

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024100702

CSTR:32061.14.hjhx.2024100702

李黛青, 夏莎莎, 张镇松, 等. 再生水补给型城市河道水生态环境质量评价方法研究[J]. 环境化学, 2024, 43(12): 4112-4120.

LI Daiqing, XIA Shasha, ZHANG Zhensong, et al. Study on water ecological evaluation method of urban river water with regenerated water recharge[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(12): 4112-4120.

再生水补给型城市河道水生态环境质量评价方法研究*

李黛青 夏莎莎** 张镇松 李洁 李红华

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

摘要 城市河道的水生态环境质量对城市的可持续发展和居民生活质量至关重要. 随着《水污染防治行动计划》的颁布和实施, 我国城市河道水质有了显著的提高. 北方缺水城市普遍采用再生水补给河道, 更易受人类活动影响. 目前城市河道水生态评价技术体系逐渐从单一水质评价转变到水生态环境质量综合评价, 但仍需进一步完善, 特别是对再生水补给型河道, 建立和选择多要素、更适用的综合评价体系和方法尤为重要. 本研究对北方缺水城市中再生水补给型城市河道的水生态环境, 以两条不同护岸类型的河流为研究对象, 进行了包含水质、生境和水生生物的水生态环境质量综合评价, 并讨论了不同水生生物评价指数参与评价的综合评价差异. 研究发现, 尽管两条河流在丰水期和平水期的水质状况相似, 硬质护岸河段的水质略优, 但软质护岸河段在生境条件和底栖动物评价指数上表现更佳; 尤其在平水期, 软质护岸河段的生物多样性更为丰富; 综合评价结果显示, 软质护岸河段的水生态环境质量整体优于硬质护岸河段. 而在水生生物评价指数的选择上, 生物指数(BI)、生物学污染指数(BPI)、香农-维纳多样性指数(H)均能较合理地反映出研究区域城市河道的水生态综合质量. 研究建议, 在河道整治和设计中, 应更多采用软质护岸, 以提升生境和生物多样性, 实现美丽河湖与城市自然环境的融合.

关键词 城市河道, 底栖动物评价指数, 水生态质量综合指数.

中图分类号 X822; O6 文献标识码 A

Study on water ecological evaluation method of urban river water with regenerated water recharge

LI Daiqing XIA Shasha** ZHANG Zhensong LI Jie LI Honghua

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

Abstract The health of urban river is very important to the sustainable development of the city and the quality of life of the residents. With the promulgation and implementation of the Action Plan for Water Pollution Prevention and Control, the water quality of urban river in China has been significantly improved. Urban rivers in arid cities in the north are generally replenished with regenerated water, which are more susceptible to human activities. Currently, the water ecological evaluation technology system is gradually shifting from a single water quality evaluation to a comprehensive evaluation of water ecological quality, but it still needs to be further improved, especially for rivers replenished with regenerated water. It is particularly important to establish and select multi-factor, more suitable comprehensive evaluation systems and methods for such rivers. This study conducted a comprehensive evaluation of water ecological quality, including water

2024年10月7日收稿(Received: October 7, 2024).

* 北京市污染防治专项资金资助.

Supported by the Special Fund for Pollution Prevention and Control in Beijing.

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: ssxia@rcees.ac.cn

quality, habitats, and aquatic organisms, for two rivers with different types of riverbanks in a water-scarce city in the north, and discussed the differences in the comprehensive evaluation results with different aquatic organism evaluation indices. The study found that although the water quality of the two rivers was similar during the high-water period and the normal-water period, the water quality of the hard armor protection river was slightly better, but the softbank protection river performed better in terms of habitat conditions and the evaluation indices of zoobenthos; in particular, the biological diversity was more abundant in the softbank protection river during the normal-water period. The comprehensive evaluation results showed that the water ecological quality of the softbank protection river was overall better than that of the hard armor protection river. In terms of the selection of aquatic organism evaluation indices, the biotic index (BI), the biological pollution index (BPI), and the Shannon-Wiener diversity index (H) could all reasonably reflect the comprehensive water ecological quality of the study area's urban rivers. The study suggests that more softbank protection rivers should be adopted in river embankment and design to improve habitats and biodiversity and achieve the integration of beautiful rivers and natural environments in cities.

Keywords surban river, evaluation indices of zoobenthos, comprehensive evaluation of water ecological quality.

在当今快速城市化和工业化的背景下,城市河道作为城市生态系统的重要组成部分,其水生态环境质量直接关系到城市的可持续发展和居民的生活质量.我国自八十年代设立水质监测指标和标准以来,对水质进行了有效的污染治理,特别是随着《水污染防治行动计划》的实施,通过截污减排、中水回用等水环境治理和水资源利用措施,我国城市河道水环境质量得到了显著提升.我国北方城市多为缺水城市,以再生水作为水源补给的城市河道较为普遍.但常规的水质监测指标很难准确反映复杂的水生态环境变化趋势,不能满足日益提高的水环境管理评价需求,也无法满足《重点流域水生态环境保护“十四五”规划》中提出的水资源、水环境、水生态综合治理(即“三水统筹”)的要求.目前城市河道水生态环境质量评价技术体系的研究和应用还有待完善,对城市中心区河道开展水生生物和生境调查的基础数据较少,特别是针对再生水补给型城市河道的水生态评价体系也相对较少^[1-4].因此,构建多要素、更适用的城市河道水生态环境综合评价体系和评估方法是非常必要的.

本研究以北京市海淀区的两条河流为例,综合考虑水质、生境和水生生物三大要素,根据生物生长周期,在丰水期和平水期分别展开监测,并采用多种评价指标进行水生态综合评价,筛选出适合评价本地再生水补给型城市河道水生态质量的评价指标,为北方缺水地区城市河道水生态综合评价和水生态修复提供基础资料和参考信息.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

研究区位于北京市海淀区(北纬 39°53′—40°09′,东经 116°03′—116°23′),属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均气温 12.5 °C,7月平均气温 25.8 °C,9月平均气温 19.5 °C,年均降雨量为 600—700 mm,降雨量年内分布不均,75%降雨集中在 6—8 月份,区内河流属于北运河水系.研究选取位于海淀区北部和南部的两条规模相当,且近五年内均未进行清淤作业、水质现状基本一致的河流作为研究对象,两条河流均以水库、再生水厂补水为主,沿途没有污水直接排放,水闸均处于开启状态.

1.2 样品采集与监测

本次研究对水质、生境和水生生物进行同步调查监测,在 2023 年 7 月初(丰水期)和 9 月中下旬(平水期)各监测 1 次.其中北部的为软质护岸不可涉水河流(H1)、南部的为硬质护岸可涉水河流(H2).每条河流分别设置 3 个监测点位 S1、S2、S3,并以每个监测点位为中心,上下游各 50 m 分别采集样品.监测点位如图 1 所示.

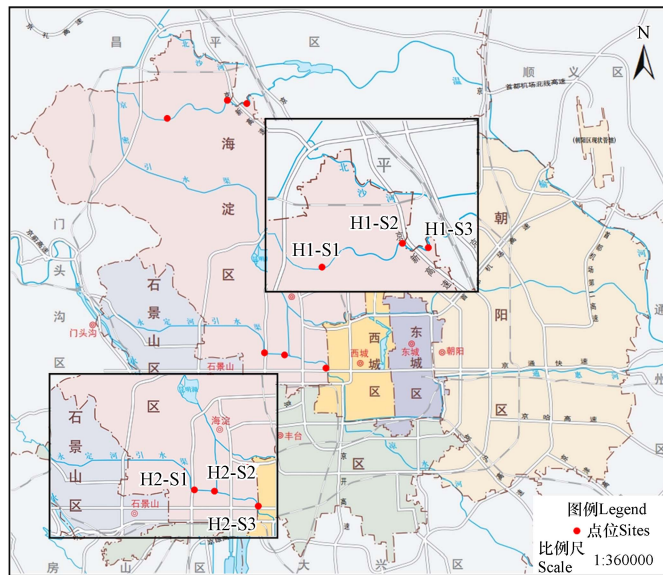


图 1 监测点位分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites

水质监测指标包括 pH、溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷、氟化物、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂、硫化物、硒、砷、汞、铜、锌、镉、铅、六价铬等 21 项指标。

对监测点位周边开展生境调查, 选用底质、栖境复杂性、流速/深度结合特性、河岸稳定性、河道变化、水量、河岸带植被覆盖率、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型等 10 项生境指标。

河流水生生物监测选用对环境响应较敏感着生藻类、大型底栖无脊椎动物(以下简称底栖动物)和鱼类^[5]。由于研究区域存在河面打捞清洁、人工放流等行为, 而底栖动物具有活动范围相对固定、寿命相对较长、受外界人为活动干扰较少等诸多优势, 因此以底栖动物为代表对水生生物进行生物学评价, 被广泛应用于河流的水生生物监测和水生态环境质量评价中^[6-7]。本研究选用底栖动物为水生生物监测对象, 通过定性样品采集和定量样品采集, 在实验室开展鉴定和计数, 并计算采样点位的物种数量和个体密度^[5]。

1.3 数据处理与分析

数据分析与图表制作采用 Excel 和 Origin2021 软件完成。

1.3.1 水质评价

采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的单因子评价法^[8]。

1.3.2 生境评价

每项生境指标分值为 0—20, 每个点位的生境总分由以上 10 项生境指标分值累加^[9]。

1.3.3 底栖动物评价

计算底栖动物的物种数量和个体密度, 并选用生态监测和相关研究中使用较多、适用于底栖动物的 4 种评价指数进行评价。香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index, H)可以对物种多样性开展评价, 生物指数(Biotic index, BI)和生物监测工作组记分(Biological monitoring working party, BMWP)分别依据定量和定性监测数据评价底栖动物类群对污染物的耐受性或敏感性差异, 生物学污染指数(Biological pollution index, BPI)可以反映底栖动物指示类群的结构特征。分别计算 Shannon-Wiener 多样性指数(H)、生物指数(BI)、生物学污染指数(BPI)和生物监测工作组记分(BMWP)。计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^{N_i} \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

$$BI = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{n_i}{N} t_i \quad (2)$$

$$BPI = \frac{\lg(n_1 + 2)}{\lg(n_2 + 2) + \lg(n_3 + 2)} \quad (3)$$

$$BMWP = \sum_{i=1}^{N_z} F_i \quad (4)$$

式中, N_s 为物种数; i 为第 i 个物种; n_i 为物种 i 的个体数; N 为生物个体总数; t_i 为物种 i 的耐污值; n_1 是寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数; n_2 是多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的其他水生昆虫的个体数; n_3 是软体动物个数; N_z 为科级分类单元; BMWP 指数计算中 i 为第 i 个科; F_i 为科 i 的记分。

1.3.4 综合评价

通过水质、生境和水生生物各指标评价赋分结果及其权重求和, 计算水生态质量综合指数 (WEQI), 公式如下:

$$WEQI = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (5)$$

式中, x_i 为评价指标赋分值; w_i 为评价指标权重, 分别取水质指标 0.4、生境指标 0.2、水生生物指标 0.4。

根据 WEQI 分值, 将水生态环境质量状况等级分为 5 级, 水质、生境、水生生物各指标评价赋分情况和 WEQI 分级情况详见表 1^[9]。

表 1 水生态环境质量评价等级及赋分标准

Table 1 Water eco-environment quality assessment levels and scoring standards

评价指标 Parameters	赋分标准 Scoring standards				
	5	4	3	2	1
水质	I、II	III	IV	V	劣V
生境	>150	120-150	90-120	60-90	≤60
H	$H > 3.0$	$2.0 < H \leq 3.0$	$1.0 < H \leq 2.0$	$0 < H \leq 1.0$	$H = 0$
BI	$BI \leq 3.9$	$3.9 < BI \leq 5.4$	$5.4 < BI \leq 7.0$	$7.0 < BI \leq 8.5$	$BI > 8.5$
BPI	$BPI < 0.1$	$0.1 \leq BPI < 0.5$	$0.5 \leq BPI < 1.5$	$1.5 \leq BPI < 5$	$BPI \geq 5$
BMWP(不可涉水)	$BMWP \geq 86$	$65 \leq BMWP < 86$	$43 \leq BMWP < 65$	$22 \leq BMWP < 43$	$BMWP < 22$
BMWP(可涉水)	$BMWP \geq 146$	$110 \leq BMWP < 146$	$73 \leq BMWP < 110$	$37 \leq BMWP < 73$	$BMWP < 37$
WEQI	$WEQI = 5$	$4 \leq WEQI < 5$	$3 \leq WEQI < 4$	$2 \leq WEQI < 3$	$1 \leq WEQI < 2$
评价等级	优秀	良好	中等	较差	很差

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 水质分析和评价

根据本研究的监测结果显示, 研究河段 H1 和 H2 在丰水期、平水期的水质类别均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的 IV 类水质。21 项监测指标中, 重金属等污染物均未检出, 影响城市黑臭水体和河流水生态环境质量的主要指标溶解氧 (DO)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、化学需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD)、氨氮 (NH_4^+-N)、总磷 (TP)、总氮 (TN) 等的河段水质平均监测结果如图 2 所示。可以看出, 水质指标在丰水期和平水期的变化差异不是很大, H2 的水质指标浓度相对较低、水质整体略好。H1 和 H2 河段均以水库、再生水厂补水为主, 河段的水质现状更大程度上与汇入的再生水水质执行标准相关。

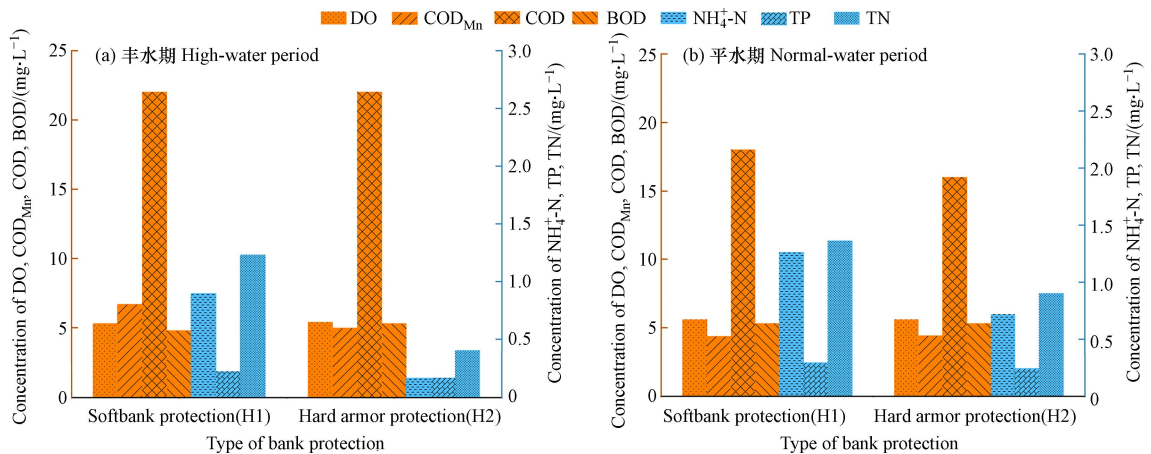


图 2 不同河段的水质监测指标在丰水期和平水期的浓度变化

Fig.2 The concentration changes of water quality indexes in different river types during high and normal water periods

2.2 生境调查和评价

根据 H1 和 H2 的河流类型,所有监测点位的生境调查评分和河段整体得分如表 2 所示. H1 河段是软质护岸,河岸周边多为植物、土壤等原生态环境和天然材料组成的生态护岸形式,能够更好地适应河岸的自然变形和水流变化,不仅有利于水土保持,还能对水体修复和生态多样性的提升起到积极作用,整体生境情况更好. H2 河段是硬质护岸,为混凝土和装饰石材等硬质材料建成的直立式护岸形式,具有更强的结构强度和稳定性,可以有效抵御水流的冲刷,但对该河流区域的水生生物栖息地会造成影响,对河道的生物多样性和自净化能力也有负面影响^[10-11].

表 2 研究区域河流生境调查结果

Table 2 River habitat survey results in the study area

监测点位 Sampling sites	生境得分 Habitat survey scores		河段得分 Average		生境等级 River habitat level		评价赋分 Scores	
	丰水期 High-water period	平水期 Normal-water period	丰水期 High-water period	平水期 Normal-water period	丰水期 High-water period	平水期 Normal-water period	丰水期 High-water period	平水期 Normal-water period
	H1-S1	128	126					
H1-S2	122	129	125	141	良好	良好	4	4
H1-S3	124	169						
H2-S1	92	105						
H2-S2	92	102	92	107	中等	中等	3	3
H2-S3	91	113						

2.3 水生生物分析和评价

2.3.1 时空分布特征

水生生物的变化可以直观表现水环境质量的变化,特别是底栖动物具有的长期性、敏感性、稳定性等优势^[6-7]. 监测结果表明 H1 和 H2 都表现为平水期物种数量高于丰水期;相同水期 H1 的底栖动物物种数量较 H2 更高(图 3). 而底栖动物各类群密度占比的表现较物种数量更为复杂(图 4): H2 在两个水期均是软体动物为主要类群,占比分别达到 73% 和 68%; H1 的 3 个类群占比在不同水期发生了明显变化,丰水期以软体动物和节肢动物为主,占比分别 52% 和 46%,而平水期变为以节肢动物为主,占比达到 57%. 此外在平水期调查中, H1 河段发现了被称为“EPT 物种”的蜉蝣目(Ephemeroptera)四节蜉科物种、细蜉科物种和毛翅目(Trichoptera)纹石蛾科物种, EPT 物种为清洁水体指示物种,对环境变化反应较快,可用于预测水生生态风险^[12-14].

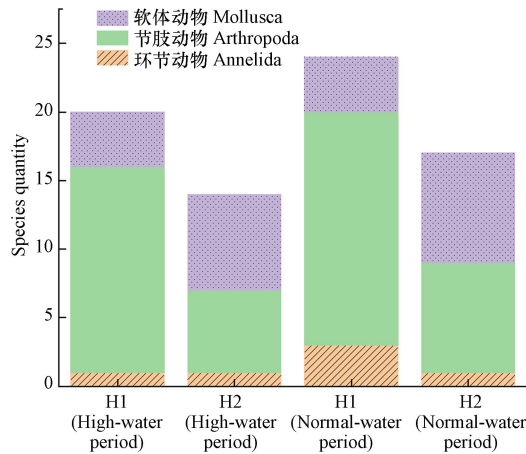


图 3 不同河段监测期间各类群物种数量变化

Fig.3 Changes of species quantity in different river types during high and normal water periods

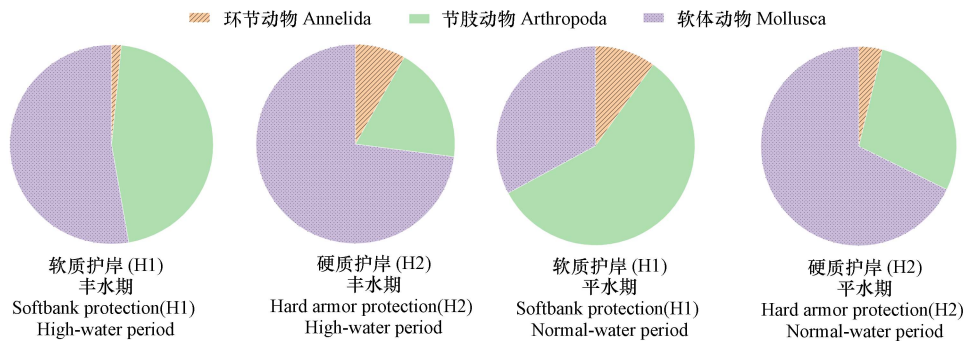


图 4 底栖动物各类群密度所占比例

Fig.4 Distribution of community densities for zoobenthos

2.3.2 水生生物分析与评价

本研究中,底栖动物多种评价指数结果显示(表 3),不同评价指数和对应评价等级虽有差异,但整体趋势是一致的,软质护岸河段(H1)优于硬质护岸河段(H2),平水期略优于丰水期.分析其中原因,软质护岸对水生态环境质量和生态多样性方面都有积极影响,而平水期处于秋季,河流生态系统凋落物的输入量增大,加上水温适宜,可以为部分底栖动物提供充足的食物和栖息场所^[15].

表 3 水生生物评价指数结果和赋分情况

Table 3 Assessment levels of evaluation indices and scores for aquatic organisms

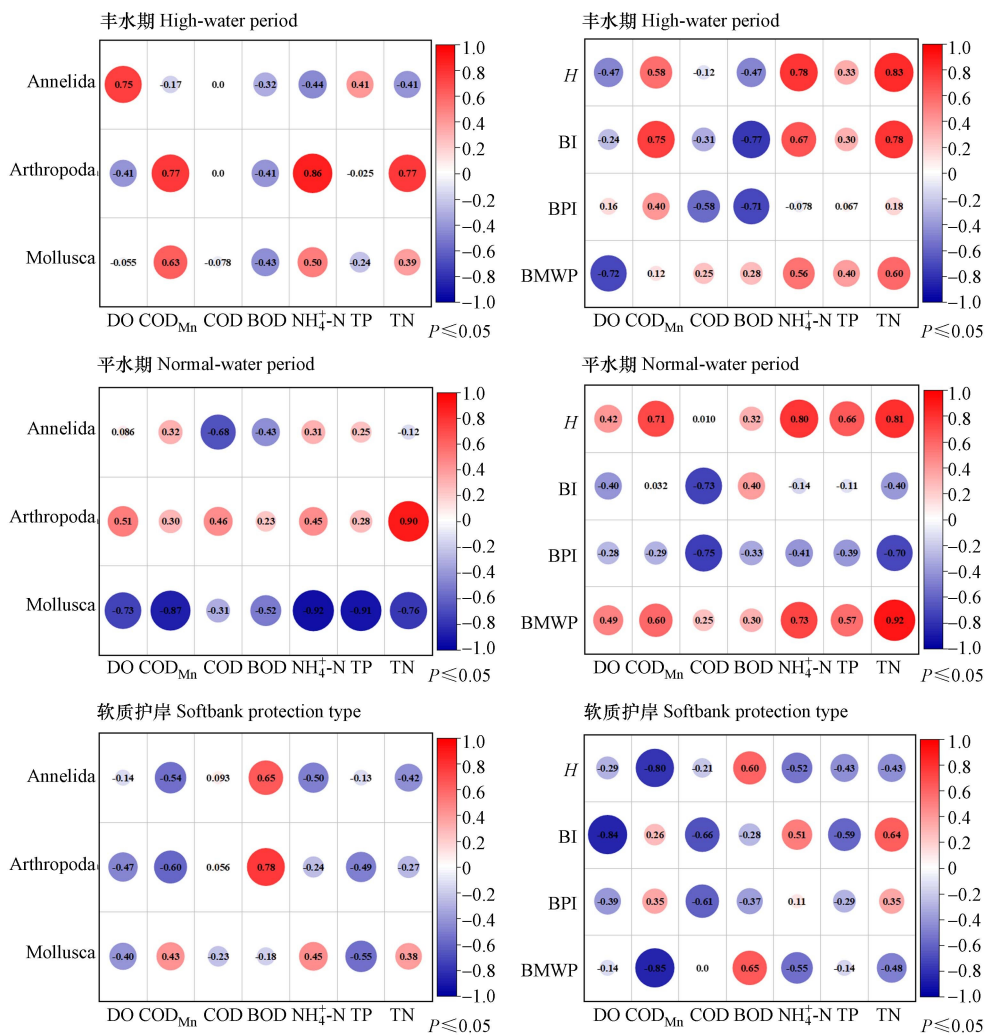
评价指数 Evaluation indices	监测时间 Periods	软质护岸(H1) Softbank protection(H1)			硬质护岸(H2) Hard armor protection(H2)		
		指数值 Values	评价等级 Levels	赋分 Scores	指数值 Values	评价等级 Levels	赋分 Scores
		<i>H</i>	丰水期	2.3	良好	4	2.2
	平水期	3.2	优秀	5	2.0	中等	3
<i>BI</i>	丰水期	5.9	中等	3	5.6	中等	3
	平水期	5.6	中等	3	5.6	中等	3
<i>BPI</i>	丰水期	0.4	良好	4	0.4	良好	4
	平水期	0.3	良好	4	0.4	良好	4
<i>BMWP</i>	丰水期	33	较差	2	32	很差	1
	平水期	57	中等	3	38	较差	2

指数评价结果间的差异,很大程度上是由参与计算的不同参数造成的.因各指数适用和评价的侧重点不同,Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)侧重于物种多样性,受底栖动物类群种类影响较为明显;生物指数(*BI*)和生物学污染指数(*BPI*)从不同类群对污染物耐受性和指示类群分布方面进行评价,

H1 和 H2 河段河流水量为人工调度, 丰水期和平水期水量变化不大, 底栖动物种类和优势种较为相似, 对污染物耐受性无明显差异; 生物监测工作组记分(BMWP)评价结果为中等至很差, 主要原因是因其使用底栖动物定性监测数据结合底栖动物类群的敏感值进行计算, 而该敏感值定义到科, 但不同地域底栖动物类群对污染的敏感程度还有待进一步研究调整. 整体来看, 城区河流底栖动物采用 BI、BPI、*H* 评价更符合实际情况.

2.3.3 水环境因子与底栖动物群落结构的相互关系

本次研究还针对水环境因子与底栖动物群落结构间的相互关系进行了探讨(图 5). Pearson 相关结果表明, 水环境因子对底栖动物群落的栖息密度和水生生物评价指数有不同程度的影响, 其中 DO、COD_{Mn}、NH₄⁺-N、TP 和 TN 是主要影响因素. 不同监测水期 and 不同护岸类型下, 影响因素和相互关系也不相同. 丰水期时, NH₄⁺-N 与节肢动物的栖息密度呈显著正相关($P < 0.05$), TN 与 *H* 指数呈显著正相关($P < 0.05$); 平水期时, 水环境因子影响更为明显、且影响方向也不同, COD_{Mn}、NH₄⁺-N 和 TP 均与软体动物栖息密度呈显著负相关($P < 0.05$), TN 与节肢动物栖息密度、BMWP 指数呈显著正相关($P < 0.05$). 对于软质护岸(H1), 各类群栖息密度都没有受到水环境因子的显著影响, 但 BI 和 BMWP 指数分别与 DO 和 COD_{Mn} 呈显著负相关($P < 0.05$); 而硬质护岸的类群栖息密度明显受水环境因子影响更大, COD_{Mn}、NH₄⁺-N 和 TP 均与软体动物栖息密度呈显著负相关($P < 0.05$), TN 与 *H* 指数呈显著正相关($P < 0.05$)、但与 BPI 指数呈显著负相关($P < 0.05$). 由此可见, 在不同监测水期, 水环境因子对群落结构有显著影响, 但对水生生物评价指数的影响不显著; 对于不同护岸类型的河段, 水环境因子对 H2 底栖动物群落结构的影响明显高于 H1, 即软质护岸河段底栖动物的群落结构受水质影响更小, 而在对不同河段水生生物评价指数的影响上没有一致趋势.



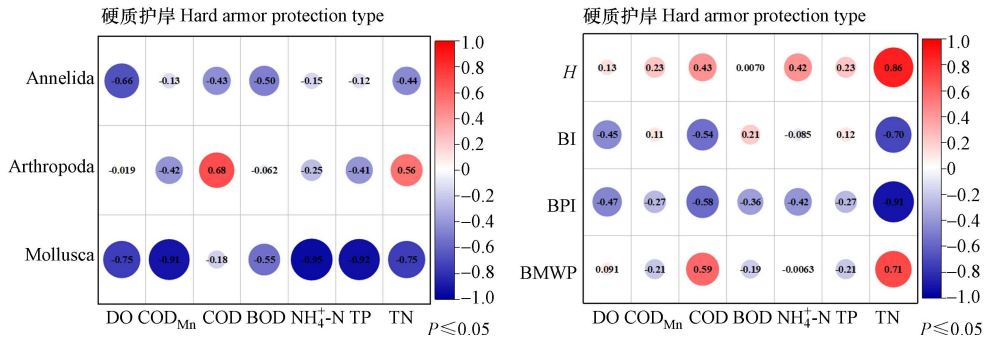


图 5 底栖动物种群密度、评价指数与水环境因子的 Pearson 相关关系

Fig.5 Pearson correlations between community densities/diversity index and aquatic factors

2.4 水生态环境质量综合评价

本研究利用综合指数法对 H1 和 H2 河段进行水生态环境质量综合评价^[9],其中水生生物指标分别采用了针对底栖动物进行的 4 种评价指数^[5],得到基于不同评价指数的综合评价结果(表 4)。

采用 BI、BPI 指数计算 WEQI 时,不同护岸形式河流在丰水期、平水期的 WEQI 值相同、均属于中等;采用 H 和 BMWP 计算 WEQI 时,平水期软质护岸河段(H1)的 WEQI 结果都更好.可以看出,采用不同的底栖动物评价指数参与 WEQI 评价,评价结果略有差异,但总体趋势一致,即从生物多样性、对污染物的敏感性看,具有软质护岸河流优于硬质护岸河流,平水期优于丰水期。

表 4 不同河段不同水期 WEQI 评分结果

Table 4 WEQI scores of different river types during high-water and normal-water periods

评价指数 Evaluation indices	监测时间 Periods	软质护岸(H1) Softbank protection(H1)		硬质护岸(H2) Hard armor protection(H2)	
		WEQI评分 WEQI values	评价等级 Levels	WEQI评分 WEQI values	评价等级 Levels
H	丰水期	3.6	中等	3.4	中等
	平水期	4.0	良好	3.0	中等
BI	丰水期	3.2	中等	3.0	中等
	平水期	3.2	中等	3.0	中等
BPI	丰水期	3.6	中等	3.4	中等
	平水期	3.6	中等	3.4	中等
BMWP	丰水期	2.8	较差	2.2	较差
	平水期	3.2	中等	2.6	较差

3 结论(Conclusion)

再生水补给型城市河道作为北方缺水城市河流生态的重要组成部分之一,对其构建全方位并兼具普适性的水生态环境综合评价体系和评估方法是非常必要的.本研究通过对北京市海淀区的两条不同护岸类型的再生水补给型河流进行了调查与监测,通过结合水质、生境和水生生物等 3 方面对研究河段进行了水生态环境质量综合评价,并分析了多种水生生物指数参与综合评价的结果,得出以下结论:

(1)两条研究河流均以水库、再生水厂补水为主,丰水期和平水期的水质现状相差不大,因来水水质不同,硬质护岸河段水质略优。

(2)软质护岸河段生境调查结果明显优于硬质护岸河段,两条河流的生境情况在平水期与丰水期的表现一致,均为平水期略好。

(3)两条河流的底栖动物物种数量均表现为平水期高于丰水期,软质护岸河段物种数量更多;底栖动物各类群密度占比的表现更为复杂,硬质护岸河段在不同水期均以软体动物密度占比最高,软质护岸河段在丰水期以软体动物和节肢动物密度占比更高,平水期以节肢动物密度占比最高。

(4)根据多种底栖动物评价指数计算结果,不同评价指数和对应的评价结果虽有差异、但趋势一致,软质护岸河段优于硬质护岸河段,平水期略优于丰水期;根据统计学分析发现,软质护岸河段的底栖动物群落结构受水质影响更小。

(5)软质护岸河段的水环境质量综合评价要优于硬质护岸河段,采用不同底栖动物评价指数参与WEQI评价后发现,评价结果略有差异,但总体趋势一致。

基于本次研究成果,发现通过水质、生境评价和水生生物评价指数进行赋分,并按设定权重计算综合评价指数,存在一定的主观性,但有利于改变几十年来仅依靠单一水质指数评价河流环境状况的情况,更符合新时期“三水统筹”“美丽河湖”建设的需要。建议在河道整治和新建河道设计中,兼顾用地、防洪、生态修复和滨水游憩休憩功能,更多地采用软质护岸以提升生境多样性和生物多样性,做到美丽河湖与城市大自然融合。

参考文献 (References)

- [1] 宋晓聪,沈鹏,赵慈,等. 2021—2035年我国水污染防治战略路径研究[J]. 环境保护, 2021, 49(10): 42-46.
SONG X C, SHEN P, ZHAO C, et al. Study on the strategic path of water pollution prevention and control in China from 2021 to 2035[J]. Environmental Protection, 2021, 49(10): 42-46 (in Chinese).
- [2] 徐敏,张涛,王东,等. 中国水污染防治40年回顾与展望[J]. 中国环境管理, 2019, 11(3): 65-71.
XU M, ZHANG T, WANG D, et al. Review and prospect of water pollution prevention and control of China in the forty years of reform and opening-up[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(3): 65-71 (in Chinese).
- [3] 孟婷婷,董月群,闻丞,等. 生物多样性导向的再生水补给型城市河道水生态修复效果[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1552-1561.
MENG T T, DONG Y Q, WEN C, et al. Biodiversity-oriented water ecological restoration effect in urban river with reclaimed water supply[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1552-1561 (in Chinese).
- [4] 李文泉,南贵珍,牟天瑜. 城市河道生态评价体系构建研究[J]. 环境科技, 2023, 36(3): 54-58,65.
LI W Q, NAN G Z, MU T Y. Study on the evaluation method of urban river ecological environment quality[J]. Environmental Science and Technology, 2023, 36(3): 54-58,65 (in Chinese).
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价: HJ 1295—2023[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for water ecological monitoring—aquatic organism monitoring and evaluation of rivers(on trial): HJ 1295—2023[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2023 (in Chinese).
- [6] 罗彪,孙丹焱,郑涛,等. 基于底栖动物群落特征的再生水回用河道环境质量评价[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 64-70.
LUO B, SUN D Y, ZHENG T, et al. Environmental quality assessment of river with reclaimed water based on characteristics of benthic communities[J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(1): 64-70 (in Chinese).
- [7] 吴东浩,王备新,张咏,等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 129-134.
WU D H, WANG B X, ZHANG Y, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(2): 129-134 (in Chinese).
- [8] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [9] 中国环境监测总站. 河流水生态环境质量监测与评价技术指南[R]. 北京: 中国环境监测总站, 2021.
China National Environmental Monitoring Centre. Technical guidelines for water ecological environment quality monitoring and assessment of rivers[R]. Beijing: China National Environmental Monitoring Centre, 2021 (in Chinese).
- [10] 陈勇,朱丽丽,张浩,等. 生态护岸研究综述[J]. 中国水运(下半月), 2024, 24(3): 82-84.
CHEN Y, ZHU L L, ZHANG H, et al. Review on Ecological Shoreline Restoration[J]. China Water Transport, 2024, 24(3): 82-84 (in Chinese).
- [11] 陈丙法,黄蔚,陈开宁,等. 河道生态护岸的研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 74-77,168.
CHEN B F, HUANG W, CHEN K N, et al. Research progress on the ecological revetment in riparian[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 74-77,168 (in Chinese).
- [12] 李飞龙,丁森,张远,等. 太子河流域不同水生态区EPT群落时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(12): 1833-1842.
LI F L, DING S, ZHANG Y, et al. Spatial and temporal distribution of EPT community in different freshwater ecoregions in Taizi River basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(12): 1833-1842 (in Chinese).
- [13] PANDER J, GEIST J. Ecological indicators for stream restoration success[J]. Ecological Indicators, 2013, 30: 106-118.
- [14] STOYANOVA T, VIDINOVA Y, YANEVA I, et al. Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera as indicators for ecological quality of the Luda Reka River, Southwest Bulgaria[J]. Acta ZoologicaBulgarica, 2014, 66(2): 255-260.
- [15] 傅海霞,张玉洲,黄书雅,等. 徽水河底栖动物群落结构季节动态及构建机制[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(6): 1239-1249.
FU H X, ZHANG Y Z, HUANG S Y, et al. Seasonal dynamics and assembly mechanism of macroinvertebrate community in Huishui River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(6): 1239-1249 (in Chinese).