文章编号：1003-1421(2026)04-0051-12
引用格式：乔国通，廖瑞，胡佳旭，等. 长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化及驱动因素研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(4)：51-62.
QIAO Guotong，LIAO Rui，HU Jiaxu，et al. Research on Co-Evolution and Driving Factors of Green Resilience and Efficiency of Logistics in Yangtze River Economic Belt[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：51-62.

长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化及驱动因素研究

乔国通，廖　瑞，胡佳旭，祝倩倩，管成慧

(安徽理工大学 经济与管理学院，安徽 淮南 232000)

摘　要：明晰物流绿色韧性与效率的互动关系和协同演化特征，是推动物流业可持续发展的理论基础。以2010—2022年长江经济带11个省(市)为研究对象，基于DPSIR模型和投入产出理论，构建物流绿色韧性与效率评价指标体系并测度其水平，引入哈肯模型探究两者的协同效应，分析其时空分异特征及驱动因素。结果表明，研究期内物流绿色韧性明显提升，而绿色效率呈波动下降趋势；物流绿色韧性是主导协同演化的序参量，发挥更强的正反馈效应；物流绿色韧性与效率协同演化趋势整体向好，形成东部>西部>中部的空间格局；物流需求水平、物流信息化水平和物流创新能力是协同演化水平空间分异的主要驱动因素，各因子在交互作用下均呈协同增强作用。研究成果可为促进区域物流业可持续发展提供参考。

关键词：长江经济带；物流绿色韧性；物流绿色效率；协同演化；哈肯模型
中图分类号：U2-9；F062.2；F252.5　**文献标识码**：A　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250418003

Research on Co-Evolution and Driving Factors of Green Resilience and Efficiency of Logistics in Yangtze River Economic Belt

QIAO Guotong，LIAO Rui，HU Jiaxu，ZHU Qianqian，GUAN Chenghui

(School of Economics and Management, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232000, Anhui, China)

Abstract: Clarifying the interaction and co-evolution characteristics of green resilience and efficiency of logistics is the theoretical basis for promoting the sustainable development of the logistics industry. A total of 11 provinces (municipalities) in the Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2022 were taken as the research object. Based on the DPSIR model and input-output theory, an evaluation index system for green resilience and efficiency of logistics was constructed, and its level was measured. The Haken model was introduced to explore the synergistic effect of the two, and its spatio-temporal differentiation characteristics and driving factors were analyzed. The results show that during the study period, the green resilience of logistics is significantly improved, while the green efficiency of logistics shows a fluctuating downward trend. Green resilience of logistics is the ordinal parameter

收稿日期：2025-04-18　**修订日期**：2026-01-31
通信作者：廖瑞(2000—)，男，安徽宿州人，安徽理工大学经济与管理学院硕士研究生。
基金项目：安徽省科协决策咨询研究项目(2025jczx03)；安徽省社会科学创新发展研究课题(2022CX064)；安徽理工大学研究生创新基金项目(2024cx2143)

that dominates the co-evolution, exerting a stronger positive feedback effect. The overall trend of co-evolution of green resilience and efficiency of logistics is improving, forming a spatial pattern of eastern region > western region > central region. The level of logistics demand, the level of logistics informatization, and the ability of logistics innovation are the main driving factors for the spatial differentiation of the co-evolution level. All factors show a synergistic enhancement effect under the interaction. The research findings can provide a reference for promoting the sustainable development of the regional logistics industry.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; Green Resilience of Logistics; Green Efficiency of Logistics; Co-Evolution; Haken Model

0　引言

当今复杂多变的外部环境凸显了经济系统韧性与效率协同强化的重要性。世界经济论坛《全球风险报告》及我国“十四五”规划均强调，提升系统应对外部冲击的韧性和资源配置的效率是实现可持续发展的关键路径。物流业作为现代经济支柱，正面临供应链波动、自然灾害及高能耗高污染传统模式转型的多重挑战，其绿色高效发展亟需韧性与效率的协同支撑。长江经济带横跨我国11个省(市)，是国家区域一体化与“绿色发展、生态优先”战略的核心载体。然而，频繁的物流活动带来显著的环境压力和资源消耗，区域内物流资源配置无序、环境污染累积及生态系统功能减弱，不仅制约了物流绿色效率提升，也加剧了系统面对外部冲击的脆弱性[1-2]。因此，深入分析长江经济带物流系统绿色韧性与绿色效率的协同效应，揭示其互动机制，有助于打破绿色转型桎梏，推动物流业可持续发展。

关于物流韧性的既有研究多聚焦于实证测度方面，部分学者采用单一指标法、变量弹性系数评价模型及综合指标评价法进行度量。例如，余金艳等[3]利用“物流配送时长变化幅度的时间轴积分”这一指标，度量物流韧性水平；陈素月等[4]通过测度交通运输、仓储和邮政业实际增加值的弹性系数，表征物流韧性水平；金凤花等[5]从物流经济能力、社会人口能力、社区连接能力与创新能力4个维度，Xu等[6]基于韧性理论，从抵抗力、适应力、恢复力、转型力4个维度，分别构建物流韧性综合评价指标体系。

关于物流绿色效率的既有研究则主要聚焦于测度方法、影响因素及空间特征3个方面。在测度方面，易燕[7]基于非期望产出的松弛值测度数据包络模型(SBM)，测度我国31个省(区、市)的物流绿色效率水平，发现东部地区的效率水平高于中西部地区；邓梦杰等[8]基于超效率SBM与全局Malmquist-Luenberger(GML)组合指数模型，从动静结合的角度量化我国30个省(区、市)的冷链物流绿色效率，认为冷链物流全要素生产率的提升主要得益于技术进步。在影响因素方面，何景师等[9]构建Tobit模型，指出物流运输强度、物流劳动生产率等因素对绿色效率的提高具有积极影响；孟珊珊等[10]同样通过Tobit模型发现环境规制对我国东中西部的生鲜农产品物流绿色效率均具有显著促进作用。在空间特征方面，徐超毅等[11]得出华东地区物流绿色效率高水平和低水平省份存在空间集聚现象。

综上，有关物流韧性与效率的研究虽已较为丰富，但仍存在可拓展的方面。一是鲜有研究系统地将表征“绿色”的指标纳入物流韧性评价体系；二是较少研究将韧性与效率视为协同演化的整体，缺乏对其互动机制的研究。基于此，以长江经济带为例，构建物流绿色韧性与绿色效率评价指标体系，分别采用熵值法和超效率SBM模型进行测度，并引入改进的哈肯模型与地理探测器模型分析二者协同演化机制及驱动因素，为区域物流业绿色与可持续发展提供参考。

1　研究设计

1.1　指标体系构建

1.1.1　物流绿色韧性指标体系

“驱动力-压力-状态-影响-响应”(DPSIR)模型是研究环境、社会、资源和经济发展的常用模型，将指标分为驱动力D、压力P、状态S、影响I和响应R 5个层次。借鉴既有物流韧性成果[4, 12-13]，将物流绿色韧性理解为物流系统在面对外部环境变化或风险时，能够迅速调整并恢复至原有或更高服务水平的同时，减少对环境负面影响的能力。遵循科

学性、客观性和可获取性原则，基于DPSIR模型构建物流业绿色韧性评价指标体系。物流绿色韧性评价指标体系如表1所示，其中，指标权重是基于熵值法测度所得。

（1）驱动力。驱动力指推动物流系统实现绿色与韧性发展的根本动力，涵盖经济与社会2个层面。经济动力包括反映基础设施投入的物流业固定资产投资和体现规模经济效应的物流业规模；社会动力包括保障运营人力基础的从业人员数和支撑应急运力储备的民用载货汽车拥有量。

（2）压力。压力指经济社会发展中对物流绿色韧性形成制约的因素，分为需求压力、能源压力及环境压力。用人均快递量和货运量表征需求压力；能源压力通过单位增加值煤炭、油品及电力消耗量反映能源依赖强度；环境压力聚焦单位增加值碳排放量，直接关联“双碳”目标刚性约束。

（3）状态。状态表征物流系统在动力与压力作用下所呈现的即时韧性水平，包括抵抗能力、转型能力和恢复能力。抵抗力维度由物流业资本效率、劳动力效率及增加值占比3个指标表征，反映出资源配置效能与抗风险基础；转型力以铁路与公路货物周转量之比为核心，用以衡量运输结构低碳化程度；恢复力通过物流业增加值增长率体现动态恢复能力。

（4）影响。影响指系统状态变化所带来的多维效应，包括经济影响、社会影响和环境影响。经济影响表现为农业与工业生产率的提升；社会影响涵盖居民消费水平与人口失业率；环境影响以空气质量优良率为核心，实证物流活动绿色运营的生态贡献。

（5）响应。响应指为应对压力、改善状态和优化影响所采取的政策与行动。本研究构建多维度响应体系，包括人才培养、金融服务、科技创新、基础设施及环境治理。

表1　物流绿色韧性评价指标体系

Tab.1　Evaluation index system of green resilience of logistics

准则层	要素层	指标层	计算方法	性质	权重
驱动力	经济动力	物流业固定资产投资额/亿元	物流业固定资产投资额	+	0.044 0
		物流业规模/(万元/人)	物流业增加值/总人口	+	0.039 3
	社会动力	物流业从业人员数/万人	物流业从业人员数	+	0.031 7
		民用载货汽车拥有量/万辆	民用载货汽车拥有量	+	0.025 8
压力	需求压力	人均快递量/(件/人)	快递量/总人口	+	0.108 8
		人均货运量/(t/人)	货运量/总人口	+	0.022 1
	能源压力	单位物流业增加值煤炭消耗量/(t/万元)	煤炭消耗量/物流业增加值	−	0.003 3
		单位物流业增加值油品消耗量/(t/万元)	油品消耗量/物流业增加值	−	0.013 0
		单位物流业增加值电力消耗量/(万kW·h/万元)	电力消耗量/物流业增加值	−	0.006 2
	环境压力	单位物流业增加值碳排放量/(t/万元)	碳排放量/物流业增加值	−	0.011 7
状态	抵抗力	物流业资本效率	物流业增加值/固定资产投资额	+	0.049 0
		物流业劳动力效率/(万元/人)	物流业增加值/从业人员数	+	0.029 5
		物流业增加值占比	物流业增加值/地区GDP	+	0.018 1
	转型力	物流业运输结构	铁路货物周转量/公路货物周转量	+	0.046 2
	恢复力	物流业增加值增长率	(当年物流业增加值/前一年物流业增加值)−1	+	0.013 9
影响	经济影响	农业生产率/(万元/人)	农业增加值/农业从业人员数	+	0.034 0
		工业生产率/(万元/人)	工业增加值/工业从业人员数	+	0.032 9
	社会影响	居民消费水平/元	居民人均消费支出	+	0.030 7
		人口失业率/%	城镇登记失业率	−	0.017 4
	环境影响	空气质量/%	省会城市空气质量优良天数占比	+	0.010 9
响应	人才培养	教育支持力度	教育经费支出/地方财政支出	+	0.014 1
		人才储备力度	普通高等学校在校生数/总人口	+	0.255 1
	金融服务	金融发展水平	存贷款余额/GDP	+	0.026 7
	科技创新	R&D经费投入力度	R&D经费投入/GDP	+	0.023 7
	基础设施	交通基础设施/(km/万km^2)	综合运营里程/地区面积	+	0.031 1
		信息化基础设施/个	每百人互联网宽带接入端口数	+	0.031 7
	环境治理	环境治理力度	环境污染治理投资额/GDP	+	0.029 1

1.1.2　物流绿色效率指标体系

基于投入产出理论，梳理既有研究发现[14]，传统的物流效率研究往往只关注经济投入和产出的比率，而忽视了生态和环境的影响，而物流绿色效率研究将碳排放量这一环境因素纳入物流效率的产出指标中，体现出对“绿色”的考量。将劳动力、能源和资本作为投入变量，产出变量则需兼顾期望产出与非期望产出。

投入变量方面，以物流业年末就业人数为劳动力投入；选取煤油、柴油、燃料油、汽油、原煤、天然气和液化石油气7种终端能源消费量，折算为万吨标准煤后求和作为能源投入[15]；以固定资产投资额作为资本投入指标；以运输线路综合总里程表征基础设施投入。

产出变量方面，物流业增加值能够衡量物流业的发展水平，体现了物流业对国内生产总值的贡献；货物周转量与货运量能反映出物流业的产出规模；而物流业的污染主要是生产运作过程中碳的排放，物流业碳排放量通过7种主要能源的终端消费量，结合折标准煤系数和碳排放系数估算。物流绿色效率评价指标体系如表2所示。

表2　物流绿色效率评价指标体系

Tab.2　Evaluation index system of green efficiency of logistics

一级指标	二级指标	三级指标
投入指标	资本投入	固定资产投资额/亿元
	劳动力投入	年末就业人数/万人
	能源投入	能源消费量/万吨标准煤
	基础设施投入	运输线路综合总里程/km
期望产出指标	物流发展水平	物流业增加值/亿元
	物流业产量	货物周转量/(亿t·km)
		货运量/万t
非期望产出指标	物流业污染物	碳排放量/万t

1.2　研究方法

1.2.1　熵值法

熵值法是一种客观赋权法，相比于主观赋权法，其对指标选取的差异程度具有很强的包容性，得出的指标权重值准确度更高。选用熵值法对物流绿色韧性水平进行赋权及测度，能够避免专家赋权的主观性，客观反映物流绿色韧性水平[16]。具体计算公式及步骤如下。

步骤1：数据标准化处理，正向指标为

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \tag{1}$$

负向指标为

$$Y_{ij}=\frac{\max(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \tag{2}$$

式中：X_{ij}，Y_{ij}分别为标准化前后第i个地区第j个指标的数值。

步骤2：计算第i个地区第j个指标的权重Z_{ij}为

$$Z_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Y_{\mathrm{ij}}} \tag{3}$$

步骤3：计算第j项指标的熵值e_j为

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}\ln Z_{ij} \tag{4}$$

步骤4：计算第j项指标的信息效用值d_j为

$$d_j=1-e_j \tag{5}$$

步骤5：计算各指标权重W_j为

$$W_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j} \tag{6}$$

步骤6：计算综合得分H_i为

$$H_i=\sum_{j=1}^{m}(W_jY_{ij}) \tag{7}$$

1.2.2　超效率SBM模型

采用Tone改进后的超效率SBM模型测度物流绿色效率水平，该模型不仅可以对效率值为1的决策单元进行排序，同时也考虑了非期望产出的影响[17]，具体如式(8)—(9)所示。

$$\rho=\min\frac{1+\frac{1}{m}\sum_{t=1}^{m}\frac{w_i^-}{x_{ik}}}{1-\frac{1}{n+g}\left(\sum_{r=1}^{n}\frac{w_r^+}{y_{rk}}+\sum_{t=1}^{g}\frac{w_t^-}{b_{tk}}\right)} \tag{8}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}x_{ik}\geqslant\sum\limits_{j=1,\ j\neq k}^{J}\lambda_jx_{ij}-w_i^- & i=1,\ 2,\ \cdots,\ m\\ y_{rk}\leqslant\sum\limits_{j=1,\ j\neq k}^{J}\lambda_jy_{rj}+w_r^+ & r=1,\ 2,\ \cdots,\ n\\ y_{tk}\geqslant\sum\limits_{j=1,\ j\neq k}^{J}\lambda_jy_{tj}-w_g^- & t=1,\ 2,\ \cdots,\ g\\ 1-\frac{1}{n+g}\left(\sum\limits_{r=1}^{n}\frac{w_r^+}{y_{rk}}+\sum\limits_{t=1}^{g}\frac{w_t^-}{b_{tk}}\right)>0\\ \lambda_j\geqslant0(\forall j),\ w_i^-\geqslant0(\forall i),\ w_r^+\geqslant0(\forall r),\ w_t^-\geqslant0(\forall t)\end{cases} \tag{9}$$

式中：ρ为物流绿色效率值，ρ小于1时，表明该地未达到有效生产前沿，物流绿色效率无效，ρ大于1时，该地物流绿色效率有效；m为决策单元投入数量；n为期望产出数量；g为非期望产出数量；i为第i个投入；r为第r个期望产出；t为第t个非期望产出；k为被评价的决策单元；x_i，y_r，b_t分别为投入、期望产出和非期望产出变量；j为第j个决策单元，共有J个决策单元；λ为决策单元的权重变量，$\lambda_j \geqslant 0$表示规模报酬不变；w_i^-，w_r^+，w_g^-分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量。

1.2.3　改进的哈肯模型

哈肯模型是分析复杂系统有序度的重要模型[18]，通过识别序参量评估系统演化阶段。当前多数学者常利用耦合协调度模型来探究韧性与效率的关系，如孙才志等[19]利用耦合协调度模型研究区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系，吴小妮等[20]运用其探究经济效率与经济韧性的耦合特征，但耦合协调度模型仅能从表面探究出两者的协调程度，难以揭示两者内在的互动作用机制。因此，本研究选择哈肯模型构建物流业绿色韧性与绿色效率的协同演化方程，探究两者间的协同互动机制，并进一步测度协同水平。把物流系统视作一个动态运作的系统，物流业绿色韧性与绿色效率分别作为该运动系统中的2个子系统，分别为序参量(即慢变量)q_1和被序参量支配的快变量q_2。此时的运动系统中，需要满足系统演化方程式为

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 q_1 - a q_1 q_2 \tag{10}$$

$$\dot{q}_2 = -\gamma_2 q_2 + b q_1^2 \tag{11}$$

式中：γ_1，γ_2为阻尼系数；$\dot{q}_1$，$\dot{q}_2$为状态变量对时间的导函数；a，b表示2个子系统间的作用强度。

若$\gamma_2 > 0$且$|\gamma_2| > |\gamma_1|$，2个子系统具备数量级的差距，则满足“绝热近似”假设，表明q_1为起主导作用的序参量。此时瞬间撤去q_2，序参量q_1来不及变化，使得$\dot{q}_2 = 0$，可得

$$q_2 = \frac{b}{\gamma_2} q_1^2 \tag{12}$$

将式(12)代入序参量演化方程式(10)，可得

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 q_1 - \frac{ab}{\gamma_2} q_1^3 \tag{13}$$

对序参量演化方程式(13)等号右边取相反数，再求积分，可得复合系统的势函数为

$$v = \frac{1}{2}\gamma_1 q_1^2 + \frac{ab}{4\gamma_2} q_1^4 \tag{14}$$

物流绿色韧性与绿色效率复合系统的平衡点主要由式(13)为0时确定，当$\gamma_1\gamma_2 ab > 0$时，方程有且仅有唯一解，即$q_1 = 0$；当$\gamma_1\gamma_2 ab < 0$时，方程具备3个解，分别为$q_1' = 0$，$q_1'' = -\sqrt{\left|\frac{\gamma_1\gamma_2}{ab}\right|}$，$q_1''' = \sqrt{\left|\frac{\gamma_1\gamma_2}{ab}\right|}$。

传统哈肯模型最早应用于物理学，在经济和社会领域应用仍有局限性，需要依据复合系统的实际与子系统的划分状况来改进，参考韩增林等[21]、欧阳慧等[22]的研究，认为韧性与效率是系统固有属性，即使初值为0，通过生产结构调整和创新转型仍可实现增长。基于此，在传统的哈肯模型默认常数项为0的情况下加入常数项ς_1和ς_2，并将方程进行离散化处理，得到物流业绿色韧性GRL与绿色效率GEL的协同演化方程式为

$$q_1(t) = (1 - \gamma_1) q_1(t-1) - a q_1(t-1) q_2(t-1) + \varsigma_1 \tag{15}$$

$$q_2(t) = (1 - \gamma_2) q_2(t-1) + b q_1(t-1) q_1(t-1) + \varsigma_2 \tag{16}$$

1.2.4　地理探测器模型

地理探测器是一种探测空间分异性及驱动因子影响程度的统计方法，无需线性假设即可分析驱动因素与地理现象的关系，并探测因子交互作用对因变量的影响[23]。本研究利用因子探测器和交互探测器分别分析长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化水平的空间分异驱动因子及其交互作用强度，计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \tag{17}$$

式中：q为自变量因子对物流绿色韧性与效率协同演化水平空间分异的解释力，其值域为[0，1]，q值越大表示自变量因子对物流绿色韧性与效率协同演化水平空间分异的解释力越强，反之则越弱。$h = 1, 2, \cdots, L$，为自变量因子的分类数量；N_h，N分别为层h和全区的样本数量；σ_h^2，σ^2分别为层h和全区物流绿色韧性与效率协同演化水平空间分异的方差。

对于交互探测器的结果来说，当2个因子交互作用后，可能会出现以下5种情况，交互作用类型如表3所示。

表3　交互作用类型

Tab.3　Interaction types

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1),\ q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1),\ q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1),\ q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1),\ q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

1.3　数据来源与区域划分

我国尚未将物流业单独统计，交通运输、仓储及邮政业占物流行业8成以上，能较好反映物流业发展状况[24]。基于数据可得性，选取2010—2022年各省交通运输、仓储和邮政业数据作为研究对象，数据来源包括国家统计局、《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》及省域统计年鉴。缺失数据采用线性插值法补充；经济指标均已消涨处理；物流绿色韧性与绿色效率指标体系中碳排放量的计算方法一致。

根据《长江经济带发展战略规划纲要》的地区划分，长江经济带共11个省(市)，包括东部地区的江苏、浙江、上海，中部地区的江西、湖南、湖北、安徽，西部地区的云南、贵州、四川、重庆。

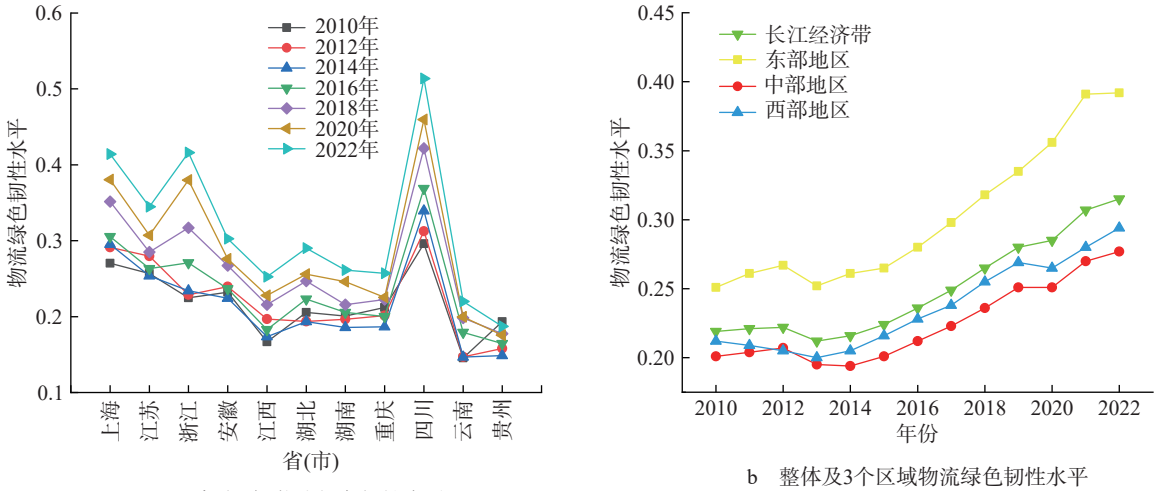
2　实证分析

2.1　物流绿色韧性水平分析

基于熵值法，测度长江经济带物流绿色韧性水平，为直观地反映物流绿色韧性水平的时序演变特征，绘制物流绿色韧性水平如图1所示。从图1可知，长江经济带物流绿色韧性整体有明显提升。时间序列上，2013年起稳定增长，均值从2013年的0.212升至2022年的0.315，增长约48.58%，表明物流业抵御威胁和自我修复的能力增强。区域层面上，3个区域的物流绿色韧性值时序变化特征与长江经济带整体高度相似，且存在阶梯性失衡，均值由低到高排序为中部地区<西部地区<东部地区。分省份来看，四川物流绿色韧性均值遥遥领先，上海、江苏、浙江的均值普遍高于其余大部分省份，中部地区4个省份均值维持在0.1~0.3之间，区域内部存在中低水平趋同现象。

2.2　物流绿色效率水平分析

基于超效率SBM模型，测度长江经济带物流绿色效率水平，物流绿色效率水平如图2所示，直观呈现其时序演变特征。由图2可知，长江经济带物流绿色效率整体呈波动下降趋势，均值从2010年的0.378降至2022年的0.309，年均下降约1.67%。从时间序列来看，以2016年为拐点，先减后增。区域上，物流绿色效率值存在明显层级性非平衡，东部效率最高，中部次之，西部最低，东部均值为



a　各省(市)物流绿色韧性水平

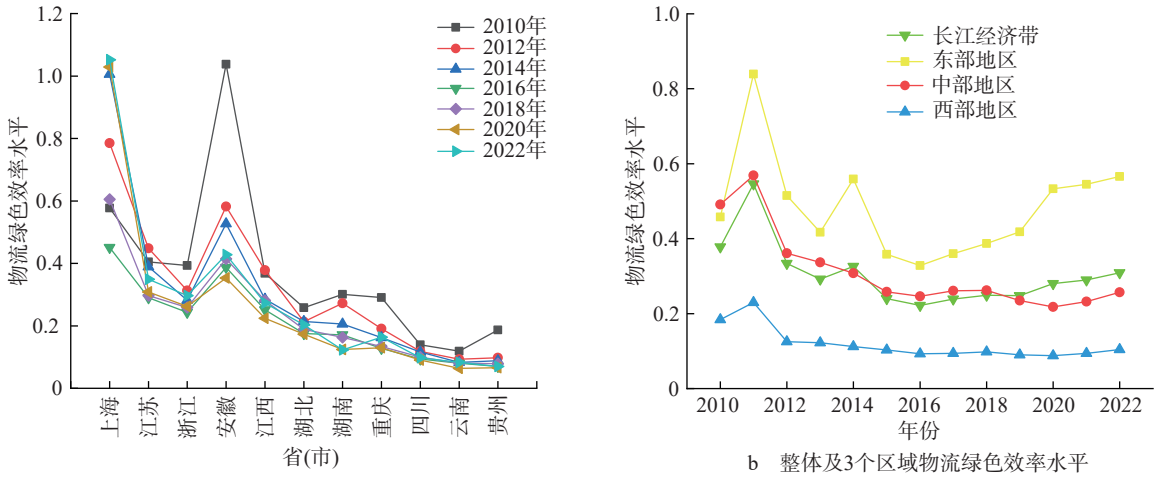
a　Green resilience level of logistics in each province (municipality)

b　整体及3个区域物流绿色韧性水平

b　Green resilience level of logistics in all regions and in three regions

图1　物流绿色韧性水平

Fig.1　Level of green resilience of logistics



a　各省(市)物流绿色效率水平
a　Green efficiency level of logistics in each province (municipality)

b　整体及3个区域物流绿色效率水平
b　Green efficiency level of logistics in all regions and in three regions

图2　物流绿色效率水平

Fig.2　Level of green efficiency of logistics

整体的1.59倍，西部仅为整体的0.39倍；重庆、四川、云南、贵州的效率值显著低于其他省(市)。

2.3　物流绿色韧性与效率协同演化分析

2.3.1　序参量识别

在构建模型前对物流绿色韧性与效率进行共线性诊断，得到方差膨胀因子(VIF)≤5，两者不具备共线性，符合哈肯模型构建基本要求。再将物流绿色韧性*GRL*与绿色效率*GEL*作为模型变量，通过数学软件求解，依据所得结果判断假设是否成立。哈肯模型回归结果如表4所示。

哈肯模型参数结果表明物流绿色韧性为序参量，各项参数为γ_1=−0.078 399、γ_2=0.492 709、a=−0.009 018、b=−1.104 002。演化方程为q_1=0.078 399q_1−0.020 206q_1^3。势函数为v=−0.039 199 5q_1^2+0.005 052q_1^4。令$\dot{q}_1=0$，求出3个解分别为$q_1'=1.969\,7$，$q_1''=-1.969\,7$，$q_1'''=0$。物流绿色韧性与效率都为正值，仅考虑$q>0$部分即可。求出系统产生新有序结构的稳定点为v(1.969 7，−0.076 1)。势函数曲线上任意一点与稳定点的距离决定该点所处的状态，由此得到系统状态评价函数公式为$d=\sqrt{(q-1.969\,7)^2+[(v(q)+0.076\,1)]^2}$。其中，$d$为协同值，$d$值大说明协同程度低，反之则协同程度高。再对$d$值进行正向化处理，即可得到2010—2022年长江经济带物流绿色韧性与效率复合系统的协同得分值。

2.3.2　协同演化的时空分异特征分析

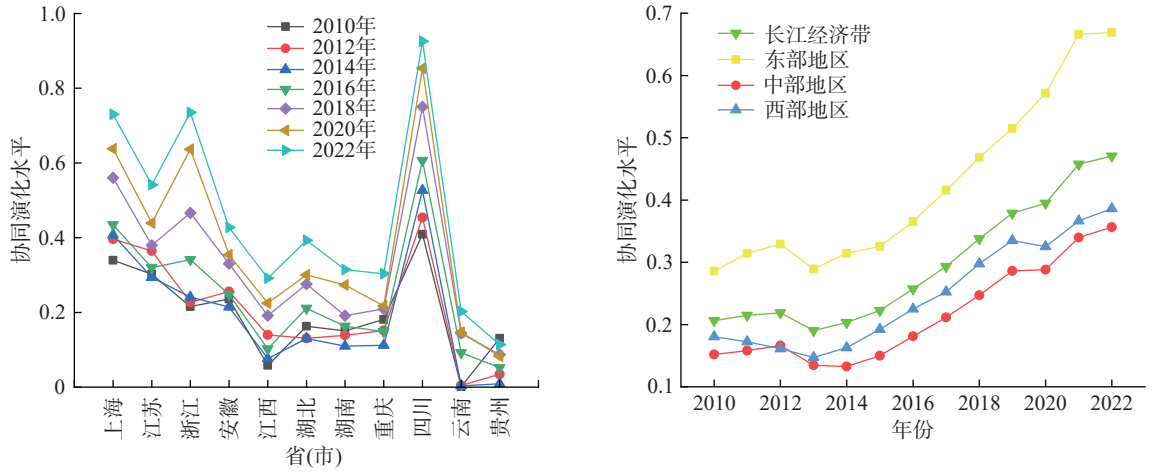
基于哈肯模型，计算长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化水平，物流绿色韧性与效率协同演化水平如图3所示，直观呈现其时序演变特征。观察图3可知，协同演化水平呈“V”型大幅提升，整体趋势向好。以2013年为分界点，可分为2个阶段：2010—2013年为波动下降期，协同均值约为0.208；2013—2022年为持续提升期，协同值从0.19快速升至0.471，增幅0.281，年均增幅约0.03。2010—2013年协同演化水平有小幅下降，主要原因在于此阶段绿色韧性与效率处于双双波动下降状态，在两者的共同作用下其协同演化效应波动减弱。2013年后，东、中、西部地区协同水平上升，整体协同效应增强。区域上，协同演化水平排序为

表4　哈肯模型回归结果

Tab.4　Regression results of Haken model

假设条件	演化方程	参数信息	结论
$q_1=GRL$	$q_1=1.078\,399^{***}q_{1(t-1)}+0.009\,018^{**}q_{1(t-1)}q_{2(t-1)}-0.009\,932^{***}$	$\gamma_1=-0.078\,399$ $\gamma_2=0.492\,709$ $a=-0.009\,018$ $b=-1.104\,002$	运动方程成立 绝热近似假设成立 *GRL*为序参量
$q_2=GEL$	$q_2=0.507\,291^{***}q_{2(t-1)}-1.104\,002^{**}q_{1(t-1)}q_{1(t-1)}+0.054\,67^{***}$		

注：***，**分别表示模型在1%，5%水平下显著。



a　各省(市)协同演化水平
a　Co-evolution level in each province (municipality)

b　整体及3个区域协同演化水平
b　Co-evolution level in all regions and in three regions

图3　物流绿色韧性与效率协同演化水平

Fig.3　Co-evolution level between green resilience and efficiency of logistics

中部地区<西部地区<东部地区，仍然存在阶梯性失衡现象，其中，东部地区物流绿色韧性与效率双高，协同效应长期呈高效增长态势。从各省(市)协同均值来看，四川0.644>上海0.491>浙江0.409>江苏0.376>安徽0.296>湖北0.226>重庆0.188>湖南0.186>江西0.155>云南0.086>贵州0.068。

沿用既有研究的做法[25]，采用自然断点法将11个省(市)协同演化水平聚类划分为4个阶段：高级协同[0.542，0.926)、较高级协同[0.317，0.542)、中级协同[0.176，0.317)、低级协同[0.001，0.176)，并选取2010年、2016年、2022年及2010—2022年4个观测期进行展示，物流绿色韧性与效率协同演化的空间分异特征如表5所示。结果显示，协同演化水平呈东部>西部>中部的空间格局。

（1）初级协同区域：云南、贵州、江西。云南的韧性和效率始终处于“双低”水平，因此协同水平长期在低位徘徊。江西的协同水平由初级升至中级，原因在于江西在“十三五”期间因政策推动物流业绿色建设，绿色韧性和效率水平均有所提高，两者的均衡发展逐步实现良性互动。贵州受制于地形与政策支持不足，系统响应能力弱，面对风险时表现出韧性不足和效率低下，致使物流系统内部要素流动紊乱，协同演化具有无序性，成为协同“低谷”。

（2）中级协同区域：安徽、湖北、湖南、重庆。重庆因交通衔接与节点布局问题制约物流系统恢复能力，导致其协同演化发展遭遇瓶颈，长期停滞于中级协同阶段。安徽表现为中韧性-高效率组合，表明物流业系统内要素流动失序，系统内要素多数流向“效率”一侧，对协同产生负向抑制。湖北、湖南与安徽同处中部地区，一方面，中部地区物流业在产业协同发展中扮演着“载体”一角，承接着东、西部地区高污染高排放产业，生态环境面临较大压力；另一方面，中部地区资源禀赋相较于东部地区并不突出，且受东部地区发达省(市)人才“虹吸效应”影响，人才流失严重，降低了协同系统演化的人才保障，由此形成低水平协同集聚区。

（3）较高级协同区域：江苏、浙江、上海。该区域凭借区位优势、政策支持与创新投入，实现韧性与效率双向驱动发展[26]。上海的协同水平由较高

表5　物流绿色韧性与效率协同演化的空间分异特征

Tab.5　Spatial differentiation characteristics of co-evolution of green resilience and efficiency of logistics

协同演化阶段	2010年	2016年	2022年	2010—2022年
初级协同	云南、贵州、湖南、湖北、江西	云南、贵州、湖南、江西、重庆	贵州	云南、贵州、江西
中级协同	江苏、安徽、浙江、重庆	湖北、安徽	云南、重庆、湖南、江西	重庆、湖北、湖南、安徽
较高级协同	上海、四川	江苏、浙江、上海	江苏、安徽、湖北	江苏、浙江、上海
高级协同	—	四川	四川、上海、浙江	四川

级跃升至高级，江苏、浙江则由中级持续上升，其中浙江2022年进入高级协同，但研究后期江苏物流增长动能不足，效率有所回落，与韧性的发展陷入失衡困境是制约其跃至高级协同阶段的主要因素。

（4）高级协同区域：四川。四川表现为“韧性驱动，效率滞后”型发展模式。其协同水平自2016年起持续居于高位，主要依托生态优势和完整产业体系所带来的强抵抗与恢复能力。然而，该协同实质为韧性对系统的单方面拉动，效率长期滞后，可能隐藏系统错配与低质量协同的风险，即韧性与效率的错配造成系统间的协同演化并不一定具有正向作用[21]。

2.4　协同演化水平的驱动因素分析

2.4.1　驱动因子选取

为探究长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化水平空间分异的驱动因素，参考既有研究[4, 9]，遵循指标选取的科学性、可操作性原则[27]，选取以下指标作为驱动因子。经济水平X1：为物流业提供关键资金支撑。政府支持力度X2：通过政策与资金引导绿色高效发展。物流需求水平X3：响应需求波动，提升资源配置与应变能力。物流创新能力X4：推动行业转型升级与效能提升。物流信息化水平X5：增强系统预警、协同与响应能力。产业结构X6：影响物流业的运作方式、需求结构及发展方向。工业化进程X7：刺激物流服务需求并推动技术创新与绿色转型。城镇化水平X8：集聚效应促进物流经济效益与绿色化进程。碳排放X9：直接反映物流活动环境影响，关联绿色效能评估。物流绿色韧性与效率协同驱动因子指标体系如表6所示。

表6　物流绿色韧性与效率协同驱动因子指标体系

Tab.6　Synergistic driving factor index system of green resilience and efficiency of logistics

驱动因子	指标解释
X1	人均GDP，万元/人
X2	地方财政交通运输支出占一般预算支出比重，%
X3	社会消费品零售总额，亿元
X4	R&D经费支出占GDP比重，%
X5	互联网宽带接入端口数，个
X6	第三产业增加值占GDP比重，%
X7	第二产业增加值占GDP比重，%
X8	城镇化率，%
X9	碳排放量，万t

2.4.2　单因子探测

以X1，X2，…，X9作为驱动因子，运用数学软件进行聚类处理，将物流绿色韧性与效率协同演化水平共同导入地理探测器模型，分别探测2010年、2016年、2022年和2010—2022年各驱动因子的驱动力q值，q值越大表明因子的驱动力越强，物流绿色韧性与效率协同驱动因子的探测结果如表7所示。

表7　物流绿色韧性与效率协同驱动因子的探测结果

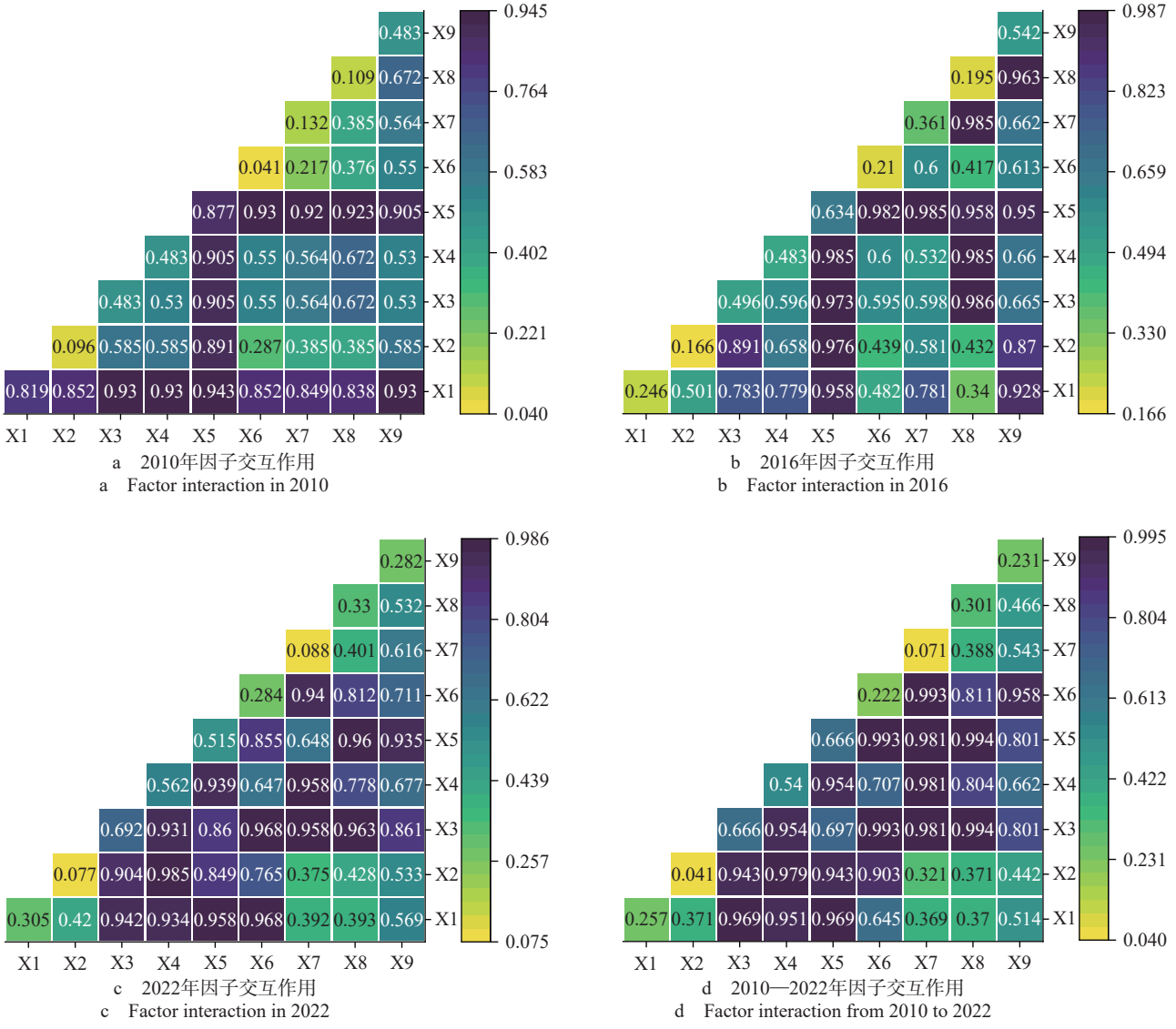
Tab.7　Detection results of synergistic driving factor of green resilience and efficiency of logistics

驱动因子	2010年		2016年		2022年		2010—2022年	
	q值	排序	q值	排序	q值	排序	q值	排序
X1	0.819	2	0.246	6	0.305	5	0.257	5
X2	0.096	8	0.166	9	0.077	9	0.041	9
X3	0.483	3	0.496	3	0.692	1	0.666	1
X4	0.483	3	0.483	4	0.562	2	0.540	3
X5	0.877	1	0.634	1	0.515	3	0.666	1
X6	0.041	9	0.210	7	0.284	6	0.222	7
X7	0.132	6	0.361	5	0.088	8	0.071	8
X8	0.109	7	0.195	8	0.330	4	0.301	4
X9	0.483	3	0.542	2	0.282	7	0.231	6

将排序前3位的作为主要驱动因子，其余均为次要驱动因子。结果显示，不同因子在不同时期对物流绿色韧性与效率协同演化水平的驱动力存在差异与共性。分时间点来看，X3与X5在整个样本期及所有年份均位列主要驱动因子。X1仅在2010年为主要驱动因子，q值高达0.819，而X4在2016年虽为次要驱动因子，但其q值大于0.4，仍具重要影响力。X9在2010和2016年作用突出，至2022年显著减弱。X2，X6，X7，X8在3个时间点及整个样本期始终为次要驱动因子。由此可知，物流需求水平、物流信息化水平和物流创新能力是协同演化水平空间分异的核心驱动因素。

2.4.3　交互因子探测

运用地理探测器中的交互探测器分析各驱动因子交互作用对协同演化水平空间分异的影响，交互探测结果如图4所示。因子间交互作用均呈双因子增强或非线性增强效应，驱动力显著高于单一因



a　2010年因子交互作用
a　Factor interaction in 2010

b　2016年因子交互作用
b　Factor interaction in 2016

c　2022年因子交互作用
c　Factor interaction in 2022

d　2010—2022年因子交互作用
d　Factor interaction from 2010 to 2022

图4　交互探测结果

Fig.4　Interactive detection results

子。从时间维度看，2010年，X1和X5与其他因子的交互作用显著增强驱动力，其中X1与X5交互作用最强，q值为0.943。2016年，X5与其他因子交互作用影响力较强，q值均超过0.9，其中X3与X5交互作用最强，q值为0.986。2022年，X2与X4共同作用的影响最强，q值为0.985。从整个样本期来看，X7，X8，X9与其他因子的交互作用较弱，q值多小于0.5；X3和X5分别与X8的交互作用最强，q值均为0.994。综上，因子间交互作用显著增强了对协同演化水平空间分异的影响力，尤其是物流需求水平X3和物流信息化水平X5，在与其他因子共同作用下影响最为显著。

3　结论

基于2010—2022年长江经济带11省(市)的面板数据，通过构建物流绿色韧性与效率评价指标体系，结合哈肯模型与地理探测器，揭示了二者的协同演化机制及驱动因素。主要结论如下。

（1）长江经济带物流绿色韧性水平在研究期内显著提升，表明系统抗风险与恢复能力增强；而物流绿色效率水平总体呈波动下降趋势，反映出资源错配与碳排放压力未得到有效缓解，两者呈现“韧性升、效率降”的背离趋势。

（2）物流绿色韧性为协同演化的序参量，主导

系统要素整合，支配系统的演化方向。协同演化水平整体呈上升趋势，但空间分异明显，形成中部地区<西部地区<东部地区的空间格局，其中四川因高韧性支撑的“伪高级协同”需警惕质量失衡。

（3）地理探测器探测结果表明，物流需求水平、信息化水平与创新能力是协同分异的主因，且因子交互作用均呈非线性增强效应。

参考文献：

[1] 郑金娥，关高峰，杜厚维．长江经济带省域物流业效率差异研究[J]. 统计与决策，2020，36(11)：110-113.

[2] ZHANG X F，HUANG Y. Spatial Evolution，Influencing Factors and Spillover Effects of Logistics Resilience in the Yangtze River Economic Belt[J]. PLoS One，2024，19(8)：e0303639.

[3] 余金艳，张英男，刘卫东，等．疫情冲击下全球跨境电商物流韧性的时空异质性研究[J]. 地理研究，2021，40(12)：3333-3348.
YU Jinyan，ZHANG Yingnan，LIU Weidong，et al. Research on Spatio-Temporal Heterogeneity of Global Cross-Border E-Commerce Logistics Resilience under the Impact of the COVID-19 Epidemic[J]. Geographical Research，2021，40(12)：3333-3348.

[4] 陈素月，王欢芳，傅贻忙，等．物流产业韧性水平测度及其影响因素研究[J]. 商业经济研究，2024(5)：84-90.

[5] 金凤花，杨白玫，马洪伟．长三角城市群物流韧性测算[J]. 统计与决策，2022，38(4)：102-105.

[6] XU C Y，LI J Y，ZHENG M Q，et al. Measurement of the Resilience of China’s Logistics Industry and Its Influencing Factors[J]. Sustainability，2024，16(13)：5517.

[7] 易　燕．我国物流产业绿色效率及区域空间特征：基于非期望产出的SBM模型[J]. 商业经济研究，2020(20)：104-107.

[8] 邓梦杰，李义华，吴露青，等．基于超效率SBM-GML指数模型的冷链物流绿色发展效率[J]. 中南林业科技大学学报，2024，44(4)：189-200.
DENG Mengjie，LI Yihua，WU Luqing，et al. Green Development Efficiency of Cold Chain Logistics Based on the Super SBM-GML Index Model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2024，44(4)：189-200.

[9] 何景师，王术峰，徐　兰．碳排放约束下我国三大湾区城市群绿色物流效率及影响因素研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(8)：30-36.
HE Jingshi，WANG Shufeng，XU Lan. Research on the Efficiency and Influencing Factors of Green Logistics in Three Bay-Area City Clusters under the Constraint of Carbon Emission[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(8)：30-36.

[10] 孟珊珊，刘维忠，孙　宇．生鲜农产品绿色物流效率空间差异及影响因素[J]. 商业经济研究，2024(19)：75-79.

[11] 徐超毅，齐　豫．我国区域物流业绿色发展效率测度和空间分析：以华东地区为例[J]. 生态经济，2023，39(4)：81-88.
XU Chaoyi，QI Yu. Measurement and Spatial Analysis of Green Development Efficiency of Regional Logistics Industry in China：Taking East China as an Example[J]. Ecological Economy，2023，39(4)：81-88.

[12] 李敏杰，陈毅辉．中国物流业绿色韧性的时空演变及空间关联网络结构[J]. 地理与地理信息科学，2024，40(4)：48-56.
LI Minjie，CHEN Yihui. Spatio-Temporal Evolution and Spatial Correlation Network Structure of Green Resilience of Logistics Industry in China[J]. Geography and Geo-Information Science，2024，40(4)：48-56.

[13] 金　鑫，黄　菲．绿色物流发展韧性测度及其耦合关系分析：以长江经济带为例[J]. 商业经济研究，2023(6)：73-77.
JIN Xin，HUANG Fei. Analysis of the Resilience Measurement of Green Logistics Development and Its Coupling Relationship：Take the Yangtze River Economic Belt as an Example[J]. Journal of Commercial Economics，2023(6)：73-77.

[14] 石思文，饶小玉，韩　瑜，等．广东省沿海港口物流效率评价及影响因素研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(4)：39-47.
SHI Siwen，RAO Xiaoyu，HAN Yu，et al. Assessment of Coastal Port Logistics Efficiency and Analysis of Influencing Factors in Guangdong Province[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(4)：39-47.

[15] 马　飞，胡江艳，孙启鹏，等．中国省际物流业碳排放绩效测度及驱动因素研究[J]. 生态经济，2021，37(9)：27-33，39.
MA Fei，HU Jiangyan，SUN Qipeng，et al. Carbon Emission Performance Measurement and It’s Driving Factors of China’s Provincial Logistics Industry[J]. Ecological Economy，2021，37(9)：27-33，39.

[16] 李泽明，刘　兵．中国式产业链现代化水平的统计测度、

区域差异及动态演进[J]. 统计与决策，2024，40(8)：89-93.
LI Zeming，LIU Bing. Statistical Measurement，Regional Differences and Dynamic Evolution of Chinese-Style Industrial Chain Modernization Level[J]. Statistics and Decision，2024，40(8)：89-93.

[17] 范在予，易筱雅，耿　虹．黄河三角洲生态效率与城镇化效率的时空耦合研究：基于2008—2017年面板数据的实证分析[J]. 城市问题，2021(3)：17-28.
FAN Zaiyu，YI Xiaoya，GENG Hong. A Spatial-Temporal Coupling Study on Urbanization Efficiency and Eco-Efficiency in the Yellow River Delta：An Empirical Study Based on Panel Data from 2008 to 2017[J]. Urban Problems，2021(3)：17-28.

[18] 郑玉雯，薛伟贤．丝绸之路经济带沿线国家协同发展的驱动因素：基于哈肯模型的分阶段研究[J]. 中国软科学，2019(2)：78-92.
ZHENG Yuwen，XUE Weixian. The Driving Forces of Regional Synergistic Development in the Silk Road Economic Belt：Empirical Study by Stages Based on Haken Model[J]. China Soft Science，2019(2)：78-92.

[19] 孙才志，孟程程．中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J]. 地理科学，2020，40(12)：2094-2104.
SUN Caizhi，MENG Chengcheng. Evaluation of the Development Coordination Relationship between Resilience and Efficiency of Regional Water Resources System in China[J]. Scientia Geographica Sinica，2020，40(12)：2094-2104.

[20] 吴小妮，管卫华，张　惠，等．中国省域经济效率与经济韧性耦合特征及驱动因素[J]. 地理与地理信息科学，2024，40(2)：116-125.
WU Xiaoni，GUAN Weihua，ZHANG Hui，et al. Spatio-Temporal Coupling Characteristics and Driving Factors of Provincial Economic Efficiency and Economic Resilience in China[J]. Geography and Geo-Information Science，2024，40(2)：116-125.

[21] 韩增林，朱文超，李　博．中国海洋渔业经济韧性与效率协同演化研究[J]. 地理研究，2022，41(2)：406-419.
HAN Zenglin，ZHU Wenchao，LI Bo. Synergistic Analysis of Economic Resilience and Efficiency of Marine Fishery in China[J]. Geographical Research，2022，41(2)：406-419.

[22] 欧阳慧，阳国亮．基于Haken模型的区域协同发展测度方法[J]. 统计与决策，2019，35(12)：9-13.
OUYANG Hui，YANG Guoliang. Measurement Method of Regional Synergetic Development Based on Haken Model[J]. Statistics and Decision，2019，35(12)：9-13.

[23] 王劲峰，徐成东．地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，2017，72(1)：116-134.
WANG Jinfeng，XU Chengdong. Geodetector：Principle and Prospective[J]. Acta Geographica Sinica，2017，72(1)：116-134.

[24] 张立国，李　东，周德群．中国物流业二氧化碳排放绩效的动态变化及区域差异：基于省级面板数据的实证分析[J]. 系统工程，2013，31(4)：95-102.
ZHANG Liguo，LI Dong，ZHOU Dequn. Dynamic Carbon Dioxide Emissions Performance and Regional Disparity of Logistics Industry in China：The Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data[J]. Systems Engineering，2013，31(4)：95-102.

[25] 周　霞，王　佳．中国省域经济韧性与生态效率测度及其协同演化分析[J]. 干旱区地理，2024，47(2)：319-331.
ZHOU Xia，WANG Jia. Measurement and Synergistic Evolution Analysis of the Economic Resilience and Eco-Efficiency of Provincial Regions in China[J]. Arid Land Geography，2024，47(2)：319-331.

[26] 谯熙康，陈　斌，黄福友．组态视角下我国低碳物流效率分析及提升路径研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：61-72.
QIAO Xikang，CHEN Bin，HUANG Fuyou. Efficiency Analysis and Improvement Path of Low-Carbon Logistics in China from the Perspective of Configuration[J]. Railway Logistics，2025，43(5)：61-72.

[27] 郭晓峰，侯德兵，刘海红．基于熵权-耦合协调度模型的湖南省物流业与制造业协同发展研究[J]. 铁路物流，2025，43(12)：61-67.
GUO Xiaofeng，HOU Debing，LIU Haihong. Research on Coordinated Development of Hunan Province's Logistics and Manufacturing Industries Based on Entropy Weight-Coupling Coordination Degree Model[J]. Railway Logistics，2025，43(12)：61-67.

(责任编辑　李丹丹)