

香溪河流域梯级水库大型底栖动物群落变化及其与环境的关系*

李斌^{1,2} 申恒伦^{1,2} 张敏³ 蔡庆华^{1**} 邵美玲⁴

(¹中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051; ⁴安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000)

摘要 分别于2005年10月和2011年10月对香溪河流域3个梯级水库的大型底栖动物群落进行了调查,探讨了大型底栖动物群落变化及其与环境的关系。结果表明:与2005年相比,2011年古洞口一级水库仍以寡毛类占优势,大型底栖动物总密度升高;古洞口二级水库中,摇蚊的优势度降低,前突摇蚊相对丰度由94.5%降低至35.5%,霍甫水丝蚓的相对丰度升至36.0%,总密度增加;香溪河库湾大型底栖动物群落发生很大变化,前突摇蚊取代颤蚓科种类成为绝对优势类群,相对丰度达到89.0%,而总密度降低,三峡水库水位剧烈波动对这一变化有推动作用。各水库大型底栖动物群落与环境因子的典型对应分析(CCA)结果表明,浊度较大的水体,前突摇蚊容易占优势,而颤蚓科的霍甫水丝蚓和正颤蚓则在水柱稳定性较高、底层水温较低的水体中更易占优势。

关键词 香溪河库湾; 水位波动; 三峡水库; 群落排序

中图分类号 X835 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)8-2070-07

Changes of macrobenthos community and their relationships with environmental factors along cascading reservoirs of Xiangxi River Basin, China. LI Bin^{1,2}, SHEN Heng-lun^{1,2}, ZHANG Min³, CAI Qing-hua^{1**}, SHAO Mei-ling⁴ (¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; ⁴College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2070-2076.

Abstract: An investigation was made on the macrobenthos communities in three cascading reservoirs in Xiangxi River Basin in October, 2005 and 2011, respectively, aimed to explore the changes of the macrobenthos communities and their relationships with the environment. As compared with that in 2005, the macrobenthos community in the three reservoirs in 2011 changed to some extent. In Gudongkou Reservoir I, Oligochaeta was still dominant, and the total macrobenthos density increased. In Gudongkou Reservoir II, the dominance degree of Chironomidae descended, while the total macrobenthos density ascended. Meanwhile, the relative abundance of *Procladius* sp. declined dramatically from 94.5% to 35.5%, while that of *Limnodrilus hoffmeisteri* increased to 36%. The macrobenthos community in Xiangxi Bay had great change. Since Chironomidae replaced Tubificidae as the absolutely preponderant species, the relative abundance of Chironomidae reached 89%, but the total macrobenthos density decreased. These changes were attributed to the drastic water level fluctuation of the Three-Gorges Reservoir. The canonical correspondence analysis (CCA) on the relationships between the macrobenthos community and environmental factors in the three reservoirs showed that *Procladius* sp. preferred the waters with higher turbidity, while *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tubifex tubifex* preferred the waters

* 国家科技重大专项(2012ZX07104-002)资助。

** 通讯作者 E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

收稿日期: 2013-01-16 接受日期: 2013-05-07

with higher water column stability and lower bottom water temperature.

Key words: Xiangxi Bay; water level fluctuation; the Three-Gorges Reservoir; community ordination.

为满足快速发展对能源的需求,近几十年,中国大力开发水能资源。对河流进行梯级开发可更充分地利用流域水能资源,而生态环境问题一直是水电开发中不可避免的热点话题,关于梯级水库对河流的连续多次拦截所引起的生态学效应(麻泽龙和程根伟,2006),将是相关科研工作者更加关注的问题。目前,国外学者对梯级水库的生态学研究较为全面,包括浮游生物(da Silva *et al.*, 2005; McEwen & Butler, 2010)、鱼类(Draštík *et al.*, 2008)、大型底栖动物(Callisto *et al.*, 2005)、微生物(Abe *et al.*, 2003)以及水体理化性质(Jorcin & Nogueira, 2005)等各方面。而国内则较为零散,如关于梯级水库水体理化环境在乌江流域(魏浪等,2010)、猫跳河流域(黎慧卉等,2009)有过一些研究;关于浮游植物(申恒伦等,2012)和大型底栖动物(邵美玲等,2007;陈浒等,2010;简东等,2010)分别在香溪河、红水河、乌江流域梯级水库开展过研究。这些少量的研究资料远不能满足对中国梯级水库生态环境效应更深入认识的需要。

大型底栖动物是水生态系统的重要组成部分,常被作为环境变化的指示因子(McEwen & Butler, 2010)。水库水体较深、沿岸带不发达、生境比较单一,大型底栖动物主要由寡毛类和摇蚊2大类群组成(Kaster & Jacobi, 1978),它们的移动能力相对较弱,具有较长的生活史,对环境变化的响应时间相对于浮游生物较长(Brinkhurst & Kennedy, 1965; Oliver, 1971),这些特征决定了在开展水库生态系统次生演替研究时,大型底栖动物是良好的材料(Real *et al.*, 1993)。本文选择香溪河流域的3个水库开展较长时间跨度下水库大型底栖动物群落的变化研究,可以排除由局域气候不同引起的大型底栖动物群落差异对研究结果的影响(Sagarin *et al.*, 1999)。

香溪河流域梯级水库包括香溪河库湾以及上游的古洞口一级水库、古洞口二级水库3个水库。古洞口一级水库于1999年开始运行,是兴山县的饮用水源地;古洞口二级水库于2004年开始运行,水库的主要用途为防洪、蓄水、发电(邵美玲等,2007)。香溪河库湾是由三峡水库蓄水,香溪河下游水位升高而形成。2005年,三峡水库处于一期蓄水期间,

水位为135~139 m,最大水位落差仅4 m;2011年,三峡水库已完成三期蓄水,水位为145~175 m,最大水位落差达30 m。本文通过分析、比较2005及2011年10月香溪河流域梯级水库大型底栖动物群落结构,探讨3个水库6年后大型底栖动物群落的变化及其与环境的关系。

1 材料与方法

1.1 样品采集与数据获取

分别于2005年10月、2011年10月对香溪河流域3个梯级水库大型底栖动物群落及环境因子进行调查(图1)。由于水位上涨以及基于优化样点分布的考虑,2011年新增GD1-2a、XX00、XX08、XX09、XX10五个样点,去掉XX04、XX06两个样点。

使用1/40 m²的彼得森采泥器采集大型底栖动物,每个样点取单次样品,经200 μm网径的纱网筛洗干净后,在解剖盘中将大型底栖动物检出,保存在福尔马林溶液中。标本鉴定计数,密度折算成每平方米的数量。将相对丰度大于5%的物种定为优势种(邵美玲等,2007)。

各样点同步测定水深(Depth)、底泥温度(Sedi Temp);水体透明度(SD)用萨氏圆盘测定;表层水体的pH、浊度(Turb)、溶氧(DO)用YSI6600现场测定;底层水温(Bott Temp)、底层溶氧(Bott DO)用温深仪(RBR)现场测定;总氮(TN)、硝态氮(NO₃-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₂-Si)用水化学分析仪SAN PLUS ANALYZER测定;总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)用TOC-V CPH+ASI-V测定;叶绿素a(Chl-a)、悬浮有机颗粒物(VSS)、悬浮无机颗粒物(NVSS)、总悬浮物(TSS)按照有关湖泊调查规范测定(蔡庆华,2007)。

1.2 数据处理

水柱稳定性(relative water column stability, RWCS)描述水动力条件的变化,即以整个水层的密度梯度与4℃、5℃间的密度差的比值来描述水体的相对稳定程度(Padisák *et al.*, 2003)。公式如下:

$$RWCS = (D_b - D_s) / (D_4 - D_5)$$

式中 D_b 为底层水密度, D_s 为表层水密度, D_4 、 D_5 分别为4℃、5℃时水的密度。水密度可以通过

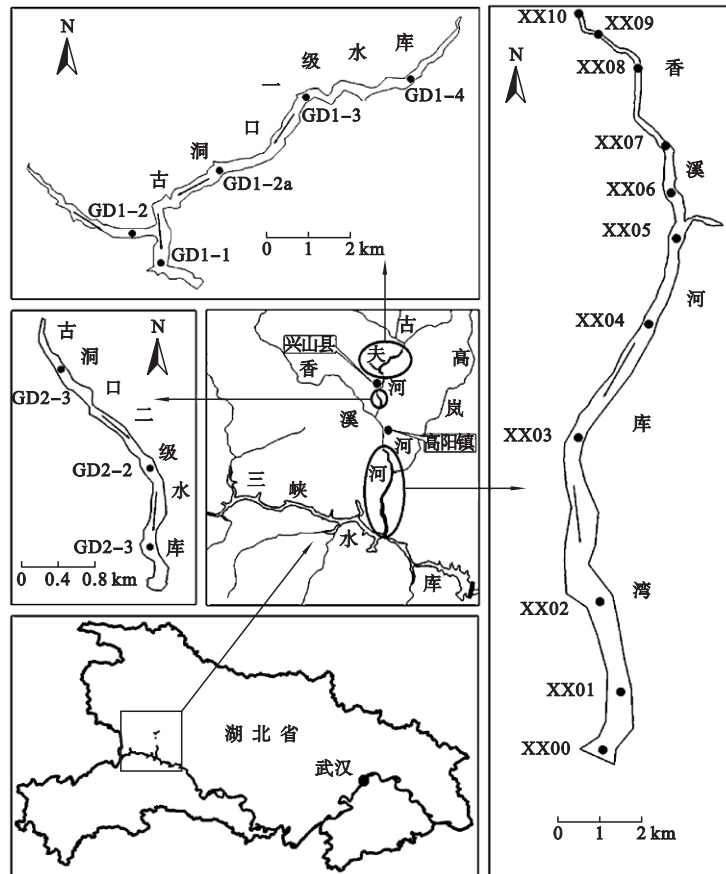


图1 采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites

Krambeck 方程来计算 (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2004):

$$\rho = 0.999869 + 6.67413 \times 10^{-5} T - 8.85556 \times 10^{-6} T^2 + 8.23031 \times 10^{-8} T^3 - 5.51577 \times 10^{-10} T^4$$

式中 ρ 为水密度, T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

群落的多样性用 Shannon 多样性指数 H 表示, 计算公式如下:

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

$$P_i = n_i / N$$

式中 n_i 为第 i 个种的个体数, N 为总个体数。

大型底栖动物群落排序采用非度量多维标度法 (non-metric multidimensional scaling, NMS) 进行解析 (PC-ORD/Version 4), NMS 分析时对物种密度进行对数转换, 采用 Sørensen 距离计算方法度量大型底栖动物群落结构的相似性。CCA 分析用 Canoco 4.5 完成。进行 CCA 分析时将环境因子进行对数转换, 以消除纲量的影响。采用 Monte Carlo 置换检验, 对环境变量进行预选, 选取对响应变量有显著贡献的因子参与分析。

2 结果与分析

2.1 群落结构特征

2011 年 10 月古洞口一级水库共采集大型底栖动物 10 种, 其中颤蚓科 8 种, 摇蚊科 2 种; 古洞口二级水库共采集大型底栖动物 13 种, 其中颤蚓科 7 种, 摇蚊科 4 种, 蚌科 1 种, 线虫 1 种; 香溪河库湾共采集大型底栖动物 11 种, 其中颤蚓科 5 种, 摇蚊科 5 种, 线虫 1 种。与 2005 年相比, 2011 年 3 个水库大型底栖动物群落发生不同程度的变化。大型底栖动物种类组成相对最稳定的是古洞口一级水库; 古洞口二级水库寡毛类的种类增加; 香溪河库湾物种数减少, 主要是寡毛类的物种数减少, 而摇蚊种类增加 (图 2)。古洞口一级水库的优势类群没有发生变化, 仍然以寡毛类为优势类群, 大型底栖动物总密度升高到 $97240 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$; 古洞口二级水库中, 摇蚊的优势度降低, 寡毛类相对丰度增加, 两个类群占总密度的百分比相近, 并且大型底栖动物的总密度上升到 $3040 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$; 香溪河库湾大型底栖动物群落发生很大的变化, 寡毛类的相对丰度非常低, 摇蚊成为

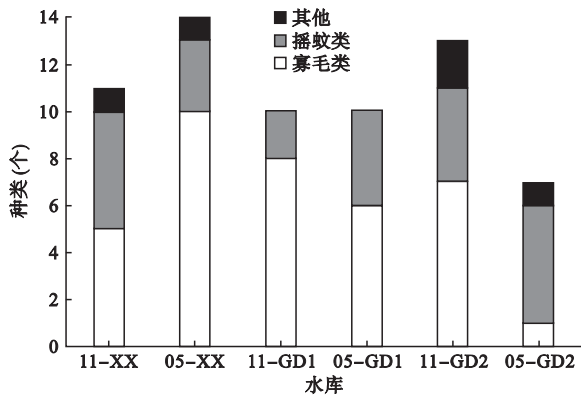


图2 各水库2次采样大型底栖动物物种组成
Fig.2 Species composition of each reservoir in each survey

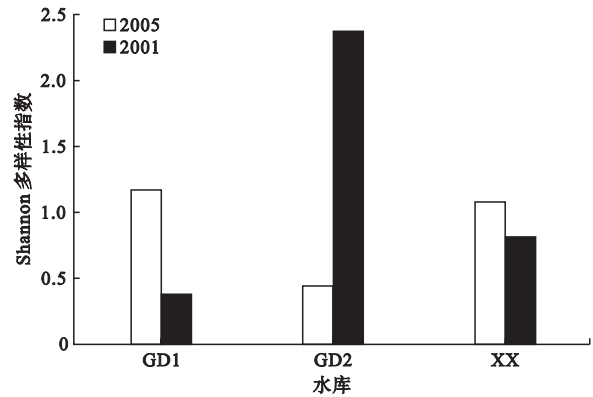


图4 各水库2次采样间 Shannon 多样性指数对比
Fig.4 Comparison of Shannon index of each reservoir in each survey

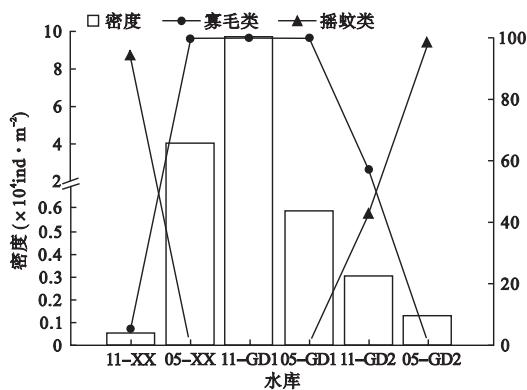


图3 各水库2次采样总密度及寡毛类、摇蚊类比例
Fig.3 Density and proportional abundance of oligochaetes and chironomids of each reservoir in each survey

表1 2次采样各水库优势种(%)
Table 1 Dominant species of the three reservoirs of each survey

水库	物种	2005年10月	2011年10月
古洞口一级水库(I)	霍甫水丝蚓 ^a	58.3	7.4
	正颤蚓 ^b	38.2	92.6
古洞口二级水库(II)	前突摇蚊 ^c	94.5	35.5
	霍甫水丝蚓		36.0
香溪河库湾	多毛管水蚓 ^d		10.5
	霍甫水丝蚓	76.9	
	管水蚓一种 ^e	17.8	
	前突摇蚊		89.0

a. *Limnodrilus hoffmeisteri*; b. *Tubifex tubifex*; c. *Procladius* sp.; d. *Aulodrilus plurisetia*; e. *Aulodrilus* sp.

优势类群 群落组成类似于2005年古洞口二级水库(图3)。Shannon多样性指数的对比可以发现,2005年古洞口一级水库及香溪河库湾多样性相对较高,古洞口二级水库多样性较低;2011年古洞口二级水库多样性大大升高,远高于香溪河库湾及古洞口一级水库;与此同时,古洞口一级水库多样性处于非常低的水平,香溪河库湾多样性也明显降低(图4)。

对比2次采样各水库的优势种可以发现,古洞口一级水库2次采样的优势类群都是寡毛类,但是2011年正颤蚓的优势度远远超过霍甫水丝蚓;古洞口二级水库2005年与香溪河库湾2011年的大型底栖动物群落优势种均为前突摇蚊;古洞口二级水库寡毛类的优势度有增加的趋势。

2.2 群落结构相似性比较

群落排序结果可以看出XX01、GD1-2、GD1-3三个样点的群落结构与其他样点差异较大(图5)。根据各水库样点间大型底栖动物群落结构的相似性,选取GD1-1、GD1-2a代表古洞口一级水库,GD2-

1、GD2-2、GD2-3代表古洞口二级水库,XX02、XX03、XX05、XX07、XX08、XX09、X10代表香溪河库湾进行下一步的分析。

对2次采样各水库的代表样点大型底栖动物群落做NMS排序(图6),从图6可以看到,2005年古洞口二级水库样点与2011年香溪河库湾的XX03、XX05、XX07三个样点聚合在一起。古洞口一级水库2次的样点大致集中在同一个区域,2005年香溪河库湾及2011年古洞口二级水库的样点分别单独聚集在一起,2005年香溪河库湾样点与其他的样点距离都较大。说明香溪河库湾经过6年的演变,大型底栖动物群落发生了很大的改变,与2005年时古洞口二级水库的群落非常相似。古洞口一级水库的大型底栖动物群落比较稳定,变化最小。

2.3 群落分布与环境的关系

用去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)的方法对2011年3个水库的代表性样点大型底栖动物群落数据进行分析,发现4个轴

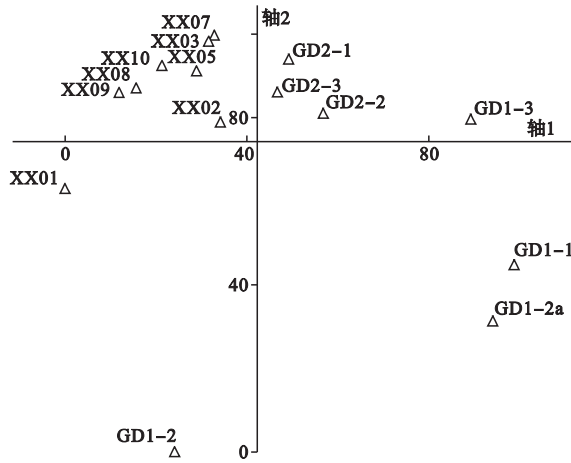


图 5 2011 年 10 月各样点物种密度的 NMS 分析结果
Fig. 5 Two-dimensional NMS configuration for macrobenthos data of reservoirs, October 2011

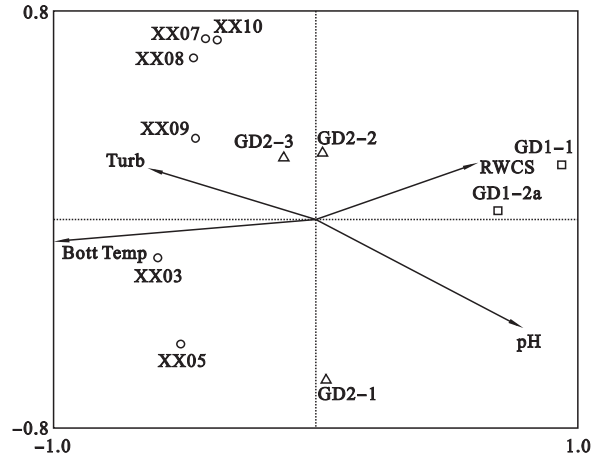


图 7 样点和环境变量在 CCA 轴上的负荷
Fig. 7 Position of sampling sites and significant ($P < 0.05$) environmental variables on CCA axes

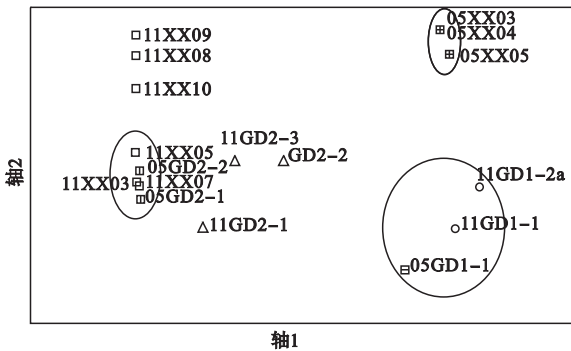


图 6 2 次采样各样点物种密度的 NMS 分析结果
Fig. 6 Two-dimensional NMS configuration for macrobenthos data of reservoirs in each survey

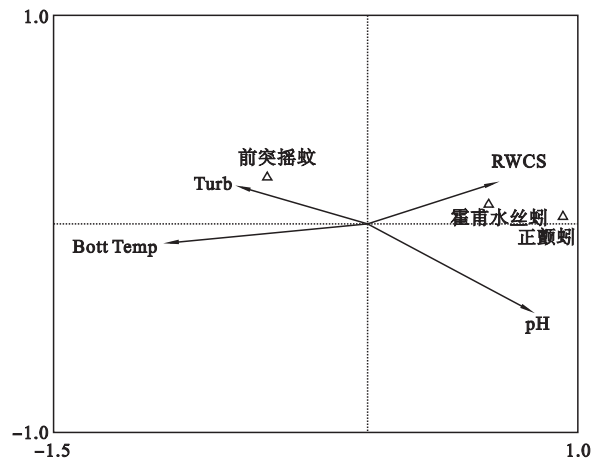


图 8 优势物种和环境变量在 CCA 轴上的负荷
Fig. 8 Position of dominant species and significant ($P < 0.05$) environmental variables on CCA axes

最大梯度为 5.742,说明群落数据进一步分析适于采用单峰模型的排序方法。运用 Monte Carlo 转置检验对环境变量进行预选,选择 $P \leq 0.05$ 的环境变量参与下一步的典型对应分析(CCA)。得到对大型底栖动物分布具有重要作用的 4 个环境变量 Turb、Bott Temp、RWCS、pH,其在 4 个轴上的特征值分别为 0.603、0.355、0.278 和 0.130,可以解释大型底栖动物 68.5% 的累积方差。3 个水库的样点在 CCA 轴上负荷的分布显示出明显的梯度,较高的底层水温、浊度,较低的水柱稳定性、pH 决定了香溪河库湾样点分布;古洞口一级水库则恰好相反,具有较高的水柱稳定性,较低的底层水温和浊度;古洞口二级水库具有较高的浊度(图 7)。从图 8 可以发现,浊度较大的水体,前突摇蚊容易形成优势种;而颤蚓科的霍甫水丝蚓和正颤蚓则在水柱稳定性较高、底层水温较低的水体中更易占优势。

3 讨论

筑坝蓄水改变流域水文特征,使水库中的大型底栖动物群落发生次生演替(Baxter, 1977; Armitage 2006)。蓄水初期,大型底栖动物密度非常低,但是经过一段时间的发展,群落结构变得稳定,密度逐渐增加(Armitage, 1977; Shao *et al.*, 2006, 2008b)。然而,水库发展后期会走向老化,大型底栖动物群落多样性降低,密度降低,形成以耐污种为优势类群的单一结构(Popp & Hoagland, 1995)。本研究中,古洞口一级水库两次调查中均是颤蚓科种类占优势,密度百分比由 96.5% 增加到 99%;多样性指数及总密度显著降低。古洞口二级水库则出现相反的变化,多样性指数及总密度均明显增加。古

洞口一级水库水体营养水平及水体悬浮颗粒物含量均较低,具有很高的透明度,水质良好。水库较高的水柱稳定性,底层较低的水温说明古洞口一级水库水体容易形成温跃层,且底层溶氧含量较低。古洞口二级水库水体环境正好相反,具有较高的浊度,非常低的水柱稳定性,水浅,底层水温及溶氧相对较高。水深及底层溶氧含量是解释大型底栖动物分布的两个重要因子(Prat *et al.*, 1992; Real & Prat, 1992; Petridis & Sinis, 1993; Rossaro *et al.*, 2007)。温度除了直接影响大型底栖动物群落外,还通过形成温跃层导致底层的缺氧环境间接影响大型底栖动物分布(Real & Prat, 1992)。水库大型底栖动物主要的2大类群寡毛类和摇蚊类对环境有不同的适应性,在季节及深度方面出现相互分离的分布趋势(Real & Prat, 1992)。本研究,CCA结果显示,寡毛类在水柱稳定性高、底层水温较低的水体中占优势,摇蚊类适应于分布在浊度高、水柱稳定性低的水体中。古洞口一级水库运行时间较长,6年后水生态环境变化较小,寡毛类仍然是库区大型底栖动物群落中的优势类群。2005年古洞口二级水库运行时间为一年,摇蚊类是库区的优势种类,经过6年的演化,寡毛类的丰富度逐渐增加,甚至超过摇蚊类。古洞口二级水库相对较浅,水体扰动较大,因而摇蚊类能够长期占据大型底栖动物群落中的优势地位。

香溪河库湾大型底栖动物群落的变化最大,前突摇蚊取代寡毛类成为整个库湾的优势物种。然而,从2003年三峡水库首次蓄水到2010年7月,关于香溪河库湾大型底栖动物群落的研究均显示,寡毛类是库湾的优势类群(Shao *et al.*, 2006, 2010),仅在一期蓄水的第1年,库湾中摇蚊类和寡毛类的相对丰度相当(Shao *et al.*, 2006)。2011年10月,前突摇蚊成为香溪河库湾的绝对优势种,寡毛类仅在少数样点少量出现。香溪河库湾一方面受到上游来水的影响,另一方面由于三峡水库的调蓄,水位上升过程中长江干流回水影响库湾大型底栖动物群落的纵向分区,在河口附近形成了干流区(Shao *et al.*, 2010)。三峡水库三期蓄水完成后,年水位变化达到30 m,如此大的水位落差势必会对香溪河库湾水生态系统造成巨大的影响,而大型底栖动物群落对水位波动比较敏感(Zhang *et al.*, 2010)。2010年7—11月以及2011年7—10月,三峡库区水位发生了剧烈的波动,一方面是夏季洪水的影响,短时间内水位波动达15 m;另一方面是秋季蓄水,使库区水

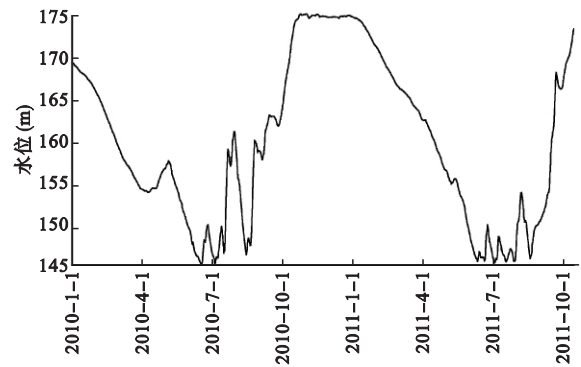


图9 三峡库区水位日变化

Fig. 9 Daily water level fluctuation in The Three-Gorges Reservoir

位在一个多月的时间内上升30 m(图9)。水位快速上升期间,干流回水中裹挟着大量的泥沙注入香溪河库湾,导致库湾中粗颗粒物沉积大量增加(Shao *et al.*, 2008a)。寡毛纲颤蚓科的种类适应于底质细腻,有机物含量丰富的环境(Takamura *et al.*, 2009);摇蚊类尤其是移动能力较强的前突摇蚊在水位波动剧烈、沉积量大的水体中占优势(Bazzanti & Seminara, 1987; Zhang *et al.*, 2010)。水位波动对大型底栖动物群落中的摇蚊和颤蚓科都有显著的影响,颤蚓科丰富度随水位波动增强而降低,摇蚊丰富度随水位波动增强而增加(张敏, 2012)。据此,作者认为,三峡库区剧烈的水位波动对2011年10月香溪河库湾大型底栖动物群落发生的巨大变化有推动作用。

致谢 张长群、黄东、闫然协助完成野外采样,谭路、杨顺益、董笑语、屈月明在室内样品测定中提供了大量的支持,汪兴中对数据统计分析提供了帮助,在此一并感谢。

参考文献

- 蔡庆华. 2007. 水域生态系统观测规范——中国生态系统研究网络(CERN)长期观测规范丛书. 北京: 环境科学出版社.
- 陈 许, 李厚琼, 吴 迪, 等. 2010. 乌江梯级电站开发对大型底栖无脊椎动物群落结构和多样性的影响. 长江流域资源与环境, 19(12): 1462-1470.
- 简 东, 黄道明, 常秀岭, 等. 2010. 红水河干流梯级运行后大型底栖动物的演替. 水生态学杂志, 3(6): 12-18.
- 黎慧卉, 刘从强, 汪福顺, 等. 2009. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征. 长江流域资源与环境, 18(4): 368-372.
- 麻泽龙, 程根伟. 2006. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展. 水科学进展, 17(5): 748-753.
- 邵美玲, 韩新芹, 蔡庆华, 等. 2007. 香溪河流域梯级水库大型底栖动物群落比较. 生态学报, 27(12): 4963-4971.

- 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. *湖泊科学*, **24**(1): 197-205.
- 魏浪,夏霆,严志程,等. 2010. 乌江上游梯级水库水体富营养化研究. *水资源保护*, **26**(4): 39-42.
- 张敏. 2012. 大型深水水库大型底栖动物群落格局及其驱动过程研究——以三峡水库为例(博士学位论文). 武汉:中国科学院水生生物研究所.
- Abe DS, Matsumura-Tundisi T, Rocha O, et al. 2003. Denitrification and bacterial community structure in the cascade of six reservoirs on a tropical river in Brazil. *Hydrobiologia*, **504**: 67-76.
- Armitage PD. 1977. Development of the macro-invertebrate fauna of Cow Green reservoir (Upper Teesdale) in the first five years of its existence. *Freshwater Biology*, **7**: 441-454.
- Armitage PD. 2006. Long-term faunal changes in a regulated and an unregulated stream—Cow Green thirty years on. *River Research and Applications*, **22**: 947-966.
- Baxter R. 1977. Environmental effects of dams and impoundments. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **8**: 255-283.
- Bazzanti M, Seminara M. 1987. Environmental stress in a regulated eutrophic lake indicated by the profundal macrobenthic community. *Italian Journal of Zoology*, **54**: 261-266.
- Brinkhurst R, Kennedy C. 1965. Studies on the biology of the Tubificidae (Annelida, Oligochaeta) in a polluted stream. *Journal of Animal Ecology*, 429-443.
- Callisto M, Goulart M, Barbosa F, et al. 2005. Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco river (northeastern Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, **65**: 229-240.
- da Silva CA, Train S, Rodrigues LC. 2005. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system. *Hydrobiologia*, **537**: 99-109.
- Draštk V, Kubečka J, Tušer M, et al. 2008. The effect of hydropower on fish stocks: Comparison between cascade and non-cascade reservoirs. *Hydrobiologia*, **609**: 25-36.
- Jorcin A, Nogueira MG. 2005. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment: Water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Parapanema River, south-east Brazil). *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, **10**: 1-12.
- Kaster J, Jacobi G. 1978. Benthic macroinvertebrates of a fluctuating reservoir. *Freshwater Biology*, **8**: 283-290.
- Mcewen DC, Butler MG. 2010. The effects of water-level manipulation on the benthic invertebrates of a managed reservoir. *Freshwater Biology*, **55**: 1086-1101.
- Oliver D. 1971. Life history of the Chironomidae. *Annual Review of Entomology*, **16**: 211-230.
- Padisák JB, Far KR, Krienitz L. 2003. Deep layer cyanoprokaryota maxima are constitutional features of lakes: Examples from temperate and tropical regions. *Archiv für Hydrobiologie: Advances in Limnology*, **58**: 175-199.
- Petridis D, Sinis A. 1993. Benthic macrofauna of Tavropos reservoir (central Greece). *Hydrobiologia*, **262**: 1-12.
- Popp A, Hoagland KD. 1995. Changes in benthic community composition in response to reservoir aging. *Hydrobiologia*, **306**: 159-171.
- Prat N, Real M, Rieradevall M. 1992. Benthos of Spanish lakes and reservoirs. *Limnetica*, **8**: 230.
- Real M, Prat N. 1992. Factors influencing the distribution of chironomids and oligochaetes in profundal areas of Spanish reservoirs. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, **26**: 405-410.
- Real M, Prat N, Riera J. 1993. Abundance and distribution of profundal zoobenthos in Spanish reservoirs: Differences between 1973/75 and 1987/88 surveys. *Water Science & Technology*, **28**: 45-53.
- Rodríguez-Rodríguez M, Moreno-Ostos E, De Vicente I, et al. 2004. Thermal structure and energy budget in a small high mountain lake: La Caldera, Sierra Nevada, Spain. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **38**: 879-894.
- Rossaro B, Marziali L, Cardoso AC, et al. 2007. A biotic index using benthic macroinvertebrates for Italian lakes. *Ecological Indicators*, **7**: 412-429.
- Sagarin RD, Barry JP, Gilman SE, et al. 1999. Climate-related change in an intertidal community over short and long time scales. *Ecological Monographs*, **69**: 465-490.
- Shao M, Xie Z, Ye L, et al. 2006. Changes in the benthic macroinvertebrates in Xiangxi Bay following dam closure to form the Three Gorges Reservoir. *Journal of Freshwater Ecology*, **21**: 717-719.
- Shao M, He L, Han X, et al. 2008a. Seasonal patterns of sedimentation and their associations with benthic communities in Xiangxi bay of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Freshwater Ecology*, **23**: 151-160.
- Shao ML, Xie ZC, Han XQ, et al. 2008b. Macroinvertebrate Community Structure in Three Gorges Reservoir, China. *International Review of Hydrobiology*, **93**: 175-187.
- Shao M, Xu Y, Cai Q. 2010. Effects of reservoir mainstream on longitudinal zonation in reservoir bays. *Journal of Freshwater Ecology*, **25**: 107-117.
- Takamura N, Ito T, Ueno R, et al. 2009. Environmental gradients determining the distribution of benthic macroinvertebrates in Lake Takkobu, Kushiro wetland, northern Japan. *Ecological Research*, **24**: 371-381.
- Zhang M, Shao M, Xu Y, et al. 2010. Effect of hydrological regime on the macroinvertebrate community in Three-Gorges Reservoir, China. *Quaternary International*, **226**: 129-135.

作者简介 李斌,男,1988年生,硕士研究生,主要从事大型底栖动物生态学研究。E-mail: libin@ihb.ac.cn
责任编辑 李凤芹