

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.020

应用底栖动物完整性指数评价济南市水生态健康状况

张欣^{1,2,3,4}, 徐宗学^{3,4}, 刘麟菲^{3,4}, 窦同文⁵, 赵长森⁶, 王博涵^{1,2}

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海洋大学辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁 大连 116023;
3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;
5. 济南市水文局, 山东 济南 250000; 6. 北京师范大学地理与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 基于2014年5—6月对济南市4个生态区中48个采样点的底栖动物和水环境调查结果, 采用多元统计分析以及干扰程度最小原则构建底栖动物生物完整性指数B-IBI的参照系统, 按河流型和水库型样点分别构建IBI指数。通过对28个候选生物参数进行判别能力和相关性分析, 确定了河流型B-IBI的4个构成指数: 水生昆虫分类单元数、甲壳动物和软体动物个体百分比、BI指数、BWMP指数, 以及水库型B-IBI的3个构成指数(水生昆虫分类单元数、优势分类单元数百分比和多样性指数)。采用比值法统一量纲, 分别构建了河流型和水库型B-IBI指数, 利用其B-IBI值对济南市水生态健康状况进行评价。结果表明: 河流型36个样点中各有7个处于极差和较差状态, 11个为一般, 8个为亚健康, 3个为健康。12个水库样点中有1个为健康, 6个为亚健康, 4个为一般, 1个为极差; 黄河区健康状态最好, 城区最差。影响底栖动物群落的重要环境变量是水体中氮含量和城建用地百分比。

关键词: 底栖动物完整性指数; 河流; 水库; 健康评价; 济南市

中图分类号: X17 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)06-0123-08

Health assessment of aquatic ecology in Ji'nan City using benthic-index of biotic integrity

ZHANG Xin^{1,2,3,4}, XU Zongxue^{3,4}, LIU Linfei^{3,4}, DOU Tongwen⁵, ZHAO Changsen⁶, WANG Bohan^{1,2}

(1. School of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
2. Liaoning Key Laboratory of Aquatic Biology, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
4. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
5. Ji'nan Hydrology Bureau, Ji'nan 250000, China;
6. School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The benthic-index of biotic integrity (B-IBI) was used to evaluate the health status of aquatic ecology in Ji'nan City. Benthic macro-invertebrate assemblages and the aquatic environment were sampled from four ecoregions of 48 sites in the city from May to June, in 2014. Based on multivariate statistical analysis and the principle of least interference, the reference system of B-IBI was built. The B-IBI was developed for river points and reservoir points, respectively. The analyses of the judgment ability and Pearson correlation were conducted on 28 candidate biotic metrics. The core metrics of B-IBI for river points were determined to be four indices: the number of aquatic insect taxa, relative percentage of Crustaceans and Molluscs, BI index, and BWMP index. The metrics of B-IBI for reservoir points included the number of aquatic insect taxa, percentage of advantage number of taxa, and diversity index. The B-IBI values for river and reservoir points, which were transformed into uniform

基金项目: 山东省水利厅、山东省财政厅水生态文明试点科技支撑计划项目(SSTMZCJH-SD02)

作者简介: 张欣(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水生态修复及水生态分区。E-mail: zhang0xin_1990@126.com

通信作者: 徐宗学, 教授。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

scores by the ratio score method, were obtained. The results show that of the 36 river sampling sites, seven sites were at unhealthy or extremely unhealthy status, 11 sites were at moderately healthy status, eight sites were at sub-healthy status, and three sites were at healthy status. Of the 12 reservoir sampling sites, one site was at healthy status, six sites were at sub-healthy status, four sites were at moderately healthy status, and one site was at extremely unhealthy status. The health status was best in the Yellow River ecoregion and worst in the urban region. The major environmental variables that affected the macro-invertebrate assemblages were the nitrogen content and the percentage of urban construction land.

Key words: benthic-index of biotic integrity; river; reservoir; health assessment; Ji'nan City

评估水生态健康是有效保护、合理利用河流资源的前提。城市化和工业化的快速进程导致水生态系统受到严重威胁,水生态系统承受越来越大的压力,水源枯竭、水体污染和富营养化及河道断流等问题频频出现^[1]。如何运用有效的方法评价河流健康成为亟待解决的关键问题。

生物监测方法已经广泛用于水生态健康评价^[2]。与化学或物理监测相比,生物群落结构特征能直接体现出水体中各种化学、物理、生物因子的综合作用,更好地反映水生态健康状况^[3]。在水生态系统健康评价中,采用生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)评价水生态健康状况是目前应用较为广泛的方法^[4]。不同生物类群在河流生态系统中具有特殊的位置与生态功能,在一定程度上可指示生态系统变化^[5]。近年来,以底栖动物完整性指数评价河流生态健康普遍得到业界人士认可^[6-8]。但底栖动物完整性指数(benthic integrated biotic index, B-IBI)在以城市为对象的水库、湖泊等静水生态系统中研究较少。其原因是:一方面,城市是一个高度管理的系统,行政区内按水体功能分饮用水源区、自然景观区、农业灌溉区等。复杂的水体功能体系和强烈的人类干扰致使构建 B-IBI 过程中在参照点确立和评价指标筛选上难度增大;另一面,水库大多位于河流上游区,参照点系统受干扰最小样点难以确定,底栖动物采样困难大^[9]。熊春晖等^[10]采用“百分比模相似性(PMA)指数不小于 50;水质综合指数在Ⅲ类标准以上”确定参照点,该方法在以河流为样点确定参照点上有一定科学性,但以水库为样点存在缺陷。其原因是水库水体较深,底栖动物种类及数量较小且由于水库受人类保护,水质相对较好。池仕运等^[11]采用多元统计、探查水库系统中潜在环境梯度的方法来确立参照点。该方法对今后国内水库系统健康评价具有较好参考价值。

河、库水生态功能类型不同,对其进行生态健康评价标准也不同。本研究目的是明确城市河、库参照点系统的确定方法,结合 2014 年河、库共 48 个采样点的生物和水质环境等数据,构建适合济南今后一段时期内应用的底栖动物完整性指数,为济南市水生态

系统健康评价、管理及生态修复提供技术依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

济南市为全国首家水生态文明建设试点城市,位于泰山北麓,地势南高北低,区域海拔在-66~957 m 之间。地处中纬度地带,属半湿润季风型气候,四季分明,春季干旱少雨,夏季温热多雨。年均气温 14.3℃,最高月均气温发生在 6 月份,为 26.8~27.4℃,最低月均温在 1 月份,其温度范围是-3.2~-1.4℃^[12]。境内 3 大水系分别为黄河水系、徒骇马颊河水系和小清河水系,集水面积分别为 2 778 km²、2 400 km²、2 792 km²。近年来,随着城市化和工业化速度加快,济南市水资源不足和水污染问题不仅降低了水体的使用功能,还将严重威胁到城市居民的饮水安全和身体健康。

1.2 样品采集及数据的获取

于 2014 年 5—6 月对济南市 36 个河流监测点及 12 个水库监测点进行水质和底栖动物调查,济南市调查样点分布见图 1。采用改良索伯网(35 cm×45 cm)在河流浅滩处进行定量采集。对于较深河流或水库样点采用改良的彼得逊采泥器,每个样点采集 2 次底泥。采泥器在样点中采得的样品为底栖动物与底泥、腐屑等混合体,采用孔径为 40 目的金属筛对混合体进行筛选,最后将筛洗后样品放入白瓷盘中并挑出样本于 25 mL 塑料瓶中,用 95% 的医用酒精对样品进行保存。所有样本带回实验室进行鉴

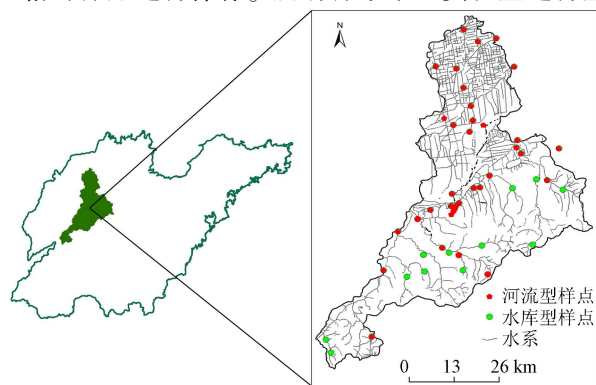


图 1 济南市调查样点分布

定、计数与称量,样本尽量鉴定到种^[13-14]。

水质理化指标测定分现场和室内两部分进行:水温、pH、电导率、DO 及盐度采用便携式水质分析仪 YSI(Pro-plus) 现场测定。另采集 1L 混合水体带回实验室,参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》测定以下水环境理化因子:TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、COD、COD_{Mn}、BOD 等。

栖息地质量评价采用栖息地环境质量评价指标(qualitative habitat evaluation index, QHEI),确定 10 个指标(栖境复杂性、底质类型比、流速和水深、堤岸稳定性、渠道化程度、河水水量变化、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土壤利用类型),每项 20 分,共 200 分,分为 4 个等级(健康、较好、一般和较差),分数越高代表栖息地环境质量越好。栖息地评分由同一人调查完成,以消除由于人为误差导致评价结果的不一致。评价指标判定标准详见文献[15]。

1.3 B-IBI 体系的构建

1.3.1 参照点的确定及候选指标筛选

底栖动物易受外界影响导致其群落结构波动较大。筑坝蓄水能改变流域水文特征使水库中底栖动物群落发生改变^[16],使得底栖动物多样性较河流区单一,因而水库区和河流区健康状态在本质上是不同的。鉴于此,本文结合济南市河流和水库生态环境特点并借鉴已有研究成果^[11,16],分别对河流型和水库型样点建立 B-IBI 指标体系。

参照点和受损点筛选是建立 B-IBI 指数的基础。水库不存在由于剧烈的人为影响对整个水库生态系统造成难以持久、不可逆转的胁迫,因此采用专家判断法难以确定参照点。本文采用多元统计分析方法一极点排序(bray-curtis ordination)探查水生态系统中的环境梯度,根据各样点在排序轴上得分,确定水库型参照点^[11]。对于河流型样点,由于济南市人口密集,找到干扰点小或无干扰点较困难,因此,结合已有研究和实际情况,确立了参考点的两个原则^[17]:①栖息地评价分数在 110 分以上,且河岸缓冲带土地利用无农田;②水质综合标准在Ⅲ类标准以上。

根据此次调查内容及 IBI 应用较为成熟的指标,共选择了 28 个候选指标^[18-20](表 1),力求尽可能反映环境变化对底栖动物(群落丰富度、耐受能力、营养级组成、多样性等)的影响,从而能够有效地监测和评价水环境质量。

采用箱线图分析上述候选指标在参考点和受损点间的分布情况。根据 Barbour 等^[21]的评价法,比较参考点和受损点 25%~75% 分位数的重叠情况,并分别赋值。本研究只对 IQ(判别能力)不小于 2 的指标作进一步分析。

表 1 构建 B-IBI 指标体系的生物参数

候选参数	缩写	候选参数	缩写
各个样点总数	M ₁	敏感类群分类单元数	M ₁₅
EPT 分类单元数	M ₂	敏感个体百分比(%)	M ₁₆
水生昆虫分类单元数	M ₃	耐污个体百分比(%)	M ₁₇
甲壳和软体动物的分类单元数	M ₄	滤食者百分比(%)	M ₁₈
优势分类单元	M ₅	撕食者及刮食者百分比(%)	M ₁₉
摇蚊分类单元百分比(%)	M ₆	收集者百分比(%)	M ₂₀
毛翅目个体百分比(%)	M ₇	杂食者及刮食者百分比(%)	M ₂₁
蜉蝣目个体百分比(%)	M ₈	捕食者百分比(%)	M ₂₂
颤蚓个体百分比(%)	M ₉	撕食者百分比(%)	M ₂₃
襁翅目个体百分比(%)	M ₁₀	黏附者百分比(%)	M ₂₄
双翅目个体百分比(%)	M ₁₁	多样性指数	M ₂₅
摇蚊个体百分比(%)	M ₁₂	均匀度指数	M ₂₆
甲壳动物及软体动物个体百分比(%)	M ₁₃	BI 指数	M ₂₇
其他双翅目及非昆虫个体百分比(%)	M ₁₄	BWMP 指数	M ₂₈

对保留下来的指标进行相关性分析。分析前对指标进行正态分布检验,对于符合标准的进行 Pearson 相关性分析。若相关系数 $R < 0.7$ 则通过检验;若 $R > 0.7$,则两个指标之间存在冗余信息,需要选择其中之一作为候选指标。数据处理在 SPSS 17.0 软件和 Excel 2007 中进行。

1.3.2 评价参数标准化及评价标准

目前 IBI 研究中应用较多的方法包括:连续赋值法,1、3、5 赋值法及比值法。本文选择最常用的比值法,其中各参数的标准化模式分为两种情况。

a. 对于随着干扰强度增大,数值变小的指标,其标准化指数方法为

$$P_m = O_m / S_{0.95} \quad (1)$$

式中: P_m 与 O_m 分别为第 m 个指标标准化指数与原始观测值; $S_{0.95}$ 为第 m 样点中的 95% 分位值。

b. 对于随着干扰强度增大,数值增大的指标,其标准化指数方法为

$$P_m = (X_{\max} - O_m) / (X_{\max} - S_{0.05}) \quad (2)$$

式中: X_{\max} 为第 m 个样点的最大生物值; $S_{0.05}$ 为第 m 个样点中第 5% 分位值。

目前大多采用美国环保署推荐的方法,以参照点 IBI 值的 25% 分位值作为生态健康的阈值。由于本次研究的水库型点位数量较少,为克服样点群规模过小带来精度过低的问题,采用所有水库样点 IBI 分值的 95% 分位值作为最佳期望值,以便剔除极端值^[22]。最终分别以河流样点和水库样点 IBI 值的 25% 和 95% 分位值为最佳值进行 4 等分,确定济南市 B-IBI 体系的评价标准,分别为健康、亚健康、一般、较差和极差 5 个等级。

2 结果与分析

在研究区内共采到底栖动物 35 种,隶属于 3 门 6 纲 14 科。节肢动物门 2 纲 6 科 18 种,占总种数的 51%。其中昆虫纲 15 种,软甲纲 3 种;软体动物门 2 纲 7 科 12 种,占总种数的 34%;环节动物门 2 纲 3 科 5 种,占总种数的 15%。

2.1 参照点和受损点群的确立

根据 12 个水库型样点底栖动物数据构建矩阵,采用 PC-ORD4.0 软件进行极点排序(图 2)。结果表明轴 1 较为真实地反映了环境梯度,这是因为其样点在轴 1 排序轴分值越低,物种组成越以耐污种为主,组成物种多样性越偏低。以所有样点轴 1 排序分值的 95% 分位值为基点确定参考点位和受损点位,若样点的 B-IBI 值大于 95%,则作为参考点位,其他点位作为受损点位。经统计,95% 分位值为

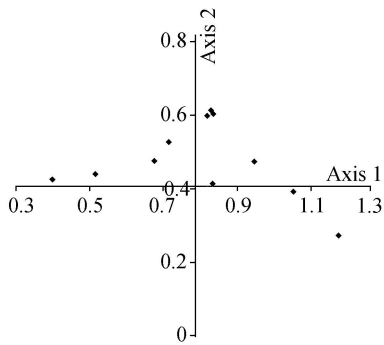


图 2 底栖动物数据极点排序结果

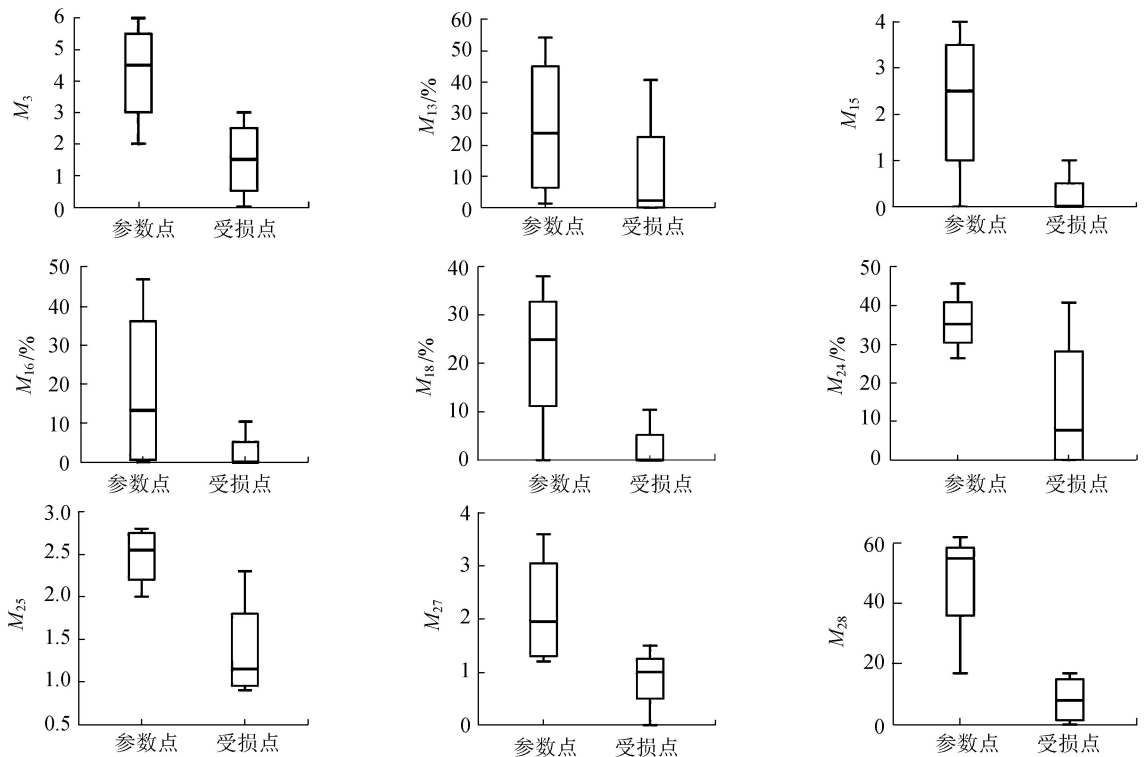


图 3 河流样点候选生物参数在参考点和受损点的箱线

0.9192。根据此标准共筛选出 3 个参照点分别为 J4、J9、J15,其余 9 个点位为受损点位。36 个河流点位则通过栖息地评分及水质级别的原则共选取了 4 个样点作为参照点,分别为 J1、J3、J16、J45,其余点位作为受损点。

2.2 B-IBI 评价体系

根据 IQ 评定方法,对候选指标进行箱型图分析,如图 3、图 4 所示。图 3、图 4 表明河流点位的生物参数 M_3 、 M_{13} 、 M_{15} 、 M_{16} 、 M_{18} 、 M_{24} 、 M_{25} 、 M_{27} 、 M_{28} ,水库点位生物参数 M_3 、 M_5 、 M_{11} 、 M_{25} 、 M_{28} 这些生物参数符合 IQ 值大于 2 的标准,进入下一步分析。

对剩余的 9 个生物参数进行正态性检验,结果表明符合正态分布,通过 Pearson 相关性分析结果如表 2 所示。指标 M_{28} 与 M_{16} 、 M_{18} 、 M_{25} 存在较强相关性,表明参数间包含冗余信息,选择其一即可。 M_{28} 基于底栖动物敏感值的计算,是表示清洁种的重要指数,能较好地反映水体的健康状况^[23],故保留 M_{28} 。 M_{27} 与 M_{24} 具有强相关性, M_{27} 不仅能反映群落耐污特征,也能反映不同耐污类群的丰度,故予以保留。 M_3 与 M_{15} 呈显著相关,因 M_3 能较好反映群落丰富度,故保留 M_3 指标。根据以上筛选原则,选择 M_3 、 M_{13} 、 M_{27} 、 M_{28} 个参数参与评价河流 B-IBI 指标体系。

同理,水库样点中对保留下的 5 个生物参数进行 Pearson 相关分析(表 3)。 M_3 与 M_{28} 、 M_5 与 M_{11} 、 M_{25} 与 M_{28} 之间具有显著关系。 M_3 能反映清洁种群落丰富度,保留 M_3 。而 M_{25} 包含信息较多且在国内外

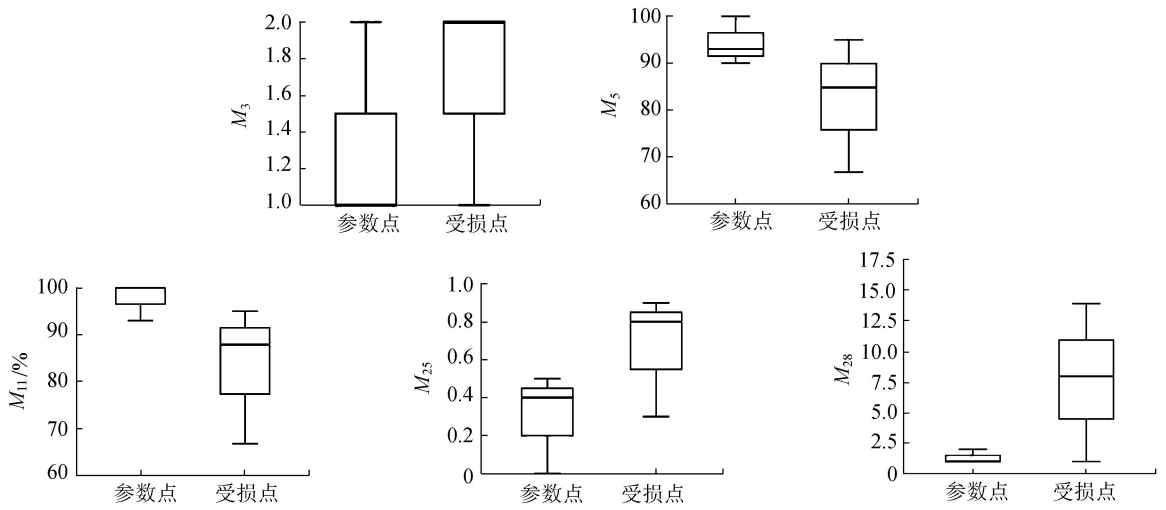


图4 水库样点候选参数在参照点和干扰点的箱线

表2 河流样点9个生物参数间 Pearson 相关分析

项目	M_3	M_{13}	M_{15}	M_{16}	M_{18}	M_{24}	M_{25}	M_{27}	M_{28}
M_3	1								
M_{13}	0.357*	1							
M_{15}	0.710**	-0.049	1						
M_{16}	0.446*	0.126	0.692**	1					
M_{18}	0.396*	-0.258	0.630**	0.834**	1				
M_{24}	-0.024	0.130	-0.049	0.017	0.184	1			
M_{25}	0.290	0.068	0.074	0.323*	0.421**	0.597**	1		
M_{27}	0.201	-0.042	0.232	0.341*	0.438**	0.824**	0.615**	1	
M_{28}	0.341*	0.058	0.342*	0.792**	0.725**	0.443**	0.752**	0.467**	1

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

表3 水库样点5个生物参数间 Pearson 相关分析

项目	M_3	M_5	M_{11}	M_{25}	M_{28}
M_3	1				
M_5	-0.182	1			
M_{11}	0.018	0.757**	1		
M_{25}	0.614**	-0.562**	-0.638**	1	
M_{28}	0.767**	-0.506**	-0.415**	0.837**	1

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

外研究中属常用指标,予以保留。由于水库出现种类数相对河流较为单一,而 M_5 能反映群落丰度。经以上筛选,最终选择水生昆虫分类单元数 M_3 、优势分类单元数 M_5 和反映多样性 M_{25} 这3个参数作为水库系统B-IBI指标体系。

2.3 核心指标与环境因子关系

根据各生物指数在所有样点的分布,采用比值

表5 生物参数与物理-化学环境因子相关性分析

项目	河流生物指标				水库生物指标		
	M_3	M_{13}	M_{27}	M_{28}	M_3	M_5	M_{25}
城建用地百分比	-0.669**	-0.460**	-0.579**	-0.385*	-0.387*	-0.015	-0.387*
林地	0.254	-0.421	0.566**	-0.201	0.384*	-0.344*	0.584**
$\rho(\text{DO})$	0.357*	-0.099	0.483**	0.357*	0.337*	-0.382*	0.437**
$\rho(\text{TN})$	-0.551**	-0.685**	-0.522**	-0.692**	-0.584**	0.758**	0.684**
电导率	-0.536**	0.248	-0.407**	-0.069	-0.424**	0.491**	0.342*
$\rho(\text{BOD})$	-0.338*	0.081	-0.368*	0.052	-0.642**	-0.037	-0.463**
$\rho(\text{TP})$	-0.360*	-0.460**	-0.387*	-0.485**	-0.027	0.568**	-0.558**

法计算公式(表4),计算各样点B-IBI值。

表4 比值法计算各参数分值的计算公式

河流样点		水库样点	
参数	计算公式	参数	计算公式
M_3	$Z/5$	M_3	$Z/3.8$
M_{13}	$Z/99.24$	M_5	$(100-Z)/(100-13.75)$
M_{27}	$Z/2.49$	M_{25}	$Z/2.68$
M_{28}	$Z/49.5$		

注:Z为参数值。

水体理化性质及周边土地利用类型不仅是水生生态系统的重要组成部分,也是水生物生存环境的重要反映,直接影响着河流水生物的群落结构特征。将通过筛选并计算得出的生物指标与环境要素进行相关性分析,结果见表5。各生物指标与环境因子大多存在显著相关关系,表明这些环境因子作为河流周边

环境要素,对底栖动物群落特征有重要影响。其中城建用地百分比与 M_3 ($r>0.65, p<0.05$)、 M_{27} ($r>0.57, p<0.05$) 具有较强负相关性,林地百分比与 M_{25} ($r>0.58, p<0.05$)、 M_{27} ($r>0.56, p<0.05$) 具有较强正相关性。以上说明土地利用类型可通过影响栖息地质量、营养物质浓度、底质类型对底栖动物群落结构产生影响。氮元素作为水环境质量关键指标,其浓度值与所有生物指标 ($r>0.5, p<0.05$) 具有显著相关性,这与之前研究^[24]结论一致。TP、BOD 浓度也均与部分生物指标存在显著相关,表明所选生物参数对人类活动影响下的环境因子具有较强敏感响应。

2.4 确定健康等级阈值

将计算后的指数分值加和,即得到 B-IBI 指数值。河流区和水库区分别用参照点的 25% 和 95% 分位值作为健康阈值,得出河流区和水库区健康阈值分别为 2.80 和 2.06,大于该值样点均为健康状态,小于该值分布范围进行 4 等分,得到 B-IBI 的评价标准(表 6)。

表 6 河流样点和水库样点 B-IBI 指标体系生态健康评价标准

点位	健康	亚健康	一般	较差	极差
河流区	>2.80	[2.10, 2.80)	[1.40, 2.10)	[0.70, 1.40)	≤0.70
水库区	>2.06	[1.56, 2.06)	[1.04, 1.56)	[0.52, 1.04)	≤0.52

2.5 B-IBI 评价结果

济南市水生态一级分区^[25]和 B-IBI 体系的评价结果(图 5)表明济南市整体健康状况一般。河流型 36 个样点中各 7 个处于“极差”和“较差”状态,各占总样点 19.4%;有 11 个样点处于“一般”状态,占 30.6%;8 个样点处于“亚健康”状态,占 22.2%;3 个样点为“健康”状态,占 8.3%。3 个健康采样点位都位于Ⅲ黄河生态区,这可能与该区人口密度相对较小、土地利用类型多以林草地为主有关。“一般”和“亚健康”点位大多集中在北部的 I 徒骇马颊河生态区。位于Ⅳ主城区及其周边的采样点多以“较差”状态为主,这可能与城区人口密度密集、受城市污水等点源污染有关。由此看出,不同水生态区健康度具有明显差异性,需要政府部门针对不同水生态区采取不同管理措施。

水库点位于济南市南部黄河生态区和东南部小清河生态区,处于“健康”状态点位有 1 个,“亚健康”的点位有 6 个,“一般”点位有 4 个。总体健康状况较好,只有 J13 崮头水库为“极差”。其原因是持续的旱情,蒸发量增大,下游灌溉需要持续放水,导致几乎干涸,大量水生生物死亡,对水库的生态环境造成了较大影响。目前我国水库主要安全隐患是由于库湾以上河流营养盐的输入造成各种藻类水华

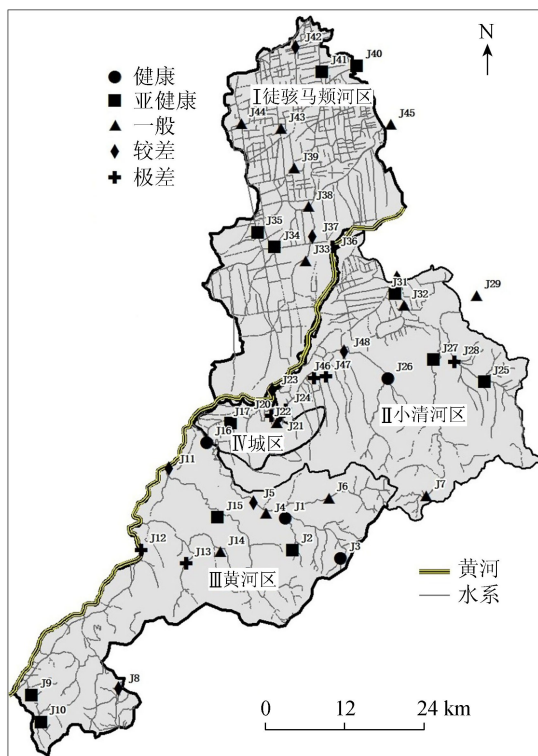


图 5 济南市 B-IBI 体系评价结果

的暴发,使得库区经济性鱼类大量死亡,造成巨大经济损失。依本次研究情况来看,济南市水库健康状况有所改善,这与当地政府部门监督管理密不可分。从济南市河库水生态健康状况来看,呈现出远郊区域水生态健康度优于近郊的特点,而市内的健康状况最差。

3 讨论

3.1 样点分类及参照点的确定

选择适合的参考点对于构建 B-IBI 体系及健康评估至关重要。较理想的参考点设置应在不受损或受损程度最小的区域。由于济南市经济发达,人口较为密集,找到无干扰或干扰小样点作为参考点较困难。大多数研究者利用土地利用类型所占百分比^[26]、样点上游有无点源污染及周围有无村庄和农田^[27]、水质等级在Ⅱ类以上和栖息地评分在 150 分以上且河岸缓冲带土地利用无农田^[17]、底栖动物多样性指数值大于 3^[18]作为参考点评判标准。由于本次研究区域中水库周围人口密度相对较低,同时也进行了封山育林等,且水库特有的形态结构使其在物理、化学、生物特性均与河流特性存在差异性,表现在由激流环境到静水环境的过渡。因此,对于水库样点,采用河流的参照点标准不太适用。在本研究中,河流和水库分开评价,采用不同的方法选择参照点位。河流点位参照点选择标准:①栖息地评价在 110 分以上,且河岸缓冲带土地利用无农田;

②水质综合标准在Ⅲ类标准以上。水库点位则是依靠生物数据进行极点排序方法确立受损点和参照点,这种分组方法较为客观,反映出生物指数之间的变化关系,也有学者进行过这种尝试。Velk 等^[28]对荷兰地表水体建立 B-IBI 指数时,首先通过对水化学参数进行站点的筛选,力图使这些样点涵盖各种类型环境压力,然后通过生物数据聚类分析,给样点确定不同生态状态等级来进行参数筛选。

3.2 生物指数的筛选与健康评价

不同生态区的地表水底质类型和环境状况不同,底栖动物组成也不同,构建 B-IBI 指标体系也不同。在徒骇河生态区及小清河生态区底栖动物组成以甲壳动物、软体动物和双翅目中的摇蚊等耐污种为主,黄河生态区和小清河生态区的水库点位以水生昆虫等清洁种为主。另外由于水库水位较深,DO 含量减少,导致水库型底栖动物多样性低于河流。因此,对于不同水体类型选择合适的生物参数对评价结果起关键性作用。通过箱体图及相关性分析,最终在河流型样点中选择了水生昆虫分类单元数、甲壳动物和软体动物个体百分比、BI 指数和 BWMP 指数 4 个指标;水库型样点评价指标选择了水生昆虫分类单元数、优势分类单元数和反映多样性 3 个指标。不同生物参数对不同类型的人为活动响应敏感性具有差异性^[29]。由表 5 可知,各参数在子流域尺度上,与城市用地百分比和林地百分比均具有显著影响,其中水生昆虫分类单元数与城市用地相关性最高($R^2 = -0.669$)。在河段尺度上,优势分类单元数与水质指标(TP)相关性最高($R^2 = 0.758$)。表明本次所选生物指标能够在不同程度上反映出不同环境因子下的胁迫,所构建的 B-IBI 指标体系能有效地评价济南市水生态系统健康状况。

通过对水生态健康评价,其结果显示:济南市处于“健康”、“亚健康”、“一般”、“差”、“和“极差”状态的采样点分别占采样数的 8.33%、29.17%、31.25%、14.58%、16.67%。健康状况为“差”和“极差”的样点主要分布在主城区及各支流下游。主城区为济南市经济圈的重要组成部分,发达的工农业和强烈的人类活动给水生态造成巨大胁迫,尤其是城市周边的河流污染更为严重且河道存在部分渠化,植被覆盖率偏低,河岸缓冲带大量被侵占。黄河区的健康状态较好,该区域位于南部山区,以林草地为主,人类开发程度较低,水系受人类干扰程度较弱。评价表明人类活动与河流生态系统健康关系密切。在最南部的 J3 点位水质和栖息地质量较好,河道底质多为卵石和砾石,生境状况也有利于附着性水生昆虫生存,该点为济南市水生态健康最优点位,

几近自然状态。济南市北部徒骇马颊生态区地势较为平坦,土地利用类型以农田为主,大量施肥导致周边河流在径流方式下形成非点源污染。该区域生态健康状况多为“一般”状态,随着农业和城市用地面积比例增加,生态健康状况令人担忧。

3.3 构建的底栖动物完整性体系的适宜性

自 Karr^[30]提出生物完整性指数并应用水生态健康评价以来,B-IBI 是目前应用最广泛的水生态健康评价指标之一,用来评估人类活动对水体生态状况影响。栖息地质量反映的是河岸带受人类长期干扰的状况,能够综合环境各要素的结构体系,对于城市采样点,栖息地受到严重的人为影响,进而导致河流生态完整性下降。因此,环境栖息地评分能够很好地验证 B-IBI 指数适宜性。采用 Spearman 非参数性检验方法,分析得到 B-IBI 与河流栖息地评分的相关关系(图 6)。由图 6 可知,B-IBI 与栖息地生境质量评分呈显著的线性正相关($R^2 = 0.58, P < 0.01$),说明 B-IBI 随生境质量提高而增大。

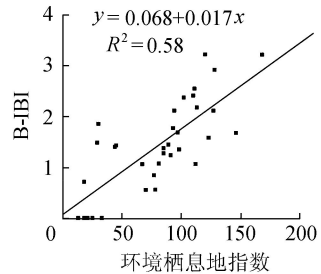


图 6 B-IBI 与环境栖息地评分的相关关系

水库的生态作用主要是调蓄工农业及生活用水,且本次采样的水库大多为水源地,生境条件大多为良好。本文通过极点排序方法揭示主要的环境压力(第 1 轴分值),与 B-IBI 进行相关性分析(图 7)。结果显示两者具有明显线性相关($R^2 = 0.644, P < 0.01$),表明构建的指数能够反映潜在的环境压力,适用于水库的水生态健康评价。

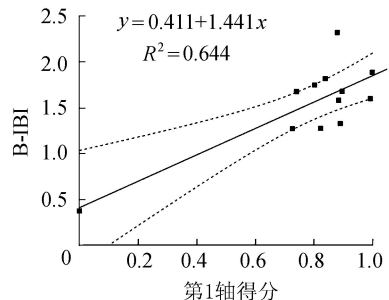


图 7 B-IBI 与轴 1 的相关关系

4 结论

a. 采用不同的方法与标准确立河流型和水库型参照点和受损点,应用 B-IBI 体系筛选出河流健

康评价指标:水生昆虫分类单元数、甲壳动物和软体动物个体百分比、BI 指数和 BWMP 指数 4 个指标;水库健康评价指标:水生昆虫分类单元数、优势分类单元、多样性指数这 3 个指标,分别用于济南市河流和水库水体健康评价。

b. 济南市水生态环境整体处于一般状态,济南中部健康状况不容乐观,较多处于极差或较差状态。南部山区总体状态较好,只有个别干流样点生物完整性较低。水库型样点总体较为健康,只有 1 个水库面临库水干竭,生态环境面临退化的威胁,这与人类及自然环境共同影响有关。

参考文献:

[1] PINTO U, MAHESHWARI B. A framework for assessing river health in peri-urban landscapes [J]. *Ecohydrology Hydrobiology*, 2014, 14(2) : 121-131.

[2] BIRK S, BONNE W, BORJA A S, et al. Three hundred ways to assess Europe ' s surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive [J]. *Eco-logical Indicators*, 2015, 18(8) : 31-41.

[3] KARR J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality [J]. *Environment Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(9) : 1521-1531.

[4] 曹艳霞,张杰,蔡德所,等.应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况[J]. *水资源保护*, 2010, 26(2) : 13-20. (CAO Yanxia, ZHANG Jie, CAI Desuo, et al. Lijiang River health assessment using a benthos index of biotic integrity for invertebrate [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(2) : 13-20. (in Chinese))

[5] 徐宗学,武玮,殷旭旺.渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1) : 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang, Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1) : 23-30. (in Chinese))

[6] OLIVEIRA R B S, BAPTISTA D F, MUGNAI R, et al. Towards a rapid bioassessment protocol for wadeable streams in Brazil: development of a multimetric index based on benthic macroinvertebrates [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(6) : 1584-1593.

[7] HUTTON M, VENTURINI N, GARCIA-RODRIGUEZ F, et al. Assessing the ecological quality status of a temperate urban estuary by means of benthic biotic indices [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 9(1) : 441-453.

[8] ASCHALEW L. OTTO M. A multimetric index based on benthic macronvertebrates for assessing the ecological status of streams and rivers in central and southeast highlands of Ethiopia [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 75(1) : 229-242.

[9] BECK M W, HATCH L K. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity [J]. *Environmental Reviews*, 2009, 17: 21-44.

[10] 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[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(6) : 1067-1078. (XIONG Chunhui, ZHANG Ruilei, XU Yuping, et al. Health assessment on rivers in Shanghai City using benthic index of biotic integrity [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(6) : 1067-1078. (in Chinese))

[11] 池仕运,俞建军,陈晖,等.供水型水库底栖动物完整性指数的构建[J], *生态学杂志*, 2012, 33(2) : 6-11. (CHI Shiyun, YU Jiangjun, CHEN Hui, et al. Study on the development of a biological integrity index based on zoobenthos for drinking water resources-based reservoirs [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2) : 6-11. (in Chinese))

[12] ZHANG Z G, SHAO Y S, XU Z X. Prediction of urban water demand on the basis of Engel ' s coefficient and Hoffmann index: case studies in Beijing and Jinan, China [J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(2) : 410-418.

[13] 刘月英,张文珍,王跃先,等.中国经济动物志:淡水软体动物[M].北京:科学出版社,1979.

[14] 何雪宝.西藏和四条大型河流水生寡毛类区系研究[D].武汉:中国科学院水生生物研究所,2011.

[15] 郑丙辉,张远,李英博.辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6) : 928-936. (ZHENG Binghui, ZHANG Yuan, LI Yingbo. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6) : 928-936. (in Chinese))

[16] 李斌,申恒伦,张敏,等.香溪河流域梯形水库大型底栖动物群落变化及其与环境关系[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8) : 2070-2076. (LI Bin, SHEN Helun, ZHANG Min, et al. Changes of macrobenthos community and their relationships with environmental factors along cascading reservoirs of Xiangxi River Basin, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8) : 2070-2076. (in Chinese))

[17] 李艳利,徐宗学,杨晓静.基于底栖动物完整性指数的浑太河流域河流健康状况评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2) : 297-303. (LI Yanli, XU Zongxue, YANG Xiaojing. Health assessment by using a benthic-index of biotic index in the Huntaihe River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Nature Sciences)*, 2013, 49(2) : 297-303. (in Chinese))

[18] 高欣,牛翠娟,裴雪娇.太湖流域大型底栖动物生物完整性研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(4) : 392-398. (GAO Xin, NIU Cuijuan, FEI Xuejiao, et al. On biological integrity of macronvertebrate in Taihu Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Nature Sciences)*, 2012, 48(4) : 392-398. (in Chinese))

(下转第 141 页)

- (AUSRIVAS) in the Brantas River, East Java, Indonesia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, 62(1): 93-100.
- [26] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER Blaine, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable Rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish [R]. Washington D C: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [27] RAVEN P J, HOLMES N T H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the U K [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 359-367.
- [28] WRIGHT J F, SUTCLIFFE D W, FURSE M T. Assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS and other techniques [M]. Ambleside, Cumbria, U K: The Freshwater Biological Association, 2000: 124.
- [29] KLEYNHANS C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996 (5): 41-54.
- [30] European Communities. Directive 2000/60/EC of the European parliament and the council of 23rd October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy [J]. *Official Journal of the European Communities*, 2000, 43: 1-15.
- [31] 涂敏. 基于水功能区水质达标率的河流健康评价方法 [J]. *人民长江*, 2008, 39(23): 130-133. (TU Min. River health assessment methods based on the probability of meeting water quality standard [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(23): 130-133. (in Chinese))
(收稿日期: 2016-03-11 编辑: 熊水斌)
-
- (上接第 130 页)
- [19] 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 Zhaoan, et al. Application of 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))
- [20] SILVERA M P, BAPTISTA D F, BUSS D F, et al. Application of biological measures for stream integrity assessment in south-east Brazil [J]. *Environment Monitoring and Assessment*, 2005, 10(1): 117-128.
- [21] BARBOUR M T, GERRITSEN J, GRIFFITH G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [22] BLOCKSOM K A, KURTENBACH J P, KLEMN D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 311-333.
- [23] 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 [J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2281-2287. (GENG Shiwei, QU Xiaodong, ZHANG Yuan, et al. Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. *Environment Science*, 2012, 33(7): 2281-2287. (in Chinese))
- [24] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子关系 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 218-226. (YIN Xuwang, XU Zongxue, GAO Xin, et al. Macroinvertebrate community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River Basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 218-226. (in Chinese))
- [25] 张欣, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 济南市水生态功能分区研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 303-310. (ZHANG Xin, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. Freshwater ecological function zoning in Jinan City [J]. *Journal of Beijing Normal University (Nature Sciences)*, 2016, 52(3): 303-310. (in Chinese))
- [26] 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 [J]. *环境科学*, 2007, 28(9): 2141-2147. (LI Qiang, YANG Lianfang, WU Jing, et al. Stream health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Xitiao Stream, Zhejiang Province, China [J]. *Environment Science*, 2007, 28(9): 2141-2147. (in Chinese))
- [27] 杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等. 基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价 [J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3313-3322. (YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al. The assessment of river health using benthic-index of biotic integrity for Wenyu River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3313-3322. (in Chinese))
- [28] VLEK H E, VERDONSCHOT P F M, NIJBOER R C. Towards a multimetric index for the assessment of Dutch streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 516(1): 173-189.
- [29] 陈桥, 徐东炯, 张翔, 等. 太湖流域平原水网区底栖动物完整性健康评价 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(12): 1301-1308. (CHEN Qiao, XU Dongjiong, ZHANG Xiang, et al. A preliminary benthic index of biotic integrity (B-IBI) for bioassessment of the plain waterway network of Taihu Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(12): 1301-1308. (in Chinese))
- [30] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
(收稿日期: 2016-06-22 编辑: 徐娟)