



应用与环境生物学报

Chinese Journal of Applied and Environmental Biology

ISSN 1006-687X, CN 51-1482/Q

## 《应用与环境生物学报》网络首发论文

题目: 基于 P-IBI 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况  
作者: 顾毓蓉, 薛庆举, 万翔, 舒秀波, 张鸣晨, 谢丽强  
DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.10024  
收稿日期: 2019-10-15  
网络首发日期: 2020-01-21  
引用格式: 顾毓蓉, 薛庆举, 万翔, 舒秀波, 张鸣晨, 谢丽强. 基于 P-IBI 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况. 应用与环境生物学报.  
<https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.10024>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于 P-IBI 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况

顾毓蓉<sup>1,2</sup> 薛庆举<sup>1</sup> 万翔<sup>1,2</sup> 舒秀波<sup>3</sup> 张鸣晨<sup>4</sup> 谢丽强<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室 南京 210008

<sup>2</sup>中国科学院大学 北京 100049

<sup>3</sup>贵州大学资源与环境工程学院 贵阳 550025

<sup>4</sup>东南大学土木工程学院, 南京 211189

**摘要** 松雅湖是湖南省最大的城市湖泊,为探究生态修复对松雅湖的改善效果,本研究对松雅湖的水生态现状进行了调研和评价。另外,结合浮游生物完整性(P-IBI)与因子分析,从生物完整性角度对各区域水生态状况进行了排序。结果显示,2018年松雅湖各区域水体介于II类~V类水之间,全湖优于III类水的出现频次占比27%,修复区内优于III类水的出现频次占比为30%。修复区营养盐浓度与2013—2015年相比大幅下降,但生物多样性指数仍处于较低水平。松雅湖9月时水生态状况得分最低,其中以湖区中部水生态状况最差,存在局部水华的风险。除此之外,相关性分析研究显示水温、总磷(TP)、溶解氧(DO)以及化学需氧量(COD<sub>Mn</sub>)等环境因子与表征松雅湖生态状况的公因子相关。研究表明,生态修复对松雅湖湖体水质起到了明显的改善作用,但生物多样性仍处于受损状态,控制外源营养盐输入、及时清除有机聚集体以及控制内源污染释放对进一步修复改善松雅湖水质及水生态状况具有积极意义。

**关键词** P-IBI指数; 因子分析; 生态评价; 水质评价; 松雅湖

## Aquatic ecosystem states evaluation based on P-IBI factor analysis in Songya Lake after ecological restoration

GU Yurong<sup>1,2</sup>, XUE Qingju<sup>1</sup>, WAN Xiang<sup>1,2</sup>, SHU Xiubo<sup>3</sup>, ZHANG Mingchen<sup>4</sup>, XIE Liqiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China

<sup>3</sup>College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, P. R. China

<sup>4</sup>School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China

**Abstract** Songya Lake is the largest urban lake in Hunan province. In order to study the effects of ecological restoration in Songya Lake, aquatic ecosystem status of Songya Lake was analyzed and evaluated in 2018. Additionally, this study combined the concept of index of biological integrity (IBI) and factor analysis, sorted ecological health states by score, and evaluated ecosystem status from the perspective of biological integrity. The results demonstrated that the water quality in Songya Lake ranged from Grand II to V level, with 27% sample points better than Grand III. In the view of time, TP and TN concentrations in 2018 obviously decreased comparing to the states investigated during 2013-2015, while the plankton biodiversity index was still in low level. Results also showed that September got the lowest health

收稿日期 Received: 2019-10-15 接受日期 Accepted: 2019-12-19

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208008)、中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-038-3)和中国科学院南京地理与湖泊研究所引进人才启动项目(NIGLAS2017QD10)联合资助 Supported by Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2018ZX07208008), Science and Technology Service Network Initiative (KFJ-STZ-ZDTP-038-3) and Talent-Recruiting Program of Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences (NIGLAS2017QD10).

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: lqxie@niglas.ac.cn)

integrated score. Among them, ecological condition of the central area without restoration was the worst, and it was at risk of cyanobacteria bloom. What's more, the correlation between common factors and environment factors shows that temperature, TP, DO, and COD<sub>Mn</sub> were main factors related to ecological health status of Songya Lake. In Conclusion, this study indicated that eco-restoration did work in improving water quality, but plankton biodiversity was still damaged. Controlling the input of exogenous nitrogen and phosphorus sources along with control the endogenous pollution release by timely removal of organic aggregates seems to have positive effects on water quality and water ecological status of Songya Lake.

**Keywords** P-IBI; factor analysis; ecosystem states evaluation; water quality evaluation; Songya Lake

水质和水生态研究均可作为湖泊的科学管理提供重要依据<sup>[1,2]</sup>。其中,水质理化参数评价因其可以快速直观地反映出湖泊水体状况而被广泛使用。事实上,虽然修复后的水体水质可能存在明显改善,但部分区域中会出现水生生物受损等问题<sup>[3]</sup>。而生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)则是一种可以反映人类干扰与生物特性之间关系的综合生物评价方法,目前已广泛应用于河流、湖泊的生态评价中<sup>[4-6]</sup>。IBI生物评价可以分为先验法和后验法,其主要区别在于是否需要划分参考点和受损点。先验法通过水体理化性质或地理属性划分参考点,将参考点与测试点的生态系统健康进行比较<sup>[7]</sup>,其准确性依赖于采样点划分的准确性,但实际情况下湖泊中很难找到与原始或未受干扰的自然区域相对应的参考区域,退化的栖息地导致的生物学差异将难以与化学污染变化产生的差异分开。后验法对选取的参数做多变量分析,利用统计工具克服参照点的不足<sup>[8]</sup>,适合采样点较少、划分参考区存在困难的情况,但其准确性依赖于候选参数的选择<sup>[9-11]</sup>。目前已有的生物完整性评价多以鱼类和底栖生物等作为构建对象展开<sup>[12]</sup>,而基于浮游生物的研究较少<sup>[13]</sup>。浮游生物作为湖泊生态系统中的主要生产者和初级消费者,在食物链中起基础性作用,而其群落特征的变化则会影响到更高营养级生物的生存,进而引起生态系统的变化。一些研究表明,浮游动物<sup>[14]</sup>和浮游植物<sup>[15]</sup>丰度是反应湖泊和河流的营养状况的极好指标,其生物完整性指数能有效反应湖泊<sup>[16]</sup>和水库<sup>[17]</sup>的生态状况。此外,与鱼类和底栖动物等水生生物相比,浮游生物具有繁殖速度快、生命周期短等特点,从而在群落结构方面面对环境变化做出快速有效的反应<sup>[18]</sup>。因此,采用浮游生物完整性指数(P-IBI)进行水生态状况评价相对于鱼类生物完整性指数、底栖动物完整性指数具有一定的优势,但其评价体系的构建尚不成熟<sup>[17]</sup>。

松雅湖位于湖南省长沙县县城北部,与捞刀河、松雅河相邻,是湖南省目前最大的城市湖泊,对湘江水系有着重要的影响。2003~2009年湖南省政府通过退田还湖工程,对松雅湖湖盆进行了修复重建,并在2013—2014年开始蓄水。2013年夏季,松雅湖水体总氮、总磷、铵氮和化学需氧量含量极高,属劣V类水体;经过补水后,2014年夏季水体营养盐含量有所降低,但仍处于富营养水平<sup>[19]</sup>。有鉴于此,相关部门对松雅湖水生生态系统进行了修复,并分别在湖区东部、西部和北部部分区域设置了生态修复示范区与推广区。目前,有关松雅湖生态状况的研究十分有限,仅张玮等<sup>[9]</sup>于蓄水期间夏季对松雅湖浮游植物群落结构与环境因子的关系进行了剖析。现有研究缺乏对其现状的了解,特别是在生态修复之后,因此难以评价修复工程对改善松雅湖水生态健康的作用和效果。此外,我国对城市湖泊的健康评价多以水质和浮游生物多样性为指标,但生物多样性忽略了不同物种对干扰的耐受性,掩盖了生态保守性,不能准确反映区域的生物完整性<sup>[4]</sup>,而城市湖泊受人为干扰严重,容易影响P-IBI先验法的准确性,增加P-IBI体系构建的难度。所以,本研究在调查松雅湖水生态现状的基础上,对比了松雅湖生态修复前后的水质变化。其次,研究采用P-IBI后验法,选取能够反映短期污染影响的浮游生物作为生物完整性度量,并基于因子分析对松雅湖水生态状况进行了评价,规避了湖泊参考区与受损区划分不确定性导致的误差,探究了松雅湖水生态现状与环境因子之间的相关关系,以期能够全面准确地综合评价松雅湖的水生态状况,并为松雅湖及相关城市湖泊的水环境评价及治理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样点分布

松雅湖水生态现状调查点位分布如图1所示。点位主要分布在四个区域,包括三个生态修复区和中部未修复区,其中西部及东部生态修复区相对较小(50000 m<sup>2</sup>),各设置2个点位,而北部生态修复区较大(310000 m<sup>2</sup>),与中部未修复区均设置3个点位,共10个点位。

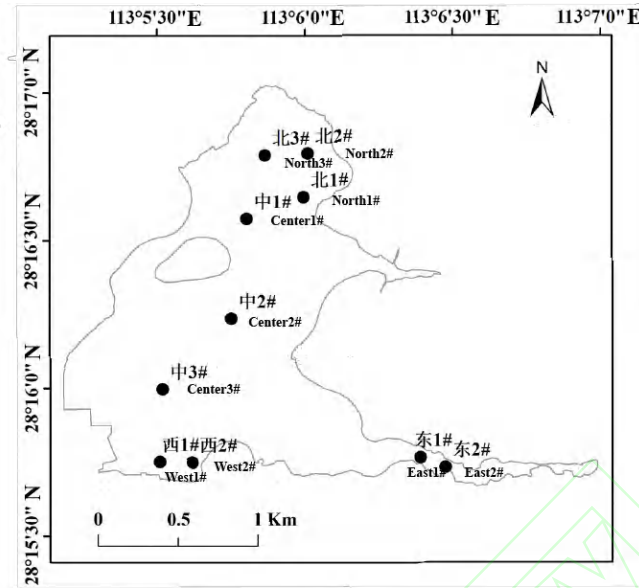


图1 松雅湖采样点位分布图  
Fig.1 Sampling sites locations on Songya Lake

## 1.2 样品的采集与测定

松雅湖水生态调查共开展三次，调查时间分别为2018年1月9日、5月26日和9月28日，每次调查均在各个点位采集水体样品用于检测水体理化指标现状，并分析浮游植物以及浮游动物群落结构。其中，水体样品均为采样点水体表层、中层及底层三层的混合水样。水体样品的采集使用2.5 L有机玻璃采样器进行，其中，500 mL混合水样用于检测水体的相关理化指标；1 L混合水样在现场加入1%的鲁哥试剂固定，用于浮游植物物种鉴定<sup>[20]</sup>；20 L水样在经25#浮游生物网过滤后浓缩于50 mL白色方瓶中，并加入5%甲醛溶液固定用于浮游动物物种鉴定。

水温(T)、溶解氧(DO)和pH在原位使用多参数水质分析仪(YSI 6600 V2)测定，透明度(SD)使用黑白盘测定；总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、化学需氧量(COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素a(Chl-a)等理化指标在实验室中按照《湖泊富营养化调查规范》中规定的方法进行测定<sup>[21]</sup>；浮游植物样品在静置48 h后用虹吸法浓缩至50 mL，浮游植物的物种鉴定方法参考文献<sup>[22]</sup>，在显微镜对不同物种进行计数之后，浮游植物生物量按照1 mm<sup>3</sup>体积藻类等于1 mg藻类生物量进行计算；浮游动物样品在显微镜下进行鉴定和计数，具体方法参考文献<sup>[22]</sup>。

## 1.3 研究方法

1.3.1 水质等级划分 水质分级按地表水环境质量标准(GB3838-2002)中的规定将水质划为I类至劣V类。主要参考指标为TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>含量，若各指标分布在不同标准范围时，以反映水质等级最差的指标为准。另外用生物多样性指数加以验证，Shannon-Weaver生物多样性指数(计算公式见表1)0~1为重污染，1~2为α-中污型(中度污染)，2~3为β-中污型(轻度污染)，>3为清洁<sup>[23]</sup>。

1.3.2 基于P-IBI的因子分析 因子分析是一种对数据进行重组的统计分析方法，采用降维的思想，提取可以反映原始数据基本信息的少数综合变量(公因子)。根据样本各原始变量xi(i=1,...,m)的取值，估计该样本的各公因子fj(j=1,...,m)的取值叫做因子得分，每个样品的各公因子得分为f<sub>1(i)</sub>, f<sub>2(i)</sub>, ..., f<sub>m(i)</sub>，根据各公因子得分和方差贡献率可计算综合得分，计算公式为：

$$f(i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} [\lambda_1 f_{1(i)} + \lambda_2 f_{2(i)} + \dots + \lambda_m f_{m(i)}]$$

本研究采用基于P-IBI的因子分析对松雅湖生态状况进行评价。为全面反映浮游生物组成、丰富度、耐受性、生物群落多样性、群落营养结构，综合考虑各生物参数的获取难度，选择28类受水生态状况影响的浮游生物指标来构建P-IBI(表1)。本研究基于主成分法提取公因子，采用正交旋转对因子载荷矩阵进行优化，回归法计算各因子得分，进一步计算综合得分。因为各指标以作标准化处理，所以不同月份与区域采样点的因子得分可以直接比较相对大小<sup>[17]</sup>。

表1 候选浮游生物参数<sup>[7,24-27]</sup>  
Table 1 Candidate metrics of plankton

序号 Number	候选参数 Candidate metrics	序号 Number	候选参数 Candidate metrics
m1	浮游植物分类单元数 Taxa of phytoplankton	m16	枝角桡足类/浮游动物密度比 Cladocera and copepods density / zooplankton density
m2	浮游植物密度 Phytoplankton density	m17	枝角桡足类浮游动物生物量比 Cladocera and copepods biomass / zooplankton biomass
m3	各类浮游植物密度百分比 Proportion of each phytoplankton density (P%)	m18	浮游动物/浮游植物密度比 Phytoplankton density / zooplankton density
m6	浮游植物生物量 Phytoplankton biomass	m19	浮游动物生物量 Zooplankton biomass
m7	各类浮游植物生物量百分比 Proportion of each phytoplankton biomass (P%)	m20	浮游动物/浮游植物生物量比 Phytoplankton biomass / zooplankton biomass
m8	潜在产毒藻类百分比 Proportion of potential toxic algae (P%)	m21	浮游植物优势度: $D = \frac{n_i}{N} \times 100\%$ Dominance index of phytoplankton
m9	难被摄食藻类百分比 Proportion of ingestible algae (P%)	m22	浮游植物 Simpson 指数: $D_s = 1 - \sum P_i^2$ Simpson index of Phytoplankton
m10	硅藻商 Diatoms	m23	浮游植物 Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ Shannon-Wiener index of Phytoplankton
m11	浮游动物分类单元数 Taxa of zooplankton	m24	浮游植物 Pielou 指数: $J' = \frac{H'}{\ln s}$ Pielou evenness index of phytoplankton
m12	轮虫分类单元数 Taxa of rotifer	m25	浮游动物优势度: $D = \frac{n_i}{N} \times 100\%$ Dominance index of zooplankton
m13	枝角类+桡足类单元数 Taxa of cladocera and copepods	m26	浮游动物 Simpson 指数: $D_s = 1 - \sum P_i^2$ Simpson index of zooplankton
m14	浮游动物密度 Zooplankton density	m27	浮游动物 Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ Shannon-Wiener index of zooplankton
m15	轮虫密度 Rotifer density	m28	浮游动物 Pielou 指数: $J' = \frac{H'}{\ln s}$ Pielou evenness index of zooplankton

$n_i$ : 第  $i$  种的数量;  $N$ : 该点位群落中所有种的密度;  $s$ : 种类数;  $P_i$ : 每种生物所占比例 ( $n_i/N$ )。

$n_i$ : the number of the  $i$ 's species;  $N$ : the density of all species in the site;  $s$ : the number of species;  $P_i$ : the proportion of each species ( $n_i/N$ ).

1.3.3 统计方法 本研究采用单因素方差分析判断目标因子在各月和各采样区域是否存在显著差异,  $P < 0.05$  认为差异显著。采用斯皮尔曼相关性分析对水质理化指标与各公因子之间的相关性进行分析,  $P < 0.05$  表明环境因子与对应公因子存在显著的相关关系。以上统计分析及因子分析均在 Spss 24.0 软件中完成, 分析结果采用 Origin9.0 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 松雅湖水质现状

调查期间, 松雅湖水体各月理化指标状况如表 2 所示。1 月时, 松雅湖水体 TN 平均浓度为 1.15 mg/L, 其中以东部修复区为最低, 北部修复区为最高; 5 月和 9 月时, TN 平均浓度分别为 0.46 和 0.51 mg/L, 各区域差异较小。从 TP 来看, 1 月时平均浓度为 0.041 mg/L, 其中东部修复区水体 TP 含量最低为 0.013 mg/L, 其他区域水体 TP 含量水平相近; 5 月时平均浓度为 0.027 mg/L, 各湖区水体 TP 含量以西部修复区为最低, 湖区中部最高; 9 月时平均浓度为 0.044 mg/L, 其中湖区中部 TP 浓度高达 0.076 mg/L。调查期间, 不同月份松雅湖  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均较低, 其中 1 月时平均浓度为 0.18 mg/L 相对较高, 5 月和 9 月平均浓度相近, 分别为 0.05

mg/L 和 0.07 mg/L, 各湖区水体以湖区中部和北部修复区含量较高; COD<sub>Mn</sub> 三个月份含量相近, 分别为 2.46、2.76、2.96 mg/L, 空间上以北部修复区平均含量最高, 其余湖区含量相近。各月份 DO 平均值分别为 12.27、8.10、7.11 mg/L, Chl-*a* 含量平均值分别为 3.04、2.99、6.66 μg/L, 透明度平均值分别为 0.95、0.81、0.52 m, 其中湖区中部的 Chl-*a* 含量高于 3 个修复区, SD 低于 3 个修复区。

根据湖泊水质评价标准 (以水质等级最差的指标为准), 调查期间松雅湖水体介于 II 类~V 类水。总体来说水质情况较好, III 类水达标率为 73%, 优于 III 类水体出现的频次占 27%。调查期间, 松雅湖 5 月时的水质情况优于 9 月和 1 月, 1、5、9 月 II 类水体占比分别为 20%、40%、20%, 其中 5 月和 9 月各采样区域均达到 III 类水标准, 1 月 80% 的采样点水质未达 III 类水标准, 主要问题是 TN、TP 含量过高。

表 2 松雅湖各区域水质情况

Table 2 The physiochemical parameters (median ± SD) of different areas in Songya Lake

日期 Date	采样区 Areas	T (t/°C)	pH	TN (ρ/mg L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (ρ/mg L <sup>-1</sup> )	TP (ρ/mg L <sup>-1</sup> )	COD (ρ/mg L <sup>-1</sup> )	DO (ρ/mg L <sup>-1</sup> )	Chl- <i>a</i> (ρ/μg L <sup>-1</sup> )	SD (δ/m)
1.09	NRA	5.73 ± 0.27	7.26 ± 0.13	1.61 ± 0.21	0.23 ± 0.05	0.052 ± 0.005	2.69 ± 0.18	12.78 ± 0.02	0.79 ± 0.25	1.88 ± 0.3
	WRA	7.07 ± 0.23	6.91 ± 0.04	1.13 ± 0.05	0.14 ± 0.01	0.041 ± 0.004	2.38 ± 0.16	11.83 ± 0.10	5.36 ± 0.07	0.50 ± 0.0
	ERA	5.99 ± 0.59	7.01 ± 0.18	0.27 ± 0.07	0.09 ± 0.01	0.013 ± 0.001	2.26 ± 0.18	12.73 ± 0.01	0.67 ± 0.06	0.70 ± 0.28
	CUA	6.81 ± 0.08	7.24 ± 0.18	1.29 ± 0.08	0.23 ± 0.02	0.047 ± 0.007	2.42 ± 0.21	11.76 ± 0.12	5.31 ± 0.2	0.48 ± 0.03
	Average	6.37 ± 0.63	7.13 ± 0.2	1.15 ± 0.51	0.18 ± 0.07	0.041 ± 0.015	2.46 ± 0.23	12.27 ± 0.51	3.04 ± 2.43	0.95 ± 0.67
5.26	NRA	26.79 ± 0.34	8.98 ± 0.06	0.49 ± 0.09	0.03 ± 0.01	0.023 ± 0.002	3.25 ± 0.15	7.84 ± 0.12	3.34 ± 0.96	1.27 ± 0.21
	WRA	27.41 ± 0.23	9.43 ± 0.28	0.25 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.014 ± 0.001	2.4 ± 0.04	9.58 ± 1.19	1.39 ± 0.27	1.35 ± 0.49
	ERA	27.25 ± 0.32	7.66 ± 1.42	0.52 ± 0.18	0.08 ± 0.02	0.027 ± 0.018	2.64 ± 0.11	8.03 ± 0.97	3.39 ± 1.26	0.65 ± 0.49
	CUA	26.68 ± 0.15	7.13 ± 0.18	0.53 ± 0.04	0.07 ± 0.01	0.039 ± 0.001	2.59 ± 0.08	7.44 ± 0.08	3.42 ± 0.07	0.40 ± 0.00
	Average	26.97 ± 0.38	8.25 ± 1.11	0.46 ± 0.13	0.05 ± 0.02	0.027 ± 0.012	2.76 ± 0.36	8.11 ± 0.96	2.99 ± 1.05	0.90 ± 0.50
9.28	NRA	23.58 ± 0.19	7.26 ± 0.13	0.58 ± 0.21	0.08 ± 0.02	0.030 ± 0.01	3.24 ± 0.06	6.69 ± 0.43	3.38 ± 1.2	1.07 ± 0.51
	WRA	23.97 ± 0.63	6.91 ± 0.04	0.41 ± 0.07	0.07 ± 0.03	0.034 ± 0.007	2.68 ± 0.1	7.48 ± 0.35	7.10 ± 4.78	0.60 ± 0.57
	ERA	23.72 ± 0.83	7.01 ± 0.18	0.42 ± 0.22	0.08 ± 0.00	0.029 ± 0.017	3.38 ± 1.11	7.96 ± 1.21	6.79 ± 4.58	0.20 ± 0.14
	CUA	24.33 ± 0.04	7.24 ± 0.18	0.58 ± 0.06	0.06 ± 0.01	0.076 ± 0.057	2.59 ± 0.07	6.73 ± 0.12	9.55 ± 0.59	0.12 ± 0.03
	Average	23.91 ± 0.48	7.13 ± 0.2	0.51 ± 0.15	0.07 ± 0.02	0.044 ± 0.036	2.96 ± 0.52	7.11 ± 0.72	6.66 ± 3.42	0.52 ± 0.52

NRA: 北部修复区; WRA: 西部修复区; ERA: 东部修复区; CUA: 湖区中部未修复区

NRA: North restoration area; WRA: west restoration area; ERA: east restoration area; CUA: center unrestored area

## 2.2 浮游植物群落现状

调查期间, 松雅湖不同月份之间浮游植物群落组成差异较大。1 月时, 松雅湖各点位共检出浮游植物 40 种, 隶属 7 门, 其中以硅藻门物种数量最多 (图 2)。5 月时, 共检出 71 种浮游植物物种, 分别隶属 7 个门类, 其中绿藻门浮游植物物种数量最多, 相对 1 月份增加 22 种, 硅藻门次之, 蓝藻门物种数量增加 8 种, 其他门类浮游植物物种数量仍较少。9 月时, 浮游植物物种数量为 77 个, 但门类数量降至 6 类, 此时松雅湖松雅湖浮游植物仍以绿藻种类数最多 (31 种), 但相对 5 月时出现小幅降低, 其次为硅藻门, 其数量出现小幅升高。分析发现, 松雅湖各区域出现过的优势种 (优势度 > 20%<sup>[28]</sup>) 有: 色金藻 (*Chromulina* sp.)、尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*)、中圆胞束球藻 (*Gomphosphaeria aponina*)、双对栅藻 (*Scenedesmus biguga*)、小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、单角盘星藻具孔 (*Pediastrum simplex* var. *duodenarium*)、球孢鱼腥藻 (*Anabaena sphaerica*)、伪鱼腥藻 (*Pseudoanabaena* sp.)、喜碳颤藻 (*Oscillatoria carboniciphila*) 和微囊藻 (*Microcystis* sp.)。1 月时优势度最高的为尖尾蓝隐藻, 5 月时变为双对栅藻, 9 月时为伪鱼腥藻。

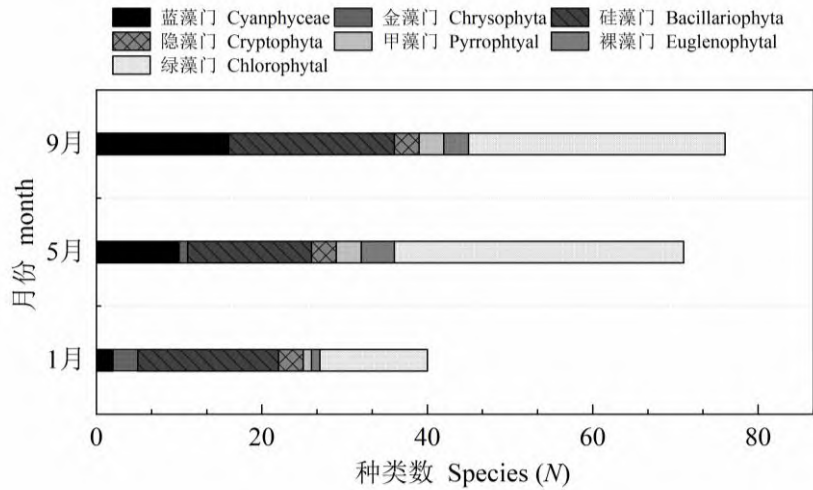


图2 松雅湖各月浮游植物种类数变化

Fig.2 Changes of phytoplankton species in different months in Songya Lake

整个调查期间全湖浮游植物平均密度为  $1.57 \times 10^6$  ind/L, 在不同月份表现为 9月 > 5月 > 1月 (图3)。1月时, 浮游植物密度平均密度  $8.87 \times 10^5$  ind/L, 以西部修复区平均密度最高, 北部修复区平均密度最低。其中, 隐藻门检出物种数量虽然较少但密度在所有检出藻类中最大, 为  $7.2 \times 10^5$  ind/L, 占总浮游植物月平均密度的 79.91%, 蓝藻门在东部修复区和湖区中部均有检出, 但密度相对较小, 平均密度为  $1.91 \times 10^4$  ind/L。5月时, 各点位浮游植物总密度平均值为  $1.54 \times 10^6$  ind/L, 以北部修复区密度最高, 西部修复区密度最低。其中, 各区域绿藻门物种数量和密度均较高, 占总浮游植物月平均密度的 56.02%, 蓝藻门密度仅次于绿藻门, 占总密度的 21.12%, 主要集中在北部修复区, 其次为湖区中部。9月时, 浮游植物各点位平均密度为  $2.29 \times 10^6$  ind/L, 以西部修复区密度最高, 北部修复区密度最低, 除北部修复区外, 其他区域蓝藻门数量均较多, 在各区域总浮游植物密度中的占比均超过 75%。

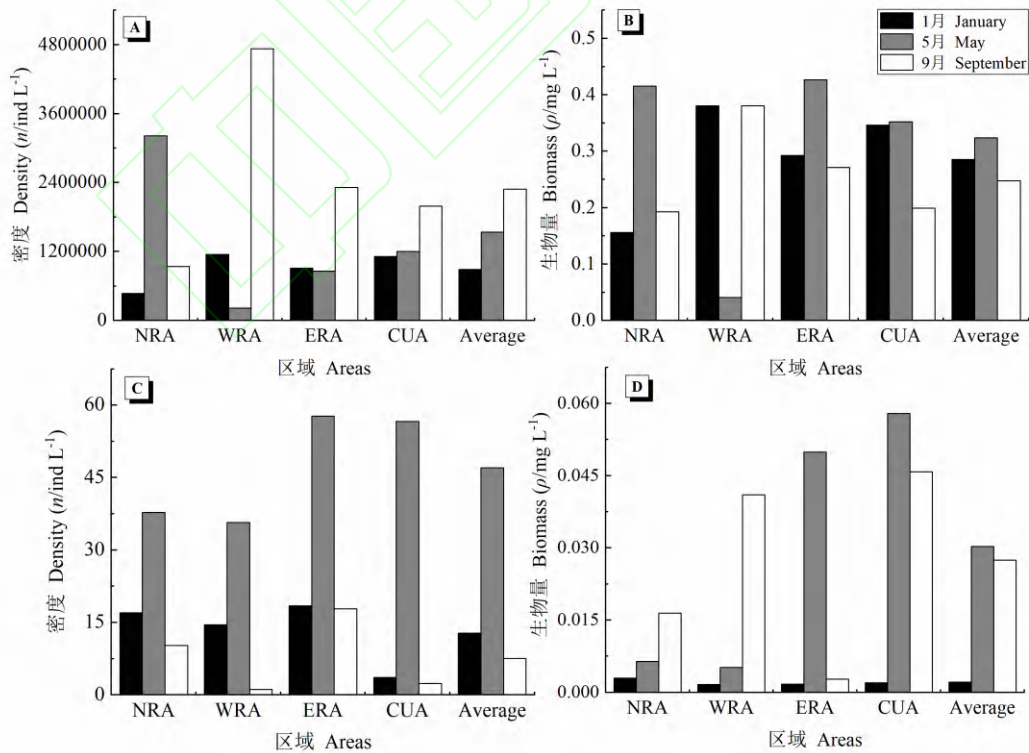


图3 松雅湖浮游生物密度及生物量。A、B 分别为浮游植物密度和生物量空间分布, C、D 分别为浮游动物密度和生物量空间分布) NRA: 北部修复区; WRA: 西部修复区; ERA: 东部修复区; CUA: 湖区中部未修复区

Fig.3 Density and biomass of plankton in Songya Lake. A,B,C,D respectively represent spatial distribution of phytoplankton density, phytoplankton biomass, zooplankton density, and zooplankton biomass) NRA: North restoration area; WRA: west restoration area; ERA: east restoration area; CUA: center unrestored area

从浮游植物生物量上看, 调查期间全湖浮游植物平均生物量为 0.28 mg/L, 各月浮游植物生物量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 总体表现为 5 月高, 而 1 月和 9 月低的特点。1 月时平均生物量为 0.27 mg/L, 以西部修复区生物量最高 (0.38 mg/L), 北部修复区最低 (0.16 mg/L), 隐藻门在各点位均有检出, 生物量平均值为 0.21 mg/L, 明显高于其他门类浮游植物; 5 月平均生物量为 0.32 mg/L, 以东部修复区为最高 (0.43 mg/L), 西部修复区最低 (0.04 mg/L), 全湖以绿藻门生物量占比最高, 平均生物量 97.16  $\mu\text{g/L}$ ; 9 月时, 松雅湖浮游植物在全湖的平均生物量为 0.25 mg/L, 其中以西部修复区为最高 (0.38 mg/L), 北部修复区最低, 为 0.19 mg/L, 蓝藻门取代绿藻门成为生物量最高的浮游植物, 平均生物量 80.12  $\mu\text{g/L}$ 。1、5、9 月浮游植物 Shannon 指数平均值分别为 0.96, 2.16, 2.18, 指示 1 月水体为重污染, 5 月和 9 月份为轻度污染。整个调查期间松雅湖浮游植物 Shannon 指数均值为 1.76, 说明松雅湖水体处于中度污染。

### 2.3 浮游动物群落现状

松雅湖 2018 年 3 次采样共检出浮游动物物种 56 种, 其中以轮虫纲种类最多, 有 37 种, 占总物种数的 66%, 枝角纲 12 种, 占 21%, 而桡足纲种类最少, 仅 7 种, 占 13%。优势种为针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、有棘螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、对棘同尾轮虫 (*Diurella stylata*)、圆筒异尾轮虫 (*Trichocerca cylindrica*)、裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*)、曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valga*)、晶囊轮属 (*Asplanchna* sp.) 和汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*), 各月优势度最高的均为针簇多肢轮虫。

松雅湖浮游动物的密度和生物量在不同月份差异较大 ( $P < 0.05$ ), 各区域浮游动物密度与生物量如图 3-C、3-D 所示。密度在 5 月份时最高, 达到 47 ind./L, 1 月时最低, 为 7.93 ind./L。浮游动物生物量在 5 月时达到最高, 为 0.0303 mg/L, 9 月时最低, 仅为 0.0022 mg/L。从空间上看, 1 月时, 湖区中部浮游动物密度明显低于其他三个修复区, 生物量以北部修复区最高; 5 月时东部修复区与湖区中部平均密度相近, 均高于北部与西部修复区, 浮游动物生物量的空间分布规律与密度分布规律保持一致; 9 月时东部修复区浮游动物密度最高, 北部修复区次之, 均明显高于西部与湖区中部, 浮游动物生物量的空间分布与之相反, 以湖区中部和西部修复区生物量最高, 而北部与东部修复区生物量较低。1、5、9 月浮游动物 Shannon 指数平均值分别为 1.60, 1.87, 2.16, 指示 1 月和 5 月水体为中度污染, 9 月份为轻度污染。整个调查期间松雅湖浮游动物 Shannon 指数平均值为 1.36, 说明松雅湖水体整体处于中度污染。

### 2.4 基于因子分析的浮游生物完整性指数

2.4.1 因子分析 对选出的 36 个参数进行标准化处理, 消除不同参数之间数量级和量纲的影响。综合考虑各参数在公因子上的差异性和可解释性, 选择前四个因子 ( $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ ) 作为公因子, 各公因子的方差解释率为 23.19%、16.11%、13.63%、12.93%, 累计方差解释率达 65.84%。各生物参数在公因子上的因子载荷如图 4 所示, 因子载荷代表了原始变量与公因子的相关性, 可以看出  $f_1$  主要与蓝藻门密度百分比、蓝藻门生物量百分比、潜在产毒藻类百分比、难被摄食藻类百分比成高度正相关, 蓝藻是我国湖库的主要水华藻类, 其生物量和密度的增加是水华发生的常见现象, 而微囊藻等难被摄食藻类和产毒藻类可对大型浮游动物造成牧食抑制作用<sup>[29]</sup>, 较低的牧食压力为其大量繁殖创造了有利环境, 使其易形成优势种, 引发水华, 因此认为  $f_1$  代表水体发生水华的风险。 $f_2$  主要与浮游植物的 Simpson、Shannon、Pielou 指数成高度正相关, 与浮游植物优势度成高度负相关,  $f_3$  主要与浮游动物 Simpson、Shannon、Pielou 指数成高度正相关, 与浮游动物 Dominance 指数成负相关, 因此认为  $f_2$ 、 $f_3$  分别反映了浮游植物和浮游动物群落的生物多样性。 $f_4$  与轮虫的种类和密度成正相关, 反映了轮虫的丰富度。因此, 因子分析的结果表明水体发生水华的风险、浮游植物群落多样性、浮游动物的群落多样性和轮虫的丰富度是与松雅湖水生态状况相关的 4 类主要因素。



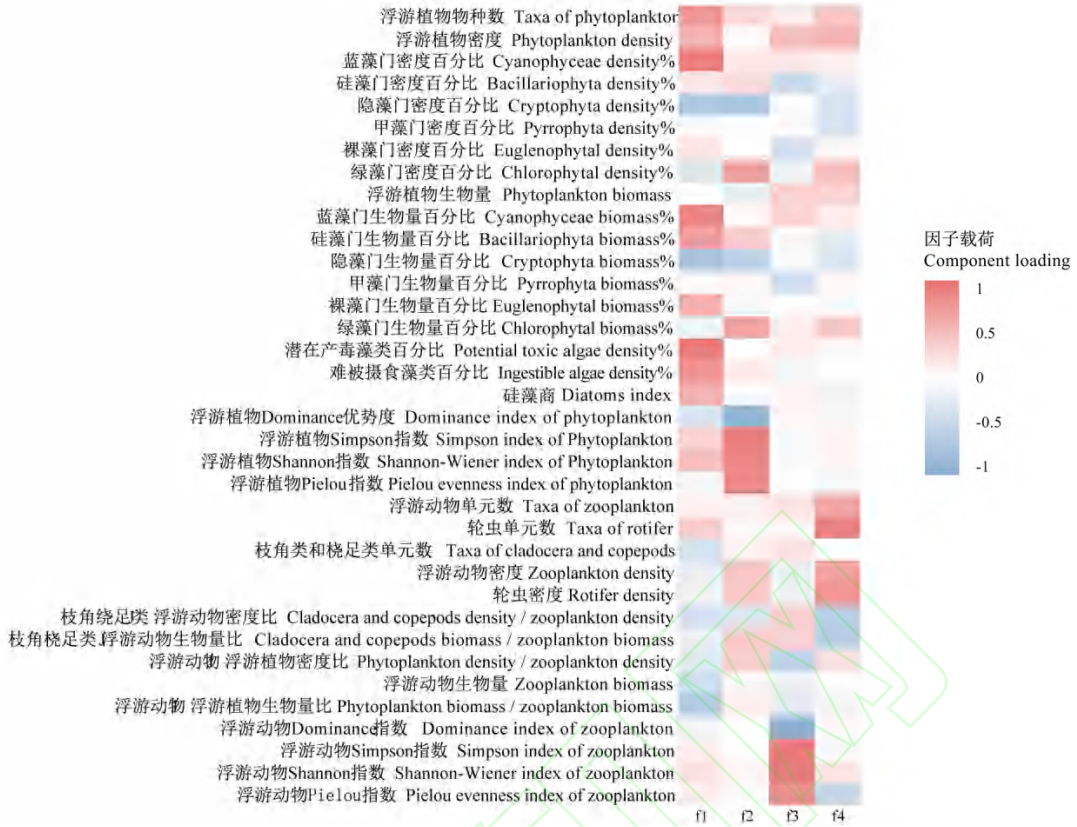


图4 正交旋转后因子载荷热图。因子载荷代表了各生物参数与公因子的相关性  
 Fig.4 Heatmap of the rotated component loading. Component loading represents the correlation between various biological metrics and common factors

2.4.2 各区域因子得分情况 因原始生物参数已经过标准化处理,所以因子得分可以直接反映不同月份与区域水生态状况的相对大小。各公因子得分和综合得分如图5所示。综合得分表现出5月高,1月、9月低的特点,这与水质分类结果一致。从空间上看,1月时北部与西部修复区水生态状况得分相近,东部修复区水生态状况得分最低;5月时北部修复区得分最高,东部修复区得分最低;9月时各区域得分均较低,其中湖区中部得分最低。从各公因子得分情况来看, f1、f2、f4 各月得分差异较大,松雅湖各区域 f1 在9月得分显著高于1月和5月得分, f2、f4 在5月得分显著高于1月得分。

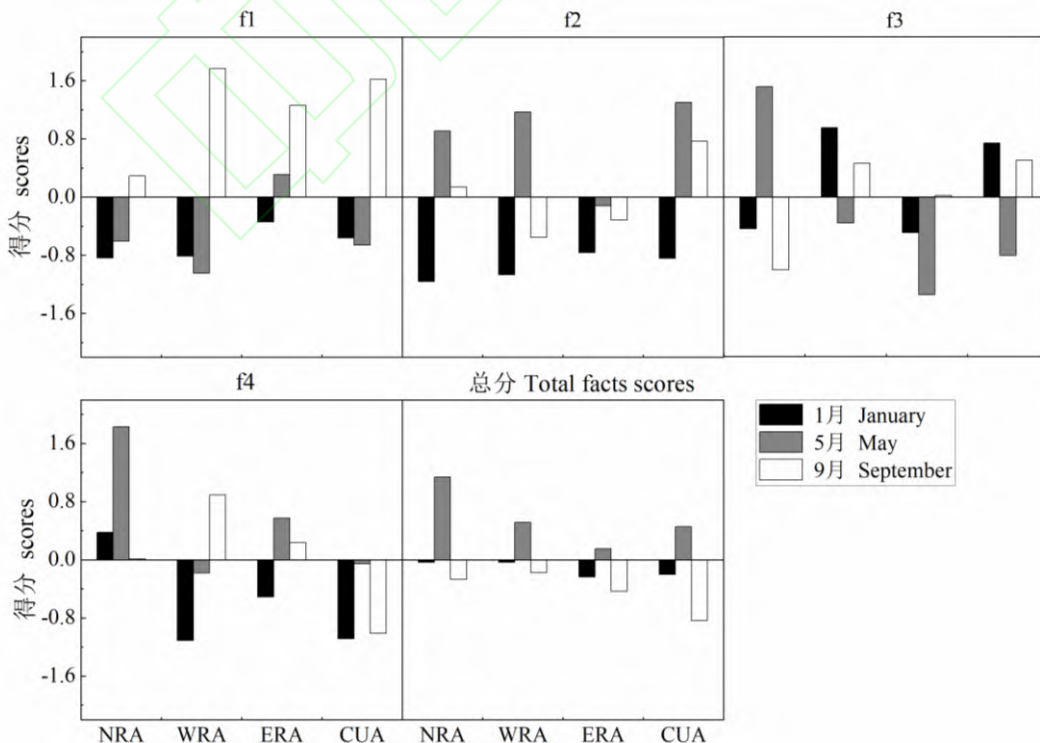


图5 松雅湖不同区域公因子得分情况。NRA: 北部修复区; WRA: 西部修复区; ERA: 东部修复区; CUA: 湖区中部未修复区

Fig.5 The factors scores in the different areas of Songya Lake. NRA: North restoration area; WRA: west restoration area; ERA: east restoration area; CUA: center unrestored area

## 3 讨论

### 3.1 松雅湖生态修复后水生态现状

进行生态修复前,松雅湖是一个富营养化程度较高的城市湖泊,在经过生态修复之后,2018年松雅湖全湖Ⅲ类水达标率已高达73%,东部修复区在调查期间均达Ⅲ类水标准,西部和北部修复区仅在1月时出现Ⅳ类和Ⅴ类,而湖区中部相对较差一些。总体来说,TP含量明显低于前期的调查结果(0.2 mg/L)<sup>[19]</sup>,TN含量也由前几年的不断上升趋势中出现下降,相比未进行修复的湖区中部,修复区内TP、Chl-*a*含量下降明显,透明度也大幅升高;未进行生态修复的湖区中部可能受春夏季节雨水淋溶作用影响,TP浓度随季节波动较大,TP含量在夏末秋初升高明显,而修复区的营养盐含量均相对稳定,说明生态修复措施有效改善了松雅湖的水质情况。三个修复区中北部修复区TN浓度仍相对较高,这可能与松雅湖周边人口较为密集,而北部与捞刀河相接外部氮源输入较多有关。

另外,浮游植物和浮游动物多样性指数评价显示松雅湖处于中度污染状态。同时,数据分析结果表明,尽管修复后水质条件得到一定程度的改善,但浮游生物多样性水平仍较低。不同月份之间污染程度差异较大,其中,1月时污染程度较为严重,这与此时松雅湖水体氮磷含量过高,水质较差(多为Ⅳ类、Ⅴ类)有关,水体受污染后,浮游植物群落敏感性物种种类会减少,而抗性强的种类大量增加,这会进一步导致生物多样性水平的下降<sup>[30]</sup>。此外,多样性指数指示修复区与未修复的湖区中部污染程度差异不大,与水质参数对水质的评价结果存在一定差异。

生态修复的目的不仅仅是改善水质,还旨在恢复受损的生态系统结构和功能<sup>[31, 32]</sup>。从生物完整性角度,本研究通过基于P-IBI的因子分析法对松雅湖水生态状况的分析,可以看出经过修复的区域水生态状况均优于未进行修复的湖区中部,说明生态修复对松雅湖浮游生物的完整性恢复起积极作用。9月时未修复的湖区中部水生态状况问题最为突出,水华发生风险(f1)高,轮虫丰富度(f4)水平低,两个公因子均指向夏末秋初时期松雅湖未修复区的富营养化问题,存在局部水华暴发的可能,这与生态修复前的调查结果一致。与生物多样性评价结果相似,修复区部分采样点存在生态状况与湖区中部差别不大甚至低于湖区中部的情况,但生态系统达到平衡是一个缓慢的过程,生物完整性相对理化指标来说,对水质改善的反应存在一定滞后性<sup>[25]</sup>,并不能以此否定生态修复的作用。另外,已有研究发现沉水植被修复和鱼类调控不仅可以改善水质,也可以改善浮游生物群落结构<sup>[33, 34]</sup>,因此在营养盐得到有效控制后,进一步实施以沉水植物恢复结合鱼类投放为主的生态修复措施对松雅湖生态结构的恢复具有借鉴作用。

### 3.2 生态修复后浮游生物的群落结构

一般来说,浮游生物群落结构会随环境因子的改变而产生相应的变化<sup>[35]</sup>。生态修复后松雅湖藻类主要以绿藻门、蓝藻门和硅藻门为主。藻类优势种月份变化差异明显,1月时优势种为隐藻门的尖蓝尾隐藻,5月时为绿藻门的双对栅藻,9月时为蓝藻门的伪鱼腥藻,这种更替模式符合隐藻-硅藻-绿藻-蓝藻-硅藻演替的PEG(Plankton Ecology Group)模式<sup>[36]</sup>。隐藻特殊的细胞膜和光合色素能帮助隐藻适应弱光和极端营养盐浓度环境<sup>[37]</sup>,而蓝藻属能在冬季低温水体中占绝对优势<sup>[38]</sup>,松雅湖所处地域为亚热带季风气候区,周年气温波动较大,1月平均水温6.37℃,为尖蓝尾隐藻的竞争优势创造了有利条件。另外,在千岛湖湖库下游湖泊区<sup>[39]</sup>和遵义市新建城市湿地公园<sup>[40]</sup>等水动力条件相对较小的研究区均发现优势种尖蓝尾隐藻,其水动力条件与本研究区的情况相似,因此,尖蓝尾隐藻的生长优势可能与松雅湖作为城市湖泊流通性较差有关。绿藻和蓝藻在合适的温度和营养盐条件下会迅速生长繁殖,其中双对栅藻和伪鱼腥藻分别适应高营养水体和透明度低的水体<sup>[35]</sup>,伪鱼腥藻对磷酸盐含量需求较大<sup>[41]</sup>,易在富营养水体形成优势<sup>[42]</sup>。研究者普遍认为优势种可以用于指示湖泊的污染状态<sup>[21]</sup>,松雅湖优势种的变化说明松雅湖富营养化程度从春季至夏末秋初逐渐加深,但从水质分析的结果来看,这种情况只在未修复的湖区中部表现明显,而中部区域水质受TP浓度影响较大,TP含量的升高可能是导致湖区中部富营养化,伪鱼腥藻数量激增的原因。另外,调查期间松雅湖游动物以轮虫为主,各月优势度最高的优势种均为针簇多肢轮虫,群落特征表现为以小型浮游动物为主。滤食藻的枝角类浮游动物比例较低可能导致浮游植物的牧食压力减弱,增加富营养化发生的可能<sup>[43]</sup>,而优势种针簇多肢轮虫主要出现在富营养水体<sup>[44]</sup>,指示松雅湖存在富营养化的风险,这与浮游植物优势种的指示趋势相一致。

### 3.3 公因子与水质因子的关系

相关性分析结果表明, 松雅湖水华发生风险(f1)与 Chl-a、COD<sub>Mn</sub> 含量成极显著正相关与 DO 成极显著负相关。有机质含量和叶绿素浓度是影响水华发生的重要因子, 有机质含量可为藻类提供了生长必须的物质, 但过量的有机物浓容易造成藻类大量繁殖, 加快消耗湖体中的溶解氧, 增加水华暴发的风险<sup>[45, 46]</sup>。

另外, 水温是影响松雅湖浮游植物生物多样性(f2)得分的重要因子。一般认为, 水温对藻类在水中的繁殖和分布起重要作用<sup>[47]</sup>, 大多数藻类随着水温的升高而快速生长和繁殖, 而水温的下降将导致藻类生长变缓或者停滞<sup>[48]</sup>, 但松雅湖浮游植物生物多样性(f2)得分随水温表现出升高后降低的规律, 在水温较高的 9 月该因子得分反而有所回落。松雅湖夏末秋初时生物多样性(f2)得分与水温波动的不一致性可能与 9 月时蓝藻大量繁殖, 抑制其他藻类有关<sup>[49]</sup>, 因此浮游植物多样性得分有所下降, 在南湾水库<sup>[17]</sup>也发现了类似规律。

除此之外, 研究发现 TP 与轮虫群落丰富度得分(f4)关系紧密。松雅湖 TP 与轮虫群落丰富度得分成负相关, 这与 Jeppesen 等(2011)对丹麦、爱沙尼亚、英国多个湖泊的研究结果相似, 轮虫的物种数量随 TP 浓度的增加明显下降, 丰富度发生了明显变化<sup>[50]</sup>。胡菊香等(2007)指出富营养化会降低轮虫均匀度和物种多样性<sup>[51]</sup>, 随着 TP 浓度升高, 敏感种因无法适应环境而消失, 耐污种迅速繁殖占据更多生态位, 造成群落的丰富度下降<sup>[52, 53]</sup>。调查期间, 松雅湖未修复的湖区中部 f4 得分均较低, 而湖区中部 TP 与 Chl.a 浓度均达到了 OECD 提出的富营养化水平, f4 公因子得分较低的区域恰好也是富营养化出现的区域, 这与表明轮虫丰富度(f4)对水生生态健康具有一定指示性。

## 4 结论

实施生态修复后, 2018 年松雅湖水质与前期相比得到明显改善, TN、TP 等含量明显下降, 调查期间 III 类水达标率达 73.3%。修复区的水生态状况优于未进行修复的湖区中部, 9 月时湖区中部水生态状况最差, 存在水华风险。为了进一步了解和改善松雅湖水质及水生态状况, 除了需要对松雅湖水质和生物情况进行长期监测外, 还需综合控制外源营养盐输入, 及时清除有机聚集体和水生植物残体控制内源污染释放, 使松雅湖湖区中部的富营养化趋势得到遏制。从评价方法来看, 基于 P-IBI 的因子分析评价法的结果与水质评价结果在时间与空间上总体相似, 有一定可信度, 且规避了参考区与受损区难以划分的情况, 具有一定的应用价值。但考虑到该方法的准确性依赖于生物参数的选择, 在今后的研究中还需要完善对耐污性、群落营养结构等相关参数的选择, 优化评价指标体系的构建。

### 参考文献 [References]

- 1 胡金, 万云, 洪涛, 钟明, 万安, 安树青. 基于河流物理化学和生物指数的沙颍河流域水生态健康评价[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21 (5): 783-790 [Hu J, Wan Y, Hong T, Zhong MW, An A. Shuqing aquatic ecological health assessment of Shaying River basin based on indices of physico-chemistry and aquatic organisms [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2015, 21 (5): 783-790]
- 2 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探[J]. 环境科学, 2014, 35 (1): 271-278 [Zhou XB, Zhang NH, Zhang Y, Niu ZC, Liu L, Yu HX. Preliminary study on the relationship between the water quality and the aquatic biological health status of Taihu Lake [J]. Chin J Environ Sci, 2014, 35 (1): 271-278]
- 3 Cairns J, McCormick P V, Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health [J]. Hydrobiologia, 1993, 263 (1): 1-44
- 4 夏会娟, 孔维静, 王汨, 徐宗学, 殷旭旺, 李学森. 北京市北运河水系水生植物群落结构与生物完整性[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (2): 260-268 [Xia HJ, Kong WJ, Wang M, Xu ZX, Yin XW, Li XS. Community structure and biotic integrity of aquatic plants along the North Canal in Beijing [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2018, 24 (2): 260-268]
- 5 Niu L, Li Y, Wang P, Zhang W, Wang C, Li J, Wu H. Development of a microbial community-based index of biotic integrity (MC-IBI) for the assessment of ecological status of rivers in the Taihu Basin, China [J]. Ecol Indic, 2018, 85: 204-213
- 6 Einheuser M D, Nejadhashemi A P, Wang L, Sowa S P, Woznicki S A. Linking Biological Integrity and Watershed Models to Assess the Impacts of Historical Land Use and Climate Changes on Stream Health [J]. Environ Manage, 2013, 51 (6): 1147-1163
- 7 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康[J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1481-1490 [Wang BX, Yang LF, Hu BJ, Shan LN. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25 (6): 1481-1490]

- 8 Cai W, Zhou Z, Xia J, Wang W, Dou C, Zeng Z. An advanced index of ecological Integrity (IEI) for assessing ecological efficiency of restoration revetments in river plain [J]. *Ecol Indic*, 2020, **108**
- 9 Loughheed V L, Chow-Fraser P. Development and use of a zooplankton index of wetland quality in the Laurentian Great Lakes basin [J]. *Ecol Appl*, 2002, **12** (2): 474-486
- 10 O'Connor R J, Walls T E, Hughes R M. Using multiple taxonomic groups to index the ecological condition of lakes [J]. *Environ Monit Assess*, 2000, **61** (2): 207-228
- 11 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林. 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2019, **40** (3): 1270-1279 [Su, Y, Xu YX; An WH, Wang YL, He ZC, Lou YW, Shen AL. Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. *Chin J Environ Sci*, 2019, **40** (3): 1270-1279]
- 12 Ruaro R, Gubiani E A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: Applications and main flaws [J]. *Ecol Indic*, 2013, **29**: 105-110
- 13 Wu Z, Kong M, Cai Y, Wang X, Li K. Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **658**: 395-404
- 14 Whitman R L, Nevers M B, Goodrich M L, Murphy P C, Davis B M. Characterization of Lake Michigan coastal lakes using zooplankton assemblages [J]. *Ecol Indic*, 2004, **4** (4): 277-286
- 15 Mischke U, Venohr M, Behrendt H. Using Phytoplankton to Assess the Trophic Status of German Rivers [J]. *Int Rev Hydrobiol*, 2011, **96** (5): 578-598
- 16 蔡琨, 秦春燕, 李继影, 张咏, 牛志春, 李旭文. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价——以 2012 年冬季太湖为例 [J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1431-1441 [Cai K, Qin CY, Li JY, Zhang Y, Niu ZC, Li XW. Preliminary study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for lake ecosystem health: a case of Taihu Lake in Winter, 2012 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (5): 1431-1441]
- 17 胡俊, 沈强, 陈明秀, 池仕运, 胡菊香. 基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价[J]. 生态学报, 2019, **39** (10): 3759-3769 [Hu J, Shen Q, Chen MX, Chi SY, Hu JX. Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (10): 3759-3769]
- 18 Cabecinha E, Cortes R, Cabral J A, Ferreira T, Lourenco M, Pardal M A. Multi-scale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs [J]. *Ecol Indic*, 2009, **9** (2): 240-255
- 19 张玮, 赵风斌, 徐后涛, 王丽卿. 松雅湖成湖初期夏季浮游植物群落及其与环境因子的关系 [J]. 生物学杂志, 2017, **34** (3): 47-52 [Zhang W, Zhao FB, Xu HT, Wang LQ. The community structures of phytoplankton from Lake Songya and its relationship to environmental factors in summer during the early completed period [J]. *J Biol*, 2017, **34** (3): 47-52]
- 20 任辉, 田恬, 杨宇峰, 王庆. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2017, **37** (22): 7729-7740 [Ren H, Tian T, Yang YF, Wang Q. Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (22): 7729-7740]
- 21 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第二版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. [Jin XC, Tu QY. Survey Standards of Lake Eutrophication: 2nd Edition [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990]
- 22 Xue Q, Rediske R R, Gong Z, Su X, Xu H, Cai Y, Zhao Y, Xie L. Spatio-temporal variation of microcystins and its relationship to biotic and abiotic factors in Hongze Lake, China [J]. *J Great Lakes Res*, 2018, **44** (2): 253-262
- 23 钟非, 刘保元, 贺锋, 梁威, 成水平, 左进城, 吴振斌. 水生态修复对莲花湖底栖动物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13** (1): 55-60 [Zhong F, Liu BY, He F, Liang W, Cheng SP; Zuo JC; Wu ZB. Effect of Aquatic Ecological Restoration on Zoobenthos Community of Lotus Lake [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (1): 55-60]
- 24 Kane D D, Gordon S I, Munawar M, Charlton M N, Culver D A. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health [J]. *Ecol Indic*, 2009, **9** (6): 1234-1247
- 25 黎明民, 骆鑫, 付家想, 蓝文陆. 基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价[J]. 中国环境监测, 2018, **34** (6): 113-121 [Li MM, Luo X, Fu JX, Lan WL. Study on Phytoplanktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI) Assessment for marine ecosystem health: a case of Beibu Gulf [J]. *Environ monit Chin*, 2018, **34** (6): 113-121]
- 26 Devlin M, Best M, Coates D, Bresnan E, O'Boyle S, Park R, Silke J, Cusack C, Skeats J. Establishing boundary classes for the classification of UK marine waters using phytoplankton communities [J]. *Mar Pollut Bull*, 2007, **55** (1-6): 91-103
- 27 Spatharis S, Tsiartsis G. Ecological quality scales based on phytoplankton for the implementation of Water Framework Directive in the Eastern Mediterranean [J]. *Ecol Indic* 2010, **10** (4): 840-847
- 28 王雨, 项鹏, 叶又茵, 林更铭, 杨清良, 林茂. 广西中华白海豚栖息地的浮游植物群落生态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (6): 1162-1169 [Wang Y, Xiang P, Ye YY, Lin GM, Yang QL, Lin M. Ecological characteristics of phytoplankton community in the habitat of *Sousa chinensis* at Sanniangwan Bay, Guangxi [J].

- 29 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, **40** (10): 1-16 [Du CL, Yang L, Zhao Y, Wu XM, Xu M, Wang LQ, Zhang W. Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. *Chin J Environ Sci*, 2019, **40** (10): 1-16]
- 30 吴卫菊, 王玲玲, 张斌, 闫春森. 梁子湖水生生物多样性及水质评价研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37** (10): 199-204 [Wu WJ, Wang LL, Zhang B, Yan CM. Investigation on biodiversity of aquatic organisms and water quality in Liangzi Lake [J]. *Environ Sci Tech*, 2014, **37** (10): 199-204]
- 31 余德琴, 郭匿春, 汤祥明, 过龙根. 无锡亲水河生态修复过程中浮游甲壳动物群落结构研究 [J]. 水生态学杂志, 2016, **37** (01): 70-77 [Yu Deqin; Guo Nichun; Tang Xiangming; Guo Longgen, Community structure of crustacean zooplankton in the Qinshui River during ecological restoration [J]. *J Hydroecol*, 2016, **37** (01): 70-77]
- 32 Palmer MA, Ambrose R F, Poff N L. Ecological theory and community restoration ecology [J]. *Restora Ecol*, 1997, **5** (4): 291-300
- 33 毛杰, 邢鹏, 刘正文. 惠州西湖沉水植被修复对浮游细菌群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2011, **32** (3): 26-31[Mao J, Xin P, Liu ZW. Impact of submerged vegetation restoration on the structure of bacterioplankton in Huizhou West Lake[J]. *J Hydroecol*, 2011, **32** (3): 26-31]
- 34 莫家勇, 钟萍, 刘正文. 生态修复对浅水湖泊沉积物磷形态特征及湖水磷浓度的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22** (02): 320-325 [Mo JY, Zhong P, Liu ZW. Effects of ecological restoration on the sediment phosphorus form and the water phosphorus concentration in a shallow lake[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (02): 320-325]
- 35 马欣洋, 李秋华, 陈倩, 何应, 袁振辉, 李红梅, 张华俊. 生态调控后贵州花溪水库浮游植物群落结构的变化特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 1-14 [Ma XY, Li QH, Chen Q, He Y, Yuan ZH, Li HM, Zhang HJ. Variation Characteristics and Influencing Factors of the Structure of a Phytoplankton Community after an Ecological Regulation in Huaxi Reservoir, Guizhou Province [J]. *Res Environ Sci*, 1-14 ]
- 36 Sommer U G Z M, Lampert W. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. *Environ Monit Assess*, 1986, **106** (4): 433-471
- 37 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. 环境科学, 2017, **38** (10): 4160-4168 [Sun X, Zhu GW, Yang WB, Zhu MY, Xu H, Guo CX, Yu L, Shi HC, Hang XY, Xu DF. Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China [J]. *Chin J Environ Sci*, 2017, **38** (10): 4160-4168]
- 38 吉正元, 刘绍俊. 抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价[J]. 中国环境监测, 2019, **35** (04): 67-77 [Ji ZY, Liu SJ. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in the Fuxian Lake [J]. *Environ monit Chin*, 2019, **35** (04): 67-77]
- 39 胡忠军, 莫丹玫, 周小玉, 任丽萍, 王金朋, 何光喜, 陈来生, 刘其根. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2017, **38** (5): 46-54 [Hu Zhongjun; Mo Danmei; Zhou Xiaoyu; Ren Liping; Wang Jinpeng; He Guangxi; Chen Laisheng; Liu Qigen. Spatial and Seasonal Distribution of Phytoplankton in Qiandao Lake and Relationship with Environmental Factors [J]. *J Hydroecol*, 2017, **38** (5): 46-54]
- 40 潘鸿, 韩晓玉, 蓝文朗, 唐宇宏, 许洁. 新建城市湿地公园浮游植物群落结构及富营养化评价 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2018, **36** (4): 376-379 [Pan H, Han XY, Lan WL, Tang YH, Xu J. Phytoplankton community structure and eutrophication evaluation of a newly built urban wetland park [J]. *J Hubei Univ Nationalities (Nat Sci)*, 2018, **36** (4): 376-379]
- 41 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄祺. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2015, **36** (3): 922-927 [Wang YF, Zhao XL, He BH, Huang Q. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake [J]. *Chin J Environ Sci*, 2015, **36** (3): 922-927]
- 42 陈飞, 唐鹤辉, 肖利娟, 彭亮, 林小涛. 亚热带城市中小型水库蓝藻种类组成及其群落季节动态[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (3): 595-601 [Chen F, Tang QH, Xiao LJ, Peng L, Lin XT. Species composition and seasonal community dynamics of cyanobacteria in small- and medium-sized reservoirs in subtropical cities of southern China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, **24** (3): 595-601]
- 43 Emir Akbulut N, Tavsanoglu U N. Impacts of environmental factors on zooplankton taxonomic diversity in coastal lagoons in Turkey [J]. *Turk J Zool*, 2018, **42** (1): 68-78
- 44 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态学报, 2019, **39** (20): 1-9 [Lin H, Wang Y, Li B. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (20): 1-9]
- 45 秦伯强, 高光, 朱广伟, 张运林, 宋玉芝, 汤祥明, 许海, 邓建明. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, **58** (10): 855-864 [Qin BQ, Gao G, Zhu GW, Zhang YL, Song YZ, Tang XM, Xu H, Deng JM. Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. *Sci Bull*, 2013, **58** (10): 855-864]
- 46 王淑芳. 水体富营养化及其防治[J]. 环境科学与管理, 2005, (6): 63-65 [Wang SF. Water eutrophication and its prevention, control and treatment [J]. *Environ Sci Manage*, 2005, **30** (6): 63-65]
- 47 Lopes M R M, Bicudo C E D, Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **542**: 235-247
- 48 白宁静, 陈丽, 蒋伊能, 张涛, 刘术, 刘晓曦, 李天丽, 赵帅营, 陈光杰. 阳宗海磷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析[J]. 湖泊科学, 2019,

- 
- 31 (1): 147-158 [Bai Ningjing; Chen Li; Jiang Yineng; Zhang Tao; Liu Shu; Liu Xiaoxi; Li Tianli; Zhao Shuaiying; Chen Guangjie. Spatio-temporal characteristics of phytoplankton distribution and the identification of driving factors in the arsenic-contaminated Yangzong Lake [J]. *J Lake Sci*, 2019, **31** (1): 147-158]
- 49 O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, Gobler C J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change [J]. *Harmful Algae*, 2012, **14**: 313-334
- 50 Jeppesen E, Nøges P, Davidson T A, Haberman J, Nøges T, Blank K, Lauridsen T L, Sondergaard M, Sayer C, Laugaste R, Johansson L S, Bjerring R, Amsinck S L. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD) [J]. *Hydrobiologia*, 2011, **676** (1): 279-297
- 51 胡菊香, 吴生桂, 陈金生, 胡望斌, 唐会元, 邹清. 巢湖富营养化对轮虫的影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2007, **30** (12): 16-8+68+118 [Hu JX, Wu SG, Lu JS, Hu WB, Tang HY, Zhou Q. Effect of Eutrophication on Rotifers in Chaohu Lake [J]. *Environ Sci Tech*, 2007, **30** (12): 16-18+68+118]
- 52 钱方平, 席贻龙, 温新利, 黄林. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2007, **15** (04): 344-355 [Qian FP, Xi YL, Wen XL, Huang L. Eutrophication impact on community structure and species diversity of rotifers in five lakes of Anhui [J]. *Biodivers Sci*, 2007, **15** (04): 344-355]
- 53 Ochocka A, Pasztaleniec A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions [J]. *Environ Monit Assess*, 2016, **188** (11): 622