

引水型电站对河流底栖动物群落结构的影响

傅小城^{1,2}, 唐 涛¹, 蒋万祥^{1,2}, 李凤清^{1,2}, 吴乃成^{1,2}, 周淑婵^{1,2}, 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:于 2005 年 10 月对香溪河干流 5 个小水电站对河流底栖动物的影响进行调查, 按影响情况, 各电站设 5 个采样点。应用底栖动物物种组成、现存量、优势类群、功能摄食类群等参数, 衡量小水电站对河流底栖动物群落结构的影响。在研究区域共采集到底栖动物 4656 条, 平均密度为 658 ind./m², 蜉蝣目的四节蜉属 (*Baetis* spp.) 是该区域的优势类群。研究表明: 电站的修建对河流水化学指标没有显著影响, 但河流生境的物理因子 (如流速和水深) 都发生了较大的改变; 对河流底栖动物的各方面均有一定的影响, 特别是密度在 5 个样点间差异显著, 而功能摄食类群中滤食者和捕食者的百分含量也有明显差异。另外, 各项指标在 5 个样点间均有一致的变动趋势。相似性分析表明, 坝下 3 号样点的群落组成差异最大, 这意味着完全阻隔的坝不利于河流生物多样性的保护。

关键词:底栖动物; 群落结构; 引水型电站; 香溪河

文章编号: 1000-0933(2008)01-0045-08 中图分类号: Q145, Q178, Q958 文献标识码: A

Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate communities

FU Xiao-Cheng^{1,2}, TANG Tao¹, JIANG Wan-Xiang^{1,2}, LI Feng-Qing^{1,2}, WU Nai-Cheng^{1,2}, ZHOU Shu-Chan^{1,2}, CAI Qing-Hua^{1,*}

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

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

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0045 ~ 0052.

Abstract: The influence of small hydropower plants (SHPs) on the spatial distribution of macroinvertebrate assemblages was investigated in five cascade SHPs along the Xiangxi River in October 2005. Five sites were sampled at each SHP. A total of 4656 macroinvertebrates belonging to 69 genera were collected. The characteristics of macroinvertebrate community structures were analyzed by using richness, abundance, dominant species and functional feeding groups. The results suggested that the construction of the SHPs had no significant impact on water chemistry, but physical variables (such as current velocity and water depth) varied significantly among the five sites. All the characteristics of the macroinvertebrate community were more or less affected by the construction, especially the abundance, filter-collectors percentage and predators percentage were significantly affected by the stations. The results also suggested that the sites beneath the dam had most different community structures, which indicates that diverting the water current completely is harmful to the protection of macroinvertebrate diversity of the river.

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)

收稿日期:2006-10-27; **修订日期:**2007-01-19

作者简介:傅小城(1983 ~), 男, 浙江省金华市人, 硕士生, 主要从事系统与流域生态学研究. E-mail: xcfu0549@ihb.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心研究生王欢和韩霜在野外采样中给予的帮助。

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 30330140) and the National Basic Research Priorities Program (973 Programme, No. 2002CB412300)

Received date: 2006-10-27; **Accepted date:** 2007-01-19

Biography: FU Xiao-Cheng, Master candidate, mainly engaged in systems ecology and watershed ecology. E-mail: xcfu0549@ihb.ac.cn

Key Words: macroinvertebrate; community structure; small hydropower plant; Xiangxi River

我国的小水电资源分布广泛,特别是广大农村地区和偏远山区,适合因地制宜开发利用。小水电的开发既有利于发展地方经济,又能解决当地人民用电困难的问题,同时还可以给投资人带来可观的效益回报,因此有很大的发展前景。小水电站工程投资小、风险低、效益稳、运营成本比较低,并且作为可再生的新能源,在改善生态、保护环境等方面具有重要的作用,因而得到了国家计委、水利部的各种优惠政策的鼓励和支持。特别是 20 世纪 80 年代以后,以小水电为主的农村电气化计划的实施,以及小水电代燃料工程的全面铺开,小水电的建设规模迅速扩大。但小水电站的修建给人们带来了巨大经济利益的同时也带来了一些环境问题,如河道脱减水、植被破坏、水土流失等^[1]。研究表明,小水电项目修建的永久性拦河水坝阻止了水、沉积物、生物和营养盐的传输,在水坝上下游形成不同的水生态系统,这明显改变了水坝上下游、水底、岸边生境及生物的结构和动态平衡^[2]。目前针对水电站对河流生态系统影响的研究主要集中在大型水利工程方面^[3,4],而对小型水电站的生态影响则研究较少^[5,6]。因此开展这方面的研究对维持河流生态系统的可持续发展具有重要意义。

兴山县地处香溪河流域,水能资源极为丰富。据兴山县政府网(<http://www.xingshan.gov.cn/xqjj.htm>)介绍,目前全县在香溪河流域共建成小水电 47 座,人均装机和发电量居全国县级第一。本文对香溪河干流上 5 个电站的修建对河流底栖动物的影响做了分析,希望为建立健全我国小水电建设环境保护管理体系,以及在流域开发规划中全面引入环境影响评价制度提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点设置

香溪河起源于神农架林区,为湖北省境内三峡库区的一条主要入库支流。河流全长 94km,流域面积 3099km²,自然落差为 1540m。古夫河、高岚河和九冲河是它的 3 条主要支流^[7]。在这些河流上,修建了许多呈阶梯式分布的引水型小水电站。选取香溪河干流上 5 个连续的小水电站进行采样,电站的名称按顺序分别为小当阳(XDY)、青峰(QF)、三堆河(SDH)、苍坪河(CPH)、猴子包(HZB)。针对电站对河流的干扰设置了相应的 5 个样点进行监测(如图 1)。

样点 1:设在低头引水坝上游 50 ~ 100 m 处,此处河流基本不受电站的影响。底质成分主要为卵石和少量泥沙。

样点 2:设在引水坝坝前,此处由于坝的修建,河水受到蓄留,流速下降,水面变宽,水深增加。由于流速变小,以及上游外源物质的不断截留,使得该样点有轻微的淤积现象。

样点 3:位于紧靠坝下的余水区,由于上游的水流被引走,坝下往往形成一个由丰水期时溢水冲刷而成的孤立的水塘。在上游来水量不是很大时,此处基本没有水流。该点水深较大,缺少外源物质的输入,形成了较为独特的生态系统。

样点 4:设在电站出水口上游 50 ~ 100 m 处,虽然上游的低头引水坝引走了所有的水,但经过坝下几公里的汇水,到这里水量有所恢复,样点生境与 1 相近,但水量较小。

样点 5:设在电站出水口处,这里上游引水坝引的水急泻而下,冲刷形成一个深水潭。潭中间区域流速很急,水深

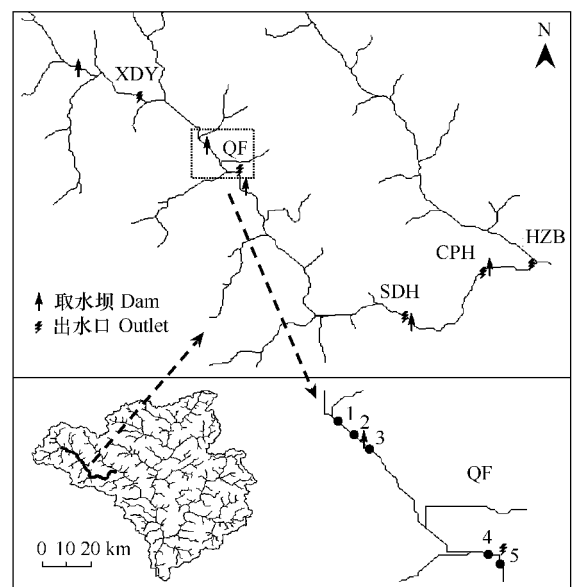


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites

XDY 小当阳电站 Xiaodangyang station; QF 青峰电站 Qingfeng station; SDH 三堆河电站 Sanduihe station; CPH 苍坪河电站 Cangpinghe station; HZB 猴子包电站 Houzibao station

大,但边缘流速、水深较小,样本采集也主要在这些区域。

1.2 样品采集和处理

于 2005 年 10 月对上述各个电站的 5 个样点进行采样,每一样点断面用 40 目孔径的 Surber 底栖动物采集网采集 3 次,将采集到的底栖动物装瓶,回实验室仔细挑拣,并用 4% 甲醛溶液固定。将所采集的底栖动物分到可行的最低分类单元。绝大多数的昆虫纲、腹足纲、寡毛纲和蜗虫纲物种鉴定到属,少数物种到科。线虫和水螨仅鉴定到纲^[8,9]。底栖动物采集的同时,现场测量环境指标。采样点位置用麦哲伦 GPS 315 定位,流速(用 LJD 打印式流速仪测量 0.6 倍水深处流速)、河宽、水深为选定断面的平均值。水质指标 pH、电导(Cond)、溶氧(DO)、温度(T)、浊度(Turb)、氧化还原电位(orp)等使用日本 HORIBA W-23 多参数水质监测仪现场测量。

1.3 数据分析

样点间群落结构的相似性采用聚类分析方法分析,以欧氏距离度量样本间的距离,运用单联法生成聚类图。所有的数据统计分析均由统计分析软件 STATISTICA 6.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 环境因子变化

影响底栖动物分布的环境因子很多,如海拔、流速、水深、电导、pH 等^[10]。现将主要的水体理化指标及河流生境物理因子测量结果列于表 1,更为详细的水质分析可参考叶麟等人的研究^[11]。

表 1 5 个样点间的理化指标
Table 1 Physical-chemical factors of five sites (mean $\pm$ SD)

参数 Parameters	样点 1 Site 1	样点 2 Site 2	样点 3 Site 3	样点 4 Site 4	样点 5 Site 5	均值 Mean
pH	7.49 $\pm$ 0.28	7.56 $\pm$ 0.26	7.53 $\pm$ 0.16	7.50 $\pm$ 0.15	7.64 $\pm$ 0.21	7.55 $\pm$ 0.21
电导 Cond (ms/m)	18.7 $\pm$ 1.52	18.7 $\pm$ 1.32	19.5 $\pm$ 1.50	20.3 $\pm$ 2.49	19.9 $\pm$ 1.73	19.4 $\pm$ 1.74
浊度 Turb (NTU)	44.9 $\pm$ 9.95	48.0 $\pm$ 2.80	42.8 $\pm$ 4.68	38.2 $\pm$ 7.66	40.9 $\pm$ 7.02	43.0 $\pm$ 7.16
溶氧 DO (mg/L)	10.07 $\pm$ 0.44	9.98 $\pm$ 0.39	9.37 $\pm$ 0.64	9.72 $\pm$ 0.34	9.67 $\pm$ 0.35	9.76 $\pm$ 0.48
温度 T ($^{\circ}$ C)	11.97 $\pm$ 0.46	11.95 $\pm$ 0.49	12.37 $\pm$ 0.64	12.94 $\pm$ 0.85	12.6 $\pm$ 0.41	12.37 $\pm$ 0.67
总溶解性固体 TDS (g/L)	0.120 $\pm$ 0.01	0.120 $\pm$ 0.01	0.130 $\pm$ 0.01	0.130 $\pm$ 0.02	0.130 $\pm$ 0.01	0.130 $\pm$ 0.01
氧化还原电位 orp (mV)	-187.0 $\pm$ 18.56	-191.0 $\pm$ 18.75	-177.0 $\pm$ 16.16	-169.0 $\pm$ 17.27	-181.0 $\pm$ 26.80	-181.0 $\pm$ 19.73
流速 Velocity (m/s)	0.62 $\pm$ 0.25	0.17 $\pm$ 0.19	0.00 $\pm$ 0.00	0.60 $\pm$ 0.24	0.36 $\pm$ 0.43	0.35 $\pm$ 0.34
河宽 Width (m)	20.34 $\pm$ 5.06	17.81 $\pm$ 11.48	23.43 $\pm$ 5.13	8.00 $\pm$ 1.91	16.72 $\pm$ 6.54	17.00 $\pm$ 8.14
水深 Depth (m)	0.43 $\pm$ 0.17	0.58 $\pm$ 0.17	0.79 $\pm$ 0.09	0.53 $\pm$ 0.29	0.62 $\pm$ 0.30	0.59 $\pm$ 0.23

对各水体理化指标进行非参方差分析(Kruskal-Wallis)发现,各因子在 5 个样点间差异均不显著。而对 3 个物理因子的分析表明,水深(KW-H(4,25) = 11.87, p = 0.02)和流速(KW-H(4,25) = 16.52, p = 0.002)在 5 个样点间差异显著,河宽差异不明显。另外,流速在 5 个样点间的变化趋势为样点 1、2、3 之间逐渐减小,而样点 4 恢复,样点 5 受发电影响变化较大。水深与流速的变化相反,而河宽变动趋势不明显。

以上分析可知,电站的修建对水体的电化学指标并没有造成太大的影响,Cortes 等人在其文章中也谈到了这点^[12]。而物理因子则由于河道的改变发生了较大的变化。可以推测,这种变化将对底栖动物的组成、分布起主要的作用。

2.2 物种组成和数量变化

本次采样共采集到 4656 条大型底栖动物,隶属 13 目 40 科 69 属。其中水生昆虫占绝大多数,占总物种数的 90.0%。优势类群为蜉蝣目的四节蜉属(*Baetis* spp.),各样点的出现频率达 100% 且密度相当大,而三

角涡虫 (*Dugesia japonica*)、蜉蝣科的高翔蜉属 (*Epeorus* spp.)、扁蜉属 (*Heptagenia* spp.) 和似动蜉属 (*Cinygmula* spp.) 在部分样点中占优。各样点的优势类群(相对丰度大于 5% 的底栖类群)列于表 2。

表 2 各样点优势类群相对丰度(%)

Table 2 The relative abundance of dominant species

类群 Species	样点 1 Site 1	样点 2 Site 2	样点 3 Site 3	样点 4 Site 4	样点 5 Site 5	均值 Mean
四节蜉属 <i>Baetis</i> spp.	51.99	23.56	24.84	40.13	30.68	47.72
三角涡虫 <i>Dugesia japonica</i>	8.04	20.63	5.28		7.11	10.66
高翔蜉属 <i>Epeorus</i> spp.	12.18					5.49
扁蜉属 <i>Heptagenia</i> spp.			9.80		5.02	5.33
似动蜉属 <i>Cinygmula</i> spp.			8.75			

对 5 个样点底栖动物的数量分析发现:5 个样点间的密度分布具有显著差异($F=4.29, p=0.01$), 其中平均密度最高的样点为样点 4, 其次是样点 1, 密度最低的样点为样点 5(如图 2)。造成这种状况的原因可能为样点 4 的水流来自于坝下河段自然水流的补充, 其流量相对稳定, 生境适合底栖动物的生存, 这使得样点 4 底栖动物密度相对较高。另外多重比较表明, 样点 1 和样点 4 都与样点 5 差异显著。这与样点 5 受电站发电周期的影响而生境变动大、频率高有关, 只有少量耐受能力强的物种才能在这里生存, 这使得该样点的密度最低。

总物种数和生物量在 5 个样点间差异均不显著($p>0.05$), 但未受干扰的样点要优于其它样点, 如总物种数在样点 1 和样点 4 最高, 样点 3 最低, 而生物量最高的样点为样点 1, 其次是样点 2, 生物量最低的点与密度一致为样点 5。样点 2 生物量较高的原因可能为该点位于坝上蓄水区, 上游样点 1 输入的外源有机物质在这里得到沉积, 这些外源物质的输入支持了这里较高的生物量。而样点 5 不仅外源物质输入少, 而且频繁地被急流冲刷, 因此该点靠外源物质支持的生物量很小, 导致总的生物量也最低。

从物种数的分析结果看, 电站的修建对其影响并不明显。分析原因可能为: (1) 小水电站的影响有限, 还不至于引起河流内大部分底栖动物的消失, 毕竟大部分底栖动物对生境有较强的适应能力^[13]。从各样点优势种的组成(表 2)及优势种百分含量在 5 个样点间差异不显著($p>0.05$)也证明了这点。(2) 物种数衡量的是样点内出现的物种数, 而不考虑具体的物种组成。样点内一些物种的消失往往会伴随有其它物种的出现, 而使得总的物种数相差不大。(3) 整个研究区域的空间跨度并不是很大, 不同的样点间的距离更小。这也使得各物种在整个研究区域都能扩散。

相对于物种数, 密度对生境的变化更为敏感, 因为大多数物种能够在较大的生境范围内生存, 如不同的流速、水深及底质等, 但基本上这些物种都有其最适的生境条件, 如 Jowett 和 Richardson 研究发现 *Deleatidium* spp. 能够在流速为 1.5m/s 的生境下生存, 但其密度和生物量最大的流速在 0.7~1.0m/s 左右^[14]。

从上述 3 个指标的变动情况来看, 5 个样点间总的变化趋势与环境因子中的流速变化趋势一致而和水深的变化相反, 即样点 1、2、3 物种数逐渐降低, 样点 4 回升, 样点 5 再降低(如图 2)。可以推测出 5 个样点的生境受破坏程度, 即样点 1、2、3 逐渐增加, 样点 4 较小, 而样点 5 又增大。

2.3 功能摄食类群的变化

功能摄食类群(Functional Feeding Group)对研究底栖动物群落的结构和功能组成有重要作用^[15]。参照 Barbour 等对功能摄食类群的划分^[16], 上述样点所采集到的底栖动物可分为 5 个主要功能摄食类群: 滤食者(Filter-collectors FC)、收集者(Gather-collectors GC)、捕食者(Predators PR)、刮食者(Scrapers SC)和撕食者(Shredders SH)。其中优势的功能摄食类群为收集者, 其次是捕食者。

分析各功能摄食类群的百分含量发现, 滤食者百分含量($KW-H(4,25) = 10.85, p = 0.03$)和捕食者百分含量($KW-H(4,25) = 9.28, p = 0.05$)在 5 个样点中差异显著, 而收集者百分含量和撕食者百分含量的差异并不明显。但它们都有明显的变动规律即滤食者百分含量和收集者百分含量在样点 1、2、3 逐渐降低, 样

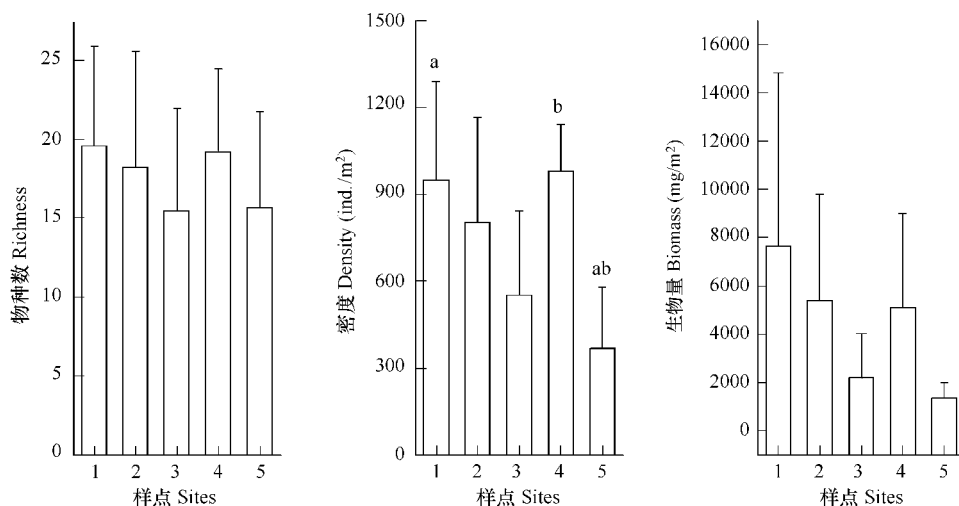


图2 5个样点间的底栖动物物种数、密度和生物量分析

Fig. 2 The richness, density (ind./m²) and biomass (mg/m²) of the five sites

图柱代表平均数,直线代表标准误差;具有相同字母表示两者之间差异显著 box: mean, whisker: standard deviation; The same letters mean the variation is significant among the sites

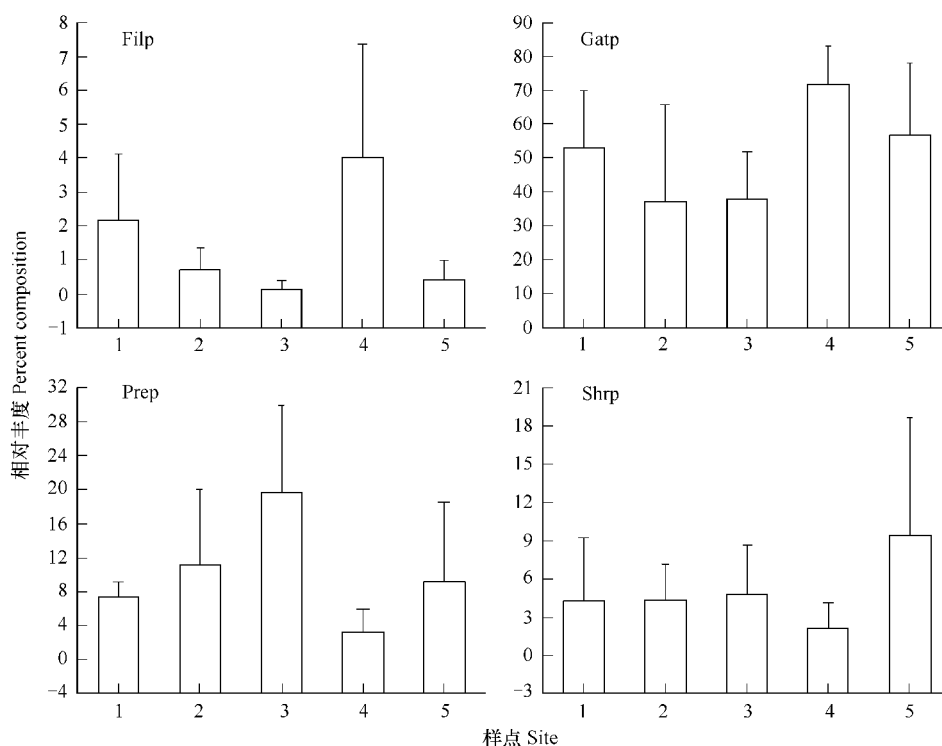


图3 底栖动物各主要功能摄食类群在5个样点间的变动

Fig. 3 The percent composition of FFG among five sites

Filp: 滤食者百分含量, GatP: 收集者百分含量, Prep: 捕食者百分含量, Shrp: 撕食者百分含量 Filp: Filter-collectors percentage, GatP: Gather-collectors percentage, Prep: Predators percentage, Shrp: Shredders percentage

点4迅速回升,而样点5再次下降,而捕食者百分含量和撕食者百分含量的变动规律刚好相反(图3)。从图中还可以看出,样点3的滤食者相对丰度基本为零,这可能与该样点的流速基本为零有关,因为滤食者主要依靠水流的作用来获取食物。而颗粒物收集者在该点的变化不大,因为其食物获取方式主要依靠的是颗粒物的

自然沉降作用,但高流速的样点依然利于收集者获得更多的食物而有较高的百分含量。捕食者百分数在样点 3 最高的原因可能是样点 3 无水流搅动,易于捕食者捕食。另外样点 3 几乎无水流,使得适应流水生境的其它底栖动物大量消失,这也可能使得捕食者占有较大的百分比。按照河流连续统理论(River Continuum Concept, RCC),越往下游,撕食者的相对丰度越少,而颗粒物收集者则增加^[17]。而本研究中,撕食者相对丰度和收集者相对丰度的变化趋势都发生了较大的改变,因为坝对物质、能量的阻隔使两者的分布发生了较大的变化。唐涛等对香溪河河流连续统特征研究中也发现,在局部受干扰的河段 RCC 的趋势已经改变,特别是在前 3 级河流内^[18]。

2.4 群落相似性分析

从上述结果可大致看出各样点底栖动物的物种组成及群落结构。下面的聚类分析则更为清楚地说明各样点间群落组成的相似性。从图中可以看出样点 3 与其它 4 个样点在物种组成上有较大的差异(图 4A)。而考虑各物种的相对丰度时,5 个样点可按相似性程度划分如下:样点 1 与样点 4 最为相近,其次是样点 2 与样点 5,样点 3 的相似程度最低(图 4B)。大多数河流底栖动物对流速有最低要求,当流速低于这个下限时,这些动物就不能正常存活^[19,20]。而样点 3 的流速基本为零,这导致了样点 3 会与其它样点有较大的物种组成差异。另外,样点 3 被坝阻隔,基本不与河流联通(大水漫过河坝的情况除外),而其余 4 个样点都有水流相连,在水流的作用下或底栖动物自身的移动能力,各物种会在各样点间进行一定的扩散。各样点物种的丰度则与该样点生境的舒适程度(habitat suitability)^[14]有关。由结果可见,样点 1 与样点 4 的生境较为舒适,因为这两个样点受电站的影响较小,基本保持河流状态,而所采集到的物种又基本是适于河流生境的水生昆虫,这就决定了这两个样点各物种丰度较为相似。

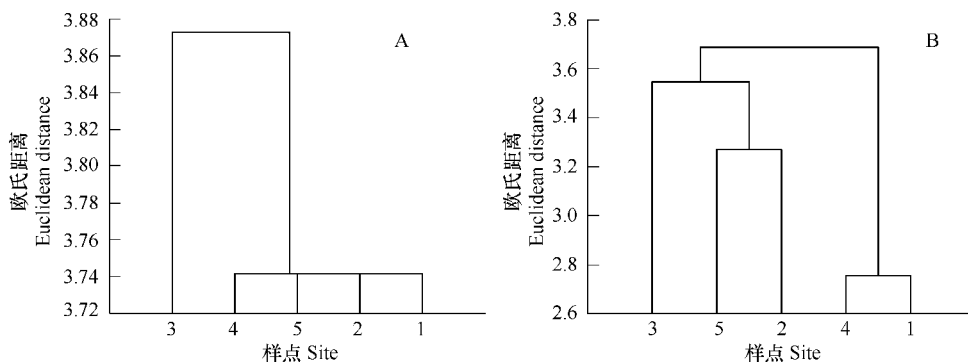


图 4 根据底栖动物物种组成(A)和平均丰度(B)对电站 5 个样点聚类分析结果(单联法)

Fig. 4 Hierarchical agglomerative clustering (single linkage) based on taxa composition (A) and average individual abundance (B)

目前关于最小生态需水量的研究很多^[21,22]。从对样点 3 的研究结果表明,保持最小生态需水量对样点 3 具有重要意义。而计算出这个水量将是以后研究的重点,当然,计算时必须考虑这些水量能否保证生境破坏的程度最低,如保持最小流速,使得原本生活在这里的大部分物种不至于消失。

3 结论

本研究主要分析小水电站的修建对河流底栖动物的影响及其影响程度。研究表明,小水电站的修建对河流生态系统各方面都产生了影响。主要表现在河段物理因子方面,因为引水坝的修建使得河流生境片段化。而水化学方面各种影响并不明显,各参数也没有太大的差异。

从底栖动物的变动情况看,底栖动物的物种组成、现存量、优势类群以及功能摄食类群等方面都不同程度地受到小水电站的干扰。其中,底栖动物的密度、功能摄食类群指数受到了较为显著的影响,而物种组成、优势类群等受到的影响并不明显。

从样点情况看,电站对各样点的影响程度不同。根据各样点间的群落组成及相似性差异可知,样点 3 受到的影响最大,其次是样点 5。

本研究从河流环境与河流底栖动物等方面对小水电站修建的负面影响进行了探讨,为生物资源保护及水资源的合理利用提供了重要的参考依据。考虑到底栖动物的分布具有较强的季节性,下一步实验将着重研究该影响在时间动态上的差异。

References:

- [1] Fan J H, Liu Q, Ma Z L, *et al.* Environmental Impact of Hydropower Development in the Upper Reaches of Minjiang River. *Sichuan Environment*, 2006, 25(1): 23—27.
- [2] Thomson, James R, Hart, *et al.* Effects of removal of a small dam on downstream macroinvertebrate and algal assemblages in a Pennsylvania stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24: 192—207.
- [3] Chen Y B, Li S R. Environmental Impacts and Environmental Protection Progress of Three Gorge Hydroelectric Project on the Yangtze River. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2001, 17(4): 65—70.
- [4] Xu J, Chen L H. Analysis on Environmental Impact and Eco-restoration of Large Hydropower Station Construction — Take the Manwan Hydropower of Yunnan as a Case. *Yunnan Environmental Science*, 2005, 24(4): 14—18.
- [5] Benstead J P, March J G, Pringle C M, *et al.* Effects of a low-head dam and water abstraction on migratory tropical stream biota. *Ecological Applications*, 1999, 9: 656—668.
- [6] March J G, Benstead J P, Pringle C M, *et al.* Damming tropical island streams: Problems, solutions, and alternatives. *BioScience*, 2003, 53: 1069—1078.
- [7] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345—352.
- [8] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Jiangsu: Huhai University Press, 1994.
- [9] Epler J H. Identification manual for the larval chironomidae (Diptera) of North and South Carolina; EPA Grant # X984170-97. 2001.
- [10] Qu X D, Tang T, Xie Z C, *et al.* Distribution of macroinvertebrates in the Xiangxi River System and their relationship with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(2): 233—238.
- [11] 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.
- [12] Cortes R M V, Ferreira M T, Oliveira S V, *et al.* Contrasting impact of small dams on the macroinvertebrates of two Iberian mountain rivers. *Hydrobiologia*, 1998, 389: 51—61.
- [13] Castella E, Bickerton M, Armitage P D, *et al.* The effects of water abstractions on invertebrate communities. *Hydrobiologia*, 1996, 317: 97—107.
- [14] Jowett I, Richardson J. Microhabitats of benthic invertebrates in a New Zealand river and the development of in-stream flow-habitat models for *Deleatidium* spp. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1990, 24: 19—30.
- [15] Heino J. Functional biodiversity of macroinvertebrate assemblages along major ecological gradients of boreal headwater streams. *Freshwater Biology*, 2005, 50(9): 1578—1587.
- [16] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish (second edition). Vol. EPA 841-B-99-002. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [17] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 130—137.
- [18] Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 141—144.

- [19] Hynes H B N. The Ecology of Running Waters. Toronto: University of Toronto Press, 1970.
- [20] Statzner B, Gore J A, Resh V H. Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, 7: 307—360.
- [21] Tang Y, Wang H, Chen M J, *et al.* Research on Minimum Ecological Flux on Lower Reach of Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 171—174.
- [22] Sun T, Yang Z F, Liu J L. Study on the ecological water demands for typical estuaries in Haihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2707—2715.

参考文献:

- [1] 范继辉,刘巧,麻泽龙,等. 岷江上游水电开发对环境的影响. *四川环境*, 2006, 25(1): 23~27.
- [3] 陈永柏,李盛荣. 三峡工程的环境影响及环境保护进展. *水电站设计*, 2001, 17(4): 65~70.
- [4] 徐旌,陈丽晖. 大型水电站建设的环境影响及生态修复——以云南漫湾水电站为例. *云南环境科学*, 2005, 24(4): 14~18.
- [11] 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.
- [18] 唐涛,黎道丰,潘文斌,等. 香溪河河流连续统特征研究. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 141~144.
- [21] 唐蕴,王浩,陈敏建,等. 黄河下游河道最小生态流量研究. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 171~174.
- [22] 孙涛,杨志峰,刘静玲. 海河流域典型河口生态环境需水量. *生态学报*, 2004, 24(12): 2707~2715.