

基于 EKC 理论的滨海湿地水环境质量与经济增长关系及驱动因素分析

黄 莉¹,雷珂凡¹,尹熙琛²,万旭哲²,张涵禹²,王 伟²

(1. 河海大学公共管理学院; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要:聚焦东亚-澳大利西亚迁飞通道的滨海湿地,选取江苏沿海 3 市(盐城、连云港、南通)和澳大利亚昆士兰州、新西兰怀卡托地区、泰国与柬埔寨为研究区,基于 1994—2023 年水质与社会经济数据构建 EKC 模型,识别了水环境质量与经济增长的关联特征,结合 Tapio 脱钩指数开展了二者动态耦合关系评估,并结合主成分分析与敏感性分析揭示其内在驱动机制。结果表明:EKC 曲线形态区域分异显著,昆士兰州与怀卡托地区呈倒 U 形,水环境治理进入稳定期,江苏沿海 3 市为倒 N 形,现阶段处于转型期,泰国、柬埔寨曲线波动剧烈,生态环境基础较为薄弱;区域脱钩状态差异明显,昆士兰州与怀卡托地区呈负脱钩特征,江苏沿海 3 市自 2010 年后逐步转为强正脱钩状态;泰国、柬埔寨水环境质量与经济增长关系稳定性较差,水质恶化与经济扩张同步;驱动机制呈梯度特征,高收入地区以产业结构与环境治理投入为主导,中等收入地区受教育水平与经济结构协同影响,低收入地区的主导影响因素为人口密度与基础设施建设;人口密度与第二产业占比是低收入地区总磷与 pH 变化的主要触发因素,高收入地区水环境指标则受多因子协同稳定作用。

关键词:滨海湿地;水环境质量;经济增长;脱钩分析;EKC 模型;东亚-澳大利西亚迁飞通道

Analysis on relationship between water environmental quality and economic growth and its driving factors of coastal wetlands based on EKC theory//Huang Li¹, Lei Kefan¹, Yin Xichen², Wan Xuzhe², Zhang Hanyu², Wang Wei²(1. School of Public Administration, Hohai University; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: Focusing on coastal wetlands along the East Asian-Australasian Flyway, this study takes three coastal cities in Jiangsu Province (Yancheng, Lianyungang and Nantong), Queensland of Australia, Waikato Region of New Zealand, Thailand and Cambodia as research areas. Based on water quality and socio-economic data from 1994 to 2023, an environmental Kuznets curve (EKC) model is constructed to identify the correlation characteristics between water environment and economic growth. Tapio decoupling index is adopted to evaluate their dynamic coupling relationship, and principal component analysis and sensitivity analysis are combined to reveal the internal driving mechanisms. The results show that shapes of EKC curves present prominent regional differentiation. Queensland and Waikato Region feature inverted U-shaped curves with water environmental governance entering a stable stage; the three coastal cities of Jiangsu exhibit inverted N-shaped curves and are currently in a transition period; Thailand and Cambodia witness drastically fluctuating curves with fragile ecological and environmental foundations. There are distinct disparities in regional decoupling states: Queensland and Waikato Region show negative decoupling, while the three coastal cities of Jiangsu have gradually shifted to strong positive decoupling since 2010. Thailand and Cambodia possess unstable decoupling relations, where water quality deterioration occurs simultaneously with economic expansion. Driving mechanisms display gradient characteristics: industrial structure and environmental governance investment dominate high-income regions; education level and economic structure jointly affect middle-income areas; population density and infrastructure construction act as leading influencing factors in low-income areas.

Key words: coastal wetlands; water environmental quality; economic development; decoupling analysis; environmental Kuznets curve model; the East Asian-Australasian Flyway

基金项目:国家自然科学基金委员会-联合国环境规划署可持续发展国际合作科学计划重点项目(42361144873)

作者简介:黄莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事滨海湿地可持续发展研究。E-mail:lily8214@126.com

通信作者:王伟(1979—),男,教授,博士,主要从事滨海湿地可持续发展研究。E-mail:13813826667@163.com

东亚-澳大利西亚迁飞通道的滨海湿地是衔接候鸟繁殖地与越冬地的关键生态节点,不仅可为水生生物提供栖息地^[1],还在防止海岸线侵蚀与碳封存方面发挥了重要作用。近年来,沿海城市化快速推进,导致滨海湿地面临农业径流污染、填海造地、工业污染物排放及水产养殖扩张等多重压力,湿地面积持续萎缩、生态功能不断退化^[2-3],其中港口工程建设对湿地丧失的驱动效应尤为显著^[4-5]。例如:地中海湿地受农业开发与城市扩张的影响,1990—2013 年物种数量下降了 15%^[6];中国近岸 14.5 万 km² 浅海水域水质未达标^[7],充分凸显了迁飞通道滨海湿地生态保护的严峻形势与迫切需求。裴理鑫等^[8]研究表明,经济活动强度与水质演变密切相关,工业化推进与城市扩张通常会加剧水体营养盐输入,诱发富营养化、溶解氧含量降低等水环境问题。因此,分析经济增长与水环境质量的关系^[9],成为开展滨海湿地生态保护的议题。尽管已有研究使用遥感技术、空间计量等方法探讨了滨海湿地与人类活动的关系^[10-13],但针对滨海湿地水环境质量与经济增长之间的关系,尤其是多区域对比研究,成果仍然较为匮乏。

环境库兹涅茨曲线(EKC)理论为分析经济增长与环境污染关系提供了重要框架^[14],已有实证显示,不同地区的经济增长与水环境质量呈现倒 U 形、U 形和 N 形等多种曲线形态^[15-17]。脱钩理论可作为 EKC 模型的有效补充,能够直观表征经济增长与污染排放的脱钩关系^[18-19]。然而,现有研究多集中于温室气体排放等特定污染物,缺乏面向滨海湿地水环境质量与经济增长之间的实证对比^[20-23]。

本文选取东亚-澳大利西亚迁飞通道江苏沿海 3 市(盐城、连云港、南通)、澳大利亚昆士兰州、新西兰怀卡托地区、泰国与柬埔寨 5 个典型区域,运用 EKC 方法与脱钩理论,探讨滨海湿地水环境质量与经济增长的关系,并结合主成分分析与敏感性分析方法,探讨社会经济因素对水质的影响路径。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

滨海湿地具有显著的跨国界保护属性,东亚-澳大利西亚迁飞通道串联起沿线多个地区的滨海湿地。候鸟是表征生态系统健康的指示物种,对生境变化敏感度极高,因此选择东亚-澳大利西亚迁飞通道上 5 个发展水平各异的滨海湿地为研究区,分析水环境质量与经济增长的关系及其影响因素。各研究区空间分布及其与东亚-澳大利西亚迁飞通道的关系如图 1 所示(审图号 GS(2020)4619 号)。

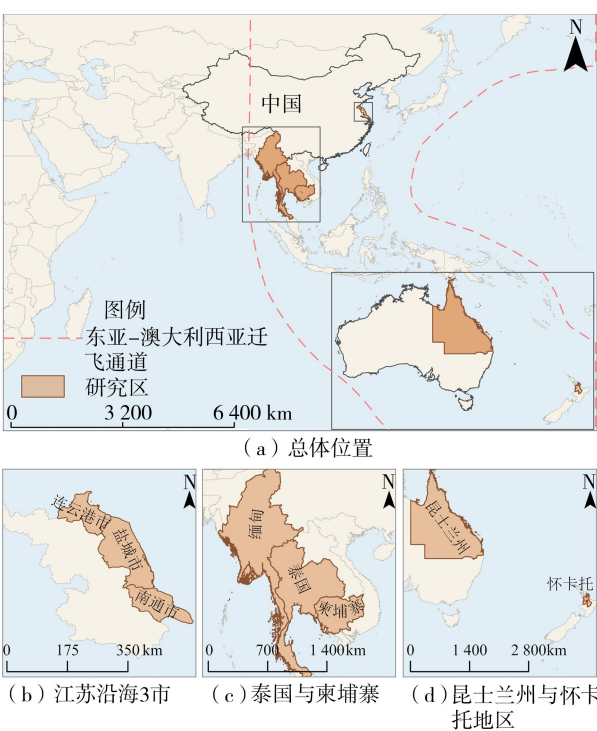


图 1 东亚-澳大利西亚迁飞通道及研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of East Asian-Australasian Flyway and location of study area

各研究区为候鸟迁徙的关键停歇地与觅食地,生态价值突出。然而,江苏沿海 3 市自 20 世纪 90 年代起大规模实施围垦、港口与工业园区建设,大量滩涂湿地转为建设用地或水产养殖塘,严重影响了水质稳定性;泰国与柬埔寨则受制于工业点源与农业面源双重污染,且环境治理能力相对薄弱;澳大利亚与新西兰虽然治理体系较为完善,农业与城市的扩张仍对湿地构成持续威胁,湿地保护与水质修复工作需长期开展。

1.2 数据来源

收集 1994—2023 年研究区社会经济与水质指标数据。水质指标包括直排总磷(TP)、总氮(TN)、溶解氧(DO)与 pH^[24]。江苏沿海 3 市的数据来自地方统计年鉴与 Scidata 平台,泰国与柬埔寨的数据来自清莱与昌瓦尔监测站,怀卡托地区数据由 NIWA 提供,昆士兰州数据则由昆士兰州统计局与国家统计局联合发布。社会经济数据包括人口密度、高等教育人数、第二产业增加值占 GDP 比重与人均 GDP,均来自国家统计年鉴、CEIC 数据库与世界银行。所有数据均统一为年度数据,并进行了归一化处理,以确保跨区域分析的可比性和一致性。

2 研究方法

2.1 EKC 模型的构建

相关学者尝试从不同的角度解释经济增长和水

环境质量之间的关系。内生增长理论认为,技术进步推动了企业资源利用效率的提升,环境质量得到改善;经济结构说认为,规模经济导致环境污染的增加,同时也促使经济结构调整和产业升级^[25]。本文根据 1991 年 Grossman 和 Krueger 提出的 EKC 理论^[26],研究水环境质量与经济增长之间的关系。为识别二者之间可能存在的非线性关系,选取的 EKC 公式为^[27]:

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X + \beta_2 (\ln X)^2 + \beta_3 (\ln X)^3 + \varepsilon \tag{1}$$

式中: Y 为水质指标,即直排海 TP、TN、DO、pH 等指标值; X 为人均 GDP; β_0 为常数项; β_1 、 β_2 、 β_3 分别为一次、二次、三次项系数; ε 为随机误差项。

泰国和柬埔寨的拟合结果显示,水质指标与人均 GDP 之间同样存在较明显的统计关联。泰国 DO、TN、pH 和直排 TP 的拟合优度分别为 0.963、0.809、0.810、0.727,均通过显著性检验;柬埔寨 DO、TN、pH 和直排 TP 的拟合优度分别为 0.941、0.897、0.910、0.786,拟合结果整体较好。

将水质指标和人均 GDP 分别取对数后做散点图,发掘其潜在相关关系;再利用 SPSS 软件对 EKC 基本函数型(一次函数、二次函数、三次函数、指数函数、对数函数和复合函数等)进行回归曲线估计。回归结果表明,各水质指标以三次函数曲线拟合最好^[28],故选用三次函数曲线估计模型,拟合结果见表 1。可见,研究区水质指标与人均 GDP 之间的相关性显著($R^2>0.7$, $p<0.001$), F 检验值符合要求, p 均在 10^{-7} 以下,EKC 模型检验通过。

2.2 脱钩模型与类型

脱钩分析能够动态阐释两个及以上要素间关联关系的演变特征^[29],现有相关研究大多选用 Tapio 弹性系数作为分析方法^[30],本文采用的 Tapio 脱钩模型具备更强的适用性,该模型不受数据量纲影响,测算结果更为稳定。将人均 GDP 与水质指标的脱钩弹性系数 e 定义为脱钩指数:

$$e = \frac{(Y_t - Y_{t-1})/Y_{t-1}}{(X_t - X_{t-1})/X_{t-1}} \tag{2}$$

式中: X_t 、 X_{t-1} 分别为第 t 年和上一年的人均 GDP; Y_t 、 Y_{t-1} 分别为第 n 年和上一年的水质指标年度观测值。

根据人均 GDP 变化率、水质指标变化率的方向及脱钩指数大小,将脱钩状态划分为 8 种类型。本文以 0.8 和 1.2 作为脱钩弹性系数判别阈值,当人均 GDP 增长而水质指标下降时为强脱钩;当二者均增长且 $0<e<0.8$ 时为弱脱钩;当二者均增长且 $0.8\leq e\leq 1.2$ 时为扩张连接;当二者均增长且 $e>1.2$

表 1 研究区人均 GDP 与水质指标拟合结果
Table 1 Fitting results of per capita GDP and water quality indicators in study area

区域	水质指标	R^2	F 检验值	p
江苏沿海 3 市	DO	0.862	43.36	2.01×10^{-6}
	TN	0.702	21.97	2.12×10^{-5}
	pH	0.880	52.28	7.42×10^{-7}
	直排 TP	0.739	25.92	1.04×10^{-5}
昆士兰州	DO	0.668	17.50	2.01×10^{-6}
	TN	0.938	131.04	8.19×10^{-16}
	pH	0.746	25.52	6.55×10^{-8}
	直排 TP	0.734	23.88	1.23×10^{-7}
怀卡托地区	DO	0.784	31.50	8.23×10^{-9}
	TN	0.860	53.36	3.02×10^{-11}
	pH	0.746	81.89	2.26×10^{-13}
	直排 TP	0.904	90.54	6.92×10^{-14}
泰国	DO	0.963	321.61	1.09×10^{-18}
	TN	0.809	79.46	1.55×10^{-6}
	pH	0.810	80.24	1.48×10^{-6}
	直排 TP	0.727	23.16	3.1×10^{-7}
柬埔寨	DO	0.941	231.82	1.03×10^{-8}
	TN	0.897	149.36	2.46×10^{-7}
	pH	0.910	176.88	1.79×10^{-7}
	直排 TP	0.786	31.816	7.4×10^{-9}

时为扩张负脱钩。当人均 GDP 下降时,则划分为强负脱钩、弱负脱钩、衰退连接和衰退脱钩。

2.3 主成分分析与敏感性分析

主成分分析是经典的降维统计方法,可将多个高度相关的原始变量转换为少量互不相关的主成分,以此识别影响滨海湿地水质演变的驱动因素^[31]。采用 Z -score 标准化处理数据,计算各主成分的方差贡献率,并选取累计方差贡献率超过 85% 的主成分参与后续分析。基于主成分载荷矩阵进一步求解各指标的综合权重,并据此识别水质变化的主要驱动机制。

此外,为探究各驱动因素对湿地水质变化的年度响应程度,引入敏感性分析法,构建年度敏感性指数:

$$s_{kj} = \frac{\Delta B_k/B_k}{\Delta F_{kj}/F_{kj}} \tag{3}$$

式中: s_{kj} 为第 j 个解释变量在第 k 年的敏感性指数; B_k 、 ΔB_k 分别为第 k 年滨海湿地环境状态指标(如水质指标质量浓度均值)及其变化量; F_{kj} 、 ΔF_{kj} 分别为第 k 年第 j 个解释变量的观测值及其变化量。 s_{kj} 越大,说明湿地系统对该因素的响应越显著。

3 实证结果与分析

3.1 EKC 曲线拟合结果

a. 江苏沿海 3 市(图 2,图中标的为拐点年份) DO 质量浓度与 pH 的 EKC 曲线呈倒 U 形,拐点分

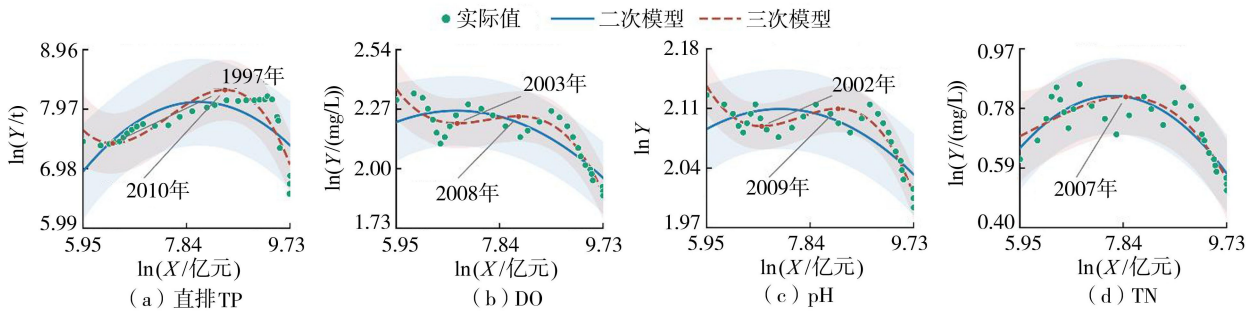


图2 江苏沿海3市EKC拟合结果

Fig. 2 EKC fitting results for three coastal cities of Jiangsu Province

别出现在 2008 年和 2009 年。TN 质量浓度在 2007 年达到峰值后持续下降,直排 TP 质量浓度虽然在 2010 年出现下降趋势,但波动较大,整体呈倒 N 形。南通水质改善较早,连云港水质波动较大,盐城在生态政策的影响下水质变化较平稳。

b. 昆士兰州和怀卡托地区(图 3、图 4)表现出典型的倒 U 形曲线。TN 质量浓度在 2010 年左右达到峰值, pH 与 DO 质量浓度分别在 2009 年和 2007 年发生转折,TP 主要受农业和水产养殖影响,波动较大,治理进程较慢。其中怀卡托地区水质改善较为稳定, TN 质量浓度稳步下降, pH 与 DO 质量浓度逐步改善, TP 排放量维持平稳。

c. 泰国与柬埔寨(图 5、图 6)表现出不规则的曲线。泰国的 TP 排放量与 DO 质量浓度在 2005 年左右出现转折, 2016 年再次达到峰值, 显示治理效果的波动。 pH 与 TN 曲线不稳定, 水质改善趋势不

明显。柬埔寨的水质指标波动较大, DO 质量浓度自 2014 年起略有改善, pH 自 2017 年趋稳, TN 质量浓度自 2016 年下降, TP 排放量波动明显。

可见,昆士兰州与怀卡托地区的水质改善为先污染、后改善模式,而江苏沿海 3 市正处于污染控制与治理并进阶段,水质变化的时间差异反映出治理体系的调整期。泰国与柬埔寨水质变化幅度大,治理进程仍不稳定,受到政策执行等因素的影响。

综合来看,早期区域经济增长先是以牺牲环境为代价,当经济水平提升至一定阶段后,环境保护力度逐步加大,达到 EKC 拐点后,环境质量随着经济增长整体趋于向好,且经济发达区域通常更早抵达 EKC 拐点。以 TP 排放量为例,怀卡托地区近 30 年持续回落;昆士兰州于 2014 年达排放峰值后呈持续下降趋势;江苏沿海 3 市则在 2019 年达峰后整体呈下降趋势。

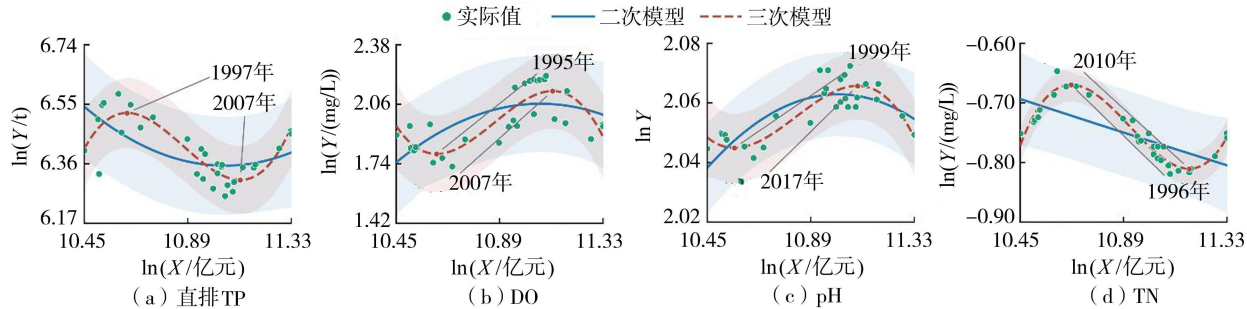


图3 昆士兰州 EKC 拟合结果

Fig. 3 EKC fitting results for Queensland

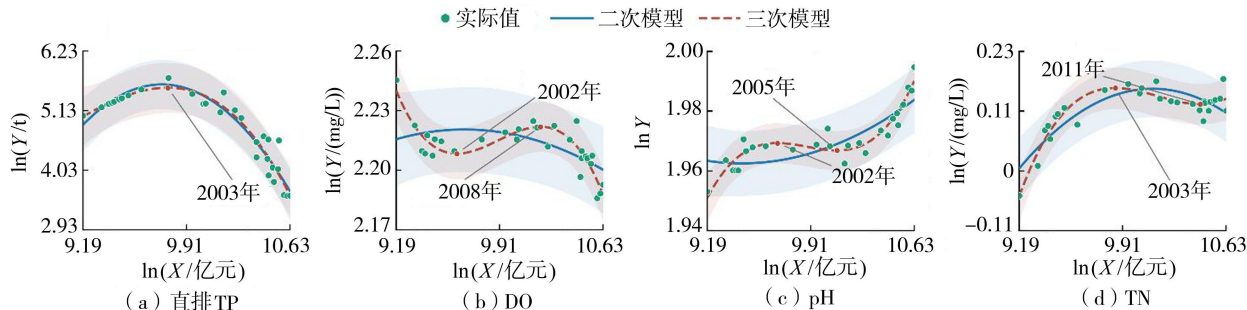


图4 怀卡托地区 EKC 拟合结果

Fig. 4 EKC fitting results for Waikato

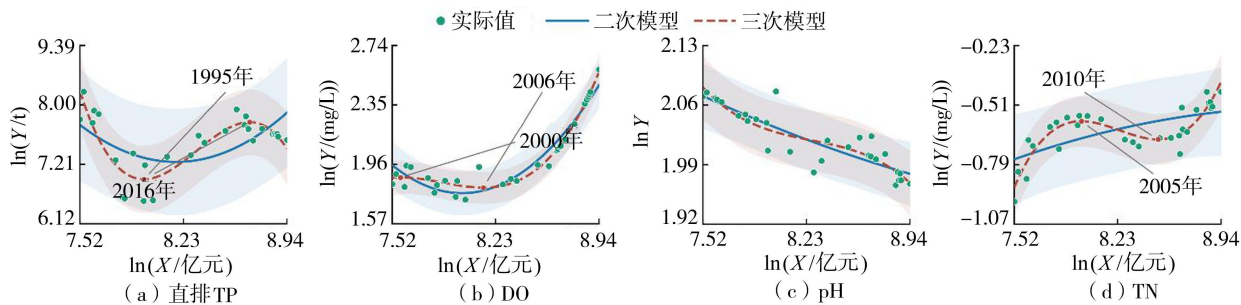


图 5 泰国 EKC 拟合结果

Fig. 5 EKC fitting results for Thailand

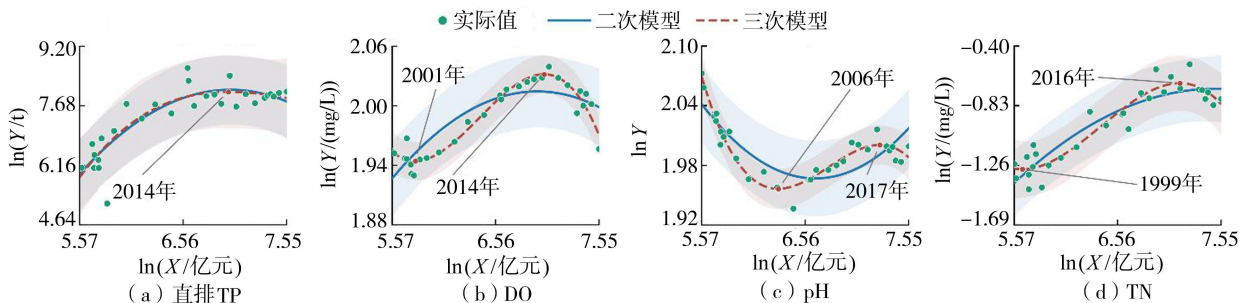


图 6 柬埔寨 EKC 拟合结果

Fig. 6 EKC fitting results for Cambodia

3.2 各区域脱钩状态

图 7 为研究区主要水质指标与人均 GDP 之间的脱钩状态热力图,不同发展阶段水质指标与经济发展的关系呈现明显的分阶段特征。

a. 江苏沿海 3 市由污染排放与经济增长同步逐步转向脱离。1995—2010 年 TP 排放量与人均 GDP 基本同步,脱钩类型以弱脱钩和扩张负脱钩为主;2010 年后,TP 排放量与经济增长明显脱钩,TN

质量浓度整体呈强脱钩状态,pH 和 DO 质量浓度在波动中逐渐改善。

b. 怀卡托地区的水质指标脱钩状态较为复杂,TP 排放量以弱负脱钩为主,pH 由强负脱钩逐步转为弱脱钩,DO 质量浓度随气候和经济波动而起伏,TN 质量浓度对农业压力反应显著。

c. 昆士兰州 TP 同样表现为弱负脱钩,排放量下降与经济增长并存,其余指标整体改善,反映出经

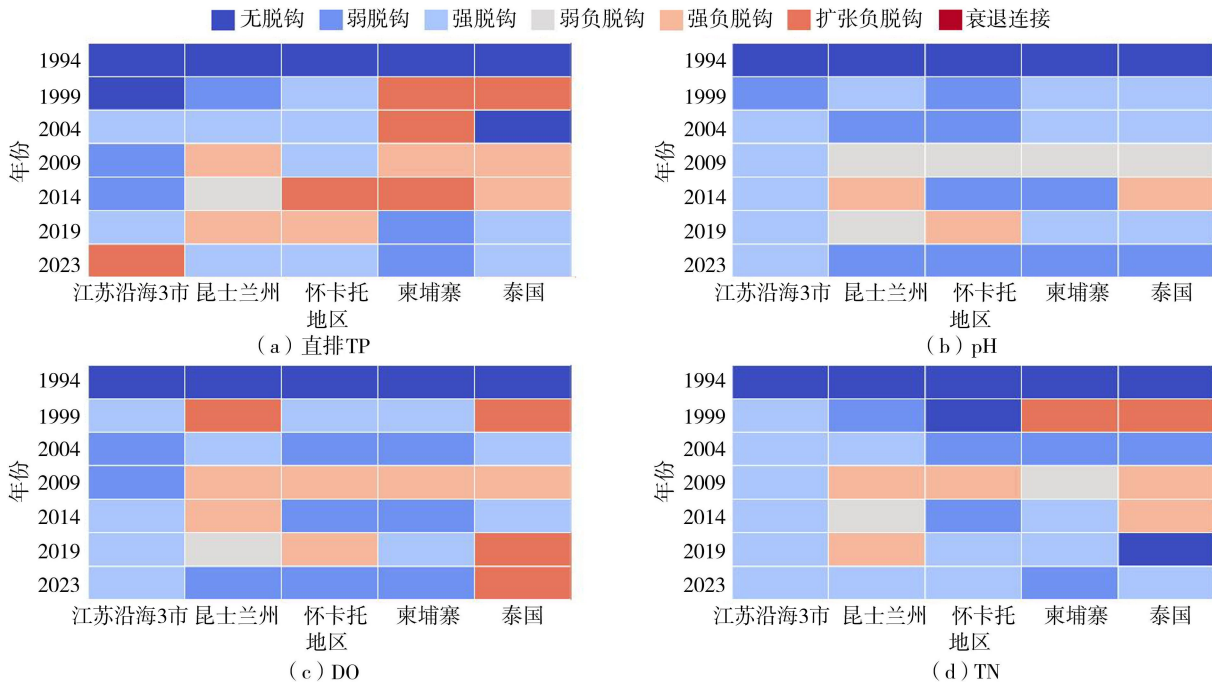


图 7 研究区脱钩分析结果

Fig. 7 Decoupling analysis results of study area

济恢复期的治理成效。

d. 泰国水质指标与经济增长的脱钩状态波动较大,TP 排放量由同步扩张转为弱脱钩,但稳定性不足,pH 受经济和自然因素共同驱动,DO 质量浓度在经济扩张期与污染负荷同步增加,TN 质量浓度在农业干扰下长期处于扩张负脱钩状态。

e. 柬埔寨水质指标整体波动明显,TP 排放量与人均 GDP 多表现为扩张负脱钩,pH 脱钩状态变化频率高,TN 质量浓度变化不稳定,表明治理成效尚未稳固。

总体上,5 个研究区水质指标与经济发展脱钩状态差异明显,昆士兰州和怀卡托地区已基本实现水质指标与经济增长的有效脱钩,江苏沿海 3 市同步推进污染管控与水环境治理,泰国、柬埔寨的水质指标波动特征更为突出,易受宏观经济波动和政策执行力度的影响。

3.3 各区域主成分分析与敏感性分析结果

为识别滨海湿地水质变化的主要影响因素,基于研究区 1995—2023 年的社会经济指标开展主成分分析。结果显示,各区域第一主成分的贡献率均超过 80% (江苏沿海 3 市为 84.79%,昆士兰州 82.63%,怀卡托地区 80.51%,泰国 85.22%,柬埔寨 83.96%),表明水质变化主要由经济因素系统性驱动。第一主成分主要由人均 GDP、人口密度和第二产业增加值占 GDP 比重组成,反映经济发展水平、空间开发强度与产业结构对水质变化的综合作用。在江苏沿海 3 市、昆士兰州和怀卡托地区,第二产业增加值占 GDP 比重的权重较高,说明经济扩张与产业活动是主要影响路径;而在泰国与柬埔寨,人口密度和教育因素贡献更大,显示生活源压力与环境治

理能力更为关键。主成分构成的区域差异揭示出水质变化机制随发展阶段和治理基础的演化逻辑。

不同区域的主导因素存在显著差异(表 2)。江苏沿海 3 市中,高等教育人数、第二产业增加值占 GDP 比重共同构成主要影响力,反映出教育水平和产业结构优化对水质改善的重要作用;昆士兰州与怀卡托地区以人均 GDP 与第二产业增加值占 GDP 比重为主导,体现经济增长与工业格局对水环境的复合压力;而在泰国与柬埔寨,人口密度始终占据主导地位,显示生活源排放与基础设施负荷是水质变化的重要驱动因素。总体来看,尽管各地主导因素有所不同,但水质变化都与社会经济活动密切相关。经济越发达、基础设施越完善的地区,水质就越稳定;而发展水平较低的地区则更容易受到人口增长、生活污染和治理能力不足的影响,水质波动大,改善过程不稳定。

图 8 为研究区水质指标对不同社会经济因素的敏感度。结果显示,各地区在敏感性响应上存在显著差异,呈现出与发展阶段相匹配的主导特征。进一步来看,该差异主要源于各国发展水平和治理能力的不同。经济水平较高的国家,更容易建立较完善的水环境管理体系,水质变化受多个因素共同影响;而经济水平较低的国家,治理体系尚不健全,往往表现为水质对某一因素反应特别强烈,缺乏整体协调。

在社会经济因素方面,江苏沿海 3 市水质变化对教育与收入水平表现出较强响应,反映出区域水环境治理已逐步由产业转型向结构优化与公共投入协同推进。怀卡托地区和昆士兰州对产业结构与人口格局均较敏感,呈现多因素协同作用下的稳定响应特征,说明具备一定治理基础的地区,能够更有效

表 2 研究区社会经济因素对水质指标变化贡献率

水质指标		贡献率/%				
		江苏沿海 3 市	昆士兰州	怀卡托地区	泰国	柬埔寨
直排 TP	高等教育人数	23.00	23.33	24.64	24.62	27.12
	人均 GDP	23.50	25.91	27.40	8.19	23.63
	人口密度	25.40	26.44	27.94	47.08	23.98
	第二产业增加值占 GDP 比重	28.10	24.32	25.70	20.10	25.27
DO	高等教育人数	20.90	20.16	20.00	26.42	27.54
	人均 GDP	22.60	28.57	27.17	25.53	22.27
	人口密度	31.40	25.13	23.91	22.36	27.68
	第二产业增加值占 GDP 比重	21.10	26.14	24.92	25.69	22.52
pH	高等教育人数	19.90	15.95	16.67	32.50	22.86
	人均 GDP	20.70	26.11	27.28	29.17	14.76
	人口密度	19.80	32.15	33.59	34.85	32.96
	第二产业增加值占 GDP 比重	22.70	25.78	26.91	3.48	29.42
TN	高等教育人数	31.20	22.48	19.53	32.66	28.10
	人均 GDP	18.30	34.84	30.37	18.74	25.24
	人口密度	23.00	29.71	25.93	36.96	24.83
	第二产业增加值占 GDP 比重	27.50	12.98	11.26	11.64	21.83

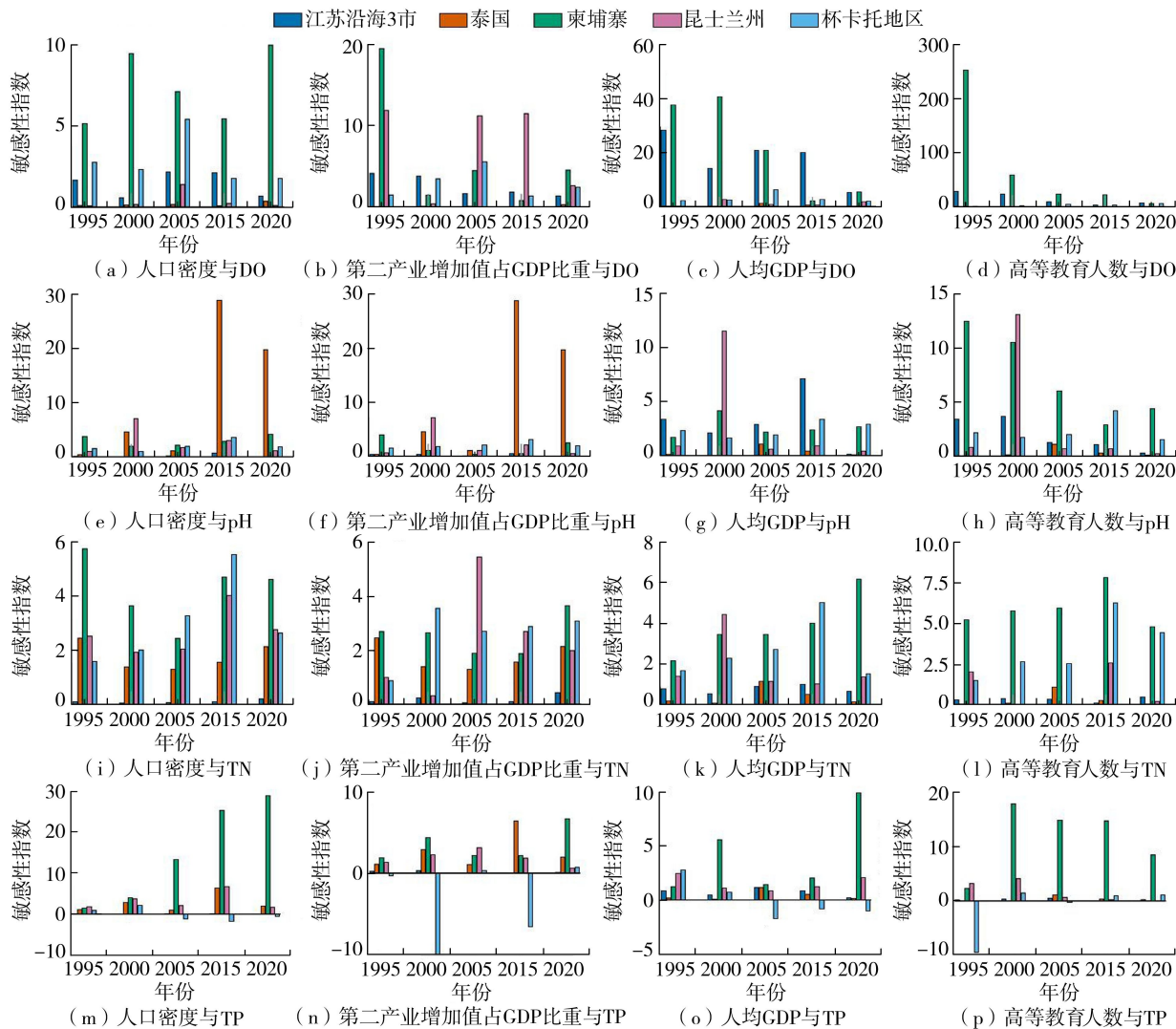


图8 研究区水质指标对社会经济因素的敏感度

Fig. 8 Sensitivity of water quality indicators to socio-economic factors in study area

地同时应对多方面的环境压力。

相比之下,泰国和柬埔寨的水质指标对人口密度变化更为敏感,尤其TP与pH等指标呈现阶段性强化趋势,说明城市扩张与基础设施压力是其水质波动的主要来源。该地区水质变化不稳定,短时段内各指标敏感因素易发生变化,水质改善尚依赖政策干预而非结构性转型。可见,泰国和柬埔寨水环境治理仍处于初期阶段,通过项目式干预可解决突出问题,但难以形成持续有效的整体管控机制。

总体来看,不同发展阶段的地区在滨海湿地水质变化中展现出显著差异:发达地区治理体系成熟,水质变化由多因素共同调控;中等收入地区处于多元结构逐步建立的过渡期;低收入地区单一社会经济变量依赖较强,治理模式仍需体系化构建。

4 结 语

本文分析了不同发展水平地区滨海湿地水环境质量与经济增长的关系,经济增长先是以牺牲环境

为代价,在经济增长到一定阶段开始逐步注重环境保护,达到拐点后,随着经济增长环境呈现总体改善趋势,一般越发达地区总体更早到达EKC拐点。如TP排放量,怀卡托地区近30年持续下降;昆士兰州自2014年达峰值后呈持续下降趋势;江苏沿海3市2019年达峰值后呈现总体下降趋势。昆士兰州和怀卡托地区(高收入区域)的水质改善较为明显,EKC曲线主要呈倒U形,拐点主要出现在中高收入阶段,TN与pH的变化与第二产业密切相关。脱钩分析显示,水质指标与人均GDP实现了弱负或强脱钩;敏感性分析表明,产业结构对TN和DO的影响稳定保持在10%~25%之间,表明在稳定的治理体系下,经济增长未加剧水质负担。江苏沿海3市(中等收入区域)处于从污染向治理转型的阶段,TN质量浓度与pH呈现倒U形曲线,直排TP则呈波动较大的倒N形。自2016年起,脱钩状态逐步转为强脱钩,政策调整成效逐步显现。主成分分析显示,高等教育人口对TN、pH的贡献率超过30%;敏感性

分析表明,教育水平、财政投入和产业结构的变化共同促进了水质改善,显示这些因素在治理效果中的复合作用。泰国和柬埔寨(低收入区域)的水质变化波动较大,EKC 曲线多为倒 N 形或 U 形,且拐点较为复杂。泰国的 TP 与人口密度关系紧密,敏感度达 47%;pH 变化较为剧烈。柬埔寨的 pH 与人口密度、DO 与教育水平之间敏感度较高,主成分分析显示,人口和教育因素是水质变化的主要驱动因素,反映出生活源污染压力大,且治理体系仍在完善中。

总体而言,不同发展阶段的地区在滨海湿地水质变化的驱动机制上存在显著差异。发达地区水质改善主要受到产业结构调整与经济增长的共同作用,脱钩关系较为稳定;江苏沿海 3 市处于环境治理转型期,在政策和教育等多因素作用下水质逐年改善;而泰国和柬埔寨则面临治理基础薄弱、指标波动较大的挑战,水质变化受社会经济因素影响较大,且治理效果尚不稳定。为了进一步促进滨海湿地保护,以及人鸟和谐共处,应加强东亚-澳大利西亚迁飞通道滨海湿地环境协同治理与保护。

本文基于宏观统计数据的分析,尚未深入考虑政策执行强度、地方治理能力等制度变量,也未全面考虑生态系统服务功能差异带来的空间响应异质性。未来研究可在机制识别和空间扩展方面进一步拓展。

参考文献:

[1] Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D R, Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach [M]. Amsterdam:Elsevier,2018.

[2] 赵铜铁钢,吴迪熠,杨振华,等. 粤港澳大湾区滨海自然与人工湿地演变及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2024,40(6): 38-47. (Zhao Tongtiegang, Wu Diyi, Yang Zhenhua, et al. Evolution and driving factors of coastal natural and artificial wetlands in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection,2024,40(6):38-47. (in Chinese))

[3] Deng Tianan, Duan Huanfeng, Alireza K. Spatiotemporal characterization and forecasting of coastal water quality in the semi-enclosed Tolo Harbour based on machine learning and EKC analysis[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022, 16 (1) : 694-712.

[4] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40 (2): 134-140. (He Zhenfang, Mou Tingting, Guo Qingchun, et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen River Basin from 1979 to 2019[J]. Water Resources Protection,2024,

40(2):134-140. (in Chinese))

[5] 郭紫茹,王刚,吴玉琴,等. 人类活动对盐城海岸线与滨海湿地的影响研究[J]. 生态与农村环境学报,2021,37 (3):295-304. (Guo Ziru, Wang Gang, Wu Yuqin, et al. Impacts of human activities on the coastline and coastal wetlands of Yancheng [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2021,37(3):295-304. (in Chinese))

[6] Martínez-Megías C, Rico A. Biodiversity impacts by multiple anthropogenic stressors in Mediterranean coastal wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2022, 818:151712.

[7] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services [J]. Ecological Monographs, 2011, 81(2): 169-193.

[8] 裴理鑫,叶思源,何磊,等. 中国湿地资源与开发保护现状及其管理建议[J]. 中国地质,2023,50(2):459-478. (Pei Lixin, Ye Siyuan, He Lei, et al. Wetland resources in China: current status of exploitation and conservation, with management recommendations [J]. Geology in China, 2023,50(2):459-478. (in Chinese))

[9] 宋敏,肖颖,邹声瑞,等. 环境规制下流域水环境污染转移的协同治理效率测度分析[J]. 水利经济,2025,43 (6): 1-11. (Song Min, Xiao Ying, Zou Shengrui, et al. Measurement and analysis of collaborative governance efficiency of water environmental pollution transfer in river basins under environmental regulation [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (6): 1-11. (in Chinese))

[10] 王海云,匡耀求,郑少兰,等. 粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地时空变化及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023,39(4): 126-134. (Wang Haiyun, Kuang Yaoqiu, Zheng Shaolan, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of wetlands in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area form 2010 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):126-134. (in Chinese))

[11] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 盐城自然保护区盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3): 88-95. (Luo Feng, Dai Jiancheng, Chen Zhipeng, et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of salt marsh vegetation distribution in Yancheng nature reserve [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(3):88-95. (in Chinese))

[12] 马学垚,杜嘉,梁雨华,等. 20 世纪 60 年代以来 6 个时期长江三角洲滨海湿地变化及其驱动因素研究[J]. 湿地科学,2018,16(3): 303-312. (Ma Xueyao, Du Jia, Liang Yuhua, et al. Changes and driving factors of coastal wetlands in the Yangtze River Delta during six periods since the 1960s [J]. Wetland Science, 2018, 16(3): 303-312. (in Chinese))

[13] 王雯,王静,祁元,等. 基于空间回归分析的滨海湿地演变驱动机制研究:以江苏省滨海 3 市为例[J]. 中国土

- 地科学,2017,31(10):32-41. (Wang Wen, Wang Jing, Qi Yuan, et al. Driving mechanism of coastal wetland evolution based on spatial regression analysis; a case study of three coastal cities in Jiangsu Province[J]. China Land Science, 2017, 31(10): 32-41. (in Chinese))
- [14] 彭水军,包群. 经济增长与环境污染:环境库兹涅茨曲线假说的中国检验[J]. 财经问题研究, 2006(8): 3-17. (Peng Shuijun, Bao Qun. Economic growth and environmental pollution: testing the environmental Kuznets curve hypothesis in China[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2006(8): 3-17. (in Chinese))
- [15] Chen Wanyun, Chang Anyu, Lin Chiachi, et al. Losing tidal flats at the midpoint of the East Asian-Australasian Flyway over the past 100 years [J]. Wetlands, 2024, 44(5): 59.
- [16] 李一阳,王红瑞,杨默远,等. 基于多重检验 EKC 的中国用水与产业发展关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 190-198. (Li Yiyang, Wang Hongrui, Yang Moyuan, et al. Analysis of the relationship between water use and industrial development in China based on multiple-test EKC[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 190-198. (in Chinese))
- [17] Chen X, Huang B, Lin C T. Environmental awareness and environmental Kuznets curve [J]. Economic Modelling, 2019, 77: 2-11.
- [18] 许锴,陈东景. 基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 20-27. (Xu Nuo, Chen Dongjing. Research on decoupling relationship between water resource utilization and high-quality economic development based on water footprint [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 20-27. (in Chinese))
- [19] Özokcu S, Özdemir Ö. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 639-647.
- [20] 邵帅,张可,豆建民. 经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60. (Shao Shuai, Zhang Ke, Dou Jianmin. The energy-saving and emission-reduction effects of economic agglomeration: theory and Chinese experience[J]. Journal of Management World, 2019, 35(1): 36-60. (in Chinese))
- [21] Sarkodie S A, Strezov V. Empirical study of the environmental Kuznets curve and environmental sustainability curve hypothesis for Australia, China, Ghana and USA [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 98-110.
- [22] 李涛,曹卫东,王雪妍. 长三角一体化下城市规模提升的水环境风险:以合肥市为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(5): 1366-1377. (Li Tao, Cao Weidong, Wang Xueyan. Water-environment risk from city-size growth under Yangtze River Delta integration: a case study of Hefei [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(5): 1366-1377. (in Chinese))
- [23] Lee C C, Chiu Y B, Sun C H. The environmental Kuznets curve hypothesis for water pollution: do regions matter? [J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 12-23.
- [24] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 122-130. (Lu Shuaishuai, Zhou Nianqing, Cai Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 122-130. (in Chinese))
- [25] Wang Zhibao, Bu Chao, Li Hongmei, et al. Seawater environmental Kuznets curve: evidence from seawater quality in China's coastal waters [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 925-935.
- [26] 姬生才,何海,吴志勇. 环境库兹涅茨曲线在水资源领域的应用进展 [J]. 水资源保护, 2014, 30(6): 1-6. (Ji Shengcai, He Hai, Wu Zhiyong. Progress in application of environmental Kuznets curve to water resources field [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(6): 1-6. (in Chinese))
- [27] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: a high resolution global study [J]. Water Resources Research, 2018, 54(1): 345-358.
- [28] 朱智洺. 库兹涅茨曲线在中国水环境分析中的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 387-390. (Zhu Zhiming. Application of the Kuznets curve to China's water environment analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(4): 387-390. (in Chinese))
- [29] Wang Qiang, Jiang Rui, Li Rongrong. Decoupling analysis of economic growth from water use in city: a case study of Beijing, Shanghai, and Guangzhou of China [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 86-94.
- [30] 周灵. 基于 Tapio 模型的我国低碳经济发展研究 [J]. 经济问题探索, 2019(6): 185-190. (Zhou Ling. Research on China's low-carbon economic development based on the Tapio model [J]. Inquiry into Economic Issues, 2019(6): 185-190. (in Chinese))
- [31] 李继清,刘佳利,邓世浪,等. 变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素 [J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 9-18. (Li Jiqing, Liu Jiali, Deng Shilang, et al. Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 9-18. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-07 编辑:胡新宇)