

应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况

曹艳霞^{1,2},张杰^{1,2},蔡德所³,赵湘桂⁴,王备新^{1,2}

(1.南京农业大学植物保护学院,江苏 南京 210095;2.农业部作物病虫害监测与防控重点开放实验室,江苏 南京 210095;
3.三峡大学土木水电学院,湖北 宜昌 443002;4.广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004)

摘要 :为了通过漓江底栖无脊椎动物状况建立适合漓江的生物完整性指数,进而评价漓江流域内水质健康状况,于 2008 年 3 月调查了漓江水系 17 个参照点和 14 个监测点的水化学与底栖无脊椎动物指标。水质化学指标检测结果显示,参照点的 TP、TN、NH₃-N 和 COD 浓度一般低于监测点。通过对 46 个候选生物参数的计算和逐步分析,确定了构成底栖动物完整性 B-IBI 指数的 4 个生物参数:总分类单元数、EPT 分类单元数、扁蜉占蜉蝣总数的百分比和优势单元数量百分比,初步确立了 B-IBI 健康评价标准,即 B-IBI≥21 为健康;B-IBI<21 为不健康。评价结果表明,漓江上游及各支流健康状况较好,大部分为健康,中下游干流健康状况较差,大多为不健康。
关键词 :底栖动物;完整性指数;漓江;健康评价;水系
中图分类号 :Q958.8,Q968.8 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2010)02-0013-05

Lijiang River health assessment using a benthos index of biotic integrity for invertebrate

CAO Yan-xia^{1,2},ZHANG Jie^{1,2},CAI De-suo³,ZHAO Xiang-gui⁴,WANG Bei-xin^{1,2}

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Key Laboratory of Monitoring and Management of Crop Diseases and Pest Insects, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; 3. College of Civil and Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract :In order to develop a benthos index of biotic integrity (B-IBI) for benthic invertebrate and assess the water quality health of the Lijiang River basin, benthic invertebrate communities and hydrochemical variables were investigated in March 2008 at 31 sites, of which 17 were reference sites and 14 were monitoring sites. TP, TN, NH₄⁺-N and COD_{Mn} were lower at reference sites than at monitoring sites. Forty-six candidate biological parameters were selected and calculated from the data of all sites and sequentially analyzed to develop the B-IBI. The B-IBI was composed of four biological parameters: total taxa, EPT taxa, percentape of Heptageniidae in Ephemeroptera, and percentage of dominant taxa. It was suggested that the water quality in Lijiang River basin was healthy for B-IBI≥21, and unhealthy for B-IBI<21. The assessment results using B-IBI showed that most of the branches in the middle and upper reaches of the Lijiang River were healthy, and the lower reaches of the Lijiang River were unhealthy.

Key words :benthos; index of integrity; Lijiang River; health assessment

“河流健康”是河流科学研究与管理之间的“桥梁”^[1],是水资源合理开发利用、管理和保护的基础。在西方发达国家,河流健康监测和评价是开展河流健康管理与实践的关键。欧盟为实现水框架条例(WFD)2015 年目标,计划完成 54 000 个地表水样点的健康监测和评价工作^[2],在美国有 90% 以上的州

基金项目:国家自然科学基金(40371047,30871045);广西科技厅攻关项目(0632006-3A)
作者简介:曹艳霞(1983—)女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为溪流生态。E-mail:caoyanxia110@163.com
通讯作者:王备新,副教授。E-mail: wangbeixin@njau.edu.cn

开展了河流健康监测与评价工作^[3]。我国也非常重视河流健康的研究与实践^[4-8]。漓江是珠江水系上游桂江的重要支流,是广西壮族自治区重要的河流生态系统之一。近年来,随着漓江流域内经济和社会的快速发展,漓江水系健康状况不断恶化。由于缺乏科学的健康评价指标,漓江健康监测以水化学和单一的生物指标为主^[9-13]。笔者以大型底栖无脊椎动物为指示生物,参考 Barbour 等^[14]的方法研究建立适合漓江水系健康评价的底栖动物完整性指数。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区

漓江(E110°18'~111°18'、N25°59'~23°23')发源于广西兴安县与资源县交界,流域总面积 12 159 km²。漓江流域属于亚热带湿润季风气候,年均降雨量达到 1 627 mm^[15]。受季风影响,丰枯水季明显,每年 3~8 月为汛期,9 月至翌年 2 月为枯水期。

漓江水系河床底质以卵石、砾石和沙为主。源头及上游地貌是碎屑岩为主的中低山,山涧山谷纵横曲折,有丰富的原生和次生植被覆盖。中下游地貌以碳酸盐岩的喀斯特地貌为主,植被主要是喜钙的石山灌木林和人工林。

1.2 研究方法

1.2.1 生物标本采集

2008 年 2 月底至 3 月中旬在漓江水系(从源头至平乐)用 D 形网采集了 31 个样点(图 1)的大型底栖无脊椎动物。在 100~200 m 的采样河段内,选择急流生境用踢网采集 3 m²(D 形网宽 0.3 m×总采样长度 10 m)。标本经大致清洗后用 5%~10% 福尔马林溶液固定带回实验室。标本鉴定至属或种,少数为目或科。记录各分类单元个体数。

1.2.2 参照点确定准则

参照点是建立生物完整性指数及评价标准的关键,理想的参照点应该位于无干扰溪流上。但是现实中已不存在这样的溪流。参考国外已有研究,提出了建立漓江流域底栖动物水生态健康评价参照样点的标准,具体如下:①上游流域无居民地或居民地极少且散布;②样点上游流域无矿区或采矿作业在样点上游 10 km 以上;③样点上游 5 km 以内无采砂

作业;④样点 200 m 长的沿岸带植被保护良好,无侵蚀;⑤样点底质组成中值直径大于 64 mm 的石块占到 50% 以上,底质上的周丛生物以硅藻为主;⑥样点有丰富的底栖动物多样性,对水质敏感的蜉蝣目(E)、翅目(P)和毛翅目(T)昆虫都出现,且 EPT 的物种数在 15 以上。根据以上原则,在野外采集过程中,先根据①~⑤的原则初选合适的参照点,等底栖动物标本鉴定完成后,再根据原则⑥最终确定合格的参照点。本文共确定 17 个参照点,14 个监控点。

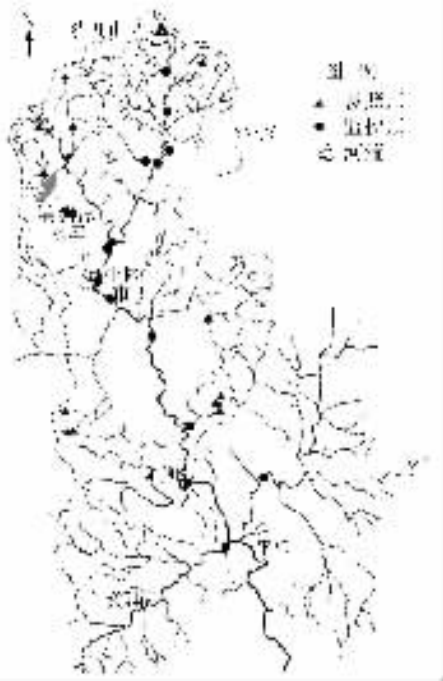


图 1 采样点分布示意图

1.2.3 水体理化指标的测定

采集生物样本的同时,在该溪流段缓流处利用 U-10 多参数水质监测仪(HORIBA Ltd. Japan)测定各项理化指标:DO、电导率、酸碱度、温度。并且采集此水域的表层水样约 500 mL,用来测定水化学指标。水化学指标 TP、TN 和 NH₃-N 分别采用钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和纳氏试剂比色法测定。

2 实验结果

2.1 生物样本鉴定结果

共鉴定出 4 门(节肢动物门、软体动物门、环节

表 1 参照点与监测点理化数据

指标	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$
参照点 ($n=17$)	0.04 (0.00~0.09)	0.93 (0.26~1.91)	0.05 (0.03~0.19)	0.75 (0.50~1.10)	0.016 (0.001~0.031)	10.52 (9.45~11.43)	8.47 (7.3~9.12)	12.9 (9.2~16.1)
监测点 ($n=14$)	0.09 (0.02~0.18)	2.28 (1.07~4.19)	0.22 (0.03~0.67)	1.52 (0.60~4.20)	0.105 (0.004~0.23)	10.28 (6.35~12.7)	8.8 (8.39~9.5)	13.5 (10.5~16.6)

注:表中只列出数据的平均值、最大值、最小值。

动物门、扁形动物门),6 纲(昆虫纲、甲壳纲、腹足纲、蛭纲、寡毛纲、涡虫纲)76 科,103 属 171 种的大型底栖无脊椎动物共 48 724 头,其中昆虫纲个体数占总个体数的 95%。

2.2 理化指标测定结果

水体理化指标结果见表 1。从水质化学指标的评价结果看,监控点的 TP、TN、NH₃-N 等化学指标及电导率均相对较高,而 DO、水温、pH 等指标参照点和监测点的数据差异较小。

2.3 生物完整性指数的初步研究结果

2.3.1 候选生物参数筛选

计算 46 个生物参数在 17 个参照点的分布情况,即 25% ~ 75% 分位数的数值范围,数值太小以及分布范围太小或太大的参数不适宜参与构建 B-IBI 指数。其中 24 个生物参数 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_6 、 M_7 、 M_8 、 M_{13} 、 M_{14} 、 M_{15} 、 M_{16} 、 M_{17} 、 M_{18} 、 M_{19} 、 M_{20} 、 M_{22} 、 M_{23} 、 M_{25} 、 M_{27} 、 M_{29} 、 M_{30} 、 M_{31} 、 M_{33} 、 M_{39} 、 M_{44} 在 25% ~ 75% 分位数之间数值范围太小,随着干扰的增强,其可变范围太小,不适宜参与建立生物指数; M_5 、 M_{10} 、 M_{11} 、 M_{28} 、 M_{34} 、 M_{43} 本身数值太小从而删除;而 M_{19} 、 M_{24} 数值范围太大也不适合建立 B-IBI 指数。剩余 15 个参数进入下一步计算,见表 2。

2.3.2 判别能力分析

参考 Barbour^[14]的方法,根据剩余的 15 个参数值在参照点和监控点的箱线图(图 2)中的箱体(IQ, interquartile ranges)的重叠情况,赋予不同的值:没有重叠,IQ = 3;部分重叠,但各自中位数值都在对方箱体范围之外,IQ = 2;仅一个中位数值在对方箱体范围之内,IQ = 1;各自中位数值都在对方箱体范围之内,IQ = 0。对 IQ ≥ 2 的参数作进一步分析,结果 M_1 、 M_9 、 M_{21} 、 M_{26} 、 M_{35} 、 M_{36} 、 M_{37} 、 M_{46} 共 8 个参数(图 2 中纵坐标变量标记 * 的参数)IQ ≥ 2,进入下一步筛选。

2.3.3 生物参数之间的 Pearson 相关性分析

Pearson 相关分析中高度相关的参数可以选取

其中一个保留,使参数反映信息具有独立性。采用 Maxted^[16]的标准进行生物参数的筛选。经过计算, M_{46} 与其余 7 个参数 M_1 、 M_9 、 M_{21} 、 M_{26} 、 M_{35} 、 M_{36} 、 M_{37} 均显著相关,首先被删除。反应群落丰富度的 M_1 、 M_9 、 M_{26} 之间的相关系数均大于 0.9,由于 M_1 包含的信息量最大, M_9 具有较高的灵敏度和较好的指示性,所以保留 M_1 和 M_9 ,删除 M_{26} 。 M_{21} 与其他参数的相关性均相对较小($|r| < 0.7$),予以保留。反应群落个体数量组成的参数 M_{36} 比 M_{37} 与其他参数的相关系数要小,所以保留 M_{36} 。经过筛选,最终应用 M_1 、 M_9 、 M_{21} 、 M_{36} 4 个生物参数来构建 B-IBI 指数(表 3)。

表 3 8 个生物参数之间的 Pearson 相关分析

	M_1	M_9	M_{21}	M_{26}	M_{35}	M_{36}	M_{37}	M_{46}
M_1	1.00							
M_9	0.98	1.00						
M_{21}	0.55	0.57	1.00					
M_{26}	0.99	0.99	0.58	1.00				
M_{35}	-0.85	-0.84	-0.48	-0.86	1.00			
M_{36}	-0.79	-0.75	-0.67	-0.77	0.70	1.00		
M_{37}	-0.82	-0.80	-0.71	-0.81	0.70	0.96	1.00	
M_{46}	0.89	0.88	0.70	0.89	-0.78	-0.93	-0.97	1.00

注:下划线数值为极显著相关。

2.3.4 分值计算与 B-IBI 健康评价标准建立

分析 4 个参数在 25% ~ 75% 分位数的分布,根据各参数的分位数值计算 B-IBI 的分值标准,笔者采用三分制计分法^[17](表 4)。根据参照点和所有样点的 B-IBI 数据,以参照点的 B-IBI 分值分布的 25% 分位数 21 作为溪流健康评价的标准,点位分值小于 21 为不健康。

表 4 4 个生物参数在参照点的分布状况及分值计算标准

生物参数	统计分布			分值		
	25% 分位数	50% 分位数	75% 分位数	6 分	3 分	0 分
M_1	42	47	52	> 42	21 ~ 42	< 21
M_9	22	24	30	> 22	11 ~ 22	< 11
M_{21}	0.20	0.37	0.64	> 0.2	0.1 ~ 0.2	< 0.1
M_{36}	0.14	0.24	0.28	< 0.28	0.29 ~ 0.42	> 0.42

表 2 46 个候选生物参数

生物参数			
M_1 总分类单元数 *	M_{13} 翅目数量所占比例	M_{25} 长角泥甲科/鞘翅目	M_{37} 前两位优势单元数量所占比例 *
M_2 蜉蝣目分类单元数	M_{14} 毛翅目数量所占比例	M_{26} 水生昆虫分类单元数 *	M_{38} 前三位优势单元数量所占比例 *
M_3 毛翅目分类单元数	M_{15} 双翅目数量所占比例	M_{27} 捕食者数量所占比例	M_{39} 前五位优势单元数量所占比例
M_4 翅目分类单元数	M_{16} 鞘翅目数量所占比例	M_{28} 撕食者数量所占比例	M_{40} ETP 数量所占比例 *
M_5 甲壳动物 + 软体动物	M_{17} 摇蚊科/双翅目	M_{29} 集食者数量所占比例	M_{41} ETP/(EPT 数量 + 摇蚊数量) *
M_6 鞘翅目分类单元数	M_{18} 大蚊科/双翅目	M_{30} 滤食者数量所占比例	M_{42} EPT/摇蚊数量 *
M_7 蜻蜓目分类单元数	M_{19} 蚋科/双翅目	M_{31} 刮食者数量所占比例	M_{43} 刮食者/(集食者 + 滤食者)
M_8 双翅目分类单元数	M_{20} 纹石蛾科/毛翅目	M_{32} 敏感类群比例 *	M_{44} 刮食者/滤食者
M_9 EPT 分类单元数 *	M_{21} 扁蜉科/蜉蝣目 *	M_{33} 中性类群数量所占比例	M_{45} 黏附者数量所占比例 *
M_{10} 寡毛类动物所占比例	M_{22} 小蜉科/蜉蝣目	M_{34} 耐污类群数量所占比例	M_{46} 多样性指数 *
M_{11} 软体动物所占比例	M_{23} 四节蜉科/蜉蝣目	M_{35} BI 值 *	
M_{12} 蜉蝣目所占比例 *	M_{24} 扁泥甲科/鞘翅目	M_{36} 优势单元数量比例 % *	

注:标记 * 的参数进入下一步计算。

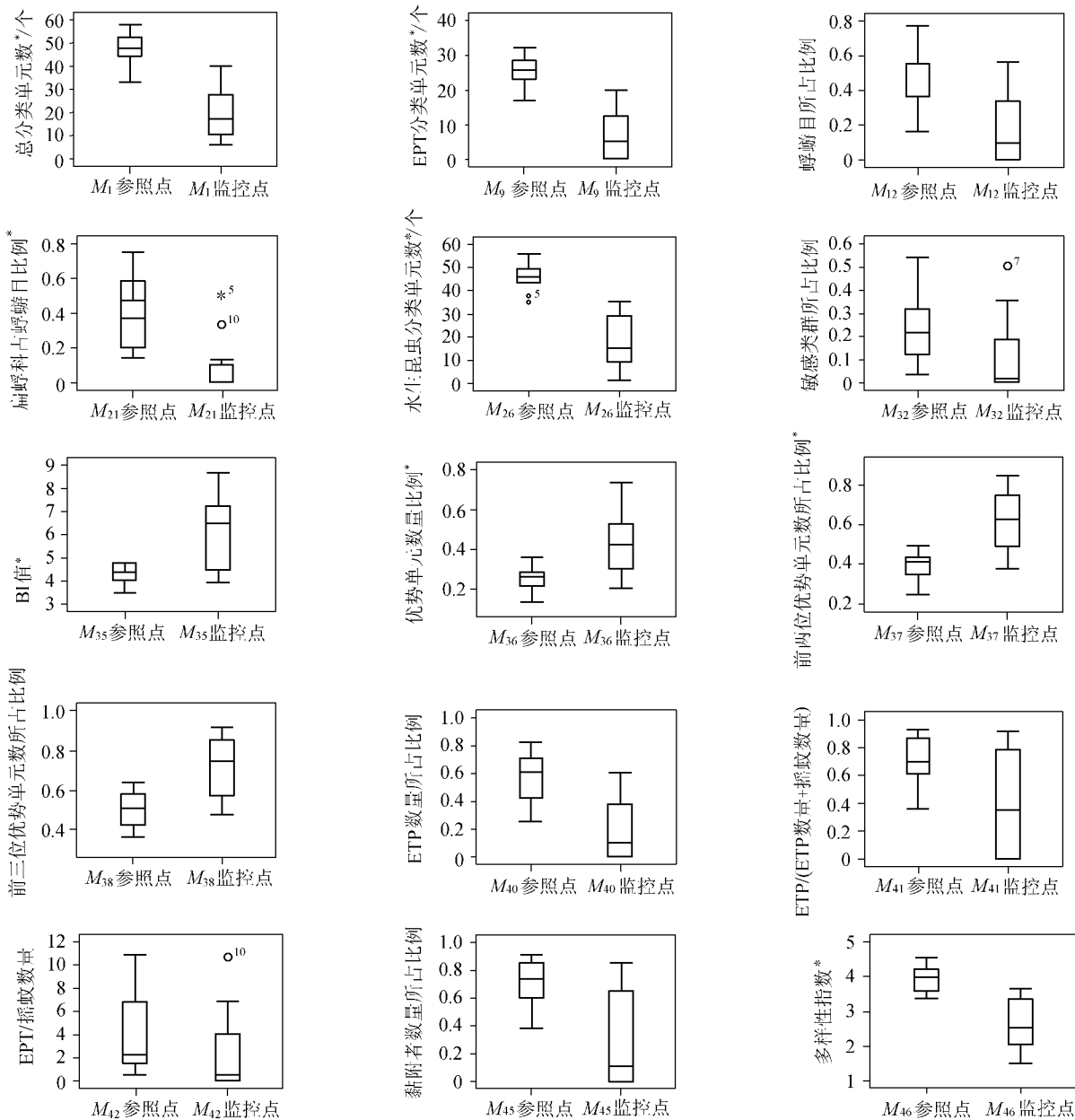


图2 15个生物参数在参照点与监控点的箱线图

2.3.5 漓江各样点生物健康评价

依据 B-IBI 健康评价标准评价各样点健康状况。结果见表 5。评价为健康的点基本都位于漓江上游支流,其森林植被覆盖率都大于 90%,农田少,农业种植以竹林为主,因而受到的污染也很小,河床底质为卵石。卵石是底栖动物栖息、繁殖、生长的重要场所,这些点的生物多样性都很好。

评价为不健康的点位于市区或者市区下游不远处,受城市污水和农业面源污染较重,沿岸带破坏程度高,植被覆盖率低,并受河道改变和河床沙化等诸多因素影响,水中底栖动物种类极少,数量较多的是耐有机污染强的螺类和摇蚊。

2.4 影响底栖动物完整性的环境因子初步解析

对所采集样点的理化数据和水文数据(包括温

表5 漓江各个样点健康评价

点位名称	B-IBI 分值	健康状况	点位名称	B-IBI 分值	健康状况
桃花江入漓江口	3	不健康	幸福源水库上游	18	不健康
桂林水文站	3	不健康	阳朔水文站	3	不健康
新寨河	24	健康	阳朔矿山	21	健康
磨盘山码头	3	不健康	漓江兴坪码头	9	不健康
小莫家断面	3	不健康	平乐沙子镇石拱桥	3	不健康
灵渠水文站	12	不健康	荔浦河断面	18	不健康
大小溶江灵渠汇合	6	不健康	靖远村双岔河	24	健康
小溶江断面	12	不健康	双岔河小河支流	18	不健康
乌龟江	24	健康	公平河	24	健康
乌龟、砂木江汇合口	21	健康	簸箕塘	24	健康
砂木江	21	健康	兰田河左支流	24	健康
六峒河	12	不健康	兰田河右支流	24	健康
鲤鱼塘上游	21	健康	兰田河下游	24	健康
大面断面	3	不健康	和平大桥	24	健康
东江支流	24	健康	斧子口木材厂	9	不健康
大源林场	24	健康			

表 6 理化数据、水文数据与 B-IBI 指数值的相关性分析

	温度	pH	电导率	DO	TP	TN	NH ₃ -N	COD	宽	深	平均流速	最大流速	宽深比
B-IBI	-0.02	-0.23	-0.68	0.29	-0.66	-0.8	-0.64	-0.58	-0.75	-0.26	0.04	-0.06	0.49

注：有下划线数值者为显著相关。

度、pH、电导率、DO、TP、TN、NH₃-N、COD、溪流的宽、深、宽深比、平均流速、最大流速等)与得出的 B-IBI 指数值做相关性分析。结果底栖动物完整性指数 B-IBI 与水的电导率、TP、TN、NH₃-N、COD、溪流宽度、宽深比具有显著相关性(表 6)。所以笔者初步推断漓江底栖动物完整性与水中导致富营养化的化学物质相关性极大,P、N 等化学物质致使水质下降,水中生物减少。下游河道拓宽,河床被破坏,也可能是导致生物减少、生物完整性下降的重要原因。

3 讨 论

生物完整性指数 B-IBI 及其评价标准的建立需要足够量的代表性数据作支撑,笔者仅根据有限的 数据探讨了在漓江流域建立 B-IBI 完整性指数评价 漓江水系健康的可能性,离实际应用还有较大的差距。但是研究结果还是反映了漓江流域的健康状况,即受人类活动(旅游开发、种植、采矿和挖沙等)影响小的支流健康状况较好,而受人类活动影响大的支流和干流都为不健康。由于影响河流健康的因素很多,河流的生物学属性仅是表征河流健康的一个属性,因此在应用底栖动物完整性指数评价河流健康时,要注意与其他评价因子如水文、河道形态、水质理化指标的有机结合。Llansó^[18]指出健康评价的最终结果都要将底栖生物群落状况与主要胁迫因子联系起来,以提高评价结果的准确性和适用性。

B-IBI 指数受到自然地貌的影响比较大,在美国 马里兰州的 B-IBI 应用体系中,就将溪流分为海岸平原、内地平原、东部高原、山地丘陵等 4 种不同的类型^[19],主要因为生物的分布有一定的范围,跟气候、地形地貌、植被和土壤类型是密切相关的。笔者初步建立的漓江流域 B-IBI 指数目前也仅适用于漓江水系,不同的流域应该建立与流域相适应的 B-IBI 指数。由此可见,利用 B-IBI 指数来评价水生态健康还有大量的工作需要做。另外 B-IBI 的应用还涉及较多标本鉴定、数据处理等工作,需要操作人员有相关的专业知识。如果将全国的流域划分成不同区域,将物种分类编辑成通俗易懂的鉴定手册,数据处理等方面则使用统计模型来进行,则 B-IBI 水质监测将会有更广泛的应用。

致谢：

本课题研究前期的采样工作得到广西壮族自治区水利厅及广西壮族自治区水文水资源桂林分局相

关工作人员的大力支持,在此一并致谢。

参考文献：

[1]董哲仁.河流健康的内涵[J].中国水利,2005(4):15-18.

[2]EU WFD.Directive 2000/60/EC of the European Parliament of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy[M]. Official Journal of the European Communities,2000(L327):1-72.

[3]HILL B,BLAIR R.Monitoring the condition of our nation's streams and rivers: from the mountains to the coasts: introduction to the proceedings of the 2002 EMAP symposium[J].Environmental Monitoring and Assessment,2005,103(1-3):1-4.

[4]赵彦伟,杨志峰.城市河流生态系统健康评价初探[J].水科学进展,2005,16(3):349-355.

[5]冯普林.渭河健康生命的主要标志及评价指标体系研究[J].人民黄河,2005,27(8):3-6.

[6]吴阿娜,杨凯,车越,等.河流健康评价在城市河流管理中的应用[J].中国环境科学,2006,26(3):359-363.

[7]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.

[8]李强,杨莲芳,吴盘,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.

[9]韩耀全,周解,吴祥庆.漓江的自然地理与水质调查[J].广西水产科技,2007(2):8-16.

[10]邓华,蒋艳红,李莲花,等.漓江市区段沿岸餐饮废水对漓江水水质影响调查与对策探讨[J].环境科学导刊,2008,27(4):27-29.

[11]蔡德所,马祖陆.漓江流域的主要生态环境问题研究[J].广西师范大学学报:自然科学版,2008,26(1):110-112.

[12]石大康.底栖动物在评价漓江水水质污染中的作用[J].环境科学,1985,6(3):54-58.

[13]张益峰.漓江底栖动物调查[J].广西水产科技,2007(2):47-54.

[14]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,1996,15:185-211.

[15]朱小媚,粟维斌.漓江流域风景区生物多样性现状与保护对策研究[J].生态经济,2008(4):153-157.

[16]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,2000,19:128-144.

(下转第 23 页)

融入入渗通过基岩地层的深部循环后向上渗透补给沙漠湖泊及周边地下水的快速补给,而且,从古老碳酸盐岩地层的存在、区域活动断裂构造体系的发育,以及地下水慢源氦同位素特征、巴丹吉林沙漠湖泊中钙华慢源碳特征等方面得到验证。补给水源在基岩中的循环深度和强度还取决于宏观水动力条件,祁连山区大气降水和冰雪融水的入渗高程越高,距离巴丹吉林沙漠越远,循环深度将越深。

参考文献：

[1] 马金珠 ,李丁 ,李相虎 ,等 .巴丹吉林沙漠包气带 Cl^- 示踪与气候记录研究 [J].中国沙漠 ,2004 ,24(6) :674-678.

[2] 李明森 .探访巴丹吉林沙漠 [J].自然杂志 ,2007 ,29(5) :300-302.

[3] 杨小平 .近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化 [J].科学通报 ,2000 ,45(4) :428-433.

[4] 马妮娜 ,杨小平 .巴丹吉林沙漠及其东南边缘地区水化学和环境同位素特征及其水文学意义 [J].第四纪研究 ,2008 ,28(4) :702-709.

[5] 杨小平 .巴丹吉林沙漠腹地湖泊的水化学特征及其全新世以来的演变 [J].第四纪研究 ,2002 ,22(2) :97-103.

[6] 陈建生 ,汪集 .试论阿尔金断裂中地下河的发现对西部水资源开发与经济发展的影响 [J].水利经济 ,2004 ,22(4) :1-7.

[7] 陈建生 ,汪集 ,赵霞 ,等 .用同位素方法研究额济纳盆地承压含水层地下水的补给 [J].地质论评 ,2004 ,50(6) :649-658.

[8] 陈建生 ,赵霞 ,盛雪芬 ,等 .巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究 [J].科学通报 ,2006 ,51(23) :2789-2796.

[9] CHEN Jian-sheng . Groundwater maintains dune landscape [J]. Nature ,2004 ,432 :459-460.

[10] 陈建生 ,赵霞 ,汪集 ,等 .巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义 [J].中国岩溶 ,2004 ,23(4) :277-282.

[11] 顾慰祖 ,陈建生 ,汪集 ,等 .巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义 [J].水科学进展 ,2004 ,15(6) :695-698.

[12] 黄天明 ,庞忠和 .应用环境示踪剂探讨巴丹吉林沙漠及古日乃绿洲地下水补给 [J].现代地质 ,2007 ,21(4) :624-630.

[13] 郑淑蕙 ,侯发高 ,倪葆龄 .我国大气降水的氢氧稳定同位素研究 [J].科学通报 ,1983 ,28(13) :801-806.

[14] 马金珠 ,黄天明 ,丁贞玉 ,等 .同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源 [J].地球科学进展 ,2007 ,22(9) :922-929.

[15] 张光辉 ,聂振龙 ,王金哲 ,等 .黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应 [J].地球科学进展 ,2005 ,20(5) :511-518.

[16] 黄天明 ,聂中青 ,袁利娟 .西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应 [J].干旱区资源与环境 ,2008 ,22(8) :76-80.

[17] 李学礼 ,刘金辉 ,史维浚 ,等 .新疆准噶尔盆地北部天然水的同位素研究及其应用 [J].地球学报 ,2000 ,21(4) :401-406.

[18] 陈建生 ,凡哲超 ,汪集 ,等 .巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析 [J].地球学报 ,2003 ,24(6) :497-504.

[19] 陈宗宇 ,万力 ,聂振龙 ,等 .利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源 [J].水文地质工程地质 ,2006 , (6) :9-14.

[20] 张应华 .应用环境同位素对黑河流域水循环的研究 [D].中国科学院寒区旱区研究所 ,2005.

[21] 刘纯恒 .同位素水文地质概论 [M].北京 :地质出版社 ,1991.

[22] 马金珠 ,陈发虎 ,赵华 .1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录 [J].科学通报 ,2004 ,49(1) :22-26.

[23] 史基安 ,王先彬 ,王琪 ,等 .地下水补给、循环和混合作用的氢同位素证据 [J].沉积学报 ,1999 ,17(12) :815-818.

[24] 张虎才 ,明庆忠 .中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成 [J].地球科学进展 ,2006 ,21(5) :532-537.

(收稿日期 2009-04-22 编辑 徐 娟)

(上接第 17 页)

[17] BARBOUR M T ,GERRITSEN J ,SNYDER B D ,et al .Rapid bio-assessment protocols for use in streams and wade able rivers : periphyton ,benthic macro-invertebrates and fish [M]. 2nd ed . EPA/841/B-99/002 US Environmental Protection Agency ,Office of Water ,Washington ,D C ,1999.

[18] LLANSÓ R J ,DAUER D M ,VOLSTAD J H . Assessing ecological integrity for impaired waters decisions in Chesapeake Bay ,USA [J]. Marine Pollution Bulletin ,2009 ,59(1-3) :48-53.

[19] SOUTHERLAND M T ,ROGERS G M ,KLINE M J ,et al . Improving biological indicators to better assess the condition of

stream [J]. Ecological Indicator ,2007 ,7(4) :751-767.

(收稿日期 2009-01-16 编辑 徐 娟)

