

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王楠楠 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素

张江艳

(重庆工商大学长江上游经济研究中心, 重庆 400067)

摘要: 为研究经济发展与碳排放的脱钩情况, 常用对数平均迪式指数分解法(LMDI)结合 Kaya 恒等式和 Tapio 脱钩模型计算碳变化量和弹性脱钩指数. 借鉴上述方法, 将 STIRPAT 模型与 LMDI 分解法相结合, 建立 STIRPAT 模型的回归系数与碳变化量和脱钩弹性指数之间的数量关系, 研究影响碳排放各因素的脱钩状态. 结果表明: ①STIRPAT 模型 LMDI 分解法能够避免满足 Kaya 恒等式的 IPAT 模型中使用 LMDI 分解法时增加新变量的情况, 部分新增变量往往缺乏明确的经济学含义; ②LMDI 分解将 STIRPAT 模型中的统计回归系数的含义, 由变量的变动引起碳排放量变动的弹性系数, 扩展到变量的变动引起碳变化量的倍数; ③STIRPAT 模型 LMDI 分解法, 将数据的统计结果通过统计回归系数纳入到各因素的碳变化量和弹性脱钩指数之中, 使弹性脱钩指数能够反映数据的统计信息; ④以重庆市 2001~2019 年碳排放数据为例, 来说明 STIRPAT 模型 LMDI 分解法可以用于判定碳排放变量的脱钩状态, 能够体现数据本身所包含的统计信息, 更能反映研究对象的实际情况.

关键词: STIRPAT 模型; Kaya 恒等式; LMDI 分解; Tapio 脱钩模型; 碳排放

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1888-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202304203

Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition

ZHANG Jiang-yan

(Upper Yangtze River Economic Research Center, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: To study the decoupling between economic development and carbon emissions, the logarithmic mean Divisia index (LMDI) method is commonly used in conjunction with the Kaya identity and Tapio decoupling models to calculate carbon change and the elastic decoupling index. It was found that the STIRPAT model could obtain the carbon change in each variable through the LMDI decomposition method, and the regression coefficient was included in the carbon change and elastic decoupling index of each variable. In the LMDI decomposition of the Kaya identity, new variables were introduced to satisfy the identical equation, which often lacked clear economic meaning. The LMDI decomposition of the STIRPAT model could maintain consistency in selecting variables before and after without adding new variables. The LMDI decomposition extended the meaning of statistical regression coefficients in the STIRPAT model and the elasticity coefficient of carbon emissions caused by variable changes to the multiple of carbon emissions changes caused by variable changes. The LMDI decomposition of the STIRPAT model incorporated the statistical information of the data into the carbon change and elastic decoupling index of each variable through statistical regression coefficients so that the carbon change and elastic decoupling index could reflect the statistical information of the data. Taking the carbon emission data of Chongqing from 2001 to 2019 as an example, it was shown that the STIRPAT model LMDI decomposition could be used to determine the decoupling state of variables affecting carbon emissions, which was more comprehensive than the LMDI decomposition that satisfied Kaya identity to reflect the actual situation of the research object.

Key words: STIRPAT model; Kaya identity; LMDI decomposition; Tapio decoupling model; carbon emission

人类生产活动排放了过多温室气体, 导致全球气温上升和极端天气的频繁发生^[1]. 为减少温室气体 CO₂ 的排放, 降低极端气候的发生, 世界各国间积极加强合作, 提出了各自应对全球气候危机的行动方案. 2021 年中国政府向国际社会公布了自己的碳排放计划《2030 年前碳达峰行动方案》, 制定了实现碳达峰碳中和的具体任务、目标、时间表和路线图. 低碳发展已成为各国应对气候变化的必然选择^[2], 碳达峰和碳中和就是碳排放与经济脱钩, 即经济发展不再过度依赖化石能源.

现有研究碳排放影响因素的文献多应用 IPAT 模型、Kaya 恒等式、STIRPAT 模型以及其扩展模型等, 有研究表明: 人口、城镇化率、产业结构和经济增长对碳排放呈现正向的影响^[3-9]. 研究碳排放与

经济发展之间的关系多采取环境库兹涅茨曲线研究方法, 发现中国经济发展与碳排放呈倒 U 型关系^[10,11], 表明经济发展与碳排放之间存在关联现象. 脱钩理论最早由经济合作与发展组织提出, 其用来研究经济发展与环境压力之间的关联度. Tapio^[12]将 LMDI 分解引入到脱钩理论, 根据脱钩指标将研究对象分 3 种状态 8 种情形^[13]. 使用 LMDI 分解和 Tapio 脱钩模型, 计算贡献率和脱钩努力系数, 研究某地区的碳排放的驱动机制和脱钩状态^[14]. 应用 LMDI 分解和 Tapio 脱钩模型分析某行业、工业区和城市群工业增长与碳脱钩的关系^[15-17], 以及各影响因素对人均

收稿日期: 2023-04-23; 修订日期: 2023-06-25

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0569)

作者简介: 张江艳(1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为绿色经济与碳排放, E-mail: zhangjiangyan85@126.com

碳排放量的贡献量和贡献率^[18]. 可见, LMDI 分解与 Tapio 模型多被用来分析经济增长与影响碳排放因素的脱钩情况^[13,19-21], 以及具体行业经济增长与碳排放的脱钩情形^[22-24]. 现有研究多基于 Kaya 恒等式的 IPAT 模型, 通过 LMDI 分解和 Tapio 脱钩模型研究影响碳排放的因素, 及其对经济发展的影响^[25-29].

为了满足 Kaya 恒等式, 在 IPAT 模型 LMDI 分解过程中会引入新的变量^[29], 其中部分新增变量往往缺乏明确的经济含义. 为此, 本文将 STIRPAT 模型通过 LMDI 分解与 Tapio 脱钩模型相结合, 构建统计回归系数与碳变化量及脱钩弹性系数之间的数量关系, 而无需增加新变量来满足 Kaya 恒等式. 碳变化量和脱钩弹性指数吸收了 STIRPAT 模型的统计回归系数, 使其包含数据的统计信息. STIRPAT 模型 LMDI 分解法与满足 Kaya 恒等式的 IPAT 模型 LMDI 分解法碳变化量和脱钩弹性指数相比, 相同变量的碳变化量和脱钩弹性指数更符合数据统计的结果, 更能全面反映研究对象的实际情况.

1 材料与方法

1.1 Kaya 恒等式和 STIRPAT 模型的 LMDI 分解

IPAT 模型是研究人口(P)、富裕程度(A)和技术水平(T)对环境压力(I)的理论模型, 其一般表达式为^[6]: $I = P \times A \times T$. 用 C 表示碳排放量, P 表示人口, $A = G/P$ 表示人均地区生产总值(G 为地区生产总值), $T = C/G$ 表示技术水平. 于是满足 Kaya 恒等式, 研究碳排放的 IPAT 模型表达式为: $C = P \times A \times T = P \times G/P \times C/G$. 使用 Kaya 恒等式的 LMDI 分解法^[30-33], 计算 IPAT 模型在不同时间段的碳排放变化量, 令 t 期的碳排放量为 C_t , 基期的碳排放量为 C_0 , 基期和 t 期的碳变化量 ΔC 为:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_t - C_0 = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{C_t}{C_0} \\ &= \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{P_t \times A_t \times T_t}{P_0 \times A_0 \times T_0} \quad (1) \\ &= \Delta C_P + \Delta C_A + \Delta C_T \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta C_P &= \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{P_t}{P_0} \\ \Delta C_A &= \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{A_t}{A_0} \quad (2) \\ \Delta C_T &= \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{T_t}{T_0} \end{aligned}$$

式中 ΔC_P 、 ΔC_A 和 ΔC_T 分别表示: 人口、人均地区生产总值和技术水平引起的碳变化量.

Dietz 等在 IPAT 模型基础上提出了 STIRPAT 模型^[34], 成为研究碳排放与其影响因素之间因果关系

的主要理论模型之一, STIRPAT 模型可以写为: $C = b \times P^\alpha \times A^\beta \times T^\gamma \times e$. 式中, C 为碳排放量, b 为常数项, α 、 β 和 γ 为需要估计的指数项, e 为误差项. 扩展 STIRPAT 模型只需满足乘法形式, 而不需要严格满足 Kaya 恒等式. 本文选择人口 P , 城镇化率 U ($U = P_U/P$, 其中 P_U 为城镇常住人口), 人均地区生产总值 A , 工业产值占比 S ($S = G_{ind}/G$, 其中 G_{ind} 为工业产值) 和能源强度 T ($T = E/G$, 其中 E 为能源消耗量) 5 个变量作为影响碳排放的因素^[35-37]. 于是, 扩展 STIRPAT 模型可以写为: $C = b \times P^\alpha \times U^\beta \times A^\gamma \times S^\delta \times T^\varepsilon \times e$. 式中, α 、 β 、 γ 、 δ 和 ε 为统计回归系数, 即变量每变化 1% 引起碳排放量变动的百分比. 上述碳排放的变量都是增加碳排放的因素, 因此统计回归系数应当大于 0. 参照式(1)对扩展 STIRPAT 模型进行 LMDI 分解, 基期和 t 期之间的碳变化量 ΔC 为:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_t - C_0 = b P_t^\alpha U_t^\beta A_t^\gamma S_t^\delta T_t^\varepsilon e - b P_0^\alpha U_0^\beta A_0^\gamma S_0^\delta T_0^\varepsilon e \quad (3) \\ &= \Delta C_P + \Delta C_U + \Delta C_A + \Delta C_S + \Delta C_T \end{aligned}$$

式中, ΔC_P 、 ΔC_U 、 ΔC_A 、 ΔC_S 和 ΔC_T 分别表述为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta C_P &= \alpha \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \frac{P_t}{P_0} \\ \Delta C_U &= \beta \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \frac{U_t}{U_0} \\ \Delta C_A &= \gamma \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \frac{A_t}{A_0} \\ \Delta C_S &= \delta \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \frac{S_t}{S_0} \\ \Delta C_T &= \varepsilon \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \frac{T_t}{T_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, ΔC_P 、 ΔC_U 、 ΔC_A 、 ΔC_S 和 ΔC_T 分别表示人口、城镇化率、人均地区生产总值、工业产值占比和能源强度的碳变化量. 对比式(2)和式(4)可以看出, 式(4)碳变化量不仅与各变量的当期和基期的比值有关, 而且还与回归系数 α 、 β 、 γ 、 δ 和 ε 的数值有关.

为对比 Kaya 恒等式和扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的异同, 同样选取人口、城镇化率、人均地区生产总值、工业产值占比和能源强度作为主要变量, 构造满足 Kaya 恒等式的 IPAT 模型, 表达式为: $C = P \times P_U/P \times G/P \times G_{ind}/G \times E/G \times G/P_U \times P/G_{ind} \times C/E = P \times U \times A \times S \times T \times Lab \times Pci \times F$. 可见, 满足 Kaya 恒等式的 IPAT 模型中变量的系数为 1. 为满足 Kaya 恒等式, 式中增加了 G/P_U 、 P/G_{ind} 和 C/E 这 3 项. 参照文献[29], G/P_U 定义为技术水平 (Lab), P/G_{ind} 定义为实体经济的人口承载强度 (Pci), C/E 定义为能源碳排放系数 (F). 根据式(1)和式(2)可以得到新增变量所对应的碳变化量: ΔC_{Lab} 、 ΔC_{Pci} 和 ΔC_F .

扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解与 Kaya 恒等式

LMDI分解不同之处在于：①扩展 STIRPAT 模型中各变量的碳变化量与模型中的统计回归系数 α 、 β 、 γ 、 δ 和 ε 的数值有关；②在初始选取相同变量的前提下，为满足 Kaya 恒等式，IPAT 模型需要在原有假设的基础上增加新的变量，而 STIRPAT 模型则不需要；③从式(2)和式(4)可知，两种模型中相同变量的碳变化量在数值上相差一个与统计回归系数的乘积，将统计回归系数每变化 1% 引起碳排放量变动百分比的统计学含义，扩展为变量的变动引起碳变化量的倍数；④统计回归方法将假设变量以外的影响因素纳入统计回归常数和回归系数中，满足 Kaya 恒等式的 IPAT 模型则不存在统计误差，部分新增加的变量往往缺乏实际的经济意义。

1.2 Tapio 脱钩模型

经济发展的脱钩模型是指经济发展到一定阶段后，经济发展不再与能源消耗或环境污染成正相关关系，即经济的发展与资源消耗(或环境污染)实现脱钩，经济的增长不再会引起环境进一步恶化。Tapio 脱钩模型的弹性指数见公式(5)^[12,20,21,33]：

$$t(C, G) = \frac{(C_t - C_0)/C_0}{(G_t - G_0)/G_0} = \frac{(\Delta C_p + \Delta C_U + \Delta C_A + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_{Lab} + \Delta C_{Pci} + \Delta C_F)/C_0}{\Delta G/G_0} \quad (6)$$

$$= t_p + t_U + t_A + t_S + t_T + t_{Lab} + t_{Pci} + t_F$$

式中， t_p 、 t_U 、 t_A 、 t_S 和 t_T 分别表示影响碳排放变量的人口、城镇化率、人均地区生产总值、工业产值占比和能源强度对总脱钩弹性指数的贡献值， t_{Lab} 、 t_{Pci} 和 t_F 分别表示技术水平、实体经济的人口承载强度和能源碳排放系数对总脱钩弹性指数的贡献值。从式(6)可知：①STIRPAT 模型统计回归计算的脱钩弹性指数和满足 Kaya 恒等式的脱钩弹性指数，在统计回归精度内数值是相同的；②两种模型中相同变量的脱钩指数相差一个与统计回归系数的乘积；③各变量的脱钩弹性指数的数值大于 0，说明该变量对

$$t(C, G) = \frac{(C_t - C_0)/C_0}{(G_t - G_0)/G_0} = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta G/G_0} \quad (5)$$

碳排放有促进作用，对脱钩起阻碍作用；反之，该变量对碳排放有阻碍作用，对脱钩起促进作用，促使经济发展向脱钩状态转化^[33]。

式中， $t(C, G)$ 表示与碳排放量和地区生产总值有关的脱钩弹性指数， ΔC 和 ΔG 分别表示 t 期与基期之间的碳排放和地区生产总值的变化量， $\Delta C/C_0$ 和 $\Delta G/G_0$ 分别表示碳排放增加率和地区生产总值增加率。根据脱钩弹性指数 $t(C, G)$ 以及 $\Delta C/C_0$ 和 $\Delta G/G_0$ 的符号和数值可以判定碳排放与经济发展是否存在脱钩，将脱钩程度分为脱钩、连接和负脱钩 3 种类型，又可将其进一步分为 8 种情形，详见表 1^[12-15]。从中可以看出，脱钩状态是经济发展不再过度依赖化石能源消耗，经济发展和碳排放处于一个合理的比例范围；负脱钩状态是经济发展与碳排放处于失调状态，为维持经济增长或防止经济衰退，而增加化石能源的消耗；连接状态为经济和碳排放处于同步增加或减少的情形。

为探究影响碳排放的各变量对碳排放与经济增长之间脱钩的贡献数值，将式(1)代入式(5)中，得到满足 Kaya 恒等式 IPAT 模型(8 个变量)的脱钩弹性指数，见公式(6)：

碳排放有促进作用，对脱钩起阻碍作用；反之，该变量对碳排放有阻碍作用，对脱钩起促进作用，促使经济发展向脱钩状态转化^[33]。

2 碳排放量估算和回归分析

2.1 碳排放量的估算和数据来源

本文碳排放主要指温室气体 CO₂ 排放，只考虑本地化石能源消费量所产生的 CO₂ 量，估算公式如下：

$$C = \sum_{i=1}^k E_i f_i c_i \quad (7)$$

表 1 碳排放与经济增长脱钩状态划分标准

Table 1 Criteria for decoupling between economic development and carbon emissions

脱钩分类	状态	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	脱钩弹性指数(t)	赋值	意义
脱钩	强脱钩	< 0	> 0	$t < 0$	8	碳排放降低, 经济增长, 是低碳发展的最理想状态
	弱脱钩	> 0	> 0	$0 < t < 0.8$	7	经济和碳排放都增长, 碳排放增速小于经济增长, 是低碳发展的理想状态
	衰退脱钩	< 0	< 0	$t > 1.2$	6	碳排放降低, 经济衰退, 碳排放降低速度大于经济衰退
连接	增长连接	> 0	> 0	$0.8 < t < 1.2$	5	经济和碳排放同时增长, 且两者增速相当
	衰退连接	< 0	< 0	$0.8 < t < 1.2$	4	经济和碳排放同时减少, 且两者减速相当
负脱钩	弱负脱钩	< 0	< 0	$0 < t < 0.8$	3	碳排放降低, 经济衰退, 碳排放降低速度小于经济衰退, 是经济发展较差状态
	强负脱钩	> 0	< 0	$t < 0$	2	碳排放增加, 经济衰退, 是低碳发展的最差状态
	扩张负脱钩	> 0	> 0	$t > 1.2$	1	碳排放增长, 经济增长, 碳排放增加速度大于经济增速, 说明经济发展消耗过多能源, 属于高碳经济发展状态

式中, C 为碳排放总量, i 为化石能源种类, E_i 为第 i 类化石能源消费量, f_i 为第 i 种化石能源标准煤折算系数, c_i 为第 i 种化石能源碳排放系数, k 为本地化

石能源消费种类总数. 表 2 为化石能源标准煤折算系数和碳排放系数^[38-40].

本文选取重庆市 2001~2019 年的碳排放数据作

表 2 不同类型化石能源的标准煤折算系数和碳排放系数¹⁾

Table 2 Calculation parameters of carbon emissions for different types of fossil energy

项目	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
标准煤折算系数	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	13.300
碳排放系数	0.747 6	0.112 8	0.585 4	0.553 2	0.341 6	0.591 3	0.617 6	0.447 9

1) 原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油和燃料油的标准煤折算单位为: $\text{tce} \cdot \text{t}^{-1}$, 天然气标准煤折算单位为: $\text{tce} \cdot (10^4 \text{m}^3)^{-1}$; tce 表示 t(标准煤); 标准煤碳排放系数的单位为: $\text{t} \cdot \text{tce}^{-1}$

为研究对象, 其中能源消耗数据来源于国家统计局网站的能源消耗分省统计数据, 其他数据来源于 2001~2019 年的《重庆市统计年鉴》. 按照式(7)对重庆市 2001~2019 年原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气这 8 种主要化石能源的碳排放进行核算. 为了消除价格因素的影响, 本文以 2001 年为基期, 将名义地区生产总值和工业产值换算为实际地区生产总值和工业产值, 其他变量也做了相应的换算.

2.2 STIRPAT 模型统计回归分析

为应用统计回归方法获得 STIRPAT 模型中的回归系数, 对扩展 STIRPAT 模型两边取对数, 得到: $\ln C = \ln b + \alpha \ln P + \beta \ln U + \gamma \ln A + \delta \ln S + \varepsilon \ln T + e$. 为了避免伪回归, 先对数据进行共线性检验, 发现每个变量的方差膨胀因子(VIF)远大于 10, 表明各变量

之间存在较严重的共线性, 见表 3. 现有研究多采用最小二乘法^[40]、偏最小二乘法^[41,42]和岭回归^[35-37,40,43-46]等, 采用时间序列数据进行统计回归. 为消除共线性对统计回归结果的影响, 岭回归方法是学者使用较多的回归方法. 为此, 本文采用岭回归方法和时间序列数据对 STIRPAT 模型进行统计回归分析(使用 Stata 软件的 Ridgereg 软件包). 为了找到合适的岭系数 kr 值, 利用 Ridgereg 软件包中的广义岭回归程序自动确定岭系数 kr 值, 再使用该软件包中的普通岭回归调整 kr 值大小, 以找到最佳显著水平的回归系数, 见表 4.

表 3 重庆市 STIRPAT 模型的方差膨胀因子(VIF)

Table 3 VIF of the STIRPAT model in Chongqing

$\ln P$	$\ln U$	$\ln A$	$\ln S$	$\ln T$
209.68	818.92	2 658.02	159.16	32.32

表 4 重庆市碳排放与各变量的岭回归拟合结果¹⁾

Table 4 Ridge regression fitting results of carbon emissions and various variables in Chongqing

变量	α	β	γ	δ	ε	常数项($\ln b$)	R^2	kr 值
5	3.117 4**	0.430 0*	0.615 7**	0.650 6**	1.019 3**	-23.938 0***	0.998 7	0.000 35
4	2.564 6***	—	0.703 6***	0.746 7***	0.952 4***	-18.639 5***	0.998 5	0.001

1) **、*和*分别表示 1%、5% 和 50% 显著程度; “—”表示文章中没有相关数据

从表 4 可以看出, 在 5 个变量的 STIRPAT 模型中除城镇化率外其他变量的显著程度都通过了 5% 假设检验, 拟合优度 R^2 为 0.998 7. 删除显著程度数值较大的变量城镇化率, 重新回归发现 4 个变量的显著程度都在 1% 以内, 拟合优度 R^2 为 0.998 5. 从 5 个变量和 4 个变量的拟合优度数值来看, 城镇化率对回归的贡献并不明显. 5 个变量和 4 个变量的 STIRPAT 模型, 其回归系数均大于 0, 符合变量选取的理论假设. 两种情况对应变量回归系数的数值相对变化最大在 17.73% 以下, 岭回归方法给出了较稳定的统计回归结果. STIRPAT 模型中回归得到的回归系数与 IPAT 模型中的系数相比, 人口的回归系数数值增加 3 倍多, 城镇化率、人均地区生产总值和工业产值占比的系数数值减少, 而能源强度的系数的数值接近 1, 其与 IPAT 模型中能源强度系数相

同. 为确保数据精度能够满足脱钩模型对数据的要求, 将变量回归系数代入到扩展 STIRPAT 模型的对数表达式中, 用得到的 STIRPAT 模型预测值与估算值进行对比. 5 个变量和 4 个变量的碳排放的预测值与估算值的差距都在 0.02%~2.85% 之间, 统计回归所得到的结果是可靠的, 可用于脱钩模型的分析, 见表 5.

3 结果与讨论

3.1 碳变化量比较

从式(2)和式(4)可知 STIRPAT 模型与 IPAT 模型的 LMDI 分解中, 相同变量的碳变化量数值相差一个回归系数的乘积. 从图 1 可以看出两种模型中相同的变量的碳变化量数值随时间变化趋势相同. 从 2001~2019 年 STIRPAT 模型中增加碳排放的主要变

表 5 STIRPAT 模型中 5 个变量和 4 个变量预测值精度

Table 5 Accuracy of five variables and four variable prediction values in the STIRPAT model

年份	估算值	预测值(5个变量)	预测值误差/%	预测值(4个变量)	预测值误差/%
2001	1 755.787	1 763.084	0.42	1 776.556	1.18
2002	1 933.899	1 915.59	-0.95	1 907.432	-1.37
2003	1 728.716	1 729.015	0.02	1 737.767	0.52
2004	1 971.455	1 950.791	-1.05	1 959.936	-0.58
2005	2 265.13	2 315.549	2.23	2 303.26	1.68
2006	2 516.436	2 546.612	1.20	2 536.75	0.81
2007	2 765.493	2 779.318	0.50	2 784.114	0.67
2008	3 466.732	3 463.996	-0.08	3 442.351	-0.70
2009	3 752.013	3 677.855	-1.98	3 659.197	-2.47
2010	4 188.715	4 091.897	-2.31	4 090.208	-2.35
2011	4 743.996	4 724.009	-0.42	4 699.949	-0.93
2012	4 589.511	4 720.085	2.85	4 707.447	2.57
2013	4 111.91	4 089.782	-0.54	4 124.062	0.30
2014	4 338.348	4 361.459	0.53	4 393.155	1.26
2015	4 417.017	4 378.38	-0.87	4 407.831	-0.21
2016	4 278.686	4 315.679	0.86	4 334.628	1.31
2017	4 333.565	4 366.906	0.77	4 373.89	0.93
2018	4 069.836	4 021.029	-1.20	4 001.146	-1.69
2019	4 076.425	4 083.681	0.18	4 045.664	-0.75

量是人均地区生产总值, 减少碳排放主要变量是能源强度; IPAT 模型中增加碳排放的主要变量是人均

地区生产总值和技术水平, 减少碳排放主要变量是能源强度和实体经济的人口承载强度, 见图 1.

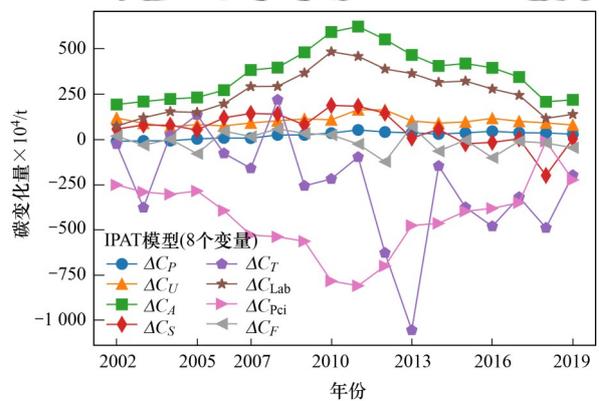
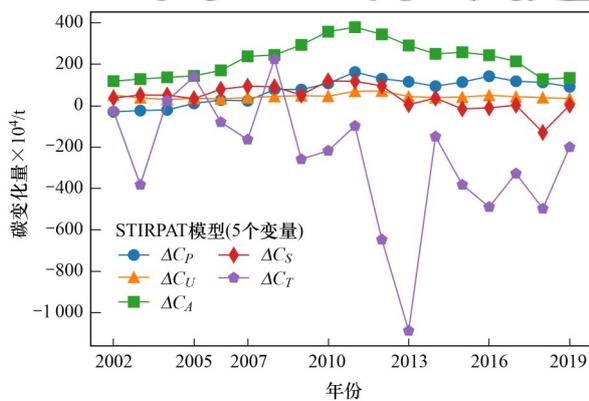


图 1 STIRPAT 模型(5个变量)和 IPAT 模型(8个变量)碳变化量随时间的变化情况

Fig. 1 STIRPAT model (five variables) and the IPAT model (eight variables) explore the changes in carbon emissions over time

图 2 是删除城镇化率变量后的 STIRPAT 模型, 而满足 Kaya 恒等式 IPAT 模型为: $C = P \times G/P \times G_{ind}/G \times E/G \times G/G_{ind} \times C/E = P \times A \times S \times T \times D \times F$, 新增 2 项, 一项为: G_{ind}/G , 另一项为: C/E . 前者为新增变量, 其含义不明确, 这里定义为“经济工业承载度(D)”, 后者为能源碳排放系数(F).

图 2 与图 1 类似, 两个模型中相同变量的碳变化数值随时间的变化趋势相同. 从 2001~2019 年来看, 两个模型中相同变量中的人均地区生产总值和人口是增加碳排放的因素, 工业产值占比在 2014 年开始成为减少碳排放的因素, 能源强度在大多数年份是减少碳排放的因素; IPAT 模型中, 新增的 2 个

变量经济工业承载度和能源碳排放系数在大多数年份都是减少碳排放的因素.

为比较两种方法中, 各变量影响碳排放的具体数值差异, 本文使用贡献率^[14]来刻画各变量的碳变化占总的碳变化量情况. 贡献率是衡量各因素对碳排放影响的度量, 其数值等于碳变化量绝对值与各变量的碳变化量绝对值之和的比值, 见式(8). 对于不同变量, 贡献率数值越高的变量, 其对碳排放的影响程度越强.

$$CON = \frac{\sum_1^n |\Delta C|}{\sum_1^n |\Delta C|} / n \quad (8)$$

式中, ΔC 为某一变量的碳变化量, CON 为 n 年贡献

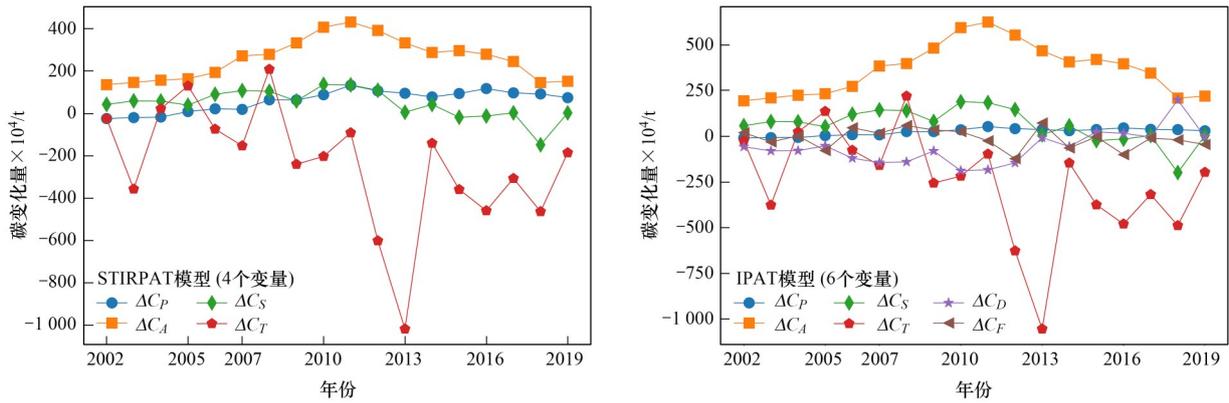


图2 STIRPAT模型(4个变量)和IPAT模型(6个变量)碳变化量随时间的变化情况

Fig. 2 STIRPAT model (four variables) and the IPAT model (six variables) explore the changes in carbon emissions over time

率的平均值. 从表6可以看出, IPAT模型中的人口的贡献率平均值只有1.61%(8个变量)或2.90%(6个变量), 在所有变量中贡献最少. STIRPAT模型中统计回归系数为3.1174(5个变量)和2.5646(4个变量), 将人口的贡献率扩大到11.32%(5个变量)和9.90%(4个变量), 超过了城镇化率(5个变量)和工

业产值占比(5个变量), 在增加碳排放的因素中处于第2位(5个变量). 上述表明, 在STIRPAT模型LMDI分解中, 变量人口的贡献率获得了提升, 这符合人类活动是增加碳排放的主要因素客观现实. 用STIRPAT模型LMDI分解法计算的各碳变化量的数值更符合研究对象的实际情况.

表6 STIRPAT模型和IPAT模型的碳变化量贡献率/%

Table 6 Contribution of carbon change in STIRPAT model and IPAT model/%

模型	变量个数	CON _p	CON _u	CON _A	CON _S	CON _T	CON _{lab}	CON _{pei}	CON _D	CON _F
STIRPAT	5	11.32	7.39	34.96	9.44	36.89	— ¹⁾	—	—	—
	4	9.90	—	42.16	11.35	36.58	—	—	—	—
IPAT	8	1.61	7.00	22.95	5.79	17.38	15.95	26.59	—	2.74
	6	2.90	—	42.57	10.17	29.24	—	—	10.17	4.94

1)“—”表示文章中没有相关数据

3.2 脱钩指数的比较

从表5可知, STIRPAT模型碳排放回归预测值和IPAT模型中的碳排放估算值在误差范围内是相同的. 因此, 这两个模型刻画的总的弹性指数也相同. 为展示重庆市2001~2019年经济发展与碳排放的脱钩情形, 分别用数字1~8表示扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩、衰退连接、增长连接、衰退脱钩、弱脱钩和强脱钩8种脱钩情形, 见图3和图4. 从图3中的纵坐标可以看出, 重庆市的经济发展与碳排放脱钩呈现出4种情形: 强脱钩、弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩, 其中强脱钩和弱脱钩共13次, 增长连接3次, 扩张负脱钩2次.

脱钩弹性指数刻画了经济发展与碳排放两者之间的关系, 但无法解释碳排放量变化背后的具体影响因素所起的作用. 为此, 对脱钩弹性指数进行LMDI分解. 根据式(6)各变量弹性指数的贡献率与碳排放变化的贡献率相同. STIRPAT模型与IPAT模型中相同变量的碳变化量相差一个统计回归系数的乘积, 导致其脱钩弹性指数也相差一个统计回归系数的乘积. 图4中纵坐标显示, 除了人均地区生产总

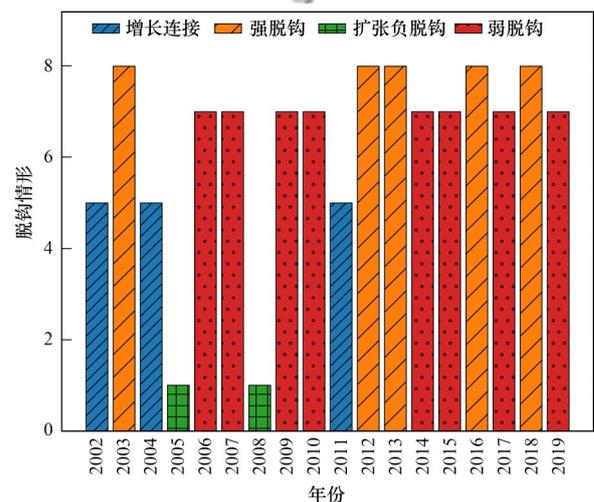


图3 2001~2019年重庆市经济发展与碳排放脱钩情形

Fig. 3 Decoupling situation between economic development and carbon emissions in Chongqing from 2001 to 2019

值的脱钩情形不同外, 两种模型其他相同变量的脱钩情形是相同的. 对比图1和图4发现, 总的脱钩情形不等于各脱钩情形的相加.

从图5中可以看到, 在STIRPAT模型的5个变量中, 人均地区生产总值、城镇化率、工业产值

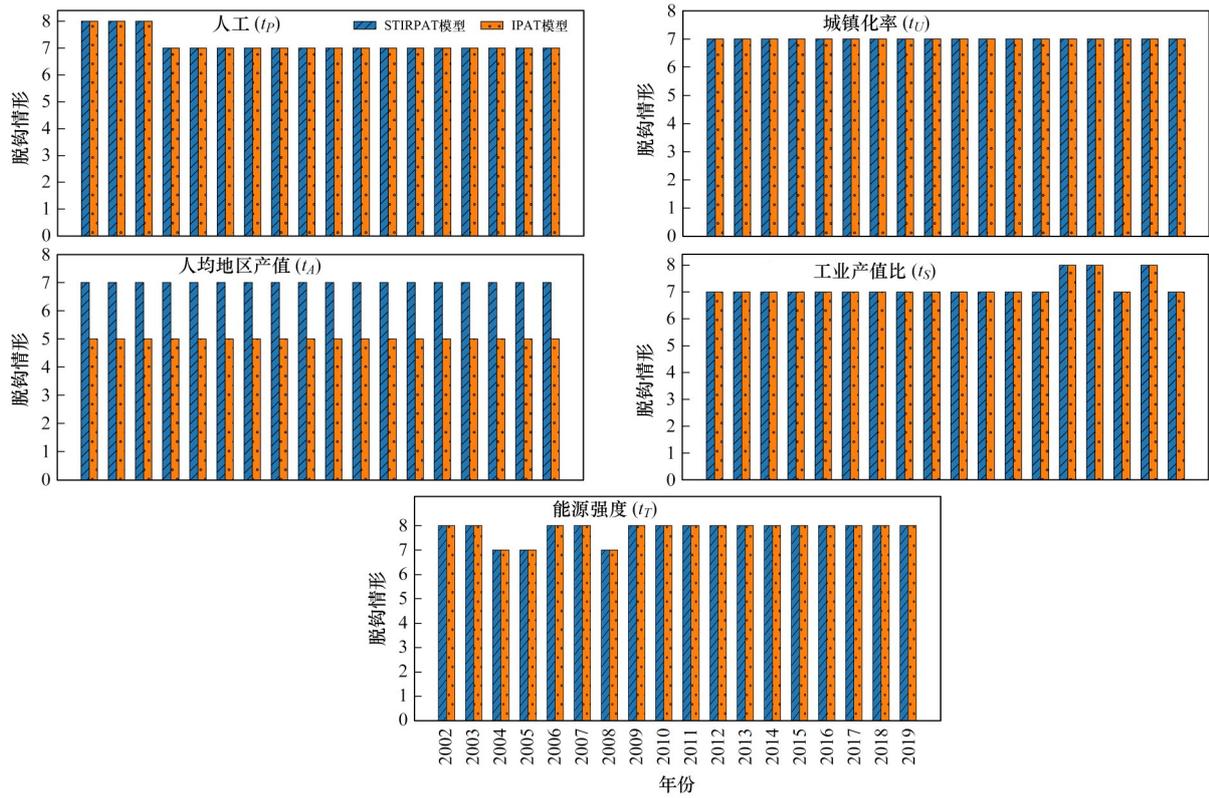


图4 STIRPAT模型和IPAT模型相同变量2001~2019年重庆市经济发展与碳排放脱钩情形对比

Fig. 4 Comparison of the decoupling situation between economic development and carbon emissions in Chongqing from 2001 to 2019 using the same variables in the STIRPAT and IPAT models

占比和人口4个变量的脱钩弹性指数在多数年份都大于0, 其为增加碳排放的因素, 阻碍碳脱钩; 能源强度大多年份小于0, 其为减少碳排放的因素, 促进碳脱钩. IPAT模型中新增加的3个因素中, 技术水平大于0, 其是增加碳排放的因素, 阻碍了碳

脱钩; 人口承载强度小于0和能源碳排放系数在多数年份小于0, 它们是减少碳排放的因素, 促进碳脱钩. 从图6可以看出, 两种模型中相同影响因素的变化趋势相同, 在IPAT模型中新增加的经济工业承载度在大多数年份小于0, 促进碳脱钩.

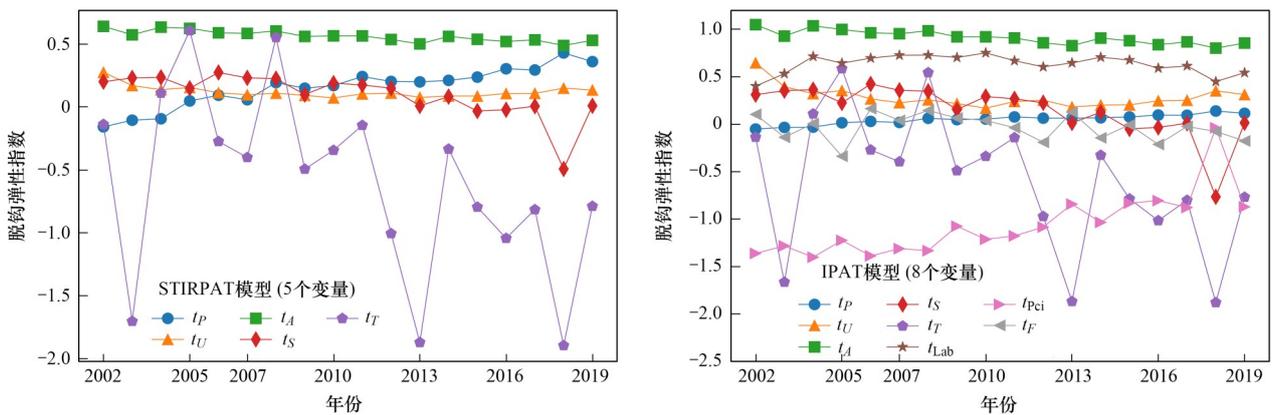


图5 STIRPAT模型(5个变量)和IPAT模型(8个变量)脱钩弹性指数随时间的变化情况

Fig. 5 Decoupling elasticity index over time of the STIRPAT model (five variables) and the IPAT model (eight variables)

满足Kaya恒等式的IPAT模型中新增加的变量也能成为增加或减少碳排放的因素, 但是其前提是这些新增变量要有明确的经济意义. 从统计回归结果看, 各变量的回归系数都大于0, 说明各变量都是增加碳排放的因素. 在碳变化量和弹性脱钩指数

中有部分变量却成为了减少碳排放的因素, 其原因是碳变化量和弹性脱钩指数表征了变量的相对变化, 只要变量每年递减, 其对应的碳变化量和弹性脱钩指数就会成为减少碳排放的因素, 反之其是增加碳排放的因素.

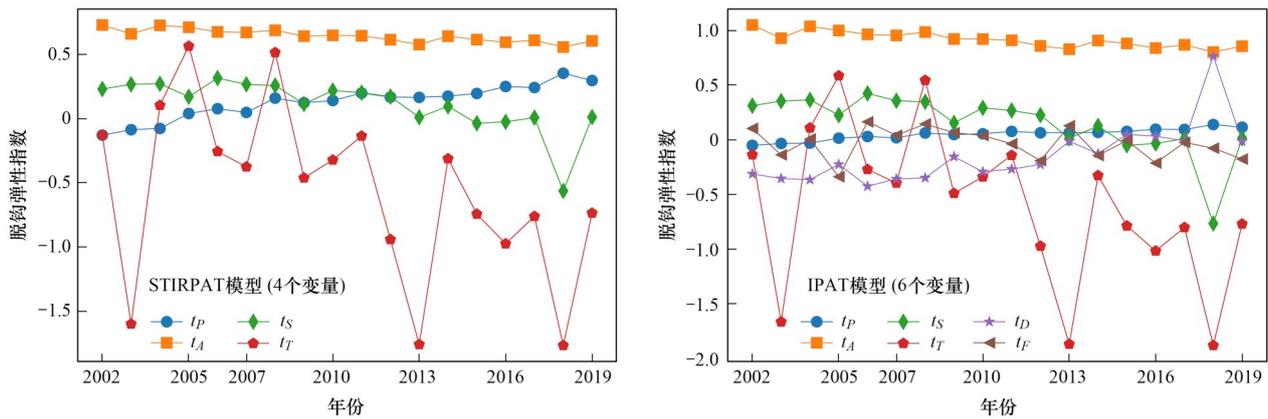


图6 STIRPAT模型(4个变量)和IPAT模型(6个变量)脱钩弹性指数随时间的变化

Fig. 6 Decoupling elasticity index over time of the STIRPAT model (four variables) and the IPAT model (six variables)

4 结论

(1) STIRPAT模型LMDI分解法和基于Kaya恒等式LMDI分解法在计算总的碳变化量和脱钩弹性指数时两种方法在误差范围内是一致的,判定的脱钩情形也相同. STIRPAT模型LMDI分解将STIRPAT模型的统计回归系数引入到碳变化量之中,并通过回归系数将STIRPAT模型与Tapio脱钩模型相关联,拓展了两个模型各自的应用范围.

(2) STIRPAT模型LMDI分解法主要是在模型初始设定时可能犯遗漏变量的错误,导致现有变量不能客观全面地表征研究对象.基于Kaya恒等式LMDI分解法,会在模型中引入新的变量,由于满足了恒等式,不需要对数据进行回归.

(3) 统计回归系数的引入导致两种方法中的个别变量的地位不同,如:人口变量在满足Kaya恒等式的IPAT模型中贡献率位于末位,而在STIRPAT模型(5变量)的贡献率则上升到第2位.统计回归系数纳入到了STIRPAT模型的碳变化量和弹性脱钩指数中,使其更具有统计学意义.

(4) 实证表明: STIRPAT模型LMDI分解法与基于Kaya恒等式LMDI分解法一样可以用来计算各个变量的碳变化量和脱钩指数,可规避为满足恒等式而新增缺乏经济学意义的变量问题,能体现数据的统计回归结果,全面反映研究对象的实际情况.

参考文献:

[1] Baker H S, Millar R J, Karoly D J, et al. Higher CO₂ concentrations increase extreme event risk in a 1.5°C world [J]. Nature Climate Change, 2018, 8(7): 604-608.

[2] Shi Y B, Zhao X X, Jang C L, et al. Decoupling effect between economic development and environmental pollution: a spatial-temporal investigation using 31 provinces in China [J]. Energy & Environment, 2019, 30(5): 755-775.

[3] York R, Rosa E A, Dietz T. A rift in modernity? Assessing the anthropogenic sources of global climate change with the STIRPAT

model [J]. International Journal of Sociology and Social Policy, 2003, 23(10): 31-51.

- [4] Shi A Q. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: evidence from pooled cross-country data [J]. Ecological Economics, 2003, 44(1): 29-42.
- [5] Wang Z H, Yin F C, Zhang Y X, et al. An empirical research on the influencing factors of regional CO₂ emissions: evidence from Beijing City, China [J]. Applied Energy, 2012, 100: 277-284.
- [6] 吴振信, 石佳. 基于STIRPAT和G(1, 1)模型的北京能源碳排放影响因素分析及趋势预测 [J]. 中国管理科学, 2012, 20(S2): 803-809.
- Wu Z X, Shi J. The influencing factor analysis and trend forecasting of Beijing energy carbon emission based on STIRPAT and GM(1, 1) model's [J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(S2): 803-809.
- [7] Zhou X Y, Zhang J, Li J P. Industrial structural transformation and carbon dioxide emissions in China [J]. Energy Policy, 2013, 57: 43-51.
- [8] Tian X, Chang M, Shi F, et al. How does industrial structure change impact carbon dioxide emissions? A comparative analysis focusing on nine provincial regions in China [J]. Environmental Science & Policy, 2014, 37: 243-254.
- [9] Shahbaz M, Loganathan N, Muzaffar A T, et al. How urbanization affects CO₂ emissions in Malaysia? The application of STIRPAT model [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 83-93.
- [10] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析 [J]. 管理世界, 2009, (4): 27-36.
- Lin B Q, Jiang Z J. A forecast for China's environmental Kuznets curve for CO₂ emission, and an analysis of the factors affecting China's CO₂ emission [J]. Journal of Management World, 2009, (4): 27-36.
- [11] 郑丽琳, 朱启贵. 中国碳排放库兹涅茨曲线存在性研究 [J]. 统计研究, 2012, 29(5): 58-65.
- Zheng L J, Zhu Q G. Study on existence of environmental Kuznets curve of carbon emissions in China [J]. Statistical Research, 2012, 29(5): 58-65.
- [12] 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.
- [13] Chen J D, Wang P, Cui L B, et al. Decomposition and decoupling analysis of CO₂ emissions in OECD [J]. Applied Energy, 2018, 231: 937-950.
- [14] 侯丽朋, 王琳, 钱瑶, 等. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状

- 态及驱动机制分析[J]. 生态学报, 2022, **42**(23): 9663-9676.
- Hou L P, Wang L, Qian Y, *et al.* Decoupling status and driving mechanisms of carbon emissions in the golden triangle of southern Fujian under “carbon peaking and neutrality” goals [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022 **42**(23): 9663-9676.
- [15] 赖文亭, 王远, 黄琳琳, 等. 福建省行业碳排放驱动因素分解及其与经济增长脱钩关系[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(10): 3529-3538.
- Lai W T, Wang Y, Huang L L, *et al.* Decomposition of driving factors of industry-related CO₂ emissions and its decoupling with economic growth in Fujian Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(10): 3529-3538.
- [16] 陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明. 基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 6412-6420.
- Chen S Y, Liu J R, Sun G M. Relationship between carbon emissions and economic development of industrial parks based on decoupling index [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(11): 6412-6420.
- [17] 刘伟, 毛显强, 李巍, 等. 黄河流域城市群工业增长与碳排放脱钩关系研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, **13**(2): 849-856.
- Liu W, Mao X Q, Li W, *et al.* Study on decoupling relationship between industrial growth and carbon dioxide emission in the urban agglomeration in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(2): 849-856.
- [18] 陈涛, 李晓阳, 陈斌. 中国碳排放影响因素分解及峰值预测研究[J]. 安全与环境学报, 2024, **24**(1): 396-406.
- Chen T, Li X Y, Chen B. Decomposition of influencing factors and peak prediction of carbon emissions in China [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, **24**(1): 396-406.
- [19] Roimioti A, Koroneos C. The decomposition of CO₂ emissions from energy use in Greece before and during the economic crisis and their decoupling from economic growth [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **76**: 448-459.
- [20] 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 等. 长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- Wu Y F, Xu Y, Tang Y B, *et al.* Temporal and spatial characteristics of net CO₂ emissions and decoupling analysis in Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- [21] 李芸邑, 刘利萍, 刘元元. 长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3820-3828.
- Li Y Y, Liu L P, Liu Y Y. Spatial distribution pattern and influencing factors of industrial pollution emissions in Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3820-3828.
- [22] 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.
- [23] Wang Q, Jiang R. Is China's economic growth decoupled from carbon emissions? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **225**: 1194-1208.
- [24] Lu Q L, Yang H, Huang X J, *et al.* Multi-sectoral decomposition in decoupling industrial growth from carbon emissions in the developed Jiangsu Province, China [J]. *Energy*, 2015, **82**: 414-425.
- [25] 吴开亚, 何彩虹, 王桂新, 等. 上海市交通能源消费碳排放的测算与分解分析[J]. 经济地理, 2012, **32**(11): 45-51.
- Wu K Y, He C H, Wang G X, *et al.* Measurement and decomposition analysis on carbon emissions of transportation industry in Shanghai [J]. *Economic Geography*, 2012, **32**(11): 45-51.
- [26] 林涛, 赵涛, 康纪东, 等. 中国区域工业碳排放测算与影响因素分析——以天津市为例[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2013, **23**(1): 36-42.
- Lin T, Zhao T, Kang J D, *et al.* Estimates and analysis of influencing factors of china's regional industrial carbon emissions: case study of Tianjin [J]. *Journal of Xidian University (Social Science Edition)*, 2013, **23**(1): 36-42.
- [27] 庄颖, 夏斌. 广东省交通碳排放核算及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(7): 1154-1162.
- Zhuang Y, Xia B. Estimation of CO₂ emissions from the transport sector in Guangdong Province, China and analysis of factors affecting emissions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(7): 1154-1162.
- [28] 李健, 景美婷, 苑清敏. 绿色发展下区域交通碳排放测算及驱动因子研究——以京津冀为例[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(7): 36-42.
- Li J, Jing M T, Yuan Q M. Estimation of carbon emission and driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei traffic under green development [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(7): 36-42.
- [29] 林寿富, 王善勇, Marinova D, 等. STIRPAT模型的改进及其应用[J]. 统计与决策, 2018, **34**(16): 32-34.
- Lin S F, Wang S Y, Marinova D, *et al.* Improvement and application of STIRPAT model [J]. *Statistics & Decision*, 2018, **34**(16): 32-34.
- [30] 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, Zou 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.
- [31] 胡程, 丁正山, 穆学青, 等. 长江经济带旅游交通碳排放时空演变及驱动因素[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2022, **45**(1): 40-48.
- Hu C, Ding Z S, Mu X Q, *et al.* The spatio-temporal evolution and driving factors of carbon dioxide emissions from tourism transportation in the Yangtze River economic belt [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, **45**(1): 40-48.
- [32] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, **33**(7): 867-871.
- [33] 刘源, 李向阳, 林剑艺, 等. 基于LMDI分解的厦门市碳排放强度影响因素分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(9): 2378-2387.
- Liu Y, Li X Y, Lin J Y, *et al.* Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen city based on LMDI method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(9): 2378-2387.
- [34] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994, **1**(2): 277-300.
- [35] 颜伟, 黄亚茹, 张晓莹, 等. 基于STIRPAT模型的山东半岛蓝色经济区碳排放预测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, **35**(2): 125-131.
- Yan W, Huang Y R, Zhang X Y, *et al.* Prediction of carbon emission in Shandong Peninsula blue economic zone based on STIRPAT model [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2021, **35**(2): 125-131.

- [36] 余明成, 徐占军, 余健. 山西省 CO₂ 排放影响因素研究及情景分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(8): 1357-1365.
Yu M C, Xu Z J, Yu J. Influencing factors of CO₂ emission and scenario analysis in Shanxi Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(8): 1357-1365.
- [37] 黄蕊, 王铮. 基于 STIRPAT 模型的重庆市能源消费碳排放影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 602-608.
Huang R, Wang Z. Influencing factors of carbon emissions from energy consumptions in Chongqing based on STIRPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 602-608.
- [38] 程豪. 碳排放怎么算——《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014, **39**(11): 28-30.
- [39] 任晓松, 赵国浩. 中国工业碳排放及其影响因素灰色预测分析——基于 STIRPAT 模型[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2014, **13**(4): 18-24.
Ren X S, Zhao G H. Gray forecasting of China's industrial carbon emissions and its influencing factors—a study based on the STIRPAT model[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2014, **13**(4): 18-24.
- [40] 胡茂峰, 郑义彬, 李宇涵. 多情景下湖北省交通运输碳排放峰值预测研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(4): 464-472.
Hu M F, Zheng Y B, Li Y H. Forecasting of transport carbon emission peak in Hubei Province under multiple scenarios[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(4): 464-472.
- [41] 刘茂辉, 刘胜楠, 李婧, 等. 天津市减污降碳协同效应评估与预测[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(8): 3940-3949.
Liu M H, Liu S N, Li J, et al. Evaluation and prediction of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(8): 3940-3949.
- [42] 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 等. 基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1277-1286.
Liu M H, Yue Y Y, Liu S N, et al. Multi-dimensional analysis of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin based on the STIRPAT model [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1277-1286.
- [43] 潘崇超, 王博文, 侯孝旺, 等. 基于 LMDI-STIRPAT 模型的中国钢铁行业碳达峰路径研究[J]. 工程科学学报, 2023, **45**(6): 1034-1044.
Pan C C, Wang B W, Hou X W, et al. Carbon peak path of the Chinese iron and steel industry based on the LMDI-STIRPAT model [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, **45**(6): 1034-1044.
- [44] 姚明秀, 王森薇, 雷一东. 基于 STIRPAT 模型的上海市碳达峰预测研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2023, **62**(2): 226-237.
Yao M X, Wang M W, Lei Y D. Research on Shanghai carbon peak forecast based on STIRPAT model [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2023, **62**(2): 226-237.
- [45] 潘栋, 李楠, 李锋, 等. 基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 1142-1152.
Pan D, Li N, Li F, et al. Mitigation strategy of Eastern China based on energy-source carbon emission estimation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 1142-1152.
- [46] 孔令晖, 罗明科, 余辉, 等. 长江中游湖南段湖泊重金属时空累积因素研究[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(4): 1812-1823.
Kong L H, Luo M K, Yu H, et al. Spatial-temporal accumulation factors of heavy metals in Hunan lakes along the middle reach of the Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2023, **43**(4): 1812-1823.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)