

苏锡常地区城市公园土壤微量元素分布特征及其环境指示意义*

廖启林^{1,2} 刘 聪³ 徐慧珍⁴ 金 洋^{1,2} 朱伯万^{1,2} 华 明^{1,2}

(1 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 南京 210018)

(2 江苏省地质调查研究院, 南京 210018)

(3 江苏省国土资源厅, 南京 210049)

(4 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘 要 在江苏省国土 1/250 000 多目标地球化学调查基础上, 选择苏州市、吴江市、无锡市、江阴市、常州市、金坛市等 45 个城市公园土壤作为研究对象, 系统研究了当地典型城市公园土壤中 Cd、Hg、Pb、Zn、Sb、Sn、B、Se、N、稀土元素(REE)等 50 个元素含量及土壤 pH、总有机碳(TOC)等分布特征。结果表明, 城市公园土壤的微量元素分布与城区污染土壤、农田土壤有显著差异, 公园土壤的重金属含量总体偏低, N 与 TOC 含量明显低于农田土壤, 在公园土壤中 S、Se、Cd、Pb、Zn、TOC 等元素未出现高强度的人为富集, 重金属污染以轻度 Hg 污染为主, S、Se、Cd、Pb、TOC、pH 等指标在 200 cm 深度内分布相对稳定, 未出现元素含量在不同深度的显著变化, 指示多数公园土壤的微量元素分布总体上较一般城市土壤更少受人为因素干扰, 可为人为活动对城市土壤环境的影响研究提供重要的参比对象。

关键词 微量元素分布; 环境指示意义; 土壤; 城市公园; 苏锡常地区

中图分类号 P632; P596 **文献标识码** A

随着土壤环境受人为活动影响越来越频繁, 地表土壤环境中化学元素的分布、迁移和富集也逐渐成为土壤环境评价与研究的一大热点^[1-14]。土壤元素含量调查作为研究土壤物质组成、来源、成因等的重要手段, 在国内近期有关土壤圈化学作用的研究报道中也可见大量相关文献[2-3, 5-14], 为研讨局部地区土壤中元素分布及其意义提供了借鉴资料。城市或城镇化地区, 作为人口密集、工业发达、人为活动影响强度高的代表, 包括重金属污染在内的土壤微量元素分布问题十分令人关注, 围绕城市土壤环境所开展的元素地球化学研究也有一定的历史。公园作为城镇化地区人群活动和生息的重要场所, 闹中取静是其一大特点, 但目前专门针对城市公园土壤所开展的元素地球化学研究并不常见, 城市公园土壤的微量元素分布与其他地区土壤环境有无差别? 公园土壤环境的元素分布有何环境指示意义? 有必要对此做一剖析。本文即以新近获得的苏州市盘门公园等 45 个城市公

园土壤的元素含量分布等调查数据为基础, 对城市公园土壤微量元素分布特征及其环境指示意义做一浅析, 旨在能为研究城镇化地区土壤环境质量演变、认识人-地相互作用对地表物质循环的影响等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏南部是我国长江三角洲一带城镇化发展最快的地区之一, 在长江三角洲占有举足轻重地位的苏锡常地区更是我国当代经济社会快速发展极为活跃的地段, 国土面积约为 14 400 km², 其地理坐标为 E 119°08' ~ 121°18'、N 30°46' ~ 32°05' 之间。典型亚热带海洋性季风气候, 降雨充沛。其地形地貌以平原为主, 残丘为辅, 大部分地区海拔高度均不足 100 m, 平原地区海拔高度通常只有 2 ~ 8 m, 第四纪覆盖区占

* 国土资源公益性行业科研专项经费项目(201111021)、国家自然科学基金项目(40873081)资助

作者简介: 廖启林(1964—), 男, 汉族, 博士, 研究员级高工, 主要从事矿床地球化学与环境地球化学研究。E-mail: 1043034588@qq.com

收稿日期: 2013-07-02; 收到修改稿日期: 2014-03-25

全区 75% 以上,不同部位的第四纪发育演化历史不尽相同,冲积、湖积、残坡积等是当地第四纪沉积物的基本形成方式,沉积物多呈细粉砂-砂黏土。土壤种类发育比较齐全,水稻土是当地最具代表性的土类。当地交通发达,水网密布。人均耕地资源量远低于全国平均水平,建设用地需求旺盛,乡镇企业发展历史悠久,国土资源开发利用程度较高,人为活动对土壤环境的改造作用力度较大。

其地质环境调查研究程度相对较高,2009 年结束的江苏全省国土生态地球化学调查工作获得了当地 4 000 多个土壤样品及太湖沉积物的系列元素含量等分布数据,是当地近期地质环境调查的一大盛事,笔者曾对江苏国土生态地球化学研究的相关成果或认识做过报道^[13-16],为了解苏锡常地区地表环境地球化学状况提供了部分线索。本研究所调研的 45 个城市公园分布在苏州市、无锡市、常州市这 3 个省辖市及它们下属的吴江市、昆山市、太仓市、常熟市、张家港市、江阴市、宜兴市、溧阳市、金坛市等 9 个县级市所在地,均有约 20 年以上的城镇化发展历史,城市种类比较齐全,人口密度及每年生产的经济总量在全国同类城市中大多名列前茅。

1.2 样品采集与分析

省辖市各选择 6 个城市公园,县级市各选择 3

个城市公园,共在 45 个城市公园内进行了规范化地表土壤及典型土壤沉积柱调查采样,1 个公园采集 1 个土壤样品,共采集公园土壤样品 45 个,其样点分布见图 1。在空地依据公园展布形状采集土壤样品,1 个土壤样品约 1 000 g,其至少由 5 个小点的土壤组成、每个小点采取土壤约 200 g,统一采集地表 30 cm 以上深度的土壤,采样时去除草木、碎石、异物等杂物,选采熟土,各小点之间的距离和分布依据实地情况确定、正常情况下两小点之间的距离大于 20 m,各小点所取土壤完全相同。使用统一工具采样,采样中严防任何形式的污染,各点采样程序完全一致。每个采样点均填写采样记录表,同时拍摄采样背景照片,作为正式地质环境调查资料长期保存。在一个公园采集 1 个地表土壤样的同时,还采集了少量土壤沉积柱样品,土壤沉积柱布设在与所选公园土壤类似、且靠近公园所在地附近的林地或空地中,每个土壤沉积柱采样控制深度在 200 cm 左右,用自制的专门土柱取样器采样,从地表往深部连续采样,100 cm 以上部分、按照 5 cm 或 10 cm 间隔连续采样,100 cm 以下部分、按照 20 cm 间隔连续采样,1 个既定深度对应 1 个样品、每个样品不少于 200 g。所有土壤采样均安排在 2009 年 10 月下旬至 11 月中旬完成。

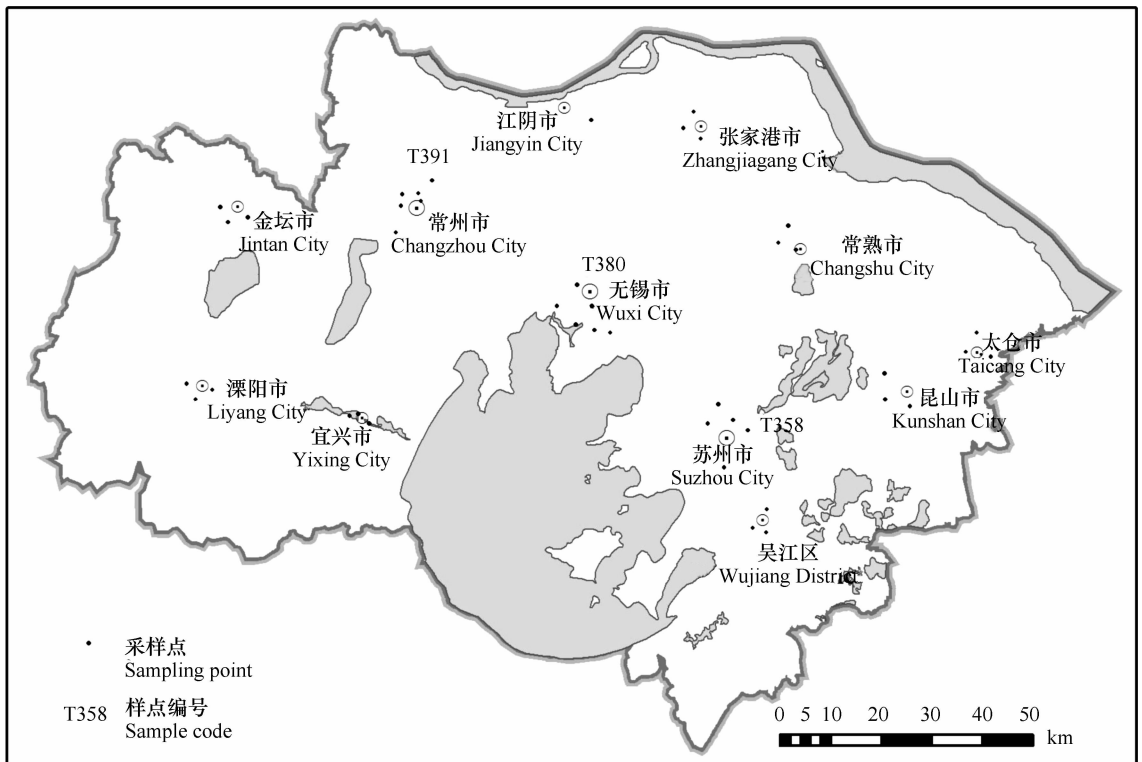


图 1 苏锡常地区城市公园土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil sampling sites in typical city parks of the Su-Xi-Chang area

将所采集的土壤样品自然晾干后,统一过 20 目尼龙筛、剔除杂质,按照均匀缩分法分出约 200 g 送实验室进行分析测试,pH 直接采用所送土样进行测试,样品经石英玛瑙罐磨碎至 200 目后用于元素含量的测定。样品分析测试委托国土资源部南京矿产资源监督检测中心完成,分析中插入 5% 盲样和 2% 国家标样进行质量监控,每个样品分析测试 Cd、Hg、Pb、Zn、Cr、Ni、As、Cu、Sn、Sb、Se、N、P、K、Fe、Mn、B、Mo、S、pH、TOC 及 15 个稀土元素(La、Ce、Pr、Y 等)指标,计 52 项,分析方法有 ICP-MS、XRF、AFS 等,分析测试全部实行规范化、程序化作业。

1.3 研究方法

采用内梅罗综合污染指数(P)对土壤重金属污染状况进行评价。内梅罗综合污染指数(P)计算公式为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(P_i)_{\text{ave}}^2 + (P_i)_{\text{max}}^2}{2}} \quad (1)$$

式中, $(P_i)_{\text{max}}^2$ 为所有污染物中单因子污染指数最大值的平方; $(P_i)_{\text{ave}}^2$ 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 的二级含量限值); i 包括 As、Cd、Hg、Pb、Cu、Cr、Ni、Zn 等 8 项重金属。依据上述综合污染指数 P 的大小,将土壤重金属污染现状分为如下 4 个等级:(1) $P < 1.0$, 清洁;(2) $P = 1.0 \sim 2.0$, 轻度污染;(3) $P = 2.0 \sim 3.0$, 中度污染;(4) $P > 3.0$, 重度污染。

2 结果与讨论

2.1 土壤微量元素分布特征

所调查的 45 个城市公园土壤代表了不同的城市区位,其中部分样品的采样描述及周围背景情况列表对比于表 1,可看出不同城市公园土壤的基本属性多无本质差异、几乎均是亚黏土质地的棕壤或黄棕壤,肉眼很难鉴别不同城市公园土壤之间的环境质量差异,但表 1 的相关信息可为进一步分析各城市公园土壤的元素含量分布提供参考。表 2 列出了本次研究中 12 个代表性城市公园土壤样品的部分元素含量分布数据,表 3 为上述 45 个公园土壤样品有关元素含量分布的参数统计结果,对比分析显示:

公园土壤的 Cd、Pb、Zn 等重金属含量普遍低于部分城区附近的被污染土壤。例如,常州市公园土

壤的 Pb 含量为 26 ~ 72 mg kg⁻¹,而常州市区附近一处重金属污染地的土壤 Pb 含量高达 400 ~ 3 000 mg kg⁻¹,显示出正常公园土壤的 Pb 含量明显低于那些受重金属污染的场地;又如,无锡市公园土壤的 Cd 含量为 0.07 ~ 0.21 mg kg⁻¹,而无锡市区附近某电池厂旁一处重金属污染地的土壤 Cd 含量高达 3.6 ~ 50 mg kg⁻¹,也显示出当地公园土壤 Cd 含量远低于污染区土壤。

公园土壤的 N、P、TOC 等养分的含量低于当地农田土壤,但较农村建筑用地土壤的相应养分含量高。如无锡市境内 11 个城市公园土壤的 TOC 含量为 0.65% ~ 1.69%、平均含量为 1.01%,而无锡市境内农田土壤的 TOC 含量为 1.2% ~ 4.99%、平均含量为 1.95%,无锡境内农村建筑用地土壤的 TOC 含量为 0.16% ~ 1.56%、平均含量为 0.85%,城市公园土壤的 TOC 含量介于正常农田与农村建筑用地土壤之间。

公园土壤的酸碱度(pH)一般偏碱性,如本次所调查的 45 个公园土壤的 pH 介于 6.5 ~ 8.3、pH 平均在 7.8 左右,而苏锡常地区无论是农田土壤、还是建筑用地土壤其平均 pH 低于或接近 7.0,如无锡市农田土壤的平均 pH 为 6.3,常州全市地表土壤的 pH 平均为 6.4。

公园土壤的 Sb、B 含量同当地土壤接近,但公园土壤的 Sb 含量分布很不均一。上述 45 个公园土壤的 Sb 含量介于 0.63 ~ 2.74 mg kg⁻¹之间,元素含量变异系数接近 0.5,平均 Sb 含量为 1.23 mg kg⁻¹,与苏锡常地区同年所采集的 300 个农田土壤样的平均 Sb 含量 1.22 mg kg⁻¹一致,但 Sb 含量在 1.1 mg kg⁻¹以上的样点超过 50%,指示公园土壤中 Sb 含量分布很不均匀;公园土壤的平均 B 含量为 68 mg kg⁻¹,而苏锡常地区土壤的平均 B 含量为 68.8 mg kg⁻¹,两者几乎完全相同。

公园土壤中稀土元素(REE)含量相对稳定,其 REE 总量介于 185 ~ 262 mg kg⁻¹之间。所有样品的 REE 球粒陨石标准化分布形式一致,呈典型的舒缓右倾式折线、相对富集轻稀土的趋势明显,不同公园之间的土壤样品以及公园土壤与整个苏锡常地区土壤之间的 REE 分布形式均十分相似,无论是 REE 标准化分布曲线还是 REE 总量等均是如此。公园土壤样品的 δEu 介于 0.58 ~ 0.65 之间, δCe 值介于 0.84 ~ 0.95 之间,苏锡常地区土壤的 δEu 介于 0.51 ~ 0.71 之间, δCe 介于 0.83 ~ 1.02 之间,均指示公园土壤与当地土壤的稀土元素分布非常接近。

包括公园土壤在内的苏锡常地区几百个土壤样品中、绝大多数样品的 REE 分布均具有上述共性,指

示成土过程也是一个使稀土元素分布均一化的过程。

表 1 苏锡常典型城市公园背景及其土壤采样情况

Table 1 Background of the typical city parks in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region and soil sampling therein

公园名称 Park name	位置 Location	周围环境 Surrounding environment	土壤编号 Code	样点位置 Sampling site	土壤特征 Soil properties
盘门公园	苏州市老城区	老城中历史悠久的公园,周围产业布局复杂,居民较集中	T358	120°36'47"E, 31°17'27"N	黄棕壤,黄褐色亚黏土,原土 ¹⁾
吴江公园	苏州吴江市	市区近中心地段,附近以新兴商业楼为主,绿化环境好	T364	120°38'05"E, 31°09'22"N	黄棕壤,绿地上的半原土 ²⁾
柏庐公园	苏州昆山市区	南靠城际铁路,北、东以居民区为主,未见大型工厂	T366	120°57'16"E, 31°021'26"N	褐色亚黏土,黄棕壤,半原土
太仓公园	苏州太仓市区	城中大片绿地区,周围多为草地与树木,未见工厂	T370	121°05'45"E, 31°26'54"N	黄褐色亚黏土,黄棕壤,原土
虞园	苏州常熟市区	城市中心绿地区,商业区为主,附近未见大的工厂	T372	120°44'08"E, 31°39'10"N	棕壤,亚黏土,原土为主 ³⁾
张家港公园	苏州张家港市	城区近中心地段大片绿地区,未发现工厂,办公区居多	T376	120°31'34"E, 31°51'56"N	灰褐色黏土,棕壤,原土为主
惠山公园	无锡市北塘区	靠近市中心,东侧为市一中,教学办公环境为主,林地多。	T380	120°16'27"E, 31°34'53"N	亚黏土,黄棕壤,原土为主
中山公园	无锡江阴市区	市中心,商业环境为主,靠近步行街,未见大工厂	T385	120°16'08"E, 31°54'38"N	灰褐色亚黏土,棕壤,原土
团氿广场	无锡宜兴市区	西为团氿,东为宜兴市城区。城中公园,附近见热电厂	T386	119°48'30"E, 31°22'23"N	黄褐亚黏土,黄棕壤,半原土
五星公园	常州市钟楼区	北为别墅群,南为居民楼。城中老公园,附近产业多样化	T391	119°54'44"E, 31°47'08"N	黄褐黏土,黄棕壤,原土为主
高静园	常州溧阳市区	城市边缘,以前为城郊农村环境,曾经有工厂	T397	119°48'30"E, 31°22'23"N	黄褐色亚黏土,黄棕壤,原土
华罗庚公园	常州金坛市区	城市中心,绿地较集中,周边工厂、企业多,产品不详	T398	119°34'31"E, 31°44'35"N	潮土,灰褐色亚砂土,半原土
运河公园	苏州市新区	北靠运河,附近多为办公楼,未见大工厂,园中种植混交林	T356	120°34'14"E, 31°17'59"N	灰色亚黏土,黄棕壤,原土
蠡湖公园	无锡市滨湖区	近期城市外扩地段,南临太湖,园林环境,附近多为居民区	T378	120°15'55"E, 31°31'20"N	灰黄色棕壤,亚黏土,原土
翠竹公园	常州市戚墅堰区	主城区边缘,东邻高速公路,绿化环境好,总体属园林景观	T393	119°59'37"E, 31°47'15"N	亚黏土,黄棕壤,原土为主

注:1)“原土”即原地形成的土壤(公园中土壤非异地搬运而来);2)“半原土”指有可能是从外地搬运来,但已经具有 10 年以上历史、基本能反映当地土壤环境质量;3)“原土为主”指主要是原地土壤,但不能完全排除有少量异地搬运来土壤之可能

公园土壤的微量元素分布在沉积剖面上的变化与城市附近的污染土壤有显著不同。图 2 对比了 2 个典型土壤沉积柱中 Cd、Hg、Pb、Se、pH 的分布特点,Z01 柱取自无锡市境内靠近某公园附近的城市

土壤,Z02 柱取自无锡境内一电池厂附近的重金属污染土壤。Z01 柱不同深度土壤中 Cd、Hg、Pb、Se、pH 相对稳定,10 ~ 160 cm 深度各元素含量基本无变化,Z02 柱不同深度土壤中 Cd、Hg、Pb、Se、pH 等

分布有较大差异,在 30 ~ 40 cm 以上深度的地表土壤中 Cd、Hg、Pb、Se 等含量总体明显偏高,pH 明显偏低,指示污染土壤环境微量元素的地表富集及土壤酸化更明显,而公园土壤则相对稳定。这从另一

个侧面证实了正常城市公园土壤的微量元素分布在一定时期内具有相对稳定性,公园土壤与城市中的污染土壤代表了不同的人为活动环境。

表 2 苏锡常典型城市公园土壤样品元素含量

Table 2 Contents of the elements studied in the soil samples from some typical parks in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region (mg kg⁻¹)

元素 Element	T358	T364	T366	T370	T372	T376	T380	T385	T386	T391	T397	T398
Cd	0.59	0.15	0.28	0.23	0.10	0.16	0.072	0.21	0.12	0.14	0.19	0.11
Hg	1.49	0.13	0.12	0.44	0.36	0.059	0.32	1.87	0.30	0.12	1.05	0.44
Pb	65.2	25.6	27.4	32.7	31.0	24.7	35.8	58.0	48.4	28.0	72.0	32.8
Zn	127	61.6	102	87.3	76.9	83.1	74.0	128	69.1	81.5	112	77.8
Cr	80.7	60.7	85.7	74.9	79.3	76.8	78.6	74.2	78.5	83.0	82.0	80.8
Ni	32.8	24.3	38.4	31.3	32.7	33.3	34.0	29.4	28.0	35.8	35.8	37.4
As	20.5	6.88	10.0	7.54	9.24	8.75	10.6	9.77	11.9	8.22	12.7	10.5
Cu	68.2	19.6	30.8	27.9	29.7	25.8	30.1	44.5	38.3	28.9	49.6	34.8
Sn	21.9	5.07	4.81	10.3	14.0	3.54	13.2	30.6	22.6	5.84	27.4	14.4
Sb	2.27	0.69	0.63	0.76	1.19	0.81	1.18	2.69	2.03	0.96	2.15	1.13
Se	0.42	0.26	0.20	0.17	0.19	0.17	0.19	0.45	0.29	0.18	0.34	0.17
B	61.2	79.5	67.9	64.7	83.6	62.9	68.1	59.3	81.1	76.8	68.4	65.6
S	264	286	354	178	194	184	159	370	188	154	310	158
Mo	1.02	0.58	0.61	0.50	0.74	0.50	0.60	1.00	0.79	0.55	0.80	0.52
Fe	3.90	2.87	3.98	3.32	3.68	3.55	3.86	3.28	3.87	3.75	3.88	3.79
Mn	783	580	685	804	741	646	950	818	694	634	769	720
N	103.2	180.7	106.7	929	108.4	809	740	137.7	826	723	137.7	792
P	181.4	715	618	105.3	822	845	589	223.5	560	651	921	879
K	1.62	1.55	2.23	1.94	1.72	1.88	1.59	1.83	1.64	1.82	1.88	1.84
TOC	1.16	1.59	1.02	0.80	1.08	0.89	0.74	1.69	0.99	0.82	1.29	0.72
pH	7.82	6.51	8.03	8.20	7.45	6.68	8.06	7.87	7.61	7.74	7.53	7.64
ΣREE	216.2	224.7	235.7	209.1	251.2	230.3	259.7	231.5	235.9	244.3	241.8	229.2

注:ΣREE 为 La、Ce、Pr、Nd、Y 等 15 种稀土元素的总量,Fe、K、TOC 为 % 含量, pH 为无量纲,其余元素含量单位为 mg kg⁻¹。各样品所代表的公园名称列于表 1

2.2 公园土壤环境质量现状

利用上述 45 个公园土壤样品获取的 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Ni、Zn 等重金属含量分布数据,对其重金属污染状况进行评价,结果见表 4。重金属污染评价结果显示,在 45 个土壤样品中,8 项重金属

属轻度综合污染者占 6.67%,属中度综合污染者占 2.22%,未发现严重污染者,其余 91.11% 皆属于清洁区。存在少量中轻度污染者,多与土壤 Hg 含量超标有直接联系,Hg 是最主要的致污因子。

表 3 苏锡常典型城市公园土壤元素含量基本统计特征

Table 3 Statistics of distribution parameters of element contents in the soils of some typical city parks in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region

元素 Element	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	中值 Mid	标准差 SD	变异系数 CV	平均值 Mean						
							X1 ¹⁾	X2 ²⁾	X3 ³⁾	X4 ⁴⁾	X5 ⁵⁾	X6 ⁶⁾	M ⁷⁾
Cd	0.063	0.59	0.183	0.16	0.1	0.55	0.196	0.086	0.151	0.092	0.083	0.081	0.097
Hg	0.028	3.69	0.464	0.165	0.67	1.44	0.214	0.059	0.082	0.032	0.032	0.037	0.065
Pb	22.2	194	39.76	31	27.64	0.7	34.07	24.04	26.8	22.6	25.3	25.1	26.0
Zn	54.5	128	90.25	87.75	18.36	0.2	83.3	68.78	73	66	72	84	74.2
Cr	60.7	111	79.6	79	7.43	0.09	81.04	81.72	76	76	87	86	61.0
Ni	24.3	38.9	33.27	32.8	3.39	0.1	32.77	34.29	32.9	33.7	40.1	42.2	26.9
As	5.67	20.5	9.41	9.23	2.38	0.25	8.64	9.24	9.4	9.9	10.7	10.5	11.2
Cu	19.6	68.2	34.03	32.2	9.01	0.26	30.25	26.95	26	24	26	28	22.6
Sn	2.81	38.9	10.51	7.095	8.01	0.76	10.68	3.75	5.32	3.16	3.19	3.1	2.6
Sb	0.63	2.74	1.23	1.1	0.57	0.46	1.22	0.78	0.96	0.82	0.79	0.63	1.21
Se	0.07	0.69	0.24	0.2	0.12	0.5	0.33	0.15	0.21	0.1	0.15	0.16	0.29
B	50.6	96.8	67.87	65.8	8.42	0.12	68.85	58.64	56	51	60	61	47.8
S	71.5	486	239.9	203.5	93.82	0.39	457.7	161.4	343	140	652	123.4	—
Mo	0.41	1.56	0.64	0.59	0.21	0.33	0.63	0.47	0.55	0.53	0.45	0.5	2.0
Fe	2.87	4.08	3.59	3.64	0.3	0.08	3.37	3.78	3.35	3.55	4.22	4.19	2.94
Mn	542	950	690.36	685	78.46	0.11	567.9	729.7	629	773	867	961	583
N	482	244.3	1116.3	101.5	399.19	0.36	1572.8	629.7	125.2	460	548	687	—
P	306	223.5	893.5	759.5	420.33	0.47	760.1	483.2	791	529	423	505	—
K	1.48	2.23	1.8	1.83	0.15	0.08	1.65	1.7	1.82	1.86	1.74	2.06	1.86
TOC	0.29	2.83	1.14	1.035	0.48	0.42	1.48	0.43	1.09	0.3	0.44	0.73	1.8
pH	6.5	8.3	7.72	7.82	0.4	0.05	6.41	7.39	7.33	8.04	7.28	7.54	6.7
ΣREE	184.7	261.8	234.5	235.7	15.08	0.06	—	—	—	—	—	—	187.6

注:表中 ΣREE 为 La、Ce、Pr、Nd、Y 等 15 种稀土元素的总量, Fe、K、TOC 为 % 含量; 1) X1 指苏锡常地区表层土壤(0~20 cm)算术平均值; 2) X2 指苏锡常地区深层土壤(150~200 cm)算术平均值; 3) X3 指江苏省表层土壤(0~20 cm)算术平均值; 4) X4 指江苏省深层土壤(150~200 cm)算术平均值; 5) X5 指太湖表层湖积物(0~20 cm)算术平均值; 6) X6 指太湖深层湖积物(150~200 cm)算术平均值; 7) M 指全国土壤平均值,引自文献[17]。“—”表示缺资料

表 4 苏锡常典型城市公园土壤综合评价内梅罗指数分级结果

Table 4 Grading of Nemerow indices of the city park soils in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region

总样品数 Total number of samples (个)	$P < 1.0$		$P = 1.0 \sim 2.0$		$P = 2.0 \sim 3.0$		$P > 3.0$	
	样品数 Number of sample	占比 Percentage (%)	样品数 Number of sample	占比 Percentage (%)	样品数 Number of sample	占比 Percentage (%)	样品数 Number of sample	占比 Percentage (%)
45	41	91.11	3	6.67	1	2.22	0	0

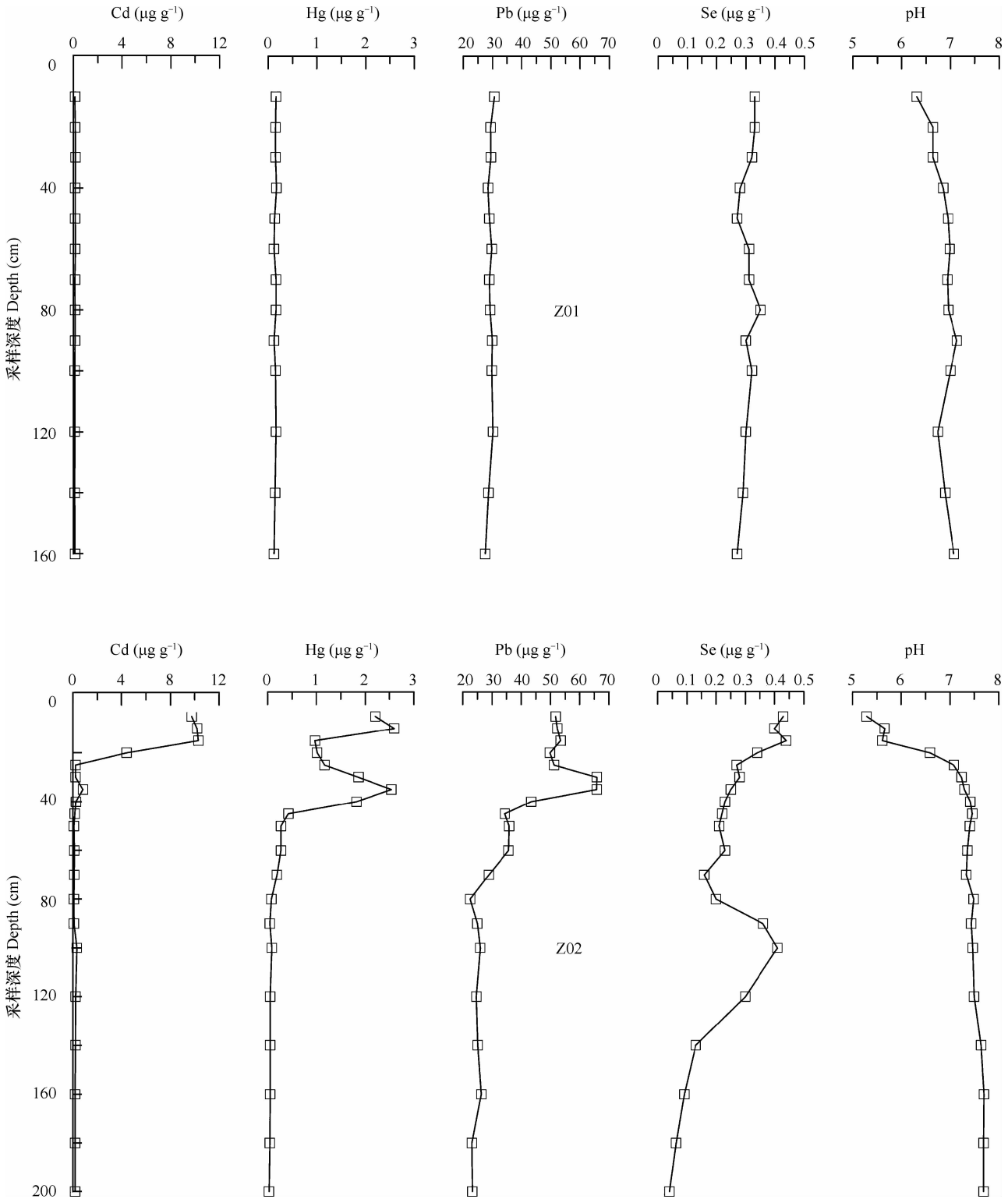


图 2 典型城市公园土壤特征元素沉积柱分布特征

Fig. 2 Distribution of sediment cores of characteristic elements in the two typical city park soils

对比不同城市公园土壤的重金属污染评价结果,发现以吴江公园、宜兴市团氿公园(广场)土壤 Hg 污染相对最严重,吴江公园可能由工矿废弃地改建而成,而团氿公园附近存在热电厂,推测工业污

染仍是形成部分公园土壤 Hg 污染的主因。相对于城市土壤环境易出现 Cd、Pb 等重金属污染而言,公园土壤的 Cd、Pb 等污染程度总体上明显偏低,如常州市区某老工厂附近土壤中 Cd、Pb 等严重污染比

例高达 30% 以上,无锡市城区某处土壤的 Cd 污染已达到极严重污染水平,但本次未发现公园土壤中存在 Cd 与 Pb 的严重污染,也未发现除 Hg 之外的其他重金属存在轻度污染,说明城市公园土壤中除 Hg 外,其他重金属污染程度总体要低于相关城市土壤、特别是要显著低于一些污染工厂附近的土壤。就各污染因子所占比例而言,城市公园土壤中 Hg 污染所占比例为 7.6% (轻度污染为主),其余 7 个重金属元素 As、Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等所占污染比例全部为 0 (无污染),与当地农田土壤的重金属污染构成有所不同,如与上述 45 个公园土壤同时调查的苏锡常地区 355 个农田土壤样品的评价结果显示,其 Hg、Cd、Zn、Cu、As 污染比例分别为 9.01%、8.62%、1.41%、0.56%、0.28%,而其 Pb、Cr、Ni 仍为零污染。

上述城市公园土壤的重金属污染特点与农田土壤、城区污染土壤有差异,从 R 型聚类分析结果中也可找到类似证据,各自样品的 Cd、Hg、Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、Sb、Sn、Se、Mo、S、F、P 等 39 个元素的聚类分析结果显示,城市公园土壤呈 Sb-Sn-Hg 型组合,农田土壤呈 Cu-Pb-Cd-Zn 型组合,城区污染土壤呈 Hg-Cu-Zn-Pb-Sb 型组合,说明公园土壤在污染成因上与其他土壤应有所不同。

2.3 环境指示意义

随着人为活动对地表土壤中微量元素分布的影响越来越显著^[18-22],土壤中微量元素分布的环境指示意义也备受关注。笔者在研究江苏全省土壤微量元素分布特征时,曾发现人为活动因素对 S、Se、Cd、Hg、Sn、TOC、N 等在地表土壤的人为环境富集有显著影响,并证实江苏全省 13 市土壤中 S、Se、Cd、Hg、Sn 等元素的人为环境增量均值(即上述 5 种元素代表人为活动环境下 20 cm 以上深度的表层土壤含量减去其代表自然环境下 150 cm 以下深度的深层土壤含量之增量的平均值,详见文献[16])与各地人口密度呈显著正相关,指示人为活动对土壤环境的改造越强,地表土壤中 S、Se、Cd、Hg、Pb、N 等微量元素出现人为富集的程度就越高^[16]。但城市公园土壤因为相对比较特殊,其微量元素分布也与老城区土壤、特别是城市中靠近污染地的土壤(如工厂附近)有所差异,总体而言,城市公园土壤的微量元素分布以相对稳定且含量较低,具有以下指示意义:

(1) 可为研究人为活动对城市土壤环境的影响程度提供参比依据。像 Se、Cd、Pb、Zn、S 等微量元素含量总体反映了正常土壤的水平,而有别于城市

污染土壤,说明城市公园土壤的微量元素含量主要代表了一个地区受人为活动影响相对较轻的状况,一旦城市公园土壤中 Se、Cd、Pb、Zn、S 等微量元素含量相对于自然土壤环境也出现了显著人为环境富集,则表明当地土壤环境已经普遍受到人为干扰的影响,类似于 Cd、Pb、Zn 等元素的土壤污染就不仅仅是局限在某个特定的城区了。

(2) 可为城市居民选择宜居范围提供参照。一般情况下,一个城市的老公园附近土壤环境质量要优于传统工矿区及新兴工业园区,除非一个公园本身就是利用污染场地改造而成的,凡是在正常农林用地上建成的有一定历史的公园,其土壤环境质量(以重金属污染为标志)变化相对缓慢,即使有个别重金属污染近期也无大危害,居民选择老公园及其附近安居乐业更符合生态安全的理念。

(3) Sb、Sn、Hg 等重金属元素含量代表了一个地区土壤环境受人为活动影响的正常水平,客观记录了人为活动改变城市土壤环境元素含量分布的真实现状。Sb 作为一个比较特殊的金属元素,其环境生物效应以前未被引起足够重视^[23],事实上 Sb 与 Sn、Hg 等重金属元素在土壤环境中的分布有相似性,在苏锡常的城市公园土壤中,Sb、Sn、Hg 三元素含量相对于当地原始土壤环境均有一定程度的增长,但这种增长幅度又不同于 Se、Cd、S 等元素,是一种渐进式的长期积累的增长,很难直接找到污染源,但只要人为活动对土壤环境的改造长期存在,这种渐进式增长就可能继续。

(4) 公园土壤中有机质和酸碱度变化总体不及城市正常土壤明显,有机质含量总体呈逐渐下降趋势,酸碱度基本继承了源区土壤的特征。正常情况下,城市公园土壤的有机质含量较耕地土壤低,一个城市内不同公园土壤的 pH 呈现较大差异,从碱性到酸性均存在,反映了不同公园的源土不一致,同一个城市中年代越悠久的公园,其土壤 pH 越具有可比性。土壤有机质与 pH 的指示意义前人已经总结了很多^[24],但城市公园土壤的有机质与 pH 变化仍有现实环境指示意义,还可深入发掘。

3 结 论

城市公园土壤的微量元素分布具有一定特殊性,其 S、Se、Cd、Pb、Zn 等元素未出现高强度的人为环境富集,TOC 含量明显低于农田土壤,Cd、Pb、Zn 等重金属污染程度明显低于城市污染土壤,公园土

壤的重金属污染主要表现为轻度的 Hg 污染;城市公园土壤中 Hg、Sn、Sb 分布具有相似性,其元素含量变异系数多大于 0.5;城市公园土壤的 pH 分布有较大变化范围,可以在酸性—碱性之间变化,酸碱度的差异同公园土壤来自不同源区有关;城市公园土壤的稀土元素含量与公园之外的其他土壤环境保持了一致性,相对富集轻稀土的趋势明显。总体而言,城市公园土壤的环境质量要优于一般城区土壤,8 项重金属综合污染评价结果显示其 90% 以上土壤处于清洁状态,可为城市居民选择宜居地点提供参考;同时,因为城市公园土壤主要代表了城市中受人为活动影响相对比较轻微的环境,可为研究一个地区的土壤环境微量元素区域背景值、人为活动对城市土壤环境的改造程度等提供依据。

致谢 参加该项研究的还有潘永敏、马浩、杨楠、高孝礼、蔡玉曼、常青、汤志云、黄光明等。中国科学院南京土壤研究所史学正、张甘霖、黄标等三位研究员给予了热情的指导与帮助,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 陈明,曹晓娟,谭科艳,等. 土壤环境中化学定时炸弹的研究现状与展望. 地质学报, 2006, 80(10): 1607—1615. Chen M, Cao X J, Tan K Y, et al. Present and future of the researches on chemical time bomb in soil (In Chinese). *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(10): 1607—1615
- [2] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002: 46—144. Chen H M. Behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality (In Chinese). Beijing: Science Press, 2002: 46—144
- [3] Fakayode S O, Olu-Owolabi B L. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria; Its relationship to traffic density and proximity of highways. *Environmental Geology*, 2003, 44(2): 150—157
- [4] 张甘霖,朱永官,傅伯杰. 城市土壤环境质量演变及其生态环境效应. 生态学报, 2003, 23(3): 539—546. Zhang G L, Zhu Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts—A review (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 539—546
- [5] 谭长银,吴龙华,骆永明,等. 典型潮土剖面主要性质和微量重金属垂直分布特征. 土壤学报, 2009, 46(5): 817—824. Tan C Y, Wu L H, Luo Y M, et al. Vertical distribution characteristics of selected soil properties and trace metals in typical calcareous fluvo-aquic soil profile (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 817—824
- [6] 黄成敏,龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究Ⅲ. 元素地球化学特征. 土壤学报, 2002, 39(5): 644—653. Huang C M, Gong Z T. Genesis of soil derived from basalt in Northern Hainan Island Ⅲ. Element geochemistry (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 644—653
- [7] 叶玮,朱丽东,李凤全,等. 中国中亚热带网纹土的地球化学特征与沉积环境. 土壤学报, 2008, 45(3): 385—391. Ye W, Zhu L D, Li F Q, et al. Sedimentary environment of vermicular red earth in mid-subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 385—391
- [8] 吴卫红,谢正苗,徐建明,等. 杭嘉湖水稻土中氟的分布特征. 土壤学报, 2006, 43(6): 898—904. Wu W H, Xie Z M, Xu J M, et al. Distribution characteristics of fluorine in paddy soils of the Hang-Jia-Hu Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 898—904
- [9] 李新艳,黄春长,庞奖励,等. 淮河上游全新世黄土—古土壤序列元素地球化学特性研究. 土壤学报, 2007, 44(2): 189—196. Li X Y, Huang C C, Pang J L, et al. Geochemical characteristics of elements in Holocene loess-paleosol profile in the upper-reaches of the Huaihe River basin (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 189—196
- [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. 地球化学, 2000, 29(1): 94—99. Qian J P, Zhang L, Liu H L, et al. Soil mercury distribution and pollution in urban and suburbs of Guilin (In Chinese). *Geochemica*, 2000, 29(1): 94—99
- [11] 王学松,秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析. 地球化学, 2006, 35(1): 88—94. Wang X S, Qin Y. Environmental risk and sources of heavy metals in Xuzhou urban topsoil (In Chinese). *Geochemica*, 2006, 35(1): 88—94
- [12] 郑茂坤,骆永明,赵其国,等. 废旧电子产品拆解区农田土壤 Cu、Zn、Pb、Cd 污染特征及空间分布规律. 土壤学报, 2010, 47(3): 384—388. Zheng M K, Luo Y M, Zhao Q G, et al. Contamination characteristics and spatial distribution of Cu, Pb, Zn, and Cd in farmland soil in an electronic waste disassembling area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 384—388
- [13] 廖启林,翁志华,吴新民,等. 覆盖区多目标地球化学调查数据应用前景浅析——以江苏省国土生态地球化学调查成果为例. 地质通报, 2005, 24(8): 772—777. Liao Q L, Weng Z H, Wu X M, et al. Prospects of applications of multi-target geochemical survey data in covered areas—Example from relevant results of ecological geochemical survey of land in Jiangsu, China (In Chinese). *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(8): 772—777
- [14] 廖启林,黄顺生,范迪富,等. 微量元素在湖积物、土壤的垂直分布与稻谷中的分配. 第四纪研究, 2005, 25(3): 331—339. Liao Q L, Huang S S, Fan D F, et al. Vertical distribution in lake sediments and soils and partition within paddy for relevant trace elements: Preliminary testing results from eco-geochemical survey in Jiangsu (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 331—339
- [15] 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. 中国地质, 2009, 36(5): 1163—1174. Liao Q L, Hua M, Jin Y, et al. A preliminary study of the distribution and pollution source of heavy metals in soils of Jiangsu Province (In Chinese). *Geology in China*, 2009, 36(5): 1163—1174

- [16] 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. 第四纪研究, 2013, 33(5): 972—985. Liao Q L, Liu C, Jin Y, et al. Surface environmental enrichment of some elements and its relationship between anthropogenic activity and elemental distribution in soil in Jiangsu Province (In Chinese). Quaternary Sciences, 2013, 33(5): 972—985
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 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 (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 93—493
- [18] Abu-Rukah Y, Ghrefat H A. Assessment of the anthropogenic influx of metallic pollutants in Yarmouk River, Jordan. Environmental Geology, 2001, 40(6): 683—692
- [19] Reimann C, de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic source for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors. Science of the Total Environment, 2005, 337: 91—107
- [20] Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variations in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. Journal of Hydrology, 2002, 263(1/4): 56—71
- [21] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool N, et al. Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. Geoderma, 1998, 86(3/4): 211—228
- [22] Tack F M G, Singh S P, Verloo M G. Leaching behavior of Cd, Cu, Pb and Zn in surface soils derived from dredged sediments. Environmental Pollution, 1999, 106: 107—114
- [23] 吴丰昌, 郑健, 潘响亮. 镉的环境生物地球化学循环与效应研究展望. 地球科学进展, 2008, 23(4): 350—356. Wu F C, Zheng J, Pan X L. Prospect on biogeochemical cycle and environmental effect of antimony (In Chinese). Advances in Earth Science, 2008, 23(4): 350—356
- [24] 戴万宏, 黄耀, 吴丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. 土壤学报, 2009, 46(5): 851—860. Dai W H, Huang Y, Wu L, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in topsoil of zonal soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 851—860

DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS IN SOILS OF CITY PARKS OF SU-XI-CHANG AREA AND ITS SIGNIFICANCE AS ENVIRONMENTAL INDICATOR

Liao Qilin^{1,2} Liu Cong³ Xu Huizhen⁴ Jin Yang^{1,2} Zhu Baiwan^{1,2} Hua Ming^{1,2}

(1 Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210018, China)

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

(3 Office of Land Resources of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China)

(4 China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081, China)

Abstract On the basis of the provincial multi-target geochemical land survey at 1: 250 000 scale in Jiangsu, a total of 45 city parks in the Su-Xi-Chang region, like the Panmen Park in Suzhou, the Wujiang Park in Wujiang, the Huishan Park in Wuxi, the Zhongshan Park in Jiangyin, the Five-star Park in Changzhou, the Hualuogen Park in Jintan, and so on were elected as subjects in a systematic study on distribution of pH, TOC and 50 elements, including Cd, Hg, Pb, Zn, Sb, Sn, B, F, Se, N, REEs, etc. in the soils of these parks. Results show that the distributions of trace elements in city park soils are obviously different from those in polluted urban soils and normal farmland soils. The park soils, as a whole, tend to be low in heavy metal content and significantly lower than farmland soils in N and TOC content. No intensive anthropogenic enrichment of S, Se, Cd, Pb, Zn and TOC is found in the park soils. Heavy metal pollution there is very slight and dominated with Hg, which is related to human activities. The distribution of S, Se, Cd, Pb, TOC and pH in the 0 ~ 200cm soil layer is quite stable and does not vary much with soil depth. All the findings indicate that the distribution of trace elements in most of the park soils has rarely been disturbed by human activities as compared with that in general urban soils. Therefore, the soil environment of the city parks can be cited as reference essential to the study on impacts of human activities on urban soil environment.

Key words Distribution of trace elements; Significance of environmental indicator; Soil; City park; Su-Xi-Chang Region

(责任编辑: 檀满枝)