

广东横石水河大型底栖动物群落与环境因子的关系

迟国梁^{1,2}, 赵颖³, 官昭璞¹, 王建武², 童晓立^{1,*}

(1. 华南农业大学资源环境学院昆虫学系, 广州 510642; 2. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642;

3. 华南农业大学理学院应用化学系, 广州 510642)

摘要:应用典范对应分析(CCA)对横石水河流域 14 个样点中的大型底栖动物与环境因子的关系进行了研究。结果表明,枯水期和丰水期的物种与环境因子的相关性均在 90% 以上,说明大型底栖动物在横石水河的分布很大程度上受到环境因子的影响。化学需氧量(COD)和 pH 值是影响枯水期大型底栖动物分布的两个主要因子,浊度和重金属 Cu、Pb 浓度对大型底栖动物分布也有一定程度的影响。在丰水期,重金属 Cu、Pb 浓度和 pH 值是影响大型底栖动物分布的关键因子。从种类水平看,耐污种类如螺类、摇蚊和大蚊的丰富度与 COD 和重金属浓度的环境轴呈正相关,而敏感种类如腹足纲、毛翅目以及蜉蝣目昆虫与 COD 和重金属浓度的环境轴呈负相关。

关键词:大型底栖动物; 环境因子; 典范对应分析; 酸性矿山废水; 横石水河

Relationship between macroinvertebrate and environmental variables in Hengshishui River, Guangdong, China

CHI Guoliang^{1,2}, ZHAO Ying³, GUAN Zhaoying¹, WANG Jianwu², TONG Xiaoli^{1,*}

1 Department of Entomology, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 Department of Applied Chemistry, College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: The relationship between macroinvertebrates and environmental factors at 14 sites on the Hengshishui River was studied by Canonical Correspondence Analysis (CCA). The species-environment correlations in the dry season and wet season were both higher than 90%, which indicated the distribution of macroinvertebrates in Hengshishui River was strongly affected by environmental factors measured. Chemical oxygen demand (COD) and pH were the two major factors affecting macroinvertebrate distribution in the dry season. Turbidity and heavy metal concentrations (such as copper and lead) were also influential on macroinvertebrate distribution to some extent. In the wet season, copper and lead concentrations, and pH were the most important factors influencing macroinvertebrate distribution. At the species level, the abundance of pollution tolerant species such as Ceratopogonidae, Chironomidae and Tipulidae were positively correlated with the environmental axes of COD and heavy metal concentration, but the sensitive species such as Gastropoda, Trichoptera and Ephemeroptera were negatively correlated with COD and heavy metal concentrations.

Key Words: macroinvertebrate; environmental factor; Canonical Correspondence Analysis; acid mine drainage; Hengshishui River

大型底栖动物是河流生态系统中最常见、最重要的水生生物类群,在很大程度上它们与河流生态系统的营养物循环、能量流动、初级生产力、物质分解和迁移有密切关系^[1]。大型底栖动物群落对水环境的变化相当敏感,当河水受污染后,其群落组成和结构首先发生变化,而且不同种类的大型底栖动物对水体污染具有不

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270279, 40871242)

收稿日期:2009-04-02; **修订日期:**2009-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xtong@scau.edu.cn

同的耐受力。通过大型底栖动物群落结构的调查可以评价水体被污染的程度^[2]。因此,大型底栖动物群落与水体环境因子之间的相互关系一直以来都是淡水生态学领域中的研究热点之一。

目前国际上通常采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, 简称 CCA)研究生物群落与环境因子的关系。CCA 是基于对应分析(CA)发展而来的一种独特的排序方法^[3],将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,其排序结果能同时显示采样点、生物种类和环境因子三者之间的关系。国内外的相关研究表明,CCA 是分析生物群落与环境因子间复杂关系的有效工具^[4-13]。

广东大宝山矿(北纬 24°31'37"N,东经 113°42'49"E)是一座大型多金属伴生露天矿床。自 20 世纪 70 年代以来,大宝山地区掀起了民营采矿热潮,采选洗矿点总数曾达到百余家。大部分民采民选矿点没有任何治污设施,重金属、悬浮物、pH 值等严重超标。大宝山矿区南侧的山谷曾修建了一座拦泥坝,目的是阻止从山顶排土场不断排出的废矿土移向下游河段。由于矿区水土流失严重,拦泥库早已被废矿土填满,大量富含重金属的酸性矿山废水(Acid mine drainage, 简称 AMD)常年漫过坝顶流入一条长约 16 km 的 3 级溪流,在广东翁源县新江镇上坝村附近汇入潞江的主要支流——横石水河。横石水河源于广东翁源、始兴和曲江交界处,全长约 70 km,是粤北潞江的主要支流,而潞江最后汇入珠江流域的主要干流——北江。AMD 所经之处,河流的生态环境遭受严重破坏,大部分的沉水植物和挺水植物消失,河床也已被一层厚厚的黄褐色或红褐色的废矿沉积物所覆盖。AMD 的直接排放导致矿区周边地区的水域与农田存在严重的环境污染和生态环境退化^[14-17]。本研究的目的是通过在横石水河流域设置不同的采样点,利用人工基质法采集大型底栖动物,借助 CCA 方法分析大型底栖动物群落、采样河段及环境因子三者之间的相互关系,明确影响横石水河大型底栖动物群落组成、结构和分布的主要环境因子,为横石水河受损河道的生态恢复和综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究样点

在受 AMD 影响的污染河段上设 4 个样点:A1、A2、A3 和 A4,其中样点 A1、A2 和 A3 三点距离污染源(即拦泥坝)约 3.5 km,A2 的上游被尾矿坝所拦截,溪水受污染程度比 A1 和 A3 相对较轻,A4 距离污染源约 16 km;邻近的清洁河段从上游到下游设 7 个样点:B1、B2、B3、B4、B5、B6 和 B7,其中样点 B7 设在横石水河的另一条清洁支流上,以上 7 个样点均未受到 AMD 污染,作为清洁组;两支流汇合后的下游河段设 3 个样点:C1、C2 和 C3,其中样点 C1 和 C2 设在污染支流与清洁支流交汇后的 500 m 和 1000 m 处,而样点 C3 距离污染源约 30 km。共设置 14 个样点(图 1)。

1.2 采样方法

依据童晓立等^[18],用内装树叶凋落物的分解网袋作为底栖动物定殖的人工基质放入溪流中,分别于设样后的 50 d 和 120 d 将网袋取回。

1.2.1 供试材料

藜蒴(壳斗科,*Castanopsis fissa*)和荷木(山茶科,*Schima superba*)的成熟树叶。

1.2.2 网袋类型

选择大型底栖动物可以自由出入,孔径约为 5 mm 的塑料网袋作为人工基质袋(规格为 20 cm × 15 cm)。

1.2.3 研究方法

将采集的上述 2 种供试树叶的表面杂质洗净,自然风干 5 d 后用于实验。每种树叶称取 4 g 装入网袋作为 1 袋,将 5 袋系在一起作为 1 组(代表 5 个重复)于 2007 年 1 月 14 日放置在上述 14 个样点处,用石块压住网袋,以免被水流冲走。每个样点每种树叶各放 2 组,分别在设样后的第 50 天(枯水期)和第 120 天(丰水期)取回样本。取回后,将树叶上定殖的大型底栖动物挑出,并保存于含 75% 酒精的标本瓶中,以备鉴定。

1.2.4 水体理化参数测定

每次采样时,用便携式水质检测仪(YSI-6600 型,美国金泉仪器公司)测定样点的水温、pH 值、溶解氧、电导率和氨氮等理化指标。另外,用 555 mL 矿泉水瓶采集水样两瓶,并做酸化处理(用于测定 COD 含量的水样

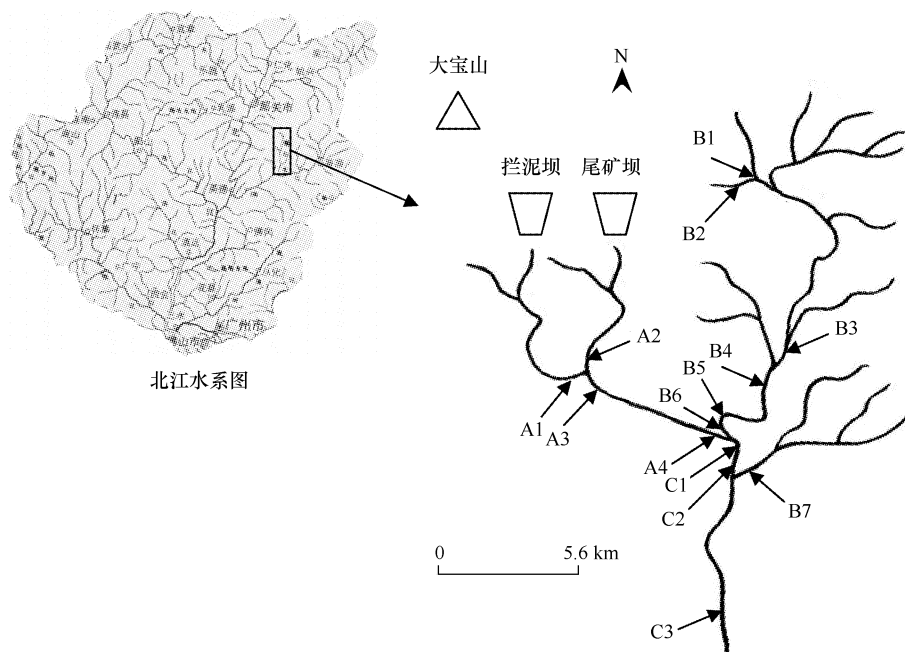


图1 北江水系图及样点分布示意图

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

用硫酸酸化,用于测定重金属含量的水样用硝酸酸化),带回实验室后,尽快利用重铬酸钾法测定水样的COD,用 BSH9 原子吸收光谱仪测定 Cu、Cd、Pb、Zn 重金属含量。

1.2.5 标本鉴定

依据《水生生物监测手册》、《中国经济动物志——淡水软体动物》和《Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality》^[19-23],将软体动物鉴定到种,其余鉴定到属并区分到种。

1.3 数据统计与分析

CCA 排序采用国际通用软件 CANOCA (Version 4.5) 进行分析。

2 结果与分析

2.1 样点水体的理化参数及相关性分析

各样点在枯水期和丰水期的理化指标变动不大。受污染的样点 A1、A2、A3、A4、C1、C2 和 C3 中, A2、C3 点的污染程度较轻, pH 值在 6.0 以上, 其余样点均在 5.0 以下, 污染最重的 A1 点 pH 值低至 3.12。与地表水环境质量国家标准 (GB3838-2002) 相比, 各污染样点的 COD 和重金属 Cd、Zn 和 Pb 量达到了劣 V 类水标准。位于清洁溪流的样点 B1、B2、B3、B4、B5、B6 和 B7 中, 以 B5、B6 和 B7 点水质较好, COD 和重金属 Cu、Cd 和 Zn 量等指标均达到了 I 类水标准, 而 B1、B2、B3 和 B4 4 个样点因靠近农田, 受轻微污染, COD 指标偏高, 属于 III 或 IV 类标准 (表 1)。通过 14 个样点 12 种环境因子的相关性分析表明, 电导率与总溶解固体的相关性为 100%, 且均与 Cu、Cd、Pb、Zn 4 种重金属呈显著的正相关关系, 重金属之间的相关性也较高 (表 2)。

2.2 大型底栖动物在不同时期的种类与数量

共采集到 1904 头大型底栖动物, 隶属 3 门, 5 纲, 10 目, 26 科, 51 种。其中枯水期采到 1508 头, 按照 Bunn 等^[24]把密度相对丰富度大于 5% 的类群定义为优势类群, 发现纹沼螺 (*Parafossarulus striatulus*)、槲豆螺 (*Bithynia misella*) 和粗腹摇蚊 (*Pentaneura* sp.) 为优势种, 它们的相对密度分别为 50.9%、15.6% 和 5.5%。优势类群基本上分布在清洁河段, 占清洁河段收集到的大型底栖动物数量的 98.6%, 而污染河段只采集到摇蚊 11 头, 包括 3 个属; 下游河段采到两个属的摇蚊 5 头和 1 头双突细蜉。丰水期采到 396 头, 优势种为闪蛄 (*Corbicula nitens*)、水丝蚓 (*Limnodrilus* sp.)、直突摇蚊 (*Orthocladius* sp.) 和铜锈环棱螺 (*Bellamyia*

acruginosa), 相对密度分别为 20.2%、19.2%、12.9% 和 11.1%, 除直突摇蚊中有 28 头采自污染河段, 7 头采

表 1 各样点的水体理化参数值 (2007-03—2007-05)
Table 1 Water physicochemical parameters in different sampling sites

样点 Site	温度 <i>T</i> /℃	酸度 pH	电导率 Spcond/(ms/cm)	总溶解固体 TDS/(g/L)	化学耗氧量 COD/(mg/L)	氨 NH ₄ /(mg/L)
A1	23.89	3.12	2.08	1.35	129.32	0.54
A2	22.81	6.21	0.41	0.26	68.21	0.16
A3	22.96	3.40	1.39	0.91	102.16	0.47
A4	27.54	3.31	1.00	0.65	91.05	0.35
B1	25.12	8.21	0.14	0.09	50.00	0.36
B2	21.98	8.06	0.12	0.08	41.98	0.26
B3	23.30	7.58	0.15	0.10	26.54	0.30
B4	20.70	7.44	0.14	0.09	27.78	0.18
B5	23.93	7.57	0.14	0.09	14.82	0.18
B6	23.83	7.36	0.15	0.10	14.82	0.20
B7	23.93	8.37	0.23	0.15	14.20	0.24
C1	26.62	3.51	0.98	0.64	81.79	0.33
C2	24.64	4.58	0.44	0.29	75.00	0.25
C3	24.80	6.64	0.28	0.18	58.65	0.12

样点 Site	氯离子 Cl ⁻ /(mg/L)	浊度 Turbid(NTU)	铜 Cu/(mg/L)	镉 Cd/(mg/L)	锌 Zn/(mg/L)	铅 Pb/(mg/L)
A1	3.75	182.80	6.04	0.25	117.78	1.20
A2	5.42	24.90	0.90	0.04	4.79	0.15
A3	3.62	67.40	3.97	0.16	51.76	0.75
A4	5.35	300.40	2.56	0.09	36.72	0.61
B1	6.91	—	0.23	0.01	0.82	0.12
B2	4.21	10.60	0.32	0.01	0.76	0.10
B3	8.51	—	0.24	0.01	0.42	0.15
B4	4.04	5.80	0.05	0.00	0.66	0.10
B5	6.68	8.80	0.09	0.00	0.54	0.08
B6	5.96	9.00	0.09	0.00	0.54	0.08
B7	11.97	5.00	0.14	0.00	0.60	0.11
C1	4.66	150.20	2.33	0.09	37.82	0.68
C2	6.21	73.00	1.18	0.05	17.25	0.31
C3	9.93	18.40	0.76	0.03	9.39	0.22

注: 各测定值为两次取样的平均值

表 2 14 个样点 12 种环境因子的相关性分析
Table 2 Correlation coefficients between the environmental variables in 14 sampling sites

环境因子 Environmental factor	温度 <i>T</i>	酸度 pH	电导率 Spcond	总溶固体 TDS	化学耗 氧量 COD	氨 NH ₄	氯离子 Cl ⁻	浊度 Turbid	铜 Cu	镉 Cd	锌 Zn	铅 Pb
<i>T</i>												
pH	-0.467											
Spcond	0.274	-0.872										
TDS	0.274	-0.873	1.000 *									
COD	0.346	-0.898	0.898	0.897								
NH ₄	0.227	-0.620	0.824	0.826	0.714							
Cl ⁻	0.175	0.523	-0.486	-0.487	-0.523	-0.436						
Turbid	0.662	-0.830	0.725	0.725	0.727	0.549	-0.379					
Cu	0.242	-0.861	0.996 *	0.996 *	0.912	0.829	-0.497	0.699				
Cd	0.209	-0.847	0.991 *	0.991 *	0.913	0.826	-0.498	0.663	0.998 *			
Zn	0.228	-0.801	0.977 *	0.977 *	0.861	0.812	-0.462	0.679	0.981 *	0.982 *		
Pb	0.343	-0.887	0.989 *	0.989 *	0.900	0.828	-0.475	0.758	0.984 *	0.978 *	0.975 *	

* 代表相关性显著

自下游河段,其余优势类群全部分布在清洁河段,丰水期清洁河段收集到的大型底栖动物数量占总样本量的90.7% (表3)。

表3 大型底栖动物在不同时期不同河段定殖的个体数
Table 3 Amount of macroinvertebrate colonized in different time and different reach

种类 Species	枯水期 (2007 年 1—3 月) Dry season (Jan. — Mar., 2007)			丰水期 (2007 年 3—5 月) Wet season (Mar. — May., 2007)		
	污染河段 Polluted reach	清洁河段 Clean reach	下游河段 Downstream reach	污染河段 Polluted reach	清洁河段 Clean reach	下游河段 Downstream reach
粗腹摇蚊 <i>Pentaneura</i> sp.	2	81	—	—	11	—
直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.	—	2	—	28	16	7
心突摇蚊 <i>Cardiocladius</i> sp.	4	28	4	—	3	—
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp. 1	—	2	—	—	12	1
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp. 2	5	19	1	—	—	—
双突细蜉 <i>Caenis Bicornis</i>	—	67	1	—	—	—
四鳃扁泥甲 <i>Eubrianax</i> sp.	—	16	—	—	—	—
侧枝纹石蛾 <i>Ceratopsyche</i> sp.	—	17	—	—	1	—
长角泥甲 <i>Zaitzevia</i> sp.	—	2	—	—	5	—
狭溪泥甲 <i>Stenelmis</i> sp.	—	8	—	—	14	1
溪泥甲 <i>Ordobrevia</i> sp.	—	4	—	—	17	—
橈豆螺 <i>Bithynia misella</i>	—	235	—	—	—	—
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	—	768	—	—	11	—
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	—	19	—	—	14	—
大脐圆扁螺 <i>Hippeutis umbilicalis</i>	—	31	—	—	10	—
绘环棱螺 <i>Bellamya limnophila</i>	—	—	—	—	6	—
铜锈环棱螺 <i>Bellamya acruginosa</i>	—	2	—	—	44	—
闪蛞 <i>Corbicula nitens</i>	—	33	—	—	80	—
水丝蚓 <i>Limnodrilus</i> sp.	—	40	—	—	76	—
舌蛞 <i>Glossiphonia</i> sp.	—	3	—	—	17	—
水蚤 <i>Daphnia</i> sp.	—	37	—	—	3	—

只列出了相对密度均 > 1% 的种类

2.3 大型底栖动物在不同基质中的种类与数量

通过分析发现,在枯水期和丰水期,定殖在藜蒴树叶的大型底栖动物种类数和个体数均多于荷木树叶,这可能是两种树叶的质地差异以及化学成分差异造成的。在枯水期,藜蒴树叶上采集到 33 种,983 头大型底栖动物,而荷木树叶上采集到 28 种,591 头大型底栖动物。藜蒴树叶上的优势类群为纹沼螺、橈豆螺和粗腹摇蚊,它们的相对密度分别为 52.2%、15.7% 和 6.6%,荷木树叶上的优势类群为纹沼螺和橈豆螺,相对密度分别为 56.7% 和 13.7%。在丰水期,藜蒴树叶上采集到 25 种,243 头大型底栖动物,而荷木树叶上采集到 21 种,154 头大型底栖动物。藜蒴树叶上的优势类群为闪蛞、水丝蚓、铜锈环棱螺和直突摇蚊,它们的相对密度分别为 23.0%、17.3%、11.9% 和 10.7%,荷木树叶上的优势类群为直突摇蚊、闪蛞、水丝蚓、铜锈环棱螺和舌蛞 sp. 1,相对密度分别为 22.1%、15.6%、14.9%、9.7% 和 6.5% (表4)。另外,枯水期定殖的大型底栖动物种类和数量均多于丰水期,可能是因为生境的剧烈变动破坏了大型底栖动物的群落构成,也可能是树叶凋落物的营养状况和干重的变化在一定程度上改变了大型底栖动物的栖境质量。

2.4 CCA 分析

枯水期,CCA 分析的前两轴特征值分别为 0.427 和 0.385,种类与环境因子排序轴的相关系数高达 0.995 和 0.994,且物种-环境关系的累积百分率为 55.3,说明排序图较好地反映了大型底栖动物与环境因子之间的关系(表5)。在排序图中,与第一轴相关性较大的前 3 个环境因子是 pH 值、COD 和浊度。pH 值位于左侧,

呈负相关,相关系数为 -0.7087 ;COD 和浊度位于右侧,呈正相关,相关系数分别为 0.6133 和 0.4980 。与第二轴相关性较大的环境因子是 NH_4 和 COD,两者均位于坐标轴上方,呈正相关,相关系数分别为 0.7637 和 0.7386 。

表 4 大型底栖动物在不同时期两种基质袋定殖的个体数

Table 4 Amount of macroinvertebrate colonized in different time and two leaf litter bags

种类 Species	枯水期 (2007 年 1—3 月) Dry season (Jan. — Mar. ,2007)		丰水期 (2007 年 3—5 月) Wet season (Mar. — May. , 2007)	
	藜蒴 <i>C. fissa</i>	荷木 <i>S. superba</i>	藜蒴 <i>C. fissa</i>	荷木 <i>S. superba</i>
长足摇蚊亚科 Tanypodinae	—	—	1	2
粗腹摇蚊 <i>Pentaneura</i> sp.	65	20	7	4
直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.	2	—	26	34
心突摇蚊 <i>Cardiocladius</i> sp.	23	13	1	2
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp. 1	1	1	7	7
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp. 2	17	8	—	—
长角泥甲 <i>Zaitzevia</i> sp.	2	—	2	3
狭溪泥甲 <i>Steneimis</i> sp.	5	3	8	7
溪泥甲 <i>Ordobrevia</i> sp.	2	2	3	5
四鳃扁泥甲 <i>Eubrianax</i> sp.	—	8	—	—
双突细蜉 <i>Caenis Bicornis</i>	48	21	—	—
短脉纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp.	4	8	—	—
侧枝纹石蛾 <i>Ceratopsyche</i> sp.	13	4	—	1
绘环棱螺 <i>Bellamya limnophila</i>	—	—	5	1
铜锈环棱螺 <i>Bellamya acruginosa</i>	2	—	29	15
橈豆螺 <i>Bithynia misella</i>	154	81	—	—
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	513	335	7	4
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	9	10	12	2
大脐圆扁螺 <i>Hippeutis umbilicalis</i>	10	21	10	—
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	5	8	2	—
闪蛞 <i>Corbicula nitens</i>	29	4	56	24
舌蛞 <i>Glossiphonia</i> sp. 1	—	3	7	10
舌蛞 <i>Glossiphonia</i> sp. 2	2	—	—	2
水丝蚓 <i>Limnodrilus</i> sp.	23	17	42	23
水蚤 <i>Daphnia</i> sp.	25	12	9	5

只列出了相对密度均 $>1\%$ 的种类

表 5 排序轴特征值、种类与环境因子排序轴的相关系数

Table 5 Eigenvalues for CCA axis and species-environment correlation

季节 Season	枯水期 Dry season				丰水期 Wet season			
轴 Axes	1	2	3	4	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.427	0.385	0.278	0.174	0.471	0.372	0.127	0.093
种类-环境相关性 Species-environment correlations	0.995	0.994	0.985	0.989	0.977	0.937	0.938	0.834
物种数据累积变化百分率 Cumulative percentage variance of species data	26.4	50.2	67.4	78.1	31.2	55.9	64.3	70.5
物种-环境关系累积变化百分率 Cumulative percentage variance of species-environment relation	29.1	55.3	74.2	86.1	44.1	79.0	90.9	99.6

丰水期,CCA 分析的前两轴特征值分别为 0.471 和 0.372 ,种类与环境因子排序轴的相关系数达到 0.977 和 0.937 ,且物种-环境关系的累积百分率高达 79.0 ,说明排序图更好地反映了大型底栖动物与环境因子之间的关系(表 5)。在排序图中,与第一轴相关性较大的前 3 个环境因子是 Cu、Pb 和 pH 值。Cu 和 Pb 位于右侧,呈正相关,相关系数分别为 0.8929 和 0.8884 ;pH 值位于左侧,呈负相关,相关系数为 -0.8735 。与第二轴相

关性较大的环境因子是温度和 NH_4 。温度位于坐标轴上方,呈正相关,相关系数为 0.7595; NH_4 位于坐标轴下方,呈负相关,相关系数为 -0.5012。

在进行 CCA 分析时,还检测了各环境变量的独立效应,每个变量的重要性和显著性采用 Monte-Carlo 假设检验,以 $P < 0.05$ 作为显著性标准,以排除贡献较小的因子。在枯水期,pH 值、Cu、Pb、Zn、COD 和浊度 6 个变量为主要影响因子($P < 0.05$);在丰水期,pH 值、COD、Cu、Pb 和 Cd 5 个变量为主要影响因子($P < 0.05$)。以主要环境因子为变量生成新的环境文件,再进行 CCA 排序。

从枯水期的样点与环境因子的 CCA 排序图中看出,样点 A1、A3、A4 和 C1 因受污染较重,未参与分析。样点 B7 与 pH 值环境轴呈正相关,B5、B6 和 B7 与重金属和 COD 轴呈负相关,这 3 个样点均属于清洁样点,而样点 A2、C2 和 C3 与重金属和 COD 轴呈正相关,均属于污染样点,但受酸性废水污染相对较轻。样点 B2 和 B4 虽处在清洁溪流上,但与农田靠近,受到一定程度的农业污染,两点表现为与重金属和 COD 轴呈正相关(图 2A)。在丰水期,样点 B1、B2、B3、B5、B6 和 B7 与 pH 值环境轴呈正相关,与重金属轴呈负相关,属于清洁样点,其中样点 B2 可能由于水量的增大,水质有所改善。而样点 A3、A4、C1 和 C2 属于污染样点,与重金属轴呈正相关(图 2B)。

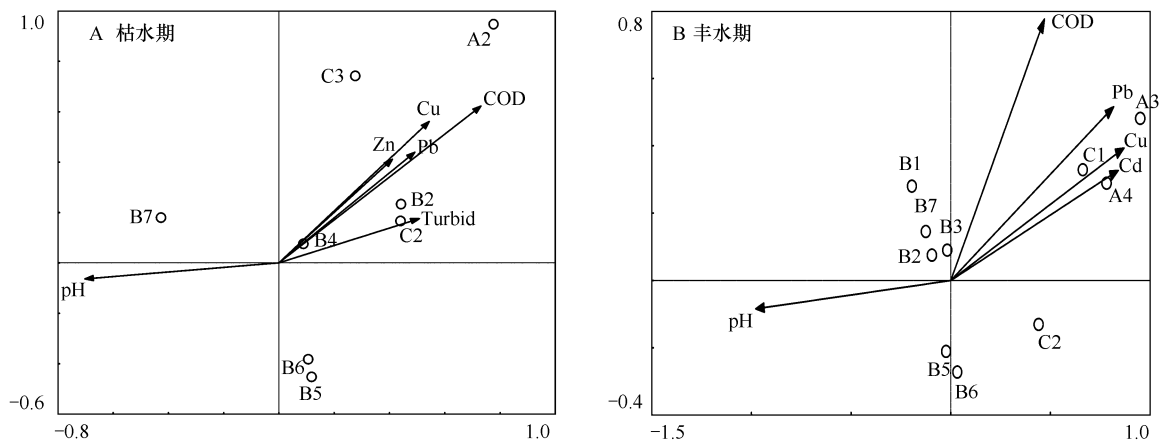


图 2 样点与环境因子的 CCA 排序图

Fig 2 CCA ordination diagram of samples-environmental factors

图 3 反映了大型底栖动物分布与环境因子的关系。首先对从各样点收集到的大型底栖动物数据进行开平方处理。在枯水期的 CCA 排序图第一象限,螺类 *Bezzia* sp. 1 (1)、*Bezzia* sp. 2 (2)、粗腹摇蚊 *Pentaneura* sp. (3)、心突摇蚊 *Cardiocladius* sp. (5)、摇蚊 *Chironomus* sp. 2 (7) 和沼大蚊 *Antocha* sp. (9) 等处在重金属和 COD 环境轴附近,与重金属 Cu、Pb、Zn 和 COD 呈正相关,与 pH 值呈负相关,属耐污种类。在其余象限,四鳃扁泥甲 *Eubrianax* sp. (20)、橈豆螺 *Bithynia misella* (33)、纹沼螺 *Parafossarulus striatulus* (34)、闪鳃 *Corbicula nitens* (40) 和水蚤 *Daphnia* sp. (46) 等在 pH 值环境轴附近,与 pH 值呈正相关,与重金属 Cu、Pb、Zn 和 COD 呈负相关,属不耐污种类(图 3A)。在丰水期的 CCA 排序图第一和第四象限,由于螺类 *Bezzia* sp. 1 (1) 和 *Bezzia* sp. 2 (2) 耐污性较强,超出了排序图的范围。粗腹摇蚊 *Pentaneura* sp. (3)、心突摇蚊 *Cardiocladius* sp. (5) 和大蚊 *Tipula* sp. (8) 等耐污种与重金属轴呈正相关,与 pH 值轴呈负相关。在第二和第三象限,其余种类基本上与 pH 值轴呈正相关,与重金属轴呈负相关(图 3B)。

3 讨论

人类活动造成的水体酸化对水生生物多样性存在着严重的负面影响^[25, 26]。在本研究中,污染河段的上游样点 A1、A3 的 pH 在 3—3.5 之间,远远超出 V 类水标准的最高允许值,两点均未采集到大型底栖动物。到了距源头约 30 km 的翁城段 C3 点,仅采到了摇蚊,而摇蚊在许多报道中被认为是耐酸物种,其他大型底栖动物仍无定殖,说明大宝山矿外排酸性废水严重破坏了横石水河大型底栖动物的群落结构。朱江和任淑智的研

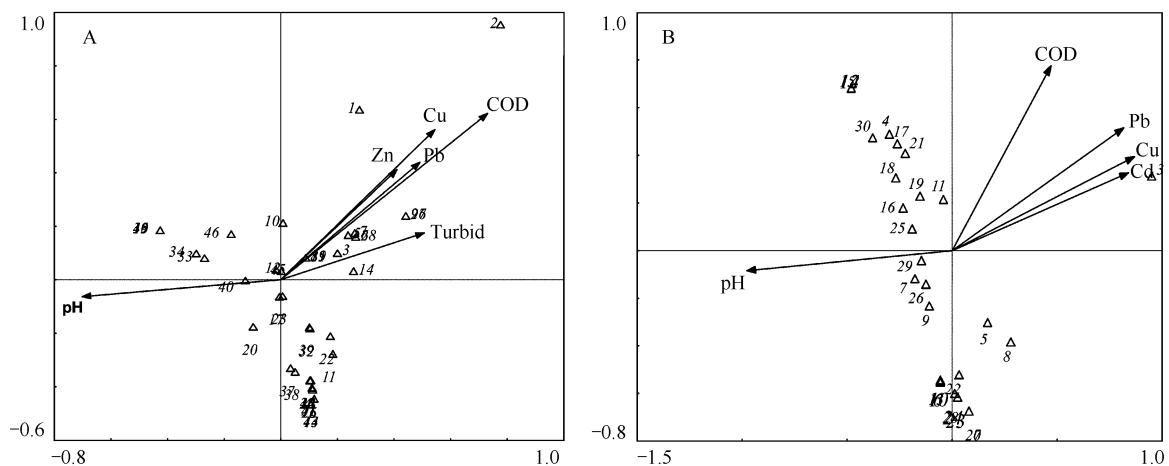


图3 大型底栖动物与环境因子的 CCA 排序图

Fig.3 CCA ordination diagram of macroinvertebrates-environmental factors

注: A: 枯水期 Dry season; B: 丰水期 Wet season

A: 1. *Bezzia* sp.1; 2. *Bezzia* sp.2; 3. *Pentaneura* sp.; 4. *Orthocladus* sp.; 5. *Cardiocladius* sp.; 6. *Chironomus* sp.1; 7. *Chironomus* sp.2; 8. *Tipula* sp.; 9. *Antocha* sp.; 10. *Zaitzevia* sp.; 11. *Steneimys* sp.; 12. *Ordobrevia* sp.; 13. *Neochauiodes* sp.; 14. *Neohemes* sp.; 15. *Ceragrion* sp.; 16. *Protoneura* sp.; 17. *Caenis Bicornis*; 18. *Cinygmmina yixingensis*; 19. *Serratella rufa*; 20. *Eubrianax* sp.; 21. *Potamyia* sp.; 22. *Cheumatopsyche* sp.; 23. *Ceratopsyche* sp.; 24. *Hydropsyche* sp.; 25. *Chimarra* sp.; 26. *Ceracis* sp.; 27. *Brachycentrus* sp.; 28. *Ecnomus* sp.; 29. *Paracymoriza* sp.; 30. *Potamomusa* sp.; 31. *Eristena* sp.; 32. *Bellamyia acruginosa*; 33. *Bithynia misella*; 34. *Parafossarulus striatulus*; 35. *Bithynia fuchsiana*; 36. *Hippeutis cantori*; 37. *Gyraulus convexiusculus*; 38. *Hippeutis umbilicalis*; 39. *Radix swinhoei*; 40. *Corbicula nitens*; 41. *Glossiphonia* sp.1; 42. *Glossiphonia* sp.2; 43. *Glossiphonia* sp.3; 44. *Barbronia* sp.1; 45. *Limnodrilus* sp.; 46. *Daphnia* sp.

B: 1. *Tanytus* sp.; 2. *Pentaneura* sp.; 3. *Orthocladus* sp.; 4. *Cardiocladius* sp.; 5. *Chironomus* sp.1; 6. *Xestochironomus* sp.; 7. *Zaitzevia* sp.; 8. *Steneimys* sp.; 9. *Ordobrevia* sp.; 10. *Ectopria* sp.; 11. *Serratella rufa*; 12. *Ephemerella* sp.; 13. *Ceratopsyche* sp.; 14. *Ieratopsyche* sp.; 15. *Rhyacophila* sp.; 16. *Potamomusu* sp.; 17. *Bellamyia limnophila*; 18. *Bellamyia acruginosa*; 19. *Parafossarulus striatulus*; 20. *Bithynia fuchsiana*; 21. *Alocinma longicornis*; 22. *Gyraulus convexiusculus*; 23. *Hippeutis umbilicalis*; 24. *Radix swinhoei*; 25. *Corbicula nitens*; 26. *Glossiphonia* sp.1; 27. *Glossiphonia* sp.2; 28. *Glossiphonia* sp.3; 29. *Limnodrilus* sp.; 30. *Daphnia* sp.

究^[27]表明,对于受德兴铜矿污染的乐安江,无论是大型底栖动物种类数量还是种类多样性,丰水期均高于枯水期,主要是因为乐安江在丰水期水量充沛,总体水质状况比枯水期要好,底栖动物种类和数量有所恢复。本文通过对比枯水期和丰水期定殖的大型底栖动物的种类和数量,发现清洁样点定殖的底栖动物表现为枯水期多于丰水期,可能是因为水量突增影响了清洁河流中底栖动物群落的稳定性,但污染样点差异不明显,表明横石水河受损程度要比乐安江严重,横石水河底栖动物群落结构常年遭到破坏,并没有随着季节的变化而发生明显的变化。

大型底栖动物与环境因子的 CCA 排序结果表明,枯水期和丰水期的底栖动物种类与环境因子的相关性均在 90% 以上,说明底栖动物在横石水河的分布很大程度上受到环境因子的影响,与自身的繁殖力关系不大。从环境因子看,pH 值和 COD 对枯水期大型底栖动物的分布影响最为显著,其次 Cu、Pb 和 Zn 等重金属也有一定影响。Cu、Pb 和 pH 值是影响丰水期大型底栖动物分布的关键环境因子。蒋万祥等^[13]利用 CCA 分析得出,湖北高岚硫铁矿外排酸性废水污染的高岚河中的大型底栖动物生物多样性受 Al、Ca、Cd、Fe、Mg 和 Mn 等金属的影响最大。以上分析结果的差异可能是由河流受污染程度以及所处地区的纬度差异造成的,也可能是采样方法的不同造成的。在本文中采用人工基质-树叶凋落物网袋沉积法,而没有采用索伯网或踢网取样,主要考虑丰水期水位抬升,无法用索伯网取样。

从种类组成看,螺类、摇蚊和大蚊等类群耐污性较强,主要分布在污染样点,与 COD 和重金属呈正相关性,而耐污能力差的腹足纲、毛翅目以及蜉蝣目昆虫则分布在清洁样点,与 COD 和重金属呈负相关性。童晓

立等^[18]证实,在横石水河受污染河段,收集到 4 种底栖动物,其中以摇蚊在数量上占绝对优势。颜玲等^[28]证实,在横石水河用网袋收集的大型底栖动物有摇蚊、毛翅目、蜉蝣目以及螺类等 36 种,这与本研究收集到的大型底栖动物种类组成基本一致。

酸性矿山废水大量持续汇入横石水河,而酸性废水具有 pH 值低、重金属含量高等特点^[29],从而使横石水河水体理化参数中的 pH 值和重金属等严重超标,逐步上升为影响大型底栖动物分布的主要环境因子。因此,酸性矿山废水的排放可能是大型底栖动物分布特征发生变化的重要诱因。但 pH 值和 Cu、Cd、Pb 和 Zn 等重金属对大型底栖动物分布的影响机理目前尚不清楚。

References:

- [1] Wallace J B, Webster J R. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology*, 1996, 4(1): 115-139.
- [2] Rosenberg D M, Resh V H. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. New York: Chapman & Hall, 1993: 1-488.
- [3] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [4] Zamora-Muñoz C, Alba-Tercedor J. Bioassessment of organically polluted Spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(3): 332-352.
- [5] Ter Braak C J F, Verdonschot P F M. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Sciences*, 1995, 57(3): 255-289.
- [6] Kessler K, Lockwood R S, Williamson C E. Vertical distribution of zooplankton in subalpine and alpine lakes: ultraviolet radiation, fish predation, and the transparency-gradient hypothesis. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(6): 2374-2382.
- [7] D'Ambrosio J L, Williams L R, Witter J D, Ward A. Effects of geomorphology, habitat, and spatial location on fish assemblages in a watershed in Ohio, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148(1-4): 325-341.
- [8] Takamura N, Ito T, Ueno R, Ohtaka A, Wakana I, Nakagawa M, Ueno Y, Nakajima H. Environmental gradients determining the distribution of benthic macroinvertebrates in Lake Takkobu, Kushiro wetland, northern Japan. *Ecological Research*, 2009, 24(2): 371-381.
- [9] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2004: 171-178.
- [10] Wei Y L, Ji L Z, Wang M, Zhao M. CCA of water beetles' distribution and environmental factors in lentic samples of North Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 91-94.
- [11] Yu N, Chen L Q, Zhao Q H. CCA of ostracod distribution and environmental factors in the Taihu Lake. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2007, 24(1): 53-60.
- [12] Wu J, Yang L F, Li Q, Wang B X. Relationship between aquatic beetle community structure and environmental variables in the Xitiao Stream, Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2008, 14(1): 64-68.
- [13] Jiang W X, Tang T, Jia X H, Wu N C, Duan S G, Li D F, Cai Q H. Impacts of acid pyrite drainage on the macroinvertebrate community in Gaolan River. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4805-4814.
- [14] Lin C X, Long X X, Tong X L, Xu S J, Zhang J E. Guangdong Dabaoshan Mine: ecological degradation, acid drainage and possible measures for their remediation. *Ecologic Science*, 2003, 22(3): 205-208.
- [15] Lin C X, Lu W Z, Wu Y G, Long J, Nie C R. Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine II. Agricultural ecosystem. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 169-172.
- [16] Lin C X, Huang S W, Tong X L, Lu W Z, Tan Z Y, Wu Y G, Nie C R, Xu S J. Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine III. Strategies for remediation. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 173-177.
- [17] Wu Y G, Lin C X, Tong X L, Lu W Z, Zhu L X, Chu C X, Yan L, Xu S J. Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine I. Downstream aquatic ecosystem. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 165-168.
- [18] Tong X L, Yan L, Zhao Y, Lin C X, Han C X, Liu R S, Liu L J. The breakdown of leaf litter in a stream impacted by acid mine drainage. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4033-4038.
- [19] Casey R J, Kendall S A. Sample number and colonization patterns of benthic macroinvertebrates and organic material on artificial and natural substrata. *Journal of Freshwater Ecology*, 1997, 12(4): 577-584.
- [20] Hunphries P, Growns J E, Serafini L G, Hawking J H, Chick A J, Lake P S. Macroinvertebrate sampling methods for lowland Australian rivers. *Hydrobiologia*, 1997, 364(2/3): 209-218.
- [21] The Bureau of National Environmental Protection《The Monitoring Book Using Hydrophily Biology》Editorial Committee. *The Monitoring Book Using*

Hydrophily Biology. Nanjing: Southeast University Press, 1993: 1-690.

- [22] Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, Wang E Y. Chinese Fauna of Economic Animal-Freshwater Mollusc. Beijing: Science Press, 1979: 1-134.
- [23] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994. 1-570.
- [24] 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 (1): 67-91.
- [25] Guerold F, Boudot J P, Jacquemin G, Vein D, Merlet D, Rouiller J. Macroinvertebrate community loss as a result of headwater stream acidification in the Vosges Mountains (N-E France). *Biodiversity and Conservation*, 2000, 9 (6): 767-783.
- [26] Braukmann U. Stream acidification in South Germany — chemical and biological assessment methods and trends. *Aquatic Ecology*, 2001, 35 (2): 207-232.
- [27] Zhu J, Ren S Z. Effect of the wastewater from a copper mine on benthos community in the Le An River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1996, 2 (2): 162-168.
- [28] Yan L, Zhao Y, Han C X, Tong X L. Litter decomposition and associated macro-invertebrate functional feeding groups in a third-order stream of northern Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (11): 2573-2579.
- [29] Cherry D S, Currie R J, Soucek D J, Latimer H A, Trent G C. An integrative assessment of watershed impacted by abandoned mined land discharges. *Environmental Pollution*, 2001, 111: 377-388.

参考文献:

- [9] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004: 171-178.
- [10] 魏玉莲, 姬兰柱, 王森, 赵敏. 长白山北坡静水水体中水甲虫分布与环境关系的典范对应分析. *应用生态学报*, 2002, 13 (1): 91-94.
- [11] 禹娜, 陈立侨, 赵泉鸿. 太湖介形虫分布与水环境因子间关系的典范对应分析. *微体古生物学报*, 2007, 21 (1): 53-60.
- [12] 吴璟, 杨莲芳, 李强, 王备新. 西苕溪中上游流域水生甲虫分布与环境的关系. *应用与环境生物学报*, 2008, 14 (1): 64-68.
- [13] 蒋万祥, 唐涛, 贾兴焕, 吴乃成, 段树桂, 黎道丰, 蔡庆华. 疏铁矿酸性矿山废水对大型底栖动物群落结构的影响. *生态学报*, 2008, 28 (10): 4805-4814.
- [14] 林初夏, 龙新宪, 童晓立, 徐颂军, 章家恩. 广东大宝山矿区生态环境退化现状及治理途径探讨. *生态科学*, 2003, 22 (3): 205-208.
- [15] 林初夏, 卢文洲, 吴永贵, 龙洁, 聂呈荣. 大宝山矿水外排的环境影响 II. 农业生态系统. *生态环境*, 2005, 14 (2): 169-172.
- [16] 林初夏, 黄少伟, 童晓立, 卢文洲, 谭志远, 吴永贵, 聂呈荣, 徐颂军. 大宝山矿水外排的环境影响 III. 综合治理对策. *生态环境*, 2005, 14 (2): 173-177.
- [17] 吴永贵, 林初夏, 童晓立, 卢文洲, 朱丽霞, 储诚兴, 颜玲, 徐颂军. 大宝山矿水外排的环境影响 I. 下游水生生态系统. *生态环境*, 2005, 14 (2): 165-168.
- [18] 童晓立, 颜玲, 赵颖, 林初夏, 韩翠香, 刘若思, 刘丽娟. 树叶凋落物在受酸性矿山废水污染溪流中的分解. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4033-4038.
- [21] 国家环保局《水生生物监测手册》编委会. 水生生物监测手册. 南京: 东南大学出版社, 1993: 1-690.
- [22] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. 中国经济动物志——淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979: 1-134.
- [27] 朱江, 任淑智. 德兴铜矿废水对乐安江底栖动物群落的影响. *应用与环境生物学报*, 1996, 2 (2): 162-168.
- [28] 颜玲, 赵颖, 韩翠香, 童晓立. 粤北地区溪流中的树叶分解及大型底栖动物功能摄食群. *应用生态学报*, 2007, 18 (11): 2573-2579.