

doi:10.11988/ckyyb.20241243

2026,43(2):88-96

基于底栖动物完整性指数的张掖市河流 水生态健康评价

李航^{1,2}, 郭伟杰^{1,2}, 刘晗^{1,2}, 李鲁丹^{1,2}, 贡丹丹^{1,2}, 梁木^{1,2}, 乔强龙^{1,2}, 杜琦^{1,2}, 赵伟华^{1,2}

(1.长江科学院 流域水环境研究所,武汉 430010;

2.长江科学院 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,武汉 430010)

摘要:张掖市作为中国西北地区的重要生态屏障,其河流水生态健康对区域生态安全具有至关重要的作用。为全面掌握张掖市境内河流在不同水期的水生态健康状况,基于 2023 年张掖市境内 7 条河流全河段 136 个采样点的底栖动物调查数据,构建了张掖市境内河流底栖动物生物完整性评价指标体系。调查涵盖了丰水期和枯水期,共鉴定出底栖动物 5 门 8 纲 17 目 51 科 159 种。研究表明,节肢动物在两个水期中均为绝对优势类群,特别是四节蜉属(*Baetis* sp.)和直突摇蚊属(*Orthocladius* sp.)。底栖动物生物完整性指数(B-IBI)评价结果显示,各河流整体水生态健康状况较好,不同水期之间的健康状况差异不大,枯水期和丰水期的健康点位占比分别为 42.39% 和 42.71%。研究结果可为张掖市生态保护与管理提供科学依据。

关键词:底栖动物;生物完整性指数;健康评价;群落结构;张掖市

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)02-0088-09

Assessment of Aquatic Ecological Health of Rivers in Zhangye City Based on Benthic Macroinvertebrate Index of Biological Integrity

LI Hang^{1,2}, GUO Wei-jie^{1,2}, LIU Han^{1,2}, LI Lu-dan^{1,2}, GONG Dan-dan^{1,2}, LIANG Mu^{1,2},

QIAO Qiang-long^{1,2}, DU Qi^{1,2}, ZHAO Wei-hua^{1,2}

(1.Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Hubei Provincial Key Laboratory of River Basin Water Resources and Eco-environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] As a vital ecological barrier in Northwest China, the river ecosystem health of Zhangye City is of critical importance to regional ecological security. This study aims to provide a comprehensive understanding of the aquatic ecological health of rivers in Zhangye City across different seasons. [Methods] A survey of benthic macroinvertebrates was conducted in 2023 at 136 sampling sites along seven rivers in Zhangye City. The benthic macroinvertebrate-based index of biological integrity (B-IBI) system for rivers in Zhangye City was constructed by selecting 23 candidate biological parameters from five categories that increased in sensitivity with the level of disturbance. B-IBI values of each river were then calculated for different seasons to evaluate their ecological health. [Results] A total of 159 benthic species were identified across both the wet and dry seasons. These species belonged to 5 phyla, 8 classes, 17 orders, and 51 families. Arthropods were the dominant taxa in both seasons, particularly *Baetis* sp. and *Orthocladius* sp. The analysis revealed significant differences in benthic macroinvertebrate communities between the dry and wet seasons across rivers in Zhangye City ($r=0.09, p<0.05$). The B-IBI results indicated that the overall ecological health of the rivers was satisfactory, with minimal seasonal variation. The proportion of sites classified as “healthy” during the dry and wet seasons was 42.39% and 42.71%, respectively. [Conclusion] Despite the currently favorable state of aquatic ecological health in Zhangye City, ecological degra-

收稿日期:2024-12-03;修回日期:2025-06-16;接受日期:2025-06-17

作者简介:李航(1997-),女,湖北潜江人,助理工程师,硕士,主要从事水环境保护与水生生态修复研究。E-mail:catherineelh@163.com

通信作者:赵伟华(1982-),男,陕西扶风人,正高级工程师,博士,主要从事流域水环境保护与治理研究。E-mail:zwh820305zwh@163.com

dation remains a risk due to ongoing climate change and human activities. To enhance the stability and health of the river ecosystem, it is necessary to strengthen monitoring and management efforts, optimize water resource allocation, and conduct further research on the long-term adaptability of benthic macroinvertebrate communities to extreme weather events and human activities.

Key words: benthic macroinvertebrates; index of biological integrity; health assessment; community structure; Zhangye City

0 引言

河流是地表水资源的重要载体,参与地球水循环,在维持生态、环境和社会服务功能方面发挥着至关重要的作用^[1-2]。对河流水生态环境进行评价可以掌握流域内河流的健康状况,进而为水资源的管理与保护提供科学依据。目前,生物完整性指数法、预测模型法、综合评价法等是国内外应用较多的水生态健康评价方法^[3]。其中,基于水生生物群落信息建立的生物完整性指数(Index of Biological Integrity, IBI)综合了多类型评价指数的信息,具有全面、敏感、可靠等优点,已成为河流水生态环境评价的有效工具^[4-5]。

水生生物是水生态系统的重要组成部分,参与物质转换和能量流动过程,维持着水生态系统的稳定与平衡^[6]。水生生物的保护一直是水生态管理关注的热点^[7],大型底栖无脊椎动物(以下简称底栖动物)作为水生态系统食物链的重要组成部分,全部或整个生命周期都生活在水体底部和沉积物中^[8]。它们体积小、迁移能力有限、生命周期长、对环境变化高度敏感,其多样性、物种组成和群落结构特征等常被作为评价水生态环境健康的重要指标^[9-10]。我国学者基于底栖动物构建的完整性指数指标体系已成功应用于河湖生态环境健康评价,姚琦等^[11]通过对不同评价方法结果的对比分析,比较了东洞庭湖不同季节的水生态健康状况;贺瑶等^[10]通过构建对延河流域底栖动物完整性指数(Benthic Macroinvertebrate Index of Biological Integrity, B-IBI),探究了流域内不同地貌单元的底栖动物生物完整性差异及其影响因素;张宇航等^[4]分别构建了山区、平原区河流 B-IBI 指数,评估了北京市五大水系的生态状况。

张掖市地处甘肃西部,河西走廊中段,黑河流域中上游,南依祁连山、北临巴丹吉林沙漠,是国家重要的生态屏障。张掖市境内的河流均为内陆河,由东至西分别属于石羊河、黑河、疏勒河三大水系,均发源于祁连山北麓及前山地带,流向多为由南向北

流入河西走廊区域。近年来,随着张掖市工业化、城镇化和产业化进程的推进,全市经济社会呈现出持续快速发展的趋势,在经济社会快速发展进程中,水环境和水生态健康也面临严峻的风险形势。目前,针对张掖市境内河流水生态环境健康的研究较少,且基于底栖动物完整性指数的水生态环境评价尚处于空白,滞后于现阶段流域社会经济发展的实际需求。基于此,本研究旨在构建适用于张掖市境内河流的底栖动物完整性指数指标体系,评价区域内不同季节各河流的健康状况,为张掖市水环境治理、水生态保护与修复、水资源利用与管理等方面提供支撑与参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

张掖市位于河西走廊中段,地处 97°20'E—102°12'E, 37°28'N—39°57'N,东靠武威、金昌,西邻嘉峪关、酒泉,南与青海省接壤,北和内蒙古毗邻,东西跨度 4°52',长 210~465 km,南北跨度 2°29',宽 30~148 km^[12]。地势东南高、西北低,中间为低平的狭长平原走廊,地处欧亚大陆腹地,气候要素复杂多变,时空分布不均,属半干旱和干旱温带大陆性气候,春秋季风沙大、夏季清凉、冬季干燥寒冷^[12]。全市境内可供开发利用的河流 26 条,年均径流量 26.5 亿 m³,多年平均可利用水资源总量 25.84 亿 m³,人均占有可利用水资源 1 250 m³,只有全国平均水平的一半,是典型的资源型缺水地区。本研究的范围为张掖市境内黑河流域和石羊河流域河流,包括黑河、山丹河、梨园河、北大河、东大河、西大河和西营河共 7 条河流。

1.2 样品采集与处理

综合考虑水文特征、河道地形、生境类型、人口聚集程度等因素,同时兼顾采样的便利性,共设置了 136 个采样点(图 1),其中黑河 39 个、山丹河 25 个、梨园河 27 个、北大河 18 个、东大河 6 个、西大河 11 个、西营河 10 个采样点,并于 2023 年 3 月(枯水期)和 2023 年 6 月(丰水期)完成各河流底栖动物样品

的采集。在监测期间,河流中部分监测点位处于冰封或断流状态,枯水期共采集 92 个样品,丰水期共采集 96 个样品。

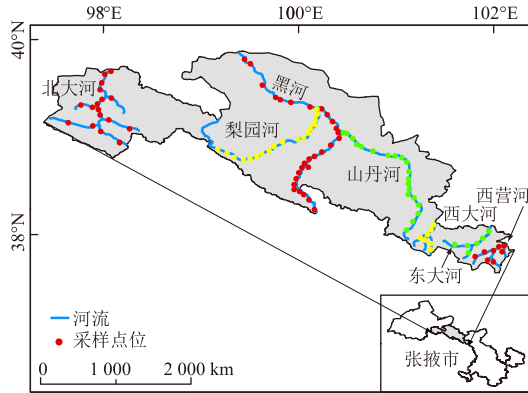


图 1 张掖市境内河流调查样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in rivers within Zhangye City

底栖动物样品采集时,将筛网孔径为 420 μm 、网口宽度为 20 cm 的手持 D 型网放置于河床,在一定河段长度范围内搅动采样框内的底质,并将框内石头上的底栖动物冲刷进网内。在现场进行初步冲洗,随后将网中底质倒置于白瓷盘内进行挑拣,挑拣出的底栖动物置于 50 mL 样品瓶内保存,并加入 75% 的酒精以固定底栖动物,样品带回实验室后进行鉴定、称重和计数。

1.3 数据分析方法

本研究中,因底栖动物群落样本分布尚不能确定且样本数量较多,使用基于 Bray-Curtis 距离的非度量多维尺度分析 (Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS) 和相似性分析 (Analysis of Similarities, ANOSIM) 来探究底栖动物群落的分布特征及组间差异。NMDS 适用于处理多样本、物种数量多且存在配对距离缺失的数据,对数据分布形态无严格要求,能够弱化距离矩阵数值,侧重排序关系。采用 ANOSIM 分析可以通过非参数检验方法来检验样本组间的差异是否显著大于组内差异,从而判断分组是否有意义。

使用 WPS Office 和 Origin 2021 软件对底栖动物的相关数据进行统计、分析及图表绘制;使用 ArcGIS 10.8.1 绘制调查样点分布图和 B-IBI 空间分布图;使用计算软件 SPSS 26.0 进行相关性分析和 Kruskal-Wallis 检验等显著性检验。NMDS 分析和 ANOSIM 分析采用计算软件 R 4.3.2 完成。将优势度指数 $Y > 0.02$ 的底栖动物定为优势种,具体计算式为

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数 H' 计算式为

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

Margelef 多样性指数 d_m 计算式为

$$d_m = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数 J 计算式为

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (4)$$

式中: n_i 为第 i 种底栖动物的个体数; N 为所有底栖动物的个体总数; f_i 为第 i 种底栖动物出现的频率; S 为总分类单元数^[11]。

1.4 B-IBI 评价体系构建方法

1.4.1 参照点选取

原则上选择未受人类活动干扰或受人类活动干扰较小的采样点为参照点,受人类活动干扰较大的采样点为受损点^[11]。结合现场调查时各河流的实际情况,最终选取黑河 3 个采样点、山丹河 1 个采样点、梨园河 1 个采样点、北大河 2 个采样点、东大河 2 个采样点、西大河 1 个采样点、西营河 1 个采样点为参照点,其余采样点为受损点。

1.4.2 候选生物参数

参照文献[13]—文献[15]并结合张掖市各河流实际情况,选取随着干扰强度增加反应越敏感的 5 个大类别共 23 个候选生物参数进行 B-IBI 评价体系的构建,涵盖物种群落丰富度、物种个体数量占比、物种敏感性和耐污性、营养层级及小生境质量等,具体见表 1。候选生物参数选择原则是,要反映底栖动物群落对干扰的敏感性、群落的特征及其在生态系统中的功能。各生物参数的权重相同。

1.4.3 核心参数筛选

根据本研究的数据结果,分别计算各采样点 23 个生物参数值,遵循以下原则对参数进行筛选:①对于随干扰增强变化幅度过小或过大的参数都不适宜用于构建 B-IBI 指标体系;②在参照点位范围内自身变化过高的参数,这类参数无法有效区分不同环境条件下的采样点,也不适宜用于构建 B-IBI 指标体系。

对于筛选后的剩余参数,利用箱形图法分析比较参照点和受损点各个候选参数箱体四分位距 (Inter quartile, IQ),即 25%~75% 分位数范围的重叠程度,并根据箱体的重叠情况对 IQ 赋予相应的值^[16]: IQ=3,表示箱体无任何重叠;IQ=2,表示箱体有小部分重叠,但中位数都在对方箱体之外;IQ=1,表示箱体大部分重叠,但至少有一方的中位数在对方箱

表1 候选生物参数

Table 1 Candidate biological parameters for B-IBI

指标类型	编号	生物参数	对干扰的反映	参数描述
物种群落丰富度	M1	香农多样性指数 H'	下降	—
	M2	Margelef 多样性指数 d_m	下降	—
	M3	Pielou 均匀度指数 J	下降	—
	M4	总分类单元数 S	下降	底栖动物群落所有分类单元数
	M5	EPT 分类单元数	下降	3类底栖动物(E:蜉蝣目, P:襁翅目, T:毛翅目)分类单元数之和
	M6	摇蚊分类单元数	下降	底栖动物类群中摇蚊的种类数
物种个体数量占比	M7	前3位优势分类单元占比	上升	个体数量最多的3个分类单元的个体数/总个体数
	M8	颤蚓目占比	下降	颤蚓目个体数/总个体数
	M9	蜉蝣目占比	下降	蜉蝣目个体数/总个体数
	M10	襁翅目占比	下降	襁翅目个体数/总个体数
	M11	毛翅目占比	下降	毛翅目个体数/总个体数
	M12	双翅目占比	下降	双翅目个体数/总个体数
	M13	甲壳动物和软体动物占比	下降	甲壳动物和软体动物个体数之和/总个体数
	M14	优势分类单元占比	上升	个体数量最多的一个分类单元的个体数/总个体数
物种敏感性和耐污性	M15	敏感类群分类单元数	下降	底栖动物类群中敏感类群(耐污值 ≤ 3)的种类数
	M16	敏感类群分类单元占比	下降	敏感类群(耐污值 ≤ 3)分类单元数/总分类单元数
	M17	耐污类群分类单元占比	上升	耐污类群(耐污值 ≥ 7)分类单元数/总分类单元数
营养层级	M18	捕食者占比	下降	捕食者个体数/总个体数
	M19	滤食者占比	下降	滤食者个体数/总个体数
	M20	刮食者占比	下降	刮食者个体数/总个体数
	M21	收集者占比	上升	收集者个体数/总个体数
	M22	撕食者占比	上升	撕食者个体数/总个体数
小生境质量	M23	黏附者占比	上升	黏附者个体数/总个体数

体之外; $IQ=0$, 表示一方箱体在另一方箱体范围内或双方的中位数都在对方的箱体范围内, 将 $IQ \geq 2$ 的生物参数作进一步分析^[14]。

对 $IQ \geq 2$ 的生物参数进行相关性分析, 检验各项生物参数所反应信息的独立性, 根据相关系数的大小确定生物参数所反应的信息的重叠度。当两个参数之间显著相关时, 表明其所反映的信息大部分是重叠的, 则选择其中一个参数来代表两个相关参数的信息即可^[16]。

1.4.4 核心生物参数分值计算及评价标准

采用比值法统一核心生物参数的量纲, 受到干扰程度越强而生物完整性指数越高的参数, 其分值计算方法为: 以 95% 分位数为最佳期望值, 参数分值 = (最大值 - 指数值) / (最大值 - 最佳期望值); 受到干扰程度越强而生物完整性指数值越低的参数, 其分值计算方法为: 以 5% 分位数为最佳期望值, 参数分值 = 指数值 / 最佳期望值。

将各采样点中核心生物参数的分值进行相加, 即可得到各采样点的 B-IBI, 某河流的 B-IBI 以该河流各采样点的 B-IBI 的算术平均值来表示。以参照点 B-IBI 的 25% 分位数作为健康评价的标准, 大于该值则河流的状态为健康, 对该值到零点进行四等分, 分别代表河流不同的健康程度, 从高到底分别为良好、一般、较差、极差^[14-15]。

2 结果

2.1 河流底栖动物群落组成

2023 年的 3 月份和 6 月份 2 次调查共鉴定出底栖动物 159 种(属), 隶属于 5 门 8 纲 17 目 51 科。节肢动物种类数最多, 共 131 种, 占 82.39%; 其次为环节动物, 共 20 种, 占 12.58%; 软体动物、线虫动物和扁形动物均较少, 种类数分别为 6、1、1 种。丰、枯水期底栖动物各门类组成见图 2, 其中, 枯水期共鉴定出底栖动物 3 门 5 纲 12 目 24 科 77 种(属), 丰水期共鉴定出底栖动物 5 门 8 纲 16 目 48 科 138 种(属)。昆虫纲是张掖市境内河流的绝对优势类群, 各河流均有分布, 共 8 目 128 种。其中, 双翅目 73 种, 襁翅目 22 种, 蜉蝣目 12 种, 毛翅目 9 种, 蜻蜓目和鞘翅目各 4 种, 半翅目和鳞翅目各 2 种。不同水期, 黑河和山丹河底栖动物种类数均较多, 东大河和西大河枯水期种类数较少, 梨园河和北大河丰水期种类数较少。整体来看, 四节蜉属 (*Baetis* sp.) 和直突摇蚊属 (*Orthocladius* sp.) 是枯水期张掖市境内河流的优势种; 四节蜉属、多足摇蚊属 (*Polypedilum* sp.) 和直突摇蚊属是丰水期张掖市境内河流的优势种。

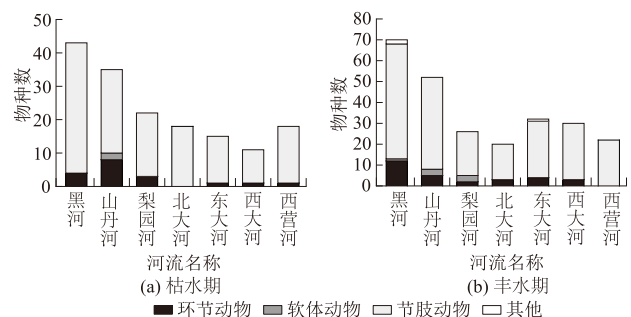


图2 丰、枯水期底栖动物种类组成

Fig.2 Species composition of macroinvertebrates during wet and dry seasons

枯水期各河流底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 1.29~1.92, 均值为 1.54; Pielou 均匀度指数范围为 0.60~0.83, 均值为 0.74; Margalef 多样性指数范围为 0.44~0.95, 均值为 0.73。丰水期各河流底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 1.18~

2.16,均值为1.71;Pielou 均匀度指数范围为0.58 ~ 0.93,均值为0.77;Margalef 多样性指数范围为0.71 ~ 1.37,均值为0.99。整体来看,除梨园河和北大河外,其余河流丰水期 shannon-Wiener 多样性指数均高于枯水期。各河流相比,东大河和西大河的 shannon-Wiener 多样性指数较高,梨园河较低。

基于 Bray-Curtis 距离的 NMDS 分析确定底栖动物群落结构组成(图 3)。其中,Stress 值用于检验 NMDS 分析结果的优劣,一般认为 $Stress < 0.2$ 时可用 NMDS 的二维点图表示,其图形有一定的解释意义。ANOSIM 分析显示,张掖市境内河流枯水期和丰水期底栖动物群落存在差异(相关系数 $r = 0.09$,显著性水平 $p < 0.05$),相比于丰水期,枯水期各河流之间底栖动物群落结构存在更大的差异($r = 0.37, p < 0.05$)。

2.2 河流 B-IBI 评价结果

根据前文所述核心生物参数筛选原则,枯水期剔除 M8、M9、M11 和 M13 后剩下共 19 个生物参数进行下一步分析,丰水期剔除 M8、M10、M11、M13、M19、M20 和 M23 后剩下共 16 个生物参数进行下一步分析。通过箱形图法分析比较参照点和受损点各个候选生物参数箱体四分位距,2023 年枯水期箱体图 $IQ \geq 2$ 的生物参数共计 4 个,包括 M1、M2、M4、M14;2023 年丰水期箱体图 $IQ \geq 2$ 的生物参数共计 5 个,包括 M1、M2、M4、M7、M18(图 4)。对 $IQ \geq 2$ 的生物参数进行相关性分析,去掉所反映信息重叠度高的生物参数。最终确定 M1、M4 和 M14 三个参数为构成枯水期 B-IBI 的核心生物参数,M1、M4、M7 和 M18 四个参数为构成丰水期 B-IBI 的核心生物参数。

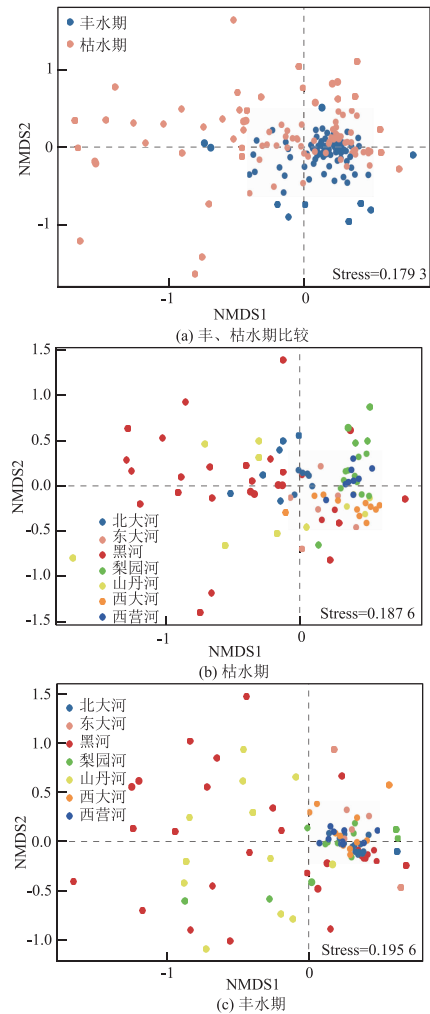


图 3 丰、枯水期底栖动物群落非度量多维尺度分析
Fig.3 Non-metric multidimensional scaling analysis of macroinvertebrate communities during wet and dry seasons

根据核心生物参数指标值在所有采样点的分布,依次计算各采样点的 B-IBI,结果表明,张掖市境

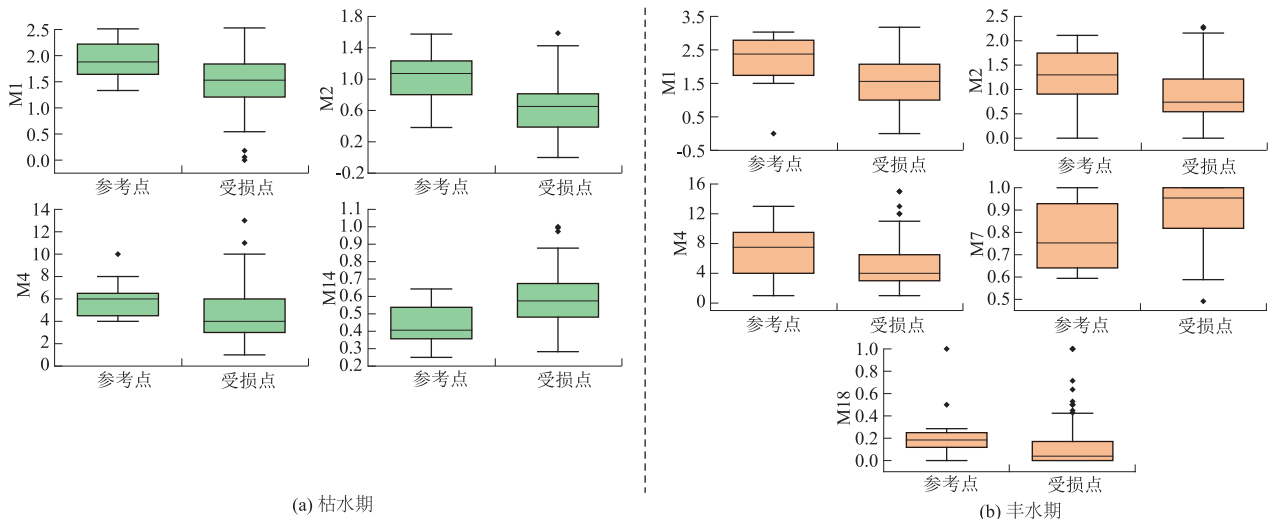


图 4 核心参数参照点和受损点箱线
Fig.4 Box plot of reference and impaired points for core parameters

内河流各点位丰、枯水期 B-IBI 范围为 0.08~4.08, 其中参照点 B-IBI 范围为 1.13~3.45。以参照点 IBI 值的 25% 分位数当作健康评价的标准, 确定出张掖市境内河流大型底栖动物生物完整性评价标准 (表 2), 评价结果如图 5 所示。

表 2 张掖市境内河流 B-IBI 评价标准

Table 2 Criteria for B-IBI assessment in rivers within Zhangye City

评价标准	健康	良好	一般	差	极差
枯水期 B-IBI	>1.99	(1.50, 1.99]	(1.00, 1.50]	[0.50, 1.00]	<0.50
丰水期 B-IBI	>1.74	(1.31, 1.74]	(0.87, 1.31]	[0.44, 0.87]	<0.44

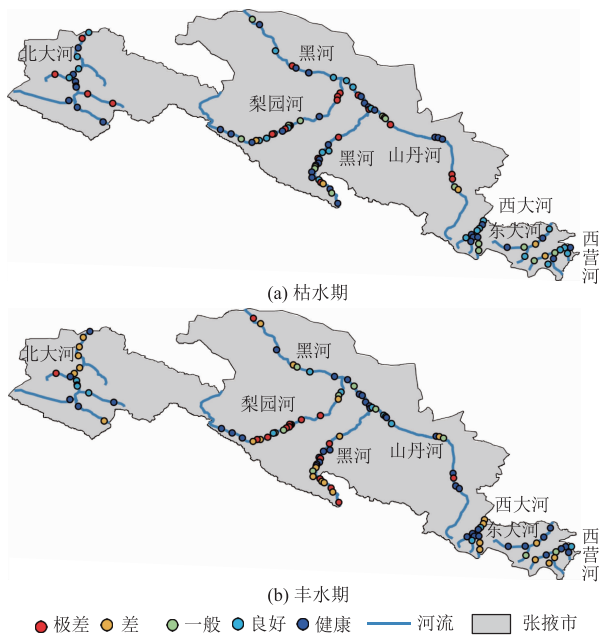


图 5 张掖市境内河流样点的 B-IBI 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of B-IBI at river sampling sites within Zhangye City

本次调查评估中, 张掖市境内河流枯水期的 B-IBI 平均值为 1.87, 7 条河流中仅北大河为健康状态, 其余河流均为良好状态; 丰水期 B-IBI 平均值为 1.59, 山丹河和东大河均为健康状态, 梨园河为一般状态, 其余河流均为良好状态 (图 6)。其中, 枯水期处于健康状态的采样点占比 42.39%, 处于良好状态的采样点占比 30.43%, 处于一般采样点占比 14.14%, 处于差和极差状态的采样点占比 13.04% (图 5(a)); 丰水期处于健康状态的采样点占比 42.71%, 处于良好状态的采样点占比 14.58%, 处于一般状态的采样点占比 10.42%, 差和极差状态的采样点占比 32.29% (图 5(b))。整体来看, 张掖市境内河流大多水生态环境良好, 本次评估的采样点中, 枯水期河流水生态环境状况优于丰水期。对不同水期河流的 B-IBI 进行 Kruskal-Wallis 检验, 结果显示

各河流之间的 B-IBI 不存在显著差异 ($p>0.05$), 表明张掖市境内河流的健康状况差别不大。

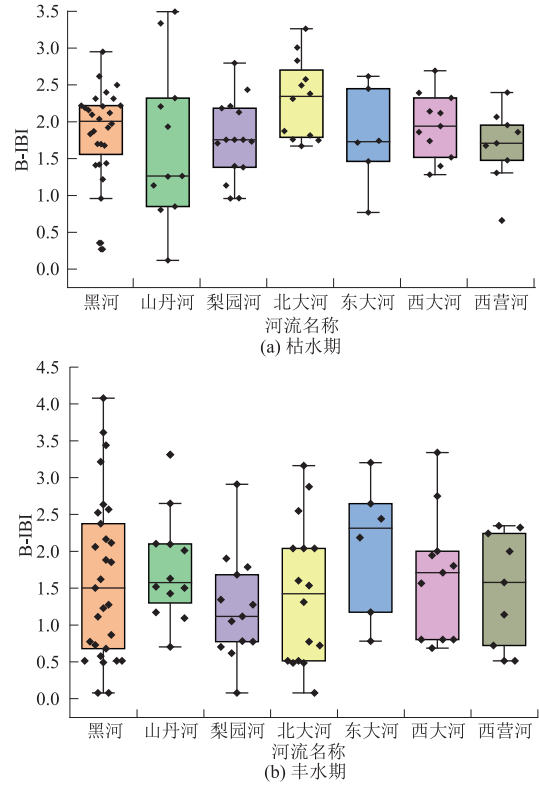


图 6 张掖市境内河流丰、枯水期 B-IBI 评价结果

Fig.6 Assessment results of B-IBI for rivers within Zhangye City during wet and dry seasons

3 讨论

不同水期, 张掖市境内各河流中底栖动物的种类数存在较大差异。山丹河和黑河由于流域面积较大, 河流较长, 调查点位涵盖戈壁、绿洲、城区、农村、高山、水库等河段, 不同河段多样化的地形地貌给底栖动物创造了各种生境条件, 有利于底栖动物的繁殖和生存, 种类数较多。东大河和西大河枯水期种类数较少可能与气候和人类活动有关, 2023 年 3 月现场调查时, 东大河和西大河上游部分河段仍处于冰封状态, 水量较小, 且存在涉河桥梁、水库、河岸有土木工程施工作业的情况, 频繁的人类活动可能破坏河流的自然生态环境, 底栖动物的栖息地、食物来源、生长活动等也可能因此受到影响^[17]。

底栖动物群落不同水期存在明显差异可能与水温、水量、流速、营养物质浓度等因素有关^[14,18]。有研究表明, 水温可以影响水生生物的生物量和分布, 进而导致群落结构发生变化^[14,19]。展洋等^[14]研究发现黑河大型底栖动物完整性与水体温度的相关性极大, 水温较高的河段物种丰富度更高。水温的变化可以改变河流的溶氧能力、有机质的分解速率

及悬浮物释放营养物质的速率而间接作用于底栖动物^[20],如水温升高可加快水体和底泥中有机物的分解,从而促进以有机颗粒物为食的撕食者和收集者的生长繁殖^[9]。不同种类的底栖动物对水温的适应范围不同,水温的变化会影响其代谢率、繁殖和生存,过低的水温会使大部分底栖动物的生长受到抑制,使得耐低温种更具优势,多样性降低,进而改变群落结构^[18]。水量的变化直接影响河流的生境条件,进而影响底栖动物的生存和繁衍。水流携带的有机物质和营养物质随水量增加而增多,为底栖动物提供了丰富的食物来源,促进了它们的生长和繁殖。丰水期水位上升,淹没了一部分原本干燥或暴露的河床,为底栖动物提供了更广阔的栖息空间。而在枯水期,水量减少导致河水流速降低,水体富营养化加剧,影响底栖动物的生存。在延河流域的研究中发现,丰水期集中降雨量增多导致水土流失加剧,从而显著影响底栖动物群落的健康^[10]。此外,流速和流量的增加也有助于物种的迁移和扩散,一些底栖动物会利用这个机会迁移到新的生境中,从而改变河流生态系统中底栖动物的群落结构^[21]。然而,过快或过慢的水流条件也会导致底栖动物多样性降低,一方面,流速过快某些物种无法找到合适的生活空间或食物来源而消失;另一方面,流速过慢使某些物种获得竞争优势,占据更多的生态位,抑制其他物种的生长。水中氮、磷等营养物质浓度对底栖动物群落的影响具有双重性,适量的营养物质可以促进藻类生长,为某些底栖动物提供更多的食物来源。但超过一定阈值时,过量的营养物质会引起水质恶化,降低水中的溶解氧,进而对底栖动物产生负面影响^[22]。

本次调查结果显示张掖市境内河流底栖动物优势种为四节蜉属、多足摇蚊属和直突摇蚊属,在多条河流不同季节中均有分布。这与潮白河^[23]、金沙江^[24]、打邦河^[9]、永定河^[25]等流域中的研究结果相同。四节蜉属和直突摇蚊属均为收集者,其活动范围广泛,具有较强的适应能力和迁移能力,占据河流中较宽的生态位。张掖市境内河流部分河段水量较少,流速缓慢或趋于静滞,有机碎屑更容易在河床沉积,充足的有机碎屑和较低的流速也给收集者提供了良好的栖息环境。水体污染程度影响着底栖动物在水环境中的分布,一般而言,污染较轻时节肢动物占据优势,污染较重时软体动物和环节动物占据优势^[26]。张掖市境内河流节肢动物占据绝对优势,表明其水生态环境状况整体较好,这也与 B-IBI 的评价结果一致。

评价结果显示,张掖市境内河流 B-IBI 为 1.24~2.31。北大河枯水期 B-IBI 最高,特别是上游采样点的 B-IBI 较高,这与采样点所处的地理位置及周边环境状况有关,北大河上游河段海拔较高,地广人稀,人类活动对河流的干扰程度弱,沿岸植被较为丰富,且相比于中游冰封河段,下游河段水量充沛且流速较快,底栖动物群落组成复杂,多样性较高;梨园河丰水期 B-IBI 最低,特别是下游采样点的 B-IBI 较低,究其原因可能是该河段处于人口活动较密集区域,部分河道硬化、建有涉河桥梁等,破坏了河流原本的自然状态,减少了底栖动物的栖息地。此外,该河段部分区域丰水期也仍处于断流状态,这也是导致 B-IBI 较低的重要原因。B-IBI 不同水期的变化也受流域的环境因素和人为干扰的共同影响。枯水期健康与良好状态采样点占比(72.82%)高于丰水期(57.21%),但丰水期差与极差状态采样点占比(32.29%)高于枯水期(13.04%),这可能归因于丰水期河流流量和流速增加,水流湍急的区域水土流失加剧,畜牧污染物随水流进入水体,污染了水环境,破坏了底栖动物的栖息环境;此外,流域内较多的水电开发使河流受到筑坝截流的影响^[14,27],导致评价结果变差。

4 结束语

本研究通过不同水期对底栖动物进行监测,构建了张掖市境内河流底栖动物生物完整性评价体系,并对 7 条河流的水生态健康状况进行了科学评价。结果显示,在调查的 136 个采样点中,丰、枯水期中均有>50%的样点处于良好及以上状态,表明张掖市境内河流底栖动物群落整体健康状况较好。总体而言,枯水期河流的健康状况优于丰水期,底栖动物群落结构在不同水期的差异可能与水温、水量、流速及营养物质浓度等环境因素密切相关。

由于张掖市地处内陆干旱地区,河流的季节性变化显著,水量和流速主要受降水和冰雪融水补给影响,具有较大的不稳定性。随着气候变化和人类活动的不断加剧,张掖市境内河流仍面临生态环境恶化的风险。因此,需加强河流生态系统监测与管理,优化水资源配置,保障生态流量,以减少因季节性变化对底栖动物群落的不利影响,并进一步提升河流生态系统的稳定性和健康水平。

未来的研究应进一步深入探讨底栖动物群落对不同环境压力的响应机制,特别是极端气候事件和人类活动叠加影响下的长期适应性变化。此外,建议开展跨区域对比研究,以便更全面地理解河流生

态系统的共性规律与区域特征。这些研究方向将为河流生态系统的保护和管理提供更具前瞻性和针对性的科学依据。

参考文献(References):

- [1] 王飞. 河流健康评价相关研究综述[J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(2): 1-3. (WANG Fei. A Review of Research on River Health Assessment[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2023, 36(2): 1-3. (in Chinese))
- [2] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, *et al.* Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [3] 曹家乐, 张亚辉, 张瑾, 等. 国内外水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 Jia-le, ZHANG Ya-hui, ZHANG Jin, *et al.* Research Progress of Water Ecological Health Assessment at Home and Abroad[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1402-1410. (in Chinese))
- [4] 张宇航, 颜旭, 姜兵琦, 等. 应用底栖动物完整性指数评价北京市河流水生态环境质量[J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 2010-2022. (ZHANG Yu-hang, YAN Xu, JIANG Bing-qi, *et al.* Water Ecosystem Quality Assessment on Rivers in Beijing City Using Benthic Index of Biotic Integrity[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 2010-2022. (in Chinese))
- [5] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 等. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 74-82. (CAI Kun, ZHANG Jie, XU Zhao-an, *et al.* Application of a Benthic Index of Biotic Integrity for the Ecosystem Health Assessment of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 74-82. (in Chinese))
- [6] WANG J, SOININEN J, HEINO J. Ecological Indicators for Aquatic Biodiversity, Ecosystem Functions, Human Activities and Climate Change[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108250.
- [7] 易雨君, 叶敬吁, 丁航, 等. 水生态评价方法研究进展及展望[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 657-669. (YI Yu-jun, YE Jing-xu, DING Hang, *et al.* Research Progress and Prospect in China of Aquatic Ecosystem Assessment Methods[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(3): 657-669. (in Chinese))
- [8] 冯治远, 侯易明, 阴琨, 等. 基于底栖动物生物完整性指数的黄河干流生态健康评价[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 512-529. (FENG Zhi-yuan, HOU Yi-ming, YIN Kun, *et al.* Ecological Health Assessment of the Yellow River Mainstem Based on Benthic Macroinvertebrate Index of Biological Integrity[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2): 512-529. (in Chinese))
- [9] 邹泓光, 孔维静, 杜彩丽, 等. 贵州打邦河夏季大型底栖动物群落功能摄食类群特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(2): 402-411. (ZOU Hong-guang, KONG Wei-jing, DU Cai-li, *et al.* Functional Feeding Groups of Summer Macroinvertebrates in Dabang River, Guizhou[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(2): 402-411. (in Chinese))
- [10] 贺瑶, 孙长顺, 侯易明, 等. 基于流域底栖动物完整性指数评价延河的水生态健康[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 806-816. (HE Yao, SUN Chang-shun, HOU Yi-ming, *et al.* Evaluation of Water Ecological Health of Yanhe River Based on Benthic Fauna Integrity Index[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 806-816. (in Chinese))
- [11] 姚琦, 黎明杰, 麻林, 等. 基于大型底栖动物完整性指数与综合生物指数的水生态评价: 以东洞庭湖为例[J/OL]. 中国环境科学, (2023-11-30) [2024-12-02]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231130.001>. (YAO Qi, LI Ming-jie, MA Lin, *et al.* Ecological Health Assessment Based on Benthic Macroinvertebrates Index of Biotic Integrity and Comprehensive Biological Index: A Case Study of the East Dongting Lake[J/OL]. *China Environmental Science*, (2023-11-30) [2024-12-02]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231130.001>. (in Chinese))
- [12] 窦寒梅, 赵锐锋, 陈喜东, 等. 西北干旱区国土空间生态修复优先区识别: 以黑河流域张掖市为例[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 469-479. (DOU Han-mei, ZHAO Rui-feng, CHEN Xi-dong, *et al.* Identification of Priority Areas for Territorial Space Ecological Restoration in Arid Area of Northwest China: A Case Study of Zhan-gye City in Heihe River Basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(2): 469-479. (in Chinese))
- [13] 赵燕楚, 王菲, 吴丹, 等. 海河流域河流大型底栖动物生物完整性指数健康评价[J]. 生态环境学报, 2023, 32(10): 1785-1793. (ZHAO Yan-chu, WANG Fei, WU Dan, *et al.* Health Assessment of Haihe River Basin Based on Benthic Index of Biotic Integrity[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(10): 1785-1793. (in Chinese))
- [14] 展洋, 汪双, 陈吉平, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的黑河中上游水生生态系统健康评价[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 271-280. (ZHAN Yang, WANG Shuang, CHEN Ji-ping, *et al.* Evaluation of Aquatic Ecosystem Health in the Middle and Upper Reaches of the Heihe River Based on Macroinvertebrate Integrity Index[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(2): 271-280. (in Chinese))
- [15] 汪双. 应用底栖动物完整性指数(B-IBI)评价黑河

- 健康状况[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022. (WANG Shuang. Evaluation of the Health of the Heihe River by Applying the Method of Benthic Integrity Index Method (B-IBI)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [16] 章运超, 朱孔贤, 柴朝晖, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的龙感湖健康评价[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 21-28, 34. (ZHANG Yun-chao, ZHU Kong-xian, CHAI Zhao-hui, *et al.* Health Assessment of Longgan Lake Using Benthic Index of Biotic Integrity[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 21-28, 34. (in Chinese))
- [17] BRYSEWICZ A, CZERNIEJEWSKI P, DABROWSKI J, *et al.* Characterisation of Benthic Macroinvertebrate Communities in Small Watercourses of the European Central Plains Ecoregion and the Effect of Different Environmental Factors[J]. *Animals*, 2022, 12(5): 606.
- [18] 王 昱, 李宝龙, 冯 起, 等. 筑坝截流对黑河上中游大型底栖动物群落结构及物种多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(10): 1309-1317. (WANG Yu, LI Bao-long, FENG Qi, *et al.* Effects of Dam Construction on Macrozoobenthos Community Structure and Species Diversity in the Upper and Middle Reaches of Heihe River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(10): 1309-1317. (in Chinese))
- [19] 王锦旗, 宋玉芝, 黄 进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J]. 水生生态学杂志, 2020, 41(1): 100-109. (WANG Jin-qi, SONG Yu-zhi, HUANG Jin. Effects of Increasing Water Temperature on Water Properties and Aquatic Organisms: A Critical Review [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 100-109. (in Chinese))
- [20] 杨强强, 徐光来, 章 翩, 等. 青弋江流域大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4169-4180. (YANG Qiang-qiang, XU Guang-lai, ZHANG Pian, *et al.* Macroinvertebrate Community Structure and Water Quality Assessment in the Qingyi River Watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4169-4180. (in Chinese))
- [21] PTATSCHECK C, GANSFORT B, MAJDI N, *et al.* The Influence of Environmental and Spatial Factors on Benthic Invertebrate Metacommunities Differing in Size and Dispersal Mode[J]. *Aquatic Ecology*, 2020, 54(2): 447-461.
- [22] 胡 威, 王 丽, 莫康乐, 等. 扬州市河网大型底栖动物群落结构及其生境特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1440-1448. (HU Wei, WANG Li, MO Kang-le, *et al.* Community Structure and Habitat Characteristics of Macroinvertebrates in River Network of Yangzhou City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1440-1448. (in Chinese))
- [23] 韩 静, 罗遵兰, 孙 光, 等. 潮白河流域大型底栖无脊椎动物多样性与群落格局[J]. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1-15. (HAN Jing, LUO Zun-lan, SUN Guang, *et al.* Benthic Macroinvertebrates Diversity and Community Pattern in Chaobai River Basin, Beijing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(5): 1-15. (in Chinese))
- [24] 池仕运, 王 瑞, 魏 秘, 等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8723-8738. (CHI Shi-yun, WANG Rui, WEI Mi, *et al.* Community Structure and Diversity of Macroinvertebrates in the Upper and Middle Reaches of Jinsha River Based on the Monitoring Data from 2010—2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8723-8738. (in Chinese))
- [25] 张宇航, 彭文启, 彭 帅, 等. 永定河流域大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态评价[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3433-3440. (ZHANG Yu-hang, PENG Wen-qi, PENG Shuai, *et al.* Temporal-spatial Distribution and Ecological Evaluation of Macroinvertebrate Functional Feeding Groups in Yongding River Basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3433-3440. (in Chinese))
- [26] 王 川, 岳兴建, 谢嗣光, 等. 越溪河春季底栖动物的群落结构及水质评价[J]. 内江师范学院学报, 2010, 25(12): 59-64. (WANG Chuan, YUE Xing-jian, XIE Si-guang, *et al.* Community Structure of Zoobenthos and Bioassessment of Water Quality in Yuexi Stream in Spring[J]. *Journal of Neijiang Normal University*, 2010, 25(12): 59-64. (in Chinese))
- [27] 王 昱, 左一锋, 冯 起, 等. 黑河中上游大型底栖动物栖息地适宜度评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1116-1127. (WANG Yu, ZUO Yi-feng, FENG Qi, *et al.* Assessment of Macrozoobenthos Habitat Suitability in the Upper and Middle Reaches of the Heihe River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1116-1127. (in Chinese))

(编辑: 罗玉兰)