J. Lake Sci.(湖泊科学),2023,**35**(2):493-506
DOI 10.18307/2023.0231

三峡库区浮游植物群落结构特征及水生态评价*

苏新然,于　潘,尤庆敏,庞婉婷**,王全喜
(上海师范大学生命科学学院,上海 200234)

摘　要:2020 年是长江禁渔开局之年,三峡库区作为长江的重要生态屏障,其水生态环境健康对长江大保护的实施具有重要意义。本文于 2020 年 8 月、11 月及 2021 年 1 月、4 月在三峡库区干支流共设置 19 个断面探究浮游植物群落结构特征,并利用生物量、多样性指数、综合营养状态指数和浮游植物 *Q* 指数等多种评价方法评价三峡库区水生态健康并分析其影响因素。结果表明:(1)三峡库区共鉴定出浮游植物 8 门 105 属 266 种,年平均丰度为 $6.4×10^4$ cells/L,年平均生物量为 0.038 mg/L。不同季节优势种组成不同,变异直链藻(*Melosira varians* Agardh)、骨条藻(*Skeletonema* spp.)、脆杆藻(*Fragilaria* spp.)为全年优势种。(2)三峡库区共划分 24 个功能群,B、D、MP、S1、P、Y 为优势功能群。RDA 分析表明,电导率、总氮、化学需氧量、总磷、pH、总溶解性固体与三峡库区四季功能群呈现显著关系。(3)相较于丰度、生物量和多样性水质评价结果,浮游植物 *Q* 指数更适用于三峡库区水生态评价,显示三峡库区干流水生态环境总体较好,但春、夏两季支流浮游植物丰度、生物量显著升高和浮游植物 *Q* 指数的降低在一定程度上影响了干流水生态健康,成为三峡库区面临的主要风险。因此更应充分做好支流水华监测、预警,充分利用干流水生态调度,保障三峡库区水生态环境健康。
关键词:三峡库区;浮游植物;群落结构;水生态评价

Phytoplankton community structure and water ecological assessment in the Three Gorges Reservoir*

Su Xinran, Yu Pan, You Qingmin, Pang Wanting** & Wang Quanxi
(*College of Life Sciences*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 200234, *P.R.China*)

Abstract: The year 2020 is the first year of the 10-year fishing ban in the Yangtze River. As an important ecological barrier of the Yangtze River, the water ecological environment health of the Three Gorges Reservoir (TGR) is of great significance to the implementation of the Yangtze River protection. Nineteen sites were set in the main and tributaries of the TGR in year 2020 (August and November) and 2021 (January and April) to explore the composition of phytoplankton community, and multiple assessment methods such as biomass, diversity index, comprehensive trophic status index and phytoplankton *Q* index were used to evaluate the water ecological health of the TGR area and analyze its influencing factors. The results showed that: (1) The 266 taxa of phytoplankton belonging to 105 genera in 8 phyla were identified, the average annual density was $6.4×10^4$ cells/L and an average annual biomass was 0.038 mg/L. The composition of dominant species varied seasonally. *Melosira varians* Agardh, *Skeletonema* spp. and *Fragilaria* spp. were the dominant species all year round. (2) The phytoplankton in the TGR was classified into 24 functional groups, of which B, D, MP, S1, P and Y were the dominant functional groups. Redundant analysis showed that Cond, total nitrogen, COD, total phosphorus, pH and total dissolved solid were the main environmental factors affecting the functional groups in the TGR. (3) Compared with the assessment results of density, biomass and the diversity of water quality, phytoplankton *Q* index were more suitable for the assessment of water ecology in the TGR. Results showed that the water ecological environment of the main stream in the TGR area was generally good. However, the significant increases of the density, biomass and the decrease of phytoplankton *Q* index in spring and summer tributaries would affect the water ecological health of the main stream to a certain extent, which had become the main risks for the TGR area. Therefore, we should make full use of the monitoring and early warning of tributary bloom and take advantage of the water ecological dispatch of the main stream to ensure the water ecological environment health of

* 2022-10-27 收稿;2023-01-18 收修改稿。
生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)资助。
** 通信作者;E-mail: pangwt@shnu.edu.cn。

the whole TGR area.
Keywords: Three Gorges Reservoir; phytoplankton; community structure; water ecological assessment

三峡库区位于中国长江上游下段,是中国最特殊的生态功能区。三峡工程水利枢纽的长期安全运行对于长江中下游的防洪、水质保护和生物多样性的维持具有重要意义[1]。但自 2003 年三峡工程二期蓄水、2008 年试验性蓄水以来,周期性的蓄放过程给上游水体的水文情势带来巨大改变;受长江回水的影响,支流水位逐渐抬高、水流减缓、水体扩散和交换能力减弱,为藻类生长和水华暴发提供了有利条件[2-3]。

自 2003 年 9 月巫山大宁河回水区首次发生水华以来,香溪河、大宁河、神农溪和小江等支流均发生过水华现象[4];截至 2020 年,三峡库区支流共发生水华 100 余次,覆盖巫山县、奉节县、云阳县、丰都县、万州区、涪陵区、秭归县 7 个区县,其中 2010-2016 年水华发生次数较多,近几年水华发生频率逐渐下降并趋于稳定[5-6];三峡库区水华现象主要发生于长江支流,在干流并未出现,但受支流等环境因素影响,干流藻类丰度较蓄水前有所上升[4,7]。

浮游植物作为水生态系统的初级生产者[8],其群落结构特征已成为评估水环境状况的重要指标[9-10]。相较于理化因子,利用浮游植物群落特征评价水质可以更加直观、全面地反映一段时间内水环境变化[11],为水域生态系统的监测和治理提供理论依据。20 世纪初,德国学者首次提出利用藻类评价水质污染的方法,并对水体污染程度进行了等级划分[12]。此后,各国学者相继提出了多种浮游植物水质监测方法,并逐渐开始广泛应用于国内外不同水域水质调查与评估[13-14]。三峡库区蓄水后,朱爱民等[15]、马芊芊[16]、杨潇[17]分别利用浮游植物多样性指数、完整性指数和 Q 指数等方法对不同时期长江流域水体进行水生态评价,均取得了一定成果,但不同指数的评价结果略有不同。

2020 年长江保护法正式通过,强调了水生生物指标对于评价水环境质量情况的重要意义。因此,本研究于长江禁渔开局之年,在长江大保护的关键阶段探究三峡库区浮游植物群落结构时空变化趋势,从浮游植物角度利用多种评价方式科学评价三峡水生态现状,分析其影响因素,为科学评估"十年禁渔"效果提供浮游植物基础数据,为三峡浮游植物水生态评价方法的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域设置

三峡库区位于长江上游地段,位于 28°31′~31°44′N、105°50′~111°40′E 之间,西起重庆市江津区,东至宜昌市夷陵区,面积约为 5.8 万 km^2,属于亚热带季风性气候,气候季节变化明显,年平均气温在 16~18℃,是长江流域最为重要的生态经济区[18]。

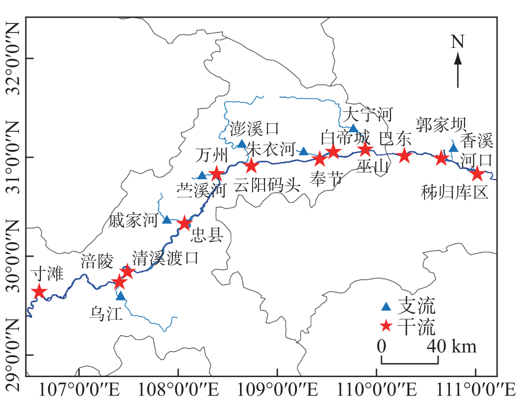

图 1 三峡库区采样点分布示意

Fig.1 Location of sampling sites in the Three Gorges Reservoir

本研究于 2020 年 8 月(夏季)、11 月(秋季)、2021 年 1 月(冬季)及 2021 年 4 月(春季)开展 4 次采样。根据三峡水库流域特征,共布设寸滩、涪陵等 12 个干流采样断面及 7 个支流采样断面,具体断面分布如图 1 所示。

1.2 样品采集与鉴定

浮游植物定量样品采用有机玻璃采水器采集,采集 1 L 水样后加入 15 mL 的鲁哥试剂(Lugol)进行现场固定,实验室静置后采用虹吸法浓缩至 50 mL;浮游植物定性样品使用 25#浮游生物网进行采集,同时使用 4%甲醛进行现场固定。浮游植物鉴定和计数参考相关经典文献进行属种鉴定[19-21]。

1.3 理化指标的测定

采用 YSI 多参数测量仪(美国 YSI 公司)测定水温(WT)、酸碱度(pH)、盐度(Sal)等指标;水体透明

度使用赛氏透明度盘来进行测定;化学需氧量(COD)采用高锰酸钾指数法测定;总氮(TN)、总磷(TP)浓度按照国家标准方法(GB 11893—1989;GB 11894—1989)进行。

1.4 数据分析

使用 Excel2016 和 Origin2021 软件完成基础数据处理统计分析及图表制作;使用 R 语言完成多样性指数计算;理化数据(除 pH 外)进行 $\lg(x+1)$ 转换后采用 CANOCO5 软件进行去趋势对应分析(DCA),得出物种的单峰响应值 SD(梯度)<3,经蒙特卡洛置换检验后,使用冗余分析(RDA)探究影响浮游植物群落结构与环境因子之间的关系。

1.4.1 浮游植物丰度　每升浮游植物个体数 N 计算方法如下[22]:

$$N = \frac{A \cdot V_s}{A_c \cdot V_a} \cdot n \tag{1}$$

式中,N 为群落中所有物种丰度($\times 10^4$ cells/L);A 为计数框面积(mm^2);A_c为计数面积(mm^2);V_s为 1 L 原水样沉淀浓缩后的体积(mL);V_a为计数框体积(mL);n 为计数所得浮游植物的丰度。

1.4.2 浮游植物优势度　浮游植物优势度指数 Y 采用 Mcnaughton 优势度指数公式计算如下[23]:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \tag{2}$$

式中,Y 为优势度指数, n_i 为第 i 个物种丰度;N 为群落中所有物种丰度;f_i 为第 i 种浮游植物在各采样点中出现的频率。

1.4.3 多样性指数　本研究中多样性指数主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 指数(D)[24-26],计算方法如下:

$$H' = -\sum\left(\frac{n_i}{N}\right)\ln\left(\frac{n_i}{N}\right) \tag{3}$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \tag{4}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \tag{5}$$

式中,N 为群落中所有物种丰度;S 为物种数; n_i 为第 i 个物种丰度。

1.4.4 综合营养状态指数　以 TP、TN、COD 参数,采用综合营养状态指数($TLI(\sum)$)对长江三峡水库水体营养状态进行评价[27],公式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{i=1}^{n} w_j \times TLI(j) \tag{6}$$

式中, $TLI(j)$ 表示第 j 种参数的营养状态参数; w_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

1.4.5 浮游植物功能类群 Q 指数　欧盟水框架根据 FG 功能类群与环境特征的适应性开发出 Q 指数[28],计算方法如下:

$$Q = \sum_{i=1}^{n}(P_i F_i) \tag{7}$$

式中,n 为浮游植物 FG 功能群的数量,P_i为第 i 个功能群生物量占总生物量的比例;F_i为第 i 个功能群的赋值。

2 结果与分析

2.1 三峡库区干流浮游植物群落结构现状

2.1.1 浮游植物种类组成　三峡库区干流共鉴定出浮游植物 8 门 105 属 266 种,其中绿藻门最多,为 40 属 131 种(49.25%);其次是蓝藻门 16 属 45 种(16.92%)、硅藻门 31 属 44 种(16.92%)、裸藻门 6 属 28 种(10.53%);其他门类数量较少,金藻门 5 属 5 种(1.88%)、甲藻门 4 属 8 种(3.01%)、隐藻门 2 属 4 种(1.49%)、黄藻门 1 属 1 种(0.38%)(图 2)。

2.1.2 三峡库区干流浮游植物丰度及生物量时空变化　三峡库区干流浮游植物年平均丰度为 6.40×10^4 cells/

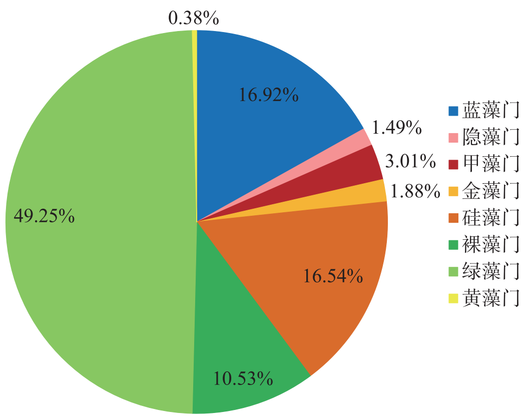

图 2 三峡库区干流浮游植物种类组成

Fig.2 Phytoplankton species composition in the main stream of Three Gorges Reservoir

L;夏、冬两季丰度较高,春、秋两季浮游植物丰度较低。夏季主要以蓝藻门为主,冬季以硅藻门为主。空间上看,三峡库区寸滩—清溪渡口段浮游植物丰度较低,平均值仅为 3.44×10^4 cells/L,忠县—秭归库区段浮游植物丰度有所上升,平均值为 7.43×10^4 cells/L(图 3)。

三峡库区干流浮游植物年平均生物量为 0.038 mg/L;春季生物量最高,为 0.067 mg/L,其余季节生物量较为相近(图 3)。春季主要以甲藻门为主,其余季节主要以硅藻门为主。空间上,寸滩—清溪渡口生物量较低,仅为 0.012 mg/L,忠县—秭归库区生物量有所上升,为 0.027 mg/L;其中云阳码头—巫山段浮游植物甲藻门生物量显著升高,其丰度占浮游植物总丰度的 3.74% ~ 75.93%,以拟多甲藻(*Peridiniopsis* spp.)及飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella* (Müller) Dujardin)为主。

2.1.3 三峡库区干流浮游植物优势种组成　三峡库区干流浮游植物不同季节优势种不同。春季优势种种类组成各门类均有分布;夏季优势种主要以蓝藻门、硅藻门为主;秋季优势种主要以蓝藻门、隐藻门和硅藻门为主;冬季主要以隐藻门、硅藻门为主。其中变异直链藻(*Melosira varians* Agardh)、骨条藻(*Skeletonema* spp.)、脆杆藻(*Fragilaria* spp.)为全年优势种,骨条藻主要由江河骨条藻(*Skeletonema potamos*(Weber) Halse)和近盐骨条藻(*Skeletonema subsalsum*(Cleve) Bethge)组成,美丽星杆藻(*Asterionella formosa* Hassall)仅在冬季成为优势种,衣藻(*Chlamydomonas* spp.)、拟多甲藻(*Peridinium* spp.)和飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella* (Müller) Dujardin)仅在春季成为优势种(表 1)。

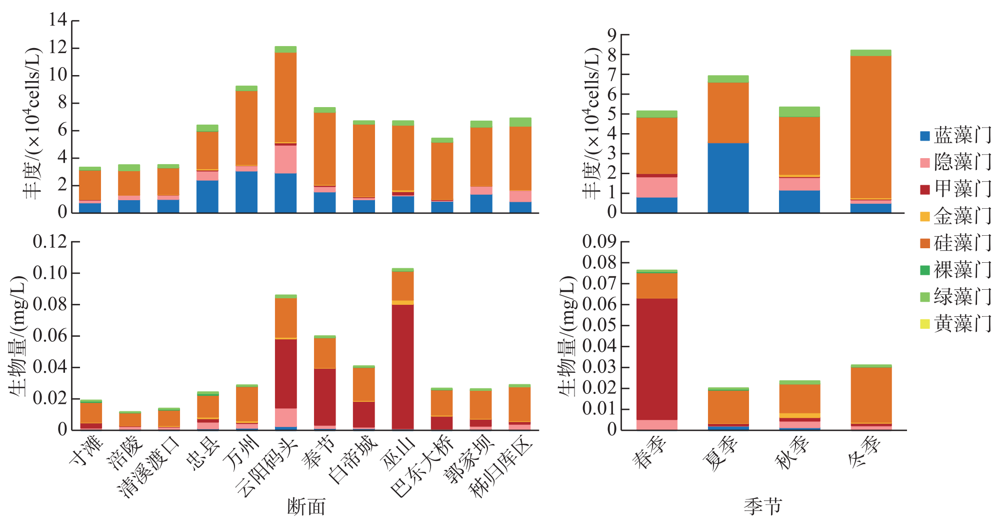

图 3 三峡库区干流浮游植物丰度、生物量时空变化

Fig.3 Spatial and temporal variations of phytoplankton abundance and biomass in the main stream of Three Gorges Reservoir

2.2 三峡库区干流水生态评价

2.2.1 三峡库区干流 *TLI*(∑)水质评价　三峡水库周期性蓄水使长江干流由原来的河流型水体转变为湖泊或类湖泊型水体[29],因此本文根据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级规定》,利用 *TLI*(∑)法,选取 TN、

表 1 三峡库区干流浮游植物优势种*

Tab.1 Dominant phytoplankton species in the main stream of Three Gorges Reservoir

门类	优势种	春季	夏季	秋季	冬季
硅藻门	骨条藻 *Skeletonema* spp.	+++	+++	+++	+++
	脆杆藻 *Fragilaria* spp.	+	+	++	+
	变异直链藻 *Melosira varians*	++	+	+	+
	小环藻 *Cyclotella* spp.		+	+	++
	尖肘形藻 *Ulnaria acus*			++	++
	颗粒沟链藻 *Aulacoseira granulate*			+	+
	美丽星杆藻 *Asterionella formosa*				+
隐藻门	尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*	+++		++	+
	卵形隐藻 *Cryptomonas ovata*	++		++	+
甲藻门	拟多甲藻 *Peridinium* spp.	+			
	飞燕角甲藻 *Ceratium hirundinella*	+++			
蓝藻门	湖生假鱼腥藻 *Pseudanabaena limnetica*	++	+++	++	
绿藻门	衣藻 *Chlamydomonas* spp.	+			

* "+"表示优势度 $0.02 \leqslant Y < 0.05$; "++"表示优势度 $0.05 \leqslant Y < 0.1$; "+++"表示优势度 $Y \geqslant 0.1$。

TP、COD(详见附表Ⅰ)作为评价基准参数评价三峡库区干流水体的水生态健康。一般将营养状态分为 5 级:$TLI(\sum)<30$ 为贫营养水体;$30 \leqslant TLI(\sum) \leqslant 50$ 为中营养水体;$50<TLI(\sum) \leqslant 60$ 为轻度富营养水体;$60<TLI(\sum) \leqslant 70$ 为中度富营养水体;$TLI(\sum)>70$ 为重度富营养水体。

根据 $TLI(\sum)$ 评价结果,三峡库区干流全年 $TLI(\sum)$ 指数平均值为 48.93~56.36,总体处于中营养—轻度富营养之间;其中夏季受洪水影响,水质较差,为中度富营养。其余季节 $TLI(\sum)$ 指数较为接近,处于中营养—轻度富营养,总体呈现出秋冬季水质好于春夏季水质;空间上看,三峡各断面 $TLI(\sum)$ 指数相差不大(表 2)。

表 2 三峡库区干流 $TLI(\sum)$ 指数及水质评价结果

Tab.2 $TLI(\sum)$ index and water assessment results in the main stream of Three Gorges Reservoir

断面	春季	夏季	秋季	冬季	平均值
寸滩	52.32(轻富)	66.54(中富)	46.89(中)	48.57(中)	54.77(轻富)
涪陵	51.47(轻富)	60.7(中富)	49.83(中)	54.3(轻富)	54.98(轻富)
清溪渡口	53.85(轻富)	58.74(轻富)	49.50(中)	44.61(中)	51.37(轻富)
忠县	49.98(中)	64.46(中富)	53.38(轻富)	47.79(中)	55.24(轻富)
万州	51.16(轻富)	66.18(中富)	48.68(中)	48.91(中)	54.85(轻富)
云阳码头	56.94(轻富)	/	46.69(中)	58.39(轻富)	53.36(轻富)
奉节	48.24(中)	63.26(中富)	49.31(中)	44.43(中)	52.62(轻富)
白帝城	53.91(轻富)	61.97(中富)	44.68(中)	36.87(中)	48.94(中)
巫山	48.13(中)	60.68(中富)	48.18(中)	42.47(中)	50.72(轻富)
巴东大桥	46.57(中)	61.16(中富)	50.01(轻富)	33.57(中)	48.98(中)
郭家坝	40.36(中)	63.02(中富)	52.28(轻富)	44.52(中)	53.09(轻富)
秭归库区	51.37(轻富)	57.22(轻富)	48.56(中)	50.64(轻富)	52.25(轻富)
平均值	50.36(轻富)	62.18(中富)	49.00(中)	46.26(中)	52.73(轻富)

/表示数据缺失。

2.2.2 三峡库区干流浮游植物群落结构水生态评价　浮游植物的群落结构受水体生态环境变化的直接影响。浮游植物的丰度、生物量在一定程度上可作为衡量水体的营养状况重要指标,根据浮游植物丰度、生物量及硅藻熵评价标准[30-32](详见附表Ⅱ)评价三峡库区干流水生态环境可知:丰度上,所有断面均低于 50×10^4 cells/L,均为极贫营养水体;生物量上,云阳码头、奉节和巫山生物量高于 0.1 mg/L,为极贫营养—贫营养水

体,其余断面均为极贫营养水体;利用硅藻熵评价水质,三峡库区干流均为贫营养水体(表3)。

表3 丰度、生物量、硅藻熵水生态评价结果(平均值±标准差)

Tab.3 Abundance, biomass and Diatom entropy water ecological assessment results (Mean±standard deviation)

断面	丰度/($\times10^4$ cells/L)	评价结果	生物量/(mg/L)	评价结果	硅藻熵	评价结果
寸滩	3.32±0.80	极贫营养	0.019±0.006	极贫营养	0.47±0.25	贫营养
涪陵	3.50±1.28	极贫营养	0.012±0.002	极贫营养	0.62±0.22	贫营养
清溪渡口	3.51±1.73	极贫营养	0.014±0.001	极贫营养	0.35±0.11	贫营养
忠县	6.39±3.31	极贫营养	0.024±0.006	极贫营养	0.54±0.14	贫营养
万州	9.23±4.26	极贫营养	0.029±0.008	极贫营养	0.45±0.07	贫营养
云阳码头	12.11±3.93	极贫营养	0.086±0.075	极贫营养—贫营养	0.43±0.42	贫营养
奉节	7.66±4.41	极贫营养	0.06±0.069	极贫营养—贫营养	0.65±0.43	贫营养
白帝城	6.70±3.92	极贫营养	0.041±0.023	极贫营养	0.46±0.14	贫营养
巫山	6.69±3.91	极贫营养	0.103±0.140	极贫营养—贫营养	0.69±0.38	贫营养
巴东大桥	5.43±3.88	极贫营养	0.027±0.007	极贫营养	0.68±0.21	贫营养
郭家坝	6.68±3.12	极贫营养	0.026±0.007	极贫营养	0.56±0.22	贫营养
秭归库区	6.91±1.38	极贫营养	0.029±0.005	极贫营养	0.42±0.12	贫营养
平均值	6.40±1.44	极贫营养	0.038±0.026	极贫营养	0.54±0.15	贫营养

2.2.3 三峡库区干流多样性指数水质评价　三峡水库浮游植物多样性指数变化如图4所示。各断面浮游植物多样性指数差异不大。Simpson指数范围为0.55~0.86,均值为0.74;Shannon-Wiener多样性指数在1.43~2.47,均值为2.01;Pielou均匀度指数在0.45~0.72,平均值为0.61。

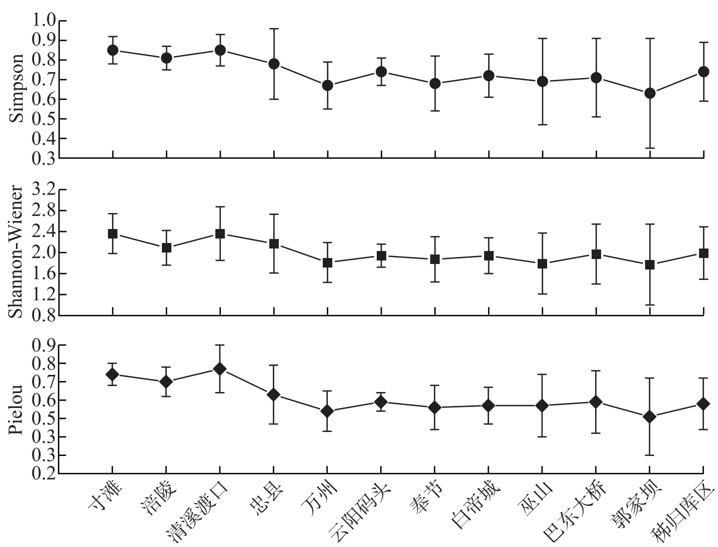

图4 三峡库区干流浮游植物多样性指数

Fig.4 Phytoplankton diversity index in the main stream of Three Gorges Reservoir

根据多样性指数水质评价标准[22-24](详见附表Ⅱ),Simpson多样性指数评价结果显示三峡库区干流均为严重污染;Shannon-Wiener多样性指数显示三峡库区干流所有断面均为中污染—重污染,寸滩—忠县段水体差于万州—秭归库区段;Pielous均匀度指数显示多数点位为轻污染—中污染,少数点位呈现轻污染状态(表4)。

2.2.4 三峡库区干流浮游植物功能类群水质评价　参考Padisák等[33-34]对浮游植物功能类群的分类方法,将三峡库区浮游植物划分为24个功能群,B、C、D、E、F、G、H1、J、L_M、L_O、M、MP、N、P、S1、T、TB、W1、W2、W_S、X1、X2、X3、Y。各功能类群的代表种属、生境特征及F因子权重如表5所示。

表 4 多样性指数及其水生态评价结果(平均值±标准差)

Tab.4 Diversity index and water ecological assessment results(Mean±standard deviation)

断面	Simpson	评价结果	Shannon-Wiener	评价结果	Pielous	评价结果
寸滩	0.85±0.07	严重污染	2.36±0.38	中污染—重污染	0.74±0.06	轻污染
涪陵	0.81±0.06	严重污染	2.09±0.33	中污染—重污染	0.70±0.08	轻污染
清溪渡口	0.85±0.08	严重污染	2.36±0.51	中污染—重污染	0.77±0.13	清洁—轻污染
忠县	0.78±0.18	严重污染	2.17±0.56	中污染—重污染	0.63±0.16	轻污染—中污染
万州	0.67±0.12	严重污染	1.81±0.38	中污染—重污染	0.54±0.11	轻污染—中污染
云阳码头	0.74±0.07	严重污染	1.94±0.22	中污染—重污染	0.59±0.05	轻污染
奉节	0.68±0.14	严重污染	1.87±0.43	中污染—重污染	0.56±0.12	轻污染—中污染
白帝城	0.72±0.11	严重污染	1.94±0.34	中污染—重污染	0.57±0.10	轻污染—中污染
巫山	0.69±0.22	严重污染	1.79±0.58	中污染—重污染	0.57±0.17	轻污染—中污染
巴东大桥	0.71±0.20	严重污染	1.97±0.57	中污染—重污染	0.59±0.17	轻污染—中污染
郭家坝	0.63±0.28	严重污染	1.77±0.77	中污染—重污染	0.51±0.21	轻污染—重污染
秭归库区	0.74±0.15	严重污染	1.99±0.5	中污染—重污染	0.58±0.14	轻污染—中污染
平均值	0.74±0.09	严重污染	2.01±0.27	中污染—重污染	0.61±0.07	轻污染—中污染

表 5 三峡库区浮游植物功能类群组成

Tab.5 Functional group composition of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir

功能群	代表种属	环境特征	赋值
B	小环藻 *Cyclotella* sp.	中营养水体,对分层敏感	5
C	星杆藻 *Asterionella* sp.	中营养、中小型水体	5
D	菱形藻 *Nitzschia* sp.、骨条藻 *Skeletonema* sp.	浑浊的浅水水体	3
E	锥囊藻 *Dinobryon* sp.	小型浅水贫营养水体	5
F	卵囊藻属 *Oocystis* sp.	混合充分的、中或富营养型深水湖泊	3
G	空球藻 *Eudorina elegans*、实球藻属 *Pandorina* sp.	水体中营养富集的停滞水层	4
H1	鱼腥藻 *Anabaena* sp.、束丝藻 *Aphanizomenon* sp.	富营养、分层、含氮低的浅水	1
J	空星藻 *Coelastrum* sp.、盘星藻属 *Pediastrum* sp.	高营养的混合浅水水体	5
L_M	拟多甲藻 *Peridiniopsis* sp.、飞燕角甲藻 *Ceratium hirundinella*	富到超富营养、中小型水体	0
L_O	色球藻属 *Chroococcus* sp.	贫到富营养、中到大型水体	5
M	微囊藻 *Microcystis* sp.	富到超富营养型、小型到中型水体	0
MP	舟形藻 *Navicula* sp.	经常受到搅动的浑浊型浅水水体	3
N	鼓藻属 *Cosmarium* sp.、角星鼓藻属 *Staurastrum* sp.	栖息在 2~3 m 连续或半连续水体混合层	5
P	脆杆藻属 *Fragilaria* sp.	混合程度较高的中富营养型浅水水体	5
S1	伪鱼腥藻 *Pseudoanabaena* sp.	均匀的浑浊水体	0
T	转板藻 *Mougeotia* sp.	具有光限制、表层持续混合的水体	5
TB	异极藻 *Gomphonema* sp.、变异直链藻 *Melosira varians*	水流湍急的水体	3
W1	绿色裸藻 *Euglena viridis*、尖尾裸藻 *Euglena oxyuris*	富集有机质的浅水	2
W2	囊裸藻 *Trachelomonas* sp.	中营养型浅水	3
W_S	黄群藻属 *Synura* sp.	富含植物分解有机质	4
X1	纤维藻属 *Ankistrodesmus* sp.	富营养和高度富营养型的浅水水体	3
X2	尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*	中营养和富营养型的浅水水体	3.5
X3	弓形藻 *Schroederia setigera*、草鞋形波缘藻 *Cymatopleura solea*	浅水、清水、混合层水体	4
Y	啮蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*	静水水体	3.5

各季节浮游植物功能类群组成如图 5 所示。其中,将相对丰度至少在一个样本大于 5% 且出现频率大于 50% 的功能群定义为优势功能群[35],三峡库区干流优势功能群分别为 B、D、MP、S1、P、Y。优势功能群随时间变化为 D/MP/S1/P/Y(春季)→D/MP/S1/P(夏季)→D/MP/S1/P/Y(秋季)→B/D/P/Y(冬季),D 和

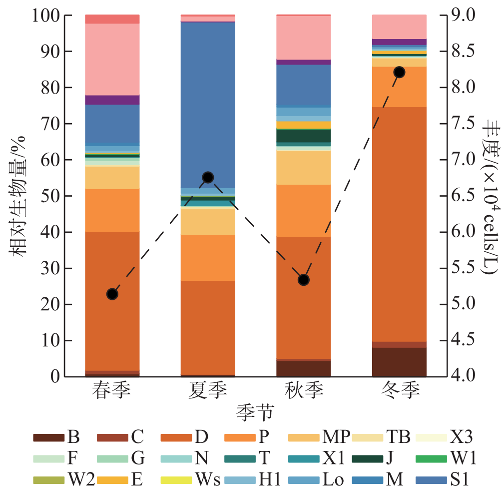

图 5 三峡库区干流不同季节浮游植物功能类群组成

Fig.5 Composition of phytoplankton functional groups in different seasons in the main stream of Three Gorges Reservoir

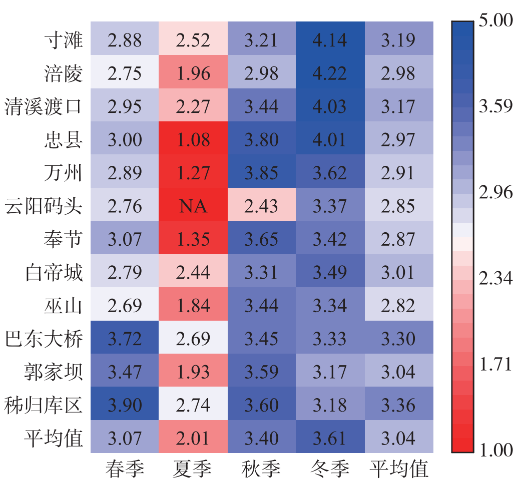

图 6 三峡库区干流浮游植物功能群 Q 指数热图

Fig.6 Heatmap of Q index of phytoplankton functional group in the main stream of Three Gorges Reservoir

P 为全年优势功能群,S1 在夏季明显升高,Y 功能群在夏季有所降低,春、秋两季优势功能群结构组成较为接近。

Q 指数是欧盟水框架组织开发的用于水环境监测的生态健康指数[28,36]。Q 指数取值范围为 0~5:$0<Q<1$ 表示水质差(Bad),$1<Q<2$ 表示水质耐受(Tolerable),$2<Q<3$ 表示水质中等(Medium),$3<Q<4$ 水质好(Good),$4<Q<5$ 水质极好(Excellent)[37]。

根据 Q 指数对三峡库区干流水质进行评价:时间上,三峡水库 Q 指数范围为 2.01~3.61,平均值为 3.04,水质较好。其中夏季水质较差,处于中等范围;冬季水质最好,平均值为 3.61(图 6)。空间上,受支流等环境因素影响总体呈现出支流汇入较多的忠县—巫山段水质差于其他断面水质。

2.3 三峡库区支流浮游植物群落结构现状

对三峡库区内 7 条支流进行四季采样,不同支流丰度、生物量各不相同,浮游植物支流丰度和生物量显著高于干流。丰度上,戚家河最多,为 $872.59×10^4$ cells/L;乌江最少,仅为 $36.25×10^4$ cells/L。生物量上,朱衣河最高,为 2.23 mg/L;苎溪河最低,为 0.14 mg/L(图 7)。其中,戚家河、朱衣河和香溪河蓝藻门丰度较高,澎溪口、朱衣河和大宁河甲藻门生物量较高。

3 讨论

3.1 理化因子对三峡库区干流浮游植物的影响

浮游植物时空分布格局与营养特征、水文条件等密切相关[38],不同季节影响浮游植物功能群分布的影响因素也各不相同。对不同三峡库区干流浮游植物功能群丰度及环境因子数据进行 DCA 分析,结果显示最大排序梯度均小于 3,因此选择冗余(RDA)分析,结果如图 8。其中, Cond 与夏、秋和冬季浮游植物功能类群分布均呈现正相关关系;TN 与春、夏季浮游植物功能类群呈现正相关关系;COD 与夏、秋两季浮游植物功能类群呈现正相关关系;TP、pH、TDS 与浮游植物功能类群分布相关性较小,TP 仅在春季与浮游植物功能类群分布呈现正相关关系,pH 仅在秋季与浮游植物功能类群呈现负相关关系,TDS 仅在冬季分布呈现正相关关系。

Cond 受水体中游离离子浓度影响,可间接反映水中无机盐浓度,与水体营养状态密切相关[39]。营养盐含量的增多促进了浮游植物的生长,使得电导率与浮游植物功能群丰度呈现显著正相关关系。COD 与水体中有机物浓度密切相关[40],夏、秋两季蓝藻丰度的升高使得水体中有机物含量升高,从而与 COD 呈现显著正相关关系。甲藻水华形成前,水体中氮、磷浓度升高;而当水华消亡时,水中的氮、磷浓度明显下降[41]。春季三峡库区干流甲藻生物量升高,使得氮、磷浓度成为春季浮游植物的主要限制因素,L_M 功能群与氮、磷呈

现显著正相关;夏季甲藻丰度下降,水体中氮、磷浓度的限制作用也逐渐减弱。pH 是水体化学性状和生命活动的综合反映[42],在一定程度上也会对浮游植物分布产生影响。

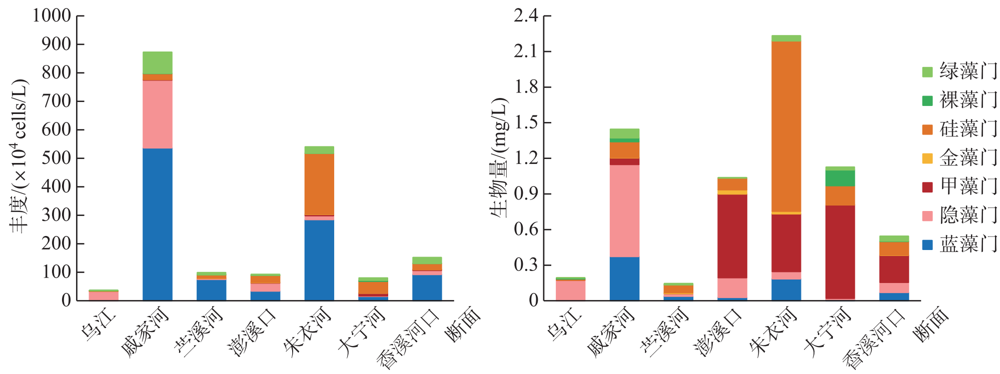

图 7 三峡库区支流浮游植物丰度、生物量时空变化

Fig.7 Spatial and temporal variations of phytoplankton abundance and biomass in the Three Gorges Reservoir tributaries

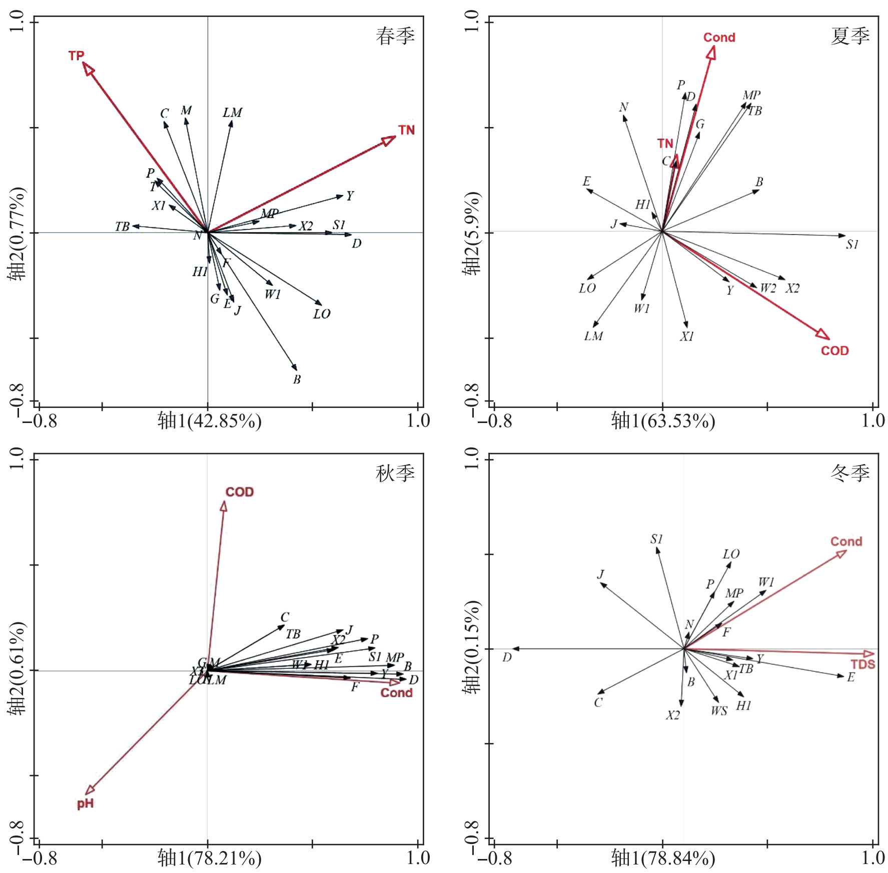

图 8 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析

Fig.8 RDA analysis between phytoplankton functional groups and environmental factors

3.2 三峡库区干流水生态评价方法比较

2020年是长江禁渔开局之年,在此阶段选择合适的评价方法对三峡库区水生态环境进行评估对后续长江流域环境监测及治理具有十分重要的意义。国家生态环境部数据显示:自2020年起,长江干流水质已连续两年全线年均值达到Ⅱ类水质。本文分析结果显示,利用种类数、丰度或生物量评价三峡库区干流水生态环境,水生态环境多数呈现极贫营养状态;而利用多样性指数评价三峡库区干流水质,水生态多数呈现出重污染或严重污染状态,两者差异较大,且与实地观察及生态环境部的监测结果存在一定差异。利用 TLI(∑)评价水质,多数水体呈现轻度富营养状态;利用 Q 指数评价三峡库区干流水生态环境,水生态较好;两者评价结果一致且与实地观测及国家生态环境部的监测结果较为一致。TLI(∑)指数是越小越好型指数,Q 指数是越大越好型指数。为进一步探究两种指数的变化情况,将 TLI(∑)指数与 Q 指数进行 Pearson 相关性分析;结果显示,两者呈现极显著负相关关系($P<0.01$)(图9)。但基于理化参数指标的监测方法易受到环境变化影响,如偶然性的降雨会减低水体营养盐浓度,从而影响营养等级划分[43],此外浮游植物作为鱼类的天然饵料可更加便捷、直观地反映鱼类生存环境的变化情况,也可在一定程度上对长江十年禁渔效果进行长期科学的监测与评估。因此 Q 指数这一生物评价标准更适用于三峡库区干流的水生态环境的监测,可作为三峡库区干流水生态状况的生物评价指标。

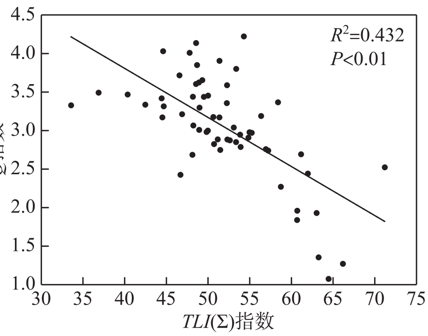

图9 TLI(∑)指数与 Q 指数相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between TLI(∑) index and Q index

由此可见,相较于浮游植物 Q 指数,利用种类数、丰度或生物量的绝对值和多样性指数的评价方法并不适用于评价三峡库区干流水生态状况。这与蔡琨等在评价洮滆水系[44]、殷燕等在评价老虎潭水库[45]水质状况时的结论较为一致。浮游植物个体微小且随波逐流,仅依据浮游植物丰度、生物量的绝对值评价三峡库区水生态环境过于片面,无法真实反映水生态情况。此外,多样性指数数学模型建立主要根据物种个体数,而对浮游植物的计数多采用丰度,从而在一定程度上降低了物种丰富度,过差地评估了三峡库区的水生态状况,并不适用于浮游植物的水生态评价。浮游植物功能类群的引入打破了传统分类方法无法体现生态环境特征的局限[46],将具有相同或相近的生态位的浮游植物划分为同一群组[47],在生态学研究应用上更具优势[48]。Q 指数不同于丰度、生物量、多样性指数仅单一的考虑某一物种数量变化情况,而是以浮游植物功能群为基础,对不同生境中的浮游植物类群进行赋值,实现了浮游植物与生境间的相互对应,更好地关注了不同的浮游植物所承载的生态学效应,更加直观地从浮游植物角度监测水生态环境变化,其适用性已在不同水库水生态评价中得到验证[49-52],可用于不同水库的水生态健康评价。

3.3 三峡库区水环境风险及控制

根据历史调查显示,三峡水库建成前,库区干支流并未发生过水华现象。自2003年蓄水发电以来,长江三峡库区不同支流回水河段多次呈现间隔性水华[53]。澎溪河自2005年起,每年春季出现水华现象;大宁河自2010年3月暴发甲藻水华后,水华频率逐渐降低;香溪河作为库区北岸距离大坝最近的支流,自2005年7月首次暴发蓝藻水华以来,每年夏季均出现不同程度的蓝藻水华现象[54]。

在本研究调查期间,春、夏两季支流浮游植物丰度、生物量显著高于干流,并在一定程度上影响干流浮游植物。其中,春季浮游植物生物量主要受甲藻影响,夏季丰度主要受蓝藻影响,不同支流在的影响程度不同。因此本文选取了影响干流春季甲藻生物量和夏季蓝藻丰度较高的支流利用浮游植物 Q 指数进一步分析其对干流的影响。

由图10可知,春季澎溪口、朱衣河和大宁河甲藻生物量显著高于干流,受其影响,与之相邻的云阳码头—秭归库区干流断面平均值较寸滩—万州段上升了9倍。甲藻所属的 L_M 功能群多存在于富到超富营养的水体中,其生物量增多与水生态健康存在密切联系。夏季蓝藻丰度呈现同样规律,戚家河、朱衣河和香溪河口夏季蓝藻丰度较高,为 308×10^4~1306×10^4 cells/L。距离其较近的忠县、万州等干流断面蓝藻丰度高于寸

滩、涪陵等断面。虽然夏季支流蓝藻丰度的增多同样会提高干流蓝藻丰度,但受洪水等其他环境因素影响,水体流速较快,换水周期短,使得夏季支流浮游植物的影响作用小于春季,这也与陈勇等在三峡库区三期蓄水后的调查结果较为一致[55]。

利用浮游植物 Q 指数进一步分析支流对干流的影响程度可知,多数支流浮游植物 Q 指数低于干流,水生态环境较差;此外,支流临近的干流断面 Q 指数值也有所降低,表明支流水生态环境在一定程度上也可影响干流水体生态,使得干流水生态环境下降,因此更应在易发生水华的季节对支流水生态环境进行治理与管控,减少其对三峡库区干流存在的生态威胁。

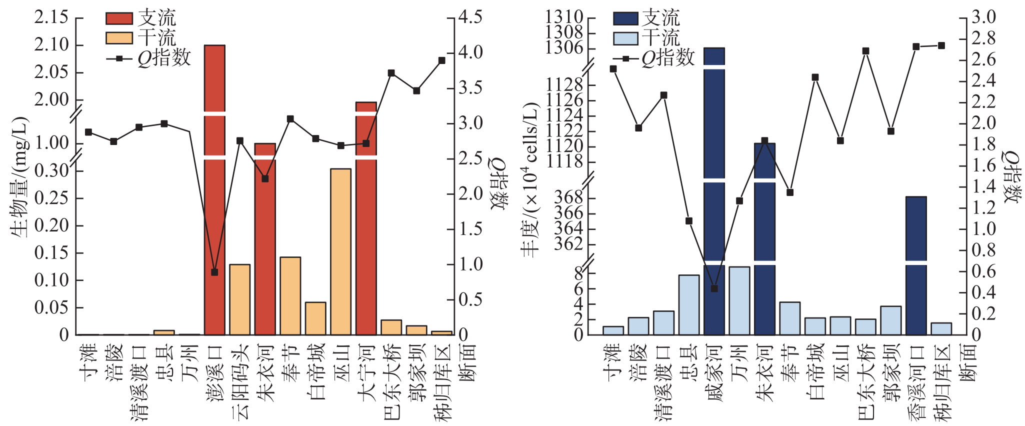

图 10 三峡库区春季甲藻生物量、夏季蓝藻丰度空间变化

Fig.10 Spatial variation of Pyrrophyta biomass in spring and Cyanophyta abundance in summer in the Three Gorges Reservoir

综上,虽然目前三峡库区干流水生态环境较好,但支流水华现象仍是三峡库区面临的主要风险,水文水动力变化是水华暴发的主要诱因。孙启鑫等在研究汛期三峡库区水华发生期间的影响因素时同样指出,水动力条件对甲藻及蓝藻水华的暴发具有重要的作用[56]。较快的流速及较短的换水周期使得水体浊度增大,泥沙含量较高,浮游植物被水流快速冲击到下游水体,无法大量生长繁殖;而当水体流速减慢、换水周期较长时,水体中的泥沙等颗粒悬浮物被沉降,水体透明度增大、光照增强,更适宜浮游植物生长,使得干流浮游植物生物量显著上升,更易暴发水华。低流速、小扰动有利于藻类的生长和聚集,藻类的生长会随着湍流程度的增加而逐渐受到抑制[57]。所以,对于三峡库区水生态环境的防控不仅要加强三峡库区水污染防治,控制库区的营养负荷;更应做好重点支流的水华实时监测、预警工作,减少澎溪河、大宁河等重点支流水体污染状况,从源头减少水华现象的发生;此外,还需充分利用三峡库区水生态调度,蓄清排浑,及时调整换水周期,保障三峡库区水生态健康。

4 结论

1)调查期间,长江三峡库区共鉴定出浮游植物 8 门 105 属 266 种,其中绿藻门、硅藻门和蓝藻门是三峡库区浮游植物主要组成门类,三峡库区浮游植物年平均丰度为 6.40×10^4 cells/L,浮游植物年平均生物量为 0.038 mg/L;三峡库区浮游植物不同季节优势种不同,硅藻门在各个季节均成为优势,绿藻门、甲藻门仅在春季形成优势。

2)三峡库区浮游植物共划分为 24 个功能群,B、D、MP、S1、P、Y 为优势功能群,其中 D 和 P 在四季均成为优势功能群,B 仅在冬季成为优势功能类群。Cond、TN、COD、TP、pH、TDS 是影响该区浮游植物功能群分布的主要环境因子。

3)种类数、丰度或生物量的绝对值和多样性指数的水生态评价结果差异较大,并不适用于三峡水库水质评价。利用浮游植物功能群 Q 指数的评价结果较好,且与生态环境部监测结果及 $TLI(\sum)$ 法的评价结果

基本吻合。因此,浮游植物功能类群 Q 指数可作为评价三峡水生态环境的生物指标,指示三峡库区水生态环境变化。

4)根据水生态评价结果可知,三峡水库水生态总体较好,但支流水华现象仍是三峡库区面临的主要风险。更应做好易发生水华季节的重点支流水生态监测、预警,充分利用干流水生态调度,蓄清排浑,保障三峡库区水生态健康。

致谢:感谢汪志伟、龙波、彭靖、胡友全、胡婧文、罗粉、李庭英、王康宇、刘红岩等在样品采集过程中的帮助与支持。

5 附录

附表Ⅰ和Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2023.0231)。

6 参考文献

[1] Li Z. Water quality monitoring and chemical characteristics analysis in Three Gorges Reservoir area. *Chemical Enterprise Management*, 2019, (14): 36-37. [李智. 三峡库区水质监测及化学特征分析. 化工管理, 2019, (14): 36-37.]

[2] Chen ZM, Wang W, Zhao Y *et al*. Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the Three Gorges Reservoir region. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 32-37. DOI: 10.13205/j.hjgc.201904007. [陈昭明, 王伟, 赵迎等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略. 环境工程, 2019, **37**(4): 32-37.]

[3] Zhang GY. Mechanism of algal bloom in the tributaries of Three Gorges Reservoir: Progress and control suggestions. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, **29**(10): 48-56. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2012.10.010 [章国渊. 三峡水库典型支流水华机理研究进展及防控措施浅议. 长江科学院院报, 2012, **29**(10): 48-56.]

[4] Ma JH, Hu MM, Zhu X. Present situation and control of outbreaks of algal blooms in the Three Gorges Reservoir. *Meteorological and Environmental Research*, 2016, **7**(6): 33-37, 44.

[5] Li L, Yu H, Liu H *et al*. Current situation of water bloom in tributaries of Three Gorges Reservoir area and its prevention and control measures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(3): 64-66, 69. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.03.021. [李礼, 喻航, 刘浩等. 三峡库区支流"水华"现状及防控对策. 安徽农业科学, 2019, **47**(3): 64-66, 69.]

[6] Yao JZ, Fan XJ, Yang X *et al*. Current situation, causes and prevention and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(6): 2041-2048. DOI: 10.12030/j.cjee.202112199. [姚金忠, 范向军, 杨霞等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策. 环境工程学报, 2022, **16**(6): 2041-2048.]

[7] Zeng H, Song LR, Yu ZG *et al*. Post-impoundment biomass and composition of phytoplankton in the Yangtze River. *International Review of Hydrobiology*, 2007, **92**(3): 267-280. DOI: 10.1002/iroh.200610893.

[8] Wang XL, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 431-440. DOI: 10.18307/2018.0214. [王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 431-440.]

[9] Luo MN, Sun BL, Zhu BC *et al*. Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1471-1488. DOI:10.18307/2022.0506. [罗敏纳, 孙蓓丽, 朱冰川等. 太湖流域浮游植物功能类群分布特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1471-1488.]

[10] 沈蓉蓉. 长江下游干流浮游植物分布格局及其与环境因子相关性[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2019.

[11] 许志. 上海河道浮游生物群落结构时空分布特征及水质生物学评价[学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2020.

[12] Kolkwitz R, Marsson M. Ökologie der tierischen saprobien. beiträge zur lehre von der biologischen gewässerbeurteilung. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie*, 1909, **2**(1/2): 126-152. DOI: 10.1002/iroh.19090020108.

[13] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.

[14] 李鑫. 基于浮游植物的珠江中下游水环境质量评价[学位论文]. 上海:上海海洋大学, 2019.

[15] Zhu AM, Hu JX, Li SX *et al*. Phytoplankton diversity and water quality in the main stream and tributaries of Three Gorges Reservoir region of Yangtze River during dry season. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 378-385. DOI: 10.18307/2013.0311. [朱爱民, 胡菊香, 李嗣新等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 378-385.]

[16] 马芊芊. 以浮游生物完整性指数评价长江上游干流宜宾至江津段河流健康度[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2015.

[17] 杨潇. 长江干流浮游植物群落结构和功能群特征及其与环境因子的关系[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2021.

[18] Zhang CY, Chen GJ, He Q *et al*. Response of vegetation to extreme temperature in the Three Gorges Reservoir area. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2022, **43**(1): 44-49. [张春叶, 陈国建, 何谦等. 三峡库区植被对极端气温的响应. 四川林业科技, 2022, **43**(1): 44-49.]

[19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.

[20] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.

[21] 张潇月. 长江下游干流浮游植物多样性研究[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2018.

[22] 童琰. 滴水湖浮游植物群落结构动态及其与环境因子关系的研究[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2012.

[23] Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM *et al*. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, 1993, **116**(4): 689-702. DOI: 10.1007/BF00355486.

[24] 董东平. 土壤与植物地理野外调查研究. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2007.

[25] Elwood SC, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949

[26] Pielou EC. Ecological diversity. New York: Wiley, 1975.

[27] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002,(5): 47-49. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2002.05.023. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002,(5): 47-49.]

[28] Padisák J, Borics G, Grigorszky I *et al*. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14. DOI: 10.1007/s10750-005-1393-9.

[29] Yang H, Zeng B, Sun XY *et al*. Effect of impoundment on community structure of the phytoplankton in the main stream of the Three Gorges Reservoir of ChongQing. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(4): 715-723. DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00715. [杨浩, 曾波, 孙晓燕等. 蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响. 水生生物学报, 2012, **36**(4): 715-723.]

[30] 沈蕴芬, 章宗涉, 龚循矩等. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.

[31] Cai QH. Comprehensive evaluation of eutrophication in Donghu, Lake Wuhan. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(4): 335-339. [蔡庆华. 武汉东湖富营养化的综合评价. 海洋与湖沼, 1993, **24**(4): 335-339.]

[32] Kuang QJ, Ma PM, Hu ZY *et al*. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(2): 87-91. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2005.02.024. [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. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.]

[33] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al*. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.

[34] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.

[35] Han LB, Wang X, Li QH *et al*. Dynamic changes and driving factors of phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1102-1114. DOI: 10.18307/2022.0405. [韩丽彬, 王星, 李秋华等. 贵州高原百花水库浮游植物功能群的动态变化及驱动因子. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1102-1114.]

[36] Borics G, Tóthmérész B, Várbíró G *et al*. Functional phytoplankton distribution in hypertrophic systems across water body size. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 81-90. DOI: 10.1007/s10750-015-2268-3.

[37] Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschtel D *et al*. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(2): 403-424. DOI: 10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.

[38] Cui GY, Wang BL, Xiao J *et al*. Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in Karst hydroelectric reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2021, **592**: 125607. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125607.

[39] Li L, Zhang Y, Chen N *et al*. Seasonal variations and driving factors of phytoplankton functional groups in the Longfeng wetland, Daqing City. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(9): 2850-2859. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202109.027. [李磊, 张莹, 陈宁等. 大庆龙凤湿地浮游植物功能类群季节变化及其驱动因子. 生态学杂志, 2021, **40**(9): 2850-2859.]

[40] Tan Y, Wu XD, Yang ZW *et al*. Summer phytoplankton community structure in urban lakes of Daye City and its influencing factors. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(6): 130-142. [谭亚, 吴晓东, 杨梓文等. 大冶市城市湖泊夏季浮游植物群落结构及其影响因子. 水利水电技术, 2021, **52**(6): 130-142.]

[41] Zhang Q, Miao RL, Liu GX *et al*. The review of the studies on freshwater dinoflagellate bloom. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(2): 352-360. DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00352. [张琪, 缪荣丽, 刘国祥等. 淡水甲藻水华研究综述. 水生生物学报, 2012, **36**(2): 352-360.]

[42] Lu F, Li L, Qi QS *et al*. Distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton community in Harbin Urban River Network during wet season. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3253-3262. DOI: 10.13227/j.hjkx.202011158. [路枫, 李磊, 齐青松等. 哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子. 环境科学, 2021, **42**(7): 3253-3262.]

[43] Xia YF, Hu XD, Xu JX *et al*. Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 134-146. DOI: 10.18307/2019.0113. [夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 134-146.]

[44] Cai K, Lu WQ, Niu ZC *et al*. Phytoplankton community structure and biological assessment in lakes of Taoge River System in spring. *The*

Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, **30**(3): 37-41. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2009.2018.03.009. [蔡琨, 陆维青, 牛志春等. 洮滆水系湖泊春季浮游植物群落结构和水质生物学评价. 环境监测管理与技术, 2018, **30**(3): 37-41.]

[45] Yin Y, Cai J, Zhu ZX *et al*. Phytoplankton community composition and health status assessment of aquatic ecosystem in Laohutan Reservoir. *Environmental Ecology*, 2022, **4**(8): 31-39. [殷燕, 蔡娟, 朱哲欣等. 老虎潭水库浮游植物群落特征及水生态健康评价. 环境生态学, 2022, **4**(8): 31-39.]

[46] Zhao D, Wang WT, Chen SY *et al*. Temporal and spatial variation characteristics of phytoplankton functional groups in Jinze Reservoir[J/OL]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022: 1-11[2022-09-26]. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0095. [赵丹, 王文婷, 陈诗雨等. 金泽水库浮游植物功能群时空变化特征[J/OL]. 环境科学学报, 2022: 1-11[2022-09-26].

[47] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al*. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI: 10.18307/2015.0102. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]

[48] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G *et al*. Classification schemes for phytoplankton: A local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 901-912. DOI: 10.1093/plankt/24.9.901.

[49] Becker V, Caputo L, Ordóñez J *et al*. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean Reservoir. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354. DOI: 10.1016/j.watres.2010.03.018.

[50] Shen HL, Li B, Cai QH *et al*. Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(4): 859-869. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.09.007.

[51] Chen KF, Ye L, Tan L *et al*. Composition of phytoplankton functional groups and ecological status of typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in 2015. *Wetland Science*, 2022, **20**(2): 268-276. [陈克峰, 叶麟, 谭路等. 2015 年三峡水库典型支流库湾的浮游植物功能群组成和生态状况. 湿地科学, 2022, **20**(2): 268-276.]

[52] Peng M, Wu JW, Li LX *et al*. Characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental drivers in Xiaowan Reservoir area of Lancang River during the summer of 2017-2019. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(1): 50-57. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.028. [彭梦, 吴嘉伟, 李罗新等. 澜沧江小湾库区 2017－2019 夏季浮游植物功能群特征及其环境驱动因子. 生态学杂志, 2022, **41**(1): 50-57.]

[53] 朱喜, 袁萍. 长江三峡水库“水华”爆发及其对策. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 昆明, 2013: 32-37.

[54] 刘晋高. 防控三峡水库支流水华的潮汐式生态调度研究[学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.

[55] Chen Y, Duan XB, Liu SP *et al*. Community structure of the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir after the third period of sluice. *Freshwater Fisheries*, 2009, **39**(1): 10-15. [陈勇, 段辛斌, 刘绍平等. 三峡水库三期蓄水后浮游植物群落结构特征初步研究. 淡水渔业, 2009, **39**(1): 10-15.]

[56] Sun QX, Song LX, Ji DB *et al*. An analysis of correlation factors during the occurrence of algal blooms in the Three Gorges Reservoir area in flood seasons. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (10): 17-23, 33. [孙启鑫, 宋林旭, 纪道斌等. 汛期三峡库区水华发生期间相关因子关系分析. 中国农村水利水电, 2019, (10): 17-23, 33.]

[57] Wu XH, Li XJ. Reviews of influences from hydrodynamic conditions on algae. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(7): 1732-1738. [吴晓辉,李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1732-1738.]

附表Ⅰ三峡库区理化因子（平均值±标准差）

Attached Tab.Ⅰ Changes of physical and chemical factors in the Three Gorges Reservoir

（Mean±standard deviation）

区域	点位	水温/℃	透明度/cm	Cond/(ms/cm)	TDS/(mg/L)	SAL/(‰)	pH	TP/(mg/L)	TN (mg/L)	COD (mg/L)
干流	寸滩	18.45±5.49	90±8	353.2±22.7	260.33±37.2	0.19±0.03	8.3±0.3	0.35±0.47	2.3±1.3	3.1±1
	涪陵	18.43±5.77	97±50	354.6±23.6	266.01±29.73	0.2±0.02	8.3±0.4	0.13±0.05	2.2±1	3.9±1.4
	清溪渡口	18.48±5.84	100	351±16.6	263.41±26.81	0.22±0.06	8.2±0.5	0.13±0.06	1.8±0.2	3.2±1.1
	忠县	18.48±5.87	165±82	352.4±23.5	264.12±30.25	0.2±0.03	8.7±0.5	0.13±0.09	2.2±0.4	3.8±1.7
	万州	18.41±5.56	95±85	352.8±22.2	262.78±28.07	0.19±0.02	8.4±0.4	0.15±0.11	2.8±0.8	3.2±1.7
	云阳码头	16.3±3.61	380	348.5±33.1	274.08±29.68	0.21±0.02	8.5±0.4	0.1±0.02	2.2±0.9	4.5±2.1
	奉节	18.35±5.65	204±109	342.6±33.1	256.91±27.63	0.19±0.02	8.2±0.5	0.14±0.11	2±0.5	3.2±1.6
	白帝城	18.48±5.5	220±119	344.6±35.9	257.03±27.69	0.19±0.02	8.2±0.4	0.15±0.1	1.9±0.6	2.8±1.7
	巫山	18.58±5.53	200±128	342.8±34.9	255.61±27.79	0.19±0.02	8.6±0.4	0.16±0.07	2.1±0.7	2.3±1.2
	巴东大桥	18.48±5.59	192±118	342.4±32.7	256.1±26.89	0.19±0.02	8.1±0.7	0.12±0.07	2.1±1	2.6±1.6
	郭家坝	19.48±6.49	260±71	343.3±32	254.8±26.38	0.19±0.02	8.2±0.4	0.15±0.07	2.3±0.5	2.5±1.9
	秭归库区	19.04±5.22	230±127	347.8±31.6	256.48±26.52	0.19±0.02	8.2±0.3	0.13±0.03	2.5±0.9	2.7±0.7
支流	乌江	17.68±4.21	193±74	330.8±24.4	250.5±12.48	0.19±0.01	8.3±0.4	0.11±0.01	2.18±0.11	2.85±2.32
	戚家河	20.15±6.27	113±68	239.7±120.7	227.9±34.52	0.17±0.03	8.7±0.3	0.1±0.01	2.23±0.69	9.9±5.29
	苎溪河	19.15±5.19	170±122	365±22.8	269.2±23.61	0.2±0.02	8.4±0.3	0.12±0.03	3.2±1.76	4.68±0.65
	澎溪口	17.2±3.02	260	340.9±22.1	261.5±20.84	0.19±0.02	8.5±0.3	0.09±0.03	1.33±0.25	5.07±1.87
	朱衣河	19.78±5.87	161±80	350.1±31.7	255.2±31.56	0.19±0.03	8.8±0.3	0.09±0.01	1.98±0.95	5.83±4.49
	大宁河	18.93±4.66	239±121	346.4±34.4	255.1±22.99	0.19±0.02	8.2±0.4	0.11±0.03	2.11±0.45	2.73±1.14
	香溪河口	20.33±6.44	248±75	338.9±32	245.3±34.75	0.18±0.03	8.3±0.3	0.1±0.02	2.55±0.78	5.05±4.22

附表Ⅱ水生态指标评价标准

Attached Tab.Ⅱ Criteria of water ecological assessment criteria indicator

水生态评价指标	极贫营养	贫营养	中营养	轻度富营养	中度富营养	极度富营养
细胞丰度/（$\times 10^6$ 个/L）	＜0.5	＜1.0	＜40	＜80	＜100	≥100
生物量/（mg/L）	＜0.1	＜1.0	＜5.0	＜7.0	＜10.0	≥10.0
硅藻熵		＜1.0	＜5.0			≥15.0
TLI 综合营养状态指数		＜30	＜50	＜60	＜70	≥70
	清洁	轻污染	中污染	重污染	严重污染	
Simpson 多样性指数	≥6		＜6	＜2		
Shannon-Wiener 多样性指数	≥4.5	＜4.5	＜3	＜2	＜1	
Pielous 均匀度指数	≥0.8	＜0.8	＜0.5	＜0.3		
	水质极好	水质好	水质中等	水质耐受	水质差	
Q 指数	≥4	＜4	＜3	＜2	＜1	