

四川丘陵区水库浮游植物功能群季节演替特征及驱动因子

陶敏 岳兴建 罗家林 郭涛 王永明 刘果 李斌

SEASONAL SUCCESSION OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS AND ITS DRIVING FACTORS IN RESERVOIRS IN HILLY REGIONS OF SICHUAN PROVINCE

TAO Min, YUE Xing-Jian, LUO Jia-Lin, GUO Tao, WANG Yong-Ming, LIU Guo, LI Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

仙女湖及入湖河流浮游植物功能类群与环境因子的相互关系

RELATIONSHIP BETWEEN PHYTOPLANKTON MORPHOLOGY-BASED FUNCTIONAL GROUPS AND ENVIRONMENTAL FACTORS OF DIFFERENT HABITAT IN THE LAKE XIANN AND INFLOW RIVERS

水生生物学报. 2018, 42(3): 622-634 <https://doi.org/10.7541/2018.078>

金门岛北部海域浮游植物的季节变动及与环境的关联

SEASONAL DYNAMICS OF PHYTOPLANKTON COMMUNITY AND ITS RELATION WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN SEA WATERS OF THE NORTHERN JINMEN ISLAND

水生生物学报. 2017, 41(3): 712-723 <https://doi.org/10.7541/2017.89>

长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析

SEASONAL SUCCESSION AND ECOLOGICAL NICHE ANALYSIS OF THE DOMINANT SPECIES OF PHYTOPLANKTON IN CHANGHU LAKE

水生生物学报. 2020, 44(3): 612-621 <https://doi.org/10.7541/2020.075>

贵州草海水生植物多样性及群落演替

AQUATIC PLANT DIVERSITY AND COMMUNITY SUCCESSION IN CAOHA1 WETLAND, GUIZHOU PROVINCE

水生生物学报. 2020, 44(4): 869-876 <https://doi.org/10.7541/2020.104>

太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究

THE RESEARCH OF DYNAMIC SUCCESSION OF ZOOPLANKTON AND ITS CORRELATION WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN TAIPING LAKE

水生生物学报. 2017, 41(3): 700-711 <https://doi.org/10.7541/2017.88>

浙江沿岸海域春季螺类群落结构特征及其与环境因子的关系

COMMUNITY STRUCTURE OF SNAILS AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS ALONG ZHEJIANG COAST IN SPRING

水生生物学报. 2018, 42(3): 606-615 <https://doi.org/10.7541/2018.076>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.236

四川丘陵区水库浮游植物功能群季节演替特征及驱动因子

陶敏^{1,2} 岳兴建^{1,2} 罗家林¹ 郭涛¹ 王永明^{1,2} 刘果¹ 李斌^{1,2}

(1. 内江师范学院, 生命科学学院, 内江 641112; 2. 长江上游鱼类资源保护与利用四川省重点实验室, 内江 641112)

摘要: 为了解四川丘陵水库浮游植物群落结构、演替规律和影响因素, 于2016—2017年分4个季节对该区域10个中小型水库的浮游植物功能类群演替与水环境变化关系进行了分析。研究期间10个水库共检出浮游植物9门104属188种, 分属于24个功能群; 在全年或各季节占优势的功能群, 多为喜高营养或喜静水, 耐低光、不耐冲刷和高光的类群, 包括低光静水类群S₁、S₂、S_N和Y, 高营养静水类群T_C、X₁和X₂, 高营养低光类群J和C, 及具有广适性的L_O。其中, 全年优势度指数Y>0.02的功能群有6个, 高低依次为S₁>T_C>S_N>S₂>L_O>J。单因素方差分析表明: 不同季节优势功能群存在明显差异(P<0.05), 其中夏季为S₁+T_C+S_N+L_O+S₂, 秋季为S₁+S₂+J+S_N+X₁+L_O+X₂, 冬季为S₁+X₂+C+X₁+J+Y, 春季为S₁+S_N+H₁+J+X₁+X₂。丝状蓝藻的种类组成(包括S₁、S₂、S_N、T_C和H₁)在四季间有所更替, 但其优势度并未改变; 季节间水库分层的形成与打破, 及水体光照强度、牧食强度和营养水平等因素的变化, 导致了该地区水库浮游植物功能群之间的此消彼长。RDA分析显示, 浮游植物功能群季节演替主要受水温(WT)、营养水平(包括总氮TN、总磷TP、氨氮NH₄-N和硝态氮NO₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和透明度(SD)等环境因子的驱动。研究发现, 优势功能群现存量均表现出随营养水平和水温的升高而增加的趋势, 因此为防止丝状蓝藻在高营养水平与全球气候变暖的双重促进下发生爆发性增殖, 需要对该地区水库水质进行有效管理与修复。

关键词: 丘陵地区; 中小型水库; 浮游植物功能群; 演替; 环境因子

中图分类号: Q145⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2021)04-0826-12



浮游植物作为水生生态系统基础碳源的重要组成部分, 是水生生物食物链的基础环节, 促进了能量在食物链中的传递, 最终影响整个水域生态系统的稳定^[1]。浮游植物种类组成、群落结构和生物量时空分布格局的变化既能反映水环境的变化^[2], 又能在很大程度上决定水域生态系统的结构和功能, 是指示水体富营养化程度和水质健康状况的重要指标^[3], 尤其在饮用水源地和水产品产地等特殊水域中甚至关系着公共卫生与人类的健康^[4, 5]。因此, 在水生态研究中浮游植物常被用作评估水体健康状况的重要指示性生物类群^[4]。

基于浮游植物分类的定性定量研究是掌握其群落结构的变化趋势和生态功能的基础^[6, 7]。近年来, 功能类群分类法的提出为浮游植物群落生态学研究提供了一种新方法^[8, 9]。浮游植物功能类群

分类法以浮游植物的功能性特征(包括生理、形态和生态特征)为基础, 将同一生境下共存的藻类归为一组, 同组内的浮游植物通常具有相同或相近的生态位及相似的环境适应性特征, 可以反映特定生境类型^[8]。由Reynolds等^[8]和Padisáketal等^[9]确定的功能群(Functional Group, FG)是应用最广的功能类群分类标准。该标准是基于个体生态学的浮游植物功能类群划分, 能够与浮游植物群落演替过程有效结合, 最大限度地阐述浮游植物群落与水环境因子之间的动态关联, 可较好地预测群落生态功能的变化^[5, 10, 11]。该方法将具有专门的适应特征或需求(如对营养水平、光照强度、水体交换速度等因子的需求、耐受性和敏感性)的浮游植物集群归为相同功能群^[8], 目前共总结出39个群组, 分别命名为A、B、C、D、N、NA、P、MP、T、T_C、T_D、T_B、

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2021-02-14

基金项目: 四川省科技厅项目(2019YJ0498和2019YJ0397); 四川省教育厅重点项目(18ZA0277)资助 [Supported by Sichuan Science and Technology Program (2019YJ0498 and 2019YJ0397); the Project of Education Department of Sichuan Province (18ZA0277)]

作者简介: 陶敏(1984—), 女, 博士; 主要从事淡水生态学研究。E-mail: celery_319_07@126.com

通信作者: 李斌(1981—), 教授; E-mail: libin2004xinyang@126.com

S1、S2、S_N、Z、X3、X2、X1、X_{Ph}、E、Y、F、G、J、K、H1、H2、U、Lo、L_M、M、R、V、W1、W2、Ws、Wo和Q功能群^[8,9]。目前该方法已作为林氏分类法的有力补充,成为开展浮游植物群落演替研究的重要手段,已被广泛应用于湖泊、水库和河流等多种水体的水生态系统研究中^[12-21]。

四川丘陵地区降水时空分布不均,季节性、区域性干旱频繁^[22],城镇生活与工农业生产对水库的依赖性大。该区域人口多,工农业较为发达,人为活动对水库水质影响较大。与大型水库相比,中小型水库纳污、缓冲和自净能力较弱,更容易受到污染^[23]。近年来该地区中小型水库中屡见夏季水华爆发的报道,而相关研究却极为匮乏,亟需开展浮游植物生态学方面的研究。本研究首次将FG浮游植物功能类群运用于四川丘陵地区中小型水库的浮游植物群落结构研究中,探究浮游植物功能群在季节间的演替特征,同时探究驱动浮游植物群落结构季节演替的关键环境变量,为进一步研究丘陵地区水库生态系统结构及功能,保证水库水质安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取四川省东南丘陵地区10座代表性水库开

展研究(图1)。该区域地处长江上游,海拔274—900 m,属台状低山丘陵地形。气候类型为亚热带湿润季风气候,冬暖夏热,年降雨量约1000 mm,多分布在夏秋季^[22]。10座水库中有中型水库5座和小型水库5座,大坝坐标范围29°20′02″N—29°54′51″N,104°37′12″—105°15′42″E,总库容 1.7×10^5 — 7.58×10^7 m³。按面积与形状,在每个水库中设置1—5个采样点,于2016年8月(夏)、2016年11月(秋),2017年2月(冬)和2017年5月(春)分季节开展采样工作。

1.2 浮游植物样品采集与分析

用5 L采水器采集表层(水下0.5 m)水样1 L,并立即加入1.5 mL浓缩鲁哥试剂现场固定,避光带回实验室后重力沉降48h,虹吸掉上清液后浓缩至30—50 mL,并加入甲醛溶液数滴,留作浮游植物定量观测。用25号浮游生物网(0.064 mm)在水面下0.5 m作“∞”字形捞取,将网底管中的滤液收集起来现场加入4%甲醛固定,留作浮游植物定性观测。浮游植物种类鉴定与计数方法参照相关文献^[24,25]。在林氏分类的基础上,按照不同种属浮游植物在FG功能群系统39个功能群(包括A、B、C、D、N、NA、P、MP、T、T_C、T_D、T_B、S1、S2、S_N、Z、X3、X2、X1、X_{Ph}、E、Y、F、G、J、K、H1、H2、U、Lo、L_M、M、R、V、W1、W2、Ws、Wo和Q)中的归属,进行浮游植物功能

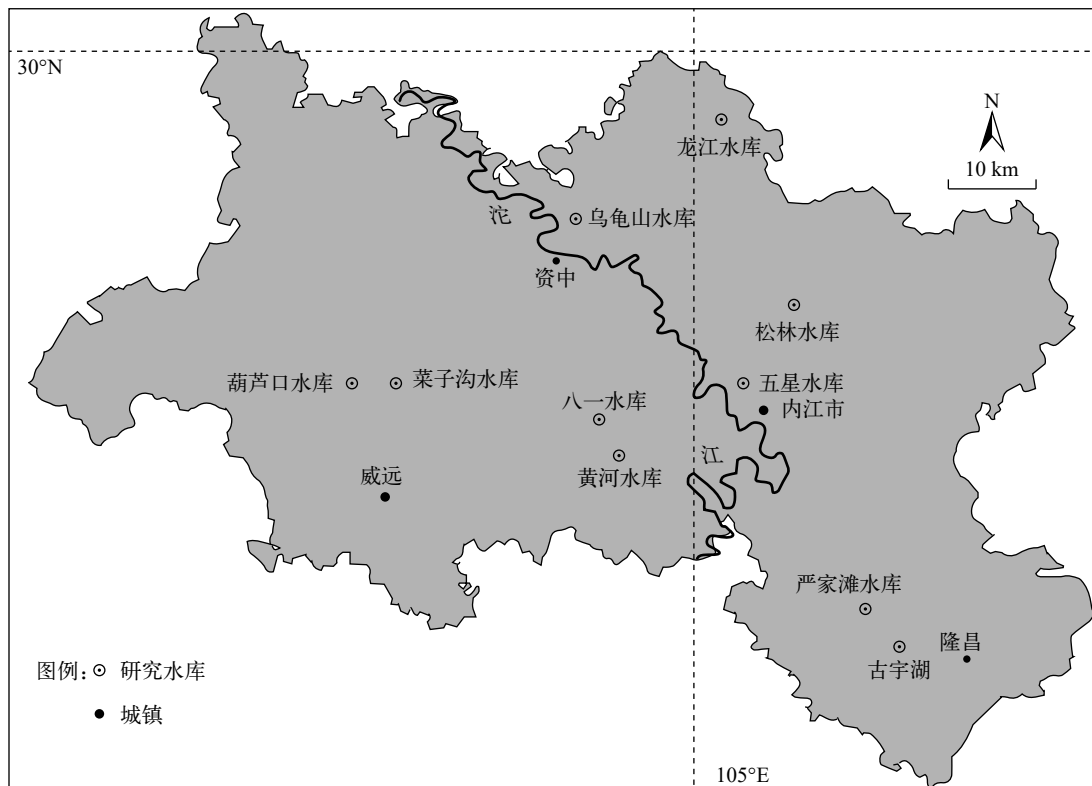


图1 研究水库地理分布

Fig. 1 Spatial distribution of surveyed reservoirs

类群划分^[5, 8, 9, 19, 26]。

1.3 理化指标的分析测定

采样点透明度(Secchi depth, SD)、水温(Water temperature, WT)、pH、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)等理化指标使用塞氏盘、便携式溶解氧测量仪(YSI-550A)和便携式pH计(METTLER TOLEDO Seven2Go)等设备进行原位测定。总氮(TN)、氨氮(NH₄-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO₄-P)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a (Chl. a)等指标的样品采集与测定参考相关文献^[27]在实验室中进行。

1.4 数据分析

浮游植物功能群优势度分析 优势功能群以Mcnaughton优势度指数(Y)值进行鉴别^[19]:

$$Y = P_i \times f_i$$

式中, P_i 为第 i 种功能群丰度与样品中浮游植物种总丰度的比值(n_i/N), f_i 为第 i 功能群在各采样点出现的频度。 $Y \geq 0.02$ ^[19]的功能群为优势功能群。选择优势功能群进行下一步的排序分析。

排序分析 采用Canoco for Windows 4.5 软件对功能群数据和环境数据进行排序分析。浮游植物功能群矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换, 环境因子数据除ORP数据做 $\lg[-(x+1)]$ 转换外, 其他全部进行 $\lg(x+1)$ 转换^[19]。首先进行去趋势对应分析(DCA)选择合适的排序和分析方法, 根据分析结果, 选择冗余分析(RDA)或典范对应分析(CCA), 以逐步迭代的方式筛选出有显著解释性的环境因子, 以揭示显著环境因子对优势浮游植物功能群的影响。单因素方差分析(One-way ANOVA)在SPSS 13.0中完成, 其他图表制作则通过Excel 2007进行。

2 结果

2.1 研究水库环境因子动态

表1显示了10个水库主要环境因子的变化情况。水温(WT)变化为12.8—34.2℃, 夏季最高, 冬季最低; 透明度变化幅度较大, 分布在35—370 cm, 秋季普遍较高。叶绿素 a (Chl. a)含量春季稍低; 水体在调查期间基本呈弱碱性, 夏季稍高, 秋季稍低, 溶解氧(DO)与pH季节变化基本一致; 总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})均表现出冬季枯水期最高的趋势, 但最低出现时间不一致, 其中TN在夏季最低, TP和COD_{Mn}则在春季含量低于其他三季。

2.2 研究水库浮游植物功能群组成

浮游植物种类组成与功能群划分 调查期间共检出浮游植物9门104属188种, 其中绿藻门出现的种类最多为48属84种, 占44.7%, 其次为硅藻门(15属35种, 占18.6%)和蓝藻门(19属34种, 占18.1%)。其余门类种类数均较少, 包括裸藻门5属12种, 金藻门8属10种, 甲藻门4属7种, 隐藻门2属4种, 种类数最少的黄藻门和定鞭藻门, 均只出现1属1种。根据功能群分类法, 研究水库中共出现24个功能群, 分别为B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_O、M、MP、N、P、S1、S2、S_N、T、T_C、W1、W2、X1、X2和Y(表2)。

浮游植物优势功能群及分布特征 从全年来看(表2和图2), 各功能群出现频率范围为5.6%—100%; 根据优势度指数计算结果, 全年 $Y > 0.02$ 的功能群有6个, 按优势度指数高低依次为S1、T_C、S_N、S2、L_O和J, 其年均丰度范围为 2.12×10^6 — 6.28×10^7 cells/L, 与优势度指数分布一致。

从四季来看, 优势度指数与平均丰度之间均表

表1 四川丘陵水库环境因子季节变化

Tab. 1 Seasonal variations of environmental factors in studied reservoirs (Mean±SD)

环境因子Parameter	单位Unit	夏季Summer	秋季Autumn	冬季Winter	春季Spring	全年Annual data
WT	℃	30.9±1.2	17.5±1.4	14.1±1.0	26.5±2.6	22.4±7.0
Chl. a	μg/L	49.7±38.3	43.2±50.8	56.9±46.2	18.3±15.5	42.7±42.4
SD	cm	80.8±71.9	132.1±94.3	80.9±22.0	84.6±19.5	95.2±66.0
pH	—	8.7±0.5	7.7±0.5	8.3±0.3	8.6±0.4	8.3±0.6
ORP	mv	-91±23	-55±21	-89±18	-100±19	-83±27
DO	mg/L	9.42±2.15	4.80±0.40	6.19±1.82	8.20±3.28	7.0±2.6
TN	mg/L	1.27±0.49	3.39±0.92	6.52±0.64	1.86±0.63	3.21±2.14
NH ₄	mg/L	0.046±0.087	0.627±0.733	0.211±0.499	0.033±0.029	0.233±0.505
NO ₃	mg/L	0.44±0.38	0.598±0.450	0.89±0.48	1.78±0.55	0.89±0.68
NO ₂	mg/L	0.035±0.055	0.026±0.024	0.098±0.194	0.042±0.112	0.049±0.115
TP	mg/L	0.198±0.179	0.176±0.254	0.896±0.533	0.068±0.055	0.331±0.443
PO ₄	mg/L	0.008±0.012	0.098±0.210	0.088±0.167	0.026±0.044	0.055±0.140
COD _{Mn}	mg/L	5.1±1.4	4.0±1.6	6.8±2.3	2.0±1.3	4.6±2.4

表 2 四川丘陵水库浮游植物功能群划分

Tab. 2 Functional classification of phytoplankton in studied reservoirs

序号 Number	功能群 Functional group	代表种/属 Representative species	功能群生境特征 Habitat characteristics	优势度 Y
1	S1	浮鞘丝藻 <i>Planktolyngbya</i> spp. 湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	均匀的浑浊水体, 对光照敏感, 藻种适合生 活于暗环境中	0.533
2	T _C	颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp. 环鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> <i>circumcreta</i>	富营养型静止水体或藻类爆发的缓流型河 流	0.073
3	S _N	史氏棒胶藻 <i>Rhabdogloea smithii</i> 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> spp.	温暖的混合水体	0.059
4	S2	小尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> spp. 螺旋藻 <i>Spirulina</i> spp.	温暖的、浅的、高碱度的水体	0.026
5	L _O	平裂藻 <i>Merismopedia</i> spp. 腔球藻 <i>Coelosphaerium</i> sp. 色球藻 <i>Chroococcus</i> spp. 束球藻 <i>Gomphosphaeria</i> sp. 双眉藻 <i>Amphora</i> sp. 多甲藻 <i>Peridinium</i> spp. 角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i> 拟多甲藻 <i>Peridiniopsis</i> spp.	寡营养型到富营养型、大中型深水或浅水 湖泊	0.026
6	J	顶棘藻 <i>Chodatella</i> spp. 盘星藻 <i>Pediastrum</i> spp. 栅藻 <i>Scenedesmus</i> spp. 多芒藻 <i>Golenkinia</i> spp. 十字藻 <i>Crucigenia</i> spp. 四星藻 <i>Tetrastrum</i> spp. 集星藻 <i>Actinastrum</i> sp. 四角藻 <i>Tetraedron</i> spp. 空星藻 <i>Coelastrum</i> spp.	混合的、高营养的浅水水体(包括一些落差 较低的河流)	0.020
7	X2	四鞭藻 <i>Carteria</i> sp. 塔胞藻 <i>Pyramimonas</i> spp. 衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 翼膜藻 <i>Pteromonas</i> spp. 蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> spp. 金杯藻 <i>Kephyrion</i> sp. 棕鞭藻 <i>Ochromonas</i> spp. 小金色藻 <i>Chrysochromulina</i> <i>parva</i>	中营养型到高度营养型的浅水水体	0.014
8	X1	单针藻 <i>Monoraphidium</i> spp. 弓形藻 <i>Schroederia</i> spp. 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp. 小球藻 <i>Chlorella</i> spp.	富营养型到高度富营养型的浅水水体	0.010
9	H1	拟鱼腥藻 <i>Anabaenopsis</i> spp. 束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> spp. 鱼腥藻 <i>Anabaena</i> spp.	富营养型小型湖泊, 有分层现象, 氮含量低	0.007
10	P	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> spp. 拟新月藻 <i>Closteriopsis</i> spp. 新月藻 <i>Closterium</i> spp. 脆杆藻 <i>Fragilaria</i> spp. 颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i>	混合程度较高中富营养浅水水体	0.005
11	F	网球藻 <i>Dictyosphaerium</i> spp. 卵囊藻 <i>Oocystis</i> spp. 球囊藻 <i>Sphaerocystis</i> sp. 微芒藻 <i>Micractinium</i> sp. 蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> spp. 月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp. 肾形藻 <i>Nephrocytium</i> sp. 四棘藻 <i>Treubaria</i> sp.	中或富营养型、均匀的、清澈的深水湖泊	0.005
12	C	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	富营养型的小中型湖泊, 无分层现象	0.004
13	Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> spp. 真蓝裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> <i>eucyaneum</i>	牧食强度低的所有静水水体	0.004
14	K	隐杆藻 <i>Aphanothece</i> spp. 隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> spp.	营养物质丰富的浅水水体	0.003
15	M	微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	富营养型或高度富营养型小中型水体	0.001
16	B	岛沟链藻 <i>Aulacoseira islandica</i> 意大利沟链藻 <i>Aulacoseira italica</i>	中营养型中小型湖泊, 无分层现象	0.000
17	D	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp. 针杆藻 <i>Synedra</i> spp.	河流在内的浑浊型浅水体	0.000
18	E	鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> sp. 锥囊藻 <i>Dinobryon</i> spp.	寡营养型小型浅水湖泊或者非自养的池塘	0.000
19	G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i> 实球藻 <i>Pandorina morum</i>	富营养型小型湖泊及大型河流和贮水池等 静止水域	0.000
20	MP	短缝藻 <i>Eunotia</i> sp. 类S状菱形藻 <i>Nitzschia sigmoidea</i> 卵形藻 <i>Cocconeis</i> spp. 桥弯藻 <i>Cymbella</i> spp. 曲壳藻 <i>Achnanthes</i> spp. 异极藻 <i>Gomphonema</i> spp. 舟形藻 <i>Navicula</i> spp.	经常受到搅动的、无机的、浑浊的淡水湖 泊	0.000
21	N	鼓藻 <i>Cosmarium</i> spp.	栖息在2—3 m的连续或者半连续的水体混 合层中	0.000
22	T	并联藻 <i>Quadrigula</i> sp. 转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.	持续混合层, 光照为限制因子, 夏季清澈的 深水湖的变温层水体	0.000
23	W1	盘藻 <i>Gonium</i> sp. 扁裸藻 <i>Phacus</i> spp. 鳞孔藻 <i>Lepocinclis</i> sp. 裸藻 <i>Euglena</i> spp.	从农田或污水中获得有机质的池塘或临时 形成的水体	0.000
24	W2	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> spp.	中或富营养型池塘, 或临时形成的浅水湖泊	0.000

现出良好的一致性,其中夏季各功能群出现频率范围为3.4%—100%,优势功能群依次为S1+T_C+S_N+L_O+S2,平均丰度 7.64×10^6 — 1.84×10^8 cells/L;秋季各功能群出现频率为3.6%—100%,依次为S1+S2+J+S_N+X1+L_O+X2,平均丰度 1.69×10^6 — 3.18×10^7 cells/L,夏季优势类群中的T_C被J、X1和X2所替代;冬季各功能群出现频率为3.8%—100%,依次为S1+X2+C+X1+J+Y,平均丰度 6.12×10^5 — 1.28×10^7 cells/L,秋季优势功能群中的S2、S_N和L_O被C和Y所替代;春季各功能群出现频率为4.2%—100%,依次为S1+S_N+H1+J+X1+X2,平均丰度 4.30×10^5 — 6.08×10^6 cells/L,冬季优势功能群中的C和Y被S_N和H1所替代(图3)。S1功能群在4个季节中均占优势,是绝对的优势类群;J、X1和X2在除夏季以外的3个季节占优势,S_N在除冬季以外的3个季节中占优势,为次优势类群。

从浮游植物组成比例的季节变化来看,全年以S1功能群丰度占比最高,达60.6%,6个优势功能群总丰度为 9.47×10^7 cells/L,占浮游植物总丰度的91.3%。夏、秋和冬季3个季节也均以S1功能群丰度占比最高,分别占64.8%、52.1%和53.8%;春季有所变化,以S_N功能群(31.7%)占比最高,其次才是S1功能群(28.8%;图4)。四季优势功能群总丰度分别为 2.70×10^8 、 5.36×10^7 、 1.97×10^7 和 1.91×10^7 cells/L,占当季浮游植物总丰度的95.0%、87.8%、82.1%和90.5%。

2.3 环境因子对浮游植物群落季节演替的影响

单因素方差分析(One-way ANOVA)结果显示,四季间浮游植物功能群组成差异显著($P=0.019$, $F=3.674$, $df=3$)。各功能群季节变化较为明显:S1、T_C、S_N和L_O等功能群大致呈现出从夏季到春季丰度减少的趋势,J、X1和S2在秋季取得最高值,H1和X2则在冬季最高。

物种组成的DCA分析结果显示,线性模型RDA更适合本研究数据。根据RDA分析的结果,全

年环境因子第一轴解释了浮游植物群落变化的33.0%,第二轴解释了3%(表3)。与轴1相关性较强的因子有NO₃-N和NO₂-N,均为正相关;与环境因子第二轴相关性较强的ORP、TP和DO等,为正相关。物种箭头主要集中在第三象限和第四象限;对于优势度最大的S1功能群来说,COD_{Mn}、Chl.a和DO与之正相关最显著,无机离子则与之明显负关联。总的来说,优势功能群主要与NO₃-N、NO₂-N和PO₄-P等无机离子呈较显著的负相关关系,与COD_{Mn}、Chl.a和DO等呈正相关;TP和ORP仅对J和S2功能群有较明显的作用,呈负相关(图5)。从样点的分布来看,夏季样点主要分布在第四象限,秋季主要分布于二、三象限,冬季和春季则主要分布在第一象限,说明冬季和春季浮游植物对环境的需求较为接近,与夏、秋季需求差异较大。

从四季分析结果来看,夏季5个优势功能群除L_O外均分布在第四象限,较为集中,环境因子第一轴解释了29.1%的浮游植物群落变化,环境因子第二轴解释了19.3%的变化(表3)。S1、T_C、S2和S_N功能群均与TP、COD_{Mn}和Chl.a正相关最为显著,与SD负相关最强。L_O功能群则与TP、COD_{Mn}、Chl.a和SD关联很弱,更多的受到TN、NO₂-N和PO₄-P等指标的正向作用;DO则与S1和L_O的正向关联性最强(图6A)。秋季环境因子第一轴解释了72.4%的浮游植物群落变化,环境因子第二轴解释了8.1%的变化(表3);7个优势功能群均与SD和NO₃-N显著负相关;与夏季情况类似,除L_O和J以外,其余5类(S1、S2、X1、X2和S_N)分布极为靠近,与Chl.a、NH₄-N、NO₂-N和pH显著正相关,J和L_O则更多的受到TN和COD_{Mn}的正向作用(图6B)。冬季环境因子第一轴解释了43.6%的浮游植物群落变化,环境因子第二轴解释了14.9%的变化(表3);S1、X1、X2、J和Y均分布在第四象限,较为集中,与SD负关联显著,与WT、ORP、pH、Chl.a、TN、

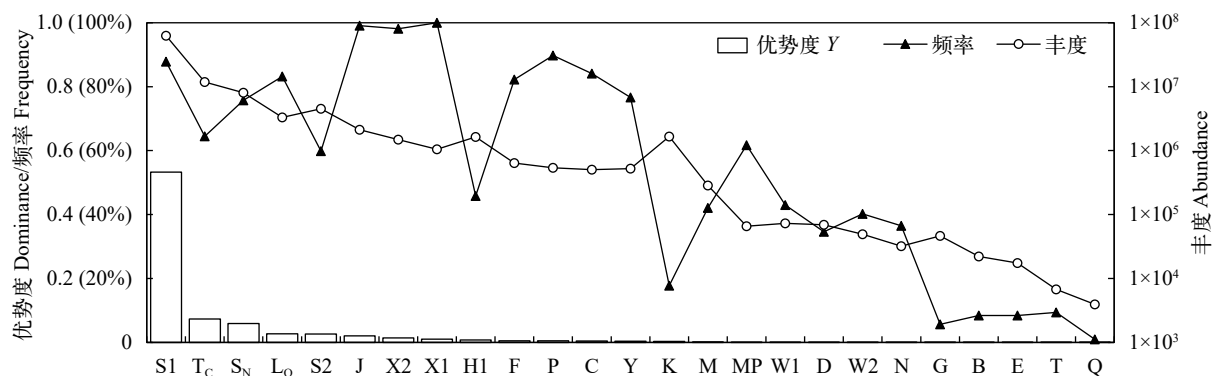


图2 全年浮游植物各功能群优势度、频率及丰度

Fig. 2 Dominance index, frequency and abundance of phytoplankton functional groups in studied reservoirs

TP和COD_{Mn}等正相关, 与离子状态的营养盐和DO等关联性不大。C功能群独自分布在第四象限, 仅与离子状态的营养盐和DO显著负相关(图 6C)。

春季环境因子第一轴解释了49.5%的浮游植物群落变化, 环境因子第二轴解释了21.0%的变化(表 3); H1和S1位于第四象限, 与DO和COD_{Mn}正相关, 与

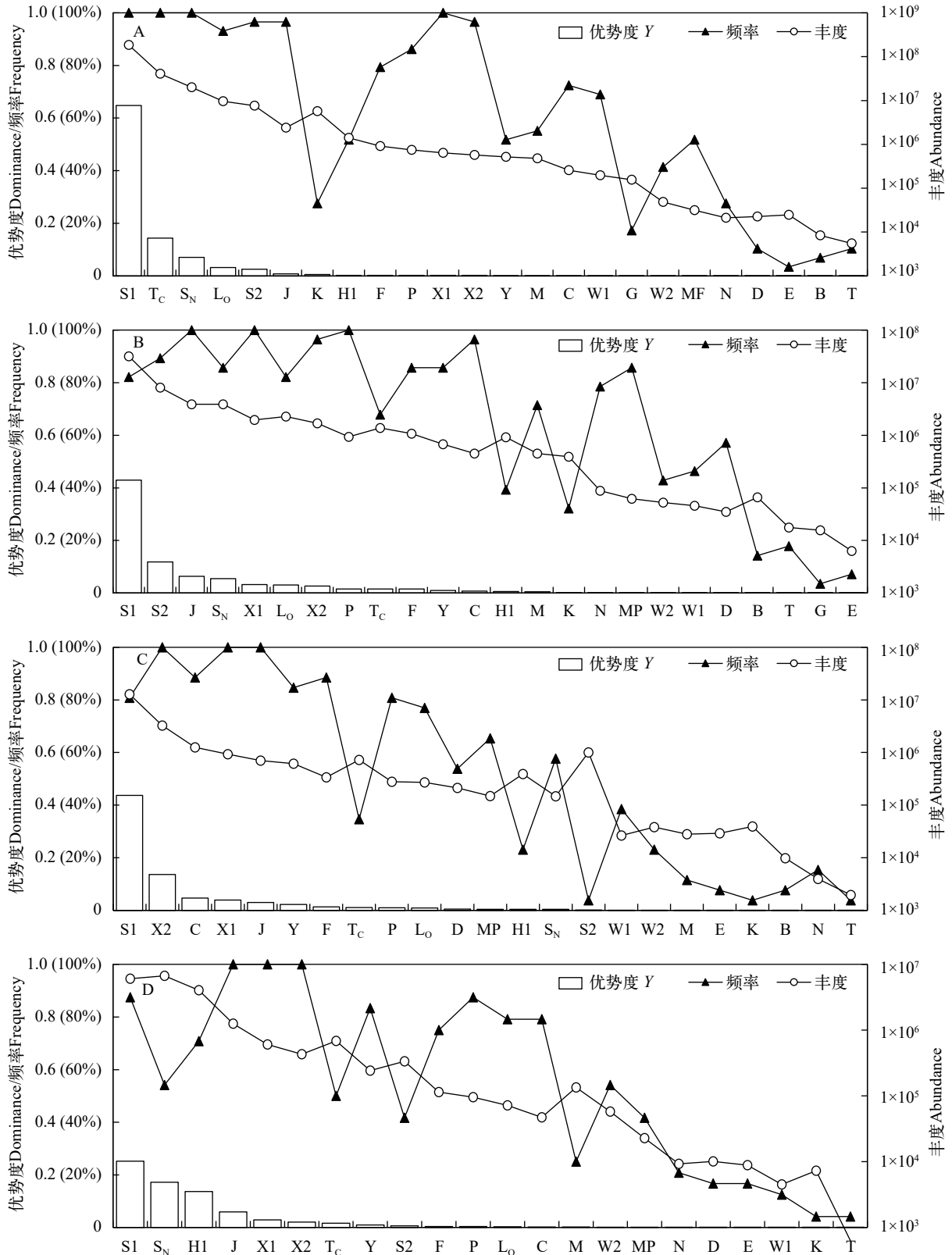


图 3 四季浮游植物各功能群优势度、频率及丰度

Fig. 3 Dominance index, frequency and abundance of phytoplankton functional groups for each season

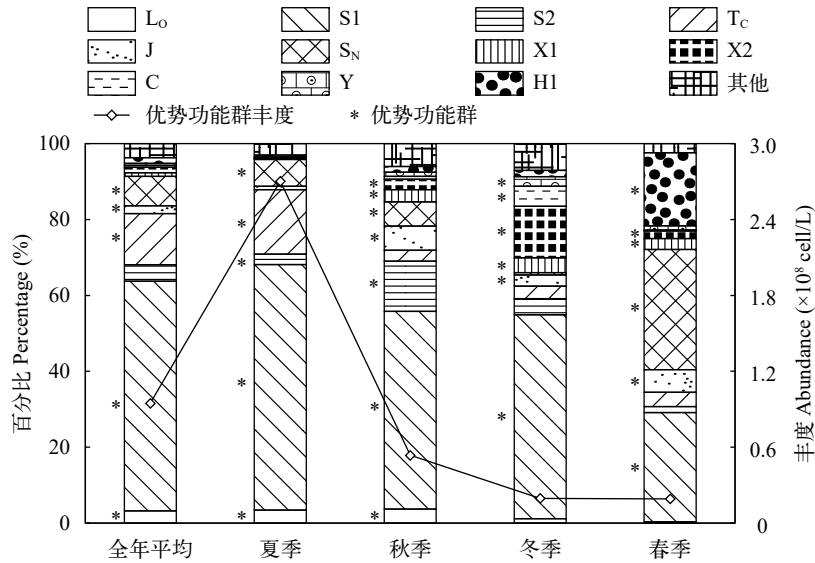


图4 浮游植物群落组成与优势功能群总丰度

Fig. 4 Relative abundance and total abundance of phytoplankton functional groups for each season

表3 浮游植物功能群与环境因子的冗余分析(RDA)统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of redundant analysis (RDA) of phytoplankton functional groups and environmental factors

季节 Season	轴序 Axis	特征根 Eigenvalue	物种-数据累计解释变化率 Cumulative percentage variance of species data (%)
全年All year	1	0.3297	33.0
	2	0.03	36.0
	3	0.012	37.2
	4	0.007	37.9
夏季Summer	1	0.2909	29.1
	2	0.1931	48.4
	3	0.0518	53.6
	4	0.0257	56.2
秋季Autumn	1	0.7241	72.4
	2	0.0807	80.5
	3	0.013	81.8
	4	0.0112	82.9
冬季Winter	1	0.4357	43.6
	2	0.1491	58.5
	3	0.1234	70.8
	4	0.033	74.1
春季Spring	1	0.4952	49.5
	2	0.2097	70.5
	3	0.0925	79.7
	4	0.0139	81.1

氮磷指标显著负相关; S_N 和 X_2 之间夹角很小,集中在第三象限,与WT正相关显著,与氮磷营养指标负相关; J与 X_1 之间夹角较小,与Chl.a正相关显著,与SD、pH和ORP呈现较为明显的负相关关系(图6D)。S1功能群在4个季节中均占优势,但在不同季节中

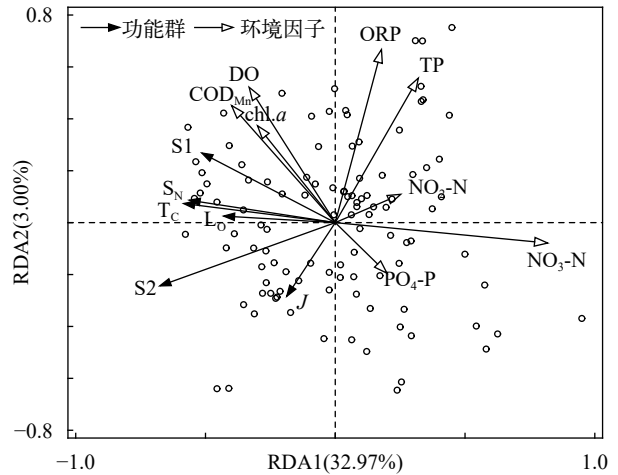


图5 研究水库全年浮游植物优势功能群与主要环境因子的RDA分析

Fig. 5 Redundancy analysis of functional groups of phytoplankton in studied reservoirs

的主要影响因子有所不同:夏季与磷(包括TP和 PO_4-P)正相关,与SD负相关;秋季与多数氮磷营养正相关,与SD和 NO_3-N 负相关;冬季和春季均与WT正相关,与离子态营养盐负相关(图6),说明冬季和春季浮游植物对环境的需求较为接近,这与全年样点分布情况结果一致。

结合优势功能群的季节演替(图3),从夏季到秋季出现了 T_C 与J、 X_1 和 X_2 之间的演替,其中夏季 T_C 与TP、 COD_{Mn} 和Chl.a呈正相关,与SD呈负相关;秋季 X_1 和 X_2 与Chl.a、 NH_4-N 、 NO_2-N 和pH显著正相关, J则受到TN和 COD_{Mn} 的正向作用。秋季到冬季出现了 S_2 、 S_N 和 L_0 被C和Y所替代的现象,其中秋季 S_2 和 S_N 与Chl.a、 NH_4-N 、 NO_2-N 和pH显著正

相关, L_O 则与 TN 和 COD_{Mn} 显著正相关; 冬季 C 仅与离子状态的营养盐和 DO 显著负相关, Y 则与 SD 负相关, 与 WT 、 ORP 、 pH 、 $Chl.a$ 、 TN 、 TP 和 COD_{Mn} 等正相关。从冬季到春季, C 和 Y 被 S_N 和 $H1$ 所替代, $H1$ 与 DO 和 COD_{Mn} 正相关, S_N 则与 WT 正相关, 二者均与氮磷指标呈负相关。

3 讨论

3.1 四川丘陵水库浮游植物功能群的季节演替特征

尽管在不同类型的水体中浮游植物群落结构特征各不相同, 但通常均表现出较为明显的季节变化^[28, 29], 其演替是多种环境因子在时空上综合作用的结果^[30]。

四川丘陵区中小型水库中全年优势功能群为 $S1$ 、 T_C 、 S_N 、 $S2$ 、 L_O 和 J 。研究水域表现出高营养、较少分层和水体透明度不高等功能群生境特征, 该结果也得到了理化数据的支持(表 1)。从全年来看, $S1$ 是 4 个季节的优势功能类群, 其次为 S_N (夏、秋、春)、 J (秋、冬、春)、 $X1$ (秋、冬、春)和 $X2$ (秋、冬、春)在 3 个季节均占优势。研究发现 $S1$ 和 S_N 功能群代表种类主要为丝状蓝藻, 其喜好

较高的营养, 对低光照耐受力强^[8], 而四川丘陵地区水域夏季雨量丰富, 地表径流导致水体营养丰富, 加上闷热弱光天气等因素^[17, 18], 促进了上述 2 个功能群的大量增殖。该结果与热带和亚热带地区分布的其他水库^[13]和河流^[31]中的情况类似。值得注意的是, 本研究 6 个全年优势功能群中, 优势度最大的前 4 个功能群代表物种全部为蓝藻(表 2), 它们喜好高营养环境, 对不同的光照环境各有适应机制^[8, 18, 32], 占据着该地区水库的大部分生态空间。

秋季优势功能群组成为 $S1+S2+J+S_N+X1+L_O+X2$, 相对于夏季减少了 T_C , 增加了 $X1$ 、 $X2$ 和 J 。 T_C 在本研究中的代表为颤藻和鞘丝藻, 为丝状蓝藻, 喜好高温和高营养的静止环境^[9], 研究区域秋季水温和水文情势的变化(表 1)破坏了其喜好的生境条件, 可能导致其优势度降低。 $X1$ 和 $X2$ 的典型代表多为 C 生长策略(竞争型)的小型绿藻^[5, 16], 一旦营养与水温合适就会迅速繁殖占据生境^[17, 19], 但这类小型绿藻, 特别是 $X1$ 对滤食敏感^[26]。分析研究区域 $X1$ 和 $X2$ 夏季生物量相对较低的可能原因: 首先, 夏季浮游动物生物量显著增加限制了 $X1$ 和 $X2$ 生物量的发展; 其次调查水域鱼类以滤食性鲢 *Hypophthalmich-*

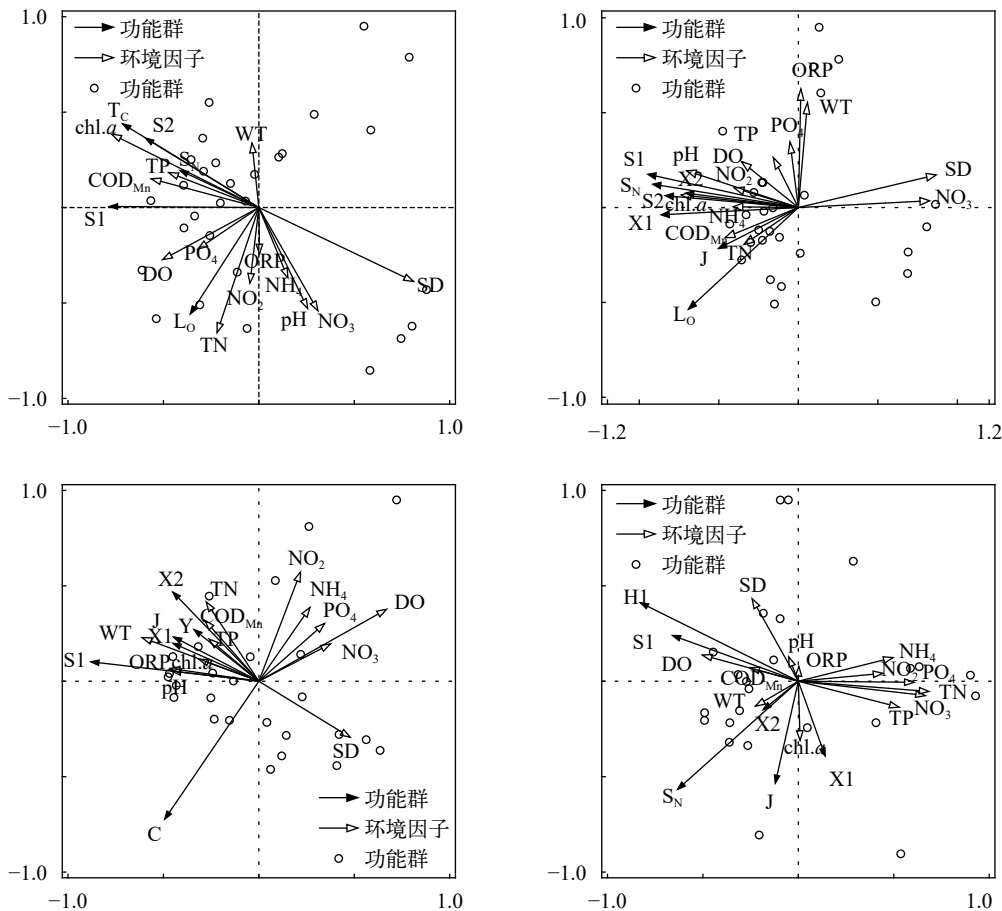


图 6 研究水库不同季节浮游藻类优势功能群与主要环境因子的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis of phytoplankton functional groups in different seasons in studied reservoirs

thys molitrix、鳙 *Hypophthalmichthys nobilis* 为优势类群, 夏季鲢和鳙生长速度快, 摄食强度大, 调控了 X1 和 X2 的生物量。J 功能群为不能运动的无胶质的绿藻, 典型代表栅藻和四角藻等, 喜好光照较低的高营养水体^[8], 容易在温度不太高、阳光较温和的季节, 如春秋和冬季占优势地位^[19]。

冬季优势组成为 S1+X2+C+X1+J+Y, 与秋季相比, 少了 S2、S_N 和 L_O, 增加了 C 和 Y。S2、S_N 和喜好较高水温^[5, 8], 冬季水温的降低(表 1)打破了 2 个类群的优势地位; L_O 耐分层, 对混合敏感^[5, 18], 冬季水库水温层解除, 进入完全混合状态^[33-35], 上下水层的混合导致环境不再适宜于 L_O, 而这样的混合和低光的环境恰好对以梅尼小环藻为代表的 C 功能群有利^[8]。Y 功能群以隐藻和真蓝裸甲藻等为代表, 喜好牧食强度低的所有静水水体^[8], 冬季水温降低, 鱼类与浮游动物活动减弱, 摄食强度降低, 为 Y 的繁衍提供了良好的生物环境, 最终导致了 C 和 Y 对 S2、S_N 和 L_O 的替代。

春季优势组成为 S1+S_N+H1+J+X1+X2, S_N 和 H1 取代了冬季 C 和 Y 的优势地位。春季水温分层开始发育, 底质中营养物质向水柱中输送减少^[33, 36], 再加上较冬季为多的降水稀释作用^[22], 导致营养水平的降低; 同时随着水温增加浮游动物数量与活性增强, 环境对 C 和 Y 不再有利, 而更为适合喜好分层与低营养环境的 S_N 和 H1^[8]。

从四季的演替可以看出, 夏季的优势功能群全部以蓝藻为代表, 秋季绿藻优势有所加大, 冬季硅藻、隐藻和甲藻数量增多, 到了春季又恢复到秋季蓝藻+绿藻的优势模式。丝状蓝藻(包括 S1、S2、S_N、T_C 和 H1)在季节间有所更替, 但优势从未丢失。

3.2 环境因子对浮游植物群落季节演替的影响

从全年来看, 优势功能群主要与氮磷无机离子负相关。浮游植物光合作用不断吸收水中的可利用氮磷, 包括 NO₃-N、NO₂-N 和 PO₄-P 等^[37], 导致这些无机离子浓度随着优势功能群丰度的增加而不断降低。优势功能群均与 COD_{Mn}、Chl. *a* 和 DO 等呈显著正相关, 尤其是绝对优势功能群 S1, 说明本研究中水体主要初级生产者浮游植物, 特别是以 S1 功能群为代表的优势功能群, 是水域中有机物、叶绿素和溶氧的主要贡献者, 其他类似研究^[19]也支持了该结论。

从夏季到秋季出现了 T_C 与 J、X1 和 X2 之间的演替, 其中 T_C 与 WT 等因子正相关; X1、X2 与 J 则与 TN 等因子的正相关。随着秋季水温的降低, 滤食性动物活性也随之降低, 以喜好高温的丝状蓝藻为典型代表的 T_C 逐渐失去其优势地位, X1 与 X2 的优

势逐渐显现, 同时秋季较低的光照条件对喜低光的 J 的扩繁也有利。研究水域夏季丰水期降雨较集中水量较大, 秋季平水期水位降低^[22], TN 浓度增大, 更加适合 X1、X2 与 J 的生长繁殖。

秋季到冬季出现了 S2、S_N 和 L_O 被 C 和 Y 所替代的现象, 这 5 个功能群均对低光生境有较强的耐受性^[8]。其中 S2 和 S_N 与 L_O 和 NH₄-N 等因子正相关, Y 与 TP、TN 和 COD_{Mn} 等正相关。一般 NH₄-N 在溶氧充足的条件下, 会被好氧菌氧化^[38], 冬季水温较低, 微生物耗氧较少, 溶氧相对充足, 再加之降水少水体交换缓慢, 对硝化作用有利^[38], 从而导致冬季 NH₄-N 浓度的降低。研究发现氮源中 NH₄-N 比例的升高有利于增强蓝藻的竞争优势^[39, 40], 而 NO₃-N 的升高会导致蓝藻被其他藻类替代^[41]。本研究中的 S2、S_N 和 L_O 以棒胶藻、螺旋藻和平裂藻等非固氮蓝藻为典型代表, 随着秋季到冬季 NH₄-N 浓度的降低与 NO₃-N 的升高而逐渐失去优势地位。同时, 从秋季到冬季, 水库经历了从分层到循环的过程^[33-35], 底质向水柱中输送氮磷的量加大, 同时冬季枯水期水位进一步下降, 导致水体中营养物质浓度进一步加大, 如 TN、TP、COD_{Mn} 和 NO₃-N 都呈现出不同程度的升高(表 1), 促进了 Y 的增长。

从冬季到春季, C 和 Y 被 S_N 和 H1 所替代, 其中 H1 与 SD 等正相关, S_N 则与 WT 等正相关, 二者均与氮磷指标呈负相关。进入春季, 水体分层逐渐开始形成^[33-35], 水温回升, 滤食性动物活动加强, 同时由于春季降水造成的稀释作用, 水体中营养水平降低, 喜好高 COD_{Mn} 和高 TN 的 Y 功能群优势被削减, 而耐低营养, 尤其是耐低氮的 H1 和 S_N 则更具有优势^[8]。春季光照条件与水体透明度的提升(表 1), 也加大了喜好较强光照的 H1 的优势度。

从不同季节影响丝状蓝藻分布的关键因子来看, 夏季 S1、S2、T_C 和 S_N 与 TP 正相关, L_O 与 TN 和 PO₄-P 正相关; 秋季 S1 和 S2 与无机氮离子正相关, L_O 与 TN 和 COD_{Mn} 正相关; 冬季 S1 与 WT、TN、TP 和 COD_{Mn} 正相关; 春季 S1、H1 与 COD_{Mn} 正相关, S_N 则与 WT 正相关。尽管各季节优势丝状蓝藻种类有所区别, 各因子作用大小也有所不同, 但其现存量均表现出随营养水平和水温的升高而增加的趋势。目前该地区水库氮磷营养水平已经较高(表 1), 如不加强水质管理, 丝状蓝藻的数量可能会在高营养水平与全球气候变暖的双重促进下逐年增加, 以致于暴发水华, 严重威胁该地区生活与安全^[42]。

4 结论

(1) 对四川丘陵地区 10 个中小型水库进行的周

年调查显示, 该地区水库中共有24个功能群, 其中全年 $Y>0.02$ 的功能群有6个, 按优势度指数高低依次为S1、T_C、S_N、S2、L_O和J。不同季节优势功能群存在明显差异, S1在四季均占优势, 为绝对优势功能群。(2)根据功能群生境特征, 研究水域表现出高营养、较少分层和水质透明度较低等特点。季节间水库分层的形成与打破, 及水体光照条件、牧食强度和营养水平等的变化, 导致了该地区水库浮游植物功能群之间的此消彼长。(3)研究水域浮游植物功能群的季节演替受主要受到WT、TN、TP、NH₄-N、NO₃-N、COD_{Mn}和SD的影响。尽管各季节优势丝状蓝藻种类有所区别, 各因子作用大小也有所不同, 但其现存量均表现出随营养水平和水温的升高而增加的趋势。

参考文献:

- [1] Falkowski P G, Laws E A, Barber R T, *et al.* Phytoplankton and Their Role in Primary, New, and Export Production [M]. Berlin: Springer, 2003: 99-121.
- [2] Padišák J, Borics G, Grigoršzky I, *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14.
- [3] He R, Jiang L, Zheng S M, *et al.* The study of the community structure of the phytoplankton and the assessment of the water quality in the Ganjing River of the Three Gorge Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 902-909. [贺蓉, 蒋礼, 郑曙明, 等. 三峡库区甘井河水域牧场浮游植物群落结构及水质评价 [J]. *水生生物学报*, 2015, **39**(5): 902-909.]
- [4] Huisman J, Matthijs H C, Visser P M. Harmful Cyanobacteria [M]. Berlin: Springer, 2005: 1-23.
- [5] Yang W, Zhu J Y, Lu K H, *et al.* The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(6): 1833-1840. [杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(6): 1833-1840.]
- [6] Sommer U. Plankton Ecology, Succession in Plankton Communities [M]. Berlin: Springer, 1989: 17-36.
- [7] Solbrig O T. Plant Traits and Adaptive Strategies: Their Role in Ecosystem Function [M]. Berlin: Springer, 1993: 97-116.
- [8] 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.
- [9] Padišák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [10] 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 [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 901-912.
- [11] Izaguirre I, Allende L, Escaray R, *et al.* Comparison of morpho-functional phytoplankton classifications in human impacted shallow lakes with different stable states [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 203-216.
- [12] Li Z, Fang F, Guo J S, *et al.* Seasonal succession of Phytoplankton function groups in the Xiaojiang (Pengxi) River backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 392-400. [李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 392-400.]
- [13] Zhang Y, Hu R, Xiao L J, *et al.* Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 111-121. [张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 111-121.]
- [14] Stević F, Mihaljević M, Špoljarić D. Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations [J]. *Hydrobiologia*, 2013(709): 143-158.
- [15] Bovo-Scomparin V M, Train S, Rodrigues L C. Influence of reservoirs on phytoplankton dispersion and functional traits: A case study in the Upper Paran River, Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2013(702): 115-127.
- [16] Zhang Y W, Li H, Li J, *et al.* Spatiotemporal succession characteristics of algal functional groups and its Impact factors for a typical channel-type reservoir in a Southwest Mountainous Area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2680-2687. [张耀文, 李洪, 李嘉, 等. 西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2680-2687.]
- [17] Zheng C, Lu K H, Xu Z, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2688-2697. [郑诚, 陆开宏, 徐镇, 等. 四明湖水水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2688-2697.]
- [18] Fan X C, Dai C F, Lu X X, *et al.* Study on phytoplankton functional group succession and driving parameters in the Jinhewan Urban Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(16): 5726-5738. [范小晨, 代存芳, 陆欣鑫, 等. 金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子 [J]. *生态学报*, 2018, **38**(16): 5726-5738.]
- [19] Ge Y, Zhou Y F, Wang C H, *et al.* Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of

- Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3027-3039. [葛优, 周彦锋, 王晨赫, 等. 阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 3027-3039.]
- [20] Chen Q, Li Q H, Ma X Y, *et al.* Comparison of functional groups of phytoplankton in FG, MFG and MBFG: Taking three reservoirs as an example in Guizhou Plateau [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4061-4071. [陈倩, 李秋华, 马欣洋, 等. 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*, 2019, **40**(9): 4061-4071.]
- [21] Wei Z B, Chai Y, Luo J B, *et al.* Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 612-621. [魏志兵, 柴毅, 罗静波, 等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析 [J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(3): 612-621.]
- [22] Luo H L. Dynamic characteristics of drought and waterlogging and climate change in hilly area of central Sichuan during last 46 years [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2011, **32**(2): 273-278. [罗怀良. 川中丘陵地区近46年来气候变化及旱涝动态特征 [J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2011, **32**(2): 273-278.]
- [23] Liu G X, Wu M L, Yin J, *et al.* Influence of pumping water from Xijiang River on eutrophication of water supply reservoirs and its management strategy in Zhuhai City [J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(4): 494-499. [刘格辛, 吴孟李, 尹娟, 等. 西江调水对珠海市供水水库富营养化的影响及其管理对策 [J]. *生态科学*, 2013, **32**(4): 494-499.]
- [24] Hu H J, Wei Y X. *The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-900. [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: 23-900.]
- [25] Zhang Z S, Huang X F. *The Research Methods of Freshwater Plankton* [M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-414. [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: 1-414.]
- [26] Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 11-23. [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 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [27] State Environmental Protection Administration, the Monitor and Analysis Methods of Water and Wastewater Editorial Committee. *The Monitor and Analysis Methods of Water and Wastewater* [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002: 88-284. [国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. *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: 88-284.]
- [28] Bellinger E G, Sigeo D C. *Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators*. 2nd ed [M]. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2015: 11-56.
- [29] Hu J, Gong C, Xia W, *et al.* Study on phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Tian'e section Changjiang River [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, **49**(1): 70-77. [胡俊, 龚成, 夏纬, 等. 天鹅洲长江段浮游植物群落季节演替及环境因子研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2018, **49**(1): 70-77.]
- [30] Ma P M, Shi L D, Zhang J F, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569. [马沛明, 施练东, 张俊芳, 等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4560-4569.]
- [31] Liu Z G, Zhang Z, Zhang M, *et al.* Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(3): 375-384. [刘足根, 张柱, 张萌, 等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(3): 375-384.]
- [32] Zhan L. Study on leisure agriculture garden planning in central Sichuan hilly area [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016: 21-25. [詹雷. 四川盆中丘陵区休闲农业园区规划研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2016: 21-25.]
- [33] Su Y P. Study on the nutrition character of the river with dam-A case study on the reach of Shanzi Dam of Aojiang watershed in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2006: 14-22. [苏玉萍. 筑坝河流营养特征研究——以福建省敖江山仔大坝河段为例 [D]. 福州: 福建师范大学, 2006: 14-22.]
- [34] Wang Y C, Zhu J, Ma M, *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, Southwestern China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(1): 54-60. [王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化 [J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(1): 54-60.]
- [35] Duan Y. Water environment dynamics simulation technology research base on EFDC-Danjiangkou Reservoir as an example [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014: 54-59. [段扬. 基于EFDC的丹江口水库水环境数值模拟分析 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 54-59.]
- [36] Wang Y Y, Xu T, Cui Y J, *et al.* Seasonal thermal stratification in Shennong Bay and its effect on algae blooms [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(4): 19-26. [王耀耀, 徐涛, 崔玉洁, 等. 神农溪水体季节热分层特征及其对水华影响 [J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(4): 19-26.]
- [37] Shen H W. The bioavailability of nitrogen and phosphorus in surface sediment in Daya Bay [D]. Fujian: Xiamen University, 2002: 1-99. [沈海维. 大亚湾表层沉积物中

- 氮和磷的生物可利用性研究 [D]. 福建: 厦门大学, 2002: 1-99.]
- [38] Liu T. Research of water environment control and protection technology of Songta Reservoir [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014: 1-108. [刘婷. 松塔水库水环境控制与保护技术研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014: 1-108.]
- [39] Zhou T. The role of nitrogen in bloom formation and maintenance of Lake Taihu [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013: 13-26. [周涛. 氮在太湖水华形成与维持中的作用 [D]. 南京: 南京大学, 2013: 13-26.]
- [40] Ye L L, Wu X D, Liu B, *et al.* Temporal and spatial distributions of phytoplankton and inorganic and organic nitrogen in northwest region of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 859-869. [叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 等. 太湖西北湖区浮游植物和无机、有机氮的时空分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 859-869.]
- [41] Kappers F I. On population dynamics of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [D]. Amsterdam: University of Amsterdam, 1984: 23-36.
- [42] Wang H Z, Wang H J, Li Y, *et al.* The control of lake eutrophication: focusing on phosphorus abatement, or reducing both phosphorus and nitrogen [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(5): 938-960. [王洪铸, 王海军, 李艳, 等. 湖泊富营养化治理: 集中控磷, 或氮磷皆控 [J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(5): 938-960.]

SEASONAL SUCCESSION OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS AND ITS DRIVING FACTORS IN RESERVOIRS IN HILLY REGIONS OF SICHUAN PROVINCE

TAO Min^{1,2}, YUE Xing-Jian^{1,2}, LUO Jia-Lin¹, GUO Tao¹, WANG Yong-Ming^{1,2}, LIU Guo¹ and LI Bin^{1,2}

(1. School of Life Sciences, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China; 2. Conservation and Utilization of Fishes Resources in the Upper Reaches of the Yangtze River, Key Laboratory of Sichuan Province, Neijiang 641112, China)

Abstract: The community structure and succession of phytoplankton are strongly related to water quality and affects the structure, function and utilization of aquatic ecosystem, especially in reservoirs. Seasonal annual surveys on 10 typical reservoirs in hilly regions of Sichuan Province were conducted from 2016 to 2017, with the aim to explore the annual changes, succession rules and influencing factors of phytoplankton community structure in this area. Phytoplankton functional classification and redundancy analysis were used. 24 phytoplankton functional groups were identified in total, which are dominated by the 6 groups of S₁, T_C, S_N, S₂, L_O and J. Furthermore, the seasonal succession patterns for the dominant functional groups of phytoplankton in investigated reservoirs were identified as follows: S₁+T_C+S_N+L_O+S₂ in summer, S₁+S₂+J+S_N+X₁+L_O+X₂ in autumn, S₁+X₂+C+X₁+J+Y in winter and S₁+S_N+H₁+J+X₁+X₂ in spring. The results showed that the phytoplankton is always dominated by filamentous cyanobacteria whose composition changed from season to season. The formation and breaking of reservoir stratification, changes of light intensity, grazing intensity and nutrient level in water in different seasons led to the fluctuation of phytoplankton functional groups. Redundancy analysis indicated that water temperature, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, Nitrate nitrogen, permanganate index and Secchi depth were the main environmental factors that influencing the functional groups. Although the filamentous cyanobacteria were seasonally different in terms of its dominant species, its abundance increased with the increase of nutrient level and water temperature. In order to ensure the safety of life and production in this area, it is recommended that the water quality of the reservoirs should be effectively managed and immediately repaired to prevent the explosive proliferation of filamentous cyanobacteria under the dual promotion of high nutritional level and global warming.

Key words: Hilly regions; Small and medium-sized reservoirs; Phytoplankton functional groups; Succession; Environmental factors