

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.10.2014081101

王成, 李文青, 陈森, 等. 长江下游典型工农业交错区土壤重金属含量随时间变化特征[J]. 环境化学, 2015, 34(10): 1816-1822

WANG Cheng, LI Wenqing, CHEN Sen, et al. Characteristics of temporal variations of heavy metals in the soil at the industry-agriculture transition area from the lower Yangtze River region[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(10): 1816-1822

长江下游典型工农业交错区土壤重金属 含量随时间变化特征*

王成^{1**} 李文青² 陈森² 李婧² 陈红燕³
周艳文² 高小杰² 夏学齐⁴

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京, 210044; 2. 南京市环境保护科学研究院, 南京, 210013;
3. 河海大学环境学院, 南京, 210098; 4. 中国地质大学(北京), 北京, 100083)

摘要 以长江下游八卦洲工农业交错区为研究区, 研究了表层土壤2014年相对于2003年重金属等元素含量变化特征、富集机制与影响因素。结果表明, 2014年研究区土壤Cd、Zn、Cu、Cr平均含量较2003年发生显著的增加, 其增加率分别为32%、15%、14%和11%; Hg平均含量发生了显著的下降, 下降率是20%; As、Pb和Ni含量未随时间呈现出显著变化。土壤Cu、Zn、Ni、Cr、Cd和As在大多采样点表现为含量的增加; Hg在大多数采样点表现为含量降低。分析表明, 重金属富集范围和程度的变化主要受研究区周围工业分布以及调整的影响, 大气沉降是土壤Cd、Cu、Zn、Cr、Ni等重金属富集加强最主要的贡献因子, 而土壤Hg含量的降低主要与Hg的地球化学行为特性以及产业结构调整有关。土壤重金属富集不仅与外源物质输入有关, 元素本身的地球化学性质和行为导向也是非常重要的影响因素。

关键词 重金属, 富集, 污染源, 含量变化。

Characteristics of temporal variations of heavy metals in the soil at the industry-agriculture transition area from the lower Yangtze River region

WANG Cheng^{1**} LI Wenqing² CHEN Sen² LI Jing² CHEN Hongyan³
ZHOU Yanwen² GAO Xiaojie² XIA Xueqi⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China;
2. Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing, 210013, China;
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 4. China University of Geosciences, Beijing, 100083, China)

Abstract: An industry-agriculture transition area from the lower Yangtze River region was selected to study the variations of heavy metals in the soil and the mechanism of enrichment. The results show that the concentrations of Cd, Zn, Cu and Cr increased significantly in 2014 relative to 2003, and the rate of increase was 32%, 15%, 14% and 11% respectively. The concentration of As, Pb and Ni presented no significant change, and the concentration of Hg presented significant decrease. Most of the sampling sites show an increase in the concentrations of Cu, Zn, Ni, Cr, Cd and As. Only 20% of samples showed in creased concentration of Hg. The changes of rates and ranges of heavy metals enrichments were affected by the adjustment of industry sectors, and the atmospheric deposition may be the most important contribution to soil Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, etc enrichment. The decrease of soil Hg concentration may be related to the specific geochemical behavior and the

2014年8月11日收稿。

* 南京环保科技项目(201306); 南京信息工程大学人才启动基金; 国家地质实验测试中心基本科研业务费专项经费(2013CSG-K04); 国土资源部公益性行业科研专项经费(201111021); 国家自然科学基金(40873081)资助。

** 通讯联系人, E-mail: wangcheng118@163.com

relocation of mercury-related enterprises. The results of the present study imply that the soil heavy metal enrichment is not only related to the exterior matter import such as atmospheric deposition, but also influenced by their geochemical characteristics.

Keywords: heavy metals, enrichment, pollution source, variation.

自人类进入工业社会以来,加强的人为活动给地表环境带了许多外源性物质输入,造成了土壤等系统物质平衡的破坏^[1-2].地表系统中,土壤重金属富集(或污染)以其高生态风险倍受人们关注^[3-5].长时间的外源物质输入极有可能造成表层土壤中重金属富集,从而引起重金属生态风险增加,对生物健康构成威胁.

前人围绕世界各地工农业交错区土壤重金属富集的大量研究表明,土壤重金属富集主要是工业污染源扩散通过大气沉降引起的^[6-7].近来,一些学者开始研究土壤重金属富集的机理以及利用数理模型定量污染源对重金属富集的贡献^[7-9].但是,研究土壤重金属富集有一个非常重要但又让人无奈的一环——过去样品数据难以获得,因此,对土壤重金属含量时空变化特征的研究甚为缺乏.

长江下游地区是我国重要的工业带,同时也是传统的农业生产基地.尽管针对长江下游土壤重金属富集已经做了一些调查研究^[10-12],基本明确了长江下游重金属富集的地域范围和程度^[13].但是已有研究多停留在环境污染调查和污染源分析上,缺乏时间序列的对比,对重金属时空变化特征研究不足;而土壤元素时空变化特征是最能反映重金属富集趋势和机制的研究内容之一.

位于长江下游河流走向拐点的八卦洲地区是典型的工农业交错区.八卦洲以北地区分布着南京钢铁集团、南京化工集团等大型企业,以南地区在上个世纪至本世纪初也分布着一些化工、氯碱、冶炼、涂料、电器、仪表等企业.随着产业结构的调整,近几年八卦洲以南地区原先的污染型企业陆续关停或搬迁,但是以北地区的钢铁、化工重工业依然存在,使得八卦洲成为一个研究工农业交错区土壤重金属富集变化特征和产业结构调整对土壤环境影响的代表性区域.

2003年,中国地质调查局生态地球化学调查项目曾在八卦洲采集过一些土壤样品并进行了重金属和主量元素分析^[12].鉴于此,本文于2014年再次对这些采样点采样,选择八卦洲地区来研究土壤重金属的时空变化特征,拟为土壤环境污染治理提供技术支持,同时促进土壤重金属富集机制的研究.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据2003年中国地质调查局生态地球化学调查的数据资料,2014年在长江下游八卦洲地区借助GPS再次勘查了当年的采样点(为保持可对比性,2003年样品采集除用GPS定位外,在采样点也做出了标识),并采集了24件表层土壤(0—20 cm).在每个采样点,利用铁锹采集4件土壤分样(“十”字采样法)充分混合成1件表层土壤样品,置于样品布袋中,运回实验室进行预处理.土壤样品首先自然风干,过2 mm尼龙筛去除土壤中较大的碎屑、石块等杂物.过筛后的土壤在玛瑙研钵中研磨至 < 0.074 mm,储存备化学分析.

1.2 分析方法

为保持2014年样品与2003年样品在测试分析的一致性以及减少系统误差,两期样品分析在同一实验室严格按照《中国地质调查局地质调查技术标准》进行.土壤pH值用pH计在土液(水)比为1:2.5的条件下测试^[14].土壤K、Fe、Mn、S和P含量利用粉末压片XRF法测试.对于微量元素Zn、Cu、Ni、Cr、Pb和Cd含量的测试,首先利用HCl-HNO₃-HClO₄-HF四联酸对土壤粉末样品消解,然后Zn、Cu、Ni、Cr用ICP-OES分析完成,Pb、Cd用ICP-MS分析.Hg和As用王水溶样,KBH₄还原、氢化法处理,含量用原子荧光光谱法(AFS)检测^[14].TOC利用重铬酸钾氧化+氧化还原容量法分析^[15].

分析数据质量采用中国标准物质(BW07402和GBW07406)控制.检测数据精密度符合中国地质调查局生态地球化学调查标准和规范的要求.标准偏差(RSD)Cd为0.3%—0.7%,TOC、N和S为 $< 5.0\%$,其它元素 $< 3.0\%$.Pb和Cd的检出限分别为 $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,符合《中国地质调查局地质调查技

术标准》关于生态地球化学评价样品分析技术要求。

1.3 统计分析

文中数据统计分析用 SPSS 18 完成,地图绘制用 ArcGIS 9 完成。

2 结果与讨论

2.1 表层土壤重金属含量

表 1 给出了 2014 年采集的 24 件土壤样品的重金属与相关主量元素含量。土壤 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 平均含量分别为 48.99、114.14、43.47、92.98、34.26、0.41、11.28、0.08 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。除 Ni、As 和 Hg 稍低于当地背景值外,其余重金属平均含量均超过相应的当地土壤背景值^[16]。为研究元素富集变化特征,本文将元素含量超过背景值的样品占全部样品的比例定义为该元素的土壤相对富集率(以下简称富集率)。对重金属 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd 来说,富集率都在 70%以上,其中对 Cr、Pb 和 Cd 为 95%以上,表明重金属 Cu、Zn、Cr、Pb 和 Cd 在当地表层土壤中出现了大范围的富集,且外源物质输入应是富集的主要来源。而对 Hg 来说,只有 1 件样品的含量超过当地 Hg 背景值,且 2014 年土壤 Hg 平均含量明显低于背景值。

表 1 土壤重金属、相关元素含量及变化情况

Table 1 The concentrations of heavy metals and other relevant parameters in the soil

元素	2014 年重金属以及相关元素				2003 年含量 平均值	$\Delta(2014-2003)$		增长率 平均值/%	当地 背景值
	平均值	最大值	最小值	富集率/%		平均值	标准方差		
Cu	48.99 ^b	63.10	19.10	75	43.99	5.00	12.68	14	43.9
Zn	114.14 ^b	140.80	67.00	71	100.05	14.09	21.97	15	102
Ni	43.47 ^a	53.60	24.40	33	40.30	3.17	8.83	10	48
Cr	92.98 ^b	113.20	66.40	96	84.77	8.21	16.080	11	70
Pb	34.26 ^a	46.50	23.00	96	34.55	-0.29	8.091	3	26.4
Cd	0.41 ^b	0.90	0.23	100	0.33	0.08	0.16	32	0.19
As	11.28 ^a	14.131	4.282	63	10.78	0.51	2.63	7	11.4
Hg	0.08 ^b	0.19	0.03	4	0.11	-0.03	0.04	-20	0.12
Fe	4.42	5.34	2.87	/	4.72	-0.30	0.78	-5	/
K	2.33	2.78	1.70	/	2.19	0.14	0.33	7	/
Mn	0.76	1.00	0.46	/	0.79	-0.02	0.18	-1	/
P	1.40	1.97	0.77	/	0.90	0.50	0.31	59	/
S	0.30	0.55	0.22	/	0.19	0.11	0.09	69	/
TOC	1.41	2.40	0.59	/	1.18	0.23	0.50	31	/
pH	6.87	7.94	4.59	/	7.72	-0.85	1.14	-11	/

注:重金属元素含量单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Fe、K 和 TOC 为%, Mn、S 和 P 为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。^a, 两期样品(2003 年和 2014 年)方差分析不存在显著差异;^b, 两期样品方差分析存在显著差异。富集率为 2014 年超过背景值样品所占全部样品的比例(%). 元素增长率为该元素的 $\Delta(2014-2003)$ 除以该元素 2003 年的量。

2.2 表层土壤重金属含量变化特征

2003 年,江苏生态地球化学调查项目曾在本文选择的 24 个采样点采集过对应的表层土壤样品。将本文的测试分析结果与 2003 年的分析结果对比^[17],可以得到采样点土壤重金属等元素含量的变化量与变化率(表 1)。从两期土壤样品方差分析结果看,Hg、Zn、Cd、Cr 和 Cu 含量存在显著差异,而 As、Pb 和 Ni 差异不显著。就研究区平均水平来说,相对于 2003 年,2014 年土壤 Zn、Cu、Cr、Cd、S、P、TOC 含量显著增加,其增加量(增加率)分别为 14.09 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (15%)、5.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (14%)、8.21 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (11%)、0.08 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (32%)、0.11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (69%)、0.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (59%)、0.23% (31%); Ni 和 As 平均含量轻微增加,增加率低于 10%; Pb 和 Mn 平均含量没有明显变化; Fe 平均含量轻微减少; Hg 平均含量和 pH 平均水平发生了明显的下降,下降量(下降率)分别是 0.03 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (20%) 和 0.85 (11%)。从元素含量的变化率和地球化学意义角度看,代表自然端元的 Fe、Mn 和 K 变化率小于 8%,而反映人为活动的元素因子 S、P 和

TOC 变化率在 30%—70%, 这表明人为活动主导研究区土壤元素含量的变化。

图 1 给出了研究区采样点表层土壤 2014 年重金属以及相关元素相对于 2003 年的变化情况。对 Cu、Zn、Ni、Cr 和 As 来说, 除位于西部的点位多表现为含量的下降外, 其它采样点多表现为增加。



图 1 采样点土壤重金属以及相关元素含量变化(2003,2014 年)

重金属元素含量单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Fe、K 和 TOC 单位为%, Mn、S 和 P 单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Fig.1 Variations of concentrations of heavy metals and relevant elements in the soil (2003,2014)

Pb 除位于研究区中部高速公路两侧的点外,在大多数点位表现出含量的降低.Cd 除在西部和东南地区的表层土壤含量明显降低外,在其它地区的土壤含量明显增加.K 和 TOC 主要在西部表现出含量的降低,在其它地点表现为含量增加.S 和 P 在大多数采样点土壤中的含量表现出明显的增加.Fe 在多数采样点土壤的含量表现出降低.研究区除个别点外,大部分采样点的土壤 pH 都呈现下降,尤其是东南地区,下降量在全区平均水平 0.85 以上,说明研究区表层土壤发生了明显的酸化.

2.3 土壤重金属富集变化特征与机制

上文分析结果表明,2014 年研究区表层土壤出现了 Cd、Cr 和 Pb 的大范围富集(富集率 90%以上),其次是 Cu 和 Zn(富集率 70%以上),As 和 Ni 也出现了一定范围的富集,仅一个采样点出现了 Hg 富集.土壤重金属的富集往往是外源性物质长期输入的结果.根据中国地质调查局生态地球化学调查结果^[17],以当地背景值为依据,研究区表层土壤在 2003 年就已经出现了 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 的大范围富集(富集率 50%以上),Hg 和 As 一定范围的富集(富集率约 30%)以及 Ni 在个别点富集(富集率 8%).对比 2014 年与 2003 年研究区表层土壤中的重金属富集情况,除 Cd 的富集率为 100%不变、Hg 富集率从 33%下降到 4%外,其余重金属的富集率均呈增长趋势(图 2).

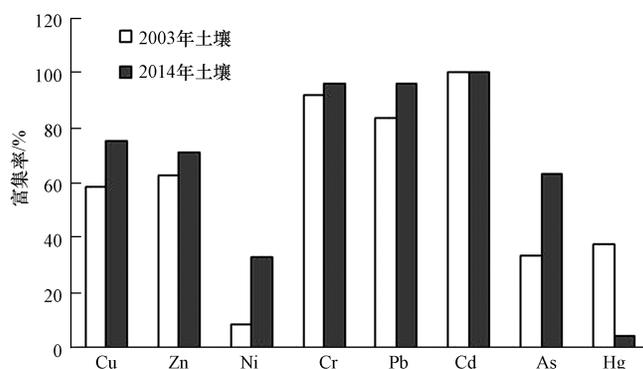


图 2 2014 年与 2003 年土壤重金属富集情况对比
富集率:含量超过背景值的样品数量占全部样品量的比例.

Fig.2 Comparison on heavy metals enrichment in the soil between 2014 and 2003

8 种重金属中,以 Cd 富集最为突出,100%的样品富集率,且 2014 年表层土壤 Cd 平均含量较 2003 年增加了 $0.08 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (方差分析呈显著差异),平均增长率达 32%.这暗示了研究区土壤圈外的 Cd 源仍在源源不断地向表层土壤输入 Cd,没有衰减.一般来说,表层土壤中镉的外源主要有大气降尘、煤灰、污水灌溉、工业固体废弃物的不当堆置引起的扩散、矿业活动等^[2,18].结合实际区域调查,研究区最主要的 Cd 外源应该是受粉煤灰源扩散影响的大气降尘,因为化肥、农药等输入的量远远小于大气沉降重金属通量,且研究区采样点周围不存在污水灌溉、工业废弃物堆积等.研究区周围存在较多的燃煤设备(炼钢、火电),煤灰是土壤和大气重金属最重要常见污染源头之一^[2],对大气沉降的成分有重要影响.根据江苏省地质调查研究院提供的 2013 年研究区大气沉降 Cd 通量数据,由于湿沉降输入到表层土壤的 Cd 为 $4.7\text{--}11.0 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ($n=5$),平均 $7.2 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;Cd 沉降通量可以与 1986—1988 年间甘肃白银有色金属基地附近农田的通量水平($10.8 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)相比较^[19].由此可见,大气沉降是研究区土壤 Cd 富集最主要的起因.

从元素富集变化特征看,另一比较特殊的重金属是 Hg.无论是富集率的变化还是含量增长率的变化,Hg 都不同于其它重金属:相对于 2003 年,Hg 富集范围在 2014 年出现了缩小,且大多数采样点土壤 Hg 含量都出现了显著降低(表 1,图 1).这与 Hg 相对特殊的地球化学行为特征以及研究区周围工业变迁有直接关系.工农业交错区土壤中 Hg 的外源输入主要是工业生产废料扩散(通过大气沉降)^[2].研究区周围在上个世纪 80—90 年代曾分布一定规模的氯碱、冶炼、涂料、电器、仪表、农药、化工等企业,这些是众多工业中涉 Hg 排放的主体行业,很可能是研究区上个世纪土壤 Hg 富集的主要源头.但是近 10 年来,由于产业结构调整等原因,这些企业先后迁离八卦洲附近周边地区,使得 Hg 外源输入明显减少.另外,Hg 是一种易挥发元素,易流动,常态下土壤中的 Hg 容易转成气态扩散开^[20];这也许是研究区表层

土壤 Hg 含量下降最直接的原因。

2014 年 Cu、Zn、Ni 和 Cr 的富集范围和程度较 2003 年表现为增强,说明与这些元素紧密关联的人为活动仍没有明显减弱。虽然过去 10 年中研究区周围关停搬迁了许多化工、涂料、电器等污染源企业,但是与 Cu、Zn、Ni 和 Cr 密切相关的钢铁、冶金、化工等大型企业仍存在,尤其是在研究区以北地区。As 和 Pb 的富集率表现为增加,但两期样品含量未有显著差异。这种 As 和 Pb 较 Cu、Zn、Ni 和 Cr 稍弱的富集范围扩大也是研究区工业结构调整的结果,涉 As 和 Pb 等毒性元素的主要行业基本搬离了研究区,而涉 Cu、Zn、Ni 和 Cr 的钢铁和化工企业仍存。Cu、Zn 等重金属在南京工业区大气沉降中强烈富集,2005—2008 年间大气沉降 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的浓度分别是 189.9、1294.6、135.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 60.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[6],远高于南京郊区及市区,也高于兰州和哈尔滨大气沉降相应重金属浓度^[6]。由此可见,研究区土壤重金属富集主要是受大气沉降重金属含量和沉降量的共同影响。

2.4 土壤重金属富集的元素地球化学关系与影响因素

主成分分析(PCA)通常可以用来讨论各种变量之间的内在联系。在土壤环境学分析中,PCA 常被用来分析元素之间的地球化学行为内在联系和物质来源^[7]。表 3 为 24 个土壤元素变化量主成分分析的结果。主成分分析通过旋转方差处理,将所有参数共分出 3 组,3 组成分解释了 87.65% 的方差总量。

第一主成分包括 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、As、Fe、K。Fe 和 K 通常是土壤成土过程的稳定性元素,被视为自然地质因子^[7]。Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、As 与 Fe、K 分在第一因子,说明这些重金属在研究区土壤中的存在形式与 Fe、K 有密切关系,受 Fe 和 K 影响显著,这也符合元素地球化学行为特征的基本解释。第二主成分包括 Cd、Hg、Mn、pH、P,反映 Cd 和 Hg 主要与 Mn 多价阳离子元素关联性突出,在土壤中的存在显著受 Mn、pH 和 P 的影响。大量研究表明,Cd 在土壤中与 P 关系密切,常与磷酸盐形成络合物,P 对 Cd 存在和活性有重要影响^[21-22]。而本文发现 Hg 也与 Mn、P 这些变价元素有显著关系。另外,从上文分析中,可以看出 Hg 和 Cd 的土壤富集特征以及变化趋势明显不同于其它重金属。以上这些说明研究区土壤中 Hg 和 Cd 不同于其它元素的富集机制,它们的富集不仅与物质来源有关,更重要的是受元素本身地球化学性质和行为导向的影响。第三主成分包括 S 和 TOC,反映了与人为活动中与有机质相关的因子和地球化学行为联系。

表 2 土壤重金属主成分分析
Table 2 Principal component analysis on soil parameters

	旋转成分矩阵		
	第一主成分	第二主成分	第三主成分
增长量 Pb	0.796	0.387	0.280
增长量 Zn	0.945	-0.027	0.163
增长量 Cu	0.950	0.141	0.192
增长量 Cr	0.937	-0.087	0.163
增长量 Ni	0.967	0.034	0.158
增长量 As	0.891	0.293	0.050
增长量 Hg	0.394	0.810	0.158
增长量 Fe	0.976	0.069	0.161
增长量 Mn	0.162	0.882	0.041
增长量 K	0.950	-0.096	0.223
增长量 Cd	0.306	0.837	0.308
增长量 P	0.243	-0.669	0.053
增长量 S	0.144	0.140	0.931
增长量 pH	-0.612	0.733	0.072
增长量 TOC	0.577	0.143	0.696

3 结论

与当地背景值相比较,八卦洲地区土壤重金属(Hg 除外)出现了富集,2014 年土壤 Cu、Zn、Cr、Pb 和

Cd 超过当地背景值的样品数量均达 70% 以上. 重金属富集并不是过去 10 年的产物, 而是长期的积累造成的. 统计分析表明, 2014 年研究区土壤 Cd、Zn、Cu、Cr 平均含量较 2003 年发生显著的增加, 其增加率分别为 32%、15%、14% 和 11%; Hg 平均含量和 pH 发生了显著的下降, 下降率分别是 20% 和 11%; As、Pb 和 Ni 含量未随时间呈现出显著变化. Cu、Zn、Ni、Cr、Cd 和 As 在大多采样点表现为含量的增加, Hg 在大多数采样点出现了含量的降低. 土壤重金属富集范围和程度的变化主要受研究区周围工业分布以及调整的影响, 大气沉降是土壤 Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 等重金属富集加强最主要的贡献因子, 而土壤 Hg 含量的降低主要与 Hg 的地球化学行为特性以及当地产业结构调整有关. 土壤重金属富集不仅与外源物质输入有关, 元素本身的地球化学性质和行为导向也是非常重要的影响因素.

参 考 文 献

- [1] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194
- [2] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [3] 谢小进, 康建成, 闫国东, 等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8): 1110-1117
- [4] 林啸, 刘敏, 侯立军, 等. 上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 613-618
- [5] Wang C, Ji J, Yang Z, et al. The contamination and transfer of potentially toxic elements and their relations with iron, vanadium and titanium in the soil-rice system from Suzhou region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 13-21
- [6] 李山林, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 22-29
- [7] 骆永明. 长江、珠江三角洲土壤及其环境[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [8] Wang C, Wang J, Yang Z, et al. Characteristics of lead geochemistry and the mobility of Pb isotopes in the system of pedogenic rock-pedosphere-irrigated riverwater-cereal-atmosphere from the Yangtze River delta region, China[J]. Chemosphere 2013, 93(9): 1927-1935
- [9] 廖启林, 华明, 金洋, 等. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1163-1174
- [10] 廖启林, 刘聪, 金洋, 等. 江苏省域土壤元素地表富集及其与人为活动的关系研究[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 1-14
- [11] 邵学新, 黄标, 赵永存, 等. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J]. 环境化学, 2008, 27(2): 218-221
- [12] 夏学齐, 陈骏, 廖启林, 等. 南京地区表土镉汞铅含量的空间统计分析[J]. 地球化学, 2006, 35(1): 95-102
- [13] 成杭新, 杨忠芳, 奚小环, 等. 长江流域沿江镉异常源追踪与定量评估的研究框架[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 261-272
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [15] 中华人民共和国行业标准(LY/T1237—1999). 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 1999
- [16] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987
- [17] 夏学齐. 苏南沿江地区镉生态地球化学特征及其反射光谱研究[D]. 南京: 南京大学博士论文, 2007
- [18] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature, 333(12): 134-139
- [19] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995
- [20] Gabriel M C, Williamson D G. Principal biogeochemical factors affecting the speciation and transport of mercury through the terrestrial environment[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26: 421-434
- [21] Song Y C, Sivakumar S, Nguyen T T, et al. The immobilization of heavy metals in biosolids using phosphate amendments—Comparison of EPA (6010 and 3051) and selective sequential extraction methods[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167: 1033-1037
- [22] 陈苗苗, 张桂银, 徐明岗, 等. 不同磷酸盐下红壤对镉离子的吸附-解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1578-1584