

# 安徽省宣城市南部地区土壤重金属元素 地球化学特征

邢润华<sup>1</sup>, 隋新新<sup>2</sup>

(1. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 2. 河北地矿局第五地质大队, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 利用1:25万土地质量地球化学调查数据分析和研究了安徽省宣城市南部地区土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8种重金属元素的地球化学特征以及重金属异常来源。调查发现地质背景是土壤元素含量的主控因素, 调查区表、深层土壤重金属元素含量空间分布特征与地质背景、沉积环境表现出显著的空间一致性, 重金属高含量成土母岩(荷塘组、皮园村组、蓝田组等地层)是土壤重金属元素高异常的主要影响因素, 此外矿山开采、大气干湿沉降也是土壤重金属高异常的影响因素之一, 土壤中Pb、Hg、Cd、Cr元素具有大气干湿沉降的输入来源。调查区土壤重金属污染风险主要影响指标为Cd, 土壤Cd超过农用地土壤污染风险管制值的样品比例为2.56%, 形态分析结果显示土壤Cd以离子交换态为主, 结合农作物调查发现在土壤Cd高异常区存在一定的生态风险。

**关键词:** 土壤; 重金属元素; 地球化学分布特征; 异常来源分析; 宣城南部地区

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0185-10

## Geochemical characteristics of the heavy metals in soil, the south of Xuancheng, Anhui Province

XING Run-hua<sup>1</sup> and SUI Xin-xin<sup>2</sup>

(1. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China; 2. The Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** The geochemical characteristics and abnormal sources of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in the soil of Southern Xuancheng were analyzed and studied by using the 1:250 000 land quality geochemical survey data. It is found that the geological background is the main controlling factor for the content of soil elements, and that the spatial distribution characteristics of heavy metal elements in the surface and deep soil in the area are significantly consistent with the geological background and sedimentary environment. The high content of heavy metal in the soil parent rock geological background (Hetang Formation, Piyuancun Formation and Lantian Formation, etc) is the main influencing factor for the high anomaly of soil heavy metal elements. In addition, mining and atmospheric dry and wet deposition are also one of the factors affecting high anomaly of heavy metals in soil. It is found that Pb, Hg, Cd and Cr in soil have input sources of atmospheric dry and wet deposition. The main impact index of heavy metal in soil pollution risk in the survey areas was Cd. The proportion of samples that soil Cd exceeded the control value of soil pollution risk of agricultural land was 2.56%. The morphological analysis results show that soil Cd is mainly in ion-exchange state. Combined with crops investigation, it is found that there is a certain ecological risk

收稿日期: 2021-07-06; 接受日期: 2021-09-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160322)

作者简介: 邢润华(1973-), 女, 高级工程师, 地质矿产勘查、地球化学专业, 主要从事矿产资源地球化学勘查与土地质量地球化学调查工作, E-mail: 785146117@qq.com。

in the area with high abnormal soil Cd.

**Key words:** soil; heavy metal elements; geochemical distribution characteristics; abnormal source analysis; Southern Xuancheng

**Fund support:** Project of China Geological Survey (DD20160322)

土壤是地球陆地生态系统的重要组成部分,是人类赖以生存的自然资源。土壤中的有益及营养元素可以促进和加快植物生长,而有毒有害元素则会导致农作物污染或减产。若土壤中污染物进入植物或农作物,再通过食物链进入人体和动物体,会引发疾病甚至癌症,危害人畜健康(任旭喜, 1999; 高太忠等, 1999; 崔德杰等, 2004; 陈怀满, 2005)。土壤中重金属元素属于无机污染物,重金属污染具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆性(王振中等, 2006),国内外众多学者对土壤重金属污染评价方法、来源分析进行了大量研究,一般认为土壤中重金属元素主要有自然来源和人为输入两种途径,在自然因素中,成土母质对土壤重金属含量影响很大;人为因素中工业、农业和交通等引起的土壤重金属污染所占比重较高(周国华等, 2003; 刘文辉, 2004; 李苹等, 2008)。2015年全国耕地地球化学调查报告中指出土壤污染的主要原因是地质高背景、成土过程次生富集和人类活动(张继舟等, 2012)。有研究表明土壤重金属生物有效性与其成因来源关系密切,地质高背景引起的土壤重金属高含量,其生态危害相对较小(周国华, 2014; 刘意章等, 2019; 彭敏, 2020),目前针对安徽省宣城市南部地区土壤重金属元素含量特征及成因分析未见有相关研究及报道,本次依托中国地质调查局开展的皖南岳西-宁国(旌德-宁国片)1:25万土地质量地球化学调查项目(邢润华等, 2019)<sup>①</sup>,以安徽省宣城市南部地区土壤中重金属为研究对象,分析了土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 8种重金属元素的地球化学特征并对土壤污染风险进行评价,再结合土壤剖面及降尘调查,研究了调查区土壤重金属异常来源,为区内土壤资源的安全利用和科学管理、开展土壤环境保护及污染防治提供参考和科学依据。

## 1 调查区概况

调查区位于安徽省东南部,长江流域接皖南山区地带,行政区划隶属宣城市,面积5 100 km<sup>2</sup>。调查区位于皖南山地丘陵区,地势总体南高北低,地貌以山地和丘陵为主,中低山占调查区总面积31.42%,主要分布于调查区南部的绩溪县、旌德县及宁国市;丘陵区占39.46%,主要分布在调查区北部的泾县、宣州区;岗地面积占28.04%,集中分布在调查区东北部广德县;水域面积占0.12%(王少龙等, 2013)<sup>②</sup>。

调查区属扬子地层区江南地层分区,区内地层自新元古代至第四纪发育齐全,出露地层以南华纪-志留纪碳酸盐、硅泥质页岩、炭质页岩、碎屑岩系为主。青白口系和蓟县系仅在查区西南部出露,泥盆纪-三叠纪地层在调查区西北部少量出露,白垩纪-古近纪地层仅零星分布。调查区地质构造复杂,自元古宙以来经历了多期构造活动,总体以北东向构造为主,以宁国墩(虎-月)断裂为界,北西侧主要表现为北东向展布的复式背斜、向斜;断裂南东侧以一系列构造盆地和穹窿相间展布为特色。区内主要褶皱为绩溪复背斜和板桥-水东复式向斜。区内断裂发育,以北东向绩溪断裂和宁国墩(虎-月)断裂两条主干断裂为主体,与北西向狮桥-宁国断裂呈反接关系,构成区内主要的断裂构造格架。区内侵入岩以燕山期中酸性花岗岩类为主,受构造控制明显;晚侏罗世-早白垩世火山岩在皖浙两省交界处少量出露,为黄尖组流纹质英安岩(图1)。调查区成矿地质条件良好,地跨中国东部江南隆起东段、钦杭东部北段两个成矿带,位于下扬子台坳皖南陷褶断带与皖浙陷褶断带交接部位北部,已发现的矿产有39种,以钨、铜铅锌多金属、钼、锡、萤石、

① 邢润华, 吴正, 李朋飞, 等. 2019. 皖南岳西-宁国(旌德-宁国片)1:25万土地质量地球化学调查.

② 王少龙, 刘遗平, 程言新, 等. 2013. 安徽省环境质量图系及空间数据库说明书.

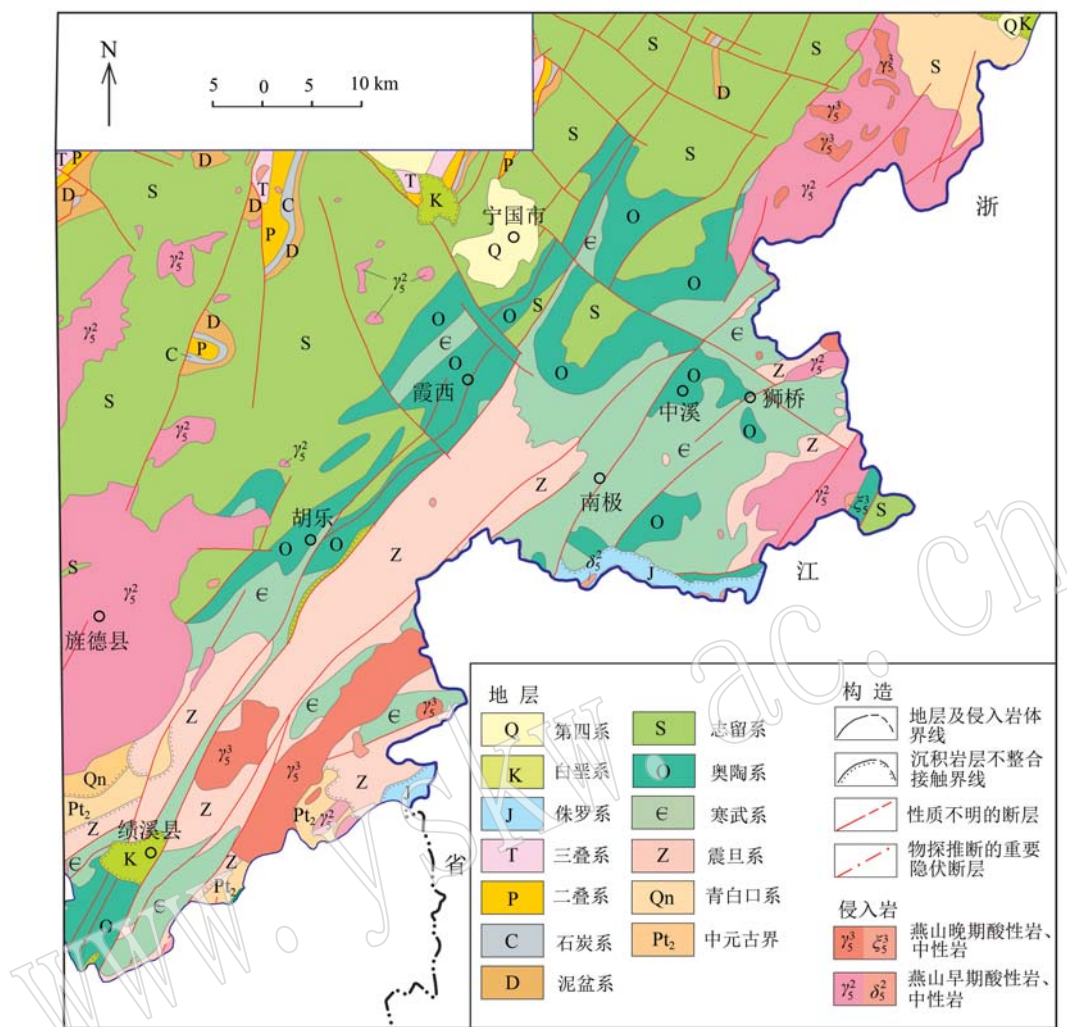


图 1 安徽省宣城市南部地区地质简图(据戴圣潜等, 2014)<sup>①</sup>

Fig. 1 The geological map of Southern Xuancheng City, Anhui Province(after Dai Shengqian *et al.* , 2014)<sup>①</sup>

白云岩、石灰岩等比较具有工业价值(戴圣潜等, 2014)<sup>①</sup>。

区内土壤母质以浅色碎屑岩风化物母质和酸性岩类风化物母质为主, 其次为碳酸盐类风化物母质, 少量河流冲积物母质和蠕虫状网纹红土母质, 晚更新世黄土母质和红色碎屑岩类风化物母质零星分布。土壤类型以红壤为主, 占调查区总面积的 60.04%, 其次为水稻土、粗骨土和石灰岩土, 分别占 12.89%、12.06% 和 7.36%, 此外还见暗黄棕壤(2.90%)、黄壤(1.86%)、石质土、紫色土、潮土和黄棕壤等。土地利用以林地为主, 占调查区总面积的 77.26%, 是皖南林区的重要组成部分; 耕地占调查区

总面积的 10.48%, 其中水田、旱地比例为 8:2; 园地占 7.47%, 以茶叶、山核桃、花卉、板栗、中药为主。调查区内农林资源丰富, 名优特农产品较多, 主要有宁国山核桃、旌德灵芝、广德板栗、绩溪燕笋干、水东蜜枣、汀溪兰香及木耳、香菇等山野菜等农特产品。

## 2 样品采集及测试方法

调查区共采集表层土壤样 5 322 件、深层土壤样 1 327 件, 表层土壤采样深度 0~0.2 m, 深层土壤采样深度 1.5~2.0 m; 表层土壤采样密度 1 点/km<sup>2</sup>, 深层土壤采样密度 1 点/4 km<sup>2</sup>; 土壤样品组合分析,

① 戴圣潜, 储东如, 刘家云, 等. 2014. 安徽省区域地质志.

表层土壤 4 km<sup>2</sup> 为组合单元, 深层土壤 16 km<sup>2</sup> 为组合单元。样品分析测试由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心承担, 测试分析包括 As、Cd、Cr、Cu、

Hg、Ni、Pb、Zn、pH 值等共 54 项指标。

样品分析采用的配套方案及分析方法检出限见表 1、表 2, 均达到或优于《多目标区域地球化学调查

表 1 土壤样品 8 项重金属元素分析方法  
Table 1 The analysis samples methods of 8 heavy metals in soil

分析项目	样重/g	样品处理方法	分析方法
Cr、Pb、Zn	5	粉末压片法	X 荧光光谱法 (XRF)
Ni、Cu	0.2	HCl-HNO <sub>3</sub> -HF-HClO <sub>4</sub> 溶样	等离子体光谱法 (ICP-AES)
Cd	0.2	HCl-HNO <sub>3</sub> -HF-HClO <sub>4</sub> 溶样	稀释 10 倍、等质子质谱法 (ICP-MS)
As、Hg	0.5	王水溶样	原子荧光光谱法 (AFS)

表 2 土壤样品 8 项重金属元素分析检出限  
Table 2 The detection limits of 8 heavy metals in soil samples

元素	要求检出限/10 <sup>-6</sup>	配套方法检出限/10 <sup>-6</sup>	测定范围/10 <sup>-6</sup>	元素	要求检出限/10 <sup>-6</sup>	配套方法检出限/10 <sup>-6</sup>	测定范围/10 <sup>-6</sup>
As	1	0.2	0.2~500	Hg	0.000 5	0.000 5	0.000 5~10
Cd	0.03	0.02	0.02~4.0	Pb	2	1	2~2 000
Cr	5	3	3~3 500	Ni	2	1	1~2 000
Cu	1	0.8	0.8~2 000	Zn	4	2	2~3 000

规范 (DZ/T0258-2014)》要求, 实验室内部和外部质量控制方法及各项质量参数均符合规范要求。

### 3 土壤重金属元素地球化学特征

#### 3.1 土壤重金属元素含量特征

表 3 为调查区表、深层土壤 8 项重金属元素地球化学参数统计结果, 可以看出, 调查区表层土壤重金属元素平均含量与全国 A 层土壤平均值 (迟清华等, 2007) 相比, Cd、Hg 强富集 ( $k_1 > 2.0$ ,  $k_1$  值分别为 2.82、2.15), Pb、Zn 相对富集 ( $1.2 < k_1 \leq 2.0$ ,  $k_1$  值分别为 1.36、1.30), 其它元素含量值基本相当

( $0.8 < k_1 \leq 1.2$ ); 深层土壤元素含量与全国 C 层土壤平均值 (迟清华等, 2007) 对比, Cd 强富集 ( $k_2$  值为 2.58), Hg 相对富集 ( $k_2$  值为 1.41), 其它元素含量基本相当。调查区土壤 Cd、Hg 元素相对于全国土壤平均含量, 总体表现为相对富集和强富集。变异系数 (CV) 反映元素的分异程度, 变异系数越大, 反映元素的分异程度越高。区内表层土壤 Cd、As 为强分异 ( $CV > 1.00$ , CV 分别为 1.46 和 1.15), Pb、Cu、Cr、Hg 为中等分异 ( $0.5 < CV \leq 1.0$ ), Zn、Ni 属于弱分异 ( $0.25 < CV \leq 0.5$ ); 深层土壤 Cd、As 表现为强分异, Hg、Cu 为中等分异, Ni、Pb、Zn、Cr 为弱分异。表、深层土壤重金属分异总体表现一致。

表 3 调查区表、深层土壤重金属元素含量和地球化学参数统计表  
Table 3 Contents and geochemical parameters of heavy metals in surface and deep soil of the survey area

元素	表层土壤 (样品 1 331 件)				全国 A 层土壤均值	$k_1$	深层土壤 (样品 348 件)				全国 C 层土壤均值	$k_2$
	最小值	最大值	算术均值	变异系数			最小值	最大值	算术均值	变异系数		
$w(\text{As})/10^{-6}$	1.5	198.5	15.6	1.15	10	1.07	1.6	158	17.2	1.02	11.5	1.07
$w(\text{Cd})/10^{-9}$	8	8 026	397	1.46	90	2.82	26	7 290	340	1.51	84	2.58
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	11	792	58	0.59	65	0.85	11	176	58	0.35	60.8	0.94
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	5.9	188.3	27.5	0.62	24	0.99	4.8	101.9	25.2	0.52	23.1	0.97
$w(\text{Hg})/10^{-9}$	20	709	97	0.57	40	2.15	19	788	66	0.87	44	1.41
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	1	91	25	0.47	26	0.95	5	84	28	0.43	28.6	0.95
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	16	617	34	0.63	23	1.36	15	137	29	0.38	24.7	1.11
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	40	482	96	0.40	68	1.3	43	290	91	0.35	71.1	1.19

注: 变异系数为标准差与平均值的比值;  $k_1$  为区内表层土壤平均值与全国 A 层土壤平均值的比值;  $k_2$  为区内深层土壤平均值与全国 C 层土壤平均值的比值。

#### 3.2 表层土壤重金属含量相对深层土壤富集贫化程度

以区内表层土壤重金属含量与相应采样大格深层土壤重金属含量的比值 ( $k$ ) 反映表层土壤元素相

对深层土壤的富集贫化程度 (孙志国等, 1996; 廖启林等, 2005)。经统计, 表、深层土壤 Zn、Cr、Cu、Pb 元素 50% 以上样品含量相当 ( $0.8 < k \leq 1.2$ ), 表层土

壤 Hg、Cd、Pb 富集程度较高,尤其是 Hg、Cd 极富集 ( $k > 2.0$ ) 比例在 25% 以上;表层土壤 As、Ni 贫化程度较高,As 贫化样品比例近 50%,Ni 贫化比例近 30%。

### 3.3 表层土壤重金属元素含量分布特征

调查区表、深层土壤重金属元素含量分布特征总体一致,土壤元素含量空间分布与地质背景、沉积环境表现出显著的空间一致性。

土壤 As 高背景-高值区主要分布在宁国市南极-中溪一带,地质背景主要为震旦系、奥陶系;Cr、Cu、Ni 元素高背景-高值区主要分布在宁国市霞西-南极一带,地质背景主要为震旦系、寒武系、奥陶系;Cd、Hg、Zn 高背景-高值区主要分布在宁国市霞西-南极、狮桥-胡乐一带,地质背景主要为震旦系、寒武系;Pb 高背景-高值区与区内铅锌、钨钼等多金属矿分布区域总体一致,区内旌德断裂、桥头埠断裂、绩溪-宁国墩断裂附近以及刘村岩体、仙霞岩体、伏岭岩体与围岩接触带。土壤 As、Cr、Cu、Hg、Ni 低背景-低值区与区内燕山期中酸性侵入岩分布总体一致,包括旌德岩体、刘村岩体、仙霞岩体等,而 Cd、Zn、Pb 低背景-低值区主要分布在宁国市北-广德县,主要为志留系分布区。元素地球化学化学分布特征与地质背景的空间一致性反映了地质背景是土壤元素含量的主控因素。

对区内表层土壤重金属元素含量按地质单元进行统计(图 2),As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 元素在震旦系土壤中平均含量最高,其次为寒武系,在燕山期侵入岩土壤中含量最低;Pb 在各地质单元土壤中含量变化不大。

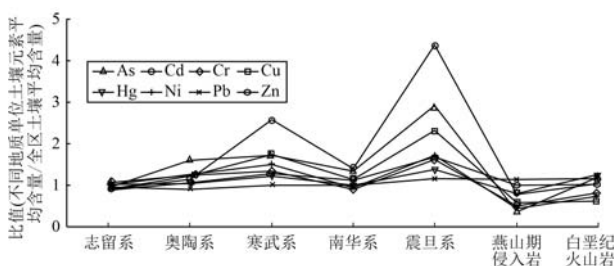


图 2 调查区主要地质单元土壤重金属元素含量对比图  
Fig. 2 The content comparison of heavy metal elements in soil of main geological units in the survey area

### 3.4 土壤重金属元素污染风险等级

依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)中 8 项重金属元素的污染风险筛选值和管控值标准,对调查区土壤污染

风险等级进行划分,按从严原则,As、Hg 取水田标准,Cd、Pb、Cr、Cu 取其他标准。

区内土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 项重金属元素不同污染风险等级土壤面积占比见表 4。较高污染风险土壤中 Cd 比例最高,As、Pb 较低;污染风险可控土壤中 Cd 比例最高,其次为 As、Cu, Zn、Pb、Cr、Ni 较低,Hg 最低。由此可见,全区土壤重金属污染风险等级由高到低排序为: Cd > As > Pb > Cu > Zn > Cr > Ni > Hg。污染风险较高土壤面积 136 km<sup>2</sup>,占调查区总面积 2.64%;污染风险可控土壤面积 1 874 km<sup>2</sup>,占 36.37%。

表 4 调查区土壤重金属元素不同污染风险等级面积占比表 %

土壤污染风险等级	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Zn
无污染风险	89.17	63.48	99.11	92.33	99.88	98.04	99.18	98.06
污染风险可控	10.75	33.96	0.89	7.67	0.12	1.88	0.82	1.94
污染风险较高	0.08	2.56				0.08		

## 4 土壤重金属元素异常分布及来源分析

### 4.1 土壤重金属异常分布

以土壤 As、Cd、Hg、Pb、Zn、Ni、Cu、Cr 8 项重金属元素含量 85% 累频数值结合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中农用地土壤污染筛选值,确定调查区重金属元素异常下限(表 5)。

调查区共圈出 7 处土壤重金属综合异常(图 3),由综合异常图可以看出,以霞西-南极异常复合元素最多,异常面积最大。此外,汀溪异常、狮桥异常和瀛州异常元素组合较多且具有一定规模。异常查证在霞西-南极异常以及狮桥异常布置了 3 条 T 型剖面。

### 4.2 土壤重金属异常来源分析

#### 4.2.1 地质背景对土壤重金属异常的影响

土壤水平剖面 I(图 4 上)12 号和 24 号点土壤 Cr、Cu、Cd、Hg 等元素含量明显高,这 2 个点均位于荷塘组;7 号(皮园村组)、9 号(南沱组)和 21 号(蓝田组上段)土壤存在部分元素高含量(As、Pb、Hg 等)。水平剖面 II(图 4 中)2、5、9 号点土壤 Cd、Zn、Hg、Cu、Ni、Pb 元素含量高,以上 3 个点均落

表5 表层土壤重金属元素异常下限圈定

Table 5 The delineation of abnormal lower limit of heavy metal elements in topsoil

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
全区土壤元素含量 85% 累频值	24.3	592.4	73.7	41.1	129.1	35.6	39.7	115.0
全区土壤元素含量 95% 累频值	46.5	1 000.3	86.4	58.4	184.2	47.5	49.9	159.1
全区土壤元素含量 98.5% 累频值	80.0	2 394.0	141.3	81.9	268.2	59.6	90.4	220.2
GB15618 土壤污染风险筛选值	30	300	150	50	500	60	70	200
异常下限	30	600	90	50	200	50	50	160

注: Cd、Hg 元素含量单位为  $10^{-9}$ , 其余元素均为  $10^{-6}$ ; 土壤污染风险筛选值为不考虑 pH 值从严取最低值。

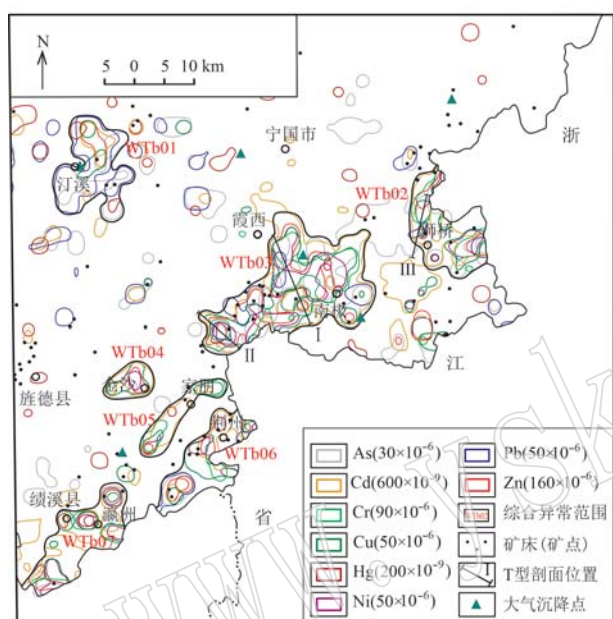


图3 表层土壤重金属元素综合异常图

Fig. 3 The comprehensive anomaly map of heavy metal elements in surface soil

在皮园村组上段, 4号位于荷塘组, Cr、Cu 含量高, 12和14号点 Hg 含量高(位于西阳山组)。水平剖面Ⅲ(图4下)6、8、10号点存在高值, 6号点位于南沱组和蓝田组交界处(为断层接触), As、Pb、Zn、Cu、Hg 等元素含量高, 10号位于蓝田组, 且靠近断层, 土壤中 Cd、Hg、Cu、Zn、As 含量均高, 8号点位于皮园村组, 土壤 Cu、Hg、Ni、Cr、Pb、Zn 含量较高。由此可以看出土壤重金属元素含量变化及空间分布与地质背景关系密切, 尤以荷塘组、皮园村组以及蓝田组等地层区土壤中重金属元素含量高。

调查区土壤垂向剖面自地表向下重金属含量变化规律不明显, 但从垂向剖面表层土、深层土元素含量曲线图(图5)可以看出, 表层土壤与深层土壤

含量变化趋势几乎一致, 反映出表层土壤元素含量对深层土壤元素含量的继承性(张明等, 2007, 2012; 陈国光等, 2011)。因深层土壤受人类活动影响小, 更接近于母质含量, 因此也反映出表层土壤元素含量主要受成土母岩或地质背景的影响。

通过统计, 垂向剖面表、深层土壤重金属高含量值主要分布在荷塘组、皮园村组、蓝田组和南沱组等地层, 与水平剖面结果一致。赵华荣等(2013)<sup>①</sup>总结了安徽省扬子地层区主要岩石类型元素含量特征, 发现寒武系、震旦系以及南华系岩石中重金属元素普遍较其它地层高, 寒武系页岩 Cr、Ni、Cd、Cu、Pb、Zn 相对高, 南华系泥岩 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量较高, 皮园村组硅质岩 Hg、Cd 含量较高, 灰岩中 Hg 含量较高, 岩石中元素含量特征与调查区土壤中元素含量特征总体一致。这进一步说明调查区内荷塘组、皮园村组、蓝田组等重金属高含量成土母岩是土壤中重金属元素高含量的主控因素。

#### 4.2.2 矿山开采对土壤重金属异常的影响

调查区地处皖浙赣边界地体汇聚带, 成矿地质条件良好, 矿产资源丰富, 已查明矿床、矿(化)点约 238 处, 以钨、铜铅锌多金属、钼、锡、锰、萤石、石灰岩为主, 调查区圈定的土壤重金属异常包含了区内大部分矿床点(图3)。在剖面 I 附近的大坞尖钨钼(金锌)矿区以及剖面Ⅲ附近的竹溪钨钼矿区均采集了土壤样, 土壤中重金属含量均为高值, 矿区周边土壤重金属高含量应该是地质背景叠加矿山开采的双重影响。

#### 4.2.3 大气沉降对土壤重金属异常的影响

调查区布设了 6 个大气干湿沉降收集点(收集周期为 1 年), 通过对比大气沉降中重金属含量与收集点最近的表层土壤重金属含量, 判断大气沉降与土壤间重金属的输入输出关系。通过对比发现,

① 赵华荣, 周存亭, 李明辉, 等. 2013. 安徽省地球化学特征及找矿目标研究.

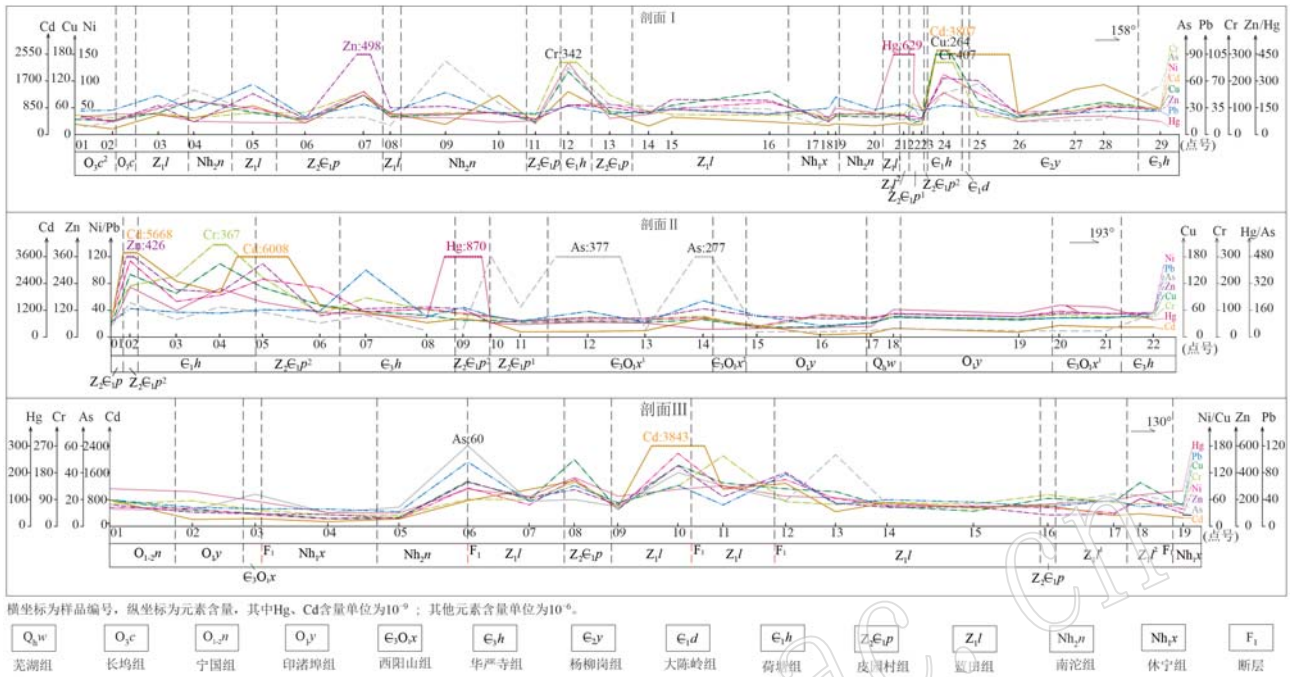


图 4 霞西-南极异常(上、中)、狮桥异常(下)水平剖面土壤元素含量曲线图

Fig. 4 The curves of the horizontal profile soil element content of Xiaxi-Nanji anomaly (upper, middle) and Shiqiao anomaly (lower)

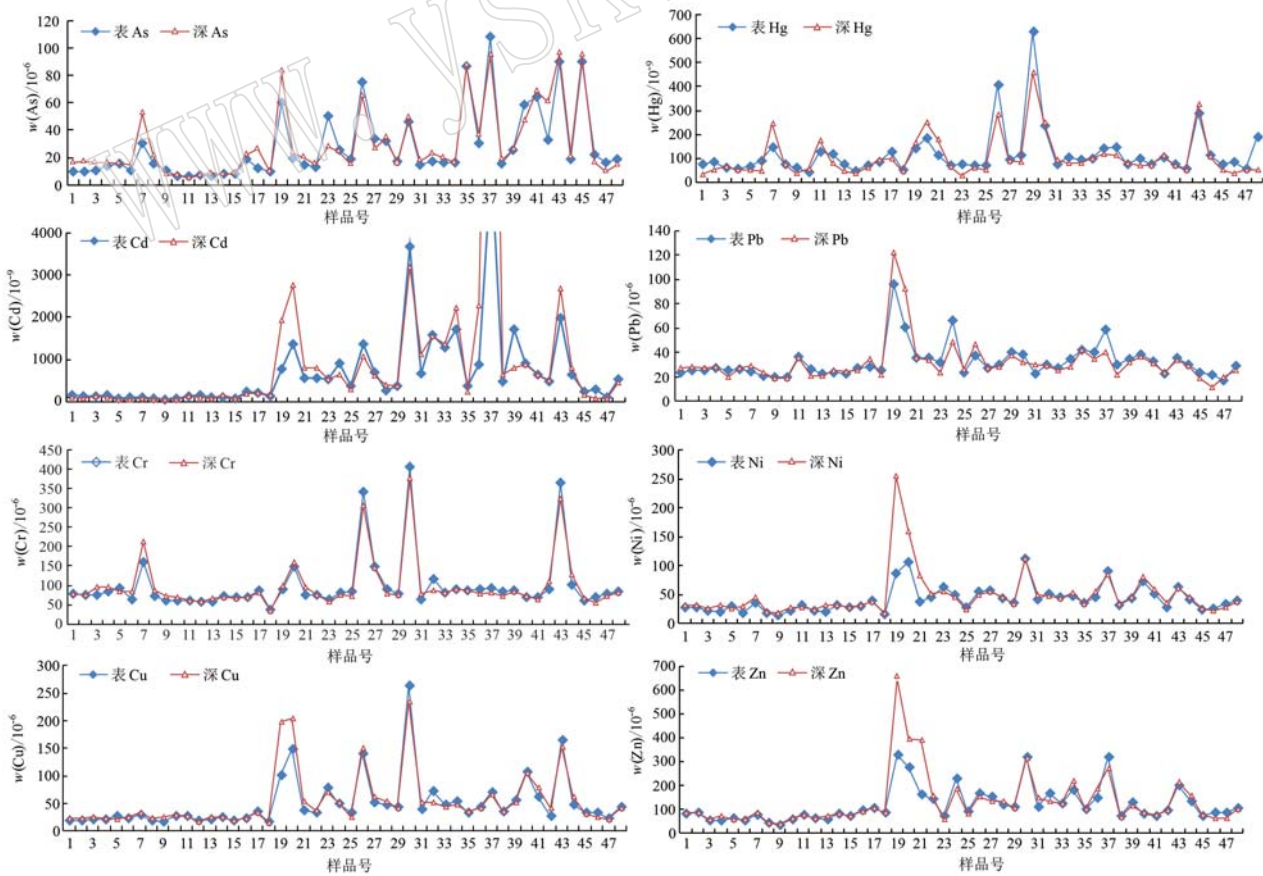


图 5 垂向剖面表层、深层土壤重金属含量曲线图

Fig. 5 The curves of heavy metal content in surface and deep soil of vertical profile

Pb、Hg、Cr 大气含量均高于土壤含量, Cd 大气含量总体高于土壤含量(除 4 号点, 4 号点位于霞西镇-南极乡异常区内部, 土壤 Cd 远高于大气 Cd, 土壤 Cr 略高于大气 Cr), As、Cu 土壤含量均高于大气含量, Ni 两者含量相近, Zn 含量有低有低。由此可以判断, 大气沉降也是土壤 Pb、Hg、Cd、Cr 高含量的主要影响因素。

## 5 土壤重金属元素赋存形态及生态效应评价

### 5.1 土壤重金属元素主要赋存形态

调查区以林地为主(占比 78%), 耕地占 10%左右, 园地近 8%。在霞西镇-南极乡重金属异常区以及狮桥重金属异常区共采集了 13 件水稻样及根系土(根系土 1 件污染风险较高、10 件污染风险可控、2 件污染风险低), 对其中 5 件水稻根系土样品进行 As、Cd、Hg、Pb 七形态分析(图 6)。

Cd 元素以离子交换态比例最高, 其次为铁锰氧化态、残渣态和腐殖酸态和碳酸盐态。离子交换态

Cd 活性强, 极易从土壤中释放被植物吸收; 铁锰氧化态和腐殖酸态 Cd 在氧化条件或有机质高的土壤中会释放出进入植物体; 碳酸盐态 Cd 在酸性条件下可从土壤中释放进入植物体。

As、Hg 元素均以残渣态比例最高, 因此土壤中 As、Hg 多滞留在土壤中不易进入植物体, 少量的腐殖酸态 Hg 在土壤富有机质情况下可能进入植物体, 一定比例的铁锰氧化态、水溶态、腐殖酸态 As 在土壤氧化、含水或富有机质等条件下易从土壤中释放进入植物体; Pb 元素以残渣态和铁锰氧化态为主, 残渣态 Pb 不易进入植物体, 较高比例的铁锰氧化态 Pb 在土壤处于氧化条件下易进入植物体。

综上所述, 土壤 Cd 活性最强, 易进入植物体(王学锋等, 2004; 韩春梅等, 2005), 而调查区土壤污染风险主要影响指标即为 Cd 元素, 因此需加强土壤 Cd 的监测和治理, 同时关注调查区农产品是否存在 Cd 超标现象。

### 5.2 生态效应评价

在土壤重金属异常区采集了 13 件水稻和 2 件山核桃样品, 参照《食品安全国家标准食品中污染

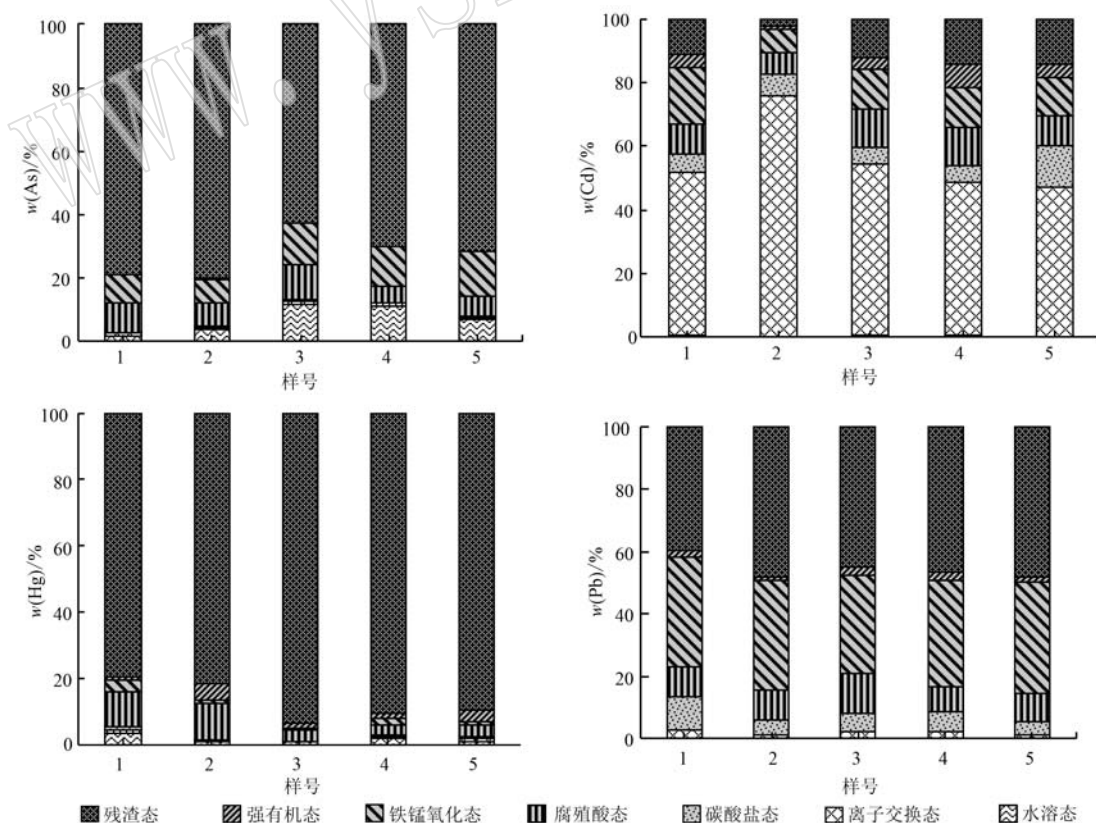


图 6 根系土抽样重金属七态含量及比例柱状图

Fig. 6 The histograms of contents and proportions of seven states of heavy metals in root soil samples



物限量》(GB2762-2012), 13 件水稻样中有 3 件 Cd 超标( $Cd > 200 \times 10^{-9}$ ), 1 件 Cd、Hg 超标( $Cd > 200 \times 10^{-9}$ ,  $Hg > 20 \times 10^{-9}$ ), 而采集的 2 件山核桃样未出现重金属超标。调查区林业资源丰富, 耕地种植面积相对低, 在土壤重金属高异常区存在的少量水稻 Cd 超标问题仍应引起重视并进行针对性土壤污染治理, 鉴于山核桃等林果类无重金属超标, 可考虑着力发展山核桃等林果产业。

通过调查区农作物及根系土中重金属元素相关性分析, 仅 Cd 元素显示作物与根系土有一定相关性(图 7),  $R$  值在 0.5 左右, 其它元素作物及根系土相关性不明显。图中显示土壤 Cd 在筛选值以上, 水稻 Cd 存在一定的超标比率。

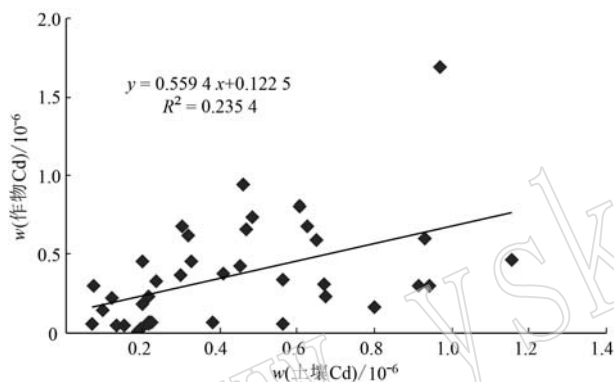


图 7 根系土 Cd 与作物 Cd 线性相关图

Fig. 7 The linear correlation diagram of root soil Cd versus crop Cd

## 6 结论

(1) 与全国 A 层土壤平均值相比, 调查区表层土壤 Cd、Hg 强富集, Zn、Pb 相对富集; 与全国 C 层土壤平均值相比, 深层土壤 Cd 强富集, Hg 相对富集。表层土壤相对于深层土壤, Hg、Cd 极富集, Pb 较富集。

(2) 表、深层土壤重金属元素含量分布特征总体一致, 土壤元素含量空间分布与地质背景、沉积环境表现出显著的空间一致性, 反映了地质背景是土壤元素含量的主要影响因素。

(3) 表层土壤 Cd、As、Pb 具有较高污染风险, Cd 有 2.56% 土壤超过农用地污染风险管制值标准, As、Pb 各有 0.08% 土壤超过农用地污染风险管制值, 主要分布于宁国县霞西-南极、绩溪县临溪一带。

(4) 调查区土壤重金属高异常主要由地质背景、矿山开采和大气沉降等内、外因素共同影响, 区

内荷塘组、皮园村组、蓝田组等重金属高含量成土母岩是土壤中重金属元素高含量的主控因素, 大气沉降的输入对土壤 Pb、Hg、Cd、Cr 高含量有一定影响。

(5) 调查区土壤 Cd 活性最强, 离子交换态 Cd 在七态中占比在 50% 以上, 易进入植物体造成农作物污染, 生态风险较高, 土壤 Cd 含量超过农用地污染风险筛选值, 水稻 Cd 就可能存在超标现象, 因此针对土壤 Cd 含量超过农用地污染风险筛选值的区域, 需加强土壤 Cd 的监测和治理, 同时关注调查区农产品是否存在 Cd 超标。

## References

- Chen Guoguang, Liang Xiaohong, Zhou Guohua, *et al.* 2011. Grade division method for soil geochemical contamination and its application[J]. *Geology in China*, 38(6): 1 631~1 639(in Chinese with English abstract).
- Chen Huaiman. 2005. *Environmental Soil Science*[M]. Beijing: Science Press, 30~38(in Chinese with English abstract).
- Chi Qinghua and Yan Mingcai. 2007. *Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 80~83(in Chinese with English abstract).
- Cui Dejie and Zhang Yulong. 2004. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 35(3): 366~370(in Chinese with English abstract).
- Gao Taizhong and Li Jingyin. 1999. Study on the heavy metal-contaminated soil and status of the treatment[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 8(2): 137~140(in Chinese with English abstract).
- Han Chunmei, Wang Linshan, Gong Zongqiang, *et al.* 2005. Chemical forms of heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24(12): 1 499~1 502(in Chinese with English abstract).
- Li Ping, Huang Yong, Lin Yun, *et al.* 2008. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou District in Beijing[J]. *Geoscience*, 32(1): 86~94(in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Jin Yang, Wu Xinmin, *et al.* 2005. Artificial environmental concentration of elements in soils in the Nanjing area[J]. *Geology in China*, 32(1): 141~147(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenhui. 2004. Geochemical characteristics of soil heavy metals in Zhangye-Yongchang area, Gansu Province [J]. *Geophysical and*

- Geochemical Exploration, 38(5): 883~888(in Chinese with English abstract).
- Liu Yizhang, Xiao Tangfu, Xiong Yan, *et al.* 2019. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of Cadmium, Southwestern China[J]. Environmental Science, 40(6): 2 877~2 884(in Chinese with English abstract).
- Peng Min. 2020. Heavy Metals in Soil-Crop System from Typical High Geological Background Areas, Southwest China; Transfer Characteristics and Controlling Factors[D]. China University of Geosciences (Beijing), 8~16(in Chinese with English abstract).
- Ren Xuxi. 1999. The heavy metal pollution in soil and the prevention measurement[J]. Environmental Protection Science, 25(5): 31~33(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhiguo, Yao De, Liang Hongfeng, *et al.* 1996. Characteristics of element concentration coefficient in microlayers of polymetallic nodules[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 16(2): 65~74 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuefeng and Yang Yanqin. 2004. Progresses in research on speciation and bioavailability of heavy metals in soil-plant system[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 24(1): 24~28(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenzhong, Zhang Youmei, Deng Jifu, *et al.* 2006. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 17(10): 1 948~1 952(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jizhou, Wang Hongtao, Ni Hongwei, *et al.* 2012. Current situation, sources and diagnosis method analysis of heavy metal contamination in agricultural soils[J]. Soil and Crop, 1(4): 212~218(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ming, Chen Guoguang, Liu Hongying, *et al.* 2012. Spatial distribution characteristics of heavy metal in soils of Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science, 43(5): 1 098~1 103(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ming, Yang Zhongfang, Chen Yuelong, *et al.* 2007. Sources of Hg in soils of Dongting Lake area, Hunan, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(11): 1 463~1 469(in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua. 2014. Recent progress in the study of heavy metal bioavailability in soil[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(6): 1 097~1 106(in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua and Liu Zhanyuan. 2003. The methods for soil geochemical quality assessment—The application of soil regional geochemical mapping data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 27(3): 223~226(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 2011. 土壤元素污染等级划分方法及其应用[J]. 中国地质, 38(6): 1 631~1 639.
- 陈怀满. 2005. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 30~38.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 80~83.
- 崔德杰, 张玉龙. 2004. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 35(3): 366~370.
- 高太忠, 李景印. 1999. 土壤重金属污染研究与治理现状[J]. 土壤与环境, 8(2): 137~140.
- 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 2005. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 24(12): 1 499~1 502.
- 李 苹, 黄 勇, 林 赟, 等. 2008. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质, 32(1): 86~94.
- 廖启林, 金 洋, 吴新民, 等. 2005. 南京地区土壤元素的人为活动环境富集系数研究[J]. 中国地质, 32(1): 141~147.
- 刘文辉. 2004. 甘肃省张掖-永昌地区土壤重金属元素地球化学特征[J]. 物探与化探, 38(5): 883~888.
- 刘意章, 肖唐付, 熊 燕, 等. 2019. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 40(6): 2 877~2 884.
- 彭 敏. 2020. 西南典型地质高背景区土壤-作物系统重金属迁移富集特征与控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 8~16.
- 任旭喜. 1999. 土壤重金属污染与防治对策研究[J]. 环境保护科学, 25(5): 31~33.
- 孙志国, 姚 德, 梁宏峰, 等. 1996. 多金属结核微层中元素的富集系数特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 16(2): 65~74.
- 王学锋, 杨艳琴. 2004. 土壤-植物系统重金属形态分析和生物有效性研究进展[J]. 化工环保, 24(1): 24~28.
- 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 2006. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 17(10): 1 948~1 952.
- 张继舟, 王宏韬, 倪红伟, 等. 2012. 我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析[J]. 土壤与作物, 1(4): 212~218.
- 张 明, 陈国光, 刘红樱, 等. 2012. 长江三角洲地区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 土壤通报, 43(5): 1 098~1 103.
- 张 明, 杨忠芳, 陈岳龙, 等. 2007. 湖南洞庭湖地区土壤 Hg 的来源[J]. 地质通报, 26(11): 1 463~1 469.
- 周国华. 2014. 土壤重金属生物有效性研究进展[J]. 物探与化探, 38(6): 1 097~1 106.
- 周国华, 刘占元. 2003. 区域土壤环境地球化学研究——异常成因判别·环境质量·污染程度评价的思路与方法[J]. 物探与化探, 27(3): 223~226.