地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol. 14 No. 1 | Feb. 2023
DOI: 10.7515/JEE222038
研究论文
ARTICLE

呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染现状分析

陆晨遨[1,2]，曹　郁[1,2]，夏宇欣[1]，顾沁然[1,3,4]，易文文[1]，张以恒[1]，华　政[1]，赵文伟[1*]

1. 南通大学　地理科学学院，南通　226000
2. 兰州大学　资源环境学院，兰州　730000
3. 中国科学院南京地质古生物研究所，南京　210008
4. 中国科学院大学，北京　100049

摘　要：河岸带类型对河流环境重金属富集具有显著影响，合理规划河岸环境，可以减缓河流周围土地的重金属污染对河流生态系统的影响。随着内蒙古自治区呼伦贝尔市工矿业、农牧业和旅游业的快速发展，频繁的人类活动会增加对河流周边重金属污染潜在威胁。为揭示呼伦贝尔市河流域环境重金属污染的现状、分布特征以及不同的河岸带类型对河流沉积物重金属污染的影响，在该区域采集了 34 个河岸带表层土壤和河流表层沉积物样品，并测定了 6 种重金属（Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 与 Zn）含量，采用污染负荷指数法（pollution load index，PLI）对重金属污染情况进行评价。结果显示：6 种重金属的平均含量分别为背景值的 2.08 倍、1.55 倍、0.80 倍、1.61 倍、0.82 倍、1.00 倍，总体 PLI 为 1.19，属轻度污染；河岸带的重金属污染程度总体高于河流，但是河流的重金属污染变率更大，相比之下重金属含量的最高值多出现于河流中；不同河岸带类型的 PLI 呈工业型河岸最高（1.535）、自然型河岸次之（1.126）、城市绿化河岸最低（1.030）、工矿业活动是区域重金属污染的主要源头，城市绿化型河岸带与自然型河岸带具有一定的缓解重金属污染累积的作用。

关键词：海拉尔河流域；重金属；城市化；河岸带类型

Analysis on the current heavy metal pollution situation in the riparian zone and river in the suburbs and urbans of Hulun Buir

LU Chen'ao[1,2], CAO Yu[1,2], XIA Yuxin[1], GU Qinran[1,3,4], YI Wenwen[1], ZHANG Yiheng[1], HUA Zheng[1], ZHAO Wenwei[1*]

1. School of Geographical Science, Nantong University, Nantong 226000, China
2. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
3. Nanjing Institute of Geology and Palaeontoloy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

收稿日期：2021-11-19；**录用日期：**2022-01-09；**网络出版：**2022-01-25
Received Date: 2021-11-19; **Accepted Date:** 2022-01-09; **Online first:** 2022-01-25
基金项目：国家自然科学基金项目（42171157）；江苏省普通高校自然科学研究计划项目（19KJB170026）；大学生创新训练项目（202210304144Y，202010304040Z）
Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (42171157); Natural Science Research Program of Colleges and Universities in Jiangsu Province (19KJB170026); Innovation Training Program for College Students (202210304144Y, 202010304040Z)
通信作者：赵文伟，E-mail：wenwei. zhao@foxmail.com
Corresponding Author: ZHAO Wenwei, E-mail: wenwei. zhao@foxmail.com
引用格式：陆晨遨，曹　郁，夏宇欣，等. 2023. 呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染现状分析 [J]. *地球环境学报*，14(1): 110–120.
Citation: Lu C A, Cao Y, Xia Y X, et al. 2023. Analysis on the current heavy metal pollution situation in the riparian zone and river in the suburbs and urbans of Hulun Buir [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(1): 110–120.

Abstract: ***Background, aim, and scope*** The potential threat of heavy metal pollution to rivers increases due to rapid development of industry, mining, agriculture, animal husbandry, tourism, frequent human activities and improper planning of riparian zones in Hulun Buir, Inner Mongolia Autonomous Region. We therefore investigate the distribution characteristics of heavy metal pollution in the river areas of Hulun Buir and the influence of different riparian types (urban greening type, natural type and industrial type) on the enrichment of heavy metal pollution in the rivers on the Hailar River Basin. ***Materials and methods*** A total of 34 riparian surface soil and river surface sediment samples were collected in the Hailar River. The contents of six heavy metals (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn) were determined by elemental mass spectrometry, and the pollution load index (PLI) method was used to evaluate the heavy metal pollution level. ***Results*** The results show that the average content of these six heavy metals were 2.08, 1.55, 0.80, 1.61, 0.82, and 1.00 times of the background value, respectively. An overall PLI of 1.19 indicated light pollution occurred. The PLI was highest in industrial river banks (1.535), intermediate in natural river banks (1.126), and lowest in the urban greenbelt river banks (1.030). ***Discussion*** The pollution level of heavy metals in the riparian zone was generally higher than that in the rivers. However, the variability of heavy metal pollution in rivers was comparatively greater, with the highest heavy metal content occurring in rivers. The river environment may have a certain purification effect on heavy metal pollution compared with the terrestrial environment. The natural type riparian zone may have a stronger purification effect on heavy metal pollution. The industrial activities could be the main source of heavy metal pollution in the region. ***Conclusions*** The overall heavy metal pollution remains a low level, and its content has not yet reached the level that could endanger human health. The urban greenbelt and natural riparian zone could reduce the heavy metal accumulation in rivers. ***Recommendations and perspectives*** During the process of the urbanization, continuous monitoring of heavy metal pollution and urban planning schemes are necessary for reducing the potential threat of heavy metal pollution.

Key words: Hailar River Basin; heavy metals; urbanization; riparian zone types

近几十年来，中国经济社会快速发展的同时，化石燃料燃烧、矿山开采、农药化肥使用、废水排放等人类活动逐步加剧，致使重金属元素逐渐在环境中富集（Zhou et al.，2016；张伟燕等，2019）。河岸带是陆地生态系统与水生生态系统进行物质信息交换、能量转移的重要生物过渡带，也是防治水环境污染中发挥重要作用的河岸缓冲带（孙金伟和许文盛，2017）。作为河流域环境的重要组成部分，河岸带的植被性质、土壤性质与稳定性等是关系河流域环境重金属积累的重要因素，这些因素在控制河岸带土壤重金属污染迁移转换的过程中发挥着重要的作用，如草地、漫滩等类型的河岸带对重金属污染具有显著的吸附作用，是重金属污染的显著汇（何文鸣等，2011；Wang et al.，2015），而缺乏植被保护的河岸带类型则可能通过水土流失等过程使得重金属污染转移至水中，成为重金属污染的源。其中重金属 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 与 Zn 在土壤中较易富集且难降解使其成为研究的热点（史浩圆等，2018）。近年来国内外学者针对河岸带土地利用类型对比河流沉积物重金属污染，采用潜在生态指数法、地质累积指数法、单因子累积指数法等手段（秦雷等，2015；Islam et al.，2018；曹郁等，2020）对河岸带或河流的重金属污染特征进行了诸多探索，然而却鲜有涉及河岸带类型对河流域环境重金属污染影响的相关研究。

呼伦贝尔市城郊位于海拉尔河流域中下游，海拉尔河作为中俄跨界河流额尔古纳河的最大支流，其河流环境状况对中俄环保外交具有重要意义（庞燕等，2019）。在过去的经济发展中，河岸带土地利用类型发生较为显著的变化，河岸带作为水环境污染的河岸缓冲带的性质也相应发生了改变。已有研究对海拉尔河流域内陈巴尔虎旗露天煤矿附近土壤进行了重金属元素分析与评价（杨晓刚等，2016），而海拉尔河流域内呼伦贝尔市城郊河岸带与河流沉积物重金属的研究仍然存在空缺。本研究分别采集了呼伦贝尔市城郊地区工业型河岸、城市绿化型河岸与自然型河岸的

DOI: 10.7515/JEE222038

表层土壤与河流表层沉积物，并将其进行对比，综合探究呼伦贝尔市城郊土地利用与河岸带类型对河流沉积物重金属污染的影响；揭示呼伦贝尔市城郊河岸带与河流沉积物重金属污染现状，并寻找其相互作用的机制；为呼伦贝尔市城市发展与海拉尔河流域重金属污染的防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区呼伦贝尔市城郊地区位于内蒙古自治区北部海拉尔河流域中下游（47°32′—50°16′N，117°48′—122°28′E），其中海拉尔河干流自东向西，源出大兴安岭吉勒老奇山西坡，最终汇入额尔古纳河。海拉尔河流域属中温带半湿润半干旱大陆性季风气候，多年平均降水量为 353.4 mm，降水主要集中于夏季；多年平均气温为 −1.42℃。流域上游地区主要为山地河谷，河岸带分布针阔混交林，河岸环境受人类活动影响小，植被保存完好；中游地区地势开阔，河道迂回弯曲，部分水系呈辫状，沿岸为河漫滩草甸和温带草原，土壤肥沃，河岸周边农牧业与工业活动频繁，受到人类活动的扰动；流域下游地势平坦，多分布湿地，受到土地开发成本与环境保护政策影响，此处人类活动程度不高，仅存在少数放牧业活动，河岸环境多为自然状态，植被保存较好。

综上，研究区（图 1）范围广阔，人类活动主要集中分布在中游地区，自然型河岸占据了上游与下游绝大部分地域。为了聚焦受人类活动影响的河岸带与自然河岸带之间的对比与差异，将呼伦贝尔市城郊河岸带分为工业型河岸、城市绿化型河岸与自然型河岸三种类型。其中自然型河岸带周边存在一些农牧业活动，环境扰动较小；工业型河岸带多分布于工厂周边，河岸带受到人类活动的改造相对最多；城市绿化型河岸主要分布于城区周边，河岸带植被受到较多的人类改造，多为人工种植。

1.2 样品采集与分析

2020 年 8 月对呼伦贝尔市城郊地区进行野外实地考察与采样，采样地点包括海拉尔河干流以及其支流伊敏河、莫日格勒河。共选择了 17 处样点，编号 1—17，分别采集每处采样点河流表层沉积物样品与河流附近 1 km 处河岸带土壤样品，共得到河流沉积物样品与河岸带样品 17 组（表 1）。样品涵盖了河流主要的河岸带类型以体现“自然 - 改造 - 自然”的河岸带分布模式，研究区上游与下游的采样点多属于自然型河岸带，中游的采样点多属于城市绿化型或工业型河岸带，采样点河岸带类型分布规律明显且基本涵盖了人类活动频繁的区域，便于同上下游人类活动扰动较小的自然地区进行对比研究。这些采样点周边的土地利用情况如表 1 所示。

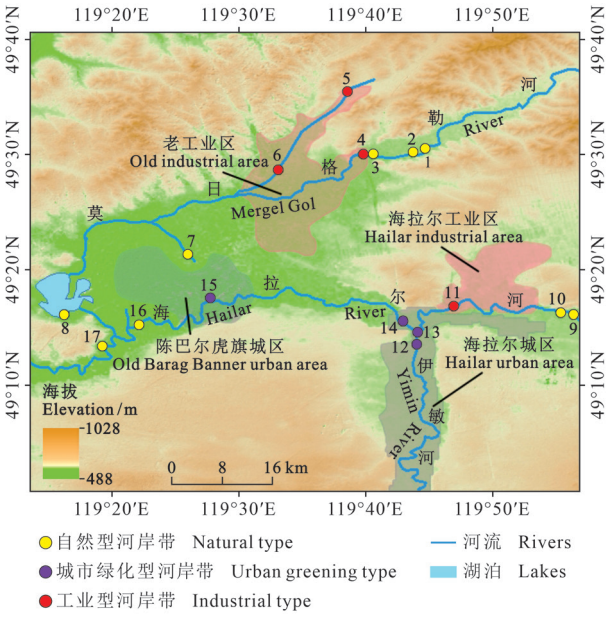

图 1 研究区概况

Fig. 1 Sketch map showing the study area

河流沉积物采集时使用聚乙烯勺，每个采样点均使用手持式 GPS 进行精准定位，现场获取采样点经纬度数据，随机采取有代表性的河流沉积物 4 次并充分混合后装入聚乙烯自封袋密封保存记为 1 个样品；河岸带土壤同样使用聚乙烯勺采集，并剔除石块与大块植物残体，全程样品不接触任何金属制品，样品采集完成后将样品迅速带回实验室进行保存和分析，以防样品变质。

样品带回实验室后，使用聚乙烯勺挑出植物根系、残渣后经风干、压碎、研磨并过 100 目筛，按土壤分析国家标准，采用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 消解法进行消解（刘向磊等，2020）。使用 ICPE-9000 电感耦合等离子体发射光谱仪测定样品中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 与 Zn 6 种重金属元素。测试采用国家标准河流沉积物样品 GBW07317 进行实验质量控制，回收率符合国家标准。

DOI: 10.7515/JEE222038

表 1　采样点分布情况
Tab. 1　The locations and descriptions of sampling sites

编号 Item	采样点地理坐标 Geographic coordinates of sampling sites	河岸带类型 Riparian zone type	周边环境情况 Surrounding environment
1	49°29′56″N，119°44′53″E	自然型河岸 Natural type	牧场，周边放牧，水草分布多 Pasture, surrounding grazing, water and grass distributed
2	49°29′53″N，119°44′42″E		金帐汗，周边放牧，旅游设施 Jinzhanghan, surrounding grazing, tourism facilities
3	49°29′56″N，119°40′26″E		周边放牧，旅游设施 Surrounding grazing and tourism facilities
4	49°29′46″N，119°40′16″E	工业型河岸 Industrial type	废弃的钢材堆放地 Abandoned steel stacking area
5	49°35′17″N，119°39′00″E		农业机械加工制造厂 Agricultural machinery processing factory
6	49°28′19″N，119°33′00″E		工厂排污口，附近道路修建工地 Sewage outfall of the plant and nearby road construction site
7	49°20′49″N，119°25′08″E	自然型河岸 Natural type	伊利牧场，周边放牧 Yili pasture, surrounding grazing
8	49°15′50″N，119°14′09″E		呼和诺尔湿地，附近公路 Hoh Nuur wetland, nearby highway
9	49°16′30″N，119°57′54″E		废弃景点，附近为村庄耕地 Abandoned scenic spots, nearby villages are cultivated land
10	49°16′30″N，119°57′14″E		老饲场，周边牛羊饲养 Feeding farm, surrounding cattle and sheep feeding
11	49°16′37″N，119°47′46″E	工业型河岸 Industrial type	建材制品厂，北山采石场上游 Building materials products factory, upstream of Beishan quarry
12	49°14′13″N，119°44′53″E	城市绿化型河岸 Urban greening type	城区，海拉尔热电厂上游 Urban area, upstream of Hailar thermal power plant
13	49°14′28″N，119°45′00″E		城区，海拉尔热电厂下游 Urban area, downstream of Hailar thermal power plant
14	49°15′36″N，119°43′41″E		城区，远处存在工厂 Urban area, there are factories in the distance
15	49°17′31″N，119°26′56″E		陈巴尔虎旗北，呼和诺尔景区上游 North of Old Barag Banner, upstream of Hoh Nuur Scenic Area
16	49°15′25″N，119°20′49″E	自然型河岸 Natural type	二校菜地下游 Downstream of Second School vegetable field
17	49°13′48″N，119°18′00″E		白音哈达湿地，附近渔场 Bayan Had wetland, nearby fishing ground

1.3　重金属污染评价方法

本文结合单因子累积指数法与污染负荷指数法定量评价海拉尔河流域沉积物中重金属污染现状。单因子累积指数指的是单种重金属的实测值与背景值的比值，若单因子累积指数大于 1 则说明该重金属元素在区域中存在累积现象，单因子累积指数可以通过公式 (1)（Angulo，1996）得到：

$$P_i = C_i \div S_i \tag{1}$$

式中：P_i 为重金属 i 的单项污染指数，C_i 为重金属 i 的污染物实测值，S_i 为重金属 i 选取的评价标准。本研究主要探讨重金属污染积累的机制与规律，因此选用普查的土壤重金属背景值作为参照标准并与采样所测得的重金属含量进行对比。在综合对比各种评价标准的权威性以及地域性问题后，最终采用 1990 年国家环境环保局记录的内蒙古自治区重金属背景值（中国环境监测总站，1990）作为评价标准：Cr、Cu、Mn、Ni、Pb与 Zn 的背景值分别为 41.4 mg·kg^{-1}、14.4 mg·kg^{-1}、520.0 mg·kg^{-1}、19.5 mg·kg^{-1}、17.2 mg·kg^{-1} 与 59.1 mg·kg^{-1}。

DOI: 10.7515/JEE222038

污染负荷指数法（PLI）是 Tomlinson 等学者在从事重金属污染水平的分级研究中提出来的一种评价方法（Nemerow，1974；Tomlinson et al.，1980；Angulo，1996；Okogbue et al.，2017）。能够直观反映多种重金属的综合污染情况及其在空间上的变化规律，灵活多变，既能描述一个区域也可以描述同一种元素的重金属含量特征，契合本文探索不同河岸带类型下重金属积累机制的目的，其计算公式（Tomlinson et al.，1980）如下：

$$W=\sqrt[n]{\prod_{a=1}^{n}P_a} \tag{2}$$

$$W_{\text{zone}}=\sqrt[k]{\prod_{a=1}^{k}W_a} \tag{3}$$

式中：W 为污染负荷指数（PLI），n 为评价元素的个数，k 为采样点编号，W_{zone} 为整个区域的污染负荷指数。根据 W 值可以将重金属污染划分为四个等级，在 $W=1$ 时说明重金属含量相对背景值没有改变（表 2）。

表 2 重金属污染等级划分
Tab. 2 Classifications of heavy metal pollution levels

取值范围 Range	污染等级 Class of pollution	污染水平 Level of pollution
(0, 1]	0	清洁 Clean
(1, 2]	1	轻度污染 Light pollution
(2, 3]	2	中度污染 Moderate pollution
(3, ∞)	3	强度污染 Extreme pollution

2 结果与分析

2.1 呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属含量

呼伦贝尔市城郊河流沉积物与河岸带土壤 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 与 Zn 含量如图 2 所示，其平均含量分别为背景值的 2.08 倍、1.55 倍、0.80 倍、1.61 倍、0.82 倍、1.00 倍。同一种重金属元素在河岸带土壤与河流沉积物的含量虽然没有明显一致的变化趋势，但基本位于同一区间内，不存在量级差别。Cr、Ni 含量在大部分样点均超过背景值，且超出幅度较大，最高达到背景值的 5—6 倍，Cr、Ni 两种元素含量的变化趋势也具有较强一致性；Cu 含量超过背景值的样点数量同样很多，但是超出幅度相对较小，最多达到背景值的 2—3 倍；约有 50% 的样点 Zn 含量超过背景值，超出背景值的幅度仅为 1—2 倍；Pb、Mn 含量仅在少量样点超过背景值，表明仅有少数地区存在 Pb、Mn 积累，但在采样点 13 的河流表层沉积物中 Pb 含量出现显著的高值，达到背景值的 4 倍左右。各重金属含量最小值与最大值大多数都出现在河流沉积物中，表明河流沉积物中重金属积累的差异性相对河岸带更大，张杰等（2019）对太湖流域的研究也发现了同样的现象。

2.2 呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染评价

将样点各重金属污染对比分析得到的呼伦贝尔市城郊河流沉积物与河岸带各采样点重金属 PLI 如图 3 所示，区域整体 PLI 为 1.19，河岸带土壤与河流沉积物的整体 PLI 分别为 1.33 与 1.06，河岸带的重金属积累程度略高于河流沉积物，但均处于轻度污染的状态。河岸带土壤 PLI 比河流表层沉积物高的样点更多，表明河岸带土壤的污染面积也大于河流沉积物。

按照河岸带类型分区，将各样点归入工业型河岸、城市绿化型河岸与自然型河岸三类并在图 3 中用不同颜色的背景标识，三类区域的总体 PLI 排序为工业型河岸（1.535）＞自然型河岸（1.126）＞城市绿化型河岸（1.030），而河岸带土壤比河流沉积物规律更加明显，似乎河岸带类型对河岸带土壤重金属积累的影响要大于河流沉积物。在图 4 中可以发现河岸带土壤与河流沉积物中的各重金属 PLI 基本呈正比关系且河岸带土壤高于河流沉积物，只有城市绿化型河岸中 Pb 的 PLI 是特例。

三种类型河岸带土壤 PLI 排序为：工业型河岸（1.763）＞自然型河岸（1.314）＞城市绿化型河岸（1.028），PLI 均超过 1，表明河岸带土壤中重金属均存在一定积累。其中工业型河岸带土壤中 Cr、Ni 的 PLI 达到强度污染水平，表明这些重金属污染在此区域的积累程度高且普遍。河流沉积物的 PLI 排序为：工业型河岸（1.535）＞城市绿化型河岸（1.032）＞自然型河岸（0.964），河流沉积物的 PLI 相对河岸带土壤来说更低，且在自然型河岸带中河流沉积物比河岸带土壤的 PLI 低的最多。

DOI: 10.7515/JEE222038

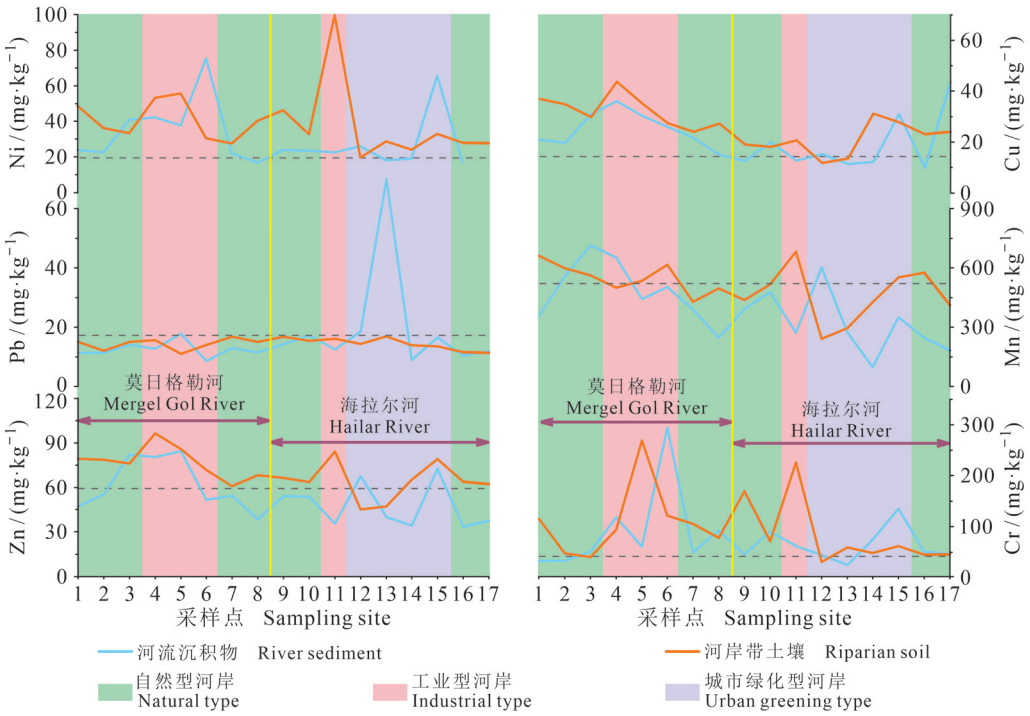

图 2　呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属含量（灰色虚线为背景值）

Fig. 2　Heavy metal content in rivers and riparian zones in the suburbs and urban of Hulun Buir (the gray dotted line is the background value)

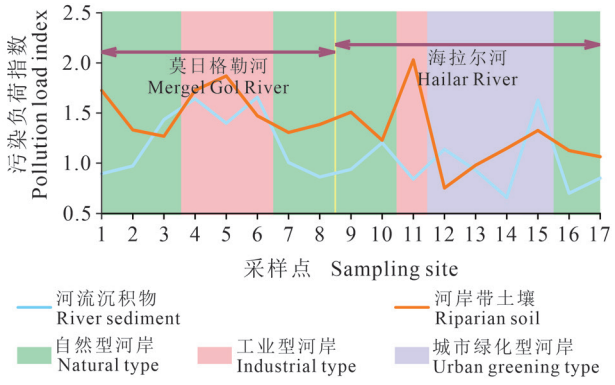

图 3　呼伦贝尔市城郊河岸带与河流沉积物重金属污染负荷指数（PLI）分布

Fig. 3　The heavy metal pollution load index (PLI) of rivers and riparian zones in the suburbs and urban of Hulun Buir

3　讨论

3.1　呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染分布特征

研究表明呼伦贝尔市城郊地区重金属累积指数属于轻度污染，然而从图 4 能够清晰地发现河岸带土壤的重金属污染累积指数明显高于河流沉积物，表明河岸带土壤的重金属累积情况整体上更严重，袁旭音等（2002）对太湖的研究与王志英等（2013）对温榆河的研究也发现了这样的现象。这很可能与水环境中一些植物与藻类对重金属的净化作用有关。例如 Cu 是微生物生长的必备营养元素，藻类的特殊细胞结构对 Cu 具有较强的亲和性（江用彬和季宏兵，2007），因此河流沉积物中的 Cu 含量通常会低于河岸带。由图 4 可知河流沉积物与河岸带土壤的各重金属 PLI 呈现很好的正相关关系，然而河岸带土壤的 PLI 总是比河流沉积物中高，这一部分的“差距”很可能是河流水环境的净化作用的体现，王志英等（2013）也在其研究中发现了类似的现象，并认为河流相对于土壤存在重金属净化的过程。自然型河岸中河流沉积物与河岸带土壤的 PLI 差距最大（图 3），说明自然型河岸带的河流水环境对重金属的净化作用可能要强于工业型河岸带与城市绿化型河岸带。

呼伦贝尔市城郊河流沉积物整体重金属含量相对河岸带土壤较低，然而其重金属含量变率相对更大，重金属含量的极值更多出现在河流沉积物中，赵健等（2001）在对苏州河上海段以及 Wang et al.（2015）在长江三峡段的重金属污染研究中也发现类似的特征，并提出在重金属污

DOI: 10.7515/JEE222038

染积累的过程中，河流沉积物更可能先达到重金属污染阈值。此外，水环境中重金属污染的运移转化能力相对更强（池源，2013），河流域环境相对复杂，流量、流速等表现出随机性（王圣伟和李志敏，2019），因此河流沉积物相对河岸带土壤在重金属积累的过程中受到更多的环境因子的影响，这也是河流沉积物中重金属含量变率相对更大的原因之一。由图 3 可知：河岸带土壤重金属含量的变化与土地利用类型之间的关系更具有规律：工业型河岸最高，城市绿化型次之，自然型最低，河流表层沉积物也有类似的规律但弱于河岸带土壤，这也是由于河流沉积物受到更多环境因子影响所致。综上表明：研究区河岸带土壤与河流具有不同的重金属积累机制与特点，而河流沉积物受到其他因素的影响更多，不稳定性更高。此次数据不能逐一排除这些因素的影响，但揭示了其中有关重金属污染累积的一些规律。

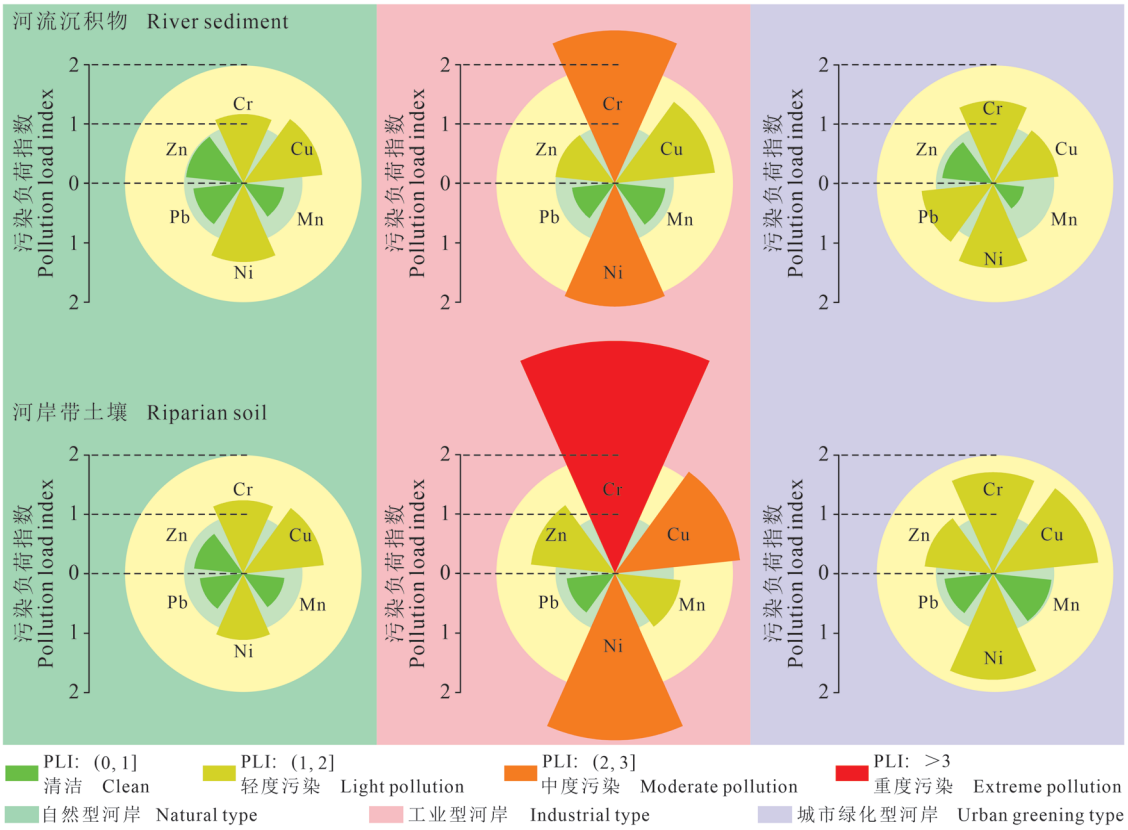

图 4 不同河岸带类型下的河岸带土壤与河流沉积物重金属污染负荷指数

Fig. 4 Heavy metal pollution load index (PLI) of riparian surface soil and river surface sediment for different riparian zone types

3.2 河岸带类型与土地利用对呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染的影响

由图 3 可知：工业型河岸土壤的重金属污染程度相对最高。在工业活动较为密集的工业型河岸土壤中，Cr、Ni、Cu 污染最为严重，达到中度到重度污染水平，显著超出其他河岸类型。重金属含量变率相对更大（图 4）表明 Cr、Ni、Cu 在工业型河岸的 PLI 很高，工业型河岸周边工业活动很有可能是区域 Cr、Ni、Cu 元素积累的主要源头，郭伟等（2011）与毛香菊等（2016）对内蒙古自治区其他城市工业区的研究中也发现了类似的现象，并认为工业活动是这些重金属污染的主要源头。本研究以临近工厂的采样点 5 与采样点 6 最为典型（表 3）。其中采样点 5 附近为一处农业机械加工制造厂（图 5a），采样点 5 的河岸带土壤中检测出 Cr、Ni 含量的高值，分别达到背景值的 6.49 倍、2.86 倍，显著高于该点河流沉积物中的相应值；采样点 6（图 5b）的河流沉

DOI: 10.7515/JEE222038

积物中 Cr、Ni 含量达到背景值的 7.12 倍、2.94 倍，显著高于该采样点河岸带土壤中的相应值。由于采样点 6 附近存在工厂排污口，排污口直通河流沉积物，而机械加工厂直接影响土壤，表明这些重金属积累很可能与这些污染源相关。调查中发现工业型河岸周边也存在一些废品处理厂以及废弃金属堆放的情况（图 5a），在雨水淋溶作用下，可能会导致 Cu 等重金属释放并进入河岸带与河流环境中。谢小进等（2010）认为机械工业与有色金属冶炼是重金属 Cu 的主要来源之一；曹郁等（2020）在盐城新洋港河流沉积物重金属的研究中也发现了类似的现象，并认为工业活动是 Cu 积累的主要因素；李晶等（2019）对草原型露天煤矿区重金属的研究中也发现了 Cu 积累较为严重的情况，并认为其积累可能是煤炭开采所致；海拉尔河流域也存在露天煤矿区（杨晓刚等，2016），因此在整个区域上的 Cu 积累可能与煤炭开采相关。

表 3　代表性采样点单因子累积指数

Tab. 3　Single factor cumulative index of heavy metal pollution for representative sampling sites

采样点 Sampling site	采样位置 Sampling location	河岸带类型 Riparian zone type	单因子累积指数 P_i Single factor cumulative index					
			Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
5	河岸带　Riparian zone	工业型　Industrial type	6.49	2.43	0.82	2.86	0.64	1.45
5	河流　River	工业型　Industrial type	1.46	2.09	0.85	1.93	1.03	1.43
6	河岸带　Riparian zone	工业型　Industrial type	2.94	1.90	1.18	1.56	0.82	1.21
6	河流　River	工业型　Industrial type	7.12	1.80	0.97	3.86	0.50	0.87
13	河岸带　Riparian zone	城市绿化型　Urban greening type	1.43	0.94	0.57	1.47	0.98	0.80
13	河流　River	城市绿化型　Urban greening type	0.61	0.78	0.53	0.93	4.06	0.68

a：农业机械加工制造厂；b：工厂排污口；c：城区内部，海拉尔热电厂下游；d：河岸带放牧活动。

a: agricultural machinery processing factory; b: factory sewage outlet; c: the downstream of Hailar Thermal Power Plant inside the city; d: riparian grazing activity.

图 5　呼伦贝尔市城郊典型地区

Fig. 5　Typical polluted riparian areas in the suburbs and urbans of Hulun Buir

此外，在一些非工业型河岸带周边也存在着工矿业活动，例如采样点 13（表 3），该点属于城市绿化型河岸，位于热电厂下游（图 5c），其河流沉积物样品中检出 Pb 含量超出背景值 4.06 倍。在杨永志等（2019）与郭伟等（2011）的研究中也发现了城市附近 Pb 含量相较其他区域更

DOI: 10.7515/JEE222038

高的现象，并认为 Pb 的积累与城市相对密集的交通运输相关。然而本研究区 Pb 的积累可能与工业活动更密切相关。热电厂在燃煤生产过程中产生一些含 Pb 的废水、废气与废渣（王圣伟和李志敏，2019），从而造成下游河流沉积物中的 Pb 积累。

研究区内的农牧业土地利用同样对重金属的积累产生了一定的影响，呼伦贝尔市城郊河岸带地区广泛存在放牧活动（图 5d），并采用半舍饲的饲养方式（额尔敦乌日图等，2019），很可能造成研究区部分重金属元素的积累。魏荣菲等（2010）发现牧业用地周边的 Cu 积累较高，并提出 Cu 主要来源于饲料。综上表明：不同河岸带类型不仅能通过其周边各异的土地利用类型（工矿业、农牧业等）影响重金属污染的积累，还能通过不同类型河岸带的各种机制（例如自然型河岸带对河流水环境重金属更强的净化作用）对重金属的积累进行调节。

3.3 呼伦贝尔市城郊地区重金属污染现状

呼伦贝尔市城郊区域河岸带土壤与河流沉积物的 PLI 分别为 1.33 与 1.06，其中 Cr、Cu 与 Ni 积累速度较快，但均属于轻度污染状态。杨晓刚等（2016）对呼伦贝尔城郊煤矿堆土区的研究表明该地的重金属污染处于较低水平，重金属含量尚未达到危害人类健康阈值的程度。此结果与内蒙古自治区其他工业型城市与地区的土壤重金属污染状况类似，不同的工矿业类型城市 / 地区重金属污染存在不同的特点。例如：郭伟等（2011）发现包头铁矿区 Pb、Cu、Zn 和 Mn 含量都为 1990 年国家环境环保局记录的内蒙古自治区重金属背景值的 3 倍以上，其中 Zn 达到 17.7 倍；毛香菊等（2016）发现内蒙古草原铜钼矿区土壤中 Cr、Cu、Pb 这 3 种重金属均为当地土壤背景值的 1—2 倍。对比显示呼伦贝尔市城郊地区重金属污染处于相对较低的水平，不同工矿业类型城市的重金属污染防控应因地而异。

研究区内重金属含量相对较高的河岸带区域均位于远离城市的郊区，自然河岸与城市绿化河岸的重金属污染程度相对较低，内蒙古自治区其他城市的重金属污染也呈现这样的特征（郭伟等，2011；杨永志等，2019），可能与工业活动区域的合理规划、科学的城市规划方案、产业结构的转型、生产技术的改进以及污染监测的加强有关。根据呼伦贝尔市 2016—2019 年统计公报（http://www.hlbe.gov.cn/News/showList/142/page_1.html），区域内第一产业与第二产业的增长相对缓慢，而以旅游业为代表的第三产业增长迅速；煤矿开采和洗选业、有色金属矿采选业等比值逐渐下降；医疗制造业、农副食品加工业等增长快速，这样的产业调整可能是目前海拉尔河流域重金属积累程度不高的原因，也有利于缓解未来重金属污染的进一步积累。生产技术的进步也为重金属污染的防治做出了重要贡献，早期粗放的燃煤小锅炉被环保型设备取代，工厂废气废液经过工艺处理后进行排放，露天煤矿采用了抑尘网防尘措施（杨晓刚等，2016），使得重金属污染的积累得到控制。然而在城市与工业发展的过程中，河岸带环境原有的植被与土壤可能会被改变，从而削弱其对重金属污染的缓冲保护作用（王圣伟和李敏，2019）。因此在呼伦贝尔市未来的城市化推进过程中，需要继续做好城市发展规划，加强河岸带土壤重金属污染的监测并对河岸带环境进行科学规划与保护，消除重金属污染的潜在威胁。

4 结论

呼伦贝尔市城郊河流沉积物与河岸带土壤 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 与 Zn 平均含量分别为背景值的 2.08 倍、1.55 倍、0.80 倍、1.61 倍、0.82 倍、1.00 倍，工业活动可能是区域内重金属污染的主要来源，区域整体重金属 PLI 为 1.19，属轻度污染，可被环境自身降解至对人体健康无害的程度。

河岸带土壤的重金属污染（PLI=1.335）相对高于河流沉积物（PLI=1.100），但是河流沉积物中的重金属含量变率更大，重金属污染高值反而更多地出现在河流沉积物中；河流水环境可能对重金属污染具有一定净化作用，且自然型河岸带条件下的河流对重金属污染的净化作用可能更强。

不同的河岸带类型能通过其周边各异的土地利用类型（工矿业、农牧业等）影响重金属积累，河岸带的地表覆盖也对重金属的积累有着一定的影响，使得河岸植被覆盖更好的自然型河岸带与城市绿化型河岸带对重金属污染的积累存在更好的缓解保护作用。

DOI: 10.7515/JEE222038

参考文献

曹　郁 , 赵文伟 , 伍婧怡 , 等 . 2020. 盐城新洋港河流表层沉积物重金属污染评价 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 15(3): 39–46. [Cao Y, Zhao W W, Wu J Y, et al. 2020. Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Xinyanggang River in Yancheng City [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 15(3): 39–46.]

池　源 . 2013. 安徽铜陵地区土壤和河流沉积物重金属分布特征与污染评价 [D]. 南京 : 南京大学 . [Chi Y. 2013. Distribution characteristics and pollution evaluation of soil and river sediment heavy metals in Tongling, Anhui [D]. Nanjing: Nanjing University.]

额尔敦乌日图 , 图　雅 , 花　蕊 . 2019. 呼伦贝尔市牧区发展中亟待解决的几个问题 [J]. *北方经济*, (4): 69–71. [Erdun Wuritu, Tu Y, Hua R. 2019. Several problems to be solved urgently in the development of pastoral areas in Hulunbuir [J]. *Northern Economy*, (4): 69–71.]

郭　伟 , 赵仁鑫 , 张　君 , 等 . 2011. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价 [J]. *环境科学*, 32(10): 3099–3105. [Guo W, Zhao R X, Zhang J, et al. 2011. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 32(10): 3099–3105.]

何文鸣 , 吴　峰 , 张昌盛 , 等 . 2011. 河岸带土壤重金属元素的污染及危害评价 [J]. *生态学杂志* , 30(9): 1993–2001. [He W M, Wu F, Zhang C S, et al. 2011. Heavy metal pollution and its ecological risk assessment of riparian soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(9): 1993–2001.]

江用彬 , 季宏兵 . 2007. 藻类对重金属污染水体的生物修复 [J]. *地理科学进展* , 26(1): 56–67. [Jiang Y B, Ji H B. 2007. Bioremediation of heavy metal contaminated water by algae [J]. *Progress in Geography*, 26(1): 56–67.]

李　晶 , 杨超元 , 殷守强 , 等 . 2019. 草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征 [J]. *煤炭学报* , 44(12): 3676–3684. [Li J, Yang C Y, Yin S Q, et al. 2019. Evaluation and spatial distribution characteristics of soil heavy metals pollution in grassland open-pit coal mine area [J]. *Journal of China Coal Society*, 44(12): 3676–3684.]

刘向磊 , 孙文军 , 文田耀 , 等 . 2020. 三酸分步消解 - 电感耦合等离子体质谱法测定土壤详查样品中 23 种金属元素 [J]. *岩矿测试* , 39(5): 793–800. [Liu X L, Sun W J, Wen T Y, et al. 2020. Determination of 23 metal elements in detailed soil survey samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry with three acid stepwise digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 39(5): 793–800.]

毛香菊 , 马亚梦 , 邹安华 , 等 . 2016. 内蒙古草原某铜钼矿区土壤重金属污染特征研究 [J]. *环境科学与技术*, 39(6): 156–161, 173. [Mao X J, Ma Y M, Zou A H, et al. 2016. Characteristics of heavy metals in soils from a copper-molybdenum mining area of grassland in Inner Mongolia [J]. *Environmental Science & Technology*, 39(6): 156–161, 173.]

庞　燕 , 项　颂 , 杨天学 , 等 . 2019. 内蒙古海拉尔河水质污染时空变化特征 [J]. *环境工程技术学报* , 9(4): 414–420. [Pang Y, Xiang S, Yang T X, et al. 2019. Spatial and temporal variation characteristics of water pollution in Hailaer River, Inner Mongolia [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 9(4): 414–420.]

秦　雷 , 解东昊 , 朱卫红 , 等 . 2015. 图们江流域河岸带土壤重金属污染特征研究 [J]. *干旱区资源与环境* , 29(8): 120–125. [Qin L, Xie D H, Zhu W H, et al. 2015. The characteristics of riparian heavy metal pollution in Tumen River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 29(8): 120–125.]

史浩圆 , 杨萍果 , 周进财 , 等 . 2018. 临汾市不同功能区土壤重金属分布特征及污染评价 [J]. *干旱区资源与环境*, 32(8): 135–140. [Shi H Y, Yang P G, Zhou J C, et al. 2018. Distribution characteristics and assessment of soil heavy metal pollutions in different functional areas of Linfen [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 32(8): 135–140.]

孙金伟 , 许文盛 . 2017. 河岸植被缓冲带生态功能及其过滤机理的研究进展 [J]. *长江科学院院报* , 34(3): 40–44. [Sun J W, Xu W S. 2017. Research advances in ecological functions and filtration mechanism of riparian buffer [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(3): 40–44.]

王圣伟 , 李志敏 . 2019. 环境土壤重金属分布特征与运移规律 [M]. 北京 : 科学出版社 . [Wang S W, Li Z M. 2019. Distribution characteristics and migration laws of heavy metals in environmental soils [M]. Beijing: Science Press.]

王志英 , 刘　云 , 王建立 , 等 . 2013. 城郊流域河岸带土壤与河流沉积物的重金属污染及分布特征 —— 以温榆河昌平段为例 [J]. *农业环境科学学报* , 32(4): 783–791. [Wang Z Y, Liu Y, Wang J L, et al. 2013. Heavy metal pollution and distribution in riparian zone soil and

DOI: 10.7515/JEE222038

river sediment in Beijing suburbs, China: a case study in Changping section of Wenyu River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 32(4): 783–791.]

魏荣菲, 庄舜尧, 杨　浩, 等. 2010. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征 [J]. *湖泊科学*, 22(4): 527–537. [Wei R F, Zhuang S Y, Yang H, et al. 2010. Pollution characteristics of heavy metals in sediments from the river network of Suzhou City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 22(4): 527–537.]

谢小进, 康建成, 闫国东, 等. 2010. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析 [J]. *中国环境科学*, 30(8): 1110–1117. [Xie X J, Kang J C, Yan G D, et al. 2010. Heavy metal concentration in agricultural soils around the upper—middle reaches of Huangpu River [J]. *China Environmental Science*, 30(8): 1110–1117.]

杨晓刚, 胡　冰, 庄　洋, 等. 2016. 呼伦贝尔露天煤矿堆土场外围牧场土壤的重金属污染评价 [J]. *贵州农业科学*, 44(9): 152–156. [Yang X G, Hu B, Zhuang Y, et al. 2016. Heavy metal pollution of pasture soil around soil accumulated place of Hulunbuir opencast coal mine [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 44(9): 152–156.]

杨永志, 闫海霞, 马穆德. 2019. 呼和浩特市绿地土壤重金属污染特征及评价 [J]. *北方园艺*, (16): 110–116. [Yang Y Z, Yan H X, Ma M D. 2019. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different greenbelts of Hohhot [J]. *Northern Horticulture*, (16): 110–116.]

袁旭音, 陈　骏, 季峻峰, 等. 2002. 太湖沉积物和湖岸土壤的污染元素特征及环境变化效应 [J]. *沉积学报*, 20(3): 427–434. [Yuan X Y, Chen J, Ji J F, et al. 2002. Characteristics and environmental changes of pollution elements in Taihu sediments and soils near the lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 427–434.]

张　杰, 郭西亚, 曾　野, 等. 2019. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 [J]. *环境科学*, 40(5): 2202–2210. [Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, et al. 2019. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu Basin [J]. *Environmental Science*, 40(5): 2202–2210.]

张伟燕, 马　龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 2019. 博尔塔拉河地表水重金属来源分析及其污染评价 [J]. *干旱区资源与环境*, 33(7): 100–106. [Zhang W Y, Ma L, Jilili Abuduwaili, et al. 2019. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in surface water of Bortala River, Northwest China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33(7): 100–106.]

赵　健, 郑祥民, 毕春娟, 等. 2001. 苏州河市郊段底泥重金属污染特征及对河道疏浚的影响 [J]. *农业环境保护*, 20(1): 27–30. [Zhao J, Zheng X M, Bi C J, et al. 2001. Characteristics of heavy metal pollution in sediments of Suzhou River at suburban interval and influences on dredging plan [J]. *Agro-Environmental Protection*, 20(1): 27–30.]

中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. [China National Environmental Monitoring Centre. 1990. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press.]

Angulo E. 1996. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal, 'mussel-watch' data: a useful index to assess coastal pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 187(1): 19–56.

Islam M S, Hossain M B, Matin A, et al. 2018. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River Estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 202: 25–32.

Nemerow N. 1974. Scientific stream pollution analysis [M]. 1st edition. Washington: Scripta Book Company.

Okogbue C O, Oyesanya O U, Anyiam O A, et al. 2017. Assessment of pollution from produced water discharges in seawater and sediments in offshore, Niger Delta [J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(10): 1–12.

Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. *Helgoläander Meeresuntersuchungen*, 33(1/2/3/4): 566–575.

Wang Y, Ao L, Lei B, et al. 2015. Assessment of heavy metal contamination from sediment and soil in the riparian zone China's Three Gorges Reservoir [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24: 2253–2259.

Zhou J, Feng K, Pei Z P, et al. 2016. Pollution assessment and spatial variation of soil heavy metals in Lixia River Region of eastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 16(3): 748–755.

DOI: 10.7515/JEE222038