

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

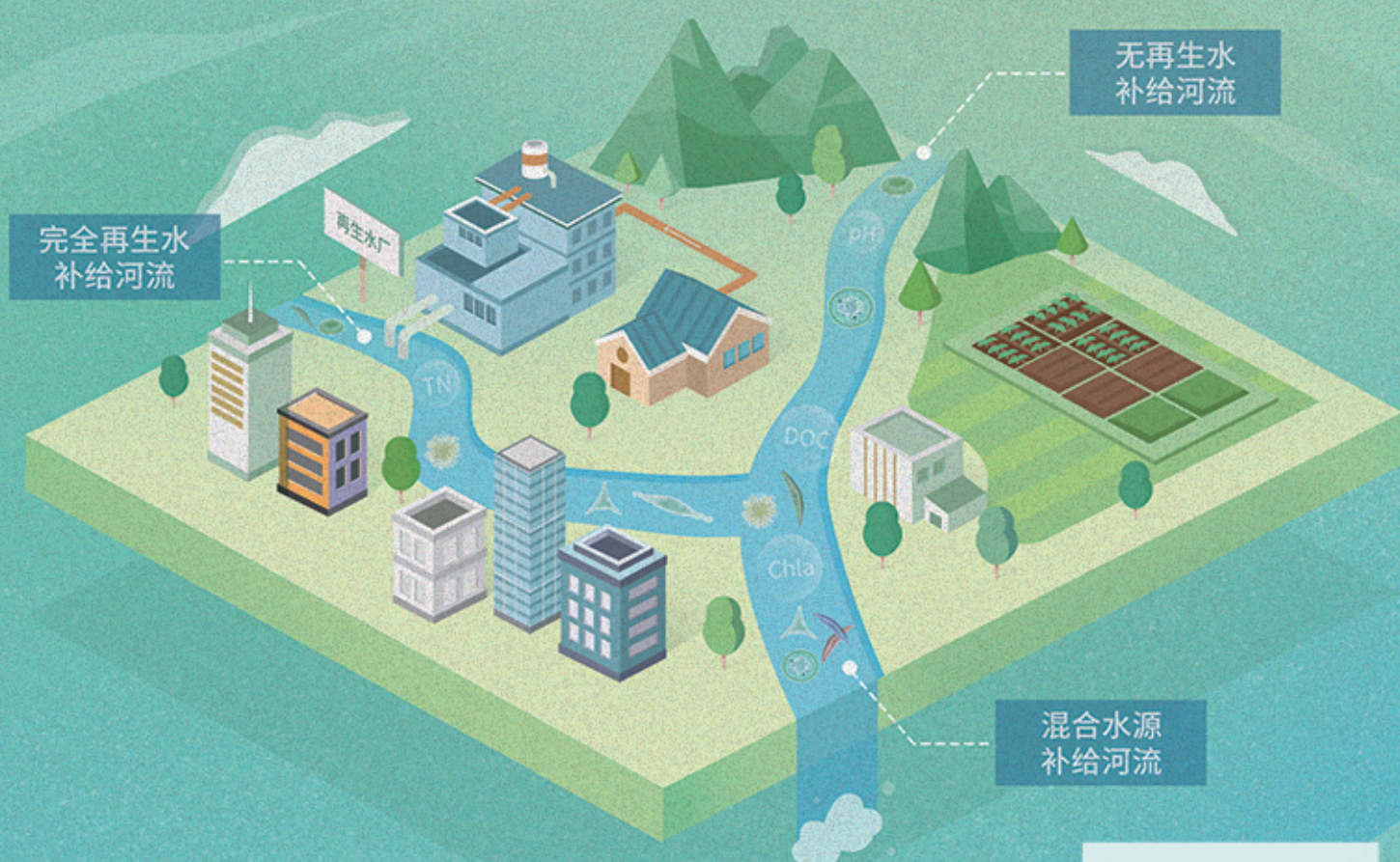
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析

杨柏, 秦广鹏*, 邬钦

(重庆工商大学工商管理学院, 重庆 400074)

摘要: 对各省域 CO₂ 排放量进行核算能够确定中国 CO₂ 排放的主要贡献者, 为碳减排决策提供相关信息. 以往的研究表明, 核算视角的不同会导致碳排放水平的差异. 在多区域投入产出分析框架的基础上, 基于不同能源类型, 量化中国由生产、需求和供给驱动的省级 CO₂ 排放量, 构建能源-碳排放关系模型, 对我国 CO₂ 排放进行综合分析. 结果发现: ①由煤炭导致的 CO₂ 排放占比 57.2% (生产视角)、60.7% (消费视角) 和 58.2% (收入视角). ②各产业部门中, 电力、热力、燃气及水的生产和供应部门 CO₂ 排放占比 49.1% (生产视角)、70.2% (消费视角) 和 14.2% (收入视角). ③河北、内蒙古、河南和辽宁等高度工业化省份的碳减排政策应侧重生产侧; 东部沿海发达省份和矿产资源丰富省份的政策应分别侧重需求侧和供给侧. ④以往被忽略的第三产业在收入视角下贡献了大量的 CO₂ 排放. 因此各省份及产业部门需要在生产、需求和供给侧制定差异化且具有针对性的碳减排政策才能减少 CO₂ 的排放, 实现“双碳”目标.

关键词: 三重视角分析; 多区域投入产出分析; 省际贸易; 碳排放流; 政策制定

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5840-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202202083

Analysis of Provincial CO₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

YANG Bai, QIN Guang-peng*, WU Qin

(School of Business Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The accounting of provincial CO₂ emissions can determine the main contributors to CO₂ emissions and provide relevant information for CO₂ emission reduction decisions. Previous studies have shown that different accounting perspectives often lead to different levels of CO₂ emission. On the basis of the multi-regional input-output analysis framework, considering different energy types and separately quantifying China's provincial CO₂ emissions driven by production, demand, and supply, an energy-carbon emission relationship model was established to promote the comprehensive analysis of CO₂ emissions in China. The results showed that: ① the CO₂ emissions caused by coal accounted for 57.2% (production perspective), 60.7% (consumption perspective), and 58.2% (income perspective). ② Among the industrial sectors, the CO₂ emissions from the production and supply sectors of electricity, heat, gas, and water accounted for 49.1% (production perspective), 70.2% (consumption perspective), and 14.2% (income perspective). ③ CO₂ emission reduction policies in highly industrialized provinces such as Hebei, Inner Mongolia, Henan, and Liaoning should focus on the production side. The policies of the developed eastern coastal provinces and the provinces rich in mineral resources should focus on the demand side and the supply side, respectively. ④ The tertiary industry, which has been neglected in the past, contributed a lot of CO₂ emissions from the perspective of income. Therefore, the provinces and industrial departments need to formulate differentiated and targeted CO₂ reduction policies on the supply, demand, and production sides to reduce CO₂ emissions and achieve the carbon peak and carbon neutralization goals.

Key words: three-perspective analysis; multi-region input-output analysis; inter-provincial trade; CO₂ emission flow; policymaking

中国是当前世界上碳排放量最大,也是历史碳排放总量仅次于美国的国家^[1]. 为应对全球气候变化和国内环境问题,75 届联合国大会上习近平主席承诺中国将在 2030 年实现碳达峰,2060 年前实现碳中和. 并且在 2005 年碳排放数据的基础上,于 2030 年将单位 GDP 的碳排放量降低 60%~65%. 中国政府针对早期达峰加强了政策制定力度,并为深度脱碳做出了巨大努力^[2,3]. 然而中国现行的减排政策大多数是通过改变能源结构和优化产业结构来减少生产方面的碳排放量^[4],因为国内经济发展依赖于化石能源以及碳密集型行业^[5,6].

此外,中国地区之间发展不平衡,30 多个省份在经济发展和 CO₂ 排放方面存在着巨大的差异^[7,8],不同省份在碳排放强度和碳减排责任方面有着明显的区别,决策者迫切需要精确而有效地针

对性减排政策^[9]. 因此碳排放责任界定是否合理和科学,不仅会影响到全国碳减排目标的实现,碳减排政策的合理制定,也会对各省经济社会发展造成重大影响. 从碳排放责任承担主体出发,省域范围 CO₂ 排放核算方法主要包括生产视角、消费视角和收入视角 3 大类. 随着中国省际贸易的增长,越来越多的排放体现在省际产业部门之间的商品贸易和服务中^[10,11]. 如图 1 所示,省域 A 为省域 B 的生产提供所需,省域 B 为省域 C 的最终消费做出供应. B 省域范围内地方部门生产商品和服务过程中直接产生的 CO₂ 排放量,称为“基于生产的 CO₂ 排放量”,通

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-04-13

基金项目: 国家社会科学基金项目(18BGL147)

作者简介: 杨柏(1971~),男,博士,教授,主要研究方向为经济转型与增长和能源经济与政策, E-mail: 2692852010@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1286268304@qq.com

过能源使用量和对应的 CO_2 排放系数计算^[12]. 以生产视角为基础的核算方法忽略了供应链中包含的间接 CO_2 排放,会造成“碳泄漏”^[13],会影响减排政策的效果. 供应链末端省域 C 范围内各种主体对商品和服务的最终需求而产生的碳排放量称为“基于消费的 CO_2 排放量”,其排放源可以来自省域 C 地理边界内,也可以来自地理边界外. 基于消费的核算方法可量化最终需求和家庭生活方式对 CO_2 排放的直接影响和供应链效应^[14,15],为需求侧减排政策提供指导,但上述核算方法在指导供应方政策方面很薄弱^[16]. 而最初投入来自供应链开始时的生产活动,引起当地和下游其他区域的 CO_2 排放^[16]. 营业盈余、劳动者报酬和税收等是省域 A 支付生产要素的主要收入来源,因此由最初投入产生的排放量称为“基于收入的 CO_2 排放量”^[17],包括供应链下游直至最终需求导致的排放量,对其进行核算有助于供应侧减排政策的制定.

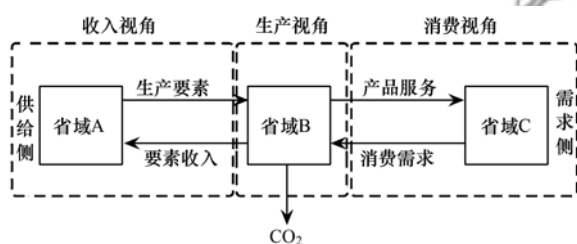


图 1 国家供应链中碳流动轨迹

Fig. 1 Map of carbon flow trajectories in national supply chains

在基于生产和消费视角的研究中, Liu 等^[18]对北京生产视角下 CO_2 排放进行了预测及驱动因素分析,发现第二产业规模的增长会促进 CO_2 排放; Qian 等^[19]对珠江流域消费视角下的 CO_2 排放进行对比研究,发现城市间碳转移发生在发展中地区上游城市和珠三角下游城市; Peng 等^[20]从两种视角出发,对中国各省份电力部门 CO_2 排放量进行核算,发现中国的经济转型和用电强度增加很大程度上促进了电力部门 CO_2 的排放,而能源效率的提高、非化石燃料替代和工业产出份额的缩小减少了 CO_2 排放; Li 等^[21]对全球 129 个经济体在 1995 年至 2015 年期间生产和消费视角下的 CO_2 排放量进行实证研究,发现人口密度、能源强度、贸易和工业化比重对生产侧的影响显著,而人均 GDP 对消费侧的影响更大. 在基于收入视角的研究中,余晓泓等^[22]对全球 40 个国家和地区供给侧碳排放及碳排放转移进行研究,发现了国家层面的碳排放分析在指导各国减排责任划分方面的重要性; Xie 等^[23]基于收入视角分析了 2007 年和 2010 年 CO_2 排放的跨省转移,发现在收入视角下高碳排放省份由中西部

资源密集型地区转移到东部沿海发达地区的趋势愈发明显. 在基于三重视角的研究中,丛建辉等^[24]对京津冀及周边晋、陕、蒙等资源密集型省份的碳排放量进行核算和对比分析,发现京津冀晋陕蒙六省市在三重视角下承担的排放量呈现出不同的特点. 上述研究在理论与可行性上对中国省域层面碳排放的研究、界定各省份碳排放的责任、探究能源结构和产业结构与 CO_2 排放之间的关系等方面提供了指导性的意见. 对于实现“双碳”目标、制定针对性减排政策和能源规划等有着重要的启示.

多区域投入产出模型 (multi-region input-output model) 是由各区域投入产出模型联结而成、衡量不同区域之间互动关系的数理工具,在产业关联与跨区域绿色核算等领域发挥了独特作用^[25], Leontief-MRIO 模型和 Ghosh-MRIO 模型两大投入产出模型共同统构成了现代产业关联效应测度的基本支撑,能够用来追踪产品需求侧最终消费隐含的碳排放,追踪产品供给侧的最初投入引起的碳排放,国内外学者利用两大投入产出模型完成了大量碳排放领域的研究. 王育宝等^[26]利用中国多区域投入产出数据和 MRIO 模型,对省域净碳转移方向和根源进行研究,发现省域碳转移的主要原因是中间产品和最终需求的调出与调入; Wang 等^[27]利用多区域投入产出模型对京津冀地区 CO_2 排放和碳减排路径进行研究,揭示了个体和城市群在多要素、多部门和多城市的互动效应; Liu 等^[28]在收入视角下,利用全球多区域的投入产出模型核算了由最初投入引起的碳排放量,发现发展中国家收入视角下的碳排放量要高于生产视角下的碳排放量,这意味着他们的排放收益与环境成本并不相符.

现阶段中国经济处于更注重国内大循环的“双循环”新发展格局中^[29],生产要素在省际间的流动愈加频繁,单纯的考虑生产和消费视角下 CO_2 的排放,会忽略最初投入对 CO_2 排放的驱动作用,并不能从供应链源头界定生产要素的含碳量,不能对省域在要素供给端进行“源头降碳”提供强有力的支撑;此外单纯地考虑生产和消费视角,对与金融、能源等关键生产要素供给相关的部门在整个国家减排体系中的约束和激励作用有限,不能合理地界定各个省域的碳排放责任,这对于省级层面减排政策的制定十分不利,进而会导致这些部门相对集中的能源富集省域和资本充裕省域在国家减排任务中发挥的作用相对不足. 另一方面, CO_2 的排放与能源类型息息相关,不区分引起 CO_2 排放的具体能源类型,就不能对国家政策提出针对性的意见反馈. 本文在生产、收入和消费视角下,在多区域投入产出模

型的基础上,建立三重视角的能源-碳排放关系模型,从省域、能源类型和行业部门 3 个层面综合考察中国 CO₂ 排放情况.能够了解各省的生产者、最终消费者和主要供应商在推动中国 CO₂ 排放方面的作用.基于三重视角对各省域不同行业、不同产业部门和不同能源类型的 CO₂ 排放进行对比和驱动因素分析,有利于中国政府针对不同省域制定针对性的碳减排政策,理清各省域应承担的碳减排责任,丰富碳排放多元治理理论,量化各省和部门间接排放的综合影响,并为国家“双碳”目标的分解与实现、碳交易市场配额分配等政策的制定提供科学依据.

1 模型与数据

1.1 模型

生产视角下每个省域作为直接排放者,只需要对省域范围内直接排放的 CO₂ 进行核算;消费视角下每个省域作为最终消费者,由本省域最终需求引起的本省域和其他省域产品在生产过程中的 CO₂ 都需要进行核算;收入视角下每个省域作为最初供应者,需要对本省域提供生产要素的产品在生产过程中产生的 CO₂ 进行核算.所用模型由一个节点网络(30 个省的 19 个部门)和定向线路(体现在跨省的商品贸易)组成,并对煤炭、天然气、焦炭、汽油和柴油等天然和二次能源在 3 种视角下的 CO₂ 排放进行核算.最后对各省域及各产业部门中“碳泄漏”存在可能性以及驱动类型进行分析对比.

生产、消费和收入视角下每个省域 CO₂ 排放量由式(1)~(3)来衡量:

$$p_r = \varepsilon_r^d x_r \quad (1)$$

$$c_r = \varepsilon^d (I - A)^{-1} f_r \quad (2)$$

$$i_r = v(I - B)^{-1} \varepsilon \quad (3)$$

式中, p_r 、 c_r 和 i_r 分别表示 r 省域范围内生产、消费和收入视角下的 CO₂ 排放量. x_r 为 r 省域内各产业部门的总产出列向量,其元素 x_{ri} 为 r 省域 i 产业部门的总产出.矩阵 I 为单位矩阵, A 为 Leontief 模型的投入产出系数矩阵,其子块矩阵 A^{rs} 为区域间直接消耗系数矩阵,即省域 s 产品需要省域 r 的产品提供中间投入的比例. A^{rs} 中元素表示省域 s 内 j 产业部门单位产出需要消耗 r 省域 i 产业部门的投入. B 为 Ghosh 模型的投入产出系数矩阵,其子块矩阵 B^{rs} 为区域间直接分配系数矩阵,即省域 s 直接销售给省域 r 的中间产品的所占比例. B^{rs} 中元素表示 r 省域 i 产业部门直接销售给 s 省域 j 产业部门的中间产品所占份额. $(I - A)^{-1}$ 为 Leontief 逆矩阵, $(I -$

$B)^{-1}$ 为 Ghosh 逆矩阵. $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_r, \dots, \varepsilon_n)^T$ 为所有省域的直接碳排放系数列向量, ε^d 为 ε 的转置向量, ε_r 表示省域 r 的直接排放系数列向量,其中元素 ε_{ri} 表示 r 省域 i 产业部门单位产出的 CO₂ 排放量,即 r 省域 i 产业部门的直接排放系数,等于 r 省域 i 产业部门 CO₂ 排放量与该部门总产出的比值,具体计算见式(4).

$$\varepsilon_{ri} = \frac{e_1 \alpha_1 + e_2 \alpha_2 + \dots + e_j \alpha_j}{x_{ri}} \quad (4)$$

式中, e_j 表示 j 类能源的消耗量, α_j 表示 j 类能源的排放因子, $e_j \alpha_j$ 则表示 r 省域 i 行业部门使用 j 类能源而造成的直接碳排放量.列向量 $f_r = (f_{1r}, f_{2r}, \dots, f_{nr}, \dots, f_{nr})^T$, 子向量 f_{rr} 表示 r 省域对本省域范围内最终产品的需求,子向量 $f_{sr} (s \neq r)$ 表示 r 省域对其他省域最终产品的需求. $v = (0, 0, \dots, v_r, \dots, 0)$, 子向量 v_r 表示 r 省域内各个产业部门的初始投入.

子块矩阵 A^{rs} 和 B^{rs} 中元素具体计算见式(5)和式(6).

$$a_{ij}^{rs} = x_{ij}^{rs} / x_j^s \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$b_{ij}^{rs} = x_{ij}^{rs} / x_i^r \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, x_{ij}^{rs} 为 r 省域 i 产业部门对 s 省域 j 产业部门产品的中间投入和使用.

$$A = \begin{pmatrix} A^{11} & \dots & A^{1s} & \dots & A^{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A^{r1} & \dots & A^{rs} & \dots & A^{rm} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A^{m1} & \dots & A^{ms} & \dots & A^{mm} \end{pmatrix},$$

$$A^{rs} = \begin{pmatrix} a_{11}^{rs} & \dots & a_{1j}^{rs} & \dots & a_{1n}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1}^{rs} & \dots & a_{ij}^{rs} & \dots & a_{in}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1}^{rs} & \dots & a_{nj}^{rs} & \dots & a_{nn}^{rs} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} B^{11} & \dots & B^{1s} & \dots & B^{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ B^{r1} & \dots & B^{rs} & \dots & B^{rm} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ B^{m1} & \dots & B^{ms} & \dots & B^{mm} \end{pmatrix},$$

$$B^{rs} = \begin{pmatrix} b_{11}^{rs} & \dots & b_{1j}^{rs} & \dots & b_{1n}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{i1}^{rs} & \dots & b_{ij}^{rs} & \dots & b_{in}^{rs} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{n1}^{rs} & \dots & b_{nj}^{rs} & \dots & b_{nn}^{rs} \end{pmatrix}.$$

1.2 数据

投入产出模型描述了一个经济体内部的商品流

动交易情况^[30]. 2017 年中国各省区域间投入产出表由国务院发展研究中心和国家统计局编制^[31], 为中国最新的区域间投入产出表, 包括 30 个省份(西藏、香港、澳门和台湾资料暂缺), 每个省份又包含 42 个行业部门. 为方便研究, 对部门能源消耗表和

投入产出表中的部门分类进行整理合并, 使用统一的编制规则, 具体分类如表 1 所示. 根据文献[32, 33]收集各种能源的 CO₂ 排放系数和标准煤系数, 其他数据来自各省能源统计年鉴和 CEADs 中国碳核算数据库.

表 1 行业部门分类

Table 1 Industrial sector classification

部门简称	部门类别	部门简称	部门类别
AG	农林牧渔产品和服务	OI	其他制造产品
MD	煤炭采选产品		废品废料
	石油和天然气开采产品		金属制品、机械和设备修理服务
	金属矿采选产品	EP	电力、热力的生产和供应
	非金属矿和其他矿采选产品		燃气生产和供应
FP	食品和烟草		水的生产和供应
TP	纺织品	CO	建筑
	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	WR	批发和零售
	木材加工品和家具	TS	交通运输、仓储和邮政
PP	造纸印刷和文教体育用品	CP	水利、环境和公共设施管理
PC	石油、炼焦产品和核燃料加工品		居民服务、修理和其他服务
RN	化学产品		教育
	非金属矿物制品		卫生和社会工作
MP	金属冶炼和压延加工品		文化、体育和娱乐
	金属制品		公共管理、社会保障和社会组织
OM	通用设备	OS	住宿和餐饮
	专用设备		信息传输、软件和信息技术服务
TE	交通运输设备		金融
EM	电气机械和器材		房地产
	通信设备、计算机和其他电子设备		租赁和商务服务
IM	仪器仪表		科学研究和技术服务

2 结果与讨论

2.1 整体分析

图 2(a) 和 2(c) 从不同视角展示了各省 CO₂ 排放量和各类能源引起的 CO₂ 排放量. 从中可知江苏、河北和内蒙古在生产视角下的 CO₂ 排放要远高于收入和消费视角. 广东和河南则在作为最终消费者方面比作为生产者和最初供应商带来更多的 CO₂ 排放. 能源消耗方面: 由煤炭消耗引起的 CO₂ 排放远高于其余的能源种类, 占比为 57.2% (生产视角)、60.7% (消费视角) 和 58.2% (收入视角). 图 2(b) 根据最终需求和最初投入列举了 30 个省份的 CO₂ 排放量. 生产视角下各省份共排放 CO₂ 为 9 689 Mt. 消费视角下, 由最终需求引起的 CO₂ 排放量占比 91.5%; 收入视角下, 最初投入导致了 89.3% 的 CO₂ 排放. 在进出口方面: 2017 年中国由贸易进口产生的 CO₂ 排放量为 1 041.13 Mt, 占全国 CO₂ 排放总量的 10.75%, 贸易出口产生的 CO₂ 排放量为 829.92 Mt, 占全国 CO₂ 排放总量的 8.57%. 其中广东、江苏、浙江、山东和辽宁等省份在由出口贸易产生的 CO₂ 排放量中占比 59.8%; 上海、广

东、山东、江苏和辽宁等省份在由进口贸易产生的 CO₂ 排放量中占比 52.3%.

2.2 生产视角分析

从生产视角下 CO₂ 排放结果可知[图 3(a) 和 3(b)]: 山东、江苏、河北、内蒙古、广西、河南、山西和辽宁是中国的主要直接碳排放源, 碳排放量为 4 831 Mt, 占全国排放量的 49.86%. 高排放省份主要位于中国北方, 能源消耗则以煤炭、焦炭和石油等化石燃料为主. 从产业部门层面分析, 电力、热力、燃气及水的生产和供应, 金属制品, 化学及非金属矿物制品, 交通运输、仓储和邮政, 采矿业, 公共服务建设以及石油、炼焦产品和核燃料加工等行业承担了大部分的 CO₂ 排放, 为 8 921.4 Mt, 占全国排放量的 92.08%. 从各省份产业部门结构层面分析, 生产视角下各省份的产业部门的 CO₂ 排放量存在巨大差异. 山东电力、热力、燃气及水的生产和供应, 金属制品, 化学及非金属矿物制品行业 CO₂ 排放量(占比)分别为: 452.8 Mt (56.9%)、115.8 Mt (14.5%) 和 66.7 Mt (8.4%), 3 个行业部门 CO₂ 量为 635.3 Mt, 占山东排放量的 79.8%; 而河北 3 个行业部门碳排放量分别为: 224.1 Mt (32%)、330

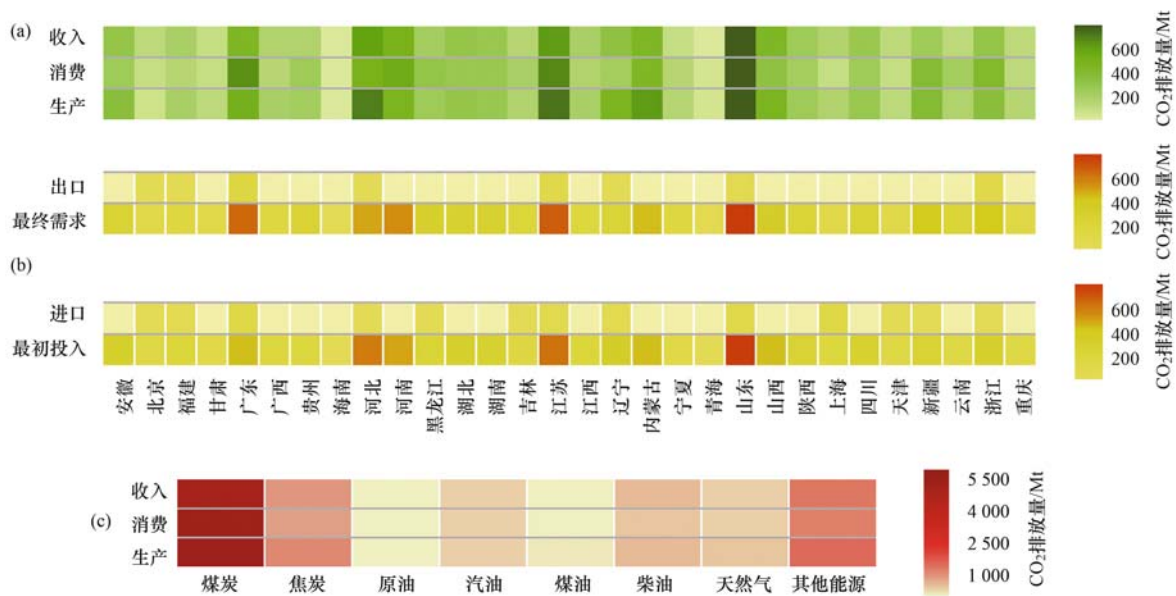


图2 生产、消费和收入视角下各省份 CO₂ 排放量、不同能源类型导致的 CO₂ 排放量和各省份由进出口、最终需求/最初投入导致的 CO₂ 排放量

Fig. 2 Production-based, consumption-based, and income-based CO₂ emissions of each province, as well as CO₂ emissions caused by different energy types and CO₂ emissions caused by import and export, final demand/initial input of each province

Mt (47.1%) 和 41.2 Mt (5.9%), 排放 CO₂ 量为 595.3 Mt, 占河北排放量的 85%. 由此可见不同省份的不同行业部门排放占比存在着显著差异, 对此加以分析比较, 有助于在生产视角下确定每个省域减排政策需要针对的关键区域和核心产业部门.

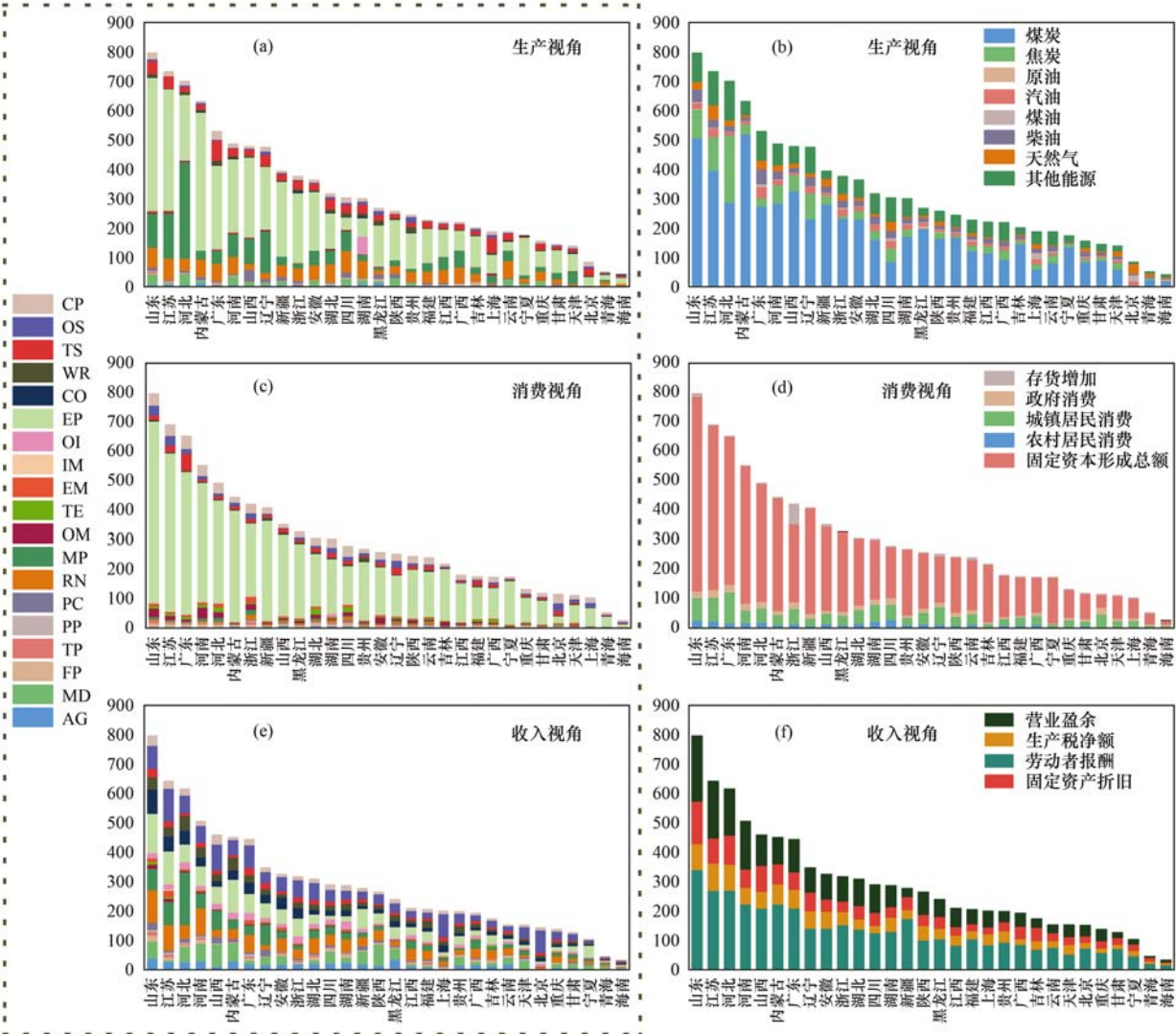
2.3 消费视角分析

消费视角下 CO₂ 排放结果如图 3(c) 和 3(d) 所示, 比较生产和消费两种视角下的碳排放量发现, 大多数发达省份的最终消费者比其省域范围内的生产者对 CO₂ 排放有更大的影响. 例如: 广东和浙江等省份, 必须从其他省份进口大量的中间产品或最终产品来满足最终需求. 广东生产视角下 CO₂ 排放量为 529.5 Mt, 而为满足广东的最终需求 CO₂ 排放量为 651.95 Mt, 即至少有 90 Mt 的 CO₂ 是其他省份为满足广东的最终需求而排放. 为保证碳减排责任分配的公平性以及减排政策的有效性, 广东及其他在需求侧有较高排放的省份需要实施更多的需求侧减排政策 (例如, 对碳密集型产品的消费和国际出口征税, 鼓励低碳生活方式和减少房地产投资等). 从产业部门层面分析, 电力、热力、燃气及水的生产和供应行业仍在绝大多数省份中产生大量的 CO₂ 排放, 在碳排放量前三的省份中分别占比 77.4%、77.6% 和 74.1%. 从最终需求的类别层面分析, 固定资产形成总额排放了较多的 CO₂. 山东固定资产形成总额导致的 CO₂ 排放量为 662.37 Mt, 占山东总碳排放量的 83.16%. 因为固定资产形成总额中

包括 2017 年内完成的建筑工程、安装工程等项目的价值, 而与此相关的钢筋和水泥等建筑材料均为碳密集型产品. 除此之外, 城镇居民消费也是中国 CO₂ 排放的主要驱动因素, 其导致的 CO₂ 排放量为 1 126.03 Mt, 占中国排放量的 13.7%. 2017 年中国城乡居民占比分别为 58.52% 和 41.48%^[34], 但农村居民消费引发的 CO₂ 排放量为 340.68 Mt, 即在消费视角下, 城镇居民人均 CO₂ 排放量约为农村居民的 3 倍. 因此在城市化进程中, 农村居民不能完全模仿城市居民的生活方式, 无论城镇还是乡村, 都应该倡导绿色低碳的生活方式.

2.4 收入视角分析

收入视角下 CO₂ 排放结果如图 3(e) 和 3(f) 所示, 在由最初投入引起的 CO₂ 排放量中, 山东、江苏、河北、河南、山西、内蒙古、广东和辽宁等省份位居前列, 排放 CO₂ 共 4 261.86 Mt, 占收入视角下 CO₂ 排放总量的 49.3%. 除江苏和广东外其余省份均位于中国北方, 包括山东、山西、河南和内蒙古等矿产资源较为丰富的省份. 从行业部门层面分析, 这些省份所拥有的丰富煤炭和石油资源在下游行业部门和省份使用时会产生大量的 CO₂, 因此收入视角下与资源开采或能源供应有关的部门, 如电力、热力、燃气及水的生产和供应以及采矿行业会产生大量的 CO₂ 排放. 收入视角下电力、热力、燃气及水的生产和供应产业排放 CO₂ 量为 1 226.97 Mt, 采矿业则排放 783.63 Mt, 占总排放



纵坐标表示 CO₂ 排放量,单位为 Mt,图例为部门缩写,见表 1

图 3 各省份在生产、消费和收入视角下不同产业部门的 CO₂ 排放量,不同能源类型、最终消费去向和最初投入来源导致的 CO₂ 排放量

Fig. 3 CO₂ emissions from different industrial sectors based on production, consumption, and income, CO₂ emissions caused by different energy types, final consumption destinations, and primary input sources in each province

量的 14.2% 和 9.1%。结果表明,供给侧减排政策应更多地关注能源丰富的省份中与能源开采相关的部门。此外第三产业部门通常被认为是低碳产业,但在收入视角下第三产业部门却造成了大量的 CO₂ 排放,其中交通运输、仓储和邮政,批发和零售,公共服务建设及其他服务业等行业排放 CO₂ 量为 2 501.68 Mt,占全国总排放的 28.81%,这意味着中国的第三产业与碳密集型产业紧密相连,或者为碳密集型产业提供了大量的服务。从省域范围层面分析,收入视角下各省域范围内的 CO₂ 排放构成存在着很大差异,如收入视角下广东和内蒙古自治区的 CO₂ 排放量相近,但其第三产业部门的 CO₂ 排放量占比为 33% 和 24%,意味着广东第三产业的劳动力资源和固定资产投资远高于内蒙古自治区。从最初投入来源层面分析,收入视

角下每个省域范围内营业盈余和劳动者报酬导致了绝大多数的 CO₂ 排放。

2.5 3 种视角下中国各省份碳排放对比分析

进一步比较每个省份的生产、消费和收入视角下的 CO₂ 排放量,每千元 GDP 的 CO₂ 排放量以及人均 CO₂ 排放量,结果如图 4~6 所示。从图 4(a)可知,河北、山西、辽宁、江西和安徽等省份生产和收入视角下的 CO₂ 排放量明显高于其消费视角,表明这些省份可能在供应链上游中拥有碳密集型生产部门,并生产大量化石能源或其他中间产品出口供应链下游省份,导致下游省份较高的 CO₂ 排放。而浙江和广东等沿海发达省份,河南、吉林和黑龙江等省份以及贵州、宁夏、青海和新疆等西部欠发达省份,消费视角下的 CO₂ 排放量高于生产和收入视角。

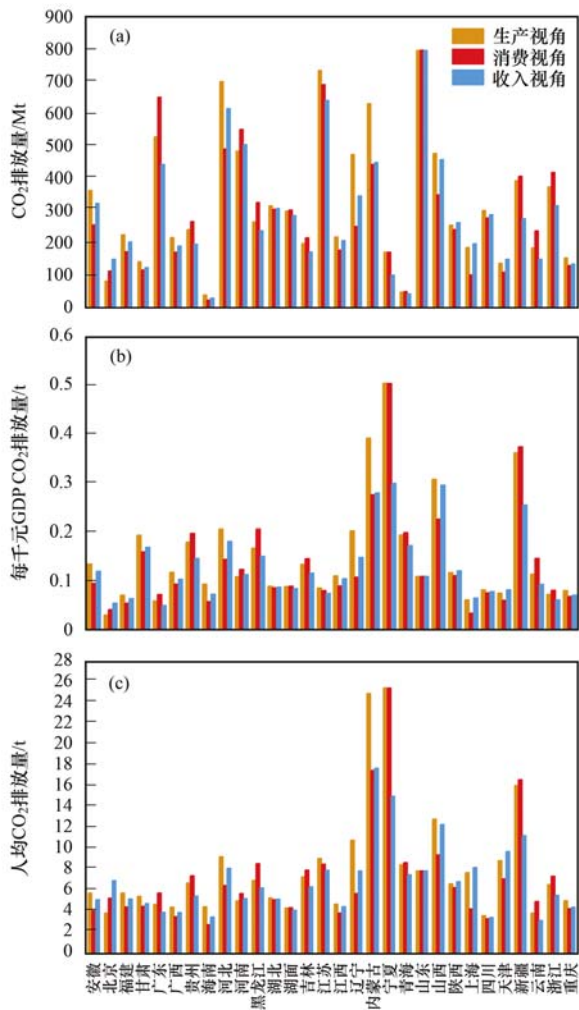


图4 各省份生产、消费和收入视角下 CO_2 排放量、每千元 GDP CO_2 排放量和人均 CO_2 排放量的比较

Fig. 4 Comparison of CO_2 emissions based on production, consumption, and income, as well as average CO_2 emissions per thousand yuan of GDP and per capita CO_2 emissions in each province

从图4(b)和4(c)可以看出,中国欠发达省份宁夏、新疆、内蒙古、山西和黑龙江等每千元 GDP 碳排放量以及人均 CO_2 排放量显著高于其他省份. 表明这些省份最终消费所包括的碳密集型产品比例较高,或者这些地区消费的最终产品更多来自低效率地区. 因此这些省份需要在未来的经济发展中努力减少消费视角下的 CO_2 排放量.

从图5可知,人均 GDP 高的地区分为两类,一类为生产和收入视角下 CO_2 排放量均相对较高的地区,主要位于中国北方,如内蒙古和山东;一类为消费型 CO_2 排放量相对较高的地区,主要位于中国南方,如广东和浙江. 因此中国北方需要实施更多的生产侧和供给侧碳减排政策,而南方则需要更多需求侧碳减排政策. 此外在欠发达的西部地区,如云南、四川、甘肃和贵州,以消费、生产和收入为基础的 CO_2 排放量非常相似,说明这些地区可能相对较

少地参与国内的生产部门.

从图6各省每千元最终需求和最初投入产生的 CO_2 排放量可知,除宁夏、内蒙古、山西、新疆和青海等中西部欠发达省份外,其他省份在每千元最终需求和最初投入带来的 CO_2 排放没有太大的差别. 整体上看宁夏、内蒙古、山西和新疆等省份每千元最初投入产生的 CO_2 在 0.15 t 以上,这些省域的最初投入更多地供给了碳密集型部门,或者说供应链下游地区使用的中间产品大部分是煤炭、电力等碳密集型产品. 内蒙古、宁夏、新疆和贵州等欠发达省份每千元最终需求产生的 CO_2 在 0.15 t 以上,说明这些省域的产业结构以碳密集型行业为主. 雷达图的右上部分(宁夏至辽宁)每千元最初投入比最终需求产生的 CO_2 要高,因此这些省域的碳减排政策需要更多地关注供给方面,而其余省份(黑龙江至广东)碳减排政策则需要侧重于最终需求方面.

2.6 驱动分析

从省域层面分析[图7(a)],北京、云南、广东、黑龙江、河南和浙江等省份 CBA/PBA 比值大于 1,即 CO_2 排放更多由最终需求驱动,于其他省份进口了大量的中间产品和最终产品来满足本省份的最终需求. 这些省份需求侧比其供给侧减排政策对其他省份排放量的影响要更大. 因此省级需求侧政策需要其他省份在生产侧进行更多的政策协调及配合. 同理北京、天津和陕西等省份 IBA/PBA 大于 1,这些省份 CO_2 排放更多由最初投入驱动,这些省份供给侧的减排政策对其他省份的影响要更大. 当 CBA/PBA 或 IBA/PBA 比值大于 1 时,表明这些省份在碳减排责任分配中需要承担比其他省份更多的责任. 因为这些省份要么消费了其他省份的产品,要么为用于其他省份的产品消费提供了要素投入,造成间接的 CO_2 排放.

从产业部门层面分析,仪器仪表、电气机械和器材及电子设备、交通运输设备、食物和烟草加工业,纺织服装和木材加工制品等产业 CBA/PBA 大于 1[图7(b)],这些行业消费了大量其他产业部门的中间产品,各个省域在制定其政策时,需要在这些产业部门的需求侧和其他产业部门的生产侧统一配合以达到最优的政策效果. 建筑、金属制品、农林牧渔产品和服务业等产业部门的 IBA/PBA 大于 1,表明这些产业部门向其他行业部门输入了大量的中间产品,其 CO_2 排放更多由最初投入驱动. 政策制定方面,则需要在这些产业部门的供给侧和其他产业

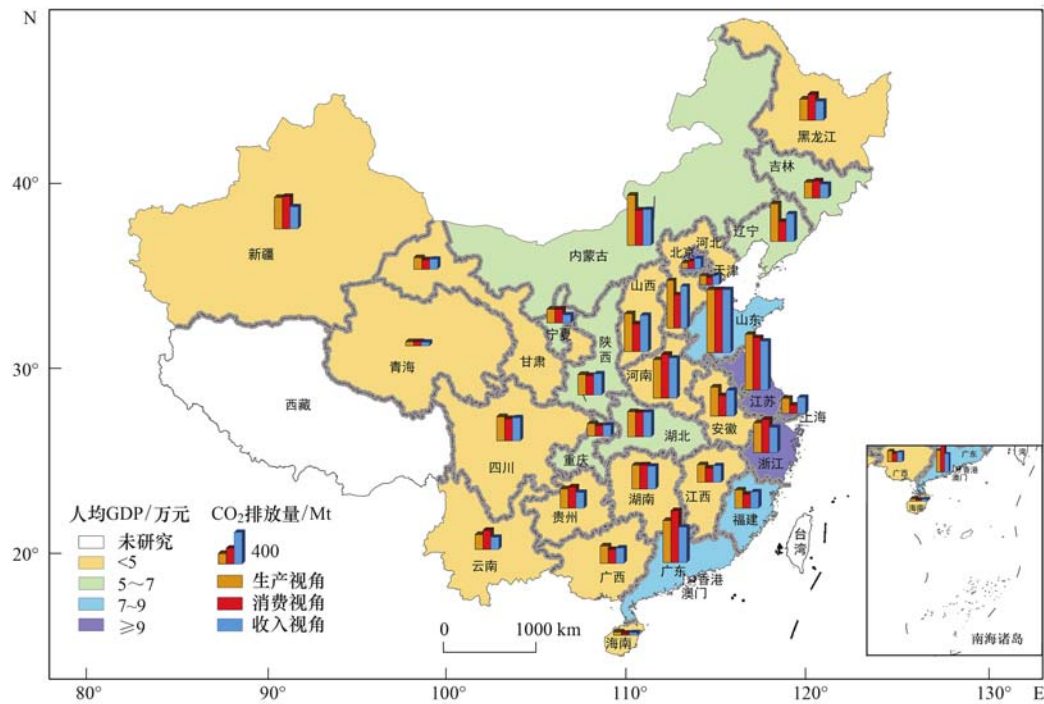


图5 人均国内生产总值和CO₂排放量的比较
Fig. 5 Comparison of per capita GDP and CO₂ emissions

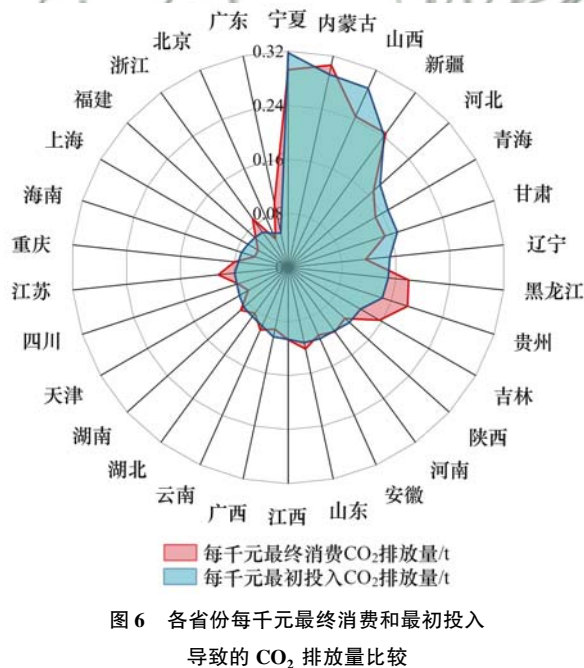


图6 各省份每千元最终消费和最初投入导致的CO₂排放量比较
Fig. 6 Comparison of CO₂ emissions embodied per thousand yuan of final demand and CO₂ emissions enabled per thousand yuan of primary input

部门的需求侧协调制定。

3 结论与建议

(1) 根据生产视角下CO₂排放结果,山东、江苏、河北、内蒙古、广东和河南等各类生产活动直接排放大量CO₂的省份,应将减排政策重点放在生

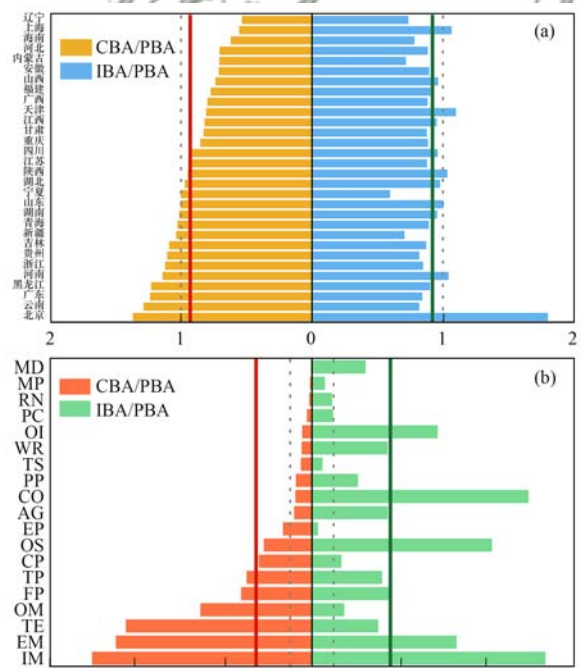


图7 各省份、各产业部门消费和收入视角下CO₂排放量与生产视角下CO₂排放量比值
Fig. 7 Ratio of consumption-based CO₂ emissions and production-based CO₂ emissions, income-based CO₂ emissions, and production-based CO₂ emissions of each province and industry sector

产方面.具体而言,推行更多旨在减少化石能源使用和调整产业结构等相关政策.此外政府还应大力发展可再生能源来减少对化石能源的依赖.具体就是在广东、福建、浙江和山东等东南沿海地区建设海上风电基地;在黄河上游、金沙江下游和雅鲁藏布江下游等建立水电基地;在西藏和青海等高海拔省份发展太阳能;在黑龙江、四川、河南和广西等农业省份发展生物质能.

(2) 根据消费视角下 CO_2 排放结果,广东、江苏和浙江等省份消费视角下 CO_2 排放量和人均消费型 CO_2 排放量相对较高.这些省份为了满足省域范围内的最终需求,需从其他省份进口大量的中间产品和最终产品.与此同时这些省份经贸易出口间接性地向海外输出了大量的 CO_2 排放.因此沿海发达省份以及消费型 CO_2 排放较多的省份应努力制定更多的需求侧碳排放缓解政策(例如,通过补贴低碳产品鼓励低碳生活方式,对碳密集型产品的消费和出口征税)来减少其消费视角下的 CO_2 排放量.

(3) 根据收入视角下 CO_2 排放结果,发达省份和煤炭、石油等矿产资源丰富省份的最初投入使供应链下游的 CO_2 排放量大幅增加.因此为了减少收入视角下的 CO_2 排放,政府可以引入一些供给侧政策,如优化能源部门的产权结构、降低低碳部门的税收和交易成本和行政壁垒等,使更多的生产要素(如劳动力、资本和政府服务)可以输入到低碳部门,这些省域煤炭或石油公司可以向更高效地区出售化石燃料.政府也可以在收入视角下 CO_2 排放高的部门引进低碳技术.

(4) 此外中国西部欠发达地区(如新疆、青海、内蒙古和宁夏等省份)的减排也需要得到同等重视.根据研究结果,西部大部分省份单位 GDP 导致的 CO_2 排放量较高,这是大力发展西部经济的不利因素,如果这种状况不能得到改善,西部欠发达省份将成为中国近期 CO_2 排放增长的新的主要驱动力.

(5) 本研究发现我国城乡居民人均 CO_2 排放量存在较大差异.“十四五”规划强调要推进城乡融合发展,提升乡村基础设施和公共服务水平,分类提高城市化地区发展水平.已有研究表明城市化是中国乃至世界 CO_2 排放增长的主要驱动力之一.中国越来越多的农村人口转变为城市居民,将会刺激市场需求和排放需求的不断增长.因此中国有必要采取需求侧碳排放政策来针对城市化进程中产生的大量 CO_2 排放.

(6) 从产业部门的角度看,现行的碳减排政策主要集中在石油、焦化和核燃料,金属冶炼和轧制加工,电力、热力及水的生产和供应等直接排放量大的

部门.第三产业往往被视为低碳产业,但在收入视角下交通运输、仓储、邮政,批发、零售和公共服务建设等第三产业成为中国 CO_2 排放的主要贡献者,中国第三产业的最初投入使得供应链下游产业部门排放大量 CO_2 成为可能.就全国而言,2017 年第三产业的最初投入排放 CO_2 量为 2 501.68 Mt,占 CO_2 排放总量的 28.81%.这可能是由于中国各产业之间强有力的工业关系造成的.因此扩大第三产业比重的同时,还要减少其与碳密集型产业的产业联系.

(7) 就整体而言,中国各省经济基础和发展方向存在差异,中国并不能单一地根据省级碳排放量来划分碳减排责任,中国需要的是能够实现“双碳”目标的减排政策.通常,一省出台的减排政策不仅会影响本地排放,还会影响其他省份的排放.因此在对各省域生产、消费和收入侧制定针对性碳减排政策的同时,必须考虑不同省份之间政策的互补效应,必须从整个供应链的不同角度考虑 CO_2 的排放.例如,如果广东出台政策减少其基于消费的 CO_2 排放量,那么向广东出口大量中间产品的省份需要更多的生产侧减排政策来减少其直接排放量;如果天津出台政策减少其收入视角下的 CO_2 排放量,那么从天津进口大量中间产品的省份需要更多需求侧减排政策来减少其间接排放量.因此只有制定各省份相互配合,地方和国家相互协调的减排政策,才能保证减排政策的公正有效,保证中国“双碳”目标的实现.

参考文献:

- [1] 邓旭,谢俊,滕飞.何谓“碳中和”?[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.
Deng X, Xie J, Teng F. What is carbon neutrality? [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113.
- [2] Wang Y, Guo C H, Chen X J, et al. Carbon peak and carbon neutrality in China: goals, implementation path and prospects [J]. China Geology, 2021, 4(4): 720-746.
- [3] Fang G C, Tian L X, Fu M, et al. The effect of energy construction adjustment on the dynamical evolution of energy-saving and emission-reduction system in China [J]. Applied Energy, 2017, 196: 180-189.
- [4] Zhang P, Wang H. Do provincial energy policies and energy intensity targets help reduce CO_2 emissions? Evidence from China [J]. Energy, 2022, 245, doi: 10.1016/j.energy.2022.123275.
- [5] Zhai M Y, Huang G H, Liu H Z, et al. Three-perspective energy-carbon nexus analysis for developing China's policies of CO_2 -emission mitigation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 705, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135857.
- [6] Lin B Q, Xu B. How does fossil energy abundance affect China's economic growth and CO_2 emissions? [J]. Science of the Total Environment, 2020, 719, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137503.
- [7] Gao C C, Ge H Q, Lu Y Y, et al. Decoupling of provincial energy-related CO_2 emissions from economic growth in China and its convergence from 1995 to 2017 [J]. Journal of Cleaner

- Production, 2021, **297**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126627.
- [8] Mi Z F, Meng J, Guan D B, *et al.* Chinese CO₂ emission flows have reversed since the global financial crisis [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**, doi: 10.1038/s41467-017-01820-w.
- [9] Zhai M Y, Huang G H, Liu L R, *et al.* Inter-regional carbon flows embodied in electricity transmission: network simulation for energy-carbon nexus [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.rser.2019.109511.
- [10] Xia Q, Tian G L, Wu Z. Examining embodied carbon emission flow relationships among different industrial sectors in China [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, **29**: 100-114.
- [11] Zhang K, Liang Q M. Quantifying trade-related carbon emission in China's provinces: insight from sectoral production technology heterogeneity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **344**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131141.
- [12] Zhang H X, Sun W Q, Li W D, *et al.* A carbon flow tracing and carbon accounting method for exploring CO₂ emissions of the iron and steel industry: An integrated material-energy-carbon hub [J]. *Applied Energy*, 2022, **309**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118485.
- [13] Rocco M V, Golinucci N, Ronco S M, *et al.* Fighting carbon leakage through consumption-based carbon emissions policies: empirical analysis based on the World Trade Model with Bilateral Trades [J]. *Applied Energy*, 2020, **274**, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115301.
- [14] Huang Q, Zheng H R, Li J S, *et al.* Heterogeneity of consumption-based carbon emissions and driving forces in Indian states [J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, **4**, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100039.
- [15] Hubacek K, Baiochi G, Feng K S, *et al.* Poverty eradication in a carbon constrained world [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**, doi: 10.1038/s41467-017-00919-4.
- [16] Chen W M, Lei Y L, Feng K S, *et al.* Provincial emission accounting for CO₂ mitigation in China: Insights from production, consumption and income perspectives [J]. *Applied Energy*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113754.
- [17] Liang S, Qu S, Zhu Z Q, *et al.* Income-based greenhouse gas emissions of nations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(1): 346-355.
- [18] Liu Z, Wang F, Tang Z Y, *et al.* Predictions and driving factors of production-based CO₂ emissions in Beijing, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **53**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101909.
- [19] Qian Y K, Zheng H R, Meng J, *et al.* Large inter-city inequality in consumption-based CO₂ emissions for China's pearl river basin cities [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, **176**, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105923.
- [20] Peng X, Tao X M, Zhang H, *et al.* CO₂ emissions from the electricity sector during China's economic transition: from the production to the consumption perspective [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, **27**: 1010-1020.
- [21] Li C, Zuo J, Wang Z, *et al.* Production- and consumption-based convergence analyses of global CO₂ emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121723.
- [22] 余晓泓, 詹夏颜. 基于收益原则的碳排放转移及中国碳排放责任研究 [J]. *资源科学*, 2018, **40**(1): 185-194.
- Yu X H, Zhan X Y. Analysis of carbon emissions transferred and China's carbon emissions responsibility based on the Income Principle [J]. *Resources Science*, 2018, **40**(1): 185-194.
- [23] Xie R, Hu G X, Zhang Y G, *et al.* Provincial transfers of enabled carbon emissions in China: a supply-side perspective [J]. *Energy Policy*, 2017, **107**: 688-697.
- [24] 丛建辉, 常盼, 刘庆燕. 基于三维责任视角的中国分省碳排放责任再核算 [J]. *统计研究*, 2018, **35**(4): 41-52.
- Cong J H, Chang P, Liu Q Y. Re-evaluation of China's provincial carbon emissions responsibility based on three-dimensional perspective [J]. *Statistical Research*, 2018, **35**(4): 41-52.
- [25] 李永源, 张伟, 蒋洪强, 等. 基于 MRIO 模型的中国对外贸易隐含大气污染转移研究 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 889-896.
- Li Y Y, Zhang W, Jiang H Q, *et al.* Transfers of air pollutant emissions embodied in China's foreign trade based on MRIO model [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 889-896.
- [26] 王育宝, 何宇鹏. 增加值视角下中国省域净碳转移权重分配 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, **31**(1): 15-25.
- Wang Y B, He Y P. Responsibility allocation of China's provincial net carbon transfer from the perspective of value-added [J]. *China Population Resources and Environment*, 2021, **31**(1): 15-25.
- [27] Wang P P, Li Y P, Huang G H, *et al.* A multi-scenario factorial analysis and multi-regional input-output model for analyzing CO₂ emission reduction path in Jing-Jin-Ji region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **300**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126782.
- [28] Liu H G, Fan X M. Value-added-based accounting of CO₂ emissions: A multi-regional input-output approach [J]. *Sustainability*, 2017, **9**, doi: 10.3390/su9122220.
- [29] 丁晓强, 张少军, 李善同. 中国经济双循环的内外导向选择——贸易比较偏好视角 [J]. *经济管理*, 2021, **43**(2): 23-37.
- [30] Leontief W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States [J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1936, **18**(3): 105-125.
- [31] Zheng H R, Bai Y C, Wei W D, *et al.* Chinese provincial multi-regional input-output database for 2012, 2015, and 2017 [J]. *Scientific Data*, 2021, **8**, doi: 10.1038/s41597-021-01023-5.
- [32] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [33] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Geneva: International Panel on Climate Change, 2019.
- [34] 国家统计局. 中国统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [35] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素 [J]. *地理科学进展*, 2021, **40**(12): 1999-2010.
- Wang R, Zhang H, Qiang W L, *et al.* Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization [J]. *Progress in Geography*, 2021, **40**(12): 1999-2010.
- [36] Yao F, Zhu H S, Wang M J. The impact of multiple dimensions of urbanization on CO₂ emissions: a spatial and threshold analysis of panel data on China's prefecture-level cities [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **73**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103113.
- [37] Zhang S X, Li Z F, Ning X, *et al.* Gauging the impacts of urbanization on CO₂ emissions from the construction industry: evidence from China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112440.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangshui Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)