

有色金属矿区周边土壤磁化率与 Pb、Zn、Cd 的相关性研究^①

赵 宏, 包 立, 许敬敬, 韩云昌, 张乃明*

(云南农业大学资源与环境学院/云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201)

摘 要: 有色金属矿区周边土壤是典型的人为污染土壤, 人为污染土壤具有特殊的磁化率特征。本文选取有色金属矿区表层土壤来研究土壤磁化率与 Pb、Zn、Cd 的关系, 研究结果表明: 兰坪与会泽土壤表现出不一样磁性特征, 兰坪磁化率变异系数较大。兰坪和会泽均表现为 Cd 污染最为严重。兰坪土壤仅重金属 Cd 与磁化率 χ_{lf} 相关性显著; 有效态 Pb、Zn、Cd 均与磁化率 χ_{lf} 的相关性显著; 而会泽土壤仅 Pb 与磁化率 χ_{lf} 呈显著相关关系; 有效态仅 Zn 与磁化率 χ_{lf} 的相关性达到显著水平。兰坪土壤 pH、电导率与磁化率 χ_{lf} 相关性较好, 有机质与磁化率 χ_{lf} 的相关性不显著; 会泽土壤 pH、电导率及有机质与磁化率的相关性均未达到显著水平。本研究为矿区土壤环境状况调查提供参考, 同时也为找寻土壤磁化率 χ_{lf} 和重金属的关系、实现快速掌握土壤重金属污染状况提供理论基础。

关键词: 矿区土壤; 磁化率; Pb; Zn; Cd; 相关性

中图分类号: X825 **文献标识码:** A

随着工业化的发展, 土壤环境污染问题越来越严重, 而由于重金属污染的长期性和难治理性, 土壤重金属污染已成为当今污染面积最广、危害性最大的环境污染问题之一^[1-2], 已经成为威胁社会发展和人体健康的焦点问题。矿区内挖掘、粉碎和冶炼等一系列矿石采集加工过程, 运输, 废弃矿渣的风化和淋洗, 在地表生物地球化学作用下, 通过释放和迁移导致了土壤及河流严重的重金属污染, 并通过食物链进入人体, 对矿区周围居民的身体健康和生存环境构成了严重威胁^[3-5], 目前国内外土壤重金属污染研究主要集中在形态特征、治理措施和污染来源等方面, 而重金属分析检测方法上成熟的是化学分析法。

环境中很多物质都带有磁性, 除了物质本身形成过程中所形成的原生磁性物质, 大部分磁性都来源于人类活动所产生的次生磁性物质^[6]。工矿业生产各种废弃物中, 都不同程度含有磁性颗粒而表现出不同的磁性特征, 它们在一定程度上可以反映污染物质来源、生成环境、搬运过程和沉积作用等综合信息^[7]。根据不同的磁性特征, 就可以进行污染物追踪和评价。大量研究证实, 土壤磁化率与重金属含量之间存在相关性^[8-11]。这是因为人类活动不仅使污染物含有

大量重金属的同时, 也赋予了污染物不同的磁性特征。本文选取云南省部分矿区周边土壤, 针对磁化率与重金属的关系进行分析和研究, 以期在当地土壤重金属调查和监测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰坪金顶镇年平均气温 11.7 °C, 年平均降水量 1 015.5 mm, 为亚热带、山地主体型季风气候, 土壤类型以紫色土和紫棕壤为主。兰坪金顶铅锌矿厂为流域内最典型矿区, 是世界现已探明储量最大的铅锌矿之一, 也是开采规模最大的矿区。探明 Pb、Zn、Cd 储量分别达 2.53、1.30、0.17 Mt, 且集中在 6.8 km² 的矿区范围内, 80% 以上可以露天开采^[12]。其重金属污染主要体现在矿区土壤污染、沱江水体污染和沱江流域农田土壤污染, 常表现为复合污染, Pb、Cd、As 最为突出, 且矿渣中含有大量 Pb、Zn、Cd^[13], 对区域生态系统造成极大的危害。

会泽县隶属云南省曲靖市, 平均海拔 2 200 m 以上; 年平均气温 12.7 °C, 属典型的温带高原季风气候, 立体气候特点突出; 棕壤、红壤、紫色土占一半。会泽县拥有我国重要的铅锌矿产资源, 矿产规模大、

^①基金项目: 云南省科技惠民计划项目(2014RA018)资助。

* 通讯作者(zhangnaiming@sina.com)

作者简介: 赵宏(1992—), 女, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染防治与监测。E-mail: 737489836@qq.com

品位高、伴生有用元素多,是开采历史最悠久的矿区;由于生产力落后,长期以来都采用土法冶炼,重金属元素释放到大气或残留于矿渣中^[14],重金属污染较严重。

土壤磁化率与重金属的关系研究主要集中在矿区周边、城市及交通道路周边等人为活动影响较大的区域。针对云南省重金属污染研究较少结合磁化率,特别是针对有色金属矿区土壤磁化率与重金属的关系探讨较少。本文通过测定兰坪和会泽两个有色金属矿区土壤磁化率和 Pb、Zn、Cd,对其相关关系进行探讨,为重金属污染土壤的磁学性质研究提供参考。

1.2 样品采集与制备

于 2016 年在兰坪和会泽铅锌矿区采集周边表层 0~20 cm 土壤,采用随机多点混合采样,兰坪铅锌矿区共 31 个土样,会泽铅锌矿区有 15 个,共计 46 个土样。样品采集后自然风干,去除植物残体,每个样品依次过 100、18、10 目筛,分别用于检测有机质和 Pb、Zn、Cd 全量,pH 和电导率,Pb、Zn、Cd 有效态和磁化率 χ_{lf} 。密封保存于样品袋中,做好标记,留待测定。

1.3 测定项目和方法

土壤有机质根据水合热重铬酸钾氧化比色法测定,用雷磁 pH 计测定土壤 pH 和电导率,用原子吸收测定重金属全量和有效态含量,磁化率用英国 BartingtonMS2 型双频磁化率仪测定低频磁化率 χ_{lf} (也称磁化率)。

1.4 数据处理和分析

试验数据主要利用 Excel 2013 和 SPSS 17.0 软件进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 有色金属矿区土壤磁化率 χ_{lf} 特征

对研究土壤进行统计分析,结果如表 1 所示。兰坪矿区土壤磁化率 χ_{lf} 变化范围为 $8\times10^{-8}\sim56\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $14.81\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$,变异系数为 0.71,变幅较大,说明其空间分布不均匀。会泽矿区土壤磁化率 χ_{lf} 变化范围为 $90\times10^{-8}\sim2\,306\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $1\,400.13\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$,变异系数为 0.45,变幅不大,说明其空间分布差异性不大。

总体而言,兰坪与会泽的土壤磁化率 χ_{lf} 特征表现不一样。会泽土壤磁化率 χ_{lf} 约是兰坪土壤的 100 倍,差距较大,推测与环境气候以及土壤类型等因素有关,因为磁化率 χ_{lf} 受多种因素的影响,包括成土母质、气候条件、土壤水分、pH、有机质以及人为活动等。

2.2 有色金属矿区土壤重金属污染特征分析

研究区土壤 Pb、Zn、Cd 含量如表 2 所示。Pb 含量平均值为 1 509.72 mg/kg,参考国家土壤环境质量三级标准,超标率达 78.26%,属于重金属 Pb 污染较严重的区域。重金属 Zn 的平均值为 1 318.33 mg/kg,超标率为 96%。重金属 Cd 的平均值为 19.45 mg/kg,超标率达 100%,是 3 种重金属中超标最严重的。一是因为云南省土壤重金属 Cd 背景值原本较高,是国家土壤背景值 2.5 倍;二是因为工矿业活动产生的重金属 Cd 污染较严重。就重金属超标率来看,Cd>Zn>Pb。重金属 Pb 和 Zn 的变异系数较大,说明其空间分布很不均匀。这与地理位置和环境的差异,以及工矿活动对周边土壤的污染情况和重金属解吸迁移路径差异等有关。

表 1 有色金属矿区土壤磁化率 χ_{lf} 统计分析表
Table 1 Soil magnetic susceptibility χ_{lf} in non-ferrous metal mining

采样区	平均值($\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)	中位数($\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)	标准差($\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)	最大值($\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)	最小值($\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$)	变异系数
兰坪	14.81	12.00	10.52	56.00	8.00	0.71
会泽	1 400.13	1 519.00	633.68	2 306.00	90.00	0.45

表 2 有色金属矿区土壤重金属含量统计分析表
Table 2 Soil heavy metal contents in non-ferrous metal mining

重金属	平均值(mg/kg)	中位数(mg/kg)	最大值(mg/kg)	最小值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数	国家三级标准(mg/kg)	超标率(%)
Pb	1 509.72	1 275.98	5 496.95	46.81	1 170.51	0.72	500	78.26
Zn	1 318.33	869.95	4 313.42	355.74	1 248.19	0.95	500	96
Cd	19.45	18.58	34.35	9.33	6.37	0.33	1	100

2.2.1 兰坪矿区周边土壤重金属污染特征 如表 3 所示,兰坪矿区土壤 Pb 含量平均值为 1 127.04 mg/kg,参考国家土壤环境质量三级标准,超标率达 74.19%,属于重金属 Pb 污染较严重的区域。重金属 Zn 的平

均值为 1 340.87 mg/kg,超标率为 96.77%,土壤 Zn 污染程度严重。重金属 Cd 的平均值为 19.65 mg/kg,超标率达 100%,是 3 种重金属中超标最严重的。就重金属超标率来看,Cd>Zn>Pb。重金属 Pb 和 Zn 的

表 3 兰坪矿区周边土壤重金属含量统计表
Table 3 Soil heavy metal contents around Lanping Mining

重金属	平均值(mg/kg)	中位数(mg/kg)	最大值(mg/kg)	最小值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数	国家三级标准(mg/kg)	超标率(%)
Pb	1 127.04	890.38	4 049.05	250.24	781.10	0.69	500	74.19
Zn	1 340.87	892.58	4 313.42	355.74	967.66	0.72	500	96.77
Cd	19.65	19.27	34.35	9.33	6.34	0.32	1	100

变异系数较大,说明其空间分布很不均匀,这与地理位置和环境的差异,以及工矿活动对周边土壤的污染情况和重金属解吸迁移路径差异等有关。

土壤重金属全量决定土壤有效态重金属的含量,但由于土壤重金属性质不同及土壤理化性质各异再加上重金属各种形态与土壤有机物颗粒作用也不相同,使得两者之间的相关性可以揭示特定环境条件下两者之间的关联特征,为深入研究重金属的环境行为机制提供参考。

兰坪矿区土壤重金属 Pb、Zn、Cd 全量与有效态相关性分析如表 4 所示,仅重金属 Cd 全量与有效态含量相关性达显著水平,重金属 Pb 和 Zn 与其有效态的相关性不明显。可能是由于土壤理化性质、农业耕作和灌排水等人为活动,使重金属有效态含量发生变化,所以对重金属全量与有效态的关系产生了影响。

2.2.2 会泽矿区周边土壤重金属污染特征 如表 5 所示,会泽矿区周边土壤 Pb 含量平均值为 2 079.28 mg/kg,

参考国家土壤环境质量三级标准,超标率达 86.67%,属于重金属 Pb 污染较严重的区域。重金属 Zn 的平均值为 1 271.75 mg/kg,超标率与 Pb 一样,为 86.67%,重金属 Zn 污染较严重。重金属 Cd 的平均值为 19.05 mg/kg,超标率达 100%,是 3 种重金属中超标最严重的。重金属 Zn 的变异系数较大,重金属 Pb 和 Cd 变异系数不大,说明相比 Pb 和 Cd,重金属 Zn 的空间分布很不均匀。

表 4 兰坪矿区周边土壤重金属全量与有效态相关系数表
Table 4 Correlation between total and available heavy metal contents in soils around Lanping Mining

重金属	Pb	Zn	Cd
有效态 Pb	0.226	-	-
有效态 Zn	-	0.327	-
有效态 Cd	-	-	0.663**

注:*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平,**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平,下表同。

表 5 会泽矿区周边土壤重金属含量统计表
Table 5 Soil heavy metal contents around Huize Mining

重金属	平均值(mg/kg)	中位数(mg/kg)	最大值(mg/kg)	最小值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数	国家三级标准(mg/kg)	超标率(%)
Pb	2 079.28	2 070.50	3 904.48	46.81	1 206.84	0.58	500	86.67
Zn	1 271.75	802.00	4 313.42	355.74	1 731.43	1.36	500	86.67
Cd	19.05	17.78	27.36	10.92	6.63	0.35	1	100

会泽矿区周边土壤重金属全量与有效态相关性分析如表 6 所示,仅重金属 Zn 全量与有效态 Zn 含量相关性达显著水平,重金属 Pb 和 Cd 与其有效态的相关性不明显。说明人为活动改变了该地区重金属全量与有效态的关系。

表 6 会泽矿区周边土壤重金属全量与有效态相关系数表
Table 6 Correlation between total and available heavy metal contents in soils around Huize Mining

重金属	Pb	Zn	Cd
有效态 Pb	-0.199	-	-
有效态 Zn	-	0.602*	-
有效态 Cd	-	-	0.091

2.3 有色金属矿区磁化率 χ_{lf} 与重金属含量相关性分析
土壤中磁性矿物的组成决定土壤磁性特征,根据

其来源可分为内源性磁性矿物和外源性磁性矿物,内源性磁性矿物是指磁性来源于成土母质中的含铁矿物,外源性磁性矿物主要指由外部环境进入土壤的磁性矿物,包括:土壤理化性质、地形、气候、植被以及人为活动等。现今,人类活动如采矿、冶炼、制造等工业过程,燃料燃烧、汽车尾气排放等,大大改变了环境中磁性矿物的存在形式和循环规律,使其磁性特征有了显著的人类活动特点,重金属污染是其人类活动最明显的特点。

2.3.1 兰坪矿区周边土壤磁化率与 Pb、Zn、Cd 含量相关性分析 如表 7 所示,兰坪矿区周边土壤重金属 Cd 与磁化率 χ_{lf} 相关系数为 0.539,达极显著水平,Pb、Zn 与磁化率 χ_{lf} 的相关性不强;有效态 Pb、Zn、Cd 均与磁化率 χ_{lf} 的相关性达到极显著水平,说明重金属有效态与磁化率 χ_{lf} 的关系更密切。可能是由于

人为活动产生的污染物中重金属有效态含量较高,与磁化率 χ_{lf} 表现出相似的含量特征。

表 7 磁化率 χ_{lf} 与 Pb、Zn 和 Cd 相关系数矩阵表
Table 7 Correlation coefficient matrix between soil susceptibility χ_{lf} and Pb, Zn and Cd contents

矿区	Pb	Zn	Cd	有效态 Pb	有效态 Zn	有效态 Cd
会泽	0.517*	0.332	-0.218	-0.322	0.608*	0.412
兰坪	0.078	-0.166	0.539**	0.400**	0.582**	0.566**

2.3.2 会泽矿区周边土壤磁化率与 Pb、Zn、Cd 含量相关性分析 如表 7 所示,会泽矿区周边土壤 Zn、Cd 与磁化率 χ_{lf} 相关性不显著,但 Pb 与磁化率 χ_{lf} 呈显著相关关系;有效态 Pb 和 Cd 均未与磁化率 χ_{lf} 的相关性达到显著水平,仅有效态 Zn 与磁化率 χ_{lf} 达显著相关水平。会泽矿区土壤重金属有效态与磁化率 χ_{lf} 的相关性不如兰坪矿区,可能与当地人人为扰动有关。

2.4 有色金属矿区土壤 pH、电导率和有机质对磁化率 χ_{lf} 的影响分析

pH 变化往往关系着土壤中元素的存在形态和有效性的变化,主要包括:各类化合物的溶解度和土壤胶体所带的电荷,进而影响包括磁性颗粒在内的土壤物质的变化和移动,最终影响土壤磁化率的变化。电导率主要与土壤含盐量有关,人为活动所产生的废弃污染物大多含有很多盐类物质,使其进入土壤必然影响土壤电导率。土壤中的腐殖质是土壤有机质存在的主要形态,占有有机质总量的 85%~90%,它是有机质分解合成的一种大分子胶体物质,通常与土壤矿物质部分紧密结合在一起,故分析土壤有机质与磁化率的关系是有必要性的。

相关性分析结果如表 8 所示,兰坪土壤 pH、电导率与磁化率 χ_{lf} 呈极显著正相关关系,有机质与磁化率 χ_{lf} 的关系不显著;说明对该地区而言,pH、电导率对土壤磁化率 χ_{lf} 的影响较大,有机质影响不大。会泽土壤 pH、电导率及有机质与磁化率 χ_{lf} 的相关性均未达到显著水平。推测与环境条件、人为活动等因素有关,致使 pH、电导率及有机质与磁化率 χ_{lf} 之间的关系发生变化。

表 8 土壤磁化率 χ_{lf} 与 pH、电导率和有机质相关系数矩阵表
Table 8 Correlation coefficient matrix between soil magnetic susceptibility χ_{lf} and pH, conductivity and organic matter content

矿区	pH	电导率	有机质
兰坪	0.677**	0.797**	-0.153
会泽	-0.196	0.326	0.095

3 讨论

本研究土壤 pH 与云南省酸性土壤背景有偏差,主要是受工矿活动的影响。人为活动不仅造成土壤环境污染,还会对土壤性状产生影响,进而影响土壤生产力 and 安全性。有关云南省土壤磁化率 χ_{lf} 研究结果较少,丁迈等人^[15]研究云南西双版纳种植茶叶 10 a 的土壤磁化率 χ_{lf} 为 $226 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$;卢升高^[16]报道的景洪 2 个土壤样品的磁化率 χ_{lf} 值为 $142.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $120.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$;汪彦林等人^[17]指出昆明西山山原红壤和红色石灰土的磁化率 χ_{lf} 分别为 $102 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $3\,441 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,与本研究一些样品测试结果相当,但总体呈偏大的趋势。

重金属 Pb、Zn 全量与磁化率 χ_{lf} 为极显著正相关关系,而 Cd 与磁化率 χ_{lf} 的相关性不强。该结论与闫海涛等人^[18]的结论一致。大量研究也已经证实,土壤表层磁化率 χ_{lf} 增强与人类活动产生的污染物有密切关系^[19],由于各种污染源中大多含有磁性矿物,而磁性矿物又和重金属元素等污染物之间关系密切。实际上,所有化石燃料燃烧产生的工业飞灰中都含有大量磁性颗粒^[20-21],它们沉降到土壤表层就会造成城市土壤的污染,同时表现为表层土壤磁化率的升高^[22-23]。目前针对土壤磁化率 χ_{lf} 与各种重金属的关系研究已有很多,根据不同地理位置、不同土壤类型以及不同污染方式,两者之间的关系有明显不同,但至今都还没有出现一种或一类统一的关系模式,以及外部条件对两者关系产生影响机制和机理也尚不明确,有待研究的问题还很多。

磁化率 χ_{lf} 与 pH、有机质相关性显著,而与电导率相关性不明显。这与汪彦林等人^[17]的研究结果相似。这与人为带入土壤的碱性污染物和有机质含有磁性物质有关。有机质与磁化率 χ_{lf} 的关系不明显可能是由于土壤遭受强烈的人为干扰,其形成过程与自然土壤存在较大区别,相互之间基本没有发生学上的联系,因而形成了这样的相关模式。

4 结论

1)兰坪矿区土壤磁化率 χ_{lf} 平均值为 $14.81 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,变异系数为 0.71,变幅较大。会泽矿区土壤磁化率 χ_{lf} 平均值为 $1\,400.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,变异系数为 0.45,变幅不大。

2)总体而言,超标严重程度排序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。兰坪矿区周边土壤 Cd 超标最为严重,且重金属 Pb 和 Zn 的变异系数较大。重金属 Cd 全量与有效态含

量相关性达显著水平,但 Pb 和 Zn 与其有效态的相关性不明显。会泽矿区周边土壤 Cd 超标最为严重, Zn 变异系数较大,且仅全量 Zn 与有效态 Zn 含量相关性达显著水平, Pb 和 Cd 与其有效态的相关性不明显。

3) 兰坪矿区周边土壤只有重金属 Cd 与磁化率 χ_{lf} 相关性达极显著水平;而有效态 Pb、Zn、Cd 均与磁化率 χ_{lf} 的相关性达到极显著水平。会泽土壤仅 Pb 与磁化率 χ_{lf} 呈显著相关关系;有效态 Pb 和 Cd 均未与磁化率 χ_{lf} 相关性达到显著水平,仅有效态 Zn 与磁化率 χ_{lf} 达显著相关水平。

4) 兰坪土壤 pH、电导率与磁化率 χ_{lf} 呈极显著正相关关系,有机质与磁化率 χ_{lf} 的关系不显著;会泽土壤 pH、电导率及有机质与磁化率的相关性均未达到显著水平。

参考文献:

- [1] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310-315
- [2] 史文娇,岳天祥,石晓丽,等. 高风险重金属污染土壤识别研究方法综述[J]. 土壤, 2012, 44(2): 197-202
- [3] 张鑫,周涛发,袁锋,等. 铜陵矿区水系沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境化学, 2005, 24(1): 106-107
- [4] 吴春宇. 某铅锌矿区矿渣和土壤中重金属浸出特性及生物毒性[D]. 南京: 南京农业大学, 2015
- [5] 曹雪莹,张莎娜,谭长银,等. 中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(1): 94-99
- [6] Āurža O. The effect of the heavy metals soil contamination on magnetic susceptibility[J]. Acta Universitatis Carolinae-Geologica, 1993, 37(1): 135-143
- [7] 陈满荣,王少平,俞立中. 环境磁学及其在地理环境研究中的应用[J]. 云南地理环境研究, 2001, 13(1): 11-19
- [8] 旺罗,刘东生,吕厚远. 污染土壤的磁化率特征[J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1091-1094
- [9] 毛应明. 徐州市典型污染源周边土壤重金属污染特征及磁学响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015
- [10] 杨小强,张铁男,张澄博,等. 矿山重金属污染土壤的磁化率特征及其意义——以广东大宝山多金属矿床为例[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(4): 98-102
- [11] 白世强,卢升高,单红丹. 环境物质磁性对重金属污染的指示作用研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 773-777
- [12] 赵筱青,杨红辉,易琦. 沘江流域农田土壤重金属污染特征及原因剖析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7569-7573
- [13] 江宏,马友华,尹国庆,等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 352-359
- [14] 陆泗进,王业耀,何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1832-1838
- [15] 丁迈,李海侠,李世玉,等. 西双版纳大渡岗茶园土壤磁化率垂直分布特征[J]. 中国锰业, 2017, 35(1): 12-14
- [16] 卢升高. 第四纪红土的磁性与氧化铁矿物学特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 182-191
- [17] 汪彦林,苏怀,董铭,等. 昆明西山山原红壤和红色石灰土的 pH 值与磁化率关系研究[J]. 土壤, 2012, 44(1): 107-110
- [18] 闫海涛,胡守云,Appel E,等. 土壤剖面中粉煤灰垂向迁移的磁响应[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1392-1399
- [19] 符超峰,强小科,宋友桂,等. 磁学方法及其在环境污染研究中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 249-255
- [20] Flanders P J. Collection measurement and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75: 5931-5936
- [21] Kapička A, Jordanova N, Petrovsky E, et al. Magnetic stability of power-plant fly ash in different solutions[J]. Physics and Chemistry of the Earth (A), 2000, 25(5): 431-436
- [22] Wang X S. Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China)[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 98: 73-78
- [23] 张孔合. 城市样带土壤环境磁学基本特征及其对土壤重金属污染的指示性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014

Correlation Analysis of Soil Magnetic Susceptibility and Pb, Zn and Cd Contents Around Non-ferrous Metal Mining

ZHAO Hong, BAO Li, XU Jingjing, HAN Yunchang, ZHANG Naiming*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University / Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201, China)

Abstract: Soil around non-ferrous metal mining usually is typical man-made polluted soil. The polluted soil has a special magnetic susceptibility. In this paper, the relationship was studied between soil magnetic susceptibility (χ_{lf}) and Pb, Zn and Cd contents in topsoils around non-ferrous metal mining. The results showed that soils in Lanping and Huize mining had different χ_{lf} , and the coefficient of variation of χ_{lf} was larger in Lanping mining than in Huize mining. Both Lanping and Huize mining showed most serious soil Cd pollution. Total Cd and available Pb, Zn, Cd around Lanping mining had significant correlation with χ_{lf} ($P < 0.01$). Total Pb and available Zn around Huize mining had significant correlation with χ_{lf} ($P < 0.05$). Soil pH and conductivity around Lanping mining had significant correlation with χ_{lf} while no significant correlation was found between organic matter and χ_{lf} . Soil pH, conductivity and organic matter around Huize mining had no significant correlation with χ_{lf} . This study provided a reference for the investigation of soil environment in the mining area, and provided a theoretical basis for finding the relationship between soil magnetic susceptibility and heavy metals, and thus for rapid understanding the status of soil heavy metal pollution.

Key words: Mining soil; Magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pb; Zn; Cd; Correlation