

长江经济带碳排放与经济增长“脱钩陷阱”的识别与破解研究¹

赵菲菲 胡 政 赵 旭* 何伟军

(三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443000)

【摘 要】：为推动长江经济带城市碳排放与经济增长持续稳定脱钩，率先完成“双碳”目标的战略使命，基于脱钩理论并以脱钩路径为切入点，提出“脱钩陷阱”与“真伪脱钩”的概念与识别方法，将 Tapio 脱钩模型与 Logit 模型相结合，分析并检验 2006～2019 年长江经济带 110 个地级及以上城市碳排放与经济增长的“真伪脱钩”状态，进一步探究破除“脱钩陷阱”的主要驱动力。结果表明：(1) 长江经济带 110 个城市主要呈现强脱钩与弱脱钩状态，扩张连接和增长负脱钩零星分布，整体脱钩状态较好，但脱钩状态存在空间异质性与时序波动性特征，黄石、湘潭等城市均出现复钩现象，陷入“脱钩陷阱”，呈现“伪脱钩”状态；(2) “真伪脱钩”城市存在显著地域性，“真脱钩”城市主要位于下游地区，且多为省会城市，陷入“脱钩陷阱”城市主要分布于中上游地区；(3) 提升技术创新能力、优化集聚规模、加大外商直接投资等是城市实现内源性脱钩，避免落入“脱钩陷阱”的重要举措。

【关键词】：碳排放；经济增长；脱钩陷阱；真伪脱钩

【中图分类号】：F124. 5；X321 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2023) 06-1127-11

【DOI】：10. 11870 /cjlyzyyhj202306002

改革开放以来，中国经济增长取得了举世瞩目的成就，但传统粗放型发展方式导致的环境压力也日趋紧张。2020 年，根据英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计年鉴(第 70 版)》统计数据显示，我国碳排放量 98.99 亿 t，占全球碳排放比重高达 30.7%^①，再创历史新高，为全球最大的二氧化碳排放国。长江经济带是中国除沿海开放地区外经济密度最大的经济地带，产业园区密集，工业显著集聚，二氧化碳排放量占全国排放总量的 37.5%^①，并呈现刚性增长趋势，从 2003 年的 8.01 亿 t 快速升至 2019 年的 16.66 亿 t，年平均增长率高达 6.94%^②，形成高碳排放的集聚地带。

为从根本上化解经济发展带来的高碳排放，实现绿色低碳发展，推动经济发展与碳排放脱钩成为重要途径。为此，各级政府及相关部门积极通过设置节能减排目标、配额分配、能源结构调整等方式以期实现脱钩，但结果却不尽人意，部分地区脱钩状态出现波动性，即脱钩与复钩呈现不断反复的变化趋势^[3,4]，严重削弱了长江经济带节能减碳政策的治理效果，延缓了脱钩进程，增加了“双碳”目标实现的艰巨性、困难性。出现上述现象的原因是什么、采取何种有效的针对性举措成为长江经济带碳排放与经济增长实现稳定脱钩亟待解决的首要问题。

¹ **【收稿日期】**：2022-08-08；**【修回日期】**：2022-10-13

【基金项目】：国家社会科学基金重大项目(19ZDA089)；国家自然科学基金项目(72004116)

【作者简介】：赵菲菲(1990～)，女，讲师，主要研究方向为低碳经济、区域经济。E-mail: zhff2013@163. com

【* 通讯作者 E-mail】：zhaoxu@ctgu. edu. cn

² ① 数据来源：2021 年全球及主要国家碳排放市场现状及分析，全球减排仅一国增长
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1705165729203243257&wfr=spider&for=pc>

1 文献综述

“脱钩”概念最早应用于物理领域，表示具有相互关系的两个或多个物理量间的响应关系不复存在的状态。2002 年，经济合作与发展组织 (OECD)^[5]首次将“脱钩”用于衡量经济发展与生态环境之间的相互影响关系，并将其分为“相对脱钩”和“绝对脱钩”两种类型。Tapio^[6]构建弹性脱钩模型，提出完整的脱钩指标体系，并划分强脱钩、弱脱钩、衰退脱钩等六种类型，推动了脱钩理论的发展。此后，Tapio 脱钩模型被广泛应用到国家^[7,8]、区域^[9,10]、省际^[11,12]和城市^[13,14]层面的碳排放与区域经济增长相关关系研究。

脱钩理论主要反映了碳排放与区域经济增长相互关系的动态演变特征，但该演化并非呈现持续向好或下滑的规律性变化，而具有一定的非稳定性或波动性。孙叶飞等^[15]对中国能源碳排放与经济增长脱钩关系分析时发现 2000 年后两者脱钩状态呈现“M”型的波动特点，即弱脱钩、扩张连结、强脱钩交替出现，脱钩状态极不稳定。王越等^[16]对东北三省 2000~2015 年能源碳排放脱钩关系研究时发现与之相似结论。除地区层面出现该现象之外，产业层面也与之类似，Jiang 等^[17]研究发现中国建筑业 2005~2013 年碳排放脱钩状态呈现弱脱钩变为扩张连接进而恶化为增长负脱钩状态。

碳排放脱钩为何出现波动状态，为何部分地区出现脱钩后又复钩的现象。为回答该问题，结合脱钩状态差异性，可追溯为地区脱钩路径的不同。朱震锋等^[18]根据环境高山理论 (Environment Mountain Curve, EMC) 提出碳排放与经济增长之间存在稳步脱钩、强制脱钩与消极脱钩 3 种状态，其中稳步脱钩主要依托科技进步、效率提升等内生驱动方式逐渐突破经济增长过程中的资源环境压力，是打破经济增长与资源消耗之间依赖关系的理想方式，而强制脱钩与消极脱钩则难以实现双赢局面，甚至损害一方利益，进而提出“伪脱钩”概念。能源效率提升、产业结构调整、绿色清洁技术进步是促进脱钩的核心驱动力。查建平等^[19]、杨英明等^[20]通过构建脱钩分解模型实证分析发现，推动能效技术提升，加快产业结构升级是促进未来地区和产业脱钩的重点方向。Zhang 等^[21]、王世进等^[22]通过 LMDI 因素分解法研究发现能源强度是促进碳排放脱钩的主要因素。李健等^[23]采用因子分析法研究发现能源效率提升是促进天津市碳排放与经济增长脱钩的关键。

通过总结相关学者观点发现，当地区碳排放脱钩是由能源效率提升等路径加以实现时，则能从根本上实现碳排放强度的持续下降，实现区域经济发展方式的根本转型，从而推动碳排放与经济增长的良性、稳定脱钩，可称为“内源型脱钩”。但若区域碳排放脱钩单纯因政策驱动等外部因素影响而出现，则会导致脱钩状态的波动性，或称为“外源型脱钩”。结合脱钩路径差异，可将“伪脱钩”界定为这样一种状态，即能源效率的上升难以拉动碳排放的持续下降，进而导致脱钩状态呈现动态性，“脱钩-复钩”现象交替出现，此时区域陷入“脱钩陷阱”。落入“脱钩陷阱”的地区存在两种显著特征：一是不同于未脱钩，该地区经济增长与碳排放之间已经实现有效背离，即出现脱钩趋势；二是能源效率提升与碳排放下降之间出现非同步性，即脱钩路径尚未实现由外源型向内源型的转化。

通过梳理相关文献可知，当前关于碳排放与经济增长脱钩关系的研究主要集中于从国家、区域和省域 3 个尺度，对脱钩水平的时空演化格局^[24,25]、影响因素^[26,27]等视角展开，鲜有文章关注脱钩状态的稳定性问题；实证研究主要采用因素分解法对影响脱钩与否的因素进行探讨，尚未关注促进稳定脱钩的驱动力量。为此，本文基于前人研究基础上，提出了“脱钩陷阱”、“真伪脱钩”的概念与识别方法，并将研究对象拓展至市域尺度，对长江经济带 110 个城市脱钩状态的时空动态特征进行总结，筛选落入“脱钩陷阱”的城市，并进一步通过 Logit 模型探寻摆脱“脱钩陷阱”的主要驱动力，从而为从根本上打破碳约束，实现区域碳排放与经济增长的稳定脱钩提供思路与借鉴。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

长江经济带横跨我国东、中、西三大区域，覆盖上海、湖北等 11 省市，面积约 205.23 万 km²。考虑到数据可得性和行政区划调整，本文以长江经济带 110 个地级及以上城市为研究对象，包括浙江 (11 个)、江苏 (13 个)、安徽 (16 个)、江西 (11 个)、

湖南(13 个)、湖北(12 个)、四川(18 个)、云南(8 个)、贵州(6 个)、重庆和上海(图 1)。

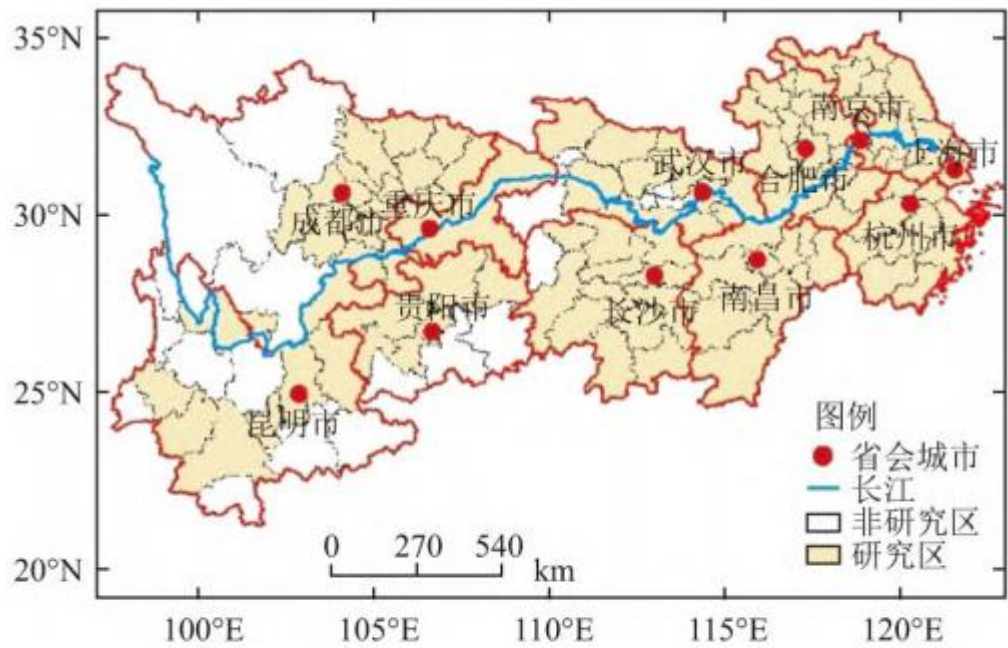


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

2.2 碳排放核算

本文基于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的参考方法^[28],采用排放因子法对城市 C02 排放量进行估算，具体估算公式如下：

$$C = \sum_i E_i * c_i * e_i * \frac{44}{12} \tag{1}$$

式中：C 为城市工业能源产生的 C02 排放量；Ei 为第 i 种化石能源的消耗量；ci 和 ei 分别为第 i 类化石能源的标准煤折算系数和碳排放系数；44/12 表示二氧化碳与碳的分子量之比。基于数据可得性考虑，本文选取 8 种化石能源，其碳排放计算参数如表 1 所示。

表 1 碳排放计算参数

能源类型	原煤	焦炭	天然气	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油
折标煤系数 (tce/t)	0.714 3	0.971 4	1.330 0	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6

碳排放系数 (t/tce)	0.755 9	0.855 0	0.448 3	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5
------------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

2.3 脱钩模型

碳排放脱钩是经济增长与 CO2 排放之间关系不断弱化直至消失的理想化过程，即在实现经济增长的同时逐渐降低碳排放量。脱钩状态用脱钩指数表示，本文借鉴 Tapio 弹性脱钩模型，构建长江经济带城市碳排放脱钩模型，具体公式为：

$$\varepsilon = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta I} = \frac{\Delta C / C}{\Delta I / I} = \frac{(C_i - C_{i-t})}{C_i} \bigg/ \frac{(I_i - I_{i-t})}{I_i} \quad (2)$$

式中：ε 为工业能源碳排放脱钩指数；C 为碳排放总量；ΔC 为现期（i）相对于基期（i-t）碳排放变化量；%ΔC 为碳排放增长率；I 为工业总产值；ΔI 为现期（i）相对于基期（i-t）工业总产值变动量；%ΔI 为工业经济增长率。

为更详细地研究碳排放脱钩关系，按照脱钩弹性临界值 0、0.8、1.2 将脱钩状态分为 8 种类型，具体如表 2 所示^[29]。

表 2 脱钩弹性与脱钩状态

脱钩状态		% Δ C	% Δ GDP	ε	意义
连接	衰退连接	<0	<0	0.8 < ε < 1.2	C 和 G 降速相当
	扩张连接	>0	>0	0.8 < ε < 1.2	C 和 G 增速相当
脱钩	衰退脱钩	<0	<0	ε > 1.2	C 降速比 G 降速快
	强脱钩	<0	>0	ε < 0	C 下降， G 上升
	弱脱钩	>0	>0	0 < ε < 0.8	C 增速比 G 增速快
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	0 < ε < 0.8	C 降速比 G 降速慢
	强负脱钩	>0	<0	ε < 0	C 上升， G 下降
	增长负脱钩	>0	>0	ε > 1.2	C 增速比 G 增速快

2.4 “脱钩陷阱”识别方法

2.4.1 识别因素选择

碳排放脱钩研究在强调脱钩结果的同时，更反映了经济发展中的能源效率问题^[30]，在驱动脱钩的众多影响因素中，以技术进步为依托的能源效率提升始终发挥着决定性作用^[31]，能源强度下降对于实现脱钩至关重要^[32, 33]。为此，本文在前人基础上，选用对数平均迪氏分解法(LMDI)^[34]对影响脱钩的主要因素进行识别。结果如图 2 所示，图中 EF、EE、EI、S、I、ε 分别为碳排放系数效应、能源结构效应、能源强度效应、区域经济比重效应、经济规模效应和碳排放脱钩指数。可以发现，在促进脱钩的众多

因素中，能源强度效应一直占据绝对比重，且随着长江经济带发展方式的转型，能源强度效应持续增强，该结论与相关研究结果一致。因此，本文选取能源强度作为“脱钩陷阱”的主要识别因素。

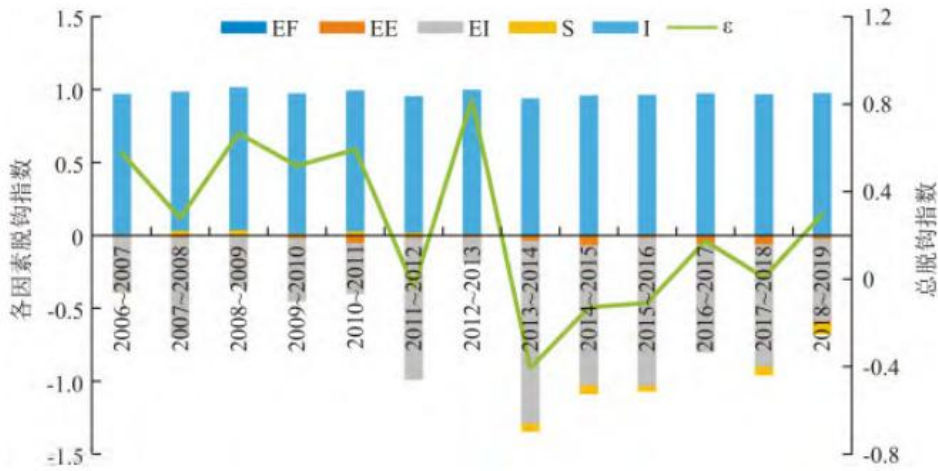


图 2 2006 ~2019 年长江经济带脱钩水平因素分解

Fig. 2 Factor decomposition of decoupling level in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

2.4.2 识别方法构建

弹性脱钩模型用来刻画一个变量相较于另一个变量的变动情况，是基于个体自身变动速度的比较。本文在弹性脱钩模型基础上，以能源强度与碳排放强度构建“脱钩陷阱”识别公式，对已脱钩城市进行筛选，具体如下所示：

$$\beta = \frac{\% \Delta CI}{\% \Delta EI} = \frac{\Delta CI / CI}{\Delta EI / EI} = \frac{(CI_i - CI_{i-t})}{CI_i} \bigg/ \frac{(EI_i - EI_{i-t})}{EI_i} \quad (3)$$

式中：CI 为碳排放强度；EI 为能源强度；β 为碳排放强度与能源强度的弹性指数；CI_i 与 EI_i 分别表示城市第 i 年碳排放强度与能源强度；ΔCI 与 ΔEI 分别为现期（i）相对于基期（i-t）的碳排放强度和能源强度变动量。由于本文基于化石能源核算碳排放，单位产值能源消耗量的增加(减少)必然导致单位产值碳排放量的增加(减少)，因此，按照脱钩临界值 0 和 1，将“脱钩陷阱”弹性指数分为 4 类(表 3)。当 ΔCI<0、ΔEI<0 且 β>1 时，表明碳排放强度下降速度快于能源强度的下降速度，能源效率的提升有效拉低碳排放量，实现真正脱钩，是最理想的脱钩状态；当 ΔCI<0、ΔEI<0 且 β<1 时，表明碳排放强度下降速度慢于能源强度下降速度，此时能源强度的下降难以有效拉动碳排放强度的下降，此时脱钩状态为增长“伪脱钩”；当 ΔCI>0、ΔEI>0 且 β>1 时，此时碳排放强度和能源强度均上升，碳排放强度上升速度快于能源强度上升速度，脱钩状态为强负“伪脱钩”；当 ΔCI>0、ΔEI>0 且 β<1 时，碳排放强度上升速度慢于能源强度上升速度，此时脱钩状态为弱负“伪脱钩”。后 3 种脱钩状态均为“伪脱钩”，表明城市虽已实现脱钩，但其脱钩主要依赖政策驱动等外源性因素，陷入了“脱钩陷阱”。

表 3 脱钩陷阱识别 导出到 EXCEL

脱钩状态	% Δ CI	% Δ EI	β	是否陷入脱钩陷阱
------	--------	--------	---	----------

真脱钩	/	<0	<0	$\beta > 1$	否
伪脱钩	增长伪脱钩	<0	<0	$0 < \beta < 1$	是
	强负伪脱钩	>0	>0	$\beta > 1$	是
	弱负伪脱钩	>0	>0	$0 < \beta < 1$	是

2.5 数据来源

本文选取长江经济带 2006~2019 年 110 个城市面板数据进行实证研究。城市规模以上工业企业能源消耗量来自各城市统计年鉴；化石能源的标准煤折算系数来源于《综合耗能计算通则 GBT2589-2020》，碳排放系数取自 IPCC 参考值；规模以上工业企业总产值来自各城市的统计年鉴和统计公报，为消除通货膨胀的影响，利用指数(上年=100)对其进行修正，以 2006 年不变价进行平减。其他数据来源于 2006~2020 年《中国城市统计年鉴》与《中国区域统计年鉴》。

3 “脱钩陷阱”城市的判定与时空分布

3.1 长江经济带城市脱钩状态判定

为切实落实二氧化碳减排责任，中国分别于 2010、2012 和 2017 年开展了三批低碳城市试点，覆盖了长江经济带湖北、南昌、上海等省市。为此，本文将脱钩状态的研究时间划分为 2006~2010、2011~2012、2013~2017 和 2018~2019 年四个时段，并将第一次低碳城市试点政策开展后的脱钩状态、整个研究期的脱钩状态与四个时段的脱钩状态进行对比分析，判断长江经济带城市是否陷入碳排放“脱钩陷阱”。城市脱钩状态具体如图 3 所示。

从各阶段整体脱钩状态来看，长江经济带主要呈现强脱钩和弱脱钩，扩张连接和增长负脱钩零星分布。这主要得益于国家对长江流域环境问题的高度重视，2010 年 2 月《长江流域综合规划》出台，长江流域生态保护进入新的发展阶段；2016、2018 年习近平总书记多次做出“生态优先、绿色发展”的重要指示，为长江经济带协调经济发展与环境保护的关系指明方向。同时，低碳城市试点和碳排放交易权等碳减排政策亦对长江经济带各城市脱钩产生显著促进作用。

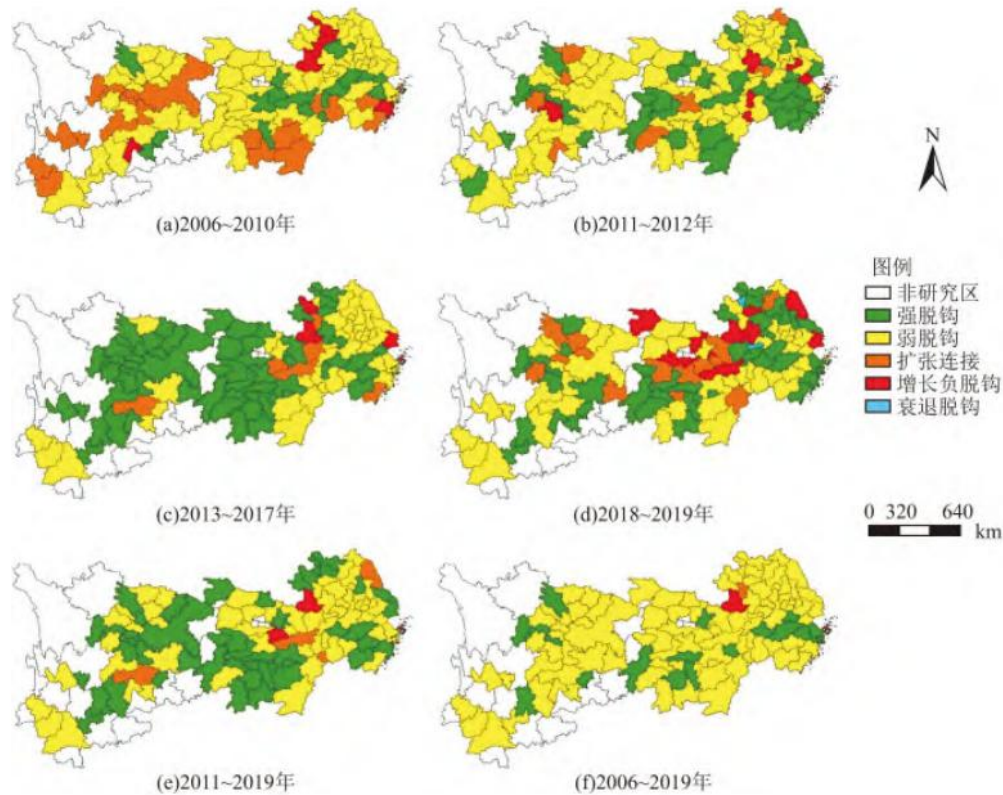


图3 2006~2019年长江经济带碳排放脱钩状态时空格局

Fig. 3 Spatio-temporal pattern of carbon emission decoupling in Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2019

2006~2010年,武汉、绍兴等17个城市经济快速增长的同时碳排放出现下降趋势,处于强脱钩状态,城市碳减排行动取得显著成效。宜昌、德阳等67个城市经济增长与碳排放呈现同步上升趋势,但碳排放增长幅度小于经济增长,为弱脱钩状态。重庆、温州等20个城市碳排放增速与经济增长速度相当,处于扩张连接状态;蚌埠、淮南、宿州、六安、六盘水、台州6个城市碳排放增速快于经济增长,呈现增长负脱钩状态。该阶段长江经济带脱钩状况有待提升,85%的城市随着经济增长碳排放呈现不同幅度增加,但下游城市脱钩状态显著优于中上游城市。归因于发展阶段差异,下游城市已进入碳减排路径探索阶段,减排政策效果虽未充分发挥却也初见成效;而中上游城市正处于工业化初中期阶段,经济发展过多依赖于高耗能、高污染产业,脱钩状态欠佳。

2011~2012年,强脱钩城市快速增长至36个,较第一阶段增长约一倍,新增城市主要来源于衡阳、扬州等。弱脱钩城市下降至59个,扩张连接城市下降至8个,增长负脱钩城市为7个。该阶段较第一阶段整体脱钩状态有所改善,但改善幅度有限,弱脱钩城市占比近60%,增长负脱钩城市数量不降反增。2010年国家发改委发布《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》,确定在湖北省、杭州市等五省八市开展第一批低碳试点,但此时长江经济带进入整体工业化中后期阶段,产业结构高耗能、重型化特征明显,导致碳排放增长趋势难以在短时间内根本转变,脱钩状态尚未产生显著性好转。

2013~2017年,强脱钩城市大幅增加达到62个,四川、湖北和湖南三省基本实现强脱钩全覆盖;弱脱钩城市下降至38个,主要分布于江苏和安徽两省;扩张连接城市6个;增长负脱钩城市减少至4个。该阶段长江经济带脱钩水平大幅提升,约90%的城市均实现了不同程度的脱钩,其中强脱钩城市占比62%。2012年,第二批低碳城市试点确立,至此试点城市几乎覆盖长江经济带全流域,加之第一批试点政策效果全面显现,有效加快碳排放治理进程。2016年“共抓长江大保护”发展理念的提出以及《长江经济带发展规划纲要》的出台,共同推动长江经济带环境保护与工业化水平的提升,降低了区域经济发展对能源的高度依赖,碳排放出现下降趋势。

2018~2019 年,强脱钩城市下降至 39 个,减少至 2012 年左右水平;扩张连接和增长负脱钩状态城市分别反弹到 14 个、10 个;共 13 个城市从脱钩退化为扩张连接,7 个城市退化为增长负脱钩。较上一阶段,长江经济带脱钩状态出现波动性,脱钩率下降至 76%,强脱钩城市占比下降至 46%。城市脱钩状态出现反复的原因可能在于,部分长江中上游城市脱钩路径依赖于政策驱动等外在因素影响,进而出现外源型脱钩。2017 年之后,《长江经济带生态环境保护规划》《长江保护修复攻坚战行动计划》和各省环保法规不断出台,众多法律法规加之低碳城市试点等政策的累积影响,给城市经济发展带来巨大压力。与此同时,经济发展仍是地方官员政绩考核与晋升的重要考核指标^[35],进而出现政府对环境治理“不作为”“乱作为”等现象^[36],缺乏完善的环境治理体系,导致外源型脱钩状态的反复。

2006~2019 年,整个研究期来看,除淮南、六安和舟山外,其余城市均实现脱钩,脱钩率超过 98%,然而 107 个脱钩城市中,仅杭州、武汉等 17 个城市实现强脱钩。可能原因在于,期初阶段长江经济带城市均致力于加速经济增长,发展方式仍较为粗放,环境问题尚未获得足够重视;随着对环境问题的持续关注,在新发展理念引领下,经济发展方式发生根本转变,碳排放上升趋势有所缓解。但由于发展惯性,加之“脱钩陷阱”的存在,碳排放量出现波动性,难以持续下降,城市强脱钩仍面临严峻挑战。

2011~2019 年,低碳城市试点政策实施以来,强脱钩状态城市 48 个,弱脱钩状态城市 55 个,较整个研究期脱钩状态有较大改善,表明低碳城市试点的开展对于推动长江经济带城市脱钩作用显著。但试点政策实施后,整体脱钩状态较 2013~2017 年脱钩状态有所恶化,可能的原因是部分城市脱钩为外源型脱钩,陷入了“脱钩陷阱”,脱钩状态呈现非稳定性。

3.2 “脱钩陷阱”城市识别与空间分布

通过长江经济带 110 个城市 4 个阶段脱钩状态的分析,发现 48 个城市在研究期内均实现了脱钩,但脱钩状态却存在时间差异性。为进一步识别城市脱钩状态呈现波动性的深层次原因,借助公式(3),以 2006 年为基期,对上述城市是否陷入“脱钩陷阱”进行检验,结果如图 4 所示。武汉、苏州等 17 个城市实现“真脱钩”;阜阳、遵义等 31 个城市并未通过检验,其脱钩状态的实现可能源于外在因素驱动而产生的强制脱钩,脱钩状态难以持续,极易出现复钩现象,陷入“脱钩陷阱”,呈现“伪脱钩”状态。

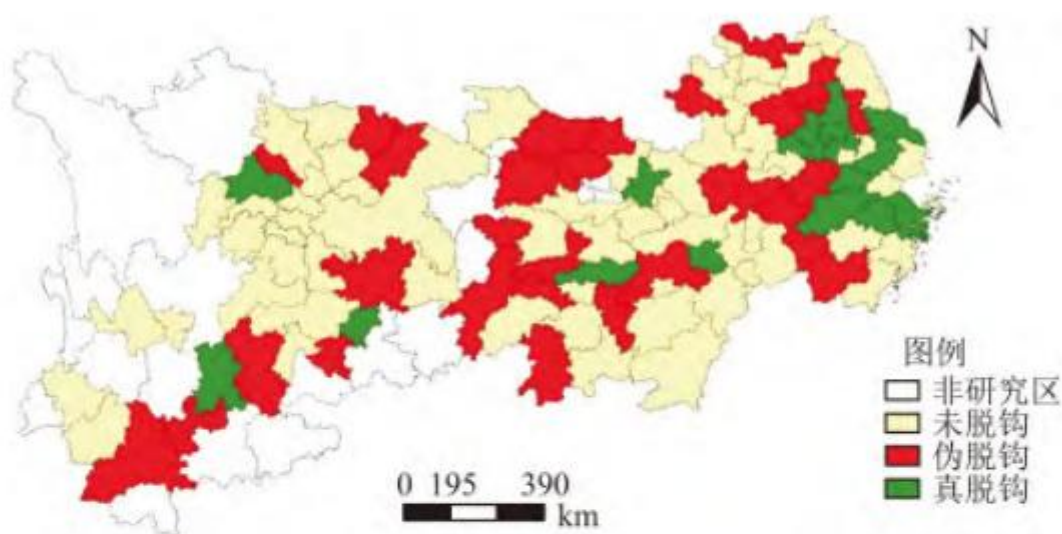


图 4 2006 ~2019 年长江经济带碳排放脱钩陷阱
空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of carbon
emission decoupling traps in Yangtze River
Economic Belt from 2006 to 2019

通过真伪脱钩城市的空间分布发现，真脱钩城市主要位于下游地区，中上游地区仅成都、昆明等少数省会城市实现真脱钩。可能原因在于，长江经济带下游地区已进入后工业化阶段，产业结构转型升级的引领作用显著，现代化产业体系初步形成，科技创新资源集聚能力快速提升^[37]，能源效率逐年上升，实现了经济发展方式的根本性转变，经济增长对碳排放的依赖性下降，两者之间实现有效脱钩。而上中游地区受制于经济发展水平的限制，发展方式尚未出现根本性转变，减排政策的实施力度有限，且受到政绩考核等因素的影响，经济发展与碳排放的脱钩状态出现波动性，陷入“脱钩陷阱”。

4 破除“脱钩陷阱”的动力因素分析

4.1 模型构建

传统研究主要选用 LMDI 因素分解法对脱钩驱动因素进行探讨^[38,39]。本文区别于以往研究，在对长江经济带城市脱钩状态进行分析基础上，利用“真伪脱钩”识别公式，筛选出“真脱钩”与“伪脱钩”两类城市，进而探究城市破除“脱钩陷阱”的驱动力。为此，将“真脱钩”城市赋值为 1，“伪脱钩”城市赋值为 0，构建二值选择模型-Logit 模型进行实证分析，模型具体如下(公式 4)。

$$\begin{aligned}\text{logit}(p) &= \ln \frac{p_{it}}{1-p_{it}} \\ &= \beta_0 + \beta_1 \ln te_{it} + \beta_2 \ln es_{it} + \beta_3 \ln ia_{it} + \\ &\quad \beta_4 \ln ur_{it} + \beta_5 \ln fai_{it} + \beta_6 \ln fdi_{it} + \varepsilon_{it}\end{aligned}\quad (4)$$

式中：p 表示脱钩状态的二元变量，真脱钩城市取 1，伪脱钩城市取 0； β_0 表示常数项； β_i 为真伪脱钩影响因素的待估计参数。

4.2 变量选取

技术水平提升能够驱动经济发展方式的根本性转变，有效降低碳排放强度，选取城市创新指数予以表征。能源结构是地区经济发展的基础，也是影响碳排放的重要因素，选取原煤消费占能源消费的比重表示。合理的工业集聚水平能通过技术溢出等效应助推碳排放脱钩，采用工业区位熵予以表征。以人为本的新型城镇化以农村人口向城镇转移为特征，加大了能源需求，但城镇化与碳排放存在长三角城市群和京津冀城市群呈负向线性关系^[40]，选取户籍人口中非农人口比重表示。固定资产投资与外商直接投资均会影响地区经济发展规模，通过规模效应影响碳排放^[41]，分别使用固定资产投资额、外商直接投资额加以表示。变量选取情况具体如表 4 所示。

表 4 变量符号与说明 导出到 EXCEL

符号	含义	指标说明
te	技术水平	城市创新指数
es	能源结构	原煤消费占能源消费比重
ia	工业集聚度	区位熵指数
ur	城镇化率	非农人口占户籍人口比重
fai	固定资产投资	固定资产投资额
fdi	外商直接投资	外商直接投资额

4.3 结果分析

采用极大似然估计法(MLE)对模型中的变量参数进行估计。结果如表 5 所示，该模型整体较为显著，具有较好的拟合效果。从单个解释变量来看，除能源结构外，其他主要变量在统计上均具有显著性。解释变量符号反映了该变量影响脱钩状态的方向。其中，技术水平、工业集聚度、城镇化率、外商直接投资系数显著为正，表明随着技术水平、工业集聚度等的提升，城市实现经济增长与碳排放“真脱钩”的概率会增加；能源结构系数为负，但不显著；固定资产投资系数显著为负，表明固定资产投资额增加会导致城市出现“伪脱钩”的概率上升。

表 5 Logit 模型回归结果

自变量	估计系数	标准误	边际效应
ln _{te}	1.914***	0.326	0.083***
ln _{es}	-0.032	0.471	-0.001
ln _{ia}	3.528***	0.805	0.152***
ln _{ur}	7.344***	1.075	0.317***
ln _{fai}	-4.671***	0.656	-0.202***
ln _{fdi}	2.529***	0.339	0.109***
常数项	32.573***	4.53	—
R ²	0.153		
LR 统计量	124.210		
LR 统计量 P 值	0.000		

注：*、**、***分别代表 10%、5%、1%的水平上显著。

上述 Logit 模型解释变量的符号虽然反映了其对因变量的影响方向，但系数大小并无直接含义^[42]。因此，为能清晰反映解释变量对因变量的具体影响程度，引入平均边际效应。边际效应的计算结果表明，平均而言，城市创新指数增加 1，城市实现“真脱钩”的概率增加 8.3%。这是因为城市创新能力增加能提升能源利用效率，降低能源强度，从而有效抑制碳排放。区位熵指数增加 1，城市实现“真脱钩”的概率增加 15.2%。工业集聚度的增加，能通过空间溢出效应等方式增强碳排放治理效率以及能源使用效率。城镇化率增加 1%，城市实现“真脱钩”的概率增加 31.7%。可能的原因在于，城镇化进程产生的规模经济和集聚效应能够抵消人口、产业规模增加带来的碳排放量上升，从而引起整体碳排放量下降。固定资产投资额增加 1 万元，城市陷入“脱钩陷阱”的概率增加 20.2%。基础设施建设项目占固定资产投资比重越大，交通、电力等项目建设过程中必然会消耗大量能源从而导致碳排放量的增加，固定资产投资流入工业、制造业领域亦会拉动能源消费增长，增加节能减排难度。外商直接投资额增加 1 万美元，城市实现“真脱钩”的概率增加 10.9%。当前国家间的投资仍然是以发达国家向外投资为主，随着经济进步，发达国家更加重视环保技术创新，外商直接投资的流入会产生技术溢出效应，促进我国环保技术革新，带动环境治理效率的提升。

5 结论与政策建议

碳排放与经济增长的脱钩是经济高质量发展的重要标志，也是实现“双碳”目标的必然路径。本研究从脱钩路径视角讨论城市脱钩状态波动的根本原因，提出了“脱钩陷阱”与“真伪脱钩”的概念和识别方法，并以 2006~2019 年长江经济带 110 个地级及以上城市为研究样本进行了实证分析，得出如下结论与启示。

(1) 2006~2019 年，长江经济带 110 个城市主要呈现强脱钩和弱脱钩两种状态，整体脱钩状态较好，但脱钩状态呈现波动性，黄石、湘潭等城市均出现复钩现象。近年来，我国环保法规和政策不断出台，环境治理体系不断完善，在面对政策约束时，各级政府应正确认识环境保护和经济增长的相关关系，贯彻绿水青山就是金山银山的发展理念，积极响应国家各项政策，加强自主创新与技术引进，提升绿色技术创新能力推动实现持续稳定脱钩。

(2) 长江经济带“真伪脱钩”城市存在显著的地域特征，且与城市环境保护政策力度、经济发展结构等因素紧密相关。“真

脱钩”城市主要分布于下游地区，且多为省会城市；陷入“脱钩陷阱”城市则主要分布于中上游地区。由于经济基础、资源禀赋、产业结构等因素差异导致长江经济带上中下游之间脱钩状态的异质性。采取差异化碳减排策略是长江经济带实现真脱钩的重要举措。此外，区域内各城市间要强化环境治理合作，通过建立行动纲要、创新合作联盟等方式构建分层多元的区域环境减排协同机制，有效释放区域协同带动效应。

(3)技术创新能力、工业集聚度、城镇化水平、外商直接投资等因素均是影响城市脱钩稳定性的重要因素。加强绿色技术创新、优化工业集聚规模、积极吸引外商投资等举措均能促进城市实现“真脱钩”，避免陷入“脱钩陷阱”。技术创新是推动碳排放脱钩的核心动力，也是决定成败的关键，在重点地区、关键行业加强以节能减排为目标的技术研发投入，强化高端绿色科技要素集聚，增强区域创新合作与溢出。工业集聚不仅通过规模效应减少碳排放提高产出，而且有助于实现减排效应的溢出，优化集聚规模是城市实现“真脱钩”的重要举措。城镇化的规模效益和集聚效应会促进碳排放脱钩，但在城镇化的推进过程中，要做好城镇化的宏观布局和微观治理，避免盲目扩张和无序发展。加大外商直接投资力度，引导外资投向低碳绿色清洁产业，充分利用外商直接投资带来的资本积累效应和技术溢出效应也是推动城市实现稳定脱钩的有效路径。

参考文献

- [1] 李庆. 长江经济带城市二氧化碳排放空间异质性分析[J]. 生态经济, 2020, 36(12):21-26, 33. LI Q. Analysis of spatial heterogeneity of carbon dioxide emissions from cities in the Yangtze River economic belt[J]. Ecological Economy, 2020, 36(12):21-26, 33.
- [2] 赵凡, 罗良文. 长江经济带产业集聚对城市碳排放的影响: 异质性与作用机制[J]. 改革, 2022(1):68-84. ZHAO F, LUO L W. The impact of industrial agglomeration on urban carbon emissions in the Yangtze River economic belt: Heterogeneity and action mechanism[J]. Reform, 2022(1):68-84.
- [3] 杨梅. 长江经济带经济增长与环境污染脱钩的效应及驱动因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. YANG M. Study on the decoupling effect and driving factors of economic growth and environmental pollution in the Yangtze River Economic Belt[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [4] 黄国华, 刘传江, 李兴平. 长江经济带工业碳排放与驱动因素分析[J]. 江西社会科学, 2016, 36(8):54-62. HUANG G H, LIU C J, LI X P. Analysis of industrial carbon emissions and driving factors in Yangtze River Economic Belt[J]. Jiangxi Social Sciences, 2016, 36(8):54-62.
- [5] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002.
- [6] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2):137-151.
- [7] SHUAI C, CHEN X, WU Y, et al. A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidences from 133 countries[J]. Science of the Total Environment, 2019, 646:524-543.
- [8] WANG Q, ZHANG F. The effects of trade openness on decoupling carbon emissions from economic growth—Evidence from 182 countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279:123838.
- [9] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4):78-86. LIU B

W, ZHANG X, YANG L. Decoupling efforts of regional industrial development on CO₂ emissions in China based on LMDI analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4):78-86.

[10] RAO G, LIAO J, ZHU Y, et al. Decoupling of economic growth from CO₂ emissions in Yangtze River Economic Belt sectors: A sectoral correlation effects perspective[J]. Applied Energy, 2022, 307:118223.

[11] LI Y, DU Q, LU X, et al. Relationship between the development and CO₂ emissions of transport sector in China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 74:1-14.

[12] DONG B, ZHANG M, MU H, et al. Study on decoupling analysis between energy consumption and economic growth in Liaoning Province[J]. Energy Policy, 2016, 97:414-420.

[13] LI K, ZHOU Y, XIAO H, et al. Decoupling of economic growth from CO₂ emissions in Yangtze River Economic Belt cities[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775:145927.

[14] DU X, SHEN L, WONG S W, et al. Night-time light data based decoupling relationship analysis between economic growth and carbon emission in 289 Chinese cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 73:103119.

[15] 孙叶飞, 周敏. 中国能源消费碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究[J]. 经济与管理评论, 2017, 33(6):21-30. SUN Y F, ZHOU M. Decoupling and driving factors analysis between the energy carbon emissions and economic growth in China[J]. Review of Economy and Management, 2017, 33(6):21-30.

[16] 王越, 赵婧宇, 李志学, 等. 东北三省碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6):190-196. WANG Y, ZHAO J Y, LI Z X, et al. Study on decoupling effect and driving factors of carbon emission and economic growth in northeast China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(6):190-196.

[17] JIANG R, LI R. Decomposition and decoupling analysis of life-cycle carbon emission in China's building sector[J]. Sustainability, 2017, 9(5):793.

[18] 朱震锋, 曹玉昆. 国有林区经济增长与资源消耗的伪脱钩风险识别及破解思路[J]. 林业科学, 2017, 53(4):139-149. ZHU Z F, CAO Y K. Pseudo decoupling risk of economic growth and resource consumption identifying and cracking in the national forestry area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(4):139-149.

[19] 查建平, 唐方方, 傅浩. 中国能源消费、碳排放与工业经济增长——一个脱钩理论视角的实证分析[J]. 当代经济科学, 2011, 33(6):81-89, 125. ZHA J P, TANG F F, FU H. Energy consumption, carbon emission and industrial economical growth in China: An empirical analysis based on decoupling theory[J]. Modern Economic Science, 2011, 33(6):81-89, 125.

[20] 杨英明, 孙健东. 世界主要国家能源消费碳排放脱钩及驱动因素研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(7):173-177. YANG Y M, SUN J D. Carbon emission decoupling and drivers of energy consumption in major countries[J]. Coal Engineering, 2019, 51(7):173-177.

[21] ZHANG M, SONG Y, SU B, et al. Decomposing the decoupling indicator between the economic growth and energy consumption in China[J]. Energy Efficiency, 2015, 8(6):1231-1239.

-
- [22] 王世进, 姬桂荣, 仇方道. 雾霾、碳排放与经济增长的脱钩协同关系研究[J]. 软科学, 2022, 36(7):104-110, 144. WANG S J, JI G R, QIU F D. Research on the decoupling and synergistic relationship between haze, carbon emissions and economic growth[J]. Soft Science, 2022, 36(7):104-110, 144.
- [23] 李健, 王尧, 王颖. 天津市碳排放脱钩态势及碳减排潜力分析——基于 2007-2016 年的面板数据[J]. 生态经济, 2019, 35(4):26-32. LI J, WANG Y, WANG Y. Tianjin carbon emissions decoupling analysis and carbon emission reduction potential:Based on panel data from 2007 to 2016[J]. Ecological Economy, 2019, 35(4):26-32.
- [24] WANG L, FAN J, WANG J, et al. Spatio-temporal characteristics of the relationship between carbon emissions and economic growth in China ' s transportation industry[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(26):32962-32979.
- [25] 杨浩, 卢新海, 匡兵, 等. 城市紧凑度与碳排放强度的时空互动关系及驱动因素——以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11):2618-2629. YANG H, LU X H, KUANG B, et al. Spatial-temporal interaction and driving factors of urban compactness and carbon emission intensity:A case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(11):2618-2629.
- [26] XIE P, GAO S, SUN F. An analysis of the decoupling relationship between CO₂ emission in power industry and GDP in China based on LMDI method[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211:598-606.
- [27] WANG Q, ZHAO M, LI R, et al. Decomposition and decoupling analysis of carbon emissions from economic growth:A comparative study of China and the United States[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197:178-184.
- [28] STECHEMESSER K, GUENTHER E. Carbon accounting:A systematic literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 36:17-38.
- [29] ZHOU X, ZHANG M, ZHOU M H, et al. A comparative study on decoupling relationship and influence factors between China ' s regional economic development and industrial energy-related carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:783-800.
- [30] 曹广喜, 刘禹乔, 周洋, 等. 中国制造业发展与碳排放脱钩的空间计量研究——四大经济区分析[J]. 科技管理研究, 2015, 35(21):224-228. CAO G X, LIU Y Q, ZHOU Y, et al. Study on spatial econometrics of carbon emission decoupling in the development of Chinese manufacturing industry:Analysis of four major economic zones[J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35(21):224-228.
- [31] WANG Q, JIANG R, ZHAN L. Is decoupling economic growth from fuel consumption possible in developing countries?:A comparison of China and India[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229:806-817.
- [32] 马晓君, 陈瑞敏, 董碧滢, 等. 中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8):3549-3557. MA X J, CHEN R M, DONG B Y, et al. Factor decomposition and decoupling effect of China ' s industrial carbon emissions[J]. China Environmental Science, 2019, 39(8):3549-3557.
- [33] WU Y, TAM V W Y, SHUAI C, et al. Decoupling China ' s economic growth from carbon emissions:Empirical studies

from 30 Chinese provinces (2001–2015) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656:576–588.

[34] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7):867–871.

[35] 盛明科, 李代明. 地方生态治理支出规模与官员晋升的关系研究——基于市级面板数据的结论[J]. *中国行政管理*, 2018(4):128–134. SHENG M K, LI D M. A study on the relationship between the scale of local ecological governance expenditure and the officials' promotion: Based on the municipal panel data [J]. *Chinese Public Administration*, 2018(4):128–134.

[36] 陈伟伟, 杨悦. 我国环境治理体系构建的逻辑思路[J]. *环境保护*, 2020, 48(9):18–24. CHEN W W, YANG Y. Logical analysis of constructing China's environmental governance system [J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(9):18–24.

[37] 骆康, 郭庆宾, 刘耀彬. 长江经济带科技创新资源集聚能力空间格局及网络结构[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8):1783–1794. LUO K, GUO Q B, LIU Y B. Research on spatial pattern and network structure analysis of science and technology innovation resources aggregating ability in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8):1783–1794.

[38] WEN L, ZHANG Z. Probing the affecting factors and decoupling analysis of energy industrial carbon emissions in Liaoning, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(14):14616–14626.

[39] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4):862–877. HU H M, ZUO W, XU S Y. Decoupling effect and driving factors of transportation energy carbon emission in Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4):862–877.

[40] 胡建辉, 蒋选. 城市群视角下城镇化对碳排放的影响效应研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2015, 15(6):11–21. HU J H, JIANG X. Study on the impact of urbanization on carbon emissions from the perspective of urban agglomeration [J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2015, 15(6):11–21.

[41] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement [J]. *CEPR Discussion Papers*, 1992, 8(2):223–250.

[42] 黄武. 农户对有偿技术服务的需求意愿及其影响因素分析——以江苏省种植业为例[J]. *中国农村观察*, 2010(2):54–62. HUANG W. Analysis on farmers' demand willingness for paid technical services and its influencing factors: Taking planting industry in Jiangsu Province as an example [J]. *China Rural Survey*, 2010(2):54–62.