DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.06.004

三峡水库神农溪浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

胡 莲,邹 曦,郑志伟,张志永,杨 晴,万成炎,潘晓洁

(水利部中国科学院水工程生态研究所,水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室,
湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心,湖北 武汉 430079)

摘要:神农溪作为"引江补汉"工程的比选源头之一,维持其良好水质状况具有重要意义。作为反映水环境质量重要指标的浮游植物,其群落结构受三峡季节性蓄水倒灌的影响。2016年5月(低水位运行期)和10月(高水位运行期),沿神农溪上游至下游江段开展了浮游植物调查,采用数量生态学方法研究了神农溪浮游植物群落结构的时空变化特征及其与环境因子的关系,以期对可能产生的藻类水华采取有针对性的防治措施。结果显示,两次采样共检测到浮游植物7门、62属、97种(变种),种类数5月(6门、64种)比10月(7门、71种)略低,但均以绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)和蓝藻门(Cyanophyta)种类为主;浮游植物密度5月在各个采样站点间呈波动分布特征,而10月从河口区到上游回水变动区呈纵向梯度分布特征;两次采样的优势种均以富营养型水体指示藻类为主,其群落结构空间分布特征存在较大差异,但均不显示明显的沿河流纵向梯度分布的特征;线性模型和典型对应分析表明,影响浮游植物空间分布的最重要因子,5月为高锰酸盐指数(COD_{Mn}),而10月则为浊度(Turb);浮游植物主要种类的空间差异性与所处采样点环境因子的浓度梯度差异以及藻类自身生物学特征明显相关。

关键词:神农溪;浮游植物;环境因子;时空变动特征;典范对应分析

中图分类号:Q145 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)06-0027-10

浮游植物是水生态系统结构的重要组成部分,在实现水生态系统功能中发挥着十分重要的作用。浮游植物群落的种类及数量特征不仅能够准确反映水环境的质量状况(Gharib et al,2011)及水域富营养化的程度和过程(况琪军等,2005;Danilov & Ekelund,1999),而且也是河流和湖泊生物完整性评价的重要选择指标(Li et al,2013;Harig & Bain,1998)。浮游植物的群落结构特征与环境因子的关系紧密,其时空变化易受光照、水温、营养盐等多种环境因素地理梯度差异及季节性或月度变动的影响(Rychtecky & Znachor,2011;冯佳等,2016)。辨识浮游植物群落特征的时空变化,可以反映水域生态环境的时空特征,从而有利于水域生态环境的监测与管理(熊莲等,2016);而了解浮游植物群落特征与环境因子的关系,则可以确定影响其群落特征变动的关键环境因子,从而为控制浮游植物获取有针对性的防治措施(况琪军等,2005;冯佳等,2016)。尤其作为受干流水库季节性倒灌影响的支流,其生境要素的季节性变动以及沿纵向梯度分布存在明显差异(陈小娟等,2012),更需要通过辨识浮游植物群落的时空变化特征及其与环境因子的关系,以获得个性化(不同站点、不同季节)的浮游植物防治措施。

神农溪是三峡库区长江北岸一级支流,地处长江三峡巫峡与西陵峡之间,发源于神农架山脉南坡鸡公山,自北向南流经神农架林区和巴东县境域,并于巴东新县城北岸西瀼口汇入长江。神农溪干流全长60.6 km,流域总面积1 031.5 km^2,相对落差超过2 900 m(徐慧等,2017)。三峡工程建库蓄水后,神农溪中下游河段受回水影响而成为水库区,水库蓄水至正常水位175 m时,神农溪干流回水到达距入江口约27 km的沿渡河镇石板坪。神农溪作为国家5A级景区,是"引江补汉"工程的比选调水源头之一,维持其良好的水质状况具有重要意义。由于神农溪旅游业的发展以及沿岸城镇化加速,目前神农溪的水环境已受到一定程度的影响(朱孔贤等,2012)。由于三峡水库季节性蓄水运行导致的神农溪水环境状况的季节性变动以及地理性差异,很可能对神农溪浮游植物群落的时空分布特征造成一定

收稿日期:2020-01-29

基金项目:国家自然科学基金(51709189,51679152);国家重大水利工程建设基金(12620200600018J003);重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021)。

作者简介:胡莲,1972年,女,高级工程师,主要从事水环境与湿地生态恢复研究。E-mail:hulian@mail.ihe.ac.cn

通信作者:潘晓洁,1980年生,女,研究员,主要从事藻类环境生物学与生态规划工作。E-mail:cpanxj2008@sohu.com.cn

程度的影响。尽管如此，有关神农溪浮游植物群落结构的时空变化及其与环境因子的关系，目前尚未见过相关报道，这对神农溪水环境质量的保护是不利的。因此，本研究采用数量生态学方法，探讨了三峡水库高低水位运行时神农溪浮游植物的群落结构演替规律及其影响因素，以期为其水环境综合治理和生态修复提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 样点设置和采样时间

在充分考虑神农溪河道形态、污染源分布、邻近支流汇入以及受回水影响等因素后，沿神农溪上游至下游设置8个采样断面（图1）。包括麻线坪（S1）、下谷坪（S2）、茶园村（S3）、两河口（S4）、上码头（S5）、蔡家包（S6）、孙家岩（S7）、铜鼓包（S8）。采样时间根据三峡水库运行调度，分别于2016年5月（低水位运行期）和2016年10月（高水位运行期）开展两次采样。

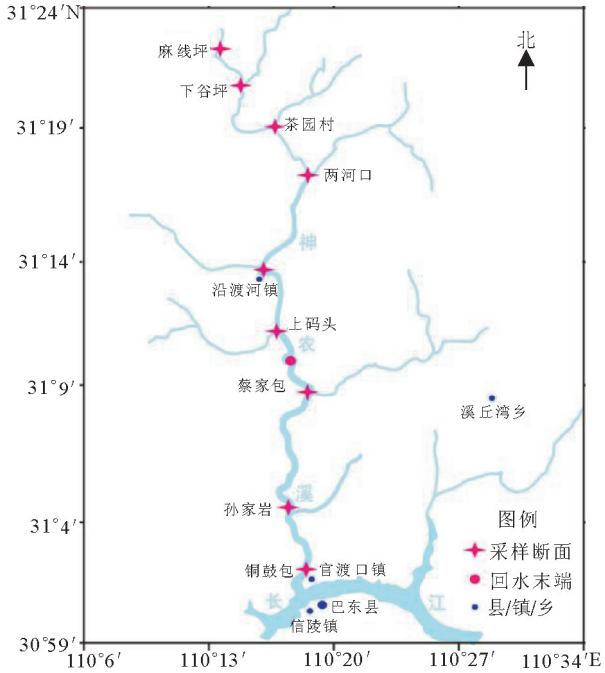


图1 神农溪采样点分布

Fig.1 Location of the sampling sites in the Shennong Stream

1.2 样品采集与鉴定

1.2.1 水质指标 水质指标采集、调查及测定方法主要参考《水质采样样品的保存和管理技术规定（GB12999－1991）》、《水环境监测规范（SL219－2013）》、《水和废水监测分析方法（第4版）》（2002）等相关规范资料。

现场测定采用YSI6680多参数水质分析仪测定水温（WT）、pH、溶解氧（DO）、电导率（EC）；哈希浊度仪测定浊度（Turb），ADCP多普勒流速仪测定流速（Flr）和流量（Flow）。

实验室测定包括总氮（TN）、氨氮（NH_4^+-N）、硝酸盐氮（NO_3^--N）、总磷（TP）、磷酸盐（PO_4^{3-}-P）、五日生化需氧量（BOD_5）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、叶绿素a（Chl-a）等指标。

1.2.2 浮游植物 浮游植物样品采集及鉴定方法参照《中国淡水藻类—系统、分类及生态》（胡鸿钧和魏印心，2006）和《淡水浮游生物研究方法》（章宗涉和黄祥飞，1991）。定性样品的采集使用25号浮游植物网在水中画“∞”字拖曳数次，将采集的样品收集在50 mL样品瓶中，现场用甲醛固定，带回实验室镜检。定量样品采用2 500 mL有机玻璃采水器取上、中、下层水样，经充分混合后，取1 000 mL水于样品瓶中，加鲁哥氏液固定，带回实验室静置沉淀48 h，浓缩定容到30 mL备检。定性、定量样品在显微镜下进行鉴定和计数，每个样品计数2次，取其平均值。

1.3 数据分析

1.3.1 浮游植物优势度 优势度（Y）计算公式为：

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

式中：n_i 为第 i 种的丰度；N 为总丰度；f_i 为第 i 种的出现频率。当优势度 $Y\geqslant 0.02$ 时，则将该种类定为神农溪的优势种（熊莲等，2016）。

1.3.2 浮游植物群落结构的时空变化 （1）聚类分析。基于5月和10月不同采样点浮游植物的种类和相对丰度（密度）数据，以Bray-Curtis相似性系数为基础构建不同采样点的相似性矩阵，采用等级聚类（非加权的组平均，即UPGMA）的分类方法（Cluster analysis）分别分析5月和10月神农溪不同采样点浮游植物群落的空间结构特征，并绘制聚类分析图（Anderson et al，2008）。

（2）相似性分析。在基于One-way ANOSIM方法检验各聚类组之间群聚结构差异存在显著性的前提下，采用百分比相似性（Similarity Percentage，SIMPER）对聚类结果进行分析，分别获得5月和10月引起不同聚类组之间浮游植物群落结构差异的主要种类，并基于该结果确定5月和10月能够反映不同采样点之间浮游植物丰度梯度的主要种类（Anderson et al，2008）。

1.3.3 浮游植物群落结构与环境因子关系 （1）数据标准化处理。进行不同环境因子之间的统计分析。首先，为了减少不同环境因子因量纲上的差异对实验结果的影响，将所有环境因子采用自然对数

进行标准化处理：

$E_S = \lg(E_0 + 1)$

式中：E_0 为原始测量数据；E_S 为标准化后的数据。采用 t-test 探讨不同环境因子平均值在不同采样期间的差异（Borcard et al，2011）。

（2）线性模型分析。基于 5 月和 10 月反映浮游植物丰度空间梯度的主要种类密度以及不同采样点环境因子的监测分析值，采用基于距离的线性模型方法（Distance-based Linear Model，DistlLM）分别构建 5 月和 10 月浮游植物群落结构与环境因子的关系模型；其中，环境因子为解释变量，浮游植物的丰度为因变量；采用逐步回归的方法选择模型参数，并使用 Adjusted R^2 评判模型的优劣，并最终获得能够解释浮游植物群落结构空间变动的重要环境因子（Anderson et al，2008）。

（3）典型对应分析。基于 DistlLM 选择的重要环境因子以及 SIMPER 获得的主要浮游植物种类丰度，采用典型对应分析（Canonical Correlation Analysis，CCA）检验上述变量之间关系的显著性；其中，重要环境因子为解释变量，主要浮游植物种类的丰度为响应变量。获得的结果以三序图方式表示，其包括 2 类标尺；其中，1 型标尺为物种坐标等比例于相对特征根；2 型标尺为样方坐标等比例于相对特征根（Borcard et al，2011）。

2　结果与分析

2.1　不同采样期间的环境参数

2016 年 5 月和 10 月两次采样各环境参数的描述性统计见表 1。5 月，TP、NH_4^+-N、Chl-a、BOD_5、WT、DO、Turb、Flr、Flow 的平均值大于 10 月，而 5 月的 PO_4^{3-}-P、TN、COD_{Mn}、EC 和 pH 平均值小于 10 月。尽管如此，神农溪的水环境参数中，仅有 TP、NH_4^+-N 和 BOD_5 的平均值在两次采样中存在显著性差异（$P<0.05$）。

2.2　浮游植物的种类组成、丰度及优势种

2.2.1　种类组成　2016 年 5 月和 10 月共检测到浮游植物 7 门、62 属、97 种（变种）；其中，绿藻门种类最多，有 28 属、42 种，占总种类数的 43.30%；硅藻门次之，有 14 属、25 种，占 25.77%；蓝藻门 12 属、20 种，占 20.62%；甲藻门 3 属、3 种、裸藻门和隐藻门各 2 属、3 种，均占总种类数的 3.09%；金藻门 1 属、1 种，占 1.03%。5 月的浮游植物总种类数较 10 月略低，其中 5 月共检测到浮游植物 6 门、64 种，10 月检测到浮游植物 7 门、71 种，均以绿藻门、硅藻门和蓝藻门藻类为主。各样点不同门类的浮游植物种类数在两次采样间存在一定的差异，但均以绿藻门、硅藻门和蓝藻门种类为主，2016 年 5 和 10 月神农溪浮游植物各门的种类分布情况见图 2。

表 1　2016 年 5 月和 10 月神农溪环境参数的描述性统计及其平均值比较

Tab.1　Environmental parameter values measured in Shennong Stream in May and October 2016 and a comparison of mean values for the two sampling periods

环境参数	5 月				10 月				P
	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	
PO_4^{3-}-P/mg·L^{-1}	0.03	0.03	0.01	0.11	0.04	0.02	0.02	0.07	0.52
TP/mg·L^{-1}	0.10	0.03	0.07	0.14	0.07	0.00	0.07	0.08	0.04
NH_4^+-N/mg·L^{-1}	0.36	0.17	0.17	0.72	0.04	0.01	0.03	0.06	0.00
TN/mg·L^{-1}	1.39	0.67	0.08	2.32	1.54	0.80	0.92	3.60	0.71
Chl-a/μg·L^{-1}	15.09	24.96	1.09	80.21	2.21	1.40	0.71	4.33	0.19
COD_{Mn}/mg·L^{-1}	1.83	0.76	1.14	3.64	2.51	1.02	1.80	4.50	0.18
BOD_5/mg·L^{-1}	1.67	0.78	0.96	3.52	0.25	0.12	0.08	0.52	0.00
WT/℃	20.61	1.99	17.14	23.85	19.71	3.20	15.80	23.16	0.54
EC/μS·cm^{-1}	236.00	46.68	203.00	374.00	284.60	77.38	163.00	365.10	0.40
DO/mg·L^{-1}	8.96	1.26	6.93	10.92	7.99	0.35	7.18	8.42	0.07
pH	8.48	0.31	8.11	9.04	8.75	0.20	8.41	9.04	0.08
Turb/NTU	9.34	8.16	2.43	28.40	2.70	1.48	0.75	5.09	0.05
Flr/m·s^{-1}	2.01	2.76	0.02	7.80	0.07	0.08	0.01	0.22	0.08
Flow/m^3·s^{-1}	87.72	74.20	1.66	222.30	64.92	95.92	1.02	277.86	0.63

2.2.2　丰度　2016 年 5 月，神农溪蓝藻门（14.88×10^5 个/L）、绿藻门（2.09×10^5 个/L）和隐藻门（0.28×10^5 个/L）的密度分别大于 10 月蓝藻门（2.99×10^5 个/L）、绿藻门（0.42×10^5 个/L）和隐藻门（0.14×10^5 个/L）的密度；然而，5 月的硅藻门（0.41×10^5 个/L）密度要比 10 月（2.19×10^5 个/L）低，其它各门藻类的密度在两次采样期间均无明显差异，其值接近为 0（图 3）。

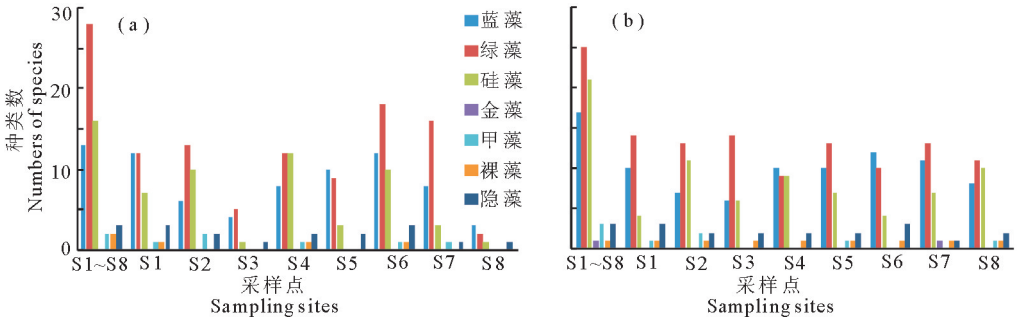


图2 2016年5(a)和10月(b)神农溪浮游植物各门的种类数

Fig.2 Phytoplankton species composition for each sampling site in May and October of 2016 in Shennong Stream

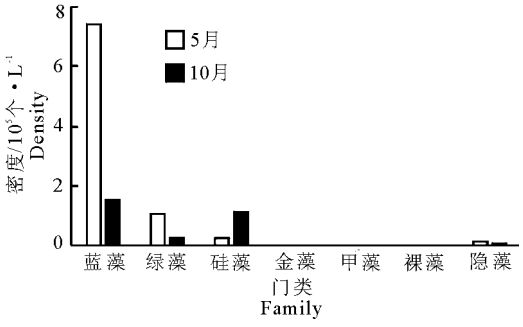


图3 2016年5月和10月神农溪8个样点各门类浮游植物密度均值

Fig.3 Phytoplankton density for each taxa in Shennong Stream in May and October of 2016

不同采样站点浮游植物的密度在5月和10月存在较大差异(图4)。5月,各采样点浮游植物密度呈现锯齿状变动趋势,密度变化为0.22×10^5～43.53×10^5个/L,平均密度为17.69×10^5个/L;其中,S6密度最高、S8密度最低。10月,各样点密度总体上呈现从上游往下游逐渐增高的趋势,密度变化为1.02×10^5～9.05×10^5个/L,平均密度为5.79×10^5个/L;其中,S8密度最高,S2密度最低。

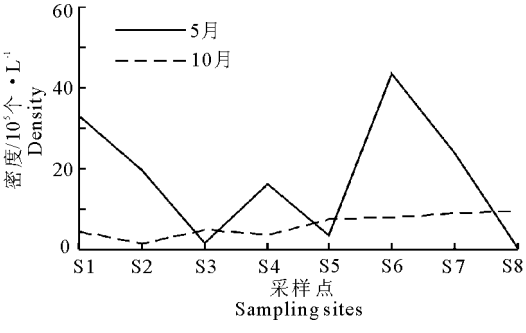


图4 2016年5月和10月神农溪不同采样站点浮游植物密度变化

Fig.4 Spatial variation of phytoplankton densities at different sampling sites in Shennong Stream in May and October of 2016

2.2.3 优势种 不同采样时间浮游植物的优势种差异较大。5月优势种为水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)、束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、粘球藻(*Gloeocapsa* sp.)、空球藻(*Eudorina elegans*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)和小环藻(*Cyclotella* sp.),其中水华鱼腥藻的优势度最大(0.71);10月的优势种为水华鱼腥藻、蓝纤维藻(*Dactyloccocopsis* sp.)、微囊藻(*Microcystis* sp.)、链丝藻(*Hormi-dium* sp.)、尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)、小环藻和小桥弯藻(*Cymbella gracilis*);其中,蓝纤维藻的优势度最大(0.31);两次调查中水华鱼腥藻和小环藻均为优势种,5月和10月神农溪浮游植物的优势种组成见表2。

表2 2016年5月和10月神农溪浮游植物的优势种组成

Tab.2 Dominant species composition of phytoplankton in Shennong Stream in May and October of 2016

采样时间	种类	优势度	水质指示状态
5月	水华鱼腥藻	0.71	α-ms
	束丝藻	0.03	α-ms
	粘球藻	0.02	β-α-ms
	空球藻	0.05	α-ms
	小球藻	0.04	α-ms
	小环藻	0.02	β-α-ms
10月	水华鱼腥藻	0.04	α-ms
	蓝纤维藻	0.31	α-ms
	微囊藻	0.10	β-α-ms
	链丝藻	0.03	β-ms
	小环藻	0.22	β-α-ms
	小桥弯藻	0.11	α-ms
	尖尾蓝隐藻	0.02	β-α-ms

注:α-ms为富营养型;β-α-ms为中-富营养型;β-ms为中营养型。

Note: α-ms indicates severe eutrophication; β-α-ms indicates moderate-severe eutrophication; β-ms indicates mesotrophic.

2.3 浮游植物群落结构的时空变化特征

2.3.1 聚类分析 对2016年5月和10月8个采样点的浮游植物群落结构进行聚类分析。

结果表明，5 月，在 35.85%的 Bray-Curtis 相似性水平上可聚为 3 组。样点 S8 单独聚为一组，组 2 包括 S3 和 S5 采样点，其余采样点聚为一组（图 5－a）。One-way ANOSIM 检验显示，这 3 组间的群聚结构差异显著（全局 $R=1$，$P=0.125$，迭代次数 28 次）。10 月，在 39.99%的 Bray-Curtis 相似性水平上可聚为 2 组，样点 S2 单独聚为一组，组 2 包括其它采样点（图 5－b）。One-way ANOSIM 检验显示，这 2 组间的群聚结构在统计学上差异显著（全局 $R=1$，$P=0.125$，迭代次数 28 次）。

2.3.2　SIMPER 分析　SIMPER 分析结果显示，5 月，引起 3 个聚类组浮游植物群落结构差异的主要种类共有 22 种，这些种类在不同采样点间具有明显的密度梯度，其密度差异对不同组别之间浮游植物平均密度差异的累积贡献率分别为 91.18%（组 1－组 2）、83.70%（组 2－组 3）和 84.68%（组 1－组 3）（表 3）；10 月，引起 2 个聚类组浮游植物群落结构差异的主要种类共有 21 种，这些种类在不同采样点间具有明显的密度梯度，其密度差异累积贡献了组 1 和组 2 浮游植物平均密度差异的 80.07%（表 4）。

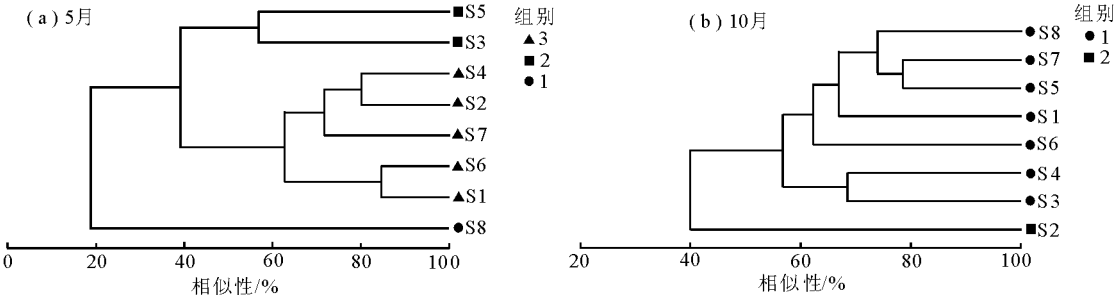


图 5　2016 年 5 月和 10 月神农溪各采样点浮游植物群落结构聚类

Fig.5　Cluster analysis of phytoplankton community structures in the Shennong Stream in May and October 2016, by sampling site

表 3　引起 2016 年 5 月浮游植物聚类差异的主要种类、平均差异度及其贡献率

Tab.3　Major species causing differences in phytoplankton community structure among different cluster groups in May 2016, and their average dissimilarities and contribution rates

种类	组 1 vs 组 2		组 2 vs 组 3		组 1 vs 组 3	
	平均差异度/%	贡献率/%	平均差异度/%	贡献率/%	平均差异度/%	贡献率/%
水华鱼腥藻	22.83	35.30	3.47	10.93	4.80	16.86
空球藻	10.84	16.75	1.55	6.90	2.71	9.70
束丝藻	7.53	11.64	1.20	7.14	0.71	4.84
小球藻	3.94	6.09	2.44	6.29	3.28	6.67
粘球藻	2.34	3.61	1.85	5.79	1.66	5.35
细小平裂藻	2.25	3.48	1.48	4.45	1.54	4.34
蓝纤维藻	2.05	3.16	1.32	1.43	2.54	1.97
衣藻	1.81	2.80	2.24	3.85	3.25	3.53
针晶蓝纤维藻	1.49	2.31	1.03	2.63	0.72	1.97
实球藻	1.06	1.63				
四鞭藻	0.84	1.30	1.17	3.95	1.11	3.65
微囊藻	0.82	1.27	1.99	4.20	2.24	3.99
尖尾蓝隐藻			1.49	5.91	1.45	5.32
球衣藻			1.43	2.97	1.46	2.77
小环藻			3.31	5.49	5.26	5.07
集球藻			2.17	2.44	2.71	2.26
梅尼小环藻			0.95	2.11	0.90	1.86
颗粒直连藻			1.11	1.16	0.94	1.04
小席藻			0.90	1.13		
四尾栅藻			1.06	1.04		
土生席藻			1.84	1.03	2.77	1.05

表4 引起2016年10月浮游植物聚类差异的主要种类、平均差异度及其贡献率

Tab.4 Major species causing differences in phytoplankton community structures among different cluster groups in October 2016, and their average dissimilarities and contribution rates

种类	类群A丰度/10^5个·L^{-1}	类群B丰度/10^5个·L^{-1}	平均差异度/%	贡献率/%	累计贡献率/%
蓝纤维藻	2.97	0	12.06	20.10	20.10
小环藻	2.15	0.18	7.38	12.29	32.38
小桥弯藻	1.84	1.27	3.81	6.34	38.73
水华鱼腥藻	1.29	0.77	3.13	5.21	43.94
链丝藻	0.99	0.22	3.08	5.14	49.08
微囊藻	1.87	1.32	2.73	4.54	53.62
尖尾蓝隐藻	0.71	0.10	2.36	3.93	57.55
空球藻	0.31	0	1.24	2.06	63.11
项圈藻	0.31	0	1.21	2.01	65.12
束丝藻	0.24	0.18	1.09	1.81	66.93
土生席藻	0.26	0	1.02	1.70	68.63
衣藻	0.31	0.10	0.92	1.54	70.17
具星小环藻	0.19	0.18	0.88	1.47	71.64
囊裸藻	0.31	0.10	0.87	1.44	73.08
小颤藻	0.38	0.18	0.86	1.43	74.51
啮蚀隐藻	0.20	0	0.80	1.33	75.85
针晶蓝纤维藻	0.25	0.10	0.70	1.17	77.02
集球藻	0.17	0.10	0.61	1.02	78.04
颗粒直链藻最窄变种	0.16	0	0.61	1.02	79.05
球衣藻	0.18	0.10	0.61	1.01	80.07

2.4 浮游植物群落结构与环境因子的关系

2.4.1 线性模型分析 基于距离的线性模型方法(DistlLM)分析结果显示,5月,仅有COD_{Mn}与不同站点浮游植物群落结构具有显著的相关性($P<0.05$);预测模型选择结果表明,除COD_{Mn}以外,其他5个环境参数加入模型时的adjusted R^2最大,为0.777(表5)。10月,仅有Turb与不同站点浮游植物群落结构具有显著的相关性($P<0.05$);预测模型的选择结果表明,除Turb外,其他5个环境参数加入模型时的adjusted R^2最大,为0.758(表6)。

2.4.2 典型对应分析 基于DistlLM选择的重要环境参数以及SIMPER选择的主要种类,典型对应分析(CCA)结果如图6所示。在1型标尺三序图内,样方点垂直投影到定量解释变量的箭头或延长线上,投影点位置接近该样方内该解释变量数值的位置;而在2型标尺三序图中,将物种的点直投影到定量解释变量的箭头或延长线上,投影点位置表示物种在该环境变量梯度上的最适区域。5月,采样点S2、S4、S7和S8处在高Flow的区域,S1、S5和S6处于较高pH的区域,S3和S7处于NH_4^+-N、Chl-a、BOD_5和COD_{Mn}较高的区域(1型标尺);四鞭藻(*Carteria* sp.)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、颗粒直连藻(*Melosira granulata*)等与Flow关系密切,小席藻(*Phormidium tenus*)、空球藻、水华鱼腥藻与NH_4^+-N、Chl-a、BOD_5和COD_{Mn}关系密切,而针晶蓝纤维藻(*Dactylococcopsis rhaphidioides*)、细小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、束丝藻等则与pH关系密切(2型标尺)。

表5 2016年5月神农溪浮游植物群落结构与环境参数的关系

Tab.5 Relationship between phytoplankton community and environmental parameters in Shennong Stream in May 2016

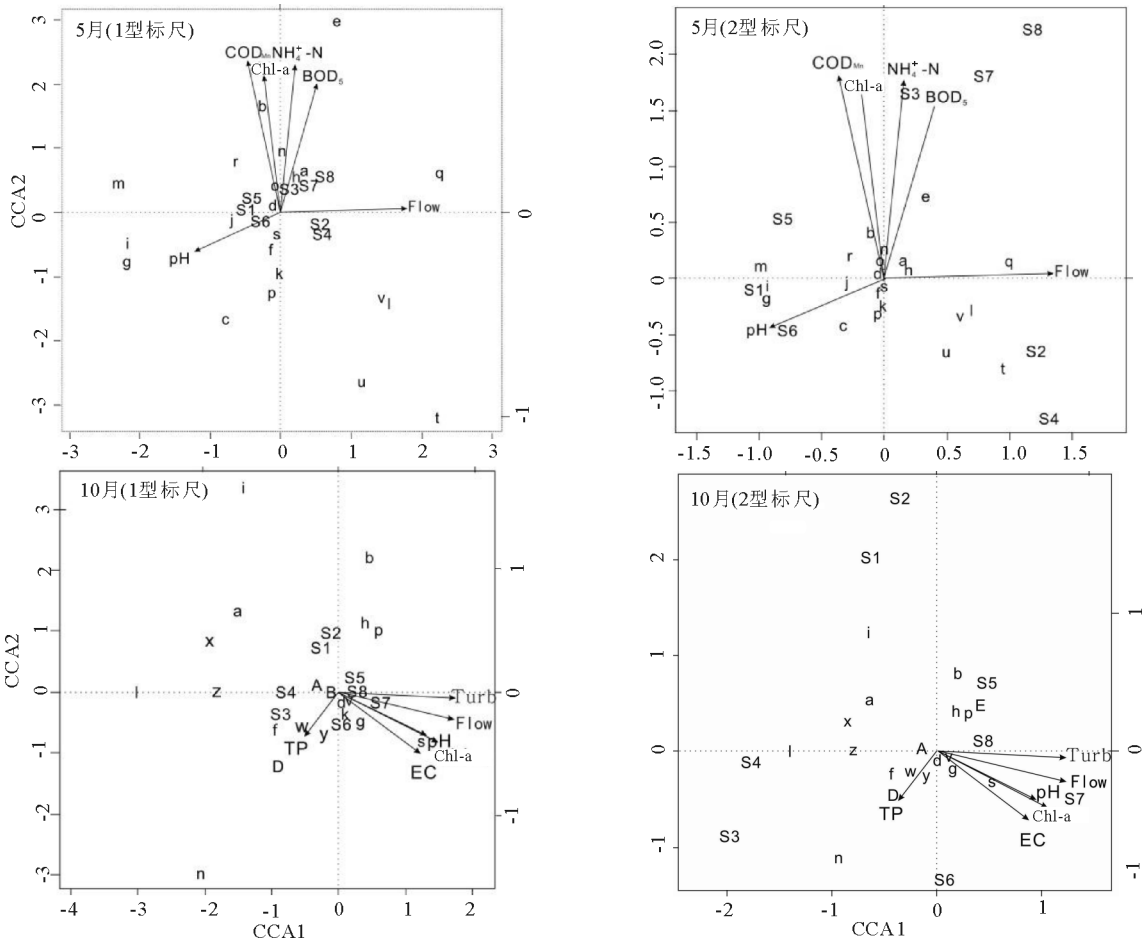
环境参数	R^2	F	P	解释变异/%
Chl-a	0.145	2.187	0.116	26.72
COD_{Mn}	0.489	5.032	0.004	36.76
pH	0.608	2.525	0.069	14.13
BOD_5	0.614	1.058	0.397	0.06
Flow	0.630	1.135	0.413	0.06
NH_4^+-N	0.777	2.307	0.297	0.07

表6 2016年10月神农溪浮游植物群落结构与环境参数的关系

Tab.6 Relationship between phytoplankton community and environmental parameters in Shennong Stream in October 2016

环境参数	R^2	F	P	解释变异/%
Turb	0.335	4.522	0.002	42.98
TP	0.457	2.348	0.115	18.22
Chl-a	0.497	1.398	0.241	10.05
EC	0.538	1.353	0.315	0.09
pH	0.636	1.811	0.265	0.09
Flow	0.758	2.006	0.379	0.07

10 月，采样点 S3 和 S4 处在高 TP 区域，S6－S8 处于较高的 Flow、Chl-a、EC、Turb 和 pH 的区域，S1 和 S2 则处于 6 个环境变量较低的区域（1 型标尺）；空球藻、啮蚀隐藻（*Cryptomons erosa*）、颗粒直连藻等与 TP 关系密切，而小环藻、蓝纤维藻、颗粒直链藻最窄变种、衣藻与 Turb、Chl-a、pH、EC 和 Flow 关系密切（2 型标尺）。CCA 建立模型的解释惯量分别为 35.19%（5 月）和 45.91%（10 月），其中前 3 轴能够解释该惯量的比例分别为 86.62%（5 月）和 86.68%（10 月）。



（a：浮游鱼腥藻；b：水华鱼腥藻；c：细小平裂藻；d：土生席藻；e：小席藻；f：蓝纤维藻；g：针晶蓝纤维藻；h：微囊藻；i：束丝藻；j：粘球藻；k：衣藻；l：球衣藻；m：实球藻；n：空球藻；o：小球藻；p：集球藻；q：四鞭藻；r：四尾栅藻；s：小环藻；t：梅尼小环藻；u：颗粒直链藻；v：尖尾蓝隐藻；w：项圈藻；x：具星小环藻；y：颗粒直链藻最窄变种；z：小颤藻；A：囊裸藻；B：链丝藻；D：啮蚀隐藻；E：小桥弯藻）

图 6　2016 年 5 月和 10 月神农溪 8 个采样点主要浮游植物种类与重要环境参数的主成分分析

（a：*Anabaena planctonica*；b：*Anabaena flos-aquae*；c：*Merismopedia tenuissima*；d：*Phormidium mucicola*；e：*Phormidium tenus*；f：*Dactyloccocopsis* sp.；g：*Dactyloccocopsis rhaphidioides*；h：*Microcystis* sp.；i：*Aphanizomenon flosaquae*；j：*Gloeocapsa*；k：*Chlamydomonas* sp.；l：*Chlamydomonas globosa*；m：*Pandorina morum*；n：*Eudorina elegans*；o：*Chlorella vulgaris*；p：*Palmellococcus* sp.；q：*Carteria* sp.；r：*Scenedesmus quadricauda*；s：*Cyclotella* sp.；t：*Cyclotella meneghiniana*；u：*Melosira granulata*；v：*Chroomonas acuta*；w：*Anabaena* sp.；x：*Cyclotella stelligera*；y：*Melosira granulata* var.*angusrissima* M；z：*Oscillatoria tenuis*；A：*Trachelomonas* sp.；B：*Hormidium* sp.；D：*Cryptomonas erosa*；E：*Cymbella gracilis*）

Fig.6　Principal component analysis between the main phytoplankton species and important environmental parameters in Shennong Stream in May and October of 2016

3　讨论

3.1　神农溪环境参数的时间变化特征

由于气候、光照等的季节性变动，一些河流和湖泊的水环境特征表现出明显的季节性变化特征（Garg et al，2010）。由于干流水库的蓄水倒灌，支流的倒灌淹没区域易受干流水文和水环境变动的明显影响（黄祺等，2016）。神农溪作为三峡水库的重要支流之一，有研究表明，即使在汛末蓄水的 9－11 月，N、P 等营养盐在各月也表现出一定的时间变动

特征，其中 TN 和 TP 均在神农溪库湾中呈现先上升、后下降的趋势(李欣等，2017)。本文的结果也表明，三峡水库高低水位时(5月和10月)的水环境参数存在一定程度的差异，许多水环境指标在三峡水库低水位运行时的数值高于其高水位运行时的数值(表1)。尽管如此，两次调查间仅有3个环境指标(TP、NH_4^+-N 和 BOD_5)的平均值在统计学上存在显著性差异，表明在三峡水库正常蓄水运行的2016年，多数环境指标在5月和10月之间无明显差异。黄祺等(2016)研究也发现，夏季和秋季之间的水质特征差异明显小于夏季和冬季之间的差异。

3.2 神农溪浮游植物的群落结构特征

研究表明，河流成库后，原以硅藻门为主的浮游植物类群会逐渐演变为以适应湖泊生境的绿藻和硅藻为主的类群(申恒伦等，2012；朱孔贤等，2012；徐慧等，2017)。本次研究显示，神农溪2016年5月和10月的浮游植物类群以绿藻门和硅藻门种类为主(图2)，表明神农溪从原来的河流相演变为湖泊相时，其蓄水倒灌区域内浮游植物的优势类群也由河流型转变为湖泊型，显示神农溪绿藻种类数多于硅藻种类数。这一结果也与在三峡水库许多支流获得的结果一致(申恒伦等，2012；潘晓洁等，2016)，表明三峡水库许多支流的浮游植物种类组成在门的分类水平上很可能存在类似的数量特征。

尽管神农溪的蓝藻种类数明显少于绿藻种类数，但5月和10月两次采样期间的蓝藻密度均明显高于绿藻密度(图3)；同时，不同藻类的密度在两次采样间呈现明显的差异，5月以蓝藻和绿藻为主，而10月以蓝藻和硅藻为主，表明神农溪藻类密度的季节变动化征较为明显；此外，浮游植物密度的沿程分布也存在较大的差异，5月的浮游植物密度在各个采样站点间波动，而10月浮游植物的密度从河口区到上游回水变动区呈逐渐上升趋势(图4)，这表明浮游植物密度的纵向梯度分布特征在不同水位间的明显差异。尽管两次采样浮游植物密度存在较大差异，但其优势种均以富营养型(α-ms)水体指示藻类(浮游鱼腥藻、蓝纤维藻、小桥弯藻)为主(表2)，表明神农溪水体已呈现富营养化发展态势。

同一采样期间神农溪浮游植物群落结构在不同站点之间存在明显差异，但并不显示明显的地理梯度分布特征(图5)。部分相邻采样点之间的浮游植物群落结构差异明显，表明影响浮游植物空间分布的环境要素也未能显示纵向梯度分布特征。图6也显示了相同的结果；同时，不同采样期间浮游植物群落结构也发生较大改变，如决定不同聚类组差异的主要浮游植物种类从5月的浮游鱼腥藻、空球藻、束丝藻等变为10月的蓝纤维藻、小环藻和小桥弯藻(表5，表6)。

3.3 神农溪浮游植物群落结构与环境参数的关系

有研究表明，浮游植物群落结构变化与其所处的生境特征紧密相关(Vidussi et al，2015)。由于不同区域生境特征在不同时空尺度上的差异，影响浮游植物群落结构变化的重要或关键生境因子组合在不同区域之间或不同时间之间通常会显示不同程度的差异(申恒伦等，2012；冯佳等，2016；熊莲等，2016)。本次研究中，DistlLM 分析结果显示，5月，影响浮游植物群落结构空间分布差异的环境因子主要有 Chl-a、COD_{Mn}、pH、BOD_5、Flow 和 NH_4^+-N，其中 COD_{Mn} 为最重要的环境因子；10月，影响浮游植物群落结构空间分布差异的环境因子为 Turb、TP、Chl-a、EC、pH 和 Flow，其中 Turb 为最重要的环境因子(表5，表6)，不仅表明影响神农溪浮游植物空间分布特征的环境因子具有明显的时间差异性，也表明环境污染指标是影响不同采样期间神农溪浮游植物空间分布特征的最关键的环境要素。COD_{Mn} 是反映水体中有机和无机可氧化物质污染的常用指标，而 Turb 与水体中悬浮物的含量、大小、形状及折射系数有关，其均为反映水体污染程度的指标(路娜等，2010)。上述结果与表2优势种的结果相对应。很显然，神农溪水体呈现富营养化现象是与水体中有机、无机可氧化物质或悬浮物有明显联系的。因此，如何有效地控制水体的有机物、还原性无机物或悬浮物的浓度是控制神农溪水体富营养化的关键。神农溪作为一条典型的峡谷溪流，其两岸山峰紧束、绝壁峭耸，5月汛期时的山洪以及10月的蓄水倒灌均很可能导致水体污染物或悬浮物含量的升高。因此，控制沿岸带生产、生活垃圾的输入以及农业化利用很可能是提升神农溪水质的首要问题。

CCA 结果显示了2016年5月和10月神农溪浮游植物主要种类、重要环境因子沿不同站点的梯度分布特征及其相互关系(图6)，表明浮游植物主要种类的空间差异性与所处采样点环境因子的浓度梯度差异以及藻类自身生物学特征明显相关(Suikkanen et al，2007)。如适应流水生境的四鞭藻更易栖息在水流量较大的区域，而适应静缓流、较高营养盐条件的小席藻、空球藻、水华鱼腥藻等多分布在 TP 或 NH_4^+-N 较高的区域(Salmaso & Padisák，2007)；同时，不同采样期间，环境因子梯度差异影响

神农溪浮游植物结构差异的模式特征也存在较大的不同。如在 5 月，pH 值与轴 1 和轴 2 呈负相关，影响着一些种类的空间分布；而在 10 月，则为 TP 与轴 1 和轴 2 呈负相关，影响着另外一些种类的空间分布。综上，在采取措施控制水体浮游植物丰度时，应考虑措施的地理适用性和季节可行性。

参考文献

陈小娟，潘晓洁，邹曦，等，2012. 三峡水库小江回水区水环境时空变化特征研究[J]. 水生态学杂志，33(6)：1－6.

冯佳，郭宇宁，王飞，等，2016. 太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析[J]. 环境科学，37(4)：1353－1361.

国家环境保护总局，2002. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京：中国环境科学出版社.

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.

黄祺，何丙辉，赵秀兰，等，2016. 三峡库区汉丰湖水质的时空变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版)，38(3)：136－142.

况琪军，马沛明，胡征宇，等，2005. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报，5(2)：87－91.

李欣，宋林旭，纪道斌，等，2017. 三峡水库蓄水过程中神农溪库湾营养盐的动态分布[J]. 中国农村水利水电，(3)：103－111.

路娜，尹洪斌，邓建才，等，2010. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学，22(1)：70－78.

潘晓洁，刘诚，朱梦灵，等，2016. 三峡水库泄、蓄水过程对小江浮游植物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志，37(3)：42－48.

申恒伦，蔡庆华，邵美玲，等，2012. 三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学，24(2)：197－205.

熊莲，刘冬燕，王俊莉，等，2016. 安徽太平湖浮游植物群落结构[J]. 湖泊科学，28(5)：1066－1077.

徐慧，龙良红，纪道斌，等，2017. 三峡水库神农溪 2014 年春季浮游藻类演替成因分析[J]. 微生物学报，57(3)：60－72.

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.

朱孔贤，毕永红，胡建林，等，2012. 三峡水库神农溪 2008 年夏季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华暴发特性[J]. 湖泊科学，24(2)：220－226.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，1992. 水质采样样品的保存和管理技术规定(GB12999－1991)[S]. 北京：中国标准出版社.

中华人民共和国水利部，2011. 水环境监测规范(SL219－2013)[S]. 北京：中国水利水电出版社.

Anderson M J, Gorley R N, Clarke K R, 2008. PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods[S]. Plymouth, UK: PRIMER-E.

Borcard D, Gillet F, Legendre P, 2011. Numerical ecology with R[M]. Springer New York.

Danilov R, Ekelund N G A, 1999. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden[J]. Science of the Total Environment, 234(1/3): 15－23.

Garg R K, Rao R J, Uchchariya D, et al, 2010. Seasonal variations in water quality and major threats to Ramsagar reservoir, India[J]. African Journal of Environmental Science & Technology, 4(2): 61－76.

Gharib S M, El-Sherif Z M, Abdel-Halim A M, et al, 2011. Phytoplankton and environmental variables as a water quality indicator for the beaches at Matrouh, southeastern Mediterranean Sea, Egypt: an assessment[J]. Oceanologia, 53(3): 819－836.

Harig A L, Bain M B, 1998. Defining and restoring biological integrity in Wilderness Lakes[J]. Ecological Applications, 8(1): 71－87.

Li J P, Dong S K, Liu S L, et al, 2013. Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River[J]. Ecological Engineering, 60(6): 316－324.

Rychtecky P, Znachor P, 2011. Spatial heterogeneity and seasonal succession of phytoplankton along the longitudinal gradient in a eutrophic reservoir[J]. Hydrobiologia, 663(1): 175－186.

Salmaso N, Padisák J, 2007. Morpho-Functional Groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany)[J]. Hydrobiologia, 578(1): 97－112.

Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M, 2007. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 71(3/4): 580－592.

Vidussi F, Roy S, Lovejoy C, et al, 2015. Spatial and temporal variability of the phytoplankton community structure in the North Water Polynya, investigated using pigment biomarkers[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 61(11): 2038－2052.

(责任编辑　万月华)

Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Shennong Stream of Three Gorges Reservoir

HU Lian, ZOU Xi, ZHENG Zhi-wei, ZHANG Zhi-yong,
YANG Qing, WAN Cheng-yan, PAN Xiao-jie

(Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources & Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: Shennong Stream is an important water source for the project "Diverting the Yangtze River to Hanjiang River", and it is crucial to maintain its good water quality. The phytoplankton community is an important indicator of water quality in Shennong Stream and it is affected by seasonal water storage and impoundment in Three Gorges Reservoir. In this study, the spatial and temporal variation of phytoplankton community characteristics in Shennong Stream and their relationships with environmental factors were studied using quantitative ecological methods. The study was based on a field survey of the upper and lower reaches of Shennong Stream in May (low water level operating period) and October (high water level operating period) 2016. A total of 97 phytoplankton species from 62 genera and 7 phyla were observed during the investigation, with absolute dominance by Chlorophyta, Bacillariophyta and Cyanophyta. The number of phytoplankton species in May were slightly lower than in October, and the species composition at each sampling site was different. Phytoplankton density fluctuated among sampling sites in May, and presented a longitudinal gradient from estuary to upstream backwater in October. The dominant species during the two sampling periods were indicators of eutrophication. The phytoplankton community structure displayed evident spatial differences, but no longitudinal gradient. The factor most associated with the spatial distribution of phytoplankton was the permanganate index (COD_{Mn}) in May and turbidity (Turb) in October. Spatial differences in the primary phytoplankton species were closely correlated with nutrient concentrations among the different sampling sites, and the biological characteristics of different algae species. Our results provide basic information for the protection and management of water quality in Shennong Stream.

Key words: Shennong Stream; phytoplankton; environmental factors; spatial and temporal variation; canonical correlation analysis (CCA)