

DOI: 10.5846/stxb201911182498

王远飞,周存通,赵增辉,林植华.亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系.生态学报,2021,41(10):4010-4022.

Wang Y F, Zhou C T, Zhao Z H, Lin Z H. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4010-4022.

亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系

王远飞¹, 周存通¹, 赵增辉², 林植华^{2,*}

¹ 南京师范大学生命科学学院, 南京 210023

² 丽水学院生态学院, 丽水 323000

摘要:以亚热带黄村水库流域为研究对象,探讨了浮游植物群落季节变化及其与环境因子的关系。共鉴定出浮游植物 51 种,种类最多的是绿藻门(18 种)(35.29%),其次是硅藻门(15 种)(29.41%)和蓝藻门(11 种)(21.57%)。从浮游植物群落季节组成差异来看,春季(62.96%)和夏季(71.03%)蓝藻门丰度最高,秋季(56.11%)和冬季(80.74%)硅藻门丰度最高。黄村水库流域优势种尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)和曲丝藻(*Achnanthes sp.*)在春夏秋冬季节均存在。多样性指数表明该流域水体处于中营养状况。温度、电导率和营养盐是影响浮游植物群落组成最主要的环境因素。

关键词:黄村水库流域;浮游植物;群落结构;季节动态;环境因子;水质

Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs

WANG Yuanfei¹, ZHOU Cuntong¹, ZHAO Zenghui², LIN Zhihua^{2,*}

¹ College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

² College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China

Abstract: The seasonal variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in subtropical Huangcun reservoirs basin were investigated in this study. A total of 51 phytoplankton species were identified, in which 35.29% of Chlorophyta, followed by 29.41% of Bacillariophyta, and 21.57% of Cyanophyta. In terms of the seasonal composition of community, Cyanophyta was dominant in spring and summer, accounting for 62.96% and 71.03% of the abundance, respectively. While Bacillariophyta was the most abundant group during the fall and winter, with an average contribution of 56.1% and 80.74% to the abundance, respectively. The main dominant species in Huangcun reservoirs basin were *Chroomonas acuta* and *Achnanthes sp.*, which occurred in four seasons and were common dominant species. The diversity indices indicated that the basin was in mesotrophic condition. The water temperature, conductivity and nutrients were the environmental factors having the greatest influence on the phytoplankton community composition.

Key Words: Huangcun reservoirs basin; phytoplankton; community structure; seasonal dynamics; environmental factors; water quality

浮游植物群落是湖泊和水库的主要初级生产者,是水生食物链的基础^[1]。因此,浮游植物对维持健康的水生生态系统至关重要,经常被用作水生生态系统健康和化学污染物胁迫效应的指标^[2]。浮游植物种类组

基金项目:国家自然科学基金项目(31500329);丽水市山海合作项目(SH2017001);丽水市重点研发计划项目(20150406)

收稿日期:2019-11-18; 网络出版日期:2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhlin1015@126.com

成、分布和主要色素叶绿素 a (Chl-a) 浓度的动态变化是水质和营养状况的生物指标。一般来说,浮游植物的种类组成和数量分布在理化参数的影响下呈现出广泛的时空变化^[3]。这种变化通常被认为是由环境变量例如温度^[4-5],光照,营养盐^[6-7]的上行效应和浮游动物的下行效应控制^[8]。这些因子发生变化,将在一定程度上影响浮游植物群落结构^[9]。由于浮游植物对环境因素的敏感性,通常作为检测河流、湖泊等淡水水体水质局部变化的关键指标,为水污染和富营养化提供早期预警信号^[10]。

水库是具有经济和生态重要性的人造水体,提供重要的淡水资源和生态服务,具有重要的社会和经济价值^[11]。富营养化是湖泊和水库最严重的生态问题之一,导致水质退化和用水严重限制^[12],由此造成的浮游植物大量繁殖引起的藻类水华已成为全球水质的重大威胁^[13],已成为中国和许多其他国家最普遍的水质问题^[14]。近年来,在中国沿海和湖泊等大型水生生态系统中已经开展了关于浮游植物及其控制因素的广泛研究^[15-17],对小型亚热带水库浮游植物群落与环境因子的关系也有少量相关的报道^[18-19]。

黄村水库流域位于浙江省西南部,属亚热带小型饮用水水库,近年来遭受污染并出现局部蓝藻水华。本研究对水库表层水中的浮游植物进行了鉴定和计数,记录相关的环境因子。研究了亚热带小型水库浮游植物丰度的动态变化及其演替模式;通过浮游植物群落组成与水生环境因子的冗余分析(RDA),分析了影响浮游植物动态变化的关键环境因子;为该流域生态变化、水质评价和污染控制提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄村水库流域位于浙江省西南部,坐标东经 118°41'—120°26'和北纬 27°25'—28°57'之间。该水库正常蓄水位 149.20m,流域面积 184.3km²,水库总库容 1876 万 m³,年供水总量为 2920 万 t。黄村水库流域地处亚热带季风气候区,温暖湿润,降水丰沛。流域内无工业企业、养殖场,且流域内耕地为梯田和水平地并无顺坡耕作现象,因此流域内无工业污染源、养殖场污染及农业污染^[20]。

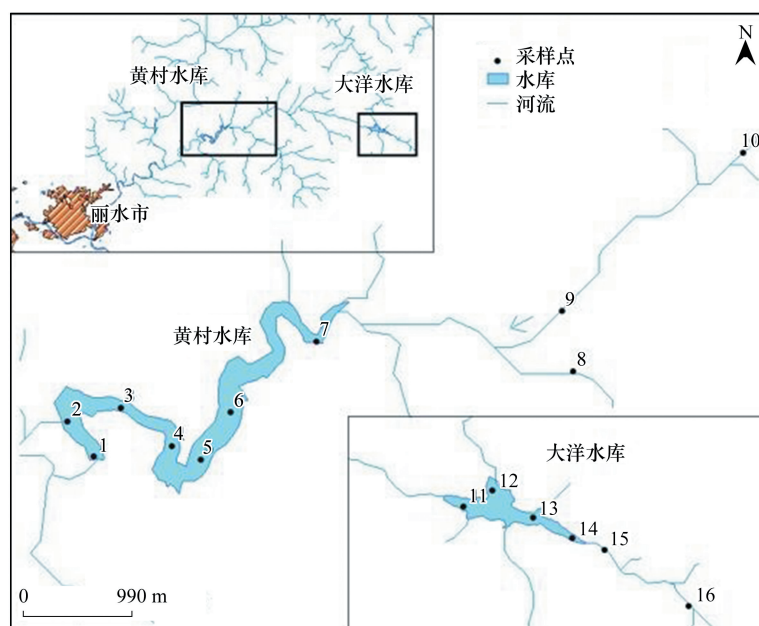


图 1 黄村水库流域采样点设置

Fig.1 Sampling sites in huangcun reservoirs basin

1.2 取样和分析

根据候平均气温四季划分方法,研究区域四季变化为春季 3—5 月、夏季 6—9 月、秋季 10—11 月和冬季

12月—次年2月^[21]。在2017年4月至2018年3月期间,从该流域16个取样点每月采集浮游植物和水样。浮游植物的分类分析,用浮游生物网(55 μm 网目)从表层水中提取定性浮游植物样品,并转移到100mL聚乙烯瓶中。对于浮游植物的定量分析,采集表层水样并转移到500mL聚乙烯瓶中。定性和定量浮游植物样品均在现场用鲁哥试剂保存(最终浓度为4%)^[22]。使用 $\times 20$, $\times 40$ 和 $\times 100$ 物镜在光学显微镜(Olympus BX51)下测定浮游植物物种组成、生物量等信息。浮游植物鉴定依据中国淡水藻类和蓝藻分类的最新研究^[2]。根据Utermöhl沉淀法用倒置显微镜(Olympus CKX-41)分别用 $\times 20$ 和 $\times 40$ 物镜对藻类进行计数^[23]。

在浮游植物采样的同时采集表层水样品,转移到2L聚乙烯瓶中,立即送往实验室进行水化学分析。使用YSI-多参数水质测量仪现场测量电导率(EC)、pH、溶解氧(DO)和水温(WT)。用萨氏盘测量水透明度(Turb)。

水样在取样当天进行过滤。对过滤后的水样进行硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)分析,对未过滤的水样进行总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})分析。

用分光光度法对 $\text{NO}_3\text{-N}$ (2,6-二甲基苯酚法)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (苯酸盐法)、 $\text{NO}_2\text{-N}$ (重氮化法)、TN(过硫酸盐消解后2,6-二甲基苯酚法)和TP(过硫酸盐消解后抗坏血酸法)进行分析,通过重铬酸盐回流法测定 COD_{Mn} ^[24]。

1.3 数据分析

根据每个物种的优势度确定浮游植物的优势种,如下式所示。

$$Y = (n_i/N) \times f_i$$

式中, N 为样品所有物种的总丰度, n_i 为样品中第 i 个物种的总丰度, f_i 为该物种在所有样品中出现的频率。如果物种的优势度值 Y 大于0.02,则认定为优势种^[17]。

利用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)和Pielous均匀度指数(J)计算浮游植物群落指标。指数通过以下等式计算^[25]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \times \log_2 P_i$$

$$D = (S - 1)/\ln N$$

$$J = H'/\ln S$$

式中, P_i 是物种 i 的丰度与所有物种丰度(N)的比值, S 是物种总数。

利用物种丰度数据进行去趋势对应分析(DCA)来确定是采用线性排序还是单峰排序。DCA四个轴中梯度最大值超过3,选择典范对应分析(CCA),否则选择冗余分析(RDA)。数据分析时,所有物种数据均进行 $\lg(x+1)$ 转化,通过这种转化,降低稀有种对分析结果的影响。此外,除pH外的所有环境变量均进行 $\lg(x+1)$ 转化。DCA是使用CANOCO 5进行的^[1]。

数据用STATISTICA统计软件包(verison 10.0)分析。在作进一步统计分析前,用Kolmogorov-Simironov和Bartlet方法分别检验数据的正态性和方差同质性。Pearson相关分析用于评估浮游植物丰度与环境因子之间的关系,方差分析及后续的多重比较检验相关因子的季节差异,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 环境变量

方差分析结果显示(表1), $\text{NH}_4\text{-N}$ 和电导率季节差异不显著。水温季节差异显著,从高到低依次为夏季、秋季、春季和冬季;冬季pH显著低于春季、夏季和秋季,春季、夏季和秋季之间pH差异不显著;春季DO显著高于夏季、秋季和冬季,冬季DO显著高于夏季和秋季,夏季和秋季之间差异不显著;春季、冬季TN显著高于夏季、秋季,春季和冬季之间差异不显著,夏季、秋季之间差异不显著;冬季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 显著高于夏季,春季和秋季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 处于二者之间并无显著差异;春季和夏季高锰酸盐指数显著高于冬季,秋季与其他季节差异不显著;春季、夏季 $\text{NO}_2\text{-N}$ 显著高于秋季、冬季,春季和夏季之间、秋季和冬季之间差异不显著;秋季TP最高、冬季最低,

春季和夏季处于二者之间;冬季透明度最高、春季最低,夏季和秋季处于二者之间。

表 1 环境因子季节比较(平均值±标准差)

Table 1 Environmental variables (Mean±SD) in different seasons				
环境参数 Environmental variables	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Fall	冬季 Winter
氨氮 Ammonia / (10 ⁻² mg/L)	20.89±8.14 a 3.29—51.45	18.28±14.81 a 0.47—117.56	12.61±4.19 a 1.75—36.88	19.28±11.07 a 2.16—88.18
硝酸盐氮 Nitrate / (10 ² mg/L)	55.60±13.24 ab 18.93—127.14	41.96±20.95 b 11.90—136.85	56.42±10.75 ab 36.48—88.27	66.61±15.16 a 46.16—112.27
亚硝酸盐 Nitrite / (10 ⁻³ mg/L)	13.51±4.39 a 0.29—34.61	10.89±7.06 a 0.40—49.27	3.78±3.30 b 0.09—19.85	5.41±4.04 b 0.32—22.62
总氮 TN / (10 ⁻¹ mg/L)	10.84±1.4 a 5.28—16.45	7.85±2.45 b 2.56—20.72	8.10±1.42 b 5.59—12.80	11.46±2.12 a 4.32—23.38
高锰酸盐指数 COD _{Mn} / (mg/L)	1.69±0.33 a 0.72—2.52	1.78±0.42 a 0.73—2.97	1.57±0.46 ab 0.47—2.47	1.29±0.30 b 0.45—1.85
总磷 TP / (10 ⁻³ mg/L)	38.92±11.17 b 0.52—107.65	32.51±17.30 bc 7.78—117.04	68.66±13.31 a 45.60—123.52	24.86±16.45 c 3.76—101.59
pH	7.77±0.39 a 6.52—9.70	7.89±0.56 a 6.03—9.57	8.05±0.20 a 7.42—8.80	7.16±0.08 b 6.28—8.79
温度 Temperature/℃	16.21±1.32 c 10.00—20.89	27.41±2.01 a 20.17—31.75	19.91±2.17 b 12.92—25.39	11.74±1.72 d 2.68—14.71
溶解氧 DO / (mg/L)	9.99±0.56 a 8.45—13.17	8.12±0.50 c 6.03—10.83	8.22±0.54 c 6.50—9.74	9.14±0.67 b 7.13—10.71
电导率 Conductivity / (10 ⁻² S/m)	3.92±0.37 a 2.10—4.80	4.61±1.03 a 2.50—11.8	4.26±0.85 a 3.30—7.00	4.73±1.06 a 3.50—9.00
透明度 Transparency/m	1.44±0.10 c 0.60—2.98	1.91±0.40 b 0.70—3.13	1.78±0.26 bc 1.26—2.61	2.60±0.37 a 1.73—3.33

* 同一行上标相同字母代表差异不显著.显著性水平 $P < 0.05$; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus;

2.2 浮游植物群落动态

2.2.1 浮游植物群落组成

本研究共鉴定出浮游植物 9 门 51 种。种类最多的是绿藻门(18 种)(35.29%),其次是硅藻门(15 种)(29.41%)和蓝藻门(11 种)(21.57%),甲藻门、褐藻门、黄藻门、隐藻门、眼虫藻门、金藻门分别各 1 种(1.96%)。

浮游植物年平均丰度为 19.92×10^6 个/L。平均丰度春季最高(35.14×10^6 个/L),夏季和冬季次之(分别为 19.13×10^6 个/L, 19.67×10^6 个/L),秋季最低(5.74×10^6 个/L)(图 2),但差异不显著($P > 0.05$)。春季蓝藻门丰度最高(62.96%)、硅藻门次之(18.40%),夏季蓝藻门丰度最高(71.03%)、绿藻门次之(11.93%),秋季硅藻门丰度最高(56.11%)、绿藻门次之(22.47%),冬季硅藻门丰度最高(80.74%)、隐藻门次之(13.69%)(图 3)。

2.2.2 浮游植物优势种

黄村水库流域 4 个季节浮游植物优势种及优势度见表 2。这些优势种中,尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)和曲丝藻(*Achnanthes* sp.)在春夏秋冬季节均出现,其中曲丝藻是秋季优势度最高的物种(表 2)。除春季外,优势种嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)和小环藻(*Cyclotella* sp.)在其余 3 个季节均出现,其中小环藻是冬季优势度最高的物种。春季和夏季,黄村水库流域优势度最高的物种均为伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.),且丰度最大。漂浮绿丝藻(*Limnithrix planctonica*)在春夏季出现,浮游蓝丝藻(*Planktothrix* sp.)在夏季出现,圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)在秋冬季出现,针杆藻(*Synedra*)和双对栅藻(*Scenedesmus biguga*)在秋季出现,钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)、异极藻(*Gomphonema*)和扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)在冬季出现。

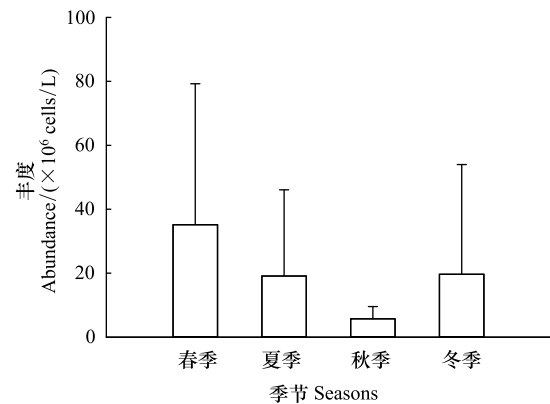


图2 黄村水库流域不同季节浮游植物丰度(平均值±标准差)

Fig.2 Abundance (Mean ± SD) of phytoplankton in different seasons in Huangcun Reservoirs basin

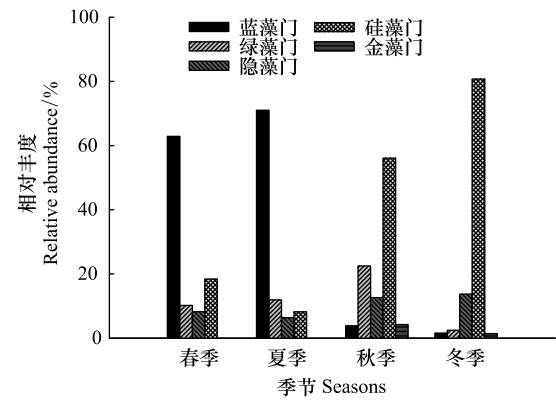


图3 黄村水库不同季节各门类浮游藻类相对丰度

Fig.3 Relative abundance of phytoplankton in different seasons of Huangcun Reservoir

表2 黄村水库流域浮游植物优势种及优势度

Table 2 The dominant species dominace of phytoplankton in Huangcun reservoirs basin			
季节 Season	优势种 Dominant species	丰度百分/% Percentage of abundance	优势度(Y) Dominace
春季 Spring	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	57.1	0.54
	曲丝藻 <i>Achnanthyidum</i> sp.	15.32	0.15
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	6.63	0.07
	漂浮泽丝藻 <i>Limnothrix planctonica</i>	8.73	0.05
夏季 Summer	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	55.43	0.35
	浮游蓝丝藻 <i>Planktothrix</i> sp.	10.38	0.08
	曲丝藻 <i>Achnanthyidum</i> sp.	3.91	0.04
	漂浮泽丝藻 <i>Limnothrix planctonica</i>	7.7	0.03
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	3.24	0.03
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	3.16	0.03
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	2.82	0.03
	曲丝藻 <i>Achnanthyidum</i> sp.	31.88	0.32
秋季 Fall	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	11.12	0.11
	双对栅藻 <i>Scenedesmus biguga</i>	16.2	0.08
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	7.53	0.07
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	5.08	0.05
	针杆藻 <i>Synedra</i>	4.43	0.04
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	2.1	0.02
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	20.38	0.2
	曲丝藻 <i>Achnanthyidum</i> sp.	13.08	0.13
冬季 Winter	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	11.14	0.11
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	8.29	0.08
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	5.4	0.05
	钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	5.64	0.05
	异极藻 <i>Gomphonema</i>	8.92	0.05
	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	11.39	0.04

2.2.3 浮游植物多样性指数

不同的生物多样性指标可以以不同的方式表达浮游植物群落或组合的多样性,但综合利用这些指标是评价群落多样性的最佳方法^[17](图4)。方差分析结果显示,夏季物种数最多、秋季最低,春季和冬季处于二者之间;Shannon-Wiener 指数季节差异不显著;Margalef 丰富度指数夏季最高、秋季最低,春季和冬季处于二者之间;Pielous 均匀度指数冬季最高、春季最低,夏季和秋季处于二者之间。

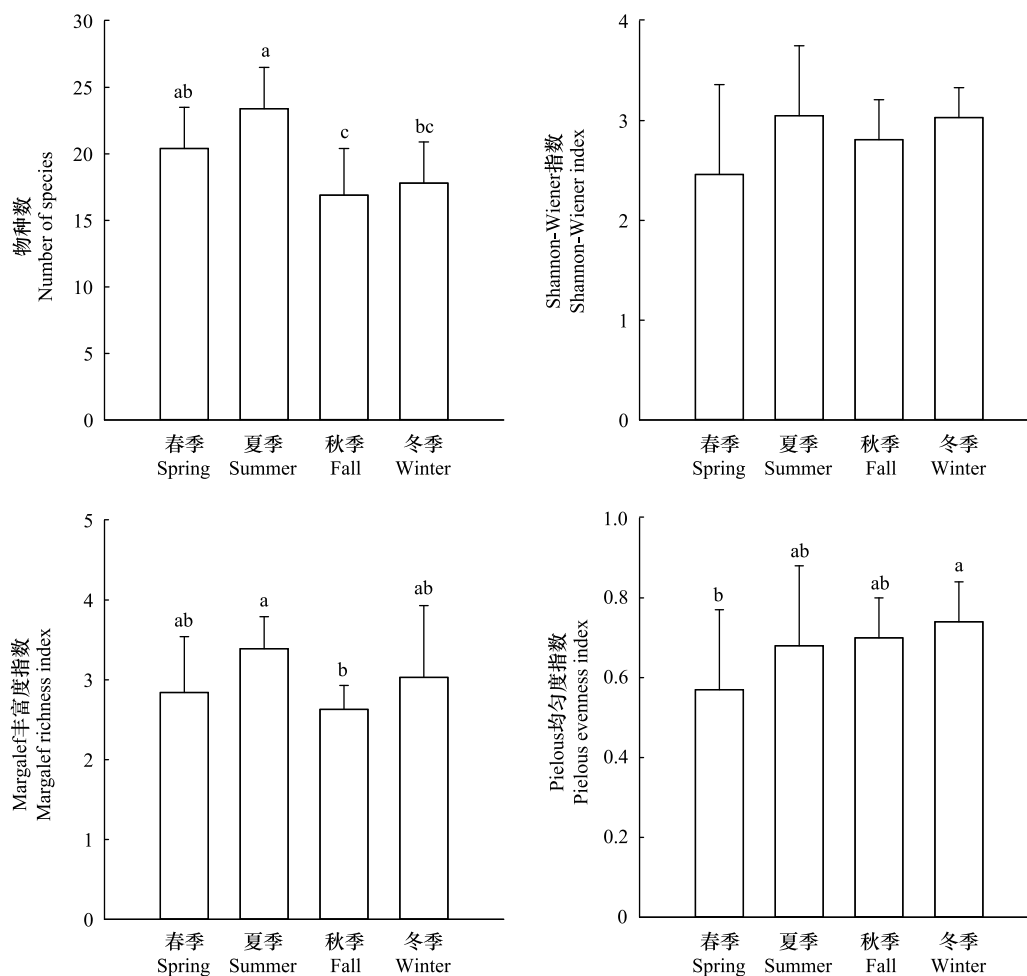


图4 不同季节浮游藻类种类数和多样性指数(平均值±标准差)

Fig.4 Species number and biodiversity indices (Mean±SD) of phytoplankton in different seasons

2.3 浮游植物群落与环境因子的关系

浮游植物丰度与环境因子相关性矩阵见表3。春季浮游植物总丰度与电导率呈显著负相关($P=0.048$);夏季浮游植物总丰度与高锰酸盐指数呈显著正相关($P=0.038$);秋季浮游植物总丰度与高锰酸盐指数($P=0.001$)、pH($P=0.014$)和温度($P=0.012$)呈显著正相关,与电导率呈显著负相关($P=0.022$);冬季浮游植物总丰度与电导率($P=0.002$)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($P=0.024$)呈显著正相关,与温度($P=0.008$)呈显著负相关。Pearson 相关性表明,影响黄村水库流域浮游植物群落的环境因子较为复杂,电导率、高锰酸盐指数、温度、pH 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是影响较大的环境因子。

DCA 表明,4 个季节所有轴的梯度最大值均小于 3,为线性排序模型。因此,直接梯度分析采用冗余分析(RDA)。在 RDA 中,利用蒙特卡罗置换检验方法,检验环境参数对 RDA 中浮游植物数据解释的显著性。蒙特卡罗检验结果表明,4 个季节 RDA 排序图第一轴与全部轴均呈显著性差异($P < 0.05$),表明排序结果是可信的。春季 RDA 排序图如图 5 所示,春季环境因子共解释了 89.00% 的浮游植物群落总变量,轴 I 和轴 II 的

特征值分别为 0.87 和 0.02,累积解释了 88.93%的物种变化信息。春季 RDA 显示漂浮泽丝藻、嗜蚀隐藻、尖尾蓝隐藻、曲丝藻和衣藻 (*Chlamydomonas*) 与 pH 呈正相关,与氨氮呈负相关;色球藻 (*Chroococcus* sp.) 和伪鱼腥藻与亚硝酸盐氮呈正相关,与电导率呈负相关。

表 3 浮游植物丰度与环境因子相关性矩阵

Table 3 Pearson correlation between phytoplankton cell abundance and environmental factors		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	COD _{Mn}	TP	pH	T	DO	Cond
春季 Spring	A	-0.10	-0.22	0.38	-0.12	0.28	0.24	0.34	0.07	0.38	-0.50 *
	H'	0.26	0.38	-0.36	0.23	-0.65 **	0.03	-0.65 **	-0.49	-0.49	0.15
	J	0.23	0.35	-0.38	0.20	-0.59 *	-0.02	-0.60 *	-0.43	-0.66 **	0.21
	D	0.03	0.57 *	-0.46	0.09	-0.94 **	0.08	-0.76 **	-0.78 **	-0.72 **	-0.29
夏季 Summer	A	-0.02	-0.19	0.47	-0.06	0.52 *	-0.12	-0.03	-0.14	0.12	-0.47
	H'	0.10	0.34	-0.35	0.21	-0.49	0.28	-0.10	0.01	-0.24	0.58 *
	J	0.11	0.33	-0.36	0.18	-0.55 *	0.26	-0.09	-0.03	-0.22	0.63 **
	D	-0.10	0.49	-0.35	0.27	-0.47	0.20	-0.46	-0.07	-0.53 *	0.31
秋季 Fall	A	0.01	-0.50	0.04	-0.39	0.75 **	-0.31	0.60 *	0.61 *	0.01	-0.57 *
	H'	0.04	-0.02	0.07	-0.06	-0.33	0.10	-0.38	-0.62 *	0.29	0.07
	J	0.07	0.16	0.03	0.14	-0.65 **	0.27	-0.59 *	-0.81 **	0.22	0.34
	D	-0.24	0.01	-0.05	-0.19	0.23	-0.29	0.15	0.16	0.01	-0.23
冬季 Winter	A	-0.03	0.56 *	0.33	0.45	-0.28	0.23	-0.34	-0.64 **	0.11	0.72 **
	H'	0.33	-0.15	0.20	0.21	0.57 *	-0.11	0.20	0.53 *	-0.39	-0.07
	J	0.23	0.40	0.16	0.50	0.13	0.07	-0.02	0.16	-0.58 *	0.45
	D	0.19	-0.04	-0.09	0.11	0.23	0.05	0.16	0.51 *	-0.60 *	-0.32

* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$. A: 丰度 Abundance, H': Shannon-Wiener 指数, J: Pielous 均匀度指数, D: Margalef 丰富度指数; NH₄⁺-N: 氨氮, NO₃⁻-N: 硝酸盐氮, NO₂⁻-N: 亚硝酸盐氮, TN: 总氮, COD_{Mn}: 高锰酸盐指数, TP: 总磷, T: Temperature 温度, DO: 溶解氧, Cond: Conductivity 电导率

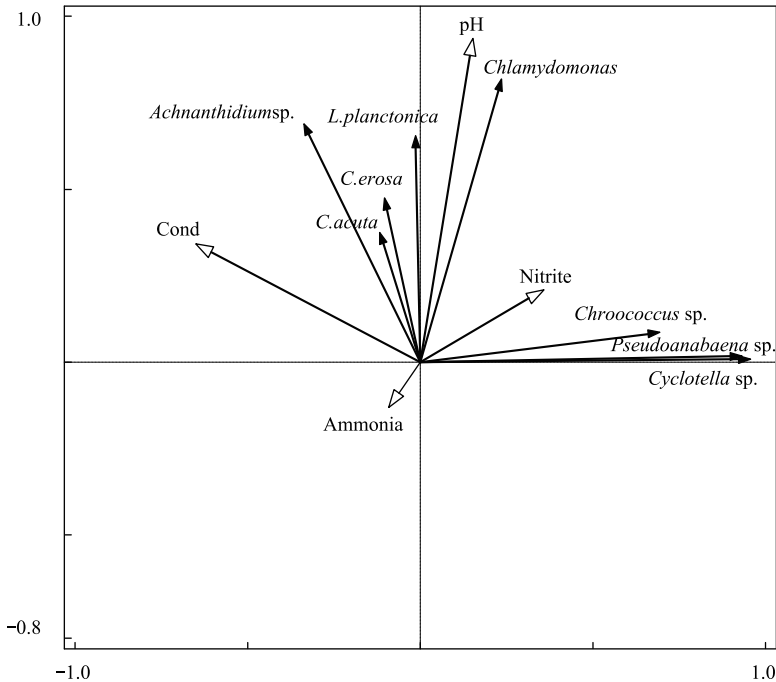


图 5 春季主要浮游植物和环境变量 RDA 排序图

Fig.5 RDA ordination diagram of the prevailing phytoplankton and environmental variables in spring

漂浮泽丝藻 *Limnotherix planctonica*; 伪鱼腥藻 *Pseudoanabaena* sp.; 色球藻 *Chroococcus* sp.; 尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*; 嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*; 曲丝藻 *Achnanthidium* sp.; 小环藻 *Cyclotella* sp. 衣藻 *Chlamydomonas*; 氨氮 Ammonia; 电导率 Cond; 亚硝酸盐 Nitrite

夏季 RDA 排序图如图 6 所示,夏季环境因子共解释了 59.50% 的浮游植物群落总变量,轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.51 和 0.07,累积解释了 58.22% 的物种变化信息。与 Pearson 相关分析结果一致,夏季 RDA 显示高锰酸盐指数、pH 和亚硝酸盐氮是影响浮游植物群落分布的主要环境因子。浮游蓝丝藻、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 等大多数藻类与高锰酸盐指数呈正相关,与总氮呈负相关。

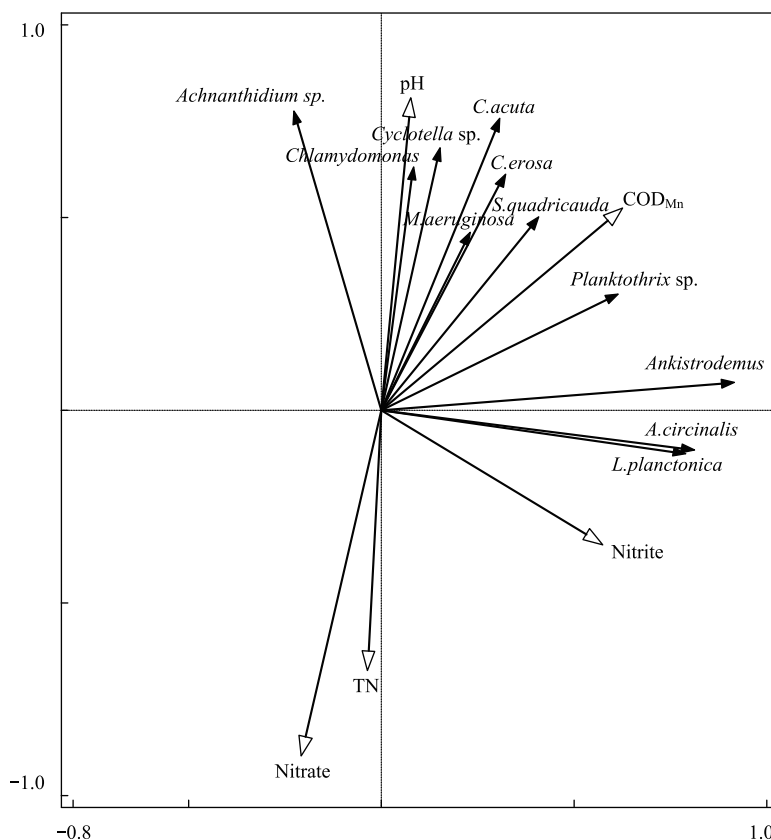


图 6 夏季主要浮游植物和环境变量 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination diagram of the prevailing phytoplankton and environmental variables in summer

漂浮丝藻 *Limnithrix planctonica*; 卷曲鱼腥藻 *Anabaena circinalis*; 纤维藻 *Ankistrodesmus*; 浮游蓝丝藻 *Planktothrix* sp.; 四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda*; 铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa*; 嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*; 尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*; 小环藻 *Cyclotella* sp.; 曲丝藻 *Achnanthyidium* sp.; 衣藻 *Chlamydomonas*; 总氮 TN; 硝酸盐氮 Nitrate; 高锰酸盐指数 CODMn; 亚硝酸盐 Nitrite

秋季 RDA 排序图如图 7 所示,秋季环境因子共解释了 80.10% 的浮游植物群落总变量,轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.57 和 0.23,累积解释了 79.49% 的物种变化信息。与 Pearson 相关分析结果一致,秋季 RDA 显示高锰酸盐指数、pH、温度和电导率是影响浮游植物群落分布的主要环境因子。尖尾蓝隐藻、嗜蚀隐藻和小环藻与高锰酸盐指数呈显著正相关,与电导率呈负相关;曲丝藻和衣藻与温度和 pH 呈正相关,与电导率呈负相关。

冬季 RDA 排序图如图 8 所示,选取的环境因子共解释了 65.50% 的浮游植物群落总变量,轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.56 和 0.08,累积解释了 64.36% 的物种变化信息。与 Pearson 相关分析结果一致,冬季 RDA 显示硝酸盐氮、温度和电导率是影响浮游植物群落分布的主要环境因子。舟形藻 (*Navicula* sp.)、扁圆卵形藻和钝脆杆藻与电导率和硝酸盐氮呈正相关,与温度呈负相关;鼓藻 (*Cosmarium*) 和桥弯藻 (*Cymbella* sp.) 与 DO 呈正相关,与温度呈负相关。

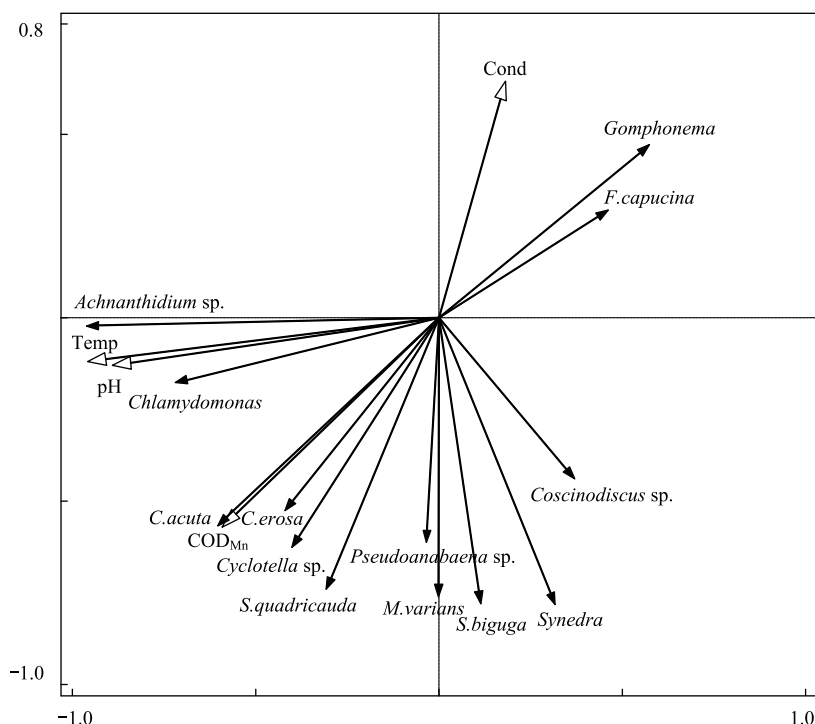


图7 秋季主要浮游植物和环境变量 RDA 排序图

Fig.7 RDA ordination diagram of the prevailing phytoplankton and environmental variables in fall

异极藻 *Gomphonema*; 钝脆杆藻 *Fragilaria capucina*; 圆筛藻 *Coscinodiscus* sp.; 针杆藻 *Synedra*; 双对栅藻 *Scenedesmus biguga*; 变异直链藻 *Melosira varians*; 小环藻 *Cyclotella* sp.; 伪鱼腥藻 *Pseudoanabaena* sp.; 四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda*; 尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*; 嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*; 曲丝藻 *Achnanthyidium* sp.; 衣藻 *Chlamydomonas*; 温度 Temperature; 电导率 Conductivity; 高锰酸盐指数 COD_{Mn}

3 讨论

3.1 环境变量季节变化

本研究发现黄村水库流域水质存在明显的季节性模式,例如亚热带气候导致水温随季节变化显著。pH 反映了水中可用于浮游植物光合作用的溶解无机碳的量^[26],秋季 pH 超过 8,原因可能是强烈的光合作用减少可以利用的 CO_2 ,使水体的 pH 增加^[27]。在 11 月份和 12 月份分别测得最大 TP 和 TN 浓度,这可能归因于流入的营养盐和水库沉积物释放的营养盐^[28]。本研究夏季平均高锰酸盐指数最高,平均溶解氧含量最低,表明研究区内有机负荷较高,这可能与周边居民不良生产生活方式有关^[11]。从水的透明度可以很好地预测浅层水库的水清澈度和生态质量^[29-30],黄村水库流域春季水透明度最低,可能是由于整个水体的频繁混合和松散沉积物的再悬浮造成的^[31]。此外,溶解的有机物质也会对水的透明度产生影响^[32]。

3.2 浮游植物群落动态

在黄村水库流域观察到浮游植物群落季节变化,春季 NH_4-N 、 NO_2-N 和 TN 平均浓度高导致浮游植物平均丰度春季最高。在群落季节组成上,春季(62.96%)、夏季(71.03%)蓝藻门丰度最高,黄村水库流域在春夏季已出现局部水域蓝藻水华,秋季(56.11%)、冬季(80.74%)硅藻门丰度最高,这与 Wang 等^[33]对盛锦湖浮游植物群落结构变化的研究一致。

黄村水库流域优势种尖尾蓝隐藻在春夏秋冬季节均出现,由于隐藻独特的光合作用和辅助色素,其在低光条件下也能生长和繁殖^[34]。此外,隐藻还具有鞭毛,能够调节自身在水体中的位置以获得最佳光照条件^[35],因此在本研究期间广泛存在。春夏季优势度较高的优势种伪鱼腥藻、浮游蓝丝藻和漂浮泽丝藻,主要是蓝藻门,由于蓝藻中存在的气泡可以调节细胞的浮力,所以蓝藻比其他浮游植物更耐光^[36],如果光线较弱,

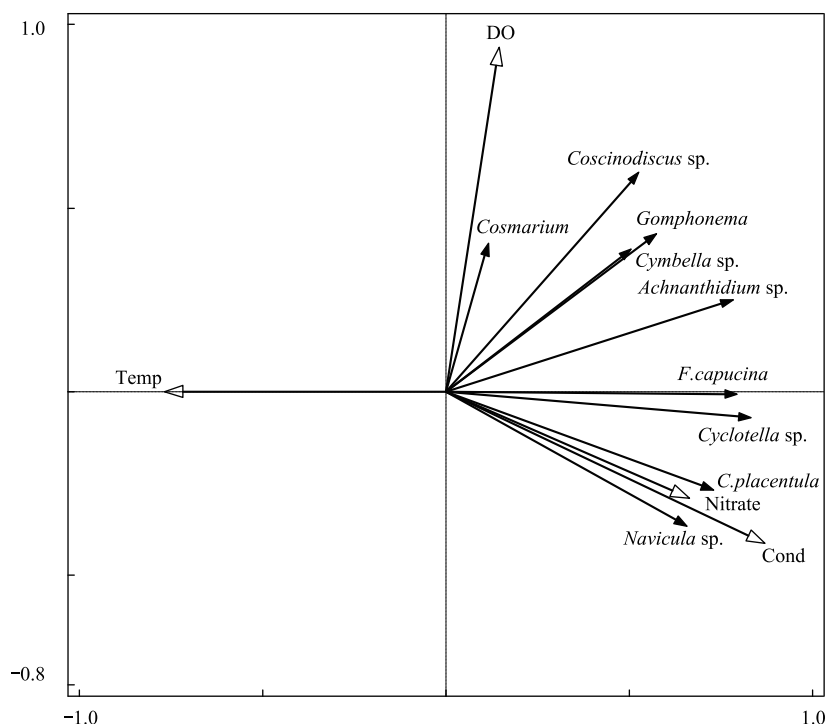


图 8 冬季主要浮游植物和环境变量 RDA 排序图

Fig.8 RDA ordination diagram of the prevailing phytoplankton and environmental variables in winter

舟形藻 *Navicula* sp.; 扁圆卵形藻 *Cocconeis placentula*; 鼓藻 *Cosmarium*; 桥弯藻 *Cymbella* sp.; 圆筛藻 *Coscinodiscus* sp.; 异极藻 *Gomphonema*; 曲丝藻 *Achnanthisdium* sp.; 小环藻 *Cyclotella* sp.; 钝脆杆藻 *Fragilaria capucina*; 温度 Temperature; 溶解氧 DO; 硝酸盐氮 Nitrate; 电导率 Conductivity

气泡则可以使蓝藻细胞移到水面,如果光线较强,气泡的作用是让蓝藻细胞移动到水底^[2]。这种能力是蓝藻作为一年生优势种在春夏季广泛分布的原因之一。秋冬季优势度较高的圆筛藻、针杆藻、钝脆杆藻、异极藻和扁圆卵形藻,均属于硅藻门,这表明浮游植物优势种从春夏季蓝藻门向秋冬季硅藻门演替,Winder 等^[37]发现,在秋季水温较低时,在湖泊和水库中存在大量硅藻。

Shannon-Wiener 指数、Margalef 丰富度指数、Pielous 均匀度指数等单变量物种多样性指数被认为是识别浮游植物群落结构和指示生态系统健康的解释参数^[38]。物种多样性指数的下降模式可能与某一特异性或多物种浮游植物水华形成有关^[3],春季,有益的环境水质促进伪鱼腥藻的增殖(占春季浮游植物总丰度的 57.10%),导致物种多样性指数下降。浮游植物多样性指数在夏季表现出较高的值,表明浮游植物群落由更多物种主导,这与我们的观测结果相一致。此外,浮游植物多样性指数也被用来评估湖泊和水库的营养状况^[39-40]。高多样性指数表示生态系统健康,而低值表示生态系统不健康或退化^[41]。在富营养化湖泊水库中,Shannon-Wiener 指数通常在 0—1 之间,在中-富营养化湖泊水库中,Shannon-Wiener 指数通常在 1—2 之间,在中营养化湖泊水库中,Shannon-Wiener 指数通常在 2—3 之间,在寡营养湖泊水库中,Shannon-Wiener 指数通常大于 3^[1,42]。在该研究中,Shannon-Wiener 指数年平均值为 2.84,表明水体处于中营养状态,因此,黄村水库可归类为中营养化水库。

3.3 浮游植物群落结构对环境水质的响应

浮游植物的生长和分布很大程度上取决于环境变量的影响^[43]。Pearson 相关分析显示,温度和营养盐是影响较大的环境因子。温度对不同的浮游植物分类群产生物种特异性影响^[44],影响大多数浮游藻类的生长和繁殖速率^[45],导致浮游植物群落组成的变化。通常认为较高的温度有利于绿藻门和蓝藻门的生长和繁殖^[46-47],当水温升高到 25℃ 以上时,蓝藻达到最大生长速率,当春季和夏季水温大幅上升时,它们的细胞丰度

会迅速增加,相反,硅藻喜欢较冷的水^[35],秋冬季水温相对较低并伴随着水体热分层的破坏^[1],水体混合完全,硅藻通常会兴盛,因为它们沉重的硅质细胞壁会导致它们在热分层过程中下沉^[37]。Turner 等^[48]研究发现,硅藻的丰度与温度呈反比关系,在低于 18℃ 的温度下,硅藻的丰度较高。在本研究中,夏季蓝藻占 71.03%,冬季硅藻占 80.74%,这与 Abirhire 等^[35]和 Turner 等^[48]的研究结果相一致。

与 Pearson 相关分析结果一致,RDA 结果显示黄村水库流域中的浮游植物群落受水温、DO、pH 和高锰酸盐指数的调控。在春季,浮游植物群落中以伪鱼腥藻为主,与 NO₂-N 和 pH 呈正相关,与 NH₄-N 和电导率呈负相关,表明浮游植物群落受到综合因素的影响。夏季水体出现铜绿微囊藻,本文数据表明与 DO 呈显著正相关,与 TN、TP 呈负相关,Varol^[1]认为与水温、DO 和高锰酸盐指数呈正相关,与 TN、NO₃-N、DIN 和 TP 呈负相关,该物种也出现在土耳其 Arancio 湖^[49],Charzykowskie 湖^[50]以及 Glebokie 湖^[51]。除春季外,优势种小环藻在其余 2 个季节均出现,是冬季优势度最高的物种,与 TP 和 TN 呈负相关,表明其在低营养盐浓度下也能快速生长,这与 Yuan^[10]等人的研究结果一致。

4 结论

在这项研究中,共鉴定出 51 种浮游植物,分属于 9 门和 41 属,其中绿藻门占总物种数的 35.29%,硅藻门、蓝藻门分别占 29.41%和 21.57%。夏季浮游植物种类最多,秋季最少。从浮游植物群落季节组成来看,春季丰度最高,秋季丰度最低,春夏季蓝藻门丰度最高,秋冬季硅藻门丰度最高。黄村水库流域优势种尖尾蓝隐藻和曲丝藻在春夏秋冬季节均出现,春季和夏季伪鱼腥藻优势度最高,秋季曲丝藻优势度最高,冬季小环藻优势度最高。Shannon-Wiener 指数年平均值为 2.84,表明该流域水体处于中营养状态。Pearson 相关分析和冗余分析(RDA)显示,温度、电导率和营养盐是影响浮游植物群落组成最主要的环境因素。

参考文献(References):

- [1] Varol M. Phytoplankton functional groups in a monomictic reservoir: seasonal succession, ecological preferences, and relationships with environmental variables. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20439-20453.
- [2] Jiang Y J, He W, Liu W X, Qin N, Ouyang H L, Wang Q M, Kong X Z, He Q S, Yang C, Yang B, Xu F L. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2014, 40: 58-67.
- [3] Srichandan S, Baliarsingh S K, Prakash S, Lotlikar A A, Parida C, Sahu K C. Seasonal dynamics of phytoplankton in response to environmental variables in contrasting coastal ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(12): 12025-12041.
- [4] 陈梦齐,刘紫丹,戴文芳,叶仙森,梁新友,熊金波.象山港电厂温排水增温对浮游细菌群落空间分布的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6574-6582.
- [5] Vogt R J, Sharma S, Leavitt P R. Decadal regulation of phytoplankton abundance and water clarity in a large continental reservoir by climatic, hydrologic and trophic processes. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(S2): 81-90.
- [6] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, Marcé R, Armengol J, Crossetti L O, Huszar V L M. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. *Water Research*, 2010, 44(11): 3345-3354.
- [7] Lv H, Yang J, Liu L M, Yu X Q, Yu Z, Chiang P C. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(9): 5917-5928.
- [8] Xiong J B, Xiong S L, Qian P, Zhang D M, Liu L, Fei Y J. Thermal discharge-created increasing temperatures alter the bacterioplankton composition and functional redundancy. *AMB Express*, 2016, 6(1): 68.
- [9] Cao J, Hou Z Y, Li Z K, Chu Z S, Yang P P, Zheng B H. Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 1127-1137.
- [10] Yuan Y X, Jiang M, Liu X T, Yu H X, Otte M L, Ma C X, Her Y G. Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 1-12.
- [11] Woldeab B, Beyene A, Ambelu A, Buffam I, Mereta S T. Seasonal and spatial variation of reservoir water quality in the southwest of Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(3): 163.
- [12] Padedda B M, Sechi N, Lai G G, Mariani M A, Pulina S, Sarria M, Satta C T, Viridis T, Buscarinu P, Lugliè A. Consequences of eutrophication

- in the management of water resources in Mediterranean reservoirs; a case study of Lake Cedrino (Sardinia, Italy). *Global Ecology and Conservation*, 2017, 12: 21-35.
- [13] Zhao C S, Liu C M, Xia J, Zhang Y Y, Yu Q, Eamus D. Recognition of key regions for restoration of phytoplankton communities in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 292-300.
- [14] Tian C, Pei H Y, Hu W R, Xie J. Phytoplankton variation and its relationship with the environmental factors in Nansi Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 295-310.
- [15] Liu X, Huang B Q, Huang Q, Wang L, Ni X B, Tang Q S, Sun S, Wei H, Liu S M, Li C L, Sun J. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea. *Journal of Sea Research*, 2015, 95: 45-55.
- [16] Huo Y Z, Wei Z L, Liu Q, Yang F F, Long L J, Zhang Q, Bi H S, He Q, He P M. Distribution and controlling factors of phytoplankton assemblages associated with mariculture in an eutrophic enclosed bay in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(8): 102-112.
- [17] Huo Y Z, Shi H H, Zhang J H, Liu Q, Duan Y L, He Q, Yu K F, Bi H S, Fan C L, He P M. Spatio-temporal variability of phytoplankton assemblages and its controlling factors in spring and summer in the Subei Shoal of Yellow Sea, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(10): 84-92.
- [18] 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑忠明, 朱津永. 大明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子. *环境科学*, 2018, 39(6): 2688-2697.
- [19] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 徐镇, 吕光汉, 金春华. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 569-576.
- [20] 丽水市水利局. 丽水市城市饮用水水源地安全保障规划. 丽水: 丽水市水利局, 2008.
- [21] 雷波, 刘朔藩, 张方辉, 闫苏苏, 李建辉, 张晟. 三峡水库上游长寿湖浮游藻类的季节变化特征及关键环境影响因子. *湖泊科学*, 2017, 29(2): 369-377.
- [22] Varol M, Şen B. Abiotic factors controlling the seasonal and spatial patterns of phytoplankton community in the Tigris River, Turkey. *River Research and Applications*, 2018, 34(1): 13-23.
- [23] Utermöhl H. Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodik: mit 1 tabelle und 15 abbildungen im text und auf 1 tafel. *SIL Communications*, 1953-1996, 1958, 9(1): 1-38.
- [24] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th ed. New York: American Public Health Association, 1995.
- [25] Xu Y G, Li A J, Qin J H, Li Q, Ho J G, Li H S. Seasonal patterns of water quality and phytoplankton dynamics in surface waters in Guangzhou and Foshan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 590-591: 361-369.
- [26] Rao K, Zhang X, Yi X J, Li Z S, Wang P, Huang G W, Guo X X. Interactive effects of environmental factors on phytoplankton communities and benthic nutrient interactions in a shallow lake and adjoining rivers in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 1661-1672.
- [27] Okello W, Kurmayer R. Seasonal development of cyanobacteria and microcystin production in Ugandan freshwater lakes. *Lakes & Reservoirs*, 2011, 16(2): 123-135.
- [28] Tian C, Lu X T, Pei H Y, Hu W R, Xie J. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(3): 2627-2645.
- [29] Pedrozo F L, Temporetti P F, Beamud G, Diaz M M. Volcanic nutrient inputs and trophic state of Lake Caviahue, Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 178(2): 205-212.
- [30] Peeters E T H M, Franken R J M, Jeppesen E, Moss B, Bécares E, Hansson L A, Romo S, Kairesalo T, Gross E M, van Donk E, Nöges T, Irvine K, Kornijów R, Scheffer M. Assessing ecological quality of shallow lakes: does knowledge of transparency suffice? *Basic and Applied Ecology*, 2009, 10(1): 89-96.
- [31] Ishikawa T, Tanaka M. Diurnal stratification and its effects on wind-induced currents and water qualities in Lake Kasumigaura, Japan. *Journal of Hydraulic Research*, 1993, 31(3): 307-322.
- [32] Torremorell A, Bustigorry J, Escaray R, Zagarese H E. Seasonal dynamics of a large, shallow lake, laguna Chascomús: the role of light limitation and other physical variables. *Limnologia*, 2007, 37(1): 100-108.
- [33] Wang L, Wang C, Deng D G, Zhao X X, Zhou Z Z. Temporal and spatial variations in phytoplankton: correlations with environmental factors in Shengjin Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(18): 14144-14156.
- [34] Tardio M, Tolotti M, Novarino G, Cantonati M. Ecological and taxonomic observations on the flagellate algae characterising four years of enclosure experiments in Lake Tovel (Southern Alps). *Hydrobiologia*, 2003, 502(1/3): 285-296.
- [35] Abirhire O, North R L, Hunter K, Vandergucht D M, Sereda J, Hudson J J. Environmental factors influencing phytoplankton communities in Lake Diefenbaker, Saskatchewan, Canada. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(S2): 118-128.
- [36] Scheffer M, Rinaldi S, Gagnani A, Mur L R, van Nes E H. On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology*, 1997, 78(1): 272-282.

- [37] Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia*, 2012, 698(1): 5-16.
- [38] Lopes M R M, Ferragut C, Bicudo C E M. Phytoplankton diversity and strategies in regard to physical disturbances in a shallow, oligotrophic, tropical reservoir in Southeast Brazil. *Limnetica*, 2009, 28(1): 159-174.
- [39] Soylu E N, Maraşlıoğlu F, Gönülol A. Phytoplankton seasonality of a shallow turbid lake. *Algological Studies*, 2007, 123(1): 95-110.
- [40] Zhang N N, Zang S Y. Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland, China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(11): 3657-3664.
- [41] Wilhm J L. Range of diversity index in benthic macroinvertebrate populations. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1970, 42(5): R221-R224.
- [42] Brendonck L, Maes J, Rommens W, Dekeza N, Nihwatiwa T, Barson M, Callebaut V, Phiri C, Moreau K, Gratwicke B, Stevens M, Alyn N, Holsters E, Ollevier F, Marshall B. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). II. Species diversity. *Archiv für Hydrobiologie*, 2003, 158(3): 389-405.
- [43] Peng S T, Qin X B, Shi H H, Zhou R, Dai M X, Ding D W. Distribution and controlling factors of phytoplankton assemblages in a semi-enclosed bay during spring and summer. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(5): 941-948.
- [44] Tolotti M, Thies H, Nickus U, Psenner R. Temperature modulated effects of nutrients on phytoplankton changes in a mountain lake. *Hydrobiologia*, 2012, 698(1): 61-75.
- [45] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(10): 1739-1745.
- [46] Alam M G M, Jahan N, Thalib L, Wei B, Maekawa T. Effects of environmental factors on the seasonally change of phytoplankton populations in a closed freshwater pond. *Environment International*, 2001, 27(5): 363-371.
- [47] Poste A E, Hecky R E, Guildford S J. Phosphorus enrichment and carbon depletion contribute to high *Microcystis* biomass and microcystin concentrations in Ugandan lakes. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(3): 1075-1088.
- [48] Turner J W, Good B, Cole D, Lipp E K. Plankton composition and environmental factors contribute to *Vibrio* seasonality. *The ISME Journal*, 2009, 3(9): 1082-1092.
- [49] Naselli-Flores L. Morphological analysis of phytoplankton as a tool to assess ecological state of aquatic ecosystems: the case of Lake Arancio, Sicily, Italy. *Inland Waters*, 2014, 4(1): 15-26.
- [50] Wiśniewska M, Luścińska M. Long-term changes in the phytoplankton of Lake Charzykowskie. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2012, 41(3): 90-98.
- [51] Pasztaleniec A, Poniewozik M. Phytoplankton based assessment of the ecological status of four shallow lakes (Eastern Poland) according to Water Framework Directive-a comparison of approaches. *Limnologica- Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(3): 251-259.