

DOI: 10.5846/stxb202004291043

马康, 史璇, 尤晓光, 刘静玲. 河流岸带湿地沉积物重金属分布对植被物种多样性和底栖动物群落特征的影响. 生态学报, 2021, 41(5): 2001-2010.

Ma K, Shi X, You X G, Liu J L. Relationship of the heavy metals distribution in sediments to vegetation diversity and macroinvertebrate communities in riparian wetlands. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 2001-2010.

河流岸带湿地沉积物重金属分布对植被物种多样性和底栖动物群落特征的影响

马 康^{1,2}, 史 璇¹, 尤晓光^{1,3}, 刘静玲^{1,2,*}

1 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学流域环境生态工程研发中心, 珠海 519087

3 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088

摘要:河流岸带湿地栖息地完整性对河流水环境、水生态和水文的安全与健康具有重要意义,为探究河流岸带湿地表层沉积物重金属分布特征及其对植被和底栖动物的影响,对滦河干流上中下游河段表层沉积物、植物群落和底栖动物调查分析,采用生物毒性效应系数法和综合潜在生态风险指数法评价沉积物重金属污染特征,采用植被物种多样性指数和底栖动物完整性指数评价滦河植物和底栖动物群落特征,探究岸带湿地沉积物重金属空间分布与植被及底栖动物群落特征之间关系。结果表明,滦河表层沉积物总体呈清洁水平,但不同河段重金属空间分布差异较大,下游重金属生态危害系数和潜在生态风险指数高于上中游。湿地物种调查共识别维管束植物 219 种,大型无脊椎底栖动物 105 种,综合评价结果表明下游植物群落物种多样性和底栖动物群落完整性低于上中游。滦河下游岸带湿地沉积物重金属对生物群落具有生物毒性和潜在的生态风险,降低了植被物种多样性和底栖动物群落完整性。大型底栖动物完整性指数能够综合反映底栖动物群落结构特征变化,对河岸带湿地生态健康评价和监测具有重要意义。

关键词:表层沉积物;重金属;植被;大型底栖动物;岸带湿地

Relationship of the heavy metals distribution in sediments to vegetation diversity and macroinvertebrate communities in riparian wetlands

MA Kang^{1,2}, SHI Xuan¹, YOU Xiaoguang^{1,3}, LIU Jingling^{1,2,*}

1 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Research and Development Center for Watershed Environmental Eco-Engineering, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai 519087, China

3 China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China

Abstract: River habitat integrity plays a key role in maintaining the safety and health of environment, ecology, and hydrology of rivers. To investigate the relationship of the distribution of heavy metals in sediments to vegetation diversity and macroinvertebrate communities in riparian wetlands, the surface sediments, vegetations and benthic invertebrates were sampled in Luanhe River. Six heavy metals, including Ni, Cr, Zn, Cu, Pb and Cd, were measured. Effects range-median quotient and integrated potentially ecological risk index were calculated to evaluate the pollution characteristics of heavy metals. The biological communities were assessed with the application of vegetation diversity index and benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity (B-IBI). The results showed that the surface sediments of Luanhe River

基金项目:国家自然科学基金广东联合基金重点项目(U1901212);广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项(GDNRC[2020]064);国家水体污染控制与治理科技重大水专项(2012ZX07203-006)

收稿日期:2020-04-29; 网络出版日期:2021-01-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jingling@bnu.edu.cn

were at clean status, but the distribution of heavy metals varied substantially in different sections. Along the river, the ecological harm index and potential ecological index were the highest at the lower reaches. A total of 219 vascular plant species and 105 macroinvertebrate species were collected in Luanhe River. The plant diversity and benthic macroinvertebrate integrity was lower in the downstream than in the middle and up stream. Overall, heavy metals in sediments of the downstream showed a high potentially biological toxicity on biological communities in Luanhe River, reducing the vegetation species diversity and benthic community integrity in the riparian wetlands. The B-IBI reflects the change of the structural characteristics of benthic macroinvertebrate communities effectively and has significant implications in assessing ecological health of riparian wetlands.

Key Words: surface sediments; heavy metal; vegetation; macroinvertebrate; riparian wetland

河流生态系统中自然存在重金属微量元素,主要来源于岩石侵蚀、水动力迁移等地球化学作用。随着社会发展,人类生产生活直接或间接向自然水体中排放大量重金属,成为水体中重金属的主要来源,对水生生态系统造成不同程度生态风险。重金属污染物具有高毒性、不可降解性和生物蓄积性等特点,进入河流后大量滞留在水体中,被水体中悬浮物吸附,沉积在河流沉积物中^[1]。长期沉积作用使河流沉积物成为河流重金属主要受体,当水环境条件改变,重金属重新进入水体,形成“二次污染”。因而,河流沉积物不仅是重金属主要储存库,也是重金属潜在释放源,即使污染源消除,受重金属污染的沉积物也可以长时间缓慢释放重金属,从而延长重金属污染时间,对河流生态系统健康具有长期影响。

河流沉积物不仅是河流重金属污染物的重要贮存库和释放源,还是河流湿地生物如植物、大型无脊椎动物的重要栖息地^[2-3]。沉积物释放的重金属通过水流迁移或富集作用进入植物体内,对生物体产生毒性效应,使得抗逆性低的植被死亡,降低植物群落多样性^[4]。沉积物-水界面是底栖动物主要生活场所,重金属污染的细沉积物可被底栖动物吞食^[5],使无脊椎动物生长受到抑制,底栖动物群落受到破坏^[6-7]。例如 Costas 等^[8]研究发现沉积物重金属含量与底栖生物群落结构多样性指标显著相关,重金属污染点位 EPT 昆虫(蜉蝣目 *Ephemeroptera*、襀翅目 *Plecoptera* 和毛翅目 *Trichoptera*) 数目显著高于参照点。类似的, Bere 等^[9]研究表明沉积物金属改变了大型底栖无脊椎动物群落物种组成,且重金属污染程度较低时对底栖动物群落组成的影响依旧显著。

滦河隶属于海河流域,是京津冀城市群的重要水源地,也是北方重要的生物栖息地,其生态健康对于区域经济、社会以及生态等方面可持续发展具有重要意义。进入 21 世纪,随着城市化进程和工农业发展,滦河水环境受到人类活动严重影响,例如,流域径流减少^[10],部分河段富营养化^[11],水体重金属含量超标^[12-13],水和沉积物中存在化学品多环芳烃(PAHs)污染的潜在生态风险^[14]。河流污染物对生物群落具有生物毒性和潜在生态风险,因而,明确沉积物重金属分布与湿地生物群落特征的关系是当前河流生态管理和保护亟待解决的问题。

本研究以滦河岸带湿地为研究对象,采用沉积物生物毒性效应系数法和内梅罗指数法评价沉积物重金属污染生物毒性和生态风险,通过计算植物物种多样性指数和底栖动物完整性指数探究滦河植被和底栖动物群落特征,分析沉积物重金属分布、植被和底栖群落特征的关系,旨在为滦河流域河流生态风险管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滦河流域(115°34'—119°50'E, 39°02'—42°43'N)地跨蒙古高原和华北平原,地势由西北向东南倾斜,面积约 4.47 万 km²。滦河发源于河北省丰宁满族自治县西北巴彦古图尔山麓,上游属内蒙古高原区,中游为华北山地丘陵区,下游为冀北平原区,由河北乐亭县入渤海,水系呈羽状分布,全长约 888 km。滦河流域年均降

水量 553.2 mm,夏季多冬季少,汛期为 7—8 月,枯水期为 1—2 月,受降雨量影响,径流量年内变化较大,平均径流量 47.9 亿 m^3 ,气候为典型温带大陆性季风气候^[15]。

1.2 样点布设和数据获取

根据已有研究对滦河流域生态分区,结合两岸地形、气候、植被、土壤类型等特点,在河流上游高原区(L1—L4)、中游山区(L5—L10)、下游平原区(L11—L14),依次布设 L1-大滩镇(41°34′42″N, 115°59′18″E)、L2-白城子(41°19′05″N, 116°28′31″E)、L3-石人沟(41°21′23″N, 116°20′35″E)、L4-红旗营房(42°04′16″N, 116°42′37″E)、L5-外沟门(41°52′148″N, 115°33′32″E)、L6-郭家屯(41°34′53″N, 117°05′53″E)、L7-太平庄(41°13′28″N, 117°22′50″E)、L8-西沟(41°08′55″N, 117°29′52″E)、L9-张百湾(40°59′42″N, 117°29′30″E)、L10-三道河(40°58′04″N, 117°42′52″E)、L11-迁西大桥(40°09′37″N, 118°18′43″E)、L12-马兰庄(40°06′53″N, 118°37′01″E)、L13-王家楼(39°34′37″N, 118°52′49″E)、L14-姜各庄(39°27′39″N, 119°08′12″E)共计 14 个样地,于 2014 年 7 月从滦河源头到河口进行野外采样和实地调查。

采用样方法在滦河岸带植被类型样地进行取样,植被调查采样面积参照草本层设计,每个样点处设置 10 个 2 m×2 m 样方,总计 140 个样方,记录样方植被覆盖度、物种丰度、物种名称等植被信息。底栖动物样品利用直径 1/16 m^2 采泥器在河岸带区域采集,每个点位采集多于 3 个子样品混合,样品经过 0.595 mm 筛网过滤,保存于 75% 乙醇,利用解剖镜或显微镜分类鉴定底栖动物分类单元(种或属),称量净重。沉积物样品利用彼得逊采泥器在 14 个样地采集 0—10 cm 深度表层沉积物,每个样地在河岸带采集 3 个样品,同一样地沉积物样品混合后放入聚乙烯塑料袋中密封保存,在实验室风干,剔除动植物残体等杂质待测。沉积物样品过 100 目尼龙筛,采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 三酸混合,经石墨消解仪(SH220N)消解后,利用岛津火焰原子吸收分光光度计(GFA-6880)测定沉积物重金属 Ni、Cr、Zn、Cu、Pb 和 Cd 的含量^[16]。实验中所用试剂均为优级纯,用水为超纯水,分析过程中采用沉积物标准参考物质(GSD-9 和 GSD-11)进行质量控制,各元素回收率在 94%—105% 之间,测量误差均小于 10%。

1.3 数据统计与分析

应用 EXCEL 2016 软件对所有数据进行处理,采用 SPSS 23.0 软件进行统计学分析,采用 Origin 2017 软件绘图,进行采用 Canoco 5.0 对生物群落指标与沉积物环境因子进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)。

1.3.1 重金属污染评价

根据沉积物质量基准值(sediment quality guideline values, SQGs)^[17]的生物毒性效应范围值计算效应系数(effects range-median quotient, ERMQ)评价不同采样点沉积物生物毒性危害等级^[18],采用综合潜在生态风险指数(Integrated potential ecological risk index, RI)对沉积物重金属综合生态风险进行评价^[19],其中 ERMQ 和 RI 评价等级划分标准见表 1,计算公式如下:

$$\text{ERMQ} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ERM}_i} \right) / n$$

$$\text{RI} = \sum E_r^i = \sum (T_r^i \times (C_d^i / C_r^i))$$

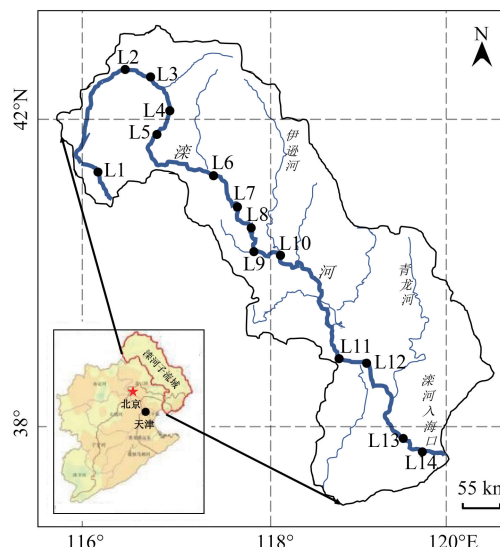


图 1 滦河采样点分布图

Fig. 1 Locations of sampling sites of Luanhe River

式中, C_d^i 表示样品第 i 种重金属元素含量, C_r^i 表示当地背景值(表 2), T_r^i 表示重金属毒性响应系数, ERM_i 是第 i 种重金属元素对应的效应范围阈值, n 为重金属数目; 重金属毒性响应系数 Ni 为 5, Cr 为 2, Zn 为 1, Cu 为 5, Pb 为 5, Cd 为 30, As 为 10, Hg 为 40^[20], 效应范围阈值 Ni 为 52, Cr 为 370, Zn 为 410, Cu 为 270, Pb 为 218, Cd 为 9.6^[21]。

表 1 重金属污染评价等级划分

Table 1 Level criterion of ecological risk assessment

等级 Rank	效应系数 ERMQ	危害等级 Level of ecological harm	综合潜在生态风险指数 RI	风险等级 Level of ecological risk
1	<0.1	低	<150	低
2	0.1—0.5	中低	150—300	中
3	0.5—1.5	中高	300—600	高
4	>1.5	高	>600	极高

ERMQ: 效应系数 Effects range—median quotient; RI: 综合潜在生态风险指数 Integrated potential ecological risk index

1.3.2 植被物种多样性评价

植被物种多样性评价采用以下 3 种指标: 物种丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (J), 计算公式如下^[22]:

$$J = H' / \ln S$$

$$H' = - \sum p_i \ln p_i$$

其中, p_i 表示种 i 出现的频度, 即重要值, S 为物种数(物种丰富度指数), N 为个体总数。

1.3.3 底栖动物完整性评价

研究团队选取表征底栖动物多样性和丰度(Diversity and Abundance, D/A)、耐污敏感性(Sensitivity and Tolerance, S/T)及功能摄食类群(Functional Feeding Groups, FFGs)的 31 个候选指标, 通过分布范围分析、敏感性分析和冗余分析筛选显著区分参照点和受损点的核心指标, 核心指标由蜉蝣目、襀翅目和毛翅目个体数之和百分比(EPT%)、物种耐污性综合指数 BI (Biotic Index) 和收集者摄食类群百分比(Collect-Gatherers%)三个指标组成, 通过验证和标准化构建底栖动物完整性指数(B-IBI, Benthic Macroinvertebrate-based Index of Biotic Integrity), 详细方法见团队已发表的相关文献^[23-24]。

2 研究结果

2.1 滦河表层沉积物重金属分布特征

滦河沉积物重金属元素含量见表 2, 滦河沉积物重金属元素 Ni、Cr、Zn、Cu、Pb 和 Cd 的平均值分别为 33.66 mg/kg、37.64 mg/kg、36.06 mg/kg、12.79 mg/kg、6.76 mg/kg 和 0.09 mg/kg, 其中仅 Ni 元素超过了背景值, 说明滦河水系无明显重金属污染。重金属 Ni、Cr、Zn、Cu、Pb 和 Cd 的变异系数分别为 0.42、0.43、0.78、1.39、0.65 和 0.60, 说明滦河水系沉积物重金属空间分布具有较大差异, 特别是 Zn 和 Cu 离散程度较大, 分布极不均匀。查阅文献, 滦河沉积物重金属历史值见表 2, 2010 年重金属 Cr、Cu、Cd 含量分别是背景值 1.98、5.21、2.55 倍, 重金属污染十分严重, 2013 年滦河沉积物重金属含量显著降低, 本研究中沉积物 Ni、Cr、Zn、Cu、Pb 和 Cd 分别为背景值的 1.09、0.55、0.46、0.59、0.31、0.93、0.02、0.09 倍, 沉积物质量明显改善。

滦河沉积物重金属效应系数 ERMQ 和潜在生态风险指数 RI 结果如图 2 所示。研究结果表明, 滦河水系上游、中游和下游沉积物重金属 ERMQ 范围为 0.09—0.12、0.09—0.16 和 0.07—0.28, 在下游 L14—姜各庄点位最低, 在下游 L12—马兰庄镇点位最高。上、中、下游点位均位于低级和中低级, 但下游点位总体高于上中游点位, 且波动较大。综合潜在风险指数上游、中游和下游范围分别为 31.13—47.75、23.35—66.11、22.49—112.37, 在下游 L14—姜各庄点位最低, 在下游 L12—马兰庄镇点位最高, 与 ERMQ 评价结果一致, 所有点位风险

等级处于低风险水平,下游重金属潜在风险总体高于上中游。对不同河段沉积物重金属效应系数 $ERMQ$ 和潜在生态风险指数 RI 进行非参数检验 (Kruskal-Wallis 法),检验结果表明,滦河干流上中下游沉积物沉积物重金属效应系数 $ERMQ$ 具有显著性差异 ($P<0.05$)。

表 2 滦河沉积物样品重金属元素含量 (mg/kg) 统计

Table 2 Heavy metal concentrations (mg/kg) in the sediments of Luanhe River

项目 Index	镍 Ni	铬 Cr	锌 Zn	铜 Cu	铅 Pb	镉 Cd	数据来源 Data source
最大值 Maximum	75.30	79.00	113.90	69.00	20.70	0.23	本研究
最小值 Minimum	20.00	20.00	3.50	4.00	2.30	0.04	
平均值 Mean value	33.66	37.64	36.06	12.79	6.76	0.09	
标准偏差 Standard deviation	14.21	16.25	28.15	17.72	4.39	0.05	
变异系数 Variable coefficient	0.42	0.43	0.78	1.39	0.65	0.60	
背景值 Background value	30.8	68.3	78.4	21.8	21.5	0.094	文献 ^[25]
历史值 Historical value(2008)	26.15	60.4	71	23	27	0.18	文献 ^[26]
历史值 Historical value(2010)	—	135.23	76.23	113.59	23.33	0.24	文献 ^[27]
历史值 Historical value(2013)	29.03	104.53	84.67	34.47	34.92	0.31	文献 ^[28]

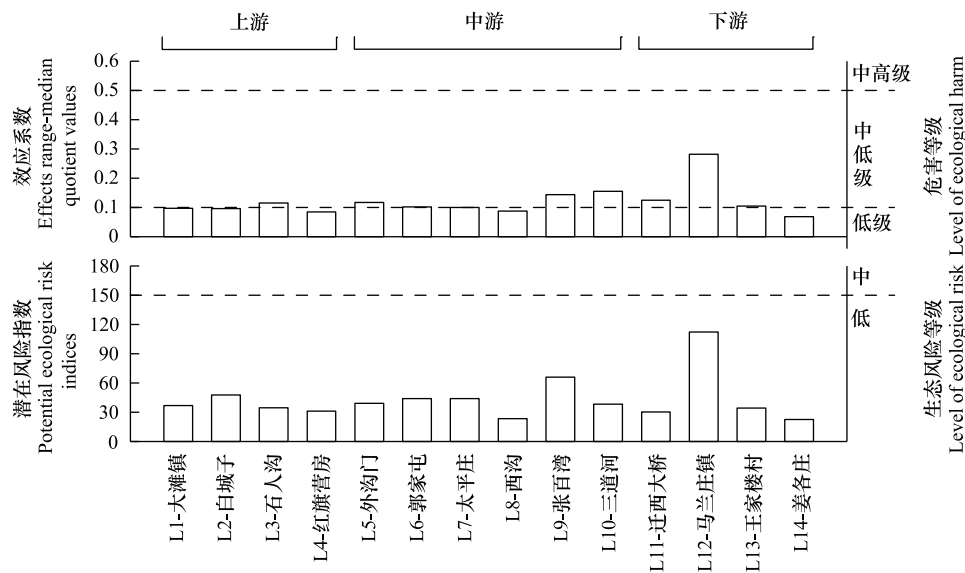


图 2 滦河沉积物重金属效应系数 $ERMQ$ 和潜在风险指数 RI

Fig. 2 Effects range-median quotient (ERMQ) values and potential ecological risk indices (RI) of heavy metals in sediments

2.2 滦河岸带湿地植被物种分布特征

野外调查共识别维管束植物共计 50 科 93 属 219 种,其中本地物种 273 种,外来物种 54 种。植物群落以被子植物为主,主要科系依次为菊科(42 种)、禾本科(32 种)、蓼科(12 种)、豆科(11 种)、蔷薇科(11 种)、莎草科(9 种)、十字花科(9 种)、藜科(6 种),分别占总物种数的 19.2%、14.6%、5.5%、5.5%、5.5%、4.1%、4.1%、2.7%,9 个科系植物占有所有物种的 70.0%。植物区系优势科明显,滦河上游为高原草甸,主要可见“披碱草 (*Elymus dahuricus* Turcz.) + 委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser.)”、“蘆草 (*Scirpus triqueter* Linn.) + 节节菜 (*Rotala indica* (Willd.) Koehne) + 地榆 (*Sanguisorba officinalis* L.)”和“野艾蒿 (*Artemisia lavandulaefolia* DC.) + 藜 (*Chenopodium serotinum* Linn.)”等为优势种的群落,草甸中伴生有水杨梅 (*Geum aleppicum* Jacq.)、地榆 (*Sanguisorba officinalis* L.)、篇蓄 (*Polygonum aviculare* L.)等,其余杂类草群落成分繁杂,优势种不明显。中游为山区植被,主要可见以“委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser.) + 无芒雀麦 (*Bromus inermis* Layss. Linn.)”、“扁秆

藨草(*Scirpus planiculmis* Fr. Schmidt)+老芒麦(*Elymus sibiricus* Linn.)和“泽芹(*Sium suave* Walt.)+大刺儿菜(*Cephalanoplos setosum* (Willd.) Kitam.)+地笋(*Lycopus lucidus* Turcz.)”等为优势种的群落,草甸中伴生有冬葵(*Malva crispa* Linn.)、地肤(*Kochia scoparia* (Linn.) Schrad.)、苍耳(*Xanthium sibiricum* Patr. ex Widder.)等。下游为平原植被,主要可见“附地菜(*Trigonotis peduncularis* (Trev.) Benth. ex Baker et Moore)+水芹(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)”、“野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)+附地菜(*Trigonotis peduncularis* (Trev.) Benth. ex Baker et Moore)”和“白茅(*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv.)+芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)”等为优势种的群落,草甸中伴生有圆叶牵牛(*Pharbitis purpurea* (L.) Voigt)、菖蒲(*Acorus calamus* L.)、萝藦(*Metaplexis japonica* (Thunb.) Makino)等。

综合物种数、个体数、分布特性等植被调查信息,计算植物群落物种多样性指数(物种丰富度指数 S 、Shannon-Wiener 指数 H 和 Pielou 均匀度指数 J)定量反映植物群落物种多样性特征,结果如图 3 所示。物种丰富度指数 S 范围为 5.75—12.33,中游 L9-西沟点位最高,下游 L15-姜各庄点位最低,上、中、下游平均值分别为 8.65、8.37、7.20;Shannon-Wiener 指数 H 范围为 2.25—3.30,中游 L9-西沟点位最高,下游 L13-马兰庄镇点位最低,上、中、下游平均值分别为 3.13、2.92、2.33;Pielou 均匀度指数 J 范围为 21.75—40.91,中游 L9-西沟点位最高,下游 L14-王家楼村点位最低,上、中、下游平均值分别为 30.53、30.57、23.47。总体来看,上游和中游群落物种多样性指数波动较小,二者高于下游,说明上游和中游植被种类最多,群落复杂程度最高,且群落分布较为均匀。对不同河段植物群落物种多样性指数的非参数检验(Kruskal-Wallis 法)结果表明,滦河干流上中下游 Shannon-Wiener 指数 H 和 Pielou 均匀度指数 J 具有显著性差异($P<0.05$)。

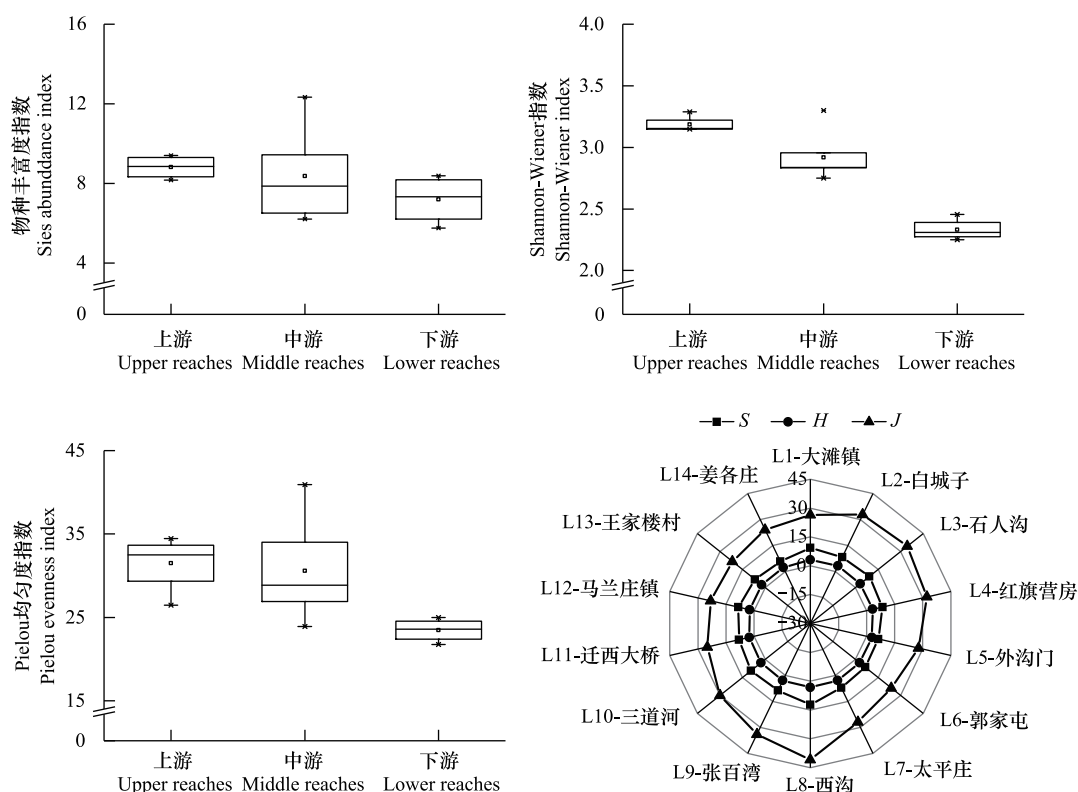


图 3 滦河植物群落物种多样性指数

Fig. 3 Vegetation species diversity index in Luanhe River

2.3 滦河底栖动物群落分布特征

滦河水系共采集底栖动物 105 种,属于节肢动物、环节动物和软体动物等三大类,其中节肢动物 76 种,占比 72.4%,环节动物 18 种,占比 17.1%,软体动物 10 种,占比 9.5%。优势类群为节肢动物门的昆虫纲,共

33 科 71 属 73 种,占全部种类的 69.5%。EPT 昆虫对栖息地生境变化十分敏感,通常生活在清洁河流水环境中,常作为河流水系清洁的指示生物^[29]。本研究 EPT 昆虫总物种数为 17 种,占调查发现的水生昆虫物种数的 16.2%,蜉蝣目 7 科 10 属,襀翅目 2 科 2 属,毛翅目 4 科 4 属。

滦河水系底栖动物生物量和密度如图 4 所示,生物量范围为 0.31—67.03 g/m²,最低点位为 L6-外沟门,最高点位为 L14-迁西大桥,上、中、下游平均值分别为 4.13、1.35、33.31 g/m²。密度范围为 3.85—414.00 个/m²,最低点位为 L2-白城子,最高点位为 L12-马兰庄镇,上、中、下游平均值分别为 132.46、99.83、190.00 个/m²。研究团队基于蜉蝣目、襀翅目和毛翅目个体数之和的百分比(EPT%)、物种耐污性综合指数(Biotic Index, BI)和收集者摄食类群的百分比(Collect-Gatherers%)三个指标,建立底栖动物完整性指数(B-IBI)表征底栖动物群落的结构功能特征,综合评价河流生态系统健康。滦河干流水系 14 个点位 B-IBI 均值为 0.41,变化范围为 0.15—0.79,最大值为 L6-外沟门,最小值为 L2-白城子,上中下游点位平均值分别为 0.56、0.29、0.28,中游 B-IBI 指数高于上游和下游,对 B-IRHI 指数进行等级划分,优级(0.75—1.0)、良(0.50—0.75)、中(0.25—0.50)、差(0—0.25)点位数分别占比 7.14%、42.86%、28.57%、28.57%,说明滦河干流底栖动物完整性总体良好,但上游和下游较差。基于 Kruskal-Wallis 法的不同河段底栖动物完整性指数非参数检验结果为,下游 B-IBI 指数低于上游和中游,具有显著性差异($P<0.05$)。

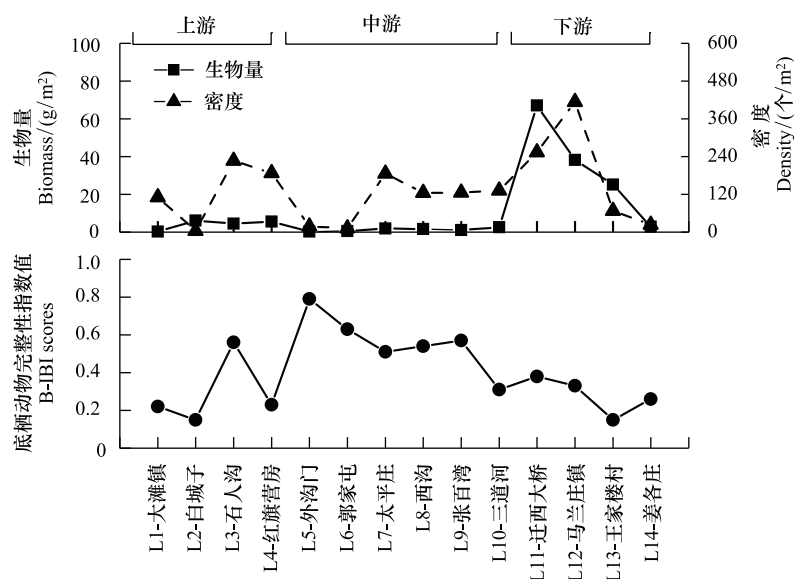


图 4 滦河底栖动物密度、生物量和底栖动物完整性指数 (B-IBI) 值

Fig. 4 The macroinvertebrate density, biomass and benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity (B-IBI) in Luanhe River

2.4 生物群落对沉积物污染因子的响应

对滦河水系沉积物重金属、岸带湿地植物和大型底栖动物特征信息进行主成分分析(图 5),PC1 解释了总方差的 65.43%,PC2 解释了方差的 22.99%。对第一排序轴作用最大的生境因子是生物毒性效应系数(ERMQ),沉积物重金属污染程度与物种多样性指数呈负相关,与底栖动物完整性指数(B-IBI)呈负相关。重金属 Zn、Cu、Cr、Pb 作为主要环境因子,显著影响了滦河水系植物群落物种多样性和底栖动物群落。

3 讨论

河流沉积物重金属污染具有长期潜在的危害,重金属能对底栖生物和植被产生毒性效应,进而可能通过迁移进入食物链危害人类健康。本研究中,滦河干流岸带湿地沉积物无明显重金属污染,说明该流域水系较为清洁,这与已有研究结果基本一致^[28]。查阅文献,分析滦河沉积物历史研究发现,2008—2013 年表层沉积物重金属含量显著升高,污染较为严重,说明该历史时间段水体吸纳了大量污染物,表层沉积物受到严重污

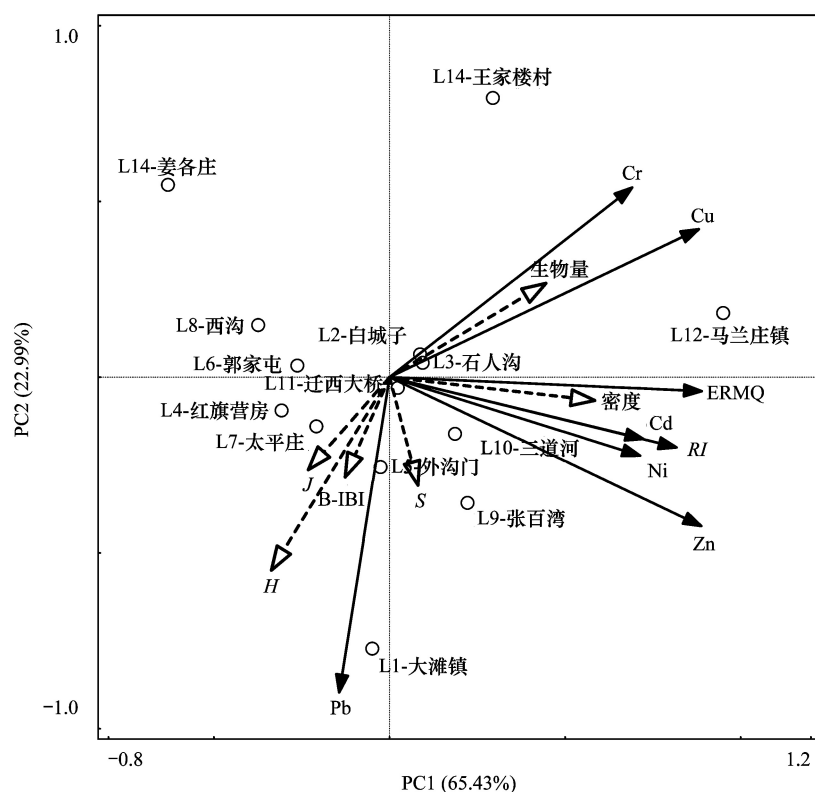


图5 沉积物特征和植被、底栖动物因子的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of macroinvertebrate species, vegetation communities, and sediment indicators

染。滦河作为京津冀地区重要水源地,近年来管理部门投入大量资金进行专项整治,重金属污染水平逐渐降低,但部分河段水质和沉积物重金属含量仍旧超标,本研究中重金属污染程度上中下游空间差异较大,污染程度随河流流向呈上升趋势,下游河段沉积物重金属污染相比于上中游河段仍处于较高污染水平。变异系数能够表征不同样点间重金属含量离散和均匀程度^[30],本研究中滦河岸带湿地沉积物重金属含量变异程度较大,一定程度上说明人类活动可能对滦河水系沉积物重金属分布造成影响。

河流重金属来源与周边城市分布和人类活动密切相关^[31],滦河上游和中游分别位于高原和山区,生态环境较为原始,人口稀疏且工农业不发达,但下游为人口密集工业发达的平原区,周边有大量城市和农田,工农业生产可能是滦河重金属的主要来源。环境中 Zn 主要来源于燃煤和铅锌矿业, Cu 主要来源于金属冶炼等,且 Zn、Cu、Cd、Pb 和 Cr 普遍存在于农药化肥中,滦河下游流经河北省唐山市,该地区人口密集,冶金工业发达,且冶金过程中会燃烧大量煤炭,结合本研究结果分析可知,滦河重金属主要来源为下游平原区工农业生产,特别是下游冶金业和农药化肥的施用。

植被物种多样性和底栖动物完整性是评价生态系统健康和稳定的关键指标,对生境健康具有一定指示作用。本研究中滦河上中游植物群落物种多样性较高,下游较低,这与已有研究结果一致^[32-33]。河岸带湿地植物群落与湿地生态健康密切相关,特别是水体中污染物例如重金属是植物的重要胁迫因子。重金属迁移进入植物体内后能够导致生物膜损伤,光合作用效率下降等毒性效应,进而导致部分耐受性差的植物物种退化、死亡,群落物种多样性降低。类似的,底栖动物也是水环境质量的重要指示生物,对生境变化十分敏感,当其栖息环境受到扰动时,其内部群落特征会相应发生改变。本研究中,滦河下游沉积物重金属污染程度高于上中游,但下游底栖动物生物量和密度高于上中游河段,分析原因可能为底栖动物群落是一个复杂动态整体,随着环境因子发生变化,其内部群落特征也会相应发生改变^[34],仅考虑群落整体生物量和密度并不能准确反映底栖动物群落对环境因子的响应。例如,李晋鹏等^[35]分析水库底栖动物群落对重金属污染的响应,发现昆虫纲

摇蚊科密度随沉积物中重金属铬含量升高而升高。李立强等^[36]对洞庭湖大型底栖动物研究发现寡毛类底栖动物较为耐受重金属污染,其密度与重金属含量呈极显著正相关。Wang 等^[2]研究表明了以摇蚊为主腹足类昆虫(以摇蚊为主)与沉积物铬、铅浓度呈极显著正相关。以往研究说明随着河流沉积物污染程度增加,部分耐污种底栖动物呈增加趋势,大型底栖动物是河流生态系统健康的敏感生物,近年来许多研究者建立底栖动物完整性指数(B-IBI)综合反映底栖动物群落结构功能特征,评价河流生态系统健康^[23-24]。本研究中滦河下游底栖动物完整性较差,说明沉积物中重金属污染改变了河流底栖动物群落结构,耐污种的增加使得群落整体密度和生物量增加,这与已有研究结果基本一致^[37]。

河流岸带湿地植物和底栖动物群落与沉积物质量密切相关,例如沉积物粒径、污染物含量、营养盐水平等特征的改变都可能引起生物群落变化^[2]。本研究中沉积物重金属污染水平与植物群落物种多样性、底栖动物完整性呈负相关关系,说明重金属污染降低了水环境质量,对植被和底栖动物及湿地栖息地完整性造成胁迫效应。

4 结论与建议

(1)滦河干流沉积物总体清洁,但具有明显空间差异性,河流下游沉积物重金属生物毒性危害和潜在生态风险高于上游和中游,下游工农业是滦河沉积物重金属主要污染源。

(2)生物群落调查共识别维管束植物 219 种,大型无脊椎底栖动物 105 种,下游植物群落物种多样性最低,上游和中游群落物种多样性指数波动较小,二者高于下游,说明上游和中游植被种类最多,群落复杂程度最高,且群落分布较为均匀。滦河干流上中下游 Shannon-Wiener 指数 H 和 Pielou 均匀度指数 J 具有显著性差异($P<0.05$)。

(3)底栖动物完整性下游最差,说明上中游河段生境较好,下游植被和底栖动物受到环境因子干扰。滦河干流底栖动物完整性总体良好,但上游和下游较差。基于 Kruskal-Wallis 法的不同河段底栖动物完整性指数非参数检验结果为,下游 B-IBI 指数低于上游和中游,具有显著性差异($P<0.05$)。

(4)主成分分析结果显示,对第一排序轴作用最大生境因子是生物毒性效应系数(ERMQ),沉积物重金属污染程度与物种多样性指数呈负相关,与底栖动物完整性指数(B-IBI)呈负相关,说明沉积物污染水平是影响河流岸带湿地生态健康的重要环境因子。

河流岸带沉积物是影响湿地环境质量和生态健康重要基质,滦河流域管理者应进一步加强下游污染源治理,特别是控制工业点源污染排放和农业面源污染,充分保障滦河水源地生态安全。河流岸带湿地是重要生物栖息地,未来研究中应重点关注河流沉积物典型污染物释放及其在生物群落内部的迁移转化过程,进而揭示河流岸带湿地栖息地关键生态功能过程与污染物特征的响应关系。建议流域管理部门将岸带湿地植被多样性和底栖动物完整性指数 B-IBI 纳入河流水文-水环境水生态一体化监测与风险评价指标体系中。

参考文献(References):

- [1] Almeida J A, Diniz Y S, Marques S F G, Faine L A, Ribas B O, Burneiko R C, Novelli E L B. The use of the oxidative stress responses as biomarkers in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to in vivo cadmium contamination. *Environment International*, 2002, 27(8): 673-679.
- [2] Wang X X, Su P, Lin Q D, Song J X, Sun H T, Cheng D D, Wang S Q, Peng J L, Fu J X. Distribution, assessment and coupling relationship of heavy metals and macroinvertebrates in sediments of the Weihe River Basin. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101665.
- [3] Mirzaei R, Ghorbani H, Hafezi Moghaddas N, Martin J A R. Ecological risk of heavy metal hotspots in topsoils in the Province of Golestan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 147: 268-276.
- [4] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 朱广伟, 邹伟, 朱梦圆, 康丽娟. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素. *环境科学*, 2020, 41(09): 4030-4041.
- [5] Dias V, Vasseur C, Bonzom J M. Exposure of *Chironomus riparius* larvae to uranium: effects on survival, development time, growth, and mouthpart deformities. *Chemosphere*, 2008, 71(3): 574-581.
- [6] Gale S A, King C K, Hyne R V. Chronic sublethal sediment toxicity testing using the estuarine amphipod, *Melita plumulosa* (Zeidler): evaluation using metal - spiked and field - contaminated sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(7): 1887-1898.
- [7] Dabney B L, Clements W H, Williamson J L, Ranville J F. Influence of metal contamination and sediment deposition on benthic invertebrate

- colonization at the North Fork Clear Creek Superfund Site, Colorado, USA. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(12): 7072-7080.
- [8] Costas N, Pardo I, Méndez-Fernández L, Martínez-Madrid M, Rodríguez P. Sensitivity of macroinvertebrate indicator taxa to metal gradients in mining areas in Northern Spain. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 207-218.
- [9] Bere T, Dalu T, Mwedzi T. Detecting the impact of heavy metal contaminated sediment on benthic macroinvertebrate communities in tropical streams. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 147-156.
- [10] 师忱, 袁士保, 史常青, 赵廷宁. 滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 264-269.
- [11] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1177-1184.
- [12] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 李文赞. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 645-653.
- [13] 王旭, 单保庆, 郭伊苻, 赵钰, 唐文忠. 滦河干流表层沉积物中营养元素和重金属含量分布特征及其风险评价. *环境工程学报*, 2017, 11(10): 5429-5439.
- [14] 曹治国, 刘静玲, 栾芸, 李永丽, 韩守亮, 刘宝艳, 王少明. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 246-253.
- [15] 董满宇, 王磊鑫, 李洁敏, 江源, 徐霞. 1960—2017 年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(4): 468-475.
- [16] 孟博, 刘静玲, 李毅, 史璇. 北京市凉水河表层沉积物不同粒径重金属形态分布特征及生态风险. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5): 964-972.
- [17] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1): 20-31.
- [18] Roach A C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines. *Marine Environmental Research*, 2005, 59(5): 453-472.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, Japenga J, Li T Q, Yang X E, He Z L. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 159-168.
- [21] 郭西亚, 高敏, 张杰, 张海涛, 朱金格, 邓建才. 阳澄湖沉积物重金属空间分布及生物毒害特征. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 802-811.
- [22] 常虹, 孙海莲, 刘亚红, 邱晓, 石磊, 温超. 东乌珠穆沁草甸草原不同退化程度草地植物群落结构与多样性研究. *草地学报*, 2020, 28(1): 184-192.
- [23] Shi X, Liu J L, You X G, Bao K, Meng B, Bin C. Evaluation of river habitat integrity based on benthic macroinvertebrate-based multi-metric model. *Ecological Modelling*, 2017, 353: 63-76.
- [24] Shi X, Liu J L, You X G, Bao K, Meng B. Shared effects of hydromorphological and physico-chemical factors on benthic macroinvertebrate integrity for substrate types. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 406-414.
- [25] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [26] 郝红, 高博, 王健康, 周怀东, 陆瑾, 殷淑华, 朱成. 滦河流域沉积物中重金属分布特征及风险评价. *岩矿测试*, 2012, 31(6): 1000-1005.
- [27] 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价. *环境科学*, 2012, 33(2): 606-611.
- [28] 苏虹程, 单保庆, 唐文忠, 王立硕, 王卫民. 海河流域典型清洁水系表层沉积物中重金属总体污染水平研究. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2860-2866.
- [29] Lenat D R, Penrose D L. History of the EPT taxa richness metric. *Bulletin of the North American Benthological Society*, 1996, 13(2): 305-307.
- [30] Wang S P, Wang Y H, Zhang R J, Wang W T, Xu D Q, Guo J, Li P Y, Yu K F. Historical levels of heavy metals reconstructed from sedimentary record in the Hejiang River, located in a typical mining region of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 645-654.
- [31] Zhang G L, Bai J H, Xiao R, Zhao Q Q, Jia J, Cui B S, Liu X H. Heavy metal fractions and ecological risk assessment in sediments from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Estuary, China. *Chemosphere*, 2017, 184: 278-288.
- [32] 周绪申, 齐向华, 吴筱, 孙峰, 孙凯艳, 王乙震, 张俊, 罗阳. 滦河干流浮游植物多样性及污染状况. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 448-452, 462-462.
- [33] 吴佳宁, 王刚, 路献品, 郝彩莲, 张诚, 秦天玲. 滦河流域浮游生物与底栖动物分布特征调查研究. *环境保护科学*, 2014, 40(6): 1-6.
- [34] Peng F J, Pan C G, Zhang N S, ter Braak C J F, Salvito D, Selck H, Ying G G, Van Den Brink P J. Benthic invertebrate and microbial biodiversity in sub-tropical urban rivers: Correlations with environmental variables and emerging chemicals. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136281.
- [35] 李晋鹏, 赵爱东, 董世魁. 澜沧江梯级水电开发对漫湾库区大型底栖动物群落及重金属沉积的影响. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 117-127.
- [36] 李利强, 王丑明, 张屹, 黄代中, 田琪. 洞庭湖大型底栖动物与表层沉积物重金属研究. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 286-291.
- [37] 田鹏, 钱昶, 林佳宁, 代阳, 张远, 丁森, 高欣. 滦河流域大型底栖动物生物完整性指数健康评价. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 50-58.