

江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究

廖启林 华 明 金 洋 黄顺生 朱伯万 翁志华 潘永敏

(江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要:以 24 186 个表层土壤(0~20 cm)和 6 127 个深层土壤(150~200 cm)样品之 Cd、Hg、Pb、As 等含量数据为基础,研究了江苏全省土壤环境的重金属分布与主要污染特征。结果表明,全省自然土壤环境与人为活动土壤环境的重金属元素分布都不均匀,但人为活动土壤环境中的不均衡程度远高于自然土壤环境;全省农田中有 1.02% 的土壤受到 Cd、Hg、Pb 等 8 种重金属的严重污染,苏州市、无锡市土壤环境被重金属污染的程度相对严重;工业化、城市化进程中的人为活动及自然地质作用都是引起江苏局部土壤重金属污染的重要原因,自然成因的重金属污染土壤多呈面状、多元素、低强度、双层污染等特点,从而与人为成因的重金属污染土壤有所区别。

关键词:土壤;重金属;分布特征;污染机理;江苏省

中图分类号:P596, X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)05-1163-12

土壤中重金属的富集可以形成环境污染,对植物生长安全及人体健康等构成直接危害^[1-2]。探讨土壤环境的重金属分布与污染问题一直是现代环境地球化学十分关注的一个热点,国内外最近 10 年来都有众多学者在持续研究这方面的问题^[1-12]。重金属是指比重大于 5.0g/cm³ 的金属元素,包括 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Co、Sn 等^[1]。As 是一个半金属元素,但因为其化学性质与地球化学环境行为同重金属元素十分相似,在环境学领域也通常将 As 归为重金属的研究范畴。Fe、Mn 因为在土壤中的含量通常很高,形成局部土壤环境污染的可能性较小,在环境上更看重 Fe、Mn 的营养价值。因此,中国土壤环境学界通常所指的重金属主要包括 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Ni、Co、Sn 等,还于 1995 年颁布了 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Ni 等 8 个重金属元素的中国《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)。进入 21 世纪以来,中国地质调查局推动并组织全国多个省、市、区完成了 160 万 km² 的 1:250 000 多目标区域地球化学调查,开启了从区域地球化学调查角度

研究土壤重金属行为的一个新时代,也为地质科技人员研究土壤重金属的环境地球化学特征提供了机遇,像一些反映国家层面地质调查工作的地学期刊也常有此类文献发表^[2,6-7]。

江苏地处中国东部,位居淮河和长江下游,为南方热带、亚热带向北方温暖带、温带气候过渡的地带,交通便利,工农业生产相对都比较发达。全省国土面积 10.26 万 km²(不含海域),地貌以平原为主,最高海拔仅 625.3 m,湖荡众多、海陆相邻,大致可分为徐淮黄泛平原、里下河浅洼平原、太湖水网平原、宁镇扬丘陵岗地等 7 大地貌单元。全省基岩出露范围不足其国土面积的 20%,第四系特别发育,主要包括全新统和上更新统,地表大多发育有一定厚度的土壤。全省土壤类型主要有水稻土、潮土、滨海盐土、沼泽土、红壤、紫色土、石灰岩土等。

江苏已经在全国率先完成了其全部国土的 1:250 000 多目标区域地球化学调查,按照取样深度 0~20 cm、1 km² 采集 1 个样品、4 km² 分析 1 个组合样的网度共分析测试全省表层土壤样品 24 186 个,

收稿日期:2009-07-03;改回日期:2009-08-10

基金项目:国家自然科学基金(40873081)和江苏省人民政府与国土资源部合作项目(200312300008)共同资助。

作者简介:廖启林,男,1964 年生,博士,研究员级高级工程师,地球化学与矿床学专业,现主要从事生态地球化学调查研究;

E-mail:liaoqilin64@jssmail.com.cn。

按照采样深度 150~200 cm、4 km² 采集 1 个土样、16 km² 分析 1 个组合样的网度共分析测试其深层土壤样品 6 127 个, 一次性获取全省土壤环境 30 313 个样品的 54 项指标的系统地球化学调查数据, 初步掌握了全省地表物质组成特征的“家底”资料, 笔者曾多次报道过这一工作的有关成果^[13-16]。笔者将以上述调查所获的重金属元素含量分析数据为基础, 结合有关背景资料, 对江苏省土壤环境的重金属分布特点及其局部污染的来源问题做一浅析。

1 江苏省土壤重金属含量分布特征

土壤环境有人为(活动)和自然环境之分, 一般表层土壤(0~20 cm 深度)重金属含量分布代表了人为活动环境, 而深层土壤(150~200 cm 深度)重金属含量分布则主要反映了自然环境。表 1 对比了江苏全省土壤人为活动与自然环境的 As、Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、Co、Sn 等 10 个重金属元素的含量分布参数统计结果, 从中可以看出:

(1) 江苏深、表层土壤的重金属含量分布不均, 最大值与最小值的差值较大。深层土壤中 Hg 元素含量变异系数(Cv)高达 3.58, 其余重金属元素 Cv 都接近或小于 0.5, 指示全省自然环境土壤中重金属 Hg 分布极不均匀。表层土壤中 Cd、Hg、Pb、Sn 的元素含量变异系数(Cv)都远大于 0.5, 以 Sn 的 Cv 最高, 达 4.55, 表明人为活动土壤环境中部分重金属元

素分布相对更不均匀。

(2) 表层土壤同深层土壤相比, Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、Sn 等元素平均含量明显在表层土壤偏高, 显示人为活动导致这些重金属在表层土壤出现了明显富集, 以 Cd、Hg、Sn 地表相对富集最强烈。

(3) 相对目前发布的全国土壤元素背景值^[17]而言, 全省深层土壤各重金属元素平均含量除 Cr 偏高外, 其他重金属元素平均含量基本接近其土壤的背景含量, As 的平均含量还略低于其全国土壤背景含量。但表层土壤的 Cd、Hg 等重金属平均含量远高于其全国土壤背景值, 也显示了人为活动因素对江苏表层土壤的 Cd、Hg 等重金属分布有极显著影响。

不同地貌单元之间的土壤重金属含量分布也有明显差异。江苏全省从北向南分为沂沭丘陵平原、徐淮黄泛平原、里下河浅洼平原、苏北滨海平原、长江三角洲平原、太湖水网平原、宁镇扬丘陵岗地等 7 大地貌单元, 表 2 列出了上述 7 地貌单元土壤中有关重金属元素的平均含量(X)与变异系数(Cv), 发现沂沭丘陵平原深层土壤中 As、Cr、Ni、Co 等重金属元素的平均含量明显高于其表层土壤, 显示这一带自然成土过程中相对富集了 As、Cr、Ni、Co 等重金属元素, 这一片也正是苏鲁造山带(超高压变质带)所在地, 其地质背景与周边存在较大差异。长江三角洲平原与太湖水网平原表层土壤的 Cd、Hg、Pb、Zn、Sn 等元素平均含量普遍偏高, 而且也高于当地深层土

表 1 江苏省土壤重金属元素含量(mg/kg)分布参数统计

Table 1 Statistical parameters of heavy metals distribution in soils of Jiangsu Province

| 元素 | 深层土壤 (150~200 cm 深度) | | | | | | 表层土壤 (0~20 cm 深度) | | | | | | 全国背景 |
|----|----------------------|------|----------|-----------|-------|------|-------------------|------|----------|-----------|-------|------|-------|
| | Min | Max | $X_{\#}$ | \bar{X} | S | Cv | Min | Max | $X_{\#}$ | \bar{X} | S | Cv | |
| As | 1.51 | 319 | 9.7 | 9.9 | 5.8 | 0.58 | 2.15 | 245 | 9.1 | 9.4 | 3.8 | 0.41 | 11.5 |
| Cd | 0.018 | 0.9 | 0.081 | 0.092 | 0.044 | 0.48 | 0.033 | 22.8 | 0.13 | 0.151 | 0.182 | 1.20 | 0.084 |
| Hg | 0.003 | 6.85 | 0.023 | 0.032 | 0.114 | 3.58 | 0.005 | 8.09 | 0.045 | 0.082 | 0.138 | 1.68 | 0.044 |
| Pb | 2.9 | 693 | 22.0 | 22.6 | 11.3 | 0.50 | 11.4 | 1932 | 25.5 | 26.8 | 21.6 | 0.81 | 24.7 |
| Cu | 4.47 | 253 | 24.0 | 24.0 | 8.0 | 0.34 | 5.89 | 756 | 25.0 | 26.0 | 11.0 | 0.43 | 23.1 |
| Zn | 21.2 | 1040 | 64.0 | 66.0 | 20.0 | 0.30 | 18.3 | 1021 | 69.0 | 73.0 | 26.0 | 0.36 | 71.1 |
| Cr | 14.5 | 351 | 76.0 | 76.0 | 15.0 | 0.19 | 16.6 | 508 | 74.8 | 76.0 | 15.0 | 0.20 | 60.8 |
| Ni | 8.2 | 162 | 32.8 | 33.7 | 10.4 | 0.31 | 1.6 | 238 | 31.4 | 32.9 | 11.4 | 0.35 | 28.6 |
| Co | 2.24 | 131 | 14.0 | 15.2 | 7.7 | 0.51 | 2.41 | 91.8 | 13.0 | 13.7 | 4.0 | 0.29 | 13.4 |
| Sn | 0.86 | 24 | 3.1 | 3.16 | 0.85 | 0.27 | 1 | 2835 | 3.7 | 5.32 | 24.24 | 4.55 | |

注: 深层土壤参与统计样品数 6 127 个, 表层参与统计样品数 24 186 个; Min 为最小值(最低含量), Max 为最大值(最高含量), $X_{\#}$ 为中值, \bar{X} 为算术平均值(或含量), S 为标准离差, Cv 为变异系数; 全国背景即全国土壤元素含量背景值, 引自文献^[17], 空白表示缺资料。

表 2 江苏省不同地貌单元土壤重金属元素平均含量(mg/kg)与变异系数对比
Table 2 Mean content (mg.kg⁻¹) and variation coefficients of heavy metals in soils from
7 geomorphic units in Jiangsu

| 地貌单元 | 土壤分层 | 参数 | As | Cd | Hg | Pb | Cu | Zn | Cr | Ni | Co | Sn |
|---------|--------|----|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 沂沭丘陵平原 | 深层土 | X | 12.0 | 0.088 | 0.021 | 31.2 | 25 | 65 | 79 | 41.7 | 24.5 | 3.01 |
| | (588) | Cv | 0.40 | 0.56 | 0.58 | 0.39 | 0.28 | 0.28 | 0.29 | 0.40 | 0.75 | 0.15 |
| | 表层土 | X | 8.9 | 0.112 | 0.032 | 29.1 | 23 | 61 | 70 | 32.8 | 15.6 | 3.25 |
| | (2292) | Cv | 0.40 | 1.65 | 1.00 | 0.57 | 0.38 | 0.58 | 0.29 | 0.38 | 0.39 | 0.25 |
| 徐淮黄泛平原 | 深层土 | X | 11.1 | 0.093 | 0.022 | 21.1 | 22 | 60 | 69 | 30.4 | 13.9 | 2.83 |
| | (1383) | Cv | 0.30 | 0.31 | 6.43 | 0.28 | 0.40 | 0.23 | 0.19 | 0.29 | 0.44 | 0.17 |
| | 表层土 | X | 11.1 | 0.149 | 0.034 | 23.8 | 25 | 68 | 73 | 32.1 | 13.4 | 3.33 |
| | (5517) | Cv | 0.27 | 0.33 | 0.95 | 0.23 | 0.57 | 0.27 | 0.14 | 0.25 | 0.28 | 0.28 |
| 里下河洼平原 | 深层土 | X | 9.2 | 0.078 | 0.028 | 22.7 | 25 | 69 | 81 | 34.6 | 14.4 | 3.27 |
| | (814) | Cv | 0.32 | 0.33 | 0.53 | 0.17 | 0.18 | 0.16 | 0.12 | 0.16 | 0.17 | 0.15 |
| | 表层土 | X | 8.7 | 0.133 | 0.062 | 25.9 | 27 | 74 | 81 | 34.6 | 13.6 | 4.43 |
| | (3257) | Cv | 0.29 | 0.31 | 0.70 | 0.13 | 0.19 | 0.27 | 0.11 | 0.17 | 0.16 | 0.38 |
| 苏北滨海平原 | 深层土 | X | 9.5 | 0.089 | 0.022 | 19.5 | 21 | 67 | 72 | 30.7 | 12.8 | 2.89 |
| | (932) | Cv | 0.44 | 0.34 | 0.41 | 0.24 | 0.34 | 0.26 | 0.16 | 0.25 | 0.24 | 0.14 |
| | 表层土 | X | 9.6 | 0.128 | 0.039 | 21.9 | 23 | 72 | 73 | 32.2 | 12.7 | 4.12 |
| | (3675) | Cv | 0.46 | 0.31 | 1.15 | 0.32 | 0.32 | 0.26 | 0.14 | 0.29 | 0.25 | 1.77 |
| 长江三角洲平原 | 深层土 | X | 6.7 | 0.123 | 0.047 | 18.9 | 21 | 67 | 74 | 29.5 | 12.9 | 3.15 |
| | (754) | Cv | 0.73 | 0.52 | 0.60 | 0.27 | 0.43 | 0.23 | 0.13 | 0.20 | 0.20 | 0.25 |
| | 表层土 | X | 8.0 | 0.183 | 0.115 | 25.5 | 27 | 82 | 76 | 31.0 | 12.9 | 6.86 |
| | (2923) | Cv | 0.38 | 0.57 | 1.13 | 1.11 | 0.38 | 0.28 | 0.15 | 0.25 | 0.22 | 4.33 |
| 太湖水网平原 | 深层土 | X | 9.2 | 0.082 | 0.060 | 23.9 | 27 | 69 | 83 | 35.2 | 14.7 | 3.75 |
| | (793) | Cv | 0.45 | 0.33 | 4.09 | 0.34 | 0.19 | 0.17 | 0.12 | 0.17 | 0.16 | 0.37 |
| | 表层土 | X | 8.5 | 0.194 | 0.236 | 34.9 | 31 | 85 | 81 | 33.5 | 13.2 | 11.67 |
| | (3090) | Cv | 0.27 | 2.22 | 0.99 | 1.20 | 0.31 | 0.34 | 0.13 | 0.20 | 0.15 | 5.15 |
| 宁镇扬丘陵岗地 | 深层土 | X | 11.3 | 0.094 | 0.030 | 24.5 | 29 | 69 | 84 | 38.0 | 16.5 | 3.42 |
| | (854) | Cv | 0.98 | 0.69 | 1.02 | 0.96 | 0.32 | 0.53 | 0.21 | 0.37 | 0.36 | 0.32 |
| | 表层土 | X | 9.8 | 0.155 | 0.093 | 29.6 | 29 | 71 | 80 | 34.3 | 15.0 | 5.02 |
| | (3413) | Cv | 0.6 | 0.98 | 2.01 | 0.83 | 0.50 | 0.47 | 0.33 | 0.63 | 0.37 | 0.79 |

注:深层土指采自 150~200 cm 深度的深层土壤,表层土指采自 0~20 cm 深度的表层土壤;()内数字表示参加统计的样品数;X 为算术平均值(或含量),Cv 为变异系数。

壤的平均含量,这一带也是江苏人口相对更密集、经济相对更发达的地段,显示人类活动对这些地段土壤的重金属分布有明显影响。宁镇扬丘陵岗地的深、表层土壤中 As、Cd、Hg、Pb、Zn 等元素含量的变异系数都普遍较高(多大于 0.5),应与当地是江苏境内多金属矿化最集中的地段有一定联系。总体看来,苏北土壤中 As 含量要明显偏高,而苏南土壤的 Cd、Hg、Sn 含量要明显偏高。

江苏全省从南到北依次分为苏州、无锡、常州、镇江、南京、南通、泰州、扬州、淮安、盐城、宿迁、徐州、连云港等 13 个省辖市,总体是东南部的经济发展水平、人口密度、工业化程度高于西北部。不同地区因为人口密度、产业结构、经济发展水平等有一定差异,在其土壤尤其是表层土壤的重金属含量分布

上也存在一些差异。如上述 13 个城市土壤环境的重金属分布资料统计结果显示(表 3),各市深层土壤之间的重金属含量差异远不如表层土壤明显,说明不同地区自然土壤环境之间的重金属含量分布差异远不如人为活动所造成的差异明显,人为因素对江苏土壤的重金属分布有直接影响;就主要反映人类活动影响的表层土壤而言,苏州市表层土壤的 Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn 等重金属的平均含量都排在最高,如苏州市表层土壤的 Cd 平均含量为 0.213mg/kg,比最低的盐城市表层土壤高出了 73%,苏州市表层土壤的 Hg 平均含量为 0.273 mg/kg,比最低的宿迁市表层土壤高出了近 9 倍,这些与苏州是目前全省经济最发达、人口密度偏高、城镇化水平最高都有一定关系,表明地表土壤重金属含量分布不均衡的

表3 江苏省13市土壤重金属元素平均含量(mg/kg)与变异系数对比
Table 3 Mean content (mg.kg⁻¹) and variation coefficients of heavy metals in soils from 13 cities of Jiangsu Province

| 市 名 | 土壤分层 | 参数 | As | Cd | Hg | Pb | Cu | Zn | Cr | Ni | Co | Sn |
|------|--------|----|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 徐州市 | 深层土 | X | 11.1 | 0.095 | 0.026 | 22.5 | 21.8 | 57.6 | 66.4 | 31.1 | 16.16 | 2.81 |
| | (717) | Cv | 0.38 | 0.48 | 7.70 | 0.44 | 0.48 | 0.23 | 0.17 | 0.38 | 0.84 | 0.16 |
| | 表层土 | X | 10.4 | 0.14 | 0.036 | 23.8 | 25 | 64.7 | 70.4 | 30.8 | 13.45 | 3.3 |
| | (2859) | Cv | 0.27 | 0.39 | 0.77 | 0.23 | 0.75 | 0.28 | 0.14 | 0.25 | 0.33 | 0.26 |
| 连云港市 | 深层土 | X | 12.9 | 0.101 | 0.024 | 30.8 | 28.1 | 80.3 | 85.8 | 43.7 | 22.33 | 3.03 |
| | (485) | Cv | 0.35 | 0.39 | 0.54 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.33 | 0.58 | 0.16 |
| | 表层土 | X | 11.7 | 0.147 | 0.031 | 30.7 | 27.3 | 76.7 | 77.2 | 38.4 | 16.73 | 3.2 |
| | (1883) | Cv | 0.46 | 1.42 | 0.86 | 0.59 | 0.41 | 0.57 | 0.31 | 0.39 | 0.36 | 0.26 |
| 宿迁市 | 深层土 | X | 12 | 0.085 | 0.018 | 24.7 | 23.8 | 59.5 | 75.1 | 34.9 | 17.48 | 3 |
| | (486) | Cv | 0.29 | 0.31 | 0.49 | 0.34 | 0.25 | 0.17 | 0.17 | 0.31 | 0.62 | 0.16 |
| | 表层土 | X | 10.8 | 0.13 | 0.028 | 25.9 | 24.1 | 63.2 | 74.9 | 33.3 | 14.74 | 3.4 |
| | (1921) | Cv | 0.29 | 0.33 | 0.60 | 0.21 | 0.25 | 0.25 | 0.14 | 0.25 | 0.29 | 0.20 |
| 盐城市 | 深层土 | X | 9.2 | 0.081 | 0.024 | 22.7 | 22 | 72 | 78 | 35.1 | 13.6 | 3.06 |
| | (951) | Cv | 0.12 | 0.12 | 0.5 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.14 | 0.2 | 0.18 | 0.14 |
| | 表层土 | X | 8.6 | 0.123 | 0.045 | 24 | 24 | 73 | 76 | 33 | 12.8 | 3.4 |
| | (3747) | Cv | 0.12 | 0.17 | 0.83 | 0.16 | 0.19 | 0.15 | 0.11 | 0.15 | 0.14 | 0.28 |
| 淮安市 | 深层土 | X | 11.1 | 0.086 | 0.021 | 22.4 | 25.4 | 64.1 | 80.2 | 36.6 | 15.37 | 3.02 |
| | (580) | Cv | 0.22 | 0.33 | 0.77 | 0.19 | 0.26 | 0.18 | 0.25 | 0.41 | 0.34 | 0.17 |
| | 表层土 | X | 10.1 | 0.139 | 0.04 | 24.7 | 26 | 67.2 | 82.7 | 38 | 14.75 | 3.6 |
| | (2288) | Cv | 0.25 | 0.34 | 1.06 | 0.19 | 0.27 | 0.29 | 0.35 | 0.64 | 0.45 | 0.32 |
| 扬州市 | 深层土 | X | 9.3 | 0.096 | 0.034 | 21 | 24.6 | 65.5 | 77.9 | 33.1 | 13.62 | 3.4 |
| | (391) | Cv | 0.69 | 0.53 | 0.84 | 0.21 | 0.26 | 0.17 | 0.13 | 0.17 | 0.19 | 0.28 |
| | 表层土 | X | 8.8 | 0.154 | 0.113 | 26.9 | 28 | 76.4 | 77.4 | 33.5 | 13.32 | 5.6 |
| | (1550) | Cv | 0.26 | 0.61 | 1.52 | 0.21 | 0.24 | 0.34 | 0.13 | 0.19 | 0.16 | 0.58 |
| 泰州市 | 深层土 | X | 6.7 | 0.09 | 0.035 | 18.9 | 20.5 | 63.2 | 74.7 | 29.8 | 12.79 | 3.13 |
| | (353) | Cv | 0.34 | 0.56 | 0.55 | 0.22 | 0.35 | 0.19 | 0.11 | 0.18 | 0.18 | 0.14 |
| | 表层土 | X | 7.6 | 0.144 | 0.076 | 24.4 | 24.4 | 73.6 | 75.5 | 30.3 | 12.5 | 6.7 |
| | (1429) | Cv | 0.29 | 0.60 | 0.67 | 1.61 | 0.33 | 0.20 | 0.14 | 0.22 | 0.20 | 6.36 |
| 南通市 | 深层土 | X | 5.8 | 0.092 | 0.037 | 17.5 | 18.2 | 64.3 | 71.3 | 27.7 | 12.33 | 3 |
| | (560) | Cv | 0.35 | 0.72 | 0.43 | 0.21 | 0.34 | 0.17 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| | 表层土 | X | 6.8 | 0.139 | 0.078 | 21.5 | 22.2 | 73.9 | 72.6 | 28.1 | 12.16 | 6 |
| | (2173) | Cv | 0.45 | 0.34 | 0.53 | 0.24 | 0.29 | 0.16 | 0.10 | 0.17 | 0.17 | 0.63 |
| 苏州市 | 深层土 | X | 8.6 | 0.094 | 0.08 | 24.7 | 27.1 | 74.4 | 84.1 | 35 | 14.98 | 3.8 |
| | (440) | Cv | 0.57 | 0.46 | 4.13 | 0.43 | 0.20 | 0.18 | 0.12 | 0.17 | 0.17 | 0.23 |
| | 表层土 | X | 8.7 | 0.213 | 0.273 | 34.3 | 32.5 | 92.8 | 84.4 | 36.2 | 14.13 | 10.3 |
| | (1683) | Cv | 0.29 | 2.69 | 1.04 | 0.42 | 0.28 | 0.27 | 0.12 | 0.17 | 0.13 | 1.15 |
| 无锡市 | 深层土 | X | 10 | 0.08 | 0.044 | 23.8 | 27.2 | 65.5 | 81.2 | 34.4 | 14.93 | 3.8 |
| | (260) | Cv | 0.33 | 0.38 | 0.52 | 0.14 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.21 | 0.19 | 0.50 |
| | 表层土 | X | 9 | 0.187 | 0.195 | 34.2 | 29.5 | 81.3 | 78.9 | 30.9 | 12.85 | 9.6 |
| | (1017) | Cv | 0.25 | 1.01 | 0.80 | 0.54 | 0.30 | 0.41 | 0.14 | 0.25 | 0.13 | 1.41 |
| 常州市 | 深层土 | X | 9.4 | 0.073 | 0.04 | 23.2 | 26.5 | 62.9 | 78.4 | 33.1 | 14.97 | 3.7 |
| | (269) | Cv | 0.30 | 0.33 | 0.90 | 0.13 | 0.17 | 0.14 | 0.12 | 0.16 | 0.19 | 0.49 |
| | 表层土 | X | 8.2 | 0.177 | 0.138 | 33.6 | 27.3 | 69.9 | 77.6 | 29 | 13.01 | 12.3 |
| | (1043) | Cv | 0.32 | 0.78 | 0.81 | 2.02 | 0.33 | 0.31 | 0.14 | 0.27 | 0.19 | 8.27 |
| 镇江市 | 深层土 | X | 10.1 | 0.118 | 0.036 | 22.4 | 28 | 70.3 | 80.3 | 35.7 | 14.27 | 3.24 |
| | (237) | Cv | 0.30 | 0.61 | 0.68 | 0.22 | 0.27 | 0.20 | 0.12 | 0.17 | 0.23 | 0.24 |
| | 表层土 | X | 9.3 | 0.185 | 0.121 | 31.5 | 31.4 | 80.1 | 75.5 | 32 | 13.29 | 6.2 |
| | (943) | Cv | 0.90 | 0.72 | 0.93 | 1.35 | 0.46 | 0.49 | 0.16 | 0.22 | 0.20 | 0.46 |
| 南京市 | 深层土 | X | 11.9 | 0.114 | 0.032 | 25.6 | 29.9 | 72.9 | 82.8 | 37.9 | 16.56 | 3.4 |
| | (398) | Cv | 1.34 | 0.71 | 0.84 | 1.32 | 0.40 | 0.71 | 0.19 | 0.32 | 0.37 | 0.27 |
| | 表层土 | X | 10.5 | 0.174 | 0.111 | 30.9 | 32.9 | 78.4 | 77.6 | 33.4 | 14.69 | 4.7 |
| | (1650) | Cv | 0.49 | 1.03 | 2.24 | 0.45 | 0.54 | 0.51 | 0.19 | 0.34 | 0.21 | 0.69 |

注:深层土指来自150~200 cm深度的深层土壤,表层土指来自0~20 cm深度的表层土壤;()内数字表示参加统计的样品数;

X为算术平均值(或含量),Cv为变异系数。

确与人类活动有关、人为因素对地表土壤环境的作用力度与经济发展水平存在正相关的趋势。

重金属含量分布不均衡是江苏土壤的一大共性,但江苏境内自然土壤环境的绝大多数重金属元素的平均含量与全国土壤相关元素背景含量^[17]接近;地貌差异对自然土壤环境的重金属含量分布也有一定影响;人为活动已成为影响地表土壤环境重金属含量分布的重要因素,地表土壤中 Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn 等元素含量分布能够有效指示人类活动对土壤环境影响的程度,这些重金属相对富集越明显、则人为作用力度相对更强烈;全省 13 个市之间自然土壤环境的 Cd、Hg、Sn 等重金属元素含量分布差异远不如其人为活动土壤环境显著,发达城市的地表土壤环境重金属含量总体偏高。

2 江苏土壤重金属污染现状初步评价

依据土壤环境中有关重金属元素的含量评价其污染现状的方法有多种,像地累积指数法、内梅罗指数法、生态效应法、环境质量标准法等都是评价土壤重金属污染的基本方法^[2,6,7,10]。评价土壤重金属污染一般多限定在地表耕作层土壤,因为真正对人类健康影响巨大、且与人类活动密切相关的主要是这些表层(或耕作层)的土壤。利用表层土壤新获得的 24 186 个样品的 8 项重金属元素含量分布资料,参照中国《土壤环境质量标准》(GB15618-1995),对江苏全省地表土壤环境重金属含量分布的质量状况做

了初步评价(表 4),一般认为达到或超过三级标准的土壤都属于重金属污染土壤,评价结果表明:

(1)全省表层土壤环境中,93.49%的样品所控制土壤范围内重金属污染都基本无显示,这些地段表层土壤中 Cd、Hg、Pb、As、Cr 等 8 项重金属含量总体都能达到国家二级以上土壤环境质量标准,相当于清洁-正常(污染不明显)这一含量范畴;

(2)上述样品所控制的全省表层土壤环境中,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 这 8 个重金属元素含量分布综合污染数据显示,江苏省重金属污染土壤比例为 6.08%、严重污染土壤比例为 0.43%,二者总控制土壤分布范围大于 6 000 km²(含建筑物等覆盖面积在内,余同),人口密集的城镇地段是重金属污染土壤主要分布区域;

(3)上述 8 个重金属的污染程度明显不一致,在重金属污染土壤中,Ni、Hg、Cd 是主要的致污因子,这 3 个元素的总污染比例都超过 1.3%。在严重污染土壤中,Cd、As、Hg 3 元素污染比例最高。

利用农田土壤环境质量综合污染指数评价方法,依据新获得的调查数据对全省 13 个省辖市农田土壤环境重金属污染现状进行了评价(表 5)。综合污染指数($P_{\text{综合}}$)计算方法如下:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(P_i)_{\text{ave}}^2 + (P_i)_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中 $(P_i)_{\text{max}}$ 为土壤中所有污染物中单因子污染

表 4 江苏省表层土壤 8 种重金属元素分布现状环境质量评价结果
Table 4 Environmental assessment of 8 heavy metal elements concentrations in topsoils of Jiangsu Province

| 参评指标 | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn | 综合 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 优一级(面积/km ²) | 70060 | 58124 | 11027 | 45190 | 76098 | 30841 | 41813 | 50572 | 6332 |
| 优一级所占比例(%) | 72.98 | 60.55 | 11.49 | 47.07 | 79.27 | 32.13 | 43.56 | 52.68 | 6.6 |
| 一级(面积/km ²) | 20060 | 25109 | 74212 | 38921 | 8322 | 49702 | 47029 | 36514 | 56725 |
| 一级所占比例(%) | 20.9 | 26.16 | 77.3 | 40.54 | 8.67 | 51.77 | 48.99 | 38.04 | 59.09 |
| 二级(面积/km ²) | 5263 | 11516 | 10372 | 11385 | 9597 | 12656 | 7118 | 8739 | 26686 |
| 二级所占比例(%) | 5.48 | 12 | 10.8 | 11.86 | 10 | 13.18 | 7.42 | 9.1 | 27.8 |
| 三级(面积/km ²) | 497 | 1108 | 381 | 497 | 1879 | 2777 | 16 | 127 | 5839 |
| 三级所占比例(%) | 0.52 | 1.15 | 0.4 | 0.52 | 1.96 | 2.89 | 0.02 | 0.13 | 6.08 |
| 超三级(面积/km ²) | 119 | 143 | 8 | 8 | 103 | 24 | 24 | 48 | 417 |
| 超三级所占比例(%) | 0.12 | 0.15 | 0.01 | 0.01 | 0.11 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.43 |

注:参加评价的样品数为 24 186 个,实际控制土壤分布面积约 96 000 km²,评价标准参照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995);土壤重金属污染分最清洁、清洁、正常、污染、严重污染等 5 级,优一级即最清洁,一级即清洁,二级即正常,三级即污染,超三级即严重污染;综合指 8 个重金属的综合评价结果;表中所列的面积均为依据样品数所估算的控制面积。

指数最大值的平方; $(P_i)_{\text{ave}}^2$ 为土壤中所有单因子污染指数平均值的平方; P_i 为单因子污染指数, $P_i=C_i/S_i$, C_i 为土壤中重金属*i*的实测含量, S_i 为重金属*i*的评价标准(取 GB15618 的一级含量限值);*i*包括 As、Cd、Hg、Pb、Cu、Cr、Ni、Zn 等 8 种重金属。

依据综合污染指数 $P_{\text{综合}}$ 的大小,将农田土壤重金属污染现状分为如下 5 个等级:

- (1) $P_{\text{综合}} < 0.7$, 清洁;
- (2) $P_{\text{综合}} = 0.7 \sim 1.0$, 尚清洁(或基本清洁);
- (3) $P_{\text{综合}} = 1.0 \sim 2.0$, 轻污染(或轻度污染);
- (4) $P_{\text{综合}} = 2.0 \sim 3.0$, 中等污染(或中污染);
- (5) $P_{\text{综合}} > 3.0$, 重污染(或严重污染)。

上述评价结果显示:全省农田土壤环境受上述 8 项重金属元素严重污染的比例占 1.02%、控制土壤面积超过 900 km², 重金属中等污染土壤比例为 1.71%, 总控制面积大于 1 600 km², 全省农田土壤环境中受到重金属轻度污染的比例达到 21.02%, 所控制的土壤分布范围累计超过 19 900 km², 目前未受

到重金属污染的农田土壤累计占 76.25%, 其中清洁土壤占 25.34%、总控制面积约 24 000 km², 尚清洁或基本清洁土壤占 50.91%、总控制面积约 48 300 km², 基本清洁土壤占据主导地位。13 个省辖市农田土壤环境的重金属污染程度存在较大差异, 像盐城、宿迁、南通、泰州等长江以北地区农田土壤基本不存在中等以上的重金属污染, 这 4 个城市的中等以上污染土壤所占比例皆低于 0.3%, 宿迁市重金属中等+严重污染的比例合计才 0.07%, 而苏州、无锡、南京等人口密集、工业发达城市的农田土壤环境中其重金属严重污染比例明显偏高, 这 3 个城市土壤的重金属中等+严重污染比例均超过 5%, 以苏州市土壤重金属污染比例相对最高, 其上述 8 项重金属严重污染比例达 6.67%、中等污染比例达到 9.37%、二者合计比例超过了 16%, 显示了城市化、工业化对当地土壤环境的重金属污染有直接影响。总体而言, 长江以南工业化程度高的地区土壤重金属污染严重程度远高于长江以北农业区, 苏州、无锡这 2 个太湖边上的经济相对发达市的土壤重金属污染比例累计已经

表 5 江苏 13 省辖市农田土壤环境重金属污染现状综合评价结果对比

Table 5 Integrated assessment of heavy metal pollution in farmland soils from 13 cities of Jiangsu Province

| 地 区 | 清 洁 | | 尚 清 洁 | | 轻 污 染 | | 中 等 污 染 | | 重 污 染 | |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|
| | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% |
| 全省 | 24063 | 25.34 | 48344 | 50.91 | 19961 | 21.02 | 1624 | 1.71 | 969 | 1.02 |
| 徐州市 | 4556 | 40.63 | 5633 | 50.23 | 973 | 8.68 | 36 | 0.32 | 16 | 0.14 |
| 宿迁市 | 2502 | 32.81 | 4174 | 54.74 | 941 | 12.34 | 8 | 0.07 | 0 | 0 |
| 连云港市 | 2093 | 28.21 | 1930 | 26.02 | 3353 | 45.18 | 24 | 0.32 | 20 | 0.27 |
| 盐城市 | 5966 | 40.32 | 7873 | 53.21 | 941 | 6.36 | 0 | 0 | 16 | 0.11 |
| 淮安市 | 2125 | 23.6 | 5196 | 57.7 | 1323 | 14.69 | 282 | 3.13 | 79 | 0.88 |
| 扬州市 | 628 | 10.29 | 4226 | 69.27 | 1049 | 17.19 | 123 | 2.02 | 75 | 1.24 |
| 泰州市 | 1553 | 27.5 | 3233 | 57.24 | 846 | 14.98 | 8 | 0.14 | 8 | 0.14 |
| 南通市 | 3269 | 38.19 | 4688 | 54.76 | 584 | 6.82 | 16 | 0.19 | 4 | 0.05 |
| 苏州市 | 99 | 1.5 | 1565 | 23.66 | 3889 | 58.8 | 620 | 9.37 | 441 | 6.67 |
| 无锡市 | 99 | 2.53 | 1804 | 45.9 | 1732 | 44.08 | 179 | 4.55 | 115 | 2.93 |
| 常州市 | 365 | 9.07 | 2372 | 58.88 | 1196 | 29.68 | 52 | 1.28 | 44 | 1.08 |
| 镇江市 | 298 | 8.06 | 2002 | 54.19 | 1279 | 34.62 | 56 | 1.51 | 60 | 1.61 |
| 南京市 | 508 | 8.05 | 3647 | 57.7 | 1851 | 29.29 | 218 | 3.46 | 95 | 1.51 |

注:表中所述的面积均为依据样品数所估算的控制面积;全省农田土壤参与统计样品数 23 905 个、控制土壤面积约 94 960 km², 其中徐州市 2 823 个、控制面积约 11 200 km², 宿迁市 1 920 个、控制面积约 7 600 km², 连云港市 1 868 个、控制面积约 7 400 km², 盐城市 3 725 个、控制面积约 14 760 km², 淮安市 2 267 个、控制面积约 9 000 km², 扬州市 1 536 个、控制面积约 6 000 km², 泰州市 1 422 个、控制面积约 5 600 km², 南通市 2 155 个、控制面积约 8 500 km², 苏州市 1 665 个、控制面积约 6 600 km², 无锡市 989 个、控制面积约 3 900 km², 常州市 1 014 个、控制面积约 4 000 km², 镇江市 930 个、控制面积约 3 690 km², 南京市 1 591 个、控制面积约 6 300 km²; 各市之间界限依据全省 1:500000 地理底图(2002 年版)确定。

超过了当地国土总面积的 50%, 苏州市土壤重金属中等+严重污染比例比宿迁市高出 228 倍多, 说明城市化、工业化的过程客观上也加剧了部分土壤的重金属污染。Cd、Hg 污染是目前最应关注的重金属污染, 在苏南地区尤其应该引起重视。

3 土壤重金属污染来源浅析

前人研究已经认识到地表土壤的重金属含量分布是随着时间推移而不断变化的^[18-19], 而且地表土壤环境中的重金属将在土壤-植物或农作物之间不断发生迁移与重新分配、土壤重金属污染可能随时威胁到当地农作物的安全^[6, 20-22], 这些都说明了研究土壤重金属污染机理是非常必要的, 同时也预示着准确掌握一个地区的土壤重金属污染成因也是有相当难度的。导致江苏局部土壤环境出现重金属污染的因素应该不是唯一的, 地表土壤重金属污染与人类活动有直接关系。图 1 对比了江苏境内不同经济发展水平下的 4 个典型土壤沉积柱的 Cd、Zn、Pb、Hg 等重金属元素含量垂向变化, 可以看出工业化、城市化可能是加剧部分土壤重金属污染的直接原因。

从图 1 可看出, 在苏州、无锡宜兴等经济更发达、乡镇工业水平更高、城市化发展更快的地区, 其土壤柱的重金属在地表 40 cm 以上深度出现了显著富集, 在人为活动背景下的土壤环境重金属含量远高于 100 cm 深度以下的自然土壤环境, 而在苏北连云港、徐州丰县等农田土壤环境的沉积柱上则未出现人为活动背景下的重金属表层富集现象, 这类地区土壤沉积柱的重金属含量从地表到深部 (100 cm 以下) 都相对稳定, 基本找不到受人为活动明显影响的证据。这些不同人为活动背景下的土壤沉积柱重金属含量随深度递变的差异, 很清晰地指示了伴随工业化、城市化的发展, 通过一些人为生产、消费活动向局部土壤环境输入重金属是导致地表土壤重金属污染的重要原因之一, 人类活动对环境的作用力度越大, 当地表层土壤受到重金属污染的程度有可能就越高, 土壤被污染的深度将更大。

工业化、城市化等人为活动因素导致局部土壤重金属污染的机制本身也比较复杂, 像矿业活动、农田施肥、机械加工、造纸印刷等都可能当地附近土壤出现重金属污染。这次在对江苏部分土壤重金属污染的追踪调查中, 认识到金属加工与冶炼对土

壤的重金属污染影响很明显。以南京市附近的梅山钢铁厂为例, 当地土壤的重金属人为活动富集非常强烈, 地表土壤 Hg 污染较普遍, 其地表 30 cm 以上深度土壤的重金属含量与深部 200 cm 以下深度土壤的含量有本质差别 (图 2), 地表土壤中 Hg、Pb、Zn、Cu、Cd 等含量远高于深部的自然土壤环境。另外还在该钢铁厂附近发现上风口和下风口的地表土壤重金属含量有较大差别, 当地相关蔬菜样品重金属超标很严重, 都显示出当地的冶金活动是其土壤重金属污染的直接原因。工业活动导致局部土壤环境出现重金属污染, 一方面可能因为工业活动本身就牵涉到一些重金属元素的排放; 另一方面与工业烧煤有很大关系。

除了上述人为因素外, 自然地质作用也是导致江苏土壤出现重金属污染的重要原因之一。本次还发现, 在江苏境内洪泽湖南侧 (靠近盱眙—六合一带) 存在大片 Cr、Ni、Co、Cu 等重金属污染土壤, 呈面状分布, 当地大片土壤的 Cr、Ni 含量都超出了绿色食品产地限定的质量标准 (图 3)。

将当地 Cr、Ni 等污染土壤的分布特征与地质背景做一对比分析, 了解到该 Cr、Ni、Co、Cu 等重金属污染土壤的分布具如下 3 个显著特点: (1) 所在地土壤 Cr、Ni、Co 等亲铁元素的富集范围高度吻合; (2) 当地深、表层土壤中出现了 Cr、Ni、Co 等重金属的同步富集, 且深层土壤的 Cr、Ni、Co 等重金属含量丝毫不比其表层土壤低; (3) Cr、Ni、Co 等重金属元素的相对富集范围 (或异常区) 与当地一套新近系的基性偏超基性火山岩 (玄武岩等) 的分布范围高度一致。这些线索都共同反映了这样一个事实, 即当地土壤中所存在的大片面状 Cr、Ni、Co、Cu 等重金属污染是由基性偏超基性火山岩风化成土所致, 是由地质背景所形成的自然污染, 非人为污染。

自然地质作用所形成的局部重金属土壤污染, 其污染区分布范围、污染强度、元素组合、对农作物的危害等都与人为污染有明显区别, 自然地质作用所形成的污染通常具有非点状、多元素、低强度、2 个环境同时出现污染等共性, 这些都可以为鉴别人为污染与自然污染提供参考。其实, 前人在研究土壤元素含量背景值时已经认识到成土母质的差异对土壤元素含量分布有直接影响^[23], 最近朱立新等在研究中国东部平原土壤元素基准值时, 也发现了在珠江三角洲平原、鄱阳湖平原一带土壤中 Pb、Zn、Hg、

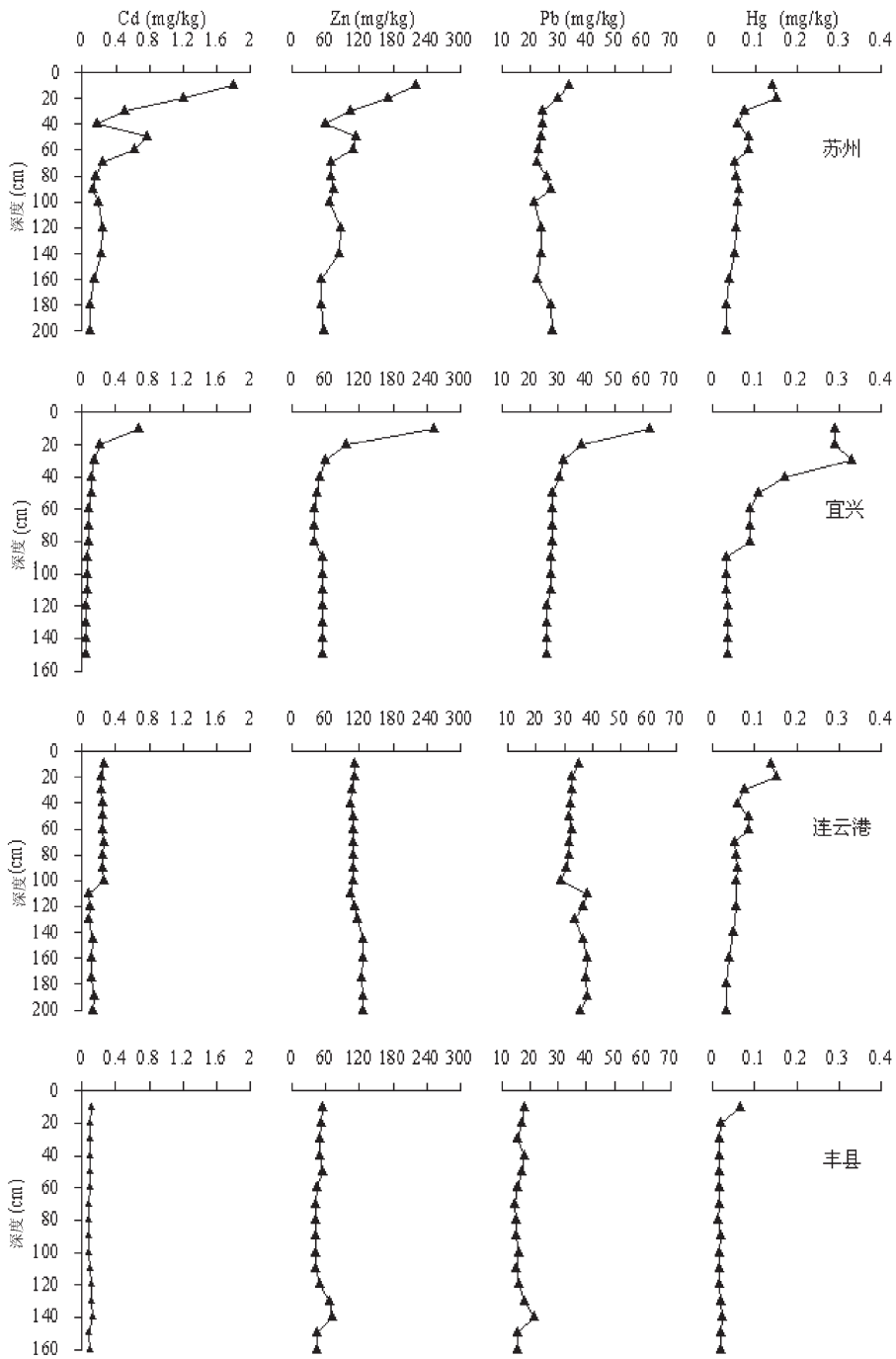


图1 江苏省不同地区典型土壤沉积柱 Cd、Zn、Pb、Hg 含量变化对比
 Fig.1 Cd, Zn, Hg and Hg concentration changes along 4 typical soil vertical sections from different areas of Jiangsu Province

Cd、Sn 等重金属基准值明显高于中国东部平原其他地区土壤^[24],这些都说明了成土母质的差异是导致土壤重金属分布不均衡的重要原因,也为自然地质作用

能形成局部土壤环境重金属污染提供了旁证。江苏境内像洪泽湖南侧土壤的重金属污染源于自然地质作用的实例在连云港等地也存在,随着对土壤重金属污

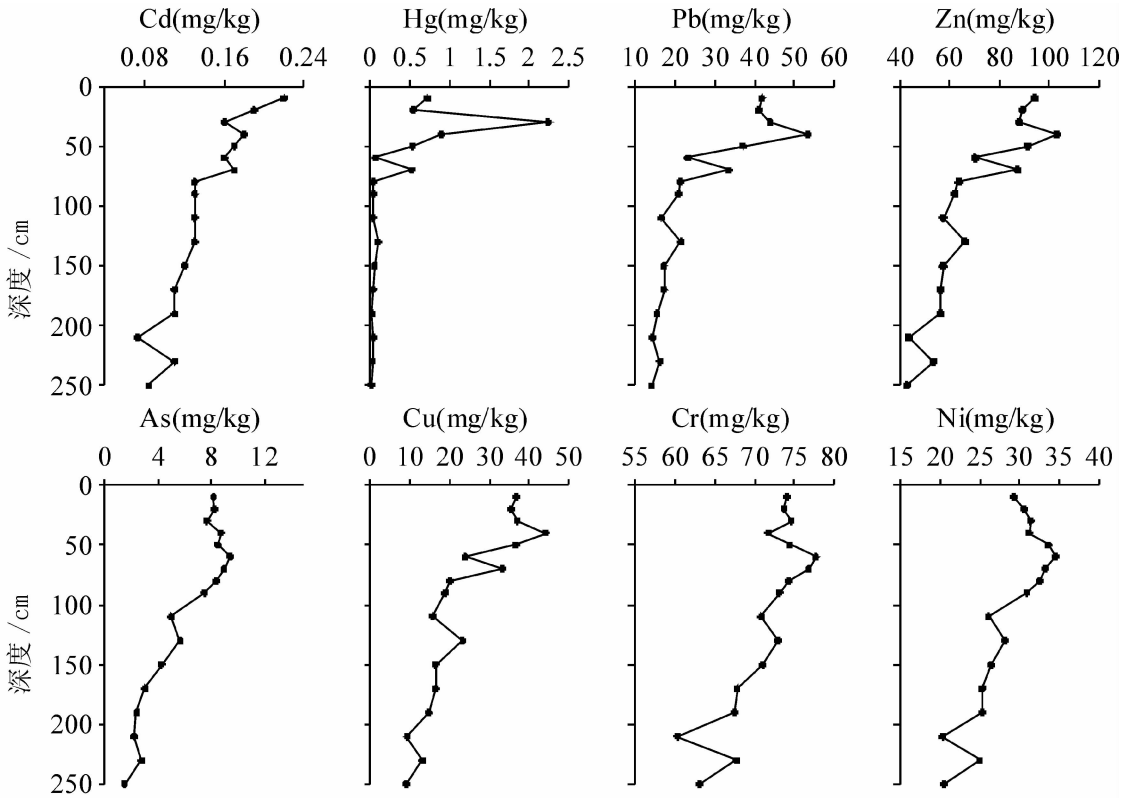


图 2 南京梅山钢铁厂附近农田土壤沉积柱重金属含量分布特征
 Fig.2 Heavy metal elements concentration changes along the soil longitudinal section near the Meishan iron and steel factory in Nanjing

染研究的不断深入,有关认识也会不断深化。

4 结论

(1)江苏自然土壤环境的重金属元素平均含量大多与全国土壤环境对应的重金属元素背景含量接近,但全省土壤重金属分布极不均衡,苏南土壤Cd、Hg等含量总体偏高,苏北土壤则相对聚集了更多的As。人为活动已成为影响地表土壤环境重金属含量分布不均衡的重要因素,Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn等含量是指示人类活动影响土壤环境的有效指标。全省13个省辖市之间自然土壤环境的重金属含量分布差异远不如其人为活动土壤环境显著。

(2)江苏境内存在局部土壤环境的重金属污染,全省农田土壤环境受到Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、As等8种重金属综合污染的严重比例为1.02,总控制土壤面积超过900 km²。全省13市中,以苏州市、无锡市土壤环境的重金属污染相对最严重,二者的

中等+重污染土壤比例均超过7%,其地表土壤的Cd、Hg污染应引起足够重视。

(3)与工业化、城镇化相伴随的人类相关生产与消费活动已成为引起苏南局部土壤环境出现重金属污染的一个重要因素,大量工业用煤、冶金生产等是人类活动导致局部土壤环境出现重金属污染的直接原因,土壤沉积柱的元素含量变化在解析土壤污染成因方面有独到功用。

(4)自然地质作用也是导致江苏土壤出现重金属污染的又一重要原因,但自然成因与人为成因的土壤重金属污染在表现形式上有一定区别。自然成因的土壤重金属污染通常具有非点状、多元素组合、低强度、深层与表层土壤同时出现污染等共性,人为成因的土壤重金属污染则多与之相反。

致谢:参加该项研究工作的还有吴新民、毕葵森、范迪富、陈宝、冯金顺、高孝礼、汤志云、周泳德等,江苏省地质调查研究院、省国土资源厅有关领导

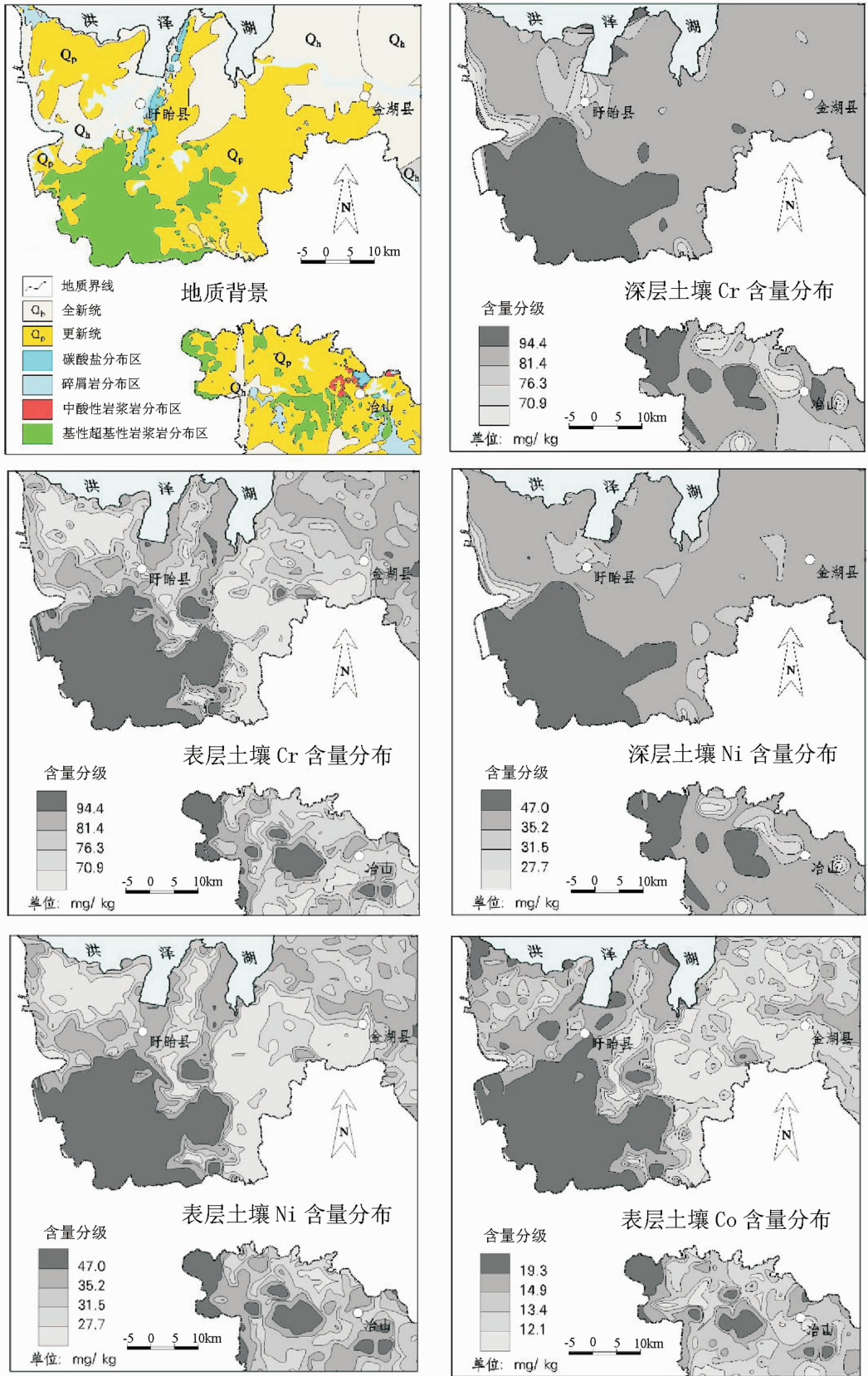


图3 洪泽湖南部土壤 Cr 等重金属富集特征剖析图

Fig.3 Cr, Ni and Co distribution and enrichment in soils on the southern margin of the Hongze Lake

与专家对该项研究给予了大力关照与指导帮助,样品分析测试由国土资源部南京矿产资源监督检测中心完成,谨一并诚致谢忱!

参考文献 (References):

- [1] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京:科学出版社, 2002:46-144.
Chen Huaiman. Behavior of Chemicals in Soils and Its Relation to Environmental Quality [M]. Beijing: Science Press, 2002:46-144 (in Chinese).
- [2] 息朝庄, 戴塔根, 黄丹艳. 湖南株州市土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 中国地质, 2008, 35(3):524-530.
Xi Chaozhuang, Dai Tagen, Huang Danyan. Distribution and pollution assessments of heavy metals in soils in Zhuzhou, Hunan [J]. Geology in China, 2008, 35 (3):524-530 (in Chinese with English abstract).
- [3] Gäbler H-E, Schneider J. Assessment of heavy-metal contamination of floodplain soils due to mining and mineral processing in the Harz Mountains, Germany [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (7): 774-782.
- [4] Borrego J, Morales J A, Torre M L, et al. Geochemical characteristics of heavy metal pollution in surface sediments of Tinto and Odiel river estuary (Southwestern Spain) [J]. Environmental Geology, 2002, 41 :785-796.
- [5] Calace N, Campisi T, Iacondini A, et al. Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludge addition: chemical and ecotoxicological evaluation[J]. Environ. Pollut., 2005, 136:485-492.
- [6] 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 等. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. 中国地质, 2007, 34(4):716-722.
Xu Youning, Zhang Jianghua, Liu Ruiping, et al. Environmental effects of heavy metal pollution of farmland soils in gold mining areas[J]. Geology in China, 2007, 34(4):716-722(in Chinese with English abstract).
- [7] 姚德, 孙梅, 杨富贵, 等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3):539-550.
Yao De, Sun Mei, Yang Fugui, et al. Environmental geochemistry of heavy metals in urban soils of Qingdao City [J]. Geology in China, 2008, 35(3):539-550 (in Chinese with English abstract).
- [8] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6):592-596.
Chai Shiwei, Wen Yanmao, Zhang Yunni, et al. The heavy metal content character of agriculture soil in Guangzhou suburbs[J]. China Environmental Science, 2003, 23 (6):592-596 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张乃明, 李保国, 胡克林. 污水灌区耕层土壤中铅、镉的空间变异特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(1):151-154.
Zhang Naiming, Li Baoguo, Hu Kelin. The spatial variation characteristics of lead and cadmium in the soil of the sewage irrigation area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1):151-154 (in Chinese).
- [10] 钱建平, 张力, 刘辉利, 等. 桂林市及近郊土壤汞的分布和污染研究[J]. 地球化学, 2000, 29(1):94-99.
Qian Jianping, Zhang Li, Liu Huili, et al. Soil mercury distribution and pollution in urban and suburbs of Guilin [J]. Geochemica, 2000, 29(1): 94-99 (in Chinese with English abstract).
- [11] 唐文春, 张秀芝, 何玉生, 等. 成都盆地平原区浅层土壤 Cd、Pb、Zn 分布特征及其成因初探[J]. 地球化学, 2007, 36(1):89-97.
Tang Wenchun, Zhang Xiuzhi, He Yusheng, et al. Distribution and origin of Cd, Pb and Zn in topsoils of plain region of Chengdu Basin [J]. Geochimica, 2007, 36 (1): 89-97 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(6):921-928.
Wu Xinmin, Pan Genxing. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing city [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6):921-928 (in Chinese with English abstract).
- [13] 廖启林, 吴新民, 翁志华, 等. 南京地区多目标地球化学调查基本成果及其相关问题初探[J]. 中国地质, 2004, 31(1):70-77.
Liao Qilin, Wu Xinmin, Weng Zhihua, et al. Basic results of multi-target geochemical survey of the Nanjing area and its relevant problems [J]. Geology in China, 2004, 31 (1):70-77 (in Chinese with English abstract).
- [14] 廖启林, 黄顺生, 范迪富, 等. 微量元素在湖积物、土壤的垂向分布与稻谷中的分配[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3):331-339.
Liao Qilin, Huang Shunsheng, Fan Difu, et al. Vertical distribution in lake sediments and soils and partition within paddy for relevant trace elements: preliminary testing part results from eco-geochemical survey in Jiangsu [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (3):331-339 (in Chinese with English abstract).
- [15] Liao Qilin, Les J. Evans, Xueyuan Gu, et al. A regional geochemical survey of soils in Jiangsu Province, China: Preliminary assessment of soil fertility and soil contamination [J]. Geoderma, 2007, 142:18-28.
- [16] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2007, 67:2148-2155.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:93-493.
Inspective Station of Environment of China. The Background Value of Soil Element in China [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990:93-493(in Chinese).
- [18] 潘根兴, 成杰民, 高建琴, 等. 江苏吴县土壤环境中某些重金属元素的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(1):51-55.
Pan Genxing, Chen Jiemin, Gao Jianqin, et al. On the change of status of some heavy metal elements in soil environment under intensive economical development [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(1):51-55 (in Chinese with English abstract).

- [19] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 太湖地区水稻土表层土壤 10 年尺度重金属元素积累速率的估计[J]. 环境科学, 2002, 23(3):119-123.
Li Lianqing, Pan Genxing, Zhang Pingjiu, et al. Estimating of decadal accumulation rates of heavy metals in surface rice soils in the Tai Lake region of China [J]. Environmental Science, 2002, 23(3): 119-123 (in Chinese with English abstract).
- [20] 郑冬梅, 王起超, 张仲胜, 等. 葫芦岛市五里河土壤—植物系统中汞的迁移[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5):676-680.
Zheng Dongmei, Wang Qichao, Zhang Zhongsheng, et al. Transfer of mercury in soil-plant system of Wuli River, Huludao City [J]. China Environmental Sciences, 2007, 27 (5):676-680 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土—辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4):52-56.
Li Feili, Liu Congqiang, Yang Yuangen, et al. Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and capsicum (*Capsicum frutescens* L.Var.Longum Bailey) system in Guiyang, Southwest China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(4):52-56 (in Chinese with English abstract).
- [22] Jung M C, Thornton I. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine in Korea [J]. Appl. Geochem., 1996, 11: 53-59.
- [23] 杨学义. 南京地区土壤背景值与母质的关系 [C]//刘卓澄编. 环境中若干元素的自然背景值及其研究方法. 北京: 科学出版社, 1982:16-20.
Yang Xueyi. Relationship between soil background values and their parent materials in Nanjing[C]//Liu Zhuocheng (ed.). Natural Background Value of Elements in Environment and Its Research Method. Beijing: Science Press, 1982:16-20(in Chinese).
- [24] 朱立新, 马生明, 王之峰. 中国东部平原土壤生态地球化学基准值[J]. 中国地质, 2006, 33(6):1400-1405.
Zhu Lixin, Ma Shengming, Wang Zhifeng. Soil eco-geochemical baseline in alluvial plains of eastern China [J]. Geology in China, 2006, 33(6):1400-1405(in Chinese with English abstract).

A preliminary study of the distribution and pollution source of heavy metals in soils of Jiangsu Province

LIAO Qi-lin, HUA Ming, JIN Yang,

HUANG Shun-sheng, ZHU Bo-wan, WENG Zhi-hua, PAN Yong-min

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: Based on data of 24186 topsoil (0~20 cm in depth) and 6127 deep soil (150~200 cm in depth) samples from whole Jiangsu which contain such elements as Cd, Hg, Pb, As, Cu, Zn, Cr, and Ni, the authors studied the distribution and pollution characteristics of heavy metals in soils by analyzing their spatial variation and pollution source. Some conclusions have been reached: First, the spatial distribution of heavy metal elements is relatively uneven within natural environmental soils and anthropogenic environmental soils of Jiangsu, and the nonuniformity in anthropogenic environmental soils is higher than that in natural environmental soils. Second, a part of farmland soils (1.02% or so) has been badly polluted by some heavy metal elements such as Cd, Hg and Pb, and the pollution from Suzhou and Wuxi is the most severe in all soils of Jiangsu Province. Third, human activities in the industrialization and expansion of cities and some natural geological processes with the formation of parent soil are both important factors responsible for local pollution of heavy metals, and there exist obvious differences between man-made pollution and natural pollution in soils. It is thus held that natural pollution of heavy metals is characterized by planar, polymetallic and double-layer soil pollution with relatively low concentration, whereas things are quite different for man-made pollution.

Key words: soil; heavy metal; distribution; pollution source; Jiangsu Province

About the first author: LIAO Qi-lin, male, born in 1964, Ph.D and senior researcher, majors in geochemistry and mineral deposit geology and now mainly engages in the study of eco-geochemistry; E-mail: liaoqilin64@jsoil.com.cn.