

宜宾市城市土壤锌含量的空间分布特征 及污染评价

郭广慧^{1,2}, 张航程³

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 四川省汶川县城乡规划局, 汶川 623000)

摘要: 在对四川省宜宾市 63 个土壤样品 Zn 含量分析的基础上, 运用 GIS 地统计模块对 Zn 的空间分布特征和污染状况进行了系统分析。结果表明: 不同功能区土壤 Zn 含量从高到低依次为: 工业区>交通区>商业区>居民区>风景区; 工业区、交通区和商业区土壤 Zn 含量显著高于四川省土壤背景值 (82.1 mg/kg) ($p=0.000$), 居民区和风景区土壤 Zn 含量与背景值无显著性差异 ($p>0.05$); 与四川省土壤基线值 (156.4 mg/kg) 相比, 工业区、交通区和商业区土壤 Zn 超标率分别为 71.42%、41.67% 和 33.33%, 其他功能区未超标。地统计分析表明, 土壤 Zn 具有中等程度的空间相关性, Zn 的空间分布受随机性因素和结构性因素的共同影响。克里格插值分析表明上江北、下江北区域土壤 Zn 污染严重, 翠屏区和南岸区也表现出一定污染, 尤以工业区、交通区和商业区 Zn 污染最突出。

关键词: 城市土壤; 锌; 地统计分析; 克里格插值; 宜宾市

文章编号: 1000-0585(2011)01-0125-09

1 引言

城市是受人类活动影响最强烈的区域, 矿山开采、金属冶炼、交通活动和城市生活等极易造成城市土壤中重金属的富集^[1~3]。这些重金属元素在城市土壤中重新分布, 使得土壤介质既是重金属的汇, 又是重金属污染的源^[4]。由于重金属在环境中不可降解, 因而重金属在城市土壤中的积累具有较大的环境污染危害和重要的环境指示意义。

重金属与人类健康有密切关系。Zn 是人体的必需元素, 若缺锌会引起侏儒症、糖尿病、高血压^[5], 还会影响儿童的智力发育^[6]; 但长期暴露在含 Zn 环境中, 会引起慢性锌中毒, 如贫血、白血球减少、免疫力受损、体重减轻^[7]。城市土壤中的重金属可以通过呼吸吸入和皮肤接触等途径进入人体, 尤其是儿童具有较多的手-口活动且免疫力较低, 极易受到重金属的影响^[8~10]。研究城市土壤重金属污染具有非常重要的意义。

目前, 人类活动引起的城市土壤质量演变已成为国内外学者关注的热点, 已有学者对伦敦^[11]、纽约^[12]、曼谷^[13]、高威 (爱尔兰)^[14] 和格鲁利亚斯科 (意大利)^[15] 等城市土壤重金属污染开展了调查研究工作; 北京^[16, 17]、上海^[18]、香港^[19]、沈阳^[20]、深圳^[21]、徐州^[22]、长春^[23]、西安^[24]、乌鲁木齐^[25] 和杭州^[26] 等地也陆续对城市土壤重金属进行了研

收稿日期: 2010-06-04; 修订日期: 2010-09-06

基金项目: 四川省青年基金项目 (2007Q04)

作者简介: 郭广慧 (1981-), 女, 山西交城人, 讲师, 博士, 主要从事区域环境质量评价研究。

Email: kellyggh@163.com

究。应用 GIS 和地统计模型对城市不同功能区进行空间分析, 可以为人类提供污染物的空间分布特征、空间变异性等有效信息^[27,28], 并可以将污染程度直观地表达出来, 有利于解释污染物的来源。因此, 本研究基于 GIS 地统计分析模块, 以长江上游宜宾市城区为例, 对城市土壤 Zn 含量及其空间分布特征进行研究, 以期在城市环境污染防治、城市规划 and 城市环境质量改善提供科学依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区域

宜宾市位于四川省南部, 地跨 $27^{\circ}50' \sim 29^{\circ}16'N$ 、 $103^{\circ}36' \sim 105^{\circ}20'E$, 处于川、滇、黔三省交汇地, 长江零公里处。市区总面积 1123 km^2 , 人口 70 多万^[29]。市内地势呈西南高东北低之势, 海拔 $236 \sim 2800 \text{ m}$, 属亚热带季风性湿润气候, 全市多年平均温度 17.5°C , 年平均降水为 1168 mm , 合降水量为 154.9 亿 m^3 ^[30]。

2.2 样品采集与分析

2008 年 11~12 月在宜宾市五个功能区(工业区、商业区、交通区、居民区和风景区)共采集 63 个具有代表性的土壤样品 ($0 \sim 5 \text{ cm}$) (图 1)。采用多点采样 ($5 \sim 7$ 个点), 混合均匀后按照四分法取 1 kg 左右装入塑料袋。土壤样品室内风干后, 去掉砾石和动植物残体, 过 20 目尼龙筛, 用玛瑙研磨机研磨后过 100 目尼龙筛。土壤样品采用 USEPA 3050B 法消化处理, 火焰原子吸收光谱法测定 Zn。分析过程采用超纯水, 利用国家标准土壤参比物质 (GSS-1, GSS-2)、平行样和空白样进行质量控制, 结果符合质控要求。

2.3 数据统计分析及计算

正态分布检验采用 Origin 8.0 中 Shapiro-Wilk 法 (S-W 法), 若 $p_{sw} > 0.05$, 表示土壤样本呈正态分布。方差分析采用 SPSS 11.5 完成, 半变异函数拟合及克里格插值采用 Suffer 8.0 和 Arc GIS 9.2 完成。

采用土壤污染累积指数来评价宜宾市土壤 Zn 的污染现状, 计算公式^[31]如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤污染物 i 的污染累积指数; C_i 为土壤污染物 i 的实测浓度, 单位为 mg/kg ; S_i 为污染物 i 的背景值, 单位为 mg/kg 。本研究采用四川省土壤 Zn 背景值^[32]。



图 1 宜宾市土壤采样点分布图

Fig. 1 Sketch map of sampling sites from Yibin

3 结果分析

3.1 城市土壤 Zn 含量分布特征

宜宾市土壤 Zn 含量统计分析结果见表 1。从表 1 可知，宜宾市土壤 Zn 含量经对数转换后符合正态分布；商业区和交通区土壤 Zn 符合对数正态分布，其他功能区土壤 Zn 符合正态分布。

表 1 不同功能区城市土壤 Zn 含量统计
Tab. 1 Concentration of Zn from different functional zones in Yibin

功能区	n	变异 系数 (%)	Zn 含量 (mg/kg)						超出 背景值 的比例 (%)	超出基线 值的比例 (%)
			中值	范围	算术		几何			
					平均值 (标准差)	p_{S-W}	平均值 (标准差)	p_{S-W}		
风景区	15	29.55	85.05	36.16~137.39	86.46A (25.55)	0.99	82.55 (1.38)	0.39	46.67	0.00
商业区	9	50.31	131.53	83.2~297.13	160.42B (80.72)	0.01	145.55 (1.57)	0.14	88.89	33.33
交通区	12	44.36	140.54	118.43~362.15	181.09 B (80.33)	0.00	167.84 (1.48)	0.05	100	41.67
居民区	13	16.38	95.76	65.03~116.60	91.28A (14.95)	0.71	90.08 (1.18)	0.31	61.6	0.00
工业区	14	34.24	190.75	99.91~331.21	189.22B (64.78)	0.55	178.91 (1.42)	0.61	100	71.42
全部	63	51.83	111.78	36.16~362.15	138.88 (71.98)	0.00	123.90 (1.60)	0.11	79.3	28.57

注：同一列中相同字母表示差异不显著，不同字母表示差异显著（ $p<0.05$ ）； p_{S-W} ：表示用 S-W 法检验正态分布的显著性水平。

宜宾市土壤 Zn 含量的几何平均值为 123.90 mg/kg，显著高于四川省土壤背景值（Zn 几何均值为 82.1 mg/kg），表现出明显的累积效应（ $p=0.000$ ）。风景区和居民区土壤 Zn 含量分别为 86.46 和 91.28 mg/kg，与四川省土壤 Zn 背景值无显著性差异（ $p>0.05$ ）；人类活动强度较大的商业区、交通区和工业区土壤 Zn 含量均显著超过土壤背景值（ $p=0.000$ ）。因此，Zn 在商业区、交通区和工业区土壤中表现出明显的累积现象。从表 1 可看出，以四川省土壤背景值为标准，不同土地利用类型的土壤样品均出现超标现象，风景区土壤超标率最低，为 46.47%；商业区和居民区超标率都在 60%以上；交通区和工业区中所有样品都超标。对符合对数正态分布的数据，土壤基线值可定义为几何均值与方差平方的乘积^[33]。四川省土壤 Zn 背景值为 82.1 mg/kg，相应的基线值为 156.4 mg/kg。若以基线值为标准，宜宾市土壤 Zn 的超标率为 28.57%，其中风景区和居民区土壤 Zn 未超标，其他 3 个功能区均出现超标现象；工业区超标率最高，达 71.42%；其次是交通区，超标率为 41.67%；商业区土壤 Zn 超标率 33.33%。总体来看，Zn 在宜宾市土壤中已有不同程度的积累，尤其是工业区土壤 Zn 含量累积最明显，说明不同的土地利用方式、利用历史等外在因素对土壤 Zn 含量有较大的影响。

从表 1 还可知，宜宾市土壤 Zn 的变异系数为 51.83%，表现出较强的变异性，说明

土壤 Zn 含量在不同程度上受到人为影响,在空间上有很大变化。风景区和居民区土壤 Zn 含量较其他功能区含量低,分别为 85.05 mg/kg 和 95.76 mg/kg,且变异系数较低,说明风景区和居民区土壤样品 Zn 含量的差别较小。因而可推断,Zn 在风景区和居民区土壤中的积累相对较少。商业区、交通区和工业区土壤 Zn 含量较高,变异系数相对较大,说明人为活动不同程度地影响了土壤 Zn 含量。进一步的方差分析表明,不同功能区土壤 Zn 含量表现出显著差异(表 1)。由于各功能区土壤 Zn 含量不能同时服从某种正态分布,因而采用非参数方法来检验各功能区土壤 Zn 含量的差异性。商业区、交通区和工业区土壤 Zn 含量无显著性差异($p>0.05$)。风景区和居民区土壤 Zn 含量特征相似,其含量显著低于其他功能区土壤 Zn 含量($p<0.05$)。

3.2 城市土壤 Zn 的空间分布

块金值 C_0 反映了最邻近样点间的非连续程度,代表随机性变异程度;基台值 C_0+C 是系统中最大的变异,是结构性变异和随机性变异之和,表示系统内的总变异; C_0 与 C_0+C 的比值反映区域化变量空间异质性程度,揭示区域化变量的空间相关程度,该比值越大,表明空间相关性越弱,受人为影响越大^[34,35]。一般来说,该比值 $<25\%$ 表明空间相关性很强;比值在 $25\sim75\%$ 之间表明具有中等的空间相关性; $>75\%$ 表明空间相关性很弱^[36]。利用 ArcGIS 地统计模块对土壤中 Zn 含量进行最优拟合,Zn 含量的半变异模型及参数见表 2。从表 2 可看出, $C_0/(C_0+C)$ 为 27.9%,表现出中等程度的相关性,这说明 Zn 的空间变异一方面与土壤母质、地形和气候等非人类影响因素有关,另一方面也与汽车尾气、工业排污等人为干扰因素有关。

表 2 城市土壤中 Zn 的半变异函数参数

Tab. 2 Parameters of semivariance of Zn in the soils

模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值/基台值 ($C_0/(C_0+C)$)	有效变程/ (m)	R^2
指数模型	0.062	0.222	27.9%	1053.7	0.923

利用克里格插值法绘制城市土壤中 Zn 含量的空间分布图(图 2)。从图 2 可知,城市土壤 Zn 表现出较强的空间变异性,高值点主要分布在交通区、工业区和商业区,说明人类活动强化了土壤 Zn 的空间分布的随机性。宜宾市土壤 Zn 含量的最高值出现在市内北门车站,含量高达 362.15 mg/kg,为土壤背景值的 4.2 倍。该车站 2008 年之前承接来自市内外长途运输车辆,又是众多公交车辆的起点站,交通污染是该地 Zn 污染的一个重要来源。另外几个高值点分布在车流量大,刹车频率高的十字路口。研究表明,汽车轮胎中含有二乙基锌盐或二甲基锌盐等抗氧化剂及分散剂^[37],Zn 含量高达 10250 mg/kg^[38],因而汽车轮胎磨损和破裂成为 Zn 排放的主要来源^[39,40]。此外,润滑油燃烧及防腐镀锌汽车板的使用也产生大量的含 Zn 粉尘^[41,42],造成土壤 Zn 含量升高。研究发现,交通流量大的公路旁土壤 Zn 含量(154 mg/kg)和工业区(169 mg/kg)相当^[43]。工业区土壤 Zn 含量较其他功能区高,说明工业活动对土壤 Zn 污染有重要贡献。工业区内印染、机械加工等企业排放含 Zn 污染物,造成土壤 Zn 含量增高;化工行业生产过程中添加含 Zn 稳定剂^[44],不可避免的造成城市土壤 Zn 含量增加。谢小进等发现印染企业对工业区土壤 Zn 具有较大贡献,其次是化工和机械制造等企业^[45]。另外,工业区内燃煤企业如大型火电厂等对土壤 Zn 含量具有一定的贡献。据统计我国煤中 Zn 含量为 0.56~193.0 mg/kg,几何均值为 28.9 mg/kg^[46],煤中的 Zn 主要通过燃烧挥发后吸附和凝聚在飞灰表面,随大

气沉降进入周边土壤^[47]。因而工业活动对土壤 Zn 含量的偏高起到较大的作用。商业区位于市内繁华热闹地带,车流量高、行驶缓慢、车辆磨损使得商业区土壤 Zn 含量较高,仅次于交通区。韦炳干等研究也发现交通繁忙的商业区道路灰尘中 Zn 含量较高,甚至高于工业区^[48]。因此,不同的土地利用方式对城市土壤重金属含量和空间分布具有重要的影响作用。

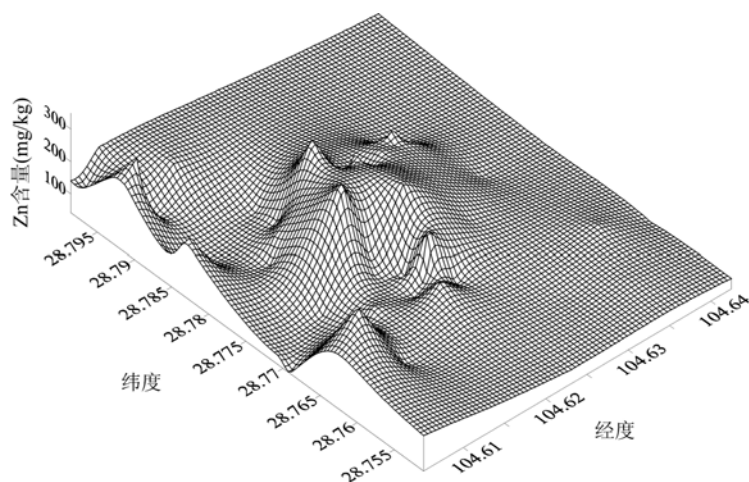


图 2 城市土壤中 Zn 的空间分布特征

Fig. 2 The distribution of Zn in the urban soils from Yibin

3.3 城市土壤 Zn 污染评价

根据污染累积指数来评价宜宾市土壤 Zn 的污染程度,总体看来,宜宾市土壤 Zn 污染累积指数在 0.42~4.19 之间,平均值为 1.60,属轻度污染。不同功能区土壤 Zn 污染程度不同,工业区 (2.18) > 交通区 (2.09) > 商业区 (1.85) > 生活区 (1.05) > 风景区 (0.98)。图 3 为不同功能区土壤 Zn 污染累积指数累积分布图。从图 3 可知,工业区、交通区和商业区土壤 Zn 污染累积指数均超过 1,工业区和交通区中分别有 14.28% 和 16.67% 的土壤 Zn 污染累积指数大于 3,呈重度污染。风景区和生活区土壤 Zn 污染累积指数均未超过 2,超过半数的风景区土壤样品尚未受到 Zn 污染 ($P_i < 1$),生活区中 61.54% 的土壤样品受到轻度污染,污染累积指数在 0.75~1.35。

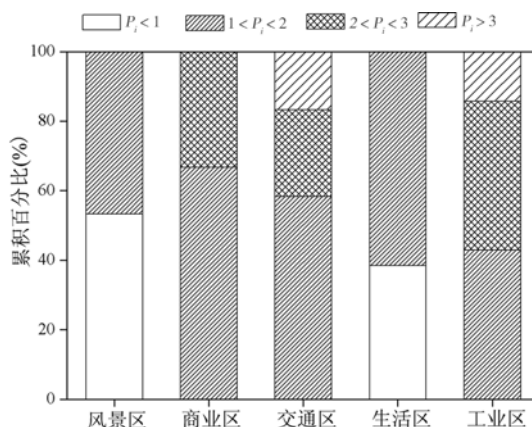


图 3 不同功能区土壤 Zn 污染累积指数累积分布图

Fig. 3 Accumulative frequencies of pollution accumulative index for Zn in the urban soils from different functional zones

城市土壤中 Zn 污染累积指数的空间分布存在较大差异 (图 4)。下江北地区土壤 Zn 污染指数在 1.5~2.5 之间,尤其是工业密集的区域污染指数在 2~2.5 之间。宜宾市工业区主要分布在下江北,包括化工、机械制造、燃煤发电、印染、制药等企业。另外,工业

区交通运输繁忙,且重型车辆(货车)因磨损排放的重金属超过普通客车^[38],因而工业排污和交通运输造成了土壤 Zn 含量增加。值得注意的是,下江北路况较差,容易发生堵车现象,车辆行驶缓慢、刹车现象频繁,加重了汽车轮胎磨损,从而产生大量的含 Zn 颗粒物,加剧了土壤污染。上江北污染累积指数在 1~2 之间,其中,位于西北部工业用地的土壤 Zn 污染累积指数在 1.5~2 之间,可能与该区域尚未搬迁的企业排污有关。翠屏区是宜宾市主城区,人口密集,商业活动强度大、车流量大,并且各种建筑材料、油漆和涂料中的 Zn 在长期风化作用下可能进入城市土壤^[50],因而使得翠屏区土壤 Zn 污染加重,南岸区为宜宾市经济开发新区,成为商业、文化、娱乐及住宅集中区域,人类活动的扰动不断增强,

表现出一定的 Zn 污染。从图 4 还可以看出,交通路线密集的区域,Zn 污染较为严重,车流量在很大程度上影响了土壤 Zn 含量^[51],这与 Charlesworth 等的研究结果一致^[52]。与江北公园土壤 Zn 污染相比,翠屏区森林公园土壤 Zn 污染较轻,森林公园受人类活动干扰少,植被覆盖率高,植被对进入土壤的重金属起到有吸收和过滤作用^[53],因而表现出低污染状况;而位于江北区的江北公园建园时间较长,距离工业区较近,表现出一定的污染,建园时间和地点对城市公园土壤重金属污染状况有重要影响^[54, 55]。

在采用克里格插值时,空间预测值的标准平均值为-0.0597,接近于 0;均方根预测误差为 0.834,平均标准误差为 0.7667,接近均方根预测误差;标准均方根为 1.086,接近于 1,说明克里格法对宜宾市土壤 Zn 污染累积指数进行空间插值预测结果可靠。值得注意的是,Zn 污染累积指数大于 2.5 的值未在图 4 中体现,主要是因为克里格插值法在空间上具有低通滤波效应,插值过程中会丢失局部极大值和极小值信息,导致对局部极大值的低估和局部极小值的高估^[56],尤其在空间变异大、自相关性较差的区域,克里格插值的平滑效应越强。

4 结论

宜宾市土壤 Zn 含量的几何均值为 123.90 mg/kg,显著高于四川省土壤背景值 ($p=0.000$);与四川省土壤基线值相比,土壤 Zn 含量的超标率为 28.6%,其中工业区、交通区和商业区土壤 Zn 含量的超标率为 71.42%、41.67%和 33.33%,居民区和风景区土壤

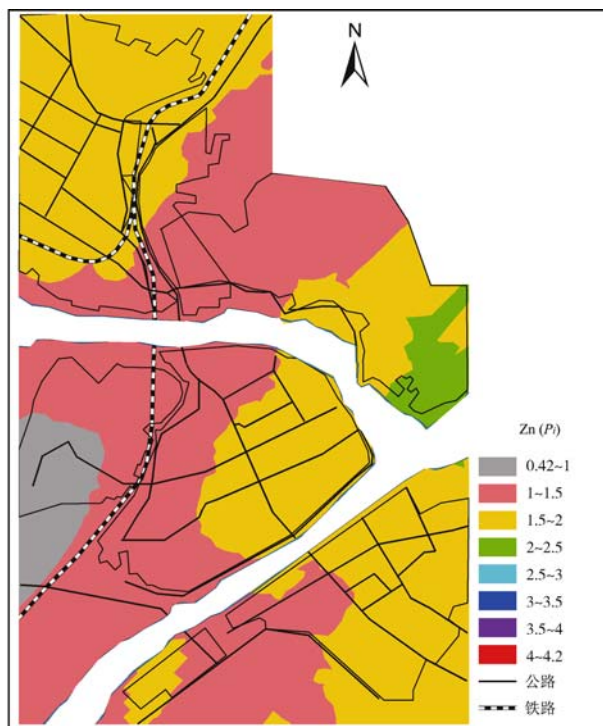


图 4 宜宾市土壤中 Zn 污染累积指数的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of pollution accumulative index of Zn concentrations in the soils of Yibin

Zn 含量未超标。

城市土壤中的 Zn 表现为中等程度的空间相关性, 说明土壤中 Zn 含量一方面受到土壤母质和地形等结构性变异的影响, 一方面受到交通活动以及工业活动等随机因子的影响。

空间分布分析表明, 上江北和下江北区域 Zn 污染较严重, 翠屏区和南岸区均表现出一定的污染。Zn 的空间分布主要受工业、交通和商业等活动的影响, 在工业区、商业区及交通区土壤 Zn 累积较为严重。

参考文献:

- [1] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例. 地理研究, 2006, 25(5): 843~852.
- [2] Adamo P, Imperato M, Naimo D, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 247~256.
- [3] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算. 地理研究, 2007, 26(5): 922~930.
- [4] Martinez G M J, Moreno G S, Martinez G J J, *et al.* Distribution of the metals lead, cadmium, copper and zinc in the top soil of Cartagena, Spain. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, 131(1~4): 329~347.
- [5] 廖自基. 环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化. 北京: 科学出版社, 1989. 20~24.
- [6] 李合华, 潘建平. 锌缺乏对儿童智力发育的影响. 中国公共卫生, 2002, 18(2): 151~152.
- [7] Tyler G, Balsberg P M, Bengtsson G, *et al.* Heavy metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates: A review. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, 47(3~4): 189~215.
- [8] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al.* Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756~760.
- [9] Mielke H W, Gonzalez C R, Smith M K, *et al.* The urban environment and children's health: Soils as integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, USA. *Environmental Research*, 1999, 81(2): 117~129.
- [10] Rasmussen P E, Subramanian K S, Jessiman B J. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada. *The Science of Total Environment*, 2001, 267(1~3): 125~140.
- [11] Culbard E B, Thornton I, Watt J, *et al.* Metal contamination in British urban dusts and soils. *Journal of Environmental Quality*, 1988, 17: 226~234.
- [12] Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southwestern New York, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 1(57~58): 797~807.
- [13] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool N. Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminum partitioning in topsoils. *Geoderma*, 1998, 86(3~4): 211~228.
- [14] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3): 501~511.
- [15] Poggio L, Vrscaj B, Schulin R, *et al.* Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco (Italy). *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 680~689.
- [16] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征. 地理研究, 2005, 24(4): 542~548.
- [17] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平和健康风险. 地理研究, 2010, 29(6): 989~996.
- [18] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究. 环境科学学报, 2007, 27(5): 803~809.
- [19] Li X, Lee C S, Shi W, *et al.* Metal contamination in urban, suburban and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. *The Science of Total Environment*, 2006, 356(1~3): 45~61.
- [20] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1~3): 455~462.
- [21] 卢瑛, 甘海华, 张波, 等. 深圳市城市绿地土壤中重金属的含量及化学形态分布. 环境化学, 2009, 28(2): 284~288.
- [22] Wang X S, Qin Y. Spatial distribution of metals in urban topsoils of Xuzhou (China): Controlling factors and en-

- vironmental implications. *Environmental Geology*, 2006, 49(6): 905~914.
- [23] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价. *地理科学*, 2005, 25(1): 108~112.
- [24] Li X P, Feng L N. Spatial distribution of hazardous elements in urban topsoils surrounding Xi'an industrial areas, (NW, China): Controlling factors and contamination assessments. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1~3): 662~669.
- [25] Wei B G, Jiang F Q, Li X M, *et al.* Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China. *Microchemical Journal*, 2009, 93(2): 147~152.
- [26] Liu X M, Chen T, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of urban-rural transitional area of Hangzhou, China. *Environmental Pollution*, 2008, 151(1): 67~78.
- [27] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的系统区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析. *环境科学*, 2007, 28(12): 2758~2765.
- [28] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in silvermines area, Ireland. *Environmental Pollution*, 2004, 127(2): 239~248.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 2006 年中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2006. 26~30.
- [30] 宜宾地区国土局. 宜宾地区国土资源. 成都: 四川科学技术出版社, 1991. 27~31.
- [31] 国家环境保护局. 中华人民共和国环境保护行业标准—土壤环境监测技术规范. HJ/T 166—2004, 2004. 24~25.
- [32] 国家环境保护局. 环境背景值和环境容量研究. 北京: 科学出版社, 1993. 31~35.
- [33] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, *et al.* Arsenic background concentrations in Florida, USA. surface soils: Determination and interpretation. *Environmental Forensics*, 2001, 2(2): 117~126.
- [34] Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246~1266.
- [35] 王政权. 地统计及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 32~35.
- [36] Spijker J, Vriend S P, vanGaans P F M, *et al.* Natural and anthropogenic patterns of covariance and spatial variability of minor and trace elements in agricultural topsoil. *Geoderma*, 2005, 127(1~2): 24~35.
- [37] De Miguel D, Llamas J F, Chacon E, *et al.* Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(17): 2733~2740.
- [38] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loading in the runoff waters from a major rural highway. *The Science of Total Environment*, 1999, 235(1~3): 143~150.
- [39] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environmental International*, 2004, 30(8): 1009~1017.
- [40] Li X D, Poon C S, Yang Z H, *et al.* Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11~12): 1361~1368.
- [41] Ellis J B, Revitt D M. Incidence of heavy metals in street surface sediments: Solubility and grain size studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 1982, 17(1): 87~100.
- [42] Sawyer R F, Harley R A, Cadle S H, *et al.* Mobile sources critical review: 1998 Narsto assessment. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(12~14): 2161~2181.
- [43] Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(21): 3835~3944.
- [44] 林美娟, 章文贡. 新型、高效、无毒的钙皂、锌皂热稳定剂的研究. *聚氯乙烯*, 2000, (1): 35~37.
- [45] 谢小进, 康建成, 等. 上海市不同工业类型土壤重金属含量差异性分析. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1777~1782.
- [46] 唐修义, 赵继尧, 黄文辉. 中国煤中的九种金属元素. *中国煤田地质*, 2002, 14(增刊): 43~54.
- [47] 康艳红, 李光哲, 李国德, 等. 煤燃烧过程中金属原色迁移特性. *电力环境保护*, 2009, 25(1): 44~46.
- [48] 韦炳干, 姜逢清, 等. 城市不同功能区道路沙尘重金属污染地球化学特征与评价. *环境化学*, 2009, 28(5): 721~727.
- [49] 李胤, 毛义伟, 等. 上海世博会规划区域城市土壤重金属调查及评价研究. *土壤通报*, 2009, 40(4): 926~931.
- [50] 郑袁明, 宋波, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 64~69.
- [51] Chen X, Xia X H, Zhao Y, *et al.* Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1~3): 640~646.
- [52] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, *et al.* A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK.

Environmental International, 2003, 29(5): 563~573.

- [53] 邱媛, 管东胜. 经济快速发展区域的城市植被叶面沉降粒径和重金属特征. 环境科学学报, 2007, 27(12): 2080~2087.
- [54] 郑袁明, 余轲, 吴泓涛, 等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价. 地理研究, 2002, 21(4): 418~424.
- [55] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. Chemosphere, 2005, 60(4): 542~551.
- [56] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma, 1999, 89(1~2): 1~45.

Spatial distribution and pollution assessment of Zn in urban soils of Yibin, Sichuan Province

GUO Guang-hui^{1, 2}, ZHANG Hang-cheng³

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Urban and Rural Planning Authority of Wenchuan County, Wenchuan 623000, Sichuan, China)

Abstract: Urban soils are regarded as recipient of large amounts of heavy metals from various sources. Information on the environmental effects of different functional zones is lacking, especially in Yibin, a city with a rapidly increasing rate of development. Such information will assist in developing strategies to protect urban environment against long-term hazardous accumulation.

In order to identify the concentration and spatial distribution of Zn in urban soils, 63 topsoil samples of Yibin, Sichuan Province, were collected and analyzed with geo-statistics extent based on GIS. The results showed the concentration of Zn in the soils of Yibin ranged from 36.16 to 362.15 mg/kg, with the average value of 138.88 mg/kg, which is apparently higher than the background value of Sichuan Province ($p=0.000$). Moreover, compared with the soil baseline value of Sichuan Province, 28.57% of the samples exceeded this reference. The concentrations of Zn in industrial areas, traffic areas and commercial areas were significantly higher than the background value, respectively. Using the soil-baseline concentration as a criteria, 71.42%, 41.67% and 33.3% of the samples in industrial areas, commercial areas and traffic areas exceeded the limit, respectively. The geo-statistical analysis showed that the spatial correlations of Zn belonged to the medium degree, indicating that the concentration of Zn in the soils was influenced by the random factor and structural factor. Spatial distribution of Zn pollution accumulative index produced by kriging showed that Zn exhibited serious pollution risk in Shangjiangbei and Xiajiangbei districts, and that soils in Cuiping and Nan'an districts were contaminated by Zn to some degree, particularly in industrial areas, commercial areas and traffic areas.

Key words: urban soils; Zinc; geostatistical analysis; kriging; Yibin