

无定河流域不同水土流失区底栖动物生物完整性指数构建与健康评价*

侯湘然¹, 潘保柱^{1**}, 侯易明¹, 胡恩², 贺瑶¹, 冯治远¹

(1: 西安理工大学, 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

(2: 陕西省环境科学研究院, 西安 710061)

摘要: 无定河流域位于黄土高原与毛乌素沙地过渡带, 水土流失严重, 生态环境具有脆弱性和波动性。于 2021 年春季 (4 月) 和秋季 (10 月) 对无定河流域上、中、下游及其 6 条支流和流域内的 3 个淤地坝开展水生生态系统调查, 旨在厘清无定河流域底栖动物群落特征, 构建底栖动物生物完整性指数并开展健康评价。无定河流域春季共采集到底栖动物 105 种, 平均密度为 181 ind./m², 平均生物量为 0.760 g/m², 秋季共采集到底栖动物 67 种, 平均密度为 94 ind./m², 平均生物量为 0.454 g/m²。通过对两季度研究区域内底栖动物 27 个生物参数开展分布范围检验、判别能力分析和相关性分析, 构建无定河流域底栖动物生物完整性指数, 对全流域 40 个样点 (6 个参照点和 34 个受损点) 进行 B-IBI 健康评价。评价结果表明, 总体上无定河流域底栖动物生物完整性较好, 40 个样点中春季有 19 个处于健康或亚健康状态, 秋季有 23 个处于健康或亚健康状态, 其中无定河上、中游干支流大都以健康和亚健康为主, 无定河下游干支流以及 3 个淤地坝水体健康状况较差。在不同水土流失类型区域, 底栖动物群落特征和生物完整性评价具有显著性差异。本研究结果可为无定河流域河流健康评估提供科学依据。

关键词: 无定河流域; 水土流失; 底栖动物完整性指数; 大型底栖无脊椎动物; 健康评价

Construction of benthic integrated biotic index and health assessment in different soil erosion areas of Wuding River Basin *

Hou Xiangran¹, Pan Baozhu^{1**}, Hou Yiming¹, Hu En², He Yao¹ & Feng Zhiyuan¹

(1: *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China*)

(2: *Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, P.R. China*)

Abstract: The Wuding River Basin is located in the transition zone between the Loess Plateau and the Mu Us Sandy Land, characterized by extensive soil erosion and a fragile and volatile ecological environment. In this study, water ecosystem surveys were conducted in the spring (April) and autumn (October) of 2021 in the upper, middle, and lower reaches of the Wuding River Basin, its six tributaries, and three check dams in the basin, to map the characteristics of the benthic community in the Wuding River Basin, constructing the benthic integrated biotic index of Wuding River and conducting health evaluation. A total of 105 species of benthic macroinvertebrates with an average density of 181 ind./m² and an average biomass of 0.760 g/m² were collected in the Wuding River Basin in spring, and 67 species of benthic macroinvertebrates with an average density of 94 ind./m² and an average biomass of 0.454 g/m² were collected in autumn. By carrying out distribution range test, discriminatory ability analysis and correlation analysis for 27 biological parameters of benthic macroinvertebrates in the study area in two seasons, we constructed the benthic integrated biotic index (B-IBI) of the Wuding River Basin, and carried out the B-IBI health evaluation for 40 sample sites (6 reference sites and 34 impaired sites) in the whole basin. The evaluation results showed that, in general, the benthic biotic integrity of the Wuding River Basin was good, with 19 of the 40 sampling sites in a healthy or sub-healthy state in spring and 23 in a healthy or

* 2022-12-07 收稿; 2023-07-07 收修改稿。

陕西省重点研发计划重点产业链 (群) 项目 (2021ZDLSF05-10) 资助。

** 通信作者; E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn。

sub-healthy state in autumn, of which the upper and middle reaches of the Wuding River were mostly healthy and sub-healthy, while the lower reaches of the Wuding River and the three check dams were in a poor state of health. There were significant differences in the characteristics of benthic communities and biological integrity evaluation in different soil erosion areas. The results of this study can provide a scientific basis for assessing the ecological health of the Wuding River Basin.

Keywords: Wuding River Basin; soil erosion; benthic integrated biotic index; benthic macroinvertebrates; health assessment

无定河流域位于黄土高原与毛乌素沙地过渡带,流域内沟壑纵横,底质较为疏松,夏季多暴雨,导致区域内水土流失严重,是黄河流域水土流失和沙化最严重的支流之一,其生态环境具有脆弱性和波动性^[1]。无定河流域是黄河中游典型的风水两相复合侵蚀区,也是黄土高原水土保持措施实施的重点区域,流域内按水土流失类型可分为河源梁涧区、风沙区和黄土丘陵沟壑区^[2],其中无定河上游主要为风沙区,以风力侵蚀为主,中下游主要为黄土丘陵沟壑区,以水力侵蚀为主^[3]。多年来,流域内采取了一系列如淤地坝等水土保持措施,具有滞洪拦泥、减少沟道产沙以及淤地造田的作用^[4]。长期以来,受自然和人为因素的综合作用^[5-6],无定河流域具有水少沙多的特点,在此流域开展生态健康评价对整个黄河流域的生态保护具有重要科学意义。

在河流生态健康评价中,采用生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)评价水生态系统健康状况是目前应用较为广泛的方法^[7]。IBI方法体系最初由 Karr^[8]在1981年提出,以鱼类为研究对象,建立了以鱼类为主的生物完整性指数(fish-index of biotical integrity, F-IBI),随后逐渐被应用于大型底栖无脊椎动物^[9]、浮游生物^[10]、高等维管束植物^[11]等生物。底栖动物具有种类多、生活周期长、迁移能力有限、便于采集等特点,且不同种类对水质的敏感性差异大,对环境的长期变化有着很好的指示作用,因此底栖动物的完整性指数(benthic-index of biotical integrity, B-IBI)被广泛地应用于河湖健康评价。我国对B-IBI的研究始于2000年以后,王备新等^[12]以安徽黄山地区的溪流为研究区域,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。张远等^[13]以辽河流域的河流为研究区域,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。张葵等^[14]以新疆伊犁河为研究区域,从时间尺度上对B-IBI指标体系的构建进行研究。以往研究B-IBI指标的构建多集中于山区河流,而对水土流失严重区域的研究尚未见报道,无定河作为黄河流域水土流失最严重的支流之一,地貌复杂且具有代表性,对无定河流域构建B-IBI指标评价体系,可探究水土流失对底栖动物群落特征的影响,也可为类似流域河流健康评价提供借鉴价值。

本研究对无定河流域开展了底栖动物群落调查,旨在厘清无定河流域底栖动物群落特征,构建大型底栖动物生物完整性指数并进行健康评价,以期对无定河流域以及类似水土流失严重区域的生态健康状况评估提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

无定河为黄河的一级支流,位于中国陕西省北部,是陕西榆林地区最大的河流,也是陕西输出粗沙最多的河流,它发源于白于山北麓,流经定边、靖边、米脂、绥德和清涧县,由西北向东南注入黄河,总体呈西北高、东南低的趋势。无定河干流全长491 km,流域面积30261 km²,海拔556~1824 m,地处半湿润、半干旱地区交界带,为温带大陆性季风气候,雨热同期^[1]。流域位于毛乌素沙漠东南缘,黄土高原北部,下垫面环境复杂,流域内沟壑纵横、土壤沙化、气候干旱、植被稀少、植物覆盖度低,是黄河流域水土流失和沙化最严重的支流之一^[15]。

本研究于2021年春季(4月)和秋季(10月)对无定河上、中、下游及其6条典型支流:海流兔河(HLTH)、芦河(LH)、榆溪河(YXH)、马湖峪河(MHYH)、大理河(DLH)、淮宁河(HNH),以及3个淤地坝:南沟大坝(NG)、榆林沟淤地坝(YLG)、韭园沟淤地坝(JYG),共40个样点开展系统的水生态调查。研究区域及调查河流见图1。

1.2 样品采集与鉴定

底栖动物样本采集参照《河流水生生物调查指南》^[16]。样品用筛网孔径420 μm、网口宽度0.3 m的手持D型网在河流浅滩处采集,淤地坝底栖动物用采泥器采集。每个采样点采集5个平行样,每个平行样的

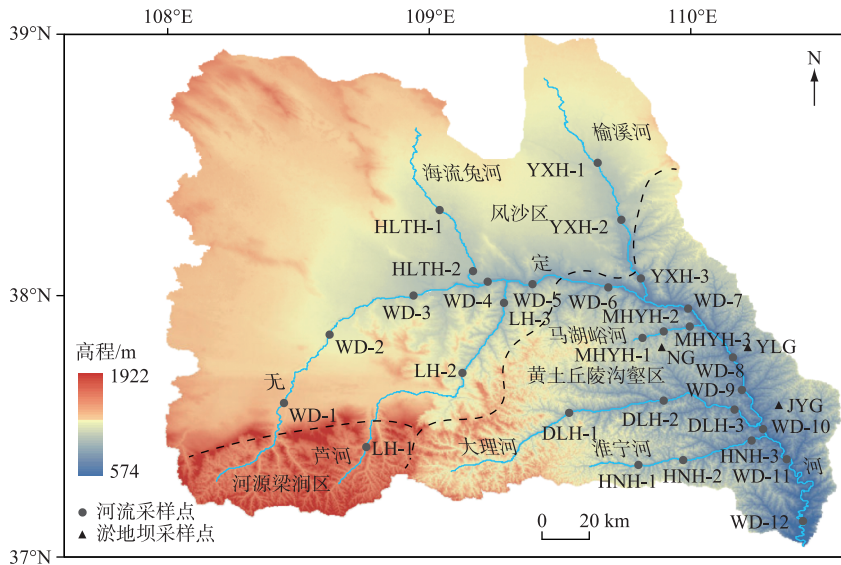


图1 无定河流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Wuding River Basin

采集面积为 0.3 m^2 。所有样品用河水淘洗后装入密封袋,在室内置于白瓷盘中进行分拣,并将分拣好的底栖动物标本放入装有 75% 浓度酒精的样本瓶中固定,带回实验室。在实验室中,利用解剖镜和显微镜对底栖动物样品进行物种鉴定、计数、称重。鉴定工作参照相关专业书籍及资料,将样品尽量鉴定至种,少数不能鉴定到种的样品,将其鉴定至科或属^[17-20],并确定底栖动物耐污值、敏感值及功能摄食类群^[21-23],以便为后续的指数计算提供参考。

1.3 参照点的选取

参照点的选择是影响生物完整性评价质量的关键因素,根据采样实际状况,选择生境接近自然状况,人类活动干扰较少,河床结构稳定的样点作为参照点。参照点的筛选一般按照采样点的被干扰程度,可以分为极小干扰点、轻微干扰点,极小干扰点是指几乎没有受到任何干扰,显示最原始河流景观状态的样点,轻微干扰点是指有轻微人类干扰迹象,显示现有最佳物理、化学和生物栖息地条件的样点,标准因地区而异^[24]。由于无定河流域人类活动强度普遍较高,几乎无法找到极小干扰点,因此,本研究结合郑丙辉等^[25]的评价方法,根据底质、栖息地复杂性、速度和深度结合特性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型 10 项评分标准对采样点进行栖息地质量评分(附表 I、II),每项满分 20 分,总分 200 分,基于栖息地质量评分结果和研究区域实际情况,选择大于等于 115 分的采样点作为参照点。最终选择无定河上游 WD-1、WD-2、WD-3,无定河中游 WD-8,马湖峪河 MHYH-2、MHYH-3 共 6 个采样点作为参照点。

1.4 B-IBI 指数体系的构建

构建 B-IBI 指数体系的基本步骤^[26-27]: (1) 确定候选生物指数; (2) 通过分布范围、判别能力和相关关系分析对生物指数进行筛选; (3) 确定每种生物指标值及 B-IBI 指数计算方法; (4) 确定底栖动物生物完整性的评价标准。

1.4.1 选取候选指数 参考相关文献^[28],并根据无定河流域水生态条件,选取 27 个 B-IBI 指标体系的候选生物指数(表 1),包括反映群落丰富度的指数 7 个、反映底栖动物种类个体数量比例的指数 8 个、反映生物耐污能力的指数 5 个、反映营养结构的指数 5 个,以及反映多样性指数的指数 2 个。

1.4.2 分布范围分析 确定候选生物指数后,对参照点的指数分布范围进行分析,并对以下几种指数予以剔除:对于随着干扰增强而值变小的指数,如果值过小,说明受干扰后指数可变范围过窄,则无法准确区分出

水体的干扰程度,不适于参与 B-IBI 指标体系构建;对于随着干扰增加而值变大的指数,如果值波动程度过大,也会导致该指数无法准确反映水体的受干扰程度,同样不适于参与 B-IBI 指标体系构建。若指数标准差过大,说明数据分散,指数不稳定,也不适于参与 B-IBI 指标体系构建^[29]。

表 1 27 个候选生物指数计算方法

Tab.1 Calculation method of 27 candidate biological indices

指标代码	指标类型	生物指数	计算方法	对于扰反应
M1	反映群落	总分类单元数	底栖动物的所有分类总数	减小
M2	丰富度	蜉蝣目分类单元数	底栖动物类群中蜉蝣目的种类数	减小
M3		毛翅目分类单元数	底栖动物类群中毛翅目的种类数	减小
M4		软体动物分类单元数	底栖动物类群中软体动物的种类数	减小
M5		双翅目分类单元数	底栖动物类群中双翅目的种类数	减小
M6		摇蚊科分类单元数	底栖动物类群中摇蚊科的种类数	增大
M7		EPT 分类单元数	E—蜉蝣目, P—襀翅目, T—毛翅目, 三目昆虫分类单元数	减小
M8		反映种类个体数量比例	优势分类单元个体相对丰度	个体数量最多的一个分类单元的个体数/总个体数
M9		毛翅目个体相对丰度	毛翅目个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M10		软体动物个体相对丰度	软体动物个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M11		双翅目个体相对丰度	双翅目个体数/采样点底栖动物群落总个体数	增大
M12		摇蚊科个体相对丰度	摇蚊科个体数/采样点底栖动物群落总个体数	增大
M13		其他双翅目+非昆虫类个体相对丰度	其他双翅目+非昆虫类个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M14		寡毛类个体相对丰度	寡毛类个体数/采样点底栖动物群落总个体数	不定
M15		EPT 个体相对丰度	蜉蝣目+襀翅目+毛翅目个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M16	反映生物耐污能力	敏感类群分类单元数	分类单元(种)耐污值 ≤ 3 的为敏感类群	减小
M17		耐污类群物种数相对丰度	耐污类群个体数/采样点底栖动物群落总个体数	增大
M18		FBI 指数(family biotic index)	采样点底栖动物所有分类单元科的耐污值与对应数量乘积和/该采样点所有底栖生物的总数	增大
M19		BMWP 指数(biological monitoring working party)	底栖动物所有科的敏感值相加	减小
M20		ASPT 指数(average score per taxon)	底栖动物所有科的敏感值相加/底栖动物中所有科的种数	减小
M21	反映营养结构	滤食者个体相对丰度	滤食者个体数/采样点底栖动物群落总个体数	不定
M22		撕食者+刮食者个体相对丰度	撕食者+刮食者个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M23		收集者个体相对丰度	收集者个体数/采样点底栖动物群落总个体数	不定
M24		捕食者个体相对丰度	捕食者个体数/采样点底栖动物群落总个体数	减小
M25		撕食者个体相对丰度	撕食者个体数/采样点底栖动物群落总个体数	增大
M26	多样性指数	Shannon-Wiener 指数(H)	$H = \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$ p_i 为 i 种生物个体数/采样点底栖动物群落总个体数, S 为该采样点所有底栖动物物种数	减小
M27		Simpson 指数(D)	$D = 1 - \sum_{i=2}^S p_i^2$	减小

1.4.3 判别能力分析 根据 Barbour 等^[30]的评判方法,利用箱形图法分析上述筛选后的候选指数在参照点与受损点的分布情况,比较各指数在参照点和受损点的箱体 IQ (即 25%~75%分位数范围)重叠情况,并分别赋予不同的分值: $IQ=3$,表示参照点和受损点箱体没有重叠; $IQ=2$,表示参照点和受损点部分重叠,但各自中位数在对方箱体范围之外; $IQ=1$,表示仅有一个中位数在对方箱体范围之内; $IQ=0$,表示各自的中位数都在对方箱体范围内。最后保留 $IQ \geq 2$ 的指数进行下一步分析。

1.4.4 相关性分析 对余下的指数进行 Spearman 相关分析,若两个候选指数 Spearman 相关系数 $|r| > 0.75$,则表明两个指数相关性较高,反映的信息重叠较大,根据两个候选指数反映信息的重要程度,选择其中一个^[31]。经过以上 3 步分析筛选,最终确定出构成 B-IBI 指数体系的核心指数。

1.4.5 生物指数数值计算 采用比值法^[32]统一评价量纲,对核心指数值的评分方法进行拟定:对于受到干扰而值降低的指数,以 95%分位数为最佳期望值,各参数的分值为参数实际值除以最佳期望值;对于受到干扰而值增加的指数,以 5%分位数为最佳期望值,分值=(最大值-实际值)/(最大值-最佳期望值)。

1.4.6 健康评价标准 将各指数的分值用比值法计算后,再对分值进行加和,得到 B-IBI 值,计算结果以参照点 B-IBI 值分布的 25%分位数作为健康评价的标准,对小于 25%分位数的分布范围进行四等分,得到 5 个范围,对应 5 个等级,即健康、亚健康、一般、较差、极差。

2 结果

2.1 底栖动物群落结构

无定河流域共鉴定到底栖动物 125 种(附表 III),其中春季 105 种,隶属于 4 门 7 纲 26 科,包括:环节动物 3 科 6 属 11 种,占物种总数的 10.5%;软体动物 2 科 2 属 2 种,占 1.9%;水生昆虫 18 科 60 属 89 种,占 84.8%;其他动物(节肢动物门的蛛形纲 1 科 1 属 1 种、甲壳纲 1 科 1 属 1 种,线形动物门 1 科 1 属 1 种)3 科 3 属 3 种,占 2.8%。春季全流域底栖动物平均密度为 181 ind./m²,平均生物量为 0.760 g/m²。秋季底栖动物 67 种,隶属 4 门 8 纲 27 科,包括:环节动物 3 科 4 属 5 种,占物种总数的 7.5%;软体动物 2 科 2 属 2 种,占 3%;水生昆虫 18 科 40 属 56 种,占 83.6%;其他动物(节肢动物门蛛形纲 1 科 1 属 1 种、软甲纲 1 科 1 属 1 种、甲壳纲 1 科 1 属 1 种,线形动物门 1 科 1 属 1 种)4 科 4 属 4 种,占 5.9%。秋季全流域底栖动物平均密度为 94 ind./m²,平均生物量为 0.454 g/m²。总体上无定河流域底栖动物种类较多,在春秋两季的底栖动物种类组成中,水生昆虫均为绝对优势类群,其中双翅目摇蚊科物种多样性最高。

2.2 B-IBI 指数体系

2.2.1 生物指数分布范围分析 计算春季 27 个指数在 6 个参照点的分布情况(附表 IV),M2、M4、M10、M16、M22、M25 这 6 个指数的 25%分位数、中位数、75%分位数均为 0,说明随着干扰增强,其值基本无法变动,不予考虑,M19 标准差过大,说明数据分散,指数不稳定,也不适于参与 B-IBI 指数体系构建,对剩余 20 个指数进行进一步分析。

计算秋季 27 个指数在 6 个参照点的分布情况(附表 V),M16、M25 这两个参数的 25%分位数、中位数、75%分位数均为 0,说明随着干扰增强,其值基本无法变动,不予考虑,M19 标准差过大,说明数据分散,指数不稳定,也不适于参与 B-IBI 指数体系构建,对剩余 24 个指数进行下一步分析。

2.2.2 判别能力分析 选择箱形图 $IQ \geq 2$ 的指数进行进一步研究,对春季 20 个指数进行箱形图分析(附图 I),各指标值在参照点和受损点的频数分布结果显示,M1、M5、M6、M8、M26、M27 等 6 个参数满足 $IQ \geq 2$,进入下一轮筛选。对秋季 24 个指数进行箱形图分析(附图 II),各指标值在参照点和受损点的频数分布结果显示,指数 M5、M6、M21、M26、M27 等 5 个参数满足 $IQ \geq 2$,进入下一轮筛选。

2.2.3 相关性分析 分别对两个季节经过判别能力筛选后的指数进行 Spearman 相关性分析(附表 VI、VII)。春季结果显示,M1、M5、M6 之间呈显著相关($|r| > 0.75$),且均为反映群落丰富度的指数,而 M1(总分类单元数)包含的信息更多,保留 M1;M8、M26、M27 之间呈显著相关,M26 和 M27 均为反映多样性的指数,保留 M26;M8 虽然与 M26 相关系数较高($|r| = 0.781$),考虑到 M8(优势分类单元个体相对丰度)为反映种类个体数量比例的指数,在完整性评价体系构建中较为重要,本研究中予以保留。即确定保留 M1、M8、M26 等 3 个指数来构建春季 B-IBI 指数体系。秋季结果显示,M5、M6、M26 之间呈显著相关,M5 和 M6 均为表示群落组

成结构的指数,而 M5(双翅目分类单元数)包含的信息相对较多,保留 M5;M26 和 M27 均为反映多样性的指数,删掉 M26。即确定保留 M5、M21、M27 等 3 个指数来构建秋季 B-IBI 指数体系。

2.2.4 生物指数分值计算及健康评价标准 根据各指数值在参照点所有采样点的分布,确定计算各指数分值的比值法的计算公式(附表 VIII),并依次计算各采样点的指数分值。

将各指数的分值用比值方法计算后,再对分值进行加和,得到 B-IBI 的指数值,以参照点 25% 分位数为健康评价的标准,对小于 25% 分位数的分布范围进行四等分。春季参照点 B-IBI 指数值的 25% 分位数为 2.48,因此比值法 B-IBI 评分标准为: B-IBI 值 > 2.48 为健康; 1.86 < B-IBI 值 ≤ 2.48 为亚健康; 1.24 < B-IBI 值 ≤ 1.86 为一般; 0.62 < B-IBI 值 ≤ 1.24 为较差; B-IBI 值 ≤ 0.62 为极差。秋季参照点 B-IBI 指数值的 25% 分位数为 1.80,因此比值法 B-IBI 评分标准为: B-IBI 值 > 1.80 为健康; 1.35 < B-IBI 值 ≤ 1.80 为亚健康; 0.90 < B-IBI 值 ≤ 1.35 为一般; 0.45 < B-IBI 值 ≤ 0.90 为较差; B-IBI 值 ≤ 0.45 为极差。

2.3 B-IBI 指标体系的评价结果

根据健康评价标准得出无定河流域河流健康评价结果(表 2),春季 40 个采样点中有 5 个处于健康状态,14 个处于亚健康状态,12 个处于一般状态,7 个处于较差状态,2 个处于极差状态。秋季无定河流域采样点中有 13 个处于健康状态,10 个处于亚健康状态,9 个处于一般状态,3 个处于较差状态,5 个处于极差状态。

表 2 无定河流域各河段 B-IBI 评价结果

Tab.2 B-IBI results for each sampling sites in the Wuding River Basin

河流名称	采样点		春季		秋季	
	编号	性质	B-IBI 值	评价结果	B-IBI 值	评价结果
无定河上游	WD-1	参照点	2.00	亚健康	1.68	亚健康
	WD-2	参照点	2.85	健康	2.54	健康
	WD-3	参照点	3.04	健康	1.50	亚健康
	WD-4	受损点	1.98	亚健康	1.94	健康
无定河中游	WD-5	受损点	2.28	亚健康	2.48	健康
	WD-6	受损点	2.24	亚健康	1.88	健康
	WD-7	受损点	2.24	亚健康	2.04	健康
	WD-8	参照点	3.00	健康	2.34	健康
	WD-9	受损点	2.14	亚健康	1.08	一般
无定河下游	WD-10	受损点	1.75	一般	1.69	亚健康
	WD-11	受损点	1.44	一般	2.01	健康
	WD-12	受损点	2.27	亚健康	1.34	一般
海流兔河	HLTH-1	受损点	1.56	一般	1.95	健康
	HLTH-2	受损点	2.30	亚健康	0.00	极差
芦河	LH-1	受损点	2.05	亚健康	1.15	一般
	LH-2	受损点	1.86	亚健康	1.50	亚健康
	LH-3	受损点	2.33	亚健康	1.09	一般
榆溪河	YXH-1	受损点	1.83	一般	1.68	亚健康
	YXH-2	受损点	1.73	一般	1.37	亚健康
	YXH-3	受损点	1.00	较差	1.43	亚健康
马湖峪河	MHYH-1	受损点	2.64	健康	1.58	亚健康
	MHYH-2	参照点	3.04	健康	2.16	健康
	MHYH-3	参照点	2.36	亚健康	2.39	健康
大理河	DLH-1	受损点	1.83	一般	0.00	极差
	DLH-2	受损点	0.85	较差	1.88	健康
	DLH-3	受损点	2.10	亚健康	1.29	一般

续表 2

河流名称	采样点		春季		秋季	
	编号	性质	B-IBI 值	评价结果	B-IBI 值	评价结果
淮宁河	HNH-1	受损点	1.60	一般	1.75	亚健康
	HNH-2	受损点	0.22	极差	1.86	健康
	HNH-3	受损点	0.89	较差	1.95	健康
南沟大坝水体	NG-1	受损点	1.50	一般	0.88	较差
	NG-2	受损点	1.05	较差	1.22	一般
	NG-3	受损点	1.65	一般	1.50	亚健康
	NG-4	受损点	0.70	较差	1.33	一般
	NG-5	受损点	1.83	一般	1.18	一般
榆林沟淤地坝水体	YLG-1	受损点	1.00	较差	0.00	极差
	YLG-2	受损点	1.70	一般	0.00	极差
	YLG-3	受损点	1.91	亚健康	0.94	一般
韭园沟淤地坝水体	JYG-1	受损点	0.06	极差	0.00	极差
	JYG-2	受损点	1.42	一般	0.85	较差
	JYG-3	受损点	1.00	较差	0.66	较差

春季无定河上、中游整体处于健康—亚健康状态,其中,上游中段和中游后半段均为健康状态,其余河段样点为亚健康状态;无定河下游处于亚健康—一般状态。支流及淤地坝中,海流兔河处于亚健康—一般状态;芦河和马湖峪河均处于健康—亚健康状态;榆溪河处于一般—较差状态;大理河处于亚健康—一般—较差状态;南沟大坝、榆林沟淤地坝处于一般—较差状态。淮宁河、韭园沟淤地坝处于一般—较差—极差状态。

秋季无定河上游处于健康—亚健康状态;无定河中游多为健康状态,后半段存在一般状态;无定河下游处于健康—亚健康—一般状态。支流及淤地坝中,海流兔河和大理河处于健康—极差状态;芦河处于亚健康—一般状态;榆溪河、马湖峪河和淮宁河均处于健康或亚健康状态;南沟大坝处于亚健康—一般—较差状态;榆林沟淤地坝处于一般—极差状态;韭园沟淤地坝处于较差—极差状态。

用箱形图法分析两个季节参照点与受损点 B-IBI 值的分布情况(图 2),分别对春秋两季参照点与受损点的 B-IBI 值进行 Mann-Whitney U 非参数检验,结果表明春秋两季河流参照点与受损点之间 B-IBI 值均存在显著差异($P < 0.05$),两个季节参照点的 B-IBI 值均显著高于受损点,表明本研究所构建的无定河流域 B-IBI 健康评价体系适用性良好。

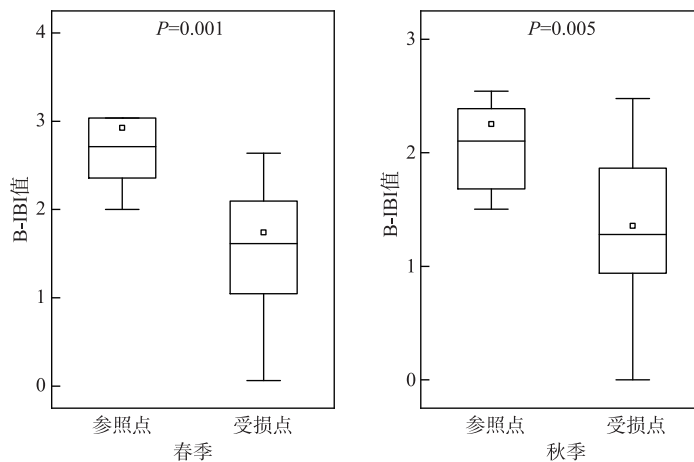


图 2 两个季节参照点与受损点的 B-IBI 分值箱型图

Fig.2 Box plots of B-IBI scores for two seasons between reference and impaired sites

2.4 不同水土流失类型区对底栖动物群落特征及完整性评价的影响

研究区域主要涉及黄河中游典型的风沙区和黄土丘陵沟壑区两个水土流失类型区,计算两个区域在春秋两季的平均密度和物种数,由于春秋两季的 B-IBI 健康评价标准不同,根据评价等级进行百分制赋分,即将评价结果的“健康、亚健康、一般、较差、极差”分别赋予“100、80、60、40、20”的分值,并计算两个区域在春秋两季的 B-IBI 百分制平均值。对两个区域在春秋两季以及春秋两季在两个区域的密度、物种数和 B-IBI 百分制分值分别进行 Mann-Whitney U 非参数检验(表 3),根据检验结果,风沙区的密度和物种数在春、秋两季具有显著差异($P<0.05$)。

表 3 底栖动物密度、物种数及完整性评价在不同水土流失类型区的差异性检验
Tab.3 The difference test of benthic density, species number and integrity evaluation in different soil and water loss areas

	<i>n</i>	春季	秋季	M-W 检验(<i>P</i> 值)
密度				
风沙区	12	96.75	12.33	0.003
黄土丘陵沟壑区	20	42.93	26.21	0.140
M-W 检验(<i>P</i> 值)		0.102	0.320	
物种数				
风沙区	12	72	33	0.002
黄土丘陵沟壑区	20	68	60	0.569
M-W 检验(<i>P</i> 值)		0.058	0.184	
B-IBI 百分制				
风沙区	12	78.33	78.33	0.639
黄土丘陵沟壑区	20	66	77	0.103
M-W 检验(<i>P</i> 值)		0.111	0.935	

3 讨论

无定河流域不同季节的底栖动物群落特征表明,无定河流域春季底栖动物物种数、密度和生物量皆高于秋季。在物种数上,水生昆虫由春季的 89 种减少至秋季的 56 种,主要减少的物种隶属于摇蚊科,这可能是由于春季气温回升,有利于摇蚊生长,物种数显著提高^[33],而秋季因为经历过夏季的集中降雨,黄土土质疏松易受降水侵蚀^[1],流域内水土流失较为严重,河床稳定性降低,底栖动物生境被破坏后未能完全恢复,从而导致秋季水生昆虫物种数较少^[34-35]。在现存量上,无定河流域整体上底栖动物密度和生物量春季要高于秋季,除了春季气温回升有利于底栖动物生长外^[36],还可能归因于摇蚊在秋季经历羽化迁出^[37],导致数量减少。从空间尺度上看,无定河干流底栖动物物种数上游多于中、下游,支流中处于无定河上游的支流马湖峪河物种数较多,淤地坝水体物种数最少。底栖动物物种组成空间差异可能归因于流域内地形地貌及土地利用状况的差异,无定河上游河道主要为风沙地貌,地表物质以粗颗粒风沙为主,地形较为平坦,水力侵蚀相对较少^[38],而中下游主要位于黄土丘陵沟壑区,水力侵蚀加剧,同时河岸两边耕地面积占比较大,水土流失严重^[15],农业面源污染的影响相应增加,致使水生生物多样性下降。榆溪河底栖动物物种数最低,是因为榆溪河受到了农业面源污染,并且河流经过城区,生产生活污水也对其造成一定的污染。

本研究对无定河流域两个季节进行了 B-IBI 健康评价,评价结果显示秋季无定河流域整体的健康状况要稍好于春季,可能归因于春季虽然河床稳定,但是河流流动性差,且摇蚊种类较多,而秋天为雨季后期,河流相对流量大,摇蚊种类减少,蜉蝣目、毛翅目种类增加,因此秋季的健康状况要稍好于春季。基于 B-IBI 健康评价结果,有 12 个采样点在两个季节里均处于亚健康及以上状态,底栖动物生物完整性比较稳定,这些采样点位于无定河干流上游全段、中游上半段以及中、上游部分支流,如芦河中段和马湖峪河全段,这些河段的特点是河岸较为稳定,渠道化较少,水质较为清澈,人类活动干扰较少。评价结果处于较差及以下状态的样点大多位于无定河下游支流和淤地坝水体,这些河段距离城镇和农田较近,土质疏松,人类活动强度

大,并且两个季节的评价结果改变较大,生物完整性不稳定。淤地坝作为修筑在水土流失严重区域的人工堤坝,因其底层泥沙淤积厚度深,生境单一,故仅少数直接收集者如摇蚊幼虫及寡毛类存活。

本研究表明,无定河流域的水土流失现象对流域内底栖动物群落特征有显著影响($P < 0.05$),且底栖动物的群落特征在风沙区受到的季节性影响更大。风沙区以风力侵蚀为主,而黄土丘陵沟壑区则以水力侵蚀为主^[2],流域内集中降雨及水力侵蚀主要集中在7—8月^[39-40],秋季相较春季而言,受到了洪水过程的影响。在春季,底栖动物的密度和物种数都表现为风沙区高于黄土丘陵沟壑区,表明此时风沙区的水生生态状态较黄土丘陵沟壑区更稳定。而在秋季,底栖动物的密度和物种数在两个区域均显著下降,且风沙区结果低于黄土丘陵沟壑区,表明风沙区在经历集中降雨后,底栖动物的群落受到的影响更大,而黄土丘陵沟壑区由于长年累月经受过水力侵蚀的影响,下降幅度相对较小,同时也归因于下游黄土丘陵沟壑区集中了大量的淤地坝,有效拦蓄了入河泥沙,降低了高强度的水力侵蚀^[41]。

无定河流域具有水少沙多、暴雨集中、土质疏松、天然植被稀少、自然侵蚀强烈的特点,并且有不同类型的水土流失区,构建此类流域底栖动物生物完整性指数的难点主要在于参照点的选择和指数体系的构建。参照点的选择是生物完整性评价的关键步骤^[42],以往的研究中选择参照点的方法不尽相同^[43-45],基本依据水质质量、现场评估人类干扰强度和河岸带土地利用类型来选择。本研究中无定河流域属于黄土高原区域,是水土保持的重点治理区,经过夏季水文过程后,会导致水土流失和河床淤积,因此,在参照点的选择过程中,除了要选择人类干扰强度小的样点之外,还要考虑选择经过丰水期后未受水土流失影响或影响较小的样点。无定河上游上半河段附近基本为草地和未利用土地,且属于风沙区,水力侵蚀较少,无定河中游和马湖峪河的部分采样点附近草地居多,远离居民区^[46],故选择无定河上游3个采样点、中游1个采样点以及马湖峪河2个采样点作为参照点。根据春秋两季参照点和受损点B-IBI值的Mann-Whitney U非参数检验结果,参照点与受损点之间B-IBI值存在显著差异,两个季节参照点的B-IBI值均显著高于受损点,表明本研究所构建的无定河流域B-IBI健康评价体系适用性较好。郑丙辉^[25]研究中采用的生境打分法包括了10项评分标准,在类似水土流失较为严重的河流选择参照点时,建议评分应侧重于堤岸稳定性、河道变化等方面。

在生物完整性评价中,指数体系的构建也同样非常重要。本研究选取了M1(总分类单元数)、M8(优势分类单元个体相对丰度)和M26(Shannon-Wiener指数)3个核心指数构成无定河流域春季B-IBI指数体系,选取M11(双翅目分类单元数)、M21(滤食者个体相对丰度)和M27(Simpson指数)3个核心指数构成无定河流域秋季B-IBI指数体系,两季度B-IBI健康评价体系的核心指数和B-IBI值的差异性表明,在类似黄土高原等水土流失严重区域中,对水生生物开展多季节调查具有重要意义。在构建无定河流域底栖动物生物完整性指数体系的过程中,摇蚊是两个季度底栖动物物种组成的主要类群,无定河流域作为典型的生态脆弱地区,由于区域内生境的不稳定性,更适合摇蚊这类个体小、繁殖快、生活周期短的类群恢复和繁衍,因此,在生物完整性指标的选择时,需要考虑流域内主要类群的相关参数,类似本文中对于双翅目中摇蚊类群的选择,更能反映流域生物完整性的特点。此外,M1、M8、M11、M26和M27等能够表征物种丰富度、优势种和多样性的指数也是无定河完整性构建的核心参数,这在以往河流中也常被用到^[43,47-50]。同时,在开展生物完整性研究时,还需要关注水土流失区域的季节性变化,建议在一个水文年内至少进行两次调查来进行研究,并尽量避开一些干扰性较强的季节(如夏季),以保证评价结果的准确性和科学性。

根据对无定河流域的底栖动物群落特征分析和B-IBI评价结果,对黄土高原地区的生态治理提供以下几条建议:(1)无定河流域上游底栖动物生物完整性处于亚健康及以上状态,评价结果相对较好,该区域主要位于风沙区,应持续推行退耕还林等政策,在降低风力侵蚀的同时,还要注意改善河道周围植被状况,提高水土保持能力,确保源头的水质水量;(2)中下游干支流完整性评价等级较低,该区域主要位于黄土丘陵沟壑区,应加强水土保持措施,如在水力侵蚀严重区域增加淤地坝的修建,并对已有淤地坝进行维护和改进,提高拦蓄入河泥沙的能力;(3)中下游支流,如榆溪河等,底栖动物物种数较少,应加强农业面源污染治理,控制周边污水排放,相关部门做好宣传教育,工业废水和居民生活污水必须经处理达标后排放,以改善水质,提高底栖动物生境质量。

4 结论

无定河流域共鉴定底栖动物125种,春季鉴定出105种,秋季鉴定出67种。春季物种数、密度和生物量

均明显高于秋季,归因于春季气温开始回升,水生昆虫大量繁殖,而部分摇蚊在秋季经历羽化迁出。基于 B-IBI 健康评价体系,春季 47.5% 的样点处于亚健康及以上状态,秋季 57.5% 的样点处于亚健康及以上状态,其中多集中分布在干流上游和中游上半段及上、中游支流,主要原因是这些河段河岸较为稳定,人类活动影响较小。在不同水土流失类型区域,底栖动物群落特征和生物完整性评价具有显著性差异。本研究对黄土高原区域、多沙河流区域内底栖动物生物完整性指数的构建具有重要意义。

5 附录

附表 I ~ VIII 和附图 I ~ II 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0138)。

6 参考文献

- [1] Wang YD, Li J, Zhou ZX *et al.* Simulation and analysis of supply, demand and flow of soil conservation service in the Wuding River Basin, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(3): 138-145. [王玉丹, 李晶, 周自翔等. 无定河流域水土保持服务供需关系及服务流模拟. 水土保持学报, 2022, **36**(3): 138-145.]
- [2] Ren ZP, Ma YY, Wang YS *et al.* Runoff changes and attribution analysis in tributaries of different geomorphic regions in Wuding River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4309-4318. DOI: 10.5846/stxb201805221120. [任宗萍, 马勇勇, 王友胜等. 无定河流域不同地貌区径流变化归因分析. 生态学报, 2019, **39**(12): 4309-4318.]
- [3] Han XN, Xie SY, Gao YF. Study on sediment retaining effect of check dams in Wuding River Basin in recent years. *Yellow River*, 2018, **40**(11): 5-8, 37. [韩向楠, 谢世友, 高云飞. 近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究. 人民黄河, 2018, **40**(11): 5-8, 37.]
- [4] Ma YD, Yang S, Han J *et al.* Remote sensing interpretation of check dams in Wuding River Basin in Yulin Area of Shaanxi Province. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(3): 786-791. [马煜栋, 杨帅, 韩静等. 陕西榆林地区无定河流域淤地坝遥感解译. 干旱区地理, 2022, **45**(3): 786-791.]
- [5] Zhao X, Wang L, Zheng S *et al.* Analysis on community characteristics and environmental factors of plankton and zoobenthos in headwater area of Wudinghe River Watershed; A tributary of Mid Yellow River. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(10): 121-132. [赵鑫, 王琳, 郑帅等. 黄河中游支流无定河流域源头区浮游生物和底栖动物群落特征与环境因子分析. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(10): 121-132.]
- [6] Wang SM, Huang C. Ecological environment quality monitoring and evaluation based on remote sensing and GIS techniques: A case of Wuding River Basin. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(1): 134-141. [王思梦, 黄昌. 基于遥感和 GIS 的流域自然生态环境质量监测与评价——以无定河流域为例. 干旱区地理, 2018, **41**(1): 134-141.]
- [7] Xu ZX, Wu W, Yin XW. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, **36**(1): 23-30. [徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生生态系统群落结构特征及其健康评价. 水利水电科技进展, 2016, **36**(1): 23-30.]
- [8] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.
- [9] Karr JR, Chu EW. Sustaining living rivers. *Hydrobiologia*, 2000, **422**: 1-14. DOI: 10.1023/A: 1017097611303.
- [10] Silow EA, In-Hye O. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecological Indicators*, 2004, **4**(3): 189-198. DOI: 10.1016/j.ecolind.2004.03.003.
- [11] Karr JR. Ecological integrity and ecological health are not the same. In: Schulze P ed. *Engineering within ecological constraints*. Washington DC: National Academy Press, 1995: 97-109.
- [12] Wang BX, Yang LF, Hu BJ *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1481-1490. [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): 1481-1490.]
- [13] Zhang Y, Xu CB, Ma XP *et al.* Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 919-927. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2007.06.005. [张远, 徐成斌, 马溪平等. 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.]
- [14] Zhang K, Wang J, Ge YH *et al.* 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. DOI: 10.5846/stxb202002280365. [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. 生态学报, 2021, **41**(14): 5868-5878.]
- [15] Zhang LL, Xu CY, Lei B *et al.* Analysis of soil erosion in Wuding River Basin, Shaanxi Province. *Shaanxi Water Resources*, 2020, (12): 142-143, 146. [张琳琳, 徐春燕, 雷波等. 陕西省无定河流域水土流失状况分析. 陕西水利, 2020, (12): 142-143, 146.]
- [16] 陈大庆. 河流水生生物调查指南. 北京: 科学出版社, 2014.
- [17] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫. 北京: 中国言实出版社, 2011.

- [18] 刘月英. 中国经济动物志: 淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.
- [19] Morse JC, Yang L, Tian L *et al.* Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing; Hohai University Press, 1984.
- [20] 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.
- [21] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable River: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish; 2nd edition. Washington, DC: US EPA, Office of Water, 1999: B1-B50.
- [22] Zhao R, Gao X, Ding S *et al.* Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(14): 4797-4809. DOI: 10.5846/stxb201311082699. [赵瑞, 高欣, 丁森等. 辽河流域大型底栖动物耐污值. 生态学报, 2015, **35**(14): 4797-4809.]
- [23] Leng LL, Zhang HP, Zhang M *et al.* Application of the biological monitoring working party (BMWP) score system of macroinvertebrates for river health in Taizi River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(11): 1781-1788. [冷龙龙, 张海萍, 张敏等. 大型底栖动物快速评价指数 BMWP 在太子河流域的应用. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(11): 1781-1788.]
- [24] Stoddard JL, Larsen DP, Hawkins CP *et al.* Setting expectations for the ecological condition of streams: The concept of reference condition. *Ecological Applications; a Publication of the Ecological Society of America*, 2006, **16**(4): 1267-1276. DOI: 10.1890/1051-0761(2006)016[1267: seftec]2.0.co;2.
- [25] Zheng BH, Zhang Y, Li YB. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Science Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928-936. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2007.06.006. [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. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 928-936.]
- [26] Huang BB, Li GJ, Feng MC *et al.* Health assessment of Ganjiang River mainstream based on B-IBI. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, **31**(5): 30-36, 41. [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. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(5): 30-36, 41.]
- [27] Wang ZZ, Li YH, Pang JP *et al.* Application of B-IBI in the health evaluation of the Qingshui River Basin. *China Water Transport (second half)*, 2013, **13**(7): 131-133. [王振钟, 李艳华, 庞家平等. 底栖生物完整性指数在清水河流域健康评价中的应用. 中国水运(下半月), 2013, **13**(7): 131-133.]
- [28] Geng SW, Qu XD, Zhang Y *et al.* Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2281-2287. DOI: 10.13227/j.hjkk.2012.07.002. [耿世伟, 渠晓东, 张远等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用. 环境科学, 2012, **33**(7): 2281-2287.]
- [29] Mu LQ, Zhang HP, Zhao SQ *et al.* River health assessment of Yongding River based on benthic integrated biotic index. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(4): 697-707. [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. 环境科学研究, 2018, **31**(4): 697-707.]
- [30] 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.
- [31] Maxted JR, Barbour MT, Gerritsen J *et al.* Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**(1): 128-144.
- [32] Blocksom KA, Kurtenbach JP, Klemm DJ *et al.* 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. DOI: 10.1023/A: 101609625401.
- [33] Zhang K, Cui YJ, Chen SS *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of macrozoobenthos and their relationship with environmental factors in Huangbai River, a first-class tributary of the Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2022, **52**(5): 3-16. [张坤, 崔玉洁, 陈圣盛等. 长江一级支流黄柏河大型底栖动物时空分布特征及其与环境因子的关系. 淡水渔业, 2022, **52**(5): 3-16.]
- [34] Zhu PH, Pan BZ, Li ZW *et al.* Macroinvertebrate communities characteristics and their responses to fluvial geomorphological feature of typical debris flow gullies in the Xiaojiang River Basin, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 869-880. DOI: 10.18307/2019.0325. [朱朋辉, 潘保柱, 李志威等. 云南小江流域典型泥石流沟中底栖动物群落特征及其对河流地貌的响应. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 869-880.]
- [35] 赵娜. 河床演变对底栖动物群落的影响研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [36] Xiong CH, Zhang RL, Ji GH *et al.* Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Gehu, Jiangsu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(3): 927-936. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201603.039. [熊春晖, 张瑞雷, 季高等. 江苏瀕湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 927-936.]
- [37] Guo XW. Biological characteristics and annual population variance of three chironomid species (Diptera: Chironomidae) from South Lake (Wuhan), China. *J Lake Sci*, 1995, **7**(3): 249-255. DOI: 10.18307/1995.0307. [郭先武. 武汉南湖三种摇蚊幼虫生物学特性及其种群变动的研究. 湖泊科学, 1995, **7**(3): 249-255.]
- [38] Yan M, Zhang YH, He L *et al.* Blocking effect of upper reaches of Wuding River on desertification. *Journal of Desert Research*, 2022, **42**(2): 62-68. [颜明, 张应华, 贺莉等. 无定河上游河道对沙漠化的阻截效应. 中国沙漠, 2022, **42**(2): 62-68.]
- [39] Li MN, Yu KX, Zhang X *et al.* Variation characteristics of extreme sediment and its influencing factors in the Wuding River Basin. *Journal*

- of *Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(1): 114-122. [李梦楠, 于坤霞, 张翔等. 无定河流域极端泥沙变化特征及其影响因素. 水土保持学报, 2023, **37**(1): 114-122.]
- [40] Nong XX, Nie WB, Ma XY. Baseflow variation and driving factors in the blown-sand region of Wuding River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(1): 103-113. [农晓星, 聂卫波, 马孝义. 无定河流域风沙滩区河道基流变化规律与驱动因素分析. 水土保持学报, 2023, **37**(1): 103-113.]
- [41] Zhang D, Zhao Y, Zhao H. Dynamic monitoring of soil and water loss at Wuding River Basin, a typical tributary of middle reaches of Yellow River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(3): 89-94, 147. [张栋, 赵院, 赵辉. 黄河中游典型支流无定河流域水土流失动态监测. 水土保持通报, 2022, **42**(3): 89-94, 147.]
- [42] Schmidt SI, König-Rinke M, Kornek K *et al.* Finding appropriate reference sites in large-scale aquatic field experiments. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(1): 169-179. DOI: 10.1007/s10452-007-9155-6.
- [43] Hu F, Liu JT, Wen CY *et al.* Macroinvertebrate community structure and health assessment of Fuhe River based on benthic integrated biotic index. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(1): 30-39. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202003250075. [胡芳, 刘聚涛, 温春云等. 抚河流域底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价. 水生态学杂志, 2022, **43**(1): 30-39.]
- [44] Li Q, Yang LF, Wu J *et al.* Stream health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Xitaoxi Stream, Zhejiang Province, China. *Environmental Science*, 2007, **28**(9): 2141-2147. DOI: 10.13227/j.hjcx.2007.09.011. [李强, 杨莲芳, 吴璟等. 底栖动物完整性指数评价西苕溪溪流健康. 环境科学, 2007, **28**(9): 2141-2147.]
- [45] Rawer-Jost C, Zenker A, Böhrer J. Reference conditions of German stream types analyzed and revised with macroinvertebrate fauna. *Limnologia*, 2004, **34**(4): 390-397. DOI: 10.1016/s0075-9511(04)80008-2.
- [46] Li SJ, Han X, Wang WH *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 220-229. DOI:10.13227/j.hjcx.202103039. [李书鉴, 韩晓, 王文辉等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素. 环境科学, 2022, **43**(1): 220-229.]
- [47] Fu L, Jiang Y, Liu Q *et al.* Eco-health assessment of Dongjiang River Basin based on index of biotic integrity (B-IBI) of macroinvertebrates. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(8): 1502-1511. [付岚, 江源, 刘琦等. 基于大型底栖动物完整性指数 B-IBI 的东江流域水生态健康评价. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1502-1511.]
- [48] Tian P, Qian C, Lin JN *et al.* Study of river health assessment based on the benthic index of biological integrity in the Luanhe River Basin. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 50-58. [田鹏, 钱昶, 林佳宁等. 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.]
- [49] Wang JH, Tian JH, Lu XG. Assessment of stream habitat quality in Naoli River Watershed, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 481-486. DOI: 10.1016/S1872-5813(11)60001-7. [王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价. 生态学报, 2010, **30**(2): 481-486.]
- [50] Xiong CH, Zhang RL, Xu YP *et al.* Health assessment on rivers in Shanghai City using benthic index of biotic integrity. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1067-1078. DOI: 10.18307/2015.0611. [熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍等. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1067-1078.]

附表I 栖息地质量评分

Attached tab.I Habitat quality assessment scales

评价指标	好	较好	一般	差
底质	75%以上是碎石、卵石、大石, 余为细沙等沉积物 20 19 18 17 16	50%~75%是碎石、鹅卵石、大石, 余为细沙等沉积物 15 14 13 12 11	25%~50%是碎石、鹅卵石、大石, 余为细沙等沉积物 10 9 8 7 6	碎石、鹅卵石、大石少于 25%, 余为细沙等沉积物 5 4 3 2 1 0
栖息复杂性	有水生植被、枯枝落叶、倒木、倒凹河岸和巨石等各种小栖息境 20 19 18 17 16	有水生植被、枯枝落叶和倒凹河岸等小栖息境 15 14 13 12 11	以 1 种或 2 种小栖息境为主 10 9 8 7 6	以 1 种小栖息境为主, 底质多以淤泥或细沙为主 5 4 3 2 1 0
速度和深度结合特性	慢—深、慢—浅、快—深和快—浅 4 种类型均有, 近乎平均分布 20 19 18 17 16	只有 3 种情况(如快—浅未出现, 分值较低) 15 14 13 12 11	只有 2 种情况出现(如快—浅和慢—浅未出现, 分值较低) 10 9 8 7 6	只有 1 种类型出现 5 4 3 2 1 0
堤岸稳定性	河岸稳定, 无侵蚀痕迹, 观察范围内(100 m)小于 5%河岸受到损害 20 19 18 17 16	比较稳定, 观察范围内(100 m)有 5%~30%的面积出现侵蚀现象 15 14 13 12 11	观察范围 30%~60%面积发生侵蚀, 且洪水期可能会有较大隐患 10 9 8 7 6	观察范围内 60%以上的河岸发生侵蚀 5 4 3 2 1 0
河道变化	渠道化没有或很少, 河道维持正常模式 20 19 18 17 16	渠道化较少, 通常出现于桥墩周围, 对水生生物影响较小 15 14 13 12 11	渠道化较广泛, 出现于两岸有筑堤或桥梁支柱的情况下, 对水生生物有一定影响 10 9 8 7 6	河岸由铁丝和水泥固定, 对水生生物影响严重, 使其栖息完全改变 5 4 3 2 1 0
河水水量状况	水量较大, 河水淹没到河岸两侧, 或仅有少量的河道暴露 20 19 18 17 16	水量比较大, 河水淹没 75%左右的河道 15 14 13 12 11	水量一般, 河水淹没 25%~75%的河道 10 9 8 7 6	水量很小, 河道干涸 5 4 3 2 1 0
植被多样性	河岸周围植被种类很多, 面积大, 河岸植被覆盖 50%以上 20 19 18 17 16	河岸周围植被种类比较多, 面积一般, 河岸植被覆盖 50%~25% 15 14 13 12 11	河岸周围植被种类比较少, 面积较小, 河岸植被覆盖少于 25% 10 9 8 7 6	河岸周围几乎没有任何植被, 河岸无植被覆盖 5 4 3 2 1 0
水质状况	很清澈, 无任何异味, 河水静置后无沉淀物质 20 19 18 17 16	较清澈, 轻微异味, 河水静置后有少量的沉淀物质 15 14 13 12 11	较浑浊, 有异味, 河水静置后有沉淀物质 10 9 8 7 6	很浑浊, 大量的刺激性气体溢出, 河水静置后沉淀物很多 5 4 3 2 1 0
人类活动强度	无人类活动干扰或少有人类活动 20 19 18 17 16	人类干扰较小, 有少量的步行者或自行车通过 15 14 13 12 11	人类干扰较大, 少量机动车通过 10 9 8 7 6	人类干扰很大, 交通必经之路, 有机动车通过 5 4 3 2 1 0
河岸土地利用类型	河岸两侧无耕作土壤, 营养丰富 20 19 18 17 16	河岸一侧无耕作土壤, 另一侧为耕作土壤 15 14 13 12 11	河岸两侧耕作土壤, 需要施加化肥和农药 10 9 8 7 6	河岸两侧为耕作废弃的裸露的风化土壤层, 营养物质很少 5 4 3 2 1 0

附表II 无定河流域栖息地质量评分

Attached tab.II Habitat quality assessment scales in Wuding River Basin

	断面名 称	底 质	栖息复杂 性	速度与深度结合特 性	堤岸稳定 性	河道变 化	河水水量状 况	植被多样 性	水质状 况	人类活动强 度	河岸土地利用类 型	总计
无定河上 游	WD-1	5	9	4	13	19	12	11	11	14	18	116
	WD-2	10	7	8	13	16	16	16	15	16	16	133
	WD-3	5	9	5	9	18	14	12	15	14	18	119
	WD-4	5	11	6	16	12	9	11	10	14	12	106
无定河中 游	WD-5	6	8	6	12	9	9	3	8	14	16	91
	WD-6	3	6	5	16	13	14	5	10	16	16	104
	WD-7	2	4	5	11	16	12	12	10	14	16	102
	WD-8	5	9	6	11	14	12	16	12	14	16	115
	WD-9	5	5	5	11	13	11	12	7	12	16	97
无定河下 游	WD-10	5	5	6	9	11	9	13	12	8	11	89
	WD-11	9	8	6	11	11	10	10	9	9	16	99
	WD-12	6	5	6	9	16	6	8	9	16	16	97
海流兔河	HLTH-1	3	4	4	7	10	14	7	5	15	16	85
	HLTH-2	5	6	6	16	16	13	13	5	8	16	104
芦河	LH-1	4	6	6	11	16	8	14	12	16	16	109
	LH-2	5	9	6	8	16	9	9	12	12	16	102
	LH-3	5	5	6	16	16	13	5	14	12	16	108
榆溪河	YXH-1	6	6	7	9	10	9	8	8	12	16	91
	YXH-2	5	6	6	13	16	13	12	8	16	16	111
	YXH-3	2	1	4	11	14	14	10	6	18	16	96
马湖峪河	MHYH-1	7	5	6	7	11	8	4	9	10	16	83
	MHYH-2	19	9	7	7	19	9	10	13	17	16	126

	MHYH-3	16	11	9	10	16	12	11	15	16	16	132
大理河	DLH-1	5	5	5	7	16	12	3	7	12	16	88
	DLH-2	15	5	9	12	14	6	14	14	14	9	112
	DLH-3	8	7	5	11	12	10	12	9	15	16	105
淮宁河	HNH-1	11	6	6	6	12	10	12	11	14	12	100
	HNH-2	5	7	10	11	16	11	10	11	15	13	109
	HNH-3	5	7	10	8	16	12	11	11	16	16	112

附表III 无定河流域底栖动物种类名录

Attached tab.III Species list of benthic macroinvertebrate in Wuding River Basin

种类	春季	秋季
环节动物 Annelida		
水蛭科 Hirudinidae		
欧洲医蛭 <i>Hirudo medicinalis</i>		+
医蛭属一种 <i>Hirudo</i> sp.	+	+
仙女虫科 Naididae		
豹行仙女虫 <i>Nais pardalis</i>	+	+
哑口仙女虫 <i>Nais elinguis</i>	+	
沿岸拟仙女虫 <i>Paranais litoralis</i>	+	
费氏拟仙女虫 <i>Paranais frici</i>	+	
颤蚓科 Tubificidae		
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	+	
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+
克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedeianus</i>	+	
水丝蚓属一种 <i>Limnodrilus profundicola</i>	+	
奥特开水丝蚓 <i>Limnodrilus udekemianus</i>	+	
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+
软体动物 Mollusca		
腹足纲 Gastropoda		
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	+	+
半球多脉扁螺 <i>Polypylis hemisphaerula</i>	+	+
水生昆虫 Insecta		
双翅目 Diptera		
无距摇蚊属 A 种 <i>Acalcarella</i> sp.A	+	+
苍白摇蚊 <i>Chironomus pallidivittatus</i>	+	+
溪流摇蚊 <i>Chironomus riparius</i>	+	+
喜盐摇蚊 <i>Chironomus salinarius</i>		+
墨黑摇蚊 <i>Chironomus anthracinus</i>	+	+
猛摇蚊 <i>Chironomus acerbiphilus</i>	+	
黄色羽摇蚊 <i>Chironomus flaviplumus</i>		+
平铁枝角摇蚊 <i>Cladopelma edwardsi</i>	+	
残枝长跗摇蚊 <i>Cladotanytarsus mancus</i>	+	+
三带环足摇蚊 <i>Cricotopus trifasciatus</i>	+	+
双线环足摇蚊 <i>Cricotopus bicinctus</i>	+	+
三轮环足摇蚊 <i>Cricotopus triannulatus</i>	+	+
三束环足摇蚊 <i>Cricotopus trifascia</i>		+
林间环足摇蚊 <i>Cricotopus sylvestris</i>	+	+
白色环足摇蚊 <i>Cricotopus albiforceps</i>	+	+
凹缺隐摇蚊 <i>Cryptochironomus defectus</i>	+	+
喙隐摇蚊 <i>Cryptochironomus rostratus</i>	+	
缺损拟隐摇蚊 <i>Demicryptochironomus vulneratus</i>	+	

叶二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes lobifer</i>	+	
双突摇蚊属 A 种 <i>Diplocladius</i> sp.A	+	
内摇蚊属一种 <i>Endochironomus</i> sp.	+	
真开氏摇蚊属一种 <i>Eukiefferiella</i> sp.	+	
布真开氏摇蚊群 B 种 <i>Eukiefferiella brehmi</i> sp.B	+	
偏真开氏摇蚊群 A 种 <i>Eukiefferiella devonica</i> group sp.A	+	+
细真开氏摇蚊 <i>Eukiefferiella gracei</i>	+	
伊尔克真开氏摇蚊 <i>Eukiefferiella ilkleyensis</i>	+	
柔嫩雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes cauliginellus</i>	+	
浅白雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes pallens</i>		+
水摇蚊属一种 <i>Hydrobaenus</i> sp.	+	
近藤水摇蚊 <i>Hydrobaenus kondoi</i>	+	
克罗摇蚊属一种 <i>Kloosia</i> sp.	+	
摇蚊科一属一种 <i>Larsia</i> sp.	+	
大粗腹摇蚊属一种 <i>Macropelopia</i> sp.	+	
软铗小摇蚊 <i>Microchironomus tener</i>	+	+
小突摇蚊属 A 种 <i>Micropsectra</i> sp.A	+	
斑点纳塔摇蚊 <i>Natarsia punctata</i>	+	
纳塔摇蚊属一种 <i>Natarsia</i> sp.		+
克拉直突摇蚊 <i>Orthocladius clarki</i>	+	+
茨城直突摇蚊 <i>Orthocladius makabensis</i>	+	
溪流直突摇蚊 <i>Orthocladius rivulorum</i>	+	
特氏直突摇蚊 <i>Orthocladius thienemanni</i>	+	
韦特直突摇蚊 <i>Orthocladius wetternsis</i>	+	
直突摇蚊属一种 <i>Orthocladius</i> sp.	+	
长崎直突摇蚊 <i>Orthocladius yagashimaensis</i>	+	
石栖直突摇蚊 <i>Orthocladius saxicola</i>	+	+
金直突摇蚊 <i>Orthocladius kanii</i>		+
直突摇蚊属 E 种 <i>Orthocladius</i> gen.E	+	
长方拟枝角摇蚊 <i>Paracladopelma undine</i>	+	
拟劳氏摇蚊属一种 <i>Paralauterborniella</i> sp.	+	
拟长跗摇蚊属 A 种 <i>Paratanytarsus</i> sp.A	+	
裸瓣间摇蚊 <i>Paratendipes nudisquama</i>	+	
白间摇蚊 <i>Paratendipes albimanus</i>	+	
黄明摇蚊属 <i>Phaenopsectra flavipes</i>	+	
列摇蚊属一种 <i>Platysmittia</i> sp.	+	
多足摇蚊属 A 种 <i>Polypedium</i> sp.A	+	
梯形多足摇蚊群 A 种 <i>Polypedium scalaenum</i> group sp.A	+	+
云集多足摇蚊 <i>Polypedium nubifer</i>	+	
白角多足摇蚊 <i>Polypedium albicorne</i>		+
拟踵突多足摇蚊 <i>Polypedium paraviceps</i>	+	+
步行多足摇蚊 <i>Polypedium pedestre</i>	+	
前突摇蚊属一种 <i>Procladius</i> sp.	+	+
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	+	+

刀突摇蚊属一种 <i>Psectrocladius</i> sp.	+	
伪寡角摇蚊属一种 <i>Pseudodiamesa</i> sp.	+	
长足摇蚊亚科一种 <i>Radotanypus</i> sp.	+	
钢灰趋流摇蚊 <i>Rheocricotopus chalybeatus</i>	+	
褐色趋流摇蚊 <i>Rheocricotopus fuscipes</i>	+	+
流粗腹摇蚊属一种 <i>Rheopelopia</i> sp.	+	+
流长跗摇蚊属 A 种 <i>Rheotanytarsus</i> sp.A	+	+
流长跗摇蚊属 B 种 <i>Rheotanytarsus</i> sp.B	+	+
苔流长跗摇蚊 <i>Rheotanytarsus muscicola</i>	+	+
高田似波摇蚊 <i>Sympothastia takatensis</i>	+	
大提尼曼摇蚊 <i>Thienemanniella majuscula</i>		+
刺铁长足摇蚊 <i>Tanypus punctipennis</i>		+
长跗摇蚊属 A 种 <i>Tanytarsus</i> sp.A	+	+
长跗摇蚊属 C 种 <i>Tanytarsus</i> sp.C		+
特维摇蚊属一种 <i>Tvetenia</i> sp.	+	
浪突摇蚊属一种 <i>Zalutschia</i> sp.	+	
摇蚊蛹 Chironomidae pupae	+	+
蠓科一种 Ceratopogonidae	+	
前蠓属一种 <i>Probezzia</i> sp.	+	+
锯蠓属一种 <i>Serromyia</i> sp.	+	
虻科一种 Tabanidae	+	+
蚋科一种 Simuliidae	+	+
蚊科一种 Culicidae	+	
大蚊科一种 Tipulidae	+	+
细蚊属一种 <i>Dixella</i> sp.		+
鞘翅目 Coleoptera		
龙虱科一种 Dytiscidae	+	+
叶甲科一种 Chrysomelidae		+
溪泥甲科一种 Elmidae	+	
象甲科一种 Curculionidae	+	
蜉蝣目 Ephemeroptera		
河花蜉属一种 <i>Potamanthus</i> sp.	+	
扁蜉属一种 <i>Heptagenia</i> sp.		+
四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	+	+
半翅目 Hemiptera		
划蝽科一种 Corixidae	+	+
蜻蜓目 Odonata		
蜻科一属一种 <i>Orthemis</i> sp.	+	+
尼螳属一种 <i>Nehalennia</i> sp.	+	+
螳科一属一种 <i>Zongrion</i> sp.		+
色螳属一种 <i>Calopteryx</i> sp.		+
蛇纹春蜓属一种 <i>Ophiogomphus</i> sp.		+
毛翅目 Trichoptera		
长角石蛾科一属一种 <i>Setodes</i> sp.	+	

沼石蛾科一属一种 <i>Dicosmoecus</i> sp.	+	
短脉纹石蛾属一种 <i>Cheumatopsyche</i> sp.	+	+
纹石蛾属一种 <i>Hydropsyche</i> sp.	+	+
径石蛾科一种 Ecnomidae		+
小石蛾科一种 Hydroptilidae		+
弹尾目 Collembola		
球角蛸科一种 Hypogastruridae	+	+
其他动物		
水螨 <i>Hydracarina</i>	+	+
钩虾属一种 <i>Gammarus</i> sp.		+
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	+	+
铁线虫属一种 <i>Gordius</i> sp.	+	+
合计	105	67

附表IV 27 个生物指数值在参照点的分布范围（春季）

Attached tab.IV Distribution range of the 27 biological index values at the reference sites (Spring)

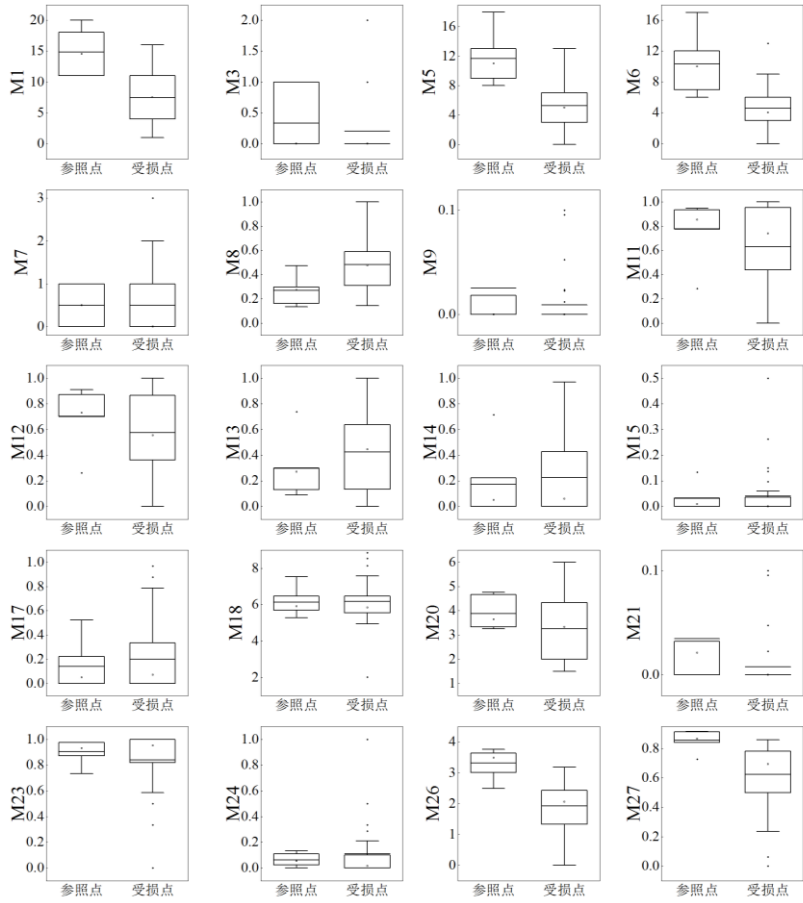
指标代码	平均数	标准差	最小值	最大值	25%分位数	中位数	75%分位数
M1	14.83	3.44	11	20	11.5	14.5	17.5
M2	0.17	0.37	0	1	0	0	0
M3	0.33	0.47	0	1	0	0	0.75
M4	0	0	0	0	0	0	0
M5	11.67	3.25	8	18	9.5	11	12.5
M6	10.33	3.59	6	17	7.75	10	11.5
M7	0.5	0.5	0	1	0	0.5	1
M8	0.27	0.11	0.13	0.47	0.19	0.27	0.29
M9	0.03	0.05	0	0.13	0	0	0.01
M10	0	0	0	0	0	0	0
M11	0.77	0.23	0.29	0.95	0.78	0.85	0.93
M12	0.70	0.21	0.26	0.91	0.71	0.73	0.84
M13	0.30	0.21	0.09	0.74	0.16	0.27	0.29
M14	0.17	0.25	0	0.71	0.01	0.05	0.18
M15	0.03	0.05	0	0.13	0	0.01	0.03
M16	0	0	0	0	0	0	0
M17	0.14	0.19	0	0.52	0.01	0.05	0.18
M18	6.13	0.72	5.28	7.53	5.73	5.90	6.36
M19	17.17	5.81	10	28	13.25	16.5	19
M20	3.88	0.61	3.25	4.75	3.375	3.65	4.45
M21	0.03	0.05	0	0.13	0.00	0.02	0.03
M22	0	0	0	0	0	0	0
M23	0.90	0.08	0.73	0.98	0.89	0.93	0.97
M24	0.06	0.05	0	0.13	0.03	0.05	0.10
M25	0	0	0	0	0	0	0
M26	3.31	0.44	2.48	3.76	3.10	3.48	3.63
M27	0.85	0.06	0.73	0.92	0.84	0.87	0.91

附表 V 27 个生物指数值在参照点的分布范围（秋季）

Attached tab.V Distribution range of the 27 biological index values at the reference sites (Autumn)

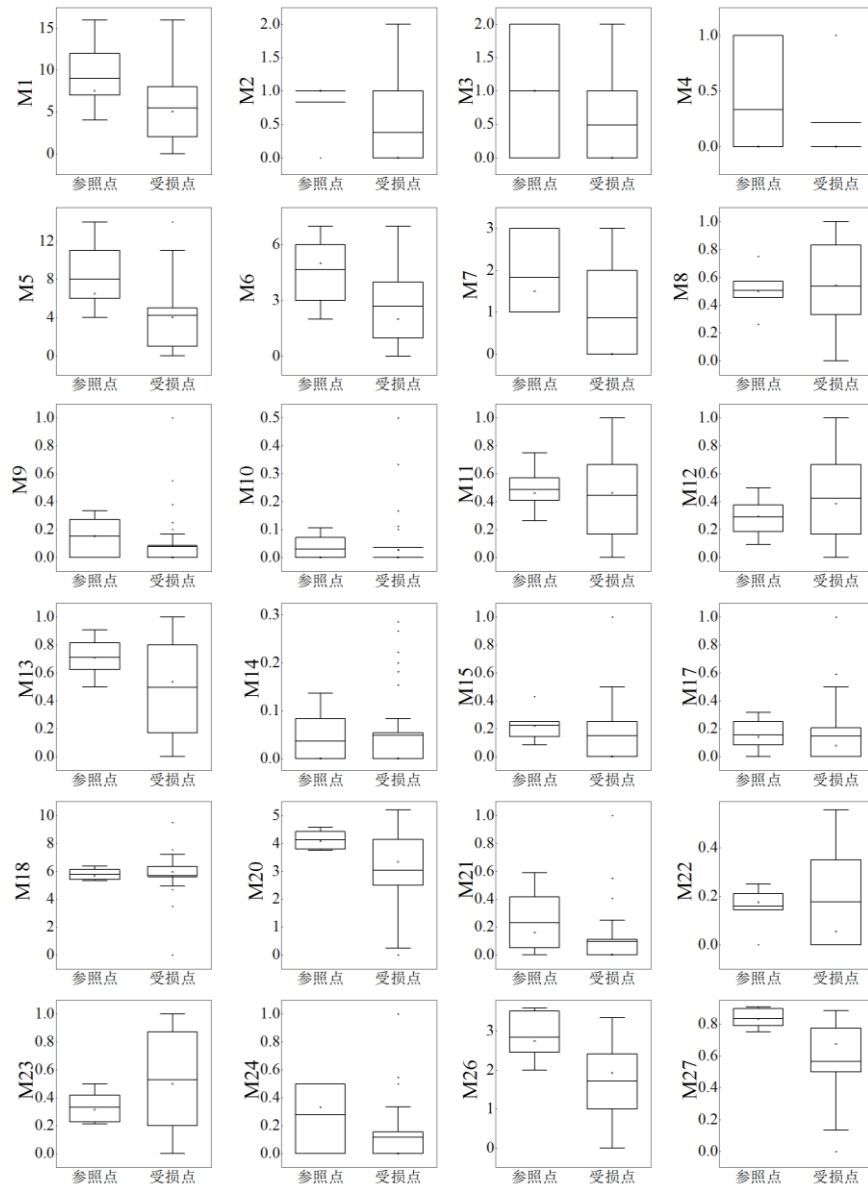
指标代码	平均数	标准差	最小值	最大值	25%分位数	中位数	75%分位数
M1	9	3.92	4	16	7	7.5	11
M2	0.83	0.37	0	1	1	1	1
M3	1	0.82	0	2	0.25	1	1.75
M4	0.33	0.47	0	1	0	0	0.75
M5	8	3.42	4	14	6	6.5	10
M6	4.67	1.70	2	7	3.5	5	5.75
M7	1.83	0.90	1	3	1	1.5	2.75
M8	0.51	0.14	0.26	0.75	0.47	0.5	0.55
M9	0.15	0.14	0	0.33	0.01	0.15	0.27

M10	0.03	0.04	0	0.11	0	0	0.05
M11	0.49	0.15	0.26	0.75	0.41	0.46	0.55
M12	0.29	0.13	0.09	0.5	0.20	0.29	0.36
M13	0.71	0.13	0.5	0.91	0.64	0.71	0.80
M14	0.04	0.05	0	0.14	0	0	0.06
M15	0.22	0.11	0.08	0.43	0.15	0.22	0.25
M16	0	0	0	0	0	0	0
M17	0.15	0.10	0	0.32	0.10	0.14	0.22
M18	5.77	0.38	5.33	6.37	5.46	5.67	6.05
M19	28.17	12.99	15	55	20.25	24.5	29.5
M20	4.12	0.31	3.75	4.58	3.85	4.08	4.36
M21	0.23	0.21	0	0.59	0.06	0.16	0.38
M22	0.16	0.08	0	0.25	0.15	0.17	0.20
M23	0.33	0.11	0.21	0.5	0.23	0.31	0.41
M24	0.28	0.21	0	0.5	0.07	0.33	0.47
M25	0.02	0.05	0	0.13	0	0	0
M26	2.85	0.56	2	3.59	2.53	2.75	3.33
M27	0.83	0.06	0.75	0.91	0.80	0.83	0.88



附图1 20个候选指数在参照点和受损点的箱型图（春季）
 （箱体表示 25%~75%分位数值分布范围，小正方形表示中位数、横线表示平均值，上下线条表示数据的最大值和最小值）

Attached fig.1 Box plots of 20 candidate indices between reference and impaired sites (Spring)



附图II 24 个候选指数在参照点和受损点的箱型图 (秋季)

Attached fig. II Box plots of the 24 candidate indices between reference and impaired sites (Autumn)

附表VI 候选指数间的 Spearman 相关分析结果 (春季)

Attached tab.VI Spearman's correlation matrix of candidate indices (Spring)

指标代码	M1	M5	M6	M8	M26	M27
M1	1					
M5	0.940**	1				
M6	0.900**	0.971**	1			
M8	-0.250	-0.244	-0.228	1		

M26	0.692**	0.704**	0.655**	-0.781**	1	
M27	0.485**	0.503**	0.475**	-0.923**	0.944**	1

**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关，下同。

附表VII 候选指数间的 Spearman 相关分析结果（秋季）

Attached tab.VII Spearman's correlation matrix of candidate indices (Autumn)

指标代码	M5	M6	M21	M26	M27
M5	1				
M6	0.919**	1			
M21	0.426**	0.209	1		
M26	0.855**	0.809**	0.327*	1	
M27	0.388*	0.406**	0.056	0.617**	1

附表VIII 比值法计算指数分值的公式

Attached tab.VIII Formulas for calculating indices scores by the ratio scoring method

春季		秋季	
指标代码	分值计算公式	指标代码	分值计算公式
M1	$M1/16.1$	M5	$M5/11$
M8	$(1-M8)/(1-0.16)$	M21	$M21/0.54$
M26	$M26/3.6$	M27	$M27/0.88$