

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

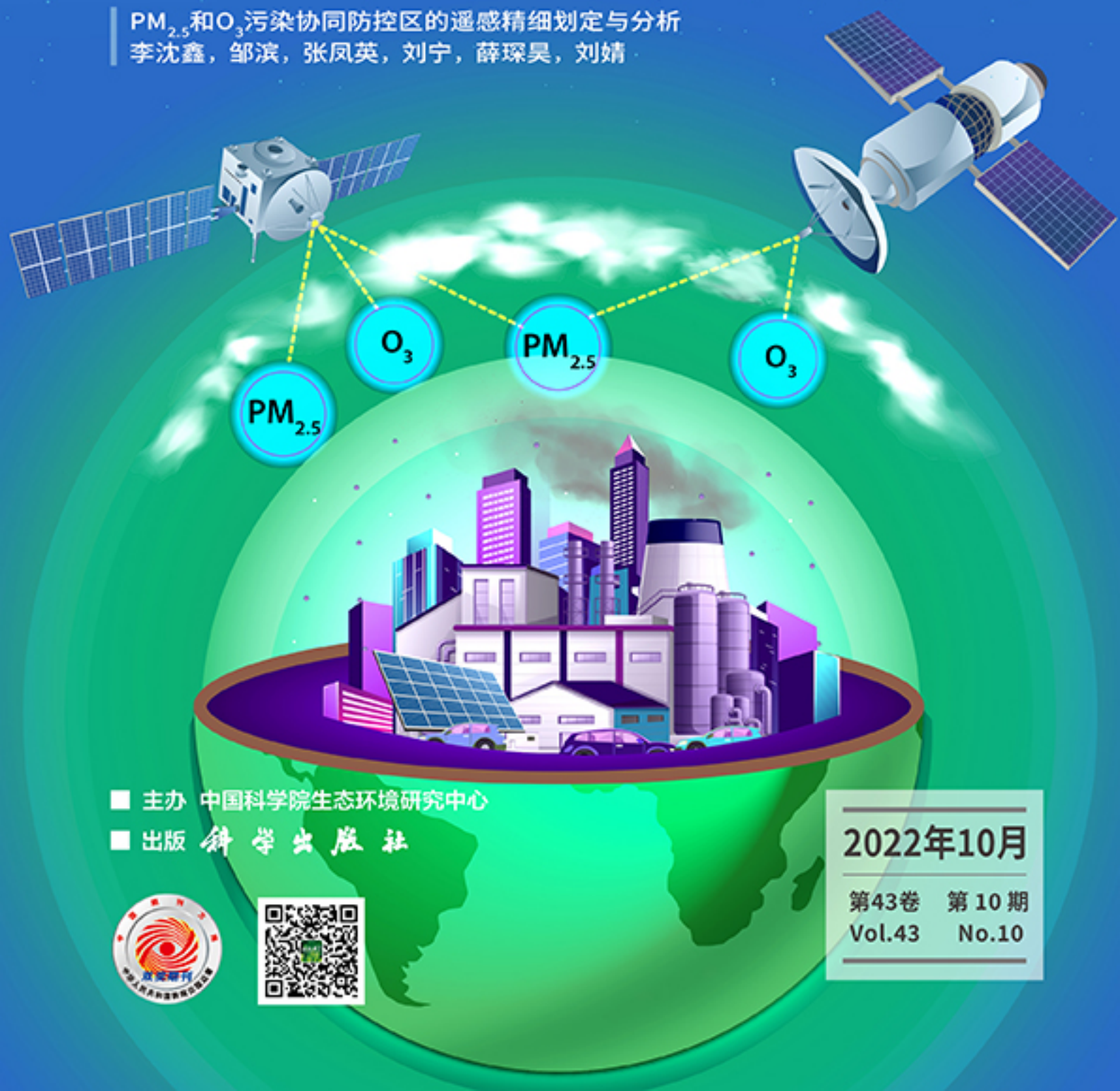
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图

薛英岚^{1,2,3}, 张静^{1,2}, 刘宇³, 陈瑜⁴, 孙健⁵, 蒋洪强^{1,2}, 张伟^{1,2}, 曹东^{1,2*}

(1. 生态环境部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012; 2. 生态环境部环境规划院, 京津冀区域生态环境研究中心, 北京 100012; 3. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 4. 冶金工业经济发展研究中心, 北京 100010; 5. 首钢集团有限公司技术研究院, 100043)

摘要: 钢铁行业的低碳绿色转型和率先煤耗和碳排放达峰, 将对我国实现整体碳达峰目标和经济高质量发展作出重要贡献。基于碳排放-能源集成模型, 对我国钢铁行业“双碳”目标下控煤降碳路径开展情景研究。结果表明, 我国钢铁行业很有可能在“十四五”前期实现碳达峰, 峰值 16.4 ~ 16.7 亿 t (含过程和间接排放), 作为主要消费能源的煤炭也将一起达峰, 峰值 4.6 ~ 4.7 亿 t 标煤 (含焦炭), 在最先进的强化情景 2035 年煤炭消费和碳排放将降至 2020 年的 38% 和 49%; 粗钢产量很大程度上主导了钢铁行业的碳达峰进程, 推进全废钢电炉短流程和加大废钢利用是碳达峰阶段最主要的控煤降碳措施。基于预测结果提出的钢铁行业控煤降碳路线图显示, 需求侧方面, 粗钢产量在不考虑“双碳”目标约束的情况下也会随工业化、城镇化水平逐渐达到发达国家水平而达到峰值并开始下降, 新能源相关基础设施建设在实现碳中和期间带来的钢材需求增长体量相对有限; 技术进步方面, 推广长流程节能降碳技术应用是短期内性价比较高的措施, 应重点推进高炉高效喷煤等技术的应用, 同时增大高炉球团矿平均配比, 远期碳捕集封存技术将具有较大的碳减排潜力; 产能结构方面, 推进全废钢电炉短流程是钢铁行业在碳达峰阶段的主要措施, 到“十四五”末期电炉钢占比将提高至 15% ~ 20%, 在碳中和目标下氢冶金是唯一具有超低碳排放潜力的生产工艺, 在未来随着可再生能源或余热余能生产的绿氢供应量提高, 氢冶金将成为与基于废钢的电炉短流程并重的钢铁生产工艺。

关键词: 钢铁行业; 碳达峰; 控煤; 路线图; 电炉短流程; 废钢利用

中图分类号: X322 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4392-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201081

Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target

XUE Ying-lan^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2}, LIU Yu³, CHEN Yu⁴, SUN Jian⁵, JIANG Hong-qiang^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, CAO Dong^{1,2*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. Center for Beijing-Tianjin-Hebei Regional Environment and Ecology, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 3. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. China Steel Development Research Institute, Beijing 100010, China; 5. Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: The low-carbon green transformation and the earlier peak in coal consumption and carbon emissions of the steel industry will make important contributions to the overall carbon peaking goal and high-quality economic development in China. Based on the carbon emission-energy integration model, we conducted a scenario study on the path of coal control and carbon reduction under the “carbon peak and neutralization” target of the steel industry. The results showed that the steel industry is likely to achieve a carbon peak in the early stage of the “14th Five-Year Plan,” with a peak value of 1.64-1.67 billion tons (including process and indirect emissions), and coal will also peak together as the main form of energy consumption, with a peak value of 460-470 million tons of standard coal (including coke). In the most aggressive intensification scenario, coal consumption and carbon emissions will drop to 38% and 49%, respectively, in 2035. The yield of crude steel will largely dominate the carbon peaking of the steel industry. Promoting the short process of all-scrap electric furnaces and increasing the utilization of scrap steel are the most important measures to control coal and reduce carbon in the carbon peak stage. The roadmap for coal control and carbon reduction based on the forecasted results showed that, on the demand side, the yield of crude steel will reach its peak and begin to decline, with the level of industrialization and urbanization gradually reaching the level of developed countries, even without considering the constraints of the carbon peak and neutralization target, the growth of steel demand brought about by the construction of new energy-related infrastructure during the period of achieving carbon neutrality is relatively limited. In terms of technological progress, promoting the application of long-process energy-saving and carbon-reducing technology is a cost-effective measure in the short term, and by increasing the average ratio of blast furnace pellets at the same time, the carbon capture and storage technology will have greater carbon emission reduction potential in the long term. In terms of production capacity structure, promoting the short process of all-scrap electric furnaces is the main measure of the steel industry in the carbon peak stage, and the proportion of electric furnace steel will increase to 15%-20% by the end of the “14th Five-Year Plan” period. Under the carbon neutrality target, hydrogen metallurgy is the only production process with ultra-low carbon emission potential. In the future, with the increase in the supply of green hydrogen produced by renewable energy or waste heat, hydrogen metallurgy will become a steel production process that is as important as the short process of electric furnaces based on scrap steel.

Key words: steel industry; carbon peaking; coal control; roadmap; electric arc furnace; scrap steel utilization

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(72140008, 72140004, 72125010, 71974186)

作者简介: 薛英岚(1990 ~), 男, 博士(后), 主要研究方向为产业经济与温室气体减排, E-mail: xueyl@casid.cn

* 通信作者, E-mail: caodong@caep.org.cn

我国是世界上煤炭消费和二氧化碳排放最多的国家,2020年煤炭消费和碳排放分别占世界总量54%和30%^[1,2]。在积极应对气候变化成为全球共识的背景下,我国明确提出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。由于以煤为主的能源结构,煤炭控制将显著影响中国的碳达峰进程^[3]。钢铁行业是仅次于火电的煤耗和碳排放主要部门,2019年钢铁行业煤炭消费量占能源消费总量的17%以上,二氧化碳排放占能源活动相关排放总量的15%以上^[4]。在“双碳”目标背景下,钢铁行业的低碳绿色转型和率先煤耗和碳排放达峰,将对我国实现整体达峰目标和经济高质量发展作出重要贡献^[5,6]。

目前关于钢铁行业控煤降碳路径研究,整体可分为两类:一类是从宏观层面的“自上而下”模式,聚焦钢铁行业能源消费和碳排放的影响因素,基于生产函数以集约化形式体现不同措施和政策情景下钢铁行业的煤耗和碳排放趋势,如Shen等^[7]采用LMDI方法识别出粗钢产量、突破性技术进步和生产工艺结构是影响钢铁行业能耗和碳排放的关键驱动因素,并基于此预测了BAU、NDC、2℃和1.5℃情景下钢铁行业碳排放;吴凡等^[8]基于CGE和多目标优化模型求解了满足累积成本最小条件的钢铁生产技术路径,得到未来钢铁行业的技术路线、能源消费和碳排放情景。另一类是以“自下而上”模式,通过设定富含技术细节的活动水平、技术组合、煤耗和碳排放形式来预测钢铁行业未来的发展路径,与“自上而下”模式相比可以展现更多的路径细节,为决策提供更为详细的参考信息。典型研究如上官钦等^[9]从控制产量、资源、能源和生产流程脱碳化,发展节能低碳技术等角度定性提出钢铁行业“碳达峰”、“碳中和”的实施路径;Tan等^[10]评估了主流节煤节电技术在不同情景下的减排潜力,并提出钢铁行业不同阶段优先推广的技术清单;Ren等^[11]综述了钢铁行业节煤降碳技术目前的成本、

效益、减排潜力和应用现状,基于生命周期方法将不同工序和同类型的技术加以整合,并提出未来钢铁行业发展氢冶金和碳捕获技术的经济可行性。

有研究表明,我国钢铁行业已接近碳排放达峰^[4,9,12,13],但不同研究对未来粗钢产量和碳排放峰值的预测结果有较大差异,对达峰路径及面向碳中和的展望尚未形成系统性结论,且研究主要集中于钢铁行业的碳排放领域,对煤炭消耗及其对碳排放影响的宏观性研究相对较少。此外,由于钢铁行业是支撑国民经济发展的重要原材料行业,新发展格局下的产业和经济发展态势也将在很大程度上影响钢铁行业规模,既有研究在此方面多偏保守^[14]。

基于以上研究进展和局限,本文基于环境规划院研发的碳排放-能源集成模型(integrated carbon and energy model, ICEM),对我国钢铁行业“双碳”目标下控煤路径开展情景研究,分别以2020年和2035年为基准年和目标年,全面考虑社会经济发展阶段、新发展格局下游产业需求、不同节能降碳措施和技术潜力以及资源禀赋等,提出钢铁行业控煤降碳路线图。

1 材料与方法

1.1 ICEM模型及其钢铁行业模块

碳排放-能源集成模型(ICEM)涵盖了能源生产、工业(包括各行业)、建筑(包括生活和第三产业)、交通等全社会用能和碳排放部门,其机制由人口、GDP、国民经济部门等社会经济驱动因子决定各类能源(煤、石油、天然气、电力等)和原材料(粗钢、水泥等)需求,在不同情景下确定未来技术扩散率和技术组合,基于终端用能部门(或工序)的用能(耗煤、耗电等)强度和碳排放强度,得到终端能源消费量和碳排放量。

钢铁行业模块的基本框架如图1所示。在需求端,根据不同预测需求可选择基于人口、GDP、工业化水平、城镇化水平预测未来产品产量和产业规

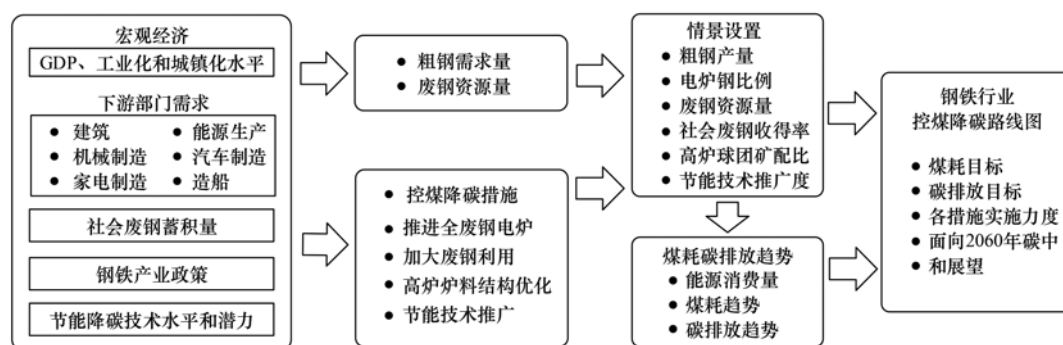


图1 ICEM模型钢铁模块结构

Fig. 1 Structure of the steel module of ICEM model

模,或基于下游的建筑、机械、能源生产和汽车制造等部门发展趋势预测未来需求.在供给端根据钢铁生产工艺分为高炉-转炉长流程和电炉短流程,长流程又分为烧结(球团)、炼焦、炼铁和炼钢等工序,综合考虑高炉球团矿配比、炼钢废钢率等钢铁生产参数的影响,并将各工序的节能降碳技术纳入模型.由于钢铁行业氢能冶金和碳捕获与封存(carbon capture and storage, CCS)技术成熟度较低^[15,16],没有大规模商业化推广,因此本文未将其纳入主要控煤降碳措施,而是作为钢铁行业面向碳中和的革命性技术加以讨论.

1.2 研究边界与核算方法

钢铁行业煤耗核算边界包括烧结、炼焦、炼铁等工序过程中的煤炭和焦炭消耗;碳排放核算边界包括燃料燃烧、生产过程等直接排放,以及净购入时候用的电力等间接排放.钢铁行业煤耗和碳排放可表达为:

$$\begin{cases} CC_{\text{steel}} = \sum (Y_i \cdot CI_{i,j}), \\ EM_{\text{steel}} = \sum (Y_i \cdot EI_{i,j,k} \cdot ef_k). \end{cases}$$

式中, CC_{steel} 和 EM_{steel} 分别为钢铁行业的煤炭消费和碳排放,其中煤炭消费包括煤和焦炭; i 为钢铁生产工艺,包括高炉-转炉长流程和电炉短流程; Y_i 为长流程或短流程的粗钢产量; j 为钢铁生产工序,其中长流程包括烧结、球团、炼焦、高炉炼铁、转炉炼钢和钢铁加工,短流程为电炉炼钢; $CI_{i,j}$ 为长流程或短流程工序 j 的单位产品耗煤系数; k 为钢铁生产过程中的能源消费种类; $EI_{i,j,k}$ 为单位产品碳排放系数; ef_k 为能源 k 的碳排放系数.

1.3 数据来源

本文社会经济方面的数据包括现状年 GDP、人口、城镇化率、工业增加值、生铁和粗钢产量等,主要来自文献[17,18],未来宏观经济和钢铁产业预测参考文献[19,20],结合世界发达国家的钢铁产业发展规律,城镇化率参考文献[21]和发达国家现有水平.各工序的单位产品能耗、煤耗、碳排放等数据主要参考冶金工业规划研究院和冶金科技发展中心的研究成果^[22,23],节能降碳技术参数主要参考 Tan 等^[10]和 Ren 等^[11]的研究成果,并综合考虑炼钢废钢比和高炉炉料球团矿配比等对钢铁生产煤耗和碳排放的影响.

1.4 情景设定

1.4.1 情景描述

粗钢产量和控煤降碳措施的实施力度是影响钢铁行业煤耗和碳排放的主要因素.本文设定基准情景(business as usual, BAU)、政策情景和强化情景这3个钢铁行业发展情景,各情景控煤降碳措施包

括推进全废钢电炉短流程、加大废钢利用、高炉炉料结构优化和节能技术改造,不同情景的控煤降碳路径通过设定各措施在不同阶段的发展水平来表征:基准情景是按照现有发展趋势的延续;政策情景考虑碳达峰目标下对现有技术和经济可行的措施采取更高应用比例;强化情景考虑碳中和目标约束,减小达峰到中和的难度,对现有措施采取最高潜力的应用比例.

1.4.2 粗钢产量预测

本文基于粗钢消费系数和下游部门需求方法,并结合我国处于工业化中后期的发展阶段和2021年开始实施的压减粗钢产量政策,预测未来的粗钢需求.其中消费系数参照历史单位 GDP 粗钢消费系数变化情况^[14],预计“十四五”、“十五五”和“十六五”期间单位 GDP 粗钢强度年均分别下降 4.5%、6% 和 7%,得到未来单位 GDP 粗钢消费强度和粗钢产量;下游部门需求法分析房屋建筑、机械、汽车和能源生产等部门的需求情况,并考虑装配式建筑、风电光伏等新能源推广可能带来的粗钢需求增量,得到未来的粗钢需求.根据两种方法预测的未来钢铁行业产品产量及相应的活动水平,在基准情景下采用基于消费系数法的粗钢产量预测结果,在政策情景下采用下游部门需求法的粗钢产量预测结果.由于强化情景更多考虑碳中和目标约束,本文采用 Ren 等^[4]基于 Carbon Neutrality Scenario 下的预测结果作为强化情景的粗钢产量.各情景的粗钢产量预测如图2所示.

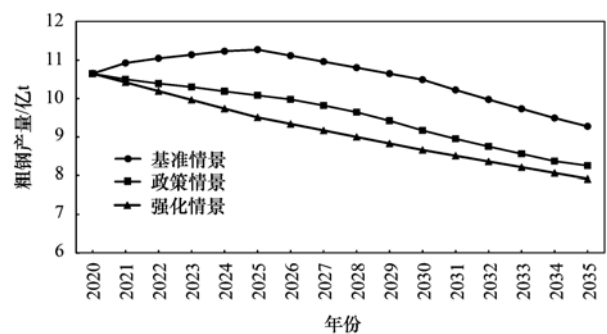


图2 各情景粗钢产量预测

Fig. 2 Crude steel yield forecast for each scenario

1.4.3 措施实施力度设定

基准、政策和强化情景下各措施的实施力度如表1所示.

(1)推进全废钢电炉短流程 全废钢电炉短流程的单位产品煤耗、碳排放显著低于长流程,因此该措施将是近期钢铁行业控煤降碳的重要措施.2020年,中国钢铁行业电炉钢占比10%左右,远低于世界其他主要产钢国^[24].文献[25]提出“到2025年电炉钢产量占粗钢总产量比例提升至15%以上,

力争达到 20%”的目标.不同情景下电炉钢占比如 表 1 所示.

表 1 各情景措施实施力度

Table 1 Intensity of implementation of measures in each scenario

措施	参数	情景	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
推进全废钢电炉短流程	电炉钢占比/%	基准情景	10	12	15	20
		政策情景	10	15	20	25
		强化情景	10	18.2	26.3	34.4
加大废钢利用	社会废钢收得率/%	基准情景	1.4	1.8	2.2	2.6
		政策情景	1.4	1.9	2.5	3
		强化情景	1.4	2	2.6	3.2
	废钢资源量/亿 t	基准情景	2.6	3.4	3.9	4.4
		政策情景	2.6	3.4	4.2	4.9
		强化情景	2.6	3.4	4.3	5.1
高炉炉料结构优化	高炉球团矿配比/%	基准情景	13	15.3	17.7	20
		政策情景	13	18.7	24.3	30
		强化情景	13	22	31	40

(2)加大废钢利用 目前,虽然我国废钢消耗量居世界首位,但相对于粗钢产量而言,废钢资源仍严重不足^[26].废钢资源充足与否,直接关系到炼钢的炉料结构和钢铁工业的流程结构.随着社会废钢资源产生量的不断增加和再生废铁原料进口的逐步放开,废钢供应状况将逐步得到改善,钢铁工业可供废钢量将大量增加.文献[27]提出到 2025 年废钢利用量达到 3.2 亿 t.推进废钢资源利用措施在情景设定中主要为设定未来废钢资源量和炼钢废钢比.随着生产和加工工艺进步,自产废钢和加工废钢的回收率有所下降,同时随着社会废钢收得率的提升,回收废钢将持续增长.不同情景下社会废钢收得率、废钢资源量和炼钢废钢比如表 1 所示.

(3)高炉炉料结构优化 高炉炉料结构优化措施主要是提高高炉中球团矿的配比.目前我国长流程高炉炉料中球团矿整体配比约为 13%,远低于欧

盟等先进产钢国水平^[28].球团矿的单位产品能耗、碳排放和污染物排放均远低于烧结矿,但由于球团矿对铁矿石品位要求相对较高,因此制约国内炉料结构中球团矿比例大幅提升的主要因素在于可供资源的稀缺^[29].考虑到资源禀赋、国内铁矿市场因素以及环保限产对钢厂提高球团矿配比产生的推动作用,设定球团矿配比在基准、政策和强化情景分别以低速、中速和高速发展,不同情景下球团矿配比如表 1 所示.

(4)节能技术改造 钢铁行业的节能技术改造主要为在各工序进行余热、余能和余压的回收循环利用.本文主要考虑钢铁生产过程中各工序的节能降碳技术,参考 Tan 等^[10]对各项技术的推广度和减排潜力的研究结果,在基准、政策和强化情景中,分别对各技术进行低速、中速和高速推广.具体设定参数如表 2 所示.

表 2 不同情景节能技术推广度

Table 2 Application rate of energy-saving technologies in each scenario

工序	节能技术	2020 年	基准情景推广度/%			政策情景推广度/%			强化情景推广度/%		
		推广度/%	2025 年	2030 年	2035 年	2025 年	2030 年	2035 年	2025 年	2030 年	2035 年
焦化	干熄焦	85	90	95	95	95	99	99	95	99	99
	煤调湿	9	20	30	40	30	40	50	40	50	60
烧结	烧结余热回收利用技术	20	30	40	50	30	40	50	40	50	60
	厚料层烧结技术	80	90	95	95	95	99	99	95	99	99
	降低烧结漏风率技术	70	80	85	90	80	90	99	80	90	99
	低温烧结工艺技术	60	70	75	80	70	80	90	70	80	90
高炉炼铁	高炉高效喷煤技术	40	50	55	60	50	60	70	55	70	80
	高炉炉顶煤气干式余压发电	83	90	95	95	95	99	99	95	99	99
	热风炉烟气双预热技术	5	20	30	40	30	40	50	40	50	60
	高炉煤气回收技术	94	95	99	99	95	99	99	95	99	99
	高炉渣综合利用技术	1	20	30	40	30	40	50	40	50	60
转炉炼钢	转炉煤气显热回收技术	40	50	55	60	50	60	70	55	70	80
	转炉烟气高效利用技术	15	20	30	40	30	40	50	40	50	60
	转炉渣显热回收技术	5	20	30	40	30	40	50	40	50	60
电炉炼钢	废钢预热技术	10	20	30	40	30	40	50	40	50	60
	电炉优化供电技术	15	20	30	40	30	40	50	40	50	60
	电炉烟气余热回收技术	10	20	30	40	30	40	50	40	50	60
	泡沫渣利用技术	30	40	45	50	40	50	60	40	50	60

2 结果与讨论

2.1 钢铁行业煤炭消费和 CO₂ 排放预测

不同情景下钢铁行业煤炭消费量和 CO₂ 排放预测结果如图 3 所示: ①基准情景下, 钢铁行业煤炭消费和碳排在“十四五”前期有一定的增长趋势, 煤耗和碳排放均在 2023 年达峰, 煤耗峰值(含焦炭)为 4.7 亿 t(以标煤计, 下同), 碳排放(含间接排放)峰值 16.7 亿 t, 达峰后经历 3~4 a 平台期, “十五五”期间开始下降, 到 2030 年(全国达峰年)煤耗和碳排放分别降至 4.1 亿 t 和 14.1 亿 t。②政策情景下, 钢铁行业煤炭消费和碳排放呈下降趋势, 到 2025 年煤耗和

碳排放分别降至 3.8 亿 t 和 14.1 亿 t, 到 2030 年分别降至 3.0 亿 t 和 11.4 亿 t。③强化情景下, 钢铁行业煤炭消费和碳排放比政策情景下降更快, 到 2025 年煤耗和碳排放分别降至 3.3 亿 t 和 12.9 亿 t, 到 2030 年分别降至 2.4 亿 t 和 10.2 亿 t。

在我国城镇化水平逐步达到发达国家水平, 以及国家严控钢铁行业产能和产量的背景下, 钢铁行业远早于国家整体的 2030 年碳达峰目标, 有效保证了工业和全社会的按时达峰。“十六五”期间, 钢铁行业煤炭消费和碳排放继续下降, 到 2035 年煤炭消费和碳排放分别降至峰值的 67.5% 以下和 72.4% 以下。

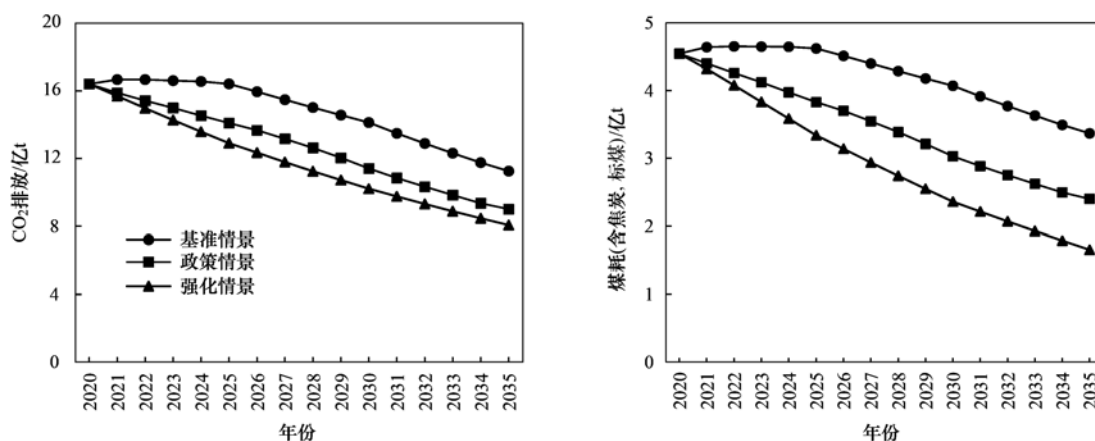


图3 钢铁行业煤炭消费和碳排放预测

Fig. 3 Prediction results of coal consumption and carbon emissions in the steel industry

与大多数对钢铁行业未来碳排放预测的研究判断一致^[30-32], 我国钢铁行业很有可能在“十四五”前期达到碳排放峰值, 作为主要消费能源的煤炭也将一起达峰。随着粗钢产量的逐年下降以及控煤降碳措施、节能降碳技术的推广, 钢铁行业煤炭消费和碳排放将持续保持下降趋势。在最激进的强化情景下, 钢铁行业 2035 年煤炭消费和碳排放将降至 2020 年的 38% 和 49%。

2.2 分措施控煤降碳贡献

以基准情景的煤炭消费和碳排放为基准核算政策和强化情景产量差异和各措施的减煤降碳贡献, 如图 4 和图 5 所示。从需求端来看, 情景间的产量差异带来了约一半的减煤降碳贡献, 在很大程度上主导了钢铁行业的碳达峰进程, 粗钢产量的峰值也影响到碳排放峰值。总体而言, 钢铁需求在不考虑“双碳”目标约束的情况下, 也会随工业化、城镇化水平逐渐达到发达国家水平而达到峰值并开始下降^[33]。新建建筑的减少、存量建筑寿命的延长将降低建筑行业对钢铁消费的支撑作用; 风电、光伏等新能源生产行业和汽车制造行业将带来一定需求增量, 但不足以抵消整体钢铁需求下降趋势。

供给端贡献了钢铁行业另一半的减煤和降碳量: ①得益于单位产品能耗和碳排放显著低于高炉-转炉长流程工艺, 推进基于废钢的电炉短流程成为钢铁行业碳达峰进程中供给端重点实施的措施, 随着新式电弧炉技术的推广和废钢资源供给的日益充足, 电炉钢占比将逐年提高^[34], 政策情景下, 推进全废钢电炉短流程措施年均减少 1 833 万 t 标煤(含焦炭, 下同), 贡献了 48.5% 的供给端减煤量, 年均减碳量 0.56 亿 t; 强化情景下年均减煤量 4 236 万 t 标煤, 年均减碳量 1.33 亿 t。②扣除掉用于供给电炉钢的部分, 废钢应用于长流程工艺时也会产生较大的减煤和碳减排效益^[26], 从而逐渐成为与铁矿石并重的铁素原料。政策情景下, 长流程加大利用废钢将带来年均 1 349 万 t 标煤的减煤和 0.49 亿 t 的减碳效益, 增强废钢铁回收加工产能也成为保障钢铁行业控煤降碳的重要措施。③相较而言, 节能技术改造和高炉炉料结构优化的减煤降碳贡献相对较小。现有高炉-转炉长流程生产设备推广节能技术是最有效的短期碳减排选择, 因为其不涉及引入昂贵的新生产流程^[35], 但未来随着技术推广度逐步达到饱和和长流程炼钢产能的降低, 节能技术改造的减煤降

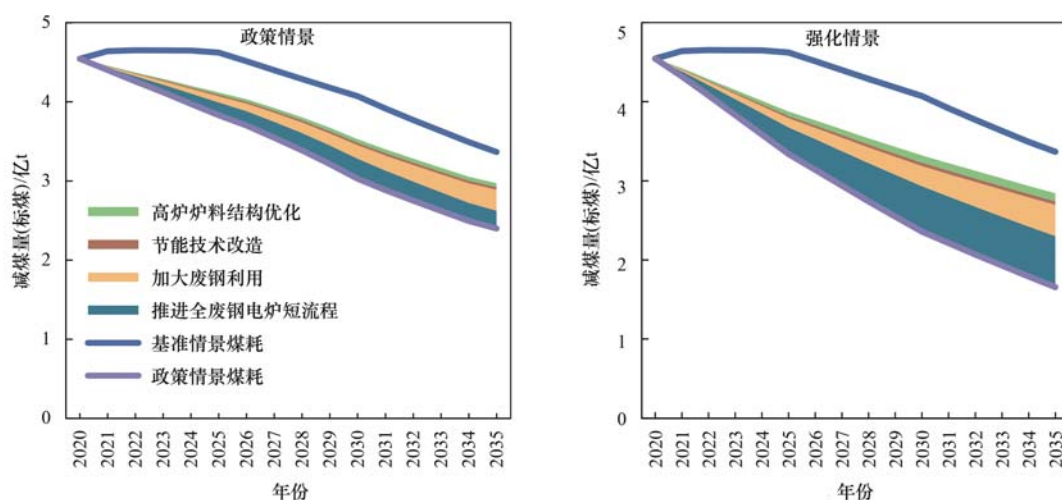


图4 钢铁行业产量差异和不同措施的减煤贡献

Fig. 4 Contribution of yield differences and measures to coal consumption reduction in the steel industry

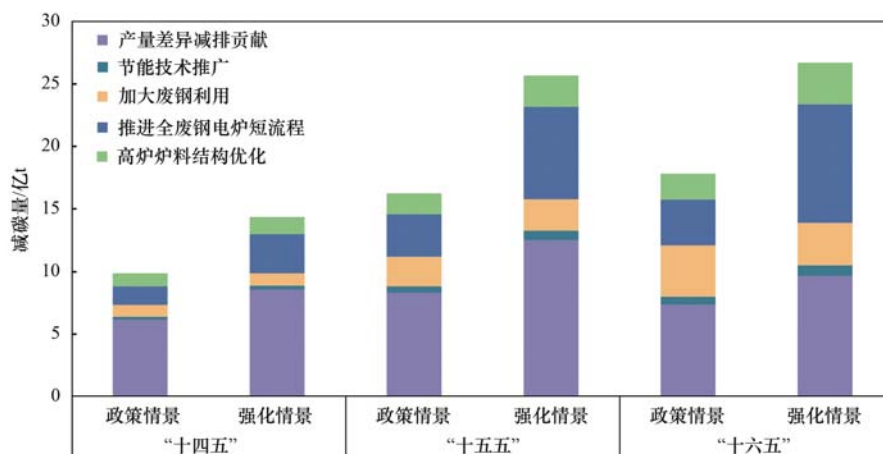


图5 钢铁行业产量差异和不同措施的累计降碳贡献

Fig. 5 Contribution of yield differences and measures to cumulative carbon emission reduction in the steel industry

碳贡献将有所下降.在“双碳”目标和钢铁行业环保压力之下,长流程高炉的球团矿配比将进一步提升,虽然未来转炉钢占比将有所下降,但球团矿是氢能炼铁的重要原料之一,因此在面向碳中和过程中将逐步取代烧结矿.

2.3 钢铁行业控煤降碳路线图

根据以上对“双碳”背景下钢铁行业在控煤降碳措施下的煤炭消费和碳排放预测结果,得到我国钢铁行业控煤降碳路线图,从需求侧路径、技术路径和产能结构路径这3个方面描述未来钢铁行业供需的规模、结构以及各措施潜在施行的力度.

2.3.1 需求侧路径

目前钢材消费主要来自建筑行业,包括民用、商用住宅以及各类城市基础设施建设,其他主要用钢部门包括机械制造、汽车制造和能源生产,家电制造、造船和行业^[36].对于建筑行业,文献^[37]提出到2025年“装配式建筑占新建建筑面积比例达到25%”的目标,因此在“十四五”期间建筑业钢材需

求增量集中在新型城镇化和老旧小区改造方面.长期来看,我国工业化已达到中后期水平^[38],城镇化在2030~2035年将达到发达国家水平^[39],因此未来建筑行业对钢材消费需求将逐步减弱.对于机械制造业,工程机械和化工专用装备等传统高耗钢产业增速正在放缓,新型智能机械和高性能机械对钢材需求将有所提高.对于汽车行业,在当前从传统燃油汽车转向新能源汽车的窗口期,钢材需要将持续提高,但未来随着汽车轻量化和共享化水平的提高,在远期汽车行业钢材需求将出现下降趋势.对于能源生产行业,“双碳”背景下新能源和智能电网的相关基础设施建设将带来一定的需求增长,但体量相对较小,年均需求量约1 200万t^[33].

2.3.2 技术路径

我国以高炉-转炉为主的钢铁冶炼设备普遍投产时间相对较短,距离退役年限还有一定时间,推广长流程节能降碳技术应用是短期内性价比比较高的措施.根据目前各项技术的推广程度,干熄焦、厚料层

烧结技术、高炉炉顶煤气干式余压发电、高炉煤气回收等技术已应用较为广泛,未来应重点推进煤调湿、烧结余热回收利用、高炉高效喷煤、热风炉烟气双预热、转炉烟气高效利用等技术的应用。此外,推进高炉大比例球团技术的研究和推广利用,到2035年高炉球团矿平均配比达到30%以上。

除排放源头控制外,碳捕集封存(CCS)技术也可应用于钢铁行业,但目前钢铁行业 CCS 技术发展水平较低,尚处于试点示范阶段。CCS 可分为燃烧前捕集(材料和燃料的脱碳)和燃烧后捕集(排气处理)^[40]。当前,钢铁行业中主流的 CCS 技术是将焦化和高炉炼铁尾气燃烧后捕集 CO₂,燃烧后捕集技术包括化学吸收、物理吸收和膜分离等。根据试点数据,目前国内钢铁生产 CCS 成本(以 CO₂ 计,下同)为 65 美元·t⁻¹,包括设备投资以及捕获和运输的成本^[41],到 2030 年有望降至 20 美元·t⁻¹^[42],届时其推广潜力将大幅提高。

2.3.3 产能结构路径

推进全废钢电炉短流程是钢铁行业在碳达峰阶段的主要措施,到“十四五”末期,电炉钢占比将提高至 15%~20%,电炉钢产量增至 1.5~1.7 亿 t。随着社会废钢蓄积量的逐年升高,新建电炉短流程炼钢产能将重点分布在产生废钢资源的城市周边,现有钢铁产能分布将有所改变^[43]。到“十五五”和“十六五”阶段,随着废钢供给的进一步充足,电炉钢占比将提升至 25%~35%。

针对“碳中和”的零碳排放目标,氢冶金是钢铁行业唯一具有超低碳排放潜力的工艺选择^[44]。氢冶金原理是在炼铁过程中使用氢代替焦炭作为还原剂,被认为是可以从根本上去除钢铁生产过程中的碳排放^[45,46]。多个国家和地区已对氢冶金开展研究,其中一些已进行较大规模的实证应用,我国河钢、宣钢已建成全球首例 60 万 t(一期)氢冶金示范工程。根据目前工艺能力,生产 1 t 直接还原铁需要 12 GJ 氢^[47],在未来随着可再生能源或余热余能生产的绿氢供应量提高,氢冶金的碳减排潜力将有明显提升^[48],将逐渐取代高炉-转炉长流程,成为与基于废钢的电炉短流程并重的钢铁生产工艺^[49]。目前已有对我国在远期氢冶金规模的讨论^[4,9],但整体不确定性较大。

3 建议

(1) 坚持供给侧改革,严控钢铁行业产能产量

深入推进钢铁行业供给侧结构性改革,严禁以任何名义、任何方式备案新增钢铁产能的项目。对于确有必要建设的钢铁冶炼项目需严格执行产能置

换办法,加大长流程减量置换的比例,完善相关置换政策细节要求。对于列入鼓励率先实现碳达峰区域产能置换项目,宜采用全废钢电炉短流程工艺,并完善相关配套政策。

(2) 推进全废钢电炉短流程,鼓励短流程置换长流程

有序引导电炉短流程炼钢。鼓励有环境容量、有市场需求、有废钢保障、钢铁产能相对不足的地区积极承接转移产能,鼓励在城市和内陆地区布局中小型短流程电炉钢厂。长流程工艺集中且环境敏感地区,鼓励高炉-转炉长流程企业转型为全废钢电炉短流程企业。完善税收、电价补贴、碳交易配额等方面配套优惠政策。推广应用新型节能电炉冶炼和废钢预热等先进工艺技术,进一步降低原材料和能源消耗,提高节能、环保和降碳效率。

(3) 加大废钢资源回收利用,推进废钢资源回收体系建设

支持钢铁企业等牵头成立大型废钢回收加工配送企业,推进废钢回收、拆解、加工、分类、配送一体化发展,提升优质废钢资源保障能力。有序放开废钢资源进口,充分发挥进口废钢的市场调节作用,降低铁矿石的对外依存度。推动废钢现货、期货平台建设,促进形成公开透明有序的废钢定价机制。在废钢铁回收行业范围内统一所得税核定方法,推行简易征税办法试点,适当降低行业增值税税负,减轻废钢铁回收加工企业的税收负担。

(4) 优化原燃料结构,提高绿电使用比例

提高炼铁炉料球团矿配比,加大对“大比例使用球团矿”企业的政策支持,减少球团矿生产设备的限产比例,给予国内球团用铁精粉生产企业金融和税收等方面优惠政策。充分挖掘钢铁企业新能源及可再生能源利用潜力,鼓励企业因地制宜,充分利用风力、生物质能等可再生能源。鼓励钢铁企业以及以钢铁为核心的工业园区建设绿色微电网,优先利用可再生能源。

(5) 完善法律法规标准体系,建立健全钢铁行业碳金融体系

建立以钢铁行业应对气候变化为发展目标的低碳标准体系,分批和有序开展钢铁行业低碳领域标准化工作。发布钢铁行业碳排放分级绩效评价标准,推动钢铁行业全面开展低碳绩效评价工作,并将低碳绩效评价结果与差别水价、电价和停限产等地方政策挂钩。充分发挥市场机制对控制温室气体的作用,加快推进建立钢铁行业全国统一碳市场。加强碳减排的政策引导和激励,通过财政、税收、价格和金融等一系列调控政策,引导企业低碳转型。

4 结论

(1)我国钢铁行业很大可能在“十四五”前期实现煤炭消费和碳排放达峰,煤炭消费峰值在4.6亿t标煤左右(含焦炭),“十五五”期间开始持续下降。粗钢产量很大程度主导了钢铁行业煤炭消费和碳排放达峰进程,推进全废钢电炉短流程和加大废钢利用对控煤降碳的贡献也相对较大。

(2)新型城镇化建设和老旧小区改造所需的建筑钢材和新能源汽车制造所需的汽车用钢在近期内支撑钢铁消费增量,远期随着我国城镇化和工业化增速放缓将逐渐下降;新能源和智能电网的相关基础设施建设在我国实现碳中和期间将带来持续的钢材需求增长,但体量相对有限。整体而言钢铁需求在近期将开始呈现下降趋势。

(3)推广长流程节能降碳技术应用是短期内性价比比较高的措施,应重点推进煤调湿、烧结余热回收利用、高炉高效喷煤、热风炉烟气双预热、转炉烟气高效利用等技术的应用,同时增大高炉球团矿平均配比,优化高炉炉料结构。远期随着技术成熟度提高,碳捕集封存技术的投资和运行成本将显著降低,有望成为可大规模推广的碳减排技术。

(4)推进全废钢电炉短流程是钢铁行业在碳达峰阶段的主要措施,随着废钢供给的日益充足,电炉钢原料成本将逐渐降低,减少与转炉钢相比的价格劣势。到“十四五”末期,电炉钢占比预计将提高至15%~20%，“十五五”和“十六五”阶段进一步提升至25%~35%。面向碳中和目标,氢冶金是钢铁行业唯一具有超低碳排放潜力的生产工艺,在未来随着可再生能源或余热、余能生产的绿氢供应量提高,氢冶金将逐渐取代高炉-转炉长流程,成为与基于废钢的电炉短流程并重的钢铁生产工艺。

参考文献:

- [1] BP集团. BP世界能源统计年鉴2021[R]. 伦敦, 2021.
- [2] 联合国环境规划署. 2020年排放差距报告-执行摘要[R]. 内罗毕, 2020.
- [3] Chen X M, Liang Q M, Liu L C, *et al.* Critical structural adjustment for controlling China's coal demand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **235**: 317-327.
- [4] Ren M, Lu P T, Liu X R, *et al.* Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. *Applied Energy*, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117209.
- [5] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, **23**(2): 17-24.
Yu B Y, Zhao G P, An R Y, *et al.* Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, **23**(2): 17-24.
- [6] 李新创, 李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. *钢铁*, 2019, **54**(8): 224-231.
Li X C, Li B. Low carbon transition path of China's iron and steel industry under global temperature-control target[J]. *Iron and Steel*, 2019, **54**(8): 224-231.
- [7] Shen J L, Zhang Q, Xu L S, *et al.* Future CO₂ emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **326**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129354.
- [8] 吴凡, 谢文秀. 低碳约束下的中国钢铁行业能耗情景分析[J]. *现代化工*, 2019, **39**(1): 12-17.
Wu F, Xie W X. Energy consumption scenario analysis of China's steel industry under low carbon constraints[J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, **39**(1): 12-17.
- [9] 上官方钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. *中国冶金*, 2021, **31**(9): 15-20.
Shangguan F Q, Liu Z D, Yin R Y. Study on implementation path of “carbon peak” and “carbon neutrality” in steel industry in China[J]. *China Metallurgy*, 2021, **31**(9): 15-20.
- [10] Tan X C, Li H, Guo J X, *et al.* Energy-saving and emission-reduction technology selection and CO₂ emission reduction potential of China's iron and steel industry under energy substitution policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **222**: 823-834.
- [11] Ren L, Zhou S, Peng T D, *et al.* A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **143**, doi: 10.1016/j.rser.2021.110846.
- [12] Li Z L, Dai H C, Song J N, *et al.* Assessment of the carbon emissions reduction potential of China's iron and steel industry based on a simulation analysis[J]. *Energy*, 2019, **183**: 279-290.
- [13] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. *钢铁*, 2021, **56**(10): 152-163.
Zhang Q, Shen J L, Xu L S. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel industry[J]. *Iron and Steel*, 2021, **56**(10): 152-163.
- [14] 黑色金属矿产资源强国战略研究专题组. 黑色金属矿产资源强国战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [15] 郭学益, 陈远林, 田庆华, 等. 氢冶金理论与方法研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, **31**(7): 1891-1906.
Guo X Y, Chen Y L, Tian Q H, *et al.* Research progress on hydrogen metallurgy theory and method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, **31**(7): 1891-1906.
- [16] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业 CO₂ 减排技术及成本研究[J]. *环境工程*, 2021, **39**(10): 23-31, 40.
Dong J C, Wang X Y, Cai B F, *et al.* Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China[J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(10): 20-31, 40.
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [18] 中国钢铁工业协会. 中国钢铁工业年鉴2020[M]. 北京: 中国冶金出版社, 2021.
- [19] 全国人民代表大会. 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]. <http://www.npc.gov.cn/npc/kgfb/202103/bf13037b5d2d4a398652ed253cea8eb1.shtml>, 2021-03-13.
- [20] 国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm, 2015-05-18.

- [21] 中共中央国务院. 国家新型城镇化规划(2014-2020年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2644805.htm, 2014-03-16.
- [22] 冶金工业规划研究院. 钢铁行业煤炭消费总量控制方案和政策研究[R]. 北京: 冶金工业规划研究院, 2020.
- [23] 冶金工业经济发展中心. 钢铁行业“十四五”煤炭消费总量控制规划[R]. 北京: 冶金工业经济发展中心, 2020.
- [24] World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2021 [EB/OL]. <https://www.worldsteel.org/zh/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>, 2021-12-14.
- [25] 工业和信息化部. 关于推动钢铁工业高质量发展的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. <https://www.cnstock.com/image/202012/31/20201231155427129.pdf>, 2020-12-31.
- [26] 上官方钦, 郇秀萍, 周继程, 等. 中国废钢资源发展战略研究[J]. 钢铁, 2020, **55**(6): 8-14.
Shangguan F Q, Li X P, Zhou J C, *et al.* Strategic research on development of steel scrap resources in China [J]. Iron and Steel, 2020, **55**(6): 8-14.
- [27] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm, 2021-07-01.
- [28] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理, 2018, (9): 53-58.
- [29] Bai K K, Liu L C, Pan Y Z, *et al.* A review: research progress of flux pellets and their application in China [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, **48**(9): 1048-1063.
- [30] Chen W Y, Yin X, Ma D. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions [J]. Applied Energy, 2014, **136**: 1174-1183.
- [31] Wen Z G, Wang Y H, Li H F, *et al.* Quantitative analysis of the precise energy conservation and emission reduction path in China's iron and steel industry [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **246**: 717-729.
- [32] An R Y, Yu B Y, Li R, *et al.* Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry [J]. Applied Energy, 2018, **226**: 862-880.
- [33] 陈济, 李抒苒, 李相宜, 等. 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路[R]. 北京: 落基山研究所, 2021.
- [34] 上官方钦, 殷瑞钰, 李煜, 等. 论中国发展全废钢电炉流程的战略意义[J]. 钢铁, 2021, **56**(8): 86-92.
Shangguan F Q, Yin R Y, Li Y, *et al.* Discussion on strategic significance of developing full scrap EAF process in China [J]. Iron and Steel, 2021, **56**(8): 86-92.
- [35] Zhou K L, Yang S L. Emission reduction of China's steel industry: progress and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **61**: 319-327.
- [36] 冶金工业规划研究院. 2021年中国和全球钢铁需求预测成果[R]. 北京: 冶金工业规划研究院, 2020.
- [37] 国务院办公厅. 关于促进建筑业持续健康发展的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content_5170625.htm, 2017-02-24.
- [38] 尹虹潘. 中国工业化水平的重新测度[J]. 经济学家, 2019, (3): 35-42.
Yin H P. Re-measurement of China's industrialization level [J]. Economist, 2019, (3): 35-42.
- [39] 乔文怡, 李玢, 管卫华, 等. 2016-2050年中国城镇化水平预测[J]. 经济地理, 2018, **38**(2): 51-58.
Qiao W Y, Li L, Guan W H, *et al.* Prediction of urbanization level in China; 2016-2050 [J]. Economic Geography, 2018, **38**(2): 51-58.
- [40] Zhang X, Fan J L, Wei Y M. Technology roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China [J]. Energy Policy, 2013, **59**: 536-550.
- [41] Ding H, Zheng H R, Liang X, *et al.* Getting ready for carbon capture and storage in the iron and steel sector in China: assessing the value of capture readiness [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.jclepro. 2019.118953.
- [42] Tonomura S, Kikuchi N, Ishiwata N, *et al.* Concept and current state of CO₂ ultimate reduction in the steelmaking process (COURSE50) aimed at sustainability in the Japanese steel industry [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2016, **2**(3): 191-199.
- [43] 徐建伟, 计晶韵, 郇环. 全球钢铁企业布局的新特点及城市钢厂发展启示[J]. 开发研究, 2017, (6): 41-48.
- [44] Karakaya E, Nuur C, Assbring L. Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: towards a hydrogen-based future? [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **195**: 651-663.
- [45] Yilmaz C, Turek T. Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **164**: 1519-1530.
- [46] 李少飞, 顾华志, 黄奥. 钢铁行业氢冶金技术的发展初探[J]. 耐火材料, 2021, **55**(4): 360-363.
Li S F, Gu H Z, Huang A. Development of hydrogen metallurgy technology in iron and steel industry [J]. Refractories, 2021, **55**(4): 360-363.
- [47] Gielen D, Saygin D, Taibi E, *et al.* Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: a case study [J]. Journal of Industrial Ecology, 2020, **24**(5): 1113-1125.
- [48] 张真, 杜宪军. 碳中和目标下氢冶金减碳经济性研究[J]. 价格理论与实践, 2021, (5): 65-68.
Zhang Z, Du X J. Economic research of carbon reduction in hydrogen metallurgy under the goal of carbon neutralization [J]. Price: Theory & Practice, 2021, (5): 65-68.
- [49] Vogl V, Åhman M, Nilsson L J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **203**: 736-745.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)