

# 鄱阳湖总氮总磷时空变化的遥感反演分析

李 晓<sup>1,2,3</sup>, 吴剑邦<sup>4</sup>, 薛晨阳<sup>5,6</sup>, 熊丽黎<sup>7</sup>, 刘发根<sup>8</sup>, 张 奇<sup>5,6</sup>

(1. 南京信息工程大学地理科学学院; 2. 中国科学院大学南京学院; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所;  
4. 江西省赣抚尾间整治有限公司; 5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 6. 长江保护与绿色发展研究院;  
7. 江西省水文监测中心; 8. 鄱阳湖水文水资源监测中心)

**摘要:**基于 Landsat 遥感影像并结合实测数据,利用机器学习方法构建了鄱阳湖全湖总氮、总磷质量浓度反演模型,结合流域“五河”入湖水质数据,系统分析了 2021 年 8 月至 2023 年 1 月鄱阳湖总氮、总磷的时空分布特征。结果表明:利用 BP 神经网络构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好( $R^2=0.91$ ),基于遗传算法优化的 BP 神经网络构建的总磷质量浓度反演模型表现较好( $R^2=0.82$ );鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,丰水期水质总体优于枯水期;丰水期湖区总氮、总磷质量浓度空间分布异质性较强;鄱阳湖总氮、总磷质量浓度偏高的区域主要集中在湖区中部、东北部以及“五河”入湖口;特大干旱可加剧鄱阳湖水质恶化,导致全湖总氮、总磷质量浓度上升。  
**关键词:**Landsat;遥感反演;总氮;总磷;鄱阳湖

**Remote sensing inversion analysis of spatiotemporal variations in total nitrogen and total phosphorus in Poyang Lake**//Li Xiao<sup>1,2,3</sup>, Wu Jianbang<sup>4</sup>, Xue Chenyang<sup>5,6</sup>, Xiong Lili<sup>7</sup>, Liu Fagen<sup>8</sup>, Zhang Qi<sup>5,6</sup> (1. School of Geographical Science, Nanjing University of Information Science and Technology; 2. Nanjing College, University of Chinese Academy of Sciences; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences; 4. Jiangxi Ganfu Weih Renovation Co., Ltd.; 5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 6. Yangtze Institute for Conservation and Development; 7. Jiangxi Hydrological Monitoring Center; 8. Hydrology and Water Resources Monitoring Center of Poyang Lake)

**Abstract:** Based on Landsat remote sensing imagery and in-situ measurements, machine learning methods were used to construct inversion models for total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) mass concentrations across the entire Poyang Lake. Combined with water quality data from the five rivers (the Ganjiang, Fuhe, Xinjiang, Raohe and Xiushui rivers) flowing into the lake, the spatiotemporal distribution characteristics of TN and TP mass concentrations in Poyang Lake from August 2021 to January 2023 were systematically analyzed. The results show that the TN mass concentration inversion model constructed using a back propagation (BP) neural network achieves a good fit ( $R^2=0.91$ ), and the TP mass concentration inversion model based on the GA-optimized BP neural network (GA-BP) performs well ( $R^2=0.82$ ). The TN and TP mass concentrations in Poyang Lake exhibit strong seasonal variation, and the water quality in the wet season is generally better than that in the dry season. The spatial distribution of TN and TP mass concentrations in the lake area during the wet season shows strong heterogeneity. Areas with high TN and TP mass concentrations in Poyang Lake are mainly concentrated in the central and northeastern parts of the lake area and the entrances of the five rivers flowing into the lake. The extreme drought exacerbated water quality deterioration in Poyang Lake, leading to an increase in the TN and TP mass concentrations across the entire lake.  
**Key words:** Landsat; remote sensing inversion; total nitrogen; total phosphorus; Poyang Lake

湖泊是地球上重要的淡水资源之一,为人类提供生产、生活用水<sup>[1]</sup>。鄱阳湖位于长江中游,是我国第一大淡水湖泊,也是我国宝贵的淡水资源<sup>[2]</sup>。随着鄱阳湖流域人口的增长和工农业的发展及工农业和生活污水的大量排放,鄱阳湖入湖氮磷负荷有所增加,水环境质量下降,水体富营养化有加剧趋势,影响到区域社会经济的可持续发展<sup>[3-4]</sup>。氮磷是水体富营养化的物质基础和主要诱因<sup>[5-6]</sup>,其中总氮

(TN)和总磷(TP)作为指示指标,被广泛用于表征水体富营养化的程度,已成为内陆水体水质评价的重要依据。因此,开展鄱阳湖水质的监测,研究总氮、总磷时空分布特征,解析其原因,对于鄱阳湖富营养化防治有着重要的意义。

传统人工巡测可精确获得点位的水质状况,但由于点位数的限制,难以获取整个湖泊水体的水质状况及其动态变化<sup>[7-9]</sup>,这是传统的野外采样方法在监测总氮、总磷时空动态分布研究中存在的局限性。20世纪70年代以来,遥感技术的应用越来越广泛,逐渐扩展到陆地水体的水环境监测中。遥感监测具有范围大、持续时间长、周期短、成本低等优点,可以实现大湖面水质的长时间、高时空分辨率的监测,一定程度上弥补了传统人工采样方式的局限性,可以较好地反映湖泊水质的时空差异性和变化规律。因此,越来越多的研究将遥感手段与人工实测数据进行结合,通过建立反演模型来获取湖面的水质状况<sup>[10-11]</sup>。水质遥感的基本原理是通过遥感传感器接收经水体吸收、反射和大气衰减后的反射光谱,再将光谱特征与污染物含量进行关联,根据两者的关系构建模型,从而反演水质参数<sup>[12]</sup>。但总氮、总磷是非光敏参数,难以直接通过遥感反演获取<sup>[13-14]</sup>,需要借助半经验法或机器学习进行间接遥感解析,往往需要通过构建基于实测数据验证的遥感反演模型来获取水体中总氮、总磷含量。

众多学者利用遥感技术对太湖、长江、洞庭湖和鄱阳湖等内陆水体进行了水环境监测:Gao等<sup>[15]</sup>利用Landsat 5数据,建立了太湖水质反演模型,对总氮、总磷等8个水质指标进行了分析;Chen等<sup>[16]</sup>利用实测数据和Landsat数据反演草海的总氮、总磷等参数,证明了非光敏参数遥感反演的可行性;杜冰雪等<sup>[17]</sup>研究了鄱阳湖2009—2016年富营养化时空变化,发现鄱阳湖湖区空间差异不大,但该研究仅仅依靠实测数据监测湖区水质,空间分辨率不高;陈兴鹏等<sup>[18]</sup>基于高分一号、Landsat 8等多源卫星数据,使用遥感光谱的单一波段反射率构建了反演模型,对2013—2019年秋季鄱阳湖水生态进行了遥感监测。

鄱阳湖汛期水域面积广阔,枯水期面积显著缩小,呈显著的季节性变化。其水位和面积的年际和年内波动,导致水质状况表现出明显的时空差异性。已有研究在揭示鄱阳湖水质时空分布特征方面仍显不足,尤其缺乏2022年特大干旱背景下总氮和总磷的空间分布特征对比分析。为弥补这个不足,本文基于2021—2023年的实测数据,结合同时段遥感反射率数据,利用机器学习方法反演了2021年8月至2022年1月和2022年8月至2023年1月鄱阳

湖全湖总氮、总磷质量浓度,分析了研究时段总氮、总磷质量浓度的空间和季节性变化特征及可能的影响因素,以期为认识鄱阳湖水质对极端干旱水文情势的响应提供新的视角。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江中游南岸(28°24'N~29°46'N,115°49'E~116°46'E),是长江中游最大的一个过水型、吞吐型、季节性通江湖泊<sup>[19]</sup>。鄱阳湖流域面积达16.2万km<sup>2</sup>,主要承纳赣江、抚河、信江、饶河和修水(以下简称“五河”)水系及环湖区间来水。鄱阳湖水情变化受“五河”流域来水和长江水位的双重影响<sup>[20]</sup>,流域来水经湖区调蓄后由北部湖口注入长江(图1)。每年4月,鄱阳湖流域降水增多,水位上涨;9月开始水位下降。鄱阳湖洪(6—8月)、枯(11月至次年3月)的水位差可达15m。丰水期时,鄱阳湖水域面积可达3000km<sup>2</sup>,而枯水期萎缩至不足1000km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>,呈现“洪水一片,枯水一线”的独特洪泛特征。

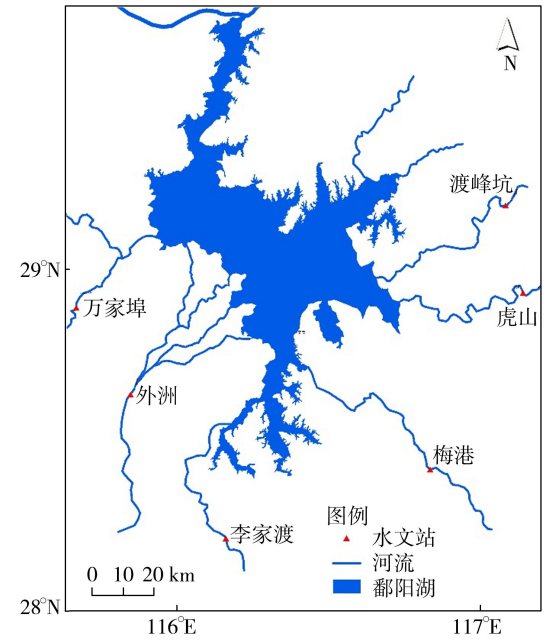


图1 研究区概况

受极端气候条件影响,鄱阳湖干旱化趋势严重,尤其在2022年的特大干旱年。2022年8—10月降水量均在25mm以下,特别是9月仅有1mm,降水量远低于2021年。受降雨的影响鄱阳湖2022年水位较2021年低,尤其是8—10月。2022年8月水位仅为10m左右,9月和10月水位更低,甚至只有7m左右,与2021年相差5~10m。

### 1.2 研究数据

使用美国陆地卫星Landsat系列遥感数据产品

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。数据产品系列为 2021—2023 年,包含 Landsat 7、Landsat 8 和 Landsat 9 数据<sup>[22]</sup>。在影像筛选过程中,设置单幅影像云量小于 50%,在此基础上通过目视选取无云遮蔽湖区的影像。实测数据由江西庐山水文水资源监测大队提供,包括 2021 年 1 月至 2023 年 12 月的总氮、总磷质量浓度数据。总氮、总磷实测数据由每月月初的湖区人工巡测采样测定,采集的水样均在 24 h 内完成实验室分析,测定方法为分光光度法。虽然 2021—2023 年每月测量 16 组样本,共计 576 组实测数据,但由于 Landsat 系列卫星数据存在被云雾大量遮蔽湖区的现象,因此除去无法识别湖区的影像,可与实测数据时空相匹配的共 384 组。巡测采样的实测总氮质量浓度范围为 0~3.5 mg/L,均值为 1.57 mg/L,实测总磷质量浓度范围为 0~0.18 mg/L,均值为 0.066 mg/L。虽然巡测采集水样费时费力,且站点稀疏,但其获取的水质数据准确性较高,可为本文的水质反演模型构建及反演结果验证提供可靠支撑。

大气校正使用 ENVI 5.3 中的 Fast Line-of-sight atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) 模块。FLAASH 能够精确补偿大气影响,其适用的波长范围包括可见光至近红外及短波红外,最大波长为 3  $\mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>。由于鄱阳湖水域面积季节性变幅较大,无法使用统一的水体边界划分水域,因此在反演之前需要提取水体边界。本文采用归一化水体指数 (NDWI) 对遥感影像的特定波段进行归一化差值处理,以突显影像中的水体信息。一般来说,NDWI 阈值范围在 0.1~1 之间,较低的阈值(如 0.1)可用于提取较小的水体,如河流、湖泊等;较高的阈值(如 0.5 或 1)可用于提取较大的水体,如海洋<sup>[24]</sup>。本文水体提取的阈值范围选定为大于 0.1。基于生成的 NDWI 图像,利用密度分割法对像元值进行分类,从而实现鄱阳湖水体的提取。

## 2 研究方法

### 2.1 遥感反演技术路线

本文遥感反演的技术路线如下:①先对数据进行处理,包括实测数据和遥感卫星数据预处理,从而获取波段组合;②根据波段组合构建总氮和总磷质量浓度的反演模型;③对模型进行精度评价;④利用模型反演湖区总氮、总磷质量浓度。

### 2.2 反演模型构建

#### 2.2.1 数据清洗

由于用于模型训练和预测的湖泊光谱反射率数据仅为 Landsat 系列卫星数据,并无光谱仪等实测的

波谱数据校验,再加上数据异常值、缺失值、重复值等对模型的训练和预测造成干扰,因此需对数据进行降噪处理,目的是增强波谱特征,加强特征量与实测值的相关性,提高模型预测的准确度。

#### 2.2.2 敏感波段分析

对遥感数据预处理完成后,获取与人工采样点相同地理位置和采样时间段的波段反射率,利用 SPSS 统计软件将 384 组波段反射率和与之相对应的实测质量浓度数据进行皮尔逊相关分析。由于单一波段反射率难以满足反演精度的要求,本文基于 Landsat 的 6 个波段组合了 20 种波段算法,选取了皮尔逊相关系数绝对值较高的前 3 个波段反射率算法组合作为特征量、实测数据作为输出构建反演模型。与总氮相关性较强的波段组合为 B3/B2、B3/B1 和 B2/B1,与总磷相关性较强的波段组合为 B3/B2、B3/B1 和  $(B4-B1+B3)/(B4+B1+B3)$ ,相关系数均在 0.6 以上。

#### 2.2.3 机器学习算法的选择

本文选用随机森林、支持向量机、基于粒子群算法优化的支持向量机、BP 神经网络、基于遗传算法优化的 BP (GA-BP) 神经网络和基于粒子群算法优化的 BP 神经网络 6 种机器学习方法构建反演模型。用于机器学习模型的样本为 384 组,包含 3 个输入特征量、1 个输出特征量,共 1 536 个样本。为确保模型训练与验证的科学性,样本数据组按照 7:2:1 的比例划分为训练集、测试集、验证集,其中训练集用于模型拟合,测试集用于测试预测精度,验证集用于验证模型精度。

如表 1 所示,随机森林、支持向量机、基于粒子群算法优化的支持向量机拟合效果较差(决定系数  $R^2 < 0.6$ ),而利用 BP 神经网络算法构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好,基于 GA-BP 神经网络构建的总磷质量浓度反演模型拟合效果较好。GA-BP 神经网络解决了局部最小化、学习速度慢、过拟合等问题,显著提高了 BP 神经网络的性能。模型参数设置如下:BP 神经网络模型输入层节点数为 3(对应 3 种敏感波段组合),输出层节点数为 1(对应目标水质参数),隐含层节点数为 5,最大迭代次数为 1 000,学习率为 0.01;GA-BP 神经网络模型输入层节点数为 3,输出层节点数为 1,隐含层节点数为 6,学习率为 0.01,遗传代数 50,种群规模为 30。

### 2.3 模型精度评价指标

模型精度评价是评估实测值与模型预测值之间的拟合效果。训练集的精度越高,模型的稳定性越好;测试集的精度越高,模型的预测能力越强。使用确定性系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对



表 1 6 种机器学习方法构建总氮、总磷质量浓度反演模型的验证精度

| 机器学习方法             | $R^2$ |      | RMSE/(mg/L) |      | MAE/(mg/L) |      |
|--------------------|-------|------|-------------|------|------------|------|
|                    | 总氮    | 总磷   | 总氮          | 总磷   | 总氮         | 总磷   |
| 随机森林               | 0.56  | 0.48 | 0.71        | 0.74 | 0.50       | 0.56 |
| 支持向量机              | 0.34  | 0.35 | 0.79        | 0.75 | 0.66       | 0.64 |
| 基于粒子群算法优化的支持向量机    | 0.41  | 0.40 | 0.72        | 0.78 | 0.61       | 0.59 |
| BP 神经网络            | 0.91  | 0.67 | 0.12        | 0.34 | 0.09       | 0.32 |
| GA-BP 神经网络         | 0.75  | 0.82 | 0.49        | 0.01 | 0.21       | 0.01 |
| 基于粒子群算法优化的 BP 神经网络 | 0.64  | 0.56 | 0.43        | 0.53 | 0.32       | 0.48 |

误差(MAE)作为模型精度的评价指标。

3 结果与分析

3.1 模型拟合效果

总氮、总磷质量浓度反演模型拟合效果很好, $R^2$  分别为 0.91、0.82, RMSE 分别为 0.12、0.01 mg/L, MAE 分别为 0.09、0.01 mg/L(表 1)。如图 2 所示,数据点均匀分布在 45 度对角线的两侧,总氮、总磷质量浓度反演模型均未见明显的系统误差,两个模

型的拟合效果均符合要求。

3.2 鄱阳湖总氮、总磷时空分布特征

3.2.1 空间分布特征

采用构建的反演模型对 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月鄱阳湖总氮、总磷质量浓度进行了反演计算,其中 2021 年和 2022 年 8、10、11、12 月反演结果如图 3 和图 4 所示。2021 年 8—10 月为汛期,鄱阳湖水域面积较大,总氮、总磷质量浓度空间异质性较强,湖区中部、东北部以及

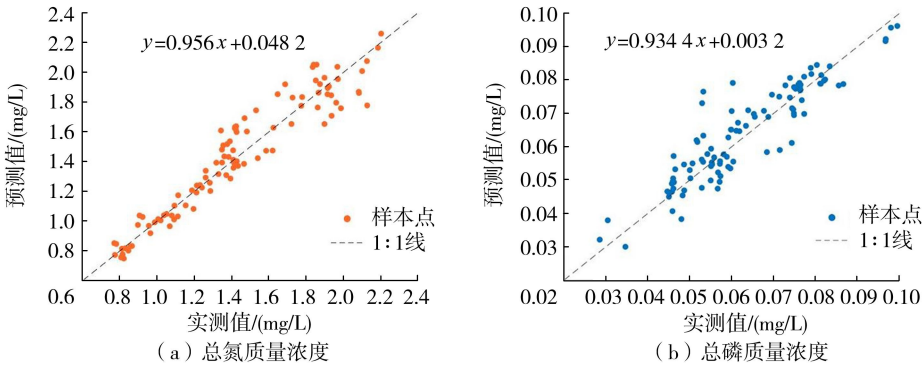


图 2 反演模型拟合效果

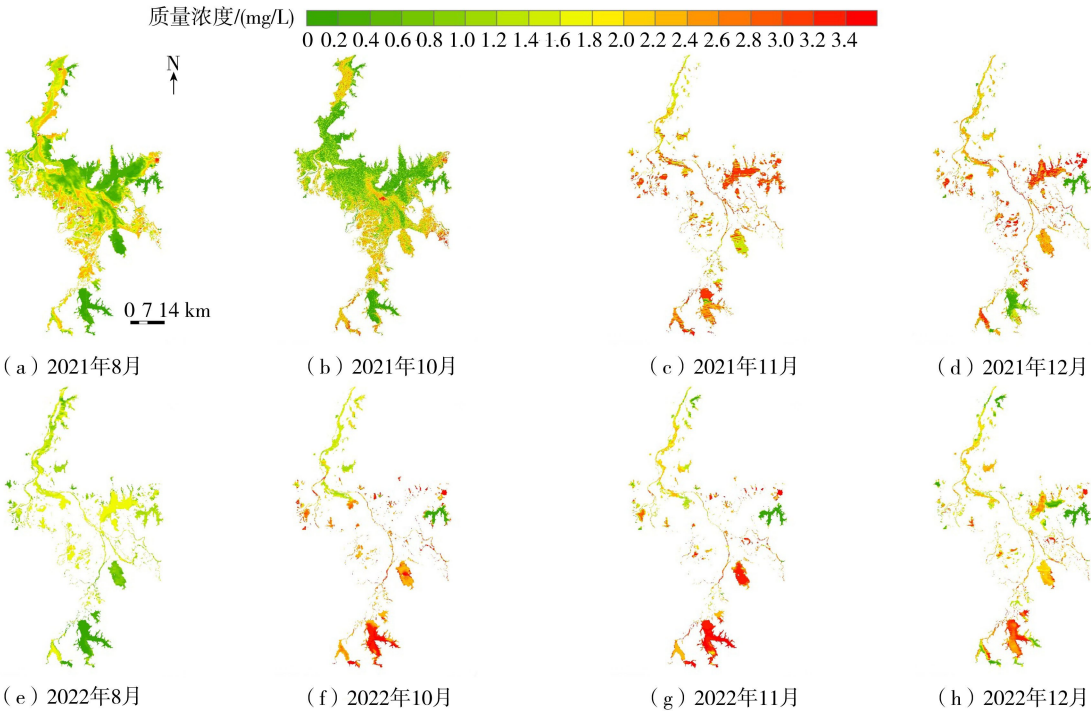


图 3 2021 年和 2022 年总氮质量浓度空间分布



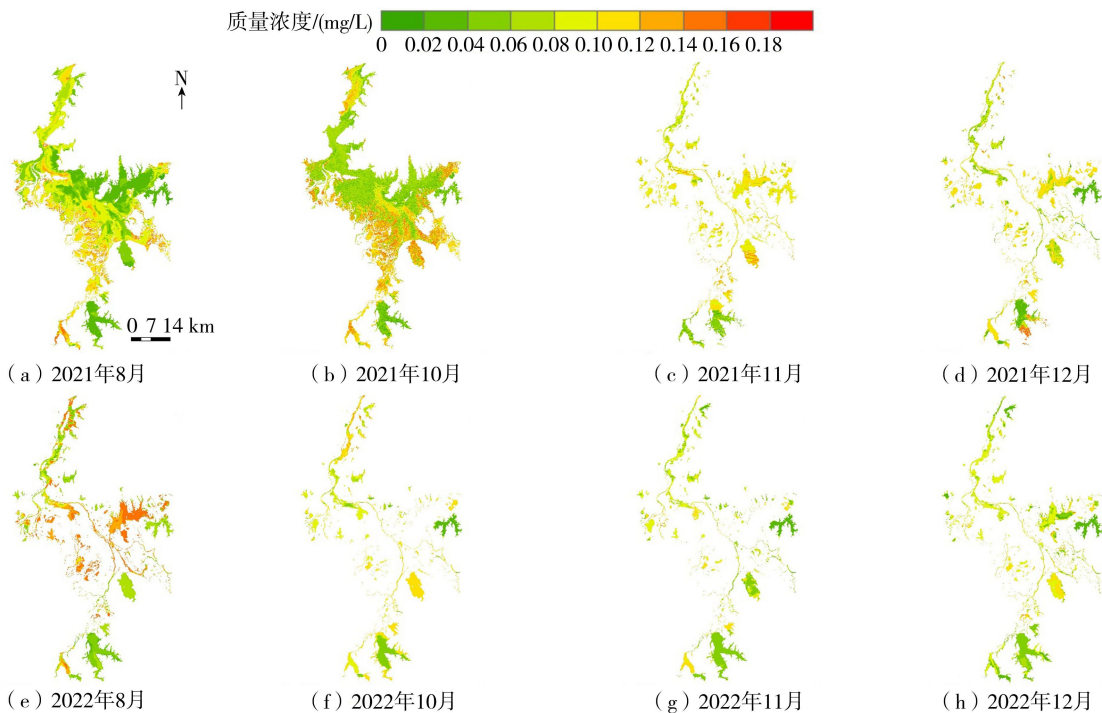


图4 2021年和2022年总磷质量浓度空间分布

“五河”入湖区域总氮、总磷质量浓度偏高,主湖区总氮在 $1.7\sim2.2\text{ mg/L}$ 之间,总磷在 $0.06\sim0.14\text{ mg/L}$ 之间,而其他区域总氮在 $1.0\text{ mg/L}$ 以下,总磷在 $0.06\text{ mg/L}$ 以下。枯水期(2021年11月至2022年1月)水域面积锐减,总氮、总磷质量浓度明显升高,大部分湖区总氮质量浓度在 $1.9\text{ mg/L}$ 以上,东北部甚至超过 $2.3\text{ mg/L}$ 。2022年1月,全湖总氮、总磷质量浓度有所下降,主湖区总氮质量浓度在 $1.0\sim2.0\text{ mg/L}$ 之间,总磷质量浓度在 $0.08\text{ mg/L}$ 以下,但隔离水体(与主湖区分割的独立水体)的总氮质量浓度较高。综上所述,2021年湖区总氮、总磷质量浓度空间分布较为一致,表现在8—10月空间分布异质性较强,部分区域质量浓度偏高,11月至次年1月空间异质性有所减弱,但整体质量浓度较高。

如图3所示,2022年8月至2023年1月湖泊水域面积较小,8—9月总氮质量浓度整体偏低,均在 $1.6\text{ mg/L}$ 以下;10月至次年1月湖区总氮质量浓度

明显升高,大部分区域在 $1.9\sim3.0\text{ mg/L}$ 之间。如图4所示,2021年8—9月湖区总磷质量浓度空间分布异质性较强,湖区中部和东北部总磷质量浓度较高,在 $0.10\sim0.16\text{ mg/L}$ 之间,而其他区域总磷质量浓度在 $0.06\text{ mg/L}$ 以下;2022年10月至2023年1月总磷质量浓度空间分布异质性减弱。综上所述,2022年8—9月湖区总氮质量浓度偏低,但在局部区域偏高,空间异质性较强,2022年10月至2023年1月湖区总氮、总磷质量浓度空间分布异质性明显减弱。

### 3.2.2 时间变化特征

鄱阳湖总氮、总磷月均质量浓度(图5)表现出较为明显的季节性变化。秋冬季(10月至次年1月)总氮、总磷质量浓度总体高于夏季(8—9月)。具体来说,2021年8—10月,总氮质量浓度在 $1.37\sim1.44\text{ mg/L}$ 之间,明显低于11月至次年1月( $1.60\sim2.03\text{ mg/L}$ )。2022年10月总氮浓度增加明

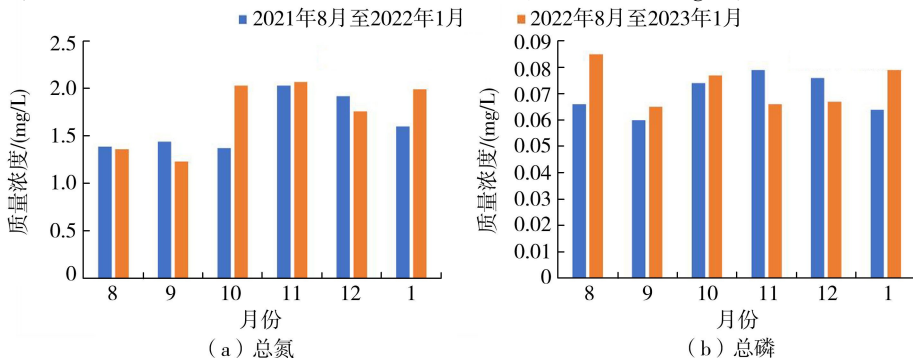


图5 2021年8月至2022年1月和2022年8月至2023年1月总氮、总磷月均质量浓度变化

显,达 2.0 mg/L 左右,此后一直保持较高质量浓度 (1.6~2.0 mg/L)。

相比之下,总磷质量浓度变化幅度较小,但仍可看出 2021 年总磷质量浓度变化呈先上升后下降的趋势,峰值出现在 11 月(0.08 mg/L 左右)。2022 年 10 月至次年 1 月的总磷质量浓度同样较高,均在 0.06 mg/L 以上。

### 3.2.3 不同质量浓度区间值分布特征

为了进一步揭示不同质量浓度水平的空间分布特征,将总氮质量浓度 0~1.5 mg/L 划定为中低质量浓度区, >1.5~2.4 mg/L 为高质量浓度区, >2.4 mg/L 为极高质量浓度区;将总磷质量浓度 0~0.06 mg/L 划定为中低质量浓度区, >0.06~0.12 mg/L 为高质量浓度区, >0.12 mg/L 为极高质量浓度区。

由图 6 和图 7 可知,除 9 月外,2022 年总氮、总磷高和极高质量浓度区占比均高于 2021 年,2022 年鄱阳湖全湖总氮高和极高质量浓度区占比相较于 2021 年提高了 1.4~44.8 个百分点,其中 10 月最为突出,提高了 44.8 个百分点。2022 年鄱阳湖全湖总磷高和极高质量浓度区占比相较于 2021 年提高了 8.5~29.0 个百分点,同样 10 月变化最大,提高了 29.0 个百分点。此外,2022 年总氮、总磷极高质量浓度区占比明显高于 2021 年,相较于 2021 年分别平均提高了 6.0 个百分点和 3.4 个百分点。其次,2021 年总氮中低质量浓度区占比为

17.3%~61.4%,总磷为 18.7%~53.3%;2022 年总氮中低质量浓度区占比为 15.3%~77.5%,总磷为 10.2%~45.5%。由此可见,2022 年在特大干旱背景下,鄱阳湖水体中总氮、总磷高和极高质量浓度区占比明显提高。

## 4 讨论

### 4.1 总氮、总磷质量浓度季节性变化的原因

鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,秋冬季偏高,丰水期水质总体优于枯水期。这与鄱阳湖季节性水文变化节律有关。夏季降水量高,“五河”入湖径流量增多,湖区水位增高,而冬季降水量低,入湖径流减少,湖区水位降低。因此,丰水期降雨充沛时,虽入湖径流量大,携带氮磷等污染物入湖,但湖泊水位高,蓄水量大,起到一定程度的稀释作用,使总氮、总磷质量浓度值相对较低;而枯水期水位低,水文连通性弱,局部湖区的换水周期较长,容易引起氮磷等污染物的聚集,导致较高的污染物含量。

### 4.2 总氮、总磷质量浓度空间差异的原因

a. 受湖盆结构的影响,鄱阳湖水文、水动力过程呈现明显的空间差异,这是导致湖区总氮、总磷质量浓度空间异质性的主要原因。比如,受局部地形的影响,东北湖湾换水周期较长,可达 180 d,最高可超过 300 d<sup>[25]</sup>。东北湖湾较长的换水周期导致污染物易在此区域富集和滞留<sup>[26]</sup>,因此东北湖湾总氮、

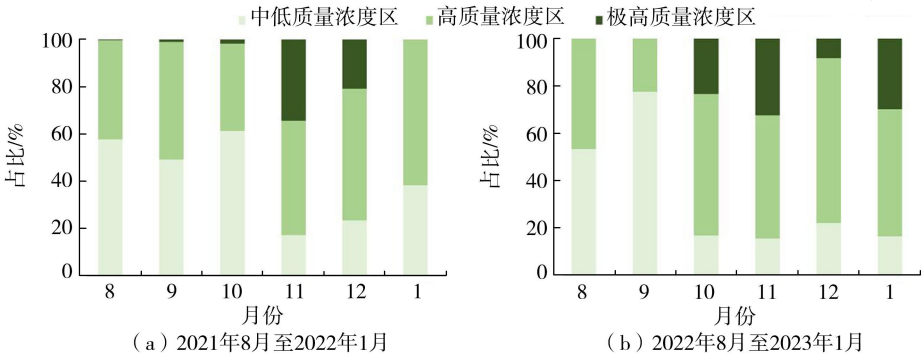


图 6 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月总氮各质量浓度分区占比

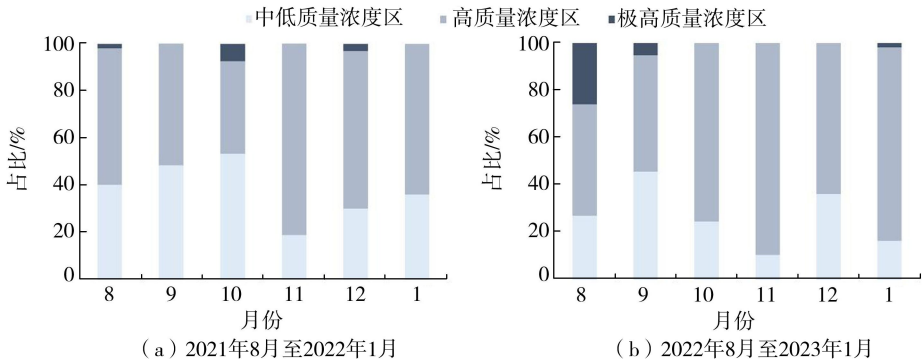


图 7 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月总磷各质量浓度分区占比

总磷质量浓度偏高,尤其在枯水期,水位下降引起水文连通性进一步变弱,抬升了该湖区污染物含量。

b. “五河”入湖口总氮、总磷质量浓度偏高的现象在水域面积较大的 2021 年 8—10 月最为明显。这主要是由于流域径流携带大量来自面源污染的氮磷污染物在入湖口输入鄱阳湖<sup>[27]</sup>,这些来自流域的氮磷污染物以入湖口为中心,向湖区扩散<sup>[27]</sup>,因此,“五河”入湖口的氮磷含量通常明显高于其他区域。

c. 湖区北部总氮、总磷质量浓度偏高的现象在水位快速上涨的汛期较为明显。2021 年 8 月湖口水位达 15.33 m,到 9—10 月涨至 16.5 m 左右。这说明汛期水位快速上涨,鄱阳湖向长江的排泄能力减弱,导致北部湖区流速缓慢,而上游湖区的大量氮磷污染物需经北部水道输送至长江,导致污染物在北部湖区聚集,使得湖区北部水道氮磷污染物含量偏高。

d. 鄱阳湖丰水期水质空间异质性较强,原因在于丰水期换水周期的空间异质性要明显强于枯水期<sup>[25]</sup>,受入湖径流的影响,丰水期“五河”入湖口区域水体交换速率相对较快<sup>[28]</sup>,换水周期较短,而湖区水域面积较大,导致湖区换水周期空间异质性较强。

### 4.3 2022 年秋季干旱的影响

a. 2022 年秋季干旱导致湖区总氮、总磷质量浓度上升现象较 2021 年秋季提前了 1 月。2022 年 9 月湖区水位较 2021 年降低了 9.4 m,水域面积缩小了 75%。10 月湖区水位较 2021 年降低了 7.8 m,水域面积缩小了 74%。2022 年秋季因降水量减少,鄱阳湖提前进入枯水期,导致总氮、总磷质量浓度上升的现象提前。

b. 湖区保持总氮、总磷质量浓度偏高现象持续时间更久。2021 年秋冬季湖区总氮、总磷质量浓度偏高的现象主要在 11—12 月,到次年 1 月有所下降,而 2022 年秋冬季湖区总氮、总磷质量浓度偏高的现象从 10 月持续到了次年 1 月。

c. 鄱阳湖湖区总氮、总磷高和极高质量浓度区扩大。2022 年 8 月因降水量减少,鄱阳湖提前进入枯水期,2022 年秋季水域面积甚至比 2021 年冬季还小,高和极高质量浓度区占比相对较高。此外,总氮、总磷质量浓度上升现象提前以及质量浓度偏高现象持久共同导致了 2022 年湖区总氮、总磷高和极高质量浓度区扩大。

综上,2022 年特大干旱加剧了鄱阳湖水质状况的恶化,不仅导致湖区总氮、总磷质量浓度提高及高和极高质量浓度区占比明显扩大,还导致湖区总氮、总磷质量浓度上升的时间提前,且湖区保持总氮、总

磷质量浓度偏高状态的持续时间延长。

## 5 结 论

a. 利用 BP 神经网络构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好, $R^2$  为 0.91;而 GA-BP 神经网络在构建鄱阳湖总磷质量浓度反演模型时表现较好, $R^2$  为 0.82。

b. 鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,秋冬季总氮、总磷质量浓度偏高,丰水期水质总体优于枯水期。鄱阳湖季节性水文节律变化是影响氮、磷质量浓度季节变化的主因。

c. 鄱阳湖总氮、总磷质量浓度偏高的区域主要集中在湖区中部、东北部以及“五河”入湖口。在丰水期,湖区北部水道总氮、总磷质量浓度升高。流域“五河”、湖泊、长江的相互作用以及鄱阳湖流场是影响氮磷含量空间分异的主因。

d. 特大干旱(2022 年秋冬季)加剧了鄱阳湖水质恶化,不仅导致全湖总氮、总磷质量浓度升高,且高和极高质量浓度区占比明显增大,全湖总氮、总磷高和极高质量浓度状态的持续时间也有所延长。

### 参考文献:

[ 1 ] Pi Xuehui, Luo Qiuqi, Feng Lian, et al. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5777.

[ 2 ] 张奇,刘元波,姚静,等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1360-1379. (Zhang Qi, Liu Yuanbo, Yao Jing. Lake hydrology in China: advances and prospects [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1360-1379. (in Chinese))

[ 3 ] 田熊长,蒋水华,贾卓,等. 基于 KH-SVM 的鄱阳湖水质评价及变化趋势分析[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 72-78. (Tian Xiongchang, Jiang Shuihua, Jia Zhuo, et al. Water quality evaluation and change trend analysis of the Poyang Lake based on KH-SVM [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 72-78. (in Chinese))

[ 4 ] 侯露,高愈霄,刘冰,等. 汛期暴雨情景下鄱阳湖流域水质时空分布特征与污染成因分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(4): 110-124. (Hou lu, Gao Yuxiao, Liu Bing, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and pollution causes of water quality in Poyang lake basin under rainstorm in flood season [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(4): 110-124. (in Chinese))

[ 5 ] Graeber D, McCarthy M J, Shatwell T, et al. Consistent stoichiometric long-term relationships between nutrients and chlorophyll-a across shallow lakes [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 809.



- [ 6 ] Fernandez-Figueroa E G, Rogers S R, Waters M N, et al. The green convergence: United States lakes are collectively moving toward a eutrophic state[J]. *Harmful Algae*, 2024, 139:102721.
- [ 7 ] Iadtem N, Saengchut P, Obpat S, et al. Application of dominant phytoplankton to assess water quality in small reservoirs[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26(7):114-129.
- [ 8 ] Rome M, Beighley R E, Faber T. Sensor-based detection of algal blooms for public health advisories and long-term monitoring[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767:144984.
- [ 9 ] Schürmann Q J F, Visser P M, Sollie S, et al. Risk assessment of toxic cyanobacterial blooms in recreational waters: a comparative study of monitoring methods[J]. *Harmful Algae*, 2024, 138:102683.
- [ 10 ] Batina A, Krtalić A. Integrating remote sensing methods for monitoring lake water quality: a comprehensive review[J]. *Hydrology*, 2024, 11(7):92.
- [ 11 ] Yang Haibo, Kong Jialin, Hu Huihui, et al. A review of remote sensing for water quality retrieval: progress and challenges[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8):1770.
- [ 12 ] Adjovu G E, Stephen H, James D, et al. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7):1938.
- [ 13 ] Li Xiaojuan, Huang Mutao, Li Jianbao. Remote sensing inversion of lake water quality parameters based on ensemble modelling[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 143:2007.
- [ 14 ] Yuan Yuhao, Lin Zhiping, Jiang Xinhao, et al. Hyper-parameter optimization-based multi-source fusion for remote sensing inversion of non-photosensitive water quality parameters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2024, 45(18):6838-6859.
- [ 15 ] Cao Hongye, Han Ling. Hourly remote sensing monitoring of harmful algal blooms (HABs) in Taihu Lake based on GOCI images[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(27):35958-35970.
- [ 16 ] Chen Lei, Liu Leizhen, Liu Shasha, et al. The application of remote sensing technology in inland water quality monitoring and water environment science: recent progress and perspectives[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(4):667.
- [ 17 ] 杜冰雪, 徐力刚, 张杰, 等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(5):795-801. (Du Bingxue, Xu Ligang, Zhang Jie, et al. The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5):795-801. (in Chinese))
- [ 18 ] 陈兴鹏, 王怀清, 戴芳筠, 等. 鄱阳湖水生态遥感监测及干旱影响分析[J]. *气象研究与应用*, 2024, 45(4):102-107. (Chen Xingjuan, Wang Huaqing, Dai Fangyun, et al. Remote sensing monitoring of water ecology in Poyang Lake and assessment of drought impact[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2024, 45(4):102-107. (in Chinese))
- [ 19 ] 陶海南. 鄱阳湖生态环境保护与生态文明建设[C]//中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2009:320-340.
- [ 20 ] 刘健, 张奇, 左海军, 等. 鄱阳湖流域径流模型[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(4):570-578. (Liu Jian, Zhang Qi, Zuo Haijun, et al. A surface runoff model for Lake Poyang watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(4):570-578. (in Chinese))
- [ 21 ] 张奇. 鄱阳湖水文情势变化研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018:50-60.
- [ 22 ] Zhao Qiang, Yu Le, Du Zhenrong, et al. An overview of the applications of earth observation satellite data: impacts and future trends[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8):1863.
- [ 23 ] Katkovsky L V, Martinov A O, Siliuk V A, et al. Fast atmospheric correction method for hyperspectral data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11):1698.
- [ 24 ] Yang Xiucheng, Zhao Shanhan, Qin Xiubin, et al. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6):596.
- [ 25 ] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(1):32-42. (Li Yunliang, Yao Jing, Li Mengfan, et al. Numerical simulations of residence time and tracer travel time in Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1):32-42. (in Chinese))
- [ 26 ] Li Yunliang, Yao Jing. Estimation of transport trajectory and residence time in large river-lake systems: application to Poyang Lake (China) using a combined model approach[J]. *Water* 2015, 7:5203-5223.
- [ 27 ] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖水流动与污染物迁移路径的粒子示踪研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(11):1748-1758. (Li Yunliang, Yao Jing, Li Mengfan, et al. Research of water flow and pollutant transport pathways in Poyang Lake using particle-tracking technique[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(11):1748-1758. (in Chinese))
- [ 28 ] 张素香, 许新发, 徐兴, 等. 鄱阳湖水龄季节性变化特征[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1):199-210. (Zhang Suxiang, Xu Xinfu, Xu Xin, et al. Seasonal variations of water age in Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1):199-210. (in Chinese))

( 收稿日期: 2025 - 06 - 03 编辑: 熊水斌)