

白雪兰, 范泽宇, 徐聚臣, 等. 洩水水库浮游生物群落结构特征及水质评价[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 118-127.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.015

洩水水库浮游生物群落结构特征及水质评价

白雪兰¹, 范泽宇¹, 徐聚臣¹, 林深¹, 马帅兵¹,
黄路全¹, 李金能¹, 侯杰^{1,2}, 何绪刚^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070;

2. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070

摘要 为阐明洩水水库浮游生物的群落结构特征、了解库区水质现状, 于2021年7月(夏)、11月(秋)、2022年1月(冬)和3月(春)调查了洩水水库浮游生物群落结构和水质理化指标。结果显示: 浮游植物有75属129种, 以绿藻门为主; 浮游动物(轮虫和浮游甲壳动物)23属31种, 以轮虫为主。浮游生物的优势物种主要为链形小环藻(*Cyclotella catenata*)、双对栅藻(*Scenedesmus biguga*)、湖泊伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena limnetica*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、无节幼体等。浮游植物和浮游动物密度及其生物量年均值分别为 1.656×10^7 、 1.75×10^2 ind./L和6.32、1.92 mg/L。在空间分布上, 浮游生物的丰度和生物量由上游河道型库区至下游敞水区大致呈逐渐降低的特点。典范对应分析(CCA)结果显示: $PO_4^{3-}-P$ 、WT、pH值和DO均对洩水水库中浮游生物群落的生态分布有重要影响, 且 $NO_3^- - N$ 和Cond仅对浮游植物影响较大。根据物种多样性评价, 洩水水库浮游生物群落结构较稳定, 库区水质处于中营养水平。

关键词 洩水水库; 浮游生物; 群落结构; 环境因子; 水质评价; 生物多样性; 水生态安全; 渔业资源评估; 水生态环境评价

中图分类号 S932.8; X824 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0118-10

浮游生物是水生食物网中物质循环和能量流动的基础, 是衔接上行效应和下行效应的关键枢纽^[1]。特别是在湖库水体, 浮游植物作为初级生产力的主要贡献者, 其种类组成、群落结构及资源存量直接影响水域生态系统的功能^[2-3]; 浮游动物既作为消费者捕食浮游植物, 同时又作为鱼类和无脊椎动物的饵料被捕食^[4], 其在湖库初级生产力水平调节及食物链能量传递方面占据举足轻重的地位^[5]。此外, 浮游生物能够对水温、溶解氧和营养盐等环境变化迅速做出响应, 其丰度、生物量变化以及多样性特征作为反映水体质量的重要指征已在水生态系统广泛应用^[5]。因此, 研究浮游生物群落特征及水质状况, 对了解水生态系统的基本结构及确保水生态安全具有重要指导意义。

洩水水库位于湖北省松滋市洩水镇, 水库正常水面面积37 km², 总库容 5.12×10^8 m³, 是一座以防洪、灌溉为主, 兼有供水、养殖、发电等综合功能的大型水库^[6]。水库水质在2010年以前曾处于国家地表

水Ⅱ类标准甚至接近Ⅰ类; 2010年以后, 周边工业、农业、畜牧业的发展以及大水面围栏养殖的迅猛兴起使得水质急剧恶化, 例如库汉处总磷浓度超标, 库心和坝前取水口的总氮水平由国家地表水Ⅲ类转为Ⅳ类、Ⅴ类, 甚至达到劣Ⅴ类; 2015年大水面围栏养殖逐渐清退, 水质状况仍不见好转^[7]。近年来, 洩水水库出现了浮游植物短期内快速增殖、偶发水色异常等现象, 由于研究的缺乏, 对洩水水库水质及其浮游生物群落的时空分布格局尚不清楚。因此, 笔者对洩水水库的水质现状以及浮游生物的多样性进行了深入细致的研究, 以期为该水库及类似丘陵山谷型水库的生态修复工作提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

本研究依据库区水体的特征设S1~S8共8个采样点(图1), 其中桃花岛(S1)是上游河水流进库区的唯一入口, 大堤口(S8)靠近水坝, 青潭湾(S2)、潘家

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900601-02); 中央高校基本科研业务费专项(2662020SCP001)

白雪兰, E-mail: 2877316374@qq.com

通信作者: 何绪刚, E-mail: xgh@mail.hzau.edu.cn

咀(S3)和马达山(S4)位于库区干流,蔡家湾(S5)、华严寺(S6)和碧岛山(S7)位于库区支流。于2021年7月(夏)、11月(秋)、2022年1月(冬)和3月(春)进行4个季节样品采集。使用Arcgis 10.2软件绘制库区采样图。

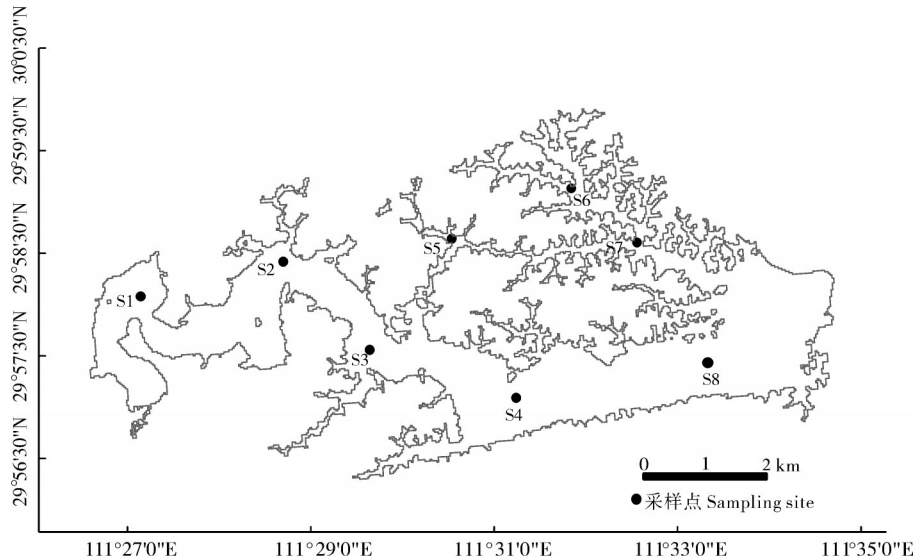


图1 洩水水库浮游生物采样点分布

Fig.1 Plankton sampling sites of the Weishui Reservoir

1.2 样品采集与处理

根据浮游生物调查规范^[8],浮游植物和轮虫的定性样品用25号浮游生物网采集,浮游甲壳动物的定性样品用13号浮游生物网采集,采集时浮游生物网在水面呈“∞”型拖5 min后转移至样品瓶,滤液用4%甲醛溶液固定。浮游植物和轮虫的定量样品采集时,将各采样点表层和底层水样等量混合取1 L装瓶,现场滴加15 mL鲁哥试剂固定,静置48 h浓缩至30 mL;浮游甲壳动物的定量样品采集时,将各采样点表层和底层各取10 L水样通过25号浮游生物网过滤后转移至瓶中,现场滴加4%甲醛溶液固定,静置24 h定容至20 mL。实验室内镜检时充分摇匀溶液,浮游植物与浮游动物的丰度分别用0.1 mL和1 mL计数框进行鉴定计数^[9-11],并参照相关文献计算生物量^[12]。

水温(water temperature, WT)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、电导率(conductivity, Cond)和pH值利用YSI多参数水质监测仪现场测定,水体透明度(secchi depth, SD)采用赛氏盘现场测量,总氮(total nitrogen, TN)、氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总磷(total phosphorus, TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和叶绿素a(Chl.a)参照文献^[13]测定。

1.3 数据处理与分析

1) 多样性指数和营养状态评价。浮游生物优势度指数(Y)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Mar-

galef丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)的计算公式参照文献^[3]。水体营养状态采用浮游植物和浮游动物的 H' 、 D 和 J 指数评价^[14-15],其中 H' 为2~3、 D 为2~4、 J 为0.3~0.5时,水体处于中营养状态。

2) 统计分析。通过Excel 2021和OriginPro 2021软件对数据进行统计和分析。使用SPSS 26.0软件判断数据的正态性,使用Canoco 4.5软件进行去趋势对应分析(detrended correspond analysis, DCA)筛选出可以有效解释水环境与浮游生物丰度关系的模型。选择单峰模型-典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)探讨洩水水库水环境参数与浮游生物的关系。

2 结果与分析

2.1 水体环境参数

洩水水库WT变化范围为8.2~29.1 °C;SD分布在0.2~2.7 m,变化幅度较大;DO和Chl.a含量的季节变化基本一致,春季较低,其他三季稍高;水体pH值呈弱碱性,全年变化不大;水深从入库至出库呈上升趋势,变化范围为1.5~27.2 m,平均深度为12.4 m。Cond范围为186.3~278.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$,TDS范围为139.1~209.3 mg/L。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN的含量均表现出夏季丰水期高、冬季枯水期低的趋势; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和TP的含量在夏季时最低,但最

高值出现的时间不一致(表1)。根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002),仅DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水平达到地表水Ⅱ类标准,TP水平达到Ⅱ~Ⅲ类水标准,TN水平大部分超出Ⅳ类水标准。

表1 淦水水库环境参数的季节变化(平均值±标准差)

Table 1 Seasonal variation of environmental parameters in the Weishui Reservoir (Mean±SD)

环境参数 Parameter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
水温/°C WT	16.5±1.1	28.6±0.4	17.2±0.7	10.1±0.8
透明度/m SD	1.7±0.8	1.4±0.8	1.0±0.3	1.2±0.2
溶解氧/(mg/L) DO	5.4±1.2	8.5±1.8	9.2±0.5	8.8±1.0
pH	8.4±0.1	8.8±0.2	8.3±0.1	8.7±0.1
深度/m Depth	11.2±6.1	14.8±3.9	11.5±5.5	12.3±7.3
电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$) Cond	236.5±16.4	246.1±10.4	212.3±20.7	197.1±6.3
总溶解性固体/(mg/L) TDS	183.5±9.5	149.7±6.1	162.5±18.5	179.3±7.4
叶绿素 a/($\mu\text{g}/\text{L}$) Chl.a	7.3±4.5	16.5±12.7	17.4±3.3	10.1±3.2
氨态氮/(mg/L) $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.30±0.06	0.17±0.09	0.18±0.05	0.36±0.1
硝态氮/(mg/L) $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.53±0.21	1.09±0.10	0.64±0.56	0.40±0.12
总氮/(mg/L) TN	1.05±0.37	1.58±0.09	1.26±0.49	1.00±0.26
正磷酸盐/(mg/L) $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.030±0.002	0.005±0.004	0.020±0.002	0.033±0.003
总磷/(mg/L) TP	0.06±0.01	0.03±0.02	0.04±0.03	0.04±0.01

2.2 浮游生物种类组成

浮游植物共75属129种,种类以绿藻门为主,共54种,占浮游植物总种数的41.86%;其次是硅藻门和蓝藻门,分别为29、28种,各自占总种数的22.48%、21.70%。浮游植物在全年没有共同优势种,季节变化显著,其中颗粒直链藻(*Melosira granulata*)仅在春季是优势种,湖泊伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena limnetica*)是除夏季之外其他三季的共同优势种,小球藻(*Chlorella vulgaris*)是除秋季之外其他三季的共同优势种,小型色球藻(*Chroococcus minor*)、居氏腔球藻(*Coelosphaerium kuetzingianum*)、固氮鱼腥藻(*Anabaena azotica*)等则是夏季特有的优势种(表2)。

浮游动物共23属31种,其中轮虫18种、枝角类6种、桡足类7种,分别占总种数的58.06%、19.35%和22.58%。浮游动物优势种在夏季时以枝角类和桡足类为主,其他三季以轮虫为主,全年都占优势的是无节幼体(表2)。

2.3 浮游生物丰度和生物量的季节变化

浮游植物的丰度变化范围为(4.59~36.59)×10⁶ ind./L,平均值为1.656×10⁷ ind./L。硅藻门是春季丰度的主要组成,占总丰度的54.38%;夏季硅藻门丰度下降,甲藻门的丰度明显增加;蓝藻门在秋季和冬季占据绝对优势,分别占总丰度的92.25%、78.48%。浮游植物生物量全年变化范围为3.36~11.78 mg/L,平均值为6.32 mg/L。生物量在夏季最大,主要以甲藻门和绿藻门为主,二者占总生物量的

67.43%;其他三季的生物量较为接近,但春季以硅藻门为主,秋季以蓝藻门为主,冬季各门类分布则较平均(图2A、2B)。

浮游动物的丰度变化范围为(1.43~2.04)×10² ind./L,平均值为1.75×10² ind./L。丰度在夏季最小时以桡足类为主,占总丰度的68.41%;在春季最大时以轮虫为主,占总丰度的94.21%;同时,秋季和冬季的轮虫也占绝对优势。浮游动物生物量变化范围为0.41~5.69 mg/L,平均值为1.92 mg/L。其中,桡足类和枝角类是全年生物量的主要贡献者(图2C、2D)。

2.4 浮游生物丰度和生物量的空间变化

各采样点的浮游植物丰度变化范围为(13.89~18.52)×10⁶ ind./L,表现为上游河道型库区高、中心区逐渐降低和下游敞水区骤增的特点,蓝藻门是各采样点丰度的主要贡献者,硅藻门次之;浮游植物生物量变化范围为3.81~11.78 mg/L,表现为上游河道型库区至敞水区逐渐降低的特点,最高值和最低值分别出现在S1、S8,蓝藻门、硅藻门和绿藻门对生物量的贡献率总和达58.03%~82.03%(图3A、3B)。

浮游动物丰度范围为(0.92~3.32)×10² ind./L,表现为上游河道型库区高、敞水区逐渐降低和中心区S5出现显著升高的特点,最高值和最低值分别出现在S1、S4,枝角类的占比均较低;浮游动物生物量变化范围为1.17~3.29 mg/L,空间分布特征与丰度相似,桡足类对生物量的贡献率超过71.89%(图3C、3D)。

表2 洩水水库不同季节浮游生物优势种
Table 2 Predominant species of plankton in different seasons in the Weishui Reservoir

编号 Code	优势种 Dominant species	优势度 Dominance index			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
sp1	湖泊伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena limnetica</i>	0.052	—	0.708	0.536
sp2	坑形细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya foveolaria</i>	0.099	—	0.119	—
sp3	小型色球藻 <i>Chroococcus minor</i>	—	0.035	—	—
sp4	巨氏腔球藻 <i>Coelosphaerium kuetzingianum</i>	—	0.024	—	—
sp5	固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	—	0.029	—	—
sp6	中华尖头藻 <i>Raphidiopsis sinensia</i>	—	—	0.025	0.057
sp7	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.160	—	0.035	—
sp8	克罗顿脆杆藻 <i>Fragilaria crotonensis</i>	—	0.048	—	—
sp9	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i>	0.161	0.023	—	—
sp10	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	0.026	—	—	—
sp11	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.037	0.042	—	0.053
sp12	实球藻 <i>Pandorina morum</i>	—	0.021	—	—
sp13	双对栅藻 <i>Scenedesmus biguga</i>	—	0.069	—	—
sp14	啃蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	—	0.036	—	—
sp15	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	—	0.029	—	0.024
sp16	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.801	—	0.370	0.765
sp17	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.105	—	—	0.028
sp18	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella ualga</i>	—	—	0.246	—
sp19	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	—	—	0.038	—
sp20	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	—	0.110	—	—
sp21	短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	—	0.045	—	—
sp22	无节幼体 Nauplius	0.021	0.307	0.127	0.071
sp23	桡足幼体 Copepodid	—	0.120	0.046	—
sp24	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckartii</i>	—	0.144	—	—
sp25	汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	—	0.058	—	—

注:“—”表示该物种不是该季节的优势物种。Note:“—” indicates that this species is not the dominant specie in this season.

2.5 浮游生物与水环境的关系

用浮游生物优势种的丰度值为响应变量进行DCA分析,物种及编号见表2。结果显示:排序轴长度分别为3.5和3.1,选择单峰模型-典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)探讨洩水水库水环境参数与浮游生物的关系。浮游植物的CCA分析结果如图4A所示,轴一和轴二累计解释物种信息量达76.23%(表3)。第一排序轴与WT、NO₃⁻-N和pH呈正相关(r 值分别为0.76、0.74、0.71, $P < 0.01$),与PO₄³⁻-P呈负相关($r = -0.80, P < 0.01$);第二排序轴与DO呈最大正相关性($r = 0.64, P < 0.01$),与Cond呈负相关($r = -0.60, P < 0.01$)。就物种与水环境的关系而言,小球藻和卵形隐藻与pH和DO

呈正相关;湖泊伪鱼腥藻、中华尖头藻与PO₄³⁻-P呈正相关,但是更多受到Cond、WT和NO₃⁻-N的负向作用;坑形细鞘丝藻和尖针杆藻与NO₃⁻-N和WT的呈负相关,同时与TP正相关;小型色球藻、巨氏腔球藻、固氮鱼腥藻、克罗顿脆杆藻、链形小环藻、实球藻、双对栅藻和啃蚀隐藻与Cond、WT和NO₃⁻-N呈正相关性,与PO₄³⁻-P的负相关。

浮游动物的CCA分析结果如图4B所示,轴一和轴二累计解释物种信息量达92.53%(表3)。第一排序轴与WT呈正相关性($r = 0.87, P < 0.01$),与PO₄³⁻-P呈负相关性最强($r = -0.93, P < 0.05$);第二排序轴与pH呈最大正相关($r = 0.47, P < 0.01$),与DO呈负相关性($r = -0.44, P < 0.01$)。就物种与水

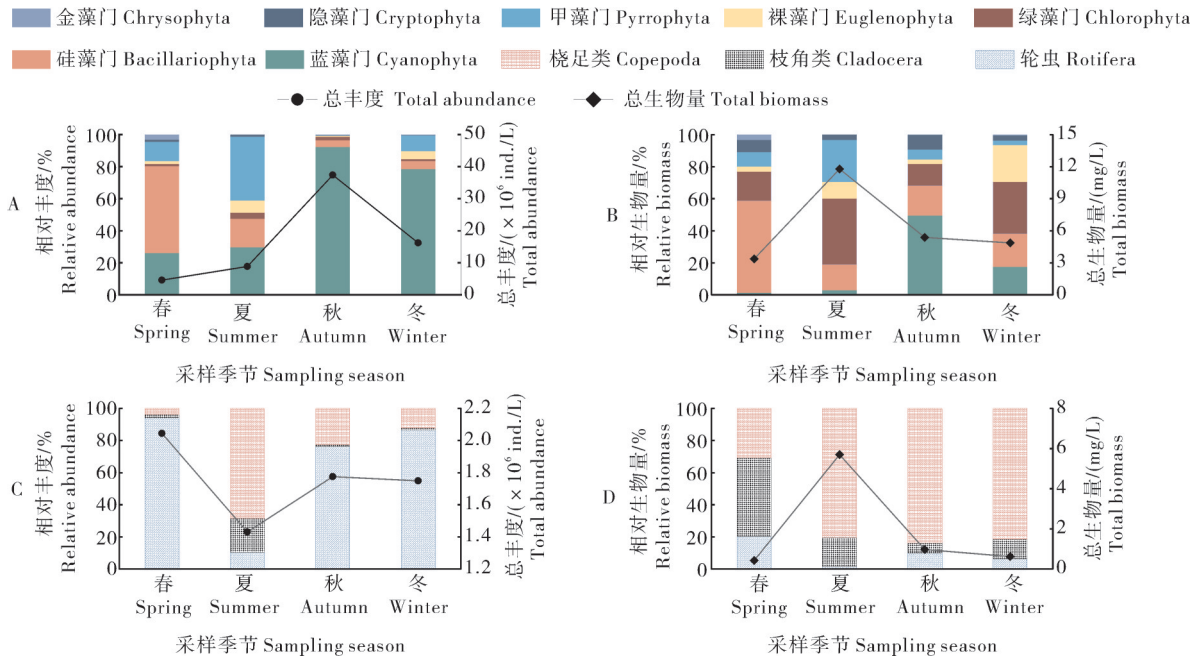


图2 滢水水库浮游植物(A、B)和浮游动物(C、D)丰度和生物量季节变化

Fig.2 Seasonal variation in abundance and biomass of phytoplankton (A, B) and zooplankton (C, D) in the Weishui Reservoir

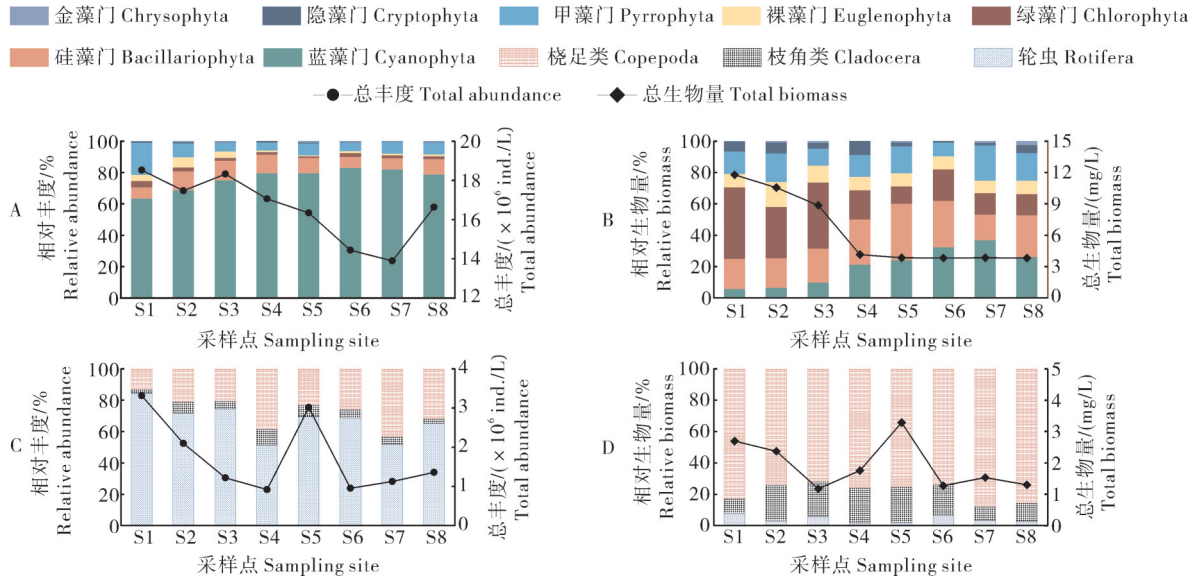


图3 滢水水库浮游植物(A、B)和浮游动物(C、D)丰度和生物量空间变化

Fig.3 Spatial variation in abundance and biomass of phytoplankton (A, B) and zooplankton (C, D) in the Weishui Reservoir

环境的关系而言,长额象鼻溞、短尾秀体溞、广布中剑水蚤和汤匙华剑水蚤与WT和pH呈正相关,与 $PO_4^{3-}-P$ 为负相关;螺形龟甲轮虫和针簇多肢轮虫与 $PO_4^{3-}-P$ 呈正相关,但与WT呈负相关;桡足幼体受DO的正向作用,无节幼体与 $PO_4^{3-}-P$ 和WT关联较弱。

2.6 浮游生物多样性

浮游植物的 H' 、 D 和 J 指数的范围分别为1.48~4.66、1.09~3.05和0.34~0.83,均值分别为2.64、1.78和0.53,3种多样性指数在季节间的变化趋势相似,即春季和夏季均高于秋季和冬季;浮游动物的 H' 、 D 和 J 指数的范围分别为1.25~2.81、1.12~1.88和

表 3 浮游生物与环境因子的 CCA 统计特征

Table 3 Statistical characteristics of CCA of plankton and environmental factors

统计信息 Statistical information	浮游植物 Phytoplankton				浮游动物 Zooplankton			
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征根 Eigenvalue	0.721	0.300	0.152	0.079	0.665	0.342	0.036	0.020
物种-环境变异累了解释百分数/% Cumulative explained percentage of species-environment variation	53.85	76.23	87.54	93.40	61.09	92.53	95.82	97.64

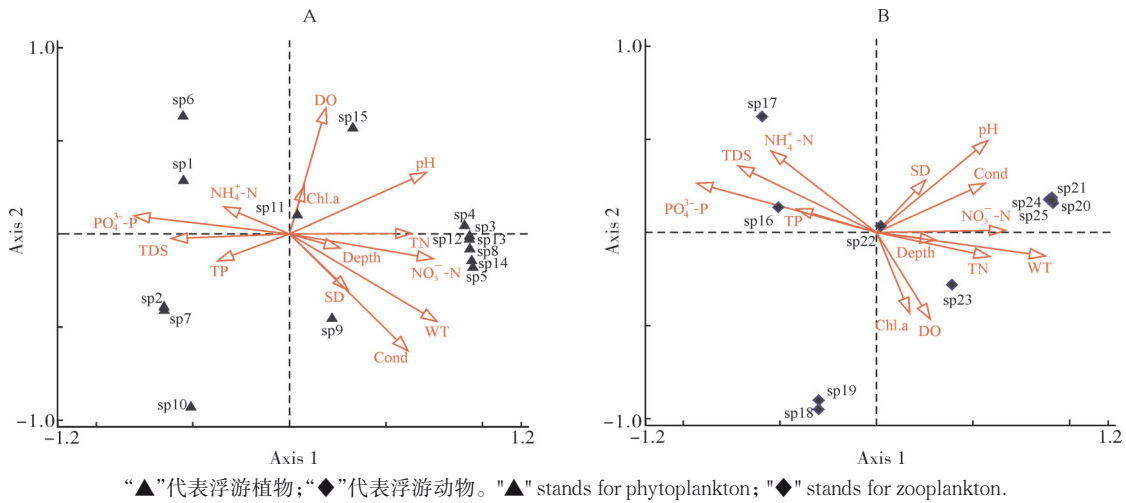


图 4 浮游生物优势种与环境参数的典范对应分析

Fig.4 Canonical correspondence analysis of plankton dominant species and environmental parameters

0.40~0.74, 均值分别为 2.17、1.49 和 0.62, 3 种多样性指数的最低值均出现在春季, 最高值均出现在夏季(图 5A、5B)。从空间分布来看, 浮游植物的 3 种多样性指数变动幅度均很小, S4 采样点的 H' 和 D 指数为各指数的最小值; 浮游动物的 3 种多样性指数

虽然变动幅度均很小, 但是变化趋势相似(图 5C、5D)。

以浮游植物和浮游动物的 H' 、 D 和 J 指数对洩水水库 4 个季节的水质营养状态进行评价, 综合结果均显示水体处于中营养水平。

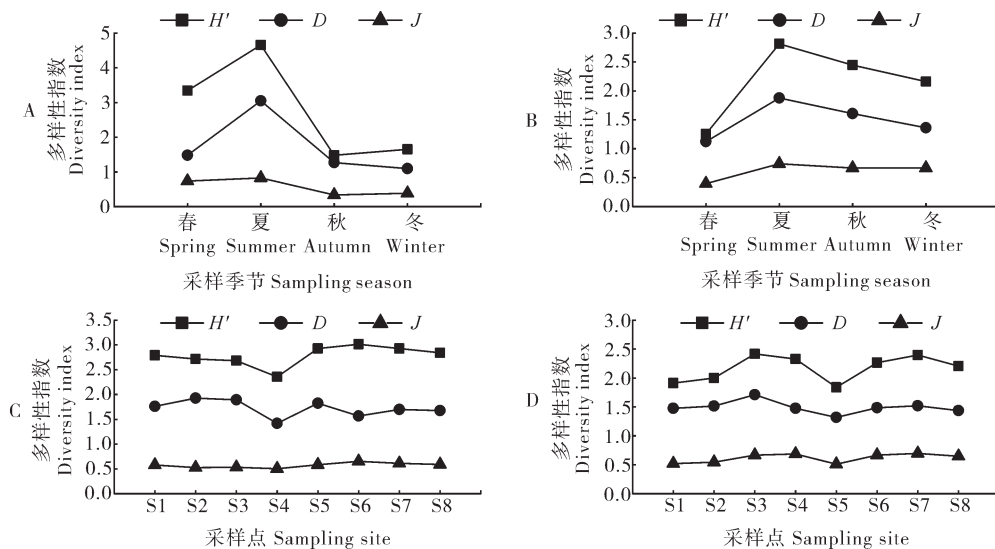


图 5 洩水水库浮游植物(A、C)和浮游动物(B、D)多样性指数的时空变化

Fig.5 Seasonal and spatial variation of phytoplankton (A, C) and zooplankton (B, D) diversity index in the Weishui Reservoir

3 讨论

3.1 浮游生物群落结构特征

调查期间, 浣水水库浮游植物的演替呈硅藻-绿藻-蓝藻型。这是因为水温低的早春季节, 喜冷水的尖针杆藻和链形小环藻容易增殖, 该结果符合大多数湖库春季藻类的生长特点^[16], 而夏季雨量充沛时, 降雨冲刷导致水体有机质丰富, 促进了喜中-富营养型水体的小球藻、实球藻和双对栅藻的增殖^[17]; 秋季丰度出现骤增, 可能与库区丰富的内源营养物质、较长的水力停留时间有关, 浣水水库在蓄水多年后, 自净能力降低^[7], 而以小型藻类为主的蓝藻偏好稳定且营养高的水体, 这与青草沙水库浮游植物的季节演替结果相似^[16]; 经历蓝藻猛增后的冬季, 虽然浮游植物丰度有所下降, 但物种仍以蓝藻为主, 可能与水体营养失衡^[18]有关。浮游动物丰度在春、秋和冬季以轮虫为主要类群, 轮虫大量出现的原因极可能与水中丰富的有机物质相关, 浣水水库流域周围湿地植物被水淹没后, 很多植物碎屑可以进入水体分解成为腐殖质, 轮虫可将其作为食物摄食而增长^[19]。夏季丰度以桡足类和枝角类为主, 同期生物量达到最大, 此时水库中生长快、摄食强度大的滤食性鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)并没有使浮游动物群落组成小型化, 该现象在新丰江水库同样存在^[20], 这一结果与大小效率假说的解释并不一致^[20], 可能与过高的水温^[21]、鲢和鳙的放养量不足等有关。另外, 由于浮游甲壳动物对浮游植物牧食压力大, 且更喜好捕食除丝状蓝藻外的其他藻类^[22], 可能促进了蓝藻水华的发生, 这与秋季蓝藻丰度的大量增殖相一致。

在空间层面上, 浮游生物的丰度和生物量由上游河道型库区至下游敞水区大致呈逐渐降低的趋势, 其中, 浮游植物的丰度和生物量在S1采样点明显高于其他点位, 浮游动物的丰度和生物量除S5采样点外与浮游植物表现相同的特点, 这主要是因为S1采样点位于入库口, 附近居民生活排污、工矿企业排污、畜禽养殖排污和农业用地施肥严重^[7], 使得有机碎屑、营养物质易集聚, 为浮游植物的生长繁殖创造了条件, 滤食性的浮游动物则通过摄食有机碎屑及浮游植物而出现相同的变化趋势^[23]; S5采样点位于库区支流的回水湾, 水体流速变慢导致浮游动物的捕食成功率高^[24], 可能是造成该点浮游动物丰度值高的原因。

3.2 影响浮游生物群落的主要水环境因子

浮游生物群落结构的变化是多个环境因子在时空序列上综合作用的体现。此次调查研究中, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、WT、pH和DO均对浣水水库中浮游生物群落的生态分布有重要影响, 且 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和Cond仅对浮游植物影响较大。

内陆水域中, 绿藻、蓝藻和小型浮游动物更偏好高氮磷的富营养环境^[25]。本研究中, 秋冬季节湖泊伪鱼腥藻、小球藻等优势物种的出现与水中较高的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 相关, 而夏季水中较低的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 可能导致了大型浮游动物如长额象鼻蚤、短尾秀体蚤、广布中剑水蚤等的出现, 这与众多湖库研究结果一致, 再次证实氮、磷营养盐是浮游植物生长繁殖的物质基础, 是调控浮游动物物种组成的重要参数^[17]。Cond值则是水中营养状况的反映, 微生物分解树叶碎片和土壤有机物质后, 直接对Cond产生影响, 进而影响浮游生物的群落组成^[26]。WT是影响浮游生物生长繁殖极为关键的环境因子^[27]。Robrats等^[28]的研究发现, 硅藻易在10~20℃时成为优势物种, 绿藻和蓝藻易在25~35℃时成为优势物种, 本研究中浮游植物优势种的变化基本遵循这一规律, 且在CCA分析中, 硅藻门的尖针杆藻与WT呈负相关, 大部分绿藻和蓝藻(如双对栅藻、小型色球藻等)的优势种与WT呈正相关; 新安江水库^[20]、鄱阳湖^[17]、长江中游江段^[29]等关于浮游动物群落结构的研究中均得到WT与浮游动物的分布密切相关, 这与本研究的结果一致, 表明浣水水库中浮游动物的群落结构变化同样离不开WT的控制。

pH值是浮游生物数量、种类变化的重要因素, 研究表明酸性、中性及微碱性水体有利于枝角类生存, 而偏碱性水体有利于轮虫、桡足类和浮游植物的生存^[30], 此次调查期间, 浣水水库水体偏碱性, 使得轮虫和桡足类成为构成浮游动物丰度的主体, 浮游植物的丰度始终处于较高水平, 这与杨文焕等^[31]的研究结果一致。DO含量的高低是浮游生物能否适应水域环境的象征, 较低的DO含量可抑制浮游植物生长^[32], 制约枝角类的繁殖^[33]。本研究中春季的DO与其他三季有显著差异($P < 0.05$), 可能是造成春季浮游植物和枝角类丰度值低的原因。

3.3 浮游生物多样性与水质变化特点

生物多样性指数常被用于反映群落构成的复杂性、丰富性和均匀性, 以此揭示水质受污染的程度。本研究中, 浮游植物的H'指数和D指数年均值较浮

游动物高,浮游植物和浮游动物的 H' 指数处于多样性指数划分标准的Ⅲ~Ⅳ级^[34], J 指数年均值大于0.5,表明浮游植物群落丰富度较高,浮游动物则较简单,但在分布上都相对均匀,浮游生物群落结构较为稳定^[35]。夏季时浮游植物和浮游动物的3种指数均高于其他季节,表明夏季水质状况较好,这很可能与夏季水体交换加快有关,水位高的丰水期,开闸泄洪导致水体流动性强,其他因素不再是构成浮游生物生态分布的主要因素^[36]。浮游植物多样性在S4采样点出现低的原因可能与此地开阔的水域有关。综合浮游生物多样性指数的评价结果,水体处于中营养水平。

综合上述分析,洩水水库水质现面临很高的富营养化风险,由于其具有至关重要的生态服务功能,防止水质恶化将是后续研究的重点。从本次调查的水质状况和浮游生物的群落结构来看,对该水库水体的管理应聚焦于以下三个方面。一是关注水体流通性、增加与外界水体的交换频率,洩水水库围栏养殖后滞留丰富的内源营养物质,经常开放闸门有助于氮磷等营养盐稀释,起到净化的作用;二要加大力度控制上游来水的质量,规范水库周边的排污行为,调整流域附近土地的施肥结构,以减少外源性污染;三要优化食物链的结构、增大滤食性鲢鳙的比重,尤其要通过增加鲢的放养数量来控制蓝藻的过度生长,尽管这一观点目前存在较多争议,但在阻止浮游植物聚集成片的过程中也得到了诸多研究验证。

参考文献 References

- [1] HANSSON L A, GUSTAFSSON S, RENGEFORS K, et al. Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition[J]. *Freshwater biology*, 2007, 52(7): 1290-1301.
- [2] 杨宋琪,高兴亮,王丽娟,等.西北干旱区典型水库浮游植物群落结构特征及驱动因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 377-387. YANG S Q, GAO X L, WANG L J, et al. Phytoplankton community structure and driving factors in typical reservoirs of arid region of northwest China[J]. *Journal of lake sciences*, 2021, 33(2): 377-387(in Chinese with English abstract).
- [3] 张辉,彭宇琼,邹贤妮,等.南亚热带特大型水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系——以新丰江水库为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(2): 404-417. ZHANG H, PENG Y Q, ZOU X N, et al. The characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors of a large reservoir in subtropic of Southern China: a case study of Xinfengjiang Reservoir[J]. *Journal of lake sciences*, 2022, 34(2): 404-417(in Chinese with English abstract).
- [4] LOMARTIRE S, MARQUES J C, GONCALVES A M M. The key role of zooplankton in ecosystem services: a perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment[J/OL]. *Ecological indicators*, 2021, 129: 107867 [2022-06-09]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>.
- [5] ZHOU J, QIN B Q, ZHU G W, et al. Long-term variation of zooplankton communities in a large, heterogenous lake: implications for future environmental change scenarios[J/OL]. *Environmental research*, 2020, 187: 109704 [2022-06-09]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109704>.
- [6] 毕研新. 洩水水库中长期优化调度研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. BI Y X. Research on long-term optimal dispatching of Weishui Reservoir[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014(in Chinese with English abstract).
- [7] 喻婷,周念来,苗滕,等. 洩水水库水质变化趋势分析[J]. *湖北水利*, 2016(2): 7-10. YU T, ZHOU N L, MIAO T, et al. Analysis on the changing trend of water quality in Weishui Reservoir[J]. *Hubei water conservancy*, 2016(2): 7-10(in Chinese).
- [8] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 340-344. ZHANG Z S, HUANG X F. Research methods of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991: 340-344(in Chinese).
- [9] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China[M]. Beijing: Science Press, 2006(in Chinese).
- [10] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961. WANG J J. Chinese freshwater rotifers[M]. Beijing: Science Press, 1961(in Chinese).
- [11] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. HAN M S, SHU Y F. Biographical map of freshwater in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1995(in Chinese).
- [12] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. ZHAO W. Hydrobiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005(in Chinese).
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. State environmental protection administration. Standard methods for examination of water and wastewater (4th edition)[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2002(in Chinese).
- [14] 王朝晖,韩博平,胡韧,等. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 402-405, 409. WANG Z H, HAN B P, HU R, et al. Phytoplankton community structure and eutrophication of reservoirs in Guangdong Province, China[J]. *Chinese journal of ecology*, 2005, 24(4): 402-405, 409(in Chinese with English abstract).
- [15] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91. KUANG Q J, MA P M, HU Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of safety and environment*, 2005, 5(2): 87-91(in Chinese with English abstract).

- [16] 王三秀,魏莱,王爽,等.上海水源地毗邻湖库浮游植物群落结构的季节变化及其影响因素[J].湖泊科学,2022,34(4):1127-1139.WANG S X, WEI L, WANG S, et al. Seasonal changes of phytoplankton community structure and its influencing factors in lakes and reservoirs adjacent to water sources in Shanghai [J]. Journal of lake sciences, 2022, 34 (4) : 1127-1139 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨潇,马吉顺,张欢,等.鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价[J].水生生物学报,2021,45(5):1093-1103. YANG X, MA J S, ZHANG H, et al. Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2021, 45 (5) : 1093-1103 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陶敏,岳兴建,罗家林,等.四川丘陵区水库浮游植物功能季节演替特征及驱动因子[J].水生生物学报,2021,45(4):826-837. TAO M, YUE X J, LUO J L, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in reservoirs in hilly regions of Sichuan Province [J]. Acta hydrobiologica Sinica, 2021, 45 (4) : 826-837 (in Chinese with English abstract).
- [19] CALBET A, LANDRY M R. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems [J]. Limnology and oceanography, 2004, 49 (1) : 51-57.
- [20] 秦云霞,周雯,乔永民,等.新丰江水库浮游动物群落结构特征[J/OL].水生生态学杂志,2022[2022-06-09]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202110200361>. QIN Y X, ZHOU W, QIAO Y M, et al. An analysis of the structure characteristics of zooplankton community in Xinfengjiang Reservoir [J/OL]. Journal of hydroecology, 2022 [2022-06-09]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202110200361> (in Chinese with English abstract).
- [21] YVON-DUROCHER G, MONTOYA J M, TRIMMER M, et al. Warming alters the size spectrum and shifts the distribution of biomass in freshwater ecosystems [J]. Global change biology, 2011, 17 (4) : 1681-1694.
- [22] LOPES M R M, DE M BICUDO C E, FERRAGUT M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [J]. Hydrobiologia, 2005, 542 (1) : 235-247.
- [23] 魏念,余丽梅,杜开开,等.三峡库区干流浮游植物群落结构及环境影响因子相关性分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(3):615-623. WEI N, YU L M, DU K K, et al. Phytoplankton communities and correlations analysis of environmental factors in mainstream of Three Gorges Reservoir [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2022, 31 (3) : 615-623 (in Chinese with English abstract).
- [24] 白海锋,王怡睿,宋进喜,等.渭河浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2022,31(1):117-130. BAI H F, WANG Y R, SONG J X, et al. Characteristics of plankton community structure and its relation to environmental factors in Weihe River, China [J]. Ecology and environmental sciences, 2022, 31 (1) : 117-130 (in Chinese with English abstract).
- [25] BAYS J S, CRISMAN T L. Zooplankton and trophic state relationships in Florida lakes [J]. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 1983, 40 (10) : 1813-1819.
- [26] ZHENG Y Y, NIU J G, ZHOU Q, et al. Effects of resource availability and hydrological regime on autochthonous and allochthonous carbon in the food web of a large cross-border river (China) [J]. Science of the total environment, 2018, 612: 501-512.
- [27] ZHAO Q Y, LIU S T, NIU X L. Effect of water temperature on the dynamic behavior of phytoplankton-zooplankton model [J/OL]. Applied mathematics and computation, 2020, 378: 125211 [2022-06-09]. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125211>.
- [28] ROBERTS R D, ZOHARY T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria [J]. New Zealand journal of marine and freshwater research, 1987, 21 (3) : 391-399.
- [29] 孙晓梅,刘绍平,段辛斌,等.长江中游江段浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J].淡水渔业,2021,51(3):3-12. SUN X M, LIU S P, DUAN X B, et al. Plankton community structure and its relationship with environmental factors in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Freshwater fisheries, 2021, 51 (3) : 3-12 (in Chinese with English abstract).
- [30] 高原,赖子尼,李捷,等.连江浮游动物多样性的空间分布[J].生物多样性,2013,21(6):699-708. GAO Y, LAI Z N, LI J, et al. Spatial pattern of zooplankton diversity in Lianjiang River, Guangdong Province, China [J]. Biodiversity science, 2013, 21 (6) : 699-708 (in Chinese with English abstract).
- [31] 杨文焕,申涵,周明利,等.冻融期包头南海湖浮游植物群落及优势种生态特征[J].湖泊科学,2020,32(2):450-461. YANG W H, SHEN H, ZHOU M L, et al. Ecological characteristics of dominant phytoplankton community in Lake Nanhai (Baotou) during freezing-thawing period [J]. Journal of lake sciences, 2020, 32 (2) : 450-461 (in Chinese with English abstract).
- [32] 俞焰,刘德富,杨正健,等.千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J].环境科学,2017,38(4):1393-1402. YU Y, LIU D F, YANG Z J, et al. Dissolved oxygen and vertical stratification of phytoplankton in Qiandao Lake and their influencing factors [J]. Environmental science, 2017, 38 (4) : 1393-1402 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董旭峰,宋祥甫,刘娅琴,等.猪场废水资源化处理系统中枝角类群落结构的周年动态[J].生态学杂志,2015,34(2):477-482. DONG X F, SONG X F, LIU Y Q, et al. Annual dynamics of Cladocera community structure in swine wastewater recycling system [J]. Chinese journal of ecology, 2015, 34 (2) : 477-482 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陈清潮,黄良民,尹建强,等.南沙群岛海区浮游动物多样性研究[M].北京:海洋出版社,1994:42-50. CHEN Q C, HUANG L M, YIN J Q, et al. Research on zooplankton diversity in the Nansha Islands [M]. Beijing: China Ocean Press, 1994: 42-50

- (in Chinese).
- [35] 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1358-1367. CHEN J Z, MENG S L, YOU Y, et al. Characteristic of phytoplankton community in lake Wuli, Lake Taihu[J]. Ecology and environmental sciences, 2009, 18(4): 1358-1367 (in Chinese with English abstract).
- [36] DE SOUZA C L, DA MOTTA M D. Hydrodynamics-driven plankton community in a shallow lake[J]. Aquatic ecology, 2009, 43(1): 73-84.

Characteristics of plankton community structure and water quality evaluation in Weishui Reservoir

BAI Xuelan¹, FAN Zeyu¹, XU Juchen¹, LIN Shen¹, MA Shuaibing¹,
HUANG Luquan¹, LI Jinneng¹, HOU Jie^{1,2}, HE Xugang^{1,2}

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China

Abstract In order to clarify the characteristics of plankton community structure and understand the current status of water quality in Weishui Reservoir, in this study, plankton and water quality surveys were carried out in the typical area of Weishui Reservoir in July (summer) and November (autumn) 2021, January (winter) and March (spring) 2022. The results showed that there were 75 genera and 129 species of phytoplankton, mainly Chlorophyta, and 23 genera and 31 species of zooplankton (rotifers and planktonic crustaceans), mainly rotifers. The dominant plankton species mainly included *Cyclotella catenate*, *Scenedesmus biguga*, *Pseudoanabaena limnetica*, *Keratella cochlearis*, nauplius, etc. The annual mean density and biomass of phytoplankton were 1.656×10^7 ind./L and 6.32 mg/L, respectively, and the annual density and biomass of zooplankton were 1.75×10^2 ind./L and 1.92 mg/L, respectively. In terms of spatial distribution, the abundance and biomass of plankton decreased gradually from the upstream channel-type area to the downstream open-water area. Canonical correspondence analysis showed that $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, WT, pH and DO all had important effects on the ecological distribution of plankton communities in Weishui Reservoir, while $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and Cond only had an effect on phytoplankton. According to the evaluation of species diversity, the plankton community structure of Weishui Reservoir is relatively stable, and the water quality in the reservoir area is in the mesotrophic status.

Keywords Weishui Reservoir; plankton; community structure; environmental factors; water quality evaluation; biodiversity; water ecological security; fisheries stock assessment; water ecological environment assessment

(责任编辑: 边书京)