

基于浮游植物生物完整性指数的福建省水库健康状态评价

王雪¹, 黄锦平¹, 苏玉萍^{1,2}, 陈颖欣¹, 钟启俊³, 郑洪萍⁴

(1. 福建师范大学环境与资源学院、碳中和现代产业学院, 福建 福州 350117; 2. 福建省河湖健康研究中心 (福建师范大学), 福建 福州 350007; 3. 福建省环境保护设计院有限公司, 福建 福州 350003; 4. 福建省环境监测中心站, 福建 福州 350003)

摘要:根据2021年夏季福建省24座重要饮用水水源地水库水生态调查结果,分析了浮游植物群落结构特征和水库营养状态,并采用浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比3个生物参数构建浮游植物生物完整性指数(P-IBI)评价了沙溪口水库和东张水库的健康状态。结果表明:2021年福建省大部分水库的浮游植物群落结构以蓝藻-绿藻-硅藻为主,其中以蓝藻门为优势藻的水库占比为60.9%;综合营养状态指数范围为24.3~51.7,平均值为40.3,水库富营养化程度较低,但个别水库仍存在富营养化的风险;沙溪口水库P-IBI综合得分为79.7,处于健康状态,东张水库P-IBI综合得分为59.0,处于亚健康状态;P-IBI评价结果与《2021年福建省河湖健康评估蓝皮书》中的多指标评价方法的结果一致性较好,基于浮游植物生物完整性指数的评价方法具有有效性和适用性。

关键词:浮游植物总密度;蓝藻门密度百分比;香农-维纳多样性指数;生物完整性指数;水库健康评价

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0054-07

Health status assessment of reservoirs in Fujian Province based on phytoplankton biotic integrity index//WANG Xue¹, HUANG Jinping¹, SU Yuping^{1,2}, CHEN Yingxin¹, ZHONG Qijun³, ZHENG Hongping⁴(1. College of Environmental and Resource Sciences, College of Carbon Neutral Modern Industry, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. Fujian Research Center for River and Lake Health (Fujian Normal University), Fuzhou 350007, China; 3. Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 4. Fujian Provincial Environmental Monitoring Central Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on the water ecology survey results of 24 major drinking water sources in Fujian Province in the summer of 2021, the characteristics of phytoplankton community structure and nutrient status of reservoirs were analyzed. The phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) was constructed using three biological parameters, total phytoplankton density, Shannon-Wiener diversity index, and proportion of cyanobacteria density to evaluate the health status of the Shaxikou Reservoir and the Dongzhang Reservoir. The results show that the phytoplankton community structure of most reservoirs in Fujian in 2021 was dominated by Cyanophyta-Chlorophyta-Bacillariophyta, and 60.9% of the reservoirs were dominated by Cyanobacteria. The comprehensive nutrient status index ranged from 24.3 to 51.7, with an average value of 40.3. The eutrophication degree of reservoirs was low, but some reservoirs still had the risk of eutrophication. The P-IBI score of the Shaxikou Reservoir was 79.7, which was in a healthy state, while the P-IBI score of the Dongzhang Reservoir was 59.0, which was in a sub-healthy state. The evaluation results of P-IBI are in good agreement with the results of the multi-index evaluation method in the *Blue Book of River and Lake Health Assessment of Fujian Province in 2021*. The evaluation method based on phytoplankton integrity index is effective and applicable.

Key words: total phytoplankton density; proportion of cyanobacteria density; Shannon-Wiener diversity index; index of biotic integrity; reservoir health assessment

基金项目:福建省高校产学研合作项目(SC-292);福建省水利科技项目(21NB000922,MSK202202);福建省水利厅项目(DH1408,DH-1558)

作者简介:王雪(1996—),女,硕士,主要从事河湖健康与生态修复研究。E-mail:741886503@qq.com

通信作者:苏玉萍(1972—),女,教授,博士,主要从事河湖健康与生态修复研究。E-mail:ypsu@fjnu.edu.cn

水库与人类的关系密切,一个健康的水库生态系统,既要保证水库生态系统的完整性,也要维持水库经济社会系统发展的可持续性,更要满足人居环境的生态性。近年来,水库生态系统受到人为干扰的压力日渐增强,构建简洁有效的评价方法和指标体系为水库生态环境保护和管理提供数据支撑显得尤为重要,应用生物完整性指数已成为定量评价水生生态健康状态的热门方法之一^[1]。Karr^[2]在1981年首次通过12个与物种组成和生态结构相关的鱼类群落特征指标评估了水体的健康状态,随后生物完整性评价方法的指示生物也扩展到了其他的生物类群,如鸟类^[3]、大型底栖动物^[4]和浮游植物^[5]等。

浮游植物生命周期短,分布范围广,对周围水体环境变化敏感迅速,在淡水生态系统中起着至关重要的作用,是表征生态系统状态的重要指标^[6-7]。构建浮游植物生物完整性指数(phytoplanktonic index of biotic integrity, P-IBI)评价体系,定量评价湖泊水体的综合状态,揭示在外界扰动下水生态环境的健康状态,是当前评价水生态环境状态最行之有效的办法之一^[8-9]。王芳等^[10]选择浮游植物生物量、密度和 Margalef 指数构建了铜陵西湖 P-IBI 评价体系;肖善势等^[11]以甲藻和隐藻丰度、硅藻相对丰度、硅藻商、硅藻和绿藻相对丰度和桥弯藻属相对丰度5个参数评价了钱塘江流域浙江段水生态系统健康状况。浮游植物群落结构的主要表征指标为多样性指数^[12],多样性指数通常由种类多寡、个体丰富度和均匀度决定^[13]。水体中存在较高密度的蓝藻是蓝藻水华形成的基础,蓝藻水华暴发对生态系统健康的危害最大^[14],所以蓝藻比例是评价水生态环境健康风险的重要指标。

我国水库的健康评价起初主要集中于评价水库水质^[15],之后逐渐采用生物指标的方法,通过分析水库中生物群落结构在时空上的变化来评价水库的健康状态^[16]。除了关注水质和生物指标之外,一些研究者还将研究指标集中到水文、物理结构和社会经济等方面^[17]。水库在水资源调蓄和饮用水供给方面发挥着举足轻重的作用,水库水生态环境健康状况愈来愈受到重视^[18],但常规评价方法指标数量较多,指标体系受周围环境影响较大。本文在对福建省主要水库开展水生态调查的基础上,构建基于浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比的 P-IBI,并将该指数应用于沙溪口水库和东张水库健康状态评价,以期为亚热带水库的保护和可持续开发利用提供參考。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

选择的24座重要饮用水水源地水库覆盖了福建省9个地市(图1)。水库类型包括大、中、小型水库,其中进行健康评估分析的沙溪口水库和东张水库均为大型水库。这24座重要水库的浮游植物群落结构大部分以硅藻门和绿藻门为主,总体生态状况良好,但个别水库以蓝藻门为优势种类。其中,东张水库浮游植物群落结构以蓝藻门为主,而沙溪口水库形成了以蓝藻-绿藻为主的群落结构。

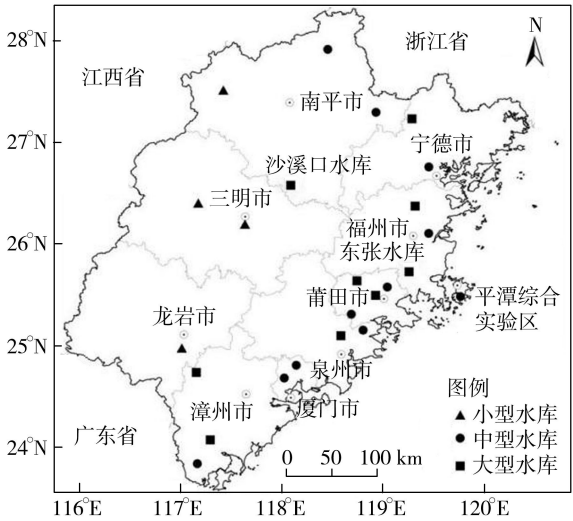


图1 福建省24座重要水库分布

1.2 样品采集与处理

于2021年8月采集了福建省24座水库水体理化指标和浮游植物数据。其中,沙溪口水库和东张水库分别增加了2021年4月采样分析。

浮游植物定量样品用有机玻璃采水器采集水深0.5 m处水样1 L,现场加入15 mL 鲁哥氏液并摇匀,带回实验室静置沉淀48 h后浓缩并定容至50 mL 供镜检。每个样品观察100个视野,计数3次取其平均值,同一样品计数结果误差在5%内说明有效。

使用便携式多参数水质仪现场测定水温、pH值、溶解氧(DO)浓度、透明度(SD)和电导率。取部分水样带回实验室于24 h之内进行叶绿素a(Chl-a)、总磷(TP)和总氮(TN)等指标的测定,各指标具体测定方法参考文献^[19-20],每个参数重复监测3次取平均值。

1.3 浮游植物多样性指数

采用香农-维纳多样性指数(H')、Magalef 丰富度指数(d)和 Pielou 均匀度指数(J)对水库浮游植物的多样性特征进行分析^[21]。

1.4 综合营养状态指数

通常以 Chl-a 浓度、TP 浓度、TN 浓度、透明度

(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})5项指标作为湖泊富营养化评价的统一指标^[22]。但是,由于不同单一因子在富营养化过程中所起的作用不同,所以综合营养状态指数(I_a)被广泛用于水体营养状态的评价^[23]。本文选用综合营养状态指数对水库富营养化进行评价,其计算公式参考文献^[24]。

1.5 P-IBI 评价方法

1.5.1 参考点与受损点的确定

确定参考点和受损点是浮游植物生物完整性评价的核心内容,综合营养状态指数能够较为客观地评价水环境的营养状态^[25]。本文通过综合营养状态指数来确定参照点和受损点。

1.5.2 候选生物参数的筛选与确定

P-IBI 评价体系的候选生物参数选择与水库综合营养状态指数相关性较高、能够对水环境变化作出反应的指标。采用箱线图法对各候选生物参数进行判别能力分析,比较各候选生物参数在参照点和受损点 25% ~ 75% 分位数的分布情况,即箱体的重叠程度,来确定不同生物指标的判别能力^[26],保留 IQ (interquartile range, 25% ~ 75% 分位数范围) 值大于或等于 2 的指标,即箱体无重叠或箱体有部分重叠但中位线不在对方箱体内。

1.5.3 P-IBI

由浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比构建 P-IBI,其计算公式为

$$I = w_1 C_1 + w_2 C_2 + w_3 C_3 \tag{1}$$

式中: I 为 P-IBI; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比的标准化赋值; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比的权重,其值由层次分析法确定。

2 结果与分析

2.1 24 座重要水库浮游植物现状

浮游植物鉴定结果显示,24 座水库共检出 7 个门类,分别是蓝藻门 (Cyanophyta)、绿藻门 (Chlorophyta)、硅藻门 (Bacillariophyta)、隐藻门 (Cryptophyta)、甲藻门 (Pyrrophyta)、裸藻门 (Euglenophyta) 和金藻门 (Chrysophyta)。浮游植物总密度范围为 $6.40 \times 10^4 \sim 1.52 \times 10^7$ 个/L,存在明显的地域差别,见图 2。

福建省大部分水库的浮游植物群落结构以蓝藻-绿藻-硅藻为主。其中,以蓝藻门为优势藻的水库占比为 60.9%,如东张水库、官昌水库、惠女水库、山仔水库和坂头水库等;沙溪口水库和古洋水库形成了以蓝藻-绿藻为主的群落结构;南一水库、东

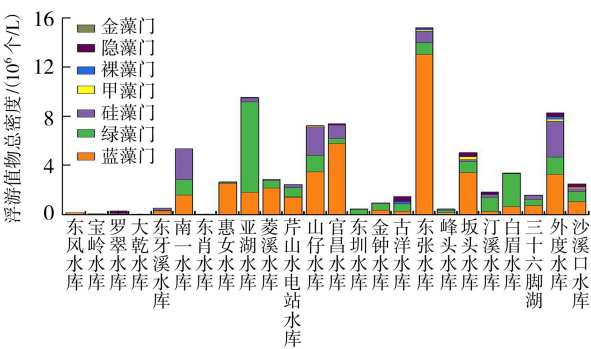


图2 2021 年 8 月福建省 24 座水库各门类浮游植物总密度
肖水库、东圳水库、金钟水库和外度水库形成了以蓝藻-绿藻-硅藻为主的群落结构;以绿藻门为优势门类的水库有汀溪水库和白眉水库;罗翠水库以隐藻门为优势门类。

2.2 24 座重要水库营养状态

24 座重要水库夏季的综合营养状态指数评价结果见图 3。由图 3 可知,2021 年 24 座重要水库的综合营养状态指数范围是 24.3 ~ 51.7,平均值为 40.3。根据营养状态分级标准^[27], $I_a < 30$ 属贫营养; $30 \leq I_a < 50$ 属中营养; $50 \leq I_a < 60$ 属轻度富营养; $60 \leq I_a < 70$ 属中度富营养; $I_a \geq 70$ 属重度富营养。大乾水库和东肖水库处于贫营养状态;沙溪口水库、外度水库等 19 座水库处于中营养状态;东张水库、峰头水库和山仔水库处于轻度富营养状态。已有研究表明,东张水库大多年份处于中营养状态^[28],山仔水库处于中-富营养化状态^[29-30]。总体上,24 座重要水库富营养化程度较低,但个别水库仍存在富营养化的风险。

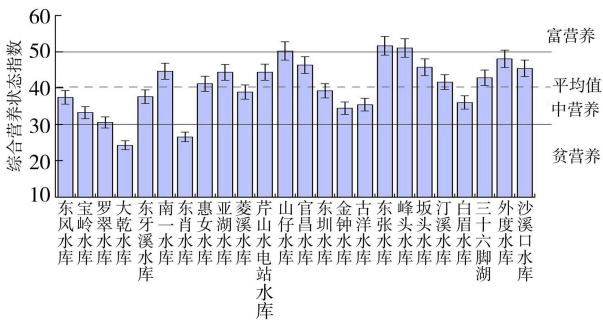


图3 2021 年夏季福建省 24 座水库综合营养状态指数

2.3 水库营养状态与浮游植物的关系

对 24 座重要饮用水源地水库的各浮游植物群落结构特征和综合营养状态指数进行 Pearson 相关性分析,结果见表 1。综合营养状态指数与蓝藻门密度和浮游植物总密度呈显著正相关关系 ($p < 0.01$, $n = 24$, 其中 p 为显著程度, n 为样本数量),说明水体的营养状态与浮游植物特征较为一致。浮游植物总密度和蓝藻细胞密度相关性极显著,说明福建省饮用水源地水库蓝藻门的优势度比较高,个

表 1 浮游植物群落结构特征与水库综合营养状态指数 Pearson 相关系数

参数	蓝藻门密度	蓝藻门密度百分比	绿藻门密度	绿藻门密度百分比	硅藻门密度	硅藻门密度百分比	浮游植物总密度	综合营养状态指数	香农-维纳多样性指数	Magalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数
蓝藻门密度	1										
蓝藻门密度百分比	0.396	1									
绿藻门密度	0.098	-0.363	1								
绿藻门密度百分比	-0.314	-0.739 **	0.568 **	1							
硅藻门密度	0.374	-0.099	0.135	-0.195	1						
硅藻门密度百分比	-0.052	-0.310	-0.131	-0.208	0.670 **	1					
浮游植物总密度	0.881 **	0.127	0.502 *	-0.058	0.574 **	0.060	1				
综合营养状态指数	0.588 **	0.052	0.267	0.034	0.533 *	0.191	0.676 **	1			
香农-维纳多样性指数	0.247	0.171	-0.324	-0.326	0.210	0.281	0.092	0.215	1		
Magalef 丰富度指数	0.160	0.053	-0.287	-0.100	-0.060	-0.013	-0.001	0.299	0.773 **	1	
Pielou 均匀度指数	0.142	0.196	-0.273	-0.424	0.412	0.464	0.067	0.147	0.858 **	0.576 *	1

注: *、** 分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上显著相关。
别水库存在蓝藻水华的风险。

营养盐是浮游植物生长的物质基础,不同类型的浮游植物对不同含量的营养盐响应不同,导致浮游植物不同群落之间在密度上会存在明显的差异^[31]。福建省夏季温度较高,促进了浮游植物的繁殖。随着水库水体中营养盐含量的增加,大部分水库水体中将逐渐形成蓝藻门占优势的群落结构。

2.4 P-IBI 评价体系构建及评价结果

2.4.1 参考点和受损点的确定

选取综合营养状态指数值小于 40 的水库作为参考点,其余的为受损点。根据图 3,确定大乾水库、东肖水库、罗翠水库、宝岭水库、金钟水库、古洋水库、白眉水库、东风水库、东牙溪水库、菱溪水库和东圳水库共 11 座水库作为参考点,东张水库、峰头

水库、山仔水库、惠女水库、汀溪水库、亚湖水库、芹山水电站水库、南一水库、坂头水库、官昌水库、外度水库、沙溪口水库和三十六脚湖共 13 座水库作为受损点。

2.4.2 候选生物参数的筛选与确定

选择浮游植物总密度、蓝藻门密度、蓝藻门密度百分比、绿藻门密度、绿藻门密度百分比、硅藻门密度、硅藻门密度百分比、香农-维纳多样性指数、Magalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数共 10 个指标作为候选生物参数,采用箱体图对这些参数进行判别能力分析(图 4),保留 IQ 值大于或等于 2 的参数,得到蓝藻门密度、蓝藻门密度百分比、硅藻门密度、浮游植物总密度和香农-维纳多样性指数 5 个生物指标。

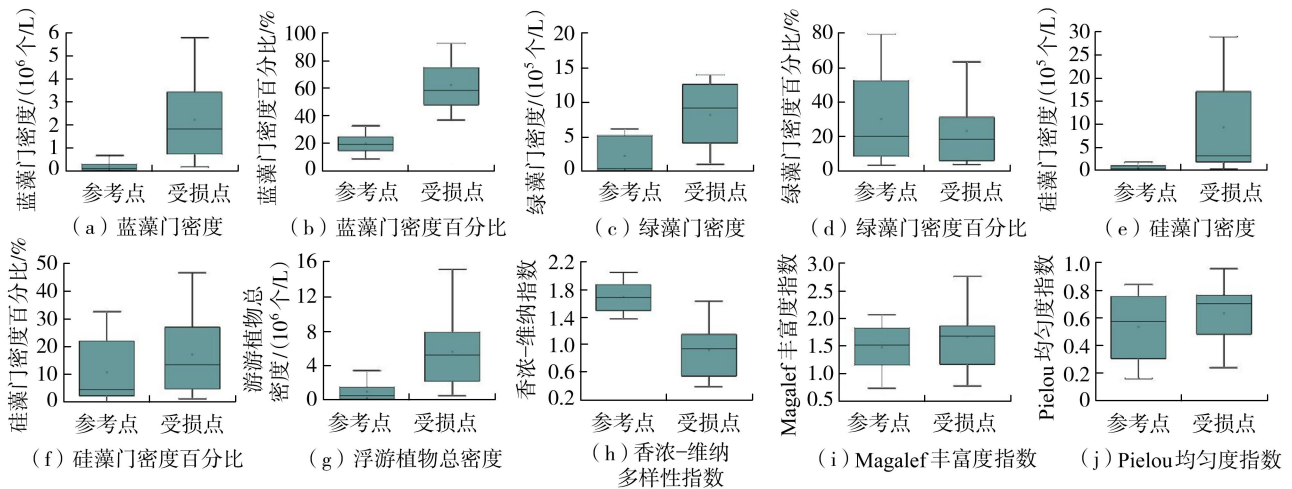


图 4 候选生物参数的箱体图

对 5 个符合条件的候选生物参数进行 Pearson 相关分析,在 $p<0.01$ 时,当 2 个候选生物参数之间的相关系数范围是 $0.5\leq R^2<0.8$ 时,说明 2 个生物指标中度相关,指标包含的生物信息有相似性,那么保留 2 个生物指标中的任意一个指标即可。5 个候选生物参数 Pearson 相关性分析(表 1)结果显示:浮游植物总密度与蓝藻门密度和硅藻门密度的相关系数分别为 0.881 和 0.574 ($n=24, p<0.01$),因浮游植物总密度常被用作判别水生态系统健康状态的指标,因此去除蓝藻门密度和硅藻门密度 2 个指标,保留浮游植物总密度。经过判别能力分析,最终保留浮游植物总密度、蓝藻门密度百分比和香农-维纳多样性指数 3 个参数。

2.4.3 评价标准的确定

参考相关文献^[32-33],以水利部《河湖健康评价指南(试行)》(2020 年)中的浮游植物密度评价赋分标准和 2021 年福建省内 24 座重要水库浮游植物密度和群落结构特征为依据,采用百分制对各生物参数进行连续赋分^[34],3 个生物参数的赋分标准见表 2。

表 2 生物参数赋分标准

赋分	浮游植物 总密度(万个/L)	香农-维纳 多样性指数	蓝藻门密度 百分比/%
100	≤20	>3.0	≤15
90	>20~50	>2.0~3.0	>15~25
80	>50~200	>1.0~2.0	>25~35
70	>200~300	>0.9~1.0	>35~45
60	>300~400	>0.8~0.9	>45~55
50	>400~500	>0.7~0.8	>55~65
40	>500~1000	>0.5~0.7	>65~70
30	>1000~3000	>0.3~0.5	>70~75
20	>3000~4500	>0.1~0.3	>75~85
10	>4500~5500	>0.05~0.1	>85~90
0	>5500	≤0.05	>90

参考水利部《河湖健康评价指南(试行)》(2020 年)和《2021 年福建省河湖健康评估蓝皮书》中水库健康综合指数分级,建立基于 3 个参数的 P-IBI 健康状态评价分级标准,85≤I<100 属非常健康;70≤I<85 属健康;55≤I<70 属亚健康;40≤I<55 属不健康;I<40 属劣态。

2.4.4 P-IBI 指标权重的确定

采用层次分析法确定 P-IBI 评价方法的指标权重。经过专家咨询后得出 3 个参数的重要性从高到低分别为浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数、蓝藻门密度百分比。根据相对重要性的比例标度表构造判断矩阵,采用方根法计算 3 个参数的权重,经一致性检验和正态分布检验后,确定浮游植物总密度、香农-维纳多样性指数和蓝藻门密度百分比的权重分别为 0.6、0.3 和 0.1。

2.4.5 P-IBI 评价结果

使用 P-IBI 对 2021 年沙溪口水库和东张水库的健康状态进行评价,结果如下:

a. 沙溪口水库 4 月和 8 月 P-IBI 分别为 81.7 和 77.7,P-IBI 综合得分为 79.7,沙溪口水库整体处于健康状态。沙溪口水库 4 月浮游植物总密度范围为 $1.23\times10^6\sim2.84\times10^6$ 个/L,平均值为 2.19×10^6 个/L,其中以金藻门的优势类群为主,占有藻类的 44.8%,优势藻种为金藻门中的黄群藻(*Synuraceae urelin Her*),蓝藻门占有藻类的 24.8%,其他藻占有藻类的 30.4%。沙溪口水库 8 月浮游植物总密度范围为 $1.57\times10^6\sim3.84\times10^6$ 个/L,平均值为 2.53×10^6 个/L。其中,蓝藻门占有藻类总数的 41.6%,优势藻种为蓝藻门中的边缘微囊藻(*Microcystis marginata (Menegh) Kute.*)和苍白微囊藻(*Microcystis pallida (Farlow) Lemm.*),绿藻门占有藻类总数的 32.9%,其他藻占有藻类的 15.5%。总体上,沙溪口水库浮游植物总密度不高,蓝藻个体微小,物种丰富度较高。

b. 东张水库 4 月和 8 月 P-IBI 分别为 61.5 和 56.4,P-IBI 综合得分为 59.0,东张水库整体处于亚健康状态。东张水库 4 月浮游植物总密度范围为 $1.14\times10^7\sim2.84\times10^7$ 个/L,平均值为 1.27×10^7 个/L,其中以蓝藻门的优势类群为主,占有藻类的 52.7%,优势藻种为蓝藻门鱼腥藻属(*Anabaena*),硅藻门占有藻类总数的 25.4%,绿藻门占有藻类总数的 20.2%,其他藻占有藻类的 1.7%。2021 年 8 月浮游植物总密度范围为 $1.23\times10^7\sim5.76\times10^7$ 个/L,平均值为 2.53×10^7 个/L。其中,蓝藻门占有藻类总数的 92.2%,优势藻种为蓝藻门鱼腥藻属(*Anabaena*)和微囊藻属(*Microcystis*),其他藻占有藻类的 7.8%。总体上,浮游植物总密度较大,蓝藻比例较高,物种丰富度不高,水库处于亚健康状态,有发生蓝藻水华的风险。

2.4.6 不同评估方法结果的比较

福建省 2020 年开展了全域性水库健康状态调查,构建了福建省水库健康评估指标体系,包括生态状态和社会服务功能两个亚目标层,水文水资源、物理结构、水质、生物和社会服务功能 5 个准则层共 12 个三级指标。采用《2021 年福建省河湖健康评估蓝皮书》中的多指标评价方法对 2021 年沙溪口水库和东张水库健康状态进行评价,健康综合得分分别为 80.8 和 66.8,评估结果分别为健康和亚健康。

沙溪口水库 2021 年 P-IBI 综合得分为 79.7,与《2021 年福建省河湖健康评估蓝皮书》中的多指标评价方法中生态状态得分 77.5 的误差为 2.8%,与

健康综合得分 80.8 的误差为 1.4%;东张水库 2021 年 P-IBI 综合得分为 59.0,与《2021 年福建省河湖健康评估蓝皮书》中的多指标评价方法中生态状态得分 57.6 的误差为 2.4%,与健康综合得分 66.8 的误差为 11.7%。对比结果表明本文构建的 P-IBI 评估结果较为准确可靠,有望用于快速评估亚热带水库的健康状态。

4 结 论

- a. 2021 年福建省 24 座重要水库的综合营养状态指数范围为 24.3 ~ 51.7,平均值为 40.3;浮游植物总密度范围为 $6.40 \times 10^4 \sim 1.52 \times 10^7$ 个/L,大部分水库的浮游植物群落结构以蓝藻-绿藻-硅藻为主。
- b. 水库综合营养状态指数与蓝藻门密度和浮游植物总密度显著正相关,说明水体的营养状态与浮游植物特征较为一致。
- c. 应用建立的 P-IBI 评价沙溪口水库和东张水库的健康状态,结果表明:2021 年沙溪口水库 P-IBI 综合得分 79.7,总体为健康状态;东张水库 P-IBI 综合得分 59.0,总体为亚健康状态。两个水库健康状态的 P-IBI 评价结果与《2021 年福建省河湖健康评估蓝皮书》中的多指标评价方法的结果一致性较好,表明本文的评价方法具有有效性和适用性。

参考文献:

[1] 苏瑶,许育新,安文浩,等. 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 Yao, XU Yuxin, AN Wenhao, et al. Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. Environmental Science,2019,40(3):1270-1279. (in Chinese))

[2] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981,6(6):21-27.

[3] 肖科沂,朱颖,周敏军,等. 基于鸟类生物完整性指数的苏州湿地健康评价[J]. 中国城市林业,2022,20 (1):114-119. (XIAO Keyi,ZHU Ying,ZHOU Minjun,et al. Health assessment of wetland in Suzhou based on bird-based index of biotic integrity [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2022, 20(1):114-119. (in Chinese))

[4] 王寿兵,隗琪,陈浩,等. 水体高 pH 值对滇池生态修复的潜在影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):26-31. (WANG Shoubing, WEI Qi, CHEN Hao, et al. Potential influence of high pH value on ecological restoration of Dianchi Lake[J]. Water Resources Protection,2023,39 (4):26-31. (in Chinese))

[5] 刘凌,朱燕,李博韬,等. 基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价[J]. 水资源保护,2020,36

(4):13-20. (LIU Ling, ZHU Yan, LI Botao, et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):13-20. (in Chinese))

[6] ABOIM Igor Lima, GOMES Doriedson Ferreira, MAFALDA JUNIOR Paulo Oliveira. Phytoplankton response to water quality seasonality in a Brazilian neotropical river [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2019,192(1):70.

[7] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. 水利水电科技进展,2016,36 (1):23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(1):23-30. (in Chinese))

[8] 余明峰,刘建中,夏丹,等. 基于浮游植物生物完整性的横岭湖丰水期生态系统健康评价[J]. 湖南林业科技, 2022,49(4):35-43. (YU Mingfeng, LIU Jianzhong, XIA Dan, et al. Ecosystem health evaluation in Hengling Lake based on the biological integrity of phytoplankton [J]. Hunan Forestry Science & Technology,2022,49(4):35-43. (in Chinese))

[9] ZHU Han,HU Xiaodong,WU Peipei,et al. Development and testing of the phytoplankton biological integrity index (P-IBI) in dry and wet seasons for Lake Gehu [J]. Ecological Indicators,2021,129(5):107882.

[10] 王芳,李永吉,马廷婷,等. 基于浮游植物的城市湖泊生态健康评价:以长江下游铜陵市西湖为例[J]. 湖泊科学,2022,34(6):1890-1900. (WANG Fang, LI Yongji, MA Tingting,et al. Ecological health assessment of urban lake based on phytoplankton: a case study of Lake Xihu, Tongling, lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (6):1890-1900. (in Chinese))

[11] 肖善势,郝雅宾,刘金殿,等. 应用生物完整性指数评价钱塘江流域—浙江段水生态系统健康[J]. 水产科学, 2021,40(5):740-749. (XIAO Shanshi, HAO Yabin, LIU Jindian,et al. Application of biological integrity index to evaluate the health of water ecosystems in the Qiantang River Basin Zhejiang Section [J]. Fisheries Science, 2021,40(5):740-749. (in Chinese))

[12] 杨洪泽. 基于大凌河流域水生生物指数调查与评估探究[J]. 黑龙江水利科技,2021,49(3):75-77. (YANG Hongze. Investigation and analysis of aquatic biodiversity index in Daling river basin [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49 (3):75-77. (in Chinese))

[13] 陈晓江,李兴,李佳佳. 乌梁素海浮游植物污染指示种及水质评价[J]. 生态科学,2021,40(3):231-237. (CHEN Xiaojiang, LI Xing, LI Jiajia. Pollution indicator

- species and evaluation of water quality in Wuliangshui Lake[J]. Ecological Science,2021,40(3):231-237. (in Chinese))
- [14] 顾苏莉,陈方,孙将陵. 太湖蓝藻监测及暴发情况分析[J]. 水资源保护,2011,27(3):28-32. (GU Suli, CHEN Fang, SUN Jiangling. Analysis of cyanobacteria monitoring and algal blooms in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2011,27(3):28-32. (in Chinese))
- [15] 程佳明,杨银科,王金星. 盐田正坑水库水源地水质分析与健康风险评价[J]. 水电能源科学,2022,40(7):76-79. (CHENG Jiaming, YANG Yinke, WANG Jinxing. Water quality analysis and health risk assessment of water source of Zhengkeng Reservoir in Yantian [J]. Water Resources and Power,2022,40(7):76-79. (in Chinese))
- [16] KATSIAPI M, MOUSTAKA-GOUNI M, SOMMER U. Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCoI: a new phytoplankton community index [J]. Ecological Informatics,2016,31:22-29.
- [17] 姚歌,孙雪岚,陈少冰. 基于云模型的汾河水库健康评价[J]. 人民黄河,2020,42(4):30-35. (YAO Ge, SUN Xuelan, CHEN Shaobing. The health evaluation of Fenhe Reservoir based on cloud model[J]. Yellow River,2020,42(4):30-35. (in Chinese))
- [18] 梁舒汀,王菲,吴丹,等. 基于大型底栖动物完整性指数的海河流域典型水库水生态健康评价 [J]. 生态环境学报,2023,32(8):1457-1464. (LIANG Shuting, WANG Fei, WU Dan, et al. Ecological health assessment of reservoirs based on macrobenthic index of biotic integrity in Haihe Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences,2023,32(8):1457-1464. (in Chinese))
- [19] 崔丽娜,徐韧. 两台多参数水质仪在线监测比对结果分析及方法评估[J]. 海洋环境科学,2019,38(4):634-638. (CUI Lina, XU Ren. The comparative result analysis and method evaluation of two multiple parameters of water quality on-line monitoring[J]. Marine Environmental Science,2019,38(4):634-638. (in Chinese))
- [20] 王顺天,雷俊山,贾海燕,等. 三峡水库浮游植物群落特征及水体富营养化评价[J]. 三峡生态环境监测,2020,5(1):32-41. (WANG Shuntian, LEI Junshan, JIA Haiyan, et al. Characteristics of phytoplankton community and eutrophication evaluation of the Three Gorges Reservoir[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges,2020,5(1):32-41. (in Chinese))
- [21] 王雪,张虹,林志蓉,等. 东张水库夏季浮游植物特征与健康评价[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2022,38(5)18-25. (WANG Xue, ZHANG Hong, LIN Zhirong, et al. Phytoplankton characteristics and health evaluation of Dongzhang Reservoir in summer[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022,38(5):18-25. (in Chinese))
- [22] 李娜,周绪申,孙博闻,等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,2020,32(3):772-783. (LI Na, ZHOU Xushen, SUN Bowen, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Science,2020,32(3):772-783. (in Chinese))
- [23] 邹伟,朱广伟,蔡永久,等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J]. 湖泊科学,2020,32(1):36-47. (ZOU Wei, ZHU Guangwei, CAI Yongjiu, et al. Limitations and improvement suggestions of the Comprehensive Nutritional Status Index (TLI) in the evaluation of lakes and reservoirs in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Journal of Lake Science,2020,32(1):36-47. (in Chinese))
- [24] ZHI Guozheng, CHEN Yaoning, LIAO Zhenliang, et al. Comprehensive assessment of eutrophication status based on Monte Carlo-triangular fuzzy numbers model: site study of Dongting Lake, Mid-South China [J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(12):1011.
- [25] 钱畅,汪晓东,罗芳,等. 营养状态指数在长江下游小型浅水湖泊富营养化水平评价中的局限及改进建议[J]. 湖泊科学,2023,35(4):1173-1184. (QIAN Chang, WANG Xiaodong, LUO Fang, et al. Application limitations and improvement recommendations of trophic state indices in the eutrophication level assessment of small shallow lakes along the lower reach of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(4):1173-1184. (in Chinese))
- [26] 王霞,郭凯娟,李晓旭,等. 淀山湖浮游植物生物完整性指数的构建及水生态健康评价[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),2021,50(1):39-49. (WANG Xia, GUO Kaijuan, LI Xiaoxu, et al. Construction of phytoplanktonic index of biotic integrity and evaluation of water ecological health in Dianshan Lake, China [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2021,50(1):39-49. (in Chinese))
- [27] 彭娟,朱丹丹,王丑明. 2020 年洞庭湖水生生物群落结构特征及水生态评价研究[J]. 水利水电快报,2023,44(11):110-114. (PENG Xian, ZHU Dandan, WANG Chouming. Community structure of hydrobiology and water ecological assessment of Dongting Lake in 2020[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House,2023,44(11):110-114. (in Chinese))
- [28] 翁玉兰. 福清市东张水库水环境质量现状调查及控制对策[J]. 生物化工,2020,6(5):128-131. (WENG Yulan. Current status of lake and reservoir water environment quality in Fuqing City[J]. Biological Chemical Engineering,2020,6(5):128-131. (in Chinese))

(下转第 86 页)

- (5): 95-97. (YE Chenmao, WANG Fei. Optimum design for cross-section of gravity retaining wall based on reliability[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(5): 95-97. (in Chinese))
- [5] 陈栋梁, 党进谦. 重力式挡土墙的截面优化设计研究[J]. 岩土力学, 2007(9): 1969-1973. (CHEN Dongliang, DANG Jinqian. Study on optimum cross-section of gravity retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(9): 1969-1973. (in Chinese))
- [6] DAS M R, PUROHIT S, DAS S K. Multi-objective optimization of reinforced cement concrete retaining wall [J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(4): 354-368.
- [7] ZHU Y, TANG H. Automatic damage detection and diagnosis for hydraulic structures using drones and artificial intelligence techniques [J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 615.
- [8] 张建华, 李静, 林潮宁, 等. U型渡槽参数化有限元建模与智能优化设计研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 75-81. (ZHANG Jianhua, LI Jing, LIN Chaoning, et al. Study on parametric finite element modelling and intelligent optimal design of U-shaped aqueduct [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 75-81. (in Chinese))
- [9] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python语言在Abaqus中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 张威. 基于ABAQUS二次开发的框架结构有限元分析平台的设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [11] SRINIVAS N, DEB K. Multi objective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.
- [12] 王勇庆. 改进的含约束NSGA-II算法在货位多目标优化问题中的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [13] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [14] FONSECA C M, PAQUETE L, LOPEZ-IBANEZ M, et al. An improved dimension-sweep algorithm for the hypervolume indicator [C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 2006: 1157-1163.

(收稿日期: 2023-03-12 编辑: 骆超)

(上接第 60 页)

- [29] 苏玉萍, 赖寿辉, 林佳, 等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3107-3113. (SU Yuping, LAI Shouhui, LIN Jia, et al. Research on the limiting nutrient in Shanzi Reservoir, an eutrophied drinking water source [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3107-3113 (in Chinese))
- [30] 翁笑艳, 杨芳, 林志鹏. 福建省山仔水库水质现状及演变趋势分析[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(8): 114-117. (WENG Xiaoyan, YANG Fang, LIN Zhipeng. Water quality evolution of Shanzi Reservoir [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(8): 114-117. (in Chinese))
- [31] 代亮亮, 吕敬才, 周维成, 等. 3种不同营养水平的河流浮游植物群落结构及其与环境因子的相关性[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1242-1250. (DAI Liangliang, LYU Jingcai, ZHOU Weicheng, et al. Phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors in three rivers with different nutrition levels [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1242-1250. (in Chinese))
- [32] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物生物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 501-508. (MA Tingting, FAN Yamin, LI Kuanyi, et al. Ecological health assessment of main estuaries of Lake Taihu based on phytoplankton index of biotic integrity [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4): 501-508. (in Chinese))
- [33] WU Zhaoshi, KONG Ming, CAI Yongjiu, et al. 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]. Science of The Total Environment, 2019, 658: 395-404.
- [34] 赵晓晨, 张亚娟, 陈基培. 韩江流域河流健康评估中新旧方法差异分析[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(11): 33-42. (ZHAO Xiaochen, ZHANG Yajuan, CHEN Jipei. Differences in new and old methods for river health assessment in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(11): 33-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-01-12 编辑: 雷燕)