

基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选

卢东琪¹ 张勇¹ 蔡德所² 刘朔孺¹ 陈燕海³ 王备新^{1*}

(1. 南京农业大学昆虫学系, 南京 210095; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 3. 广西钦州市水利局, 钦州 535000)

摘要: 候选参数的科学筛选是构建底栖动物完整性指数的关键步骤。在缺乏足够参照样点的情况下, 生物参数与环境梯度的响应关系是重要依据。以广西钦江流域冬季枯水期 22 个样点的环境和底栖动物数据为例, 应用主成分分析法提取研究流域的环境梯度, 进而采用多重回归分析确定对环境干扰敏感且预测性强的构成参数。相关性分析表明, 38 个候选参数中有 12 个参数与其他参数间的信息冗余性很高 ($|r| > 0.80$, $P < 0.05$); 余下的 26 个生物参数与环境梯度主成分 I (PC I)、主成分 II (PC II) 和栖境质量参数的多重回归分析表明, 有 13 个参数能和环境胁迫较好地响应 ($P < 0.05$)。参考各指数的代表性和实用性, 提出了适于构建该区域底栖动物完整性指数的 8 个生物参数: 科级丰度、蜉蝣目丰度、鞘翅目丰度、EPT 多度、优势种百分比、捕食者百分比、属级香农多样性指数和 BI 指数。本研究为类似情况下底栖动物完整性指数的构建提供了一个较好的解决途径。

关键词: 底栖动物完整性指数; 底栖生物指数; 主成分分析; 多重回归; 钦江流域

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0137-08

Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin

LU Dong-qi¹, ZHANG Yong¹, CAI De-suo², LIU Shuo-ru¹, CHEN Yan-hai³, WANG Bei-xin¹

(1. Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Qinzhou Water Conservancy Bureau, Qinzhou 535000, China)

Abstract: The selection of proper macroinvertebrate metrics was a key step in the successful construction of benthic-index of biotic integrity (B-IBI). In the context of lack of sufficient reference sites, the responses of biotic metrics to the stress gradients have been proved crucially important in metrics selection. We explored this using a data set (twenty-two sampling sites), where water environmental parameters, habitat quality index (HQI) and zoobenthos were measured and sampled using standardized methodology in the winter dry season (January, 2010) within the Qinjiang River basin, Guangxi. Water quality stress gradients were synthesized using principle component analysis. Twelve out of the 38 candidate metrics were excluded because of high co-linearity ($|r| > 0.80$, $P < 0.05$) with others. Multiple regression analysis of the rest twenty-six metrics, environmental gradients (PC I and PC II) and habitat quality index showed that thirteen metrics significantly correlated ($P < 0.05$) with the environmental stressors (PCs and HQI). Eight of these metrics, family richness, Ephemeroptera richness, Coleoptera richness; Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera (EPT) abundance, proportion of dominant species; proportion of predators; Shannon-Weaver diversity index for genus; and Biotic index (BI), satisfied the selection criteria (e. g., operational simplicity) and were thus candidates for developing a multimetric system to assess river health in our study region. We suggest that the response of metrics to environmental gradient is an ideal alternative for the construction of benthic-index of biotic integrity in the context of insufficient reference sites.

Key words: benthic index of biotic integrity; macroinvertebrate metrics; principal component analysis; multiple regression; Qinjiang River Basin

沿岸带植被带消失、流域土地利用改变、污染物、气候变化和水资源过度利用等, 致使溪流/河流生态系统健康受到严重威胁, 主要体现在物理生境退化、水质恶化、生物多样性减少和溪流生态系统功能下降^[1]。水生生物作为溪流生态系统的重要组成部分, 由于其群落组成和结构的变化通常能综合反映受污染或干扰生态系统的质量, 而被广泛应用于水生生态健康评价^[2, 3]。常用于健康评价的生物类

群有细菌、藻类、底栖动物及鱼类, 其中底栖动物因其特有的生物属性, 是应用最为广泛的指示生物^[4]。基于底栖动物的完整性指数 (B-IBI) 已在国际

收稿日期: 2012-03-17; 修订日期: 2012-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30870345); 广西水利“十一五”重点科技项目

作者简介: 卢东琪 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河流水质生物健康评价, E-mail: windylu@tom.com

* 通讯联系人, E-mail: wangbeixin@njau.edu.cn

不同的地区得到广泛研究和创建,如美国环境保护署(EPA)建立了全国性的B-IBI操作规范^[5,6],法国、巴西、日本等地也有大量的相关研究^[7~9]。国内,自20世纪90年代杨莲芳等^[10]首次将水质生物评价方法系统地介绍到中国以来,王备新等^[11]和李强等^[12]开展了黄山、西苕溪等地区的底栖动物完整性指数研究,张远等^[13]和周晓蔚等^[14]开展辽河和长江河口的底栖动物完整性指数研究,由于不同流域间特定的景观属性和气候特征差异^[15],同类研究尚需在更广泛的区域,针对底栖动物完整性指数构建方法体系中的共性问题展开探讨,以期到底栖动物完整性指数广泛而深入地应用提供技术支持。

针对溪流/河流健康评价,国内外已有大量基于水生生物类群(主要为藻类、底栖动物和鱼类)构建完整性指数的研究,且对于构建参数,一般采用参照组和受损组对比、判别分析等方法确定^[11,16,17]。这套传统的方法,虽已发展得十分成熟,但其应用条件仍具有一定的局限性(如:有些研究区域参照点/参照系统无法满足等)。为此,本研究以广西钦江流域为对象,从另一种角度探讨底栖动物完整性指数的构建,旨在为该区域溪流/河流水质生物监测和评价提供技术支持,为未来相关的水生态环境管理活动提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

钦江是广西南部钦州市境内最大的入海河流,地处东经 $108^{\circ}34' \sim 109^{\circ}30'$,北纬 $21^{\circ}52' \sim 22^{\circ}34'$ 之间。钦江流经灵山县和钦州城区,于钦南区尖山镇注入茅尾海,干流长195 km,平均坡降约为0.321‰。流域面积2391 km²,气候属南亚热带季风气候。地势特点为东北高、西南低,上游地区为低山丘陵,海拔在250~600 m,森林覆盖率较高;中下游为平原地区,人为土地利用程度较高(主要为农业种植用地、城镇化建设用地等)。多年平均降雨量为1600 mm,5~9月汛期的雨量约占全年降雨量的75%~80%。近些年,伴随该区域经济的快速发展,由于污染和水资源利用的影响,钦江(尤其是中下游河段)水生态环境遭受了较大的破坏。

1.2 数据收集

1.2.1 大型底栖无脊椎动物采集

2010年1月(枯水期)在钦江流域选定的22个样点进行大型底栖无脊椎动物采集(图1)。在100 m长的采样河段内,应用D形网(0.3 m直径,40目)采集10个小样方(0.3 m×0.5 m),总样方面积为1.5 m²。样方的分配根据采样河段内各类型小生境的出现比例进行合理分配。样本在野外用40目的钢筛筛选后用10%的福尔马林溶液固定。在实验室内根据鉴定资料,样品尽量鉴定至属,区分到种。

1.2.2 环境因子数据测定

利用GPS仪器(Garmin eTrex venture)测定每个

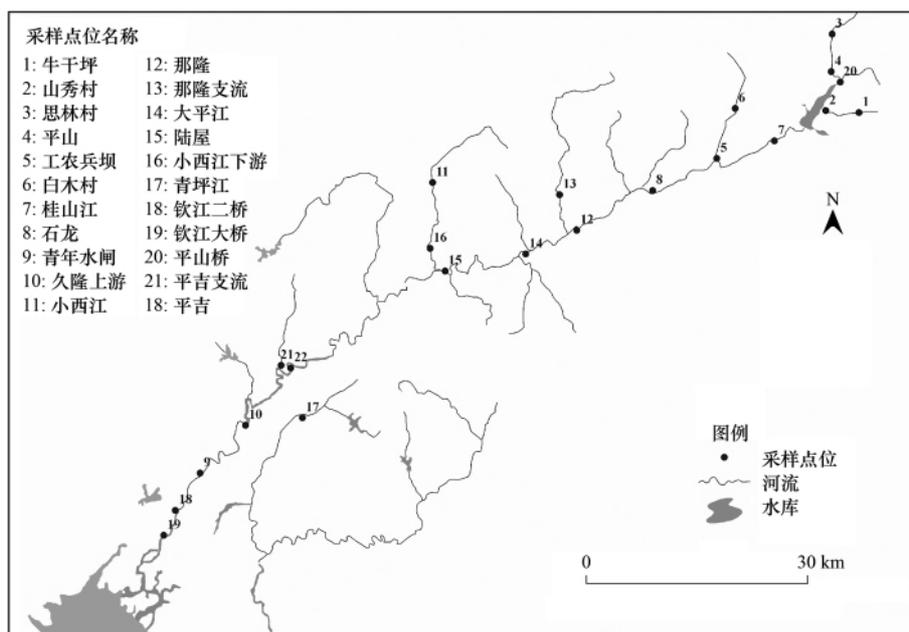


图1 钦江流域采样点位示意

Fig. 1 Location map of sampling sites in the Qinjiang River Basin

采样点位的地理坐标和海拔. 利用 HANNA (HI98129) 多参数水质分析仪测定水体的温度、pH、电导率和溶氧. 同时, 在现场对河床宽、水面宽、水深和流速进行记录 (FP101, Global Water). 用水样瓶采集水样, 黑暗环境下冷藏保存送至广西沿海水环境监测中心进行总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的测定, 所有指标的测定都按照国家标准 (GB 3838-2002) 进行. 栖境质量指数 (HQI) 通过对包括底质沉积、河岸带情况、堤岸稳定性等 7 项定性指标 (表 1) 进行综合打分获得, 在野外将所采集溪流/河流分为高落差河流和低落差河流进行栖境质量评价.

1.3 数据分析

参照相关文献 [4, 18, 19], 计算了 38 个对干扰反应敏感的底栖生物指数 (表 2). 为避免信息“冗余”, 首先分别对环境变量和底栖生物指数进行 Spearman 秩相关分析, 剔除显著相关的变量 ($|r| > 0.80, P < 0.05$). 为了得到研究区域的整体环境梯度, 利用筛选得到的环境因子进行主成分分析 (PCA), 得到主成分 I (PC I) 和主成分 II (PC II). 最后, 为了找到能较好和环境干扰响应的底栖生物指数, 利用环境指数 (主成分得分和栖境质量指数) 和第一次筛选得到的底栖生物指数, 进行多重回归分析. Spearman 秩相关分析和多重回归分析在 SPSS 18.0^[20] 中进行, PCA 在统计软件 PRIMER v6.0^[21] 中进行; 具体的数据处理流程图见 (图 2).

表 1 栖境质量指数评分表

Table 1 Mark sheet of habitat quality parameters

溪流/河流类型	栖境参数	极好 (16~20 分)	好 (11~15 分)	一般 (6~10 分)	差 (0~5 分)
高落差溪流/河流	1a: 速度和深度结合	慢-深、慢-浅、快-深和快-浅 4 种类型都出现, 且几乎是平均分布	3 种情况出现 (若快-浅没有出现, 分值比缺其他情况分值低)	只有 2 种情况出现 (如果快-浅和慢-浅没有出现, 分值低)	只有一种类型出现
低落差溪流/河流	1b: 浅滩类型	大-浅、大-深、小-浅和小-深 4 种类型都出现, 几乎平均分布	大多数为大-深类型; 仅少数大-浅或小-浅类型	大-浅和小-浅类型远多于大-深和小-深类型	大多数为大-浅和小-浅类型, 或者浅滩缺失
高/低落差溪流/河流	2: 底质沉积	边滩很少或者几乎没有; 受底质沉积影响的底部比例 (高落差溪流: < 5%, 低落差溪流: < 20%)	以砾石、沙等新形成了一些边滩; 受底质沉积影响的底部比例 (高落差溪流: 5%~30%, 低落差溪流: 20%~50%)	在新、旧边滩上以新的砾石、沙等出现了中度沉积 (高落差溪流: 30%~50%, 低落差溪流: 50%~80%)	边滩的形成不断增加, 出现了细颗粒底质的严重沉积 (高落差溪流: > 50%, 低落差溪流: > 80%)
高/低落差溪流/河流	3: 河道水量情况	水量较大, 河水淹没到河岸两侧, 或由及少量的河道暴露	水量比较大, 河水淹没 75% 左右的河道	水量一般, 河水淹没 25%~75% 的河道	水量很小, 河道干涸
高/低落差溪流/河流	4: 河道变化	渠道化没有出现或很少出现, 河道维持正常模式	渠道化出现较少, 通常在桥墩周围处出现渠道化, 对水生生物影响较小	渠道化比较广泛, 在两岸有筑堤或桥梁支柱出现, 对水生生物有一定影响	河岸由铁丝和水泥固定, 对水生生物的影响很严重, 使其生活环境完全改变
高落差溪流/河流	5a: 急流出现的频率	急流出现很频繁, 急流间的平均距离与河宽的比值一般小于 7 (通常介于 5~7)	急流出现频繁, 急流间的平均距离与河宽比值一般大于 7 (介于 7~15)	急流偶尔出现, 急流间的平均距离与河宽的比值一般大于 15 (通常介于 15~25)	通常水面平静, 或者是浅滩, 急流间的平均距离与河宽的比值一般大于 25
低落差溪流/河流	5b: 河道蜿蜒度	由于河道蜿蜒, 使得溪流的长度达到理论上直线长度的 3~4 倍	由于河道蜿蜒, 使得溪流的长度达到理论上直线长度的 2~3 倍	由于河道蜿蜒, 使得溪流的长度达到理论上直线长度的 1~2 倍	河道一般较为笔直, 河道在很长一段范围内已被渠道化
高/低落差溪流/河流	6: 堤岸稳定性	堤岸很稳定, 无侵蚀痕迹, < 5% 的堤岸受到了损害	比较稳定, 偶发的小侵蚀地区已恢复好, 有 5%~30% 的面积出现了侵蚀现象	观察范围内 30%~60% 的面积发生了侵蚀, 且有可能在洪水期间发生大的隐患	观察范围内 60% 以上的堤岸发生了侵蚀
高/低落差溪流/河流	7: 沿岸带植被区域宽度	沿岸带宽度 > 18 m, 区域内基本无人为活动干扰	沿岸带 12~18 m, 区域内有些许人为干扰	沿岸带 6~12 m, 区域内人为干扰较大	沿岸带 < 6 m, 沿岸带基本无植被覆盖

2 结果与分析

2.1 底栖生物参数

表 2 列出了本研究选取的 38 个底栖生物指数

及各个指数对人为干扰的响应. 生物参数主要包含丰富度、多度、取食功能团指数、多样性指数和生物完整性指数五大类型; 每种类型包含的参数个数分别为: 8、15、5、9 和 1 个. 利用 38 个生物参数进

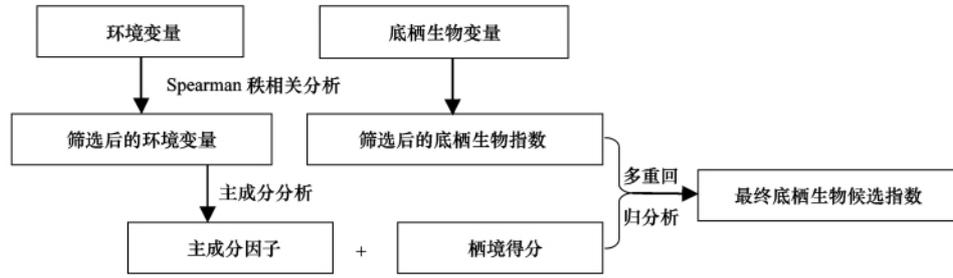


图 2 数据分析流程示意

Fig. 2 Flow diagram of data analyses

行 Spearman 秩相关分析,以检验各指数所涵括信息的独立性;最终剔除了12个底栖生物指数,分别为 M32、M35 和 M37。

表 2 候选底栖生物指数及其对干扰的反应¹⁾

Table 2 Candidate macroinvertebrate metrics and their expected response to disturbance

指数	对干扰的响应	指数	对干扰的响应	指数	对干扰的响应
M1	下降	M14	上升	M27	下降
M2	下降	M15	上升	M28	下降
M3	下降	M16	上升	M29	下降
M4	下降	M17	下降	M30	下降
M5	下降	M18	下降	M31	下降
M6	下降	M19	下降	M32	下降
M7	下降	M20	下降	M33	下降
M8	上升	M21	上升	M34	下降
M9	不定	M22	下降	M35	下降
M10	下降	M23	上升	M36	下降
M11	下降	M24	不定	M37	下降
M12	下降	M25	下降	M38	上升
M13	下降	M26	不定		

1) M1 ~ M8 丰度指数: M1 目级丰度 Richness-Order、M2 科级丰度 Richness-Family、M3 属级丰度 Richness-Genus、M4 EPT 丰度 Richness-EPT、M5 蜉蝣目丰度 Richness-E、M6 毛翅目丰度 Richness-T、M7 鞘翅目丰度 Richness-C、M8 双翅目丰度 Richness-D;
 M9 ~ M23 多度指数: M9 总多度 Total abundance、M10 EPT 多度 Abundance-EPT、M11 蜉蝣目多度 Abundance-E、M12 毛翅目多度 Abundance-T、M13 鞘翅目多度 Abundance-C、M14 双翅目多度 Abundance-D、M15 摇蚊多度 Abundance-Chi、M16 优势种多度 Abundance-Dominant、M17 EPT 百分比 EPT%、M18 蜉蝣目百分比 E%、M19 毛翅目百分比 T%、M20 鞘翅目百分比 C%、M21 双翅目百分比 D%、M22 (EPT/摇蚊) 百分比 (EPT/Chi) %、M23 优势种百分比 Dominant%;
 M24 ~ M28 取食功能团指数: M24 捕食者百分比 Predators%、M25 撕食者百分比 Shredders%、M26 集食者百分比 Gatherers%、M27 滤食者百分比 Filterers%、M28 刮食者百分比 Scrapers%;
 M29 ~ M37 多样性指数: M29 目级均匀度 Pielou's evenness-Order、M30 科级均匀度 Pielou's evenness-Family、M31 属级均匀度 Pielou's evenness-Genus、M32 目级香农多样性指数 Shannon diversity-Order、M33 科级香农多样性指数 Shannon diversity-Family、M34 属级香农多样性指数 Shannon diversity-Genus、M35 目级辛普森多样性指数 Simpson diversity-Order、M36 科级辛普森多样性指数 Simpson diversity-Family、M37 属级辛普森多样性指数 Simpson diversity-Genus;
 M38 生物指数 BI 指数

2.2 环境梯度

通过对环境变量进行 Spearman 相关性分析,剔除了经纬度、水宽、水深、电导和总氮这 6 个变量 (|r| > 0.80, P < 0.05)。剩下 9 个环境因子,分别命名为 E1 ~ E9; 利用初步筛选得到的环境因子进行主成分分析,结果表明:第一、二主成分能解释环境变异的 63.1%,能很好的代表研究区域的环境干扰。其中第一主成分 (PC I) 可解释总变异的

38.6%,从主成分排序结果(图 3)可以看出 PC I 与海拔、流速和溶解氧显著正相关;与河宽、氨氮和总磷负相关(表 3);总体上第一主成分反映了溪流的物理生境和水化梯度。第二主成分 (PC II) 解释总变异的 24.5%,且与水温、流速和氨氮显著正相关;与 pH、流速和溶解氧负相关。

2.3 生物参数的筛选

利用第一、二主成分、栖境质量指数及 26 个初

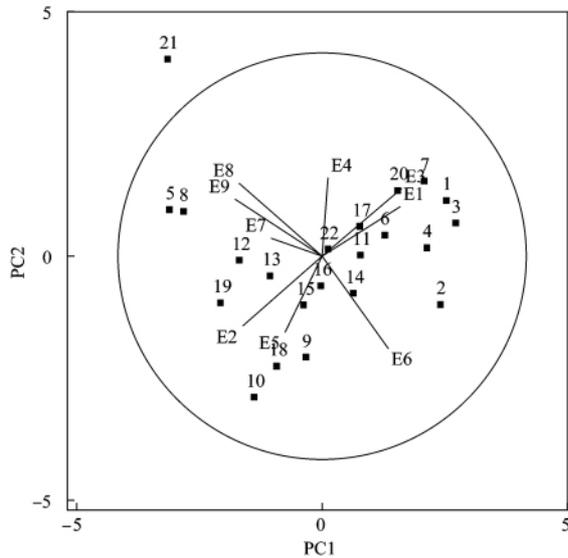


图 3 22 个采样点位环境因子的主成分分析排序图

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) ordination plot for all the 22 sampling sites based on the environmental factors

步筛选得到的生物参数进行多重回归分析,结果(表4)显示26个生物参数中有13个与环境干扰显

著相关. 这 13 个生物参数包含 3 个丰富度参数: 科级丰度、蜉蝣目丰度和鞘翅目丰度; 7 个多度参数: EPT 多度、蜉蝣目多度、毛翅目多度、鞘翅目多度、EPT 百分比、鞘翅目百分比以及优势种百分比; 另外还包含取食功能团指数、多样性指数和生物完整性指数、3 种类型中的各一个,分别为: 捕食者百分比、属级香农多样性指数和 BI 指数.

表 3 22 个采样点位环境因子的主成分分析结果 (第一、二主成分和各环境因子的相关系数)

Table 3 Results of principal component analysis of environmental variable data from 22 sampling sites (correlation coefficients of principal component 1 and 2 and the variables)

环境变量名称	代码	主成分 I	主成分 II
海拔	E1	0.383	0.244
河宽	E2	-0.389	-0.343
流速	E3	0.390	0.333
水温	E4	0.029	0.386
酸碱度	E5	-0.182	-0.375
溶解氧	E6	0.325	-0.455
化学需氧量	E7	-0.250	-0.088
氨氮	E8	-0.407	0.359
总磷	E9	-0.427	0.280

表 4 基于 22 个采样点位初选底栖生物参数和环境干扰(主成分和栖息质量指数)的多重回归分析结果¹⁾

Table 4 Multiple linear regression results for the selected macroinvertebrate metrics and the environmental stressors (PCA components 1 and 2, and HQI), for data of 22 sampling sites

底栖指数	项目	R ²	P	回归系数		
				主成分 I	主成分 II	栖息质量指数
丰富度指数	M1 目级丰度	0.171	0.325	0.024	-0.148	-4.998
	M2 科级丰度	0.536	0.003	0.303	0.143	13.104
	M5 蜉蝣目丰度	0.579	0.001	0.410	0.252	4.390
	M7 鞘翅目丰度	0.379	0.032	0.136	0.050	4.132
多度指数	M9 总多度	0.121	0.497	-1916.73	1136.215	4199.681
	M10 EPT 多度	0.441	0.013	48.547	2.574	1454.670
	M11 蜉蝣目多度	0.420	0.018	31.916	6.602	626.776
	M12 毛翅目多度	0.379	0.032	16.631	-4.028	827.896
	M13 鞘翅目多度	0.345	0.050	9.060	0.794	766.583
	M14 双翅目多度	0.123	0.487	166.068	222.663	4.164
	M15 摇蚊多度	0.112	0.534	167.405	219.457	2.43
	M17 EPT 百分比	0.475	0.008	0.031	0.026	0.004
	M18 蜉蝣目百分比	0.316	0.071	0.026	0.029	0.002
	M20 鞘翅目百分比	0.443	0.013	0.001	0.002	-0.002
多样性指数	M21 双翅目百分比	0.142	0.419	0.043	0.062	-0.003
	M23 优势种百分比	0.355	0.044	-0.017	0.016	-0.003
	M24 捕食者百分比	0.613	0.001	0.002	0.022	0.003
	M25 撕食者百分比	0.019	0.951	0.001	0.001	0.002
	M26 集食者百分比	0.067	0.732	0.011	0.024	-0.002
	M27 滤食者百分比	0.059	0.773	0.003	-0.022	0.001
取食功能团指数	M30 科级均匀度	0.013	0.969	-0.012	-0.013	0.001
	M31 属级均匀度	0.029	0.909	-0.011	-0.007	0.002
	M33 科级香农多样性指数	0.326	0.064	0.052	-0.031	0.009
	M34 属级香农多样性指数	0.535	0.003	0.074	-0.024	0.012
生物指数	M36 科级辛普森多样性指数	0.152	0.384	-0.003	0.013	-0.003
	M38 BI 指数	0.436	0.014	-0.310	-0.428	-0.023

笔者根据构建生物参数必须尽可能地涵括底栖群落信息、生物参数必须很好地与人为干扰响应、且计算操作简易;最终确立了该区域底栖动物完整性指数的 8 个候选生物参数,它们分别为丰富度指数: M2 科级丰度、M7 鞘翅目丰度;多度指数: M10 EPT 多度、M12 毛翅目多度、M23 优势种百分比;取食功能团指数: M24 捕食者百分比;多样性指数: M34 属级香农多样性指数;生物完整性指数: M38 BI 指数。

3 讨论

3.1 环境梯度的确定

底栖动物作为指示生物已在全球各个地方得到应用^[22],这取决于底栖生物在水质生物监测和评价中的优越性^[4]。但关于底栖生物对干扰的响应方式一直存在争议^[3]:因为,水生底栖动物对点源污染的响应途径可能清晰可循,然而对非点源干扰的响应却是错综复杂的;且非点源干扰(如人为土地利用)对溪流生态系统的影响方式也是多样的^[1]。因此,确定研究区域的环境梯度是进行底栖生物参数筛选的基础,正如我们的研究结果:通过相关性分析和主成分分析得到了该区域的综合环境梯度,并利用主成分和栖境质量指数代表;结果表明主成分分析能很好的解释环境变异(第一、二主成分的解释率达到了 63.1%);由于人类活动对溪流生态系统的影响是分层次、多尺度的,学者们也越来越关注溪流小尺度物理栖境质量的作用,并建立了一些针对特定区域的溪流生境评定标准:如美国环境保护署(EPA)制定了针对可涉河流栖境评价的标准^[16],评定的内容包含河岸带状况、堤岸状况和河道状况等 10 项定性指标;在澳大利亚,关于溪流物理生境的评定也已有大量的研究;笔者针对研究区域的实际情况,首先对溪流进行高低落差分类;然后选取了底质沉积、河道形态和堤岸稳定性等 7 项指标进行综合评定。

3.2 生物参数的筛选

底栖动物之所以广泛的被应用于溪流/河流健康评价中,主要是由于其对干扰较好地响应;因此基于底栖动物完整性指数构建参数的筛选也必须以此为前提。国内关于底栖动物完整性指数的建立已有一定的研究^[11-14],研究者的一般思路是通过对比底栖生物参数的范围、相关性及判别能力进行分析,最终选择适当的生物参数用以构建生物完整性指数;在这种方法的具体实施过程中,一般要将采

样点位分成参照和干扰两大组进行生物参数的筛选^[11,12]。参照点位被定义为那些“最小程度干扰或没有干扰”的点位,但在实际研究中,这种参照条件往往很难满足,且迄今为止;对于参照点的选取也没有特定的标准^[19,22-24]。在本研究中以生物参数对人为干扰的响应为出发点、考虑参数的实际应用价值,通过相关性分析、多重回归分析、全面涵括底栖生物群落信息、坚持各类型生物参数的均衡考虑,最终筛选得到了 8 个候选生物参数。其中的科级丰度(科级总分类单元数)体现了底栖生物种类多样性的信息,与国内其他一些研究人员的所得结果类似,如王备新等^[11]和李强等^[12]在安徽黄山地区和浙江西苕流域开展的 B-IBI 构建表明总分类单元数是理想的构建指数;张远等^[13]在辽河流域开展的研究,也得到了相同的结果;与这些研究结果一致的还有 EPT 和 BI 指数也被我们的研究结果证明是适合钦江流域底栖动物完整性指数构建的生物参数。因为不同研究区域的特定属性和研究者的考量角度差异,出现构建参数的差别是理所当然的,如本研究结果表明鞘翅目丰度是理想的候选构建参数,而周晓蔚等^[14]在长江河口地区的研究则表明甲壳类和棘皮动物的密度百分比是构建 B-IBI 的理想指标,同样本研究结果表明取食功能团指数中的捕食者百分比是钦江流域的一个合适构建参数,而王备新等^[11]和张远等^[13]则认为黏附者个体百分比和个体丰度是理想的构建参数。

笔者认为钦江流域底栖动物完整性指数构建参数筛选过程中透射出了一些共性问题。第一,生物鉴定级别:众所周知,鉴定级别能在很大程度上影响对底栖生物群落结构和环境胁迫的分析^[25,26],是生物监测和评价中的一个关键点;另一方面,不同的鉴定级别对人力、专业层次和所需时间的要求差异很大,从监测和管理的角度考虑,理想的情况是较低级别的鉴定能满足监测和评价要求;但低级别的鉴定不一定能体现出相关的信息,本研究结果中的属级香农多样性指数就是一个反映。第二,取食功能团的划分:取食功能团指数已被研究者提出可以用作溪流的生物健康评价^[27],但是在实际的操作过程中最大的问题是不同取食功能团的准确划定^[28],这方面也体现了底栖生物功能学研究的必要性。第三,BI 指数、耐污值的计算问题:BI 指数是溪流生物监测中最常应用的底栖生物指标之一,在国内 BI 指数的应用也很频繁,吴东浩等^[29]在秦淮河上游河段开展研究、通过分析比较,得出 BI 指数比

Shannon-Weaver 多样性指数的评价结果更进阶实际情况; BI 指数评价准确性的报道也被国内外其他一些学者提出^[30, 31]。这主要是因为 BI 指数不仅考虑了底栖生物物种的组成与数量、还考虑了生物本身的耐污能力; 但就底栖生物耐污能力(耐污值)的确定研究, 我国目前还相对较为缺乏, 在今后的监测管理中理应深入开展相关研究。

4 结论

(1) 参照标准: 生物指数尽可能涵括群落全面的信息, 且避免“冗余”; 对干扰敏感且可预测; 指数测定在理论和实践中简易可行, 适合被相关环保部门采用对用于构建底栖生物完整性指数的生物参数进行了筛选和探讨。

(2) 通过对环境变量进行 Spearman 秩相关分析和主成分分析, 得到了第一、二主成分(占总解释率的 63.1%); 综合 7 项物理生境指标得到栖境质量指数(HQI), 反映了研究区域的综合环境梯度。

(3) 通过对生物指数进行相关性分析、结合生物指数和环境胁迫进行多重回归, 提出了适合构建软江流域底栖生物完整性指数的 8 个底栖生物参数: 科级丰度、蜉蝣目丰度、鞘翅目丰度, EPT 多度、优势种百分比, 捕食者百分比, 属级香农多样性指数和 BI 指数。

参考文献:

[1] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, **35**: 257-284.

[2] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.

[3] Bonada N, Prat N, Resh V H, et al. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches [J]. *Annual Review of Entomology*, 2006, **51**(1): 495-523.

[4] Rosenberg D M, Resh V H. Introduction to freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates [A]. In: Rosenberg D M, Resh V H (Eds.). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates* [M]. New York: Chapman and Hall, 1993. 1-9.

[5] Yagow G, Wilson B, Srivastava P, et al. Use of biological indicators in TMDL assessment and implementation [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2006, **49**(4): 1023-1032.

[6] Astin L E. Developing biological indicators from diverse data: the Potomac Basin-wide index of benthic integrity (B-ABI) [J]. *Ecological Indicators*, 2007, **7**(4): 895-908.

[7] Oberdorff T, Hughes R M. Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Seine Basin, France [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(2): 117-

130.

[8] Silvera M P, Baptista D F, Buss D F, et al. Application of biological measures for stream integrity assessment in south-east Brazil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **101**(1-3): 117-128.

[9] Rossano E M. Development of an index of biotic integrity for Japanese streams (IBI-J) [D]. Seattle: University of Washington, 1995.

[10] 杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 等. 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价 [J]. *生态学报*, 1992, **12**(1): 8-15.

[11] 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 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(6): 1481-1490.

[12] 李强, 杨莲芳, 吴璟, 等. 底栖动物完整性指数评价西苕溪溪流健康 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(9): 2141-2147.

[13] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 919-927.

[14] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉, 等. 基于底栖动物完整性指数的河口健康评价 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 242-247.

[15] Brenden T L O, Wang L Z, Su Z M. Quantitative identification of disturbance thresholds in support of aquatic resource management [J]. *Environmental Management*, 2008, **42**(5): 821-832.

[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 (2nd ed.) [M]. EPA/841/B-99/002, US. Washington, D C: Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.

[17] Li F, Cai Q, Ye L. Developing a benthic index of biological integrity and some relationships to environmental factors in the subtropical Xiangxi River, China [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, **95**(2): 171-189.

[18] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**(2): 185-211.

[19] Fore L S, Karr J R, Wisseman R W. Assessing invertebrate responses to human activities: evaluating alternative approaches [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**(2): 212-231.

[20] SPSS Inc. Systat Version 8.0: Statistics [M]. Chicago: SPSS Inc., 1998.

[21] Clarke K R, Gerler R N. PRIMER v6: User Manual/Tutorial [M]. Plymouth: PRIMER-E, 2006.

[22] Resh V H. Which group is best? Attributes of different biological assemblages used in freshwater biomonitoring programs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **138**(1-3): 131-138.

[23] Maxted J R, Barbour M T, Gerritsen J, et al. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**(1): 128-144.

- [24] Blocksom K A , Kurtenbach J P , Klemm D J , *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* , 2002 , **77**(3) : 311-333.
- [25] Hewlett R. Implications of taxonomic resolution and sample habitat for stream classification at a broad geographic scale [J]. *Journal of the North American Benthological Society* , 2000 , **19**(2) : 352-361.
- [26] Thompson R M , Townsend C R. Is resolution the solution? The effect of taxonomic resolution on the calculated properties of three stream food webs [J]. *Freshwater Biology* , 2000 , **44**(3) : 413-422.
- [27] Cummins K W , Merritt R W , Andrade P C N. The use of invertebrate functional groups to characterize ecosystem attributes in selected streams and rivers in south Brazil [J]. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* , 2005 , **40**(1) : 69-89.
- [28] Tomanova S , Goitia E , Helesic J. Trophic levels and functional feeding groups of macroinvertebrates in neotropical streams [J]. *Hydrobiologia* , 2006 , **556**(1) : 251-264.
- [29] 吴东浩, 刘伟, 赵煜, 等. 秦淮河上游水体大型底栖无脊椎动物群落结构及水质生物评价 [J]. *环境监测管理与技术* , 2010 , **22**(5) : 19-22 , 30.
- [30] 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.
- [31] 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.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2012年12月7日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2011年度中国科技论文统计结果。统计结果显示2011年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列。

《环境科学》综合评价总分81.2,排名第一,总被引频次5359,影响因子0.956。

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分。这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较。根据发布的统计结果,2011年度《环境科学》综合评价总分81.2,在被统计的1998种核心期刊中名列第41位,在被统计的37种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一。