

饮水型水库浮游植物功能群分布特征及环境驱动因子

杨萌卓, 夏继红, 蔡旺炜, 杨陆波, 朱星学, 李朝达

(淮海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:浮游植物群落结构既可以反映水源水环境质量, 也能指示水源生态系统的健康状况。以浙江温州珊溪水库为例, 探究丰水期到枯水期水文情势变化过程中浮游植物群落分布特征变化及其影响因子。基于功能群分类体系确定浮游植物优势功能群, 应用 Pearson 相关分析和冗余分析法研究水库不同生态区中浮游植物功能群、Margalef 丰富度指数和生态健康指数(Q)的分布特征, 采用冗余分析识别不同水文情势期下的主要环境驱动因子, 探讨浮游植物优势功能群演替、生长策略模式及其与驱动因子的互指示关系。结果表明: (1) 珊溪水库浮游植物可分为 19 个功能群, 功能群个数在丰水期最高, 枯水期最低, 其中 M、MP、C、P 为 4 个优势功能群; (2) 珊溪水库浮游植物优势功能群在丰水期→平水期→枯水期的演替特征为 MP→M→C; (3) Q 指数为 2.66~3.26, 水体整体情况为中营养, 其中丰水期和平水期的 Q 指数较枯水期更低, 表明此时珊溪水库营养化问题更为严重, 与功能群分布的动态变化特征一致; (4) 氧化还原电位、高锰酸盐指数和水温为影响珊溪水库浮游植物优势功能群和相关生物指标时空变化的主要驱动因子; (5) 浮游植物优势功能群与关键环境因子之间存在明显的对应关系, 依据优势功能群适宜生境特点及生长策略可以相互指示。

关键词:浮游植物; 功能群; 环境驱动因子; 生长策略; 珊溪水库

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)02-0037-08

随着人们对饮用水源重视程度的提高, 准确掌握饮用水源健康状况已成为保障饮水安全的重要基础。目前, 我国重点关注饮用水源地的水环境质量, 主要通过水体理化性状和微生物指标监测来反映水环境质量, 而较少考虑水源生态系统健康问题(黄月群等, 2019)。浮游植物作为水生态系统重要的初级生产者之一, 其种类组成、群落结构和数量分布等与水体温度、水面光照强度、营养物质含量、水动力及捕食者(浮游生物、鱼类等)等密切相关(Watson et al, 1997); 既可以反映水源水环境质量, 也能敏感反映出水源生态系统的健康状况(陈倩等, 2019)。因此, 从生态学角度出发, 采用浮游植物进行饮用水源健康水环境监测, 可以为水环境保护提供更多有效信息, 浮游植物已成为水域生态学研究的重要内容。由于水体中浮游植物的表征方式有很大差异, 基于传统物种同源性的浮游植物种群并不能将水环境状

况完全区分。Reynolds(1980; 1984)对英格兰西北部湖泊监测时发现环境因子与浮游植物种群分布特征的同步性, 定义了浮游植物集群分类法; Sommer 等(1986)在研究浮游植物种群随季节变化规律时提出了浮游生态群分类法; 以此为基础, Padisák 等(2009)进行了优化完善并提出了浮游植物功能群分类法。近年来, 该方法已被广泛应用于水生态学研究(Li et al, 2017; Varol et al, 2019)。

由于水库的特殊性, 特别是山区水库水文情势通常具有较为强烈的周期性变化, 水库中浮游植物种类和数量常呈现出比河流或湖泊更大的时空变异性(Bortolini et al, 2016), 因而水库浮游植物功能群的分布和演替规律也具有其特殊性; 其能有效反映水库健康状况, 对提升水库的健康保护和管理具有重要指示作用(Lv et al, 2013)。本文以浙江温州珊溪水库为例, 应用功能群分类方法, 分析水库型饮用水源浮游植物功能群在不同水文情势条件下的分布特征, 并识别其主要驱动因子, 探讨优势浮游植物功能群与驱动因子的互指示关系, 以期水库型饮用水源健康评估与管理提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 水库概况与样点设置

珊溪水库(27°36'~27°50'N, 119°47'~120°15'E)位于浙江省温州市, 是温州市重要饮用水源, 也是全

收稿日期: 2020-05-16 修回日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900805); 国家自然科学基金项目(41471069)。

作者简介: 杨萌卓, 1995 年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为河流生态健康。E-mail: yangmengzhuo0927@hhu.edu.cn

通信作者: 夏继红, 1969 年生, 男, 教授, 主要从事河流健康与生态修复教研工作。E-mail: syjhxia@hhu.edu.cn

国重要饮用水源之一;流域面积 1 529 km²,总库容 18.2×10⁸ m³,属于亚热带湿润型季风气候,年均气温 18℃,年均降雨量 1 870 mm。依据 Wetzel(2001)提出的生态区概念,同时结合珊溪水库实际地理和生态特点,本研究将水库划分为河流区、过渡区和湖泊区开展监测,共布设了 5 个断面,每个断面设置 3 个

采样点,每一采样点沿水深方向按 0~1 m、4~7 m 和 10~20 m 设置 3 个水层分别采样(图 1)。每一水层分别取 3 个重复样,其中浮游植物样品将后续于实验室进行等量混匀。根据珊溪水库的水文情势变化周期,于 2018 年 7 月和 10 月以及 2019 年 1 月开展野外采样,分别代表该水库的丰水期、平水期和枯水期。

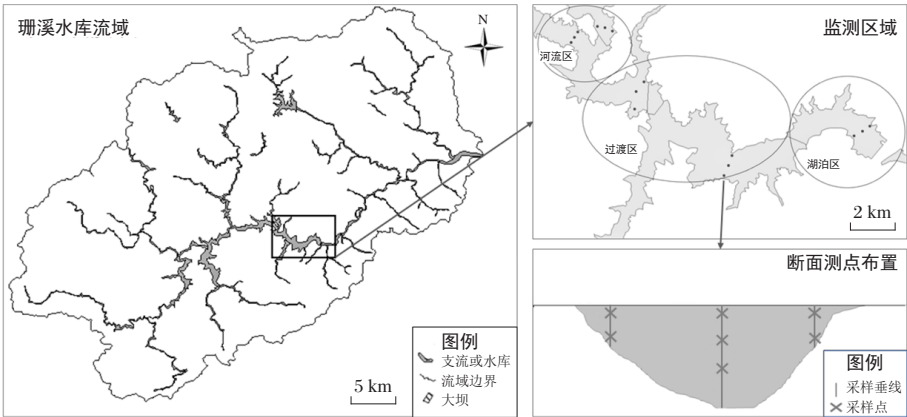


图 1 珊溪水库采样点设置
Fig.1 Shanxi reservoir basin and sampling site locations

1.2 样品采集与分析

用 350 mL 样品瓶采集水样,用 1%酸化的鲁哥试剂固定浮游植物样品,并在 4℃ 的黑暗环境中静置至少 24 h。采用虹吸法汲取上清液,浓缩至 30 mL 后进行离心处理,再次沉淀至少 24 h,去除上清液,最后浓缩成 10 mL 样品液。进行浮游植物定量计数前,先摇匀样品浓缩液,取 0.1 mL 于计数框内,在光学显微镜(Olympus BX51)下使用 40×10 倍进行镜检。浮游植物计数采用逐行进行方法,当数量较少时进行全片计数(章宗涉和黄祥飞,1991)。对浮游植物的种类鉴定参考《中国淡水藻类—系统、分类及生态》。对生物量的计算首先参考文献得到各种浮游植物对应的体积系数,再通过计算浮游植物体积系数与细胞丰度的乘积得到最终结果(赵文,2005)。

现场监测中使用多功能水质仪(HYDROLAB DS5X)对各采样点位置的水环境指标进行检测。本水质仪的检测指标包括水温(WT)、pH、电导率(SpC)、浊度(Tur)和氧化还原电位(ORP);此外,参照《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》分析方法,对水样高锰酸盐指数(COD_{Mn})和总磷(TP)浓度进行测定。

1.3 功能群划分

根据物种生理形态和生态属性定义的功能群理论(Reynolds et al,2002;Padisák,2009),对珊溪水库 3 个水情期的浮游植物进行划分。鉴于在生态环境中主导或者共同控制的功能群可以很好地反映浮游植物与

其生境之间的联系,因此将相对生物量大于 5% 的划定为代表性功能群(Lampitt et al,1993)。

1.4 数据处理与分析

浮游植物丰富度采用 Margalef 指数计算式:
$$D = (S-1)/\ln N \tag{1}$$

式中: D 为丰富度指数, S 为总物种数, N 为总个体数。 D 值越小,表明水体中浮游植物种类组成越单一,水体污染程度可能更严重(Margalef,1960)。

以浮游植物功能群与环境特征之间的相互响应为基础,有学者基于欧盟水框架(Water Framework Directive, European Parliament and Council, 2000)开发出了由浮游植物功能群相关参数计算的生态健康指数用于水环境监测,并依据水体形态将其分为了湖泊或水库(Q)和河流(Q_R)评价指数(Padisák et al, 2009)。其中, Q 评价指数的计算式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \cdot F_i \right) \tag{2}$$

式中: n 为浮游植物功能群个数, n_i 为第 i 个功能群生物量, N 为总生物量, F_i 为第 i 个功能群的赋值(Padisák et al,2006)。 Q 指数是基于浮游植物功能群组成和生物量表征水体富营养状态,通常情况下该指数越小,表明水体富营养化程度越高。

由于水生态系统和水环境的组成和过程都极其复杂,且在不同条件下可能会存在不同的相互关系,因此统计分析方法是处理和挖掘生态调查类数据信息的主

要手段(章家恩,2007)。应用Excel 2016和SPSS 23.0进行数据统计处理,通过CANOCO 5.0分析浮游植物细胞密度与环境影响因子之间的相关性。首先采用主成分分析法(PCA)筛选重要的环境因子,再采用去趋势对应分析法(DCA)分析各生态区的浮游植物优势功能群。若最大梯度长小于3,即浮游植物功能群的群落分布更接近线性模型,则对功能群数据和环境因子进行冗余分析(RDA),以识别重要环境驱动因子;若最大梯度长大于4,则选择典型范例分析(CCA);若最大梯度长在3~4,则两种分析方法均可。应用Origin 9.0制图。

2 结果与分析

2.1 不同水文情势下的水环境因子变化

珊溪水库的水环境因子测定结果如表2所示。3个水文情势期下,WT为16.54~29.44℃,变化较大。水体pH均值为9.47~9.83,整体偏碱性,在丰水期时达到最高。ORP、Tur和TP的变化幅度较大。Tur丰水期较高,平水期开始降低,枯水期最低;ORP在丰水期和平水期较低,枯水期较高;TP在丰水期和枯水期较高,平水期较低。SpC和COD_{Mn}的差异不明显。

表1 水环境因子变化

Tab.1 Water environmental factors for each hydrologic period

环境因子	变化范围 (平均值±标准差)		
	丰水期	平水期	枯水期
WT/℃	25.69~29.44 (27.62±1.08)	23.34~25.17 (24.49±0.45)	16.54~16.81 (16.74±0.08)
pH	9.34~10.34 (9.83±0.41)	9.45~9.50 (9.47±0.02)	9.71~9.80 (9.76±0.04)
ORP/mV	181.25~279.75 (221.15±26.95)	218.00~255.50 (237.0±11.34)	276.50~298.50 (285.88±7.45)
Tur/NTU	2.50~22.80 (6.33±5.73)	0.40~18.70 (3.65±4.98)	1.03~5.73 (2.16±1.16)
SpC/mS·cm ⁻¹	35.08~49.73 (40.66±5.28)	33.05~41.21 (35.51±3.22)	35.68~38.78 (36.71±1.18)
COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	1.61~2.23 (1.95±0.16)	1.12~1.73 (1.52±0.19)	0.80~9.78 (1.82±2.40)
TP/mg·L ⁻¹	0.03~0.20 (0.12±0.05)	0.04~0.13 (0.07±0.03)	0.05~0.14 (0.09±0.03)

2.2 浮游植物种类及功能群组成

在珊溪水库的3个水情期,共检出了7门、72属浮游植物。其中,硅藻门(Baci)种类最多,共24属;绿藻门(Chlo)其次,共23属;蓝藻门(Cyan)共15属;裸藻门(Eugl)和甲藻门(Dino)各3属;隐藻门(Cryp)和金藻门(Chry)各2属。不同水情期各门浮游植物年均生物量占各生态区总生物量的比例及丰富度指

数变化如图2所示。硅藻门年均生物量约占总生物量的37.76%,蓝藻门约占31.21%,绿藻门约占19.68%,隐藻门约占10.52%,金藻门约占5.65%,裸藻门约占2.46%,甲藻门约占1.98%。不同水情期珊溪水库浮游植物丰富度差异明显,尤其在过渡区。3个水情期的浮游植物细胞丰度也存在较大差异,丰水期为67.93×10⁴个/L,平水期为20.79×10⁴个/L,枯水期为5.07×10⁴个/L。丰水期和平水期的蓝藻门优势度最为明显,而枯水期硅藻门优势度最明显。

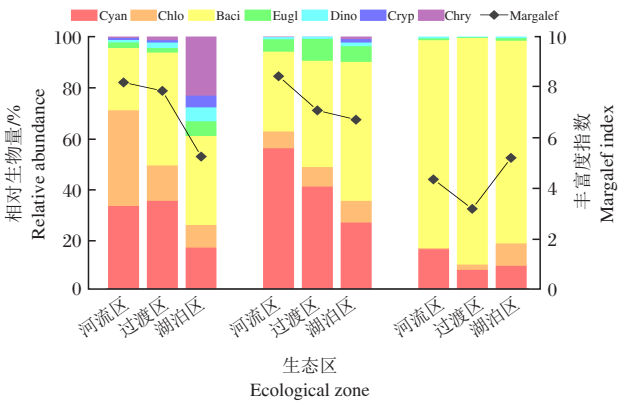


图2 浮游植物生物量的相对比例及丰富度指数变化
Fig.2 Biomass percentage of each phytoplankton taxa and Margalef index for each hydrological period and ecological zone

依据浮游植物功能群分类方法(Reynolds et al, 2002),可将珊溪水库浮游植物划分为19个功能群,分别记为B、C、D、F、H2、J、L₀、M、MP、N、P、S1、S_N、T_B、W1、W_s、X2、X3、Y。各生态区不同水情期浮游植物功能群相对生物量变化如图3所示,发现珊溪水库3个水情期有M、MP、S1、D、X2、N、P、W1、C共9组代表性功能群,其中丰水期的主要功能群为M、MP、S1、D、X2、N、P(图3-a);平水期主要功能群为M、MP、W1、C、P(图3-b);枯水期主要功能群为M、C、P(图3-c)。珊溪水库3个水情期的优势功能群有4组,以微囊藻(Microcystis spp.)为主的功能群M;以舟形藻(Oscillatoria sp.)、绿球藻(Chlorococcum sp.)和颤藻(Navicula spp.)为主的功能群MP;以颗粒直链藻(Aulacoseira granulata)和脆杆藻(Fragilaria spp.)为主的功能群P和以星杆藻(Asterionella sp.)为主的功能群C。河流区优势功能群随水文脉动周期(丰水期→平水期→枯水期,下同)的变化顺序为M/MP→M→C;过渡区为MP→M/P→C;湖泊区为MP→MP/P→C。由于划分功能群的主要依据是浮游植物形态和对生境适应性特征的相似性,因此从物种的功能性角度出发,通过简化对浮游植物群落的分析,能够更为精确地展现浮游植物与环境因子的关系。

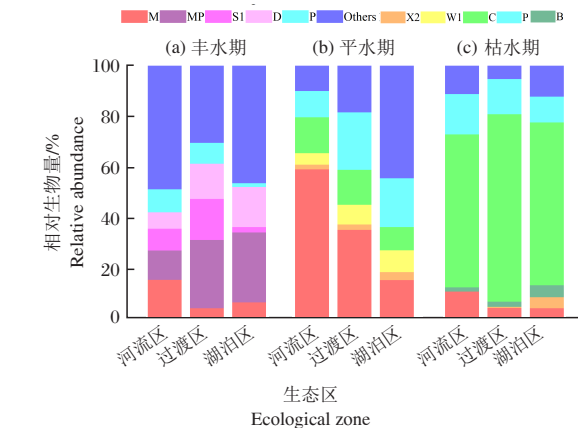


图3 各生态区不同水情期浮游植物主要功能群优势度
Fig.3 Dominance of each phytoplankton functional group for each hydrological period and ecological zone

由于浮游植物优势功能群的功能性特征,在物质和能量供给关系上存在差异,使其所呈现的生长策略也不同(Grime, 1977; Reynolds et al, 2002)。浮游植物功能群的物质与能量供给变化规律C-R-S生长策略中(表2),C策略(竞争)种类表示在物质及能量供给都充足的条件下占优势的功能群,R策略(耐受)种类表示在物质充足但能量受限的条件下占优势的功能群,S策略(机会殖民)种类表示在物质有限但能量充足的条件下占据优势的功能群。不同时期的生长策略也存在差异,珊溪水库河流区优势功能群在不同水文期的生长策略变化为S/CR→S→R;过渡区为CR→S/R→R;湖泊区为CR→CR/R→R。

表2 代表性功能群环境适应与生长策略C-R-S模式
Tab.2 Primary classification features and growth strategies of the representative phytoplankton functional groups

功能群	代表藻种	耐受	敏感	环境特征	生长策略
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	暴晒	冲刷作用、低光照	富营养、稳定、透明度较高	S
MP	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.、 颤藻 <i>Navicula</i> spp.	混合搅动		经常性搅动、浑浊	CR
S1	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	低光照	冲刷作用	混合浑浊、透明度低	R
D	针杆藻 <i>Synedra</i> spp.	冲刷	低营养	含有营养盐、浑浊	R
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp.	分层	水体混合	中到富营养	C
N	鼓藻 <i>Cosmarium</i> spp.	低营养	水体分层	持续或半持续混合水层	R
P	颗粒直链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	中度低光照和低碳含量	水体分层、硅元素缺乏	持续或半持续混合水层	R
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	高生化需氧量	牧食作用	有机污染	R/CS
C	星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.	低光照、低含碳量	硅消耗、水体分层	富营养	R

2.3 基于浮游植物功能群的水质指标

通过对珊溪水库3个水情期各生态区的浮游植物功能群数据进行计算,得到Q指数为2.66~3.26。据Padisák等(2006)的研究,Q值越小,说明富营养化程度越高。据此判断,珊溪水库水体整体为中营养,其中枯水期营养化程度更低。相比较来看,丰水期和平水期的Q指数较枯水期较低,表明此时珊溪水库营养化风险较高,尤其是河流区的营养化程度在丰水期和平水期明显较高(图4)。因此,从丰水期(夏季)到平水期(秋季)再到枯水期(冬季),珊溪水库的富营养化风险逐渐降低。

2.4 基于RDA的优势功能群环境驱动因子识别

对环境因子数据进行去趋势对应分析(DCA),发现其最大梯度长<3。因此选用冗余分析(RDA)对浮游植物优势功能群和环境因子进行约束性排序。环境因子包括水温(WT)、pH、氧化还原电位(ORP)、浊度(Tur)、电导率(SpC)、高锰酸盐指数

(COD_{Mn})和总磷(TP)共7个。采用蒙特卡洛置换检验进行筛选(P<0.05),确定出各生态区具有显著解释性的环境驱动因子为WT、ORP、COD_{Mn}。

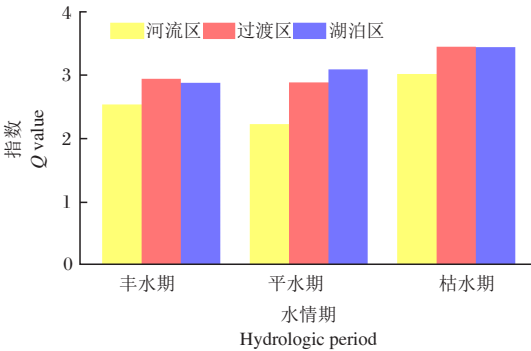


图4 珊溪水库各生态区生态健康指数的变化
Fig.4 Q values for each hydrological period and ecological zone

将各水情期环境因子之间及其与Q指数和Margalef指数进行相关性分析。结果表明,Q指数

与WT呈极显著负相关,而与ORP则呈极显著正相关关系;此外, Q 指数与Margalef指数存在极显著的负相关关系,Margalef指数与 COD_{Mn} 显著正相关。环境因子之间, COD_{Mn} 与WT呈极显著的正相关;ORP与WT呈显著负相关,与Tur也呈显著负相关;SpC与pH呈显著正相关,pH与TP浓度呈显著

正相关(表3)。整体来看,WT与ORP和 COD_{Mn} 存在极显著的关系。WT的变化主要由季节变化引起,充分说明珊溪水库水质在不同季节存在明显变化,尤其在夏季水质较差。 Q 指数因为温度的升高呈现出下降趋势,也说明夏季珊溪水库的富营养化程度较高。

表3 各因子间的Pearson相关性系数矩阵
Tab.3 Pearson correlation analysis of environmental factors and biological indices

指标	WT	pH	ORP	Tur	SpC	COD_{Mn}	TP	Margalef
pH	0.491							
ORP	-0.916**	-0.502						
Tur	0.640	0.621	-0.817**					
SpC	0.127	0.854**	-0.310	0.614				
COD_{Mn}	0.927**	0.658	-0.769*	0.556	0.240			
TP	0.122	0.789*	-0.182	0.394	0.762*	0.326		
Margalef	0.896**	0.230	-0.869**	0.450	-0.036	0.717*	-0.109	
Q	-0.839**	-0.232	0.896**	-0.639	-0.015	-0.626	0.066	-0.846**

注:*表示相关性在0.05水平显著;**表示相关性在0.01水平显著。
Note:* significant correlation ($P<0.05$); ** highly significant correlation ($P<0.01$)

对珊溪水库优势浮游植物优势功能群与环境驱动因子的RDA分析发现,优势功能群与关键环境驱动因子之间存在显著相关性。前两轴的特征值分别为0.6443和0.0607,解释了共73.9%的浮游植物分布情况。两轴物种-环境的相关系数分别为0.9299和0.7594,表明非生物因子与浮游植物功能群变量之间存在着显著的相关关系(图5)。由图5可以看出,功能群M、MP、P、W1、X2与WT有正相关性,而功能群C与WT为负相关关系, COD_{Mn} 与组N、S1、D及ORP与组C呈正相关性。

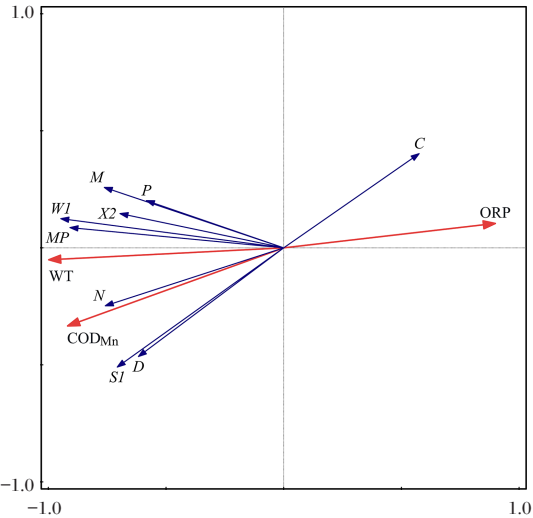


图5 浮游植物功能群与环境驱动因子的RDA关系
Fig.5 Redundancy analysis of phytoplankton functional group biomasses and environmental factors

3 讨论

3.1 珊溪水库浮游植物优势功能群分布特征

目前,针对浮游植物的鉴别计数主要还是基于显微图像进行人工判断的方法(闫海龙等,2014)。然而,水体中浮游植物的类型数量十分庞大,形态变化也复杂多样,即便是专业人员对同一区域种类鉴定结果也可能存在较大差异。基于生态位分类的浮游植物功能群,由于对鉴定结果要求较低,且更能反映浮游植物栖息地属性和水体营养等级,在进行浮游植物季节演替分析时,相较传统方法更为有效(Reynolds et al, 2002; Padisák et al, 2009);且对环境具有更明确的指示意义(黄享辉等,2013;黄国佳,2015)。从珊溪水库浮游植物的功能群组成及时间变化特征来看,优势功能群随水文期的演替趋势为MP→M→C,其相对生物量从丰水期到枯水期呈上升趋势,群落结构趋向单一。这与同属深水型的西安金盆水库调查结果一致(卢金锁等,2014)。浮游植物优势功能群的空间差异也较为明显,表明其与环境适应性密切相关(笪文怡等,2019;Zheng et al, 2020)。

珊溪水库是温州市最大的供水水源地,但近几年来水库水质呈下降趋势,曾出现蓝藻水华等富营养化现象,季节性的水质恶化事件也时有发生(李平等,2016)。2010年5-9月的珊溪水库浮游植物研究数据显示,大面积蓝藻暴发于黄坦坑等水质较差的支流淹没区上游位置,水库坝前、库中等区域的浮游

植物的含量也较正常值偏高,大坝附近浮游植物优势种为蓝藻门和绿藻门的藻种,研究期间水体处于中富营养状态(曾广恩等,2011)。以绿球藻为代表的优势功能群MP生长策略为CR型(Reynolds et al, 2002),喜好经常性搅动的浑浊水体。珊溪水库丰水期的监测数据显示,MP功能群占主要优势,这可能是此时水流量较大,过渡区各支流汇聚,水层混合作用明显造成的。夏、秋季以微囊藻为主的优势功能群M大量繁殖,在河流区所检测到的生物量相较于其他两个生态区更高,这与水库上游流域放养畜禽导致营养化污染问题更为严重有关(陈丰禹等,2019)。尽管河流区有一定的冲刷作用,得益于较强的日照以及更高的营养物质含量,以蓝藻门为主的浮游植物仍在该流域大量生长繁殖,且生物量随水流方向在过渡区和湖泊区显著减弱(吴波等,2007)。珊溪水库冬季光照强度较弱、水温较低、水体混合较好,符合对水体分层比较敏感的类群C的生长环境(张玉超等,2008;蓝于倩等,2015)。此时类群C表现出绝对优势,相对生物量达到58%。

3.2 浮游植物优势功能群与关键因子的互指示性

通过对水质评价生物指标Q指数和Margalef指数与环境因子进行的Pearson相关性分析(表3)以及环境因子与物种数据的RDA分析,发现WT、ORP、COD_{Mn}是关键环境驱动因子。关键环境驱动因子与以种群为计算基准的Margalef丰富度指数和以功能群为基础的水质指标Q指数均有显著的相关关系。

不同功能群与关键环境因子的响应程度不同,两者之间存在明显的互指示性,其中WT是优势功能群M、MP、P、C分布的主要环境驱动因子。在氮、磷等营养盐满足其生长繁殖的情况下,水温是M功能群季节分布的主要影响因素(夏莹霏等,2019)。本研究中,水域的M功能群在丰水期和平水期占优势,可能与其耐暴晒的习性有关(钱奎梅等,2008)。珊溪水库夏季水体较混浊,有富营养化现象,这也在本研究中得到验证。RDA分析表明,与水温有较强相关关系的功能群MP和P在此时含量较高,其中丰水期的3个生态区都以MP为优势功能群。在平水期和枯水期,珊溪水库的水体分层现象减弱,这为类群C提供了良好的生存环境。

已有研究表明,浮游植物的种类、生理结构之间存在差异,其最适宜的生长温度也有所不同,较低的水温通常更适合硅藻的生长繁殖,而蓝绿藻的适宜温度较高(钱奎梅等,2019)。这与本研究中RDA分析得出的水温与功能群C呈负相关的结果吻合,也与

陈倩等(2018)在贵州百花水库研究得出的以硅藻为主的功能群在枯水期和平水期形成优势,丰水期水温较高时蓝藻和绿藻大量繁殖的研究结果一致;此外,C功能群也受到氧化还原电位的影响,与向蓉等(2017)在汝溪河的研究结果一致。

以典型R型策略功能群S1为优势的现象大量存在于受污染的中富营养水体,耐受能量输入受到COD_{Mn}的影响。珊溪水库的功能群S1在丰水期含量较高,尤其在支流混合的过渡区大量存在。功能群S1适应生境为浑浊的混合水环境,这与水库功能、人类活动、夏季高温降雨等造成的水体浊度升高有关(陈倩等,2018);与COD_{Mn}相关的功能群除S1外,还有同时期表现出优势的主要功能群D,该类群对养分消耗敏感,因此常出现在丰水期,并且多与环境因子中的营养盐密切相关(Li et al, 2017)。

综上,浮游植物群落的动态变化是由多种环境驱动因子与浮游植物本身共同作用的结果;此外,珊溪水库气候变化、日常运行等造成的水位波动等水文因素,也可能是浮游植物生物量和种类变化的主要因素(钱奎梅等,2019)。因此,在讨论功能群与环境驱动因子之间的互指示性时,应综合考虑研究区域多方面的影响因素。

志谢 感谢河海大学刘则雯、黄梦婷及温州市水利局夏志昌、董旭在实验室工作及野外取样给予的支持和帮助。

参考文献

- 陈丰禹,王为木,刘慧,等,2019. 南方山丘区水源地土地利用结构对水库水质的影响—以珊溪水库流域为例[J]. 水土保持通报, 39(2):260–266.
- 陈倩,李秋华,胡月敏,等,2018. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 31(7):1266–1274.
- 陈倩,李秋华,马欣洋,等,2019. FG、MFG和MBFG浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例[J]. 环境科学, 40(9):4061–4071.
- 宣文怡,朱广伟,吴志旭,等,2019. 2002–2017年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, 31(5):1320–1333.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 黄国佳,2015. 贵州高原红枫湖水库和百花湖水库浮游植物功能群时空演替特征[D]. 贵阳:贵州师范大学.
- 黄享辉,胡韧,雷腊梅,等,2013. 亚热带典型中小型水库浮

- 游植物功能群季节演替特征[J]. 生态环境学报, 22(2): 311-318.
- 黄月群, 张庆, 李洁月, 等, 2019. 水生态环境健康评价方法研究[J]. 世界生态学, 8(4):303-309.
- 蓝于倩, 袁一文, 彭亮, 等, 2015. 江谷水库鱼类网箱养殖富营养化及浮游植物功能群的指示作用[J]. 生态环境学报, 24(6):1028-1036.
- 李平, 陈强, 王婷, 等, 2016. 温州饮用水源地珊溪水库水质的时空分析[J]. 浙江农业科学, 57(5):778-784.
- 卢金锁, 张颖, 胡亚潘, 等, 2014. 深水型水库中藻类功能群组演替及其与环境因子的关系[J]. 环境工程学报, 8(11): 4605-4611.
- 钱奎梅, 陈宇炜, 宋晓兰, 2008. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系[J]. 生态科学, 27(2):65-70.
- 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜, 2019. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年)[J]. 湖泊科学, 31(4):1035-1044.
- 吴波, 陈德辉, 吴琼, 等, 2007. 黄浦江浮游植物群落结构及其对水环境的指示作用[J]. 武汉植物学研究, 25(5): 467-472.
- 夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄, 等, 2019. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 31(1):134-146.
- 向蓉, 李巧玉, 喻焱, 等, 2017. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析[J]. 环境科学, 38(8):3290-3301.
- 闫海龙, 袁欣, 刘哲人, 2014. 关于建立藻类自动检测、分类与存储系统的方法的研究[J]. 黑龙江环境通报, 38(2):32-34.
- 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等, 2008. 太湖水温分层现象的监测与分析[J]. 环境科学与管理, 33(6):117-121.
- 章家恩, 2007. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京:化学工业出版社.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.
- 赵文, 2005. 水生生物学[M]. 北京:中国农业出版社.
- 曾广恩, 潘忠斌, 陈秀珠, 等, 2011. 珊溪水库藻类异常繁殖特征与成因分析[J]. 华北水利水电学院学报, 32(2):141-144.
- Bortolini J C, Train S, Rodrigues L C, 2016. Extreme hydrological periods: effects on phytoplankton variability and persistence in a subtropical floodplain[J]. Hydrobiologia, 763: 223-236.
- Grime J P, 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory[J]. The American Naturalist, 111:1169-1194.
- Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al, 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. Marine Biology, 116(4):689-702.
- Li L, Li Q, Chen J, et al, 2017. Temporal and spatial distribution of phytoplankton functional groups and role of environment factors in a deep subtropical reservoir[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 36(1):1-11.
- Lv H, Yang J, Liu L, 2013. Temporal pattern prevails over spatial variability in phytoplankton communities from a subtropical water supply reservoir[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 42:420-430.
- Margalef R, 1960. Valeur indicatrice de la composition des pigments du phytoplankton sur la productivité, composition taxonomique et propriétés dynamiques des populations. Rapport et procès-verbaux des réunions[J]. Commission internationale pour l'Exploration de la Mer Méditerranée, 15: 277-281.
- Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L, 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 621(1):1-19.
- Padisák J, Borics G, Grigorszky I, et al, 2006. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index[J]. Hydrobiologia, 553(1):1-14.
- Reynolds C S, 1980. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems[J]. Holarctic Ecology, 3: 141-159.
- Reynolds C S, 1984. The ecology of freshwater phytoplankton [J]. Journal of Ecology, 73(2):722-723.
- Reynolds C S, V Huszar C, Kruk L, et al, 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. Journal of Plankton Research, 24:417-428.
- Sommer U, Gliwicz Z, Lampert W, et al, 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters[J]. Archives of Hydrobiology, 106(4):433-471.
- Varol M, 2019. Phytoplankton functional groups in a monomictic reservoir: seasonal succession, ecological preferences, and relationships with environmental variables[J]. Environmental Science and Pollution Research, 26(20):20439-20453.
- Watson S, Mccauley Y E, Downing J, 1997. Patterns in phytoplankton taxonomic composition across temperate lakes of different nutrient status[J]. Limnology and Oceanography, 42:487-495.
- Wetzel R G, 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems [M]. San Diego: Academic Press.
- Zheng T, Zhou M, Yang L, et al, 2020. Effects of high light and temperature on *Microcystis aeruginosa* cell growth and β -cyclocitral emission[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 192:110313.

Distribution of Phytoplankton Functional Groups in a Drinking Water Reservoir and Analysis of Environmental Driving Factors

YANG Meng-zhuo, XIA Ji-hong, CAI Wang-wei, YANG Lu-bo, ZHU Xing-xue, LI Chao-da

(College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

Abstract: Phytoplankton community structure reflects both the water quality and the ecosystem health of freshwater resources. Shanxi reservoir is a vital drinking water source for Wenzhou City, Zhejiang Province. In this investigation, Shanxi reservoir was selected for a case study and the dominant phytoplankton functional groups, succession pattern and growth strategies in the different hydrological periods (flood, normal, dry) were characterized using functional group classification methods. The distribution of dominant phytoplankton functional groups, Margalef richness index and the Q values of the ecological health index were analyzed in the different ecological zones (riverine, transition and lake). Redundancy analysis was used to identify the primary driving factors that influence the dominant functional groups. The aim was to provide a reference for the health assessment and management of drinking water sources. In July and October, 2018 and January, 2019, a phytoplankton investigation was carried out in Shanxi reservoir along five transects in the three ecological zones. The water quality parameters measured included water temperature (WT), pH, specific conductivity (SpC), turbidity (Tur), oxidation-reduction potential (ORP), permanganate index (COD_{Mn}) and TP. Results show that: (1) A total of 19 phytoplankton functional groups were identified in Shanxi reservoir, and the dominant functional groups were M, MP, C and P. The number of functional groups was highest during the flood period and lowest during the dry period. The phytoplankton cell density in the riverine zone was much higher than in the other ecological zones. (2) The succession pattern of dominant functional groups in the different hydrological periods (flood→normal→dry) was MP→M→C. (3) The Q value range, 2.66–3.26, indicated mesotrophic conditions. The Q values were lower in the flood and normal periods, indicating higher nutrient levels during those times, consistent with functional group dynamics. (4) The ORP, COD_{Mn} , and WT were the primary driving factors affecting the spatial and temporal distributions of dominant functional groups and related biological indicators. (5) There was a clear correlation between the dominant functional groups and key drivers, and thus, either one can be used to estimate the other.

Key words: phytoplankton; functional group; environmental driving factors; growth strategy; Shanxi reservoir