车、出租车、火车等提供燃料。生物天然气在净化提纯符合规格后，也可直接并入天然气管网，供终端用能部门消费，减少对传统天然气的依赖。

从能源消费脱碳的角度出发，生物天然气有望在电力、交通、工业和建筑部门广泛替代传统天然气。这是由于生物天然气与传统天然气的物理和化学特性相同，理论上生物天然气可满足传统天然气的任一应用场景，并且不需要对现有的天然气管网基础设施以及终端用能设备进行改造。

ⁱⁱⁱ 国际上，生物天然气的制备技术除厌氧发酵产沼气再净化提纯之外，还包括木制生物质热解气化、甲烷化再净化提纯。根据国际能源署（IEA）的数据，全球仅10%的生物天然气通过该技术生产，而在我国几乎没有以热解气化技术生产的生物天然气，因此本报告不纳入对热解气化技术的讨论。

图表 4 生物天然气生产流程与下游消费去向



资料来源：课题组整理

生物天然气的开发潜力

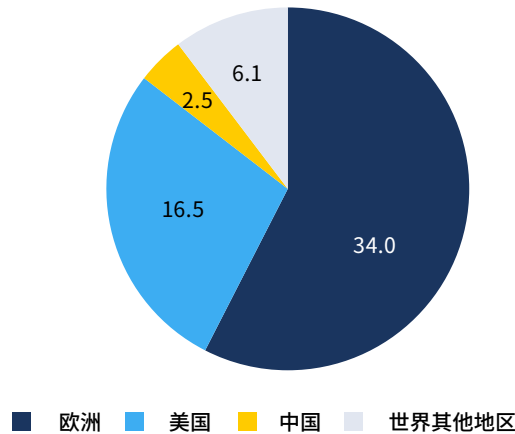
生物天然气在全球和我国的理论开发潜力十分可观。根据国际能源署（IEA）评估，在可持续利用生物质的条件下，全球生物天然气开发的技术潜力可达 7.3 亿吨油当量（toe），折合 8800 亿 m^3 天然气^{iv}，相当于当前全球天然气需求的 20%¹；世界沼气协会预测，全球范围内的沼气开发潜力达到 10000~14000TWh⁷，若全部提纯为生物天然气，折合 4800~6700 亿 m^3 天然气。尽管不同机构的预测结果有差异，但综合来看全球范围内，生物天然气的理论开发潜力高达数千亿立方米。我国的生物天然气理论开发潜力也非常可观。据中国产业发展促进会生物质能产业分会预测，在考虑生物质综合多元利用、充分发掘未利用生物质的情景下，生物天然气总产气潜力接近 500 亿 m^3 ；中国沼气学会预测，到 2030 年和 2060 年我国利用城乡有机废弃物的沼气生产潜力可达 1690 亿和 3710 亿 m^3 ³，折合为生物天然气后，2030 年和 2060 年的产气潜力将分别超过 800 亿和 1800 亿 m^3 天然气，相当于 2021 年我国天然气消费量的 22% 和 50%⁴。

生物天然气的市场规模

目前生物天然气在全球范围内的市场规模很小，生产集中在欧美地区。2021 年，全球生物天然气的产量约为 59 亿 m^3 ⁸，仅相当于当前全球天然气需求的 0.1%。分地区来看，欧洲是全球最大的生物天然气生产地区，产量约 34.0 亿 m^3 ，约占全球的 58%；美国是全球最大的生物天然气生产国，产量达 16.5 亿 m^3 ，约占全球的 28%。我国的生物天然气产量约为 2.5 亿 m^3 ，约占全球的 4%（图表 5）。

iv 以1吨油当量=1210立方米天然气当量进行折算。

图表 5 2021 年全球分地区生物天然气产量(单位:亿 m³)



资料来源: CEDIGAZ

生物天然气行业发展挑战

当前我国生物天然气产量规模较小,处于行业发展初期。尽管行业发展受益于沼气行业多年发展的积淀以及国家支持工业化规模化生产生物天然气的政策引导,但目前生物天然气生产技术不成熟,产业体系不健全,政策支持力度不够,行业发展面临多重挑战。

生产技术有待成熟,项目投资成本较高

生物天然气全产业链技术国产化程度不高,发展不成熟。一是发酵技术单一,经过沼气行业多年的发展,我国在厌氧发酵技术上有一定积累,特别是中常温湿式发酵技术。但湿法发酵相比于干法技术,工程建设成本较高、容积产气率较低,且沼液产量大,若处置不当则环境污染风险较高。在厌氧发酵的基础理论、在线控制与预警等方面,我国与国外先进水平相比仍存在差距。而我国的多种原料混合发酵、干法厌氧发酵等技术仍在试点示范阶段,工程技术装备仍有欠缺;二是生物天然气原料预处理、净化提纯、原位脱硫、发酵预警调控等关键技术和进出料装置、厌氧发酵搅拌器等核心设备尚未完全实现国产化,在系统整体效率、稳定性、装配可靠性等方面仍与国外先进水平存在较大差距。这导致我国目前一些生物天然气项目的关键技术和设备依赖进口,推高了投资成本。

产业体系有待健全,可复制可推广商业模式较少

生物天然气产业体系有待进一步健全发展。生物天然气产业链较长,完整产业体系应包含有机废弃物收运处理、生物天然气生产和消费、副产品生产和消纳等环节,并且有专业化投资、建设、管理机构以及监管执法机构参与。但我国沼气行业转型升级、工业化规模化生产生物天然气的历史较短,产业化程度不足。具体而言,第一,尚未建立覆盖城乡的有机废弃物收运处理体系。生物天然气生产原料分布比较分散,收集、储存、加工、运输成本相对较高,目前农作物秸秆、畜禽粪污和餐厨垃圾的收储运体系还不完善,基于“污染者付费”原则的废物有偿处理模式还没有完全建立和推广;第二,尚未建立生物天然气多元化消费体系。目前我国生物天然气的下游消费利用模式主要是车用燃气或并入燃气管网,在建筑供暖、工业燃料和原料等领域还没有推广应用;第三,尚未建立副产品生产消费体系。生物天然气项目沼液沼渣制成的有机肥质量较优,正规有机肥替代化肥的施肥效果更佳,但由于行业缺乏标准等原因,有机肥进入肥料市场尚存在壁垒,使得沼液沼渣的消纳利用成为部分项目面临的一大难题;第四,尚未形成专业化一体化投资建设运行管理服务体系,缺乏成熟的商业化市场环境。第五,暂未建立原料收运、生物天然气生产及沼液沼渣肥料生产与利用等全过程的环保监管与执法监察体系。

此外，部分成功项目的商业模式难以复制和推广。经过调研，目前生物天然气项目运营较好的原因主要有：1) 在原料收集环节成功控制了成本甚至获得收益；2) 打通了沼液沼渣的消纳渠道，避免了沼液沼渣末端处理的额外成本，且通过有机肥销售额外增加了项目收入；3) 生物天然气项目方与用户达成协议，确保生物天然气以具有吸引力的价格稳定销售。然而不同项目的运营模式差异较大，例如在原料收集成本控制上，有的项目是通过为农户提供整地、播种、收割等服务代替秸秆离田费用，节约了成本，而有的项目是因废物有偿处理制度在原料收集阶段获得了收益。再比如在生物天然气的消纳上，有的项目是以并入燃气管网的方式，有的项目则是直供用户。由于各个项目所在地区的资源、政策、市场条件有区别，同一商业模式难以完全复制推广至其他地区。

政策支持力度有待加强，行业需进一步规范发展

生物天然气行业发展的支持政策有待完善和落实。在发展初期，适当的产业扶持政策可加速项目成本下降和市场需求增加。生物天然气行业支持政策应覆盖原料收储运、项目建设、生物天然气和副产品消费等产业链供应链的各个环节，然而目前一些领域的支持政策存在空白或需加强落实。在原料收储运环节，原料收集保障措施、废物有偿处理机制尚未完全覆盖农村地区。在项目建设和生产环节，长期以来国家财政以建设投资补贴而非基于产气量补贴的形式支持项目建设，一些项目补贴金额高达工程投资的40%，但“重建设、轻运营”的补贴政策导致部分项目建成后实际运营出现困难。此外，由于缺乏生物天然气项目建设标准，有些地区按照危险化学品项目标准对生物天然气项目进行评估，导致评估要求过高，项目难以落地建设。在消费环节，生物天然气作为一种可再生能源，在非电利用方面相关政策支持较少，《可再生能源法》中所提到的相关产品的强制市场保障措施与机制尚未建立。一些相关国家政策中提出的支持政策尚未落实，例如生物天然气入网全额保障性收购政策、工程用地用电优惠政策、有机肥补贴政策等。缺乏支持消费利用的政策使得生物天然气及其副产品进入市场存在壁垒，无法保障其稳定消纳。

生物天然气行业发展支持政策分散，政策协调难度较大，暂未形成推动产业前进的强大合力。目前生物天然气行业发展的主管部门没有明确，全产业链供应链的相关支持政策涉及能源、发改、财政、农业农村、生态环境、住建等部门，行业管理“九龙治水”的局面使得协调具体支持政策的难度较大，仍在成长期的产业未能充分享受政策支持红利，因而发展缓慢。

生物天然气行业标准体系有待完善。目前已经出台《生物天然气》(GB/T 41328-2022)国家标准，填补了我国生物天然气标准领域空白，同国家标准《生物天然气术语》《车用生物天然气》与农业行业标准《生物天然气工程技术规范》初步构建了生物天然气的标准体系，若能在质量控制、并网运输、环保监管等方面设立针对生物天然气自身特性的行业标准，则可进一步完善技术、施工和管理标准体系。

第三章

生物天然气市场展望与机遇

碳中和目标愿景下，能源系统低碳转型的需求巨大而紧迫，这为沼气行业转型升级、生物天然气工业化规模化生产创造强劲动力。生物天然气作为绿色低碳可再生能源的价值将更加凸显，可在电力、工业、交通、建筑等部门替代传统化石天然气消费，在能源消费脱碳进程中发挥独特作用。尽管能源绿色低碳转型创造了可观的生物天然气需求，但目前生物天然气生产成本仍较高，项目经济性较差，缺乏可复制可推广的商业模式，支持政策有待落实，因此生物天然气行业市场尚未成熟，产能规模有待加速增长以满足需求。本章将围绕生物天然气行业需求和产能规划预估，分析影响生物天然气生产成本的主要因素，评估未来行业发展的投资规模，并结合当前市场发展动态，对未来生物天然气行业发展趋势进行分析展望。

生物天然气供需展望

需求来源：生物天然气助力能源系统脱碳

电力、工业、交通和建筑部门各自面临不同的减排挑战。在能源供应侧的电力部门，随着可再生能源在新型电力系统中的占比不断升高，未来需要更多保障电力系统稳定性的措施，例如因地制宜建设调峰电站。在能源终端消费侧，工业、交通和建筑三大部门的减排难度较大。具体而言，工业部门通过电气化可以实现低温到中温加热过程的脱碳，但在高温工业热源脱碳方面的选择并不多，此外化工行业的生产需要碳氢化合物作为原料，减少生产过程排放需要依赖低碳零碳原料对化石能源原材料进行替代；交通行业的电气化是推动轻型道路运输和铁路运输脱碳的解决方案，但是重型公路运输、航空和船运的电气化比较困难，在这些领域实现减排需要能量密度高、低碳、可再生的替代燃料；建筑部门供暖的能源消费需求巨大，化石燃料仍是最大的能源来源，实现建筑部门的完全脱碳需要能源输入均来自零碳来源⁹。

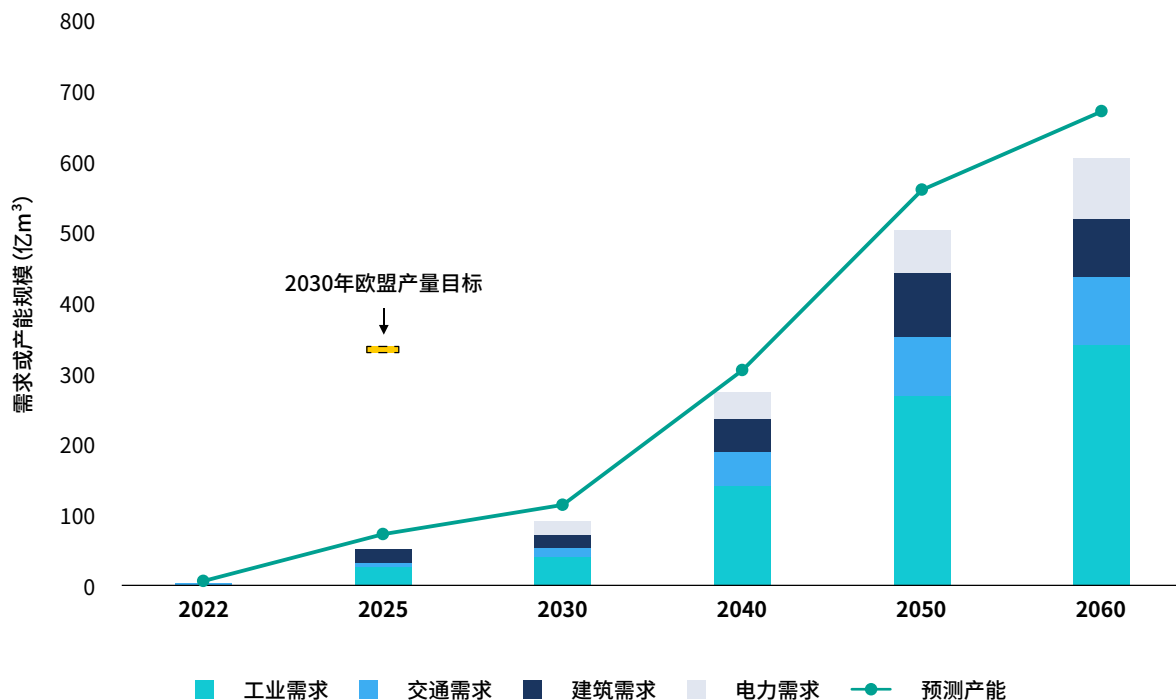
面对不同部门的减排挑战，生物天然气能够发挥独特作用。在电力部门，生物天然气可替代传统化石天然气作为气电调峰机组的燃料，为新型电力系统提供灵活性，帮助高比例可再生能源的消纳；在工业部门，钢铁、水泥和玻璃等产品生产的高温加热和原料处理过程可采用生物天然气作为燃料来提供高温过程所需的热能，化工行业生产甲醇等产品也可利用生物天然气作为原料，实现化学品生产的绿色化；在交通部门，生物天然气相较于其他可再生能源具有较高的能量密度和燃烧效率，可以支持更长的行驶里程，特别适合用于长途重型公路运输、水路运输和远洋船舶运输的脱碳，并且大幅减少大气污染物排放；在建筑部门，利用生物天然气直接替代传统天然气为建筑供暖，或是作为混合动力锅炉的气源，是可行的减碳方式，其优势在于可充分利用现有的天然气管网和热网等能源基础设施进行热能传输。

供需展望：需求驱动生物天然气产能规模不断扩张

碳中和目标下，生物天然气消费需求将显著增加。根据课题组测算，到2030年，我国生物天然气需求将增长至接近100亿m³/年的水平，随着市场逐渐成熟，2030年后生物天然气的消费需求将加速上升，到2060年增长至超过630亿m³/年的水平（图表6）。生物天然气的需求主要来自于工业部门的原料和燃料脱碳，占总需求的比例在45~60%之间，而在交通、建筑和电力部门，生物天然气的需求也将持续增加，在能源系统脱碳进程中扮演独特角色。

目前生物天然气产能规模较小，未来生物天然气的需求增长将持续推动产业规模扩张。2030年前，国内生物天然气产业化发展仍将处于成长阶段，产能规模快速增长，到2030年生物天然气总体产能需接近120亿m³。此后，生物天然气市场逐步发展成熟，到2060年生物天然气年产能有望超过700亿m³（图表6）。相比之下，欧盟为实现REPowerEU计划提出了到2030年生物天然气产量达到350亿m³的目标¹⁰。长期来看，我国生物天然气产业规模有望在2030年之后逐步接近欧盟，跻身全球生物天然气生产大国之列。

图表 6 2022-2060年我国生物天然气需求规模与产能展望



资料来源：课题组测算

生物天然气项目经济性展望

生物天然气项目经济性影响因素

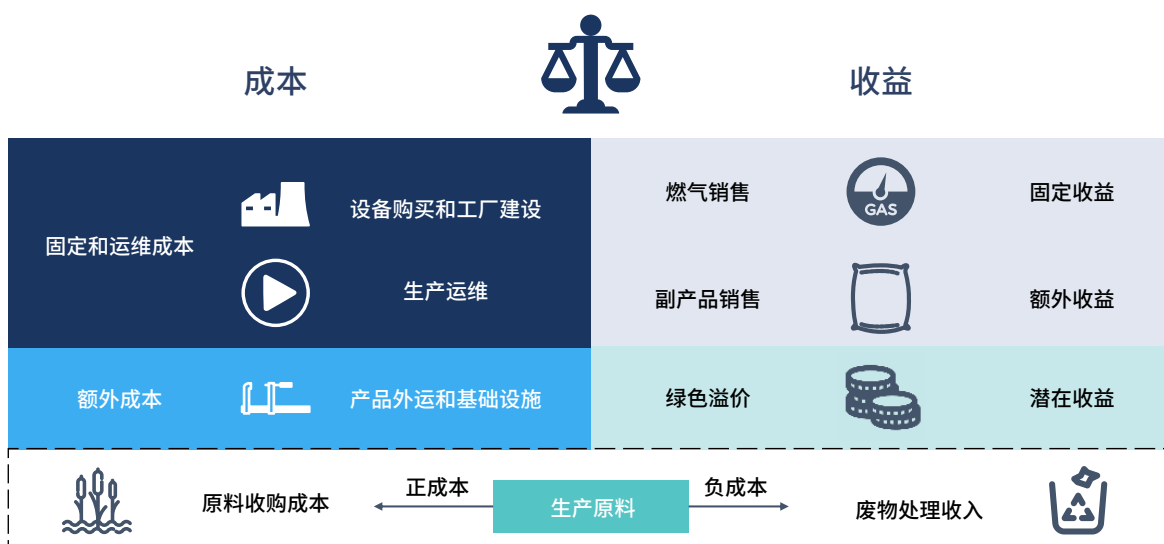
生物天然气行业发展规模与其技术经济性紧密相关。生物天然气项目经济性改善将刺激相关投资进入行业，推动产业规模扩张、产业链发展和商业模式成熟，进一步带来规模经济效应并持续增强生物天然气市场竞争力。因此需要对影响生物天然气项目经济性的主要因素进行分析，为出台针对性支持措施改善项目经济性、推动市场迅速发展提供参考。从成本和收益两方面来看，生物天然气产业链上下游的多个因素影响其项目经济性（图表7）。

生物天然气项目的成本主要涵盖固定和运维成本、额外成本和原料收购成本等。生物天然气的固定成本主要包括设备的购买成本以及工厂建设成本，而运维成本主要来自于工厂日常运营和管理产生的费用。一般而言，工厂日常运营和管理的可变成本在一定的技术与管理水平下所占比例不会发生较大变动，对项目经济性的影响也有限。生物天然气的额外成本包括产品外运（例如生物天然气制压缩气并通过公路运输至消费端、并入燃气管网等）以及相关基础设施建设的成本。此外，原料收购成本是生物天然气成本结构中的重要一环，对于以畜禽粪污、秸秆、餐厨垃圾等为原料的厌氧发酵项目来说，全国各地废弃物资源类型、资源可用量、废弃物收集与综合利用政策等差异明显，不同项目之间的原料收购综合成本可能差异巨大，进而显著影响项目经济性。

生物天然气项目的潜在收益来源也较多，可分为固定收益、额外收益、潜在收益和废物处理收入。固定收益指燃气销售收入，生物天然气通过一定的价格并入燃气管网或是直供下游消费用户，项目可获得稳定收益。额外收益指项目副产品的销售收入，例如农业有机废弃物厌氧发酵后生产有机肥或是餐厨垃圾厌氧发酵生产粗油脂的收入，打通副产品销售渠道将显著改善项目经济性。潜在收益指生物天然气在市场机制下的绿色溢价。此外，生物天然气项目还有可能获得废物处理收入，这是由于生物天然气项目可无害化处理餐厨垃圾、畜禽粪污等城乡废弃物，减少环境污染，在环保政策要求下一些项目在原料收集环节可获得废物生产者支付的处理费用。

在不同条件下，生产原料既可能增加项目成本，也可能增加项目收益。若项目原料需收购才能获得，则生产原料会增加项目成本。相反，在废弃物管理政策要求下，原料供应方有可能需要为生物天然气项目运营方支付废物处理费用，则生产原料会增加项目收益。

图表 7 生物天然气项目经济性主要影响因素总结

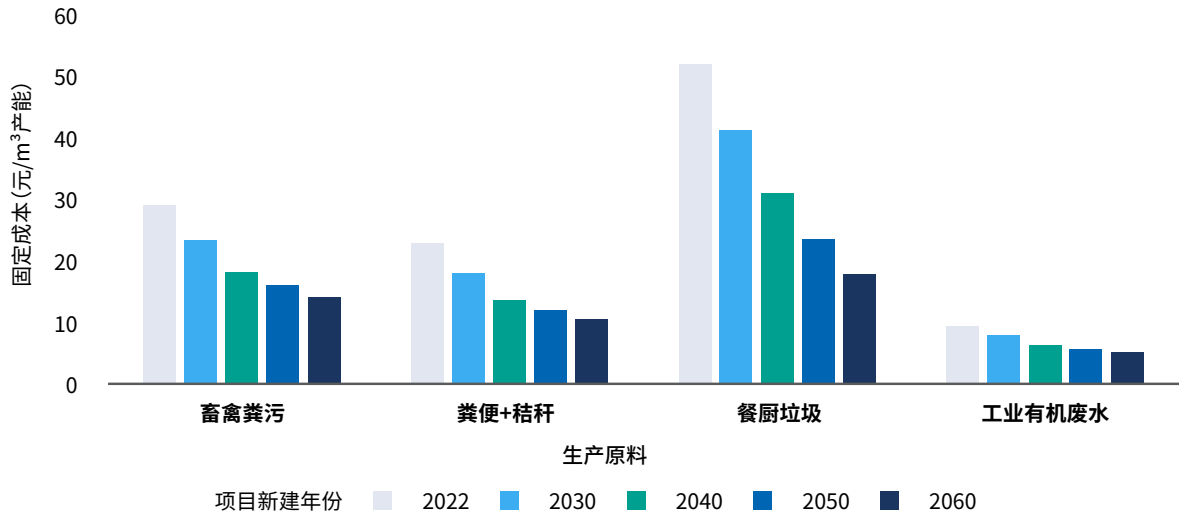


资料来源：课题组整理

影响因素分析：固定投资成本

在碳中和目标下，生物天然气项目固定投资成本将持续下降。由于核心工艺设备依赖国外进口、项目方经验不足，目前固定成本仍然较高，约为 10~54 元 /m³ 产能，其中设备购买成本约占 1/3 ~ 1/2。但未来随着国内生物天然气技术成熟化、设备国产化和工程设计集约化，固定成本有较大下降空间。根据课题组测算，预计到 2040 年，以畜禽粪污、粪便与秸秆混合废弃物、餐厨垃圾为原料的项目单位设备购买成本有望下降约 50%，单位建设成本有望下降约 1/3；以工业有机废水为原料的项目单位设备购买成本可下降约 20%。到 2060 年，四种典型原料的生物天然气项目固定成本有望下降至 6~18 元 /m³ 产能（图表 8）。

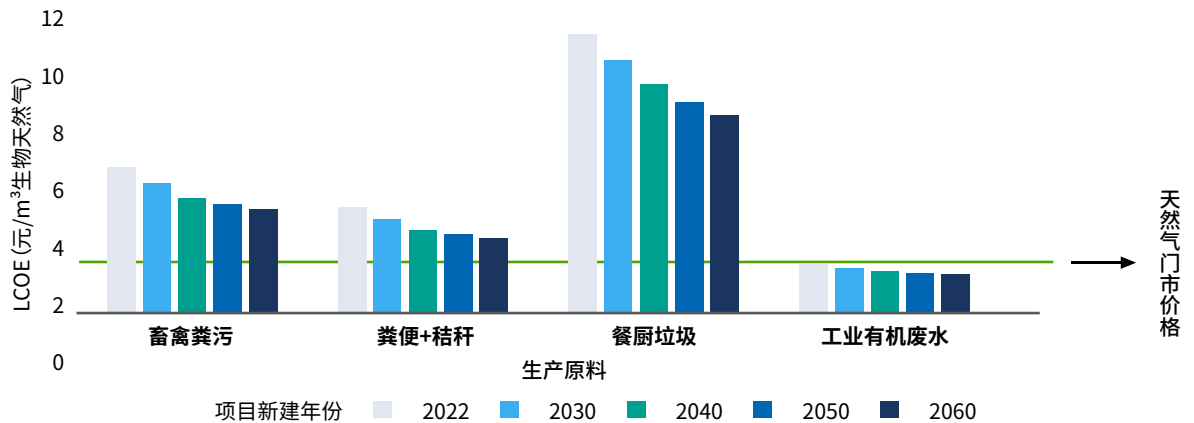
图表 8 不同原料的生物天然气项目固定成本展望



资料来源: 课题组测算

固定成本下降的趋势将持续改善生物天然气项目经济性, 但一些技术路线仍难以实现与传统天然气平价^v。如图表 9 所示, 根据课题组测算, 目前国内以畜禽粪污、粪便与秸秆混合废弃物、餐厨垃圾为原料的生物天然气项目平准化能源成本 (Levelized Cost of Energy, LCOE)^{vi} 高达 4.4~11.5 元 /m³ 生物天然气, 到 2040 年这三种原料的项目 LCOE 有望下降至 3.4~9.4 元 /m³ 生物天然气, 到 2060 年 LCOE 进一步下降至 3.1~8.2 元 /m³ 生物天然气。然而相比于 2~3.5 元 /m³ 天然气的民用价格和 3~5 元 /m³ 天然气的工商业用气价格而言, 这三种原料的生物天然气项目难以存在有市场竞争力的定价水平。相比之下, 以工业有机废水为原料的生物天然气项目目前 LCOE 已低至 2.0 元 /m³ 生物天然气左右, 到 2060 年可进一步下降至 1.6 元 /m³ 生物天然气, 这表明其已具备市场竞争力。总体来看, 设备国产化和建设集约化是生物天然气投资成本下降的主要驱动力, 投资成本下降可带动各类项目的 LCOE 相比当前水平下降 21~30%, 但仅依靠投资成本下降, 除以工业有机废水为原料的项目外, 其他类型项目到 2060 年的 LCOE 仍高于天然气价格, 不具备盈利空间。

图表 9 固定成本降低趋势下生物天然气项目 LCOE 展望



资料来源: 课题组测算

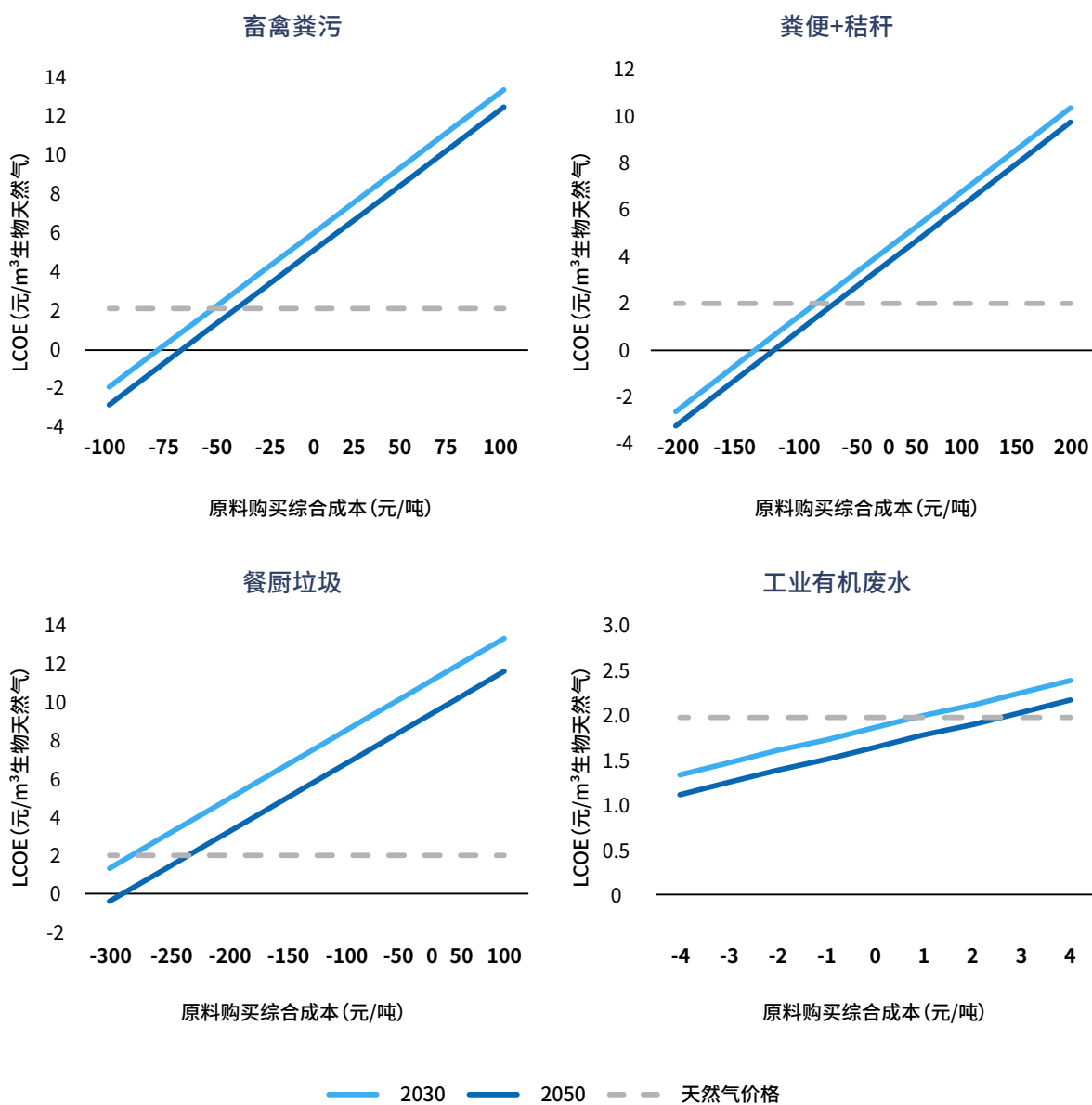
^v 本研究中的“平价”一词指生物天然气的平准化能源成本 (LCOE) 等于或低于天然气市场价格, 这使得生物天然气存在具备市场竞争力的定价空间。

^{vi} 平准化能源成本, 即项目生命周期内单位能源产量对应的平准化生产净成本, 以生命周期内净成本现值与能源产量现值的比例进行表示。

影响因素分析：原料成本

原料成本显著影响生物天然气项目经济性，化成本为收益将大大拓宽项目盈利空间。控制原料购买综合成本，进而降低项目 LCOE，是增强生物天然气市场竞争力的关键措施。项目方若需付费购买原料，则难以有盈利空间；反之，若项目方获得废物处理的费用，则项目经济性可大幅改善。如图表 10 所示，根据课题组测算，假设天然气价格为 2 元/m³，在其他条件不变时，2030 年以畜禽粪污、粪便与秸秆混合废弃物、餐厨垃圾为原料的新建项目，每吨原料收取费用需在 50、75 和 250 元/吨以上才存在可与传统天然气竞争的定价区间。虽然随着技术进步和规模效应，生物天然气项目 LCOE 将不断下降，但即使到 2050 年新建的这三类项目，也需要保证从原料供应方收取费用——即原料收购成本为负——才有可能使生物天然气与传统天然气平价。对于以工业有机废水为原料的项目而言，其固定投资和运维成本较低，因此即使原料收购成本为正，也有可能保证其与传统天然气平价，事实上污水处理费制度已普遍实施。

图表 10 2030 年和 2050 年新建项目的原料购买综合成本对项目 LCOE 的影响



资料来源：课题组测算

影响因素分析: 额外成本

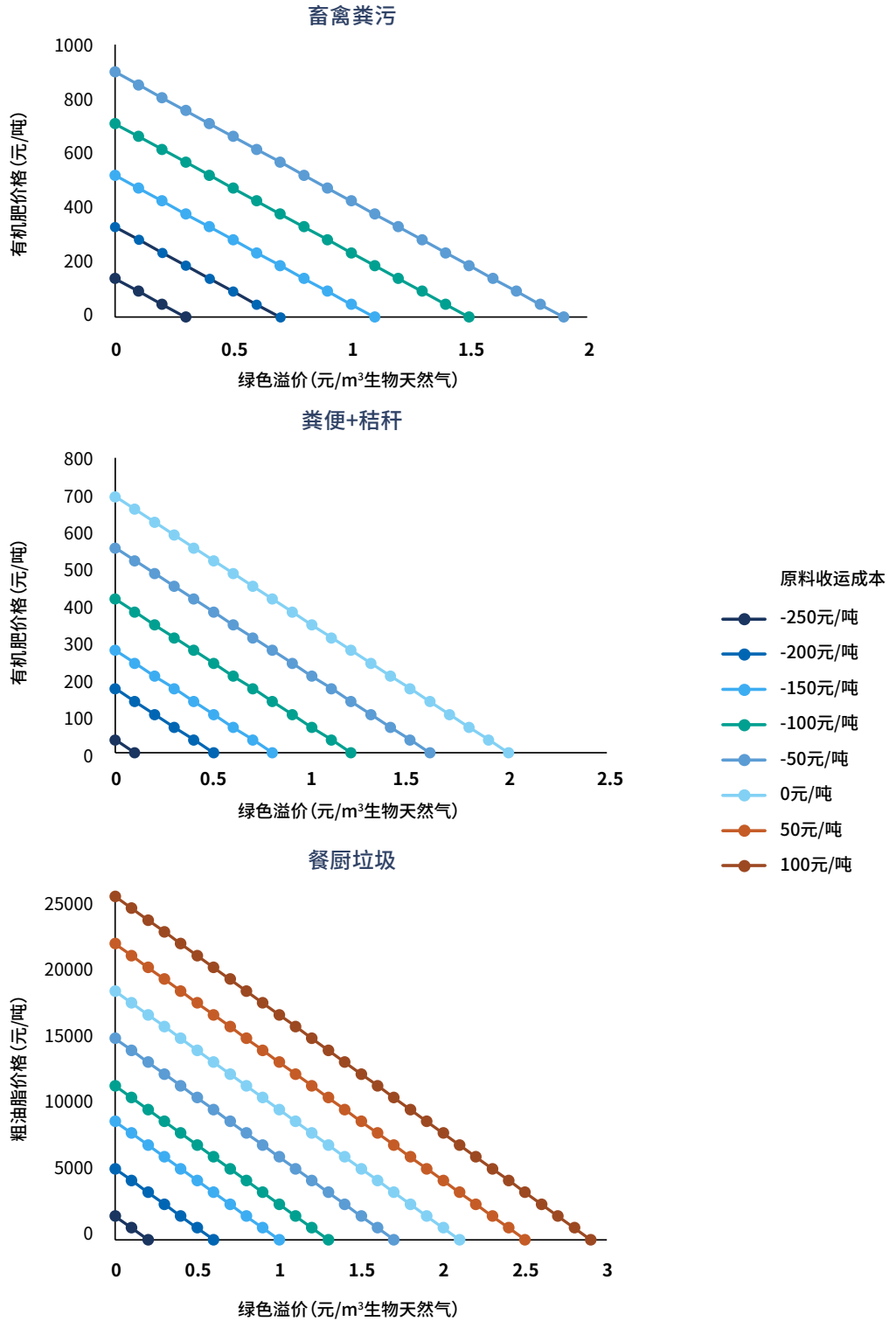
生物天然气产品外运会增加项目的额外成本，而促进产品的就近消费利用、扩张和完善相关基础设施可在一定程度上改善项目经济性。生物天然气的典型消纳模式包括直供消费用户和并入燃气管网。对于直供消费用户的模式来说，若生物天然气项目所在地距离消费端较远，则需要将最终产品制成压缩天然气后储存在高压气瓶中并运输至用户，其间运输成本可能会显著压缩项目盈利空间，因此推广分布式生产消费模式可节约这部分运输成本。对于并入燃气管网的模式来说，并网的前提条件是项目所在地被天然气管网覆盖。为确保生物天然气产品消纳、项目取得稳定收益，需要建设额外的天然气管网基础设施，特别是在乡村地区建设天然气管网，这也符合我国天然气发展完善“全国一张网”的要求。

影响因素分析: 收益端

在生物天然气项目仅依靠固定投资成本下降难以实现与传统天然气平价条件下，多元化项目创收渠道成为改善经济性、实现与传统天然气平价的重要手段。在副产品额外收益方面，以畜禽粪污和秸秆为原料的项目可生产有机肥，而以餐厨垃圾为原料的项目可生产粗油脂。对于成本较高的生物天然气项目而言，打通副产品的销售渠道、确保副产品以较好的价格稳定消纳是改善项目经济性不可或缺的措施。另外，生物天然气本身具有绿色低碳属性，其绿色溢价若能被采购方消化，则能将其绿色价值变现为项目的潜在收益。

实现生物天然气与传统天然气平价需要降本增收的组合措施。对于新建项目而言，为实现与传统天然气平价，项目的各项成本和收益需满足一定组合条件。此处以原料收运成本、副产品收益和绿色溢价为例探讨生物天然气的平价条件。不难发现，在一定的原料收运成本下，若副产品收益下降，生物天然气的绿色溢价需随之上升以保持项目与传统天然气平价，反之亦然。如图表 11 所示，以 2030 年新建的畜禽粪污为原料的项目为例，在原料收运成本为 50 元/吨时，若项目有机肥销售不畅（即，有机肥价格为 0），绿色溢价需达到 1.5 元/m³ 以上，才能补偿其副产品收益损失；若生物天然气的绿色溢价无法被市场消化（即，绿色溢价为 0），则有机肥销售价格需达到 700 元/吨以上才能实现平价。其次，随着原料收运成本上升，为实现平价，对副产品收益和绿色溢价的要求也相应提高。仍以 2030 年新建的畜禽粪污为原料的项目为例，当原料成本从 0 元/吨上升至 75 元/吨时，假设项目绿色溢价为 0，其对有机肥价格的要求将从约 300 元/吨上升至约 900 元/吨。对于其他原料的项目而言，同样需要使成本和收益达到实现平价的组合，才能使项目具备盈利空间。

图表 11 2030 年新建生物天然气项目平价线



注：在平价线上对应的原料收运成本、副产品价格和绿色溢价的组合，使得生物天然气项目 LCOE 与传统天然气价格（假设为 2 元 /m³）相当。由于工业有机废水产生生物天然气项目没有副产品，因此不纳入分析范围。

资料来源：课题组测算

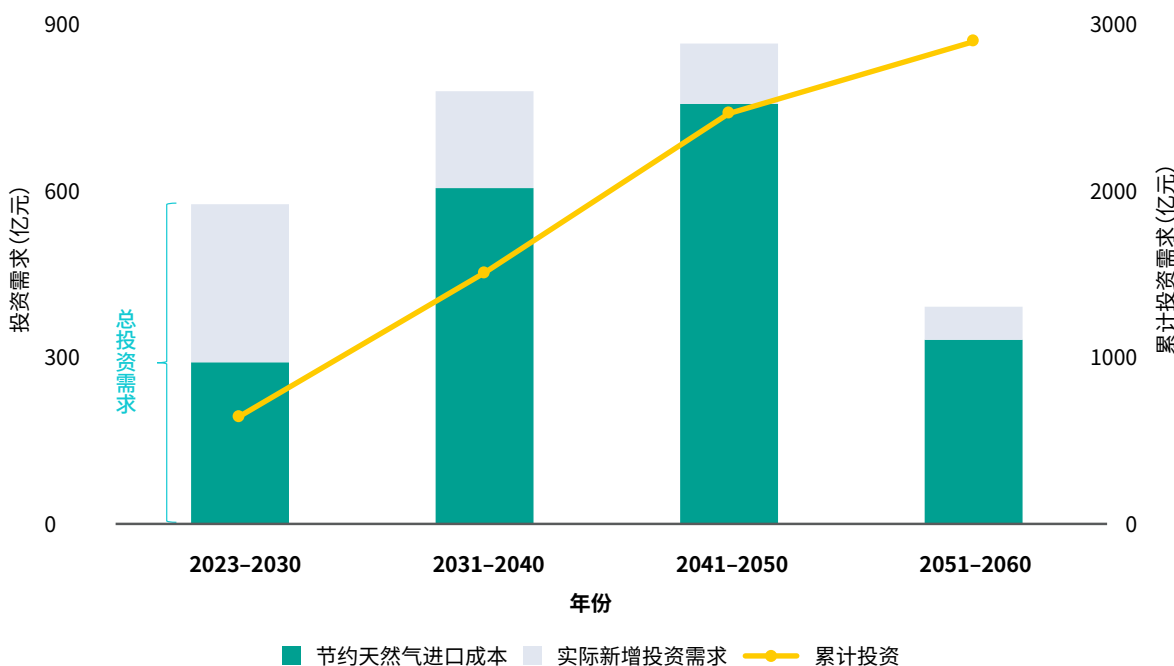
综合上述分析，生物天然气的项目经济性受成本端和收益端多个因素共同影响。推动生物天然气与传统天然气市场平价，既需要在成本端促进技术和建设成本下降，完善基础设施以控制产品外运成本，也需要在收益端拓宽项目收益渠道，在生物天然气销售之外确保副产品消纳，并积极通过市场机制使生物天然气的绿色低碳价值变现。对于原料供应这一既可能增加成本又可能成为收益的环节，则需尽可能化成本为收益，从而改善项目经济性。

生物天然气行业投资需求展望

在碳中和目标下，生物天然气行业发展需要约 2700 亿元的投资支持。随着生物天然气行业从起步到发展再到成熟，生物天然气的需求和产能都将迎来数量级的增长，而行业的发展背后需要巨大的投资支持。根据课题组测算，到 2060 年生物天然气发展的累计投资需求近 2700 亿元。2030 年前，国内生物天然气市场处于成长初期，预计这一时期的投资需求占未来总投资需求的 22%；2030 年后行业加速发展，近 63% 的新增投资都将支持 2030~2050 年的产能建设。2050 年后，生物天然气发展的新增投资需求有所下降，这一方面是因为生物天然气投资和产能建设的步伐逐步趋于平稳，市场进入成熟阶段，另一方面受益于生物天然气不断下降的项目成本，使得整体投资效率提高。

超过 3/4 的生物天然气投资需求可由节约的天然气进口成本所满足。由于生物天然气的发展进一步推动我国天然气对外依存度不断下降，考虑由此节约的天然气进口成本，实际的新增投资需求远低于总投资需求。根据课题组测算，发展生物天然气将节约天然气进口支出超过 2000 亿元，可满足约 76% 的总体投资需求（图表 12）。

图表 12 生物天然气投资需求与节约进口成本对比



资料来源：课题组测算

生物天然气市场动态

尽管生物天然气行业仍处于成长阶段，但国内已有部分“先行者”企业开始布局，引领市场发展。一些企业投资建设了生物天然气的试点示范项目（图表 13），这些项目消耗的原料包括畜禽粪污、秸秆、工业有机废水、餐厨垃圾等有机废弃物，项目厌氧发酵产沼气并进一步提纯生产的生物天然气用途广泛，可并入燃气管网，也可供电力、建筑、工业等部门消费。部分项目已探索出适合自身的商业模式，建立了稳定的供应链，创造了可观的经济、环境和减排效益，为市场进一步发展树立了信心。

图表 13 国内部分生物天然气示范项目情况

原料	企业	投产年份	部署情况	下游应用模式
畜禽粪污	华新燃气	2022	项目年产生物天然气460万m ³ ，一期工程已完工并投运，生物天然气已顺利并入燃气管网，并直接运用于应县陶瓷产业集群	并入燃气管网；供工业消费
秸秆	中国石油	2022	大庆油田建成秸秆制生物天然气中试基地，日产沼气体量达2000m ³ 以上	—
秸秆、畜禽粪污	中电建生态环境集团	2022	项目采用“预处理+厌氧发酵+沼气净化提纯+CNG压缩”为核心的工艺技术，以畜禽粪污和玉米秸秆为原料，年处理有机废弃物12万吨，年产生物天然气400多万m ³	并入燃气管网
秸秆、畜禽粪污	国能生物发电集团	2020	项目以玉米秸秆和猪粪为原料，目前可年处理各类有机废弃物21万吨，年产天然气1080万m ³ ，年产有机肥6.15万吨	为工业园区及当地居民供热
餐厨垃圾	宁波首创	2019	每日可处理餐厨垃圾400吨，日产生物天然气约2万m ³	并入燃气管网
秸秆、畜禽粪污	三河市盈盛生物	2018	项目以农作物秸秆、畜禽粪污等农业固废为原料，采用国际先进设备和国际领先的厌氧发酵、纤维素预水解技术，可年处理农作物秸秆7万吨，畜禽粪污12万吨，年产生物天然气650万m ³	为企业生产供能；作为车用燃料
秸秆、畜禽粪污	黑龙江博能环保	2016	项目以玉米秸秆、养殖场畜禽粪污为原料，采用干式厌氧发酵技术，可年处理玉米秸秆3.45万吨、畜禽粪污6.9万吨、病死畜禽3000吨，可生产天然气377万m ³ ，有机肥2.5万吨	为沃尔沃供气
工业有机废水	东莞中堂纸厂	2014	该项目收集多个造纸厂废水进行厌氧发酵，日均产提纯生物天然气5.2万m ³ ，已连续高效稳定运行8年	并入燃气管网；压缩制CNG分销
市政、农业、畜禽粪污、餐厨等有机废弃物	广西神州环保产业控股集团	2014	项目可集中处理市政、农业和畜禽有机废弃物，每日可处理城乡有机固体废弃物1500吨和垃圾焚烧厂渗滤液600吨，采用湿式中温厌氧发酵工艺，年产生物天然气370万m ³	作为城市公共交通与环卫运输车辆用燃料

资料来源：中国产业发展促进会生物质能产业分会、中国沼气学会、公开资料整理

在能源危机和减碳压力下，国际商业巨头纷纷开始部署生物天然气投资。近年来由于全球能源危机，液化天然气（LNG）现货价格高企。同时各国不断加强气候雄心，力推能源转型。在这样的背景下，生物天然气凸显出其保能源安全、促低碳转型的价值，因而国际商业巨头纷纷布局生物天然气市场。

专栏 1 国际企业实践案例

能源企业：2022 年 11 月，壳牌公司（Shell）发布声明称，将以近 20 亿美元的价格收购欧洲最大的沼气生产商 Nature Energy，壳牌将通过此次收购在全球范围内构建一个综合的生物天然气价值链。2022 年 10 月，英国石油（BP）斥资近 41 亿美元收购美国最大生物天然气生产商之一——Archaea Energy。此次收购将使 BP 的生物天然气日生产量增加 50%。此外，BP 已规划再开发 40 个生物天然气项目，以实现在 2030 年生物天然气产量增长 6 倍的目标。2022 年 7 月，法国天然气苏伊士集团（ENGIE）宣布，计划与法国达飞公司共同投资 Salamander 项目——首个工业化和商业化的第二代生物天然气生产装置，项目装置的目标年产量为 11000 吨生物天然气，计划于 2026 年投产。

电商、物流和运输企业：亚马逊和清洁能源公司（CLNE）计划在美国多个州开发 19 座生物天然气加气站，供亚马逊物流车使用。法国达飞公司（CMA CGM）于 2022 年 9 月宣布设立 15 亿美元、为期 5 年的能源专项基金，旨在加速能源转型，其中生物天然气作为可再生燃料发展的一部分。同月，达飞宣布将订购 7 艘生物天然气动力集装箱船。

金融投资机构：高盛集团于 2023 年 2 月宣布，计划未来四年在欧洲投资 1 亿欧元发展生物天然气。HIG Capital 于 2022 年 9 月宣布，已收购 Northern Biogas 公司的控股权，该公司在美国各地的农场和垃圾填埋场开发生物天然气生产设施。贝莱德集团于 2022 年 7 月收购了 Vanguard Renewables，该企业将餐厨垃圾和奶牛粪便等有机废弃物转化为生物天然气和液体肥料。

第四章

生物天然气发展模式展望

在碳中和目标下，生物天然气将迎来前所未有的发展机遇。随着行业的转型升级，生物天然气将持续在促进能源转型、保障能源安全、减少温室气体排放、助力乡村振兴等方面发挥重要作用。目前，生物天然气行业处于早期发展阶段，产业链供应链尚未完全打通，市场尚未培育成熟。本章将从行业整体的区域发展格局以及行业内部产业链两个角度出发，展望碳中和目标下我国生物天然气行业发展图景，以及助力行业高质量发展的行动举措。

区域发展格局：因地制宜推进产能布局

碳中和目标下，为满足我国对生物天然气的消费需求，未来产能需要大幅扩张，因此科学合理规划产能布局成为重要课题。推进产能布局的总体原则是因地制宜，可从生物天然气的生产和需求两方面进行考虑。从生产来看，生物天然气的生产原料是各类有机废弃物，那么有机废弃物资源量丰富的地区具有较大的生产潜力。从需求来看，全国各区域的天然气供需情况有较大差异，因此可优先在天然气供需缺口较大的区域推广生物天然气。

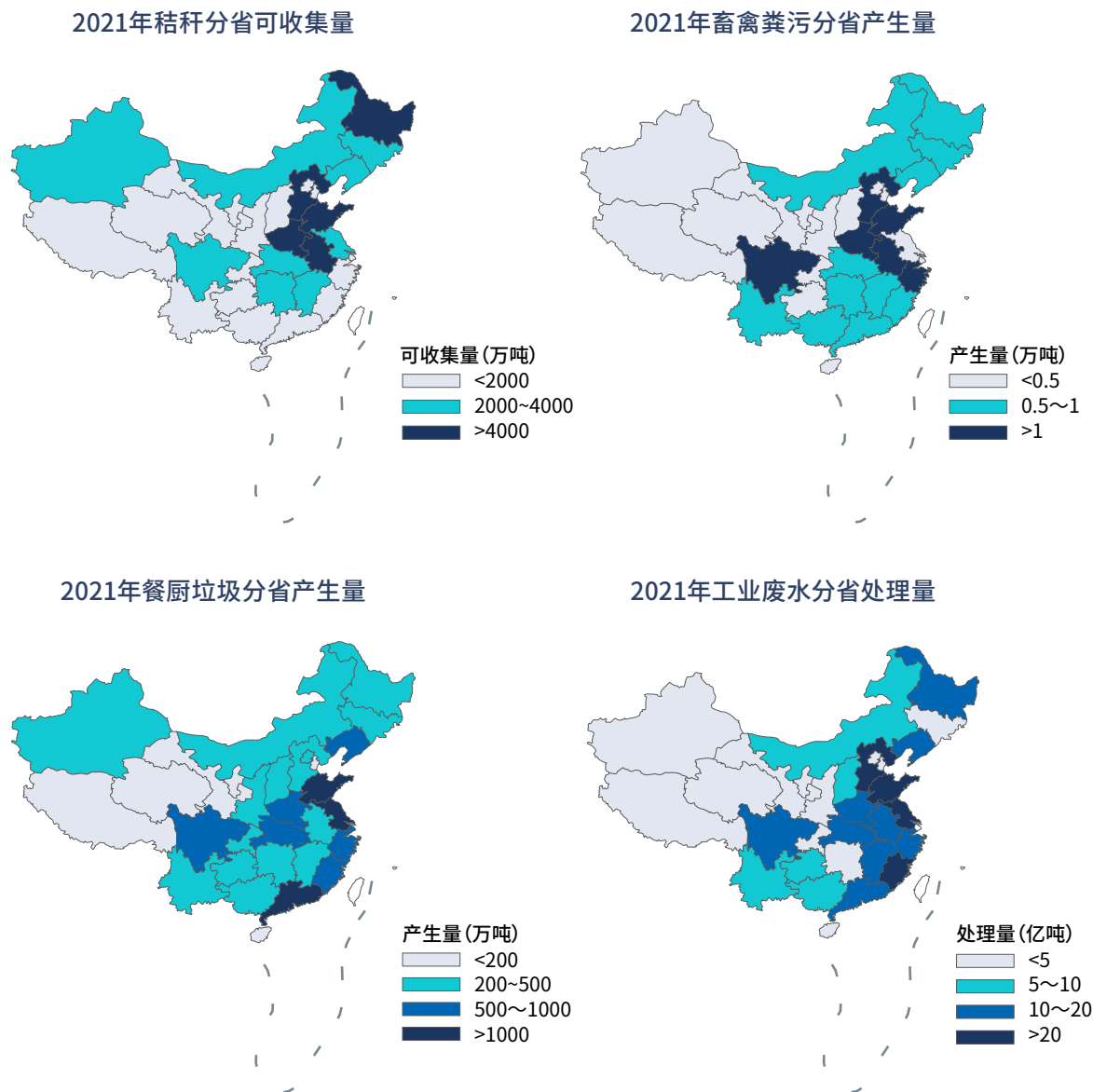
资源潜力：统筹利用各区域有机废弃物

从生物天然气的生产来看，我国有机废弃物产生量大，农作物秸秆、畜禽粪污、餐厨垃圾和工业有机废水的资源化能源化利用空间广阔。2021年我国农作物秸秆可收集量约为7.3亿吨，畜禽粪污资源量约为18.7亿吨^{vii}，餐厨垃圾产生量据估算超过2亿吨^{11,12}，工业废水处理量约为301.4亿吨¹³。虽然我国城乡废物管理体系不断完善，有效防治了环境污染，但在秸秆、畜禽粪污、餐厨垃圾和工业有机废水的资源化能源化利用上仍有提升空间，而生物天然气的生产将为不断增加的有机废弃物提供了良好的出路。

可利用有机废弃物资源量的省际差异十分显著。秸秆和畜禽粪污产生量与农牧业发展程度相关，农业大省黑龙江、河南、山东等是全国较大的秸秆产区，畜牧业大省四川、湖南、云南等是畜禽粪污产生量较大的地区；餐厨垃圾产生量一般与人口规模和当地饮食消费习惯相关，广东、江苏、山东等省的餐厨垃圾产生量较大；工业有机废水处理量取决于废水产生量 and 处理率，造纸、食品加工、石化等行业发达地区的有机废水产生量较大，而废水治理设施完善的地区处理率较高，河北、福建、江苏等省的工业有机废水处理量较大。因此，各地有机废弃物资源化利用潜力不同，需要因地制宜、立足资源潜力进行生物天然气的产能布局（图表14）。

vii 农作物秸秆可收集量和畜禽粪污资源量数据来源为中国产业发展促进会生物质能产业分会。

图表 14 2021 年我国各类有机废弃物分省产生或处理量

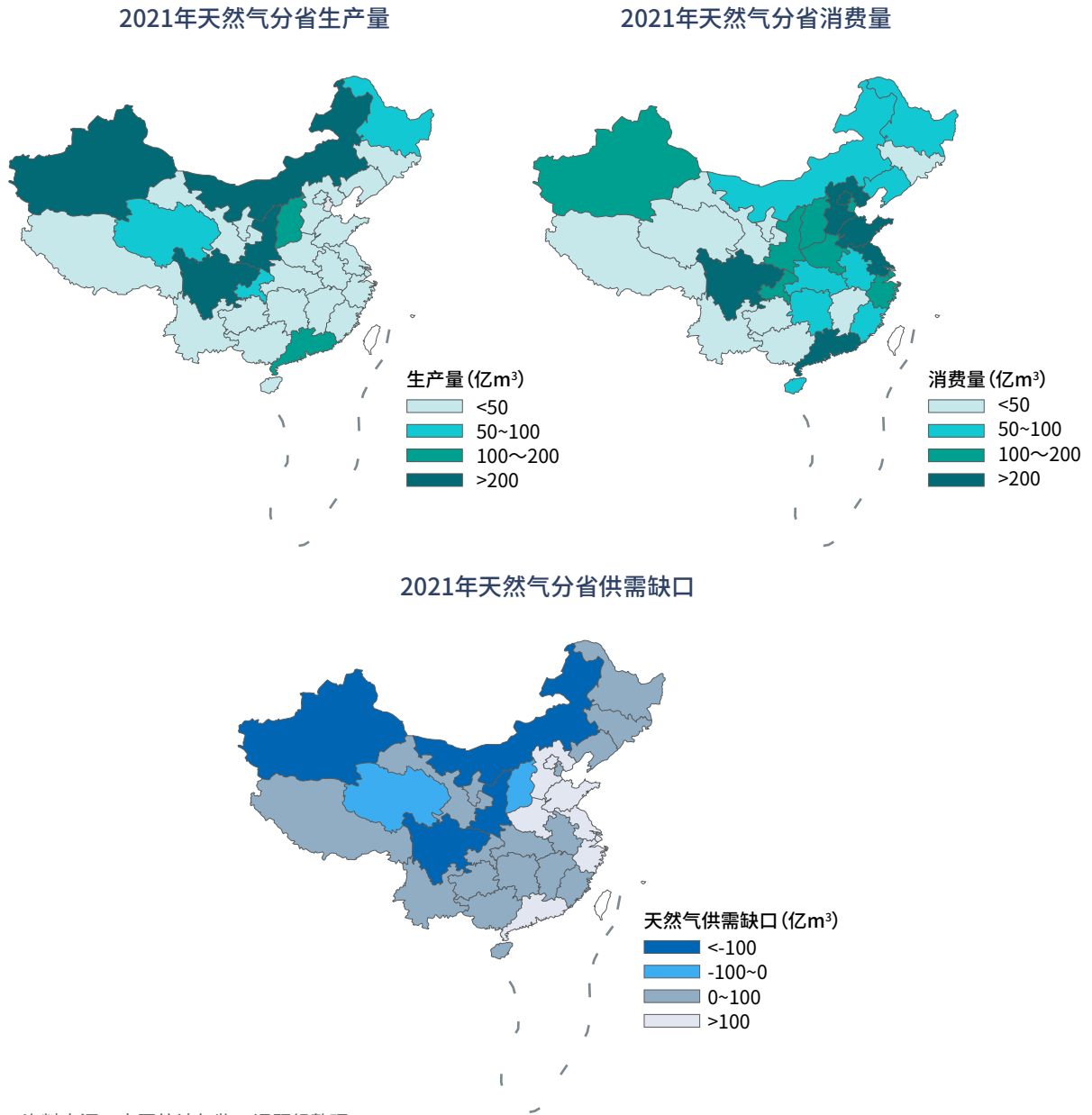


资料来源：2021 年中国生态环境统计年报，中国统计年鉴 2022，中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析，第一次全国污染源普查畜禽养殖业排污系数与排污系数手册，“无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状问题与建议，2021

消费需求: 填补各区域天然气供需缺口

从生物天然气的消费来看，我国大部分省份的天然气供需存在缺口，生物天然气在补充天然气供应、保障能源安全方面可发挥重要作用。我国天然气生产集中在四川、新疆、陕西、内蒙古等西部、北部省份，而消费大省大多位于华北、华东和华南地区，例如广东、江苏、山东等，天然气的生产和消费格局存在明显的空间错配。根据公开统计数据，2021 年有 25 个省级行政区的本省天然气消费量大于产量，即供给存在缺口，其中江苏、广东、山东、河北、北京、浙江、河南、上海八省市的供给缺口超过了 100 亿 m^3 (图表 15)。一些省份虽然可以依靠天然气的跨省运输来满足消费需求，但我国天然气消费整体仍处于对外依存度较高的状态，需对外进口天然气。在能源安全约束下，随着天然气消费需求的持续增长，天然气对外依存度升高的压力凸显。因此，在供需缺口较大的省份布局生物天然气产能可有效缓解能源安全保障压力。

图表 15 2021 年我国天然气分省生产量、消费量和供需缺口

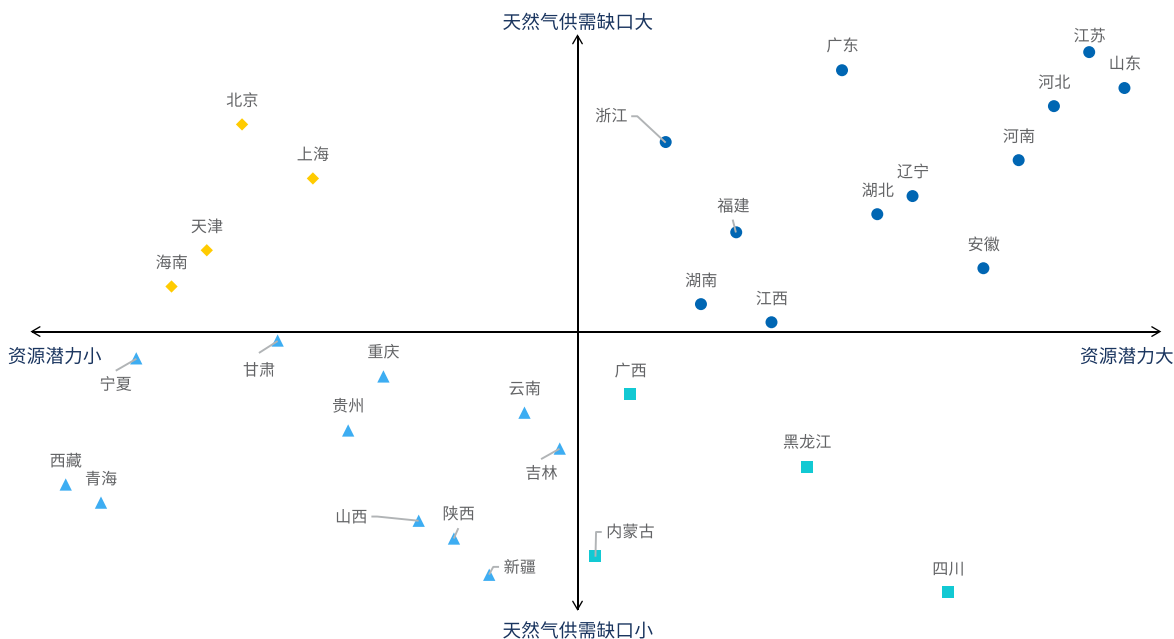


资料来源：中国统计年鉴，课题组整理

区域格局：因地制宜推进产业集群发展

生物天然气产业的区域格局需与资源潜力和供需缺口匹配。如图表 16 所示，全国各省可根据有机废弃物资源潜力和天然气供需缺口大致划分为四类。生物天然气产业可首先考虑在废物资源潜力较大的省份进行布局，其中天然气供需缺口更大的省份，产业布局的优先级更高，例如江苏、山东、广东、河北、河南等。从地理位置来看，这些省份大多坐落于华北、华东、华南地区，农业和工业均较为发达，人口众多，因此它们的有机废弃物综合资源潜力和天然气消费需求都较大；对于资源潜力较大而本省天然气供需缺口较小的省份而言，生物天然气在满足本省消费需求之外，可考虑通过天然气管网“全国一张网”进行跨省调配，支持其他省份的天然气消费，特别是北京、天津、上海等废弃物资源有限但天然气消费需求旺盛的省市。而对于其他资源潜力相对较小但天然气供需缺口也较小的省份而言，生物天然气产业同样具有发展前景，可结合本地优势有机废弃物资源进行产能布局。

图表 16 各省有机废弃物资源潜力和天然气供需缺口对比

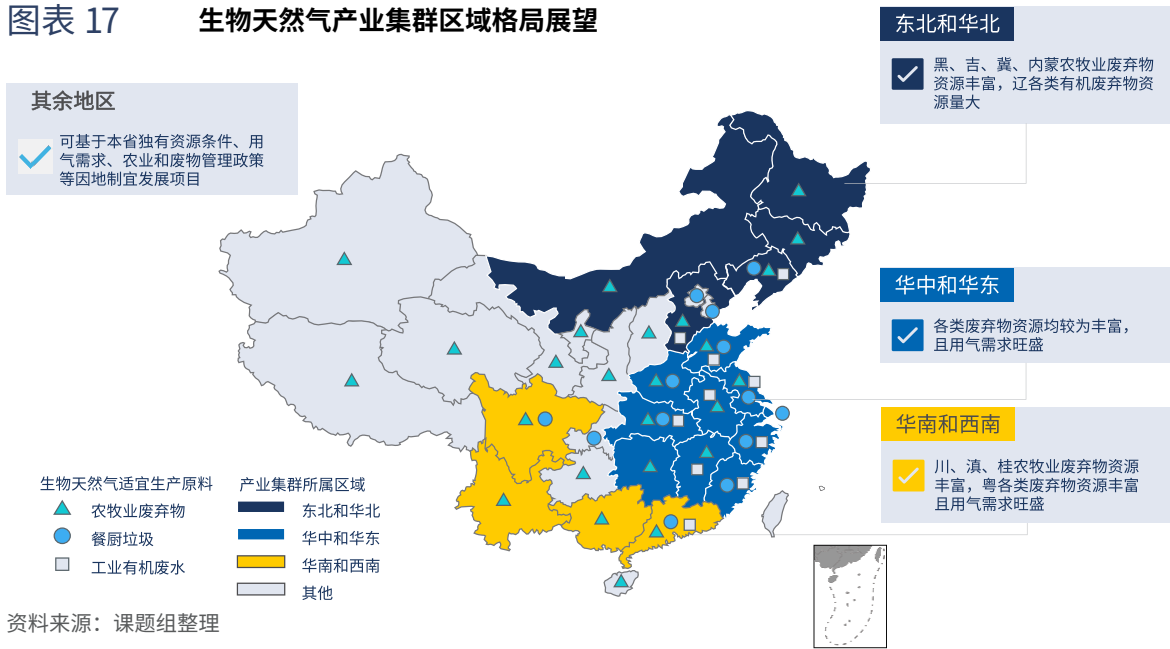


资料来源：课题组整理

考虑资源潜力以及消费需求两方面因素，生物天然气产业有望在区域上呈现出集群发展的格局，实现对各类有机废弃物的综合利用。如图表 17 所示，未来生物天然气产业有望在三大区域形成集群：1) 东北和华北地区：这一区域的黑龙江、吉林、河北和内蒙古的农牧业废弃物资源较丰富，适合发展以秸秆、畜禽粪污等农牧业废弃物为原料的生物天然气项目。此外，辽宁和河北的餐厨垃圾和工业有机废水资源量大，可考虑发展以这两种城市废弃物为原料的生物天然气项目。2) 华中和华东区域：该区域内包含众多人口和经济大省，例如山东、江苏、浙江等。一方面，该区域内省份各类城乡有机废弃物资源非常丰富，部分省份工业发展基础雄厚，重视前沿技术创新和产业转型升级。另一方面，该区域内诸多省份天然气消费需求旺盛，供给缺口较大。因此，生物天然气产业在华中和华东区域有良好的发展需求和发展条件。3) 华南和西南地区：该区域内的四川、云南、广西农牧业废弃物资源量较为丰富，而广东的各类废弃物资源量都较为丰富且用气需求量大，因此适合发展生物天然气项目。

值得注意的是，其他省份虽然有机废弃物综合资源量相对较低，但也可基于本省独有资源条件、用气需求、农业和废物管理政策等因地制宜发展适当规模的生物天然气项目。例如，新疆和陕西是全国天然气生产大省，发展生物天然气可在一定程度上缓解天然气生产压力；甘肃和宁夏天然气消费量大于本省产量，供给存在缺口，可基于农牧业废弃物资源发展生物天然气项目；青海、宁夏、山西等省近年来把畜禽粪污资源化利用作为农业农村工作的重点任务之一，出台相关规划和支持政策，发展生物天然气也有望成为新举措。

图表 17 生物天然气产业集群区域格局展望

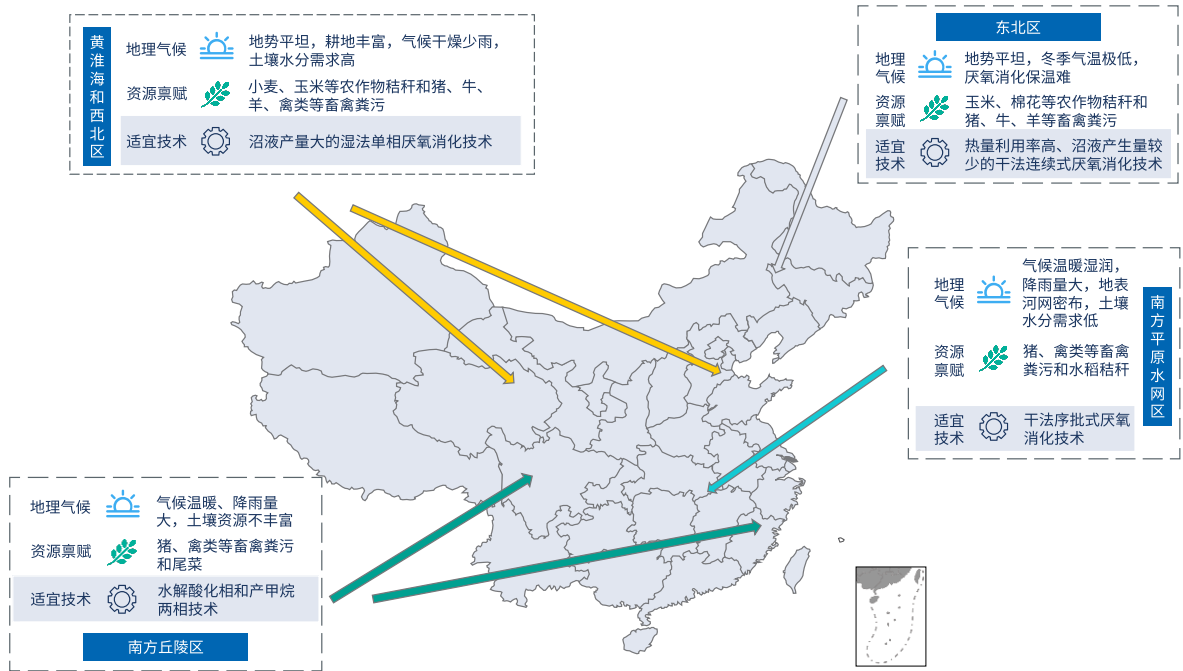


专栏 2 因地制宜选择农业废弃物厌氧发酵产气技术

厌氧发酵是生物天然气生产的关键一步。对于以农业废弃物为原料的项目，发酵技术的选择需综合考虑生物质资源禀赋、地理环境、气候条件等因素。基于此，我国不同地区适宜采用的农业废弃物厌氧发酵技术存在差异（图 18）。

- 南方丘陵区（我国东南地区和川中地区）：该区域由于气候温暖，降雨量大，土壤资源不丰富且有机质流失较为严重，可供厌氧消化利用的农业废弃物以猪、禽类等畜禽粪污和尾菜为主，因此采用适合易酸化原料的水解酸化相和产甲烷两相技术与装备为佳。沼渣和沼液在无害化处理后可施用于耕地中，弥补当地耕地资源，提高土壤有机质含量。
- 南方平原水网区（淮河以南、巴山 - 武陵山以东、南岭山以北平原及成都平原）：该区域气候温暖湿润，降雨量大，地表河网密布，土壤水分需求低，因而农业面源污染风险高，沼液消纳能力弱。而可供厌氧消化利用的农业废弃物以猪、禽类等畜禽粪污和水稻秸秆为主，故采用干法序批式厌氧消化技术与装备较为适宜，可减少沼液产生量、降低农业面源污染的风险。沼渣无害化处理后可作为有机肥施用，而沼液宜处理达标后排放。
- 黄淮海和西北区（京津冀鲁豫大部分地区、苏皖北部、陕甘宁及毗邻的新疆和内蒙古部分地区）：该区域地形较平坦，耕地资源丰富，气候干燥少雨，因此土壤水分需求高，沼液、沼渣消纳能力较强。可供厌氧消化利用的农业废弃物有小麦、玉米等农作物秸秆和猪、牛、羊、禽类等畜禽粪污。因此，该区域可采用沼液产量大的湿法单相厌氧消化技术与装备。沼液和沼渣在进一步处理后可生产液体有机肥和高端有机肥。
- 东北区（黑龙江省、吉林省、辽宁省以及内蒙古自治区东部区域）：该区域可供厌氧消化利用的农业废弃物有玉米、棉花等农作物秸秆和猪、牛、羊等畜禽粪污，而由于冬季气温极低，厌氧消化保温难，沼液结冰期长，难以处理利用。因此，采用热量利用率高、沼液产生量较少的干法连续式厌氧消化技术与装备较为适宜。沼渣处理后可作为有机肥施用，而沼液可回流并与畜禽养殖废水共同用于原料预处理。

图表 18 我国不同地区的地理、气候、资源特点及适宜采用的厌氧发酵技术



资料来源：课题组整理

完善产业链构建:打造成熟市场模式

当前我国生物天然气行业仍处于起步阶段，实现工业化商业化可持续发展需要构建完善的产业链供应链，从供给和消费两端打造成熟的市场模式。而建立健全完善的产业体系需要在政策、技术、基础设施、金融等多个维度协同行动，共同助力行业高质量发展。

生物天然气行业发展愿景: 产业链视角

碳中和目标下，生物天然气行业需要产业链上、中、下游的成熟发展。**在产业链上游，完善的原料供应体系是支撑生物天然气产能扩张的基石。**原料供应体系将覆盖城乡各类有机废弃物，具体而言，在城市力争实现对居民生活垃圾、餐厨垃圾、污水污泥等废物的完全收集和清运，在农村建立农作物秸秆、果蔬种植废弃物、畜禽粪污等废物的收储运体系。原料供应体系将以市场化方式运作，因此培育专业化收储运市场主体，在排污者和生物天然气项目方之间提供服务。原料供应体系还将体现废物无害化处理的市场价值，为此需普及推广“谁排污、谁付费”的第三方有偿处理模式。

在产业链中游，生物天然气的生产环节需要突破技术瓶颈、降低生产成本，实现工程建设现代化，在供给侧持续培育市场主体。生物天然气产能的大规模扩张必将伴随着工程建造成本和设备投资成本的下降，而这依赖于生物天然气生产关键技术的创新、设备的国产化以及工程建设经验的积累。未来，适合我国原料特性的预处理、厌氧发酵、净化提纯、系统监测技术体系将得到大规模应用，项目工程建设将逐步集约化，项目规模符合原料供应量，避免产能浪费。随着技术和工程建设的进步，越来越多的投资主体将进入生物天然气行业，在良性市场竞争的氛围中共同推动行业发展。

在产业链下游，构建生物天然气的多元化消费体系，规范副产品消费市场，将打通生物天然气消纳利用的“最后一公里”。实现生物天然气减排温室气体、保障能源安全、推动能源转型、助力乡村振兴的多重效益，需要确保生物天然气的消纳利用。未来，生物天然气将形成并入燃气管网以及交通、工业、建筑部门的多元消费模式，用户与供气方达成稳定的中长期交易协议。此外，生物天然气项目绿色溢价将在市场机制下由采购方承担，进一步增加项目的财务回报。

多方位助力行业高质量发展：政策、技术、基础设施和金融

面向行业高质量发展的愿景，政策、技术、基础设施、金融等多重举措可支持建立覆盖全产业链的完整产业体系以及良好市场环境。产业链上、中、下游的成熟和完善，是生物天然气行业助力碳中和目标实现的必经之路，这需要多方合力、协同行动（图表 19）。

- **政策支持：**在行业发展早期、尚未建立规范高效的市场机制时，政策支持对于产业走上发展正轨至关重要。主管部门通过规章制度、标准、财政补贴等政策工具，可扶持产业链上、中、下游的发展。在上游，为保证生物天然气原料以合理的价格稳定供应，可通过政策手段鼓励或强制要求建立城乡有机废弃物的收运体系，推动废弃物的资源化能源化利用而非进入末端处理设施或直接排放。在中游，重点在于降低生物天然气生产成本，为此需要加强政策对技术创新和装备制造的支持力度。在下游，建立生物天然气和副产品的消费体系是关键，为此需要采取多元化政策手段保障其消纳利用。
- **技术突破和部署：**攻关突破生物天然气生产的关键技术、实现技术和装备国产化，是推动产能规模扩张、实现对化石燃料替代的核心动力。技术突破的重点在于产业链中游的生产环节和下游的消费环节。在中游，实现生物天然气原料预处理、消化、利用等关键技术以及装备制造的突破可大幅降低生产成本。在下游，为促进生物天然气的消费，需要在电力、交通、工业和建筑领域推动脱碳技术的创新和部署。
- **基础设施完善：**原料收储运、道路和天然气管网基础设施的建设完善，可额外降低生物天然气生产成本并促进产品的消纳利用，尤其是在基础设施并不发达的农村地区，发展基础设施不仅能支持生物天然气项目的可持续商业化运营，其本身也具有带动农村经济社会发展、加强农村能源供应的效益。在上游，重点是完善城乡有机废弃物的收储运站点，助力原料供应体系的完善。在下游，重点是完善天然气管网建设，特别是将其延伸至有条件的农村地区，以促进生物天然气并网利用。道路建设则需贯穿产业链各个环节，可进一步推动原料和产品的运输成本下降。
- **金融支持：**如前文所示，实现生物天然气产能的大幅扩张需要数千亿元的资金投入，因此金融在支持行业高质量发展的进程中发挥关键作用。目前生物天然气项目投资成本高，各类金融机构的投资经验较少，项目投资风险较大，因而项目建设方难以获得低成本融资。在此背景下，绿色金融和气候金融体系可对全产业链的活动提供支持。项目企业可根据绿色金融和气候金融标准，通过不同工具和机制为生物天然气项目融资，例如可根据国内外绿色金融或气候金融标准申请银行绿色贷款、获得投资机构绿色股权融资等。

图表 19 助力生物天然气行业高质量发展的多重行动

	上游:原料供应	中游:产品生产	下游:产品消费
政策支持	<ul style="list-style-type: none"> 完善城乡废弃物分类和清运体系 建立、完善和推广废物有偿处理制度 落实农村秸秆综合利用和畜禽粪污资源化利用政策 	<ul style="list-style-type: none"> 完善技术创新政策体系,加大财政对关键技术研发投入的支持 出台和完善设备制造标准 	<ul style="list-style-type: none"> 为项目提供基于产气量的补贴 修订和完善燃气并网标准及制度 采用绿色燃气配额制度,促进生物天然气保障性消纳 制定有机肥等副产品标准 探索将生物天然气项目纳入CCER 探索绿色能源非电利用消费认证制度
技术突破和部署	/	<ul style="list-style-type: none"> 攻关原料破碎和预处理、干式和混合原料发酵、净化提纯、系统监测和预警、沼液沼渣处理等关键技术及装备 	<ul style="list-style-type: none"> 突破燃气轮机技术,实现天然气发电核心技术自主化 推广压缩天然气汽车应用,适当推进燃油车“油改气” 加快生物天然气作为原料或燃料的工业脱碳技术部署 推广热泵使用,以生物天然气作为气源
基础设施	<ul style="list-style-type: none"> 增加城乡废物收储运设施站点 完善交通基础设施 	<ul style="list-style-type: none"> 完善交通基础设施 	<ul style="list-style-type: none"> 加速天然气管网“全国一张网”建设 完善交通基础设施
金融支持	<ul style="list-style-type: none"> 发展健全绿色金融和气候投融资体系,完善标准制定,开发多元化融资工具 		

资料来源:课题组整理

第五章

生物天然气发展行动建议

碳中和目标下，生物天然气具有广阔的发展前景，在减少能源、农业、废弃物等领域温室气体排放的同时，具有保障能源安全、加速能源转型、推动乡村振兴等多重效益。尽管具有良好的发展基础和独特的发展优势，但我国生物天然气行业还处于起步阶段，政策有待完善，技术需要进一步突破，产业链、供应链和市场环境尚未成熟。在产业转型升级的背景下，实现生物天然气行业的高质量发展需要多方参与，形成合力，通过政策支持、技术创新、完善市场机制等措施，为生物天然气行业实现商业化可持续运营创造良好环境。

对此提出如下行动建议：

以技术创新驱动行业高质量发展。生物天然气生产技术和装备制造的创新及全面国产化，是确保产业链供应链安全、降低生产成本、实现大规模商业应用的基础。科研院所和企业应加强研究多种有机废弃物混合高效发酵、干法厌氧发酵、发酵自动化、沼气净化提纯等关键技术，推广应用先进原料预处理、净化提纯、自动监控等成套国产化设备。鼓励企业与科研机构共建联合实验室和重点工程，积极申报并认定企业技术研究中心、工程研究中心或技术创新平台，通过研发合作加速推进生物天然气技术创新。政府需加强对技术研发和工程示范的支持力度。

以试点示范探索产业商业化发展之路，完善政策支持体系。建议在国家规划指导下，鼓励全国资源条件和产业化发展基础较好的省、市、区建立生物天然气产业示范区，分批次建设规模化试点项目，引进人才、技术和资本。鼓励有实力的企业提出自身发展目标和制定发展战略，支持企业先行先试，逐步积累设计、建设、运行经验。探索可持续运营的商业模式，在前端建立生物天然气原料收储运体系，按“谁排污、谁付费”原则明确废弃物收运处置费用；在后端拓展生物天然气多元化应用领域，推进供气、供热、供冷、供电等集成一体化经营，依托大型种植和养殖基地，发展“能源—农业—生态环保”的循环经济模式。在试点示范的经验基础上，建立完善通用的生物天然气产品与副产品标准、认证和监测体系，研究出台生物天然气项目管理办法，健全支持生物天然气产业化发展的政策体系。

完善顶层设计，加强规划指导。生物天然气产业链长，涉及部门和相关方较多，需要改善“九龙治水”的管理方式。国家层面应建立包括能源、农业、科技、环保等相关部门在内的产业化发展跨部门协调机构，负责研究制定生物质能产业化发展指导意见、战略规划和配套支持政策，统筹协调产业化发展，审议重大行动方案，整合现有资金、技术和人才等各种要素和资源。在国家 and 地方层面制定和完善生物天然气发展战略规划，加强生物天然气发展规划与可再生能源、生物质能和天然气发展规划的衔接，统筹生物天然气发展与乡村振兴战略。

建立后端产品消费的约束和激励机制，打破产品消纳壁垒。需通过多样化措施，确保生物天然气和副产品进入市场并消纳利用。对于生物天然气并入管网、进加气站以及点对点销售等下游消纳模式，应打破并网标准、城市燃气特许经营等方面的壁垒，通过保障性收购或绿色燃气配额等措施，为生物天然气的消纳提供政策保障。积极推动生物天然气通过开发温室气体自愿减排项目参与碳市场交易、进行绿色认证等多途径进行绿色价值的市场变现。对于有机肥、粗油脂等副产品的消费，应完善相关市场标准，拓宽市场渠道，提升市场认可度。

引资金活水，助推生物天然气产业化发展。以投融资作为产业成长发展的重要支柱，政策上引导气候投融资支持生物天然气示范项目和产业集群建设，完善气候投融资标准，创新融资产品和机制。发挥财政资金对绿色低碳产业的支持引导作用，鼓励政策性银行、政府产业投资基金等公共部门投资者提供低成本长期融资，有效调

动大规模社会资本以市场化方式支持生物天然气产业化发展。

调动各方积极性，打造利于产业化发展的社会氛围。充分调动地方政府、科研院所、企业、金融机构等主体积极性，提升各方对生物质能促进城乡可持续发展重要意义的认识，推动各方共同推进生物天然气产业化发展。鼓励能源企业和金融投资机构基于自身可持续发展战略，积极布局生物天然气项目，主动对接资源、寻求合作机会，成为市场“先行者”。鼓励各方利用媒体，在国内外广泛传播推广生物天然气项目发展的好经验、好做法，打破信息壁垒，形成示范效应。通过各方积极行动，逐步打造利于生物天然气产业化发展的良好社会氛围和营商环境，共同助力碳中和目标实现。

加强生物天然气产业国际合作，加速国内和国际能源转型和气候行动。立足国内生物天然气产业化发展需求，将“引进来”和“走出去”相结合，加强技术、投融资、政策、标准等方面的国际合作。通过国际技术研发创新和投融资合作，促进全球范围内生物天然气技术成本快速下降、项目部署与技术推广。参考欧美各国政策实践和国际先进标准，完善我国生物天然气行业政策标准体系，构建与国际兼容、互认的政策标准体系，推动国内国际能源转型和应对气候变化进程。

参考文献

- [1] IEA (2020). Outlook for biogas and biomethane.
- [2] 农民日报(2021). 碳中和征程起始之年，农村沼气“持续发酵”。https://nyncj.wuhan.gov.cn/xwzx_25/xxlb/202110/t20211022_1817392.html
- [3] 中国沼气学会(2021). 中国沼气行业“双碳”发展报告
- [4] 国家统计局(2022). 中国能源统计年鉴2022
- [5] EDGAR - Emissions Database for Global Atmospheric Research (2022). Global Greenhouse Gas Emissions - EDGAR v7.0. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg70
- [6] 落基山研究所(2023). 乡村碳中和公平转型：现状与展望 暨乡村碳中和发展指数报告
- [7] World Biogas Association (2019). Global Potential of Biogas
- [8] CEDIGAZ (2023). Global Biomethane Market 2023 Assessment – From ambition to action
- [9] 落基山研究所(2019). 中国2050：一个全面实现现代化国家的零碳图景
- [10] European Commission (2022). Commission Staff Working Document – Implementing the REPower EU Action Plan: Investment Needs, Hydrogen Accelerator and Achieving the Bio-methane Targets
- [11] 王小铭, 陈江亮, 谷萌等. “无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状、问题与建议[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(06) : 1-10+15.
- [12] 国家统计局(2022). 中国统计年鉴2022
- [13] 生态环境部(2022). 2021年中国生态环境统计年报

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

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

©2023年12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。