

温升 2 °C/1.5 °C 情景下世界主要区域 BECCS 发展潜力评估分析

郑丁乾^{1,2}, 常世彦^{1,2*}, 蔡闻佳^{1,3}, 杨方⁴, 张士宁⁴

(1. 清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心, 北京市 海淀区 100084;

2. 清华大学能源环境经济研究所, 北京市 海淀区 100084;

3. 清华大学地球系统科学系, 北京市 海淀区 100084; 4. 全球能源互联网集团有限公司, 北京市 西城区 100031)

Assessment of Global and Regional BECCS Development Potential Under the Scenario of Global Warming of 2 °C/1.5 °C

ZHENG Dingqian^{1,2}, CHANG Shiyan^{1,2*}, CAI Wenjia^{1,3}, YANG Fang⁴, ZHANG Shining⁴

(1. Tsinghua-Rio Tinto Joint Research Centre for Resources, Energy and Sustainable Development, Laboratory for Low Carbon Energy, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

4. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: The development of BECCS has an important impact on the global temperature change control 2 °C/1.5 °C. However, considering the current situation of biomass resource utilization, bioenergy potential and carbon sequestration potential will affect the future development of BECCS technology in each region. It is necessary to perform the analysis on the bioenergy potential and possible typical technology pathways in each region. Based on the scenario analysis results of the global integrated assessment models, the development of regional bioenergy and BECCS potential are reviewed and analyzed. The results show that in the future, the bioenergy development potential of ASIA, MAF and OECD regions is the largest under the baseline scenario, and that of ASIA and OECD regions is the largest under the temperature change control scenario, while other regions are smaller. Bioenergy utilization are mainly based on biomass power generation and liquid biofuels. Biomass hydrogen has higher development potential under temperature change control scenarios.

Keywords: biomass; BECCS; climate change; SSP database; CD-LINKS database

摘要: BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) 发展对全球控制温升 2 °C/1.5 °C 具有重要影响。但是各区域的生物质资源利用现状、生物质能潜力以及碳封存潜力都会影响到各区域未来 BECCS 技术的发展, 有必要对各区域的生物质能及未来可能的典型技术构成进行详细研究。梳理了全球综合评估模型中的主要情景设定与研究结果, 结合全球各区域生物质能统计数据, 分析了各区域生物质能和 BECCS 的发展。初步研究结果表明, 未来的生物质能发展在基准情景下以 ASIA、MAF 和 OECD 区域的生物质能发展潜力最大, 温升情景下以 ASIA 和 OECD 区域的生物质能发展潜力最大, 而其他区域较小。生物质能利用方式上, 主要以生物质发电和生物质液体燃料为主, 生物质制氢在温升情景下的发展潜力较大。

关键词: 生物质; BECCS; 气候变化; SSP 数据库; CD-LINKS 数据库

基金项目: 国家自然科学基金 (71673165, 51711520318); 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (101662227); 国家电网有限公司科技项目 (5202011600U8)。

National Natural Science Foundation of China (71673165, 51711520318); Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (101662227); Science and Technology Foundation of SGCC (5202011600U8).

0 引言

应对气候变化是一项重要的全球性议题。2018年 全球平均 CO₂ 浓度达到历史最高水平的 0.040 78%, 是 工业化前 CO₂ 浓度的 147%, 其中使用化石燃料排放的

CO₂是引起气候变化的主要原因^[1]。2018年包括土地利用变化在内的温室气体排放量达到553亿t CO₂当量,其中化石燃料相关的CO₂排放达到375亿t当量^[2]。全球温室气体排放不断增长意味着排放达峰的延后,以及需要幅度更大、速度更快的减排措施才能将温升控制在2℃或1.5℃以内^[2]。快速减排极有可能需要考虑CO₂移除(carbon dioxide removal, CDR)技术^[3],包括生物质能结合碳捕集和封存(bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)、造林和再造林、土壤恢复和土壤碳固定、直接空气碳捕集和封存(carbon capture and storage, CCS)以及增强风化和海洋碱化等^[4]。

生物质能的直接利用和BECCS在减缓全球气候变化中发挥着重要的作用^[4, 5]。一般而言,植物在生长过程中会吸收CO₂,在利用生物质能的过程中会释放CO₂,因此生物质能的利用通常被认为是碳中性的。而BECCS技术将生物质能的利用与CCS相结合,通过CCS技术将生物质能利用过程中排放的CO₂进行分离、压缩并运至封存地点,使其与大气长期隔离起来。BECCS是应对气候变化的重要措施,许多综合评估模型(integrated assessment models, IAMs)的研究成果都表明,要依赖BECCS的大规模部署来实现全球温升控制2℃或1.5℃的目标。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在《全球升温1.5℃》特别报告中提出,在实现全球升温1.5℃路径中,2030年、2050年和2100年的BECCS的规模预计将达到0~1、0~8和0~16 Gt/a^[4]。

全球各区域的生物质能潜力和碳封存潜力有较大差异,因此未来各区域BECCS的发展潜力与技术构成会有较大差异。这些差异也会在一定程度上影响各区域实现全球升温2℃/1.5℃的目标选择和减排路径选择。为了能够对现有BECCS发展潜力在区域层面的研究有一个初步认识,本研究基于全球情景研究数据库,分析了全球各区域生物质能发展潜力以及BECCS发展潜力。

本研究的全球区域划分主要参考IPCC共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)数据库中的区域划分,分为3个层次^[6]。第一个层次是将全球分为5个区域,分别是OECD——包括1990年的OECD国家以及欧盟成员国和候选国,REF——东欧和前苏联国家,ASIA——除了中东、日本和前苏联国家以外的亚洲国家,MAF——中东和非洲国家,LAM——拉丁美洲和加勒比海地区的国家;第二个

层次是将全球分为32个区域;第三个层次是以各个国家和地区为主的划分方式。本研究主要关注世界主要区域的BECCS发展潜力,因此在区域划分上保持与IPCC数据库中5个区域相同的划分方式(具体的区域划分见<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>)。对于区域划分方式不同,但具有重要参考价值的其他来源数据,根据第二层次和第三层次区域划分规则进行重新聚合后加以分析。

1 全球及各区域生物质能利用概况

生物质能的利用主要分两大类:低效的传统生物质利用,例如将木材和秸秆当作薪柴用于炊事和采暖;高效的现代生物质能利用,例如将生物质转化为固体、液体和气体用于发电、供热、热电联产和交通运输燃料等^[5]。

根据149个世界主要国家和地区的能源数据核算,2017年全球生物质能利用量达到53.06 EJ,其中ASIA区域生物质能利用规模最大,2017年的利用量约为20.66 EJ;其次为OECD区域和MAF区域,生物质能利用规模约为12.65 EJ和13.67 EJ;LAM区域生物质能利用规模约5.91 EJ;而REF区域生物质能利用规模较小,仅为0.57 EJ(见表1)。生物质能利用中生物质固体燃料的利用量最大。2017年全球生物质固体燃料利用量达到46.23 EJ,其中ASIA区域和MAF区域是占比最大的地区,根据IEA统计的2017年世界主要区域生物质能利用情况(见图1),MAF区域的生物质固体燃料利用量达到13.67 EJ,大部分用于终端消费,其中住宅用能达到9.98 EJ,而生物质液体燃料、沼气和城市生活垃圾的利用量几乎为零。ASIA区域的生物质固体燃料利用方式也以住宅用能为主,2017年住宅用能达到13.19 EJ,同时ASIA区域在生物质液体燃料、沼气和城市生活垃圾的利用上也有一定的比例。相比其他区域,OECD区域在生物质液体燃料、沼气和城市生活垃圾的利用中占比相对较大,2017年OECD区域的生物质液体燃料、沼气和城市生活垃圾的利用量分别占全球利用量的66.45%、69.70%和70%。从生物质能利用方式来看,全球各区域的生物质固体燃料主要用于住宅用能,部分生物质固体燃料也用于工业以及发电、供热和热电联产等。生物质液体燃料基本上用于交通部门,而城市生活垃圾和其他废弃物大部分用于发电、供热和热电联产。比较不同的是沼气的利用,在沼气利用量最大的两个区域中,OECD区域大

部分的沼气用于转化为二次能源，ASIA区域的沼气主要用于住宅用能。

表 1 2017年世界主要区域生物质能利用概况^[7]

Table 1 Global bioenergy utilization in 2017

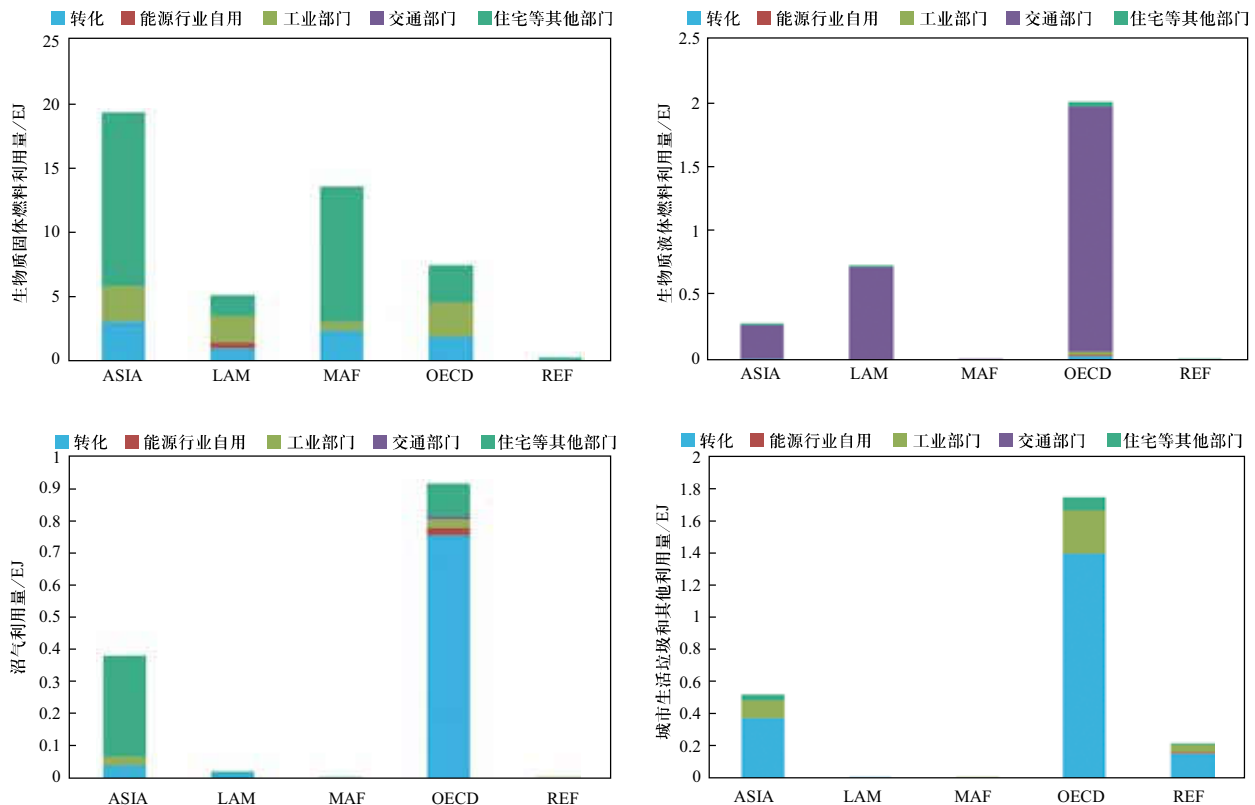
生物质种类	ASIA	LAM	MAF	OECD	REF
生物质固体燃料/EJ	19.47	5.16	13.67	7.58	0.35
生物质液体燃料/EJ	0.28	0.73	0	2.00	0
沼气/EJ	0.38	0.02	0	0.92	0
城市生活垃圾和其他/EJ	0.53	0	0	1.75	0.22
总计/EJ	20.66	5.91	13.67	12.25	0.57

注：①基于全球149个国家和地区的能源数据进行核算，由于缺少部分国家的统计数据，核算的生物质能利用总量略低于全球的统计数据。②统计的生物质液体燃料以t为单位，为方便数据之间的对比，按乙醇热值26.9 MJ/kg进行了换算。

高效的生物质能利用方式中，生物质发电是其主要的利用方式之一。根据2019年IRENA的统计结果^[8]，

2017年全球生物质发电量达到495 395 GWh，相比于2009年增加了218 335 GWh。OECD区域是生物质发电量最大的地区，2017年OECD区域生物质发电量达到291 214 GWh，其中生物质固体燃料占70.05%，液体生物质燃料占1.80%，沼气发电占28.15%。ASIA区域、LAM区域和MAF区域主要是生物质固体燃料发电，2017年ASIA区域生物质发电达到126 718 GWh，其中生物质固体燃料发电占96.74%，沼气发电占3.26%。LAM区域和MAF区域2017年生物质发电分别为72 112 GWh和3453 GWh，其中生物质固体燃料发电分别占98.21%和89.34%。REF区域的生物质发电量最小，2017年生物质发电量为663 GWh，主要是生物质固体燃料和沼气发电，分别占70.23%和29.77%（见图2）。

生物质固体燃料的发电量中ASIA区域、LAM区域和OECD区域占比最大。将生物质固体燃料发电细分为城市生活垃圾、蔗渣和其他固体废弃物发电（见图3），城市生活垃圾发电和其他固体废弃物



注：①转化包括生物质发电、供热和热电联产以及转化成其他形式的能源等；生物质能终端消费分为工业部门、交通部门和住宅等其他部门，住宅等其他部门包括住宅、农业、林业、渔业、商业和公共服务等。②数据来源于IEA《世界能源统计2019》，基于全球149个国家和地区的能源数据进行核算，由于缺少部分国家的统计数据，核算的生物质能利用总量略低于全球的统计数据。

图 1 2017年世界主要区域生物质能利用概况（根据2017年IEA统计结果整理）^[7]

Fig. 1 Global bioenergy utilization in 2017 (based on statistical results of IEA, 2017)

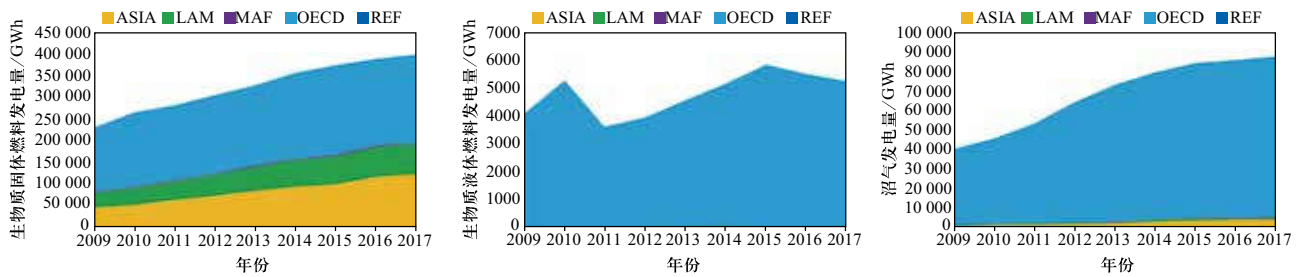


图2 世界主要区域不同生物质发电技术的发电量（根据2019年IRENA统计结果整理）

Fig. 2 Global electricity generation from biomass resources (based on statistical results of IRENA, 2019)

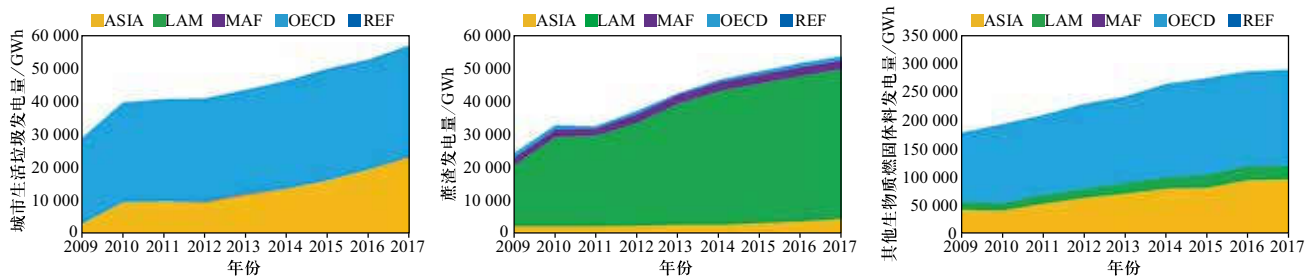


图3 世界主要区域不同种类的生物质固体燃料的发电量（根据2019年IRENA统计结果整理）

Fig. 3 Global electricity generation from solid biomass resources (based on the statistical results of IRENA, 2019)

发电主要分布在ASIA和OECD区域，2017年这两个区域的城市生活垃圾发电分别达到23 250 GWh和33 604 GWh，其他固体废弃物发电分别达到94 818 GWh和169 145 GWh。蔗渣发电主要分布在LAM区域，2017年LAM区域的蔗渣发电达到45 375 GWh，占全球蔗渣发电量的84.1%。

2 全球各区域BECCS情景分析

2.1 情景数据库的主要特征

本研究对IPCC数据库中的共享社会经济路径数据库（SSP scenario database）^[6]和CD-LINKS数据库（CD-LINKS scenario database）^[9]进行了评估分析。

SSP数据库主要是共享社会经济路径和相关综合评估情景的定量预测。SSP是IPCC开发的情景框架，反映了社会经济发展与辐射强迫之间的关联，以及不同社会经济路径所面临的气候变化适应与减缓挑战^[10-12]。其中社会经济情景由5条SSP路径表示，而气候情景由典型浓度路径（representative concentration pathways, RCP）表示。SSP路径对应的RCP2.6和RCP1.9分别代表了SSP情景限制全球升温2℃和1.5℃的路径，与基准情景一起是本研究综述的3类情景。

CD-LINKS数据库来自于CD-LINKS项目的主要

成果。CD-LINKS项目主要探讨了气候行动和社会经济发展之间复杂的相互作用，并开发了一系列以当前的国家政策和国家自主贡献作为短期气候行动目标的国家政策和国家自主贡献作为短期气候行动目标的国家政策和国家自主贡献作为短期气候行动目标的国家政策和国家自主贡献作为短期气候行动目标的国家政策。CD-LINKS以不同的气候政策开发了8个不同的情景，其中NoPolicy（无气候政策影响的基准情景）在本研究中按基准情景进行分析报告、NPi2020_1000（当前的国家政策持续到2020年，2020年之后维持2011—2100年1000 Gt CO₂的碳预算，相当于超过66%的机会在21世纪末达到2℃升温情景）和NPi2020_400（当前的国家政策持续到2020年，2020年之后维持2011—2100年400 Gt CO₂的碳预算，相当于超过66%的机会在21世纪末达到1.5℃升温）在本研究中分别按2℃和1.5℃进行分析报告。以下综述以比较这三类情景为主。

SSP和CD-LINKS从不同的角度探讨了未来的应对气候变化路径。其中SSP结合了未来社会经济发展和典型浓度路径，设计了不同的社会发展模式，代表了不同的减缓和适应挑战。CD-LINKS则探讨了国家政策与全球升温目标之间的关联。

2.2 情景数据库中的生物质能发展情景

从生物质能发展规模上看，众多IAMs模型的研究

结果都表明未来的生物质能利用量有可能不断增加^[4-5]。

SSP数据库中, 全球各区域的生物质能利用量将逐步增加。基准情景下(见图4(a)), ASIA、MAF和OECD区域是发展较快的地区, 从2020年到2100年, 这三个区域的平均生物质能利用量分别增加了12.98 EJ/a、13.64 EJ/a和14.06 EJ/a。相对而言, LAM和REF区域分别增加了5.75 EJ/a和2.58 EJ/a。当考虑全球温升目标的影响时, 各区域的生物质能利用量相比基准情景都明显增加(见图4(b))。在全球温升2 °C情景下, ASIA和OECD区域的平均生物质能利用量在2020年到2100年期间分别增加了58.34 EJ/a和73.47 EJ/a, 而LAM、MAF和REF区域分别增加了30.74 EJ/a、30.27 EJ/a和12.74 EJ/a。而考虑更为严格的温升目标时, 全球温升1.5 °C情景下各区域的生物质能利用量相对于全球温升2 °C情景增加的相当有限(见图4(c)), 结合各区域的生物质资源潜力, 预计当生物质能的利用量达到较高水平时, 将更多受制于土地、淡水、粮食安全等上限约束。

CD-LINKS数据库中, 基准情景下的生物质能利用量也同样在不断增加。从2020年到2100年, ASIA、LAM、MAF、OECD和REF区域的平均生物质能利用量分别增加了4.04 EJ/a、5.13 EJ/a、7.85 EJ/a、15.54 EJ/a

和1.29 EJ/a, 其中ASIA和MAF区域的增加量与SSP数据库相比大幅减少(见图5(a))。在温升2 °C情景下, CD-LINKS数据库中ASIA和OECD区域的生物质能利用量的增加(2020—2100年, ASIA和OECD区域的平均生物质能利用量分别增加了32.66 EJ/a和53.43 EJ/a)相对于SSP数据库(2020—2100年, ASIA和OECD区域的平均生物质能利用量分别增加了58.34 EJ/a和73.47 EJ/a)也大幅减小(见图5(b))。

从转化为二次能源的生物质能利用方式上看, 生物质发电、生物质制氢、生物质液体燃料以及沼气是未来主要的生物质能利用方式(见图6)。SSP数据库的基准情景中, 未来的生物质能利用以生物质发电和生物质液体燃料为主, 并且在不断增加, 相对而言, 生物质制氢无论是总量和增加幅度都十分微小, 而部分区域沼气的利用量反而在缓慢下降。考虑温升条件的约束时, 生物质发电和生物质液体燃料依然是主要的利用方式。与基准情景下各区域的生物质制氢接近于0不同的是(2020年各区域在基准情景下的生物质制氢平均利用量约为0 EJ/a, 2100年为0.01~0.16 EJ/a), 温升控制情景下生物质制氢的发展潜力将大幅增加, 2100年各区域生物质制氢在2 °C温升情景下的平均利用量为0.92~6.45 EJ/a, 在1.5 °C温升情景下的平均利用量

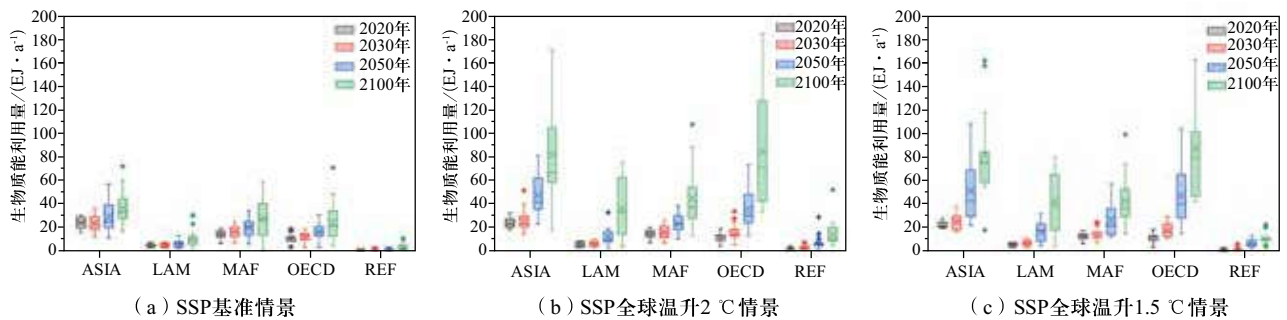


图4 SSP数据库中世界主要区域的生物质能发展潜力

Fig. 4 Regional bioenergy development potential of SSP scenario database

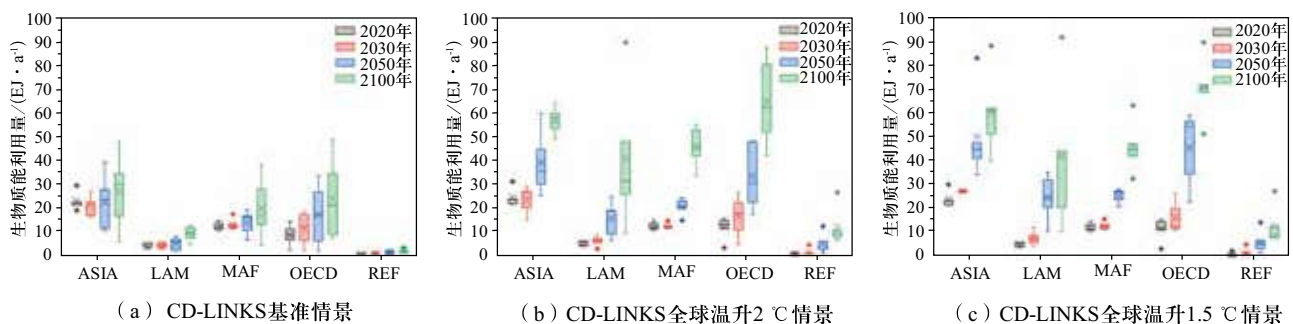


图5 CD-LINKS数据库中世界主要区域的生物质能发展潜力

Fig. 5 Regional bioenergy development potential of CD-LINKS scenario database

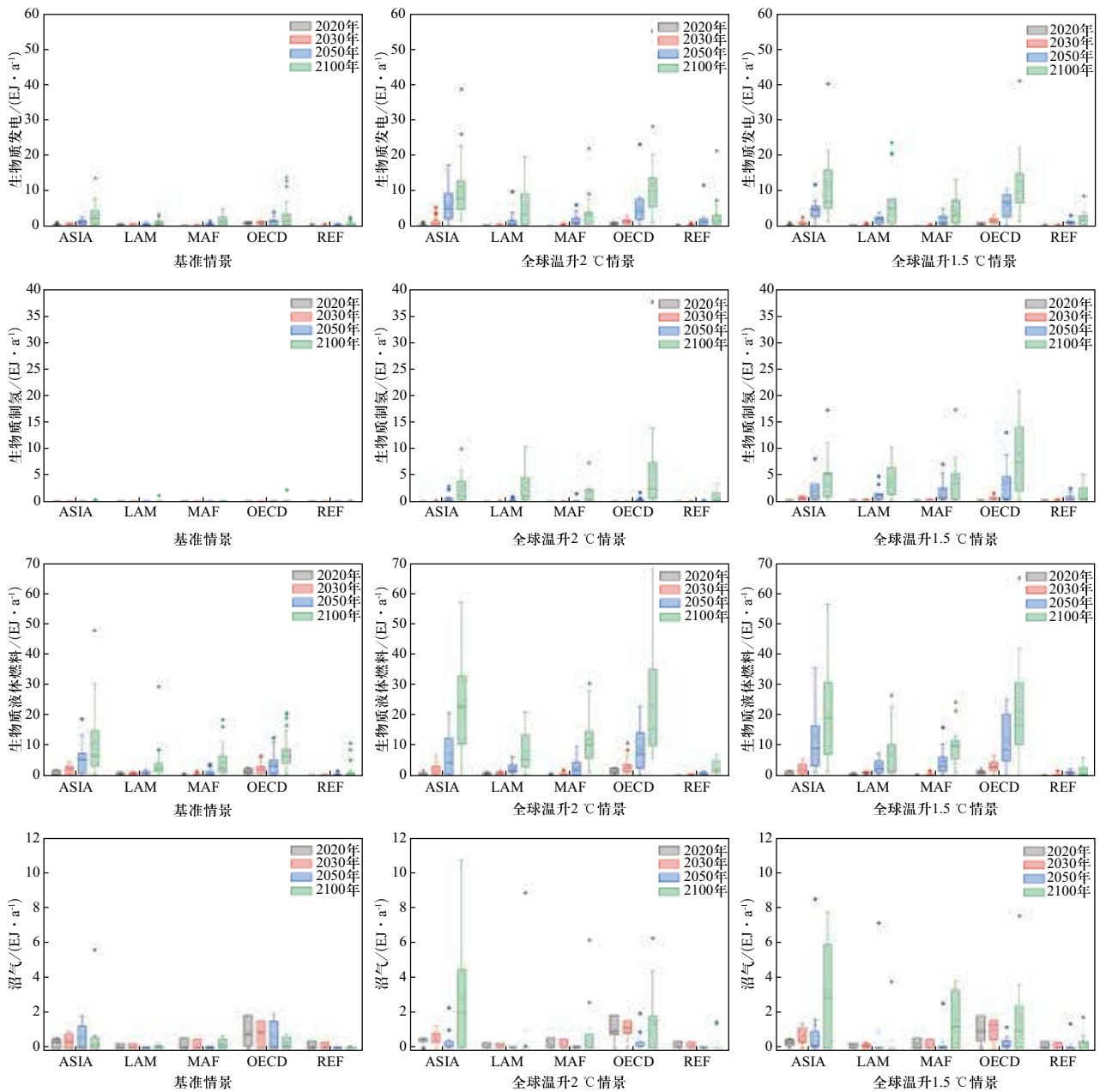


图6 SSP数据库中世界主要区域生物质能利用方式

Fig. 6 Regional bioenergy utilization of SSP scenario database

为1.24~8.76 EJ/a。此外,情景研究结果表明沼气的发展潜力受到升温目标的约束相对较小,基准情景下,除了OECD区域的沼气平均利用量在2020—2100年期间下降了0.59 EJ/a,其他区域基本维持当前的利用水平。在升温条件约束下,沼气利用量的增加幅度也很小,其中ASIA是增加最大的区域。2020—2100年期间,ASIA区域的平均沼气利用量在2℃和1.5℃升温情景下分别增加了2.51 EJ/a和2.84 EJ/a,而其他区域的增加量较小。

2.3 情景数据库中BECCS发展情景

由于各区域的生物质资源量、技术路线的选择以及社会经济发展水平的差异,其BECCS潜力也存在着较大的差异。生物质资源相对丰富的OECD区域,BECCS发展得相对更早,并且发展的潜力也最大。实际上目前已有的BECCS示范项目基本上分布在OECD区域^[14]。考虑到BECCS技术的发展,情景数据的结果表明各区域BECCS在2030年以前的发展较为缓慢,从2030年到2050年开始快速发展。

例如SSP数据库的2 °C温升情景中, 2030年全球BECCS发展潜力为0~29.83 EJ/a, 到2050年迅速增加到5.48~159.60 EJ/a, 其中ASIA和OECD是发展较快的地区, 2050年这两个区域的BECCS发展潜力分别为1.78~54.38 EJ/a和2.00~59.01 EJ/a, 其余区域为0~30.12 EJ/a。全球温升1.5 °C情景下, 各区域发展BECCS的时间更早, 并且发展潜力也更大。以BECCS发展潜力最大的两个区域为例, 全球温升1.5 °C情景下, ASIA区域在2030年和2050年的BECCS发展潜力分别为0.04~6.37 EJ/a和5.60~103.41 EJ/a; OECD区域为0.04~9.91 EJ/a和5.18~102.81 EJ/a (见图7)。

CD-LINKS数据库中, BECCS同样在2030年左右开始进入快速发展阶段。2 °C温升情景下, 2030年全球BECCS发展潜力为0~6.51 EJ/a, 到2050年达到34.10~69.51 EJ/a, 其中OECD是BECCS发展潜力最大的地区, 2050年其BECCS发展潜力为10.46~19.52 EJ/a。1.5 °C温升情景下, 各区域的发展潜力和发展速度也进一步扩大, 2030年全球BECCS发展潜力为0~7.36 EJ/a, 到2050年, 全球BECCS发展潜力将达到

37.46~128.50 EJ/a (见图8)。

从转化为二次能源的BECCS技术路线来看, 主要包括生物质发电、生物质制氢以及生物质液体燃料结合CCS。其中生物质发电和生物质液体燃料结合CCS占比较大, 而生物质制氢的占比较小, 但是当提高温升目标到1.5 °C时, 生物质制氢的增加量相对较大。全球温升1.5 °C情景下, 2100年全球生物质制氢结合CCS的平均利用量为22.85 EJ/a, 相对于2 °C情景增加了8.51 EJ/a, 作为对比, 2100年全球温升1.5 °C情景下生物质发电结合CCS的平均利用量相对于2 °C情景仅增加3.80 EJ/a (见图9)。

由于BECCS仅考虑了生物质能利用中适于结合CCS的技术路径, 因而一般其利用量会低于生物质能的利用量。全球温升2 °C情景下, 生物质能中BECCS的比重在2030年开始快速增加, 各区域从2030年占比2.7%~24.55%, 到2050年增加到26.96%~55.33%。从2070年开始各区域的BECCS占生物质能的比重稳定在60%~80% (见图10)。不同区域的BECCS在该区域总生物质能利用量中的占比也有差别, 2020—2100年的

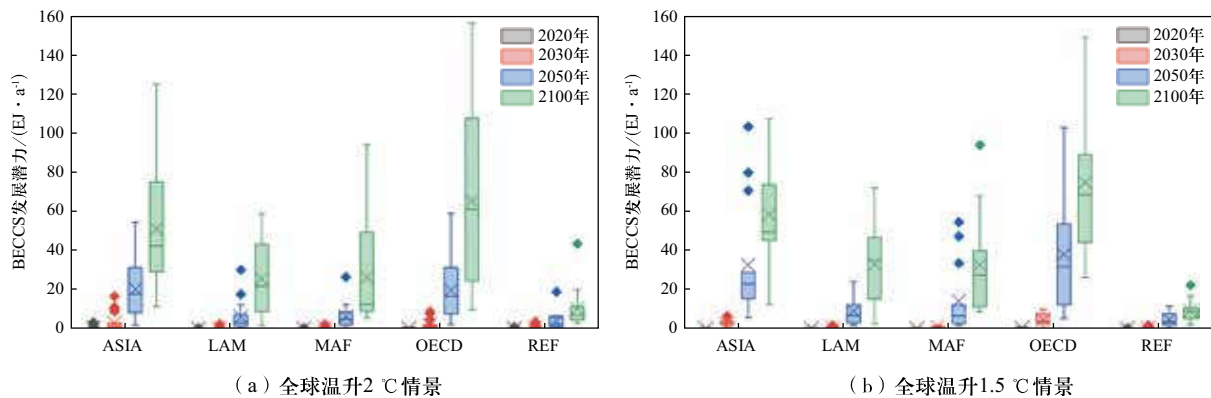


图7 SSP数据库中2 °C/1.5 °C温升情景下世界主要区域的BECCS发展潜力

Fig. 7 Regional BECCS development potential under global warming of 2 °C/1.5 °C in SSP scenario database

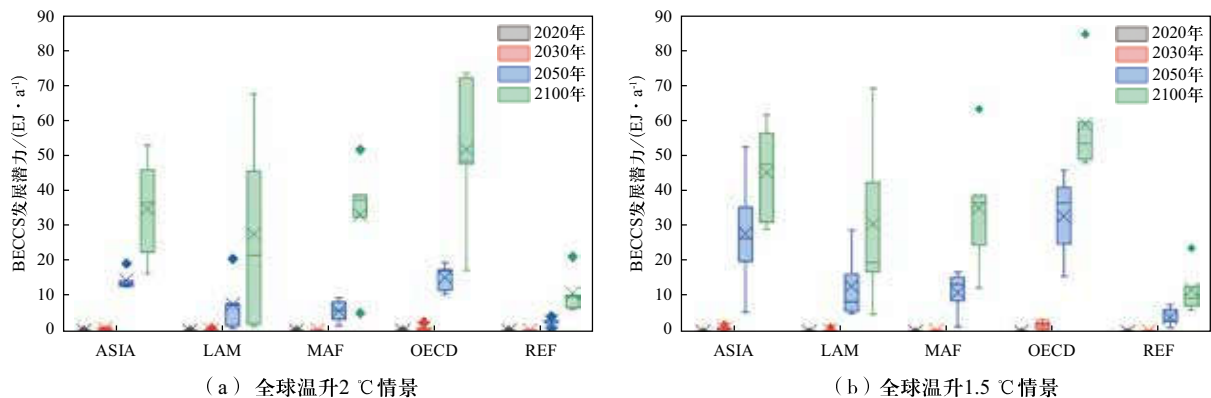


图8 CD-LINKS数据库中2 °C/1.5 °C温升情景下世界主要区域的BECCS发展潜力

Fig. 8 Regional BECCS development potential under global warming of 2 °C/1.5 °C in CD-LINKS scenario database

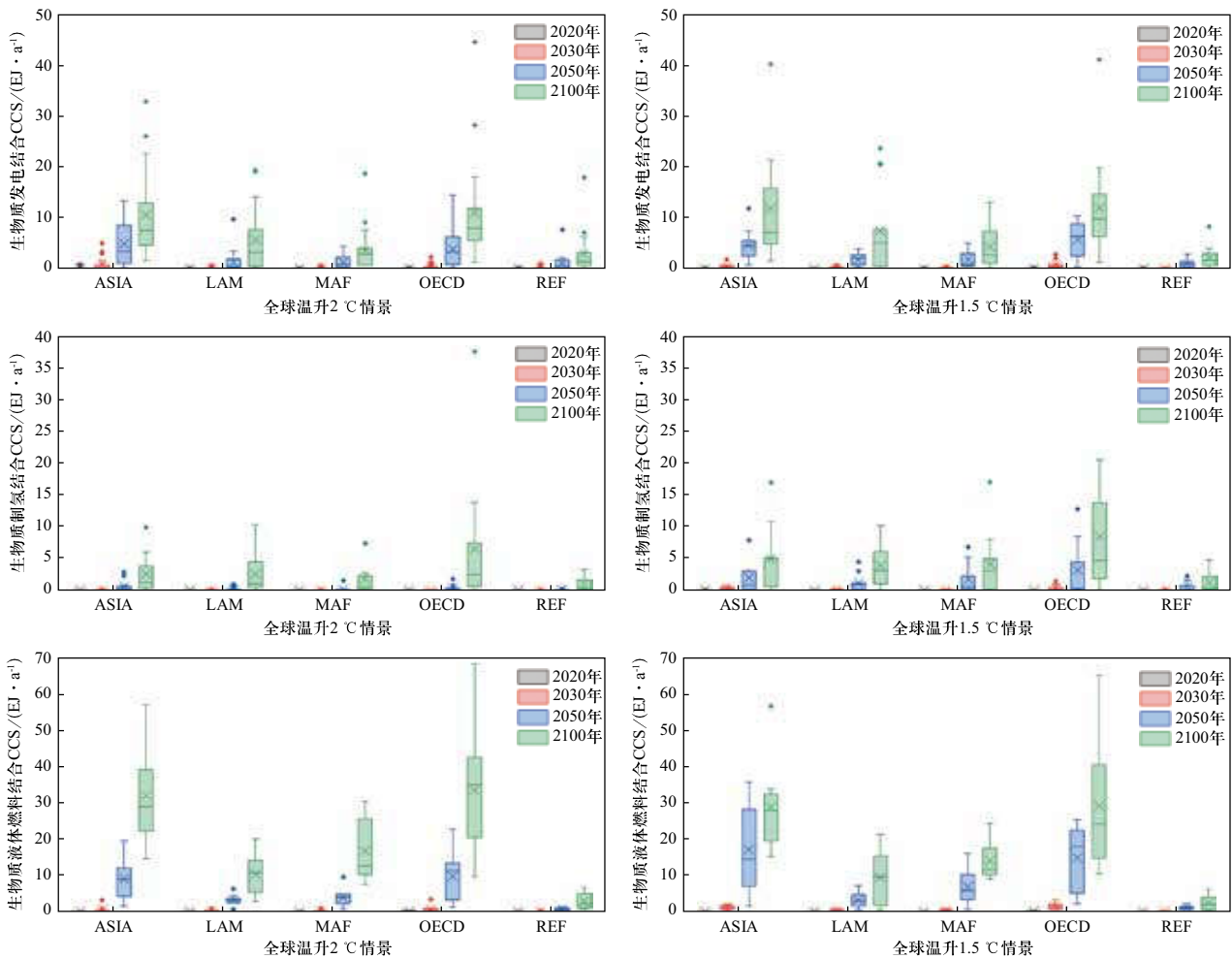


图9 SSP数据库中世界主要区域在全球升温2℃/1.5℃情景下的BECCS技术路线

Fig. 9 Regional BECCS technology options under global warming of 2 °C/1.5 °C in SSP scenario database

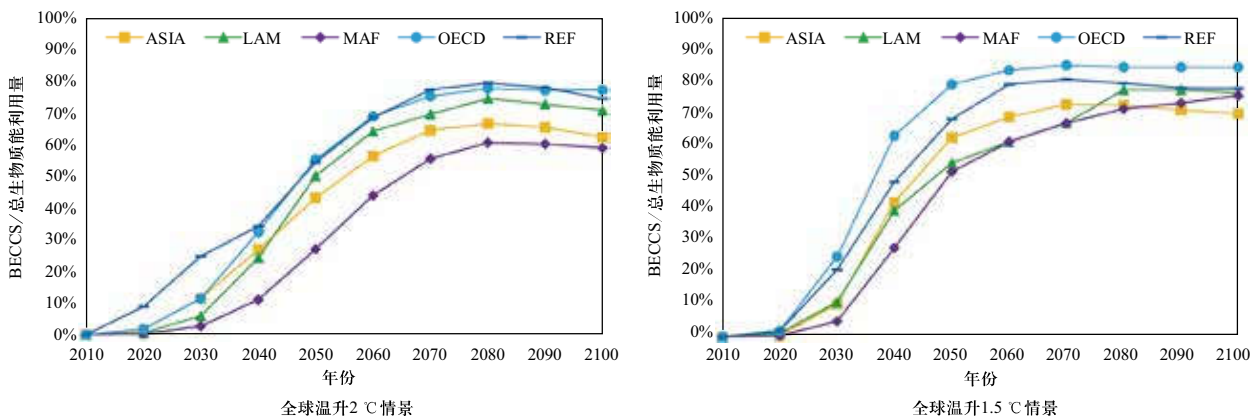


图10 SSP数据库中BECCS占生物质能利用量的比例

Fig. 10 BECCS share in bioenergy of SSP scenario database

大部分时间里OECD是占比最大的区域，而MAF是占比最小的区域。全球温升1.5℃情景下，BECCS在生物质能中的比重也在2030年开始迅速增加。与2℃温升相比，1.5℃情景下BECCS在生物质能中的比重更

早趋于稳定，并且比重更高。全球温升1.5℃情景下，2050年各区域BECCS的比重就达到51.74%~79.15%，并且进一步增加。到2100年，BECCS在生物质能利用中的比重最高的OECD区域将达到84.52%，即使比重

最低的ASIA区域也达到70.01%。

综合各区域的生物质能和BECCS技术的发展潜力来看，OECD区域当前的生物质能利用量、生物质能发展和BECCS的发展都具有较大的潜力。根据欧盟委员会在《欧洲绿色新政》中的目标，欧盟将会在2050年实现净零排放，为此，欧盟计划2030年温室气体排放目标将比1990年的水平减少50%，力争达到55%^[15]。ASIA区域的生物质种类主要以生物质固体资源为主，并且能源的转化主要集中在生物质发电领域，因此生物质固体燃料结合CCS是ASIA区域的主要发展方向，例如Ricci在2013年的研究^[16]表明就电力部门而言，BECCS将会在中国和印度等发展中国家快速发展。当前ASIA区域的生物质液体燃料利用量较小，按照未来温升2 °C和1.5 °C情景下的生物质液体燃料的发展潜力来看，生物质液体燃料结合CCS具有较大的发展空间。MAF区域的生物质能利用主要集中在生物质固体燃料，未来在生物质发电和生物质液体燃料结合CCS上会有较大的发展。LAM和REF区域目前的生物质能利用水平相对较低，全球温升2 °C和1.5 °C情景下需要逐步发展生物质发电、生物质制氢和生物质液体燃料结合CCS。

3 讨论

3.1 生物质能技术的原料构成

从生物质能技术的原料构成来看（见图11），农业剩余物、林业剩余物和能源植物是主要的生物质资源。

能源植物在未来的生物质能利用中可能具有较大

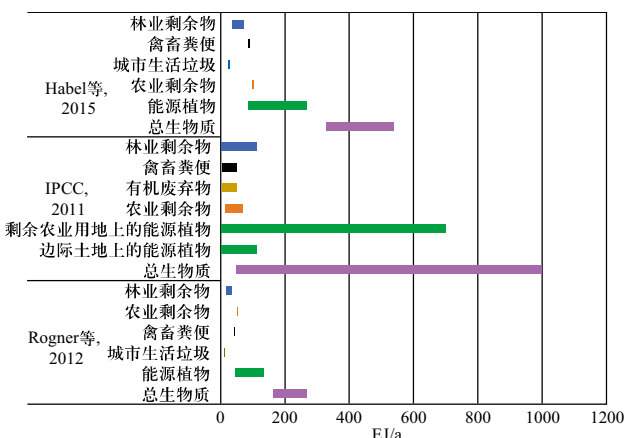


图 11 2050年全球生物质能技术潜力^[5, 18, 20]

Fig. 11 Global technical bioenergy potential in 2050

的比例，但是能源植物的不确定范围也最大。IPCC在《可再生能源与气候变化》特别报告中提出2050年全球生物质资源技术潜力为50~1000 EJ/a，其中剩余农业用地上的能源植物潜力为0~700 EJ/a，边际土地上的能源植物潜力为0~110 EJ/a^[5]。Haberl等在2015年认为2050年全球生物质能技术潜力在327~539 EJ/a之间，而能源植物达到89~179 EJ/a^[17]。Rogner等在2012年的研究表明2050年生物质能技术潜力将达到162~267 EJ/a，其中能源植物将达到44~133 EJ/a^[18]。IPCC在《全球升温1.5 °C》特别报告中提出在没有或有限超过1.5 °C的路径中，2050年能源植物的种植面积为20万~280万km²，而在更高超过1.5 °C的路径中，2050年能源植物的种植面积将达到720万km²。根据不同文献的评估结果，全球生物质资源潜力中能源植物的占比将达到0%~81%（见图11）。

农业剩余物和林业剩余物是目前大量利用的主要生物质资源，与能源植物相比其资源潜力的不确定范围较小，例如Rogner等在2012年认为2050年全球农业剩余物技术潜力为49 EJ/a，林业剩余物为19~35 EJ/a^[18]。Haberl等在2015年综合众多的研究成果表明2050年全球农业剩余物技术潜力为101 EJ/a，林业剩余物为37~71 EJ/a。EMF-33（EMF-33，即第33次斯坦福能源模型论坛，共11个IAMs参加了此次论坛）项目对于大规模部署生物质能以实现长期气候目标的可行性也进行了详细的研究。其中，关于农林剩余物作为原料的生物质能利用规模，基于参与EMF-33项目的8个IAMs模型的研究表明^[19]，在低生物质能需求情景下农林剩余物提供了大部分的生物质能供应，在高生物质能需求或较高的生物质原料价格时，农林剩余物的供应将会增加。在高生物质能需求情景下，农林剩余物将在2050年和2100年分别提供7%~50%和2%~30%的生物质能需求。同时考虑文献评估的农林剩余物资源潜力时，2050年农林剩余物的能源供应将达到55 EJ/a。

考虑到生物质能可利用条件的限制，IPCC于2011年预计到2050年全球可用于能源化利用的生物质潜在推广利用水平为100~300 EJ/a^[5]。

各区域的生物质能潜力也有较大差别。Haberl等在2010年评估了世界主要区域的生物质能技术潜力（见图12），其研究表明2050年OECD区域的生物质资源技术潜力达到了59 EJ/a，其中林业剩余物和能源植物占比最大，分别为23 EJ/a和17 EJ/a。ASIA地区的总生物质能技术潜力为59 EJ/a，其中农业剩余物占比最大，达到23 EJ/a。REF、MAF和LAM区域的生物质能技术潜力也

分别达到19 EJ/a、33 EJ/a和45 EJ/a^[20]。各区域的生物质能潜力的不确定范围也较大，主要以能源植物和林业剩余物的不确定为主，其中以OECD的不确定范围最大，其生物质能技术潜力为41~77 EJ/a，REF区域的不确定范围最小，其生物质能技术潜力为12~23 EJ/a^[20]。

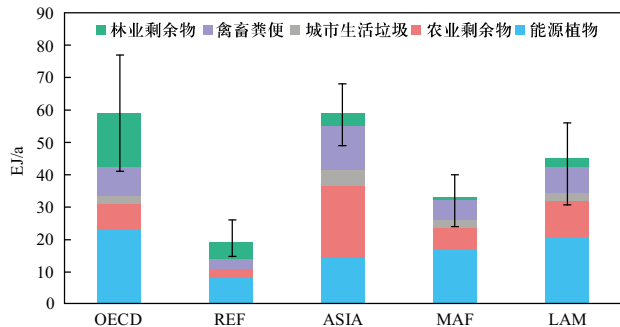


图 12 2050年全球各区域生物质能技术潜力
(根据Haberl 等在2010年的分析整理)^[20-24]

Fig. 12 Global and regional technical bioenergy potential in 2050
(adapted from Haberl et al., 2010)

3.2 全球及各区域碳封存潜力

BECCS的减排量不仅和生物质能潜力相关，同时还可能受制于全球碳封存潜力。考虑到不同地区的地质构造差异、岩层的渗透率要求，全球碳封存潜力在空间上差异较大。根据GCCSI在2016年对全球29个国家的碳封存潜力的研究^[25]，全球碳封存潜力为7374~27 522 Gt CO₂，其中ASIA地区的碳封存潜力为1 852.4~1949 Gt CO₂，LAM地区为2130 Gt CO₂，MAF地区为194.3~465.6 Gt CO₂，REF地区仅评估了俄罗斯的碳封存潜力，达到6.8 Gt CO₂，OECD地区是碳封存潜力最大的地区，达到3190~22 971 Gt CO₂，其中美国的碳封存潜力最大，碳封存潜力在2367~21 200 Gt CO₂之间。Benson等在2012年评估的全球碳封存潜力为5052~24 471 Gt CO₂^[26]，其中咸水层的碳封存潜力最大，为3963~23 171 Gt CO₂，此外，枯竭油气田和煤层的碳封存潜力分别为996~1150 Gt CO₂和93~150 Gt CO₂。McCollum等在2014年认为全球碳封存潜力为1680~24 000 Gt CO₂^[27]。综合以上研究可以看出，全球碳封存潜力范围在1680~27 522 Gt CO₂，是否可以支撑全球BECCS的发展，具有不确定性。

3.3 BECCS的生态影响

大规模部署BECCS还面临土地利用变化、水资源紧张和粮食安全等问题^[4, 28]。Fajardy等在2017年的

研究表明BECCS的大规模部署将需要大量的土地、淡水和营养物^[29]。Smith等在2015年对负排放技术发展的生物物理和经济条件的限制进行了评估^[30]，在全球温升2 °C路径下，发展BECCS需要的土地面积为380万~700万km²，是2000年全球农业用地的7%~25%，以及可耕地和永久性作物面积的25%~46%，同时需要额外使用约全球3%的淡水资源。BECCS的发展很可能对淡水、土地和生物圈造成严重影响^[31]，这也引起了BECCS对减缓气候变化作用的争议^[32-33]。但是，如果生物质能、CCS和BECCS的发展受到限制，许多模型的结果表明很难将温升幅度控制在2 °C范围内^[34]。平衡BECCS的发展与土地利用、淡水资源、粮食安全和生态环境安全将是世界主要区域BECCS规模化发展中需要面临的挑战。

3.4 生物质能技术路线

目前生物质发电、生物质液体燃料和沼气是生物质能利用的主要方式。其中生物质发电和生物质液体燃料由于容易与CCS相结合，是未来生物质能利用的主要方式。当前生物乙醇和生物柴油等生物质液体燃料主要作为交通运输燃料应用于交通部门来减少CO₂排放和空气污染，但是电动汽车的快速发展，预计未来可能会逐步替代汽油车，从而导致交通部门对生物质液体燃料的需求减少。2019年IRENA预计到2050年电动汽车将会达到10亿辆，同时2050年电力能源在交通部门的终端能源消费中的比重将达到43%^[35]。2019年IRENA同时也调查分析了目前生物质液体燃料发展面临的主要障碍^[36]，其中道路运输的日益电气化将使得交通部门的低碳化发展不仅依靠生物质液体燃料的应用，未来生物质液体燃料的应用将朝着多种用途的方向发展。因此相对于生物质发电，生物质液体燃料的发展潜力将存在更大的不确定性。

4 结论与建议

本研究基于全球情景研究结果，结合全球各区域生物质资源利用现状、生物质能潜力与碳封存潜力，评估分析了全球温升2 °C和1.5 °C情景下主要区域的BECCS发展潜力。各区域BECCS从2030年到2050年开始快速发展。全球温升2 °C情景下，主要以生物质发电和生物质液体燃料结合CCS为主，而生物质制氢结合CCS的发展潜力较小，但是在温升1.5 °C情景下，生物质制氢结合CCS相对于2 °C温升情景的增加量较大。

分区域来看, OECD和ASIA区域是BECCS发展潜力最大的两个区域, 其次是MAF和LAM区域, 而REF区域的BECCS发展潜力最小。BECCS在生物质能利用的比重上, OECD区域是比重最大的地区, 而MAF区域是比重最小的地区。到本世纪末, 全球温升2 °C和1.5 °C情景下各区域的BECCS在生物质能利用中的比重都超过了50%。

当前BECCS的发展还存在争议, 各区域的生物质资源潜力以及对BECCS的需求也不尽相同。BECCS的发展在实现全球温升2 °C和1.5 °C以及各区域实现净零排放路径中具有重要作用。如何协调各区域的BECCS发展, 以及平衡BECCS的发展过程中对土地、淡水、粮食和生态环境的影响是全球各区域应对气候变化, 实现全球温升2 °C/1.5 °C路径中面临的巨大挑战。

参考文献

- [1] WMO, GAW. Greenhouse gas bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018[R]. Geneva: World Meteorological Organization and Global Atmosphere, 2019.
- [2] UNEP. The emissions gap report 2019[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019.
- [3] GASSER T, GUIVARCH C, TACHIIRI K, et al. Negative emissions physically needed to keep global warming below 2 °C[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7958.
- [4] IPCC. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [5] IPCC. Renewable energy sources and climate change mitigation special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press, 2011.
- [6] SSP Public Database Version 2.0[DB/OL]. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>.
- [7] IEA. World energy statistics (2019 edition)[R]. Paris: International Energy Agency, 2017.
- [8] IRENA. Renewable energy statistics 2019[R]. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency, 2019.
- [9] CD-LINKS Scenario Database [DB/OL]. <https://db1.ene.iiasa.ac.at/CDLINKSDB>.
- [10] ROGELJ J, POPP A, CALVIN K V, et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 325-332.
- [11] 曹丽格, 方玉, 姜彤, 等. IPCC影响评估中的社会经济新情景(SSPs)进展[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(1): 74-78. CAO Lige, FANG Yu, JIANG Tong, et al. Advances in shared socio-economic pathways for climate change research and assessment[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2012, 8(1): 74-78(in Chinese).
- [12] 张杰, 曹丽格, 李修仑, 等. IPCC AR5中社会经济新情景(SSPs)研究的最新进展[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 225-228. ZHANG Jie, CAO Lige, LI Xiucang, et al. Advances in shared socio-economic pathways in IPCC AR5[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2013, 9(3): 225-228(in Chinese).
- [13] CD-LINKS. Linking climate and sustainable development: Policy insights from national and global pathways[R]. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2019.
- [14] KEMPER J. Biomass and carbon dioxide capture and storage: a review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 401-430.
- [15] EUROPEAN-COMMISSION. The European Green Deal[Z]. Brussels: 2020.
- [16] RICCI O, SELOSSE S. Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage[J]. Energy Policy, 2013, 52: 689-698.
- [17] HABERL H, ERB K H, KRAUSMANN F, et al. Global bioenergy potentials from agricultural land in 2050: Sensitivity to climate change, diets and yields[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(12): 4753-4769.
- [18] ROGNER H, AGUILERA R F, ARCHER C L, et al. Chapter 7- Energy Resources and Potentials[M]//Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: 2012: 425-512.
- [19] HANSSEN S V, DAIIOGLOU V, STEINMANN Z J N, et al. Biomass residues as twenty-first century bioenergy feedstock—a comparison of eight integrated assessment models[J]. Climatic Change, 2019.
- [20] HABERL H, BERINGER T, BHATTACHARYA S C, et al. The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(5-6): 394-403.
- [21] WBGU. Future bioenergy and sustainable land use[R]. Berlin, Germany: German Advisory Council on Global Change (WBGU), 2009.
- [22] ERB K H, HABERL H, KRAUSMANN F, et al. Eating the planet: feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely—a scoping study[R]. Vienna, Austria and Potsdam, Germany: Potsdam Institute of Climate Impact Research, 2009.

- [23] VAN VUUREN D P, VAN VLIET J, STEHFEST E. Future bio-energy potential under various natural constraints[J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4220-4230.
- [24] ANTTILA P, KARJALAINEN T, ASIKAINEN A. Global potential of modern fuelwood[R]. Vantaa, Finland: Finnish Forest Research Institute, 2009.
- [25] GCCSI. Global storage portfolio: a global assessment of the geological CO₂ storage resource potential[R]. Melbourne, Australia: Global CCS Institute, 2016.
- [26] BENSON S M, BENNACEUR K, COOK P, et al. Chapter 13- Carbon capture and storage[M]//Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: 2012: 993-1068.
- [27] MCCOLLUM D, BAUER N, CALVIN K, et al. Fossil resource and energy security dynamics in conventional and carbon-constrained worlds[J]. Climatic Change, 2014, 123(3): 413-426.
- [28] 常世彦, 郑丁乾, 付萌. 2 °C/1.5 °C温控目标下生物质能结合碳捕集与封存技术 (BECCS) [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 277-287.
CHANG Shiyan, ZHENG Dingqian, FU Meng. Bioenergy with carbon capture and storage(BECCS) in the pursuit of the 2 °C/1.5 °C target [J], Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 277-287 (in Chinese).
- [29] FAJARDY M, MAC DOWELL N. Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions?[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(6): 1389-1426.
- [30] SMITH P, DAVIS S J, CREUTZIG F, et al. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(1): 42-50.
- [31] HECK V, GERTEN D, LUCHT W, et al. Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries[J]. 2018, 8(2): 151-155.
- [32] FUSS S, CANADELL J G, PETERS G P, et al. Betting on negative emissions[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(10): 850-853.
- [33] ANDERSON K, PETERS G. The trouble with negative emissions[J]. Science, 2016, 354(6309): 182-183.
- [34] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] [R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [35] IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [36] IRENA. Advanced biofuels. What holds them back?[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-06-01。



郑丁乾

作者简介:

郑丁乾 (1990), 男, 硕士, 研究方向为地理信息系统和生物质资源评价, E-mail: zhengdingqian@mail.tsinghua.edu.cn。

常世彦 (1979), 女, 副研究员, 主要从事能源管理与气候政策研究。通信作者, E-mail: changshiyan@mail.tsinghua.edu.cn。

蔡闻佳 (1984), 女, 副教授, 主要从事气候变化研究和系统分析, E-mail: wcai@mail.tsinghua.edu.cn。

杨方 (1981), 女, 高级工程师, 研究方向为气候变化、电力系统、能源与环境等, E-mail: fang-yang1@geidco.org。

张士宁 (1987), 男, 博士, 研究方向为全球能源发展战略规划、综合评价、能源经济与能源供需、可再生能源发电技术等, E-mail: shining-zhang@geidco.org。

(责任编辑 张鹏)