

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制

钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邬娜, 封强, 傅泽强*

(中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012)

摘要:合理界定碳排放责任,开展省域间碳补偿是促进区域协同减排的重要途径。基于2017年多区域投入产出表,使用增加值贸易分解方法对各省市碳排放进行了分解,测算了省域间的隐含碳流动,并设计了基于减排成本的差异化碳补偿机制,为我国开展横向碳补偿提供了参考。结果表明:①省内最终需求引致碳排放占比53.56%、省外最终需求引致碳排放占比32.49%,省域间隐含碳流动显著存在;②隐含碳总体呈现出从北部、中部地区向京津地区和东南沿海地区转移的显著流动特征;③生产者、消费者和责任共担视角下各省市的碳排放总量相等,其中责任共担的分配思路体现了“受益原则”。④省域间碳减排成本存在差异,碳减排成本低的地区直接碳排放量高,产业以重工业为主,碳减排成本高的地区直接碳排放量低,产业以高新技术产业和服务业为主。⑤基于减碳成本各省市需支付(接受)的补偿金额不等,其中,广东需支付的补偿金额最高,内蒙古的受偿金额最高。

关键词:隐含碳;碳排放责任;多区域投入产出模型;减碳成本;碳补偿

中图分类号:X24 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2023)08-4637-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202209038

Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost

ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, WU Na, FENG Qiang, FU Ze-qiang*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: A reasonable definition of carbon emission responsibility and inter-provincial carbon compensation is an important approach to promote regional coordinated emission reduction. Here, based on the 2017 multi-regional input-output table, carbon emissions from provinces were decomposed by using the value-added trade decomposition method, the embodied carbon flows between provinces were measured, and a differentiated carbon compensation mechanism based on emission reduction cost was designed, which provides the reference for China to carry out horizontal carbon compensation. The main conclusions were as follows: ① the carbon emissions caused by the final demand within the province accounted for 53.56%, whereas the carbon emissions caused by the final demand outside the province accounted for 32.49%. The embodied carbon flows among provinces showed a significant existence. ② The embodied carbon showed a significant flow characteristic of transferring from the northern and central regions to the Beijing-Tianjin region and the southeastern coastal regions. ③ From the perspective of producers, consumers, and shared responsibility, the total carbon emissions of provinces and cities were equal, and the distribution idea of shared responsibility reflected the “benefit principle.” ④ There were differences in carbon emission reduction costs between provinces. In areas with low carbon emission reduction costs, direct carbon emissions were high, and the industries were dominated by heavy industry. In areas with high carbon emission reduction costs, direct carbon emissions were low, and the industries were high-tech industries and service industries. ⑤ The amount of compensation to be paid/accepted by provinces varied based on the cost of emission reduction. Among them, Guangdong had the highest amount of compensation to be paid, and Inner Mongolia had the highest amount of compensation to be accepted.

Key words: embodied carbon; carbon responsibility; multi-regional input-output model; carbon reduction cost; carbon compensation

气候变化及其影响已成为世界各国关注的焦点,作为负责任的大国,我国高度重视应对气候变化工作,积极履行降低二氧化碳排放的行动方案,相继出台《加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》、《2030年前碳达峰行动方案》和《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》等一系列指导性文件。根据《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书,2020年我国碳排放强度比2015年下降18.8%,超额完成“十三五”约束性目标累计少排放二氧化碳约58亿t。但需要注意到,我国碳排放总量仍然较大,是世界上碳排放量最高的国家,碳减排刻不容缓。

隐含碳是产品从原材料获取、制造加工和运输销售到成为产品的全过程碳排放^[1~4]。与直接碳排放概念相比,隐含碳从经济活动中生产要素交换的视角,对碳在经济系统中的流动给出了更为系统的

诠释^[5~7]。通过投入产出表可以将价值型关系转换为碳流动关系,从而对区域间的生产关系进行清晰描述,避免由于地区间复杂的贸易关系所导致的碳排放重复或遗漏计算^[8~12]。如马远等^[13]使用2015年EORA世界投入产出表测算了中国与RCEP成员国进出口贸易间的隐含能耗和隐含碳排放,得出中间品贸易在中国贸易隐含能耗及隐含碳排放中占据着主导地位的结论,并给出了调整贸易结构、减少高能耗高碳排中间品出口的相关建议;Peng等^[14]使用国际MRIO模型对国际贸易隐含碳的研究指出,发达国家通过从发展中国家进口大量能源密集型产

收稿日期:2022-09-05;修订日期:2022-10-28

基金项目:中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室开放基金项目(2022KFF-14);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2022YSKY-09)

作者简介:钟诗雨(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为低碳经济与隐含碳,E-mail:zhongshiyu@126.com

* 通信作者,E-mail:zqfu@craes.org.cn

品而造成了隐含碳的转移,加剧了二者之间的环境不平等性;陈晖等^[15]通过编制2012年31省市多区域投入产出表对我国省市间的贸易隐含碳排放进行了测算,得出隐含碳从经济发达且产业结构以高附加值低碳型产业为主的省份转移到欠发达且能源产业密集省份的结论。

随着区域间产业链和加工链不断完善,贸易隐含碳占碳排放的比例逐年增大,区域间贸易引致的碳转移问题已引起学者们的广泛关注^[16~22]。传统的消费责任法、生产责任法和收入责任法已无法保证公平和效率,更为科学合理的共担责任原则方案引起学者们的广泛讨论^[23~26],其中,Ferng等^[27]提出的生产者与消费者共担的责任分担模型成为如今计算碳排放责任的主流方法,该方法最初建议采用平均分配,但受生产方与消费方行为不对称性的影响,有学者对此方法提出了质疑,随着研究的不断深入,更为科学的分配方案被提出,如王文治等^[28]基于收益原则设计了生产责任与消费责任视角下的加权分配方案,引入增加值分配因子,计算了全球贸易隐含碳的责任共担;朱点钰等^[29]根据经济发展水平和资源禀赋等特征设置了省际贸易系数与国际贸易系数,对中国省级层面碳排放责任分担进行了测算。

碳补偿是在全球气候变暖和低碳经济背景下产生的新的生态补偿领域,碳补偿金额的估算需考虑单位价格和碳补偿量^[30~32]。在补偿量的测算方面,区域间贸易的产品和服务中隐含了大量碳排放,而在现有的碳排放核算体系下,这一部分碳由产品或服务的生产端完全承担,消费端却并未承担或较少承担相应的补偿责任,导致生产端承担了较大的减碳压力。在单位补偿价格的测算方面,现有研究主要有3种方法,其一是使用碳排放市场价格进行计算,如汪燕等^[17]使用北京、天津、上海和广东这4省域

排放权交易所2013年12月的平均碳排放结算价(以二氧化碳当量计)即42.5元·t⁻¹作为补偿单位价格;其二是使用碳汇价格进行计算,如赵荣钦等^[33]在余光辉等^[34]的研究基础上进行了进一步修正,将补偿单价定义为国内碳汇价格的平均值与各地经济发展情况的比值;其三是使用减碳成本进行计算,如吴立军等^[35]基于投入产出模型计算了单一产业部门最终使用需求减少引起的全产业系统产出损失,并将全部产业部门的加权平均作为碳单价。综合来看,以市场价格和碳汇价格为标准的单位价格适用范围较广,且获得普遍认可,但考虑到碳这一物品的公共属性,可能会导致市场交易价格与碳汇价格偏低,基于减碳成本的方案可排除这一因素的影响,测算结果更为公正。

目前区域横向碳补偿制度尚未确立,区域公平发展问题有待解决。因此,本文将在共担原则下准确界定各省市碳排放责任,明确生产端额外承担的碳排放及消费端应承担的碳排放量,精准测算单位碳补偿价格,研究结果将对促进我国区域间协同减排,助力“双碳”目标的达成具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 多区域投入产出模型

投入产出法是一种“自上而下”的研究方法,最初由Leontief^[36]在1936年提出,20世纪70年代开始应用于能源环境领域的研究^[37]。用于定量描述隐含碳排放量的跨区域转移的多区域投入产出模型基本框架如表1所示。其中, Z^r 表示地区 r 产品投入到地区 s 中间使用环节的价值量; Y^r 表示地区 r 产品投入到地区 s 最终使用中的价值量; V^r 表示地区 r 的增加值; EX^r 表示地区 r 对国外的出口; X^r 表示地区 r 的总产出。

表1 多区域投入产出模型(MRIO)基本框架
Table 1 Multi-region input-output model (MRIO) basic framework

项目		中间使用				最终使用				出口	总产出
		地区 r	地区 s	...	地区 t	地区 r	地区 s	...	地区 t		
中间投入	地区 r	Z^{rr}	Z^{rs}	...	Z^{rt}	Y^{rr}	Y^{rs}	...	Y^{rt}	EX^r	X^r
	地区 s	Z^{sr}	Z^{ss}	...	Z^{st}	Y^{sr}	Y^{ss}	...	Y^{st}	EX^s	X^s
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	地区 t	Z^{tr}	Z^{ts}	...	Z^{tt}	Y^{tr}	Y^{ts}	...	Y^{tt}	EX^t	X^t
增加值		V^r	V^s	...	V^t						
总投入		$(X^r)'$	$(X^s)'$	...	$(X^t)'$						

根据投入产出模型的基本理论,多区域投入产出表中存在行平衡关系,表示为:

$$\begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{11} & A^{12} & \cdots & A^{1n} \\ A^{21} & A^{22} & \cdots & A^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A^{n1} & A^{n2} & \cdots & A^{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{r=1}^n Y^{1r} + EX^1 \\ \sum_{r=1}^n Y^{2r} + EX^2 \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^n Y^{nr} + EX^n \end{pmatrix} \tag{1}$$

移项可得：

$$\begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A^{11} & -A^{12} & \cdots & -A^{1n} \\ -A^{21} & I - A^{22} & \cdots & -A^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -A^{n1} & -A^{n2} & \cdots & I - A^{nn} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^n Y^{1s} + EX^1 \\ \sum_{s=1}^n Y^{2s} + EX^2 \\ \vdots \\ \sum_{s=1}^n Y^{ns} + EX^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B^{11} & B^{21} & \cdots & B^{1n} \\ B^{21} & B^{22} & \cdots & B^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B^{n1} & B^{n2} & \cdots & B^{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^n Y^{1s} + EX^1 \\ \sum_{s=1}^n Y^{2s} + EX^2 \\ \vdots \\ \sum_{s=1}^n Y^{ns} + EX^n \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中， A 为地区间的直接消耗系数矩阵，其中元素可表示为：

$$A^{rs} = Z^{rs} / X^s \tag{3}$$

由式(1)，地区 r 的总产出可以表示为：

$$\begin{aligned} X^r &= A^{rr} X^r + \sum_{s \neq r} A^{rs} X^s + Y^{rr} + \sum_{s \neq r} Y^{rs} + EX^r \\ &= L^{rr} Y^{rr} + L^{rr} EX^r + L^{rr} \sum_{s \neq r} A^{rs} X^s \end{aligned} \tag{4}$$

式中， $L^{rr} = (I - A^{rr})^{-1}$ 为地区 r 的完全消耗系数。由式(2)，地区 s 的总产出可表示为：

$$\begin{aligned} X^s &= \sum_{t=1}^n B^{st} \sum_{k=1}^n Y^{tk} + \sum_{t=1}^n B^{st} EX^t = \sum_{t=1}^n B^{st} Y^{ts} + \\ &\quad \sum_{t=1}^n B^{st} Y^{tr} + \sum_{t=1, k \neq r, s}^n B^{st} Y^{tk} + \sum_{t=1}^n B^{st} EX^t \end{aligned} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)，可将地区 r 的总产出分解为表 2 所示的 8 条路径。

仅考虑区域间的总流量，引入碳排放系数，将地区间的价值型流动关系转为碳排放流动关系^[38]，地区 r 的碳排放强度可表示为：

$$d^r = c^r / X^r \tag{6}$$

式中， c^r 为地区 r 的直接碳排放量， X^r 为地区 r 的总产出。

仅考虑地区 r 与地区 s 时，可将表 1 所示 8 条路径进一步分解为 4 个部分，分别为路径 1 和路径 4 组成的地区 r 生产并最终用于满足地区 r 最终需求的 PSD；由路径 2、路径 3 和路径 5 组成的由地区 r 生产并最终用于满足地区 s 最终需求的 PFD；路径 6 组成的由地区 r 生产并最终用于满足地区 r 出口的 PSE；路径 7、路径 8 组成的由地区 r 生产最终在地区 s 出口的 PFE。根据产品的最初生产地和最终消费地，将地区 r 和地区 s 的碳流动表示如表 3 所示。

表 2 地区 r 总产出的分解结果

Table 2 Decomposition results of total output in region r		
路径编号	表达式	解释
1	$L^{rr} Y^{rr}$	地区 r 的最终品本地需求
2	$L^{rr} \sum_{s \neq r} Y^{rs}$	除地区 r 外的其他地区最终需求，即地区 r 的最终品流出
3	$L^{rr} \sum_{s \neq r} A^{rs} \sum_{t=1}^n B^{st} Y^{ts}$	地区 r 的中间品投入到其他地区的中间使用中，并最终用于满足中间品流入地的最终需求
4	$L^{rr} \sum_{s \neq r} A^{rs} \sum_{t=1}^n B^{st} Y^{tr}$	地区 r 的中间品投入到其他地区的中间使用中，并最终返回地区 r 满足地区 r 的最终需求
5	$L^{rr} \sum_{t \neq r, s} A^{rt} \sum_{k=1}^n B^{tk} Y^{ks}$	地区 r 的中间品投入到其他地区的中间使用中，并最终用于满足流入地与地区 r 以外的的最终需求
6	$L^{rr} EX^{rr}$	地区 r 的最终品出口
7	$L^{rr} \sum_{s \neq r} A^{rs} \sum_{t=1}^n B^{st} EX^t$	地区 r 的中间品投入到其他地区的中间使用中，并最终回到地区 r 出口
8	$L^{rr} \sum_{t \neq r} A^{rt} \sum_{s \neq t} B^{ts} EX^s$	地区 r 的中间品投入到其他地区中间使用中，并在中间品流入地出口

表3 地区 r 与地区 s 间的隐含碳流动关系Table 3 Relationship of embodied carbon flow between region r and region s

变量名	最初生产地	最终消费地	表达式
c^{rr}	r	r	$\text{PSD}^r + \text{PSE}^r$
c^{rs}	r	s	$\text{PFD}^{rs} + \text{PFE}^{rs}$
c^{ss}	s	s	$\text{PSD}^s + \text{PSE}^s$
c^{sr}	s	r	$\text{PFD}^{sr} + \text{PFE}^{sr}$

因此,地区 r 对地区 s 的隐含碳净转移量为:

$$T^{rs} = c^{rs} - c^{sr} \quad (7)$$

1.2 不同责任视角下的碳排放核算模型

碳排放责任测算可从生产者、消费者和共担责任视角进行测算,因此,在地区 r 与地区 s 的贸易中,地区 r 生产者责任视角下的碳排放 $C_{r \text{ produce}}$ 可表示为:

$$C_{r \text{ produce}} = c^{rr} + c^{rs} \quad (8)$$

消费者责任视角下的碳排放 $C_{r \text{ costume}}$ 可表示为:

$$C_{r \text{ costume}} = c^{rr} + c^{sr} \quad (9)$$

共担责任视角下的碳排放 $C_{r \text{ shared}}$ 可表示为:

$$C_{r \text{ shared}} = c^{rr} + \alpha^{rs} c^{rs} + (1 - \alpha^{rs}) c^{sr} \quad (10)$$

式中, α^{rs} 为最终需求与出口引致的隐含碳净转移分配系数,为地区 r 向地区 s 的增加值流出占双边增加值流出总量的比例计算,计算公式为:

$$\alpha^{rs} = V^{rs} / (V^{rs} + V^{sr}) \quad (11)$$

式中, V^{rs} 为地区 r 与地区 s 贸易中地区 r 获得的增加值, V^{sr} 为地区 r 与地区 s 贸易中地区 s 获得的增加值, α^{rs} 越大表示地区 r 在与地区 s 的贸易中实现了更多的增加值,获得经济利益更大,应承担更多的碳排放责任。在具体测算时存在 2 种情况:① $T^{rs} > 0$, 地区 r 是隐含碳的净流入地,此时, α^{rs} 越大说明地区 r 在双边贸易中获取的利益越大,应承担更多的碳排放责任,这符合“谁受益谁付费”的受益原则;② $T^{rs} < 0$, 地区 r 是隐含碳的净流出地, α^{rs} 越大则地区 r 承担的碳排放责任越少,与“受益原则”相悖,因此需要用反向分配因子 $(1 - \alpha^{rs})$ 调整,以保证分担原则的一致性。

1.3 基于碳减排成本的碳补偿标准估算方法

基于碳减排成本的碳补偿标准估算需要明确各省市的减碳成本,现有研究一般讨论碳减排的边际成本,普遍参考 Boyd 等^[39]开创的距离函数方法体系,以影子价格估算减排成本,但由于以影子价格估算的碳减排成本与会计意义的成本概念并不一致,对于社会经济体系中的减排代价无法全面衡量。因此本文参考了吴立军等^[40]基于行业视角下碳减排成本的研究方法,在投入产出模型的基础上对各地

区碳减排成本进行估算。与产业部门间的复杂关系相似,系统视角下,各地区之间存在的紧密生产关系可能使单个地区的减排引起的产出减少不仅发生在本地区,还会影响其他地区,因此利用投入产出模型对碳减排成本的估算即为在一定的生产结构下,某一地区的碳减排导致全部地区的产出损失,并以此作为衡量地区减排的成本。具体方法为假设地区 r 减少一个单位的最终需求,其他地区的最终需求保持不变,则各地区的最终需求变化可以表示为:

$$\Delta Y = [\Delta y^1 = 0, \dots, \Delta y^r = -1, \dots, \Delta y^n = 0]^T \quad (12)$$

地区 r 单位最终需求减少所引致的碳排放变动估算矩阵如下:

$$\Delta C^r = [\Delta c^{r1}, \dots, \Delta c^{rr}, \dots, \Delta c^{rn}]^T = \hat{D} L \Delta Y \quad (13)$$

式中, $\hat{D}$ 为各地区碳排放强度的对角阵, L 为多区域投入产出表的列昂惕夫逆矩阵。受地区间关联作用,地区 r 最终需求减少不仅将减少地区 r 自身的碳排放,也将使其他地区的碳排放减少,因此,地区 r 减少一个单位的最终需求所引致的碳减排总量为

$\sum_{i=1}^n \Delta c^{ri}$, 因此地区 r 单位碳减排成本为:

$$cc^r = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta c^{ri}} \quad (14)$$

从碳排放的共担责任视角出发,地区 r 与地区 s 间发生的隐含碳净转移量中,地区 r 应承担 $\alpha^{rs} T^{rs}$ 的碳排放责任,地区 s 应承担 $(1 - \alpha^{rs}) T^{rs}$ 的碳排放责任,而地区 s 应承担的这部分碳排放实际在地区 r 发生,因此地区 s 需向地区 r 进行碳补偿,补偿金额为 $(1 - \alpha^{rs}) T^{rs} cc^r$ 。

1.4 数据来源与处理

本研究所使用的省域间投入产出数据来源于 Zheng 等^[41]编制的 2017 年我国多区域投入产出数据,并在此基础上基于本研究的研究对象进行了调整,最终形成 2017 年我国 30 个省、市、自治区间的投入产出表(由于西藏自治区、香港、澳门和中国台湾的相关数据缺失,本研究未包含以上 4 个地区),碳排放数据来自于 CEADs 中国碳核算数据库发布的 2017 年 30 个省份排放清单数据^[42]。

2 结果与分析

2.1 省域直接碳排放分解结果

从全国层面分析,2017 年我国 30 省市碳排放总量约为 986 600 万 t,碳排放强度为 0.438 t·万元⁻¹。直接碳排放的分解结果如表 4 所示,可以

看出,我国省内最终需求引致的碳排放是碳排放的主要来源,占比为 53.56%,其次,省外最终需求引致的碳排放占比为 32.49%,说明省域间的隐含碳流动与转移显著存在。

表 4 2017 年全国碳排放分解结果

Table 4 National carbon emission decomposition results in 2017										
项目	省内最终需求引致的碳排放 (PSD)		省内出口引致的碳排放 (PSE)	省外最终需求引致的碳排放 (PFD)			省外出口引致的碳排放 (PFE)		总计排放量 / 万 t	
	1 ¹⁾ 4			6	2	3	5	7		8
排放量/万 t	524 812	3 615	94 642	120 047	118 979	81 478	425	42 602	986 600	
占比/%	53. 19	0. 37	9. 59	12. 17	12. 06	8. 26	0. 04	4. 32		
合计排放量/万 t	528 426		94 642	320 504			42 602			
占比/%	53. 56		9. 64	32. 49			4. 32			

1) 表示路径编号

在各省市层面,2017 年各省市直接碳排放量与碳排放强度的计算和分解结果如图 1 所示。从碳排放总量来看,山东、江苏和河北这 3 省的直接碳排放相对较高,分别占全国碳排放量的 8.17%、7.46% 和 7.36%,海南、青海和北京的直接碳排放较低。从碳排放强度来看,各省市间碳排放强度差异较大,主要表现为西北高东南低,其中,宁夏、内蒙古和新疆的碳排放强度最大,分别为 2.112、1.860 和 1.563 t·万元⁻¹,该 3 省均位于西北地区,是我国重要的能源战略基地,产业以能源开采、加工等重工业为主,因此碳排放强度偏高;北京、上海和广东的碳排放强度最低,分别为 0.105、0.221 和 0.234 t·万元⁻¹。

分解来看,2017 年我国由省内最终需求引致的碳排放(PSD)占碳排放总量约 53.56%,其中湖北、

四川、宁夏和青海这 4 省最终需求引致的碳排放较高,均大于 70%。省内出口引致的碳排放(PSE)占碳排放总量约 9.64%,其中,浙江和广东这 2 省由省内出口引致的碳排放量分别占该地区直接碳排放量的 33.86% 和 26.13%,是我国的出口大省。省外最终需求引致的碳排放(PFD)占碳排放总量约 32.49%,其中,吉林和海南由省外最终需求引致的碳排放占比均超过该省直接碳排放的 50%,可以说其生产过程所产生的大部分碳排放都是用于满足其他地区的最终需求。省外出口引致的碳排放(PFE)占碳排放总量约 4.32%,各地区省外出口引致的碳排放比例相差不大,在 1%~7% 之间。综上,引致各省市碳排放的主要需求不同,减碳政策也应结合实际情况,分类施策。

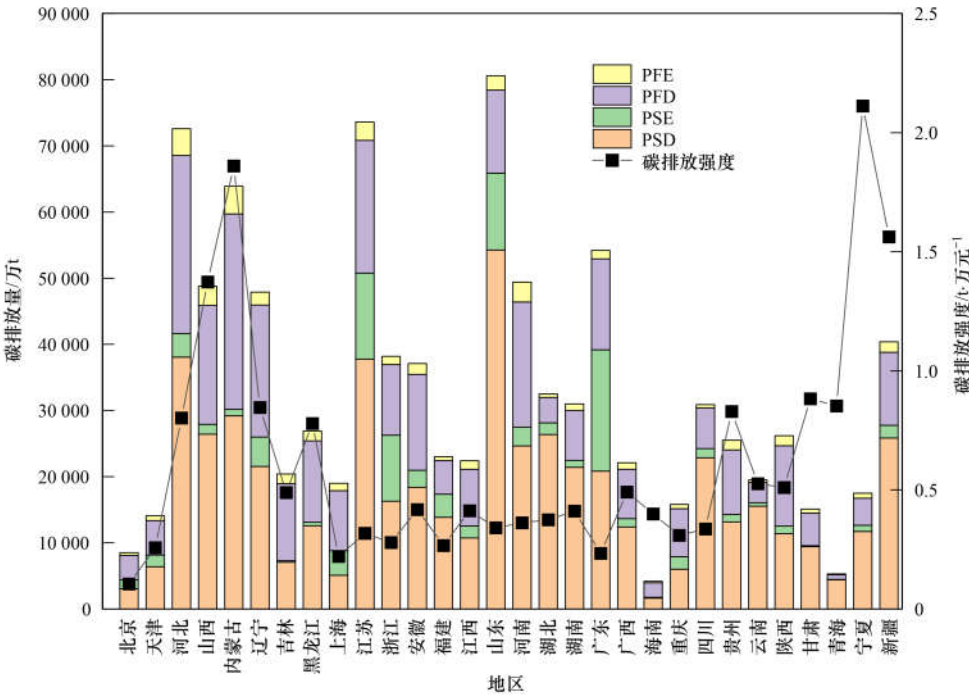


图 1 我国 30 省市直接碳排放量与碳排放强度的计算和分解结果

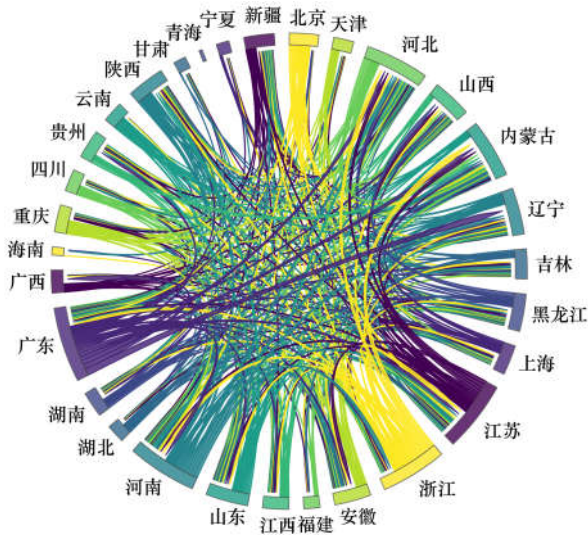
Fig. 1 Calculation and decomposition results of direct carbon emission and carbon emission intensity in 30 provinces

2.2 省域间隐含碳的流动与净转移

2017 年由省外需求引起的隐含碳流动量

363 106 万 t,省域间隐含碳路径如图 2 所示。可以看出,隐含碳流入量最高的省市为内蒙古、河北和江

苏,分别占省域隐含碳生产总量的 9.28%、8.53% 和 6.29%,其中;隐含碳流出最高的省市为广东、浙江和江苏,分别占隐含碳消费总量的 10.47%、9.56% 和 7.48%.



箭头表示隐含碳流动方向,由隐含碳流出省份指向隐含碳流入省份(即从含碳产品消费省份流向含碳产品生产省份),由于省域间隐含碳流动关系密切且复杂,其中仅显示隐含碳流动量在前 50% 的流动路径

图 2 省域间隐含碳流动路径示意

Fig. 2 Schematic diagram of inter-provincial embodied carbon flow paths

由式(7)计算省域间的隐含碳净流动量,计算结果如图 3 所示.可以看出,隐含碳净流入量较高的省份有内蒙古(2.43 亿 t)、河北(1.91 亿 t)、山西(1.42 亿 t)和辽宁(1.10 亿 t),占隐含碳流动量的

44.75%;隐含碳流出量较高的省份有广东(2.45 亿 t)、浙江(2.36 亿 t)、北京(1.25 亿 t)和江苏(1.10 亿 t),占隐含碳净流动量的 46.8%. 总体呈现出省域间最终需求引致北部、中部地区隐含碳净流入,同时引起京津地区、东南沿海地区隐含碳净流出的显著流动特征.

2.3 省域碳排放责任共担与碳补偿测算

表 5 中前 4 列为 2017 年各省市在不同责任视角下的碳排放量,总体来看 3 种责任视角下的碳排放量均为 986 600 万 t,各省市在不同责任视角下的碳排放量不同,但碳排放总量一致.

从共担责任视角计算碳补偿,具体思路如下(以北京和天津为例):根据上文公式计算,2017 年北京与天津之间的隐含碳净转移量为 336.47 万 t,北京为净隐含碳流出地区,天津为净隐含碳流入地区,两地间生产端和消费端的隐含碳净转移分配系数分别为 0.63 和 0.37,天津和北京贸易产生的增加值比例相对较大,进行隐含碳分配后天津应承担碳为 213.42 万 t,北京应承担碳为 123.05 万 t,这种分配思路体现了“谁受益谁补偿”的生态补偿原则,而实际上应由北京所承担的碳(123.05 万 t)也在天津排放,考虑两地间的共担责任,这部分碳排放应由北京向天津支付补偿金额.

表 5 后 4 列为各省市补偿标准和在共担责任原则下的碳补偿金额.分析碳减排成本,各省市碳减排成本在 0.27 ~ 1.88 万元·t⁻¹之间,平均碳减排成本为 0.93 万元·t⁻¹,各省市之间碳减排成本相差较

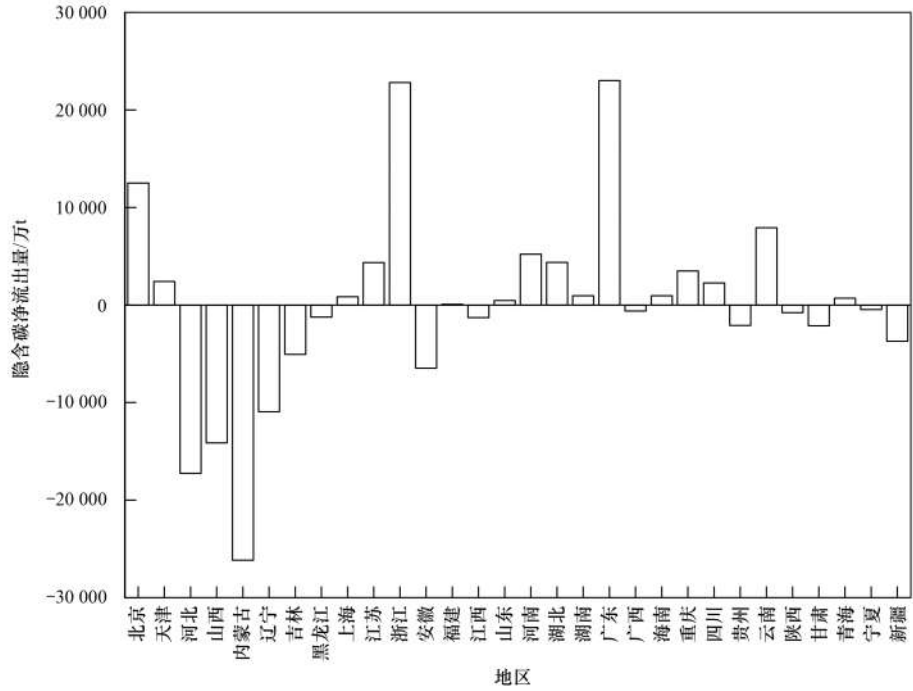


图 3 省域间碳隐含碳净流动量

Fig. 3 Net flow of carbon embodied among provinces

大,呈现出西北到东南地区递增的整体特征,具体表现为宁夏、内蒙古和山西的碳减排成本最低,分别为0.27、0.31和0.37万元·t⁻¹,这些地区大多为能源产品供应加工基地,其所生产的产品隐含碳较高且增加值较低,故具有较大的减排空间;北京、上海和广东的碳减排成本最高,为1.87、1.86和1.64万元·t⁻¹,这些地区的高新技术产业与服务业较为发达,其所生产的产品隐含碳较少且增加值高,因此碳减排成本较高。

进一步依据上述共担原则确定的碳补偿思路,算得各省市的补偿(受偿)金额,净碳补偿金额<0,说明该地需向其他地区进行碳补偿,为碳补偿区;净碳补偿金额>0,说明该地接收其他地区进行碳补偿,为碳受偿区。结果表明10个隐含碳净流出地区需要支付53.72~553.19亿元的碳补偿金额,其中广东省需支付的净碳补偿金额最高,需向除北京、浙江、湖北、云南和四川外的24个省级行政区支付553.19亿元的碳补偿金额;相反,20个隐含碳净流

入地区可以获得46.46~3100.31亿元的碳补偿金额,其中,内蒙古自治区所获得的碳补偿金额最高,研究范围内的29个省市均需向其支付总计3100.31亿元碳补偿金额。因此,对于以广东、北京和浙江为代表的碳补偿区,这些地区的经济社会发展水平较高,产业以高新技术产业、加工制造业和服务业为主,生产原料大都来自其他省份,自身产生的直接碳排放较少,但隐含碳流出较多,碳减排成本也普遍较高,对于这些地区一方面需承担相应的碳减排责任,积极执行碳补偿标准,减少自身对高碳产品的需求;另一方面需起到碳减排的带头作用,为其他地区提供减排技术支持,促进全国各省市的协同减排;对于以内蒙古、河北和辽宁为代表的碳受偿区,这些地方在省际贸易链中多以能源、矿石等原材料产品流出,引起较大的隐含碳流入,碳减排成本较低,应从生产侧着力提升清洁生产水平,不断提升能源利用效率,降低碳排放强度,同时利用地方优势,发展太阳能、风能、潮汐能等可再生能源。

表5 碳排放责任共担与碳补偿金额(2017年)

Table 5 Carbon emission responsibility shared and carbon compensation amount (2017)							
地区	生产者责任碳排放/万t	消费者责任碳排放/万t	共担责任碳排放/万t	基于碳减排成本的补偿标准/万元·t ⁻¹	碳补偿金额/亿元	碳受偿金额/亿元	净碳补偿金额/亿元
北京	8 500.00	20 998.19	14 274.77	1.88	-4 446.05	19.59	-4 426.46
天津	14 100.00	16 520.08	15 797.46	1.29	-954.90	501.96	-452.94
河北	72 600.00	55 356.15	68 300.24	0.51	-431.93	3 432.80	3 000.87
山西	48 800.00	34 661.15	44 063.58	0.37	-100.65	2 048.04	1 947.39
内蒙古	63 900.00	37 740.91	54 315.10	0.31	0.00	3 100.31	3 100.31
辽宁	47 900.00	36 969.15	43 731.48	0.61	-291.51	2 745.93	2 454.42
吉林	20 400.00	15 343.51	19 729.59	0.87	-434.61	1 832.62	1 398.01
黑龙江	26 900.00	25 667.42	25 379.98	0.67	-585.78	1 602.92	1 017.14
上海	19 000.00	19 845.78	22 303.93	1.86	-882.82	1 417.97	535.15
江苏	73 600.00	77 952.95	77 668.97	1.14	-2 591.94	2 408.93	-183.02
浙江	38 200.00	61 004.83	42 480.10	1.17	-4 986.72	425.24	-4 561.47
安徽	37 100.00	30 625.55	36 723.06	0.83	-216.14	2 079.96	1 863.83
福建	23 000.00	23 082.27	24 293.98	1.52	-618.62	691.18	72.56
江西	22 400.00	21 115.09	22 807.87	0.89	-474.64	978.06	503.42
山东	80 600.00	81 065.17	81 044.79	0.96	-1 143.03	1 852.70	709.67
河南	49 400.00	54 608.77	50 536.84	0.91	-2 350.51	1 465.65	-884.87
湖北	32 500.00	36 875.49	33 285.48	1.05	-1 073.50	196.12	-877.38
湖南	31 000.00	31 946.58	32 013.47	1.04	-720.99	781.19	60.20
广东	54 200.00	77 212.46	62 500.96	1.64	-6 411.56	858.37	-5 553.19
广西	22 100.00	21 487.83	21 946.95	0.89	-744.43	790.89	46.46
海南	4 200.00	5 144.35	4 400.28	1.04	-375.12	205.07	-170.05
重庆	15 800.00	19 293.98	17 756.69	1.11	-1 403.92	509.14	-894.78
四川	30 900.00	33 162.04	32 373.13	1.15	-1 060.80	445.23	-615.57
贵州	25 500.00	23 395.10	23 668.37	0.63	-264.16	1 248.98	984.82
云南	19 500.00	27 419.51	19 652.38	0.87	-1 216.39	26.67	-1 189.72
陕西	26 200.00	25 413.54	26 322.05	0.86	-871.59	1 457.30	585.71
甘肃	15 100.00	12 970.98	14 182.35	0.55	-111.93	563.44	451.51
青海	5 300.00	5 997.39	5 107.15	0.55	-96.44	42.72	-53.72
宁夏	17 500.00	17 032.43	14 691.80	0.27	-97.53	345.65	248.12
新疆	40 400.00	36 691.35	35 247.19	0.38	-204.07	1 087.65	883.58

综上,使用隐含碳净转移分配系数进行计算后,省域隐含碳流动被分解,总体来看,生产端需承担

64.17%的隐含碳排放责任,消费端需承担33.83%的隐含碳排放责任,超过70%的省域隐含碳流动中生产者需承担的隐含碳大于消费者需承担的隐含碳,而这部分应由消费地区承担的碳未被省域间贸易利益补偿,应以专项碳补偿基金的形式对生产地区实施补偿,从而鼓励和促使生产地区进一步发展减碳技术,推动区域间协同减排。

3 讨论

现有研究多数使用碳交易价格和基于行业的碳减排成本加权作为补偿标准,对我国各省市碳排放的差异性考虑不周,可能导致核算结果不准确,或不能体现公平性。本研究以基于投入产出表的碳减排成本作为省市间的碳补偿标准,本质上是以省市间经济关联为基础衡量的差异化减排产出损失计算,充分考虑了不同省市间发展阶段、产业结构的差异性,得出的差异化补偿标准更能契合各省市的实际情况,更具合理性和科学性。从核算结果看,本研究所选取的补偿标准与现有研究的补偿金额相比存在差异,但仍在现有研究选取的补偿标准范围内($42.5 \sim 12986 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$,以二氧化碳当量计)^[17,28,33~35,43~45],表明本文的研究思路和方法丰富和拓展了碳补偿机制研究方法,更具有可操作性和科学性。

4 建议

(1)科学制定差异化减排政策。不同地区引致其碳排放的主要因素不同,应站稳扩大内需的基本点,对于省内最终需求引致碳排放较大的地区,树立绿色生产、绿色生活理念,减少企业、居民对高碳产品的需求;对于省外需求和出口引致碳排放较高的地区,尽快提升出口产品生产工艺,减少过程中的能源使用,减少隐含碳生产。

(2)积极履行碳补偿责任。东南沿海、京津地区等隐含碳净流出地区具有较高的经济社会发展水平,在省域贸易中获取了较大收益,但也通过使用高碳产品,向外转移大量贸易隐含碳,是碳排放净补偿区,应向受偿区提供碳补偿,并提供资金、技术、人员等方面的支持,促进双方协同降碳;西北地区、东北地区等隐含碳净流入地区一般为欠发达地区,产业结构层次偏低,是碳排放净受偿区,应积极寻求产业转型升级,提高产品附加值,推进地区能源结构改革,提高能源使用效率。

(3)建立完善碳补偿制度。一方面需建立全国省域碳补偿机制,确保受偿区获得合理补偿金额,另一方面应明确补偿资金的使用领域,明确受偿资金

用于鼓励清洁生产技术、碳减排技术、能源综合利用技术的开发与应用,提高清洁能源使用率,减少受偿区隐含碳流入。

(4)建立省际协同减排机制。以碳排放关联为基础,突破地理空间局限,整合各地区资源与技术优势,形成跨省产业协同链条,共建生态产业链、绿色供应链。鼓励跨省贸易主体间形成技术创新共同体,产业链上下游共同发力降低全国整体碳减排成本,解决隐含碳跨省流动产生的负外部性问题。

5 结论

(1)2017年我国30省市碳排放总量约为986600万t,碳排放强度为 $0.438 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$,省内最终需求引致碳排放占比53.56%,是碳排放的主要来源,省外最终需求引致碳排放占比32.49%,省域间隐含碳流动显著存在,引致各省市碳排放的主要需求不同,需结合实际情况分类施策。

(2)由省外需求引致的隐含碳流动量约为363106万t,隐含碳净流入量较高的省份集中在西北、东北地区,净流出量较高的省份集中在东南沿海、京津地区,隐含碳总体呈现出从北部、中部地区向京津地区、东南沿海地区转移的显著流动特征,从省市间贸易产业链分析,北部、中部地区产业结构偏重、能耗强度偏高,主要产品以原料为主,处于产业链上游,呈现出隐含碳的净流入,京津地区和东南沿海地区以最终品的生产加工业与服务业为主,处于产业链中下游,呈现出隐含碳的净流出,这体现了地区间贸易分工的显著特征。

(3)3种责任视角下各省市的碳排放总量相等,证实了责任共担分配思路的有效性,体现了“受益原则”。各省市碳减排成本在 $0.27 \sim 1.88 \text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$ 之间,平均碳减排成本为 $0.93 \text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$,省域间碳减排成本呈现出西北到东南地区递增的整体特征,碳减排成本低的地区直接碳排放量高,产业以重工业为主,碳减排成本高的地区直接碳排放量低,产业以高新技术产业和服务业为主。基于碳减排成本各省市需支付/接受的补偿金额不等,这与各省市的碳补偿量和受偿地区的碳减排成本相关,其中,广东需支付的补偿金额最高,约为5553.19亿元,内蒙古的受偿金额最高,约为3100.31亿元。

参考文献:

- [1] Machado G, Schaeffer R, Worrell E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach[J]. *Ecological Economics*, 2001, **39**(3): 409-424.
- [2] Hou H M, Wang J W, Yuan M N, et al. Estimating the mitigation potential of the Chinese service sector using embodied carbon emissions accounting [J]. *Environmental Impact*

- Assessment Review, 2021, **86**, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106510.
- [3] 李峰, 胡剑波. 中国产业部门隐含碳排放变化的影响因素动态研究——基于细分行业数据的实证分析[J]. 经济问题, 2021, (11): 77-87.
- Li F, Hu J B. Dynamic analysis of influential factors on the change of embodied carbon emissions in China's industrial sectors: empirical research based on the industrial data[J]. On Economic Problems, 2021, (11): 77-87.
- [4] 齐晔, 李惠民, 徐明. 中国进出口贸易中的隐含碳估算[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(3): 8-13.
- Qi Y, Li H M, Xu M. Accounting embodied carbon in import and export in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, **18**(3): 8-13.
- [5] 宋金昭, 邱小龙, 王晓平. 中国产业部门间隐含碳排放流动结构分析——基于复杂网络的视角[J]. 统计与信息论坛, 2020, **35**(3): 49-58.
- Song J Z, Di X L, Wang X P. Structure analysis of embodied carbon emission flow among China's industrial sectors: based on the perspective of complex networks[J]. Statistics & Information Forum, 2020, **35**(3): 49-58.
- [6] 王喜莲, 金青. 碳中和背景下中国贸易隐含碳排放及责任分担[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(11): 205-210.
- Wang X L, Jin Q. China's trade embodied carbon emissions and shared responsibility under the background of carbon neutrality[J]. Environmental Science & Technology, 2021, **44**(11): 205-210.
- [7] 闫敏, 孙慧. 经济内循环视角下中国省域间隐含碳转移网络结构特征研究[J]. 生态经济, 2022, **38**(2): 13-21.
- Yan M, Sun H. Research on the network structural characteristics of China's provincial implicit carbon transfer from the perspective of economic internal circulation[J]. Ecological Economy, 2022, **38**(2): 13-21.
- [8] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(4): 696-708.
- Zhang Q F, Fang K, Xu M, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(4): 696-708.
- [9] Zhang Z H, Zhao Y H, Su B, et al. Embodied carbon in China's foreign trade: an online SCI-E and SSCI based literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, **68**: 492-510.
- [10] Sato M. Embodied carbon in trade: a survey of the empirical literature[J]. Journal of Economic Surveys, 2014, **28**(5): 831-861.
- [11] 李晖, 刘卫东, 唐志鹏. 全球贸易隐含碳净转移的空间关联网络特征[J]. 资源科学, 2021, **43**(4): 682-692.
- Li H, Liu W D, Tang Z P. Spatial correlation network of net carbon transfer in global trade[J]. Resources Science, 2021, **43**(4): 682-692.
- [12] 黄和平, 易梦婷, 曹俊文, 等. 区域贸易隐含碳排放时空变化及影响效应——以长江经济带为例[J]. 经济地理, 2021, **41**(3): 49-57.
- Huang H P, Yi M T, Cao J W, et al. Trade embodied carbon emissions and its effects of China: take the Yangtze River economic belt as an example[J]. Economic Geography, 2021, **41**(3): 49-57.
- [13] 马远, 骆佩. 中国国际贸易的隐含能源流动及隐含碳排放——以 RCEP 为例[J]. 价格月刊, 2021, (9): 69-78.
- Ma Y, Luo P. Embodied energy flow and embodied carbon emissions of China's international trade——taking RCEP as an example[J]. Prices Monthly, 2021, (9): 69-78.
- [14] Peng S J, Zhang W C, Sun C W. 'Environmental load displacement' from the North to the South: a consumption-based perspective with a focus on China[J]. Ecological Economics, 2016, **128**: 147-158.
- [15] 陈晖, 温婧, 庞军, 等. 基于 31 省 MRIO 模型的中国省际碳转移及碳公平研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(12): 5540-5550.
- Chen H, Wen J, Pang J, et al. Research on the carbon transfer and carbon equity at provincial level of China based on MRIO model of 31 provinces[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(12): 5540-5550.
- [16] Andersson F N G. International trade and carbon emissions: the role of Chinese institutional and policy reforms[J]. Journal of Environmental Management, 2018, **205**: 29-39.
- [17] 汪燕, 王文治, 马淑琴. 中国省域间碳排放责任共担与碳减排合作[J]. 浙江社会科学, 2020, (1): 40-51.
- Wang Y, Wang W Z, Ma S Q. Responsibility sharing of China's inter-provincial carbon emission and cooperation in carbon reduction[J]. Zhejiang Social Sciences, 2020, (1): 40-51.
- [18] Wang Z H, Li Y M, Cai H L, et al. Regional difference and drivers in China's carbon emissions embodied in internal trade[J]. Energy Economics, 2019, **83**: 217-228.
- [19] 郑航, 叶阿忠. 空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4401-4407.
- Zheng H, Ye A Z. Carbon emission reduction effect of spatial correlation network structure characteristics: from the perspective of urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4401-4407.
- [20] Chuai X W, Gao R Y, Huang X J, et al. The embodied flow of built-up land in China's interregional trade and its implications for regional carbon balance[J]. Ecological Economics, 2021, **184**, doi: 10.1016/J.ECOLECON.2021.106993.
- [21] 彭水军, 张文城, 孙传旺. 中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J]. 经济研究, 2015, **50**(1): 168-182.
- Peng S J, Zhang W C, Sun C W. China's production-based and consumption-based carbon emissions and their determinants[J]. Economic Research Journal, 2015, **50**(1): 168-182.
- [22] Chen J Q, Lian X Y, Su H N, et al. Analysis of China's carbon emission driving factors based on the perspective of eight major economic regions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(7): 8181-8204.
- [23] 魏守道. 碳排放责任划分原则的研究进展[J]. 湖北经济学院学报, 2019, **17**(5): 89-95.
- Wei S D. Research progress of carbon emission responsibility principles[J]. Journal of Hubei University of Economics, 2019, **17**(5): 89-95.
- [24] Zhang Y G. Provincial responsibility for carbon emissions in China under different principles[J]. Energy Policy, 2015, **86**: 142-153.
- [25] 王育宝, 何宇鹏. 增加值视角下中国省域净碳转移权责分配[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.
- [26] 徐盈之, 郭进. 开放经济条件下国家碳排放责任比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, **24**(1): 55-63.
- Xu Y Z, Guo J. A comparative study of countries' carbon responsibilities for carbon emission in open economy[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, **24**(1): 55-63.

- [27] Ferng J J. Allocating the responsibility of CO₂ over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit [J]. *Ecological Economics*, 2003, **46**(1): 121-141.
- [28] 王文治, 杨爽, 王怡. 全球贸易隐含碳的责任共担及其跨区域补偿[J]. *环境经济研究*, 2019, **4**(3): 30-47.
Wang W Z, Yang S, Wang Y. The responsibility sharing of carbon emissions embodied in global trade and its cross-border compensation[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2019, **4**(3): 30-47.
- [29] 朱点钰, 马小林, 张艳霞, 等. 中国分省的碳排放责任分担机制探讨[J]. *环境保护*, 2018, **46**(12): 58-63.
Zhu D Y, Ma X L, Zhang Y X, *et al.* Discussion on the sharing mechanism of carbon emission responsibility in China [J]. *Environmental Protection*, 2018, **46**(12): 58-63.
- [30] 康彦霞, 马忠. 黄河流域省区隐含碳排放及其碳转移研究[J]. *资源开发与市场*, 2022, **38**(8): 930-938.
Kang Y X, Ma Z. Embodied carbon emission and carbon transfer at the provincial level of the yellow river basin [J]. *Resource Development & Market*, 2022, **38**(8): 930-938.
- [31] 刘春腊, 刘卫东, 陆大道, 等. 基于投入产出方法的中国省域产业生态补偿研究[J]. *地理科学进展*, 2016, **35**(1): 67-77.
Liu C L, Liu W D, Lu D D, *et al.* Inter-provincial industry eco-compensation in China based on input-output method [J]. *Progress in Geography*, 2016, **35**(1): 67-77.
- [32] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 等. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议[J]. *地域研究与开发*, 2015, **34**(5): 116-120.
Zhao R Q, Liu Y, Li Y X, *et al.* Overview of regional carbon compensation: mechanism, pattern and policy [J]. *Areal Research and Development*, 2015, **34**(5): 116-120.
- [33] 赵荣钦, 刘英, 马林, 等. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(10): 1675-1687.
Zhao R Q, Liu Y, Ma L, *et al.* County-level carbon compensation of Henan province based on carbon budget estimation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(10): 1675-1687.
- [34] 余光辉, 耿军军, 周佩纯, 等. 基于碳平衡的区域生态补偿量化研究——以长株潭绿心昭山示范区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(4): 454-458.
Yu G H, Geng J J, Zhou P C, *et al.* Quantitative research of regional ecological compensation based on carbon balance—Take Zhaoshan demonstration area of Changzhutan green heart as an example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(4): 454-458.
- [35] 吴立军, 田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J]. *地理研究*, 2022, **41**(1): 149-166.
Wu L J, Tian Q B. Study on regional carbon ecological security and ecological compensation in China under carbon neutralization target[J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(1): 149-166.
- [36] 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.
- [37] Wiedmann T, Minx J, Barrett J, *et al.* Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis[J]. *Ecological Economics*, 2006, **56**(1): 28-48.
- [38] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 京津冀区域生产和消费 CO₂ 排放的时空特点分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3619-3631.
Wang H, Chen C C, Pan T, *et al.* Spatial temporal differentiation of product-based and consumption-based CO₂ emissions and balance in the Beijing-Tianjin-Hebei region: an economic input-output analysis [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3619-3631.
- [39] Boyd G A, Tolley G, Pang J. Plant level productivity, efficiency, and environmental performance of the container glass industry[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2002, **23**(1): 29-43.
- [40] 吴立军, 曾繁华. 行业视角下减排成本估算及减排路径研究[J]. *技术经济*, 2022, **41**(4): 120-129.
Wu L J, Zeng F H. Research on emission reduction cost estimation and emission reduction path from the perspective of industry[J]. *Journal of Technology Economics*, 2022, **41**(4): 120-129.
- [41] Zheng H R, Zhang Z K, Wei W D, *et al.* Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(7), doi: 10.1088/1748-9326/ab794f.
- [42] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, *et al.* Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. *Earth's Future*, 2021, **9**(11), doi: 10.1029/2021EF002241.
- [43] 方恺, 张琦峰, 杜立民. 初始排放权分配对各省区碳交易策略及其减排成本的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(2): 696-709.
Fang K, Zhang Q F, Du L M. Analyzing the impacts of allocation schemes for initial emission allowance on provincial emission trading strategies and their abatement costs [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 696-709.
- [44] 曹庆仁, 刘书玲, 郑卫. 中国省域二氧化碳减排目标与成本分担研究[J]. *统计与信息论坛*, 2019, **34**(4): 114-120.
Cao Q R, Liu S L, Zheng W. The carbon dioxide emission reduction targets of provincial regions of China and their cost sharing[J]. *Statistics & Information Forum*, 2019, **34**(4): 114-120.
- [45] 范英, 张晓兵, 朱磊. 基于多目标规划的中国二氧化碳减排的宏观经济成本估计[J]. *气候变化研究进展*, 2010, **6**(2): 130-135.
Fan Y, Zhang X B, Zhu L. Estimating the macroeconomic cost of CO₂ emission abatement in China based on multi-objective programming[J]. *Climate Change Research*, 2010, **6**(2): 130-135.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)