

# 长江流域鄂西四河流大型底栖动物群落结构特征及水质生物学评价<sup>1</sup>

潘超<sup>1</sup>, 周驰<sup>2</sup>, 苗滕<sup>2</sup>, 刘林峰<sup>1</sup>, 高健<sup>1</sup>, 焦一滢<sup>1</sup>, 李祝<sup>1</sup>, 张佳敏<sup>1</sup>, 王卉君<sup>1</sup>, 徐德雄<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 土木建筑与环境学院, 湖北武汉 430068; 2. 湖北省水利水电科学研究院, 湖北武汉 4300702)

**【摘要】:** 鄂西水系是国家级水源保护区, 也是湖北省重要的生态旅游区。为了解鄂西水生态健康状况, 于 2014 年 10 月~2017 年 1 月不同时段在宜昌国家可持续发展实验示范区卷桥河 (J)、清江利川段 (Q)、宜昌市水源地黄柏河 (H) 和丹江口入库河流天河郧西段 (T) 开展了底栖动物群落特征研究。研究表明: 4 个河段共采集到大型底栖动物 5 门 8 纲 18 目 61 科。基于底栖动物指示种耐污性及其丰度占比分析, 表明 J、Q 和 T 三河流污染程度沿水流方向呈加重趋势, 而 H 水体健康状况整体较好。运用 FBI 和 SIGNAL 底栖生物评价指数, 显示四条河流健康程度沿水流方向均呈下降趋势, 但 H 变化趋势平缓, 结果表明 H 水体上下游均处于较健康状态, 其他 3 条河流上游或源头水体健康状况良好, 下游受到较重污染。对主要环境因子 (TP、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub> 和 TN) 做主成分分析表明, 轴 1 的解释率达到 65.1%, 表明轴 1 可以有效表征主要环境压力梯度。FBI 和 SIGNAL 指数与轴 1 线性拟合度均较高, 表明二者在鄂西河流水生态健康评估中可作为快速生物评价指数。

**【关键词】:** 鄂西 生态旅游区 大型底栖动物 群落结构 生物评价指数

**【中图分类号】:** X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 11-2529-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201811014

湖北省鄂西地区是中国南北气候过渡带和中西结合部的生态走廊, 是中国重要的生态功能区, 被誉为“中华之肺、华中水塔”。鄂西地区水资源丰富, 如恩施、宜昌和十堰等山区河网是长江重要一级支流或二级支流, 是国家级水源保护区。据鄂西清江、黄柏河、丹江口水库入库河流等水体断面监测数据显示, 部分区域水质污染较重, 局部断面甚至降低为劣 V 类水质, 对长江水环境和丹江口水库构成了直接的威胁<sup>[1-5]</sup>。2016 年《湖北省水污染防治行动计划工作方案》(鄂政发[2016]3 号) 提出重点保护与治理长江、汉江、清江等流域, 进一步提高全省河流优良水体比例, 推进实施重点流域区域水环境分区分管, 推进长江大保护和湖北绿色发展。然而, 鄂西又逢迎国家重点开发长江流域的战略机遇, 利用其丰富的生态资源, 大力发展鄂西生态文化旅游产业。因此, 水生态保护与经济发展建设性破坏生态的矛盾问题依然存在。

大型底栖动物多以藻类和碎屑等为食, 处于食物链的中间环节, 其类群组成决定了河流物质循环和能量流动的方式<sup>[6]</sup>。底

<sup>1</sup>收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (31500378); 湖北省科技支撑计划 (2015BCH329)

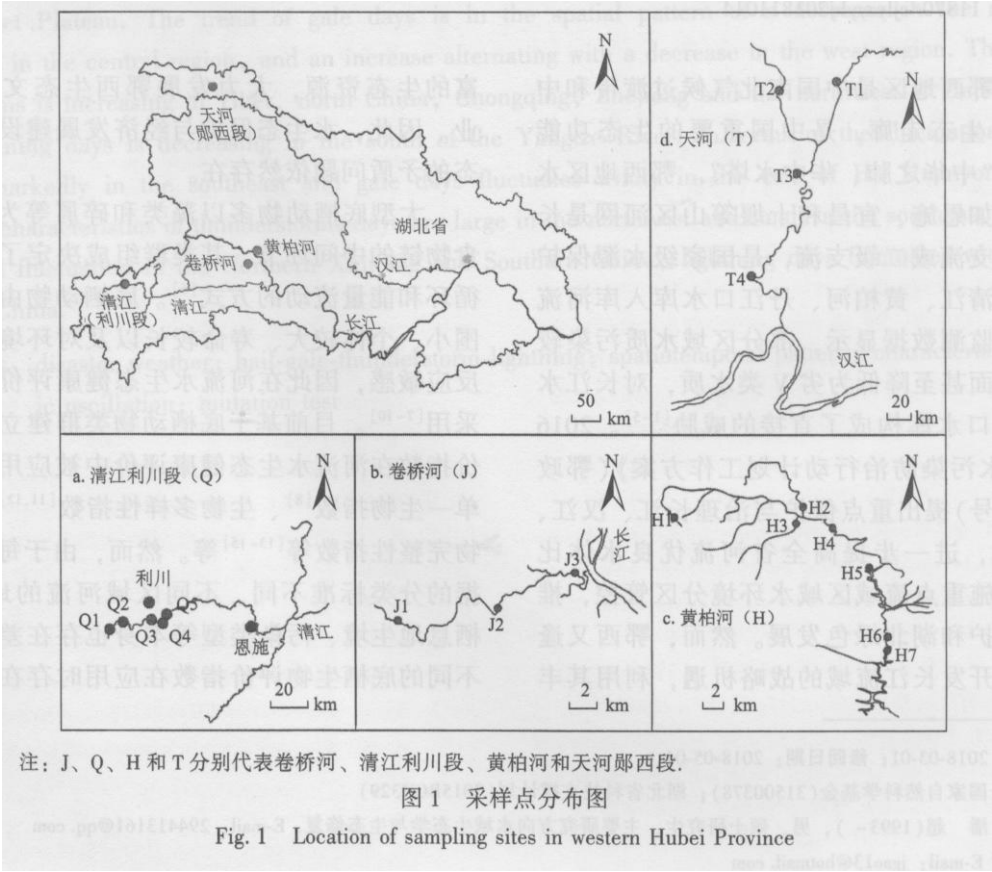
作者简介: 潘超 (1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向水域生态学与生态修复。E-mail: 294413161@qq.com

通讯作者 E-mail: jgaol3@hotmail.com

栖动物由于活动范围小、个体较大、寿命较长以及对环境条件改变反应敏感，因此在河流水生态健康评价中被广泛采用<sup>[7~10]</sup>。目前基于底栖动物类群建立的生物评价指数在河流水生态健康评价中被应用广泛，如单一生物指数<sup>[8]</sup>、生物多样性指数<sup>[11, 12]</sup>和底栖生物完整性指数等<sup>[13~15]</sup>等。然而，由于每个指数依据的分类标准不同，不同区域河流的地貌特征、栖息地生境、污染类型等本身也存在差异，导致不同的底栖生物评价指数在应用时存在误差，因此在应用时应慎重选择适宜的方法<sup>[16]</sup>。目前在鄂西山区河流基于底栖动物生物指数评价方法开展了少量的研究<sup>[17, 18]</sup>，但针对该区域典型的源头河流、水源地保护区等尚缺乏较系统的评估和适宜的方法筛选。本研究于2014年10月~2017年1月不同时段在鄂西宜昌、恩施、十堰选择了4条山区河流（段）开展了底栖动物群落结构研究，并结合水质数据和底栖动物生物评价指数评估了水生态健康状况。本研究将增进对鄂西山区河流生态状况的了解，为合理实施有针对性的生态保护措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况和采样点设置



鄂西清江（Q）是长江一级支流，发源于湖北省利川市齐岳山，于宜昌市宜都区注入长江，是全流域都在湖北境内的第一大江。研究选取清江源头至利川城下游段作为研究地点，该区域是清江重要的源头水源地保护区。采样共设置 5 个采样点，从上游到下游分别为 Q1~Q5（图 1a）。

鄂西宜昌点军区卷桥河（J）是长江一级支流，位于宜昌点军区。点军区于 1986 年 12 月经国务院批准建立，是湖北省宜昌市的五个主城区之一，该区 2008 年被批准为湖北省可持续发展实验区，2009 年批准建设国家可持续发展实验示范区。采样共设置 3 个采样点，从上游到下游分别为 J1~J3（图 1b）。

鄂西黄柏河（H）是长江一级支流，是宜昌市的重要水源地，于葛洲坝三江航道前注入长江。采样共设置 7 个点，从上游到下游分别为 H1~H7（图 1c）。

鄂西天河（T）是长江一级支流汉江的支流，发源于陕西省山阳县鹤岭东南侧的西照川镇，流经山阳县、湖北省郧西县境，汇入汉江，是南水北调水源地一丹江口水库湖北主要入库支流之一，天河流经县城或乡镇，农业面源、点源混合污染特征明显。采样共设置 4 个采样点，分别为 T1~T4（图 1d）。

根据人类干扰特点，采样点主要分 3 种类型：源头、城镇上游临近村镇以及城市下游。采样点底质主要以泥沙、沙石为主。除 Q5 和 T2 点分布有较多沉水植物，Q3 和 Q4 点零星分布少量沉水植物外，其他采样点无沉水植物（表 1）。

| 表 1 采样点特征                               |           |        |            |
|-----------------------------------------|-----------|--------|------------|
| Tab. 1 Characteristics of sampling site |           |        |            |
| 采样点                                     | 人类干扰      | 底质特征   | 沉水植物       |
| Q1(30° 14' 17"N, 108° 37' 36"E)         | 近清江源头，干扰少 | 沙石     | 无          |
| Q2(30° 17' 35"N, 108° 44' 54"E)         | 位于红鹤坝村    | 泥沙     | 无          |
| Q3 (30° 17' 26"N, 108 ° 54' 1"E)        | 流经汪营镇     | 泥沙和硬质底 | 零星分布       |
| Q4(30° 17 ' 40"N, 108 ° 55' 14"E)       | 利川市中心     | 泥沙     | 零星分布       |
| Q5(30° 1 8' 18"N ,108° 57 ' 24"E)       | 利川市下游近城区  | 以泥沙为主  | 覆盖 60%左右河面 |
| J1(30° 39' 49"N, 111° 53' 53 "E)        | 源头村庄旁     | 以沙石为主  | 无          |
| J2(30° 40' 14"N, 111° 10' 4"E)          | 桥边村旁      | 以沙石为主  | 无          |
| J3(30°41' 22 " N, 111° 14' 35"E)        | 点军区城镇下游   | 以沙石为主  | 无          |
| H1(31° 23' 56"N, 111° 15' 40"E)         | 支流源头      | 以沙石为主  | 无          |
| H2(31° 27' 3rN, 111° 13' 20 " E)        | 近干流源头     | 以沙石为主  | 无          |
| H3(31° 21' 59"N, 111° 15' 32"E)         | 水电站旁      | 以沙石为主  | 无          |
| H4(31°19' 58"N, 111° 18' 14"E)          | 磷矿开展区     | 以沙石为主  | 无          |
| H5(31° 16' ir N, 111° 20' 48"E)         | 支流汇入干流口   | 以沙石为主  | 无          |
| H6(31° 9' 12"N, 111°21' 47"E)           | 水库下游缺水河滩  | 以沙石为主  | 无          |
| H7(30° 47' 28"N, 111°19' 35"E)          | 流入城区上游    | 以沙石为主  | 无          |
| T1( 32° 23' 33"N, 110° 17' 13"E)        | 郧西市上游支流   | 以沙石为主  | 无          |
| T2(32° 44' 2"N, 110° 21' 43 " E)        | 郧西市上游干流   | 以沙石为主  | 覆盖 40%左右河面 |
| T3( 32°57' 55"N, 110° 24' 53"E)         | 郧西市下游     | 以沙石为主  | 无          |
| T4( 32° 57' 23"N, 110° 24' 49"E)        | 郧西市下游     | 以沙石为主  | 无          |

1.2 样本采集时间、方法及分析

采集时间跨度为 2014 年 10 月至 2017 年 1 月，其中卷桥河采集 5 次（2015 年 8 月，2016 年 1 月、4 月和 8 月，2017 年 1 月），清江利川段采集 2 次（2014 年 10 月和 2015 年 8 月），天河郧西段（2014 年 11 月）和黄柏河（2015 年 8 月）各采集 1 次。

水温（WT）、pH 和溶解氧（DO）采用 YSIPro-Plus 多参数水质测量仪（美国）现场测定。

用 5L 有机玻璃采水器采集表面 0.5m 左右表层水样（水深小于 0.5m 取表层水样），随机采集 4 次，共计 20L 水样放置在用河水洗净的塑料桶内，混合后取约 2.5L 水样低温保存，带回实验室分析水质。总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH<sub>3</sub>-N）和高锰酸盐指数（COD<sub>Mn</sub>）等水质指标的检验方法依据《水和废水监测分析方法（第四版）》<sup>[19]</sup>。

底栖动物定量采集采用 60 目索伯网 (Surber, 30cmx30cm)。由于采样点水深均较浅, 采样人员涉水采集。在每个采样点根据生境特点随机采集 3~5 次, 样品筛洗后置于白色解剖盘中分检, 标本用 99% 的乙醇固定保存在广口瓶中, 贴上标签, 带回实验室中鉴定标本至属或尽可能低的分类单元<sup>[20-25]</sup>。样品在分类计数时, 若标本损坏则只统计头部, 计算密度 (ind./m<sup>2</sup>)。

### 1.3 数据处理及分析

#### 1.3.1 优势科敏感性分析

对水环境的污染敏感性指示分类参照 Chess-man 等文献<sup>[8, 14, 15, 26, 27]</sup>, 底栖动物优势类群的变化在一定程度上可直接反映水体污染程度的改变。其中底栖动物耐污值 <4 为敏感类群, 4~6 为有一定的耐受能力类群, >6 为耐污类群。

#### 1.3.2 水质生物学评价法

##### (1) 科级生物指数

大型底栖动物科级水平生物指数法 FBI (Family biotic index) 是 Hilsenhoff<sup>[13]</sup>于 1988 年提出, 并提供了 10 目 69 科的耐污值, 该指数是目前美国环境保护局推荐使用的指数之一, 该指数的公式为:

$$FBI = \sum_{i=1}^s n_i \times t_i / N \quad (1)$$

式中: N 代表样品科的个体总数  $n_i$  代表第  $i$  科的个体数;  $t_i$  代表第  $i$  科的耐污值; S 为科数。水质评价标准沿用 Hilsenhoff 标准: FBI=0.00~3.75 极清洁; 3.76~4.25 很清洁; 4.26~5.00 清洁; 5.01~5.75 一般; 5.76~6.50 轻度污染; 6.51~7.25 污染; 7.26~10.00 严重污染。

##### (2) 底栖动物敏感性计分器

底栖动物敏感性计分器 SIGNAL 指数 (Stream invertebrate grade number-average level) 是利用研究区域所出现的底栖动物的敏感性来评价栖息地的水质<sup>[14, 15]</sup>, 计算公式:

$$SIGNAL = \sum_{j=1}^m O_j \times w_j / \sum_{j=1}^m w_j \quad (2)$$

式中:  $O_j$  为采样点出现的  $j$  目物种的敏感值<sup>[14]</sup>;  $w_j$  为其权重值, 权重值 (表 2) 的大小由该目级分类单元中出现的物种个体总数决定;  $m$  为目级分类单元总数。

评价标准为: SIGNAL>6, 清洁; SIGNAL 为 5~6, 轻污染; SIGNAL 为 4~5, 中等污染; SIGNAL<4, 严重污染。SIGNAL 指数得分越高, 表明该采样点受到人为活动的影响越小。

SIGNAL 指数分类要求仅到目级分类单元即可, 并进一步考虑了不同物种出现时个体数的多寡, 将个体数的多寡加入权重值进一步完善和发展了敏感值指数<sup>[15]</sup>。

表 2 SIGNAL 指数计算中的权重赋分<sup>[15]</sup>

Tab. 2 Weight of SIGNAL index

| 目级分类单元中出现的物种个体总数（个） | 权重赋分 |
|---------------------|------|
| >20                 | 5    |
| 11-20               | 4    |
| 6~10                | 3    |
| 3~5                 | 2    |
| 1~2                 | 1    |

### 1.3.3 数据分析

FBI 和 SINGAL 线性相关通过 SPSS Statistics 22.0 进行 Spearman 秩相关分析,  $P<0.05$  表 75 有显著差异; 水质与生物评价指数采用线性回归拟合分析关联性<sup>[28, 29]</sup>。

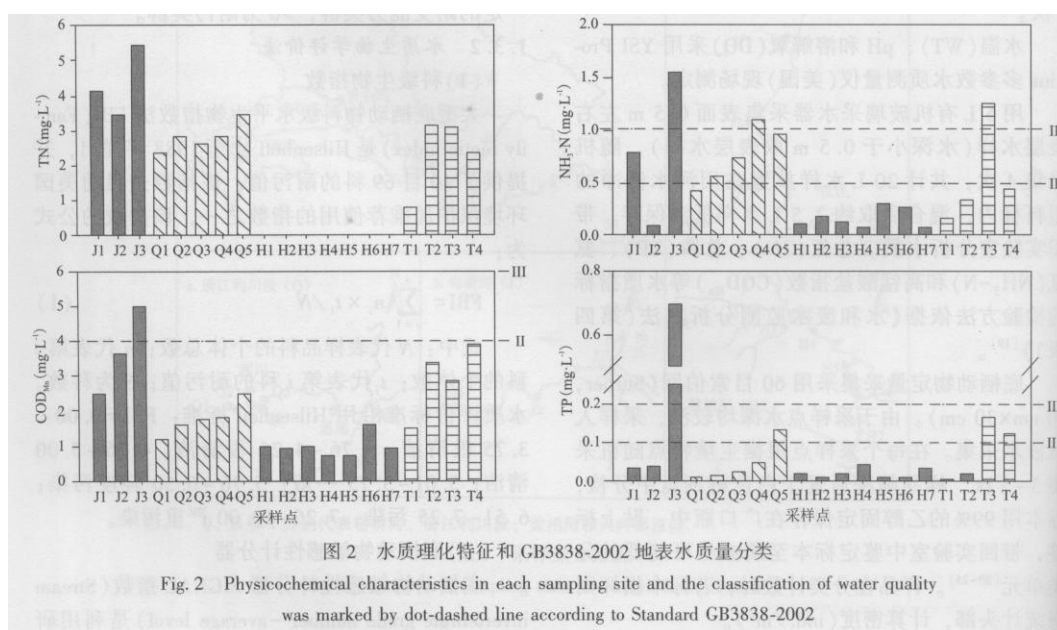
采用 PCA 分析理化数据, 将 4 个主要环境指标重新组合, 从而提取出可以尽可能多的反应原来变量信息的综合变量, 寻找各采样点环境因子的潜在梯度。主成分轴选取特征根值 (eigenvalue) 大于 1 者进入下一步分析<sup>[28]</sup>。为了获得数据正态分布, 将环境因子均进行  $\ln(x+1)$  转换<sup>[30]</sup>。

PCA 分析和回归分析通过 SPSS Statistics22.0 进行, 图形处理主要采用 SigmaPlot 12.5 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体主要营养盐特征

J3、Q4 和 T3 三采样点  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度在  $1.0\sim1.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 属于 GB3838-2002 地表水质量分类标准 IV 类; 其他采样点  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均在  $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 优于 GB3838-2002 地表水质量分类标准 III 类水, 其中黄柏河各采样点  $\text{NH}_3\text{-N}$  值优于 II 类水。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度除 J3 点外均优于 II 类水标准。TP 浓度除采样点 J3 外均优于 III 类水标准, J3 为劣 V 类。各采样点的 TN 浓度均较高 (黄柏河未测定 TN), 除天河郎西段 T1 点值低于  $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  外, 其他各点值均高于  $2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (图 2)。



2.2 大型底栖动物群落特征与分布

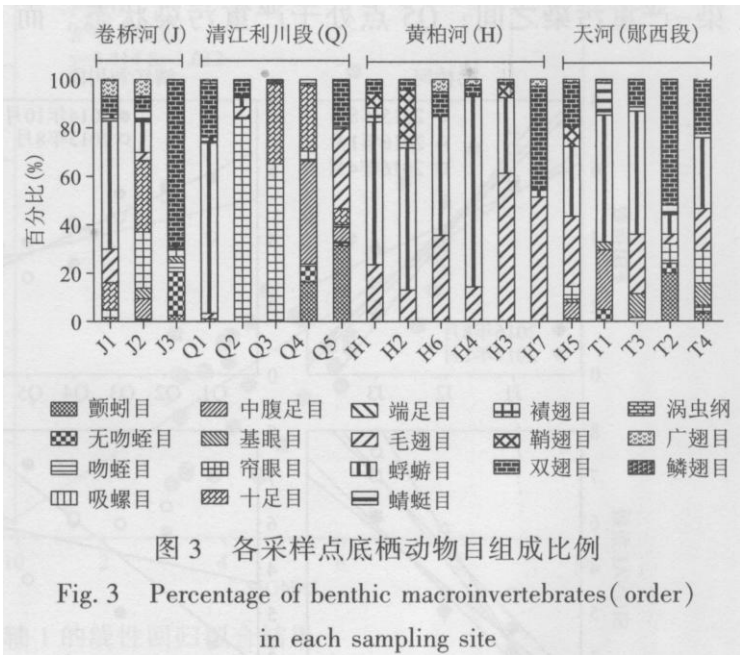


表 3 不同采样点大型底栖动物优势科所占比例

Tab. 3 Percentage of the dominant family in each sampling site

| 河流名称  | 采样点 | 科（污染敏感值，数量排前三的科占总数的百分比） |                  |                  |
|-------|-----|-------------------------|------------------|------------------|
|       |     | 1                       | 2                | 3                |
| 卷桥河   | J1  | 细裳蜉科（3, 28.9%）          | 匙指虾科（4, 9.1%）    | 蜉蝣科（3, 8.6%）     |
|       | J2  | 匙指虾科（4, 29.3%）          | 蜉科（6, 23.4%）     | 鱼蛉科（4, 6.9%）     |
|       | J3  | 摇蚊亚科（6, 63.6%）          | 石蛭科（10, 18.0%）   | 长足摇蚊亚科（7, 4.6%）  |
| 清江利川段 | Q1  | 扁蜉科（3, 55.0%）           | 大蚊科（3, 10.6%）    | 小蜉科（1, 7.8%）     |
|       | Q2  | 蜉科（6, 83.8%）            | 纹石蛾科（4, 4.5%）    | 蜉蝣科（3, 3.0%）     |
|       | Q3  | 蜉科（6, 64.8%）            | 匙指虾科（4, 32.7%）   |                  |
|       | Q4  | 田螺科（6, 43.0%）           | 匙指虾科（4, 27.3%）   | 颤蚓科（9, 16.5%）    |
|       | Q5  | 纹石蛾科（4, 33.0%）          | 颤蚓科（9, 31.3%）    | 摇蚊亚科（6, 18.2%）   |
| 黄柏河   | H1  | 小蜉科（1, 41.2%）           | 四节蜉科（5, 11.8%）   | 管石蛾科（2, 11.8%）   |
|       | H2  | 扁蜉科（3, 44.9%）           | 扁泥甲科（4, 20.4%）   | 纹石蛾科（4, 12.2%）   |
|       | H3  | 纹石蛾科（4, 32.8%）          | 扁蜉科（3, 22.4%）    | 细裳蜉科（3, 20.7%）   |
|       | H4  | 蜉科（3, 54.8%）            | 扁蜉科（3, 16.7%）    | 纹石蛾科（4, 9.5%）    |
|       | H5  | 纹石蛾科（4, 55.9%）          | 四节蜉科（5, 12.9%）   | 扁蜉科（3, 7.5%）     |
|       | H6  | 纹石蛾科（4, 51.4%）          | 直突摇蚊亚科（6, 20.0%） | 长足摇蚊亚科（7, 14.3%） |
|       | H7  | 纹石蛾科（4, 23.7%）          | 扁蜉科（3, 19.7%）    | 溪泥甲科（5, 7.9%）    |
| 天河鄢西段 | T1  | 蜉蝣科（3, 44.3%）           | 黑螺科（6, 24.6%）    | 蜻科（1, 6.6%）      |
|       | T2  | 蜉蝣科（3, 36.1%）           | 小石蛾科（4, 18.0%）   | 摇蚊科（8, 11.5%）    |
|       | T3  | 摇蚊科（8, 52%）             | 颤蚓科（9, 20%）      | 蜉蝣科（3, 8%）       |
|       | T4  | 摇蚊科（8, 20.8%）           | 纹石蛾科（4, 16.7%）   | 蜉科（6, 13.3%）     |

4 个河段共采集到大型底栖动物 5 门 8 纲 18 目 61 科。卷桥河共采集 4 门 7 纲 15 目 35 科, J1 点蜉蝣目占 52.9%, 以敏感类群细蜉科为主; J2 点十足目占 29.6%, 以具一定耐污能力的匙指虾科为主; J3 点双翅目占 68.8%, 以耐污类群摇蚊亚科为主, 耐污类群数量占比超过一半而清洁类群蜉蝣目仅占 0.7% (图 3, 表 3)。

清江利川段共采集 5 门 7 纲 16 目 37 科, Q1 蜉蝣目占 70.5%, 以敏感类群扁蜉科为主; Q2 和 Q3 帘蛤目分别占 83.8% 和 64.7%, 以具一定耐污能力的蜆科为主; Q4 中腹足目占 42.6%, 以田螺科为主, 且耐污类群颤蚓出现并占较大比例 (16.4%); Q5 颤蚓目和双翅目分布占 31.3% 和 19.0%, 耐污类群颤蚓和摇蚊比例占近 1/2 (图 3, 表 3)。

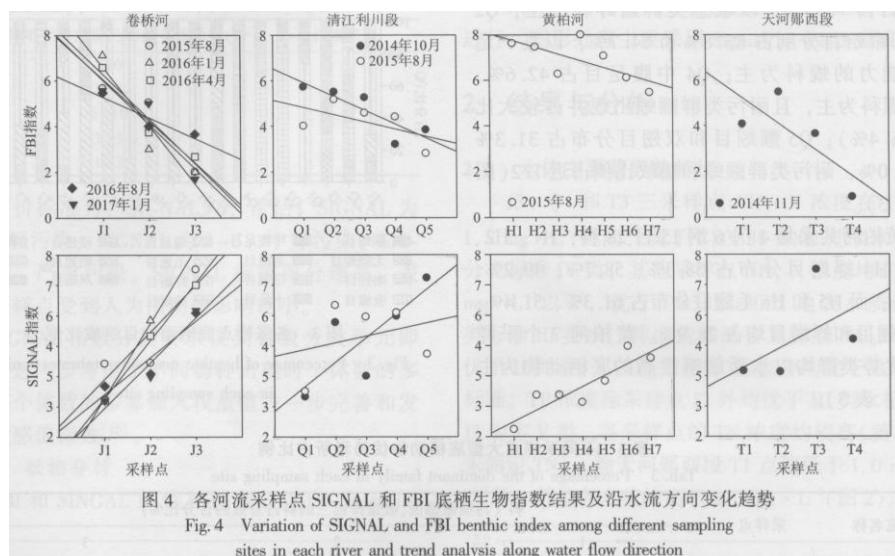
黄柏河共采集 4 门 6 纲 15 目 28 科, H1、H2、H3 和 H4 蜉蝣目分布占 58.3%、58.7%、49.2%、78.6%; 而出和毛翅目分布占 61.3%、51.4%; H7 毛翅目和蜉蝣目均占 28.9%。黄柏河 7 个采样点的优势类群均以水质敏感性高的底栖动物为主 (图 3, 表 3)。

天河郧西段共采集 3 门 5 纲 12 目 21 科, T1 和 T2 敏感类群蜉蝣目分别占 52.5% 和 50.8%; T3 双翅目占 52.0%, 以耐污类群摇蚊科为主; T4 蜉蝣目占 29.2%、双翅目 21.7% 和毛翅目占 17.5%, 其中摇蚊科占比最高 (图 3, 表 3)。

从污染敏感性指示类群数量占总数的比例来看, 水污染沿水流方向呈逐渐加重趋势 (图 3, 表 3)。

### 2.3 底栖生物评价指数及对水质污染的指示

根据所选取的 FBI 和 SIGNAL 指数, 对研究河段水体进行健康评价。而基于 SIGNAL 指数计算结果 (图 4) 显示卷桥河 H 点水质介于轻污染-清洁之间; J2 点介于中等污染-严重污染之间; J3 点处于严重污染。清江利川段 Q1 介于轻污染-中等污染之间; Q2 点处于轻污染状态; Q3 点介于轻污染-中等污染之间; Q4 点介于中等污染-严重污染之间; Q5 点处于严重污染状态。而黄柏河 H1~H6 计算出的 SIGNAL 值均大于 6, 水体处于清洁状态; 而 H7 点值为 5.5, 处于轻污染状态, 表明黄柏河水体整体处于清洁状态。天河郧西段 T1 点、T2 点分别处于中等污染和轻污染状态; 而城区下游 T3 和 T4 点值均小于 4, 处于严重污染状态。从 SIGNAL 指数的变化趋势来看, 水质污染程度沿水流方向变化一致, 均呈加重趋势, 但卷桥河和天河郧西段下降趋势更快, 而黄柏河趋势变化平缓 (图 4)。



基于 FBI 指数计算结果 (图 4), 卷桥河 J1 点介于极清洁-清洁之间; J2 点介于清洁-轻度污染之间; J3 点处于污染-严重污染之间。清江利川段 Q1 介于极清洁-很清洁之间; Q2 点处于轻度污染状态; (J3 点介于很清洁-轻度污染之间; Q4 点处于轻度污

染状态; Q5 点 10 月份处于污染状态, 而 8 月份处于清洁状态。黄柏河 H1~H4 采样点 FBI 值均小于 3.75, 处于极清洁状态; H5-H7 点介于很清洁—一般清洁之间, 表明黄柏河水体健康状况良好。天河郎西段 T1 和 T2 均处于良清洁状态; 而城区下游 T3 点值为 7.5, 表明水质严重污染; 14 点值为 5.2, 表明水质处于一般清洁状态。从 FBI 指数的变化趋势来看, 水质污染程度沿水流方向变化一致, 均呈加重趋势, 不同河流之间, 除黄柏河上下游水体健康良好, 其他 3 个河流均表现为上游或源头水体健康良好, 中游或下游河段受到一定污染。

FBI 和 SIGNAL 指数尽管对水质评价侧重点有区别, 但二者评价结果呈显著相关 (图 5), 表明两种生物评价指数在评估本研究的 4 个河段的健康状况时具有一致性。

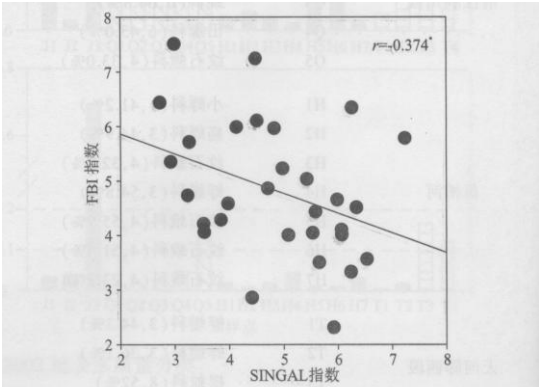


图 5 FBI 和 SIGNAL 指数相关性分析  
Fig. 5 Linear correlation analysis between SIGNAL and FBI index

2.4 底栖生物评价指数对水质指示的敏感性分析

对主要环境因子 (TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TN) 主成分分析结果表明, 轴 1 的解释率达到 65.1% (特征根为 2.60), 轴 2 的解释率达到 18.0% (特征根为 0.72)。选择特征根大于 1 的轴 1 作为主要环境压力梯度, 与生物评价指标做进一步分析来评估指数的敏感性。在水环境指标中,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  对轴 1 的贡献率最高。将 FBI 和 SIGNAL 指数与轴 1 进行线性回归分析, 结果显示二者对主要水质压力梯度均具有显著的解释 (图 6), 表明 SIGNAL 和 FBI 指数可有效指示水质污染状况。

FBI 和 SIGNAL 指数与各水质指标的线性回归分析进一步显示二者与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TP 线性拟合关系极显著, 与 TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  关系不显著 (图 7)。

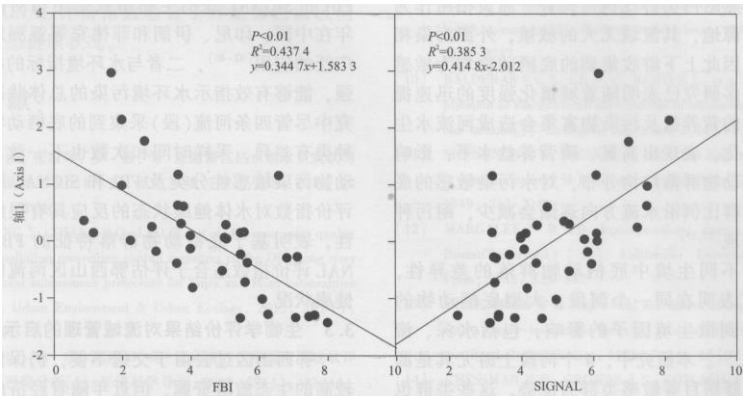


图 6 FBI 和 SIGNAL 指数与轴 1 的线性回归拟合结果  
Fig. 6 Linear regression analysis between benthic biological indices (FBI and SIGNAL) and Axis 1

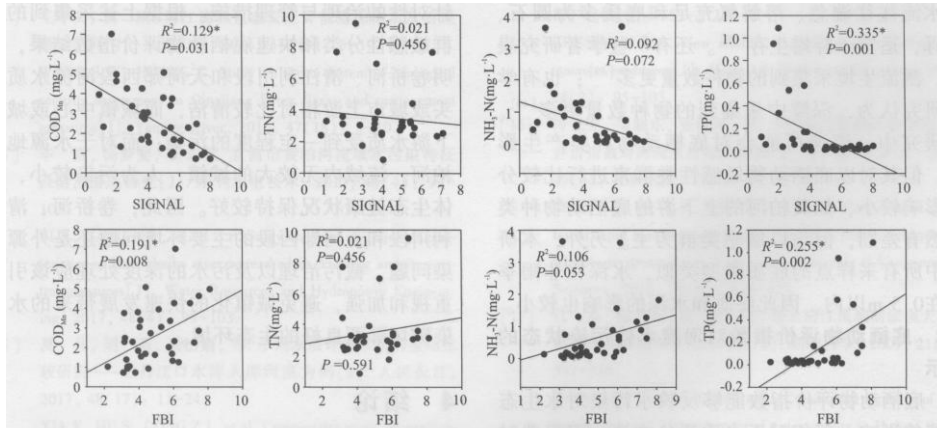


图 7 FBI 和 SIGNAL 指数与主要水质指标的线性拟合结果

Fig. 7 Linear regression analysis between benthic biological indices (FBI and SIGNAL) and each environmental variable

### 3 讨论

#### 3.1 底栖动物群落结构特征

底栖动物群落结构沿河流流动方向的分布格局主要受水体理化性质、栖息地类型等环境因子的影响，导致在空间上存在差异<sup>[1, 2, 31]</sup>。卷桥河上游 J1 和 J2 点尽管氮浓度较高，但磷浓度较低，底栖动物敏感类群指示水生态健康状况良好；而下游 J3 点底栖动物类群以耐污种为主，可能是由大多污水直排卷桥河，导致 TP、以 COD<sub>mn</sub> 和 TN 浓度均较高。清江利川段敏感类群蜉蝣目主要分布在靠近源头 Q1 和 Q2 点，颤蚓等耐污类群主要分布在利川城中 Q4 和下游 Q5 点，其影响因素可能主要是临近的城镇污水汇入。天河郧西段蜉蝣目也主要分布在城市上游的 T1 和 T2，下游两个采样点耐污类群比例占优势。而黄柏河作为宜昌市水源地，其流域无大的城镇，外源污染相对较少，因此上下游收集到的底栖动物均为敏感类群。许多研究已表明随着城镇化强度的迅速提高，区域的营养盐及污染物富集会造河流生态状况恶化，表现出高氮、磷营养盐水平，影响大型底栖动物群落结构分布，对水污染敏感的底栖动物类群比例沿水流方向逐渐会减少，耐污种会逐渐出现<sup>[32, 33]</sup>。

关于不同生境中底栖动物群落的差异性，较多研究表明在同一个河段，大型底栖动物的分布还受到微生境因子的影响，包括水深、流速和底质<sup>[34]</sup>。本研究中，4 个河段上游尤其是源头区均以蜉蝣目等敏感类群为优势，这些类群也往往是源头河流中的常见种<sup>[31, 35~37]</sup>，例如蜉蝣目喜急流和洁净水体且对水质变化敏感，在溪流上游水流往往湍急、溶解氧充足和底质多为圆石、漂砾，适宜于蜉蝣生存<sup>[38]</sup>。还有一些学者研究表明，激流生境采集到的物种数量更多<sup>[39]</sup>；也有学者研究认为，深潭中采集到的物种数量更多<sup>[40]</sup>。本研究中，流速可能会对底栖动物种类产生影响，但其对以底栖动物敏感性类群来进行比较分析影响较小，如黄柏河的上下游的底栖动物种类虽然有差别，但均以敏感类群为主。另外，本研究中所有采样点的底质类型类似，水深在非雨季多在 0.5m 以内，因此底质和水深的影响也较小。

#### 3.2 底栖动物评价指数对河流水体污染状态的指示

底栖动物评价指数能够反映水污染对水生态系统的影响，但相对于水质评价方法，不仅费时而且底栖动物鉴定也有难度。目前常用的生物评价指数，对底栖动物的分类要求较高，如 Shan-non-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数等。此外，底栖动物分布有较强的地域性，评价标准难以统一。因此，在构建生物评价基准时，仍需将生物学评价结果与理化指标数据进行比较以验证其准确度<sup>[41]</sup>。本研究在预分析的基础上，参考冷龙龙等<sup>[16]</sup>研究结果，选择 FBI 和 SIGNAL 两个快速评价指数。从有机污染、富营养化、面源污染，选取 COD<sub>mn</sub>、TP、TN 和 NH<sub>4</sub>-N 这 4 个典型水质指标与底栖动物评价指数线性拟合，结果显示 FBI 和 SIGNAL 指数与有机污染 (COD<sub>mn</sub>) 和富营养化指标 (TP) 拟合显著，表明二者对有机污染和水体富营养化程度具有较强的指示作用。由于 FBI 和 SIGNAL 底栖生物指数运用相对简便，近年在中国、印尼、伊朗和菲律宾等亚洲地区得到广泛的应用<sup>[42~45]</sup>，二

者与水环境指标的相关性较强，能够有效指示水环境污染的总体状况。本研究中尽管四条河流（段）采集到的底栖动物数量与种类有差异，采样时间和次数也不一致，但底栖动物污染敏感性分类及 FBI 和 SIGNAL 底栖生物评价指数对水体健康状态的反应具有很好的一致性，表明基于底栖动物群落特征的 FBI 和 SIGNAL 评价指数适合于评估鄂西山区河流的水生态健康状况。

### 3.3 生物学评价结果对流域管理的启示

鄂西山区过去由于交通不便，仍保留着品位较高的生态旅游资源，但近年随着经济的快速发展，水污染问题加剧，威胁了旅游的可持续发展，因此评估该流域的水质污染现状有利于提出针对性的治理与管理措施。根据上述采集到的类群敏感性分类和快速底栖动物评价指数结果，表明卷桥河、清江利川段和天河郧西段河流水质源头或城市上游相对比较清洁，而城镇中心或城镇下游水质受到一定程度的污染；而对于水源地黄柏河，流域内无较大的城镇，人为污染较小，水体生态健康状况保持较好。因此，卷桥河、清江利川段和天河郧西段的主要环境问题还是外源污染问题，截污治理以及污水的深度处理应该引起重视和加强，避免城镇化的快速发展带来的水污染破坏鄂西良好的生态环境。

## 4 结论

（1）鄂西山区大型底栖动物种类丰富，源头及河流上游以蜉蝣目等敏感类群为主，但随着污染输入的加重，清洁种逐渐减少或消失，颤蚓目和双翅目等耐污类群比例逐渐增加。底栖动物敏感指示类群的变化能够反映水体污染情况。

（2）FBI 和 SIGNAL 指数尽管对水质评价侧重点有区别，但二者结果呈显著相关，表明这两种生物评价指数在评估本研究的 4 个河段的健康状况时具有一致性，而且 FBI 和 SIGNAL 指数与各水质指标的线性回归拟合关系较好，因此能够相互印证指示水质污染程度。

（3）底栖动物污染敏感性分类及 FBI 和 SIGNAL 底栖生物评价指数对水体健康状态的反映具有很好的一致性，表明基于底栖动物群落特征的 FBI 和 SIGNAL 评价指数适合于评估鄂西山区河流的水生态健康状况。

### 参考文献：

[1] 张仪，张淑琴，罗薇，等. 恩施清江枯水期水质现状与 污染防治对策分析[J]. 城市环境与城市生态，2015，28(1)：42-46.

river in Enshi autonomous prefecture for Tujia and Miao nationalities[J] . Urban Environment & Urban Ecology, 2015，28(1)：42-46.

[2] 李柏山，熊欣，沈建军，等. 湖北清江长阳段水质现状评 价及污染分析[J]. 环境科学导刊，2010，29(1)：42-44.

LI B S, XIONG X, SHEN J J, et al. Present status and assess-ment on water quality of Qingjing river in Hubei [ J]. Environmental Science Guide, 2010, 29( 1) : 42-44.

[3] 王守文，黄刚. 清江流域生态安全评估指标体系及治理措施研究[J]. 人民长江，2016，47(18)：5-10.

WANG S W, HUANG G. Study on index system of ecological security assessment in Qingjiang River Basin and management measures[ J]. Yangtze River, 2016, 47(18) : 5-10.

[4] 毕雪，杨梦斐，田志福. 宜昌市黄柏河流域水污染特征 及防治措施研究[J]. 水利水电技术，2017，48(4)：99-103.

---

BI X, YANG M F, TIAN Z F. Study on water pollution characteristics of Huangbaihe river watershed in Yichang and its control measures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(4) : 99-103.

[5] 夏凡,胡圣,龚治娟,等.不同水质评价方法的应用比较研究——以丹江口水库入库河流为例[J].人民长江, 2017, 48(17): 11-24.

XIA F, HU S, GONG Z J, et al. Comparative study on application of different water quality evaluation methods: a case study of inflow rivers in Danjinkou reservoir area[ J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 11-24.

[6 ] TOWNSEND C R, THOMPSON R M, MCINTOSH A R, et al. Disturbance, resource supply and food - web architecture in streams[ J]. Ecology Letters, 1998, 1: 200-209.

[7 ] CHUTTER F M. An empirical biotic index of the quality of water in south African streams and rivers [J]. Water Research, 1972, 6(1) : 19-30.

[8 ]王备新, 杨莲芳.我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J].生态学报, 2004, 24(12) : 2769-2775.

WANG B X, YANG L F. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China[ J] • Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12) : 2769-2775.

[9 ]耿世伟, 渠晓东, 张远, 等.大型底栖动物生物评价指数 比较与应用[J].环境科学, 2012, 33(7): 2281-2287.

GONG S W, QU X D, ZHANG Y, et al. Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [ J ]. Environmental science, 2012, 33(7): 2281-2287.

[10] BALDERAS E C S, JGRAC C, BERTI E L, et al. Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams[J]. Ecological Indicators, 2016, 61: 558-567.

[11] SHANNON C E, WEAVER W EDS. The mathematical theory of communication [ M ]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 213-216.

[12] MARGALEF D R ED. Inperspectives marine biology ( A BuzzatiTraversoed) [ M ]. California: University California Press, 1958: 323-347.

[13] HILSENHOFF W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index [ J ] . Journal of the North American Benthological Society, 1988, 7(1): 65-68.

[14] CHESSMAN B C, GROWNS J E, KOTLASH A R. Objective derivation of macro invertebrate family sensitivity grade numbers for the SIGNAL biotic index: application to the Hunter River system, New South Wales[J]. Marine & Freshwater Research, 1997, 48(2) : 159-172.

[15] CHESSMAN B C. New sensitivity grades for Australian river macroinvertebrates [ J ]. Marine & Freshwater Research, 2003 , 54(2) : 95-103.

---

[16] 冷龙龙, 渠晓东, 张海萍, 等. 不同大型底栖动物快速生物 评价指数对河流水质指示比较 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(6) : 819-828.

LENG L L, QU X D, ZHANG HP, et al. Comparisons of different rapid bioassessment indices based on benthic macroinvertebrates to stream water quality [ J ]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(6) : 819-828.

[17] 江晶, 温芳妮, 顾鹏, 等. 湖北清江流域胡家溪大型底 栖动物群落结构及水质评价[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 547-555.

JIANG J, WEN F N, GU P, et al. Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Hujiayi Stream of Qingjiang River Basin, Hubei Province [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4) : 547-555.

[18] 苏华武, 江晶, 温芳妮, 等. 湖北清江流域叹气沟河底栖 动物群落结构与水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2008, 20 (4) : 520-528.

SU H W, JIANG J, WEN F N, et al. Community structures of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Tanqigou Stream of Qingjiang River Basin, Hubei Province [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(4) : 520-528.

[19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版, 2005.

State Environmental Protection Administration ( China ) . Water and wastewater monitoring and analysis method ( 4thEdition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.

[20] 王洪铸. 中国小蚓类研究-附中国南极长城站附近地区两 新种[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

WANG H Z. The study of Chinese small earthworm -with de-scriptions of two new species from the vicinity of the great wall station of China, Antarctica[ M] . Beijing: China Higher Education Press, 2002.

[21] BRINKHURST R O, JAMIESON B G M. Aquatic Oligochaeta of the World[ M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1971.

[22] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志: 淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

LIU Y Y, ZHANG W Z, WANG Y X, et al. Chinese fauna of economic animals: freshwater Mollusca [ M ] • Beijing: Science Press, 1979.

[23] EPLER J H. Identification manual for the larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina [ M]. USA: EPA Region 4 and Human Health and Ecological Criteria Division, 2001.

[24] MORSE J C, YANG L, TIAN L. Aquatic insects of China use-ful for monitoring water quality[ M] . Nanjing: Hohai University Press, 1994.

[25] 尤大寿, 归鸿. 中国经济昆虫志(第 48 册: 蜉蝣目)[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

YOU DT, GUI H. Chinese fauna of economic insects ( Vol 48: Ephemeroptera) [M]. Beijing: Science Press, 1995.

- 
- [26] 段学花, 王兆印, 徐梦珍, 等. 底栖动物与河流生态评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- DUANG X H, WANG Z Y, XU MZ, et al. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [27] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 等. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价 [J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 279-284.
- WANG J G, HUANG H B, YANG M X, et al. Tolerance values of benthic macroinvertebrates and bioassessment of water quality in the LUSHAN nature reserve [J]. China Journal of Applied & Environmental biology, 2003, 9(3): 279-284.
- [28] 武松, 潘发明. SPSS 统计分析大全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- WU S, PANG F M. SPSS for statistical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [29] 张利田, 卜庆杰, 杨桂华, 等. 环境科学领域学术论文中常用数理统计方法的正确使用问题 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 171-173.
- ZHANG L T, BU Q J, YANG G H, et al. The proper use of mathematical statistics in academic papers in the field of environmental science [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(1): 171-173.
- [30] LEPS J, MILAUER P ED. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. London: Cambridge University Press, 2003.
- [31] MEYER J L, STRAYER D L, WALLACE J B, et al. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 86-103.
- [32] 刘东晓, 于海燕, 刘朔孺, 等. 城镇化对钱塘江中游支流水质和底栖动物群落结构的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1370-1376.
- LIU D X, YU H Y, LIU S Y, et al. Impacts of urbanization on the water quality and macrobenthos community structure of the tributaries in middle reach of Qiantang River, East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1370-1376.
- [33] 李宁, 陈阿兰, 杨春江, 等. 城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3570-3576.
- LI N, CHEN A L, YANG C J, et al. Impacts of urbanization on water quality and macrobenthos community structure upstream in the Huangshui river [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3570-3576.
- [34] 张海萍, 张宇航, 马凯, 等. 河流微生物异质性与大型底栖动物空间分布的关系 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3023-3031.
- ZHANG HP, ZHANG Y H, MA K, et al. Relationship of river microhabitat heterogeneity and macroinvertebrate spatial distribution [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 3023-3031.

---

[35] 汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 等. 南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态 [J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6) : 803-807.

WANG XZ, CAIXH, LIFQ, et al. Distribution dynamics of macroinvertebrates in the source water areas of the south-water-to-north project [ J ]. China Journal of Applied & Environmental biology, 2009, 15(6) : 803-807.

[36] 李杨, 蒋万祥, 李斌, 等. 2009 年苍山水系 6 条源头河流中的大型底栖动物群落结构季节动态 [J]. 湿地科学, 2016, 14(5) : 733-739.

LI Y, JIANG W X, LI B, et al. Seasonal dynamics of structure of benthic macroinvertebrates community in 6 headwater streams of river system of Cangshan Mountain in 2009 [ J ]. Wetland science, 2016, 14(5) : 733-739.

[37] 许晨. 长白山源头溪流大型底栖动物群落特征初步研究 [D]. 东北师范大学, 2015.

XU C. A Preliminary study on macroinvertebrates community characteristics in a headwater stream of Changbai mountain [ D ]. Dongbei Normal University, 2015.

[38] 阚春梅, 于洪贤. 亚布力山涧溪流秋季水生昆虫群落特征 及其与环境因子的关系 [J]. 东北林业大学学报, 2014 (1) : 143-147.

KAN C M, YU H X. Correlation between aquatic insect community characteristics and environmental factors in Yabuli Mountain Streams [ J ]. Journal of Northeast Forestry University, 2014 (1): 143-147.

[39] BROWN A V, BRUSSOCK P P. Comparisons of benthic invertebrates between riffles and pools [ J ] • Hydrobiologia, 1991, 220(2): 99-108.

[40] BOULTON A J, LAKE P S. The ecology of two intermittent streams in Victoria, Australia. I. Multivariate analyses of physicochemical features [ J ]. Freshwater Biology, 1990, 24 ( 1): 123-138.

[41] 陈小华, 康丽娟, 孙从军, 等. 典型平原河网地区底栖动物 生物指数筛选及评价基准研究 [J]. 水生生物学报, 2013, 37(2) : 191-198.

CHEN X H, KANG L J, SUN C J. et al. Development of multi-metric index based on benthic macroinvertebrates to assess river ecosystem of a typical plain river network in China [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(2) : 191 — 198. [42] DU L N, JIANG YE, CHEN X Y, et al. A family-level macroinvertebrate biotic index for ecological assessment of lakes in Yunnan, China [ J ]. Water Resources, 2017, 44(6): 864 — 874.

[43] KRIS ANTI M, WARDIATNO Y, ANZANI Y M. Assessing the ecological status of the Cisadane River' s headwaters using benthic macroinvertebrates [ C ] #IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017: 012-023.

[44] SHARIFINIA M, MAHMOUDIFARD A, GHOLAMI K, et al. Benthic diatom and macroinvertebrate assemblages, a key for evaluation of river health and pollution in the Shahrood River, Iran [J]. Limnology, 2016, 17(1) : 95-109.

---

[45] DEBORDE, HERNANDEZ. Magbanua Benthic macroinvertebrate community as an indicator of stream health: the effects of land use on stream benthic macroinvertebrates [ J ]. Science Dili-man, 2016, 28(2) : 5-26.