

流域土地利用类型变化对鄱阳湖入湖水质的驱动特征

王 华^{1,2}, 徐浩森^{1,2}, 邓燕青^{3,4,5}, 吴小毛⁶, 曾一川^{1,2}, 闫雨婷^{1,2}

- (1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 江西省水文监测中心, 江西 南昌 330008;
5. 江西省鄱阳湖流域生态水文监测研究重点实验室, 江西 南昌 330008;
6. 江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室, 江西 南昌 330009)

摘要: 基于 1990—2020 年鄱阳湖入湖水水质及流域土地利用数据, 分析了流域土地利用变化对鄱阳湖入湖水质的驱动特征。结果表明: 入湖河流总氮与总磷质量浓度显著上升, 其中总氮增幅尤为突出, 2010 年后总氮平均质量浓度较前期提高 83.2% 以上, 总磷则在 2010 年后 90% 的时段超过湖库Ⅲ类水标准; 流域内耕地向建筑用地的转化是土地利用类型变化的主导类型, 建筑用地的扩张 90% 来自对耕地的侵占, 其中赣江流域建筑用地年均增长量为 67.8 km², 且下游区域转化强度最高; 建筑用地和耕地是导致鄱阳湖流域水质恶化的关键土地利用类型, 下游区域耕地向建筑用地的转变对污染物浓度提高的贡献度达 25.9%; 总氮质量浓度变化与建筑用地的相关系数最高达 0.819, 而总磷受颗粒态迁移的影响与土地利用类型的相关性较弱。

关键词: 土地利用; 水质; 驱动特征; 鄱阳湖

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)04-0244-09

Driving characteristics of watershed land use type changes on water quality of inflow rivers to Poyang Lake// WANG Hua^{1,2}, XU Haosen^{1,2}, DENG Yanqing^{3,4,5}, WU Xiaomao⁶, ZENG Yichuan^{1,2}, YAN Yuting^{1,2} (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Jiangxi Hydrological Monitoring Center, Nanchang 330008, China; 5. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Ecohydrological Monitoring Research in Poyang Lake Basin, Nanchang 330008, China; 6. Construction Office of Water Conservancy Hub at Poyang Lake of Jiangxi Province, Nanchang 330009, China)

Abstract: Based on the water quality data of the inflow into Poyang Lake and the land use data of the basin from 1990 to 2020, the driving characteristics of land use changes in the basin on the water quality of the inflow into Poyang Lake were analyzed. The results show that the concentrations of total nitrogen and total phosphorus in the inflow rivers have significantly increased, with the increase in total nitrogen being particularly prominent. After 2010, the average concentration of total nitrogen increased by more than 83.2% compared with the previous period, and the total phosphorus exceeded the Class III water standard of lakes and reservoirs in 90% of the time after 2010. The conversion of cultivated land to construction land is the dominant type of land use changes in the basin, and 90% of the expansion of construction land comes from the occupation of cultivated land. The average annual growth rate of construction land in the Ganjiang River Basin is 67.8 km², and the transformation intensity is the highest in the downstream area. Construction land and cultivated land are the key land use types that lead to the deterioration of water quality in the Poyang Lake Basin. The transformation of cultivated land to construction land in the downstream area contributes 25.9% to the increase in pollutant concentrations. The correlation coefficient between the change in total nitrogen concentration and construction land is as high as 0.819, while the correlation between total phosphorus and land use is relatively weak due to the influence of particulate migration.

Key words: land use; water quality; driving characteristics; Poyang Lake

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179064); 国家重点研发计划项目(2023YFC320900001); 江西省“科技+水利”联合计划项目(2023KSG003); 2023 年度江苏省高等教育质量保障与评价研究课题项目(2023-C04); 2024 年度江西省水利厅科技项目(202426ZDKT17)

作者简介: 王华(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水环境综合治理研究。E-mail: wanghua543543@163.com

土地利用类型变化再现了地球表面的时空动态,为揭示人类活动与自然环境相互作用提供了有效的途径^[1]。湖泊作为重要的淡水生态系统,在水资源调控、饮用水安全保障、水产养殖、旅游业开发等方面发挥着重要作用^[2-4]。将自然生境转化为可利用土地以满足人类日益增长的资源需求是导致河湖水质恶化的主要原因之一,农业与建筑用地的扩张显著加剧了陆地生态系统对全球淡水系统营养物质及沉积物的输入^[5-8]。作为人类活动、气候变化和地理过程共同驱动的结果,土地利用类型在一定程度上表征了污染物的产生和运输过程^[9-10]。入湖河流作为湖泊最直接的污染物来源,土地利用类型变化导致的入湖河流水质恶化会使得湖泊污染负荷加剧,因此研究流域土地利用类型变化对湖泊入湖水质的驱动特征,对于入湖河流水质的预测和湖泊水环境质量的提升均具有重要意义。

随着城市化进程的加快和全球极端气候事件的频发,土地利用类型变化的加剧导致了大量营养物质向湖泊输送,流域土地利用类型变化与湖泊水环境质量的相互作用已成为近年来流域治理研究的热点。针对二者相关关系的研究多采用冗余分析、相关性分析、多元回归分析等方法。①土地利用类型/覆被变化(land use and land cover change,LUCC)对水质的影响,在局部尺度与流域尺度上均存在差异性^[11-12]。王鹏等^[13]认为流域尺度的土地利用类型变化对区域内水质的影响较大,而Johnson等^[14]发现缓冲区的土地利用类型面积比例与河流水质的相关性更显著。方娜等^[15]研究认为,控制小尺度(小于等于1 km)的土地利用格局,特别是居民用地和耕地面积的占比,以及河流污染物的输入,有助于保护鄱阳湖水环境安全。②人为因素驱动的土地利用方式能够通过各种复杂的途径对地表水质造成直接影响,不同的土地利用类型和土地结构对流域水质的驱动存在差异^[10,16-18]。徐启渝等^[19]发现,建筑用地是对水质影响最显著的土地利用类型,土地利用结构与景观格局都对赣江水质有较大影响,二者的交互作用在该影响中占有重要地位。综上,目前针对土地利用类型变化与水质的相关性研究多聚焦于距离尺度或景观格局与土地利用的相互作用,通常采用单一年份土地利用数据与多点位水质监测数据进行分析,缺乏对土地利用演变过程持续驱动作用的探讨,且未充分考虑湖泊不同区域内土地利用类型对水质的驱动特征可能存在差异。因此,基于长时间序列的流域土地利用数据与湖泊水质数据,有助于揭示土地利用类型变化过程对湖泊水质的驱动机制,识别不同流域内影响入湖水质的主要土地利

用类型及其热点区域,从而为针对性优化湖泊子流域土地利用结构提供科学依据。

鄱阳湖作为典型的浅水通江湖泊,外部江河营营养物质输入是导致湖体富营养化加剧的主要原因之一^[20]。鄱阳湖枯水期形成的湿地是越冬候鸟的重要栖息地和鱼类的产卵场所,入湖河流的水质恶化严重影响了鄱阳湖各类生物的生境质量^[21-22]。鄱阳湖流域河流众多且地势差距较大,耕地与建筑用地主要分布在鄱阳湖湖区及其支流附近,人类生活产生的大量污染物通过入湖河流直接进入鄱阳湖^[23-25]。近年来,鄱阳湖极端干旱事件频发,洪旱交替导致的高频次土地利用类型变化直接影响了鄱阳湖水环境质量与安全^[26-27]。

本文基于鄱阳湖流域的土地利用类型变化趋势,明确鄱阳湖入湖河流水质的变化特征,解析流域土地利用类型变化对鄱阳湖入湖水质的驱动作用,以期对鄱阳湖生态健康及水资源保护提供重要支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部,长江中下游南岸,是长江主要支流之一。流域面积16万 km²,是我国第一大淡水湖泊;承接赣江、抚河、信江、饶河和修河五大河流的来水,每年为长江输送1480亿 m³的水量,占长江中下游总水量的17%。鄱阳湖流域为典型的亚热带季风气候,降雨主要分布在春夏两季,年均降水量达1350~1900 mm。降雨的时间分布不均,导致鄱阳湖在洪季与枯季的水面面积及库容差距显著。低水位时鄱阳湖平均水域面积仅为500 km²,库区边缘呈现较为明显的河流特征。湖泊与河流的水质评价标准差异导致鄱阳湖水质评价更为敏感。入湖河流是鄱阳湖污染负荷的主要来源之一,其流域概况及监测点位分布见图1,其中赣江主支、抚河口、信江主支、鄱阳和修河口5个监测点位水质数据分别代表赣江、抚河、信河、饶河、修河5条河流的入湖水质。

鄱阳湖入湖河流流域划分基于ArcGIS软件的水文分析工具实现。①利用填洼工具对高程数字模型(DEM)数据进行预处理;②通过流向计算确定区域内水流方向,并基于流量及河网生成工具构建鄱阳湖流域河流网络;③通过栅格河网矢量化及河网分级获取流域河网数据;④结合盆地和集水区分析,提取鄱阳湖流域所有河流及其支流的小流域,根据河流入湖口在河网数据中分别选定赣江、抚河、信河、饶河、修河5条河流的河网,通过与鄱阳湖小流域叠加选取并合并,最终得到5河子流域。

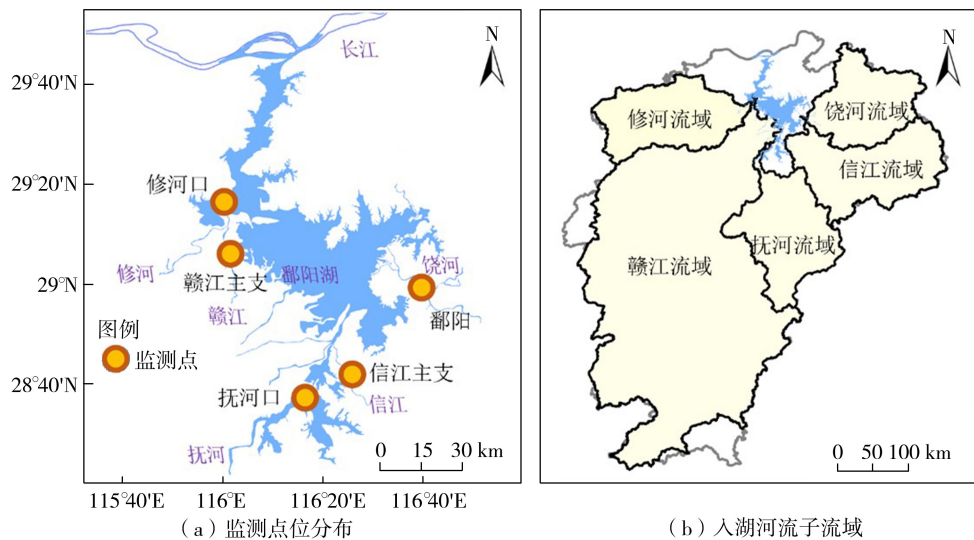


图 1 研究区概况及监测点位分布

Fig. 1 Study area and distribution of monitoring points

1.2 数据来源

监测点位逐月水质数据来自江西省水文监测中心,取样间隔为 1 月,时间跨度为 1988—2023 年,水质指标取总氮(TN)与总磷(TP)。土地利用数据使用 CLCD(China land cover dataset),该数据集基于 Google Earth Engine (GEE) 平台的 Landsat 影像数据,利用随机森林分类器得到耕地、林地、灌木、草地、水域、冰/雪、裸地、不透水面、湿地 9 种土地分类结果,空间分辨率为 30 m,时间分辨率 1 a。CLCD 利用包含时空滤波器和逻辑推理的后处理方法提高数据集的时空一致性,并基于 5 463 个目视解释样本得到数据的总体准确率达 80%。考虑水质数据与土地利用数据的时间尺度差异,将水质数据进行年平均以匹配土地利用数据,并以 1990—2020 年作为研究时间,最后得到 5 个点位共计 155 组水质数据及 31 a 鄱阳湖流域土地利用数据。DEM 数据由地理空间数据云 GSA (GeoSpace data cloud) 网站获取,分辨率为 30 m,用于鄱阳湖子流域划分。

2 研究方法

2.1 水质数据分析

在水质数据分析中,①对数据进行预处理,采用四分位数间距法剔除异常值;②通过 Mann-Kendall 检验和 Sen's Slope 法对水质指标的时间序列进行趋势性分析,以评估其变化方向及速率;③借助基于二分分割法的突变点检测方法,识别水质指标时间序列中的显著变化点。分析过程中使用了 R 语言的 trend 和 changepoint 包完成相关计算。

2.2 土地利用类型转移矩阵

利用 Zhu 等^[28]使用的土地利用类型转移矩阵

来定量表征研究区时段初至时段末各地类的时空演变特征。该矩阵不仅能量化不同土地类型之间的相互转化过程,还能识别土地转化过程中的热点类型。

2.3 相关性分析

首先,基于 Pearson 相关系数分析土地利用类型与水质的相关关系,随后采用广义线性混合模型 (generalized linear mixed model, GLMM) 得到各土地利用类型对水质变化的独立贡献。GLMM 作为普通线性模型的扩展形式,能够实现预测结果的非线性映射,在处理纵向数据方面具有显著优势。再利用 R 语言程序包 glmm. hp, 结合层次分割法 (hierarchical partitioning method), 对模型内每个解释变量分配独立效应,从而定量评价各解释变量的相对重要性。最后,分别以鄱阳湖各入湖河流所在子流域的土地利用类型面积变化和土地利用类型转移情况为解释变量,通过独立效应分析,系统揭示流域土地利用类型变化对鄱阳湖入湖水质的驱动机制及其特征。

3 结果与分析

3.1 鄱阳湖流域入湖河流水质特征

3.1.1 入湖河流水质演变趋势

鄱阳湖入湖河流 1990—2010 年水质变化差异较为显著,总氮与总磷质量浓度总体呈现上升趋势 (表 1)。流域内赣江和修河总磷质量浓度呈显著上升趋势;所有入湖河流总氮质量浓度都呈显著上升趋势,其中饶河上升速度最快,而修河的上升速度最缓慢。通过分析鄱阳湖入湖污染物质量浓度变化突变点,发现总氮质量浓度在 2010 年后显著上升,而总磷则在 2013 年左右开始逐渐下降。鄱阳湖入湖河流污染物质量浓度逐年变化情况见图 2。

表 1 鄱阳湖入湖河流水质趋势

Table 1 Trend of water quality of rivers flowing into Poyang Lake

子流域	总磷趋势与突变检验			总氮趋势与突变检验		
	斜率/ (mg/(L·a))	p 值	突变点	斜率/ (mg/(L·a))	p 值	突变点
赣江	0.00046	0.023		0.03921	0.032	2010 年
抚河	0.00037	0.093	2018 年	0.02787	0.015	2010 年
信江	0.00016	0.834	2016 年	0.02712	0.005	2012 年
饶河	0.00164	0.216	2014 年	0.04479	0.008	2010 年
修河	0.00078	0.015	2013 年	0.02086	0.040	2010 年

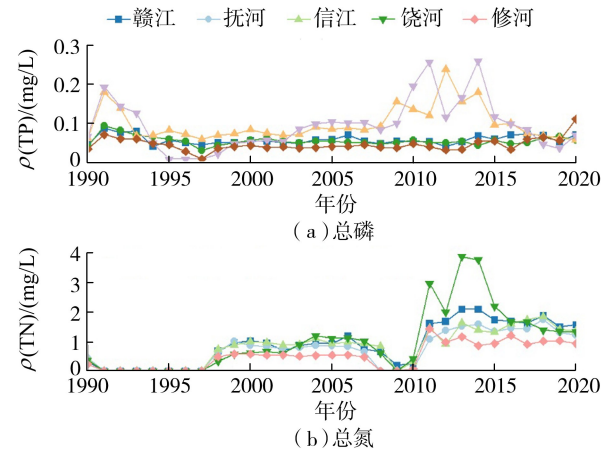


图 2 鄱阳湖流域入湖河流总磷与总氮质量浓度
Fig. 2 Annual changes in total phosphorus and total nitrogen mass concentrations of rivers flowing into Poyang Lake Basin

a. 1990—2010 年。①各入湖河流水质差距较小,且年均质量浓度波动较小;入湖河流总氮、总磷平均质量浓度分别为 0.628~0.785 mg/L 和 0.057~0.090 mg/L,其中平均污染物质量浓度最高的入湖河流为信江。②总磷质量浓度总体呈先下降后平稳的趋势。赣江、抚河和修河较为稳定,其质量浓度变化幅度均在 50%以内;信江和饶河波动情况较为明显,其质量浓度分别由 1991 年的 0.180、0.194 mg/L 降至 1997 年的 0.060、0.010 mg/L,1998—2010 年总磷质量浓度最高上升到 0.156、0.197 mg/L,已超过湖库Ⅲ类水标准。③总氮质量浓度。2002 年前赣江、抚河和信江处于较高水平,饶河和修河相对较低;2002—2010 年抚河开始呈现下降趋势;而饶河较 2002 年前有明显的恶化,总氮平均质量浓度增加了 0.272 mg/L,增幅达 50.7%。

b. 2011—2020 年。鄱阳湖各入湖河流水质变化较为显著,总氮质量浓度呈现总体上升趋势,总磷则表现为部分入湖河流质量浓度快速上升的情况。①总氮质量浓度。总氮平均质量浓度较 2010 年前显著上升,增幅达 0.83~2.03 倍。其中,饶河增幅最为显著,其平均质量浓度从 0.692 mg/L 上升到 2.099 mg/L。值得注意的是,2011—2015 年饶河总

氮质量浓度大幅波动,变化范围为 2.014~3.901 mg/L,均超过Ⅳ类水水质标准限值,为同期其他入湖河流总氮质量浓度的 1.18~2.37 倍。增幅最小的信江平均质量浓度也达 1.438 mg/L,超过Ⅲ类水水质标准。②总磷质量浓度。相较于其他入湖河流的平稳上升趋势,信江与饶河在 2009 年后呈现出显著的上升态势,质量浓度最大值分别达 0.239、0.260 mg/L,是同时期其他入湖河流的 2 倍以上。2015 年《鄱阳湖生态经济区规划》《鄱阳湖生态经济区环境保护条例》实施后,各流域入湖污染物质量浓度总体呈下降趋势。

总体上看,鄱阳湖入湖河流总氮与总磷质量浓度呈现上升趋势,但不同入湖河流变化特征差异明显。赣江、抚河与修河 30 a 污染物质量浓度呈较稳定的上升趋势;信江总氮质量浓度变化与赣江和修河相似,但总磷质量浓度在 2010 年前后大幅度升高;饶河总氮和总磷质量浓度 30 a 均大幅升高,位于饶河入湖口的鄱阳县的快速城市化进程可能是导致饶河 2010 年后入湖污染物质量浓度上升的主要原因之一。

3.1.2 入湖河流水质达标率

鄱阳湖各入湖河流水质达标率见表 2,考虑到洪枯季鄱阳湖部分区域河湖相的转变^[29],总磷水质达标率将同时考虑 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中的湖库水质标准(Ⅲ类水总磷限值小于等于 0.05 mg/L,总氮限值小于等于 1.0 mg/L;Ⅳ类水总磷限值小于等于 0.1 mg/L,总氮限值小于等于 1.5 mg/L)与河流水质标准(Ⅲ类水总磷限值小于等于 0.2 mg/L)。

表 2 鄱阳湖入湖河流水质达标率

Table 2 Water quality compliance rate of rivers flowing into Poyang Lake

子流域	总磷达标率/%			总氮达标率/%	
	Ⅲ类 (湖库)	Ⅳ类 (湖库)	Ⅲ类 (河流)	Ⅲ类 (湖库)	Ⅳ类 (湖库)
赣江	17.14	100.00	100.00	50.00	60.71
抚河	2.86	74.29	97.14	53.57	85.71
信江	68.57	97.14	100.00	82.14	100.00
饶河	22.86	60.00	94.29	42.86	75.00
修河	20.00	97.14	100.00	53.57	89.29

a. 总磷。湖库Ⅲ类标准下,鄱阳湖各入湖河流总磷水质达标率不足 70%,其中抚河水质最低,仅有 2.86%,其余河流为 20%~68.57%。湖库Ⅳ类标准下,总磷赣江水质达标率达 100%,抚河为 74.29%,而饶河仅为 60%。说明抚河的年均水质总体较差,而饶河总磷年均质量浓度极值较高,水质波动明显。河流Ⅲ类标准下,各入湖河流总磷水质达标率均在 90%以上,其中赣江、信江和修河达标率为 100%。湖库与河流的总磷水质标准差异将显著

影响入湖河流的达标率评价。对于河湖交替频繁的人湖河流,建议分洪枯季采用差异化的水质标准进行评估。

b. 总氮。各入湖河流总氮的水质超标率更为显著。Ⅲ类水质标准下,鄱阳湖各入湖河流平均达标率仅为 56%,信江总氮达标率为 82.14%,在入湖河流中达标率最高。Ⅳ类水质标准下,各入湖河流达标率有所提升,但仅信江达标率超过 90%,赣江达标率仅从 50.00% 提升到 60.71%,说明赣江总氮污染比较严重,较高的污染物质量浓度和较大的流量导致赣江成为鄱阳湖入湖总氮的主要贡献河流。

从水质达标率方面来看,总磷是影响抚河水质达标率的主要指标,总氮是影响赣江水质达标率的主要指标。

3.2 鄱阳湖流域土地利用类型变化特征

3.2.1 土地利用类型变化时间特征

鄱阳湖各入湖河流土地利用类型面积变化见图 3。①信江流域的耕地面积占比最大,达到 33.4%,农业面源污染输入是信江入湖总磷较高的原因之一。②饶河流域建筑用地面积占比为 2.2%,仅次于建筑用地面积最小的修河流域(1.7%),说明饶河流域持续升高的入湖污染物浓度可能与下游建筑用地相关。③作为入湖河流面积最大的子流域,赣江流域的土地利用类型变化较为剧烈,其中以建筑用地和草地的变化特征最为显著,1990—2020 年有 98.3% 的草地消失,而建筑用地持续增长 2 084.24 km²,增长率达 67.8 km²/a;耕地与林地的面积变化相反,1990—2020 年耕地面积先

下降后上升,净增加面积为 636.05 km²;而林地面积经历了波动上升—降低的过程后,面积共减少 2 363.32 km²;水域面积增加了 62.08 km²,主要来自流域中下游水田的增加与河道的扩张;灌木面积经过先增后减的过程最后总量保持不变;而荒地则经过 30 a 的土地演变基本消失。④抚河的荒地在 1990 年面积为 10.05 km²,1990—2007 年荒地面积持续减少,在 2017 年后荒地减少速度减缓,说明流域内荒地还会持续存在一段时间。总体来看,林地是各子流域占比最高的土地利用类型,所占比例为 59.4%~73.0%。相较于赣江流域的大规模土地利用类型变化,抚河、信江、饶河和修河的土地利用类型变化相对平缓,其中 4 个子流域中建筑用地的占比均有所上升,增长率分别为 9.9、13.9、9.0、6.0 km²/a。4 个子流域的耕地、林地和水域净增长率均低于 8.9%,净增加的面积较小。

3.2.2 土地利用类型转移矩阵

通过转移矩阵进一步分析鄱阳湖子流域主要土地利用类型变化情况,结果见图 4。

各流域土地利用类型转移情况大致相同,主要为耕地与林地的相互转化、耕地与水域的相互转化及耕地向建筑用地的转化。赣江流域面积是其他子流域的 4 倍以上,而发生土地利用类型转化的总面积平均是其他流域的 6 倍,土地利用类型转化最为频繁。各子流域建筑用地持续扩张,其中向耕地的侵占是建筑用地面积增加的主要来源。赣江、抚河、信江、饶河、修河子流域耕地向建筑用地转化的面积分别为 1 635.67、248.86、401.11、189.85、144.68 km²,

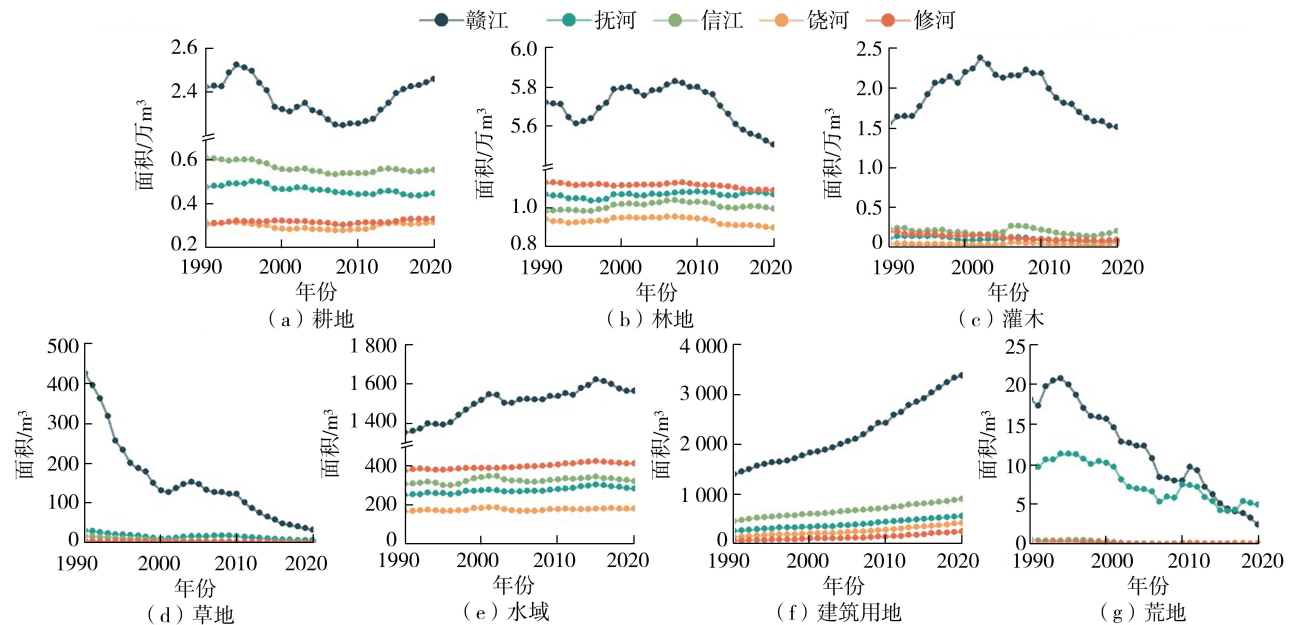


图 3 鄱阳湖子流域土地利用类型面积变化及趋势

Fig. 3 Changes and trends of land-use types' area in the sub-watersheds of Poyang Lake

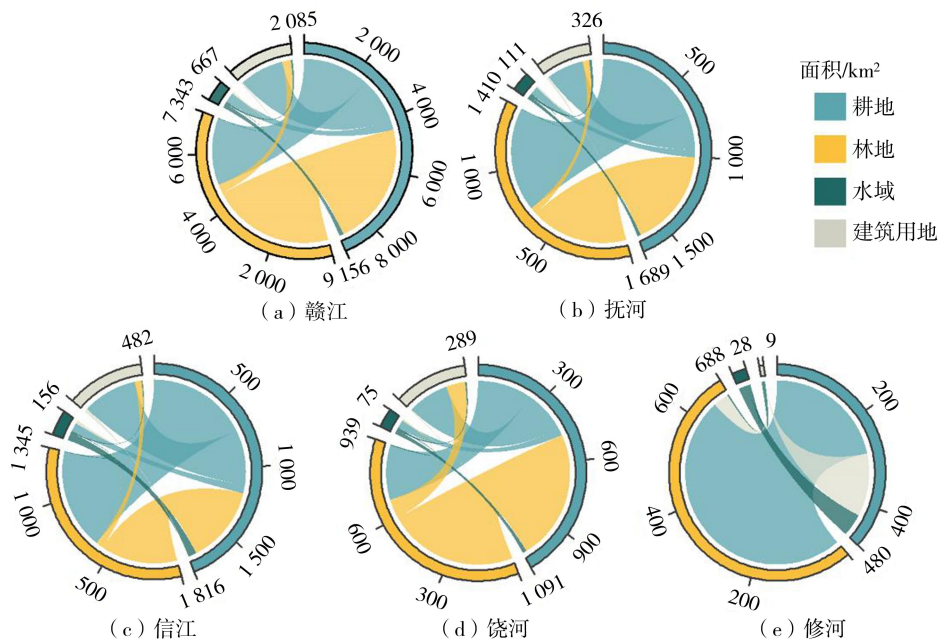


图 4 鄱阳湖子流域土地利用类型转移矩阵

Fig. 4 Land-use transfer matrix in the sub-watersheds of Poyang Lake

占各子流域建筑用地总增长面积的 90% 以上。赣江、饶河和修河流域的耕地与林地相互转化最终导致林地面积增加,净增加面积分别为 2 083.06、348.41、365.40 km²;而抚河和信江流域耕地净增加面积分别为 40.90、167.13 km²。同时,鄱阳湖流域生态用地有所增加,赣江流域耕地向水域的转化面积为 358.91 km²,主要来自旱地变更为水田、赣江干流的扩张、入湖口处鄱阳湖湖体的扩张,发生在干流缓冲区附近;水域向耕地的转化则主要发生在入湖口附近,其他子流域土地利用类型转化分布与赣江流域大致相同。

3.3 鄱阳湖入湖河流水质与土地利用类型变化的相关性分析

3.3.1 土地利用类型面积变化相关性

入湖河流的总氮质量浓度对流域内的土地利用类型面积变化表现出更高的相关性(表 3)。耕地与建筑用地的增加导致鄱阳湖入湖河流水质恶化。在抚河、信江和修河流域,总氮质量浓度与耕地面积表现出较强的正相关关系;同时,各流域总氮质量浓度

与建筑用地之间也存在显著相关性,相关系数最高达 0.819,表明城市化进程对水体氮污染具有重要影响。值得注意的是,不同流域林地与水质的关系存在明显差异:抚河和信江流域的林地分布主要集中在下游地区,这种空间分布特征削弱了林地的污染物拦截功能,使其成为向鄱阳湖输送污染物的近岸污染源,导致水质恶化。相比之下,修河流域的水体面积与水质呈显著负相关,反映出该流域众多水库在阻隔污染物向湖泊迁移方面发挥了积极作用。这些发现说明,土地利用类型对水质的影响不仅取决于其本身,还与其空间分布特征和人为调控措施密切相关。

对子流域土地利用类型面积变化进行独立效应分析,结果表明,相较于总磷质量浓度,总氮质量浓度对于土地利用类型面积变化的响应更为敏感(图 5)。鄱阳湖入湖河流总氮与各子流域土地利用类型面积变化的拟合度(R^2)在 38.1%~73.8%之间,其中赣江流域最高,饶河流域最低。水域和建筑用地是影响赣江、抚河和修河流域总氮质量浓度的

表 3 鄱阳湖入湖河流水质与土地利用类型面积相关系数

Table 3 Correlation coefficient between water quality of rivers flowing into Poyang Lake and area of land-use types

子流域	总磷				总氮			
	耕地	林地	水域	建筑用地	耕地	林地	水域	建筑用地
赣江	0.107 *	-0.172 *	0.258	0.405 *	-0.059	-0.452 *	0.717 ***	0.819 ***
抚河	0.112	0.042	-0.020	0.182	0.624 ***	0.367 *	0.787 ***	0.752 ***
信江	0.271	0.274	0.044	0.135	0.496 **	0.060	0.488 **	0.814 ***
饶河	0.005	-0.048	-0.032	0.108	0.195	-0.453 *	0.340 *	0.634 ***
修河	0.126	-0.290	-0.337 *	0.386 *	0.465 **	-0.742 ***	-0.837 ***	0.814 ***

注: * 表示 $p < 0.1$, ** 表示 $p < 0.05$, *** 表示 $p < 0.001$ 。

主要因素,建筑用地的快速扩张是流域内总氮污染的主要来源,经处理排放的工业废水和部分未经处理的生活污水直接或间接排入水体,最后影响入湖污染物浓度。耕地是信江流域总氮质量浓度的主要影响因素,独立效应达 22.2%;抚河流域耕地相对集中,主要分布在流域下游及干流沿岸,其耕地面积是鄱阳湖入湖河流子流域中占比最高的子流域,表明降雨产生的农田高营养盐径流汇入河流是导致信江入湖总氮质量浓度较高的原因。总体来看,由于赣江、抚河、饶河和修河入湖口靠近大型城市,总氮质量浓度与建筑用地面积增加的相关性较高,而信江流域下游多为耕地,是影响信江入湖总氮质量浓度的关键土地利用类型。

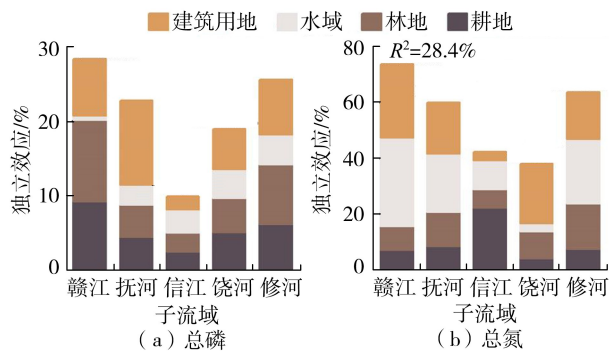


图 5 土地利用类型面积变化与鄱阳湖入湖水质的相关性
Fig. 5 Correlation between changes in land-use type area and water quality of rivers inflowing into Poyang Lake

各子流域土地利用类型面积变化与总磷质量浓度的 R^2 均未超过 30%,对入湖总磷的解释程度不高,可能的原因是水体内磷形态较为复杂,且多以颗粒态磷的形式存在,导致河流总磷质量浓度除了与污染排放直接相关外,还与水体冲刷导致的颗粒态磷的迁移有关。而土地利用类型仅能代表污染物的释放强度,在相关性分析中并未考虑代表水文过程的相关参数,导致总磷质量浓度的拟合度过低。虽然总磷质量浓度与土地利用类型的相关程度并不高,但依旧可以通过独立效应相对值探究不同土地利用类型对磷的释放作用。建筑用地和耕地是各类污染物释放的主要来源,而林地对总磷浓度的贡献显著高于总氮,表明森林系统中落叶和植被腐化过程产生

的含磷物质通过雨水冲刷进入了河流。同时,河流总氮浓度受到耕地、林地和建筑用地的共同影响。

3.3.2 土地利用类型转移相关性分析

土地利用类型转移矩阵代表着流域内土地的转化方向,其与水质的相关性分析可以得到流域内影响水质变化的主要区域。各入湖流域内林地变为耕地、耕地变为建筑用地及耕地变为水域是与水质相关性最高的土地利用类型转移模式(表 4)。其他土地利用类型向耕地与建筑用地的转化导致入湖水质显著恶化;水域面积的增加表明河流水量增加,赣江水域面积的增加使得入湖总磷与总氮质量浓度下降。总体上耕地向林地的转化对总磷呈负相关关系,说明耕地是流域内总磷的主要输入源,耕地向林地的转化有效阻止了总磷通过径流向河流的输送过程。赣江流域各土地利用类型转移与水质的相关性高于其他流域,说明鄱阳湖入湖污染负荷与土地利用类型转化的相关性受流域面积的影响。

通过独立效应分析总氮、总磷质量浓度与土地利用类型转移的关系,进一步解析土地利用类型变化对入湖污染物的驱动作用(图 6)。可见,土地利用类型转移对总氮质量浓度和 R^2 均小于 50%,仅饶河与修河流域呈现较高相关性。饶河的入湖总氮质量浓度受林地向耕地的转化影响较大(独立效应 23.6%),尤其是下游及干流缓冲区周边高强度的耕地扩张。修河流域 R^2 达 48.2%,其中耕地转为建筑用地的独立效应为 25.9%,主要原因是该流域约 50%的建筑扩张发生在入湖口附近,导致总氮排放强度增加。抚河流域耕地向水域的转化对总氮的独立效应达到 24.7%,且转化多集中于干流区,表明退耕还河政策有效降低了污染物入湖量。总体而言,相比土地利用类型面积变化,土地利用类型转移与入湖污染物的相关性较弱,但其贡献度与其地理位置相关,下游区域的土地利用类型转移对污染物浓度的影响尤为显著。

4 结 论

a. 鄱阳湖入湖河流总氮与总磷质量浓度整体呈上升趋势,不同河流的污染物质量浓度变化特征

表 4 鄱阳湖入湖河流水质与土地利用类型转移相关系数										
Table 4 Correlation coefficient between water quality of rivers flowing into Poyang Lake and changes in land-use type										
子流域	相关系数(总磷)					相关系数(总氮)				
	水域-耕地	林地-耕地	耕地-建筑用地	耕地-水域	耕地-林地	水域-耕地	林地-耕地	耕地-建筑用地	耕地-水域	耕地-林地
赣江	0.230	0.327 *	0.337 *	-0.392 *	-0.224	0.343 *	0.531 **	0.543 **	-0.262	0.100
抚河	0.120	0.117	-0.011	-0.268	-0.381 *	0.296 *	0.006	0.007	-0.266 *	0.269
信江	0.160	0.246	0.075	-0.265	-0.327 *	0.366 *	0.215	-0.009	-0.205	0.212
饶河	-0.103	0.413 *	0.282	-0.130	-0.475 **	0.125	0.439 *	0.328 *	-0.217	-0.252
修河	0.334 *	0.372 *	0.207	-0.10	-0.078	0.151	0.319 *	0.651 **	-0.212 *	0.017

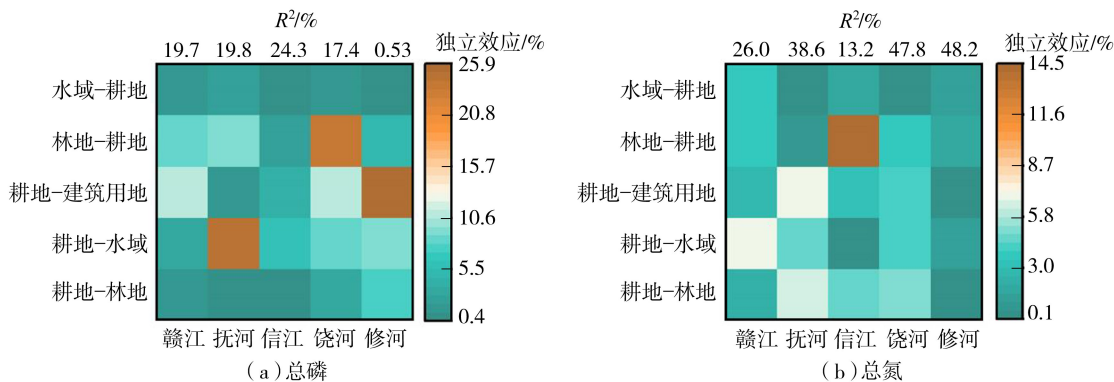


图 6 土地利用类型转移与鄱阳湖入湖河流水质的相关性

Fig. 6 Correlation between land-use type transition and water quality of rivers inflowing into Poyang Lake

差异显著。各入湖河流在 2010 年前水质相对平稳；2010—2015 年水质波动较为明显,其中总氮平均质量浓度增幅超过 80%,信江与饶河的总磷质量浓度是同时期其他河流的 2 倍以上;2015 年以后相关环境政策的实施使得水质趋于稳定。总磷是影响抚河水质达标率的主要指标,总氮是影响赣江水质达标率的主要指标。

b. 各子流域内主要土地利用类型变化为耕地向其他土地利用类型的转化及建筑用地的持续增加。1990—2020 年赣江、抚河、信江、饶河与修河流域的建筑用地增长率分别为 67.8、9.9、13.9、9.0、6.0 km²/a,其中增加的面积超过 90%源于对耕地的侵占。耕地与林地和耕地与水域的频繁转化促使各子流域下游区域土地结构变化显著,进而对鄱阳湖入湖水质产生影响。

c. 土地利用类型面积是影响鄱阳湖入湖河流水质的主要驱动因素,为鄱阳湖入湖总氮质量浓度预测发挥了重要作用。建筑用地及耕地面积的增加显著加剧了各流域入湖污染,相关系数最高达 0.819 和 0.624,且下游耕地向建筑用地转化主导了入湖水质的变化,相关系数最高为 0.615。由于土地利用类型只能表示总磷的排放强度,无法描述磷的颗粒态迁移过程,需结合水文参数进一步分析。

参考文献:

[1] WINKLER K,FUCHS R,ROUNSEVELL M,et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated[J]. Nat Commun,2021,12(1):2501.

[2] 谢三桃,朱慧雯,唐晓先,等. 巢湖流域山水林田湖草生态保护和修复[J]. 水资源保护,2023,39(2):252-258. (XIE Santao, ZHU Huiluan, TANG Xiaoxian, et al. Ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in the Chaohu Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 252-258. (in Chinese))

[3] 饶贵康,王玲玲,徐津,等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):31-37. (RAO Guikang, WANG Lingling, XU Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 31-37. (in Chinese))

[4] 夏军,刁艺璇,余敦先,等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护,2022,38(3):1-8. (XIA Jun, DIAO Yixuan, SHE Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 1-8. (in Chinese))

[5] GIRI S, QIU Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in twenty first century: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 173: 41-48.

[6] SU Weichia, AHERN J F, CHANG C Y. Why should we pay attention to “inconsistent” land uses? A viewpoint on water quality [J]. Landscape Ecological Engineering, 2016, 12(2): 247-254.

[7] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))

[8] HUANG Zhilin, HAN Liyang, ZENG Lixiong, et al. Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(4): 3943-3955.

[9] GOMI T, SIDLE R C, RICHARDSON J S. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems [J]. Bioscience, 2002, 52(10): 905-916.

- [10] DE MELLO K, VALENTE R A, RANDHIR T O, et al. Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in southeastern Brazil: watershed versus riparian zone[J]. *Catena*, 2018, 167: 130-138.
- [11] LI Siyue, ZHANG Jing, JIANG Ping, et al. Linking land use with riverine water quality: a multi-spatial scale analysis relating to various riparian strips[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1013318.
- [12] XU Mingzhu, XU Guoce, LI Zhanbin, et al. Effects of comprehensive landscape patterns on water quality and identification of key metrics thresholds causing its abrupt changes [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 333: 122097.
- [13] 王鹏, 齐述华, 陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35 (13): 4326-4337. (WANG Peng, QI Shuhua, CHEN Bo. Influence of land use on river water quality in the Ganjiang Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (13): 4326-4337. (in Chinese))
- [14] JOHNSON L, RICHARDS C, HOST G, et al. Landscape influences on water chemistry in midwestern stream ecosystems[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37 (1): 193-208.
- [15] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40 (12): 5348-5357. (FANG Na, LIU Lingling, YOU Qinghui, et al. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (12): 5348-5357. (in Chinese))
- [16] SAEIDI S, MOSALLAEI A, IMANI H J, et al. Assessing the impact of land use and land cover on water quality: a case study of the R kos Catchment in Hungary [J]. *ARPHA Conference Abstracts*, 2023, 6: e108160.
- [17] MIRHOSSEINI M, FARSHCHI P, NOROOZI A A, et al. Changing land use a threat to surface water quality: a vulnerability assessment approach in Zanjanroud Watershed, central Iran [J]. *Water Resources*, 2018, 45 (2): 268-279.
- [18] YOU Qinghui, FANG Na, LIU Lingling, et al. Effects of land use, topography, climate and socio-economic factors on geographical variation pattern of inland surface water quality in China[J]. *Plos One*, 2019, 14 (6): 217840.
- [19] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32 (4): 1008-1019. (XU Qiyu, WANG Peng, WANG Tao, et al. Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang River of Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Science*, 2020, 32 (4): 1008-1019. (in Chinese))
- [20] 盛文涛, 欧阳小军. 鄱阳湖五条入湖河流氮磷污染特征研究 [J]. *当代化工研究*, 2021 (16): 118-122. (SHENG Wentao, OUYANG Xiaojun. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus pollution in five poyang lake inflowing rivers [J]. *Modern Chemical Research*, 2021 (16): 118-122. (in Chinese))
- [21] 吴培军, 万晓明, 徐继铭, 等. 鄱阳湖枯水期水位变化及应对措施[J]. *水资源保护*, 2019, 35 (6): 104-108. (WU Peijun, WAN Xiaoming, XU Jiming, et al. Changes of water levels in low-water season in Poyang Lake and it's countermeasures [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35 (6): 104-108. (in Chinese))
- [22] YANG Wenjing, YOU Qinghui, FANG Na, et al. Assessment of wetland health status of Poyang Lake using vegetation-based indices of biotic integrity[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 79-89.
- [23] 夏少霞, 于秀波, 刘宇, 等. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (7): 1103-1111. (XIA Shaoxia, YU Xiubo, LIU Yu, et al. Current issues and future trends of Poyang Lake wetland [J]. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2016, 25 (7): 1103-1111. (in Chinese))
- [24] 徐丽婷, 阳文静, 吴燕平, 等. 基于植被完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价[J]. *生态学报*, 2017, 37 (15): 5102-5110. (XU Liting, YANG Wenjing, WU Yanping, et al. Assessing the ecological health of Poyang Lake wetland using a vegetation-based index of biotic integrity (V-IBI) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (15): 5102-5110. (in Chinese))
- [25] 汤明. 城镇化过程对鄱阳湖水域生态环境影响研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [26] 李谕路. 鄱阳湖水位变化对水质的影响研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [27] 李文轩, 蒋名亮, 徐力刚, 等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及其对极端洪枯事件的响应[J]. *湖泊科学*, 2024, 36 (4): 1001-1013. (LI Wenxuan, JIANG Mingliang, XU Ligang, et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events [J]. *Journal of Lake Science*, 2024, 36 (4): 1001-1013. (in Chinese))
- [28] ZHU Huiyi, LI Xubin. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (5): 643-650.
- [29] 袁伟皓, 王华, 曾一川, 等. 通江湖泊河湖两相判别机制研究与应用[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44 (1): 181-189. (YUAN Weihao, WANG Hua, ZENG Yichuan, et al. Research and application of two phases discriminant mechanism of river and lake in river-connected lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44 (1): 181-189. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 11 - 25 编辑: 胡新宇)