

长江经济带省际贸易隐含水-能-碳耦合关系研究

王保乾,肖佳慧

(河海大学商学院,江苏南京 211100)

摘要:采用环境投入产出模型计算长江经济带省际贸易中虚拟水、隐含能及隐含碳流量,进一步结合 Spearman 等级相关系数研究分地区与分部门间的水-能-碳耦合关系。结果表明:水、能和碳在地区间和部门间均呈显著相关关系,其中第二产业和隐含能-碳相关性最强。虚拟水、隐含能和隐含碳调出调入中,江苏、浙江为关键省份,农业、建筑业和电力、热力、燃气及水的生产供应业是关键部门。深入研究隐含水-能-碳耦合特征,从贸易平衡视角将长江经济带 11 省市分为 3 类,发现隐含水-能-碳压力存在从发达地区转入欠发达地区的环境不公平现象。长江经济带应注重关键地区和关键部门节水节能减碳目标落实,推动产业结构低碳化、绿色化发展,同时加快形成区域协同治理体系。

关键词:长江经济带;水-能-碳耦合;环境投入产出模型;Spearman 等级相关系数

中图分类号:F727

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2023)01-0047-08

中国面临严峻的水资源短缺和时空分布不平衡问题,人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4,被联合国列为 13 个贫水国之一。水资源分布“南多北少”,80%的水资源位于南方,北方人口占人口总数的一半,拥有全国耕地面积的六成,水资源占有量仅为 20%。作为世界第一大能源消费国,2017 年中国一次能源消费总量为 310 500 万 t 标准煤,约为欧盟消费量的两倍^[1]。碳排放量自 2006 年超过美国以来,一直位列全球首位。随着人口增加与经济总量的日益扩张,有限的水资源和能源供给与日趋紧张的碳排放约束之间的矛盾不断凸显。为缓解资源环境压力,推动经济社会可持续发展,中国政府相继出台水资源管理“三条红线”和“四项制度”以及“碳达峰”“碳中和”等战略措施。考虑到水、能、碳三要素间的耦合关系,越来越多的学者开始意识到单一资源管理模式难以有效应对日益复杂的资源环境问题,反而会造成资源浪费和部门管理无效^[2],因此,水、能、碳要素的综合管理显得十分紧迫。同时,水、能、碳要素可以通过贸易进行地区间和部门间转移^[3],这会增加资源节约和环境治理难度。本文以国家重点经济区域长江经济带作为研究对象,计算各省市及各部门虚拟水、隐含能及隐含碳流量,

并定量分析贸易隐含水-能-碳耦合关系,对推进资源协同管理和优化地区间贸易结构具有重要的现实意义。

1 文献综述

近年来,学界广泛关注水资源、能源和二氧化碳之间的复杂关系,并引入物理学概念“耦合”来表示这种复杂关系。“耦合”指两个或两个以上的系统通过相互作用而彼此影响,这种影响包括要素间关联、要素间制约或抑制等,甚至包括政策间的相互影响^[4]。当前对水-能-碳要素耦合关系概念的界定可分为两层:一层是狭义耦合,是指将一种要素作为另一种要素系统供给或服务中的投入或产出来讨论多要素间的相互关系,即只关注能源部门或水系统部门的水-能-碳关系,在揭示全产业部门水-能-碳耦合关系时存在局限性;另一层是广义耦合,它将水和能源同时作为投入,碳排放为产出,讨论三者在全产业部门中的耦合关系^[5]。

目前关于水、能源和碳排放关系的研究,大多数集中于 3 种要素中的两种,又以能源部门或水系统部门的狭义“水-能耦合关系”作为重点研究对象。Li 等^[6]使用 2012 年城市层面单区域投入产出表分

作者简介:王保乾(1964—),男,教授,博士,主要从事应用经济与区域经济研究。E-mail:bq64@163.com

通信作者:肖佳慧(1997—),女,硕士研究生,主要从事应用经济研究。E-mail:2580924014@qq.com

别核算京津冀城市群 13 个城市能源部门用水量和水系统部门能源消耗量,同时对区域内的水-能耦合关系进行综合评估。关伟等^[7]从水-能关联视角构建能源水足迹评价模型,分析 2004—2016 年中国 30 个省份原煤、天然气、火电等 5 类能源全生命周期水资源使用时空演化特征和水-能匹配情况,发现原煤和火电水-能矛盾最突出,华北地区水-能匹配压力最大。在此基础上,学者进一步探讨了全产业部门要素耦合关系。杨文娟等^[8]从碳水关联视角对比研究 2012 年河南省不同产业部门碳水足迹效率,并分析产生差异的原因,最终提出制订节水和碳减排政策时应当充分考虑不同产业碳水关联情况的建议。

随着研究不断深入,除直接水-能-碳耦合外,研究主题开始考虑存在于居民最终消费和商品贸易中的间接水-能-碳耦合关系^[5]。地区间和产业部门间以比较优势理论和要素禀赋理论为基础参与贸易活动,该理论将环境要素作为贸易增长的外生变量,然而现实中的贸易活动却是通过消耗资源和污染环境为代价换取经济利益^[9]。

关于贸易隐含环境影响的研究,文献中分析单一要素居多,如贸易隐含碳^[10]、贸易虚拟水^[11]、贸易隐含能^[12]以及贸易隐含氮、磷、钾^[13]等等,且主要从国家层面围绕国际贸易展开研究。另一方面,国家内部省际贸易隐含环境问题受到国内外学者广泛关注。王勇^[14]基于全行业口径采用水资源拓展型 MRIO 模型和投入产出表对中国八大区域间贸易虚拟水转移情况进行测算,发现虚拟水存在从缺水地区向富水地区转移的不合理现象,不同区域和不同行业虚拟水转移既有共性也有差异。Cheng 等^[15]使用双边贸易含污量模型(EEBT)分析 1997—2007 年东北工业园区省际贸易隐含碳排放净流出空间演化特征,并采用两阶段空间结构分解法(two-stage SDA)研究得出技术水平 and 需求是隐含碳净转移主要驱动力。

伴随资源管理方式向“多资源”协同转变,贸易隐含环境问题不再囿于单一要素。如汪艺晗等^[16]以“一带一路”沿线国家粮食贸易为主体,分析其虚拟水和隐含能源流动格局,进一步基于网络视角揭示研究国家粮食国际贸易隐含能源-水系统关联。Zhang 等^[17]则侧重分析省际电力贸易中隐含的水-能耦合关系。也有少部分研究聚焦于虚拟水、隐含能和隐含碳 3 种环境要素。Yang 等^[18]从水-能-碳耦合角度分析北京和上海分部门虚拟水、隐含能和隐含碳,将服务业确定为北京和上海水-能-碳耦合关键节点,认为研究不同行业的水-能-碳耦合特征有助于缓解环境压力。Wang 等^[1]基于环境投入产出模型测算 2012 年中国分行业虚拟水、隐含能和隐

含碳,借助水资源间接消耗系数、能源间接消耗系数和二氧化碳间接排放系数总结贸易隐含水-能-碳耦合特征,发现轻工业、重工业和服务业特征相似均为贸易隐含水-能-碳密集型行业。

已有研究为厘清水-能-碳耦合关系及后续研究奠定了良好基础,但仍有不足之处,主要表现在以下三方面:一是绝大部分研究集中在 3 种要素的一种或两种,缺乏运用系统观点将水、能、碳纳入统一框架的研究视角;二是对于开放型经济系统而言,环境压力会通过供应链转移,对以商品贸易为媒介的跨区域和跨部门虚拟水、隐含能和隐含碳流动研究较少;三是研究范围多选择国家层面和省市层面,针对城市群、经济带的研究较少。鉴于此,本文以长江经济带作为研究区域,基于 2017 年投入产出表和环境投入产出模型计算虚拟水、隐含能和隐含碳流量,结合 Spearman 等级相关系数进行相关性分析,综合考察各省市和全产业部门贸易隐含水-能-碳耦合关系,为构建多资源综合管理机制、推动长江经济带可持续发展提供理论依据和实践指导。

2 多区域环境投入产出模型构建

2.1 贸易隐含水-能-碳耦合关系的内在联系

图 1 是梳理学者赵荣钦等^[19]和潘安^[20]的观点绘制的贸易视角水-能-碳耦合关系框架图,水资源、能源和二氧化碳作为区域经济社会发展的物质基础和代谢产物,彼此之间相互联系、相互作用。一方面,水的抽取、运输、使用以及污水处理等环节需要能源投入;另一方面,能源系统原材料开发、加工、运输、废料处理等过程也需要水资源投入。这些环节都不可避免地排放大量二氧化碳。此外,碳排放也会反作用于水系统与能源系统。例如,二氧化碳超额排放导致的气候变化问题会增加洪涝、干旱、暴雪等极端天气发生的频率,从而增加水资源系统、能源系统管理的复杂性。同时,贸易也会导致水-能-碳间接耦合。随着商品和服务在地区间交换时,水资源、能源和二氧化碳也以调入调出贸易为媒介发生地区间转移。因此,有必要综合考虑贸易隐含水-能-碳耦合关系,推动水资源、能源和二氧化碳管理方式向多要素协同管理转变。

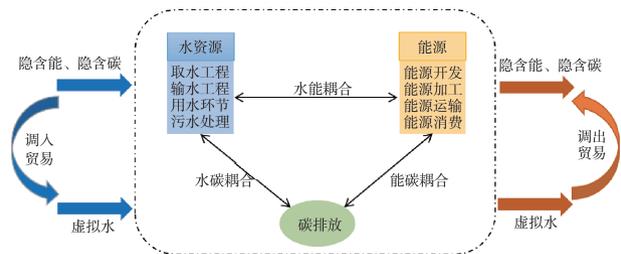


图 1 贸易视角水-能-碳耦合关系框架图

2.2 多区域环境投入产出模型

目前关于贸易隐含环境问题的研究方法主要包括投入产出模型^[3]、生命周期评价^[7]、物质流^[5]、生态网络分析等。其中,多区域投入产出模型(multi-region input-output model, MRIO)可以刻画区域产业间的相互关联,被广泛应用于经济学研究领域,由此延伸的环境投入产出方法可以建立起衔接经济、资源和环境的基本框架,是解决贸易隐含资源消耗和环境污染问题的有效方法^[21]。本文基于2017年中国31省份42部门多区域投入产出表,采用多区域投入产出法计算长江经济带贸易中虚拟水消费量、隐含能消费量和隐含碳排放量。

由 m 个行政区域 n 个国民经济部门构成的多区域投入产出模型表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{11} & \cdots & \mathbf{z}_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{z}_{m1} & \cdots & \mathbf{z}_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{11} & \cdots & \mathbf{y}_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{m1} & \cdots & \mathbf{y}_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为区域总产出,为 $n \times 1$ 阶列向量; \mathbf{z} 表示不同区域中部门间的相互投入,为 $n \times n$ 阶矩阵; \mathbf{y} 表示区域间的最终需求,为 $n \times n$ 阶矩阵; \mathbf{e} 表示区域出口,为 $n \times 1$ 阶列向量。

依据 MRIO 表的行向平衡关系可得:

$$x_{ri} = \sum_s \sum_j z_{ri,sj} + \sum_s y_{ri,s} + e_{ri} \quad (2)$$

式中: r, s 为 2 个随机区域; i, j 为区域内 2 个随机经济部门; x_{ri} 为 r 区域 i 部门总产出; $z_{ri,sj}$ 为 r 区域 i 部门向 s 区域 j 部门的中间投入; $y_{ri,s}$ 为 s 区域对 r 区域 i 部门的最终需求; e_{ri} 为 r 区域 i 部门的出口。

令 $a_{ri,sj} = z_{ri,sj}/x_{sj}$ 表示某个部门单位产出对其他部门的直接消耗,即直接消耗系数,则式(2)可以表示为

$$x_{ri} = \sum_s \sum_j a_{ri,sj} x_{sj} + \sum_s y_{ri,s} + e_{ri} \quad (3)$$

令 $\mathbf{X} = (x_{ri})$ 为总产出矩阵; \mathbf{A} 为直接消耗系数矩阵; $\mathbf{Y} = (\sum_s y_{ri,s})$ 为最终需求矩阵; $\mathbf{E} = (e_{ri})$ 为出口矩阵,则上式表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{AX} + \mathbf{Y} + \mathbf{E} \quad (4)$$

移项得:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{Y} + \mathbf{E}) \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵,又称完全需求矩阵。

此外,生产单位产品消耗的水、能源和二氧化碳分别为

$$f_w = \frac{w_{ri}}{x_{ri}} \quad (6)$$

$$f_N = \frac{N_{ri}}{x_{ri}} \quad (7)$$

$$f_C = \frac{C_{ri}}{x_{ri}} \quad (8)$$

式中: f_w, f_N, f_C 分别为水资源消耗系数、能源消费系数和碳排放系数,指部门单位产值对水、能源消费量和碳排放量; w_{ri}, N_{ri}, C_{ri} 分别为 r 地区 i 部门单位产出消费的水资源、能源和排放的二氧化碳量。

嵌入水资源、能源和二氧化碳环境要素,将价值型多区域投入产出模型拓展成环境多区域投入产出模型:

$$\widehat{\mathbf{H}}_W = \widehat{\mathbf{F}}_W (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} (\widehat{\mathbf{Y}} + \widehat{\mathbf{E}}) \quad (9)$$

$$\widehat{\mathbf{H}}_N = \widehat{\mathbf{F}}_N (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} (\widehat{\mathbf{Y}} + \widehat{\mathbf{E}}) \quad (10)$$

$$\widehat{\mathbf{H}}_C = \widehat{\mathbf{F}}_C (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} (\widehat{\mathbf{Y}} + \widehat{\mathbf{E}}) \quad (11)$$

式中: $\widehat{\cdot}$ 表示对角矩阵; $\mathbf{F}_W, \mathbf{F}_N, \mathbf{F}_C$ 分别为分部门水资源消耗系数列向量、能源消费系数列向量和碳排放系数列向量; $\mathbf{H}_W, \mathbf{H}_N, \mathbf{H}_C$ 分别为由于最终产品消费通过贸易导致的区域内用水矩阵、能源消费矩阵和二氧化碳排放矩阵。因此,区域 r 的虚拟水、隐含能和隐含碳计算公式如下:

$$\mathbf{T} = \sum_{r=1, r \neq s}^n \mathbf{H}_{rs} \quad (12)$$

$$\mathbf{P} = \sum_{r=1, r \neq s}^n \mathbf{H}_{sr} \quad (13)$$

式中: \mathbf{T} 为区域 r 调出贸易隐含要素矩阵; \mathbf{P} 为区域 r 调入贸易隐含要素矩阵。则省际贸易中虚拟水、隐含能和隐含碳转移平衡量(净调出量)为

$$\mathbf{B} = \mathbf{T} - \mathbf{P} \quad (14)$$

2.3 Spearman 等级相关系数

相关分析方法能直观量化要素耦合关系,已被广泛应用于水-能-碳耦合关系研究中,主要包括 Pearson 积差相关系数和 Spearman 等级相关系数^[3,22-23]。前者用于度量符合正态分布的随机变量之间线性关系的强弱,后者属于非参数检验方法,适用范围更广。因此本文参考 Chhipi-Shrestha 等^[22] 和 Tian 等^[3] 的方法,应用基于 IBM SPSS Statistics 的 Spearman 等级相关系数(ρ)来度量虚拟水、隐含能和隐含碳的耦合关系。当相关系数显著且为正表示要素之间存在正相关关系,为负表示存在负相关关系;不显著则表示要素间相互独立。

3 数据来源与处理

a. 多区域投入产出表。采用 2017 年中国 31 省份(因数据原因,台湾地区、香港和澳门特别行政区未列入研究范围)42 部门多区域投入产出表,该表由中国碳核算数据库(CEADs)编制完成。为方便研究,根据 Guo 等^[24] 的行业分类标准将 42 个部门合并成 17 个部门,如表 1 所示包含 1 个第一产业

表 1 我国 17 部门行业分类标准

部门代码	部门整合(17 部门)	2017 年投入产出表(42 部门)
S1	农业	农林牧渔产品和服务
S2	采掘业	煤炭采选产品,石油和天然气开采产品,金属矿采选产品,非金属矿和其他矿采选产品
S3	食品和烟草业	食品和烟草
S4	纺织、服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	纺织品,纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品
S5	木材加工品和家具业	木材加工品和家具
S6	造纸印刷和文教体育用品业	造纸印刷和文教体育用品
S7	石油、炼焦产品和核燃料加工品业	石油、炼焦产品和核燃料加工品
S8	化学产品业	化学产品
S9	非金属矿物制品业	非金属矿物制品
S10	金属制品、金属冶炼和压延加工业	金属冶炼和压延加工品,金属制品
S11	机械设备制造业	通用设备,专用设备,交通运输设备,电气机械和器材,通信设备、计算机和其他电子设备,仪器仪表
S12	其他制造产品业	其他制造产品
S13	电气、热力、燃气及水的生产供应业	电力、热力的生产和供应,燃气生产和供应,水的生产和供应
S14	建筑业	建筑
S15	交通运输、仓储和邮电通信业	交通运输、仓储和邮政
S16	批发零售及住宿餐饮业	批发和零售,住宿和餐饮
S17	其他服务业	金属制品、机械和设备修理服务,信息传输、软件和信息技术服务,金融,房地产,租赁和商务服务,科学研究,技术服务,水利、环境和公共设施管理,居民服务、修理和其他服务,教育,卫生和社会工作,文化、体育和娱乐,公共管理、社会保障和社会组织

部门、13 个第二产业部门和 3 个第三产业部门。

b. 分部门水资源消费数据。农业部门用水数据直接采用《中国统计年鉴》中的农业用水总量;由于没有官方公布的细分部门用水数据,分部门工业用水数据通过间接推算得到^[25]。基于 2008 年《中国经济普查年鉴》中的分部门水消费数据,将地区经济增长率作为水资源使用增长率,间接获得地区分部门工业用水数据,并根据各地区当年工业部门实际用水总量进行调整;分部门服务业用水数据计算过程与工业部门相同。

c. 分部门能源消费数据和分部门碳排放数据。来自中国碳核算数据库(CEADs),为便于研究,参照《中国能源统计年鉴(2018)》^[26]中各种能源折标煤参考系数将能源消费量统一为标准煤单位。为与投入产出表时间一致,本文使用的数据均为 2017 年数据。此外,由于缺少西藏能源消费和碳排放数据,本文使用 Shan 等^[27]测算的 2014 年西藏能源消费和碳排放数据作为替代。

4 长江经济带省际贸易隐含水-能-碳耦合关系分析

4.1 分地区分析

基于前文阐述的环境投入产出模型和与之匹配的水资源、能源及碳排放数据,首先对长江经济带各

省市调出、调入贸易中的虚拟水消费量、隐含能消费量和隐含碳排放量进行计算(表 2)。

表 2 长江经济带各省市虚拟水、隐含能和隐含碳流量

省市	虚拟水/亿 m ³		隐含能/万 t 标准煤		隐含碳/万 t	
	调出贸易	调入贸易	调出贸易	调入贸易	调出贸易	调入贸易
上海	33.83	48.99	5417.67	6053.79	11619.76	19713.89
江苏	161.95	139.66	6647.63	14915.55	24572.26	43296.82
浙江	82.31	246.36	8416.05	27355.19	36436.45	69919.44
安徽	93.38	54.86	3330.58	4177.67	15329.22	12767.66
江西	97.33	37.02	3489.14	3099.43	11700.30	12090.75
湖北	31.33	37.18	2035.37	1964.53	6103.44	6315.42
湖南	71.40	41.49	2134.24	3178.65	6092.79	12805.12
重庆	19.97	55.96	2399.58	7095.47	5627.91	22764.25
四川	27.77	44.47	1568.41	3253.13	4167.07	8480.19
贵州	37.99	23.97	2932.67	2577.73	11436.46	7413.77
云南	38.22	33.64	2226.42	3654.52	5077.09	10868.80

如表 2 所示,从各省市表现来看,虚拟水调出最多的省份是江苏(161.95 亿 m³),占长江经济带虚拟水总调出量的 23.29%。其次是江西(97.33 亿 m³)和安徽(93.38 亿 m³)。虚拟水调入最多的省份是浙江(246.36 亿 m³)、江苏(139.66 亿 m³)和重庆(55.96 亿 m³),三者合计调入虚拟水量占长江经济带调入总量的 57.88%。隐含能、隐含碳调出调入中,浙江、江苏为重点省份,它们调入了超过半数的

隐含能和隐含碳。在贸易隐含水-能-碳平衡方面,虚拟水净调入最多的省市为浙江、重庆、四川和上海,隐含能净调入最多的省市为浙江、江苏、重庆和四川,隐含碳净调入最多的省市为浙江、江苏、重庆和上海。虚拟水、隐含能和隐含碳净流入的省市为长江经济带内经济发达地区,它们通过贸易从其他地区调入水资源密集型、能源密集型和碳密集型产品满足自身消费。可以发现,不同省市的虚拟水、隐含能、隐含碳在调入、调出贸易和贸易平衡情景下的量级排序既有重合也有差别,因此有必要进一步探究它们之间的内在关系。

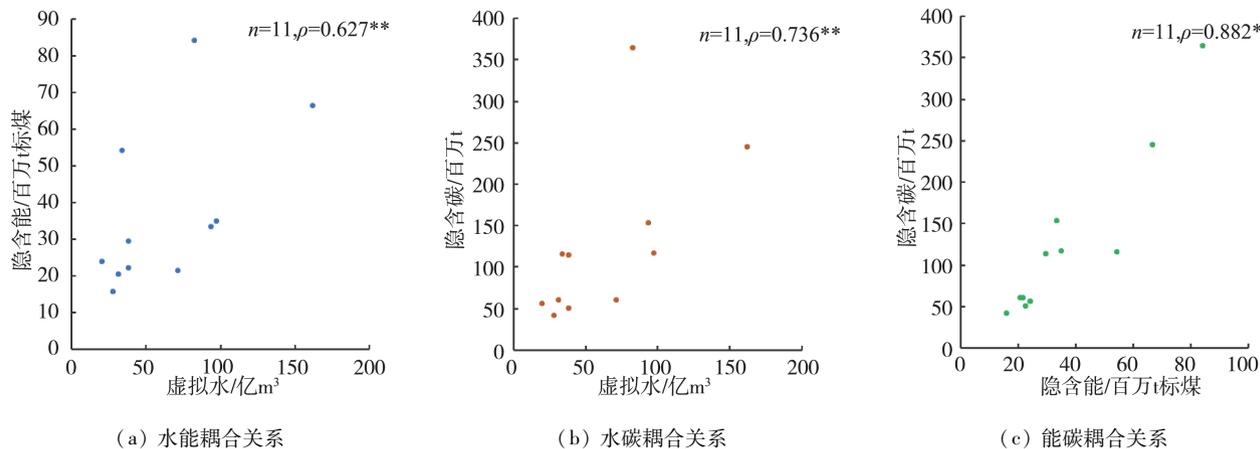
结合 Spearman 等级相关系数可以进一步分析长江经济带各省市贸易隐含水-能-碳耦合关系。如图 2 和图 3 所示,长江经济带 11 省市调出与调入贸易中虚拟水、隐含能和隐含碳均呈显著正相关关系,意味着虚拟水消耗量越大的地区通常对应于更多的隐含能消费和隐含碳排放。调出贸易中,虚拟水和隐含能相关系数为 0.627,在 0.01 置信水平上显著正相关;虚拟水和隐含碳相关系数为 0.736,在 0.01 置信水平上显著正相关;隐含能和隐含碳相关系数为 0.882,在 0.01 置信水平上显著正相关。调入贸易

比调入贸易呈现更强的水-能-碳相关性,其各项相关系数分别为 0.864,0.836 和 0.900,同样在 0.01 置信水平上显著。此外对比 3 项系数,隐含能、隐含碳相关性更强,表明区域间贸易中高能耗和高碳排放密切相关,因此应当重点关注长江经济带中资源型城市贸易活动带来的碳排放问题。

4.2 分部门分析

根据表 1 的部门划分方法,可以计算出长江经济带 11 省市分部门虚拟水消费量、隐含能消费量和隐含碳排放量,其中正值为省际调入贸易,负值为省际调出贸易。

图 4 展示了各省市分部门虚拟水情况,省际调入贸易中,农业部门(S1)是虚拟水流入主要来源,占长江经济带虚拟水流入总量的 20.89%。其次是建筑业(S14)以及食品和烟草业(S3),占比为 18.44% 和 14.38%。省际调出贸易中,农业部门(S1)同样是最大的虚拟水流出部门,占调出总量的 59.27%,紧随其后的是电力、热力、燃气及水的生产供应业(S13)和化学产品部门(S8)。值得一提的是其他服务业(S17)省际调入贸易虚拟水量级排序同样比较靠前。作为最大的虚拟水流动省份,江苏超



注: n 为样本量, ρ 为 Spearman 等级相关系数, ** 表示相关性在 0.01 置信水平上显著,下同。

图 2 长江经济带各省市调出贸易水-能-碳耦合关系

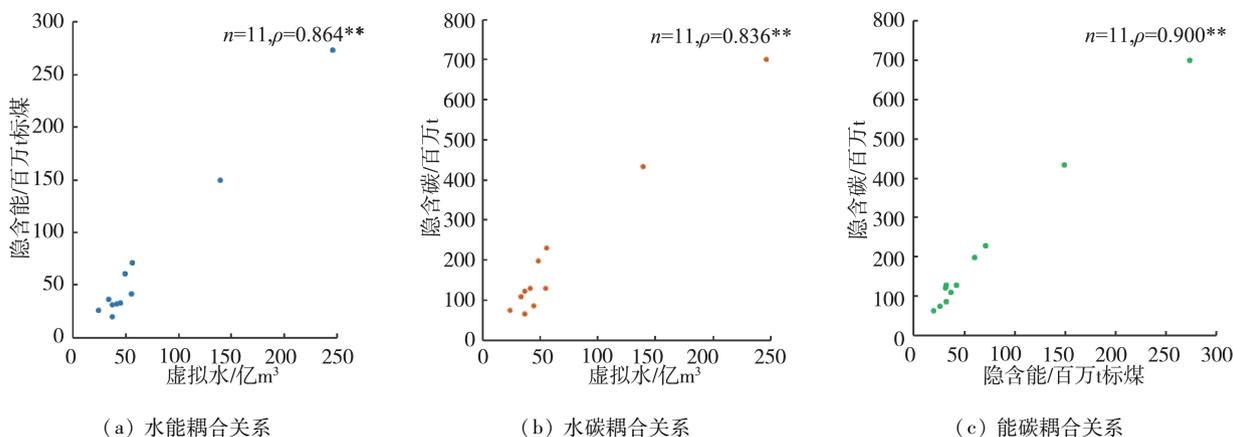


图 3 长江经济带各省市调入贸易水-能-碳耦合关系

过 60% 的流量来自农业(S1)、电力、热力、燃气及水的生产供应业(S13)和建筑业(S14)。此外,除上述重要部门外,浙江民营制造业企业数量众多,其他制造业(S12)也需要调入大量虚拟水。

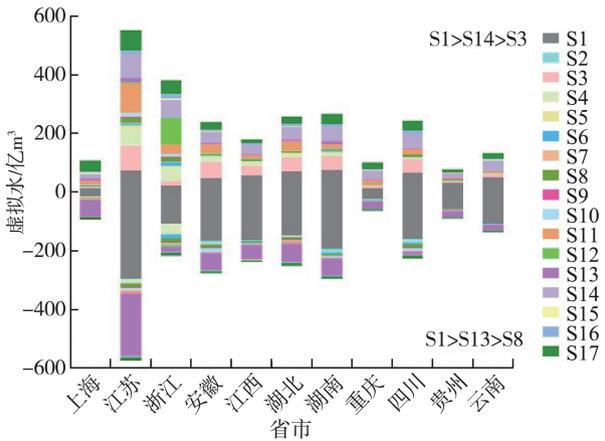


图 4 长江经济带各省市分部门虚拟水消费情况

图 5 为各省市分部门隐含能消费量,与虚拟水流动相比,各部门隐含能流动分布比较平均。省际调入贸易中,建筑业(S14)、机械设备制造业(S11)和其他服务业(S17)隐含能流入最多,占长江经济带隐含能调入总量的比例分别为 33.41%、18.95%和 15.30%。省际调出贸易中,金属制品、金属冶炼和压延加工业(S10)、交通运输仓储和邮电通信业(S15)和电力、热力、燃气及水的生产供应业(S13)隐含能流出最多,占调出总量的比例分别为 21.82%、15.89%和 14.99%。同样,对于浙江而言,其他制造业(S12)也调入了大量隐含能。

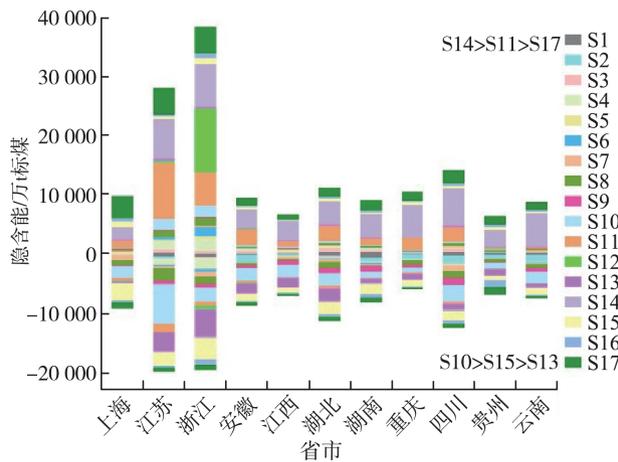


图 5 长江经济带各省市分部门隐含能源消费量

图 6 为各省市分部门隐含碳排放量,其中省际调入贸易隐含碳排放部门量级排序与隐含能一致,建筑业(S14)、机械设备制造业(S11)和其他服务业(S17)也是隐含碳流入最多的三大部门,占长江经济带隐含碳调入总量的比例为 36.24%、17.99%和

14.62%。调出贸易隐含碳排放中,电力、热力、燃气及水的生产供应业(S13)、金属制品、金属冶炼和压延加工业(S10)和非金属矿物制品业(S9)占比较大,合计占长江经济带隐含碳调出总量的比例高达 75.46%。

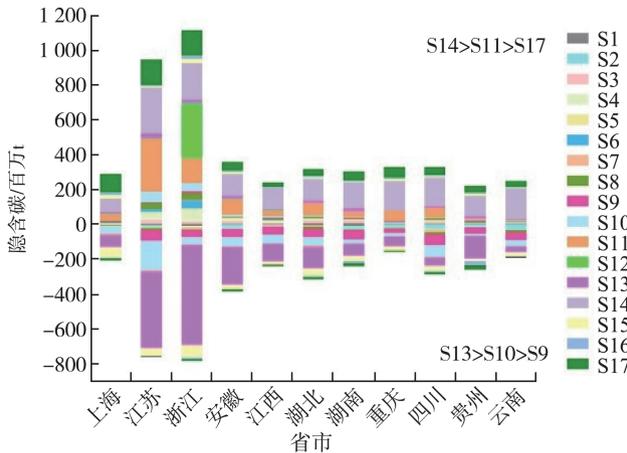


图 6 长江经济带各省市分部门隐含碳排放量

长江经济带各省市分部门虚拟水、隐含能及隐含碳流动情况表明,农业部门(S1)是虚拟水调出调入关键部门,建筑业(S14)是隐含能调出调入关键部门,电力、热力、燃气及水的生产供应业(S13)是隐含碳调出调入关键部门。对于浙江,还应当重点关注其他制造业(S12)调入的隐含能、隐含碳。

为进一步探究长江经济带不同产业部门贸易隐含水-能-碳耦合关系,表 3 和表 4 给出三大主要产业调出贸易与调入贸易隐含水-能-碳 Spearman 等级相关系数。调出贸易中,第一产业水-能耦合关系与水-碳耦合关系不显著,农业产业活动虚拟水消费与隐含能消费、隐含碳排放无关,符合农业是我国能耗最低的领域的现实情况。而第一产业隐含能消费与隐含碳排放显著正相关,且相关系数高于二、三产业,表明农业部门排放的二氧化碳主要来自能源消费。重工业主导的第二产业拥有高能耗、高排放的产业特质,贸易隐含水-能-碳耦合关系显著正相关。第三产业贸易隐含水-能-碳耦合关系同样显著相关,但是水-能、水-碳相关系数为负,表明产业活动虚拟水消费越多,则隐含能消费越少,隐含碳排放越少,这与第三产业用水量大、能源消耗低、污染轻的产业结构特点有关。调入贸易方面,三大主要产业贸易隐含水-能-碳耦合关系均呈显著正相关,且二产隐含水-能-碳相关性最强。此外,贸易隐含能-碳相关性系数始终最大,推动能源消费低碳化势在必行。同时,长江经济带也应着手调整优化产业结构,大力发展节水农业,提高第三产业比重,以推动节水节能减排。

表3 长江经济带三大主要产业调出贸易隐含水-能-碳耦合关系

调出贸易	水-能			水-碳			能-碳		
	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>
第一产业	11	0.6		11	0.491		11	0.982	**
第二产业	143	0.806	**	143	0.736	**	143	0.915	**
第三产业	33	-0.463	**	33	-0.627	**	33	0.931	**

表4 长江经济带三大主要产业调入贸易隐含水-能-碳耦合关系

调入贸易	水-能			水-碳			能-碳		
	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>	<i>n</i>	ρ	<i>p</i>
第一产业	11	0.718	*	11	0.673	*	11	0.936	**
第二产业	143	0.917	**	143	0.912	**	143	0.965	**
第三产业	33	0.786	**	33	0.801	**	33	0.959	**

注: *表示相关性在0.05置信水平上显著。

4.3 贸易隐含水-能-碳耦合特征分析

基于前文分析,虚拟水、隐含能和隐含碳在长江经济带不同省市和不同部门间两两呈现显著相关性,从而可以根据要素在不同省市的净调出与净调入情况将长江经济带11省市分为3类,以揭示水-能-碳耦合特征。表5给出了水-能-碳贸易平衡视角的省市分类情况。

类别I典型省份为贵州,其特征为贸易隐含水-能-碳净调出,它向长江经济带内其他省市调出大量虚拟水、隐含能和隐含碳。在长江经济带中,贵州位于产业链最底层,传统农业经济和能源工业发达,在省际贸易中为长江经济带内其他发达省市提供低附加值水资源、能源密集型贸易产品,并排放大量二氧化碳。

表5 根据水-能-碳贸易平衡的长江经济带省市分类

类别	特征	省市	数量
I	虚拟水、隐含能和隐含碳净调出	贵州	1
II	虚拟水、隐含能和隐含碳流动不一致	云南、江西、湖北、江苏、安徽、湖南	6
III	虚拟水、隐含能和隐含碳净调入	上海、浙江、重庆、四川	4

类别II包含江苏、安徽、江西、湖北、湖南和云南6个省份,其特征为贸易隐含水-能-碳流动不一致。此外,6个省份还可继续细分为3类。其中,江苏、安徽及湖南为一类,它们的水-能-碳耦合特征接近类别III,虚拟水、隐含能和隐含碳流动体量大,虚拟水流动产生差异的原因可能是江苏、安徽和湖南农业发达,作为产粮大省粮食贸易发达,从而导致调出到长江经济带内其余省市的虚拟水量超过调入量。江西和湖北为一类,它们的隐含能和隐含碳调出量、调入量差别不大,处于隐含能和隐含碳调入调出基

本平衡状态。云南为一类,其水-能-碳耦合特征与类别I相似,虚拟水、隐含能、隐含碳流动量很少,与长江经济带其他省市贸易往来较少。

类别III包含上海、浙江、四川和重庆4个省市,特征为贸易隐含水-能-碳净调入,它们大量消费长江经济带内其他城市调出的虚拟水、隐含能和隐含碳以满足自身发展。上海和浙江经济发达,发展重心倾向于制造业和服务业,而四川拥有高质量的电子信息制造业和发达的旅游业。重庆作为直辖市,较上游其他省市工业和服务业发达。这4个省市二、三产业并重发展,在省际贸易中,它们通过消费长江经济带内其他省市提供的水资源、能源密集型初级产品创造更高的经济收益,且碳排放污染少。

综上,长江经济带内贸易隐含水-能-碳流动时,上海、浙江、江苏等发达省市凭借产业结构优势将隐含水-能-碳压力转嫁到贵州、云南等欠发达省市,针对这种环境不公平现象,发达省市应当承担转移到其他地区的资源消耗和环境污染责任。

5 结论与建议

5.1 结论

a. 分区域看,长江经济带中江苏、浙江是虚拟水、隐含能和隐含碳流动关键省份。各省市省际贸易中虚拟水、隐含能和隐含碳两两呈显著正相关关系,且隐含能、隐含碳相关性最强。虚拟水、隐含能和隐含碳流动格局与各省市经济发展水平相关,江苏、浙江、上海经济发达,通过贸易调入自身发展所需的农产品、原材料等,而贵州等欠发达地区与其他省市贸易往来不频繁,同时大量调出水资源、能源和碳密集型产品。

b. 分部门看,农业是虚拟水流动关键部门,建筑业是隐含能流动关键部门,电力、热力、燃气及水的生产供应业是隐含碳流动关键部门。对于浙江,还应当重点关注其他制造业调入的隐含能、隐含碳。三大主要产业虚拟水、隐含能和隐含碳相关性与产业特质有关,除第一产业外,二、三产中虚拟水、隐含能和隐含碳两两显著相关,且第二产业相关性最强。

c. 虚拟水、隐含能和隐含碳在区域和部门中两两显著相关,根据贸易隐含水-能-碳耦合特征,长江经济带11省市可分为3类:上海、浙江等为一类,其耦合特征为贸易隐含水-能-碳净调入;贵州为一类,其特征为贸易隐含水-能-碳净调出;云南、江西等为一类,其耦合特征为贸易隐含水-能-碳流动不一致。产生差异的原因在于各省市产业结构特点不同,发达省市存在凭借产业结构优势将隐含水-能-碳压力转嫁到欠发达省市的不公平现象。

5.2 建议

a. 应注重关键地区、关键部门资源使用效率升级和碳减排目标落实。长江经济带作为重要的内河流域经济带,省际贸易往来频繁对水资源、能源依存度较高,并伴随二氧化碳过度排放,且资源消耗和碳排放主要集中在少数几个地区和行业。因此,不同地区、部门在节约资源和减少二氧化碳排放上承担的责任并不相同,江苏、浙江作为虚拟水、隐含能和隐含碳流动关键地区,应当是政策引导节水节能减排的重点区域。而农业、建筑业和电力、热力、燃气及水的生产供应业是推进长江经济带绿色发展重点行业。

b. 长江经济带各省市产业结构亟待优化。贵州等欠发达地区以传统农业为主,大量调出水资源密集型产品,可大力发展节水型农业,同时调整产业结构向二、三产业转型升级;上海、浙江等发达地区应调整能源消费结构,推动产业结构低碳化、绿色化发展。同时,在制订节水节能减排目标时,应深入考虑地区和产业间的水-能-碳耦合关系,使政策制订更加科学化。

c. 长江经济带各省市应加强节水节能减碳和环境保护方面的合作,促进区域协作节水节能减排机制落实,由发达省市向欠发达省市提供技术、资金等方面的支持,以缓解当前由贸易传导的环境不公平现象,形成绿色可持续的贸易格局。

参考文献:

[1] WANG Xuechao, KLEMŠ J J, WANG Yutao, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: an environmental input-output model-based approach [J]. Applied Energy, 2020, 261 : 1-12.

[2] 秦腾, 佟金萍. 长江经济带水-能源-粮食耦合效率的时空演化及影响因素 [J]. 资源科学, 2021, 43 (10) : 2068-80.

[3] TIAN Peipei, LU Hongwei, REINOUT H, et al. Water-energy-carbon nexus in China's intra and inter-regional trade [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806 : 150666.

[4] 曹丽斌, 蔡博峰, 王金南. 中国城市产业结构与CO₂排放的耦合关系 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27 (2) : 10-14.

[5] MENG Fanxin, LIU Gengyuan, LIANG Sai, et al. Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities [J]. Energy, 2019, 171 : 1017-1032.

[6] LI Xian, YANG Lili, ZHENG Heran, et al. City-level water-energy nexus in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Applied energy, 2019, 235 : 827-34.

[7] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系 [J]. 资源科学, 2019, 41 (11) : 2008-19.

[8] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 等. 河南省不同产业碳足迹效率研究 [J]. 自然资源学报, 2019, 34 (1) : 92-103.

[9] 胡剑波, 任香, 高鹏. 中国省际贸易、国际贸易与低碳贸易竞争力的测度研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2019, 36 (9) : 42-60.

[10] 孟凡鑫, 苏美蓉, 胡元超, 等. 中国及“一带一路”沿线典型国家贸易隐含碳转移研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29 (4) : 18-26.

[11] 曾贤刚, 段存儒, 王睿. 中国农产品贸易虚拟水转移及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2021, 41 (2) : 983-92.

[12] 芦风英, 庞智强, 邓光耀. 增加值贸易视角下中美隐含能贸易研究 [J]. 统计与决策, 2020, 36 (24) : 146-50.

[13] 朱安丰, 郭正权, 解伟, 等. 全球价值链视角下中国农产品贸易隐含氮、磷、钾研究 [J]. 自然资源学报, 2022, 37 (1) : 221-32.

[14] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26 (4) : 107-15.

[15] CHENG Hao, DONG Suocheng, LI Fujia, et al. Multiregional input-output analysis of spatial-temporal evolution driving force for carbon emissions embodied in interprovincial trade and optimization policies: case study of northeast industrial district in China [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52 (1) : 346-58.

[16] 汪艺晗, 杨谨, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动 [J]. 资源科学, 2021, 43 (5) : 974-86.

[17] ZHANG Yiyi, FANG Iake, WANG Saige, et al. Energy-water nexus in electricity trade network: a case study of interprovincial electricity trade in China [J]. Applied energy, 2020, 257 : 113685.

[18] YANG Xuechun, WANG Yutao, SUN Mingxing, et al. Exploring the environmental pressures in urban sectors: an energy-water-carbon nexus perspective [J]. Applied Energy, 2018, 228 : 2298-2307.

[19] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析 [J]. 地理学报, 2016, 71 (9) : 1613-28.

[20] 潘安. 对外贸易、区域间贸易与碳排放转移: 基于中国地区投入产出表的研究 [J]. 财经研究, 2017, 43 (11) : 57-69.

[21] ZHANG Wei, WANG Feng, KLAUS H, et al. Unequal exchange of air pollution and economic benefits embodied in China's exports [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52 (7) : 3888-3898.

[22] CHHIPHI-SHRESTHA G, HEWAGE K, SADIQ R. Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: system dynamics approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143 (6) : 04017016.

(下转第61页)

- al. Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment: a review of available spatial approaches [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165(11): 811-827.
- [15] KIRIKKALELI D, DARBAZ I. The causal linkage between energy price and food price[J]. *Energies*, 2021, 14(14): 4182-4182.
- [16] YILDIZ I. Review of climate change issues: a forcing function perspective in agricultural and energy innovation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(6): 2200-2215.
- [17] SCHAEFER T, UDENIO M, QUINN S, et al. Water risk assessment in supply chains [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 208(10): 636-648.
- [18] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [19] LABAKA L, MARAÑA P, GIMÉNEZ R, et al. Defining the roadmap towards city resilience [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146(9): 281-296.
- [20] MARANA P, EDEN C, ERIKSSON H, et al. Towards a resilience management guideline: cities as a starting point for societal resilience[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48(7): 101531.
- [21] KHAZAI B, ANHORN J, BURTON C G. Resilience performance scorecard: measuring urban disaster resilience at multiple levels of geography with case study application to Lalitpur, Nepal[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31(10): 604-616.
- [22] WARDEKKER A, WILK B, BROWN V, et al. A diagnostic tool for supporting policymaking on urban resilience[J]. *Cities*, 2020, 101(6): 102691.
- [23] SHARIFI A. Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: a literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276(12): 1-14.
- [24] 吕悦风, 项铭涛, 王梦婧, 等. 从安全防灾到韧性建设: 国土空间治理背景下韧性规划的探索与展望[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2281-2293.

(收稿日期: 2022-02-17 编辑: 熊水斌)

(上接第 9 页)

- [23] GONZÁLEZ-VAL R, LANASPA L. Patterns in US urban growth, 1790—2000 [J]. *Regional Studies*, 2016(2): 289-309.
- [24] LANOIE P, LAURENT-LUCCHETTI J, JOHNSTONE N, et al. Environmental policy, innovation and performance: new insights on the porter hypothesis [J]. *Journal of Economics & Management Strategy*, 2007, 20(3): 803-842.
- [25] 赵敏, 赵骏. 索罗模型视角下城市创新对经济增长的效应测度: 以中国 35 个大中城市为例[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(22): 78-83.
- [26] 贾学秀, 严岩, 朱春雁, 等. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1783-1791.
- [27] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 571-582.
- [28] 孙克, 徐中民. 基于地理加权回归的中国灰水足迹人文驱动因素分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 37-48.
- [29] 王曦, 陈中飞. 中国城镇化水平的决定因素: 基于国际经验[J]. *世界经济*, 2015, 38(6): 167-192.
- [30] 黄磊, 吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(8): 40-49.
- [31] 王雨飞, 倪鹏飞. 高速铁路影响下的经济增长溢出与区域空间优化[J]. *中国工业经济*, 2016(2): 21-36.
- [32] 朱平芳, 徐伟民. 政府的科技激励政策对大中型工业企业 R&D 投入及其专利产出的影响: 上海市的实证研究[J]. *经济研究*, 2003(6): 45-53.
- [33] 高辉, 石寅斌, 张陈俊. 中国城镇化影响因素的阶段差异研究: 基于诺瑟姆理论[J]. *管理现代化*, 2019, 39(1): 58-61.
- [34] 宋敏, 陈益鑫. 城市群综合交通运输效率对经济增长的影响: 基于长三角与粤港澳大湾区的比较研究[J]. *城市问题*, 2019(9): 45-53.
- [35] 鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系[J]. *地理学报*, 2014, 69(12): 1799-1809.

(收稿日期: 2022-06-30 编辑: 陈玉国)

(上接第 54 页)

- [23] LI Hao, ZHAO Yuhuan, LIN Jiang. A review of the energy-carbon-water nexus: concepts, research focuses, mechanisms, and methodologies [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2020, 9(1): 1-18.
- [24] GUO Shan, ZHENG Shupeng, HU Yunhao, et al. Embodied energy use in the global construction industry [J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113838.
- [25] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 788-99.
- [26] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴(2018) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [27] SHAN Yuli, ZHENG Heran, GUAN Dabo, et al. Energy consumption and CO₂ emissions in Tibet and its cities in 2014 [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(8): 854-64.

(收稿日期: 2022-03-19 编辑: 陈玉国)