

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.001

碳中和体系解读

Interpretation on carbon neutrality system

张晋宾, 周四维
ZHANG Jinbin, ZHOU Siwei

(电力规划设计总院, 北京 100120)
(Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

摘要: 应对全球气候变化, 加速全社会绿色低碳转型, 尽早实现碳中和, 是全人类的共同期望。为系统了解碳中和背景, 掌握概念体系, 把握发展战略, 判定实施路径, 介绍了碳中和起源和国内外背景及形势、主要国家的碳中和目标, 界定了碳达峰、碳中和相关术语概念, 描述并分析了欧盟、英国、日本、中国、美国等的低碳发展战略, 最后分析归纳了实现碳中和目标的10个关键方法或技术。

关键词: 气候变化; 温室气体; 碳达峰; 碳中和; 概念; 战略; 关键方法或技术

中图分类号: X 321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)06-0001-10

Abstract: In response to global climate change, it is the shared vision of humanity to accelerate the transition to a green and low-emission society and achieve carbon neutrality as soon as possible. In order to comprehensively understand the background and concept system of carbon neutrality, we must take the development strategy and choose suitable implementation path. The origin of carbon neutrality, its status quo at home and abroad and carbon neutrality targets of major countries are introduced. The concepts of carbon peaking, carbon neutrality and other terminologies are defined. In addition, the low-carbon development strategies of EU, UK, Japan, China and US are analyzed. In the end, ten key solutions / technologies to achieve carbon neutrality are summarized.

Keywords: climate change; greenhouse gas; carbon peaking; carbon neutrality; concept; strategy; key solutions/ technologies

0 引言

工业革命以来, 人类行为带来了大量的温室气体排放, 大幅增加了大气中温室气体的体积分数, 增强了地球自然温室效应, 由此而导致的全球气候变化造成全球干旱、热浪、暴雨、滑坡等恶劣气候现象频发, 同时也引起了海平面上升、海洋酸化和生物多样性丧失。气候变化是当代人类社会发展的重大挑战, 限制全球气温上升, 碳达峰是前提, 碳中和是关键。

准确了解碳达峰、碳中和的国内外背景和形势, 是判断其发展态势的前提。全面、系统、准确地知晓与碳中和相关的主要概念和知识, 了解发达区域或国家(包括中国)的低碳转型战略, 对于碳达峰、碳中和路线的制定具有重要参考价值。明确实现碳中和的关键方法或技术, 对于深入开展碳中和

工作, 达成碳中和目标至关重要。当前国内进行这些方面系统性综合性研究的文献尚不多见。

本文从碳达峰、碳中和背景及形势, 基本术语概念及知识, 主要经济体的低碳发展战略, 实现碳中和的关键方法或技术等方面, 对碳中和体系进行系统解读。

1 碳中和背景及大势

1.1 国际背景及全球大势

政府间气候变化专门委员会(IPCC)是世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于1988年联合成立的联合国下属机构, 专门负责评估与全球气候变化相关的科学技术和社会经济事务(如气候变化科技和社会经济认知现状, 气候变化原因及对社会、经济的潜在影响, 如何适应和减缓气候变化的可能对策等)。自成立以来, IPCC每5~7年编写1套全球气候评估报告, 至今已编写了5套多卷册的评估报告, 为《联合国气候变化框架公约》

(UNFCCC)《京都协定》《巴黎协定》等的制定做出了重大贡献。目前正处于IPCC第6个评估周期, AR6综合报告预计于2022年发布^[1]。

气候变化是当今人类社会可持续发展面临的重大挑战。IPCC认为,人类对气候系统的影响是明确的且该影响仍在不断增强(如图1—4所示)。自20世纪50年代以来,许多观测到的变化在几十年乃至上千年时间里从未出现过。破坏气候的人类活动越多,对人类和生态系统造成严重、普遍和不可逆转影响的风险也就越大。

要将全球平均气温升幅限制在工业化前水平以上低于2℃甚至1.5℃以内,需要紧急并彻底远离“一切照常”的做法,尽早将大气中温室气体的体积分数稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平。越晚采取行动,成本将越高,而且面临的技术、经济、社会和体制方面的风险也将越高^[2-3]。

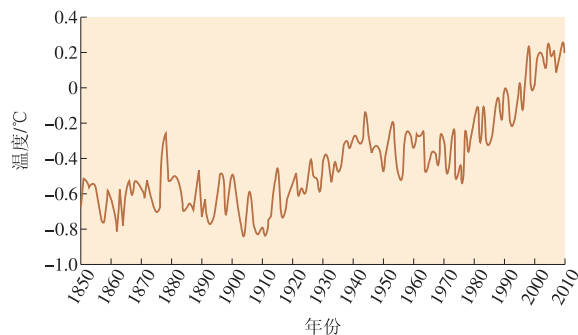


图1 全球平均陆地和海表综合温度异常变化

Fig. 1 Abnormal variation of global average land and sea surface temperature

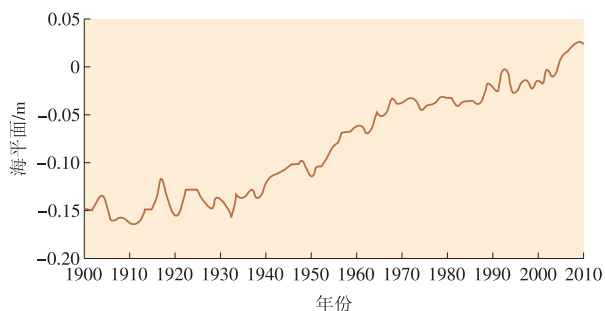


图2 全球平均海平面变化

Fig. 2 Global average sea levels

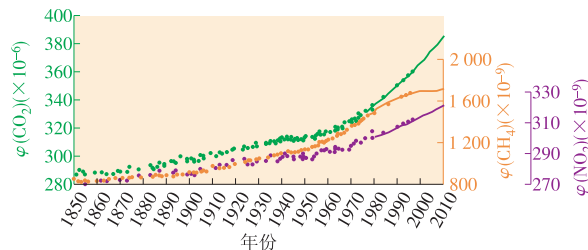


图3 全球平均温室气体体积分数变化

Fig. 3 Global average GHG volume fractions

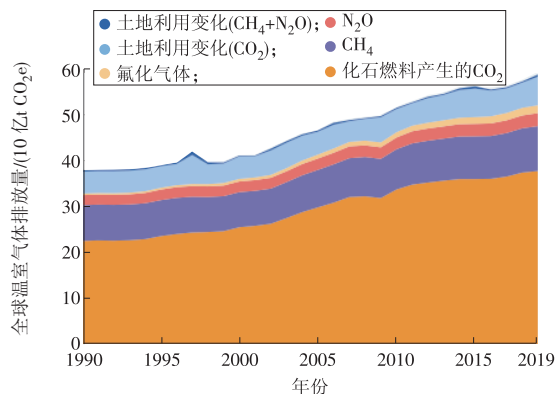


图4 所有来源的全球温室气体排放

Fig. 4 Global GHG emissions from all sources

为应对由于人类活动大幅增加大气中温室气体体积分数而带来的全球气候变化,自20世纪90年代以来,国际社会在联合国框架下进行了一系列气候变化谈判,先后达成了《联合国气候变化框架公约》《京都协定》《巴黎协定》等条约或协定(如图5所示),奠定了世界各国携手应对全球气候变化的法律基础。

《巴黎协定》第2条提出“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,并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上1.5℃之内”的目标;其第4条要求各缔约方尽快做到温室气体排放达峰,在21世纪下半叶实现温室气体源的人为排放与汇的清除之间的平衡^[4]。《巴黎协定》生效后,各缔约国先后制定了各自的碳中和行动目标。截至2021年4月,全球已有100多个国家正式通过、宣布或承诺在21世纪中叶左右实现净零排放目标。当前,全球已有不丹、苏里南2个国家实现了碳负排放,世界主要国家或地区碳中和目标见表1^[5-6]。

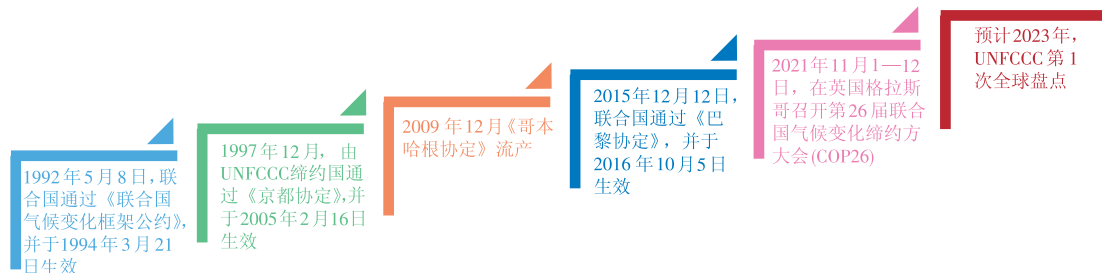


图5 UNFCCC及其相关系列活动时间表

Fig. 5 Time-table of UNFCCC and its activities

表 1 世界主要国家或地区碳中和目标
Tab. 1 Carbon neutrality targets of major countries/regions

国家或地区	碳中和目标		备注
	年份	状态	
阿根廷	2050	提交 UNFCCC	2020 年 12 月提交联合国 ^[7]
澳大利亚	2050—2100	对《巴黎协定》的承诺	
奥地利	2040	联盟协定	2020 年 1 月联合政府承诺 2040 年实现气候中和、2030 年实现 100% 清洁电力 ^[8]
比利时	2050	政策立场	
巴西	2060	提交 UNFCCC	2020 年 12 月提交联合国 ^[9]
加拿大	2050	政策立场	特鲁多总理于 2020 年 11 月提交了相关法律草案 ^[10]
中国	2060	政策立场	习近平主席于 2020 年 9 月 23 日,在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出:中国力争 2030 年前碳达峰,2060 年前碳中和 ^[11]
丹麦	2050	立法	2030 年起禁售汽/柴油车 ^[12]
欧盟	2050	政治协定	2019 年 12 月“绿色新政”确立欧盟 2050 年碳中和目标(波兰是唯一持不同意见的国家,拒绝承诺执行) ^[13] 。2020 年 3 月提交联合国 ^[14]
芬兰	2035	联盟协定	2019 年 6 月 5 个政党一致同意强化该国的气候法 ^[15]
法国	2050	立法	2019 年 6 月 27 日议员投票将净零排放目标纳入法律 ^[16]
匈牙利	2050	立法	2020 年 6 月通过气候中和气候法 ^[17]
德国	2050	立法	德国第 1 部主要气候法于 2019 年 12 月生效,详细列出了未来 10 年各行业的年度排放预算 ^[18]
日本	2050	意向声明	2020 年 10 月菅义伟首相宣布,将于 2050 年前实现碳中和 ^[19]
新西兰	2050	立法	2019 年 11 月立法设定了除生物甲烷(主要来自绵羊和牛)外的所有温室气体的净零排放目标;到 2050 年,生物甲烷排放将在 2017 年的基础上削减 24% ~ 47% ^[20]
挪威	2050(实际) 2030(补偿)	政策立场	议会同意国内实现 2050 年目标,通过国际碳补偿实现 2030 年目标 ^[21]
新加坡	2050—2100	提交 UNFCCC	2020 年 3 月提交联合国 ^[22]
南非	2050	政策立场	2020 年 9 月公布了低排放发展战略(LEDs) ^[23]
韩国	2050	政策立场	2020 年 10 月文在寅总统公开承诺,将于 2050 年前实现碳中和 ^[24]
西班牙	2050	立法(草案)	2020 年 5 月提交法律草案 ^[25]
瑞典	2045	立法	2017 年 6 月立法 ^[26]
瑞士	2050	提交 UNFCCC	2020 年 12 月提交联合国 ^[27]
乌克兰	2060	政策立场	2021 年 3 月发布的《2030 经济战略》中,提出了不晚于 2060 年实现碳中和的计划 ^[28]
英国	2050	立法	2019 年 6 月立法 ^[29]
美国	2050	政策立场	2021 年 1 月《关于应对国内外气候危机的行政命令》中提出:不迟于 2050 年实现全经济范围内净零排放 ^[30]

1.2 国内背景及形势

据联合国环境规划署《2020 年排放差距报告》,中国绝对温室气体排放量处于全球第 1 位(如图 6 所示),人均排放量处于全球第 4 位且高于全球平均水平(如图 7 所示)^[3],中国碳减排压力巨大。计及中华民族永续发展和构建人类命运共同体,党中央经过深思熟虑作出了中国“力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”的重大战略决策。

为实现碳中和目标,世界各国都需要做出巨大努力,而发展中国家将面临更大的挑战,中国主要面临以下问题。

(1)时间紧、难度大。就碳达峰到碳中和过渡期而言,欧盟和美国等发达经济体为 50~70 a,而我国仅有 30 a(如图 8 所示);就减排量而言,我国碳排放量占全球的 30% 左右,超过美国、欧盟、日本的总

和;预计 2030—2050 年中国年均减排率将达到 8%~10%,远超发达国家的减排速度和力度^[31]。

(2)发展与碳排放强耦合。发达国家已完成工业化,经济增长与碳排放弱耦合;我国尚处于工业化阶段,经济发展与碳排放仍为强耦合。

正如党中央所强调,实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,是一场硬仗,也是对我们党治国理政能力的一场大考。

2 碳达峰、碳中和相关概念及常识

2.1 温室气体

温室气体是指大气层中自然存在的和由于人类活动所产生的能够吸收并重新发射由地球表面、大气和云层所发射的、波长在红外光谱范围内的辐射的气态成分,温室气体包括二氧化碳(CO₂)、甲烷

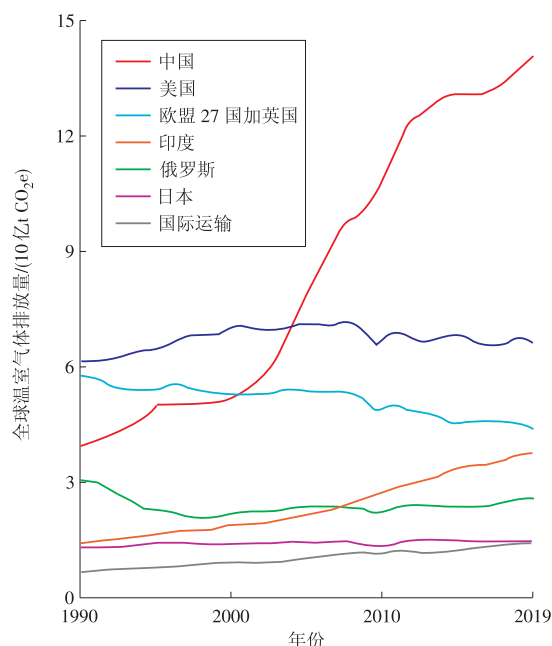


图6 排名前6位的排放国家或地区及国际运输绝对温室气体排放量(不包括土地利用变化排放量)

Fig. 6 Absolute GHG emissions of the top 6 emitters (excluding emission of LUC) and international transport

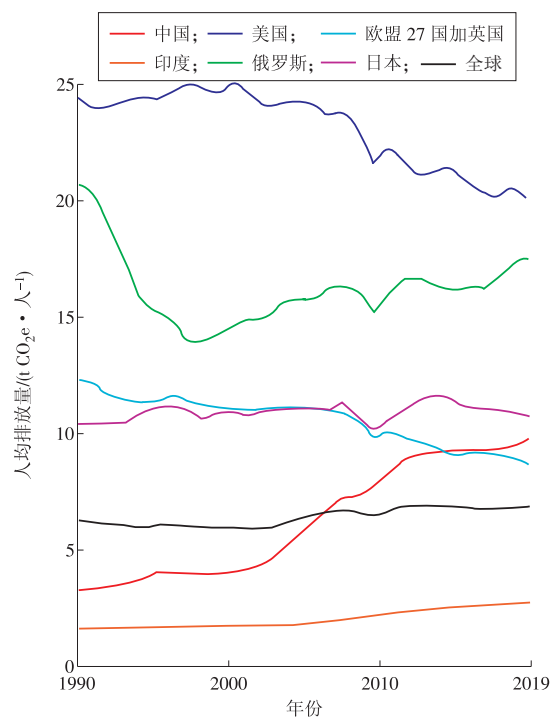


图7 排名前6位排放国或地区的人均排放量及全球平均排放水平

Fig. 7 Per capita emissions of the top six emitters and the global average

(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF₆)等。温室气体排放是指温室气体和/或其前体在一个特定地区和时期内向大气的释放。

不同温室气体对地球温室效应的贡献程度不同。为统一度量各类温室气体的温室效应,同时考

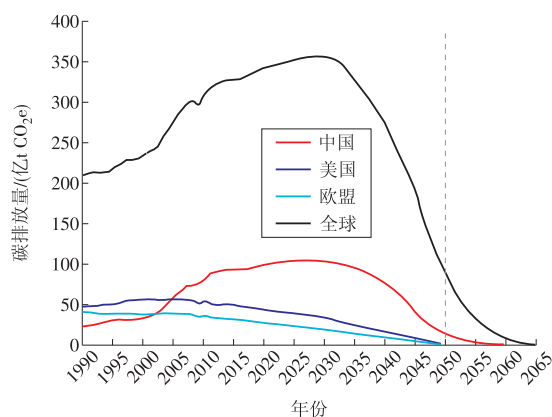


图8 全球及主要国家碳中和路径

Fig. 8 Carbon neutrality process of the world and major countries

虑到温室气体总增温效应中CO₂贡献最大,故规定二氧化碳当量(CO₂e)为度量温室效应的基本单位。各类常见温室气体辐射效率及相对于CO₂在给定时间范围内的全球变暖潜能值(GWP)见表2^[32]。

2.2 碳达峰

碳达峰(Carbon Peaking)即碳排放达峰,是指在某个时间点(段)人为向大气环境中排放的二氧化碳(或包括其他主要温室气体)量达峰。简而言之,即指二氧化碳(或包括其他主要温室气体)排放量达到历史最高值。如图9所示,碳达峰并不是指在某一达到最大排放量,而是一个过程。碳排放先经过迅猛或平缓增长后进入平台期并可能在一定范围内波动,然后进入平稳或快速下降阶段。C40是2005年成立的一个致力于应对气候变化的全球性城市气候领导联盟,其成员包括北京、上海、香港、广州、东京、首尔、纽约、芝加哥、伦敦、巴黎、柏林等近百个城市。C40要求必须在5年或更长时间内(可理解为平台期取值为5年)减少温室气体排放量,并且与峰值排放量相比至少减少10%,才能称之为碳达峰^[33]。

2.3 碳中和及其相关概念

碳中和(Carbon Neutrality, Carbon Neutral)有时亦称净零碳排放(Net Zero Carbon Emission)或净零碳足迹(Net Zero Carbon Footprint),其概念分为狭义和广义。狭义碳中和是指:(1)在规定的时段和规定的区域内(如某个国家、地区或组织内),人为向大气环境中释放的二氧化碳排放量与人为的二氧化碳去除量相平衡,即做到二氧化碳“源”与“汇”的平衡;(2)从规定的时间起,在规定的区域内,直接完全消除人为二氧化碳排放,即二氧化碳净零排放。广义碳中和是指不仅二氧化碳(CO₂)要达到净零排放,其他主要温室气体(如CH₄, N₂O, SF₆等)也要达到净零排放。

表 2 常见温室气体辐射效率及相对于 CO₂ 的 GWP

Tab. 2 Radiative efficiencies and GWPs relative to CO₂ for common GHGs

温室气体	化学分子式	辐射效率/(W·m ⁻² ·ppb ⁻¹)	给定时间范围内的 GWP		
			20 年	100 年	500 年
二氧化碳	CO ₂	1.40×10 ⁻⁵	1	1	1
甲烷	CH ₄	3.70×10 ⁻⁴	72	25	7.6
氧化亚氮	N ₂ O	3.03×10 ⁻³	289	298	153
哈龙-1301	CBrF ₃	0.32	8 480	7 140	2 760
哈龙-1211	CBrClF ₂	0.30	4 750	1 890	575
哈龙-1201	CHBrF ₂	0.14	1 380	404	123
哈龙-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	0.33	3 680	1 640	503
四氯化碳	CCl ₄	0.13	2 700	1 400	435
甲基氯仿	CH ₃ CCl ₃	0.06	506	146	45
六氟化硫	SF ₆	0.52	16 300	22 800	32 600
三氟化氮	NF ₃	0.21	12 300	17 200	20 700
三氟甲基五氟化硫	SF ₅ CF ₃	0.57	13 200	17 700	21 200

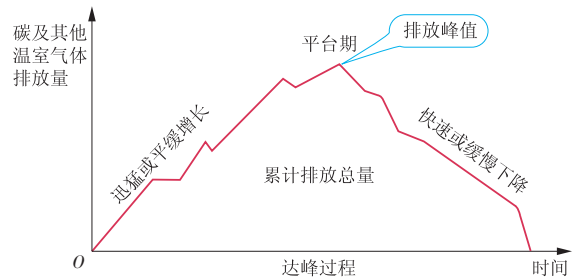


图 9 碳达峰过程示例

Fig. 9 A typical carbon peaking process

碳源(Carbon Source)是指任何自然或人工向大气排放二氧化碳、甲烷等含碳化合物类温室气体,气溶胶或温室气体前体的过程或活动。燃烧化石燃料、森林火灾、动物呼吸和植物降解等都是常见的碳源示例。

碳汇(Carbon Sink)是指通过物理或生物机制等从大气中清除二氧化碳、甲烷等含碳化合物类温室气体,气溶胶或温室气体前体的过程、活动或机制。光合作用植物、浮游生物、海洋、森林等即为常见的碳汇示例。

碳库(Carbon Reservoir)是指气候系统内存储二氧化碳、甲烷等含碳化合物类温室气体或其前体的一个或多个组成部分。碳在地球上四大储层体,即生物圈、岩石圈、水圈和大气。

碳封存(Carbon Sequestration)也称固碳,指捕获和储存大气中二氧化碳的过程或方式,碳封存可细分为 3 种类型。(1)生物封存:指在植被、土壤、树木和水生生态系统中储存大气中二氧化碳的过程或方式;(2)地质封存:指二氧化碳被储存在地质构造中的过程,如化石燃料的形成、提高石油采收率(EOR);(3)技术封存:指将二氧化碳捕获并储存起来的人工过程,如碳捕集及储存(CCS),碳捕集、利

用及储存(CCUS),直接空气捕集及储存(DACS),带碳捕集及储存的生物能(BECCS)等。

3 碳中和战略

3.1 欧盟绿色新政

欧盟委员会于 2019 年 12 月发布了《欧洲绿色新政》,旨在提振经济,改善人们的健康和生活质量,将欧盟转变为一个公平、繁荣的社会及富有竞争力的资源节约型现代经济体,到 2050 年使欧洲成为全球第 1 个温室气体净零排放的大陆,实现经济增长与资源消耗脱钩,做到不让任何地方和任何人掉队,使欧盟占据全球领导者地位。

《欧洲绿色新政》推出的重要起因是全球气候变化,落脚点是推动欧盟经济社会绿色可持续发展,核心目标是 2050 年实现碳中和。图 10 为《欧洲绿色新政》的要点^[34],主要包括以下“七大行动”。

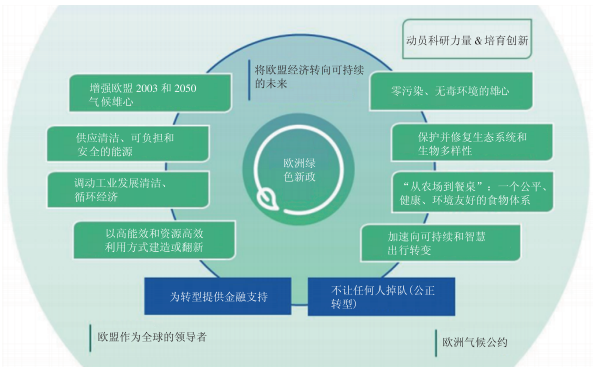


图 10 《欧洲绿色新政》要点

Fig. 10 Key points in European Green Deal

(1)构建清洁、可负担、安全的能源体系:能源活动温室气体排放占比 75% 以上,通过能效提升,发展以可再生能源为基础的电力系统,快速淘汰煤

炭,天然气脱碳,能源数字化、智能化、绿色化及市场一体化等,确保2030年和2050年低碳目标的实现。

(2)构建清洁循环的工业体系:工业部门温室气体排放占比20%,以绿色循环经济和数字经济应对挑战。

(3)推动高能效和资源高效利用的建造和建筑升级改造:建筑能耗占比40%,以建造革新、建筑能效提升等手段应对挑战。

(4)发展智能可持续交通系统:交通运输温室气体排放占比25%,通过可持续与智慧出行等手段应对挑战。

(5)实施“农场到餐桌”的绿色食品体系:大幅减少化学杀虫剂、化肥、抗生素的使用量,推动农场到餐桌产业链循环经济发展。

(6)保护自然生态和生物多样性:制定2030年生物多样性战略和森林新战略,提高森林固碳能力,发展海洋蓝色经济。

(7)创建零污染、无毒生态环境。

为实现2030年气候与能源目标(2030年温室气体排放量比1990年的排放量下降50%~55%),预计每年需2 600亿欧元的额外投资,约占2018年欧盟国内生产总值(GDP)的1.5%。

3.2 英国绿色工业革命

2020年11月,英国政府公布了《绿色工业革命十点计划》,旨在使英国成为绿色技术和绿色金融的世界中心,并实现2050年前温室气体净零排放的目标。该计划包括以下内容。

(1)推进海上风电:充分利用成熟技术,支持创新,到2030年,实现风电装机容量翻2番,达到40 GW(包括1 GW的创新型海上浮动风能)。

(2)推动低碳氢增长:到2030年,实现5 GW低碳氢产能,为住宅、交通和工业提供清洁燃料和供暖;供给产业、交通、电力和住宅领域;10年内建成首个完全由氢能供能的示范城镇。

(3)输送新的先进核电:一方面发展大型核电,另一方面开发小型模块化堆(SMR)和先进模块化堆。

(4)加速向零排放交通工具转型:从2030年开始,停售汽/柴油车,所有交通工具均应具有显著的零排放能力;从2035年开始,所有交通工具均应达到100%零排放。

(5)绿色公共交通、骑行与步行。

(6)飞机零排放与绿色航运:推动可持续航空燃料的使用,研发零排放飞机和清洁海运技术,使英国成为绿色船只和绿色飞机的家园。

(7)更绿色的建筑:使建筑能效更高并脱离化石燃料的使用。2028年前每年安装60万台热泵,未

来住宅比当前标准降低75%~80%的碳排放。

(8)投资CCUS:到2030年实现每年捕集10 Mt二氧化碳的能力,投入10亿英镑以支持在4个工业群中部署CCUS。

(9)保护自然环境:到2030年保护和改善30%陆地面积;投入52亿英镑,实施为期6年的防洪和沿海防御计划。

(10)绿色金融和创新:到2027年,总研发投入提高到GDP的2.4%;下一阶段绿色创新旨在降低净零转型的成本,培育更好的产品和新的商业模式并影响消费者行为^[35]。

3.3 日本绿色增长战略

2020年12月,日本政府发布2050年实现碳中和的《绿色增长战略》,旨在促进产业结构和社会经济变革,创造“经济与环境良性循环”的产业政策,即绿色增长战略。为确保2050年碳中和目标的实现,该战略对14个产业领域分别设定了绿色增长实施计划和2021—2050年绿色增长路线图,其中14个产业领域的发展目标如下。

(1)海上风电产业:装机容量2030年达10 GW,2040年达30~45 GW;成本2030—2035年削减至8~9日元/(kW·h);国产化率2040年达60%。

(2)氨燃料产业:2030年火电厂掺烧20%的氨,2050年纯氨燃料发电;2030年氨供应价格目标为10日元/m³(标态)。

(3)氢能产业:氢供应量2030年达3 Mt,2050年达20 Mt;力争在发电、交通、钢铁、化工等领域将氢能成本降到2030年30日元/m³(标态),2050年20日元/m³(标态)。

(4)核能产业:到2030年成为SMR全球主要供应商;研发高温气冷堆,到2050年核能制氢成本降至12日元/m³(标态);研发核聚变,2040—2050年实现实用化规模示范。

(5)汽车和蓄电池产业:未来10年加速电动汽车普及;力争2050年实现合成燃料成本低于汽油;研发下一代电池,增强蓄电池产业的全球竞争力。

(6)半导体和信息通信产业:通过数字化推动能效需求管理和碳减排(即数字化绿色);支持数字设备和信息通信产业的节能和绿色化(即绿色数字化);2030年所有新建数据中心节能30%,2040年实现该产业碳中和目标。

(7)船舶产业:2028年前实现零排放船舶的商用;2050年实现全部船舶的氢、氨等替代燃料转换。

(8)物流、人流和土木工程基础设施产业:全面建设碳中和港口;部署智能交通,推广绿色出行,实现低碳排放的交通运输社会;打造绿色物流,提高

交通网络枢纽运输效率,推动低碳化;实现基础设施和城市空间零碳排放;通过推广智能建造和提高工效,施工现场到2030年实现每年减少32 000 t碳排放,到2050年实现碳中和目标。

(9)食品、农林和水产业:大力推广 CH_4 和 N_2O 等温室气体减排技术,推进农林业机械化、渔船电气化、氢能化,打造智慧农业、林业和水产业,发展农田、森林和海洋固碳技术,到2050年实现该产业碳中和。

(10)航空业:推动电气化、绿色化发展,约2030年进行混合动力系统电动飞机技术示范,稍晚进行氢动力飞机技术示范;2050年全面实现电气化,碳排放较2005年减少一半。

(11)碳循环产业:研发各种碳回收和资源化利用技术。生产成本目标:2030年碳制混凝土,30 日元/kg;2030年碳制藻类生物燃料,100 日元/L;2050年碳制塑料原料,100 日元/kg。碳分离及回收成本目标:2030年低压废气,2 000 日元/t CO_2 ;高压废气,1 000 日元/t CO_2 ;2050年直接空气捕集(DAC),2 000 日元/t CO_2 。

(12)住宅和建筑业及下一代太阳能产业:利用大数据、人工智能(AI)和物联网等技术对电动汽车、空调等进行能量管理;推广全生命周期负碳住宅和零能耗建筑物及住宅,普及和扩大木结构建筑、高性能建材/设备的研发及应用,加快研发下一代太阳能电池(如钙钛矿电池等);2030年增量住宅/建筑实现零能耗;2050年后存量住宅/建筑实现零能耗。

(13)资源循环相关产业:向循环经济转型(如普及和推广废弃物发电、热利用和沼气利用);2050年将温室气体排放量降为零。

(14)生活方式相关产业:普及零排放建筑物和住宅,部署先进智慧能量管理系统,利用数字技术推动共享经济;2050年实现碳中和、弹性、舒适的生活方式。

实施绿色增长战略,预计到2030年、2050年会分别带来年均90万亿、190万亿日元的经济增长^[36]。

3.4 中国碳达峰、碳中和战略

2020年9月22日,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中承诺:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[11]。2030年前碳达峰是实现2060年前碳中和的阶段性目标,制定2030年前碳排放达峰行动方案是2021年的重点任务。

在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十

四个五年规划和2035年远景目标纲要》中,国家明确提出“实施可持续发展战略,完善生态文明领域统筹协调机制,构建生态文明体系,推动经济社会发展全面绿色转型”,在坚持公平、共同但有区别的责任及各自能力原则下,积极应对全球气候变化^[37]。其要点包括以下几个方面。

(1)完善能源消费总量和强度双控制度,重点控制化石能源消费(到2025年,单位GDP能耗降低13.5%;到2030年,非化石能源占一次能源消费比重达到25%左右)。

(2)实施以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的制度,支持有条件的地方、行业、企业率先碳达峰(“十四五”时期,碳强度下降18%;到2030年,碳强度比2005年下降65%以上)。

(3)推动能源清洁低碳安全高效利用(到2030年,风电、太阳能发电总装机容量达到1 200 GW以上),深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型。

(4)加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体的控制力度。

(5)提升生态系统碳汇能力(“十四五”时期,森林覆盖率提高到24.1%;到2030年,森林蓄积量将比2005年增加60亿 m^3)。

(6)锚定努力争取2060年前实现碳中和,采取更加有力的政策和措施。

为实现碳中和,高盛公司预测需为清洁技术基础设施投资16万亿美元^[38],而国内机构预测需为能源基础设施投资约138万亿元,超过每年GDP的2.5%^[31]。

3.5 其他

美国政府于2021年2月重新加入《巴黎协定》后,2021年3月31日又公布了约2.3万亿美元的《美国就业计划》,其目标之一是2050年实现碳中和。其中:计划为电力基础设施投入1 000亿美元,以确保2035年电力率先实现碳中和(包括建立能效和清洁电力标准;建立更具韧性的输电系统,搭建清洁能源和可持续性加速器;投资电动车市场,启动大规模储能、CCS、氢能、先进核能、漂浮式海上风电、生物燃料/生物产品、量子计算、电动车等方面的示范项目等)。该计划尚待美国国会批准。

4 实现碳中和的关键方法或技术

实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,不仅涉及能源、采矿、制造、交通运输、建筑等行业,而且还涉及农林牧渔业及各类服务业,覆盖社会生活的方方面面。例如:全球2016年温室气体总排放约为75.0 Gt CO_2e (基于20

年 GWP, 包括 CO_2 , CH_4 , SF_6 , 氢氟碳化物, 全氟化碳等温室气体)^[39], 主要排放源占比如图 11 所示; 2016 年全世界牛类 (包括奶牛) 所排放的温室气体量已达 7.9 Gt CO_2e (基于 20 年 GWP), 比美国全国的温室气体排放量还多 0.1 Gt CO_2e ^[40]。

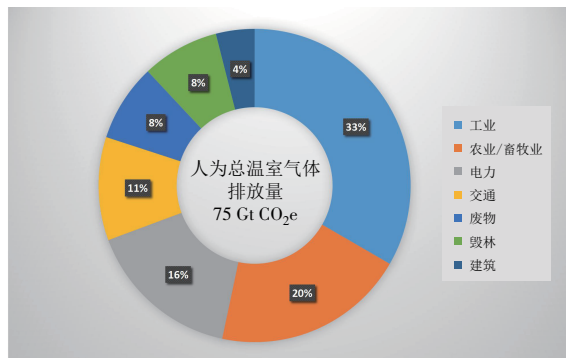


图 11 全球温室气体分类排放源占比

Fig. 11 Break-down of global GHG emission sources

实现碳中和的关键方法或技术如下。

(1) 需求侧控制及资源循环: 一是节约资源, 二是资源的循环利用, 即在生产、流通和消费等过程做到减量化、再利用、资源化, 从而促进可持续发展。例如: 在工业领域可通过设备再利用以及金属回收、塑料再生等再循环, 降低对资源的需求; 利用农林废弃物、生活垃圾发电; 采取共享交通、绿色出行、少食牛肉等低碳生活方式等。

(2) 能效: 国际上通常认为能效是满足人类需求的第一能源, 通过能效提升 (如提高建筑保温性能或废热回收利用等), 可降低建筑物、工厂或基础设施的能源强度。能效对于实现碳中和目标至关重要, 国际能源署 (IEA) 将能效与可再生能源、CCUS 等除碳技术并列为三大碳中和手段。

(3) 电气化与碳中和电源或低碳电源及新型电力系统: 1) 大力提高工业、交通、建筑、日常生活等用能终端的电气化水平 (如将电力占终端能源消费比重由当前的 25% 提升到 75%); 2) 用碳中和电源或低碳电源 (如风力发电、光伏/光热发电、地热发电、生物质能发电、海洋能发电或超临界 CO_2 布雷顿循环发电等) 逐渐取代化石燃料电源; 3) 采用一体化、新型输电/配电等构成新一代电力系统, 以适应碳中和的新需求 (如图 12 所示)。

(4) 以碳中和氢/氨或低碳氢/氨为燃料或原料: 用绿氢 (可再生能源制氢) 或蓝氢 (化石燃料制氢 + CCS) 或绿氨 (可再生及无碳制氨) 替代碳密集型燃料或原料。当前采用绿氨可有效降低大规模输氢的难题。

(5) 以生物质 (包括固态生物质、液态生物质、气态生物质等) 作为燃料或原料: 用可再生的生物

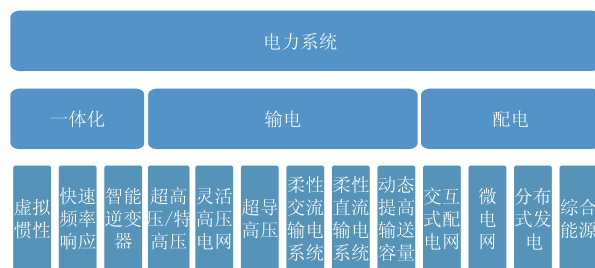


图 12 新一代电力系统示意

Fig. 12 Schematic new-generation power system

质 (如生物质颗粒、沼气、生物甲烷、生物乙醇、生物柴油等) 代替不可再生燃料或原料, 如在化学品生产中采用生物基原料。

(6) 储能: 分为由电化学类 (锂离子电池、钠流电池、电化学电容等) 和机电类 (抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮、重力等) 等构成的双向电储能, 由高温显热、相变、低温存储、热光伏、热化学等构成的储热, 由氢、氨等化学载体构成的化学储能等。1) 可解决风/光等可再生能源的间歇性、不可调度问题, 增加其灵活性; 2) 可用于平抑电力系统功率波动, 实现削峰填谷、改善电力品质; 3) 性价比、安全性等进一步提升, 可解决电能难以大规模存储的难题。

(7) 主要温室气体的捕集和储存或利用技术及其市场管控手段: 1) 利用技术手段, 捕集生产过程中排放或泄漏的 CO_2 , CH_4 等主要温室气体, 也可以直接从大气捕集这些温室气体并加以储存或利用, 以达到温室气体零排放甚至负排放的目的, 如 CCS, CCUS, BECCS, DACS 等; 2) 参照国际标准化组织 (ISO) 制定的国际标准或国际惯例等, 尽快建立全国范围内的主要温室气体测量、报告和核查 (MRV) 体系; 3) 通过碳税、碳配额制、绿证及碳排放权交易等市场手段, 进行碳排放的管控。

(8) 土地利用或农业、畜牧业方式的改良: 改变土地使用或农业、畜牧业的习惯做法, 以减少温室气体排放。如通过植树造林等绿化行动, 提升生态碳汇能力, 实现负排放; 或改变牲畜饲料, 减少牲畜的 CO_2 及 CH_4 排放量等。

(9) 数字技术: AI、物联网 (IoT)、大数据分析、区块链及其他新一代信息通信等数字技术的利用。数字技术赋能智慧交通、智能工厂等, 可提高能效, 减少资源消耗, 降低废品率等; 数字技术赋能需求侧响应、车辆到电网 (V2G)、碳足迹监视及溯源等新场景; 能源区块链在可再生能源监管、能源控制、充电桩共享等方面的应用。

(10) 其他创新性、新兴/颠覆性低碳或零碳或负碳技术/工艺: 创新工艺, 如电化学生产工艺, 采用非

化石原料(水泥原料改变等);新兴/颠覆性技术,如CO₂转水晶、CO₂转岩石、CO₂转燃料、CO₂转纤维等。

另外有3点需要说明:(1)对于中国等大型经济体,目前的成熟技术还难以支撑全面的碳中和,需通过深度投入研发、进一步科研创新、全面市场化等组合拳来确保碳中和目标按期实现(如N₂O、CH₄和氟类等温室气体,初期减排成本较低,但深度减排尚缺乏有效技术支撑,是实现碳中和目标的难点);(2)在具体应用中,有时是多个方法或技术的综合应用,如采用生物质作为燃料(视为零排放)+CCS实现负排放(BECCS);(3)需通过对技术成熟度、性价比、市场化程度等的综合研判,按照集中攻关一批、示范试验一批、应用推广一批的路径,分门别类因地制宜地应用,如近期应用能效、电气化、风/光/生物质等可再生能源,中期应用氨、氢、电动飞机等,远期应用核聚变等颠覆性去碳或深度碳利用技术等。

5 结束语

全球气候变化是人类社会面临的深层次危机,应对气候变化,在碳中和目标下的经济社会低碳或零碳转型是世界大势。

各级政府、行业及全社会,应响应习近平主席及党中央指示,提高应对气候变化的政治站位,坚定不移贯彻新发展理念,树立紧迫感、竞争意识和责任担当意识,拿出抓铁有痕的劲头,积极部署和行动,确保如期实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标。

参考文献:

- [1] IPCC. AR6 synthesis report: Climate change 2022 [EB/OL]. [2021-05-01]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- [2] IPCC. AR5 synthesis report: Climate change 2014 [EB/OL]. [2021-05-01]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [3] UN. Emissions gap report 2020 [R]. Kenya: UN Environment Programme, 2020.
- [4] 联合国. 巴黎协定 [Z]. 联合国: 2015.
- [5] Wikipedia. Carbon neutrality [DB/OL]. (2021-04-26) [2021-05-01] https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_neutrality.
- [6] DARBY M, GERRETSEN I. Which countries have a net zero carbon goal? [EB/OL]. (2019-06-14) [2021-05-01]. <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/>.
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Argentina. Segunda contribución determinada a nivel nacional de la República Argentina [DB/OL]. [2021-05-02]. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Argentina%20Second/Argentina_Segunda%20Contribuci%C3%B3n%20Nacional.pdf.
- [8] FARAND C. Austria swears in coalition government with strengthened climate plan [EB/OL]. (2020-01-07) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/01/07/austria-swears-coalition-government-strengthened-climate-plan/>.
- [9] GERRETSEN I. Brazil sets 'indicative' goal of carbon neutrality by 2060 [EB/OL]. (2020-12-09) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/12/09/brazil-sets-indicative-goal-carbon-neutrality-2060/>.
- [10] FARAND C. Canada sets out to enshrine 2050 net zero emissions goal in law [EB/OL]. (2020-11-20) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/11/20/canada-sets-enshrine-2050-net-zero-emissions-goal-law/>.
- [11] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL]. (2020-09-22) [2021-05-02]. http://m.xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm.
- [12] TIMPERLEY J. Denmark adopts climate law to cut emissions 70% by 2030 [EB/OL]. (2019-12-06) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2019/12/06/denmark-adopts-climate-law-cut-emissions-70-2030/>.
- [13] MATHIESEN K. EU agrees 'climate neutral' target for 2050, but Poland stands alone [EB/OL]. (2019-12-13) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2019/12/13/eu-sets-climate-neutral-target-2050-poland-stands-alone/>.
- [14] Submission by Croatia and the European Commission on behalf of the European Union and its member states [DB/OL]. (2020-03-06) [2021-05-02]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/HR-03-06-2020%20EU%20Submission%20on%20Long%20term%20strategy.pdf>.
- [15] DARBY M. Finland to be carbon neutral by 2035. One of the fastest targets ever set [EB/OL]. (2019-06-03) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2019/06/03/finland-carbon-neutral-2035-one-fastest-targets-ever-set/>.
- [16] FELIX B. France sets 2050 carbon-neutral target with new law [EB/OL]. (2019-06-28) [2021-05-02]. <https://www.reuters.com/article/us-france-energy/france-sets-2050-carbon-neutral-target-with-new-law-idUSKCN1TS30B>.
- [17] DARBY M. Hungary sets 2050 climate neutrality goal in law, issues green bond [EB/OL]. (2020-06-04) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/06/04/hungary-sets-2050-climate-neutrality-goal-law-issues-green-bond/>.
- [18] APPUNN K, WETTENGEL J. Germany's climate action law [EB/OL]. (2021-04-29) [2021-05-02]. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-climate-action-law-begins-take-shape>.
- [19] GERRETSEN I. Japan net zero emissions pledge puts coal

- in the spotlight [EB/OL]. (2020-10-26) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/10/26/japan-net-zero-emissions-pledge-puts-coal-spotlight/>.
- [20] JAMES S. Climate change response (zero carbon) amendment bill [EB/OL]. [2021-05-02]. https://www.parliament.nz/en/pb/bills-and-laws/bills-proposed-laws/document/BILL_87861/climate-change-response-zero-carbon-amendment-bill.
- [21] DARBY M. How will Norway go carbon neutral from 2030? [EB/OL]. (2016-06-14) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2016/06/14/how-will-norway-go-carbon-neutral-from-2030/>.
- [22] Charting Singapore's low-carbon and climate resilient future [DB/OL]. [2021-05-02]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SingaporeLongtermLowEmissionsDevelopmentStrategy.pdf>.
- [23] South Africa's low-emission development strategy 2050 [DB/OL]. (2020-02) [2021-05-02]. https://www.environment.gov.za/sites/default/files/docs/2020lowemission_developmentstrategy.pdf.
- [24] GERRETSEN I. South Korea formally commits to cutting emissions to net zero by 2050 [EB/OL]. (2020-10-28) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/10/28/south-korea-formally-commits-cutting-emissions-net-zero-2050/>.
- [25] FARAND C. Spain unveils climate law to cut emissions to net zero by 2050 [EB/OL]. (2020-05-18) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2020/05/18/spain-unveils-climate-law-cut-emissions-net-zero-2050/>.
- [26] DARBY M. Sweden passes climate law to become carbon neutral by 2045 [EB/OL]. (2017-06-15) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2017/06/15/sweden-passes-climate-law-become-carbon-neutral-2045/>.
- [27] Switzerland's information necessary for clarity, transparency and understanding in accordance with decision 1/CP.21 of its updated and enhanced nationally determined contribution (NDC) under the Paris Agreement (2021-2030) [DB/OL]. [2021-05-02]. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Switzerland%20First/Switzerland_Full%20NDC%20Communication%202021-2030%20incl%20ICTU.pdf.
- [28] LO J. Stuck in the middle: Ukraine aims for net zero but struggles to access finance [EB/OL]. (2021-03-25) [2021-05-02]. <https://www.climatechangenews.com/2021/03/25/stuck-middle-ukraine-aims-net-zero-struggles-access-finance/>.
- [29] UK becomes first major economy to pass net zero emissions law [EB/OL]. (2019-06-27) [2021-05-02]. <https://www.gov.uk/government/news/uk-becomes-first-major-economy-to-pass-net-zero-emissions-law>.
- [30] The White House. Executive order on tackling the climate crisis at home and abroad [EB/OL]. (2021-01-27) [2021-05-02]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/27/executive-order-on-tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad/>.
- [31] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国低碳发展战略与转型路径研究[R]. 北京: 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020.
- [32] IPCC. AR4 climate change 2007: Synthesis report [EB/OL]. [2021-05-01]. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.
- [33] WRAY S. 30 cities say their greenhouse gas emissions have peaked [EB/OL]. (2019-10-08) [2021-05-02]. <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/30-cities-say-their-greenhouse-gas-emissions-have-peaked--4662>.
- [34] European Commission. The European Green Deal [Z]. Brussels: European Commission, 2019.
- [35] Department of Business, Energy and Industrial Strategy. The ten point plan for a green industrial revolution [EB/OL]. (2020-11-18) [2021-05-02]. <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution>.
- [36] 経済産業省. 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました[EB/OL]. (2020-12-25) [2021-05-04]. <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>.
- [37] 新华社. (两会受权发布) 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-05-04]. http://www.xinhuanet.com/politics/2021lh/2021-03/13/c_1127205564.htm.
- [38] Goldman Sachs Research. Carbonomics: China net zero——The clean tech revolution [R]. New York: Goldman Sachs, 2021.
- [39] McKinsey & Company. Climate math: What a 1.5-degree pathway would take [R]. New York: McKinsey & Company, 2020.
- [40] McKinsey & Company. The 1.5-degree challenge [EB/OL]. [2021-05-05]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/interactive-the-1-point-5-degree-challenge>.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

张晋宾(1967—),男,山西阳城人,专业副总工程师,正高级工程师,从事自动化,信息系统,发电系统的设计、咨询、研究及管理工作(E-mail: jbzhang@eppei.com)。