

可持续发展目标 (SDGs) 下, 全球生物质能的供给及其影响

房晨

北京大学环境科学与工程学院 2019 级本科生

摘要: 作为一种关键的可再生能源类型, 生物质能对于我国实现能源转型与双碳目标具有重要价值, 同时也有着巨大的供给潜力与发展前景。本研究借助综合评估模型 GLOBIOM, 定量模拟了不同需求量与不同可持续发展约束情景下, 全球生物质能的生产成本, 并绘制了生物质能的供给曲线, 同时定量分析了生物质能生产对土地管理、粮食安全、温室气体排放等可持续发展目标 (SDGs) 之间的权衡取舍关系, 对于全球生物质能的发展与政策制定提供了一定的模型依据。

关键词: 可持续发展目标 生物质能 能源转型 粮食安全

1. 研究背景

1.1 生物质能的定义与内涵

生物燃料 (Biofuel) 是直接或间接来源于植物通过吸收太阳光进行光合作用的, 以化学能形式储存的有机物质的总称。通过燃烧、发酵等方式利用生物燃料产生的能源类型被定义为生物质能 (Biomass Energy 或 Bioenergy)。

生物燃料的来源一般包括四类: 木材及其加工废料、农作物及其废料、城市固体废物、动物粪便与人类污水。而生物质能源转化为生物质能的方式主要包括直接燃烧产生热能或者通过热化学 (热解、加氢处理或气化)、化学或生物的方式转化为气态、液态或固态的燃料, 包括生物乙醇、生物柴油 (Biodiesel)¹、沼气 (Biogas 或 Biomethane) 等, 从而燃烧产生热能², 转化过程中也可以与氢能、燃煤、厌氧发酵等技术耦合实现生物质发电与资源化利用。

根据上述生物质能的来源可以将其大致分为两类: 被动性生物质与主动型生物质。其中, 前者主要产生于人们生产生活中排出的有机废物, 而后者则是人类为了满足能源和资源的需求主动且有规划种植的, 富含糖类、淀粉类、油脂类、纤维素类的作物 (陈勇, 2021)。而主动型生物质能的发展历史又主要分为两代 (车长波 & 袁际华, 2011)。

第一代生物质能主要来自于粮食作物, 农作物制成的生物乙醇 (玉米、甘蔗、甜菜) 与生物柴油 (油菜籽), 代表性的国家为美国、巴西等粮食生产大国, 它们利用相关作物等产量较高的优势在 20 世纪 90 年代左右生产了大量第一代生物质能。但发展此类生物

¹ 生物质首先转化为脂肪酸甲酯 (fatty acid methyl esters, FAME), 之后再生成生物柴油。

² Biomass explained (美国能源信息署 EIA 对于生物质能的介绍)

Available at: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/> (Accessed 16 Oct 2022)

质能可能导致粮食种植结构单一、粮食供应总量下降、粮食（油料）价格振荡上升、粮食危机等一系列问题。

第二代生物质能主要来源于非粮能源作物或麦秆、草和木材等农林废弃物，采用将生物的木质纤维素（Ligno-Cellulosic）转化为生物燃料的模式产出生物质能，主要的非粮能源作物包括柳枝稷（Switchgrass）、巨芒草（Miscanthus×Giganteus）等（Kato et al., 2014）。由于生长在种植农作物的边缘地带，因此该类生物质能与耕地的竞争关系较小，在未来可能会得到广泛应用。³

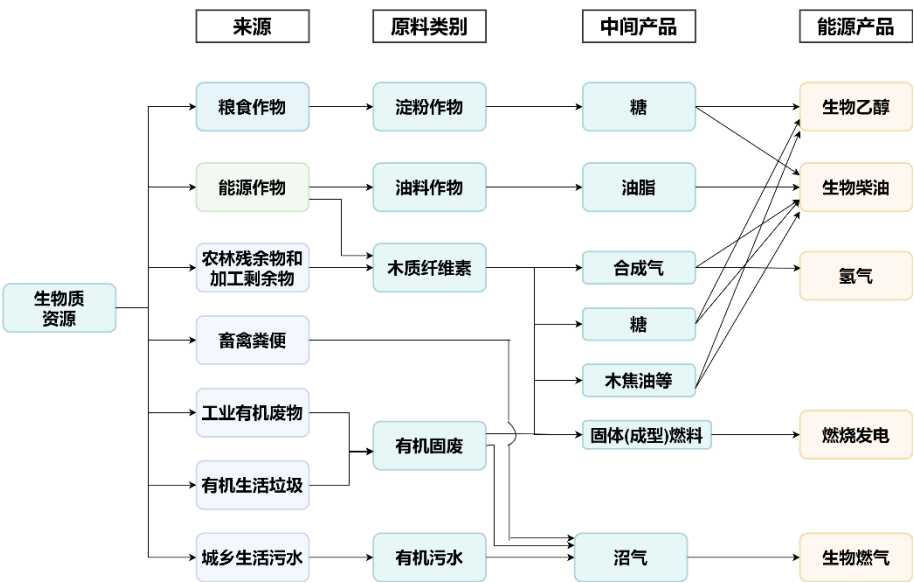


图 1 生物质能原料、中间产品与能源产品关系示意图

1.2 生物质能与能源系统转型

社会与经济的发展离不开能源的驱动与支撑。然而传统能源类型以化石燃料为主，在发展过程中产生了多方面的问题：①化石能源供给不可持续。随着人们对化石能源的大量消耗，煤、石油、天然气等会逐渐陷入枯竭；②化石能源污染严重。大量的大气污染物质来源于化石燃料的直接燃烧，尽管目前已经对燃料本身进行了充分的预处理，但燃烧过程中仍然会有氮氧化物、硫化物等物质释放，化石燃料燃烧同时也是大气中 PM_{2.5} 的主要来源，对人体健康构成威胁；③化石能源燃烧会排放大量温室气体。自工业革命以来，三大产业的发展均离不开化石燃料（其中，第二产业的依赖程度最大），从而造成了大量温室气体的排放，使得全球气候变化日益加剧，2011-2020 年全球表面温度要比 1850-1900 年暖 1.09℃，其中，陆地增温的幅度是 1.59℃（IPCC，2021），人类生存面临巨大威胁（Wu Y et al., 2018）。因此，在来自多方面的压力下，能源系统需要进行彻底而深刻的变革与转型。

“能源转型”（Energy Transition）这一概念最早出自上世纪八十年代德国科学院出版的名为《能源转型：没有石油与铀的增长与繁荣》的报告，该报告呼吁德国放弃核电

³ 其实还有第三代生物质能的概念，指的是以微藻为原料生产的各种生物燃料，也称为微藻燃料，但研究尚处于实验室阶段，提炼难度高，距离商业化阶段还比较远。

和石油能源，转向可再生的、安全、高效的绿色能源（柳逸月，2017）。实际上，能源转型始终伴随着人类的历史发展进程，随着社会经济的高速发展，对能源转换效率与可持续性提出了更高的要求，一次能源中，煤炭替代薪柴、石油替代煤炭的过程正是能源转型的鲜活案例，而风、光、水以及生物质能等可再生能源则会是当前与未来能源转型的重要发展目标。

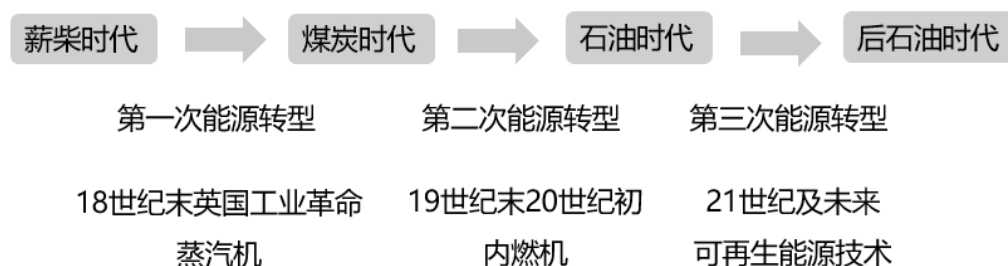


图 2 能源转型时间轴

生物质能对于能源转型的作用主要体现在以下三个方面。

首先，生物质能是未来重要的替代能源。在 20 世纪 70 年代，当时的气候变化问题并没有今天这么严重，但由于当时爆发了世界石油危机，全球油价暴涨，工业化国家的经济增长放缓，各国开始加大对可降低石油依赖度的替代性能源的重视程度，开始寻求各种替代能源类型。从那时起，科学家就开始了针对生物质能的研究，如美国的玉米乙醇、巴西的甘蔗乙醇、北欧的生物质发电、德国的沼气等纷纷出台，但由于生物质能发展过程中存在生产成本高、技术突破难度大、粮食安全有风险等等问题，因此在 21 世纪初期，生物质能的发展处于较为平稳的状态，没有得到足够的重视。

其次，作为一种替代能源，生物质能在能源结构调整方面有着重要作用。能源系统转型需要能源结构的根本性调整，这意味着我国需要由以煤、油、气为基础的化石能源结构转为以风电、光电、水电、核电为主的零碳能源结构。在未来新的能源结构体系中，风、光、水、核转化生成的最终能源形态均为电能，而生物质是其中唯一一种以燃料形式供能的能源类型。生物质的燃料属性使得其具有广泛的应用场景与丰富的物质状态，既能对现有的传统化石能源起到较好的替代效果，也有助于满足不同部门的用能储能需求，具有显著的灵活性。

最后，生物质能与负排放技术（Negative Emission Technology, NET）相结合并规模化应用于发电行业将有力替代传统化石燃料，推动电力部门实现净零排放乃至负排放。

在未来，生物质能作为零碳燃料会有更多的应用情景，将会发挥更广泛且重要的作用。对于维持社会经济稳定运行（部分工业生产过程，如工业窑炉等，就需要固体或气体燃料），补充太阳能光伏和风能的可变发电（发热电促进电力系统调峰）等方面均具有重要意义⁴。

⁴ 江亿：生物质是未来零碳能源系统中最重要燃料（中国能源网）

Available at: <https://www.china5e.com/news/news-1127154-1.html> (Accessed 16 Oct 2022)

1.3 生物质能与碳中和目标

2016 年的《巴黎协定》(Paris Agreement) 要求全球平均气温升高幅度需要控制在 2°C 以内, 并努力将其限制在 1.5°C 的范围内⁵。2020 年 9 月, 习总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了 CO_2 “排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和” 的双碳目标⁶。可以看出, 温室气体减排将会在未来很长一段时间影响我国乃至全球的发展模式与路径。

为了控制温室气体的排放不再增长, 需要在未来努力实现碳中和 (Carbon Neutral), 达到源 (Source) 与汇 (Sink) 的平衡状态, 即人为排放量可以被人为努力和自然过程所吸收的净零排放状态。根据丁仲礼院士等人《中国碳中和框架路线图研究》提出的碳中和实现机制, 碳中和状态下, 不得不排放的 CO_2 为 25 亿吨左右, 这部分 CO_2 将会被自然过程消耗 13 亿吨, 剩余的 12 亿吨则需要人为采用工业封存、木材蓄积、土壤固碳等方式进行吸收。

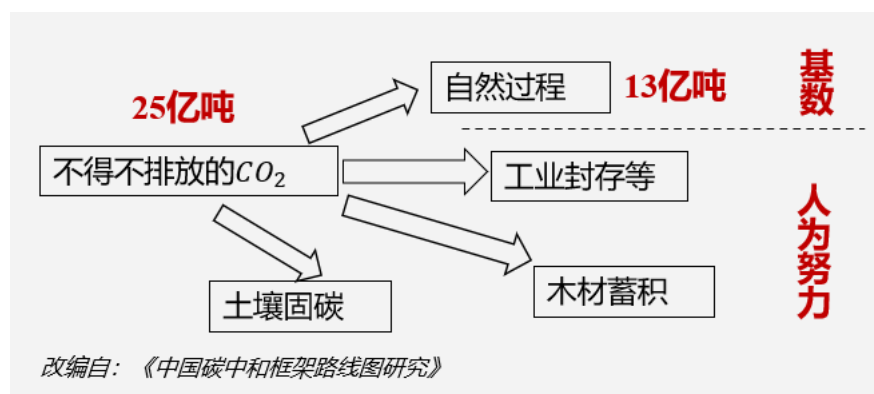


图3 碳中和实现机制示意图

生物质能作为直接替代化石能源的燃料对于碳减排有重要作用, 如果不考虑能源作物生长过程中的生命周期排放, 可以将生物质能的使用过程视为净零排放, 创造显著的减排效益。早期瑞典学者的研究曾指出, 将生物量的使用量增加 $125 \text{ TWh}^7/\text{yr}$ 将消除瑞典化石燃料二氧化碳排放量的一半以上 (Gustavsson L & Sverinsson P, 1996)。国际可再生能源署 IERNA 的一份研究报告也指出, 如果不考虑可行性以及成本, 更广泛地使用生物质能替代煤与焦炭, 能够至少削减 50% 的碳排放⁸。由此可以看出, 生物质能的减排潜力巨大, 有助于我国碳减排的推进与实施。

同时, 生物质能还可以改造成为负排放技术 (NETs), 从而能够较为高效且快速实现温室气体从大气的固定与吸收。如果在集中使用生物质能的场景中加上碳捕集、利用或封存技术 (CCUS) (比如在电厂燃烧这类点源上加上 CCUS 设备), 就能够带来净

⁵ The Paris Agreement (UNFCCC 对于巴黎协定的介绍)

Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (Accessed 16 Oct 2022)

⁶ 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 (中共中央党校)

Available at: https://www.ccps.gov.cn/xtt/202009/t20200922_143555.shtml (Accessed 16 Oct 2022)

⁷ TWh 即太瓦时, 是指 10 亿千瓦时, $1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$

⁸ IERNA 碳循环经济研究报告中“生物质能”有关章节: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/CC_05_Recycle_bioenergy_2020.pdf (Accessed 16 Oct 2022)

负排放,也就是生物质能耦合碳捕集、利用或封存技术(Bioenergy with Carbon Capture and Utilization or Storage, BECCUS⁹)。目前主流的负排放技术除了 BECCS 外,还包括植树造林工程(Afforestation and Reforestation)、直接空气捕集与封存(Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS)、强化风化(Enhanced Weathering)、海洋肥料(Ocean Fertilization)、生物炭(Biochar)、土壤碳封存(Soil Carbon Sequestration)等若干类型,有综述文章整理了每类负排放技术的文献后发现,相比其他负排放的技术类型,BECCUS 技术具有很强的潜力,能带来每年 0.5-5Gt 二氧化碳的减排效果,但可能成本偏高,未来的不确定性较大(Fuss S et al., 2018)。

目前对于 BECCS 技术的研究集中于两方面,一方面从可行性角度分析不同种类能源作物的种植与生物质能的供给量能否对土地利用造成过大负担,能否支撑未来负排放技术的使用(Kato et al., 2014);另一方面则分析碳捕集与封存过程对地球系统可能造成的对陆地系统变化、生物圈完整性和生物地球化学流动等领域的反馈影响(Heck et al., 2018)。由于,碳捕集、利用或封存技术(CCUS)当下还不够成熟,在未来将其大规模地用于负排放过程具有不确定性。

另外,生物质能与粮食生产和土地利用也有着一定的联系,因此为了寻求能源、环境和粮食三角平衡的解决方案,需要正确应用生物质能,力求社会在实现全球温室气体减排的同时创造社会效益(Tilman et al., 2009),并在我国支撑双碳目标的实现、助力美丽乡村建设。

尽管生物质能在未来具有广阔的应用前景,但生物质能的发展模式是值得注意与思考的。如果通过牺牲林地或者泥炭地等具有巨大碳储存能力的土地类型进行生物质能的生产,则有可能在生产过程中产生土地利用变化(Land Use Change, LUC)进而造成大量温室气体的泄漏,产生“碳负债”(Carbon Debt)现象,即利用可耕地或森林生产生物质能引起的间接排放远大于生物质能创造的减排潜力(Bensten et al., 2017)。因此需要注意开发生物质能的土地类型,应当尽量选择废弃的农田、边缘土地或者直接利用废弃生物质进行生物质能的生产与加工,努力减少对自然界自身储碳固碳能力的扰动。

1.4 生物质能的供需情况

根据 IEA 统计,目前生物质能约占世界一次能源供应总量的十分之一¹⁰(这里不包括生物质能的传统使用,即发展中国家和新兴经济体借助效率低下的明火或简单的炉灶使用生物质能进行做饭取暖,这对人类健康和环境有负面影响),在全部可持续能源中的占比具有重要地位(约占可再生能源中的 70-80%),而其中木质生物质能占据了绝大部分生物质能的供给比例(Bauen et al., 2009)。

从分布情况上看,北美(主要是美国)、拉丁美洲(主要是巴西)是生物质能需求量最高的地区,分别占据全球总量的 1/3 左右,其次则是欧洲与亚洲。事实上,中国是目前生物质能直接燃烧最多(80Mtce, 2018)、沼气产量最多(198 亿 m³, 2019)的国家,可见我国的生物质能具有巨大的供给潜力。但生物质发电装机容量最大(76.2GW, 2019)与生

⁹ 有时也省去“利用”(Utilization)部分,简称为 BECCS。

¹⁰ 国际能源署 IEA 上 Bioenergy 专题介绍

Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy> (Accessed 16 Oct 2022)

物燃料产量最多(37.0Mtoe, 2019)的国家则是美国。因此, 针对生物质进行深入加工制备燃料或用于发电, 使其得以高效利用十分重要(王庆一, 2021)。

未来对于生物质能的需求也将逐渐升高。根据 IEA 的预测, 全球生物质能需求量会有显著升高的趋势, 净零目标下, 生物质能的需求在 2050 年将会至少达到 100EJ 的水平, 占据总能源供给的比例将会接近 20%, 同时生物质能的具体利用情景也会从传统意义上的直接焚烧转变为更多地用于发电、液态或气态生物燃料的加工与生产当中¹¹。另外, 据预测, 中国到 2060 年生物质能需求量在基准情景下大概是 8-10EJ, 若是较为严格的 1.5°C 碳中和情景则可能会使需求量增加到 20EJ (约 6 亿吨标准煤), 占一次能源消费比重的 10%-15%。在 1.5°C 情景下, 全球生物质能的需求到 2050 年一般认为会在 100-280EJ 的范围内。

¹¹ Source: Bioenergy demand in the Net-Zero by 2050 Scenario, 2010-2050 (IEA, 2021)
Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/bioenergy-demand-in-the-net-zero-by-2050-scenario-2010-2050> (Accessed 16 Oct 2022)

2. 文献综述

2.1 生物质能的供给

2.1.1 理论供给潜力评估

不少文献基于已有的统计数据资料进行折算与分析,对我国近年来生物质能的供给情况进行了测算与评估。

Li et al. (2005)基于 2005 年前后我国农村人口比例较多的现实背景,根据农作物产量、肉类消费量的预测结果估算了非植物(即能源作物)的生物质能(涉及农业残余物、牲畜粪便、市政废水等不同类型)供给潜力,2005 年与 2010 年的潜力分别为 8.1 与 8.9EJ,其中农业残余物占据了主导,达到了 70%以上的比例。Yang et al. (2010)使用了国家林业局的林业清查统计数据,同时结合统计年鉴的数据,借助热值转换效率进行核算,得出了 2007 年生物质能的供给潜力为 8.87 亿吨标准煤(约 26EJ,其中动物粪便占据 50%,其次是森林生物质,占 32%),以及全国的空间分布情况,结果显示生物质能在我国的分布规律呈现大致均匀与东密西疏的特征。Zhou et al. (2011)利用生物质的热值估计了我国 2008 年的生物质能供给潜力,结果发现生物质能的供给潜力达到了 25.2EJ,占当年总能源消耗量(83.4EJ)的 30%,且农业残余物提供了 14.7EJ,占据了生物质能总量的接近 60%。(该研究考虑了 LIHD 的影响,即通过改善土地使用生产实现负碳排放的生物质能燃料)。Xing et al. (2021)利用中国农业和工业统计数据库,并结合不同报告、年鉴等数据来源整理了我国不同生物质原料的产量数据,并与之前的研究进行对比分析。研究将生物质原料分为农业残余物(Agricultural Residues)、林业残余物(Forestry Residues)、能源作物(Energy Crops)三种类型分别进行生物质实物量与能量值的折算。最终发现:2015 年,农业残留物的供给接近 14.7-16.8 EJ/年,林业和能源作物的供给大约为 6EJ/年。从不同评估结果的对比中也可以看出不同文献对于生物质能的折算结果具有较大差异。

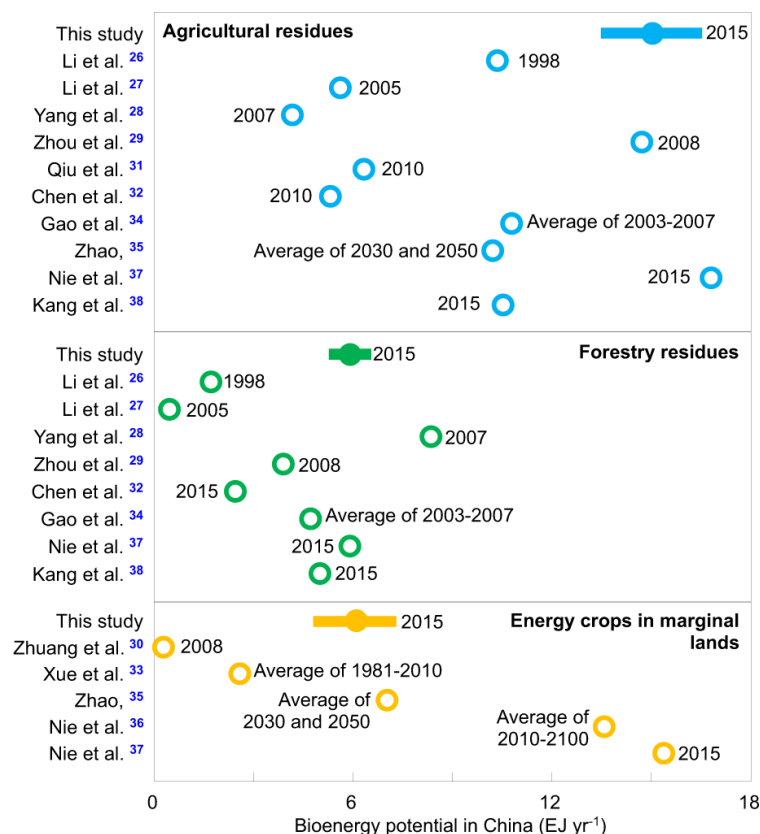


图 4 不同文献对生物质原料的评估结果对比(Xing et al., 2021)

在减缓气候变化, 实现净零排放的全球背景下, 生物质能需要得到更多的应用, 因此对未来生物质能供需潜力的预测尤为重要。生物质能在未来可能达到怎样的供给水平? 不同种类的生物质的的发展程度有何差异? 为了解答这些问题, 有大量文献采用综合评估模型 (Integrated Assessment Models, IAMs) 进行了分析与探讨。

Monique 等人借助了综合评估模型 IMAGE2.2¹²对能源作物在三种土地类型 (废弃农田、低生产率土地、未耕种土地) 上的发展潜力进行了评估, 模型考虑了四条土地利用变化路径, 结果显示废弃农田的发展潜力最大, 在 2050 年可能提供 130-410EJ/年的生物质能, 未耕种土地的潜力较小, 而低生产率土地的潜力可忽略不计。Vassilis 等学者采用了 IMAGE3.0 模型进行预测, 结果显示: 为了将温度升高控制在 1.5℃ 的范围以内, 生物质能占据最终能源消耗的比例应超过 20%, 在 2050 年左右达到 115-180EJ/年的水平, 并且需要农业产量显著上升、土地分区效率提高, 同时不造成土地利用的明显改变。另外, 这一结果还建立在木质纤维素燃料 (Lignocellulosic Fuels) 和碳捕集与封存技术的可获得性上(Daioglou et al., 2019)。

对我国而言, 据估算, 如果考虑广义的生物质能, 将秸秆、稻壳、玉米芯、花生壳等农产品加工剩余物, 树木枝条和木材等林产品加工废弃物, 禽畜粪便和城市垃圾等固

¹² IMAGE 模型, 全称“温室效应综合评估模型 (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect)”, 是一个全球气候变化的综合评估模型。由荷兰环境评估署于 20 世纪 80 年代开始开发, 为政府间气候变化专门委员会 (IPCC)《排放情景特别报告》所采纳的综合模型之一。包括能源工业系统、陆地环境系统、大气海洋系统等 3 个模块。

体废弃物等来源全部加总在一起,大概会生产出总量约 10 亿吨标煤/年的生物质燃料¹³,折合能量为 30EJ¹⁴ (艾焦, 10^{18}J)¹⁵。因此可以认为在未来我国每年供应 5 到 10 亿吨标煤/年的生物质燃料会是一个科学的范围(大概占我国每年一次能源消费量¹⁶的 10-20%)。

表 1 我国生物质能供给潜力预测情况¹⁷

资源	可利用资源量 (万吨)		已利用资源量 (万吨)		剩余可利用资源量 (万吨)	
	实物量	折标量	实物量	折标量	实物量	折标量
农作物秸秆	34000	17000	800	400	33200	16600
农产品加工剩余	6000	3000	200	100	5800	2900
林业木质剩余物	35000	20000	300	170	34700	19830
畜禽粪便	84000	2800	30000	1000	54000	1800
城市生活垃圾	7500	1200	2800	500	4700	700
有机废水	435000	1600	2700	10	432300	1590
有机废渣	95000	400	4800	20	90200	380
合计	/	46000	/	2200	/	43800

近年来,由于全球对于生物质能发展的政策支持力度加大,用于发电的生物质能和运输过程使用的生物燃料增长也十分迅速。以我国为例,我国目前制定了促进生物质能发展的《生物质能发展“十三五”规划》,其中明确提出:到 2020 年,生物质能基本实现商业化和规模化利用,分布式热电联产将成为主要支持发展方向。目标实现生物质能年利用量约 5800 万吨标准煤;生物质发电总装机容量达到 1500 万千瓦,年发电量 900 亿千瓦时;生物天然气年利用量 80 亿立方米;生物液体燃料年利用量 600 万吨;生物质成型燃料年利用量 3000 万吨¹⁸。

¹³ 生物质能:“被忽视的巨人” 如何长大(科学网) Available at:

<https://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2019/11/351410.shtm?id=351410> (Accessed 16 Oct 2022)

¹⁴ EJ 和标准煤的转换大致是 $1\text{Mtce}=0.03\text{EJ}$, 可认为 3EJ 基本等于 1 亿吨标准煤左右。

¹⁵ 同时也有一部分的研究直接将生物质能的重量转换成能量值,一般采用的系数为 $19\text{GJ}(\text{t biomass}^{-1})$

¹⁶ 我国目前一次能源消费大概是 50 亿吨标准煤(2020 年 49.8 亿吨,即 150EJ 左右,来源:国家统计局),未来碳中和转型趋势下会不变或略有下降。

¹⁷ 表 1 由前瞻产业研究院整理, Available at: <https://news.bjx.com.cn/html/20180206/879151.shtml> (Accessed 16 Oct 2022)

¹⁸ 《生物质能发展“十三五”规划》公布(中华人民共和国自然资源部)

Available at: http://www.mnr.gov.cn/dt/kc/201612/20161207_2321594.html (Accessed 16 Oct 2022)

2.1.2 技术路径评估

从技术角度分析,充分利用不同地区的禀赋优势进行生物质能的生产是效率最高的方式。因此评估生物质能的技术潜力中,很大程度上需要借助地区异质性和对生物质能的空间生产格局进行分析。

不同地区具有不同的自然与社会经济禀赋,气候温湿,水热资源,农户收入水平等等均会影响生物质能生产的合理性与有效性,GLOBIOM 模型通过迭代优化的模拟思路,在全球不同地区之间因地制宜分配生物质能的生产,设计相应的土地利用方案与能源作物的种植类型,从而有助于最大化不同地区生物质能的发展潜力与减排效果并最小化其生产成本与价格。

在较为贫瘠的边缘土地(Marginal Land)上种植能源作物是生物质能生产的一种具有巨大潜力的方式,这样既可以保留更多的土地种植粮食作物,同时也能为贫穷的农民提供新的收入来源。Liu et al. (2011) 利用 SWOT 分析法对边际土地进行生物质能的生产做了框架性分析,识别了这一过程的优势、劣势、机遇与威胁,研究结果表明,优势主要包括土地可用性和农村经济发展;劣势包括经济可行性、环境影响;机遇主要包括粮食安全考虑、生物燃料政策和技术发展;威胁主要包括燃料价格上涨和劳动力成本上升。Calliope et al. (2020) 研究了意大利和希腊低质量边际土地上芒草的种植和供应对作物产量和边际土地对就业和利润的影响,结果证实有着良好的就业前景,能够产生可观的经济利润。Brian et al. (2014) 提出目前人们对于边际土地的理解是模糊且主观的,并对边际土地中“边际”的定义进行了更深入的剖析与界定,“边际”是相对的概念,会随着空间与时间的改变而改变,并建议作者在边际土地报告中清楚地陈述“边际化”(Marginality)的背景、定义和细节。

对于我国而言,边际土地的重要性更为明显,我国幅员辽阔,有大量不适于生产粮食但可种植高抗逆性能源作物的荒山、荒坡和盐碱地等边际土地,正是生物质能发展的关键区域。农业农村部的工作者于 2008 年开展的工作提出了“宜能荒地”(Wasteland for Energy Crops)的概念,将我国宜能荒地重点开发区划分为武陵山区、西南岩溶地区、秦巴山区等 8 个大区域,并指出在考虑边际土地的生物质能发展潜力的同时不能忽视其生态脆弱性,同时在发展过程中需要合理布局,努力通过产业化集群提高能源作物的开发效益(寇建平等,2008)。

Lu et al. (2013) 分析了中国江苏、上海、浙江等东部沿海地区集中分布的入侵植物互花米草(*Spartina alterniflora*),并认为可以将其作为能源作物用于生物质能的生产,从而在约束其生态危害的同时充分利用其减排属性。Xing et al. (2021) 在生物质能生产的基础上进一步分析了生物质生产、发电厂和碳捕集与封存设施所处地区的空间不匹配性——作为低成本生物质能原料的农林废弃物主要生长在中国中部、南部和东北部的农村地区,适宜种植能源作物的边际土地和草地分布在人口稀少的西南和东北部;而燃煤发电厂集中在中国人口密集的中部和东南部地区;大多数适合进行碳封存的地质库,如深部咸水含水盆地、枯竭的油气盆地和深部煤储量,都位于中国的西部和东北部。这种空间上的错配关系需要通过合理调整最小化总生产成本。

2.1.3 供给成本评估

在经济学中, 供给曲线(Supply Curve)和需求曲线(Demand Curve)反映的是某一种商品在一定价格水平下的供给量与需求量, 即价格-数量(Price-Quantity)之间的相互关系。通常来说, 商品的价格越高, 供给量越高而需求量越低。

不少研究人员将供给曲线的定义融入模型分析中, 对生物质能的供给量进行了不同价格水平下的预测。经典生物质能供给曲线的研究已经有不少相关文献。Pekka et al. (2014) 用 GLOBIOM 模型探讨了木材生物质 (Woody Biomass) 的供给曲线。由于木材的数量并非限制其产量的关键因素, 因此聚焦于价格变量能够更好地分析其利用问题。供给曲线模拟了在各种假设的能源木材价格(单位: 美元/吉焦¹⁹)下可用于大规模能源生产的木材生物量, 并提供了不同地区、不同部门的供给比例等信息²⁰。

Stefan et al. (2021) 的研究则运用 GLOBIOM 与 G4M 模型综合评估了不同可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) (实现零饥饿、清洁水和卫生、负责任的消费和生产等) 情景下, 以生物质能产量衡量的陆地减缓气候变化潜力的影响。研究得到的供给曲线纵轴为生物质能的价格, 横轴为生物质能供给潜力(与 Pekka 研究中供给曲线的横纵坐标含义相反), 从不同 SDGs 情景下的生物质能供给曲线中可以看出: 在模型内部设置更高的环境约束(比如生物多样性保护)时, P-Q 曲线会整体向左移动, 这意味着在同样的成本下, 生物质的生产量会有所下降, 这也展现了生物质能发展和可持续发展目标之间的权衡关系。

McKinsey 提出的温室气体减排成本边际曲线(Global GHG Abatement Cost Curve)也可以理解为一种特殊形式的供给曲线, 这类不等宽柱形图的形式概括了各种低成本(减排每吨二氧化碳当量成本低于 60 欧元)的技术性减排机会(不对消费者生活方式产生实质性影响的减排机会)。

从图中可以看出, 长方形的宽度代表相对于基准情景(BAU)温室气体减排的潜力大小(均假设从 2010 年起采取全球积极行动); 长方形的高度代表 2030 年前, 通过该机会减排一吨二氧化碳当量的平均成本, 该成本是各种子机会、各地区和年份的成本经过加权处理的平均值²¹。(需要注意的是, 对单一减排机会而言, 估计的规模和成本值都会有极大的不确定性)

但在解读的过程中需要注意的是: 这类减排成本曲线将各种层次与维度的政策简单加总在一起, 忽略了不同政策的生效时间不同以及政策之间存在的相互影响与协同作用, 因此不能单纯地认为每种政策类型是孤立且互不影响的²²。

¹⁹ 即: $\$/GJ$, 1 吉焦 (1GJ) = 10 亿焦耳 (10^9J)

²⁰ 注: 本文中的“能源木材”一词是指大规模木质生物量用于能源, 不包括小规模木质生物质能源使用(如家庭薪材)

²¹ 通向低碳经济之路——全球温室气体减排成本曲线 (2.0 版) Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve (McKinsey)
Available at: <https://www.docin.com/p-604834910.html> (Accessed 16 Oct 2022)

²² [Joule]英国电力部门何以在 8 年内减排三分之二?

Available at: <https://mp.weixin.qq.com/s/zPkGSbBNZv4nh96k11KNqQ> (Accessed 16 Oct 2022)

2.2 生物质能与可持续发展目标

生物质能的生产会对环境、社会以及经济产生一定的影响，在缓解气候变化的同时也会影响到其他若干可持续发展目标。

生物质能的生产对环境造成的影响包括产生温室气体排放、改变土地利用模式、影响水资源和化肥的消耗等等。另外，生物质能会通过改变土地利用模式影响全球粮食生产与农产品市场，这种影响会间接地反映在社会层面，包括食品供应与饥饿人群比例等等。卡路里摄入量和营养不良率等即是对此进行衡量的关键指标。

有不少文献对生物质能生产过程中产生的环境、社会与经济多方面的影响进行了评估与预测。

Searchinger et al. (2008) 利用全球农业模型估算了美国使用粮食作物耕地进行生物质能生产可能带来的后果，结果发现生物质能生产不仅无法带来足够的减排效果，反而在生产过程中因土地利用改变(LUC)大量增加温室气体排放。这也引发了人们对于大规模种植能源作物进行生物质能生产的担忧，同时也从另一个角度强调了废弃物作为生物质能原料的价值。Pimentel et al. (2009) 针对粮食与生物质能生产的矛盾分析了二者的关系，并结合不同类型的生物质能进行了详细的分析与探讨，最后发现大多数生物质转化为乙醇和生物柴油的能源回报为负，回报为正种类的回报率也很低，对于减排与能源替代的积极作用有限，且会加剧已有的粮食问题、土地侵蚀、空气污染与化肥消耗等一系列问题。Yiping Wu et al. (2018) 的综述文章则对以往公开的文献与数据进行了整理与分析，探讨了生物质能发展可能带来的环境影响。通过对资料进行整合发现生物质能的生产对消耗水并造成污染、会造成温室气体排放、会影响生物多样性以及土壤有机碳含量等等。以水为例，影响主要体现在三个方面：①生物质能的生长与种植的过程中会大量耗费水，因此存在较大的水资源压力（且不同种类生物质能对水的消耗量也不尽相同，如玉米的耗水量就显著高于大豆与小麦）；②将原始农田转变为进行生物质能生产的土地会改变其水文特征，如减少地表径流和土壤蓄水量；③生产生物质能的过程中会使用肥料，因此还会造成水中的硝酸盐含量升高，引发富营养化的污染。

这也启示我们在生物质能生产的过程中需要充分考虑对环境的影响，在栽种能源作物的时候尽量选择边缘土地等不干扰粮食生产以及当地自然生态的区域。同时在评估生物质能的影响时应当综合多方面，并且考虑生物质能生产与使用的完整生命周期。

Fujimori et al. (2022) 整合了 GLOBIOM 模型、GCAM 模型在内的六大综合评估模型，并利用不同模型对基于陆地的气候减缓措施（生物质能生产、植树造林、农业非 CO₂ 气体减排）产生的社会经济影响（人均卡路里摄入量、处于饥饿风险的人口数量、农产品价格等等）进行了预测，通过对结果进行综合对比、分析与探讨发现：生物质能生产在三种减缓措施中产生的负面影响最小。并推测可能的原因为生物质能生产利用的土地量相较于植树造林较少，且在模型中通常会将生物质能生产与负排放技术相结合，产生较大的减排潜力，从而弥补生产过程中产生的负面影响。

3. 研究问题与创新性

基于上述的背景介绍与文献梳理，现提出本研究希望解决的实际问题：本研究希望借助 GLOBIOM 模型分析全球生物质能的供给趋势以及对于联合国可持续发展目标（SDGs）的风险与影响，通过情景模拟的方式识别相应风险，同时借助“供给曲线”的方式评估生物质能发展的环境效益与经济成本。

本文围绕以下两个问题展开研究：

1. 在有无 SDGs²³约束的情况下，全球生物质能的供给成本与风险有何差异；

2. SDGs 目标与生物质能的供给之间的矛盾源于何处，如何进行合理的权衡。

本研究的创新性主要体现在以下几点：

- ① 通过设置全球阶梯生物质能需求量，分析不同需求情景下生物质能的供给模式与产生的社会环境影响，通过供给曲线(Supply Curve)的形式描述生物质能供给的时空分布，从而为我国与全球未来生物质能的发展提供更加可靠的结果支撑；
- ② 综合考虑生物质能生产过程中可能出现的不同方面影响，将其与 SDGs 相结合，作为约束条件情景引入模型中，从土地利用可持续性的角度探讨不同 SDGs 条件下，不同规模的生物质能生产可能产生的影响，使模型输出的结果更具有实际意义，也更便于识别并筛选出最优的生物质能发展战略与实施路径；
- ③ 综合社会、经济、环境多方面的影响，更细致全面地解析不同时间不同地区的生物质能潜力，从而有助于后续耦合能源系统分析模型，具有一定的方法学意义（如拓展 CGE 等能源模型或技术模型中对土地和生物质的刻画，将供给和影响作为参数输入模型）。

²³ 本研究考虑的 SDGs 目标主要包括 SDG2（零饥饿）、SDG13（气候行动）、SDG15（生物多样性），具体而言，子目标包括：SDG2.1.1 营养不足发生率；SDG6.4.2 用水紧张程度：淡水汲取量占可用淡水资源的比例；SDG13.2.2 年温室气体排放总量；SDG15.1.1 森林面积占陆地总面积的比例；SDG15.1.2 与 SDG15.4.1：保护区内生物多样性重点区域的覆盖比例。

4. 研究方法

本研究使用 GLOBIOM 模型进行全球生物质能利用的建模分析与预测,通过设置不同的生物质能需求情景对未来生物质能发展路径进行刻画,并根据模型中自然环境与社会经济模块的均衡求解得出不同情景下生物质能的供给价格与对不同环境介质与社会生活产生的引致影响。

4.1 GLOBIOM 模型介绍

全球生物圈管理模型(the Global Biosphere Management Model, GLOBIOM)是由国际应用系统分析研究所(The International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)最初于 2007 年开发的一个全球农业和林业部门的局部均衡模型,它也是综合评估模型 IAMs 中的一种,它能有效模拟世界农业与林业部门的供给需求与贸易关联,以及与之最为相关的经济与人口指标,并且作为一个均衡模型,GLBIOM 中某一商品的供给和需求在任一价格水平下会保持相等。

总的来说, GLOBIOM 模型是一个包含全球(Global)农业、林业和生物能源部门的,内部采用自下而上(Bottom-Up)建模思路的,动态递归(Recursive Dynamic)的局部均衡(Partial Equilibrium)模型。

上述定义阐释了 GLOBIOM 模型的四大特征:①全球 Global: 模型内部包含欧盟 28 国以及世界上的 27 个国家与地区,这些地区之间可以在完全竞争的市场上生产、消费和交易农业和森林部门的最终产品;②自下而上 Bottom-Up: 该模型并非自上而下 Top-Down 的建模思路,而是从土地覆盖、土地利用情况以及管理模式等底层基础上上升到总产出与市场贸易中;③动态递归 Recursive Dynamic: 和静态模型(Static)相对应, GLOBIOM 模型的均衡状态会随着时间的演替而发生改变;④局部均衡 Partial Equilibrium: 和一般均衡(General Equilibrium)相反,因为 GLOBIOM 模型只针对林业、农业等部门进行了细致的刻画,而其余部门的基本信息是外生给定的。

模型的具体工作原理为:通过选择土地利用和生产活动的范围与位置,使得生产者与消费者剩余最大化,同时考虑来自资源、技术与政策等不同维度的约束与限制。某一个地区的商品产量由该地区的农业林业收益率、市场价格(反映需求情况)以及改变土地利用类型与扩张土地的成本。

更多信息可以登录 GLOBIOM 模型官网(www.globiom.org)了解。

4.2 生物质能的分类

在 GLOBIOM 模型中划分的生物质能主要包括五类:

- ① 能源木材生物质 EW_Biomass(Energy Wood Biomass)指的是来自林业部门的林木生物质。能源林(Energy Forests)在提供锯材与胶合板原料的同时,在锯木过程

和胶合板制作过程中的林木残渣可以作为生物质使用，即为锯材生物质(Sawn Wood Biomass, SW_Biomass)和胶合板生物质(Plywood Biomass, PW_Biomass)；

- ② 薪材生物质 FW_Biomass(Fuel Wood Biomass)是能源木材生物质的一种，但在模型中将其单独划分出来，代指用于住宅与烹饪中的生物质，其主要来源为从可持续经营的森林砍伐收获的林木资源(sustainable harvest of managed forests and deforestation)，实现供需平衡；
- ③ 工业种植的生物质 IP_Biomass(Industrial Plantation Biomass)又被称为短周期作物(Short-Rotation Plantations)、能源植物(Dedicated Energy Crops)，可以用来生产第二代生物燃料(2nd generation biofuel 或 advanced biofuel)。这类生物质能到目前为止在全球范围内都还没有大规模商业化运用，仍处在试验阶段。但由于不需要消耗粮食且不占用大量耕地，因此在未来大规模发展生物质的时候会有着巨大的潜力，这一部分生物质通常被称为“生物能源作物”；
- ④ 谷物与糖类作物(Grain Crops and Sugar Crops)包括玉米(Corn)、小麦(Wheat)、甘蔗(Sugarcane)等，可用来生产第一代生物乙醇(1st generation bioethanol, crop ethanol)，但和粮食作物存在对耕地的竞争关系；
- ⑤ 油料作物(Oil Crops)包括油棕(Oil Palm, OPAL)、油菜(Rape)、大豆(Soya)等，可用来生产生物柴油。

本研究使用 GLOBIOM 模型时将后两种生物质能加上固体废物、禽畜粪便、有机污水等生物质能类型共同合并为非木质生物质能(Non-Woody Biomass)，并默认该类生物质能的供给量在未来保持不变。

具体的分类结果如图 5 所示：

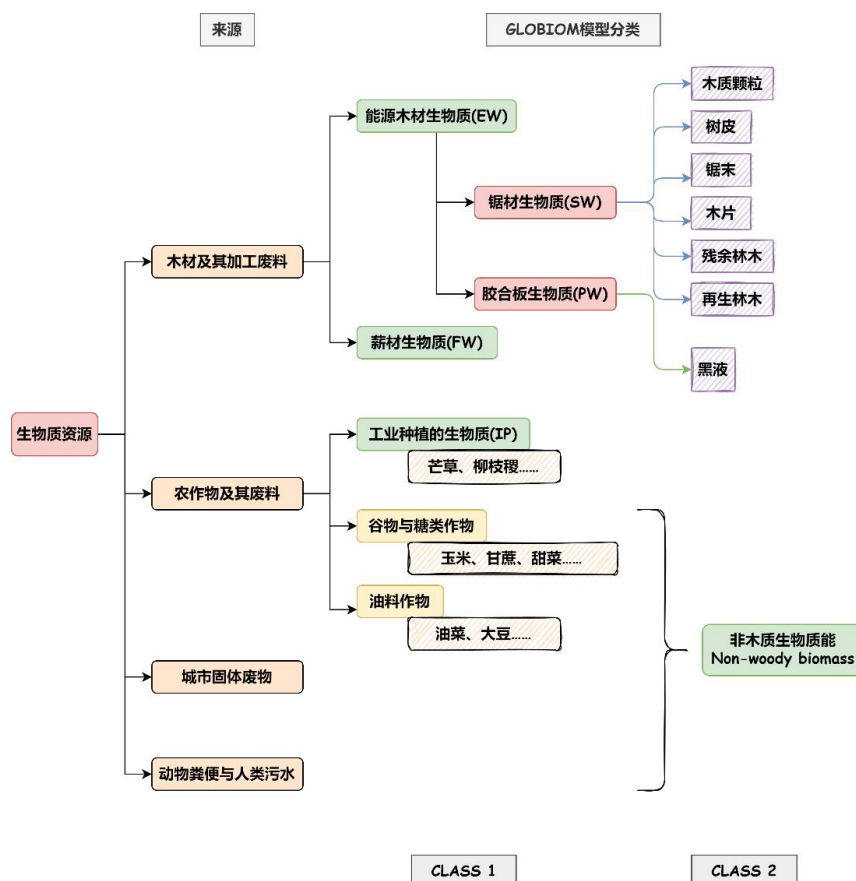


图5 GLOBIOM 模型中对生物质能的分类示意图

结合 1.1 中关于生物质能定义的介绍，在 GLOBIOM 模型中对生物质能进行了宏观与微观两大尺度的分类。

宏观尺度（在模型中记为 Class1）将生物质能分为 4 类，包括：能源木材生物质、薪材生物质、工业种植生物质、非木质生物质。

微观尺度（在模型中记为 Class2）则对能源木材生物质部分进行了细分，共将生物质能分为 11 类，包括：薪材生物质、工业种植生物质、胶合板生物质、非木质生物质、木片(WoodChips)、树皮(Bark)、锯末(Sawdust)、再生木材(Recycled wood)²⁴、木质颗粒燃料(WoodPellets)、黑液(BlackLiquor)²⁵、伐木残料(LoggingResidues)²⁶。

²⁴ 是指从原始应用中回收的可用于以后使用的加工木材。

²⁵ 用树木制造纸等产品的纸浆厂的副产品， Available at: <https://www.bl2f.eu/what-is-black-liquor/> (Accessed 16 Oct 2022)

²⁶ 林木采伐作业后留在森林中的木材， Available at: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/logging-residues_en (Accessed 16 Oct 2022)

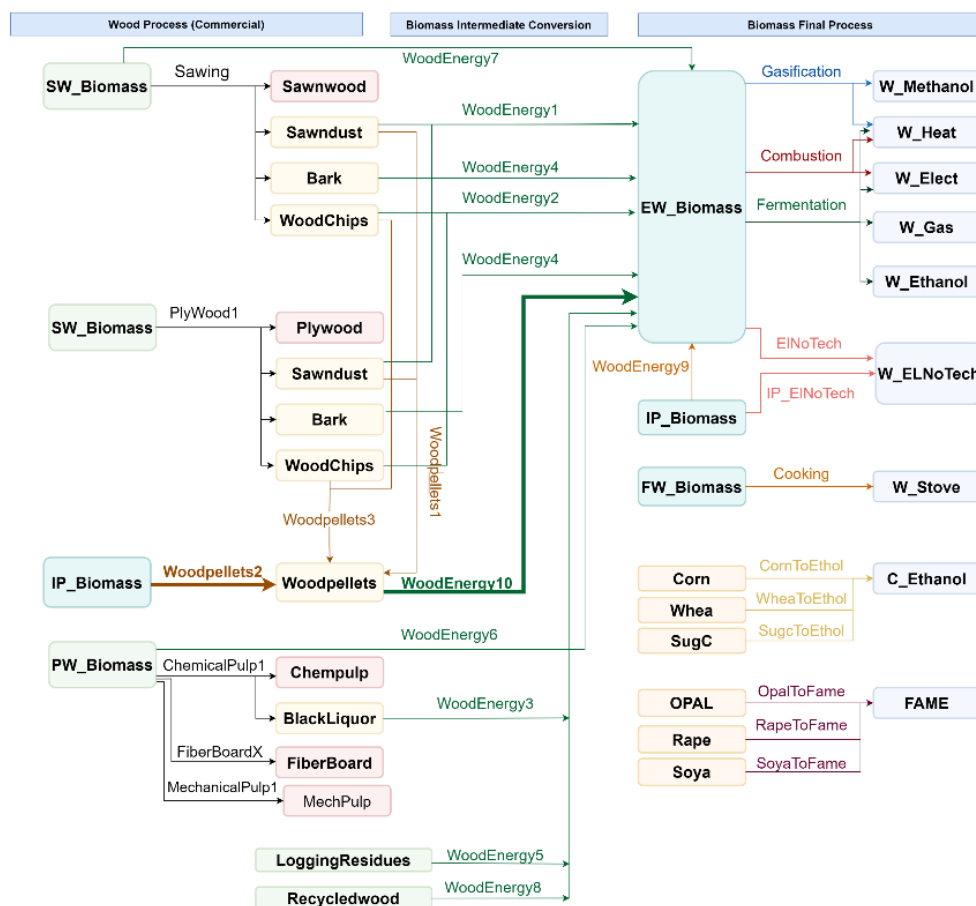


图 6 GLOBIOM 模型中生物质能相关的模块与关联

4.3 生物质能需求情景设置

模型的输入值中,2000,2010,2020 年全球生物质能的供给总量依据历史数据设置,之后设置一系列生物质能需求情景,分别要求 2060 年的生物质能供给量相较于 2020 年的水平(42.6EJ)依次增加 0-150EJ(因此最后模型结果中 2060 年前的数据不会达到 150EJ 情景的需求量),各情景以 5EJ 为数量间隔(scen0EJ 到 scen150EJ),时间尺度上,设置生物质能总量从 2000 到 2060 年呈线性递增。

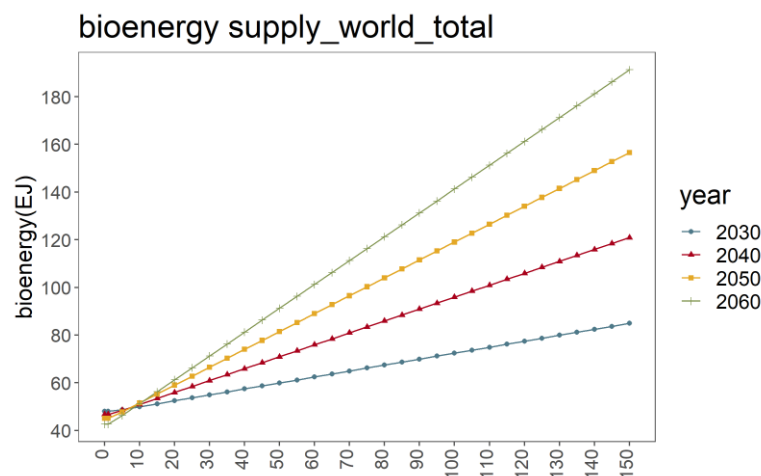


图 7 情景设置中，全球生物质能总量的变化趋势

4.3.1 基准情景

首先，我们在 GLOBIOM 模型中放松了对于碳税（Carbon Tax）、生物多样性保护（Biodiversity Reserve）以及毁林（Deforestation）的限制与约束（即：无碳税、不加额外的生物多样性保护，没有毁林限制），并利用模型预估了不同生物质能生产情景下的生物质能价格、不同区域不同种类的生物质能产量以及可能产生的一系列对于土地利用与食品安全的影响（即由于生物质能生产引发的风险 Induced-Risks）。

4.3.2 生态可持续目标约束情景

从基准情景的结果可以看出，生物质能的生产可能会造成粮食安全、毁林风险以及温室气体排放与水资源利用量的改变，为了考虑实际可持续的生产模式，在 GLOBIOM 模型中设置了关于生态可持续目标的 SDGs 约束：①生物多样性（根据“爱知生物多样性目标”的要求将总保护区表面积比例增加到 17%，另外，在地图中划定生物多样性高的区域并禁止其从 2030 年起转换为农业或林业管理用地，具体的划定标准为：若一片区域满足三条及以上的生物多样性优先体系中的标准则将其视为高生物多样性并禁止进行土地改造的保护区）；②禁止毁林（中国、美国、欧盟、拉丁美洲、撒哈拉以南非洲五个地区严格禁止森林砍伐，其他地区也施加一定的约束）；③严格碳税情景（碳税的额度基于 MESSAGE 和 GLOBIOM 模型耦合得到，对应于 SSP2-1.9 下的 1.5℃ 目标，碳税主要的征收对象是农业生产和土地利用的排放，税率与金额随着时间线性增加）。

尽管“零饥饿”也是关键的可持续发展目标，而且也很有可能因生物质能的生产而受到不利影响，但在本研究的情景设置中不将粮食安全作为 SDGs 的约束，一方面是因为这“零饥饿”目标在 GLOBIOM 模型中对应的两个指标（人均卡路里摄入量、营养不良人群）是后评估得到的结果，与土地利用和农业发展之间存在较为复杂的非线性、概率关系，同时也具有地区的差异性；另一方面则是目前不控制粮食安全的约束能够比较

好地对比对于生态环境与森林管理的约束和生物质能生产之间的关系,从而进一步考虑生态保护与粮食安全之间的权衡关系(trade-off)。

表 2 GLOBIOM 模型中碳税设置的情景

	2020	2030	2040	2050	2060
CentralEastEurope	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
FormerSovietUnion	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
LatinAmericaCarib	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
MidEastNorthAfrica	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
NorthAmerica	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
OtherPacificAsia	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
PacificOECD	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
PlannedAsiaChina	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
SouthAsia	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
SubSaharanAfrica	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97
WesternEurope	43.6	71.03	115.69	188.45	306.97

4.4 生物质能的供给成本

在 GLOBIOM 模型中,生物质(Biomass)的成本包括技术成本与机会成本。技术成本即种植能源作物过程中使用的设备、土地利用与约束成本(固定成本)以及种植、收获、预处理(如烘干)与运输生物质过程中所需的成本(可变成本),而机会成本则为同一块土地如果用于种植粮食作物(农业)或是生产木材(林业)可带来的收益,同时在模型中不考虑生物质的地区间贸易。

GLOBIOM 模型对生物质转化为生物质能的过程进行了一定的简化,仅仅考虑将生物质能视为直接使用的初始能源(Primary Energy)考虑,而不考虑基于生物质能产生的热能、燃料、燃气等二次或多次利用对应的最终能源(Final Energy)形式,并根据初始能源对应的能值转换为生物质能供给成本的表达形式(Lauri et al. 2014)。

4.5 模型内地区设置

模型共把全球分为 12 个区域,包括:前苏联(FormerSovietUnion)、其他亚太地区(OtherPacificAsia)、西欧(WesternEurope)、中东欧(CentralEastEurope)、撒哈拉以南非洲(SubSaharanAfrica)、拉丁美洲和加勒比国家(LatinAmericaCarib)、亚太经合组织(PacificOECD)、北美(NorthAmerica)、中国(PlannedAsiaChina)、北非中东地区(MidEastNorthAfrica)和南亚(SouthAsia)。²⁷

²⁷ 为了便于后分析,还在模型中设置了 Europe 地区,输出值等于直接把中东欧和西欧给合并起来的结果,可以用来检查区域总量是否计算正确,再次加和到 World 时是否有重复计算等。模型中还设置了 sum REGION,表示各个地区加起来的结果,不是模型原有的地区。

4.6 本研究框架图

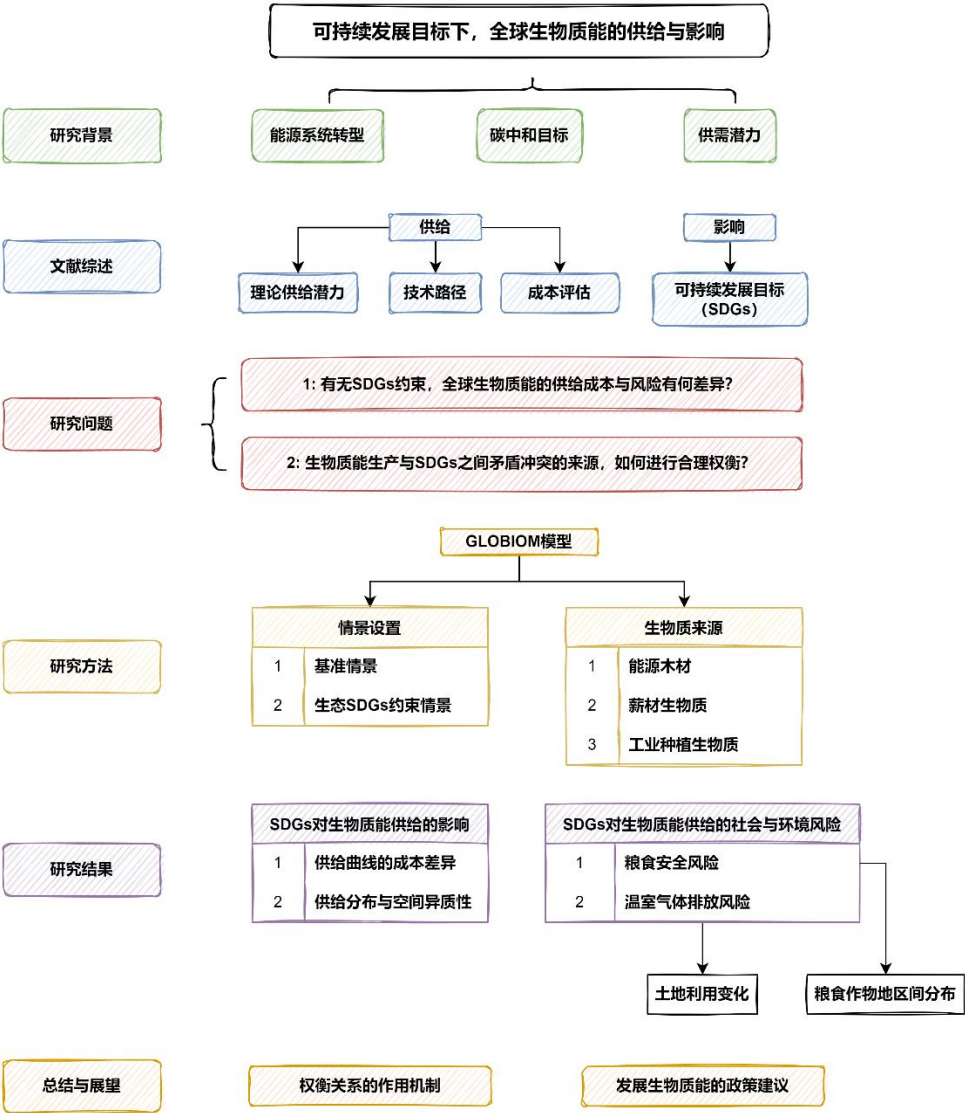


图 8 本研究的框架图

5. 研究结果

本研究的结果主要分为两部分，均围绕两个情景的对比展开。第一部分呈现 SDG 约束对生物质能供给的影响，主要分析 SDG 约束下生物质能供给成本和区域分布特征的变化；第二部分则主要分析有无 SDG 约束对发展生物质能可能造成的引致风险，聚焦于粮食安全和温室气体排放两类风险展开。

通过对比的分析方法能够更好地理解在减缓全球气候变化的大背景下，生物质能发展与可持续发展目标之间的冲突与取舍，从而有助于分析在未来生物质能发展路径下，需要对哪些可持续发展目标进行重点约束与考量。

5.1 SDG 约束对生物质能供给的影响

5.1.1 供给成本

从供给成本角度分析，在基准情景下（图 9），生物质能的供给对土地利用没有施加约束与限制，从而能够以较低的价格保证较高的供给量。从供给曲线中也可以看出，此时的生物质能价格较低，并且随着供给与需求情景中的生物质能产量的增加，价格会不断上升。从价格上升趋势来看，产量增加的初期较为陡峭，从接近为 0 的价格上升至 3USD/GJ 后增速趋缓，之后稳步上升，而当产量情景处于高于 100EJ/年的阶段时，价格的增速重新变快，最终在 150EJ/年的情景下接近 10USD/GJ。

同时也可以发现，随着时间的推移，相同产量情景下，生物质能的单位价格呈现下降趋势，这可能与生物质能生产的规模效应有关。中长期情景下，生物质能的发展推动了技术进步与社会经济的变化，从而使得生物质能的生产更加具有经济性。一般来说，电力的基本价格大概在 60-80 美元/GJ 的水平范围，因此在基准情景下，生物质能相比其他类型的能源价格明显更低。

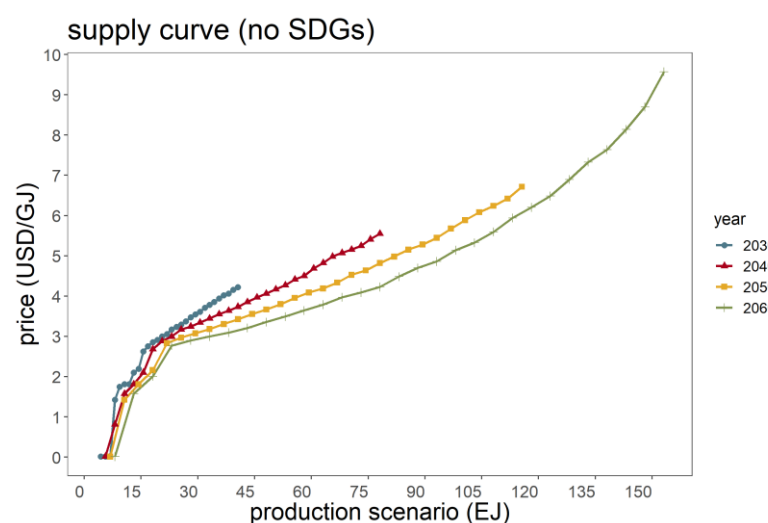


图 9 无 SDG 约束下的生物质能供给曲线

而在生态可持续目标约束的情景下（图 10），由于在 GLOBIOM 模型中施加了针对部分土地利用方面的限制，因此从供给曲线可以看出：不同情景下生物质能的价格有显著上升，从之前的 0-10 美元/EJ 扩展到了 0-200 美元/EJ 的范围。同时可以发现，生物质能价格在需求量较高的情景下呈现加速增长的趋势，尤其是 2060 年对应的供给曲线，最终在 150EJ/年情景下，每艾焦的生物质能价格高达 200 美元，这一价格相比传统能源以及其他可再生能源的价格而言都昂贵很多。

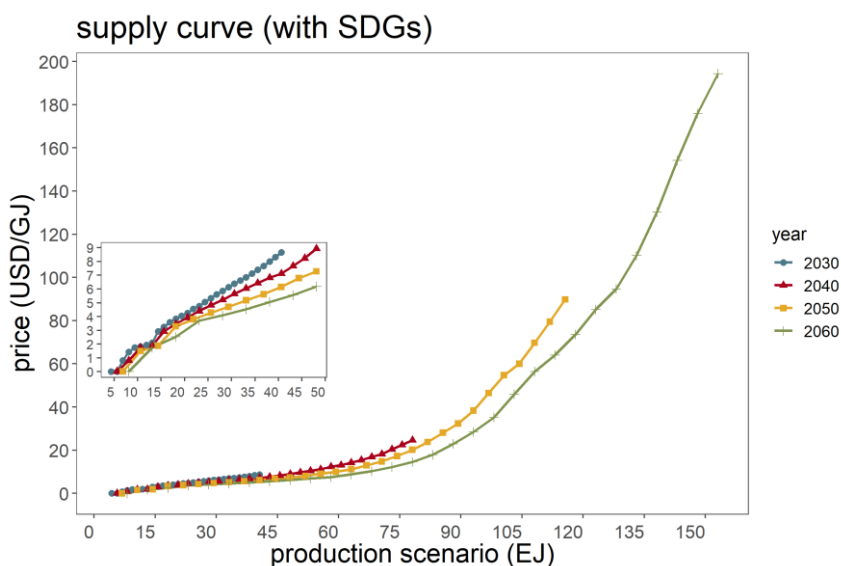


图 10 有 SDG 约束下的生物质能供给曲线

对比未来不同时间点下两种情景对生物质能价格的预测结果（图 11），可以明显看出：随着生物质能需求量的不断提升，可持续约束下的生物质能价格呈现出加速上升的发展态势，而基准情景下生物质能价格的增速则平稳而缓慢，最终两种情景下生物质能价格的差距会越来越大。这意味着如果需要保证生物多样性等 SDGs 不受破坏，那么在生物质能生产技术不存在突跃的前提下，生物质能将失去价格上同其他类型能源的竞争力，尽管随着时间的推移会有一定的规模效应使生物质能生产成本下降（图 9、图 10），但下降的幅度相比高昂的成本而言很小。

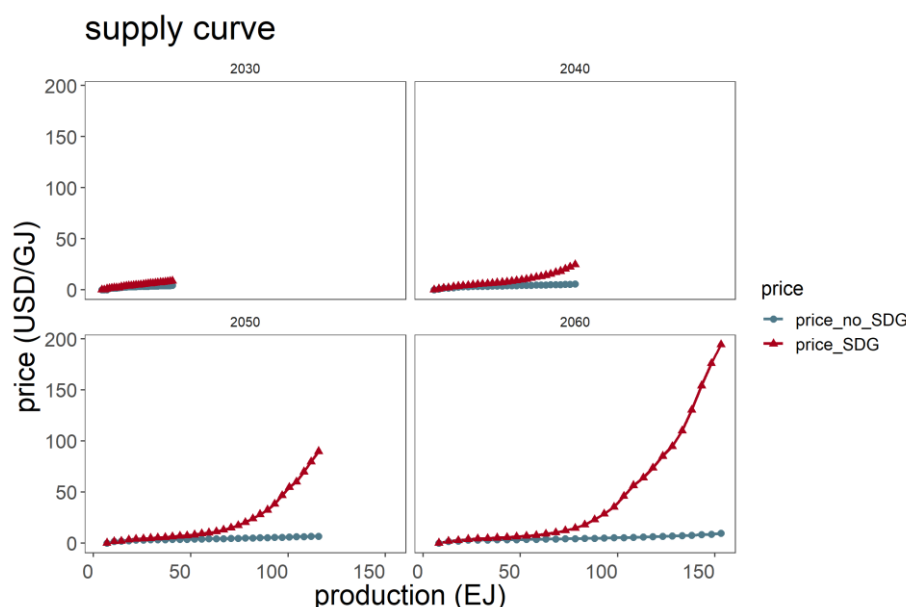


图 11 两种情景下不同年份下的生物质能供给曲线

另外，生物质能如果想要最大限度地发挥减排潜力，往往需要与 CCS 等技术合并使用。但就目前来看，BECCS 技术本身具有较高的门槛，市场化的推广还需要一段时间，所需的成本还有巨大的下降空间。因此，如果生物质能的供给量有限，其价格也居高不下，那么在未来二者相结合用于气候变化与温室气体减排的可行性会降低，同时在实际应用的过程中可能因为面临着高昂的成本压力而规模有限。因此，为了缓解土地竞争与减排的矛盾，协同实现多个 SDGs，可以借助本研究提供的视角评估可再生能源系统中的其他可再生能源类型（如水电、风能、太阳能等）。

5.1.2 供给分布

生物质能供给的区域一般较为集中地分布在森林覆盖广泛，农耕地需求小而闲置土地较为丰富的地区，这些地区的生物质能原料供应较为充足，供给成本也较低，但当需求量逐渐升高时，生物质能供给引发成本上升的同时，分布也会发生一定的变化，模型最优化求解的结果会尽量缓和生物质能与粮食作物的供给矛盾、降低生产生物质能过程中的温室气体排放与水资源消耗、减小生物质能生产对土地与原料的占用与消耗。

图 12 展示了 2060 年全球生物质能的供给量随需求情景的分布情况，从总量上看，撒哈拉以南非洲、拉丁美洲、亚太地区将会在未来提供绝大部分的生物质能，三个地区加总占据全球的 60% 以上。而从结构上看，首先，欧洲、非洲的中北部、北美以及前苏联地区主要利用能源林作为生物质能的主要来源，意味着这些地区需要通过造林与毁林生产木材进而生产生物质，但也可以看出能源木材对应的生物质能潜力有限，在高于 100EJ/年情景后，能源木材无法提供更多的生物质能。其次，能源作物的迅猛发展对于生物质能的供给起到了关键作用，可以看到，亚太地区、撒哈拉以南非洲、拉丁美洲、南亚地区等等都凭借能源作物的高速发展满足了生物质能的供给需求，但这同时意味着能源作物的迅速扩张可能会对土地利用造成一定压力。最后，南亚地区、撒哈拉以南非

洲的非木质生物质能的存量较大, 但并没有较大生产潜力, 反而会随着需求的增加而有些微下降趋势。

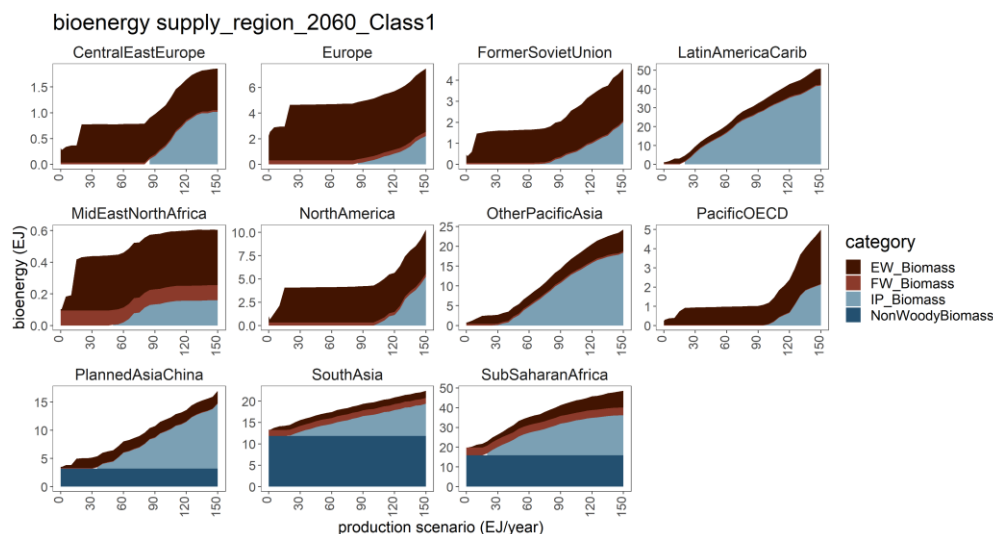


图 12 无 SDG 约束下的生物质能供给分布

图 13 则呈现了在 SDGs 约束的前提下, 2060 年全球生物质能的供给量随需求情景的分布情况, 从总量上看, 生物质能的生产仍主要集中在撒哈拉以南非洲、拉丁美洲、南亚等地区, 但不同的是, 北美和前苏联地区呈现了较大的生物质能发展潜力。

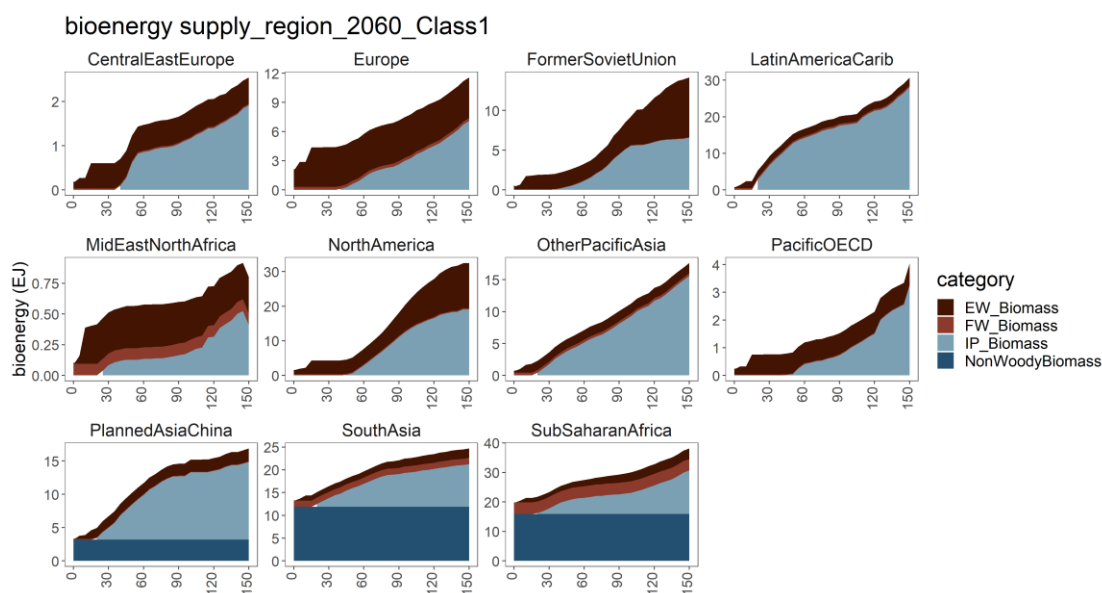


图 13 有 SDG 约束下的生物质能供给分布

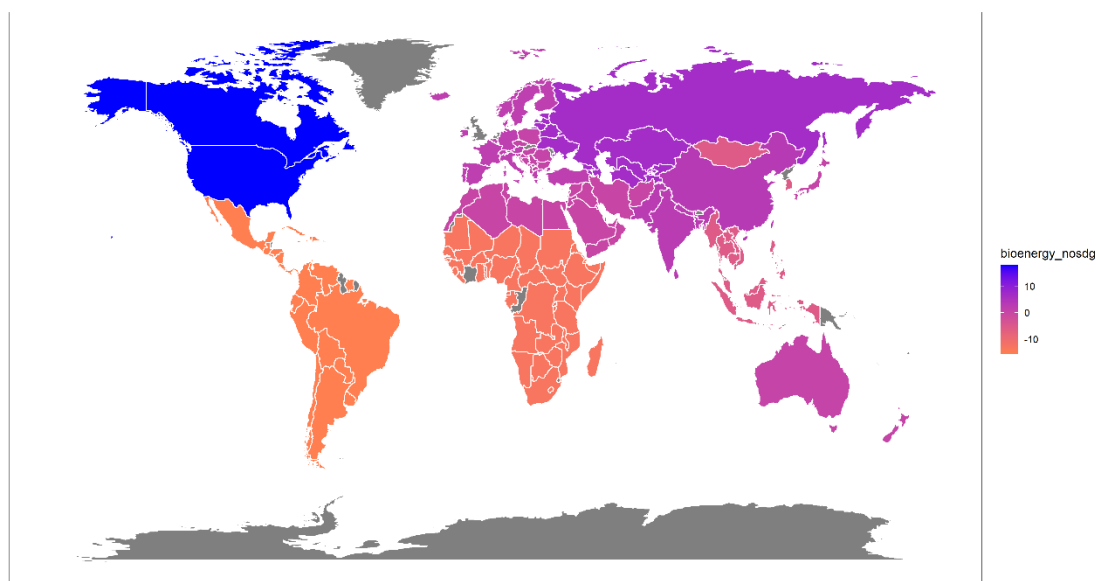


图 14 施加 SDG 约束后，不同地区生物质能供给的变化情况

对比两种分布模式可以看出，各地区在生物质能供给的结构上并没有太大的区别，主要的趋势是 SDG 约束会提升能源作物在生物质能供给中的占比。对中非与北非地区来说，在需求量较大的阶段，生物质能的供给对能源木材的依赖将会 SDG 约束情景下有所下降，而对于欧洲而言同样如此，即生物质能需求较大时，能源木材的占比会降低而能源作物的占比会升高，这可能与能源作物在大规模生产生物质能的过程中更具有成本有效性有关，也可能与不同生物质能类型在供给过程中与土地利用的其他用途相冲突的程度有关。

5.2 SDGs 约束下，生物质能供给产生的环境与社会风险

SDGs 约束不仅会直接影响生物质能供给的成本与分布情况，同时还会进一步影响可能带来的环境与社会风险，由于生物质能生产与森林资源以及土地利用之间存在着一定的竞争关系，因此多个可持续发展目标都可能因生物质能的生产而受到负面影响。图 15 和图 16 展示了生物质能供给产生的部分环境与社会引致风险（Induced Risks）的影响程度与变化情况，包括粮食安全、温室气体排放、土地利用、水资源消耗等等。

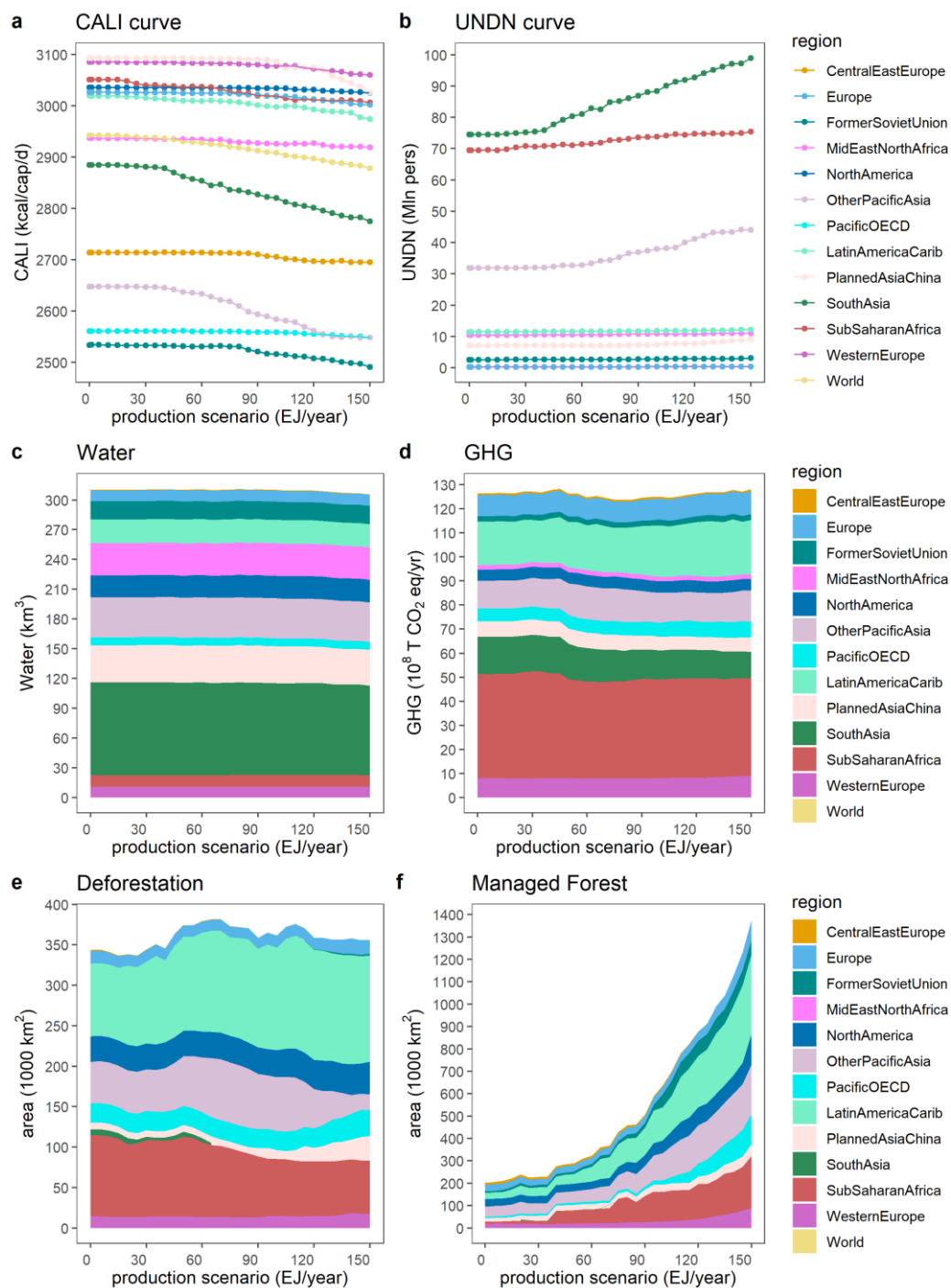


图 15 无 SDG 约束情况下的引致风险汇总

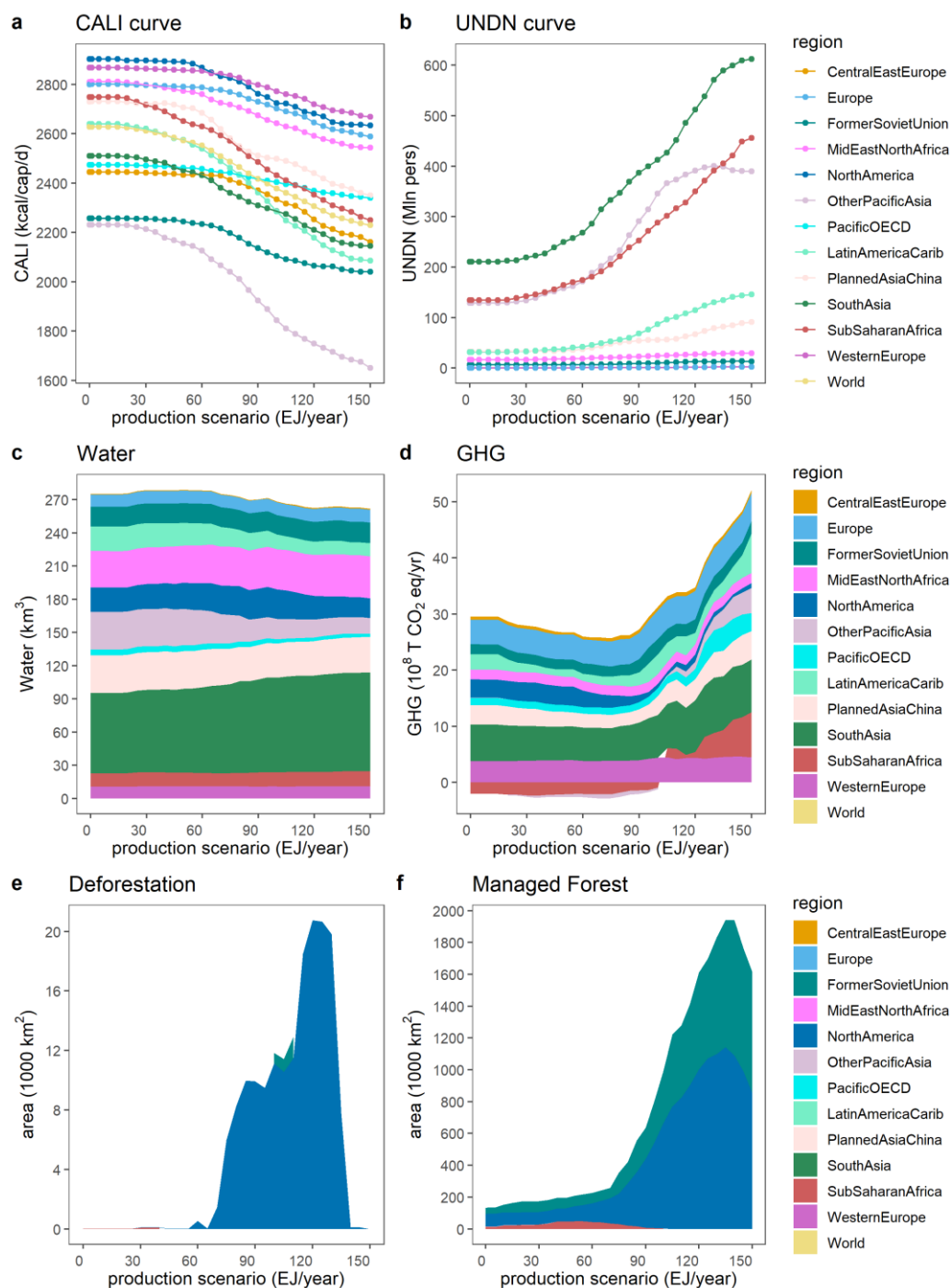


图 16 有 SDG 约束情况下的引致风险汇总

5.2.1 粮食安全风险

在基准情景下，生物质能的生产已经会对粮食安全构成一定的威胁，人均卡路里摄入量（CALI）随生物质能需求增加而下降幅度最大的地区主要为亚太地区以及南亚地区。同时，营养不良人数（UNDN）上升最多的地区也为亚太与南亚地区，且全球营养不良的总人数会上升约 4000 万人。而在施加设置土地利用维度的 SDGs 约束可以发现，

粮食安全的风险会有十分显著的升高，风险最高的地区依然是亚太和南亚地区，并且在基础风险高的地区粮食安全受到的威胁增幅也越大。亚太地区的粮食安全问题十分明显，在生物质能高需求量的情况下，人均卡路里摄入量有着很严重的下跌，在 150EJ 情景下甚至低于 1700 卡路里/人，和基准情景低了接近 1/4。营养不良人数方面，撒哈拉以南非洲和南亚值得重点关注，SDGs 的约束甚至让高生物质能需求情景下南亚地区的营养不良人数增至原来的 6 倍，达到 6 亿人²⁸。

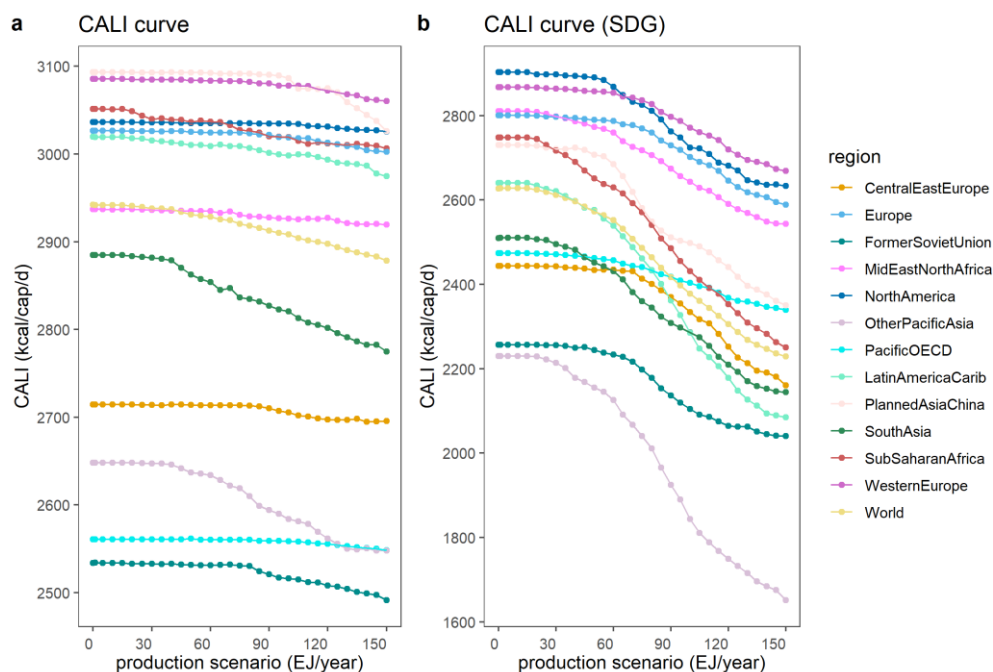


图 17 两个情景下卡路里摄入量（CALI）的变化曲线

²⁸ 由于在 GLOBIOM 模型中，营养不良人数基于卡路里摄入量换算得到，但二者并非简单线性对应关系，因此营养不良人数和卡路里摄入量之间呈现共变关系但并非完全成比例。

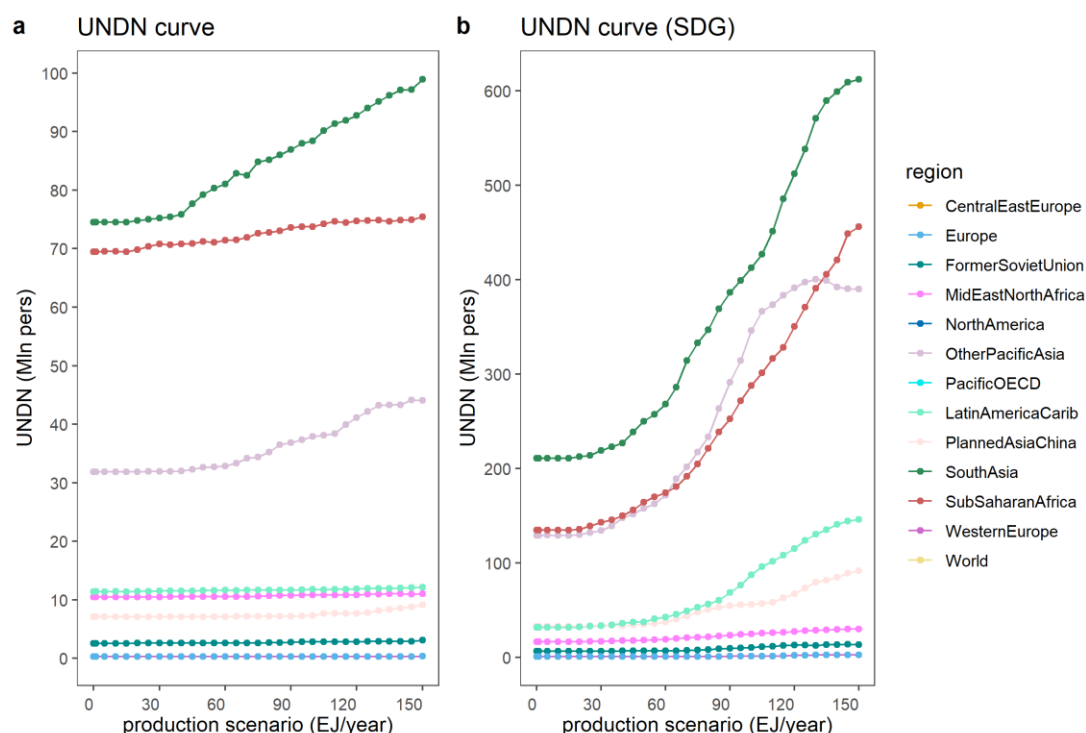


图 18 两个情景下营养不良人群（UNDN）数量的变化曲线

粮食安全风险的显著提升意味着，生态可持续与社会可持续二者之间的矛盾会在未来应对气候变化的挑战下会越来越剧烈。这也促使研究者更好地评估二者之间的取舍关系，并且为气候减缓措施提供了重要的评估思路。

以上针对生物质能发展带来的市场价格变化以及由此产生的一系列可持续发展风险进行了描述性分析，接下来希望通过具体对比 SDGs 约束前后，生物质能及其相关影响指标的变化规律追踪并寻找背后的原因，呈现不同地区的变动情况，从而更加清晰地梳理出逻辑链条。

5.2.2 温室气体排放风险

如图 19 所示，施加土地利用等可持续目标的约束后，温室气体的排放有较为明显的下降趋势。这一方面与模型中施加的碳税约束有关，高碳税是应对气候变化的重要政策手段，能够较为显著地降低温室气体的排放；另一方面，SDG 约束也改变了与土地利用相关的温室气体排放，这些排放主要来自于森林管理（毁林与造林释放的 CO_2 ）以及农作物生产（种植水稻产生的 CH_4 与耕作土地释放的 N_2O 等非二气体）。

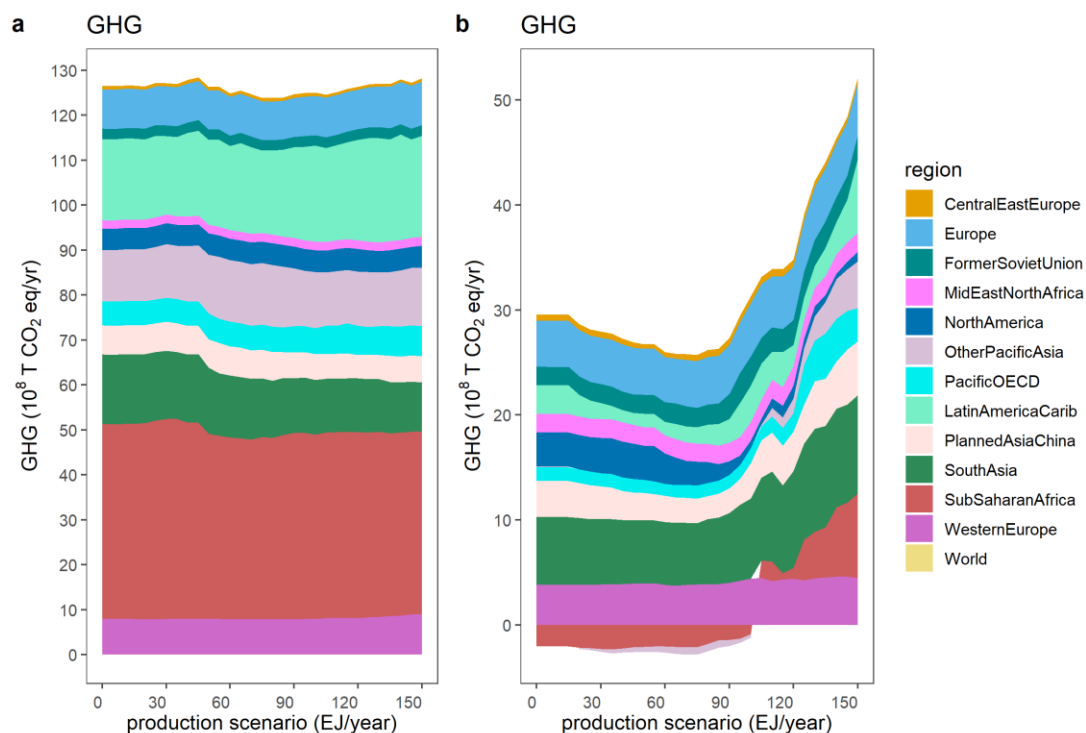


图 19 两个情景下温室气体排放的变化曲线

图 20 呈现不同地区在两种情景下非二气体（ CH_4 和 N_2O ）的排放情况，从不同地区的变化趋势可以看出各自在面对 SDGs 约束下采取的不同策略。

CH_4 和 N_2O 的对比规律大致相同，主要是因为二者的来源均来自于农作物的生长与施肥，种植过程直接受到 SDGs 和生物质能需求的约束，因而直接会影响 CH_4 和 N_2O 的排放。

可以看出，基本上全球所有地区在施加 SDGs 约束后，非二气体的排放量均有所下降。其中，亚太地区、拉丁美洲地区的下降幅度最大，可以推测是 SDGs 中的碳税设置对其有最为明显的约束作用，而欧洲、北美、中非、前苏联地区的非二气体排放量则无明显改变，中非地区甚至出现了 SDGs 情景下的 CH_4 排放量更高的结果。

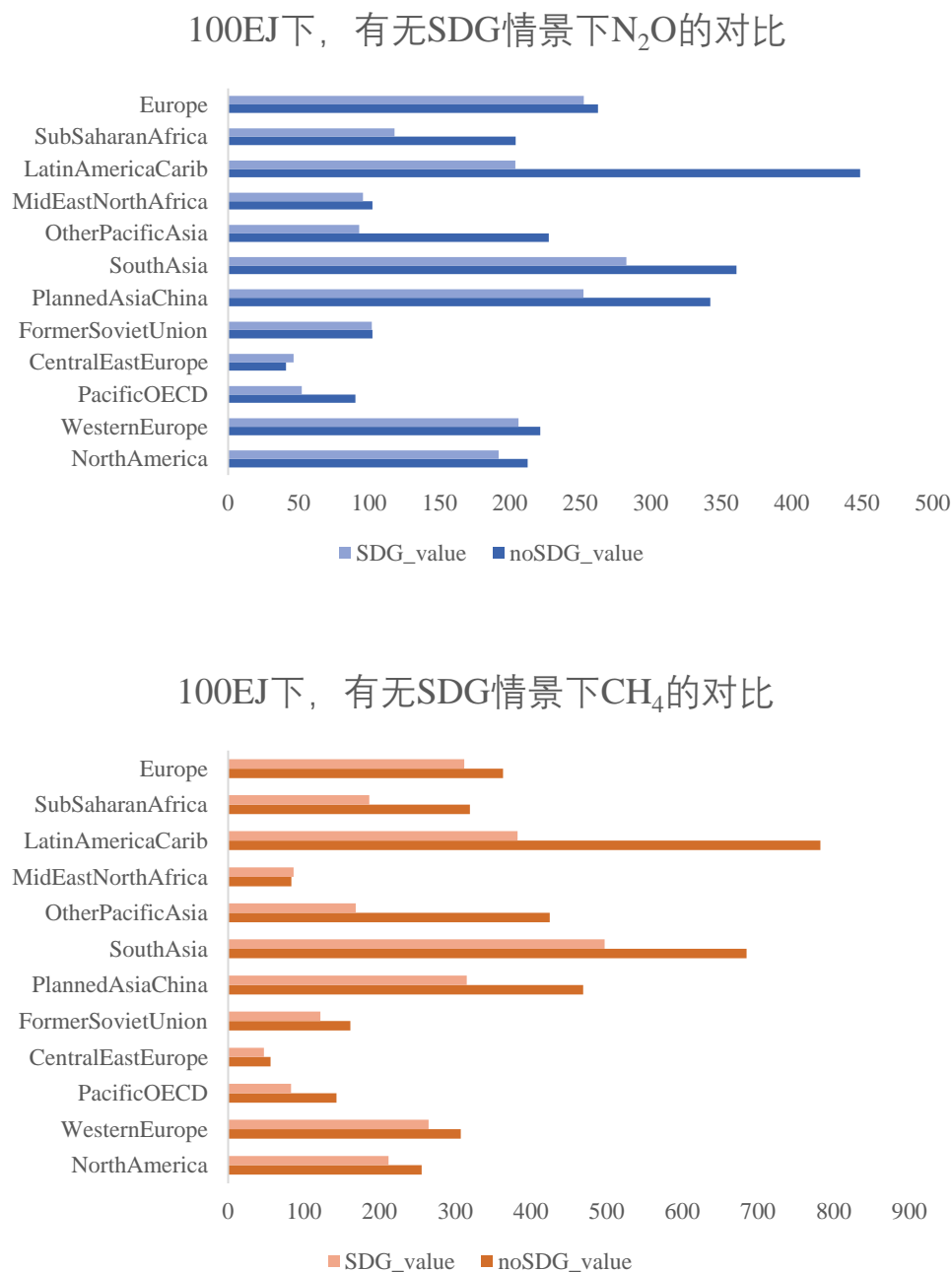


图 20 不同地区两个情景下温室气体排放量对比

5.2.3 讨论与补充分析

从上述两种情景的引致风险对比中可以看出，土地利用 SDGs 约束的情景下，人均卡路里摄入量明显下降，营养不良人群的数量则对应显著上升，粮食安全受到了严重的威胁，而且呈现出较为独特的区域异质性，受影响最严重的区域为南亚、撒哈拉以南非洲、亚太地区、拉美地区等。

如图 21 呈现的是最为典型的四类作物——水稻、小麦、大豆、玉米在两种情景下的生产供给情况，可以发现，四类主要的农作物在两个情景下随生物质能需求量在不同地区的产量情况，从粮食生产的角度可以进一步解释不同地区在营养摄入方面的差距。

从图中可以看出，对于南亚的印度地区而言，SDGs 约束使印度地区的玉米和小麦种植出现了略微的下降，其他粮食作物的变化则不明显，而撒哈拉以南非洲的南非地区则在 SDGs 约束后除水稻和玉米之外的两种粮食产量均有上升（扩大的作物种植或许并没有直接供给至本地的百姓）。

其他地区也呈现出不同的变化规律，巴西地区的小麦生产、澳大利亚的水稻生产、前苏联地区的大豆生产在 SDGs 约束下均有明显减少的情况发生，而其他区域的粮食生产并没有受到 SDGs 约束的显著影响，如中国地区的水稻生产。

总的来说，SDGs 约束条件下，不同地区粮食产量和生物质能需求之间的关系更加明显，共变的幅度也更大，可以推测是由于粮食和生物质能生产的冲突导致在生物质能需求量较高的情景下，不同地区可能会根据其自然条件禀赋的差异选择牺牲部分的粮食产量，此时的粮食生产往往会减少（前苏联的大豆生产、巴西的小麦生产、澳大利亚的水稻生产就是典型的案例）。

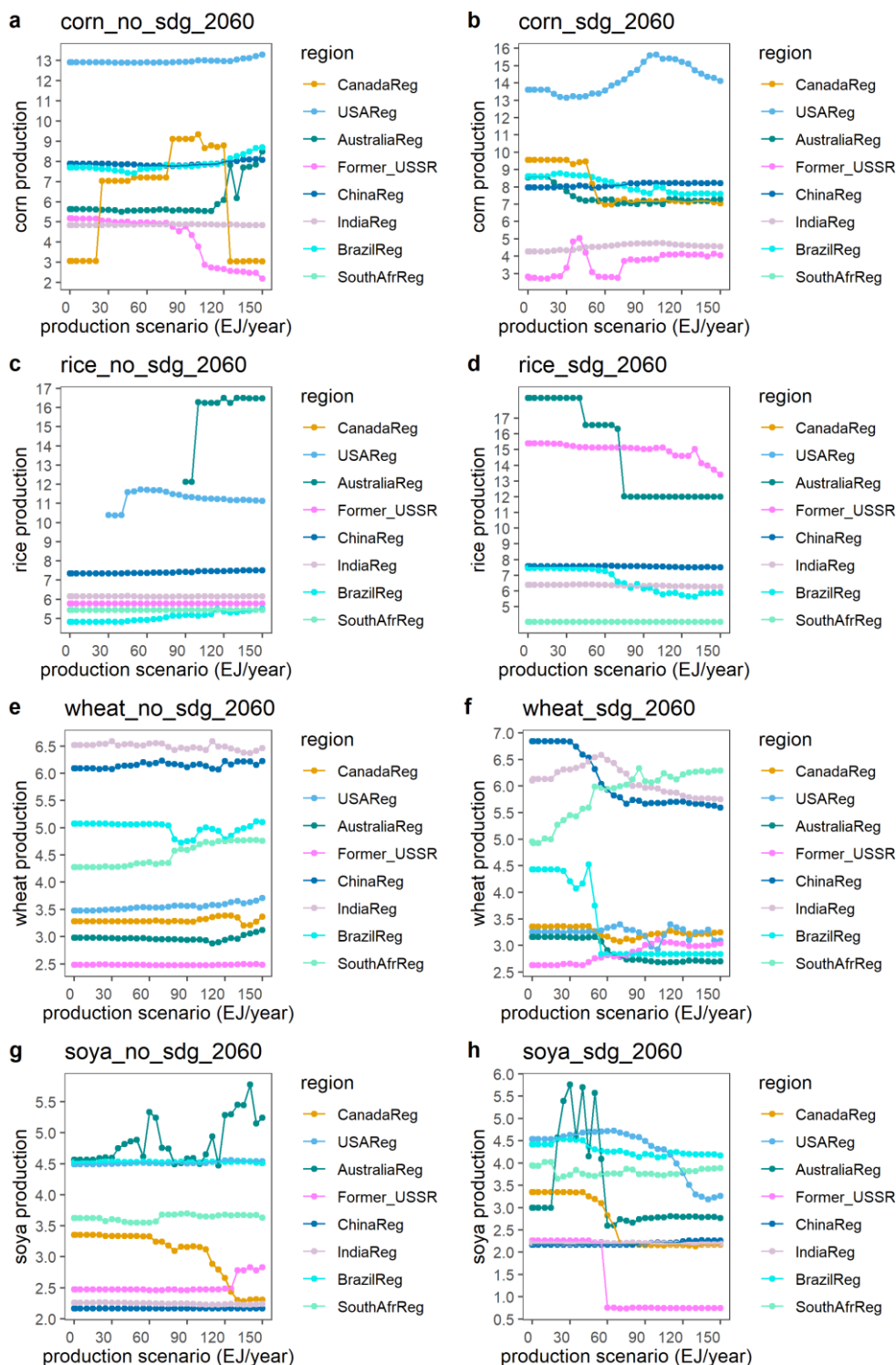


图 21 有 SDG 与无 SDG 情景下的主要粮食供给情况

二氧化碳的排放主要与森林管理和土地利用方式改变有关，土地约束对于粮食安全造成了巨大的威胁，因此生产粮食和生产生物质能之间对于土地利用的竞争与冲突会变得更加剧烈。深入到不同土地类型利用的变化对比图中可以看到，施加 SDGs 约束后的毁林和森林管理呈现出不断集中的趋势。毁林主要由北美地区提供（由于模型约束了美

国的毁林，因此毁林主要来自于加拿大和墨西哥)；森林管理也主要集中于北美地区和前苏联地区。

选取森林改变较为典型的地区进行分析，利用 GLOBIOM 提供的土地类型改变数据绘制出如下的桑基图：

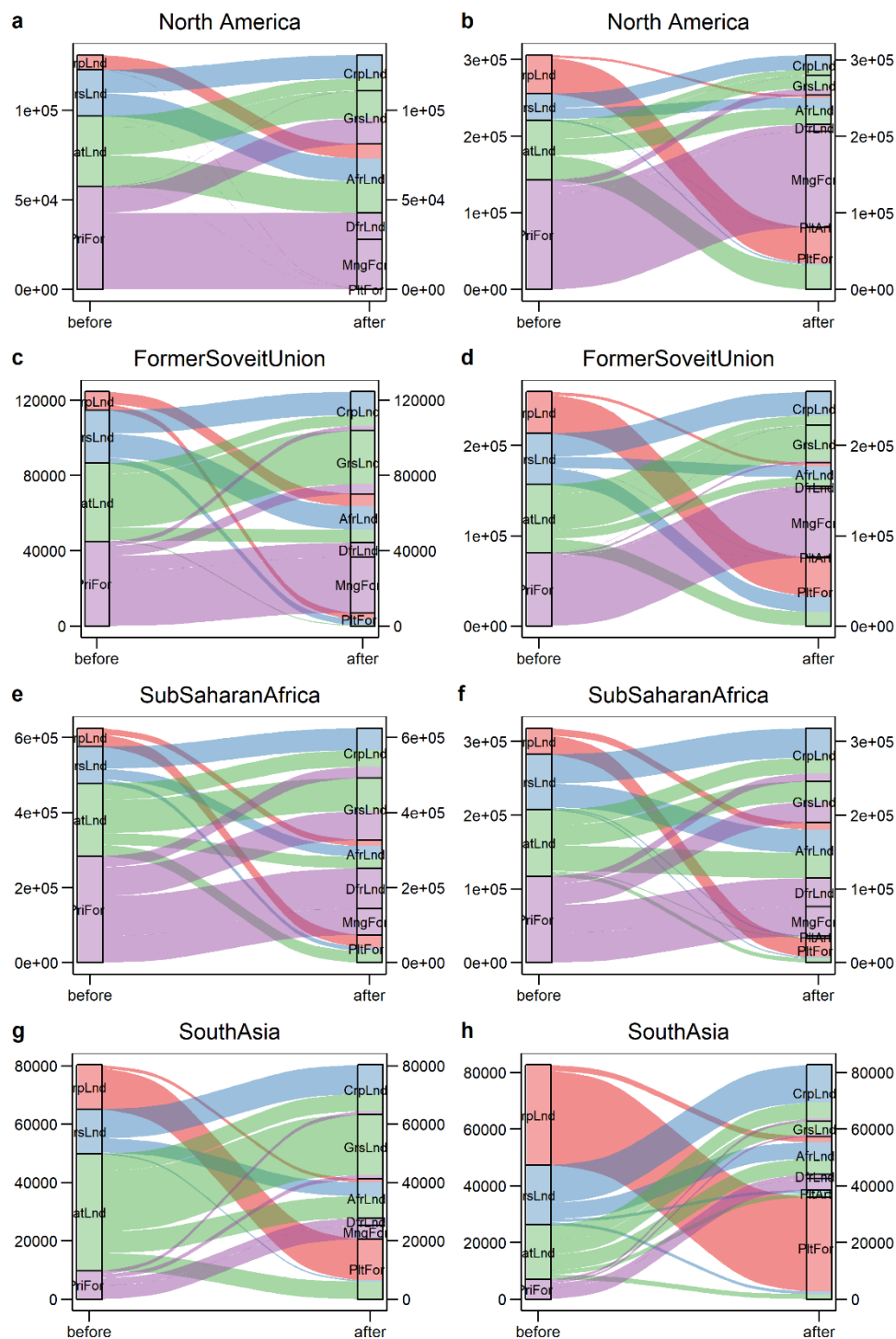


图 22 没有 SDG 和有 SDG 约束下的土地利用变化情况

可以看出，北美地区和前苏联地区呈现出类似的规律，大量的天然原始林地被改造为人工林，同时将耕地改造为种植林地，从而能够实现生物质能的充足供应与生产，乃至在全球范围内均占据了主导地位。而撒哈拉地区则有较大规模的毁林，没有进行合理与大规模的林地管理。南亚地区的土地变化面积大约只有前述地区的三分之一左右，且土地利用类型的变化规律也很不相同，变动的土地中有接近一半是耕地，均被改造成种植的林地，这一方面是 SDGs 的要求，另一方面也是为了提供生物质能的需要。

可以根据模型结果提出土地利用类型变动原因的两点推测：①不同地区的生物质能生产力与所需成本的比较优势不同；②不同地区毁林和粮食供给的约束不同。

在生物质能生产的过程中，协调土地利用将会是一个巨大的困难，如何提高土地利用效率，缓解能源作物与粮食作物之间的竞争关系有待进一步从技术与管理的角度分析与思考。

6. 总结与展望

本研究借助 GLOBIOM 模型对全球不同生物质能需求情景下的生物质能供给模式进行了预测与分析,结合生物质能的生产成本绘制了生物质能的供给曲线,同时分析了生物质能生产对土地管理、粮食安全、温室气体排放等可持续发展目标可能带来的影响。结果显示:①生物质能的供给价格会随着需求量的上升而不断升高,且在前期升高的趋势最为明显;②生物质能的生产会与粮食生产形成竞争关系,导致营养不良人群比例显著上升,人均卡路里摄入量下降;③生物质能生产对于温室气体排放以及水资源消耗的影响不大;④生物质能生产会影响土地管理,尤其是增加森林破坏的比例,促使土地向人工管理类型转变。

为了控制生态环境可持续性,在模型中施加一定约束后发现:在保证一定区域的土地利用不受生物质能干扰的前提下,生物质能生产对于林地的利用与破坏程度会减小,但生物质能与粮食生产之间的矛盾会进一步激化,导致受饥饿风险的人群比例增加,而温室气体的排放会有一定的减少。

本研究为生物质能的生产模式以及生物质能生产与可持续发展目标之间的权衡关系进行了分析与阐述,但仍存在较多不足之处:①本文没有详细分析生物质能的减排潜力,因此无法具体评估生物质能生产在应对气候变化方面发挥的作用,难以与其他减排措施进行横向比较;②本文对生物质能和可持续发展目标之间的权衡取舍关系分析不够深入,尤其对背后的作用机制缺乏详细解释。

7. 参考文献

- [1] Bauen A, Berndes G, Junginger M, et al. Bioenergy: a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects[J]. Bioenergy: a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects., 2009.
- [2] Bentsen N S. Carbon debt and payback time—Lost in the forest? [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1211-1217.
- [3] Daioglou V, Doelman J C, Wicke B, et al. Integrated assessment of biomass supply and demand in climate change mitigation scenarios[J]. Global Environmental Change, 2019, 54: 88-101.
- [4] Frank S, Gusti M, Havlík P, et al. Land-based climate change mitigation potentials within the agenda for sustainable development[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(2): 024006.
- [5] Fujimori S, Wu W, Doelman J, et al. Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security[J]. Nature Food, 2022, 3(2): 110-121.
- [6] Fuss S, Lamb W F, Callaghan M W, et al. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 063002.
- [7] Gustavsson L, Svanenningsson P. Substituting fossil fuels with biomass[J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(6-8): 1211-1216.
- [8] Heck V, Gerten D, Lucht W, et al. Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries[J]. Nature climate change, 2018, 8(2): 151-155.
- [9] Kato E, Yamagata Y. BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions[J]. Earth's Future, 2014, 2(9): 421-439.
- [10] Lauri P, Havlík P, Kindermann G, et al. Woody biomass energy potential in 2050[J]. Energy policy, 2014, 66: 19-31.
- [11] Liu T T, McConkey B G, Ma Z Y, et al. Strengths, weaknessness, opportunities and threats analysis of bioenergy production on marginal land[J]. Energy Procedia, 2011, 5: 2378-2386.
- [12] Lu J, Zhang Y. Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 175-181.
- [13] Panoutsou C, Chiaramonti D. Socio-Economic Opportunities from *Miscanthus* Cultivation in Marginal Land for Bioenergy[J]. Energies, 2020, 13(11): 2741.
- [14] Pimentel D, Marklein A, Toth M A, et al. Food versus biofuels: environmental and economic costs[J]. Human ecology, 2009, 37(1): 1-12.

- [15] Richards B K, Stoof C R, Cary I J, et al. Reporting on marginal lands for bioenergy feedstock production: a modest proposal[J]. *BioEnergy Research*, 2014, 7(3): 1060-1062.
- [16] Searchinger T, Heimlich R, Houghton R A, et al. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change[J]. *Science*, 2008, 319(5867): 1238-1240.
- [17] Tilman D, Socolow R, Foley J A, et al. Beneficial biofuels—the food, energy, and environment trilemma[J]. *Science*, 2009, 325(5938): 270-271.
- [18] Wu Y, Zhao F, Liu S, et al. Bioenergy production and environmental impacts[J]. *Geoscience Letters*, 2018, 5(1): 1-9.
- [19] Xing X, Wang R, Bauer N, et al. Spatially explicit analysis identifies significant potential for bioenergy with carbon capture and storage in China[J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 1-12.
- [20] 车长波, 袁际华. 世界生物质能源发展现状及方向[J]. *天然气工业*, 2011, 31(01): 104-106+119-120.
- [21] 陈勇. 生物质能技术发展战略研究[M]. 机械工业出版社, 2021.
- [22] 寇建平, 毕于运, 赵立欣, 高春雨, 田宜水, 魏顺义, 王亚静. 中国宜能荒地资源调查与评价[J]. *可再生能源*, 2008, 26(06): 3-9.
- [23] 柳逸月. 中国能源系统转型及可再生能源消纳路径研究[D]. 兰州大学, 2017.
- [24] 王庆一. 2020 能源数据. 绿色发展创新中心; 2021.

8. 附录

8.1 感悟和寄语

很感谢这次本科生科研的经历。于我而言，这是我第一次接触完整而较为独立的科学研究，尽管最终可能并没有呈现足够完美而精彩的研究结果，但这一年时光是将对气候变化的关注与热爱转化并落实为实际科学研究的一次艰难但也收获满满的体验。

感谢戴老师在最初选题环节结合我对于全球环境议题的关注给予我的指导与研究过程中提供的建议。感谢肖逸龙学长，在研究伊始结合亲身经历引导我认识科学研究的思路与结构。感谢吴雅珍学姐针对 GLBIOM 模型、生物质能的核心知识给我分享了大量经典的文献与材料，并且不厌其烦地回答我的困惑，指导我的研究，给我提供了丰富的宝贵建议。感谢任明师姐让我参与她的水泥研究和生物质能研究，在参与过程中我不仅初步掌握了 R、Ai、GAMS 软件等的使用技巧，也对 GLOBIOM 建模思路与结果呈现，对论文撰写与研究范式都有了更清晰的认知。同时也感谢我的好朋友马啸天，在我俩的日常交流中给我的研究提供了鼓励支持与修改的意见。最后，感谢 LEEEP 组里的大家，这一段在组里的时光是我大学四年美好而闪亮的点缀！

8.2 指导教师简介

戴瀚程，北京大学环境科学与工程学院研究员，博士生导师，环境管理系主任，兼任北京大学全球健康发展研究院研究员、区域与国别研究院研究员。2006 年获北京大学学士学位，2009 年获德国慕尼黑理工大学硕士学位，2012 年获日本东京工业大学博士学位。研究方向为能源环境与气候政策分析，针对经济绿色低碳转型路径和成本效益，以能源—环境—经济综合评估（IMED）模型为手段开展系统研究。