

硫铁矿酸性矿山废水对大型底栖动物群落结构的影响

蒋万祥^{1,2}, 唐 涛¹, 贾兴焕^{1,2}, 吴乃成^{1,2}, 段树桂^{1,2}, 黎道丰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: 2006 年 11 月和 2007 年 1 月通过金属和生物指标的量化监测, 就酸性矿山废水对大型底栖动物群落结构的影响及高岚河污染现状进行研究。典型对应分析表明: 酸性废水对高岚河上游大型底栖动物群落结构影响最大。对高岚河大型底栖动物群落结构和功能摄食类群进行分析, 研究硫铁矿酸性矿山废水对河流大型底栖动物群落的影响, 结果表明: 高岚河自矿源起约 16 km 河段, 大型底栖动物群落结构已经遭到严重破坏; 多足摇蚊 *Polypedilum tritum* 和真凯氏摇蚊 *Eukiefferiella brehmi* 对酸和金属均具有较强的耐受力; 捕食者和刮食者对矿山酸性废水带来的污染反应最为敏感。逐步回归分析表明: 大型底栖动物生物多样性受 Al、Ca、Cd、Fe、Mg、Mn 等金属影响最大; 密度受 Ca、Cr 和 Mg 的影响最大。

关键词: 酸性矿山废水; 大型底栖动物; 高岚河

文章编号: 1000-0933(2008)10-4805-10 中图分类号: Q142, Q958, Q178 文献标识码: A

Impacts of acid pyrite drainage on the macroinvertebrate community in Gaolan River

JIANG Wan-Xiang^{1,2}, TANG Tao¹, JIA Xing-Huan^{1,2}, WU Nai-Cheng^{1,2}, DUAN Shu-Gui^{1,2}, LI Dao-Feng¹, 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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4805 ~ 4814.

Abstract: To evaluate the impacts of acid mine drainage on macroinvertebrate community and the pollution in Gaolan River, metals and macroinvertebrates were quantitatively investigated in November 2006 and January 2007. The results show that acid mine drainage is the major factor impacting the macroinvertebrate community in the upstream of Gaolan River; macroinvertebrates communities are significantly affected by acid mine drainage from pyrite about 16 km downstream of the mine water discharge point; *Polypedilum tritum* and *Eukiefferiella brehmi* are tolerant of both acid and metals; predators and scrapers of macroinvertebrates are most sensitive to the pollution of acid mine drainage; the biodiversity of macroinvertebrates is impacted by aluminum, calcium, cadmium, ferrum, magnesium and manganese; and the density is significantly impacted by cadmium, chromium and magnesium.

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(KZCX2-YW-427, KSCX2-SW-111); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2005AA60101003)

收稿日期: 2007-06-06; **修订日期:** 2007-12-14

作者简介: 蒋万祥(1979 ~), 男, 山东青岛人, 硕士生, 主要从事系统与流域生态学, 大型底栖动物生态学研究. E-mail: jiangwx@ihb.ac.cn
jiangwx99@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30330140), the National Basic Research Priorities Program (973 Program, No. 2002CB412300), the Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX2-YW-427, KSCX2-SW-111), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program 2005AA60101003)

Received date: 2007-06-06; **Accepted date:** 2007-12-14

Biography: JIANG Wan-Xiang, Master candidate, mainly engaged in systems ecology and watershed ecology, macroinvertebrate ecology. E-mail: jiangwx@ihb.ac.cn jiangwx99@163.com

Key Words: acid mine drainage; macroinvertebrate; Gaolan River

酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)具有低 pH 值、高重金属含量的特征,它往往通过地表径流和地下渗透等形式,使得地表水和地下水酸化和盐化,通常对生态区系产生较大的负面影响^[1,2]。重金属是指比重大于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属^[3,4],它不但能够致使生物的生长受阻、繁殖率降低、产生畸形等,而且当浓度达到一定高度时可直接杀死生物体^[5]。重金属不能被微生物分解,但可在生物体内富集,成为持久性污染物^[6]。河流生态系统是地表水的重要载体,与周围人群生活密切相关,由于受生产和生活的影响,特别是采矿业发达的地区,受盐化(金属化)和酸化的影响,地表水水质日趋恶化,人类的生存环境遭到不同程度的破坏^[7]。

大型底栖无脊椎动物是淡水生态系统的一个重要组成部分,对环境变化比较敏感,不同种类的大型底栖无脊椎动物对水体污染具有不同的耐受力,因此常被用作水质评价的指标^[8]。目前,我国由矿山酸性废水造成河流污染的现象较为普遍,而关于这方面的研究相对较少。对香溪河支流高岚河底栖动物群落结构进行研究,旨在通过大型底栖动物的量化监测,对高岚河污染现状进行评估,了解大型底栖无脊椎动物对酸性废水的承受力与敏感性,找出该流域的耐污种群,以为后续实验及香溪河的综合治理和建立生物指示规范提供相应理论基础。

1 材料与方法

1.1 样点概况与设置

香溪河是三峡水库湖北库区最大且靠近三峡大坝坝首的一条河流,干流长 94 km,流域面积 3099 km^2 ,自然落差 1540 m,拥有九冲河、古夫河、高岚河 3 条主要支流^[9,10],其健康与否对三峡水库水质有直接影响^[11]。香溪河流域属亚热带季风气候,冬季降水较少,仅占全年降水量的 5% 左右^①,水文学特征相对稳定;大型底栖动物生物多样性在冬季最高^②,群落结构稳定,因此本研究的开展定于 2006 年 11 月和 2007 年 1 月,以避免洪水事件及生物的羽化繁殖等对研究结果的影响。

高岚硫铁矿位于香溪河支流高岚河的上游,致使高岚河成为一条典型的上源污染型河流。本研究分 3 个河段就高岚硫铁矿污染及其对底栖动物群落结构的影响进行探讨(见图 1)。

(1) 自硫铁矿(pyrite, P)到高岚河支流夏阳河汇入点为一段(上游河段),选取 3 个样点,依次命名为 G1、G2、G3;该河段长约 19 km,河床不同程度地被废矿沉积物所覆盖;其中,硫铁矿到 G3 点河段长约 16 km。

(2) 于未受污染的夏阳河支流(对照河段)选取 4 个对照点,依次命名为 D1、D2、D3、D4;其中 D1 海拔较高,生境特点同硫铁矿处相似,D2、D3、D4 距两河汇合处距离分别同 G1、G2、G3 相当。

(3) 从夏阳河汇入点起(中下游河段)选取 5 个样点,依次命名为 G4、G5、G6、G7、G8,该河段长约 30 km。

1.2 研究方法

1.2.1 底栖无脊椎动物的采集与处理

于每一样点用 40 目网径、采样面积为 0.09 m^2 的索伯网(Surber sampler)顺流方向沿断面分左中右各采集

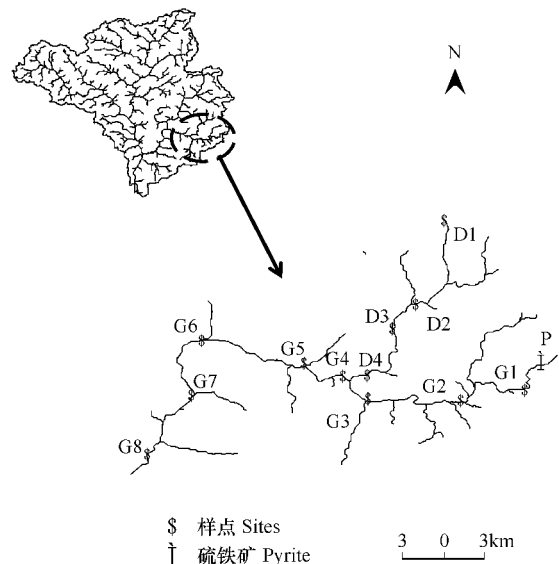


图 1 香溪河水系图及样点分布图

Fig. 1 Xiangxi River system and locations of the sampling sites

① 唐涛. 香溪河附石藻类特征及河流生态系统管理研究. 中国科学院水生生物研究所博士学位论文, 2003, 30 ~ 36

② 渠晓东. 香溪河大型底栖动物时空动态、生物完整性及小水电的影响研究. 中国科学院水生生物研究所博士学位论文, 2005, 49 ~ 67.

1 次,将网中的大型底栖无脊椎动物拣出,分装于 3 个标本瓶中,并用 10% 的福尔马林液固定^[12];标本带回实验室挑拣后,分类、计数。本研究中绝大多数底栖动物鉴定到种或属^[13,14]。

1.2.2 水样的采集与处理

用干净的塑料瓶于每个样点采集 3 个重复水样,放于有冰块的保温箱中,带回实验室后将水样用 0.45 μ m 的微孔滤膜抽滤,取一定量抽滤后的水样,配成 1% HNO₃ 的溶液,用电感耦合等离子体原子发射光谱分析仪(ICP-AES)测量水样中各种金属含量^[15]。本研究测量的金属指标有 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Fe、Al、Ca 和 Mg 等 10 种金属。

1.3 现场指标的测定

pH、电导、水温、总溶解性固体用 HORIBA W-23 多参数水质分析仪测定(由于仪器故障,2006 年 11 月总溶解性固体、G1 号点的水温和电导、G5 和 G7 号点 pH 值未测);流速利用 LJD 型打印式流速仪测定断面 0.6 倍水深处的流速,水深和水面宽度利用卷尺测定。

1.4 软件使用

本研究中非度量多维标度排序、典型对应分析使用的统计软件分别为 PC-ORD 4.0 和 Canoco 4.5,逐步回归分析和方差分析使用的统计软件为 SPSS 11.5。

2 结果与讨论

2.1 环境因子

影响大型底栖动物分布的环境因子有很多,渠晓东等^[16]研究认为流速、海拔、电导、pH 等环境因子是影响香溪河流域大型底栖动物群落结构的主要环境因子。为明确影响高岚河大型底栖动物分布的主要环境因子,基于大型底栖动物群落结构对采样点与环境因子间进行典型对应分析(CCA)(图 2)。两次采样 G1 点均未采集到底栖动物,不能参与分析。结合渠晓东等^[16~18]关于香溪河的研究及高岚河的污染现状,本研究选取的主要环境指标有流速、海拔、电导、pH、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Fe、Al、Ca、Mg 等 14 个因子。

对环境因子进行蒙特卡罗检验,排除贡献较小的因子,得到海拔、流速、电导、pH、Mn、Fe、Al、Ca、Mg 为影响调查区域大型底栖动物群落结构的主要环境因子。两次采样影响上游河段样点(G2、G3)大型底栖动物的因子均为流速、Mn、Fe 和 Al,其中 2006 年 11 月受 Mn 和 Al 影响最大,2007 年 1 月受 Mn、Al 和 Fe 影响最大。上述分析表明:酸性废水的排放是影响高岚河上游河段大型底栖动物群落结构的主要因素。

2.2 群落结构特征

本研究共采集到大型底栖动物 29091 个,计 145 个分类单元,隶属 7 纲 13 目 42 科 94 属;按 Bunn 等^[19]把密度相对丰富度大于 5% 的类群定义为优势类群,发现侧枝纹石蛾(*Ceratopsyche* sp.)、锯形蜉(*Serratella* sp.)和四节蜉(*Baetis* sp.)为调查区域的优势类群,密度相对丰富度分别为 18.89%、15.50%、12.01%。其中,对照河段(D1~D4)的优势类群为锯形蜉(*Serratella* sp.)、四节蜉(*Baetis* sp.)、侧枝纹石蛾(*Ceratopsyche* sp.)、真凯氏摇蚊(*Eukiefferiella brehmi*)和朝大蚊(*Antocha* sp.);中下游(G4~G8)底栖动物优势类群为侧枝纹石蛾(*Ceratopsyche* sp.)、锯形蜉(*Serratella* sp.)、四节蜉(*Baetis* sp.)和朝大蚊(*Antocha* sp.);上游河段(G1~G3)仅出现侧枝纹石蛾(*Ceratopsyche* sp.)、多足摇蚊 *Polypedilum tritum*、真凯氏摇蚊 *Eukiefferiella brehmi* 和摇蚊蛹(*Pupa of chironomidae*)。

对各样点金属含量及 pH 值进行比较(表 1),可以看出,2 次采集的水样中金属含量具有相同规律,即上游河段(矿源-G3)金属含量高于对照河段(D1~D4)和中下游河段(G4~G8),中下游河段水体中金属含量和对照河段相当;pH 值在上游河段低于其它河段,特别是 G1 和 G2 两样点,水体呈现较强的酸性。结合表 1 和表 2 进行分析可知:G1 号样点 pH 值小于 4,金属含量最高,酸污染和金属污染最严重,两次采样均未采集到底栖动物,表明该生境已不适合大型底栖动物生存;G2 号样点 pH 仍然较低,金属含量仅次于 G1 号样点,仅采集到多足摇蚊 *Polypedilum tritum* 和真凯氏摇蚊 *Eukiefferiella brehmi* 及一种摇蚊蛹;G3 号样点水体表现为弱酸性,金属含量较 G1、G2 两个样点明显降低,两次采样中仅 Mn 的含量明显高于对照河段(D1~D4)和中下游

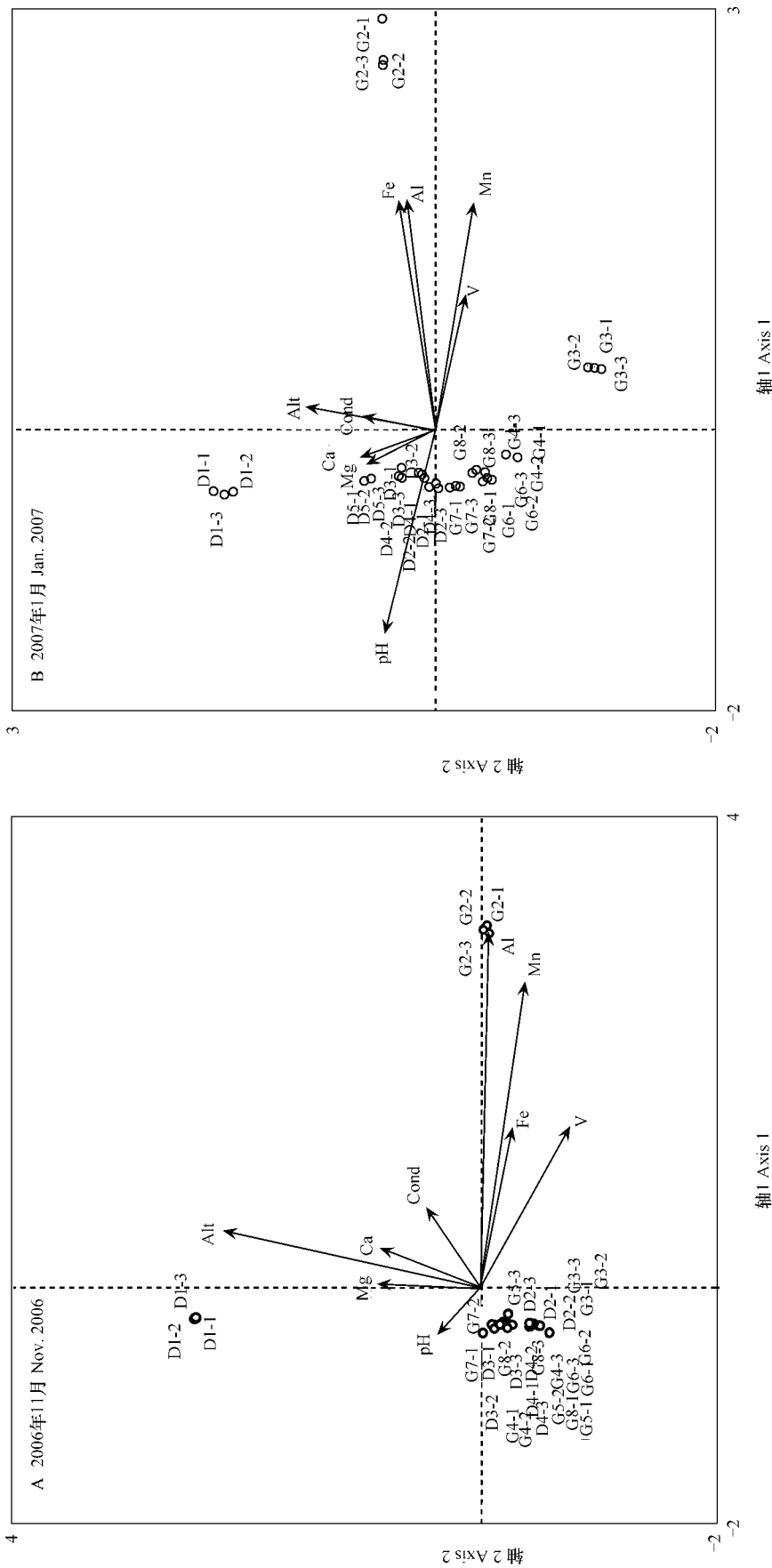


图2 大型底栖动物采样点与金属含量的典型对应分类图
Fig. 2 CCA ordination diagrams of macroinvertebrates: sites-metal
Alt: 海拔 altitude; V: 流速 velocity; Cond: 电导 conductance

河段(G4~G8)各样点,生物样本中仅发现侧枝纹石蛾(*Ceratopsyche* sp.)和多足摇蚊 *Polypedilum tritum* 2 个分类单元,各项生物指标并没有因 pH 趋近中性和金属含量的明显减少而明显提高;中下游河段(G4~G8)水体中金属含量及 pH 值与对照河段(D1~D4)相近,底栖动物各项生物指标较上游都有很大提高,除 G4 号样点部分生物指标较明显低于对照河段外,其它样点的生物指标与对照河段非常接近。上述分析表明:(1)上游河段大型底栖动物群落结构已经遭到严重破坏;(2)多足摇蚊 *Polypedilum tritum* 和真凯氏摇蚊 *Eukiefferiella brehmi* 对金属和酸具有较强的耐受性。

根据两次采样各样本大型底栖动物物种组成特点及各分类单元的密度,对每次采样中 11 个样点(G1 号样点由于未采集到大型底栖动物,不参与分析)共计 33 个样本的大型底栖动物群落结构进行非度量多维标度排序(NMS)2 维分析(图 3)。结果为:两次采样的大型底栖动物群落结构排序图非常相似,即高岚河中下游 5 个样点(G4~G8)与对照样点(D1~D4)距离非常近;而位于上游的 G2 和 G3 号样点与对照样点距离较远。说明中下游河段大型底栖动物群落结构与对照河段相似性较高,上游河段大型底栖动物群落结构与对照河段存在较大差异。上述分析再次表明:上游约 16km 的河段大型底栖动物群落结构受矿山酸性废水的影响非常严重;夏阳河的稀释作用和水体中金属的沉积等,使得高岚河中下游水质明显变好,大型底栖动物物种多样性和密度趋近对照河段,随着中下游其它支流的汇入和沉积作用,使得部分样点大型底栖动物群落结构达到对照样点水平。

2.3 功能摄食类群

功能摄食类群(functional feeding groups)对研究底栖动物群落结构和功能组成有重要作用^[20]。根据 Barbour 等^[21]将大型底栖动物分为滤食者(filter-collectors)、收集者(gather-collectors)、捕食者(predators)、刮食者(scrapers)和撕食者(shredders)等 5 个功能类群进行分析,探讨功能摄食类群对河流酸化和盐化现象的敏感性。

对大型底栖动物功能摄食类群进行分析,发现收集者密度相对丰度最大,其次为滤食者和刮食者,捕食者和撕食者最小,相对丰度分别为 52.2%、25.3%、12.2%、5.9%、4.4%。对两次采样大型底栖动物功能摄食类群密度相对丰度的空间动态进行分析(图 4),结果,两次采样于 G1 点均未采集到任何功能类群的底栖动物;2006 年 11 月于 G2 点采集的大型底栖动物均属于收集者,2007 年 1 月于 G2 点采集的大型底栖动物属于撕食者和收集者;2006 年 11 月于 G3 点采集到的大型底栖动物均属于滤食者,2007 年 1 月于 G3 点采集到的大型底栖动物属于撕食者和滤食者;对照河段各点(D1~D4)和中下游各点(G4~G8)大型底栖动物群落均由四到五个功能摄食类群组成;捕食者、刮食者于高岚河上游均未出现。两次采集的样本中刮食者于上游 G1~G3 号点均未出现,主要是因为该河段底层为废矿沉积物覆盖,刮食者的食物来源附石性藻类生长受限所致;而捕食者于上游河段(矿源-G3)样本中未出现,除酸性废水污染的原因外,主要是因为该河段其它功能摄食类群的大型底栖动物密度过低,不能满足其摄食需求。上述分析表明,受硫铁矿酸性矿山废水影响,高岚河上游河段各样点功能类群相对单一;捕食者和刮食者对矿山酸性废水带来的污染反应最为敏感。

2.4 金属对大型底栖动物群落结构的影响

由表 1 可以看出,金属含量在 G1、G2 两个样点均明显高于其它样点;从 G4 号样点开始,高岚河干流各样点金属(Mn 除外)含量同对照河段(夏阳河)各样点相当。Ca 和 Mg 两种金属含量在高岚河干流并未表现出明显的下降趋势,张建立等^[22]认为是矿坑酸性排水与含 Ca、Mg 的碳酸盐矿物接触发生一系列化学反应所致。

为进一步验证金属对大型底栖动物群落结构的影响,以 Al、Mn、Cr、Zn、Cd、Cu、Mg、Ca、Fe、Zn 等 10 种金属含量为自变量,分别取 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 多样性指数、均匀度指数、总物种丰富度、EPT 物种丰富度、总密度、侧枝纹石蛾密度、锯形蜉密度、四节蜉密度为因变量进行逐步回归分析(见表 3)。参与分析的 10 种金属中,有 Al、Mn、Cr、Fe、Cd、Ca、Mg 等 7 种对不同生物参数有显著影响($p < 0.05$)。其中,Al、Ca、Cd、Mn 对 Shannon-Wiener 多样性指数影响显著($p < 0.05$),Al、Fe、Mg、Mn 对 Margalef 多样性指数影响显著($p < 0.05$),Al、Fe、Mn 对均匀度指数影响显著($p < 0.05$),Fe、Mg、Mn 对总物种丰富度影响显著($p < 0.05$),

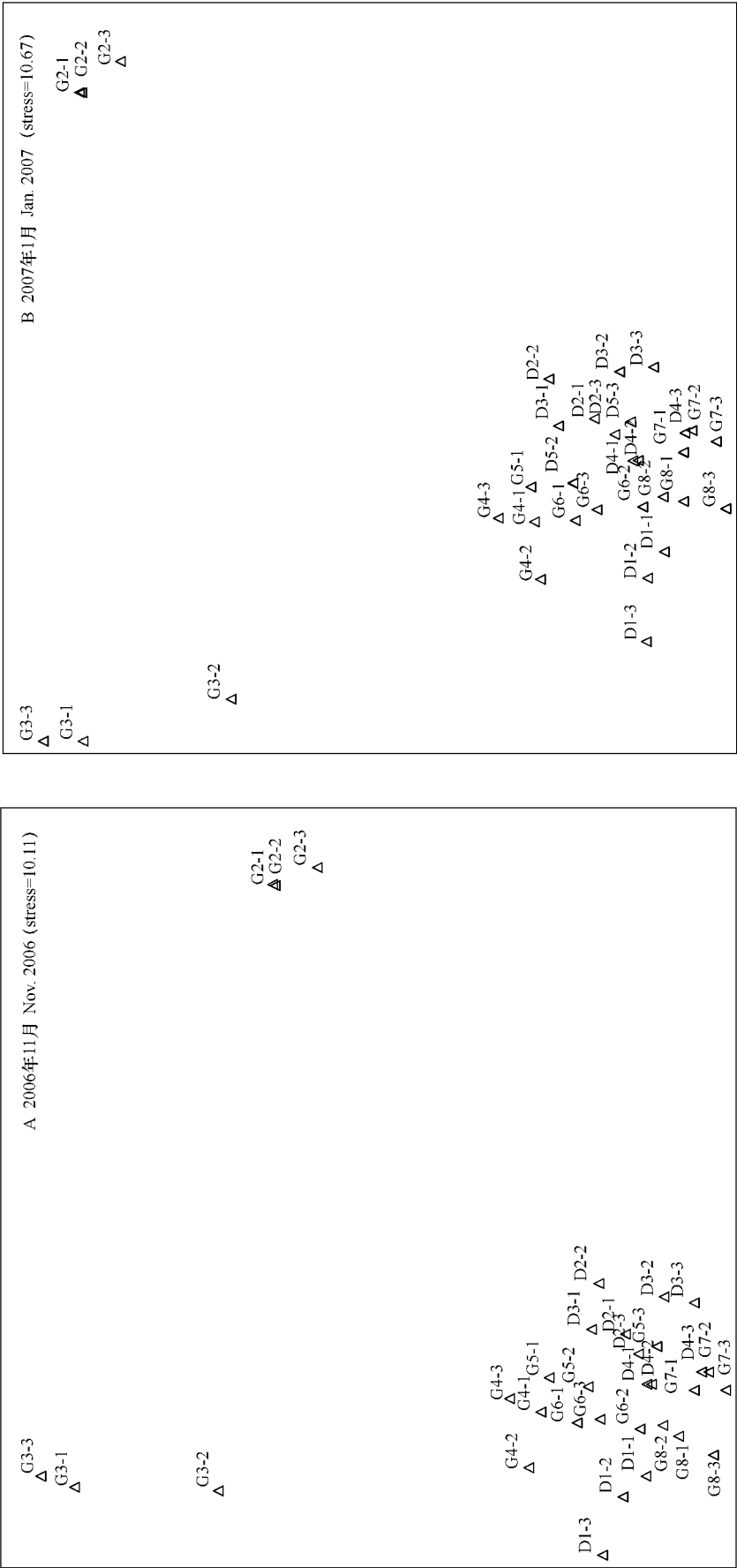


图3 大型底栖动物群落非度量多维标度排序图
Fig. 3 The non-metric multidimensional scaling ordinal configuration of macroinvertebrates communities

表 1 水体中重金属含量(10^{-3} mg/L)和 pH 值

Table 1 The content of heavy metals (10^{-3} mg/L) and pH

时间 Time	样点 Sites	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Zn	pH 值
2006 年 11 月 Nov. 2006	D1	43.72 ± 12.59	33553.53 ± 193.40	0.41 ± 0.10	0.00 ± 0.00	5.15 ± 0.19	32.08 ± 7.17	17622.77 ± 52.72	1.29 ± 0.15	3.45 ± 1.11	24.69 ± 3.78	8.60
	D2	160.83 ± 183.37	12163.30 ± 161.71	0.12 ± 0.17	0.578 ± 0.82	5.30 ± 2.02	151.62 ± 185.99	4780.99 ± 120.91	2.78 ± 2.31	2.98 ± 0.55	13.45 ± 3.86	8.79
	D3	46.98 ± 19.29	19021.27 ± 119.16	0.18 ± 0.16	0.00 ± 0.00	7.61 ± 2.60	32.04 ± 18.06	9075.82 ± 66.53	1.45 ± 1.36	4.27 ± 0.16	15.32 ± 3.51	8.32
	D4	37.07 ± 14.40	23840.33 ± 96.31	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	5.85 ± 1.76	20.16 ± 8.30	10378.97 ± 22.62	0.72 ± 0.06	4.13 ± 0.00	11.97 ± 0.66	8.32
	G1	8350.23 ± 95.61	24014.87 ± 365.18	6.46 ± 0.45	12.02 ± 4.17	25.70 ± 11.04	6449.85 ± 18.55	13126.55 ± 145	660.41 ± 8.59	71.01 ± 3.78	73.98 ± 11.60	<4
	G2	4590.72 ± 45.14	28782.90 ± 260.91	0.41 ± 0.13	1.78 ± 1.17	15.17 ± 1.28	167.04 ± 7.54	12866.8 ± 72.02	399.4 ± 2.93	9.10 ± 0.00	26.66 ± 2.77	5.17
	G3	73.78 ± 12.26	22847.07 ± 1036.32	0.35 ± 0.01	0.78 ± 1.10	8.08 ± 4.13	58.03 ± 57.65	9301.95 ± 119.08	226.56 ± 2.5	5.15 ± 0.00	20.78 ± 5.72	6.82
	G4	83.04 ± 20.33	18575.07 ± 2063.33	0.40 ± 0.03	0.86 ± 1.21	5.94 ± 1.48	81.37 ± 88.99	7745.13 ± 1115.30	71.77 ± 21.75	1.55 ± 0.00	12.95 ± 0.59	8.32
2007 年 1 月 Jan. 2007	G5	43.66 ± 16.27	39454.67 ± 187.88	0.16 ± 0.00	0.00 ± 0.00	4.79 ± 4.73	40.10 ± 26.59	20110.43 ± 223.80	0.88 ± 0.35	3.01 ± 0.00	7.60 ± 2.78	\
	G6	82.23 ± 12.38	22789.9 ± 284.08	0.45 ± 0.32	0.89 ± 0.37	5.94 ± 1.31	24.10 ± 11.79	10730.17 ± 109.40	24.37 ± 1.43	2.43 ± 0.35	8.04 ± 2.01	8.82
	G7	33.59 ± 10.63	33358.23 ± 193.94	0.26 ± 0.05	0.88 ± 0.00	5.04 ± 2.24	34.53 ± 7.82	19276.03 ± 21.15	1.40 ± 0.31	2.39 ± 0.00	7.06 ± 0.94	\
	G8	133.70 ± 42.90	32356.30 ± 173.94	0.36 ± 0.10	2.27 ± 0.00	4.54 ± 1.95	91.63 ± 40.19	18345.77 ± 87.64	3.83 ± 1.70	1.38 ± 1.95	9.96 ± 2.67	8.82
	D1	1.60 ± 1.96	38829.87 ± 281.06	0.00 ± 0.00	2.02 ± 0.6	0.00 ± 0.00	9.61 ± 2.66	15080.53 ± 215.18	0.02 ± 0.03	1.43 ± 1.72	9.74 ± 1.15	8.21
	D2	7.00 ± 9.43	16426.73 ± 144.43	0.10 ± 0.09	1.76 ± 0.68	1.65 ± 2.10	7.67 ± 2.12	4771.18 ± 40.05	0.15 ± 0.10	0.00 ± 0.00	3.03 ± 0.39	8.33
	D3	6.87 ± 4.64	23964.40 ± 178.56	0.06 ± 0.08	1.59 ± 0.80	0.98 ± 1.52	13.02 ± 6.22	8717.84 ± 50.90	0.00 ± 0.00	0.40 ± 0.10	5.14 ± 1.43	8.02
	D4	3.40 ± 0.62	26810.93 ± 113.85	0.00 ± 0.00	2.71 ± 0.22	1.43 ± 1.36	10.50 ± 7.65	9264.03 ± 54.82	0.23 ± 0.07	1.08 ± 1.88	3.60 ± 1.66	8.16
	G1	9789.17 ± 92.31	43601.33 ± 173.78	0.25 ± 0.22	6.98 ± 0.72	17.96 ± 1.93	4799.80 ± 192.93	17447.77 ± 74.95	924.55 ± 1.23	1.76 ± 1.29	34.55 ± 1.13	<4
	G2	1507.49 ± 268.30	28745.20 ± 156.06	0.03 ± 0.05	0.80 ± 0.12	7.52 ± 0.65	143.02 ± 1.84	10352.40 ± 43.00	333.96 ± 2.41	1.19 ± 2.07	17.03 ± 1.99	5.35
	G3	6.18 ± 7.25	23503.87 ± 179.68	0.04 ± 0.04	1.46 ± 0.51	0.52 ± 0.20	5.20 ± 0.63	7464.45 ± 56.33	199.33 ± 1.51	1.46 ± 2.28	8.80 ± 1.50	6.52
	G4	33.58 ± 6.13	17873.07 ± 126.76	0.00 ± 0.00	1.68 ± 0.47	0.00 ± 0.00	5.50 ± 2.13	5270.70 ± 32.63	89.31 ± 1.74	0.00 ± 0.00	4.54 ± 0.92	6.92
	G5	7.82 ± 3.58	50204.03 ± 479.02	0.03 ± 0.04	1.87 ± 0.45	0.73 ± 0.76	5.56 ± 1.46	19669.3 ± 98.01	0.34 ± 0.16	0.86 ± 1.49	3.45 ± 1.68	7.22
	G6	63.29 ± 7.91	26643.33 ± 197.51	0.00 ± 0.00	1.81 ± 0.55	2.21 ± 1.06	6.96 ± 1.62	9668.03 ± 76.92	31.46 ± 0.76	0.72 ± 1.25	3.52 ± 1.90	7.24
	G7	5.69 ± 4.9	40505.40 ± 140.55	0.00 ± 0.00	1.42 ± 0.89	0.43 ± 0.74	5.71 ± 0.84	17520.30 ± 54.45	0.48 ± 0.10	0.00 ± 0.00	4.27 ± 1.13	7.45
	G8	36.36 ± 5.97	38458.93 ± 214.76	0.05 ± 0.09	1.30 ± 1.09	0.20 ± 0.34	9.25 ± 2.10	16737.47 ± 82.90	5.39 ± 0.10	0.00 ± 0.00	4.07 ± 1.47	7.87

表 2 各采样点生物参数
Table 2 The bioparameters among the sampling sites

时间 Time	样点 Sites	密度 (个/m ²) Density(ind./m ²)	优势类群密度(个/m ²) Density of dominant taxa (ind./m ²)			物种丰富度 Richness	EPT 物种丰富度 EPT Richness
			侧枝纹石蛾 <i>Ceratopsyche</i> sp.	锯形蜉 <i>Serratella</i> sp.	四节蜉 <i>Baetis</i> sp.		
2006 年 11 月 Nov. 2006	D1	5759.26 ± 718.74	300.00 ± 120.19	33.33 ± 33.33	700.00 ± 447.35	37.00 ± 4.36	17.67 ± 2.31
	D2	4692.60 ± 2301.94	985.19 ± 1030.78	1177.78 ± 762.31	107.41 ± 75.63	25.67 ± 8.62	10.00 ± 3.00
	D3	3666.67 ± 1251.81	22.22 ± 29.40	1174.07 ± 556.92	500.00 ± 107.15	26.00 ± 5.20	10.00 ± 1.73
	D4	8762.96 ± 4496.94	1255.56 ± 732.07	2574.07 ± 1768.35	1007.41 ± 179.62	29.67 ± 6.81	10.33 ± 3.79
	G1	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	G2	70.37 ± 54.81	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	2.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	G3	55.56 ± 48.43	55.56 ± 48.43	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.00 ± 0.00	1.00 ± 0.00
	G4	1566.67 ± 57.74	837.04 ± 392.89	11.11 ± 11.11	248.15 ± 119.84	9.33 ± 1.53	5.33 ± 1.15
	G5	3707.41 ± 2133.34	774.07 ± 532.21	270.37 ± 391.47	503.7 ± 431.1	23.33 ± 4.73	12.67 ± 1.15
	G6	4222.22 ± 1684.02	2155.56 ± 1580.90	166.67 ± 86.78	555.56 ± 141.86	22.00 ± 3.46	9.33 ± 2.08
	G7	13988.89 ± 3561.44	2229.63 ± 1434.08	5522.22 ± 1353.23	1662.96 ± 870.67	34.33 ± 4.51	13.00 ± 1.73
	G8	9685.19 ± 2952.32	5292.59 ± 2578.79	81.48 ± 44.91	944.44 ± 193.73	27.00 ± 0.00	10.67 ± 0.58
2007 年 1 月 Jan. 2007	D1	11670.37 ± 10308.18	151.85 ± 150.85	18.52 ± 16.97	1729.63 ± 2104.8	41.00 ± 5.29	21.33 ± 5.03
	D2	3585.19 ± 492.20	533.33 ± 234.13	533.33 ± 176.38	414.81 ± 271.56	23.67 ± 2.01	10.33 ± 2.08
	D3	3029.63 ± 50.10	351.85 ± 237.36	185.19 ± 23.13	340.74 ± 57.02	24.00 ± 1.00	12.67 ± 0.58
	D4	7614.81 ± 465.39	288.89 ± 135.17	2325.93 ± 195.74	1677.78 ± 379.73	30.67 ± 3.51	14.67 ± 1.15
	G1	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	G2	37.04 ± 44.91	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.67 ± 1.15	0.00 ± 0.00
	G3	29.63 ± 12.83	22.22 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.33 ± 0.58	1.00 ± 0.00
	G4	970.37 ± 55.92	518.52 ± 128.78	11.11 ± 11.11	170.37 ± 123.89	9.00 ± 2.00	4.33 ± 0.58
	G5	8218.52 ± 1996.92	559.26 ± 198.87	470.37 ± 689.64	1248.15 ± 462.46	31.33 ± 2.52	14.33 ± 1.53
	G6	2803.70 ± 685.06	874.07 ± 810.22	207.41 ± 112.40	677.78 ± 250.43	20.00 ± 2.65	12.00 ± 1.00
	G7	6596.30 ± 2534.61	596.3 ± 470.66	1670.37 ± 1108.46	118.52 ± 92.52	32.00 ± 3.46	13.00 ± 2.65
	G8	7022.22 ± 2959.73	2548.15 ± 2309.44	266.67 ± 194.68	329.63 ± 448.64	22.67 ± 3.06	6.67 ± 1.53

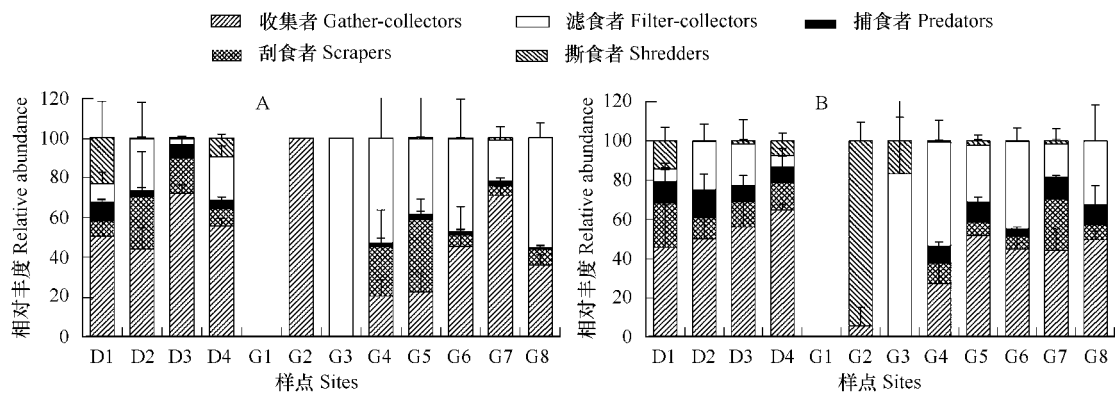


图 4 大型底栖动物各功能摄食类群的密度相对丰度

Fig. 4 The density relative abundance of Functional Feeding Groups

A: 2006 年 11 月 Nov. 2006; B: 2007 年 1 月 Jan. 2007

Fe、Mn 对 EPT 物种丰富度影响显著 ($p < 0.05$); Ca 对密度、侧枝纹石蛾密度、锯形蜉密度具有显著影响 ($p < 0.05$), Cr 对锯形蜉密度具有显著影响 ($p < 0.05$), Mg 对密度、侧枝纹石蛾密度、锯形蜉密度和四节蜉密度影响均显著 ($p < 0.05$)。多样性指数(包括 Shannon-Wiener 和 Margalef 多样性指数、物种丰富度、均匀度和属丰富度等)提供更多的有关群落组成方面的信息,多用来指示环境变化^[23],本研究中 Al、Ca、Cd、Fe、Mg、Mn 等 6 种金属对不同多样性指数有显著影响 ($p < 0.05$),表明本研究调查的金属中,Al、Ca、Cd、Fe、Mg、Mn 为影响大型底栖动物生物多样性和群落组成的主要金属;对密度及优势类群密度影响显著的金属为 Ca、Cr 和 Mg,表明 Ca、Cr 和 Mg 为影响该区域大型底栖动物密度的主要金属。

表 3 各项生物参数与金属的回归分析系数

Table 3 The coefficient of stepwise regression analysis between metals and every biological parameters

金属 Metals	Shannon- Wiener 指数 Shannon- Wiener index	Margalef 指数 Margalef index	均匀度指数 Evenness	物种丰富度 Richness	EPT 物种 丰富度 EPT richness	总密度 Total density	侧枝纹 石蛾密度 Density of <i>Ceratopsyche</i> sp.	锯形蜉密度 Density of <i>Serratella</i> sp.	四节蜉密度 Density of <i>Baetis</i> sp.
Al	366	191	-151	—	—	—	—	—	—
Ca	34	—	—	—	—	-3010361	-169231	-203365	—
Cd	59635	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	—	—	—	—	—	—	—	430000000	—
Cu	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe	—	254	-251	2928	2186	—	—	—	—
Mg	—	57.2	—	1151	—	1015326	320089	485711	95989
Mn	17236	-5491	1944	-63051	-31002	—	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn	—	—	—	—	—	—	—	—	—
常数 Constant	1.5	0.9	0.3	10.1	5.9	1072.1	2661.7	86.2	208.7
R^2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.489	0.4	0.507
F	49.3	55.8	37.9	49	28	10.5	3.5	2.86	3.8
p	0	0	0	0	0	0	0.002	0.01	0.001

“—”表示不具有统计学意义 for no statistical significance; * 本分析中金属单位为 g/L The unit of metals in this analysis is g/L

3 结论

酸性废水的排放是影响高岚河上游河段大型底栖动物群落结构的主要因素。

自矿源起约 16 km 河段,大型底栖动物群落结构受到严重影响,水生生态系统遭到严重破坏;捕食者和刮食者对矿山酸性废水造成的污染反应最为敏感;

多足摇蚊 *Polypedilum tritum* 和真凯氏摇蚊 *Eukiefferiella brehmi* 对酸性矿山废水具有较强的耐受力;

大型底栖动物生物多样性受 Al、Ca、Cd、Fe、Mg、Mn 等金属影响最大,密度受 Ca、Cr 和 Mg 的影响最大。

References:

- [1] Besch K W, Roberts-Pichette P. Effects of mining pollution on vascular plants in the Northwest Miramichi River system. *Canadian Journal of Botany*, 1970, 48: 1647—1656.
- [2] Cherry D S, Currie R J, Soucek D J, *et al.* An integrative assessment of a watershed impacted by abandoned mined land discharges. *Environmental Pollution*, 2001, 111: 377—388.
- [3] Martin M H, Coughtrey P J. *Biological monitoring of heavy metal pollution: Land and air*. London: Applied Science Publishers of The United Kingdom, 1982.
- [4] He L, Fan B W. Heavy metals in Marine Environment and their effects on Marine Organisms. *Guangzhou Chemistry*, 2006, 31(3): 63—69.
- [5] Hazen J M., Williams M W, Stover B, *et al.* Characterisation of acid mine drainage using a combination of hydrometric, chemical and isotopic analyses, Mary Murphy Mine, Colorado. *Environmental Geochemistry and Health*, 2002, 24: 1—22.
- [6] Fan C X, Zhu Y X, Ji Z J, *et al.* Characteristics of the Pollution of Heavy Metals in the Sediments of Yilihe River, Taihu basin. *Journal of Lake*

- Sciences, 2002, 14(3): 242—248.
- [7] Chen X Q and Su C L. Analysis of the Heavy Metal Pollution of Moshuihu Lake in Wuhan City. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(4): 470—474.
- [8] 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.
- [9] Wu N C, Tang T, Zhou S C, *et al.* Influence of the cascaded small hydropowers on phytoplankton in Xiangxi River system. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1091—1096.
- [10] 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.
- [11] Tang T, Qu X D, Cai Q H, *et al.* River ecosystem management — A case study of Xiangxi River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(6): 594—598.
- [12] Wang B X, Yang L F, Hu B J, *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1481—1490.
- [13] Morse J C, Yang L F and Tian L X. Aquatic insect of China useful for monitoring water quality. Jiangsu: Huai University Press, 1994.
- [14] Epler J H. Identification manual for the larval chironomidae (Diptera) of North and South Carolina; EPA Grant#X984170—97. 2001.
- [15] Hirst J, Juttner I and Ormerod S J. Comparing the responses of diatoms and macroinvertebrates to metals in upland streams of Wales and Cornwall. Freshwater Biology, 2002, 47, 1752—1765.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Tang T, Cai Q H, Liu J K, *et al.* Distribution of Epilithic Algae in Xiangxi River System and Their Relationships with Environmental Factors. Journal of Freshwater Ecology, 2002, 17(3): 345—352.
- [19] Bunn S E, Edward D H, Loneragan N R. Spatial. and temporal variation in the macroinvertebrate fauna of streams of the northern jarrah forest, Western Australia: community structure. Freshwater Biology, 1986, 16: 67—92.
- [20] Heino J. Functional biodiversity of macroinvertebrate assemblages along major ecological gradients of boreal headwater streams. Freshwater Biology, 2005, 50(9): 1578—1587.
- [21] 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.
- [22] Zhang J L, Shen Z L, Li D Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of drainage water in Coal Mines of Zibo. Geological Review, 2000, 46(3): 263—269.
- [23] Wang Y K, Stevenson R J, Metzmeier L. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the Interior Plateau Ecoregion, USA. J. N. Am. Benthol. Soc., 2005, 24(4): 990—1008.

参考文献:

- [4] 贺亮, 范必威. 海洋环境中的重金属及其对海洋生物的影响. 广州化学, 2006, 31(3): 63—69.
- [6] 范成新, 朱育新, 吉志军, 等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染. 湖泊科学, 2002, 14(3): 242—248.
- [7] 陈学庆, 苏春利. 武汉市墨水湖重金属污染现状分析. 资源环境与工程, 2006, 20(4): 470—474.
- [8] 邵美玲, 谢志才, 叶麟, 等. 三峡水库蓄水前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.
- [9] 吴乃成, 唐涛, 周淑婵, 等. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1091—1096.
- [10] 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.
- [11] 唐涛, 渠晓东, 蔡庆华, 等. 河流生态系统管理研究——以香溪河为例. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 594—598.
- [12] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, 25(6): 1481—1490.
- [17] 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.
- [22] 张建立, 沈照理, 李东艳. 淄博煤矿矿坑排水的水化学特征及其形成机理的初步研究. 地质论评, 2000, 46(3): 263—269.