张 燕,官冬杰,周李磊,等.元耦合下的山水林田湖草复合生态系统隐含碳流耦合研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1114-1124.
Zhang Y, Guan D J, Zhou L L, et al. The coupling of embodied carbon flows in the composite ecosystem of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Lakes, and Grasslands under the metacoupling framework [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1114-1124.

元耦合下的山水林田湖草复合生态系统隐含碳流耦合研究

张 燕[1],官冬杰[2*],周李磊[2],和秀娟[3],朱旭森[4] (1.重庆交通大学河海学院,重庆 400074；2.重庆交通大学智慧城市学院,重庆 400074；3.香港大学地理系,香港 999077；4.重庆社会科学院生态安全与绿色发展研究中心,重庆 400020)

摘要：通过 MRIO 和 PLE-SEM 模型,测算重庆市山水林田湖草复合生态系统(CEMRFFLG)四个子系统的隐含碳,分析各子系统间在元耦合框架下的隐含碳流动,并探究隐含碳流的影响机制.结果表明:(1)2020 年重庆市的 CEMRFFLG 的子系统中隐含碳排序为田>草>林>水,田子系统占比为 68.88%.(2)重庆市的 CEMRFFLG 的隐含碳流入量是流出量的 3.45 倍,呈现出显著的“净输入型”特征.(3)直接碳流的远程系统流入量贡献率达 99.28%,流出量贡献率达 78.82%,呈现远距离传输为主的特征;隐含碳流则呈现出“远程输入、近程输出”的结构性特征,远程系统的流入量贡献率为 85.61%,近程系统的流出量贡献率为 91.36%.(4)消费水平对 CEMRFFLG 的隐含碳流具有最强的正向影响,路径系数为 0.845.对直接碳与隐含碳进行分析比较,为重庆市的 CEMRFFLG 隐含碳流减排优化建议提供科学依据,为实现生态系统复合格局的绿色发展具有重要意义.

关键词：山水林田湖草复合生态系统；隐含碳流；元耦合；MRIO 模型；PLE-SEM 模型
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1114-11

The coupling of embodied carbon flows in the composite ecosystem of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Lakes, and Grasslands under the metacoupling framework.

ZHANG Yan[1], GUAN Dong-jie[2*], ZHOU Li-lei[2], HE Xiu-juan[3], ZHU Xu-sen[4] (1.School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China；2.School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China；3.Department of Geography, The University of Hong Kong, Hong Kong SAR 999077, China；4.Research Center for Ecological Security and Green Development, Chongqing Academy of Social Sciences, Chongqing 400020, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1114~1124

Abstract：In Chongqing's composite ecosystem of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Lakes, and Grasslands (CEMRFFLG), the embodied carbon of four subsystems (farmland, grassland, forest, and water) was quantified using Multi-Regional Input-Output (MRIO) and Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) approaches. The flows of embodied carbon among these subsystems were analyzed within a metacoupling framework, and their driving mechanisms were systematically explored. The results indicated that: (1) In 2020, embodied carbon of CEMRFFLG subsystems in Chongqing ranked as farmland > grassland > forest > water, with the farmland subsystem accounting for 68.88% of the total; (2) The embodied carbon inflow to the CEMRFFLG of Chongqing was 3.45 times greater than its outflow, exhibiting a distinct net-input characteristic; (3) Direct carbon flows were characterized by inflow and outflow contribution rates from distant systems of 99.28% and 78.82%, respectively, indicating predominance of long-distance transmission. Conversely, embodied carbon flows presented a distinctive structural pattern of "remote inflows and proximate outflows," wherein distant systems contributed 85.61% of inflows and adjacent systems received 91.36% of outflows; (4) Among all factors, the consumption level showed the strongest positive influence on embodied carbon flows of CEMRFFLG, with a path coefficient of 0.845. A comparative analysis of direct and embodied carbon flows provides a scientific basis for optimizing embodied carbon flow reduction strategies in Chongqing's CEMRFFLG, offering significant implications for achieving green development of composite ecosystem patterns.

Key words：the composite ecosystem of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Lakes and Grasslands；embodied carbon flows；metacoupling；MRIO model；PLE-SEM model

随着经济的全球化,各国和地区之间的经济贸易日益密切,商品和服务的贸易背后隐含着大量的碳排放转移[1-2].2004 年,全球约 64t CO_2 是由贸易所隐含的碳排放造成的,大约占全球 CO_2 排放量的 23%[3].在中国经济快速发展和工业化进程中,碳排放持续上升,生态系统受到了显著的破坏,恢复并保护山水林田湖草复合生态系统(CEMRFFLG)已成

收稿日期：2025-06-12
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目(U24A20580);国家社科基金一般项目(25BJY215);国家自然科学基金专项项目(42542116);自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室开放课题(LMEE-KF2024012);重庆自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2023NSCQ-LZX0009)
* 责任作者, 教授, guandongjie_2000@163.com

为中国生态保护的重要措施.量化隐含碳流对“双碳”目标的实现及可持续发展意义重大,开展CEMRFFLG 的隐含碳流耦合研究,为生态系统保护、修复可持续管理提供新的思路和方法.

隐含碳(也称为虚拟碳),是指由商品或服务的生产、加工、运输、消费等环节所产生和转移的碳排放,它以虚拟的形式存在于贸易交易过程中[4].隐含碳的测算方法主要以生命周期法和投入产出法为主[5].其中,投入产出法适用于中宏观层面生产、贸易、消费等多个场景的隐含碳测算,是隐含碳测算的主流方法[6].隐含碳的流动,在碳排放总量中往往占据着不可忽视的比重,对单个国家和地区的碳排放总量和构成具有显著影响[7-9].因此,隐含碳流也逐渐成为国内外学者关注的重点.CEMRFFLG 的各个子系统在不同的生产、消费和土地利用过程中,都可能涉及到隐含碳的流动和转移.量化和区分本地、相邻和远程系统之间的隐含碳流动是明确消费者的碳排放责任意识和支持生态保护可持续性的重要基础[10].Fang 等[11]探讨了全球隐含碳排放转移网络,从多区域角度揭示了国家间的隐含碳排放的不平等现象;Kleemann 等[12]基于贸易商品可可进口,通过远程耦合来量化德国对其他国家生物多样性的相关影响.现有研究多侧重于国内或全球的虚拟流动分析,且侧重于特定商品,缺少 CEMRFFLG 各子系统隐含碳之间的耦合测算,对不同距离下隐含碳流差异的理解仍显不足.

元耦合框架由Liu 等[13]于2017 年提出,用以系统刻画不同空间尺度上人类与自然系统之间的交互关系,包括原位耦合、近程耦合以及远程耦合.与以往侧重单一维度的传统耦合分析方法相比,元耦合框架能够在统一体系中综合考虑区域内、邻近区域及远程区域之间的多重耦合过程,从而更全面揭示社会经济和环境之间的复杂联动关系[14].该框架提出后被广泛应用于隐含碳、隐含能源、隐含水、隐含土地等研究领域,在分析跨区域、跨尺度的物质流与虚拟流等方面表现出较强的适用性[15].Cheng 等[16]基于元耦合框架揭示中国黄河流域与中国其他地区之间隐含水-能源-碳-价值流动的联系;Li 等[17]基于元耦合框架量化了城市群内隐含碳的原位-近程-远程系统间的三个流动过程.引入元耦合框架为深入理解跨区隐含碳流动提供重要理论支撑.

随着隐含碳流动和排放的复杂化,深入研究CEMRFFLG 隐含碳流的影响机制显得尤为重要,目前对该领域的研究缺乏深入认识,尚未形成系统的研究方法[18].目前关于隐含碳的影响机制的研究比较成熟,常用方法主要包括描述性统计、回归分析及因素分解法.因素分解法主要包括结构分解和指数分解法,可以定量计算出各因素对隐含碳变化的贡献值,因此该类方法的应用更加广泛[19].对于影响隐含碳的研究基于省域和国际的尺度下,主要影响因素也有所区别.在省域尺度下,人均收入水平、能源强度和产业结构等是影响隐含碳的主要因素[20-23].在国际尺度下,贸易结构、贸易量、经济水平和技术水平等因素对国家间隐含碳差异存在影响[24].在不同的研究尺度,这些因素对隐含碳的影响程度不同.目前关于对 CEMRFFLG 隐含碳流影响机制的研究较少,深入探讨 CEMRFFLG 隐含碳流的影响机制,能够帮助我们识别不同区域在碳汇服务中的责任分担,进而优化碳汇资源的配置,制定更加合理的碳排放控制策略.

研究者们基于隐含碳进行了深入的研究,目前关于 CEMRFFLG 研究领域存在以下问题:(1)基于元耦合框架测算 CEMRFFLG 隐含碳流流动情况较为缺乏;(2)基于 CEMRFFLG 隐含碳流影响机制仍不清晰.本研究以重庆市为案例区,基于重庆市CEMRFFLG 隐含碳的定量评估,通过元耦合框架分析不同子系统的隐含碳在重庆市和不同距离之间的流动过程,深入分析隐含碳流影响机制,基于直接碳与隐含碳的耦合关系,为优化碳汇资源配置、制定科学合理的碳排放控制策略提供理论支持,助力重庆市实现“双碳”目标.

1　研究数据与方法

1.1　数据来源

重庆市地处中国西南地区和三峡库区腹心地带(图 1),2018 年重庆市获批长江上游生态屏障“十三五”第三批山水林田湖草生态保护修护工程试点;2021 年,《重庆市筑牢长江上游重要生态屏障“十四五”建设规划(2021—2025 年)》提出统筹“山水林田湖草”生命共同体,实现各种生态要素的协同治理,强化生态屏障释氧固碳的功能.“十四五”期间,2021~2023 年重庆市单位 GDP 能耗分别为 0.34,

0.33 和 0.32t 标准煤/万元,三年累计下降 8.9%,能源消费年均增速控制在 2.4%,能源消费总量近年来持续上升.随着碳排放的持续上升,重庆市产生了能源消耗持续增加、碳汇能力失衡、隐含碳流动不清晰等一系列生态环境问题,亟需寻找重庆市 CEMRFFLG 的碳减排策略.

CEMRFFLG 整合了资源、环境和生态多要素等多种要素构成了复合的生态系统,各子系统相互依存,互相影响,与人类共同组成了一个有机、有序的“生命共同体”.重庆是典型的山地城市,林田湖草系统共同依存于山水之上,将湖子系统归纳到水子系统中,本研究将 CEMRFFLG 分为水、林、田和草 4 个子系统.

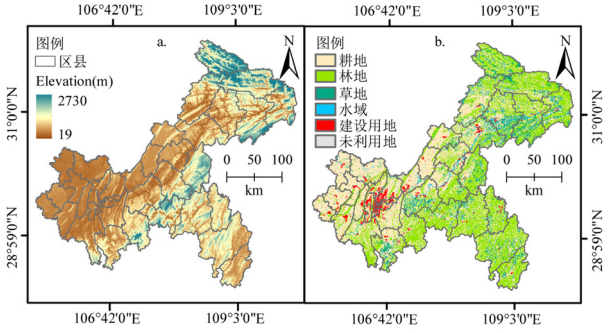


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

1.2 数据来源

多区域投入产出表来自中国碳核算数据库(CEADs)(https://www.ceads.net.cn/),各种统计数据来自《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和《重庆统计年鉴》.2020 年分省部门碳排放数据来自 CEADs 数据库.讨论部分的直接碳数据来自 Zhang 等[25]的研究.

基于 CEDAs 数据库目前关于中国的投入产出表只有 2005、2012 和 2017 年,故基于 2017 年的数据外推出中国各省市 2020 年的投入产出表,由于数据可用性,西藏、香港、澳门和台湾不包括在内.利用 RAS 法外推第 I 象限,按比例外推第 II 和 III 象限[26].投入产出表中的经济部门与土地利用分类并不是完全符合的,因此需要对投入产出表中的经济部门重新划分调整,以使水、林、田和草子系统与其中的部门对应起来.将耕地、林地、牧业用地和渔业用地 4 类农业用地与田、林、草和水子系统相对应,而这 4 类农业用地与投入产出表中唯一农业部门(农林牧渔产品和服务)相对应,因此对该部门进行拆分[27-28].根据农林牧渔 4 个农业部门在《中国农村统计年鉴》中记录的百分比,将投入产出表中“农林牧渔产品和服务”部门划分为每个省市的农林牧渔 4 个子部门,以和田、林、草和水子系统相对应.重庆市内部四个子系统的隐含碳的计算,根据重庆市各区县的农林牧渔的比值进行.

1.3 研究方法

1.3.1 量化隐含碳 本研究使用多区域投入产出(MRIO)模型来衡量和测算重庆市及跨区域的各部门隐含碳情况[29].该方法假设有 r 个地区组成,每个地区有 s 个部门和 k 种最终需求,投入产出平衡可用如下公示表示:

$$x_i^u = \sum_{v=1}^{r}\sum_{j=1}^{s} z_{ij}^{uv} + \sum_{v=1}^{r}\sum_{i=1}^{k} y_{it}^{uv} \quad (1)$$

式中:x_i^u 为 u 地区中 i 部门的总产出,其值与总投入相等,总投入与总产出的单位均为万元;z_{ij}^{uv} 为从 u 地区 i 部门对 s 地区 j 部门的投入量,以满足区域 s 中部门 j 的中间使用需求;y_{ij}^{uv} 为 u 地区 i 部门提供给 v 地区 t 类需求的最终需求,最终需求单位为万元.本研究的最终需求包含农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、固定资本形成总额和货存增加,不考虑出口与进口贸易.

将 a_{ij}^{uv} 设置为直接消耗系数,$a_{ij}^{uv}=z_{ij}^{uv}/x_i^u$,表示 u 中部门 i 的投入,该投入直接用于区域 v 中部门 j 的每单位产出.根据 MRIO 模型的基本均衡定律,每个部门的总投入等于总产出.设置以下公式:

$$A=[a_{ij}^{uv}];X=[x_i^u];Y=[y_{it}^{uv}] \quad (2)$$

式中:$\boldsymbol{A}$ 是整个地区的直接消费系数矩阵,$\boldsymbol{X}$ 是总产出列向量,$\boldsymbol{Y}$ 是最终需求矩阵.联合方程为:

$$X=(I-A)^{-1}Y \quad (3)$$

式中:$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵,$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵,它揭示了贸易过程中某地区的最终需求所消耗的直接和间接消耗量.为了测度 CEMRFFLG 隐含碳的流动情况,引入了直接碳排放强度系数,表示各部门单位产出碳排放量,并将产出数据转化为相应的碳排放量.

$$d_i^u = k_i^u / z_i^u; D=[d_i^u] \quad (4)$$

式中:d_i^u 为区域 u 中 i 区的直接碳排放强度系数,k_i^u 为区域 u 中 i 区的碳排放量,单位为 g CO_2;z_i^u 为区域

u 中 i 区的投入总值,$\boldsymbol{D}$ 为直接碳排放强度系数矩阵.由贸易引起的隐含碳可有以下公式确定:

$$LC = D(I - A)^{-1}Y \tag{5}$$

式中:LC 为最终需求消耗所体现的隐含碳量,单位为 g CO_2.

1.3.2　量化隐含碳流　基于隐含碳矩阵,区域间隐含碳量可以计算出来[30],设置 LC=[H^{ds}].计算公式如下:

$$T^{ds} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} H_{(ij)}^{ds} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{H}^{ds}$ 是由元素 $H_{(ij)}{}^{ds}$ 组成的矩阵.当 $d \neq s$ 时,H^{ds} 表示区域 d 产生的与区域 s 的最终消耗相关的隐含碳;T^{ds} 是指 H^{ds} 中每个元素 $H_{(ij)}{}^{ds}$ 的总和,表示从 d 到 s 的总隐含碳流,单位为 g CO_2.当 d=s 时,H^{ds} 表示与当地产生的最终消费相关的隐含碳量.从重庆市流入其他地区的流量称为流出量,从其他地区流入重庆市的流量称为流入量.

本研究从元耦合的角度分析隐含碳流.元耦合是一个全面的框架,包括特定系统内(原位耦合)、相邻系统之间(近程耦合)和远程系统之间(远程耦合)[13,25].近程耦合为原位系统与近程系统之间的耦合,远程耦合为原位系统与远程系统之间的耦合关系.元耦合框架不受行政边界限制的,它可以实现跨省、国家甚至全球范围的流动[31].根据现有研究的区域大小和服务类型的不同,对近远程系统的划分尺度范围是不一致的.参考文献[13,17,32]等通过地理邻近关系对不同的生态系统服务流定义近远程系统,本研究采用相同的方法.具体来说,重庆市周围有 5 个相邻的省份,即近程系统:四川省、贵州省、湖北省、湖南省和陕西省.其他省份被视为远程系统,包含 24 个省份.基于划分,量化了重庆市与近程系统之间以及重庆市与远程系统之间的隐含碳流,以研究隐含碳流对跨尺度社会生态系统的近程耦合和远程耦合影响.由于缺少重庆市内部的多区域投入产出数据,故没有进行原位耦合情况的分析.

1.3.3　影响因素分析　(1)模型构建:在分析隐含碳影响因素的过程中,因素分解法本质是分析跨期差异[33],由于本研究只有一年的样本数据,不适合用该方法.偏最小二乘法结构方程(PLS-SEM)模型不依赖于时间序列,对数据的样本量、模型识别问题及分布状态要求不高,可有效处理高维共线性数据[34-35],适用于本研究探索 CEMRFFLG 的隐含碳流的影响因素分析.本研究选择了 5 个潜变量,分别为经济发展水平、结构水平、绿色发展水平、消费水平和清洁能源技术,10 个指标,具体指标见表 1.本研究通过 SmartPLS 4 软件来构建模型.

表 1　影响因素选择及定义

Table 1　Selection and definition of influencing factors

潜变量	指标	解释
经济发展水平	GDP(亿元)	各地区生产总值
	人口规模(人)	各地区的年末人口数
结构水平	产业结构(%)	第二、三产业/地区生产总值
	生产结构(万元)	多区域投入产出表中昂惕夫逆矩阵
绿色发展水平	环境投资(万元)	各地区的环境投资总额
	技术创新(万元)	各地区的 R&D 经费
	使用强度(万元)	多区域投入产出表中的中间消耗
消费水平	家庭消费水平(万元)	多区域投入产出表中农村居民和城镇居民消费水平
清洁能源技术	能源强度(%)	各地区的隐含碳/能源消耗总量
	清洁能源投入(亿 kW·h)	各地区的水力、风力和太阳能发电总和

PLS-SEM 模型由测量模型和结构模型组成.测量方程是指标和潜变量之间的联系,而结构方程是潜变量之间的关系.测量方程表示如下:

$$\begin{aligned} X &= \Lambda_X \xi + \delta \\ Y &= \Lambda_Y + \varepsilon \end{aligned} \tag{7}$$

式中:X 和 Y 是由外源指数和内源指数组成的向量;ξ 和 δ 是由外生潜变量和内生潜变量组成的向量,Λ_X 和 Λ_Y 是否需要估计相应的参数,δ 和 ε 是干扰项.结构方程表示为:

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \tag{8}$$

式中:B 是内生潜变量之间的关系;Γ 是外生潜变量对内生潜变量的影响;ζ 是误差项.

表 2　信度、效度分析和多重共线性检验

Table 2　Reliability and validity analysis and multicollinearity test

潜变量	Cronbach's α	CR	AVE	指标	因子载荷	VIF
经济发展水平	0.929	0.930	0.934	GDP	0.967	3.960
				人口规模	0.965	4.060
结构水平	0.851	0.854	0.870	产业结构	0.938	2.214
				生产结构	0.928	2.204
绿色发展水平	0.742	0.714	0.730	环境投资	0.791	1.288
				技术创新	0.913	1.288
	0.921	0.942	0.864	使用强度	0.964	4.198
消费水平				家庭消费水平	0.929	3.580
清洁能源技术	/	/	/	能源强度	0.893	3.406
				清洁能源投入	1.000	1.000

(2)数据与显著性检验:为验证 PLS-SEM 模型分析的有效性,对数据进行信度检验、效度检验、模型拟合效果和影响路径系数检验[36].通过表 2 的信度和效度分析结果发现,各潜变量的 Cronbach's α 及 CR 值均超过 0.7,测量模型具有较好的信度.通过 VIF 值对指标间可能存在的多重共线性问题进行检验,一般认为,当 VIF 值小于 10 时,可以认为不存在严重多重共线性问题.表 2 数据显示,所有变量的 VIF 值均小于 5,符合标准.通过 R^2 评估结构模型的预测性能,本研究的 R^2 为 0.847,表明该模型具有良好的解释能力和拟合效果.另外,采用自主样本法,将取样次数设置为 5000 次,计算各个潜变量路径之间的显著性.路径系数表示结构方程模型中潜变量之间的直接关系,可以用来展现出变量之间的影响程度.检验结果见表 3,发现各个路径均显著.

表 3 显著性检验

Table 3 Significance test

路径	原始样本 (O)	样本均值 (M)	标准差 (STDEV)	T 统计 (|O/STDEV|)	P
消费水平→隐含碳流	0.845	0.858	0.142	5.956	0.000
经济发展水平→隐含碳流	0.405	0.391	0.176	2.311	0.028
清洁能源水平→隐含碳流	−0.171	−0.167	0.087	1.976	0.019
绿色发展水平→隐含碳流	−0.259	−0.264	0.109	2.387	0.027
结构水平→隐含碳流	−0.195	−0.175	0.092	2.123	0.034

注:T>1.96,P<0.05 水平显著;T>2.58,P<0.01 水平显著;T>3.29,P<0.001 水平显著.

2 结果与分析

2.1 重庆市 CEMRFFLG 的隐含碳

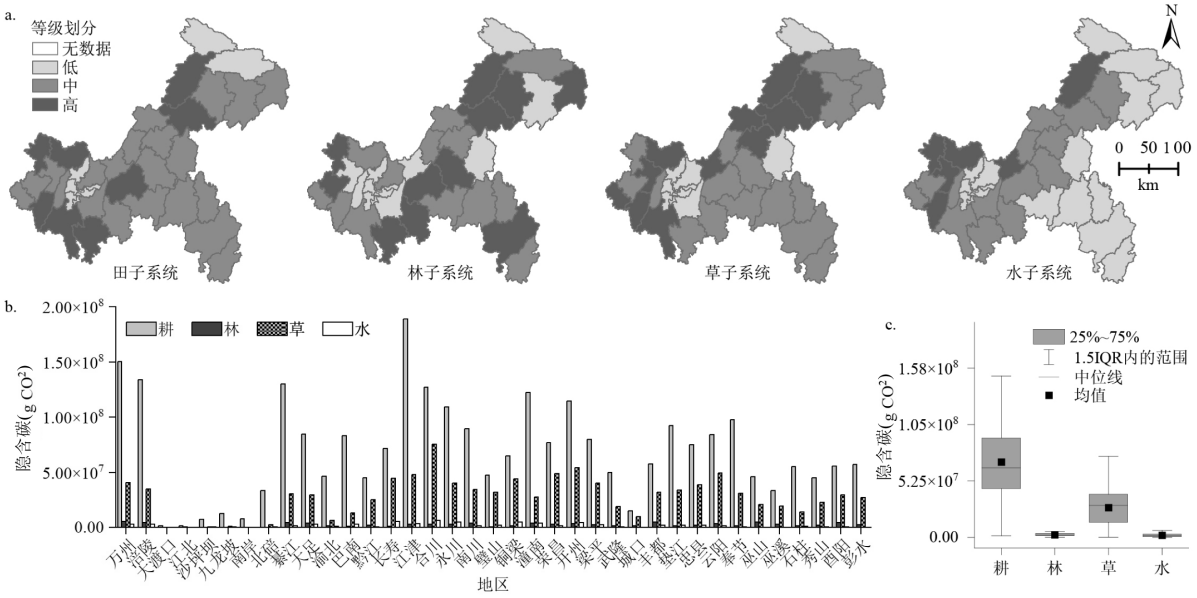


图 2 重庆市 CEMRFFLG 隐含碳分布特征

Fig.2 Distribution patterns of embodied carbon in Chongqing's CEMRFFLG

2020 年重庆市 CEMRFFLG 的隐含碳总量为 3.76×10^9g CO_2,子系统的隐含碳从大到小依次为田子系统、草子系统、林子系统和水子系统,占比依次为 68.88%、27.07%、2.29%、1.75%,田子系统隐含碳均值达到了 7.00×10^7g CO_2,水子系统仅为 1.78×10^6g CO_2,可见重庆市以农产品贸易为主.四个子系统中,隐含碳高等级大多数分布于渝东北和主城都市区,如图 2 所示.这可能是由于渝东南地区经济相对欠发达,工业基础较弱,侧重于民族文化、旅游业和生态林业,基于贸易的隐含碳较少.江津、合川和万州区县的隐含碳较高,这四个子系统的隐含碳总和分别为 2.43×10^8g CO_2、2.12×10^8g CO_2、1.99×10^8g CO_2,在各子系统的贡献率中均达到了 5%以上.这可能是由于这些地区不仅是重庆市“一区两群”发展战略的核心区域,也是成渝地区双城经济圈的重要节点,工业结构较好,农业集约化,贸易量大.

四个子系统中,隐含碳高等级大多数分布于渝东北和主城都市区.田子系统中,江津、万州和涪陵

等地区的隐含碳较高,均在 1.34×10^8g CO_2 以上;林子系统中,万州、巫山和丰都等地区的隐含碳较高,均在 5.46×10^6g CO_2 以上;草子系统中,合川、开州和云阳等地区的隐含碳较高,均在 4.88×10^7g CO_2 以上;水子系统中,合川、长寿和铜梁等地区的隐含碳较高,均在 4.91×10^6g CO_2 以上.

渝中区在农林牧渔产品和服务部门中并无贸易数据,故不进行分析.

2.2　CEMRFFLG 中隐含碳流元耦合过程

2.2.1　CEMRFFLG 隐含碳流流动特征　根据 2020 年的多区域投入产出表数据,最终得到四个子系统的流入流出的空间分布完全一致,如图 3 所示.从重庆市流出隐含碳的区域仅有江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、四川、贵州和陕西共 8 个地区,流入重庆市隐含碳的区域有北京、天津和山西等 19 个地区.其余地区由于隐含碳流数据量过小,均小于 1g CO_2,故忽略不计.2020 年重庆市 CEMRFFLG 的隐含碳总流入量为 2.30×10^9g CO_2,流入量最高的地区是黑龙江(34.10%),达到了 7.84×10^8g CO_2;隐含碳总流出量为 6.65×10^8g CO_2,流出量最高的地区是贵州(33.84%),达到了 2.25×10^8g CO_2.总体来看,流入量远远大于流出量,流入量是流出量的 3.45 倍.重庆市呈现出显著的“净输入型”特征,反映了重庆在 CEMRFFLG 贸易中扮演了资源消费地的角色.同时,隐含碳流动的空间分布呈现出极化现象,流入地区广泛而分散,而流出地则集中于地缘相近且与重庆产业联系紧密的区域.

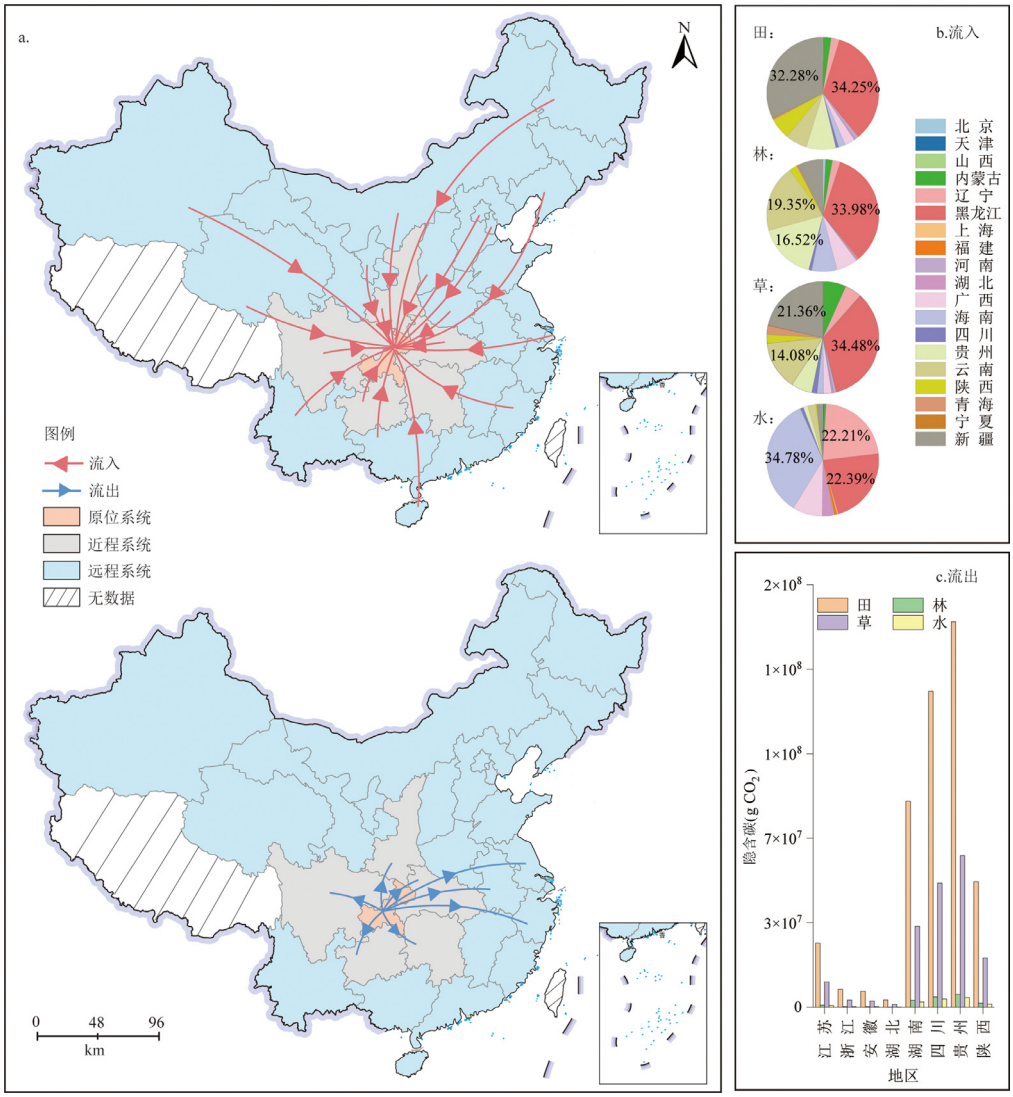


图 3　重庆市 CEMRFFLG 隐含碳在近程耦合和远程耦合的流入与流出情况

Fig.3　Inflows and outflows of embodied carbon in Chongqing's CEMRFFLG under pericoupling and telecoupling

审图号:GS(2019)1825 号

根据图 4 可知,流入量中,远程系统(1.97×10^9g CO_2)的总流量大于近程系统(3.31×10^8g CO_2),是近程系统的 5.95 倍;流出量中,远程系统(5.75×10^7g CO_2)的总流量小于近程系统(6.08×10^8g CO_2),相对于近程系统减少了 90.55%.这可能是由于重庆市在生态产品的生产方面相对较充足,一方面一些区域对该产品的需求更高,另一方面本地生产能力有限.

2.2.2 子系统隐含碳流流动特征 流入量中(图 3b),田子系统的流入量从高到低依次是黑龙江(34.25%)和新疆(32.28%),隐含碳流入值分别为 5.63×10^8g CO_2、5.30×10^8g CO_2,流入值最低为山西,流入量仅有 2.74×10^5g CO_2(0.17%).重庆市农产品输入高度依赖中国北方农业大省.林子系统的流入量从高到低依次是黑龙江(33.98%)、云南(19.35%)和贵州(16.53%),隐含碳流入值分别为 1.77×10^7g CO_2、1.01×10^7g CO_2、8.61×10^6g CO_2,流入值较低的区域与田子系统空间分布相似.林产品输入以中国东北、西南林区为主.草子系统的流入量从高到低依次是黑龙江(34.48%)、新疆(21.36%)和云南(14.08%),隐含碳流入值分别为 1.94×10^8g CO_2、1.20×10^8g CO_2、7.93×10^7g CO_2,剩余地区均较低,大部分位于中国的北方地区.水子系统的流入量从高到低依次是海南(34.78%)、黑龙江(22.39%)和辽宁(22.21%),隐含碳流入值分别为 1.36×10^7g CO_2、8.78×10^6g CO_2、8.71×10^6g CO_2,流入量较低的地区基本分布在中国中部,其中青海、北京和山西尤其较低,均在 1.6×10^4g CO_2 以下.

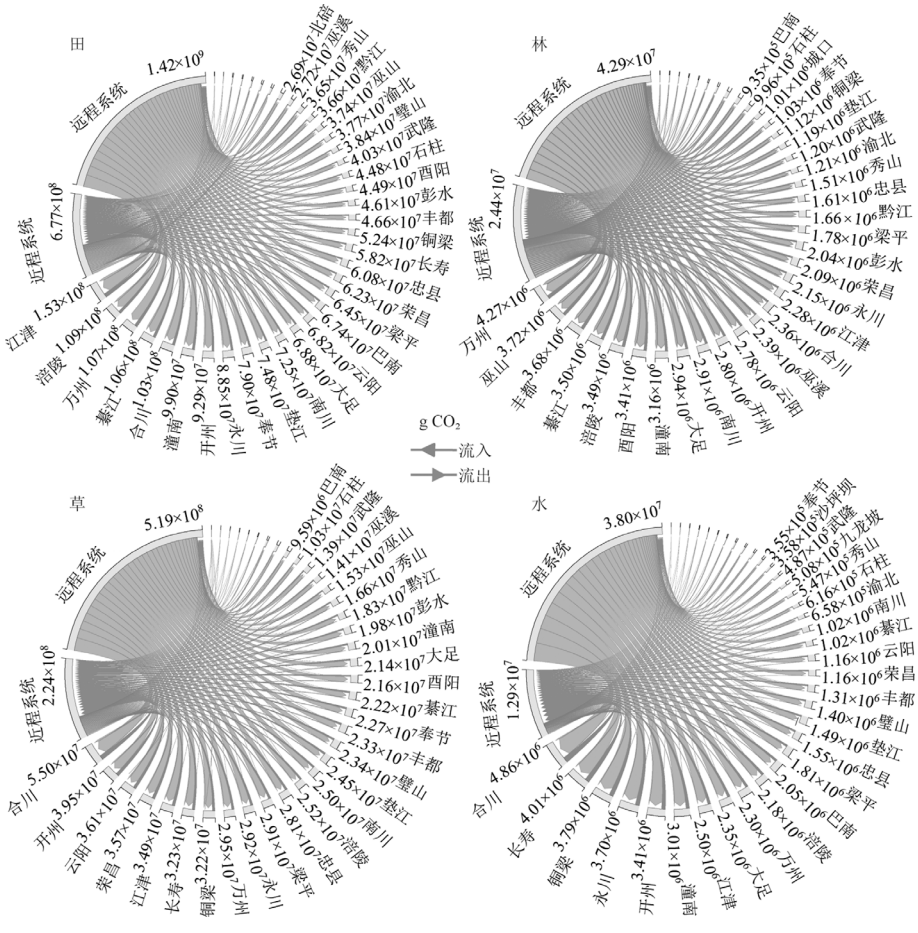


图 4 重庆市 CEMRFFLG 隐含碳的原位系统与其他地区的流入与流出情况

Fig.4 Inflows and outflows of embodied carbon between Chongqing's CEMRFFLG local system and other regions

流出量中(图 3c),四个子系统的流出值从高到低依次为贵州(33.84%)、四川、湖南、陕西、江苏、浙江、安徽和湖北(0.64%),流出值最高为 2.25×10^8g CO_2,其中田子系统有 1.55×10^8g CO_2(23.31%),流出值最低为 4.27×10^6g CO_2,显示出不同地区之间在 CEMRFFLG 产品吸纳能力与交易强度上的显著差异.值得注意的是,四个子系统的隐含碳流出地区排序完全一致,反映出流出方向上的空间格局一致性.

这一现象主要归因于模型中各部门最终需求的构建逻辑,即按照各省市间既定比例进行分配推算.由于 CEMRFFLG 的各子系统隐含碳的核算依赖于统一的投入产出框架,各子系统在面对同一套最终需求结构时,其结果呈现出较强的空间同质性和分布一致性.

2.3　CEMRFFLG 隐含碳流影响因素分析

从图 5 可知,消费水平对隐含碳流具有最强的正向影响,路径系数为 0.845,说明消费活动的增加显著推动了隐含碳的流动,是影响隐含碳流的最主要因素.经济发展水平同样对隐含碳流产生正向影响,路径系数为 0.405,但其影响力度小于消费水平,说明经济规模的扩张主要通过支撑和放大消费活动来推动碳流动,而非形成主导效应.清洁能源技术(−0.171)、结构水平(−0.195)和绿色发展水平(−0.259)均与隐含碳流呈现负向关系,尤其是绿色发展水平的负向作用最为显著,凸显了其在控制隐含碳转移中的重要作用.

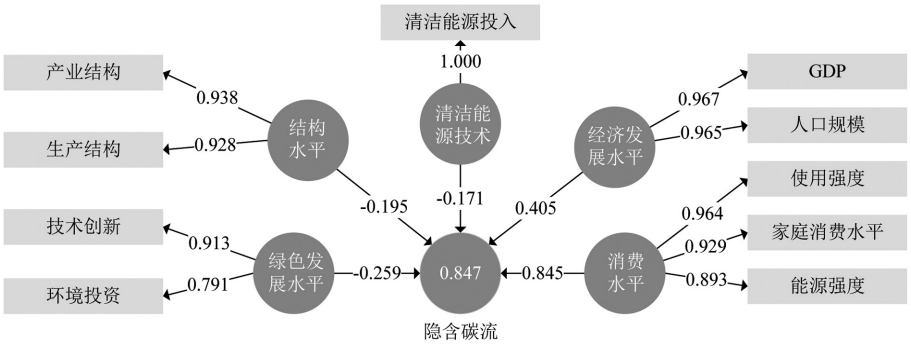


图 5　隐含碳流影响因素结果

Fig.5　Quantification results of factors influencing embodied carbon flows

另外,各因素之间也存在交互关系.消费水平与经济发展水平呈现出叠加效应[37],二者通过“经济增长—消费扩张”链条共同强化碳流效应;绿色发展水平则在其中发挥关键的调节作用,不仅通过低碳产业与绿色消费的引导直接削弱碳流规模,还间接抑制了经济扩张和消费增长所带来的碳转移[38];产业结构优化与清洁能源技术进步则形成协同效应[39],前者通过减少高能耗产业比重降低碳流供给,后者通过降低单位能耗碳强度实现过程减排.因此,有效削减隐含碳流,需要综合各因素协同作用形成系统化调控.

3　讨论

3.1　近程系统与远程系统的对比

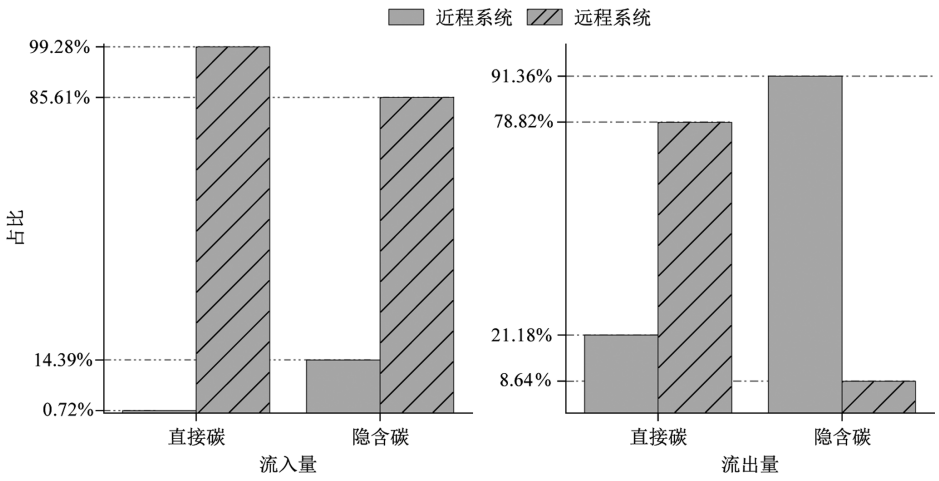


图 6　近程系统与远程系统的直接碳与隐含碳的流量占比

Fig.6　Proportions of direct and embodied carbon flows in adjacent and distant systems

在重庆市 CEMRFFLG 中,碳流动在近程系统与远程系统之间表现出显著的空间异质性.具体而言,

直接碳流的远程系统流入贡献率高达 99.28%,流出贡献率亦达 78.82%,表明直接碳流以远距离传输为主(图 6).相较之下,隐含碳流则呈现出“远程输入、近程输出”的结构性特征.这说明重庆市隐含碳排放大部分发生在远距的生产地,而本地输出的产品则主要流向邻近区域.这种流动结构也提示了隐含碳具有更强的经济地理依赖性和空间“碳转嫁”效应.

3.2 各子系统对比

在重庆市 CEMRFFLG 中,不同子系统在碳流动中的表现存在显著差异.根据图 7 可知,从流出量来看,直接碳的流量排序为林>田>草>水子系统;隐含碳的排序则为田>草>林>水子系统.从流入量来看,直接碳的流入排序为林>草>田>水子系统,隐含碳的流入排序与其流出排序一致.这一结果反映出各子系统在不同碳的功能过程中的分工与主导机制存在差异.林子系统在直接碳流的流入量和流出量中均排名第一,表明其在自然生态过程中的碳汇功能最为显著,具有重要的生态调节作用.田子系统在隐含碳流中居于主导地位,反映其在生产与消费过程中承载了大量的碳“虚拟流”.此外,隐含碳各子系统的流入与流出排名保持一致,表明其流动较为稳定.相比之下,水子系统在碳流动中的作用相对较弱,体现出其在碳循环中的边缘地位,但也不应忽视其在其他生态系统服务(如水源涵养、生态调节等)中的关键价值.

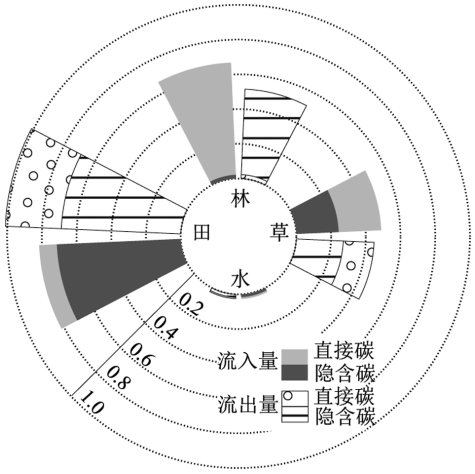


图 7 流入量与流出量的直接碳与隐含碳各子系统占比

Fig.7 Proportions of direct and embodied carbon inflows and outflows across subsystems

3.3 重庆市 CEMRFFLG 隐含碳流减排优化建议

(1)强化自然碳汇功能,提升碳管理基础.重庆市生态系统整体表现为强碳汇状态,林草子系统在碳吸收与释放中发挥核心作用.对此,应在渝东北和主城都市区等碳流强度较高区域加大生态系统修复力度.例如,持续推进退耕还林和草地改良工程,因地制宜选择树、草种植,提升植被固碳效率.在管理层面,应基于隐含碳流的空间分布特征,建立分区碳汇管理制度,形成动态监测与考核机制.可以利用遥感、无人机与地面样地监测等技术相结合,定期获取林草覆盖率和碳储量数据,并将其纳入国土空间规划与生态红线监管中,作为财政转移支付与生态补偿的考核依据.

(2)引导绿色消费模式与能源结构优化,减缓隐含碳输入压力.隐含碳流动结果反映出碳责任的转移与不对称.为缓解这一问题,可在消费端建立低碳产品认证与标签制度,配套财政补贴或绿色积分机制,引导居民和企业优先选择本地低碳产品.同时与四川、贵州等邻省构建生态产品反向供应链,以短距离替代远程输入,降低运输环节的隐含碳排放.在能源端,加快可再生能源的开发与应用,提升本地能源自给率;同时,依托西南水能与西北风光资源,构建区域清洁能源互补机制.

(3)产业结构优化,推进低碳技术发展.研究发现产业结构和绿色发展水平明显可以降低隐含碳流的转移,需要加快产业升级,进一步推进低碳技术的研发与应用.首先,在江津、万州等高排放区县,调整高排放区域生产结构,开展田、林、草子系统产能评估与结构调整试点.例如,推广稻渔综合种养、林下经济等复合生态模式,减少单一作物连作带来的碳泄漏风险.另外,可依托成渝经济圈合作机制,推动重庆与四川、贵州等地在竹木加工、生态农业、清洁能源等领域的产业链协同,促进低碳技术在区域间的推广应用,实现碳责任共担与效益共享.

(4)推动产业绿色升级与区域协同,构建双碳责任分担机制.一方面,建立跨区域生态补偿与碳责任联动.对新疆、黑龙江等远程输入省份,建立基于隐含碳量的横向生态补偿基金,支持输出地低碳技术推广;与四川、浙江等近邻省份共建生态产品联盟,制定碳足迹互认标准,探索区域隐含碳配额交易机制.另一方面,构建重庆市内碳责任考核优化体系.对合川、长寿等隐含碳输出区,实施产业链碳强度限额

管理,纳入区县考核;在主城都市区推行企业碳披露与个人碳账户制度,引导低碳消费.

4　结论

4.1　2020 年重庆市 CEMRFFLG 的隐含碳总量为 3.76×109g CO_2,各子系统的隐含碳从大到小依次为田、草、林、水子系统,占比依次为 68.88%、27.07%、2.29%、1.75%.

4.2　重庆市CEMRFFLG的四个子系统的隐含碳流入量是流出量的 3.45 倍,呈现出显著的隐含碳“净输入型”特征.流入量中,远程系统的总流量是近程系统的 5.95 倍;流出量中,远程系统的总流量相对于近程系统减少了 90.55%.

4.3　直接碳流以远距离传输为主,隐含碳流则以远程输入、近程输出为主;林子系统在直接碳流入和流出中均排名第一,田子系统在隐含碳流动中居于主导地位.

4.4　消费水平对CEMRFFLG的隐含碳流具有最强的正向影响,路径系数为0.845;绿色发展水平对隐含碳流具有最强的负向影响,路径系数为−0.259.基于影响因素分析和直接碳与隐含碳的对比分析,对重庆市 CEMRFFLG 的隐含碳流减排提出优化建议.

参考文献：

[1] Hou H, Wang J, Yuan M, et al. Estimating the mitigation potential of the Chinese service sector using embodied carbon emissions accounting [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021,86: 106510.

[2] 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.

[3] Davis S J, Peters G P, Caldeira K. The supply chain of CO_2 emissions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011,108(45): 18554−18559.

[4] 王少剑,王泽宏,方创琳.中国城市碳排放绩效的演变特征及驱动因素 [J]. 中国科学:地球科学, 2022,52(8):1613−1626.
Wang S J, Wang Z H, Fang C L. Evolution characteristics and driving factors of carbon emission performance in Chinese cities [J]. Scientia Sinica Terrae, 2022,52(8):1613−1626.

[5] 钟诗雨,张晓敏,吴　佳,等.隐含碳及其测算方法研究综述 [J]. 生态经济, 2023,39(6):32−38.
Zhong S Y, Zhang X M, Wu J, et al. Review on the embodied carbon and its accounting methods [J]. Ecological Economy, 2023,39(6): 32−38.

[6] 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 31provinces [J]. China Environmental Science, 2020,40(12):5540−5550.

[7] 黄明辉,李　巍,陆中桂,等.黄河流域城市群碳足迹及隐含碳转移研究 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3544−3552.
Huang M H, Li W, Lu Z G, et al. Carbon footprint and embodied carbon transfer of the city clusters in the Yellow River basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3544−3552.

[8] 李富佳.区际贸易隐含碳排放转移研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018,37(10):1303−1313.
Li F J. Progress and prospects of research on transfer of carbon emissions embodied in inter−regional trade [J]. Progress in Geography, 2018,37(10):1303−1313.

[9] Zhou L, Chang Q, Guan D, et al. Flow path simulation and diffusion effect evaluation of carbon sequestration services coupled with the SPANs and BBNs models [J]. Ecological Frontiers, 2025,45(3): 610−620.

[10] Friess D A, Phelps J, Garmendia E, et al. Payments for ecosystem services (PES) in the face of external biophysical stressors [J]. Global Environmental Change, 2015,30:31−42.

[11] Fang G, Huang M, Zhang W, et al. Exploring global embodied carbon emissions transfer network—an analysis based on national responsibility [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 202:123284.

[12] Kleemann J, Schröter M, Bagstad K J, et al. Quantifying interregional flows of multiple ecosystem services – a case study for Germany [J]. Global Environmental Change, 2020,61:102051.

[13] Liu J. Integration across a metacoupled world [J]. Ecology and Society, 2017,22(4):1708−3087.

[14] Manning N, Li Y, Liu J. Broader applicability of the metacoupling framework than Tobler's first law of geography for global sustainability: a systematic review [J]. Geography and Sustainability, 2022,4(1):6−18.

[15] Xu Z, Chen X, Liu J, et al. Impacts of irrigated agriculture on food–energy–water–CO_2 nexus across metacoupled systems [J]. Nature Communications, 2020,11:5837.

[16] Cheng L, Tian J, Xu H, et al. Unveiling the nexus profile of embodied Water–Energy–Carbon–Value flows of the Yellow River Basin in China [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(23):8568−8577.

[17] Li P, He C, Huang Q, et al. Metacoupling flow of embodied carbon in resource−based cities: a case study of Hohhot−Baotou−Ordos−Yulin urban agglomeration in China [J]. Energy, 2024,313:134041.

[18] 萨　娜,赵金羽,寇旭阳,等.“山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望 [J]. 生态学报, 2023,43(11):4333−4343.
Sa N, Zhao J Y, Kou X Y, et al. Coupling mountains−waters−forests−farmlands−lakes−grasslands−sandlands life community: framework, models and prospect [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4333−

4343.

[19] 郭文强,于忠萍,雷 明,等.我国碳排放驱动因素分解及脱钩努力效应研究 [J]. 环境科学研究, 2025,38(2):209-219.
Guo W Q, Yu Z P, Lei M, et al. Decomposition of carbon emission drivers and decoupling effort effects in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(2):209-219.

[20] 刘贤赵,高长春,张 勇,等.中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究 [J]. 地理科学, 2018,38(5):681-690.
Liu X Z, Gao C C, Zhang Y, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(5):681-690.

[21] Lu Z L, Wang L L, Guo X P, et al. Decoupling effect and influencing factors of carbon emissions in China: based on production, consumption, and income responsibilities [J]. Advances in Climate Change Research, 2024,15(6):1177-1188.

[22] Cui S, Xu P, Wang Y, et al. Influencing mechanisms and decoupling effects of embodied carbon emissions: an analysis based on China's industrial sector [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 41:320-333.

[23] 周晓艳,张雪莹,吴炫匡,等.中国城市工业贸易隐含碳排放转移网络结构及影响机制 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3472-3483.
Zhou X Y, Zhang X Y, Wu X K, et al. Structure and mechanism of China's inter-city industrial trade embodied carbon emission transfer network [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3472-3483.

[24] Hong C, Zhao H, Qin Y, et al. Land-use emissions embodied in international trade [J]. Science, 2022,376(6593):597-603.

[25] Zhang Y, Guan D, Zhou L, et al. Coupling process of carbon sink service flow based on metacoupling framework [J]. Scientific Reports, 2025,15(1):6594.

[26] 谭显东,胡兆光.投入产出表外推及主导产业研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008,(3):84-89.
Tan X D, Hu Z G. Study on extrapolating input-output table and leading industry of China [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2008,(3):84-89.

[27] 王少剑,王婕妤.区域贸易视角下中国省域隐含土地流动研究 [J]. 地理学报, 2022,77(5):1072-1085.
Wang S J, Wang J Y. Embodied land in China's provinces from the perspective of regional trade [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(5): 1072-1085.

[28] Fu W, Yang S, Hu S, et al. The impact of embodied land flow in interregional trade on carbon emissions in China [J]. Applied Geography, 2023,159:103065.

[29] 王少剑,周诗洁,方创琳.远程关联视角下中国碳储量在建设用地流动中的变化及驱动因素分析 [J]. 科学通报, 2024,69(27):4119-4136.
Wang S J, Zhou S J, Fang C L. Changes and driving forces of carbon storage in China's construction land flow from a teleconnection perspective [J]. Science Bulletin, 2024,69(27):4119-4136.

[30] Zhang L, Huang Q, Qiu J, et al. Measuring virtual flows of ecosystem services embedded in traded goods across an urban agglomeration in China [J]. Ecosystem Services, 2024,69:101651.

[31] Liu J. Leveraging the metacoupling framework for sustainability science and global sustainable development [J]. National Science Review, 2023,10(7):nwad090.

[32] Zhang J, He C, Huang Q, et al. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework [J]. Ecological Indicators, 2023,151:110303.

[33] 吴乐英,赵义义,苗长虹,等.基于多区域投入产出的黄河流域贸易隐含碳排放时空格局及结构分解 [J]. 生态学报, 2024,44(19):8737-8750.
Wu L Y, Zhao Y Y, Miao C H, et al. Spatial-temporal pattern and structural decomposition of trade- embodied carbon emissions in the Yellow River Basin based on multi-regional input-output analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8737-8750.

[34] 朱宏城,田 甜.微观视角下居民消费碳排放结构及影响因素研究——基于 PLS-SEM 模型的实证分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2022,36(1):59-65.
Zhu H C, Tian T. Research on the carbon emission structure of household consumption and its influencing factors from the micro perspective [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(1):59-65.

[35] 戴晓爱,马佳欣,唐艺菱,等.甘肃省植被时空动态变化及其归因分析 [J]. 生态环境学报, 2024,33(8):1163-1173.
Dai X A, Ma J X, Tang Y L, et al. Spatio-temporal dynamics and attribution analysis of vegetation in Gansu province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024,33(8):1163-1173.

[36] 吴启贤,谢新艳,陈 赟,等.基于偏最小二乘法结构方程模型的城市轨道交通工程碳排放影响因素分析 [J]. 环境工程, 2023,41(10): 133-140.
Wu Q X, Xie X Y, Chen Y, et al. Analysis of factors influencing carbon emissions ofurbanrail transit projects based on partial least squares structural equation modeling [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(10):133-140.

[37] Wiedmann T, Lenzen M, Keyßer L T, et al. Scientists' warning on affluence [J]. Nature Communications, 2020,11(1):3107.

[38] 李 莹.绿色金融对碳排放的影响研究——基于绿色技术创新的链式中介作用 [J]. 社会科学前沿, 2023,12(10):6100-6115.
Li Y. A Study on the impact of green finance on carbon emissions—based on the Chain intermediation of green technology innovation [J]. Advances in Social Sciences, 2023,12(10):6100-6115.

[39] 胡 萌,伍雅思,常娇娇.降碳减污协同效应:区域差异与协调路径 [J]. 环境经济研究, 2023,8(4):191-208.
Hu Meng, Wu Y S, Chang J J. Synergistic effects of carbon emissions and pollution reduction: regional differences and coordination paths [J]. Journal of Environmental Economics, 2023,8(4):191-208.

作者简介: 张 燕(2000-),女,重庆市合川人,重庆交通大学博士研究生,主要从事生态系统服务流研究.3049599699@qq.com.