

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0446

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.

JIANG Xiao-yan, CHEN Chao, FENG Zhi-zheng, et al. A Fish-based Index of Biotic Integrity for the Health Assessment of Aqua-ecological System in Cao'e River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(6): 767-773.

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

蒋孝燕¹, 陈超², 冯志政¹, 金叶飞¹, 杨庆满³, 任岗^{1,4} (1. 绍兴文理学院生命与环境科学学院, 浙江绍兴 312000; 2. 宁波市江南中学, 浙江宁波 315800; 3. 绍兴市水产技术推广中心, 浙江绍兴 312000; 4. 浙江绍兴鉴湖国家湿地公园管理委员会, 浙江绍兴 312036)

摘要: 2016—2018 年对曹娥江干流以及主要支流的 9 个采样点进行鱼类调查, 构建曹娥江鱼类生物完整性指数 (F-IBI) 体系, 评价曹娥江流域水生态系统的健康状况。共采集到鱼类标本 17 116 尾, 分属 12 目 25 科 69 属 107 种。从种类组成与丰度、营养结构、环境耐受性、繁殖共位群、鱼类数量与健康状况 5 个属性的 23 个候选指标中筛选出鲤形目鱼类种类数 (M3)、中下层鱼类物种数占比 (M9)、敏感性鱼类个体数占比 (M15)、借助贝类产卵鱼类物种数占比 (M19) 4 个指标作为计算曹娥江流域 F-IBI 的核心指标, 建立具有诊断意义的鱼类生物完整性评分标准, 并对曹娥江流域 9 个采样点的鱼类生物完整性状况进行了评价。结果表明, 曹娥江流域不同采样点中干流的健康状况等级为“极差~差”到“一般”, 支流为“一般”到“好”。水质污染、水利设施阻挡和过度捕捞是造成曹娥江干流水生态系统健康水平较低的重要因素, 而水利设施则可能是造成支流长诏健康水平较低的重要因素。

关键词: 曹娥江; 鱼类; 生物完整性指数; 河流健康评价

中图分类号: X82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)06-0767-07

A Fish-based Index of Biotic Integrity for the Health Assessment of Aqua-ecological System in Cao'e River. JIANG Xiao-yan¹, CHEN Chao², FENG Zhi-zheng¹, JIN Ye-fei¹, YANG Qing-man³, REN Gang^{1,4} (1. School of Life and Environmental Sciences, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Jiangnan Middle School of Ningbo, Ningbo 315800, China; 3. Shaoxing Fisheries Technical Extension Center, Shaoxing 312000, China; 4. Administrative Committee of Jianhu National Wetland Park of Shaoxing in Zhejiang Province, Shaoxing 312036, China)

Abstract: To assess the health status of aqua-system of Cao'e River, fish resources in nine sampling points in the main stream and tributaries of Cao'e River were investigated from 2016 to 2018, and the fish-based index of biotic integrity (F-IBI) was established. A total number of 17 116 individuals of fishes were collected, which belonged to 12 orders, 25 families, 69 genera and 107 species. Twenty-three candidate indices in five properties, including species composition and richness, nutritional structure, environmental tolerance, reproductive colocation group, fish quantity and health status, were proposed to develop the F-IBI. The results of data analysis show that four indices, i.e. species number of Cypriniformes (M3), ratio of species number in middle and lower layer (M9), ratio of sensitive fish individuals (M15) and ratio of species number spawned eggs in Mollusca (M19), were screened out as the core indices. Meanwhile, the scoring standard with diagnostic significance for fish biotic integrity was established and successfully used to evaluate the health statuses of nine sampling points in Cao'e River basin. The results show that the health statuses of the nine sampling points along the main stream were in "very poor-poor" to "normal" levels, while those of the tributaries were in "normal" to "good" levels, indicating that the health statuses of the tributaries were better than those of the main stream. The results suggest that, water pollution, obstruction of water conservancy projects and overfishing might be the important factors causing the lower health statuses of the main stream of Cao'e River, and water conservancy projects might be the important factor causing the lower health status of the main tributary Changzhao.

Key words: Cao'e River; fish; biotic integrity index; river health assessment

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 绍兴市水政渔业执法局曹娥江鱼类生物完整性评价体系构建及应用课题(2017)

① 通信作者 E-mail: reng@usx.edu.cn

河流生态系统的健康评价是河流生态系统性修复、保护和管理的工具之一,其代表方法包括指示物种法和指标体系法^[1]。目前国外已经形成了多种较为成熟的河流健康评价方法,如澳大利亚溪流状态指数法^[2]、美国全国河流生态系统健康评价项目^[3]、欧盟水框架指令^[4]等。近年来,许多学者采用基于硅藻等浮游植物、大型无脊椎动物、水生植物、鱼类等物种的指示物种法和基于水质、水文、水生生物、河流系统物理形态结构、社会经济指标及社会服务功能等综合评价的指标体系法对我国松花江、浑太河、东江等河流的全流域或部分流域进行了河流生态系统健康评价^[5]。尽管通过数学模型构建的指标体系法是近年来和未来河流健康评价的重要发展方向^[1],但结合指示物种法将更加全面客观地反映河流生态系统健康状态。

生物完整性是指在一个地区的天然栖息地中的群落所具有的种类组成、多样性和功能结构特征以及该群落所具有的自身平衡、保持结构完整和适应环境变化的能力^[6]。KARR^[7]最早提出生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI),该指数综合了多个较为敏感的生物指标且可定量评价生态系统的健康状态,弥补了传统生态系统评价中单一理化监测方式的不足,最初以鱼类为研究对象构建了鱼类生物完整性指数(fish index of biotic integrity, F-IBI),经过多年的发展已逐渐向底栖动物^[8]、藻类^[9]、鸟类^[10]以及高等维管束植物^[11]等生物类群推广,被广泛应用于全球不同国家和地区不同类型的生态系统健康研究和评价中。

鱼类通常处于淡水生态系统食物链的顶端,具有鉴定分类信息完善、生活史长、对水环境改变反应灵敏、群落组成在不同水域呈特异性等特征,在水生态系统完整性评价中占有重要地位^[7, 12]。鱼类生物完整性指数目前已应用于辽河^[13]、长江^[14]、黄河^[15]、黑河^[16]等众多流域的水生生物资源及其栖息生境状况的系统评价中。

曹娥江是钱塘江的主要支流,是中国东部中小河流的代表性河流之一,也是流域地区工农业、饮用水源的主要河流和水资源来源。但近30 a来,由于经济社会的快速发展,水质污染、过度捕捞、水利工程建设等人为因素极大干扰了曹娥江流域水生生物特别是鱼类的栖息生境,鱼类群落结构的复杂性降低、稳定性下降^[17],且与长江等大型河流相比,曹娥江鱼类的整体遗传多样性处于中等偏下水平,生物多样性较为脆弱^[18]。近年来,曹娥江流域水域环境得到持续治理和明显改善,但鲜有从生物学角

度对其水生态环境健康状况开展系统性评估的研究。该研究以曹娥江流域鱼类为研究对象,旨在建立适合该流域的F-IBI评价体系,并对该流域生态系统的健康状况进行客观描述和评价,为曹娥江渔业环境监测和管理、渔业资源可持续发展及区域水域生态环境建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

曹娥江发源于磐安县尚湖镇王村的大盘山脉长坞,自南向北流经新昌县、嵊州市、上虞区、柯桥区,自2008年曹娥江大坝建成后成为内陆型河流,干流全长197.2 km,流域面积6 080 km²,主河道平均坡降3.0%。曹娥江主要支流有澄潭江、长乐江、新昌江、黄泽江等,已建有长诏、南山2个大型水库和坂头、辽湾、剡源、巧英4个中型水库。曹娥江大部分河道是沿岸地区重要的工农业用水来源,建有上浦闸、曹娥江大坝、清风船闸等水利枢纽工程。

1.2 样品采集

此次调查共设置9个采样点:干流选取曹娥江入海口滨海,上虞区上浦、沥海,嵊州市三界、仙岩为采样点;支流选取新昌县澄潭江镜岭、新昌江长诏水库,嵊州市黄泽江黄泽、长乐江甘霖为采样点(图1)。2016年4月至2018年12月期间,每年的4、6、9和12月各开展1次样品采集。鱼类样品采集主要在当地渔民协助下进行,在采样点上下游0.5 km范围内进行连续采样。干流利用拖网(规格为4 m宽、2 m高、20 m长,网目10 mm)、流刺网(规格为3层,1.5 m高、50 m长,外层和内层网目分别为100和10 mm)、地笼(规格为20节,0.4 m宽、0.4 m高、0.5 m深,网目5 mm)等渔具,支流利用背负式电鱼机(功率2 kW,6场管)、流刺网和地笼等渔具。网具作业时间2 h,地笼作业时间12 h,电鱼机采样按“之”字形路线前行采集1 h。

1.3 渔获物保存及种类鉴定

渔获物按采集时间、地点分袋包装,用冰保存后带回实验室。鱼类的物种分类鉴定参照文献[19-21]进行,确定各种鱼的目科属种等分类地位。取自同一个采样点的样品按鱼类种类统计其尾数和总质量,同时统计该采样点的总渔获量。在称重过程中,所有的样品鱼应保持标准湿度,以免因失重而造成误差。经低温保存的样品鱼质量测定值按样品鱼保存期的失重率予以校正。

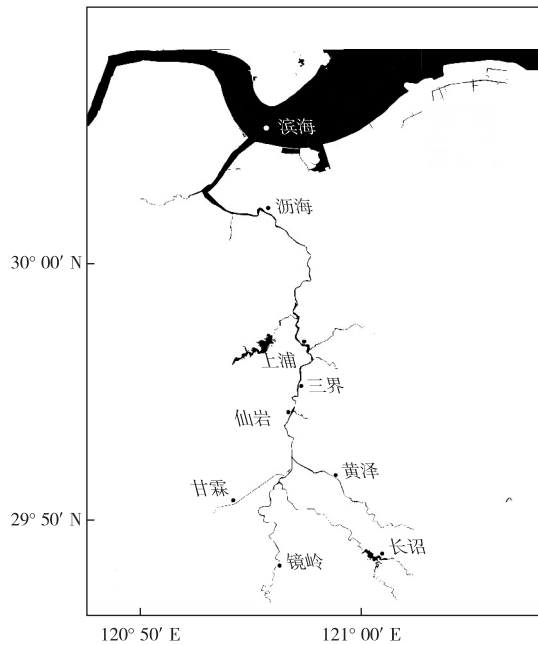


图1 曹娥江鱼类采样点分布

Fig. 1 The sampling points in Cao'e River

1.4 F-IBI 候选指标体系构建及筛选

1.4.1 参考点和受损点选择

参考点和受损点筛选是构建 IBI 的基础。按照未受到人为活动干扰或受到轻度人为活动干扰的采样点要求,并根据前期曹娥江水质和渔业资源调查结果^[17],选择干流上浦和支流镜岭为参考点,选择滨海、沥海、三界、仙岩、长诏、甘霖、黄泽为受损点。

1.4.2 候选指标体系构建

为体现曹娥江流域环境梯度上鱼类群落结构的变化,参考曹娥江鱼类群落组成结构^[19]并结合文献^[13,22],选择种类组成与丰度、营养结构、耐受性、繁殖共位群、鱼类数量与健康状况 5 个属性的 23 个候选指标构建 F-IBI 评价体系(表 1)。

1.4.3 候选指标分布范围检验

用 Excel 2016 软件对候选指标进行分布范围检验,对采样点中超过 95% 为零值的候选指标视为不适用于构建 F-IBI,予以删除。

1.4.4 候选指标敏感性分析

用 GraphPad Prism v8.0.2.263 软件绘制候选指标箱形图,分析其在参考点与受损点的分布情况。参照郜星晨等^[22]的方法,比较各候选指标在参照点和受损点的箱体 IQ(interquartile ranges, 25%~75%分位数范围)的重叠情况,分别赋值,保留 IQ 值 ≥ 2 的候选指标进行下一步分析。

1.4.5 候选指标间冗余检验

用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对经敏感性分

析筛选的候选指标进行 Pearson 相关性分析,检验候选指标的冗余。以 $P < 0.05$ 为显著水平,当相关系数 $|r| > 0.9$ 时,代表 2 个候选指标间生物信息重叠度高,按候选指标的重要性大小删除次要候选指标^[23]。候选指标经冗余检验后最终获得构建曹娥江流域 F-IBI 体系的指标。

1.5 F-IBI 指标的计算及评价标准

选用 1、3、5 赋值法对曹娥江流域鱼类生物完整性进行评分计算^[13]。将所有指标的分值累加,确定 F-IBI 分值。采用 MOYLE 等^[24]的 F-IBI 总分计算方法计算各采样点 F-IBI 总分(F-IBI 总分=各指标总分/指标数量 $\times 12$),并参照 KARR 等^[25]的方法将曹娥江流域水生态系统的健康状况分为 6 个评价等级,即极好(58~60)、好(48~52)、一般(40~44)、差(28~34)、极差(12~22)和无鱼(0)。

表 1 F-IBI 评价体系候选指标及其对干扰的响应

Table 1 Candidate indices of F-IBI and their responses to disturbance

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	D
	Shannon-Wiener 多样性指数	M2	D
	鲤形目鱼类种类数	M3	I
	鲈形目鱼类种类数	M4	D
	鲤科鱼类种类数	M5	I
	鳅科鱼类种类数	M6	D
	虾虎鱼科鱼类种类数	M7	D
	中上层鱼类物种数占比	M8	I
	中下层鱼类物种数占比	M9	D
	底层鱼类物种数占比	M10	D
营养结构	杂食性鱼类个体数占比	M11	I
	无脊椎动物食性鱼类个体数占比	M12	D
	植食性鱼类个体数占比	M13	I
	肉食性鱼类个体数占比	M14	D
环境耐受性	敏感性鱼类个体数占比	M15	D
	耐受性鱼类个体数占比	M16	I
繁殖共位群	产漂流性卵鱼类物种数占比	M17	D
	产黏性卵鱼类物种数占比	M18	I
	借助贝类产卵鱼类物种数占比	M19	D
	筑巢护卵行为鱼类物种数占比	M20	D
鱼类数量与健康状况	单位努力捕捞量	M21	D
	畸形、患病鱼类个体数占比	M22	I
	外来鱼类个体数占比	M23	I

D 为下降, I 为上升。

2 结果与分析

2.1 鱼类群落组成及生活习性特征

此次调查在曹娥江 9 个采样点共采集到鱼类标本 17 116 尾,分属于 12 目 25 科 69 属 107 种。其

中,鲤形目种 2 科 40 属 65 种,占总种类数的 60.75%;其次是鲈形目 11 科 15 属 20 种,占总种类数的 18.69%;鲇形目 3 科 5 属 11 种,占总种类数的 10.28%;鲱形目和鲈形目各 1 科 1 属 2 种,各占总种类数的 1.87%;仙女鱼目、鲮形目、合鳃目、鲟形目、鳗鲡目、颌针鱼目和蝶形目各 1 科 1 属 1 种,各占总种类数的 0.93%。

2.2 F-IBI 参考指标分析及筛选

各采样点 F-IBI 参数指标的调查分析结果见表 2。所有 23 个 F-IBI 候选指标都通过了分布范围的

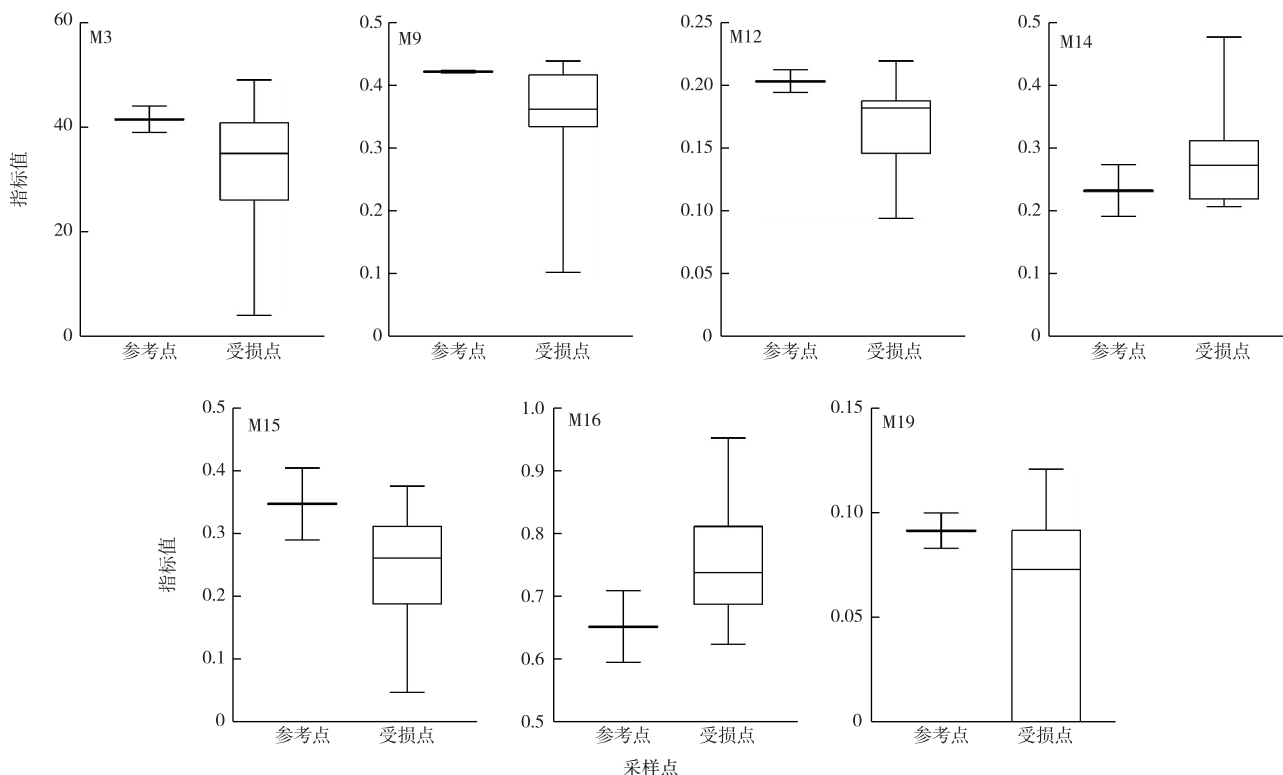
筛选。候选指标的敏感性分析发现,鲤形目鱼类种类数(M3)、中下层鱼类物种数占比(M9)、无脊椎动物食性鱼类个体数占比(M12)、肉食性鱼类个体数占比(M14)、敏感性鱼类个体数占比(M15)、耐受性鱼类个体数占比(M16)、借助贝类产卵鱼类物种数占比(M19)7 个候选指标的 IQ 值 ≥ 2(图 2)。对上述 7 个候选指标进行 Pearson 相关性分析,结果发现,M12 与 M14、M15 和 M16 呈显著相关,且 |r| > 0.9。

表 2 曹娥江各采样点 F-IBI 参数指标的调查分析结果

Table 2 The investigate results of F-IBI indices in sampling points of Cao'e River

采样点	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23
滨海	21	3.349	4	6	4	0	1	0.286	0.333	0.381	0.381	0.095	0.048	0.476	0.048	0.952	0.722	0.278	0.000	0.000	560	0.001	0.000
三界	69	4.298	49	6	47	2	3	0.304	0.362	0.333	0.435	0.188	0.130	0.246	0.261	0.739	0.303	0.455	0.121	0.121	1030	0.002	0.001
长诏	48	4.390	36	3	33	3	3	0.292	0.417	0.292	0.458	0.188	0.146	0.208	0.313	0.688	0.267	0.533	0.067	0.133	395	0.000	0.000
甘霖	32	3.855	26	3	22	4	2	0.219	0.438	0.344	0.406	0.219	0.156	0.219	0.375	0.625	0.310	0.655	0.000	0.034	495	0.000	0.000
镜岭	52	4.472	39	7	34	5	4	0.192	0.423	0.385	0.462	0.212	0.135	0.192	0.404	0.596	0.250	0.583	0.083	0.083	293	0.001	0.000
仙岩	48	3.829	35	6	34	1	2	0.333	0.354	0.313	0.417	0.146	0.125	0.313	0.188	0.813	0.283	0.522	0.087	0.109	1580	0.003	0.003
黄泽	44	4.524	30	6	27	3	3	0.250	0.364	0.386	0.409	0.182	0.114	0.273	0.295	0.705	0.195	0.585	0.073	0.146	765	0.001	0.000
沥海	68	4.258	41	13	38	3	5	0.279	0.103	0.382	0.471	0.162	0.088	0.279	0.206	0.794	0.523	0.431	0.092	0.138	2130	0.004	0.001
上浦	62	5.057	44	5	42	2	2	0.306	0.419	0.274	0.403	0.194	0.129	0.274	0.290	0.710	0.317	0.450	0.100	0.133	1420	0.003	0.000

各指标代码含义见表 1。



各指标代码含义见表 1; 箱形图中横线从上到下依次表示上边缘、上四分位数、中位数、下四分位数、下边缘。

图 2 7 个候选指标在参考点与受损点的箱形图

Fig. 2 Box plots of 7 candidate indices between reference sites and observed sites

M15 相比于 M12、M14 和 M16 更能从整体上反映曹娥江鱼类受到水质或生境退化等环境因子影响的变化特征。剔除 M12、M14 和 M16, 最终获得用于计算曹娥江流域 F-IBI 的 4 个核心指标, 即 M3、M9、M15 和 M19, 分属于种类组成与丰度、营养结构、环境耐受性、繁殖共位群 4 个属性。

2.3 曹娥江流域 F-IBI 健康评价

曹娥江流域各采样点 F-IBI 核心指标的赋分标准

表 3 曹娥江流域 F-IBI 核心指标赋分标准

Table 3 Scoring standard of F-IBI core indices in Cao'e River basin

核心指标	赋分标准		
	5	3	1
鲤形目鱼类种类数(M3)	<32	32~38	>38
中下层鱼类物种数占比(M9)	>0.326	0.215~0.326	<0.215
敏感性鱼类个体数占比(M15)	>0.332	0.260~0.332	<0.260
借助贝类产卵鱼类物种数占比(M19)	>0.081	0.040~0.081	<0.040

表 4 曹娥江流域各采样点 IBI 总分及健康评价结果

Table 4 IBI scores and health status of the sampling points in Cao'e River

流域	采样点	F-IBI 总分	健康状况等级
干流	滨海	36	差~一般
	沥海	24	极差~差
	上浦	42	一般
	三界	42	一般
	仙岩	42	一般
支流	镜岭	48	好
	甘霖	48	好
	黄泽	48	好
	长诏	42	一般

3 讨论

3.1 曹娥江鱼类特征

此次调查一共采集到鱼类 107 种, 与历史数据^[19]相比有很大差异, 与何海生等^[26]采集的鱼类种数相比, 采集种类更多, 其原因可能是此次调查设置的采样点更多且时间幅度更长, 但两者均以鲤科种类为优势鱼类且鱼类体型小型化现象突出, 这与钱塘江等流域的渔业资源的状况^[27]相似。鲤科鱼类为优势鱼类符合我国淡水鱼类资源的特点, 鱼类体型小型化现象突出可能与过度捕捞、水利工程兴建、水质污染等因素有关。与钱塘江流域^[28-30]相比, 此次调查在曹娥江流域未采集到太湖新银鱼、松江鲈、鳊、矛尾复虾虎鱼等江海洄游性鱼类及河口鱼类, 表明水利工程造成的鱼类生境条件改变可能是导致鱼类资源衰退的重要原因之一^[31]。

准见表 3, 各采样点 F-IBI 总分及健康状况等级见表 4。结果表明, 曹娥江流域干流采样点的健康状况等级为“极差~差”到“一般”水平, 支流健康状况等级为“一般”到“好”水平, 干流健康状况低于支流, 显示曹娥江干流中鱼类相对于支流中鱼类受到更多的外界干扰和生存压力。此外, 在支流中, 长诏的健康状况等级低于甘霖、黄泽和镜岭。

3.2 F-IBI 评价体系及其参考点的选择

鱼类作为水生食物链的顶层或近顶层生物, 其生命周期较长、活动能力强、分布广泛、形态特征明显, 对水生态环境具有长期性、系统性和稳定性的指示作用, 因此鱼类生物完整性指数评价已成为水生态环境健康评价的主要方法之一。鱼类种类数等鱼类状况指数作为长江流域水生生物完整性指数评价必选指标, 被列入农业农村部制订的《长江流域水生生物完整性指数评价办法(试行)》(农长渔发[2021]3号), 可应用于我国大多数河流的健康评价。

参考点的选取对 F-IBI 评价体系的构建起着关键性作用。有鱼类历史调查数据的评价水域和无人干扰的原始区域是理想的参考点^[22]。研究表明, 使用不同的标准化方法(历史数据法、水质法、栖境法、综合法)筛选出不同的参考点, 会导致河流健康状况评价结果的差异^[16, 22]。然而, 该研究中曹娥江流域干流和支流均长期受到不同程度的人为活动干扰, 同时也缺少捕捞量等量化的鱼类历史调查数据。因此, 选择干流中栖息地生境和水质条件较好的上浦和支流中无大型水利设施、栖息地生境相对较好的镜岭作为参考点。曹娥江 F-IBI 评价结果也显示干流中上浦的健康水平等于三界、仙岩, 优于滨海、沥海; 支流中镜岭的健康水平等于甘霖、黄泽, 优于长诏。然而, 由于此次研究中采样点的限制, 选择的参考点数量较少, 在后续的研究中需要增加采样点, 对干流和支流分别建立评价体系, 以提高评价结果的可靠性。

3.3 评价结果与实际情况的符合程度

评价结果表明,曹娥江流域干流采样点的健康状况处于“极差~差”到“一般”水平,总体低于支流采样点“一般”到“好”的健康水平。这一评价结果与目前曹娥江干流和支流受到的不同程度干扰相一致。曹娥江干流先后建有上浦闸、曹娥江大坝、清风船闸等多处水利工程,使得曹娥江流域的连通性下降,河流向湖泊型转变,从而导致干流采样点鲤形目鱼类种类数(M3)、鲤科鱼类种类数(M5)和中上层鱼类物种数占比(M8)等指数整体大于支流采样点(表2),这一研究结果与李雪健等^[32]的研究结果相一致。同时,在支流采样点中,位于新昌江上游的长诏水库的健康水平低于未建有大型水利设施的长乐江甘霖、澄潭江镜岭和在建水库的黄泽江黄泽的健康水平。这一结果进一步说明了水利设施对水生态系统的影响。

此外,干流采样点敏感性鱼类个体数占比(M15)整体小于支流采样点,而干流采样点耐受性鱼类个体数占比(M16)整体大于支流采样点,也反映出干流比支流遭受更多的水质污染、过渡捕捞和航运等人为干扰压力,水域生态环境处于较差的状态。不过仍需注意的是,支流健康状况等级较高并不代表其生态系统绝对稳定。在前期研究中,镜岭群体的麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)和刺鳅(*Mastacembelus aculeatus*)3种鱼类的单倍型多样性指数和核苷酸多样性指数水平均低于中游仙岩群体的相应指数水平^[18],提示曹娥江支流水生态系统健康的脆弱性。因此,建议在曹娥江流域生态环境大力治理和修复的工作中进一步加强休渔期的渔业资源保护,修复鱼类的天然栖息地和产卵场生境,利用水利工程合理调节生态流量提高各江段的水体流动性,进而加快曹娥江流域水生态系统的健康修复。

参考文献:

- [1] 刘焱序,彭建,汪安,等.生态系统健康研究进展[J].生态学报,2015,35(18):5920-5930. [LIU Yan-xu, PENG Jian, WANG An, et al. New Research Progress and Trends in Ecosystem Health [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): 5920-5930.]
- [2] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and Testing of an Index of Stream Condition for Waterway Management in Australia [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.
- [3] KAISER J. Getting a Handle on Ecosystem Health [J]. Science, 1997, 276(5314): 887.
- [4] SOLHEIM A L, REKOLAINEN S, MOE S J, et al. Ecological Threshold Responses in European Lakes and Their Applicability for the Water Framework Directive (WFD) Implementation: Synthesis of Lakes Results from the REBECCA Project [J]. Aquatic Ecology, 2008, 42(2): 317-334.
- [5] 魏春风. 松花江干流河流健康评价研究 [D]. 哈尔滨: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2018. [WEI Chun-feng. Study on the Health Evaluation of the Main Stream of Songhua River [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [6] 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 Ming-xing, HUANG Liang-liang, MO Yuan-min, 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.]
- [7] KARR J R. Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [8] SIMON T P. The Use of Biological Criteria as a Tool for Water Resource Management [J]. Environmental Science & Policy, 2000, 3: 43-49.
- [9] WANG Y K, STEVENSON R J, METZMEIER L. Development and Evaluation of a Diatom-Based Index of Biotic Integrity for the Interior Plateau Ecoregion, USA [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(4): 990-1008.
- [10] O'CONNELL T J, JACKSON L E, BROOKS R P. A Bird Community Index of Biotic Integrity for the Mid-Atlantic Highlands [M] // SANDHU S, JACKSON L, AUSTIN K, et al. Monitoring Ecological Condition at Regional Scales. Dordrecht, UK: Springer, 1998: 145-156.
- [11] CROFT M V, CHOW-FRASER P. Use and Development of the Wetland Macrophyte Index to Detect Water Quality Impairment in Fish Habitat of Great Lakes Coastal Marshes [J]. Journal of Great Lakes Research, 2007, 33: 172-197.
- [12] 张亚, 余宏昌, 毕宝帅, 等. 基于鱼类生物完整性指数的上海苏州河水生态系统健康评价 [J]. 中国环境监测, 2021, 37(6): 164-177. [ZHANG Ya, YU Hong-chang, BI Bao-shuai, et al. Ecological Health Assessment of Suzhou River in Shanghai Based on Fish Index of Biotic Integrity [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(6): 164-177.]
- [13] 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 Xue-jiao, NIU Cui-juan, GAO Xin, 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.]
- [14] 林鹏程, 刘飞, 高欣, 等. 鱼类生物完整性评价体系的构建及其在赤水河的应用 [J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 81-86, 92. [LIN Peng-cheng, LIU Fei, GAO Xin, et al. Development of a Fish Index of Biotic Integrity (F-IBI) and Its Application to the Chishui River [J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(6): 81-86, 92.]
- [15] 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.
- [16] 边坤, 张建禄, 苟妮娜, 等. 应用鱼类生物完整性指数评价秦岭黑河流域健康状况 [J]. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 23-29. [BIAN Kun, ZHANG Jian-lu, GOU Ni-na, et al. Ecological Health

- Assessment of Heihe River, Qingling, Using the Fish-based Index of Biotic Integrity [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42 (3): 23-29.]
- [17] 陈超, 余理睿, 冯志政, 等. 曹娥江流域鱼类资源调查[J]. *水生生态学杂志*, 2020, 41 (6): 113-121. [CHEN Chao, YU Li-rui, FENG Zhi-zheng, *et al.* Current Status of Fish Resources in Cao'e River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41 (6): 113-121.]
- [18] 任岗, 宣鑫玲, 谢亚婷, 等. 中国东部沿海中小型河流鱼类的整体遗传多样性评价: 以曹娥江为例[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(1): 67-74. [REN Gang, XUAN Xin-ling, XIE Ya-ting, *et al.* Evaluation of General Genetic Diversity of Fishes from Middle and Small Rivers on the East China; Taking Cao'e River as an Example [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(1): 67-74.]
- [19] 浙江动物志编辑委员会. 浙江动物志: 淡水鱼类[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991: 22-229.
- [20] 绍兴市水政渔业执法局. 绍兴鱼类图鉴[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2018: 1-109.
- [21] 成庆泰, 郑葆珊. 中国鱼类系统检索[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 268-393. [CHENG Qing-tai, ZHENG Bao-shan. *Systematic Retrieval of Fish in China* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 268-393.]
- [22] 邵星辰, 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 Xing-chen, ZHANG Qun, HAN Bo-ping, *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.]
- [23] KARR J R, FAUSCH K D, ANGERMEIER P L, *et al.* Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and Its Rationale [M]. Champaign, USA: Illinois Natural History Survey Specific Publication, 1986, 5: 1-28.
- [24] MOYLE P B, RANDALL P J. Evaluating the Biotic Integrity of Watersheds in the Sierra Nevada, California[J]. *Conservation Biology*, 1998, 12(6): 1318-1326.
- [25] KARR J, CHU E W. Sustaining Living Rivers[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 1-14.
- [26] 何海生, 刘金殿, 张爱菊, 等. 曹娥江不同江段鱼类的物种多样性和优势度[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(2): 359-364, 389. [HE Hai-sheng, LIU Jin-dian, ZHANG Ai-ju, *et al.* Species Diversity and Dominance of Fishes in Different Sections of the Cao'e River [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(2): 359-364, 389.]
- [27] 储忝江, 冯晓宇. 钱塘江流域鱼类资源研究现状及保护对策[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(10): 2122-2124, 2192. [CHU Tian-jiang, FENG Xiao-yu. Research Progress and Protection Measures of Fish Resources in the Qiantang River Basin [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(10): 2122-2124, 2192.]
- [28] 郝雅宾, 刘金殿, 张爱菊, 等. 钱塘江下游江段鱼类资源现状[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(10): 1620-1629. [HAO Ya-bin, LIU Jin-dian, ZHANG Ai-ju, *et al.* Current Status of Fishery Resources in Downstream Section of Qiantang River [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(10): 1620-1629.]
- [29] 郝雅宾, 刘金殿, 郭爱环, 等. 钱塘江富阳段鱼类资源现状[J]. *淡水渔业*, 2017, 47(3): 45-51. [HAO Ya-bin, LIU Jin-dian, GUO Ai-huan, *et al.* Current Status of Fishery Resources in Fuyang Section of Qiantang River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, 47(3): 45-51.]
- [30] 刘鹏飞, 张婉平, 徐东坡, 等. 钱塘江西湖段鱼类群落结构特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(3): 525-535. [LIU Peng-fei, ZHANG Wan-ping, XU Dong-po, *et al.* Current Situation of Fish Community Structure in West Lake Section of Qiantang River [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(3): 525-535.]
- [31] 杨峰, 姚维志, 邓华堂, 等. 三峡库区蓄水后大宁河鱼类资源现状研究[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(4): 51-52, 56. [YANG Feng, YAO Wei-zhi, DENG Hua-tang, *et al.* The Current Situation of Fish Resources in the Daning River after the Impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(4): 51-52, 56.]
- [32] 李雪健, 贾佩尧, 牛诚祯, 等. 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价[J]. *生物多样性*, 2020, 28(4): 422-434. [LI Xue-jian, JIA Pei-yao, NIU Cheng-yi, *et al.* Species Diversity of Freshwater Fish and Assessment on Watershed Health in the Irtysh River and Ulungur River Basins in Xinjiang, China [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(4): 422-434.]

作者简介: 蒋孝燕(1987—), 女, 浙江诸暨人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为实验生物技术。E-mail: 395540571@qq.com

(责任编辑: 陈 昕)

附录

附表 I 曹娥江渔获鱼类的分类地位及其生活习性特征

Appendix I Fish species collected and their living habits in Cao'e River

http://www.ere.ac.cn/attached/file/20230612/20230612091902_104.pdf