

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.

# 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

展洋<sup>1</sup>,汪双<sup>2a</sup>,陈吉平<sup>3</sup>,王昱<sup>2ab</sup>,王昱鹏<sup>4</sup>

(1.甘肃省水利厅 水利工程建设造价与规费管理中心,甘肃 兰州 730046; 2.兰州理工大学 a.能源与动力工程学院, b.甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室,甘肃 兰州 730050; 3.甘肃省水文站,甘肃 兰州 730000; 4.酒泉市肃州区洪临灌区临水水利管理所,甘肃 酒泉 735000)

**摘要:**为探究中国高寒内陆河流的健康状况,多年在黑河上中游采集大型底栖动物和水样样品,采用生物参数分布范围分析、生物判别能力分析以及相关性分析的方法,构建了由总分类单元数、水生昆虫分类单元数、前三位优势分类单元、捕食者%、敏感类群%及耐污类群%组成的黑河大型底栖动物完整性指数(*B-IBI*)评价体系。结果表明:(1)基于比值法得到黑河河流健康评价等级: $B-IBI > 3.28$ 为健康, $2.46 < B-IBI < 3.28$ 为良好, $1.64 < B-IBI < 2.46$ 为一般, $0.82 < B-IBI < 1.64$ 为较差, $B-IBI < 0.82$ 为极差。(2)*B-IBI*评价体系评价结果均表明,黑河上、中游整体健康状况处于良好状态。

**关键词:**黑河;大型底栖动物;群落结构;环境因子

**文章编号:** 1000-694X(2023)02-271-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00143

**中图分类号:** X826

**文献标志码:** A

## 0 引言

河流在物质循环、能量流动及信息交流等方面发挥着重要的生态服务功能<sup>[1]</sup>。然而,随着人类活动日益加剧,水体污染、生物多样性锐减等生态环境问题凸显,从而造成河流水生态系统的自然、生态和社会服务功能逐渐减弱甚至丧失,河流健康受到严重威胁。准确客观的河流健康评价体系能有效反映其完整性、可持续性、水资源利用之间的动态平衡,同时对水环境保护和水生态系统修复具有重要的参考价值。与单一的生物指数相比,生物完整性指数(index of biological integrity, *IBI*)能更全面地反映河流的健康状况<sup>[2]</sup>。自1981年Karr<sup>[3]</sup>提出利用*IBI*评价河流健康以来,国内外学者相继运用于不同区域河流的健康评价,并不断改进与完善。目前已经构建了鱼类生物完整性指数<sup>[4]</sup>(fish-index of biological integrity, *F-IBI*)、藻类生物完整性指数<sup>[5]</sup>(diatom-index of biological integrity, *D-IBI*)等生

物指数评价体系。张亚等<sup>[6]</sup>基于鱼类生物完整性指数对上海苏州河水生态系统进行了健康评价,结果表明其上游干流的水生态系统已基本恢复,而上游支流和下游干流还未建立健康稳定的水生态系统;吕立鑫等<sup>[7]</sup>基于浮游藻类生物完整性指数对永安河小流域进行了健康评价,结果显示永安河小流域上游段的评价结果最好;赵文超等<sup>[8]</sup>为了解蚂蚁河上游水生态健康状况,利用大型底栖动物完整性指数对其健康进行了评估,深层次分析出蚂蚁河上游健康状况为一般。中国高寒内陆河地区气候寒冷,降水稀少,蒸发强烈,荒漠化现象严重<sup>[9]</sup>,脆弱的生态环境使得该地区的鱼类和藻类生物本底值较低,而大型底栖动物物种相对丰富<sup>[10]</sup>。大型底栖动物生命周期长,行动缓慢,分布广泛,作为水生态系统的主要组成部分,其群落结构、优势种类和现存量等参数可反映环境因素的长期变化,从而可以有效指示水生态系统的健康状况<sup>[11]</sup>。因此利用大型底栖动物作为指示物种可准确评价高寒区内陆河流的

收稿日期:2022-08-15; 改回日期:2022-12-12

资助项目:国家自然科学基金项目(52169015);甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA227);甘肃省2022年水利科研与技术推广项目(22GSLK038,22GSLK039)

作者简介:展洋(1970—),男,甘肃白银人,高级工程师,主要从事水利工程建设、水资源管理与研究工作。E-mail: 252030532@qq.com

健康。

黑河流域作为中国西北地区第二大内陆河,是河西走廊绿洲赖以生存和经济社会持续发展的重要水源基地<sup>[12]</sup>。近年来由于气候环境变化、梯级电站开发以及畜牧业、种植业、工业等社会经济的持续发展,河道水量逐年下降,造成生态环境逐步恶化,上、中游地区的植被和土壤差异化现象愈发严重,水生态系统受损等问题突出<sup>[13]</sup>。因此,本文以高寒区黑河上中游为研究区域,通过生物参数分布范围分析、生物参数判别能力分析以及生物参数相关性分析,筛选出适合构建黑河大型底栖动物完整性指数(*B-IBI*)评价体系的生物参数,并构建大型底栖动物生物完整性指标体系评价黑河河流健康状况,以期对西北高寒内陆地区河流生态修复与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

黑河发源于青海的祁连山北麓,流经青海、甘肃后形成了尾间湖泊(居延海),流域范围 $37^{\circ}45'—42^{\circ}40'N$ 、 $96^{\circ}42'—102^{\circ}04'E$ ,干流全长约821 km,流域面积14万 $km^2$ <sup>[14]</sup>。黑河莺落峡以上303 km为上游祁连山地褶皱带,海拔3 000~3 500 m,属高寒半干旱气候<sup>[15]</sup>,气温全年较低,年降水量约为350 mm以上,该地区水能资源最为丰富,水能蕴藏量达到560 MW。上游支流地区为径流的产流区,河床多为沙质河床,为农牧业过渡区<sup>[16]</sup>;上游干流地区黄藏寺—莺落峡河段水资源储量约为388 MW,相继开发了8座梯级电站,年发电量 $23.97 \times 10^8$  kW·h。其中黄藏寺电站库区主要满足当地生产生活用水和生态需水,兼顾发电效能,其他电站以发电为主。

### 1.2 采样点布设及参照点选取

在大型底栖动物完整性指数健康评价的过程中,参照点的选取会直接或间接地影响到适宜生物参数的筛选以及河流健康评价的结果。参照点的选取原则为无人干扰样点和干扰极小样点,但在实际河流健康评价中,由于不同河流地理位置、气候条件等环境因素不尽相同,因此参照点的选择尚无统一标准,根据Kerans等<sup>[17]</sup>的方法,一般按人类活动干扰程度大小可将各采样点分为无干扰样点、

干扰极小样点和干扰样点<sup>[18-19]</sup>。许维等<sup>[20]</sup>在研究大清河水系的健康状况时,以分布在Ⅲ类以上水域的采样点作为参照点;黄彬彬等<sup>[21]</sup>在赣江干流健康评价中,以附近无农田污染源、水质低污染、无毒、能溶解氧气的采样点为参照点。

黑河是中国高寒地区重要内陆河,近些年工农业的迅速发展以及密集的人类活动使得很难找到无干扰的采样点,并且黑河上游污染来源主要是畜牧业;中游水体健康主要受到工业生产、生活污水以及农业如农药、化肥等的影响。因此本研究根据黑河流域环境气候特点及地理位置特征,选取自然河道(人为影响小),梯级库区段以及中游人类活动剧烈的河段作为研究对象,共布设14个采样点,包括上游支流段(H1、H2、H3),上游干流段(H4、H5),中游段(H6、H7、H8、H9、H10、H11、H12、H13、H14),并选择受不同程度人为干扰的采样点H3、H6、H9、H13作为参照点,其余采样点为受损点(图1)。

### 1.3 样品的采集、处理与分析

#### 1.3.1 大型底栖动物

本次研究中用面积为1/60 m<sup>2</sup>的彼得逊采泥器(HL-CN)及手抄网,对底栖动物进行定性和定量采集,并结合不同的生境特点,在每个采样点及周围不同位置重复采集3次后合并为一个点位样本,以保证底栖动物群落的代表性。在采集现场用60目筛网过滤、洗净后对底栖动物进行挑拣并将样品保存在4%~10%的福尔马林溶液中,贴好标签。样品带回实验室鉴定至尽可能低的分类单元,一般为属或种,严格按照不同种类计算每个采样点的底栖动物数量<sup>[22]</sup>,并做好记录以便处理数据使用。对样品进行称重时,应先用滤纸将样本表面的水分吸干,再用电子秤(精度为0.0001)称其湿重,最后将所有样品折算成单位面积的生物量( $g \cdot m^{-2}$ )<sup>[23]</sup>。

#### 1.3.2 水体理化指标

在采样现场使用哈希便携式水质分析仪测定水温(*WT*)、pH值、电导率(*EC*)、溶解性总固体(*TDS*)、溶解氧(*DO*)、盐度(*S*)、电阻率(*R*)数据,同时采集1 000 mL水样固定后放在4℃保温箱带回实验室,严格参照《水和废水监测分析方法》<sup>[24]</sup>,分析测定全磷(*TP*)、全氮(*TN*)、亚硝酸盐氮(*NO<sub>2</sub>-N*)含量、氨氮(*NH<sub>3</sub>-N*)含量、高锰酸盐指数(*KMnO<sub>4</sub>*)、化学需氧量(*COD*)、5日生化需氧量(*BOD<sub>5</sub>*)以及水

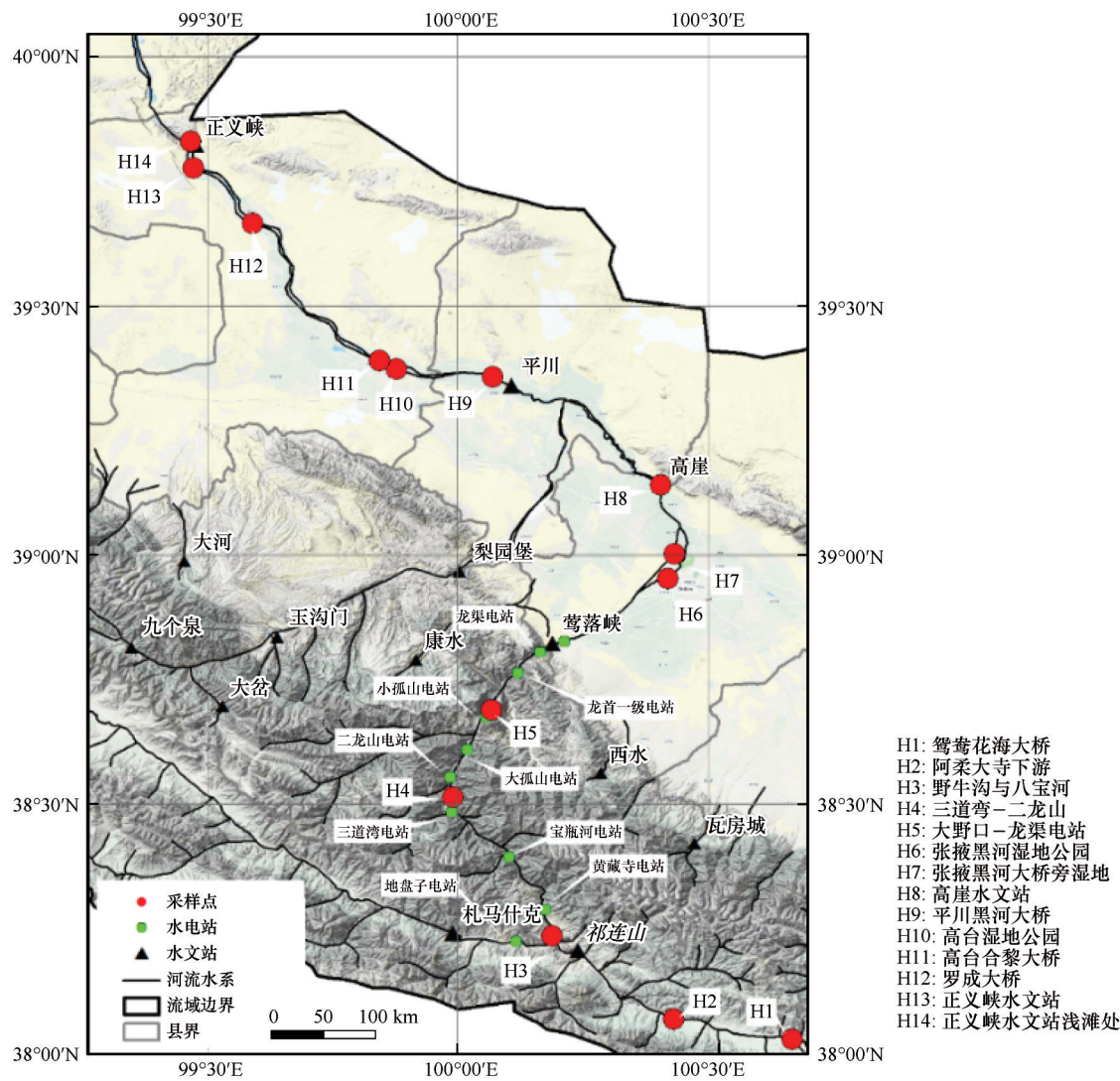


图 1 黑河采样点分布示意图  
Fig.1 Distribution diagram of sampling points in Heihe River

中悬浮物等化学指标,为减小系统误差和人为误差,每一个化学指标均重复测定 3 次并取其平均值。

1.4 优势物种的计算

优势度指数(Y)是表示大型底栖动物群落中某一物种在其中所占优势的程度,反映的是群落中各物种种群数量的变化情况,一般情况下优势度指数值越大,说明优势物种的地位越突出,群落内物种数量分布越不均匀<sup>[25]</sup>。本研究利用优势度指数(Y)确定黑河河段底栖动物优势物种。

$$Y = (n_i / N) \times f_i$$

式中: $n_i$ 为第*i*种物种个体数; $S$ 为种类数; $N$ 为样本总个体数; $f_i$ 为第*i*种物种在各采样点出现的频率, $Y>0.02$ 为优势物种。

1.5 B-IBI评价体系的构建

1.5.1 备选生物指数的选取

根据河流大型底栖动物的食性类型,参照 Cummins 等<sup>[26]</sup>和 Bode 等<sup>[27]</sup>的划分规则,将黑河上中游大型底栖动物分为 5 个功能摄食类群(FFGs,表 1)。

参照文献[28-29],并结合黑河采样实际情况,选取干扰越强反应越敏感的 5 个大类别,包括反映物种群落丰富度、物种个体数量比例、物种敏感性和耐污性、营养层级以及小生境质量等共计 19 个参数进行 B-IBI 评价体系的构建,具体生物参数分别为总分类单元数、EPT 分类单元数、摇蚊分类单元数、水生昆虫分类单元数、软体动物和甲壳动物%、双翅目%、毛翅目%、蜉蝣目%、襁翅目%、优势分类单元%、前三位优势分类单元%、撕食者%、刮食

表1 黑河上中游大型底栖动物FFGs分类  
Table 1 Macroinvertebrate taxa with respect to their corresponding FFGs in the upper and middle reaches of Heihe River

功能摄食类群(FFGs)	分类标准
滤食者(FC)	以水流中的细颗粒物为食
收集者(GC)	以河底的各种有机物颗粒为食
捕食者(PR)	以捕食其他水生动物为食
撕食者(SH)	以各种凋零物和粗有机颗粒为食
刮食者(SC)	以各种营固着生活的生物类群为食

者%、滤食者%、集食者%、捕食者%、敏感类群%、耐污类群%、黏附者%。

### 1.5.2 筛选生物参数

分布范围分析。计算候选生物参数在参照点中25%~75%分位数的数值范围,在大于95%的采样点中出现的频率都是零、随干扰增强而数值太小或太大以及标准差过大的生物指数均不能参与构建*B-IBI*评价体系,予以剔除<sup>[30]</sup>。

判别能力分析。对剔除后剩余参数在参照点和受损点的25%~75%分位数分布范围做箱体图进行判别能力分析(*IQ*),并根据箱体的重叠情况对*IQ*赋予相应的值:无重叠,则*IQ*=3;部分重叠,但各自中位数值都在对方箱体范围之外,则*IQ*=2;仅一个中位数值在对方箱体范围之内,则*IQ*=1;各自中位数值都在对方箱体范围之内,则*IQ*=0。其中,*IQ*≥2的参数才能作进一步分析<sup>[31]</sup>。

相关性分析。对*IQ*≥2的参数作相关性分析,其中呈正态分布的参数选用Pearson相关性分析,不呈正态分布的用Spearman相关性分析。当两个指数之间显著相关时,则表明两参数所反映的信息大部分是重叠的,二者选其一即可<sup>[32]</sup>。

### 1.5.3 构建记分标准

目前国内外使用最为广泛的参数计分方法为比值法。对于干扰越强,指数值越低的参数,各指数值的分值等于指数值/最佳期望值;对于干扰越强,指数值越高的参数,其分值等于(最大值-指数值)/(最大值-最佳期望值)。前者以95%分位数值为最佳值,后者则以5%分位数值为最佳值。按照上述方法计算后的分值范围为0~1,若大于1,则记为1<sup>[33]</sup>。

### 1.5.4 确定*B-IBI*体系评价标准

将各参数的分值进行加和得到*B-IBI*的指数

值。以参照点*B-IBI*值分布的25%分位数作为健康评价的标准,如果样点的*B-IBI*值大于25%分位数值,则表示该样点受到的影响很小,是健康的;对小于25%分位数值的分布范围,进行4等分,分别代表不同的健康程度。据上述方法,就可以确定出健康、良好、一般、较差和极差5个等级的划分标准<sup>[34]</sup>。*B-IBI*值越小,表示河流健康状况越差。

## 1.6 *BI*指数

*BI*指数(Biotic Index)是目前美国环境保护署EPA建议使用最多的一种水质生物评价指数,其方法是根据大型底栖动物耐污能力的不同,通过计算耐污值进而对水质进行评价<sup>[35]</sup>,目前在中国也成功通过多次验证,能够从水质方面有效地反映河流的健康状况<sup>[36]</sup>。

$$BI = \sum_{i=1}^N n_i \times \frac{t_i}{N}$$

式中:*N*为样本个体总数;*n<sub>i</sub>*为第*i*个分类单元的个体数;*t<sub>i</sub>*为第*i*个分类单元的耐污值。*BI*指数评价标准参照王备新<sup>[37]</sup>水质分级标准(表2)。

表2 基于*BI*指数的河流健康评价标准

指数	健康等级				
	健康I	良好II	一般III	较差IV	极差V
<i>BI</i> 指数	<2.97	2.98~4.72	4.73~6.48	6.49~8.24	>8.24

## 2 结果与分析

### 2.1 底栖动物群落结构

调查期间在黑河中上游所有采样点中,一共鉴定出54种大型底栖动物,隶属于4门8纲18目36科(表3)。从整体上看,研究区域内底栖动物的类群中,节肢动物中的昆虫纲占总个体比重最多。黑河上、中游现阶段优势物种主要由节肢动物和软体动物两大类群组成,中游河段的优势物种与整个研究区域对比较为相似,上游支流河段优势物种均为节肢动物。此外,黑河上、中游大型底栖动物优势物种数量沿程变化趋势为中游河段>上游河段(表4)。

### 2.2 判别能力分析

所选生物参数中,*M<sub>2</sub>*、*M<sub>5</sub>*、*M<sub>6</sub>*、*M<sub>7</sub>*、*M<sub>8</sub>*、*M<sub>9</sub>*出现零值的频率过多,不适宜构建*B-IBI*评价体系,因此予以剔除。此外,生物参数*M<sub>12</sub>*、*M<sub>19</sub>*因其25%分位数、

表 3 黑河大型底栖动物分类系统  
Table 3 The macrobenthic taxonomic system  
of Heihe River

门	纲	目	科
节肢 动物门	昆虫纲	半翅目	划蝽科、鳃蝽科、潜蝽科、跳 蝽科、盲蝽科
		蜉蝣目	四节蜉科
		毛翅目	长角石蚕科
		鞘翅目	龙虱科、泥甲科、步甲科、叶 甲科、象甲科、虎甲科
		双翅目	摇蚊科、大蚊科
		鳞翅目	夜蛾科
		蜻蜓目	雀鳉科、蜉科、箭蜉科、螳 科、伪蜻科、蜻科
		同翅目	飞虱科
		革翅目	蠹螋科
合计 1 门	软甲纲	端足目	钩虾科
	蛛形纲	蜘蛛目	水蛛科
	3 纲	11 目	26 科
软体 动物门	腹足纲	基眼目	椎实螺科、扁卷螺科
		柄眼目	蛞蝓科、琥珀螺科
		中腹足目	田螺科、觿螺科
	瓣鳃纲	帘蛤目	蜆科
合计 1 门	2 纲	4 目	7 科
环节 动物门	寡毛纲	近孔寡毛目	颤蚓科
	蛭纲	吻蛭目	舌蛭科
合计 1 门	2 纲	2 目	2 科
甲壳 动物门	甲壳纲	十足目	长臂虾科
合计 1 门	1 纲	1 目	1 科
总计 4 门	8 纲	18 目	36 科

中位数及 75% 分位数的值波动性不大,说明随着污染强度的增加,其值的可变动范围非常窄,其指示信息作用较低,无法准确地将受不同干扰程度的水体区分开来,不适宜构建 *B-IBI* 评价体系,也予以剔除。参数  $M_{15}$  随干扰增强,指数值的波动范围很大,故也予以剔除,判别能力分析结果如图 2 所示。图中  $M_{14}$  的两箱体图中,双方的中位数均在对方箱体图之内,故其 *IQ* 值为 0; 参数  $M_3$ 、 $M_{13}$  的两箱体图中,仅有一个中位数在对方箱体之内,故二者 *IQ* 值均为 1;  $M_1$ 、 $M_{10}$ 、 $M_{16}$ 、 $M_{17}$  以及  $M_{18}$  的两箱体图中部分重叠,

表 4 黑河上、中游大型底栖动物优势种组成与分布  
Table 4 Composition and distribution of dominant species  
of macrobenthos in the upper and middle reaches  
of the Black River

类群	优势种	优势度值( <i>Y</i> )		
		整个研 究区域	中游 河段	上游 河段
节肢动物 (Arthrop- oda)	水蜘蛛( <i>Argyroneta</i> )	0.078	0.057	0.039
	飞虱( <i>Delphacidae</i> )	0.042		
	大蚊( <i>Tipulidae</i> sp.)	0.036	0.037	0.033
	青步甲( <i>Chlaenius</i> sp.)	0.036	0.033	0.051
	豆娘幼虫( <i>Zygoptera</i> sp.)		0.025	0.046
软体动物 (Mollus- ca)	琥珀螺( <i>Succinea</i> sp.)	0.036	0.022	
	白旋螺( <i>Cyraululus albus hutton</i> )	0.030	0.041	
	狭萝卜螺( <i>Radix lagotis</i> )	0.030		
	耳萝卜螺( <i>Radix auricularia</i> )	0.042	0.064	

但双方中位数值均在对方箱体之外,故 *IQ* 值均为 2;  $M_4$ 、 $M_{11}$  的两箱体图无重叠部分,因此二者 *IQ* 值均为 3。选择 *IQ* 值大于等于 2 的生物参数进行相关性分析。

2.3 相关性分析

对剩余 7 个参数进行 K-S 检验,结果表明 7 个生物参数均呈正态分布,采用 Pearson 相关性分析,结果如表 5 所示,可以看出  $M_1$  与  $M_{10}$ 、 $M_{10}$  与  $M_{11}$  均显著相关( $P<0.05$ )。由于  $M_1$  可以反映物种群落丰富度,  $M_{10}$ 、 $M_{11}$  均为反映物种个体数量比例的参数,剔除  $M_{10}$ ,保留  $M_1$ 、 $M_{11}$ ,最后剩余 6 个生物参数构建 *B-IBI* 评价体系:  $M_1$ 、 $M_4$ 、 $M_{11}$ 、 $M_{16}$ 、 $M_{17}$ 、 $M_{18}$ 。

2.4 *B-IBI* 指标体系评价标准的确定

根据以上研究最终得到黑河河流健康评价等级如表 6 所示,4 个参照点 *B-IBI* 值的 25% 分位数为 3.28,将小于 3.28 的范围四等分即为 0.82,每个健康等级依次减去 0.82,即可得到评价等级为:  $B-IBI>3.28$  为健康,  $2.46<B-IBI<3.28$  为良好,  $1.64<B-IBI<2.46$  为一般,  $0.82<B-IBI<1.64$  为较差,  $B-IBI<0.82$  为极差。

2.5 基于 *B-IBI* 指数评价体系的黑河河流健康评价

利用 *B-IBI* 评价标准对黑河各采样点的河流健康状况进行初步评价(表 7)。*B-IBI* 体系评价结果

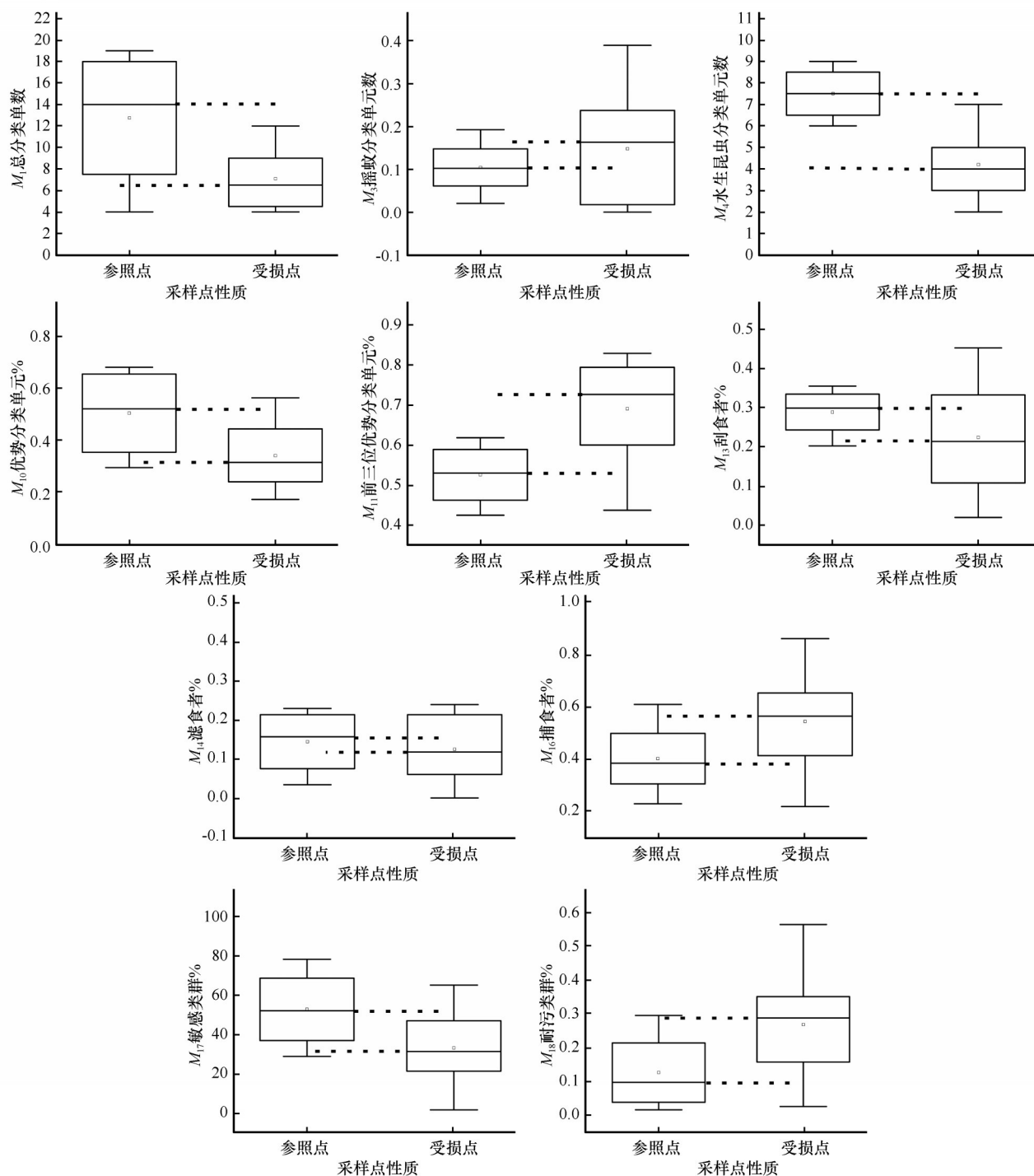


图2 候选生物参数判别能力分析结果

Fig.2 Analysis results of discrimination ability of candidate biological parameters

显示,在所有采样点中,“健康”的点有4个,占总采样点数的比例为28.57%;“良好”的采样点有7个,占总采样点数的比例为50%,多分布在中游河段;“一般”的采样点有3个,占总采样点数的比例为21.43%;没有较差和极差等级的采样点。此次评价中 $B-IBI$ 值平均为3.06,说明黑河整体健康状况属于II类水质标准,处于“良好”状态。从整体上

看,本次评估的站点中,中游地区采样点的健康状况明显高于上游支流和干流地区,其中,上游支流 $B-IBI$ 指数的平均值为2.29,处于III类水质标准,整体处于一般状态;上游干流 $B-IBI$ 指数的平均值为2.82,处于II类水质标准,属于良好状态;中游 $B-IBI$ 指数的平均值为3.37,处于I类水质标准,属于健康状态。

表 5 各生物参数相关性分析

Table 5 Correlation analysis of biological parameters

生物参数	$M_1$	$M_4$	$M_{10}$	$M_{11}$	$M_{16}$	$M_{17}$	$M_{18}$
$M_1$	1						
$M_4$	0.703	1					
$M_{10}$	-0.588*	-0.571	1				
$M_{11}$	-0.712	-0.396	0.754**	1			
$M_{16}$	-0.334	0.11	-0.048	0.265	1		
$M_{17}$	0.059	0.163	0.019	0.201	-0.176	1	
$M_{18}$	-0.031	-0.254	0.229	0.022	-0.176	0.05	1

\*表示 0.05 水平(双侧)上显著相关;\*\* 表示 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 6 基于  $B-IBI$  指数的河流健康评价标准

Table 6 Heihe  $B-IBI$  evaluation standard

指数	健康等级				
	健康	良好	一般	较差	极差
$B-IBI$	>3.28	2.46~3.28	1.64~2.46	0.82~1.64	<0.82

表 7 黑河河流健康评价结果(基于  $B-IBI$  指数)

Table 7 Evaluation results of sampling points in Heihe River

采样点	采样点性质	$B-IBI$ 指数评价结果	
		指数值	评价等级
上游支流段	H1	受损点	1.88 一般
	H2	受损点	2.46 一般
	H3	参照点	2.53 良好
上游干流段	H4	受损点	2.47 良好
	H5	受损点	3.17 良好
中游段	H6	参照点	4.25 健康
	H7	受损点	3.22 良好
	H8	受损点	4.05 健康
	H9	参照点	4.08 健康
	H10	受损点	2.97 良好
	H11	受损点	3.26 良好
	H12	受损点	2.26 一般
	H13	参照点	3.54 健康
	H14	受损点	2.74 良好

2.6 基于  $BI$  指数的黑河水质生物评价

$BI$  指数的评价结果显示(表 8),  $BI$  指数的平均值为 4.36, 黑河水体状况整体上处于Ⅱ类水质标准,

表 8 黑河河流健康评价结果(基于  $BI$  指数)

Table 8 Evaluation results of sampling points in Heihe River

采样点	采样点性质	$BI$ 指数评价结果	
		指数值	评价等级
上游支流段	H1	受损点	6.10 一般
	H2	受损点	5.72 一般
	H3	参照点	4.51 良好
上游干流段	H4	受损点	3.45 良好
	H5	受损点	2.89 健康
中游段	H6	参照点	2.93 健康
	H7	受损点	4.70 良好
	H8	受损点	4.25 良好
	H9	参照点	3.39 良好
	H10	受损点	4.25 良好
	H11	受损点	4.37 良好
	H12	受损点	5.39 一般
	H13	参照点	4.38 良好
	H14	受损点	4.64 良好

属于良好状态,这与利用  $B-IBI$  体系评价得到的结果一致。所有采样点的  $BI$  指数处于 2.89~6.10, 所有采样点中 H5 的健康状态最好, 其中“健康”的点位有 2 个, 占总采样点数的比例为 14.29%; “良好”的采样点有 9 个, 占总采样点数的比例为 64.28%, 多分布在中游河段; “一般”的采样点有 3 个, 占总采样点数的比例为 21.43%, 没有较差和极差等级的采样点。

从整体上看, 本次评估的站点中, 中游地区采样点的健康状态明显高于上游支流和干流地区, 其中, 上游支流  $BI$  指数的平均值为 5.44, 处于Ⅲ类水质标准, 整体处于一般状态; 上游干流  $BI$  指数的平均值为 3.17, 处于Ⅱ类水质标准, 属于良好状态; 中游  $BI$  指数的平均值为 4.26, 处于Ⅱ类水质标准, 属于良好状态。

3 讨论

3.1 底栖动物完整性指数结果

评价结果显示, 黑河  $B-IBI$  指数值 1.88~4.25, 最大的是中游采样点 H6(张掖黑河湿地公园), 值为 4.25, 为健康状态, 这与该采样点的地理位置有关,

张掖黑河湿地公园虽然地处人口活动密集地区,但近些年其生态环境保护较好,水生植物较为丰富,底栖动物多样性较高;*B-IBI*指数值最小的采样点是上游支流H1(鸳鸯花海大桥),值为1.88,是受损最为严重的采样点。究其原因可能是鸳鸯花海大桥处于黑河上游支流段,该河段处于高海拔地区,流量较小,季节性变化较大,河流底栖动物区系组成较简单,且上游的水电开发干扰强于中下游,受到筑坝截流影响,加之人类活动频繁干扰,因此生物完整性指数较低。上游干流段的两个采样点的健康评价结果均为一般,表明上游干流河段梯级电站的开发,导致底栖动物生存环境发生变化,使得其生物完整性指数评价等级较低。

### 3.2 底栖动物完整性指数评价体系在黑河的适用性

对比 *BI* 指数和 *B-IBI* 评价体系的结果,在两种评价指数之中,采样点 H1、H2、H3、H4、H6、H7、H10、H11、H12、H14 的两种指数的评价结果相同,说明了两种评价结果的一致性。其余采样点健康等级评价结果表现出不一致,分别为采样点 H5、H8、H9、H13,其中采样点 H8、H9、H13 位于人类活动较为复杂的中游河段,工农业和生活污水直接排放到河流,使得河流中氮、磷等浓度升高,水体富营养化,溶解氧被消耗,但该地区河流水体水温较高且无分层现象,使大量繁殖的浮游生物可以较为均匀地分布于水体中,为底栖动物的生存繁殖提供食物来源,从而使底栖动物种类逐渐增多,因此 *B-IBI* 体系的评价等级高于 *BI* 指数评价等级。然而,在采样点 H5 中两种指数表现出 *BI* 指数评价等级高于 *B-IBI* 评价等级,究其原因不难发现,这个采样点处在上游干流地区,该地区由于梯级电站的开发,使得库区生境和物种组成逐渐趋于单一化,生物完整性指数评价等级较低。

*BI* 指数和 *B-IBI* 评价体系的结果呈显著负相关 ( $r=-0.679$ 、 $P<0.01$ ,图3),二者均可以用于评价黑河健康状况,*BI* 指数侧重于从河流水质方面对河流健康状况的评价,而 *B-IBI* 评价体系可以从生物完整性角度评价黑河河流健康状况。

### 3.3 影响底栖动物完整性指数的环境因子

本研究利用 SPSS20.0 软件对黑河大型底栖动物完整性指数与水体各理化因子进行相关性分析。

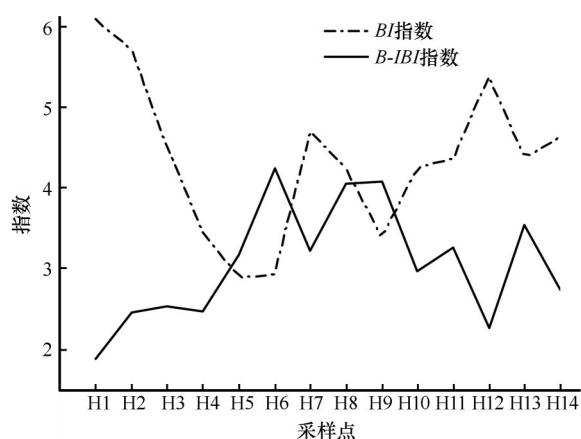


图3 两指数对黑河健康评价结果

Fig.3 Results of the two indices on the health of the Black River

K-S 检验可知, *B-IBI* 与水体各理化因子均符合正态分布,故采用 Pearson 相关性分析来探讨 *B-IBI* 与水体各理化因子之间的相关性(表9)。结果表明,在14个水体理化因子中,除流速( $v$ )、酸碱度( $pH$ )、盐度( $S$ )、亚硝酸盐氮( $NO_2^-$ -N)含量、溶解性总固体( $TDS$ )外, *B-IBI* 指数与水温( $WT$ )、溶解氧( $DO$ )、氨氮( $NH_3$ -N)含量、全磷( $TP$ )、全氮( $TN$ )5个理化指标均呈显著相关,除水温( $WT$ ,  $r=0.572$ ,  $P\leq 0.01$ )、溶

表9 黑河各采样点 *B-IBI* 与各理化因子的相关性系数

Table 9 Correlation coefficients between *B-IBI* and physicochemical factors at each sampling site in the Black River

变量	<i>B-IBI</i>
水温 $WT$	0.572**
流速 $v$	-0.238
酸碱度 $pH$	0.040
电导率 $EC$	0.283
盐度 $S$	0.265
全磷 $TP$	-0.667**
全氮 $TN$	-0.621**
亚硝酸盐氮 $NO_2^-$ -N 含量	-0.127
氨氮 $NH_3$ -N 含量	-0.528**
5 日生化需氧量 $BOD_5$	-0.377
化学需氧量 $COD$	-0.278
高锰酸盐指数 $KMnO_4$	-0.412
溶解性总固体 $TDS$	0.270
溶解氧 $DO$	-0.876**

\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

解氧( $DO$ ,  $r=0.876$ ,  $P\leq 0.01$ )呈显著正相关外,其他3个化学指标均呈显著负相关,且相关性最高的是 $DO$ ( $r=-0.876$ ,  $P\leq 0.01$ )。

由以上结果可以推断,黑河大型底栖动物完整性与水体温度、水体中氮、磷等营养物质以及水中溶解氧的相关性极大。在本研究结果中,中游河段的水温相较上游支流和上游干流均偏高,且调查到的物种明显比支流丰富,说明水温是影响底栖动物完整性的重要影响因子。此外,水中氮、磷等营养物质如氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )含量、全磷( $TP$ )、全氮( $TN$ )等的增多会使水体富营养化,使得水中溶解氧( $DO$ )的浓度发生变化,从而引起水体水质及水生生物的种类和数量也发生改变。本研究结果中上游支流和中游地区采样点,由于农、畜牧业的发展,以及人类活动的频繁干扰,使得水中氮、磷浓度升高,水体富营养化,溶解氧被消耗,而由此大量繁殖的藻类生物为底栖动物提供了食物来源,促进了底栖动物的生存和繁殖,更进一步说明氮、磷等营养物质和适宜的 $DO$ 浓度与底栖动物的生存发育密切相关。

## 4 结论

本研究选择大型底栖动物为研究对象,通过生物参数分布范围分析、判别能力分析以及相关性分析逐步筛选出适合于构建底栖动物生物完整性指数评价体系的生物指标,分别为总分类单元数、水生昆虫分类单元数、前三位优势分类单元%、捕食者%、敏感类群%、耐污类群%共6个指标,得到黑河河流健康评价等级: $B\text{-}IBI>3.28$ 为健康,  $2.46<B\text{-}IBI<3.28$ 为良好,  $1.64<B\text{-}IBI<2.46$ 为一般,  $0.82<B\text{-}IBI<1.64$ 为较差,  $B\text{-}IBI<0.82$ 为极差。

$B\text{-}IBI$ 评价体系评价结果和 $BI$ 指数评价结果表明,黑河整体健康状况处于“良好”状态,河流健康状况在不同河段表现为中游河段>上游干流>上游支流。此外,由底栖动物完整性指数与水体各理化因子之间的相关性分析结果表明,黑河大型底栖动物完整性与水体温度、水体中氮、磷等营养物质以及水中溶解氧的相关性极大。

## 参考文献:

- [1] 朱卫红,曹光兰,李莹,等.图们江流域河流生态系统健康评价[J].生态学报,2014,34(14):3969-3977.
- [2] 王军,周琼,谢从新,等.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[J].环境科学研究,2015,28(6):959-966.
- [3] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [4] 周天舒,张亚,唐文乔,等.基于鱼类完整性指数的黄浦江水生生态系统评价[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):895-903.
- [5] 薛浩,郑丙辉,孟凡生,等.基于着生硅藻指数的梧桐河水生态健康评价[J].生态毒理学报,2018,13(4):83-90.
- [6] 张亚,余宏昌,毕宝帅,等.基于鱼类生物完整性指数的上海苏州河水生态系统健康评价[J].中国环境监测,2021,37(6):164-177.
- [7] 吕立鑫,祝亚楠,隋海潮,等.基于浮游藻类生物完整性指数的永安河小流域健康评价[J].安徽农业科学,2021,49(1):48-53.
- [8] 赵文超,王立权,李铁男,等.蚂蚁河上游大型底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J].水利科学与寒区工程,2021,4(3):84-88.
- [9] 王勤花,尉永平,张志强,等.干旱半干旱地区河流健康评价指标研究分析[J].生态科学,2015,34(6):56-63.
- [10] 郝媛媛.黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [11] 霍堂斌,崔晓文,姜作发,等.应用大型底栖动物完整性指数评价海拉尔河健康[J].生态学杂志,2013,32(9):2510-2516.
- [12] 王昱,孔德星,冯起,等.筑坝蓄水对夏季黑河氮磷营养盐空间分布特征的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(8):1001-1010.
- [13] 赵睿智,赵红雪,邱小琮.黑河干流浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J].水生态学杂志,2020,41(6):81-88.
- [14] 牛最荣,赵文智,黄维东,等.黑河下游生态调水对水资源时空变化的影响分析[J].水文,2011,31(5):52-56.
- [15] 程建忠,陆志翔,邹松兵,等.黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J].冰川冻土,2017,39(1):123-129.
- [16] 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.
- [17] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley [J]. Ecological Applications, 1994, 4(4): 768-785.
- [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,2021,32(15):4661-4672.
- [19] 周堂,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.
- [20] 许维,梁舒汀,黄艳凤,等.基于大型底栖动物的大清河水系水体健康状况评价[J].湿地科学,2020,18(5):546-554.
- [21] 黄彬彬,李光锦,丰茂成,等.基于底栖动物生物完整性指数的赣江干流健康评价[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):30-36+41.
- [22] 陈博,李卫明,陈求稳,等.夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响[J].环境科学学报,2014,34(7):1758-1765.
- [23] 王昱,李宝龙,冯起,等.黑河重金属空间分布及与大型底栖动物的关系[J].中国环境科学,2021,41(3):1354-1365.
- [24] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国

- 环境科学出版社, 2002.
- [25] 李勇. 中东太平洋金枪鱼延绳钓渔获组成及其多样性分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [26] Cummins K W, Klug M J. Feeding ecology of stream invertebrates[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1979, 10(1): 147-172.
- [27] Bode R W, Novak M A, Abele L E, et al. Quality Assurance Work Plan for Biological Stream Monitoring in New York State [M]. Albany, USA: Department of Environmental Conservation, 2002: 1-115.
- [28] 张葵, 王军, 葛奕豪, 等. 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[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5868-5878.
- [29] 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.
- [30] Renata R, Éder A G, Robert M H, et al. Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition[J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105862.
- [31] 孔凡青, 崔文彦, 周绪申. 基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的永定河水系生态健康评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 550-555.
- [32] 韦建福, 王延辉, 何豪, 等. 基于大型底栖无脊椎动物的南溪河水水质评价[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 51-58.
- [33] 林罗敏, 官昭瑛, 郑训皓, 等. 流溪河底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 2077-2084.
- [34] 张海燕, 沈丽娟, 周崑, 等. 基于底栖动物完整性指数的常州武南区域水生态健康评价[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 35-39+52.
- [35] 顾晓昀, 徐宗学, 王汨, 等. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1444-1454.
- [36] 王备新, 杨莲芳. 我国底栖动物BI指数水质生物评价标准的初步建立[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(5): 42.
- [37] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.

## Evaluation of aquatic ecosystem health in the middle and upper reaches of the Heihe River based on macrobenthic integrity index

Zhan Yang<sup>1</sup>, Wang Shuang<sup>2a</sup>, Chen Jiping<sup>3</sup>, Wang Yu<sup>2ab</sup>, Wang Yupeng<sup>4</sup>

(1. The Center of Water Conservancy Project Construction Cost and Regulation Fee Management, Gansu Province Water Resources Department, Lanzhou 730046, China; 2.a. College of Energy and Power Engineering / b. Key Laboratory of Energy Supply System Driven by Biomass Energy and Solar Energy, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Hydrologic Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 4. Linshui Water Conservancy Management Office of Honglin Irrigation Area, Suzhou District of Jiuquan City, Jiuquan 735000, Gansu, China)

**Abstract:** To investigate the health status of alpine inland rivers in China, macrobenthos and water samples were collected in July 2019, August 2020 and July 2021 in the upper and middle reaches of the Heihe River. The distribution range and discriminatory ability of biological parameters, as well as correlation analysis were used to construct a *B-IBI* evaluation system of the Heihe River. The Heihe *B-IBI* evaluation system was constructed, which was composed of the total number of taxa, the number of aquatic insect taxa, the top three dominant taxa, the percentage of predators, the percentage of sensitive taxa, and the percentage of pollution-tolerant taxa. The results showed that: (1) the river health evaluation grade of the Black River was obtained based on the ratio method:  $B-IBI > 3.28$  was healthy,  $2.46 < B-IBI < 3.28$  was good,  $1.64 < B-IBI < 2.46$  was fair,  $0.82 < B-IBI < 1.64$  was poor, and  $B-IBI < 0.82$  was very poor. (2) Both the *B-IBI* evaluation system and the *BI* index results show that the middle reaches of the Heihe River is in good condition.

**Key words:** Heihe River; macrobenthos; community structure; environmental factors