傅慧珊,李加林,刘永超,等.长三角城市群水环境治理效率的区域差异及动态演进 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1747-1763.
Fu H S, Li J L, Liu Y C, et al. Regional variations and the dynamic evolution of water environment governance efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1747-1763.

长三角城市群水环境治理效率的区域差异及动态演进

傅慧珊[1],李加林[1,2*],刘永超[1,2],曹罗丹[1],朱 骁[1],孔江涛[1] (1.宁波大学,陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心,浙江 宁波 315211；2.宁波大学,东海研究院,地理与空间信息技术系,浙江 宁波 315211)

摘要：以长三角城市群 26 个城市为研究对象,基于 2010~2023 年统计数据,综合运用 Super-SBM 模型、Malmquist 指数、Dagum 基尼系数、标准差椭圆模型以及 Tobit 模型,系统分析了水环境治理效率的区域差异、动态演进特征以及影响因素.研究发现,长三角城市群治理效率整体呈波动上升趋势,2022 年因规模效率(SE)下降水环境治理效率出现低谷,水环境治理效率均值为 1.121.长三角城市群水环境治理效率的空间分布呈现“西高-东低”分化,西部城市因生态补偿与产业绿色转移效率提升显著,东部城市依赖技术创新实现效率提高.长三角城市群水环境治理效率的整体空间差异中,安徽省-浙江省水环境治理效率组间差异最大,其均值为 0.067;在组内差异对比中苏沪地区内部均衡性最优,均值为 0.055;超变密度贡献率对整体差异的贡献率最大,年均值为 38.053.研究期内,长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆重心向西南迁移,空间分布向相对聚集转变.人口规模、城镇化水平和产业结构对长三角城市群水环境治理效率呈现显著负向关联,创新水平、环境管理、对外开放程度和工业规模对长三角城市群水环境治理效率起到推动作用.

关键词：长三角城市群；水环境治理；治理效率；动态演进；协调发展
中图分类号：X52 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1747-17

Regional variations and the dynamic evolution of water environment governance efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration. FU Hui-shan[1], LI Jia-lin[1,2*], LIU Yong-chao[1,2], CAO Luo-dan[1], ZHU Xiao[1], KONG Jiang-tao[1] (1.Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University, Ningbo 315211, China；2.Department of Geography and Spatial Information Techniques, Donghai Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1747~1763

Abstract：This study focused on 26 cities within the Yangtze River Delta urban agglomeration and employed a comprehensive analytical approach, utilizing the Super-SBM model, Malmquist index, Gini coefficient, standard deviation ellipse model, and Tobit model based on statistical data from 2010 to 2023. The study systematically analyzed regional disparities, dynamic evolutionary characteristics, and the factors influencing water environment governance efficiency. Key findings included that the overall water governance efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration exhibited a fluctuating upward trend, with a notable dip in 2022 attributed to a decline in scale efficiency (SE), with an average value of 1.121. Spatially, water governance efficiency followed a “high-west, low-east” pattern: western cities experienced significant efficiency gains through ecological compensation and green industrial transfer, while eastern cities relied on technological innovation to drive improvements. The largest intergroup disparity in water environment governance efficiency occurred between the Anhui Province and Zhejiang Province, with an average value of 0.067. Within the Jiangsu-Shanghai region, the internal equilibrium was the highest, with an average value of 0.055. The hyper-variation density contributed the most to the overall difference, with an average annual value of 38.053. Over the study period, the center of gravity of the standard deviation ellipse for water environment governance efficiency shifted southwestward, suggesting a trend toward a more aggregated spatial distribution. Population size, urbanization level, and industrial structure showed significant negative correlations with water environment governance efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration. In contrast, innovation levels, environmental management, openness to external markets, and industrial scale positively drove water environment governance efficiency.

Key words：Yangtze River Delta urban agglomeration；water environment governance；governance efficiency；dynamic evolution；coordinated development

---

收稿日期：2025-07-28
基金项目：国家社科基金重大项目(23&ZD105)
* 责任作者, 教授, nbnj2001@163.com

长三角城市群作为中国经济发展最活跃、开放程度最高的区域之一,其水环境质量影响着区域生态安全与可持续发展[1].然而,随着工业化和城市化的快速推进,太湖蓝藻暴发[2]、长江口富营养化[3]等事件频发,工业废水、农业面源污染与生活污水交织叠加[4],水环境问题引起了社会各界的关注.尽管国家层面已出台了相应的政策,但区域内经济发展水平[5]、资源禀赋[6]与治理能力[7]的非均衡性,使得水环境治理效率呈现显著空间差异,这加剧了区域间生态不公平,制约着长三角高质量一体化的实现[8].

开展水环境治理效率评估是提升水资源管理水平和实现可持续发展的重要手段[9].目前现有的研究已覆盖从国家到县域的多个维度,但各具侧重点与短板[10].在全国与省级研究层面,当前水治理已进入综合性阶段,但部分研究在建议中几乎未提及公众参与水环境治理的维度[11],在区域划分科学性、变量度量准确性、机制分析深度等方面仍有提升空间,可进一步借鉴国际流域治理经验来增强研究的广度和深度[12].在市级与县域层面,研究主要聚焦于绿色金融[13]、湖长制[14]及协同机制[15]等创新实践,但仍然面临着政策建议缺乏量化支撑、自然因素思考不足以及典型案例经验普适性有待考证的挑战.此外,对于水环境治理绩效指标体系的构建[16]以及与水环境相关的耦合研究虽有进展,但对深层驱动机制的挖掘仍停留在表象[17].中国在水环境治理过程中展现出制度创新性强,政策执行力度大以及数据基础逐渐完善等特点[18],但在跨区域协同治理[19]和公众参与深度等方面仍还有待加强[20].未来可借鉴更多的国际经验,例如欧盟的流域综合管理,美国的法律强制结合市场机制等,结合“三水”统筹治理理念[21],推动水环境治理政府主导型向多元共治模式转变,进一步推动水环境治理体系的现代化.

本文以长三角城市群 26 个城市为研究对象,基于 2010~2023 年面板数据,构建涵盖非期望产出的Super−SBM模型测算静态效率,结合Malmquist指数分解技术效率与技术进步的贡献,运用 Dagum 基尼系数解析区域差异及其来源,通过标准差椭圆模型刻画治理效率的空间重心迁移与方向性特征,并通过 Tobit 模型来研究长三角城市群水环境治理效率的影响因素,旨在为长三角城市群水环境治理提供支持.

1 研究方法及数据来源

1.1 研究区概况

长三角城市群面积为 $2.117\times10^5 km^2$,常住人口约 2.25 亿人,2024 年 GDP 达到了 33.16 万亿元,区域内水系发达,拥有长江、太湖、钱塘江等众多重要的江河湖泊.根据《长江三角洲城市群发展规划》相关规定,长三角城市群主要包括上海市、安徽省(安庆市、池州市、铜陵市、芜湖市、马鞍山市、合肥市、滁州市、宣城市)、江苏省(南京市、镇江市、扬州市、泰州市、南通市、无锡市、苏州市、盐城市、常州市)浙江省(杭州市、嘉兴市、湖州市、宁波市、绍兴市、金华市、舟山市、台州市)等 26 个城市.

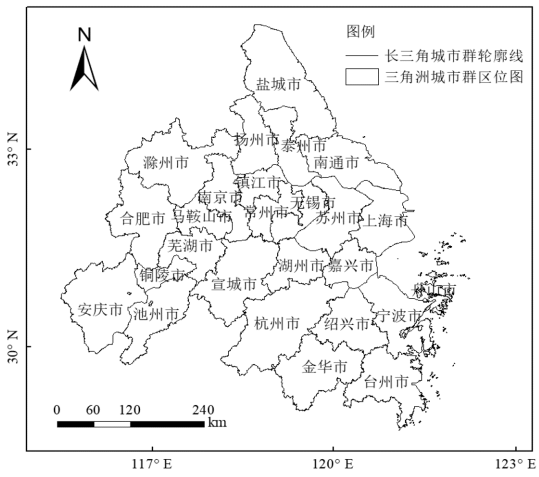


图 1 研究区范围

Fig.1 Administrative divisions of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 基于非期望产出的Super–SBM模型 Super−SBM 模型是在传统 DEA 模型的基础上进行改进,能够通过计算投入产出松弛性来评价效率,有效的考虑到了在水环境治理过程中的非期望产出,同时能够进一步区分决策单元效率值达到 1 时的情况[22].采用基于非期望产出的 Super−SBM 模型测算长三角城市群水环境治理效率.Super−SBM 模型具体公式如下:

$$\rho^{*}=\min\frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^{-}}{x_{ik}}}{1-\frac{1}{q_1+q_2}\left(\sum_{r=1}^{q_1}\frac{s_r^{+}}{y_{rk}}+\sum_{t=1}^{q_2}\frac{s_r^{b-}}{b_{tk}}\right)} \tag{1}$$

$$s.t\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}x_i\lambda_j-s_i^-\leqslant x_{ik}\left(i=1,\ldots,m\right)\\ \sum_{j=1}^{n}y_i\lambda_j+s_r^+\geqslant y_{rk}\left(r=1,\ldots,q_1\right)\\ \sum_{j=1}^{n}b_j\lambda_j-s_t^{b-}\leqslant b_{tk}\left(t=1,\ldots,q_2\right)\\ 1-\frac{1}{q_1+q_2}\left(\sum_{r=1}^{q_1}\frac{s_r^+}{y_{rk}}+\sum_{t=1}^{q_2}\frac{s_r^{b-}}{b_{tk}}\right)>0\\ \lambda_j,s_i^-,s_r^+,s_t^{b-}\geqslant 0\\ j=1,2,\ldots,n\left(j\neq k\right)\end{cases}\tag{2}$$

式中:ρ^* 表示长三角城市群各个城市的水环境治理效率;j 是长三角城市群各个决策单元;有 n 个决策单元;λ是决策单元的权重向量;m、q_1、q_2 分别为该函数的投入、产出、非期望产出;x_j、y_j、b_j 为第 j 个决策单元投入产出变量;s_i^-、s_r^+、s_t^{b-} 分别为投入、产出和非期望产出的松弛变量;x_{ik}、y_{rk}、b_{tk} 表示决策单元 k 的投入、期望产出和非期望产出.

1.2.2　Malmquist 指数　Malmquist 指数是基于距离函数的指数,它通过比较生产前沿面在不同时期的位置变化来衡量生产效率的动态变化[23]. Malmquist 指数可以衡量长三角城市群各城市从一个时期到下一个时期的水环境治理效率变化情况并揭示效率变化的根源,有利于各城市政府和监管部门根据分析结果有针对性地分配资源,为长三角城市群水环境治理发展提供数据支持和理论依据.Malmquist 指数的具体公式如下:

$$M\left(x^{t+1},y^{t+1},x^t,y^t\right)=\left(\frac{D^t(x^{t+1},y^{t+1})}{D^t(x^t,y^t)}\cdot\frac{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t+1}(x^t,y^t)}\right)^{\frac{1}{2}}\tag{3}$$

Malmquist 指数在规模报酬不变的情况下可以分解为技术效率变化(EFFch)和技术进步变化(TEch)的乘积.技术效率变化(EFFch)还可以进一步分解为纯技术效率变化(PTEch)和规模效率变化(SEch)(式(4)).技术效率变化(EFFch)衡量的是决策单元在两个时期之间相对技术效率的变化,即第 $t+1$ 年和 t 年综合技术效率的比值(式(5)).技术进步变化(TEch)反映的是生产前沿面本身在两个时期之间的移动(式(6)).纯技术效率变化指数(PTEch)是在规模报酬可变状态下求出的技术效率变化,也就是第 $t+1$ 年和第 t 年纯技术效率的比值,如(式(7))规模效率变化指数(SEch)是由规模报酬不变状态下的技术效率变化(EFFch)除以规模报酬可变状态下的纯技术效率变化(PTEch)得出的,是第 t+1 年与第 t 年规模效率的比值(式(8))具体公式为:

$$\text{TFPch=EFFch}\cdot\text{TEch=(PEch}\cdot\text{SEch)}\cdot\text{TEch}\tag{4}$$

$$\text{EFFch}=\frac{D^t(x^{t+1},y^{t+1})}{D^t(x^t,y^t)}\tag{5}$$

$$\text{TEch}=\left(\frac{D^t(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}\cdot\frac{D^t(x^t,y^t)}{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}\right)\tag{6}$$

$$\text{PEch}=\frac{D^t(x^{t+1},y^{t+1})/\text{VRS}}{D^t(x^t,y^t)/\text{VRS}}\tag{7}$$

$$\text{SEch}=\frac{\text{EFFch}}{\text{PEch}}\tag{8}$$

公式中:x、y、t 分别为投入要素、产出要素和年份;(x^t、y^t)、(x^{t+1}、y^{t+1})分别为第 t 年和第 $t+1$ 年的投入、产出量;EFFch 反映的是决策单元的追赶效应,当 EFFch>1 时,意味着该决策单元向生产前沿面的收敛速度加快;技术进步变化(TEch)反映技术前沿面的移动效应,TEch>1 说明决策单元技术创新有效;纯技术效率变化(PEch)度量由于决策单元技术水平变化所带来的影响,PEch>1 表示技术应用效率得到优化;规模效率变化(SEch)反映决策单元的“规模效应”,SEch>1 则显示规模趋向最优配置状态.

1.2.3　Dagum 基尼系数　本文采用 Dagum 基尼系数[24]从相对值角度测算长三角城市群中安徽省、苏沪地区和浙江省的水环境治理效率整体空间差异及来源[25],以此来测量在地理空间上的不平衡度[26]. 其 Dagum 基尼系数的计算公式为:

$$G=\frac{\sum_{j=1}^{k}\sum_{h=1}^{k}\sum_{i=1}^{nj}\sum_{r=1}^{nk}\left|y_{ji}-y_{hr}\right|}{2n^2\overline{y}}\tag{9}$$

$$G_{jj}=\frac{\frac{1}{2\overline{y}_j}\sum_{i=1}^{nj}\sum_{r=1}^{nj}\left|y_{ji}-y_{hr}\right|}{n_j^2}\tag{10}$$

$$G_{ij}=\frac{\sum_{i=1}^{nj}\sum_{r=1}^{nj}\left|y_{ji}-y_{hr}\right|}{njnh(\overline{y}_j+\overline{y}_h)}\tag{11}$$

式中:G 为长三角城市群水环境治理效率基尼系数,取值范围是[0,1];n 为长三角城市群的城市数量,n=26;k 为上海市、安徽省、江苏省和浙江省四个地区,k=4;$\overline{y}$ 为各城市水环境治理效率均值;$\overline{y}_i$($\overline{y}_h$) 为 j(h)地区水环境治理效率均值;$\overline{y}_{ji}$($\overline{y}_{hr}$) 为 j(h)地区内 i(r)水环境治理效率;p_j 表示 j 地区在长三角城市群中

占比,计算公式为 $p_j = n_j / n$;s_j 表示 j 地区水环境治理效率贡献率,计算公式为 $s_j = n_j \bar{y}_j / (n\bar{y})$;$D_{ih}$ 表示地区间水环境治理效率相对影响,计算公式为 $D_{jh} = (m_{jh} - n_{jh})/(m_{jh} + n_{jh})$.计算长三角城市群组内贡献($G_w$)、组间差异贡献($G_{nb}$)以及超变密度贡献($G_t$):

$$G_w = \sum_{j=1}^{k} G_{jj} p_j s_j \tag{12}$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^{k}\sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} D_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) \tag{13}$$

$$G_t = \sum_{j=2}^{k}\sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j)(1 - D_{jh}) \tag{14}$$

1.2.4 标准差椭圆及重心迁移模型 标准差椭圆是一种空间统计方法,可以用来描述长三角城市群水环境治理效率的空间分布方向和离散程度.重心迁移模型主要用于描述长三角城市群水环境治理效率在空间上的重心位置随时间的变化情况[27].重心是指在一个区域内根据某种属性计算出来的平衡点,通过分析水环境治理效率重心的迁移可以了解其空间动态变化[28].其具体公式如下:

重心坐标:

$$X_t = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i / \sum_{i=1}^{n} w_i, Y_t = \sum_{i=1}^{n} w_i y_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \tag{15}$$

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{y}_i^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{y}_i^2\right)^2 + 4\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^2}}{2\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \bar{x}^2 \bar{y}^2} \tag{16}$$

长轴:$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (w_i \bar{x}_i \csc\theta - w_i \bar{x}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}} \tag{17}$$

短轴:$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (w_i \bar{x}_i \sin\theta - w_i \bar{x}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}} \tag{18}$$

式中:$\bar{y}_i = y_j - y_t$,$\bar{x}_i = x_j - x_t$,分别表示长三角城市群各市到平均重心的坐标偏差;(x_t, y_t)是长三角城市群各市的坐标;x_j 为空间权重;θ是标准差椭圆方位角;σ_x、σ_y 分别为标准差椭圆长、短轴.

1.2.5 Tobit 模型 Tobit 模型是由经济学家 James Tobin 在 1958 年所提出一种专门用于处理被解释变量存在截断的情况的模型[29].Super−SBM 模型得到的各 DMU(决策单元)效率值通常呈现为大于 0 的截断数据分布,针对此类截断数据特征,Tobit 模型能有效处理数据截断问题,提供更为准确的参数估计结果,从而为政策制定者提供更具科学性的决策依据.

$$Y_{it}^* = \beta_0 + \sum \beta_j X_{j,it} + \varepsilon_{it}, \varepsilon_{it} \left| X_{j,it} \sim N(0, \sigma^2) \right. \tag{19}$$

$$Y_{it}^* = \begin{cases} Y_{it}, 若 Y_{it} > 0 \\ 0, 若 Y_{it} \leqslant 0 \end{cases} \tag{20}$$

式中:Y_{it}^* 指的是长三角城市群各城市水环境治理效率;β_0 表示常数项;x_j 代表影响因素;β_j 表示待估计系数;ε_{it} 表示随机扰动项.

1.3 指标体系与数据来源

1.3.1 基于非期望产出的 Super–SBM 模型的评价指标体系 本文使用基于非期望产出的 Super–SBM 模型来测算长三角城市群水环境治理效率,参考已有的水环境治理效率测算相关研究,选取了 6 个投入,3 个期望产出,5 个非期望产出指标构建长三角城市群水环境治理效率的评价指标体系(表 1).

表 1 长三角城市群水环境治理效率评价指标构建

Table 1 Construction of evaluation indicators for water environment governance efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration

类别	一级指标	二级指标	指标单位
投入	自然资源	人均水资源量	m^3/人
	资本	水污染治理投资额	万元
		年末供排水管道密度	km/km^2
		城市供水设施建设固定资产投资	万元
		城市排水设施建设固定资产投资	万元
	人力	水利、环境和公共设施管理业工作人数	万人
产出	期望产出	人均 GDP	元/人
		污水处理厂污水处理能力	万 m^3
		建成区绿化覆盖率	%
	非期望产出	工业废水排放总量	万 t
		工业废水化学需氧量 COD 排放总量	万 t
		工业废水氨氮排放总量	万 t
		水资源开发率	%
		万元 GDP 用水量	万 m^3

该体系的投入指标选择了水环境治理过程投入的自然资源、资本、人力.其中自然资源投入通过人均水资源量[30]来表示,资本投入通过水污染治理投资额、年末供排水管道密度、城市供水设施建

设固定资产投资和城市排水设施建设固定资产投资[31]来表示,人力资源选取水利、环境和公共设施管理业工作人数[32]来表示.水环境治理的有效性主要体现在对排放物的有效治理以及城市生态环境建设和优化方面,对此本文的期望产出指标[33]选择了人均 GDP、污水处理厂处理能力[34]和建成区绿化覆盖率.相应的非期望产出指标[35]选取了工业废水排放总量、工业废水化学需氧量 COD 排放总量、工业废水中氨氮排放量[36]、水资源开发率以及万元 GDP 用水量[37].

1.3.2　长三角城市群水环境治理效率影响因素指标　聚焦长三角城市群水环境治理效率影响机制的相关文献,构建长三角城市群水环境治理效率影响指标体系(表 2)并开展分析.一般情况下,人口规模的扩大[38]和城镇化水平的提高[39]意味着水资源需求与水环境污染激增.创新水平[40]的提升代表城市可以提高资源配置效率,增强水污染治理能力,为后续的保护和治理提供帮助.产业结构[41]居高不下和降幅缓慢意味着水环境治理面临着更严峻的结构性挑战.环境管理水平[42]是衡量区域环境治理投入力度的关键指标,其高低及动态变化对水环境治理效果、资源配置效率和区域可持续发展具有多重意义.对外开放程度[43]高有利于企业学习和引进国外优秀的环保技术和环保项目,提高水环境治理效率.工业规模的扩大虽然有增加重金属和有机污染物排放的风险,但也有助于加强整体水环境管理.

表 2　长三角城市群水环境治理效率影响因素指标

Table 2　Indicators of factors influencing the efficiency of water environment management in the Yangtze River Delta urban agglomeration

影响因素	单位	变量定义
人口规模	人/ km^2	人口密度
创新水平	件	国内发明专利申请授权量
城镇化水平	%	城镇人口占总人口比重
产业结构	%	第二产业占 GDP 比重
环境管理	%	环境保护投资占 GDP 比重
对外开放程度	%	货物进出口总额占 GDP 比重
工业规模	个	规模以上工业企业数量

1.3.3　数据来源　本文所选取的水环境治理绩效的相关数据主要来源于 2010~2023 年《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、各市统计年鉴、《生态环境统计公报》、《水资源公报》,个别年份数据存在缺失情况,采用插值法进行补齐.

2　结果与讨论

2.1　长三角城市群水环境治理效率的时空演变

根据基于非期望产出的 Super–SBM 模型,借助 Matlab 软件计算得到长三角城市群 26 个城市的水环境治理效率的平均值进行测算(图 2).综合效率(TE)是对决策单元整体的系统评估,涵盖资源配置合理性、资源转化能力等多个方面;规模效率(SE)是由于规模因素影响的生产效率,反映了治理规模是否处于最优经济规模.技术效率(PTE)是指仅由技术和管理水平决定的效率,反映决策单元在最优规模时投入要素的生产效率.

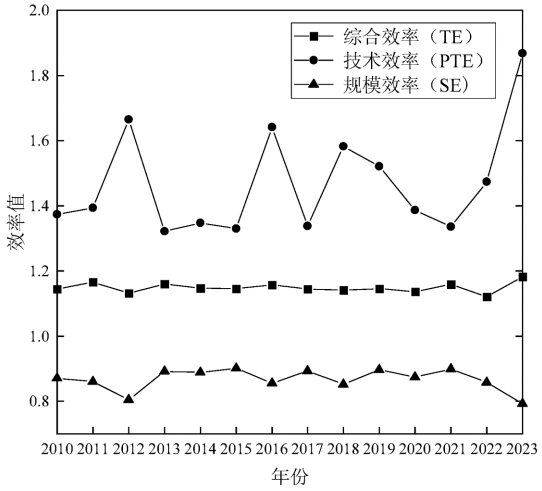


图 2　长三角城市群水环境治理效率趋势变化

Fig.2　Changes in water environment management efficiency trends in the Yangtze River Delta urban agglomeration

在研究期内,长三角城市群水环境治理综合效率(TE)整体呈现较为平稳的状态,整体平均值为 1.149;技术效率(PTE)呈现出“先上升再下降”的趋势,技术效率平均值为 1.470;而规模效率(SE)始终低于综合效率和技术效率,均值为 0.867.从研究结果看,2022 年水环境治理综合效率值达到谷底,其均值为 1.121,这是因为在这一年长江流域经历了严重的干旱,河流湖泊水位大幅下降,水体自净能力减弱,导致水环境治理难度增加.此外,水环境治理综合效率值(TE)在 2023 年达到顶峰,其均值为 1.183,原因是在 2021 年国家发布《长三角生态绿色一体化发展示范区重点跨界水体联保专项方案》,同时还加大了

基础设施建设力度,推出绿色金融政策,进一步提高水环境治理综合效率.在研究期内,规模效率平均值始终低于水环境治理综合效率平均值,并且在 2023 年达到低谷,其均值为 0.793.这表明在长三角城市群水环境治理的管理水平和技术水平相对较高,但现有的治理规模并未达到最优状态,无法继续单纯依靠扩大投入带来的治理效率提升,这也成为了提升整体综合效率的主要瓶颈.

自然断点法是一种基于数据内统计分布进行自动分类的算法,能够寻找数据中固有的断点,将相似的值分到同一组,反映水环境治理效率相对水平的变化,帮助各城市精准认识到本市水环境治理处于哪一梯队.当前关于水环境治理效率等级划分主要包括以下 3 种:(1)将水环境治理综合效率不同等级在区间内等级划分,例如徐孟志等[44]结合 ArcGIS 的自然断点法和相等间隔原则将环境治理综合效率均等划分为 4 个等级.(2)将水环境治理综合效率不同等级在区间[0,1]内不均等分,如袁宏川等[45]将水环境治理综合效率划分为(0~0.6),[0.6~0.8],[0.8~1],1 四个等级.(3)根据水环境治理综合效率测算实际结果划分不同等级,例如李海洋等[46]采用自然断点将各省份水环境治理效率值划分为[0.001~0.316]、[0.317~0.451]、[0.452~0.706]、[0.707~+]4 个等级.

结合自然断点法和相关文献,将长三角城市群水环境治理综合效率划分为低(0.000~0.556)、中等(0.557~1.148)、较高(1.149~1.334)和高(1.335~1.548)4 个效率等级(表 3),并对其空间分布变化进行可视化表达(图 3).长三角城市群水环境治理综合效率等级划分有利于各个城市认识到本城市的水环境治理的短板和瓶颈,高效率城市的治理经验可以被总结和推广,成为其他城市学习的榜样.低效城市则会受到上级政府的重点督导和帮扶,制定更加精准的治理政策,从而推动长三角城市群整体水环境治理的进一步发展[47].

从整体空间分布变化可以看出,长三角城市群中各个城市的水环境治理综合效率差异性较大.2010 年长三角城市群各个城市的水环境治理综合效率主要是以中高水平为主,主要原因是 2010 年是“十一五”的最后一年,在这期间国家制定了明确的节能减排目标,促使各城市政府开始大力推进水环境治理.此外,2007 年无锡太湖的蓝藻污染造成的供水危机事件引起了社会各界对水环境治理的高度重视,长三角各个城市开始出台各种政策和治理措施来提高水环境治理综合效率.其中,池州市作为长江流域重要的水源涵养地和生态保护区,水体的自净能力强,工业化程度相较于其他城市较低,其水环境治理效率相对高.扬州市作为南水北调东线工程的输水通道,国家对其水环境质量提出了极高的要求,这也促使了当地政府加强对水环境的保护和治理.

表 3 长三角城市群水环境治理综合效率等级划分

Table 3 Efficiency classification of water environment management in the Yangtze River Delta urban agglomeration

等级	范围	评价标准
低	0.000~0.556	水环境治理有待长效干预与监督
中等	0.557~1.148	水环境治理成果一般,提升空间较大
较高	1.149~1.334	水环境治理绩效较好
高	1.335~1.548	水环境治理绩效成果显著,具有示范效应

2014 年长三角城市群水环境治理综合效率整体较 2010 年有所上升,大部分城市开始推动低污染产业升级,减少高耗水行业占比,例如盐城市、嘉兴市、安庆市等城市.而在这期间扬州市仍以化工等传统产业为主,工业废水排放强度较高,导致水环境综合治理效率较 2010 年有所下降.2010~2014 年间,盐城市紧紧抓住沿海开发的机会,积极推动产业升级,加大对经济开发区的污水处理设施建设,实现了水环境治理综合效率的提升.

2018 年,长三角城市群水环境治理综合效率较 2014 年有所下降.2014 年长三角地区可以通过建设污水处理厂、关停明显违规的企业、建设基础管网等工程性和行政性措施来提高水环境治理综合效率.但在 2014 年之后,水环境治理进入了下一个阶段,想要进一步提升水质需要投入的资金和技术成本远高于 2014 年,导致水环境治理综合效率有所下降.值得注意的是浙江省自 2014 年起强力推进“五水共治”,在 2014~2018 期间这项政策进入了深化和攻坚阶段,嘉兴市作为重点城市积极响应政策,在加强水环境治理投入的同时,还建立了从市、县到镇、村的四级河长体系,并将河长履职情况与官员绩效考核强力挂钩,显著提高了水环境治理综合效率.

2022 年长三角城市群水环境治理综合效率较 2018 年普遍下降,整体呈现中低水平为主的趋势.此时长三角城市群为恢复疫情带来的影响,加快高耗

水行业产能发展速度,导致工业废水排放的增加,加上极端天气的影响,水环境治理综合效率有所下降.然而台州市和南京市在这一时期成功找到了提升水环境治理效率的新路径.台州市的生态基础较好,善于利用其生态系统自净能力来维持水质,提升水环境治理的长期效率,且台州市的产业主要是以医药、模具、智能家居等为主,水环境治理压力相比传统重工业城市较小.在 2018~2022 年期间,“长江大保护”战略进入全面深化和攻坚阶段.南京市作为重点区域在水环境治理过程中获得了更多的资源倾斜,其治理目标也从单一的水质达标转变成为水环境、水生态和水资源三者的统筹治理,同时南京市持续推动沿江产业布局优化和高耗水、高污染企业转型升级,从源头上减少了污染物的产生和排放,减轻了巨大的污染物处理压力,这也是南京市提升水环境治理综合效率的根本性措施.

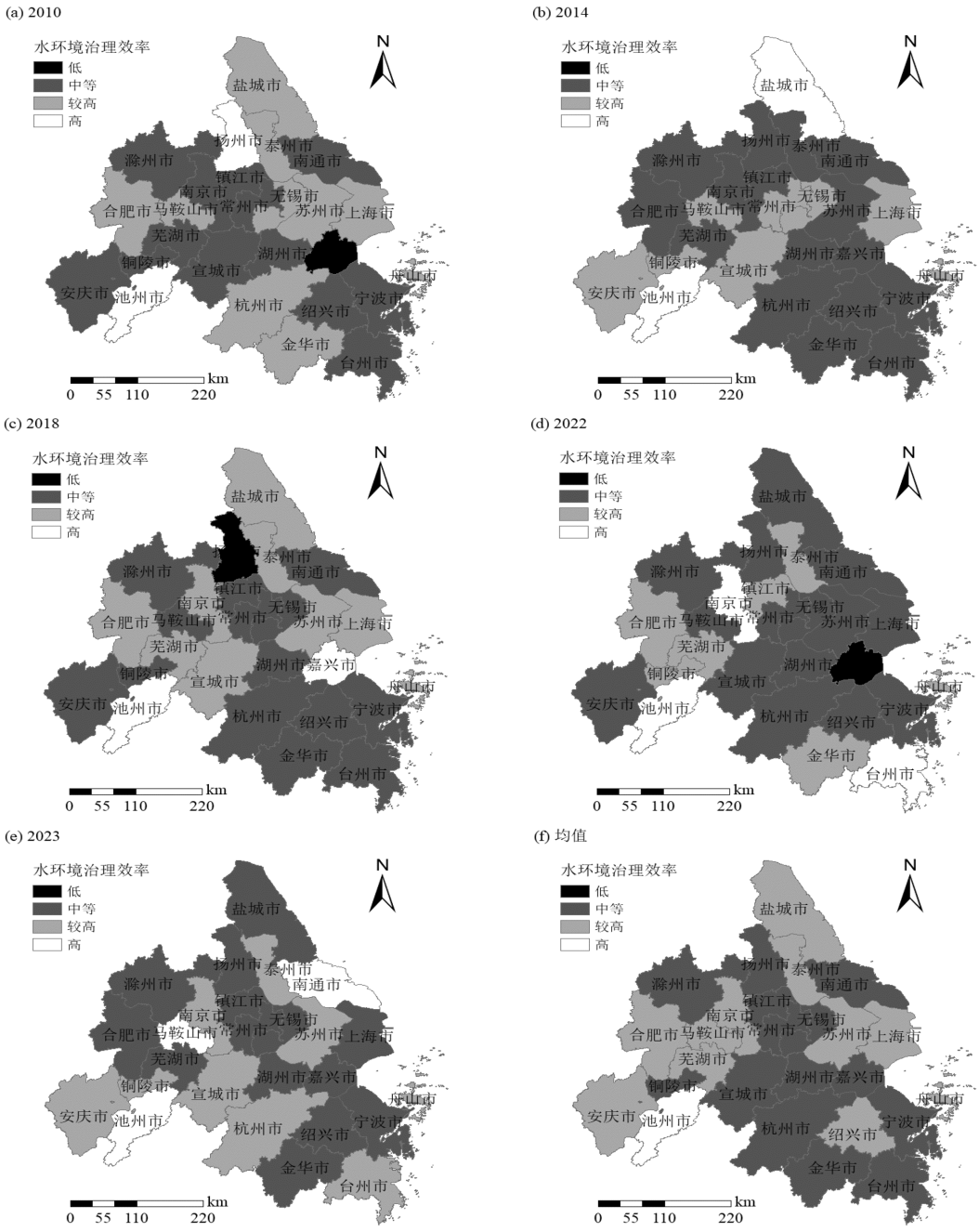


图 3　长三角城市群水环境治理效率空间分布变化

Fig.3　Changes in the spatial distribution of water environment management efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration

2023 年《重点管控新污染物清单》的实施促使长三角重点城市加快开展专项治理,水环境治理综合效率整体保持中高水平,相较于 2022 年有所上升,但也出现了区域性差异,部分城市水环境治理综合效率有所下降.例如位于巢湖流域的芜湖市和合肥市,巢湖的富营养化问题一直是治理难点,周边城市的任何排放都会对湖体产生影响,导致水环境治理压力巨大,加上这两个城市近年经济总量和人口规模的快速扩张,导致生活污水和工业废水排放量的急剧增加,不利于对水环境的进一步治理.而马鞍山市作为芜湖市和合肥市的相邻城市,在水环境治理效率上出现截然相反的情况.马鞍山市作为传统重工业城市曾因长江岸线污染和雨山湖治理等问题被中央生态环保督察重点关注,这也加强了当地政府对水环境治理的重视程度,加快了当地政府对传统重工业企业的转型和淘汰,实现水环境治理效率的大幅提升.

在 2010~2023 年期间,池州市的水环境治理效率长期保持较高水平.池州市森林覆盖率超 60%,水源涵养能力强,自然净化能力也远高于平原工业城市,加上池州市主要以旅游业与绿色农业为核心,污染负荷较低,水环境污染压力较小.除此之外,作为新安江~千岛湖生态补偿试点的受益者,池州市在 2012 年起获得浙江省和中央财政转移支付,专项用于水源地保护,为其水环境治理提供.

2.2 长三角城市群水环境治理效率的 ML 指数及分解

本文利用 Matlab 软件在 Malmquist 指数模型上得到长三角城市群水环境治理效率 ML 指数及其分解值(表 4),并对其在空间分布变化进行可视化表达(图 4).从表 4 中可以看出,长三角城市群的水环境治理效率的 ML 指数在 2014~2015 年、2019~2020 年的 ML 指数相较其他年份低,2014~2015 年的 ML 指数是整个研究期的低谷,平均值为 0.975,这是由于在 2014~2015 期间经济增速下降,长三角地区制造业产能过剩问题凸显,部分企业为降低成本会减少污染治理投入,从而引起的水环境治理效率的降低.

从技术效率变化值来看,在研究期内技术效率变化(EFFch)和纯技术效率变化值(PTEch)整体呈现波动式上升趋势,而规模效率变化值(SEch)整体呈现先上升再下降的趋势,这表明纯技术效率变化 (PTEch)的改善幅度超过了规模效率(SEch)的恶化幅度,从而带动了整体技术效率变化的提升,这意味着长三角各城市的管理水平和资源配置能力在提高.

表 4 长三角城市群水环境治理效率 ML 指数及分解变化

Table 4 Changes in the ML index and decomposition of water environment management efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration

年份	ML 指数(ML)	技术效率变化(EFFch)	技术进步变化(TEch)	纯技术效率变化(PTEch)	规模效率变化(SEch)
2010~2011	1.033	1.045	0.994	1.066	1.010
2011~2012	1.034	0.973	1.091	1.169	0.927
2012~2013	1.037	1.076	0.975	0.966	1.216
2013~2014	1.007	0.990	1.016	1.006	0.999
2014~2015	0.975	1.001	0.974	1.000	1.043
2015~2016	1.025	1.011	1.014	1.255	0.948
2016~2017	1.010	0.994	1.016	0.985	1.213
2017~2018	1.058	0.995	1.062	1.136	0.957
2018~2019	1.045	1.046	1.018	1.014	1.122
2019~2020	0.998	0.993	1.012	1.065	1.070
2020~2021	1.094	1.042	1.049	1.037	1.076
2021~2022	1.060	0.970	1.150	1.131	0.981
2022~2023	1.116	1.122	1.007	1.217	0.947

从长三角城市群各市的水环境治理绩效的 ML 指数及其分解变化的空间分布(图 4)可以看出,在 2010~2011 年,大多数城市的 ML 指数都保持在一个较为平稳的状态,部分城市表现出较高的 ML 指数,比如嘉兴市,ML 指数值为 1.768.在 2010~2011 年期间,嘉兴市 ML 指数的提升主要不是靠发明和引进革命性的新技术,而是通过优化和落实已有政策和管理手段来实现的.例如嘉兴市将水环境质量与地方官员的政绩考核相联系,同时加大水环境治理投资建设,实现水环境治理效率的有效提高.此外,还可以看出嘉兴市的纯技术效率变化(PTEch)和规模效率变化(SEch)之间存在一定差异,这表明嘉兴市在提高技术方面不断进步,而水环境治理投资存在规模不经济的情况.

在 2014~2015 年,城市群水环境治理效率 ML 指数整体呈现下降趋势,年均值为 0.975.这是由于在这期间中国经济增长放缓,各地政府在水环境治理方面的财政投入力度相对减弱,影响了水环境治理项目的持续推进.部分城市的纯技术效率变化(PTEch)呈现出上升趋势.2014~2015 年河长制已从嘉兴市等发源地开始在全国推广,安庆市在这一时期强化了本地的河长制体系,改进了水环境治理项目的管理

流程,虽然没有突破性的新技术,但很好地利用了已有的污水处理技术,提高污水处理效率.

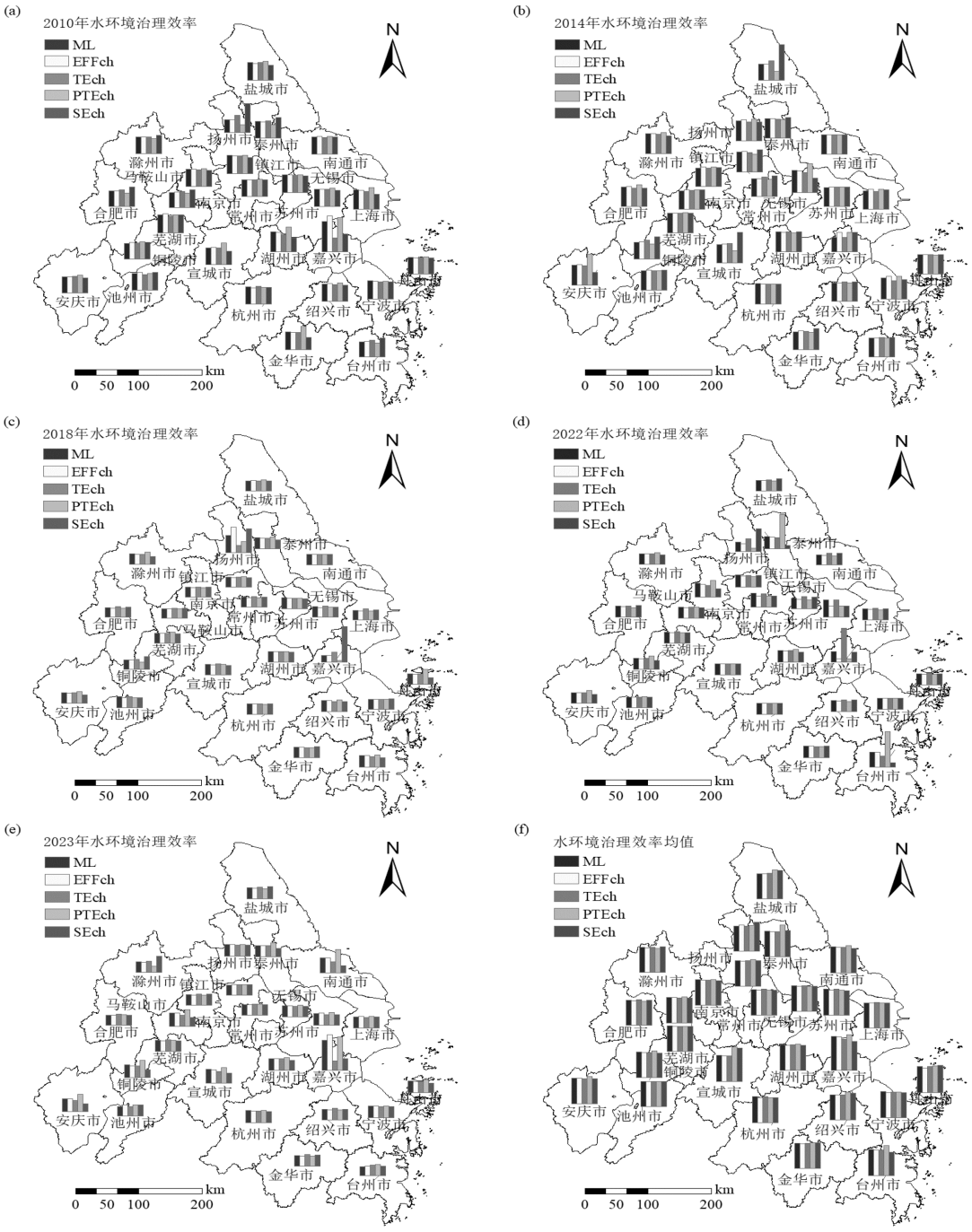


图 4　长三角城市群各市水环境治理效率的 ML 指数及其分解动态分析

Fig.4　Dynamic analysis of the ML index and its decomposition of water environment management efficiency in cities of the Yangtze River Delta urban agglomeration

在 2018~2019 年,城市群水环境治理效率 ML 指数呈现上升趋势,例如绍兴市 ML 指数上升到 1.106,技术效率变化值(EFFch)上升为 1.136.在这期间,绍兴市工作的重中之重是建设污水零直排区,这项工作的推动极大的减少了绍兴市的多重混合污染,显著提高了污水收集和处理效率.此外,在 2018 年前后,绍兴市持续推进印染产业集聚升级,同时对工业园区实行统一的污水处理,从源头减少了污染物排放,提升了整个区域的水环境治理效率.

在 2021~2022 年,长三角城市群水环境治理效

率 ML 指数整体呈现上升趋势,均值为 1.060.值得注意的是南京市的技术效率变化(EFFch)和技术进步变化(TEch)均有所上升,分别为 1.176 和 1.095,但规模效率变化(SEch)有所下降,值为 0.763.在此期间,南京市为了应对更高标准的水环境治理要求,扩建了一批大型污水处理厂,这些污水处理厂在 2021~2022 年仍处于运行的初期,无法满足当前的污水处理需求,拉低了整体的规模效率,但南京市依靠技术进步和管理创新的强大动力克服了短期规模不经济问题,实现了水环境治理效率的提高.

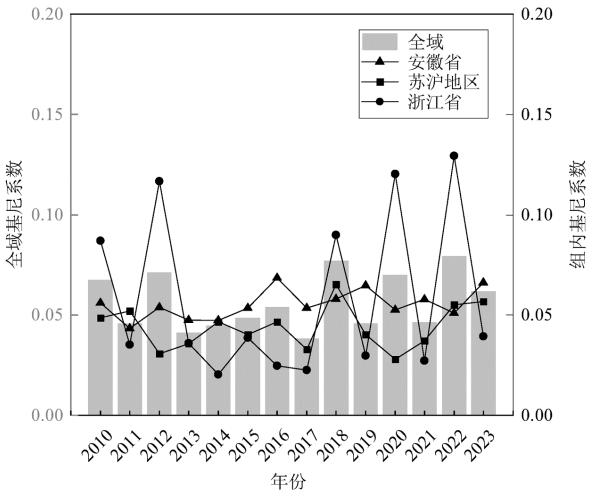
在 2022~2023 年,技术效率变化(EFFch)成为当前阶段 ML 指数增长的主要推动力,ML 指数整体呈上升趋势.同时,部分城市的纯技术效率变化值(PTEch)出现波动式上升,这是长三角城市群的水环境治理效率提升方式发生了标志性转变的表现.泰州市在 2022~2023 年期间其转变了水环境治理模式,治理工作开始向精细化管理转变,比如泰州市加强了对污染源头的监管,对每个污水处理厂的服务范围和进水浓度等都进行了精细化分析,制定符合实际情况的运行方案,实现精细化管理.

2.3 长三角城市群水环境治理效率的区域差异及分解

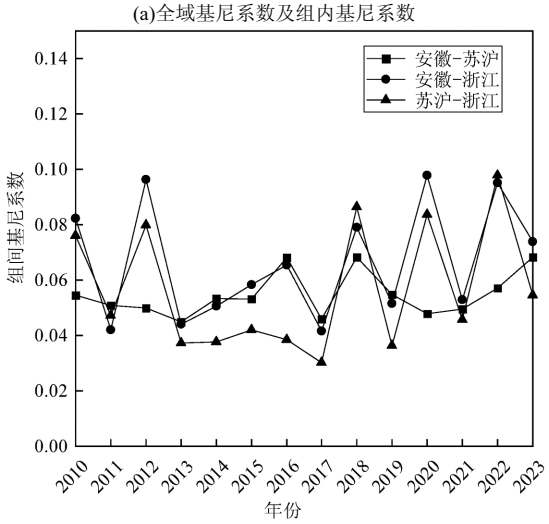
为更加准确测算长三角城市群水环境治理效率空间差异及其来源,考虑到上海市只有一个样本,本文在测算长三角城市群水环境治理效率组内差异时将上海市和江苏省整体作为苏沪地区展开分析.

由图 5(a)可知,从整体来看长三角城市群水环境治理效率总体基尼系数相对较低,均值为 0.056,整体呈现出“下降-上升”周期性波动的变化特征.从组内基尼系数来看,整体呈现出浙江省(均值为 0.058)>安徽省(均值为 0.055)>苏沪地区(均值为 0.044),其中组内基尼系数变化幅度最大的是浙江省.浙江省的组内差异主要源于省内显著的经济发展模式的差异和产业结构的多元化,浙北地区的城市大多经济发展水平高,在水环境治理中的资金投入和技术应用等方面都走在全省前列,治理效率也相对较高.而浙南和浙西地区的各个城市产业不同,产业转型的难度和速度也不同,导致各地污染治理效率出现差异.苏沪地区除个别年份外组内基尼系数均低于总基尼系数,这表示苏沪地区在水环境治理效率内部差异比起其他地区来说较为均衡.江苏和上海市是中国经济发达的区域之一,各城市政府都有充足的财力投入到基础设施建设,意味着大部分城市具备了高效治理水环境的经济基础,此外苏沪地区同属太湖流域,彼此间建立了紧密的跨行政区协同治理机制,减少了内部的差异性.

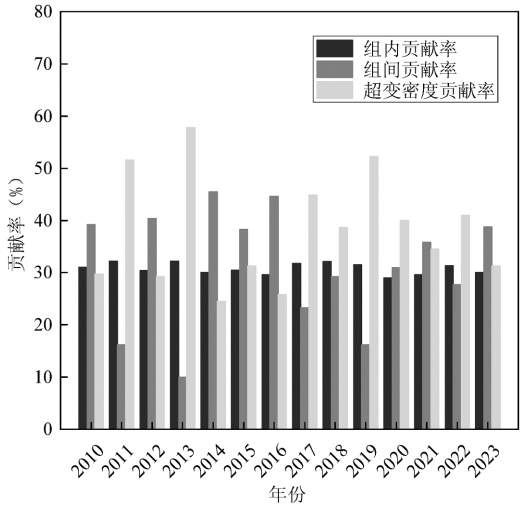
由图 5(b)可知,安徽省-浙江省(均值为 0.067)>苏沪地区-浙江省(均值为 0.057)>安徽省-苏沪地区(均值为 0.055),安徽省-浙江省的水环境治理效率的组间差异最大.浙江省作为沿海发达省份,地方财政收入高,对水环境治理的基础设施建设和先进技术创新研发的财政支持力度大,同时浙江省正处于向高端制造业和数字经济转型升级阶段,污染排放强度大幅度下降.而安徽省尤其是皖北和皖西地区,经济发展水平相对滞后,水环境治理基础设施建设有待完善,加上在承接长三角产业转移的过程中不可避免地引入了一批高污染等企业,导致污染排放的绝对量和强度相对较高,水环境治理压力更大.



(a)全域基尼系数及组内基尼系数



(b)组间基尼系数



(c) 空间分异来源贡献率

图 5　长三角城市群水环境治理效率的基尼系数变化及其贡献率

Fig.5　Changes in the Gini coefficient and its contribution to the efficiency of water environment management in the Yangtze River Delta urban agglomeration

图 5(c)表示,在研究期内 3 个区域的组内差异贡献率、组间差异贡献率以及超变密度贡献率,对整体差异的贡献率年均值分别为 30.801、31.146、38.053. 超变密度贡献率最大,整体呈现出先逐步上升再下降,而后又逐步上升的情况,且在 2013 年达到顶峰;组内差异贡献率相较于组间差异贡献率和超变密度贡献率来说是最小的.由此,可以推断出超变密度贡献率是长三角城市群水环境治理效率存在空间差异的主要因素,这也意味着长三角城市群虽整体经济发达,但核心城市和外围城市在水环境治理的基础和协同性上存在差异,降低超变密度贡献率将成为协调长三角城市群水环境治理效率空间差异的重要方向.

2.4　长三角城市群水环境治理效率标准差椭圆及其变化

利用 ArcGIS 度量地理分布模块,选择一级标准差,绘制 2010、2014、2018、2022、2023 年的标准差椭圆及重心转移轨迹图(图 6).2010~2014 年重心向西南方向迁移,从原本的靠近常州市开始向宣城市方向移动,这表明在整个研究期内水环境治理效率提升的主导区域从传统核心城市向西南地区转移;2014~2018 年之后重心开始转向东南方向移动,2018~2022 年重心向西北方向迁移,2022~2023 年重心开始向东北方向迁移.迁移中心主要处于宣城市内,总体反映出中西部城市治理效率提升速度加快,区域差距缩小,治理资源向欠发达地区倾斜.

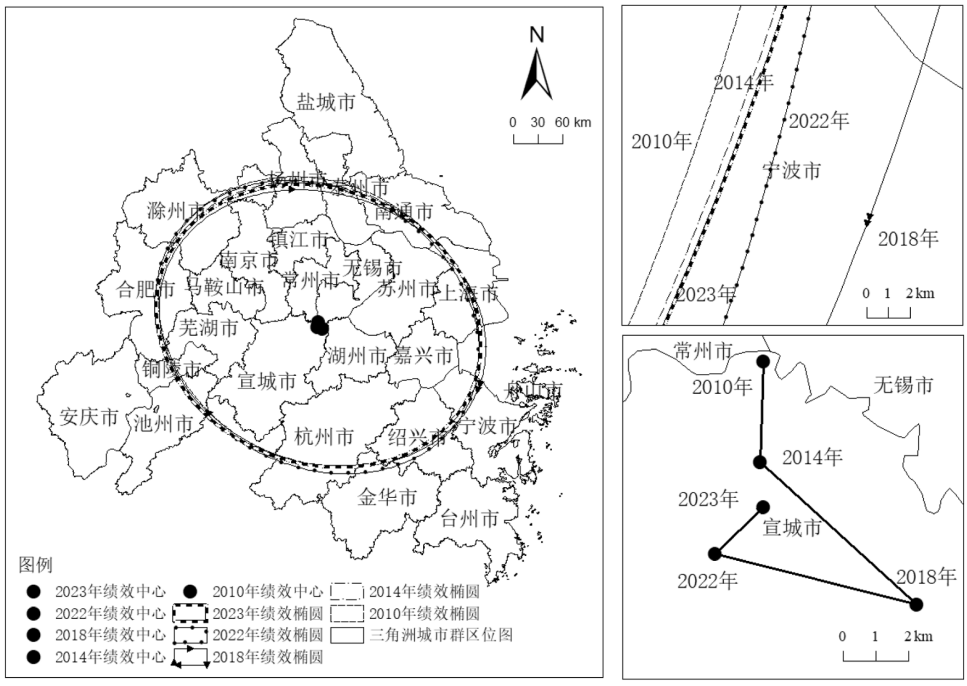


图 6　长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆与重心迁移模型分析

Fig.6　Analysis of standard deviation ellipse and gravity center migration model for water environment management efficiency in Yangtze River Delta urban agglomeration

从长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆扁率变化(图 7)可以看出,在研究期内椭圆扁率呈现波动式变化,并且在 2018 年达到顶峰,其椭圆扁率为 0.196,这表示在 2018 年长三角城市群水环境治理效率在空间分布上存在着较为显著的不均衡性.此外,在 2018~2022 年椭圆扁率呈现波动下降趋势,其值从 0.196 下降到 0.168,表明在这期间水环境治理效率的空间分布逐步变得更加均衡化和多中心化.在 2022~2023 年期间,长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆扁率为 0.171.在研究期内,长轴和短轴都以轻微幅度在缩短,长轴由 204.099 下降到 203.539km,短轴由 170.137km 下降到 168.687km,这意味着长三角城市群水环境治理效率的空间分布从“相对离散”开始向“相对聚集”转变.但椭圆长轴始终大于短轴,表明其仍未完全克服发展不均衡,未来需通过各种措施来推动空间分布的进一步优化.

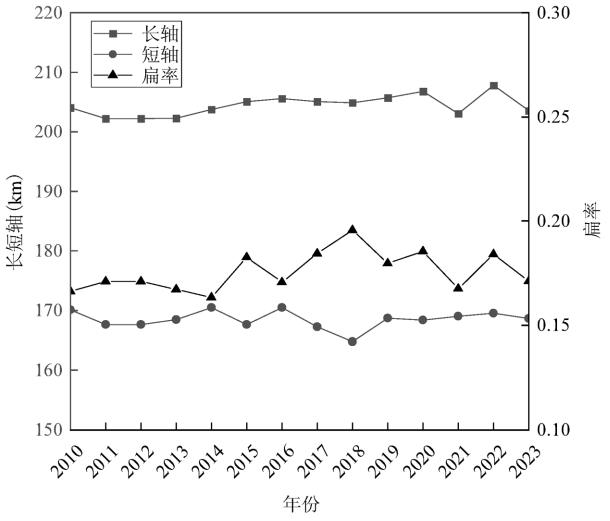


图 7 长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆扁率变化分析

Fig.7 Analysis of changes in standard deviation elliptic oblateness of water environment management efficiency in the Yangtze River Delta urban agglomeration

2.5 长三角城市群水环境治理效率影响因素分析

使用 stata18.0 软件,采用 Tobit 模型对长三角城市群水环境治理效率与其影响因素进行参数估计分析.如表 5 所示,人口规模、城镇化水平、产业结构对长三角城市群水环境治理效率产生负面影响,创新水平、环境管理、对外开放程度以及工业规模对长三角城市群水环境治理效率产生正面影响.

截至 2023 年末长三角城市群总人口达到 2.38 亿人,其中江苏省作为长三角城市群人口最多的省份,常住人口数量达到 8526 万人,接下来依次是浙江省(6627 万人)、安徽省(6121 万人)和上海市(2487.5 万人).随着人口规模的扩大和城镇化水平的提高,长三角城市群生活用水、农业用水和工业用水需求也在进一步增加,污水处理厂和管网建设速度落后于人口增长速度,对水环境治理提出了严峻挑战.

表 5 Tobit 模型估计结果

Table 5 Estimation results of the panel data random effects Tobit model

影响因素	回归系数	标准差	*Z*	*P*	显著性
人口规模	−0.007	0.007	−1.000	0.328	
创新水平	0.001	0.001	0.210	0.839	
城镇化水平	−0.341	0.145	−2.340	0.027	**
产业结构	−0.483	0.380	−1.270	0.215	
环境管理	5.038	6.494	0.780	0.445	
对外开放程度	0.002	0.001	1.520	0.140	
工业规模	0.001	0.001	0.780	0.442	
常数项	160.908	25.193	6.39	0.000	***

注:*** $P<0.01$, ** $P<0.05$, * $P<0.1$.

创新水平的提高有利于更高效的水环境治理技术和治理装备的研发,不仅企业可以降低污水处理的成本,提高出水水质标准,相关监管部门也可以凭借检测技术的创新来提高工作效率[48].比如苏州市拥有大量工业园区,这也就带来了不同行业的复杂废水的排放,对废水处理的迫切需求促进了工业废水处理技术和装备的创新和升级.同时,苏州市积极鼓励本地环保企业与高校研究机构开展合作,在水环境治理技术方面取得了大量创新成果,进一步推动水环境治理.

城镇化意味着人口、产业和消费活动在长三角城市群空间上的高度集聚,从自然水体中的取水量大幅增加,水体自净能力也开始减弱.此外,为了建设城市,长三角城市群区域填埋了湿地,破坏了水体的自我修复能力,加重了水环境治理的压力.

长三角城市群作为中国工业化和城市化的核心区域,第二产业占比较高,也意味着其工业废水排放量会远高于全国平均水平.虽然现代第二

产业正在成为长三角城市群推动水环境治理的重要力量,在政策驱动下长三角城市群也在通过淘汰落后产能和推广清洁生产技术来降低单位产值的用水量和污染物排放量,但一些高耗水行业仍依赖“先污染、后处理”模式,不利于水环境治理.

环境管理对长三角城市群水环境治理的正面影响主要体现在通过资金投入推动污染治理能力提升、产业结构优化和生态修复能力的增强.城市通过增加环境保护投入来支持新建或扩建污水处理厂,提升污水处理能力,政府还通过补贴、税收优惠等政策,带动了新能源和节能环保产业的发展,支持企业进行转型升级和技术改造[49].

长三角城市群作为中国对外开放的前沿地带,对外开放程度的持续深化有利于外资企业在环保领域投资的增加,同时有利于企业学习和引进国外优秀的环保技术和环保项目,提高工业废水处理率,进一步推动水环境治理.例如宁波舟山港作为世界级大港在吸引外资的同时也学习和引进了高标准的环保技术和内部管理标准,推动了整个区域工业废水处理水平的提升.

随着长三角一体化进程加速和绿色工业转型深化,工业规模扩大有利于降低治理成本,例如2023 年长三角化工园区推广的“一体化污水处理”模式,大型企业通过集中治污设施实现单位治理成本下降.同时,工业规模扩大也有利于吸引环保技术投资,截止 2022 年长三角高新技术企业研发投入占比达 3.2%,有利于水环境治理效率的提升.

2.6　建议

2.6.1　长期建议　(1)长三角城市群水环境治理效率整体偏向中高水平,应继续保持国家以及地方财政对城市群水环境治理的财政投入力度,培养治理过程中所需要的人才,努力提高技术效率、纯技术效率和规模效率水平,从而促进水环境治理综合效率的提升.例如安徽省部分城市需要加大水环境治理的人力资源的培养,引进环保科技人才,同时要拓展各主体参与水环境治理的途径,积极引导社会力量参与水环境治理.

(2)长三角城市群现有的经济增长方式存在引起经济发展和水环境保护之间失衡的情况,安徽省部分城市政府要注意经济发展和水环境治理的均衡发展,加强生态保护与经济发展的统筹协调,建立生态补偿长效机制,争取到中央和地方政府对欠发达地区水环境治理的财政支持,提高城市的基础设施建设水平,努力缩小区域之间的差距,实现长三角城市群水环境治理效率的均衡发展.

(3)目前,长三角城市群水环境治理效率仍未完全克服发展的不均衡性,苏州市等较发达城市应加强跨区域产业协同发展,与上海市等城市形成产业链上下游联动,共同推动区域产业绿色升级.嘉兴市等发展中城市则是要加强与周边城市的生态保护合作,实现区域水环境的共同改善.

(4)技术创新和产业结构升级有利于提升水环境治理效率,长三角城市群作为中国工业化和城市化的核心区域,第二产业占比较高,苏州市等较发达城市的当地政府要加快推进产业结构的优化升级以及对技术创新的转化,同时要加强对新兴产业的环境监管,建立健全绿色产业评价体系,确保新兴产业在发展过程中不对水环境造成破坏.

(5)从结果得知,虽然环境管理和对外开放程度没有通过显著性检验,但是仍然对长三角城市群水环境治理效率产生一定的影响.对此,各个城市应该继续加大水环境治理的资金投入,要重点支持污水处理、湖泊修复等项目,引导社会资本参与水环境治理.除此之外,像上海市等开放程度高的城市应该加强国际合作与交流,引进吸收全球先进的水环境治理理念和技术,进一步提升水环境治理效率.

2.6.2　短期建议　(1)上海市处于后工业化阶段,以服务业为主导,其水环境治理面临的主要挑战是水生态功能恢复和高品质水环境供给.上海市可以凭借其创新技术的优势,加强对水环境治理技术和工具的研发,进一步推动水环境治理.

(2)苏州市、无锡市和常州市等较发达城市处于工业化后期,水生态修复压力大,要把重点放在对高污染高耗能的传统企业的转型和升级上,出台相应的优惠政策鼓励传统企业引入污水处理技术,同时要执行更严格的污染排放标准,提高水环境治理效率.

(3)嘉兴市等发展中城市要推进区域农村环境基础设施建设,加大对污水处理厂、污水管网等基础设施建设的资金投入,缩小城乡污水基础设施的差距.同时各城市要借鉴先进地区经验并结合实际情况,制定适合本地的水环境治理技术标准和规范.

(4)安徽省部分城市要引进先进的污水处理技术和设备,加快污水处理厂等基础设施建设,同时加强与长三角其他省市的交流与合作,吸取经验了解城市的优势和当前所面临的挑战,积极采取相应措施来提升本地水环境治理水平.

3 结论

3.1 在研究期内,长三角城市群水环境治理综合效率整体呈现较为平稳的状态,并在 2023 年达到顶峰,其均值为 1.183.但在 2022 年水环境治理综合效率值达到谷底,这是因为在这一年里经历了极端天气,水环境治理综合效率较低,其均值为 1.121.此外,在研究期内规模效率平均值始终低于水环境治理综合效率平均值,并且在 2023 年达到低谷,其均值为 0.793.

3.2 长三角城市群水环境治理效率的整体基尼系数相对较低,均值为 0.056,从组内基尼系数来看,整体呈现出浙江省(均值为 0.058)>安徽省(均值为 0.055)>苏沪地区(均值为 0.044)的关系,苏沪地区内部的治理效率均衡性最优,安徽省-浙江省组间差异最大.区域差异主要来源于超变密度贡献率,在研究期内超变密度贡献率的年均值为 38.053.

3.3 在研究期内,长三角城市群水环境治理效率的标准差椭圆迁移中心主要处于宣城市内,中西部城市治理效率提升速度加快,区域差距缩小,治理资源向中西部欠发达地区倾斜.此外,在研究期内椭圆扁率呈现波动式变化,并且在 2018 年达到顶峰,其椭圆扁率为 0.196,长轴和短轴都以轻微幅度在缩短,长轴由 204.099 下降到 203.539km,短轴由 170.137km 下降到 168.687km,意味着长三角城市群水环境治理效率开始向“相对聚集”转变.

3.4 研究结果表明,在控制其他变量的多元回归模型中,人口规模(β=−0.007)、城镇化水平(β =−0.341)和产业结构(β=−0.483)对长三角城市群水环境治理效率呈现显著负向关联.与之形成对比的是,创新水平(β=0.001)、环境管理(β=5.038)、对外开放程度(β=0.002)和工业规模(β =0.001)展现出显著的正向驱动效应.

参考文献:

[1] 陈燚丽.长三角城市群协作治理研究 [D]. 杭州:浙江财经大学, 2019.
Chen Y L. Research on the cooperative governance of Yangtze River Delta city group: a case study of environmental problems [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Finance and Economics, 2019.

[2] 谢艾玲,徐 枫,向 龙,等.环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):391-397.
Xie A L, Xu F, Xiang L, et al. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5):391-397.

[3] 李俊龙,郑丙辉,张铃松,等.中国主要河口海湾富营养化特征及差异分析 [J]. 中国环境科学, 2016,36(2):506-516.
Li J L, Zheng B H, Zhang L S, et al. Eutrophication characteristics and variation analysis of estuaries in China [J]. China Environmental Science, 2016,36(2):506-516.

[4] 杨占红,孙启宏,王 健,等.我国水生态环境保护思考与策略研究 [J]. 生态经济, 2022,38(7):198-204.
Yang Z H, Sun Q H, Wang J, et al. Study on the countermeasures of water eco-environment protection in China [J]. Ecological Economy, 2022,38(7):198-204.

[5] 饶清华,林秀珠,李家兵,等.流域社会经济与水环境质量耦合协调度分析 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1784-1792.
Rao Q H, Lin X Z, Li J B, et al. Analysis of coupling coordination between social economy and water environment quality in river basin [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1784-1792.

[6] 马慧君,杨肖丽,高 甜.我国中部地区水资源利用效率评价及归因分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2662-2672.
Ma H J, Yang X L, Gao T. Evaluation and attribution of water resource utilization efficiency in the central China [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2662-2672.

[7] 罗 丽,赵 新.论制度协同框架下生态环境治理现代化之创新 [J]. 环境保护, 2023,51(8):42-45.
Luo L, Zhao X. Innovation in modernization of ecological environment governance under the framework of institutional coordination [J]. Environmental Protection, 2023,51(8):42-45.

[8] 周五七.长三角一体化的环境影响及其门槛效应研究 [J]. 当代经济管理, 2023,45(10):35-45.
Zhou W Q. Environmental impact and threshold effect of market integration in the Yangtze River Delta [J]. Contemporary Economic

Management, 2023,45(10):35−45.

[9] 李金凤.水环境治理 PPP 项目风险评价研究 [D]. 华北理工大学, 2021.
Li J F. Research on risk evaluation of PPP project in water environment management [D]. North China University of Science and Technology, 2021.

[10] Liu X Q, Xu W, Liu F Y, et al. Evaluation of the governance efficiency of water environmental governance efficiency in Yangtze River Delta from the perspective of multivariate synergies [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(4): 2347-2347.

[11] 王殿常,赵云鹏,陈亚松,等.我国城市水环境治理的现状与困境分析 [J]. 给水排水, 2023,59(11):25−31.
Wang D C, Zhao Y P, Chen Y S, et al. Analysis of present situation and dilemma for treatment of urban water environment of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023,59(11):25−31.

[12] 张　宁,李海洋,张俊飚,等.中国水环境协同治理的时空演化特征及影响因素——基于治水流程闭环与协同机制统筹的思考 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6763−6777.
Zhang N, Li H Y, Zhang J B, et al. The spatiotemporal evolution features and influencing factors of water environment co−governance in China: thinking based on the closed−loop and synergy mechanism of water control process [J]. China Environmental Science, 2023,43 (12):6763−6777.

[13] 马　骏,陈秋谕.长三角地区绿色金融的水环境治理效应研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2025,34(4):744−756.
Ma J, Chen Q Y. Study on water environment governance effect of green finance in Yangtze River Delta region [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2025,34(4):744−756.

[14] 马军旗,乐　章,夏　屹.湖长制对水环境治理效果的影响研究——以武汉市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(5):1125−1136.
Ma J Q, Le Z, Xia Yi. Research on the influence of lake chief system on water environment treatment effect: taking Wuhan City as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022,31(5):1125−1136.

[15] 鲁先锋.地方政府水环境治理的协同机制及实现条件——基于 SX 县水环境治理分析 [J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2023,23(2):127−137.
Lu X F. Coordinative mechanism and realization condition of local government water environment governance——based on the analysis of water environment governance in SX county [J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2023,23(2):127−137.

[16] 刘永超,杜政轩,施　琪,等.水资源、水环境、水生态复合系统内涵解析及韧性评估指标体系研究 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2025, 38(5):31−42.
Liu Y C, Du Z X, Shi Q, et al. Connotation analysis and resilience assessment index system development for the water resources-water environment-water ecology coupled system [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science Edition), 2025,38(5):31−42.

[17] Sun B, Liang X, Li B, et al. Spatiotemporal evolution and optimization of urbanization − water environment coupling in the Cheng−Yu Region [J]. Land, 2025,14(2):412−412.

[18] 刘智卿,尹海涛.中国首个跨省流域横向生态补偿政策的溢出效应 [J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2025,33(1):123−140.
Liu Z Q, Yi H T. Spillover effects of China's first cross-provincial river basin horizontal ecological compensation policy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 33(1):123−140.

[19] 杨　旭,汤资岚.协同势差:对流域生态治理模式的一种反思 [J]. 湖南社会科学, 2023,36(2):75−84.
Yang X, Tang Z L. Synergetic potential difference: a reflection on the model of watershed ecological governance [J]. Social Sciences in Hunan, 2023,36(2):75−84.

[20] Godden, Ison. Community participation: exploring legitimacy in socio−ecological systems for environmental water governance [J]. Australasian Journal of Water Resources, 2019,23(1):45−57.

[21] 李加林,田　鹏,应　超,等.中国治水技术的演变及其对当代“三水统筹”治理的启示 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2025,38(5):1−8.
Li J L, Tian P, Ying C, et al. The evolution of water governance technologies in China and their implications for modern “Three-Water Coordinated” governance [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science Edition), 2025,38(5):1−8.

[22] 廖果平,王云婷.长三角城市群环境治理绩效测算及影响因子分析 [J]. 常州大学学报(社会科学版), 2020,21(2):70−78.
Liao G P, Wang Y T. The performance measurement and impact factor analysis of the environmental governance in urban agglomerations in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Changzhou University (Social Science Edition), 2020,21(2):70−78.

[23] 胡　妍,李　巍.区域用水环境经济综合效率及其影响因素——基于 DEA 和 Malmquist 指数模型 [J]. 中国环境科学, 2016,36(4): 1275−1280.
Hu Y, Li W. A study of water environment−economy integrated efficiency and its driving factors for regional water use based on a combination of DEA and Malmquist index [J]. China Environmental Science, 2016,36(4):1275−1280.

[24] 梁　甜,陈　中.中国生态环境治理效率测度、区域差异与收敛特征分析 [J]. 统计与决策, 2024,40(7):93−97.
Liang T, Chen Z. Analysis of the measurement of ecological environment governance efficiency in China, regional differences and convergence characteristics [J]. Statistics & Decision, 2024,40(7):93−97.

[25] 甘　甜,王子龙.长三角城市环境治理效率测度 [J]. 城市问题, 2018, 37(1):81−88.
Gan T, Wang Z L. Measurement on the efficiency of urban environment governance in the Yangtze River Delta area [J]. Urban Problems, 2018,37(1):81−88.

[26] 颉茂华,李玲玉.中国八大综合经济区环境治理绩效测度与时空演

变 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023,33(9):86-97.
Xie M H, Li L Y. Environmental governance performance measurement and spatio-temporal evolution of eight comprehensive economic zones in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(9):86-97.

[27] 张 萌,陈小龙,狄乾斌.黄河流域环境治理效率的区域差异、动态演进及影响因素 [J]. 环境工程技术学报, 2024,14(6):1763-1776.
Zhang M, Chen X L, Di Q B. Regional differences, dynamic evolution and influencing factors of environmental governance performance in the Yellow River Basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(6):1763-1776.

[28] 李 莉,李 润,王志强,等.中国环境治理绩效的区域差异及动态演进研究 [J]. 生态经济, 2023,39(8):178-186.
Li L, Li R, Wang Z Q, et al. Research on regional differences and dynamic evolution of environmental governance performance in China [J]. Ecological Economy, 2023,39(8):178-186.

[29] 周利梅,李军军.基于SBM-Tobit模型的区域环境效率及影响因素研究——以福建省为例 [J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版), 2018,63(1):57-64,81,170.
Zhou M L, Li J J. Research on regional environment efficiency and it's factors based on SBM-Tobit model——Fujian Province as example [J]. Journal of Fujian Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2018,63(1):57-64,81,170.

[30] 徐小鹰,田煞煞.长三角城市群绿色发展水平的时空演变及趋势预测 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(12):2568-2581.
Xu X Y, Tian X X. Spatial-temporal evolution and trend prediction of green development level of Yangtze River Delta urban agglomerations [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022, 31(12):2568-2581.

[31] 何寿奎,胡春杰.多主体参与下长江经济带水环境治理效率研究——基于空间杜宾模型与门槛效应 [J]. 人民长江, 2025,56(4):8-16.
He S K, Hu C J. Efficiency of water environment governance in the Yangtze River Economic Belt under multi-stakeholder participation: a spatial Durbin model and threshold effect analysis [J]. Yangtze River, 2025,56(4):8-16.

[32] 吴 桨,张兰婷,方媛瑗,等.河长制下江西省水环境治理效率评价研究——基于超效率 SBM 和 Tobit 模型 [J]. 中国农村水利水电, 2024,(11):119-124,132.
Wu J, Zhang L T, Fang Y Y, et al. Evaluation of water environment management efficiency in Jiangxi Province under the river chief system: based on the super-efficiency SBM and Tobit models [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024,66(11):119-124,132.

[33] 王西琴,贾宝珍,姜智强,等.基于产业结构的区域水环境承载力优化方法与例证 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2652-2661.
Wang X Q, Jia B Z, Jiang Z Q, et al. Optimization and case study of water environmental carrying capacity based on industrial structure [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2652-2661.

[34] 徐小鹰,陈 宓.资源环境与高质量发展的耦合协调及空间关联——基于长三角城市群的数据分析 [J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2023,43(9):137-147,187.
Xu X Y, Zhen M. Coupled coordination and spatial association of resource & environment and high quality development: analysis based on the data in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Journal of South-Central Minzu University (Humanities and Social Sciences), 2023,43(9):137-147,187.

[35] 周 驰,李加林,刘永超,等.基于 DPSIR-Tapio 模型的水环境治理绩效及障碍评价-以环太湖城市群为例 [J]. 中国环境管理, 2025, 17(2):74-89.
Zhou C, Li J L, Liu Y C, et al. Evaluation of water environment governance performance and its obstacles based on DPSIR-Tapio model: a case study of the Taihu Lake city cluster [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2025,17(2):74-89.

[36] 邱 斌,朱洪涛,齐 飞,等.长江流域典型城市水生态环境特征解析及综合整治对策 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(1):1-9.
Qiu B, Zhu H T, QI F, et al. Analysis of the characteristics of water eco-environment and comprehensive countermeasure for typical cities in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(1):1-9.

[37] 汪嘉杨,翟庆伟,郭 倩,等.太湖流域水环境承载力评价研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1979-1987.
Wang J Y, Zhai Q W, Guo Q, et al. Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu lake Basin [J]. China Environmental Science, 2017,37(5):1979-1987.

[38] 薄立明,魏 伟,尹 力,等.2000~2020 年长江经济带水生态空间格局变化及其影响要素 [J]. 中国环境科学, 2023,43(2):874-885.
Bo L M, Wei W, Yin L et al. Evolution characteristics and influencing factors of hydro-ecological space pattern in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2020 [J]. China Environmental Science, 2023,43(2):874-885.

[39] 曾恩钰,陈永泰.空间溢出视角下的城市水环境影响因素研究——以太湖流域城市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(6):1312-1323.
Zeng E Y, Chen Y T. Research on the influencing factors of city water environment from the perspective of spatial spillover: a case of cities in the Taihu Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022,31(6):1312-1323.

[40] 段洋洲,王奕淇,甄雯青.黄河流域环境治理绩效的空间关联网络及影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2024,37(7):1546-1560.
Duan Y Z, Wang Y Q, Zhen W Q. Analysis of spatial correlation network and influencing factors of environment governance performance in the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(7):1546-1560.

[41] 张 峰,王 晗,薛惠锋.环境资源约束下中国工业绿色全要素水资源效率研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(11):5079-5091.
Zhang F, Wang H, Xue H F. China's industrial green total factor water efficiency under the constraints of environment and resource [J]. China Environmental Science, 2020,40(11):5079-5091.

[42] 康妍昕,林芊含.我国省域环境治理效率评价及其影响因素——基

于熵权法与 DEA 非期望产出模型 [J]. 海峡科学, 2023,(8):45-54.
Kang Y X, Lin Q H. Evaluation of environmental governance efficiency in provincial regions of our country and its influencing factors - based on entropy weight method and DEA non-ideal output model [J]. Straits Science, 2023,(8):45-54.

[43] 胡东滨,林　媚,陈晓红.流域横向生态补偿政策的水环境效益评估 [J]. 中国环境科学, 2022,42(11):5447-5456.
Hu D B, Lin M, Chen X H. Effects of river basin horizontal ecological compensation on water environment benefits [J]. China Environmental Science, 2022,42(11):5447-5456.

[44] 徐孟志,李继霞,刘腾飞,等.中国环境治理绩效的区域差异、动态演进及收敛性——基于流域视角的比较分析 [J]. 经济地理, 2023, 43(10):1-12.
Xu M Z, Li J X, Liu T F, et al. Difference evolution and convergence of environmental governance performance in three major river basins of China [J]. Economic Geography, 2023,43(10):1-12.

[45] 袁宏川,陈平菊,晋良海,等.城市水环境治理效率时空演变及影响因素研究 [J]. 水电能源科学, 2023,41(1):50-54.
Yuan H C, Chen P J, Jin L H, et al. Research on spatio-temporal evolution and influencing factors of urban water environment governance efficiency [J]. Water Resources and Power, 2023,41(1): 50-54.

[46] 李海洋.中国水环境治理效率的时空演化及其影响因素研究 [D]. 浙江:杭州电子科技大学, 2024.
Li H Y. Study on the spatiotemporal evolution of water environment governance efficiency and its influencing factors in China — based on the digital empowerment perspective [D]. Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2024.

[47] 吴辉煌,范冰雄,张雪婷,等.面向水环境现代化治理的绩效评估与优先区识别——以九龙江流域-厦门湾为例 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(5):2471-2480.
Wu H H, Fan B X, Zhang X T, et al. Performance evaluation and priority area identification for modern governance of water environment: a case study of Jiulong River watershed-Xiamen Bay [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2471-2480.

[48] 李　刚,邵　方.环境规制、技术创新与产业结构优化升级——基于长三角地区的实证分析 [J]. 大连大学学报, 2024,45(2):86-96,104.
Li G, Shao F. Environmental regulation, technological innovation and optimization and upgrading of industrial structure--bases on the Yangtze River Delta [J]. Journal of Dalian University, 2024,45(2):86-96,104.

[49] 黄　磊,吴传清.长江经济带生态环境绩效评估及其提升方略 [J]. 改革, 2018,31(7):116-126.
Huang L, Wu C Q. The ecological environmental performance and its improving strategies of the Yangtze River Economic Belt [J]. Reform, 2018,31(7):116-126.

作者简介：傅慧珊(2002-),女,浙江温州人,宁波大学硕士研究生,主要研究方向:水生态环境评估.2969115162@qq.com.