

DOI: 10.5846/stxb201311112712

殷旭旺, 李庆南, 朱美桦, 宋佳, 武玮, 徐宗学. 渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价. 生态学报, 2015, 35(14): 4784-4796.

Yin X W, Li Q N, Zhu M H, Song J, Wu W, Xu Z X. Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4784-4796.

渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价

殷旭旺¹, 李庆南¹, 朱美桦¹, 宋佳¹, 武玮², 徐宗学^{2,*}

1 大连海洋大学, 水产与生命学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023

2 北京师范大学, 水科学研究院, 北京 100875

摘要:以渭河为研究范例, 分别于丰水期(2011 年 10 月)和枯水期(2012 年 4 月)对渭河全流域范围内 45 个样点的底栖动物群落进行跟踪调查, 并在此基础上应用丰、枯水期底栖动物生物完整性评价指数(B-IBI)对渭河流域水生生态系统进行综合健康评价。结果表明, 渭河流域底栖动物群落结构具有明显的空间异质性, 枯水期底栖动物群落结构单一, 物种数量、生物量和香农多样性明显少于丰水期, 但单位密度差异不显著。综合健康评价结果表明, 渭河上游、洛河中上游地区的健康状况较好, 而渭河下游、泾河全流域及洛河下游地区的健康状况较差。相关分析显示, 渭河全流域范围内丰水期和枯水期底栖动物群落的 B-IBI 得分呈现明显的正相关性, 表明在不同水文过程时期, 渭河全流域大尺度范围内底栖动物群落的生物完整性特征较为一致。在河流丰、枯水期, 底栖动物群落结构的变化趋势并对比分析了渭河流域不同区域水生生态系统健康水平差异的原因。

关键词:生物完整性; 底栖动物; 主成分分析; 典范对应分析; 群落结构

Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River basin, China

YIN Xuwang¹, LI Qingnan¹, ZHU Meihua¹, SONG Jia¹, WU Wei², XU Zongxue^{2,*}

1 Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

2 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Biological community structures have long been used to assess the impact of human activity on running waters. Although there were several studies using macroinvertebrate to assess the river conditions, the influence of hydrological factors, e.g. rate of flow, on community structure of macroinvertebrate and river health received little attention. In the present work, we investigated the community structure of macroinvertebrate and characteristics of environmental factors among 45 sampling sites in the Wei River Basin, Northwest China during wet season (October, 2011) and dry season (April, 2012). We also assessed the stream conditions of Wei River in the wet and dry seasons based on the Index of Biological Integrity (B-IBI). The results indicated that there was great heterogeneity in the structure of macroinvertebrate community in Wei River. The common species were *Baetis vaillanti*, *Serratella* sp., *Leptophlebia* sp., *Cinygma* sp., *Pteronarcyidae*, *Hydropsychidae*, *Glossosomatidae*, *Cricotopus trifasciatus*, *Alotanypus venustus*, *Chironomus semireductus*, *Radix swinhoei*, *Radix ovata* and *Polypylis hemisphaerula*. The structure of macroinvertebrate community in dry season is simplified. The results of boxing analysis showed that species richness, biomass and Shannon index were significantly higher in wet season than in dry season in the Wei River basin. However, the density of macroinvertebrate was similar in both seasons. The results of B-IBI showed that upstream of Wei River was of excellent ecological integrity, while the midstream

基金项目:国家自然科学基金(51079123); 国家“水体污染控制与治理”重大科技专项(2009ZX07212-002-003); 渭河流域生态基流及其保障措施研究(2009DFA22980)

收稿日期:2013-11-11; **网络出版日期:**2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

and downstream of Wei River were in severe impairment. Though the biological integrity of macroinvertebrates in Jing River and downstream of Luo River was in severe impairment, the upstream of Luo River was in relatively good biological integrity. The score of B-IBI all over the Wei River basins showed positive correlations between wet and dry season. In this paper, we also discussed the influence of water flow and flux on the dynamic characteristics of macroinvertebrate community in wet and dry season. Moreover, the possible reasons that caused the difference in biological integrity of macroinvertebrate community in the Wei River Basin were further discussed.

Key Words: biological integrity; macroinvertebrates; principal component analysis; canonical correspondence analysis; community structure

河流生态学研究,水生生物的调查与分析是重要环节^[1],其中大型底栖动物是研究的热点和焦点^[2]。大型底栖动物是河流生境中分布最广泛的物种之一,也是河流生态系统的重要组成部分^[3-4]。大型底栖动物通常以藻类、有机颗粒和凋落物为食^[5],并为河流中鱼类提供食物来源,对河流生态系统的物质循环和能量流动起重要的作用^[6]。大型底栖动物的群落组成决定了河流中物质循环和能量流动的方式^[7],因而大型底栖动物群落生态学研究对河流的保护、利用和管理具有指导作用^[8]。

在河流健康评价研究中,生物完整性评价(IBI) 应用得较为广泛^[9-11],目前已经成为国内河流健康评价研究的主要手段。在相对集中的时间段内,对某流域进行 1 次水生生物采样调查,构建生物完整性评价体系,进而完成全流域的健康评价,是目前国内通常采取的研究方法^[12-14]。然而,一次调查结果存在较大偶然性,尤其是在受水文过程(如水量)变化影响显著的河流生态系统,这种偶然性便更为突出。重复的采样调查,特别是在不同的水文过程时期进行采样调查,将会使评价的结果更具准确性和重复性^[15]。基于此目标,本研究调查了黄河最大的一条支流——渭河在丰水期和枯水期底栖动物的群落结构特征,并在此基础上应用生物完整性评价体系对渭河流域水生态系统进行健康评价。希望以此为例,为我国河流底栖动物健康评价指标和方法的建立提供参考,并对渭河流域水生态系统健康的维护及管理提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 底栖动物样品采集

渭河(东经 103° 50'—110° 40',北纬 33° 40'—37° 25',图 1)全长 818 km,有泾河和洛河两大支流,全流域面积 13.43×10⁴ km²。渭河流域自然状况及流域特点详见相关研究。本研究中,渭河流域设定 45 个调查站位,其中渭河 23 个,泾河 13 个,洛河 9 个(图 1),分别于 2011 年 10 月(丰水期)和 2012 年 4 月(枯水期)进行采样调查。用 MAGELLAN 全球定位系统(eXplorist-200)记录采样点的经纬度和海拔高度(Elev, m)。在所选定点位的 100 m 范围之内,使用索伯网(Surber net,网口尺寸为 30 cm×30 cm,网孔径为 500 μm)随机采集 2 个平行样本,现场用 90% 的酒精固定。样品带回实验室后,将肉眼可见的底栖动物与石块、碎屑等杂质分离,并置于 100 mL 样品瓶中,用 95% 的酒精固定保存,在显微镜或解剖镜下进行分类和计数,依据相关的文献资料^[16-21],样品尽量鉴定到属或种。

1.2 水体理化性质的测定

对渭河流域各采样点的水体理化性质进行测定时,水温(Temp)、电导率(Cond)、盐度(Sal)、溶解氧(DO)和饱和度(Satu),用水质分析仪(YSI85)现场测定;河宽(River width)用米尺进行现场测定;pH 值用便携式酸度计;水深(Dept)和流速(Velo)用流速仪(FP111)现场测定;底质含沙量(Sand)用一套底质分样筛网(孔径为 16、8、4、2 和 1 mm)测定;在各样点采集两个平行水样(各 2 L),置于低温保温箱中,于 48 h 内带回实验室,根据相关标准^[22],测定以下水化学指标:悬浮物(SS)、总溶解固体(TDS)、硅酸盐(SiO₄²⁻)、总氮(TN)、总磷(TP)、碱度(Alk)、硬度(TD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

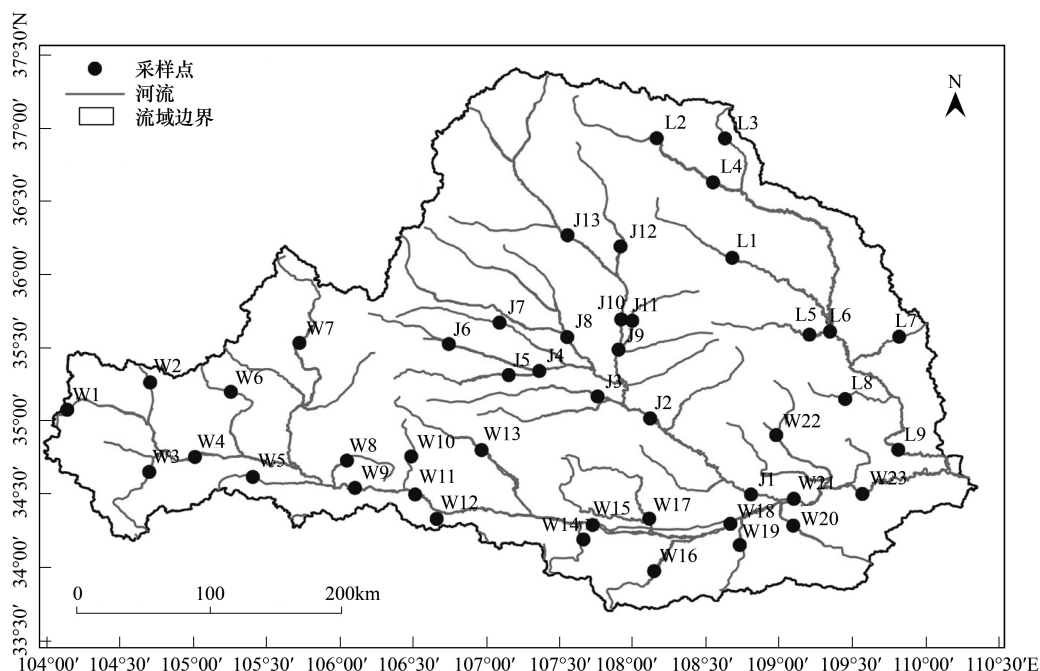


图1 渭河流域采样点位示意图

Fig.1 Location map of sample sites in Wei River Basin

1.3 数据分析和处理

1.3.1 底栖动物群落结构特征和水环境因子分析

各样点的底栖动物计算以下群落特征参数:物种种类、密度和香农多样性指数'($H' = -\sum P_i \times \log_2 P_i$, 式中 P_i 为群落中第 i 个物种个体数占总个体数的百分比)。对各样点水环境参数首先进行主成分分析(PCA)。对各样点水环境参数和底栖动物群落进行典范对应分析(CCA)。进行 PCA、CCA 时,所有水体理化数据(pH 值除外)和底栖动物相对多度数据均进行数据转换($\log_{10}[x+1]$)。

1.3.2 底栖动物完整性(B-IBI)评价指标体系

为构建渭河流域底栖动物生物完整性(B-IBI)评价体系,应用了分属于5类属性(物种群落丰富度、物种个体数量比例、生物耐污能力、生物营养级组成、小生境质量),且对环境变化较为敏感的29个指标作为候选指标,对此29个候选指标进行分布范围、判别能力和相关性分析的筛选。分布范围的筛选指若某指标在超过95%的样点得分均为零,则放弃该指标。判别能力的筛选是比较各候选指标在参照点位和受损点位的数值在百分之25—75分位数范围内重叠的情况,利用箱体图进行判别的标准详见相关文献。对箱体图判别筛选出的参数两两进行 Pearson 相关性检验,相关系数 $|r| \geq 0.9$ 的两个指标中仅取其一。

本研究中,参照点位的选择依据实地水质及水文地貌情况,以人类干扰较少,水环境理化质量较高,且流域生境保持较为完整的区域作为参照点位。采用相关标准化方法^[8]评判后,渭河流域 B-IBI 评价的参照点位选定为 W1、W5、W10、W12、W14 和 W16(图1)。

通过以上分析,确定 B-IBI 评价的核心参数,根据所有点位核心参数的分布范围,对核心参数进行赋分。本研究中使用四分法进行赋分通过对核心参数的赋分,累加得到最终的 B-IBI 得分。以参照点位 B-IBI 得分值分布的 25th 分位数作为健康评价的标准,点位的 B-IBI 分值大于 25th 分位数值,则表示该站点受到的干扰很小,是健康的;对小于 25th 分位数值值的分布范围,进行四等分,确定出健康、较好、一般、较差、极差 5 个等级的划分标准。

在国内以往的 B-IBI 评价,通常对河流的健康状况只进行一次评价,而很少考虑到河流不同的水文过程

时期(如丰水期和枯水期)的问题,为了更客观的评价渭河流域健康情况,本文将丰水期和枯水期渭河流域各调查点位的 B-IBI 评价结果进行比较和整合,即在两次调查中同点位出现高、低级别时选择折中;出现相邻级别中选择降级,最终确立渭河流域各个点位健康状况。

1.3.3 数据分析

用 SPSS 12.0 进行数据的相关性分析,PCA、CCA 在 Canoco4.5 上进行,箱体图分析在 Sigmaplot 10.0 和 OriginPro 7.5 上进行。

2 结果

2.1 丰水期和枯水期底栖动物群落结构特征

渭河流域共计采到底栖动物 102 种,其中丰水期采集到 93 种;枯水期采集到 44 种,隶属于 7 纲 16 目 56 科。水生昆虫 91 种,占 78.4%;软体动物 12 种,占 10.3%;环节动物 9 种,占 7.8%;甲壳动物 4 种,占 3.4%。水生昆虫主要由 EPT 类(E: Ephemeroptera; P: Plecoptera; T: Trichoptera)和双翅目的摇蚊幼虫组成,其中 EPT 类水生昆虫共 16 种,常见种为韦氏四节蜉(*Baetis vaillanti*)、锯形蜉属 1 种(*Serratella* sp.)、细裳蜉属 1 种(*Leptophlebia* sp.)、动蜉属 1 种(*Cinygma* sp.)、大襁科 1 种(Pteronarcyidae)、纹石蛾科 1 种(Hydropsychidae)、舌石蛾科 1 种(Glossosomatidae)。摇蚊幼虫共 17 种,常见种为三带环足摇蚊(*Cricotopus trifasciatus*)、*Alotanypus venustus* 和半折摇蚊(*Chironomus semireductus*)。软体动物常见种为椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)、卵萝卜螺(*Radix ovata*)和半球多脉扁螺(*Polypylis hemisphaerula*)。

渭河流域底栖动物的种类数表现为支流多于干流(图 2A)。从季节上看,丰水期渭河水系、泾河水系和洛河水系底栖动物物种数要多于枯水期。丰水期时全流域单个站位物种数最高为 25 种,位于渭河干流的 W12 站位,该站位大型底栖动物全部为水生昆虫,其中喜清洁水体的 EPT 类水生昆虫共 12 种,占 48%。枯水期时全流域单个站位物种数最高为 9 种,位于泾河源头的 J6 站位,该站位底栖动物主要以小蜉科和摇蚊科的清洁种为主。

渭河全流域底栖动物密度均较低(图 2B),渭河流域底栖动物密度较高的区域位于渭河干流及支流,而密度较低的区域集中于泾河全流域及洛河下游。从季节上看,丰水期渭河水系、泾河水系和洛河水系底栖动物密度要明显高于枯水期。丰水期时全流域单个站位密度最高为 3318 个/m²,位于渭河的 W1 站位。渭河源头点位 W1 主要以附石性的水生昆虫为主,包括韦氏四节蜉和纹石蛾,三带环足摇蚊在该点位密度同样较大,达到 739 个/m²。枯水期全流域单个站位密度最高为 11111 ind./m²,位于渭河下游的 W18 站位,该站位仅存在克拉伯水丝蚓一个物种,为典型耐污种。

渭河中上游河段丰水期底栖动物生物量明显高于枯水期(图 2C),而进入枯水期,下游河段生物量明显增加,这主要由于枯水期关中河段克拉伯水丝蚓密度大幅增加所致,最高值可达 95 g/m²,位于渭河下游的 W18 站位。泾河和洛河也表现出丰水期底栖动物生物量高于枯水期的趋势,而泾河和洛河干流底栖动物生物量的下降在枯水期较为明显。

渭河全流域底栖动物群落的多样性也表现为支流高于干流的趋势(图 2D),渭河、泾河和洛河的上游物种多样性高于下游。从季节上看,丰水期渭河水系、泾河水系和洛河水系底栖动物虽然在种类、密度上明显高于枯水期。丰水期时全流域单个站位多样性最高为洛河源头点位 L2,主要优势类群为双翅目的水生昆虫,该点位物种数为 19 种,双翅目水生昆虫为 10 种,占 52.6%。枯水期全流域单个站位多样性最高为 W1,其主要优势类群也是双翅目的水生昆虫,该点位物种数为 5 种,双翅目水生昆虫为 3 种,占 60%。

箱体图分析可以看出,渭河全流域范围内,丰水期底栖动物的物种数量、生物量和香农多样性指数都显著高于枯水期,而底栖动物密度在两个季节无明显差异(图 3)。统计分析结果表明,渭河全流域在丰水期和枯水期底栖动物群落的物种数量(Mann-Whitney U 检验, $Z = -5.644, P < 0.001$)、生物量(Mann-Whitney U 检验, $Z = -5.037, P < 0.001$)和香农多样性(Mann-Whitney U 检验, $Z = -5.939, P < 0.001$)都存在显著差异,而底栖动

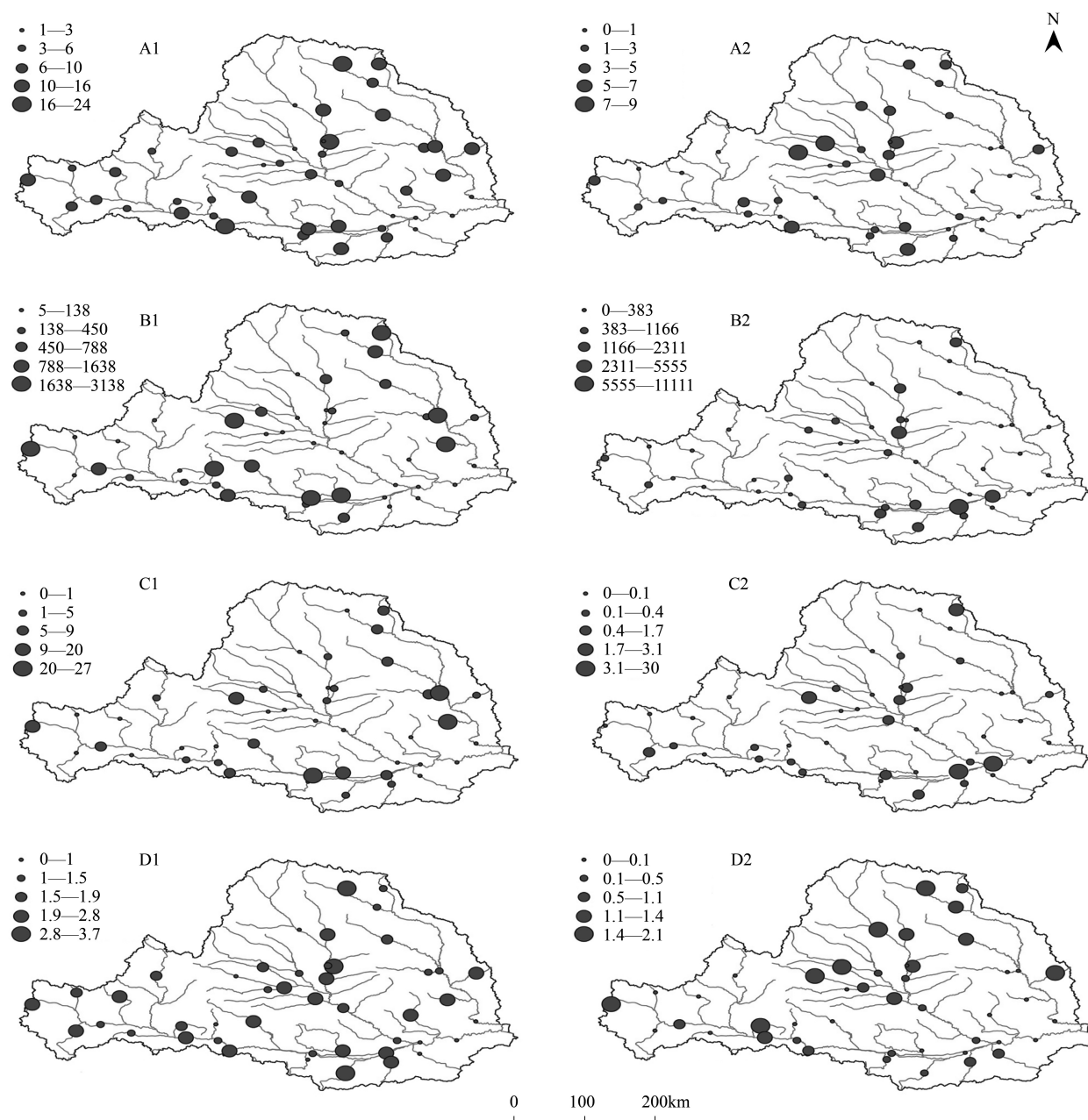


图2 渭河流域丰水期和枯水期底栖动物群落结构特征

Fig.2 Community structure of macroinvertebrate in the wet and dry season of Wei River Basins

A1: 丰水期种类数 Species richness in wet season; A2: 枯水期种类数 Species richness in dry season; B1: 丰水期密度 Density in wet season (个/m²); B2: 枯水期密度 Density in dry season (个/m²); C1: 丰水期生物量 Biomass in wet season (g/m²); C2: 枯水期生物量 Biomass in dry season (g/m²); D1: 丰水期香农多样性指数 Shannon diversity index in wet season; D2: 枯水期香农多样性指数 Shannon diversity index in dry season

物群落的密度在两个季节差异不明显 (Mann-Whitney U 检验, $Z = -0.360$, $P = 0.719$), 从而支持了箱体图分析的结果。

渭河流域丰水期、枯水期水文环境因子主成份分析 (PCA) 结果表明, 丰水、枯水两季 PCA 两轴分别解释数据承载量的 58.2% 和 66%。流域主要的水环境因子在两季表现出一致驱动性。丰水期两主轴变化分数大于 0.6 的水文环境因子为河宽、流量、电导率、盐度、总溶解固体、碱度、硬度; 枯水期两轴变化分数大于 0.6 的

水文环境因子为电导率、碱度、硬度、悬浮物、流量和河宽(图4)。两季共同水文环境驱动因子为河宽、流量、电导率、碱度和硬度。

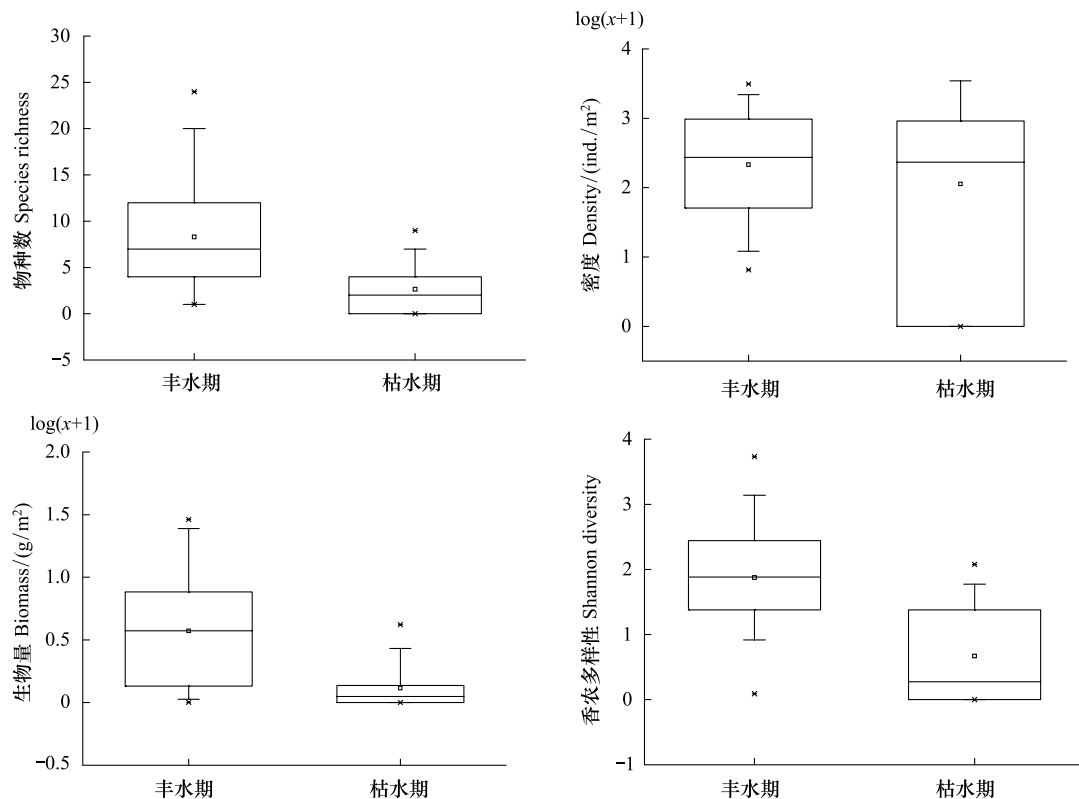


图3 渭河流域丰水期和枯水期全流域底栖动物群落结构特征的比较分析

Fig.3 Comparison of community structure of macroinvertebrates in Wei River Basin in wet and dry seasons

M: 丰水期; m: 枯水期

渭河流域丰水、枯水期底栖动物典范对应分析(CCA)结果显示(图5),渭河流域丰水、枯水两季底栖动物群落结构与水生态因子对应关系有所差异。丰水期底栖动物数量多,种类丰富,结构复杂,其中秀丽白虾、螳科和扁泥甲科与流量和河宽具明显的响应关系,长角泥科的物种对碱度响应关系明显,双翅目的蚋科、水虻科、沼蝇科对电导率和硬度响应关系明显。而枯水期底栖动物种类数量减少,群落结构也发生了较大变化,污染物及底质营养物质产生积累,底栖动物群落对驱动因子的响应性降低,一些耐污种类对驱动因子的响应性增强,如克拉伯水丝蚓在枯水期水量小、河面窄的流域大量繁殖,因此该物种在枯水期对物理形态因子河宽和流速响应关系显著,此外,卵萝卜螺、霍甫水丝蚓和等翅石蛾则对水化学因子电导率、硬度和碱度响应明显。

2.2 B-IBI 体系的建立和健康评价结果

结合区域特点及研究目标,利用参照点和受损点的调查数据计算各个候选生物指标值,分析候选指标对人类干扰的反应,挑选出随人类干扰单向增大或减小的指标,构建候选生物指标集(表1)。通过箱体图分析,渭河流域共有9个B-IBI参数(图6)进入Pearson相关性检验,其中丰水期筛选出7个、枯水期筛选出5个。两次重叠的指标为2个,分别是,EPT分类单元数、双翅目个体相对丰度。经Pearson相关性检验(表2,表3),最终丰水期筛选出EPT分类单元数、敏感类群分类单元数、蜉蝣目个体相对丰度、耐污个体相对丰度4个参数;枯水期筛选出总分类单元数、EPT分类单元数、摇蚊个体相对丰度、收集者个体相对丰度4个参数为构建渭河流域B-IBI体系的核心参数。基于B-IBI的渭河水生态系统健康标准见表4所示。

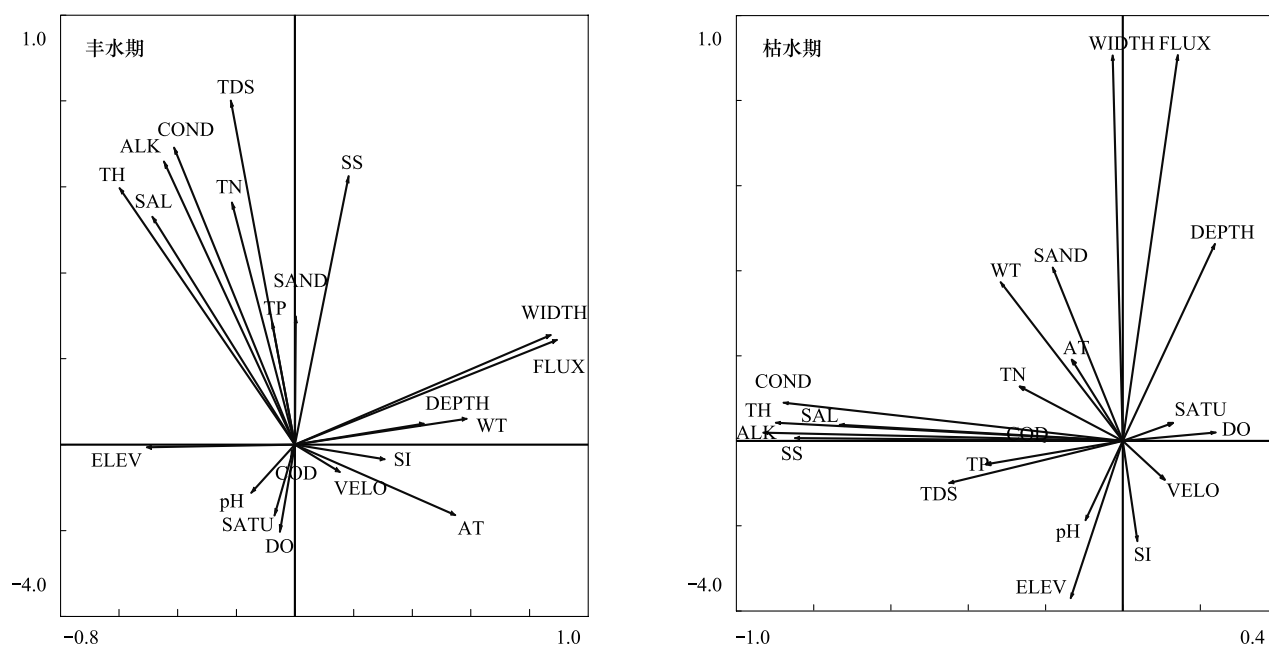


图4 渭河流域丰水期、枯水期水文环境因子主成分分析(PCA)

Fig.4 Principal component analysis of hydrological environmental factors of Wei River Basin in the wet and dry season

WT: 水温 water temperature; AT: 气温 air temperature; COND: 电导率 Conductivity; SAL: 盐度 salinity; SATU: 饱和度 Saturation; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; SS: 悬浮物 Total suspended solid; TDS: 总溶解固体 Total dissolved solid; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus; Alk: 碱度 Alkalinity; TH: 硬度 Total hardness; COD_{Mn} : 高锰酸盐指数 Permanganate index; SI: 硅酸盐 silicate; WIDTH: 河宽 River width; DEPTH: 水深 Water depth; VELO: 流速 Velocity; FLUX: 流量 Flux; ELEV: 海拔 Elevation; SAND: 底质含砂比例 Percent of sand in sediment

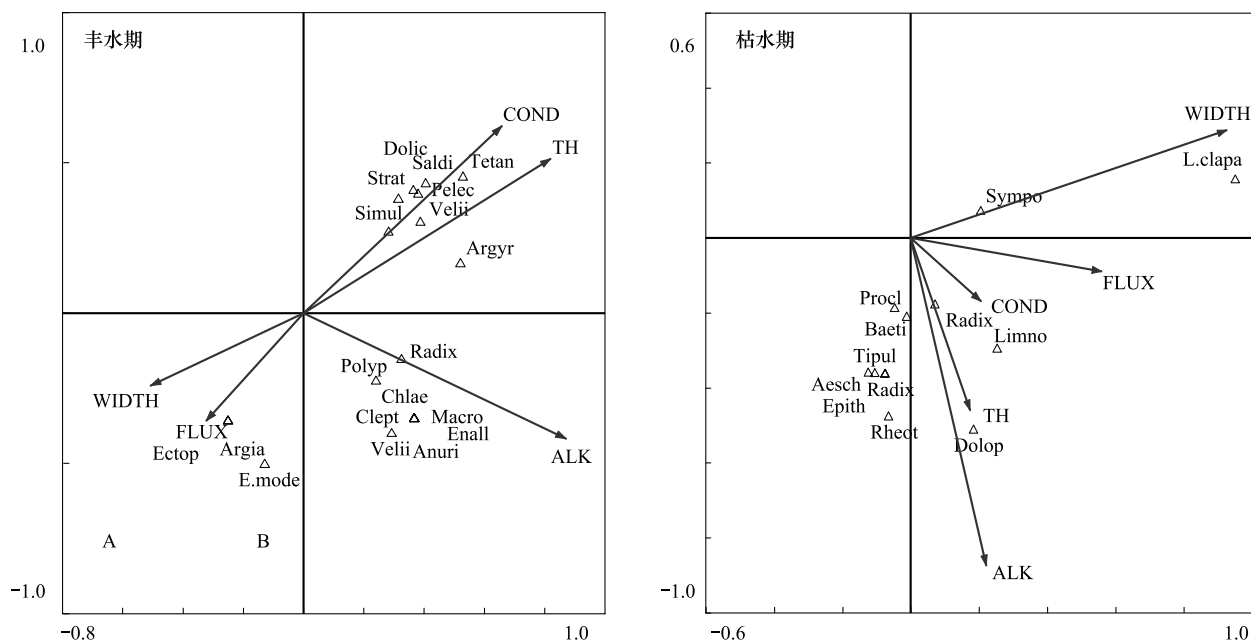


图5 渭河流域丰水期、枯水期底栖动物典范对应性分析

Fig.5 Canonical correspondence analysis between macroinvertebrates and hydrological environmental factors of Wei River Basin in the wet and dry season

Dolie: 长足虻科; Saldi: 跳蝻科; Strat: 水虻科; Tetan: 沼蝇科; Pelec: 扁蚊科; Velii: 宽肩龟科; Simul: 蚱科; Argyr: 水蛛科; Radix: 卵萝卜螺; Polyp: 半球多脉扁螺; Chlae: 龙虱科; Clept: 长角泥虫科; Macro: 长角泥虫科; Velii: 宽肩龟科; Ectop: 扁泥甲科; Argia: 螳科; E.mode: 秀丽白虾; L.clapa: 克拉伯水丝蚓; Sympo: 高田似波摇蚊; Limno: 霍雨水丝蚓; Procl: 花翅前突摇蚊; Baeti: 四节蜉科; Tipul: 大蚊科; Aesch: 蜉; Epith: 虎蜉; Rheot: 流长跗摇蚊; Dolop: 等翅石蛾属

表 1 候选生物参数及对干扰的反应

Table 1 Candidate metrics and their expected direction of response to disturbance

序号 Number	类型 Type	候选参数 Candidate metrics	参数描述 Attributes of metrics	对干扰响应 Response to disturbance
M1	反映群落	总分类单元数	底栖动物群落所有分类单元数	减小
M2	丰富度	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
M3		水生昆虫分类单元数	底栖动物类群中水生昆虫的种类数	减小
M4		甲壳和软体动物分类单元数	底栖动物中软体动物和甲壳动物的种类数	减小
M5		摇蚊分类单元数	底栖动物类群中摇蚊昆虫的种类数	减小
M6		香农多样性指数	$H' = -\sum P_i \times \log_2 P_i$, P_i 群落中第 i 个物种个体数占总个体数百分比	减小
M7		均匀度指数	$J = H' / H'_{\max}$, $H'_{\max} = \log_2 S$, S 为总物种数	减小
M8		BI 指数	$BI = \sum [s_i \times (n_i / N)]$, s_i 为各物种相应的赋分值; n_i 为每物种的个体数; N 为样品中物种总数	增大
M9		BMWP	样品中每一科的得分相加出现的种类类群数, 代表群落的多样性	减小
M10	反映种类个体数量比例	优势分类单元的个体相对丰度	个体数量最多的一个分类单元的个体数/总个体数	增大
M11		前 3 位优势分类单元的个体相对丰度	个体数量最多的前 3 个分类单元的个体数/总个体数	增大
M12		毛翅目个体相对丰度	毛翅目个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M13		蜉蝣目个体相对丰度	蜉蝣目个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M14		颤蚓个体相对丰度	颤蚓个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M15		襀翅目个体相对丰度	襀翅目个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M16		双翅目个体相对丰度	双翅目个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M17		摇蚊个体相对丰度	摇蚊个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M18		甲壳动物和软体动物的个体相对丰度	(甲壳动物+软体动物) 个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M19		其他双翅目类群和非昆虫类群个体相对丰度	(其他双翅目+非昆虫) 个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M20	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 的都为敏感类群	减小
M21		敏感类群的个体相对丰度	敏感类群个体数/底栖动物群落总个体数	减小
M22		耐污类群的个体相对丰度	耐污类群个体数/底栖动物群落总个体数	增大
M23	反映功能摄食类群	滤食者个体相对丰度	滤食者个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M24	组成的指数	撕食者和刮食者个体相对丰度	(撕食者+刮食者) 个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M25		收集者个体相对丰度	收集者个体数/样点底栖动物群落总个体数	增大
M26		杂食者和刮食者个体相对丰度	(杂食者+刮食者) 个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M27		捕食者个体相对丰度	捕食者个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M28		撕食者个体相对丰度	撕食者个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小
M29	反映小生境质量	粘附者个体相对丰度	粘附者个体数/样点底栖动物群落总个体数	减小

表 2 丰水期渭河流域 7 个底栖动物生物完整性(B-IBI) 候选参数指标间的相关系数

Table 2 Correlation analysis of 15 P-IBI candidate metrics in Wei River Basin

参考指标 Candidate metrics	M2	M13	M16	M19	M20	M21	M22
M2	1						
M13	0.46	1					

续表

参考指标 Candidate metrics	M2	M13	M16	M19	M20	M21	M22
M16	0.93	0.48	1				
M19	-0.36	-0.50	-0.29	1			
M20	-0.05	-0.28	-0.06	-0.24	1		
M21	0.43	0.99	0.48	-0.49	-0.26	1	
M22	-0.43	-0.99	-0.48	0.49	0.26	-1	1

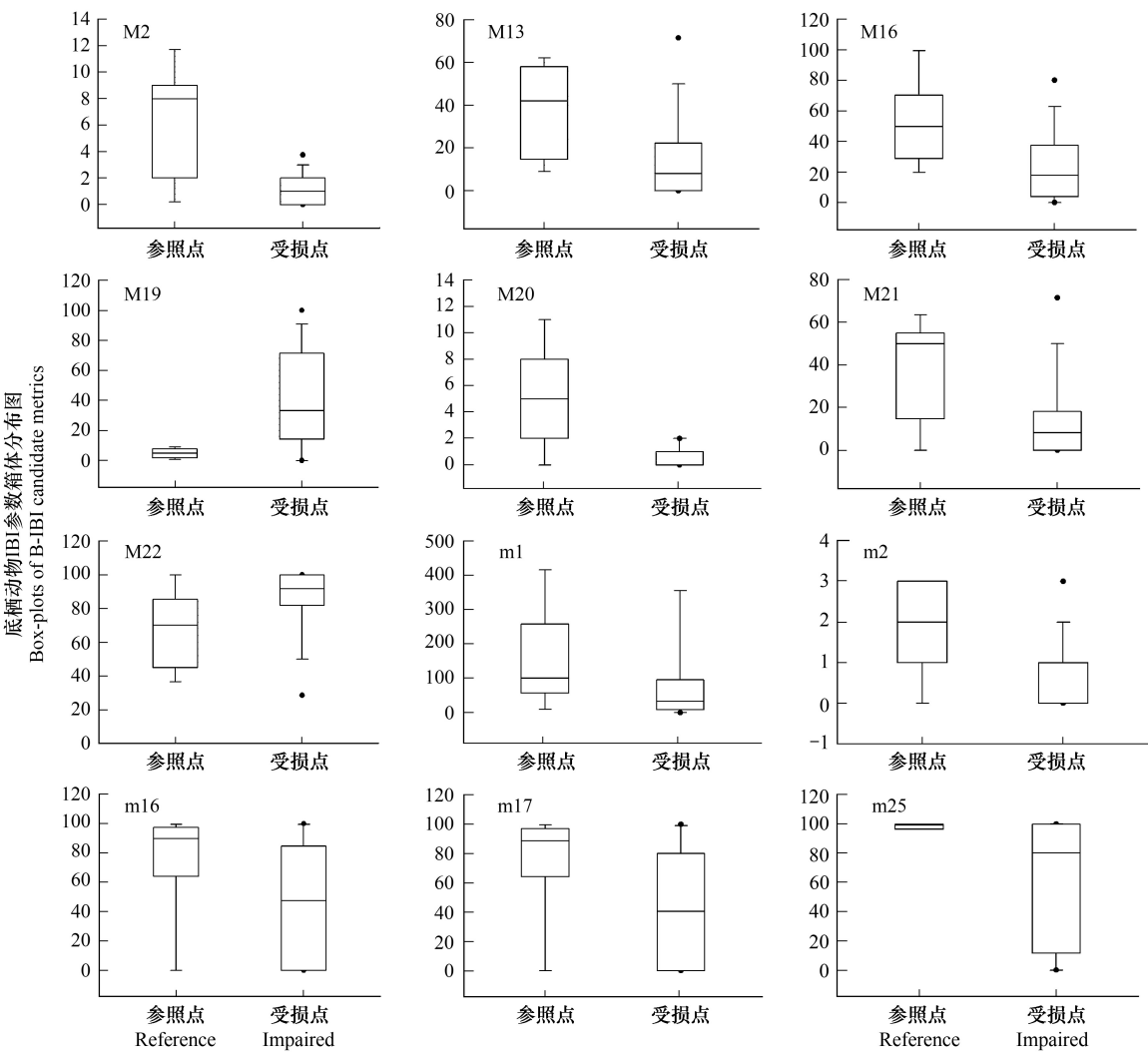


图 6 渭河流域 9 个候选 B-IBI 参数在参照点位和受损点位的箱体分布图

Fig.6 Box-plots of 9 candidate B-IBI metrics between reference and impaired sites in Wei River Basin

M: 丰水期; m: 枯水期

表 3 枯水期渭河流域 5 个底栖动物生物完整性 (B-IBI) 候选参数指标间的相关系数

参考指标 Candidate metrics	m1	m2	m16	m17	m25
m1	1				
m2	-0.08	1			
m16	-0.01	0.25	1		
m17	-0.01	0.24	0.99	1	
m25	0.31	0.31	0.77	0.76	1

表 4 基于底栖动物生物完整性指数 (B-IBI) 的渭河流域水生态健康标准

Table 4 Assessment criteria for biological integrity of macroinvertebrates in Wei River Basin

等级 Level	健康 Excellent	亚健康 Good	一般 Moderate	较差 Poor	极差 Severe
丰水期 Wet season	> 1.93	1.45—1.93	0.97—1.45	0.48—0.97	0—0.48
枯水期 Dry season	> 2.26	1.69—2.26	1.13—1.69	0.57—1.13	0—0.56

渭河流域底栖动物生物完整性评价 (B-IBI) 结果见表 5 所示。B-IBI 结果显示,渭河流域上游位于渭源市至天水市的渭河干流及其右岸支流、宝鸡至西安渭河右岸支流以及洛河中上游地区,水生态健康程度较高;泾河全流域水生态健康程度一般;水生态系统健康程度较差或极差的区域主要位于:渭河干流天水市至宝鸡市河段、渭河干流关中平原河段。渭河全流域范围内丰水期和枯水期底栖动物群落的 B-IBI 得分呈现明显的正相关性 (Person Correlation, $r=0.308$, $P=0.040$),表明在不同水文过程时期,渭河全流域大尺度范围内底栖动物群落的生物完整性特征较为一致。

表 5 渭河流域水生态系统健康评价结果

Table 5 Environmental condition assessment of Wei River Basin

站位 Site	丰水期分值 Score of wet season	丰水期健康状况 Condition of wet season	枯水期分值 Score of dry season	枯水期健康状况 Condition of dry season	演变规律 Pattern of succession	综合健康状况 River conditions
W1	1.93	A	2.35	A	—	A
W2	0.80	D	0.00	E	↓	E
W3	2.38	A	0.67	D	↓ ↑	B
W4	2.50	A	1.24	C	↓ ↑	B
W5	3.64	A	0.00	E	↓ ↑	C
W6	0.92	D	0.00	E	↓	E
W7	0.41	E	0.00	E	—	E
W8	2.59	A	2.19	A	—	A
W9	3.11	A	1.62	B	↓	B
W10	0.00	E	2.57	A	↑ ↓	C
W11	2.42	A	0.36	E	↓ ↑	C
W12	9.54	A	3.15	A	—	A
W13	2.62	A	0.00	E	↓ ↑	C
W14	2.23	A	2.38	A	—	A
W15	2.42	A	1.13	C	↓	B
W16	6.37	A	3.44	A	—	A
W17	3.10	A	2.72	A	—	A
W18	1.59	B	3.46	A	↓	B
W19	0.83	D	2.28	A	↑ ↓	B
W20	1.00	C	0.01	E	↓ ↑	D
W21	1.00	C	2.23	B	↓	C
W22	2.43	A	0.00	E	↓ ↑	C
W23	1.00	C	0.00	E	↓	D
J1	0.44	E	1.79	B	↑ ↓	D
J2	1.03	C	2.03	B	↓	C
J3	2.85	A	2.87	A	—	A
J4	2.03	A	1.35	C	↓ ↑	B
J5	1.00	C	0.00	E	↑ ↓	D
J6	2.31	A	2.26	A	—	A
J7	3.97	A	2.43	A	—	A
J8	3.80	A	2.34	A	—	A
J9	1.82	B	3.09	A	↓	B

续表

站位 Site	丰水期分值 Score of wet season	丰水期健康状况 Condition of wet season	枯水期分值 Score of dry season	枯水期健康状况 Condition of dry season	演变规律 Pattern of succession	综合健康状况 River conditions
J10	1.82	B	1.84	B	—	B
J11	2.24	A	2.09	B	↓	B
J12	2.12	A	2.22	B	↓	B
J13	0.66	D	1.89	B	↑ ↓	C
L1	1.19	C	1.83	B	↓	C
L2	1.90	B	1.98	B	—	B
L3	4.09	A	1.71	B	↓	B
L4	1.30	C	1.59	C	—	C
L5	1.95	A	0.00	E	↓ ↑	C
L6	1.57	B	0.00	E	↓ ↑	D
L7	1.11	C	1.69	C	—	C
L8	2.58	A	0.00	E	↓ ↑	C
L9	3.12	A	0.00	E	↓ ↑	C

A:健康;B:亚健康;C:一般;D:较差;E:极差

3 讨论

渭河是黄河最大支流,常年来由于降水量的不同,使得该区域水量变化较大,河水水量是保证水生态系统结构和功能正常运转的必要因素,Glecik 最早提出基本生态需水量的概念^[23],指出基本生态需水量是维系生态系统基本功能的水量。底栖动物是水生态系统的重要组成类群,对河流水量变化反应敏感。在河水水量发生改变时,底栖动物的种类组成、群落结构都会随之发生变化。从本次调查的结果中可以看出,渭河流域丰水期发现底栖动物 93 种,而到了枯水期则只剩下 44 种;底栖动物单个站点的最高密度则从 3318 个/m²下降到 739 个/m²。与此同时,空间群落结构也发生明显的变化。通过 CCA 对渭河流域丰水和枯水两季底栖动物和水文因子的相关性分析,渭河流域底栖动物的主体群落结构逐渐从粘附者主导过渡到摇蚊幼虫和寡毛类等耐污种为主导。

目前国内对不同水文过程时期(丰水期和枯水期)河流底栖动物方面的研究较少,最近一项针对辽河流域的研究显示^[24],辽河流域枯水期(5 月份)的底栖动物种类数最大值、最小值及中值均小于丰水期(8 月份)。渭河流域底栖动物在枯水期、丰水期两季种类、生物量、多样性变化上和辽河流域表现出相同的特征,但因为地理区域的差异性,其密度变化则呈现出不同的结果。渭河流域枯水期的生物密度与丰水期差异不明显,略有下降趋势;而辽河流域枯水期的生物密度则明显大于丰水期,且变幅较大^[24]。渭河干流地区水土流失严重,河底淤积大量泥沙,流域内的泾河和洛河水系的底质又是以基岩(bedrocks)为主,由于水流速度大,侵蚀作用强,所以很少有河流冲积物覆盖^[25],有时甚至在河床中露出基岩,致使底栖动物很难固着并生活其上,进而在丰水期、枯水期两季转换中,底栖动物密度呈现出下降趋势。辽河流域的底栖动物类群中,双翅目种类为优势类群^[26],虽然其他种类密度有下降趋势,但由于该流域枯水期河流营养盐浓度加大,水中双翅目幼虫,尤其是摇蚊科幼虫数量处于繁殖旺盛时期,使得辽河流域枯水期生物总密度呈现大幅升高。

国外近些年对不同水文过程时期河流底栖动物方面的研究集中在河流水量变化引起河流底栖动物群落内在结构的转化^[27-30]。以上研究多集中在平原区的河流,其研究结果表明,从丰水期到枯水期,底栖动物群落结构由滤食者转变为收集者和采集者。渭河流经秦岭山脉、六盘山脉和关中平原,流域地理状况复杂,使得渭河流域底栖动物显现出较为独特的群落结构模式。在丰水期,渭河流域水体中含大量的泥沙,水量充沛,底栖动物群落结构主要为蜉蝣目等粘附者,依靠有力的附肢、吸盘和粘附性虫巢得以生存;进入枯水期,流域水

量骤减,一些区域甚至出现断流,致使局部区域营养盐浓度骤增,导致底栖动物群落结构发生重大演变,一些摇蚊幼虫和寡毛类等耐污性强的物种大量繁殖,并逐渐占据优势地位。

在国内外 B-IBI 评价中,通常采用一次评价^[31]或者年跟踪评价^[32],而在相同点位从季节水量变化角度考察 B-IBI 评价体系的稳定性的研究较少。本研究分别在丰水期和枯水期,用底栖动物构建 B-IBI 评价体系,通过丰水期和枯水期两次评价,去除因季节变动干扰而导致的评价误差,来评价渭河流域的健康状况。尽管渭河流域的某些站位的 B-IBI 状况在丰水期和枯水期有较大出入,但在全流域范围内底栖动物群落的生物完整性特征较为一致,表明大尺度范围内流域生态系统的健康状况不会明显受河流水文状态的影响。此外,本研究结果表明,在丰水期和枯水期两次指标筛选中,相同的参考指标有两个,分别是 EPT 分类单元数和双翅目个体相对丰度,因而推测在渭河流域底栖动物指标参数中,这两个指标最为稳定,可以列为今后渭河流域底栖动物评价的核心指标。在丰水期和枯水期 IBI 评价中,评级未发生改变的点位为 15 个,占总点位的 33.3%,这些点位底栖动物类群不受丰、枯水期影响,在生物完整性评价中具有一定的稳定性。在最终评价中被评降级的点位达 25 个,占总点位的 55.6%,这些点位大部分集中在中、下游地区,渭河流域下游污染严重,生物群落结构稳定性差,健康状况受水量扰动影响,导致评级下降。鉴于本研究的结果,我们建议应加大对渭河中、下游河流生态系统的治理,控制污水排放量,最终构建一个和谐稳定的渭河流域生态系统。

参考文献 (References):

- [1] Cai Q H, Tang T, Liu J K. Several research hotspots in river ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [2] Zhang Y, Zhao R, Kong W J, Geng S W, Bentsen C N, Qu X D. Relationships between macroinvertebrate communities and land use types within different riparian widths in three headwater streams of Taizi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2013, 28(3): 307-328.
- [3] 张远,徐成斌,马溪平,张铮,王俊臣. 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.
- [4] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. 2nd ed. EPA 841-OB-99-002. Washington DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [5] Rosi-Marshall E J, Wallace J B. Invertebrate food webs along a stream resource gradient. *Freshwater Biology*, 2002, 47(1): 129-141.
- [6] Heino J, Muotka H, Mykrä R, Paavola R, Hämäläinen H, Koskenniemi E. Defining macroinvertebrate assemblage types of headwater streams: implications for bioassessment and conservation. *Ecological Applications*, 2003, 13(3): 842-852.
- [7] Townsend C R, Thompson R M, McIntosh A R, Kilroy C, Edwards E, Scarsbrook M R. Disturbance, resource supply and food-web architecture in streams. *Ecology Letters*, 1998, 1(3): 200-209.
- [8] Hughes D L, Brossett M P, Gore J A, Olson J R. *Rapid Bioassessment of Stream Health*. New York: CRC Press, 2010.
- [9] 渠晓东,刘志刚,张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [10] 殷旭旺,渠晓东,李庆南,刘颖,张远,孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. *生态学报*, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [11] 王备新,杨莲芳,胡本进,单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [12] 裴雪姣,牛翠娟,高欣,徐琛. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. *生态学报*, 2010, 30(21): 5736-5746.
- [13] 殷旭旺,张远,渠晓东,刘颖,李庆南,孟伟. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2732-2740.
- [14] 殷旭旺,徐宗学,鄢娜,武玮,宋进喜. 渭河流域河流着生藻类的群落结构与生物完整性研究. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 518-527.
- [15] Dolédec S, Statzner B. Responses of freshwater biota to human disturbances: contribution of J-NABS to developments in ecological integrity assessments. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1): 286-311.
- [16] Thorp J H, Covich A P. *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. 2nd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [17] 王桢瑞. *中国动物志—软体动物门—双壳纲*. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] Chen D N, Zhang G Q. *Fauna Sinica Phylum Mollusca Class Gastropoda*. Beijing: Science Press, 2002.
- [19] Wang Z R. *Fauna sinica Phylum Mollusca Class Bivalvia*. Beijing: Science Press, 2002.
- [20] Yang T. *Fauna Sinica Annelida Hiruclinea*. Beijing: Science Press, 2002.
- [21] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. *An Introduction to the Aquatic Insects of North American*. 4th Edition. Kendall: Hunt Publishing, 2008.
- [22] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法 (第四版)*. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Gleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
- [24] 王艳杰. 辽河流域底栖动物群落特征与生境指标关系[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [25] Dewson Z S, James A B W, Death R G. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the*

- North American Benthological Society, 2007, 26(3): 401-415.
- [26] Purdy S E, Moyle P B, Tate K W. Montane meadows in the Sierra Nevada: comparing terrestrial and aquatic assessment methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(11): 6967-6986.
- [27] 增强, 杨劲松, 李岳. 川渝地区基岩性河流定向钻穿越探讨. *天然气与石油*, 2008, 26(2): 38-64.
- [28] Graeber D, Pusch M T, Lorenz S, Brauns M. Cascading effects of flow reduction on the benthic invertebrate community in a lowland river. *Hydrobiologia*, 2013, 717(1): 147-159.
- [29] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 2010, 91(1): 299-305.
- [30] 苏玉, 王东伟, 文航, 孙金华, 黄艺. 太子河流域本溪段水生生物的群落特征及其主要水质影响因子分析. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1801-1808.
- [31] State Environmental Protection Administration of China. *Monitoring and Determination Methods for Water and Waste Water*. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [32] Teels B M, Mazanti L E, Rewa C A. Using an IBI to assess effectiveness of mitigation measures to replace loss of a wetland-stream ecosystem. *Wetlands*, 2004, 24(2): 375-384.