

三峡水库小江回水区水华爆发期原生动物群落的初步研究

陈小娟¹, 潘晓洁¹, 邹 曦¹, 王进国², 胡 莲¹, 张志永¹, 郑志伟¹

(1. 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, 武汉 430079;

2. 重庆市云阳县水产技术推广站, 云阳 404500)

摘要:2009年夏季三峡水库支流小江回水区局部水域爆发水华,在水华爆发期的5月29日和6月18日开展了水华原生动物采样调查,分析了群落变动特征及其与水环境、水华藻类的关系。结果表明,水华均以蓝藻为主,其中5月的优势种类为水华鱼腥藻(*Anabaena aquae*),6月的优势种类为微囊藻(*Microcystis*),其次是浮游鱼腥藻(*Anabaena planctonica*)和小环藻(*Cyclotella*);5月和6月的总磷、磷酸盐、叶绿素a含量、溶解氧、水温与pH等差异显著($P < 0.05$);5月鉴定出2种肉足虫,6月为10种肉足虫和5种纤毛虫;原生动物平均密度分别为200个/L和970个/L。冗余分析结果显示,与原生动物密度显著相关的水环境因子为总磷(TP)和溶解氧(DO),浮游植物密度因子为浮游鱼腥藻和微囊藻。

关键词:小江回水区;水华;原生动物群落

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2013)06-0001-06

三峡水库蓄水后,支流回水区水体富营养化及其局部水域的水华问题受到广泛关注(曹承进等,2009;陈小娟等2012a)。水华发生是初级生产者的藻类过度生长导致的一种生态灾害,反映了水体营养物质与能量无法通过食物链进行良性循环。原生动物群落是水生态系统中一个重要的结构与功能单元,承担着水体食物网尤其是微型食物网中的许多重要环节,对于水体营养物质循环与能量流动具有重要作用。在原生动物功能类群中,食藻者是原生动物的6个功能类群之一(Pratt & Cairns, 1985);涉及种类众多,如鞭毛虫中的棕鞭毛虫、变形虫中的纳氏虫和核虫以及纤毛虫中的肾形虫、篮环虫等(沈韞芬等,1990;刘新尧等,2005)。

目前,有关三峡水库原生动物群落特征研究主要关注年际变化、周年内季度或月度变化,发现水华爆发期的原生动物群落结构趋于简化(陈小娟等,2012b)。然而,在生态系统受到较大干扰且极不稳定的水华爆发期内,涉及较短周期内原生动物群落变化及其与水华藻类关系的研究工作尚鲜有报道。小江是三峡库区重要的一级支流,也是水华问题较为严重的支流之一。本文选择小江回水区为研究区

域,围绕人们所关注的三峡水库支流水华问题,研究原生动物群落在水华爆发期的变化特征,并探讨其与水华藻类和水环境的关系,以期探寻水华发生及其控制途径提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2009年5月底,小江回水区局部水域发现有水华爆发;6月中旬局部水域仍有不同程度的水华发生。项目组在水华发生的不同时间分别进行了浮游生物定性、定量样品采集和水体理化监测,其中5月29日采样站点为河口、双江、黄石、高阳、渠马(编号分别为1、2、3、4、5),6月17-18日采样站点为双江(左、中、右3个样点,编号为6、7、8)、黄石(左、右2个样点,编号为9、10)、高阳(左、中、右3个样点,编号为11、12、13)、渠马(编号14)、渠口(编号15)。具体位置如图1所示。

水样采集按《水质采样技术指导》(GB12998-91)的规定进行。原生动物采样、固定保存、样品处理及检测等方法参照《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉和黄祥飞,1991)。

监测指标包括总氮、总磷、铵氮、可溶磷、pH、水温、透明度、叶绿素a、溶解氧和化学耗氧量等,各指标的测定方法参照《水和废水监测分析方法》进行(魏复盛,2002)。

1.2 物种鉴定

参照原生动物和浮游植物分类文献(沈韞芬

收稿日期:2013-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51009099;51009100);“十二五”国家科技支撑项目(2012BAC06B04)。

作者简介:陈小娟,1981年生,女,副研究员,博士,主要从事浮游动物生态学与生态规划研究。E-mail:chenxiaojuan@mail.ihe.ac.cn

等,1990;胡鸿钧和魏印心,2006),在 100 ~ 1000 倍显微镜下对原生动物和浮游植物种类进行鉴定,大多物种鉴定到种或属,少数物种鉴定到更高的分类阶元。

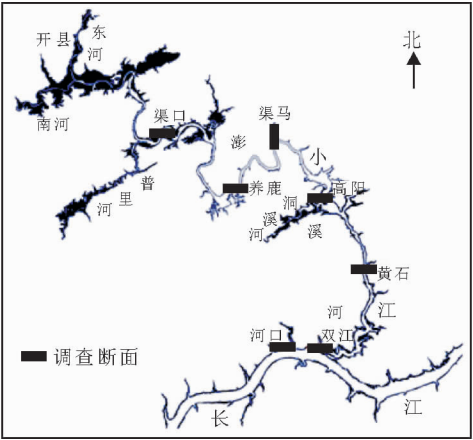


图 1 小江水样采集站点的分布示意

Fig.1 Sampling stations in Xiaojiang

1.3 数据分析

原生动物多样性分析采用 Margalef (1958) 指数。理化数据进行对数转换以使数据呈正态分布,不同时间理化参数差异的判别用 SPSS17.0 软件多因素方差分析中的 Turkey 显著差异法进行分析,并取 $P < 0.05$ 作为差异显著性判定标准。运用 CANOCO 4.5 软件中冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 来探讨原生动物群落各种类密度与水环境因子、藻类密度之间的关系。为避免植物性鞭毛虫与藻类重复统计分析,本文原生动物数据仅包括肉足虫和纤毛虫。

2 结果与分析

2.1 水体理化参数

小江水华爆发期不同时间的理化参数分析结果见表 1。多因素方差分析显示,总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$)、叶绿素 a 含量 (Chl. a)、溶解氧 (DO)、水温 (WT) 和 pH 等参数在不同时间存在显著差异 ($P < 0.05$),而其它理化参数的差异性不显著。

2.2 藻类组成与密度

水华爆发期小江回水区藻类组成及其平均密度见图 2; 其中,5 月的藻类总密度达到 2.6×10^7 个/L,6 月升至 4.5×10^7 个/L;均以蓝藻为主,分别达到藻类总密度的 84% 和 85%。5 月蓝藻中优势种类为水华鱼腥藻,其密度在黄石、高阳站点最多 (4.13×10^7 个/L、 4.47×10^7 个/L);6 月蓝藻中优势种类为微囊藻 (*Microcystis*),其次是浮游鱼腥藻

(*Anabaena planctonica*),微囊藻以双江中站点、黄石断面最多 ($1.5 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^8$ 个/L),浮游鱼腥藻以黄石样点最多 ($2.7 \times 10^7 \sim 3.9 \times 10^7$ 个/L),硅藻中的小环藻 (*Cyclotella*) 在双江左、右站点的水华藻类为 $2.6 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$ 个/L。

表 1 小江水华爆发期的理化参数

Tab.1 Physical and chemical parameters during algae bloom in Xiaojiang

理化参数	5 月	6 月
	均值 $\pm$ 标准差	均值 $\pm$ 标准差
总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.38 ± 0.18	1.19 ± 0.23
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.01
亚硝酸氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
氨氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.20 ± 0.06	0.26 ± 0.19
硝酸氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.96 ± 0.15	0.76 ± 0.21
磷酸盐/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.00
化学耗氧量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	12.80 ± 5.63	13.20 ± 3.79
叶绿素/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	22.93 ± 18.10	37.12 ± 21.12
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	8.39 ± 1.28	12.59 ± 3.67
透明度/cm	135.20 ± 59.96	76.00 ± 18.07
水温/ $^{\circ}\text{C}$	20.98 ± 1.39	28.12 ± 0.66
电导率	0.55 ± 0.03	0.62 ± 0.11
pH	8.06 ± 0.11	8.65 ± 0.31

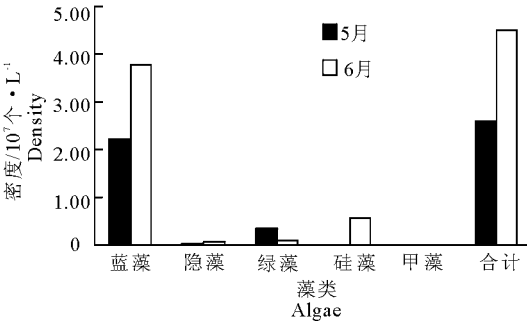


图 2 小江回水区 5 月和 6 月的藻类组成与密度

Fig.2 Algae densities in May and June of Xiaojiang backwater region

2.3 原生动物群落特征

2.3.1 种类组成 水华爆发期的 5 月底,各断面原生动物种类较少 (0 ~ 2 种),共鉴定出叉口砂壳虫 (*Diffflugia gramen*) 和球形砂壳虫 (*Diffflugia globulosa*) 2 种肉足虫,未发现纤毛虫。6 月中旬,各断面有壳肉足虫、纤毛虫种类有所增加,原生动物增加至 1 ~ 8 种,共鉴定出弯凸表壳虫 (*Arcella gibbosa*)、大口表壳虫 (*Arcella megastoma*)、普通表壳虫 (*Arcella vulgaris*)、馍状圆壳虫 (*Cyclopyxis deflandrei*)、褐砂壳虫 (*Diffflugia avellana*)、烦恼砂壳虫 (*Diffflugia difficilis*)、球形砂壳虫 (*D. globulosa*)、砂壳虫 (*Diffflugia* sp.)、管形似铃壳虫 (*Tintinnopsis tutuformis*) 和王氏似铃壳虫 (*Tintinnopsis wangi*) 10 种肉足虫以及巨长颈虫 (*Dileptus cyganus*)、长颈虫 (*Dileptus* sp.)、褶累

枝虫(*Epistylis plicatilis*)、累枝虫(*Epistylis* sp.)和钟虫(*Vorticella* sp.) 5 种纤毛虫。

2.3.2 原生动物现存量及其与水环境和水华藻类的关系 水华爆发期不同断面原生动物总密度见图 3,不同物种的密度见表 2。5 月各断面原生动物密度为 0~500 个/L,平均为 200 个/L;6 月各种类密

度显著上升,使得其原生动物密度显著高于 5 月,其中 5 月以侠盗虫密度最高,6 月钟形钟虫密度最高;6 月各断面密度为 0~3 400 个/L,平均为 970 个/L。对于水华爆发期原生动物生物量,5 月以河口站点最多,高阳、渠马断面未鉴定出原生动物;6 月则是黄石左岸站点最高,渠马和渠口断面最低。

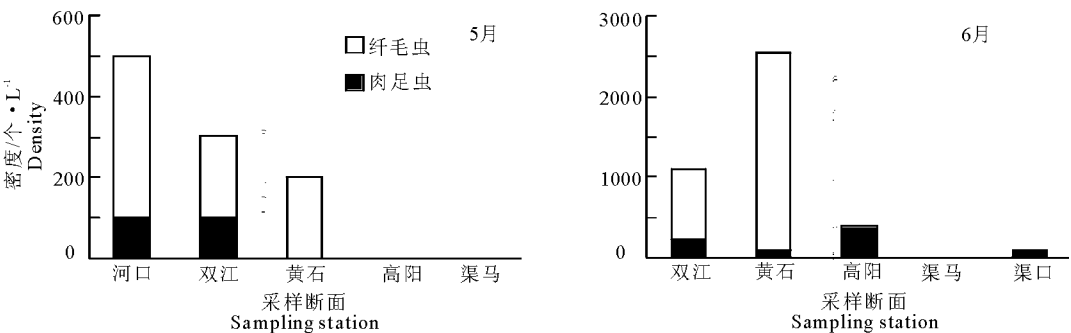


图 3 水华爆发期 5 月与 6 月原生动物密度

Fig.3 Protozoan densities in May and June

表 2 水华爆发期 5 月与 6 月原生动物种类及其丰度

Tab.2 Protozoan species and their densities in May and June

原生动物种类	丰度/个 · L ⁻¹	
	5 月	6 月
烦恼砂壳虫 <i>Diffugia difficilis</i>	0	10
球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>	0	10
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	40	190
纤毛虫 Ciliate	0	10
双环带毛虫 <i>Didinium nasutum</i>	0	10
巨长颈虫 <i>Dileptus cyganus</i>	0	20
长颈虫 <i>Dileptus</i> sp.	0	10
累枝虫 <i>Epistylis</i> sp.	0	130
侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.	100	240
钟形钟虫 <i>Vorticella campanula</i>	40	340
钟虫 <i>Vorticella</i> sp.	20	0
合 计	200	970

解释量为 29%,并代表了 100% 的原生动物组成密

表 3 冗余分析结果

Tab.3 Results of redundancy analysis (RDA)

指标	原生动物密度 - 水环境关系		原生动物密度 - 藻类密度关系	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
TP	0.50	0.56		
DO	0.66	-0.46		
浮游鱼腥藻密度			-0.03	0.74
微囊藻密度			-0.63	0.49
特征值	0.23	0.06	0.17	0.12
物种 - 环境相关性	0.91	0.67	0.84	0.74
累积方差百分比	-	-	-	-
物种数据	23.2	28.7	16.7	29.0
物种 - 环境关系	80.9	100	57.6	100

2.3.3 冗余分析 原生动物密度与水环境的 RDA 分析结果表明,RDA 排序轴前两轴对原生动物种类密度的解释量为 28.7%,并代表了 100% 的原生动物组成密度与环境的关系;原生动物种类组成密度与总磷(TP)和溶解氧(DO)显著相关,两种因子对 RDA 各轴的贡献存在显著差异,其中 TP 与第二轴呈显著正相关($r=0.66$),DO 与第一轴呈显著正相关($r=0.66$)(表 3)。RDA 排序显示,侠盗虫、钟虫与 TP 呈显著正相关,球形砂壳虫、烦恼砂壳虫则与 TP 显著负相关;累枝虫、钟形钟虫、王氏似铃壳虫、双环带毛虫、巨长颈虫等物种的密度与 DO 呈显著正相关(图 4)。

原生动物密度与浮游植物密度的 RDA 分析结果表明,RDA 排序轴前两轴对原生动物种类密度的

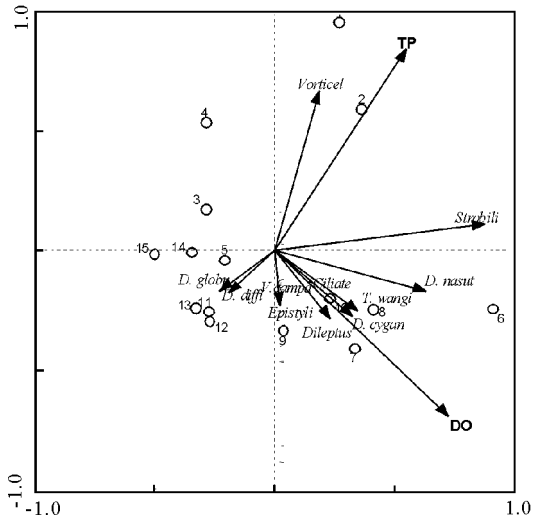


图 4 原生动物密度与水环境因子的 RDA 排序

Fig.4 Relationships between protozoan abundances and environmental parameters by RDA

度与浮游植物密度的关系;原生动物种类组成密度与浮游鱼腥藻、微囊藻密度显著相关,两种因子对RDA各轴的贡献存在显著差异,其中浮游鱼腥藻与第二轴呈显著正相关($r=0.74$),微囊藻与第一轴呈显著负相关($r=-0.63$)(表3)。RDA排序显示,累枝虫、钟形钟虫、王氏似铃壳虫、球形砂壳虫、烦恼砂壳虫、巨长颈虫等物种密度与浮游鱼腥藻、微囊藻密度显著正相关;侠盗虫、双环栉毛虫、长颈虫、钟虫等物种密度与浮游鱼腥藻密度显著负相关(图5)。

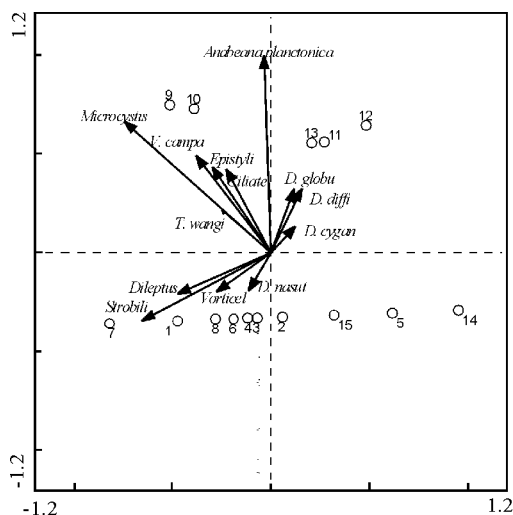


图5 原生动物密度与浮游植物密度的RDA排序

Fig.5 Relationships between protozoan abundances and phytoplankton densities by RDA

3 讨论

3.1 水华爆发期的水环境动态

调查结果表明,5月的TP、PO₄-P浓度显著大于6月,但其Chl. a含量、DO浓度和pH等显著小于6月。本研究水华种类主要为鱼腥藻、微囊藻等固氮型蓝藻,与2007年5月中下旬小江回水区的水华种类相同(李哲等,2009)。根据李哲等(2009;2010)的研究结果推测,本次研究中5月较高的磷酸盐水平使得固氮型蓝藻在小江回水区迅速生长并形成水华;由于小江回水区蓝藻生长对无机磷显著的吸收利用作用,随着6月水华爆发后藻类生物量的增加,水体总磷、磷酸盐浓度降低。郭劲松等(2011)研究发现,小江回水区藻类总生物量、细胞密度和Chl. a之间均呈极显著的正相关;因此,6月藻类细胞密度的显著增加直接导致了Chl. a含量升高。由于藻类光合作用所释放氧气能够提高水体溶解氧含量,因此6月藻类的增加可能导致了其DO浓度的升高,这与陈小娟等(2012)有关小江回水区夏季藻类生

物量与DO显著正相关的研究结果一致。藻类的光合作用可利用水中的氢还原CO₂合成有机物质,随着藻类的增加,水体CO₂减少,水体pH随即升高,表现出藻类生物量与pH的正相关性(陈小娟,2012a;王志红等,2004)。

3.2 水华爆发期原生动物群落动态

浮游动物群落是一个动态系统,受周围生物和环境因子的综合影响,系统中的生物体组成及其丰度会随着时间和空间的变化而变化,其时空分布特征对于理解生态系统功能至关重要(Romare et al, 2003;2005)。根据定量样品鉴定结果,除王氏似铃壳虫、侠盗虫、钟形钟虫、累枝虫外,其他物种均出现1次,且密度不高,这可能与这些物种的耐受性强有关。由于这几个物种密度的显著增加,6月的原生动物种类密度达到了5月的4.85倍;因此,6月的原生动物种类数也更为丰富。翟世涛等(2012)报道了2009年夏季(7月)小江回水区浮游动物特征,其中原生动物种类为辐射变形虫、瓶砂壳虫、矛状鳞壳虫,浮游动物密度为20.3~305.1个/L,且总体呈现自上游向下游密度依次增大的规律。与此结果相比,本次调查的2009年夏季水华期(6月)原生动物种类(共15种)、密度有所升高(0~3400个/L);也呈现下游断面(双江、黄石平均密度1680个/L)密度高于上游(高阳、渠马、渠口平均密度260个/L)的现象,这也与本研究下游浮游植物密度高于上游的结果一致。水体富营养化及由此造成的浮游植物大量繁殖会对浮游动物生长造成积极影响(Capriulo et al, 2002)。有壳肉足虫、纤毛虫多为食藻、食菌-碎屑等功能类群(沈韞芬等,1990)。藻类本身及其分解后的碎屑又可为这些种类提供更为丰富的食物,浮游植物使得水体溶氧增加等因素变化均可促进浮游动物的生长繁殖。

3.3 原生动物群落与水环境和浮游植物的关系

水华发生能够显著影响生态系统的结构和功能,浮游植物大量繁殖及其造成的理化扰动可对浮游动物造成许多生物学效应,同时浮游动物也对浮游植物生长发挥着调控作用(张利永等,2007;孙军和宋书群,2009)。从本次物种密度与水环境和浮游植物的关系结果来看,大部分物种密度与TP、DO呈正相关,且与浮游鱼腥藻和微囊藻密度显著相关。由此可见,水华藻类和水环境的改变等因素影响了原生动物群落组成及其密度,从而导致原生动物群落在短时间内的时空变动较大。大多数自由生活的原生动物都需要氧,氧气充足时能大量繁殖(田佳

玉, 2012)。浮游生物的组成和个体丰度往往与影响水体富营养化的总磷含量密切相关(Sousa et al, 2008; Yu et al, 2008)。大多数原生动物密度与TP显著相关,TP往往是水华发生的限制性因素,而浮游动物大多以浮游植物为食,因而间接影响了浮游动物群落的变化。本次研究中,主要水华藻类浮游鱼腥藻和微囊藻密度显著影响原生动物群落密度也说明了这一点;但影响原生动物生长和分布的生物因子还包括食物、竞争以及捕食者与被捕食者等,原生动物与浮游植物的关系也错综复杂。因此,小江回水区水华到底以何种机制影响原生动物的群落结构,进而影响微食物环的物质循环和能量流动,最终影响水生生态系统结构和功能,还有待更深入的研究。

参考文献

曹承进, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 2009. 三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究[J]. 环境科学, 30(12): 3471 – 3479.

陈小娟, 潘晓洁, 邹曦, 等. 2012a. 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.

陈小娟, 潘晓洁, 邹曦, 等. 2012b. 三峡水库小江回水区原生动物和轮虫群落结构特征及其与环境因子关系初步研究[J]. 水生态学杂志, 33(5): 31 – 35.

郭劲松, 陈园, 李哲, 等. 2011. 三峡小江回水区叶绿素a季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. 环境科学, 32(4): 976 – 981.

胡鸿钧, 魏印心. 2006. 中国淡水藻类[M]. 北京: 科学出版社.

李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 2009. 三峡小江回水区段2007年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 21(1): 36 – 44.

李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 2010. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学, 31(2): 301 – 309.

刘新尧, 石苗, 廖永红, 等. 2005. 食藻原生动物及其在治理蓝藻水华中的应用前景[J]. 水生生物学报, 29(4): 456 – 461.

沈韫芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.

孙军, 宋书群. 2009. 东海春季水华期浮游植物生长与微型浮游动物摄食[J]. 生态学报, 29(12): 6429 – 6438.

田佳玉. 2012. 原生动物生长和分布的影响因子[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 28(4): 61 – 63, 70.

王志红, 崔福义, 安全, 等. 2004. pH在藻类“水华”现象中的影响探讨[J]. 环境污染与防治, (2): 1 – 7.

魏复盛. 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.

翟世涛, 杨健, 张磊, 等. 2012. 三峡库区支流域澎溪河浮游动物的季节性变化与水质评价[J]. 中国农学通报, 28(14): 307 – 312.

张利永, 颜天一, 韩刚, 等. 2007. 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiensis*)对原生动物群落结构影响的现场船基实验[J]. 生态学报, 27(5): 1926 – 1936.

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.

Capriulo G M, Smith G, Troy R, et al. 2002. The planktonic food web structure of a temperate zone estuary, and its alteration due to eutrophication[J]. Hydrobiologia, 475: 263 – 333.

Margalef R. 1958. Perspectives in ecological theory[M]. Chicago: University of Chicago Press.

Pratt J R, Cairns J Jr. 1985. Functional groups in the protozoa: roles in differing ecosystems[J]. Journal of Protozoology, 32(3): 415 – 423.

Romare P, Berg S, Lauridsen T, et al. 2003. Spatial and temporal distribution of fish and zooplankton in a shallow lake[J]. Freshwater Biology, 48: 1353 – 1362.

Romare P, Schindler D E, Scheuerell M D, et al. 2005. Variation in spatial and temporal gradients in zooplankton spring development: the effect of climatic factors[J]. Freshwater Biology, 50: 1007 – 1021.

Sousa W, Attayde J L, Rocha E D S, et al. 2008. The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil[J]. Journal of Plankton Research, 30(6): 699 – 708.

Yu Y H, Yan Y Q, Feng W S. 2008. Spatio-temporal heterogeneity of plankton communities in Lake Donghu as revealed by PCR-DGGE and its relation to biotic and abiotic factors[J]. FEMS Microbiology Ecology, 63: 328 – 33.

(责任编辑 万月华)

Studies on the Protozoan Community Characteristics During the Phytoplankton Bloom in Xiaojiang Backwater Area of Three Gorges Reservoir

CHEN Xiao-juan, PAN Xiao-jie, ZOU Xi, HU Lian, ZHANG Zhi-yong, ZHENG Zhi-wei

(Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P. R. China)

Abstract: In the summer of 2009, water bloom occurred in the local water of Xiaojiang River backwater area of Three Gorges Reservoir. In this paper, during the algal bloom period, characteristics of protozoan community were studied in May 29th and June 18th, respectively. Their relationships with the water environment, water bloom algae were also been analyzed. Our results indicated that the dominant algae was cyanobacteria, and the bloom species were *Anabaena aquae* in May, but *Microcystis*, *Anabaena planctonica* and *Cyclotella* in June. The significant differences between May and June were found in the total phosphorus, phosphate, chlorophyll a, dissolved oxygen, temperature and pH ($P < 0.05$). The protozoan species number in May and June was 2 and 15, respectively. The average protozoan density in June was 970 ind./L, which was more than that (200 ind./L) in May. Redundancy analyses showed that the water environmental factors significantly affecting the densities of protozoa species were TP and DO, and the densities of protozoa correlated significantly with *Anabaena planctonica* and *Microcystis* densities.

Key words: Xiaojiang backwater area; water bloom; protozoan community