

基于高密度采样的土壤重金属分布特征及迁移速率

阮心玲^{1,2}, 张甘霖^{1,2*}, 赵玉国^{1,2}, 袁大刚^{1,2}, 吴运金^{1,2}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 重金属在土壤剖面中的垂直分布特征是土壤自身理化性质和外界条件影响下重金属迁移和积累的综合反映, 也是了解土壤重金属污染程度和修复治理的基础. 传统的用于农业土壤研究的层次采样技术和方法, 只能粗略了解重金属在土壤层次中的分布状况, 不足以确定污染物的垂直迁移距离和速度. 本研究通过对钢铁厂周边 3 种不同利用类型土壤进行垂直方向的高密度采样分析, 即在 0~40cm 深度内以 2cm 间隔, 在 40~80cm 以 5cm 间隔, 80cm 以下以 10cm 间隔采样, 对重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的剖面垂直分布进行了研究. 结果表明, 在几乎未受人为干扰的林地土壤中, 可见重金属在土壤表层明显富集, 证实其来源是大气沉降, 其中 Zn、Pb 向下迁移的距离很小, Cu、Cd 迁移稍快, Cr 向下淋溶迁移的深度没有明显的界限; 在受人为影响的旱地和水稻田中, 重金属在耕层土壤中被人为扰动混合, 但在耕层界面以下仍然有明显的向下迁移. 研究表明, 垂直方向高密度采样可以比较精确地理解重金属在土壤中的分布模式, 通过重金属元素含量与稳定元素 Ti 含量的比值及其变化, 还可以估计在特定时间内污染物的迁移距离和迁移速度, 各种重金属具有不同的迁移能力, 其相对顺序为 Cd>Cu>Zn>Pb.

关键词: 高密度采样; 重金属; 剖面; 分布; 迁移; 速率

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-1020-06

Distribution and Migration of Heavy Metals in Soil Profiles by High-Resolution Sampling

RUAN Xinling^{1,2}, ZHANG Ganlin^{1,2}, ZHAO Yuguang^{1,2}, YUAN Dargang^{1,2}, WU Yujin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The vertical distribution of heavy metals in soils profiles is a result of heavy metals accumulation and migration under combining influence of edaphic factors and environmental conditions. It's an important basis for evaluation of heavy metals pollution and remediation of contaminated soils. By traditional sampling methods, i. e., soils were sampled according to pedogenetic horizons, only very general information about element migration can be learned. In the current study, three sites near a steel factory were selected to represent three types of land use, i. e. forest, dry land for vegetable cultivation and rice paddy field. Soils were sampled horizontally by high-resolution sampling method. In the top of 40 cm soils were sectioned in 2 cm intervals, then 5 cm intervals in next 40 cm, and 10 cm intervals in the last 20 cm of profile. Total content of Cu, Zn, Pb, Cr and Cd were determined, and the vertical distribution of Cu, Zn, Pb, Cr, Cd in every profile was analyzed. The results indicated that enrichment of heavy metals appeared in the upper most layer of the natural forest soil that without any anthropic disturbance, and this phenomenon proved that heavy metals were coming from atmospheric deposition. We found that Cu, Zn and Pb moved downward in a short distance, Cd migrated relatively faster than Cu, Zn and Pb, while Cr had no recognizable location of migration front. In the soil profiles of dry land and paddy field, there were influences of agricultural practice, the distribution and movement of metals were thus different from those of the forest soil. In cultivated layer heavy metals were evenly distributed because soils in the upper layer were mixed by cultivation, however, below the cultivated layer obvious migration took place again. It is concluded that different heavy metals have different mobility and there is such a relative order: Cd>Cu>Zn>Pb. The study shows that the distribution pattern can be obtained with the currently adopted high-resolution sampling method, than traditional horizon sampling, and more precise migration distance and rates can be estimated.

Key words: high-resolution sampling; heavy metals; distribution; migration rate

土壤是重要的农业资源, 也是污染物的重要汇集地. 污染物进入土壤的途径多样, 工厂、矿山的烟尘粉尘排放, 肥料、农药、污泥的施用, 污水的污灌, 废弃物、垃圾的堆放以及大气干湿沉降, 都能造成污染物向土壤的输入^[1]. 土壤重金属污染不但影响植

收稿日期: 2005-05-28; 修订日期: 2005-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40235054); 江苏省自然科学基金项目(BK2004167)

作者简介: 阮心玲(1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤地球化学与土壤环境.

* 通讯联系人, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

物的生长,造成作物的减产,还能通过食物链进入动物和人体,危害健康.污染土壤中重金属的长期淋洗和迁移可导致地表水或地下水的污染.土壤中的重金属如何迁移转化,越来越受到人们的关心.

迄今为止,野外原位研究土壤中重金属的迁移多是基于传统农学概念的耕层或者土壤发生层次进行采样,局限在耕层、亚耕层、犁底层或者淋溶层、淀积层等土壤发生层次尺度上,所分析的土层代表的厚度一般超过 10cm^[2,3].由于自然条件下重金属迁移缓慢,大多研究只能粗略的发现土壤表层金属含量上升,但难以发现其迁移速度与规律,如张学询等研究张士灌区土壤后认为污水中重金属被灌溉的农田表层所截留,Cd、Pb、Cu、Zn 绝大部分留在耕层中^[4];Ettler 等对冶金厂周围农田按照发生层采样,研究后认为 Pb 的最高含量出现在表层和亚表层,并认为 Pb 在土壤中有迁移^[5];Sterckeman 等采用选取发生层采样的方法研究了法国北部的 Pb、Zn 冶炼厂周围的土壤剖面的 Pb、Zn、Cd 的分布,得出不同剖面元素迁移的大致距离^[3].

采用高密度层次的采样方法可以更精确地了解重金属的分布模式和迁移的距离.目前国内外采用这种高密度的采样方法进行土壤中重金属迁移的研究还比较少见.Chicharro Martin 曾采用 2cm 的间隔来研究靠近废弃汽车堆放场一个点 0~10cm 的土层中重金属的总量和形态^[6],采用类似方法的研究国内还未见报道.值得说明的是,在沉积学和第四纪科学研究中,密集层次的采样方法非常普遍^[7,8].本文以钢铁厂周围特殊的环境为背景,采用在土壤剖面上高密度的采样方法,研究重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 在土壤剖面上的垂直分布,分析它们的迁移距离和迁移速度,并为相关的研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 采样区情况

研究区位于长江边某钢铁厂周围.该钢铁厂是江苏最大的钢铁厂之一,1958 年开始建厂,拥有近 50a 历史.钢铁厂的年主导风向为东风和东北风.根据当地典型的利用类型,在钢铁厂的西边和西南采集了 3 个土壤剖面,样点的分布见图 1,采样点的详细情况见表 1.朱丽等人研究发现该企业所在地区林区土壤的 Cu、Zn 等重金属显著超过相同母质对照林区土壤平均值^[9].

1.2 采样方法

基于重金属迁移缓慢的一般认识,为了较准确

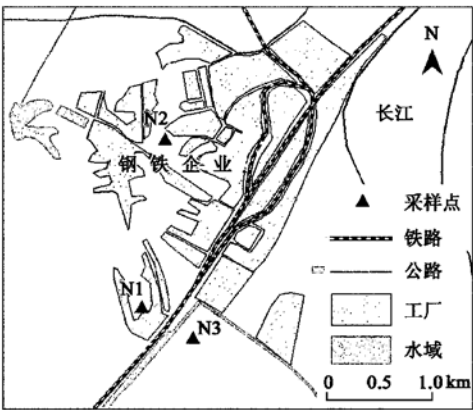


图 1 钢铁厂周边土壤采样点

Fig. 1 Location of sampling sites

表 1 样点的基本情况

Table 1 Introduction of sampling sites

样点	海拔/m	地形	坡度/°	母质	利用类型	土壤类型
N1	49	岗地	10~15	下蜀黄土	林地	黏磐湿润 淋溶土
N2	65	岗地	5~10	下蜀黄土	菜地	筒育湿润 淋溶土
N3	5	平原	<1	长江冲积物	稻田	筒育水耕 人为土

地了解它们土壤剖面中向下迁移的幅度和速率,在土壤剖面垂直方向上采用高密度的采样方法:在土壤剖面上进行连续水平分层采样,从地表向下 0~40cm 范围内每 2cm 采集 1 个样品,40~80cm 每 5cm 采集 1 个样品,80~100cm 每 10cm 采集 1 个样品,每个剖面共采集 30 个样品.土壤样品用聚乙烯自封袋盛装带回实验室,经自然风干后,四分法取出部分土样木棒碾碎使全部通过 2mm 筛,再用玛瑙研钵研磨,使其全部通过 100 目尼龙筛,混匀后装袋备用.

1.3 化学分析和数据处理

准确称取 0.200 0g 过 100 目筛的土壤样品放入铂金坩埚中,用优级纯 HNO₃、HF、HClO₄ 消化至溶液澄清,用 3% 稀 HNO₃ 定容到 25mL,溶液转入塑料瓶^[10].采用原子吸收分光光度法测定土壤消化液中的 Cu、Zn、Pb、Cr;用石墨炉原子吸收测定 Cd,用 ICP-AES 测定 Ti.同时作全程序空白实验,分析过程中插入国家标准土壤样品一同消化测定,进行质量控制.用 Excel 和 SAS 等进行数据处理和分析.

2 结果与讨论

2.1 不同利用条件下重金属在土壤剖面上的分布特征

钢铁厂周围的 N1、N2、N3 共 3 个剖面上重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的分布如图 2 所示。通过图 2 可以看出各种重金属在各剖面中的分布具有不同的特征。

图 2 中 N1 剖面表示未受人为扰动的自然林地状态下 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的分布。从图 2 的 N1 可以看出除 Cr 外, Cu、Zn、Pb、Cd 含量最高值都出现在 0~2cm 的表层土壤中, Zn、Pb、Cd 从 0 到 8cm 范围含量迅速降低, Cu 从 0 到 13cm 迅速降低。从整个

剖面上来看, 虽然含量明显变化的深度 10cm 以内, 但在 30~40cm 以上 Cu、Zn、Pb、Cd 呈现逐渐降低的趋势; 在 50cm 以下的土层中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量相对稳定, 变化较小。Cr 明显表现出不同的特点, 从 0 到 25cm 含量略有增加, 25cm 以下到 60cm 呈现一定波动, 65cm 以下到 100cm 含量逐渐降低, 但从整体来看, 在剖面中没有明显的分布峰区。除表层之外, 这些元素的绝对含量都不高, 基本上在各自的背景值附近^[11]。

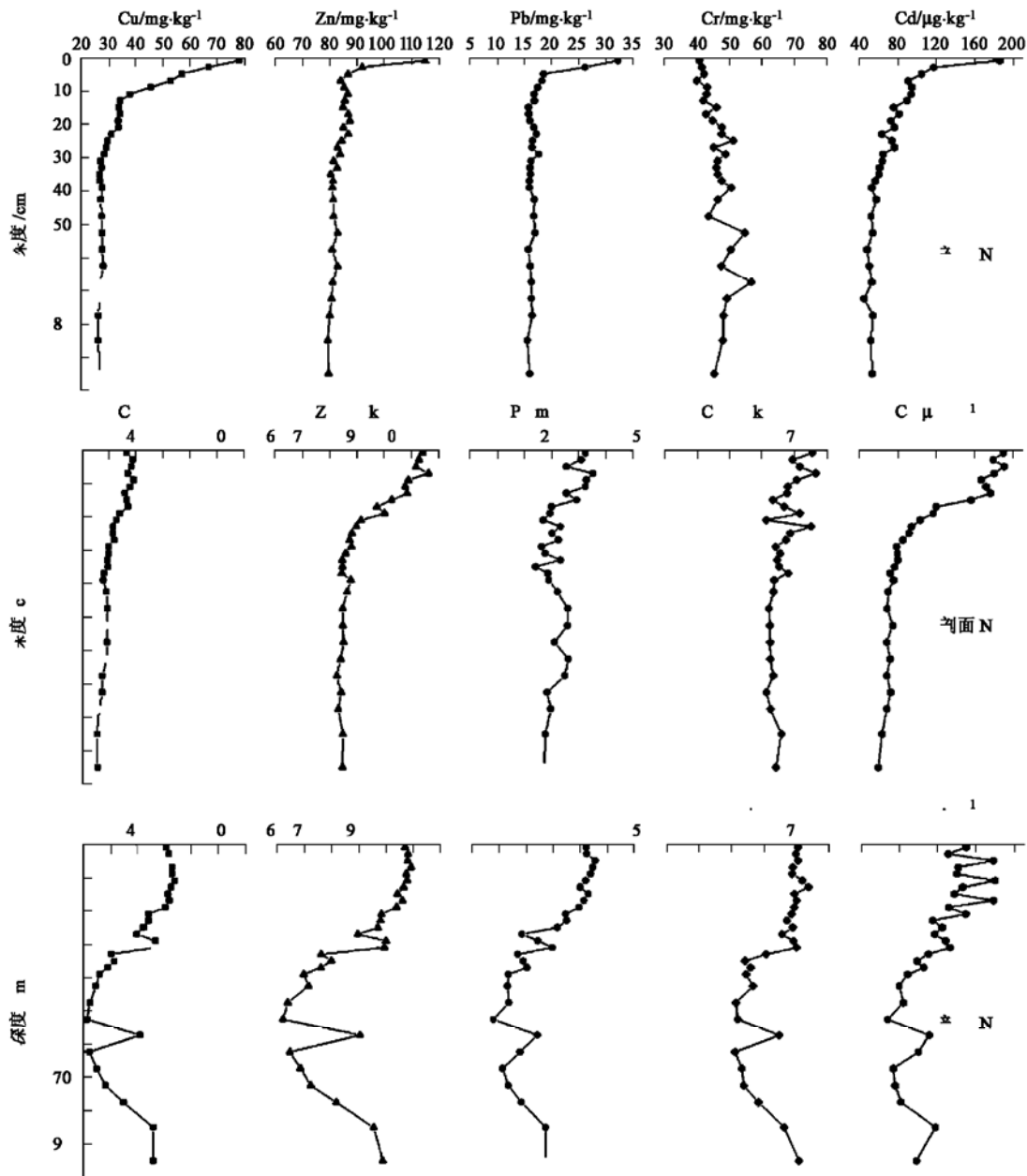


图 2 钢铁厂周围土壤剖面的 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 分布

Fig. 2 Vertical distribution of Cu、Zn、Pb、Cr、Cd concentration in soil profiles

图 2 的 N2 剖面表示菜地土壤剖面的状况。从绝对含量来看, 除 Cr 稍高外, 其它重金属元素与自

然林地状况基本相同,反映了土壤母质的相似性.从分布模式来看明显不同,菜地表层数厘米内几个重金属元素都并没有明显的积累,而在表层 10cm 以内元素含量分布比较均匀,这显然是由于耕作扰动使该深度内的土壤被混合的结果.在该耕作层之下,这些重金属元素仍然出现向下逐渐降低的趋势. Zn、Cd 在 10cm 以下明显逐步降低,直到 40cm 附近基本稳定. Cu、Pb、Cr 的变化虽然不如 Zn、Cd 明显,但仍然有逐渐降低的趋势,含量变化稳定的深度也接近.该剖面在 10cm 以下的土层基本未受到人为的扰动,土壤中的重金属又在新的界面上向下迁移.

图 2 的 N3 剖面显示的是稻田土壤剖面 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的分布.可以看出,元素的分布模式与自然和旱地条件下相比差异很大,但各元素之间非常相似.人为水耕条件下,表层扰动的深度达到 20cm 左右,所以所有这些元素在 20cm 以内呈现均一或者混合的特征.从 20cm 到 52cm 又可以分为一段缓慢降低过程,其中从 25cm 到 27cm 之间有一个小的突变.几乎所有元素在 52cm 处降到整个剖面含量的最低值,在 57.5cm 处出现 1 个峰值,从 62.5cm 处以下到 100cm 的土层各含量又逐渐升高.各元素在土壤剖面上并不具有单向的变化趋势,但各元素的含量在整个剖面上的变化趋势一致.稻田剖面重金属的这种分布是因为表层 0~20cm 范围内耕作扰动等作用,使其土壤中重金属的含量均匀,变化较小.在 33cm 以下的土层未受到人为的扰动,重金属又以自然状态向下迁移.但同时由于该剖面的母质是长江冲积物,存在比较明显的所谓岩性不连续性(lithologic discontinuity),因此重金属的分布模式叠加了土壤母质不均一的影响,30cm 和 57cm 附近的含量突变就是该影响的结果.60cm 以下的逐渐增加体现了土壤母质的差异,在 70cm~80cm 以下土壤的质地逐渐粘重,由砂土过渡到粉粘壤.

通过分析上面几个剖面重金属含量的分布,发现 Cu、Zn、Pb、Cd 在剖面的最上层(或耕作层)含量最高,在土壤表层下面一定范围内的土层中重金属含量逐渐降低.这种分布模式有 2 个可能的解释,一是并非迁移的结果,而是表层污染随时间的逐渐加强,所以表层含量最高;二是说明在溶质运移的作用下土壤中重金属向下迁移.但黄土的存在远早于污染的产生,所以这种上高下低的渐变模式是污染物逐渐下移的结果,否则污染物只出现在表层.污染物向下迁移深度将随着时间逐渐增加,在没有外来添

加的情况下,将会出现上低下高的淋溶淀积模式,而本研究所得到的结果说明目前重金属的输入速率大于其向下迁移的速率,所以仍然维持上高下低的模式. N1 剖面中 Cr 含量分布上下低而中间高,表现出表层亏损的模式,可能是外界向土壤输入的 Cr 少,淋洗等迁移作用大导致 Cr 被水淋失到剖面的中部.

研究指出,土壤的质地 $\text{pH}^{[12]}$ 、有机质含量^[13]、Eh、碳酸钙含量、CEC 等都影响重金属的形态和迁移^[14,15].一般认为,由于土壤的机械截留、有机质的固定,土壤胶体的吸附等对重金属向下迁移有很大的阻滞作用,使得重金属向下迁移缓慢^[16].但本研究中, N1 剖面中 Cu、Zn、Pb、Cd 的分布状况说明在土壤重金属含量较低、未达到污染水平的状况下,重金属在土壤中仍然存在着移动的迹象,高密度采样方法仍然能比较精确地揭示重金属的分布差异.

3 个剖面分别代表不同的土壤利用方式,其外源输入重金属的方式也不同.根据 3 个剖面的元素分布来看,不同的重金属在 1 个剖面上的分布不完全相同,不同类型的剖面其重金属的分布不一样. N1 剖面点位于未受人为干扰的林地,其表层富集的重金属主要来源于大气沉降,剖面中重金属的迁移未受到人为的影响,重金属从土壤的表层向下逐渐降低,迁移的距离较小.最近的一些研究表明,大气沉降已经成为全球范围内土壤表层重金属的来源,甚至在远离工业和人为活动的地方也不能幸免^[17,18]. N2 剖面代表旱地,大气干湿沉降、施肥等带来一定量的重金属输入; N3 剖面为水稻田,其重金属来源有母质、大气干湿沉降、施肥等,灌溉水也会输入重金属^[4,19]. N2、N3 表层受到人为耕作的影响,土壤在耕作混匀的情况下层内的重金属含量较为均匀,变化不大;耕作层下面的土壤未受到人为的混匀作用,重金属从新的“输入界面”向下迁移,加速了重金属的迁移.而 N3 母质为长江冲积物,除经常深翻和泡田等人为耕作措施增加了混合程度并加速重金属的移动之外,由于土壤具有母质不均匀和不连续性,所以重金属的分布模式还叠加了母质的背景影响.

2.2 不同重金属在剖面中迁移距离和速率

理论上,迁移距离是指外源重金属到达的位置与土表之间的深度差异,但从实际来看,因为不可能确切地知道该位置,只能将含量有明显变化的深度近似地作为迁移深度.但是,由于土壤母质来源和属性可能不同,同一剖面各层土壤组成可能存在一定的差异,因而用元素浓度直接比较对同源母质

基本上是可行的,而对母质可能存在变异的情况是欠妥的.为了消除母质的可能影响,本研究使用相对稳定的 Ti 元素含量将重金属的分布进行了转换.在土壤中一般认为 Ti 是难风化,难移动的 稳定元素^[20],可以选用土壤中的稳定元素 Ti 来计算富集或淋失系数^[21].如果用元素浓度与稳定元素 Ti 浓

度的比值,就可以消除这种影响^[22].图 3 中给出 N1 剖面中 Cu/Ti、Pb/Ti、Zn/Ti、Cr/Ti 和 Cd/Ti 的分布曲线.就 3 个剖面中 Ti 含量来说,由于 N1、N2 剖面为黄土母质,Ti 的含量上下比较均匀,差别不大;N3 是长江冲积物,Ti 的含量与 N1、N2 剖面不同土层含量上下波动.

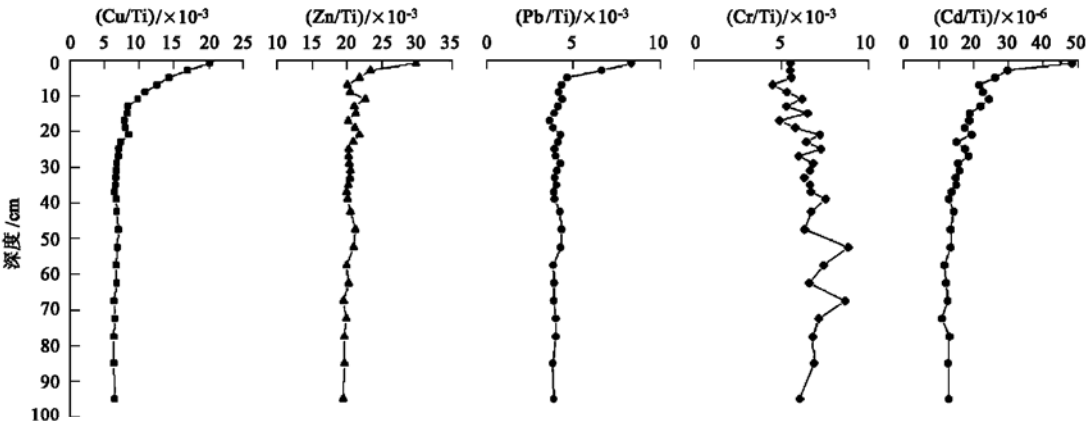


图 3 林地土壤剖面 N1 的 Cu/Ti、Pb/Ti、Zn/Ti、Cr/Ti、Cd/Ti 分布
Fig. 3 Vertical distribution of Cu/Ti、Pb/Ti、Zn/Ti、Cr/Ti、Cd/Ti in soil profile of N1

从图 3 中可以看出,N1 剖面中各种重金属与 Ti 比值在剖面上分布,其分布模式和重金属在该剖面上的分布模式相同.在本研究中,重金属主要集中在土壤表层和亚表层,土壤剖面的底层和心土层中重金属含量可以作为土壤剖面的本底值.对于 N1 剖面,因其土层未受到人为扰动,母质为均一的黄土,因此以 60cm 以下的各土层与 Ti 的比值的均值作为该土壤的原始值,然后用原始值加上 2 倍标准差作为外来污染的临界值来估算重金属迁移的距离.重金属在土壤中迁移的时间,没有办法准确计算,但可以假定钢铁厂产生的烟尘是大气干湿沉降大量输入的开始,同时可以假定最先沉降的重金属迁移深度最大而处于迁移前锋,因此以钢铁厂建厂投产(1958 年)到采样(2004 年)的时间作为影响的时间来估算重金属的年平均迁移速度.根据重金属与 Ti 含量的比值计算,N1 剖面中各元素的迁移距离和速度见表 2. N2 和 N3 剖面由于受到人为影响,其中的重金属迁移速度暂不讨论.

从表 2 可以看出不同的重金属迁移的距离与迁移速度不同.这可能是大气沉降输入重金属的量、形态,以及各种重金属本身的化学性质不同而产生的.可以看出,如果通过发生层来采样,将掩盖元素垂直分布的很多特点和信息,无法准确的理解重金属在土壤中的迁移距离.采用高密度的采样方法能够获

表 2 N1 剖面重金属迁移距离和速度估算
Table 2 Estimation on migration distance and rate of heavy metals in profile N1

元素	算术平均值 × 10 ⁻³ (深度> 60cm)	标准差 × 10 ⁻³	临界值 × 10 ⁻³	估计迁 移距离 / cm	估算迁 移速率 / cm·a ⁻¹
Cu/Ti	6.54	0.15	6.85	29	0.63
Zn/Ti	19.69	0.30	20.28	15	0.33
Pb/Ti	3.93	0.07	4.07	13	0.28
Cr/Ti	12.01	0.88			
Cd/Ti	12.38 × 10 ⁻³	0.80 × 10 ⁻³	13.98 × 10 ⁻³	35	0.76

取更多土壤中重金属分布的细节,提高估计重金属迁移距离的精度.许多研究者对重金属在土壤剖面上的分布和迁移进行了研究.Chicharro 等^[6]研究了一废弃汽车堆放场周围的土壤,堆放场的颗粒通过大气传输后沉降到场外土壤中,土壤的表层的 0~2cm 土壤中的 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 等元素的含量最高,向下含量逐渐降低,但其采样深度只有 10cm 无法获得迁移的深度.Sterckeman 等^[3]研究了法国北部的 Pb、Zn 冶炼厂周围施用污泥和废水及各种河流冲积物的土壤剖面上的 Pb、Zn、Cd 的分布,Pb、Zn 和 Cd 有污染的土层深度可达 0.4~1.2m,Cd、Zn 在 1 个冲积土剖面上污染的深度可达 2m;然而其根据发生层采样,采样的土层厚度较大,只能获得迁移深度的大致范围.Erel 等^[23,24]测定了汽油铅和高速

公路两旁的土壤中铅同位素比值,并且根据使用汽油的历史计算出铅的垂直渗透速率大约为 $0.33 \sim 0.8 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,比本研究的速率稍大,但基本上接近。Erel 研究的是公路边有耕作的土壤,但其认为耕作对 Pb 的迁移没有影响。

从表 2 可以得知 N1 剖面中各种元素在土壤剖面上的迁移距离不一样,反映了它们的迁移能力不一,迁移能力的强弱按如下顺序排列: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。Cd 是移动性最强的元素, Pb 是最难移动的元素。本研究结果与 Sterckeman 等^[3]在法国研究所得出的 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$ 的结果不完全相同;与吴燕玉等^[25]利用土柱模拟得出的 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 结果一致;与南忠仁等^[26]在干旱区耕作剖面上研究得出的 $\text{Cd} > \text{Pb}$ 的结论一致。Cr 在林地剖面中出现更快的淋失现象,没有表层积累,其迁移距离和速率难以通过本方法直接得到。

3 结论

本研究表明,采用高密度的采样方法能获得比传统发生层采样更精确的重金属在土壤中分布和迁移的特征和信息。钢铁厂周围土壤环境中的表层土壤中的重金属含量 Cu、Zn、Pb、Cd 比其下层的土壤含量高,产生表层富集,但都出现不同模式的向下迁移。研究发现,重金属即使只是受大气干湿沉降影响,浓度很低的情形下,仍然能够观察到迁移现象。在受人为扰动和母质背景含量影响下的旱地和水田土壤中,元素分布的模式明显受到影响。通过林地条件下元素分布特征的分析,结合与岩生稳定元素 Ti 的相对比较,可以粗略估计各种元素在土壤剖面中的迁移距离并估算它们的迁移速率。结果表明, Cu、Zn、Pb、Cd 的迁移能力不一,迁移能力的相对强弱有如下顺序: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 216~219.
- [2] 田均良, 刘普灵, 李雅琦. 黄土高原土壤剖面元素相对迁移强度初探[J]. 水土保持研究, 1995, 2(4): 51~55.
- [3] Sterckeman T, Douay F, Proix N, *et al.* Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France [J]. Environmental Pollution, 2000, 107: 377~389.
- [4] 张学询, 吴燕玉, 陈涛, 等. 张士灌区镉、铅等重金属迁移分布规律及其治理途径[J]. 环境科学, 1982, 3(6): 7~10.
- [5] Ettler V, Vaneček A, Mihaljević M, *et al.* Contrasting lead speciation in forest and tilled soils heavily polluted by lead metallurgy[J]. Chemosphere, 2005, 58: 1449~1459.
- [6] Chicharro Martín A, Cala Rivero V, Larrea Marin M T. Contamination by heavy metals in soils in the neighbourhood of a scrapyard of discarded vehicles[J]. The Science of the Total Environment, 1998, 112: 145~152.
- [7] 彭晓彤, 周怀阳, 翁焕新, 等. 珠江口沉积柱中重金属 V、Ni 和 Co 的分布特征、迁移机制和污染评价[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, 30(1): 103~108.
- [8] Huang C C, Pang J L, Zhou Q Y, *et al.* Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rainfed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23: 2525~2535.
- [9] 朱丽, 童春发, 乐美麟, 等. 南京大厂林区土壤重金属铜、镍、锌、锰含量分析[J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(3): 67~70.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 205~227.
- [11] 中国科学院土壤背景值协作组. 北京、南京地区土壤中若干元素的自然背景值[J]. 土壤学报, 1979, 16(4): 319~328.
- [12] 蒋建清, 吴燕玉. 模拟酸雨对草甸棕壤中重金属迁移的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 1995, 12(2): 185~190.
- [13] Dilek G Turer, Barry J Maynard. Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati, Ohio shows organic matter is key to mobility[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2003, 4(4): 235~245.
- [14] 陈怀满, 等著. 土壤-植物系统中的重金属[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 174~182, 271~273.
- [15] 陈怀满, 等著. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 127~130.
- [16] Hesterberg D. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1998, 67: 121~133.
- [17] Nriagu J O. Human influence on the global cycling of trace metals [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology (global and planetary change section), 1990, 82: 113~120.
- [18] Hernandez L, Probst A, Probst J L, *et al.* Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination [J]. The Science of the Total Environment, 2003, 312: 195~219.
- [19] 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究[J]. 土壤, 2002, 2: 90~93.
- [20] 傅桦, 丁瑞兴. 我国北亚热带白浆化土壤的地球化学特性[J]. 科技通报, 1997, 13(1): 21~25.
- [21] Egli M, Mirabella A, Sartori G, *et al.* Weathering rates as a function of climate: results from a climosequence of the Val Genova (Trentino, Italian Alps)[J]. Geoderma, 2003, 111(1~2): 99~121.
- [22] 刘廷良, 高松武次郎, 佐漱裕之. 日本城市土壤的重金属污染研究[J]. 环境科学研究, 1996, 9(2): 47~51.
- [23] Erel Y, Veron A, Halicz L. Tracing the transport of anthropogenic lead in the atmosphere and in soils using isotopic ratios[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(21): 4495~4505.
- [24] Erel Y. Mechanisms and velocities of anthropogenic Pb migration in Mediterranean soils[J]. Environmental Research, 1998, Section A 78: 112~117.
- [25] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染在农田生态系统的迁移动态研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 407~414.
- [26] 南忠仁, 李吉均. 干旱区耕作土壤中重金属镉、铅、镍剖面分布及行为研究——以白银市区灰钙土为例[J]. 干旱区研究, 2000, 17(4): 39~45.