

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0066

方淑波, 崔曲, 庞慧焕, 等. 2015. 上海市城乡梯度上土壤重金属空间分布及其影响因素定量分析[J]. 环境科学学报, 35(12): 3976-3984

Fang S B, Cui Q, Pang H H, *et al.* 2015. Distribution and factor analysis of soil heavy metal by quantitative approaches on the urbanization gradient in Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(12): 3976-3984

上海市城乡梯度上土壤重金属空间分布及其影响因素定量分析

方淑波^{1,2}, 崔曲¹, 庞慧焕¹, 田壮¹, 印春生¹, 杨晓英^{2,*}

1. 教育部水产种质资源开发利用实验室, 上海海洋大学, 上海 201306

2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433

收稿日期: 2014-12-30 修回日期: 2015-02-11 录用日期: 2015-02-11

摘要: 提出了两种上海市城乡梯度上土壤重金属空间格局及影响因素的研究方法: 缓冲区分析方法和滑动窗口分析方法。缓冲区分析的结果表明, 人口变化指数及 2~3 km 范围内的建设用地比例能显著影响 Cd 和 Cu 的空间分布 ($p < 0.05$), 而 3 km 范围内的道路密度显著影响 Pb 的浓度。滑动窗口分析的结果表明, Cd 和 Cu 主要受工业活动的影响, 而 Pb 受交通流量, 以及反映城市景观扩张过程的景观形状指数的影响。相关分析表明, 两种方式揭示了较为相似的土壤重金属空间累积影响因素, 即工业活动相关的城市化过程。研究对理解城市化的发生机制及其重金属环境风险的管理有重要意义。

关键词: 城乡梯度; 景观变量; 逐步线性回归; 缓冲区分析; 风险管理

文章编号: 0253-2468(2015)12-3976-09 中图分类号: X53 文献标识码: A

Distribution and factor analysis of soil heavy metal by quantitative approaches on the urbanization gradient in Shanghai

FANG Shubo^{1,2}, CUI Qu¹, PANG Huihuan¹, TIAN Zhuang¹, YIN Chunsheng¹, YANG Xiaoying^{2,*}

1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306

2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433

Received 30 December 2014; received in revised form 11 February 2015; accepted 11 February 2015

Abstract: Two approaches of scaled circular buffer analysis and moving window analysis were presented to explain the heavy metal (HM) spatial patterns and the associated affecting factors along the urban-rural gradient in Shanghai. The scaled circular buffer analysis results showed that the population change index and the percentages of built-up areas of the 2 and 3 km buffers affected Cd and Cu distributions significantly ($p < 0.05$), while the road density of the 3 km buffer significantly affected the Pb contents. The moving window analysis results showed that industrial activity was the main source for Cd and Cu while Pb was affected by both traffic volume and landscape metrics characterizing various urbanization processes. The correlation analysis indicated that the two approaches had revealed similar influencing factors of the spatial accumulation of the HM—the urbanization processes related to industrial activities. This study is helpful to understanding the urbanization mechanism and managing the associated potential soil HM hazards.

Keywords: urbanization gradient; landscape variables; linear stepwise regression; buffering analysis; risk management

1 引言 (Introduction)

尽管城市区域的土壤重金属生态风险已有较多的研究 (Hashemi and Bakhsh, 2013; Hooker and

Nathanail, 2006; Lu *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2011), 然而如何有效管理这一公共环境问题依然悬而未决。2011 年, 上海市康桥工业区发现 30 多名 1~3 岁的幼儿血铅超标。据报道, 发病幼儿体内血铅

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41101172)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41101172)

作者简介: 方淑波 (1976—), 男, 副教授, E-mail: bsfang@fudan.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xiaoying@fudan.edu.cn

Biography: FANG Shubo (1976—), male, associate professor, E-mail: bsfang@fudan.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: xiaoying@fudan.edu.cn

最高可达 $497 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 远超国家卫生部规定的最高 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准(新浪网, 2012)。这一公共卫生事件引发了上海市民对城市环境问题的广泛讨论, 成为迄今为止依然关注的一个话题。一个急迫的课题就是, 在城市区域, 哪些地方该被优先管理? 管理的尺度或空间范围该是多大? 这需要对重金属在城市区域的累积机制, 或者说城市化对重金属的累积过程进行研究(Duzgoren-Aydin, 2007; Pouyat and McDonnell, 1991; Qureshi *et al.*, 2013; Schwarz *et al.*, 2013)。

如何量化城乡梯度上土壤重金属的空间分布已有较多的案例报道。Pouyat and McDonnell 报道土壤 Cu 和 Ni 在纽约城市中心是乡村地区的 2 倍, 而 Pb 的浓度城市中心地区是乡村地区的 4 倍以上, Cu、Ni 和 Pb 均在城乡梯度上有着明显的变化响应, 即从市中心浓度逐渐降低(Pouyat and McDonnell, 1991)。Schwarz 等在马里兰巴尔的摩市采集了 61 份住宅地附近的土壤 Pb 样品, 对比不同景观中(林地、绿地、建筑物和道路)土壤 Pb 的中值, 结果表明:越靠近建筑物, 铅的值越高。房龄和房屋距道路的距离都显著地影响 Pb 的分布(Schwarz *et al.*, 2012)。Schwarz 等提出 3 种模型量化土壤 Pb 的分布, 一般线性模型(general linear model, GLM)证明房龄、房屋距道路的距离和房屋距建筑物的距离以及 3 个变量的交互作用可以解释 38% 的 Pb 的空间分异。用相同的 3 个变量构建随机森林(random forest, RF)线性模型则可以解释 42% 的 Pb 的空间分异。精度评估表明 GLM 模型为 90%, 分类回归树(classification and regression trees, CART)为 83%, RF 模型为 72%(Schwarz *et al.*, 2013)。Callender and Rice 研究了城乡梯度上重金属浓度与人口密度和交通密度的关系。从乔治亚州北部到亚特兰大再到墨西哥湾, 人口密度表现为下降趋势, 亚特兰大市区人口密度接近 $1000 \text{人}\cdot\text{km}^{-2}$, 而在乔治亚州南部和佛罗里达州北部的农村地区人口密度低于 $50 \text{人}\cdot\text{km}^{-2}$ 。人口密度、交通密度以及 Pb、Zn 浓度之间的相关分析表明, 人口密度与交通密度密切相关, 人口密度可以预测环境中人为来源的 Pb 和 Zn 的浓度(Callender and Rice, 2000)。

自市中心的直线距离作为一种经典的城乡梯度的度量方法在较多案例中得到了广泛运用(Luck and Wu, 2002; Hahs and McDonnell, 2006; Pouyat *et al.*, 2008)。但是直线距离本身不足以反映城乡景

观的异质性如道路密度、人口密度等的变化(Hahs and McDonnell, 2006)。Hahs and McDonnell 曾将城市化的度量方法分为 3 类, 即人口变量, 物理变量如道路密度、建筑用地面积百分比等, 以及景观格局指数。通过在澳大利亚墨尔本的城乡梯度研究, Hahs and McDonnell 提出了量化城市化格局分异的 4 种方法: 第一为耦合指数, 主要考虑人口调查指标和景观格局的分维数指标等信息; 第二为单位城市用地的人口数; 第三为景观形状指数; 第四为控制性景观的变量如一定区域范围内的面积百分比。并且指出, 人口指标和物理变量指标较景观格局指标更能反映城市化格局的特征(Hahs and McDonnell, 2006)。

本研究意在通过道路密度、人口密度、工农业产值, 以及景观格局指数等变量, 来定量解释上海市城乡梯度上土壤重金属包括 Pb、Cu 及 Cd 的空间分异规律。经典的城乡梯度窗口分析法, 以及以土壤采样点为中心的缓冲区分析方法, 被用来进行城乡梯度土壤重金属空间分异的定量对比分析。

2 采样和分析(Samples and analysis)

自 1990 年以来, 上海浦东新区经历了一个快速的城市化进程规模, 成为上海乃至中国的经济发展引擎。2009 年, 原南汇地区并入浦东新区。从 2005 年开始, 原南汇地区的临港新城因滴水湖的围垦以及洋山港的开发而快速发展为上海的潜力新城。目前浦东新区从南到北有一个自然的城市化梯度。总体而言, 浦东新区的北部地区开发较早, 城市化的程度高, 而南部地区刚刚开始其城市化过程, 尤其是在临港新城(图 1)。

2.1 基础数据

土壤样品的采集采用系统采样方法(Fang *et al.*, 2010; 2012), 采样时间在 2011 年 7—8 月间。自北向南和自东向西, 每隔 2~3 km 设置土壤样方点, 每个土壤点 4 个重复, 每个重复之间 50 m 左右, 以 W 形状采样。采集了 40 个土壤样方的样品(图 1)。采集的样品土壤剖面为表层 0~10 cm。土壤样品主要采集林下、公园、绿地及集中连片的道路绿地等区域, 距离道路 20 m 以上, 在近 1~2 年内明显没有受到人类干扰。

将采集的土壤样品风干后, 混合, 研磨, 过 0.15 mm 筛。样品消煮过程为: 称取 0.125 g 样品, 加入 2 mL 盐酸及 1 mL 硝酸分别 60 °C 加热 0.5 h, 然后

加氢氟酸 6 mL 以及 0.5 mL 高氯酸以 120 °C 加热 3 h, 余热蒸干后用 7% 硝酸定溶至 25 mL. 在复旦大学

分析测试中心采用 ICP-OES (PE optima 8000, Hitachi) 测试 Cu, Cd 及 Pb 3 种重金属元素的浓度.

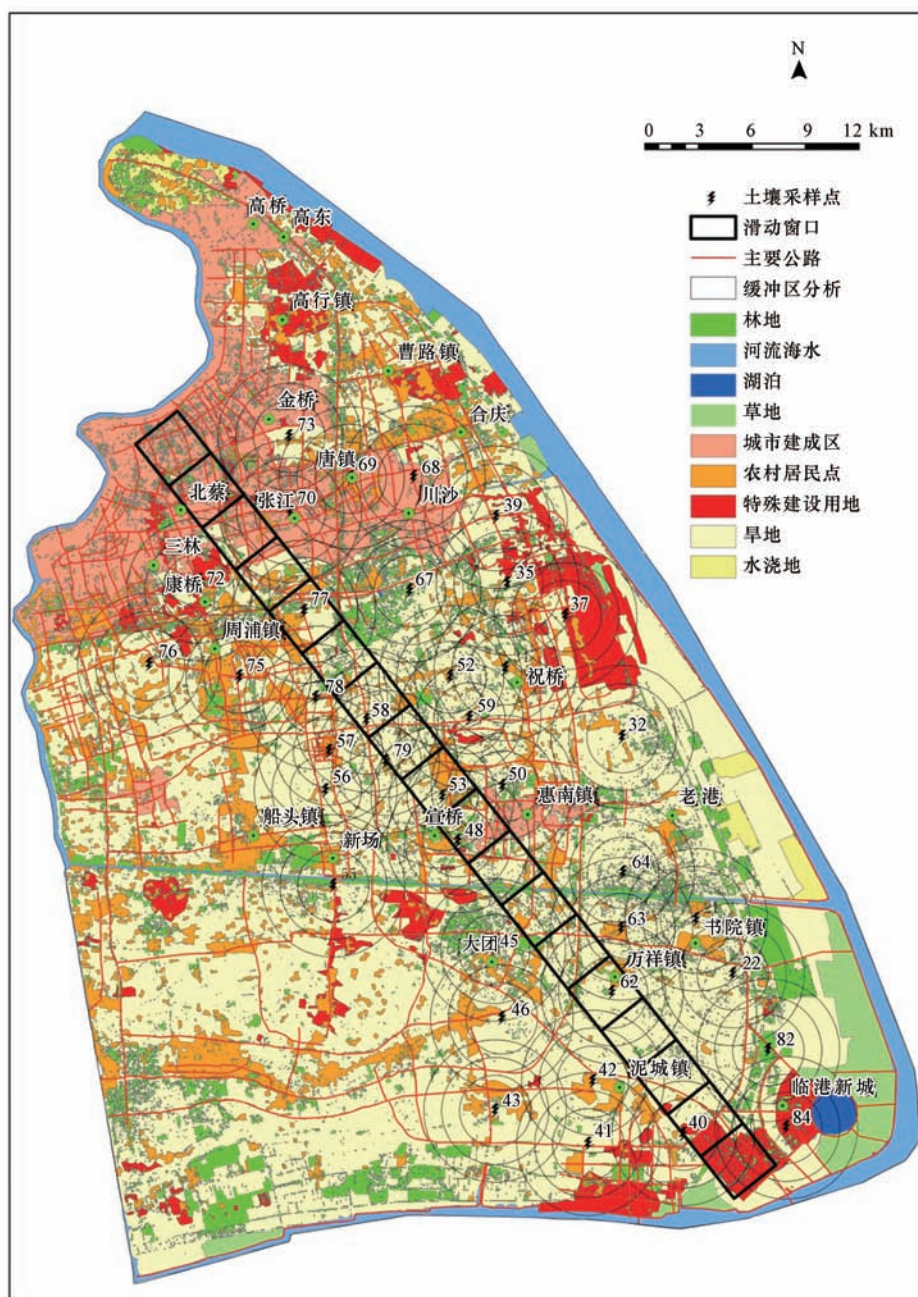


图 1 研究地点及分析方法

Fig.1 Study site and analysis approaches

采用 2010 年 7 月的两景 TM 影像 (118, 38) 和 (118, 39) 来解译研究区域的土地利用数据. 将几何校正后的影像拼接, 在 ENVI 4.2 中选定研究区域并用矢量 ROI 命令剪切. 然后, 采用监督分类把土地利用类型分为 9 类: 林地、河流海水、湖、光滩、城市建设用地、农村建设用地及其他建筑用地 (如浦东国

际机场) 和农业用地 (包括水浇地和旱地) (图 1). 主要的公路 (highways) 在影像上借助高分辨率的谷歌地图以及实地调查人工勾绘 (图 1). 通过实地调查验证表明 Kappa 指数为 0.72, 分类精度符合研究需要.

参考公开的行政区地图, 在影像图上勾绘出研

究区内的建制城镇,并在 ArcGIS 9.3 中构造属性数据库.参考浦东新区 2010 年年度统计年鉴(上海浦东新区统计局, 2010), 获得耕地面积(arable lands, AL)、人口(population, POP)、工业产值(industrial production, IP)、农业产值(agricultural production, AP)和农民的人口比例(percent of farmers population, PFP)等社会和经济信息,并将这些信息作为变量贮存在数据库中.利用 ArcGIS9.3,采用反距离加权方法插值得到这些变量的空间分布图.

将 2010 年的矢量土地利用图转换成栅格格式,用 Fragstats 软件(Mcgarigal and Marks, 1995),分析每个滑动窗口内的建筑用地面积百分比(PLAND)、景观形状指数(LSI)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、蔓延度指数(CONTAG)、面积加权平均形状指数(SHAPE_AM)、面积加权平均分维数(FRAC_AM)等景观格局指数(Luck and Wu, 2002; Yeh and Huang, 2009; Wu *et al.*, 2011; Hahs and McDonnell, 2006; Irwin and Bockstael, 2007).

采用 Kolmogorov-Smirnov 进行 Cu、Cd、Pb 的正态性检验(冉有华和李新, 2009),然后在 ArcGIS9.3 软件中采用反距离加权方法将 Cu、Cd、Pb 进行空间插值(Fang *et al.*, 2012).

研究提出一个反映主要城镇人口增量的人口变化指数(Population change index, PCI)来反映城市化历史的变化速度.PCI 的计算方式见式(1):

$$PCI = \frac{POP_{2010} - POP_{2000}}{POP_{2000}} \quad (1)$$

式中,POP₂₀₁₀和 POP₂₀₀₀为主要镇区 2000 年和 2010 年的人口数量(上海浦东新区统计局, 2010).PCI 反映了主要镇区的人口增加量,而这往往与一个地区工业相关的城市化发生速度密切相关.这与通常采用的一个城镇的人口总数的研究相比(Randa and Yungler, 2006; Du Toit and Cilliers, 2011),突出了城市化发生历史过程的差异.PCI 的值越高,人口导入的量越多,与工业用地等建成区扩张过程相关的城市化发生过程越快.

在 ArcGIS9.3 中采用 Allocation 分析方法,以主要的镇区为中心点,生成 PCI 的空间分布图.然后,将土壤采样点所处位置的 PCI 值赋给每个采样点.同时对每个滑动窗口,将其中心点所处的区域的 PCI 值赋予该滑动窗口.

2.2 分析方法

2.2.1 滑动窗口分析方法 在研究区域西北到东

南方向,构建一个长 54 km,宽 3 km 的样带,沿样带用 3 km×3 km 的滑动窗口分析城市化格局的梯度变化(图 1),窗口的移动距离是 3 km.这样一共有 18 个滑动窗口,从北到南依次标记为 1~18.

在滑动窗口内,采用 ArcGIS 软件对重金属空间插值的栅格图进行区域统计(zonal statistic),计算 3 种重金属元素的浓度均值.

在 SPSS19.0 中(IBM, 2010),以滑动窗口内区域统计分析的重金属浓度均值为因变量,以上述空间插值统计后的经济、人口变量及景观格局指数为自变量,进行逐步线性回归分析,选择具有统计显著性的影响变量($p < 0.05$),分析影响城乡梯度土壤重金属富集情况的主要因素.

2.2.2 缓冲区分析方法 以土壤采样点为中心,做 2、3、4 km 半径的缓冲区,计算缓冲区范围内的道路密度及建设用地面积比例.采用曲线拟合的方法,以土壤重金属元素的浓度为因变量,道路密度及建设用地比例以及土壤采样点所在位置的 PCI 值为自变量,分析显著影响土壤重金属空间分布的变量($p < 0.05$).曲线拟合通过 SPSS19.0 实现,选择系统最优的拟合模型(Fang *et al.*, 2010).

2.2.3 两种方法主要显著变量的相关分析 将两种方法确定的主要变量进行相关分析,确定城乡梯度上影响土壤重金属元素浓度的主要变量,辨析城市化扩张过程中的格局、效应关系的内在机制.

3 结果和讨论(Results and discussion)

3.1 重金属元素统计信息描述

3 种元素的浓度值均显著高于上海地区的重金属元素土壤背景值(戴峰和李晓斐, 2009).3 种元素经 K-S 检验(Pb 经过对数转换),都呈正态分布(Pb 的正态性较低).

采用 ArcGIS9.3 软件对 3 种元素进行了反距离插值(Xie *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2012)(图 2).Cu 和 Cd 在市中心区域都出现了浓度的高值,此外,在老港区域,Cu 和 Cd 也出现了浓度的高值.Pb 在周康地区和祝桥附近出现浓度的高值.

老港地区是上海市最大的生活垃圾填埋场,上海市近 70%的生活垃圾在此进行填埋处理.我们的分析表明,老港地区附近的重金属富集明显受到老港垃圾填埋的影响.

表 1 3 种元素的统计信息描述

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal content

	均值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准变异	偏度	峰度	背景值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	非对称显著性
Cd	2.28	1.62	0.38	0.75	0.17	0.716
Cu	34.26	8.06	0.80	0.19	27.12	0.465
Pb*	38.30	0.44	2.29	6.65	22.51	0.003 ^b

注: *, 对数转换; # 背景值参考(戴峰和李晓斐, 2009).

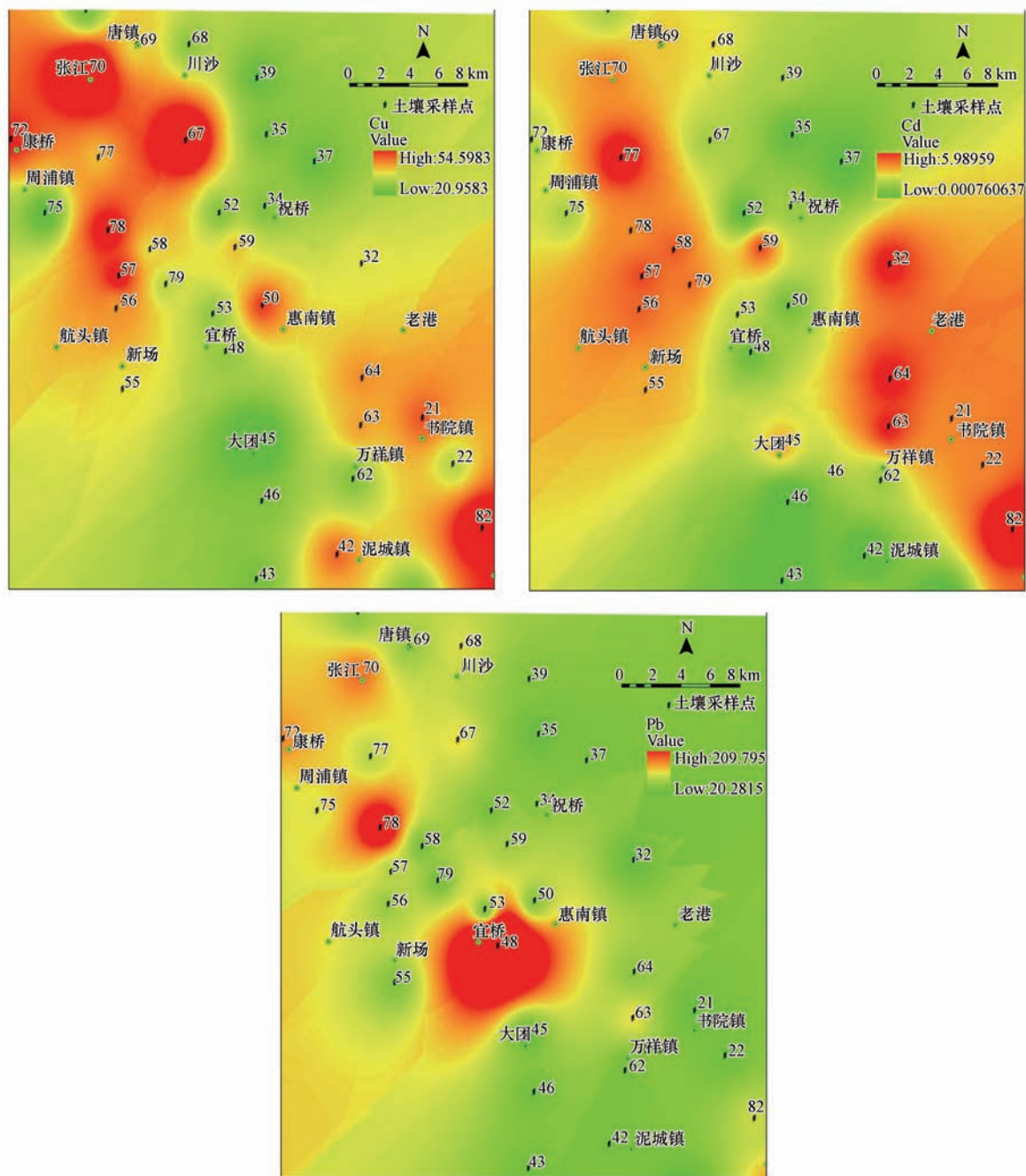


图 2 重金属元素的反距离加权插值

Fig.2 Inverse distance weighted interpolation map of the three heavy metals

3.2 缓冲区分析

PCI 的结果如图 3 所示.PCI 值沿城乡梯度呈现出先增加后减小的趋势,最高的 PCI 值处于城乡梯度接近中部的的位置.说明中部区域的人口导入自 2000 年以来较高,也说明了其较快的工业化发展速度.

曲线拟合的统计分析结果如表 2 所示.拟合结果表明,PCI 显著影响到 Cu 和 Cd 的空间分布 ($p < 0.05$);Cu 和 Cd 也受到 2~3 km 范围内的建设用地比例的影响 ($p < 0.05$);而 Pb 主要受 3 km 范围内的道路密度的影响 ($p < 0.05$).

这个结果表明,城市区域 Cu、Cd 和 Pb 主要受

局部范围的城市活动,如道路、工业、居住及商业活动的影响.这对城市区域重金属潜在环境风险的管理具有重要意义.

3.3 基于滑动窗口计算值的逐步线性回归分析

工业产值(IP)和斑块密度(PD)一起可以解释 Cd 沿城乡梯度 76%的空间变异,其中 IP 和 PD 各自解释 Cd 38%的变异(表 3).景观形状指数(LSI)和道路密度(RD)一起可以解释 Pb 沿城乡梯度 67%的空间变异,其中 LSI 可以解释 55%,RD 解释 12%.IP、PD 以及建设用地比例(PLAND)一起可以解释 Cu 88%的空间分异,其中 IP 解释的比例高达 71%,PD 和 PLAND 各自为 8%和 9%.

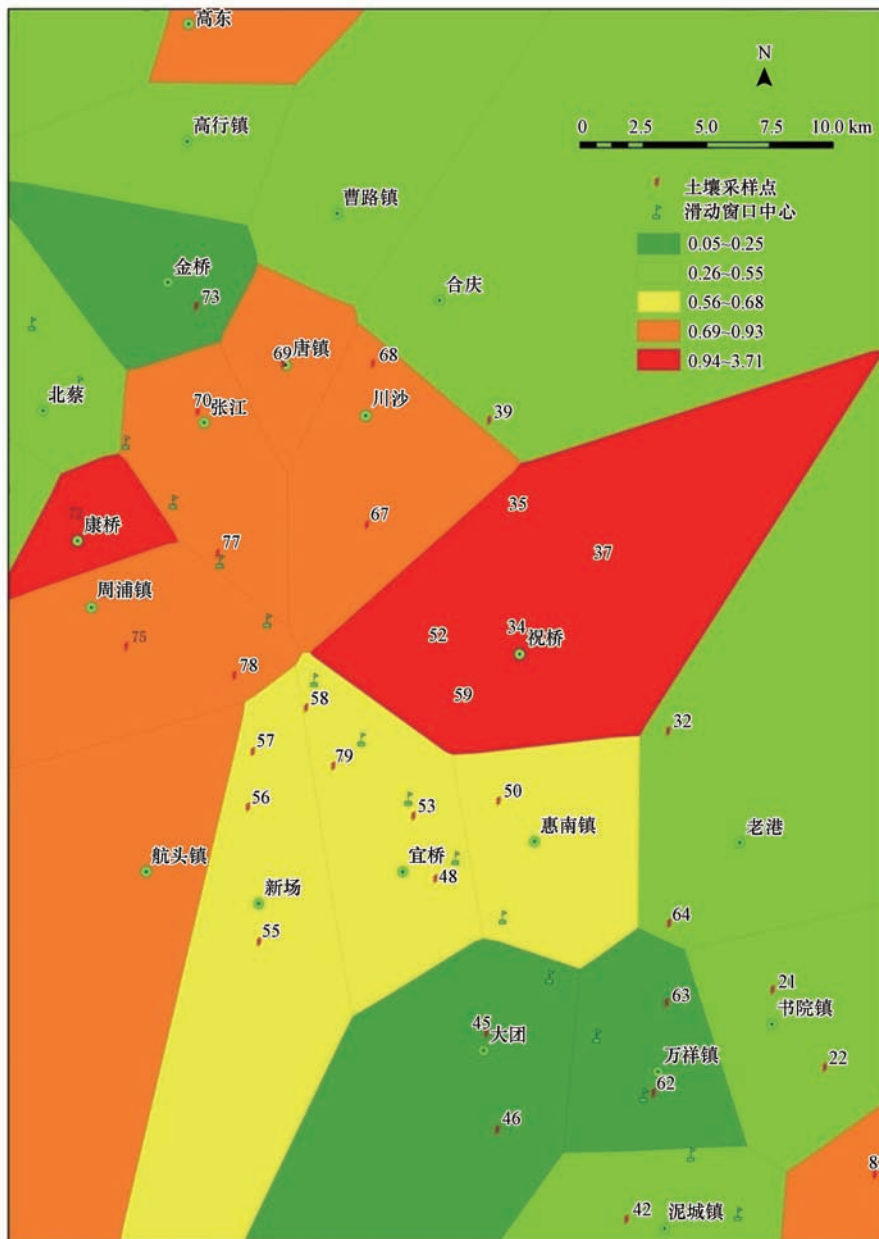


图 3 PCI 的空间分异及滑动窗口中心 PCI 的赋值方式

Fig.3 Distribution of the PCI value and the assigning method of the PCI value to each centroid of the moving windows

表 2 重金属缓冲区分析的曲线拟合参数

Table 2 Model summary and parameter estimates between the variables and total heavy metal contents

重金属	变量	模型	主要参数			主要系数			估计标注误
			R^2	F	常数	b_1	b_2	b_3	
Cd	PCI	Cubic	0.256	3.907 *	-0.113	6.867	-4.191	0.67	1.455
	BA ₁₂	Cubic	0.248	3.745 *	4.811	-6.363	3.533	-0.537	1.463
	BA ₁₃	Cubic	0.221	3.209 *	5.159	-6.62	3.492	-0.519	1.49
Pb	RD ₁₃	Compound	0.118	4.831 *	25.196	1.325	—	—	0.417
Cu	PCI	Cubic	0.269	4.162 *	22.336	34.976	-23.027	4.061	7.195
	BA ₁₂	Quadratic	0.172	3.624 *	40.484	-14.511	5.311	—	7.547

注: ^, 对数转换; BA₁₂、BA₁₃及 BA₁₄是半径为 2、3 及 4 km 范围内的建设用地面积比例; RD₁₃表示半径 3 km 的缓冲区范围道路密度; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

表 3 逐步线性回归参数估计及方差分析

Table 3 Parameters estimated and ANOVA of the stepwise linear regression analysis

重金属	模型	输入变量	R^2	R^2 changed	p	Equation
Cd	1	IP	0.38	0.38	0.007	$y = 18.69 + 0.08x$
	2	IP (x_1), PD (x_2)	0.76	0.38	0.000	$y = 21.80 + 0.09x_1 - 2.47x_2$
Pb	1	LSI	0.55	0.55	0.000	$y = 6.44 + 13.73x$
	2	LSI (x_1), RD (x_2)	0.67	0.12	0.029	$y = 1.79 + 12.13x_1 + 0.01x_2$
Cu	1	IP	0.71	0.71	0.000	$y = 29.13 + 0.12x$
	2	IP (x_1), PD (x_2)	0.79	0.08	0.029	$y = 30.75 + 0.13x_1 - 1.28x_2$
	3	IP (x_1), PD (x_2), PLAND (x_3)	0.88	0.09	0.008	$y = 31.73 + 0.14x_1 - 1.61x_2 - 0.04x_3$

(Method: stepwise; Criteria: Probability-of-F-to-enter ≤ 0.050 , Probability-of-F-to-remove ≥ 0.100).

注: RD, 道路密度; PLAND, 建设用地面积比例; IP, 工业产值; PD, 斑块密度; LPI, 最大斑块指数; LSI, 景观形状指数.

3.4 PCI 及滑动窗口内变量的相关分析

滑动窗口中心点的 PCI 及逐步线性回归所得显著影响重金属空间分异的变量之间的相关分析如表 4 所示.

表 4 滑动窗口内变量间的相关分析

Table 4 Correlation between PCI and landscape variables computed by moving window method

	PCI	LSI	IP	PD	LPI
PCI	1	0.469 *	0.738 **	0.262	-0.483 *
LSI	0.469 *	1	0.279	0.920 **	-0.851 **
IP	0.738 **	0.279	1	0.095	-0.207
PD	0.262	0.920 **	0.095	1	-0.677 **
LPI	-0.483 *	-0.851 **	-0.207	-0.677 **	1

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

相关分析的结果表明, PCI 与 LSI、IP 显著正相关, 说明人口导入的越多, 工业产值越高, 反映景观扩张过程的景观形状指数越复杂(表 4). PCI 与 LPI 显著负相关, 说明 PCI 揭示了与 LPI 相反的一种景观过程. LPI 越大, 景观中的大型斑块的优势度大, 反映的是景观的稳定性. LSI 与 PD 显著正相关, 说明两者均反映了城市化扩张过程中景观的破碎化趋势. IP 只与 PCI 显著正相关, 说明人口的导入量很

好的反映了城市化发展的过程.

相关分析的结果表明, 滑动窗口分析揭示的浦东新区与土壤重金属的空间富集相关的主要影响因素是与工业化开发活动相关的城市化过程. 这个结果与缓冲区分析的结果类似.

如 Hahs and McDonnell (2006) 指出的那样, 人口变量 (PCI), 以及城市地区的主要物理变量如道路密度、建设用地比例等变量一起, 很好的反映了城市化发生过程中的空间异质性. 我们的分析表明, 这些变量可以很好的用于土壤重金属空间变异的解释.

Pouyat 等 (2008) 发现纽约市林地土壤的重金属响应于城乡梯度的变化. 市中心的 Pb、Cu 高于郊区, 并且在大约 75 km 的位置重金属元素的浓度降为背景值, 而 75% 的城市土地利用是一个阈值, 超过这个阈值的区域林地土壤 Pb 和 Cu 的浓度是低于这个阈值区域浓度的 2 倍以上. 类似的研究还有 Pouyat and McDonnell (1991). 本研究证明, Pb 的浓度分布不仅响应于城乡的梯度格局, 也与城市化特殊的格局即工业区的分布相关.

在上海地区, Li 等研究了上海市城乡梯度上 14 个公园的表层土壤 Pb 的空间分布 (Li *et al.*, 2011).

结果表明公园表层土壤的 Pb 污染浓度超过区域土壤 Pb 背景值的 2.5 倍,达到 $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。盐酸系列提取法及同位素的分析研究表明,上海市的 Pb 污染来源主要是燃煤(47%)及历史上含铅汽油的使用(12%)。自然和人为来源的 Pb 均呈现出一个城乡梯度的渐变趋势。与我们的研究相比, Li *et al.* 的研究范围主要在上海市的中环到内环的区域,研究的幅度范围的差异可能导致我们的结论与其不同。Pb 主要响应于道路的密度,这与很多其他的研究有类似的地方 (Schwarz *et al.*, 2013; Weiss *et al.*, 2006; Shi *et al.*, 2012)。

4 结论 (Conclusions)

1) Cu、Cd 及 Pb 的空间分布不仅响应于上海市的城乡梯度,也与垃圾填埋场、工业区的分布等特殊用地的分布有关。

2) 缓冲分析的结果表明,建设用地面积比例、道路密度均显著影响重金属的空间分布,而且呈现出尺度效应。就重金属的空间分布而言,上海市区域的重金属浓度主要与局地范围的人类活动,即工业和道路交通相关。滑动窗口分析的结果表明,影响城乡梯度重金属空间分布的主要因素是工业活动,以及反映城市化扩张过程的景观形状指数。相关分析的结果表明,这两种方式揭示了较为类似的城市区域重金属空间分布及其影响因素的内在机制,即工业活动相关的城市用地扩张过程。

责任作者简介: 杨晓英(1977—),女,复旦大学环境科学与工程系副教授,工程硕士研究生导师,从事流域污染控制研究,发表论文 40 篇。E-mail: xiaoying@fudan.edu.cn.

参考文献 (References):

- Callender E, Rice K C. 2000. The urban environmental gradient: Anthropogenic influences on the spatial and temporal distributions of lead and zinc in sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 34(2): 232-238
- 戴峰, 李晓斐. 2009. 上海地区 13 种金属土壤背景值初探[J]. *上海环境科学*, 28(6): 271-274
- Duzgoren-Aydin N S. 2007. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou [J]. *Science of the Total Environment*, 385(1/3): 182-195
- Fang S B, Xu C, Jia X B, *et al.* 2010. Using heavy metals to detect the human disturbances spatial scale on Chinese Yellow Sea coasts with an integrated analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1/3): 375-385
- Fang S B, Jia X B, Yang X Y, *et al.* 2012. A method of identifying priority spatial patterns for the management of potential ecological risks posed by heavy metals [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 237-238: 290-298
- Hahs A K, McDonnell M J. 2006. Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban-rural gradient [J]. *Landscape and Urban Planning*, 78(4): 435-448
- Hashemi S A, Bakhsh N R. 2013. Analyzing lead concentration in the Sycamore Tree species and relation to environment health [A]. 1st Congress of the Society for Urban Ecology [C]. Berlin, Germany
- Hooker P J, Nathanail C P. 2006. Risk-based characterisation of lead in urban soils [J]. *Chemical Geology*, 226(3/4): 340-351
- Irwin E G, Bockstael N E. 2007. The evolution of urban sprawl: evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52): 20672-20677
- Li H B, Yu S, Li G L, *et al.* 2011. Contamination and source differentiation of Pb in park soils along an urban-rural gradient in Shanghai [J]. *Environmental Pollution*, 159(12): 3536-3544
- Lu Y, Yin W, Huang L B, *et al.* 2011. Assessment of bioaccessibility and exposure risk of arsenic and lead in urban soils of Guangzhou City, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(2): 93-102
- Luck M, Wu J G. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA [J]. *Landscape Ecology*, 17(4): 327-339
- McGarigal K, Marks B J. 1995. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure [R]. PNW-GTR-351. Portland: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 120
- Pouyat R V, McDonnell M J. 1991. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 57-58(1): 797-807
- Pouyat R V, Yesilonis I D, Szlavecz K, *et al.* 2008. Response of forest soil properties to urbanization gradients in three metropolitan areas [J]. *Landscape Ecology*, 23(10): 1187-1203
- 上海浦东新区统计局. 2010. 上海浦东新区统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社
- Qureshi B A, Qureshi S, Karim Z. 2013. Heavy metal content in urban soils as an indicator of anthropogenic and natural influences on landscape of Karachi-A multivariate spatiotemporal analysis [C]. 1st Congress of the Society for Urban Ecology. Berlin
- 冉有华, 李新. 2009. 基于块克里金的土壤水分观测向像元尺度的尺度上推研究 [J]. *冰川冻土*, 31(2): 275-283
- Randa L A, Yungler J A. 2006. Carnivore occurrence along an urban-rural gradient: a landscape-level analysis [J]. *Journal of Mammalogy*, 87(6): 1154-1164
- Schwarz K, Pickett S T A, Lathrop R G, *et al.* 2012. The effects of the urban built environment on the spatial distribution of lead in residential soils [J]. *Environmental Pollution*, 163: 32-39
- Schwarz K, Weathers K C, Pickett S T A, *et al.* 2013. A comparison of three empirically based, spatially explicit predictive models of residential soil Pb concentrations in Baltimore, Maryland, USA:

- understanding the variability *within* cities [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 35(4): 495-510
- Shi G, Chen Z, Teng J, *et al.* 2012. Fluxes, variability and sources of cadmium, lead, arsenic and mercury in dry atmospheric depositions in urban, suburban and rural areas [J]. *Environmental Research*, 113: 28-32
- Smith E, Weber J, Naidu R, *et al.* 2011. Assessment of lead bioaccessibility in peri-urban contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1): 300-305
- Du Toit M J, Cilliers S S. 2011. Aspects influencing the selection of representative urbanization measures to quantify urban-rural gradients [J]. *Landscape Ecology*, 26(2): 169-181
- Weiss A L, Caravanos J, Blaise M J, *et al.* 2006. Distribution of lead in urban roadway grit and its association with elevated steel structures [J]. *Chemosphere*, 65(10): 1762-1771
- Wu J G, Jenerette G D, Buyantuyev A, *et al.* 2011. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: the case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States [J]. *Ecological Complexity*, 8(1): 1-8
- Xie Y F, Chen T B, Lei M, *et al.* 2010. Impact of spatial interpolation methods on the estimation of regional soil Cd [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(4): 847-854
- 新浪网. 2012. 康桥儿童血铅超标系因环境中铅含量升高引发[OL]. 2012-02-26, <http://sh.sina.com.cn/news/s/2012-02-26/0900209362.html>
- Yeh C T, Huang S L. 2009. Investigating spatiotemporal patterns of landscape diversity in response to urbanization [J]. *Landscape and Urban Planning*, 93(3/4): 151-162