

海南岛农用地土壤重金属元素的空间分布特征及其环境意义

赵志忠^{1,2}, A W Rate², 唐少霞¹, 毕 华¹

(1.海南师范大学资源环境与旅游系,海南 海口 571158; 2.School of Earth and Geographical Sciences of the University of Western Australia, WA ,6009, Australia)

摘 要:采用现场采样及室内分析测试方法,对海南岛 26 个农业土壤剖面淋溶层、淀积层、母质层中 7 种重金属元素的分布特征进行研究。结果发现,重金属元素在淋溶层和淀积层的含量变化幅度与母质层含量变化幅度具有一定的正相关关系,土壤重金属分布在总体上受成土母质层制约。除 As、Pb 外,大部分重金属元素在各层中的含量低于世界土壤平均值,但也有部分重金属元素通过淋溶使表层土壤中少量重金属元素迁移而至淀积层中积累。除 Cd 有机态含量最低外,各层中重金属元素在淋溶层、淀积层、母质层中均显示可交换态含量最低,而残渣态含量最高。区内土壤表层 7 种重金属分布总体上可归为 3 类:Cr、Ni、Cd 3 种重金属元素的土壤表层平均含量较低,变异系数小,表层元素主要继承于母质层;Cu、Zn 组中的 Zn 可能存在一定的外源混入,但 Cu、Zn 在土壤表层未发生富集;而 As、Pb 等重金属元素不仅有外源混入,且发生了一定程度积累,为区内土壤主要的环境隐患。

关键词:重金属元素;农业土壤;环境;海南岛

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0182-06

Characteristics of Heavy Metals Distribution in Agricultural Soils of Hainan Island and Its Environment Significances

ZHAO Zhi-zhong^{1,2}, A W Rate², TANG Shao-xia¹, BI Hua¹

(1. Resource, Environment and Tourism Department, Hainan Normal University, Haikou 571158, China; 2. School of Earth and Geographical Sciences of Western Australia, Perth WA 6009, Australia)

Abstract: The distribution of the heavy metal elements (HMEs) in eluvial horizons, illuvial horizons and parent material horizons of 26 agricultural soil profiles in Hainan Island was studied. The results indicate that the content range of HMEs in both eluvial horizons and illuvial horizons has a positive correlation with the content range in parent material horizons, i.e., the HMEs in both eluvial horizons and illuvial horizons are associated with the HMEs in parent material horizons. For most of HMEs except As and Pb, the contents of HMEs in different horizons are lower than its average contents in the soils of the world. Both residual phase and exchangeable phase have the highest and lowest percentage in each horizon respectively for all the HMEs except Cd that has the lowest percentage in organic phase in each horizon. All HMEs can be divided into 3 groups according to the distribution of the HMEs in eluvial horizons: Cr, Cd, Ni have a low contents in each layer of the soil profiles, and the elements in both eluvial horizons and illuvial horizons are interpreted to be mainly inherited from parent materials; the group of Cu and Zn is also mainly inherited from parent materials but Zn has outside source. There is no surface enrichment for Cu and Zn. As and Pb are the third group, they have the same origins as the second group but have accumulated in both eluvial horizons and illuvial horizons and resulted in environmental problems to some degree.

Keywords: heavy metal element; agricultural soils; environment; Hainan Island

收稿日期:2007-02-11

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(地方 03148、地方 02166);海南省教育厅科学技术项目(Hikj200311);国家自然科学基金项目(40061003);海南省自然科学基金项目(40304);中国科学院边缘海地质重点实验室项目(0218)

作者简介:赵志忠(1965—),男,博士,研究员,主要从事自然地理学、地球化学方面的研究。E-mail: zhizhuwa@cyllene.uwa.edu.au

过去几十年来,由于农药的大量使用、污水灌溉面积的扩大及大气污染物增多并发生沉降,大量的重金属元素被带入到土壤之中^[1-5],尤其是农业用地土壤的耕作层,其重金属元素含量持续增高,而这些重金属元素又可通过食物链转移至动物及人体中,对人类健康产生严重的危害^[6-8]。正是由于土壤中重金属元素的分布特点、赋存状况及其迁移富集规律具有重要的环境指示意义^[9,10],因此,近年来人们对土壤中重金属元素含量分布特征、元素迁移机制及重金属元素的生态环境效应研究也予以了高度重视^[11-17]。本文选择海南岛农业土壤剖面作为研究对象,分析区内农业土壤中重金属元素在剖面中的分布特征及赋存状态,并探讨重金属元素迁移富集规律及其环境意义。

1 研究区概况

海南岛位于中国最南端,介于北纬 $18^{\circ}10'$ ~ $20^{\circ}10'$,东经 $108^{\circ}37'$ ~ $111^{\circ}03'$ 之间,面积约 3.4 万 km^2 。海南岛地处热带季风气候区,区内各地年平均气温在 $23\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,大部分地区雨量充沛,年均降雨量 $1\,500\sim 2\,000\text{ mm}$,且东湿西干明显、干湿季节分明。自然植被东部为热带季雨林,中部山地为常绿阔叶林,西部为稀树灌木草原。区内地质构造复杂,地貌上呈现中间高耸,四周低平的特点,即以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐级下降,形成由山地、丘陵、台地、平原等构成的环形层状地貌,梯级结构明显。

优越的光热条件使海南岛土壤发育较成熟,成土过程以富铝化过程为主,形成的地带性土壤包括黄壤、砖黄壤、砖红壤、赤红壤、燥红土等 5 大类型,成土母质以花岗岩、玄武岩风化物及沉积物为主。各种地带性土壤中又以砖红壤分布最为广泛,其在地表的裸露面积达到 53.42% 。

2 样品采集及研究方法

本次研究的样品全部来自区内农业土壤(包括水稻田、茶园、热带作物、菜地等)剖面,土壤类型包括砖红壤、黄壤、赤红壤。通过在不同地区选择发育程度较

好的 26 个土壤剖面进行系统取样,其中 24 个剖面分别采集了淋溶层(A 层)、淀积层(B 层)、母质层(C 层)土壤样品,另外 2 个剖面则只采集了淋溶层、淀积层二层样品。同一层位采集多个样品进行充分混合,得到的土样在室内经自然晾干→人工压碎→砾石及动植物残体剔除理→混匀→碾磨→过筛(200 目)等步骤的处理后,选取 50 g 用于土壤物理化学特征及 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 7 种重金属元素的含量测定,其中 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等氧化物含量采用 XRF 方法进行分析测定,土壤重金属元素成分分析采用 ICP-MS 方法进行,元素的地球化学形态分析采用 5 步连续提取法,各形态提取液和消化液中的重金属分别用原子吸收分光光度计测定,所有样品化学分析均在澳大利亚西澳大学地球与地理科学学院土壤化学实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 土壤的一般特征及重金属元素组成

总体来看,在研究区内的 26 个农业土壤剖面中,淀积层土壤黏粒平均含量最高(表 1),而且不同剖面同一层位间的土壤黏粒含量变化较大,其中又以淋溶层差异最大,该层黏粒含量最高可达到 $780\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而最低仅为 $150\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 pH 值由淋溶层→淀积层→母质层总体上显示出具有逐步增高的趋势,而土壤有机质含量则刚好相反。此外,土壤各层间 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等氧化物含量的变化幅度较小,但也具有 SiO_2 含量由淋溶层→淀积层→母质层逐步降低的趋势,而 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 则均显示出在淀积层中含量最高,这可能与表层 Fe、Al 在强淋溶作用下部分向下迁移并在淀积层中相对富集有关。

研究区内 26 个农业土壤剖面淋溶层、淀积层、母质层中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 7 种重金属元素的分布情况如表 2 所示。由表 2 可发现如下规律:① Cr、Ni、Zn、Cd 在土壤各层中的含量普遍低于世界土壤平均值,而 Pb 在淋溶层、淀积层及母质层中的含量均高于全球土壤平均值,As 在淋溶层与淀积层中的含量

表 1 海南岛土壤剖面土壤的一般物理化学特征

Table1 General chemical and physical properties of soils in agricultural soil profiles of Hainan Island

土层层位	pH 值		有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	黏粒含量 ($<0.002\text{ mm}$) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	范围	均值	范围	均值	均值/%	均值/%	均值/%	范围	均值
淋溶层	4.2~5.6	4.7	6.57~28.18	11.48	34.55	24.75	21.17	150~780	435
淀积层	4.5~6.1	4.9	2.35~9.12	3.65	33.78	27.42	23.86	312~835	582
母质层	4.8~6.3	5.3	0~0.46	0.22	32.12	21.19	22.64	240~810	477

表 2 海南岛土壤各层重金属元素平均含量

Table 2 The average content of heavy mental elements in different horizons in agricultural soil profiles of Hainan Island

元素	淋溶层 (A 层)			F 淀积层 (B 层)			母质层 (C 层)			A 层/C 层	B 层/C 层	全球土壤 ^[18]
	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	标准差	变异系数	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	标准差	变异系数	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	标准差	变异系数			
Cr	22.67	9.28	0.41	36.44	9.90	0.27	27.68	8.29	0.30	0.82	1.32	70
Ni	15.51	5.48	0.35	18.69	7.69	0.41	16.50	5.15	0.31	0.94	1.13	50
Cu	30.25	10.99	0.36	36.85	15.86	0.43	32.23	9.59	0.30	0.94	1.14	30
Zn	52.17	41.91	0.80	50.42	26.41	0.52	39.47	17.35	0.44	1.32	1.28	90
As	8.06	9.85	1.22	10.58	10.19	0.96	5.25	2.25	0.43	1.53	2.02	6
Cd	0.28	0.13	0.47	0.25	0.13	0.54	0.25	0.13	0.50	1.14	0.99	0.35
Pb	48.01	35.90	0.75	49.83	28.50	0.57	34.92	14.22	0.41	1.38	1.43	23.6

较高,且高于全球土壤平均值,而母质层中的 As 含量则低于全球土壤平均值,Cu 在淋溶层、淀积层、母质层中的含量相差不大,且与世界土壤平均值相差不大;②除 Zn、Cd 外,所有重金属元素在淀积层中含量最高,Cd 在淋溶层、淀积层及母质层中含量相差不大,而 Zn 在淋溶层中的含量最高;③除 Cd 外,所有重金属元素在淀积层中含量高于母质层含量,其中 As 在淀积层中的含量为母质层含量的 2 倍;此外,As、Cd、Pb、Zn 4 种元素在淋溶层中的含量也大于母质层中的含量,但 Cr、Ni、Cu 在淋溶层中的含量小于母质层中的含量;④ As、Zn、Pb 3 种元素含量在淋溶层中的变异系数较大,且 As 在淀积层中的含量也具

有较大的变异系数,其余元素含量的变异系数相对较小,总体来说,所有重金属元素在母质层中含量的变异系数较小。

进一步对各剖面中元素含量的变化特征进行分析(图 1)可发现:①淋溶层和淀积层中重金属元素含量变化与母质层含量变化幅度具有一定的正相关关系,即在母质层含量变化幅度大的重金属元素其在淋溶层和淀积层中的含量变化也较大;②除 Cr、Cd 不甚明显外,其余元素在淋溶层和淀积层中的含量变化范围明显大于母质层的变化范围;③ Cr、Ni、Cu、As 4 种重金属元素在淀积层中含量及其变化幅度明显大于其在淋溶层及母质层中的含量及其变化幅度,

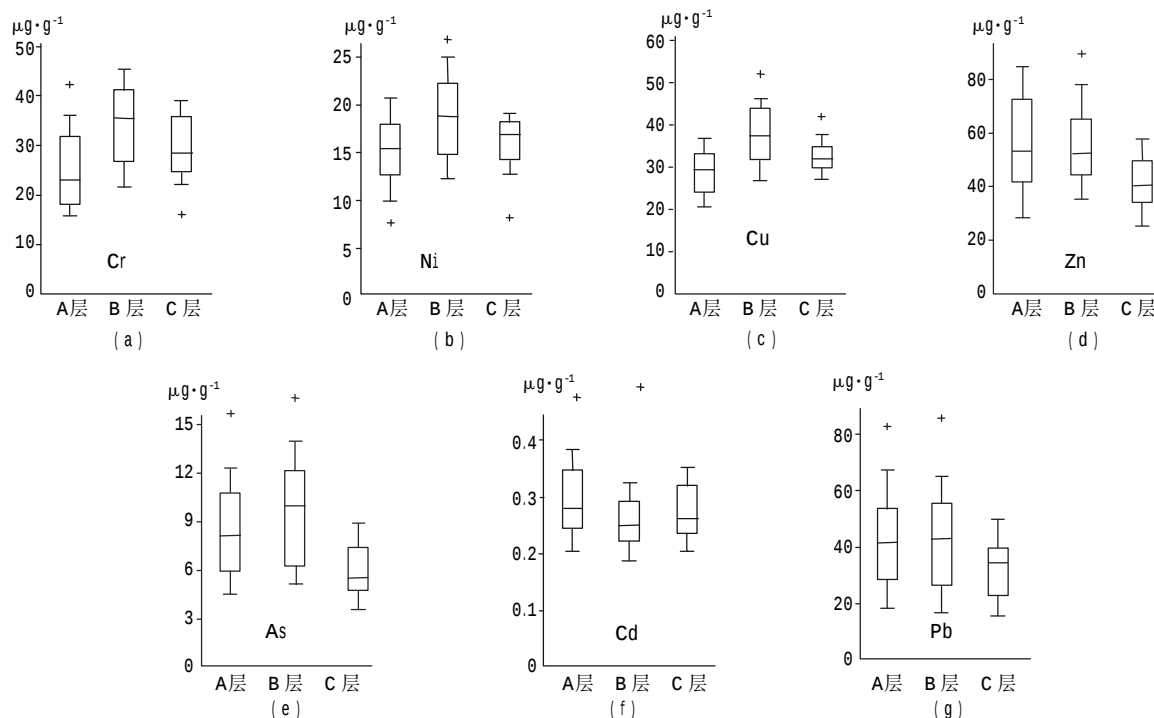


图 1 不同土壤剖面不同层位重金属元素含量空间分布特征

Figure 1 Distribution of heavy mental elements in different horizons in agricultural profiles

这可能与这些元素在淀积层中产生了不同程度的积累有关。

区内重金属元素在淋溶层、淀积层中的含量变化与母质层含量变化幅度具有一定的正相关关系,说明重金属元素含量在总体上受到成土母质的制约;而区内大部分重金属显示在淀积层中含量最高,则反映区内除 Cd 以外的大多数重金属元素可能通过淋溶作用使少量重金属元素发生向下迁移而至淀积层中积累,并最终导致淋溶层和淀积层中的含量变化范围明显大于母质层的变化范围;此外,各剖面土壤下部母质层重金属元素含量变异系数较小,含量相对稳定,可能与母质层重金属元素继承于基岩,没有外源干扰有关;而在土壤浅部,由于人类的干扰,部分重金属元素如 As、Pb、Zn 在不同剖面存在不同程度的外源的加入,使这些元素在不同剖面间含量变化相对较大,含量变异系数也较大;而 Cr、Cd、Ni,由于很少有外源重金属元素的加入,因而在表部也表现出相对的稳定。

3.2 土壤重金属元素的地球化学形态

在区内 26 个剖面中选择了 12 个剖面的淋溶层、淀积层、母质层样品进行元素地球化学形态分析。结果发现,不同重金属元素在土壤剖面各层间的地球化学形态所占比例(平均值)存在一定的差异(图 2),特别是可交换态含量和有机态含量这两种形态可以相差数百倍。相比之下,残渣态的重金属元素含量变化差别最小,表明这种形态相对稳定。

从图 2 还可看出,每一种重金属元素地球化学形态分配的共同特点是其在淋溶层、淀积层、母质层中均显示残渣态含量所占比例最高,而可交换态含量最低(除 Cd 外,Cd 的有机态最低)。其中 Cr、Pb、Zn 在各层中的含量具有残渣态> Fe-Mn 氧化态>有机态>碳

酸盐态>可交换态的特征;但其他重金属元素中的个别地球化学形态略有差异,如 Ni 的碳酸盐态>有机态;As 的碳酸盐态> Fe-Mn 氧化态;Cd 的可交换态>有机态。需指出的是,Cu 的有机态所占比例远大于其他重金属有机态的比例,其在淋溶层、淀积层、母质层 3 层中分别达到 22.15%、20.12%、18.72%,仅次于其残渣态所占比例。在 7 种重金属元素中,Cr 的可交换态最低,其在淋溶层、淀积层、母质层中分别只占 0.05%、0.02%和 0.07%;而 Zn 的可交换态含量最高,在淋溶层、淀积层、母质层中分别达到 4.24%、4.28%、3.12%;Cd 的有机态含量较低,其在 3 层中分别只占 0.48%、0.32%和 0.18%。

总体来看,土壤各层中残渣态重金属元素的含量明显高于其他形态的重金属元素含量,此外,除 Cu、Ni 不太明显外,土壤深部各重金属残渣态所占比例较浅部高,这也反映区内重金属元素的赋存状态与母质层具有密切的相关关系,各层中大部分重金属应是由母质层中继承而来。

当然,区内重金属元素形态特征还反映出重金属的分布及其赋存状态不仅与成土母质有密切的关系,还与区域地球化学环境及人类活动有一定的影响,如区内 Cu 的有机态含量较高,说明 Cu 的赋存状态受有机质的影响,且 Cu 的有机化合物往往具有较高的络合系数^[19]。区内 Cr、Cd 的地球化学形态主要是自然形成的,人类输入很少。此外,Zn 作为农作物必需元素,人类生产过程中可能对其有一定的投入,事实上,与其他重金属元素相比,Zn 的可交换态所占比例也相对较大。

3.3 土壤中重金属元素分布的环境意义

重金属元素可经过长期不断累积而在土壤中得到富集,而由于重金属元素在土壤中的迁移能力较

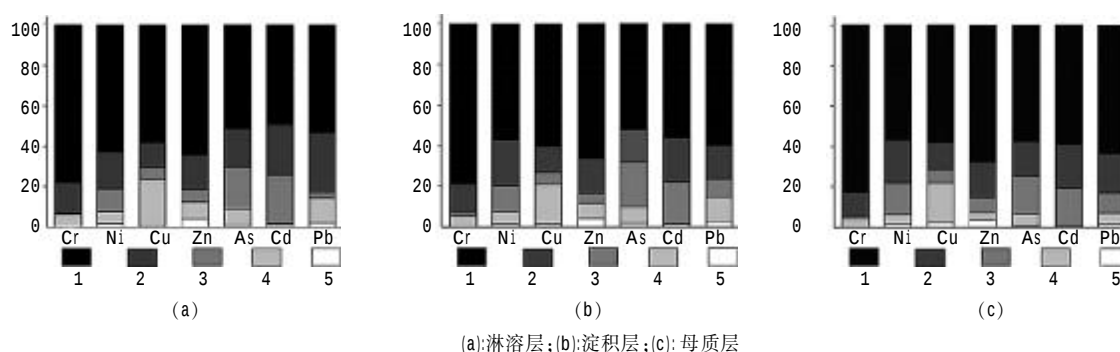


图 2 不同层位重金属元素的 5 种地球化学形态组成特征

Figure 2 Composition of 5 geochemical phases of the heavy metal elements in different horizons

弱,改造难度很大,一旦土壤重金属元素过剩,即可对土壤质量、区域环境及人类健康产生持久的影响^[20-22]。

如前所述,海南岛农业土壤中重金属元素的分布及赋存状态总体上受到土壤母质的制约,母质层重金属元素含量高,往往其淋溶层和淀积层含量也相对较高。而进一步根据区内各土壤剖面中淋溶层中各重金属元素含量与世界土壤平均值的比值进行 Q 型聚类分析发现(图 3),淋溶层中 7 种重金属元素大体可分为 3 组:Cu-Zn、Cr-Cd-Ni 和 Pb-As。结合表 1 研究可以发现,区内土壤中剖面耕作层中 7 种重金属元素中 Cr、Cd、Ni 3 种重金属相对土壤背景值来说,其元素平均含量较低,含量变异系数较小,说明这些元素含量较稳定,基本上是继承成土母质的重金属元素,即很少外源 Cr、Cd、Ni 的混入;研究区内各剖面中 Zn 含量均小于世界土壤平均值,Cu 的含量则接近世界土壤背景值,尽管 Zn 含量的变异系数较大,可能在外源重金属元素加入,但由于 Zn、Cu 为植物发育必需元素,植物吸收使土壤中的含量能基本保持平衡,且二者的含量小于世界土壤。因此,区内 Cu、Zn 对环境的影响甚小,而更主要地反映在对区域土壤质量的制约。

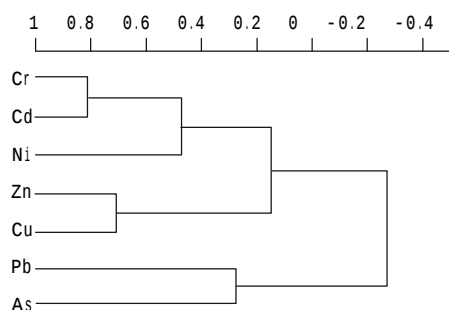


图 3 淋溶层中重金属元素组合特征

Figure 3 Heavy metal elements associations in eluvial horizons

需指出的是区内 As、Pb 平均含量相对偏高,耕作层含量高于世界土壤平均值,而且高于土壤母质层的含量。此外,耕作层中 As、Pb 平均含量的变异系数较大,反映不同剖面土壤中 As、Pb 含量变化差异较大,其原因应为耕作层中存在外源 As、Pb 的加入,且发生了一定程度的积累。事实上,区内个别剖面 As、Pb 含量已接近污染的临界值,如研究区内白沙邦溪农场砖红壤剖面淀积层 As 含量达到 $98.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,大大超过污染的临界值($45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[22],而昌江排岸村剖面浅部淋溶层的 As 含量也已达到 $49.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

区内的重金属元素 As 的来源可能与大量使用农药、化肥有关^[22,23],而区内重金属元素 Pb 可能来源于

农药及工业废气,工业废气中的铅沉淀后可直接进入土壤表层并发生富集。

从区内农业土壤剖面重金属元素分布来看,土壤表层 As、Pb 含量较高的剖面大部分分布在海南岛西部,这是由于西部较干旱,灌溉农业发达,部分重金属元素可通过灌溉而在土壤中发生积累,尽管目前大部分剖面重金属元素尚未达到污染临界值,但如果不予以足够的重视,重金属富集进一步加剧后,也可能导致环境的恶化。

4 结论

通过对海南岛几个砖红壤剖面重金属元素含量特征及变化趋势进行研究,可以得出如下几点结论:

(1)海南岛农业土壤重金属元素淋溶层和淀积层的含量变化与母质层含量变化幅度具有一定的正相关关系,土壤重金属分布在总体上受成土母质及基岩的制约,各种重金属在土壤母质层含量较稳定,但在土壤表层,由于人类的干扰,部分重金属元素如 As、Pb、Zn 等有外源的加入。

(2)区内除 Cd 以外的大多数重金属元素可能通过淋溶作用使少量重金属元素发生迁移而至淀积层中积累,并最终导致淋溶层和淀积层中的含量变化范围明显大于母质层的变化范围。

(3)重金属元素地球化学形态配分的共同特点是其在淋溶层、淀积层、母质层中均显示可交换态最低(除 Cd 外,Cd 的有机态最低),而残渣态最高。Cu 的有机态所占比例较大,赋存状态受有机质的影响较强,Cr、Cd 的地球化学形态主要是自然形成的,人类的干扰对其影响甚小。

(4)区内土壤表层 7 种重金属分布可归为 3 类:Cr、Ni、Cd 3 种重金属元素的含量普遍较低,平均含量变异系数小,其主要来源是继承母质层中,很少外源的加入;Cu、Zn 组中的 Zn 可能存在一定的外源混入,但平均含量则与世界土壤背景含量相差不大,土壤表层也未发生富集;土壤剖面中 As、Pb 含量普遍高出世界土壤的背景值,土壤表层含量变异系数大,存在外源重金属元素加入,且发生了一定程度积累,成为区内土壤环境的隐患。

参考文献:

- [1] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等.南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J].环境科学,2003,24(3):105-111.
- [2] 陈同斌,黄敏洪,黄焕忠,等.香港土壤中重金属含量及其污染现状

- [J]. 地理学报, 1997, 52(3): 228-236.
- [3] Sterckemana T, Douay F, Baizec D, et al. Factors affecting trace element concentrations in soils developed on recent marine deposits from northern France[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19: 89-103.
- [4] Ahmed F, Ishig H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3835-3844.
- [5] 张乃明. 土壤-植物系统重金属污染研究现状与展望[J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 30-33.
- [6] Mielke H W, Gonzales C R, Smith M K, et al. The urban environment and children's health: Soils as an Integrator of Lead, Zinc, and Cadmium in New Orleans, Louisiana, U.S.A.[J]. *Environmental Research Section A*, 1999, 81: 117-129.
- [7] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(1): 30-34.
- [8] Banata K M, Howarib F M, Al-Hamad A A. Heavy metals in urban soils of central Jordan: Should we worry about their environmental risks? [J]. *Environmental Research*, 2005, 97: 258-273.
- [9] 周国华, 马生明, 喻劲松, 等. 土壤剖面元素分布及其地质、环境意义[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 70-75.
- [10] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. 岩矿测试, 2001, 20(1): 34-36.
- [11] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300: 229-243.
- [12] Astrom M. The effect of acid soil leaching on trace element abundance in a medium-sized stream, W Finland[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 387-396.
- [13] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48.
- [14] Yang H, Rose N. Trace element pollution records in some UK lake sediments, their history, influence factors and regional differences[J]. *Environment International*, 2005, 31: 63-75.
- [15] Li J, Rate A W, Gilkes R J. Fractionation of trace elements in some non-agricultural Australian soils [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41: 1389-1402.
- [16] Palumbo B, Angelone M, Bellanca A, et al. Influence of inheritance and pedogenesis on heavy metal distribution in soils of Sicily, Italy[J]. *Geoderma*, 2000, 95: 247-266.
- [17] Marquesa J J, Schulze D G, Curia N, et al. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils [J]. *Geoderma*, 2004, 119: 179-195.
- [18] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [19] 袁旭音, 王爱华, 许乃政. 太湖沉积物中重金属的地球化学形态及特征[J]. 地球化学, 2004, 33(6): 611-618.
- [20] 武正华. 土壤重金属污染植物修复研究进展[J]. 盐城工学院学报, 2002, 15(2): 53-57.
- [21] 高太忠, 李景印. 土壤重金属污染物研究与治理现状[J]. 土壤与环境, 1999, 8(2): 137-140.
- [22] 张国祥, 杨居荣, 华 璐. 土壤环境中的砷及其生态效应[J]. 土壤, 1996, 2: 64-68.
- [23] 陈晶中, 陈 杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤, 2003, 35(4): 298-303.