

# 人类活动干扰下大型底栖动物功能多样性评价

杨晓明<sup>a,b</sup>, 韩雪梅<sup>a,b</sup>, 梁子安<sup>a,b</sup>, 龚子乐<sup>a,b</sup>, 朱会会<sup>a</sup>, 李玉英<sup>b,c</sup>

(南阳师范学院 a.生命科学与技术学院;

b.南水北调中线水源地水安全河南省协同创新中心;c.农业工程学院,河南 南阳 476061)

**摘要:**分析物种多样性、群落分布和功能多样性之间关系,对于了解生态系统功能,预测生态系统发展方向具有重要作用.本研究以白河南阳段为例,设置 5 个典型生态采样点,包括上游鸭河大桥和观音寺,流域组成以农田为主,干扰较少;中游泗水河桥流域组成以乡镇,主要受农村生活用水排放影响;下游沙岗和四坝,流经南阳市主城区,主要受城市生活用水排放影响.分别分析评价了 5 个样点大型底栖动物的物种多样性、功能多样性、群落分布状况以及三者之间关系.结果表明,泗水河桥和四坝受城镇生活用水的影响,水质有了明显的变化.5 个样点间物种多样性指数和功能多样性指数未发现显著性差异.但是,通过群落分布排序发现,从上游起点鸭河大桥到下游终点四坝,各个样点的底栖动物群落结构已产生明显差异,鸭河大桥与四坝间的差异最为明显,泗水河桥也显示了与其他样点不同的群落分布特征.香农威纳指数与 Rao 二次熵指数和功能分散度指数之间密切相关,表明物种多样性的高低可以反映生态系统的生产力和稳定性.因此,对河流生态系统功能进行研究时,群落分布同样重要,它能够反映生态系统的细微变化,为生态系统未来功能的变化方向提供依据.

**关键词:**底栖动物;物种多样性;功能多样性;群落分布

**中图分类号:**Q143;Q146

**文献标志码:**A

生态系统中生物多样性的评价,可以同时采用物种多样性和功能多样性进行评价<sup>[1-2]</sup>.物种多样性多用各种指数来表征,反映生物群落的丰富度和均匀度,但是却无法直观说明生态系统的生产力和稳定性<sup>[3]</sup>.功能多样性是当前底栖动物研究的热点之一,即用不同类群的功能性状表征功能多样性,功能多样性对于研究生态系统的生产力和恢复力具有重要意义<sup>[4]</sup>.

农村乡镇生活用水和城市生活用水,对人类水域生态系统产生了强烈的干扰,影响了水质和水生生物群落,进而可能改变生态系统的功能<sup>[5]</sup>.白河贯穿南阳市区,是市民游乐休闲的主要场所,是南水北调中线工程生态补水重要受益区域之一,水质好坏对本地区人民生活水平有着巨大的影响,也对客观评价南水北调生态功能具有重要作用<sup>[6-7]</sup>.

现阶段有关物种多样性、功能多样性和群落分布 3 者之间关系,以及对生态系统指示作用的研究较少<sup>[8-11]</sup>,本研究以白河流域南阳段水体中大型底栖动物为例,分别从以上 3 个方面展开讨论,分析它们在评价水生生态系统功能和预测生态系统发展方向中的作用,也为进一步了解该流域水质问题,提高水质评价标准,改善水体环境,提供更好的监测评价方法和理论依据<sup>[12-13]</sup>.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与采样地点

白河干流发源于河南省嵩县攻离山,自西北流向东南,流经南阳市城区,流域面积 12 029 km<sup>2</sup>.南阳市区

收稿日期:2019-11-18;修回日期:2020-03-20.

基金项目:国家自然科学基金(31300442);清华大学开放研究基金资助项目(klhsc-2019-B-04);河南省教育厅重点项目(18B180020,19B180007);河南省南水北调中线水源地水生态安全创新型科技团队专项项目(17454).

作者简介:杨晓明(1988—),男,河南唐河人,南阳师范学院硕士研究生,研究方向为水生生态系统.

通信作者:韩雪梅,副教授,硕士生导师,E-mail:hanxuemei916@163.com.

内流经河段总长 46.5 km,自东北向西南,呈半环形穿市而过。本次调查以鸭河口水库为起点,以市区下游四坝为终点,研究区域贯穿南阳市中北部的整个白河国家湿地公园。

根据白河流域南阳段河流的地理位置和环境特征,沿白河干流流向在河南省南阳市境内自上游至下游共设置 5 个典型生态采样点(表 1)。其中鸭河大桥(YH)和观音寺(GY)采样点位于上游,流经区域以农田为主,干扰较少;泗水河桥(SS)采样点位于中游,流经区域有乡镇,受农村生活用水排放影响较为明显;沙岗(SG)和四坝(SB)采样点位于下游,流经区域为南阳市主城区,主要受城市生活用水和生产用水排放影响。

表 1 白河流域南阳段河流生态采样点位置分布

Tab.1 Sampling sites in Nanyang section of Baihe river

样点名称	地理位置	北纬/(°)	东经/(°)	海拔/m	河宽/m	起点距离/km
鸭河大桥	南召县皇路店镇鸭河口村	33.29	112.63	131.9	271	0
观音寺	南召县皇路店镇皇路村	33.24	112.66	132.4	35	4.77
泗水河桥	卧龙区石桥镇小石桥村	33.13	112.62	128.8	540	22.93
沙岗	宛城区新店乡沙岗村	33.05	112.61	123.5	561	32.36
四坝	卧龙区市区	32.95	112.50	117.7	613	46.50

## 1.2 水样和底栖动物采集与分析

2017 年 9 月,分别采集水质样品和底栖动物样品。根据《河流水生态环境质量监测技术指南》设定采水样点,采水器采取河流表层 0~50 cm 水样。水质现场测定指标包括 pH 值,溶解氧(DO)、电导率(COND)和氧化还原电势(ORP);室内采用流动分析仪测定氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、总磷(TP)和高锰酸盐(MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>)等指标,采用重铬酸钾回流法测定化学需氧量(COD),采用分光光度法测定叶绿素含量<sup>[14]</sup>。

采用 40 目网径 D 型抄网逆水流方向采集大型底栖动物样品,采样面积为 1 m<sup>2</sup>,每个生态采样点设置 4 个重复。将网中的底栖动物迅速检出,装入标本瓶中,10%福尔马林液固定后,带回实验室进行形态学鉴定至属或种的水平<sup>[15-16]</sup>。

## 1.3 物种多样性和功能多样性评价

物种多样性评价基于底栖动物属或种的分类单元,分别选用物种数(S)、香农威纳指数(H')、辛普森多样性指数(D)、Berger-Parker 多样性指数(Berger)和 Pielou 均匀度指数(J)进行评价<sup>[17-18]</sup>。各指数计算公式如下:  $H' = - \sum P_i \times \log_2 P_i$ ;  $D = 1 - \sum P_i^2$ ;  $Berger = N_{\max}/N$ ;  $J = H'/\ln(S)$ ;  $P_i$  为物种  $i$  的相对丰度,  $N_{\max}$  为丰度最高类群的个数,  $N$  为所有类群的总个数。

功能多样性评价依据底栖动物的 11 个生物学和 11 个生态学特征进行分类评价<sup>[19]</sup>,结合物种相对丰度,分别计算功能多样性指数 Rao 二次熵指数(RaoQ)和功能分散度指数(FD<sub>is</sub>)<sup>[20]</sup>。

RaoQ 将每个物种看作多维性状空间中的点,主要计算物种距离的变异,用 Gower 距离来度量物种及生物性状的距离。  $RaoQ = \sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S d_{ij} P_i P_j$ ,  $P_i$  和  $P_j$  分别代表物种  $i$  和物种  $j$  的相对丰度,  $S$  为物种数,  $d_{ij}$  为物种  $i$  和物种  $j$  之间的距离,  $d_{ij}$  的取值范围在 0(物种  $i$  和物种  $j$  具有完全相同的生物性状组成)和 1(物种  $i$  和物种  $j$  未共有任何相似的生物性状)之间。

FD<sub>is</sub> 本质上是计算在  $i$  维性状空间中,各个物种到加权质心(c)上的加权距离总和,  $FD_{is} = \sum a_j z_j / a_j$ 。首先,计算物种在  $i$  维性状空间(维度数量等于性状数量)中的加权质心:  $c = [c_i] = \sum a_j x_{ij} / \sum a_j$ ,  $a_j$  表示物种  $j$  的多度,  $x_{ij}$  是物种  $j$  第  $i$  个性状的值,  $z_j$  是物种  $j$  到加权质心(c)的距离。

## 1.4 数据分析

多样性计算使用的软件为 R3.5.2,其中 vegan 软件包完成物种多样性指数计算,FD 软件包完成功能多样性指数计算。

SPSS11.5(SPSS Inc. Chicago, USA)中进行单因素方差分析,采用 Tukey HSD 测验比较各个生态采样点指标间的差异( $p < 0.05$ )。不满足齐次性假设的数据,统计之前进行对数或平方根转换。转换后仍不满足齐次性假设的数据,采用 Kruskal-Wallis H 非参数检验,随后用 Mann-Whitney 非参数检验两两比较处理间的

差异.

群落排序在 CANOCO for Windows 5 (Microcomputer Power, Ithaca, USA) 中进行, 利用主成分分析 (PCA)、除趋势对应分析 (DCA) 和典型相应性分析 (CCA) 探讨生态采样点的梯度变化, 以及水质理化性质与底栖动物群落分布的相互关系. CCA 分析中, Monte Carlo Test 用于检验样点或理化性质对底栖动物群落分布没有显著性影响的零假设.

## 2 结果与分析

### 2.1 水质理化性质分析

对白河上游、中游和下游水质理化性质分析发现 (表 2), 在不同生态位点变化较大的指标包括 DO, COND,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , TP,  $\text{MnO}_4^-$  和叶绿素质量浓度. 中游泗水河桥和终点四坝两个样点的这些指标整体高于其他样点, 说明这两个区域的水质要劣于其他几个区域. 沙岗虽然位于泗水河桥和四坝中间, 但水质却呈现出明显的不同, 水质整体状况与上游的鸭河大桥和观音寺更为接近. 因此, 单纯从理化性质分析对 5 个样点的区分并不明显.

表 2 白河南阳段河流生态采样点水质理化性质

Tab.2 Water physico-chemical properties at sampling sites of Nanyang section of Baihe River

指标	上游		中游	下游	
	鸭河大桥	观音寺	泗水河桥	沙岗	四坝
pH	7.2	7.6	8.6	8.8	7.4
DO 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2.63	6.97	2.78	6.92	6.36
COND/( $\text{us} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	261	266	294	251	520
ORP	188	172	157	147	191
$\text{NH}_4^+$ 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.11	0.02	1.20	0.12	1.72
$\text{NO}_3^-$ 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.86	0.09	2.51	0.75	2.13
TP 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.03	0.02	0.82	0.03	0.23
$\text{MnO}_4^-$ 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2.40	2.11	6.02	2.14	3.69
COD 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	30.18	32.06	32.2	33.47	32.98
叶绿素质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.95	0.84	6.63	12.21	17.73

### 2.2 大型底栖动物丰度分析

白河南阳段采集到的大型底栖动物隶属于 2 门 5 纲 7 目 10 科 10 属 10 种 (表 3), 下游四坝采集到的底栖动物总丰度显著高于其他 4 个生态采样点. 对各个生态采样点进行物种分析发现, 上游鸭河大桥和下游四坝优势类群较为集中, 在起点鸭河大桥优势物种为中华圆田螺, 占底栖动物总丰度的 86.4%, 显著高于其他采样点; 在下游四坝采集到的底栖动物物种全部为羽摇蚊幼虫, 也显著高于其他采样点. 另外上游鸭河大桥的椭圆萝卜螺和观音寺的河蚬虽然数量较低, 但也达到了显著水平.

### 2.3 大型底栖动物物种多样性和功能多样性分析

不同生态采样点大型底栖动物物种多样性指数计算结果见图 1(a), 尽管与其他位点相比, 上游鸭河大桥物种数最高, 但是未达到显著水平; 除此之外, 香农威纳指数、辛普森多样性指数、Berger-Parker 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均较低, 采样位点间也无显著性差异. 大型底栖动物功能多样性指数分析结果见图 1(b), 下游四坝 Rao 二次熵指数和功能分散度指数最低, 均为零, 但各个样点间无显著性差异.

不同生态采样点底栖动物物种多样性指数与功能多样性指数进行 Pearson 相关性分析发现 (图 2), 香农威纳指数与物种数 (0.84)、Rao 二次熵指数 (0.91) 和功能分散度指数 (0.84) 之间存在极显著的相关性, Rao 二次熵指数和功能分散度指数之间的相关性 (0.97) 也极为显著, 但其他指数间的相关性并不显著.

### 2.4 大型底栖动物群落分布

根据各生态采样点的物种分布特征进行 PCA 分析, 排序结果见图 3(a). 所有典型特征值解释了 98.5%

的数据变化原因( $F=1.456, p=0.002$ ),其中轴 1 解释了 58.3% 变量变化梯度,轴 2 解释了 16.0% 变量变化梯度,两轴累计解释量为 74.3%。从 PCA 二维排序图可以看出,生态采样点间存在着明显的分化现象,上游起点鸭河大桥与下游终点四坝的分化最为明显;而观音寺、泗水河桥、沙岗群落分布梯度介于两者之间,呈过渡趋势;泗水河桥受乡镇用水影响明显,与受城市用水影响的四坝样点最为接近。因此,对大型底栖动物群落进行 PCA 排序分析,能够较好反映出人类干扰活动对生境分化的影响。

表 3 白河南阳段河流生态采样点底栖动物丰度变化

Tab.3 Changes of macroinvertebrate abundance at sampling sites of Nanyang section of Baihe River  $m^{-2}$

种群	上游		中游	下游	
	鸭河大桥	观音寺	泗水河桥	沙岗	四坝
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	19.00±16.79 <sup>a</sup>	2.25±2.87 <sup>b</sup>	0.25±0.50 <sup>b</sup>	4.25±4.35 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	0.75±0.96 <sup>a</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>
尖口圆扁螺 <i>Hipppeutis cantori</i>	0.50±1.00	0	0	0	0
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>	0.50±1.00	0.25±0.5 <sup>b</sup>	0	0	0
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	0.50±0.58 <sup>b</sup>	2.50±2.65 <sup>a</sup>	0.25±0.50 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>
湖沼股蛤 <i>Limnoperna lacustris</i>	0.25±0.50	0	2.00±4.00	0	0
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	0.25±0.50	1.25±2.50	0.25±0.50	3.75±6.85	0
背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	0.25±0.50	0	0	0.25±0.50	0
羽摇蚊幼虫 <i>Chironomous plumosus</i>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	3.00±3.83 <sup>b</sup>	0.25±0.50 <sup>b</sup>	39.00±18.97 <sup>a</sup>
赛丽异伪蜻 <i>Idionyx selysi</i>	0	0	1.00±2.00	0	0
总丰度	22.00±17.83 <sup>ab</sup>	6.25±4.50 <sup>b</sup>	6.75±7.27 <sup>b</sup>	8.50±10.40 <sup>b</sup>	39.00±18.97 <sup>a</sup>

注:  $p < 0.05$ , 相同字母表示样点间无显著性差异。

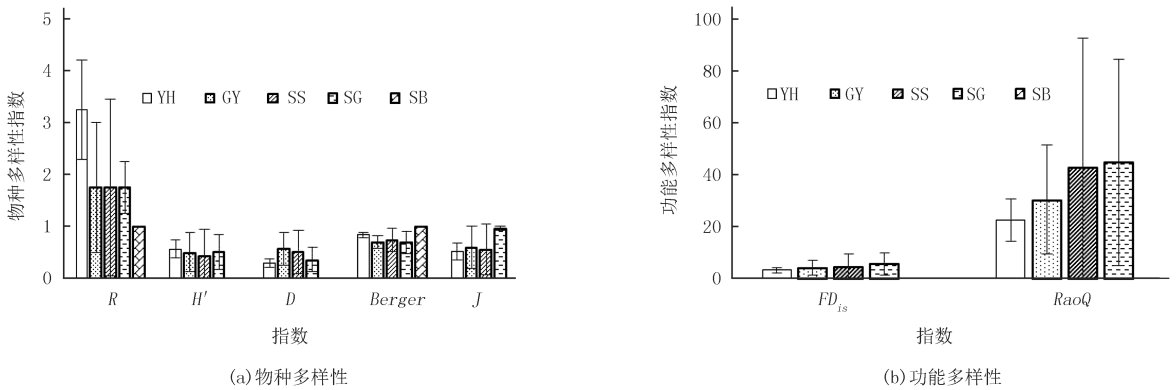


图1 白河南阳段大型底栖动物多样性分析

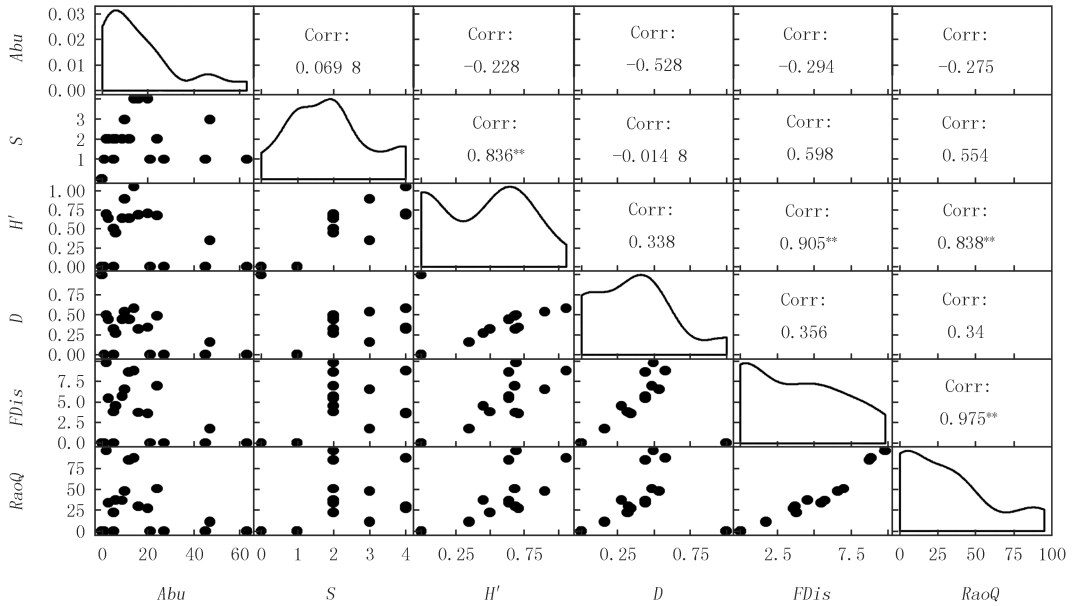
Fig.1 Analysis of macroinvertebrate diversity at sampling sites of Nanyang section of Baihe River

进一步结合环境因子,对大型底栖动物群落分布状况进行直接梯度分析。PCA 排序后得知,第一轴长度为 4.413,需对环境变量和物种变量采用 CCA 直接梯度排序。CCA 结果用二维排序图来表示,图 3(b)中实心三角为生态采样点,空心圆为大型底栖动物物种,箭头为理化性质。轴 1 解释了 31.6% 变量变化梯度,轴 2 解释了 44.6% 变量变化梯度,两轴累计解释量为 76.2%。对所有典型轴的显著性进行 Monte Carlo test,  $F=5.435, p=0.002$ 。排序图展现了环境变量(包括采样位点和水质理化性质)与底栖动物群落分布之间的关系。从该图可以看出,沿第一排序轴方向,泗水河桥和四坝样点均落于第二排序轴右侧,其他 3 个位点均位于右侧,进一步验证了 PCA 排序结果;而且其他 3 个位点物种构成较为丰富,泗水河桥和四坝样点物种构成较为单一。另外,从水质理化性质变化来看,泗水河桥受  $NH_4^+, NO_3^-, TP, MnO_4^-$  4 个理化指标影响较多。

### 3 讨 论

根据群落分析可以看出,白河南阳段流域底栖动物群落分布受人类活动干扰影响较大,从活动干扰较小

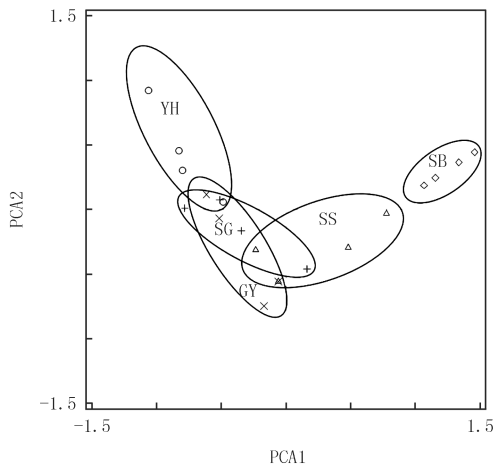
的起点到干扰较大的终点,群落出现了明显的更替,起点以中华圆田螺为主,终点以羽摇蚊为主.中华圆田螺生活史较长、食性较杂,主要以碎屑为食,碎石、沙砾、淤泥底质河流中均有分布,一般适于流速缓慢、贫营养型或中营养型水体<sup>[21]</sup>;而羽摇蚊生活史短,幼虫和蛹生活在水中、以较小碎屑为食,分布范围较广,更偏好有机质丰富的水体,也偏好流速缓慢、贫营养型或中营养型水体<sup>[22]</sup>,这两个物种分属不同门,但在相对较短的河段内,发生了种群的明显更替,说明大型底栖动物可以作为指示人类活动干扰的良好指示生物.



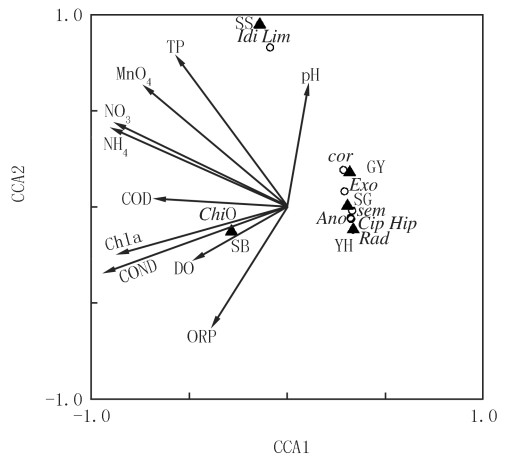
注: \*\*表示 $p < 0.01$ , 具有极显著相关性.

图2 白河南阳段大型底栖动物物种多样性与功能多样性相关矩阵图

Fig.2 Correlation matrix of species diversity and functional diversity of macroinvertebrate in Nanyang section of Baihe River



(a) 生态采样点PCA排序图



(b) 生态采样点、水质理化性质和底栖动物群落CCA排序图

YH: 鸭河大桥, GY: 观音寺, SS: 泗水河桥, SG: 沙岗, SB: 四坝.

图3 白河南阳段河流生态采样点水质理化性质与底栖动物群落分布排序分析

Fig.3 Ordination analysis of water physico-chemical properties and macroinvertebrate community distribution in Nanyang section of Baihe River

分别对 5 个生态位点的水质理化性质进行分析,发现泗水河桥受乡镇生活用水影响,水质发生了明显的恶化,尤其是氨氮、硝态氮、总磷和高锰酸盐的变化明显,水体受到一定程度的污染.河流本身具有自恢复功能,到达沙岗后,水质理化指标整体又有了明显的改善,但从沙岗到四坝,穿越市区后,水质又有所下降.但从物种多样性指数和功能多样性指数分析结果来看, 5 个生态采样点间并没有发现显著性的差异.功能多样性

指数用于表征生态系统的服务功能,反映生态系统的生产力和抗干扰能力,这个结果说明现阶段乡镇和城市生活污水的排放,均未改变该区域水生生态系统的生产力和稳定性。尽管有研究指出,物种多样性指数不能反映生态系统的功能,但是从这个研究中发现,香农威纳指数与 Rao 二次熵指数和功能分散度指数两个功能多样性指数之间,存在着密切的相关性,至少说明在该流域物种多样性的高低可以反映生态系统的生产力和稳定性。

尽管5个生态位点没有生态系统功能的差异,但是通过排序我们也发现,从上游起点鸭河大桥到终点四坝,各个样点的底栖动物群落结构已发生了明显的演替,鸭河大桥与四坝间的差异最为明显,泗水河桥也显示了与其他样点不同的群落分布特征。从这些结果可以看出,受人类活动影响,大型底栖动物群落会做出相应响应,这种响应可以从群落分布的变化上得到验证,即使生态系统功能未发生变化,这种响应也会发生。因此,对河流生态系统功能进行研究时,物种多样性同样重要,它能够反映生态系统的细微变化,为生态系统未来的变化方向提供依据。

## 4 结 论

从本研究可以看出,人类活动的干扰影响了水质和底栖动物群落结构。白河流域南阳段水质在城镇生活用水的影响下,底栖动物群落结构发生了变化,但是生态系统的生产力和稳定性尚未发生改变,底栖动物群落分布状况可以作为生态系统稳定性的监测指标。

## 参 考 文 献

- [1] 蒋万祥,陈静,王红妹,等.新薛河典型生境底栖动物功能性状及其多样性[J].生态学报,2018,38(6):2007-2015.  
JIANG W X, CHAN J, WANG H M, et al. Study of macroinvertebrate functional traits and diversity among typical habitats in the New Xue River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2007-2015.
- [2] 陈静,蒋万祥,贺诗水,等.新薛河底栖动物物种多样性与功能多样性研究[J].生态学报,2018,38(6):340-348.  
CHEN J, JIANG W X, HE S S, et al. Study of macroinvertebrate species and functional diversity in the New Xue River, Shandong Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 340-348.
- [3] 金小伟,王业耀,王备新,等.我国流域水生态完整性评价方法构建[J].中国环境监测,2017,33(1):75-81.  
JIN X W, WANG Y Y, WANG B X, et al. Methods development for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(1): 75-81.
- [4] 王波,梁婕鹏.基于不同空间尺度的河流健康评价方法探讨[J].长江科学院报,2011,28(12):32-35.  
WANG B, LIANG J P. River health assessment method based on different spatial scales[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Insti*, 2011, 28(12): 32-35.
- [5] POFF L N, ALLAN D J, BAIN B M, et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J]. *Bioscience*, 1997, 47: 769-784.
- [6] 陈凯,陈求稳,于海燕,等.应用生物完整性指数评价我国河流的生态健康[J].中国环境科学,2018,38(4):1589-1600.  
CHEN K, CHEN Q W, YU H Y, et al. Methods and prospects of index of biological integrity used for China river ecological health assessment[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1589-1600.
- [7] 郑保海,朱静亚,许信,等.丹江口水库着生藻类群落特征及其水质评价[J].河南师范大学学报(自然科学版),2018,46(4):95-101.  
ZHENG B H, ZHU J Y, XU X, et al. Community structure of periphyton algae and water quality in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 95-101.
- [8] 黄宝强,李荣昉,曹文洪.河流生态系统健康评价及其对我国河流健康保护的启示[J].安徽农业科学,2011,39(8):4600-4602.  
HUANG B Q, LI R F, CAO W H. River eco-system health assessment and implications for river protection in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(8): 4600-4602.
- [9] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of our rivers[J]. *Water*, 1996, 23(5/6): 39-43.
- [10] AN K, PARK S S, SHIN J. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions[J]. *Environment International*, 2002, 28(5): 411-420.
- [11] 赵彦伟,杨志峰.河流健康:概念、评价方法与方向[J].地理科学,2005,25(1):119-124.  
ZHAO Y W, YANG Z F. River health: Concept, assessment method and direction[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 119-124.
- [12] COSTA S S, MELO A S. Beta diversity in stream macroinvertebrate assemblages: Among-site and among-microhabitat components[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 598(1): 131-138.

- [13] LUCIA H O A, LUIZ N J. Aquatic macroinvertebrate diversity and composition in streams along an altitudinal gradient in southeastern Brazil[J]. *Biota Neotropica*, 2010, 10(3): 115-128.
- [14] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
SEPA. Methods for examination of water and wastewater[M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 刘月英, 张文珍, 王跃龙. 中国经济动物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979.  
LIU Y Y, ZHANG W Z, WANG Y L. Economic Fauna of China[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [16] MORSE J C, YANG L, TIAN L. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [17] SHANNON C, WIENER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois, 1949.
- [18] 蔡晓明, 任处长, 宗志祥, 等. 青龙河底栖无脊椎动物群落结构及其水质评价[J]. 应用生态学报, 1992, 3(4): 367-370.  
CAI X M, REN J C, ZONG Z X, et al. Benthic macroinvertebrate communities in Qinglong River and assessment of its water quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(4): 367-370.
- [19] POFF N L R, OLDEN J D, VIEIRA N K M, et al. Functional trait niches of North American lotic insects: Traits-based ecological applications in light of phylogenetic relationships[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(4): 730-755.
- [20] LALIBERTÉ E, LEGENDRE P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits[J]. *Ecology*, 2010, 91(1): 299-305.
- [21] 李学军, 杨俊, 顾钱洪, 等. 洛河东湖水生生物现状调查及水质评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 86-91.  
LI X J, YANG J, GU Q H, et al. Evaluation of the water quality on the aquatic biology investigation data of Luohe East Lake[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 47(3): 86-91.
- [22] MISERENDINO M L. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian rivers and streams: Environmental relationships[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 444(1/2/3): 147-158.

## Assessment of macroinvertebrate functional diversity under human disturbance in Nanyang section of Baihe river

Yang Xiaoming<sup>a,b</sup>, Han Xuemei<sup>a,b</sup>, Liang Zian<sup>a,b</sup>, Gong Zile<sup>a,b</sup>, Zhu Huihui<sup>a</sup>, Li Yuying<sup>b,c</sup>

(a. School of Life Science and Technology; b. Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Middle Route Project of South-North Water Diversion in Henan Province; c. School of Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**Abstract:** The relationship among species diversity, functional diversity and community distribution plays an important role in understanding the functions of ecosystems and predicting the direction of ecosystems. Five typical ecological sampling sites were set up in this research, including Yahe Bridge and Guanyin Temple in the upstream, with farmland as the main flow area and less disturbance; Sishui River Bridge in the middle reaches runs through villages and towns, which is obviously affected by rural domestic water; Shagang and Siba in the downstream, which flow through the main urban area of Nanyang City, are mainly affected by urban domestic water. The species diversity, functional diversity, community distribution and the relationship among them were evaluated. The results showed that the Sishui River Bridge and the Siba were affected by urban domestic water, and the water quality had deteriorated significantly. There were no significant differences in species diversity indices and functional diversity indices between five ecological sampling sites. However, according to the ordination of community distribution, the community structure of macroinvertebrate in each sample point had been significantly different from Yahe Bridge in the upstream to the Siba. The difference between Yahe Bridge and Siba was the most obvious, and Sishui River Bridge also showed a different community distribution characteristics. Shannon-Wiener index was closely related to Rao secondary entropy index and functional dispersion index, which indicated that species diversity in this study could reflect the productivity and stability of ecosystems. When studying the function of river ecosystem, community distribution is equally important. It can reflect the subtle changes of ecosystem and suggest the direction of ecosystem function development.

**Keywords:** macroinvertebrate; species diversity; functional diversity; community distribution