

湖南镇水库浮游生物及其影响因子的典范对应分析

陆开宏^{1,2}, 朱津永², 王扬才², 金春华², 郑忠明^{1,2}, 胡智勇², 潘洁慧²

(1. 中国海洋大学 教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003; 2. 宁波大学 教育部应用海洋生物技术重点实验室, 宁波大学 生命科学与生物工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 2006 年至 2007 年间调查了蓝藻 (Cyanophyta) 暴发水体——湖南镇水库的浮游生物群落结构及其变化, 研究了其与环境参数之间的关系。调查期间, 共鉴定出浮游植物 96 种 (属), 浮游动物 73 种 (属)。单位水体浮游植物平均细胞数量变化于 0.49×10^6 ~ $16.71 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ 之间, 浮游动物则变化于 $8\sim 3548 \text{ L}^{-1}$ 之间。春、夏季螺旋鱼腥藻 (*Anabaena* *sporoides*) 水华持续数月, 水体表层细胞密度高达 $2.28 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$, 进入秋季后其优势逐渐被颤藻属 (*Oscillatoria*) 蓝藻取代。典范对应分析显示, 浮游植物的季节演替规律与螺旋鱼腥藻数量、总溶解固形物 (TDS) 和透明度 (SD) 存在较高的相关性, 浮游动物演替主要与溶解在水中的微囊藻 (*Microcystis*) 毒素 (EMC)、营养盐和螺旋鱼腥藻数量相关。由于高水平营养盐的存在, 上行效应无法有效限制蓝藻的发生, 水华蓝藻以其数量优势改变了水体理化条件, 成为影响浮游植物群落的潜在因素, 而营养盐可能通过主导可食藻类的生长, 间接影响浮游动物的动态。将水华蓝藻数量及藻毒素浓度作为环境因子进行多元分析, 分别提高了对浮游植物、动物群落的解释 15.6% 和 25.8%, 说明水华蓝藻和藻毒素的存在对浮游生物群落的组成和结构具有较大的影响。[中国水产科学, 2008, 15 (6): 950~960]

关键词: 蓝藻水华; 浮游生物; 微囊藻毒素; 环境因子; 典范对应分析

中图分类号: X17

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2008)06-0950-11

迄今为止, 有关湖泊水库暴发蓝藻 (Cyanophyta) 水华的报道已很多, 多认为低氮磷比、透明度降低、高水温、pH 升高及热分层现象等都是导致蓝藻水华出现的可能原因^[1~4]。水华出现的直接后果就是水质的恶化, 进而对生态、经济和公共卫生等产生诸多负面影响^[5]。从生态角度看, 随着水体浑浊度的增加和溶氧的降低, 各营养级物种多样性降低, 生态系统功能弱化^[4,6]。水华蓝藻能产生影响饮用水口感和气味的物质^[7], 许多种类还会产生危害人畜等多种生物的毒素^[5,8]。目前已发现超过 50 种的有毒蓝藻种类, 主要隶属于微囊藻属 (*Microcystis*)、鱼腥藻属 (*Anabaena*)、颤藻属 (*Oscillatoria*)、束丝藻属 (*Aphanizomenon*)、鞘丝藻属 (*Lyngbya*) 和筒胞藻属 (*Cylindrospermopsis*) 等^[9]。

水体中浮游生物种类繁多, 其群落结构与动态是多个环境因子在时间和空间尺度上作用的结果,

目前还缺少一致的理论来解释所观察到的现象^[10]。不同的统计方法, 如主成份分析 (PCA)、典范对应分析 (CCA) 等多元分析方法已广泛应用于浮游生物群落动态分析^[6,11~13]。典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 因具有能同时结合多个环境因子分析生物与环境因子间的复杂关系、信息包含量大、结果明确、且直观等优点而受到重视。

湖南镇水库位于浙江省西南部山区, 为浙江省第三大水库。水域总面积 4 千余 hm^2 , 总库容 21.45 亿 m^3 , 最大水深 85 m, 是一座以发电灌溉为主, 结合饮用水供给和水产养殖等的综合利用的水库。近年来多次暴发规模大、持续时间长的蓝藻水华。本研究在总结水库浮游生物组成和动态的基础上, 对浮游生物与环境参数和蓝藻水华的出现进行了 CCA 分析, 旨在探讨蓝藻水华对水体浮游生物群落结构的影响。

收稿日期: 2008-04-22; 修订日期: 2008-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771658); 浙江省自然科学基金资助项目 (Z505319); 宁波市自然科学基金资助项目 (2006A610081); 教育部创新团队研究计划项目 (RT0734).

作者简介: 陆开宏(1964-), 男, 教授, 主要从事水生生物与污染生态学研究. E-mail: lukaihong@nbu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据湖南镇水库的自然地理特征,在水库衢州段共布设4个具有代表性的采样点(图1),其中1#位于水库衢江、遂昌两县交界处;2#(举口)

位于水库衢江段中游,是三大支流的主要交汇处;3#(绵阳)为养鱼网箱分布较为密集的水域;4#为水库下游大坝处。2006年4月至2007年2月期间,隔月采集1次,共采样6次。

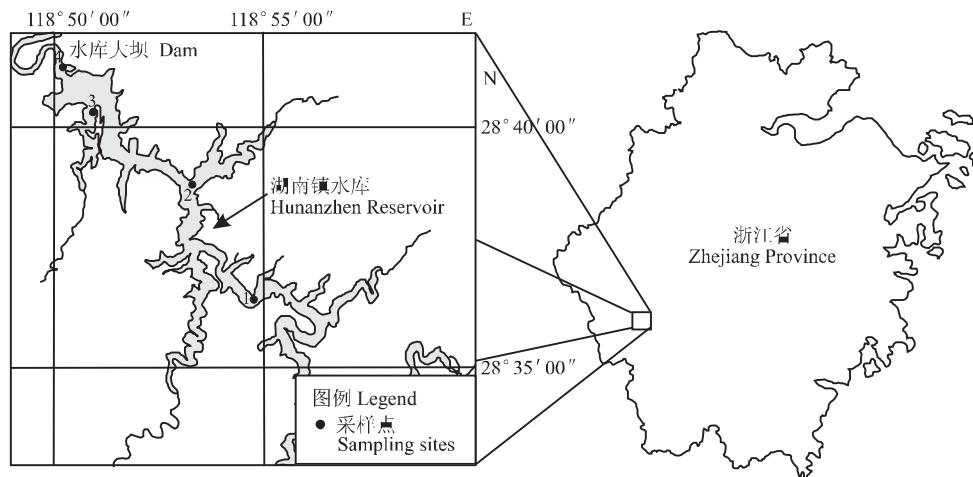


图1 湖南镇水库采样点布设图

Fig. 1 Map of Hunanzen Reservoir with four Sampling sites

各点均用2.5 L采水器采得1/2透明度(SD)、1SD、2SD和3SD4个水层水样,充分混合后,浮游植物样品取水样1 L,采得后立即加入15 mL鲁哥氏液固定。浮游动物样品则按每层5 L每点采混合水样20 L,现场用25号浮游植物网过滤,浓缩集中于500 mL的塑料瓶中,加入7 mL甲醛固定。

1.2 水样的测定与分析

现场用美国产Hydrolab Datasonde 4α水质分析仪测定水温(WT)、pH值、溶解氧(DO)和总溶解固体(TDS),德国产bbe FluoroProbe叶绿素水下荧光分析仪测定叶绿素a浓度(Chla),Secchi 盘测定透明度(SD)。总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷(TP)采用钼锑抗分光光度法测定^[14]。

浮游动、植物定量水样带回实验室后,静置沉淀48 h,虹吸法除去上清液,余下水样经二次沉淀后定容于50 mL标本瓶中。浮游动、植物的鉴定参见文献^[15-16]。数据计算依据文献[14]。

1.3 微囊藻毒素的测定

与浮游植物采集同步,各点采混合水样2 L,注入棕色玻璃瓶,经0.45 μm滤膜抽滤后,参照文献[17]对滤液和藻细胞残渣的处理方法进行改进,具

体如下:

滤液过5 mg/6 mL C₁₈固相萃取柱(萃取柱在使用前依次以10 mL甲醇和10 mL去离子水活化),用20 mL 20%甲醇洗柱,10 mL 90%甲醇(含0.1%三氟乙酸)洗脱,洗脱液挥发干燥,残渣溶于1 mL甲醇中,-20℃下保存备测。滤膜剪碎后加入30 mL 5%乙酸,65℃下水浴10 min,细胞超声破碎10 min,再反复水浴、超声2次,0.45 μm滤膜抽滤,再经与滤液相同的过程后备测。

高效液相色谱法(HPLC)测定水中微囊藻毒素。安捷伦1100型高效液相色谱仪,配在线真空脱气四元泵和荧光检测器和Zorbax XDB-C18色谱柱,检测波长238 nm。流动相为35%乙腈和0.025%三氟乙酸,流速1 mL/min,柱温30℃。

1.4 统计分析

CCA分析用于研究浮游植物、浮游动物和环境变量之间的关系。根据浮游生物出现的频度和生物量所占比例选取58种浮游植物和30种浮游动物进行CCA分析。为使浮游生物的生物量数据获得正态分布,将浮游生物丰度值进行lg(x+1)转换,各环境因子也都进行标准化处理。应用CANOCO

4.5 进行 CCA 运算，并用 CANODRAW 4.0 作图。

2 结果与分析

2.1 水库主要理化因子

库区属亚热带季风气候，调查期间，表层水温周年变化明显，最高水温为 31.01 °C，出现在 8 月，最低为 7.09 °C，出现在 1 月；底层水温较为稳定，全年变化于 10~16 °C 之间。8 月至 12 月水体存在稳定的热分层，温跃层位于水深 30~50 m 处。

水库透明度周年波动于 1.91~20.15 之间。4 月因发生严重水华，平均透明度仅为 2.15 m；夏季水华减轻，透明度有所回升，8 月全库平均值达 4.08 m；秋季（10 月）同时发生蓝藻和硅藻水华，透明度再次下降为 2.25 m；12 月份藻类数量极少，全库平均透明度高达 19.68 m。

水体溶解氧季节变化明显（图 2），春季（4 月）鱼腥藻水华发生期间，表层水 DO 最高达 11.25 mg/L，冬季（12 月）则相对较低，变化于 6.25~7.10 mg/L 之间。表底层溶氧量差异显著，20 m 以下水层 DO 均在 4 mg/L 以下，显著低于 10 m 以上水层 ($P < 0.05$)。

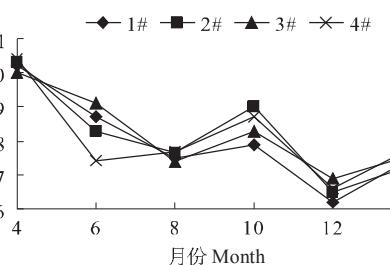
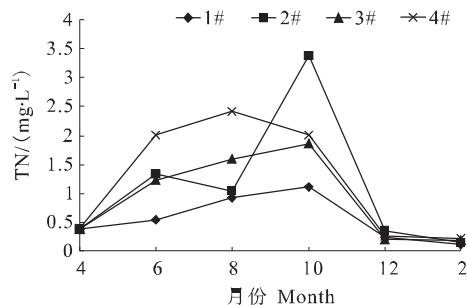


图 2 湖南镇水库各采样点表层水溶氧变化

Fig. 2 Dynamics of DO of surface water in Hunanzen Reservoir

水库 pH 变化于 6.65~8.41，表层略高于底层，春、夏、秋三季显著高于冬季。

水库总氮 (TN) 水平变化于 0.12~3.39 mg/L，总磷 (TP) 水平变化于 0.015~0.39 mg/L 之间。营养盐水平季节差异显著，且各采样点表现出相似的变化趋势，夏、秋季明显高于冬、春季。从水平分布看，2# 和 4# 营养盐浓度较高，1# 和 3# 较低（图 3）。表明湖南镇水库的营养盐以外源径流为主，并以 2# 举口上游的两条支流汇入较多。

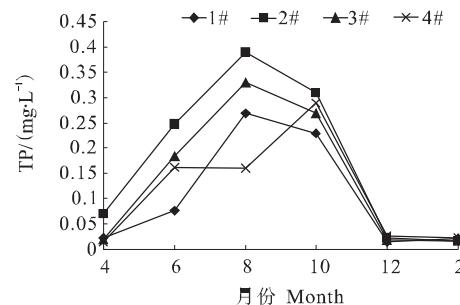


图 3 湖南镇水库总氮和总磷浓度变化

Fig. 3 Dynamics of TN and TP levels in Hunanzen Reservoir

2.2 浮游生物

共鉴出浮游植物 96 种，分隶于 7 门 62 属（由于某些种类未鉴定到种，实际种数还不止此）。蓝藻和隐藻的种类不多但都是数量上的优势类群，绿藻种类最多但无明显优势种群。优势种随季节变化而交替，4 月份螺旋鱼腥藻 (*Anabaena sporoides*) 大量发生形成水华，成为绝对优势种，并从 4 月一直持续到 7 月。8 月螺旋鱼腥藻优势消失，小颤藻 (*Oscillatoria tenuis*) 成为优势种。10 月份颤藻仍然维持优势，同期，硅藻门的针杆藻 (*Synedra*

sp.) 大量繁殖成为优势种，使水体颜色呈浅褐色。12 月、2 月藻类数量明显减少，席藻 (*Phormidium* sp.)、颗粒直链藻 (*Melosira garnulata*) 和啮蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*) 先后成优势种类。

水库中 Chla 浓度季节变化明显，各采点变化趋势相似，蓝藻门 Chla 浓度构成了总 Chla 浓度的主体。调查期间 Chla 质量浓度最高出现在 10 月，总 Chla 质量浓度达 9.75 μg/L，其中蓝藻门占 71.72%，达 6.97 μg/L。最低出现在 12 月总 Chla 质量浓度为 1.12 μg/L，蓝藻门 Chla 浓度仅为 0.08 μg/L（图 4）。

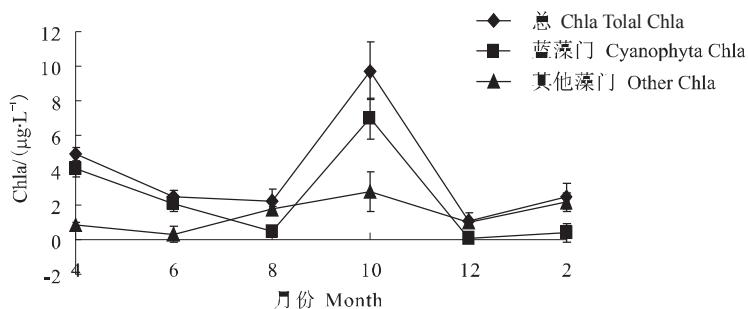


图 4 湖南镇水库 Chla 质量浓度变化

Fig. 4 Dynamics of Chla in Hunanzen Reservoir

浮游植物年平均数量达 $5.58 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 最高值出现在 10 月的 2# 点, 达 $16.98 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$; 最低值为 12 月 1# 点的 $0.59 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ (图 5A)。藻类数量随季节变化显著(图 5B)。水平分布上,除 10 月和 12 月 4# 大坝藻类数量略高于其他采样点外,总体上游高于下游(图 5A)。垂直分布上,4~10 月浮游植物基本分布于 10 m 以上水层,12~2 月藻类浓度低,垂直变化不明显。

共鉴定出浮游动物 73 种,其中原生动物 33 种,

轮虫 26 种,枝角类 9 种,桡足类 5 种,分别占浮游动物种数的 43.6%、31.9%、20.2% 和 4.3%。浮游动物个体丰度变幅为 $8\sim3548 \text{ L}^{-1}$, 季节变化明显,各采点均在 6 月出现数量高峰,2 月数量最少(图 5C)。轮虫为湖南镇水库浮游动物优势类群,常见种有螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*) 和长刺异尾轮虫(*Trichocerca longiseta*) 等。

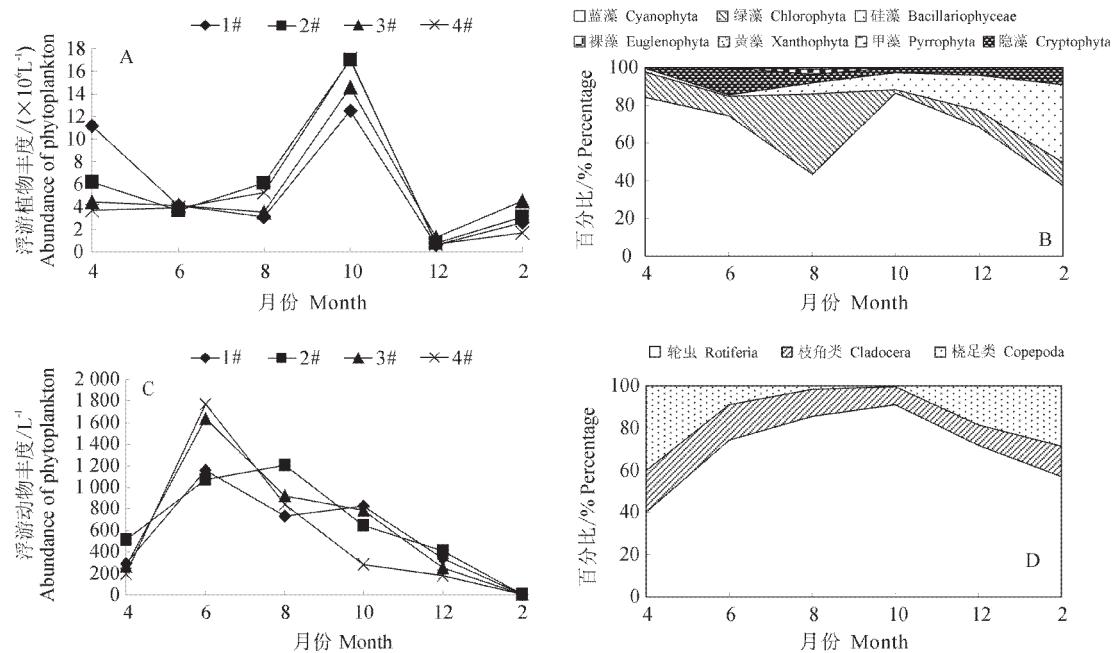


图 5 湖南镇水库浮游生物丰度周年变化与组成

A: 各采点浮游植物数量的周年变化; B: 4# 点各类浮游植物的数量组成;

C: 各采点浮游动物数量的周年变化; D: 4# 点 3 类浮游动物的数量组成

Fig. 5 Plankton abundance and composition in Hunanzen Reservoir

A: Abundance of phytoplankton at 4 sampling sites; B: Composition of phytoplankton abundance at 4#;

C: Abundance of zooplankton at 4 sampling sites; D: Composition of zooplankton abundance at 4#

2.3 微囊藻毒素

各采点的微囊藻毒素浓度在蓝藻丰度较高的月份中的变化趋势相似。溶解于水中的藻毒素质量浓度 (EMC) 4月最低平均为 $0.04 \mu\text{g/L}$, 进入 6 月后开始上升并在 8 月达到 $0.68 \mu\text{g/L}$ 的最大值, 其后迅速减少, 但在进入冬季后又到达较高水平。胞内藻毒素 (IMC) 在 12 月达到最高值, 总藻毒素 (TMC) (包括 EMC 和 IMC) 则在 8 月达到最大。

调查结果显示,无论是胞内还是胞外藻毒素浓度的变化均与2种主要水华蓝藻螺旋鱼腥藻和小颤藻的数量动态无直接联系,说明水库藻毒素水平可能更多地取决于这2种水华蓝藻的生理状态或其他有毒蓝藻的数量动态(图6)。

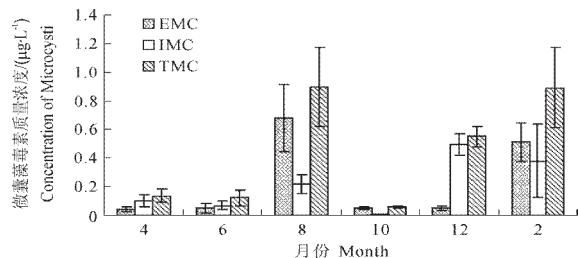


图 6 湖南镇水库微囊藻毒素质量浓度变化

Fig. 6 Dynamics of Microcystin concentration in Hunanzhen Reservoir

2.4 CCA分析

将螺旋鱼腥藻和小颤藻密度作为环境因子对浮游植物种类的CCA排序结果显示(表1),螺旋鱼腥藻数量与CCA第一排序轴相关性较高(0.72),总溶解固体(TDS)和透明度也与第一轴存在相关性(分别为0.558和-0.445)。说明第一排序轴反映了水华蓝藻密度和水下光环境的情况,即排序图从左到右,螺旋鱼腥藻数量和TDS逐渐增加,透明度逐渐降低。与第二排序轴关系最大的是溶解氧、EMC、小颤藻的数量和TN(分别为0.271、-0.267、-0.248和0.21),尽管没有达到统计学意义上的显著水平,但一定程度上反映出物种沿着小颤藻及藻毒素浓度梯度分布的情况。绿藻和硅藻大都分布在排序图的第三象限,隐藻分布在总氮和总磷向量附近,裸藻和甲藻分布在第二轴的负值一侧(图7A,表2)。两轴解释了影响浮游植物分布因素的31.1%,包括水华蓝藻和藻毒素浓度的环境因素CCA分析解释了浮游植物分布组成的71.8%。而单以理化因子作为环境因素进行对浮游植物进行排序的CCA分析时仅解释了56.2%。因此水华蓝藻及藻毒素作为环境因素的加入提高了CCA分析的解释能力15.6个百分点(表1)。

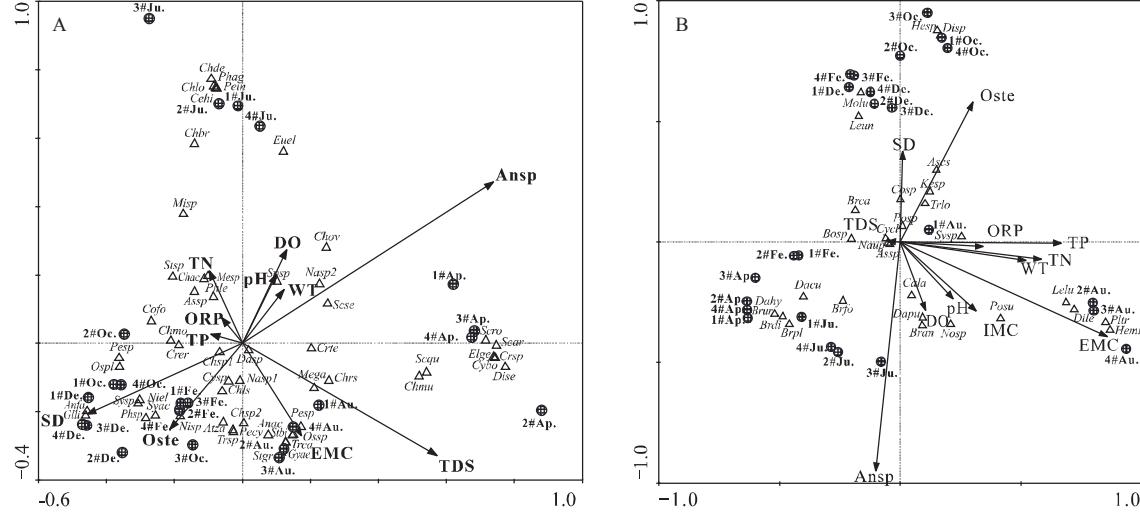


图 7 湖南镇水库浮游生物种类与环境因子间排序图

A: 浮游植物与包含蓝藻密度及毒素的环境因子的CCA分析; B: 浮游动物与包含蓝藻密度及毒素的环境因子的CCA分析

Fig. 7 Ordination triplots of plankton species and environment factors in Hunanzhen Reservoir

A: Triplot of phytoplankton species and environment factors (plus cyanobacteria densities and EMC as explanatory variables);

B: Triplot of zooplankton species and environment factors (plus cyanobacteria densities, EMC and IMC as explanatory variables)

表 1 湖南镇水库浮游生物群落 CCA 分析统计信息
Tab.1 Summary statistics of the first two axes of CCA performed on plankton at Hunanzen Reservoir

轴 Axis		A		B		C		D	
		1	2	1	2	1	2	1	2
特征值 Eigenvalues									
种类与环境因子间相关性 Species-environment correlations		0.436	0.377	0.484	0.435	0.205	0.123	0.246	0.195
物种累积百分数 Cumulative percentage variance of species data		0.978	0.892	0.973	0.985	0.918	0.894	0.986	0.984
物种与环境间关系累积百分数 Cumulative percentage variance of species-environment relation		14.8	27.5	16.4	31.1	19.8	31.7	23.8	42.7
4 个排序轴特征值总和 Sum of all unconstrained eigenvalues		26.3	49	22.8	43.3	35.7	57	30.7	55.1
全部典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues		2.955		2.955		1.034		1.034	
全部典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues		1.661		2.123		0.575		0.800	
CCA 分析所能解释的变量 Variance explained by the CCA		56.2%		71.8%		55.6%		77.4%	
前 2 个排序轴所能解释的变量 Variance explained by the first two axes		27.5%		31.1%		31.7%		42.6%	
水温与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of WT with the first two axes		0.120	0.029	0.120	0.155	-0.514	-0.476	0.515	-0.075
溶解氧与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of DO with the first two axes		0.213	0.107	0.127	0.271	-0.035	-0.311	0.104	-0.279
总氮与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of TN with the first two axes		0.267	-0.143	-0.095	0.210	-0.566	-0.404	0.578	-0.072
总磷与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of TP with the first two axes		0.116	-0.275	-0.092	0.027	-0.663	-0.360	0.660	-0.004
透明度与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of SD with the first two axes		0.004	-0.496	-0.445	-0.204	-0.087	0.747	0.011	0.370
pH 值与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of pH with the first two axes		0.167	0.031	0.097	0.120	-0.157	-0.259	0.217	-0.233
总溶解固体与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of TDS with the first two axes		-0.546	0.408	0.558	-0.323	0.053	-0.257	-0.054	0.003
氧化还原电位与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of ORP with the first two axes		0.124	-0.169	-0.060	0.075	-0.329	-0.012	0.341	-0.020
胞外毒素与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of EMC with the first two axes		-	-	0.171	-0.267	-	-	0.847	-0.386
胞内毒素与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of IMC with the first two axes		-	-	-	-	-	-	0.310	-0.283
螺旋鱼腥藻丰度与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of the abundance of <i>A. sporoidea</i> with the first two axes		-	-	0.720	0.465	-	-	-0.100	-0.934
小颤藻丰度与前 2 个排序轴的相关系数 Correlation coefficient of the abundance of <i>O. temensis</i> with the first two axes		-	-	-0.208	-0.248	-	-	0.298	0.571

A: 浮游植物与理化因子间的 CCA 分析; B: 浮游植物与包含蓝藻密度及毒素的环境因子的 CCA 分析; C: 浮游动物与包含蓝藻密度及毒素的环境因子的 CCA 分析。
 A: Summary of CCA between phytoplankton species and physico-chemical parameters; B: Summary of CCA between phytoplankton species and environment factors (plus cyanobacteria densities, EMC and IMC as explanatory variables);
 C: Summary of CCA between zooplankton species and environment factors (plus cyanobacteria densities, EMC and IMC as explanatory variables).

表 2 浮游生物及其 CCA 分析中的缩写
Tab. 2 Abbreviation of plankton species for CCA

种名 Species	缩写 Abbriation	种名 Species	缩写 Abbriation
蓝藻门 Cyanophyta		隐藻门 Cryophyta	
螺旋鱼腥藻 <i>Anabaena sporoides</i>	Ansp	尖尾隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	Chac
小形色球藻 <i>Chroococcus minor</i>	Chmo	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	Crer
微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	Chmu	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	Crsp
蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.	Dasp	甲藻门 Pyrrrophyta	
线形粘杆藻 <i>Gloeothece linearis</i>	Glli	角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	Cehi
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	Misp	裸甲藻 <i>Gymnodinium aeruginosum</i>	Gyae
灿烂颤藻 <i>Oscillatoria splendida</i>	Ospl	多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	Pesp
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	Ossp	裸藻门 Euglenophyta	
小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	Oste	敏捷扁裸藻 <i>Phacus agilis</i>	Phag
席藻 <i>Phormidium</i> sp.	Phsp	尾囊裸藻 <i>Trachelomonas caudata</i>	Trea
极大螺旋藻 <i>Spirulina maxima</i>	Scsp	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	Trsp
螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.	Spsp	金藻 Chrysophyta	
蓝球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	Chrs	锥囊藻 <i>Dinobryon sertularia</i>	Dise
绿藻门 Chlorophyta		轮虫 Rotiferia	
针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	Anac	长刺异尾轮虫 <i>Trichocerca longiseta</i>	Trlo
镰状纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	Anfa	多肢轮虫 <i>Polyarthra</i> sp.	Posp
布朗衣藻 <i>Chlamydomonas braunii</i>	Chbr	沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>	Posu
德巴衣藻 <i>Chlamydomonas debaryana</i>	Chde	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	Brea
卵形衣藻 <i>Chlamydomonas ovalis</i>	Chov	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	Brur
衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.1	Chsp1	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	Brfo
衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.2	Chsp2	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	Brdi
小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	Chlo	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	Bran
绿球藻 <i>Chorococcum</i> sp.	Chls	褶皱臂尾轮虫 <i>Brachionus plicatilis</i>	Brpl
美丽鼓藻 <i>Cosmarium formosulum</i>	Cofo	奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	Hemi
四足十字藻 <i>Cricenia tetrapedia</i>	Crte	六腕轮虫 <i>Hexarthra</i> sp.	Hesp
空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	Euel	龟甲轮虫 <i>Keratella</i> sp.	Kesp
纺锤藻 <i>Elakatothrix gelatinosa</i>	Elge	晶囊轮虫 <i>Asplanchna</i> sp.	Assp
整齐盘星藻 <i>Pediastrum integrum</i>	Pein	蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguilata</i>	Leun
圆柱形鼓藻 <i>Penium cylindrus</i>	Pecy	月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>	Lelu
柱形鼓藻 <i>Penium</i> sp.	Pesp	无柄轮虫 <i>Ascomorpha</i> sp.	Ascs
透镜壳衣藻 <i>Phacotus lenticularis</i>	Phle	狭甲轮虫 <i>Colurella</i> sp.	Cosp
被甲栅藻 <i>Scenedesmus armatus</i>	Scar	疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> sp.	Sysp
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Scqu	月形单趾轮虫 <i>Monostyla lunaris</i>	Molu
弓形藻 <i>Schroederia setigera</i>	Scse	截头皱甲轮虫 <i>Ploesoma truncatum</i>	Pltr
硬弓形藻 <i>Schroederia robusta</i>	Scro	椎轮虫 <i>Notemmatia</i> sp.	Nosp
两裂角星鼓藻 <i>Staurastrum bifidum</i>	Stbi	枝角类 Cladocera	
纤细角星鼓藻 <i>Staurastrum gracile</i>	Stgr	长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	Dile
角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.	Stsp	秀体溞 <i>Diaphanosoma</i> sp.	Disp
硅藻门 Bacillariophyceae		僧帽溞 <i>Daphnia cucullata</i>	Dacu
星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.	Assp	透明溞 <i>Daphnia hyalina</i>	Dahy
扎卡四棘藻 <i>Attheya zachariasii</i>	Atza	蚤状溞 <i>Daphnia pulex</i>	Dapu
广缘小环藻 <i>Cyclotella bodanica</i>	Cybo	象鼻溞 <i>Bosmina</i> sp.	Bosp
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	Cysp	桡足类 Copepoda	
螺旋颗粒直链藻 <i>Melosira garnulata</i>	Mega	哲水蚤 <i>Calanoida</i>	Cala
直链藻 <i>Melosira</i> sp.	Mesp	剑水蚤 <i>Cyclopoida</i>	Cycl
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.1	Nasp1	无节幼体 nauplius	Naup
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.2	Nasp2		
长刺菱形藻 <i>Nitzschia elongata</i>	Niel		
菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	Nisp		
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	Syac		
针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	Sysp		

包含水华蓝藻数量及藻毒素的环境因子对浮游动物种类的CCA排序结果显示(表1),EMC与第一排序轴显著相关,达到0.847,TP、TN和水温也与第一排序轴存在相关性(分别为0.660、0.578和0.515)。说明第一排序轴反映了藻毒素和营养盐状况,即排序图从左到右,EMC和营养盐浓度逐渐增加。两种水华蓝藻的密度与第二排序轴表现出显著的相关性(螺旋鱼腥藻和小颤藻分别为-0.934和0.571),说明该轴明确的反映出水华蓝藻丰度,即排序图从上到下,螺旋鱼腥藻生物量逐渐增加,小颤藻密度逐渐降低。其中轮虫主要分布在排序图第二象限,桡足类主要分布在坐标轴原点附近,枝角类则主要位于第三象限(图7B,表2)。两轴解释了影响浮游动物分布因素的42.6%,包括水华蓝藻和藻毒素浓度的环境因素CCA分析解释了浮游动物分布组成的77.4%。而单以理化因子作为环境因素进行对浮游动物进行排序的CCA分析时仅解释了55.6%。因此水华蓝藻及藻毒素作为环境因素的加入提高了CCA分析的解释能力21.8个百分点(表1)。

3 讨论

3.1 影响浮游植物群落的主要环境因子

一般认为蓝藻含有其他藻类所不具备的色素如藻蓝素等,可以获取很少能为其他藻类所利用的绿色、橙色等光谱,藻胆蛋白和Chla还能使蓝藻有效的获得光能^[9],因此相对于需要光能较高的绿藻来说蓝藻更能适应低光照^[18]。加之水华蓝藻具有的浮力机制^[19],使其在与其他藻类的竞争中占有很大优势。湖南镇水库的热分层出现在8~12月,热分层的消失将导致营养盐的重新补充和水下有效光照环境的恶化^[20],促进蓝藻水华的出现,造成了本研究中春夏季螺旋鱼腥藻的优势地位,透明度随之进一步的降低限制了其他藻类的生长。CCA分析反映出TDS和透明度对浮游植物群落产生了一定影响,两者代表了水体中光源情况。说明在该水库中有毒蓝藻能够通过在生存竞争中的优势来压制其他藻类的发展,影响浮游植物的群落结构。

一些研究显示,暴露于产毒蓝藻(颤藻等)及其提取物的微藻(绿藻)及细菌都表现出形态学和超微结构上的变化,并能够对其生长产生抑制^[21]。蓝藻水华发生时浮游植物群落通常会出现Chla浓度的减少^[13]。本研究中发生蓝藻水华期间除蓝藻门以外Chla浓度一直处于较低水平。多元分析也显示螺

旋鱼腥藻丰度显著的影响了浮游植物群落组成,但EMC没有与之产生显著的相关性。很多研究也显示毒素浓度和生物量并不一定是一致的^[22]。在湖泊水库等水体中毒素的时空分布受很多因素的影响,从细胞内释放出的毒素会被迅速降解(微生物或光降解),也可能很快被大量的水稀释,特别是在风力的影响下^[9]。此外由于鱼腥藻还能产生另一种毒素—类毒素(anatoxin- α)^[9,23-24],也解释了微囊藻毒素浓度和水华蓝藻生物量不一致这一结果的出现。Pawlik-Skowrońska等^[25]对波兰Zemborzycki水库的调查中也发现,类毒素与水库中包含螺旋鱼腥藻的3种鱼腥藻的丰度呈正相关。研究发现鱼腥藻的产毒株主要在16~23℃和低光照强度条件下产生毒素并释放到胞外^[26]。虽然本研究没有对这一毒素进行监测,但调查数据显示螺旋鱼腥藻处于优势地位的几个月中的水温和水下光环境符合上述条件。因此,该水库中潜在的其他蓝藻毒素可能也参与了对浮游植物群落的影响。

3.2 影响浮游动物群落的主要环境因子

由浮游动物CCA分析可以看出:除了蓝藻及藻毒素外,水体的营养状况和水温对浮游动物的分布产生较强的影响(图7B)。但理化因素无法直接地影响浮游动物群落。Abrantes等^[6]在利用CCA方法分析枝角类与浮游植物季节演替后认为理化因素通过控制浮游植物的生长,间接影响浮游动物的动态。尽管对浮游植物的排序显示营养盐并不是影响藻类丰度的主要因素,但本研究中营养盐在一定程度上还是限制了浮游植物的分布。观察浮游植物排序图可以发现,排列于4月、6月样方附近的大都是以衣藻、隐藻和小环藻等为代表的小型藻类(图7A)。Sommer等^[20]提出的季节浮游生物模式一般模型(PEG模型)也显示小型快速生长的藻类如隐藻和小型中心硅藻纲的藻类是春季初级生产力的主要来源。而这些藻类又符合浮游动物对食物的需要^[27],丰富的可食藻类的存在(图5A)支撑了浮游动物的发展。因此,即使在螺旋鱼腥藻生物量维持在较高水平($>3\times10^6\text{ L}^{-1}$),各点浮游动物仍在6月出现了最高峰。

但随着小颤藻等颤藻属蓝藻逐渐取代螺旋鱼腥藻成为优势种,浮游动物总量逐渐下降,其中大型的、不加选择的牧食性浮游动物(如溞属)的丰度出现了明显的下降,而小型种(如轮虫和象鼻溞属)和选择性捕食类浮游动物(如剑水蚤)受到

的影响相对较少(图7B)。由图5可以看出浮游动物丰度呈现出的变化规律与浮游植物正好相反,而浮游植物数量主要是由蓝藻尤其是优势蓝藻组成,这些藻类又几乎都是潜在或已证明具有毒性的种类^[9,23-24]。因此夏季水库中微囊藻毒素浓度上升可能与有毒蓝藻生物量增长有关。根据微囊藻毒素的化学结构可以推测其具有很好的水溶性,对于这样的亲水性物质来说直接穿过生物膜是比较困难的^[28]。谢平^[23]在其论著中讨论了毒素的暴露途径,认为毒素通过被动扩散直接进入生物体的量可能十分有限,动物通过取食才是摄入和积累毒素的主要途径。因此,在对浮游动物的排序中将存在于藻类细胞中的毒素(IMC)也作为环境因子,但结果显示IMC并没有与浮游动物群落分布组成存在显著的相关。这可能与本研究中水华蓝藻的形态大都属丝状以及不同浮游动物间摄食机制存在明显差异有关。丝状和群体蓝藻可能因个体太大无法被浮游动物利用^[29],且桡足类对食物具有高度选择性,能够通过大小和味觉来区分食物颗粒^[30]。象鼻溞能将被动的滤食和主动的捕获颗粒相结合^[31],因此和桡足类相似,也能够区分蓝藻和其他食物颗粒。溞属和一些其他的枝角类则不能这样,它们仅能通过减小壳缝来避免藻类群体进入滤食腔(Filtering chamber),但减小壳缝的作用又是极为有限^[29]。这样就造成了桡足类和象鼻溞等能够避免食用有害蓝藻,而其他一些枝角类尤其是溞属生物不可避免地摄入一些有毒蓝藻,或是丝状蓝藻对其摄食系统的干扰而增加了不必要的能量消耗。这也解释了很多野外调查^[32-33]所发现的浮游动物尤其是枝角类的小型化现象。同时大量证据也表明微囊藻毒素对不同种类的浮游动物的影响存在差异^[34]。Hansson等^[32]通过对瑞典南部的6个湖泊中微囊藻毒素浓度和浮游动物群落组成波动的调查结果显示:浮游动物总生物量与毒素浓度成负相关;将浮游动物细分为更小的类群后显示溞属和哲水蚤与高浓度的毒素成负相关,但剑水蚤、象鼻溞属和轮虫这样的小型的、相对低效的浮游植物掠食者却与之成正相关。本次调查的结果与这一结论在一定程度上是吻合的,水华蓝藻利用固有的一些特性对浮游动物群落产生了一定的影响。

本研究的CCA分析没有完全地解释出所有对浮游动物群落结构的影响因素(表1)。说明浮游动物群落结构可能并不是仅受上行效应如食物是

否容易获得或食物的营养来调节。捕食通常也是调节浮游动物结构的重要因素^[35]。水库自建成以来投放了大量鲢、鳙鱼种和银鱼受精卵。夏季浮游动物受到鱼类较高的捕食压力^[20],特别是由于当年鱼(Young-of-the-year, YOY)具有大小选择的摄食压力,大型枝角类受到主要影响^[6]。

4 结论

螺旋鱼腥藻、小颤藻等水华蓝藻可能利用其对低光照的适应并借助其在浮力机制等方面的生存竞争优势,与藻毒素共同限制了其他藻类的生存和发展;利用其不宜被食用的形态和藻毒素的毒性效应等对浮游动物群落结构产生了一定的影响,使浮游动物的种类趋于小型化。

参考文献:

- [1] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [2] An K G, Jones J R. Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 432: 37-48.
- [3] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [4] López-Arribilla A I, Moreira D, López-García P, et al. Phytoplankton diversity and cyanobacterial dominance in a hypereutrophic shallow lake with biologically produced alkaline pH[J]. *Extremophiles*, 2004, 8: 109-115.
- [5] Codd G A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 51-60.
- [6] Abrantes N, Antunes S C, Pereira M J, et al. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake (Lake Vela, Portugal)[J]. *Acta Oecologica*, 2006, 29: 54-64.
- [7] Sugiura N, Utsumi M, Wei B, et al. Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake[J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, 9: 195-201.
- [8] de Figueiredo D R, Azeiteiro U M, Esteves S M, et al. Microcystin producing blooms – a serious global public health issue[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 59: 151-163.

- [9] 刘光钊.水体富营养及其藻害 [M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [10] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 369/370: 11–26.
- [11] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 178: 295–311.
- [12] 李秋华, 韩博平. 基于CCA的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析 [J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2 354–2 364.
- [13] de Figueiredo D R, Reboleira A S S P, Antunes S C, et al. The effect of environmental parameters and cyanobacterial blooms on phytoplankton dynamics of a Portuguese temperate lake[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 568: 145–157.
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 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.
- [16] 韩茂森, 杜蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [17] 郑利, 谢平, 林匡飞, 等. 武汉莲花湖微囊藻毒素含量变化特征及其影响因素的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1 053–1 057.
- [18] Mur L R, Gons H J, Van Liere L. Some experiments on the competition between green algae and blue-green bacteria in light-limited environments[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1977, 1 (6): 335–338.
- [19] Humphries S E, Lyne D. Cyanophyte blooms: the role of cell buoyancy [J]. *Limno Oceanogr*, 1988, 33(1): 79–91.
- [20] Sommer U, Gliwicz M, Lampert W, et al. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. *Arch Hydrobiol*, 1986, 106: 433–471.
- [21] Valdor R, Aboal M. Effects of living cyanobacteria, cyanobacterial extracts and pure microcystins on growth and ultrastructure of microalgae and bacteria[J]. *Toxicon*, 2007, 49: 769–779.
- [22] Lindholm T, Vesterkvist P, Spoof L, et al. Microcystin occurrence in lakes in Åland, SW Finland[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 505: 129–138.
- [23] 谢平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] 广东省水文局, 暨南大学. 水库蓝藻和蓝藻毒素分布与检测 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [25] Pawlik-skowrońska B, Skowroński T, Pirszel J, et al. Relationship between cyanobacterial bloom composition and anatoxin- α and microcystin occurrence in the eutrophic dam reservoir (SE Poland) [J]. *Polish Journal of Ecology*, 2004, 52(4): 479–490.
- [26] Rapala J, Sivonen K. Assessment of environmental conditions that favour hepatotoxic and neurotoxic *Anabaena* spp. strains cultures under light limitation at different temperatures[J]. *Microb Ecol*, 1998, 36: 181–192.
- [27] 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.
- [28] Ibelings B W, Chorus I. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: A review[J]. *Environ. Pollut.*, 2007, doi: 10.1016/j.envpol.2007.04.012.
- [29] Lampert W. Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, 21: 483–490.
- [30] Demott W R, Moxter E. Foraging cyanobacteria by copepods: responses to chemical defenses and resource abundance[J]. *Ecology*, 1991, 72 (5): 1 820–1 834.
- [31] DeMott, W R, Kerfoot W C. Competition among cladocerans: nature of the interaction between *Daphnia* and *Bosmina*[J]. *Ecology*, 1982, 63: 1 949–1 966.
- [32] Hansson L A, Gustafsson S, Rengefors K, et al. Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition [J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52: 1 290–1 301.
- [33] Ferrão-Filho A S, Domingos P, Azevedo S M F O. Influences of a *Microcystis aeruginosa* KÜTZING bloom on zooplankton populations in Jacarepaguá Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil) [J]. *Limnologica*, 2002, 32: 295–308.
- [34] 朱津永, 陆开宏, 潘洁慧. 微囊藻水华对淡水浮游动物轮虫和枝角类影响的研究进展 [J]. *中国水产科学*, 2008, 15(2): 361–369.
- [35] Christoffersen K, Riemann B, Klysner A., et al. Potential role of fish predation and natural populations of zooplankton in structuring a plankton community in eutrophic lake water[J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 38: 561–573.

Structure and dynamics of plankton community and their impact factors based on CCA analysis in Hunanzen Reservoir

LU Kai-hong^{1,2}, ZHU Jin-yong², WANG Yang-cai², JIN Chun-hua², ZHENG Zhong-ming^{1,2}, HU Zhi-yong², PAN Jie-hui²

(1. Key Laboratory of Marine Aquaculture, Ministry of Education, China Ocean University, Qingdao 266003, China; 2. Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, College of Life Science and Biotechnology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the present study, the blue-green algae bloom water-Hunanzen Reservoir, the third largest reservoir in Zhejiang Province, was monitored between 2006 and 2007. Plankton abundance was measured and correlated to environmental parameters. 96 taxa of phytoplankton and 73 taxa of zooplankton were identified. Phytoplankton had an abundance ranging from 0.49×10^6 to $16.71 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, and the abundance of zooplankton varied from 8 to 3 548 ind./L. The cyanobacterial bloom of *Anabaena sporoides* lasted several months with the highest density of the surface water being $2.28 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$, and then *Oscillatoria* were dominant during autumn months. Ordination by CCA showed that the seasonal phytoplanktonic succession was mainly correlated with density of *A. sporoides*, total dissolved solids and transparency, and the seasonal zooplanktonic succession was mainly correlated with extracellular microcystin, nutrients and the density of *A. sporoides*. Due to the occurrence of high level nutrients, the development of blue-green algal may not be regulated by “bottom up” forces effectively. The bloom-forming cyanobacteria became the potential factor that influenced the community of phytoplankton by its competitive advantage. Nutrients do not influence the zooplankton community directly, but control the edible phytoplankton growth, which in turn influence the dynamics of zooplankton. By considering not only the environmental parameters but also the occurrence of cyanobacterial blooms and algal toxin as explanatory variables in a canonical correspondence analysis, the variance explained for the phytoplanktonic and zooplanktonic assemblage during the study period was increased 15.6% and 25.8% respectively, indicating a correlation that blue-green algae and the bloom-forming cyanobacteria may affect the structure and composition of plankton community. [Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15 (6) : 950-960]

Key words: cyanobacterial bloom; plankton; microcystin; environment factors; canonical correspondence analysis