

云南泚江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价

周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 明庆忠, 王李鸿, 何兰兰

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650092)

摘要:泚江上游河段流经全国已知探明储量最大的兰坪铅锌矿区, 河流深受矿业活动影响, 为典型的重金属污染河流。本文通过对其沿岸农田土壤进行采样测试, 研究了土壤磁化率的关系。结果表明, 泚江沿岸农田土壤普遍受到重金属 Zn、Cd 污染, Pb 污染主要集中在上游河段, 土壤单项污染指数 $Cd > Zn > Pb$, 综合污染指数显示, 泚江沿岸农田土壤达到重金属重度污染等级; 磁化率与重金属 Pb、Zn、Cd 含量存在一定的正相关, 说明磁化率测量在一定程度上可反映泚江沿岸农田土壤重金属污染状况。泚江沿岸农田土壤重金属污染的主要原因与兰坪铅锌矿产资源的开发有关, 泚江在污染物的迁移、扩散中起主要作用。

关键词:农田土壤; 重金属污染; 磁化率; 频率磁化率

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)04-1586-06

Magnetic Analysis and Assessment on Heavy Metal Contamination in the Farmland Soil Along Bijiang River in Yunnan Province

ZHOU Hong-bin, JIAO Yuan-mei, SHI Zheng-tao, MING Qing-zhong, WANG Li-hong, HE Lan-lan

(School of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: Lanping Lead-zinc Mine is the biggest one in China. The upstream of Bijiang River is originated from the Laping Lead-zinc Mine. Therefore, Bijiang River was affected by mining activities of Lanping Lead-zinc Mine, and had become a typically polluted river by heavy metals. According to the measurement on the magnetic susceptibility and heavy metal pollution in the farmland soil along Bijiang River, the present situation of heavy metal pollution in the farmland soil was delineated, with a simple and effective method to classify the heavy metal pollution in farmland soil around mineral mining sites. The results indicated that: (1) The farmland soil along Bijiang River had all been polluted by Zn and Cd, while the pollution of Pb was mainly on the upstream. (2) For the single contamination index, the severity sequence was $Cd > Zn > Pb$. For the comprehensive contamination index, the soil pollution of heavy metals belonged to the worst grade. (3) A positive correlation between magnetic susceptibility and concentration of heavy metals Pb, Zn, and Cd in farmland soils was found along Bijiang River, which indicated that the magnetic susceptibility can be used to monitor the heavy metal pollution in the farmland soil along Bijiang River. (4) Obviously, it was the mining activities in Lanping County that caused the heavy metal pollution in farmland soils along Bijiang River. Bijiang River was the transferring and dispersing corridor of the heavy metals. The ecological security in the Bijing River catchment need much concern from the local people and government.

Keywords: farmland soil; heavy metal contamination; magnetic susceptibility; frequency dependent susceptibility

土壤重金属污染是一种严重的环境污染类型, 土壤中的重金属元素不能被微生物所降解, 且可通过食物链在生物体内富集, 最终危害人体的健康^[1]。由于土

壤污染具有隐蔽性、潜伏性、不可逆性和长期性等特点, 土壤环境一旦遭到重金属污染便难以彻底消除^[2]。矿产资源开发地区的土壤重金属污染尤为普遍, 因而其监测与评价受到人们的广泛关注^[3-6]。20 世纪 90 年代以后, 随着一系列高灵敏度磁测仪器的问世, 环境磁学已成为应用环境物质的磁性来指示环境污染尤其是重金属污染的新手段^[7]。张卫国等^[8]对长江口潮滩沉积物的磁性研究指示了受排污影响的潮滩重金属 (Cu、Zn、Pb) 污染特征。卢瑛等^[9]对南京城市土壤和非

收稿日期: 2007-08-08

基金课题: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2003 CB15100); 云南省重点基础研究资助项目 (2004D004Z)

作者简介: 周鸿斌 (1983—), 男, 白族, 云南洱源人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与环境保护研究。

通讯作者: 角媛梅 E-mail: ymjiao@sina.com

城区自然土壤的磁化率特征的研究表明,城市土壤磁化率与 Zn、Pb、Cu 元素的全量、DTPA 提取量、活化率有极显著的正相关,土壤磁化率测量为城市土壤重金属污染的监测提供了一种简单、有效的手段。李晓庆等^[10]对上海市典型工业区和农业区土壤的磁化率特征及重金属含量的研究表明,工业区土壤磁化率与重金属含量显著正相关,土壤磁测可作为监测城市、工业区土壤污染的有效手段。俞立中^[11]指出,在许多情况下,环境样品的磁化率与重金属含量相关,尤其是 Pb、Zn、Cu, 因此磁化率在一定的环境中可以作为重金属含量的替代指标。

本文以云南泚江沿岸农田土壤为研究对象,关注兰坪铅锌矿产资源开发对泚江沿岸农田土壤环境的影响,着重讨论泚江沿岸农田土壤的磁性特征及其与重金属 Pb、Zn、Cd 含量的关系,探讨泚江沿岸农田土壤重金属污染状况以及利用环境磁学方法监测泚江沿岸农田土壤重金属污染的可行性,为泚江沿岸农田土壤重金属污染的监测与环境安全评价提供一种简单易行的手段和基本的数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泚江位于滇西北“三江并流区”南部,属澜沧江水系;发源于清水郎山脉上青岩头山,由北向南流经兰坪县金顶镇和云龙县,在云龙县功果桥注入澜沧江^[12](图1)。其上游河段流经的谷地相对平坦、宽阔,是兰坪县政治、经济和文化的中心,同时也是兰坪粮食、蔬菜的重要生产地之一,而兰坪铅锌矿产资源的开发活动也集中在此河段,河谷中选厂、冶炼厂等各矿业厂区分布密集。中、下游河段流经的谷地则相对狭窄,河床比降较大,水流湍急,河谷中有不少已建的和在建的小型水电站。在河谷相对宽阔,水流平缓地段,有农田与村镇分布,云龙县城也坐落于河谷之中。受纬度位置、季风、地形等因素的影响,河谷气候类型多样,在河谷切割较深的地段气候垂直分带明显,下游河段表现出典型干热河谷的特征。河流沿岸农田土壤多由河流阶地上的河流沉积物或山前洪积物发育而来,经过人为熟化形成,有一定的耕作历史。由于采样在冬季进行,因此河谷农田中可见作物主要有冬小麦、蚕豆和油菜等,其中油菜仅出现在下游河段,水稻田在休耕期间。

1.2 样品采集与分析

由于泚江上游河谷相对平坦、宽阔,农田面积广,

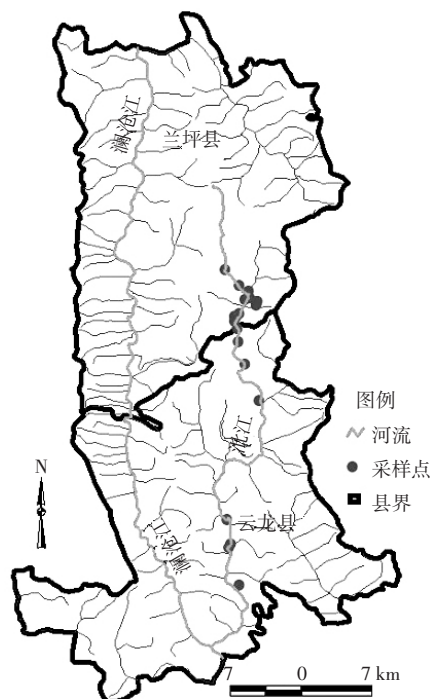


图1 研究区及样点分布图

Figure 1 Location of study area and sampling sites

分布相对集中,而中下游河谷切割较深,农田仅分布在河流相对平缓地段。因此,样点设计以河谷中农田的分布为准则,在河谷较宽,农田面积广的河谷地段适当增加采样密度。样点中有 10 个分布在河流上游,即 1~10 号采样点;8 个样点分布在中下游,即 11~18 号采样点,所采样品反映了河谷耕作土壤特征,具有较强的典型性与代表性。样品按照 0~15cm 层次采集,除去石块、植物根、叶等,置于通风处自然风干,风干后的土样经研碎、过筛、装袋,供磁测、金属全量与 pH 值的分析。

使用英国 Bartington MS2 型双频磁化率仪测量样品的低频(0.47 kHz)与高频(4.7 kHz)磁化率。取 10 g 左右待测样品装入 10 mL 无磁性圆柱形样品测量盒内,压实,上盖,称重,进行低频(0.47 kHz)和高频(4.7 kHz)磁化率的测量,分别重复 3 次,取平均值。频率磁化率(χ_{fi})用公式($\chi_{fi} = (\chi_f - \chi_{hi}) / \chi_f \times 100\%$)计算得出,式中 χ_f 和 χ_{hi} 分别是低频和高频磁化率。重金属 Pb、Zn、Cd 含量的测定采用 VISTA-MPX 全谱直读等离子发射光谱仪,依据 VARLAN ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱方法通则测定元素含量,pH 值用 TFW-III 型数字式多功能土壤分析仪测定。

1.3 评价标准与方法

采用《土壤环境质量标准》GB 15618—1995 二级

标准对样品进行单因子指数评价和内梅罗指数综合评价。

单因子指数评价法^[13],计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为第*i*种污染物的环境质量指数; C_i 为第*i*种污染物的实测浓度; S_i 为第*i*种污染物的环境质量标准。

内梅罗指数综合评价法^[13],计算公式为:

$$P_{j\text{综合}} = [(P_{j\text{max}}^2 + P_{j\text{jave}}^2) / 2]^{1/2}$$

式中: $P_{j\text{综合}}$ 为第*j*个监测点的质量综合指数; $P_{j\text{max}}$ 为第*j*个监测点*i*污染物所有单项污染指数中的最大值; $P_{j\text{jave}}$ 为第*j*个监测点*i*污染物所有单项污染指数的平均值。当 $P_{j\text{综合}} \leq 1$ 时,表示土壤未污染; $1 < P_{j\text{综合}} \leq 2$,表示土壤受到轻度污染; $2 < P_{j\text{综合}} \leq 3$,表示土壤受到中度污染; $P_{j\text{综合}} > 3$,表示土壤受到重度污染。 $P_{j\text{综合}}$ 值越大土壤污染程度越重。

2 结果与分析

2.1 样品磁化率特征

土壤磁化率(χ_f)是指土壤在低频弱磁场中土壤的磁化强度与磁场强度之比,常作为土壤中磁性矿物含量的粗略指标。频率磁化率(χ_{fd})则指在不同频率外磁场下,土壤产生的磁化率值的变化强度,反映了细小的超顺磁性(SP)颗粒的相对含量。一般来说,只有在风化成土过程中才有SP颗粒产生,因此,频率磁化率(χ_{fd})可用来鉴别土壤中磁性矿物的粒径和来源^[14,15]。

根据测定结果(表1和图2),泚江沿岸农田土壤 χ_f 多在 $5 \times 10^{-8} \sim 20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,最高值和最低值都出现在上游河段; χ_{fd} 多在2%~8%之间,最高值出现在上游河段,最低值则出现在下游河段。样品较低的 χ_f 和 χ_{fd} 平均值说明研究区内土壤中磁性矿物的含量不高,且超顺磁性(SP)颗粒较少。以样点来看,研究区内 χ_f 表现出下降趋势的样点 χ_{fd} 则上升,比如:1、6、12、16号点,由于1号样点位于离矿业活动区约10 km的泚江支流——挂登河沿岸,6号点虽然离矿业

活动区较近,但远离泚江干流,12、16号点分布在泚江下游沿岸,远离矿业活动区。因而这类样点的土壤较少或不受矿业活动的影响,其磁性主要由土壤的性质决定。相对而言,研究区内有8个样点的土壤 χ_f 高于平均值,其中7个分布在上游河段,如果以11号样点为界,将样品分为上游和中下游两部分,则上游样品 χ_f 平均值为 $17.51 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, χ_{fd} 平均值为6.13%,中下游样品 χ_f 和 χ_{fd} 平均值分别为 $8.48 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和3.26%,上游样品中磁性矿物的含量明显高于中下游样品。一般认为,大工业区周围表土和沉积物磁性的增强在一定程度上与工业排放的磁性矿物有关^[11]。泚江上游沿岸农田土壤磁性的增强很可能是受矿业活动影响的结果。整体上,泚江沿岸农田土壤磁性变化表现出高值都出现在上游河段,大部分低值出现在中下游河段,上游样品 χ_f 和 χ_{fd} 平均值明显高于中下游样品,距泚江干流较近的样品 χ_f 大于距泚江较远的样品等特征,说明泚江沿岸农田土壤的磁化率变化趋势与农田离矿业活动区和泚江的远近有关。

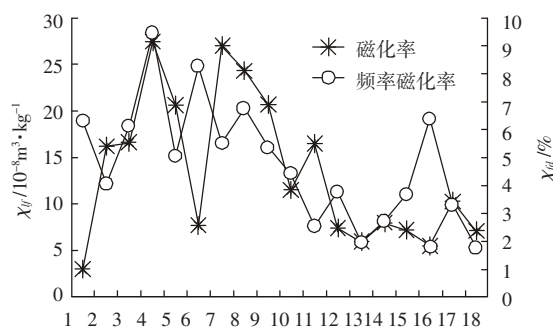


图2 样品磁化率与频率磁化率变化趋势

Figure 2 The trend of magnetic susceptibility and frequency dependent susceptibility in samples

2.2 样品重金属含量及其污染评价

9个样点的重金属Pb、Zn、Cd元素的全量分析表明(表2),样品Pb、Zn、Cd含量表现为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd}$,较大的极差与标准偏差反映了重金属元素在采样区内的分布极不均匀,少数样点Pb、Zn、Cd的富集与人为影响有关。

对样品的单因子污染指数评价显示(表3),9个样品Zn、Cd含量都超过了国家土壤环境质量二级标

表1 样品磁化率与频率磁化率特征

Table 1 Features of Magnetic susceptibility and frequency dependent susceptibility in samples

项目	最大值	最小值	平均值	标准差	单位	样品数
磁化率(χ_f)	27.37	2.93	13.5	7.87	$10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	18
频率磁化率(χ_{fd})	9.48	1.76	4.86	2.13	%	18

表2 样品Pb、Zn、Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Concentration of Pb, Zn and Cd in samples ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

重金属含量	最大值	最小值	平均值	标准差	极差	样品数
Pb	1 699	135	555.67	546.01	1 564	9
Zn	3 778	333	1 452.78	1 244.08	3 445	9
Cd	59	4.6	21.44	20.22	54.4	9

准,有 5 个样品 Pb 含量超过了国家土壤环境质量二级标准,单项污染指数 $Cd > Zn > Pb$ 。进一步分析发现,样品 Zn、Cd 的污染指数大致表现出上游样品大于中、下游样品的特点,未受到 Pb 污染的样品大多分布在远离铅锌矿采选、冶炼活动区的沱江中下游河段。由此可知,沱江沿岸农田土壤重金属 Zn、Cd 的污染是比较普遍的,Pb 污染主要集中在上游河段。沱江上游铅锌矿石的采选、冶炼,尤其是废水、废渣的排放使沱江携带了大量的重金属污染物,引用河水灌溉是沱江沿岸农田土壤重金属污染的重要原因。部分采样点不受沱江的影响,但其较高的污染指数可能与矿产开发活动引起的粉尘、扬灰的沉降有关。另外,农业活动中化肥、农药的使用也可能对沱江沿岸农田土壤的重金属污染造成一定的影响。综合污染指数评价表明(表 4),9 个样品都属重金属重度污染类型,其中最大值达 45.44,最小值为 7.11,说明沱江沿岸农田土壤受重金属污染的程度高、范围广,并且有一定的污染历史。采样过程中我们对附近村民的访谈发现,已经有人体重金属中毒的病例出现,病人明显的表现出神经机能障碍、精神呆滞等金属中毒特征。

2.3 样品磁化率与 Pb、Zn、Cd 含量的关系

沱江沿岸农田土壤 χ_f 与重金属 Pb、Zn、Cd 含量的相关性分析表明(图 3),土壤 χ_f 与重金属 Pb、Zn、

表 4 样品重金属污染综合指数评价表

Table 4 Comprehensive contamination index of heavy metal in samples

综合指数	最大值	最小值	平均值	标准差	样品数	重度污染样品数
$P_{f综合}$	45.44	7.11	22.58	15.02	9	9

Cd 含量存在一定的正相关。从图 3 中也可看出,沱江沿岸农田土壤中重金属 Pb、Zn、Cd 含量与 χ_f 的相关分析图有着相近的变化特征,说明沱江沿岸农田土壤中重金属 Pb、Zn、Cd 有着共同的来源,而且它们和土壤中部分磁性矿物也可能有相同的来源或地球化学行为。一些研究表明,沱江沉积物中重金属元素以铁锰化合物结合态为主,为较强的离子键结合态,在氧化还原电位正常及水中有足够氧时不易释放^[16]。当此类 Pb、Zn、Cd 随灌溉等农业活动进入农田后,一方面导致农田土壤 Pb、Zn、Cd 含量的升高,另一方面则可能使农田土壤的磁性也随之增强。此外,土壤中铁锰氧化物及其氢氧化物是土壤吸附重金属元素的载体^[17,18],由矿业活动释放的重金属元素可通过粉尘、扬灰的沉降,采选、冶炼废水的排放等方式进入周围农田土壤,最终在铁锰氧化物及其氢氧化物等矿物表面富集。由于土壤中铁锰氧化物及其氢氧化物的主要代表性矿物种(赤铁矿、针铁矿等)属不完整反铁磁性矿物;卢升高等^[15]指出,对高 χ_f 土壤,不完整反铁磁性矿物对 χ_f 的贡献可以忽略,但对低 χ_f 土壤,不完整反铁磁性矿物对 χ_f 有一定的贡献,而沱江沿岸农田土壤 χ_f 多在 $5 \times 10^{-8} \sim 20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,属低 χ_f 土壤。因此,对沱江沿岸农田土壤的磁化率测量一定程度上反映了重金属 Pb、Zn、Cd 的污染状况。

表 3 样品重金属污染单因子指数评价表

Table 3 Single contamination index of heavy metal in samples

单因子指数	最大值	最小值	平均值	标准差	样品数	超标样品数
P_{Pb}	4.85	0.49	1.7	1.53	9	5
P_{Zn}	12.59	1.47	5.29	4.03	9	9
P_{Cd}	59	9.33	28.41	19.57	9	9

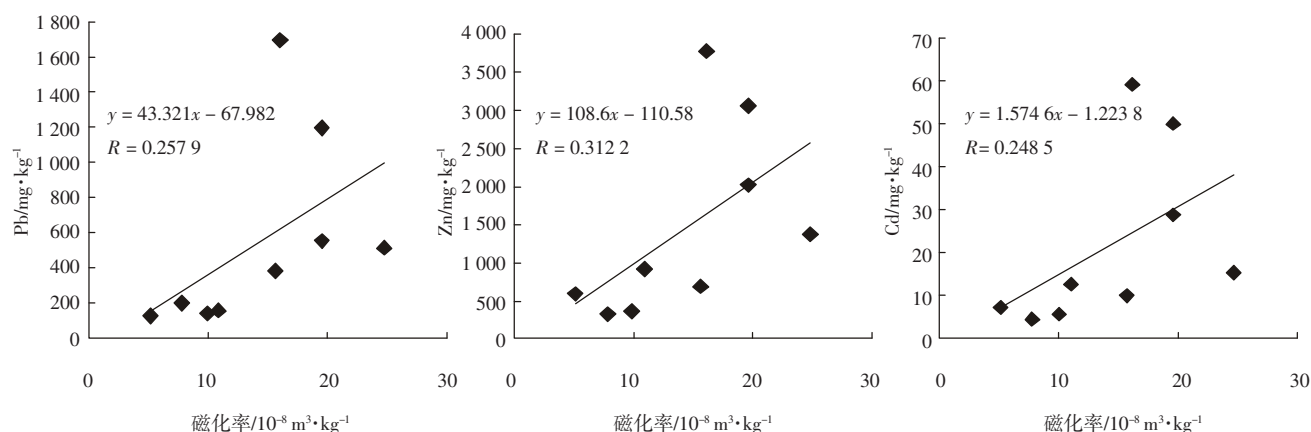


图 3 样品磁化率与 Pb、Zn、Cd 含量的关系

Figure 3 Correlation between magnetic susceptibility and concentration of Pb, Zn and Cd in samples

3 结论与讨论

以上分析表明,(1)泚江沿岸农田土壤 χ_f 多在 $5 \times 10^{-8} \sim 20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, χ_d 多在2%~8%之间,上游沿岸农田土壤磁性明显高于中下游,农田土壤的磁性变化趋势与距矿业活动区和泚江干流的远近有关。(2)泚江沿岸农田土壤普遍受到Zn、Cd的污染,Pb污染主要集中在上游河段,单项污染指数 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$;综合污染指数说明,泚江沿岸农田土壤重金属污染达到重度污染等级。(3) χ_f 与重金属Pb、Zn、Cd含量存在一定的正相关,磁化率测量在一定程度上可反映泚江沿岸农田土壤的重金属污染状况。

可利用土壤磁化率指示重金属污染,源于土壤中磁性矿物与重金属元素往往具有相同的来源或存在某种共生关系,而土壤磁化率主要受土壤中磁性矿物的含量、类型、粒度等因素的影响。因此,应用磁化率指示土壤的重金属污染时,需要考虑土壤中与重金属元素相关的这类磁性矿物对土壤磁化率贡献的方式和大小。以本研究为例,(1)泚江沿岸农田土壤中磁性矿物的含量较低,且与重金属相关的这类磁性矿物多属不完整反铁磁性矿物,对磁化率的贡献不如亚铁磁性矿物显著,因而,土壤磁化率中只有某一区段的值反映了重金属元素的含量。(2)由于农田处在不断地耕作过程中并受多种因素的影响,土壤环境的稳定性差,土壤磁性和重金属元素与磁性矿物的结合等方面会受到一定的干扰。总之,目前利用土壤磁性指示重金属污染的机理尚未明确,当磁性矿物与重金属具有不同的来源或没有共生关系时,土壤磁化率是否还会与重金属的含量相关,磁性矿物吸附了重金属后其磁性是否会发生改变等问题仍需要进一步的探讨和研究。

参考文献:

- [1] 任旭喜. 土壤重金属污染及防治对策研究[J]. 环境保护科学, 1999, 25(5): 31-33.
REN Xu-xi. The heavy metal pollution in soil and the prevention measurement[J]. *Environmental Protection Science*, 1999, 25(5): 31-33.
- [2] 王 岩, 陈宜俚. 环境科学概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 52-60.
WANG Yan, CHEN Yi-liang. *Environmental Science Conspectus*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 52-60.
- [3] 周建民, 党 志, 司徒粤, 等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1172-1176.
ZHOU Jian-min, DANG Zhi, SITU Yue, et al. Distribution and characteristics of heavy contaminations in soil from dabaoshan mine area[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2004, 23(6): 1172-1176.
- [4] 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.
LEI Dong-mei, DUAN Chang-qun, WANG Ming. Soil fertility and heavy metal contamination in abandoned regions of different Mine Tailings in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(2): 612-616.
- [5] 廖国礼, 吴 超, 谢正文. 铅锌矿山环境土壤重金属污染评价研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 78-82.
LIAO Guo-li, WU Chao, XIE Zheng-wen. The study about heavy metals pollution in lead-zinc mining activities[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2004, 19(4): 78-82.
- [6] 卢升高, 卢 瑛, 柯 江, 高吉喜, 等. 污灌区农田土壤环境质量评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 114-116.
DUAN Fei-zhou, HE Jiang, GAO Ji-xi, et al. Assessment on soil environmental quality of sewage irrigation region [J]. *Research of Environmental Science*, 2006, 19(3): 114-116.
- [7] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 105-106.
LU Sheng-gao. *Chinese Soil Magnetism and the Environment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 105-106.
- [8] 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法[J]. 海洋与湖泊, 2000, 31(6): 616-623.
ZHANG Wei-guo, YU Li-zhong, Hutchinson S M. Magnetic diagnosis of heavy metal pollution record in coastal sediments on the southern bank of the Changjiang River estuary [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 616-623.
- [9] 卢 瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤磁化率及其环境意义[J]. 华南农业大学学报, 2001, 22(4): 26-28.
LU Ying, GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin. The magnetic susceptibility characteristic of urban soil and its environmental significance[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2001, 22(4): 26-28.
- [10] 李晓庆, 胡雪峰, 孙为民, 等. 城市土壤污染的磁学监测研究 [J]. 土壤, 2006, 38(1): 66-74.
LI Xiao-qing, HU Xue-feng, SUN Wei-min, et al. Magnetic techniques used for monitoring urban soil pollution[J]. *Soils*, 2006, 38(1): 66-74.
- [11] 俞立中. 环境磁学在城市污染研究中的应用[J]. 上海环境科学, 1999, 18(4): 175-178.
YU Li zhong. Application of environmental magnetism to urban pollution study[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1999, 18(4): 175-178.
- [12] 兰坪县志编纂委员会. 兰坪白族普米族自治县志[M]. 昆明: 云南民族出版社, 2003. 49-73.
Lanping County Annals Codification Committee. *Lanping Bai Pumi Autonomic County Annals* [M]. Kunming: Yunnan Nationality Press, 2003. 49-73.
- [13] 张 从. 环境评价教程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 141-149.
ZHANG Cong. *Environmental Assessment Guide*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 141-149.

- [14] 卢升高. 土壤频率磁化率与矿物粒度的关系及其环境意义[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 9-14.
- LU Sheng-gao. Relationship between frequency magnetic susceptibility and ferrimagnetic mineral grain size in soils and its environmental implications [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, 8(1): 9-14.
- [15] 卢升高, 张子玉, 俞劲炎, 等. 玄武岩发育土壤的磁化率及其机理解析[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 544-550.
- LU Sheng-gao, ZHANG Zi-yu, YU Jin-yan, et al. Magnetic susceptibility of soils derived from basalt and its mechanism[J]. *Acta Pedologia Sinica*, 1999, 36(4): 544-550.
- [16] 乔庆霞, 黄小凤. 沘江表层底泥中重金属化学形态的研究 [J]. 昆明理工大学学报, 1999, 24(2): 195-198.
- QIAO Qing-xia, HUANG Xiao-feng. A study of heavy metal chemical formations of surface sediment in Bijiang River [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1999, 24(2): 195-198.
- [17] 鲁安怀, 卢晓英, 任子平, 等. 天然铁锰氧化物及其氢氧化物环境矿物学研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 473-483.
- LU An-huai, LU Xiao-ying, REN Zi-ping, et al. New advances in environmental mineralogy of natural oxides and hydroxides of iron and manganese[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 473-483.
- [18] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 铁锰氧化物在污染土壤修复中的作用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 558-564.
- TANG Yan-jie, JIA Jian-ye, XIE Xian-de. The environmental mineralogical significance of iron and manganese oxides in remediation of contaminated soil[J]. *Advance in Earth Science*, 2002, 17(4): 558-564.