ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第4期
2014年4月15日

目 次

第35卷第4期
2014年4月
环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE
Vol. 35, No. 4
Apr., 2014

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征

张海珍[1],唐宇力[1],陆骏[2],周虹[1],徐芸茜[2],陈川[2],赵赟[1],王美娥[3*]

(1. 杭州园文局灵隐管理处(杭州花圃),杭州 310012; 2. 杭州植物园,杭州 310012; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

摘要:西湖景区由于其特殊的社会价值和地理位置,其土壤重金属污染问题备受关注. 本研究通过对景区网格布点采样,采用数学统计学和 Arcgis 手段进行西湖风景区土壤重金属污染物的来源及空间分布特征分析. 结果表明,景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显人为累积,为景区的主要重金属污染物,浓度范围分别是 4.6~197、11.1~885、11.7~346 $mg\cdot kg^{-1}$. Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部西湖周围绿地面积比例较小、交通道路密度大、城市化程度较高的区域;不同土地利用类型之间这 3 种重金属污染物含量的多重比较及空间聚类与离散分析的结果表明,交通排放是这 3 种重金属污染物的主要来源. 本研究的结果为城市交通排放重金属污染土壤生态风险评价及城市环境管理提供了基础数据与理论依据.

关键词:城市土壤;重金属污染;交通排放;城市生态风险;空间分布

中图分类号:X131.3;X53 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2014)04-1516-07 **DOI**:10.13227/j.hjkx.2014.04.046

Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area

ZHANG Hai-zhen[1], TANG Yu-li[1], LU Jun[2], ZHOU Hong[1], XU Yun-qian[2], CHEN Chuan[2], ZHAO Yun[1], WANG Mei-e[3]

(1. Lingyin Administration Department (Hangzhou Flower Garden), Hangzhou Park and Cultural Relic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310012, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Due to the importance as a famous scenic area in China and its special geographical position, heavy metal pollution in soils in Xihu Scenic Area has attracted great concerns. Typical heavy metals in surface soils (0-20 cm) in Xihu Scenic Area was investigated using the grid sampling method and statistical analysis and Arcgis approaches. It was suggested that there were anthropogenic accumulations of Cu, Zn and Pb in soils, and they were the main heavy metal pollutants in Xihu Scenic Area. The contents of Cu, Zn, Pb in soils are in the ranges of 4.6-197 $mg\cdot kg^{-1}$, 11.1-885 $mg\cdot kg^{-1}$ and 11.7-346 $mg\cdot kg^{-1}$, respectively. The area with the highest 25% of Cu, Pb and Zn content located in the north-east part of the scenic area, which had lower ratios of green land, dense traffic roads and was characterized with high urbanization. Results of multiple comparison among different land uses and spatial cluster and outlier analysis revealed that those three main heavy metal pollutants Cu, Pb and Zn in Xihu Scenic Area were from traffic emissions. The purpose of this study was to provide basic data and theoretical bases for the ecological risk assessment of heavy metals in urban soils and environmental management of urban soils.

Key words: urban soil; heavy metal pollution; traffic emission; urban ecological risk; spatial distribution

城市土壤重金属污染一直以来是城市环境管理者及环境科学研究者的关注重点. 近年来有关国内外大、中城市土壤重金属污染的研究报道较多,大多集中在土壤重金属污染物的来源及空间分布特征分析研究. 众多研究报道表明,城市土壤重金属污染来源主要为工业活动、交通排放以及废弃物填埋等,其中交通排放是城市环境中的主要非点源污染来源[1,2]. 交通源重金属引起的土壤污染已经成为了环境科学与土壤学的关注热点,对城市不同功能区土壤重金属含量的调查结果发现,城市主要交通干道土壤中 Cu、Pb、Zn 含量较高,通过 Pb 同位素的研究发现,香港城市土壤中汽车排放等人为输入的污染水平明显较其它区域高[3]. 对土耳其伊斯坦布尔的街尘、表土层以及亚表层土壤的调查中发现,Pb、Zn、Cu 含量在汽车流量大的高速公路旁显著比二级公路旁高,说明来源于交通排放(包括尾气排放及刹车片和轮胎磨损)是城市中重金属的主要来源[4]. 对北京市建成区的土壤重金属调查结果发现,北京市区土壤中 Pb、Cu、Zn 主要来自于交通源[5].

西湖景区地处杭州市城西,自古以来为著名旅

收稿日期:2013-08-11;**修订日期**:2013-10-23
基金项目:杭州市科技发展计划项目(20130533B23);杭州园文局科技发展计划项目(201101)
作者简介:张海珍(1975~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为园林生态,E-mail:haizhenzhang@hotmail.com
* 通讯联系人,E-mail:mewang@rcees.ac.cn

游胜地，植被覆盖率达 98%，周围无工矿企业等污染源，被形容为杭州的“绿肺”. 然而，随着景区旅游业的蓬勃发展，人类活动对环境影响程度的日益增大. 最为显著的是交通压力增大，高度密集的旅游活动使风景区成为了杭州市城市土壤重金属污染的重点区域，众多针对杭州市土壤重金属污染的研究报道中都指出了西湖景区土壤的环境质量问题[6~14]. 目前，针对西湖风景区环境问题的研究大多以西湖水体[15]、湖中沉积物[16]、茶叶[17]及茶园土壤[18,19]，尚未有针对整个西湖风景区土壤重金属污染物的分布特征及主要来源进行系统的研究报道.

本研究以西湖风景区土壤为对象，通过空间网格布点采样分析，揭示景区土壤中典型重金属污染物的空间分布特征，分析和探索影响西湖风景区土壤重金属污染物的来源及影响空间分布的关键因子，以期为城市土壤重金属污染生态风险研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集及化学分析

本研究区域为西湖风景区主体部分，面积约为 65 km^2. 首先对研究区域进行 500 m×500 m 网格划分，然后在大面积相同土地类型区域如山体，按照 1 km×1 km 布置采样点，在土地利用类型较为破碎的区域按照 500 m×500 m 布置采样点；结合景区土地利用类型所占比例，分别采集茶园样点 6 个、景区绿地样品 8 个、林地 66 个、交通区 27 个、住宅区 9 个、竹林 5 个，共采集土壤样品 123 个，采样点分布如图 1 所示. 采用 10 m×10 m 正方形 5 点混合采样方法采集 0~20 cm 表层土壤混合表层土壤样品.

土壤样品风干后，碾磨，过 2 mm 筛. 一部分过 2 mm筛的土壤继续碾磨，过 100 目筛. 称取 100 目土壤样品 0.5 g，采用 1∶1王水法消煮. 消煮结束后，采用 ICP-AES 测定 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、V、Mn、Co、P 等 9 种元素的含量. 同时使用土壤标准物质 GSS-5 进行质量控制.

1.2 数据分析方法

采用 SPSS 18，把 9 个所测元素组成一个多元数列进行多元分析、方差分析(ANOVA)、多重比较以及皮尔逊相关分析. 在多元分析之前，原始数据采用对数转换法进行标准化. 存在潜在土壤污染的重金属元素通过含量的普通 Kriging 插值(ArcGIS 9.0)以及局部 Moran's Ⅰ法进行空间分布特征分析，在插值前原始数据进行自然对数转换.

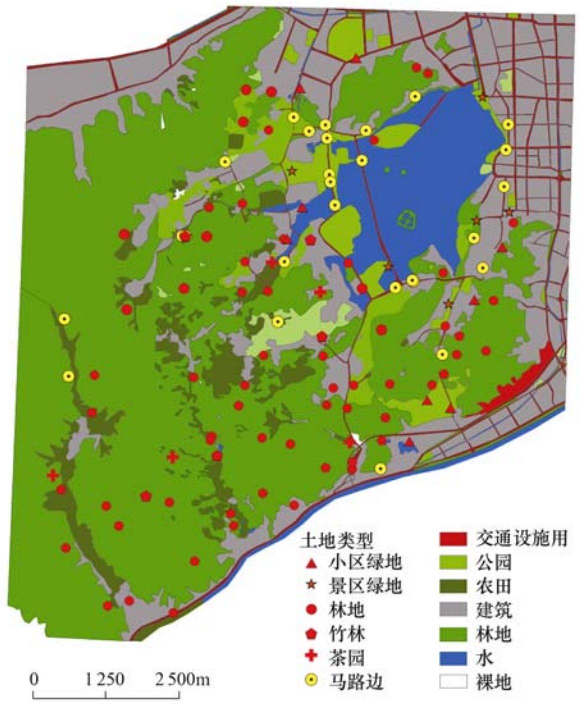

图 1 西湖景区采样点分布示意

Fig. 1 Simplified map of Xihu Scenic Area with soil sampling locations

采用局部 Moran's Ⅰ法进行土壤重金属污染的空间聚类分析和空间离群[20]，重金属污染空间聚类意味着重金属污染物含量较高的样点的周围样点重金属含量同样较高，而重金属污染空间离群意味着重金属污染物含量较高的样点的周围样点重金属含量中等或较低. 较高的正局部 Moran's Ⅰ指数说明采样点具有和周围样点类似较高或较低的重金属含量，这些样点被称之为土壤污染“区域性热点”(regional hotspots)或“区域性凉点”(regional coolspots). 反之，较高的负局部 Moran's Ⅰ指数说明该采样点与周围采样点相比重金属含量明显较低或较高，具有空间离散性，比周围采样点重金属含量高的样点称之为“独立热点”(individual hotspots)，反之为“独立凉点”(individual coolspots). 本研究中采用欧式距离矩阵分析法进行权重矩阵设置.

2 结果与讨论

2.1 西湖景区土壤元素含量的统计学分布情况

西湖风景区土壤元素的统计学分布如表 1 所示，9 种所测的土壤元素都具有较大的标准差，最大值与最小值之间差异 1~2 个数量级.

土壤元素含量的数学分布在自然状态下一般呈

表 1 西湖风景区土壤元素含量的描述性统计学分布/mg·kg^{-1}

Table 1 Statistics distribution of soil elements contents in Xihu Scenic Areas/mg·kg^{-1}

元素	最小值	中值	最大值	平均值	S. D.
Mn	18.3	368	1 388	397	287
Cu	4.60	19.7	197	250	22.1
Zn	11.1	56.6	885	82.4	91.0
Pb	11.7	43.1	346	54.6	45.5
Cr	8.33	27.4	300	32.1	28.6
Ni	7.93	21.7	99.6	23.2	11.3
Co	0.47	8.48	18.1	8.17	4.09
V	15.5	39.8	133	44.3	19.7
P	88.7	502	2 907	715	561

对数分布,然而如果人为干扰使土壤元素含量发生变化,其数学分布会发偏离正态分布[21]. 为了明确西湖景区土壤元素的分布情况,需要对数据进行多元统计分析,因此必须对原始数据的概率分布情况进行分析[22]. 对原始数据及其对数转换的数据进行了 Lilliefors 显著性校准,这些数据的形状参数以及 K-S 正态分布检验结果如表 2 所示. 西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量的原始数据都呈正偏态,偏度和峰度参数都较大. 而剩余的几种元素 Mn、Co、V 和 P 的峰度明显比前 5 种元素小. K-S p 值是检验是否正态分布的重要参数,当 K-S p 值大于 0.05 时,数据呈正态分布,当小于 0.05 时为非正态分布,从表 1 可以看出,除了 Mn 和 Co 元素以外,西湖景区土壤元素含量的原始数据的 K-S p 值都达到了极显著水平,说明非正态分布较为严重. 对原始数据进行对数转换后,除了 Mn 和 Co 元素,其它元素非正态分布的状况有明显改善,偏度和峰度参数明显降低,并趋向"0",K-S p 值都超过了 0.05,通过了正态检验. 以上结果表明,西湖景区重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni,V 和 P 含量受到了人为因素干扰,然而,干扰程度相对较小.

表 2 西湖景区土壤元素含量数据分布特征参数及其 K-S p 检验结果

Table 2 Shape parameters and results of kolmogorove smirnov test after Lilliefors significance correction (K-S p) for element concentrations in soils in Xihu Scenic Areas

元素	原始数据			对数转换		
	偏度	峰度	K-S p	偏度	峰度	K-S p
Cu	4.55	30.9	0.00	0.420	0.673	0.941
Zn	6.00	50.0	0.00	0.569	0.851	0.528
Pb	3.52	16.4	0.00	0.720	1.14	0.427
Cr	7.17	64.8	0.00	1.23	4.99	0.122
Ni	2.92	16.3	0.00	0.189	0.822	0.818
Mn	1.17	1.77	0.242	-0.713	0.058	0.029
Co	0.201	-0.369	0.674	-1.54	2.80	0.001
V	2.20	5.94	0.001	0.646	1.42	0.317
P	1.66	3.05	0.004	0.021	-0.422	0.855

2.2 西湖景区土壤典型重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 基本统计结果及比较

土壤重金属元素背景值是衡量土壤中重金属元素累积和人为污染强度的依据. 如表 3 所示,西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 的平均值和标准差明显高于 1985 年与 2002 年的背景值水平[7,12],Cr 元素评价含量低于背景值,而 Ni 元素的含量与背景值相似. 与 2002 年背景值最高限值的比较结果发现,西湖景区表层土壤中 Cu 含量高于背景值最高限值占总样品数量的 13.8%、Zn 为 10.6%、Pb 为 56.9%、Cr 为 1.6%、Ni 为 5.69%. 一半以上的样点 Pb 含量超过背景值的最高限值,说明总体上 Pb 在西湖景区土壤中水平较高. 根据许多研究结果报道,城市区域中公园土壤 Pb 含量较其它土地利用类型高,北京市城市土壤调查中也发现公园土壤中 Pb 含量在所有土地利用类型土壤中最高,并且老城区的土壤 Pb 含量较新城区高,这现象发生的原因可能是因为在 20 世纪 90 年代之前含铅汽油的消耗使道路密度大、交通量高的区域土壤中的 Pb 含量较高,随着含铅汽油被禁止使用后,土壤中 Pb 的累积逐步下降,但是含铅汽油排放对土壤 Pb 污染的影响将会持续几十年[23]. Cr 和 Ni 高于最高限的样品数量较少,Cr 只有两个样品高于最高限值,值得注意的是景行桥样点土壤 Cr 含量达 300 mg·kg^{-1},远远超过土壤环境质量标准的二级标准 150 mg·kg^{-1} (pH < 6.5),这与该样点土壤为客土有关. 总之,与背景值的比较西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显累积,部分样点已经达到污染水平,Cr 和 Ni 总体上处于自然背景值范围,只有个别客土样点存在累积现象.

与以往有关杭州市城市土壤重金属污染状况的报道比较[6~14; 17~19]（表 4），本研究在农业用地（茶园）土壤中的 Pb 和 Zn 元素的最大值、最小值及平均值和标准差都比文献报道高，而 Cu、Cr 和 Ni 含量比其它报道结果低. 对商住区土壤的结果比较发现，本研究调查区域的 5 种重金属元素含量都比文献报道低. 因此，除了农业用地的 Pb 和 Zn 以外，西湖景区农业用地（茶园）和商住区土壤重金属含量与杭州市其它区域相比处于较低水平.

表 3　西湖景区土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量与杭州市土壤背景值比较结果（mean ± S. D.）

Table 3　Comparison of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni content in soils in Xihu Scenic Area with the respective background values in Hangzhou City (mean ± S. D.)

项目	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni
实测值/$mg \cdot kg^{-1}$	25.0 ± 22.1	82.4 ± 91.0	54.6 ± 45.5	32.1 ± 28.6	23.2 ± 11.3
背景值(1985)/$mg \cdot kg^{-1}$	18.6 ± 9.68	76.8 ± 70.2	20.7 ± 10.7	58.1 ± 29.5	20.8 ± 9.3
背景值上限(2002)/$mg \cdot kg^{-1}$	40.8	110	38.2	92.1	41.1
n > 背景值/%	13.8	10.6	56.9	1.60	5.69

表 4　西湖景区农业用地与商住区土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 元素含量与杭州市其它文献报道结果的比较

Table 4　Comparison of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni contents in soils in agricultural and residential areas in Xihu Scenic Area with those reported in other areas in Hangzhou City

土地利用类型	项目	Cu	本研究	Pb	本研究	Cr	本研究	Zn	本研究	Ni	本研究
农业用地/$mg \cdot kg^{-1}$	最大	48.3	46.9	53.5	71.5	60.9	29.6	220	257	—	24.6
	最小	24.2	13.7	11.7	22.2	37	18.6	75	30.4	—	9.1
	平均	33.4	23.0	36.4	45.4	49.0	26.3	141	79.8	22.7	18.2
	SD	7.38	12.10	12.4	17.1	16.9	4.2	48.2	88.1	—	5.7
商住区/$mg \cdot kg^{-1}$	最大	154	86.3	752	241.7	60.3	44.2	301	202	31.5	31.5
	最小	34.4	10.7	13.3	12.7	39.9	23.1	76.8	48.7	22.8	11.6
	平均	80.8	31.4	313	65.1	47	31.0	176	89.9	27.0	24.8
	SD	62.0	24.2	390	74.8	8.3	7.8	96.5	48.4	4.8	7.4

2.3　西湖景区土壤元素的多元统计分析

多维尺度分析方法能够把来源相似的土壤元素进行分类. 对西湖景区土壤元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Mn、P、V、Co 含量的对数进行多维尺度分析（图2），结果发现可以分为4 组：第一组：P 元素；第二组：Cu、Zn 和 Pb 元素；第三组：Mn 和 Co 元素；第四组：Cr、Ni 和 V 元素. 对9 种元素的主成分分析结果见表 5，一共可以提取 3 个主成分，即这 9 种元素可以分为 3 组：第一组：Cu、Zn、Pb、P；第二组：Cr、Ni 和 V；第三组：Mn 和 Co 两种分类方法除了 P 元素的归属以外，结果基本一致. 在多维尺度分析中 P 元素和 Cu、Zn、Pb 这 3 种元素分开了，但是在主成分分析中这 4 种元素归属于一类. 然而，环境中通过人类活动如农业施肥以及生活垃圾排放途径输入的 P 元素较多，因此在主成分分析中 Cu、Zn、Pb 这 3 种重金属与 P 元素归属于一类能够解释为都具有人为输入的影响. 另一方面，多维尺度分析结果中 P 元素单独一组，这是因为 P 是非重金属元素，其化学性质及地球化学行为与重金属元素不同，因此导致其在土壤中的分布与重金属元素的分布差异. 此外，从多维尺度分析的结果中也可以看出 Mn 和 Co 这 2 种元素之间以及 Cr、Ni 和 V 这 3 种元素之间具有相似性质，而 Zn、Pb 和 Cu 之间具有相似性质. 结合统计学分布分析以及与背景值比较的结果，西湖景区土壤中 Zn、Pb 和 Cu 这 3 种重金属的人为累积效应较为明显，因此西湖景区土壤中的重金属污染物为 Zn、Pb 和 Cu 元素.

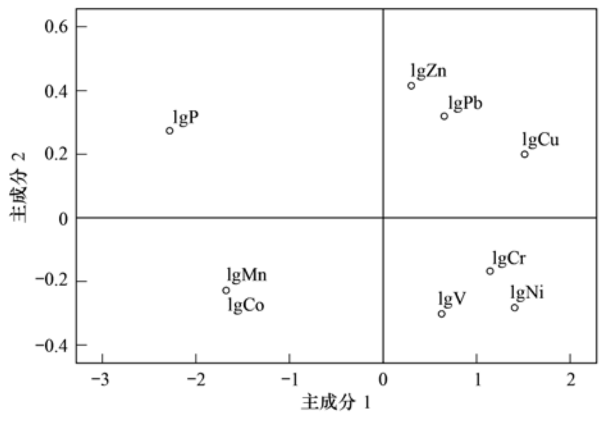

图 2　西湖景区土壤元素的多维尺度分析

Fig. 2　Multidimensional scaling analysis of elements in soils in Xihu Scenic Area

表 5 西湖风景区土壤元素主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis of soil elements in Xihu Scenic Area

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Mn	0.251	0.211	0.891
Cu	0.950	0.092	0.089
Zn	0.886	0.083	0.044
Pb	0.853	0.023	0.112
Cr	0.045	0.957	-0.008
Ni	0.129	0.894	0.235
Co	0.114	0.206	0.924
V	-0.128	0.825	0.349
P	0.751	-0.120	0.230
特征值	3.73	2.59	1.18
方差百分比/%	41.5	28.8	13.1

2.4 不同土地利用类型对西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb 和 Zn 累积的影响

对西湖景区不同土地利用类型土壤重金属污染物 Cu、Pb 和 Zn 含量的方差分析和多重比较结果如表 6 所示，公路边土壤中这 3 种重金属含量在 5 种土地利用类型中最高，林地土壤中含量最低，并达到显著水平（$P < 0.05$）. Cu 元素在 5 种土地利用类型土壤中的含量大小次序为：公路边 > 住宅区绿地 > 景区绿地 > 茶园 > 林地；Zn 元素含量大小的次序为：公路边 > 景区绿地 > 住宅区绿地 > 茶园 > 林地；Pb 含量的大小为：公路边 > 住宅区绿地 > 景区绿地 > 林地 > 茶园. 以上结果表明，西湖景区重金属污染物 Pb、Zn、Cu 主要来源于交通排放.

表 6 西湖景区不同土地利用类型土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb 含量之间的比较结果（mean ± S. D.）

Table 6 Contents of Cu, Zn and Pb in soils of different land uses in Xihu Scenic Area

土地利用类型	Cu	Zn	Pb
茶园/$mg \cdot kg^{-1}$	22.9 ± 12.1b	79.8 ± 88.1b	45.4 ± 17.1ab
景区绿地/$mg \cdot kg^{-1}$	28.1 ± 9.9ab	104 ± 62.9ab	57.0 ± 23.2ab
林地/$mg \cdot kg^{-1}$	18.0 ± 11.4b	51.8 ± 31.6b	46.3 ± 31.3b
公路边/$mg \cdot kg^{-1}$	41.6 ± 35.7a	157 ± 155a	76.0 ± 67.2a
住宅区绿地/$mg \cdot kg^{-1}$	30.0 ± 23.0ab	87.5 ± 45.9b	60.9 ± 71.1ab

2.5 西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb、Zn 的空间分布特征

把西湖景区土壤重金属污染物 Cu、Pb、Zn 含量范围分成 3 个等级，分别为：低于 25% 的含量、25% ~75% 之间的含量、高于 75% 的含量，然后进行普通克里格插值，结果见图 3. Cu 含量最低 25% 的区域在西北部，该区域在五云山一带，城市化程度较低，无重要的交通道路；除了东北部和西南部以外，其它大部分区域的 Cu 含量在 25% ~75% 之间. Pb 和 Zn 含量最低 25% 的区域没有能够在普通克里格插值图中显现出来，说明所占面积比例非常小；最高 25% 的区域较为明显，集中在东北部城市化较高的区域，并且 Zn 所占的面积比 Pb 大，几乎覆盖了整个东北部道路密集区域. 由此可见，Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部城市化程度较高的区域，并且这个区域的绿地面积比例较小，交通道路密度大. 与不同土地利用类型之间的统计分析结果类似，普通克里格插值的结果表明交通排放是西湖景区土壤中 Cu、Pb、Zn 这 3 种重金属污染的主要来源.

土壤污染调查中污染“热点”和“凉点”分别指与周围样点比较污染物含量较高或较低的样点，也就是污染物含量区域相对高点和低点. 与普通克里格插值不同，污染物分布的“热点”和“凉点”分析有助于鉴别出污染物含量异常的样点，是污染来源分析的重要手段，尤其是区域性污染物“热点”与独立污染物“热点”具有重要意义，例如：区域性污染物“热点”一般表示面源污染，而独立污染物“热点”一般是点源污染引起. 对西湖景区 Cu、Pb、Zn 这 3 种重金属污染物的“热点”分析结果如图 4 所示.

Cu 的区域性“热点”有 4 个，分别位于凤凰山风景区：玉皇山月宝厅、将台山、八卦田南观音洞、八卦田北门，对比 Cu 的普通克里格插值图可以发现，区域性“热点”并不位于 Cu 含量最高 25% 级别的区域内，说明这些区域性高含量样点有可能是因为这个区域的成土母质或成土母岩的原因；Cu 的独立“热点”有 2 个，分别为龙井问茶和满觉陇与虎跑路路口，这两个样点与周围样点比较，Cu 的含量显著较高，根据这两个样点都是车流量较高的区域，土壤中 Cu 的累积可能来自于汽车排放.

Pb 的区域性“热点”较多，一共有 17 个样点，几乎覆盖了西湖周围一圈所有的重要景点，并位于普通克里格插值图的含量最高 25% 区域内. Pb 的独立“热点”有 2 个，分别为上天竺站和白塔，这两个样点一直以来都是交通要道，因此较周围区域含量高.

Zn 的区域性“热点”分布与 Pb 类似，一共为 12

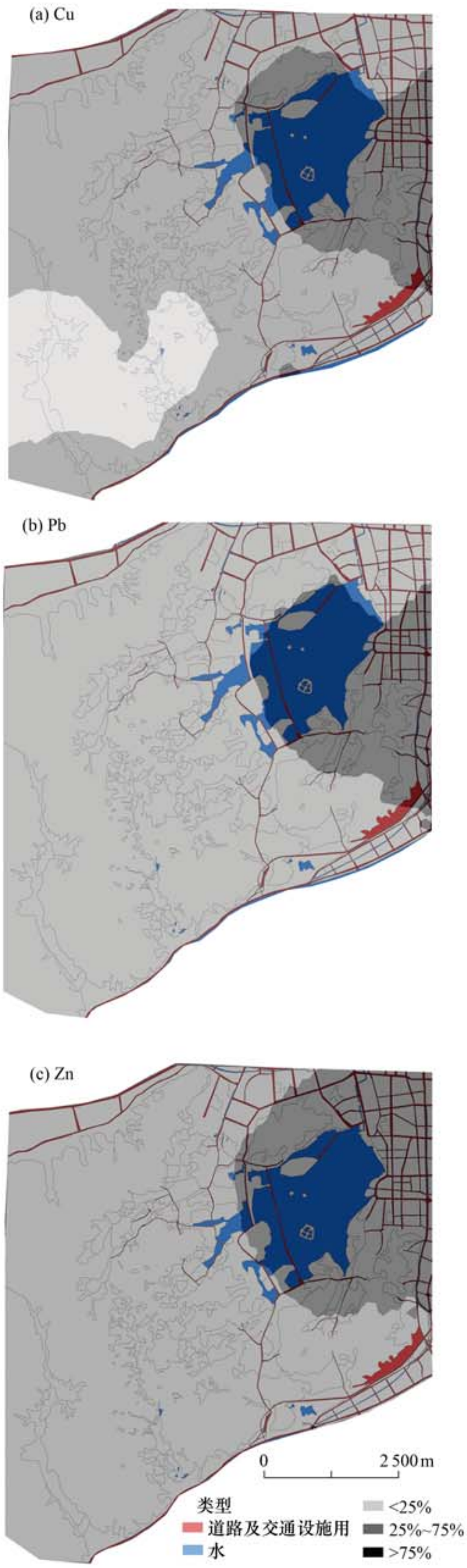

图 3　西湖景区重金属污染物 Cu、Pb、Zn 的普通克里格插值图

Fig. 3　Spatial distribution Cu, Pb and Zn in soils in Xihu Scenic Area

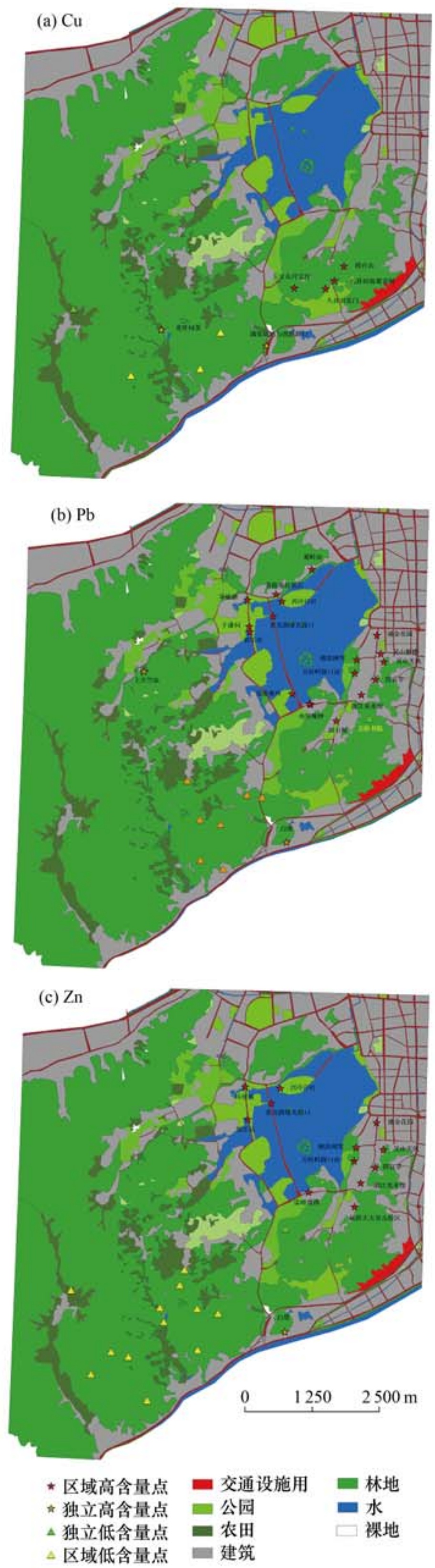

图 4　西湖景区土壤重金属 Cu、Pb、Zn 污染的“热点”和“凉点”分布

Fig. 4　Pollution hotspots and coolspots identification of Cu, Pb and Zn in soils in Xihu Scenic Area

个,都分布于西湖周围的主要景点中,并位于普通克里格插值图的含量最高 25% 区域内. Zn 的独立"热点"只有一个,位于白塔. 西湖景区土壤中 Zn 的累积特征与 Pb 十分类似,城市土壤中 Pb 的累积与汽车排放十分相关,因此从 Zn 的空间分布特征中也可以发现,西湖景区土壤中 Zn 的累积主要来源于汽车排放.

因此,从西湖景区土壤污染物 Cu、Pb、Zn 的空间分布特征中也可以推断出这 3 种重金属污染物主要来源于交通排放.

3 结论

(1)西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 含量呈正偏态分布,在土壤中的累积存在人为因素干扰,但是干扰程度相对较小.

(2)西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 的平均值和标准差明显高于背景值水平,Cr 元素评价含量低于背景值,而 Ni 元素的含量与背景值相似; 与背景值的比较结果表明,西湖景区土壤重金属 Cu、Zn、Pb 有明显累积,为景区的主要重金属污染物,Cr 和 Ni 总体上处于自然背景值范围,只有个别样点存在累积现象; 多维尺度分析以及主成分分析结果表明,西湖风景区土壤重金属污染物为 Cu、Zn、Pb.

(3)西湖风景区交通区土壤中 Zn、Pb 和 Cu 显著比其它土地利用类型尤其是林地土壤高; 空间插值结果也表明,Cu、Pb、Zn 含量最高 25% 的区域都在景区东北部绿地面积比例较小,交通道路密度大,城市化程度较高的区域,交通排放来源的特征较为明显.

(4)污染"热点"与"凉点"分析结果表明:Cu 的区域性"热点"是由于区域成土母质或成土母岩的原因,而两个独立"热点"来源于汽车排放; Pb 和 Zn 的区域性"热点"基本覆盖西湖周围的重要景点; 其余的独立高"热点"也具有汽车流量大的特点.

参考文献:

[1] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 1937-1945.

[2] 邵莉, 肖化云, 吴代赦, 等. 交通源重金属污染研究进展[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 445-459.

[3] Li X D, Lee C S, Wong S C, *et al*. The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach[J]. Environmental Pollution, 2004, **129**(1): 113-124.

[4] Guner M, Onay T T, Copty N K. Impact of overland traffic on heavy metal levels in highway dust and soils of Istanbul, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **164**(1-3): 101-110.

[5] Wang M, Markert B, Chen W P. Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(10): 5889-5897.

[6] 宋明义, 刘军保, 周涛发, 等. 杭州城市土壤重金属的化学形态及环境效应[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 666-670.

[7] 余世清, 杨强. 杭州城市土壤重金属污染研究进展及展望[J]. 环境科学与管理, 2011, **36**(4): 44-49.

[8] 贾华清, 章明奎. 杭州市城市土壤重金属的积累和释放潜力及其空间分异[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, **33**(6): 677-684.

[9] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 生态环境, 2003, **12**(3): 277-280.

[10] 康占军, 王加恩, 任荣富, 等. 浙江省安吉县土壤元素含量背景值[J]. 甘肃农业, 2009, (7): 81-86.

[11] 李向远, 蔡子华, 任荣富, 等. 浙江天目山地区土壤地质与地球化学特征[J]. 甘肃农业, 2005, (10): 41-42.

[12] 汪庆华, 董岩翔, 郑文, 等. 浙江土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 地质通报, 2007, **26**(5): 590-597.

[13] 王美青, 章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5): 603-608.

[14] 刘玉燕, 刘敏, 刘浩峰. 城市土壤重金属污染特征分析[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 184-188.

[15] 王莉红, 汤福隆, 胡岭, 等. 杭州西湖水中四种重金属的形态分布和交换过程研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(2): 147-152.

[16] 路远发, 陈好寿, 陈忠大, 等. 杭州西湖与运河沉积物铅同位素组成及其示踪意义[J]. 地球化学, 2006, **35**(4): 333-345.

[17] 励建荣, 陆海霞, 季静冰. 浙江省部分地区绿茶中重金属含量的调查和研究[J]. 中国食品科学, 2004, **4**(1): 87-92.

[18] 李仪, 章明奎. 杭州西郊茶园土壤重金属的积累特点与来源分析[J]. 广东微量元素科学, 2010, **17**(2): 18-25.

[19] 麻万诸, 章明奎. 浙江省典型茶园生态系统中重金属流及其平衡分析[J]. 茶叶科学, 2011, **31**(4): 362-370.

[20] Zhang C, Luo L, Xu W, *et al*. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland [J]. Science of the Total Environment, 2008, **398**(1-3): 212-221.

[21] 王学松, 秦勇. 利用对数正态分布图解析徐州城市土壤中重金属元素来源和确定地球化学背景值[J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 98-102.

[22] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2006, **142**(3): 501-511.

[23] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al*. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**(4): 542-551.

HUANJING KEXUE Vol. 35 No. 4
Environmental Science (monthly) Apr. 15, 2014

CONTENTS

环境科学

(HUANJING KEXUE)

(月刊　1976 年 8 月创刊)

2014 年 4 月 15 日　35 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly　Started in 1976)

Vol. 35　No. 4　Apr. 15, 2014

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号,邮政编码:100085) 电话:010-62941102,010-62849343 传真:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102,010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com	**Distributed** by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
订购处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	**Foreign**	China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行