

罗飞, 巴俊杰, 苏春田, 等. 武水河上游区域土壤重金属污染风险及来源分析[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2): 195 - 203.

LUO Fei, BA Jun-jie, SU Chun-tian, et al. Contaminant Assessment and Sources Analysis of Heavy Metals in Soils from the Upper Reaches of the Wushui River[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2): 195 - 203.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201806040069】

武水河上游区域土壤重金属污染风险及来源分析

罗飞^{1,2}, 巴俊杰^{1,2*}, 苏春田^{1,2}, 潘晓东^{1,2}, 杨杨^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 生态功能区在涵养水源、保持水土、维系生物多样性等方面具有重要的作用。本文以位于南岭生态功能区的流域——武水流域为研究对象, 采集流域上游交通运输用地、采矿用地、工业用地、耕地及林地5种土地利用类型土壤样品, 分析7种重金属Cd、As、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn的含量特征, 采用内梅罗综合污染指数评价重金属污染的程度, Hakanson潜在生态风险指数法评价土壤重金属潜在生态风险, 并应用主成分分析法探究重金属污染的来源。研究结果显示, 武水河上游地区土壤重金属Cd、As、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn平均含量分别为1.28、72.44、54.62、0.27、68.32、72.29和158.42mg/kg, 均高于土壤背景值, 其中采矿用地土壤重金属含量除Hg外均高于其他类型土壤。均值状态下土壤中Cd和As单因子污染指数分别为5.07、3.25, 其中采矿用地中Cd单因子污染指数可达13.59; 土壤重金属综合污染指数表明, 采矿用地污染最为严重, 其次是工业用地, 林地呈安全状态。潜在生态危害指数评价结果显示, 采矿用地和工业用地达到了强生态危害, 其他类型土壤为轻微生态危害, 而采矿用地土壤中Cd达到极强生态危害, As为强生态危害。土壤重金属来源研究结果表明, As、Cd、Cu和Zn来源于矿山开采及工业活动, Ni和Hg主要来源于成土母质, Pb则来源于交通运输。研究认为: 武水流域上游区土壤重金属污染情况较为严重, Cd和As是区内主要的风险因子, 主要来源于矿山开采以及工业活动。

关键词: 武水流域; 不同利用类型; 土壤重金属; 污染风险; 来源

要点:

(1) 武水流域上游区不同利用类型土壤中重金属强风险因子为Cd、As。

(2) 采矿用地和工业用地土壤中重金属构成区内主要潜在生态危害。

(3) 土壤中重金属强风险因子主要来源于矿山开采及工业活动。

中图分类号: S151.93; O657.3 **文献标识码:** A

近年来随着人类活动(矿山开采、工业排放等)对自然环境影响的加剧, 土壤重金属污染日益严重^[1]。受重金属污染的土壤其土壤酶活性和微生物的代谢活性降低, 生态结构也遭受破坏, 且重金属可通过土壤-植物系统迁移并逐级累积, 最终可直接或间接危害人类健康, 同时造成生态环境质量下

降。由于土壤重金属污染具有多源性、普遍性、潜伏性、不可逆性和难治理性等特点^[2-6], 一直是国内外学者关注的重点。

南岭生态功能区为我国南方重要的生态功能区之一, 系湘江流域与珠江流域分水岭, 其水土环境健康对下游流域有着至关重要的作用。同时该区亦为

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-12-13; 接受日期: 2019-01-04

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018JJA150151); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160303); 桂林市科技局重大专项项目(20180101-3)

作者简介: 罗飞, 助理研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质研究工作。E-mail: luofei@karst.ac.cn。

通信作者: 巴俊杰, 博士, 助理研究员, 从事水文地质环境地质研究工作。E-mail: bajunjie@karst.ac.cn。

我国重要的有色金属资源基地,长期采矿、选矿等活动造成周边环境受到重金属的污染。现阶段对于该区域内的土壤重金属污染的研究主要集中于典型矿区、受矿山开采污染的河流周边土壤重金属污染状况。典型矿区有大宝山矿区,张晗等^[7]研究了区内农田土壤重金属污染特征,发现污灌区土壤中Cd、Pb、Cu、Zn含量明显高于清水灌溉渠以及对照区;郑堃等^[8]研究了凡口铅锌矿、大宝山多金属矿以及曲江发电站三个工矿区稻田土壤重金属污染状况,发现三个工矿区重金属污染严重,具有很高或高的潜在生态风险;陈莹等^[9]研究了大宝山表层沉积物中重金属含量特征,发现沉积物重金属污染严重,土壤pH是影响土壤重金属含量的重要因子。受重金属污染的河流主要集中于横石河和翁江,朱爱萍等^[10]研究了横石河—翁江沿岸土壤重金属污染分布特征,得出横石河沿岸土壤重金属污染较翁江沿岸严重,Cd是研究区土壤污染最严重的重金属元素,这与付善明等^[11]的研究结果相一致;宿文姬等^[12]研究了横石河沿岸土壤重金属累积风险发现,土壤重金属的累积程度及其风险等级呈现出从源头向下游递减的特点。已有的研究主要集中于功能区

中游或者中下游,且多为同一土地利用类型的土壤,而对于源头区——武水流域不同土地利用类型土壤重金属的研究鲜见报道。

武水流域作为北江支流、珠江流域北源之一,位于南岭生态功能区的重点部位,急需掌握区内土壤重金属污染状况。本研究选择武水流域为研究对象,对其上游区域5种土壤:交通运输用地、采矿用地、工业用地、耕地及林地土壤进行取样,测试重金属Cd、As、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn含量,研究土壤重金属分布特征,采用内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法进行生态风险评估,并结合主成分分析法探讨土壤重金属可能的来源,以期为南岭生态功能区生态安全及生态环境的保护、治理提供数据支撑。

1 研究区概况

武水流域作为珠江水系北江干流上源之一,其集水面积约为7079km²,本次研究区位于武水流域上游区域,主要包括临武县、宜章县部分乡镇(图1)。研究区位于湘粤两省交界处,是湘南粤北产业转移带重点区域。该区属于中亚热带季风性湿

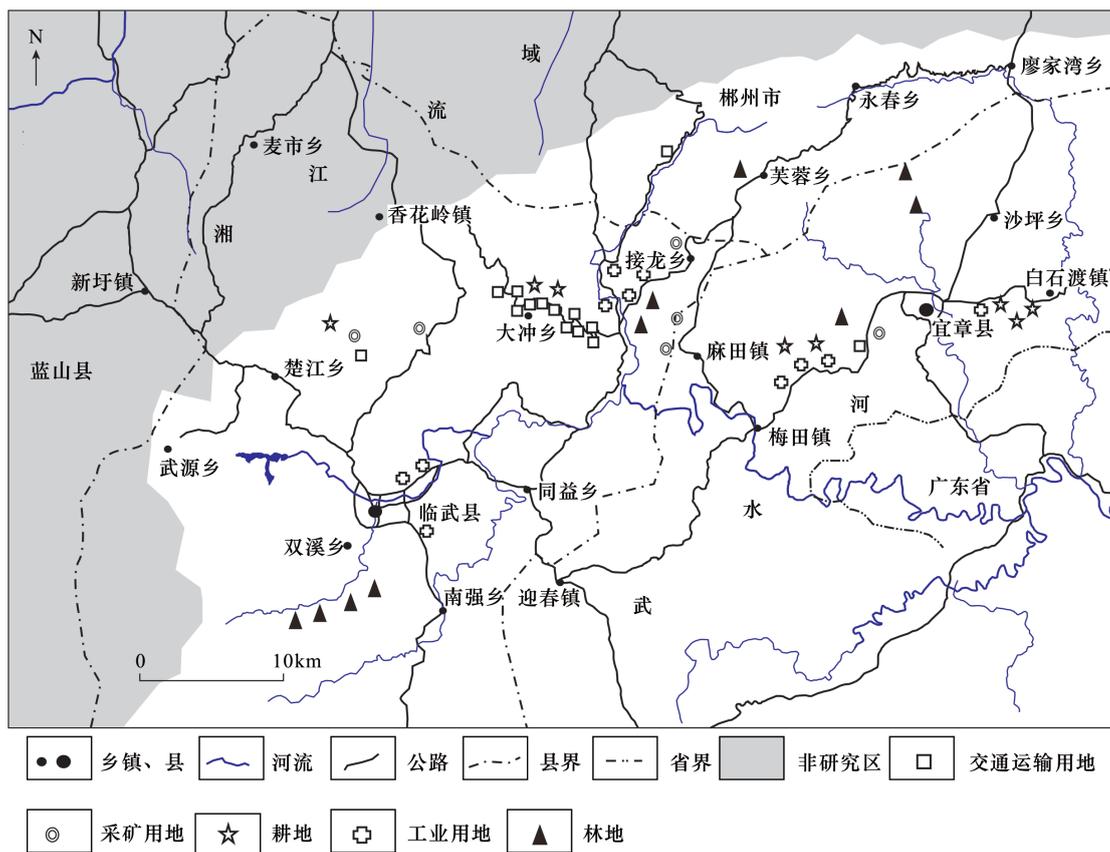


图1 采样点分布图

Fig.1 Distribution map of sampling sites

润气候区,夏季湿热多雨,秋季干旱少雨。区内地貌以中高山、中山、岩溶丘陵地貌为主。区内矿产资源丰富,主要分布于浅变质岩区以及浅变质岩与碳酸盐接触地带,主要产出钨、铅、锌、锡等有色及稀有金属。区内分布有较多的矿厂,集开采、选洗以及冶炼于一体,各个环节均会产生“三废”,未经过有效的处理直接进入自然环境中,造成周边环境的重金属污染。同时,运输矿产的车辆也较多,通过固定的路线运输也会对路线周边土壤造成一定的污染。

2 实验部分

2.1 样品采集与测试

通过前期野外调查,依据土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007),分为交通运输用地、采矿用地、耕地、工业用地及林地,在研究区共采集了49个样品(图1),其中交通运输用地14个,采矿用地6个,耕地8个,工业用地11个,林地10个,采样时期为2015年3月。采用直线型布点法采集表层土壤(0~20cm)均匀混合后转入自封袋,带回实验室后,自然风干,剔除碎石、根系等杂物,过100目筛备用。

参照美国EPA的方法对样品进行消解(USEPA 3052,1996)和仪器分析(USEPA 7470A,1994;USEPA 3052,1996),采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定Cd、As、Cu、Ni、Pb、Zn;采用冷原子吸收测汞仪测定Hg。通过测定消解空白及参考国家标准土壤样品(GBW07401)进行质量控制,各元素的分析误差在5%以内。

2.2 评价方法

为了定量反映研究区土壤重金属污染及生态风险情况,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)为参考背景值,采用单因子污染指数法、综合污染指数法和潜在生态风险指数法进行评价。

2.2.1 单因子污染指数法

该方法对土壤中的某一污染物的污染程度进行

评价。其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中: C_i 为污染物*i*的实测浓度(mg/kg); S_i 为污染物*i*的评价标准。本研究采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》风险值为污染物的评价标准。

2.2.2 综合污染指数法

采用内梅罗综合污染指数法进行重金属污染状况评价,表达式如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $(C_i/S_i)_{\max}$ 为土壤重金属元素中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤各污染指数的平均值。

依据单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法将土壤重金属污染划分为5个等级(表1)。

2.2.3 潜在生态危害指数法

该方法由瑞典科学家Hakanson^[13]提出,通过将土壤重金属含量与重金属的生态效应、环境效应与毒理学结合在一起,采取潜在生态危害指数(RI)进行分级评价。其计算方式为:

$$RI = \sum_i E_r^i = \sum_i T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中:RI为土壤中重金属潜在生态危害总指数; C_i 为重金属元素*i*实测质量分数(mg/kg); C_n^i 为重金属元素*i*参比值,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》风险值为参比值(mg/kg); T_r^i 为重金属*i*元素的毒性系数; E_r^i 为重金属*i*元素的潜在生态危害系数。重金属毒性系数采用Hakanson提出的,其中: Cd、As、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn分别为30、10、5、40、5、5、1^[13]。根据土壤重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)可以将污染状况划分为5个等级;而依据土壤重金属的潜在生态危害指数(RI)可以将污染状况划分为4个等级(表1)。

表1 单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害系数、危害指数分级标准

Table 1 Classification criterion of single geneindex, complex pollution indices methods, potential ecological risk coefficients and risk indices

等级	单项污染指数 (P_i)	综合污染指数 (P_N)	污染等级	潜在生态危害系数 (E_r^i)	潜在生态污染指数 (RI)	生态危害程度
I	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	<40	<150	轻微生态危害
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线	40~80	150~300	中等生态危害
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	80~160	300~600	强生态危害
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	160~320	>600	很强生态危害
V	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	>320	-	极强生态危害

2.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 统计软件进行相关系数和主成分分析;数据分析及计算则在 EXCEL2007 中完成;采样点分布图利用 Coreldraw X6 绘制。

3 结果与讨论

3.1 研究区重金属含量统计分析

研究区 5 种土地利用类型 49 个土壤样品测试结果表明(表 2),Cd、As、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 1.28、72.44、54.62、0.27、68.32、72.29 和 158.42 mg/kg,除 As 和 Cd,其他元素平均值未超过参考背景值,但均高于湖南土壤背景值^[14],除 Ni 外,另外 6 种重金属元素超土壤背景值的样品比例均高于 60%,尤其以 Pb 最为显著,达到了 95.34%,说明在人类活动影响下,呈现出一定程度的富集,As、Cd 和 Pb 的污染可能较为严重。

变异系数可以表征数据的离散程度,变异系数越大,表明土壤重金属分布受到干扰活动越强^[15]。Wilding^[16]将变异系数分为高度变异($CV > 0.36$)、中等变异($0.16 < CV < 0.36$)和低度变异($CV < 0.16$)。研究区内各种重金属均属于高度变异,其中,As 的变异系数高达 2.93。相比于呼和浩特市特城区土壤^[17]、洛阳市城市土壤^[18]中的重金属,本研究区内各种重金属含量分布变异系数远高于上述研究。研究区土壤重金属分布受外界干扰较为显著,且空间分布差异较大,这通常是由于人类活动造成的^[19]。

3.2 研究区不同土地利用类型土壤重金属分布特征

研究区不同利用类型土地的土壤重金属含量表明(图 2),各种重金属在不同土地利用方式下的土壤中含量相差较大。除 Hg 外,Cd、As、Cu、Ni、Zn、Pb 的最大含量均出现在采矿用地,其平均含量分别超过参考背景值的 13.6、12.2、2.2、1.3、1.6 以及 2.22 倍,其中 As 含量最高为参考背景值的 49.7 倍,Cd

含量最高为参考背景值的 33.3 倍,表明矿山开采、选矿及冶炼等活动造成了土壤严重污染;工业用地土壤中 Cd 含量较高,其平均含量为参考背景值的 8.6 倍,其中,位于一大型堆煤厂旁边的土壤 Cd 含量最高为参考背景值的 32.5 倍;交通运输用地土壤由于常年受汽车尾气排放、矿渣掉落等因素影响,As、Cd 平均含量超过参考背景值 1.4 倍、1.3 倍,其他重金属元素平均含量未超过参考背景值,仅在个别点有超标的情况出现;耕地由于化肥、农药等施用以及使用矿坑排水灌溉,造成重金属含量有一定程度的富集,Cd、As 平均含量为参考背景值的 1.49 倍、1.08 倍;林地由于植被覆盖较好,受人为活动影响较小,重金属均未超过参考背景值。

3.3 研究区不同土地利用类型土壤重金属污染评价

研究区不同土地利用类型中土壤环境质量评价结果如表 3 所示。单因子污染指数(P_i)评价结果表明,均值状态下土壤中重金属污染趋势为 $Cd > As > Ni > Cu > Zn > Pb > Hg$ 。Hg 处于安全状态,Cu、Pb、Zn、Ni 处于警戒状态,Cd 的富集程度最高,单因子得分为 5.07,污染最为严重;其次为 As,单因子得分 3.25。

不同土地利用类型中各重金属的单因子污染指数结果显示,Cd 在采矿用地及工业用地污染均达到重污染级别,单因子得分分别为 13.59、8.55;As 在采矿用地土壤中达到重污染级别,其他类型土壤为轻污染或安全状态;Cu 在采矿用地土壤为重污染,其他土壤为安全状态;Ni 在采矿用地、耕地以及工业用地土壤中为轻污染状态;Pb 在采矿用地土壤中为中污染,其他处于安全状态;Zn 在采矿用地土壤中为轻污染,其他土壤无污染;Hg 在各类型土壤中均为安全等级。土壤重金属综合污染指数(P_N)大小顺序为:采矿用地 > 工业用地 > 耕地 > 交通运输用地 > 林地,采矿用地和工业用地呈重污染,耕地和交通运输用地为轻污染,林地处于安全状态。

表 2 研究区土壤重金属描述性统计

Table 2 Statistical characteristics of heavy metals of soil in the study area

重金属 (n=49)	含量测定值 (mg/kg)	平均含量 (mg/kg)	变异系数	参考背景值 (mg/kg)	平均含量 参考背景值	超参考背景 值率(%)	土壤背景值 ^[16] (mg/kg)	超参考背景值率 (%)
Cd	0.03 ~ 10.00	1.28	1.76	0.30	4.27	60.43	0.20	71.73
As	5.39 ~ 1490.0	72.44	2.93	30.00	2.41	50.91	14.00	71.73
Cu	3.55 ~ 867.00	54.62	2.21	100.00	0.54	6.12	27.0	60.38
Hg	0.02 ~ 1.93	0.27	1.34	2.4	0.11	0	0.18	66.04
Ni	2.96 ~ 340.00	68.32	1.14	100.00	0.68	14.28	57.1	37.74
Pb	22.50 ~ 662.00	72.29	1.53	120.00	0.60	14.28	27.0	95.34
Zn	19.70 ~ 612.00	158.42	0.79	250.00	0.63	20.41	95.0	64.15

注:参考背景值采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)风险值。

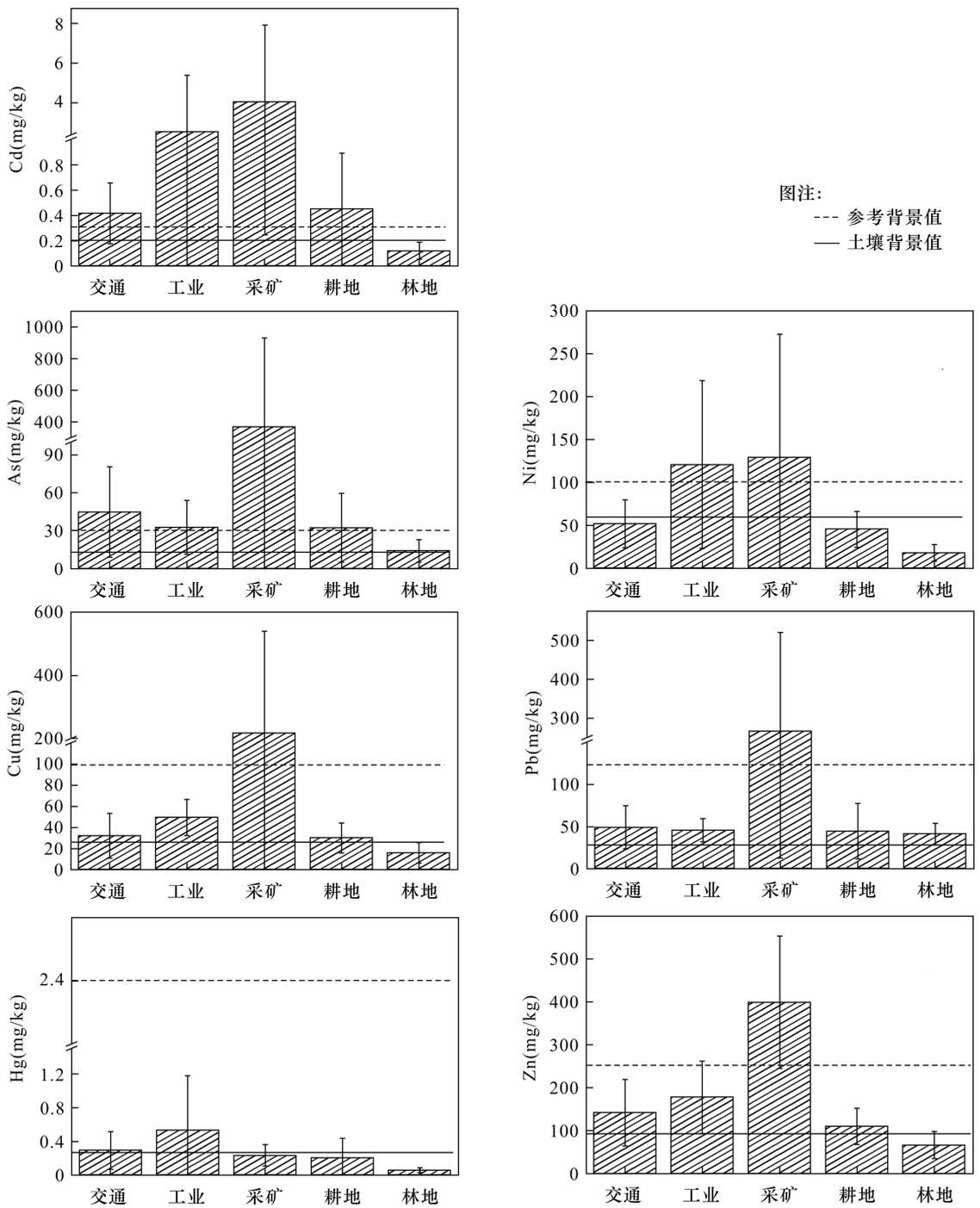


图 2 研究区不同土地利用类型的土壤重金属含量特征

Fig. 2 Heavy metals content characteristics in soil of different utilization type in the study area

单个重金属潜在生态危害指数 (E_r^i) 结果表明, 均值状态下 Cd 的潜在危害指数最高, 其 E_r^i 均值为 152.04, 达到了强生态危害, 不同土地利用类型存在一定差异, 采矿用地 Cd 达到极强生态危害, 工业用地到达很强生态危害, 耕地为中等生态危害; 而 As、Hg、Ni、Cu、Pb 和 Zn 这 6 种重金属的 E_r^i 均值分别为

32.51、5.07、3.91、3.58、3.54 和 0.72 均属于轻微生态危害水平 (除 As 采矿用地属于强生态危害)。研究区不同利用类型土壤综合潜在生态危害指数 (RI) 依次为: 采矿用地 > 工业用地 > 交通运输用地 > 耕地 > 林地, 采矿用地和工业用地达到强生态危害, 而交通运输用地、耕地和林地属轻微生态危害。

表3 研究区不同土地利用类型土壤重金属污染指数评价

Table 3 Pollution index evaluation of heavy metals in soil of different utilization type in the study area

重金属	污染指数	交通运输用地	采矿用地	耕地	工业用地	林地	均值
Cd	P_i	1.30	13.59	1.49	8.55	0.40	5.07
	E_v^i	39.06	407.80	44.78	256.45	12.13	152.04
As	P_i	1.41	12.21	1.08	1.09	0.46	3.25
	E_v^i	14.13	122.10	10.77	10.91	4.64	32.51
Cu	P_i	0.31	2.16	0.60	0.49	0.16	0.74
	E_v^i	1.56	10.80	1.51	2.47	1.57	3.58
Hg	P_i	0.12	0.10	0.41	0.22	0.02	0.17
	E_v^i	4.61	3.90	3.42	8.90	4.51	5.07
Ni	P_i	0.50	1.29	1.14	1.21	0.18	0.86
	E_v^i	2.50	6.50	2.28	6.04	2.25	3.91
Pb	P_i	0.40	2.22	0.18	0.38	0.34	0.70
	E_v^i	1.99	11.10	1.86	1.91	0.83	3.54
Zn	P_i	0.53	1.60	0.44	0.71	0.33	0.72
	E_v^i	0.53	1.60	0.44	0.71	0.33	0.72
	P_N	1.24	14.78	1.46	6.24	0.43	-
	RI	64.38	563.84	65.05	287.38	21.38	-

土壤重金属综合污染指数(P_N)和潜在生态危害指数(RI)表明,采矿用地土壤污染最严重、潜在生态危害指数最大。研究区位于南岭成矿带,区内矿产丰富,矿业开采活动持续了上百年的时间,湘江、珠江流域受采矿等影响造成流域内土壤、沉积物等重金属污染严重^[20-22];研究区工业用地土壤污染也较为严重,工业活动产生含有Cd、As、Hg和Pb等重金属粉尘、废气和废渣等,通过堆放或干湿沉降的方式导致工业区土壤重金属含量增加,超过参考背景值,出现严重富集现象^[18];耕地土壤受化肥、农药等施用、矿坑排水灌溉以及大气中重金属的沉降等影响,导致区内土壤受到一定程度的污染;交通运输用地为运输矿产资源的主要通道,矿渣掉落以及汽车轮胎老化、磨损过程产生的Cd和Zn等污染物,使得As、Cd、Zn等重金属累积程度较高^[23];研究区林地由于植被覆盖好,受人为活动影响较少,故未出现明显的重金属富集现象。

3.4 研究区不同土地利用类型土壤重金属的相关性及主成分分析

对研究区不同利用类型土壤重金属因子进行Pearson相关性分析,结果如表4所示。As - Cd、Cu - Zn、Hg - Ni和Cu - Zn显著正相关。KMO效度检验值为0.644, Bartlett球度检验的P值为0.000,小于显著性水平0.05,所以本研究中的数据适合作因子分析。

表4 研究区不同土地利用类型土壤重金属相关系数

Table 4 Correlation coefficient of heavy metals in the soil of different utilization type in the study area

元素	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.393 **	1					
Cu	0.973 **	0.477 **	1				
Hg	-0.039	0.535 **	0.036	1			
Ni	0.024	0.592 **	0.135	0.349 *	1		
Pb	0.326 *	0.419 **	0.288 *	-0.005	0.121	1	
Zn	0.424 **	0.734 **	0.468 **	0.280	0.514 **	0.489 **	1

注: ** 表示相关系数在0.01水平上显著, * 表示相关系数在0.05水平上显著。

主成分分析结果如表5所示,土壤中7种污染物的全部信息基本可由3个主成分(特征值:3.31 + 1.65 + 0.89 = 5.85)反映83.58%,前3个主成分已经基本包含了全部数据的大部分信息(表5)。主成分1的方差贡献率为47.31%,As、Cd、Cu和Zn的因子载荷分别达到了0.700、0.876、0.755和0.847。这些元素的平均值明显超过了湖南土壤背景值,分别为背景值的5.2、6.4、2.0以及1.8倍,因此其主要受人类活动的影响,但可能受到不同人为源的影响。研究区多金属矿资源丰富,矿物中Zn、As、Cd等重金属含量较高,经开采、选矿及洗矿废水、废渣排放等造成重金属进入周边土壤,造成采矿用地土壤重金属污染。同时区内建有相当数量的冶炼厂,钢铁冶炼是As和Cu进入土壤中的主要途径^[23]。因此主成分1代表了矿山开采和工业排放等人为来源。

表5 主成分分析的主要计算结果

Table 5 Main calculation results of principal component analysis

项目	主成分1	主成分2	主成分3
特征值	3.31	1.65	0.89
贡献率(%)	47.31	23.53	12.74
累积贡献率(%)	47.31	70.84	83.58
As	0.700	-0.654	0.256
Cd	0.876	0.316	0.021
Cu	0.755	-0.561	0.314
Hg	0.387	0.648	0.385
Ni	0.552	0.582	0.002
Pb	0.559	-0.161	-0.732
Zn	0.847	0.145	-0.209

主成分2的贡献率为23.53%,Hg和Ni的载荷分别为0.648和0.582,两种元素的含量与湖南省

土壤背景值接近(表2),其含量一般认为受地球化学的影响。已有的研究表明 Ni 主要为地质来源,受控于成土母质^[24]。所以主成分2代表自然来源。

主成分3的贡献率为12.74%,Pb的载荷为-0.732,其含量超过湖南省土壤背景值的3倍,高值区主要分布在交通用地土壤及采矿用地土壤。汽车尾气排放会导致 Pb 在土壤中累积,Pb常被作为机动车污染源的标志性元素^[24]。因而主成分3代表交通污染等人为来源。

4 结论

本文通过对武水流域上游区域不同土地利用类型土壤重金属污染程度及生态危害特征进行研究得出:武水流域上游区域土壤重金属均呈现出一定程度的富集,其中 Cd 和 As 超标严重;采矿用地土壤重金属含量均在一定程度上高于其他土地利用类型土壤,污染最为严重,其次是工业用地,林地则未出现污染;Cd 在研究区土壤达到了强的生态危害,而采矿用地土壤达到了极强的生态危害;研究区土壤中的 Cd、As、Cu 和 Zn 来源于工业活动及矿山开采,Ni 和 Hg 为自然来源,Pb 则来源于交通运输。研究认为矿山开采及工业活动对研究区土壤造成较为严重的重金属污染,其中 Cd 和 As 应作为研究区内土壤环境治理重点关注对象。本文的研究成果可以为南岭生态功能区土壤重金属污染治理和防治提供科学的数据支撑,服务于区内生态文明建设。

5 参考文献

- [1] 燕婷,刘恩峰,张恩楼,等.抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价[J].湖泊科学,2016,28(1):50-58.
- Yan T, Liu E F, Zhang E L, et al. The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Fuxian Lake and the contamination assessment[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 50-58.
- [2] 李春芳,曹见飞,吕建树,等.不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J].环境科学,2018,39(12):1-16.
- Li C F, Cao J F, Lü J S, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals in different land use types and evaluation of human health[J]. Environment Science, 2018, 39(12): 1-16.
- [3] 安婧,宫晓双,陈宏伟,等.沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J].农业环境科学学报,2016,35(1):37-44.

- An J, Gong X S, Chen H W, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 37-44.
- [4] 张军,董洁,梁青芳,等.宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J].干旱区资源与环境,2018,32(10):100-106.
- Zhang J, Dong J, Liang Q F, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in urban soils of Baoji city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(10): 100-106.
- [5] Cheng H X, Li M, Zhao C D, et al. Concentrations of toxic metals and ecological risk assessment for sediments of major freshwater lakes in China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 157: 15-26.
- [6] 张倩,陈宗娟,彭昌盛,等.大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J].环境科学,2015,36(11):4232-4240.
- Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, et al. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment [J]. Environment Science, 2015, 36(11): 4232-4240.
- [7] 张晗,靳青文,黄仁龙,等.大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J].土壤,2017,49(1):141-149.
- Zhang H, Jin Q W, Huang R L, et al. Characteristics of heavy metal pollution in agricultural soils and bioaccumulation in plants of Dabaoshan mine[J]. Soils, 2017, 49(1): 141-149.
- [8] 郑堃,任宗玲,覃小泉,等.韶关工矿区水稻土和稻米中重金属污染状况及风险评价[J].农业环境科学学报,2018,37(5):915-925.
- Zheng K, Ren Z L, Qin X Q, et al. Status and risk assessment of heavy metal pollution in paddy soil and rice grains from the industrial and mining area of Shaoguan, Guangdong Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(5): 915-925.
- [9] 陈莹,陈炳辉,邹琦,等.粤北大宝山 AMD 水-表层沉积物的重金属分布特征及其影响因素[J].环境科学学报,2018,38(1):133-141.
- Chen Y, Chen B H, Zou Q, et al. Distribution and influencing factors of heavy metals in water-sediments in Dabaoshan mine, Northern Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(1): 133-141.
- [10] 朱爱萍,陈建耀,江涛,等.北江流域横石河-翁江沿岸土壤重金属污染特征分析[J].中国环境科学,2015,35(2):506-515.
- Zhu A P, Chen J Y, Jiang T, et al. Characteristics

- analysis of heavy metal pollution in soil alongside Hengshihe and Wengjiang River in Beijiang Basin[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 506 – 515.
- [11] 付善明, 肖方, 宿文姬, 等. 基于模糊数学的广东大宝山矿横石河下游土壤重金属元素污染评价[J]. *地质通报*, 2014, 33(8): 1140 – 1146.
- Fu S M, Xiao F, Su W J, et al. The evaluation of heavy metals pollution in soils of the lower reaches of the Hengshi River within the Dabaoshan mining area based on fuzzy mathematics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1140 – 1146.
- [12] 宿文姬, 徐友宁, 凡生, 等. 广东大宝山矿区横石河沿岸水土重金属分布规律及其累积风险[J]. *地质通报*, 2014, 33(8): 1231 – 1238.
- Su W J, Xu Y N, Fan S, et al. The distribution regularity and accumulation risk of heavy metals in water and soil along the Hengshi River in the Dabaoshan mining area, Guangdong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1231 – 1238.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sediment ecological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975 – 1001.
- [14] 潘佑民, 杨国治. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 159 – 233.
- Pan Y M, Yang G Z. *Soil Background Values and Research Methods in Hunan* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 159 – 233.
- [15] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 971 – 984.
- Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 971 – 984.
- [16] Wilding L P. *Spatial Variability: Its Documentation, Accommodation and Implication to Soil Surveys* [M]. Wageningen: PUDOC Publishers, 1985: 166 – 194.
- [17] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1561 – 1567.
- Guo W, Sun W H, Zhao R X, et al. Characteristics and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environment Science*, 2013, 34(4): 1561 – 1567.
- [18] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2322 – 2328.
- Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, et al. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang [J]. *Environment Science*, 2016, 37(6): 2322 – 2328.
- [19] 马啸, 左锐, 王金生, 等. 沈阳浑河冲积扇土壤的重金属空间分布特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(11): 1298 – 1305.
- Ma X, Zuo R, Wang J S, et al. Spatial distribution and source of heavy metal in soils from alluvial and diluvial fan of Hun River in Shenyang [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(11): 1298 – 1305.
- [20] 周妍姿, 王钧, 曾辉, 等. 内蒙古土壤重金属的空间异质性及污染特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1381 – 1387.
- Zhou Y Z, Wang J, Zeng H, et al. Spatial characteristics of soil heavy metal pollution in Inner Mongolia, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1381 – 1387.
- [21] 李睿, 吴艳宏, 邴海健, 等. 青藏高原东麓贡嘎山东坡土壤中 Pb 的来源解析[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(9): 1439 – 1448.
- Li R, Wu Y H, Bing H J, et al. Source identification of lead in soils on the eastern slope of Gongga Mountain, Eastern Tibetan Plateau [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1439 – 1448.
- [22] 李清良, 吴倩, 高进波, 等. 基于小流域尺度的土壤重金属分布与土地利用相关性研究——以厦门市坂头水库流域为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5486 – 5494.
- Li Q L, Wu Q, Gao J B, et al. Distribution of heavy metals in topsoils affected by land use patterns at a small watershed scale: A case study in the Bantou Reservoir watershed in Xiamen, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5486 – 5494.
- [23] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 253 – 259.
- Liu D H, Wang F Y, Zhou W L, et al. Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones of Luoyang city and its potential ecological risk [J]. *Environment Science*, 2012, 33(1): 253 – 259.
- [24] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 204 – 212.
- Zhang Y X, Wang J, Qin F X, et al. Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1): 204 – 212.

Contaminant Assessment and Sources Analysis of Heavy Metals in Soils from the Upper Reaches of the Wushui River

LUO Fei^{1,2}, BA Jun-jie^{1,2*}, SU Chun-tian^{1,2}, PAN Xiao-dong^{1,2}, YANG Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources; Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China;

2. International Karst Research Center, UNESCO, Guilin 541004, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The strong risk factors of heavy metals in different types of soils in the upper reaches of Wushui River Basin were Cd and As.
- (2) Heavy metals in the soil of mining land and industrial land constituted the main potential ecological hazards in the study area.
- (3) The strong risk factors of heavy metals in soil originated mainly from mining and industrial activities.

ABSTRACT

BACKGROUND: Eco-functional areas play an important role in soil and water conservation and biodiversity conservation. The Wushui River is a watershed located in the Nanling ecological function area. However, study on the content and potential ecological risk of heavy metals in the soil of the upstream area of the watershed is scarce.

OBJECTIVES: To investigate the degree of heavy metals pollution and the potential ecological risk of soils in the upper reaches of the Wushui River.

METHODS: The soil samples of five land utilization types in the upper reaches of the Wushui River Basin, including mining, industrial, and cultivated land and forest, were collected to analyze the contents of seven heavy metals Cd, As, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in the soil. The Nemerow comprehensive pollution index was used to evaluate the degree of heavy metal pollution, and the Hakanson potential ecological risk index was used to evaluate the potential ecological risk of heavy metals in soil. Principal component analysis was used to investigate the source of heavy metal pollution.

RESULTS: The results show that the average concentrations of Cd, As, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in the upper reaches of the Wushui River were 1.28, 72.44, 54.62, 0.27, 68.32, 72.29 and 158.42mg/kg, respectively, which higher than the soil background values. The contents of the heavy metals, except mercury in mining land, were higher than those in other types of soils. The single factor pollution index of heavy metals in the mean state show that Cd and As were heavy pollution elements with factors of 5.07 and 3.25, respectively. In mining land, the Cd single factor pollution index reached 13.59. Heavy metal pollution in mining land was the most serious, followed by industrial land. Forest was in a safe state. Potential ecological hazard index evaluation results showed that Cd reached a very strong ecological hazard and As was a strong ecological hazard in mining land. Mining land and industrial land reached a strong ecological hazard, industrial land reached a moderate ecological hazard, and other types of soils were slightly ecologically harmful. The results showed that As, Cd, Cu and Zn came from industrial and mining activities, Ni and Hg mainly came from parent materials, and Pb came from transportation.

CONCLUSIONS: Heavy metal pollution of soil is relatively serious in the upstream area of the Wushui River Basin. Cd and As are the main risk factors in the area, mainly deriving from mining and industrial activities.

KEY WORDS: Wushui River Basin; different utilization types; soil heavy metal; contaminant assessment; sources