

## 应用底栖动物完整性指数评价滇池流域入湖河流生态系统健康<sup>\*</sup>

苏 玉<sup>1</sup>, 曹晓峰<sup>2</sup>, 黄 艺<sup>1\*\*</sup>

(1: 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

(2: 北京大学环境与能源学院, 深圳 518055)

**摘 要:** 采用底栖动物完整性指数 (B-IBI) 评价滇池流域入湖河流健康状况. 根据滇池流域 38 个样点 (9 个参照点, 29 个干扰点) 于 2009 年丰水期和 2010 年平水期采得的大型底栖动物数据, 对 19 个生物参数进行分布范围、Spearman 相关性和判别能力分析, 确定构成滇池流域底栖动物生物完整性的指数为甲壳动物 + 软体动物分类单元数、集食者%、捕食者% 和耐污类群%. 用比值法统一量纲, 计算各个生物参数的值, 并将所得的值相加即得到 B-IBI 指数值. 根据 B-IBI 指数值的 25% 分位数确定健康等级标准, 并对小于 25% 分位数的值进行四等分, 即得到滇池流域底栖动物完整性的评价标准, B-IBI > 1.62 为健康, 1.03 ~ 1.62 为亚健康, 0.31 ~ 1.03 为一般, 0.10 ~ 0.31 为较差, < 0.10 为极差. 评价结果表明, 滇池流域的 38 个样点中, 16 个为健康, 5 个为亚健康, 6 个为一般, 6 个为较差, 5 个为极差. B-IBI 值与硝态氮和水温有较大的负相关关系, 与其他理化因子相关性不明显.

**关键词:** 滇池流域; 底栖动物; B-IBI 指数; 生物完整性; 健康评价

## Stream ecosystem health assessment of inflow rivers in Lake Dianchi catchment by using Benthic Integrity Biotic Index (B-IBI)

SU Yu<sup>1</sup>, CAO Xiaofeng<sup>2</sup> & HUANG Yi<sup>1</sup>

(1: *College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China*)

(2: *School of Environment and Energy, Peking University, Shenzhen 518055, P. R. China*)

**Abstract:** Benthic Integrity Biotic Index (B-IBI) was used to evaluate the health of inflow rivers in Lake Dianchi of Yunnan Province, China. Macroinvertebrate assemblages were collected from 38 sampling sites in Lake Dianchi, including 9 sites that were undisturbed or less disturbed and 29 sites that were disturbed in wet season of July – Aug. 2009 and dry season of Jan. – Feb. 2010. The range of index value distribution, spearman correlation and judgment ability were analyzed for the 19 biological parameters, including Shannon-Wiener index; total number of taxa; total density; taxa numbers of Crustacea + Mollusca, Hirudinea, and Mollusca taxa; percentage of Crustacea + Mollusca, Hirudinea, Mollusca, Oligochaeta, Limnodrilushoffmeisteri, Chironomidae, Oligochaeta/Hirudinea, Gatherers, Predator, Omnivore, and Scrapers; percentage of tolerant taxa; and Goodnight index. Ratio scoring method for B-IBI index was used to get a uniform score. By using the each 20 percentiles of B-IBI as a criteria to evaluate the aquatic ecosystem health, the results showed that, health criteria when B-IBI > 1.62, sub-health when 1.03 – 1.62, good-fair when 0.31 – 1.03, fair when 0.10 – 0.31, and poor when B-IBI < 0.10. The B-IBI index was positive correlation to  $\text{NO}_3^-$ -N and water temperature, but not significantly correlation to other factors.

**Keywords:** Lake Dianchi catchment; zoobenthos; Benthic Integrity Biotic Index; biological integrity; health assessment

湖泊流域是指由流域分水线所构成的湖泊及其集水区域, 包括湖泊、河流、水库、湿地及陆地等, 而入湖河流作为汇入湖泊的源头, 其健康与人类生存发展关系密切, 其生态环境的评价不仅要从理化指标和生物类群的角度出发进行监测评价, 更注重从生态系统角度, 客观反映河流健康状况<sup>[1-2]</sup>. 生物完整性指数 (Index

<sup>\*</sup> 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2012ZX07501002-006) 资助. 2011-12-20 收稿; 2012-03-28 收修改稿. 苏玉, 女, 1984 年生, 硕士研究生; E-mail: hongyusu0727@126.com.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: yhuang@pku.edu.cn.

of Biotic Integrity, 简称 IBI) 是对所研究生态系统的完整性进行表征, 反映其生物的结构和功能, 及生物生存环境在受到干扰后, 以其反应敏感的生物参数对生态系统进行评价的一种评价方法. IBI 作为生态系统健康评价的指标之一, 主要是从生物类群的组成和结构两方面反映生态系统的健康状况, 通过定量描述生物特性与非生物因子的关系, 建立起来的对环境干扰最敏感的生物参数<sup>[3-4]</sup>, 这些生物参数主要包括反映群落丰度的指标, 反映生物耐污能力的指标, 反映生物营养状况的指标等. 一个健康的生态系统, 必须是结构完整、功能齐全的系统, 因此, 用 IBI 评估生态系统健康状态的方法, 逐渐得到生态研究者的认同.

IBI 评价法最初由 Karr 提出<sup>[5]</sup>, 以鱼类为研究对象, 构建以鱼类为主的完整性指数 (Fish-Index of Biotic Integrity, 简称 F-IBI) 运用于美国的河流<sup>[3]</sup>. 随后, 研究者根据河流状态, 研究了以藻类<sup>[6]</sup>、浮游生物<sup>[7]</sup>、高等水生植物<sup>[4]</sup>和大型底栖无脊椎动物<sup>[8-10]</sup>等为观测对象的 IBI 水生态系统健康评估指标体系. IBI 对河流进行完整性评价是在 1990s 后才真正得到广泛应用, 如 F-IBI 指数及评价标准. 而美国环保署 (EPA) 建立的以底栖动物为基础的评价指数 (Benthic Integrity Biotic Index, 简称 B-IBI), 标准已经成功应用于 16 个州的河流健康评价<sup>[11-13]</sup>; 墨西哥中西部使用 B-IBI 评价土地利用方式对溪流生态系统的影响<sup>[14]</sup>. 依据 B-IBI 各国学者提出了基于多度量指数概念的多度量指数法进行水生物评价, 如美国有 48 个州以底栖动物进行评价, 29 个州以鱼类进行评价, 4 个州以藻类进行评价, 26 个州使用一个以上的生物进行评价<sup>[3]</sup>.

我国对 B-IBI 的研究始于 1990s, Morse 等于 1994 年通过编写并出版我国第一本水生昆虫学专著《Aquatic insects of China Useful for Monitoring Water Quality》<sup>[15]</sup>, 使用 EPT (E: 蜉蝣目, P: 襀翅目, T: 毛翅目) 分类单元数首次在国内评价了安徽九华河的水质<sup>[16]</sup>. 王备新等以安徽黄山地区的溪流为研究对象, 首次在我国对 B-IBI 指标的构建及其与理化指标的关系进行研究<sup>[2]</sup>. 张远等为了在更广泛的区域内推广 B-IBI, 以辽河流域的河流为研究对象, 对 B-IBI 指标体系的构建方法、指标选择和评价标准进行研究, 为我国北方河流的 IBI 评价提供依据<sup>[1]</sup>.

综合来看, IBI 应用于湖泊流域入湖河流的评价较少, 而湖泊流域作为一个完整的社会、经济、自然的复合生态系统, 其汇水源—入湖河流对湖泊的能流、物流和信息传递都具有重要影响, 而且陆地对入湖河流通过“汇”也影响到湖泊. 因此, 利用入湖河流的生态系统完整性进行研究, 从而为湖泊流域的主要受纳水体—湖泊的生态修复和管理提供依据. 本文以滇池流域为研究对象, 首次用 B-IBI 评价滇池流域入湖流水生态系统健康, 以期建立滇池流域入湖河流生物完整性评价指标体系及标准, 并为我国高原湖泊的生态系统健康管理提供依据.

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

滇池流域是我国典型的高原淡水湖泊流域, 位于云贵高原中部 ( $24^{\circ}29' \sim 25^{\circ}28'N$ ,  $102^{\circ}29' \sim 103^{\circ}01'E$ ), 流域总面积为  $2920 \text{ km}^2$ . 流域内共有 29 条河流从北部、东部和南部辐射状汇入滇池, 与此同时, 只有西部 1 条河流 (海口河) 作为滇池出水口. 滇池流域具有干湿分明的低纬度高原季风气候特征, 其降水量主要集中在每年 5—10 月的丰水期, 约占全年总量的 80%; 而在 11 月—次年 4 月的枯水期, 流域 29 条入湖河流中的 20 条水库下游河流会出现 3~6 个月不同程度的断流.

### 1.2 样品采集与分析

2009 年 7—8 月 (丰水期) 和 2010 年 1—2 月 (平水期), 选取滇池流域 29 条入湖河流采集大型底栖动物: 选用面积为  $1/16 \text{ m}^2$  的彼得森采泥器, 每个样点采集 3 次底泥. 采泥器在样点中采得的样品为底栖动物与底泥、腐屑等混合物. 采用孔径为 40 目的金属筛对混合物进行筛选, 将筛选出的底栖动物放入装有 7% 甲醛溶液的 30 ml 塑料瓶中. 把每个样点所采集的底栖动物按不同种类准确地统计个体数, 根据采样器开口面积计算出  $1 \text{ m}^2$  内的数量 (即密度). 底栖动物的种类鉴定到属<sup>[17-18]</sup>.

2009 年 1 月—2010 年 1 月进行水体理化指标监测, 共 10 项, 包括酸碱度 (pH)、水温 (WT)、悬浮物 (SS) 和溶解氧 (DO) 共 4 项物理指标, 以及氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、生化需氧量 (BOD)、硝态氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 6 项化学指标; 样品采集和保存依据文献<sup>[19]</sup>进行, 样品测定依据 GB/T 3838—2002<sup>[20]</sup>进行, 并均由云南省昆明市环境监测中心完成.

### 1.3 布点原则与样点类型划分

布点原则主要依据湖泊流域生态水文过程的完整性,一共为 38 个样点. 在上游 9 个水源地(S1 自卫村水库、S2 松花坝、S3 东白沙河水库、S4 宝象河水库、S5 柴河水库、S6 果林水库、S7 松茂水库、S8 双龙水库、S9 映山水库)出水口处分别布设采样点;在滇池流域 29 条入湖河流(由北至南依次为 S10 王家堆渠、S11 新运粮河、S12 老运粮河、S13 乌龙河、S14 大观河、S15 西坝河、S16 船房河、S17 采莲河、S18 金家河、S19 盘龙江、S20 大青河、S21 海河、S22 六甲宝象河、S23 小清河、S24 五甲宝象河、S25 虾坝河、S26 老宝象河、S27 新宝象河、S28 马料河、S29 洛龙河、S30 捞鱼河、S31 南冲河、S32 淤泥河、S33 老柴河、S34 白鱼河、S35 茨巷河、S36 东大河、S37 中河和 S38 古城河)下游且避开滇池回水 15~20 m 的区域布设采样点(图 1). 样品采集时间是 2009 年 7~8 月(丰水期)和 2010 年 1~2 月(平水期).

样点划分原则参照点是以人类干扰程度作为划分依据,将点位分为参照点(无干扰点和干扰极小样点)和干扰点定. 本研究选择样点附近无村庄和田、植被覆盖率高且环境受到人为保护、污染小的水源地为参照点;人为活动明显(具有点源和非点源污染、城镇化等)的样点为干扰点. 根据以上原则,所布设的 38 个样点中,位于水源地出水口处的样点(S1~S9)为参照点,位于 29 条入湖河流入湖口处的点(S10~S38)为干扰点.

### 1.4 B-IBI 评价方法

1.4.1 生物参数的构建 用于构建 B-IBI 的生物参数常见的有三类:与群落和结构功能有关的参数,如多样性指数、丰富度指数和分类单元数等;与生物的耐污能力有关的指数,如耐污生物指数等;与生物习性有关的生物参数,如粘附着丰度%.

1.4.2 生物参数筛选 构建 B-IBI 的生物参数必须对环境的理化因子变化敏感,一般通过对参数进行分布范围、判别能力分析、相关分析来进一步筛选参数.

1) 生物参数对干扰的分布范围分析:计算各个生物参数值,分析所建立的生物参数对人类干扰的反应,保留随人类干扰的增强而单向递增或递减的参数. 以此为基础,进一步分析参照点参数值的分布范围,剔除:① 对随干扰增强而生物参数值递减的参数,参数值过小,说明受干扰后参数值可变范围窄,不宜作为构建 B-IBI 的参数;对随干扰增强而生物参数值递增的参数,参数值过大也不适宜考虑;② 参数值分布散、标准差大,说明该参数不稳定,也不考虑.

2) 判别能力分析:判别能力分析采用箱线图法,分析参照点和干扰点的各个生物参数的分布情况. 依据 Barbour 等<sup>[22]</sup>评价法,比较参照点和受损点的 25%~75% 分位数范围(箱体 IQ)的重叠情况,分别对其进行赋值,会有 5 种不同赋值(小长方形表示中位数):A:无重叠,设  $IQ=3$ ;B:部分重叠,且各自中位数都在对方箱体之外, $IQ=2$ ;C、D:只有一个中位数在对方箱体之内, $IQ=1$ ;E:各自中位数均在对方箱体之内, $IQ=0$ . 选择  $IQ \geq 2$  的参数进一步分析(图 2).

3) 相关分析:余下的生物参数进行 Spearman 相关分析,其相关系数的大小反映了生物参数的重叠程度,选择相关系数  $|r| > 0.75$  的生物参数之一,以保证构成 B-IBI 生物参数的独立性.

通过生物参数筛选的 3 个步骤,可以确定构成 B-IBI 生物参数组.

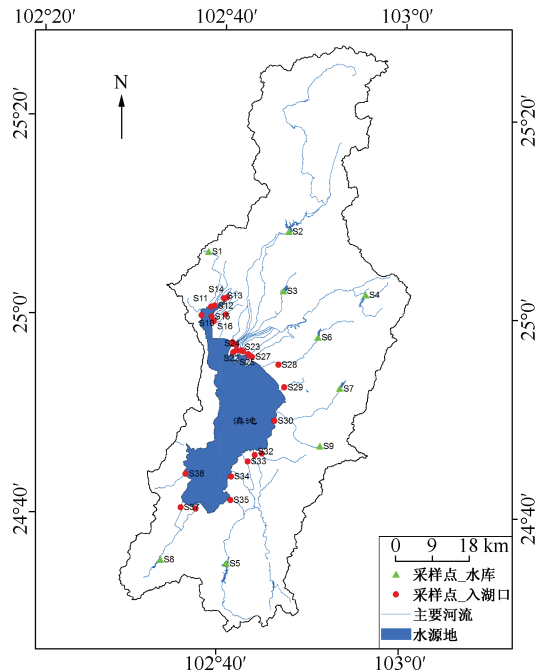


图 1 滇池流域采样点分布

Fig. 1 Sampling sites in Lake Dianchi catchment

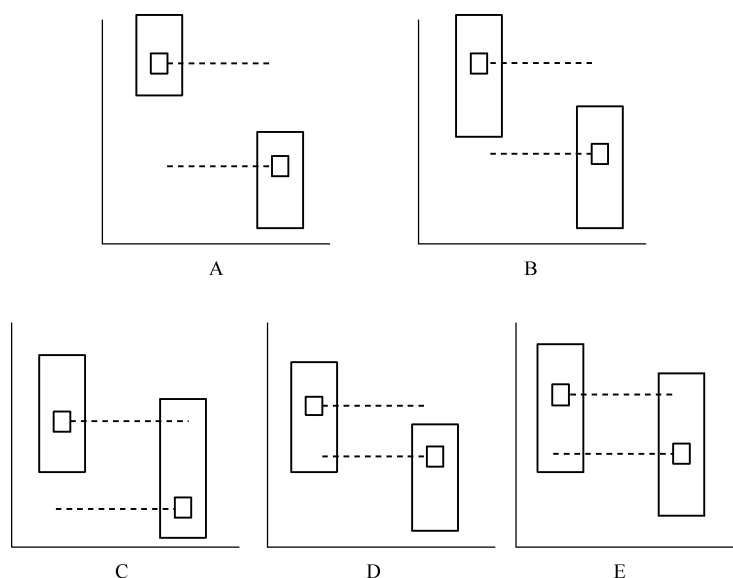


图2 箱线图法分析的 IQ 分值

Fig. 2 IQ values of Box-plots method analysis

1.4.3 统一评价量纲 对生物参数进行计分的目的是统一评价量纲,目前常用的生物参数计分法有:3分法、4分法和比值法<sup>[11]</sup>,比值法优于3分法和4分法<sup>[2]</sup>.因此,本研究采用比值法计算生物参数的分值.具体方法是:①对于随着干扰增大则数值越低的生物参数,以95%分位数为最佳期望值,参数分值为:该生物参数值/95%分位数;②对于随着干扰增大而数值越高的生物参数,以5%分位数为最佳期望值,参数分值为:(最大参数值-该生物参数值)/(最大参数值-5%分位数).

1.4.4 确定评价标准 根据比值法得到各个生物参数分值,B-IBI指数值为各个参数分值的累加和.将参照点B-IBI指数值分布的25%分位数作为健康评价的标准,若干扰点的B-IBI值大于25%分位数,则认为该样点是健康的.将小于25%分位数值值的分布范围4等分,划分不同的健康等级,因此得到健康、亚健康、一般、较差和极差5个等级的划分标准.

文中的统计分析均在SPSS 17.0中完成.

## 2 结果

### 2.1 构建生物参数

根据相关文献和底栖动物数据结果,本研究选择了反映群落丰富度、群落种类个体组成、营养级组成和生物耐污能力4类、19个生物参数作为滇池流域入湖河流底栖动物完整性评价的备选参数,以揭示环境的改变对底栖动物的群落结构和功能的影响(表1).

### 2.2 参数筛选

(甲壳动物+软体动物)% (M6)、软体动物% (M9)、寡毛类密度/蛭纲密度 (M13)、杂食者% (M16)和刮食者% (M17)这5个生物参数的75%分位数分别为0.14、0.11、0.67、0和0.01(表2),表明随着污染程度的增强,这些生物参数的值可变范围很窄,因此不作为构建B-IBI的参数体系.因此,对余下的14个生物参数进行判别能力分析.

根据Barbour等的评价方法和筛选原则,比较所有样点在25%~75%分位数的范围,即用箱线图法作图得到箱体IQ的重叠情况,分别利用SPSS软件画出箱线图分析14个生物参数的判别能力.结果表明,(甲壳动物+软体动物)分类单元数(M3)、寡毛纲% (M10)、水丝蚓% (M11)、摇蚊% (M12)、集食者% (M14)、捕食者% (M15)、耐污类群% (M18)和Goodnight指数(M19)的IQ都 $\geq 2$ ,将其保留进一步分析,其余生物参数的IQ值为1或0,将其删除.因此,剩余的8个生物参数进入下一步分析.

表 1 构建 B-IBI 指标体系的生物参数对干扰的反应

Tab. 1 Candiate biological parameters for B-IBI and their expected direction of reponse to disturbance

序号	指标类型	生物参数	对干扰的反应
M1	反映群落丰富度	Shannon 多样性指数	减小
M2		总分类单元数	减小
M3		(甲壳动物 + 软体动物)分类单元数	减小
M4		蛭纲分类单元数	增大
M5		软体动物分类单元数	减小
M6	反映群落种类个体组成	(甲壳动物 + 软体动物)%	减小
M7		总密度	增大
M8		蛭纲%	增大
M9		软体动物%	减小
M10		寡毛纲%	增大
M11	反映营养级组成	水丝蚓%	增大
M12		摇蚊%	减小
M13		寡毛类密度/蛭纲密度	增大
M14		集食者%	增大
M15		捕食者%	减小
M16		杂食者%	减小
M17		刮食者%	减小
M18	反映生物耐污能力	耐污类群%	增大
M19		Goodnight 指数	增大

表 2 19 个生物参数在 10 个参照点中的分布情况

Tab. 2 Distribution of 19 biological parameters from 10 reference sites

生物参数	标准差	极小值	极大值	5% 分位数	25% 分位数	75% 分位数	95% 分位数
M1	0.66	0	2.28	0	0	1.18	1.91
M2	1.41	0	6.00	0	1	4.00	5.00
M3	0.82	0	3.00	0	0	1.00	3.00
M4	0.67	0	3.00	0	0	1.00	2.00
M5	0.68	0	2.00	0	0	1.00	2.00
M6	0.25	0	1.00	0	0	0.14	0.97
M7	2298.05	0	10808.00	0	62.00	624.00	9432.00
M8	0.12	0	0.61	0	0	0.02	0.38
M9	0.22	0	1.00	0	0	0.11	0.65
M10	0.44	0	1.00	0	0	0.96	1.00
M11	0.42	0	1.00	0	0	0.91	1.00
M12	0.38	0	1.00	0	0	0.51	1.00
M13	205.70	0	1286.00	0	0	0.67	46.00
M14	0.42	0	1.00	0	0	0.96	1.00
M15	0.38	0	1.00	0	0	0.58	1.00
M16	0.07	0	0.32	0	0	0	0.25
M17	0.19	0	1.00	0	0	0.01	0.50
M18	0.41	0	1.00	0	0.05	0.95	1.00
M19	0.44	0	1.00	0	0	0.95	1.00

为检验各参数所反映的信息独立性<sup>[21]</sup>,对经过判别能力分析得到的 8 个生物参数进行 Spearman 相关分析,使各个生物参数至少能提供一条新的而非重复的信息. 采用 Maxted 标准,对|r| > 0.75 代表的两个高

度相关的参数,取其之一<sup>[21-22]</sup>. 结果表明(表3):水丝蚓% (M11)、集食者% (M14)、Goodnight 指数(M19)与寡毛纲% (M10),集食者% (M14)、Goodnight 指数(M19)与水丝蚓% (M11),摇蚊% (M12)与捕食者% (M15),集食者% (M14)与 Goodnight 指数(M19)显著相关. 反映生物营养组成的捕食者% (M15)与反映群落种类个体组成的摇蚊% (M12)高度相关( $r=0.899$ ),考虑到捕食者% 包含的信息多于摇蚊%,因此删除摇蚊% (M12),保留捕食者% (M15);反映群落种类个体组成的寡毛纲% (M10)、水丝蚓% (M11)与反映生物营养组成的集食者% (M14)、Goodnight 指数(M19)高度相关( $r$  均在 0.9 以上),考虑到集食者% (M14)包含的信息较多,将其保留,因此删除寡毛纲% (M10)和 Goodnight 指数(M19);集食者% (M14)与水丝蚓% (M11)的相关系数  $r$  为 0.913,考虑集食者% (M14) 包含的信息较多,因此删除水丝蚓% (M11),保留集食者% (M14). 根据以上筛选方法,将(甲壳动物+软体动物)分类单元数(M3)、集食者% (M14)、捕食者% (M15)和耐污类群% (M18)作为计算 B-IBI 的指标体系.

表 3 8 个生物参数间的 Spearman 相关矩阵分析结果  
Tab. 3 Spearman's correlation matrix of 8 candidate biological parameters

	M3	M10	M11	M12	M14	M15	M18	M19
M3	1.000	-0.398 *	-0.423 **	0.028	-0.285	0.172	0.015	-0.414 **
M10		1.000	0.934 **	-0.495 **	0.963 **	-0.563 **	0.688 **	0.988 **
M11			1.000	-0.466 **	0.907 **	-0.519 **	0.777 **	0.941 **
M12				1.000	-0.532 **	0.899 **	-0.634 **	-0.497 **
M14					1.000	-0.576 **	0.731 **	0.954 **
M15						1.000	-0.535 **	-0.567 **
M18							1.000	0.685 **
M19								1.000

\*\* 表示  $P<0.01$ , \* 表示  $P<0.05$ .

表 4 比值法计算 4 个生物参数值的公式  
Tab. 4 Formulas for calculating four biological parameters  
by ratio scoring method

生物参数	计算公式
(甲壳动物+软体动物)分类单元数(M3)	M3/3
集食者% (M14)	1-M14
捕食者% (M15)	M15
耐污类群% (M18)	1-M18

得到滇池流域底栖动物的 B-IBI 指数值的评价标准:大于 1.62 为健康;1.03~1.62 为亚健康;0.31~1.03 为一般;0.10~0.31 为较差;0~0.10 为极差. 依据此评价标准,对滇池流域 38 个样点进行底栖动物完整性的状况进行评价. 结果表明,在滇池流域的所有样点中,16 个为健康,5 个为亚健康,6 个为一般,6 个为较差,5 个为极差.

2.5 B-IBI 与理化因子的关系

采用 Spearman 相关系数分析 B-IBI 与 10 个理化因子的关系(表 5),结果表明,B-IBI 与  $\text{NO}_3^-$ -N 的相关系数最大,为 -0.354,其次为 WT,与其他理化因子的相关性不大.

表 5 B-IBI 值与理化指标的相关系数  
Tab. 5 Correlation coefficient between B-IBI and physicochemical parameters

WT	pH	DO	COD <sub>Mn</sub>	BOD	NH <sub>3</sub> -N	TP	TN	SS	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
-0.340	-0.280	-0.286	0.079	0.163	0.160	0.126	0.202	0.056	-0.354

2.3 分值计算  
根据所有样点值的分布,确定使用比值法的计算公式(表 4),以此计算各样点的 B-IBI 值.

2.4 评价标准  
将 4 个生物参数由表 4 计算所得的值相加,即得到 B-IBI 指数值.用参照点 25% 分为数值作为健康标准,大于该值的样点均为健康状态,小于 25% 分为数值的进行 4 等分,即

### 3 讨论与结论

构建 B-IBI 参照点的选择应当基于健康的河流选择无干扰和干扰小的样点. Barbour 在人为干扰极小的溪流上设置参照点,以此评价佛罗里达州的溪流健康<sup>[21]</sup>, Maxted 选择参照点是以土地利用方式、生境质量和水体理化指标为依据进行选择<sup>[23]</sup>;王备新等用底栖动物评价安徽黄山的溪流健康时,基于的原则是:选择无居民和农作物、森林覆盖率 90% 以上的为无干扰点,选择上游无点源污染,上下游 5 km 内无村庄等条件为干扰极小点,以此确定 11 个样点为参照点<sup>[2]</sup>.然而,国内外并没选择参照点的统一标准,受自然和人为干扰的双重影响,寻找健康的河流是不现实的<sup>[24]</sup>.因此,参照点的选择应以研究区域的差异为基础,选择相对干扰小的点位.

通过分析滇池流域的遥感数据可知,其在水源地区域林地面积平均在 70% 以上,耕地占 5%~23% 左右,农村居民地不足 5%,无城镇及工矿用地分布,水源地地区植被覆盖度高、人为产生的污染,导致水体环境基本没有受到干扰.以滇池流域的 9 个水源地采样点作为滇池流域 B-IBI 的参照点,保证了 IBI 评估中参考点必须无人类影响或人类干扰较小的要求.而本文的评估结果也证明,对于上游具有未被干扰的水源地的湖泊流域,可参考选择水源地水体作为 B-IBI 评估的对照点,

不同的地理区或生态区,底栖动物的组成也不相同.根据傅伯杰等的中国生态区划方案<sup>[25]</sup>,本文样点来自两个生态区:云贵高原南部湿润常绿阔叶林生态区和云贵高原北部半湿润常绿阔叶林生态区.调查结果表明,两个区的底栖动物组成具有相似性,而参照点(水源地)主要来自一个生态区.以后研究应该在条件允许的情况下,尽量选用一个生态区内的样点进行分析.另外,本文根据滇池流域 2 期(丰水期和平水期)的底栖动物数据结果,对滇池流域底栖动物完整性指数及标准进行初步研究,而只有长期对底栖动物数据进行监测和分析,才能对底栖动物群落结果和水质的关系进行较准确的研究.

### 4 结论

1) 通过指数分布范围、相关分析和判别能力分析,得到滇池流域 B-IBI 由(甲壳动物+软体动物)分类单元数、集食者%、捕食者%和耐污类群%组成.

2) 滇池流域 B-IBI 评价结果表明,38 个样点中,16 个为健康,5 个为亚健康,6 个为一般,6 个为较差,5 个为极差.

3) Spearman 相关分析表明,影响滇池流域 B-IBI 的最大的理化因子是  $\text{NO}_3^-$ -N 和 WT.

### 5 参考文献

- [1] 张远,徐成斌,马溪平.辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准.环境科学学报,2007,27(6):919-927.
- [2] 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):1481-1489.
- [3] Karr JR, Chu EW. Sustaining living rivers. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 1-14.
- [4] Karr JR. Ecological integrity and ecological health are not the same. In: Schulze P ed. Engineering within ecological constraints. Washington DC: National Academy of Engineering, National Academy Press, 1995: 97-109.
- [5] Karr JR. Assessment to biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [6] Jungwirth M, Muhar S, Schmutz S. Assessing the ecological integrity of running waters, proceedings of the international conference. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 245-256.
- [7] Eugene AS, In-Hye O. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecological Indicators*, 2004, 4(3): 189-198.
- [8] Griffith MB, Hill BH, McCormick FH et al. Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams. *Ecological Indicators*, 2005, 5(2): 117-136.
- [9] Kerans BL, Karr JR. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Application*, 1994, 4(4): 768-785.
- [10] Ode PR, Rehn AC, May JT. A quantitative tool for assessing the integrity of southern coastal California streams. *Environmental Management*, 2005, 35(4): 493-504.
- [11] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphy-

- ton, benthic macroinvertebrates and fish; 2nd ed. EPA 841-B-99-002. Washington DC; U. S. , Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [12] Yagow G, Wilson B, Srivastava P *et al.* Use of biological indicators in TMDL assessment and implementation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2006, **49**(4): 1023-1032.
  - [13] Astin LAE. Developing biological indicators from diverse data: the potomac basin-wide index of benthic integrity (B-IBI). *Ecological Indicators*, 2006, **7**(4): 895-908.
  - [14] Brian MW, Lisa JH, Luis MM. Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *Journal of the North American Benthological Society*, 2002, **21**(4): 686-700.
  - [15] Morse JC, Yang LF, Tian LI. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 1-57.
  - [16] 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. 生态学报, 1992, **12**(1): 8-15.
  - [17] 刘月英,张文珍,王跃先等. 中国经济动物志·淡水软体动物. 北京:科学出版社, 1979: 1-130.
  - [18] 王洪铸. 中国小蛭类研究. 北京:高等教育出版社, 2002: 1-220.
  - [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
  - [20] GB/T 3838—2002. 中华人民共和国地表水环境质量标准.
  - [21] Barbour MT, Gerritsen J, Griffith GE *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**(2): 185-211.
  - [22] Blocksom KA, Kurtenbach JP, Klemm DJ *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs. *Environment Monitoring and Assessment*, 2002, **77**(3): 311-333.
  - [23] Maxted JR, Barbour MT, Gerritsen J *et al.* Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrate. *Journal of North American Benthological Society*, 2000, **19**(1): 128-144.
  - [24] 董哲仁. 河流健康的内涵. 中国水利, 2005, **4**: 15-18.
  - [25] 傅伯杰,刘国华,陈利顶等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, **21**(1): 1-6.