



# 解锁秸秆高价值利用

## 生物燃料与碳移除产业的破局点

2025.11



## 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

## 作者与鸣谢

高敏惠、郝一涵、李婷、汪维、谢璨阳

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](mailto:wwang@rmi.org)

## 引用建议

落基山研究所，解锁秸秆高价值利用：生物燃料与碳移除产业的破局点，2025，  
<https://rmi.org.cn/insights/unlocking-the-high-value-utilization-of-crop-straw-report/>

## 鸣谢

特别感谢落基山研究所**李君、王珮珊、刘琦宇**等同事在报告撰写过程中给予的宝贵建议。  
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。

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| <b>董保成</b> | 农业农村部农业生态与资源保护总站研究员，中国沼气学会秘书长        |
| <b>付晶莹</b> | 中国科学院地理科学与资源研究所研究员、博士生导师             |
| <b>王亚静</b> | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所副研究员              |
| <b>蔡国田</b> | 中国科学院广州能源研究所能源战略与碳资产研究中心主任、研究员、博士生导师 |
| <b>崔学军</b> | 吉林大学化学学院教授、博士生导师                     |

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的观点。



# 目录

|                                |    |                                     |    |
|--------------------------------|----|-------------------------------------|----|
| 前言 .....                       | 5  | 三、市场展望与机遇 .....                     | 23 |
| 一、秸秆可支撑生物燃料与碳移除产业发展 .....      | 6  | 秸秆生物燃料产业化发展需要突破成本瓶颈 .....           | 24 |
| 生物质将在低碳转型中发挥关键作用 .....         | 7  | 机遇 1：健全秸秆收储运体系，降低原料成本 .....         | 25 |
| 秸秆是支撑生物燃料与碳移除产业发展的关键原料 .....   | 9  | 机遇 2：依托风光资源打造“绿氢 + 秸秆”的融合生产模式 ..... | 27 |
| 秸秆生物燃料可助力加快农业农村现代化 .....       | 10 | 机遇 3：拓展副产物市场，释放多元价值 .....           | 29 |
| 秸秆生物燃料的能源价值和减排效果可观 .....       | 11 | 机遇 4：加速开发部署负碳技术，参与碳信用交易 .....       | 30 |
| 二、秸秆资源化利用现状与挑战 .....           | 13 | 四、发展模式与行动建议 .....                   | 35 |
| 我国丰富的秸秆资源可为生物质产业发展提供坚实保障 ..... | 14 | 发展模式：依托资源禀赋，因地制宜发展秸秆生物燃料产业 .....    | 36 |
| 秸秆资源化利用具备政策基础 .....            | 17 | 行动建议：打造多方协同、合力共赢的全产业链合作模式 .....     | 40 |
| 秸秆基生物燃料的技术路径已基本建立 .....        | 19 | 参考文献 .....                          | 42 |
| 秸秆生物燃料的产业规模仍有提升空间 .....        | 21 |                                     |    |





# 前言

秸秆作为生物质资源，对能源转型和实现气候目标具有重要意义。作为可再生资源，生物质具有巨大的能源与环境价值，能够通过生物质能源助力能源转型，并通过生物源碳移除实现稳定的负排放，为净零目标提供重要保障。国际能源署和政府间气候变化专门委员会的研究显示，到 2050 年，全球对生物质能源和碳移除的需求将大幅增加，其中生物质能源需求预计超过 100 EJ<sup>1</sup>，碳移除需求超过 100 亿吨 CO<sub>2</sub><sup>2</sup>。在这一背景下，高效利用农林废弃物等生物质资源，将成为满足可再生能源和负碳需求的关键。着眼我国 2035 年自主贡献目标和“碳中和”气候目标，生物质产业需加快布局燃料生产与负碳技术应用，以满足对清洁可再生能源和负碳效益的持续需求。

作为农业大国，我国每年产生约 8.6 亿吨秸秆，是除能源作物外占比最高的生物质资源。通过高价值利用，秸秆离田不仅可以提供清洁能源，还能在重点行业转型、农村减排和固碳等方面发挥多重作用。例如，通过气化、发酵等技术，秸秆可转化为可持续航空燃料、生物甲醇、生物天然气等高品质能源产品，助力航空、航运、化工等难减排行业深度脱碳；通过热解，秸秆可制备生物炭，用于改善土壤质量、提高作物产量，同时实现二氧化碳长期封存；在稻田系统中，减少秸秆还田能够显著降低甲烷排放。目前，我国秸秆利用仍以还田和饲用为主，其潜在的能源和负碳价值尚未充分释放，在保障粮食安全的基础上，可进一步挖掘其能源供给与碳减排潜力，推动秸秆从“田间废弃物”向“绿色能源与负碳原料”转变。

我国在秸秆综合利用方面已积累了丰富的政策经验和技術基础，但受收储运成本高、产业链尚不成熟等因素影响，秸秆生物燃料的产品经济性有待提升，绿色低碳价值需要进一步体现。为帮助政策制定者、行业企业和投资者更好地评估秸秆回收利用在“碳达峰、碳中和”背景下的发展潜力，促进农村可再生能源产业发展和农业农村减排固碳，落基山研究所对我国秸秆高价值利用现状、能源化利用和碳移除的潜力与经济性进行了分析，并对产业发展模式进行了展望，同时提出了下一步行动建议，以期为市场参与者和政策制定者提供参考。





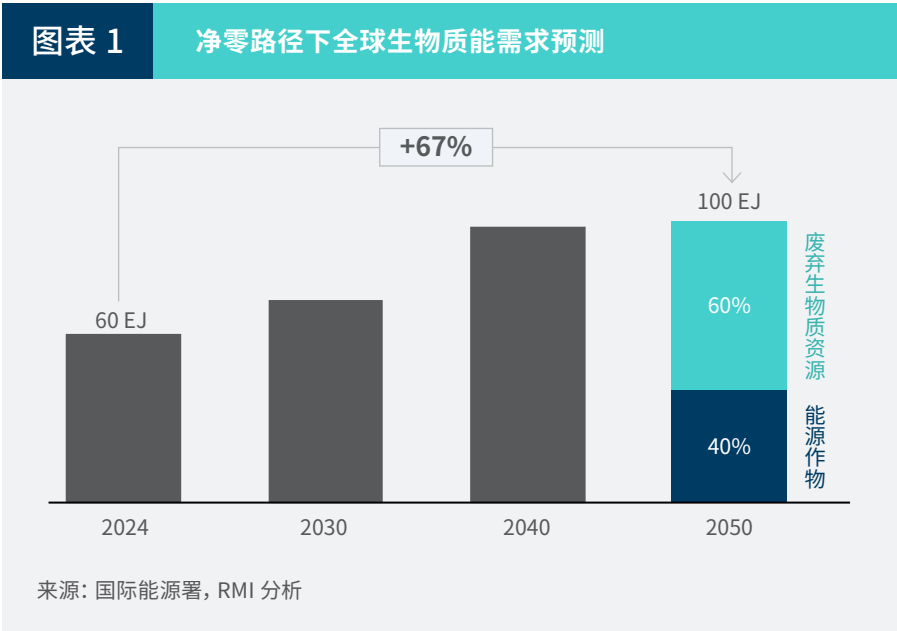
# 一、秸秆可支撑生物燃料与碳移除产业发展

---

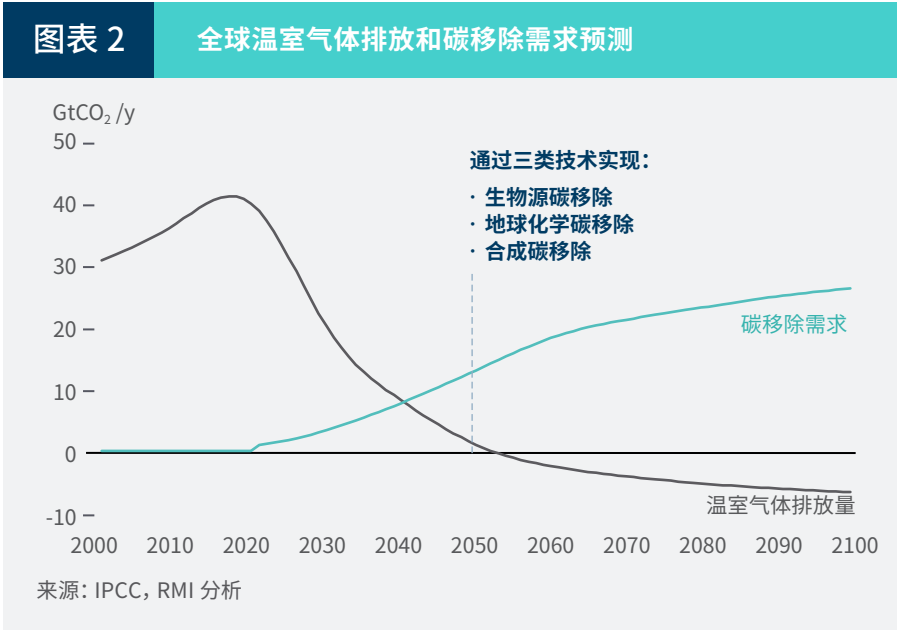




生物质将在低碳转型中发挥关键作用



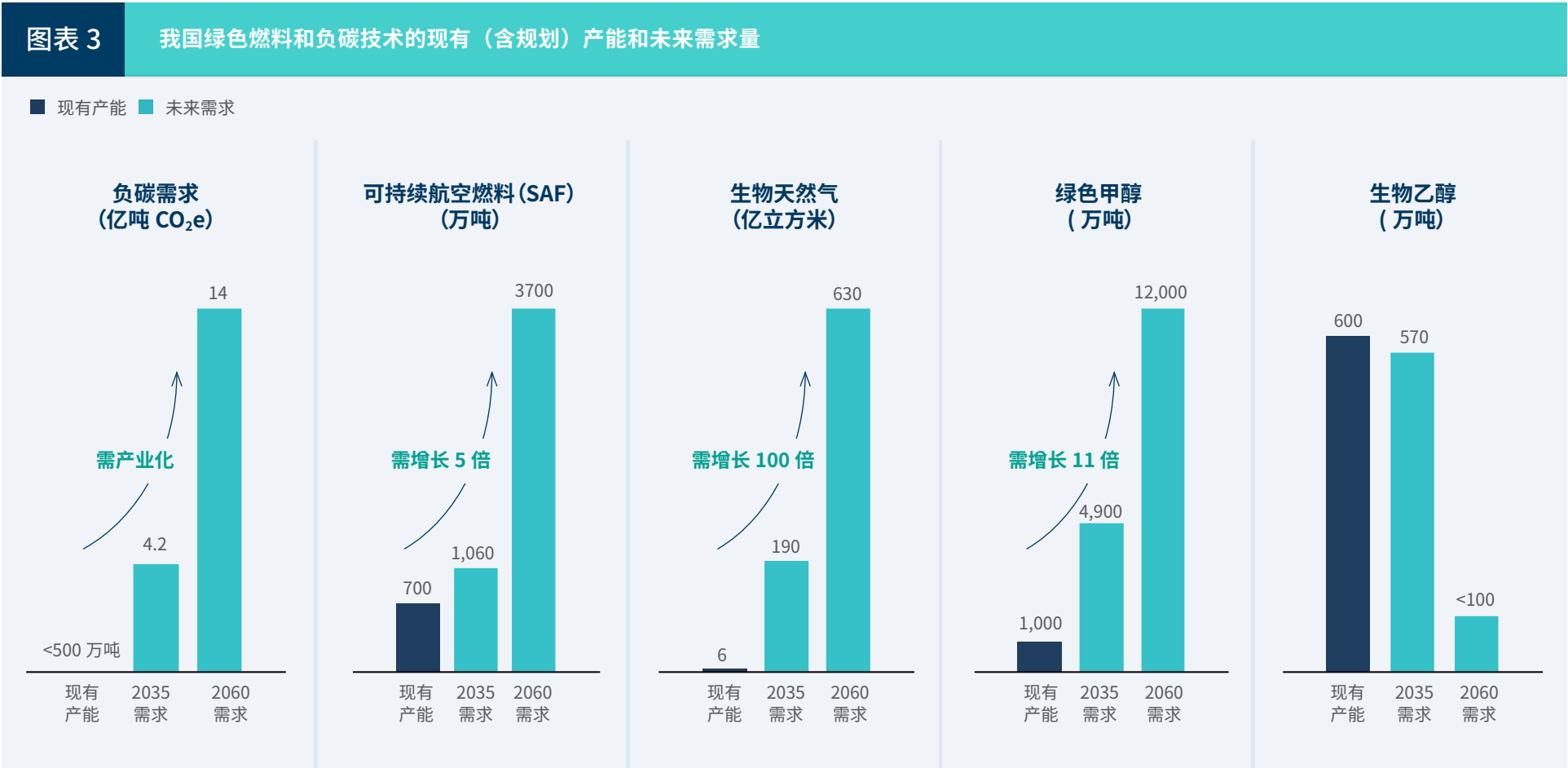
生物质的燃料化利用有助于支撑能源系统转型。以农林废弃物为主要原料的生物质能源，具有可再生、低碳和环境友好的特性，能够有效替代化石燃料减少碳排放。例如，使用生物燃油替代传统化石燃油是降低交通运输领域温室气体排放最直接和有效的手段之一，生物天然气也可以作为绿色能源，减少传统天然气的生产和消费。未来全球对于生物质能的需求将持续提升，根据国际能源署净零路径的预测，到 2050 年生物质能源需求将超过 100EJ，其中 40% 由能源作物提供，剩余 60% 则需要依靠秸秆、畜禽粪便、枯枝落叶等农林废弃物资源，生物燃料将逐渐成为推动能源转型的关键力量之一。



生物质是开发负碳技术的关键原料。碳移除（Carbon Dioxide Removal, CDR）是通过人为活动移除大气中的二氧化碳并将其长期储存的过程<sup>3</sup>，作为关键的减缓措施，碳移除可以用于补偿脱碳困难或成本高昂部门的剩余排放，与其他减排措施协同促进气候目标的实现<sup>4</sup>。未来，全球对于碳移除的需求将不断提升，IPCC 第六次评估报告显示，在 1.5°C 目标情景下，2030 年全球碳移除的需求约为 2.43Gt CO<sub>2</sub>，到 2050 年将增加至 10.8Gt CO<sub>2</sub><sup>5</sup>，其中超过一半需要通过生物源碳移除（Biogenic CDR，简称 bCDR）实现。生物源碳移除是当前技术体系中相对成熟、成本可控的主要路径之一<sup>6</sup>，主要利用生物固碳机制从大气中捕获二氧化碳，包括生物能源与二氧化碳捕获与封存（BECCS）、生物炭碳移除、增加森林、农业草原和湿地等生物量等方式。上述技术的推广与应用不仅依赖于大量稳定、可持续的生物质资源供应，也需要与生物质能生产深度耦合，从而实现碳移除与清洁能源利用的协同增效。



着眼我国2035年国家自主贡献目标和“碳中和”气候目标，生物质产业需要加速布局燃料生产、实施负碳技术，以应对我国对于清洁可再生能源与负碳效益的大量需求。未来，我国对负碳技术的需求将持续增加，可持续航空燃料、绿色甲醇、生物天然气等生物燃料的消费需求将显著增长，生物质在转型背景下的重要性将进一步凸显。



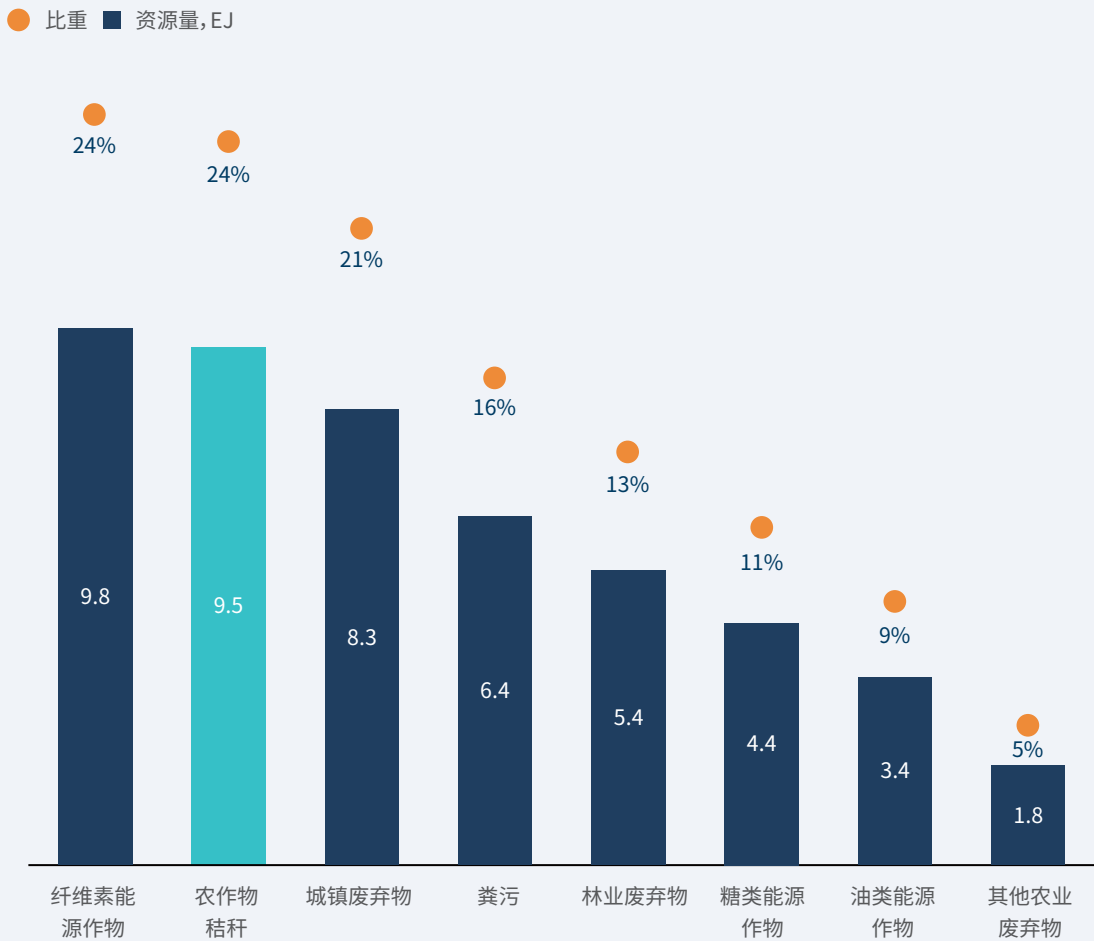
# 秸秆是支撑生物燃料与碳移除产业发展的关键原料

秸秆是我国占比最高的生物质资源之一，对促进资源高效利用、改善环境质量具有重要意义。秸秆是农作物在收获籽实后的剩余地上部分，属于农业生产系统中的废弃物。我国作为农业大国，每年产生的秸秆资源量高达 8.6 亿吨，能源潜力高达 9.5EJ，在生物质资源能源总量中占比 24%，是产量最大的农林废弃物资源。秸秆经回收后，可以通过技术手段生产生物燃料或固定二氧化碳，是支撑生物质能与碳移除产业发展的关键原材料之一，其具体用途包括：

- 制备生物燃料：秸秆可以作为原料生产生物质能源，如生物天然气、生物甲醇、生物乙醇、可持续航空燃料、生物固体燃料等等，可助力能源、交通、工业、建筑等多领域的降碳减排。
- 实现碳移除：秸秆基能源的生产和使用过程可以结合二氧化碳捕获与封存，开发 BECCS；秸秆在缺氧环境下进行热解还可以制备生物炭，通过作为肥料还田增加作物产量等方式实现碳固定<sup>1</sup>，具备极佳的负碳潜力。

<sup>1</sup> 生物炭是一种类似焦炭的物质，通过生物质在缺氧或厌氧的环境中热解获得。生物炭中易氧化态碳的比例很低，芳香碳的比例较高，不容易被分解，因此作为土壤添加剂施用于农田中具有较好的固碳效益，与此同时还能够增加土壤有机碳含量和作物产量。

图表 4 我国可收集生物质资源量及其构成

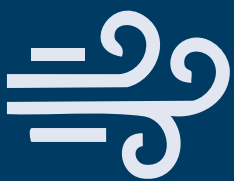


来源: Wang et al., 2023, RMI 分析



# 秸秆生物燃料可助力加快农业农村现代化

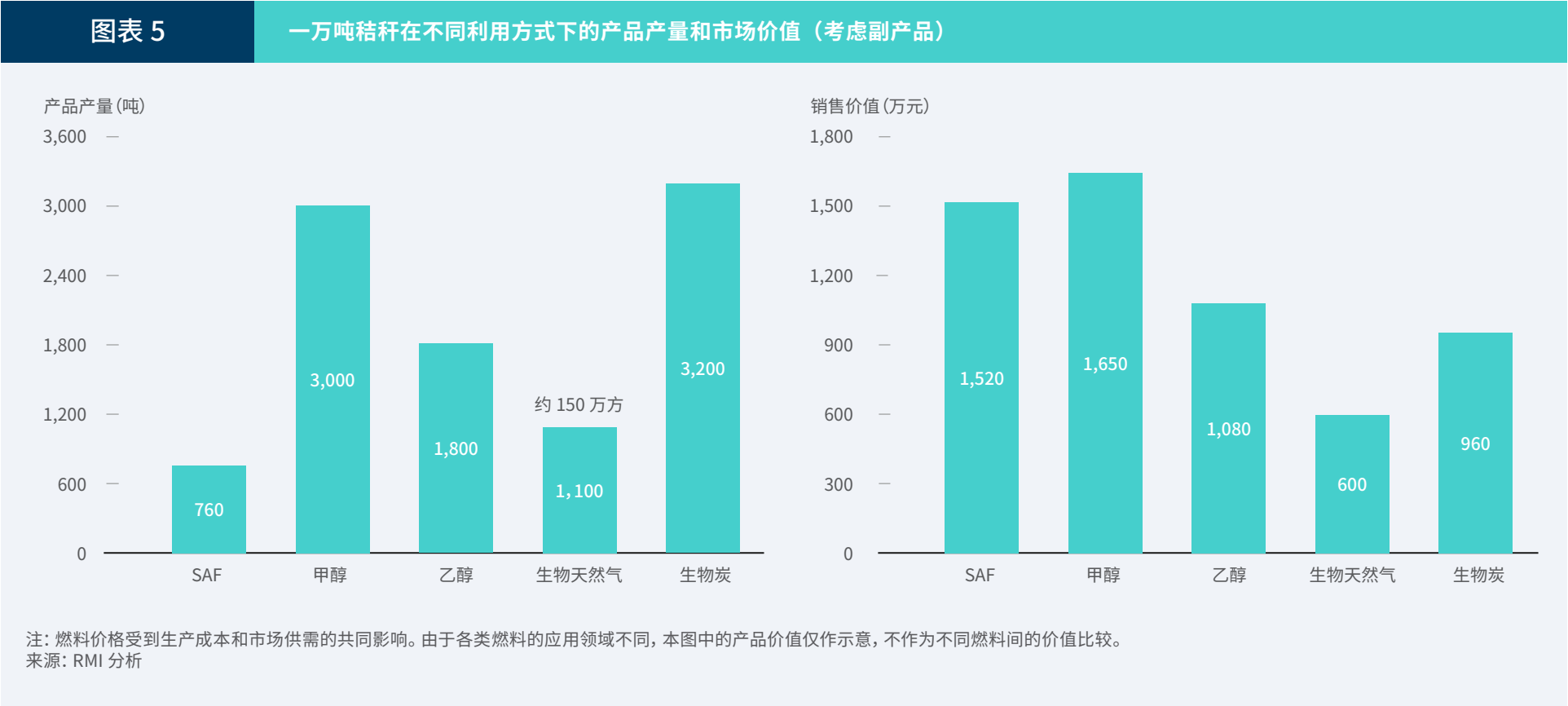
除助力能源转型和实现负排放外，采用秸秆作为原料生产燃料和生物炭对农业农村也具有十分积极的影响，体现在如下方面：

|                                                                                    |                                                                                                |                                                                                      |                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>巩固粮食安全</b><br>秸秆生产能源的过程中可以得到副产物有机肥，可代替化肥增加粮食产量。同时，生物炭作为肥料还田的增产效果约为 5%–10%，生物燃料副产品有机肥可以代替化肥。 |   | <b>推动农村一二三产业融合发展</b><br>将粮食种植产生的秸秆等农业废弃物转化为生物燃料的原材料，通过配套的流通与销售体系，为能源产业提供供给，打通从农田到工厂的产业链，实现变废为宝。                       |
|   | <b>助力农村能源转型</b><br>发展秸秆基生物质能源，能够代替农村散煤和秸秆焚烧，减少化石能源消费，增加农村地区可再生能源的可获得性。                         |   | <b>促进农业减排</b><br>避免秸秆田间焚烧温室气体排放，减少水稻秸秆还田导致的水稻甲烷排放。生物炭作为饲料添加剂，有潜力减少牛羊等反刍动物肠道发酵的甲烷排放。秸秆与畜禽粪污混合生产沼气和生物天然气，能够减少畜禽粪污的甲烷排放。 |
|  | <b>提高空气质量</b><br>避免秸秆焚烧产生的二氧化硫等空气污染物，提高环境质量并保护人体健康。                                            |  | <b>保护农田生态</b><br>避免由焚烧产生的土壤水分损失约60%，防止产生耕地土壤板结，增加土壤碳储量。                                                               |

秸秆可为农业发展开辟新路径，拓展产业发展空间，并助力绿色附加值提升

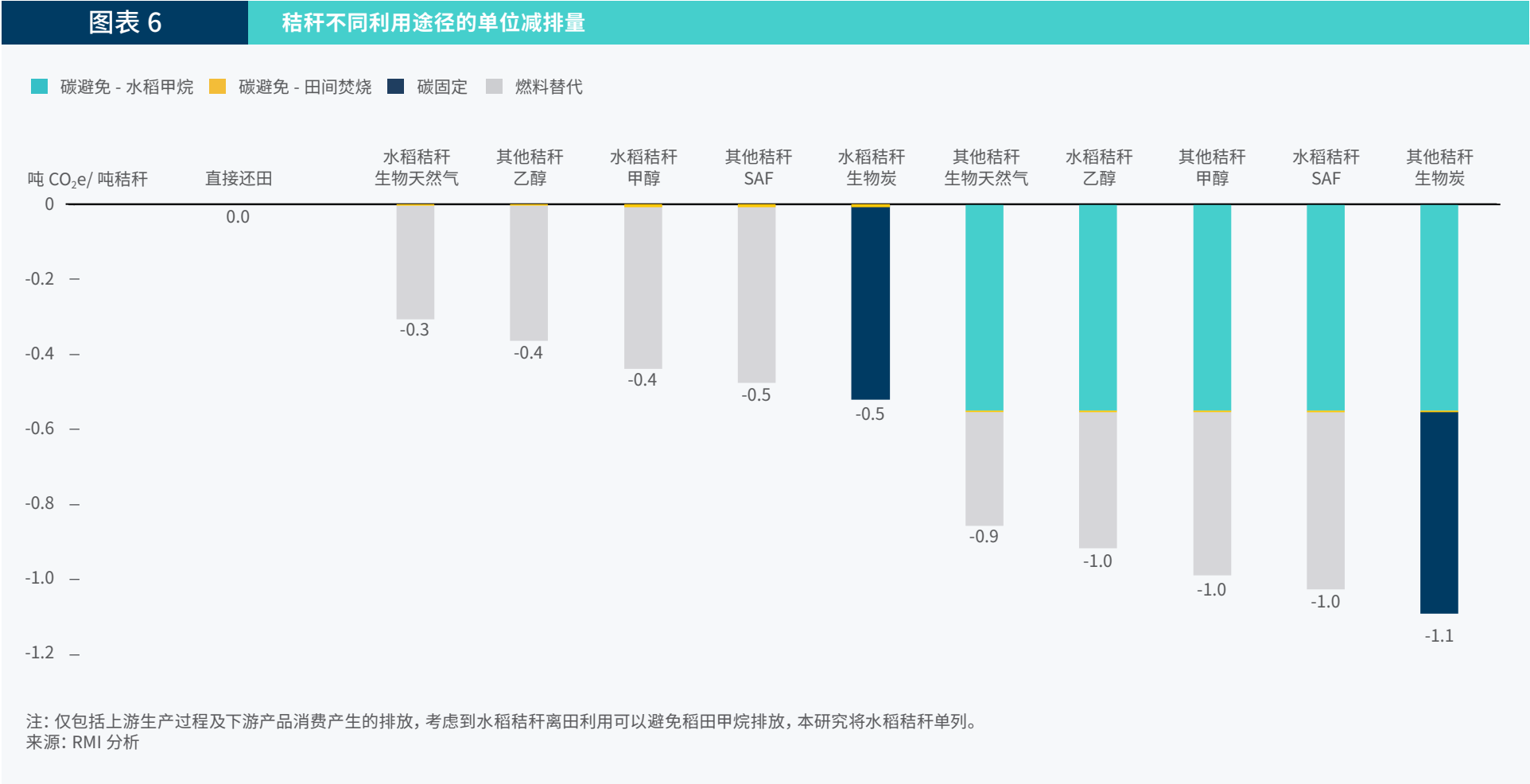
# 秸秆生物燃料的能源价值和减排效果可观

将秸秆用于生产生物燃料和生物炭等方式能够产生能源价值。秸秆直接还田操作不规范可能会存在烧苗、病虫害等风险，威胁粮食安全。而将一部分秸秆离田生产能源，不但可通过出售秸秆使农户获得收益，还可生产能源产品，例如 SAF、甲醇、生物炭等，对促进能源转型具有积极意义。若将 1 万吨秸秆进行离田能源化利用，通过不同技术手段可分别制备 760 吨 SAF、3000 吨甲醇、1800 吨乙醇、150 万方生物天然气，以及 3200 吨生物炭，能源产品及其副产品销售价值大约在 600~2000 万元之间。





与秸秆直接还田相比，秸秆生物燃料和生物炭更有助于减少温室气体排放。主要体现在四个方面：1) 秸秆生物燃料替代化石燃料消费的减排效果，每使用 1 吨秸秆生产的生物燃料，可避免消费化石能源产生的 0.3-0.5 吨 CO<sub>2</sub> 排放。2) 秸秆生产的生物炭作为肥料还田产生的碳固定效果，约为 0.5 吨 CO<sub>2</sub>e/ 吨秸秆。3) 避免水稻秸秆还田导致的甲烷排放约为 0.5 吨 CO<sub>2</sub>e/ 吨秸秆。4) 避免秸秆田间焚烧的减排效果。



## 二、秸秆资源化利用现状与挑战

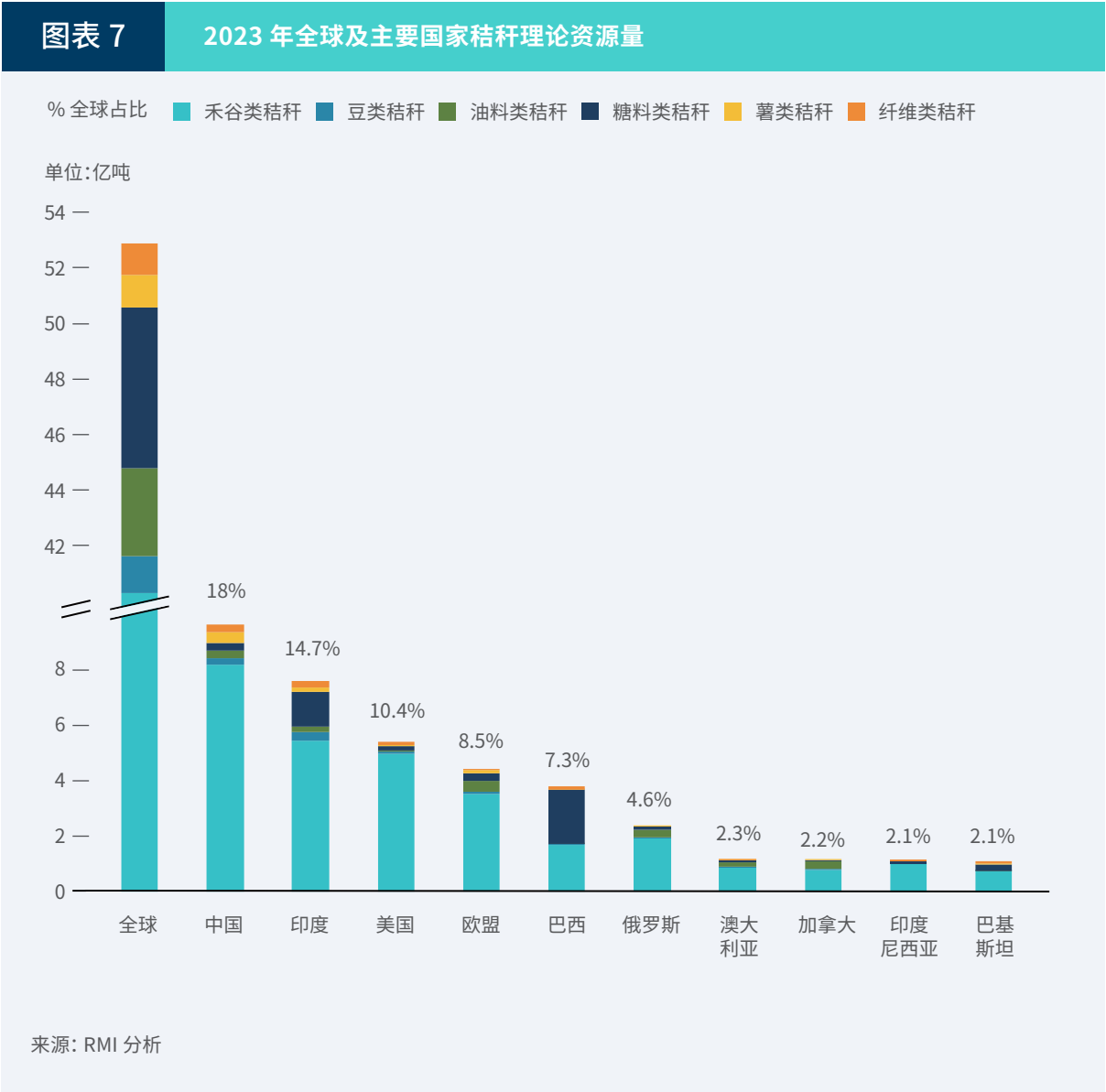




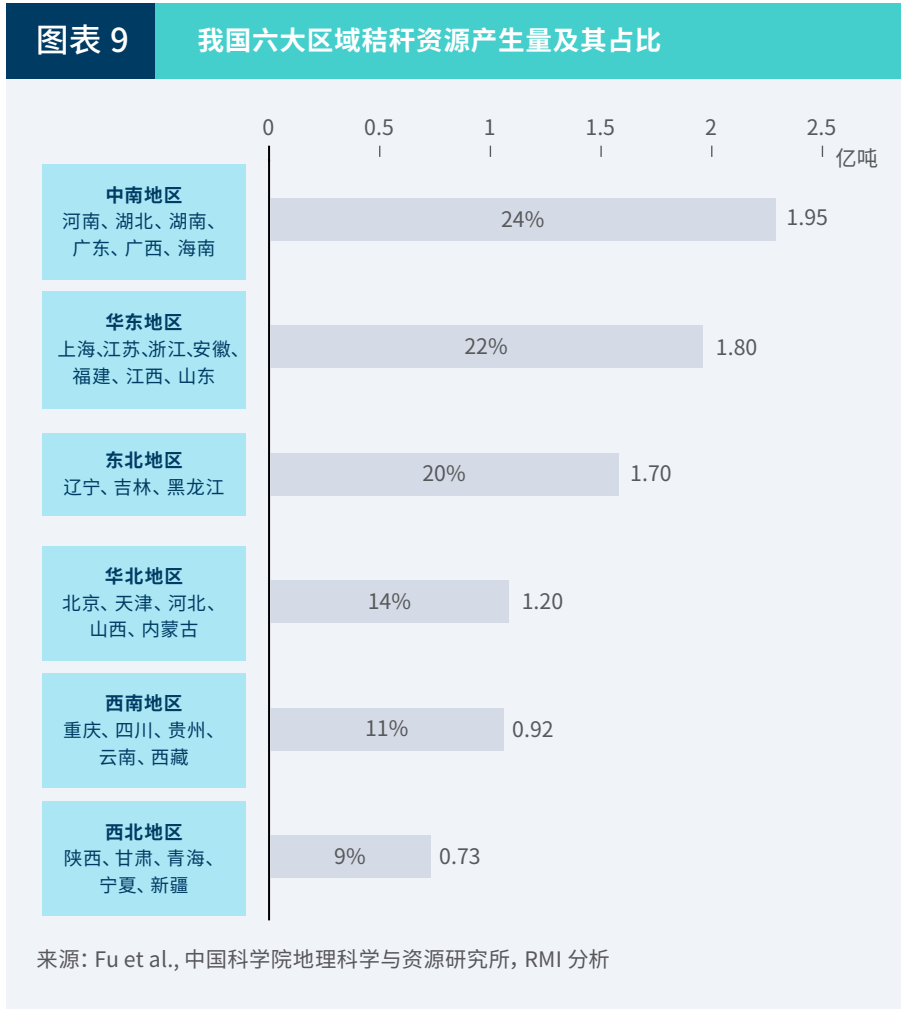
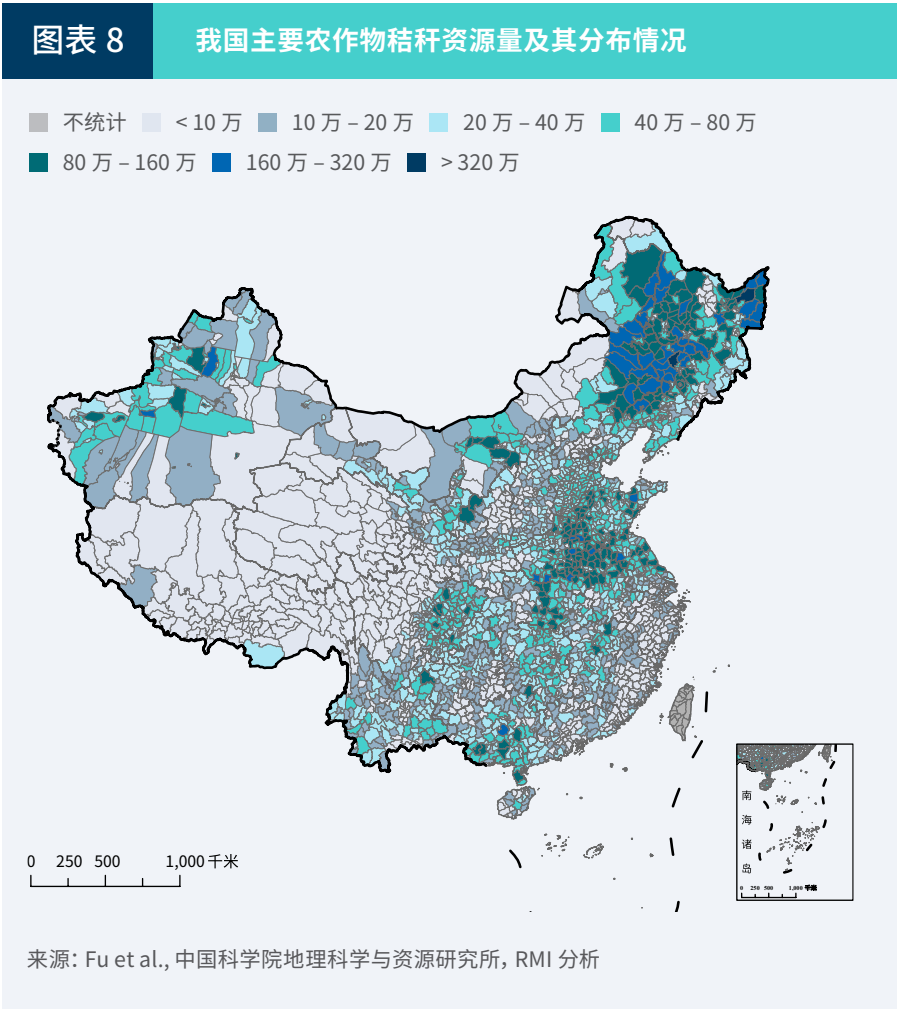
我国丰富的秸秆资源可为生物质产业发展提供坚实保障

我国是世界上农业生产规模最大的国家之一，粮食作物种类丰富、分布广泛，生产能力稳步提升。我国拥有庞大的农业生产体系和丰富的粮食作物种植基础，截至 2024 年底，全国耕地面积约 19.4 亿亩。部分农业大省（区），如黑龙江、内蒙古、河南、吉林、新疆等耕地面积均超过 1 亿亩<sup>7</sup>。近年来，我国加快建设农业强国，坚持夯实“三农”压舱石，持续增强粮食等重要农产品稳产保供能力，农作物生产持续向好，实现全球领先。2024 年，我国粮食总产量超过 7 亿吨，其中小麦、玉米、稻谷产量分别达到 1.4 亿吨、2.9 亿吨和 2.1 亿吨<sup>8</sup>，未来将维持稳中有增的生产趋势。

我国是秸秆资源量最为丰富的国家。2023 年全球秸秆理论资源量接近 53 亿吨，其中我国每年可产生约 8.6 亿吨，占比超过 18%，居世界首位。考虑到各类农作物的收割方式、留茬高度，以及在秸秆收集过程中产生的各类损耗后，我国实际可收集利用的秸秆资源（即可收集量）约为 7.7 亿吨。如此丰富的资源禀赋为我国以秸秆为原料发展生物质产业提供了坚实的物质基础与资源保障。

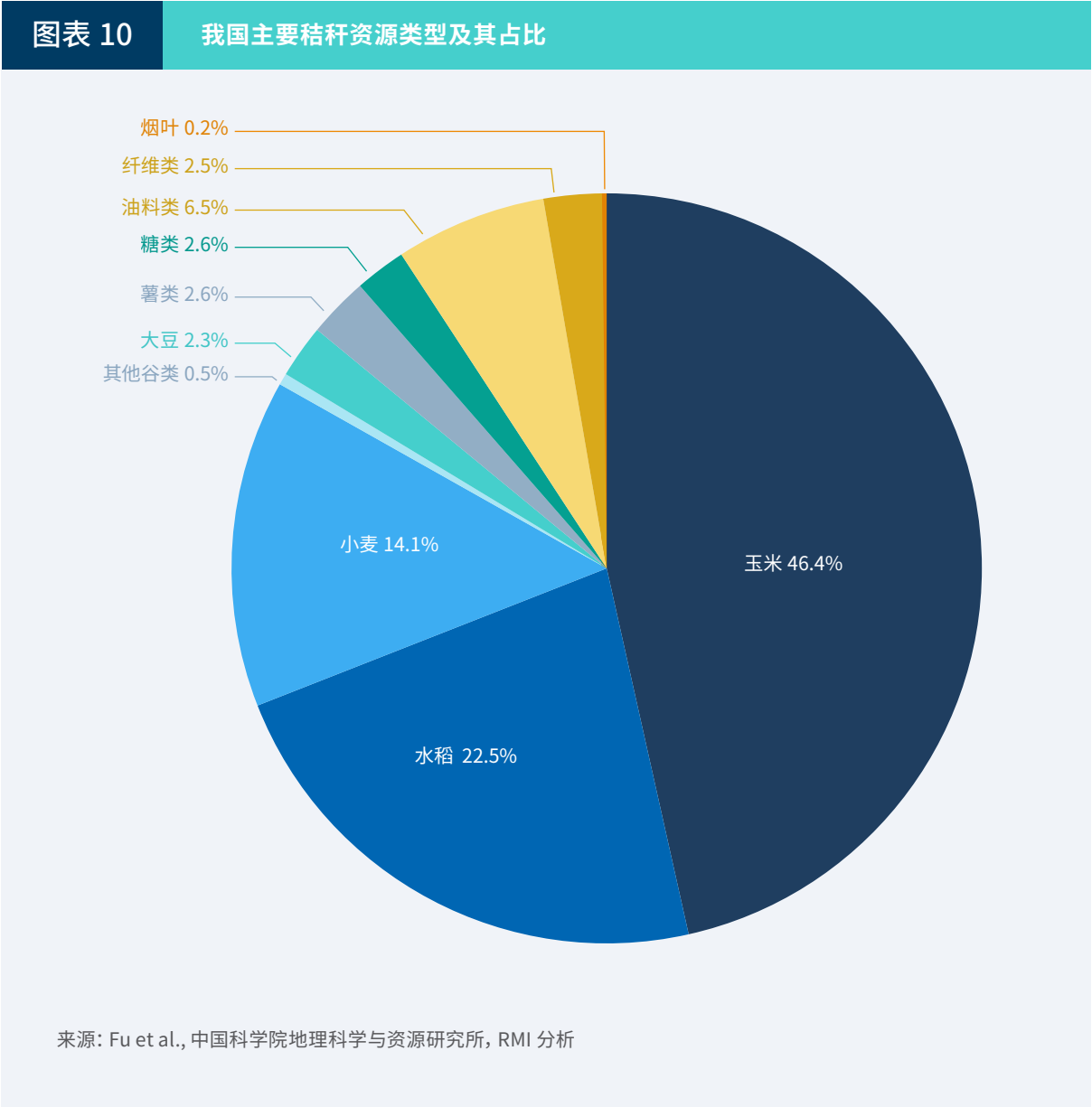


从地理分布来看，我国的秸秆资源与主要农业产区及粮食生产重心分布保持一致。我国 13 个粮食主产省份（辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古、河北、河南、湖北、湖南、山东、江苏、安徽、江西和四川） 合计秸秆理论资源量约 6.3 亿吨，占全国总量的 73%。





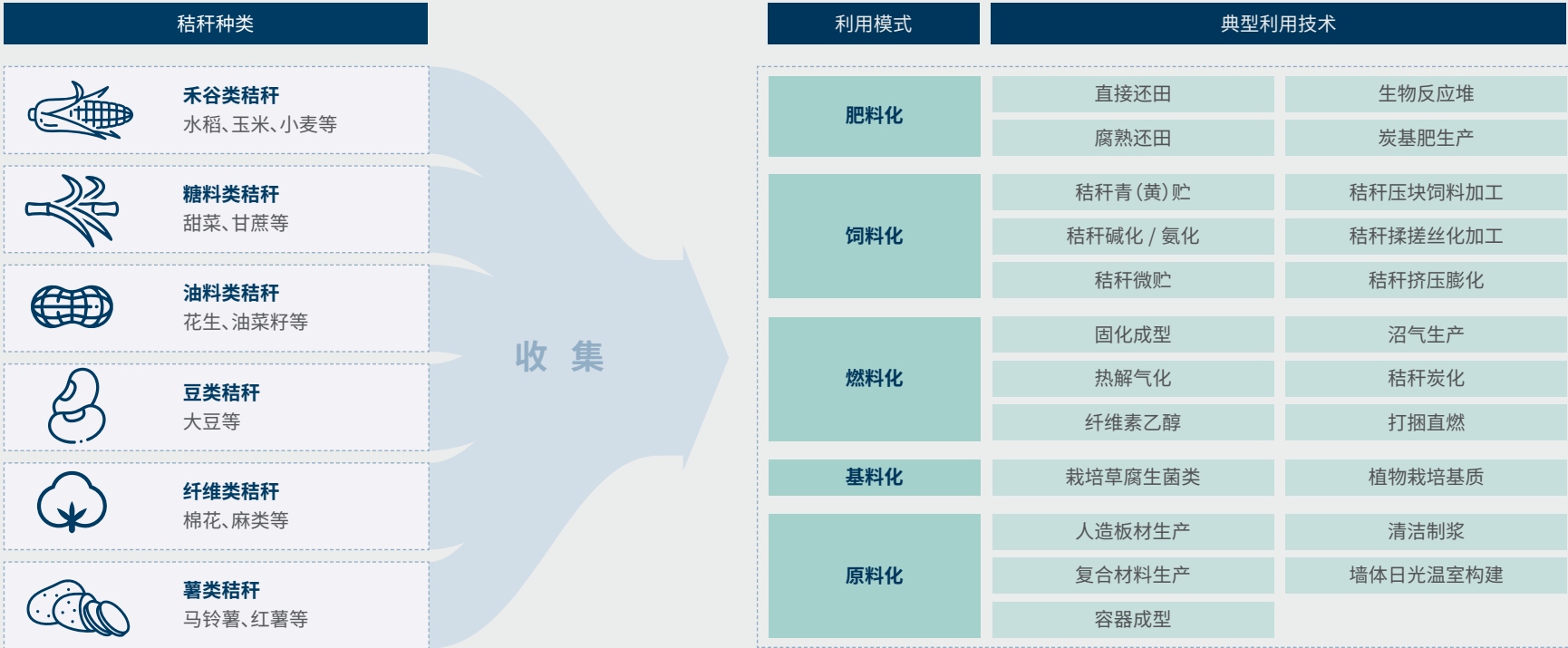
我国秸秆资源主要来自于种植面积最广、产量最大的禾谷类作物。从秸秆的来源来看，我国的秸秆主要来自六大类农作物：禾谷类作物（小麦、玉米、水稻等）、豆类作物（大豆等）、油料类作物（花生、油菜籽等）、糖料类作物（甜菜、甘蔗等）、薯类作物（马铃薯、红薯等），以及纤维类作物（棉、麻等），其中禾谷类秸秆占比最高。我国禾谷类秸秆资源量约为 7.2 亿吨 / 年，占全国秸秆总资源量的 80% 以上，其中水稻秸秆 1.9 亿吨 / 年，小麦秸秆 1.2 亿吨 / 年，玉米秸秆 4 亿吨 / 年，豆类秸秆和油料类秸秆的产量也较为可观。



秸秆资源化利用具备政策基础

我国十分重视秸秆资源回收利用，近 20 年来从政策目标、市场激励、税收等方面多措并举，并取得积极成效。在政策方面，我国积极制定秸秆综合利用国家战略，推动形成布局合理、多元利用的秸秆综合利用产业化格局。2008 年，国务院办公厅发布《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》（国办发〔2008〕105 号），提出了秸秆“五料化”利用途径，即肥料化利用、饲料化利用、燃料化利用、原料化利用，以及基料化利用，同时制定了“因地制宜、分类指导、多元利用”的指导原则。

图表 11 我国秸秆“五料化”利用模式及典型利用技术



来源：农业农村部<sup>9</sup>，RMI 整理

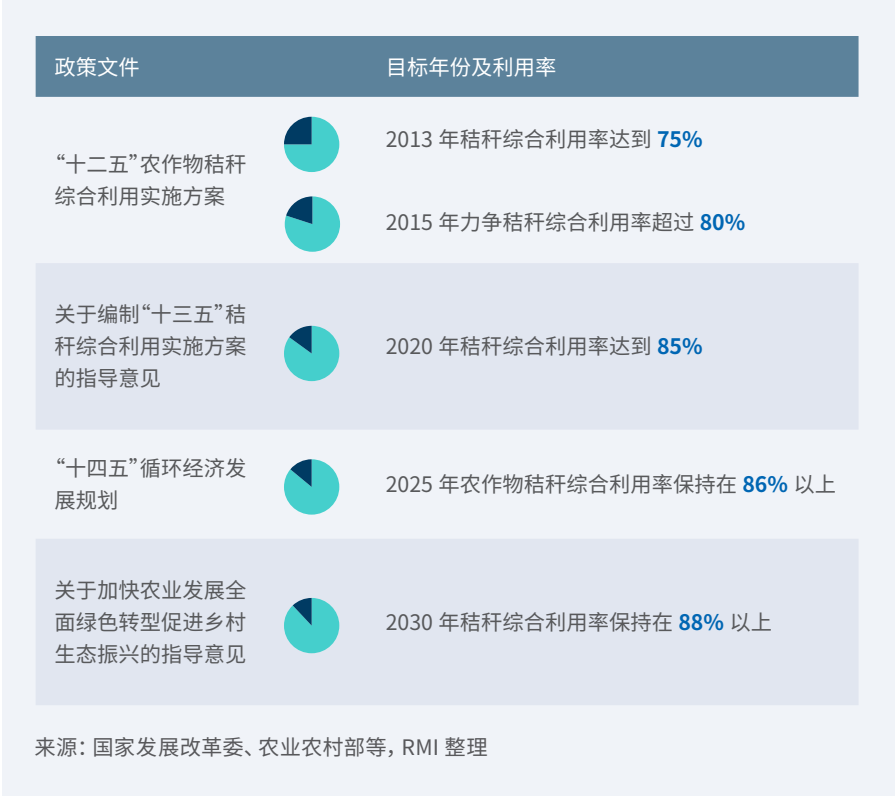
**设定秸秆综合利用目标。**2012 年，为加快农业循环经济和新兴产业发展，改善农村居民生产生活条件，我国国家发展改革委制定并发布《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》，在全国层面提出“到 2013 年秸秆综合利用率达到 75%，到 2015 年力争秸秆综合利用率超过 80%”的总体量化目标。后续，我国陆续发布多份政策文件，逐步将秸秆综合利用目标提升至 88%<sup>10</sup>，为秸秆资源的高效利用和产业化发展奠定了坚实基础。

**各省制定工作方案，因地制宜开展秸秆综合利用。**在国家层面政策措施的基础上，我国各省也积极响应国家号召，根据自身条件编制并发布了适用于本省的秸秆综合利用方案，并制定了省级秸秆综合利用目标及配套措施。例如，内蒙古自治区发布的《内蒙古自治区“十三五”秸秆综合利用实施方案》中提出：到 2020 年，全区秸秆有效

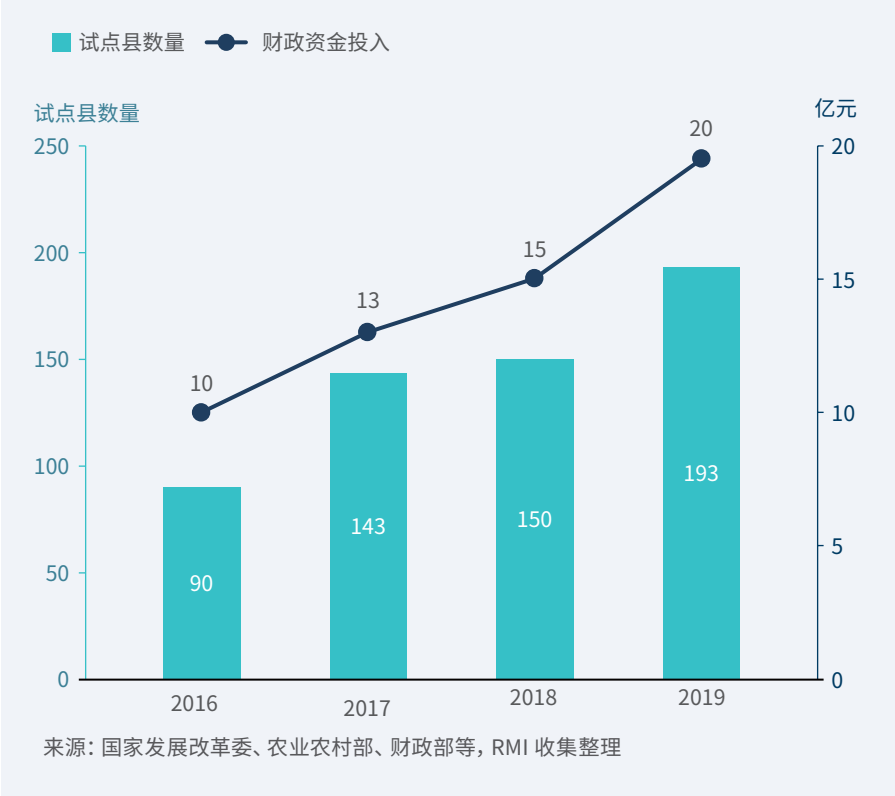
利用资源量超过 3000 万吨，秸秆有效利用率超过 85%，其中秸秆燃料化利用量达到 990 万吨，建设基地、企业和项目数量超过 115 个。

**强化科技支撑，支持试点示范。**2016 年，我国农业农村部会同财政部安排中央财政资金 10 亿元，选择秸秆资源量大、焚烧问题突出的 10 个省（区），共计 90 个县开展秸秆综合利用试点工作。2016 至 2019 年期间，我国累计安排中央资金近 60 亿元，支持 576 个县次推进秸秆综合利用试点工作。除了上述政策措施外，我国还积极实施价格政策、补贴政策与税收优惠，为秸秆回收利用项目增加收入，例如我国发布的秸秆发电标杆上网电价、秸秆利用设备补贴，以及沼气、秸秆压块燃料等秸秆产品和劳务增值优惠等等。

图表 12 我国“十二五”时期以来秸秆综合利用目标



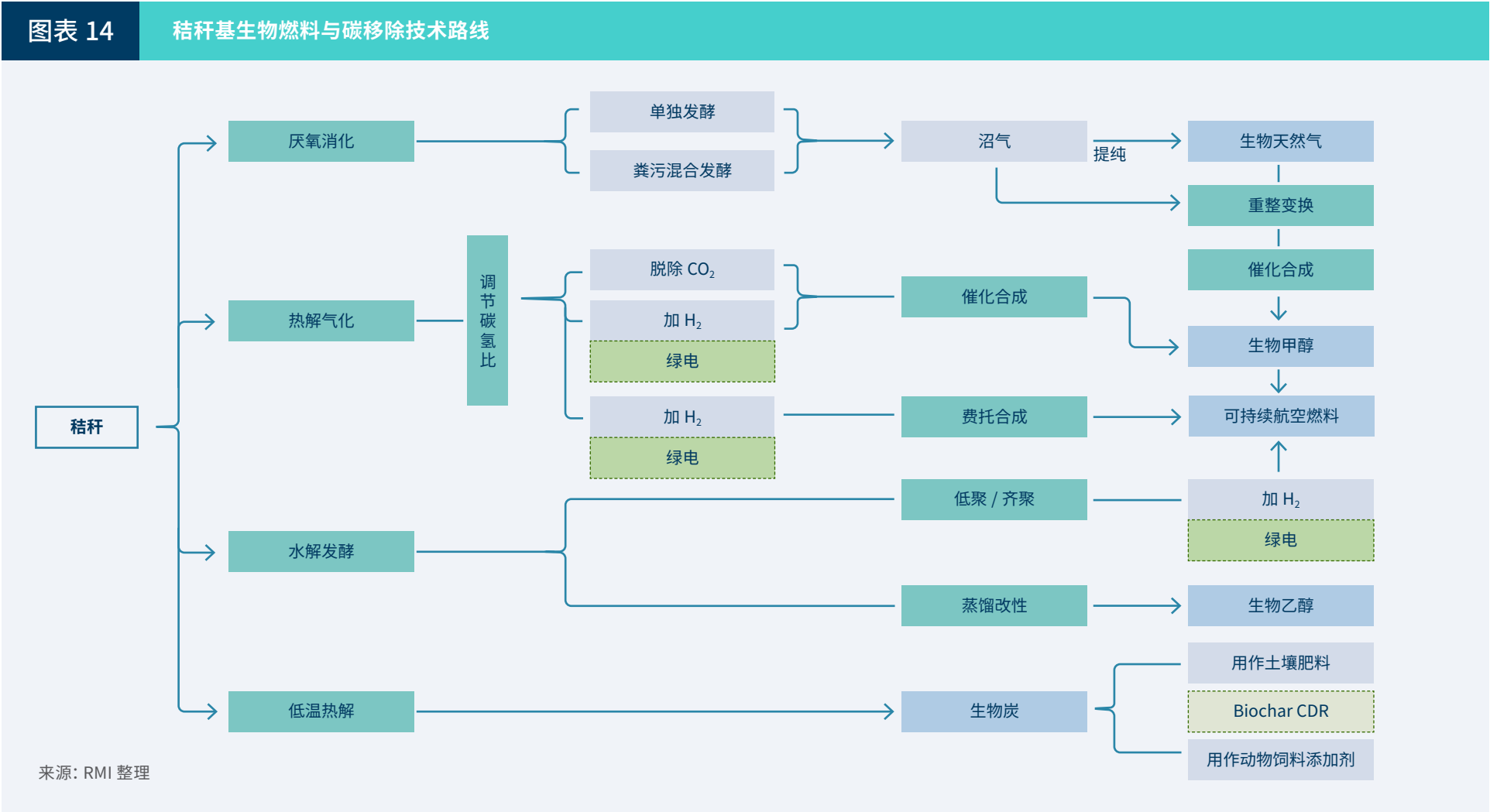
图表 13 中央资金支持秸秆综合利用试点情况





秸秆基生物燃料的技术路径已基本建立

在能源转型背景下，我国可再生能源产业快速发展，农林废弃物等非粮生物质的的重要性日益凸显。在国家秸秆综合利用政策目标和市场激励措施的持续引导下，我国秸秆回收利用技术不断进步。以秸秆为主要原料的生物液体燃料、沼气及生物天然气等技术路径逐步发展，并形成了初步的产业体系。



以秸秆为主要原料生产生物燃料，主要有四种产品，分别是生物天然气、生物甲醇、生物乙醇和可持续航空燃料（SAF）。

- **生物天然气：** 秸秆在厌氧条件下通过微生物发酵分解有机物，产生沼气（主要成分为甲烷和二氧化碳）和副产品有机肥。可采用纯秸秆单独发酵，或者与畜禽粪污混合后发酵。沼气后续进行提纯，即可形成与天然气物化特征相同的生物天然气，用于替代传统的天然气和 LNG 消费。
- **生物甲醇：** 秸秆经高温热解气化后产生富含一氧化碳、二氧化碳和氢气的合成气，后续通过将混合气体调节到合适的碳氢比，在催化剂的作用下合成为甲醇。除上述路径外，秸秆制沼气也可以进行重整变换，并催化合成为生物甲醇。
- **生物乙醇：** 秸秆在无机酸或纤维素酶的作用下进行发酵，产生富含乙醇的液体和高纯度二氧化碳，液体进行蒸馏改性后形成生物乙醇，并产生木质素等副产物。
- **可持续航空燃料（SAF）：** 与秸秆有关的 SAF 生产路径有三类，目前技术成熟度最高的是热解气化 - 费托合成路径，秸秆经气化后转化为合成气，后续添加氢气，并通过费托合成催化反应生产液体燃料，制备 SAF。除了上述路径外，秸秆基乙醇和甲醇也可以通过醇喷合成催化工艺（Alcohol to Jet, AtJ 以及 Methanol to Jet, MtJ 技术）生产 SAF。

秸秆还可以用于发展生物源碳移除，主要有两类路径可以实现。

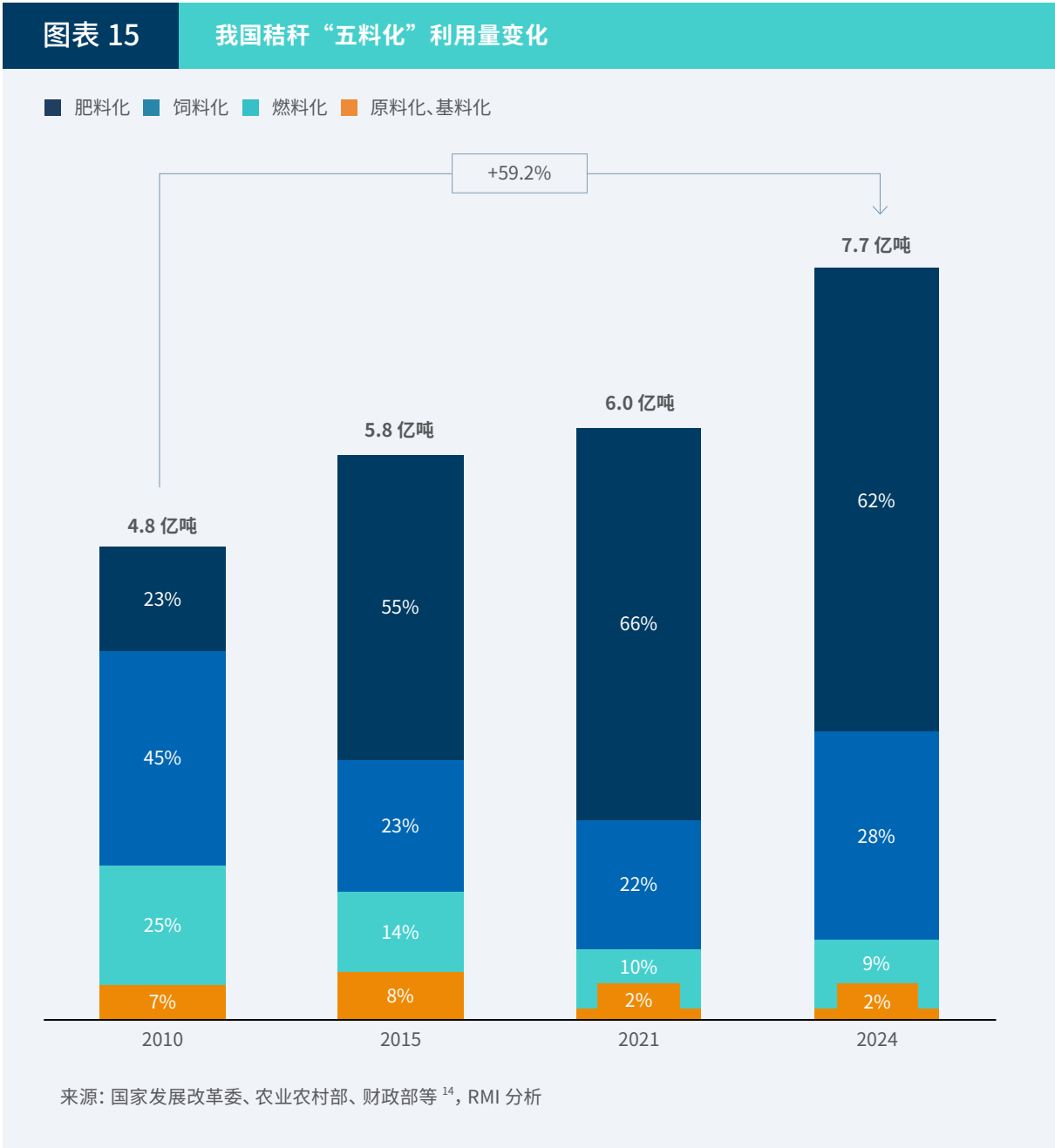
- **生物燃料与碳捕集和封存（BECCS）：** 部分秸秆燃料的生产和燃烧过程中会产生二氧化碳，例如生物天然气、甲醇和乙醇的生产，秸秆直燃发电等等。如果能够对上述路径的二氧化碳气体进行捕集和封存，能够在生产绿色能源的基础上叠加负碳效益。
- **生物炭碳移除（Biochar CDR）：** 秸秆在缺氧或厌氧条件下进行低温氧化形成生物炭，在此过程中实现碳的固定。生物炭可以作为常规燃料进行燃烧供热，也可作为土壤肥料还田，若将其还田，能够确保大部分固定下来的碳被封存从而实现碳移除，同时生物炭还田还可增加农作物产量，是秸秆直接还田的有效替代措施之一。



秸秆生物燃料的产业规模仍有提升空间

现有政策措施成功推动了我国秸秆综合利用量的稳步提升。根据农业部数据显示，2010 年至 2024 年，我国秸秆综合利用量从 4.8 亿吨逐步增加至 7.7 亿吨，增幅达 60%，综合利用率由 70.6% 上升至 88.5%<sup>11,12,13</sup>。

秸秆的还田和饲用是主流的利用方式，生态价值凸显，但燃料化利用量有待提升。根据 RMI 分析，2024 年秸秆利用量为 7.7 亿吨，其中肥料化利用的占比约为 62%，饲料化利用的占比约为 28%，两者累计贡献了秸秆利用总量的 90%。与农用相比，秸秆的燃料化利用发展则较为缓慢。2010 年我国燃料化秸秆使用量约为 1.22 亿吨，2024 年则下降至 6900 万吨，利用占比也从 25% 下降到了 9%。

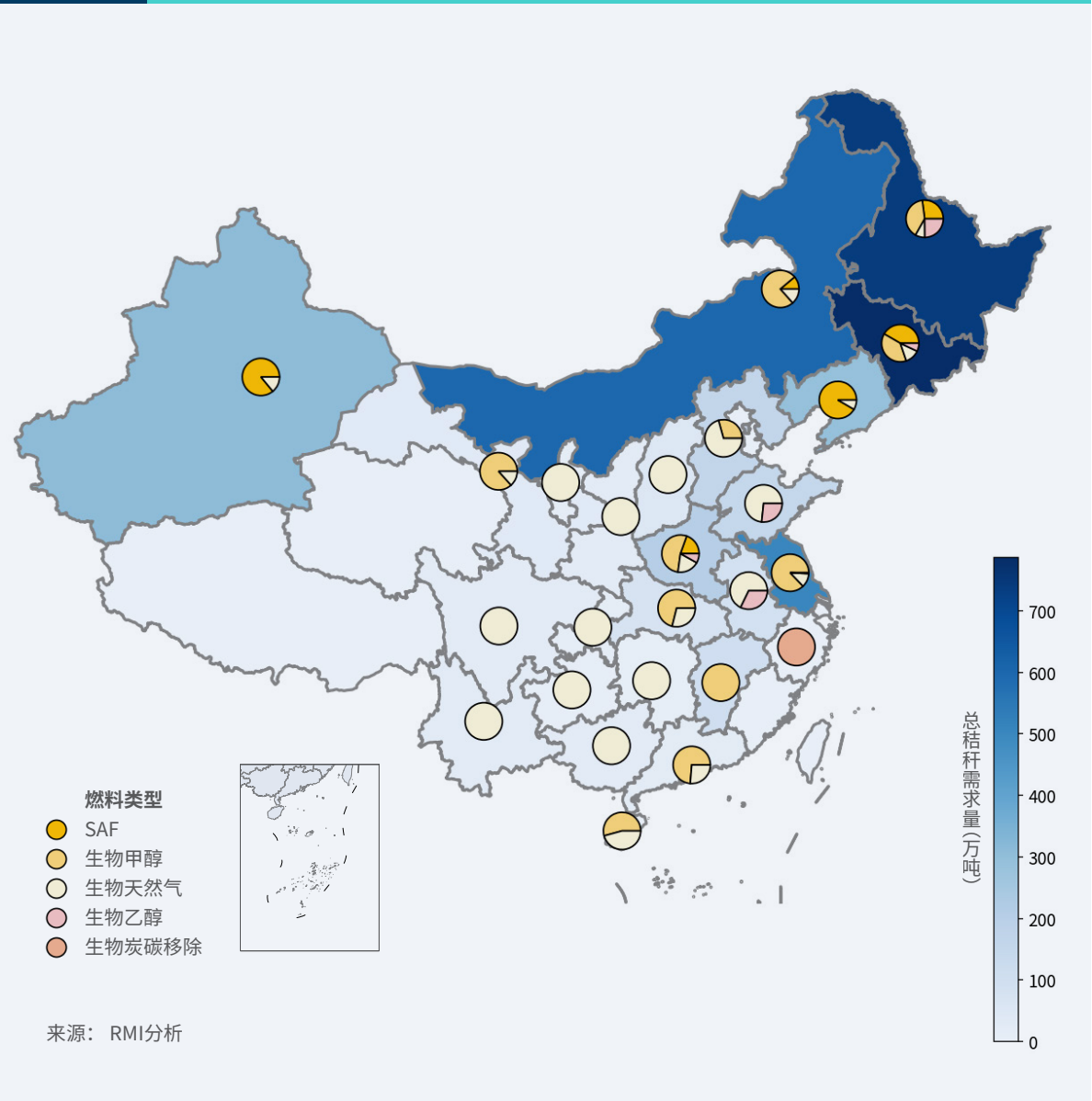




现有先进生物燃料和碳移除项目的秸秆利用量有限，可继续发展扩大规模。RMI 对我国已建、在建和规划生物燃料和生物炭碳移除项目进行了收集和整理，并根据产能规模对各类项目的秸秆原料需求进行了估算。现有先进生物燃料和生物炭产能对秸秆的需求约 4,200 万吨，不足全国秸秆资源总量的 5%。SAF、生物甲醇、生物天然气、生物乙醇项目对于秸秆原料的需求分别为每年 1,200 万吨、1,800 万吨、900 万吨、300 万吨。其中吉林、黑龙江和内蒙古对秸秆的需求最高，占比分别达到了 18%，17% 和 14%。

我国生物炭碳移除产业刚刚起步，秸秆需求有限。在生物炭碳移除方面，我国采用秸秆制备生物炭的技术发展已经比较成熟，超过 100 家企业参与生产<sup>15</sup>，但主要产品以农田炭基肥、烧烤炭和活性炭为主，而其在气候减缓方面的作用尚未被重视<sup>16</sup>。我国目前采用生物炭进行负碳资产开发的项目案例十分有限，据不完全统计，目前全国范围内有 2 个正在运营的秸秆生物炭碳移除项目，分别位于江苏省（由妙盈科技和南京年达共同开发）以及浙江省（由气候未来与同奥科技共同开发），初步估算秸秆需求约为 6 万吨 / 年，环保桥与时科生物科技有限公司也签署了生物炭合作协议，未来将开展项目建设。考虑到生物质能源和生物炭碳移除的低碳负碳属性，上述利用方式可进一步扩大规模，以支撑低碳转型目标实现。

图表 16 我国秸秆生物燃料、生物炭碳移除项目的分布情况和潜在秸秆需求量



### 三、市场展望与机遇



秸秆生物燃料产业化发展需要突破成本瓶颈

秸秆生物燃料的绿色低碳属性为其下游的消纳创造了优势，但总体而言成本经济性仍有提升空间。RMI 对于秸秆生物燃料的制备成本进行了初步估算。SAF 的生产成本在 13,000–15,000 元 / 吨左右，秸秆气化生产甲醇的成本在 3,600–4,400 元 / 吨，秸秆气化耦合绿氢的成本在 4,000–4,600 元 / 吨，秸秆沼气重整生产甲醇的成本约为 5,300–7,000 元/吨，生物天然气的生产成本在 3.6–5.9 元 / 方，生物炭的生产成本在 1,400–2,000 元 / 吨。

秸秆生物燃料的经济性与发展潜力受到多重因素的影响。秸秆原料的可获得性与采购成本决定了秸秆生物燃料的资源基础，同时绿氢原料价格、副产品（有机肥、木醋液等）消纳，以及负碳技术的实施都将影响产品的经济性与竞争力。上述因素既是当前制约秸秆生物燃料产业化的关键环节，也是未来的突破方向。在能源转型背景下，清洁能源需求不断增长，市场机制日趋完善，秸秆生物燃料有望实现技术进步并拓展减排空间，增加产品的绿色附加值。



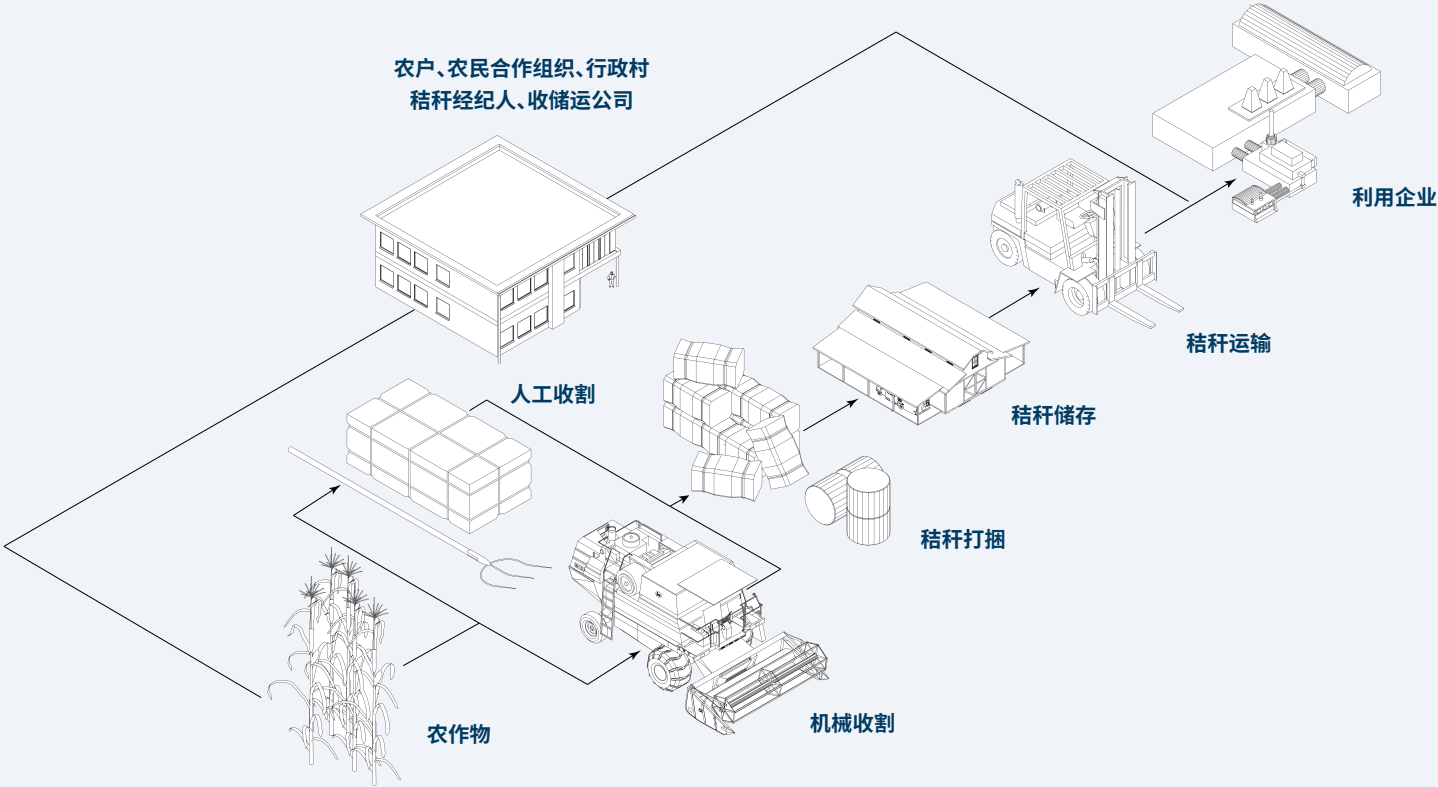


# 机遇 1：健全秸秆收储运体系，降低原料成本

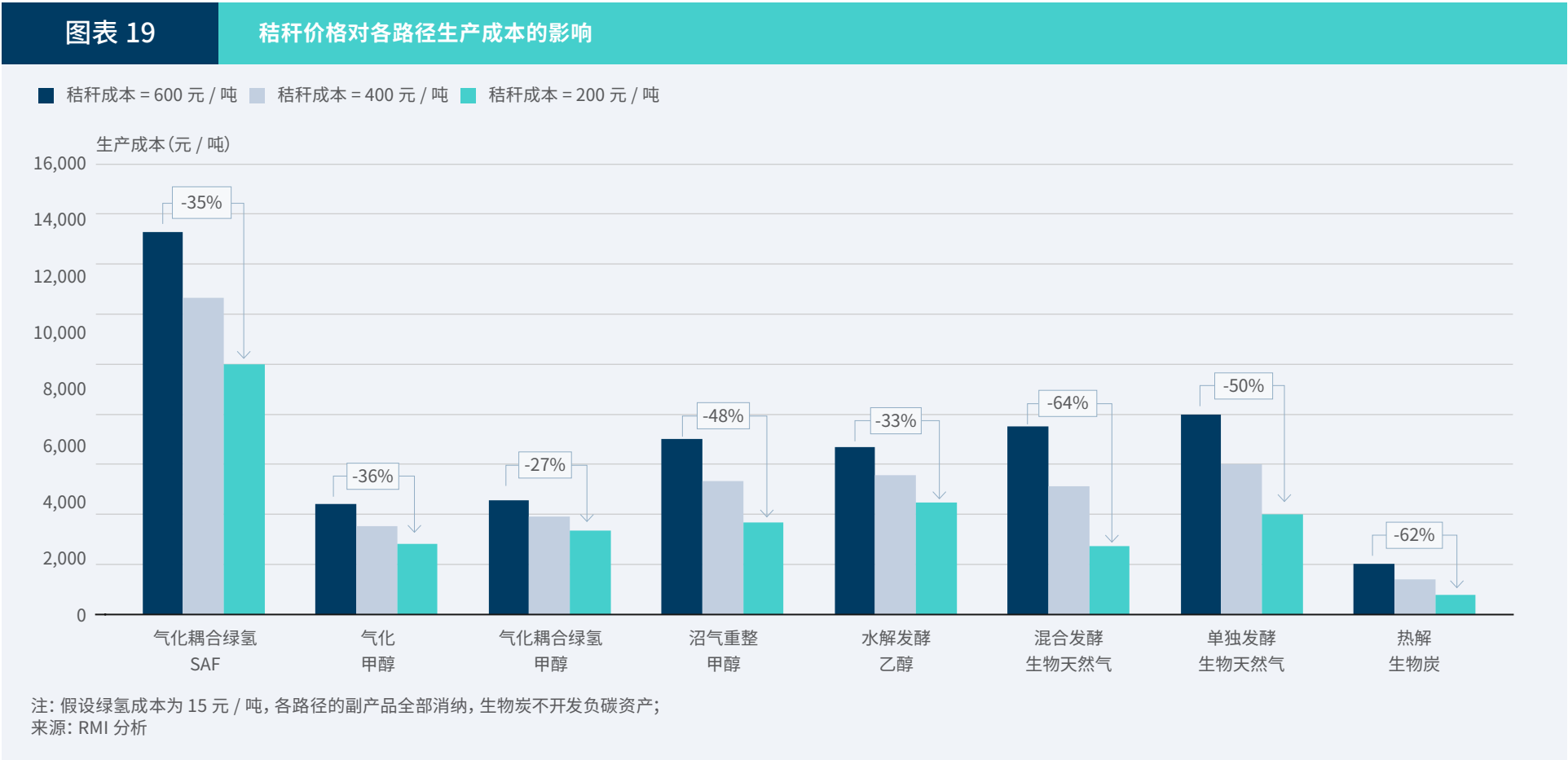
建立完善的秸秆田间处理、收集、储运体系能够促进秸秆的稳定高效供应。秸秆的收储运涉及秸秆收集打捆、秸秆储存、秸秆运输三个环节，企业向供应商购买原料秸秆用于生产燃料，价格一般会包含秸秆收集成本（一般支付给农户或经纪人）、秸秆预处理成本、储存成本、车辆运输成本，以及秸秆经纪人 / 专业合作组织提供上述服务所收取的服务费用。

目前企业采购秸秆的成本约为 400–600 元 / 吨。秸秆成本主要受两方面因素影响：一方面我国的秸秆收储运体系建设仍在推进，集约型组织模式较少，导致各环节成本仍维持在较高水平。另一方面，秸秆离田利用规模仍较为有限，秸秆能源企业需要同时与其他类型企业（如饲料企业和养殖企业）竞争原材料，而后者往往能够为秸秆支付更高的成本。例如甘肃、东北和湖南等地区的秸秆饲草品质较好，销售价格可达到 600–1,000 元 / 吨。<sup>17, 18</sup>

图表 18 我国秸秆收储运的各个环节



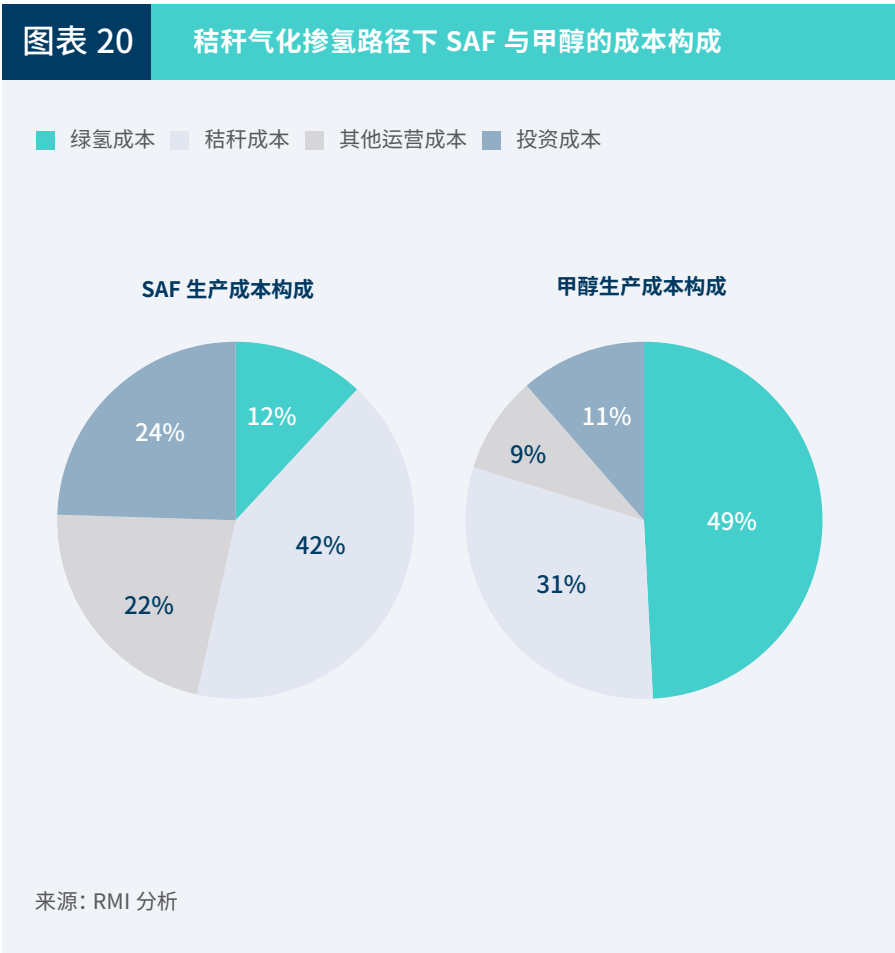
促进健全收储运体系能够提升秸秆离田利用量，有望降低秸秆原料成本，增加产品经济性。以现有秸秆价格 600 元 / 吨为基础，秸秆价格每下降 100 元，能够分别降低 SAF 成本 1300 元 / 吨，生物甲醇成本 300 至 800 元 / 吨，生物乙醇成本 550 元 / 吨，生物天然气成本 0.7 至 0.9 元 / 方，生物炭成本 300 元 / 吨。如果秸秆收购价格下降至 200 元 / 吨，各个秸秆生物燃料路径的单位成本可下降 19%~64%。



机遇 2：依托风光资源打造“绿氢 + 秸秆”的融合生产模式

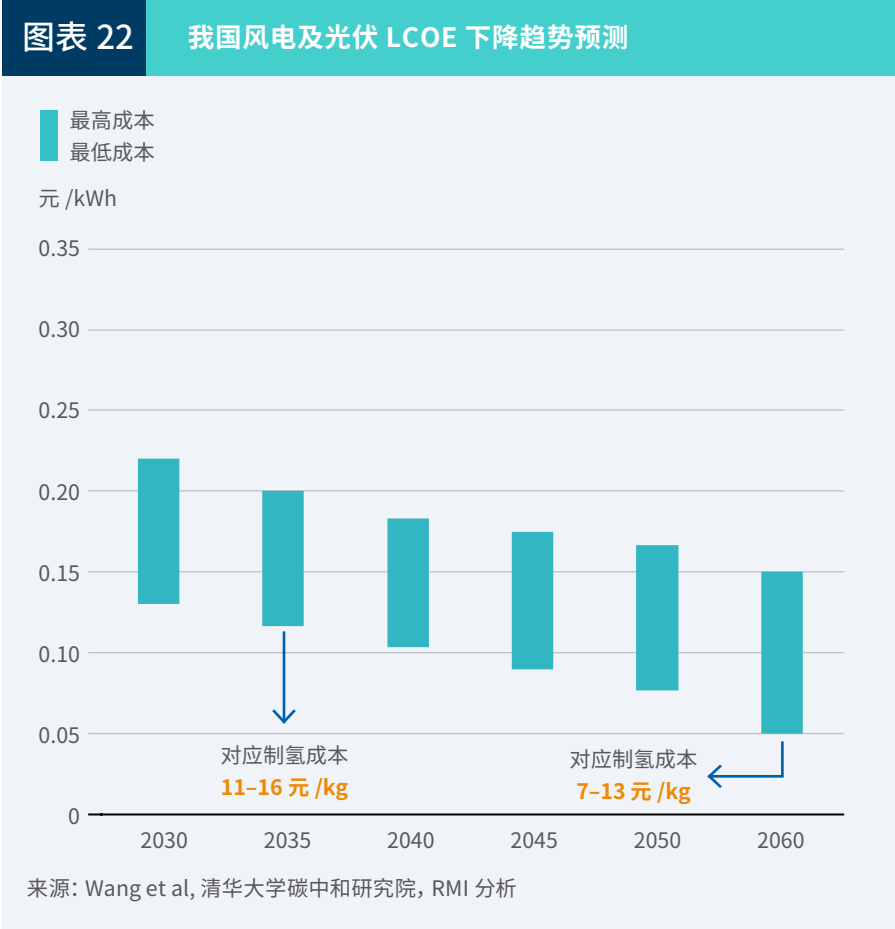
绿氢价格主要影响秸秆掺氢路径的经济性，即秸秆基 SAF 和生物甲醇的成本。根据 RMI 分析，以秸秆价格 400 元 / 吨，绿氢价格 15 元 / kg 为例，绿氢成本占 SAF 生产成本的约 12%，占气化掺氢甲醇生产成本的 49%。

我国西北地区风光资源技术可开发量充足，为秸秆耦合绿氢路线提供了充足的绿电基础。我国风能和太阳能资源十分丰富，具备极佳的开发潜力，根据统计，全国风能和光伏技术累计可开发量高达为 56,550GW<sup>19</sup>，其中华北、东北等地区陆上风电资源潜力显著，西北地区风光资源均较为突出，风光资源为发展可再生能源制氢产业提供了有利条件，也为绿氢耦合生物质制备能源创造了机遇。

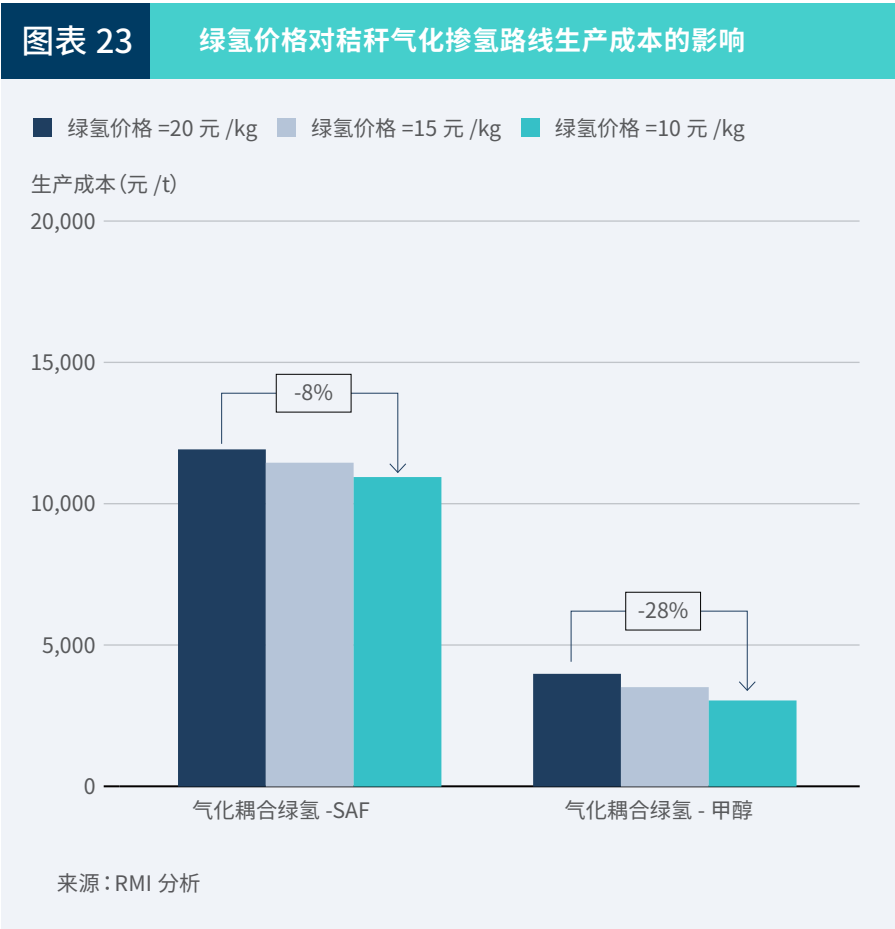




随着我国风光技术装备水平的持续加强，发电效率逐步提升，风光制氢成本将逐渐下降。目前，我国陆上风电 LCOE 约为 0.21 元 /kWh，光伏发电 LCOE 约为 0.23 元 /kWh<sup>ii, 20</sup>，对应的风光制氢成本约为 16–20 元 /kg。未来，风光发电成本将进一步下降，预计到 2035 年，我国陆上风电 LCOE 将下降至 0.14–0.19 元 /kWh，光伏 LCOE 下降至 0.12–0.2 元 /kWh，对应风光制氢成本将下降到 11–16 元 /kg。预计到 2060 年，风光 LCOE 将进一步下降至 0.05–0.15 元 kWh<sup>21</sup>，对应制氢成本 7–13 元 /kg（图表 22）。



绿氢成本下降将助力增强生物质耦合绿氢路线的经济性。根据 RMI 分析，在秸秆气化耦合绿氢生产 SAF 的路径中，绿氢价格每降低 1 元 /kg，可降低单位 SAF 生产成本 100 元 /t，绿氢价格由 20 元 /kg 下降至 10 元 /kg，能够促进 SAF 成本下降 8%。在秸秆气化耦合绿氢生产甲醇的路径中，绿氢价格每降低 1 元 /kg，可降低单位甲醇生产成本 130 元，绿氢价格由 20 元 /kg 下降至 10 元 /kg，能够促进甲醇成本下降 28%（图表 23）。

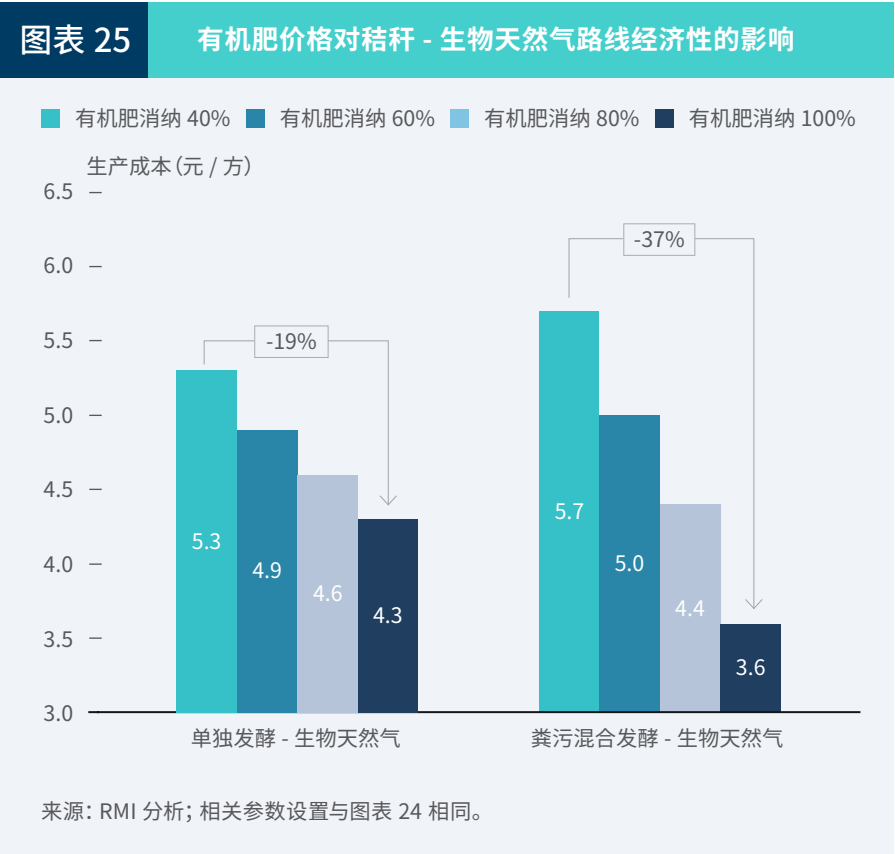
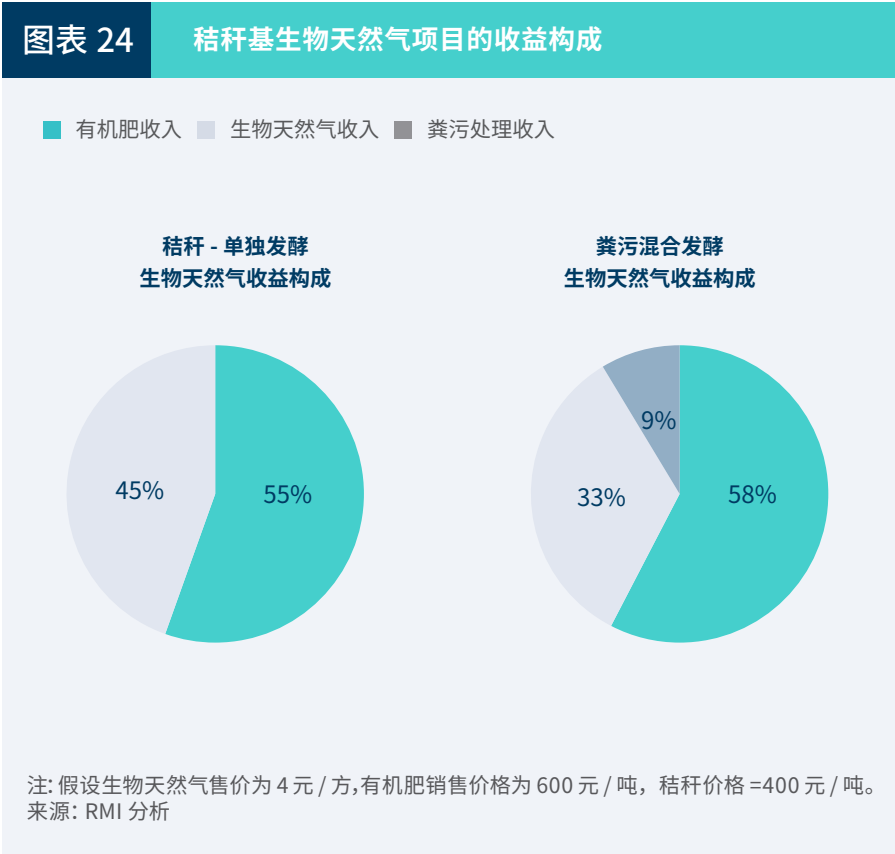


ii 汇率参考国家统计局数据，2024 年全年人民币平均汇率为 1 美元兑 7.1217 元人民币

机遇 3：拓展副产品市场，释放多元价值

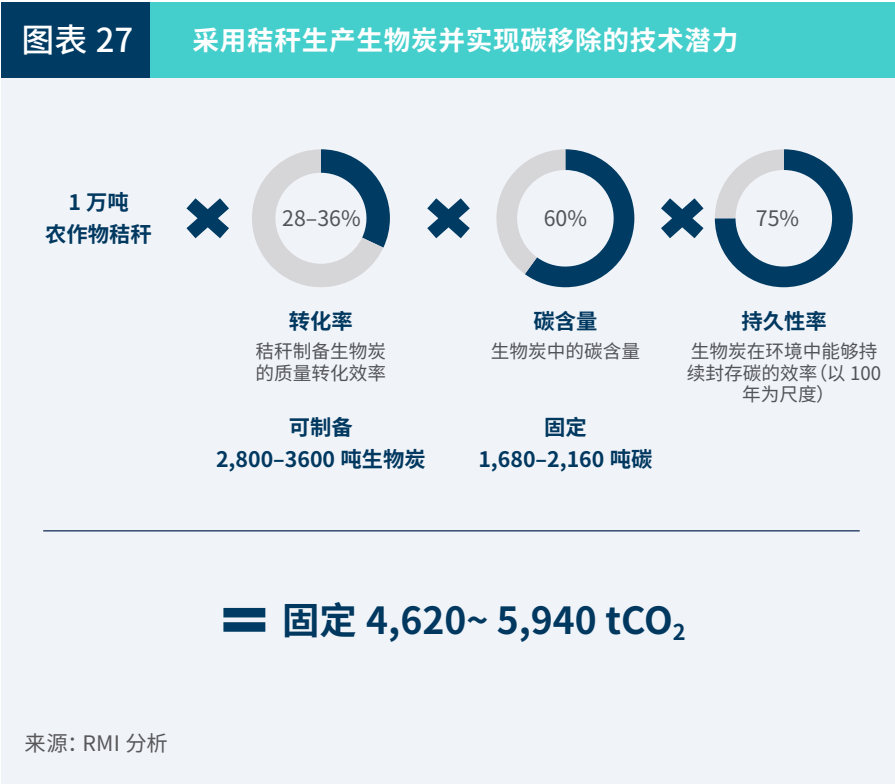
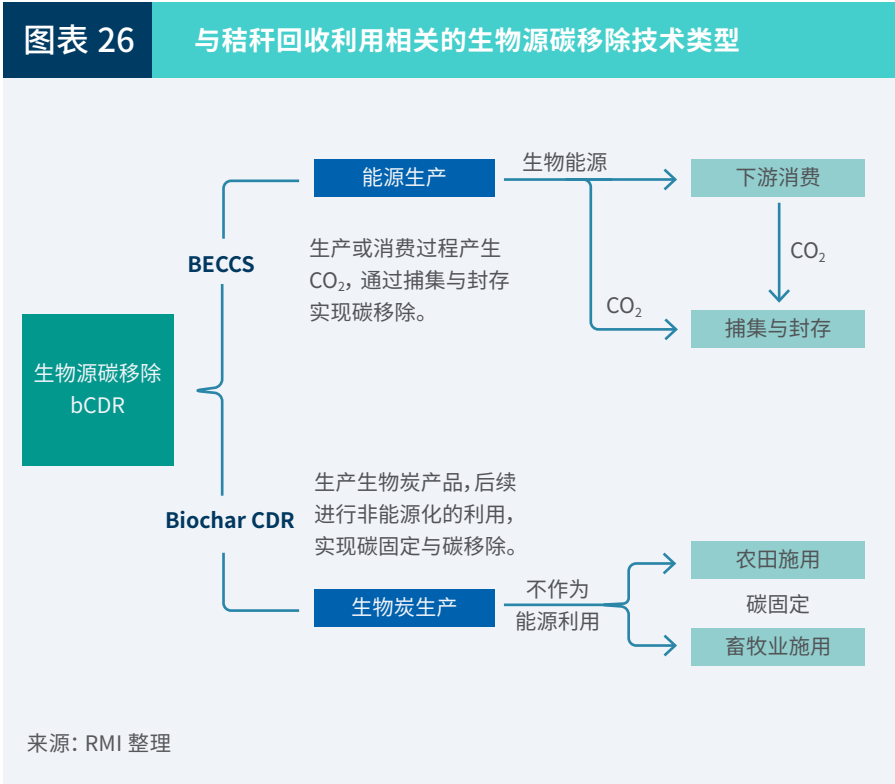
秸秆能源产品会产生有机肥、木醋液等副产品，能为项目带来额外收入。以生物天然气为例，在厌氧发酵环节，畜禽粪污和秸秆等原料产生沼气，同时也产生副产物沼液和沼渣，后续可以用于生产质量较优的有机肥，用于替代化肥效果更佳<sup>22</sup>。在部分成功运行的生物天然气项目中，单独依靠生物天然气的销售难以实现盈利，副产品有机肥成为项目的主要收入来源，在项目中的收益占比达 50% 以上。

秸秆与粪污混合生产生物天然气的路径经济性更强，容易通过副产品消纳获得更多收益。根据 RMI 分析，在秸秆单独发酵的路线中，每生产 1m<sup>3</sup> 天然气可同时产出约 2.5kg 有机肥，秸秆粪污混合发酵路线的有机肥产量更高，约为 4kg/m<sup>3</sup>。假设生物天然气售价 4 元 / m<sup>3</sup>，如果不销售有机肥，单位生物天然气的生产成本将高于 5 元 / m<sup>3</sup>，企业难以盈利。有机肥的消纳每增加 20%，将为生物天然气增加收益约 0.3-0.7 元 / m<sup>3</sup>，可部分抵消生产成本。在秸秆混合粪污生产生物天然气的路径中，如果能够实现有机肥全消纳，可获得较好的收益。而纯秸秆路线的有机肥产量有限，也不通过粪污处理获得收入，因此需要尽可能地降低原材料秸秆的成本，同时努力实现产品绿色溢价，才能确保项目具备经济性。



机遇 4：加速开发部署负碳技术，参与碳信用交易

秸秆生物燃料叠加负碳技术，可以实现碳移除并增强产品的绿色属性。生物源碳移除（Biogenic CDR, bCDR）是利用自然发生的生物固碳机制（主要是光合作用）从大气中捕获二氧化碳并实现长期储存的过程，能够实现负碳排放。与秸秆有关的 bCDR 技术主要有两类 -- 生物质能二氧化碳捕集与封存（BECCS）与生物炭碳移除（Biochar CDR）（图表 26）。其中，BECCS 主要在能源生产和消费的过程中实现二氧化碳封存，生物炭碳移除则不将生物炭进行能源化利用，而是以农作物土壤添加剂等形式进行碳固定。

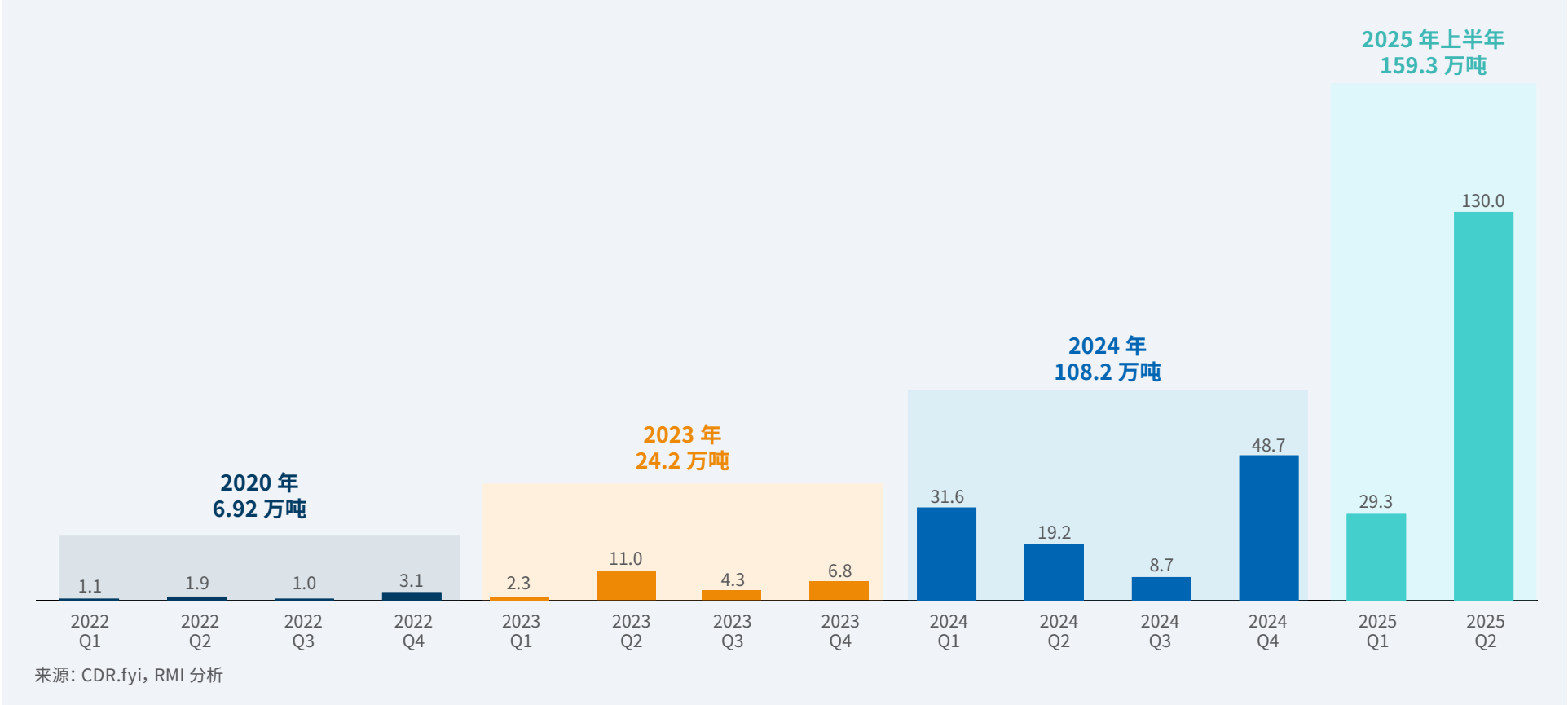




生物炭碳移除作为最直接可行、成本可控的碳移除技术，已经成功投入商业应用和市场化交易。国际上，采用生物炭实现碳移除的负碳方法学已较为成熟，相关项目产生的碳信用已经在国际碳移除信用平台（如 Puro, Verra 等）实现交易，且交付量长期领先。据统计，自 2022 年以来，86% 的已交付 CDR 信用和 92% 的已注销 CDR 信用均来自生物炭碳移除，其市场规模已从 2022 年的 1,460 万美元上升至 2024 年的 1.8 亿美元。<sup>26</sup> 截至目前，生物炭碳移除信用的交易总规模已达到 304 万吨，单位交易价格达到 150 美元 / 吨 CO<sub>2</sub>e<sup>27</sup>，微软、谷歌、瑞士再保险、波士顿咨询公司等是主要买家。

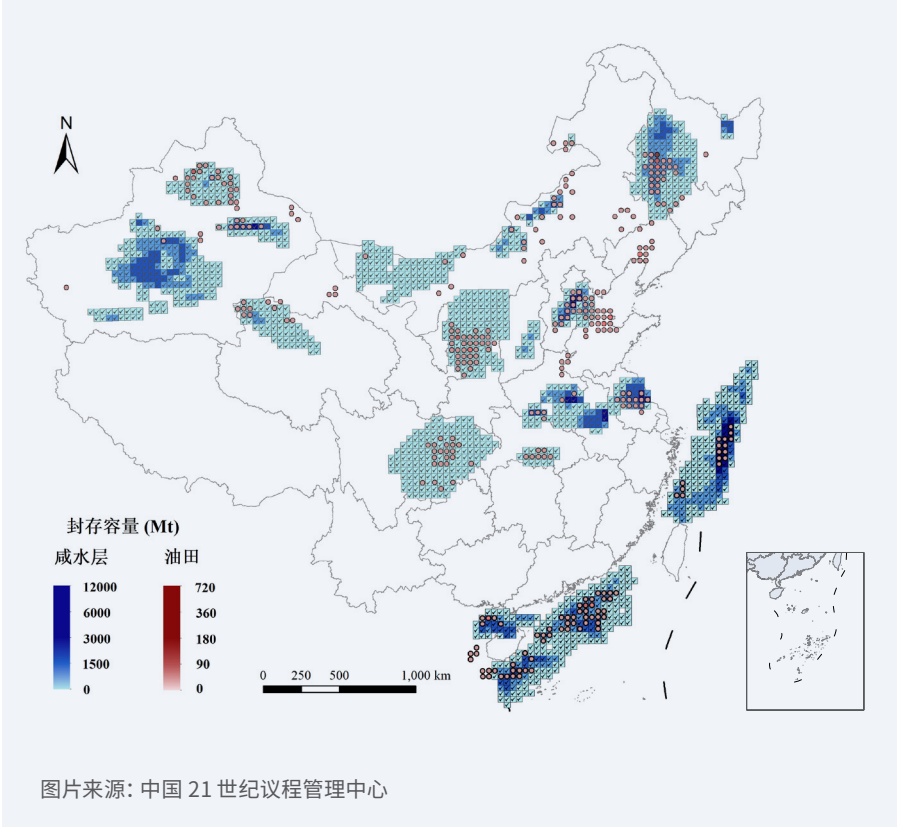
依托现有生物炭产能发展碳移除项目，有望在实现负碳的同时推动农业减排、循环经济与粮食安全协同发展。我国生物炭产能除了用于生产烧烤炭、活性炭等，还有相当部分用于生产炭基肥，作为土壤添加剂和肥料使用。这类产品在使用过程中往往已经实现了一定的碳移除效益，但由于缺乏认证体系和市场机制，其绿色溢价尚未体现，导致负碳价值被浪费。如果在我国已有生物炭产业的基础上，开发符合国际标准的生物炭碳移除资产，就有潜力获得可观的负碳收益，并同时促进农业固碳减排和循环经济发展。生物炭也能够作为秸秆直接还田的替代措施，增加粮食产量、保障粮食安全。

图表 28 国际碳移除信用市场的生物炭碳移除交易规模

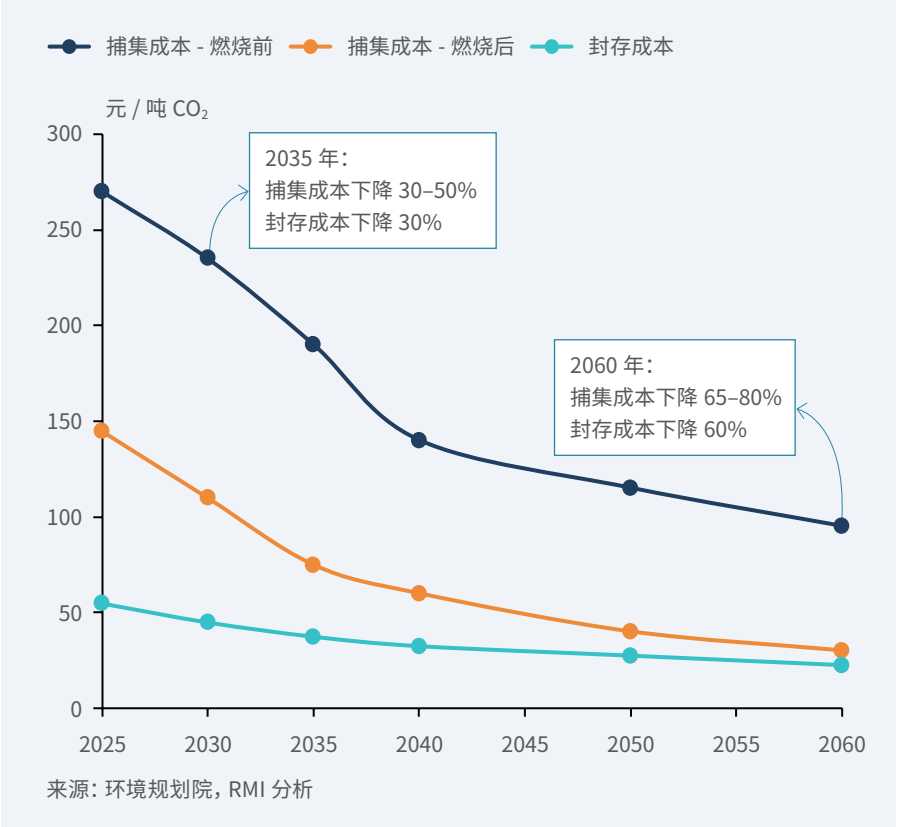


BECCS 主要在生物燃料的生产和使用过程中捕集并封存二氧化碳，我国具备较为充足的二氧化碳地质封存资源，为 BECCS 等衍生技术的发展奠定了良好的基础。研究表明，我国二氧化碳理论地质封存容量高达 1 万亿 ~4 亿吨，油田、气田和深部咸水层是主要封存区域<sup>28</sup>。当前，我国 CCS 技术的应用成本仍然偏高，与其他部分减排技术相比竞争力不足，但在国际上已处于中等偏低水平，具有一定的发展优势。未来，随着二氧化碳捕集及封存环节技术的持续进步和成本下降<sup>29</sup>，CCS 将为我国负排放路径提供更强支撑，降低“秸秆基生物燃料 +CCS”等负碳技术的开发门槛，推动“深绿燃料”和“负碳燃料”的研发与应用。

图表 29 我国二氧化碳地质封存资源分布

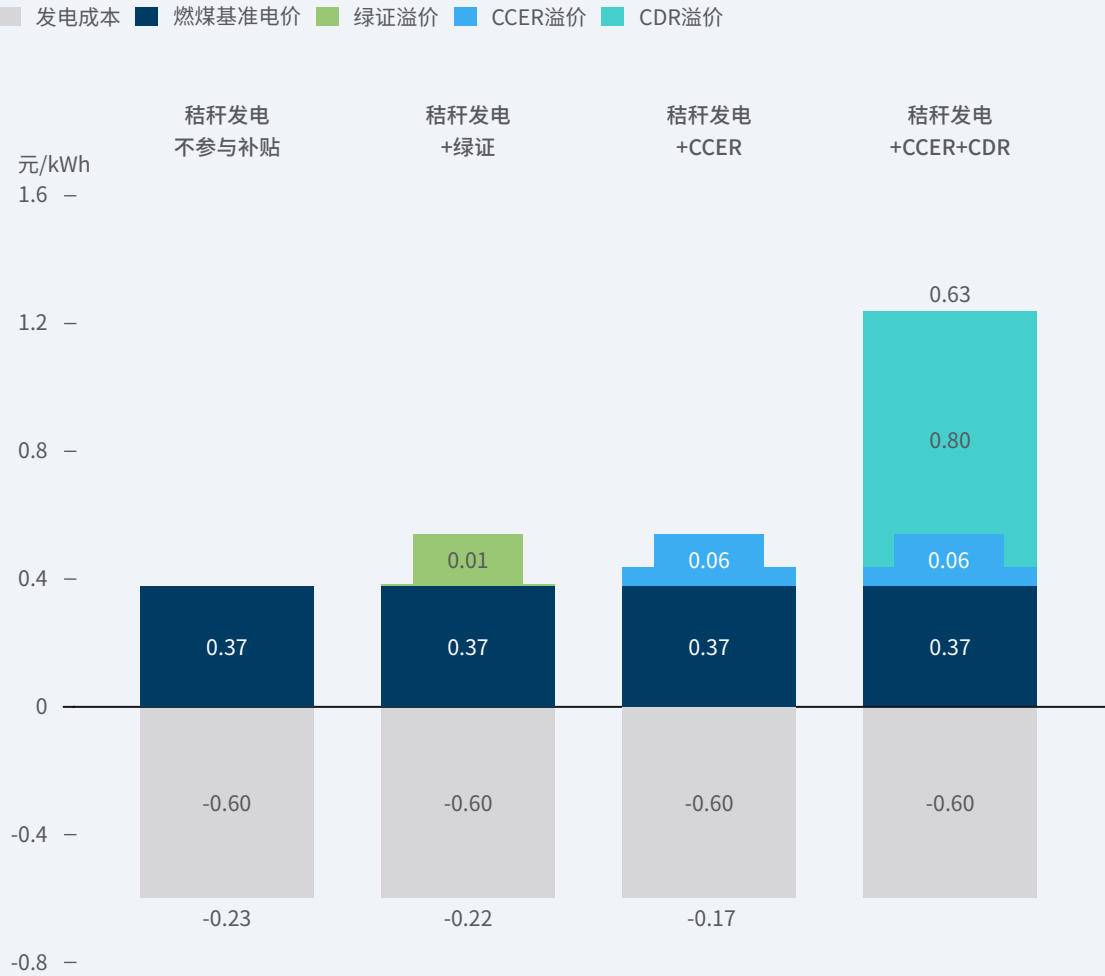


图表 30 碳中和背景下我国 CCS 成本下降趋势



目前较为成熟的 BECCS 技术主要基于生物质发电路径，但仍需要依靠较高的碳价作为支撑。根据 RMI 分析，秸秆发电度电成本约为 0.6-0.7 元/kWh，我国颁布了生物质发电上网电价 0.75 元 /kWh 的支持价格政策，但目前部分项目已经达到补贴到期条件。在不考虑上网电价的基础上，秸秆发电项目如果参与农林生物质并网发电 CCER 项目或参与绿证交易，可获得约 0.006 至 0.06 元 /kWh 的绿色溢价。如果在此基础上叠加 CCS，一家装机 30MW、年发电量 22 万 MWh 的秸秆电厂约排放 42 万吨 CO<sub>2</sub>/ 年，叠加 CCS 技术可以实现约 40 万吨的碳移除。参考目前国际碳市场 BECCS 均价 210 美元 / 吨<sup>30</sup>，秸秆生物质发电参与国际 CDR 信用交易，扣除 CCS 成本能够获得 0.8 元 / kWh 的净收益，可完全覆盖项目发电成本。但如果按照国内碳价 100 元 / 吨计算，秸秆发电的度电成本则会上升至 2.69 元 / kWh，不具备经济性。

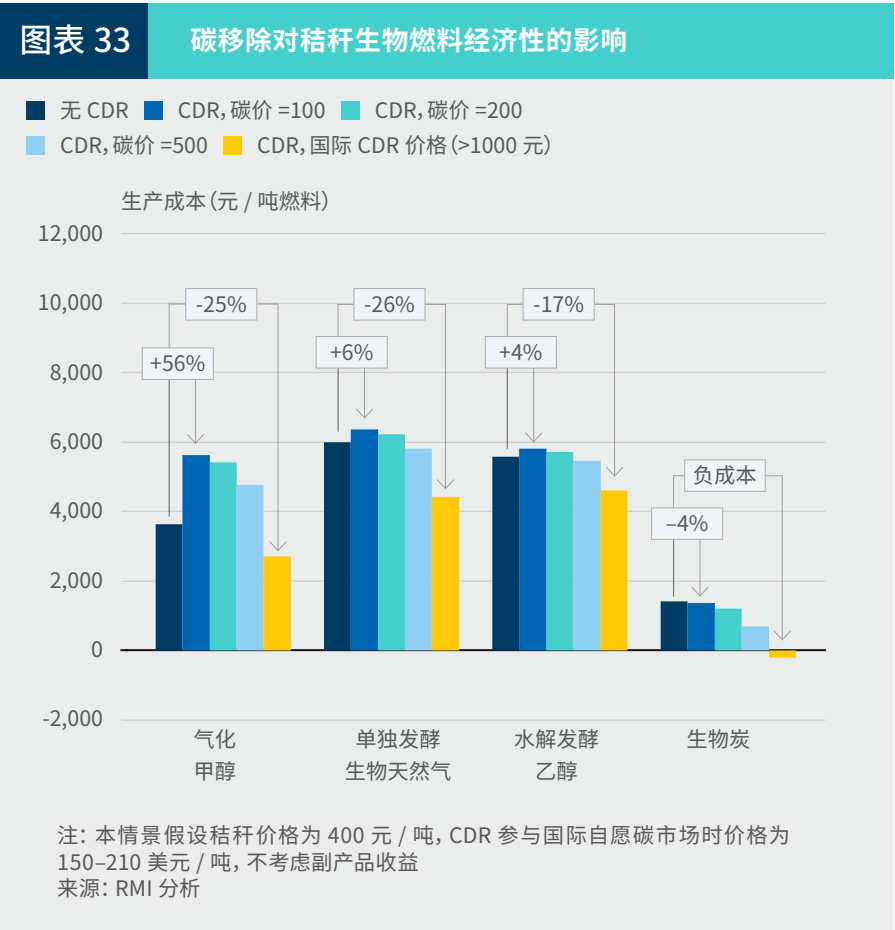
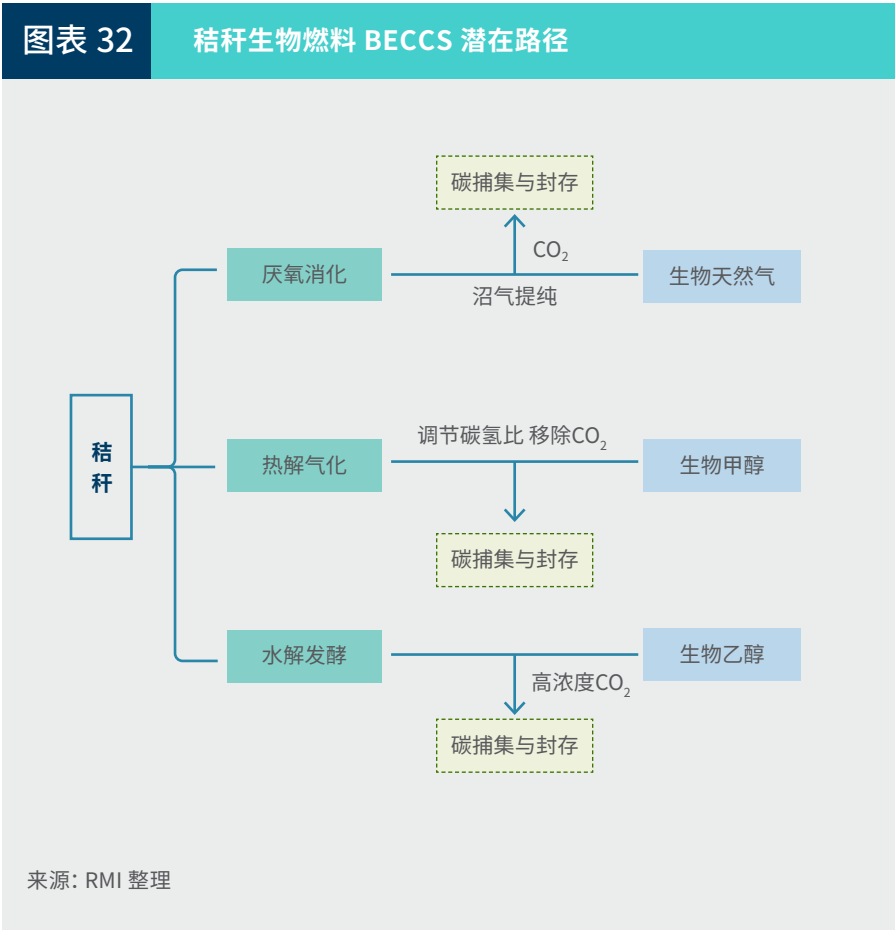
图表 31 各类市场机制对我国秸秆发电项目经济性的影响



注：本图中 CCER 价格取 100 元 / 吨，CDR 溢价参考国际 BECCS 交易价格 210 美元 / 吨，绿证价格参考 2025 年全国绿证交易平均价格 6.46 元 / 个，燃煤基准电价参考黑龙江省  
来源：RMI 分析

除发电外，秸秆生物燃料的生产过程也是开发 BECCS 的潜在路径，尽管目前技术成熟度十分有限，但未来有望随技术进步实现应用。部分秸秆生物燃料的生产过程能够产生较高浓度的二氧化碳，叠加 CCS 可以实现碳移除。例如，秸秆厌氧发酵产生的沼气含有 30%–50% 的二氧化碳<sup>31</sup>，在提纯生物天然气的过程中，副产气中二氧化碳的浓度高达 90%，只需要进行气体压缩和脱水即可进行输送与封存<sup>32</sup>。同理，水解发酵生产乙醇会产生大量的二氧化碳（超过 95%）和小部分水蒸气<sup>33</sup>，生物质气化生产甲醇的过程中也可以分离二氧化碳，后续进行二氧化碳捕集和封存实现负碳排放<sup>34</sup>。在上述提及的生物质 BECCS 路线中，除以玉米为原料制备生物乙醇的 BECCS 已经实现商业化运行，其他技术路径目前仍处于实验室或中试阶段<sup>35</sup>。

秸秆生物燃料耦合 CCS 均需要依托国际碳市场，以较高的碳价实现。RMI 基于现有技术路径以及我国 CCS 实施成本，对于可行路径下的“秸秆基生物燃料 +CCS”耦合生产模式和生物炭碳移除的经济性进行了初步估算。我国现有秸秆基生物燃料产能范围在 2 万 ~45 万吨 / 年，预计单个项目的 BECCS 潜力在 100 万吨 CO<sub>2</sub>e 以内，规模较小。在此情景下，要实现绿色溢价需要参与国际碳移除信用市场，或依托技术进步与工艺改进，例如更低的 CCS 成本实现。如果以目前国内碳价交易，碳移除将为生物燃料生产增加额外的生产成本和运营风险。





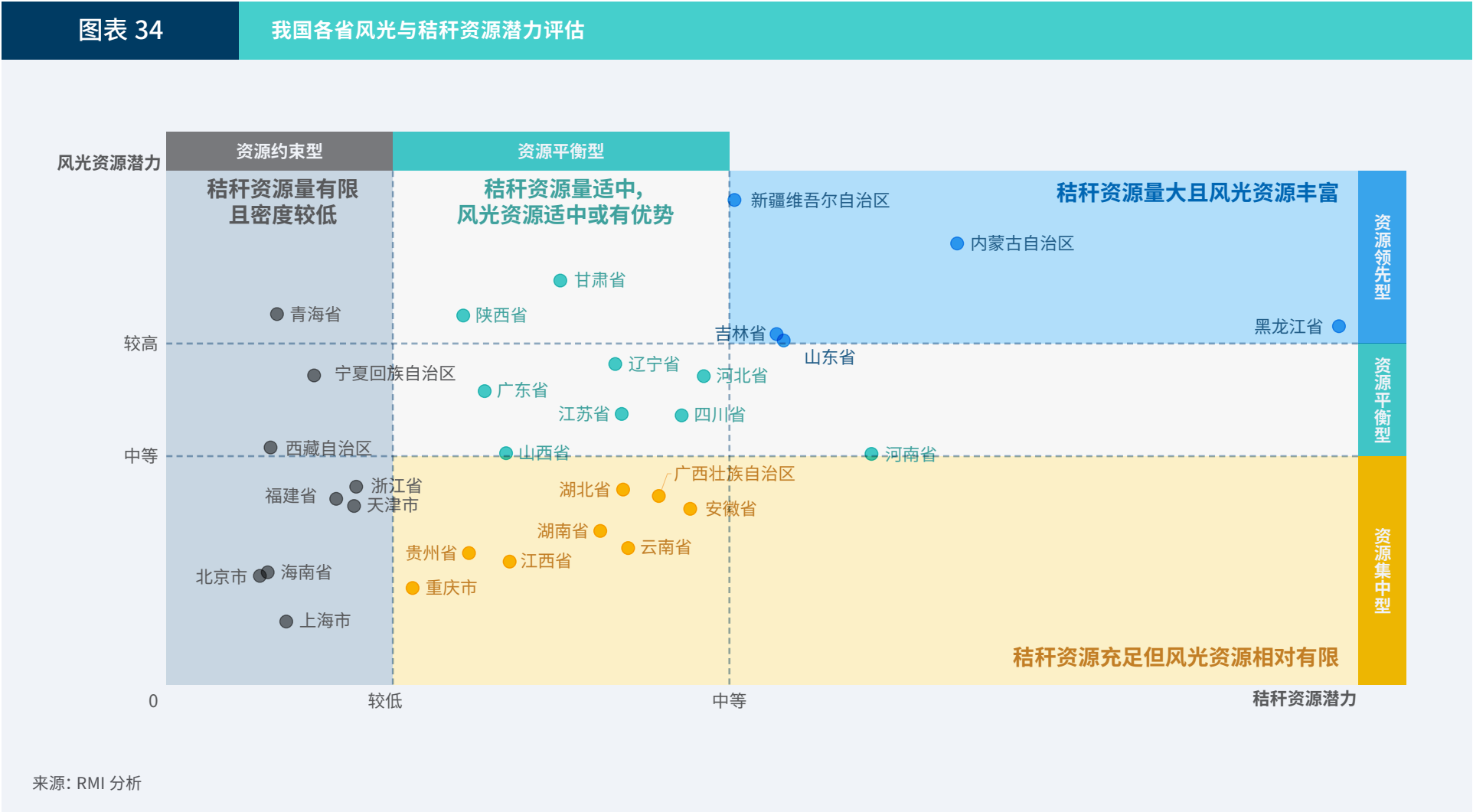
## 四、发展模式与行动建议



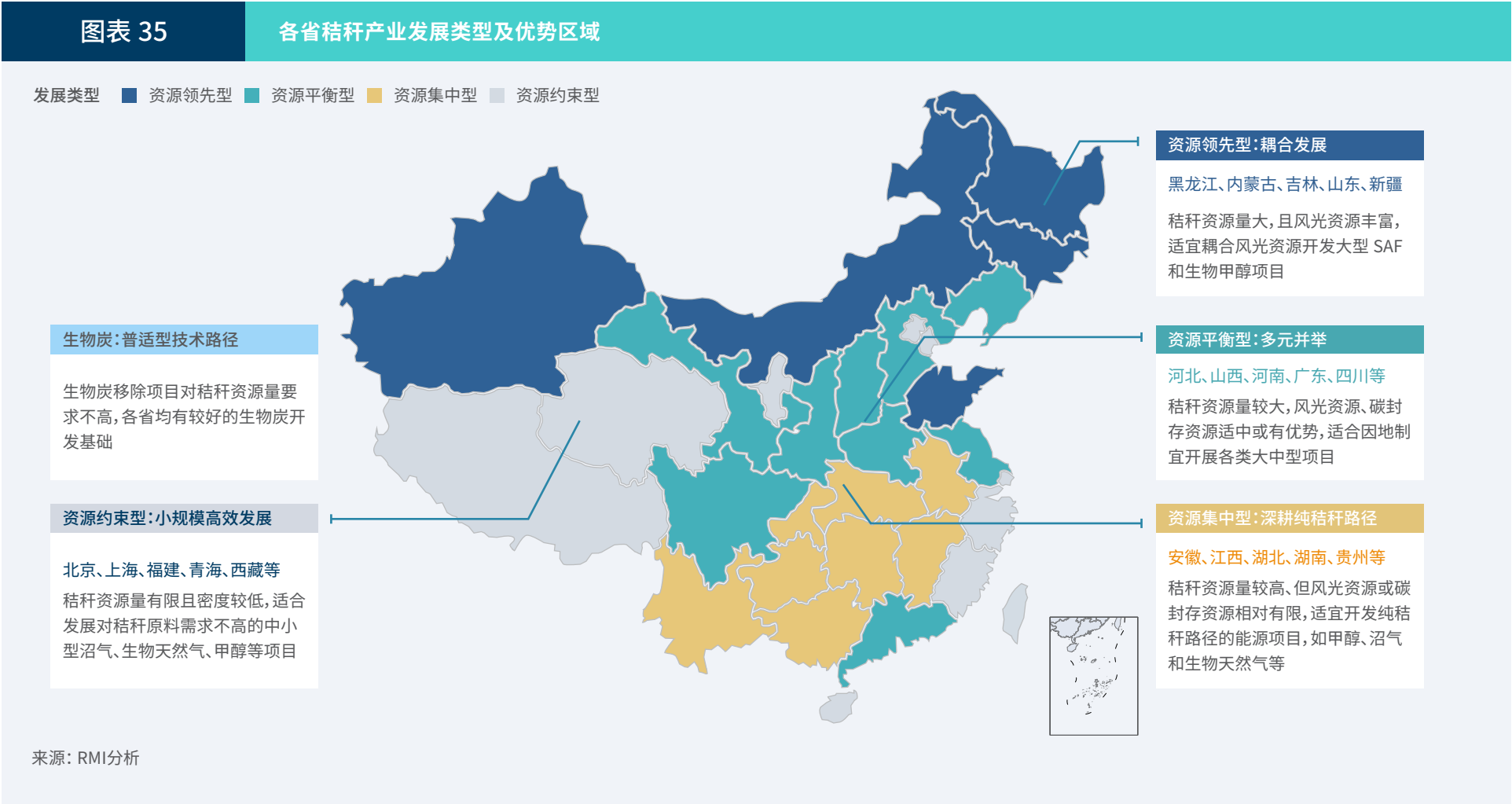


发展模式：依托资源禀赋，因地制宜发展秸秆生物燃料产业

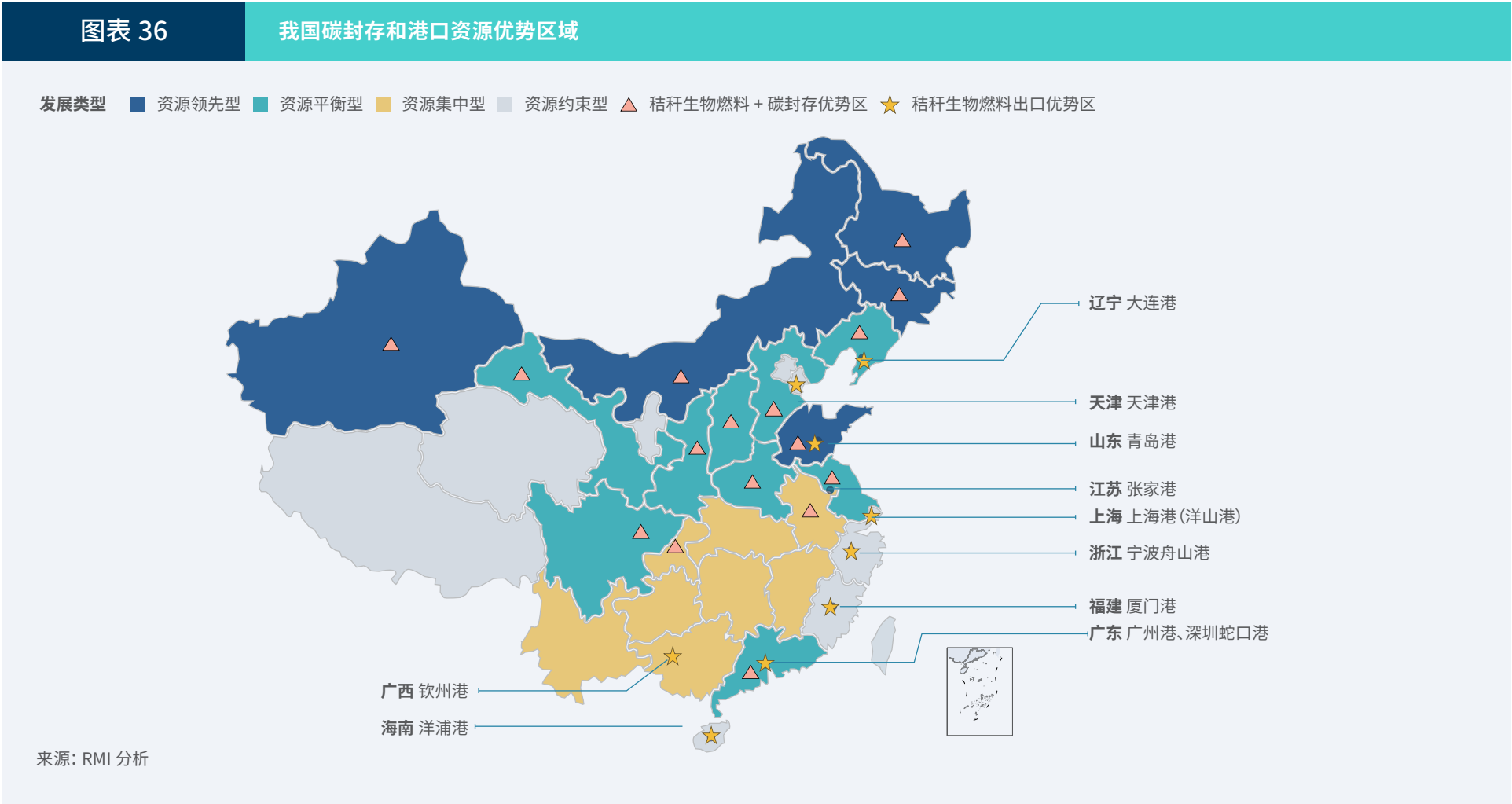
秸秆和绿氢两类资源对生物燃料的适宜技术路径和建设规模具有重要影响，我国各省份风光与秸秆资源潜力差异显著，其空间分布格局直接决定了区域生物质能源发展的布局与方向。RMI 对各省份的风光资源潜力和秸秆资源潜力进行了综合评估，并大致划分为四种类型。其中，新疆、内蒙古、黑龙江等省份属于资源领先型，秸秆与风光资源均极为丰富；湖北、广西等省份秸秆资源充足，但风光资源相对有限，属于资源集中型；广东、江苏、山西等地为资源平衡型，两类资源量均较为适中；而宁夏、福建、北京、上海等则属于资源约束型，秸秆资源相对匮乏。



各省可结合自身资源禀赋，因地制宜推进秸秆生物燃料项目建设。对于黑龙江、内蒙古、吉林、山东、新疆等**资源领先型地区**，可依托秸秆与风光资源的双重优势耦合发展，将秸秆利用与风光制氢技术结合，重点布局 SAF 和生物基甲醇等高收益化工项目，打造区域能源化工高地。**资源平衡型地区**（如河北、山西、河南、广东、四川）则可采用“多元并举”模式，在秸秆和风光资源均较适中的条件下，灵活发展生物气体和液体燃料，注重综合效益与市场适应性，不拘泥于单一技术路径。对于**资源集中型地区**（如安徽、江西、湖北、湖南、贵州），在秸秆资源丰富但风光条件受限的情况下，可采取“深耕模式”，集中资源发展纯秸秆路径的能源化项目，如沼气、生物天然气与甲醇产业，充分释放本地秸秆潜能。而对于**资源约束型地区**（如北京、上海、福建、青海、西藏）则宜采用“小而精”的发展模式，优先发展对原料需求较低的中小型项目，例如小规模生物天然气、乙醇等，或探索秸秆与其他废弃物（如畜禽粪污）协同利用，以满足本地化生物质能源需求。值得一提的是，生物炭碳移除技术因资源量需求较低、技术成熟，可在各省普遍推广，作为实现碳移除与农业固碳的重要途径，为我国秸秆高价值利用提供一条普适性的负碳发展路径。



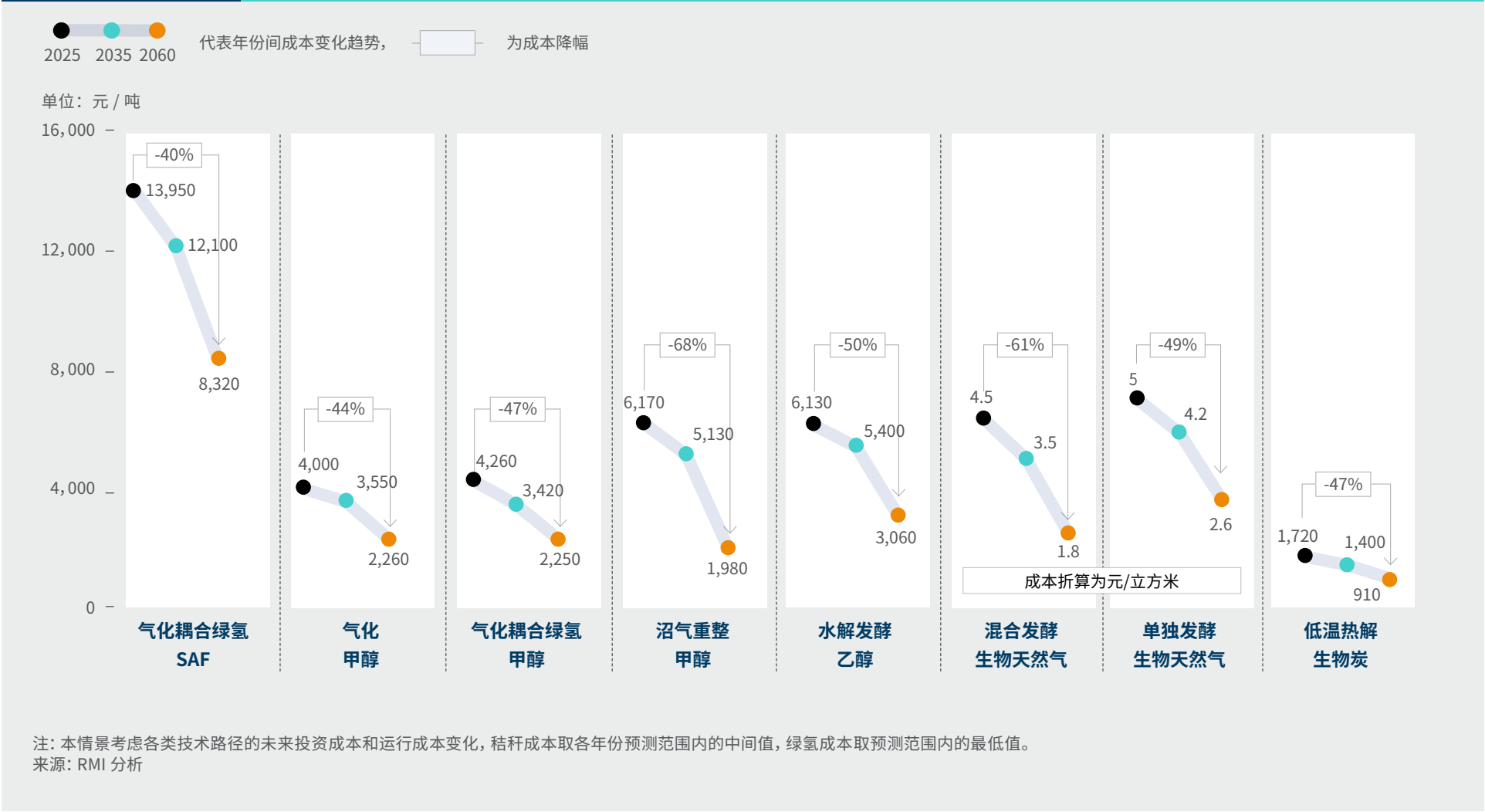
**推进我国生物 LNG、SAF 和甲醇产业发展，服务全球低碳转型。**当前，国内对 SAF、生物甲醇等绿色燃料的消费需求仍处于起步阶段，而欧洲等地区的市场需求已较为旺盛。考虑到国际航空和航运业提出的可持续目标要求，绿色燃料在出口领域的潜力更为显著，这也为沿海省份和港口城市带来发展机遇。沿海城市，如上海、浙江、广东等地区可以依据现有港口条件，加快建设面向全球的保税燃料加注和出口中心，推进生物甲醇、生物 LNG 的出口和加注。同时，我国自主生产的 SAF 除了在现阶段继续服务于 SAF 加注试点城市（北京、成都、郑州、宁波等）外，也可以借助港口设施开展 SAF 出口业务，进一步拓展我国生物燃料国际市场。部分秸秆与碳封存资源富集地区可依托已有 CCS 技术优势，探索开展“秸秆生物燃料 + 碳移除”的技术研发与工程示范，通过建立示范基地和产业链协同模式，形成可复制、可推广的低碳生物燃料发展新模式。





未来,得益于技术进步与模式创新,秸秆基生物燃料的经济性与市场竞争力有望持续提升。通过持续优化秸秆收储运体系、深化绿氢耦合应用等措施,绿氢在生物质能制造过程中的应用规模不断扩大,科学高效的田间收集模式逐步普及,秸秆离田成本稳步降低,为原料端降本提供了有力支撑。预计到 2035 年,各类秸秆利用技术路径的生产成本将在 2025 年的基础上下降 20% 以上;到 2060 年,成本优化幅度将增加至 40% 以上,为我国能源清洁低碳转型注入动力,同时也将为实现“双碳”目标提供坚实保障。

图表 37 各类秸秆基生物燃料的平均生产成本下降趋势



# 行动建议：打造多方协同、合力共赢的全产业链合作模式

秸秆作为农业生产过程中的重要副产物，不仅可用于生物燃料生产，还有助于农村固碳减排和循环经济发展，在能源转型背景下具备广阔的应用前景。我国在秸秆能源化利用方面已具备较好的发展基础，依托丰富的资源禀赋和持续的政策支持，有条件在确保合理还田比例的前提下，进一步拓展秸秆能源化利用空间。然而，目前我国秸秆离田能源化利用仍处于起步阶段，产业链体系尚未完善，存在上下游衔接不畅、成本偏高、市场机制不健全等制约因素。为推动农村生物质能发展、促进农业固碳减排，宜在秸秆基生物燃料的原料供应、产品生产及终端利用等环节形成多方协同、共建共享的产业体系，形成政府、企业、金融机构与农户协作共赢的全产业链发展模式。基于此，我们提出六大行动建议：



- 1. 强化政府引导，提供制度保障与政策支持。**我国在秸秆综合利用方面已建立较为完善的政策体系和统计基础，下一步，建议在此基础上进一步完善秸秆还田与离田利用的规范和标准体系，明确地方能源化利用目标，健全配套支持政策，为秸秆全产业链发展营造稳定、可持续的政策环境。在原料供应环节，建议继续完善细化秸秆资源台账，加强建设规范化的秸秆收储运体系，优化田间收集模式并降低原料成本，为秸秆高价值利用规模化、市场化和产业化发展奠定原料基础。在项目建设方面，建议以县为基本单元培育能源产业市场主体，支持地方政府与企业协作推进原料基地建设和能源化利用项目，实现互利共赢。在下游市场，建议加强可持续航空燃料、生物甲醇、生物天然气等产品的标准与认证体系建设，建立与国际接轨的绿色能源出口监管机制。通过健全出口认证与白名单制度，畅通重点产品出口渠道，支持沿海省份和港口城市打造国际化绿色燃料加注与出口中心，进一步提升我国生物质能源的全球竞争力。
- 2. 突出行业主导，引领高价值秸秆产业发展。**建议充分发挥企业在秸秆能源化利用中的主导作用，依托政策规划和区域资源禀赋，在重点省份和区域建设秸秆生物质资源能源化利用示范基地，形成可复制、可推广的产业集群和区域发展样板。重点推动可持续航空燃料（SAF）、生物甲醇、生物天然气、生物炭碳移除等高附加值产业项目投资与建设，带动秸秆原料端、技术装备制造端、能源和副产品消费端的产业链协同发展。鼓励企业探索多元化的合作机制，与地方政府、合作社及农户建立稳定合作机制，通过合同化原料收购、收益共享等构建可持续的生物质能源合作模式。在产业层面，建议加快推进秸秆与风光资源、碳移除技术的耦合发展路径，延伸产业价值链并提升产品绿色附加值，参与碳市场交易和绿色资产开发，完善秸秆生物燃料产品的环境价值核算与认证机制，增强产品在市场中的认可度与竞争力。同时，鼓励企业拓展国际市场，推动可持续航空燃料（SAF）、生物甲醇、生物 LNG 等重点产品出口和加注，实现产业的全球化布局与低碳价值最大化。
- 3. 鼓励农户参与，构建稳定可持续的原料供应链。**农户是秸秆能源生产的关键原料供应方，在构建稳定、高效、可持续的原料供应链体系中发挥着核心作用。建议借鉴农村能源合作社等经验，推广“农户—地方政府 / 合作社—企业”的三方协作模式，整合地方秸秆资源。通过建立长期收购协议，明确收购价格与收益分配，保障农户经济收益；同时，鼓励农户参与秸秆收储运体系建设，降低秸秆离田成本与操作难度，可由地方政府或合作社牵头建设规范化的秸秆收集、储存、运输与销售体系，并配套开展宣传培训，提升农户秸秆收集意愿及能力。通过企业与农户的协同合作，推动生物炭还田、有机肥副产品还田等多元化利用路径，实现农业减排与增收并举，促进农村绿色循环发展。
- 4. 激活市场驱动，释放终端需求潜力。**市场机制是引导投资、激励技术创新，推动秸秆生物燃料产业升级与规模化发展的重要手段。目前，以秸秆等农业废弃物为原料的生物燃料在买卖双方匹配上仍存在流通不畅的问题，建议充分发挥绿色燃料认证、交易平台及证书制度等机制的作用，完善绿色能源认证体系，加快绿色能源消费市场与碳信用交易平台建设，形成透明、高效的交易机制，帮助供需双方高效识别、匹配和交易绿色能源产品，并健全价格信号和激励机制。与此同时，建议统筹国内与国际市场布局，拓展可持续航空燃料（SAF）、生物甲醇等高附加值产品的出口渠道，实现内需与出口协同增长。
- 5. 加强科技赋能，推动关键技术研发与落地应用。**建议继续强化秸秆综合利用关键技术的研发与推广，形成多能协同、低碳高效的技术体系。针对不同区域的耕地条件和资源禀赋，研究合理的秸秆还田比例，在保障粮食稳产增产的前提下，科学拓展秸秆离田利用空间，提升资源利用效率。鼓励科研机构与企业联合攻关，推动秸秆气化、热解、厌氧发酵等能源化与高值化利用的技术创新与工程化应用，探索“秸秆 + 风光”等多能耦合发展模式，建立成套技术体系和标准化示范工程，提升能源转化效率和碳减排收益。建议推进以秸秆为原料的生物炭碳移除和 BECCS 等技术研发与应用，充分挖掘其在甲烷减排、土壤固碳及二氧化碳移除方面的潜力，推动农业与能源领域的深度低碳转型和协同发展。
- 6. 完善金融支持，降低项目融资成本与风险。**秸秆基生物燃料项目（如生物航煤、生物甲醇等）前期投资规模大、建设周期较长，但其低碳可持续的属性符合绿色能源发展方向，建议通过绿色信贷、绿色债券、碳金融及其他创新融资工具，引导社会资本参与秸秆燃料产业链关键环节与技术创新。同时，鼓励以秸秆为原料的生物燃料项目纳入绿色金融支持目录，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，促进产业健康可持续发展。

# 参考文献

- 1 International Energy Agency, 2024, The role of bioenergy in the energy transition, and implications on the global use of biomass, [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/Commentary\\_RoleBioenergy\\_Dec2024l.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/Commentary_RoleBioenergy_Dec2024l.pdf)
- 2 Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, AR6 Scenario Explorer and Database, <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ar6-scenario-explorer-and-database>
- 3 IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 4 落基山研究所, 碳移除: 应对气候变化从增量控制到存量处理的新动向, 2024年, <https://rmi.org.cn/碳移除: 应对气候变化从增量控制到存量处理的新/>
- 5 Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, AR6 Scenario Explorer and Database, <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ar6-scenario-explorer-and-database>
- 6 The Applied Innovation Roadmap for CDR, RMI, 2023, <https://rmi.org/insight/the-applied-innovation-roadmap-for-cdr/>
- 7 中国政府网, 2025年, 全国耕地面积达19.4亿亩 较2020年增加2800万亩, [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202509/content\\_7040244.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202509/content_7040244.htm)
- 8 国家统计局, 2024年, 国家统计局关于2024年粮食产量数据的公告, [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213\\_1957744.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213_1957744.html)
- 9 农业农村部, 国家发展改革委, 2021年, 关于印发《秸秆综合利用技术目录》的通知, [https://www.moa.gov.cn/nybgb/2021/202111/202112/t20211221\\_6385225.htm](https://www.moa.gov.cn/nybgb/2021/202111/202112/t20211221_6385225.htm)
- 10 农业农村部, 关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见, 农规发〔2024〕27号, 2024年12月, [https://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230\\_6468640.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230_6468640.htm)
- 11 国家发展改革委, 农业部, 财政部, 关于印发“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案的通知, 2011年11月, <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/upload/images/20231/20231815194373.pdf>
- 12 农业农村部, 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》, 2022年11月, [https://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010\\_6412962.htm](https://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm)
- 13 农业农村部, 秸秆去哪里, “五化”告诉你, 2025年10月, [https://kjs.moa.gov.cn/hbny/202510/t20251017\\_6478240.htm](https://kjs.moa.gov.cn/hbny/202510/t20251017_6478240.htm)
- 14 国家发展改革委, 农业部, 关于印发编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见的通知, 发改办环资〔2016〕2504号, 2016年. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161207\\_962800.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161207_962800.html)
- 15 Meng, J., He, T., Sanganyado, E. et al. Development of the straw biochar returning concept in China. Biochar 1, 139–149 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00019-0>
- 16 Deng, X., Teng, F., Chen, M. et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China. Nat Commun 15, 1085 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45314-y>
- 17 中国农村网, 甘肃金川区秸秆利用: 变废为宝, “秸”尽所能促发展, 2024年, [https://www.crnews.net/zl/df/968800\\_20241218022936.html](https://www.crnews.net/zl/df/968800_20241218022936.html)
- 18 华容县人民政府, 华容县: “秸”尽所能 点草成“金”, 2023年, [https://www.huarong.gov.cn/33046/content\\_2123424.html](https://www.huarong.gov.cn/33046/content_2123424.html)
- 19 清华大学碳中和研究院, 中国碳中和目标下的风光技术展望, 2024年, [https://www.icon.tsinghua.edu.cn/\\_\\_local/6/95/2F/2E40B08AF86764D6680DC9C7404\\_3BCB-5C27\\_1CD0BD9.pdf](https://www.icon.tsinghua.edu.cn/__local/6/95/2F/2E40B08AF86764D6680DC9C7404_3BCB-5C27_1CD0BD9.pdf)
- 20 IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2024, 2025, <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- 21 清华大学碳中和研究院, 中国碳中和目标下的风光技术展望, 2024年, [https://www.icon.tsinghua.edu.cn/\\_\\_local/6/95/2F/2E40B08AF86764D6680DC9C7404\\_3BCB-5C27\\_1CD0BD9.pdf](https://www.icon.tsinghua.edu.cn/__local/6/95/2F/2E40B08AF86764D6680DC9C7404_3BCB-5C27_1CD0BD9.pdf)



- 22 落基山研究所，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年，<https://rmi.org.cn/insights/biomethane-industry-outlook-report/>
- 23 Muyuan Ji et.al, Effects of biochar on methane emission from paddy soil: Focusing on DOM and microbial communities, June 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140725>
- 24 Jong-Mun Lee et.al, Effects of Biochar on Methane Emissions and Crop Yields in East Asian Paddy Fields: A Regional Scale Meta-Analysis, Sustainability 2023, 15, 9200. <https://doi.org/10.3390/su15129200>
- 25 Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies, Jan 2016, Global Change Biology, <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>
- 26 CDR.fyi, Biochar Carbon Removal Market Snapshot, 2025, <https://www.cdr.fyi/blog/biochar-carbon-removal-market-snapshot-2025>
- 27 CDR.fyi, Price Index, <https://www.cdr.fyi>
- 28 中国21世纪议程管理中心，Global CCS institute，清大学，中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2023），2023年，[https://www.acca21.org.cn/UploadFiles/file/20230713/638248438536661002/中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告\(2023\).pdf](https://www.acca21.org.cn/UploadFiles/file/20230713/638248438536661002/中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2023).pdf)
- 29 环境规划院，中国区域二氧化碳地质封存经济可行性研究，2024年，<http://www.caep.org.cn/sy/tdftzhjzx/zxdt/202403/W020240304596446739999.pdf>
- 30 CDR.fyi, Price Index, <https://www.cdr.fyi>
- 31 落基山研究所，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年，<https://rmi.org.cn/insights/biomethane-industry-outlook-report/>
- 32 Minliang Yang, Nawa Raj Baral, Aikaterini Anastasopoulou, Hanna M. Breunig, and Corinne D. Scown, Cost and Life-Cycle Greenhouse Gas Implications of Integrating Biogas Upgrading and Carbon Capture Technologies in Cellulosic Biorefineries, Environmental Science & Technology 2020 54 (20), 12810-12819, DOI: 10.1021/acs.est.0c02816
- 33 Shijie Yu, Qinghai Li, Yangguo Zhang et al., Enhancing carbon-negative emission technologies through biomass integration, 2025, 101079, ISSN 2666-6758, <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.101079>
- 34 Giorgia Lombardelli, Roberto Scaccabarozzi, Antonio Conversano, Manuele Gatti, Bio-methanol with negative CO<sub>2</sub> emissions from residual forestry biomass gasification: Modelling and techno-economic assessment of different process configurations, Biomass and Bioenergy, volume 188, 2024, 107315, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107315>
- 35 IEA, Bioenergy with Carbon Capture and Storage, 2024, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>

落基山研究所，解锁秸秆高价值利用：生物燃料与碳移除产业的破局点，2025，<https://rmi.org.cn/insights/unlocking-the-high-value-utilization-of-crop-straw-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](http://www.rmi.org)

© 2025 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。