

DOI: 10.5846/stxb202002280365

张葵, 王军, 葛奕豪, 谢鹏, 马徐发, 周琼. 基于大型底栖动物完整性指数的伊犁河健康评价及其对时间尺度变化的响应. 生态学报, 2021, 41(14): 5868-5878.

Zhang K, Wang J, Ge Y H, Xie P, Ma X F, Zhou Q. Health assessment of the Ili River based on benthic index of biotic integrity (B-IBI) and the effects of different months and years. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5868-5878.

## 基于大型底栖动物完整性指数的伊犁河健康评价及其对时间尺度变化的响应

张 葵<sup>1,2</sup>, 王 军<sup>1,2,3</sup>, 葛奕豪<sup>1,2,4</sup>, 谢 鹏<sup>1,2</sup>, 马徐发<sup>1,2</sup>, 周 琼<sup>1,2,\*</sup>

1 华中农业大学水产学院, 农业农村部淡水生物繁育重点实验室, 武汉 430070

2 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070

3 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

4 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072

**摘要:**大型底栖动物完整性指数(Benthic index of biotic integrity, B-IBI)是广泛应用的河流生态健康评价方法,然而从时间尺度(月份、年际变化)上评价 B-IBI 适用性的研究较少。有鉴于此,于 2013—2015 年期间,每年在 5 月、7 月、8 月和 10 月分别对新疆伊犁河大型底栖动物群落结构进行系统调查,并构建底栖动物完整性指数,评价河流水体的健康状况,同时评价其在时间尺度上的影响。非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)显示,伊犁河不同月份的大型底栖动物群落结构相似度较高。通过对群落丰富度、种类个体相对丰度、功能摄食群、耐污能力、小生境质量和生物多样性指数等 6 个大类共计 30 个候选参数进行筛选,选取 EPT(蜉蝣目、襁翅目、毛翅目)分类单元数、蜉蝣目个体相对丰度、耐污类群的个体相对丰度、生物指数(Biotic index, BI)以及黏附者个体相对丰度为伊犁河流域 B-IBI 健康评价体系的核心指标。B-IBI 的评价等级为:B-IBI>3.38 为健康,2.53—3.38 为亚健康,1.69—2.53 为一般,0.84—1.69 为差,B-IBI 值≤0.84 为极差。结果显示,伊犁河 8 个典型样点中,6 个采样点健康状况为健康或者亚健康,2 个采样点为一般。总体上伊犁河健康状况较好,其中支流巩乃斯河和喀什河的健康状况要好于伊犁河干流和支流特克斯河。不同月份的 B-IBI 值无显著性差异( $P>0.05$ ),表明伊犁河流域整体健康状况不受季节变化的重要影响。2013 年与 2015 年 B-IBI 值差异显著( $P<0.05$ ),伊犁河健康状况存在逐年变好的趋势,河流的生物健康评价需要开展长期的监测才能较全面的反映河流健康状况。参照点整体上的 B-IBI 值显著高于受损点的 B-IBI 值,表明 B-IBI 健康评价体系在伊犁河流域的良好适用性。该研究将从时间尺度上为基于 B-IBI 的河流健康评价方法提供理论参考。

**关键词:**底栖动物完整性指数;河流健康评价;时间尺度;伊犁河;新疆

## Health assessment of the Ili River based on benthic index of biotic integrity (B-IBI) and the effects of different months and years

ZHANG Kui<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2,3</sup>, GE Yihao<sup>1,2,4</sup>, XIE Peng<sup>1,2</sup>, MA Xufa<sup>1,2</sup>, ZHOU Qiong<sup>1,2,\*</sup>

1 Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Engineering Research Center of Green development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China

3 Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

4 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

**基金项目:**农业农村部财政专项“西北地区重点水域渔业资源与环境调查”;新疆维吾尔自治区科技厅“百名青年博士引进计划”

**收稿日期:**2020-02-28; **网络出版日期:**2021-05-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

**Abstract:** The benthic index of biotic integrity (B-IBI) is an ecological method that widely used in river health assessment, but very few studies focus on the adaptability of B-IBI in river health assessment on the time scale. This study investigated the community structure of benthic macroinvertebrates systematically in the Ili River in May, July, August and October of 2013—2015. Meanwhile, we evaluated the temporal pattern on the results of health assessment for the Ili River based on the B-IBI. The results of non-metric multidimensional scaling (NMDS) showed that the community structure of benthic macroinvertebrates in different months in the Ili River revealed a high similarity. We sifted a total of 30 candidate metrics, which belong to 6 categories, including community richness, the proportion of individual species, functional feeding group, pollution tolerance, habitat quality and biodiversity index. Ultimately, the number of Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (EPT) taxa, the percentage of Ephemeroptera, the percentage of tolerant groups, Biotic Index (BI) and the percentage of clingers were selected as the key metrics of the B-IBI health assessment system in the Ili River. The assessment grades of B-IBI were as follows:  $B-IBI > 3.38$  representing healthy,  $2.53 < B-IBI \leq 3.38$  sub-healthy,  $1.69 < B-IBI \leq 2.53$  fair,  $0.84 < B-IBI \leq 1.69$  poor, and  $B-IBI \leq 0.84$  extremely poor. Among the 8 typical sampling sites of the Ili River, 6 sampling sites are healthy or sub-healthy and 2 sampling sites are fair. In general, the Ili River is in good health. Specifically, the health status of the tributaries (the Kunes River and Kax River) is better than those of the Tekes River (tributary) and the main stream. There was no significant difference in B-IBI between different months ( $P > 0.05$ ), suggesting that the overall health status of the Ili River was not significantly affected by seasonal changes. There was a significant difference between the B-IBI in 2013 and that in 2015 ( $P < 0.05$ ). The health status of Ili River has a trend of getting better year by year. The biological health assessment of the river needs long-term and systematic investigation and research to reflect the health status of the river. The non-parametric tests indicated that, overall, the B-IBI scores of the reference sites were significantly higher than those of the impaired sites, which indicated the adaptability of the B-IBI health assessment system in the Ili River. This study can provide theoretical guidance for the river health evaluation based on the B-IBI in times of time scale.

**Key Words:** benthic index of biotic integrity; river health assessment; time scale; Ili River; Xinjiang Uygur Autonomous Region

生物完整性指数(Index of biotic integrity, IBI)是根据筛选后的多个生物参数评价生态系统的健康状况。最初由 Karr 以鱼类作为指示生物而提出的<sup>[1]</sup>,随后其研究对象逐步扩展至大型底栖动物<sup>[2]</sup>、藻类<sup>[3]</sup>、浮游生物<sup>[4]</sup>、水生植物<sup>[5]</sup>等生物类群,研究生境也由河流发展到湖泊<sup>[6]</sup>、水库<sup>[7]</sup>和湿地<sup>[8]</sup>等生态系统,其应用范围日益广泛。大型底栖动物作为河流生态系统中承上启下的重要环节,其分布范围较广,且不同物种对环境适应能力不尽相同<sup>[9]</sup>。因此,大型底栖动物可以较好的指示人类活动对河流健康状况的影响,是构建生物完整性指数的理想对象。

B-IBI最早由 Kearns 等<sup>[10]</sup>提出,后经美国国家环保局倡导并发展成为世界范围内评价水体健康状况的常规方法。我国自 80 年代已将大型底栖动物用于河流水质评价<sup>[11]</sup>,王备新等<sup>[12]</sup>首次在国内将B-IBI应用于评价黄山地区溪流的健康状况后,逐步在国内河流的水体健康评价中得到广泛应用<sup>[13-14]</sup>。然而,现有的研究通常以一周年内 1—2 个月份的调查结果为基础构建B-IBI体系<sup>[15-16]</sup>,或者虽然开展了一周年的研究,但是在时间尺度上的分析较少<sup>[17]</sup>。河流生境中的各种理化因子在不同月份存在不同程度的变化,大型底栖动物的分布呈现异质性<sup>[16]</sup>。因此,为确保B-IBI用于评价河流健康状况时的准确性,从年内不同月份和年际变化等时间尺度的角度来讨论河流健康状况是非常必要的。

伊犁河流域地处干旱少雨的中亚内陆,河流两岸是经济发展较为集中的区域,同时横跨中国和哈萨克斯坦两国。跨境河流由于特殊的地缘性,其生态和环境改变所带来的效应往往是国家之间矛盾的焦点所在<sup>[18]</sup>。由于冰封期较长、地处偏远、交通不便等因素的影响,目前该流域水生生物方面的研究报道甚少,有关底栖动物方面的研究仅限于于帅等的研究<sup>[19]</sup>。基于生物群落结构的伊犁河水质健康评价仅限于月份变化,缺少年际变化的分析<sup>[20-21]</sup>。本研究连续 3 年(2013—2015)按照不同月份对伊犁河的健康状况进行时间尺度上的评

价分析,旨在通过构建B-IBI体系,以期为伊犁河流域的环境监测和渔业管理提供理论参考,同时探讨时间尺度对河流B-IBI分值的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

伊犁河地处我国西北边陲,其主源特克斯河发源于天山汗腾格里峰,向东流经喀德明山脉与巩乃斯河汇合后,转而向西流,与北岸的喀什河汇合后始称伊犁河。伊犁河在中哈两国界河——霍尔果斯河流出国境,最终注入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖<sup>[22]</sup>。流域内整体地势东高西低,处大西洋暖湿气流的迎风面,年平均降水 417.66 mm,年平均气温 10.4 °C,属温带大陆性气候<sup>[23]</sup>。伊犁河全长 1236.5 km,在中国境内长 442 km,流域面积  $5.6 \times 10^4$  m<sup>2</sup>,年径流量为  $117 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,是新疆水量第一大河流,通常在 11 月至次年 3 月冰封,次年 4 月解冻。伊犁河上游河段为支流(特克斯河、巩乃斯河和喀什河),处于较为原始的区域,多高山急流,平均水深在 1 m 左右,水温较低,底质主要为砾石,流至河口处河道宽阔,水流平稳,底质多为砂石,而至地势平坦的伊犁河大桥处,水流更趋平缓,水深在 2 m 左右,底质则以泥沙为主。

### 1.2 样品的采集与处理

本研究于 2013—2015 年连续三年对伊犁河流域大型底栖动物进行系统调查,根据伊犁河冰封期与水文期的特点,采样月份设为每年 5 月、7 月、8 月及 10 月,共设 8 个采样点,其中特克斯河、巩乃斯河、喀什河和伊犁河干流各 2 个。

在采集底栖动物样品时,对于可涉水的采样点,使用索伯网(面积为 0.09 m<sup>2</sup>,孔径为 0.5 mm)进行采集;对于不可涉水的采样点,使用 1/16 m<sup>2</sup>彼得森采泥器进行采集,每个样点采集 3—5 次。所采集的样品现场通过 60 目网筛洗净,并转移至白瓷盘中挑拣。样品通过 10% 的福尔马林固定保存,带回实验室鉴定、计数并称其湿重。底栖动物尽可能的鉴定到较低的分类单元<sup>[24-27]</sup>,并对其功能群、耐污值等参数进行评定划分<sup>[28-31]</sup>。

### 1.3 B-IBI评价体系的构建

#### 1.3.1 采样点的划分

构建B-IBI评价体系,首先要确定参照点和受损点,参照点是指无人为活动干扰或者人为活动干扰较小的点,受损点是受到人类活动干扰较大的点。结合伊犁河流域实际情况,采用经验法<sup>[32-33]</sup>选取生境较好、受人为干扰较小的巩乃斯河零公里、喀什河的乔尔玛与尼勒克 3 个采样点作为参照点,昭苏解放大桥、特克斯三乡、巩乃斯大桥、雅玛渡和伊犁河大桥 5 个采样点作为受损点(图 1)。根据三年的采样情况,参照点的样点数据共有 34 个,受损点的样点数据共有 38 个,总计 72 个样点数据。

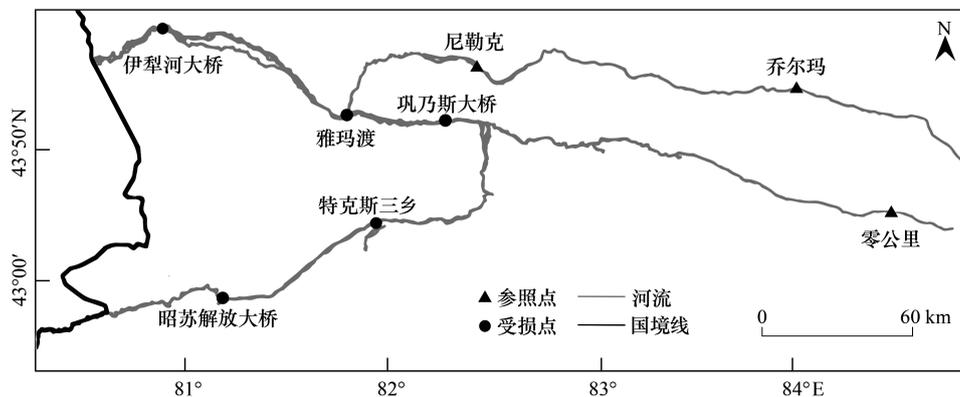


图 1 伊犁河流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Ili River basin

### 1.3.2 候选参数的确定

用于构建B-IBI健康评价体系的候选参数较多,为了准确且较为全面地评价伊犁河流域的水体健康状况,结合伊犁河流域实际情况,同时参考王军等在西北地区跨境河流的研究<sup>[13]</sup>,本研究选取6个大类,包括群落丰富度、种类个体相对丰度、功能摄食群、耐污能力、小生境质量和生物多样性指数共30个指标(表1)作为候选参数。

表1 伊犁河流域B-IBI体系候选参数及其对干扰的反应

Table 1 Candidate metrics of B-IBI in the Ili River basin and their expected response to the disturbance

参数类型 Type of metrics	候选参数 Candidate metrics	对干扰的反应 Responses to disturbance
群落丰富度 Community richness	M1 总分类单元数	减小
	M2 EPT 分类单元数	减小
	M3 摇蚊分类单元数	减小
	M4 总生物量	减小
	M5 水生昆虫分类单元数	减小
	M6 优势分类单元数	增大
种类个体相对丰度 The proportion of individual species	M7 前3位优势分类单元个体相对丰度	增大
	M8 蜉蝣目个体相对丰度	减小
	M9 襁翅目个体相对丰度	减小
	M10 毛翅目个体相对丰度	减小
	M11 寡毛类个体相对丰度	增加
	M12 摇蚊个体相对丰度	增加
功能摄食群 Functional feeding group	M13 收集者个体相对丰度	增大
	M14 滤食者个体相对丰度	增大
	M15 捕食者个体相对丰度	减小
	M16 撕食者个体相对丰度	减小
	M17 刮食者个体相对丰度	减小
耐污能力 Pollution tolerance	M18 敏感类群分类单元数	减小
	M19 耐污类群个体相对丰度	增大
	M20 敏感类群个体相对丰度	减少
	M21 耐污类群分类单元相对丰度	增大
	M22 敏感类群分类单元相对丰度	减小
小生境质量 Habitat quality	M23 BMWP	减小
	M24 BI	增大
	M25 黏附者分类单元数	减小
生物多样性指数 Biodiversity index	M26 黏附者个体相对丰度	减小
	M27 Shannon-Wiener 指数	减小
	M28 Simpson 指数	减小
	M29 Margalef 丰富度指数	减小
	M30 Pielou 均匀度指数	减小

EPT: 蜉蝣目、襁翅目和毛翅目 Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera; BMWP: BMWP 计分系统 Biological monitoring working party score; BI: 生物指数 Biotic index

### 1.3.3 候选参数的筛选

1) 分布范围检验: 候选参数中若有超过95%的点位数值为0的参数, 则其表现的信息指示作用不强, 不适合用于构建B-IBI评价体系, 予以剔除<sup>[15]</sup>。

2) 判别能力分析: 剩余参照点和受损点的参数进行箱线图对比分析, 如果参照点和受损点的箱线图范围无重叠, 则记为  $IQ$  (Inter quartile) = 3; 如重叠且两者中位数值在对方箱线图范围外, 则记为  $IQ = 2$ ; 如重叠且两者只有一个中位值在对方箱线图范围内, 则记为  $IQ = 1$ ; 如重叠且两者中位值均在对方箱线图范围内, 则记为  $IQ = 0$ 。保留  $IQ \geq 2$  的参数用于后续分析。

3) 相关性分析: 对于  $IQ \geq 2$  的参数, 进行 Pearson 相关性分析, 相关系数  $|r| > 0.75$  说明参数间反映的生物信息大部分是重叠的, 根据两参数的反应信息的重要性, 选择性的保留其中一个参数, 最终与  $|r| \leq 0.75$  的候选参数一道作为本次伊犁河流域的B-IBI核心参数。

### 1.3.4 B-IBI体系评价标准的建立

本研究采用比值法统一评价量纲。数值随干扰增强而减小的参数,以 95%分位数为最佳期望值,参数分值为:实际值/最佳期望值;数值随干扰增强而增加的参数,以 5%分位数为最佳期望值,参数分值为:(最大值-实际值)/(最大值-最佳期望值)。参数分值范围应在 0—1 之间,若大于 1,则记为 1。所有参数分值之和为该采样点的 B-IBI 值。

以参照点 B-IBI 值分布的 25%分位数作为标准,对其四等分,共得到 5 个范围,分别代表不同的健康等级,以此作为 B-IBI 体系的评价标准。

## 1.4 数据处理

不同月份底栖动物群落结构的非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)通过 R 3.6.3 软件完成。数值的分布范围、箱线图分析等在 Excel 2016 中进行。Kruskal-Wallis 检验用于比较不同月份以及不同年份 B-IBI 的差异性,利用 Mann-Whitney U 检验分析参照点和受损点的 B-IBI 的差异性及分布情况,确定 B-IBI 健康评价体系对伊犁河流域的适用性。Kruskal-Wallis 与 Mann-Whitney U 检验均在 SPSS 22.0 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 伊犁河流域底栖动物群落结构特征

本研究在 2013—2015 年期间共鉴定底栖动物 109 种,其中水生昆虫 90 种(82.6%),软体动物 10 种(9.2%),寡毛类 3 种(2.8%),甲壳动物 2 种(1.8%),其他 4 种(3.6%)。水生昆虫是本研究中绝对的优势类群,在全流域均有分布。占有优势地位的种群主要有多足摇蚊(*Polypedilum* sp.)、蚋(*Simulium* sp.)、扁蜉(*Heptagenia* sp.)、高翔蜉(*Epeorus* sp.)、四节蜉(*Baetis* sp.)、短丝蜉(*Siphonurus* sp.)和短脉纹石蛾(*Cheumatopsyche* sp.)。总体上,伊犁河流域底栖动物物种丰富度较高,物种组成上以清洁种为主,说明水体健康状况整体上较好。NMDS 分析结果显示(*stress* 值为 0.20),伊犁河不同月份的大型底栖动物群落结构相似度较高,在排序图上区分不明显(图 2)。

### 2.2 伊犁河流域 B-IBI 健康评价体系的建立

#### 2.2.1 候选参数分布范围检验和箱线图分析

候选参数分布范围检验表明 M11 零值过多,不适合用于构建 B-IBI 评价体系,予以舍弃。对剩余参数进行箱线图分析,仅 M2、M8、M19、M21、M24 和 M26 的 *IQ* 值大于或等于 2(图 3),保留这些参数用于后续分析。

#### 2.2.2 相关性分析

对保留的候选参数进行 Pearson 相关性分析,结果显示仅 M19 和 M21 的相关系数大于 0.75(表 2),考虑到个体相对丰度较分类单元相对丰度更常用于构建 B-IBI 体系中<sup>[14,34]</sup>,且个体相对丰度更能准确的反应生物信息,故保留 M19,剔除 M21。最终选出 M2、M8、M19、M24、M26 作为伊犁河流域的 B-IBI 核心参数。

#### 2.2.3 伊犁河流域 B-IBI 分值计算及评分标准

采用比值法计算各核心参数的分值,然后累加得该点的 B-IBI 值。对参照点的 25%分位的 B-IBI 值进行四等分,共得到 5 个数值范围,分别代表着不同的健康状况,以此作为伊犁河大型底栖动物完整性指数健康评价标准(表 3)。

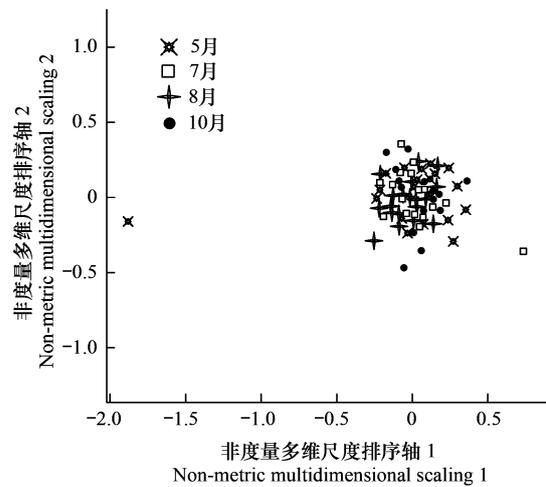


图 2 伊犁河不同月份大型底栖动物群落结构集合的非度量多维尺度分析图

Fig.2 Non-metric multidimensional scaling based on the community structure of benthic macroinvertebrates at different mouths in the Ili River

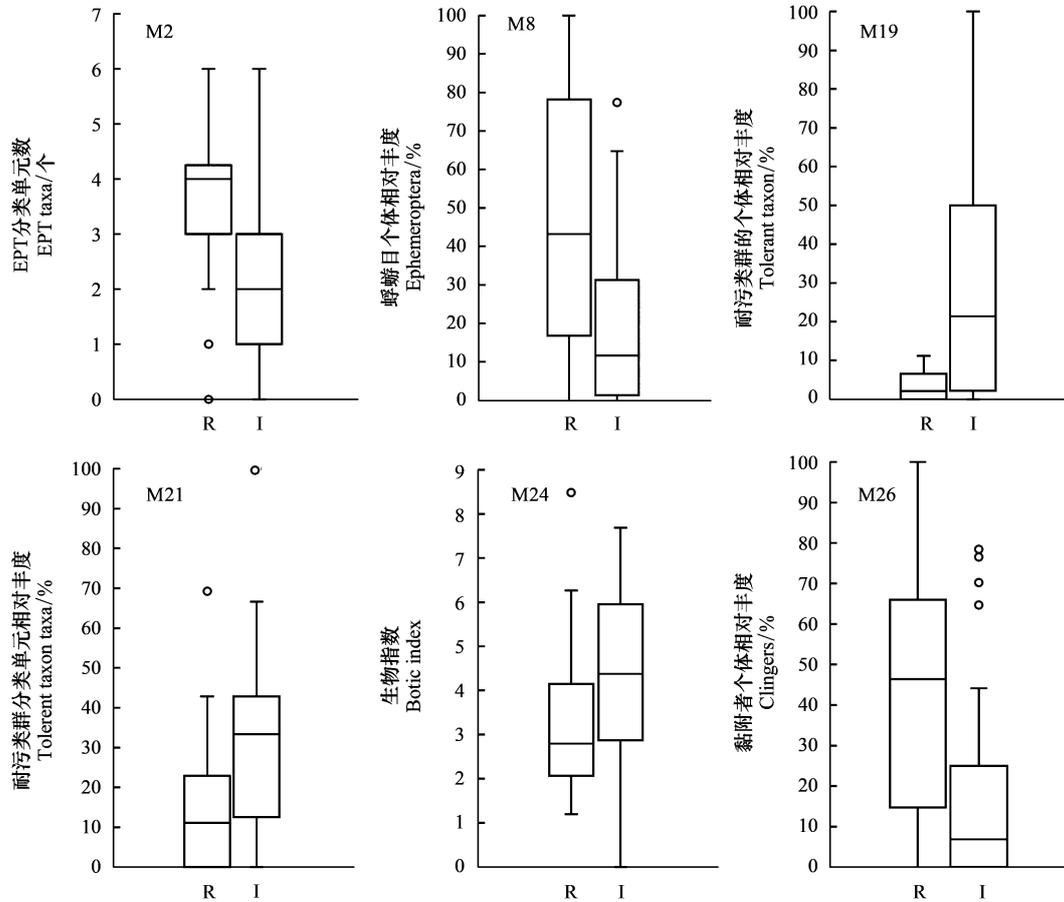


图3 候选参数在参照点和受损点中的箱线图

Fig.3 Box plots of candidate metrics between the reference and impaired sites

EPT: 蜉蝣目、襉翅目和毛翅目 Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera; R: 参照点 Reference sites; I: 受损点 Impaired sites; M2 EPT 分类单元数; M8 蜉蝣目个体相对丰度; M19 耐污类群个体相对丰度; M21 耐污类群分类单元相对丰度; M24 BI; M26 黏附者个体相对丰度

表2 6个候选参数的 Pearson 指数相关性分析

Table 2 Pearson correlation matrix of 6 candidate metrics

参数 Metrics	M2	M8	M19	M21	M24	M26
M2	1.00					
M8	0.37	1.00				
M19	-0.27	-0.49	1.00			
M21	-0.28	-0.48	0.84	1.00		
M24	-0.10	-0.30	0.73	0.67	1.00	
M26	0.31	0.37	-0.38	-0.40	-0.35	1.00

### 2.3 伊犁河流域B-IBI评价结果及其校验

综合三年数据(表4),8个采样点共计72份数据中,35份数据处于健康状态,占48.6%;15份数据处于亚健康状态,占20.8%;10份数据处于一般状态,占13.9%;9份数据处于较差状态,占12.5%;仅3份数据处于极差状态,占4.2%。基于各采样点的B-IBI综合分析,伊犁河流域处于健康状态的采样点有4个(喀什河2个,特克斯河与巩乃斯河各1个),处于亚健康的样点有2个(伊犁河干流和巩乃斯河各1个),处于一般状态的样点有2个(伊犁河干流和特克斯河各1个)。伊犁河流域河流整体处于亚健康状态。

Kruskal-Wallis 检验表明,不同月份间的B-IBI值无显著性差异( $P>0.05$ ),不同年份间的B-IBI值也无显著

异( $P>0.05$ ),但是 2013 年和 2015 年的 B-IBI 值差异显著( $P<0.05$ ),B-IBI 值有逐年上升的趋势(图 4)。

参照点与受损点 B-IBI 值的 Mann-Whitney U 非参数检验表明两者之间存在显著差异( $P<0.05$ ),参照点的 B-IBI 值显著高于受损点(图 5),表明本研究所构建的 B-IBI 健康评价体系适合用于伊犁河流域的水体健康评价。

表 3 伊犁河流域 B-IBI 健康评价标准

Table 3 The criteria of health assessment based on the B-IBI in the Ili River

健康 Healthy	亚健康 Sub-healthy	一般 Fair	差 Poor	极差 Extremely poor
>2.67	2.00—2.67	1.33—2.00	0.67—1.33	≤0.67

表 4 伊犁河流域 B-IBI 评价结果

Table 4 The B-IBI results of water quality assessment in the Ili River

时间 Time		伊犁河大桥	雅玛渡	昭苏解放大桥	特克斯三乡	零公里	巩乃斯大桥	乔尔玛	尼勒克
2013 年 5 月	B-IBI	2.67	0.49	1.74	2.50	3.51	—	3.50	1.81
	健康状况	亚健康	差	一般	亚健康	健康	—	健康	一般
2013 年 7 月	B-IBI	2.38	1.06	1.97	—	3.19	1.62	3.44	4.12
	健康状况	亚健康	一般	一般	—	健康	一般	健康	健康
2013 年 8 月	B-IBI	0.84	2.46	2.72	—	3.73	1.75	3.17	0.90
	健康状况	差	亚健康	健康	—	健康	一般	健康	差
2013 年 10 月	B-IBI	0.68	1.21	1.76	3.42	1.95	2.32	4.08	—
	健康状况	差	差	一般	健康	一般	亚健康	健康	—
2014 年 5 月	B-IBI	3.23	2.50	1.97	4.24	3.52	3.41	3.96	1.31
	健康状况	健康	亚健康	一般	健康	健康	健康	健康	差
2014 年 7 月	B-IBI	3.64	1.06	2.32	2.11	3.70	2.78	3.06	3.12
	健康状况	健康	差	亚健康	亚健康	健康	健康	健康	健康
2014 年 8 月	B-IBI	2.02	1.26	—	—	3.11	0.98	2.58	2.26
	健康状况	一般	差	—	—	健康	差	亚健康	亚健康
2014 年 10 月	B-IBI	—	—	—	—	3.99	—	4.44	2.35
	健康状况	—	—	—	—	健康	—	健康	亚健康
2015 年 5 月	B-IBI	0.18	1.19	0.36	—	4.15	—	—	3.18
	健康状况	极差	差	极差	—	健康	—	—	健康
2015 年 7 月	B-IBI	2.62	2.71	—	—	3.65	—	4.10	2.36
	健康状况	亚健康	健康	—	—	健康	—	健康	亚健康
2015 年 8 月	B-IBI	3.40	—	—	—	3.99	—	4.18	4.14
	健康状况	健康	—	—	—	健康	—	健康	健康
2015 年 10 月	B-IBI	2.33	4.13	—	—	2.49	—	3.92	4.15
	健康状况	亚健康	健康	—	—	亚健康	—	健康	健康
平均值 Mean	B-IBI	2.18	1.81	1.83	3.07	3.42	2.14	3.67	2.70
	健康状况	亚健康	一般	一般	健康	健康	亚健康	健康	健康

“—”表示没有数据

### 3 讨论

#### 3.1 大型底栖动物完整性指数在伊犁河水质健康评价中的适用性

选取参照点和受损点是构建 B-IBI 水质评价体系的关键步骤<sup>[35]</sup>,然而如何确定参照点和受损点目前尚未形成统一的方法,已有的研究中所用方法不尽相同<sup>[36-38]</sup>。本研究中 8 个采样点受人为干扰的程度差异显著,采样点之间的生境质量对比明显。因此,本研究根据经验法<sup>[28]</sup>选取了喀什河的乔尔玛、尼勒克和巩乃斯河的

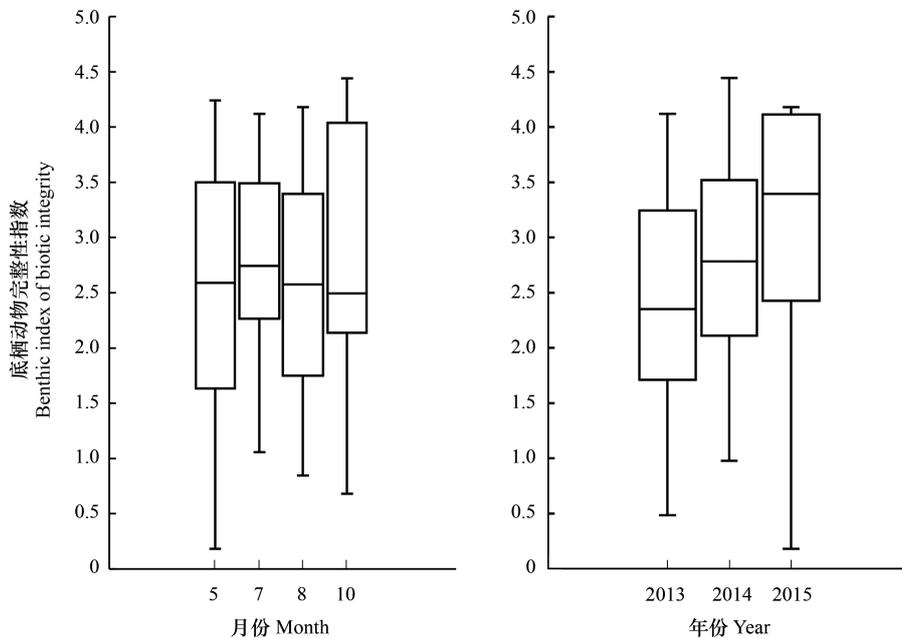


图4 不同月份及不同年份的B-IBI值比较

Fig.4 Comparison of the B-IBI among different months and different years

零公里等三个采样点作为参照点。喀什河流域被森林覆盖的区域占绝对优势,流域内整体的生态环境较好<sup>[39]</sup>。人类活动对巩乃斯河的影响主要体现在人口密集的下游区域<sup>[40]</sup>,而零公里位于巩乃斯河上游,当地政府对生态环境的保护意识强烈,受人为干扰较小。虽然经验法无法消除主观误差<sup>[41]</sup>,但也有学者对比分析了标准化方法和经验法选取参照点和受损点的B-IBI结果,两者结果较为一致<sup>[42]</sup>,本研究中非参数检验的结果也表明了参照点选取的有效性(图5)。

本研究选取的30个生物候选参数均对人为干扰较敏感<sup>[43-44]</sup>,通过指数分布范围、相关性分析和判别能力分析的筛选,M2、M8、M19、M24、M26最终确定为本研究的核心参数,基本涵盖了候选参数中的6个大类。采用比值法以参照点B-IBI值的25%分位数为基准,初步构建了伊犁河流域健康评价标准。从候选参数的确定和筛选、B-IBI值的计算到评分标准的建立等方面,确保伊犁河流域B-IBI体系建立的有效性。

### 3.2 基于B-IBI的伊犁河健康评价结果及其不同月份和年际变化的分析

B-IBI分值的变化与环境人为干扰有关<sup>[28]</sup>,一般而言,由于存在季节变化,河流的水深、水温、凋落叶的分布和流速等环境因子在不同的月份存在差异。有学者发现在河流汛期各采样点的B-IBI值明显优于其他时段<sup>[38]</sup>,在以鱼类为指示生物的IBI体系,不同的河流在旱季和雨季其IBI分值也有着不同的变化规律<sup>[45-46]</sup>。本研究中,相比于参照点长期处于健康或亚健康的状态,受损点健康状况的变化要更加明显(表4)。零公里

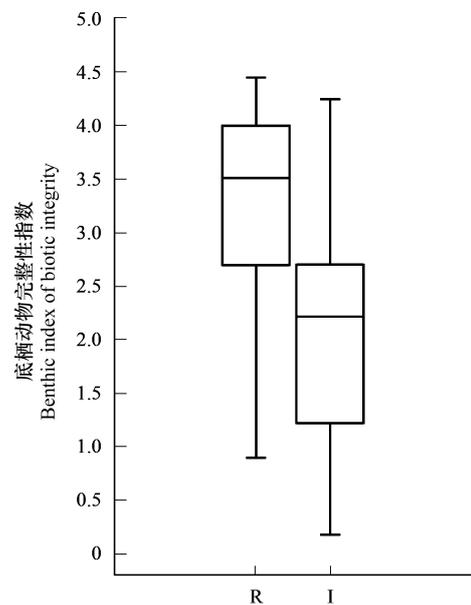


图5 参照点和受损点的B-IBI值比较

Fig.5 Comparison of the B-IBI between the reference and impaired sites

和乔尔玛两个参照点均在河流上游的山区,少有人类活动的干扰,长期处于亚健康及健康状态。参照点尼勒克的水质情况则稍有波动,但在 2014 年 5 月之后水质情况均为健康或亚健康,这可能与此处临近乡镇、水质间歇性的受到人类活动影响有关。摒弃数据较少的特克斯三乡,其他四个受损点的健康状况在时间尺度上出现了不同程度的波动,但是这种健康状况的变化并没有表现出季节规律性,这与太湖的研究类似<sup>[47]</sup>。伊犁河大桥、雅玛渡、昭苏解放大桥和巩乃斯大桥等四个受损点均处于人类活动频繁的区域,人类活动对河流健康状况影响的不可控性可能是水质健康状况波动的主要原因。综合分析所有采样点不同月份的 B-IBI 值,结果表明:特克斯三乡、零公里、乔尔玛和尼勒克四个采样点处于健康状态,伊犁河大桥和巩乃斯大桥处于亚健康状态,雅玛渡和昭苏解放大桥的健康评价一般,伊犁河整体健康状况较好,这与韦丽丽等利用周丛藻类评价伊犁河水质情况较为一致<sup>[20]</sup>。

尽管部分样点的健康状况在不同时间存在一定程度的变化,但综合全流域样点, B-IBI 值在不同月份间的差异并不显著(图 4),伊犁河流域整体健康状况不会明显受到不同水文期的影响,本结果与在渭河流域的研究类似<sup>[48]</sup>。此外,本研究中不同月份的底栖动物群落结构相似度较高(图 2),结合 B-IBI 值在不同月份间不显著的差异,进一步说明本研究所选取的核心参数对伊犁河流域的 B-IBI 健康评价体系是非常适用的。

关于 B-IBI 年际变化的研究鲜有报道,但是有学者探讨了鱼类完整性指数(Fish index of biotic integrity, F-IBI)和 BI 的年际变化。刘明典等<sup>[49]</sup>用 F-IBI 评价长江中上游健康状况时,6 年内 F-IBI 值呈逐年下降的趋势,朱迪等<sup>[50]</sup>发现 BI 值在长江中游浅水湖泊不同年代间也有着下降的趋势,他们均将其归因于人类活动的逐年增强。本研究中, B-IBI 值虽在三年间无显著差异( $P>0.05$ ),但是 2015 年 B-IBI 值显著高于 2013 年的 B-IBI 值( $P<0.05$ ), B-IBI 值呈现逐年缓慢上升的趋势(图 4)。伊犁河流域地处偏远,受人类活动干扰相对较小,而且流域内有多个自然保护区,当地人对环境的保护意识较强,本研究结果极有可能与这些因素有关。

有关 B-IBI 的研究,通常采用一次评价<sup>[15, 34, 51]</sup>,理论上,在不同水文期进行重复采样调查,可以提高评价结果的准确性<sup>[52]</sup>, Paller 等<sup>[53]</sup>在 IBI 中的研究持有同样的观点。然而,就本研究而言,利用 B-IBI 评价河流整体健康状况时,不同月份的 B-IBI 值是没有显著差异的,而仅隔两年,2013 年与 2015 年的 B-IBI 值就产生显著差异,说明河流的生物健康评价需开展持续的系统调查。如若利用 B-IBI 评价不同河段的健康状况,由于受损点的健康状况在时间尺度上存在不同程度的波动,仅由单次采样得出的结果过于片面。因此,笔者建议在不同水文期进行重复采样,以提高评价结果的准确性。迄今为止,已有学者采用不同水文期的数据构建 B-IBI 体系综合评价河流的健康状况,均取得了较好的效果<sup>[38, 54-55]</sup>。

虽然本研究持续三年对伊犁河流域大型底栖动物进行采样,在时间尺度上获得充足的数据,然而受地理条件的限制,本研究只选取了 8 个典型采样点,而 B-IBI 指数用于水质评价需要多方面的数据支撑。因此,今后的研究应设置更多的采样点,获得更加系统的数据,以期能更准确的反映伊犁河流域的河流健康状况,并在时间尺度上评价人类活动对伊犁河流域生态环境的影响。

#### 4 结论

1) B-IBI 评价结果表明,伊犁河流域 8 个典型样点中,6 个采样点健康状况为健康或亚健康,2 个采样点为一般,总体上伊犁河流域水体健康状况较好。Mann-Whitney U 非参数检验显示:参照点的 B-IBI 值显著高于受损点,表明 B-IBI 评价伊犁河河流生态健康的适用性。

2) 尽管部分采样点的 B-IBI 值在时间上存在不同程度的变化,但是 B-IBI 值在不同月份间的差异并不显著,伊犁河流域整体健康状况没有因不同水文期而产生变化。由于部分受损点的健康状况存在较大波动,在评价不同河段的健康状况时,本研究建议在不同水文期进行采样,以提高评价结果的准确性。不同月份的群落结构有着较高的相似性,进一步说明本研究选取的河流健康评价体系对伊犁河有着很好的适用性。

3) 2013—2015 年 B-IBI 值年际差异不显著,但是 2013 年与 2015 年的 B-IBI 值存在显著差异,表明伊犁河流域健康状况有着逐年变好的趋势。河流的健康评价需要长期的监测才能较为全面的反映河流的健康状况。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [ 2 ] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers. *Hydrobiologia*, 2000, 422: 1-14.
- [ 3 ] Wang Y K, Stevenson R J, Metzmeier L. Development and evaluation of a diatom-based Index of Biotic Integrity for the Interior Plateau Ecoregion, USA. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(4): 990-1008.
- [ 4 ] Silow E A, In-Hye O. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecological Indicators*, 2004, 4(3): 189-198.
- [ 5 ] Ferreira M T, Rodríguez-González P M, Aguiar F C, Albuquerque A N. Assessing biotic integrity in Iberian rivers: development of a multimetric plant index. *Ecological Indicators*, 2005, 5(2): 137-149.
- [ 6 ] Lyons J, Gutiérrez-Hernández A, Díaz-Pardo E, Soto-Galera E, Medina-Nava M, Pineda-López R. Development of a preliminary index of biotic integrity (IBI) based on fish assemblages to assess ecosystem condition in the lakes of central Mexico. *Hydrobiologia*, 2000, 418(1): 57-72.
- [ 7 ] Jennings M J, Fore L S, Karr J R. Biological monitoring of fish assemblages in Tennessee Valley reservoirs. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, 11(3/4): 263-274.
- [ 8 ] Uzarski D G, Burton T M, Cooper M J, Ingram J W, Timmermans S T A. Fish habitat use within and across wetland classes in coastal wetlands of the five Great Lakes; development of a fish-based index of biotic integrity. *Journal of Great Lakes Research*, 2005, 31(S1): 171-187.
- [ 9 ] Gao X, Niu C J, Chen Y S, Yin X W. Spatial heterogeneity of stream environmental conditions and macroinvertebrates community in an agriculture dominated watershed and management implications for a large river (the Liao River, China) basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(4): 2375-2391.
- [ 10 ] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*, 1994, 4(4): 768-785.
- [ 11 ] 李娣, 牛志春, 王霞, 吕学研, 蔡琨, 于红霞. 长江江苏段底栖动物群落结构与多样性分析. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(1): 96-100.
- [ 12 ] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 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): 1481-1490.
- [ 13 ] 王军, 周琼, 谢从新, 李红, 阿达可白克·可尔江, 蔡林钢. 基于大型底栖动物完整性指数的新疆额尔齐斯河健康评价. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 959-966.
- [ 14 ] 盛萧, 黄小追, 徐海升. B-IBI在东江河流健康评估中的应用研究. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 48(2): 52-60.
- [ 15 ] 田鹏, 钱昶, 林佳宁, 代阳, 张远, 丁森, 高欣. 滦河流域大型底栖动物生物完整性指数健康评价. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 50-58.
- [ 16 ] 相华, 郭伟, 谭璐, 贾丽, 孟云飞, 李庆南, 殷旭旺. 济南流域大型底栖动物群落生态分布及时空格局. *河北渔业*, 2018, (6): 30-33.
- [ 17 ] 林罗敏, 官昭瑛, 郑训皓, 林叔忠, 王质军, 陈刚, 韦桂峰. 流溪河底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 2077-2084.
- [ 18 ] 杨恕, 王婷婷. 中亚水资源争议及其对国家关系的影响. *兰州大学学报: 社会科学版*, 2010, 38(5): 52-59.
- [ 19 ] 于帅, 贾娜尔·阿汗, 张振兴, 李昆, 孙东东, 杨海军. 新疆伊犁河不同生境大型底栖动物群落及其影响因素. *水生生物学报*, 2017, 41(5): 1062-1070.
- [ 20 ] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 牛建功, 蔡林钢, 李红. 新疆伊犁河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价. *水生态学杂志*, 2015, 36(6): 29-38.
- [ 21 ] 刘春池, 牛建功, 蔡林钢, 张人铭. 伊犁河流域鱼类生物完整性指数构建初探. *淡水渔业*, 2017, 47(4): 15-22.
- [ 22 ] 任慕莲. 伊犁河鱼类. *水产学杂志*, 1998, 11(1): 7-17.
- [ 23 ] 孙慧兰, 李卫红, 陈亚鹏, 徐长春. 新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2010, 30(4): 887-894.
- [ 24 ] 刘月英, 张文珍, 王跃先. *中国经济动物志-淡水软体动物*. 北京: 科学出版社, 1979.
- [ 25 ] Morse J C, Yang L, Tian L. *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [ 26 ] 王俊才, 王新华. *中国北方摇蚊幼虫*. 北京: 中国言实出版社, 2011: 1-269.
- [ 27 ] 何雪宝. 西藏和四条大型河流水栖寡毛类区系研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2011.
- [ 28 ] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. *底栖动物与河流生态评价*. 北京: 清华大学出版社, 2010: 106-167.
- [ 29 ] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 唐振华, 赵凤霞. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 279-284.
- [ 30 ] 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. *生态学报*, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [ 31 ] 赵瑞, 高欣, 丁森, 张远, 渠晓东, 刘思思. 辽河流域大型底栖动物耐污值. *生态学报*, 2015, 35(14): 4797-4809.
- [ 32 ] Kane D D, Gordon S I, Munawar M, Charlton M N, Culver D A. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1234-1247.

- [33] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, Fulk F A, Cormier S M. Development and evaluation of the Lake Macroinvertebrate Integrity Index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 311-333.
- [34] Cui W Y, Guo S Y, Meng X Z, Kong F Q. Application of adapted Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) for river ecosystem health assessment in Zhanghe River Watershed, China. *Polish Journal of Ecology*, 2019, 66(4): 407-415.
- [35] Schmidt S I, König-Rinke M, Kornek K, Winkelmann C, Wetzel M A, Koop J H, Benndorf J. Finding appropriate reference sites in large-scale aquatic field experiments. *Aquatic Ecology*, 2009, 43(1): 169-179.
- [36] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, Frydenborg R, McCarron E, White J S, Bastian M L. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [37] Rawer-Jost C, Zenker A, Böhmer J. Reference conditions of German stream types analysed and revised with macroinvertebrate fauna. *Limnologica*, 2004, 34(4): 390-397.
- [38] 刘春彤, 曹升乐, 杨裕恒, 李锡铜. 基于底栖动物完整性指数的小清河健康评价. *人民黄河*, 2018, 40(5): 83-88.
- [39] 周建勤, 朱金兆, 武红旗. 伊犁喀什河流域生态景观格局分析. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(1): 113-115.
- [40] 刘志兴, 徐俊荣, 李梅英, 史志文. 新疆巩乃斯河水化学分析. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 23-28.
- [41] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 马淑芹, 张远, 殷旭旺. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 410-417.
- [42] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [43] Fore L S, Karr J R, Wisseman R W. Assessing invertebrate responses to human activities: evaluating alternative approaches. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 212-231.
- [44] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. 2nd ed. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [45] Pinto B C T, Araújo F G. Assessing of biotic integrity of the fish community in a heavily impacted segment of a tropical river in Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2007, 50(3): 489-502.
- [46] Marciano F T, Chaudhry F H, Ribeiro M C L B. Evaluation of the index of biotic integrity in the Sorocaba River Basin (Brazil, SP) based on fish communities. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2004, 16(3): 225-237.
- [47] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 吴东浩, 张咏, 王备新. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 74-82.
- [48] 殷旭旺, 李庆南, 朱美桦, 宋佳, 武玮, 徐宗学. 渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价. *生态学报*, 2015, 35(14): 4784-4796.
- [49] 刘明典, 陈大庆, 段辛斌, 王珂, 刘绍平. 应用鱼类生物完整性指数评价长江中上游健康状况. *长江科学院院报*, 2010, 27(2): 1-6.
- [50] 朱迪, 常剑波. 长江中游浅水湖泊生物完整性时空变化. *生态学报*, 2004, 24(12): 2761-2767.
- [51] De-La-Ossa-Carretero J A, Lane M F, Llansó R J, Dauer D M. Classification efficiency of the B-IBI comparing water body size classes in Chesapeake Bay. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 144-153.
- [52] Dolédec S, Statzner B, Silver P. Responses of freshwater biota to human disturbances: Contribution of J-NABS to developments in ecological integrity assessments. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29: 286-311.
- [53] Paller M H. Temporal variability in fish assemblages from disturbed and undisturbed streams. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 2002, 9(3): 149-158.
- [54] 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 王林, 何文祥, 龙胜兴, 杨扬. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价——以流溪河为例. *生态学报*, 2018, 38(1): 342-357.
- [55] 蔡文倩, 朱延忠, 林岩璇, 夏阳, 刘录三. 底栖生物完整性指数的构建及生物基准的确定. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2791-2799.