

基于层次分析法北运河流域栖境得分与 BMWP 值相关性分析

谢阳村¹, 郭亚坤², 高世凯³, 王备新⁴

(1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012;
2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300000;
3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046;
4. 南京农业大学, 南京 210095)

摘要: 准确描述北运河流域水生态状况, 为流域水生态管理决策提供支持。在北运河流域 26 个采样点进行采样, 对河流栖境打分, 采用层次分析法对河流栖境各参数得分进行加权, 计算大型底栖动物 BMWP 值, 分析北运河栖境得分与 BMWP 值相关性。结果表明, 加权前栖境得分与 BMWP 值的 Pearson 相关系数为 0.346, 相伴概率为 0.086, 两者无显著相关性; 层次分析法将河流栖境一级指标河道水量状况、河道变化状况、河滨带状况、河堤岸稳定状况分别加权为 0.1466、0.1623、0.6040、0.0872, 加权后栖境得分与 BMWP 值的 Pearson 相关系数为 0.413, 相伴概率为 0.036, 两者显著相关。后续研究需要进一步优化一级、二级指标的加权值, 以使栖境得分值既可以有效反映水生生物栖息地质量, 又可以有效指示不同河段的底栖生物状况。

关键词: 河流栖境得分; 大型底栖动物生物监测工作组指数; 层次分析法; 相关性分析; 北运河

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)04-0026-06

水生生物生存环境是水体生态系统健康功能稳定的关键要素, 栖息地质量的评价正逐步成为河流生态健康评价的最重要指标, 栖境得分被广泛用于水生态健康评价(赵进勇等, 2008; 郑丙辉等, 2007)。大型底栖动物作为水体中较为稳定的生物类群, 具有物种类群多、分布范围广、生命周期长、迁徙能力弱的特点, 且不同种类对水质敏感性不同, 能很好地指示水质优劣及人类活动的干扰状况, 对维持水生态系统功能的完整性有着至关重要的作用(付岚等, 2018; 张蕾等, 2018)。河流栖境得分以及大型底栖动物生物监测工作组(Biological Monitoring Working Party, BMWP)指数可以描述水体水生态状况, 刻画出河流水生态情况, 量化河流水生态情况(张汲伟等, 2018; 冷龙龙等, 2016; 岳亮亮, 2018)。两者均对水体水生态健康具有一定的指示作用。

北运河发源于北京市的北部昌平及海淀区一

带, 上游称温榆河, 在通州北关与通惠河相遇后称北运河。北运河流域可以分为北京段、河北段以及天津段, 从源头向南流经北京通州区, 后流经河北省廊坊市香河县、天津市武清区, 在天津大红桥处汇入海河(周红玉等, 2018; 荆红卫等, 2013)。北运河作为京津冀区域的重要水体, 是京津冀水污染防治工作的重中之重。以北京市为例, 北运河 26% 的面积、37% 的地表水资源量承载了北京市 70% 多人口和 80% 以上的 GDP。准确描述北运河流域水生态状况对北运河及京津冀区域水质改善意义重大。2019 年 10 月经布点、采样及鉴定分析, 本文通过层次分析法(佟志涛, 2019; 胡立刚, 2019)对各栖境指标进行合理加权赋值, 采用 Pearson 分析法分析加权后的栖境得分与 BMWP 值的相关性, 以期实现北运河流域栖境得分值与 BMWP 值对水体水生态评价结果的统一, 为北运河流域水生态管理决策提供支持。

1 材料与方 法

1.1 样点设置

为尽可能真实地反映北运河流域河流生态系统的实际健康状况, 布点原则为人类活动干扰越强, 采样点越密集; 此外, 采样点要能够代表点位附近河段尺度的水体自然特征(顾晓昀等, 2017)。依据以上原则布置采样点 26 个, 见图 1。

收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2021-01-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“北运河流域水质目标综合管理示范研究”课题(2018ZX07111003)。

作者简介: 谢阳村, 1983 年生, 女, 副研究员, 研究方向为环境规划。E-mail: xieyc@caep.org.cn

通信作者: 王备新, 教授, 研究方向为水质生物监测和溪流生态学。E-mail: wangbeixin@njau.edu.cn

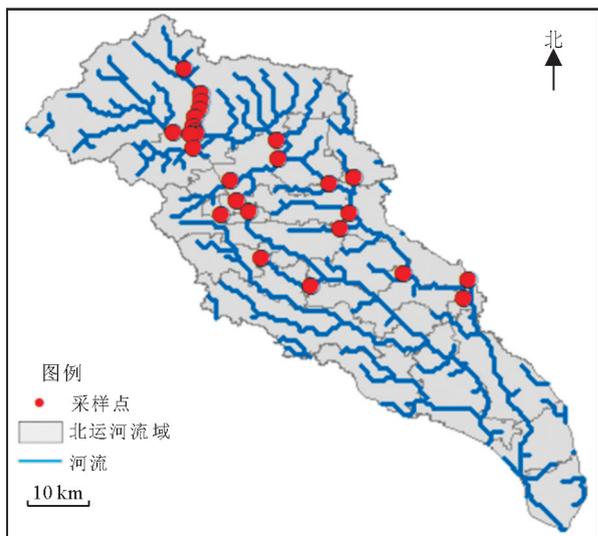


图1 北运河流域采样点位

Fig.1 Location of the sampling sites in Beiyun River basin

1.2 河流栖境打分

1.2.1 打分原则 河流栖境参数选择4个一级参数和9个二级参数,各参数打分原则见表1。

表1 河流栖境打分原则

Tab.1 Scoring of habitat parameters

栖境参数		最佳	好	一般	差
		20~16分	1~11分	10~6分	5~0分
河道水量状况 C ₁	水量 C ₁₁	水量丰富	水量较丰富	水量不太丰富	水量不丰富
	河滨带裸露状况 C ₁₂	河水淹没河岸两侧	滨带裸露面积不大	河滨带裸露面积较明显	河滨带裸露面积较明显
	河岸基质裸露状况 C ₁₃	河岸基质没有暴露	不能明显见到河岸基质裸露	河岸基质裸露不太明显	河岸基质裸露较明显
河道变化状况 C ₂	渠道化状况 C ₂₁	无渠道化	有较少的渠道化,一般出现在桥墩周围	渠道化明显;两岸为堤岸;50%~75%河道渠道化	河岸被水泥固化;超过75%的河道渠道化
	挖沙状况 C ₂₂	没有挖沙	挖沙面积很小	挖沙面积较小	挖沙面积较大
	清淤状况 C ₂₃	无清淤	清淤面积很小	清淤面积较小	清淤面积较大
河滨带状况 C ₃	植被状况 C ₃₁	水生植被丰富	水生植物较丰富	水生植物稀疏	无明显水生植物
	围网养殖状况 C ₃₂	无围网养殖	少许围网养殖	明显围网养殖	严重围网养殖
	排污口状况 C ₃₃	无排污口	零星排污口	5个以上排污口	排污口较多
河堤岸稳定性状况 C ₄	河堤岸侵蚀状况 C ₄₁	没有或者很少的堤岸被侵蚀;	5%~30%的堤岸被侵蚀	30%~60%的堤岸被侵蚀	60%~100%的堤岸被侵蚀
	河堤岸人为损坏状况 C ₄₂	小于5%的堤岸有人为损坏现象	5%~30%的堤岸有人为损坏现象	30%~60%堤岸有人为损坏现象	60%~100%堤岸有人为损坏现象
	修复难易状况 C ₄₃	修复易	修复较易	修复较难	修复难

1.2.2 栖境得分加权 采用层次分析法(徐栋等, 2019; 胡立刚, 2019; 佟志涛, 2019; 孔令健等, 2018)对河流栖境各参数得分进行加权。

(1)分层构造判断矩阵 确定 a_{ij} ,采用数字进行比较,具体是采用1~9标度法(石建等, 2004; 骆正清等, 2004),该法是将定性转变为定量的关键步骤。结构模型建立之后,需要在各级元素之间进行比较构造判断矩阵, $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。 a_{ij} 为1表示2个因素相同或非常相近; a_{ij} 为9表示前一个因素 u_i 比后一个因素 u_j 极端重要; a_{ij} 为倒数表示因素 u_j 和因素 u_i 的重要性的比例标度值 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。一般形式见式①。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{①}$$

矩阵 A 具有以下性质: $A_{ij} > 0, A_{ij} = 1/A_{ji} (i \neq j), A_{ii} = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(2)计算权向量 采用迭代法确定各项因素的权重。

1)计算判断矩阵的每一行元素的乘积 A_i

$$A_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad \text{②}$$

2)计算 A_i 的 n 次方根 W_i

$$W_i = \sqrt[n]{A_i} \quad \text{③}$$

3)对向量 $W' = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 计算 A_i 的 n 次方根 ω_i

$$\omega_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_j} \quad \text{④}$$

$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 为所求的特征向量,这个特征向量为对应的指标因素的权重,即是各个指标因素的单排序。

4)计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{n\omega_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} \quad \text{⑤}$$

其中, $(A \omega)_i$ 表示向量 $A\omega$ 的第 i 个元素。

(3)一致性检验 求出权向量之后,要进行一致性检验,保证最终的结论可靠。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

在 A 矩阵为完全一致性矩阵时,最大特征值 $\lambda_{\max} = n$,其余特征根均为 0。在一般情况下, k 为单

表 2 一致性指标 RI

Tab.2 Consistency index RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.46	1.52	1.54

一致性比例指标 CR 计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (7)$$

当 $CR < 0.1$ 时,则判断矩阵具有满意一致性,否则需要对之前建立的层次结构模型进行调整或重新建立,继续上述步骤,直到随后具有满意的一致性为止。

(4)层次总排序 从最高层次到最低层次逐层进行,依次沿模型的层次结构自上而下逐层计算下一层级指标因素的权重和一致性检验,而后需要计算各层指标对系统目标的合成权重,从而进行总排序。

1.3 BMWP 指数计算

对采样点中所采集到的所有物种的科级敏感值求和,即为该采样点 BMWP 得分(冷龙龙等, 2016)。在 26 个点位同步采集底栖动物。底栖动物采用多生境法采集(Barbour et al, 1999),即在 100 m 长的采样河段内,按小生境(底质组成、流速不同、深度、水生植物等)出现的比例分配 20 个 D 形网样方(D 形网尺寸 0.3 m×0.4 m, 0.5 mm 网径,每个样长度 0.3 m)。将 20 个 D 形网样合并在一起,作为一个样点的底栖动物样,采用踢网法和扫网法完成每个 D 形网样采集。底栖动物样品采集完成后用自封袋收集并做好点位记录,将 95% 酒精加入自封袋,让样本完全浸泡在缓冲液中保存。实验室内挑拣、计数、鉴定所有底栖动物个体至可信的最低分类单元,通常为属级,其中毛翅目昆虫和软体动物鉴定至种,水蛭鉴定至科,寡毛类鉴定至属或种(张蕾等, 2018)。

大型底栖动物 BMWP 值计算公式如下:

$$BMWP = \sum t_i \quad (8)$$

式中: t_i 是样点中出现的物种 i 的科级敏感值,该指标依据大型底栖动物耐污特性的不同,从最不敏感物种至最敏感物种依次赋予 1~10 的分值。

根,且 $k \geq n$ 。在判断矩阵具有“满意一致性”时, k 略大于 n ,其余特征根约等于 0,且需要对于“满意一致性”给出一个准确的度量指标 CR。

衡量不同阶段判断矩阵是否具有满意的一致性,在此引入平均随机一致性指标 RI, RI 是多次重复进行随机判断矩阵特征值的计算后取算术平均值得到的(表 2)(杨玲, 2016)。

BMWP 得分越高,说明该采样点受到人为干扰活动的影响越小,水体水生态健康状况越好(Armitage et al, 1983; 张汲伟等, 2018)。

1.4 相关性分析

利用 SPSS 非参数分析中的 K-S 法对加权处理前后源数据(栖境得分值、BMWP 值)进行正态分布检验(朱红兵等, 2009),采用 Pearson 相关分析法(王璐, 2010)分析两组数据的相关性。

2 结果与分析

2.1 判断矩阵及权重

各指标判断矩阵见表 3~表 7。

表 3 一级指标判断矩阵

Tab.3 First-level index judgment matrix

一级指标	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	1	1/6	2
C_2	1	1	1/4	3
C_3	6	4	1	4
C_4	1/2	1/3	1/4	1

表 4 C_1 的二级指标判断矩阵

Tab.4 Secondary index judgment matrix for first-level C_1

二级指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}
C_{11}	1	3	4
C_{12}	1/3	1	2
C_{13}	1/4	1/2	1

表 5 C_2 的二级指标判断矩阵

Tab.5 Secondary index judgment matrix for first-level C_2

二级指标	C_{21}	C_{22}	C_{23}
C_{21}	1	1/3	1/4
C_{22}	3	1	1/2
C_{23}	4	2	1

各指标权重见表 8。

各矩阵均满足 $CI < 0.1$,因此比较判断矩阵具有满意的一致性。

表6 C₃的二级指标判断矩阵Tab.6 Secondary index judgment matrix for first-level C₃

二级指标	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃
C ₃₁	1	1/4	1/7
C ₃₂	4	1	1/3
C ₃₃	7	3	1

表7 C₄的二级指标判断矩阵Tab.7 Secondary index judgment matrix for first-level C₄

二级指标	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃
C ₄₁	1	1	1/3
C ₄₂	1	1	1/4
C ₄₃	3	4	1

表8 各指标权重

Tab.8 Weighting of each indicator

指标	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	λ_{max}	CI	RI	CR
一级指标	0.1466	0.1623	0.6040	0.0872	4.0483	0.0161	0.8900	0.0181
C ₁ 的二级指标	0.6250	0.2385	0.1365	-	3.0183	0.0091	0.5200	0.0176
C ₂ 的二级指标	0.1220	0.3196	0.5584	-	3.0183	0.0091	0.5200	0.0176
C ₃ 的二级指标	0.0786	0.2682	0.6586	-	3.0324	0.0162	0.5200	0.0311
C ₄ 的二级指标	0.1919	0.1744	0.6337	-	3.0092	0.0046	0.5200	0.0088

2.2 河流栖境得分与BMWP值相关性

2.2.1 河流栖境得分加权前相关性 栖境得分值数据为正态分布,BMWP值为接近正态分布的单峰分布。相关系数为0.346,相伴概率为0.086。

2.2.2 河流栖境得分加权后相关性 加权栖境得分值数据为正态分布,BMWP值为接近正态分布的单峰分布。相关系数为0.413,相伴概率为0.036。2组数据具有显著相关性(图2)。

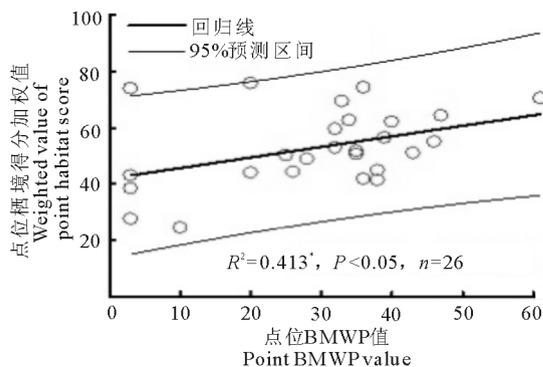


图2 加权栖境得分值与BMWP值相关性

Fig.2 Correlation of weighted habitat score and BMWP value

3 讨论

郑丙辉等(2007)研究表明,栖境参数指标与大部分底栖生物指标都呈现显著相关关系,其中与水生昆虫分类单元数、摇蚊分类单元数、毛翅目个体相对丰度、摇蚊个体相对丰度、蜉游目个体相对丰度等底栖生物指标的相关性高。冷龙龙等(2016)研究了BMWP指数与其他生物指数、生境状况的回归关系,表明BMWP指数可有效指示与反映不同河段的生物状况及其栖息地质量。由于此次对北运河流域点位栖境参数的打分值较为主观,且认为各指标同等重要,将未加权处理的栖境参数得分值与BM-

WP值进行相关性分析,2组数据没有显著相关性。通过层次分析法,由专家打分确定各指标判断矩阵,各判断矩阵均通过一致性检验,计算各指标权重,对各个指标的分值进行加权,得到的分值再统一成满分80分制,将优化后的栖境得分值与BMWP值进行相关性分析,得到2组数据具有显著相关性。本文确定的判断矩阵及计算出的各指标权重明显提高了栖境得分值与BMWP值的相关性。

水生维管植物对大型底栖生物的生存与分布影响大(刘曼红等,2019),沉水植物可为大型底栖生物提供更为合适的生存环境(渠晓东等,2018),围网养殖内的大型底栖动物的密度、生物量、多样性均低于围网外(鲍方印等,2012),围网养殖对水生态系统影响明显,底栖动物的种类及数量均处在较低水平(师吉华等,2012),污水排污口处的污水排入会导致沉积物中有机质的含量变大,从而对大型底栖动物的生存与分布产生影响(于潇等,2017)。本文将一级指标河滨带状状况指标加权为0.6040,认为河滨带状状况对指示水生态状况具有重大意义,与上述研究结果一致。

对栖境参数得分指标的优化,实现了河流点位栖境得分值对水生态状况评价结果与BMWP值对水生态状况评价结果的统一,使得两者均能准确描述水体水生态状况,为北运河流域水生态管理决策提供支持,也可为类似河流进行水体生态健康状况评价提供参考。后续研究需要进一步优化一级、二级指标的加权值,使得栖境得分值既可以有效反映水生生物栖息地质量,又可以有效指示不同河段的底栖生物状况。

参考文献

鲍方印,赵洁,崔峰,等.2012.女山湖围网养殖对水质和

- 大型底栖动物群落结构的影响[J]. 安全与环境学报, 12(2): 23-27.
- 付岚, 江源, 刘琦, 等, 2018. 基于大型底栖动物完整性指数 B-IBI 的东江流域水生态健康评价[J]. 生态环境学报, 27(8): 1502-1511.
- 顾晓鸣, 徐宗学, 王汨, 等, 2017. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价[J]. 湖泊科学, 29(6): 1444-1454.
- 胡立刚, 2019. 基于层次分析法的贵州省六硐河健康评估研究[J]. 中国农村水利水电, (9): 87-93.
- 荆红卫, 张志刚, 郭婧, 2013. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学, 33(2): 319-327.
- 孔令健, 章启兵, 2018. 基于层次分析法的清流河健康综合评价[J]. 安徽农学通报, 24(19): 105-107.
- 冷龙龙, 张海萍, 张敏, 等, 2016. 大型底栖动物快速评价指数 BMWP 在太子河流域的应用[J]. 长江流域资源与环境, 25(11): 1781-1788.
- 刘曼红, 孟瑶, 曹晶晶, 等, 2019. 挠力河湿地大型底栖动物功能特性[J]. 东北林业大学学报, 47(1): 76-82.
- 骆正清, 杨善林, 2004. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, (9): 51-60.
- 渠晓东, 余杨, 张敏, 等, 2018. 城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系[J]. 环境科学, 39(2): 783-791.
- 石建, 郭跃华, 2004. 基于指数标度的层次分析法及其应用[J]. 南通大学学报(自然科学版), (4): 4-7.
- 师吉华, 董贯仓, 冷春梅, 等, 2012. 围网养殖对南四湖生态环境的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 33(4): 370-375.
- 佟志涛, 2019. 基于层次分析法的河道岸滩稳定性综合评价[J]. 地下水, 41(2): 236-237.
- 王璐, 2010. SPSS 统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 徐栋, 周泉迪, 戚毅婷, 等, 2019. 基于层次分析法的“美丽河流”评价指标体系构建[J]. 区域治理, (2): 216-217.
- 杨玲, 2016. 基于战略管理的高校绩效预算评价指标体系研究[J]. 财经界(学术版), (5): 127-128.
- 于潇, 刘晓收, 2017. 青岛汇泉湾排污口附近大型底栖动物的群落结构和多样性[J]. 应用与环境生物学报, 23(1): 15-20.
- 岳明亮, 2018. 基于栖息地质量指数方法的浑河流域水生态健康评价指标体系研究[J]. 水土保持应用技术, (3): 47-49.
- 张汲伟, 琨蔡, 于海燕, 等, 2018. 中国底栖动物水质生物监测指数和水质等级构建[J]. 中国环境监测, (6): 10-18.
- 张蕾, 于海燕, 黄旻, 等, 2018. 浦阳江底栖动物群落特征与水质生物评价[J]. 应用与环境生物学报, 24(1): 155-161.
- 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚, 2008. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. 科技导报, (17): 82-88.
- 郑丙辉, 张远, 李英博, 2007. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. 环境科学学报, 27(6): 928-936.
- 周红玉, 王培京, 刘操, 2018. 基于 MIKE11 的北运河流域水质改善方案效果评估[Z].
- 朱红兵, 何丽娟, 2009. 关于用 SPSS 中单样本 K-S 检验法进行正态分布等的一致性检验时适用条件的研究[J]. 首都体育学院学报, 21(4): 466-470.
- Armitage P D, Moss D, Wright J F, et al, 1983. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites[J]. Water Research, 17:333-347.
- Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al, 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadable rivers: Periphyton, benthic invertebrates and fish[M]. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA 841-B-99-002

(责任编辑 张俊友)

Correlation of Habitat Scores with BMWP Values in Beiyun River Basin

XIE Yang-cun¹, GUO Ya-kun², GAO Shi-kai³, WANG Bei-xin⁴

(1.Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012,P.R.China;

2.School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000,P.R.China;

3.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources
and Electric Power, Zhengzhou 450046,P.R.China;

4.Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095,P.R.China)

Abstract: Beiyun River basin is an important source of water for the Beijing-Tianjin-Hebei region and the primary area of water pollution control and treatment. To effectively manage the resource, the status of aquatic ecology in the Beiyun River basin must be comprehensively assessed. In October 2019, river habitat was investigated and macrobenthos sampling was carried out at 26 sampling points in Beiyun River basin. Based on this investigation, river habitat quality was described by the scores of several habitat parameters after being weighted by the analytic hierarchy process. The biological monitoring working party (BMWP) score for macrobenthos in Beiyun River basin was calculated and, finally, the relationship of river habitat scores and the BMWP scores were analyzed by Pearson correlation analysis. The Pearson correlation coefficient between unweighted river habitat scores and the BMWP scores was 0.346 and the associated probability was 0.086, indicating no significant correlation. The weights given to first-level river habitat indicators of water volume, channel alteration, shoreline, and river bank stability were 0.1466, 0.1623, 0.6040, 0.0872, respectively. The Pearson correlation coefficient between weighted habitat scores and the BMPP value was 0.413 and the associated probability was 0.036, indicating a significant correlation. Thus, river habitat indicators optimized by weighting gave an internally consistent system for evaluating aquatic ecosystems. However, additional research is still needed to further optimize the weighting values of primary and secondary indicators of river habitat, so that habitat scores effectively indicate the biological conditions in different river sections and accurately reflect the quality of aquatic habitats.

Key words: score of river habitat evaluation; biological monitoring working party (BMWP); analytic hierarchy process; correlation analysis; Beiyun River