

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0077

温家华,徐征和,武玮,等. 大汶河流域水生态系统健康评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 118-124. WEN J H, XU Z H, WU W, et al. Study on water ecosystem evaluation in Dawen River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 118-124. (in Chinese)

大汶河流域水生态系统健康评价研究

温家华, 徐征和, 武 玮, 祁泽慧

(济南大学 水利与环境学院, 济南 250022)

摘要:以大汶河流域为研究对象,基于2016年10月流域水生态调查数据,采用综合污染指数法、鱼类完整性指数法、层次分析法分别对水质、鱼类、河岸带进行健康评价,并在此基础上采用层次分析法对大汶河流域水生态系统进行综合评价。结果表明:大汶河流域水生态系统健康状况整体较差,较差和极差状态的点位分别占总采样点的50.0%和41.7%,健康等级为一般的采样点位仅占8.3%。从不同评价内容来看,该流域水质状况较差,其中大汶河南支、瀛汶河南段和汇河支流水质最差,为劣Ⅴ类水;在鱼类完整性评价中,24个采样点中1个采样点为健康,10个采样点为亚健康,13个采样点为一般,分别占总点位数的4.2%、42.6%和53.2%,没有较差和极差的采样点;河岸带生境状况评价结果整体较好,未出现河岸带生境较差的采样点。

关键词:大汶河流域;水生态系统;水质;鱼类;河岸带

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0118-07

Study on water ecosystem evaluation in Dawen River Basin

WEN Jiahua, XU Zhenghe, WU Wei, QI Zehui

(School of Water Conservancy and Environmental Science, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: In this paper, we investigated the water quality, fish, and riparian zone in Dawen River Basin in October 2016 using comprehensive contamination index method, index of biotic integrity for fish, and analytic hierarchy process in order to assess the river ecosystem health in the basin. The results indicated that the health status of the water ecosystem in Dawen River Basin was generally poor. The poor and very poor sites respectively accounted for 50% and 41.7% of the total sampling points, and the sampling points with medium health level only accounted for 8.3%. The water quality was the worst in the south tributary of Dawen River, the southern section of Yingwen River, and the tributaries of Hui River, belonging to the Class V bad water. In the evaluation of fish integrity, the results showed that 1 site was healthy, 10 sites were sub healthy, and 13 sites were medium, which respectively accounted for 4.2%, 42.6%, and 53.2% of the total sampling points. The riparian zone evaluation showed generally good results.

Key words: Dawen River Basin; water ecosystem; water quality; fish; riparian zone

近年来,随着各地工业化、城镇化进程的不断加快,人类对河流水生态系统资源进行了掠夺式开发

利用^[1],导致水生态系统受到了巨大的损害,主要表现为水文特征变化、水质恶化、生物多样性退化等

收稿日期: 2017-10-11 修回日期: 2017-11-20 网络出版时间: 2018-01-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180108.1700.010.html>

基金项目: 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201602); 山东省高等学校科技计划项目(J15LH08); 济南市水环境生态治理技术的研究与示范推广(SHMS2015-3-01)

Funds: Shandong Provincial Water Conservancy Research and Technology Promotion Project(SDSLKY201602); Science and Technology Project of Shandong Colleges(J15LH08); Research and Demonstration Promotion of Water Ecological Management Technology of Jinan(SHMS2015-3-01)

作者简介: 温家华(1993-),女,山东龙口人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 657683569@qq.com

通讯作者: 徐征和(1968-),男,山东聊城人,教授,主要从事水生态、水文学及水资源研究。E-mail: xu4045@126.com

问题,目前生态系统健康评价和研究工作已成为当前研究的热点问题^[23]。从内容来看,水生生态系统健康评价包括水质、水生生物、河岸边带、水文特征等几个方面^[47]。我国河流水生态健康评价起步较晚,目前有关水质评价方面的研究较多,但单纯的水质评价结果较为单一,而生物完整性指标能够反映多种生态胁迫对水环境造成的累积效应,可作为反映河流健康状况的主要指标^[8]。Karr^[9]提出的基于鱼类的生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)是生物学评价法的典型代表。与此同时,河岸带作为水域与陆地交叉植被地带其健康状况也受到重视^[10],夏继红等^[11]认为影响河岸带生态系统的众多因素具有明显的层次性,并从定性的角度分析研究影响河岸带的因素,建立河岸带生态系统综合评价指标体系。近年来,人们开始综合使用河流水质、生物学和物理栖息地的参数,进一步发展出综合评价法对河流健康进行评估。本文从水质、水生鱼类和河岸带三个方面分别对流域的水生态健康进行评价,并以此为基础构建目标层、准则层和指标层三级组成的流域综合评价体系,并采用层次分析法进行水生生态系统综合评价,能够更加全面准确地指示河流水生态系统的健康状况^[12],以为大汶河流域水资源的保护和可持续利用提供理论依据,并为保护和恢复流域生态系统健康提供理论支持。

1 研究区概况与采样方法

1.1 大汶河流域概况

大汶河又称汶水,属黄河流域,干流发源于泰莱山区,迂回西流,汇泰山、蒙山山脉支流诸水,于东平县马口注入东平湖,由东平湖清河门出湖闸泄入黄河。流域全长 208 km,流域面积达 9 069 km²。大汶河流域多年平均气温为 12~ 14 °C,流域内雨量丰沛,但降水相对集中于夏季,多年平均降水量为 727.9 mm。各季降水量相差悬殊,其中汛期 6 月—9 月降水量 529.8 mm^[13],占全年降水量的 73%,具有春旱、夏涝、晚秋又旱的特点。

大汶河水资源主要来源于大气降水,由于大气降水年际间、年内变化大,因而水资源量也有同样的特点。随着经济社会的发展及城市化进程的加快,大汶河流域水资源短缺的问题日渐凸显^[14],且流域内排污量较大,污染物质严重超标,河水中主要的污染物为 BOD₅、悬浮物、COD、石油类等有机物^[15],使得河道内鱼类等水生生物锐减^[16],大汶河流域生态健康面临严重的威胁。

1.2 采样方法

本研究于 2016 年 10 月对大汶河流域进行了水生生态调查采样,采样点位共有 24 个,在主要支流汇入干流前后分别设置采样点,以全面监测不同河流的水生态情况。采用 GPS (MAGEL-LAN explorer-200) 现场测定采样点的经纬度和海拔高度,点位分布见图 1,其中大汶河南支点位 5 个,瀛汶河点位 4 个,汇河点位 3 个,大汶河干流点位 12 个。



图 1 大汶河流域水生生态调查采样点分布

Fig. 1 Sampling sites in Dawen River Basin

1.2.1 水样采集

采样点选在流速平均的位置处,避开有聚集悬浮物、油脂等影响因素的地方。考虑完成所有项目的分析需要,每个采样点采集水样 5 L。为了保证检测结果的准确性,水样在 0~ 4 °C 保温箱中避光冷藏保存,并于 24 h 内带回实验室进行检测。

1.2.2 生物采集

充分考虑鱼类样品的代表性和技术操作上的可行性,选择电鱼器和刺网作为鱼类采集的方法,每个点上针对不同生境进行采样,包括急流区域、缓流区域、不同底质、水草丛生地等。电鱼器用于可涉水域;不可涉水域采用刺网和电鱼器相结合的方式,采样的范围为采样点上、下游各 300 m 水域,采样时间为 30 min。

鱼类采集后现场进行鉴定,鱼类的鉴定主要参考《中国动物志:硬骨鱼纲,鲤形目(中卷)》^[17],对流域内所有捕获长度超过 20 mm 的鱼类鉴定到种或亚种,同时观察判断是否有个体存在形体异常,如畸形、病变、肿瘤、鳍条侵蚀等;记录捕获的鱼类体长、体重、个体数量以及健康状况后放生;对于不能现场鉴定物种的鱼类,采用 5% 的甲醛固定后带回实验室鉴别物种。

2 研究方法

2.1 水质综合污染指数法

本次水质评价采用水质综合污染指数法^[18],是

当前我国环保部门普遍采用的水质评价方法,在此不做详细介绍。

2.2 鱼类完整性指标体系

2.2.1 参照点位的选择

本研究参考相关文献^[19]选择参照点与受损点,同时参考各样点栖息地调查得分和该地区的鱼类物种丰富度及渔获量最终筛选出了 w10、w12、w13、w19、w21、w23、w25、w26 共计 8 个点位为参考点,其余 16 个点位为受损点。

2.2.2 F-IBI 指标体系的构建

结合本次调查鱼类的实际情况,从 5 个方面进行评价体系构建,选取了对环境变化较为敏感的 15 个指标为候选指标见表 1,然后对此 15 个候选指标进行分布范围、判别能力和相关性分析的筛选^[20]。

表 1 15 个候选指标
Tab. 1 List of IBI candidate metrics

指标类型	参数	对干扰的反应
物种丰富度和组成	鱼类总分类单元数	下降
	总渔获量	下降
物种个体数量所占比例	鲢亚科	下降
	鳊亚科	上升
	鲤亚科	上升
	鳊科	下降
	鰕虎鱼科	下降
	经济鱼类	下降
营养方式	肉食性鱼类百分比	下降
	植食性鱼类百分比	下降
反应生物耐污能力	杂食性鱼类的百分比	上升
	耐污物种百分比	上升
小生境质量	底层鱼类百分比	上升
	冷水鱼百分比	无
	有护卵行为鱼类数量	上升

应用箱线图法^[21]分析上述 15 个筛选指标后,给各指标赋予不同值。结果表明,鱼类总分类单元数、总渔获量、鲤亚科种类百分比、杂食性鱼类百分比以及耐污物种百分比的 IQ 都大于或等于 2,因此以上 5 个指标可以用于构建 F-IBI 体系。然后进行 Pearson 相关分析^[22],以 r 的绝对值 > 0.9 表示 2 个参数间高度相关。经检验,这 5 个生物指标中,杂食性鱼类百分比与耐污物种百分比呈高度相关,其他 4 个生物指标间呈非高度相关,见表 2。故经过相关性筛选,去掉杂食性鱼类百分比指标,最终获得 4 个指标。

表 2 5 个候选指标间的 Pearson 相关性系数

Tab. 2 The Pearson correlation coefficient between five candidate biological metrics

指标	鱼类总分类单元数	总渔获量	鲤亚科种类	杂食性鱼类百分比	耐污物种百分比
鱼类总分类单元数	1				
总渔获量	0.387	1			
鲤亚科	-0.200	0.616	1		
杂食性鱼类百分比	0.240	0.422	0.488	1	
耐污物种百分比	0.426	0.330	0.524	0.996	1

2.2.3 F-IBI 指标的计算及评价标准

本文采用 1, 3, 5 赋值法^[23]对大汶河流域鱼类完整性的各个指标进行评分,见表 3。以参照点位 IBI 值分布的 25% 分位数作为健康评价的标准,如果站点的 IBI 分值大于 25% 分位数值,则表示该站点受到的干扰很小,是健康的;对小于 25% 分位数值分布范围,进行 4 等分,分别代表不同的健康程度。将各指标的 IBI 分值进行加和,得到 IBI 的指数值,划分出健康、亚健康、一般、较差、极差 5 个等级,划分标准见表 4。

表 3 4 个生物指标的赋分标准

Tab. 3 Metric score criteria of four biological metrics

序号	指标	评分标准		
		5	3	1
1	鱼类总分类单元数	> 6.0	3.5~ 6.0	< 3.5
2	总渔获量	> 83.8	44.9~ 83.8	< 44.9
3	鲤亚科	> 21.5	13.5~ 21.5	< 13.5
4	耐污物种百分比	< 14.6	14.6~ 23.3	> 23.3

表 4 大汶河流域鱼类生物完整性的评价标准

Tab. 4 Assessment criteria for biological integrity of fish in Dawen River Basin

等级	健康	亚健康	一般	较差	极差
IBI 值	20~ 18	17~ 15	14~ 11	10~ 7	6~ 4

2.3 层次分析法

层次分析法^[24]的主要步骤如下。

(1) 以河岸带生境健康作为目标层,河岸带评价方面的相关指标主要从影响河岸带结构稳定性、功能完整性、健康性等因素考虑^[25],结合采样点调查选取河流健康状况、岸坡稳定性和岸边植被情况三个方面选取指标分别作为准则层和指标层,见表 5。

(2) 构造判断矩阵,判断指标相对权重。对同一层次各个元素关于上一层次中的某一准则的重要性进行两两比较,构造判断矩阵 P 。

(3) 计算一致性指标 CI 。由 P 矩阵可以先求出

表5 河岸带生境评价指标

Tab. 5 Evaluation indexes of riparian zone ecosystem

目标层	指标层	指标分值			
		4	3	2	1
河流健康状况	河道渠化	0	0	0	0
	基底物质组成	0	0	0	0
	浮游植物	0	0	0	0
河岸带生境健康	侵蚀度(%)	< 10	10~ < 40	40~ 70	> 70
	植被密度(%)	> 80	> 50~ 80	25~ 50	< 25
	植被带宽度/m	> 10	< 5~ 10	1~ 5	< 1
	纵向连续性(%)	< 10	10~ < 30	30~ 60	> 60
	植被层次/层	> 4	3	2	1
	物种多样性	> 3.5	> 2.5~ 3.5	1.5~ 2.5	< 1.5
	乡土物种覆盖比例(%)	> 75	> 50~ 75	25~ 50	< 25
	植被覆盖度(%)	> 85	> 55~ 85	25~ 55	< 25
	遮阴率(%)	> 60	> 30~ 60	10~ 30	< 10

其最大特征值,然后再由最大特征值求出其所对应的单位特征向量。所求的单位特征向量的各个分量就是各个评价因素的重要性排序,也就是权数分配。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中: λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值。

(4)一致性比率 CR 检验。上面得到的单位特征向量即为所求权向量,但权数的分配是否合理还需要对判断矩阵进行一致性检验,使用公式:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

其中, RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,当 $CR < 0.10$ 时,说明各指标权重的分配是合理的,否则需要进一步调整判断矩阵。

(5)确定相应的权重。利用综合函数公式,便可得出因素集的评判集。综合函数公式为:

$$Di^s = Wi^s \circ Ri^s \quad (3)$$

式中: s 表示第 s 个因素集; i 表示第 s 个因素集的目标层;“ \circ ”为合成算子。

3 结果与讨论

3.1 水质评价

在计算水质综合污染指数的时候要充分考虑大汶河地区的地表水污染特点,选取具有代表性的污染物,将水样检测结果与《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 比较,检测指标中,变化较大且对水质有较明显影响的指标有溶解氧含量、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和总氮(TN)。依照综合污染指数法的计算方法得到各检

测断面污染程度见图2。

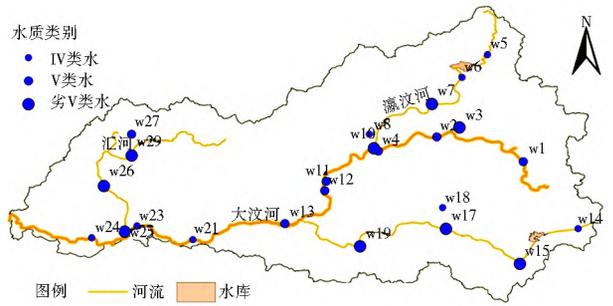


图2 大汶河流域水质空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water quality in Dawen River Basin

由综合评价的结果得出,大汶河采样点的综合污染指数都大于0.7, W15 最高达到7.3,属于严重污染水质。其中24个采样点中8个点的水质为0类水,7个点的水质为I类水,9个点的水质为劣I类水。大汶河流域水质整体水平较差,其中大汶河南支、瀛汶河南段和汇河支流水质最差,属于严重水污染,主要超标污染物为总氮、总磷和氨氮。主要原因是肥城的工农业及生活污水主要排入大汶河下游的汇河,莱芜市莱城区和泰安市岱岳区的污水主要排入大汶河的支流瀛汶河,新泰市的污水主要排入大汶河南支。

3.2 鱼类完整性评价

3.2.1 鱼类组成

通过调查,大汶河流域共鉴定出鱼类18种,隶属于3目13科,总样本量为2581尾,其中,鲤亚科、鲃亚科、花鳅亚科、鲮亚科和鮡亚科4科鱼类最多,共10种,占鱼类物种总数的56%;其他8科各有1种,占44%,是大汶河流域鱼类群落结构的主要组成。其中瀛汶河支流段鱼类10种,大汶河南支流鱼类14种,汇河支流鱼类9种。

3.2.2 F-IBI 评价结果

根据大汶河流域的健康评价标准,对全流域样点进行健康评价,所得该流域 F-IBI 指数鱼类健康状况分布见图3。



图3 大汶河流域 F-IBI 鱼类健康状况空间分布

Fig. 3 Spatial distribution fish health status based on F-IBI in Dawen River Basin

在大汶河流域 24 个点位中 1 个为健康, 10 个为亚健康, 13 个为一般, 分别占总点位数的 4.2%、42.6% 和 53.2%, 没有较差和极差。大汶河源头处和中下游鱼类健康状况大都为亚健康, 中游段为一般状态; 瀛汶河段各采样点基本为一般状态; 大汶河南支段大部分为亚健康状态; 汇河段主要为一般状态。其原因主要是大汶河河道沿岸的造纸、化工等工厂向大汶河排放污水, 鱼类组成发生了显著变化。有一些关于鱼类完整性与废水排放关系影响当地鱼类的生存环境的研究, 表明 F-IBI 值较低与城市废水排放情况紧密相关^[26]。

3.3 河岸带评价

通过层次分析法将河岸带调查数据进行分析计算, 将最终得到的目标层综合评价结果值按照评价等级表 6 确定各点的评价结果。所得大汶河流域河岸带生境状况空间分布见图 4。

表 6 河岸带生境评价等级

Tab. 6 Evaluation grades of riparian zone ecosystem

评价结果	理想状态	良好状态	一般状态	较差状态	极差状态
评价值	> 3.5	3.0~ 3.5	2.5~ 3.0	2.0~ 2.5	< 2.0

河岸带综合评价结果显示, 大汶河流域的 24 个采样点综合评分值的平均值为 3.07, 评价结果为良好状态; 大汶河干流、大汶河南支、汇河支流的综合评价均值分别为 3.16、3.04、3.01, 评价结果良好。瀛汶河的综合评价均值为 2.89, 评价结果为一般状态。从图中看出, 河岸带状况整体较好, 不存在河岸带生境较差的采样点。

表 7 大汶河流域生态健康综合评价分级标准

Tab. 7 Grading criteria for comprehensive evaluation of ecosystem health in Dawen River Basin

准则层	指标层	健康	亚健康	一般	较差	极差
		I	II	III	IV	V
水环境质量	溶解氧含量	≥7.5	6	5	3	2
	高锰酸盐指数	≤2	4	6	10	15
	氨氮	≤0.15	0.5	1	1.5	2
	总氮	≤0.2	0.5	1	1.5	2
	总磷	≤0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
鱼类生物质量	鱼类总分类单元数	> 6.0	> 5.2~ 6.0	> 4.4~ 5.2	3.5~ 4.4	< 3.5
	总渔获量	> 83.8	> 70.8~ 83.8	> 57.8~ 70.8	44.9~ 57.8	< 44.9
	鲤亚科种类百分比	> 21.5	> 18.8~ 21.5	> 16.2~ 18.8	13.5~ 16.2	< 13.5
	耐污物种百分比	< 14.6	> 14.6~ 17.5	> 17.5~ 20.4	20.4~ 23.3	> 23.3
河岸生境质量	河流健康状况	> 3.5	> 3.0~ 3.5	> 2.5~ 3.0	2.0~ 2.5	< 2.0
	岸坡稳定性	> 3.5	> 3.0~ 3.5	> 2.5~ 3.0	2.0~ 2.5	< 2.0
	河岸带植被条件	> 3.5	> 3.0~ 3.5	> 2.5~ 3.0	2.0~ 2.5	< 2.0

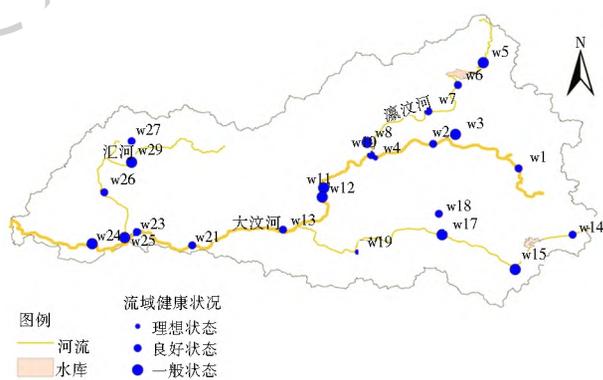


图 4 大汶河流域河岸带生境状况空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the status of riparian zone ecosystem in Dawen River Basin

4 大汶河流域水生态系统综合评价

依据对水质、鱼类和河岸带的健康评价, 选取可以表征大汶河流域水环境质量、鱼类生物质量和河岸生境质量的 12 个指标作为大汶河生态健康的综合评价指标。其中, 反映水环境质量的指标有 5 个, 包括高锰酸盐指数、五日生化需氧量、化学需氧量、氨氮、总磷和总氮, 评价分级标准参考《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 确定; 反映生物质量的指标 4 个: 鱼类总分类单元数、总渔获量、鲤亚科种类百分比、耐污物种百分比, 评价分级标准参考上述生物指标的赋分标准。反映河岸带生境质量的指标 3 个, 包括河流健康状况、岸坡稳定性、河岸带植被条件, 评价分级标准参考河岸带生境评价等级表 6。对以上 12 个指标运用层次分析法, 按照特征和评判能力进行分级, 构建出递阶层次的综合评价指标体系, 见表 7。

运用层次分析法计算指标的权重值, 准则层三

个方面对生态系统健康状况有不同影响力。水环境

质量影响力最大为 0.637, 生物质量和河岸生境质量权重值分别为 0.258 和 0.105。河岸带属于研究区的水体边缘, 其变化在一段时间内较小, 所以对环境变化的反应敏感度较低。水环境的指标层权重选择流域 24 采样点的权重平均值, 鱼类生物质量指标层权重在生物完整性指数法中, 将其看做权重均等, 故在此为 0.25, 河岸生境质量的权重值采用河岸带评价中的权重划分方法。最终得到大汶河流域生态系统整体综合评价结果, 见图 5。

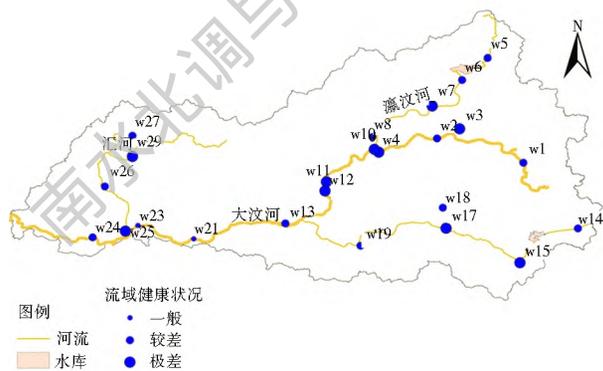


图 5 大汶河流域水生态系统健康综合状况空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of the comprehensive health status of water ecosystem in Dawen River Basin

大汶河流域水生态系统健康状况整体处于以较差和极差状态, 分别占总采样点的 50.0% 和 41.7%, 只有两个采样点的健康等级为一般状态, 占总采样点的 8.3%。河岸生境质量等级普遍比其他两项好, 鱼类生物质量等级稍差, 但由于准则层的权重比重分配, 水环境质量比重超过另两项比重之和, 故大汶河流域健康状况要更接近水环境质量等级标准。从流域范围来看, 大汶河干流上与瀛汶河交汇处 w10、w11、w12 采样点、汇河交汇处 w25 采样点健康状况最差为极差状态, 中游末段 w21、w23 采样点处健康状况最优为一般状态。瀛汶河段整体表现为极差状态。大汶河南支中段 w15、w17 采样点健康状况较差为极差状态, 其他三点为较差状态。汇河段康王河支流 w29 采样点健康状况为极差状态, 其余两点处为较差状态。

5 结论

本文以大汶河流域为研究对象, 基于 2016 年 10 月流域水生态调查数据, 采用综合污染指数法、生物完整性指数、层次分析法分别对水质、鱼类和河岸带生境进行评价, 同时构建大汶河流域水生态系统综合评价指标体系, 采用层次分析法综合评价大汶河流域水生态系统健康状况。主要得出以下结论。

(1) 应用综合污染指数法对水质进行分析, 发现大汶河流域水质整体水平较差, 其中大汶河南支、瀛汶河南段和汇河支流水质最差, 属于严重水污染, 主要超标污染物为总氮、总磷和氨氮。

(2) 应用 F-IBI 指数法评价水生鱼类的健康状况, 发现大汶河源处和中下游鱼类健康状况大都为亚健康, 中游段为一般状态; 瀛汶河段各采样点基本为一般状态; 大汶河南支段大部分为亚健康状态; 汇河段主要为一般状态。

(3) 河岸带植被缓冲带应用层次分析法评价, 得到大汶河流域总体评价结果良好的结论, 河岸带状况整体较好, 不存在河岸带生境较差的采样点。

(4) 应用层次分析法对水生态系统健康进行综合评价, 以水质、鱼类和河岸带生境作为目标层, 分别构建三层指标体系, 结果显示大汶河流域内健康状况整体较差, 主要以较差和极差状态为主, 分别占总采样点的 50.0% 和 41.7%, 仅有 8.3% 的采样点的健康等级为一般状态。

参考文献(References):

- [1] 袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价—概念构架与指标选择[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 627-629. (YUAN X Z, LIU H, LU J J. Assessment of ecosystem health concept framework and indicator selection. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4) 627-629. (in Chinese))
- [2] GRIZZETTI B, LANZANOVA D, et al. Assessing water ecosystem services for water resource management [J]. Environmental Science & Policy, 2016, 61: 194-203. DOI: / 10.1016/j.envsci. 2016. 04. 008.
- [3] 于宁, 马锡铭, 赵洪波, 等. 河流水生态系统健康评价研究进展 [J]. 环境保护与循环经济, 2014(1): 49-51. (YU N, MA X M, ZHAO H B, et al. Advances in the assessment of river ecosystem health [J]. Environmental Protection & Circular Economy, 2014(1): 49-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1674-1021. 2014. 01. 016.
- [4] EFFENDI H. River water quality preliminary rapid assessment using pollution index [J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 33: 562-567. DOI: 10.1016/j.proenv. 2016. 03. 108.
- [5] PINTO U, MAHSHWARI B. A framework for assessing river health in peri urban landscapes [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014, 14(2): 121-131.
- [6] HERRERA-SILVEIRA J A, MORALES-OJEDA S M. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59 (1-3), 72-86.
- [7] 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. (ZHU W H, CAO G L, LI Y, et al. Research on the health assessment of river eco-

- system in the area of Tumen River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3969-3977. (in Chinese)
- [8] 蔡庆华, 唐涛, 刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1573-1577. (CAI Q H, TANG T, LIU J K. Several research hotspots in river ecology. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1573-1577. (in Chinese))
- [9] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [10] KELUM S, TAKASHI A. Application and assessment of a dynamic riparian vegetation model to predict the spatial distribution of vegetation in two Japanese river systems [J]. *Journal of Hydroenvironment Research*, 2017, 16: 1-12.
- [11] 夏继红. 生态河岸带综合评价理论与应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005: 1-148. (XIA J H. Theory and application of comprehensive assessment of ecological riparian zone [D]. Nanjing: Hohai University, 2005: 1-148. (in Chinese))
- [12] 王国胜. 河流健康评价指标体系与 AHP 一模糊综合评价模型研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2007: 1-87. (WANG G S. Study on Index system and AHP—fuzzy comprehensive evaluation model in river health assessment [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007: 1-87. (in Chinese))
- [13] 泰安市大汶河志编纂委员会. 大汶河志 [M]. 方志出版社, 2016: 69-80. (Ta'an City chronicles of Dawen River. Biography of Dawen River [M]. Publishing House of Local Records, 2016, 69-80. (in Chinese))
- [14] 郭坤荣, 徐跃通. 大汶河流域健康状况及治理对策研究 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 1-60. (GUO K R, XU Y T. Study on healthy condition and countermeasures of Dawen River valley [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 1-60. (in Chinese))
- [15] 徐国东, 吕华, 古松. 大汶河污染现状及其治理措施 [J]. *水资源保护*, 2013(1): 58-60. (XU G D, LYU H, GU S. Present situation of Dawenhe River measures for pollution remediation [J]. *Water Resources Protection*, 2013(1): 58-60. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2003.01.017
- [16] 郭坤荣. 大汶河生态健康评价研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2007: 1-60. (GUO K R. A study on the ecological health assessment of Dawen River. [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007: 1-60. (in Chinese))
- [17] 陈宜瑜. 中国动物志: 硬骨鱼纲, 鲤形目 (中卷) [M]. 科学出版社, 1998. (CHEN Y Y. China fauna: osteichthyes, carp shape mesh (volume) [M]. Science Press, 1998. (in Chinese))
- [18] 孙涛, 张妙仙, 王肖肖. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4): 185-190. (SUN T, ZHANG M X, WANG X X. River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(4): 185-190. (in Chinese))
- [19] 宋智刚, 王伟, 姜志强, 等. 应用 F-IBI 对太子河流域水生态健康评价的初步研究 [J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(6): 480-487. (SONG Z G, WANG W, JIANG Z Q, et al. An assessment of ecosystem health Taizi River basin using F-IBI [J]. *Journal of DaLian Ocean University*, 2010, 25(6): 480-487. (in Chinese))
- [20] ABHIJNA U G, KUMAR A B. Development and evaluation of fish index of biotic integrity (F-IBI) to assess biological integrity of a tropical lake Veli Akkulam, South India [J]. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2017, 5(3): 153-164.
- [21] 裴雪皎, 牛翠娟, 高欣, 等. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康 [J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5736-5746. (PEI X J, NIU C J, GAO X, et al. The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5736-5746. (in Chinese))
- [22] L'WONARD P M, ORTH D J. Application and testing of an index of biotic integrity in small, coolwater streams [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1986: 401-414.
- [23] ROTH N, SOUTHERLAND M, CHAILLOU J, et al. Maryland Biological Stream Survey: Development of a Fish Index of Biotic Integrity [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 1998, 51(1-2): 89-106.
- [24] 邓雪, 李家铭, 曾浩键, 等. 层次分析法权重计算方法及其应用研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100. (DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese))
- [25] 夏继红, 严忠民, 蒋传丰. 河岸带生态系统综合评价指标体系研究 [J]. *水科学进展*, 2006, 16(3): 345-348. (XIA J H, YAN Z M, JIANG C F. Comprehensive assessment index system of ecosystem riparian zone [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 16(3): 345-348. (in Chinese))
- [26] GANASAN V, HUGHES R M. Application of an index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), India [J]. *Freshwater Biology*, 1998, 40(2): 367-383.