

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.10

不同降雨强度对亚热带水源水库浮游植物群落结构的影响及其驱动因子

白云浩^{1,2}, 黄廷林^{1,2}, 缪威铭^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了解降雨事件对亚热带水源水库浮游植物群落结构的影响,于2022年5月和6月分别在两次不同强度降雨期间进行浮游植物采集调查。结合浮游植物门分类和功能群分类方法,运用非度量多维尺度分析(NMDS)探究两次降雨以及降雨前后浮游植物群落的差异性,并采用冗余分析(RDA)和方差分析(VPA)探明浮游植物群落结构演替的驱动因子。结果表明:共检出浮游植物8门69属125种,功能群划分为11种,其中S1、SN、MP和N为主要功能群。降雨I和降雨II前后浮游植物群落结构均发生了变化:降雨I期间由蓝藻向硅藻演替,且雨期硅藻占优;降雨II期间由蓝藻向硅藻和绿藻轻微演替,但蓝藻始终处于绝对优势地位。雨期功能群SN和S1丰度百分比减小,而MP或N丰度百分比增大,与蓝藻向硅藻或绿藻演替的变化特征一致。冗余分析和方差分析表明,混合层深度(Z_{mix})、水温和营养盐共同驱动了浮游植物群落的演替,且门分类比功能群分类能更好地解释浮游植物群落变化。本文可为降雨条件下浮游植物的响应机制研究提供参考。

关键词: 浮游植物; 群落结构; 水源水库; 降雨强度; 演替特征; 驱动因子; 亚热带

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)05-0088-10

Effects of different rainfall intensities on the phytoplankton community structure of subtropical source water reservoirs and its driving factors

BAI Yunhao^{1,2}, HUANG Tinglin^{1,2}, MIAO Weiming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xian 710055, China)

Abstract: Phytoplankton surveys were carried out in May and June 2022 around two different intensities of rainfall events to better understand how rainfall affect the phytoplankton community structure in subtropical reservoirs. In combination of taxonomic and functional group classification methods, the variability of phytoplankton communities before and after the two rainfall events were examined in this study using non-metric multidimensional scaling (NMDS), and the driving factors behind the structural succession of phytoplankton communities were investigated using redundancy analysis (RDA) and variance partitioning analysis (VPA). The results showed that 125 species of phytoplankton were detected in 8 phyla and 69 genera, and the functional groups were divided into 11 species, among which S1, SN, MP, and N were the main functional groups. The phytoplankton community structure changed before and after Rainfall I and Rainfall II. The phytoplankton community evolved from *Cyanobacteria* to *Bacillariophyta* in Rainfall I, and *Bacillariophyta* were dominant during the rainy period; whereas *Cyanobacteria* were always completely dominant in Rainfall II, during which the phytoplankton community evolved slightly from

收稿日期:2022-11-28; 修回日期:2023-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51979217),陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF06-08)

作者简介:白云浩(1998—),男,河南叶县人,硕士研究生,研究方向为浮游植物演替规律。

通讯作者:黄廷林(1962—),男,山东昌邑人,教授,研究方向为水源水质污染与富营养化控制。

Cyanobacteria to *Bacillariophyta* and *Chlorophyta*. In line with the succession of *Cyanobacteria* to *Bacillariophyta* or *Chlorophyta*, the relative abundance of functional groups SN and S1 decreased while that of MP or N increased during the rainy period. Redundancy analysis and Variance partitioning analysis showed that mixing depth (Z_{mix}), water temperature, and nutrients jointly drove the succession of phytoplankton communities and the taxonomic group classification could better explain the changes of phytoplankton communities than the functional group classification. This paper can served as a reference for the investigation of phytoplankton response mechanisms in the presence of precipitation.

Key words: phytoplankton; community structure; source water reservoir; rainfall intensity; succession characteristics; driving factor; subtropics

1 研究背景

浮游植物作为水生食物链的基础部分^[1],对水生生态系统的能量流动、(营养)物质循环以及维持食物网的动态平衡等方面起着至关重要的作用^[2-4]。由于浮游植物具有生长周期短和反应灵敏等特征,能够对外界环境做出迅速响应,因此其群落组成、优势种及多样性常用来指示水环境状况^[5-6]。已有研究表明,以种属为基本单元进行划分的传统分类法不能很好地解释浮游植物的生态环境特征,在预测浮游植物群落方面存在一定局限性^[7-8],因此在一些研究中采用 Reynolds 等^[9]提出的涵盖浮游植物形态特征及生态适应性的功能群分类法来表征水环境状况。一般认为功能群分类比传统分类能更好地描述浮游植物群落结构与生态环境的动态关系^[10],但这种方法可能并不适用于所有水域,因此将两种分类方法组合能够更好地解释浮游植物的动态变化。

大量研究表明,浮游植物受诸多环境因子共同驱动,如营养盐、温度、光照和浮游动物的捕食等,而气候因子(如降雨事件)对浮游植物的影响逐渐得以重视,已成为当前湖沼学的研究热点之一^[11]。Hawkins 等^[12]和 Blois 等^[13]研究发现降雨对水生生物多样性以及水生生态系统可能构成严重威胁;Marinov 等^[14]和 Winder 等^[15]也认为降雨引起的环境变化可能是浮游植物群落、营养状态和生物地球化学状态变化的重要驱动因素。尽管已有研究表明降雨会抑制蓝藻水华^[16],但降雨事件是如何改变湖库条件,进而影响藻类丰度和分布的研究仍有待完善。此外,目前多数研究只针对单次降雨事件^[17-19],不足以揭示降雨强度对浮游植物群落的影响,也鲜有研究通过高频监测分析降雨与浮游植物群落的相互关系。鉴于上述问题,以中国亚热带地区某水库为例,开展降雨强度对水库浮游植物群落结构的影响及其驱动因子的研究,该水库承担着珠三角地区的供水任务,对粤港澳大湾区的经济发展起着重要的支撑作用。本研究结合浮游植

物传统分类方法和功能群分类方法,同时考虑水文和环境因子,通过对比两次不同强度的降雨事件探明降雨对浮游植物丰度和群落结构的影响及其关键驱动因子。研究结果揭示了浮游植物对短时降雨的响应,对于水库管理具有重要意义。

2 数据与研究方法

2.1 研究区域

南方某水库为中型调蓄水库,源自珠江。该地区太阳总辐射量较大,日照时间长,气候温和,属亚热带海洋性季风气候。年平均气温为 22 °C,年平均降雨量为 1 800 mm。该水库总库容为 $1\ 917 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大水深约 22 m。设计洪水位为 75.2 m,死水位为 55.3 m,水面面积为 1.6 km²,集雨面积为 4.43 km²。水库水域及采样点位置如图 1 所示。

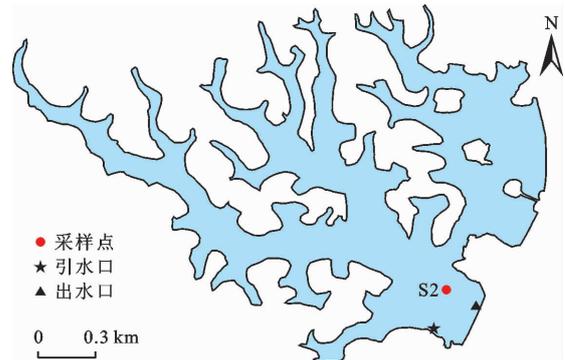


图1 南方某水库水域及采样点位置

2.2 样品采集与测定

对研究区域 2022 年 5 月和 6 月两次降雨事件分别编号为降雨 I 和降雨 II,相应采样频率分别为 1 次/d 和 1 次/2d。在库区水深最深点(图 1 中 S2 点)的表层 0.5 m 深度处采集水样 1 L,现场加入鲁哥试剂固定,摇匀,沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL。取 0.1 mL 浓缩液,利用 10 × 40 倍光学显微镜进行物种鉴定与计数,具体方法参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[20]

总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷(TP)和溶解性总磷(dissolved total phosphorus, DTP)等指标的测定参考《水和废水监测分析方法》^[21]。使用哈希Hydrolab DS5多功能水质分析仪测定水体水温、pH、溶解氧(DO)、叶绿素 a (Chl- a)，水体透明度(Secchi depth, SD)使用塞氏盘测定。

2.3 数据处理与分析

混合层深度(Z_{mix})采用与水库表层水体水温相差 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 处对应的库水深度,以真光层深度与混合层深度的比率($Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$)来反映水体中光的可利用性^[22],将2.7倍的透明度视为真光层深度(Z_{eu})^[23]。本研究除考虑传统的浮游植物门分类法,还采用浮游植物功能群分类法^[9, 24]。

气温数据和降雨量数据分别从当地气象局网站和水库水文数据中获得。根据国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012),降雨I和降雨II分别为暴雨($50.0 \sim 99.9\text{ mm/d}$)和大雨($25.0 \sim 49.9\text{ mm/d}$)。依据降雨是否对浮游植物群落结构造成了显著影响或改变,将日降雨量大于 15 mm/d 的时段视为“雨期”,否则视为“非雨期”。

所有数据通过Excel 2019进行整理,通过非度

量多维尺度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析来检验两次降雨期间及降雨前后浮游植物群落是否存在差异;采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)的方法分析浮游植物与环境因子的关系;以方差分析(variance partitioning analysis, VPA)进一步探明环境因子对浮游植物群落的相对贡献,以上3个统计分析基于R4.1.3软件的vegan包和ggplot2包完成,其余分析与作图在OriginPro 2022中完成。

3 结果与分析

3.1 水文与水动力条件变化特征

图2为研究区两次降雨期间的降雨量、气温以及水动力条件的变化特征,图2(b)采用混合深度表征不同降雨强度对水动力的影响。图2(a)显示,降雨I最大降雨量发生在5月12日,其后日均气温最低值出现在5月16日,降雨II期间气温高于降雨I。由图2(b)可以看出较大的混合深度(Z_{mix})发生在雨期,且降雨I雨期的混合深度大于降雨II。研究期内真光层深度(Z_{eu})的变化并不明显,光的可利用性($Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$)最小值出现在日均气温最低时,即 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 主要取决于 Z_{mix} 的变化。

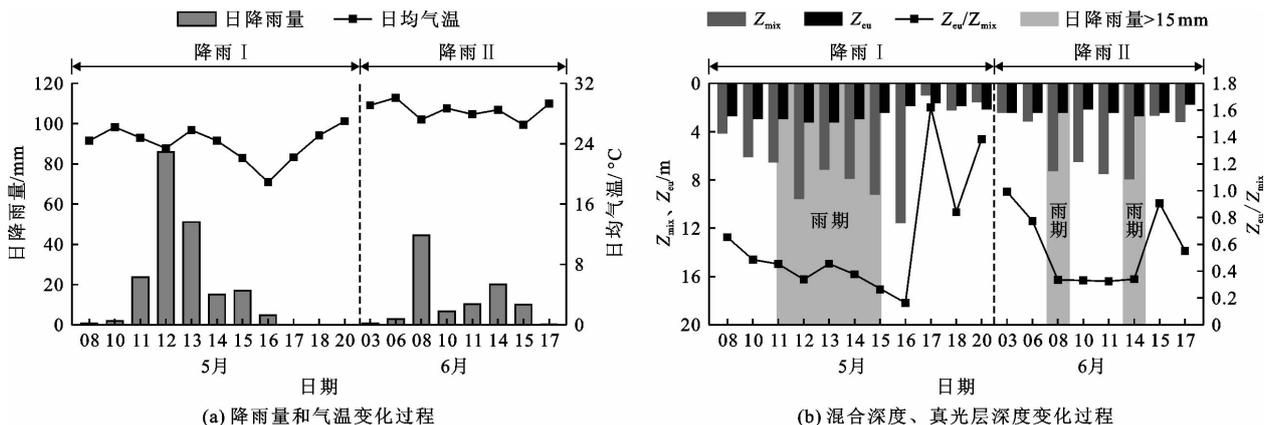


图2 研究区两次降雨期间的降雨量、气温以及水动力条件的变化特征

3.2 水体理化指标变化特征

图3为研究区两次降雨期间环境因子的变化特征。将图3(a)与图2(a)相比可以看出,两次降雨期间水温与气温的变化趋势相同,表现为降雨II期间的水温大于降雨I期间;图3(b)~3(d)显示,5月13日叶绿素 a 的浓度值最小,溶解氧浓度和pH的最小值均在5月16日,且该3个指标在降雨II期间波动较大,可能与降雨强度和降雨时间相关;由图3(e)~3(g)可以看出,3个氮素指标(总氮、氨氮和硝氮)呈

现出浓度逐渐降低的趋势,且降雨I期间的浓度大于降雨II期间,可能是由于降雨I的降雨量较大,雨后水体的氮素浓度得到一定程度的稀释;由图3(h)、3(i)可以看出,磷浓度在5月17日达到最大值,该日总氮浓度也有所增大,可能是受水库调水水质的影响。

3.3 浮游植物群落结构组成和特征

调查期间该水库共出现浮游植物8门69属125种,其中绿藻门71种,占种类总数的比例为56.8%;硅藻门22种,所占比例为17.6%;蓝藻门

19 种,所占比例为 15.2%;甲藻门、裸藻门、金藻门、隐藻门和黄藻门种类相对较少,共占 10.4%。浮游植物功能群分类有 B、D、H1、J、Lo、N、SN、W1、MP、S1 和 X1(表 1),其中 S1、SN、MP 和 N 丰度较大,为主要功能群。

图 4 为两次降雨期间浮游植物按门类分类的丰度动态变化。由图 4(a)、4(b)可以看出,雨期浮游植物丰度均呈显著下降趋势,蓝藻丰度减小幅度最大,其次是绿藻。图 4(c)、4(d)可以看出,降雨 I 前后浮游植物群落结构发生了显著改变,降雨前、降雨中、降雨后门类丰度百分比排序分别为蓝藻 > 硅藻 > 绿藻、硅藻 > 蓝藻 > 绿藻、蓝藻 > 硅藻 = 绿藻;降雨 II 期间蓝藻、绿藻和硅藻丰度均明显降低,但其相对丰度百分比排序并没有发生变化,即降雨 II 前后始终为蓝藻 > 硅藻 = 绿藻。

图 5 为两次降雨期间浮游植物按功能群分类的丰度动态变化。由图 5 可以看出,降雨 I 期间功能

群 SN 和 S1 的丰度百分比在雨期显著减少,而功能群 B、D 和 MP 的丰度百分比缓慢增加,但雨后 SN 和 S1 丰度及丰度百分比均有所升高,而 B、D 和 MP 的丰度及丰度百分比均有所降低;降雨 II 前后功能群 S1 和 SN 的丰度一直占据绝对优势,雨期功能群 B、MP 和 N 的丰度百分比略有增加,其他功能群没有发生明显演替。

3.4 浮游植物群落与环境因子的关系

图 6 为两次降雨期间浮游植物的非度量多维尺度(NMDS)分析排序图(图中未画出降雨 II 雨期置信椭圆)。图 6 中 NMDS 分析结果显示,非雨期和雨期样本点的分散程度不同,降雨 I 和降雨 II 样本点的分散程度也不同,表明不同强度降雨和是否为雨期均对浮游植物群落的结构组成有显著影响,也间接证实了分类方法的合理性。此外,功能群分类比门类分类 NMDS 的 Stress 值更大,表明本研究中门类分类对浮游植物群落的解释优于功能群分类。

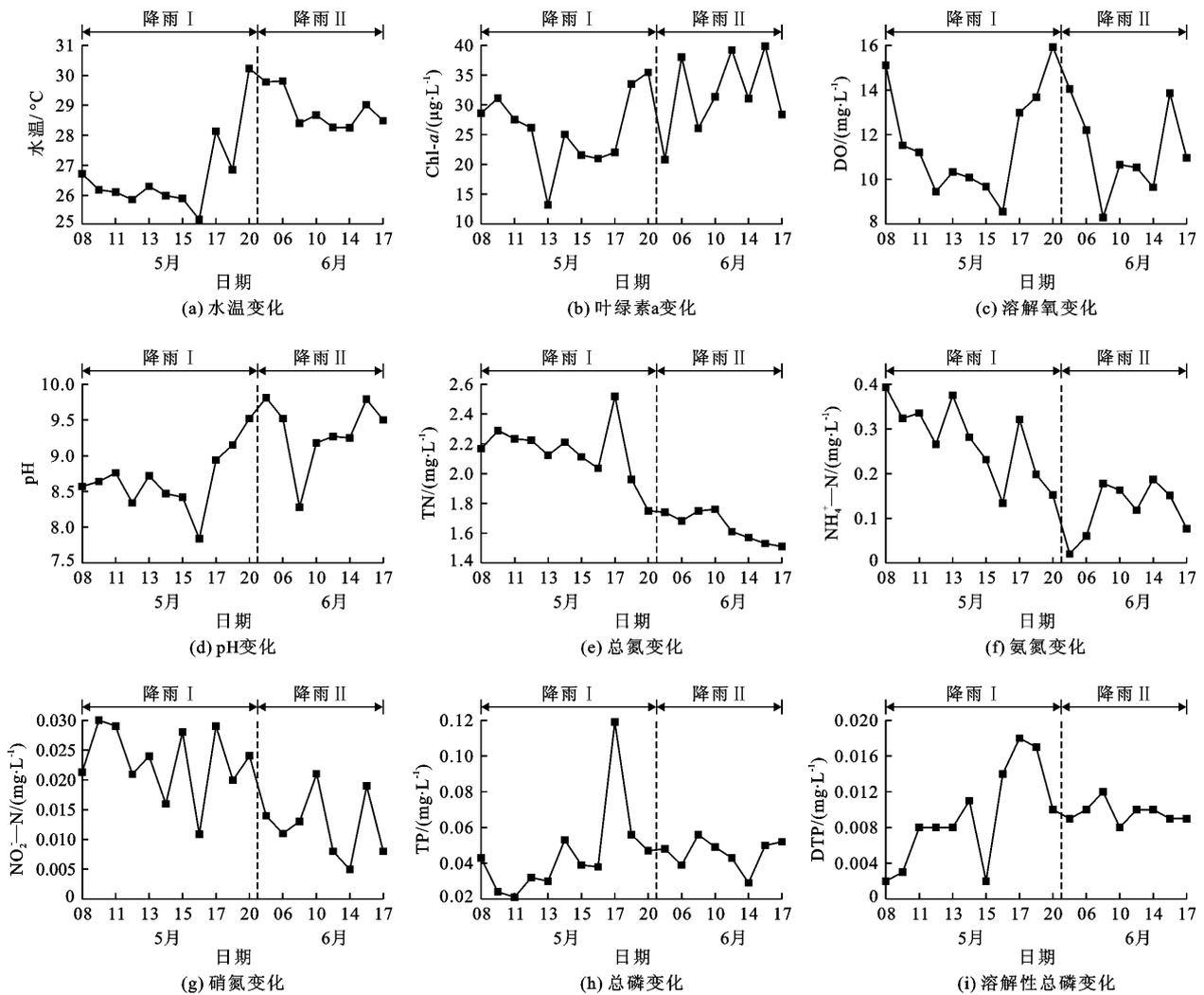


图 3 研究区两次降雨期间环境因子的变化特征

表1 调查期间水库浮游植物功能群结构组成

功能群	代表种	耐受性	敏感性	生境	门分类
B	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	低营养	pH 升高	贫营养、洁净、深水	硅藻
D	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)、肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	冲刷	营养缺乏	含有营养盐、浑浊	硅藻
H1	多变鱼腥藻(<i>Anabaena variabilis</i>)、卷曲鱼腥藻(<i>Anabaena circinalis</i>)	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照、低含磷量	富营养、分层	蓝藻
J	微小四角藻(<i>Tetraëdron minimum</i>)、膨胀四角藻(<i>Tetraëdron tumidulum</i>)、四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)、顶锥十字藻(<i>Crucigenia apiculata</i>)、华美十字藻(<i>Crucigenia lauterbornii</i>)、四足十字藻(<i>Crucigenia tetrapedia</i>)、空星藻(<i>Coelastrum sphaerucim</i>)		高光照	高营养、混合、浅水	绿藻
Lo	二角多甲藻(<i>Peridinium bipes</i>)、角甲藻(<i>Ceratium hirundinella</i>)	营养分层	长时间混合	贫到富营养	甲藻
N	扁鼓藻(<i>Cosmarium depressum</i>)、光滑鼓藻(<i>Cosmarium laeve</i>)、项圈鼓藻(<i>Cosmarium moniliforme</i>)、短鼓藻(<i>Cosmarium abbreviatum</i>)、四角角星鼓藻(<i>Staurostrum tetracerum</i>)		水体混合	贫到中营养、静水、低纬度地区	绿藻
SN	中华小尖头藻(<i>Raphidiopsis sinensia</i>)、拉式拟柱孢藻(<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)	低光照、低营养	冲刷作用	温暖、混合	蓝藻
W1	(囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.)			中营养、浅水	裸藻
MP	短小曲壳藻(<i>Achnanthes exigua</i>)、桥弯藻(<i>Cymbella</i> sp.)	冲刷		强急流	硅藻
S1	伪鱼腥藻(<i>Pseudoanabaena</i> sp.)	低光照、低磷	冲刷作用	混合、透明度低	蓝藻
X1	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)、椭圆小球藻(<i>Chlorella ellipsoidea</i>)、针形纤维藻(<i>Ankistrodesmus acicularis</i>)、螺旋纤维藻(<i>Ankistrodesmus spiralis</i>)	分层、恶劣环境条件	水体混合	贫到富营养、浅水	绿藻

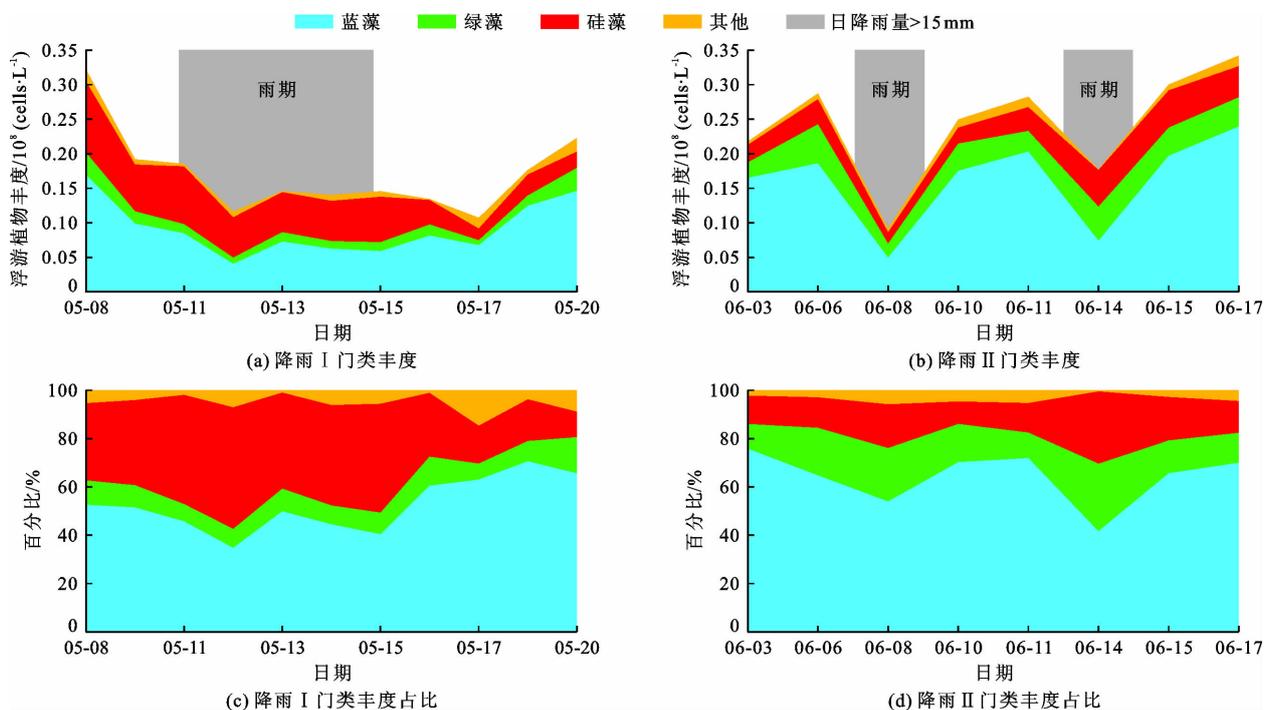


图4 研究区两次降雨期间浮游植物按门分类的丰度变化

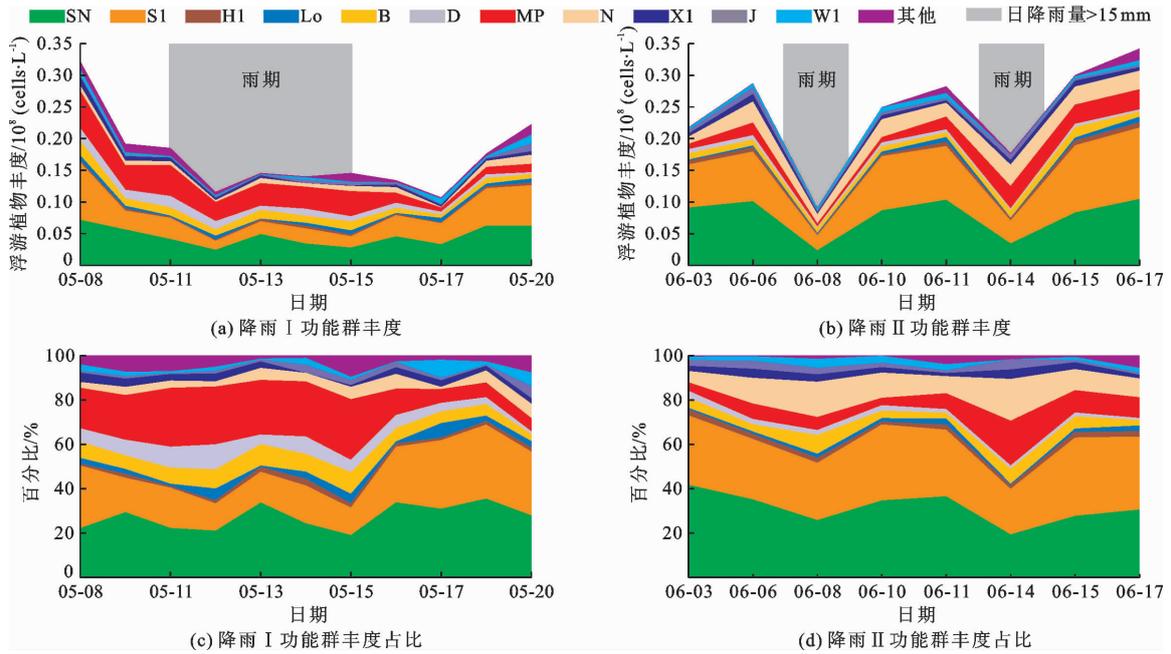


图 5 研究区两次降雨期间浮游植物按功能群分类的丰度变化

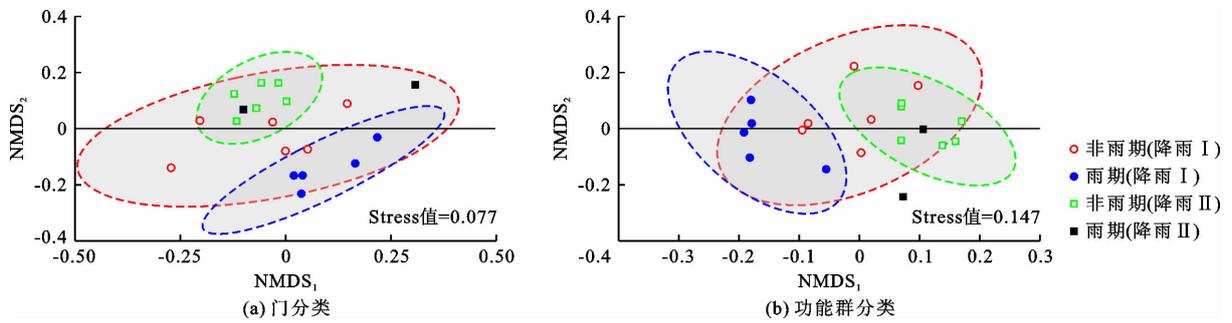


图 6 研究区两次降雨期间浮游植物的非度量多维尺度分析排序图

图 7 为两次降雨期间浮游植物与环境因子的冗余分析排序图。由图 7(a)可以看出,门分类的第 1 排序轴 RDA_1 和第 2 排序轴 RDA_2 的解释率分别为 51.38 % 和 21.13 %,其中水温、氮素和混合深度 (Z_{mix}) 是显著影响浮游植物门水平的驱动因子 ($p < 0.01$)。水温与蓝藻、绿藻的相关性更强,总磷与蓝藻

的相关性更强,氮素和 Z_{mix} 对硅藻影响较大。由图 7(b)可以看出,功能群分类的第 1 排序轴 RDA_1 和第 2 排序轴 RDA_2 的解释率分别为 17.26 % 和 9.04 %,其中硝氮和水温是影响浮游植物功能群的显著驱动因子 ($p < 0.01$),水温对功能群 S_1 、SN 和 N 影响最大,硝氮对功能群 D、B 和 MP 影响最大。

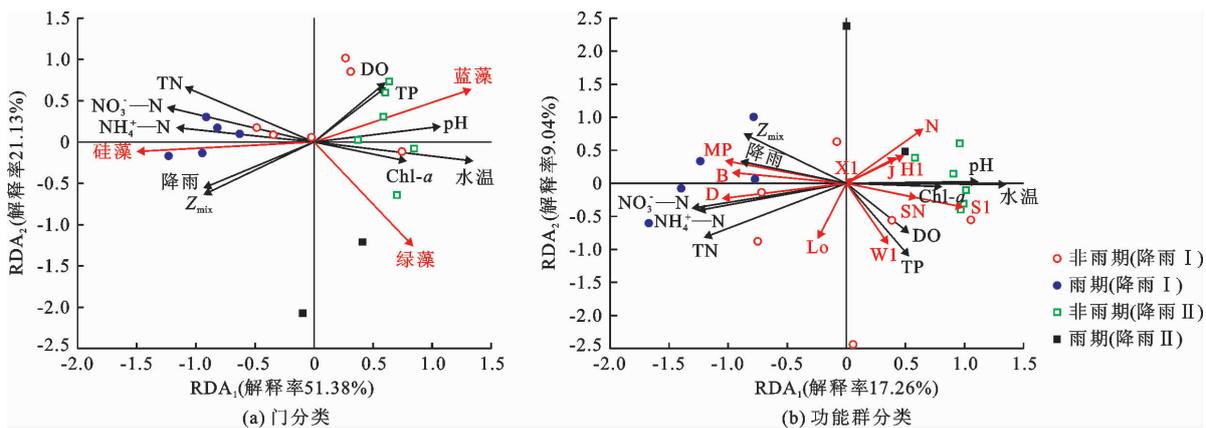


图 7 研究区两次降雨期间浮游植物的冗余分析排序图

图8为影响因子对浮游植物群落结构的方差分析。由图8表明,影响因子对浮游植物门分类的解释度(75.6%)高于对功能群分类的解释度(56.2%),且与RDA和NMDS的分析结果一致。综合上述分析结果可知,影响该水库浮游植物群落结构的主要驱动因子为混合深度、水温和营养盐。

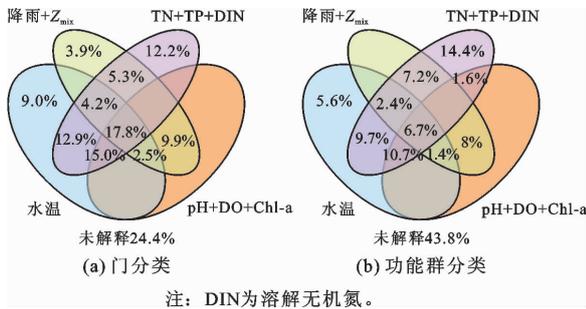


图8 影响因子对浮游植物群落结构的方差分析

4 讨论

已有研究表明,降雨历时、降雨频率和降雨量均为影响水库浮游植物的关键因素^[25-26]。降雨过程不仅影响水库的水体温度、营养盐、流速和流量等,而且使水体中的悬浮颗粒物增多,增大水体的浊度,从而抑制浮游植物的光合作用,同时还通过增加水体紊动掺混作用稀释浮游植物的细胞密度^[27-28],所以,降雨是一个相对综合和复杂的因素。本研究发现两次不同强度降雨对水库浮游植物群落的影响有显著不同,降雨I前后(非雨期)水体中浮游植物主要为蓝藻,雨期浮游植物丰度急剧下降且硅藻占优,而降雨II前后蓝藻始终处于绝对优势地位且雨期有蓝藻向绿藻和硅藻演替的微弱趋势,因此不同降雨强度可能会对群落结构产生不同影响,其他学者在相关研究中也得出了类似结论^[29-30]。必须指出的是,本研究发现除蓝藻外的其他浮游植物丰度在降雨前后未发生显著变化,即浮游植物群落结构动态变化与蓝藻丰度波动密切相关。冗余分析和方差分析表明,混合深度、水温和营养盐为降雨对浮游植物群落结构影响的主要驱动因子。

已有研究表明降雨对藻类水华有抑制作用,可能是由于水体混合程度增加、浮游植物被冲刷或稀释以及光限制等因素所致^[22,30]。事实上,水体混合是一个复杂的水动力机制,对浮游植物的影响主要表现在两个方面:(1)混合过程直接影响浮游植物的光照和营养供应;(2)混合过程引起水体的扰动和冲刷,从而影响浮游植物群落结构^[31-32]。混合深

度的改变将直接影响光的可利用性^[22,33],当 Z_{eu}/Z_{mix} 值低于其临界值(0.20~0.35)时,浮游植物生长将会受到光限制,本文所研究水库的 Z_{eu}/Z_{mix} 值雨期基本维持在临界值左右,因此雨期浮游植物光利用率较低,导致细胞丰度显著降低,其中蓝藻丰度降低最显著,这与文献[22]中“降雨对蓝藻水华有阶段性抑制作用”的结论一致。此外,功能群SN和S1对冲刷作用敏感(表1),因此雨期二者优势地位降低。研究发现降雨I的混合深度大于降雨II,表明降雨I对水体的扰动更大,Marañón^[34]和张辉等^[35]指出功能群MP能在频繁扰动的浑浊水中具有优势,这解释了雨期蓝藻向耐受冲刷的硅藻演替的现象。功能群N适宜于静水环境(表1),因此在扰动较弱的降雨II过程中绿藻丰度百分比略有增大。Wen等^[36]研究表明,混合深度的增加将伴随着浮游植物从运动型(蓝藻)向非运动型(绿藻和硅藻)的转变,与本研究降雨II雨期绿藻丰度百分比增大相一致。

温度决定浮游植物细胞酶的活性及生理代谢,进而影响其繁殖及生长速率,因此影响着藻类群落组成^[37]。本研究期间(除雨期)水库浮游植物丰度较高且优势类群均为蓝藻,文献[38]也指出,在全年温暖的亚热带地区,若具有较高浓度的氮、磷,则蓝藻可能全年占优。Recknagel等^[39]研究表明,拟柱孢藻和尖头藻最适水温约为30℃,可在较深的水库(深度大于15m)中过量繁殖,而伪鱼腥藻为广布物种^[40-41],适宜温度范围为20~30℃,分别与本研究水库功能群SN和S1的繁殖特征一致,冗余分析结果也表明水温与功能群SN和S1呈正相关。此外,降雨II期间水温显著高于降雨I雨期,蓝藻和绿藻喜高温,而硅藻适宜于低温环境,因此降雨II期间浮游植物群落由蓝藻向绿藻轻微演替且蓝藻始终占优,而降雨I期间却由蓝藻向硅藻演替且雨期硅藻占优。

营养盐是浮游植物生长繁殖的重要因子,其组成、分布、丰度和生物量等与浮游植物息息相关^[38]。本研究水库水体中TN和TP浓度远超水体富营养化的临界浓度($\rho(\text{TN}) = 0.2 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.02 \text{ mg/L}$),为浮游植物生长繁殖提供了良好的营养条件。研究期间该水库TN浓度大于1.5 mg/L, N/P值远大于16:1,水体处于磷限制水平^[42]。研究表明伪鱼腥藻耐受缺磷水体,且拟柱孢藻适宜高氮低磷的水环境^[43],因此该水库功能群S1和SN为优势种。冗余分析表明该水库以功能群D、B与MP为

代表的硅藻和TN与无机氮(inorganic nitrogen)呈显著正相关,这与文献[44]、[45]得出的硅藻适宜高氮环境的结论一致。但本研究中氮素可能并不是硅藻群落变化的关键驱动因子,首先,该水库氮素充足,功能群D、B与MP构成的硅藻丰度并没有明显增加;其次,研究期间的水温(26~30℃)不是硅藻的最佳生存条件,因此其对氮的利用率有限。此外,与其他水域因暴雨径流汇入而导致养分增大^[46]不同的是,该水库周围不存在面源污染且水体营养盐负荷易受引水水质的影响,因此雨期水库中氮、磷浓度并无明显增加。

目前,大量研究使用功能群分类以更准确地解释浮游植物与影响因素之间的动态关系并预测群落变化^[10,47]。本研究中发现功能群分类的解释率低于门分类,与Cupertino等^[7]和Kim等^[8]的研究结论一致,可能的原因是:(1)降雨事件历时较短,生境未能发生显著变化,同时浮游植物对生态环境的响应具有一定的滞后性^[48],因此多数功能群对降雨的响应较弱;(2)未考虑水体紊动参数,对生境描述不够精确,这使得功能群分类的解释率偏低。总之,两种分类方法具有各自优势,因此须结合二者综合考虑以揭示降雨对浮游植物群落的影响。

5 结 论

(1)降雨I和降雨II期间该水库浮游植物群落结构均发生了变化。降雨I期间由蓝藻向硅藻演替,雨期硅藻占比大于蓝藻;降雨II期间由蓝藻向硅藻和绿藻轻微演替,但蓝藻始终占优。研究期内共检出11个功能群,其中SN、S1、MP和N为主要功能群,雨期SN和S1丰度百分比减小,而MP或N丰度百分比增大,与蓝藻向硅藻或绿藻演替的变化特征一致。

(2)冗余分析和方差分析表明,降雨过程中混合深度、水温和营养盐共同影响了浮游植物的群落演替,改变了浮游植物的群落结构。

(3)非度量多维尺度分析和冗余分析表明,门分类比功能群分类能更好地解释浮游植物群落特征,因此在相关研究中应结合两种分类方法进行综合分析。

参考文献:

[1] LUIMSTRA V M, VERSPAGEN J M H, XU Tianshuo, et al. Changes in water color shift competition between phytoplankton species with contrasting light-harvesting strategies [J]. *Ecology*, 2020, 101(3): e02951.

[2] GOGOI P, DAS S K, SARKAR S D, et al. Environmental factors driving phytoplankton assemblage pattern and diversity: insights from Sundarban eco-region, India [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2021, 21(2): 354–367.

[3] YUAN Yuxiang, JIANG Ming, LIU Xingtuo, et al. Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 1–12.

[4] ZHANG Shasha, XU Hangzhou, ZHANG Yanfang, et al. Variation of phytoplankton communities and their driving factors along a disturbed temperate river-to-sea ecosystem [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106776.

[5] 杜红春,朱挺兵,龚进玲,等. 澜沧江西藏段浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(9): 1769–1777.

[6] ROLLAND A, BERTRAND F, MAUMY M, et al. Assessing phytoplankton structure and spatio-temporal dynamics in a freshwater ecosystem using a powerful multiway statistical analysis [J]. *Water Research*, 2009, 43(13): 3155–3168.

[7] CUPERTINO A, GÜCKER B, VON RÜCKERT G, et al. Phytoplankton assemblage composition as an environmental indicator in routine lentic monitoring: taxonomic versus functional groups [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 522–532.

[8] KIM H G, HONG S, KIM D K, et al. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: taxonomic versus functional groups [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 138940.

[9] REYNOLDS C S, HUSZAR V, KRUK C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417–428.

[10] SUN Xu, WANG Wei. The impact of environmental parameters on phytoplankton functional groups in northeastern China [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 164: 106209.

[11] 邓建明,秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 1–10.

[12] HAWKINS S J, SUGDEN H E, MIESZKOWSKA N, et al. Consequences of climate-driven biodiversity changes for ecosystem functioning of north European rocky shores [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 396: 245–259.

[13] BLOIS J L, ZARNETSKE P L, FITZPATRICK M C, et al. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 499–504.

[14] MARINOV I, DONEY S C, LIMA I D. Response of ocean phytoplankton community structure to climate change over the 21st century: partitioning the effects of nutrients, temperature and light [J]. *Biogeosciences*, 2010,

- 7(12): 3941–3959.
- [15] WINDER M, SOMMER U. Phytoplankton response to a changing climate[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 698: 5–16.
- [16] REICHWALDT E S, GHADOUANI A. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics[J]. *Water Research*, 2012, 46(5): 1372–1393.
- [17] PAERL R W, VENEZIA R E, SANCHEZ J J, et al. Picophytoplankton dynamics in a large temperate estuary and impacts of extreme storm events[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 22026.
- [18] GAO Xiaofei, CHEN Huihuang, GU Binhe, et al. Particulate organic matter as causative factor to eutrophication of subtropical deep freshwater: role of typhoon (tropical cyclone) in the nutrient cycling [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116470.
- [19] QIN Boqiang, DENG Jianming, SHI Kun, et al. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR029371.
- [20] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、生态及分类 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 国家环境保护总局本书编委会. 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.
- [22] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 774–782.
- [23] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2158–2165.
- [24] PADISÁK J, BARBOSA F A R, KOSCHEL R, et al. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes [J]. *Archives for Hydrobiology Special Issues Advances in Limnology*, 2003, 58: 175–199.
- [25] FU Hui, CHEN Lidan, GE Yili, et al. Linking human activities and global climatic oscillation to phytoplankton dynamics in a subtropical lake [J]. *Water Research*, 2022, 208: 117866.
- [26] RICHARDSON J, FEUCHTMAYR H, MILLER C, et al. Response of cyanobacteria and phytoplankton abundance to warming, extreme rainfall events and nutrient enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3365–3380.
- [27] 李季东, 肖利娟, 韩博平. 一座南亚热带中富营养水库夏季浮游植物群落的稳态平衡分析 [J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(6): 833–838.
- [28] 纪道斌, 李媛, 孔松, 等. 典型暴雨洪水对三峡水库香溪水库湾水华的影响 [J]. *中国农村水利水电*, 2013(6): 39–44.
- [29] AHN C Y, CHUNG A S, OH H M. Rainfall, phycocyanin, and N:P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 474: 117–124.
- [30] ZHOU Guangjie, ZHAO Xuemin, BI Yonghong, et al. Effects of rainfall on spring phytoplankton community structure in Xiangxi Bay of the Three-Gorges Reservoir, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, 21(11): 3533–3541.
- [31] BECKER V, CAPUTO L, ORDÓÑEZ J, et al. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. *Water Research*, 2010, 44(11C): 3533–3541.
- [32] ZHONG Yanping, SU Yuping, ZHANG Dayi, et al. The spatiotemporal variations in microalgae communities in vertical waters of a subtropical reservoir [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115379.
- [33] 王晨旭, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2166–2176.
- [34] MARAÑÓN E. Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2015, 7: 241–264.
- [35] 张辉, 彭宇琼, 邹贤妮, 等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系 [J]. *中国环境科学*, 2020, 42(1): 380–392.
- [36] WEN Chengcheng, HUANG Tinglin, WEN Gang, et al. Controlling phytoplankton blooms in a canyon-shaped drinking water reservoir via artificial and induced natural mixing: taxonomic versus functional groups [J]. *Chemosphere*, 2022, 287(Part 2): 131771.
- [37] SU Xiaomei, STEINMAN A D, XUE Qingju, et al. Temporal patterns of phyto- and bacterioplankton and their relationships with environmental factors in Lake Taihu, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 299–308.
- [38] 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子 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1127–1139.
- [39] RECKNAGEL F, ORR P T, CAO Hongqing. Inductive reasoning and forecasting of population dynamics of *Cylindrospermopsis raciborskii* in three sub-tropical reservoirs by evolutionary computation [J]. *Harmful Algae*, 2014, 31: 26–34.
- [40] 庞一鸣, 陈淑华, 徐杭州, 等. 伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena* sp.) 及其产生 2-甲基异莰醇 (2-MIB) 的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1530–1548.
- [41] 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 等. 蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4480–4488.

- [42] TIAN Chang, PEI Haiyan, HU Wenrong, et al. Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(8): 1394 – 1402.
- [43] KENESI G, SHAFIK H M, KOVÁCS A W, et al. Effect of nitrogen forms on growth, cell composition and N_2 fixation of *Cylindrospermopsis raciborskii* in phosphorus-limited chemostat cultures [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 623: 191 – 202.
- [44] 欧腾,李秋华,王安平,等. 贵州高原三板溪水库浮游植物群落动态与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3432 – 3439.
- [45] 钱玺亦,李金彪,敖文,等. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 1814 – 1827.
- [46] MICHALAK A M, ANDERSON E J, BELETSKY D, et al. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(16): 6448 – 6452.
- [47] ZHU Liying, CHEN Yuanyuan, WANG Yawei, et al. Ecological assessment of water quality in an urban river replenished with reclaimed water: the phytoplankton functional groups approach [J]. *Environmental Research Communications*, 2021, 3: 115006.
- [48] LIU Shuya, CUI Zongmei, ZHAO Yongfang, et al. Composition and spatial-temporal dynamics of phytoplankton community shaped by environmental selection and interactions in the Jiaozhou Bay [J]. *Water Research*, 2022, 218: 118488.

(上接第 87 页)

- [40] JAIN V, TANDON S K. Conceptual assessment of (dis) connectivity and its application to the Ganga River dispersal system [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3 – 4): 349 – 358.
- [41] 马栋,张晶,赵进勇,等. 扬州市主城区水系连通性定量评价及改善措施[J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 34 – 40.
- [42] 夏军,高扬,左其亭,等. 河湖水系连通特征及其利弊 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26 – 31.
- [43] 杨娜,王趁义,徐园园,等. 黑臭小微水体治理技术的研究现状与发展趋势[J]. *工业水处理*, 2021, 41(5): 15 – 21.
- [44] 高红杰,郑利杰,嵇晓燕,等. 典型城市地表水质综合评价方法研究[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(2): 55 – 60.
- [45] 韩璐,李庆龙,曾萍,等. 长江流域典型城市河段黑臭水体生态整治案例分析[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 546 – 552.

