

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比

李辉^{1,2}, 庞博³, 朱法华^{1,2}, 孙雪丽^{1,2}, 徐静馨^{1,2}, 王圣^{1,2*}

(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司清洁高效燃煤发电与污染控制国家重点实验室, 南京 210023; 2. 国电环境保护研究院有限公司国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室, 南京 210031; 3. 中国气象局科技与气候变化司, 北京 100081)

摘要: 选取 2020 年世界能源消费量累积占比达 80% 的前 23 个国家作为研究对象, 通过从一次能源清洁化率、化石能源清洁利用率和电能占终端能源消费率角度对其能源消费结构进行对比研究, 从单位 GDP 能耗、人均能耗和单位国土面积能耗角度, 结合产业结构和分部门能源消费构成, 对其能源消费强度进行深入分析, 探讨各国在社会经济运行与生产生活中的能源消费模式, 提出能源消费自然碳汇承载负荷比概念, 指出我国在碳达峰与碳中和目标下能源消费模式转型面临的优势与挑战。结果表明, 我国一次能源清洁化率、发电用能占比、化石能源清洁化利用率和电能占终端能耗比分别达到 15.90%、53.48%、37.51% 和 26.54%, 均在世界主要能源消费国家中处于前列, 已经架构起良好的能源集约化和清洁化利用结构基础; 非工农业能源消费占比尤其是仅为 14.09% 的交通能源占比在主要能源消费国中最低, 已经形成了具有相对优势的绿色低碳能源消费模式; 基于产业结构优化潜在的总体能源生产率还有较大提升空间; 但相对较短的碳达峰与碳中和目标期对清洁能源发展速度与规模提出了巨大挑战, 碳排放约束下的国际形势对我国通过优化调整产业结构实现降碳目标也增加了难度。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 能源结构; 能源消费模式; 转型

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5294-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112065

Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction

LI Hui^{1,2}, PANG Bo³, ZHU Fa-hua^{1,2}, SUN Xue-li^{1,2}, XU Jing-xin^{1,2}, WANG Sheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Clean and Efficient Coal-fired Power Generation and Pollution Control, China Energy Investment Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Physical Modeling and Pollution Control, State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 3. Department of Science & Technology and Climate Change, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The top 23 countries with energy consumption accounting for 80% of the worldwide total in 2020 were selected as the research objects for this study. The energy consumption structure of these countries has been compared and studied from the proportion of clean energy in primary energy, the clean utilization rate of fossil energy, and the proportion of electric energy in terminal energy consumption, and the characteristics of energy consumption intensity were also analyzed based on the energy consumption per unit GDP, capital, and unit land area. The energy consumption patterns of various countries in social-economic operation, production, and life were also discussed, combined with the characteristics of industrial structure and subsector energy consumption. The concept of natural carbon sink load ratio of energy consumption was put forward, and the advantages and challenges of energy consumption mode transformation under carbon peak and carbon neutralization goals in China were identified and analyzed. The results showed that: the proportion of clean energy in primary energy, the proportion of energy consumption for power generation, the clean utilization rate of fossil energy, and the proportion of electric energy in terminal energy consumption in China were 15.90%, 53.48%, 37.51%, and 26.54%, respectively, all of which were in the forefront among the major energy-consuming countries in the world. China has built a favorable structural foundation for energy-intensive and clean utilization and formed a green and low-carbon energy consumption model; the proportion of non-industrial and agricultural energy consumption, especially that of transportation energy consumption, were both the lowest among major energy-consuming countries, and there is still much room for improvement in overall energy productivity based on the optimization of industrial structure. However, the relatively short carbon peak and neutralization target period poses a great challenge to the development speed and scale of clean energy to China, and the international situation under the constraint of carbon emission also increases the difficulty for China to achieve the carbon reduction goal by optimizing and adjusting the industrial structure.

Key words: carbon peaking; carbon neutralization; energy structure; energy consumption mode; transformation

碳达峰与碳中和战略目标和国家自主贡献具体政策、措施的相继提出^[1,2], 为我国能源消费结构与模式的转型优化指明了方向, 能源低碳化和去碳化过程进入快速轨道^[3]. 有学者在碳达峰与碳中和目标的实现路径、能源结构转型发展策略^[4~10]及其对煤炭、电力等能源生产部门^[11~15], 以及工业、交

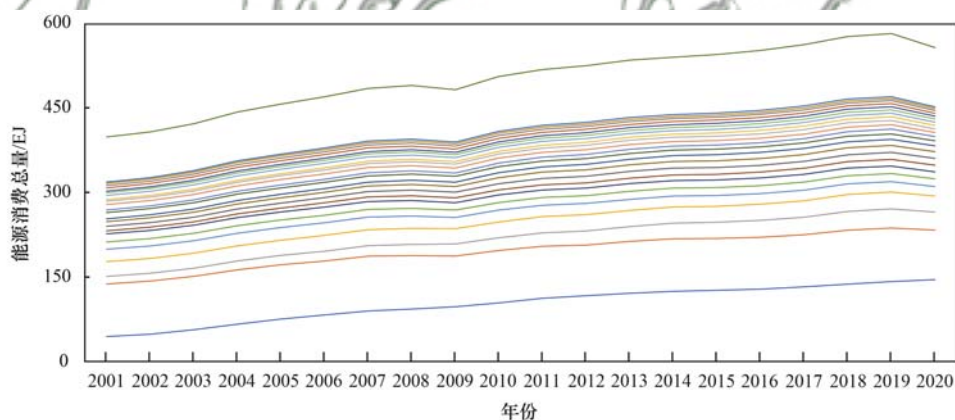
收稿日期: 2021-12-07; 修订日期: 2022-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208102); 江苏省科技成果转化专项(BA2020001); 生态环境部 2020 年度固定源大气污染防治研究专项(2020A060)

作者简介: 李辉(1985~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源、电力环境保护技术和管理政策, E-mail: lihui850627@126.com

* 通信作者, E-mail: wangsheng9999@126.com

通和居民生活等能源终端消费部门的影响^[16~21]等方面进行了大量研究,部分研究还结合能源结构特点和经济发展阶段等因素对我国与其他发达国家或地区进行了对比分析^[6,11,22].文献[23]指出我国的生态环境问题根本上是高碳的能源结构和高耗能、高碳的产业结构的问题,必须从能源结构和产业结构转型升级的源头上解决,但鲜见从是否已碳达峰角度对包含发达国家和发展中国家在内的主要能源消费国家进行全面对比,尤其是对其从不同产业和行业部门能源消费结构特征进行系统分析.本文进一步就世界主要能源消费国家,包括已碳达峰和未碳达峰国家,结合其经济、人口和国土面积等因素,对其能源消费特征进行对比,着重从产业结构和分行业部门角度对人均能源消费强度进行分解研究,采用 K 均值聚类分析(K-means)方法进行分析,探究各国在国民经济运行与生产生活中的能源消费模式差异,提出了能源消费自然碳汇承载负荷比概念,进而探讨了我国在双碳目标下能源转型具有的优势和面临的挑战,并提出了应对建议.



曲线从下到上依次为中国、美国、印度、俄罗斯、日本、加拿大、德国、伊朗、巴西、韩国、沙特阿拉伯、法国、印度尼西亚、英国、墨西哥、土耳其、意大利、澳大利亚、泰国、西班牙、南非、荷兰、阿根廷和其他国家

图1 世界主要国家能源消费总量分布情况

Fig. 1 Distribution of total energy consumption in major countries

为确保分析研究所用中国相关数据的准确性,本文对文献[27]和世界银行数据库中所提供的中国能源消费基础数据与中国国家统计局数据库中的相应统计数据,或经单位转换处理为具有可比性的同质数据,采用 ICC 组内相关系数法进行一致性检验. ICC 组内相关系数是衡量和评价观察者间信度(inter-observer reliability)和复测信度(test-retest reliability)的信度系数(reliability coefficient)指标之一^[28],用于评价不同方法或观察者对同一定量测量结果的一致性 or 可靠性,其计算 ICC 值,即信度系数介于 0~1 之间,一般认为 ICC 值大于 0.75 表示可信度良好,越接近于 1 可信度或一致性越好.经数据

1 材料与方法

1.1 数据来源与检验

为保证中国能源消费相关数据指标与其他国家数据的可比较性,本文分析研究所涉及国家的能源、经济、人口和相关基础数据均来源于国家统计局^[24]、国际能源署(International Energy Agency, IEA)^[25]、世界银行(the World Bank)^[26]和文献[27]等官方或被普遍认可的数据库.

根据文献[27]中 2020 年世界主要国家能源消费总量排名情况,本文选取了累积消费总量占世界总消费量 80% 的国家进行分析研究,共涉及 23 个国家,具体情况如图 1 所示.其中有 13 个国家已实现碳排放达峰,为美国、俄罗斯、日本、加拿大、德国、巴西、韩国、法国、英国、意大利、澳大利亚、西班牙和荷兰,除巴西外,均为发达国家;也包括未碳达峰的中国、印度、伊朗、沙特阿拉伯、印度尼西亚、墨西哥、土耳其、泰国、南非和阿根廷这 10 个发展中国家,基本涵盖了不同地区、不同经济发展阶段和不同能源结构特点类型的代表性国家.

分析,文献[27]、世界银行和国家统计局数据库中的中国能源生产、消费主要数据和主要经济指标数据的一致性检验结果如表 1 所示.检验结果显示两者具有高度一致性,采用文献[27]和世界银行数据库中的中国数据进行分析研究可保证其可信度.

1.2 能源消费结构

本文采用一次能源清洁化率、化石能源清洁利用率 and 电能占终端能源消费率这 3 个指标来表征能源消费结构.

1.2.1 一次能源清洁化率

一次能源清洁化率可以衡量能源消费结构的总体优化程度,体现清洁低碳转型发展趋势^[29~31],本

表 1 文献[27]、世界银行中国数据和国家统计局数据一致性检验结果
Table 1 Consistency test results between China's data in reference[27], the World Bank database,
and that in the database of National Bureau of Statistics

数据年份	数据样本量	数据库来源	项目	ICC 信度系数	一致性结论
2001 ~ 2020	20	文献[27]和 中国国家统计局	能源消费总量	1.000	高度一致
			煤炭消费量	1.000	高度一致
			石油消费量	0.996	高度一致
			天然气消费量	0.998	高度一致
		世界银行和中国 国家统计局	GDP	1.000	高度一致
			第二产业增加值	0.999	高度一致
2001 ~ 2019	19	文献[27]和中国 国家统计局	总发电量	1.000	高度一致
			火电发电量	0.999	高度一致
			水电发电量	0.999	高度一致

文以一次能源消费中非化石能源消费量占能源消费总量的比例来表征. 其中, 能源消费总量中以发电形式利用的核能、水能、风能和太阳能等统一采用文献[27]方法, 即根据相应年度的平均能源转换效率折算为等效能源消费量进行统计, 非化石能源消费量即能源消费总量扣除石油、煤炭和天然气消费量的部分. 计算公式如下:

$$cl = 1 - E_F / E_{total} \quad (1)$$
$$E_{total} = E_F + \frac{elc_{nuclear} + elc_{hydro} + elc_{other-renewable}}{\eta} + E_{other} \quad (2)$$
$$E_F = E_c + E_o + E_g \quad (3)$$

式中, cl 为一次能源清洁化率; E_{total} 为一次能源消费总量, 单位为 TJ; E_F 为化石能源消费总量, 单位为 TJ; E_c 、 E_o 、 E_g 和 E_{other} 分别为煤炭、石油、天然气和其他形式能源消费总量, 单位为 TJ; $elc_{nuclear}$ 、 elc_{hydro} 和 $elc_{other-renewable}$ 分别核电、水电和其他可再生能源发电量对应的能源总量, 单位为 TJ; η 为发电等效能源转化效率.

1.2.2 化石能源清洁利用率

化石能源清洁利用率可用于衡量对化石能源利用方式的优化程度. 石油、煤和天然气作为能源直接燃烧是历史最悠久和最常规的利用方式, 但同时也是利用效率最低和造成污染最严重的方式, 将化石能源进行集约化和高效率的清洁利用, 最大程度地发挥其能源价值才是更合理的利用方式^[32~35]. 火力发电技术经历 100 多年的发展, 其能源利用效率已显著高于其他方式, 伴随着火力发电污染物控制技术的迅速发展和普遍应用, 化石能源集中用于电力转化是当前技术水平下最高效、最经济和最清洁的利用方式. 本文以用于生产电力的化石能源消费量占化石能源消费总量的比例, 即化石能源发电比来表征一次化石能源清洁化利用率, 参照文献[27]方法, 根据相应年度的平均能源转换效率将来源于石油、煤和天然气的发电量折算为对应的等效能源

消费量进行计算. 计算公式为:

$$cl_F = [(elc_c + elc_o + elc_g) / \eta] / E_F \quad (4)$$

式中, cl_F 为化石能源清洁化利用率; elc_c 、 elc_o 、 elc_g 分别为燃煤、燃油和燃气发电量对应的能源总量, 单位为 TJ; η 为发电等效能源转化效率.

1.2.3 电能占终端能源消费率

电能占终端能源消费率即电能占终端能耗比, 是另一项用于衡量该国对能源消费结构优化程度的重要指标, 也是评价电气化率的核心指标^[30, 36~38]. 本文在计算电能占终端能源消费率时, 根据文献[27]中各国发电量数据扣除输配电损失量后, 换算为以焦耳为单位的能量值, 终端能源消费量为一次能源消费总量扣除了电力生产等效能源消费量中的损失和输配电损失部分, 其中中国输配电损失率来自国家统计局统计数据, 其他国家输配电损失率来自国际能源署数据库. 相关计算公式如下:

$$E_{elc} = elc \times (1 - \eta_{loss}) / [(E_{total} - elc \times (1/\eta - 1) - elc \times \eta_{loss})] \quad (5)$$

式中, E_{elc} 为电能占终端能源消费率; elc 为发电量对应的能源总量, 单位为 TJ; η_{loss} 为输配电损失率.

1.3 能源消费强度

本文采用单位国内生产总值 (GDP) 能源消费量、人均能源消费量和单位国土面积能源消费量这 3 个指标来表征能源消费强度.

1.3.1 单位 GDP 能源消费量

GDP 是用于表征经济发展水平的基本指标, 而单位 GDP 能源消费量则是经济发展对能源消费依存度的重要体现, 同样也可反映能源生产率水平, 但将其与国家经济发展阶段和产业结构等因素结合分析, 更能充分反映能源消费强度的客观性^[39~41]. 本文所用 GDP 数据来自为世界银行统计数据库 (2015 年可比价, Constant 2015 USMYM).

1.3.2 人均能源消费量

在脱离人口基数的情况下谈能源、电力消费总量和碳排放总量是对“平等享有生存权发展权”的

最基本人权和“利益共生、权利共享、责任共担”的人类命运共同体理念的重大忽视。在实现双碳目标的过程中首先是要关注发展和减排的关系^[42],减排不减生产力,在降碳的同时要确保能源安全、产业链供应链安全和粮食安全,确保群众正常生活。本文重点从产业结构出发,采用 K-means 聚类分析方法对主要能源消费国家人均能源消费情况进行解析分类讨论,探讨各国在国民经济运行与生产生活中的能源消费水平和消费模式。K-Means 算法^[43,44]是基于划分的聚类算法,采用欧式距离作为衡量数据对象间相似度的指标,距离越小相似度越大,首先从数据集中随机选取 k 个初始聚类中心 $C_i(1 \leq i \leq k)$,计算其余数据对象与聚类中心 C_i 的欧氏距离,找出离目标数据对象最近的聚类中心 C_i ,并将数据对象分配到聚类中心 C_i 所对应的簇中;然后计算每个簇中数据对象的平均值作为新的聚类中心,进行下一次迭代,直到聚类中心不再变化或达到最大的迭代次数停止。空间中数据对象与聚类中心间的欧式距离计算公式为:

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - C_{ij})^2} \quad (6)$$

式中, x 为数据对象, C_i 为第 i 个聚类中心, m 为数据对象的维度, x_j 和 C_{ij} 分别为 x 和 C_i 的第 j 个属性值。

数据集的误差平方和 SSE 计算公式为:

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |d(x, C_i)|^2 \quad (7)$$

式中, SSE 的大小表示聚类结果的好坏, k 为簇的个数。

为保证各国数据的可比性,本文在分行业部门终端能源消费分析时,参照国际能源署对分部门终端能源消费的统计方法,结合我国统计工作对产业行业的分类方式和惯例进行适当调整计算,并确保研究对象对比项统一可比。如将供气供热供水等环节能源消费纳入商贸及公共事业板块,能源生产部

门生产环节的能源消费纳入工业能源消费部分,能源的非供能消费单独统计等。

1.3.3 单位国土面积能源消费量

国土面积是表征自然环境系统对人类活动造成环境影响承载消纳能力的基本因素,森林覆盖率是与能源消费自然碳汇能力密切相关的重要因素之一^[45~47]。本文将结合各主要能源消费国单位国土面积能源消费强度及森林覆盖率,并考虑不同化石能源的碳排放强度,对各国能源消费自然碳汇相对负荷进行分析。能源消费自然碳汇相对负荷比计算公式如下:

$$Y_{ij} = L_i / L_j \quad (8)$$

$$L = e \times (p_c \times a_c + p_o \times a_o + p_g \times a_g) / f \quad (9)$$

式中, i 和 j 分别为 i 和 j 国, Y_{ij} 为 i 国相对于 j 国的能源消费自然碳汇负荷比,为无量纲值; L 为能源消费自然碳汇负荷,单位为 $t \cdot km^{-2}$,其实际意义为单位森林面积所承载的能源消费 CO_2 排放量; e 为单位国土面积能源消费量,单位为 $TJ \cdot km^{-2}$; p_c 、 p_o 和 p_g 分别为煤炭、石油和天然气消费比例; a_c 、 a_o 和 a_g 分别为煤炭、石油和天然气消费的 CO_2 排放强度,根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 国家温室气体清单指南^[48],分别取 96.9、73.3 和 56.1 $t \cdot TJ^{-1}$; f 为森林覆盖率。

所用数据中国国土面积来自民政部中华人民共和国行政区划统计表^[49],其他国家数据来自世界银行统计数据库。

2 结果与讨论

2.1 能源消费结构特征分析

中国能源消费总量占世界总消费量的比例从 2000 年的 10.80% 左右增长到 2020 年 26.10% (如图 1)。到 2020 年,我国化石燃料,尤其是煤炭的消费比重继续保持稳步下降趋势,15.90% 的清洁能源占比在未碳达峰主要国家中处于领先水平,已高于俄罗斯、日本、韩国、澳大利亚和荷兰等已碳达峰

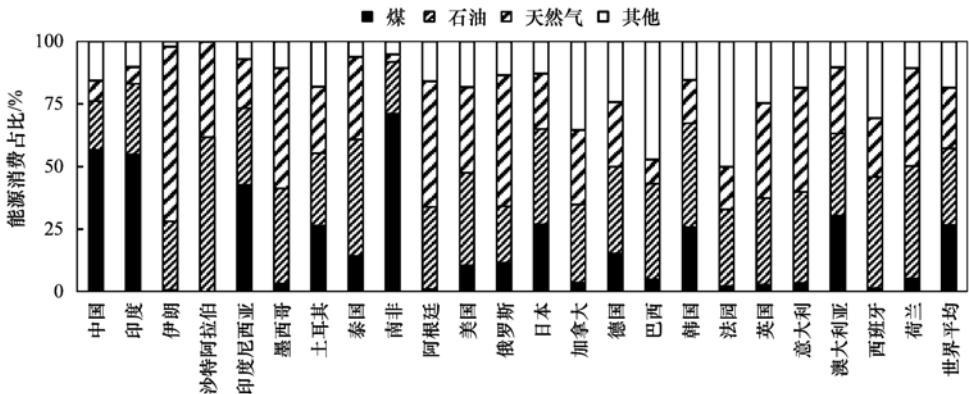


图 2 世界主要国家能源消费结构

Fig. 2 Energy consumption structure in major countries

国家(图2),但是,主体能源仍然以煤为主是我国的最主要特征。从图2中可以看出:世界平均水平及已经碳排放达峰的国家煤炭消费占比均在30%以下,大部分国家化石能源消费中以石油为主,煤炭占比低至10%甚至5%以下,俄罗斯、英国和意大利天然气使用占比最高;未碳达峰国家中南非、中国、印度和印度尼西亚煤炭消费占比在30%以上,伊朗和沙特阿拉伯清洁能源占比低,但基本不使用煤。

发电用能占比、电能占终端能耗比是电气化率的重要指标^[29],化石能源发电比是直接体现化石能源集约化和清洁化利用水平的重要因子。从图3可知,我国在上述3项指标上均处于较高水平,其中:

发电用能占比法国和日本达到60%左右,我国以53.48%位居第三;电能占终端能耗比法国和日本达到30%以上,我国以26.54%位居第三;化石能源发电比我国位列日本和南非之后(法国数据缺失)为37.51%,同样位居第三。从图3还可看出,已碳达峰国家平均发电用能占比和电能占终端能耗比高于未碳达峰国家,说明已碳达峰国家在电源结构上整体更加优化,来自清洁可再生的非化石电源占比更高,电气化率水平更高;而未碳达峰国家平均化石能源发电占比更高,显示出未碳达峰国家,尤其是中国在化石能源的集约化、清洁化利用方面做出了更大努力。

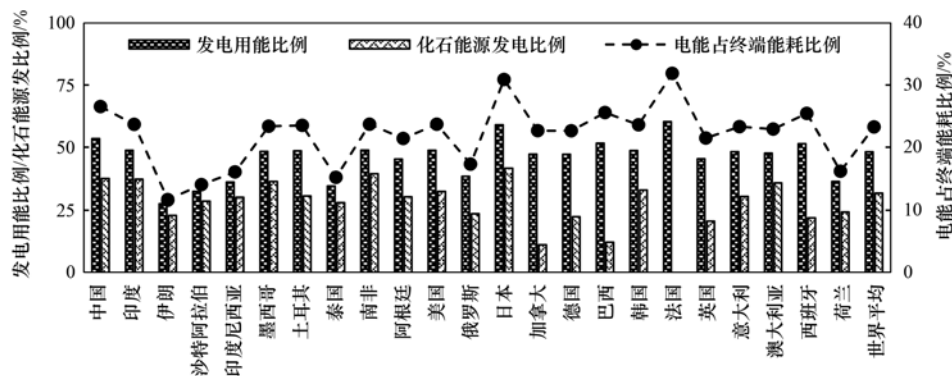


图3 世界主要国家发电用能和电能占终端能耗比例

Fig. 3 Proportion of power generation energy consumption in total energy consumption and proportion of electric energy in terminal energy consumption in major countries

2.2 能源消费强度特征分析

2020年,中国GDP占世界总量的比例从2000年的5.80%左右增长到17.90%,经济增幅大于能源消费增幅,说明能源生产率在持续提高,经济增长对能源消费的依赖性较20世纪前后已明显降低^[39,40],2011~2019年间能源消费弹性系数在0.19~0.76之间,平均值为0.45。受新冠疫情影响,2020年全球整体及各主要经济体出现经济负增长,能源消费总量有所下降,中国成为唯一经济正增长的主要经济体,能源消费总量小幅上升,能源消费弹

性系数稍有回升。图4展示了2020年主要国家单位GDP能源消费量,可以看出我国单位GDP能耗目前仍处于相对高位,约为世界平均水平的1.46倍,与已碳达峰的传统发达国家相比还有较大差距,但单位GDP能耗较2000年显著下降达35%以上。

造成单位GDP能耗差距的原因一方面与能源综合利用效率有关,更主要的原因在于不同国家之间产业结构的差异,工业尤其是重工业和传统制造业能源消费强度远高于农业、服务业和高新技术制造业等。根据国家统计局数据,中国2018年第二产

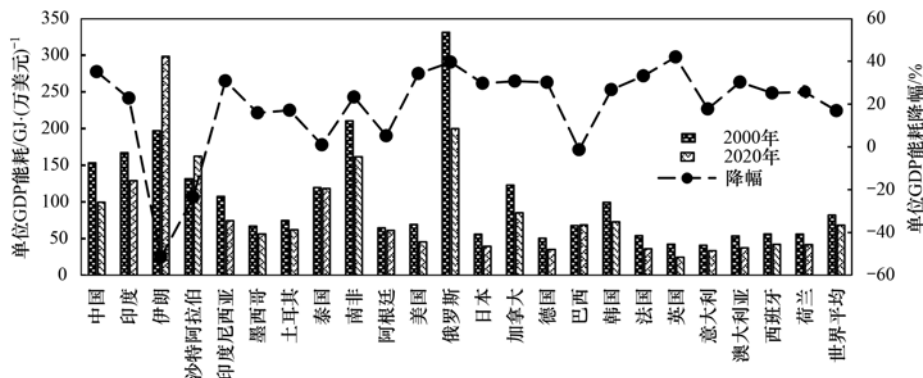


图4 世界主要国家单位GDP能源消费量

Fig. 4 Energy consumption per unit GDP in major countries

业对 GDP 的贡献率为 34.40%，但消费了全国总能耗的 67.66%。从世界主要能源消费国产业结构的变化情况来看，本文分析的主要能源消费国中，未碳达峰国家第二产业增加值占世界第二产业增加值比重从 1997 年的 17.25% 增长到 2017 年的 36.69%，其中中国从 8.12% 增长到 24.93%，而已碳达峰国家该比例从 60.93% 降至 47.32%。1997 年以来，未碳达峰国家第二产业产值占本国 GDP 的比重总体呈现出先升后降的趋势，到 2017 年为约 33%，而已碳达峰国家该比值持续下降，2017 年已降至约 23%，累积降幅约为未碳达峰国家的 1.5 倍，尤其是美国、法国、英国和荷兰已低至 18% 左右。通过单因素方差分析检验，如表 2 所示的检验结果显示已碳达峰与未碳达峰国家第二产业产值占本国 GDP

比重自 1997 年以来一直存在显著差异，是已碳达峰与未碳达峰国家之间最重要的特征性差异之一。各国各产业产值比重的变化，直观地反映出经济全球化和生产活动世界化推动全球产业链新格局的形成过程，传统经济大国迈入后工业化发展阶段，将处于产业链前端或低端、低附加值的劳动密集型、资源能源密集型传统制造业逐步转移向以中国为代表的发展中国家，这些发展中国家的工业化进程得以加快，经济快速增长，但付出的是同样快速增长的资源能源消耗。即便如此，中国在工业制造业迅速发展，成为名副其实“世界工厂”的情况下，单位 GDP 能耗仍然实现了大幅下降，节能降耗力度之大、成效之显著可见一斑，为世界平均能耗强度下降做出了重要贡献。

表 2 已碳达峰与未碳达峰国家工业产值占本国 GDP 比重差异性分析结果¹⁾

Table 2 Difference analysis results of industrial output value in GDP between carbon peaked and non-carbon peaked countries

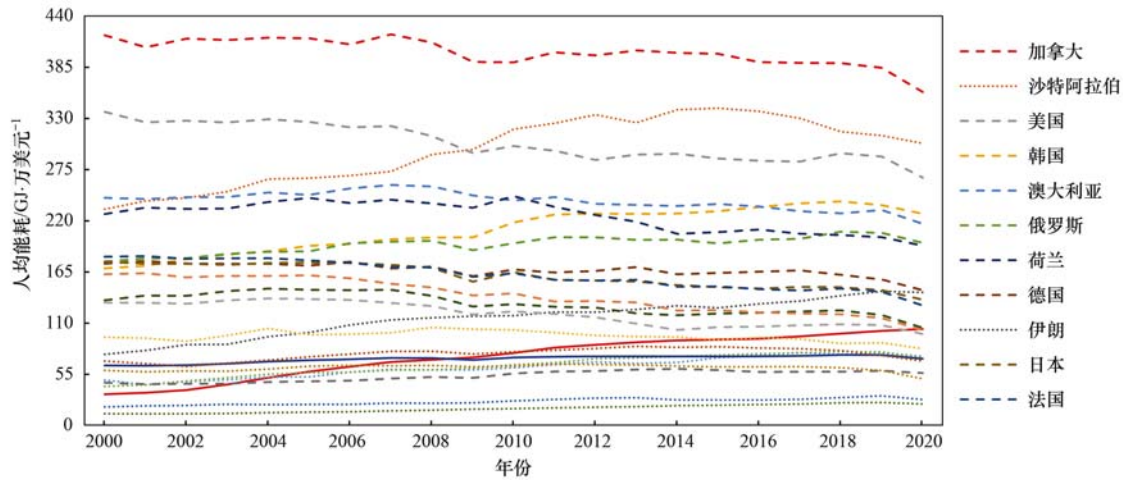
年份	项目	样本量	平均值/%	标准差/%	F	P
1997	未碳达峰国家	10	36.77	8.32	12.07	0.002***
	已碳达峰国家	13	27.18	4.84		
2000	未碳达峰国家	10	36.20	9.35	10.11	0.005***
	已碳达峰国家	13	26.71	4.76		
2010	未碳达峰国家	10	37.20	11.00	14.56	0.001***
	已碳达峰国家	13	24.24	4.84		
2017	未碳达峰国家	10	32.97	7.40	12.92	0.002***
	已碳达峰国家	13	23.12	5.76		

1) ***表示 1% 的显著性水平

图 5 展示了中国与其他主要能源消费国人均能源消费量及世界平均水平的对比情况。2020 年人均能耗排名前 10 的有 8 个已碳达峰国家，分别为加拿大、美国、韩国、澳大利亚、俄罗斯、荷兰、德国和日本，以及沙特阿拉伯和伊朗 2 个未碳达峰国家。中国在 2009 年以后人均能源消费量才赶上了世界平均水平，2020 年以前始终低于除巴西以外的其他已碳达峰国家，也低于本文研究的其他 22 个主要能源消费国平均水平，2004 年以前在未碳达峰国家中也仅略高于印度和印度尼西亚两个发展中人口大国。根据文献[6]对已碳达峰国家达峰时间的统计，从图 6 可知无论是 2000 年以前还是近年才碳达峰的国家，其人均能源消费量在 2000 年以后并未显著降低，韩国和巴西还有所升高。2020 年由于受新冠疫情影响，本文研究对象中除中国外的所有国家人均能源消费量都较 2019 年有较大的降低，其中英国和意大利的人均能源消费量降至和中国基本相当的水平，中国人均能源消费量仍然远低于绝大多数传统发达国家，分别相当于美国、德国、日本和法国的 38.93%、71.30%、76.65% 和 80.32% 水平。人均能源消费中人均电力消费量从 2000 年到 2019 年间的

变化，在已碳达峰和未碳达峰的主要能源消费国中也存在差异，较早实现碳达峰国家中主要典型发达国家人均电力消费量波动在 $\pm 10\%$ 之间，处于相对稳定状态，而未碳达峰国家除南非以外，各国人均电力消费量都出现明显增长，其中中国增长了 4 倍以上，大大超过了人均能源消费量的增幅，说明中国人均能源消费的增长量中电力的贡献度十分显著。

根据 IEA 对终端能源消费统计的行业部门分类，农、工业主要从事粮食、各类工业品和建筑活动，与其相关的能源消费为人们生活提供所需的基本物资品，而交通、商贸及其他公共服务、居民生活等则主要反映了工农业生产以外的国家经济运行及居民日常工作生活中的能源消费。进一步分析分行业部门终端能源消费比重可以发现（图 6），2019 年世界主要能源消费国中中国是唯一工业能源消费占本国终端能源消费 50% 以上的国家，工农业能源消费合计占到 55.38%，未碳达峰国家平均值为 42.18%，而除巴西以外的已碳达峰发达国家这一比例为 32.59%，其中美国、法国和英国已低至 25% 以下。同时，也可由此反观各国在基本物资品生产以外的国家经济运行及居民日常活动能源消费水平上的



图例顺序从上到下与 2020 年人均能耗数值高低对应一致,其中实线为中国和世界平均,点线为其他未碳达峰国家,短划线为已碳达峰国家

图 5 世界主要国家人均能源消费量情况

Fig. 5 Energy consumption per capita of major countries

差异.值得注意的是,在已碳达峰的主要国家中,如美国、英国、法国、意大利和西班牙等,交通已成为最大的能源消费部门,美国达到 37.06%,西班牙、澳大利亚和巴西超过 30%,英国、法国和意大利接近 30%,未碳达峰国家中墨西哥、印度尼西亚和沙特阿拉伯也超过了 30%,而中国 14.09% 的交通能源消费占比在 23 个主要能源消费国中最低,只有世界平均水平的一半左右,在我国大力发展新能源汽车的政策推动下^[49,50,51],新能源汽车产业规模全球领先,产销量连续五年位居世界首位^[52],正在加速形成绿色低碳的交通能源消费新格局,随着清洁电力比例的进一步提高,为我国交通领域实现低水平碳达峰奠定了良好的基础.

进一步对 23 个主要能源消费国家分行业人均能源消费量进行 K-means 聚类分析,可分为 6 个类别,分析结果如表 3.类 I 和类 II 各仅一个国家,分别为人均能源消费总量超过 300 GJ·人⁻¹的加拿

大和沙特阿拉伯,其中加拿大各行业人均能耗均远超过 23 国平均水平,沙特阿拉伯除人均农业能耗为各类中最低外,其余各行业人均能耗也超过 23 国平均值;类 III 与类 IV 的主要区别在于交通行业和非能源形式消费人均能耗的差异,类 IV 与类 V 的主要区别体现在工业、农业、商贸及其他和非能源形式消费人均能耗的差异;类 VI 则除农业人均能耗高于类 II 之外,其余均在六个类别中处于最低水平,且远低于 23 国平均值.从分类结果不难发现,类 VI 中除巴西外均为未碳达峰国家,而类 I 到类 V 中也只有沙特阿拉伯和伊朗两个未碳达峰国家,除去这 3 个本身具有能源结构和产业结构特殊性的国家之外,其余已碳达峰国家与未碳达峰国家在分行业人均能源消费特征上体现出明显聚类特征,尤其在交通、居民生活和商贸及其他 3 个行业部门已碳达峰国家的人均能源消费量显著高于未碳达峰国家 2~5 倍.

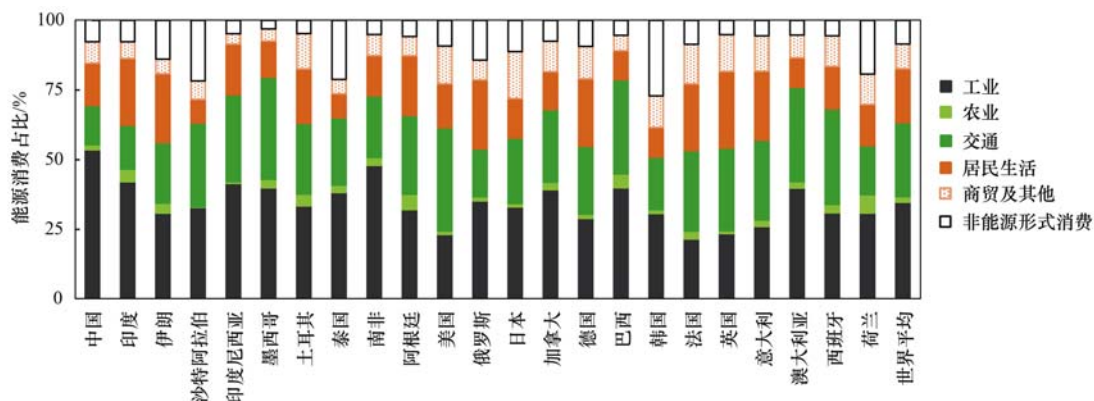


图 6 世界主要国家分行业终端能源消费比例情况

Fig. 6 Proportion of terminal energy consumption by sectors in major countries

表 3 主要能源消费国家分行业人均能源消费量 K-means 聚类分析结果¹⁾

Table 3 K-means cluster analysis results of energy consumption per capita by industry in major energy-consuming countries									
行业	样本均值 ± 标准差 /GJ·人 ⁻¹	聚类类别(平均值 ± 标准差/GJ·人 ⁻¹)						F	P
		类 I (n=1)	类 II (n=1)	类 III (n=2)	类 IV (n=3)	类 V (n=7)	类 VI (n=9)		
		加拿大	沙特阿拉伯	美国和澳大利亚	俄罗斯、韩国和荷兰	伊朗、日本、德国、法国、英国、意大利和西班牙	中国、印度、印度尼西亚、墨西哥、土耳其、泰国、南非、阿根廷和巴西		
工业	49.16 ± 32.90	150.99 ± 0.00	102.46 ± 0.00	79.66 ± 17.81	69.39 ± 5.98	37.37 ± 8.77	27.61 ± 13.70	31.04	0.000***
农业	3.51 ± 2.97	10.28 ± 0.00	0.83 ± 0.00	4.49 ± 1.25	6.64 ± 5.84	2.97 ± 1.38	2.22 ± 1.178	3.73	0.018**
交通	38.94 ± 28.57	100.13 ± 0.00	93.61 ± 0.00	92.77 ± 20.29	38.54 ± 5.29	35.87 ± 4.32	16.63 ± 6.08	66.36	0.000***
居民生活	24.00 ± 14.26	52.13 ± 0.00	26.34 ± 0.00	35.02 ± 14.83	35.45 ± 13.97	29.32 ± 7.70	10.22 ± 4.57	10.03	0.000***
商贸及其他	14.75 ± 11.23	42.04 ± 0.00	20.71 ± 0.00	29.01 ± 14.37	21.22 ± 6.17	16.09 ± 5.51	4.68 ± 2.95	14.23	0.000***
非能源形式消费	17.20 ± 18.52	28.84 ± 0.00	67.73 ± 0.00	19.41 ± 10.10	44.23 ± 17.90	11.72 ± 5.66	5.07 ± 4.80	19.52	0.000***

1) *** 和 ** 分别表示 1% 和 5% 的显著性水平

结合前文分析不难发现,一些高能耗工业产业已经向外转移,而人均能源消费量依然处于高位的典型发达国家,其国家经济运行与居民日常生产生活方式正处于一种极高能源消费水平的模式下.相对而言,在当前碳约束背景下,经济仍需进一步增长以提高居民生活水平的发展中国家要探索一条高水平、低能耗的发展之路更是一个极具挑战性的难题.

图 7 所示表明世界主要能源消费国单位国土面积能源消费量差异显著,韩国的单位国土面积能源

消费强度最高,达到 117.63 TJ·km⁻²,约为世界平均水平的 27.46 倍,中国是 7.79 倍,其次荷兰、日本、德国、英国、意大利和法国单位国土面积能源消费强度也分别是中国的 5.34、2.98、2.24、1.87、1.29 和 1.04 倍.除美国、加拿大、俄罗斯和澳大利亚少数几个国土幅员辽阔的国家以外,已碳达峰的发达国家的国土面积相对于未碳达峰的主要能源消费国普遍较小,其单位国土面积能源消费强度明显较高,也就意味着更大的能源消费碳排放负荷.

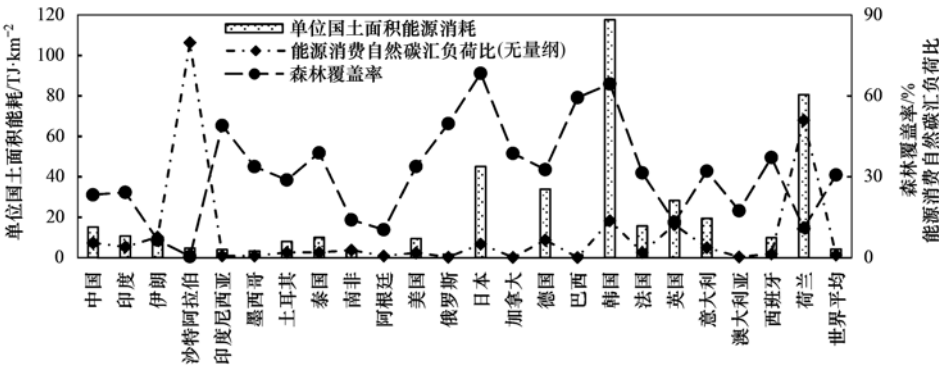


图 7 世界主要国家单位国土面积能耗、森林覆盖率及其相对于世界平均的能源消费自然碳汇负荷比

Fig. 7 Energy consumption per unit land area, forest coverage, and natural carbon sink load ratio relative to the average level of the world in major countries

根据 1.3.3 节关于国家或地区之间能源消费自然碳汇相对负荷比的定义,该无量纲比值大于 1 则表示前者能源消费自然碳汇承载负荷高于后者,在气候变化及自然碳汇的全球性效应下,能源消费自然碳汇承载负荷更高的区域将占用承载负荷较低区域的自然碳汇能力空间.从图 7 可知,只有巴西、加拿大和俄罗斯等少数几个主要能源消费国的能源消费自然碳汇承载负荷低于世界平均水平.沙特阿拉伯、荷兰相对于世界平均水平的比值分别达到 80 和 50 以上,远高于其他国家,韩国和英国也达到 10 以上.沙特阿拉伯主要是因为森林覆盖率极低,荷兰主要是单位国土面积能源消费量较高,英国则是单

位国土面积能源消费量高,而森林覆盖率不高,韩国虽然森林覆盖率较高,但单位国土面积能源消费量极高.森林覆盖率是影响能源消费自然碳汇承载负荷的重要因素,但其在一段时期内很难有较大幅度的变化,2000 年以来,只有中国森林覆盖率增幅度超过 20%,净增 4.56 个百分点,贡献了全球 1/4 的新增绿化面积,其他净增 3 个百分点以上的仅有意大利、法国,其他国家基本处于相对稳定状态,7 个国家出现森林覆盖率降低情况,其中原本森林覆盖率较高的巴西和印度尼西亚分别降低了 6.84 个和 6.52 个百分点.

相对于森林覆盖率,能源消费结构对于能源消

费自然碳汇承载负荷的影响也十分显著,以单位国土面积能源消费量基本相当的中国和法国进行对比,由于法国能源消费中化石能源占比较低,且化石能源中煤炭消费比例低,从而导致中国的能源消费自然碳汇承载负荷反而是法国的 2.80 倍,中国与德国之间的比较也存在同样情况,因化石能源结构中天然气和石油占比的差异,使得德国原本国土面积能源消费量是中国的 2.24 倍,而能源消费自然碳汇承载负荷比降至 1.19。

3 建议

(1) 积极有序加快清洁能源供应体系建设,在保证满足社会经济发展需求、能源供应安全的前提下,充分发挥国土幅员辽阔、水力气象等资源等优势,科学布局规划清洁能源空间格局,稳步提升一次能源消费中非化石能源比例,推进能源供给侧低碳转型升级。

(2) 继续倡导绿色低碳的国民经济运行、生产生活能源消费模式,建设高水平能源资源节约型社会;进一步强化化石能源的集约化高效利用,提高全社会电气化水平,构建更加清洁高效的绿色低碳能源产供消体系。

(3) 深入优化调整产业结构,能源资源密集型工业、基本品制造业以满足国内居民生产生活水平提高的需求为主,充分发挥科技进步的后发优势,在国际化产业链中以参与低能耗、低物耗、高附加值的高端制造业环节为主,加快实现制造大国向制造强国的转型。

(4) 持续增加自然碳汇,开展全国绿化建设,增加森林面积,履行碳达峰碳减排与应对气候变化国家自主贡献承诺,积极拓展草原、湿地等生态碳汇途径,探索农业用地等具有碳汇潜力的土地利用方式。

4 结论

(1) 我国能源消费模式转型的优势

在能源消费结构方面,近年来我国大力发展风能、太阳能等可再生能源发电,化石能源占一次能源消费总量的比例稳步下降,在世界主要能源消费国家中处于中等以上水平,且具有丰富的风能太阳能资源和已具备良好的开发能力与条件,在碳达峰与碳中和战略目标强化的能源、电力发展政策引导下,一次能源清洁化率的提升速度和潜力可观。我国发电用能占比、化石能源清洁化利用率和电能占终端能耗比分别为 53.48%、37.51% 和 26.54%,均在世界主要能源消费国家中处于前列,在特殊的能源

资源禀赋特点下,建成了世界最大的清洁煤电供应体系,在清洁能源占比稳步提升的基础上,建成了具有全球领先规模的清洁能源交通体系,已经架构起良好的能源集约化、清洁化利用结构基础。

在能源消费强度方面,自 2000 年以来,我国单位 GDP 能耗已下降 35% 以上,经济增长对能源消费的依赖性已显示出趋弱态势,仍然偏重的产业结构还有较大的优化空间,随着工业尤其是高能耗重工业、低端制造业等比重的逐渐降低,我国总体能源生产率还有较大的提升空间。从人均能源消费量来看,较传统发达国家在无碳排放约束情况下,能源消费自然增长出现的高位达峰相比,我国人均能源消费量仍低于世界主要能源消费国平均水平,且远低于大多数已碳达峰典型国家的目前水平,在扣除高能耗工业活动因素后,非工农业能源消费占比,尤其是仅为 14.09% 的交通能源占比在主要能源消费国中最低,我国在国民经济运行、居民日常生活活动中已形成了明显优于其他国家,尤其是发达国家的绿色低碳的能源消费模式。

(2) 我国能源消费模式转型面临的挑战

相对于在化石能源以油、天然气消费为主的其他国家,我国高比例的煤炭消费碳排放需要以更高比例的清洁能源来抵消。为满足未来我国经济社会发展和人民生活水平持续提高的能源需求,在碳达峰与碳中和目标下,需要一个规模庞大的清洁能源供应体系作为支撑,清洁能源发展的相对增速和绝对增长规模都将是一个巨大的挑战。另一方面,在高碳能源结构下,我国也急需加快提升自然碳汇能力,以降低能源消费自然碳汇的相对负荷,然而以森林生态系统为代表的自然碳汇的增长是一个长期缓慢的过程,决定了在相对较短时期内实现碳达峰与碳中和目标,降碳必将承担更大的压力。

相对较低的人均能源消费量,意味着我国能源消费总量仍处于未充分发展的阶段,且人均能源消费中用于基础物质产品生产的比重较重,作为“世界工厂”在国际化生产产业链中承担的高能源资源消耗环节生产的比重较重。而在目前碳排放约束的国际背景下,我国已不再具有其他国家曾采用过的向外转移能源资源密集型产业、低端制造业,发展低能耗低物耗高附加值高端制造业的去工业化、后工业化发展模式的条件,产业结构的优化调整已成为一个内部化问题。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 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]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm, 2020-09-22.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 继往开来,开启全球应对气

- 候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.htm, 2020-12-12.
- [3] 李辉, 孙雪丽, 庞博, 等. 基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- Li H, Sun X L, Pang B, *et al.* Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- [4] 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究[J]. 中国工业和信息化, 2021, (8): 54-61.
- [5] 王志轩. 碳达峰、碳中和目标实现路径与政策框架研究[J]. 电力科技与环保, 2021, **37**(3): 1-8.
- Wang Z X. Research on the pathway and policy framework of achieving carbon peak and carbon neutrality[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, **37**(3): 1-8.
- [6] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 碳达峰、碳中和目标下中国能源低碳发展研究[J]. 环境影响评价, 2021, **43**(5): 1-8.
- Zhu F H, Wang Y S, Xu Z, *et al.* Research on China's energy low carbon development under the targets of emission peak and carbon neutrality[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2021, **43**(5): 1-8.
- [7] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J]. 电力科技与环保, 2021, **37**(3): 9-16.
- Zhu F H, Wang Y S, Xu Z, *et al.* Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's power industry[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, **37**(3): 9-16.
- [8] 赵明轩, 吕连宏, 王深, 等. 中国碳达峰路径的 Meta 回归分析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(9): 2056-2064.
- Zhao M X, Lü L H, Wang S, *et al.* Meta regression analysis of pathway of peak carbon emissions in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2056-2064.
- [9] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学, 2021, **43**(4): 639-651.
- Hong J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model[J]. *Resources Science*, 2021, **43**(4): 639-651.
- [10] 王少洪. 碳达峰目标下我国能源转型的现状、挑战与突破[J]. 价格理论与实践, 2021, (8): 82-86.
- [11] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, **46**(7): 2197-2211.
- Xie H P, Ren S H, Xie Y C, *et al.* Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46**(7): 2197-2211.
- [12] 陈怡, 田川, 曹颖, 等. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2020, **16**(5): 632-640.
- Chen Y, Tian C, Cao Y, *et al.* Research on peaking carbon emissions of power sector in China and the emissions mitigation analysis[J]. *Climate Change Research*, 2020, **16**(5): 632-640.
- [13] 张小丽, 刘俊伶, 王克, 等. 中国电力部门中长期低碳发展路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(4): 68-77.
- Zhang X L, Liu J L, Wang K, *et al.* Study on medium and long-term low-carbon development pathway of China's power sector[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, **28**(4): 68-77.
- [14] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系
- 统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, **41**(18): 6245-6258.
- Li H, Liu D, Yao D Y. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, **41**(18): 6245-6258.
- [15] 李十中. 推动新能源革命促进实现碳中和目标[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021, (14): 42-51.
- [16] 张瑾华, 陈强远. 碳中和目标下中国制造业绿色转型路径分析[J]. 企业经济, 2021, **40**(8): 36-43.
- [17] 张伟, 朱启贵, 高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. 经济研究, 2016, **51**(12): 62-75.
- [18] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 等. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(4): 388-399.
- Gao Y B, Xing Y K, He F, *et al.* Research on co-control effectiveness evaluation of energy saving and emission reduction measures in China's iron and steel industry[J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(4): 388-399.
- [19] 邢有凯, 刘峥延, 毛显强, 等. 中国交通行业实施环境经济政策的协同控制效应研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(4): 379-387.
- Xing Y K, Liu Z Y, Mao X Q, *et al.* Research on co-control effect of environmental economic policies in China's transportation sector[J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(4): 379-387.
- [20] 何峰, 刘峥延, 邢有凯, 等. 中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(4): 400-409.
- He F, Liu Z Y, Xing Y K, *et al.* Co-control effect evaluation of the energy saving and emission reduction measures in Chinese cement industry[J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(4): 400-409.
- [21] 姜克隽, 向翩翩, 贺晨旻, 等. 零碳电力对中国工业部门布局影响分析[J]. 全球能源互联网, 2021, **4**(1): 5-11.
- Jiang K J, Xiang P P, He C M, *et al.* Impact analysis of zero carbon emission power generation on China's industrial sector distribution[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, **4**(1): 5-11.
- [22] 朱松丽, 高世宪, 崔成. 美国气候变化政策演变及原因和影响分析[J]. 中国能源, 2017, **39**(10): 19-24, 31.
- Zhu S L, Gao S X, Cui C. Evolution, reason and impacts of US's climate policies[J]. *Energy of China*, 2017, **39**(10): 19-24, 31.
- [23] 黄润秋. 生态环境问题根本上还是高碳能源结构问题[J]. 电力设备管理, 2021, (8): 1.
- [24] 国家统计局. 年度数据-能源[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2021-10-10.
- [25] The World Bank Group. Data-indicators[EB/OL]. <https://data.worldbank.org/indicator>, 2021-10-10.
- [26] IEA. Balance (2019)[EB/OL]. <https://www.iea.org/sankey/>, 2021-10-10.
- [27] BP. Statistical review of World energy 2020[R]. London, 2020.
- [28] 王维, 陈青山, 刘治民. 应用 Excel 完成组内相关系数 ICC 的计算和评价[J]. 中国卫生统计, 2008, **25**(3): 314-315.
- [29] 张运洲, 鲁刚, 王芑, 等. 能源安全新战略下能源清洁化和终端电气化率提升路径分析[J]. 中国电力, 2020, **53**(2): 1-8.
- Zhang Y Z, Lu G, Wang P, *et al.* Analysis on the improvement path of non-fossil energy consumption proportion and terminal electrification rate under the new energy security strategy[J].

- Electric Power, 2020, **53**(2): 1-8.
- [30] 屈博, 刘畅, 李德智, 等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, **23**(2): 1-3, 9.
- Qu B, Liu C, Li D Z, *et al.* Research on the development strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral”[J]. Power Demand Side Management, 2021, **23**(2): 1-3, 9.
- [31] 杨春桃. 制度创新、结构调整和电力低碳发展[J]. 经济与管理研究, 2016, **37**(7): 37-46.
- Yang C T. System Innovation, Structural adjustment and low carbon power development [J]. Research on Economics and Management, 2016, **37**(7): 37-46.
- [32] 江亿. 我国可尝试直接向电气化时代转型[J]. 中国石油企业, 2020, (10): 11-12.
- [33] 国家能源局. 我国已建成全球最大清洁煤电供应体系[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/12/c_137815509.htm, 2019-02-12.
- [34] Leslie M. The next energy battle: cheap natural gas versus renewables[J]. Engineering, 2021, **7**(2): 133-135.
- [35] 刘志坦, 李玉刚, 杨光俊, 等. 低碳转型背景下我国气电产业发展路径[J]. 天然气工业, 2021, **41**(6): 152-161.
- Liu Z T, Li Y G, Yang G J, *et al.* Development path of China's gas power industry under the background of low-carbon transformation[J]. Natural Gas Industry, 2021, **41**(6): 152-161.
- [36] 汤芳, 张宁, 代红才. 两个50%: 能源革命背景下的深度解析[J]. 能源, 2020, (2): 23-26.
- [37] 熊长虹, 王丽丽. 从电力数据看地区经济结构调整[J]. 大众用电, 2017, **32**(10): 7-8.
- [38] 叶彬, 秦丹丹, 杨欣, 等. 电力占终端能源消费比重分析预测方法及应用[J]. 电力与能源, 2014, **35**(2): 156-161.
- Ye B, Qin D D, Yang X, *et al.* Analysis & forecasting method and application of electric energy proportion in final energy consumption[J]. Power & Energy, 2014, **35**(2): 156-161.
- [39] 郭晶, 王涛. 中国能源消费与经济增长关系的实证分析[J]. 统计与决策, 2017, (4): 138-141.
- [40] 陈操操, 张妍, 刘春兰, 等. 北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2139-2144.
- Chen C C, Zhang Y, Liu C L, *et al.* Energy consumption and GDP growth in Beijing: cointegration and causality analysis[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2139-2144.
- [41] 刘仁厚, 王革, 黄宁, 等. 中国科技创新支撑碳达峰、碳中和的路径研究[J]. 广西社会科学, 2021, (8): 1-7.
- [42] 共产党员网. 习近平: 深入分析推进碳达峰碳中和工作面临的形势任务 扎扎实实把党中央决策部署落到实处[EB/OL]. <https://www.12371.cn/2022/01/25/ARTI1643102781802738.shtml>, 2022-01-25.
- [43] 杨俊闯, 赵超. K-Means 聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, **55**(23): 7-14, 63.
- Yang J C, Zhao C. Survey on K-Means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, **55**(23): 7-14, 63.
- [44] Saroj, Kavita. Review: Study on simple K mean and modified K mean clustering technique[J]. International Journal of Computer Science Engineering and Technology, 2016, **6**(7): 279-281.
- [45] 刘巍巍, 王效科, 逮非, 等. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2881-2890.
- Liu W W, Wang X K, Lu F, *et al.* Regional and global estimates of carbon stocks and carbon sequestration capacity in forest ecosystems: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(9): 2881-2890.
- [46] 张连凯, 金鑫. 实现碳达峰、碳中和的自然碳汇解决方案[N]. 中国矿业报, 2021-07-30(03).
- [47] Climate Council. Deforestation and the carbon cycle[EB/OL]. <https://www.climatecouncil.org.au/deforestation/>, 2021-08-19.
- [48] The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>, 2021-10-19.
- [49] 中华人民共和国民政部. 中华人民共和国行政区划统计表[EB/OL]. <http://xzqh.mca.gov.cn/statistics/2020.html>, 2020-12-31.
- [50] 林婷, 吴烨, 何晓旖, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO₂ 排放[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- Lin T, Wu Y, He X Y, *et al.* Well-to-wheels fossil energy consumption and CO₂ emissions of hydrogen fuel cell vehicles in China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- [51] 中华人民共和国财政部, 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国科技部, 等. 财政部工业和信息化部科技部、发展改革委关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知[EB/OL]. http://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg2021/wg202101/202106/t20210604_3714689.htm, 2021-06-04.
- [52] 国务院新闻办公室. 国新办举行上半年工业通信业发展情况新闻发布会[EB/OL]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/42311/43346/index.htm>, 2020-07-31.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)