

面向2035年我国能源发展的思考与建议

谢克昌*

(中国工程院, 北京 100088)

摘要: 2035年前是我国基本实现社会主义现代化的关键时期, 能源高质量发展是支撑经济社会可持续发展的先决条件, 应立足基本国情和所处发展阶段, 在保障能源安全供应的前提下推进能源清洁低碳转型。本文从能源总量、能源结构、综合能效、能源科技、体制机制、能源安全六方面阐述了我国能源发展现状, 重点分析了未来一段时期内能源发展的关键问题, 涵盖煤炭兜底保障作用、能源消费增量的可再生能源替代、油气供给安全、核电发展立足自主、氢能和储能全产业链规模化发展等。着眼2035年能源领域高质量发展, 提出了能源革命, 碳达峰、碳中和4个阶段的战略目标。研究建议, 各环节全面落实节能优先方针, 继续实施煤炭清洁高效低碳利用, 站位全局谋划和推动可再生能源成为未来能源供应增量的主体, 加快低碳转型并统筹构建多能互补能源系统。

关键词: 能源革命; 能源安全; 低碳转型; 碳达峰、碳中和; 煤炭清洁高效利用

中图分类号: F407 **文献标识码:** A

China's Energy Development for 2035: Strategic Thinking and Suggestions

Xie Kechang*

(Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: The period before 2035 is critical for China to realize socialist modernization. The high-quality development of its energy industry must consider basic national conditions and development stages. Moreover, promoting the green and low-carbon transformation of the energy industry while guaranteeing a stable energy supply is the prerequisite for ensuring the sustainable economic and social development. This study summarized the current status of China's energy development from six aspects: energy capacity, energy structure, comprehensive energy efficiency, energy science and technology, system and mechanism, and energy security. The key issues of energy development were analyzed, focusing on the role of coal for guaranteeing energy security, replacement of traditional energies with renewable energies for incremental energy consumption, sustainable supply of oil and gas, independent development of nuclear power, and large-scale development of the hydrogen energy industry. Four stages were proposed for the energy revolution and carbon reduction in China by 2035. Furthermore, we suggest that energy conservation should be prioritized in all aspects, clean and efficient use of coal should be promoted, renewable energies should be the major source of future energy increment, and low-carbon transformation should be accelerated to create an energy system that features multi-energy complementation.

Keywords: energy revolution; energy security; low-carbon transformation; carbon peaking and carbon neutrality; clean and efficient utilization of coal

收稿日期: 2022-08-25; 修回日期: 2022-10-30

通讯作者: *谢克昌, 中国工程院院士, 研究方向为能源发展战略和能源新技术; E-mail: xieswork@tyut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“能源战略(2035)”(2019-ZD-20), “推进现代能源体系建设进程评估及发展战略研究”(2022-XZ-33)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

党的二十大报告提出，到2035年，我国要广泛形成绿色生产生活方式，碳排放量达峰后稳中有降，生态环境基本好转，美丽中国目标基本实现。立足国情，实现能源高质量发展，是建设美丽中国、提升经济社会发展水平的关键环节。在有效保障能源安全供应的前提下，结合实现碳达峰、碳中和（“双碳”）目标任务，有序推进全国能源市场建设，这是国家总体要求。以煤为主体能源是基本国情，需要立足所处发展阶段，审慎研判国际形势，加强煤炭清洁高效利用，增强新能源的安全可靠替代性，推进储能、氢能等绿色低碳技术研发应用。加快新型电力系统和清洁低碳、安全高效能源体系建设，尽快建成能源强国，确保能源供应安全。

根据国家“十四五”规划纲要，2035年是我国基本实现社会主义现代化的重要时间节点，因而开展面向2035年的能源发展战略研究是学术热点和社会关注点。本文着眼2035年前我国能源综合发展课题，系统梳理氢能、储能、核能、煤炭、可再生能源、油气等的进展与趋势，提出能源领域发展目标以及就如何实现此目标而展开的初步思考，可为推动能源革命、确保能源供应、推进低碳转型等方面的技术和管理研究提供启发与参考。

二、我国能源发展基本情况

（一）建成世界上规模领先的能源生产与消费体系

在能源生产方面，2021年煤炭、原油、天然气产量分别为 4.13×10^9 t、 1.99×10^8 t、 2.076×10^{11} m³；发电装机容量为 2.377×10^9 kW，年发电量为 8.5×10^{12} kW·h。装机容量实现了快速增长，总体规模位居世界首位。在能源消费方面，2021年一次能源消费总量为 5.24×10^9 tce [1]，连续多年成为世界最大的能源消费国，煤炭、可再生能源（如水电、风电、太阳能发电）消费国。但在人均用能强度方面，虽然近20年我国累计增幅约为300%，但距离发达国家仍有不小差距，2021年仅为美国的1/3、德国和日本的2/3。

（二）能源结构优化且清洁低碳转型步伐加快

能源结构不断优化，新能源在“十三五”时期

得到快速发展，通过“三去一降一补”逐步淘汰落后产能并增加优质产能，稳步提升能源清洁低碳化水平。同时，伴随着火电、煤化工产业的优化升级以及新能源产业的发展壮大，能源消费结构优化取得突破，清洁低碳转型步伐稳健。其中，非化石能源装机占比由2015年的35%提升至2021年的47%，非化石能源发电占比由2015年的27%提升至2020年的34.6%，非化石能源消费占比由2015年的12%提升至2020年的16.5%；煤炭消费占比持续下降，由2015年的64%下降至2021年的56%，完成了能源发展“十三五”规划目标 [1]。

（三）能源资源综合利用水平显著提升

稳步推进“提质增效”攻关工作，改善了能源资源综合利用水平。单位国内生产总值能耗由2015年的0.62 tce/万元下降到2021年的0.46 tce/万元，但仍为世界平均水平的1.4倍左右。大型煤矿的原煤生产综合能耗为0.0104 tce/t，下降了12个百分点；煤矸石及低热值煤综合利用发电装机容量为 4.3×10^7 kW，年利用煤矸石约 1.5×10^8 t。矿井水综合利用率、煤矸石综合利用处置率、土地复垦率分别为79%、73%、57.5% [2]。煤电机组性能提升明显，火电厂供电标准煤耗为302.5 g/kW·h。可再生能源保持了较高的利用率水平，2021年水能利用率为98.8%，风能利用率为96.9%，太阳能利用率为97.9%，“三弃”电量显著减少。

（四）能源科技自主创新能力稳步增强

能源技术自主创新能力、装备国产化水平进展较快，在部分方向达到了国际先进水平。当前，已建立了较为完备的清洁能源装备制造产业链，覆盖了水电、核电、风电、太阳能发电；成功研制了单机容量为 1×10^6 kW的水电机组、单机容量超过 1×10^4 kW风电机组，打破了光伏电池转换效率的世界纪录。建成若干座应用先进三代技术的核电站，在新一代核电、小型堆等核能利用技术方面取得突破。油气勘探开发技术能力持续增强，低渗原油及稠油高效开发、新一代复合化学驱油等技术达到世界先进水平，页岩油气勘探开发与装备水平大幅提升，天然气水合物试采取得成功。大型矿井建设、特厚煤层综放开采、煤与瓦斯共采、燃煤超低排放发电、高效煤粉型工业锅炉、现代煤化工技术

等达到或接近世界先进水平，主要煤机装备、大型粉煤气化技术实现了国产化。

（五）有利于市场发展活力的体制机制基本成型

国家能源体制机制改革进入了“深水区”，重点能源领域和关键环节的市场化改革持续深化，如油气体制改革全面启动，电力体制改革积极推进。逐步构建了布局合理、竞争有效的能源市场，完善了主要由市场供需来决定的能源价格形成机制，使得市场在配置资源方面的作用更为突出。① 油气勘探开发市场有序放开，油气管网运营机制改革取得关键进展；实现了管输和销售业务分离，《关于深化石油天然气体制改革的若干意见》（2017年）实施成效显著。② 全国统一的电力市场体系正在建设，以中长期交易为“压舱石”、辅助服务市场为“稳定器”、现货试点为“试验田”的电力市场体系初步显现。③ 能源领域“放管服”改革取得成效，“十三五”时期取消和下放的审批事项占比为72%。

（六）能源自主保障能力增强但油气供给形势趋紧

立足国内、补齐短板、多元保障、强化储备，持续完善“产供销储”体系，建成了较为完备的油气政府储备、企业社会责任储备。截至2020年年底，9个国家石油储备基地、14个亿吨级煤炭生产基地、9个大型煤电基地、9个大型风电基地建成或处于在建状态。实施煤制油化工科技攻关，形成了具有自主知识产权的煤气化、煤直接液化、煤间接液化等成套工艺技术，装备国产化率超过98%。2021年，煤制油产能为 9.31×10^6 t，煤制气产能为 6.125×10^9 m³ [3]；传统油气替代的技术储备与产能储备作用初步显现，参与国际油气谈判的平衡筹码效应逐步增强。然而，油气对外依存度持续攀高，油气供给安全问题值得关注，外部因素导致的能源安全形势趋紧。

三、我国能源发展趋势研判

（一）突出煤炭兜底保障作用并开展煤炭清洁高效低碳开发利用

能源资源禀赋决定了煤炭的基础性地位，煤炭是能源安全保障的“压舱石”“稳定器”。在我国已探明的一次能源资源储量中，油气等资源占比约为

6%，而煤炭占比约为94%。这说明煤炭是自主保障最可靠的能源类型，因而长期坚持煤炭清洁高效与可持续开发利用是应有之义。

我国煤炭工程技术具备了一定的国际竞争优势，为产业升级、高质量“走出去”创造了基础条件。然而，煤炭开发依然存在一些突出问题，不利于提高煤炭绿色、安全、可持续开发水平。着眼未来，开展智慧煤矿建设和智能化开采应用，实施资源综合利用与生态保护，驱动煤炭产业创新升级；引导煤炭行业在加强主业的同时进行多元化发展，提高优质产能与革新产品类别并重。

我国一半以上的煤炭用于发电，近年来随着新能源开发规模的增长，燃煤发电占总发电量的比重持续下降，但燃煤发电在未来相当长时期内仍是电力供应的主力；燃煤发电除继续承担保障电力供应的主体责任外，还将为可再生能源大比例消纳提供灵活调峰服务。在开展节能、应用灵活性、供热等方面技术改造的基础上，推动燃煤发电朝着高参数、大容量、智能化方向发展，侧重新型动力循环系统、智能燃煤发电等技术研发，促进电力装备技术升级、发电用能结构转型。

煤炭清洁高效转化利用取得重大进展，具有自主知识产权的煤气化、煤直接液化、煤制烯烃、煤间接液化等技术开展了大规模的工业化应用，可替代石油消耗约 3×10^7 t/a，成为保障能源安全的新战略路径。着眼未来，提高煤化工产业大型化、园区化、基地化建设水平，结合资源禀赋条件，有序开展陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、宁夏宁东、新疆北部地区的大型现代煤化工基地建设 [4]。

目前，煤炭清洁（绿色）转型进展较快，煤炭作为清洁能源进行应用态势良好。然而，煤炭的高碳属性决定了行业低碳转型发展任重道远，突破碳捕集利用与封存（CCUS）技术和经济瓶颈是未来应用的关键之处 [5]。

（二）因地制宜发展可再生能源并使之成为能源供应增量的主体

近年来，我国可再生能源技术进步迅速、成本下降明显，与化石能源的经济性差距逐步缩小，在部分应用方向初步具备了市场竞争力。随着关键技术革新、产业规模壮大，可再生能源在能源结构中的占比将持续提升，逐步由补充能源转化为能源增

量主体。在大力发展可再生能源的同时，需提前规划退役期间的无害化处理和循环利用。

水电开发仍有潜力，但水电待开发区域施工条件复杂、建造技术难度大，综合建设成本难以下降。水电技术未来发展需着力优化水电站规划、设计和建设，合理减少项目土建工程量，减轻对生态系统的干扰和社会生活的影响 [6]。

风电发展迅速，但局部地区仍存在“弃风”问题。未来应进行风电场的高效开发利用，大幅增加风电比重。持续开发“三北”大型风电基地、东南沿海海上风电基地、东/中部地区分散式风电，通过技术创新降低成本并增强竞争力，提高风电在能源生产和消费中的占比 [7,8]。

光伏装机量增长迅猛、布局持续优化，仍局部存在“弃光”问题。未来应坚持集中式与分布式开发并重策略，集中建设新疆、青海、内蒙古、西藏等省份的大型太阳能基地，而东/中部地区以分布式为主 [9]。

生物质能利用形式多样，相应发电初具规模，但燃料成本偏高等问题较为明显。加强顶层设计并进行系统规划，将生物质能技术应用与美丽乡村建设、精准扶贫等国家重大任务紧密结合 [10]。

地热与海洋能资源丰富、潜力较大，但因开发难度大而发展缓慢。因地制宜进行开发利用，重点突破干热岩地热提取等技术；针对海洋能开发利用由单一能种向多能互补、综合利用转变的发展趋势，重点关注波浪能、潮汐能的开发。

（三）加强油气勘探开发力度以保障油气供给安全

我国石油对外依存度将长期保持高位，安全供应面临挑战；陆海油气开发制约、进口通道单一、工程科技滞后于国际前沿、开发扶持政策不完善等现实制约因素突出。

天然气需求持续上升，需要关注“增储上产”。2021年，天然气探明储量为 $8.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，产量为 $2.076 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，而消费量已超 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。天然气探明程度低，通过常规气老区稳产、新区建产才能保持产量稳定增长；非常规天然气则依赖页岩气、深层煤层气开发以支持规模效益上产。

着眼未来，加强油气勘探开发技术研发，构建开放灵活的油气安全保障体系。创新理论并深化认知，带动新领域拓展、战略接替区准备、重大区带

与战略目标落实，支持油气勘探持续取得突破。合理增强国内油气的勘探开发力度，力争实现非常规油气的规模经济开发。继续开展战略储备库、天然气基础设施建设，增强应急保障能力 [11]。

（四）立足自主发展核电并以技术创新提升竞争力

我国核电稳健发展，但发电量占比依然不高。2021年，我国商业运行核电机组为53台，装机容量为 $5.326 \times 10^7 \text{ kW}$ ，居世界第三位；在建核电机组为16台，装机容量为 $1.75 \times 10^7 \text{ kW}$ ，居世界第一位。相比主要核能利用国家，我国核电总装机容量并不低，但在全国发电总量中的占比仅为5%。

核电事业起步较晚，但具有后发优势。早期的核电技术及核心装备多为引进，目前以“华龙一号”“国和一号”为代表的第三代核电机组成功实现商业化应用，国产化率超过85%，体现了最高核安全标准。核电产业发展还存在一些短板，特殊材料、核测仪表、核安全级仪控设备、核安全级数字化控制系统等亟待攻克。

先进核能开发的重点是加强基础研究。第四代核电机组、可控核聚变的开发研究，涉及材料、工艺、测控等基础性科学技术问题，开展相关基础研究需要大科学装置和平台。乏燃料后处理也是完善核燃料闭式循环的关键内容 [12]。

（五）发展氢能产业并尽快实现全产业链贯通与规模化应用

氢能是清洁能源和工业原料，绿氢在“双碳”过程中将起到重要作用。形成了包括“制-储-运-加-用”在内的氢能产业链，但产业布局缺乏统筹、各地规划趋同；资金、技术创新等资源配置不够合理，重复建设现象已有显现，膜电极、电堆及系统等方面的产能过剩。与此同时，氢能产业的部分关键材料、核心零部件、装备依赖进口，技术自主化率不高 [13]。

近年来，我国积极开展氢能技术自主创新与产业化，技术成果转化应用效果显现，但与国际先进水平相比仍有差距。当前应用的氢气多由流程工业内部的高碳流程制取，大规模可再生能源制氢工作还未展开。大电流密度条件下制氢的电解槽能耗问题，氢气温和条件液化规模储备、高密度存储、长距离/大规模运输、低成本快速加注技术等仍需

突破；对于氢燃料电池相关的催化剂、碳纸、智能制造装备等，关键技术亟需提升 [14]。绿氢制备项目多处于研发示范阶段，提高效率、降低成本、规模化生产尚需时日。

（六）以电化学储能为重点实现规模化储能

储能规模化发展势头初显，但产业发展整体质量亟待提升。2021年，已投运的储能项目装机容量为 4.61×10^7 kW，标志着从商业化初期转入了规模化发展的新阶段；但储能发展的长效机制、标准体系、技术成本等均需及时补充或完善。

近年来，抽水蓄能以外的新型储能技术发展迅速，尤其是电化学储能取得长足进步，但储能安全性问题未能缓解；压缩空气、液流电池等长时储能技术进入了商业化初期，飞轮储能、钠离子电池等技术逐步开展了规模化示范。改善储能系统的运行效率，提高装置循环寿命，降低综合生产成本，开展本征安全与能源管理，在促进储能产业规模化发展的基础上推动可再生能源的大规模、高质量应用 [15]。

四、我国能源发展目标

坚持系统观念，改变既有思维，通盘谋划并切实推动能源革命，积极开展能源低碳转型，确保能源供应安全，实现高质量发展。通过研究和论证，我国能源革命、“双碳”行动可按4个阶段进行推动。① 2021—2030年为能源领域变革期，处于碳排放量达峰阶段，年排放量不超过 1.1×10^{10} t CO₂；一次能源消费量达峰，年消费量约为 6×10^9 tce；非化石能源成为能源需求增量的主体，在终端能源消费中的占比达到25%。② 2031—2035年为现代能源体系养成期，属于碳排放量稳中趋降阶段，年排放量不超过 1×10^{10} t CO₂；一次能源消费量略有下降，非化石能源在终端能源消费中的占比约为28%。③ 2036—2050年为能源革命定型期，进入碳排放量大幅减少阶段，国内生产总值增长与能源脱钩。④ 2051—2060年为碳中和阶段，努力争取2060年前实现碳中和。

能源革命和实现“双碳”目标都是渐进过程，二者紧密关联；最终构建现代能源体系，完全实现能源领域“需求合理化、开发绿色化、供应多元

化、调配智能化、利用高效化”，建成能源强国。在上述过程中，保障能源安全既是前提又是基础，还需全面协调经济、社会、环境、气候等多方面关系。立足以煤为主的基本国情，运用系统思维，稳妥处理近中期与中远期、存量脱碳与增量引导、战略方向与现实基础的辩证联系。“富煤”是相对而言的，开展资源和产能储备，释放优质产能，同步划定煤炭产能“红线”；在新能源具备安全可靠替代条件的基础上，传统能源逐步退出，支持实现能源绿色低碳转型。

五、我国能源发展建议

（一）各环节全面落实节能优先方针

节能是“第一能源”。国家能源安全新战略提出：推动能源消费革命，抑制不合理能源消费，控制能源消费总量，落实节能优先方针，将节能贯穿于经济社会发展的全过程和各领域；调整产业结构，重视城镇化节能，形成能源节约型社会。我国当前的能耗强度依然偏高，如果能耗强度下降到世界平均水平，可节能量约为 1.58×10^9 tce，减少排放近 4×10^9 t CO₂。以系统节能为切入点，以重点工业、居民生活用能为突破口，实行先进能效标准，建成能源节约型社会。

牢固树立系统节能理念，全面提高能源利用效率；积极调整产能结构、优化工艺路线，加强能源计量管理和优化运行，实现能耗大幅降低。科学论证并精准制定建筑节能标准，实施建筑节能提升工程；控制城镇建筑规模，完善建筑节能标准体系，促进可再生能源利用与建筑结构的有机融合。规划全民节能行动，引导全社会形成绿色低碳生活方式与消费模式；抑制不合理能源消费，逐步实现节约用能从外部约束到自觉行动的转变。

（二）继续实施煤炭清洁高效低碳利用

能源资源约束趋于紧张，调整结构、提高能效、减少碳排放、保障能源安全等矛盾交织。加强煤炭清洁高效低碳利用，切实发挥煤炭的兜底保障作用，确保能源发展主动权。加强能源领域战略性前沿技术、重大应用技术研发，开展以清洁低碳、安全高效为核心的煤炭清洁高效与低碳利用技术创新，将目前依靠需求拉动的“被动式”创新逐步转

向由技术积累 / 需求拉动双重推动、主 / 被动相结合的创新模式。

提升煤炭行业的集约化、高效化、智能化发展水平，科学保护煤炭资源，严格限制散煤利用，全面提升煤炭加工利用的集中度和清洁性。建立煤电、煤化工发展的准入及退出机制，淘汰落后产能，驱动煤电的集约化、高参数、大容量、清洁化、智能化发展；有序发展煤基新材料、碳材料，引导现代煤化工的高端化、清洁化、低碳化发展，实现煤炭由单一的燃料属性向燃料 / 原料并举转变。开展大规模（百万吨级 / 年）碳捕获与封存（CCS）/CCUS 关键技术研发和工程示范建设，发布综合配套政策，推进 CCS/CCUS 的碳减排量核算研究并纳入碳市场认证交易。

（三）站位全局谋划并推动可再生能源成为未来能源供应增量的主体

可再生能源快速发展并成为能源供应增量的主体已是共识。然而，传统能源的逐步退出需建立在新能源安全可靠替代的基础上，能源降碳与能源安全不可偏废。可再生能源发展需采取系统观念并进行全局谋划。在可再生能源技术发展、逐步替代化石能源的过程中，应科学规划并算清“经济账”，即技术与经济考量相结合，全面反映能源系统的经济性。若过早就不合理、不成熟的可再生能源开发利用技术进行产业化，可能引发技术路线、经济投资的“锁定”效应，将不利于能源发展全局。

制定可再生能源中长期发展专项规划，科学统筹并有序推进可再生能源行业发展。协调发展新能源产业构成，解决大规模新能源接入可能带来的电力安全与稳定性挑战；引导“风光水储氢”产业模式创新，构建电源侧储能、电网储能、需求侧响应协调发展机制，开展跨季节热储能技术与工程示范。完善可再生能源补贴退坡制度设计，提升可再生能源补贴的精准性和有效性。

（四）加快低碳转型并统筹构建多能互补能源系统

我国积极参与全球气候治理，得到了国际社会的认可，然而能源系统中的消费持续增长、高碳品类占比高、碳排放规模大、低碳转型难度大等问题是客观存在的。能源系统实现碳中和任务艰巨，应革新能源技术、创新能源业态，在加快低碳转型的过

程中寻找发展机遇，推动能源更好、更快、更绿色发展。化石能源、非化石能源耦合互补的能源系统是未来经济可行的能源发展模式。随着新能源装机规模进一步扩大，电力系统的边际成本将明显增加，保障电力系统调峰、调频需求的辅助成本占比也将大幅提高，近零碳排放的化石能源利用（配以CCUS技术）将成为平衡和兜底组合的重要形式。

能源安全事关经济社会发展全局，保障能源系统安全稳定运行是近中期能源转型的首要前提。结合当前形势及近中期演变，能源需要“靠得住、用得起、能作主”，应系统谋划能源供应的充足性、可靠性、价格可承受性、稳定性；尤其是大规模、高比例可再生能源接入电力系统后，更要考虑各类不确定性事件的潜在影响，发挥煤炭等化石能源在保障能源安全底线方面的关键作用。化石能源的减量及退出充分论证，避免过程冒进，确保能源系统以安全可靠、经济可行的方式满足经济社会发展需求；有关成本分摊安排需有可实现性，以支撑“双碳”战略目标的稳健实现。

在有关能源政策规划的编制过程中，突出能源供给与运行安全的重要性，针对性制定政策法规。加强新能源与传统化石能源协同开发利用模式研究，特别是强化能源电力、能源化工、能源冶金等零碳排放技术及工艺模式研发，支持新能源制氢（绿氢）、（煤）化工耦合制取零碳排放化工品、绿氢直接还原炼铁工艺等应用技术与工程示范。加快构建新型电力系统，统筹煤电与新能源发电，支持新能源发电逐步成为电力供应主体，兼顾电力安全稳定运行和系统平稳转型。加强“油气煤”国家储备、安全灵活的智能电网与能源互联网等重大工程建设，切实把握能源安全保障底线。

致谢

感谢参与中国工程院咨询项目“能源战略（2035）”研究工作的各位院士、专家、学者，在项目研究、本文撰写过程中的辛勤工作与积极贡献。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 25, 2022; **Revised date:** October 30, 2022

Corresponding author: Xie Kechang is a member of the Chinese Academy of Engineering. His major research fields include energy development strategies and emerging energy technologies. E-mail: xieswork@tyut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Energy Strategies (2035)” (2019-ZD-20) and “Promoting the Assessment on Construction Process and the Research on Development Strategies of Modern Energy System” (2022-XZ-33)

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook of 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [2] 中国煤炭工业协会. 2021 煤炭行业发展年度报告 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2022.
China National Coal Association. Coal industry development annual report of 2021 [R]. Beijing: China National Coal Association, 2022.
- [3] 中国石油集团经济技术研究院. 2021 年国内外油气行业发展报告 [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2022.
CNPC Economics and Technology Research Institute. Development report of domestic and foreign oil and gas industry in 2021 [R]. Beijing: CNPC Economics and Technology Research Institute, 2022.
- [4] 张亚雄. 立足国情, 走好具有中国特色的煤炭清洁高效利用之路——访光华工程科技奖励基金会理事长、中国工程院院士谢克昌 [EB/OL]. (2022-06-01)[2022-06-12]. <https://app.gmdaily.cn/as/opened/n/8b6f90ecccc4c9eb7b81dec72032f68>.
Zhang Y X. Based on the national conditions, take the road of clean and efficient utilization of coal with Chinese characteristics: An interview with Xie Kechang, chairman of Guanghua Engineering Science and Technology Award Foundation and academician of Chinese Academy of engineering [EB/OL]. (2022-06-01)[2022-06-12]. <https://app.gmdaily.cn/as/opened/n/8b6f90ecccc4c9eb7b81dec72032f68>.
- [5] 戴厚良, 苏义脑, 刘吉臻, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略思考 [J]. 石油科技论坛, 2022, 41(1): 1–8.
Dai H L, Su Y N, Liu J Z, et al. Thinking of China’s energy development strategy under carbon neutrality goal [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 1(41): 1–8.
- [6] 周建平, 杜效鹤, 周兴波. “十四五”水电开发形势分析、预测与对策措施 [J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(1): 1–5.
Zhou J P, Du X H, Zhou X B. Situation analysis, prediction and countermeasures of hydropower development during the 14th Five-Year Period [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(1): 1–5.
- [7] 张瑞刚, 王冰佳, 王杰彬, 等. 海上风电叶片行业优点及发展阻碍分析 [J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 523–525.
Zhang R G, Wang J B, Wang J B, et al. Advantages and development obstacles of offshore wind turbine blade industry [J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 523–525.
- [8] 李太江, 李巍, 刘立营, 等. 风电机组关键部件磨蚀现状及防治研究进展 [EB/OL]. (2022-09-30)[2022-10-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20220927.1138.012.html>.
Li T J, Li W, Liu L Y, et al. Research progress on the current situation and prevention of erosion of key components of wind turbines [EB/OL]. (2022-09-30)[2022-10-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20220927.1138.012.html>.
- [9] 魏景东, 赵增海, 郭雁珩, 等. 2021 年中国光伏发电发展现状与展望 [J]. 水力发电, 2022, 48(10): 4–8.
Wei J D, Zhao Z H, Guo Y H, et al. Status and prospect of China’s solar PV generation development in 2021 [J]. Water Power, 2022, 48(10): 4–8.
- [10] 邱辰, 赵增海, 郭雁珩, 等. 2021 年中国生物质发电现状与展望 [EB/OL]. (2022-03-27)[2022-10-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20220926.1954.006.html>.
Qiu C, Zhao Z H, Guo Y H, et al. Status and prospect of China’s biomass power generation in 2021 [EB/OL]. (2022-03-27)[2022-10-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20220926.1954.006.html>.
- [11] 谢克昌. 因地制宜推进区域能源革命的战略思考和建议 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 1–6.
Xie K C. Strategic thinking and suggestions on promoting regional energy revolution based on local conditions [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 1–6.
- [12] 彭述明, 夏佳文, 王毅初, 等. 我国核安全技术发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(3): 113–119.
Peng S M, Xia J W, Wang Y R, et al. Development strategy of nuclear safety technology in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3): 113–119.
- [13] 瞿国华. 我国氢能产业发展和氢资源探讨 [J]. 当代石油石化, 2020, 28(4): 4–9.
Qu G H. China’s hydrogen energy industry development and hydrogen resources [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(4): 4–9.
- [14] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76–83.
Ling W, Liu W, Li Y L, et al. Development strategy of hydrogen infrastructure industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 76–83.
- [15] 张永生, 董舵, 肖逸, 等. 我国能源生产、消费、储能现状及碳中和条件下变化趋势 [J]. 科学通报, 2021, 66(34): 4466–4476.
Zhang Y S, Dong D, Xiao Y, et al. Current status and trends in energy production, consumption, and storage under carbon neutrality conditions in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(34): 4466–4476.