

香溪河流域梯级水库底栖动物群落比较

邵美玲^{1,2}, 韩新芹^{1,2}, 谢志才¹, 贾兴焕^{1,2}, 刘瑞秋¹, 蔡庆华^{1,*}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:对香溪河流域 3 座梯级水库(古洞口一级水库、古洞口二级水库和三峡水库香溪河库湾)的底栖动物进行了比较生态学研究。运用主成分分析(PCA)对梯级水库的水质进行研究,表明沿着水库的梯度水质逐渐恶化。运用非度量多维标度法(NMS)对梯级水库的底栖动物群落结构进行相似性比较,表明选择水库湖泊区的样点进行梯级水库底栖动物生态学研究具有典型代表性。在物种组成和密度方面,古洞口一级水库和香溪河库湾都是寡毛类占优势,古洞口二级水库是摇蚊幼虫占优势。但 3 个水库都是耐污种占优势。采用典型对应分析(CCA)解析底栖动物群落结构与环境因子的关系,显示 3 个水库群落结构的差异主要由浊度造成。用 TOC/Turb 来表征有机物对浊度的贡献,结果显示古洞口二级水库有机物对浊度的贡献相对较小,因而表明泥沙等无机物对浊度的贡献相对较大。

关键词:香溪河流域;梯级水库;底栖动物;生态学;浊度

文章编号:1000-0933(2007)12-4963-09 中图分类号:Q178 文献标识码:A

Comparative on macroinvertebrate communities along a cascade of reservoirs in Xiangxi River Basin

SHAO Mei-Ling^{1,2}, HAN Xin-Qin^{1,2}, XIE Zhi-Cai¹, JIA Xing-Huan^{1,2}, LIU Rui-Qiu¹, CAI Qing-Hua^{1,*}

1 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology of China, Wuhan 430072, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 4963 ~ 4971.

Abstract: Xiangxi River originates from the Shennongjia Forest region and is the largest tributary in the Hubei portion of the Three-Gorge Reservoir. The hydropower resource is abundant in Xiangxi River, and hydropower stations are usually connected sequentially. A cascade of three reservoirs (Gudongkou Reservoir 1, Gudongkou Reservoir 2 and Xiangxi Bay of the Three-Gorge Reservoir) in Xiangxi River Basin was selected to investigate macroinvertebrate ecology in a reservoir cascade system. Principal Components Analysis (PCA) was applied to analyze the water quality of the three reservoirs. The result implies that the water quality was degrading along the cascade of reservoirs. Non-metric Multidimensional Scaling (NMS) was used to analyze the differences among benthic communities. It indicates that sampling stations located in the lacustrine zone of a reservoir are representative for comparing macroinvertebrate assemblages along a reservoir cascade.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(30330140);国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412300);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KSCX2-SW-111)

收稿日期:2006-09-21; **修订日期:**2007-03-05

作者简介:邵美玲(1980~),女,江苏南通人,博士生,主要从事底栖动物生态学研究. E-mail: shaomeiling@ihb.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

致谢:野外采样及室内样品分析中得到叶麟、李凤清、张君倩、陈静、徐耀阳等大力协助,傅小城对数据统计分析给予了帮助,在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30330140), the National Basic Research Priorities Programme (973 Programme) (No. 2002CB412300) and the Key Project of Knowledge Innovation Program of CAS (No. KSCX2-SW-111)

Received date:2006-09-21; **Accepted date:**2007-03-05

Biography: SHAO Mei-Ling, Ph. D. candidate, mainly engaged in macroinvertebrate ecology. E-mail: shaomeiling@ihb.ac.cn

Oligochaetes were numerically dominant both in Gudongkou Reservoir 1 and Xiangxi Bay, and chironomids were dominant in Gudongkou Reservoir 2. Similar pattern was also exhibited in species composition. However, the benthic assemblages of the three reservoirs were all dominated by pollution-tolerant taxa in spite of their differences in water quality. Relationship between the community structure and environmental variables was studied by using Canonical Correspondence Analysis (CCA) to determine which variables contribute most to differences in community structure. It discloses that turbidity influenced the benthic assemblages significantly. TOC/Turb was applied to determine the influence of organic matter on turbidity. The ratio of Gudongkou Reservoir 2 was the lowest among the three reservoirs, which implicates that the influence of organic matter on turbidity was smaller in Gudongkou Reservoir 2 than those in the other two reservoirs. This suggests that inorganic matter such as suspended silt and clay grains contribute substantially to the turbidity of Gudongkou Reservoir 2.

Key Words: Xiangxi River Basin; cascade of reservoirs; macroinvertebrate; ecology; turbidity

中国是世界上水能资源最丰富的国家之一。近年来由于大力开发水电,水库的梯级开发已经非常普遍。梯级水库在被淹河流上会产生纵向的物理、化学和生物学变化^[1]。国内目前对梯级水库的研究多集中在优化调度等方面^[2,3]或是侧重于水文学的研究^[4],而从水生生物的角度对梯级水库开展的研究几乎未见报道。国外对梯级水库的研究面则相对较广,除了水文学方面^[5],如 Hart 对南非 Mgeni 河上的梯级水库的浮游生物展开了长期的研究^[6,7]等,其中尤以巴西对梯级水库的研究进行得比较细致全面,涵盖了梯级水库的理化特性^[8]、浮游植物群落^[1]、微生物群落^[9]以及底栖动物群落^[10]。底栖动物是最易受水库建设影响的类群之一^[10],且在指示水质方面具有重要作用^[11],被广泛应用于生态监测,因而对梯级水库展开底栖动物生态学研究很有必要。

香溪河是三峡水库湖北库区的第一大支流,其干流全长 94km,流域总面积 3099km²^[12]。古夫河是香溪河三大支流之一,流经兴山县新县城古夫镇,县城上游和下游分别建有古洞口一级水库和古洞口二级水库。古洞口一级水库控制流域面积 965km²^①,于 1999 年 9 月首台机组开始发电^②,是古夫镇工农业生产和居民生活用水的主要水源;古洞口二级水库控制流域面积 1161km²^③,于 2004 年 4 月第一台机组开始发电^④,汇集了古夫镇的工农业生产和居民生活的废水。随着三峡水库蓄水,香溪河下游河段水位随之升高,水流减缓,形成三峡水库的一个典型库湾,即香溪河库湾^[13]。香溪河库湾位于兴山县老县城高阳镇下游,不仅汇集了古夫河的水,还汇集了其干流上游的工业和生活废水。因而这 3 个水库在流域尺度上自上而下形成了独具生态格局的梯级水库。通过分析这三座梯级水库中底栖动物的群落结构及与环境因子的关系,本文对其底栖动物生态学进行比较研究。

1 材料与方法

1.1 样点分布与采样时间

2005 年 10 月在古洞口一级水库设 4 个样点(GD1-1 ~ GD1-4),古洞口二级水库设 3 个样点(GD2-1 ~ GD2-3),香溪河库湾设 7 个样点(XX01 ~ XX07)(图 1)采集样品。

1.2 样品的采集与处理

使用 1/16m²的改良彼得生采泥器采集底泥样品,每个样点采集 1 次。样品经 200μm 网径的纱网筛洗干净后,在解剖盘中将底栖动物检出,置入 50mL 的塑料标本瓶中保存(10% 的福尔马林)。标本经鉴定后计数,其密度最终折算成每平方米的数量。

① 水电知识网:<http://www.waterpub.com.cn/JHDB/DetailDam.asp?ID=26>

② 兴山兴发古洞口电业有限公司

③ 宜昌水利质量监督月报 2004 年第 3 期

④ 宜昌市发展和改革委员会:<http://www.ycst.gov.cn/jwweb/all/ReadNews.asp?NewsID=4522>

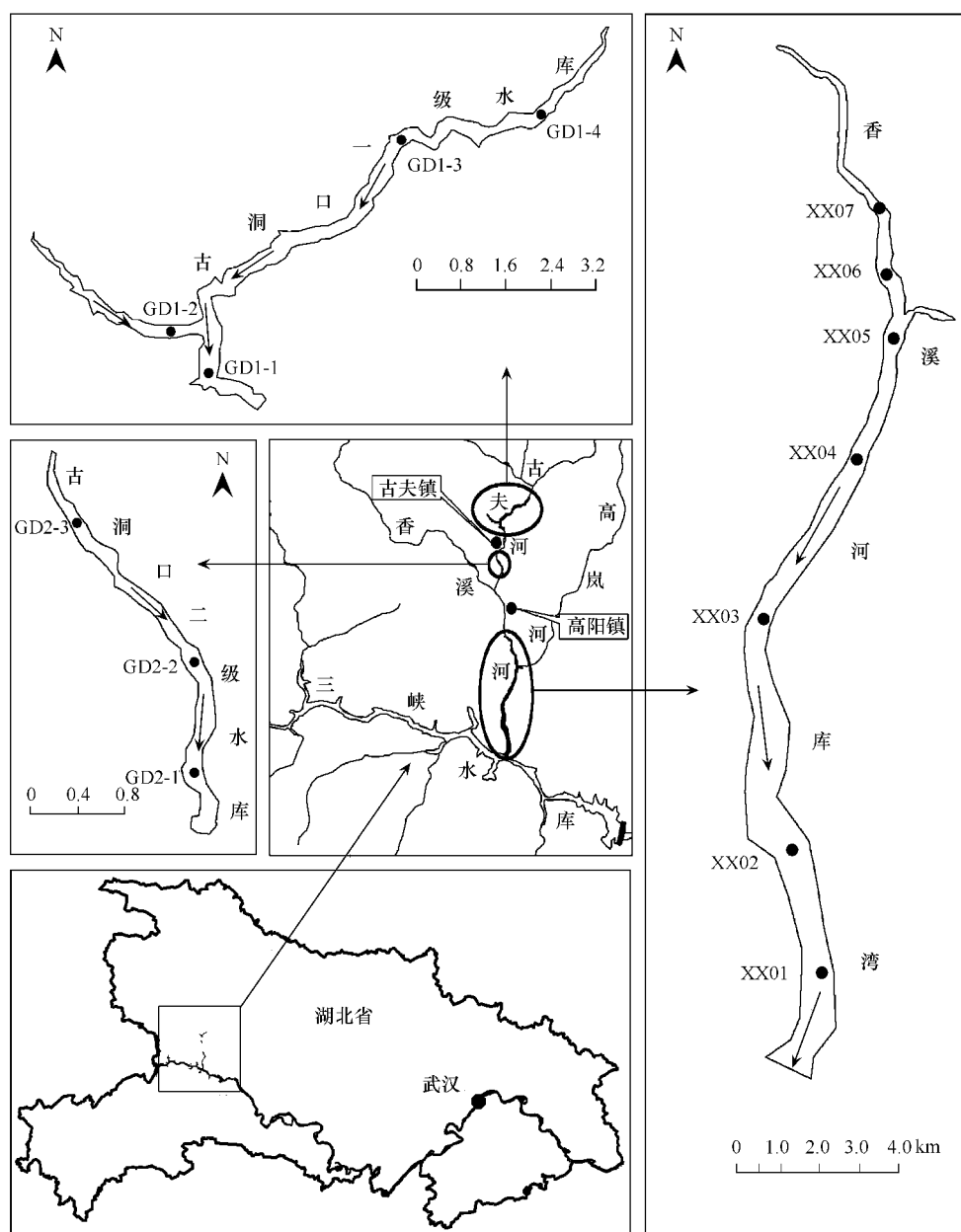


图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the three reservoirs

各样点还同步监测了水深 (Depth)、透明度 (SD)、底泥温度 (Temp), 以及水体的 pH 、浊度 (Turb)、溶氧 (DO)、总有机碳 (TOC)、溶解性有机碳 (DOC)、总氮 (TN)、硝态氮 (NO_3-N)、总磷 (TP)、磷酸盐 (PO_4-P)、硅 (SiO_2-Si) 及藻类叶绿素 a (Chla)。水深用标记过的绳子绑在采泥器上每次采样时测定, 透明度用直径为 30cm 的白色赛克圆盘 (Secchi Disc) 测定, 底泥温度用水银温度计测定。 pH 、Turb、DO 用 HORIBA-U-23 型多参数水质监测仪 (HORIBA 公司, 日本) 现场测定。 TOC、DOC 用 TOC-V CPH + ASI-V 总有机碳分析仪 (岛津公司, 日本) 分析。 TN 、 NO_3-N 、 TP 、 PO_4-P 、 SiO_2-Si 用 SAN PLUS ANALYZER 水化学分析仪 (SKALAR 公司, 荷兰) 分析。叶绿素 a 按有关湖泊调查规范测定^[14]。

1.3 数据处理

群落的多样性用 Shannon-Wiener 多样性指数 H 表示, 公式为:

<http://www.ecologica.cn>

$$H = - \sum \frac{n_i}{N} \times \log_2 \frac{n_i}{N}$$

式中, n_i 表示第 i 个种的个体数, N 表示总个体数。

3 个水库环境因子的分析采用主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA), 如果两个环境指标的 Pearson 相关系数大于 0.8, 则只取其中一个进行下一步分析; 底栖动物群落结构的相似性采用非度量多维标度法 (Non-metric Multidimensional Scaling, NMS) 进行解析。PCA 用 Statistica 6.0 软件完成, NMS 用 PC-ORD (Version 4) 软件完成。底栖动物群落结构与环境因子的关系采用了典型对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA), 用 Canoco 软件完成。相关分析用 SPSS 13.0 软件完成。进行主成分分析和典型对应分析时将环境指标的数据标准化以消除量纲的影响, 标准化公式为:

$$x_{ij} = (s_{ij} - \bar{s}_j) / \sqrt{\sum (s_{ij} - \bar{s}_j)^2 / (n - 1)}$$

式中, x_{ij} 为变量 s 标准化后的第 i 个采样点第 j 个指标的数值, s_{ij} 为原始数据的值, $\bar{s}_j$ 为第 j 个指标的均值^[12]; 进行典型对应分析时密度进行了 $\log_{10}(y + 1)$ 转换, 以减小绝对值的影响。

2 结果与讨论

2.1 3 个水库的环境因子分析

由于水深与底泥温度不能表征水质, 因而不参与主成分的排序, 而仅仅参与典型对应分析。各项理化指标中 (表 1), TOC 与 DOC 显著正相关 ($r = 0.962, p < 0.001$), TN 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 显著正相关 ($r = 0.969, 0.971, p < 0.001$), TP 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 显著正相关 ($r = 0.950, 0.835, p < 0.001$), Chla 与 DO 显著正相关 ($r = 0.833, p < 0.001$), Turb 与 DO 显著正相关 ($r = 0.938, p < 0.001$), 因而取 TOC、TN、TP、Chla、Turb、pH、SD 作为水环境参数进行主成分分析, 得到环境因子得分和样点得分图 (图 2)。可以看出, 首先, 3 个水库的环境差异非常明显, 在两个主成分上就得到了很好的分化, 解释率达 83.65%。香溪河库湾 TP、TN 都较高, 古洞口二级水库 TN 较高, 古洞口一级水库 TN、TP 都较低且透明度较大, 表明古洞口一级水库水质较佳, 香溪河库湾水质较差。表明沿着水库的梯度, 水质逐渐恶化。其次, 每个水库内所有样点间的水质差异较小。

表 1 3 个水库的环境因子

Table 1 Environmental variables of the three reservoirs

环境因子 Environmental variables	古洞口一级水库 Gudongkou Reservoir 1		古洞口二级水库 Gudongkou Reservoir 2		香溪河库湾 Xiangxi Bay	
	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	平均值 Mean	变异系数 CV (%)
Depth (m)	44.13	57.0	13.00	35.3	31.00	72.4
Temp (°C)	13.7	29.1	17.1	12.7	21.0	3.1
pH	8.08	3.2	8.01	0.3	8.29	0.5
Turb	71.2	7.2	108.5	19.5	42.6	8.6
DO (mg/L)	9.88	2.9	11.15	7.0	8.27	1.8
SD (m)	3.17	6.3	1.67	24.6	1.19	16.3
TOC (mg/L)	1.699	12.6	1.610	9.8	1.371	5.0
DOC (mg/L)	1.494	11.1	1.399	12.0	1.225	3.4
TN (mg/L)	0.730	3.7	1.034	0.2	1.078	3.5
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	0.592	3.4	0.850	4.9	0.965	4.6
TP (mg/L)	0.028	13.4	0.066	12.4	0.146	22.8
$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)	0.024	8.4	0.029	18.7	0.103	18.0
$\text{SiO}_2\text{-Si}$ (mg/L)	1.673	25.6	5.802	2.3	7.381	2.5
Chla ($\mu\text{g/L}$)	8.150	8.4	7.600	38.2	2.641	68.8

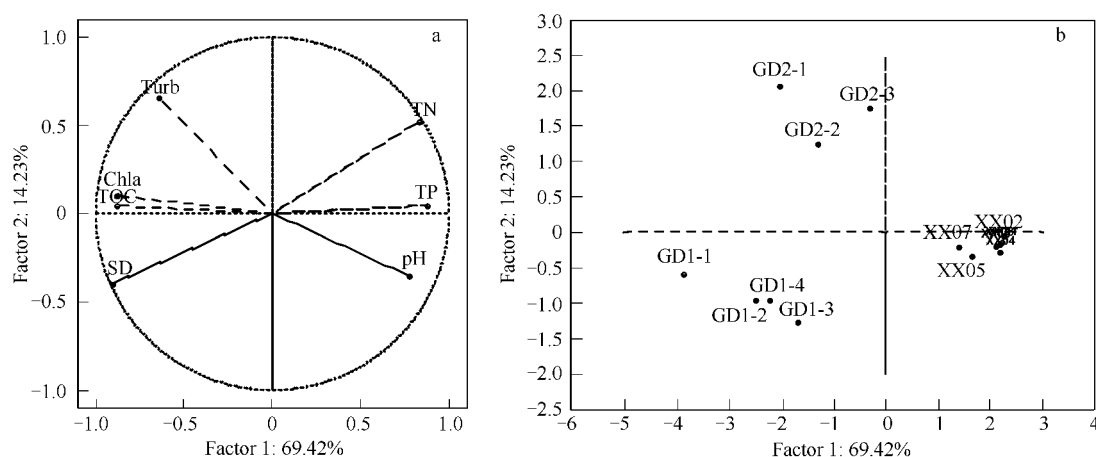


图2 环境指标主成分分析结果

Fig. 2 Principal Components Analysis (PCA) comparing the water quality of the three reservoirs

a 为环境因子坐标图, b 为样品因子坐标图 The plot of variable factor coordinates is shown on the a, and the plot of case factor coordinates is shown on the b

2.2 梯级水库底栖动物群落比较

2.2.1 群落结构相似性

对每个样点各物种的密度进行非度量多维标度分析, 计算香溪河流域梯级水库底栖动物群落结构的相似性, 结果见图3。可以看出, GD1-2、GD1-4、GD2-3、XX01、XX02、XX06、XX07 这几个样点的底栖动物群落结构比较特殊, 它们分别处于两种不同生境的交汇处。GD1-2 位于古洞口一级水库的一个库湾上, GD1-4 位于古洞口一级水库的库尾, GD2-3 位于古洞口二级水库的库尾, XX06、XX07 位于香溪河库湾的库尾, 均处于水库流水-静水的交汇区; 而 XX01 和 XX02 位于香溪河河口, 受三峡水库干流的干扰比较严重。因而在研究群落结构时, 取 GD1-1 和 GD1-3 代表古洞口一级水库, 取 GD2-1 和 GD2-2 代表古洞口二级水库, 取 XX03、XX04 和 XX05 代表香溪河库湾。对图3 进一步分析可知, 香溪河流域梯级水库之间底栖动物群落结构具有明显的差异性。结合图2B 图分析, 可以看出在单个水库的尺度上, 水质对底栖动物群落的影响可能要小于其在梯级水库的尺度上对底栖动物群落的影响, 表明选取具有代表性的样点(水库的湖泊区^[15]) 对开展梯级水库底

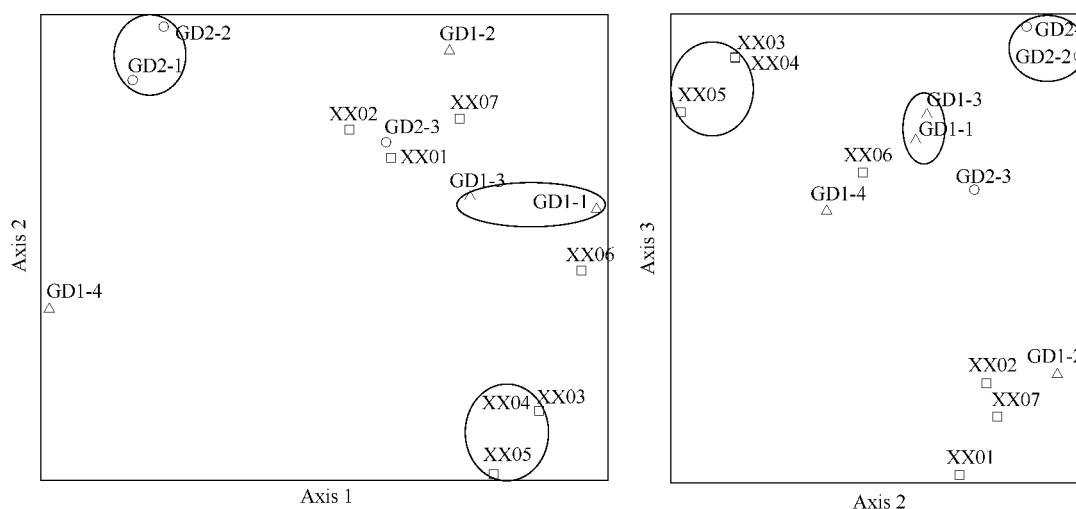


图3 对各个样点物种的密度应用非度量多维标度分析的结果

Fig. 3 3-dimensional NMS configuration for macroinvertebrate data of the three reservoirs

栖动物生态学的比较研究具有重要意义。

2.2.2 物种组成、密度及优势种的比较

古洞口一级水库共采集到 10 种底栖动物(附录),其中寡毛类 6 种、摇蚊 4 种;古洞口二级水库采集到 7 种,其中寡毛类 1 种、摇蚊 5 种、线虫 1 种;香溪河库湾采集到 14 种,其中寡毛类 10 种、摇蚊 3 种、线虫 1 种(图 4a)。古洞口一级水库和香溪河库湾都是寡毛类占优势,古洞口二级水库则是摇蚊占优势。据 Callisto 的研究结果^[10],水库的总物种数沿着水库的梯度会逐渐上升。林秋奇等也认为位于河流上游的水库,生境的多样性相对较低;处于河流下游的水库,生境的多样性相对较高^[16]。但是均未提及水库的年龄。建坝蓄水是对淡水环境影响最为剧烈的人为因素^[17,18],由此造成的生物群落次生演替过程中,时间可能是影响群落结构比较关键的因素。以香溪河库湾为例,2004 年 10 月整个库湾仅有 5 种底栖动物^[11],本次研究则发现了 14 种。因而古洞口二级水库低的物种数极有可能是由于其为新淹水库,其底栖动物群落结构尚处于演替的初始阶段。多样性指数与物种数的趋势并不一致,古洞口一级水库较高(图 4b)。这主要是因为香溪河库湾大部分物种的相对丰度都很低,尤其是 XX03 和 XX04,单一物种占了绝对优势,因而多样性指数不高。

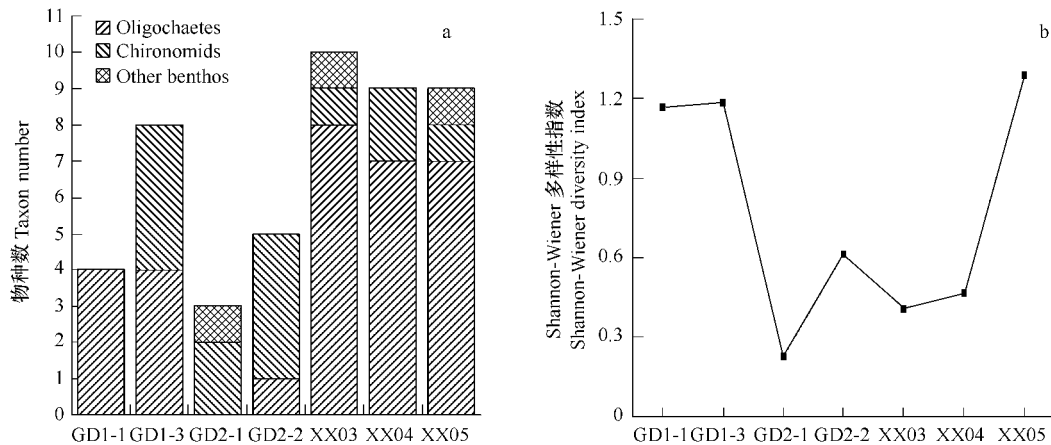


图 4 3 个水库的物种数(a)和 Shannon-Wiener 多样性指数(b)

Fig. 4 Taxon number (a) and Shannon-Wiener diversity index (b) of the three reservoirs

古洞口一级水库的平均密度为 4824 ind./m²,古洞口二级水库为 1312 ind./m²,香溪河库湾为 38837 ind./m²。密度在 3 个水库中的变化趋势与物种数的变化趋势一致。古洞口二级水库摇蚊占绝对优势,而古洞口一级水库和香溪河库湾都是寡毛类占绝对优势(图 5)。

若将相对丰度 >5% 的物种定义为优势种,则优势种见表 2。虽然 3 个水库的水质差异较大,但是都是耐污种占优势。

2.3 底栖动物与环境的关系

通过一系列筛选并用前选(forward selection)和 Monte Carlo 转置法分析,CCA 结果显示,对底栖动物分布具有重要作用的环境变量仅有 Turb($p = 0.004$)。其在 4 个轴上的特征值依次为:0.572、0.458、0.419、0.344(总惯量为 2.070),可以解释底栖动物群落 86.6% 的累计方差。可见浊度是导致 3 个水库群落结

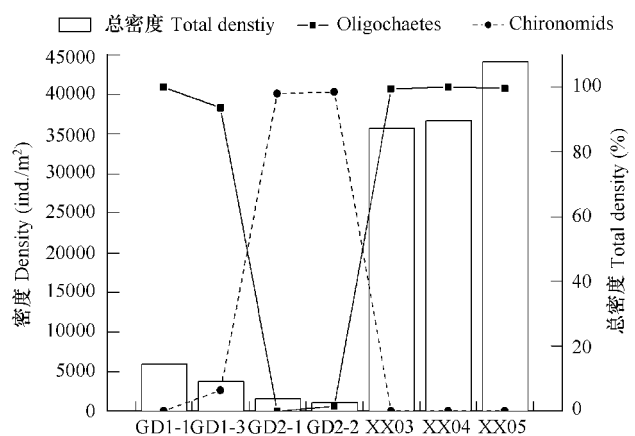


图 5 3 个水库底栖动物的密度及寡毛类、摇蚊各占的百分数

Fig. 5 Macroinvertebrate density and proportional abundance of oligochaetes and chironomids in the three reservoirs

Column: density; curves: percentage of density

构差异的主要因素。Thorpe 也发现浊度对底栖动物群落有剧烈影响^[19]。

浊度是衡量悬浮的泥沙和粘土颗粒、藻类和其他浮游生物、微生物、有机物和其他细的不能溶解的颗粒物的综合指标,其主要通过与光抑制、BOD 水平、污染物迁移以及悬移质的关系而产生生态学影响^[20]。总体而言,影响浊度的因素可以分为有机物的影响和无机物的影响。TOC 是用来反映水中有机物含量的综合指标^[14]。因而用 TOC/Turb 来表征有机物对浊度的贡献,比值越大表示有机物对浊度的贡献越大。古洞口一级水库的比值平均为 0.027,古洞口二级水库平均为 0.017,香溪河库湾为 0.032。古洞口二级水库的比值最小,表明相较于其他水库古洞口二级水库有机物对浊度的贡献最小,因而说明泥沙等无机物的贡献相对较大。

表 2 3 个水库的优势种
Table 2 Dominant species of the three reservoirs

古洞口一级水库 Gudongkou Reservoir 1		古洞口二级水库 Gudongkou Reservoir 2		香溪河库湾 Xiangxi Bay		
GD1-1	GD1-3	GD2-1	GD2-2	XX03	XX04	XX05
霍甫水丝蚓 ^a 58.3%	霍甫水丝蚓 ^a 76.5%	前突摇蚊属 ^d 96.9%	90.9%	霍甫水丝蚓 ^a 94.7%	93.0%	霍甫水丝蚓 ^a 49.1%
颤蚓科 ^b 38.2%	苏氏尾鳃蚓 ^c 14.1%					管水蚓一种 ^e 46.7%
	前突摇蚊属 ^d 5.1%					

a. *Limnodrilus hoffmeisteri*; b. Tubificidae spp.; c. *Branchiura sowerbyi*; d. *Procladius* sp.; e. *Aulodrilus* sp.

虽然所有的水库都面临着泥沙沉积问题^[21,22],古洞口二级水库的浊度高于其他水库是许多因素综合作用形成的。古洞口二级水库是 3 个水库中最为年轻的水库,新淹的大量土地和植被促进了沉积的发生。水库上游新县城的建设及挖沙等人类活动对浊度可能也产生了影响。

在古洞口二级水库占优势的前突摇蚊(*Procladius* sp.)在香溪河库湾形成初期也曾占过优势^[11],对前突摇蚊与浊度做相关性分析,结果显示其与浊度显著正相关($r=0.873, p=0.01$),表明前突摇蚊较能耐受一定程度的混水。这可能是其在新水库中占优势的主要原因。

3 小结

本文通过对香溪河流域三座梯级水库底栖动物的生态学研究发现,选择具有代表性的样点(水库的湖泊区)对开展梯级水库的比较研究具有重要意义。梯级水库的水质沿着水库的梯度逐渐恶化,反映了流域尺度上自然因素和人为因素对水质的影响。尽管 3 个水库的水质差异较为明显,但 3 个水库都是耐污种占优势,这可能是由于水库的生境相对较为单一,生态位较宽的物种易占优势。沿着水库的梯度,无论是物种数还是物种密度,都是古洞口二级水库偏低。CCA 分析的结果也显示古洞口二级水库高的浊度对群落结构具有显著作用。这都反映了在对梯级水库进行比较研究时,水库的年龄是需要加以考虑的因素,它反映了水库在生物群落的次生演替过程中所处的阶段。随着三峡水库再次蓄水,香溪河库湾水位将再次抬高,将会变为 3 个水库中相对最年轻的水库,因而对这 3 个梯级水库的跟踪调查将十分必要。

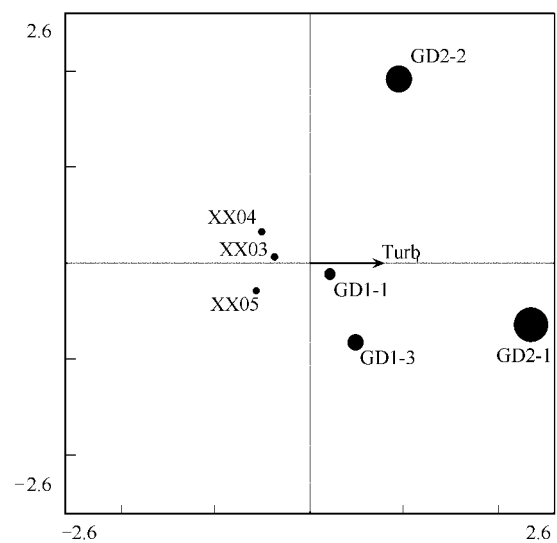


图 6 样点和环境变量在 CCA 轴上的负荷

Fig. 6 The position of sampling sites and significant ($p<0.05$) environmental variables on CCA axes

附录 三个水库的底栖动物名录

Appendix Taxa found in the three reservoirs

种类 Taxon	GD1-1	GD1-3	GD2-1	GD2-2	XX03	XX04	XX05
线虫动物 Nematoda			+		+		+
节肢动物 Arthropoda							
摇蚊科 Chironomidae							
前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.		+	+	+			
长跗摇蚊 <i>Tanytarsus</i> sp.		+					
<i>Harnischia</i> sp.			+				
<i>Cladopelma</i> sp.				+			
小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.				+			
<i>Cryptotendipes</i> sp.		+					
<i>Polypedilum halterale</i>				+		+	
<i>P. scalaenum</i> group sp.						+	+
<i>Stictochironomus</i> sp.					+		
直突摇蚊亚科 Orthoclaadiinae spp.		+					
环节动物 Annelida							
仙女虫科 Naididae							
吻盲虫一种 <i>Pristina</i> sp.		+					+
费氏拟仙女虫 <i>Paranais frici</i>					+	+	
特城史氏虫 <i>Stephensoniana trivandran</i>							+
颤蚓科 Tubificidae							
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+			+	+	+
皮氏管水蚓 <i>Aulodrilus pigueti</i>					+	+	+
湖沼管水蚓 <i>A. limnobius</i>	+			+	+	+	
多毛管水蚓 <i>A. pluriseta</i>					+	+	
管水蚓一种 <i>A.</i> sp.					+	+	+
厚唇嫩丝蚓 <i>Teneridrilus mastix</i>		+			+		+
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+			+	+	+
颤蚓科 Tubificidae spp.	+						

References:

- [1] da Silva C A, Train S, Rodrigues L C. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system. *Hydrobiologia*, 2005, 537 (1-3): 99—109.
- [2] Gao S C, Wan B, Mei Y D, *et al.* Cooperating dispatch of hydropower station groups of Three Gorges cascade and Qingjiang cascade. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (4): 504—507, 510.
- [3] Liu J P, Huang Q, Tian F W, *et al.* Research on the optimal control of power generating and shipping of Hanjiang upstream cascade. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001, (4): 8—17.
- [4] Chen J, Huang W. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14 (6): 786—791.
- [5] Matsuno Y, Tasumi M, van der Hoek W, *et al.* Analysis of return flows in a tank cascade system in Sri Lanka. *Paddy. Water. Environ.*, 2003, 1 (4): 173—181.
- [6] Hart R C. Two calanoids, two lakes, and a decade or two. An updated record and evaluation of occurrence and periodicity of *Tropodiatomus spectabilis* and *Metadiaptomus meridianus* (Copepoda: Calanoida), and alternative stable states in two cascading impoundments. *Hydrobiologia*, 2001, 453/454 (1): 269—283.
- [7] Hart R C. Cladoceran periodicity patterns in relation to selected environmental factors in two cascading warm-water reservoirs over a decade. *Hydrobiologia*, 2004, 526 (1): 99—117.
- [8] Jorcin A, Nogueira M G. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment-water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Paranapanema River, south-east Brazil). *Lakes. Reserv. Res. Manage.*, 2005, 10 (1): 1—12.

- [9] Abe D S, Matsumura-Tundisi T, Rocha O, *et al.* Denitrification and bacterial community structure in the cascade of six reservoirs on a tropical river in Brazil. *Hydrobiologia*, 2003, 504 (1-3): 67—76.
- [10] Callisto M, Goulart M, Barbosa F A R, *et al.* Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco River (northeastern Brazil). *Braz. J. Biol.*, 2005, 65 (2): 229—240.
- [11] Shao M L, Xie Z C, Ye L, *et al.* Monthly change of community structure of zoobenthos in Xiangxi Bay after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30 (1): 64—69.
- [12] Ye L, Li D F, Tang T, *et al.* Spatial distribution of water quality in Xiangxi River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (11): 1959—1962.
- [13] Xu Y Y, Ye L, Han X Q, *et al.* Characteristic and regression analysis of the par attenuation coefficient in Xiangxi Bay during spring bloom. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30 (1): 84—88.
- [14] Huang X F, ed. *Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology*. Beijing: China Standards Press, 2000. 77—79.
- [15] Straškraba M, Tundisi J G. *Guidelines of Lake Management (Volume 9): Reservoir Water Quality Management*. International Lake Environment Committee, 1999. 47—49.
- [16] Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: An overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (6): 1034—1040.
- [17] Park Y S, Chang J B, Lek S, *et al.* Conservation strategies for endemic fish species threatened by the Three Gorges Dam. *Conserv. Biol.*, 2003, 17 (6): 1748—1758.
- [18] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 1994, 266: 753—762.
- [19] Thorpe T, Lloyd B. The macroinvertebrate fauna of St. Lucia elucidated by canonical correspondence analysis. *Hydrobiologia*, 1999, 400 (0): 195—203.
- [20] Lawler D M, Petts G E, Foster I D L, *et al.* Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Sci. Total Environ.*, 2006, 360 (1-3): 109—126.
- [21] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles- Consequences of damming. *Aquat. Sci.*, 2002, 64 (1): 55—65.
- [22] Nagle G N, Fahey T J, Lassoie J P. Management of sedimentation in tropical watersheds. *Environ. Manage.*, 1999, 23 (4): 441—452.

参考文献:

- [2] 高仕春,万飏,梅亚东,等.三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究.水利学报,2006,37(4):504~507,510.
- [3] 刘俊萍,黄强,田峰巍,等.汉江上游梯级发电与航运的优化调度研究.水力发电学报,2001,(4):8~17.
- [4] 陈进,黄薇.梯级水库对长江水沙过程影响初探.长江流域资源与环境,2005,14(6):786~791.
- [11] 邵美玲,谢志才,叶麟,等.三峡水库蓄水后香溪河库湾底栖动物群落结构的变化.水生生物学报,2006,30(1):64~69.
- [12] 叶麟,黎道丰,唐涛,等.香溪河水质空间分布特性研究.应用生态学报,2003,14(11):1959~1962.
- [13] 徐耀阳,叶麟,韩新芹,等.香溪河库湾春季水华期间水体光学特征及相关分析.水生生物学报,2006,30(1):84~88.
- [14] 黄祥飞,主编.湖泊生态调查观测与分析.北京:中国标准出版社,2000.77~79.
- [16] 林秋奇,韩博平.水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用.生态学报,2001,21(6):1034~1040.