

云南个旧锡矿区大屯盆地土壤重金属污染与生态风险评价

乔鹏炜^{1,2}, 周小勇¹, 杨军¹, 雷梅¹, 陈同斌¹

QIAO Peng-wei^{1,2}, ZHOU Xiao-yong¹, YANG Jun¹, LEI Mei¹, CHEN Tong-bin¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

摘要:土壤中的重金属直接影响农业安全生产,掌握不同耕地和土壤类型中重金属的污染程度可为削减生态风险提供依据。通过实地调查,对云南个旧锡矿区松树脚矿大屯盆地不同耕地和土壤类型的重金属含量,采用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法进行污染评价,基于潜在生态危害指数法进行生态风险评价。结果表明,As、Cd、Cu、Cr、Ni、Pb和Zn七种元素中,As和Cd是大屯盆地农田土壤的主要污染因子,两者对污染程度的贡献率为97%,其中Cd的贡献率为68%;两者对生态风险的贡献率为87%。旱地重金属污染程度和生态风险大于水田,红壤中重金属的污染程度和生态风险大于红色石灰土。从空间来看,个旧大屯盆地重金属污染程度总体呈现从西南向东北逐渐降低的趋势。

关键词:重金属污染;生态风险;评价;土壤类型;锡矿区

中图分类号:P618.44;X131.3;X142

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2014)08-1253-07

Qiao P W, Zhou X Y, Yang J, Lei M, Chen T B. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of Datun basin in the Gejiu tin mining area, Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8):1253-1259

Abstract: Heavy metals in the soil body will directly affect the safety of agricultural production, and investigation of the pollution level in different cultivated land types and soil types will provide the basis for the reduction of the above ecological risk. The authors investigated the heavy metal content in different land use and soil types through field work and laboratory analysis. Pollution assessment was conducted using a single factor index and Nemerow pollution index, and ecological risk assessment was also carried out based on potential ecological risk index. The results show that As and Cd are the most important pollution factors among As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb and Zn elements. The contribution of As and Cd to the pollution level is 97%, with the contribution of Cd reaching 68%. The contribution of As and Cd to ecological risk is 87%, with Cd alone contributing 68%. In addition, the pollution level and ecological risk of heavy metals in dry land is greater than those in paddy field, and the pollution level and ecological risk of heavy metals are also greater in red soil than in cerra rossa. Spatially, the pollution level of heavy metals in Datun basin of the Gejiu mining area generally shows a decreasing trend from southwest to northeast.

Key words: heavy metal pollution; ecological risk; assessment; soil type; tin mining area

大屯盆地矿业活动造成重金属和污染物向周边环境迁移扩散^[1-2],直接威胁矿区周边的生态环境

和居民身体健康^[3]。目前,一些学者^[4]对整个个旧矿区几种重金属元素的污染分布和生态风险进行了

收稿日期:2014-01-21;修订日期:2014-06-20

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项(编号:201111020)和国家自然科学基金项目(批准号:41271479)

作者简介:乔鹏炜(1989-),女,在读硕士生,从事重金属风险评估研究。E-mail:qiaopw.11s@igsnrr.ac.cn

通讯作者:周小勇(1976-),男,博士后,从事土壤重金属修复研究。E-mail:zhouxy@igsnrr.ac.cn

分析,分析方法主要有单因子指数法^[5-7]、综合污染指数法^[8-9]、Hakanson 指数法^[10]和地累积指数法^[11]。前人^[12]研究强调了重金属元素在个旧地区空间上的整体分布情况,没有就矿区不同耕地类型和土壤类型进行讨论和分析,也未能说明污染物的空间分布特征,难以为该区域的风险防控提供参考。本文对个旧锡矿区大屯盆地重金属污染和生态风险进行分析,按耕地类型和土壤类型分别讨论了7种主要重金属元素的污染程度和生态风险特征,从污染物的空间分布特征来分析污染扩散成因,为矿区受污染区域采取有针对性的治理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松树脚矿位于个旧市老厂镇,是个旧唯一一个集采矿、选矿、冶炼于一体的矿点。松树脚矿东北向分布着古山选矿厂、大屯选矿厂和散落于甲介山的个体民营选矿厂、乘风冶炼厂,团山、管家山和大屯冲尾矿库,其空间分布如图1所示。由于选矿厂和冶炼厂的粗放经营,尤其是个体民营选矿企业废水的随意排放,导致大屯海和中海的重金属含量超标,下风向的团山、大台子、古城寨等村庄都受到不同程度的污染。

大屯盆地位于松树脚矿区的东北部山脚,属岩溶盆地地貌,全年盛行西南风,常年平均气温18~19℃,年降雨量800~1000mm,年均蒸发量为2100~

2400mm,海拔1220~1350m^[13]。研究区的耕地类型主要为大屯海周边的旱地和水田,土壤类型主要为红壤和红色石灰土(图1)。

1.2 样品采集与测试

研究区属于大屯盆地,面积53km²,随机采集117个表层(0~20cm)土壤样品,主要集中在松树脚矿东北方向。土壤样品的采集使用GPS定位,多点混合保留0.5kg,在室温下自然风干、碾碎,过100目筛。另外,在团山、大台子和古城寨3个村庄布置干湿沉降桶,桶直径为27cm,在桶口覆盖纱网,放置于楼顶2个月;将收集的样品过滤分离出液相和固相,后分别称量和消煮。As总量消解采用美国EPA方法,利用10mL的HNO₃(1:1),和2mL水及3mL 30%的H₂O₂消解;Cd、Cu、Cr、Ni、Pb和Zn用HNO₃:HClO₄(4:1 V/V)消解,过滤、定容至50mL。As有效态采用0.1mol·L⁻¹ HCl提取,其他重金属用0.005 mol·L⁻¹ DTPA(二乙三胺五乙酸)提取。As含量采用原子荧光仪(科创海光AFS-9800)测定,其他重金属含量采用连续光源吸收光谱仪(耶拿 contrAA700)测定。

2 结果与讨论

2.1 重金属污染评价

重金属污染状况采用单因子指数法^[14]和内梅罗综合污染指数法^[15]进行评价。通过调查可知,研究区农田土壤pH值小于6.5,因此,在单因子指数法评

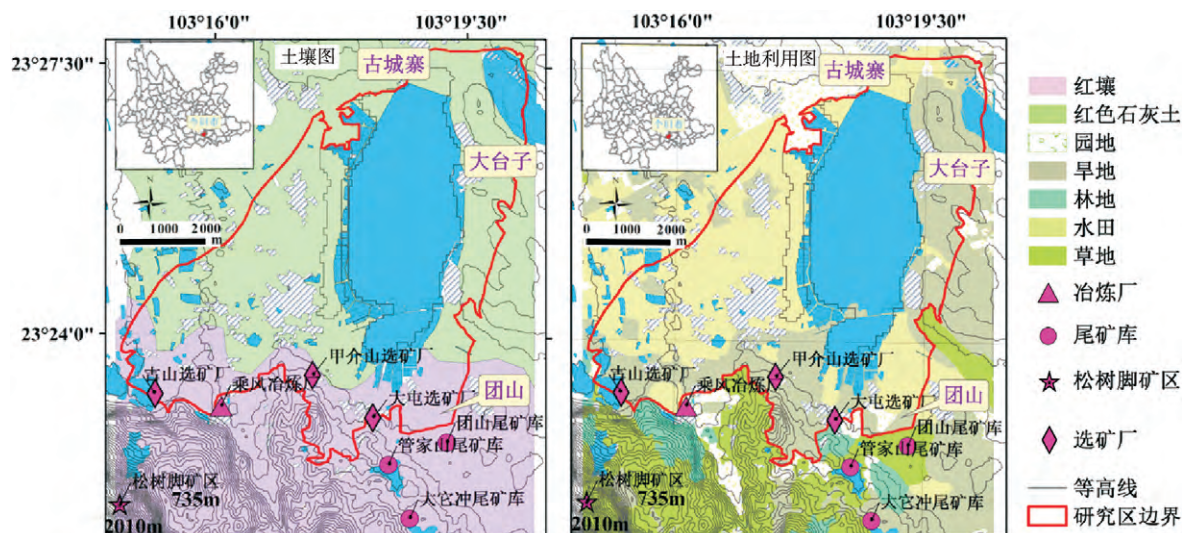


图1 松树脚矿区周边污染源分布

Fig. 1 Distribution of pollution sources surrounding the Songshujiao mining area

价中以《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准($\text{pH}<6.5$)作为参比值^[16]。7种重金属的评价结果如表1所示。

由单因子指数法得到7种重金属元素污染程度大小为: $\text{Cd}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Zn}>\text{Ni}>\text{Pb}>\text{Cr}$,其中Cr未达到污染水平,其他6种重金属的超标率依次为98.6%、97.9%、85.9%、77.5%、47.2%和38.3%;Cd和As全量分别超过《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准($\text{pH}<6.5$)6.5和4.4倍,均为重度污染,是大屯盆地农田土壤的主要污染元素。同时,Cd和As有效态含量分别超过《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准($\text{pH}<6.5$)3.7倍和2.3倍。可见,农田土壤中Cd和As的污染和环境风险需引起重视。综合污染指数评价结果显示,农田土壤属于重度污染和中度污染的样点分别占70.9%和16.4%,Cd和As对污染程度的贡献率达到97%,仅Cd的贡献率就达到68%。

不同耕地和土壤类型的污染评价结果如表2所示。不同耕地类型即旱地和水田,不同土壤类型即红壤和红色石灰土的重金属污染均为重度污染,但污染程度存在差异。分别对旱地和水田、红壤和红

色石灰土的污染程度进行差异性显著分析,分析结果如表3所示。 p 为差异性显著检验值,一般与0.05和0.01比较,小于0.05(0.01)表示在0.05(0.01)水平上差异性显著。不同耕地类型的方差齐的 t 检验结果为 $t=1.729$ 、 $p=0.087$,差异性不显著($p>0.05$),即旱地重金属污染程度略高于水田。同时,不同土壤类型的方差非齐的 t 检验结果为 $t=3.507$ 、 $p=0.004$,即红壤重金属污染程度显著高于红色石灰土($p<0.01$)。

旱地污染程度大于水田。陈慧芳等^[17]、凌乃规等^[18]的研究结果也表明了旱地污染程度较水田严重,这与旱地和水田农作物对重金属的累积效应和对土壤理化性质的影响有关。旱地土壤中重金属主要以稳定态形式存在^[19],迁移性差^[20],不易流失,在土壤中不断积累,含量较高;水田土壤发育程度较高,通过稻田排水和渗漏作用,将土壤中部分重金属带走,重金属迁移性大^[21],不易在土壤中累积。

红壤的污染程度大于红色石灰土,郭岩等^[22]的研究结果也表明红壤的污染程度较红色石灰土严重,这可能是因为红壤质地粘重板结,对重金属具有较强的吸附能力,土壤中滞留的重金属量会相

表1 大屯盆地农田土壤污染状况评价

Table 1 Assessment of cultivated land soil pollutions of Datun basin

重金属	二级标准($\text{pH}<6.5$) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	实测平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		超标倍数		超标率/%		重金属污染评价 (单因子指数法)
		总量	有效态	总量	有效态	总量	有效态	
Cd	0.30	2.26	1.41	6.5	3.7	98.6	95.3	重度
As	30	162	97.7	4.4	2.3	97.9	85.2	重度
Cu	50	110	85.4	1.2	0.7	85.9	72.6	轻度
Zn	200	391	242	1.0	0.2	77.5	72.7	轻微
Ni	40	54.0	43.3	0.4	0.1	47.2	39.5	轻微
Pb	250	302	201	0.2	0	38.3	18.0	轻微
Cr	250	39.3	29.6	0	0	0	0	清洁
$P_{\text{综}}$ (内梅罗综合污染指数法)						5.70		重度

表2 大屯盆地不同耕地和土壤类型的污染状况评价

Table 2 Assessment of pollutions of different cultivated land types and soil types in Datun basin

类型	分类	重 金 属							综合污染评价	
		Cd	As	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	$P_{\text{综}}$	污染程度
耕地	旱地	7.06	5.23	1.99	1.47	1.60	1.11	0.13	5.67	重度
	水田	5.06	4.26	1.93	1.02	1.28	0.92	0.14	4.48	重度
土壤	红壤	11.1	8.55	3.49	0.96	2.33	1.48	0.19	8.86	重度
	红色石灰土	4.75	3.84	1.66	1.22	1.22	0.89	0.13	4.11	重度

表3 大屯盆地不同耕地和土壤类型污染差异显著性分析

Table 3 Difference significance analysis of pollutions of different cultivated land types and soil types in Datun basin

类型	方差检验	Levene 检验		均值方程的 <i>t</i> 检验					
		<i>F</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i> (双侧)	均值 差值	标准 误差值	95%置信区间 下限 上限
旱地	假设方差相等	2.319	0.131	1.729	87	0.087	1.21804	0.70444	-0.18210 2.61819
	假设方差不相等			1.668	55.512	0.101	1.21804	0.73012	-0.24485 2.68093
红壤	假设方差相等	18.999	0.000	6.049	88	0.000	4.74460	0.78439	3.18579 6.30340
	假设方差不相等			3.507	13.826	0.004	4.74460	1.35274	1.83982 7.64937

注:*p* 是差异性显著的检验值;*F* 为组方差值;*df* 为自由度

对较高;而红色石灰土表土疏松,有机质含量较低,对重金属吸附能力较弱^[23],并且由于种植水稻后石灰土的pH值降低,重金属可溶性部分增加,受雨水等冲刷作用较大,表层土壤中重金属随水土流失不断减少。

2.2 重金属生态风险评价

国内外常用的生态风险评价方法^[24]是瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[25-26],用来描述土壤重金属对生态环境造成的危害^[24]。该方法综合考虑了重金属毒性、在土壤中的迁移规律和评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异,消除了区域差异影响,体现了生物有效性、相对贡献、地理空间等特点,是综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标^[27-28]。

潜在生态危害指数法的计算公式为:

$$RI=\sum_{i=1}^n E_r^i$$

公式(1)

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

公式(2)

式中,*RI*为多种重金属潜在生态危害指数,*E_{rⁱ}*

为重金属*i*的潜在生态危害系数,*C_{rⁱ}*

为重金属的富集系数(*C_{rⁱ}*

=*C_{kⁱ}*

/*C_{nⁱ}*

);*C_{kⁱ}*

为重金属*i*的实测数据,*C_{nⁱ}*

为计算所需的参比值,一般应用中以国家土壤环境标准值作为参比值,本文采用云南省土壤质量背景值作为参比值;*T_{rⁱ}*

为重金属*i*的毒性系数,本次研究中As、Zn、Cd、Cu、Ni、Pb和Cr七种重金属元素的毒性系数分别为10、1、30、5、5、5和2^[29]。计算得到的每种重金属的潜在生态危害指数和综合潜在危害指数评价结果如表4所示。

7种重金属元素潜在生态危害指数大小依次为Cd>As>Pb>Cu>Ni>Zn>Cr,其中Cd仅“极强”和

“很强”值的样品就占总样品的64.3%，“强”值样品占25.7%;As元素“很强”值和“强”值样品分别占总样品的17.9%和46.3%;Cd和As的生态风险分别达到“很强”和“强”的等级,说明这2种元素都具有较大的潜在生态危害。

不同耕地和土壤类型的综合潜在危害指数评价结果如表5所示。7种重金属元素综合潜在危害指数评价等级为强生态风险,在样品总量中,“很强”值和“强”值分别占17.9%和35.8%,Cd和As对危害的贡献率为87%,Cd的贡献率达68%。旱地生态

表4 大屯盆地农田土壤生态风险评价

Table 4 Assessment of cultivated land soil ecological risks in Datun basin

重金属	毒性系数	参比值 /mg·kg ⁻¹	实测平均值 /mg·kg ⁻¹	<i>E_{rⁱ}</i>	风险等级
Cd	30	0.22	2.26	308	很强
As	10	18.4	162	88.1	强
Pb	5	40.6	302	37.2	轻微
Cu	5	46.3	110	11.9	轻微
Ni	5	42.5	54.0	6.35	轻微
Zn	1	89.7	391	4.36	轻微
Cr	2	65.2	39.3	1.21	轻微
RI				458	强

表5 大屯盆地不同耕地和土壤类型的生态风险评价

Table 5 Assessment of ecological risks of different cultivated land types and soil types in Datun basin

类型	耕地类型		土壤类型	
	旱地	水田	红壤	红色石灰土
<i>RI</i>	445	329	720	307
风险等级	强	强	很强	强

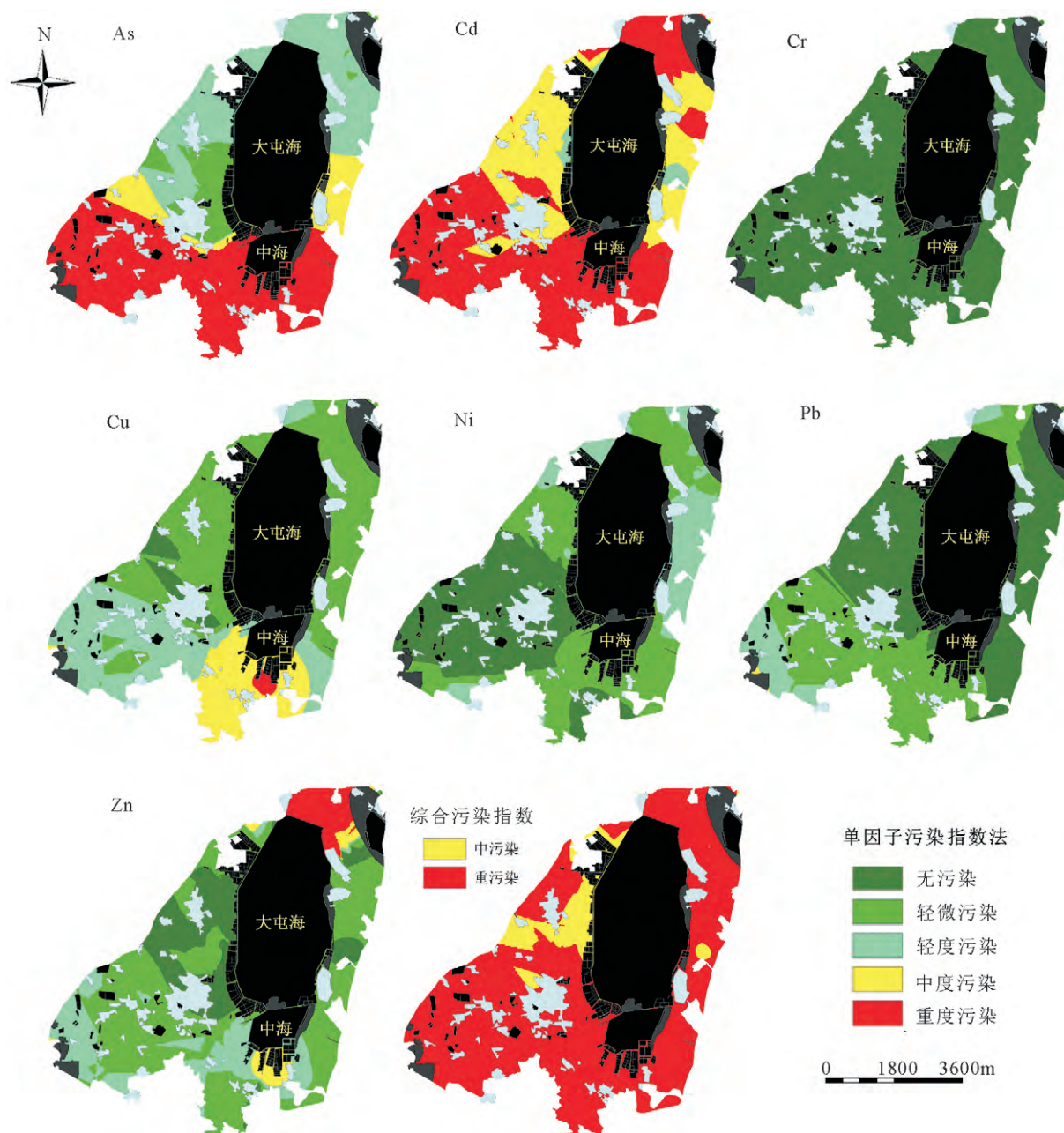


图2 大屯盆地农田土壤重金属污染分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal pollutions of cultivated land in Datun basin

风险大于水田,综合潜在危害指数评价结果分别为445和329,红壤生态风险大于红色石灰土,综合潜在危害指数评价结果分别为720和307。郭岩等^[17]的研究结果也表明旱地生态风险大于水田。

2.3 重金属污染和生态风险的空间分布

重金属污染程度和生态风险都是通过所有采样点的均值进行计算的,得到的结果只能反应研究

区农田土壤污染的整体状况,而不能直观地显示其污染和风险的空間分布情况。利用ArcGIS软件结合Kriging插值法可以直观地了解研究区重金属污染和生态风险的空間分布。

2.3.1 重金属污染评价的空間分布

按照单因子指数法和内梅罗综合污染指数法,将研究区采样点按照Kriging插值方法进行分析,分

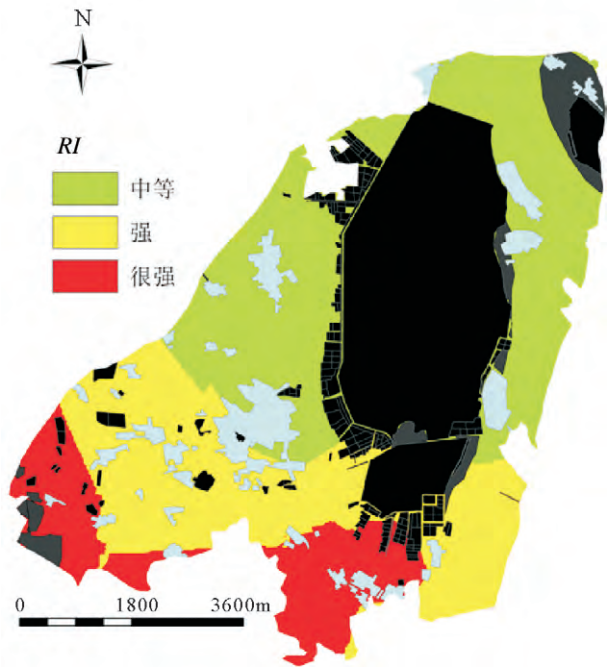


图3 大屯盆地农田土壤重金属生态风险分布
Fig. 3 Distribution of ecologic risks of cultivated land in Datun basin

析结果如图2所示,总体来看,As、Cd、Cu、Ni、Pb和Zn的污染程度大致从西南向东北方向逐渐降低。

2.3.2 重金属生态风险评价的空间分布

大屯盆地重金属综合潜在生态危害指数分布由西南向东北方向逐渐降低(图3),与地势走向基本一致。从耕地类型来看,西南部的古山选矿厂周边和管家山尾矿库北部、甲介山选矿厂南部、大屯选矿厂西部所包围的旱地生态风险等级较高,属于“很强”值,乘风冶炼厂北部、甲介山北部、大屯海南部一带区域水田和少量旱地主要是“强”值,大屯海东部旱地和西部水田属于“中等”,这种分布趋势与土地利用的分布没有密切联系(图1)。

研究区重金属污染和生态风险的空间分布与风向和地势走向较为一致,可能部分受干湿沉降的影响。为了进一步证明此推断,在研究区团山、大台子和古城寨3个村庄布置干湿沉降桶(图1)。3个地方干湿沉降的重金属量如表6所示。沿团山上村、大台子村和古城寨由南向北的方向,As、Zn、Cr等重金属的沉降量逐渐降低,即随着与污染源距离的增加,干湿沉降的量呈现从南向北逐渐降低的趋势。

表6 不同村庄重金属干湿沉降量
Table 6 Dry and wet deposition heavy metals in different villages

采样点	重金属沉降量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$		
	As	Zn	Cr
团山村	43.5	0.77	0.03
大台子村	26.4	0.56	0.01
古城寨	15.3	0.14	0.01

如图1所示,研究区的地势走向呈现从西南向东北逐渐降低的趋势,选矿厂及其尾矿库、冶炼厂分布在研究区的西南方向,所在地区地势较高,选矿厂产生的废水向地势低的大屯海和中海及其周边排放,由于地表入渗和岩溶地貌的淋溶作用,废水在排放过程中不断损失,重金属含量减少,污染程度呈现从西南向东北逐渐降低的趋势。

由重金属生态风险评价结果(图3)可以验证研究区污染程度的分布趋势,生态风险的“很强”和“强”值分布区域基本集中在红壤地区,该地区的土地利用方式几乎全部为旱地,而“中等”值主要分布在离污染源较远的红色石灰土地区,该地区的主要土地利用方式为水田,占石灰土面积的60%,其余主要是旱地。这种分布趋势与风向和地势走向具有较强的相关性,充分证明了重金属污染和生态风险主要是受风向和地势走向影响的假设。

3 结 论

(1)大屯盆地农田土壤的重金属污染程度大小为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$, Cd和As的有效态含量超过《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准($\text{pH} < 6.5$)3.7和2.3倍,Cd和As是主要污染元素。大屯盆地农田土壤重金属总体呈现重度污染,在内梅罗综合污染指数中,As和Cd的贡献率为97%,仅Cd就达到68%。旱地污染程度大于水田,红壤污染程度大于红色石灰土。

(2)大屯盆地农田土壤的重金属潜在生态危害指数大小依次为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cr}$,其中Cd和As的生态风险等级分别表现为“很强”和“强”。大屯盆地农田土壤总体上表现为“强生态危害”,其中Cd和As贡献率为87%,仅Cd就为68%;同时,旱地生态风险大于水田,红壤生态风险大于红色石灰土。

参考文献

- [1]陈同斌,曾希柏,胡清秀.中国化肥利用率的区域分异[J].地理学报,2002,57(5):531-538.
- [2]Yu R L, Yuan X, Zhao Y H, et al. Heavy metal pollution in inter-tidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. Journal of Environment Science, 2008, 20(6): 664-669.
- [3]艾建超,李宁,王宁.污灌区土壤—蔬菜系统中镉的生物有效性及迁移特征[J].农业环境科学学报,2013,32(3):491-497.
- [4]张德刚,刘艳红,张虹,等.个旧矿区土壤重金属污染研究进展[J].金属矿山,2009,11(增刊):807-810.
- [5]肖青青,王宏斌,赵宾,等.云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J].农业环境科学学报,2011,30(2):271-281.
- [6]李江燕,杨永珠,李志林,等.云南个旧大屯镇蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J].安全与环境学报,2013,13(2):91-96.
- [7]白建波,周银丽,刘艳红,等.个旧地区芦苇及其种植地土壤重金属污染评价[J].广东农业科学,2012,24:171-174.
- [8]雷冬梅,段昌群,王明.云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价[J].农业环境科学学报,2007,26(2):612-616.
- [9]张德刚,刘艳红,张虹,等.选冶炼厂周边土壤中几种重金属污染状况调查分析[J].广东农业科学,2010,3:215-217.
- [10]叶玉瑶,张虹鸥,谈树成.个旧城区土壤中重金属潜在生态危害评价[J].热带地理,2004,24(1):14-17.
- [11]郑国强,方向京,张洪江,等.云南省个旧锡矿区重金属污染评价及植被恢复初探[J].水土保持通报,2009,29(6):208-213.
- [12]刘艳红,张德刚,刘杰,等.云南个旧锡工矿区周边甘蔗植株中重金属分布特征及污染分析[J].广东农业科学,2010,8:242-244.
- [13]云南膨胀土专题研究第二协作组.蒙自鸡街膨胀土地区建筑物初步调查[J].建筑结构,1976,4:1-3.
- [14]宋静宜,傅开道,苏斌,等.澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J].地理学报,2013,68(3):389-397.
- [15]刘艳红,张德刚,刘杰,等.云南锡矿区及周边部分农作物重金属污染评价[J].环境科学,2010,16(7):517-520.
- [16]弓晓峰,陈春丽,周文斌,等.潘阳湖底泥中重金属污染现状评价[J].环境科学,2006,27(4):732-736.
- [17]陈慧芳,李艳,吴豪翔,等.富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):164-169.
- [18]凌乃规.广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J].农业环境与发展,2010,4:91-94.
- [19]赵淑苹,陈立新.大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J].水土保持学报,2011,25(5):195-199.
- [20]杨刚,沈飞,钟贵江,等.西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J].环境科学学报,2011,31(9):2014-2021.
- [21]邓超冰,李丽和,王双飞,等.典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2297-2301.
- [22]郭岩,杨国义,董巧香,等.汕头市典型区域土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2007,28(5):1067-1074.
- [23]全国土壤普查办公室.中国土种志(第6卷)[M].北京:中国农业出版社,1996.
- [24]Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174: 455-462.
- [25]王显伟,徐友宁,杨敏,等.矿山土壤重金属污染风险评价方法综述[J].中国矿业,2009,18(10):54-56.
- [26]Hakanson L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: a Sediment Logical Approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [27]Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1470-1477.
- [28]何云峰,朱广伟,陈英旭,等.运河(杭州段)沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(6):669-674.
- [29]徐争启,倪师军,庾先国,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.