

刘思思,尚光霞,高欣,等.基于大型底栖动物生物完整性的流域水生态健康评价:以辽河流域为例[J].环境工程技术学报,2023,13(2):559-566.
LIU S S,SHANG G X,GAO X,et al.Water ecological health assessment based on the biological integrity of macroinvertebrate: a case from Liaohe River Basin[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 559-566.

基于大型底栖动物生物完整性的流域水生态健康评价 ——以辽河流域为例

刘思思,尚光霞,高欣,孔维静,夏会娟,丁森*

环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

摘要 大型底栖动物完整性指数(B-IBI)在国际水生态健康评价中应用广泛,但需要结合各流域生态环境特征分别构建。以辽河流域为例,以流域99个点位水生态调查数据为基础,综合运用水质和生境质量作为参照点与受损点筛选标准,通过分布范围检验、判别能力检验和冗余性检验获得B-IBI核心参数,利用比值法进行核心参数标准化,等权求和计算B-IBI得分,最终构建适用于辽河流域的B-IBI评价体系。结果表明:辽河流域大型底栖动物包含74个分类单元,以昆虫纲为主(占总分类单元数的81.1%),个体数量最优势物种为缺尾高原纹石蛾(*Hydropsyche kozhantschikovi*);经筛选获得5个参照点和6个受损点,从28个备选参数中筛选出总分类单元数、毛翅目分类单元数、端足目+软体动物分类单元数、直接收集者相对丰度、黏附者分类单元数、Pielou均匀度指数6个核心参数用于计算B-IBI;B-IBI评价发现,调查时段的数据集中,4个点位处于健康等级,15个点位为亚健康等级,25个点位为一般等级,41个点位为差等级,14个点位为极差等级,流域水生态健康整体水平较差,超过1/2河段存在大型底栖动物群落结构退化现象。检验分析发现,B-IBI对水质变化具有较好的指示作用,且能有效区分出受损河段,表明B-IBI评价体系能准确表征辽河流域水生态健康状况,建议今后管理中作为辽河流域生物评价工具。

关键词 辽河流域;大型底栖动物;水生态健康;生物完整性;底栖动物完整性指数(B-IBI)

中图分类号:X826,X522 文章编号:1674-991X(2023)02-0559-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210326

Water ecological health assessment based on the biological integrity of macroinvertebrate: a case from Liaohe River Basin

LIU Sisi, SHANG Guangxia, GAO Xin, KONG Weijing, XIA Huijuan, DING Sen*

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract The benthic index of biological integrity (B-IBI) is widely used for river ecological health assessment all over the world. However, this index should be constructed separately according to the ecological environmental characteristics of each river basin. In this study, the Liaohe River Basin was taken as an example, the data of macroinvertebrates of 99 sites in Liaohe River Basin was used to calculate to B-IBI. Water quality and habitat quality were comprehensively used as the selection criteria for reference sites and impacted sites. The distribution range test, discriminant ability test and redundancy test were used to screen the core metrics of B-IBI. The ratio method was used to standardize the core metrics and add up to calculate B-IBI. The results showed that a total of 74 taxa of macroinvertebrates were found, and the dominant taxon was Insecta (accounting for 81.1% of the total taxa). The most dominant species was *Hydropsyche kozhantschikovi*. Five reference sites and six impacted sites were obtained after screening. Six core metrics including the number of total taxa, the taxa number of Trichoptera, the taxa number of Amphipoda and Mollusca, the relative abundance of direct collectors, the number of adherent taxa, and the Pielou evenness index, were selected from 28 candidate metrics. The evaluation results of B-IBI showed that 4 sites were in health grade, 15 sites in sub-health grade, 25 sites in normal grade, 41 sites in poor grade, 14 sites in bad grade, and the whole health level of Liaohe River Basin was poor in the survey period. The macroinvertebrate community was impacted in more than half of the sampling sites. B-IBI showed a good indicating ability for the change of water quality in Liaohe River Basin, and effectively distinguish damaged sections of the river. It was

收稿日期:2021-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201003);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2020YSKY-003)

作者简介:刘思思(1987—),女,工程师,主要从事流域水生态保护研究,562299705@qq.com

* 责任作者:丁森(1982—),男,副教授,博士,主要从事流域水生态保护研究,bearnaise@163.com

suggested that B-IBI could be used as a bioassessment tool for the river basin management in future.

Key words Liaohe River Basin; macroinvertebrate; water ecological health; biological integrity; benthic index of biological integrity (B-IBI)

自 20 世纪初利用水生生物组成变化判断水环境污染程度以来^[1], 学者们已经开发出了上百种生物评价方法^[2], 其中生物完整性评价得到了广泛关注。生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)由 Karr^[3]于 1981 年提出(由 12 个反映鱼类群落特征参数构成), 之后逐渐在藻类、大型底栖动物、水生植物、鸟类等类群中得到推广应用^[4-5], 目前在世界各国都有成功的应用案例^[6-8]。IBI 本质上属于多参数生物指数, 相比于单一生物指数, IBI 所包含的生物群落特征信息更丰富, 所反映的水生态健康状况也更完整。此外, IBI 对环境综合压力具有更好的指示性能, 主要体现在对环境压力的响应类型及范围等方面^[9]。

大型底栖动物是河流生态系统的重要组成类群, 常被用于评价河流生态系统健康状况^[10-11]。我国学者已开展了很多大型底栖动物完整性评价方面的研究^[12-14], 这些工作对于区域评价而言非常必要。由于不同地区的环境压力类型以及生物区系差异较大, 所以面向特定区域或水体需要有针对性地构建不同 IBI。例如美国明尼苏达州对其辖范围内河流建立了 9 套大型底栖动物完整性指数(B-IBI), 先基于水文地貌特征进行河流分类, 而后分别针对每一类型河流构建 B-IBI^[15], 这有利于更加科学地掌握河流生态系统状况, 也是面向流域精细化管理的基础。

辽河是我国七大水系之一, 地处东北地区, 属温带半湿润半干旱季风性气候。辽河有两源, 东源称东辽河, 西源称西辽河, 两源在福德店汇合后始称辽河。辽河为其中下游地区工农业生产及人民生活用水提供了巨大支撑。辽河流域已有的关于大型底栖动物群落的研究主要集中于浑太河流域^[16-18], 该水系自 1958 年改道独立入海而与辽河不连通。此外, 浑太河水系多属山地与丘陵型河流, 而辽河为平原型河流, 二者在河流水文地貌特征及大型底栖动物群落组成上有明显差异^[19-20]。因此, 笔者基于辽河流域较为系统的野外调查数据, 开展辽河流域大型底栖动物完整性评价体系构建研究, 以期辽河流域水生态评价管理提供方法基础。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

选择以辽宁省内辽河流域为研究区, 即从福德

店至入海口的辽河干流及主要支流。数据源自 2012 年对辽河流域 99 个采样点位的野外监测。采样点位设置根据系统调查原则, 用经纬度线将研究区划分成 50 km 长度的若干网格, 每个网格中设置 1 个采样点; 同时考虑经济性和实际操作性, 采样点位分布在干流和一、二级支流上, 其中干流段 12 个, 支流段 87 个, 从东北部向西南部包括的支流为招苏台河、二道河、亮中河、寇河、清河、柴河、汎河、王河、拉马河、秀水河、养息牧河、柳河、绕阳河、东沙河、西沙河和双台子河(图 1)。

1.2 样品采集与分析方法

数据源于 2012 年 8—10 月的调查与样品采集工作, 调查内容包括水体理化因子、栖息地质量和大型底栖动物种类及生物量。其中, 水体理化因子现场测定指标包含 pH、水温(Temp)、电导率(EC)、总溶解性固体(TDS)和溶解氧(DO)浓度, 利用多功能水质分析仪(YSI Model 58)进行测定; 额外采集水样冷藏保存带回实验室, 测定氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标, 测定方法参照《水和废水监测分析方法》4 版进行。

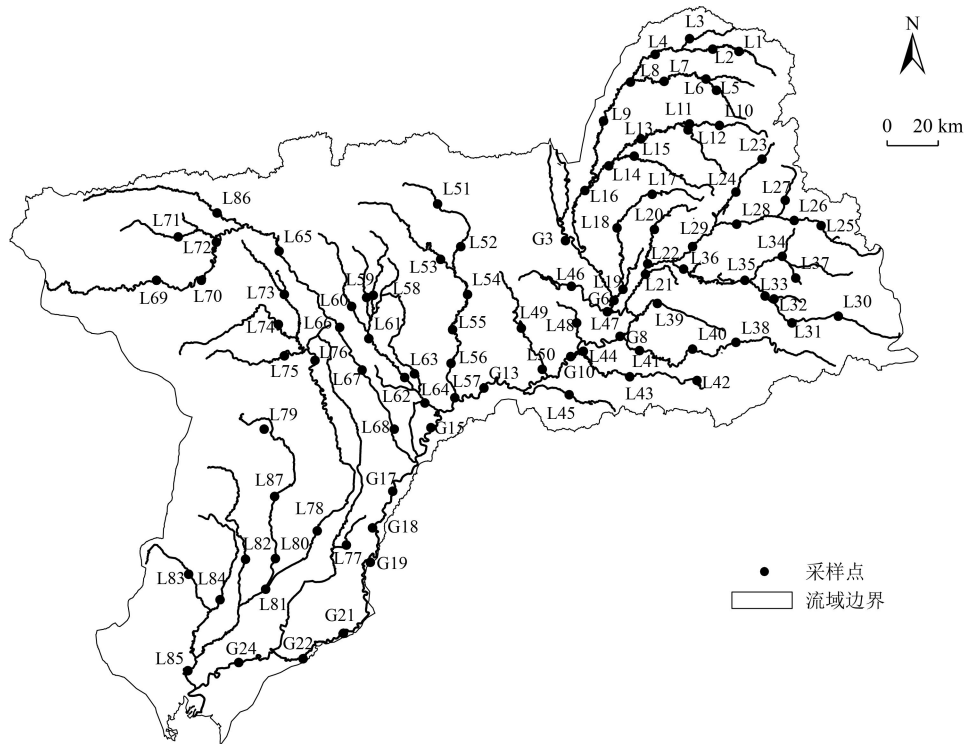
栖息地质量调查采用现场人工打分法, 参照郑丙辉等^[21]提出的方法, 评价内容包括底质状况、栖息生境复杂性、速度-深度结合状况、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、人类活动强度和土地利用类型等 10 项, 每项满分 20 分, 总分 200 分。分值越高, 表示栖息地质量状况越好。为减少主观打分造成的偏差, 所有采样点均由同一人进行打分。

利用 D 形网采集大型底栖动物定性样品, 用 1/16 m² 彼得森采泥器采集定量样品, 每个采样点采集 3 个平行样品。样品经 60 目筛网筛洗后现场挑拣, 用 95% 乙醇保存后带回实验室, 使用显微镜和解剖镜进行鉴定。所有样品鉴定至尽可能低的分类单元, 并进行功能摄食类群划分。

1.3 B-IBI 计算流程

1.3.1 参照点与受损点筛选

参考周莹等^[17]提出的参照点与受损点标准化筛选方法, 将水质等级不低于 II 类、栖息地质量总分不低于 115 分作为参照点筛选标准, 以水质等级不高于 IV 类、栖息地质量总分不高于 90 分作为受损点筛选标准。最终筛选得到 5 个参照点(L40、L52、



注: G 为干流采样点位; L 为支流采样点位。

图 1 辽河流域调查采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Liaohe River Basin

L75、L76 和 L79) 和 6 个受损点(L8、L9、L16、L19、L43 和 L72)。

1.3.2 候选参数体系构建与核心参数筛选

参考以往研究成果, 构建适用于辽河流域 B-IBI 计算的候选参数体系(表 1), 涵盖表征大型底栖动物种类组成、个体丰度、优势类群、敏感/耐污类群、功能摄食类群、生态型、多样性水平 7 类 28 项指标。

参数筛选主要包括分布范围检验、判别能力检验和参数信息冗余性检验 3 个步骤。分布范围检验主要分析候选参数的变化范围与取值, 对于变化范围过小、0 值过多的候选参数予以删除^[18]。判别能力检验主要分析候选参数对于参照点和受损点之间差异的区分能力, 利用箱线图的四分位距(interquartilerange, IQ)比较参照点和受损点 2 组箱体之间的重叠程度。若 2 组箱体间无重叠, 则 IQ=3; 若 2 组箱体部分重叠, 且中位数均不在对方箱体内, 则 IQ=2; 若 2 组箱体部分重叠, 且仅一方中位数不在对方箱体内, 则 IQ=1; 若 2 组箱体有重叠, 且中位数均在对方箱体内, 则 IQ=0。保留 IQ>1 的候选参数进行下一步筛选。参数信息冗余性检验主要分析候选参数间的重复或相关关系, 利用相关性分析对候选参数进行检验, 以 $|R|>0.75$ 为筛选标准, 若满足, 则从 2 个候

选参数中剔除 1 个。最终保留下来的为 B-IBI 计算的核心参数。

1.3.3 参数标准化与评价标准制定

核心参数标准化是统一量纲的过程。有研究发现, 利用比值法进行核心参数标准化所得的 B-IBI 评价结果可较好地判别受损水体的健康状况^[22]。本研究使用比值法对核心参数进行标准化, 标准化公式根据表 1 中核心参数对干扰的响应而定。随干扰增强而下降的核心参数, 利用式(1)进行标准化, 反之利用式(2)。

$$V'_i = V_i/V_{95\%} \quad (1)$$

$$V'_i = (V_{\max} - V_i)/(V_{\max} - V_{5\%}) \quad (2)$$

式中: V'_i 为核心参数标准化后的值; V_i 为核心参数值; $V_{95\%}$ 为核心参数 95% 分位值; $V_{5\%}$ 为核心参数 5% 分位值; V_{\max} 为核心参数最大值。标准化后的各核心参数值要求处于 0~1, 大于 1 则按 1 取值。

将标准化后的核心参数相加求和, 得到 B-IBI 得分。以参照点 B-IBI 得分的 25% 分位值作为健康等级评价标准, 对低于此标准的 B-IBI 得分范围进行四等分, 分别得到亚健康、一般、差和极差 4 个等级的评价标准。

1.4 统计方法

利用非参数检验 Mann-Whitney U 检验分析参照点与受损点之间 B-IBI 变化差异, 以 $P<0.05$ 作为

表 1 辽河流域 B-IBI 候选参数体系及其对干扰的响应
Table 1 Candidate metrics system of B-IBI in Liaohe River Basin and their response to disturbance

所属类别	参数名称	参数单位	对干扰的响应
种类组成	总分类单元数(A1)	个	下降
	EPT ¹⁾ 分类单元数(A2)	个	下降
	襁翅目分类单元数(A3)	个	下降
	蜉蝣目分类单元数(A4)	个	下降
	毛翅目分类单元数(A5)	个	下降
	端足目+软体动物分类单元数(A6)	个	下降
个体丰度	襁翅目相对丰度(A7)	%	下降
	蜉蝣目相对丰度(A8)	%	下降
	毛翅目相对丰度(A9)	%	下降
	EPT相对丰度(A10)	%	下降
	摇蚊科相对丰度(A11)	%	上升
	双翅目相对丰度(A12)	%	上升
	(端足目+软体动物)相对丰度(A13)	%	上升
寡毛类相对丰度(A14)	%	上升	
优势类群	最优势类群相对丰度(A15)	%	上升
敏感/耐污类群	敏感类群分类单元数(A16)	个	下降
	耐污类群分类单元数(A17)	个	上升
功能摄食类群	滤食者相对丰度(A18)	%	上升
	刮食者相对丰度(A19)	%	下降
	直接收集者相对丰度(A20)	%	上升
	捕食者相对丰度(A21)	%	下降
	撕食者相对丰度(A22)	%	下降
生态型	黏附者相对丰度(A23)	%	下降
	黏附者分类单元数(A24)	个	下降
多样性水平	Shannon-Wiener多样性指数(A25)		下降
	Margalef丰富度指数(A26)		下降
	Pielou均匀度指数(A27)		下降
	Simpson多样性指数(A28)		下降

1) E表示蜉蝣目(Ephemeroptera); P表示襁翅目(Plecoptera); T表示毛翅目(Trichoptera)。

差异显著性检验水平, 非参数检验在 SPSS 20.0 软件中进行。为探讨 B-IBI 对水质等级和栖息地质量的区分能力, 利用箱线图表征不同水质等级下 B-IBI 的变化情况, 以 Mann-Whitney U 检验不同水质等级下 B-IBI 变化差异显著性。

2 结果与分析

2.1 大型底栖动物群落结构组成

辽河流域大型底栖动物包含 74 个分类单元、15 543 个个体, 隶属 3 门 7 纲 16 目 38 科 62 属。种

类组成上以昆虫纲为主, 占总分类单元数的 81.1%; 其次为腹足纲, 占总分类单元数的 5.4%; 甲壳纲、瓣鳃纲、寡毛纲和蛭纲采到少量种类。在个体数量方面, 优势物种为缺尾高原纹石蛾 (*Hydropsyche kozhantschikovi*), 共采集到 2 812 个个体(占总个体数的 18.1%); 其次为钩虾属 (*Gammarus sp.*) 1 种(采集到 1 984 个个体, 占总个体数的 12.8%) 和摇蚊属 (*Chironomus sp.*) 1 种(采集到 1 923 个个体, 占总个体数的 12.4%), 二者在辽河流域分布较广, 出现在超过 75% 的点位。斑鱼蛉属 (*Neochauliodes sp.*)、*Davidius moiwanus*、中国圆田螺 (*Cipangopaludina chinensis*) 仅出现在个别点位且仅各采集到 1 个个体。此外, 发现敏感种类(耐污值 ≤ 3) 16 种(占比为 21.6%), 主要为蜉蝣目物种, 而耐污种类(耐污值 ≥ 7) 有 18 种(占总分类单元数的 24.3%)。

2.2 B-IBI 核心参数筛选

2.2.1 分布范围检验

通过对 28 个候选参数最小值、最大值、平均数、中位数等进行分析, 发现 A3、A7 和 A22 这 3 个参数 0 值较多, 而 A13、A14、A19 和 A21 的数值分布范围较窄, 均不适于后续分析, 故剔除上述 7 个候选参数。

2.2.2 判别能力检验

对剩余的 21 个候选参数箱体图进行检验, A1、A2、A4~A6、A15、A20、A24~A28 这 12 个参数通过检验 ($IQ > 2$, 图 2), 将用于下一步信息冗余性检验。

2.2.3 信息冗余性检验

对上述 12 个候选参数进行 Spearman 相关性分析(表 2), 发现 A1 分别与 A2、A4、A25、A26 存在显著强相关关系, A1 是构建 IBI 体系的常用指标, 故予以保留, 剔除 A2、A4、A25 和 A26 这 4 个参数。A15、A27 和 A28 这 3 个参数之间也呈显著强相关关系, A27 表征底栖动物群落均匀度特征, 含有群落优势物种丰度信息, 故剔除 A15 和 A28 而保留 A27。最终保留 6 个核心参数, 即 A1、A5、A6、A20、A24 和 A27, 用于 B-IBI 计算。

2.3 B-IBI 评价标准与评价结果

2.3.1 核心参数标准化

对核心参数进行标准化以降低参数极值对结果的干扰。A1、A5、A6、A24 和 A27 为随干扰增强而减小的参数, 利用式(1)进行标准化; A20 为随干扰增强而增加的参数, 利用式(2)进行标准化(表 3)。

2.3.2 评价标准制定

将标准化后各核心参数加和, 即得到 B-IBI。以 4.71、3.61、2.50、1.40 作为分级阈值, 将 B-IBI 划分

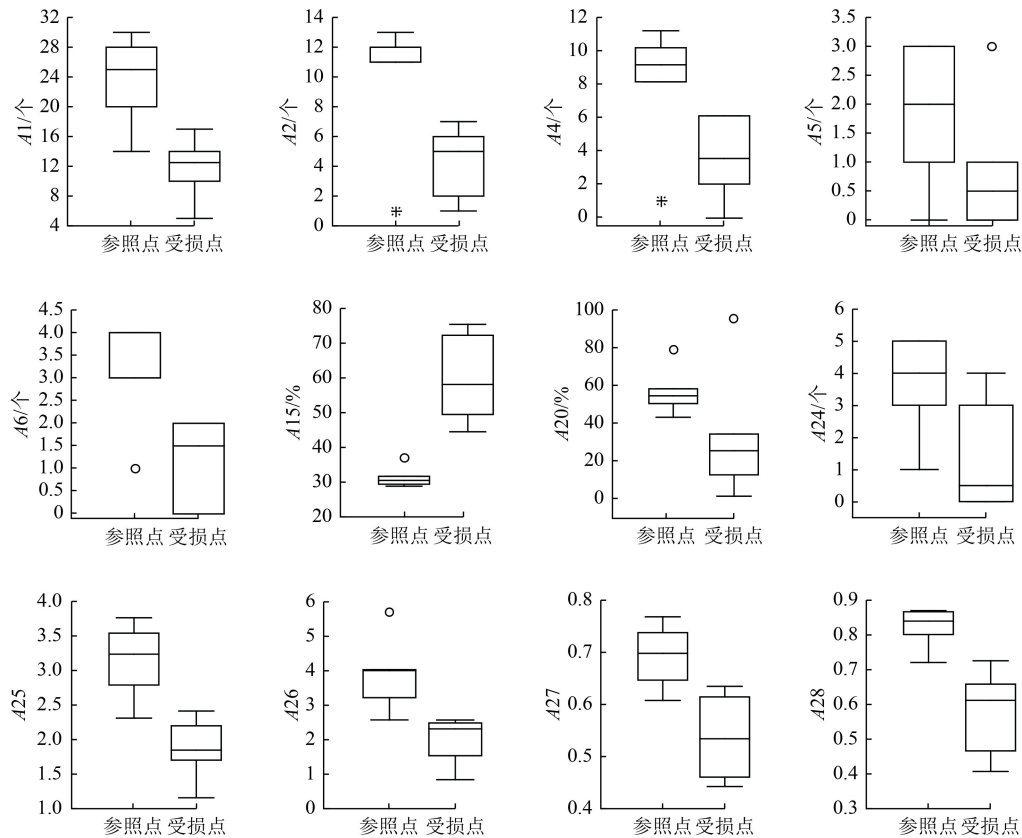


图 2 不同参数的参照点与受损点箱体图

Fig.2 Box-plots of different candidate metrics between reference sites and impacted sites

表 2 候选参数的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of candidate metrics

参数	A1	A2	A4	A5	A6	A15	A20	A24	A25	A26	A27	A28
A1	1.000											
A2	0.801**	1.000										
A4	0.753**	0.944**	1.000									
A5	0.525**	0.645**	0.357**	1.000								
A6	0.499**	0.161	0.152	0.104	1.000							
A15	-0.543**	-0.533**	-0.546**	-0.244*	-0.151	1.000						
A20	-0.154	-0.092	0.041	-0.356**	0.045	0.126	1.000					
A24	0.283**	0.382**	0.198*	0.623**	0.033	-0.004	-0.337**	1.000				
A25	0.751**	0.688**	0.689**	0.353**	0.273**	-0.925**	-0.123	0.049	1.000			
A26	0.924**	0.775**	0.756**	0.444**	0.434**	-0.692**	-0.122	0.109	0.883**	1.000		
A27	0.290**	0.341**	0.363**	0.125	0.017	-0.881**	-0.076	-0.093	0.801**	0.518**	1.000	
A28	0.584**	0.546**	0.547**	0.279**	0.186	-0.970**	-0.15	0.028	0.944**	0.740**	0.917**	1.000

注: **表示在0.01水平(双侧)显著相关; *表示在0.05水平(双侧)显著相关。

为健康、亚健康、一般、差和极差 5 个等级(表 4)。

2.3.3 评价结果

B-IBI 评价结果表明, 调查时段辽河流域处于健康等级的点位有 4 个, 亚健康等级的点位有 15 个, 一般等级的点位有 25 个, 差等级的点位有 41 个, 极差等级的点位有 14 个。健康等级点位均处于支流,

包括秀水河上游的 L53, 东沙河上游的 L79 和 L87、柴河水库下游的 L41; 亚健康等级点位集中在支流及 2 个干流河段, 包括清河、柴河、寇河、柳河、绕阳河等支流上游、柴河汇口与养息牧河汇口的干流段; 差和极差等级点位主要分布在辽河干流中下游河段以及招苏台河、条子河、二道河、清河、拉马河、万

表 3 核心参数的标准化公式
Table 3 Standardized formula of core metrics

核心参数	标准化公式
A1	A1/21
A5	A5/3
A6	A6/4
A20	(1-A20)/(1-0.08)
A24	A24/279
A27	A27/0.91

表 4 辽河流域 B-IBI 评价标准

Table 4 Criteria for B-IBI in Liaohe River Basin

健康	亚健康	一般	差	极差
≥4.71	3.61~4.71	2.50~3.61	1.40~2.50	<1.40

泉河、养息牧河、柳河、铁牛河、绕阳河等支流部分河段,该类河段附近工农业生产密集,加之周边农村生活污水排放收集率低,导致河流水质较差,故 B-IBI 整体偏低。对比参照点与受损点 B-IBI 可见,参照点 B-IBI 高于受损点(图 3),同时非参数检验也表明 2 组点位 B-IBI 存在显著差异($Z=-2.556, P=0.011$),表明 2 组点位的生物状况基本上可以区分开来。

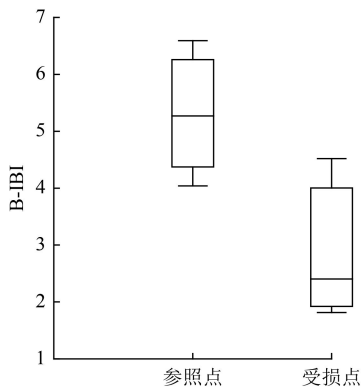


图 3 参照点与受损点 B-IBI 箱线图

Fig.3 Box-plots of B-IBI score between reference sites and impacted sites

2.4 B-IBI 与水质等级的关系

比较不同水质等级下的 B-IBI,发现随着水质等级的降低, B-IBI 呈逐渐降低趋势(图 4)。非参数检验结果表明, II 类水质等级下 B-IBI 显著高于 IV 类、V 类和劣 V 类水质等级 ($P<0.05$), III 类水质等级下 B-IBI 显著高于 IV 类和 V 类水质等级,而 IV 类、V 类和劣 V 类水质等级之间 B-IBI 没有显著差异(表 5),说明 B-IBI 能够较好地反映出水质等级变化。

在不同 B-IBI 评价等级下,栖息地质量评分没有明显变化趋势(图 5)。非参数检验结果也表明,各等级之间栖息地质量评分无显著性差异。不同点位栖

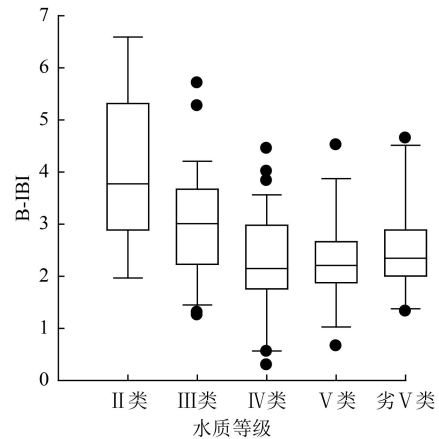


图 4 不同水质等级下 B-IBI 箱线图

Fig.4 Box-plots of B-IBI score in different water quality levels

表 5 Mann-Whitney U 检验的秩和值(Z 值)

Table 5 Rank sum (Z value) of Mann-Whitney U test

水质类别	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类
II 类		-1.805	-3.157	-2.772	-2.286
III 类	0.071*		-2.628	-2.028	-1.260
IV 类	0.002*	0.009*		-0.111	-0.819
V 类	0.006*	0.043*	0.912		-0.703
劣 V 类	0.022*	0.208	0.413	0.482	

注: *表示 $P<0.05$ 。

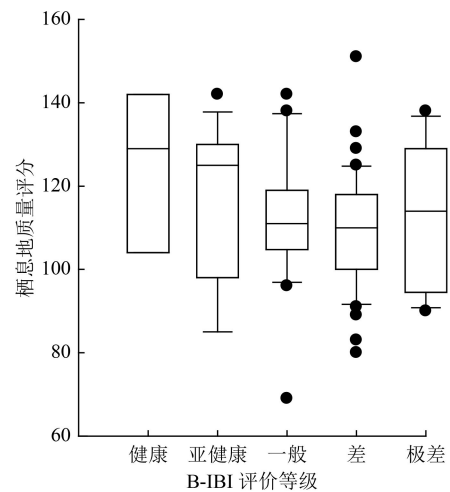


图 5 不同 B-IBI 评价等级下栖息地质量评分箱线图

Fig.5 Box-plots of habitat quality scores in different B-IBI assessment levels

息地质量评分较低,分值差异较小,说明辽河流域栖息地质量普遍出现较大程度的退化,故 B-IBI 对栖息地质量的区分能力不强。

3 讨论

参照点的选取直接影响 B-IBI 的评价结果。国内外大型底栖动物完整性评价研究中关注较多的参

照点选取方法包括先验法和后验法^[23]。先验法是在开展调查前借助专家已有经验来确定哪些点位可作为参照点,后验法则是基于获得的调查数据来判断哪些点位可作为参照点。后验法也是研究中使用较多的方法,主要依据水质、栖息地、土地利用等一种或多种环境要素进行参照点筛选,其中渠晓东等^[18]提出利用水质等级结合栖息地评分的筛选方法在我国研究中应用较多。Ruaro 等^[23]也指出,水质和土地利用在参照点筛选中具有较好的可信度。参照点还可依据生物群落结构特征进行筛选,常用多样性指数、生物指数等来确定受干扰程度最低的点位,该方法适用于环境数据有限的条件下^[24-25]。本研究借鉴渠晓东等^[18]提出的方法,筛选的参照点能客观反映辽河流域真实的水生态环境状况。

选取参照点的数量越多,所能反映的生物群落时空信息就越多,理论上制定的评价标准就越准确^[3]。参照点选取较多的有 55 个之多^[26],较少的仅选用 3 个^[27]。这与不同研究中点位数量和区域人类干扰程度有关,调查点位数量越多则选取更多参照点的机会越大,而区域干扰越普遍则能选取到的参照点数量越少。我国河流大型底栖动物完整性评价研究中对参照点数量并无明确要求,考虑到辽河流域基本处于平原,人类活动密集,工农业生产集中,流域内无干扰或低干扰程度河段数量不多,故本研究筛选得到的参照点数量仅 5 个,这对于流域受干扰严重的大型河流来说能满足 B-IBI 计算的要求。

从对辽河流域 2012 年野外调查数据 B-IBI 计算的验证结果来看,一般和差等级河段数量较多,主要分布在辽河干流中下游、招苏台河、条子河、二道河、清河、柳河、饶阳河等下游河段,而健康和亚健康等级河段主要分布于凡河、秀水河、饶阳河、东沙河等上游河段,这真实反映了辽河保护区建立初期(于 2010 年建立)辽河流域水生态健康状况。姜永伟等^[28]利用 2018 年辽河流域 31 个点位大型底栖动物监测数据计算了 B-IBI,评价结果显示,辽河干流及主要支流均处于一般及以上等级。表明辽河保护区建立以及蒲河、清河等支流生态修复工程实施以来,辽河流域整体水质明显改善,水生态健康状态逐步提升,同时也说明与水质改善相比,水生态系统恢复常会存在时滞效应。

从图 4 可以看出, B-IBI 对水质等级有较好的区分能力,即 II 类、III 类、IV 类及以下水质等级之间的 B-IBI 变化差异显著,表明本研究构建的 B-IBI 对辽河流域水质变化有较好的指示能力。相反,随着 B-IBI 的降低,物理生境评分没有相似变化规律,表

明二者之间的关联性不强。辽河流域作为东北地区老工业与粮食生产基地,河流物理生境退化普遍^[29],干流及一、二级支流间生境匀质化程度较高,这是造成本研究中 B-IBI 对物理生境评分敏感性较差的原因之一。此外,本研究中的生境评价方法起源于美国快速生物评价草案并经调整使用^[21],从指标体系来看更适合于中小型河流,这可能是导致生境评分与 B-IBI 关联性不强的原因。

4 结论

(1) 筛选了 5 个参照点和 6 个受损点, 依此建立了包含总分类单元数、毛翅目分类单元数、端足目+软体动物分类单元数、直接收集者相对丰度、黏附者分类单元数及 Pielou 均匀度指数 6 个核心参数的辽河流域 B-IBI 评价指标体系。

(2) B-IBI 评价结果显示, 2012 年辽河流域健康等级河段占比为 4%, 亚健康等级为 15.2%、一般等级为 25.3%、差等级为 41.4%、极差等级为 14.1%, 辽河保护区建立初期辽河流域整体健康水平较差, 超过半数河段存在大型底栖动物群落结构退化现象。

(3) 相比于物理生境, 构建的 B-IBI 对辽河流域水质变化的指示能力较强, 可区分 II 类、III 类、IV 类及以下不同等级的水质变化, 在流域管理中可作为一种生物评价工具。

参考文献

- [1] KOLKOWITZ R, MARSSON M. Ökologie der tierischen saprobien. beiträge zur lehre von der biologischen gewässerbeurteilung[J]. Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1909, 2(1/2): 126-152.
- [2] BIRK S, BONNE W, BORJA A, et al. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 31-41.
- [3] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [4] RUARO R, GUBIANI É A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 105-110.
- [5] 董婧, 卢少奇, 伍娟丽, 等. 基于微生物生物完整性指数的北京市城市河道生态系统健康评价[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1411-1419.
DONG J, LU S Q, WU J L, et al. Evaluation of urban river ecosystem health in Beijing based on the microbial index of biotic integrity[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1411-1419.
- [6] HERING D, FELD C K, MOOG O, et al. Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives[J]. *Hydrobiologia*, 2006,

- 566(1): 311-324.
- [7] MOYA N, HUGHES R M, DOMÍNGUEZ E, et al. Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(3): 840-847.
- [8] 袁哲, 许秋瑾, 宋永会, 等. 辽宁省辽河流域水生生态完整性恢复的实践与启示[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 48-55.
YUAN Z, XU Q J, SONG Y H, et al. Practice and enlightenment of water ecological integrity restoration in Liaohe River Basin of Liaoning Province[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 48-55.
- [9] 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(6): 707-710.
WANG B X, YANG L F, LIU Z W. Index of biological integrity and its application in health assessment of aquatic ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(6): 707-710.
- [10] LU K L, WU H T, XUE Z S, et al. Development of a multimetric index based on aquatic invertebrates to assess floodplain wetland condition[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 141-153.
- [11] MORSE J C, BAE Y J, MUNKHJARGAL G, et al. Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in East Asia[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(1): 33-42.
- [12] 王硕, 张建云, 林育青, 等. 基于大型底栖动物多度量指数的河流多尺度评价[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 284-292.
WANG S, ZHANG J Y, LIN Y Q, et al. Multi-scale evaluation of river based on the macroinvertebrates multi-metric index[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(2): 284-292.
- [13] 欧阳莉莉, 韩迁, 何鑫, 等. 岷江成都段水生生态健康评价研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(7): 1654-1662.
OUYANG L L, HAN Q, HE X, et al. Health assessment of Min River in Chengdu section[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(7): 1654-1662.
- [14] 吴家乐, 甘磊, 刘素霞, 等. 修复对湖北洋澜湖富营养化与生态状况的影响: 基于大型无脊椎底栖动物的评价[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1547-1558.
WU J L, GAN L, LIU S X, et al. Effect of restoration on the eutrophication and ecological status of Lake Yanglan (Hubei Province): assessment based on macroinvertebrates[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1547-1558.
- [15] MPCA. Development of a macroinvertebrate-based index of biological integrity for assessment of Minnesota's rivers and streams[R]. St. Paul: Minnesota Pollution Control Agency, Environmental Analysis and Outcomes Division, 2014.
- [16] 张宇航, 渠晓东, 王少明, 等. 浑河流域底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1374-1386.
ZHANG Y H, QU X D, WANG S M, et al. River health assessment of Hun River Basin based on benthic index of biological integrity[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1374-1386.
- [17] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 等. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 410-417.
ZHOU Y, QU X D, ZHAO R, et al. Standardized methods for selecting reference and impaired sites to evaluate river health[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(4): 410-417.
- [18] 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[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
QU X D, LIU Z G, ZHANG Y. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [19] 孔维静, 张远, 侯利萍, 等. 辽河流域水生生态功能区[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [20] 刘志刚, 渠晓东, 张远, 等. 浑河主要污染物对大型底栖动物空间分布的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(2): 116-123.
LIU Z G, QU X D, ZHANG Y, et al. Effects of main contaminations on the spatial distribution of macroinvertebrates in the Hun River[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(2): 116-123.
- [21] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936.
ZHENG B H, ZHANG Y, LI Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 928-936.
- [22] 慕林青, 张海萍, 赵树旗, 等. 永定河底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 697-707.
MU L Q, ZHANG H P, ZHAO S Q, et al. River health assessment of Yongding River based on benthic integrated biotic index[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 697-707.
- [23] RUARO R, GUBIANI É A, HUGHES R M, et al. Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105862.
- [24] 曹家乐, 张亚辉, 张瑾, 等. 国内外水生生态健康评价研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1402-1410.
CAO J L, ZHANG Y H, ZHANG J, et al. Research progress of water ecological health assessment at home and abroad[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1402-1410.
- [25] 熊梅君, 李秋华, 陈倩, 等. 基于GIS应用P-IBI评价贵州高原百花水库水生生态系统健康[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3093-3101.
XIONG M J, LI Q H, CHEN Q, et al. Evaluation of water ecosystem health of Baihua Reservoir in Guizhou based on GIS and P-IBI[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10): 3093-3101.
- [26] 陈凯, 于海燕, 张汲伟, 等. 基于底栖动物预测模型构建生物完整性指数评价河流健康[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1993-2002.
CHEN K, YU H Y, ZHANG J W, et al. Predictive model based multimetric index of macroinvertebrates for river health assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1993-2002.
- [27] 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 等. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价: 以流溪河为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 342-357.
LIU S L, WANG S, CUI Y D, et al. Ecological assessment of a subtropical urban river based on the Benthic-Index of Biotic Integrity: Liuxi River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 342-357.
- [28] 姜永伟, 卢雁, 问青春, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的辽河流域水生生态健康评价[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(6): 103-109.
JIANG Y W, LU Y, WEN Q C, et al. Water ecological health assessment of Liaohe River Basin based on the integrity index of benthic macroinvertebrates[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 103-109.
- [29] 陈影. 辽河保护区河岸带自然生境恢复现状评价[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2021. ◇