

太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估研究

黄琴 倪平 毕军 马宗伟¹

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

2. 南京大学 环境学院, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 目前太湖流域水生态功能分区的绩效评估体系尚未建立, 无法准确把握分区管理体系的实施现状、把握影响太湖流域生态系统健康的关键影响因子。以太湖流域水生态环境功能分区为研究对象, 基于“压力-状态-响应”模型构建不同时空尺度和管理边界下的绩效评估指标体系, 实现了水生态环境功能分区不同管理目标下的差异化绩效评估。

【关键词】: 生态功能分区 太湖流域 绩效评估 环境管理

【中图分类号】: X52 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)05-1116-09

环境绩效评估是环境绩效管理的一种工具, 是管理组织人员依据环境绩效进行分析、决策的过程^[1], 该方法通过对环境政策实施后所取得的效果进行定量评估, 从而检验环境目标的实现程度。20 世纪 80 年代以来, 环境绩效评估研究不断发展, 评估对象由企业扩展至政府及区域层面。目前, 国外在环境绩效评估方面研究较早开展, 实践成果较多。在地区层面, 美国环境保护署在 2000 年实施了国家环境绩效追踪项目; 欧洲环境局建立了环境绩效评估指标体系, 以监测欧盟各个成员国环境绩效的变化; 亚洲开发银行 2003 年开启了大湄公河次区域环境绩效评估的尝试^[2]。近年来, 由于我国环境形势愈加严峻, 公众对于环境质量改善的诉求日益提高, 目前环境管理绩效评估及管理体系不断深入研究, 在水污染^[3]、大气污染^[4]、土壤污染^[5]等方面构建了较为完善的环境绩效评估体系, 其中, 在水生态功能分区方面的研究也不断开展。

水生态功能分区是依据河流生态学中的格局与尺度理论, 将区域按照流域水生态系统空间特征差异进行分级分类, 反映了流域水生态系统在不同空间尺度下的分布格局^[6]。目前, 国内水生态功能区绩效评估研究对象主要集中于水环境质量^[7]、水生态安全^[8]、水生态健康^[9]、生态服务功能^[10]、生物多样性^[11]这几方面。评价方法主要为通过模糊综合法、层次分析法、生物多样性指数法^[12, 13, 14]等方法建立指标体系, 指标体系的构建思路通常为由目标层到准则层再到指标层, 其中最具有代表性的方法是 OECD 于 1979 年由加拿大 Rapport 等学者提出的“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)模型^[15]。近年来, 有研究基于水生态文明理念建立了更加综合全面的评估指标体系, 如褚克坚等^[14]从水资源安全、水生态环境、水文化、水管理等 4 个方面, 构建了共 3 个层次, 26 项指标的城市水生态文明建设状况的模糊综合评估模型, 为本研究中建立多维度的绩效评估指标体系提供指导。

作为我国水污染防治的重点流域之一, 太湖流域以其严峻的水生态环境形式一直备受关注, “十二五”期间, 基于水生态环境功能分区的流域水环境管理办法制定并试行, 初步形成了太湖流域水生态功能分区管理体系, 将太湖流域水生态功能区分分为 5

¹作者简介: 黄琴(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境与规划管理. E-mail: huangqin2208@163.com; 马宗伟 E-mail: zma@nju.edu.cn

基金项目: “十三五”水专项课题(2018ZX07208-004)

个一级区、10 个二级区、20 个三级区、14 个四级区^[16](图 1)。然而, 针对太湖流域水生态环境分区管理的绩效评估体系尚未建立, 无法准确把握分区管理体系的实施现状、把握影响太湖流域生态系统健康的关键影响因子, 从而难以有效评估太湖流域水生态环境分区管理对于水环境改善、生态多样性保护和土地空间利用管控的效果。本研究将绩效评估定义为在分区政策管理的约束下, 一定时期内 49 个水生态环境分区生态环境提升效率, 包括环境压力减缓、生态状态提升、管理响应增强三者耦合的管理效果评估, 采用 PSR 模型构建了太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估指标体系, 进一步推进太湖流域分区管理。通过 GIS 技术实现多时空维度下的分区管理绩效动态展示, 对 2016~2018 年不同分区、不同评估期的评估绩效进行纵横向的对比分析, 为太湖流域分区管理和环境政策的制定提供了依据。

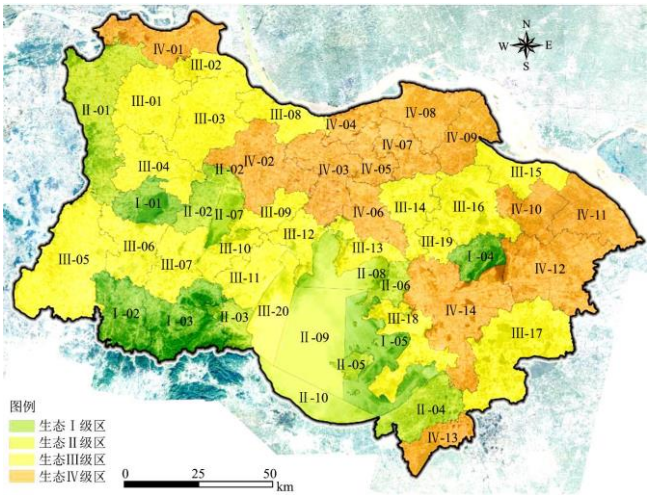


图 1 江苏省太湖流域水生态环境功能分区

1 指标体系构建与评估方法

1.1 数据获取及来源

本研究以水生态环境功能分区以评估对象, 搜集 2016~2018 年水生态环境功能分区涉及的乡镇/街道数据, 包括常州市、镇江市、南京市、无锡市、苏州市 5 个地级市, 30 个县级市。其中, 本研究涉及 COD、氨氮等污染物排放数据来源于江苏省环境统计数据; 湿地+林地占比来源于太湖流域土地利用遥感数据; 建设用地面积占比来源于中科院资源环境科学和数据中心土地利用遥感监测数据 (<http://www.resdc.cn/>); 水生态健康指数等流域相关数据来源于项目课题内部数据共享, 其余数据均来自各市县统计年鉴、水资源公报、政府工作报告等。

1.2 绩效评估指标体系构建

1.2.1 PSR 概念

PSR 概念框架即“压力-状态-响应”模型, 能够反映人类活动施加的压力、系统状态以及人类做出的响应(图 2)。其主要优点在于它突出了环境与面对环境的应力之间的因果关系, 以及压力、状态、响应三层之间的相互制约和相互作用。主要目的是在评价环境系统可持续性的基础上, 探讨人类活动与环境变化之间的因果关系。在水体流域环境中应用比较广泛。

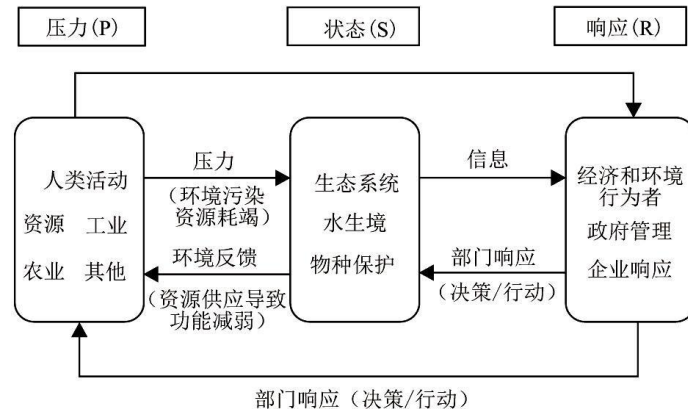


图 2 PSR 理论框架构建图

1.2.2 指标选取原则

为使评估更具有代表性，可操作性，本研究确定了以下原则：

(1) 科学系统原则。

从流域整体出发，科学系统地反映水生态系统及其生境的空间分布特征，明确体现流域水生态功能要求。

(2) 客观、可操作性原则。

能够切实反映流域水生态环境功能分区管理的绩效，并具有可操作性。

(3) 综合性原则。

结合流域自然与社会发展状况，多维度评估流域水生态环境功能分区管理绩效。

(4) 指标的公平性。

综合考虑各地不同经济社会环境情况，选取的指标要具有代表性，且是各地方政府关注的指标。

(5) 数据可获得性。

所有指标数据应较易获得，并且涉及的部门尽可能少，获取数据较为便捷。

1.2.3 多维度绩效评估指标体系

本研究通过对已有研究成果的指标体系进行整理分析，综合考虑太湖流域的特点与问题、数据的可获得性结合太湖情况，从压力、状态和响应 3 个方面选取了 9 个二级指标共计 14 个三级指标，如表 1 所示。其中，由于湖区压力及响应类指标获取极难，考虑因素复杂，因此评估框架仅包含状态层指标。

压力层指标从环境污染和资源利用两个方面筛选指标。人们在不断开发利用自然资源的同时，也在破坏环境造成环境污染，造成了对生态系统的压力。《江苏省太湖流域水生态功能区划》提出要对污染物进行总量控制，单位面积 COD、氨氮排放强度从终端废水污染物排放方面体现了对环境产生的压力，客观评估了各功能分区污染物总量控制情况。并且太湖湖体总磷指标较差，作为太湖特征污染物，将单位面积总磷排放强度纳入环境污染总量控制因子，体现了太湖治理特色。选择单位耕地面积化肥施用量体现了水环境中农业源污染排放情况。

状态层指标从水环境、水生态、土地利用和物种保护 4 方面筛选指标。水环境和水生态体现了水生态环境功能分区水质状况，物种保护体现了生态环境中生物情况。《江苏省太湖流域水生态功能区划》中明确将水质、水生态健康以及物种保护情况作为主要考核指标，明确各指标中长期管控目标。

响应层指标从污水处理、清洁生产及产业结构调整 3 个方面筛选指标。《江苏省“十三五”太湖流域水环境综合治理行动方案》中明确要求不断开展污水处理厂升级改造，全面提高工业企业清洁生产水平，并提出产业结构调整任务仍然艰巨，应不断推进区域产业转型升级。

1.3 环境绩效评估方法

1.3.1 数据标准化

由于各项指标的计量单位并不统一，因此需要进行标准化处理，本研究针对每个指标选取一定的参考值、并无量纲化处理指标现状值，在参考对比的基础上进行环境绩效指数综合评估。对于正向指标，归一化处理序列中指标上限参考值赋值为 1；对于逆向指标，归一化处理序列指标下限制赋值为 1。具体公式如下：

对于正向指标：

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{a}{a_{ref}}, & a < a_{ref} \\ 1, & a \geq a_{ref} \end{cases} \quad (1)$$

对于负向指标：

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ref}}{a}, & a > a_{ref} \\ 1, & a \leq a_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

式中：a 为指标的数值； a_{ref} 为指标参考值； x_{ij} 为指标的标准化结果。其中不同功能分区的管控目标不一，因此根据国家与地方的相关标准、科学研究成果等分别对四类功能分区选取不同的标准参考值，从而突出分区不同的管控要求，具体参考值取值见附表 1。

1.3.2 指标赋权与绩效评估结果

本研究使用主客观组合赋权法，中和了单一的主观赋权法、客观赋权法的缺陷，从目标层到准则层、指标层逐一赋权。目标

层由专家讨论确定压力、状态、响应权重比例，分目标层、指标层以均权法确定权重，经过多轮专家讨论，对指标权重进行反复论证调整，使得结果能尽可能反映出太湖流域管理绩效的真实状况。本研究认为太湖流域状态为管理效果最直接的体现，因此对状态赋予较高权重，压力：状态：响应权重为2：6：2。其中，压力层、响应层分目标层对于准则层的影响相同，重要程度相当，权重逐级依次均分；而状态层中，由于物种保护情况通过流域生物检出情况间接反映水质健康状态，较其余准则层重要程度更低，因此赋予1分权重，其余准则层依据均分原则分别赋予3分权重，权重再由准则层继续向下均分。由此逐级加权得到各具体指标权重值，总权重见表1, 各级权重具体情况见附表2。

表 1 太湖流域水环境功能分区管理绩效评估指标及权重

准则层	分目标层	指标层	说明	总权重
压力 (环境效率)	环境污染	单位面积 COD 排放强度	化学需氧量排放总量/土地面积	0.025
		单位面积氨氮排放强度	氨氮排放总量/土地面积	0.025
		单位面积总磷排放强度	总磷排放总量/土地面积	0.025
		单位耕地面积化肥施用量	化肥施用量/耕地面积	0.025
	资源利用	建设用地面积占比	建设用地面积/土地面积	0.050
		单位 GDP 用水量	用水总量/区域 GDP	0.050
状态 (环境质量)	水环境	重点监控断面优Ⅲ类比例	省考及以上断面优Ⅲ类断面数/省考及以上断面总数	0.180
	水生态	水生态健康指数	由藻类、底栖生物、水质、富营养指数等组成	0.180
	土地利用	湿地+林地占比	湿地面积占比+林地面积占比	0.180
	物种保护	底栖敏感种达标情况	底栖敏感种检出数量/区划要求检出物种数量	0.060
响应 (环境治理)	污水处理	城市污水处理率	经管网进入污水处理厂处理的城市污水量与污水排放总量比值	0.067
	清洁生产	清洁生产审核重点企业个数比例	江苏省对外公布实施强制性清洁生产审核的重点企业名单中企业个数/区域企业总个数	0.067
	产业结构调整	高新技术产业产值占规模以上工业产值比重	高新技术产业产值与规模以上工业产值比值	0.033
		单位 GDP 能耗	综合能源消耗量/区域 GDP	0.033

环境绩效指数 (Environmental Performance Index, EPI) 是对政策中的环保绩效的量化度量，通过将所有指标值根据指标权重进行线性加和的结果，具体公式如下：

$$EPI = \sum_{i=1}^n (w_i x_i)$$

(3)

式中：n 为指标数； w_i 为第 i 个指标的权重； x_i 为该指标的标准化值。

2 分区管理绩效指数分析与讨论

通过对 4 类水生态环境功能分区进行均值处理，计算结果见表 2。

首先，从综合绩效指数来看，2016~2018 年太湖流域各类水生态环境功能分区综合绩效指数 (EPI) 整体均得到了不同程度的提高。2018 年太湖流域综合绩效指数均值为 78.94，相较于 2016 年提高了 11.77 分，其中，压力、状态和响应指数分别提高了 0.47、17.77 和 -0.11 分，3 项指数对综合绩效指数提高的贡献率分别为 2.60%、98.01%和 -0.11%。从不同分区方面来看，四类生态功能分区绩效评估得分相差不大，生态 II 级区、生态 IV 级区分区管理绩效提升最为明显。由于四级分区分级管理目标要求依次降低，各级水生态环境功能分区区别不大，也说明目标设定的合理性，整体上与功能区划分基本匹配，符合客观事实规律。

在“压力”方面，太湖流域水生态环境功能分区压力层绩效得分整体变化不大，2018 年较 2016 年稍有提升，增加了 0.47 分。从分区角度来看，生态 I 级区、生态 II 级区、生态 III 级区明显优于生态 IV 级区，2016~2018 年，生态 I 级区压力得分稳步有小幅幅度上升，得分维持在 80 分以上，资源消耗及污染物排放方面管控良好；生态 II 级区、生态 III 级区得分下降，生态 II 级区下降原因主要是建设用地占比有所上升，生态 III 级区主要原因为污排有所增加；生态 IV 级功能分区污染物排放与资源利用情况最差，主要原因有单位面积污染物排放压力仍有待缓解，单位 GDP 用水量较高，水资源集约利用仍有待推进，但在 2017 年污染物排放措施有效，COD、氨氮等污染物普遍得到限制，得分有所上升，仍需进一步降低工业污染排放，通过收严梯度用水标准等方法逐步降低用水总量。

在“状态”方面，太湖流域水生态环境功能分区状态得分得到全面大幅提高，2018 年流域整体较 2016 年提升了 17.77 分，四级水生态环境功能分区状态普遍实现不同程度好转，太湖流域整体断面优 III 比提高明显，部分功能分区优 III 断面比例实现由 0%至 100%的突破，水生态健康提升明显。其中，生态 I 级区状态层 2016 年得分明显优于其他分区，由于其分区管理目标更高，得分相对来说处于高位，相比于其他分区，大幅提升较难，且 2018 年 I-03、I-04 两个分区水生态健康指数有所下降，2018 年均分与其他分区得分差距几乎得到很大程度的缩小；生态 II 级区状态得分逐年增幅较大，2018 年状态明显好转；生态 III 级区得分 2017 年增幅较大，而 2018 年部分地区状态有所回落，但得分相比于 2016 年仍有较大提高，主要原因是由于重点监控断面水质有所反复；生态 IV 级区状态层指标得分逐年稳定增加，其中 2017 年增幅较 2018 年更为明显，水质水生态健康状态提升稳定。

表 2 太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估结果(均值)

指标	年份	生态 I 级区	生态 II 级区	生态 III 级区	生态 IV 级区	太湖流域
综合绩效指数	2016 年	74.04	62.64	70.43	63.31	67.18
	2017 年	81.81	71.23	80.26	75.55	77.23
	2018 年	80.77	81.07	78.28	77.72	78.94
	2016~2018 年绩效变化	6.73	18.42	7.85	14.41	11.77
压力	2016 年	85.70	90.22	89.98	73.56	84.27
	2017 年	86.62	88.65	86.99	78.32	84.37
	2018 年	87.90	88.67	87.32	78.65	84.74

	2016~2018 年绩效变化	2.20	-1.55	-2.66	5.09	0.47
状态	2016 年	66.12	54.54	60.84	56.11	58.74
	2017 年	73.60	64.30	78.92	73.12	73.74
	2018 年	75.80	77.67	75.88	76.83	76.51
	2016~2018 年绩效变化	9.68	23.13	15.04	20.72	17.77
响应	2016 年	89.09	78.82	81.90	74.66	79.78
	2017 年	88.87	83.08	81.40	80.04	81.89
	2018 年	88.65	75.96	79.12	79.44	79.67
	2016~2018 年绩效变化	-0.44	-2.86	-2.78	4.79	-0.11

在“响应”方面，太湖流域水生态环境功能分区响应得分较良好，普遍得分在 70 分以上，其中生态 I 级区得分明显高于其他功能分区，分数稳定在 80~100 分之间，整体响应能力建设良好。但太湖流域整体响应得分逐年有所起伏，其中以生态 IV 级区响应得分提升最为明显，生态 I 级区、生态 II 级区、生态 III 级区响应层均分均有不同幅度的下降，主要原因包括清洁生产企业个数比例的下降以及高新技术产业产值占规模以上工业产值下降，需进一步重视对于水质水生态涉及污水治理、清洁生产及产业结构调整方面的管理力度。

3 分区管理绩效时空表示与分析

本研究通过 GIS 技术实现多时空维度下的绩效指标动态变化展现，对不同分区、不同评估期的绩效得分进行纵、横层面上的对比分析，如图 3。

总体来看，太湖流域水生态环境功能分区管理绩效不断向好发展，2016~2018 年，综合管理绩效得分在 80~100 区间的功能分区个数显著增加，环境管理绩效持续呈改善态势，整体达到了较好水平。其中，中部地区始终为分区管理绩效重压区，但压力逐年得到一定程度的缓解，管理绩效得到改善，其中涉及常州市区、无锡市区等地相关水生态功能分区；而以镇江市区、丹阳、溧阳、高淳等为代表的流域西部地区管理绩效得到明显改善，水生态环境得到大幅提高。各地市涉及水生态环境功能分区管理绩效水平存在着一定的差异，说明各地社会发展和环境情况不同，环境绩效有待进一步改善；但各地区水生态环境功能分区管理绩效逐年稳定提升，说明分区管理成效显著。其中仅 III-20 一直处于 60 分以下，该区域为跨行政单元湖区，涉及行政区域包括常州市武进区；无锡市滨湖区、宜兴市；苏州市吴中区，水生态健康指数差，重点断面优 III 比例为 0，需进一步加强水质水生态管理。

2016~2018 年间，太湖和流域水生态环境功能分区压力、状态、响应子系统持续优化，其中以环境状态子系统得分提升最为明显，说明持续压力减缓及强化管理响应对于改善水生态环境管理绩效有着显著提升效果。

其中，压力子系统整体有一定程度的提升，污染排放得到良好的控制，资源利用趋于高效。常州、宜兴等地压力子系统表现一直良好，压力得分保持在 80 分以上。镇江市区、苏州市区涉及水生态环境功能分区管理绩效压力层有明显改善。而常熟市北部压力有所增加，主要是由于总磷污染排放增加所导致，需要进一步改善资源环境利用水平。2018 年，分区管理绩效压力子系统主要问题区域集中在苏州市及无锡市区，其中问题区域存在 COD、氨氮排污压力加剧以及水资源消耗过度等问题。综上所述，整体从时间序列上看，水生态环境功能分区在污染控制，节约水资源方面持续转好；从区域上看，镇江、常州、南京涉及地区压

力类得分均较高，且逐年得分有所上升，苏州市压力类得分相对低，但也呈逐年提升态势。

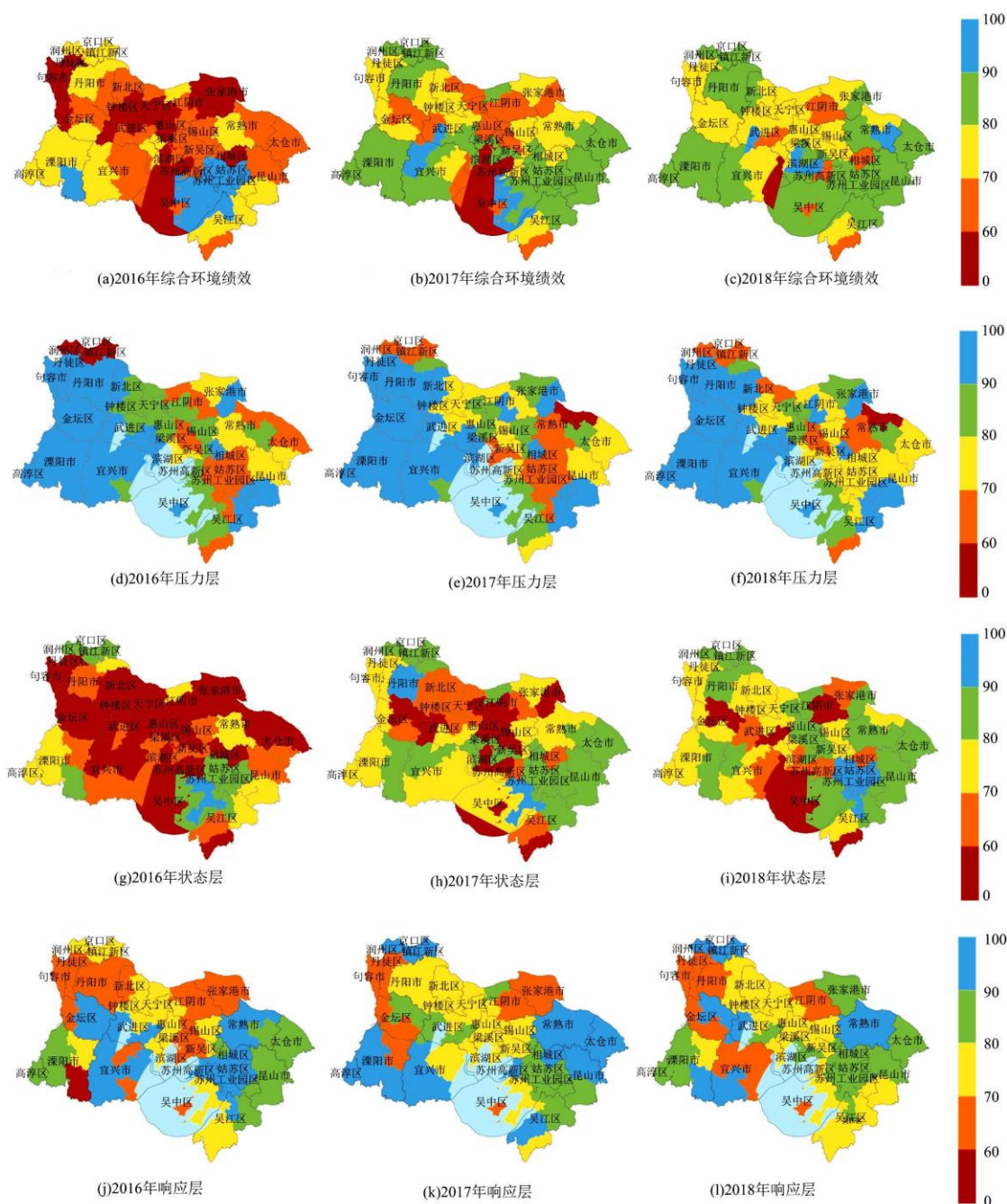


图 3 太湖流域水生态环境功能分区管理绩效指数空间分布

状态子系统提升最为明显，水质不断转好，断面优Ⅲ比例不断提升，水生态健康得到改善，林地+湿地面积不断增加。2016 年太湖流域状态指标普遍偏差，断面优Ⅲ比例不足，主要问题区域集中在以常州市区、张家港为代表的北部分区，2017、2018 年状态不断好转，至 2018 年普遍提升至 70 分以上，流域状态良好，但底栖敏感种检出情况仍不理想。2018 年，部分水生态环境功能分区状态子系统仍存在问题，太湖东岸、太湖湖体西部、江阴市等相关水生态环境功能分区水生态环境状态较差，断面优Ⅲ达标率偏低，水质状态仍需进一步改善。整体而言，底栖敏感种达标情况、水生态健康指数成为了限制太湖流域水生态环境功能

分区管理绩效提升的流域性问题。

响应子系统得分较为稳定，整体呈向好趋势，得分集中在 70~90 分之间，响应状况良好。部分功能分区响应子系统得分有所起伏，但变化不大，属于正常波动范围。问题区域主要集中在无锡市区、常州市区等为代表的中部地区，主要存在着清洁生产强度不足等问题，需进一步提高清洁生产力度，促进产业转型。其中，苏州整体响应水平较好，高新技术产业及清洁生产企业均得到较好的发展，能源消耗得到极大控制，仅张家港市单位 GDP 能耗较高，需进一步推进资源集约使用。

4 结束语

本研究利用 PSR 模型构建了太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估体系，从压力、状态、响应 3 个层面筛选了 9 个二级指标共计 14 个三级指标，对太湖流域各水生态环境功能区管理绩效水平进行评估，并基于 GIS 技术进行时空展示及分析比较。

研究结果表明，太湖流域水生态环境功能分区管理绩效不断向好发展，分区管理政策取得明显成效，2018 年各水生态环境功能分区基本达到 70 分以上水平，生态 I 级分区、生态 II 级分区管理绩效稳定发展，生态 III 级区、生态 IV 级区分区管理绩效提升明显。从空间分布来看，中部地区始终为分区管理绩效重压区，其中涉及常州市区、无锡市区等地相关水生态功能分区；以镇江市、丹阳、溧阳、高淳等为代表的流域西部地区管理绩效得到明显改善，水生态环境得到大幅提高。其中压力子系统主要问题区域主要化肥施用强度较高以及水资源消耗过度等问题；状态子系统中，底栖敏感种达标情况、水生态健康指数成为了限制太湖流域水生态环境功能分区管理绩效提升的流域性问题，其中以底栖敏感种最为突出；响应子系统得分较为稳定，主要存在着清洁生产强度不足等问题。

基于以上分析，太湖流域涉及各设区市需进一步加强对水质、水生态的分区管理，明确分区管理目标，重视水生态环境功能分区断面情况，跨区域生态环境功能分区应加强政府间沟通协作。在污染物排放方面，应进一步收严 COD、氨氮、总磷的工业污染排放标准，减少对流域环境的压力。在资源利用方面，加强集约用水，重视工业用水的循环利用，提高相关梯级用水标准，减少用水压力。在政府管理响应方面，应加强清洁生产力度，以高新技术带动企业清洁生产，促进产业转型升级。

参考文献：

- [1]董战峰, 吴琼, 李红祥, 等. 我国环境绩效评估制度建设的六大关键问题[J]. 环境保护与循环经济, 2013, 33(9):4-11.
- [2]张军莉, 严谷芬. 我国宏观区域环境绩效评估研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2015, 35(4):64-69.
- [3]孙晗, 唐洋. 基于 PSR 框架构建水环境绩效审计评价体系[J]. 财会月刊, 2014(14):94-96.
- [4]李春瑜. 大气环境治理绩效实证分析: 基于 PSR 模型的主成分分析法[J]. 中央财经大学学报, 2016(3):104-112.
- [5]王夏晖, 高彦鑫, 李松, 等. 基于 DPSIR 概念模型的土壤环境成效评估方法研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4):19-23.
- [6]OMERNIK J M, BAILEY G B. Distinguishing between watersheds and ecoregions[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(5):935-949.
- [7]李博, 孟庆庆, 赵然, 等. 基于水生态功能分区的流域水环境监测与评价研究[J]. 环境科学与管理, 2017(12):110-113.
- [8]魏冉, 李法云, 谯兴国, 等. 辽宁北部典型流域水生态功能区水生态安全评价[J]. 气象与环境学报, 2014(3):106-112.

-
- [9]衣俊琪. 辽北地区典型河流水生态功能区水生态系统健康评价[J]. 中国农村水利水电, 2014(8):67-72.
- [10]张志明, 高俊峰, 闫人华. 基于水生态功能区的巢湖环湖带生态服务功能评价[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1110-1118.
- [11]龚雪平. 黑河流域水质与水生态环境分区评价[D]. 兰州大学, 2012.
- [12]何哲, 桂居铎, 于宁, 等. 基于主成分分析-熵权-相关性分析法的水生态功能及驱动因子综合评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(26):178-183.
- [13]高永年, 高俊峰, 许妍. 太湖流域水生态功能区土地利用变化的景观生态风险效应[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7):1088-1096.
- [14]褚克坚, 仇凯峰, 贾永志, 等. 长江下游丘陵库群河网地区城市水生态文明评价指标体系研究[J]. 四川环境, 2015, 34(6):44-51.
- [15]MÄNSSON B. Evaluating and monitoring the health of large scale ecosystems[J]. Ecological Economics, 1996, 17(3):183-185.