

基于鱼类生物完整性指数的独流减河水生态系统健康评价

潘聪¹, 李安然¹, 任朝宇¹, 杨子涵¹, 孙金辉^{1*}, 李楠^{2*}

¹天津农学院, 水产学院, 天津

²天津市水产研究所, 天津

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年6月25日

摘要

2021年到2022年对独流减河水系鱼类进行调查。从种类组成与丰度、营养结构、环境耐受性、繁殖共位群四个方面构建独流减河水系鱼类生物完整性指数(F-IBI)体系, 通过1、3、5赋值法对独流减河水系水生态健康状况进行评价, 从“极差”到“好”分为6个评价等级。本次调查共采集到鱼类3601尾, 分别属于3目7科10属10种。F-IBI结果表明, 独流减河水系的健康状况评价等级为“极差”到“好”, 整体处在“一般~差”水平。洪涝灾害、水质污染、过度捕捞等人类活动是使得独流减河水系水生态系统健康水平处在较低水平的主要因素。

关键词

独流减河, 鱼类, 生物完整性指数, 河流健康评价

Health Assessment of the Duliujian River Ecosystem Based on Fish Biodiversity Index

Cong Pan¹, Anran Li¹, Chaoyu Ren¹, Zihan Yang¹, Jinhui Sun^{1*}, Nan Li^{2*}

¹Fisheries College, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²Tianjin Fisheries Research Institute, Tianjin

Received: May 28th, 2024; accepted: Jun. 17th, 2024; published: Jun. 25th, 2024

Abstract

From 2021 to 2022, fish surveys will be conducted at 8 sampling points in the Duliujian River sys-

*通讯作者。

文章引用: 潘聪, 李安然, 任朝宇, 杨子涵, 孙金辉, 李楠. 基于鱼类生物完整性指数的独流减河水生态系统健康评价[J]. 水产研究, 2024, 11(2): 79-88. DOI: 10.12677/ojfr.2024.112010

tem. The fish Biological Integrity Index (F-IBI) system was constructed from the four aspects of species composition, abundance, nutrient structure, environmental tolerance and reproductive co-location. The water ecological health status of the Duliujian River system was evaluated by 1, 3 and 5 evaluation methods, and was divided into 6 evaluation levels from “very poor” to “good”. A total of 3601 fish belonging to 3 orders, 7 families, 10 genera and 10 species were collected in this survey. The F-IBI results show that the health status of Duliujian River system is rated from “very poor” to “good”, and the whole is at the level of “normal to poor”. Flood disaster, water pollution, overfishing and other human activities are the main factors that make the health level of the water ecosystem of Duliujian River system at a low level.

Keywords

Duliujian River, Fish, Biological Integrity Index, River Health Assessment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

美国生物学家 Karr 在 1981 年提出了生物完整性指数[1] (Index of Biotic Integrity, IBI)这一概念, 国内外学者已经普遍认可并且广泛应用 IBI 评价水生态系统的健康状态。国内外在水生态系统健康评价的研究中常用到的 IBI 包括: 最早构建的鱼类完整性指数(F-IBI) [2], 以及后来发展到浮游生物完整性指数(P-IBI) [3]、底栖动物完整性指数(B-IBI) [4]等。近些年国内的学者在曹娥江[5]、黄河口[6]、黄浦江[7]等水域通过鱼类生物完整性指数对水生态系统的健康状况进行了综合评价, 对保护当地渔业资源、恢复水生态系统健康具有科学指导作用。因为鱼类在水生态系统中处在较高的食物网地位, 能够更全面的反映该水系水生态系统的健康程度, 所以本次调查选择采用鱼类生物完整性指数(F-IBI)来评价独流减河水系水生态系统的健康状态。

独流减河是海河流域大清河下游人工排洪河道, 始建于 20 世纪 50 年代, 在 1966 至 1970 年扩建, 全长 68.8 公里, 主要作用是在汛期将子牙河和大清河的大部分洪水排到渤海, 汛后蓄水用于灌溉农田和工业用水。章欣仪等[8]对瓯江口水系以及牛明香等[9]对黄河口近岸的水生态系统健康评价中, 都出现了与以前发表的 F-IBI 数据进行对比说明的研究, 独流减河流域也有一些水生态评价相关的研究[9] [10], 但没有发现有关于 F-IBI 的数据, 所以本次调查通过构建独流减河水系 F-IBI 体系, 评价独流减河水系水生态健康状况, 为独流减河渔业资源的管理与保护提供一些依据。

2. 材料与方

2.1. 采样点与采样时间

Table 1. Specific location of the sampling point

表 1. 采样点具体位置

采样点位置	采样点编号	经度(东经)	纬度(北纬)
大清河第六埠	DL01	116.930891	39.068164
独流减河津沧高速	DL02	117.016698	39.040706
独流减河团泊	DL03	117.187161	38.921113
独流减河万家码头	DL04	117.338075	38.832128

续表

独流减河防潮闸	DL05	117.576665	38.775443
南运河入境	DL06	116.893378	38.703959
静海南运河	DL07	116.918674	38.965115
马厂减河 205 国道	DL08	117.164666	38.759633

此次调查在 2021 年至 2022 年分四个季度进行,对独流减河水系设置了 8 个采样点位(见表 1)进行鱼类采样调查,这 8 个采样点位为 DL01 (大清河第六埠)、DL02 (独流减河津沧高速)、DL03 (独流减河团泊)、DL04 (独流减河万家码头)、DL05 (独流减河防潮闸)、DL06 (南运河入境)、DL07 (静海南运河)、DL08 (马厂减河 205 国道)。

2.2. 样品鉴定与数据记录

捕捞上来的鱼类进行鉴定与记录,现场无法鉴定的种类用福尔马林溶液固定后带回实验室查阅相关资料后进行鉴定[11]。记录的鱼类数据包括:个体总数、种类数、各点位物种的总重量、各点位物种的生物量、各点位的物种分布。

2.3. 分析数据公式

(1) 鱼类总分类单元数(S),即某采样点中出现的所有鱼类物种数。

(2) Shannon-Weiner 多样性指数(H')

$$H' = -\sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i \quad (1)$$

其中

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

式中: P_i 为监测站位第 i 种的丰度 n_i 与样品丰度的比值; N 为所有样品的总丰度[12]。

(3) 鱼类 Berger-Parker 优势度指数(D)

$$D = \frac{N_{\max}}{N} \quad (3)$$

式中: N_{\max} 为样点中优势种的个体数; N 为样点中全部物种的个体数[4] [11]。

(4) 标准化公式

$$S \text{ 的标准化} = \frac{\text{measured} - 5\% \text{ quantile}}{95\% \text{ quantile} - 5\% \text{ quantile}} \quad (4)$$

$$H' \text{ 的标准化} = \frac{\text{measured} - 0}{3 - 0} \quad (5)$$

$$D \text{ 的标准化} = \frac{95\% \text{ quantile} - \text{measured}}{95\% \text{ quantile} - 5\% \text{ quantile}} \quad (6)$$

其中, *measured*: 指任何一个指标在样点实际数据的检测值; *5% quantile*: 指任何一个指标检测数据 5% 的分位数值; *95% quantile*: 指任何一个指标检测数据 95% 的分位数值[13]。

(5) 鱼类物种多样性综合指数

鱼类总分类单元数(S)、Shannon-Weiner 多样性指数(H')、鱼类 Berger-Parker 优势度指数(D),这三个

数据各自标准化的平均值即为鱼类物种多样性综合指数[14]。

3. F-IBI 候选指标体系的构建及筛选

3.1. 参照点和受损点的选择

参照点原则上是选择没有人为干扰或轻微人为干扰的采样点，由于人类社会的发展很难找到理想状态下的参照点，所以根据采样的时间，通过计算鱼类物种多样性综合指数，选择鱼类物种多样性综合指数较高的采样点作为参照点，其余点位作为受损点。

3.2. 候选指标体系构建

根据独流减河水系鱼类的群落组成结构并结合相关文献[5] [6] [15]，选择种类组成与丰度、营养结构、环境耐受性、繁殖共位群 4 个属性的 19 个候选指标构建 F-IBI 评价体系(见表 2)。

Table 2. F-IBI evaluation system candidate indicators and response to interference

表 2. F-IBI 评价体系候选指标以及对干扰的响应

属性	候选参数指标	指标代码	对干扰的响应
种类组成与丰度	鱼类总种类数	M1	下降
	Shannon-Wiener 多样性指数	M2	下降
	鲤形目鱼类种类数占比	M3	上升
	鲈形目鱼类种类数占比	M4	下降
	鲤科鱼类种类数占比	M5	上升
	中上层鱼类种类数占比	M6	下降
	中下层鱼类种类数占比	M7	下降
	底层鱼类种类数占比	M8	下降
营养结构	杂食性鱼类个体数占比	M9	上升
	植食性鱼类个体数占比	M10	上升
	肉食性鱼类个体数占比	M11	下降
环境耐受性	耐受性鱼类种类数占比	M12	上升
	敏感性鱼类种类数占比	M13	下降
繁殖共位群	产浮性卵鱼类种类数占比	M14	下降
	产沉性卵鱼类种类数占比	M15	下降
	产黏性卵鱼类种类数占比	M16	上升
	产附着性卵鱼类种类数占比	M17	上升
	卵胎生鱼类种类数占比	M18	下降
	护卵行为鱼类种类数占比	M19	下降

3.3. 候选指标数据的筛选和分析

将 8 个采样点的相关数据进行合并，对 19 个候选指标进行筛选，参考相关作者[5] [7]的筛选方法，结合独流减河水系的实际情况，制定三步筛选标准：第一步，分布范围检验：若采样点中某候选指标超过 90%为零值，则删除该指标；第二步，敏感性分析：用 Origin 2021 软件绘制候选指标 25%~75%分位数箱型图，观察参照点和受损点之间的该候选指标是否具有显著差异。删除 IQ 值 < 2，即两箱体相互重叠且有中位线在对方箱体内的候选指标。保留 IQ 值 ≥ 2，即两箱体无重叠或两箱体虽然有重叠，但两个箱体的中位线均不在对方箱体内的候选指标；第三步，冗余检验：用 IBM SPSS Statistics 27 软件对剩余的候选指标进行 Pearson 相关性分析，保留 $|r| \leq 0.9$ 的候选指标，若出现相关系数 $|r| > 0.9$ 的候选指标，则保留更重要的一个候选指标。

3.4. F-IBI 分数的计算和评价标准

参照袁立来等[16]的方法,选择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。采用1、3、5赋值法[17][18][19]对独流减河水系水生态健康状况进行评价。选用余根听等[20]的评分方法,当采样点的某个候选指标实际计算值达到期望值的75%以上计5分,达不到期望值的50%计1分,介于50%到75%之间的计3分。将所有指标的分值相加后,得到采样点的未标准化的F-IBI分数。根据MOYLE等[21]的F-IBI分数标准化方法,F-IBI总分 = 各采样点的1、3、5赋值法后得到的分数 ÷ 筛选后的候选指标 × 12。参考丁洋等[22]的评价方法,把独流减河水系水生态系统的评价标准分为6个等级,极好(58~60)、好(48~52)、一般(40~44)、差(28~34)、极差(12~22)、无鱼(0),如果某个采样点的F-IBI总分位于两个评价等级之间,那么该点位的水生态健康状况也位于两个评价标准之间。

4. 结果与分析

4.1. 鱼类的物种组成

本次调查在独流减河水系8个采样点共采集到鱼类3601尾,分别属于3目7科10属10种。其中,种类数最多的是鲤形目为2科5属5种,占总种类数的50%;其次是鲈形目为3科3属3种,占总种类数的30%;最少的是鲇形目2科2属2种,占总种类数的20%。

4.2. 参照点和受损点的选择

经过鱼类物种多样性综合指数的比较和筛选(见表3),最终选择DL05、DL07作为参照点,选择DL01、DL02、DL03、DL04、DL06、DL08作为受损点,观察候选指标的参照点和受损点是否具有显著差异。

Table 3. Composite index of fish species diversity

表3. 鱼类物种多样性综合指数

点位	第一次采样		第二次采样		第三次采样		第四次采样	
	结果	评价	结果	评价	结果	评价	结果	评价
DL01	0.26	差	0.31	较差	0.29	差	0.29	差
DL02	0.48	较差	0.38	较差	0.45	较差	0.62	一般
DL03	0.03	极差	0.03	极差	0.08	极差	0.06	极差
DL04	0.14	极差	0.14	极差	0.01	极差	0.17	差
DL05	0.65	一般	0.78	良好	0.76	良好	0.74	良好
DL06	0.50	一般	0.53	一般	0.62	一般	0.63	一般
DL07	0.84	良好	0.77	良好	0.70	良好	0.94	优
DL08	0.34	较差	0.39	较差	0.46	较差	0.44	较差

4.3. F-IBI 候选指标分析及筛选

各采样点F-IBI候选指标分析结果(见表4)。19个候选指标在经过分布范围检验后,植食性鱼类个体数占比(M10)超过90%为零值,删除M10保留剩余18个候选指标进行敏感性分析。鱼类总种类数(M1)、Shannon-Wiener多样性指数(M2)、鲤科鱼类种类数占比(M5)、中下层鱼类种类数占比(M7)、杂食性鱼类个体数占比(M9)、肉食性鱼类个体数占比(M11),这6个候选指标的IQ值 ≥ 2 (见图1)。对这6个候选指标进行Pearson相关性分析(见表5),M9与M11的相关系数 $|r| > 0.9$,呈显著相关,M11相比于M9更敏感的反应独流减河水系鱼类对干扰影响的变化,删除M9。最终保留M1、M2、M5、M7、M11作为独流减河水系F-IBI的计算指标。

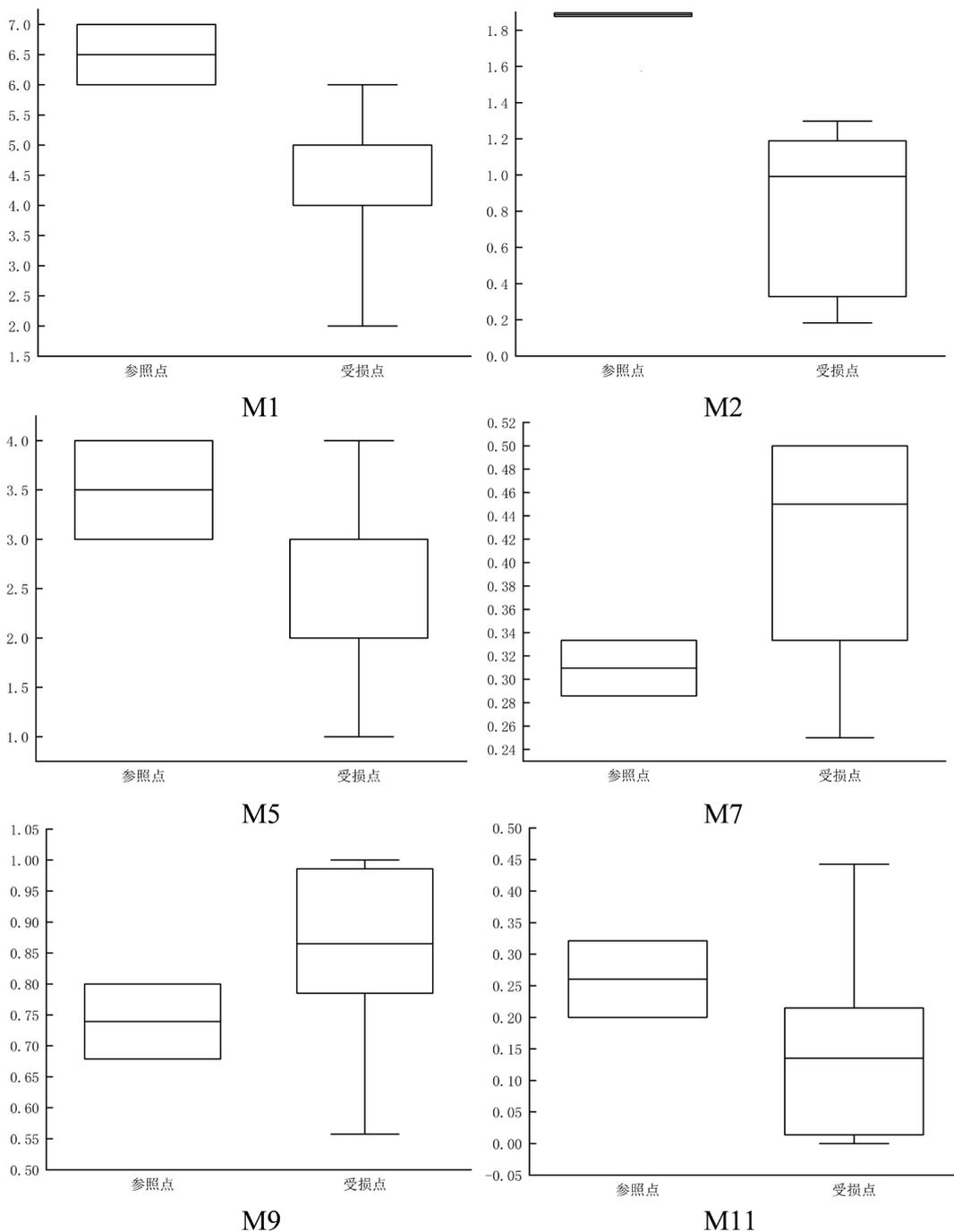


Figure 1. Box chart of six candidate indicators at reference points and damage points
图 1. 六个候选指标在参照点和受损点的箱型图

Table 4. Analysis data of F-IBI candidate indicators at each sampling point
表 4. 各采样点 F-IBI 候选指标分析数据

	DL01	DL02	DL03	DL04	DL05	DL06	DL07	DL08
M1	4	5	2	4	6	6	7	4
M2	0.80	1.30	0.33	0.18	1.88	1.19	1.90	1.18
M3	4	3	1	2	3	4	4	3

续表

M4	0	2	1	1	1	2	2	0
M5	3	3	1	2	3	4	4	3
M6	0.25	0.20	0.00	0.00	0.17	0.33	0.29	0.50
M7	0.50	0.40	0.50	0.50	0.33	0.33	0.29	0.25
M8	0.25	0.40	0.50	0.50	0.50	0.33	0.43	0.25
M9	1.00	0.79	0.92	0.99	0.80	0.56	0.68	0.81
M10	0	0	0	0	0	0	0	0
M11	0.00	0.21	0.08	0.01	0.20	0.44	0.32	0.19
M12	0.75	0.60	1.00	0.75	0.83	0.67	0.71	0.75
M13	0.25	0.40	0.00	0.25	0.17	0.33	0.29	0.25
M14	0.00	0.20	0.50	0.00	0.00	0.17	0.14	0.00
M15	0.50	0.20	0.00	0.00	0.50	0.17	0.29	0.50
M16	0.50	0.40	0.50	0.75	0.50	0.50	0.43	0.50
M17	0.00	0.20	0.00	0.25	0.00	0.17	0.14	0.00
M18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
M19	0.00	0.20	0.50	0.25	0.17	0.17	0.29	0.25

Table 5. Pearson correlation analysis data

表 5. Pearson 相关性分析数据

	M1	M2	M5	M7	M9	M11
M1	1					
M2	0.84	1				
M5	0.889	0.758	1			
M7	-0.65	-0.792	-0.694	1		
M9	-0.719	-0.662	-0.736	0.752	1	
M11	0.719	0.662	0.736	-0.752	-1	1

4.4. F-IBI 评价

独流减河水系各采样点 F-IBI 评价指标的赋值标准(见表 6), 各采样点 F-IBI 总分以及评价等级(见表 7)。由此可以得出, 独流减河水系采样点的健康状况为“差”到“好”水平, DL03 点位的评价等级为“极差”, DL01、DL04、DL08 点位的评价等级为“差”, DL02 点位的评价等级为“一般~差”, DL05 点位的评价等级为“一般”, DL06、DL07 点位的评价等级为“好”。独流减河水系整体上处在“一般~差”的水平。

Table 6. Duliujian River system F-IBI grading standard

表 6. 独流减河水系 F-IBI 赋值标准

评价指标	期望值	赋值标准		
		5 分	3 分	1 分
鱼类总种类(M1)	7	>5.25	3.5~5.25	<3.5
Shannon-Wiener 多样性指数(M2)	1.90	>1.42	0.95~1.42	<0.95
鲤科鱼类种类数占比(M5)	4	>3	2~3	<2
中下层鱼类种类数占比(M7)	0.50	>0.38	0.25~0.38	<0.25
肉食性鱼类个体数占比(M11)	0.44	>0.33	0.22~0.33	<0.22

Table 7. Total F-IBI scores and evaluation results of sampling points in Duliujian River system**表 7.** 独流减河水系各采样点 F-IBI 总分及评价结果

	DL01	DL02	DL03	DL04	DL05	DL06	DL07	DL08
M1	3	3	1	3	5	5	5	3
M2	1	3	1	1	5	3	5	3
M5	3	3	1	3	3	5	5	3
M7	5	5	5	5	3	3	3	3
M11	1	1	1	1	1	5	3	1
IBI 总分(标准化)	31.2	36	21.6	31.2	40.8	50.4	50.4	31.2
水生态等级	差	一般~差	极差	差	一般	好	好	差

5. 讨论

本次调查应用鱼类生物完整性指数(F-IBI)对独流减河水系的水生态健康状况进行了评价。调查发现,独流减河水系的水体健康状态整体上处在“一般~差”的水平。在8个采样点中,“好”水平的采样点为DL06、DL07,占25%;“一般”水平的采样点为DL05,占12.5%;“一般~差”水平的采样点为DL02,占12.5%;“差”水平的采样点为DL01、DL04、DL08,占37.5%;“极差”水平的采样点为DL03,占12.5%。可见,位于上游南运河的DL06和DL07采样点的水生态健康状态要远优于独流减河干流的健康状态。出现这种情况的可能是因为南运河不是泄洪河流,受洪汛影响小,受人为干扰少,生物群落稳定性较高,水生态健康状态好。独流减河干流从上游到下游,水生态健康等级的变化为“差”→“一般~差”→“极差”→“差”→“一般”,独流减河干流作为大清河的主要泄洪河流,在汛期泄洪时河水流速骤增、水温急降、水位剧烈变化,鱼类的栖息环境受到很大的影响,对鱼类的生存造成严重威胁。同时还受人类活动影响,如建设大坝、工厂排污、农田中的农药化肥的渗透等等,使得水污染加剧,鱼类生存的水生态环境变差,鱼类生物多样性减少,各种原因的累加导致其水生态健康状态处在较差的水平。位于独流减河干流入海口附近的DL05采样点,在海洋鱼类洄游的影响下,使得该采样点的水生态健康状态有所回升。

通过计算鱼类物种多样性综合指数四次采样后的平均值得到鱼类物种多样性综合指数评价结果,DL01为“差”、DL02为“较差”、DL03为“极差”、DL04为“极差”、DL05为“良好”、DL06为“一般”、DL07为“良好”、DL08为“较差”。鱼类物种多样性综合指数的评价结果与鱼类生物完整性指数的评价结果,大体上是一致的,如果只是想简单的观察河流健康状况的变化趋势,鱼类物种多样性综合指数相比于鱼类生物完整性指数不需要构建复杂的F-IBI评价体系,更加简便快捷,但是通过鱼类物种多样性综合指数得到的评价结果并不准确,在评价河流健康状况时还是需要构建F-IBI评价体系得到准确的水生态等级。

本次调查应用鱼类生物完整性指数(F-IBI),根据种类组成与丰度、营养结构、环境耐受性、繁殖共位群之中的一些指标,评价了独流减河水系的健康状况。其中,参照点的选取是构建F-IBI体系的关键。现有的大部分研究都是选取没有受到人类干扰的河段或者历史调查数据作为参照点,没有统一的标准。查阅相关资料后,并没有找到独流减河水系的历史调查数据,因此选取了整体上较好的DL05、DL07作为参照点,构建独流减河水系F-IBI评价体系。该方法在倭肯河[23]、滦河[24]等河流健康评价的研究里也有应用。

6. 结论

调查结果表明,上游南运河的健康状态处在“好”的水平,整体上优于独流减河干流“一般~差”的健康状态。这一调查结果与目前独流减河干流和上游南运河的实际所受到的影响相一致。

本次调查以独流减河防潮闸(DL05)、静海南运河(DL07)作为参照点,从种类组成与丰度、营养结构等方面,构建 F-IBI 评价体系,调查结果明确地表现出独流减河水系生态系统的健康状态。弥补了独流减河鱼类生物完整性指数的空缺,对于恢复独流减河水生态系统、保护和管理独流减河渔业资源有一定的实际意义。

根据调查结果及流域现状,提出以下保护独流减河水系的建议:减少流域附近的工厂对水资源的使用,加强对入河排污口的检测和监督;在汛期,要科学地、合理地调动洪水,减少流域内生物资源的损失,增强水生态系统的稳定性;附近的农田会有残留的农药和化肥渗入水体,要加强相关物品的管理,规范用量;加大非法捕捞的监察力度,避免渔业资源遭到破坏。

参考文献

- [1] Karr, J.R. (1981) Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities. *Fisheries*, **6**, 21-27.
- [2] Morley, A.S. and Karr, R.J. (2002) Assessing and Restoring the Health of Urban Streams in the Puget Sound Basin. *Conservation Biology*, **16**, 1498-1509.
- [3] Griffith, M.B., Hill, B.H., McCormick, F.H., et al. (2005) Comparative Application of Indices of Biotic Integrity Based on Periphyton, Macroinvertebrates, and Fish to Southern Rocky Mountain Streams. *Ecological Indicators*, **5**, 117-136.
- [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): 13-17+23.
- [5] 蒋孝燕, 陈超, 冯志政, 等. 基于鱼类生物完整性指数的曹娥江流域水生态系统健康评价[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(6): 767-773. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0446>
- [6] 牛明香, 王俊, 左涛, 等. 基于鱼类生物完整性指数的黄河口近岸渔业水域健康评价[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(6): 45-52. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202204100106>
- [7] 高敏佳, 陈振锋, 张彦彦, 等. 基于鱼类完整性指数的上海黄浦江骨干人工河流水生态系统健康评价[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 99-113.
- [8] 章欣仪, 刘伟成, 张川, 等. 基于鱼类完整性指数的瓯江口水域生态系统健康评价[J/OL]. 水生态学杂志, 2024: 1-18. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202206100233>
- [9] 安琦. 基于 P-IBI 的大清河流域水生态完整性评价[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2022. <https://doi.org/10.27103/d.cnki.ghebu.2022.002344>
- [10] 陈红, 张晓惠, 袁雪竹, 等. 基于 SPSS 的独流减河水生态水环境相关关系研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1203-1208. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.068>
- [11] 张琪, 李博, 姚金忠, 等. 三峡船闸鱼类组成及群落结构特征初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1585-1592.
- [12] 郭兴然, 刘宪斌, 张青田, 等. 河北昌黎海域大型底栖动物群落特征及青岛文昌鱼资源现状[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(8): 1034-1042. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0883>
- [13] 黄舟. 基于 GIS 与 RS 的楠溪江流域生态健康评估[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [14] 徐菲, 王永刚, 张楠, 等. 北京市白河和潮河流域生态健康评价[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 932-942.
- [15] 潘丽波, 黄雪妍, 刘晶晶, 等. 基于鱼类生物完整性的赤水河健康评估研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(8): 1532-1542. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.06.15>
- [16] 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.
- [17] 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. <https://doi.org/10.13721/j.cnki.dsy.2017.04.003>
- [18] 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.
- [19] 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. <https://doi.org/10.13721/j.cnki.dsy.20150309.016>
- [20] 余根听, 尤爱菊, 周鑫妍, 等. 基于鱼类完整性指数的瓯江干流(丽水段)水生态系统健康评价[J]. 环境污染与防

- 治, 2023, 45(9): 1259-1264+1270. <https://doi.org/10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.09.012>
- [21] Moyle, P.B. and Randall, P.J. (2008) Evaluating the Biotic Integrity of Watersheds in the Sierra Nevada, California. *Conservation Biology*, **12**, 1318-1326. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.97161.x>
- [22] 丁洋, 吴志强, 黄亮亮, 等. 漓江中下游基于鱼类生物完整性指数的河流健康评价体系[J]. 四川动物, 2016, 35(2): 288-293.
- [23] 金洪宇, 李雷, 张泽鹏, 等. 基于鱼类完整性指数评价倭肯河流域健康状况[J]. 水产学杂志, 2023, 36(6): 109-117+126.
- [24] 黄凯, 姚垚, 王晓宁, 等. 基于鱼类完整性指数的滦河流域生态系统健康评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 901-910. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2018.01.02>