

克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染风险评估

杨培峰¹, 李卫平^{1*}, 于玲红¹, 陈阿辉¹, 杨文焕¹, 韩佩江¹, 任娟慧¹, 焦丽燕²

(1.内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014000; 2.晖泽水务(青州)有限公司, 山东 青州 262500)

摘要:为揭示克鲁伦河滨岸带重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)污染生态风险状况,沿河采集10个采样点的土壤样品,采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对克鲁伦河重金属的污染进行生态风险评估。结果表明:7种重金属As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量平均值分别为其背景值的117.71、266.7、0.64、2.07、2.12、5.38、55.95倍,大小排序为Cd>As>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr,其中As、Cd和Zn三种重金属元素在土壤中积累情况较为严重。地积累指数法得出7种重金属污染程度排序为Cd>As>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr,潜在生态风险指数表明污染程度由强到弱排序为Cd>As>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr,由于毒性系数的影响,导致两种方法中Ni和Cu的污染程度大小顺序发生变化。结合综合污染系数及潜在生态风险系数的分析得知,10个采样点均处于极高污染风险等级,克尔伦苏木污染最为严重。由潜在生态风险贡献率得出Cd和As对土壤污染贡献率最高,初步判断Cd和As应该作为重金属污染治理和修复的优先控制对象。

关键词:重金属;滨岸带;克鲁伦河;风险评估;地积累指数法;潜在生态危害指数法

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)11-2126-07 **doi:**10.11654/jaes.2015.11.013

Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Riparian Zone of Kerulen River

YANG Pei-feng¹, LI Wei-ping^{1*}, YU Ling-hong¹, CHEN A-hui¹, YANG Wen-huan¹, HAN Pei-jiang¹, REN Juan-hui¹, JIAO Li-yan²

(1.School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, 014010, China; 2.Hui Ze water (qingzhou) Co., LTD, Qingzhou 262500, China)

Abstract: The ecological risk of soil heavy metals(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) along the riparian zone of Kerulen River was assessed by using the index of geoaccumulation and the potential ecological risk index proposed by Hakanson. Results indicated that the average concentrations of seven heavy metals including As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were 117.71, 266.7, 0.64, 2.07, 2.12, 5.38 and 55.95 times of the background values, with an order of Cd>As>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr, indicating high accumulation of As, Cd, and Zn in the soils. The index of geoaccumulation was Cd>As>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr, and the potential ecological risk index was Cd>As>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr. The combination of the comprehensive pollution coefficient and the potential ecological risk coefficient showed that the studies area was at a higher pollution risk level, with the most pollution at Keerlun Su. Both As and Cd were the priority pollutants in the studies area.

Keywords: heavy metal; riparian zone; Kerulen River; risk assessment; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

土壤重金属污染是当今社会和环境科学领域的研究热点之一,也是社会关注的焦点之一。土壤重金属污染是指人类活动将重金属释放到土壤中,致使土壤中重金属的含量明显高于背景值和国家标准,并造成生态环境质量下降的现象^[1]。2011年初,《重金属污染综合防治“十二五”规划》的实施,标志着我国在重

金属污染防治方面迈出了重要的一步,也标志着土壤重金属污染正式成为国家层面关注的重点。开展土壤重金属污染风险评价,是识别区域生态系统健康状况的重要手段,其研究内容主要是考察城市、农田以及矿区等地土壤中重金属的地球化学行为,以解释区域生态系统的健康状况^[2-3]及生物可利用性等^[4]。

河流滨岸带是介于陆地与河流之间的过渡地带,是重要的生态交互区^[5]。作为连接水生和陆生生态系统的重要枢纽,滨岸带土壤重金属污染已引起相关研究人员的关注^[6-10]。河岸带对来自河流和陆地的重金属有汇集作用^[11-12],在水质保护和水质净化方面起着

收稿日期:2015-05-06

基金项目:国家自然科学基金(41263010);2015 内蒙古科技计划项目

作者简介:杨培峰(1988—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事寒旱区水土污染研究。E-mail:peifeng1222@163.com

* 通信作者:李卫平 E-mail:sjlwp@163.com

重要的作用。克鲁伦河是我国北方第一大湖——呼伦湖的最主要入湖河流,地处于呼伦贝尔草原,是典型的草原型河流。近年来对于克鲁伦河流域的研究主要集中于植被以及水文特性方面,对于河流滨岸带的土壤重金属污染研究少有涉及。本文以克鲁伦河滨岸带土壤为研究对象,对重金属污染状况进行风险性评估,以期为克鲁伦河和呼伦湖重金属的污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

克鲁伦河位于呼伦湖西南部,发源于蒙古肯特山南麓,自西向东流,在新巴尔虎右旗克尔伦苏木西北乌兰恩格尔进入我国,注入呼伦湖。克鲁伦河沿岸地势平坦,河流全长 1264 km,在我国境内全长 206.44 km,河道弯曲,河宽 40~90 m。沿岸牧草发达,是重要的农牧业地带。该地区属温带大陆性气候,四季分明,全年盛行西北风。年平均日照为 3100 h,多年平均气温为 0.5 ℃,年最高气温为 38.2 ℃,最低气温为-41 ℃,无霜期 128 d,区域内有季节性冻土,多年平均降水量为 245 mm。克鲁伦河水系对区域经济发展、气候环境调节和人畜生活环境保障起到了重要的作用。

1.2 采样点的选择

根据克鲁伦河流域的地形地貌以及周边的人们生产生活状况,从国境线起至克鲁伦河入湖口,共设置 10 个点,利用 Arcgis 9.0 插入现场勘察坐标,具体定点为:国境线 A、乌兰恩格尔 B、克尔伦苏木 C、赛罕塔拉苏木 D、阿尔敦鲁苏木 E、布勒和木德勒嘎查 F、其其格勒嘎查 G、呼伦苏木 H、新巴尔虎右旗县城 I、入湖口 J。其具体位置见图 1。

1.3 样品采集与分析测试

土壤样品在 2014 年 7 月份采集,具体取样方法为:河岸两侧 20 m 处各定一个土壤采样点,每点东西南北 10 m 处定小采样点,在每个小采样点采集表层土(0~10 cm)500 g,将河两岸共计 10 个小采样点所取土壤进行混合,作为最终点位样品。以四分法舍去多余样品,保留 500 g 左右代表该采样点土样。将土壤样品带回实验室自然阴干,剔除砂砾后用塑料棒碾碎,取 100 g 完全研磨并过 200 目尼龙筛,装袋备用。

土样采用 HCl-HF-HNO₃-HClO₄ 混合酸电热法进行消解(GB/T 17139—1997),所用试剂为北京化工厂生产的优级纯 HCl 和 HNO₃,上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产的 HF 和优级纯 HClO₄,并采用艾

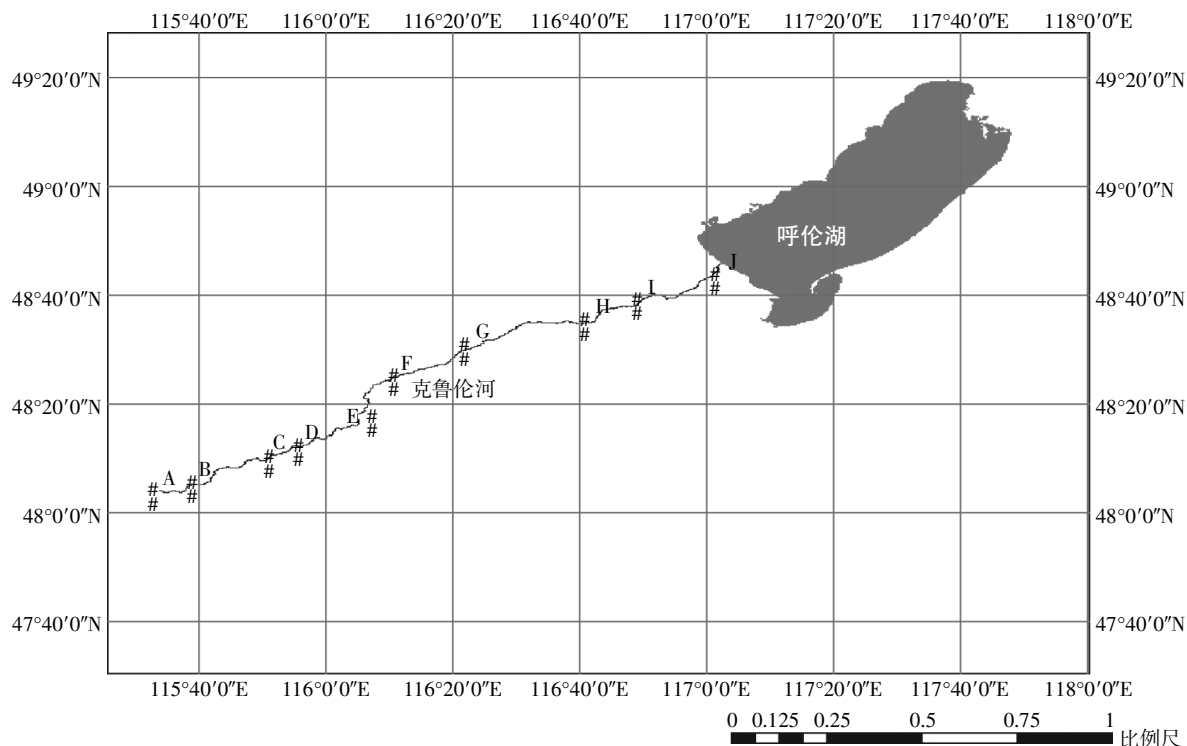


图 1 克鲁伦河滨岸带土壤采样点分布

Figure 1 Soil sampling map along riparian zone of Kerulen River

卡(广州)仪器设备有限公司生产的 IKA C-MAG HP10 电热板/加热板。土壤重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)含量于内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室进行测定,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES6300,美国热电公司)检测(HJ/T 350—2007)。实验中每五个样品任取一个测定平行样,数据显示误差范围在±5%以内,所测数据有效。为了验证方法的准确性,用国家土壤成分分析标准物质(GSS-2、GSS-7)进行分析质量控制,具体的检测准确度见表1,加标回收率符合我国 HJ/T 92—2002 规范要求。滨岸带土壤的 pH 值以 pHs-3C 型精密 pH 计测定(水土质量比为 5:1),所测 pH 值换算为 25℃下标准值。利用 SPSS 19.0 和 Origin 9.0 对数据进行分析处理。

表1 仪器检出限及方法准确度

Table 1 Detection limit and accuracy of analysis method

元素	波长/ nm	检出限/ mg·kg ⁻¹	加标回收率/ %	相对标准 偏差(RSD)/%
As	193.696	2	96.6~104.3	3
Cd	226.502	0.1	90.2~117.2	4
Zn	213.856	0.1	87.5~111.7	3
Pb	220.353	1	96.3~109.5	3
Cu	324.754	0.1	90.1~113.3	5
Ni	231.604	1	88.2~119.7	5
Cr	267.716	0.4	97.4~107.1	6

由于目前对重金属污染风险评估方法的使用范围还没有具体规定,本文根据研究对象的实际情况,采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染进行风险性评估。

1.4 生态风险评价方法

1.4.1 地积累指数法

应用 Muller^[13]提出的地积累指数定量评价沉积物中的重金属污染程度,污染程度等级划分见表2。

表2 地积累指数分级

Table 2 Grading criteria of index of geoaccumulation

地积累指数(I_{geo})	分级	污染程度
$5 < I_{geo} \leq 10$	6	极严重
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极严重
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等-强
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中等
$I_{geo} \leq 0$	0	无

其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

式中: C_n 为元素实测质量分数,mg·kg⁻¹; B_n 为该元素背景质量分数,mg·kg⁻¹;常量 1.5 是转换系数(为消除各地岩石差异可能引起的背景值变动)。

1.4.2 潜在生态危害指数法

Hakanson 潜在生态危害指数法是土壤重金属研究中较为常用的风险评估方法,它不仅考虑了土壤重金属的含量,同时兼顾了重金属的生态效应、环境效应和毒理学特征。其计算公式为:

$$C_f^i = C_i / C_n^i \quad (2)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \cdot \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C_f^i \quad (5)$$

式中: C_f^i 、 C_i 、 C_n^i 分别为重金属 i 的单项污染系数、实测值和参比值; T_r^i 、 E_r^i 分别为重金属 i 的毒性响应系数和潜在生态风险系数; C_d 为综合污染系数; RI 为潜在生态危害指数。重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的 T_r^i 分别为 10、30、2、5、5、5 和 1^[14]。

本研究中共有 7 种重金属,在物质种类和数量上与经典 Hakanson 潜在生态危害指数法有所不同,因此需要根据重金属种类和数量对 Hakanson 评价标准进行适当的调整。参考有关文献^[15-16],将 C_d 最低级上限值设定为参评重金属种类数,其余级别上限值依次加倍; E_r^i 最低级别上限值由 C_f^i 最低级别上限值(取 1)与 T_r^i 最大毒性系数值(取 30)相乘后得到(30),其余级别上限值依次加倍; RI 分级标准的最低级上限值,考虑由各重金属 T_r^i 之和与 C_f^i 最低级别限值相乘后取 10 位整数得到(约为 60),其余级别依次加倍。由此,得到本研究拟采用的评价指标等级评分标准,见表3。

2 结果与分析

2.1 重金属含量分析

克鲁伦河滨岸带土壤的重金属含量以及 pH 值见表4。研究区域土壤重金属各元素的含量范围(mg·kg⁻¹)为:As 760.4~2 664.8, Cd 15.39~52.09, Cr 29.01~53.38, Cu 27.66~63.07, Ni 28.07~98.50, Pb 87.14~218.41, Zn 2 500.1~8714。土壤 pH 范围为 7.1~8.4, 总体偏

表 3 单项污染系数(C_f)、综合污染系数(C_d)、潜在生态风险系数(E_r)和潜在生态危害指数(RI)的分级标准

Table 3 Grading criteria for C_f , C_d , E_r and RI

C_f	C_d	污染程度	E_r	RI	风险程度
$C_f < 1$	$C_d < 7$	轻微	$E_r < 30$	$RI < 60$	轻微
$1 \leq C_f < 3$	$7 \leq C_d < 14$	中等	$30 \leq E_r < 60$	$60 \leq RI < 120$	中等
$3 \leq C_f < 6$	$14 \leq C_d < 28$	重	$60 \leq E_r < 120$	$120 \leq RI < 240$	高
$C_f \geq 6$	$C_d \geq 28$	很重	$120 \leq E_r < 240$	$RI \geq 240$	很高
—	—	—	$E_r \geq 240$	—	极高

碱性。由表 4 可知,该区域 Cr、Cu 和 Pb 的变异系数较 As、Cd、Ni 和 Zn 的小,表明 As、Cd、Ni 和 Zn 的离散度相对较高。通过 7 种重金属平均值与土壤背景值的比较可知,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 分别为其背景值的 117.71、266.7、0.64、2.07、2.12、5.38、55.95 倍,其大小排序为 Cd>As>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr,相对而言,As、Cd 和 Zn 三种重金属元素在土壤中积累情况较为严重。

2.2 地积累指数法评价结果

根据计算结果,由表 5 可以看出,克鲁伦河滨岸带重金属中:As、Cd、Zn 三种重金属达到了极严重污染的程度;Pb 达到了中等污染水平,Cu、Ni 为轻度-中等污染;Cr 的含量很小,处于无污染的等级。根据地积累指数平均值,其污染由强到弱排序为 Cd>As>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr。

从 7 种元素的地积累指数分级频率计算结果(表 6)来看,As、Cd、Pb、Zn 的污染频率最大,均达到了 100%(根据土壤背景值进行计算,指 1 级以上的级别所占的百分比。下同);其次是 Cu,达到了 70%,Ni 达到了 60%,而 Cr 无污染。

从污染频率分布来看,As、Cd 均处在极严重污染的程度;Zn 达到强-极严重污染等级的和极严重污染等级的各占 50%;Pb、Ni 和 Cu 均出现了不同程度的污染,只是污染相对较轻,处于中等-强污染程度以

表 5 7 种重金属地积累指数(I_{geo})及污染分级情况

Table 5 Index of geoaccumulation and its classification of seven heavy metals

元素	统计个数	平均值	最小值	最大值	标准差	分级	污染程度
As	10	6.196 5	5.500 2	6.683 2	0.511 9	6	极严重
Cd	10	7.39	6.724 8	8.483 8	0.468 9	6	极严重
Cr	10	-1.25 4	-1.657	-0.777	0.221 2	0	无
Cu	10	0.405 8	-0.293	0.91	0.430 9	1	轻度-中等
Ni	10	0.378 1	-0.23	1.287 6	0.601 3	1	轻度-中等
Pb	10	1.798 1	1.159 9	2.485 5	0.353 3	2	中等
Zn	10	5.128 1	4.489 5	6.290 8	0.488 4	6	极严重

表 6 地积累指数分级频率表(%)

Table 6 Frequency of geo-accumulation index grades(%)

重金属	无污染	轻度-中等污染	中等污染	中等-强污染	强污染	强-极严重污染	极严重污染
As	0	0	0	0	0	0	100
Cd	0	0	0	0	0	0	100
Cr	100	0	0	0	0	0	0
Cu	30	70	0	0	0	0	0
Ni	40	40	20	0	0	0	0
Pb	0	0	60	40	0	0	0
Zn	0	0	0	0	0	50	50

下。可以看出,地积累指数法具有将土壤重金属的污染等级更加细化的优点,为进一步分析和研究克鲁伦河滨岸带重金属污染状况提供了依据。

2.3 Hakanson 潜在生态危害指数法评价结果

2.3.1 污染程度评价

利用公式(2)和(3)计算各重金属的 C_f 及 C_d ,由此得到克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染系数空间变化态势,见图 2 和图 3。

由图 2 可以看出,As、Pb、Cd 和 Zn 随点位的变化趋势具有相似性,且均在 C 采样点出现波峰;Cu 和 Ni 的变化趋势较为平缓,说明重金属 Cu 和 Ni 在区

表 4 土壤 pH 值及重金属元素含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Heavy metal content and pH values in soils from studied area($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	土壤重金属背景值
As	760.40	2 664.80	1 318.38	559.97	0.42	11.2
Cd	15.39	52.09	25.87	10.43	0.40	0.097
Cr	29.01	53.38	38.81	6.49	0.17	61
Cu	27.66	63.70	46.86	13.70	0.29	22.6
Ni	28.07	98.50	57.11	24.42	0.43	26.9
Pb	87.14	218.41	139.80	36.97	0.26	26
Zn	2 500.10	8 714.00	4 151.20	1 792.58	0.43	74.2
pH 值	7.10	8.40	7.70	0.44	0.06	—

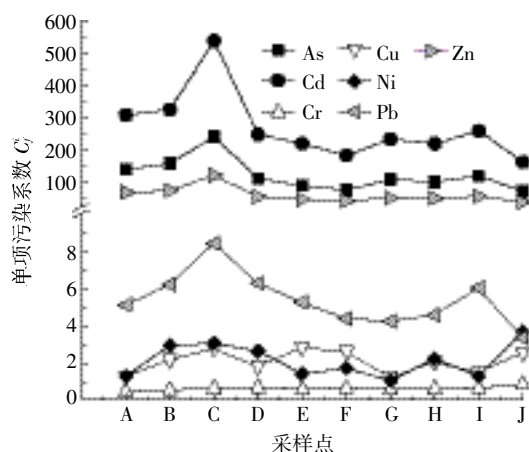


图2 单项污染系数的空间变化特征

Figure 2 Spatial variation of single pollution index

域中含量比较均衡;Cr的含量几乎处在同一条直线上,波动性极小。根据 C_i 平均值的大小,得到克鲁伦河滨岸带土壤重金属的污染程度排序: Cd(266.67) > As(117.71) > Zn(55.95) > Pb(5.38) > Ni(2.12) > Cu(2.07) > Cr(0.64)。对比表3的分级标准可以判定,As、Cd和Zn属于很重污染等级,Pb属于重污染等级,Cu和Ni属于中等污染等级,Cr属于轻微污染等级。

由图3可以看出,10个采样点的 C_d 空间差异性显著,其中C采样点相对较高,而F和J采样点相对较低。根据 C_d 平均值的大小,得到各点位重金属污染程度排序: C(907.24) > B(557.22) > A(513.68) > I(433.28) > D(414.26) > G(388.86) > H(367.97) > E(354.43) > F(297.75) > J(270.69)。由表3的分级标准可知,每一个采样点都处于很重的污染状态水平,说明克鲁伦河滨岸带土壤中重金属污染相当严重,应引起有关部门的高度重视。

2.3.2 生态风险评估

由图4可以看出,As、Cd、Zn、Pb的 E_i 值显著高

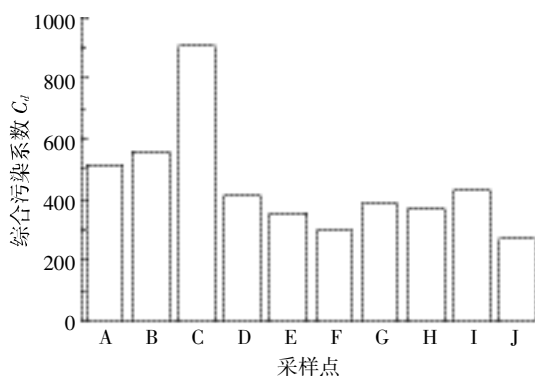


图3 综合污染系数的空间变化特征

Figure 3 Spatial variation of comprehensive pollution index

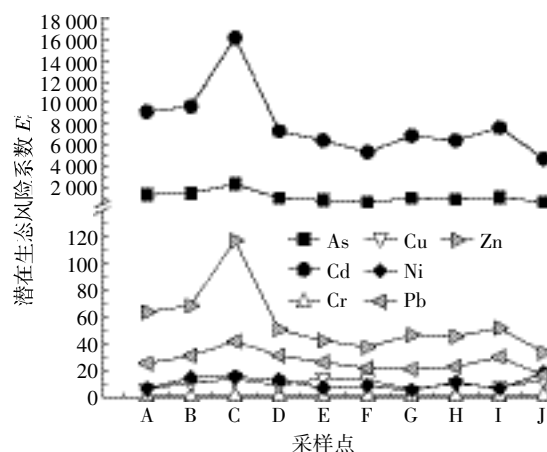


图4 潜在生态风险系数的空间变化特征

Figure 4 Spatial variation of monomial potential ecological risk factor

于其他三种金属元素,尤其是As和Cd的 E_i 值,较其他五种重金属元素表现出更加明显的差异性,分别为678.93~2379.29和4759.80~16110.31;四种重金属元素的 E_i 值均在C采样点表现出峰值,分别高于同类元素其他点位的值;其次,所有采样点Cr、Cu和Ni的 E_i 值均处在30以内,而Pb的基本都低于30;根据 E_i 平均值大小,得到7种重金属相应的风险排序: Cd(8000.10) > As(1177.13) > Zn(55.95) > Pb(26.88) > Ni(10.61) > Cu(10.37) > Cr(1.27)。由表3的分级标准可以判定Cd、As处于极高风险等级,Zn处于高风险等级,Pb、Ni、Cu和Cr处于轻风险等级。这里,Cd、As具有极高的 E_i ,除了与二者有着相对较高的 C_i 有关外,也与 T_i 密不可分。7种重金属对克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染的潜在生态风险贡献率大小排序为: Cd(86.19%) > As(12.68%) > Zn(0.6%) > Pb(0.29%) > Ni(0.11%) > Cu(0.11%) > Cr(0.01%)。由贡献率可以看出,研究区的土壤重金属潜在生态风险主要受制于Cd和As,因此特别需要引起有关部门的高度重视。

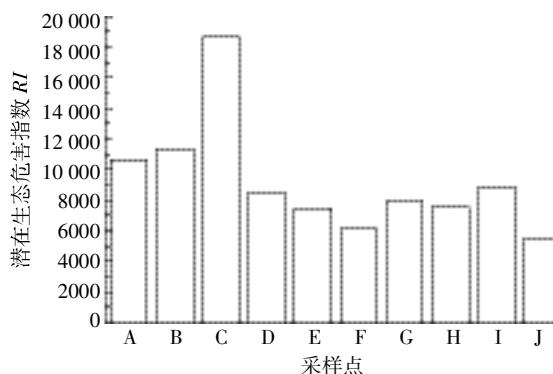


图5 潜在生态危害指数的空间变化特征

Figure 5 Spatial variation of potential ecological risk index

由图 5 可知, 采样点 C 的风险水平最高, 其 RI 高达 18 679.44; 采样点 A、B 的 RI 值比较近, 分别为 10 634.73 和 11 338.97; 采样点 D、E、G、H 和 I 的 RI 值较为接近, 分别为 8 524.39、7 436.74、8 041.13、7 534.2 和 8 933.49; 采样点 F 和 J 的 RI 值亦较接近, 分别为 6 178.03 和 5 522.00。根据表 3 的判别标准, 10 个采样点均处于极高风险等级。

3 讨论

研究发现, 无论是污染程度还是生态风险水平, 克尔伦苏木(采样点 C)都有别于其他采样点, 尤其是该点的 As、Cd 和 Zn 3 种重金属含量均较其他点位的对应重金属含量高。由重金属总量分析可知, 10 个点位中 As 和 Cd 的含量相对其他元素均比较高, 笔者认为这主要是与其所处地理位置以及周边污染类型有关。克尔伦苏木镇是新巴尔虎右旗的主要经济产生镇, 沿克鲁伦河两岸分布有锌矿、硝化厂、毛皮厂和农田, 工农业相对比较发达。选矿废水排放以及尾渣废料扬尘和非点源径流的传输作用, 对克尔伦苏木镇及其境内的克鲁伦河沿岸土壤造成了一定污染。锌矿中伴生有 Au、Ag、Cd、硫化物等, 而 As 在自然界中多以硫化物的形式夹杂在金、铜、锌等矿中^[17], 可能是导致克鲁伦河沿岸土壤重金属 As 和 Cd 污染的主要污染源; 硝化厂以及毛皮厂的排放废水中, 含有大量的 As 和 Cd 等重金属, 极易对土壤造成污染; 另外, 施用含 Cd 和 As 的农药以及化肥等物质, 也是导致周边土壤中重金属污染的原因。乌兰恩格尔(采样点 B)与克尔伦苏木镇接壤, 金属矿山开采活动以及尾矿库扬尘在地面沉积, 极有可能是造成该地区表层土壤重金属含量较高的一个主要原因。从地质成矿条件分析来看, 呼伦贝尔市拥有大型铅锌矿以及贵金属矿藏, 新巴尔虎右旗是一个有色金属和贵金属矿产集中区, 主要分布有铅锌矿和银矿, 另外还有小型的钼矿和金矿^[18]。长期地质、成土母质以及伴生矿和共生矿的形成, 极有可能是导致该地区 10 个采样点土壤中重金属 As、Cd 和 Zn 含量较高的历史原因。

由风险评估结果来看, 重金属 As 和 Cd 是风险性最大的两种元素, 与张晓晶等^[19]的结论吻合, 其次是 Zn 和 Pb, 污染风险处于重度水平。整体的风险评估与张晓晶的结果比对分析来看, 克鲁伦河滨岸带重金属的污染较为严重, 可能主要是因为草地、漫滩能够有效吸附和沉积重金属^[20], 污染物质对河岸的污染较水中更为严重; 另外由于河水在入湖口处经过湿地的净化作用使入湖河流中的重金属大为减少, 从而使得呼伦湖沉积物中重金属含量较克鲁伦河沿岸少, 沿岸重金属污染风险性较底泥沉积物中大。此次对土壤中重金属污染进行风险性评估, 只利用了重金属的全量, 对于重金属的不同赋存形态并未考虑, 而重金属的形态是决定重金属毒性的关键性因素, 因此需要进一步研究。

研究发现两种方法得出的结果有所不同(表 7)。由表中的污染程度分级可知, 尤其是在 Cr 元素的风险评价中, 地积累指数法显示无污染, 而潜在生态风险指数法显示有轻微污染。这可能是由于前者主要考虑外源重金属的富集程度, 而后者在此基础上还加入了不同重金属毒性的影响, 相比之下, 地积累指数法能够更加准确地评价重金属对克鲁伦河土壤重金属的污染状况。

4 结论

- (1)通过两种评价方法对重金属含量的分析, 除了 Cr 外, 另外 6 种重金属的含量都远超其背景值, 表明克鲁伦河滨岸带土壤已经受到较为严重的污染。
- (2)地积累指数法结果表明, As、Cd 和 Zn 三种重金属达到了极严重污染的程度, Pb 达到了中等污染程度, Cu 和 Ni 处于中等污染, 而 Cr 为无污染状态。
- (3) E_i^r 的结果表明 Cd、As 处于极高风险等级, Zn 处于高风险等级, Pb、Ni、Cu 和 Cr 处于低风险等级。 RI 表明, 10 个采样点的重金属都处于极高风险等级。
- (4)对土壤重金属潜在生态风险贡献率的分析表明, Cd 和 As 应该作为克鲁伦河滨岸带土壤重金属污染治理和生态修复的优先控制对象。
- (5)因评价方法的侧重点不同, 处理结果出现一

表 7 两种评价方法对 7 种重金属元素污染程度的评估
Table 7 Pollution of seven heavy metals evaluated by two methods

评价方法	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
I_{geo}	6.20	7.39	-1.25	0.41	0.38	1.80	5.13
地积累指数法污染	极严重污染	极严重污染	无污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	中等污染	极严重污染
E_i^r	1 177.13	8 000.10	1.27	10.37	10.61	26.88	55.95
潜在生态风险指数法	很重	很重	轻微	中等	中等	重	很重

定的差异性,主要是因为潜在生态风险指数法采用了毒性系数,更侧重重金属的毒性影响风险评估。

参考文献:

- [1] 王陆军, 范栓喜. 宝鸡市城郊农田土壤重金属污染风险评估[J]. 中国农学通报, 2015, 3(3): 179-185.
WANG Lu-jun, FAN Shuan-xi. Risk assessment of heavy metals in farmland soil in the outskirts of Baoji[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 3(3): 179-185.
- [2] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.
- [3] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 330-337.
JIANG Fei-fei, SUN Dan-feng, LI Hong, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 330-337.
- [4] Abolino O, Giacomino A, Malandrino M, et al. Assessment of metal availability in a contaminated soil by sequential extraction[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 173(1): 315-338.
- [5] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 88-96.
LI Ru-zhong, XU Jing-jing, JIANG Yan-min, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi Stream in Tongling City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 88-96.
- [6] 王志英, 刘云, 王建立, 等. 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, 2013, 32(4): 783-791.
WANG Zhi-ying, LIU Yun, WANG Jian-li, et al. Heavy metal pollution and distribution in riparian zone soil and river sediment in Beijing suburbs, China: A case study in Changping section of Wenyu River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 783-791.
- [7] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3144-3153.
ZHANG Ju, CHEN Shi-Yue, DENG Huan-guang, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3144-3153.
- [8] 钱新锋, 沈国清. 苏南河网地区河岸带土壤重金属污染生态风险评估[J]. 南京师范大学学报, 2012, 35(4): 78-83.
QIAN Xin-feng, SHEN Guo-qing. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils along river network of south Jiangsu region[J]. *Journal of Nanjing Normal University*, 2012, 35(4): 78-83.
- [9] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1/2/3): 366-372.
- [10] Sanchez-Moreno S, Canargo J A, Navas A. Ecotoxicological assessment of the impact of residual heavy metals on soil nematodes in the Guadiana River Basin(Southern Spain)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 116(1/2/3): 245-262.
- [11] Joao C, Carlos V, Laurier P, et al. Mercury in sediments and vegetation in a moderately contaminated salt marsh(Tagus Estuary, Portugal)[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(8): 1151-1157.
- [12] Du L G, Rinklebe J, Vandecasteele B, et al. Trace metal behavior in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3972-3985.
- [13] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 108.
- [14] 徐争启, 倪师军, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, et al. Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [15] 侯千, 马建华, 王晓云, 等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1764-1771.
HOU Qian, MA Jian-hua, WANG Xiao-yun, et al. Bioavailability and potential ecological risk of soil heavy metals in kindergartens, Kaifeng City[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(6): 1764-1771.
- [16] Fernandez J A, Carbalieir A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(4): 461-468.
- [17] 付一鸣, 王德全, 姜澜, 等. 固体含砷废料的稳定性及处理方法[J]. 有色矿冶, 2002, 18(4): 42-45.
FU Yi-ming, WANG De-quan, JIANG Lan, et al. The stability and disposal methods of solid arsenic bearing wastes[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2002, 18(4): 42-45.
- [18] 李宝昌. 呼伦贝尔市及毗邻地区矿产资源概况[J]. 西部资源, 2005(1): 17-21.
LI Bao-chang. Mineral resources in HulunBuir City and adjoining areas[J]. *Western Resources*, 2005(1): 17-21.
- [19] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 呼伦湖沉积物重金属分布特征及生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 157-162.
ZHANG Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hulun Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 157-162.
- [20] 何文鸣, 吴峰, 张昌盛, 等. 河岸带土壤重金属元素的污染及危害评价[J]. 生态学报, 2011, 30(9): 1993-2001.
HE Wen-ming, WU Feng, ZHANG Chang-sheng, et al. Heavy metal pollution and its ecological risk assessment of riparian soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9): 1993-2001.