

考虑水-能-粮纽带关系的中国生物质能产业发展对策

刘 钢^{1,2,3}, 王金秋^{1,2}, 杨仕亮^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学管理科学研究所, 江苏南京 210098; 3. 河海大学沿海开发与保护协同创新中心, 江苏南京 210098)

摘 要: 伴随全球气候变化与人类高强度活动的双重叠加影响, 水、能源、粮食等原生资源供需冲突日益严峻, 生物质能产业发展涉及水资源、能源、粮食资源的匹配关系, 对国家资源安全、生态安全 and 经济安全具有重要影响。采用 CiteSpace 软件分析 Web of Science 数据库中 with 生物质能相关的 11 392 篇文献, 从文献的国家分布、机构分布到关键词演变、共被引网络主题词聚类等多个方面绘制国际生物质能知识图谱, 梳理国际生物质能发展状态和科研历程。梳理生物质能产业发展趋势、从实践与科研的错位现象中提出了制约我国生物质能发展的 3 个关键瓶颈, 分析生物质能产业演进的关键要素, 得出我国生物质能产业发展的战略启示。

关键词: 生物质能; 知识图谱; 水-能-粮纽带关系

中图分类号: F326; X22

文献标志码: A

文章编号: 1671-4970(2020)05-0042-10

伴随全球气候变化与人类高强度活动的双重叠加影响, 水、能源、粮食等资源供需冲突日益严峻, 已成为制约人类社会可持续发展的瓶颈问题。《2018 年世界水资源开发报告》显示, 由于人口增长、经济发展和消费方式的转变等, 全球用水需求正以每年 1% 的速度增长, 对用水需求增长贡献率最大的因素是农业和工业用水行为^[1]。尽管农业用水激增, 饥饿人口却有增无减。《2018 年世界粮食安全和营养状况》显示, 全球饥饿人口数量从 2016 年的 8.15 亿人上升到 2017 年的 8.21 亿人^[2]。与此同时, 随着工业用水的大幅增加, 2017 年全球能源需求比去年增长 2.2%, 化石能源匮乏与能源需求激增之间的

供需冲突日益加剧^[3]。2011 年的德国波恩会议首次提出了水-能源-粮食安全纽带关系概念^[4], 多维承载要素的协同优化管理理念开始引起全球的广泛关注。

中国作为世界人口第一大国与最大的发展中国家, 庞大的人口规模与高速的经济社会发展导致了极为显著的水、能源、土地等原生资源供需冲突, 严重威胁国家的水安全、能源安全、粮食安全, 其中, 国家能源安全更是面临严峻挑战。《2017 年国内外油气行业发展报告》指出, 中国全年天然气消费量同比增长 17.0%, 出现了阶段性、区域性的“气荒”问题^[5]。一次能源资源短缺已成为制约我国能源安

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404600); 国家自然科学基金国际合作项目(5171102058)

作者简介: 刘钢(1981—), 男, 山西太原人, 副教授, 博士, 从事生态系统与公共资源治理研究。

全的战略风险要素,如何解决能源资源的科学布局问题已上升为国家安全问题。生物质能通过优化利用水土资源^[6],逐渐成为能源供给结构的有益补充和推动能源生产消费革命的重要力量,一个基于碳素循环利用的绿色经济模式正在建立^[7]。然而,生物质能产业发展涉及水资源、能源、粮食资源的匹配关系,其产业发展存在三方面难题:一是生物质能作物种植需要占用大量的水资源和土资源,在落实最严格水资源管理的同时,易与区域水土资源禀赋产生冲突;二是生物质能产业布局容易出现“能粮争水、能人争粮”问题;三是生物质能产业发展战略受国家能源需求结构变化影响显著。

面对我国高质量发展目标,如何在生物质能产业开发中优化重点研发、产业布局、产业发展战略,合理有序发展我国生物质能产业,已成为促进我国低碳发展,破解典型区域水、能源、粮食供需冲突的破局之道,更是进一步保障国家能源安全、粮食安全、水安全、国家安全的有效抓手。

一、研究方法

1. 分析工具确定

20 世纪中期,普赖斯等^[8]提出使用引文网络来研究科学发展。2003 年,在美国国家科学院组织的“知识图谱测绘”研讨会上,知识图谱作为一个新发展的跨学科科学领域被提出。2005 年,大连理工大学学者刘则渊将这一概念引入国内并命名为“科学知识图谱”^[9]。目前,常用的知识图谱分析工具多样,尤以 CiteSpace 应用更为广泛,主要用于分析某一领域科学文献的发展趋势和演化路径^[10]。

笔者以共被引分析为基础,利用 CiteSpace 进行生物质能研究的可视化分析,讨论生物质能研究的区域分布、理论进展和研究趋势。梅亮等以共被引分析为基础,采用 CiteSpace 进行创新生态系统理论研究的可视化分析^[11];王亚华等采用 CiteSpace 深入分析国内外水权市场的研究进展^[12];吴方等对碳排放权的文献基础与国际发展态势进行可视化研究^[13];侯海燕等对山东省生物技术领域的科学文献进行分析和可视化展示^[14]。科学知识图谱既可以显示研究对象的区域和学科分布,又能展现研究演变过程、研究热点和研究趋势,已经被广泛用于社会学、管理学和生态学等不同领域。

2. 数据来源与检索规则

采用的数据来源于 Web of Science 数据库。限

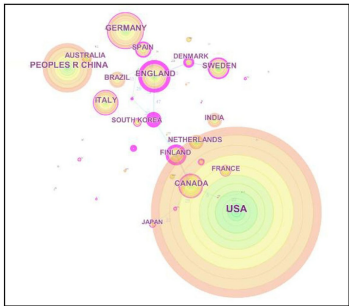
定“主题 = bioenergy”“文献类型 = Article”“时间跨度 = 1996—2018”“数据库 = Web of Science 核心合集”,共检索到 11 450 篇文献,在进行数据除重操作后共剩 11 392 篇,有效引文数量为 319 698 篇。根据 CiteSpace 要求,导出全部文献及其参考文献作为研究的数据池,并以 1—2 年为时间片段,对数据池中所有文献进行国别、研究机构共线分析,对参考文献的主题、摘要、关键词等分别选定,进行共被引分析。

二、生物质能产业发展历程

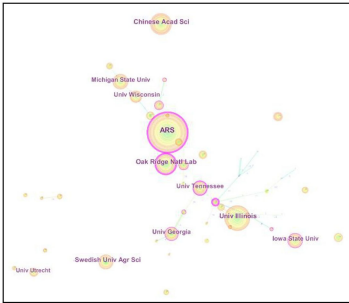
1. 全球生物质能科研历程

为了比较不同国家生物质能实践发展与科研进展的关系,更清晰地了解各个国家生物质能的发展进程,利用 CiteSpace 对国际文献的研究进行国别和机构的共线分析。

选择“主题 = bioenergy”“文献类型 = Article”“时间跨度 = 1996—2018”“数据库 = Web of Science 核心合集”“Note type = country”开始检索。数据计算结束后提醒可视化,选择“visualize”进行可视化,并选择“主题 = bioenergy”“文献类型 = Article”“时间跨度 = 1996—2018”“数据库 = Web of Science 核心合集”“Note type = institution”开始检索。数据计算结束后提醒可视化,选择“visualize”进行可视化,得到的网络可视化结果如图 1 所示。



(a) 国别分析



(b) 机构分析

图 1 全球生物质能研究国别和机构网络分析

从图 1 可知,国际范围内对生物质能研究文献主要集中在北美、北欧等发达国家,其中,美国的科研机构居多。全球生物质能研究总量排名前 10 的国家累积发表相关文献总量如表 1 所示。

表 1 全球生物质能研究文献数量国别排名

排名	国家	文献数量/篇	排名	国家	文献数量/篇
1	美国	3 895	6	瑞典	596
2	中国	1 162	7	加拿大	585
3	德国	894	8	巴西	451
4	英国	683	9	荷兰	443
5	意大利	599	10	芬兰	421

从事生物质能研究的国际学术机构中,各研究机构较为分散,合作不密切。研究文献数量排名前 10 的研究机构如表 2 所示,其中,专职科研机构与高校之比约为 1 : 4。美国农业部农业研究所的文献研究数量为 428 篇,位居榜首;伊利诺伊大学是文献研究数量最多的大学,共有 248 篇。科研机构与高校的不同可以反映出国家对于生物质能研究的战略导向,科研机构主要承接国家层面的重大科研项目;高校研究则更具自由性,主要承担项目既包括国家重大科研项目,相对而言还更擅长于对接社会需求。

生物质能研究文献的国别分布充分表明,在生物质能资源问题的研究布局上,发达国家已经占据战略先导和科研先导地位。并且,从全球各国从事生物质能研究的科研机构与高校的占比情况来看,生物质能领域的研究是与实践应用紧密结合的,“政产学研用”一体化研发更具成效。

2. 全球生物质能实践历程

20 世纪 70 年代中期以来,包括生物质能在内的可再生能源的开发引起了人们的重视,人类利用能源资源的方式也随着经济发达程度而逐渐走上了以太阳能、生物质能等为主导的新能源时代^[15]。生物质的形成主要依靠植物同化、固定太阳能和 CO₂^[16],生物质能则是以生物质为载体,将其加工转化为电、热、液、气等不同的能源形式,从而提高热能利用效率的粮食-能源-水资源利用方式^[17]。

美国是世界上最大的生物质能生产国。20 世

表 2 全球生物质能文献数量研究机构排名

排名	研究机构	文献数量/篇	排名	研究机构	文献数量/篇
1	美国农业部农业研究所	428	6	美国密歇根州立大学	190
2	美国伊利诺伊大学	290	7	美国爱荷华州立大学	173
3	美国橡树岭国家实验室	248	8	美国田纳西大学	172
4	中国科学院	247	9	美国佐治亚大学	162
5	瑞典农业科学大学	210	10	美国威斯康星大学	158

纪 30 年代,美国中西部就已开始探索生物质能的生产;2005 年,《可再生燃料标准》实施,规定美国所售运输燃料必须掺混乙醇或其他生物燃料,促进了美国玉米产业发展,提升了美国能源结构多元化,推动了经济发展。在生物质发电方面,1988 年,丹麦建设了世界上第一座秸秆生物质发电厂;2006 年,欧盟加大对生物燃料作物种植的扶持力度,生物柴油发展处于世界领先地位,综合来看,欧盟各生物质能产业发展均走在世界前列;巴西拥有世界最低的生物燃料乙醇生产成本,是目前世界上唯一不供应纯汽油的国家。

中国生物质能发展利用途径主要是沼气、生物质发电、生物液体燃料(生物燃料乙醇和生物柴油)和生物质成型燃料^[18],具体来看:20 世纪 80 年代开始,中国政府加大对沼气建设的投资力度;2005 年,国家发改委首次批复 4 个地区生物质发电的示范项目;2006 年,《可再生能源开发利用促进法》出台,初步建立了以陈化粮玉米为原料的燃料乙醇工业和以废弃油脂为原料的生物柴油工业;2019 年 1 月 1 日起,我国全面供应符合第六阶段强制性国家标准 VIA 车用汽油。从图 2 可以看出,我国生物质能产业的发展主要以生物质发电和沼气利用为主,生物质成型燃料与生物液体燃料利用还不够成熟。近

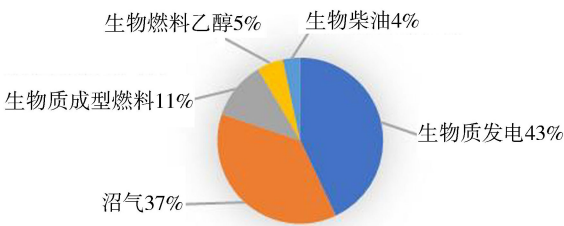


图 2 中国生物质能利用情况

(数据来源:2016 国家能源局《生物质能发展“十三五”规划》)

10 年来,在国家 and 地方发改委等部门的推动下,生物质能产业发展已取得较大的进步和发展,并开始探索新的生物质能利用方向,如微藻制油^[19]等。生物质发电和液体燃料产业已形成一定规模,生物质成型燃料、生物天然气等产业也呈现良好发展势头,

2020 年生物质能年利用量可达到约 5 800 万 t 标准煤^[20],基本实现商业化和规模化利用。

综上所述,各个国家生物质能产业的发展离不开资源禀赋与政策扶持。经过十几年的发展,我国从初期以生物质发电和沼气利用为突破口,到现在开始大力推动生物质成型燃料和液体燃料的发展,已初步形成生物质能产业基础格局。尽管实践中新能源政策尚不完善、生物质能市场尚未发育完成,但我国已开始探索生物质能产业的制度体系建设。

3. 全球生物质能产业发展程度分析

从国际生物质能的科研历程和实践历程可看出,生物质能的科研发展与实践发展在全球范围内还存在较大的不匹配。从图3可看出,“科研强国”多为发达国家,而“实践强国”中,发展中国家表现相对出色。

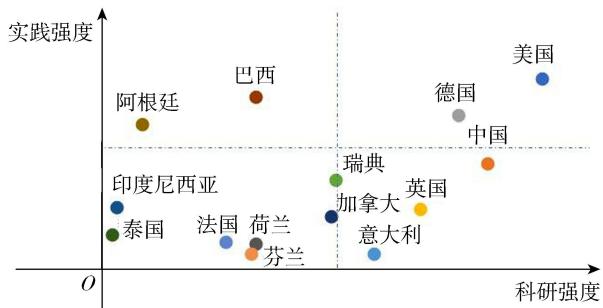


图3 国际生物质能“科研强国”与“实践强国”对比

美国科研与实践能力“双强”,而且在排名前10的研究机构中占据了8个席位,这首先得益于美国得天独厚的农业条件。美国土地、草原和森林资源的拥有量均位于世界前列,且平原土质肥沃,占国土面积的55%,这有利于农业的机械化和规模化发展。美国大部分地区雨量充沛而且分布均匀,水资源总量为29702亿 m^3 ,人均水资源量接近12000 m^3 ,是水资源较为丰富的国家之一。从2002年开始,美国农业部颁布了一系列与生物能源计划相关的政策与法规^[21],支持企业发展生物燃料,政府的一系列措施使得生物质能在短短几十年间发展迅速。另外,作为生物质能发展的“实践强国”,巴西拥有丰富的水资源,其境内北部的亚马逊河是世界上最长、最深、最宽的河流,且流量超过世界上排名其后的9条大河流量之和。此外,可耕地资源大、气候特点优良等独特资源禀赋都为巴西生物质能的发展提供了较低的生产成本,但这也导致当地产生资源依赖、轻视研发投入,导致竞争力降低。从决策行为来看,这也是

造成巴西等资源富集区域“资源诅咒”^[22]的禀赋效应。同时,巴西科研条件落后、科研人才较少也是不争的事实。

尽管我国生物质能领域的探索起步较晚,但从国际生物质能研究空间分布中可以看出,我国学者对这一问题的关注度越来越高,相关研究发表数量仅次于美国,已成为国际生物质能研究中一支重要力量。值得注意的是,我国生物质能产业规模与研究不相匹配,一方面说明我国自然资源的稀缺状况,另一方面也说明我国的相关科研转化能力较弱,需要强化生物质能产业的理论与实践的结合。从我国的科研机构看,中国科学院为唯一入选科研机构,这表明政府对生物质能产业研究较为重视,但是相关高校在生物质能领域研究热度较弱,市场对生物质能的研究需求不强,由此说明我国生物质能产业研发仍处于基础研发阶段。

三、生物质能产业发展关键要素分析

1. 国际生物质能研究领域共词分析

对文献中关键词的演变分析可以在一定程度上反映生物质能的研究方向的变化。利用 CiteSpace 软件对施引文献的原始关键词进行共词分析,通过 Timezone View 的视图方式展现了关键词随时间的变化趋势(图 4)所示。

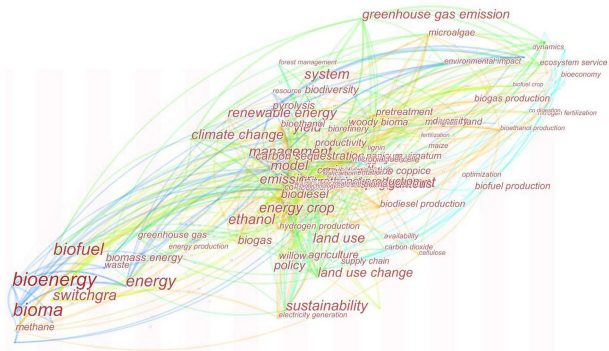


图4 国际生物质能研究文献关键词共线分析

早在 1996 年,“生物质能”“生物质”“生物燃料”“能源”等关键词已成为热门研究关键词,“温室气体”“能源生产”等也得到了不少关注。2007—2010 年,关键词出现爆炸式增长,生物质能成为全球热门研究领域,“能源作物”“燃料乙醇”“生物柴油”等关键词表明生物质能在全球的发展和研究已初具规模。与此同时,“管理”“政策”“可持续”等也成为高频关键词,这与全球高度关注气候变化和

(生物燃料)”“energy(能源)”“security(安全)”等关键词在研究早期就出现;2018 年以后,出现了“energy food nexus(能源-粮食纽带关系)”以及“greenhouse gas emission(温室气体排放)”“carbon(碳)”等关键词,对于生物质能的研究,也随着水-能源-粮食纽带关系的研究深入而逐渐进入复合系统下生物质能与其他要素间动态关系的研究,而不是单一的对生物质能本身的关注。

聚类视图是对施引文献的主题词进行聚类(图6)。分析模块度和轮廓值指标可知,网络的模块度是0.848 3,该值较高意味着聚类可以清楚地界定生物质能的各个子领域。聚类的规模越大,编号越小。平均轮廓值为0.242 9,相对较低,这主要是因为存在很多小聚类。聚类的区块颜色表示该聚类中共被引关系第一次发生的年份,颜色越趋于黄色,越接近现在。因此可知,过去的研究多关注生物质来源和发展生物质能的利用方式,而现在更多地关注生物质能对气候变化的影响以及生物质供应链的建立。

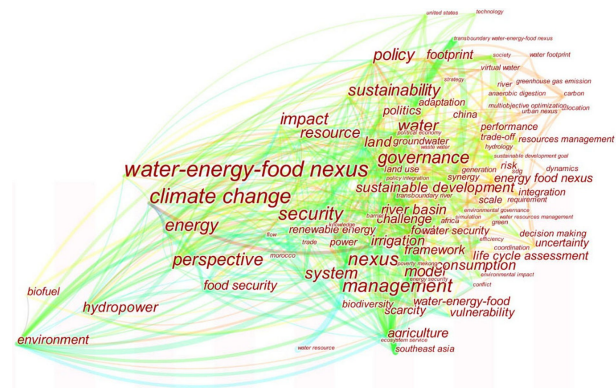


图5 国际水-能源-粮食研究文献关键词共线分析

对于水-能源-粮食纽带关系,通过 CiteSpace 软件对其关键词进行分析可知,2006—2010 年开始出现水-能源-粮食纽带关系的研究,最核心的关键词为“water-energy-food nexus”;2015 年开始,关键词开始出现井喷,“sustainable development (可持续发展)”“policy(政策)”“system(系统)”“management (管理)”等多领域方法也开始出现,其中,“biofuel

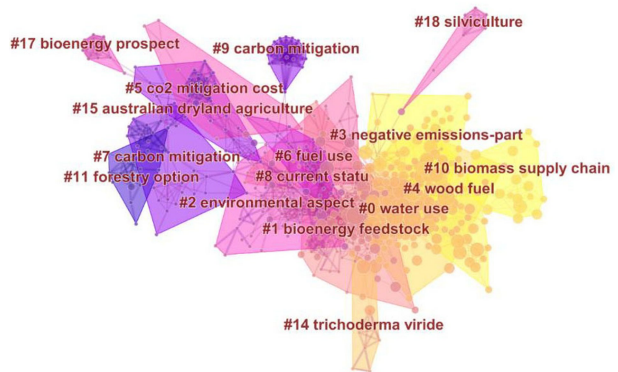


图6 国际生物质能施引文献共被引网络主题词聚类

时区视图可清晰地展现各个聚类(即子领域)发展演变的时间跨度和研究进程(图7)。聚类分析施引文献的主题词可以看出,20世纪90年代初期开始,对聚类#bioenergy strategies(生物质能策略)的研究开始萌芽;1992年以后,聚类#bioenergy resources(生物质能资源)、#large-scale bioenergy production(大规模生物质能生产)和#agronomy(农学)等与生物质资源以及农业发展相关的内容开始增多;21世纪初期,出现了规模最大、持续时间最长的两个聚类#energy crop(能源作物)和#sustainable yield challenge(可持续产量挑战),同样是关注生物质来源端的问题。此后,随着生物质能的应用与研究的不断深入,聚类#chlorella vulgaris(小球藻)成

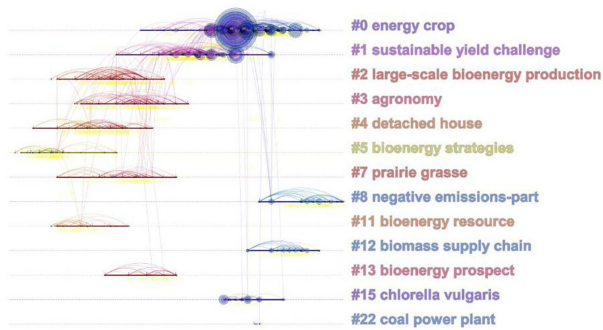


图7 国际生物质能施引文献共被引网络关键词聚类

为了新的研究热点,说明学者开始在世界范围内探索全新生物质来源;2010年,新聚类#negative emissions-part(负排放)和#biomass supply chain(生物质供应链)的出现,由此表明有关二氧化碳采集以及供应链的一系列问题引起科研人员的关注,属于较新的研究领域。

国际文献主要针对生物质能的原料问题、发展策略及生态影响,开展愈加深入的理论和实证研究,这也恰恰印证了上文提出的制约生物质能发展的3个瓶颈。针对资源储备与原料供给研究、政策框架与发展需求研究、认知特性与产业现状研究三大类,笔者列举了典型代表文献的研究方法和内容(表3)。

表3 国际生物质能研究典型代表文献

分类	作者	研究问题	研究方法	研究范围
资源储备与原料供给问题	Ji ^[23]	预测中国近期农业剩余资源理论产量,探讨利用农业废弃物生产生物液体燃料的潜力	人工神经网络	中国
	Yamamoto 等 ^[24]	利用广泛的生物质流评估未来全球生物能源的潜力	全球土地利用与能源模式	全球
	Haberl 等 ^[25]	遵循“食物优先”的原则估计2050年全球生物能源潜力	生物质平衡模型动态全球植被模型	全球
	Jiang 等 ^[26]	估计农作物剩余资源的可利用性	地理信息系统	中国
政策框架与发展需求问题	Ericsson 等 ^[27]	对比两国在不同时段内的生物质能源政策的变化	框架分析法	芬兰、瑞典
	Jeffers 等 ^[28]	给定政策和技术选项预测生物质市场的长期动态	动态计算机模拟模型	美国
	Solomon 等 ^[29]	评估各种能源和经济政策相对于美国汽油对纤维素乙醇发展的潜在影响	内容分析法	美国
	Rajcaniova 等 ^[30]	评估不同国家生物燃料政策如何对世界生物燃料市场的价格波动的影响	协整分析和向量误差修正模型	全球
认知特性与产业现状问题	Searchinger ^[31]	估计土地使用变化时的碳排放量	世界范围农业模型	美国
	Cavicchi ^[32]	从社会、经济和环境的角度分析了挪威生物能源发展的案例	系统动力学	挪威
	Adler 等 ^[33]	评估不同生物能源作物耕作系统的净温室气体通量	DAYCENT生物地球化学模型	全球
	Heller 等 ^[34]	对纽约柳树生物质作物生产系统的环境绩效进行了分析	生命周期评价	纽约

从表3可知,在供需关系研究方面,多采用全球性模型来评估未来生物质能的潜力;在政策制度变迁方面,主要是对比或梳理国家之间各类能源和经济政策对生物质能发展的关系;在评估产业现状方面,生命周期评价方法使用较广,且以评估生态环境影响为主。总的来看,依据关键词的变化趋势可知,国际文献对农作物的探究、土地利用格局的变化、对水资源和水环境的影响、温室气体排放效应、生物多样性以及生态系统价值的影响探讨越来越多。

2. 国际生物质能产业发展技术瓶颈分析

(1) 面向提质增效的资源储备开发困境

从CiteSpace的分析结果中,可以看到能源作物(energy crop)、生物质能资源(bioenergy resources)等一直是研究热点。从全球角度分析,生物质来源广泛且分布不均,应用于交通、供热和电力部门的生物质能正从传统意义上的本土能源转向现代化的全球贸易商品,在生物质能市场总需求逐渐增大的态势下,供需关系的稳定是保障产业发展的基石。

关于生物质能资源储备与原料供给问题,文献大多是从不同资源的潜力评估和利用效率来探寻的。20世纪90年代开始,研究人员对全球生物质能潜力进行评估。Yamamoto 等^[24]、Haberl 等^[25]、

Hoogwijk 等^[35]等先后对全球生物质能源潜力进行评估,认为生物质能潜力会受未来粮食供求状况、竞争土地利用类型变化及食物链的影响,处于上下波动的非稳态。Ji^[23]、Jiang 等^[26]、Lewandowski 等^[36]、杨世琦等^[37]等就农业剩余物和能源作物的发展空间进行评估。Brennan^[38]、Ho^[39]等认为,微藻衍生的生物燃料将成为可持续能源来源的重要组成部分。此外,技术研究开始得到重视,如 Ort 等^[40]旨在通过提高光合效率和性能提高作物产量,缓解全球农作物与能源作物的生产力问题;Arashiro^[41]、Li 等^[42]提出将废水处理和生物能源利用相结合,带来资源利用的最大化。

综上所述,各类生物质资源储备潜力巨大,但原料转化技术的竞争力仍略显不足,导致“潜力”无处发挥。现有文献多考虑原料潜力而忽视了实际发展的诸多限制条件,如运输生物质原料的成本以及种植能源作物的收入过低导致的社会经济问题等。拥有大量的资源储备并不等同于可以实现良好的供给,需探讨通过何种机制使生物质的潜力得以充分发挥。

(2) 面向发展需求的供给制度设计困境

从 CiteSpace 展现的全球生物质能的科研发展来看,“管理 (management)”“政策 (policy)”等关键词大规模出现在 2006—2010 年的文献中,原因就是生物质能发展初期的主要目的是为了应对全球能源危机和保障国家的能源安全,在近十几年的发展过程中,发展目标逐渐转向应对全球气候变化、实现碳减排和绿色可持续发展。

生物质能不仅具有能源属性,而且还有重要的环保属性和民生属性等,应根据其多重属性给予配套政策。Clancy 等提出,除了碳减排这一个统一的气候目标,大多数国家的生物质资源和政策目标有限,这可能导致政策不连贯、产业发展过程出现断层等问题^[43];Scarlat 等回顾了欧盟发展生物能源产业的政策框架认为,生物经济有望在低碳经济中发挥重要作用^[44];Miroslava^[30]、Doku 等^[45]探讨了生物燃料政策使用的作用;Dandres 等对大规模政策产生的中长期影响进行评估^[46];Bentsen 等对比了不同国家在发展生物质能时制定的政策法规的影响^[47];Elghali 等描述了一种建立生物质能系统可持续性评估框架的方法,从而制定不同规模的政策^[48];Shen 等认为中国的生物质能产业处于早期发展阶段,上网电价可能是最好的政策选择^[49];Durusut 等利用了新的

技术经济模型来解释生物能源终端使用部门之间的相互依赖关系,从而对政策制定起到相关影响^[50]。

综上所述,生物质能产业的发展、推广及应用,需要国家制定出一套能源与农业、环境、社会和经济可持续发展相协调的政策框架,政府采用的有针对性的小型政策措施对生物质能市场产生的不同效果值得进一步探讨。

(3) 面向认知规律的产业发展战略制定困境

从 CiteSpace 展示结果中可知,2017—2018 年开始出现“生态经济 (bioeconomy)”“生态系统服务 (ecosystem service)”等与生态相关的新关键词,意味着对生物质能的研究从早期单纯关注资源类型,发展到寻求生态系统服务价值升高的最优战略。作为在水资源和土地资源双重制约下发展起来的可再生能源的重要代表,生物质能对整个生态系统造成的影响还不够明确,反馈机制尚未建立。

生物质能适用性强、用途广泛,与农业、社会和经济系统密不可分,近几年对生物质能开发所造成的环境、经济、社会影响的研究逐渐增多。Searchinger 等使用全球农业模型发现,若农民为获取更高的效益将森林和草地都用来种植能源作物,这种土地利用变化会导致碳排放量的增加^[31]。Boschiero 等对种植能源作物产生的土地利用变化、流域水氮平衡、碳循环等进行评价^[51]。根据 Yaeger 等的观点,生物能源作物种植规模与水资源承载力不匹配的情况会加剧地区的水资源短缺^[52]。在某种程度上,生物质能的清洁性和生态友好性仍然受到怀疑。Clarens 等对利用传统作物作为生物质原料对环境的影响持有几乎相反的观点^[53]。除了考虑对环境生态的影响,生物质能发展中的经济可行性以及社会可接受性等一系列问题也需要进一步探讨。Popp 等利用了多个模型探讨生物质能对低碳转型的成本效益贡献^[54];Mirzabaev 综述了生物质能在水-能源-粮食安全关系内的权衡和协同作用,认为生物质能与粮食安全、环境可持续性、减轻贫困、健康等多要素之间都有密切关系^[55]。

综上所述,目前对生物质能生产过程全生命周期中的生态影响、社会影响和经济影响的评估方法和结论非常多样,并没有统一的评估标准,难以定量分析和判断。加上地区间自然禀赋差异极大,生物质能的产业影响与当地条件密不可分,亟需更为细分的研究,即针对不同的生物质能产品,探讨其对环

境生态以及经济社会的影响。

四、水-能-粮纽带关系下中国 生物质能产业发展对策

国内外文献已经充分揭示,要协调水-能源-粮食的耦合关系,形成规模化、市场化和商业化的生物质能产业,需要有充足稳定的原料供应,国家政策的有效支撑,对社会、经济、环境影响的综合评估以及对生物质能的正确认知。中国生物质能产业的发展尚处于初级阶段,在技术和政策上都还不成熟,距离各项生物质能应用的规模化、产业化还有很长的路要走。面对我国人口众多,水资源缺乏且分布不均的基本国情,如何在严守 18 亿亩耕地红线的原则下发展生物质能产业将是未来一段时期内的国家能源战略问题。

现阶段,我国的生物质能产业发展遇到了前所未有的良好战略机遇,生物质能产业的低碳化特性对于解决我国环境问题和应对气候变暖都有重要意义。我国的生物质能产业布局有序发展分布式生物质能发电产业,同时以“不与人畜争粮争地”“不与粮林争地争水”为目标,加强下一代生物燃料技术开发。结合其他国家的发展经验和文献分析瓶颈来看,可得到以下 3 个发展对策:

第一,完善供应体系。从世界范围来看,生物质能资源量巨大,但目前人类利用的生物量只占陆地上每年合成量的 2% 左右,大有潜力可挖。生物质能产业包含了多维承载要素的协同优化管理模式,关键在于优化多维资源要素供需网络中关键节点要素的配置机制。作为世界农业第一大国和世界人口第一大国,我国应该明确能源、农业、生态的“三位一体”布局。①利用存量不稳定的“陈化粮”和“问题粮”作为原料,必要时使用适当比例的非陈粮作为补充,底线是不影响市场粮价与土地利用格局的改变。②重点开发农业剩余物等资源,解决其分布不均匀、运输成本高、转化率低、规模小等问题。通过优化生物质能原材料的供应链体系,进一步探索和改善分布式的集收集、转化、消费为一体的生物质能商业化开发利用新模式,在差异化的地理背景下,因地制宜建立原材料供应链。③探索性地开发能源作物与粮食作物的轮作种植系统。由于水资源短缺、农业用水需求高,专门种植能源作物同时受到水资源和土地资源的制约,短期内难以实现大规模实

行,但随着轮作制度的推进,或许可以在增强能源供给的同时推动农村农业产业结构调整。④对于藻类等新型生物质原料,要加大科研投入力度,小范围试点推行,尽快探索出适合商业化的成熟利用方式,走上高效发展道路。

第二,精准配套政策。由于生物质能潜在的环境生态效益难以用经济指标衡量,加上技术和市场壁垒的限制,实际的生物质能产业规模一般会远远低于预测,因此在发展初期尤其需要国家政策的支持,政策缺失所形成的制度漏洞将直接对产业的良性发展和循环形成障碍。作为高技术行业,生物质能产业需要高投入才能获得高回报。①国家和政府应加大科研资金投入,与企业、高校共同探索出适合我国生物质能利用的新模式,借助联合力量来进行技术研发和应用转化,加强对多种资源的整合力度,积极鼓励产、学、研合作。②通过各种激励政策,鼓励各种形式的资本投资生物质能产业,发挥自由市场的作用,积极支持中小型企业进入生物质能领域。将基于市场的报酬与可持续性标准结合在一起,尽快让生物质能产业走向规模化和商业化的道路。③在源头建立生物质能优先利用机制,加强对第三方电网企业和燃油企业公平开放接纳生物质能产品的监管。在产品供应末端建立柔性补贴机制,在亏损时加大补贴力度,在收益时适当收回。④采取必要的宣传手段,使生物质能更容易得到公众市场的支持。在生物质能的产业发展过程中,国家执行的一系列政策法规对其后续发展影响至关重要,把发展需求量化,根据发展需求以及国内资源禀赋现状制定适合生物质能发展的连续政策框架。

第三,科学评估影响。明确评估发展生物质能可能造成的一系列社会、经济、生态影响极为重要,后期还需进行更为系统化的研究。①通过生物质能生产过程的全生命周期探讨其对生态系统的综合影响。生物质能的产生既可以提供某些生态系统服务(如燃料原料、碳封存),也有可能损害其他生态系统服务(如粮食、水资源、生物多样性)。②从生物质能产业的角度出发,考虑生物质能原料的生产、加工、运输和贸易过程及其中隐含的碳足迹、水足迹以及全球性贸易流动链条,需要对系统中的相互关系和反馈机制进行更好地评估,考虑其对人类社会和经济发展的正面或负面影响。③生物质能开发策略是基于特定区域、环境和物种的,要考虑不同自然禀赋和社会政策下的

生物质能开发模式,聚力打造有利于保障生态安全、资源安全、社会安全的生物质能产业。

参考文献:

- [1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions for Water[R]. <https://www.unwater.org>, 2018.
- [2] 联合国粮食及农业组织,国际农业发展基金,联合国儿童基金会,等. 2018年世界粮食安全和营养状况[R]. <https://www.who.int>, 2018.
- [3] PETROLEUM B. BP statistical review of world energy 2017(67th edition)[R]. London: BP Statistical Review of World Energy, 2011.
- [4] HOFF H. Understanding the nexus [R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [5] 中国石油集团经济技术研究院. 2017年国内外油气行业发展报告[R]. <https://www.sasac.gov.cn>, 2018.
- [6] LAIRD D A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 178-181.
- [7] 程序. 生物质能与节能减排及低碳经济[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 375-378.
- [8] DEREK J. *Science since Babylon*[M]. London: Yale University Press, 1961.
- [9] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- [10] CHEN C. Science mapping: a systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2017, 2(2): 1-40.
- [11] 梅亮,陈劲,刘洋. 创新生态系统:源起、知识演进和理论框架[J]. *科学学研究*, 2014, 32(12): 1771-1780.
- [12] 王亚华,舒全峰,吴佳喆. 水权市场研究述评与中国特色水权市场研究展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(6): 87-100.
- [13] 吴方,王济干,吴凤平. 碳排放权文献基础与国际发展态势的可视化研究——基于科学知识图谱分析[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 20(4): 52-59.
- [14] 侯海燕,郭芳琪,孙太安,等. 基于 VOSviewer 的山东省生物技术领域国内及国际研究现状分析[J]. *科学与管理*, 2018, 38(2): 25-33.
- [15] 杜祥琬. 能源革命:为了可持续发展的未来[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(7): 1-4.
- [16] 匡廷云,马克平,白克智. 生物质能研发展望[J]. *中国科学基金*, 2005(6): 326-330.
- [17] 于果. 我国生物质能技术发展研究[J]. *资源与产业*, 2016, 18(5): 38-43.
- [18] 田宜水,赵立欣,孟海波,等. 中国农村生物质能利用技术和经济评价[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1): 1-5.
- [19] 缪晓玲,吴庆余. 微藻生物质可再生能源的开发利用[J]. *可再生能源*, 2003(3): 13-16.
- [20] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016-10-28). <http://www.nea.gov.cn>.
- [21] 李超民. 美国生物质能源政策激励与粮食消费展望[J]. *农业展望*, 2010, 6(3): 37-41.
- [22] 王毅鑫,王慧敏,刘钢,等. 生态优先视域下资源诅咒空间分异分析——以黄河流域为例[J]. *软科学*, 2019, 33(1): 50-55.
- [23] JI L Q. An assessment of agricultural residue resources for liquid biofuel production in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015(44): 561-575.
- [24] YAMAMOTO H, FUJINO J, YAMAJI K. Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 21(3): 185-203.
- [25] 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.
- [26] JIANG D, ZHUANG D, FU J, et al. Bioenergy potential from crop residues in China: availability and distribution [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16(3): 1377-1382.
- [27] ERICSSON K, HUTTUNEN S, NILSSON L J, et al. Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden[J]. *Energy policy*, 2004, 32(15): 1707-1721.
- [28] JEFFERS R F, JACOBSON J J, SEARCY E M. Dynamic analysis of policy drivers for bioenergy commodity markets [J]. *Energy Policy*, 2013(52): 249-263.
- [29] SOLOMON B D, BARNES J R, HALVORSEN K E. Grain and cellulosic ethanol: history, economics, and energy policy [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(6): 416-425.
- [30] RAJCANIOVA M, DRABIK D, CIAIAN P. How policies affect international biofuel price linkages [J]. *Energy Policy*, 2013(59): 857-865.
- [31] 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.
- [32] CAVICCHI B. The burden of sustainability: limits to sustainable bioenergy development in Norway[J]. *Energy*

- Policy, 2018(119): 585-599.
- [33] ADLER P R, DEL GROSSO S J, PARTON W J. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems[J]. Ecological applications, 2007, 17(3): 675-691.
- [34] HELLER M C, KEOLEIAN G A, Volk T A. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(2): 147-165.
- [35] HOOGWIKJ M, FAAIJ A, VAN DEN BROEK R, et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(2): 119-133.
- [36] LEWANDOWSKI I, SCURLOCK J M O, LINDVALL E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 335-361.
- [37] 杨世琦,王道龙,杨正礼. 国外能源作物研究进展与焦点问题[J]. 中国农业科技导报,2009,11(1):13-18.
- [38] BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 557-577.
- [39] HO D P, NGO H H, GUO W. A mini review on renewable sources for biofuel [J]. Bioresource Technology, 2014(169): 742-749.
- [40] ORT D R, MERCHANT S S, ALRIC J, et al. Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(28): 8529-8536.
- [41] ARASHIRO L T, FERRER I, ROUSSEAU D P L, et al. The effect of primary treatment of wastewater in high rate algal pond systems: biomass and bioenergy recovery[J]. Bioresource Technology, 2019(280):27-36.
- [42] LI M, ZHOU M, LUO J, et al. Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling-type photosynthetic algae microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2019(280):95-103.
- [43] CLANCY J M, CURTIS J, Ó' GALLACHÓIR B. Modelling national policy making to promote bioenergy in heat, transport and electricity to 2030-Interactions, impacts and conflicts[J]. Energy Policy, 2018(123): 579-593.
- [44] SCARLAT N, DALLEMAND J F, MONFORTI F, et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts[J]. Environmental Development, 2015(15): 3-34.
- [45] DOKU A, DIFALCO S. Biofuels in developing countries: are comparative advantages enough? [J]. Energy Policy, 2012(44): 101-117.
- [46] DANDRES T, GAUDREAUULT C, TIRADO P, et al. Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005—2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(2): 1180-1192.
- [47] BENTSEN N S, NILSSON D, LARSEN S. Agricultural residues for energy: a case study on the influence of resource availability, economy and policy on the use of straw for energy in Denmark and Sweden[J]. Biomass and Bioenergy, 2018(108): 278-288.
- [48] ELGHALI L, CLIFT R, SINCLAIR P, et al. Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems[J]. Energy Policy, 2007, 35(12): 6075-6083.
- [49] SHEN L, LIU L, YAO Z, et al. Development potentials and policy options of biomass in China[J]. Environmental Management, 2010, 46(4): 539-554.
- [50] DURUSUT E, TAHIR F, FOSTER S, et al. Bioheat: a policy decision support tool in Ireland's bioenergy and heat sectors[J]. Applied Energy, 2018(213): 306-321.
- [51] BOSCHIERO M, CHERUBINI F, NATI C, et al. Life cycle assessment of bioenergy production from orchards woody residues in Northern Italy[J]. Journal of Cleaner Production, 2016(112): 2569-2580.
- [52] YAEGER M A, SIVAPALAN M, MCISAAC G F, et al. Comparative analysis of hydrologic signatures in two agricultural watersheds in east-central Illinois: legacies of the past to inform the future[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(11): 4607-4623.
- [53] CLARENS A F, RESURRECCION E P, WHITE M A, et al. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(5): 1813-1819.
- [54] POPP J, LAKNER Z, HARANGI-RAKOS M, et al. The effect of bioenergy expansion: food, energy, and environment[J]. Renew Sustain Energy, 2014(32):559-578.
- [55] MIRZABAEV A, GUTA D, GOEDECKE J, et al. Bioenergy, food security and poverty reduction: trade-offs and synergies along the water-energy-food security nexus [J]. Water International, 2015, 40(5-6): 772-790.

(责任编辑:高虹)