

# 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

周驰<sup>1</sup>, 李加林<sup>1,2\*</sup>, 刘永超<sup>1,2</sup>, 曹罗丹<sup>1</sup>, 应超<sup>1</sup>

(1. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江宁波 315211; 2. 浙江省陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 浙江宁波 315211)

**【摘要】**在城市化与工业化快速进程中, 日益凸显的水环境问题成为制约社会经济可持续发展的关键。构建基于水环境治理绩效评价的科学治理策略来减轻水环境压力, 已成为可持续发展的迫切需求。目前研究大多基于统计数据和时空分析法进行绩效评价, 忽视了子系统间的动态互动和影响因素的探究。以环太湖城市群为研究区, 基于驱动力—压力—状态—影响—响应 (DPSIR) 模型构建水环境治理绩效评价体系, 采用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 模型对水环境治理绩效进行时空演变分析, 运用 Tapio 脱钩模型揭示子系统间的动态互动关系, 借助障碍度模型识别水环境治理的关键影响因素。结果表明: ①环太湖城市群水环境治理绩效整体呈现上升的趋势, 各地级市水环境治理绩效排序为: 苏州>常州>湖州>嘉兴>无锡。②环太湖城市群在 P-D 和 P-R 主要呈现出弱脱钩或强脱钩状态, 而 P-S&I 表现出较大的不稳定性; 各地级市脱钩水平排序为: 嘉兴>湖州=无锡>常州>苏州市; 水环境治理绩效与脱钩水平并非正相关。③影响水环境治理的主要因素为政府节水投资、城镇化水平、产业结构优化调整、专业技术人才的投入、污水处理能力和供水综合生产能力。

**【关键词】**水环境治理绩效; DPSIR 模型; Tapio 脱钩模型; 障碍因子; 环太湖城市群

**【中图分类号】**X821; X52

**【文章编号】**1674-6252 (2025) 02-0074-016

**【文献标识码】**A

**【DOI】**10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.02.074

### 引言

水作为基础自然资源和战略性经济资源<sup>[1]</sup>, 是城市可持续发展的重要支撑<sup>[2]</sup>。随着区域经济的快速发展, 生产生活用水增长的同时水环境问题日益严重, 制约着区域的社会经济的可持续发展<sup>[3,4]</sup>。如何针对水环境实施高效精准的治理策略, 实现水资源的可持续性利用, 已成为我国城市及区域发展进程中亟须解决的问题<sup>[5]</sup>。水环境治理绩效评价作为

衡量水环境治理科学性的有效手段<sup>[6]</sup>, 是经济发展过程中促进生态环境改善不可缺失的关键环节<sup>[7]</sup>。因此, 开展水环境治理绩效评价对于构建科学的治理策略以实现水资源可持续利用和经济发展具有重要的意义。

目前, 国内外许多学者已经从水资源不同视角构建指标体系并量化了水环境治理的绩效。从研究视角看, 以流域水生态承载力评价<sup>[8,9]</sup>、水生态健康评价<sup>[10,11]</sup>和水环境治理绩效审计评价<sup>[12,13]</sup>的研

**资助项目:** 国家社科基金重大项目“统筹水资源、水环境、水生态治理的机制和路径研究”(23&ZD105)。

**作者简介:** 周驰 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源开发与水环境治理, E-mail: 2411110033@nbu.edu.cn

**\* 责任作者:** 李加林 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源开发与水环境治理, E-mail: nbnj2001@163.com。

究较多,但对水环境治理绩效模型、指标选取和实际应用方面仍然处在完善过程中<sup>[14]</sup>,对水环境治理绩效评价<sup>[15,16]</sup>的研究有待深入;从评价方法来看,主要包括主成分分析法<sup>[17]</sup>、模糊综合评价法<sup>[18]</sup>、熵权法<sup>[19]</sup>、灰色关联分析法<sup>[20]</sup>和层次分析法<sup>[21]</sup>等;从指标内容看,包括从生态保护、环境综合治理、人水关系调节、区域高质量发展、文化复兴等主题功能,构建黄河流域生态保护和高质量发展治理水平的指标体系<sup>[22]</sup>;基于驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型预测未来英格兰和威尔士水环境治理绩效<sup>[23]</sup>。目前的水环境治理评价往往集中在基础统计指标上<sup>[15]</sup>,但较少涉及生态系统服务功能及植被指数等栅格数据指标,评价指标体系的完整性尚待提升。尽管 DPSIR 模型具有综合性、整体性、系统性等优势,能够与 TOPSIS 模型相结合对区域绩效进行评估,但该模型在量子系统间相互作用时存在一定局限<sup>[24]</sup>。

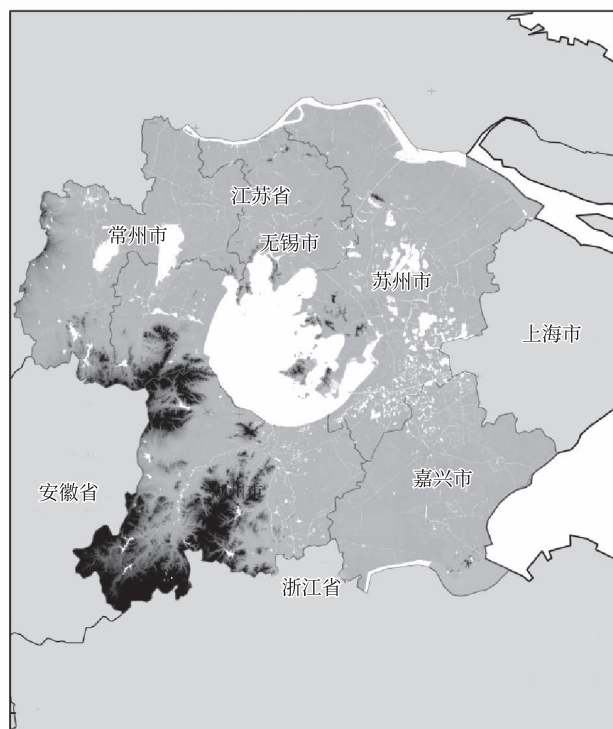
太湖是我国第三大淡水湖及长三角地区最重要的饮用水水源地。环太湖城市群作为长三角的核心圈层,是长三角一体化战略向纵深推进最重要的战略空间。该地区城市化和工业化的快速推进,带动了城镇人口的增长和社会经济的快速发展,但也引发了一系列环境问题<sup>[25]</sup>,包括水资源供需矛盾的加剧及太湖蓝藻污染等水环境质量的恶化<sup>[26]</sup>。加强太湖保护治理、对于保障环太湖城市群水安全及生态安全、推动长三角一体化发展和长江经济带共抓大保护具有重要意义。政府及学术界对太湖水环境予以高度关注,2012年江苏省原环保厅发布《关于配合做好太湖治理省实施方案修编工作的通知》,2022年国家发展改革委联合自然资源部、生态环境部、住房城乡建设部、水利部、农业农村部联合印发了《太湖流域水环境综合治理总体方案》;区域的水环境治理绩效评价,多数研究仅限于绩效的时空演变剖析,如基于压力—状态—响应(PSR)模型对太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估研究<sup>[27]</sup>,未深入探究影响绩效的因素及子系统间的相互作用。鉴于水环境治理绩效缺乏统一的概念体系,借鉴环境绩效<sup>[28]</sup>、环境治理绩效<sup>[29]</sup>及环境绩效评价<sup>[30]</sup>的相关理论界定水环境治理绩效评价的内涵,即对政府作为治理主体的水环境治理活动进行量化评估,以衡量其在解决水环境问题过程中所投入的资源与产出的成效。因此,本研究以环太

湖城市群为研究区域,基于 DPSIR 模型构建环太湖城市群水环境治理绩效评价体系,结合基础统计指标、生态系统服务功能及植被指数等指标,采用 TOPSIS 模型对环太湖城市群的水环境治理绩效进行评价,运用 Tapio 脱钩模型评估 DPSIR 模型子系统间相互作用关系,基于障碍度模型对影响水环境治理的关键障碍因素进行分析。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

环太湖城市群(30°5′~32°04′N, 119°08′~121°31′E)位于江苏省南部和浙江省北部区域,由江苏苏州、无锡、常州及浙江嘉兴、湖州组成<sup>[31]</sup>(图1);全域属亚热带季风气候,降雨充足,整体地势西南高、东北低,总面积约为27400 km<sup>2</sup>,约占长江三角洲地区面积的1/4,是长江三角洲地区重要生态涵养区和生态屏障。截至2022年末,常住人口共3473万,GDP总量约5.9万亿元,仅占长三角“两省一市”20%的常住人口、12.5%的国



湖泊与河流  
市边界线  
省边界线

DEM/m  
高: 1 545  
低: -67

图1 环太湖城市群的空间位置

土面积却贡献了近四分之一的 GDP。随着环太湖城市群工业化和城镇化进程的不断推进, 社会经济对水资源的需求激增与水资源保护之间的矛盾凸显, 对于环太湖地区的生态环境产生了诸多负面影响<sup>[32]</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

本研究涉及的数据包括地级市《统计年鉴》《水资源公报》《城市建设统计年鉴》的统计数据, 以及降水、气温、净初级生产力(NPP)等栅格数据(表1)。植被覆盖度指标数据利用归一化植被指数计算得到, 生物多样性、水源涵养、水土保持服务能力指数以《生态保护红线划定指南》中的NPP定量指标评估法得到。环太湖城市群水环境治理绩效值用各地级市水环境治理绩效值平均值表示。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 DPSIR 模型

DPSIR 是一种在环境系统中广泛使用的评价指标体系概念模型, 将自然系统的评估指标分为五个要素: 驱动力、压力、状态、影响和响应<sup>[33]</sup>。驱动力(D)是推动流域系统压力增加引发环境变化的根本动力<sup>[34]</sup>; 压力(P)是指由驱动力所引起对环境造成的影响; 状态(S)是在压力状态下生态系统环境的表现; 影响(I)是指系统状态变化对自然和社会环境的影响; 响应(R)是指针对环境问题所采取的应对措施。研究中 DPSIR 五个要素之间的关系及其脱钩分析见图2。

#### 1.3.2 评价体系的构建

根据政策相关性、科学性、系统性的原则<sup>[15]</sup>, 参考前人研究基础<sup>[15,35-37]</sup>, 结合 DPSIR 模型的原理, 本研究构建了环太湖城市群水环境

治理绩效评价指标体系, 见表2。

#### 1.3.3 组合权 TOPSIS 模型

运用熵权法和变异系数法计算组合权重, 避免单一方法下量化结果与定性分析结果的偏差<sup>[36]</sup>。组合权法结合 TOPSIS 模型能客观地评价指标的动态变化和规律, 有效避免因部分或整体数据差异过小导致的评价困难, 克服主观因素<sup>[38]</sup>。本研究利用组合权 TOPSIS 模型计算水治理绩效综合值, 计算步骤如下。

当评价指标为正向指标:

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_{ijmin}) / (x_{ijmax} - x_{ijmin}) \quad (1)$$

当评价指标为负向指标:

$$y_{ij} = (x_{ijmax} - x_{ij}) / (x_{ijmax} - x_{ijmin}) \quad (2)$$

式中,  $y_{ij}$  为环太湖城市群第  $i$  个城市第  $j$  个指标的标准值;  $x_{ijmin}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个指标数据的最小值;  $x_{ijmax}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个指标数据的最大

表1 研究数据来源

数据	数据来源	分辨率
行政区划数据	带审图号的行政区划图 [GS (2024) 0650 号]	—
河流湖泊数据	OpenStreetMap 官网	—
统计数据	《统计年鉴》《水资源公报》《城市建设统计年鉴》	—
降水量数据	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1000m
气温数据	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1000m
NPP 数据	MODIS 系列 MOD17A3 数据集 ( <a href="https://lpdaac.usgs.gov/">https://lpdaac.usgs.gov/</a> )	500m
DEM 数据	地理空间数据云 ( <a href="https://www.gscloud.cn/home">https://www.gscloud.cn/home</a> )	30m
NDVI 数据	国家青藏高原数据中心 (文献 [33])	250m
土壤数据	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 ( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )	1: 1×10 <sup>6</sup>

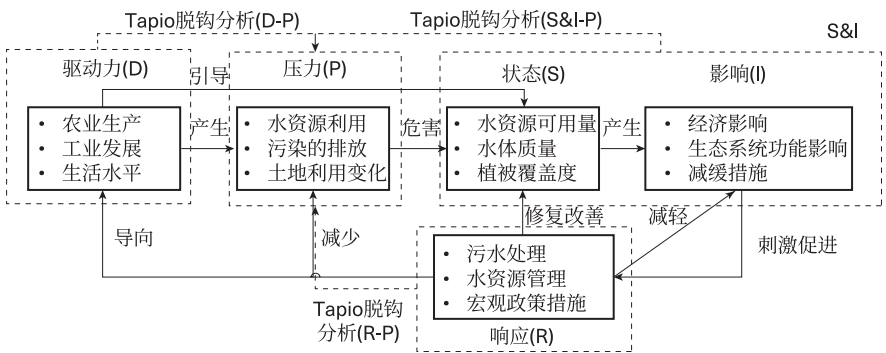


图2 基于 DPSIR-Tapio 脱钩模型框架的水环境治理评价

表2 环太湖城市群水环境治理绩效评价指标体系

目标层	子系统	具体指标	单位	类型	指标意义	简称
太湖流域水环境治理绩效评价指标体系	驱动力	人均地区生产总值	元/人	+	经济发展对水环境治理的驱动	D1
		城镇居民人均可支配收入	元/人	+	表征区域的生活水平	D2
		农村居民人均可支配收入	元/人	+		D3
		年降水量	mm	+	年降水量波动直接影响用水压力	D4
		农作物播种面积	hm <sup>2</sup>	-	播种面积越广，用水量越大	D5
	压力	第三产业占比	%	+	高耗水产业的降低	P1
		人口密度	人/km <sup>2</sup>	-	密度越大，水环境治理压力越大	P2
		城镇化率	%	-	人口聚集对环境产生的压力	P3
		供水总量	万 m <sup>3</sup>	-	反映区域实际提供的全部水量	P4
		人均用水量	L/人	-	反映区域用水量	P5
		二氧化硫排放量	t	-	反映经济发展对水环境的污染压力	P6
		污水排放量	万 t	-		P7
		COD 排放量	t	-		P8
	氨氮排放量	t	-	P9		
	状态	植被覆盖度		+	反映生态环境状况	S1
		水资源总量	亿 m <sup>3</sup>	+	反映区域水资源存在量的状况，包括地表径流量与降水入渗补给量	S2
		农林牧渔总产值	亿元	+	间接反映水质改善和产业结构优化的状况	S3
	响应	建成区绿化率	%	+	反映政府对城市生态调整的响应	R1
污水处理率		%	+	反映对水环境治理的能力	R2	
污水厂日处理能力		万 m <sup>3</sup>	+		R3	
工业固体废物综合利用率		%	+		R4	
水利、环境和公共设施管理业从业人数		人	+	反映政府对水环境治理的重视程度	R5	
节水措施投资总额		万元	+	近似反映政府对水环境治理的资金投入	R6	
影响	水源涵养服务能力		+	反映水环境治理对不同生态系统功能影响	I1	
	水土保持服务能力		+		I2	
	生物多样性维护服务能力		+		I3	
	第三产业增加值	亿元	+	反映第三产业占比变化带来的影响	I4	
	供水综合生产能力	万 m <sup>3</sup>	+	反映水环境治理对供水综合生产能力、利用和持续利用的影响	I5	
	节约用水量	万 m <sup>3</sup>	+		I6	
	万元地区生产总值用水量	m <sup>3</sup>	-		I7	
	水资源重复利用率	%	+		I8	

大值。

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (3)$$

$$E_j = (-1/\ln m) \sum_{j=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (4)$$

$$w_{1j} = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (5)$$

式中， $P_{ij}$  为第  $i$  个城市中第  $j$  个指标数据占比； $m$  为对象个数； $E_j$  为第  $j$  个指标的熵值； $w_{1j}$  为第  $j$  个指标通过熵权法计算的权重； $n$  为指标的个数。



$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (6)$$

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (7)$$

$$V_j = \delta_j / \bar{y}_j \quad (8)$$

$$w_{2j} = V_j / \sum_{j=1}^n V_j \quad (9)$$

$$w_j = w_{1j} w_{2j} / \sum_{j=1}^n w_{1j} w_{2j} \quad (10)$$

式中， $\bar{y}_j$  为第  $j$  个指标数据的平均值； $\delta_j$  为第  $j$  个指标数据的标准差； $V_j$  为变异系数； $w_{2j}$  为第  $j$  个指标通过变异系数法计算的权重； $w_j$  为第  $j$  个指标的综合权重。

$$\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 y_{11} & w_2 y_{12} & \cdots & w_n y_{1n} \\ w_1 y_{21} & w_2 y_{22} & \cdots & w_n y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 y_{m1} & w_2 y_{m2} & \cdots & w_n y_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$S_j^+ = \max(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}) \quad (12)$$

$$S_j^- = \min(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj})$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^+ - z_{ij})^2} \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^- - z_{ij})^2}$$

$$C_i = D_i^- / (D_i^- + D_i^+) \quad (14)$$

式中， $\mathbf{Z}$  为加权规范化矩阵； $S_j^+$  和  $S_j^-$  分别为第  $j$  个指标最优解和最劣解； $D_i^+$  和  $D_i^-$  分别为第  $i$  个对象到最优解和最劣解的欧式距离； $C_i$  为水环境治理绩效综合值。

### 1.3.4 Tapio 脱钩模型

本文将 Tapio 脱钩模型用于定量分析水环境驱动力 (D)、水环境治理 (R)、水环境状态 & 影响 (I&S) 与水环境压力 (P) 之间的关系 (图 2)。通过对变量的绝对增加或减少的弹性分析，将脱钩状态分为八类<sup>[40]</sup> (图 3)。以 D-P 为例，阐述脱钩状

态的含义<sup>[40]</sup> (表 3)，R-P、I&S-P 脱钩状态含义与之同理。Tapio 脱钩指数计算公式如下：

$$e(P, D) = \frac{\Delta P / P}{\Delta D / D} = \frac{(P_t - P_{t-1}) / P_{t-1}}{(D_t - D_{t-1}) / D_{t-1}} \quad (15)$$

$$e(P, R) = \frac{\Delta P / P}{\Delta R / R} = \frac{(P_t - P_{t-1}) / P_{t-1}}{(R_t - R_{t-1}) / R_{t-1}} \quad (16)$$

$$e(P, S \& I) = \frac{\Delta P / P}{\Delta S \& I / S \& I} = \frac{(P_t - P_{t-1}) / P_{t-1}}{(S \& I_t - S \& I_{t-1}) / S \& I_{t-1}} \quad (17)$$

式中， $e(P, D)$  为水环境压力—水环境驱动力的脱钩指数； $e(P, R)$  是水环境压力—水环境治理的脱钩指数； $e(P, S \& I)$  是水环境压力—水环境状态 & 影响的脱钩指数， $\Delta P$ 、 $\Delta D$ 、 $\Delta S \& I$  和  $\Delta R$  分别为第  $t$  年和  $t-1$  年之间水环境的压力、驱动力、状态 & 影响和治理的差值。

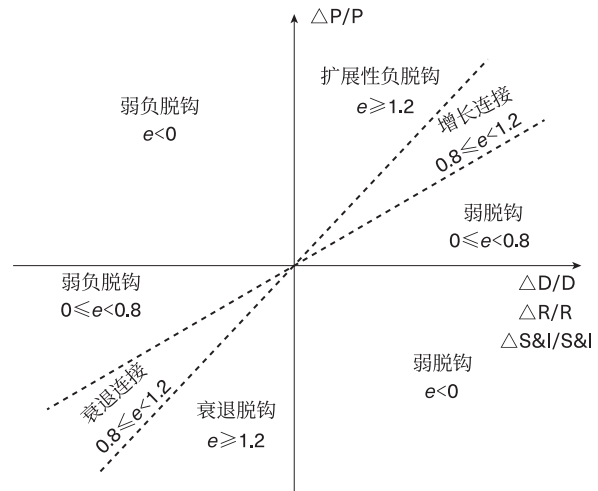


图 3 基于 Tapio 模型的脱钩类型判断示意

### 1.3.5 障碍度模型

通过障碍度模型诊断出评价结果的主要障碍因子及其障碍度，以寻求提升水环境治理的有效措施。计算公式如下：

$$Q_{ij} = \frac{w_j \times (1 - y_{ij})}{\sum_{j=1}^n w_j \times (1 - y_{ij})} \times 100\% \quad (18)$$

式中， $Q_{ij}$  为第  $i$  个对象第  $j$  个指标的障碍度； $w_j$  为第  $j$  个指标的综合权重， $y_{ij}$  为第  $i$  个城市第  $j$

表3 各类脱钩状态含义

脱钩状态	含义
强脱钩	最理想的状态, 水环境驱动力增强, 水环境压力下降
弱脱钩	水环境驱动力增强, 水环境压力上升, 但是压力上升速度小于驱动力增长速度
衰退脱钩	水环境驱动力减弱, 水环境压力下降, 但是压力下降速度大于驱动力减弱速度
强负脱钩	最不理想的状态, 水环境驱动力减弱, 水环境压力上升
弱负脱钩	水环境驱动力减弱, 水环境压力下降, 但是压力下降速度小于驱动力减弱速度
扩张性负脱钩	水环境驱动力增强, 水环境压力上升, 但是压力上升速度大于驱动力增强速度
增长连接	水环境驱动力增强, 水环境压力上升, 但是压力上升速度大于或等于驱动力增强速度
衰退连接	水环境驱动力减弱, 水环境压力下降, 但是压力下降速度小于或等于驱动力减弱速度

个指标的标准值;  $n$  为指标个数。

## 2 结果分析

### 2.1 水环境治理绩效时空演变分析

#### 2.1.1 水环境治理绩效评价指标体系关键指标

采用组合权重法计算的各指标权重见图4。在驱动力(D)子系统中, GDP(D1)、城镇与农村居民人均可支配收入(D2&D3)、降水量(D4)及农作物播种面积(D5)的权重分配相对均衡, 表明环太湖城市群水环境治理的初步推动力的影响程度大致相当; 在压力(P)子系统中, 城镇化率(P3)的权重显著高于其他压力指标, 表明环太湖城市群的城镇发展对水环境治理施加了重大压力; 在响应(R)子系统中, 节水措施的投资总额(R6)比重最大, 对影响(I)子系统产生了积极的推动作用, 促进了用水量的节约(I6), 有效减轻了供水压力。污水处理厂的日处理能力(R3)在R子系统中位居第二, 体现了政府对污水处理领域的重视; 各类污染物的排放(P6~P9)权重较低, 表明在政府积极实施治理措施后, 污染物排放有所减少, 从而有效改善了水质, 这也解释了农林牧渔总产值(S3)在状态(S)子系统中占据显著比例的原因。从子系统的角度分析, I和R子系统的综合权重超过了D、P、S子系统, 表明I和R子系统对于环太湖

城市群水环境影响更为显著, 权重比例分别达到了33.6%和28.8%。

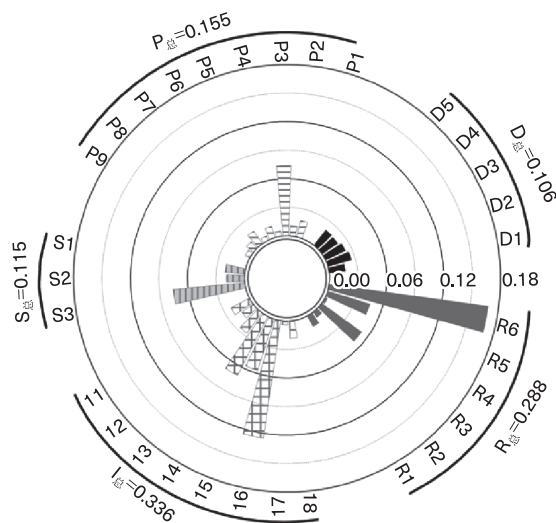


图4 水环境治理绩效评价指标体系指标权重

#### 2.1.2 基于行政区划的水环境治理绩效时空演变分析

本研究采用组合权重—TOPSIS方法, 评估了2013—2022年环太湖城市群水环境治理的绩效(图5), 呈现先下降再波动上升的趋势。分阶段来看, 2013—2015年, 环太湖城市群水环境治理绩效值呈显著下降趋势。这是因为在2013年环太湖城市群在水环境治理方面的总投资额及其节水成效显著高于后续年份(R大), 且较低的城镇化率和人口密度对水环境施加的压力较小(P小), 这些积极因素的综合效应超过了污染物排放(P)、自然降水减少(D↓)和水资源总量减少(S↓)带来的负面影响, 使得2013年水环境治理绩效达到峰值(R大, P小, 弥补了D↓和S↓, 使得水环境治理绩效最大)。随着经济的发展(P), 城镇化率和人口密度逐渐上升(P), 使得用水压力增加(D↑导致P↑), 水环境治理绩效值在2013—2015年呈现下降趋势。2015—2022年, 水环境治理绩效值总体呈上升趋势。这主要是因为国务院在2015年发布了《水污染防治行动计划》, 制定了一系列治理措施与防治目标, 期望水环境质量能得到全面改善(R↑); 以及“十三五”规划实施后, 国家对长江经济带发展的重视程度加大, 强调了水安全保障, 优化了水资源配置, 并加强了对重点流域的综合治理(R↑)。这些措施促进了环太湖城市

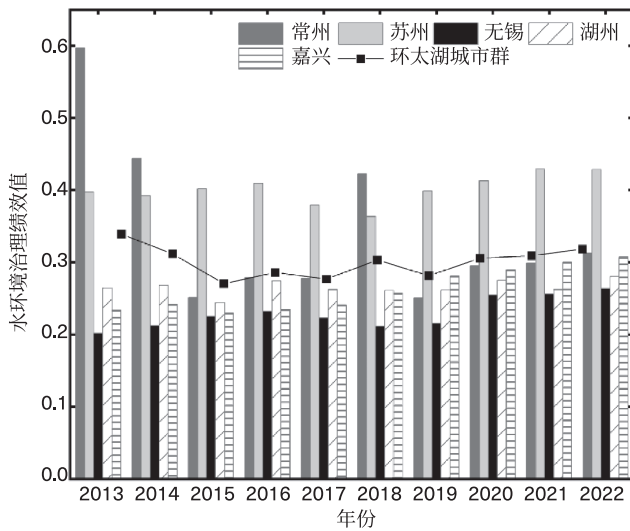


图5 水环境治理绩效演变

群经济的快速增长 ( $D \uparrow$ )、产业结构的优化调整 ( $S \uparrow$ )，以及水环境保护措施的有效执行 ( $R \uparrow$ )，提升了城市群水环境的整体质量 ( $R \uparrow$ ，促进  $D \uparrow$  和  $S \uparrow$ )。

从地级市角度分析，水环境治理绩效排名为：苏州>常州>湖州>嘉兴>无锡。这一结果与社会经济驱动、资金投入、地理位置等因素密切相关。环太湖城市群的经济社会发展呈现出“北强南弱”的趋势，从各项经济社会发展指标来看 ( $D$ )，整体上苏州和无锡表现较强，常州次之，而湖州和嘉兴相对较弱；常州、苏州、无锡、湖州和嘉兴在10年中节水措施投资总额 ( $R$ ) 分别为：67 194 万元、65 286 万元、24 721 万元、1686 万元、370.5 万元，因此，大致认为常州、苏州在太湖水环境治理上的投资远高于无锡、湖州和嘉兴；从太湖流域的水系分布与地理位置来看，苏州和嘉兴地处太湖流域下游，无锡位于中下游，常州处于中游，湖州位于上游。下游地区的水环境治理易受到中上游地区污染物排放等负面因素的干扰。苏州虽处于太湖流域偏下游位置，但凭借高经济发展程度及在水环境治理方面的大额投资，其水环境治理绩效整体优于其他城市；嘉兴由于处于下游，遭受的水环境污染较为严重，加上经济发展水平与资金投入在环太湖城市群中均靠后，致使其水环境治理绩效值排名第四；无锡经济发展强劲，投资总额也较高，但受到上游污染物排放的影响，同时城市化率提升、供水总量增加等负面因素 ( $P$ ) 未能被其正向发展 ( $R$ ) 所抵消，最终导致其在环太湖城市群中的水

环境治理绩效排名相对落后；常州在环太湖城市群中经济发展排名第三，且在水环境治理方面投资最多，结合其中游的地理位置优势，所以其水环境治理绩效表现良好；湖州尽管在水环境治理方面投资较少，经济发展也略靠后，但其处于上游，水环境污染程度相较于中下游城市更低，故水环境治理绩效排名第三。

从时间角度分析，常州市绩效波动显著，呈现先下降后上升的趋势；湖州市绩效变化则相对平稳；嘉兴市绩效呈现先平稳后增的趋势；苏州市绩效呈现为平稳后先下降再上升；无锡市绩效先上升后下降再上升。尽管各市的绩效变化受到自然因素和政府对于水环境治理重视程度的差异等因素影响 ( $R$ )，但自2019年以来，所有地级市的绩效均呈现出增长趋势。究其原因，2018年11月，长江三角洲区域一体化发展上升为国家战略<sup>[41]</sup>，这一战略举措促进了区域经济增长，提高了民众的生活水平，为水环境治理注入动力 ( $R \uparrow$  促进  $D \uparrow$ )；传统高耗水的第一产业逐步被耗水较少、经济附加值更高的第二产业和第三产业所替代，这一产业结构调整在推动经济发展的同时，也实现了水资源的有效节约<sup>[42]</sup> ( $R \uparrow$  和  $S \uparrow$ ，促进  $D \uparrow$  和  $I \uparrow$ )；污染治理政策的实施也提升了植被覆盖率和生态系统的服务功能 ( $R \uparrow$  促进  $I \uparrow$ )。这些因素共同推动了水环境治理绩效的持续提升。

### 2.1.3 基于行政区划的不同子系统指数的时空演变分析

从不同子系统的角度进行分析 (图6)，2013—2022年环太湖城市群及各地级市的驱动力指数整体呈上升趋势。环太湖城市群作为长三角一体化战略的核心区域，得到国家的高度重视和大力扶持，推动了该区域经济的迅猛发展，并显著提升了居民的生活水平 ( $R \uparrow$  促使  $D \uparrow$ )。这一积极的发展态势使得驱动力指数整体呈现上升趋势，表明推动水环境治理的动力在持续增强。尽管经济增长和农作物播种面积的减少等人为因素对驱动力产生了积极影响 ( $D1 \sim D4 \uparrow$ )，但这些因素并不能完全补偿自然降水减少 ( $D5 \downarrow$ ) 的负面影响，导致2017年和2022年的驱动力指数较前一年有所降低。

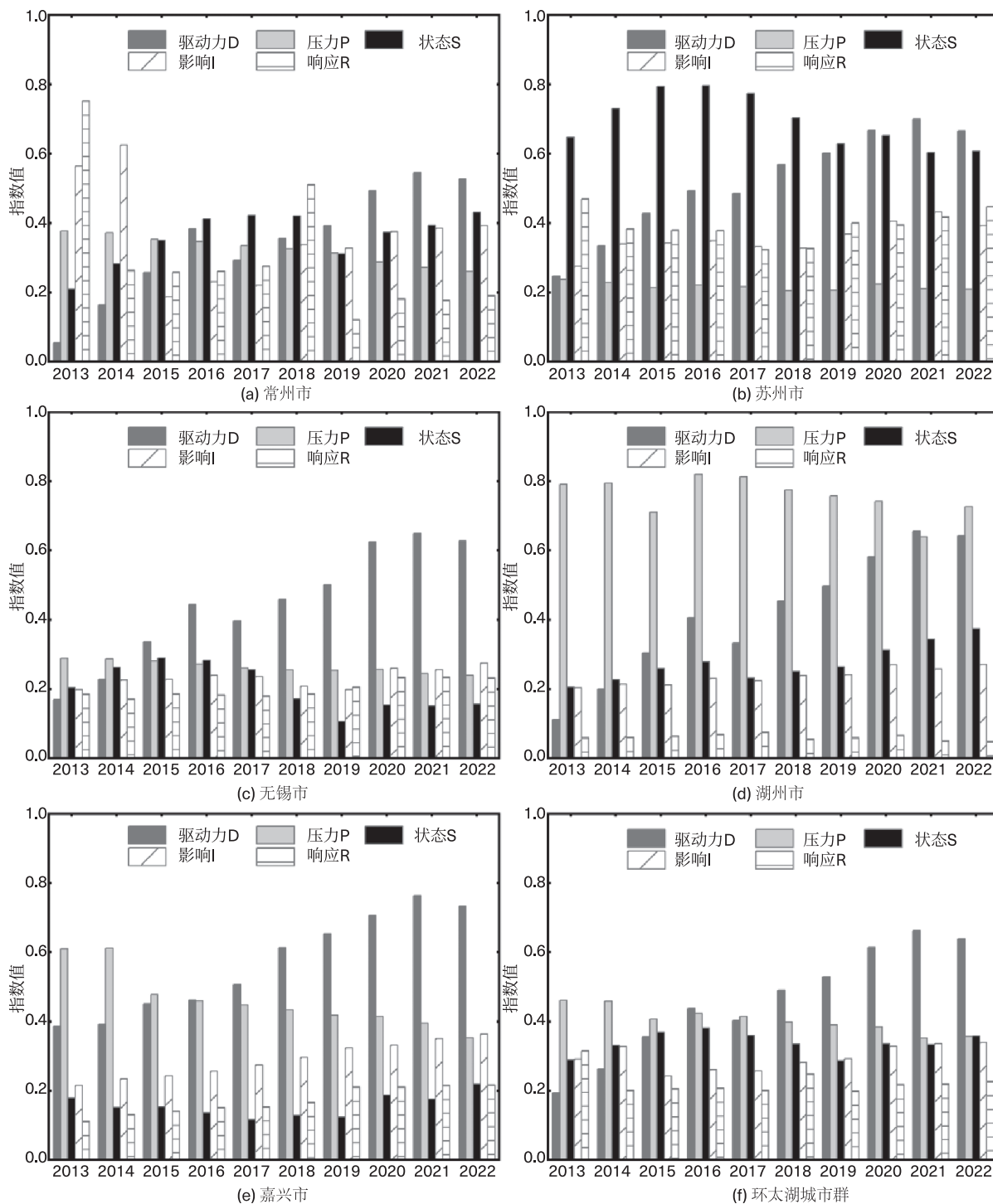


图6 水环境治理绩效各维度演变

环太湖城市群的压力指数先保持稳定后下降再趋向稳定。分阶段来看，2013—2014年废水排放量、COD排放量、人均用水量等各项压力指标变化不大，因此压力指数保持稳定；2015—2020年特别是在“十三五”规划期间，国家加大了环境综合治理力度，推动污染物达标排放和总量减排，使得压力指数持续降低（R↑使得P↓）。2021—

2022年尽管政府在水环境治理方面做出了积极响应（R↑），使得污染物排放量有所减少（P↓），但经济发展的持续推进（D↑），导致人口密度和城镇化率持续攀升（P↑），使得用水压力加大，这一系列因素的综合作用，使得压力指数呈现出趋于稳定的趋势（R↑使得P↓，但D↑使得P↑，因此P趋于稳定）。从地级市角度分析，虽然压力指数整



体均呈递减趋势，但不同地级市之间差异明显。例如，湖州市的压力指数远高于苏州市（图6），其平均压力指数分别为0.757、0.217。究其原因，湖州近年来污染物排放量较大（P），且对水环境治理重视程度较低（R），平均响应指数仅为0.061，这导致在水环境压力较大的情况下治理措施相对不足，因此压力指数偏高（R小，导致P偏高）。苏州市虽然同样面临污染物排放和用水量的压力（P），但其对水环境治理重视程度较高（R），其平均响应指数达到0.392，如苏州市在节水领域的投资总额高于湖州市（苏州65286万元，湖州1686万元），缓解了水环境面临的压力，使得苏州市的压力指数维持在一个较低的水平（R大，使得P较低）。

状态指数呈现波动上升的趋势。这反映水环境状况在政府响应下逐渐改善（R↑使得S↑），但由于流域水环境状态是人类活动和自然特征综合影响的结果<sup>[43]</sup>，所以水环境状态仍受自然因素的影响而出现波动，如水资源总量（S）因自然降水等因素的变动而出现波动（D）。从地级市角度分析，苏州市的状态指数表现出较高的优势。这主要归因于苏州作为环太湖城市群中唯一既临近上海又沿江的城市，其经济发展水平较高（D），产业结构优化，且具备较完善的水利基础设施和较多水利、环境和公共设施管理业从业人数（R），这些因素共同作用，有效缓解了自然环境因素对水环境状态的潜在负面影响（D高，R大，促使S大，即能有效缓解自然环境因素负面影响）。

影响指数呈现先上升后下降再上升的趋势。在2013和2014年，节水措施的投资额占据了十年节水总投资的30%（R），这一举措显著提升了节水

效果，对影响层产生了积极的促进作用，促使影响指数超过后续八年（R大促使I大）。2015—2022年，节水总量有所减少，导致2015年的指数下降，但得益于产业结构调整、经济快速发展（D↑）及政府对水环境治理（R↑）的积极应对，共同促进了第三产业增加值的提升、生态系统服务能力的增强、节水效率和水资源重复利用率的提高，以及万元地区生产总值用水量的持续降低（I↑），这些积极因素推动了影响指数的稳步增长（即D↑和R↑，促使I↑）。

除了2013年和2018年，其余年份的响应指数保持相对缓慢的上升趋势。尽管政府对水环境压力做出了积极响应（R↑促使P↓），使得响应指数逐年缓慢增长，然而节水项目的总投资额却出现了明显波动（R），特别是在2013年和2018年，投资额分别为6631万元和3784万元，而其他年份则保持在2500万~2800万元，这导致城市群的响应指标在2013年和2018年两年较高。进一步分析表明，江苏省苏州、常州和无锡三市的水环境治理响应指数普遍高于浙江省的嘉兴和湖州。此差异主要源于环太湖城市群中江苏省地级市的经济繁荣程度（D高），以及其在产业结构优化和水利设施建设方面的优势，具体表现为水环境治理资金投入、污水处理能力及污水处理率等方面表现出较高的水平（R大）。

## 2.2 子系统间的脱钩分析

### 2.2.1 基于环太湖城市群的脱钩分析

图7展示了2013—2022年环太湖城市群的D-P、R-P和S&I-P脱钩状态。D-P的主要脱钩状态（9

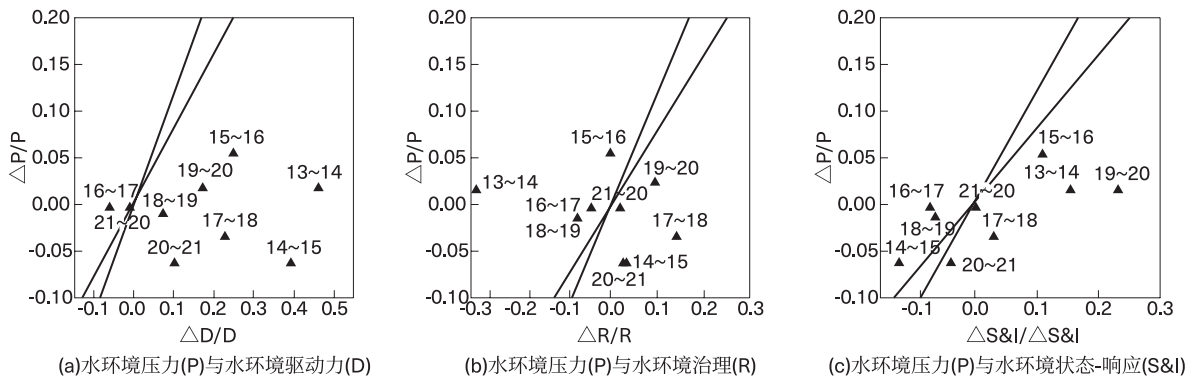


图7 环太湖城市群的 Tapio 脱钩状态

个时间段中有 7 个)是弱脱钩和强脱钩。尽管面临社会经济发展带来的压力,但水环境正在以与经济发展不同步的变化速度改善。这表明经济发展对水环境的压力在某种程度上得到了抵消。然而,在 2021—2022 年, D-P 的脱钩指数由强脱钩转为弱负脱钩,表明水环境压力与经济驱动的关系正朝不利方向发展,这要求政府保持对社会经济驱动高度关注,以防情况进一步恶化至强负脱钩状态。R-P 的主要脱钩状态(9 个时间段中有 5 个)是弱脱钩和强脱钩,尤其是自 2020 年起均保持在理想的强脱钩状态,表明近年来政府实施的一系列治理政策显著改善了水环境压力,减轻了经济增长带来的环境负担。P-S&I 主要脱钩状态(9 个时间段中有 5 个)是弱脱钩和强脱钩,虽然在最近一年表现为强脱钩,水环境压力减少且状态改善,但其强脱钩指数较小,易转变为其他状态,所以环太湖城市群各地方政府亟须在水环境治理领域加大响应力度,有效减轻水环境压力,优化水环境状态及其影响,从而推动实现 P-S&I 的完全脱钩。

### 2.2.2 基于地级市的脱钩分析

图 8 展示了 2013—2022 年环太湖城市群各地级市在 D-P、R-P 和 S&I-P 方面的脱钩状态。从 9 个时期强脱钩和弱脱钩类型总和的排序来看,嘉兴 > 湖州 = 无锡 > 常州 > 苏州市。这一排序与水环境治理绩效的排序差异明显,表明即使是水环境治理绩效较高的城市,其脱钩水平未必随之提升。这主要归因于脱钩模型反映的是系统在绝对增加或减少方面的变化。高治理水平城市在提高水环境绩效时面临更大的挑战,可能会因政策调整等因素导致部分子系统的绩效降低,尽管其整体绩效依然较高。相比之下,治理水平较低的城市更容易在水环境治理的各个子系统中实现提升。这是因为它们在基础设施建设、技术改进和政策执行等方面尚有较大的发展空间,在水环境治理中的改进显得更加迅速和显著。这一认识强调在制定治理策略时,不应仅着眼于水环境治理的绩效水平,也需综合考虑各子系统间的相互作用,以实现“高效绩—强脱钩”的理想状态。

本研究选取在水环境治理绩效与脱钩水平中表现差异显著的苏州市和嘉兴市为例进行分析(图 5 和图 8)。苏州市水环境治理绩效较好,但其脱钩

水平较低;嘉兴市水环境治理绩效较低,但其脱钩水平较高。嘉兴在早期阶段的产业技术布局较为传统,经济发展和政策执行相对缓慢。党的十八大以来,嘉兴在向新兴产业转型的过程中实现了经济快速增长,再加上国家对环境保护的高度重视促进了嘉兴对水环境治理的响应,有效改善了水环境状况,减轻了环境压力。相较之下,苏州市科技发展成熟,经济保持在较高水平且持续增长,但增速相对缓慢,且江苏省于 2009 年起建立了最严格水资源管理制度,2012 年出台了《关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》<sup>[42]</sup>,这些举措提升了苏州市在水环境治理领域的水平,使之维持在一个较高的水平,但从变化率的角度分析,水环境治理响应的增加幅度逐渐趋于平稳,甚至在某些年份(如 2019—2020 年)出现轻微的负增长,这表明水环境治理效果未必能完全跟上经济增长对水环境带来的压力。此外,苏州市的经济快速发展伴随着人口密度和城镇化率的不断提升,导致用水需求和污水排放量增加,尽管政府在水环境治理方面做出响应,其积极效果仍难以抵消环境压力,导致部分年份水环境压力有所上升。因此,尽管苏州经济繁荣且水环境治理水平较高,但脱钩水平却相对较低。这揭示了水环境各子系统之间的复杂互动关系,同时也凸显了 DPSIR 与 Tapio 脱钩模型相结合的强大功能,它不仅能够分析变量间的相关性强度,更能够深入揭示水环境治理内在的动态联系。

### 2.3 水环境治理障碍因子诊断

基于障碍度模型,本文从驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)和响应(R)五个子系统出发,探讨了水环境治理绩效的障碍因素,见表 4。2013—2022 年, D 子系统对水环境治理绩效的影响始终维持在最低水平,且呈现出逐年递减的趋势,其他四个子系统在不同城市的障碍排名中并不稳定,但其变化趋势大致相似。具体而言,各地级市的 P 子系统呈现逐年上升的趋势,反映出污染物排放、水资源压力和人口密度等障碍因素的持续增加,而 S、I 和 R 子系统则表现出上下波动的趋势。在江苏省,常州、苏州和无锡的 R 子系统障碍度占比最高,其次为 I 子系统,而在浙江省,嘉兴和湖州的情况恰恰相反, I 子系统所占比最高, R 子系

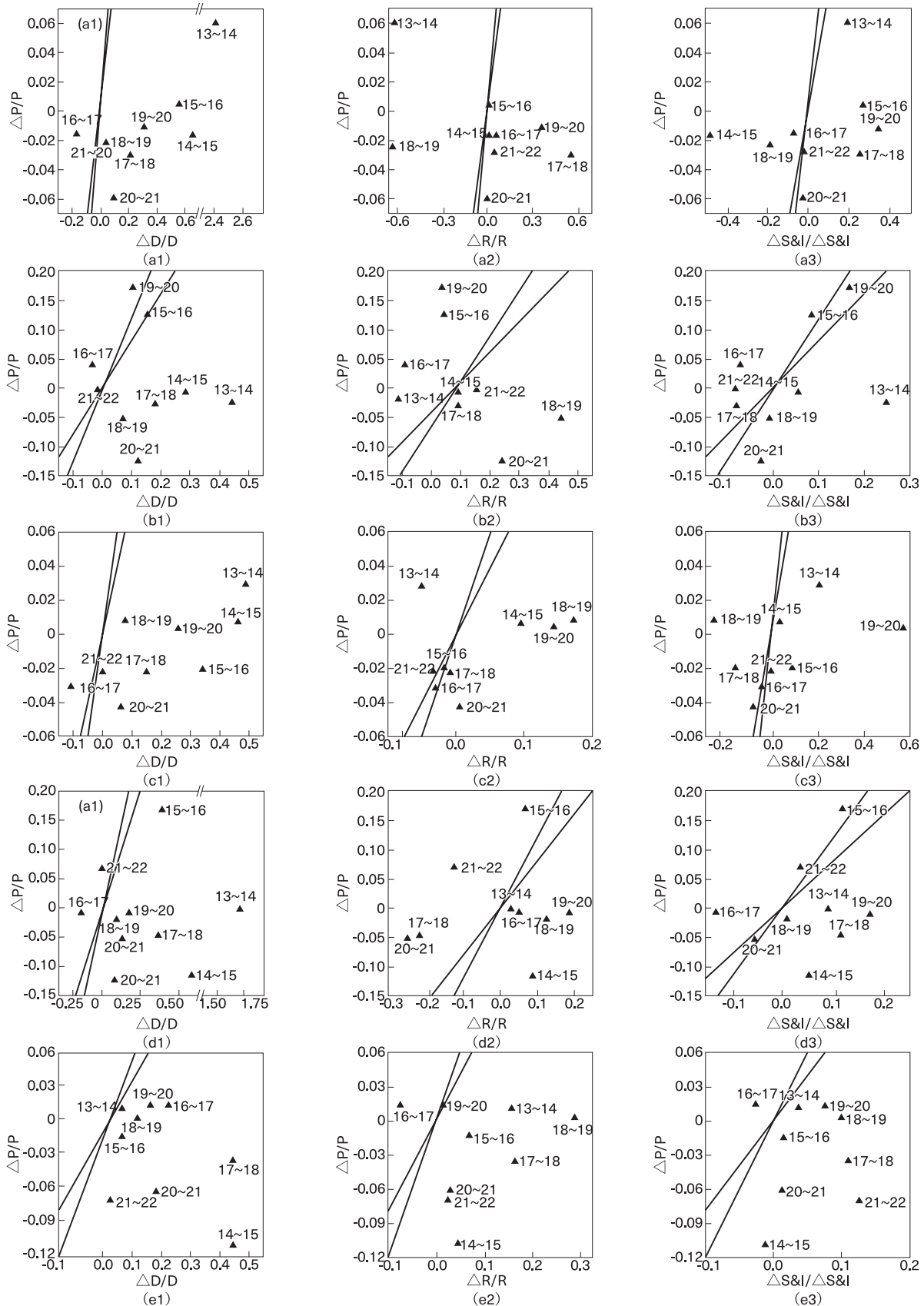


图8 各地级市的Tapio脱钩状态

注: a、b、c、d、e分别表示常州、苏州、无锡、湖州、嘉兴;(a1)表示常州市水环境压力(P)与水环境驱动力(D)的脱钩分析,依此类推。13-14表示2013年至2014年期间,依此类推。两根参考线的斜率分别为0.8和1.2。

**表 4 环太湖城市群水环境治理的障碍度等级**

城市	子系统	2013 年	2016 年	2019 年	2022 年
常州	D	19.2	10.6	11.5	10.8
	P	15.0	11.6	11.6	13.9
	S	17.3	9.6	11.5	10.8
	I	16.8	32.0	34.4	34.6
	R	31.6	36.3	33.0	32.7
苏州	D	12.9	9.6	7.4	5.4
	P	18.2	20.0	19.9	21.3
	S	8.5	3.8	9.4	10.8
	I	21.3	28.0	25.1	23.6
	R	39.0	38.6	38.1	39.0
无锡	D	11.9	8.5	7.3	5.3
	P	11.6	12.6	12.3	14.0
	S	12.0	11.2	14.0	14.2
	I	29.1	31.8	29.0	30.3
	R	35.4	35.9	37.3	39.0
湖州	D	13.4	9.8	8.1	5.6
	P	4.5	4.4	5.8	6.1
	S	11.8	10.8	11.3	10.1
	I	36.3	39.6	39.6	42.4
	R	34.1	35.6	35.3	35.6
嘉兴	D	9.5	8.1	5.4	3.6
	P	7.9	9.7	10.9	13.2
	S	12.5	13.7	15.2	14.1
	I	35.2	34.4	34.9	36.4
	R	35.0	34.1	33.7	32.8

统次之，这表明区域间水环境治理的子系统影响存在差异。

加强对影响环太湖城市群水环境治理的关键因素的管理将有助于提升水环境治理绩效，因此本研究基于障碍度模型识别了主要障碍因素（表 5）并记录了其频率（表 6）。结果表明，节水措施投资总额（R6）、节约用水量（I6）、城镇化率（P3）、农林牧渔总产值（S3）、第三产业增加值（I4）、水利、环境和公共设施管理业从业人数（R5）、污

**表 5 障碍因子平均障碍度**

城市	障碍度排名						
	1	2	3	4	5	6	7
常州	R6	I6	I4	P3	S3	R5	R3
苏州	R6	I6	P3	I4	I3	I1	S1
无锡	R6	I6	P3	S3	I3	R5	I5
湖州	R6	I6	S3	I5	R3	I4	R5
嘉兴	R6	I6	S3	I5	P3	R3	I4

**表 6 平均障碍程度频率**

障碍因素	频率	频率比
R6、I6	5	100%
S3、P3、I4	4	80%
R5、R3、I5	3	60%
I3	2	40%
I1、S1	1	20%

水处理厂日处理能力（R3）及供水综合生产能力（I5）为影响水环境治理的重要因素。在五个地级市中，节水措施投资总额（R6）均排第一，节约用水量（I6）均排第二，表明政府资金投入是影响水环境治理效果的关键因素，且投资规模直接影响 P 子系统。苏州和无锡的城镇化率（P3）与当地经济发展、高技术产业集聚、产业技术含量及发展潜力密切相关，对该地区的影响显著。按省划分，江苏省的常州、苏州和无锡表现出类似的障碍因素，浙江省的嘉兴和湖州也显示出相似的障碍因素，这表明区域间水环境治理的障碍因素分布存在差异。这一现象揭示了环太湖城市群在打破行政区划壁垒、实现水环境治理一体化过程中所面临的挑战。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

本文基于 DPSIR 模型构建了环太湖城市群水环境治理绩效评价体系，并运用 TOPSIS 模型、Tapio 脱钩模型和障碍度模型，对 2013—2022 年环太湖城市群及地级市的水环境治理绩效进行评价与分析，主要结论如下：



(1) 环太湖城市群水环境治理绩效整体呈现上升趋势。从地级市角度来看,水环境治理绩效的排序为:苏州>常州>湖州>嘉兴>无锡;从时间角度来看,2019年后各地级市水环境治理绩效呈现上升的趋势;从子系统角度来看,环太湖城市群及其各地级市的驱动力指数整体呈现上升的趋势,压力指数先稳定后下降再趋向稳定,状态指数呈现波动上升的趋势,影响指数先上升后下降再上升,响应指数整体保持相对缓慢的上升趋势。

(2) 环太湖城市群在 P-D 和 P-R 脱钩分析中主要呈现出弱脱钩或强脱钩状态,而 P-S&I 脱钩类型则表现出较大的不稳定性。从时间角度来看,P-D 的脱钩类型在 2021—2022 年由强脱钩转为弱负脱钩,P-R 的脱钩类型在 2020—2022 年均保持在理想的强脱钩状态;从地级市的角度审视,脱钩水平排序为:嘉兴>湖州=无锡>常州>苏州;从治理绩效和脱钩水平关系来看,水环境治理绩效与脱钩水平并非正相关。

(3) 政府节水投资、城镇化水平、产业结构优化调整、专业技术人才的投入、污水处理能力和供水资源生产能力,是影响水环境治理的主要因素;区域间水环境治理的子系统影响和障碍因素分布存在差异,前者表现为同一省份内各地级市的子系统对水环境治理绩效影响相似,后者表现为同一省份内各地级市对水环境治理的主要障碍因素相似。

### 3.2 建议

针对政府节水投资、城镇化水平、产业结构优化调整、专业技术人才的投入、污水处理能力和供水综合生产能力方面给予以下建议(表7)。

在水环境治理策略的制定过程中,不仅需要关注整体绩效,还应综合考虑子系统的具体表现。对于水环境治理绩效较高但脱钩水平较低的苏州和常州,政府应加强对子系统的绩效监控,如在主要水体和工厂周边设立固定监测站,对水体(污水、COD 排放量等)和排放气体(二氧化硫等)进行 24 小时实时监测,通过建立信息化监测平台,掌握水体和排放气体的动态变化情况,以评估是否达到既定标准,及时发现并解决潜在的子系统绩效下滑问题,推动该地区“高效绩—强脱钩”进程。对于水环境治理绩效不佳但脱钩水平较高的嘉兴和无锡,政府应对部门施加适当的压力和水环境治理的资金投入,如对绩效优秀的部门和个人给予表彰和奖励,对绩效不佳的进行问责和督促整改,且该地区对节水投资相对于苏州和常州较少,可大幅增加水环境治理资金的投入,提升该地区的水环境治理绩效。对于整个环太湖城市群而言,可建立“高效绩—强脱钩”的激励机制,对在水环境治理绩效评估中排名前二位,且在水环境驱动力、水环境治理、水环境状态 & 影响与水环境压力脱钩指标表现突出(如 COD、SO<sub>2</sub> 等污染物排放量下降,人均

表7 影响水环境治理的主要因素的建议

主要影响因素	建议
政府节水投资	设立节水技术创新基金,专门用于资助企业研发和实施节水效率更高的新技术;对实施节水措施的企业和农户,给予一定的财政补贴或税收优惠,以刺激他们主动参与节水行动
城镇化水平	在推进城镇化的同时,通过合理规划城市的空间布局,设置绿地和透水路面,来减轻城市扩张对水环境的压力
产业结构优化调整	对采用绿色生产技术的企业实施税收减免,比如减少增值税和企业所得税,以此激励企业投资环保技术和设备;针对低污染、低耗水的绿色产业,提供创业补贴和贷款利率优惠,帮助企业扩大生产规模,提升市场竞争力;通过环保积分制度,对减少污染排放的企业给予奖励,如优先采购权、品牌推广等,以此鼓励企业参与环保行动
专业技术人才的投入	定期举办环保行业研讨会和培训班,为在职人员提供最新的水环境管理知识和技能更新机会;设立环保人才发展基金,为从事水环境管理工作的个人提供奖学金和实习补贴;推行税收减免和职业发展奖励政策,吸引国内外环保领域的杰出人才,促进水环境管理水平的国际化提升
污水处理能力	按照不同项目规模,提供分级财政补贴,鼓励小型和中型污水处理厂进行设备更新和技术改造;设立专项资金,支持地方政府引进先进的污水处理技术,比如膜过滤、气浮沉淀等,提高污水处理的效率和效果;建立污水处理设施的绩效考核机制,对改造后处理效果良好的设施给予后续运营补贴
供水综合生产能力	在城市和农村地区推广建设雨水收集和储存设施,利用雨水进行灌溉、洗车等非饮用用途,减轻自来水供应压力;加强再生水处理设施的建设,将城市污水经过有效处理后再利用,用于工业冷却、园区绿化、冲厕、消防等用途

GDP 上升、城镇居民人均可支配收入等)的城市给予资金奖励,奖励金额根据城市规模 and 实际贡献分档设定。

为突破行政区划壁垒、实现水环境治理一体化亟须苏州发挥引领作用,成立跨市合作委员会,联合其他四市每月召开会议,共同研究制定统一的污水排放标准,避免因各市标准不一导致的污染转移问题;详细商讨资金分配方案,根据各市的治理任务量、水体污染程度等因素,科学合理分配水环境治理专项资金,确保每一笔资金都能发挥最大效益,促进信息共享、技术交流和资源共享。在苏州工业园区或苏州高新区等科技创新资源丰富的区域建立水环境治理技术创新中心,邀请国内外知名的水环境治理专家进行技术讲座与培训,提升五市技术团队的专业水平及设立专项科研基金,鼓励各市技术团队联合申报科研项目,共同研发适用于本区域的水环境治理新技术。

水环境治理绩效评价研究仍需进一步完善,在后续的研究中给出以下建议:①为了更加深入和精确地掌握环太湖城市群的实际情况,后续研究可聚焦县域层面,深入探究环太湖城市群水环境治理绩效的时空分布、区域差异及其驱动因素。②本文在环境绩效、环境治理绩效及环境绩效评价的基础上尝试界定了水环境治理绩效概念,但其内涵丰富和深入应用需要进一步探讨。③构建指标体系的过程中,由于目前对水环境治理绩效评价科学统一的指标体系,所以今后的评价体系还需进一步完善与优化,如本研究中由于数据获取原因,缺乏有关直接反映水质状况、水环境治理投资、公众参与及技术创新等关键指标,因此选用农林牧渔总产值、节水措施投资总额作为替代。④在指标数据选择方面,本研究尽管含有栅格数据,但主要依赖社会经济统计数据,限制了自然边界区域的适用性。未来研究应探索基于栅格数据的指标体系,将有效解决以行政区划为单位的社会经济数据在研究自然边界区域时遇到的适用性问题。⑤最初的 Tapio 模型可以量化 DPSIR 模型的子系统之间的内在联系,但该 Tapio 模型存在一定的局限性:在分析复杂系统关系时忽略了时间维度中分量特征值的关联。在未来基于 DPSIR 模型的长期评价时,不要局限于时空变化的分析,可以与引入时间系数的扩展 Tapio 模

型结合<sup>[35]</sup>,将更好地克服 DPSIR 模型在量子子系统间相互作用时的局限性且可以提高脱钩指标的客观性和准确性<sup>[44]</sup>。

## 参考文献

- [1] 李加林,田鹏,刘永超,等.水资源、水环境、水生态统筹治理研究进展[J].宁波大学学报(理工版),2024,37(4):22-30.
- [2] 王富强,刘沛衡,魏怀斌.郑州市水生态文明城市建设成效评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(05).
- [3] WU D S, NING S. Dynamic assessment of urban economy-environment-energy system using system dynamics model: a case study in Beijing[J]. Environmental research, 2018, 164: 70-84.
- [4] 李慧,郑王睿,刘耕源.灰水足迹研究进展与方法学改进[J].中国环境管理,2024,16(1):127-135.
- [5] 王莉芳,陈春雪.济南市水环境承载力评价研究[J].环境科学与技术,2011,34(5):199-202.
- [6] 吴辉煌,范冰冰,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.
- [7] 李琴.基于 DPSIRM 框架的长江经济带水环境治理绩效评价及障碍因素研究[J].湖北农业科学,2023,62(5):214-220.
- [8] 丁文璐,夏军,姚成慧,等.基于压力-状态-响应和 TOPSIS 模型的德安县水生态承载力评价[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(11):1081-1089.
- [9] 卢开东,王健健,马变钊,等.基于 DPSIR 模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J].环境工程技术学报,2022,12(2):538-545.
- [10] 朱莎莎,薛万来,王赛超,等.密云水库上游(北京段)流域水生态健康评价[J].人民黄河,2024,46(10):103-108,122-122.
- [11] 康玲玲,马超,孙光,等.潮白河怀柔段鱼类多样性特征及水生态系统健康评价[J].环境科学研究,2024,37(10):2214-2224.
- [12] 袁航.河长制下 L 市水环境治理绩效审计评价研究——基于 PSR 模型[D].兰州:兰州财经大学,2024.
- [13] 王雅婕.基于 DPSIR 模型的水环境治理绩效审计评价研究——以 H 河为例[D].兰州:兰州财经大学,2024.
- [14] 傅晓华,阳文林,傅泽鼎,等.基于 PSR 模型的洞庭湖区水环境治理绩效评价[J].生态经济,2022,38(8):168-175.
- [15] 徐嘉蔚.基于 DPSIR 模型的区域水环境治理绩效评估研究——以湖北省为例[D].武汉:华中师范大学,2020.
- [16] MAHON R, FANNING L, MCCONNEY P. Assessing governance performance in transboundary water systems[J]. Environmental development, 2017, 24: 146-155.
- [17] 袁宏川,彭勃,李新哲.基于 DPSIR 模型的长江流域中部

- 地区水环境治理绩效评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (5): 61-65.
- [18] 单金伟. 基于 AHP-模糊综合评价法的城市河流生态治理环境影响后评价研究[D]. 石家庄市: 河北地质大学, 2024.
- [19] 董怡华, 张雪莹, 张新月, 等. 基于层次分析-模糊综合评价法的辽河流域农田面源污染治理技术评价[J]. 环境工程, 2023, 41 (12): 150-157.
- [20] 王清芬, 王伯铎, 马俊杰, 等. 用灰色聚类关联分析法对水环境质量的评价[J]. 环境工程, 2008, 26 (3): 59-62, 95-95.
- [21] 陈南祥, 姜新慧. 基于 GIS 与层次分析法的地下水资源分区研究[J]. 人民黄河, 2010, 32 (11): 60-61, 64-64.
- [22] 徐福祥, 徐浩, 刘艳芬, 等. 黄河流域九省(区)生态保护和高质量发展治理水平测度与评价[J]. 人民黄河, 2022, 44 (6): 11-15.
- [23] HENRIQUES C, GARNETT K, WEATHERHEAD E K, et al. The future water environment — Using scenarios to explore the significant water management challenges in England and Wales to 2050[J]. Science of the total environment, 2015, 512-513: 381-396.
- [24] DUAN T T, FENG J S, ZHOU Y Q, et al. Systematic evaluation of management measure effects on the water environment based on the DPSIR-Tapio decoupling model: a case study in the Chaohu lake watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149528.
- [25] 张泽义, 周玉琴, 杜家廷. 长江经济带绿色城镇化效率评价及其影响因素——基于多维城镇化视角[J]. 中国环境管理, 2023, 15 (4): 121-129.
- [26] 贾小乐, 周源, 延建林, 等. 基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究[J]. 生态学报, 2019, 39 (17): 6487-6499.
- [27] 黄琴, 倪平, 毕军, 等. 太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31 (5): 1116-1124.
- [28] 刘立忠. 环境规划与管理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015: 146-147.
- [29] 包国宪, 保海旭, 张国兴. 中国政府环境绩效治理体系的理论研究[J]. 中国软科学, 2018 (6): 181-192.
- [30] TIAN Z B, ZHENG B H, WANG L J, et al. Effects of river-lake interactions in water and sediment on phosphorus in Dongting Lake, China[J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24 (29): 23250-23260.
- [31] 阚恒, 丁冠乔, 郭杰, 等. 基于生态安全格局分析的国土空间生态修复关键区域识别: 以环太湖城市群为例[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (8): 2217-2227.
- [32] 冯新惠, 李艳, 余迦, 等. 环太湖城市群土地利用转型及其生态环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32 (6): 1238-1253.
- [33] 王雪. 基于 DPSIR 模型的黄河流域榆中段生态安全评估研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [34] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48 (6): 971-981.
- [35] QIN X M, HU X X, XIA W. Investigating the dynamic decoupling relationship between regional social economy and lake water environment: the application of DPSIR-extended Tapio decoupling model[J]. Journal of environmental management, 2023, 345: 118926.
- [36] 朱靖, 余玉冰, 王淑. 岷沱江流域水环境治理绩效综合评价方法研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (9): 1995-2004.
- [37] 李佳奇, 沈珍瑶, 栾朝旭, 等. 国土空间规划视角下流域水环境改善潜力——以长春市第二松花江流域为例[J]. 中国环境管理, 2023, 15 (6): 45-55.
- [38] 蒋贵彦, 运迎霞, 任利剑, 等. 基于改进 TOPSIS 模型的西部河谷型城市生态安全时空分异及障碍因子诊断[J]. 安全与环境学报, 2020, 20 (1): 342-351.
- [39] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport policy, 2005, 12 (2): 137-151.
- [40] 杨良杰, 吴威, 苏勤, 等. 江苏省交通运输业能源消费碳排放及脱钩效应[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23 (10): 1383-1390.
- [41] 刘西忠. 中国式现代化区域协调发展的新路径: 世界级生态创新湖区建设[J]. 江海学刊, 2023 (2): 93-100.
- [42] 孙付华, 杨一帆, 沈菊琴, 等. 基于水足迹-LMDI 模型的江苏省水资源利用与经济发展的脱钩关系研究[J]. 江苏社会科学, 2020 (6): 233-240.
- [43] SWEENEY B W, BOTT T L, JACKSON J K, et al. Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystem services[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the USA, 2004, 101 (39): 14132-14137.
- [44] YANG J, HAO Y, FENG C. A race between economic growth and carbon emissions: What play important roles towards global low-carbon development?[J]. Energy economics, 2021, 100: 105327.

# Evaluation of Water Environment Governance Performance and Its Obstacles Based on DPSIR-Tapio Model: A Case Study of the Taihu Lake City Cluster

ZHOU Chi<sup>1</sup>, LI Jialin<sup>1,2\*</sup>, LIU Yongchao<sup>1,2</sup>, CAO Luodao<sup>1</sup>, YING Chao<sup>1</sup>

(1. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** In the rapid process of urbanization and industrialization, the increasingly prominent water environment issues have become a key constraint to sustainable socio-economic development. Establishing scientific governance strategies based on water environment management performance evaluation to alleviate water environmental pressures has emerged as an urgent demand for sustainable development. Most of the current studies are based on statistical data and spatio-temporal analysis for performance evaluation, neglecting the dynamic interaction between subsystems and exploration of influencing factors. Taking the urban agglomeration around Taihu Lake as the study area, we constructed a water environment governance performance evaluation system based on the Driving Force-Pressure-State-Impact -Response (DPSIR) model, analyzed the temporal and spatial evolution of water environment governance performance using the Approximate Ideal Solution Sorting Method (TOPSIS) model, used the Tapio decoupling model to reveal the dynamic interactions among the subsystems, and identified key influencing factors of water environment governance with the aid of the obstacle degree model. The key influencing factors of water environment governance were identified with the help of the obstacle degree model. The results showed that: ① the overall water environment governance performance of the city cluster around Taihu Lake showed an upward trend, and the water environment governance performance of each prefecture-level city was ranked as follows: Suzhou > Changzhou > Huzhou > Jiaxing > Wuxi. ② The city cluster around Taihu Lake mainly showed weak or strong decoupling in P-D and P-R, while P-S&I showed greater instability; the decoupling level of each prefectural city was ranked as: Jiaxing>Huzhou=Wuxi> Changzhou>Suzhou; the performance of water environment governance was not positively correlated with the decoupling level. ③ The main factors affecting water environment governance were government investment, urbanization level, optimization and adjustment of industrial structure, input of professional and technical talents, sewage treatment capacity and integrated production capacity for water supply.

**Keywords:** water environment governance performance; DPSIR model; Tapio decoupling model; obstacle factor; Taihu Lake city cluster