

低碳战略下供给侧减缓技术的综合成本效益分析

赵一冰¹, 蔡闻佳^{2,3}, 丛建辉⁴, 宋欣珂¹, 张雅欣¹, 李明煜¹, 李晋¹, 翁宇威², 王灿^{1,3*}

(1. 清华大学环境学院, 北京市 海淀区 100084; 2. 清华大学地学系, 北京市 海淀区 100084;

3. 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; 4. 山西大学经管学院, 山西省 太原市 030006)

Comprehensive Cost-benefit Evaluation of Supply Side Mitigation Technologies for Low-carbon Strategy

ZHAO Yibing¹, CAI Wenjia^{2,3}, CONG Jianhui⁴, SONG Xinke¹, ZHANG Yaxin¹, LI Mingyu¹, LI Jin¹, WENG Yuwei², WANG Can^{1,3*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

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

3. Tsinghua-Rio Tinto Joint Research Centre for Resources, Energy and Sustainable Development, Haidian District, Beijing 100084, China;

4. School of Economics and Management, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi Province, China)

Abstract: Achieving low-carbon strategic goals requires large-scale application of several key mitigation technologies, which may bring potential impacts in economic, social, and environmental aspects, which in turn is not conducive to achieving low-carbon goals. A comprehensive cost-benefit analysis framework has been proposed for the evaluation of key mitigation technologies underlying the low carbon strategy. This framework comprises six aspects, i.e., technological maturity, economic impacts, local environmental impacts, ecological impacts, human health impacts, and public acceptance. Several supply-side mitigation technologies have been identified and listed, including wind and photovoltaic power generation, carbon capture and storage, biomass, hydrogen and nuclear technologies. Moreover, several key aspects of these technologies are analyzed. We found that comprehensive cost-benefit analysis is beneficial for improving the operability of planning the pathway of the low-carbon technology development and for promoting the synergies between carbon reduction and sustainable development goals. The comprehensive cost-benefit analysis of the key supply-side mitigation technologies is more uncertain and more complex than that of the demand-side mitigation technologies or land-based mitigation activities. Among the current research studies of comprehensive analysis

of supply-side mitigation technologies, several studies have focused on the technology improvement and their economic impacts and certain conclusions have been drawn. Increasing number of studies are now focusing on the local environmental and health impacts, and the methods tend to improve. However, only few studies focus on the ecological impacts and the public acceptance, and the conclusions are uncertain.

Keywords: cost-benefit analysis; carbon mitigation technology; ecological and environmental impact; renewable power generation; carbon capture and storage; biomass energy; hydrogen energy

摘要: 实现低碳战略目标需要大规模应用若干关键减缓技术, 可能会带来经济、社会、环境等方面的潜在影响, 反过来不利于实现低碳目标。提出了技术成熟度、经济影响、局地环境影响、生态影响、人群健康影响和公众接受度6个维度的综合成本效益分析框架, 筛选影响减缓气候变化的供给侧技术, 识别出风电和光伏发电、碳捕集与封存、生物质能、氢能、核能5种关键技术, 重点讨论了其综合成本效益分析维度, 得出以下结论: 一、传统仅考虑技术成本和减排潜力的成本效益分析难以支撑制定中长期减缓技术战略和部署方案; 综合考虑技术的就业、局地环境、生态、健康影响及公众接受度等因素, 可以改进技术的潜力、成本有效性和空间布局等评估维度的系统性和可操作性, 有利于促进实现碳减排目标与可持续发展目标过程中的协同增效。二、相对于需求侧减缓技术及基于土地的减缓行为, 供给侧减缓技术的综合成本效益分析不确定性更大且更为复杂。三、目前对供给侧减缓技术的技术成熟度和经济影响的研究较多且结论较为确定, 对局地环境影响和人群健康影响的研究逐渐增加

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目“碳减排影响机制与政策”(71525007); 清华大学气候变化与可持续发展研究院、能源基金会联合项目“中国低碳发展转型战略及路径”。

National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (71525007); Joint Research of Institute of Climate Change and Sustainable Development and Energy Foundation.

且方法趋于成熟,但对技术的生态影响和社会公众接受度的影响研究仍然较少且较难得出确定的结论。

关键词: 成本效益分析; 减缓技术; 生态环境影响; 可再生能源发电; 碳捕集与封存; 生物质能; 氢能

0 引言

2015年,《巴黎协定》^[1]在2℃温升控制目标的基础上提出了1.5℃目标,使全球温室气体减排任务更加艰巨。为实现控制温升的目标,开发与大规模应用减缓技术至关重要。国际能源署(International Energy Agency, IEA)2015年发布的能源技术展望^[2]、Fuss等^[3]发表的相关文章及报告对实现未来碳减排目标所需的减缓技术进行了识别和判断,其中碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)、核能、可再生能源、终端燃料转换等技术成为诸多研究的共识。除了减缓气候变化的效益外,开发与大规模应用上述技术还可能带来环境、生态及人群健康等多方面的影响,有研究^[4-5]指出,减缓技术带来的复杂经济社会影响将改变技术的应用规模,因此有必要系统梳理这些影响,构建较为全面的综合成本效益分析框架。

新技术的需求及大规模部署应用已有技术,都可能带来经济社会发展和生态环境方面的新挑战,这已引起学术界关注。Rogelj等在2018年IPCC特别报告^[6]中研究了需求侧、供给侧和基于土地的减缓行为三类减缓技术在经济、环境和社会三大领域对可持续发展目标的影响,需求侧减缓技术以及基于土地的减缓行为的影响多为正面且较为确定,而供给侧减缓技术对于健康、经济增长与就业、生物多样性及社会接受程度等方面产生的影响不确定性较大,主要原因是其影响因人而异、情况复杂,不同研究方法或情景设定得出的结论存在差异。例如对于电力行业,Holland等^[7]指出,全球电力行业变革将对生物多样性产生影响,各类发电技术的发电规模与对生物多样性的威胁之间联系显著,从煤炭等化石能源向太阳能和风能等非化石能源的转型可能会减轻对生物多样性的威胁,但随着非化石燃料发电比例的增长,其对生物多样性的影响仍然存在不确定性,且地区差异显著。因此,供给侧减缓技术虽对减缓气候变化具有十分重要的作用,但其开发和大规模应用的影响具有显著的不确定性及其复杂性,亟待进一步研究。

本文首先以减缓技术为核心,以经济、社会、环境三大领域为出发点,提出了综合成本效益分析的

6个主要评价维度,并针对每个维度提出了定性或定量的衡量指标。其次,文章筛选影响未来减缓气候变化的供给侧技术,识别其中的关键技术,梳理了开发或大规模应用这些技术产生的综合影响的研究现状。进一步,文章在第3章讨论了不确定性较大的综合影响维度。文章通过文献调研和全面的综合成本效益分析,旨在研究大规模应用供给侧减缓技术在更长时间尺度的综合影响,可为关键减缓技术的综合评价和政策制定提供参考,文章最后展望了未来的研究方向。

1 综合成本效益分析框架

若仅依据技术经济成本,分析和预测技术的成本效益或选择未来进一步发展的减缓技术,可能忽略技术发展及其大规模应用对生态环境及经济社会的影响,因此有必要对关键减缓技术进行综合成本效益分析。

本文从可持续发展的经济、环境、社会3个领域出发,提出了6个维度的分析框架,如图1所示。经济领域包括技术成熟度以及对就业的影响;环境领域包括减缓技术应用所在地的局地环境影响以及土地利用变化、生物多样性等方面的自然生态影响;社会领域包括了人群健康影响和公众接受度。

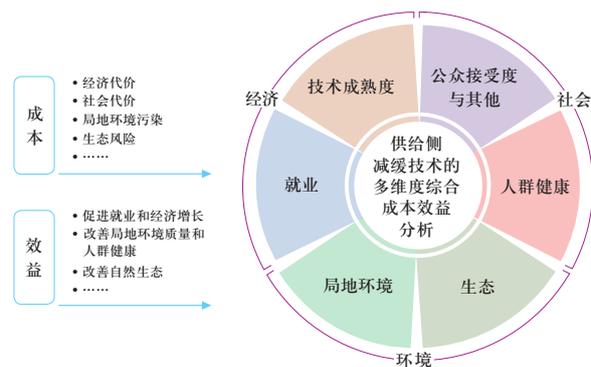


图1 关键减缓技术的综合成本效益分析框架

Fig.1 Comprehensive cost-benefit analysis framework for key mitigation technologies

本文定性描述上述6个分析维度,并提供了部分维度的量化指标。

1) 技术成熟度。

技术成熟度主要从传统技术经济角度考量技术的市场竞争力。对于已经进入市场应用甚至大规模推广的技术,主要考虑成本竞争力;对于尚未大规模应用的减缓技术,主要考察其所处发展阶段,从概念和基

基础研究阶段，到中试、工业示范和商业应用阶段等。技术的传统经济成本可作为成熟度的量化指标。

2) 就业影响。

技术的就业影响是指技术应用带来的净就业机会，同时考虑采用新技术带来的就业增加以及对受到冲击的部门造成的就业损失，可作为就业影响的量化指标。

3) 局地环境影响。

局地环境影响是指技术对当地大气环境、水环境、土壤环境产生的影响，本文主要考察大气环境影响。有些技术能够替代传统的造成局地环境污染的技术，从而减少环境污染；而有些技术则可能带来新的局地环境污染。技术应用带来的局地环境污染排放的变化可作为局地环境影响的量化指标。

4) 生态影响。

生态影响是指技术对整体自然生态的影响，其量化指标较为多元，如土地利用和水资源变化、生物多样性等。

5) 人群健康影响。

技术的健康影响取决于其改变环境和生态质量的程度，以及人口密度和暴露程度等一系列因素，可通过货币化方法评估健康损害或收益价值，作为人群健康影响的量化指标。

6) 公众接受度。

公众接受度是指公众对技术的了解程度、认可程度及接受程度。若公众对技术的接受程度较低，可能导致邻避效应，阻碍技术推广应用。公众调研问卷结果可以作为公众接受度的量化指标。

2 关键技术识别和重点分析维度筛选

2.1 关键技术识别

近年来，一系列国内外研究报告列举、研判、分析了全球及中国实现中长期减排目标所需的减缓技术。国际能源署2015年能源技术展望^[2]列举出中国为实现2℃温控目标所需的技术，认为除终端用能效率提升和终端燃料转换外，碳捕集与封存、可再生能源及核能等技术对实现气候目标至关重要。本文综合分析了第三次国家气候变化评估报告^[8]、中国2050年低碳发展之路^[9]、中国至2050年生态与环境科技发展路线图^[10]、节能减排与低碳技术成果转化推广清单^[11]、能源技术革命创新行动计划2016—2030年^[12]等国内报告，以及17份国际能源署的技术路线图系列报告^[13]、英国石油公司（BP）的技术展望^[14]、IPCC第五次评估报告^[15]、美国科学院的负排放技术及可靠封存技术报告^[16]等国际报告，发现碳捕集与封存技术、核能和氢能技术被公认为实现气候目标的关键减缓技术。横向对比上述报告，可以发现各研究报告识别出来的技术类别与实现温控目标所需的减缓技术类别能够建立对应关系，主要包括碳捕集与封存等负排放技术，氢能等新技术的开发，以及风能、太阳能和生物质能等传统可再生能源的大规模应用。如图2所示，国内外报告均关注研发新技术以及降低已有减缓技术的成本，相比之下，国内报告更侧重技术细节和已有技术的改进推广，而国际报告则更关心新技术的发展方向 and 减排潜力。

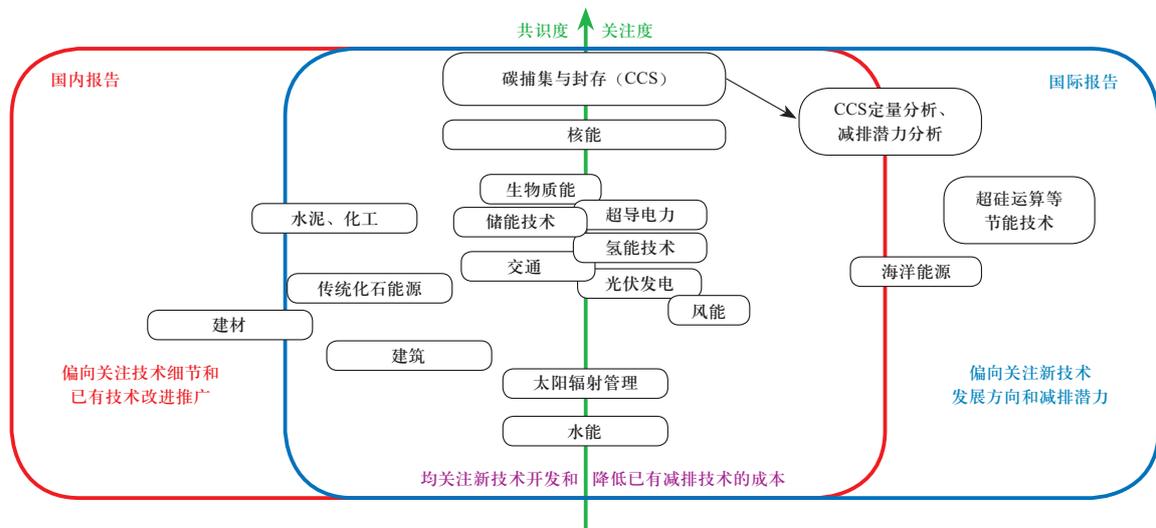


图 2 国内外报告减缓技术对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of domestic and international reports on mitigation technologies

综上,中长期减排目标的技术战略需求^[2-3]及关键减缓技术的发展情况都表明,实现全球及中国气候目标都依赖于大规模应用可再生能源技术以及开发碳捕集与封存、核能、氢能等核心技术。

2.2 重点分析维度筛选

风电和光伏发电是非常成熟的可再生能源发电技术,近年来装机规模迅速扩大,成本大幅下降^[17]。虽然面临大规模并网稳定性等技术层面的障碍以及跨区域输电、基础设施建设等问题^[18],但考虑到目前的成本及未来的学习曲线效应,大范围推广应用风电、光伏发电依然乐观,无补贴平价上网将在近期实现^[19]。从就业影响看,研究表明风电和光伏发电发展可带来大量直接和间接就业机会^[20-21];此外,由于替代了部分煤电等传统化石能源,风电和光伏发电在减少局地污染排放、改善人群健康方面效益显著^[22]。中国省级电力优化模型及综合环境影响评估表明,中国电力部门达到碳强度目标时可实现显著的健康协同效益,到2050年,健康协同效益将迅速增长到减排成本的3~9倍^[23]。然而风电和光伏发电的生态效益具有较大的争议和不确定性,本文将在3.1节讨论。

碳捕集与封存(CCS)技术是重要的负排放技术,其技术成熟度尚在中早期,是否具备大规模发展的条件仍备受争议,本文将在3.2节讨论。研究表明,CCS技术发展将对就业和经济发展带来积极影响^[5],有研究^[24]预计到2050年,CCS的经济增加值贡献将占电力部门的20%以上,煤电CCS的就业贡献将超过风电、太阳能等可再生能源电力部门。然而,CCS技术在局地环境污染和生态影响方面不确定性较大,本文将在3.3节讨论。

生物质能源作为低碳能源的过渡组成部分,具有多样性、灵活性等优点,可在多领域应用,技术相对成熟且社会接受度较高^[25]。但生物质能源种类繁多,其减排效益分析较为复杂,局地环境影响和生态影响

不确定性较大,本文将在3.4节讨论。

氢能是一种清洁高效、制取和应用途径广泛的二次能源。氢能技术有较好的减排和就业推动作用^[26],交通、工业、建筑和氢能发电等成为氢能快速发展的主要行业。其技术成熟度及公众接受度受基础设施建设和储能技术的限制,本文将在3.5节讨论。

核能技术较为成熟,供应了全球低碳电力的近三分之一,实现了清洁、安全、可靠的能源供应。中国核能减排潜力被普遍看好^[27],核电发电量增加较快^[28],如表1所示,诸多研究对中国在不同情景下的核能技术发展情况持乐观态度^[29-33]。然而受福岛核事故影响,核电在全球电力结构中的比例呈下降趋势^[34],其生态影响的不确定性和公众接受度方面存在较大争议,本文将在3.6节讨论。

表1 中国2050年核能发展预测

Table 1 Forecast on China's nuclear energy development in 2050

情景	装机量/GW	发电量占比/%
1.5 °C情景	500~554 ^[30]	28 ^[30]
2 °C情景	400 ^[29]	30 ^[29]
	250 ^[33]	—
考虑多种能源转型政策组合	300~550 ^[32]	40 ^[32]

通过大量文献分析,表2总结比较了上述5项关键供给侧减缓技术6个维度的综合影响。

3 影响供给侧减缓技术综合成本效益的重点分析维度

3.1 现有风电和光伏发电的空间布局对生态影响考虑不足

以往风电、光伏发电发展潜力评价通常采用线性外推的方式,缺乏对生态因素的综合考虑,存在潜在

表2 关键供给侧减缓技术的综合影响分析

Table 2 Comprehensive impact analysis of key supply-side mitigation technologies

减缓技术	技术成熟度	经济影响	局地环境影响	生态影响	人群健康影响	社会影响
风电、光伏发电	成熟	较确定	较确定	不确定	较确定	较确定
CCS	尚未成熟	较确定	不确定	不确定	不确定	不确定
生物质能	较成熟	不确定	不确定	不确定	不确定	较确定
氢能	尚未成熟	较确定	较确定	较确定	较确定	不确定
核能	成熟	较确定	较确定	不确定	较确定	不确定

生态风险。大自然保护协会与发改委能源研究所^[4]评估了中国已有的集中式风电和光伏发电项目与生态保护之间的平衡性，并给出了近中期生态友好的集中式风电和光伏发电发展空间布局规划建议。对已有项目的评估结果显示，已有项目基本遵循了生态保护宗旨，约71%的风电项目和85%的光伏发电项目对生态影响很小；但华北、西北和东北地区的部分风电项目以及西北地区的部分光伏发电项目，建设在较高生态保护价值的区域及耕地，对生态造成破坏。该研究还对对生态影响的角度，研究了实现2030年风、光装机目标的可行性。从全国总目标量来看，2030年高比例可再生能源发展目标在低风险发展区内可以实现，然而部分省份存在较大缺口，因此应在生态保护前提下，考虑调整省间布局，并规划省间互济电力输送。

3.2 CCS技术的未来减排潜力显著但成本较高

CCS技术总体成熟度未达到商业应用水平，目前中国已有多地部署了CCS设施，但与预期有较大差距。根据全球CCS研究所数据平台^[35]数据，截至2020年中国已有CCS设施捕集能力总和约为4.78 Mt/a，与亚洲开发银行2015年制定的CCS技术路线图中10 Mt/a^[36]的目标差距较大。根据中国碳捕集利用与封存技术发展路线图^[37]，2018年中国CCS各环节中的大部分细分技术尚未达到商业应用的成熟度，其大规模应用仍受到成本高、能耗大、安全性和可靠性不足等因素的制约。研究^[38]指出，目前CCS在碳捕集、运输和封存三个阶段对应的技术均在大规模实施方面面临挑战。表3对比了中国CCS部署现状与各规划水平年的目标。

表3 中国CCS部署现状与目标对比

Table 3 Comparison of CCS deployment status in China with targets

情景	目前运行 及规划中 /(Mt·a ⁻¹)	2030年 部署目标 /(Mt·a ⁻¹)	2040年 部署目标 /(Mt·a ⁻¹)	2050年 部署目标 /(Mt·a ⁻¹)
现状	10.51	—	—	—
2019年科技部 路线图	—	20	200	800
2015年IEA能 源技术展望	—	—	—	1320
2015年亚洲 开发银行路 线图	—	40	440	2400

以煤电CCS项目为例，CCS成本主要包括采购、维护成本和捕集过程中的能耗。在电厂加装CCS设备会造成大量的额外资本投入和运行维护成本，从而增加总发电成本，为保证CCS整体安全性的长期监测、事故应急响应和可能的赔付等也会增加成本负担^[39]。在电厂运行的总成本方面，Viebahn等^[40]通过对燃煤电厂加装CCS设施进行经济性分析，计算得到增加CCS装置将使电厂的平准化度电成本升高29%~32%，且企业面临封存风险、基础设施风险等商业风险。

但也有研究对CCS技术代际更替及电厂应用成本与能耗降低的前景持乐观态度^[37]，预计2030年前，CCS技术虽在中国仍处于研发示范阶段，面临高成本、高能耗等问题，但随着技术逐渐成熟，成本和能耗有望实现一定程度的下降。

3.3 CCS技术可能造成负面的局地环境及生态影响

IPCC第五次评估报告^[41]指出，不同种类的负排放技术可能给生物多样性、粮食安全及环境带来影响，其中包括生物质能结合碳捕集与封存技术（BECCS）^[38]。若CCS技术与化石能源结合，虽然减少了碳排放，但有可能使煤电淘汰速度放缓，出现化石能源的“锁定”效应，加上其电能消耗和水资源消耗，可能对局地环境造成负面影响。Viebahn等^[40]的研究结果发现，与部分类型发电技术结合的CCS技术可能增加一系列环境污染。

3.4 生物质能发电技术大规模应用受土地利用和水资源因素制约

生物质能源虽来源广泛，但能够作为替代能源减缓碳排放的比例较低，为满足中长期减排目标，需实现长时间大规模发展应用。然而，一方面有研究指出种植生物质能源作物可能对土地利用产生不利影响^[42]，例如影响森林覆盖率^[43]；另一方面，大规模种植生物质能源作物还受到自然生态条件的约束，其中土地^[44]和水资源^[45]对部分能源作物的可利用潜力影响显著^[46]。

Nie等^[47]通过中国“土地-生物质-生物质能源”能流图的方式，研究了生物质能源规模能否支撑应对气候变化的减排需求，系统性估算了生物质能潜力。研究发现，从生物质总量来看，中国2015年可利用的农林剩余物、能源作物和垃圾可提供总计48.11 EJ/a的生物质能；其中一部分归还土壤以保持生态平衡，另一部分用于其他经济活动，再减去物理损耗，剩下的生物质能通过技术转化后，仅可得到约3.01 EJ/a的可利用

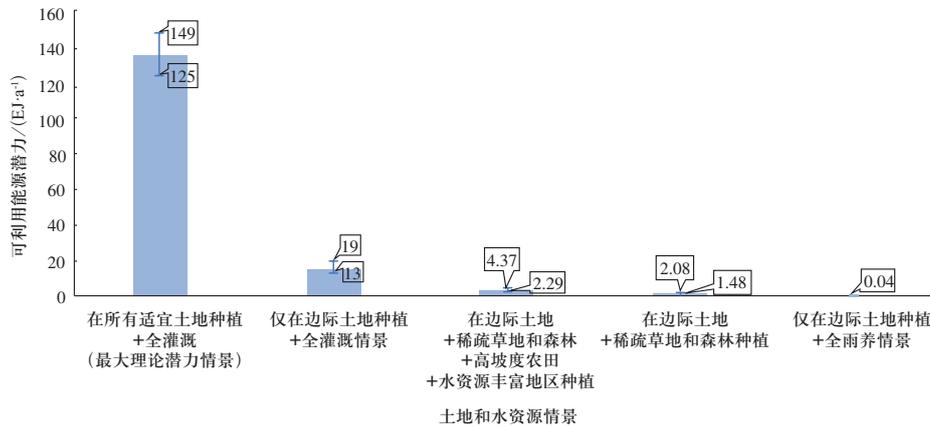


图3 不同土地和水资源情景下甜高粱可利用能源潜力

Fig. 3 Available energy potentially of sweet sorghum under different land and water scenarios

生物质能。因此，能够作为替代能源的生物质占比很低。即便如此，3.01 EJ/a（约1.03亿t标煤）的能量，能够满足十三五规划提出的2020年生物质能年利用量约5800万t标煤的要求。

未来对生物质能源需求的增长，一方面可能影响生物质归还土壤比例，导致土壤碳库平衡发生变化，另一方面加大能源作物种植力度，可能改变土地利用及水资源利用现状。研究^[47]针对土地利用、水资源两种影响因素，以甜高粱为例，估算了不同情景下的能源作物潜力。结果如图3所示，土地利用和水资源对甜高粱可利用能源潜力影响显著，若仅在边际土地种植且全雨养的情景下，甜高粱的可利用能源潜力仅为0.04 EJ/a；若在所有适宜土地均种植甜高粱，并进行全灌溉，最大理论潜力可达125~149 EJ/a，考虑土地和水资源约束后，其能源潜力会大幅下降。IEA预测全球对生物质能源需求为200 EJ/a，其中生物燃料为30 EJ/a。可见，在严格的土地利用和水资源约束条件下，能源作物甜高粱供给潜力无法满足生物质能源发展需求。

此外，Nie等^[48]进一步研究了中国能源作物种植的空间布局，非边际土地应优先选择东北和西南的稀疏草原和森林，以及云南、重庆、四川的高坡度农田；考虑水资源影响时，应优先在云南、广西、广东等水资源丰富地区种植能源作物。

3.5 氢能技术的成熟度和社会影响有一定不确定性

2019年的IEA报告^[49]指出，氢能技术目前尚未成熟，价值链高度复杂，且需要大量的基础设施以配合氢能的储运。有研究^[50]指出，目前受限于燃料电池技术，氢能基于燃料电池的交通、发电等领域应用规模相对较小，难以匹配现阶段可再生能源弃电量；

而在化工领域，依托氢气面向可再生能源消纳的电化工（power-to-X，P2X）技术在未来有较大发展潜力。

与此同时，氢能有一定的安全风险，前期基础设施投入高昂，民众反应尚不明确。此外，Valente等^[51]评估了传统蒸汽甲烷重整制氢技术和生物质气化制氢技术的生命周期可持续性及其社会影响，结果表明这类制氢技术的全生命周期社会影响可能是负面的，未来需要改进技术以提升可持续性。而高温电解系统有望实现80%的电-气-电循环效率，成为电力系统中高效、低成本的长时间储能技术^[52]。

3.6 核能技术发展挑战重重，可能面临地方政府及民众的阻力

核能的开发利用为各国低碳发展提供了一条可选路径，但同时也面临来自供应链、经济性、核安全、政治因素等多方面的挑战。对于产业供应链建设，一方面大型核电项目的本地化有助于降低核电站成本，另一方面全球化的供应链更加成熟稳定，如何平衡二者，并完成对新供应链的资质认证^[33]，可能成为新兴核电国家启动全新核电项目时需要考虑的因素。由于核电站建设成本高、建设时间长，可能存在施工延期和成本超支风险，相比其他类型电厂，其融资更加困难；同时电力系统的市场化改革、核电行业补贴水平下降也会给其投资带来不利影响。重大核事故将严重损害经济发展、破坏社会稳定，如何从规划层面直至工程技术层面建立系统而强健的核安全文化^[31]，包括反应堆的安全升级、核设施的安全退役等，对于维护核安全至关重要。福岛核电站事故后，公众对核电的支持度摇摆不定，在核电站选址等问题上出现了明显的邻避效应，政府及核电企业可能面临来自地方

政府及民众的阻力，这种政治风险迫使其不得不采取更保守的战略选择，也成为核能发展不可忽视的挑战。

由于不同国家能源及环境政策不同，各国能源资源储量及电力需求各异，核电技术较成熟的国家 and 新兴核电国家可能面临差异化的挑战。有学者认为，中国核电发展面临的较为严峻的挑战包括建立完整的、本地化的产业供应链，加快建设核燃料循环后段产业、提高对放射性废物的处理能力^[27]，解决在内陆地区建设核电站时使用河水冷却给当地造成的水污染问题，培养在核安全方面熟练的工作人员^[33]，以及赢取民众对核能产业的接受和认可。

4 结论与展望

本文提出了减缓技术综合成本效益分析的6个主要评价维度及相应的定性或定量评价指标，针对筛选识别出的未来供给侧关键减缓技术，讨论了其综合成本效益，得出以下结论。

1) 传统成本效益分析方法仅考虑技术成本和减排潜力，难以支撑制定中长期减缓技术战略和部署方案。综合考虑技术的就业、局地环境、生态、健康影响及公众接受度等因素，可改进技术潜力、成本有效性和空间布局等评估工作的系统性和可操作性，有利于促进碳减排目标与可持续发展目标协同增效。

2) 风电和光伏发电、碳捕集与封存、生物质能、氢能以及核能等技术是关键的供给侧减缓技术，但相对于需求侧减缓技术及基于土地的减缓行为，这些技术的综合成本效益不确定性更大且分析更为复杂。

3) 目前关于供给侧减缓技术的研究，更多关注技术成熟度和就业等经济影响，且结论较为确定，对局地环境影响和人群健康影响的研究逐年增加且方法趋于成熟，但对技术的生态影响和社会公众接受度影响的研究较少且较难得出确定结论。

4) 在本文提出的关键减缓技术综合成本效益分析框架下，后续可进一步细化各维度的评价指标，进行更深入的横向对比研究，其中重点加强对生态影响及社会接受度影响的研究。

参考文献

[1] UNFCCC. The Paris Agreement [EB/OL]. [2019-12-17]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/>

the-paris-agreement.

[2] International Energy Agency. Energy technology perspectives 2015-Chapter 8 energy technology innovation in China[R/OL]. [2019-12-17]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2015>.

[3] 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.

[4] 大自然保护协会, 发改委能源研究所. 生态友好的中国可再生能源发展空间布局(2016—2030) [R]. 北京, 2018.

[5] Global CCS Institute. Global status report[R/OL]. [2019-12-17]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>.

[6] ROGELJ J, SHINDELL D, JIANG K, et al. Chapter 2: Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development[M/OL].//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. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018: 156-157[2019-12-18]. <https://www.ipcc.ch/report/sr15/>.

[7] HOLLAND R A, SCOTT K, AGNOLUCCI P, et al. The influence of the global electric power system on terrestrial biodiversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(51): 26078-26084.

[8] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[9] 戴彦德, 朱跃中, 白泉. 中国2050年低碳发展之路——能源需求暨碳排放情景分析[N]. 经济研究参考, 2010: 2-22.

[10] 中国科学院生态与环境领域战略研究组. 中国至2050年生态与环境科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[11] 中华人民共和国科学技术部. 科技部 环境保护部 工业和信息化部关于发布节能减排与低碳技术成果转化推广清单(第二批)的公告[EB/OL]. [2019-12-18]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2016/201701/t20170113_130473.htm.

[12] 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》的通知 [EB/OL]. [2019-12-18]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.

[13] International Energy Agency. Technology roadmaps[EB/OL]. [2019-12-18]. <https://webstore-iaea.org/technology-roadmaps>.

[14] BP. BP technology outlook[EB/OL]. (2018)[2019-12-18]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/technology-at-bp/technology-outlook.html>.

[15] IPCC. Fifth assessment report [EB/OL]. [2019-12-17]. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>.

[16] National Academies of Sciences E. Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda[M/

- OL]. [2019-12-18]. <https://www.nap-edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>. DOI:10.17226/25259.
- [17] International Renewable Energy Agency. Renewable energy market analysis: GCC 2019[R/OL]. [2020-02-22]. <https://irena.org/publications/2019/Jan/Renewable-Energy-Market-Analysis-GCC-2019>.
- [18] JORGENSEN J, MAI T, BRINKMAN G. Reducing wind curtailment through transmission expansion in a wind vision future: NREL/TP-6A20-67240[R/OL]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2017[2019-12-19]. <https://www.osti.gov/biblio/1339078>.
- [19] 国家能源局.《关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知》解读[EB/OL]. (2019)[2019-12-19]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/10/c_137733708.htm.
- [20] CAI W J, MU Y Q, WANG C, et al. Distributional employment impacts of renewable and new energy—A case study of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 1155-1163.
- [21] MU Y Q, CAI W J, EVANS S, et al. Employment impacts of renewable energy policies in China: a decomposition analysis based on a CGE modeling framework[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 256-267.
- [22] CAO C J, CUI X Q, CAI W J, et al. Incorporating health co-benefits into regional carbon emission reduction policy making: a case study of China's power sector[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113498.
- [23] CAI W J, HUI J X, WANG C, et al. The Lancet Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: a modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, 2(4): e151-e161.
- [24] JIANG Y, LEI Y L, YAN X, et al. Employment impact assessment of carbon capture and storage (CCS) in China's power sector based on input-output model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(15): 15665-15676.
- [25] FYTILI D, ZABANIOTOU A. Social acceptance of bioenergy in the context of climate change and sustainability—A review[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2017, 8: 5-9.
- [26] Hydrogen Council. Hydrogen scaling up a sustainable pathway for the global energy transition[R]. Hydrogen Council, 2017.
- [27] 张廷克, 李闽榕, 潘启龙. 中国核能发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
- [28] XIAO X J, JIANG K J. China's nuclear power under the global 1.5 °C target: Preliminary feasibility study and prospects[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(2): 138-143.
- [29] JIANG K. Clean energy in China—clean air policy brief 2019[R/OL]. United Nations Environment Programme, 2019: 1-18[2020-04-01]. <https://wedocs.unep.org/handle/20-500-11822/28966>.
- [30] JIANG K J, HE C M, DAI H C, et al. Emission scenario analysis for China under the global 1.5 °C target[J]. *Carbon Management*, 2018, 9(5): 481-491.
- [31] 马克·希布斯. 中国核电的未来[EB/OL]. [2020-01-27]. <https://carnegietsinghua.org/2019/05/29/zh-pub-79224>.
- [32] ZHOU N, FRIDLEY D, MCNEIL M, et al. China's energy and carbon emissions outlook to 2050[R/OL]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011: 1-83. <https://eta.lbl.gov/publications/china-s-energy-carbon-emissions>.
- [33] International Energy Agency. Technology roadmap—nuclear energy 2015 – analysis[EB/OL]. [2020-01-27]. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-nuclear-energy-2015>.
- [34] BP. Statistical review of world energy [EB/OL]. [2020-01-27]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [35] Global CCS Institute. Database of CCS facilities[EB/OL]. (2019)[2019-12-21]. <https://co2re.co/FacilityData>.
- [36] Asian Development Bank. Roadmap for carbon capture and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China[M/OL]. (2015) [2019-12-21]. <https://www.adb.org/publications/roadmap-carbon-capture-and-storage-demonstration-and-deployment-prc>.
- [37] 科学技术部社会发展科技司, 中国21世纪议程管理中心. 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [38] 常世彦, 郑丁乾, 付荫. 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).
- [39] LIANG D P, WU W W. Barriers and incentives of CCS deployment in China: Results from semi-structured interviews[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(6): 2421-2432.
- [40] VIEBAHN P, VALLENTIN D, HÖLLER S. Prospects of carbon capture and storage (CCS) in China's power sector—An integrated assessment[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 229-244.
- [41] DE CONINCK H, REVI A, BABIKER M, et al. Chapter 4: Strengthening and implementing the global response[M/OL]// *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*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018[2019-12-21]. <https://www.ipcc.ch/report/sr15/>.
- [42] RÖDER M, WELFLE A. Chapter 12: Bioenergy[M/OL]. LETCHER T M // *Managing global warming*. Academic Press, 2019: 379-398[2019-12-22]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128141045000120>. DOI:10.1016/B978-0-12-814104-5-00012-0.

- [43] RATHMANN R, SZKLO A, SCHAEFFER R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: an analysis of the arguments in the current debate[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(1): 14-22.
- [44] JIANG D, HAO M M, FU J Y, et al. Potential bioethanol production from sweet sorghum on marginal land in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 225-234.
- [45] HAO M M, JIANG D, WANG J H, et al. Could biofuel development stress China's water resources?[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(9): 1447-1460.
- [46] GAO J, ZHANG A P, LAM S K, et al. An integrated assessment of the potential of agricultural and forestry residues for energy production in China[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(5): 880-893.
- [47] NIE Y Y, CHANG S Y, CAI W J, et al. Spatial distribution of usable biomass feedstock and technical bioenergy potential in China[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(1): 54-70.
- [48] NIE Y Y, CAI W J, WANG C, et al. Assessment of the potential and distribution of an energy crop at 1-km resolution from 2010 to 2100 in China-The case of sweet sorghum[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 395-407.
- [49] International Energy Agency. The future of hydrogen[R/OL]. [2020-01-27]. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [50] 李佳蓉, 林今, 肖晋宇, 等. 面向可再生能源消纳的电化工(P2X)技术分析及其能耗水平对比[J]. *全球能源互联网*, 2020(1): 86-96.
- LI Jiarong, LIN Jin, XIAO Jinyu, et al. Technical and energy consumption comparison of power-to-chemicals(P2X) technologies for renewable energy integration[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020(1): 86-96(in Chinese).
- [51] VALENTE A, IRIBARREN D, DUFOUR J. Life cycle sustainability assessment of hydrogen from biomass gasification: a comparison with conventional hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(38): 21193-21203.
- [52] 邢学韬, 林今, 宋永华, 等. 基于高温电解的大规模电力储能技术[J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(3): 303-312.
- XING Xuetao, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Large scale energy storage technology based on high-temperature electrolysis[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(3): 303-312(in Chinese).

收稿日期：2020-01-31；修回日期：2020-04-14。



赵一冰

作者简介：

赵一冰（1993），男，博士研究生，研究方向为可再生能源、气候变化经济学与低碳政策，E-mail: zyb16@mails-tsinghua.edu.cn。

王灿（1974），男，教授，研究方向为全球气候变化经济学与政策、能源环境经济系统模拟与分析、低碳经济与低碳城市。通信作者，E-mail: canwang@tsinghua.edu.cn。

（责任编辑 张宇）