



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.01.001

徐宗学, 李艳利. 河流健康评价指标体系构建及其应用——以浑太河流域为例[J]. 2016, 14(1): 01-09.

XU Zong xue, LI Yarr li. Establishment and application of assessment index system for river health: A case study in the Huntai River basin[J]. 2016, 14(1): 01-09. (in Chinese)

# 河流健康评价指标体系构建及其应用

——以浑太河流域为例

徐宗学<sup>1</sup>, 李艳利<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 依据土地利用指数(land use index)、栖息地质量指数(QHEI)和水质参数构建一个综合指数(ILWHQ),用于浑太河流域参照点的定量筛选。结果表明,太子河流域支流小汤河上游、太子河南支的5个采样点为参照点(ILWHQ  $\leq 2$ ; T13, T15, T16, T17, T18)。根据2012年浑太河流域68个采样点的鱼类数据,对35个候选参数进行主成分分析、判别能力、逐步回归分析和Pearson相关性分析,确定了鲤科鱼类种类数(F5)、底栖鱼类个体比例(F12)、杂食性鱼类比例(F14)、耐受性鱼类个体比例(F22)可以作为基本要素构建F-IBI指标体系,即采用比值法统一各生物参数量纲,将各个生物参数分值相加得到F-IBI指数值。利用构建的F-IBI指数开展浑太河流域河流健康状况评价。发现太子河流域41个点位中,5个为健康,11个为亚健康,8个为一般,9个为较差,8个为极差。浑河的23个点位中,5个为亚健康,6个点位为一般,6个为较差,6个为极差。太子河流域较差和极差的点位共占41.5%,浑河流域较差和极差点位共占52.2%,说明相比于太子河流域,浑河流域的健康状况较差。

**关键词:** 鱼类完整性指数; 河流健康评价; 土地利用指数; 栖息地质量指数; 浑太河

**中图分类号:** X82    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0001-09

## Establishment and application of assessment index system for river health:

### A case study in the Huntai River basin

XU Zong xue<sup>1</sup>, LI Yarr li<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** An index of land use, water and habitat quality (ILWHQ) was proposed and applied to evaluate the environmental quality in the study area. The least deteriorated sites (ILWHQ  $\leq 2$ ; T13, T15, T16, T17 and T18) were selected as the reference sites. Five of the initial 35 candidate metrics were selected using a stepwise procedure (principal component analysis, the analysis of the range of index value distribution, stepwise regression analysis, Pearson correlation) to evaluate metric stability, responsiveness to environmental variables and redundancy. The selected metrics included the number of Cyprinidae species (F5), the proportion of individuals as benthic species (F12), the proportion of omnivore species (F14), the proportion of individuals as tolerant species (F22), and the proportion of demersal eggs species (F23). Ration scoring method was employed to score the five metrics, and the ecosystem health of the Huntai River basin defined into five classes. The results showed that five sites were

收稿日期: 2015-12-11    修回日期: 2016-01-05    网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1701.023.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41401029); 河南理工大学博士基金(B204-071)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41401029); Doctor Foundation in Henan Polytechnic University(B204-071)

作者简介: 徐宗学(1962-), 男, 山东淄博人, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源及水生态研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

in excellent condition, eleven were in good condition, eight in normal condition, nine in poor condition, and eight in very poor condition in the Taizi River basin. There was no site in excellent condition, five in good condition, six in normal condition, six in poor condition, and six in very poor condition in the Hun River basin. The sites in poor and very poor conditions accounted for 52.2% of the total sites in the Hun River basin, and 41.5% of the total sites in the Taizi River basin. These findings indicated that ecosystem health was worse in the Hun River than that in the Taizi River.

**Key words:** F-IBI; river health assessment; land use index; QHEI; Hantai River

河流目前已成为受人类活动影响最为严重的生态系统之一<sup>[1]</sup>。河流生态系统的健康评价及水生生物对环境变化的响应已经受到世界各国科学家和流域管理者的广泛关注<sup>[2-8]</sup>。对河流的监测也从理化参数转向生物指标,并将其作为生态系统退化的预警信号。生物完整性指数( IBI) 自 Karr<sup>[9]</sup> 1981 年提出以来, 已经被广泛用于生态系统的健康评价。鱼类处于食物链的顶端, 可以反映流域不同尺度的环境变化, 且易于采集和鉴定, 因此, 其群落结构指标已经被广泛用于生态系统健康评价中<sup>[10-15]</sup>。

事实上, IBI 指数最初是基于美国中西部地区小河流的鱼类资料建立的, 它包括个体、种群、群落和生态系统等不同层次的 12 个指标, 分属于种类组成与丰度、营养结构、个体健康三个类别。每个指标均可反映某些人类活动对鱼类群落结构的影响。在之后的研究中, 相关学者根据流域特征差异, 对该指数做了不同程度的改进。例如, Oberdorff 和 Hughes (1992)<sup>[16]</sup> 改善了 IBI 指数并将其应用于法国塞纳河干流及其主要支流, 充分说明了鱼类群落结构指标可以被广泛应用。Casatti 等 (2009)<sup>[17]</sup> 基于鱼类的生物完整性指数对巴拉那流域上游严重毁林区的低地河流进行健康评价, 研究结果表明, 91% 的研究河流健康等级属于差和非常差。目前, 基于鱼类完整性指数的 IBI 方法已被广泛应用于美国<sup>[18]</sup>、欧洲<sup>[19]</sup>、巴西<sup>[20]</sup>、新泽西<sup>[21]</sup> 等国。国内相关应用研究目前主要集中在长江<sup>[22]</sup>、辽河<sup>[14]</sup> 等流域。

参照点是构建生物完整性指数的基础, 对河流健康状况的评价是与研究区域中的参考点位比较而获得的, 因此, 参考条件的选择在健康评价中非常重要。理想条件下, 参照点指未受到任何人类活动干扰的采样点。然而, 几乎找不到完全不受人类活动干扰的河流, 参照点的选择就成为河流健康评价的难点。以往研究在筛选参照点时, 主要依据专家经验判断和采样点受干扰程度的大小, 因而无法消除主观误差, 使 IBI 方法的推广和应用受到限制。本研究以浑太河流域为例, 通过四个步骤构建鱼类完整性指数 (F-IBI), 对浑太河河流健康状况进行评

价: (1) 根据 ILWHQ (Index of land use and water and habitat quality) 指数筛选参照点; (2) 选择对人类干扰反应敏感的核心参数; (3) 对核心参数积分构建 F-IBI 指数; (4) 应用 F-IBI 指数进行浑太河流域河流健康评价。

## 1 研究区域及方法

### 1.1 研究区域

浑太河流域位于中国东北, 是辽河的主要支流, 由浑河和太子河 2 条河流组成, 流域面积为  $2.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中, 浑河发源于辽宁省清源县滚马岭西南麓, 全长 451 km, 流域面积  $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 太子河发源于抚顺新宾县红石砬子, 河长 413 km, 流域面积  $1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 年平均径流量 37.7 亿  $\text{m}^3$ 。浑河和太子河在山岔河附近交汇, 形成大辽河 (大辽河长 96 km), 最后在辽宁营口市入渤海。

浑太河流域山地面积占 69%, 丘陵占 6.1%, 平原占 24.9%。流域内多年平均地表水资源量为 24 亿  $\text{m}^3$ 。浑河流域大伙房水库以上为低山丘陵区, 林地较多, 植被保护较好, 覆盖率达到 50% 以上; 中下游为平原地区, 土地开发程度高, 水田和旱地较多; 流域林地、旱地、水田、城镇建设用地分别占流域面积的 46.26%、22.54%、10.84% 和 15.45%。太子河观音阁水库以上为上游地区, 多为山地森林多水区, 植被保护较好, 占全部流域面积的 69%; 观音阁水库至菱窝水库段为中游地区, 低山丘陵为主, 占全部流域面积的 6.1%; 菱窝水库以下为下游地区, 处于平原农作物少水区, 占全部流域面积的 24.9%<sup>[23]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 鱼类采集

2012 年 5 月 - 6 月, 根据浑太河流域不同用地类型, 在浑太河干、支流共选择了 68 个样点进行鱼类采集 (见图 1), 实际仅 65 个点位捕获到了鱼。

采样方法: 对于可涉水水域, 采用电鱼器采集, 对于不可涉水水域, 采用挂网法采集, 同时辅以电鱼法以保证样品的代表性<sup>[15]</sup>。

采集区域: 在采样点河流上下游 100 m 范围内, 对不同类型生境(深潭、浅滩和急流)自下游往上游进行采集。

采集时间: 为防止由于采样人员干扰降低鱼类生物采样的代表性, 采样时间设定为 30 min。

样品记录与鉴别: 捕获的体长大于 20 mm 的鱼鉴别物种(或亚种), 计数、称重。对捕获 30 条以上的广布种进行生物学特征(例如体长)的记录。大部分鱼类标本现场进行种类鉴定和计数后放归河流中, 对于那些不能立刻准确鉴定的样品, 用 10% 福尔马林溶液的纱布包裹样本, 置于密闭样品保存盒中, 带回实验室进一步鉴定。依据东北地区的淡水鱼类鉴别方法进行鉴定。

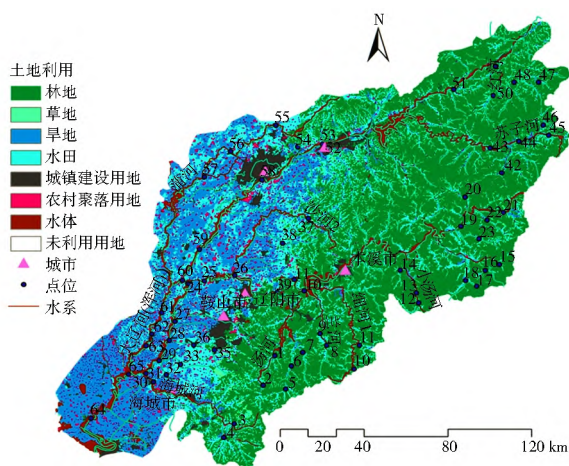


图 1 浑太河流域采样点和土地利用类型

Fig. 1 Sampling sites and land use types in the Huntai River basin

### 1.2.2 环境数据的获取

水环境理化因子采用 YSI 85 水质分析仪现场测定, 包括电导率( EC)、pH、溶解氧( DO)、总溶解颗粒物( TDS)。其他理化因子包括硬度( hardness)、高锰酸盐指数(  $COD_{Mn}$ )、总氮( TN)、硝酸盐(  $NO_3^- - N$ )、氨氮(  $NH_4^+ - N$ )、总磷( TP)、磷酸盐(  $PO_4^{3-}$ )、悬浮物固体( SS) 等, 根据《地表水环境质量标准》( GB 3838- 2002) 进行测定。

每个采样点的栖息地质量通过一个定量的栖息地评估指数( QHEI) 来完成。选取了 10 个评价指标(底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型), 每项 20 分, 总分 200 分。所有点位的栖息地评分均由同一位调查者完成, 以消除由于人为误差导致的评价结果不一致。

本研究中的土地利用数据来源于“国家科学数据共享工程-地球系统科学共享网”2005 年数据, 土地利用类型划分为林地、草地、水田、旱地、城镇建设

用地、农村聚落地、水体、未利用地 8 个一级类型(图 1)。在 ArcGIS 环境中, 基于 DEM 和水系分布图, 以各监测点为流域出口进行子流域的划分。将流域土地利用数据与子流域边界进行叠加分析, 获得子流域尺度土地利用数据。

### 1.2.3 参照点的选择

本文利用 ILWHQ 指数进行参照点筛选。ILWHQ 指数值越低, 代表水环境质量越好, 也说明人类干扰越小, 因此, 可以作为参照点。ILWHQ 指数是通过整合土地利用、水质和栖息地质量来构建的。

土地利用指数用以反映土地利用干扰的强度, 可以代表对河流生物组成的影响<sup>[24]</sup>。相比于林地和草地, 旱地和水田对生物的影响是它们的 2 倍, 城镇用地和农村居民用地是它们的 4 倍。因此, 土地利用指数的计算公式被定义为

$$\text{土地利用指数} = (\text{草地} + \text{林地})\% + 2 \times (\text{旱地} + \text{水田})\% + 4 \times (\text{城镇用地} + \text{农村居民点})\% \quad (1)$$

多种理化参数间可能存在高度相关性。为了避免冗余信息, 选取影响浑太河流域水环境质量的主要影响因子进行主成分分析(PCA)和相关性分析。首先, 主成分分析中特征参数大于等于 1 的水环境因子被保留, 然后, 对于相关分析中显著相关的 2 个因子(  $\gamma > 0.5, p < 0.01$ ) 仅保留 1 个, 以最终保留的水质因子作为主要水环境因子。采用单因子水质指数法<sup>[25]</sup> 计算每个采样点的水环境因子、土地利用指数和栖息地指数计分值(表 1)。

表 1 浑太河流域土地利用指数、水质参数和栖息地质量指数的五类标准

Tab. 1 Scoring criteria of the land use index, physiochemical variables (EC and SS) and QHEI for five classes in the Huntai River basin

主要环境参数	1	2	3	4	5
土地利用指数	1.06	1.21	1.41	1.96	2.69
EC/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	77.92	225.90	396.45	600.75	1205.00
SS/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.002	0.004	0.007	0.018	0.165
QHEI	184.50	141.75	120.00	100.50	62.60

( EC)、( SS) 和土地利用指数的单因子指数值计算公式如下:

$$ILWHQ_i = \begin{cases} 1 & C_i \leq S_{i,1} \\ j + \frac{C_i - S_{i,j-1}}{C_{i,j} - S_{i,j-1}} & S_{i,j-1} \leq C_i < S_{i,j} \\ 6 + \frac{C_i - S_{i,5}}{S_{i,5}} & C_i \geq S_{i,5} \end{cases} \quad (2)$$

栖息地质量指数( QHEI) 的单因子指数计算公式如下:

$$ILWHQ_i = \begin{cases} 1 & C_i \leq S_{i,1} \\ j + \frac{C_i - S_{i,j-1}}{S_{i,j} - S_{i,j-1}} & S_{i,j} \leq C_i \leq S_{i,j-1} \quad j = 2, 3, 4, 5 \\ 6 + \frac{C_i - S_{i,5}}{S_{i,5}} & C_i \geq S_{i,5} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $C_i$  代表  $i$  项指标的实测浓度,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $S_{i,j}$  代表指标  $i$  在第  $j$  类的标准值。

$ILWHQ$  的计算公式如下:

$$ILWHQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ILMHQ_i \quad (4)$$

根据  $ILWHQ$  指数, 河流环境状况被划分为三个等级<sup>[25]</sup>: 最小程度退化 ( $ILWHQ \leq 2$ ); 中等程度退化 ( $2 < ILWHQ \leq 4$ ); 高度退化 ( $ILWHQ > 4$ )。  $ILWHQ \leq 2$  的点位被认定为参照点。

#### 1.2.4 数据分析

根据不同生物指标类型, 共选择了 5 大类 35 个候选参数进行分析。其中若候选参数在超过 90% 的点位中位数值均为 0 的话, 说明该参数所代表的鱼类类群在流域中分布比较固定, 则不选择该参数。然后比较观察点位与参照点位在 25% ~ 75% 分位区间内的重叠情况, 采用箱体图来进行判别, 选择参照点位群间的差异达到显著性水平的参数作为评价指标, 同时采用逐步回归分析选定与不同环境因子关系显著的参数。最后选定对同一环境因子响应显著的参数进行相关性分析, 对于显著相关的因子

( $\gamma > 0.5, p < 0.01$ ) 仅保留 1 个。经过上述 3 个步骤后, 最终确定 F-IBI 评价指标的核心参数。

采用比值法计算 F-IBI 指数值。其中, 核心参数使用第 5 或第 95 分位数值作为最好的预期值, F-IBI 指数值为核心参数分值的平均值。

所有参照点位 IBI 值的 25% 分位数定义为健康的标准, 若 IBI 值大于健康标准值, 表示该样点受到干扰很小, 是健康的; 将小于参照点 25% 分位数值进行 4 等分, 确定相应亚健康、一般、较差、极差 4 个等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 参照点的选择

通过主成分分析和相关分析, 最终筛选 (EC)、(SS) 作为主要水环境理化因子。

采用  $ILWHQ$  指数值评价环境质量 (见表 2)。仅仅选定 5 个采样点 (T13, T15, T16, T17 和 T18) 作为参照点, 这些点位被视为最小程度退化 ( $ILWHQ \leq 2$ ), 位于太子河流域的支流小汤河上游和太子河南支。27 个中等程度退化的点位 ( $2 < ILWHQ \leq 4$ ), 22 个退化程度高的点位 ( $ILWHQ > 4$ ), 这 22 个点位被视为受损点位。其中, 太子河流域中, 17 个点位呈中等程度退化, 13 个受损点位。浑河流域中, 10 个点位呈中等程度退化, 7 个受损点位。整体而言, 浑河流域环境质量较太子河流域差。

表 2 土地利用指数、水质参数和栖息地质量指数以及健康评价结果

Tab. 2 Scores of the index of land use index, water and habitat quality (ILWHQ) and ecosystem health in the Huntai River basin

Site	EC	SS	QHEI	Land use index	ILWHQ	disturbance	F-IBI	Ecosystem health
T1	3.89	2.23	2.99	3.32	3.11	M	42.04	较差
T2	3.70	3.00	3.95	3.05	3.43	M	57.39	亚健康
T3	3.86	3.53	4.51	3.37	3.82	M	42.13	较差
T4	4.04	3.40	4.00	4.03	3.87	M	43.71	较差
T5	4.28	2.23	4.67	3.24	3.60	M	48.61	一般
T6	3.68	2.48	3.95	2.93	3.26	M	50.87	一般
T7	3.72	2.10	2.60	2.60	2.75	M	47.71	一般
T8	3.66	2.74	4.82	2.88	3.53	M	45.15	较差
T9	3.81	1.00	3.72	3.61	3.04	M	53.33	亚健康
T10	3.36	2.23	3.72	3.31	3.15	M	42.74	较差
T11	3.66	1.00	4.67	3.31	3.16	M	52.59	一般
T12	2.34	3.13	2.13	2.26	2.46	M	69.51	亚健康
T13	2.17	3.07	1.00	1.00	1.81	R	79.38	健康
T14	2.63	3.40	2.90	2.26	2.80	M	72.62	亚健康
T15	1.00	2.87	1.00	1.00	1.47	R	92.24	健康
T16	1.00	2.35	2.20	2.22	1.94	R	88.23	健康
T17	2.04	2.74	2.20	1.00	1.99	R	74.49	健康
T18	1.00	1.00	1.00	2.44	1.36	R	74.16	亚健康
T19	2.67	3.80	3.45	2.66	3.14	M	47.73	一般

续表 2

Site	EC	SS	QHEI	Land use index	ILWHQ	disturbance	F IBI	Ecosystem health
T 20	2.43	3.00	3.03	2.02	2.62	M	67.16	亚健康
T 21	3.33	2.23	2.88		2.11	M	51.39	一般
T 22	3.85	3.13	2.29	2.98	3.06	M	79.12	健康
T 23	3.46	2.87	2.41	2.89	2.91	M	73.01	亚健康
T 24	4.37	3.33	4.21	4.60	4.13	H		
T 25	4.26	3.40	5.01	4.63	4.33	H	16.58	极差
T 26	4.08	3.33	3.72	4.99	4.03	H	48.72	一般
T 27	4.27	3.93	4.31	5.19	4.43	H	20.91	极差
T 28	4.38	5.55	4.72	5.41	5.01	H	31.55	极差
T 29	4.65	6.20	3.72	4.47	4.76	H	42.19	较差
T 30	4.74	5.73	5.12	5.10	5.17	H	22.53	极差
T 31	4.65	5.42	3.72	4.85	4.66	H	23.76	极差
T 32	5.44	5.48	5.88	5.81	5.65	H	41.74	较差
T 33	5.21	4.53	4.92	5.40	5.01	H	46.30	亚健康
T 34	4.85	5.20	3.22	4.72	4.50	H	38.39	较差
T 35	6.04	5.16	4.77	4.44	5.10	H	31.65	极差
T 36	5.91	6.96	5.17	5.65	5.92	H	60.83	亚健康
T 39	5.04	10.75	5.01	4.41	6.30	H	49.72	一般
T 40	5.09	2.35	4.51	4.52	4.12	H	27.05	极差
T 41	3.72	4.04	3.08	3.92	3.69	M	31.96	极差
T 42	3.95	3.40	4.51	4.23	4.02	H	72.30	亚健康
T 43	5.14	5.05	3.77	3.43	4.35	H	58.46	亚健康
H 1	2.51	3.27	4.00	2.26	3.01	M	58.11	亚健康
H 2	3.03	3.67	3.40	3.30	3.35	M	53.93	亚健康
H 3	3.02	4.55	2.83	3.42	3.45	M	42.45	较差
H 4	2.29	4.00	2.99	3.19	3.12	M	60.83	亚健康
H 5	2.25	4.71	3.68	3.15	3.45	M	47.58	一般
H 6	2.16	4.35	2.53	2.29	2.83	M	59.13	亚健康
H 7	2.59	5.12	3.40	3.11	3.56	M	49.40	一般
H 8	2.70	4.80	2.53	2.27	3.07	M	47.43	一般
H 9	2.99	3.00	2.85	3.09	2.98	M	53.96	亚健康
H 10	2.91	4.11	5.33	3.27	3.91	M	50.88	一般
H 11	4.18	4.00	5.41	4.87	4.62	H	39.80	较差
H 12	4.42	5.10	5.78	4.14	4.86	H	51.29	一般
H 13	5.02	4.25	3.77	5.74	4.70	H	42.00	较差
H 14	6.05	5.07	5.15	4.76	5.26	H	21.66	极差
H 16	4.09	3.33	4.00	5.24	4.17	H	36.80	极差
H 18	3.82	5.00	4.10	6.21	4.79	H	40.33	较差
H 19	5.26	4.20	5.28	4.88	4.90	H	42.04	较差
H 20	5.11	4.56	4.21	5.04	4.73	H	41.49	较差
H 21	5.05	4.75	5.12	5.00	4.98	H	31.59	极差
H 22	5.02	5.01	5.28	5.05	5.09	H	50.81	一般
H 23	5.08	5.15	5.01	5.45	5.17	H	30.72	极差
H 24	5.02	5.33	4.31	4.88	4.88	H	28.81	极差
H 25	4.78	4.24	4.51	4.22	4.44	H	30.62	极差

注: R 为参照点, M 为中等程度退化, H 为高度退化。

## 2.2 F-IBI 体系的建立

在 35 个鱼类候选参数中, 10 个参数因中间值为零而被消除。其余参数通过箱体图分析后, 共有 16 个参数(F3, F4, F5, F7, F9, F12, F13, F14, F17,

F19, F21, F22, F23, F24, F27, F28) 进入下一步分析。F13 和 F17 因参照点位箱体较宽的四分位距而被消除, F19 和 F21 因受损点位箱体较窄的四分位距而被消除(表 3)。

表 3 回归模型中鱼类参数

Tab.3 The metrics of fish assemblages in the regression models

生物类群	属性归类	参数	参数缩写
鱼类	种类组成 与丰度	鲤形目鱼类种类数	F3
		鲤科鱼类种类数	F5
		中上层鱼类比例	F7
		底栖鱼类比例	F9
		底栖鱼类个体数比例	F12
鱼类	营养结构	杂食性鱼类比例	F14
	耐受性	耐受性鱼类个体比例	F22
繁殖共位群		产沉性卵鱼类比例	F23
		产黏性卵鱼类比例	F24
		产沉性卵鱼类个体数比例	F27
		产黏性卵鱼类个体数比例	F28

表 4 11 个鱼类参数的回归模型相关系数和变异系数

Tab.4 Regression coefficients and partial correlation coefficients for the eleven models used to simulate fish metrics

Predictors	F3	F5	F7	F9	F12	F14	F22	F23	F24	F27	F28
% Forest				0.68	0.74						
% Paddy								-0.38			
% Dry farmland											
% Urban							-0.40				
% Rural			0.74				0.81				
EC											
DO					0.45				0.24		
TN			-0.53								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N					0.54						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N		-0.51									
TP											
Hardness											
COD <sub>Mn</sub>				-0.21							
W temp								0.28		0.34	
pH	-0.31	-0.35			-0.42			-0.38		-0.51	0.27
% Sand											
%(Cobble & boulder)											
%(pebble & gravel)	0.49									0.36	
flow	0.37	0.33									
Habitat quality		-0.52			-0.31	-0.66		-0.28	0.54		0.45
Adjusted R <sup>2</sup>	0.25	0.42	0.56	0.62	0.58	0.43	0.64	0.34	0.44	0.30	0.26

( $r=0.64, p<0.001$ ), F23 被广泛用来表征水质和栖息地退化, 因此保留 F23。故最终保留 F5、F12、F14、F22、F23 为计算 F-IBI 的核心参数(见图 2)。

### 2.3 生态系统健康评价结果

鱼类完整性指数对浑太河流域的河流健康评价结果见图 3。太子河流域 41 个点位中, 5 个(T13, T15, T16, T17, T22)为健康, 11 个(T2, T9, T12, T14, T18, T20, T23, T33, T36, T42, T43)为亚健

通过逐步回归分析对特定环境变量响应显著的参数进行了识别(表 4), 结果参数 F3 和 F28 因变异系数( $\text{adjusted } \hat{Y}^2 < 0.3$ ) 太低而被剔除。其余如参数 F5、F7 和 F12 对氮浓度变化响应显著, F9 和 F12 对林地变化响应显著, F5、F14 和 F24 对栖息地质量变化响应显著, F7 和 F22 对城镇用地和居民用地变化响应显著, F23 对水田用地变化响应显著, F27 对 pH 变化响应显著。

最后, 对通过逐步回归分析保留下来的参数进行了相关性分析, 结果表明, F7、F9 和 F12 显著相关( $r=-0.49, 0.49, p<0.001$ ), 但 F12 对多种环境变量的变化响应显著, 因此保留 F12; F24 和 F14 显著相关( $r=-0.74, p<0.001$ ), F14 对栖息地变化响应更为显著, 故保留 F14; F27 和 F23 显著相关

康, 8 个(T5, T6, T7, T11, T19, T21, T26, T39)为一般, 9 个(T1, T3, T4, T8, T10, T24, T29, T32, T34)为较差, 8 个(T25, T27, T28, T30, T31, T35, T40, T41)为极差。浑河流域 23 个点位中, 无点位属于健康状态, 5 个(H1, H2, H4, H6, H9)为亚健康, 6 个(H5, H7, H8, H10, H12)点位为一般, 6 个(H3, H11, H13, H18, H19, H20)为较差, 6 个(H14, H16, H21, H23, H24, H25)为极差(图 3)。

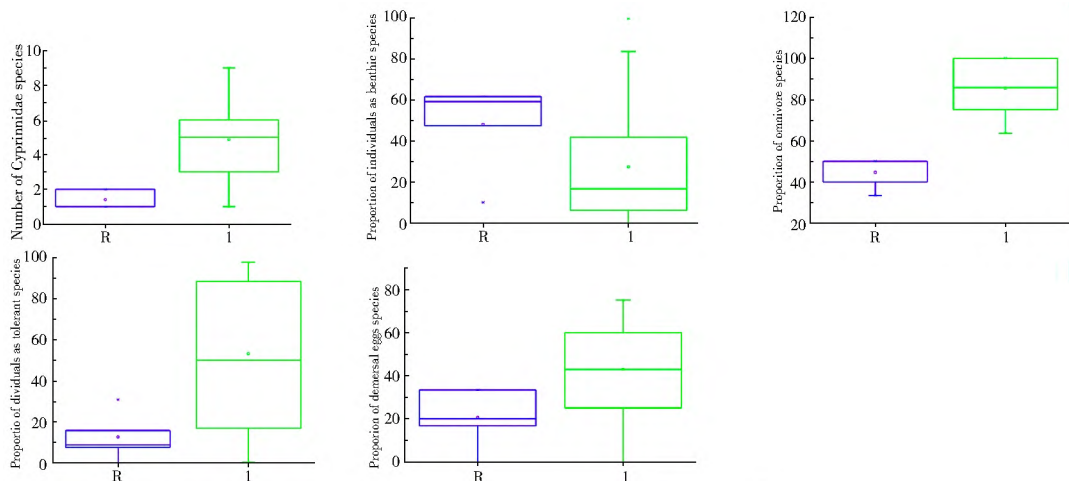


图2 参照点与受损点生物参数比较

Fig. 2 Comparison of metric values between the reference and impaired site groups

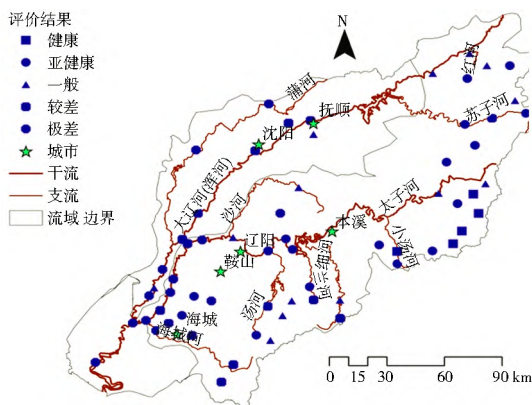


图3 浑太河流域健康评价结果

Fig. 3 Ecosystem health in the Huntuai river basin

太子河流域较差和极差的点位共占 41.5%，浑河流域较差和极差点位共占 52.2%，说明相比于太子河流域，浑河流域的健康状况较差。然而，太子河流域中 T25 点位的 F-IBI 指数值为 16.58，是浑太河流域健康状况最差的。该点位位于太子河的农业区，电导率、总溶解颗粒物、悬浮物和总氮值分别为 449.7 us/cm, 330.8 mg/L, 0.005 mg/L 和 5.65 mg/L，底质全部为沙子。所以，其健康状况差可能是密集的人类活动(包括采沙、施肥等)造成的。

### 3 讨论

#### 3.1 参照点选择

参照点应该选择不受人类干扰的点位。许多研究将受损较小的点位作为参照点，选择时依据的主要参数是水质和栖息地质量指数，如武玮等<sup>[15]</sup>依据水质和栖息地质量指数(IWHQ)来选择参照点位；Robert 等<sup>[26]</sup>基于一套明确的水质和栖息地质量确定参照点位。Raburu 等<sup>[6]</sup>开发了一个栖息地质量

指数(HQI)选择参照点位；裴雪娇等<sup>[14]</sup>和渠晓东等<sup>[27]</sup>基于水质综合质量和栖息地质量选择参照点位。一些学者发现栖息地和生物类群的退化主要原因是林地的减少和农田和城镇建设用地的增加<sup>[28-31]</sup>，所以，土地利用指数也被用来评价河流退化的程度<sup>[32, 33]</sup>。由于浑太河流域均不同程度受到人类活动的干扰，且缺少历史资料，参照点的选择尤为困难。因此，本研究将土地利用指数纳入 IWHQ 指数。例如，Jun 等<sup>[34]</sup>基于流域土地利用、水体物理化学标准选择参照点位。

另外，李艳利等<sup>[23, 35]</sup>研究生物指数和环境参数的相关性时发现鱼类和大型底栖动物对土地利用、水质参数和栖息地质量指数的变化响应敏感。因此，本文对浑太河流域河流健康评价的参考条件是基于 ILWHQ 指数的阈值来选择的，它整合了土地利用指数、水质参数和栖息地质量指数。结果显示，选择的参照点位位于海拔较高、林地面积比例较高的区域，属于太子河主要支流的上游，这与李艳利等<sup>[36]</sup>的结论一致。河流健康评价结果也证明了参照点位选择较可靠，4个参照点位的评价结果是健康的。

#### 3.2 F-IBI 指数对河流健康评估的可靠性

F-IBI 指数与 ILWHQ、QHEI、底质类型比例、土地利用比例、总氮(TN)、电导率(EC)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝酸盐浓度(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)较高的相关性。F-IBI 指数值与 ILWHQ 值呈显著负相关( $r = -0.71$ )。并且参照点位、中间点位和受损点位的 F-IBI 值有明显的区别(见图 3)，说明本研究构建的 F-IBI 指数比较可靠。

整体上，基于 F-IBI 指数评价的河流健康状况与 ILWHQ 指示的环境状况一致。但对具体一些点位评价不一致。如点位(T22, T23, T26, T33,

T36, T39, T42, T43, H12, H22) 的河流健康状况好于 ILWHQ 指示的环境状况; 点位 (T41), 基于 F-IBI 的评价结果较 ILWHQ 的差。据统计, 二者评价存在差异的是 ILWHQ 值介于 2 和 4 之间的点位。根据水质和生物资料分析原因, 发现点位 T22 和 T23, 较高浓度的 EC (371.7, 305.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 和 SS (0.004, 0.004  $\text{mg}/\text{L}$ ) 对水环境质量有一定的影响; 点位 T39 和 H12, 底栖鱼类比例 (83.5% 和 54.61%) 高和耐污鱼类个体比例 (18.82% 和 6.38%) 低, 因此, 健康评价结果较好。点位 T36、T42 和 T43, 耐污鱼类个体比例 (18.82%, 9.61% and 44.23%) 较低, 这些点位的健康评价结果较好; 点位 T41 的杂食性鱼类比例 (85.13%) 和沉性卵鱼类比例 (57.14%) 较高, 所以其健康评价结果较差。

总之, 造成 F-IBI 和 ILWHQ 评价结果存在差异的原因是: 首先, 生物群落结构受多个环境因子影响, 包括水质参数、水文情势、栖息地质量、底质类型、土地利用结构等, 这些环境因子在不同的流域对鱼类群落结构的贡献不同; 其次, F-IBI 指数包括五个生物指数, 它们对不同人类活动压力响应不同。

## 4 结论

本文基于 68 个采样点的 35 个候选参数, 采用箱体图、逐步回归分析和相关分析方法从最初的 35 个候选参数选定了 5 个核心参数构建 F-IBI 指数来评价浑太河流域河流健康, 核心参数主要依据其与特定环境压力的相互关系确定。研究结果表明, 鱼类群落结构对水文情势、氮素以及土地利用变化响应敏感。F-IBI 指数在参照点位和受损点位差异显著, 与 ILWHQ 显著相关, 说明该指数适合用来评估浑太河流域河流健康状况。另外, 应用另外一套数据对该指数的可靠性和稳定性加以验证是必要的, 这将是下一步的研究任务。

### 参考文献 (References):

- [1] Hering D, Johnson R K, Kramm S, et al. Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress [J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(9): 1757-1785.
- [2] 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 Rui lei, XU Yurping, 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))
- [3] 周波, 杜军, 张志英, 等. 基于底栖动物完整性指数的南广河河流健康评价 [J]. *广东海洋大学学报*, 2014, 34(6): 51-57. (ZHOU Bo, DU Jun, ZHANG Zhiying, et al. Health assessment of Nanguanghe river and its adjacent waters by a benthic index of biotic integrity [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2014, 34(6): 51-57. (in Chinese))
- [4] 胡金, 万云, 洪涛, 等. 基于河流物理化学和生物指数的沙颍河流域水生生态健康评价 [J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(5): 783-790. (HU Jin, WAN Yun, HONG Tao, et al. Aquatic ecological health assessment of Shaying River Basin based on indices of physicochemistry and aquatic organisms [J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(5): 783-790. (in Chinese))
- [5] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 等. 河流健康评价中不同标准方法的应用与比较 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 410-417. (ZHOU Ying, QU Xiaodong, ZHAO Rui, et al. Standardized methods for selecting reference and impaired sites to evaluate river health [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(4): 410-417. (in Chinese))
- [6] Raburu P O, Masese F O. Development of a fish-based index of biotic integrity (FIBI) for monitoring riverine ecosystems in the Lake Victoria drainage Basin, Kenya [J]. *River research and applications*, 2012, 28(1): 23-38.
- [7] Griffith M B, Hill B H, McCormick F H, et al. Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams [J]. *Ecological Indicators*, 2005, 5(2): 117-136.
- [8] Johnson R K, Hering D, Furse M T, et al. Detection of ecological change using multiple organism groups: metrics and uncertainty [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 566(1): 115-137.
- [9] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [10] Monaghan K A, Soares A M V M. The bioassessment of fish and macroinvertebrates in a Mediterranean Atlantic climate: Habitat assessment and concordance between contrasting ecological samples [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 184-191.
- [11] Lyons J. Development and validation of two fish-based indices of biotic integrity for assessing perennial coolwater streams in Wisconsin, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 402-412.
- [12] Wu W, Xu Z, Yin X, et al. Assessment of ecosystem health based on fish assemblages in the Wei River basin, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(6): 3701-3716.
- [13] 毛成贵, 钟俊生, 蒋日进, 等. 应用鱼类完整性指数 (FALL) 评价长江口沿岸碎波带健康状况 [J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4609-4619. (MAO Cheng-gui, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al. Application of fish assemblage integrity index (FALL) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4609-4619. (in Chinese))
- [14] 裴雪娇, 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 Xuejiao, NIU Cuijuan, GAO Xin. 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))
- [15] 武玮, 徐宗学, 殷旭旺. 渭河流域鱼类群落结构特征及其完整性评价 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 981-989. (WU Wei,



- XU Zongxue, YIN Xirwang, et al. Fish community structure and biological integrity in the Wei River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 981-989. (in Chinese)
- [16] Oberdorff T, Hughes R M. Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Seine Basin, France[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228(2): 117-130.
- [17] Casatti L, Langeani F, Silva A M, et al. Stream fish, water and habitat quality in a pasture dominated basin, southeastern Brazil[J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2006, 66(2B): 681-696.
- [18] Dauwalter D C, Jackson J R. A provisional fish index of biotic integrity for assessing Ouachita Mountains streams in Arkansas, USA[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 91(1-3): 27-57.
- [19] Breine J, Simoens I, Goethals P, et al. A fish based index of biotic integrity for upstream brooks in Flanders (Belgium)[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 522(1-3): 133-148.
- [20] Casatti L, Ferreira C P, Langeani F. A fish based biotic integrity index for assessment of lowland streams in southeastern Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 623(1): 173-189.
- [21] Joy M K, Death R G. Application of the index of biotic integrity methodology to New Zealand freshwater fish communities[J]. *Environmental Management*, 2004, 34(3): 415-428.
- [22] 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): 1-9. (LIU Mingdian, CHEN Daqing, DUAN Xibin, 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): 1-9. (in Chinese))
- [23] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 94-105. (LI Yanli, LI Yanfen, XU Zongxue. Effect of environmental factors on macroinvertebrate community structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin in [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 94-105. (in Chinese))
- [24] Böhmer J, Rawer Jost C, Zenker A, et al. Assessing streams in Germany with benthic invertebrates: Development of a multimetric invertebrate based assessment system[J]. *Limnologia Ecology and Management of Inland Waters*, 2004, 34(4): 416-432.
- [25] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 321-325. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2005, 33(3): 321-325. (in Chinese))
- [26] Pont D, Hughes R M, Whittier T R, et al. A predictive index of biotic integrity model for aquatic vertebrate assemblages of western US streams[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2009, 138(2): 292-305.
- [27] 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 Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan. 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))
- [28] Maloney K O, Feminella J W, Mitchell R M, et al. Landuse legacies and small streams: identifying relationships between historical land use and contemporary stream conditions[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2008, 27(2): 280-294.
- [29] Saalfeld D T, Reutebuch E M, Dickey R J, et al. Effects of landscape characteristics on water quality and fish assemblages in the Tallapoosa River Basin, Alabama[J]. *Southeastern Naturalist*, 2012, 11(2): 239-252.
- [30] Snyder C D, Young J A, Villella R, et al. Influences of upland and riparian land use patterns on stream biotic integrity[J]. *Landscape Ecology*, 2003, 18(7): 647-664.
- [31] Weijters M J, Janse J H, Alkemade R, et al. Quantifying the effect of catchment land use and water nutrient concentrations on freshwater river and stream biodiversity[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2009, 19(1): 104-112.
- [32] Allan J D. Influence of land use and landscape setting on the ecological status of rivers[C]// *Limnetica*. 2004, 23: 187-197.
- [33] Allan J D, Flecker A S. Biodiversity conservation in running waters[J]. *BioScience*. 1993, 43(1): 32-43.
- [34] 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.
- [35] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3504-3512. (LI Yanli, LI Yanfen, XU Zongxue. Effect of environmental factors on fish community structure in the Huntai river basin at multiple scales [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(9): 3504-3512. (in Chinese))
- [36] 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(2/3): 297-303. (LI Yanli, XU Zongxue, YANG Xiaojing. Health assessment by using a benthic index of biotic integrity in the Huntai River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(2/3): 297-303. (in Chinese))
- [37] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, et al. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale[J]. *Illinois Natural History Survey, Champaign, Special Publication*, 1986.
- [38] Raburu P O. Water quality and the status of aquatic macroinvertebrates and ichthyofauna in River Nyando, Kenya [D]. Kenya: Moi University, 2003.
- [39] Toham A K, Teugels G G. Diversity patterns of fish assemblages in the Lower Ntem River Basin (Cameroon), with notes on potential effects of deforestation [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1998, 141(4): 421-446.
- [40] Toham A K, Teugels G G. First data on an index of biotic integrity (IBI) based on fish assemblages for the assessment of the impact of deforestation in a tropical West African river system[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 397: 29-38.
- [41] Huguency B, Camara S, Samoura B, et al. Applying an index of biotic integrity based on fish assemblages in a West African river[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 331(1-3): 71-78.