

长三角城市群碳排放效率与高质量发展的时空耦合特征及影响因素¹

吴小妮¹, 管卫华^{1,2*}, 张惠¹, 吴连霞^{3*}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023; 3. 华东师范大学人口研究所, 上海 200241)

【摘要】: 区域碳排放效率与高质量发展的空间差异特征显著, 动态把握两者时空格局演变和耦合发展态势对推动长三角城市群均衡发展具有重要意义。以长三角城市群 26 个地级市为研究对象, 构建测度碳排放效率与高质量发展的指标体系和耦合度模型, 运用熵权法、SBM 模型和 Tobit 面板模型揭示了 2000~2020 年长三角城市群碳排放效率和高质量发展的宏观格局、两者耦合发展的时空分异及驱动因素。结果表明: (1) 长三角城市群碳排放效率和高质量发展年际变动呈现出同步的波动中上升趋势; 前者宏观格局逐渐呈现出“南北”差异, 而后的“东西”差异逐渐明晰; (2) 碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度处于初级协调及以上时期, 总体呈上升趋势, 不同省市两者差距经历了先缩小后扩大的变动; 两者宏观格局差异显著, 但均呈现出高值区向核心城市及周边收缩的特征, “东南—西北”向差异显化; (3) 经济基础、政府干预、城镇化率及产业结构对耦合协调度具有促进作用, 碳排放强度则具有负向约束作用。最后, 在推动两者协同互促、加强区域间协同互动及制定差异化的发展路径等方面提出建议。

【关键词】: 碳排放效率; 高质量发展; 耦合协调度; 长三角城市群; Tobit 模型

【中图分类号】: K921 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023) 11- 2273- 12

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj202311004

自然环境与社会环境是一个相互作用、相互约束的耦合系统, 有效平衡生态环境保护、能源开发利用、产业结构调整 and 经济社会发展之间的关系, 是加快发展方式绿色转型、实现“碳达峰、碳中和”目标和推进经济高质量发展的主要内容。二十大报告指出, 推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。长三角城市群作为潜在的世界级城市群, 经济开放程度、环境治理能力等均居全国领先地位。伴随长期的经济高速发展, 工业污染对其生态环境的胁迫效应凸显[1], 同时仍面临区域内发展不平衡不充分、绿色低碳转型任务艰巨、产业发展协同性有待提升[2,3]等问题。在此背景下, 面对“双碳”和高质量发展的双重目标, 解析碳排放效率与高质量发展的耦合协调态势, 进一步挖掘其影响因素, 对促进城市群经济低碳高效和更高质量一体化发展具有重要的理论价值和实践意义。

¹ 收稿日期: 2023- 04- 06; 修回日期: 2023- 06- 07

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJAZH023); 国家社科基金青年项目(19CRK010); 江苏高校哲学社会科学基金项目(2020SJA0247); 南京市社会科学基金专项(23YB02); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_1640)

作者简介: 吴小妮(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为经济地理与空间规划. E-mail: wuxiaoni991026@163.com

*** 通讯作者** E-mail: guanweihua@njnu.edu.cn; wlx_goahead@126.com

纵观国内外，碳排放与经济发展始终是学界关注的焦点。碳排放相关研究多基于碳排放总量[4]、强度[5]、效率[6,7]、绩效[8]等展开，其中的碳排放效率研究具有现实意义，伴随技术进步的碳排放效率提升对碳减排目标实现起重要作用。现有碳排放效率研究主要聚焦效率测算[9]、影响因素[6]、空间溢出[10]、时空分异[11]等方面，测算方法主要包括数据包络[11]、Malmquist指数[12]和随机前沿分析[13]，研究尺度涵盖了国际[14]、省域、区域[11]、城市[6]等不同层面，已有成果较好地反映了不同尺度、不同行业碳排放效率状况，为节能减排政策制定提供了参考。不同视角的经济社会发展研究从未间断，伴随中国经济发展阶段的转换，学者们就经济高质量发展水平测度[15]、空间关联网[16]、地区差异[17]等问题展开广泛研究。在高质量发展水平测度方面，部分学者从经济增长视角解析经济发展“质”的水平，通常选用GDP或人均GDP增长率、全要素生产率[18]等单一指标测度，这类指标具有明显的局限性，难以全面阐释高质量发展的真实内涵。多数学者基于新发展理念构建高质量发展“创新、协调、绿色、开放、共享”的综合指标体系[5,15]，此种方法虽综合反映了高质量发展的多维内涵，但缺乏对经济发展本身的关注。碳排放与经济发展结合的研究主要围绕碳排放与经济增长[19,20]、绿色发展[21]之间的平行关系及其与产业结构升级[22]、能源消耗[23]、新型城镇化[24]、产业发展[25]等经济社会发展单一维度的耦合关系展开，也有学者考察了碳排放强度与高质量发展的交互耦合[5]，但在理想状态下随着技术创新碳排放强度应逐步下降，高质量发展水平应逐步上升，两者的发展趋势截然相反，并不十分符合耦合模型中子系统相互影响、彼此互促的内容耦合。

综上，不同尺度碳排放效率与高质量发展测度、演化及影响因素研究已较为全面，两者结合的研究多集中于碳排放对经济社会发展的单向影响或单一维度的耦合分析，仍存在以下问题亟待解决：(1)碳排放与经济高质量发展的关系较为复杂，两者双向作用的分析有待补充，且与经济增长单一维度相比，高质量发展具有更为深刻的内涵，有必要将城市的综合发展水平置于动态的时代背景下考察；(2)碳排放与高质量发展交互耦合的研究鲜有涉及，且耦合系统构建的合理性有所欠缺。关于城市群碳排放效率与高质量发展两个系统的关联分析有待进一步扩充和深化，以寻求两者更高层次的平衡。鉴于此，本文立足于已有研究，对2000~2020年长三角城市群26个城市的碳排放效率与高质量发展水平进行测度，构建耦合度和耦合协调度模型探讨两者的耦合发展关系，进而基于随机效应Tobit模型对耦合协调度的影响因素进行较为全面的分析，以期城市群耦合协调发展的时空格局演化提供新的视角，为区域经济低碳高效和高质量发展提供决策参考。

1 碳排放效率与高质量发展的耦合机理

耦合是指两个或两个以上的系统通过相互作用而彼此影响的现象，按照耦合理论，碳排放效率与高质量发展是两个相对独立的子系统，通过系统间要素相互约束、相互胁迫形成新的耦合共生关系(图1)。

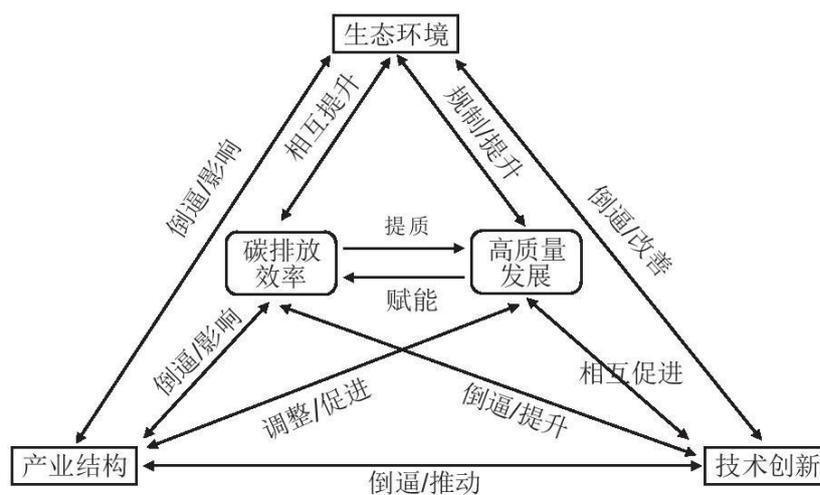


图1 碳排放效率与高质量发展耦合机理

创建环境友好型经济是高质量发展的首要任务，高质量发展情景下必然对碳减排提出新的要求，碳排放效率提升也会成为必然结果，两者相辅相成，这体现了耦合原理中的内容耦合。碳排放效率与高质量发展主要通过生态环境、产业结构和技术创新三个层面的相互作用而彼此影响。一方面，碳排放效率对高质量发展具有驱动作用，碳排放效率是影响生态环境质量的重要因子，生态环境质量与地区产业结构、技术创新水平关系密切，进而作用于经济高质量发展。碳排放效率提升能够通过改善生态环境、倒逼技术创新和推动产业结构调整为高质量发展提质增效提供有力的支撑和保障。另一方面，高质量发展也对碳排放效率存在响应作用，经济高质量发展不仅会推动产业结构不断向高级化转型，也会驱动清洁技术创新，碳源构成和能源利用则会随之发生显著改变，进而为碳排放效率提升赋能。碳排放效率与高质量发展两个子系统相互影响、彼此互促，厘清两者之间的耦合机制后，进一步探讨其耦合协调的驱动因素显得尤为重要，这对于推动碳排放效率提升和高质量发展协同进步以最终实现区域高质量一体化发展具有重要意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文选取《长江三角洲城市群发展规划》中的上海市及江苏省、浙江省、安徽省部分城市在内的 26 个城市为研究区，相关数据主要来源于 2001~2021 年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、各省(市)统计年鉴以及各城市历年国民经济和社会发展统计公报，部分年份缺失数据运用指数平滑法进行补充。

2.2 指标选取

2.2.1 碳排放效率测度

城市碳排放效率的测度取决于投入和产出变量。结合已有研究，鉴于数据的科学性和可获取性，本文选取资本存量、年末从业人员数量和能源消耗量 3 个要素作为非期望产出 SBM 模型的投入变量，以各省区的地区生产总值和二氧化碳排放量分别作为期望产出变量和非期望产出变量(表 1)。需要说明的是，城市资本存量是以 2000 年为基期、折旧率为 10.96%计算得到。碳排放计算过程参照吴建新等[26]的研究，天然气和液化石油气产生的碳排放基于 IPCC 提供的转化因子直接计算；电能产生的碳排放基于中国电网发布的华东区域电网基准线排放因子和各城市电能消耗量计算得到；热能产生的碳排放基于城市供热数据、供热锅炉热效率值(取 70%)和原煤平均低位发热量系数(20 908 kJ/kg)求得燃烧的原煤数量，再使用原煤折算标准煤系数(0.714 3 kgce/kg)及碳排放系数计算得到城市供热产生的碳排放，将 4 个方面的碳排放相加求得各城市总的碳排放。

表 1 长三角城市群碳排放效率评价指标

指标类型	指标名称	指标说明
投入变量	资本存量	资本要素投入量，采用永续盘存法，沿用单豪杰[27]的估算
	年末从业人员数量	劳动力要素投入量
	能源消耗量	包括天然气、液化石油气和全社会用电量，参照《综合能耗计算通则》统一折算为标准煤(万 t)，三者的折算系数依次为 1.33 kgce/m ³ 、1.714 3 kgce/ m ³ 、0.122 9 kgce/(kW · h)
期望产出变量	地区生产总值	经济总量
非期望产出变量	二氧化碳排放量	包括天然气、液化石油气、电能、热能产生的碳排放，具体计算方法参照吴建新等[26]的测算

2.2.2 经济高质量发展指数计算

关于高质量发展指数的测度，既有研究多基于“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念构建综合指标体系。为更全面表征城市经济高质量发展水平，基于高质量发展内涵并借鉴已有研究[5,15],将经济层面指标与 5 个维度发展理念相结合，选取 15 个三级指标构建长三角城市群经济高质量发展评价指标体系(表 2),基于熵值法测度高质量发展指数。

2.2.3 影响因素选取

结合已有研究[5,6]和耦合机理分析，从经济基础、政府干预程度等 7 个层面选取指标解析长三角城市群碳排放效率与高质量发展耦合协调的影响因素(表 3)。(1)经济基础可能对区域高质量发展起到支撑作用，选用人均 GDP 衡量；(2)政府干预会对碳排

放效率和高质量发展进程起到双重影响，选用固定资产投资额占 GDP 比重表征；(3)信息化水平用地区邮电业务总量占 GDP 比重衡量；(4)城镇化进程可能助推经济高质量发展，选用常住人口城镇化率衡量；(5)环境规制强度对碳排放效率提升具有促进作用，借鉴江心英等[28]的研究，简化选用工业污染治理完成投资额占二产比重衡量；(6)产业结构调整会对碳排放效率和经济发展产生影响，选用三产产值占 GDP 比重衡量；(7)技术进步借鉴沈杨等[29]使用单位 GDP 能耗的思路，选用碳排放强度(单位 GDP 的碳排放量)表征其对碳排放效率和高质量发展水平的作用效应。

2.3 研究方法

2.3.1 非期望产出的 SBM 模型

与传统的数据包络模型(DEA)相比，Tone[30]提出的 SBM 模型消除了径向和角度选择差异带来的影响和偏差，解决了投入产出松弛性问题。超效率 SBM 模型则是在 SBM 模型的基础上能进一步评价效率值大于 1 的决策单元，能够得到更为准确的效率分析结果，其模型表达式见文献[31]。

表 2 长三角城市群经济高质量发展评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	测度指标	方向
经济	经济发展	GDP 增长率	GDP 年增长率	+
	经济效率	劳动生产率	GDP/年末从业人员数	+
创新	创新水平	人均专利授权量	专利授权数/年末总人口	+
	创新潜力	普通高等学校数	普通高等学校数	+
协调	区域协调	地区收入协调水平	各市人均 GDP/全国人均 GDP	+

	城乡协调	城乡收入差距	城镇人均可支配收入/农村人均可支配收入	-
		城乡消费差距	城镇人均消费支出/农村人均消费支出	-
	产业协调	产业结构高级化	三产增加值/二产增加值	+
绿色	环保压力	单位产出废气排放量	二氧化硫排放量/GDP	-
	环境资源	建成区绿化覆盖率	建成区绿化覆盖率	+
	环境治理	日均污水处理能力	日均污水处理能力	+
开放	贸易开放	贸易依存度	进出口总额/GDP	+
	资本开放	外商投资占比	外商投资额/GDP	+
共享	共同富裕	居民人均可支配收入	人均可支配收入	+

	公共服务	公共预算支出占比	地方一般公共预算支出/GDP	+
--	------	----------	----------------	---

表 3 碳排放效率与高质量发展耦合协调度的影响因素

指标维度	衡量指标	指标说明	预期作用方向
经济基础	人均 GDP $\ln(p_gdp)$	元	+
政府干预	固定资产投资额占比 $\ln(fa_gdp)$	%	+
信息化水平	邮电业务总量占比 $\ln(thr_gdp)$	%	+
城镇化进程	常住人口城镇化率 $\ln(urban_r)$	%	+
环境规制强度	工业污染治理完成投资占第二产业增加值比重 $\ln(ind_sec)$	%	+
产业结构	三产产值占比 $\ln(third_gdp)$	%	+
技术进步	碳排放强度 $\ln(CO2_gdp)$	t/万元	-

2.3.2 熵值法

熵值法计算指标权重更为客观、科学，因此本文基于该方法测算长三角城市群经济高质量发展水平，其具体计算过程见文献[32]。

2.3.3 耦合度及耦合协调度模型

借鉴物理学领域耦合度的概念，构建碳排放效率与高质量发展的耦合模型，用以评判两者的协调发展程度，为保证结果的可靠性，参照已有研究成果，将耦合度和耦合协调度数值进行类型划分，其具体内容及计算公式见文献[33]。

2.3.4 Tobit 模型

随机效应面板 Tobit 模型是适用于被解释变量因截断或截堵只能选取一定范围的值的回归模型，如果用普通最小二乘法估计受限因变量，可能导致回归结果产生偏倚，无法准确反映各因素的作用效应。本文被解释变量为耦合协调度，属于典型的 0 值截尾数据，故采用该模型分析其影响因素，运用极大似然法对系数进行估计，借助 Stata17 完成模型分析。

3 时空分异特征

3.1 碳排放效率与高质量发展的时空分异

3.1.1 碳排放效率与高质量发展的时序特征

为明晰总体碳排放效率与高质量发展的时空演变特征，对 2000~2020 年 26 个城市的效率和高质量发展水平取均值并求得逐年变异系数(图 2)。(1)除个别年份外，研究期内长三角城市群碳排放效率和高质量发展指数平均值呈现同步变化的趋势。其中，前者总体位于较高水平，且在波动中不断上升，而后者整体增幅较小，且呈现出显著的阶段性波动的特征，这说明研究期内各城市在产业结构转型、低碳技术应用等方面取得一定成就，推动碳排放效率逐步提升，而高质量发展受多个维度影响，故未对其表现出显著的促进作用。(2)从变异系数的动态演进看，长三角城市群内部碳排放效率和高质量发展水平两者差异总体呈缩小的趋势，高质量发展水平的变异系数呈 U 型变动，且在多数年份其差异显著高于碳排放效率差异，这与各城市经济、创新、共享等协调发展存在的较大差距关系密切。值得注意的是，碳排放效率在 2011~2020 年间的平均增幅显著高于前十余年，且城市间变异系数也自 2011 年起下降幅度明显增大，可能原因是 2011 年颁布的“十二五”规划纲要明确给定碳排放强度下降指标，强制性约束各城市碳排放量，对城市碳排放效率提升和城市间效率差异缩小起到双重促进作用。

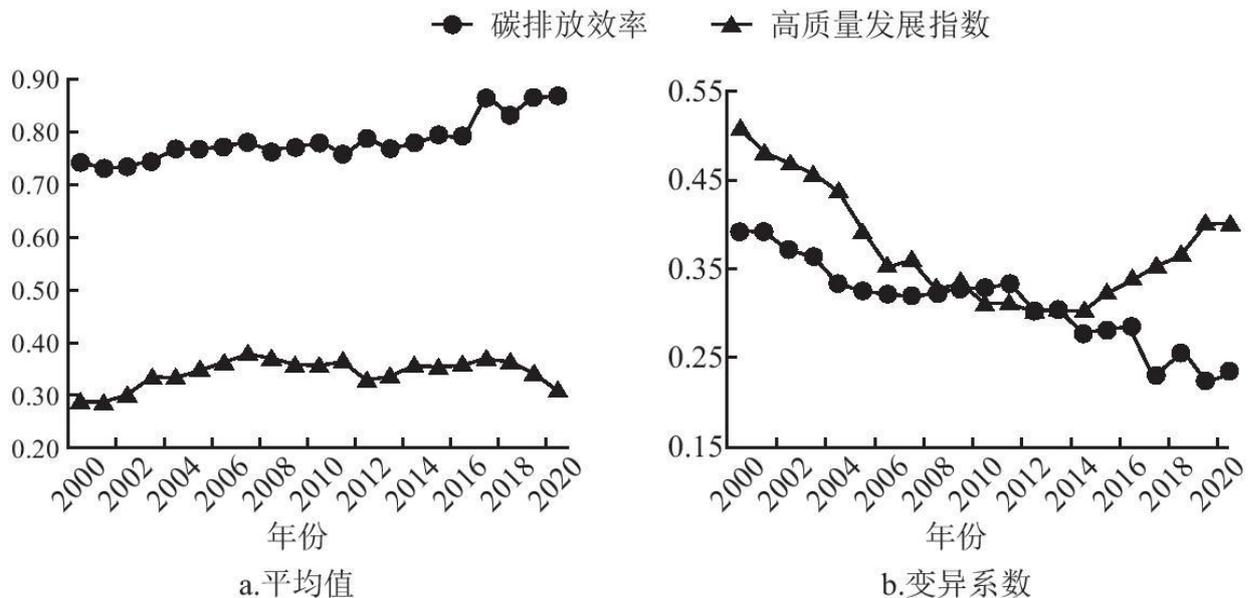


图 2 2000~2020 年长三角城市群碳排放效率与高质量发展指数平均变化趋势

为进一步刻画长三角地区不同省市碳排放效率与高质量发展的动态演进特征，对长三角城市群中涵盖的江苏 9 市、浙江 8

市和安徽 8 市的效率与发展指数分别取均值进行分析(图 3)。(1)从内部不同省市层面看,上海市碳排放效率始终大于 1 且显著高于其他地区,除个别年份外江苏 9 市次之,两者整体高于 26 市均值;浙江 8 市基本与 26 市均值持平,安徽 8 市显著低于均值,后三者效率提升上仍具有较大发展空间。除浙江 8 市总体呈现先下降后上升的变化特征外,其余地区效率水平均在波动中小幅度上升,说明长三角地区不断推进生态文明建设,利用技术创新提升能源利用效率、促进产业转型升级,逐步具备实现“双碳”战略的基础和高质量发展的条件。(2)上海市高质量发展水平最高,浙江 8 市和江苏 9 市次之,前三者均高于长三角地区均值,仅安徽 9 市低于均值,省市间存在的较大发展差距是上述变异系数变动的因素。从变动特征看,上海市呈阶段性的“上升—下降”变动,总体呈小幅度下降;浙江 8 市平均增幅最大;江苏 9 市和安徽 8 市与 26 市均值变动较为一致,均呈小幅度上升。除上海市外的区域高质量发展水平的时序演化可划分为第一阶段(2000-2012 年)的“快增—缓降”期和第二阶段(2013-2020 年)的“缓增—缓降”期,第一阶段高质量发展水平稳中有进主要凭借自身区位优势 and 迅猛的经济发展态势,第二阶段主要得益于数字经济变革释放的动能,叠加疫情等不确定因素,高质量发展水平处于变动。

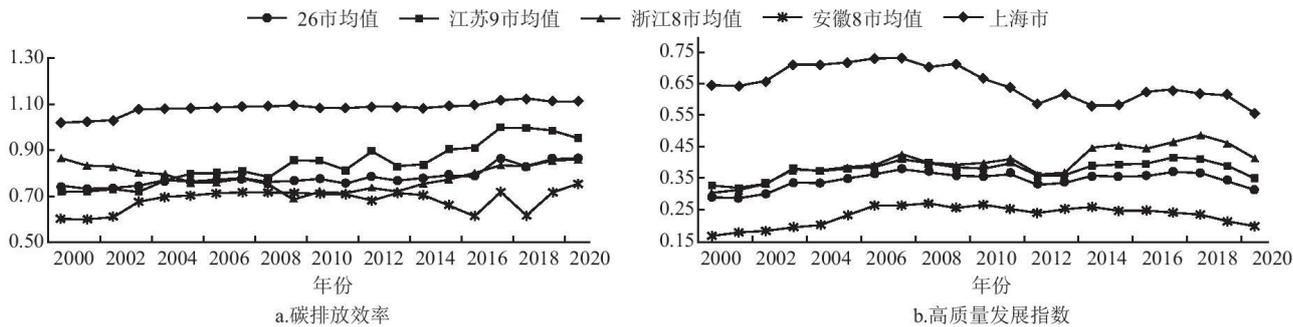


图 3 2000~2020 年长三角城市群碳排放效率与高质量发展时序变化特征

3.1.2 碳排放效率与高质量发展的空间格局

运用自然断点法将 2000、2010、2020 年长三角城市群碳排放效率与高质量发展水平划分为 5 个层级,分析其空间分布特征(图 4)。

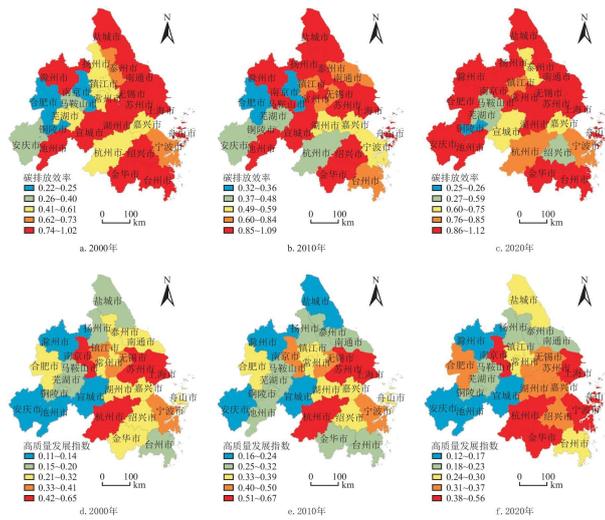


图 4 2000~2020 年长三角城市群碳排放效率与高质量发展的空间分布

比较分析表明：(1)碳排放效率的空间格局逐步由 2000 年的“一个条带+两点”的高值集聚到 2010 年的中高值连绵分布再演化为 2020 年的南北高、中间低的分布特征，部分城市碳排放效率水平发生了层级的跃迁，城市群西部城市上升更为凸显。其原因在于经济发展后政府和居民对环境质量的重视程度不断提高，加之碳排放强度下降指标的约束和清洁技术的发展，以往高耗能-高排放的发展模式被淘汰，长三角城市群碳排放效率不断得到提升。(2)长三角城市群高质量发展水平东高西低的宏观格局逐渐明晰，高水平集聚区由 2000 年的南京、杭州、苏州-上海点状分布到 2010 年的高值点略微收缩而后扩散至 2020 年的东部连片分布，浙江省中除台州外的城市层级跨越式发展最为突出，可能与沪杭甬产业创新带的深度开发有关，这些城市产业转型升级的速度较快，同时能够辐射带动周边城市高质量发展，形成了一定范围的高水平集聚区。

3.2 碳排放效率与高质量发展耦合的时空分异

3.2.1 碳排放效率与高质量发展耦合时序特征

为明晰长三角城市群整体碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度的时序演变特征，对 26 个城市逐年的耦合度和耦合协调度取均值(图 5)。整体上看，碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度呈现出小幅度波动，两者历年均值分别在 0.861~1.000 和 0.651~0.800 之间，前者处于磨合和高耦合时期，后者属于初级与中级协调时期，说明碳排放效率与高质量发展总体协同发展状态稳健，即长三角地区经济高质量发展过程中要素之间互动关系良好，符合区域发展实际。

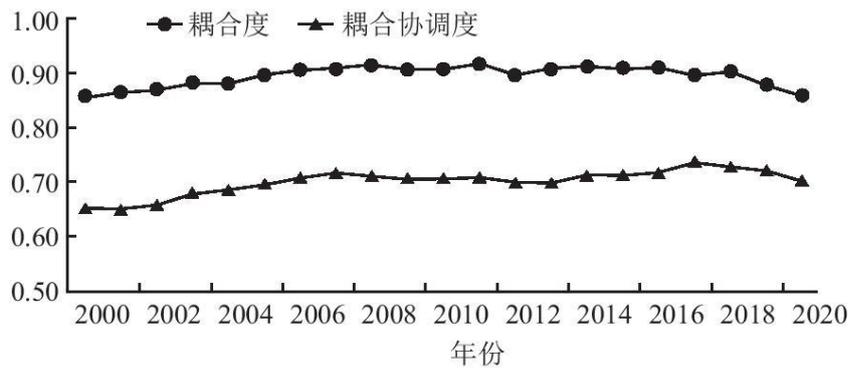


图 5 碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度平均变化趋势

为进一步刻画长三角地区不同省市碳排放效率与高质量发展耦合协调的动态演进特征，对长三角城市群中涵盖的江苏 9 市、浙江 8 市和安徽 8 市的耦合度和耦合协调度分别取均值进行分析(图 6)。(1)从内部不同省市层面看，碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度水平存在明显的区域差异。与高质量发展水平分异特征相似，总体上耦合度和耦合协调度表现为上海市>浙江 8 市和江苏 9 市>地区均值>安徽 9 市，不同发展阶段碳排放效率和高质量发展水平的区域差异是造成两者耦合水平地区分异的原因。(2)从耦合度和耦合协调度变动特征看，前者波动幅度较大，除浙江 8 市外均在波动中呈小幅度下降，后者除上海外均呈现小幅度上升，但上海耦合协调水平始终维持在高位，再次印证了沪杭甬产业创新带深度开发的正向作用效应，使得这些地区产业升级向更高级化和合理化方向发展，同时使碳排放效率和高质量发展协调并进。安徽 8 市发展初期以高耗能-高排放的传统发展模式为主，产业转型相对缓慢，因此其耦合协调水平在城市群里最低。随着长三角地区生态文明建设的持续推进，各省市耦合协调水平差距总体呈缩小态势，城市群整体均衡发展的趋势逐渐显现。

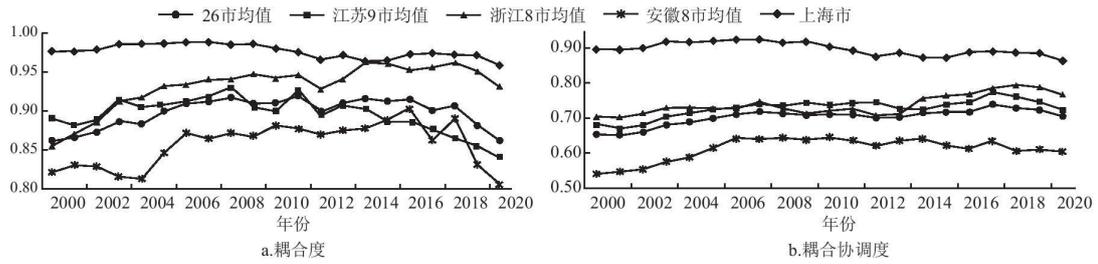


图6 碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度时序变化特征

3.2.2 碳排放效率与高质量发展耦合空间格局

参照已有研究成果并结合研究实际,将2000、2010、2020年长三角城市群碳排放效率与高质量发展耦合度和耦合协调度进行类型划分,分析其空间分布特征(图4)。其中,耦合度划分为低耦合时期($0.6 < C \leq 0.7$)、拮抗时期($0.7 < C \leq 0.8$)、磨合时期($0.8 < C \leq 0.9$)和高耦合时期($0.9 < C \leq 1.0$);耦合协调度划分为濒临失调($0.4 < C \leq 0.5$)、勉强协调($0.5 < C \leq 0.6$)、初级协调($0.6 < C \leq 0.7$)、中级协调($0.7 < C \leq 0.8$)、良好协调($0.8 < C \leq 0.9$)和优质协调($0.9 < C \leq 1.0$)。

比较分析表明:(1)从耦合类型空间分布看,长三角城市群碳排放效率与高质量发展耦合度总体呈上升的趋势,个别地区存在回落现象。耦合水平较好的区域总体呈现先扩张后逐渐向东部核心城市周边转移收缩的趋势,高耦合水平区在2000年主要处于合肥、南京、苏锡常、杭州和宁波几个都市圈连接而成的沪宁合杭甬发展带,在2010年呈现出城市群西部的断裂和东南的重组,在2020年呈现出明显的“两点+东南片区”的分布格局,这些地区资源配置效率高、区域耦合发展态势良好。处于磨合时期的城市附着在高耦合城市周边,这些城市的碳排放效率与高质量发展在彼此配合中逐步向良性耦合方向发展。拮抗时期的城市耦合水平欠佳,基本位于城市群边缘,都市圈的辐射带动效应难以显现。低耦合水平区均为安徽所属城市,如安庆、池州等,这些地区存在产业融合度不高、资源共享度低等问题是造成区域协同发展难度大的原因,符合地区发展实际。(2)从耦合协调类型空间分布看,总体耦合协调性能有所提升,协调水平呈现东高西低的格局。2000年城市群西部为勉强协调及濒临失调区,东北部为初级协调区,东南部主要为中级协调区,苏州和上海为良好协调区;2010年除东南部外其余地区耦合协调类型有所改善,上海发展为优质协调区;2020年南京、杭州等个别城市协调类型上升,城市群西部、北部较多城市及苏州、上海耦合协调层级有所下降。濒临失调和勉强协调类型的城市数量经历了大幅减少后略有上升,说明碳排放效率与高质量发展相互作用较强,两者在彼此配合中向有序、良性方向发展。耦合协调度高值点主要为城市群核心城市,其数量有所增加,呈分散布局状态,说明核心城市的辐射带动能力不足,未来需进一步建立区域资源要素共建共享机制,推动核心城市与周边地区高质量协同发展。

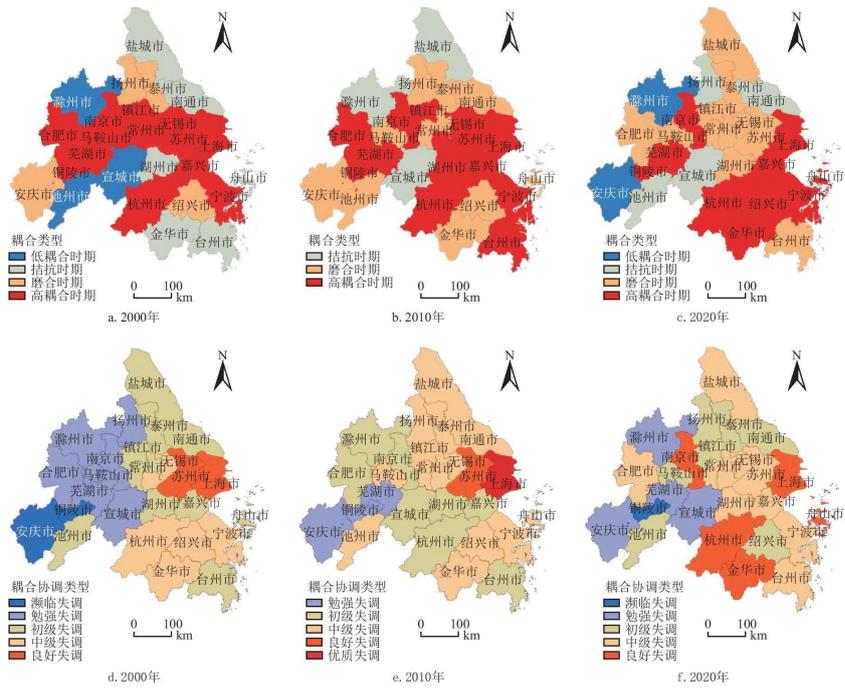


图7 长三角城市群碳排放效率与高质量发展的耦合度和耦合协调度空间分布

4 影响因素分析

为剖析长三角城市群碳排放效率与高质量发展耦合协调的影响因素,构建26个城市2000~2020年的面板数据模型进行Tobit回归,模型估计结果如表4所示,不同因素作用方向和作用强度均具有一定差异。

表4 耦合协调度驱动因素回归模型估计结果

变量	Tobit
$\ln(p_gdp)$	0.071*
$\ln(fa_gdp)$	0.011*
$\ln(thr_gdp)$	0.003
	0.022**

ln(urban_r)	
ln(ind_sec)	-0.012
ln(third_gdp)	0.013***
ln(CO2_gdp)	-0.036***
_cons	0.326*
Log-L	901.402
LR(chi)	564.860
Prob>chi	0.000

注：*、**、***分别表示回归系数在 0.1、0.05、0.01 水平上显著。

从作用方向看，经济基础(ln(p_gdp))对碳排放效率与高质量发展的耦合协调水平具有正向作用效应，这表明地区基于雄厚的经济基础更有能力为引进低碳技术、提升能源利用效率等提供充足的资金支持或财政补贴，从而对区域减少碳排放和高质量发展起到双重促进作用。政府干预(ln(fa_gdp))对耦合协调度的作用显著为正，说明一定的政府干预能够促使资源要素充分利用、促进区域经济健康且高效运行，进而对地区碳排放效率与高质量发展的良性耦合产生推动作用。

信息化水平(ln(thr_gdp))对耦合协调度的作用效应为正，环境规制强度(ln(ind_sec))对其具有负作用，但两者均未通过显著性检验，其对耦合协调的影响效应仍有待进一步探讨。城镇化率(ln(urban_r))的作用效应显著为正，可能原因是城镇化水平越高的地区更易拥有较高的社会标准和环境要求，这种发展背景下耦合水平有所提升。研究期正是长三角地区城镇化快速发展的时期，推进城镇化有助于促进就业增长、产业结构调整、技术效率进步等，进而推动区域整体经济高质量发展。

产业结构(ln(third_gdp))中三产占比对耦合协调具有显著正作用，说明伴随着三产比重的提升地区碳减排效率和经济发展质量均有所提升，进一步表明推动产业结构转型升级仍是长三角城市群均衡发展的重要方向。碳排放强度(ln(CO2_gdp))具有负作用，符合预期效果，碳排放强度越高(即单位 GDP 的 CO2 排放量越高),技术水平越低，碳排放效率相对越低，经济高质量发展相对缓慢，因此两者耦合协调度下降，也反向证明了技术创新对区域低碳经济发展的重要作用。

从作用强度看，经济基础对耦合协调水平的正向促进作用最为突出，其次是碳排放强度的负向约束作用，最后是城镇化率、产业结构和政府干预的正向作用效应，再次证明了经济基础对区域综合发展具有强大的支撑作用。雄厚的经济基础不仅能通过加大使用清洁能源、革新生产设备力度等驱动碳排放强度下降、技术创新水平提升，也能为政府治理环境、投资公共服务等以达到更高的社会标准提供保障，从而进一步推动经济低碳增长和社会发展。

5 结论与建议

本文通过构建碳排放效率与高质量发展的指标体系，揭示了两者的耦合发展的时空分异格局与影响因素。主要得出以下结论：

(1)2000~2020 年长三角城市群碳排放效率和高质量发展平均值呈现出同步的波动中上升趋势，2011~2020 年碳排放效率的增幅明显大于 2000~2011 年，高质量发展水平的城市间差异显著高于前者。从不同省市层面看，上海市碳排放效率和高质量发展水平始终高于 26 市均值，安徽 8 市则相反，浙江 8 市和江苏 9 市的两者均值总体上与城市群平均水平相差不大。从宏观格局演化看，碳排放效率的中高值区趋于在城市群北部连绵分布，高质量发展水平东高西低的空间格局逐渐明晰。

(2)研究期内长三角城市群碳排放效率与经济高质量发展总体耦合发展水平较好，两者耦合度和耦合协调度处于初级协调及以上时期，均表现出小幅度波动特征，且变化趋势基本一致。不同省市耦合协调水平平均值的差异特征与碳排放效率和高质量发展较为相似，各省市耦合度的波动幅度显著大于耦合协调度。两者耦合度及耦合协调度的空间格局变化较为显著，耦合度优质协调区由带状连绵分布逐步向核心城市周边收缩，同时在城市群东南部形成高值片区；耦合协调度处于良好协调及以上状态的城市为城市群重点核心城市，在空间上分散布局，其辐射带动能力有待提升，城市群高质量协同发展任重道远。

(3)耦合协调度受多种因素影响，不同因素的作用效应存在显著差异。经济基础、政府干预、城镇化率及产业结构对碳排放效率与高质量发展耦合协调水平提升具有明显的正向作用，其中经济基础的作用最强，碳排放强度具有符合预期的负向约束作用，信息化水平与环境规制的作用效应还需探讨。未来进一步扩大各因素的作用效应及溢出效应是促进长三角城市群低碳经济发展、加快区域协作进程的重要方向。

基于上述研究结论，提出如下建议：(1)推动长三角城市群碳排放效率与高质量发展更深层次的协同互促，为城市群经济可持续发展的良性循环奠定基础。一方面积极发展低碳产业，支持区域战略性新兴产业发展，实现技术创新驱动的产业结构优化和经济绿色发展；另一方面推动经济发展成果向社会治理等惠及民生的事业转化，在减污降碳方面加大投资力度以改善生态环境质量，保障经济发展的可持续性。(2)持续加强区域协同互动，警惕城市间发展差距扩大，为城市群更高质量一体化发展提供保障。一方面充分发挥核心城市的辐射带动作用，加大对普通城市发展的扶持力度，以普遍提高城市生态经济韧性；另一方面打破行政壁垒，深入推进城市群内的经济联合和技术合作，不断缩小城市间经济增长和绿色发展差距以推动城市群更深层次的耦合协调发展。(3)制定差异化的绿色发展政策，结合城市具体发展情况因势利导，对城市群碳减排计划和高质量一体化战略的实施做好整体布局。核心城市要在维持经济增长点的基础上不断发挥技术进步的优势以持续提高能源利用效率，普通城市要结合客观实际加快产业结构转型和绿色产业结构体系构建，以缩短伴随经济增长的碳排放量上升的阵痛期，推进碳排放效率提升和高质量发展的同步实现。

参考文献：

[1]郭政,陈爽,董平,等.长江三角洲城市群工业污染时空演化及其驱动因素[J].中国环境科学,2019,39(3):1323-1335.

GUO Z, CHEN S, DONG P, et al. Spatio-temporal evolution of industrial pollution in the Yangtze River Delta urban agglomeration and its driving factors [J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1323- 1335.

[2]孙燕铭, 谌思邈.长三角区域绿色技术创新效率的时空演化 格局及驱动因素[J].地理研究, 2021, 40(10): 2743-2759.

SUN Y M, CHEN S M. The spatio-temporal evolutionary pattern and driving forces mechanism of green technology innovation efficiency in the Yangtze River Delta region [J]. *Geographical Research*, 2021 , 40(10) : 2743-2759.

[3]李正昕, 徐维祥, 刘程军.长三角县域三次产业协调发展 的空间特征及动力机制[J].*经济地理*, 2021, 41 (3): 136-143.

LI Z X, XU W X, LIU C J. Spatial characteristics and mechanism of the coordinated development of three industries at County level in the Yangtze River Delta [J] . *Economic Geography*, 2021, 41(3) : 136- 143.

[4] YANG Y, ZHOU Y N , POON J, et al. China's carbon dioxide emission and driving factors : A spatial analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211 : 640-651.

[5]邱嫦娥, 李文意, 黄小丝.长江中游城市群碳排放强度与 经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J].*经济地理*,2022,42(8): 30-40.

KUANG C E, LI W Y, HUANG X S. Spatial-temporal evolution and driving factors of coupling coordination between carbon emission intensity and high-quality economic development in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(8) : 30-40.

[6]李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等.长三角地区碳排放效率时空 特征及影响因素分析[J].*长江流域资源与环境*, 2020, 29 (7) : 1486-1496.

LI J B, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region [J] . *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7) : 1486- 1496.

[7] IGNATIUS J, GHASEMI M R, ZHANG F, et al. Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA [J] . *European Journal of Operational Research*, 2016 , 253 (2) : 428-440.

[8]张 悦, 王晶晶, 程 钰.中国工业碳排放绩效时空特征 及技术创新影响机制[J].*资源科学*, 2022, 44(7) : 1435-1448.

ZHANG Y, WANG J J, CHENG Y. Spatiotemporal characteristics of China' s industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation [J] . *Resources Science*, 2022, 44(7) : 1435-1448.

[9]王 帅, 赵荣钦, 杨青林, 等.碳排放约束下的农业生产效 率及其空间格局——基于河南省 65 个村庄的调查[J].*自然资源学报*, 2020, 35(9) : 2092-2104.

WANG S, ZHAO R Q, YANG Q L, et al. Agricultural production efficiency and spatial pattern under carbon emission constraint: Based on 65 villages of Henan Province [J] . *Journal of Natural Resources*, 2020, 35 (9) : 2092-2104.

[10] 李 波, 王春好, 张俊飏.中国农业净碳汇效率动态演进 与空间溢出效应[J].*中国人口 -资源与环境*, 2019, 29 (12) : 68-76.

LI B , WANG C Y, ZHANG J B. Dynamic evolution and spatial spillover effects of net agricultural carbon sink efficiency in China [J] . *China Population, Resources and Environment*, 2019 , 29(12) : 68-76.

[11] WANG R, FENG Y. Research on China's agricultural carbon emission efficiency evaluation and regional differentiation based on DEA and Theil models [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(6): 1453-1464.

[12] 邵海琴, 王兆峰. 长江经济带旅游业碳排放效率的综合测度与时空分异[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1685-1693.

SHAO H Q, WANG Z F. Comprehensive measurement of carbon emissions efficiency of tourism and its spatio-temporal differentiation in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(8): 1685-1693.

[13] 谌莹, 张捷. 碳排放、绿色全要素生产率和经济增长 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(8): 47-63.

CHEN Y, ZHANG J. Carbon emission, green total factor productivity and economic growth [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2016, 33(8): 47-63.

[14] 王 劼, 朱朝枝. 农业部门碳排放效率的国际比较及影响因素研究——基于 32 个国家 1995-2011 年的数据研究 [J]. *生态经济*, 2018, 34(7): 25-32.

WANG J, ZHU C Z. International comparison of carbon emission efficiency in agricultural sector and its influencing factors based on data from 32 countries from 1995 to 2011 [J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(7): 25-32.

[15] 欧进锋, 许抄军, 刘雨骐. 基于“五大发展理念”的经济高质量发展水平测度——广东省 21 个地级市的实证分析 [J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 77-86.

OU J F, XU C J, LIU Y Q. The measurement of high-quality development level from five development concepts: Empirical analysis of 21 prefecture-level cities in Guangdong Province [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 77- 86.

[16] 王小华, 杨玉琪, 罗新雨, 等. 中国经济高质量发展的空间关联网络及其作用机制[J]. *地理学报*, 2022, 77 (8): 1920- 1936.

WANG X H, YANG Y Q, LUO X Y, et al. The spatial correlation network and formation mechanism of China's high-quality economic development [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 1920-1936.

[17] 单勤琴, 李 中. 经济高质量发展水平的地区差异及时空收敛性研究[J]. *经济地理*, 2022, 42(9): 50-58.

SHAN Q Q, LI Z. Regional differences and spatiotemporal convergence of high-quality economic development [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(9): 50-58.

[18] MEI L, CHEN Z. The convergence analysis of regional growth differences in China: The perspective of the quality of economic growth [J]. *Journal of Service Science and Management*, 2016, 9(6): 453-476.

[19] ZHOU X, ZHANG M, ZHOU M, 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.

[20] SETYARI N, KUSUMA W. Economics and environmental development :Testing the environmental Kuznets Curve Hypothesis

[J] . International Journal of Energy Economics and Policy,2021, 11(4) : 51- 58.

[21] 陈超凡.节能减排与中国工业绿色增长的模拟预测[J].中国人口-资源与环境, 2018, 28(4): 145-154.

CHEN C F. The simulation and prediction of energy conservation, emission reduction and green growth of China' s industry [J] . China Population , Resources and Environment, 2018, 28 (4) : 145- 154.

[22] 刘志华, 徐军委, 张彩虹.科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的PVAR分析[J].自然资源学报, 2022, 37(2) : 508-520.

LIU Z H, XU J W , ZHANG C H. Technological innovation , industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency: An analysis based on PVAR model of panel data at provincial level [J] . Journal of Natural Resources, 2022, 37(2) : 508-520.

[23] 黄俊鑫, 焦方太.高质量发展下能源消耗与碳排放耦合性研究[J].生态经济, 2021, 37(7): 22-27, 34.

HUANG J X, JIAO F T. Research on the coupling relationship between energy consumption and carbon emission in view of high-quality development of economy [J] . Ecological Economy, 2021, 37(7) : 22-27, 34.

[24] 姜吉坤, 祝胜来, 曹吉昌, 等.新型城镇化与碳排放水平的耦合协调度分析——以山东省为例[J].生态经济, 2023, 39(3) : 76-82.

JIANG J K, ZHU S L, CAO J C, et al. Analysis of the Coupling Coordination Degree between New Urbanization and Carbon Emission level: A case study of Shandong Province [J] . Ecological Economy, 2023 , 39(3) : 76- 82.

[25] 王凯, 李娟, 席建超.中国旅游经济增长与碳排放的耦合关系研究[J].旅游学刊, 2014, 29(6): 24-33.

WANG K, LI J, XI J C. Linking between carbon dioxide emission and tourism economic growth in China [J] . Tourism Tribune, 2014, 29(6) : 24-33.

[26] 吴建新, 郭智勇.基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J].统计研究, 2016,33(1): 54-60.

WU J X, GUO Z Y. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: based on a continuous dynamic distribution approach [J] . Statistical Research, 2016, 33(1) : 54-60.

[27] 单豪杰.中国资本存量K的再估算: 1952-2006年[J].数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17-31.

SHAN H J. Re-estimation of China: 1952 - 2006 [J] . The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008 , 25 (10) : 17-31.

[28] 江心英, 赵爽.双重环境规制视角下FDI是否抑制了碳排放——基于动态系统GMM估计和门槛模型的实证研究[J].国际贸易问题, 2019(3): 115-130.

JIANG X Y , ZHAO S. Does FDI inhibit carbon emissions from the perspective of dual environmental regulation: An empirical study based on dynamic system GMM estimation and threshold model [J] . Journal of International Trade, 2019(3) : 115- 130.

[29] 沈 杨, 汪聪聪, 高 超, 等.基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析[J].自然资源 学报, 2020, 35(2) : 329-342.

SHEN Y, WANG C C, GAO C, et al. Spatio-temporal distribution and its influencing factors of carbon emissions in economic zone of Zhejiang Bay Area based on urbanization [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2) : 329-342.

[30] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J] . European Journal of Operational Research , 2001, 130(3) : 498-509.

[31] 王少剑, 高 爽, 黄永源, 等.基于超效率 SBM 模型的中 国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J].地理学报, 2020, 75(6) : 1316-1330.

WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020 , 75(6) : 1316 - 1330.

[32] 崔 丹, 卜晓燕, 徐 祯, 等.中国资源型城市高质量发展综合评估及影响机理[J].地理学报, 2021, 76 (10): 2489-2503.

CUI D, BU X Y , XU Z, et al. Comprehensive evaluation and impact mechanism of high-quality development of China' s resource-based cities [J] . Acta Geographica Sinica, 2021, 76 (10) : 2489-2503.

[33]刘颖洁, 王 爽.长江经济带养老产业与旅游产业耦合协 调与经济增长的关系[J].经济地理, 2022, 42(8) : 123-131.

LIU Y J, WANG S. Coupling and coordination between elderly care industry and tourism industry in Yangtze River economic zone and its relationship with economic growth [J] . Economic Geography, 2022, 42(8) : 123-131.