

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20200608001

袁立来, 王晓梅, 杨文波, 等. 基于鱼类生物完整性指数的拒马河北京段河流健康评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(4): 160-169

Yuan L L, Wang X M, Yang W B, et al. River ecosystem health evaluation of Juma River in Beijing based on fish-index of biotic integrity [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(4): 160-169 (in Chinese)

基于鱼类生物完整性指数的拒马河北京段河流健康评价

袁立来¹, 王晓梅^{1,3,#}, 杨文波^{1,*}, 陈咏霞², 丁放¹, 李东浩¹, 王银肖²

1. 中国水产科学研究院资源与环境研究中心, 北京 100141

2. 河北大学生命科学与绿色发展研究院, 保定 071002

3. 中国水产科学研究院长岛增殖实验站, 烟台 265800

收稿日期: 2020-06-08

录用日期: 2020-08-19

摘要: 拒马河是北京周边具有独特生物多样性的河流, 目前面临很多水生态环境问题。鱼类生物完整性指数(F-IBI)是评价河流生态健康的重要方法。本研究于2018年5月和10月, 在拒马河北京段设置9个采样点, 利用地笼和刺网进行调查, 共获得鱼类样本2 001尾, 隶属于4目9科。根据采样情况, 初步设置了5大类21个初选指标, 经过对指标完整性、相关性和取值范围分析, 筛选得出6个评价指标: 鱼类总物种数(M1)、鲤科占总种数的百分比(M3)、中上层鱼种类数百分比(M9)、杂食性鱼类种类数百分比(M13)、产粘性卵鱼类种类数百分比(M19)和鱼类总个体数(M20), 构建了适用于拒马河的F-IBI指标体系, 运用该体系对拒马河北京段的河流健康状况进行了评价, 并将F-IBI与几个主要水环境参数和拦河坝相关数据进行了相关性分析。研究结果表明, 拒马河北京段河流健康整体处于较差水平, F-IBI与水质理化因子无显著相关性, 与参数“采样点与上游最近拦河坝的距离”呈显著相关。结果表明, 拒马河北京段河流健康指数的关键影响因素不是水质理化因子, 可能与拦河坝导致的河流片段化有关。

关键词: 鱼类组成特征; 生物完整性指数(F-IBI); 河流生态健康; 拒马河

文章编号: 1673-5897(2021)4-160-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

River Ecosystem Health Evaluation of Juma River in Beijing Based on Fish-Index of Biotic Integrity

Yuan Lilai¹, Wang Xiaomei^{1,3,#}, Yang Wenbo^{1,*}, Chen Yongxia², Ding Fang¹, Li Donghao¹, Wang Yinxiao²

1. Research Center of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China

2. Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding 071002, China

3. Changdao Enhancement and Experiment Station, Chinese Academy of Fishery Sciences, Yantai 265800, China

Received 8 June 2020

accepted 19 August 2020

Abstract: Juma River, which supports unique biodiversity in Beijing and surrounding areas, has been facing various ecological and environmental issues. The fish-index of biotic integrity (F-IBI) is an important method to evalu-

基金项目: 白洋淀水生生物资源环境调查与水域生态修复(2130135); 农业农村部渔业遥感科学观测实验站设施系统运行费(20603021); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2018B002, 2019HY-JC0309, 2019ZY07)

第一作者: 袁立来(1985—), 男, 博士, 研究方向为渔业资源环境保护, E-mail: yuanlilai@cafs.ac.cn

*** 通讯作者 (Corresponding author),** E-mail: wbyang@cafs.ac.cn

共同通讯作者 (Co-corresponding author), E-mail: wangxiaom@cafs.ac.cn

ate the ecological health of river ecosystems. In this study, fish samples were collected from nine sampling sites along Juma River in Beijing by using ground cages and gill nets in May and October, 2018. We collected a total of 2 001 fish individuals, belonging to four orders and nine families. Based on the biological characteristics of collected fish species, we selected 21 candidate metrics of five categories for the evaluation of biological integrity. After the stepwise selection procedure based on multiple analyses of integrity, value range and Pearson's correlation, we finally chose 6 out of all 21 analyzed metrics, including species richness (M1), percentage of species richness in the Cyprinidae (M3), percentage of species richness in the pelagic fishes (M9), percentage of species richness in the omnivorous fishes (M13), percentage of species richness in the fish producing cohesive eggs (M19), and total abundance (M20). The F-IBI of Juma River in Beijing was established based on the 6 selected metrics, by which the river health condition was evaluated. Further, we correlated the developed F-IBI with several major water quality parameters and barrage data by using Pearson's correlation analysis. Our results showed that the overall river ecosystem health was at a poor level in Juma River in Beijing. The F-IBI had no significant correlation with physico-chemical factors of water quality, but was significantly correlated with the parameter of distance to the nearest upstream dam. The correlation analysis illustrated that the biological integrity of fish was not mainly influenced by the measured physical and chemical factors of water quality, and the observed patterns were likely derived from the river fragmentation caused by the constructed barrages in Juma River in Beijing.

Keywords: fish composition; fish-index of biotic integrity (F-IBI); river ecosystem health; Juma River

拒马河是海河流域大清河支流,在北京境内的河段长 61 km。历史上拒马河拥有丰富的水生生物资源,据记载鱼类超过 40 种^[1]。由于丰富多样的水生生物加上独特的生境,拒马河水域生态系统具有很强的独特性,极具保护和科研价值^[2]。然而,随着北京都市圈的快速发展,拒马河流域的水域生态环境发生了巨大变化^[2],主要表现为旅游餐饮业导致局部河段出现富营养化,梯级拦河坝造成河流片段化,河底挖沙、河道固化导致水生生物栖息生境不断丧失。拒马河当前面临的生态环境问题是我国乃至世界上多数城市型河流普遍面临的困境,如何评估这类河流的健康状况,并有针对性地开展一系列管理和恢复工作,是解决其生态问题的关键。

生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)是河流健康评价的重要手段,其有效解决了仅利用物理和化学指标评价河流健康状况的局限性^[3-4]。1981 年,Karr^[5]以鱼类为对象最先建立了利用 IBI 评价河流健康的方法;经过不断完善,目前已在鱼类^[6-7]、底栖动物^[8-11]、藻类^[12-14]和水生植物^[15-16]等类群上得到广泛应用。鱼类是水域生态健康评价的主要指示生物^[3,17-19],国内外利用鱼类完整性指数(fish-index of biological integrity, F-IBI)评估水域生态健康的研究较多,美国是世界上应用 IBI 评价河流健康状况技术最成熟的国家,至少有 29 个州运用 F-IBI 评价河流健康状况^[19]。在我国,研究者们利用

F-IBI 对长江^[20-21]、黄河^[22]、辽河^[23]和漓江等^[3],开展了河流健康状况评估。虽然 IBI 指数在水域生态健康评价方面的应用较多,但由于不同水域的自然状况及人类干扰程度存在较大差异,导致鱼类等物种的种类组成差异较大,因此不同区域构建的 IBI 体系往往仅适用于该区域^[20,23-26],在不同区域间需要分别构建 IBI 体系,以解决其不同区域及大尺度空间适用性的难题。截至目前,还没有针对拒马河建立的 IBI 评价体系。本研究以鱼类为研究对象,参考 Karr^[5]建立的 F-IBI 评价体系,构建适用于拒马河的 F-IBI 体系,评价拒马河北京段河流健康状况,为拒马河河流生态健康发展提供管理和修复建议。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域及调查站位

本次调查范围为拒马河北京境内的河段,北纬 39°34'33"~39°39'4",东经 115°29'23"~115°41'13"。按照《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[27],根据拒马河北京段的地形和地势条件,充分考虑采样点的代表性,设置了 9 个调查站位,分别为琅琊河(S1)、天花板(S2)、北石门(S3)、西河口(S4)、九渡(S5)、六渡(S6)、穆家口(S7)、千河口(S8)和龙安大桥(S9)(图 1)。

1.2 鱼类采样和种类鉴定

2018 年 5 月和 10 月 2 次对拒马河北京段鱼类的分布、种类组成及多样性情况进行了调查,结合拒马河鱼类种类、生活习性和季节分布规律等特点,在

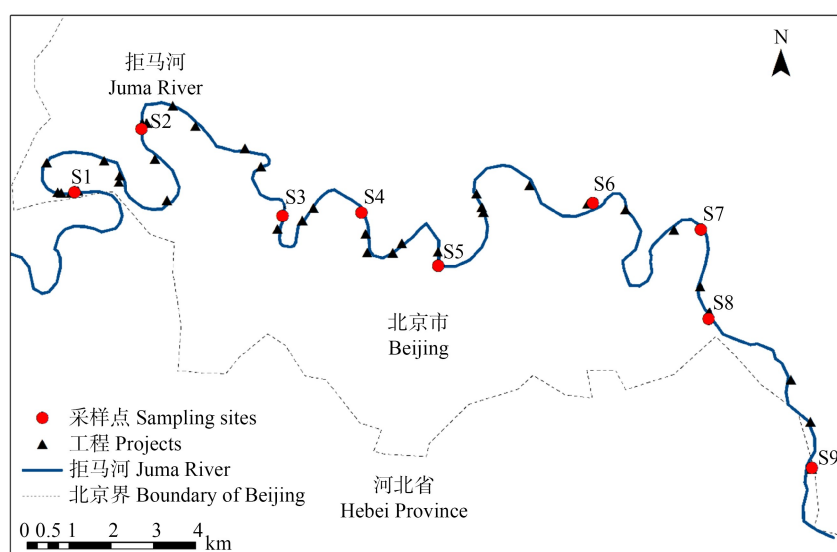


图1 拒马河(北京段)调查站位和涉水工程分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites and engineering structures in Juma River (Beijing)

调查中选择了以流刺网(捕获中上层鱼类)和地笼(主要捕获底层鱼类)2种网具相结合的方式对鱼类种类组成调查,每个采样点采用1个刺网和2个地笼,其中,刺网为长50 m高1.2 m的三层刺网(网眼30 mm),地笼1长10 m(33节,网眼6 mm,30 cm×25 cm),地笼2长12 m(33节,网眼5 mm,41 cm×32 cm),每个点网具采样时间为14 h。现场统计捕获的每一种鱼类的数量,并对每一种鱼随机选取10尾用10%的福尔马林溶液固定,带回实验室进行种类鉴定。

1.3 F-IBI 指标设置、筛选和构建

根据拒马河北京段的鱼类种类组成及生态学特征,本研究参考 Karr^[5]的方法初步设置了5大类21个初选指标(表1),包含物种组成和丰度、营养结构、耐受性、繁殖共位群、鱼类数量和健康状况。本研究将5月和10月各采样点的数据合并,进行各指标值的统计和筛选分析,参考已有指标筛选方法和原则^[6,18,24,28],结合拒马河的情况,拟定了初选指标的筛选标准:(1)如果指标值在各采样点中存在零值过多($\geq 90\%$)或者分布范围过窄的情况,则删除该指标;(2)对余下的指标进行相关性分析,删除高度相关的指标($|r| > 0.75$),只保留其中信息含量最大的一个指标。

1.4 参照点、指标赋值和评价标准

理想的参照点应选择完全不受或很少受人类干扰的区域,由于现今大多河流均不同程度受到人类活动干扰,因此应尽量选择受人类活动干扰程度低的点位为参照点,而理想中某采样点“受人类活动

干扰程度低”则该采样点相关的指标数据(生物、理化环境等)相对较好。鉴于此,本研究根据 Bozzetti 和 Schulz^[29]提出的方法,选取假设的参照数值作为期望值,即将实际采样中某一指标的最好数据作为该指标的期望值^[18,26,30]。

将各指标实测值从低到高分三等,分别用1分、3分和5分表示,5分为最理想,表示采样点实测值与期望值十分接近,3分为中等,最差的等级为1分^[6]。为消除指标数量的不同导致 F-IBI 总分的差异,进行标准化处理: F-IBI 总分=(各指标总分/指标个数) $\times 12$ ^[6,28]。依据 Karr^[5]基于鱼类完整性划分河流的6个等级:无鱼(0),极差(12~22),差(28~34),一般(40~44),好(48~52),极好(58~60),评价拒马河北京段河流健康状况,若某采样点的 F-IBI 总分介于2个评价等级的分值之间,则该河段的健康状况也处于2个评价等级之间。

1.5 环境因子调查和统计分析

调查中,对调查站位水质和河流生境进行了采样和调查。水样采集、保存和检测分析,参照《水质采样 样品的保存和管理技术规定》(HJ 493—2009)、《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)以及《渔业水质标准》(GB11607—89)等,检测的水质理化因子指标主要包括水深、透明度、pH、溶解氧(DO)、浊度、高锰酸盐指数、生化需氧量(BOD₅)和氨氮等8个指标。河流生境调查中,对拒马河北京段现有的拦河坝、桥梁等工程情况进行了GPS定位和记录,提取了各采样点周围拦河坝分布情况的相关参数,包括

表 1 拒马河河流健康的鱼类生物完整性指数 (F-IBI) 评价初选指标体系
Table 1 The primary index system of fish-index of biotic integrity (F-IBI) for
river health evaluation in Juma River

属性 Attributes	指标(缩写) Metrics (Abbreviation)	对干扰响应 Response to disturbance
种类组成和丰度 Species richness and composition	鱼类总物种数(M1)	下降
	Species richness (M1)	Decrease
	Shannon-Wiener 多样性指数(M2)	下降
	Shannon-Wiener diversity index (M2)	Decrease
	鲤科占总种数的百分比(M3)	上升
	Percentage of species richness in the Cyprinidae (M3)	Increase
	鳅科占总种数的百分比(M4)	下降
	Percentage of species richness in the Cobitidae (M4)	Decrease
	鮡亚科占总种数的百分比(M5)	下降
	Percentage of species richness in the Gobioninae (M5)	Decrease
	虾虎鱼科占总种数的百分比(M6)	下降
	Percentage of species richness in the Gobiidae (M6)	Decrease
	鲇形目占总种数的百分比(M7)	上升
	Percentage of species richness in the Siluriformes (M7)	Increase
	鲈形目占总种数的百分比(M8)	下降
营养结构 Trophic guilds	Percentage of species richness in the Perciformes (M8)	Decrease
	中上层鱼种类数百分比(M9)	下降
	Percentage of species richness in the pelagic fishes (M9)	Decrease
	底层鱼种类数百分比(M10)	下降
	Percentage of species richness in the benthic fishes (M10)	Decrease
	小型鱼种类数百分比(M11)	上升
	Percentage of species richness in the small-sized fishes (M11)	Increase
耐受性 Intolerance and tolerance	植食性鱼类种类数百分比(M12)	上升
	Percentage of species richness in the herbivorous fishes (M12)	Increase
	杂食性鱼类种类数百分比(M13)	上升
	Percentage of species richness in the omnivorous fishes (M13)	Increase
	底栖动物食性鱼类种类数百分比(M14)	下降
	Percentage of species richness in the benthic-feeding fishes (M14)	Decrease
繁殖共位群 Reproductive guilds	滤食性鱼类种类数百分比(M15)	下降
	Percentage of species richness in the filter-feeding fishes (M15)	Decrease
	产漂浮型卵鱼类种类数百分比(M18)	下降
鱼类数量与健康状况 Species abundance and condition	Percentage of species richness in the fish spawning floating eggs (M18)	Decrease
	产粘性卵鱼类种类数百分比(M19)	上升
	Percentage of species richness in the fish spawning adhesive eggs (M19)	Increase
	鱼类总个体数(M20)	下降
	Total abundance (M20)	Decrease
	外来鱼类物种个体数百分比(M21)	上升
	Percentage of species abundance in the invasive fishes (M21)	Increase

采样点与上游最近拦河坝的距离、采样点与下游最近拦河坝的距离、最近河坝距离、采样点上下游 1 km 范围内拦河坝数量、采样点上下游 2 km 范围内拦河坝数量和采样点上下游 3 km 范围内拦河坝数量。

利用 F-IBI 值与对应河流段水质理化因子以及相关工程参数进行了 Pearson 相关性分析(相关性分析前对数据进行正态性检验,不符合正态分布的数据利用 log10 进行数据转换)。统计分析使用软件 SPSS 21。

2 结果(Results)

2.1 拒马河北京段鱼类组成

累计捕获鱼类样本 2 001 尾,分属 4 目 9 科共 33 种(表 2),4 目包括鲤形目、鲈形目、鲢形目和鲇形目,其中,鲤形目鱼类最多,为 23 种,占 69.70%,鲈形目 5 种占 15.15%,鲇形目 4 种占 12.12%,鲢形目最少,仅有青鲮 1 种,占 0.03%。

2.2 F-IBI 初选指标的筛选

将适应缓流或静水的鲇形目、鲢科、沙塘鳢科、刺鲃科、鲤科和鳅科中环境适应性强的鱼类视为耐受性鱼类;将适应急流或喜清水环境的拉氏鲃、尖头

鲃、黑鳍鲃、宽鳍鲃、马口鱼和收录在《中国脊椎动物红色名录》青鲮^[31]视为敏感性鱼类。按照筛选标准对 21 个初选指标进行筛选,M15 和 M21 零值过多,从初选指标中删除;根据取值范围^[6,19,32],M2、M4、M5、M6、M7、M11、M12、M17 和 M18 指标值的取值范围过窄,从初选指标中删除。对余下的指标进行相关性分析,结果如表 3 所示,其中,M3 与 M10、M16 均存在显著相关性($P<0.05$),由于鲤科鱼类是拒马河主要种类,因此只保留信息量较大的 M3;另外,M13 与 M8、M14 存在显著相关,由于 M13 为“杂食性鱼类种类数百分比”,包含信息量较大,因此只保留 M13。综合以上分析,最终筛选得到 6 个指标:M1、M3、M9、M13、M19 和 M20。

2.3 指标赋值及健康评价

依据筛选后保留的 6 个指标对外界环境干扰的响应,将各指标实测值从低到高三等分,按 1、3、5 分 3 个层次进行赋分,结果如表 4 所示。参照 Karr^[5]的评价等级和内容对拒马河北京段河流健康状况进行评价(表 5),结果显示,除了北石门和西河口 2 个采样河段的河流健康评价结果为“一般”,其余河段均为“差”,表明拒马河北京段河流健康整体处于较差水平。

表 2 拒马河(北京段)鱼类种类组成

Table 2 Composition of fish fauna in Juma River (Beijing)

目 Orders	科数 Number of families	占总科数比/% Ratio to total families/%	种数 Number of species	占总种数比/% Ratio to total species/%
鲤形目 Cypriniformes	2	22.22	23	69.70
鲈形目 Perciformes	4	44.44	5	15.15
鲢形目 Cyprinodontiformes	1	11.11	1	3.03
鲇形目 Siluriformes	2	22.22	4	12.12

表 3 指标间相关性分析结果

Table 3 Results of correlation analysis among indicators

	M1	M3	M8	M9	M10	M13	M14	M16	M19	M20
M1	1									
M3	-0.197	1								
M8	-0.699	0.112	1							
M9	-0.054	0.656	-0.360	1						
M10	0.137	-0.770*	-0.082	-0.543	1					
M13	0.543	-0.488	-0.889**	0.174	0.365	1				
M14	-0.217	0.443	0.724	-0.140	-0.547	-0.877**	1			
M16	0.014	-0.846**	-0.289	-0.358	0.552	0.653	-0.646	1		
M19	0.108	0.227	-0.321	0.711	0.121	0.307	-0.357	-0.183	1	
M20	0.279	0.722	-0.271	0.608	-0.551	-0.111	0.238	-0.624	0.310	1

注:*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平上显著相关。

Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level; ** indicates a significant correlation at the 0.01 level.

表 4 拒马河(北京段)F-IBI 赋值标准及对干扰的响应
Table 4 Assignment criteria of F-IBI and responses to interference in Juma River (Beijing)

评价指标(缩写) Metrics (Abbreviation)	赋值标准 Scoring criteria			期望值 Value of expectation	对干扰的响应 Response to disturbance
	5	3	1		
鱼类总物种数(M1) Species richness (M1)	>17.33	12.67 ~ 17.33	<12.67	22	下降 Decrease
鲤科占总种数的百分比(M3) Percentage of species richness in the Cyprinidae (M3)	<58.2	58.2 ~ 71.95	>71.95	44.44	上升 Increase
中上层鱼种类数百分比(M9) Percentage of species richness in the pelagic fishes (M9)	>40.74	31.48 ~ 40.74	<31.48	50	下降 Decrease
杂食性鱼类种类数百分比(M13) Percentage of species richness in the omnivorous fishes (M13)	<25.03	25.03 ~ 46.56	>46.56	12.5	上升 Increase
产粘性卵鱼类种类数百分比(M19) Percentage of species richness in the fish spawning adhesive eggs (M19)	<43.33	43.33 ~ 61.67	>61.67	25	上升 Increase
鱼类总个体数(M20) Total abundance (M20)	>513	272 ~ 513	<272	754	下降 Decrease

表 5 拒马河(北京段)F-IBI 评价结果
Table 5 Results of F-IBI evaluation in Juma River (Beijing)

指标 Metrics	采样点 Sampling sites								
	琅玕河 Langya River (S1)	天花板 Top Ceiling (S2)	北石门 North Shimen (S3)	西河口 Xihekou (S4)	九渡 Ninth Crossing (S5)	六渡 Sixth Crossing (S6)	穆家口 Mujiakou (S7)	千河口 Qianhekou (S8)	龙安大桥 Longan Bridge (S9)
鱼类总物种数(M1) Species richness (M1)	1	1	3	3	1	5	1	1	1
鲤科占总种数的百分比(M3) Percentage of species richness in the Cyprinidae (M3)	1	3	1	1	1	5	5	5	3
中上层鱼种类数百分比(M9) Percentage of species richness in the pelagic fishes (M9)	3	1	1	5	5	1	3	1	1
杂食性鱼类种类数百分比(M13) Percentage of species richness in the omnivorous fishes (M13)	3	5	5	3	3	1	1	3	5
产粘性卵鱼类种类数百分比(M19) Percentage of species richness in the fish spawning adhesive eggs (M19)	3	5	5	3	1	3	5	3	3
鱼类总个体数(M20) Total abundance (M20)	1	1	5	3	3	1	1	1	1
IBI 总分(标准化) Total IBI score (Standardized)	24	32	40	36	28	32	32	28	28
等级 Grade	极差-差 Very poor-poor	差 Poor	一般 Fair	差-一般 Poor-fair	差 Poor	差 Poor	差 Poor	差 Poor	差 Poor

2.4 F-IBI 分值与环境因子的相关性分析

F-IBI 值与对应采样点的水质理化因子(水深、透明度、pH、DO、浊度、高锰酸盐指数、BOD₅ 和氨氮)Pearson 相关性分析结果(表 6)表明,F-IBI 值与几个水质参数均无显著性相关($P>0.05$)。F-IBI 值与工程分布相关参数 Pearson 相关性分析结果(表 7)表明,F-IBI 值与参数“采样点与上游最近拦河坝距离”呈显著相关($P<0.05$)。

3 讨论 (Discussion)

3.1 拒马河鱼类多样性与历史资料比较

有关拒马河北京段鱼类资源的文献较少,杨文波等^[2]2004 年对拒马河北京段的调查发现鱼类种类组成是 3 目 8 科 24 种,其中,鲤形目 16 种占 66.7%,鲈形目和鲶形目各 4 种,各占 16.7%。本研究调查鱼类种类分属 4 目 9 科 33 种,与杨文波等^[2]的调查结果相似,鲤形目的占比均为最高,本研究占比为 69.70%。其次是鲈形目和鲶形目,均只有 4 ~ 5 种,本次调查新增鲈形目 1 种。在鱼类数量和优势种上,杨文波等^[2]的调查中,麦穗占所捕获鱼类总

数的 80.1%,为拒马河北京段内的优势种类,其他种类数量占比均在 10% 以下;本研究捕获数量占比达到鱼类总数 10% 以上的种类有宽鳍鱲(35.70%)、黄魮(16.79%)和麦穗(15.30%)。结果表明,与 10 多年前杨文波的调查结果相比,拒马河北京段鱼类种类组成没有显著变化,优势种变化可能与采样总体数量、采样方法和季节有关。

拒马河历史上记载的鱼类超过了 40 种^[1],除了华北地区常见的鱼类外,还包括多鳞产颌鱼、鳊鲂、东方薄鳅和黄线薄鳅等^[1,33],这些种类在本研究和杨文波等^[2]调查中均未发现。

3.2 拒马河河流健康 F-IBI 评价体系的建立和应用

由于不同区域或不同类型河流的自然状况及人类活动干扰程度存在较大差异,本研究结合拒马河水生态环境现状及鱼类组成特征,从 21 个初选指标中根据数据的完整性、相关性和取值范围,最终确定了 6 个指标:鱼类总物种数(M1)、鲤科占总种数的百分比(M3)、中上层鱼种类数百分比(M9)、杂食性鱼类种类数百分比(M13)、产粘性卵鱼类种类数百分比(M19)和鱼类总个体数(M20),构成拒马河河流健康

表 6 F-IBI 值与水环境参数相关性分析结果
Table 6 Results of correlation analysis between F-IBI values and water environment parameters

		水深 Depth	透明度 Transparency	pH	溶解氧(DO) Dissolved oxygen (DO)	浊度 Turbidity	高锰酸盐指数 (COD _{Mn}) Chemical oxygen demand (COD _{Mn})	生化需氧量 (BOD ₅) Biochemical oxygen demand (BOD ₅)	氨氮 Ammonia nitrogen
F-IBI 总分 Total F-IBI scoring	Pearson 相关性								
	Pearson correlation	0.39	0.324	0.063	0.032	0.231	0.090	0.162	0.099
	显著性(P)								
	Significance (P)	0.299	0.395	0.872	0.935	0.550	0.818	0.676	0.799

表 7 F-IBI 值与拦河坝距离和数量相关性分析结果
Table 7 Results of correlation analysis between F-IBI values and the distance and quantity of the dams

		1 km 以内 河坝数量 Number of river dams within 1 km	2 km 以内 河坝数量 Number of river dams within 2 km	3 km 以内 河坝数量 Number of river dams within 3 km	最近河坝距离 Distance to the nearest dam	上游最近 河坝距离 Distance to the nearest dam upstream	下游最近 河坝距离 Distance to the nearest dam downstream
F-IBI 总分 Total F-IBI scoring	Pearson 相关性						
	Pearson correlation	-0.520	0.145	-0.013	0.495	0.788*	-0.203
	显著性(P)						
	Significance (P)	0.151	0.709	0.973	0.175	0.011	0.600

注:*表示在 0.05 水平上显著相关。
Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level.

F-IBI 评价体系。期望值或参照点的选取是河流 F-IBI 评价的关键,一般采取历史数据或者选择人类干扰较小的原始河段作为参照点,但目前尚没有形成统一的标准^[34]。尽管拒马河流域已经开展过鱼类资源调查,但是依然缺少系统完整的定量数据,因此只能采用实际采样点中某一指标的最好数据作为该指标的参照值,该方法在评价伊犁河^[18]、广西河池地区河流健康(部分指标参照值的确定)^[26]的研究中均得到了较好的应用。本研究中,指标赋值方法参照 1、3、5 赋值法^[6],并结合 Karr^[5]的评价等级和评价内容,对拒马河北京段河流健康状况做出了评价。

3.3 拒马河水域生态环境现状分析

利用 F-IBI 指标体系评价河流的健康状况,可反映不同类型人为活动对河流的综合干扰状况,人为干扰越强,F-IBI 指数越低^[18,24]。本研究利用 F-IBI 指数评价拒马河北京段的河流健康,结果表明拒马河北京段河流健康整体处于较差水平。鱼类的组成与分布对水利工程修建、水体污染等十分敏感^[18,35],娄方瑞等^[30]的研究表明,F-IBI 值与 COD、浊度、叶绿素和总氮等水质参数呈显著负相关性,推测由于水体环境的改变造成鱼类敏感性增强和水生群落破坏,从而影响了水域生态系统的健康状况。本研究中 F-IBI 与几个水质参数均无显著相关性。北京市生态环境局发布的数据也表明,拒马河(北京房山段)水质达到地表水二类(2018 年 5 月和 10 月,数据来源于北京市生态环境局官网),说明水质理化因子可能不是影响拒马河北京段河流健康的主要因素。

本研究对拒马河北京段的水利工程进行了排查,在约 42.6 km 调查河段内共有拦河坝 38 座(相关数据尚未公开),多数用途为旅游开发。拦河坝主要类型为水泥坝和堆石坝,材料为混凝土、沙、石,水泥坝多数为低头坝,堆石坝部分有缺口可供水流通过。水坝是河流系统中最具普遍性和典型性的人为干扰形式之一^[36-37]。已有研究表明,水坝可通过多种途径来影响河流鱼类群落,包括阻断鱼类洄游通道、改变水流流态和改变栖息地局部环境等^[38-39]。本研究相关性分析结果表明,拦河坝的截流对于下游近距离的鱼类资源和生境状况有显著影响,距离越近,影响越大。拦河坝导致河流片段化,纵向连通几乎丧失,鱼类洄游通道被阻断,造成流水性鱼类减少而静水性鱼类增多^[40-43]。而拒马河北京段鱼类种类调查结果也显示,种类组成主要是一些喜静水的鱼类,如鲫、泥鳅和黄颡鱼等。除此之外,拒马河北京段还存在河底挖沙、固化,河堤渠道化现象,大量水生植物

被破坏,导致鱼类栖息生境大量丧失。

3.4 拒马河生态环境现状及保护建议

本研究调查发现拒马河水域生态环境总体现状受人类活动干扰较重:(1)河道两岸的旅游餐饮业大量发展,导致旅游高峰期部分河段出现水质富营养化;(2)从上游到下游,逐级拦河坝阻断了河流纵向连通,造成河流片段化,导致水生生物洄游受阻;(3)河底挖沙导致底栖生物生境破损,河道及河底的固化及渠化等工程,破坏了大量水生植被,造成鱼类等水生动物的栖息生境不断丧失。本研究结果表明,拒马河北京段的河流健康整体处于较差水平,水质理化因子可能不是影响拒马河北京段河流健康的主要因素,可能主要与河流片段化有关。根据上述现状和本研究分析结果,提出下列恢复和保护拒马河生境建议:(1)根据拦河坝的大小、性质及位置等情况,统筹考虑,有序拆除部分河坝,尽可能恢复河道纵向连通,以恢复河流连续体在纵向上的种群结构及生态功能;(2)开展水生生物栖息生境营造工程,选取合适的河段,移植水生植物,投放人工鱼巢,恢复鱼类关键生境;(3)开展重要水生生物增殖放流,恢复拒马河水生生物多样性;(4)合理发展旅游业,控制污染较大的旅游项目。

通讯作者简介:杨文波(1978—),男,硕士,副研究员,主要研究方向为渔业资源保护。

共同通讯作者简介:王晓梅(1980—),女,博士,副研究员,主要研究方向为渔业资源和水生野生动物保护。

参考文献(References):

- [1] 王鸿媛. 北京鱼类和两栖、爬行动物志[M]. 1993 年版. 北京: 北京出版社, 1994: 9-198
- [2] 杨文波, 李继龙, 李绪兴, 等. 拒马河北京段鱼类组成及其多样性[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(2): 175-181
Yang W B, Li J L, Li X X, et al. Fish composition and species biodiversity of the Beijing section of Juma River [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(2): 175-181 (in Chinese)
- [3] 朱召军, 吴志强, 黄亮亮, 等. 漓江上游基于鱼类生物完整性指数的河流健康评价体系构建与应用[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(3): 533-538
Zhu Z J, Wu Z Q, Huang L L, et al. Development and application of IBI based on fish to assess river health in the upper reaches of Lijiang River [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(3): 533-538 (in Chinese)

- [4] 侯晓丽, 王云彪. 湿地生态风险评价中生物完整性指数研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 3-8
Hou X L, Wang Y B. Research progress of index of biotic integrity for ecological assessment in wetlands [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(4): 3-8 (in Chinese)
- [5] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27
- [6] 周天舒, 张亚, 唐文乔, 等. 基于鱼类完整性指数的黄浦江水生生态系统评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6): 895-903
Zhou T S, Zhang Y, Tang W Q, et al. Ecological health assessment of Huangpu River based on fish index of biotic integrity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(6): 895-903 (in Chinese)
- [7] Aparicio E, Carmona-Catot G, Moyle P B, et al. Development and evaluation of a fish-based index to assess biological integrity of Mediterranean streams [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2011, 21(4): 324-337
- [8] Jun Y C, Won D H, Lee S H, et al. A multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(10): 3599-3628
- [9] Li F Q, Cai Q H, Ye L. Developing a benthic index of biological integrity and some relationships to environmental factors in the subtropical Xiangxi River, China [J]. International Review of Hydrobiology, 2010, 95(2): 171-189
- [10] Weigel B M, Dimick J J. Development, validation, and application of a macroinvertebrate-based Index of Biotic Integrity for nonwadeable rivers of Wisconsin [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2011, 30(3): 665-679
- [11] 李增辉, 曲丹, 孙德智, 等. 宜兴市莲花荡水系整治工程前后生态健康评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(3): 181-192
Li Z H, Qu D, Sun D Z, et al. Ecosystem health assessment: A case study of Lianhuadang River system before and after the water quality improvement projects [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(3): 181-192 (in Chinese)
- [12] Wu N C, Cai Q H, Fohrer N. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity (D-IBI) for rivers impacted by run-of-river dams [J]. Ecological Indicators, 2012, 18: 108-117
- [13] Wu N C, Schmalz B, Fohrer N. Development and testing of a phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) for a German lowland river [J]. Ecological Indicators, 2012, 13(1): 158-167
- [14] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 基于着生硅藻指数的梧桐河水生态健康评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 83-90
Xue H, Zheng B H, Meng F S, et al. Health assessment on aquatic ecosystem in Wutong River using benthic diatom indexes [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(4): 83-90 (in Chinese)
- [15] Grabas G P, Blukacz-Richards E A, Pernanen S. Development of a submerged aquatic vegetation community index of biotic integrity for use in Lake Ontario coastal wetlands [J]. Journal of Great Lakes Research, 2012, 38(2): 243-250
- [16] Beck M W, Hatch L K, Vondracek B, et al. Development of a macrophyte-based index of biotic integrity for Minnesota lakes [J]. Ecological Indicators, 2010, 10(5): 968-979
- [17] 孟伟, 张远, 渠晓东, 等. 河流生态调查技术方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 121-124
- [18] 刘春池, 牛建功, 蔡林钢, 等. 伊犁河流域鱼类生物完整性指数构建初探[J]. 淡水渔业, 2017, 47(4): 15-22
Liu C C, Niu J G, Cai L G, et al. Preliminary study on fish index of biotic integrity (F-IBI) assessment for Ili River, Xinjiang [J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47(4): 15-22 (in Chinese)
- [19] 邵星晨, 章群, 韩博平, 等. 基于鱼类生物完整性指数的广东鉴江流域环境质量评估[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 679-685
Gao X C, Zhang Q, Han B P, et al. Environmental quality assessment of Jian River Basin (Guangdong) based on fish biotic integrity index [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 679-685 (in Chinese)
- [20] Zhu D, Chang J B. Annual variations of biotic integrity in the Upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI) [J]. Ecological Indicators, 2008, 8(5): 564-572
- [21] 刘明典, 陈大庆, 段辛斌, 等. 应用鱼类生物完整性指数评价长江中上游健康状况[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 1-6, 10
Liu M D, Chen D Q, Duan X B, et al. Assessment of ecosystem health of upper and middle Yangtze River using fish-index of biotic integrity [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(2): 1-6, 10 (in Chinese)
- [22] Li T H, Huang X L, Jiang X H, et al. Assessment of ecosystem health of the Yellow River with fish index of biotic integrity [J]. Hydrobiologia, 2018, 814(1): 31-43
- [23] 裴雪姣, 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)
- [24] 刘猛, 渠晓东, 彭文启, 等. 浑太河流域鱼类生物完整性指数构建与应用[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 343-352
- Liu M, Qu X D, Peng W Q, et al. Development and application of a fish-based index of biological integrity for the Hun-Tai River basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(3): 343-352 (in Chinese)
- [25] van Oosterhout M P, van der Velde G. An advanced Index of Biotic Integrity for use in tropical shallow lowland streams in Costa Rica: Fish assemblages as indicators of stream ecosystem health [J]. Ecological Indicators, 2015, 48: 687-698
- [26] 刘恺, 周伟, 李凤莲, 等. 广西河池地区河流基于鱼类的生物完整性指数筛选及其环境质量评估[J]. 动物学研究, 2010, 31(5): 531-538
- Liu K, Zhou W, Li F L, et al. A fish-based biotic integrity index selection for rivers in Hechi Prefecture, Guangxi and their environmental quality assessment [J]. Zoological Research, 2010, 31(5): 531-538 (in Chinese)
- [27] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 242-295
- [28] 余景, 赵漫, 胡启伟, 等. 基于鱼类生物完整性指数的深圳鹅公湾渔业水域健康评价[J]. 南方农业学报, 2017, 48(3): 524-531
- Yu J, Zhao M, Hu Q W, et al. Ecosystem health assessment of Egong Bay fisheries area in Shenzhen based on index of biological integrity of fish [J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(3): 524-531 (in Chinese)
- [29] Bozzetti M, Schulz U H. An index of biotic integrity based on fish assemblages for subtropical streams in southern Brazil [J]. Hydrobiologia, 2004, 529(1-3): 133-144
- [30] 娄方瑞, 程光平, 陈柏娟, 等. 基于鱼类生物完整性指数评价红水河梯级水库的生态系统健康状况[J]. 淡水渔业, 2015, 45(4): 36-40
- Lou F R, Cheng G P, Chen B J, et al. The ecosystem health assessment of Hongshui River cascade reservoirs, China, based on fish-index of biotic integrity [J]. Freshwater Fisheries, 2015, 45(4): 36-40 (in Chinese)
- [31] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 2016, 24: 500-551
- Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, et al. Red List of China's Vertebrates [J]. Biodiversity Science, 2016, 24: 500-551 (in Chinese)
- [32] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4661-4672
- Qu X D, Liu Z G, Zhang Y. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the benthic-index of biotic integrity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4661-4672 (in Chinese)
- [33] 王鸿媛. 北京鱼类志[M]. 北京: 北京出版社, 1984: 10-78
- [34] 邓明星, 黄亮亮, 莫苑敏, 等. 应用鱼类生物完整性指数评价荔浦河河流健康[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 111-119
- Deng M X, Huang L L, Mo Y M, et al. River health assessment using biotic integrity index based on fish for Lipu River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(4): 111-119 (in Chinese)
- [35] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. 长江流域资源与环境, 1992, 1(1): 17-23
- Liu J K, Cao W X. Fish resources of the Yangtze River basin and the tactics for their conservation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1992, 1(1): 17-23 (in Chinese)
- [36] Poff N L, Zimmerman J K H. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 194-205
- [37] Rosenberg D M, McCully P, Pringle C M. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction [J]. BioScience, 2000, 50(9): 746-751
- [38] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408
- [39] Wang L Z, Infante D, Lyons J, et al. Effects of dams in river networks on fish assemblages in non-impoundment sections of rivers in Michigan and Wisconsin, USA [J]. River Research and Applications, 2011, 27(4): 473-487
- [40] Tiemann J S, Gillette D P, Wildhaber M L, et al. Effects of lowhead dams on riffle-dwelling fishes and macroinvertebrates in a midwestern river [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133(3): 705-717
- [41] Gillette D P, Tiemann J S, Edds D R, et al. Spatiotemporal patterns of fish assemblage structure in a river impounded by low-head dams [J]. Copeia, 2005, 2005(3): 539-549
- [42] Poulet N. Impact of weirs on fish communities in a piedmont stream [J]. River Research and Applications, 2007, 23(9): 1038-1047
- [43] Yan Y Z, Wang H, Zhu R, et al. Influences of low-head dams on the fish assemblages in the headwater streams of the Qingyi watershed, China [J]. Environmental Biology of Fishes, 2013, 96(4): 495-506 ◆