

洪泽湖湖滨带丰水期水质空间分异特征及其影响因素¹

刘荣坤^{1,2} 徐锦前³ 张颖⁴ 胡恺源² 彭凯² 龚志军^{2,5} 夏霆^{1*} 蔡永久^{2,5*}

(1. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏南京 210008;

3. 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽芜湖 241002;

4. 江苏省水利工程规划办公室, 江苏南京 210029;

5. 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽芜湖 241002)

【摘要】湖滨带是陆地与湖泊水体之间的生态过渡带, 具有强烈的环境异质性和丰富的生产力, 同时也容易受到人类活动的威胁。洪泽湖湖滨带受人类开发利用情况严重, 为探明其水质空间分异特征, 于 2020 年 8 月对全湖 52 个点位的水质开展调查, 对比 4 个湖区水质差异, 应用逐步线性回归探究水质空间分异的影响因素。结果表明: 氮磷营养盐、高锰酸盐指数(CODMn)与叶绿素 a(Chl a)是影响洪泽湖湖滨带水质的主要指标, 各样点总氮(TN)浓度在 $0.66 \sim 4.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $1.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属 V 类水; 总磷(TP)浓度在 $0.02 \sim 0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属 V 类水; CODMn 浓度在 $5.24 \sim 14.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $7.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属 IV 类水; Chl a 浓度在 $4.55 \sim 158.31 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $49.30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。洪泽湖湖滨带水质空间差异较大: CODMn、Chl a 和溶解性有机碳(DOC)等指标在成子湖岸和西部湖岸浓度较高, 在南部湖岸与东部湖岸则相对较低, TN、TP 在各湖区未见明显差异, 表明湖区内部变异较大。洪泽湖湖滨带水质空间分异主要受湖滨带缓冲区利用类型、水生植被覆盖度及风浪扰动的影响, 其中湖滨带缓冲区利用类型是最关键的影响因子。

【关键词】水质; 空间分异; 影响因素; 洪泽湖; 湖滨带; 丰水期

¹ 收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171119); 江苏省水利科技项目(2019005, 2019004); 中国科学院青年创新促进会项目(2020316); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-075)

作者简介: 刘荣坤(1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及生态修复. E-mail: 202061224064@njtech.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: caiyj@niglas.ac.cn; xiating@njtech.edu.cn

【中图分类号】:X824 【文献标识码】:A 【文章编号】:1004- 8227(2023)01- 0151- 11

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301014

湖滨带是陆地与湖泊水体之间的生态过渡带,是湖泊生态系统的重要组成部分,湖滨带可分为水向带、岸线带和陆向带^[1]。在陆地生态系统和湖泊生态系统的共同作用下,湖滨带表现出强烈的环境异质性和丰富的生产力,同时也是最容易受到人类活动威胁的自然环境之一^[2]。健康的湖滨带具有重要的生态功能如:通过水-土-植物-微生物系统的过滤、滞留、物理吸附、还原分解及生物作用调节生态系统之间的物质交换,对外源污染物质起到良好的缓冲作用,改善湖泊水质;湖滨带内丰富的植被和土壤能够阻滞、积蓄洪水,同时还具有降低流速,减弱风浪冲击,保持岸岸稳定性的作用;湖滨带的异质性、高生产力及资源多样性有利于提升生境的生物多样性;为人类提供水源供给、水产品供给等经济收益以及较高的美学价值^[3,4]。

洪泽湖是我国五大淡水湖之一,整体水质波动性大、稳定性差、空间分异性较强^[5]。长期以来,洪泽湖湖滨带开发利用强度大,虽然近几年洪泽湖大力推进退渔还湖、退圩还湖,但是围网、圈圩面积仍然较大^[6]。以研究区 2020 年 Landsat ETM 和 OLI 遥感影像为基础,进行目视解译获取的洪泽湖蓄水范围内水域利用类型数据显示,洪泽湖水域缓冲区养殖面积占比高,围网、圈圩面积分别为 324 和 183 km²,占湖泊面积的比例高达 30.8%。另一方面,洪泽湖环湖陆域缓冲区开发利用强度也较大,基于哨兵 2A(Sentinel-2A)卫星影像结果显示,陆向 3 km 缓冲区内土地利用现状以耕地、坑塘、建设用地为主,占比分别为 65.0%、19.3%、10.4%,合计超过 95%。缓冲区高强度农业开发利用和人类活动,导致农业面源污染较为严重,环湖入湖河流水质较差,入湖河流各项营养盐平均浓度均高于湖体^[7],严重威胁湖滨带水质。然而,前期针对洪泽湖水质研究集中在敞水区,湖滨带这一重要区域相关研究较少。本文选择丰水期开展湖滨带水质调查,主要有两方面考虑:(1)丰水期洪泽湖流域农业生产活动强,河流携带入湖污染物负荷高,对湖滨带水质造成较大冲击,较其他季节污染程度更为严重,前期调查发现夏季湖滨带普遍水色较差,且成子湖东部湖滨带有蓝藻水华发生;(2)洪泽湖水位变化较大,丰水期水位较高,有利于野外采样工作开展。为此,本文对洪泽湖湖滨带进行 52 个样点的高密度监测,旨在探明丰水期湖滨带水质的空间分异特征及其影响因素,以为洪泽湖湖滨带水环境治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪泽湖(33° 06' N~33° 40' N,118° 10' E~118° 52' E)位于江苏省北部的淮安、宿迁两市,规划蓄水位 13.50 m,相应水面积 1 780 km²、库容 39.57 亿 m³,平均水深 1.9 m[8]。它西纳淮河,南注长江,东通黄海,北连沂沭。洪泽湖不但对周边地区的环境具有多方面的生态效应,还是我国最大的具有防洪、灌溉、调水、水产、水运等综合利用功能的水库型湖泊^[9]。

1.2 采样点布设

在洪泽湖湖滨带共布设了 52 个监测点(图 1),采样时间为 2020 年 8 月。根据洪泽湖湖滨带的地理位置、开发利用程度、湖区功能、人为影响(如养殖捕捞、堤岸建设等人类活动)等情况,将湖滨带划分为东部湖岸、南部湖岸、西部湖岸和成子湖岸四个区域。其中东部湖岸湖滨带类型为大堤型,生物多样性较低,受风浪扰动影响较大,布设 7 个样点。南部湖岸位于淮河入湖口至淮河入江水道,是主要过水通道,换水周期快,布设 12 个样点。西部湖岸所处区域圈圩、围网开发利用强度大,水动力条件较弱[10],布设 17 个样点。成子湖岸水动力较弱,东部开发利用强度较大,西部则相对较少,布设 16 个样点。

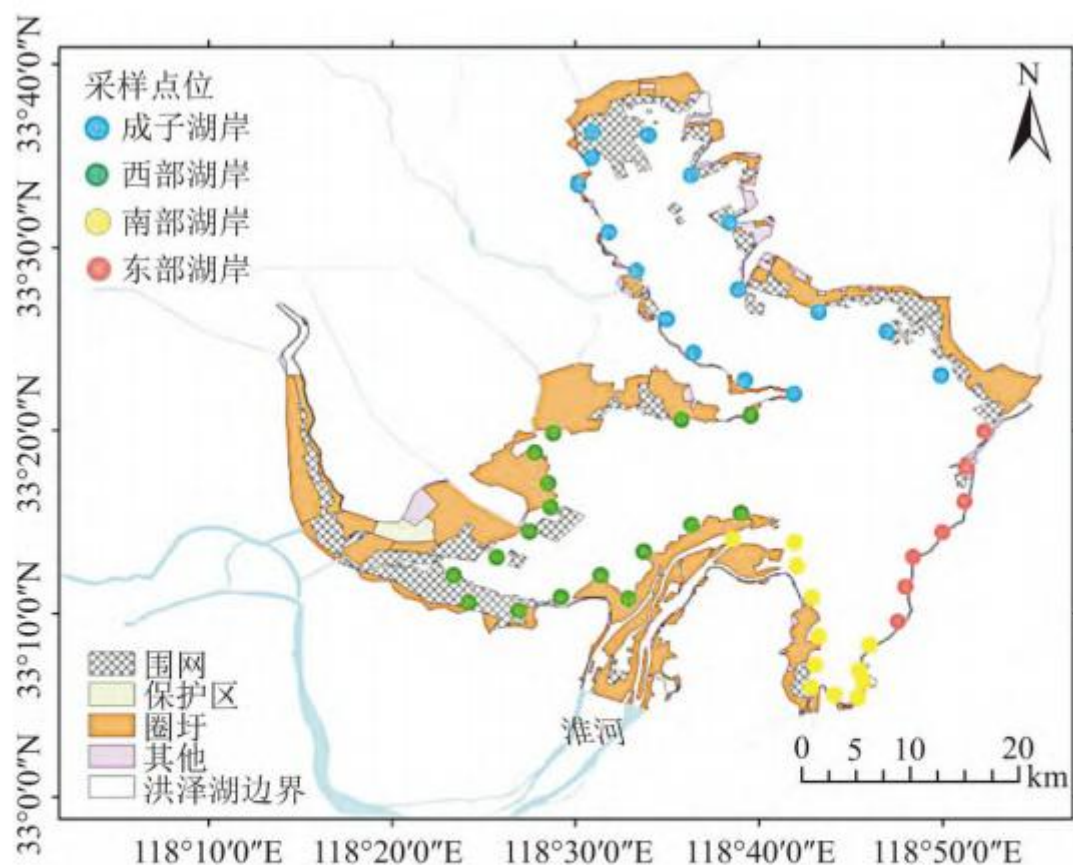


图 1 洪泽湖湖滨带水质采样点分布图

Fig. 1 Location of water quality sampling sites in littoral zone of Lake Hongze

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水质指标测定

水深(WD)采用 Speedtech SM-5 便携式测深仪测定, 透明度(SD)使用塞氏盘进行测定, pH、浊度(TUB)等水质指标由 YSI-6600 多参数水质监测仪现场测定; 用 5L 有机玻璃采水器取表层和底层水样, 混匀后取 1 L 水样冷藏保存带回实验室测定水质理化参数; 采用 GF/F 膜过滤水样用热乙醇萃取分光光度法测定 Chla 浓度; 硝态氮(NO_3^-)、正磷酸盐 (PO_4^{3-})采用比色法测定, COD_{Mn} 采用重铬酸盐法测定; TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定; TP 采用钼酸铵分光光度法测定; $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法测定。

1.3.2 水质影响因子数据获取

根据相关研究, 湖滨带水质会受到风浪扰动、水生植被、湖滨带开发利用强度、入湖河流水质等因素的影响^[11, 12, 13, 14], 结合洪泽湖湖滨带主要特征, 本文重点考虑风浪扰动、水生植被覆盖度以及湖滨带缓冲区利用的影响。

(1) 风浪扰动

风浪扰动的确定基于逐日气象数据分析获得洪泽湖近 2 年盛行风向, 计算湖泊内每个监测点东、南、西、北 4 个方位离岸距离, 选取 2 个盛行风向下样点离岸距离加和作为湖泊扰动指数, 进而获得扰动指数的空间分布, 表征风浪扰动强度的空间格局[15]。

(2) 水生植被覆盖度

按照常用水生植物盖度计算方法, 在生境随机选取面积为 1 m×1 m 的样方, 采用目测法估计植被盖度百分比^[16]。

(3) 缓冲区利用类型

本研究以洪泽湖蓄水保护范围线为边界, 以陆域、水域缓冲区开发利用为数据基础; 提取各调查点不同半径圆缓冲区的开发利用方式, 数据为百分比数据, 累加起来为 100%; 已有国内外较多研究表明, 不同空间尺度上开发利用类型对水质变化的影响效应具有较大的尺度差异性^[17, 18], 由于各流域的独特性, 造成对水质影响的最有效空间尺度识别存在一定争议^[19], 本文基于不同尺度范围对水质空间变化的解释能力, 选取半径 1 km 圆形缓冲区的开发利用方式及其面积占比, 利用类型有天然水域、养殖区、耕地、建设用地。

1.4 数据分析

1.4.1 水质空间特征分析

为评价水质, 分析单项指标水质类别占比, 应用综合营养状态指数评价营养状态(TLI)计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j TLI(j)$$

式中: TLI 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数相关权重; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, Chla、TP、TN、SD 和 CODMn 的权重分别为 0.267、0.188、0.179、0.183 和 0.183。采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级: $TLI(\Sigma) < 30$ 贫营养, $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ 中营养, $TLI(\Sigma) > 50$ 富营养, $50 < TLI(\Sigma) < 60$ 轻度富营养, $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ 中度富营养, $TLI(\Sigma) > 70$ 重度富营养[20]。

用软件 SPSS 26.0 对洪泽湖湖滨带各个指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 检验不同湖区水质指标差异显著性。为探究洪泽湖湖滨带水质的空间梯度变化, 应用 R 3.6.1 统计分析软件对数据进行主成分分析(PCA)。

1.4.2 水质影响因素分析

用软件 SPSS 26.0 进行逐步线性回归分析, 以重点指标(Chla、TN、CODMn、TP、DOC 和 TLI)为响应变量, 以影响因子为解释变量, 确定影响湖滨带水质空间分异的关键驱动因子。

2 结果与分析

2.1 湖滨带环境因子空间变化特征

One-way ANOVA 多项水体理化指标(WD、SD、pH、TUB、CODMn、DOC、SS、Chla)在不同湖区间差异显著(表 1, $P < 0.05$)。东部湖岸、南部湖岸透明度劣于西部湖岸、成子湖岸, 其中成子湖岸透明度与东部湖岸和南部湖岸的相差近 1 倍, 这一结果与悬浮颗粒物(SS)、浊度(TUB)分布特征一致。氮磷等营养盐在湖区间未显示明显差异, 东部湖岸、南部湖岸、西部湖岸 TN 浓度相差不大, 在 $1.73 \sim 1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 成子湖岸 TN 浓度最高, 为 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各湖区 TP 浓度在 $0.10 \sim 0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。但不同湖区的氮磷水质类别组成存在一些差异(图 2、图 3), 南部湖岸和西部湖岸的 TN 类别组成优于东部湖岸与成子湖岸, TP 类别组成劣于东部湖岸和成子湖岸。东部湖岸的 TN 类别中 V 类及劣 V 类占比达 85.7%, 南部湖岸该比例达 75.0%, 西部湖岸为 76.5%, 成子湖岸达 81.3%。东部湖岸的 TP 类别中 V 类占比为 42.9%, IV 类水占 57.1%; 南部湖岸 V 类占比 83.3%, IV 类占 16.7%; 西部湖岸 V 类占比 76.5%, IV 类占 23.5%; 成子湖岸劣 V 类占 12.5%, V 类占 25.0%, IV 类占 43.8%, III 类占 18.8%。

表 1 洪泽湖湖滨带不同区域环境因子特征

指标	东部湖岸	南部湖岸	西部湖岸	成子湖岸	P
WD(m)	3.07 ± 0.49 a	2.25 ± 0.69 b	1.98 ± 0.35 b	2.14 ± 0.38 b	$<0.001^{***}$
SD(cm)	22.57 ± 2.51 b	26.46 ± 9.57 b	38.71 ± 20.09 ab	50.94 ± 25.96 a	0.02*
pH	8.75 ± 0.08 c	8.36 ± 0.27 d	9.00 ± 0.14 b	9.26 ± 0.21 a	$<0.001^{***}$
TUB(NTU)	46.92 ± 5.29 a	36.21 ± 19.40 a	24.99 ± 15.76 b	14.23 ± 10.82 b	$<0.001^{***}$
CODMn($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	6.06 ± 0.64 b	5.92 ± 0.53 b	7.70 ± 2.09 a	8.25 ± 2.58 a	0.05*
TN($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.83 ± 0.26	1.76 ± 0.48	1.73 ± 0.42	2.14 ± 0.93	0.241
TDN($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.65 ± 0.26	1.36 ± 0.40	1.28 ± 0.45	1.64 ± 0.77	0.191
TP($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.10 ± 0.02 b	0.13 ± 0.03 a	0.14 ± 0.05 a	0.10 ± 0.06 b	0.095
TDP($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.04	0.661
PO43-($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.03 ± 0.02 a	0.05 ± 0.01 a	0.04 ± 0.03 a	0.03 ± 0.02 b	0.083
NH4-N($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.45 ± 0.04	0.47 ± 0.24	0.42 ± 0.12	0.44 ± 0.14	0.879
NO3-($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.53 ± 0.08	0.53 ± 0.23	0.52 ± 0.36	0.66 ± 0.52	0.711
DOC($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5.15 ± 0.83 b	5.22 ± 1.04 b	5.87 ± 1.14 b	6.96 ± 1.69 a	0.002**
SS($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	41.72 ± 15.69 b	80.38 ± 43.80 a	35.75 ± 23.67 b	35.87 ± 14.48 b	$<0.001^{***}$
Chla($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	7.41 ± 3.02 c	25.15 ± 17.68 b	57.48 ± 29.39 a	78.57 ± 49.98 a	$<0.001^{***}$
TLI	57.99 ± 2.18 b	60.74 ± 3.51 ab	63.97 ± 4.09 a	62.84 ± 8.05 ab	0.077
风浪扰动	21.80 ± 10.24	27.93 ± 17.72	25.15 ± 11.01	18.11 ± 13.95	0.259
植被盖度(%)	10.86 ± 19.36 b	49.73 ± 34.97 a	54.47 ± 31.34 a	53.38 ± 31.75 a	0.018*

注: *, **, ***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平呈显著差异。

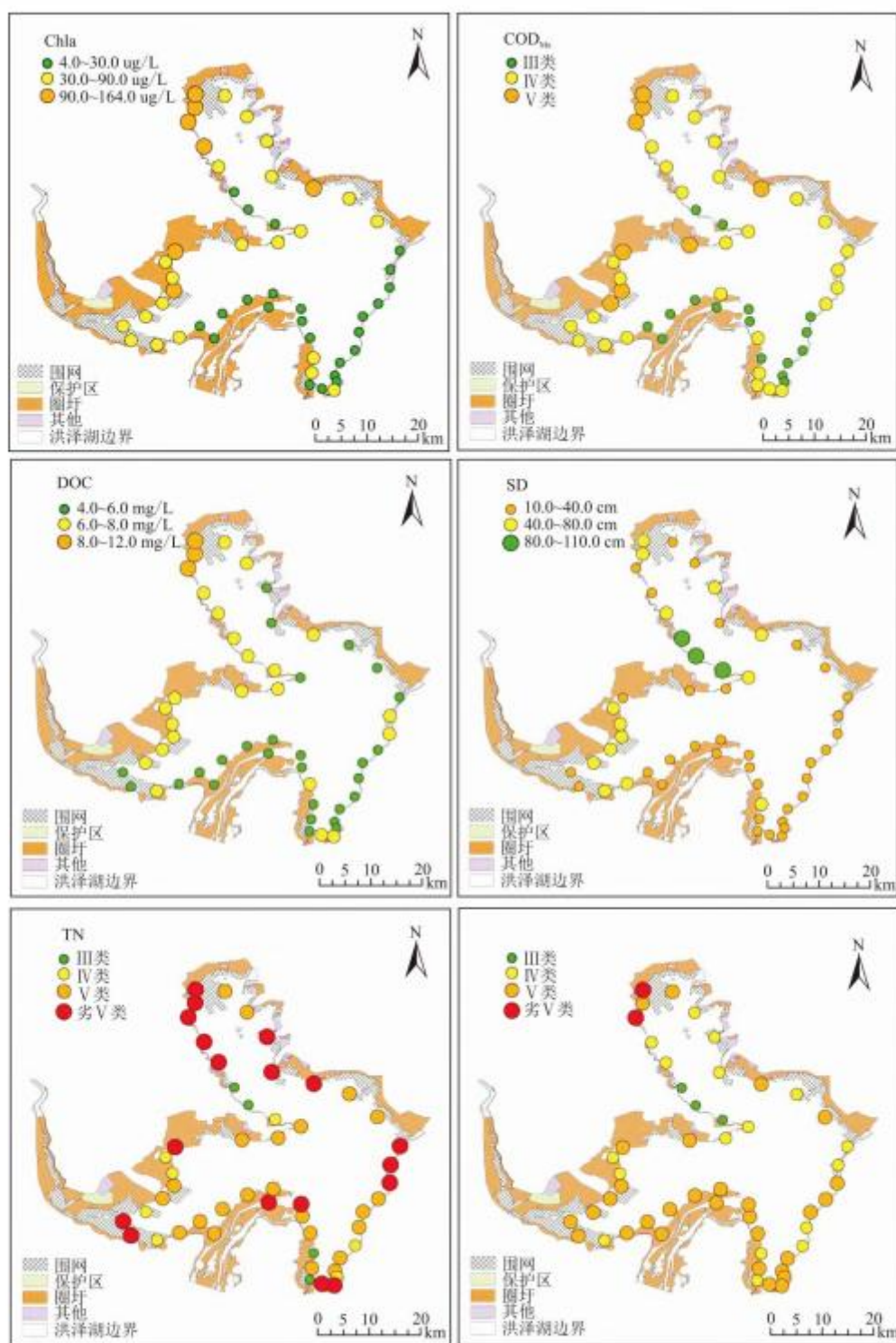


图 2 洪泽湖湖滨带环境因子空间差异

Fig. 2 Spatial differences of environmental factors in littoral zone of Lake Hongze

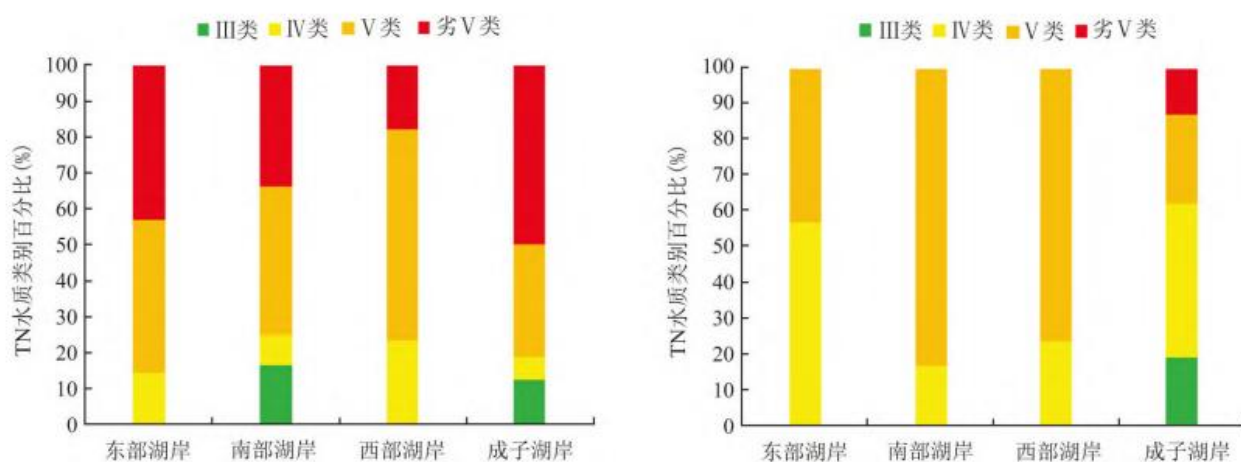


图 3 洪泽湖湖滨带不同湖区 TN 和 TP 的水质类别占比

Fig. 3 Percentage composition of water quality grade for TN and TP in each area of Lake Hongze littoral zone

主要水质指标空间分布图显示(图 2), Ch1a、CODMn、DOC 在空间格局具有一定的一致性。4 个湖区的 CODMn 浓度均在 $6\sim 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 为地表水 IV 类水。空间上, CODMn 值呈现西高东低的趋势, 成子湖区浓度最高, 均值可达 $8.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 溧河洼次之 ($7.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 南部湖岸和东部湖岸较低, 均值分别为 5.92 和 $6.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。湖滨带 Ch1a 的空间分布差异巨大, 成子湖岸最高, 均值达 $78.57\text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$, 西部湖岸次之, 均值为 $57.48\text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$, 南部湖岸和东部湖岸则较低, 均值分别为 25.15 和 $7.41\text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$ 。成子湖岸 DOC 最高, 均值为 $6.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明有机质含量较高, 西部湖岸次之(为 $5.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 东部湖岸和南部湖岸分别为 $5.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整体表现为成子湖岸、西部湖岸 Ch1a、CODMn、DOC 浓度显著高于东部湖岸与南部湖岸。

营养状态评价结果显示, 除东部湖岸为轻度富营养(58.0)外, 西部湖岸、成子湖岸、南部湖岸都为中度富营养, TLI 指数分别为 64.0 、 62.8 、 60.7 。

PCA 结果显示前两个主成分分别解释了 36.73% 和 25.48% 的环境变异(图 4), 第一主成分与 TN、TP、Ch1a 等指标相关性高, 主要反映了湖滨带的富营养化梯度, 第二主成分主要与 CODMn、DOC、SD、TUB、SS 等指标相关, 主要反映了有机质污染。

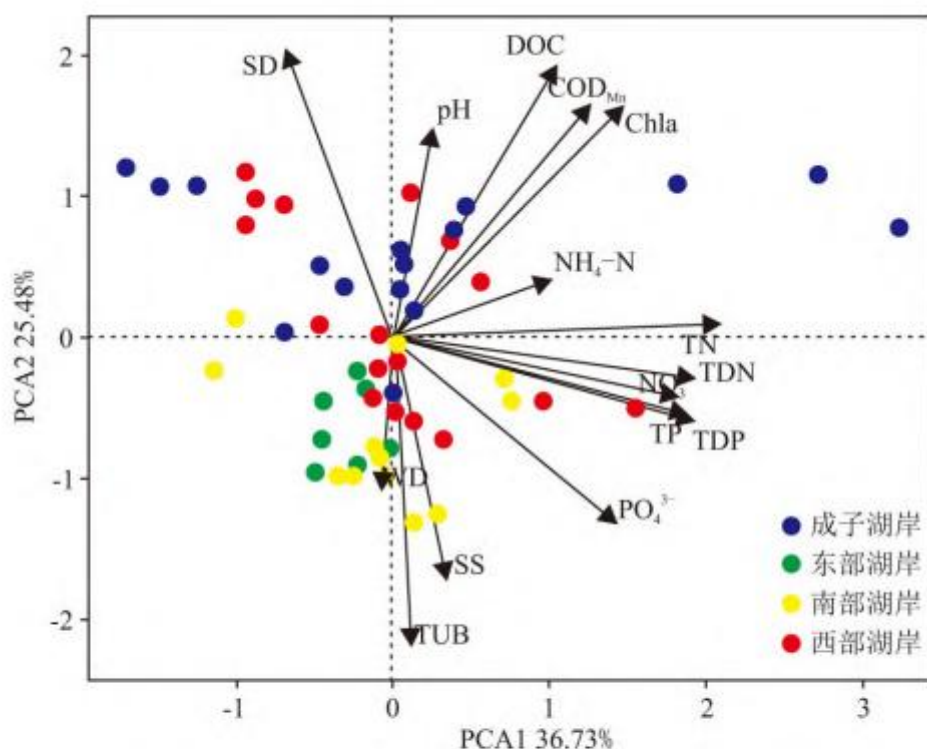


图 4 洪泽湖湖滨带水质指标主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of water quality parameters environmental factors in Lake Hongze littoral zone

2.2 水质指标与驱动因子逐步线性回归分析

逐步线性回归分析结果中，天然水域占比、养殖区占比等开发利用因子出现频率较高，植被盖度其次，风浪扰动仅出现两次。

回归分析结果表明，Chla 与水质因子的决定系数 (R^2) 为 0.82, 筛选的 3 个因子为 CODMn、TN、TUB。其中 CODMn 和 TN 的回归系数为正值，说明 CODMn 和 TN 对 Chla 的浓度分布起正向作用，TUB 的回归系数为负值，说明其对浮游植物生长起抑制作用。Chla 与外部驱动因子的决定系数也较高 ($R^2 = 0.52$)，筛选出的因子为植被盖度、建设用地占比及养殖区占比。

TN 与外部驱动因子的 R^2 为 0.42, 天然水域占比、风浪扰动和耕地占比为筛选后的因子，其中耕地占比的回归系数为正值，天然水域占比和风浪扰动的回归系数为负值。TP 的回归 R^2 为 0.22, 天然水域占比与植被盖度为筛选后驱动因子，天然水域占比回归系数为负值，盖度为正值。CODMn 的回归 R^2 为 0.32, 养殖区占比、建设用地占比以及植被盖度为筛选后的因子，回归系数皆为正值。DOC 的回归 R^2 为 0.28, 建设用地占比和养殖区占比为显著解释因子。TLI 的回归 R^2 为 0.32, 植被盖度、天然水域占比以及风浪扰动为显著解释因子。

3 讨论

3.1 湖滨带水质空间分异格局与影响因素

洪泽湖湖滨带 SD、TUB、SS 的空间分布特征所反映的环境状况为成子湖岸与西部湖岸透明度相对较高, 固体悬浮物浓度较低, 东部湖岸与南部湖岸则相反。南部湖岸地处淮河入湖口处, 换水周期短且流速快, 而西部湖岸和成子湖岸水体相对封闭, 流速缓慢, 所以受湖流影响, 南部湖岸水体中悬浮颗粒物不易沉降, 导致其 SD 最低。且西部湖岸和成子湖岸水生植被茂盛, 其植被覆盖率分别可以达到 54.5% 和 53.4%。水生植物根系繁茂, 在水中可以形成紧密的过滤层, 达到提高水体透明度的效果^[21]。挺水植物的茎和叶及浮水植物的根还可以一定程度地减缓水流速度, 以达到沉淀泥沙和有机微粒的作用^[22], 所以这两个湖岸 SD 较高。东部湖岸湖滨带类型为大堤型, 受人类建设施工影响, 生态破坏较为严重, 生物丰富度低, 植被覆盖率为 10.9%, 固体悬浮物不能被有效地絮凝沉降, 导致其 SD 较低。

成子湖岸和西部湖岸 CODMn 较高, 主要是该区域围网、圈圩内进行的水产养殖造成的, 成子湖岸和西部湖岸的围网、圈圩占比较高, 水产养殖过程中所产生的残饵和养殖生物的排泄物是 CODMn 的主要来源^[23]。此外这两个湖区的水生植被覆盖度较高, 衰败的植株腐烂分解也会释放有机物从而增加水体有机质的含量。而且水生植被多在春末夏初腐解, 本次监测时间恰属夏季, 所以不同湖区的水生植被覆盖度有显著差异也是影响 CODMn 空间差异的原因之一。南部湖岸和东部湖岸水体交换快, 自净能力强, CODMn 值较低。成子湖岸 DOC 浓度显著高于其他湖区, DOC 按其来源可分为内源性和外源性 DOC, 内源性 DOC 主要来源于浮游植物光合作用产物的释放以及内源性碎屑物质的分解^[24], 这一结果与本研究中成子湖岸 Chla 的高浓度 ($78.57 \text{ ug} \cdot \text{L}^{-1}$) 情况相吻合。Chla 的空间分布特征为成子湖岸和西部湖岸浓度显著高于东部湖岸和南部湖岸, 回归分析发现 Chla 与 CODMn、TN、TUB 相关, Chla 反映了浮游植物生物量, 在本次调查中, Chla 呈现出与 CODMn、DOC 同样的空间特征, 线性回归分析结果显示: Chla 与 CODMn、TN 成正比, 说明洪泽湖浮游藻类生长的主要驱动因子为 CODMn 和 TN, 这也与以往郝达平^[25]的研究结论一致。湖流和风能可能也会影响 Chla 浓度的分布, 洪泽湖不同湖区水体环境的水流速度差异较大, 东部湖岸和南部湖岸受入淮河的影响, 水流速度较大, 而西部湖岸、成子湖岸所受的影响较小, 较小流速和狭长的湖区形态有利于藻类的聚集生长^[26]。同时, 洪泽湖夏季盛行东南风, 且成子湖岸的风浪强度最低, 受风浪影响藻类可以从东南部到西北部聚集而造成 Chla 的空间分异^[27]。

回归分析结果显示, 风浪扰动与 TLI、TN 呈负相关。由于风浪引起的扰动、侵蚀在湖滨带比敞水区的作用更大, 一般而言扰动会引起湖底底泥的再悬浮释放, 降低水体 SD, 浊度升高进而抑制藻类生长, 这可从风浪扰动强的东部湖岸低 SD、Chla 看出, 从而导致 TLI 较低。有研究表明, 风浪扰动会提高水体营养盐浓度^[28], 随着风浪扰动强度的增大, 水体营养盐浓度会逐渐升高^[29], 与本研究分析结果不同。也有研究表明, 风浪扰动未必会促进沉积物的营养盐释放, 相反的悬浮沉积物会产生吸附、絮凝作用, 底泥成为内源营养盐的汇^[30]。所以风力对水体营养盐浓度的影响机理较为复杂, 在自然环境中不能只考虑某一影响因子的作用, 这样可能得到相反的结论, 所以还需结合实际进一步探究。本分析得出风浪扰动与 TN 呈负相关可能是成子湖岸扰动较弱, 而受围网、圈圩养殖以及面源污染的影响其营养盐浓度又较高, 所以统计上表现为两者负相关。回归分析显示植被盖度与 Chla、CODMn、TP、TLI 呈正相关, 这不同于一般研究结果。水生植被可以通过化感作用对藻类的生长繁殖起抑制作用^[31, 32], 与本文结果相反, 蓝藻水华会堆积于水生植被生长区^[33], 所以植被盖度与 Chla 和 TLI 有正向关系的原因可能是洪泽湖湖滨带水草较为繁密导致蓝藻被阻截聚集, 这与野外调查发现的现象一致。水生植被会吸收水体污染物, 起到净化水质的作用^[34], 本文得出植被盖度与营养盐呈正相关的结果可能是本身成子湖岸与西部湖岸受外、内源污染情况严重导致营养盐浓度较高, 同时这两个区域水生植被覆盖度相对较高^[35], 所以统计上表现为两者正相关。

3.2 湖滨带开发利用对水质的影响

回归分析结果显示, 天然水域、养殖区和建设用地占比以及植被覆盖度是影响水质指标的关键外部驱动因子, 进一步表明湖滨带开发利用是影响水质变化的关键因素。

天然水域占比与 TN、TP、TLI 呈负相关, 洪泽湖自 20 世纪 90 年代进行大面积围网、圈圩养殖, 湖区大量围垦导致目前自由水面率仅有 70%, 湖泊水质及生态环境受到影响。相关研究发现水域面积与水质状况关联度高, 天然水域占比的提高有利于水体水质的改善与保持^[36]。养殖区占比与 Chla、CODMn、DOC 呈正相关, 20 世纪 80 年代, 以“水下坝, 水上网”为特点的围网养殖模式在洪泽湖试点推广。为保水、防风浪、防污水, 水下坝被逐年加高加宽直到露出湖面形成封闭的养殖塘口-圈圩, 目前洪

泽湖围网、圈圩养殖面积已经达到湖体面积的 30.8%。研究表明养殖区中投放的养料和养殖物的排泄物是引起水体营养盐浓度升高, DO 值降低的主要原因, 养殖物的排泄物会成为湖泊富营养化的影响因素, 同时水生态系统结构也会受到影响^[37,38], 围网养殖水体中的营养盐含量增多会导致水体中的藻类大量繁殖, 使水体中的有机质含量增多^[39]。密集的网眼还会对水体起到一定的阻滞效应, 从而减缓湖泊水体交换, 阻碍污染物的扩散并削弱水体自净能力。大量的圈圩养殖会破坏水生植被的生长环境, 影响水生生物的生长繁殖, 破坏原有的生态平衡^[40]。建设用地占比与 Ch1a、CODMn、DOC 也呈正相关。有研究显示, 由城镇化引起的不透水地表径流污染是仅次于农业面源污染的第二大非点源污染源^[41]。随着周边城镇化进程加快, 建设用地面积不断增加, 聚集了大量人口, 但生产、生活排污污水处理能力未全面覆盖, 也是影响湖滨带水质的关键因素。

耕地占比与 TN 呈正相关, 氮磷营养盐浓度过高是洪泽湖湖滨带目前面临的主要水质问题, 各样点 TN 浓度在 0.66~4.25 mg · L⁻¹ 之间, 均值为 1.88 mg · L⁻¹, TP 浓度在 0.02~0.24 mg · L⁻¹ 之间, 均值为 0.12 mg · L⁻¹, 均属 V 类水。洪泽湖湖滨缓冲区以农业为主, 由于过量和不合理地使用农药、化肥, 从而产生大量的农业面源污染^[42], 导致入湖河流水质变差, 有研究表明, 洪泽湖环湖河流各项营养盐平均浓度均高于湖体^[7], 绝大部分污染物最终都通过环湖河流进入湖泊, 洪泽湖水质受到污染。经遥感解译可知, 洪泽湖环湖陆域缓冲区耕地占比高达 65.0%, 且湖滨带受面源污染的程度较敞水区而言更为严重。

3.3 湖滨带富营养化控制建议

目前洪泽湖西部湖岸与成子湖岸的围网和圈圩养殖面积较大, 养殖污染形成较高的营养负荷。因此需根据规划稳步推进这两个湖区的退圩(围)还湖工作, 对于退圩(围)还湖腾让出来的水面, 应及时开展生态修复^[43]。可依据退圩(围)还湖区的防洪、供水、生态与景观等功能需求, 结合湖盆湖岸地形地貌特征与功能类型分布格局, 在系统分析水文、水质、底质以及生物特征等基础上, 集成生态护坡、微地形改造、基质改良、滨岸生态廊道等技术, 开展洪泽湖退圩还湖区湖滨带草型生态系统构建^[44]。东部湖岸为大堤型湖滨带, 水生植被覆盖率、生物量和多样性均较低, 可以通过恢复水生植物群落来改善水体生境与恢复水生生态系统。外源输入是洪泽湖污染物的主要来源, 尤其是南部湖岸位于淮河入湖口附近, 要加强入湖污染物削减, 开展河流入湖污染物的监测从而精准估算污染物的入湖量及滞留量, 为污染减排和氮磷削减方案制定提供科学依据。

洪泽湖湖滨带受面源污染影响较大, 还应着重控制农业面源污染, 推进重点区域农田退水治理, 积极推进生态循环农业、现代生态农业产业化建设, 探索高效生态循环农业模式并构建规范体系^[45]。通过合理施用化肥、农药。通过精准施肥、调整化肥使用结构、改进施肥方式、有机肥替代化肥等路径, 逐步控制化肥使用量。推进重点区域农田退水治理, 在自然保护区、重要湿地等敏感区域以及灌区建设生态沟渠、植物隔离条带、净化塘等设施减缓农田氮磷流失, 减少对水体环境的直接污染^[46]。

4 结论

(1) 主成分分析结果表明, 洪泽湖湖滨带水质主要受营养盐与有机质的影响, 各样点 TN 浓度在 0.66~4.25 mg · L⁻¹ 之间, 均值为 1.88 mg · L⁻¹, 属于 V 类水; TP 浓度在 0.02~0.24 mg · L⁻¹ 之间, 均值为 0.12 mg · L⁻¹, 属于 V 类水; CODMn 浓度在 5.24~14.16 mg · L⁻¹ 之间, 均值为 7.21 mg · L⁻¹, 属于 IV 类水; Ch1a 浓度在 4.55~158.31 ug · L⁻¹ 之间, 均值为 49.30 ug · L⁻¹。

(2) 洪泽湖湖滨带水质空间差异较大, WD、SD、pH、TUB、CODMn、DOC、SS、Ch1a 在不同湖区均呈现显著差异(P < 0.05), 其中成子湖岸与西部湖岸夏季水生植被茂盛导致 SD 较高, 悬浮颗粒物浓度较低, 同时这两个湖区流速平缓, 适合围网养殖及浮游植物生长, 所以 CODMn 和 Ch1a 等指标呈现高值。南部湖岸与东部湖岸位于过水通道附近, 且东部湖岸堤岸经人工硬化导致其水生生物物种丰富度较低, 所以各指标与成子湖岸、西部湖岸呈相反表现。TN、TP 在各湖区未见明显的差异, 从水质组成类别来看, 南部湖岸和西部湖岸的 TN 优于东部湖岸与成子湖岸, TP 劣于东部湖岸与成子湖岸。

(3) 逐步线性回归分析结果表明, 湖滨带缓冲区利用类型占比(养殖区、耕地、建设用地、天然水域)、水生植被覆盖度以及风浪扰动对洪泽湖湖滨带的水质造成不同程度影响, 其中湖滨带缓冲区利用类型是最关键的影响因子。

(4)洪泽湖湖滨带受围网养殖与农业面源污染的内外源双重负荷,导致水体富营养化,推进北部湖区围网、圈圩养殖的清退工作并构建规范的生态循环农业模式是未来改善湖体富营养化状态的理想举措。

参考文献

- [1] 王洪铸. 湖滨带的基本概念(代前言)[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(S2):1-2. WANG H Z. Basic concepts of lakeshore zones(preface)[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(S2):1-2.
- [2] STRAYER D L, FINDLAY S E G. Ecology of freshwater shore zones[J]. Aquatic Sciences, 2010, 72(2):127-163.
- [3] 李春华, 叶春, 赵晓峰, 等. 太湖湖滨带生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(12):3806-3815. LI C H, YE C, ZHAO X F, et al. The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12):3806-3815.
- [4] CIFONI M, BOGGERO A, GALASSI D, et al. An overview of studies on meiofaunal traits of the littoral zone of lakes[J]. Water, 2021, 13(4):473.
- [5] 姚敏, 毛晓文, 孙瑞瑞. 洪泽湖水质 2010—2020 年时空变化特征[J]. 水资源保护, 2022, 38(3):174-180. YAO M, MAO X W, SUN R R. Spatio-temporal variation of water quality in Hongze Lake from 2010 to 2020[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):174-180.
- [6] 蔡永久, 张祯, 唐荣桂, 等. 洪泽湖生态系统健康状况评价和保护[J]. 江苏水利, 2020(7):1-7, 13. CAI Y J, ZHANG Z, TANG R G, et al. Evaluation and protection of ecosystem health in Hongze Lake[J]. Jiangsu Water Resources, 2020(7):1-7, 13.
- [7] 崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟, 等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019 年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1727-1741. CUI J Y, GUO R, SONG X W, et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010-2019[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1727-1741.
- [8] 李颖, 张祯, 程建华, 等. 2012—2018 年洪泽湖水质时空变化与原因分析[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3):715-726. LI Y, ZHANG Z, CHENG J H, et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3):715-726.
- [9] 叶春, 李春华, 王博, 等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5):725-730. YE C, LI C H, WANG B, et al. Study on building scheme for a healthy aquatic ecosystem of Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5):725-730.
- [10] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2):440-448. WU T H, LIU J S, DENG J M, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2):440-448.
- [11] 李春华, 叶春, 张咏, 等. 太湖湖滨带藻密度与水质、风作用的分布特征及相关关系[J]. 环境科学研究, 2013, 26(12):1290-1300. LI C H, YE C, ZHANG Y, et al. Temporal and spatial distribution of algal density and its relationship with water quality and wind factor in the littoral zone of Lake Taihu[J]. Research of Environmental

Sciences, 2013, 26(12):1290-1300.

[12] 李昆, 谢玉静, 孙伟, 等. 农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6):2057-2066. LI K, XIE Y J, SUN W, et al. Spatial response of lake water quality to multi-scale landscape pattern of lakeside zone in agricultural watershed[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6):2057-2066.

[13] 谢杰, 吴德意, 陈雪初, 等. 滇池和洱海湖滨带水生植被状况与水质的关系研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2):55-59. XIE J, WU D Y, CHEN X C, et al. Relationship between aquatic vegetation and water quality in littoral zones of Lake Dianchi and Lake Erhai[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(2):55-59.

[14] TANG C, LI Y, HE C, et al. Dynamic behavior of sediment resuspension and nutrients release in the shallow and wind-exposed Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Sci Total Environ, 2020, 708:135131.

[15] SHI K, ZHANG Y, ZHU G, et al. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250m MODIS-Aqua data[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 164:43-56.

[16] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6):533-548. FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6):533-548.

[17] ZORZAL-ALMEIDA S, SALIM A, ANDRADE M R M, et al. Effects of land use and spatial processes in water and surface sediment of tropical reservoirs at local and regional scales[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 644:237-246.

[18] CHENG P, MENG F, WANG Y, et al. The impacts of land use patterns on water quality in a trans-boundary river basin in northeast China based on eco-functional regionalization[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(9):E1872.

[19] ZHAO Y, YANG Q, YUAN P. Study on the influence of land use on water environment quality in riverside zone based on GIS[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4):1262.

[20] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5):47-49. WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5):47-49.

[21] LI K, WANG L, LI Z, et al. Exploring the spatial-seasonal dynamics of water quality, submerged aquatic plants and their influencing factors in different areas of a lake[J]. Water, 2017, 9(9):707.

[22] YU L, ZHANG Y, LIU C, et al. Ecological responses of three emergent aquatic plants to eutrophic water in Shanghai, P. R. China[J]. Ecological Engineering, 2019, 136:134-140.

[23] 王霞, 刘雷, 何跃, 等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2):58-61. WANG X, LIU L, HE Y, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and factor analysis of

eutrophication in Hongze Lake[J].The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, 31(2):58-61.

[24] 杨顶田, 陈伟民. 长江下游湖泊中可溶性有机碳的时空分布[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(4):275-277, 323. YANG D T, CHEN W M. The temporal and spatial distribution of dissolved organic carbon in lakes at the lower reach of Changjiang River[J]. Environmental Pollution & Control, 2004, 26(4):275-277, 323.

[25] 郝达平. 洪泽湖浮游藻类群落结构与驱动因子相关性分析[A]. 见: 湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集[C]. 安徽, 安徽科学技术出版社, 2014:191-197.

[26] 吴挺峰, 秦伯强, 马健荣, 等. 浅水富营养化湖泊中蓝藻群体运动研究述评[J]. 科学通报, 2019, 64(36):3833-3843. WU T F, QIN I, MA J R, et al. Movement of cyanobacterial colonies in a large, shallow and eutrophic lake: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(36):3833-3843.

[27] 彭兆亮, 汪院生, 胡维平, 等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1925-1939. PENG Z L, WANG Y S, HU W P, et al. Responses of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1925-1939.

[28] 周阳, 刘金娥, 许晓光, 等. 风浪扰动下湖滨带悬浮物和营养盐响应特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4):948-956. ZHOU Y, LIU J E, XU X G, et al. Response of suspended solids and dissolved nutrients in littoral zone of Lake Taihu under wind-wave disturbances[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4):948-956.

[29] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3):506-511. SUN X J, QIN B Q, ZHU G W, et al. Effect of wind-induced wave on concentration of colloidal nutrient and phytoplankton in Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2007, 28(3):506-511.

[30] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2):150-153. QIN B Q, FAN C X. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake[J]. China Environmental Science, 2002, 22(2):150-153.

[31] 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 等. 菹草乙酸乙酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定[J]. 环境科学, 2015, 36(10):3860-3865. SUN Y Y, SU Z X, PU Y F, et al. Isolation, purification and identification of antialgal activity substances of ethyl acetate extracts from the submerged macrophytes *Potamogeton crispus*[J]. Environmental Science, 2015, 36(10):3860-3865.

[32] 毕业亮, 吴诗敏, 周思宁, 等. 绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应[J]. 环境科学, 2019, 40(5):2265-2270. BI Y L, WU S M, ZHOU S N, et al. Allelopathic effects and allelochemicals of *Myriophyllum elatinoides* on *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum*[J]. Environmental Science, 2019, 40(5):2265-2270.

[33] 向速林, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖东部湖湾大型水生植物分布对水质的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2881-2887. XIANG S L, ZHU M Y, ZHU G W, et al. Influence of macrophytes on water quality in the eastern bays of Lake Taihu, China[J]. China Environmental Science, 2014, 34(11):2881-2887.

-
- [34] ZHANG Y, JEPPESEN E, LIU X, et al. Global loss of aquatic vegetation in lakes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173:259-265.
- [35] 李娜, 施坤, 张运林, 等. 基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(10):4487-4496. LI N, SHI K, ZHANG Y L, et al. Spatio-temporal variations in aquatic vegetation cover and the potential influencing factors in Lake Hongze based on MODIS images[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10):4487-4496.
- [36] 姜庆虎, 刘艳芳, 黄浦江, 等. 城市湖泊流域面源污染的源-汇效应研究——以武汉市东湖为例[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(3):469-474. JIANG Q H, LIU Y F, HUANG P J, et al. The source-sink effect between urban diffuse pollution and Lake watershed: A case study in East Lake of Wuhan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3):469-474.
- [37] 李昆, 王玲, 李兆华, 等. 丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(4):1285-1292. LI K, WANG L, LI Z H, et al. Spatial variability characteristics of water quality and its driving forces in Honghu Lake during high water-level period[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4):1285-1292.
- [38] 宋学宏, 邴旭文, 孙丽萍, 等. 阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, 31(6):23-29. SONG X H, BING X W, SUN L P, et al. The spatial and temporal changes of nutrients of net-pen aquaculture area in Yangcheng Lake and its water quality evaluation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(6):23-29.
- [39] 徐涵池, 高义臻, 诸葛瑞玉, 等. 关于南四湖水产养殖与水质改善分析与建议[J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(1):147-148. XU H C, GAO Y Z, ZHUGE R Y, et al. Analysis and suggestion on aquaculture and water quality promoting of nansi lake[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018, 43(1):147-148.
- [40] 朱卫彬, 赵伟. 清除洪泽湖非法圈圩的实践及启示[J]. *中国水利*, 2015(4):47-48. ZHU W B, ZHAO W. Practice and enlightenment of clearing illegal fence in Hongze Lake[J]. *China Water Resources*, 2015(4):47-48.
- [41] 吴晶晶, 蔡永立. 快速城市化地区土地利用变化及其对水质的影响——以上海市奉贤区为例[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(26):16208-16211. WU J J, CAI Y L. Land use change and its impact on water quality in the rapidly urbanized area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(26):16208-16211.
- [42] 张飞, 孔伟. 洪泽湖周边地区农业面源污染负荷变化分析[J]. *农业环境与发展*, 2012, 29(2):65-68. ZHANG F, KONG W. Analysis on the change of agricultural non-point source pollution load around Hongze Lake[J]. *Agro-Environment & Development*, 2012, 29(2):65-68.
- [43] 陈立冬, 何孝光, 王阳, 等. 江苏省洪泽湖退圩还湖的思考[J]. *江苏科技信息*, 2019, 36(12):75-77. CHEN L D, HE X G, WANG Y, et al. Reflections on returning polder land to lake of the Hongze Lake in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2019, 36(12):75-77.
- [44] 田伟, 杨周生, 邵克强, 等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. *环境科学*, 2020, 41(1):183-193. TIAN W, YANG Z S, SHAO K Q, et al. Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: A case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):183-193.

[45] 骆世明. 农业生态转型态势与中国生态农业建设路径[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1):1-7. LUO S M. Agroecology transition and suitable pathway for eco-agricultural development in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1):1-7.

[46] 姚春雨, 夏霆, 朱玲, 等. 太湖流域水生态功能分区沉积物污染评估[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(1):57-67. YAO C Y, XIA T, ZHU L, et al. Assessment of sediment pollution in the aquatic ecological function areas of Taihu Lake Basin[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2022, 44(1):57-67.