

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.11.002

碳中和背景、路径及源于自然的碳中和热能解决方案

Background and routs of carbon neutrality and its nature-derived thermal solutions

李扬¹,王赫阳¹,王永真²,赵军^{1*}

LI Yang¹, WANG Heyang¹, WANG Yongzhen², ZHAO Jun^{1*}

(1.天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室,天津 300350; 2.北京理工大学

机械与车辆学院,北京 100081)

(1.Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy(Tianjin University), MOE, Tianjin 300350, China; 2.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘 要:工业化以来的人类活动是全球气候变化尤其是全球变暖的关键因素,这已成为世界科学界的共识。为了早日实现“双碳”目标,碳替代、碳减排、碳循环、碳封存将是 4 个最主要的技术路径。为细化不同技术的碳中和贡献度,针对国际组织 Project Drawdown 给出的 76 种具体减碳技术进行了计算,结果表明:碳减排相关技术将发挥最重要的作用;行为改变将比技术进步产生更大的影响;与自然和热能相关技术的减碳潜力占比分别达到 45.9% 和 35.5%。基于自然在碳循环中的重要作用及我国丰富的自然热能资源,提出了源于自然的碳中和热能解决方案,并以利用地下储热为例分析了其优势。

关键词:双碳;碳替代;碳减排;碳循环;碳封存;自然热能;地下储热;卡诺电池

中图分类号:TK 01*9

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)11-0005-10

Abstract: Human activities have been the key inducement of global climate change, especially global warming, since industrialization. This has become the consensus of the scientific community in the world. Low-carbon energy, carbon emission reduction, carbon cycle and carbon storage are the four main technical routs for carbon peaking and carbon neutrality. In order to measure the contribution of different technologies to carbon neutrality accurately, 76 specific carbon reduction technologies given by the international organization Project Drawdown are analysed. The results show that carbon emission reduction related technologies will play the most important role; change of human behaviour will exert a greater impact than technological progress; the contributions of nature-derived technologies and thermal energy related technologies on carbon emission reduction potential are 45.9% and 35.5%, respectively. Then, based on the important role of nature in carbon cycle and abundant reserves of natural thermal energy resources in China, the concept of "nature-derived thermal solutions for carbon neutrality" is proposed, and its advantages are analysed by using underground heat storage as an example.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; low-carbon energy; carbon emission reduction, carbon cycle; carbon storage; nature-derived thermal energy; underground heat storage; Carnot battery

0 引言

自工业化以来,人类大量使用煤炭、石油等化石能源,同时大量排放 CO₂、甲烷、N₂O、高全球变暖潜能值(GWP)制冷剂温室气体,使地球大气中的温室气体体积分数不断增加,导致全球平均温度不断上升,即全球变暖。根据世界气象组织发布的报

告^[1],2011—2020 年是有记录以来最热的 10 年,2020 年全球平均气温约为 14.9℃,比工业化前水平(1850—1900 年平均值)高出(1.2±0.1)℃。近年来,飓风、热浪、干旱、洪水等全球极端天气事件频发,尽管上述事件与全球变暖的相关性还需进一步科学验证,但联合国、政府间气候变化专门委员会(IPCC)等多个机构的专家均认为二者有直接关系。目前,世界上绝大多数主要国家均制定了碳中和目标及相关政策。2020 年 9 月 22 日,中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会上庄严宣布了中国

收稿日期:2021-09-08;修回日期:2021-10-12

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52006114)

的“双碳”目标,即我国 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。

在此背景下,本文介绍了全球变暖成因及严峻形势的科学共识,梳理了碳中和的主要技术途径及具体技术减碳潜力,并基于不同视角进行了计算与分析,提出了源于自然的碳中和热能解决方案这一概念,以地下储热为例分析了其应用潜力。

1 2℃温控目标任务艰巨

1.1 CO₂对全球变暖影响的科学共识

美国学者查理斯·大卫·科林是最早研究大气中 CO₂ 体积分数对全球气候影响的科学家之一,其领导的团队观测并绘制了著名的科林曲线(Keeling Curve)^[2],记录了 1958 年至今的大气中 CO₂ 体积分数的变化,如图 1 所示。

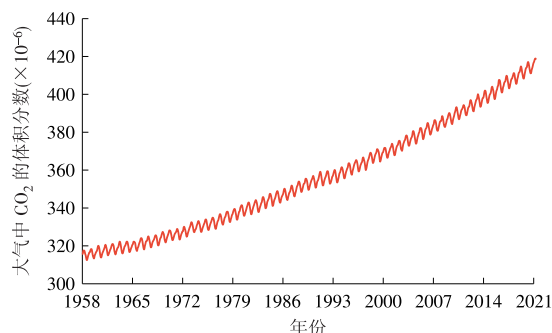


图 1 1958—2021 年大气中 CO₂ 体积分数变化

Fig. 1 Atmospheric CO₂ concentrations from 1958 to 2021

从图 1 虽然可以看出 CO₂ 体积分数的加速上升趋势,但由于该曲线的测量持续时间较短,有部分

学者怀疑其与全球平均温度升高的实际相关性,而在南极冰盖下保存良好的冰层样本则为研究古代长时间尺度下的气候变化特性提供了可能。图 2 为通过测量南极 EPICA Dome C 冰芯得到的近 80 万年地球气温^[3]和大气中 CO₂ 体积分数^[4]的关系曲线,可以看出二者具有非常显著的相似性。

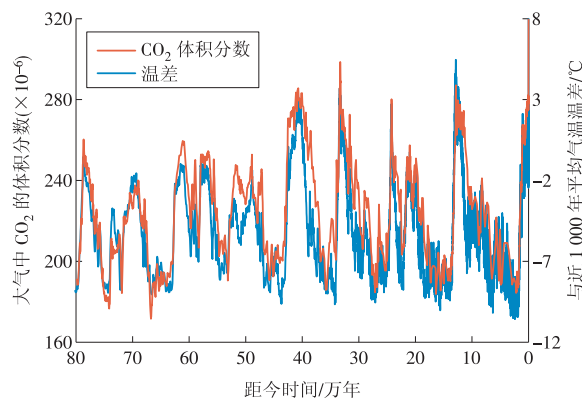


图 2 近 80 万年地球气温与大气中 CO₂ 体积分数变化

Fig. 2 Temperatures and atmospheric CO₂ concentrations in the past 800 000 years

为了更好地评估气候变化相关的科学认知现状,世界气象组织及联合国环境规划署在 1988 年联合建立了 IPCC。IPCC 至今已发布了 5 次综合报告,在历次报告中,人类活动对全球变暖影响的确定性不断增强,见表 1。值得注意的是,第 6 次评估报告中的第 1 工作组报告《气候变化 2021: 自然科学基础》已于 2021 年 8 月 9 日发布,其中首次使用了“毫无疑问”(Unequivocal)这个词来描述人类活动对气候变化影响的确定性。

表 1 IPCC 历次报告中关于人类活动对全球变暖影响确定性的结论

Tab. 1 Definitive conclusions on the impact of human activities on global warming in IPCC reports

报告	年份	人类活动对全球变暖影响的结论
第 1 次(FAR)	1990	人类活动产生的各种排放……将使温室效应增强,平均来说就是使地表更加变暖
第 2 次(SAR)	1995	自 19 世纪末以来,全球平均地面温度上升了 0.3~0.6℃,这一变化不可能完全是自然产生的
第 3 次(TAR)	2001	新的、更强的证据表明,过去 50 年观察到的大部分增暖可以归咎于人类活动
第 4 次(AR4)	2007	自 20 世纪中叶以来,大部分已观测到的全球平均温度升高很可能是观测到的人为温室气体体积分数增加导致的
第 5 次(AR5)	2014	有 95% 的把握确认人类是当前全球变暖的主要原因
第 6 次(AR6 WGI)	2021	人类活动使大气、海洋及陆地变暖,这是毫无疑问的

注:前 5 次报告结论均摘自官方中文版原文;第 6 次报告尚无官方中文版,基于英文版翻译。

1.2 严峻的减排形势: 2℃目标难以实现

尽管绝大多数主要国家都已认识到人类活动对全球变暖等气候变化的影响,并制定了相关减排政策和目标,但包含联合国报告、Nature 及其子刊在内的多项研究指出,即使当前各国的减排政策都按计划实施,也很难实现《巴黎协定》中“把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 2℃之内”的目标。

Rogelj 等^[5]于 2016 年在 Nature 刊文指出,即使所有国家的国家自主贡献(NDC)都实现且之后保持减排速度,2100 年全球平均温升也只有 50% 的可能控制在 2.7℃以内。Raftery 等^[6]于 2017 年在 Nature Climate Change 刊文指出,基于已有效果的减排政策进行计算,2100 年全球平均温升可能范围是 2.0~4.9℃,中值为 3.2℃,只有 5% 的可能控制在 2.0℃以内。联合国环境规划署于 2020 年发表报告

指出:即使所有 NDC 都实现,2100 年全球平均温升也只有 66% 的可能控制在 3.0℃ 以内;而如果延续当前减排政策,则该温升会提高到 3.5℃^[7]。

事实上,即使全球平均温升控制在 2℃,也会对生态产生显著的恶劣影响,因此《巴黎协定》中还要求“努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5℃ 之内”。IPCC 于 2019 年发布了《全球升温 1.5℃》特别报告,对比了全球温升 2℃ 和 1.5℃ 对人类及生态的影响,部分数据见表 2。

2 我国实现碳中和的难度分析

2.1 我国与其他主要国家/地区 CO₂ 排放对比

图 3 为 2019 年世界 211 个国家/地区的 CO₂ 排放情况,图中数据来自牛津大学数据库^[8]。从 CO₂ 排放总量角度看,中国为世界第 1,其总量超过美国和欧盟的总和;从人均 CO₂ 排放角度看,中国目前已超过世界人均线,但与美加澳等部分发达国家相比仍

表 2 全球温升 1.5℃ 与 2℃ 对人类和生态的影响

Tab. 2 Influence of 1.5℃ and 2℃ temperature rise on human and ecosystem

对人类和生态的影响	温升 1.5℃	温升 2℃
海平面上升	0.26~0.77 m	比 1.5℃ 提高 0.10 m
中纬度最高温度	升高 3℃	升高 6℃
物种损失	昆虫 6%、植物 8%、 脊椎动物 4%	昆虫 18%、植物 16%、 脊椎动物 8%
遭受酷热人口比例	14%	37%
遭受干旱人口	3.5 亿	4.1 亿
珊瑚礁消失	70%~90%	99%
捕鱼量降低	150 万 t	300 万 t
北冰洋夏季无冰	100 年 1 次	10 年 1 次

有不小的差距;从近 10 年 CO₂ 排放年均增长速度角度看,对于美日英法德意澳等已经实现碳达峰的发达国家,其 CO₂ 排放量逐年下降,而中国、巴西、印度等发展中国家目前仍然处于 CO₂ 排放正增长的阶段。

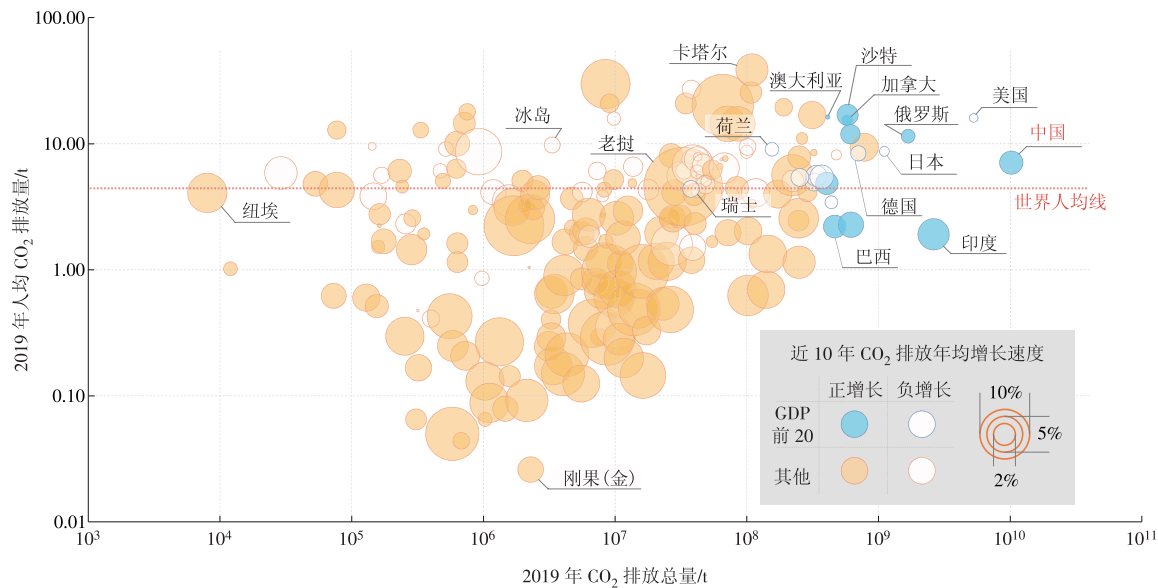


图 3 中国与其他国家/地区 CO₂ 排放情况

Fig. 3 CO₂ emissions of China and other countries/regions

2.2 我国参与气候变化治理国际行动里程碑

在上述背景下,我国积极参与气候变化治理的各项国际行动,1988 年 IPCC 成立时,时任世界气象组织主席的原国家气象局局长邹竞蒙就推动了其创建;1998 年,中国签署了《联合国气候变化框架公约的京都议定书》,人类首次以法规形式限制温室气体排放;2009 年,时任国务院总理温家宝在哥本哈根气候大会上承诺,我国 2020 年单位国内生产总值(GDP)的 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45%,该目标已提前 3 年完成;2016 年,时任国务院副总理张高丽作为习近平主席特使在巴黎气候大会上签署了《巴黎协定》并做出了包括 2030 年前后实现碳达

峰等四大承诺;2020 年 9 月,国家主席习近平在联合国大会上做出了“双碳”目标的承诺;同年 12 月,国家主席习近平在气候雄心峰会宣布我国将进一步提高 NDC 力度,提出到 2030 年,中国单位 GDP 的 CO₂ 排放将比 2005 年下降 65% 以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右,森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿 m³,风电、太阳能发电总装机容量将达到 1 200 GW 以上。

2.3 我国与其他国家/地区“双碳”目标对比

目前全球已有 30 多个国家制订了碳中和目标,图 4 为各典型国家/地区碳达峰及碳中和/净零排放年份(碳达峰年份来自牛津大学数据库^[8],碳中和/净零

排放年份参考公开报道^[9]),可以看出虽然我国承诺的碳中和年份相对最晚,但从碳达峰到碳中和的时间却显著短于其他国家,尤其是英法德等早已自然达峰的老牌资本主义国家,体现了大国的责任与担当。

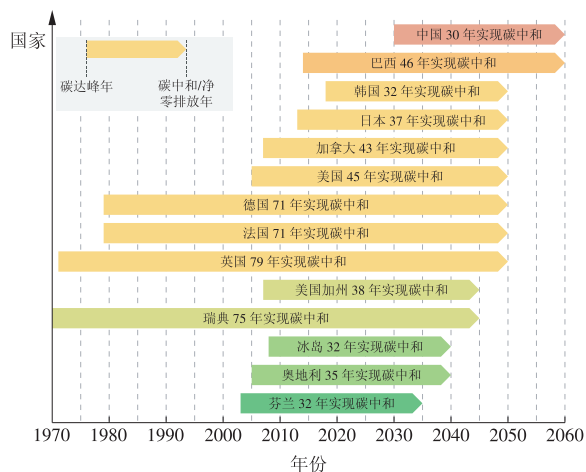


图4 中国与其他典型国家/地区碳达峰、碳中和/净零排放年份对比

Fig. 4 Comparison of the years of CO₂ peak emissions and carbon neutrality/net zero emissions between China and other typical countries/regions

值得注意的是,“双碳”目标提出时,尚未明确碳中和是针对CO₂还是指针对所有温室气体的净零排放。根据IPCC官方术语定义^[10],碳中和(Carbon

Neutrality)是指“在规定时期内人为CO₂移除在全球范围抵消人为CO₂排放”,而净零排放(Net Zero Emissions)是指“规定时期内人为移除抵消排入大气的温室气体人为排放量”。

2021年7月,中国气候变化事务特使解振华首次明确了我国的碳中和目标是针对所有温室气体^[11]。由于全球变暖实际上是受CO₂、甲烷、氢氟碳化物等所有温室气体的共同影响,因此我国将2060年的目标明确为温室气体净零排放,不仅是控制全球变暖的应有之义,也彰显了我国承担减排责任、推动构建人类命运共同体的决心。

2.4 我国与GDP前10国家CO₂排放强度对比

图5为我国和其他GDP总量(以美元计)前10国家CO₂排放强度的对比,数据来自世界资源研究所^[12]。可以看出,我国在1990年的CO₂排放强度显著高于其他国家,之后便迅速下降,2018年已低于印度,1990—2018年的年均下降比例达到6.8%,为10个国家中最高。我国1990—2018年的GDP年均增长速度达9.6%^[13],说明我国在取得巨大经济发展成就的同时显著降低了CO₂排放强度,这在世界范围内是绝无仅有的、了不起的成就;另一方面,在已有碳中和目标的9个国家中,我国实现碳中和所需的CO₂排放强度下降速度也是最高的,减排任务十分艰巨。

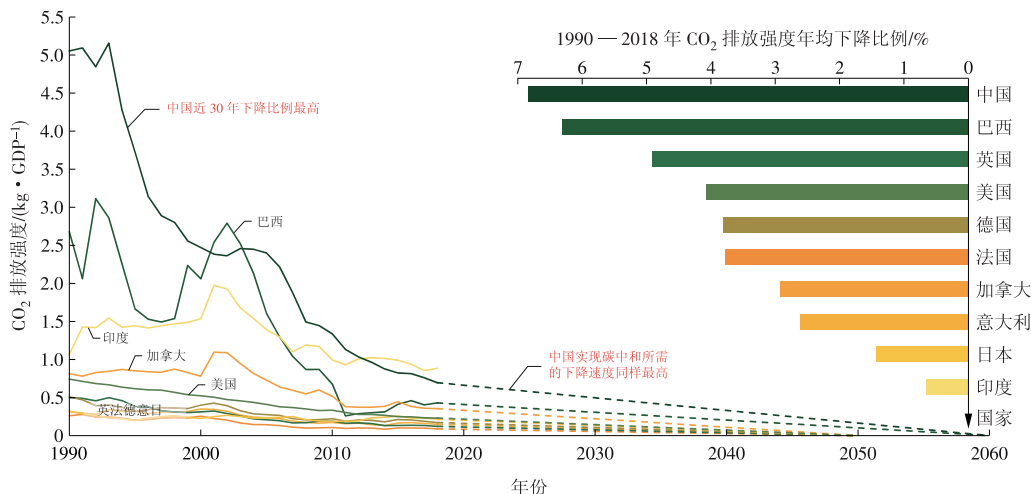


图5 中国与其他GDP总量前10国家CO₂排放强度对比

Fig. 5 Comparison of CO₂ emission intensities between China and other nine top 10 countries by GDP

3 碳中和主要路径

3.1 碳中和技术路径

目前,碳中和的技术路径主要分为以下4类:碳替代、碳减排、碳循环、碳封存。

(1) 碳替代。主要是采用零碳能源替代传统化石能源:通过光伏、风电等替代燃煤发电;通过地

热、光热、空气能等替代燃煤、燃气供暖;通过可再生能源制氢/甲醇等替代化石燃料。

(2) 碳减排。主要通过节能和减排技术提高能源的综合利用率:通过优化工艺及提高能效避免能源浪费或降低能耗;采用新型低碳排放工艺实现工业过程的余能回收;通过互联互通提高能源的利用率等。

(3) 碳循环。主要包括人工固碳和生态固碳:人工固碳包括 CO_2 制甲醇、 CO 等;生态固碳包括森林固碳、草原固碳、湖泊固碳、绿地湿地固碳、碱性土壤固碳等。

(4) 碳封存。主要包括将 CO_2 封存在地下油气层、深部咸水层、废弃煤矿、深海海底等。

3.2 76种具体碳中和技术及分视角讨论

Project Drawdown 是一个致力于提供气候变化解决方案的国际性非营利组织,其编写的图书 *Drawdown* 被评为《纽约时报》畅销书,曾被 *Science* 等权威期刊引用。该组织针对数十种碳中和技术研究了不同情景下的减排潜力并在不断更新与扩充^[14],表 3 列举了 76 种碳中和技术在“21 世纪内温升控制在 2°C 以内”这一情景下的减排潜力,并按照碳中和路径、技术进步或行为改变、是否与自然相关、是否与热能相关 4 个视角进行了分类与讨论。

3.2.1 按碳中和路径分类视角

经计算,76 种碳中和技术中:碳替代类共 14 项,合计年均减碳潜力为 $7.3 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,占比 21.9%;碳减排类共 34 项,合计年均减碳潜力为 $13.8 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,占比 41.6%;碳循环类共 28 项,合计年均减碳潜力为 $12.1 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,占比 36.5%。计算结果表明,碳减排相关技术的减碳潜力最大,虽然采用光伏、风电等碳替代技术同样十分重要,但应建立在充分节能降耗的前提下,这也佐证了杜祥琬院士^[15]、谢克昌院士^[16]等专家将节能提效作为碳中和首要路径的观点。

3.2.2 按技术进步或行为改变视角

技术进步类技术指主要依靠科技创新、研发新技术来实现减碳,该类技术共 51 项,合计年均减碳潜力为 $15.8 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,占比 47.5%。该类技术中以碳替代技术为主,合计年均减碳潜力在该类中占比 46.2%。值得注意的是,与制冷剂相关的制冷剂替代与制冷剂管理合计年均减碳潜力达 $3.4 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,若合并为一项技术则在所有技术中排名第一。我国政府已充分认识到制冷剂相关技术对实现“双碳”目标的重要性,积极参与包括签订《基加利修正案》在内的各项国际行动,并已开展制冷剂替代、回收、跟踪等方面的研究工作^[17]。

行为改变类技术指主要依赖个人或决策者改变行为方式来实现减碳,该类技术虽然数量不足技术进步类的一半,仅有 25 项,但其年均减碳潜力在该类中占比达 52.5%,表明行为改变可比技术进步实现更好的减碳效果。

当然,上述讨论并非要在技术进步和行为改变间厚此薄彼,二者各有其优势及挑战。技术进步类

的优势在于便于集中科研力量攻克重点难题,且相关从业人员对碳中和的共识高、政策规划易于落实。最典型的例子就是我国在新能源发电方面取得的巨大成就^[18]:截至 2020 年年底,我国太阳能及风能发电装机容量达 530 GW,占全国总装机容量的 24.3%,装机容量连续 3 年位居世界第一,是排名第二的美国 2 倍以上;此外,弃风弃光问题得到明显改善,2020 年全国光伏及风电平均利用率分别达 98% 和 97%。

先进技术大规模应用的不确定性会带来一些新问题和新的挑战,高比例可再生能源电力系统安全事故多发就是一个典型问题,见表 4。因此,我国提出的以新能源为主体的新型电力系统的构建也是以系统弹性和韧性为约束的。

行为改变类的优势在于人口基数大,总减碳潜力高以及单一行为复杂度低、不确定性小。以减碳潜力最高的减少食物浪费为例,据统计目前全世界温室气体排放中有 34% 与食物系统相关^[19],而供应链或消费者侧浪费造成的排放约占全世界温室气体排放的 6.2%^[20]。若按 2018 年全世界温室气体排放总量 $48.9 \text{ 亿 t CO}_2\text{e}$ ^[12] 计算,食物浪费导致的温室气体排放约 $30.3 \text{ 亿 t CO}_2\text{e}$,相当于世界第 5 大排放国。

另一方面,由于个体间经济情况、教育背景等存在较大差距,如何提高全社会对“双碳”目标重要性的共识是一大挑战。如法国“黄背心”运动持续近 1 年,其导火索即为政府为控制碳排放而计划提高燃油税;BP、壳牌等五大石油公司每年花费超 2 亿美元用来游说政府,以控制、延迟或阻碍气候政策^[21];特朗普政府退出《巴黎协定》,其支持者中有 30% 不相信全球变暖^[22]。

3.2.3 按自然相关技术视角

经计算,与自然密切相关的技术共 35 项,总减碳潜力为 $15.3 \text{ Gt CO}_2\text{e}$,占比达 45.9%。根据世界自然保护联盟(IUCN)的定义^[23],与自然相关的技术中包括基于自然的(Nature-based)和源于自然的(Nature Derived)。其中基于自然的解决方案通过对自然或人工生态系统的保护、修复和可持续管理来减缓气候变化^[24]。具体技术包括热带森林恢复、林牧一体、泥炭地保护与恢复等共 25 项,总减碳潜力在该类中占比 65.0%。源于自然的解决方案指通过源于自然的方案来满足低碳需求,但这些方案并不直接基于生态系统,而是对其实现转换利用。如对太阳能、地热能、风能、海洋能等的利用等^[23],具体技术包括陆上风电、大规模光伏、地热能利用等共 10 项,总减碳潜力在该类中占比 35.0%。

表 3 2020—2050 年 76 种碳中和技术年均减碳潜力^[14]

Tab. 3 76 carbon neutrality technologies and their annual average CO₂ reduction potential from 2020 to 2050^[14]

序号	名称	4 种分类 ^①	年均减碳潜力/ (Mt CO ₂ e)	序号	名称	4 种分类 ^①	年均减碳潜力/ (Mt CO ₂ e)
1	减少食物浪费	减-行-x-x	2 915.00	39	高效航空	减-技-x-热	209.00
2	健康与教育	减-行-x-x	2 847.33	40	地热能利用	替-技-自-热	206.33
3	富含植物饮食	减-行-x-x	2 167.00	41	森林保护	循-行-自-x	184.00
4	制冷剂管理	循-技-x-热	1 925.00	42	回收再利用	减-行-x-x	183.33
5	热带森林恢复	循-行-自-x	1 815.00	43	沼气炊事	循-技-x-热	155.00
6	陆上风电	替-技-自-x	1 573.67	44	高效卡车	减-技-x-热	153.67
7	制冷剂替代	替-技-x-热	1 451.00	45	高效海运	减-技-x-x	146.67
8	大规模光伏	替-技-自-热	1 410.67	46	高效热泵	减-技-x-热	138.67
9	清洁炊具	减-行-x-热	1 044.67	47	多年生能源作物	循-行-自-x	133.33
10	分布式光伏	替-技-自-热	932.67	48	太阳能热水	替-技-自-热	119.67
11	林牧一体	循-行-自-x	886.00	49	草原保护	循-行-自-x	111.67
12	泥炭地保护与恢复	循-行-自-x	867.67	50	稻米集约化	循-技-自-x	92.67
13	退化土地人工林	循-行-自-x	741.33	51	核电	替-技-x-热	88.33
14	温带森林恢复	循-行-自-x	647.33	52	自行车设施	减-行-x-x	85.33
15	集中式太阳能	替-技-自-热	620.00	53	生物质能	循-技-自-热	84.00
16	隔热措施	减-技-x-热	565.67	54	肥料管理	减-技-x-x	78.00
17	放牧管理技术	循-技-自-x	547.33	55	生物炭生产	循-技-自-x	74.00
18	LED 照明	减-技-x-热	535.67	56	垃圾填埋甲烷捕集	减-技-x-热	72.67
19	多年生主食作物	循-行-自-x	515.00	57	堆肥	循-技-自-x	71.33
20	树木间作	循-行-自-x	501.00	58	废物转发电	循-技-x-热	68.00
21	再生农业	循-技-自-x	484.00	59	小型水电	替-技-x-x	56.33
22	保护性农业	循-行-自-x	446.67	60	便利步行措施	减-技-x-x	48.00
23	废弃农田恢复	循-行-自-x	416.00	61	海洋能利用	替-技-自-热	46.00
24	电动车	替-技-x-热	395.67	62	小农可持续集约化	减-行-x-x	45.33
25	多层农林业	循-技-自-x	376.67	63	电动自行车	替-技-x-x	43.67
26	海上风电	替-技-自-x	348.00	64	高速火车	减-技-x-x	43.33
27	高性能玻璃	减-技-x-热	334.67	65	高效农场灌溉	减-技-自-x	37.67
28	沼气池	循-技-x-热	327.67	66	再生纸	减-技-x-x	36.67
29	提高水稻产量	减-技-自-x	314.67	67	网真	减-行-x-x	35.00
30	土著森林使用权	循-行-自-x	289.67	68	沿海湿地保护	循-行-自-x	33.00
31	竹生产	循-技-自-x	275.67	69	生物塑料	循-技-x-x	32.00
32	替代水泥	减-技-x-x	266.00	70	低流量水具	减-行-x-x	30.33
33	混合动力汽车	减-技-x-热	263.00	71	沿海湿地恢复	循-技-自-x	25.67
34	共享出行	减-行-x-x	256.67	72	配水效率	减-技-x-x	22.00
35	公共交通	减-行-x-x	250.33	73	屋顶绿化	减-技-自-x	20.00
36	智能恒温器	减-技-x-热	233.00	74	可调光玻璃	减-技-x-x	9.67
37	楼宇自动化	减-技-x-热	215.67	75	电气化铁路	减-技-x-x	3.33
38	区域供热	减-技-x-热	209.33	76	微型风电	替-技-自-x	3.00

注:①碳中和路径:替——碳替代,减——碳减排,循——碳循环;技术进步或行为改变:技——技术进步,行——行为改变;是否与自然相关:自——与自然相关,x——自然与其关系不大;是否与热能相关:热——与热能相关,x——热能与其关系不大。

3.2.4 按热能相关技术视角

经计算,与热能密切相关的技术共 26 项,总减碳潜力为 11.8 Gt CO₂e,占比达 35.5%。该类技术可细分为可再生热能利用、提高供能系统及交通系统能源利用效率、优化制冷剂、清洁炊事以及减少散热损失等。

4 源于自然的碳中和热能解决方案

4.1 自然在碳循环中的重要作用

虽然人类活动是全球变暖的主要原因,但在地球碳循环中,人类活动与大气间的碳通量(Carbon Flux)实际上远低于自然界间的碳通量。据统计^[25],

表 4 世界近年来高比例可再生能源电力系统安全事故

Tab. 4 Recent safety accidents of power systems with high-proportion renewable energy in the world

时间	地区	事故描述
2015-07	中国新疆	哈密山北地区风电系统发生次/超同步振荡 100 余次,频率覆盖 10~90 Hz,严重时导致 3 台 660 MW 直流配套火电机组相继跳闸
2019-08	英国伦敦	当地输电线路遭遇雷击,风电场因抗扰能力不足而脱网,故障冲击超出系统调节能力,导致频率持续跌落,引发大规模停电事故。事故时风电出力占比 30%
2020-08	美国加州	持续高温使电负荷激增,夜间无光伏且风电出力显著下降,导致 40 万用户停电 1 h,尖峰电价达 1 美元/(kW·h)
2021-02	美国德州	极端寒潮使电负荷激增,天然气发电机组故障且风电最低出力不足预期的 10%,电力供应充裕度不足,导致超 300 万人断电,尖峰电价达 9 美元/(kW·h)
2021-02	南澳大利亚	当地遭遇极端高温天气,由于气象预报低估了气温实际值,导致实际负荷过高,备用电严重不足,造成大规模停电。事故时风电出力占比 30%

大气与森林及土壤间的碳通量约为 120.0 Gt/a,与海洋间的碳通量约为 90.0 Gt/a,而相比之下人类向大气排放的碳通量仅为 5.5 Gt/a。

图 6 为美国航空航天局(NASA)模拟的全球 2006 年 4 月 1 日和 8 月 1 日 CO₂ 体积分数分布^[26](颜色越接近紫色说明 CO₂ 体积分数越高)。由图 6 可以看出,4 月北半球 CO₂ 体积分数很高,而到 8 月北半球植物勃发后,CO₂ 体积分数显著下降,体现了自然在碳循环中的重要作用。

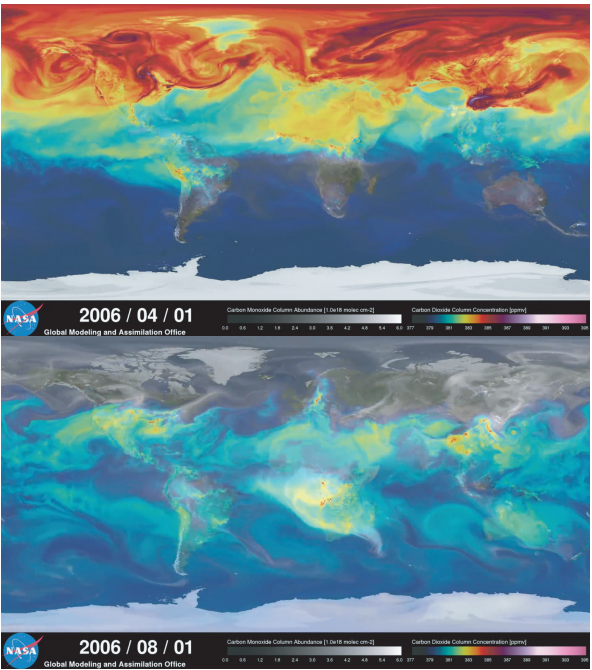


图 6 NASA 模拟制作的全年全球 CO₂ 体积分数分布

Fig. 6 Annual global CO₂ concentration distribution simulated by NASA

4.2 我国丰富的自然热能资源

我国的自然热能资源十分丰富,包括地热能、太阳能、海洋热能等,每年可利用量在我国中低温热能中占比超过 99%^[27]。

对于地热能,我国地级及以上城市浅层地热能年可利用量约 7 亿 t 标准煤,水热型地热能年可利用量约 19 亿 t 标准煤,二者合计总量超过当前我国集

中供暖能耗^[13]的 19 倍。作为浅层地热能的最主要利用形式,地源热泵在我国发展迅速,截至 2019 年全国地源热泵供能面积已达 8.41 亿 m²^[28],连续多年位居世界第一,近 5 年的年均增长率超过 20%。将地源热泵已供面积^[29]与可供面积^[30]相除,则可得各省级行政区浅层地热能利用率。经计算,我国 2015 年浅层地热能平均利用率仅为 0.5%,利用率最高的河北省不足 3.0%,尚有巨大的发展潜力。若全部开发利用,每年可减少 CO₂ 排放 9.32 亿 t^[30]。

对于太阳能,我国陆地每年接收的太阳能辐射总量约为 1.8 万亿 t 标准煤^[31],相当于 2019 年我国全国能耗^[13]的 370.9 倍。我国不仅在光伏装机容量方面连续多年世界第一^[32],在太阳能热利用方面也取得了巨大的发展。目前,我国太阳能热水利用规模已远超世界其他国家,截至 2020 年年底装机容量约 364.4 GWth,占全世界总量的 72.7%,比排名第二的土耳其高出 18 倍以上^[32]。在聚焦式光热发电方面,我国近年来也取得了很大进步,截至 2020 年年底,装机容量达 520 MWe,排名世界第三^[32],但与我国太阳能资源量相比,当前已利用量可以忽略不计,开发潜力巨大。

对于海洋热能,我国近海及毗邻海域的温差能合计约 520 Gt 标准煤,其中南海、东海、黄海的资源量分别占比 85.4%、13.7%、0.9%^[33]。虽然海洋温差能品位和利用效率较低,当前我国还没有商业化的海洋温差能利用项目,但由于其储量大,对于一些特殊场景仍有一定的应用潜力。

综上所述,自然在碳循环中具有十分重要的作用,而我国具有丰富的自然热能资源,若将二者有机结合,形成源于自然的碳中和热能解决方案,可为实现“双碳”目标做出特殊贡献。

4.3 方案示例: 利用自然进行储热

在未来高比例新能源电力系统(即新型电力系统)大规模应用的情景下,由于光伏和风电年利用小时数低(如图 7 所示),假设不考虑储能、灵活性电

源以及需求侧响应等资源,新型电力系统的装机容量需数倍于需求侧负荷^[34-35]。因此,受新能源波动性、间歇性、反调峰特性的影响,未来电网的安全运行及经济调度将受到极大考验,新能源发电波动对应的功率可能相当于整个负荷总量,而大规模、多元化的储能则成为新型电力系统必要的支撑之一^[36-37]。

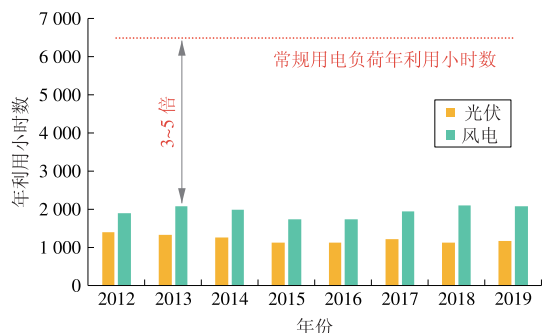


图7 中国光伏、风电及用电负荷典型年利用小时数

Fig. 7 Typical annual utilization hours of photovoltaic, wind power and electrical load in China

储能技术主要可分为物理储电、化学储电、储热等,而当前非热储能技术仍存在较多问题。

(1) 续航较短。当前储能续航时间普遍为2~8 h,难以应对连日不利气象条件导致的长时间用电缺口。如新疆电网曾出现风电平均出力连续4 d不足装机容量10%的情况^[34]。

(2) 安全性仍有待提高。近年来国内外安全事故时有发生,如2021年4月北京大红门储能电站着火爆炸,导致2名消防员牺牲,系统中包含25 MW·h锂电储能;2021年8月北京顺义区发生飞轮储能试

验系统事故,造成3人遇难。

(3) 成本较高。1 kW·h储电成本是储热的10~30倍^[38],而能量衰减、报废处理等也对成本造成了显著影响。

储热技术可扮演多个关键角色。

(1) 对标热能为主的终端需求。据统计,终端能源消费中有51%是热能需求^[32],因此与采用电锅炉等路径相比,可采用可再生热能→热用户的方式,以提高能源利用效率,降低能源损耗。

(2) 提高光热发电效果。可用于平抑太阳能波动性,提高聚焦式光热发电系统的稳定性及能效水平,降低度电成本。

(3) 可用于实现低成本卡诺电池。卡诺电池也称热泵蓄电,其原理是在用电低谷时通过热泵循环来存储热量和冷量,用电高峰时通过布雷顿循环等方式发电实现电网调峰。其初投资成本比常规锂电池储能低40%左右^[39]。

根据麻省理工学院(MIT)发表在 *Joule* 上的研究^[40],当能源系统中可再生能源占比达100%时,配套储能系统的初投资必须降至20美元/(kW·h)以下时才具备经济性,而目前抽水蓄能、锂电池、压缩空气储能等常规储能方式的初投资均高出其数倍。

在此背景下,若将储热与自然相结合,可进一步发挥储热低成本的显著优势,如利用或改造地下土壤等自然系统进行储热。表5为丹麦地下水池式跨季节储热案例统计^[41],该类技术的初投资成本可低至0.5美元/(kW·h)以下。若将地下储热与卡诺电池技术相结合实现低成本的电网调峰,将具有非常显著的经济优势。

表5 丹麦地下水池储热案例

Tab. 5 Underground heat-storage reservoirs in Denmark

项目	Ottrupgård	Sunstore 2	Sunstore 3	Sunstore 4	Vojens	Gram	Toftlund
类型	示范项目	示范项目	示范项目	示范项目	商业项目	商业项目	商业项目
建成年份	1993—1995	2003	2013	2011—2012	2014—2015	2014—2015	2016—2017
温度范围/℃	35~60	35~90	10~89	17~88	40~90	20~90	20~90
储放热功率/kW	390	6 510	26 100	10 500	38 500	30 000	22 000
储热量/(MW·h)	43.5	638.0	5 400.0	6 000.0	12 180.0	12 125.0	6 885.0
总初投资/万美元	27	79	269	315	591	509	485
单位初投资/[美元·(kW·h) ⁻¹]	6.23	1.24	0.50	0.52	0.48	0.42	0.70

5 结束语

本文首先介绍了CO₂对全球变暖影响的科学共识及严峻的减排形势,分析了我国CO₂排放的历史及现状并与世界其他主要国家进行了对比。之后梳理了碳中和的主要路径及具体技术方案并从不同视角进行了分析,分析结果表明:碳减排类技术

比碳替代、碳循环类技术具有更大的减碳潜力;行为改变类技术的减碳潜力超过技术进步类;与自然和热能相关技术的减碳潜力占比分别达到45.9%和35.5%。最后提出了源于自然的碳中和热能解决方案,并以地下储热为例介绍了其应用潜力。

值得注意的是,上述减碳技术均非孤立存在,各技术间存在互动与集成优化的可能。如何突破

体制机制壁垒,形成以自然热能为主的多能耦合互补能源互联网,实现 $1+1>2$ 的效果,应被引起足够的重视。

参考文献:

- [1] State of the global climate 2020 [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2021.
- [2] KEELING C D, PIPER S C, BACASTOW R B, et al. Exchanges of atmospheric CO_2 and $^{13}\text{CO}_2$ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I: Global aspects [R]. San Diego: Institution of Oceanography, 2001.
- [3] JOUZEL J, MASSON-DELMOTTE V, CATTANI O, et al. Orbital and millennial antarctic climate variability over the past 800 000 years[J]. Science, 2007, 317(5839): 793-796.
- [4] LÜTHI D, LE FLOCH M, BEREITER B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000—800 000 years before present [J]. Nature, 2008, 453: 379-382.
- [5] ROGELJ J, ELZEN MDEN, HÖHNE N, et al. Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C [J]. Nature, 2016, 534: 631-639.
- [6] RAFTERY A E, ZIMMER A, FRIERSON D M W, et al. Less than 2°C warming by 2100 unlikely [J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 637-641.
- [7] Emissions gap report 2020 [R]. Nairobi: UNEP, 2020.
- [8] RITCHIE H, ROSER M. CO_2 and greenhouse gas emissions [DB/OL]. (2021-05-10) [2021-08-10]. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [9] Which countries have a net zero carbon goal [EB/OL]. (2019-06-14) [2021-08-10]. <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal>.
- [10] Global warming of 1.5°C : Glossary [R]. IPCC.
- [11] 解振华: 中国碳达峰是二氧化碳达峰, 碳中和包括全部温室气体 [EB/OL]. (2021-07-26) [2021-08-10]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13746034.
- [12] Climate watch: Historical GHG emissions [DB/OL]. (2021-05-10) [2021-08-10]. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>.
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [14] Project drawdown: Table of solutions [DB/OL]. (2021-05-10) [2021-08-10]. <https://www.drawdown.org/solutions>.
- [15] 张胜杰, 齐琛阔, 张金梦. 节能提效应是“碳中和”首要举措 [N]. 中国能源报, 2020-12-21(26).
- [16] 李元丽. 减碳第一优选是节能提效 [EB/OL]. (2021-05-25) [2021-08-10]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2021-05-25/2863841.shtml>.
- [17] 史琳, 安青松. 基加利修正案生效后替代制冷剂的选择与对策思考 [J]. 制冷与空调, 2019, 19(9): 50-58.
- [18] SHI Lin, AN Qingsong. Low GWP refrigerants options and countermeasures discussion after the entry into force of Kigali Amendment [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(9): 50-58.
- [19] 袁伟. 我国新能源形势及“十四五”发展的几个关键问题 [R]. 北京: 国网能源研究院有限公司, 2021.
- [20] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions [J]. Nature Food, 2021, 2: 198-209.
- [21] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers [J]. Science, 2018, 360(6392): 987-992.
- [22] MCCARTHY N. Oil firms spend millions on climate lobbying [EB/OL]. (2019-03-26) [2021-08-10]. <https://www.statista.com/chart/17467/annual-expenditure-on-climate-lobbying-by-oil-and-gas-companies/>.
- [23] LEISEROWITZ A, MAIBACH E, ROSER-RENOUF C, et al. Trump voters & global warming [R]. New Haven: Yale Program on Climate Change Communication, 2016.
- [24] Nature-based solutions: About defining nature-based solutions [EB/OL]. (2021-01-11) [2021-08-10]. <https://www.iucn.org/theme/nature-based-solutions/about>.
- [25] 大自然保护协会. 基于自然的解决方案: 研究与实践 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [26] Carbon cycling and biosequestration: Report from the March 2008 workshop [R]. Washington DC: U. S. Department of Energy, Office of Science, 2008.
- [27] NASA's Goddard Space Flight Center. A year in the life of earth's CO_2 [EB/OL]. (2014-11-17) [2021-08-10]. <https://svs.gsfc.nasa.gov/11719>.
- [28] 赵军, 李扬, 李浩, 等. 中低温能源在中国 [J/OL]. 太阳能学报, 2020, 网络首发 [2021-08-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2082.TK.20201113.1409.002.html>.
- [29] ZHAO Jun, LI Yang, LI Hao, et al. Mid-/low-temperature energy in China [J/OL]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, Available Online [2021-08-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2082.TK.20201113.1409.002.html>.
- [30] 中国可再生能源发展报告 2019 [R]. 北京: 水电水利规划设计总院, 2020.
- [31] 地热能开发利用“十三五”规划 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 国土资源部, 2017.
- [32] 蔺文静. 浅部地质环境热调蓄能力及其可利用性研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- [33] 潘进军, 江滢, 郭鹏, 等. 中国太阳能资源和环境气象因子影响分析 [J]. 科技导报, 2014, 32(20): 15-21.
- [34] PAN Jinjun, JIANG Ying, GUO Peng, et al. Analysis of China's solar energy resources and environmental meteorological factors [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(20): 15-21.
- [35] Renewables 2011—2021 global status report [R]. Paris:

- REN21 Secretariat.
- [33]施伟勇,王传崑,沈家法.中国的海洋能资源及其开发前景展望[J].太阳能学报,2011,32(6):913-923.
- SHI Weiyong, WANG Chuankun, SHEN Jiafa. Utilization and prospect of ocean energy resource in China [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(6):913-923.
- [34]郭剑波.双碳目标下电力系统发展及挑战[R].北京:中国电力科学研究院,2021.
- [35]喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
- YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [36]王永真,张靖,潘崇超,等.综合智慧能源多维绩效评价研究综述[J].全球能源互联网,2021,4(3):207-225.
- [37]童家麟,洪庆,吕洪坤,等.电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J].华电技术,2021,43(7):17-23.
- TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.
- [38]李廷贤.高密度储热及能质调控的原理与方法探索[R].上海:上海交通大学,2021.
- [39]BOLLINGER B R. Malta Pumped Heat Electricity Storage (PHES) for coal exit and energy transition from fossil to renewable energies[R].Cambridge: Malta Incorporated,2020.
- [40]ZIEGLER M S, MUELLER J M, PEREIRA G D, et al. Storage requirements and costs of shaping renewable energy toward grid decarbonization [J]. Joule, 2019, 3(9):2134-2153.
- [41]Technology data for energy storage [R]. Copenhagen: Danish Energy Agency, 2019.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

李扬(1990—),男,山东莱州人,助理研究员,博士,从事地热能及其能源系统高效利用等方面的研究(E-mail: liyangtju@tju.edu.cn)。

王赫阳(1974—),男,黑龙江明水人,教授,博士生导师,博士,从事清洁燃烧能源技术的开发与应用等方面的研究(E-mail: heyang.wang@tju.edu.cn)。

王永真(1988—),男,陕西富平人,副教授,博士生导师,博士,从事综合能源系统与能源高效转化及利用等方面的工作(E-mail: wyz80hou@bit.edu.cn)。

赵军*(1964—),男,天津人,教授,博士生导师,博士,从事中低温热能高效利用、智慧型综合能源以及近零碳技术中的新理论与新方法等研究(E-mail: zhaojun@tju.edu.cn)。