

工业型城乡交错区农业土壤 Zn 的空间 分异及其影响因子探讨 以无锡市为例

赵彦锋^{1,2,3}, 史学正^{1,3}, 黄标¹, 于东升¹, 王洪杰¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 郑州大学环境与水利学院, 郑州 450002; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 城乡交错区的工业发展可能导致土壤重金属积累, 并威胁食品安全。本文以无锡典型工业型城乡交错区为例, 利用地统计学变异函数研究了农业土壤全量 Zn 和 DTPA-Zn 的空间变异特征, 并分析了其影响因素。结果表明: 人类活动明显增加了土壤的含 Zn 量, 研究区土壤全量 Zn 具有强烈的空间自相关性, 其空间变异主要与工业活动有关, 土地利用对它没有影响; 土壤全量 Zn 在工厂分布区附近较高, 其他地区较低。土壤 DTPA-Zn 变异性大于全量 Zn, 具有中等的空间自相关性, 其空间变异与工厂无明显关系, 但土地利用对它影响较大, 菜地 DTPA-Zn 含量明显高于水稻田。

关键词: 城乡交错区; 农业土壤; Zn; 空间分异

中图分类号: S159.2

工业化和城市化往往带来土壤重金属的积累^[1-4], 对农产品安全造成威胁。这种趋势城乡交错区更为明显, 城乡交错区除工业发达外, 还具有人口密集、土壤资源利用强度大的特点, 往往既是城市“三废”的接纳地, 同时又为当地和附近城市居民提供蔬菜和粮食。因此, 研究城乡交错区土壤重金属积累及其空间分布状况对于诊断污染源、保护土壤健康和食品安全都有重要意义。已有研究表明, 城乡交错区土壤重金属的积累和污染现象不容忽视。如 Bloemen^[5]在德国 Osnabrück 镇, Romic 等^[4]在克罗地亚 Zagreb 地区采用 1 km × 1 km 网格法采集土壤表层样, 发现工业等人为活动与土壤重金属积累明显相关; 章明奎等^[6]分析了绍兴市西南从农村到城市断面上 41 个土壤表层样, 发现城市附近土壤重金属含量较高; 柴世伟等^[7]分析了广州郊区 119 个土壤样品, 结果表明郊区土壤受到不同程度的 Hg、Cd、Pb、Zn 污染。

虽然 Zn 是生物必需微量营养元素之一, 但同时也是常见的污染重金属元素, 所以研究较为活跃。

刘付程等^[9]在原无锡锡山市 1066 km² 的范围内, 采集 65 个土壤耕层样品, 研究了县域尺度上土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的含量和空间分布特征, 发现全 Zn 和 DTPA-Zn 的含量与分布受成土母质、成土过程、人为活动等影响, 两者具有相似的空间分布趋势。但不同尺度的土壤特性空间变异各有其自身的特点, 它们发生空间变异的影响因子往往也不尽相同。尤其, 大尺度的研究, 采样密度较小, 乡镇一级范围内, 可能只有 1~2 个采样点, 这样较难反映局部土壤特性的异常, 更不能探讨土壤重金属在局部小范围地区的积累及其影响因子。自上世纪 80 年代以来, 无锡地区乡村工业发展迅速, 其中特色冶金、金属制品、精密机械及汽车配件是该地区的支柱产业^[8], 其西部城乡交错区分布着众多的炼钢、冶金、电镀、钢管等企业, 其中电镀、钢管等工业与金属 Zn 关系密切, 存在土壤 Zn 污染的潜在因素。因此, 本文在该地区采取在较小尺度上进行高密度采样的研究方法, 以期准确反映无锡工业型城乡交错区土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的空间分异特征及其与工业等

①基金项目: 欧盟项目 (RURBIFARM 和 ICA4-CT-2002-10021)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-427) 和国家重点基础研究规划项目 (2002CB410810) 资助。

作者简介: 赵彦锋 (1977—), 男, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事土壤资源和环境地学研究。E-mail: yfzhao@zzu.edu.cn

人为活动的关系。

1 研究区概况

研究区总面积约 8 km²,属于无锡西部某工业型城镇(图 1)。该镇总面积 25.67 km²,有 8 个村,1 个街道工作委员会,耕地约 1000 hm²,人口 3.4 万,2000 年有企业近 400 个,其主导产业主要有钢管厂、

电镀厂、钢铁厂等。研究区地形平坦,地面高程 5~8 m,属亚热带季风海洋性气候,年平均降雨量为 1000 mm,土壤类型是黄泥土(潜育型水稻土,普通铁渗水耕人为土),成土母质为河湖相沉积物。研究区周围是公路、小城镇、工业区,研究区内部土地利用主要是耕地,耕地类型主要包括稻田和菜地,也有零星分布的居民点。图 1 中标出了主要工厂的

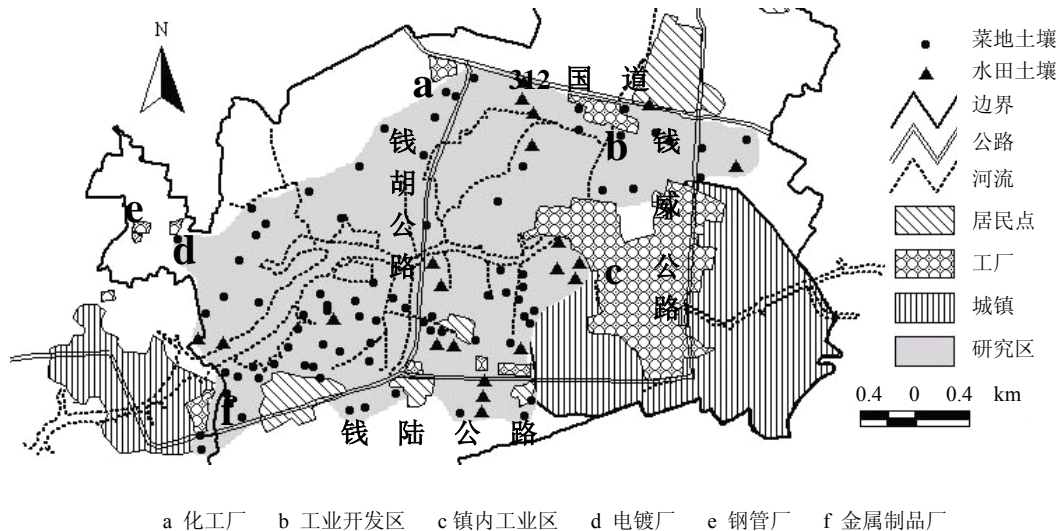


图 1 研究区概况和采样点分布

Fig. 1 A sketch map of the study area and distribution of the sampling sites

位置和较大的居民点。

2 研究方法

2.1 样品采集

土壤样品采集主要考虑到不同土地利用类型的特点:菜地地块分散,除了大面积的菜地外,还有分布于农民房前屋后的自留地,管理上的差异也较大,因此,菜地采样点布置得相对密集以充分反映菜地土壤重金属含量的特点;水稻田地块大,且耕作、灌溉等管理措施比较一致,采样点布置相对稀疏。采样遵循随机性原则,但采样点基本覆盖整个研究区,以便研究结果能反映研究区土壤变异的整体特征。共采集 0~20 cm 土样 102 个(图 1),相当于每平方公里 13 个样品,其中菜地土壤 75 个,水田土壤 27 个。每个土壤样品都是由 200 m² 以内 5 个子样混合得到。土样经室温自然风干、磨碎,分别过 10、60、100 目尼龙筛,贮存于塑料袋备用。

2.2 分析方法

用 pH S-3C 精密 pH 计测土壤 pH(土水比为 1:2.5),1 mol/L NH₄AC 提取法测定土壤 CEC,重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质,颗粒组成测定采用 LS230 激光粒度分析仪测定(结果为不同粒级土壤占总体积的百分数)。全量重金属 Zn 分析采用一种新的方法:取 100 目土壤样品 0.5~1.0 g 放入消化罐,加入 6~12 ml“反王水”(硝酸:盐酸=1:3),将消化罐在 100~170 °C 烘箱内放置过夜。第 2 天将消化罐拿出,放置在加热板上加热,不要沸腾,直至仅残留 1 ml 左右消化液。待冷却至室温后,用 0.1%的硝酸将残留物过滤至 25 ml 容量瓶中,定容、摇匀后用原子吸收法(Varian Spectr AA 110/220)测定。DTPA-Zn 含量采用 pH 7.3 DTPA(0.005 mol/L DTPA-0.01 mol/L CaCl₂-0.1 mol/L TEA)以 1:2 的土液比浸提,原子吸收法测定。

2.3 数据处理

由于特异值的存在会造成变量连续表面的中断,影响变量的分布特征,因此,本文采用域知识

别特异值。即用样本平均值 (\bar{a}) 加、减 3 倍标准差 (s)，在区间 $[\bar{a} - 3s, \bar{a} + 3s]$ 以外的数据均定为特异值，然后分别用正常的最大和最小值代替特异值^[10]。利用 SPSS10.0 对土壤全 Zn 含量和 DTPA-Zn 含量的分布进行了 Kolmogorov-Smirnov 检验。土壤全 Zn 含量符合正态分布，DTPA-Zn 含量正态分布检验显著性概率为 0.046，但偏度和峰度值较低，近似为正态分布 (表 1)，满足地统计学分析条件。因此对土壤 Zn 和 DTPA-Zn 均未做数据转换处理。

本文主要利用地统计学分析和 Kriging 插值研究土壤空间变异性。地统计学变异函数的计算和理论模型的拟合均采用地统计学软件 GS+5.3 进行，根据模型提供的参数，应用 ARCVIEW3.2 Kriging 插值模块生成土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的空间分布图，并分别以工厂和道路为中心，进行了缓冲区分析，研究了土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 与工厂和道路距离的关系。

3 结果与讨论

3.1 土壤 Zn 含量的统计特征及空间变异函数分析

由表 1 可知，研究区土壤全 Zn 的变化范围为

29.7 ~ 183.5 mg/kg，其平均值为 99.1 mg/kg，明显高于该地区 Zn 元素含量背景 77.6 mg/kg，这说明人类活动增加了土壤的含 Zn 量。DTPA-Zn 含量变化幅度为 0.96 ~ 19.02 mg/kg，变异系数 58%，远大于土壤全 Zn 的变异系数 28%。显然，土壤 DTPA-Zn 含量受到更多因素的影响。本研究区与原锡山市的研究结果相比较，可以发现两者的土壤全 Zn 含量无明显差异，但本研究区土壤全 Zn 变异系数小；土壤 DTPA-Zn 含量明显大于锡山市的平均水平，且变异系数大。这说明，人类活动对城乡交错区土壤 DTPA-Zn 的影响比对土壤全 Zn 的影响更大、更剧烈，也表明小尺度上土壤全 Zn 的变异幅度降低而 DTPA-Zn 的变异幅度增加。

地统计学变异函数是研究空间变量分布特征的有效工具，为此分别计算了土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的实验变异函数 ($r(h)$) 随步长 (h) 变化的曲线图 (图 2)，并用理论模型进行了拟合。结果表明，两者分别符合球状模型和指数模型。从模型中可以得到几个重要的参数：如有效变程 (a)，表示观测点之间存在相关性的最大距离；块金值 (C_0)，表示随机变异，它是由实验误差和小于实际取样尺度的非

表 1 土壤耕层全 Zn 和 DTPA-Zn 的统计描述 (mg/kg)

Table 1 Descriptive statistics of total Zn and DTPA-Zn in topsoil

		均值	最小值	最大值	中数	标准差	变异系数	偏度	峰度
本研究	Zn	99.1	29.7	183.5	96.9	27.5	28%	0.29	0.52
	DTPA-Zn	7.55	0.96	19.02	6.92	4.35	58%	-0.59	0.21
原锡山 ^a	Zn	98.2	57.7	195.1	96.2	32.2	33%	1.20	0.38
	DTPA-Zn	1.73	0.69	3.57	1.44	0.70	40%	1.03	0.13
Zn 背景值 ^b		77.6	20.4	173.8	71.7	27.3			

注：a 刘付程等^[9]研究结果；b 太湖流域土壤主要是发育于湖相沉积物，本文以湖相沉积物元素平均含量为研究区土壤背景值^[11]。

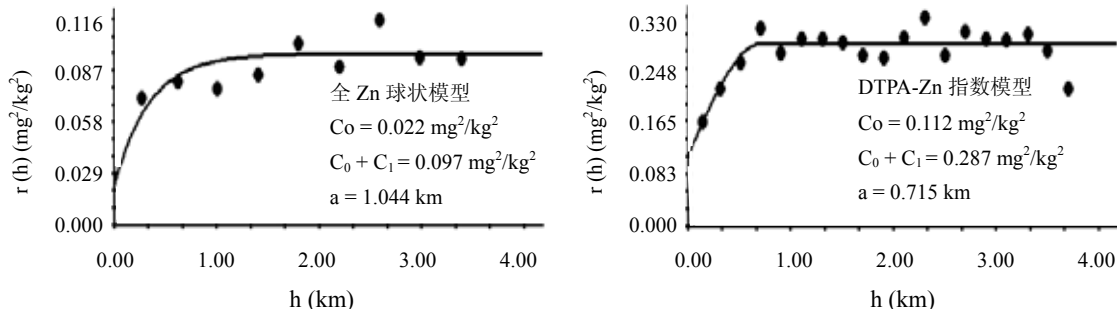


图 2 土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的变异函数及其理论模型

Fig. 2 Isotropic semivariograms of total Zn and DTPA-Zn in topsoil and their fitted models

连续性变异引起；基台值 (C_0+C_1)，表示系统内总变异；块金值与基台值之比 ($C_0/(C_0+C_1)$)，表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比，可以反映变量的空间相关程度，通常认为该比值 $< 25\%$ ，表明变量具有强烈的空间相关性，若比值 $> 75\%$ ，则说明随机部分引起的空间异质程度起主要作用，变量的空间相关性很弱^[12]。由图 2 可知，土壤全 Zn 与 DTPA-Zn 的有效变程分别为 1.044 km 和 0.715 km， $C_0/(C_0+C_1)$ 值分别为 23.1% 和 38.9%，说明土壤全 Zn 的分布具有强烈的空间相关性，土壤 DTPA-Zn 的分布具有中等强度的空间相关性。

3.2 土壤 Zn 空间分布格局

从土壤全 Zn 的空间分布图 (图 3)，可以判断其分布趋势为：研究区北部、东部和西部偏高，中部、南部偏低。对照图 1 可知，研究区北部 312 国道沿线有一个工业开发区；西北角 312 国道和钱胡

公路交叉口有一个化工厂；东部临近镇内工业区，该工业区分布着钢铁厂、制窗厂、仪器设备厂、农机厂、农药厂和水泥厂等，这些都是可能带来重金属污染的企业；研究区的西部外围，有 1 个电镀厂和 1 个钢管厂，据调查，电镀厂附近曾发生污水排放污染农田事故；西南角有 1 个金属制品厂，附近土壤 Zn 含量也较高。与全 Zn 相比，研究区土壤 DTPA-Zn 分布图的图斑较碎，这与其变异系数大和有效变程小是一致的。DTPA-Zn 和全 Zn 的分布趋势并不一致，全 Zn 含量高的地方，DTPA-Zn 的含量不一定高，而全 Zn 含量低的地方则 DTPA-Zn 的含量也不一定低，但明显看出水田 DTPA-Zn 含量较低。该结论与刘付程在县域尺度上的研究结论^[8]——锡山市土壤全 Zn 与有效 Zn 存在相似分布趋势，有所不同。这表明，不同尺度上影响土壤全 Zn 和有效 Zn 分布特征的因子可能有较大差异。

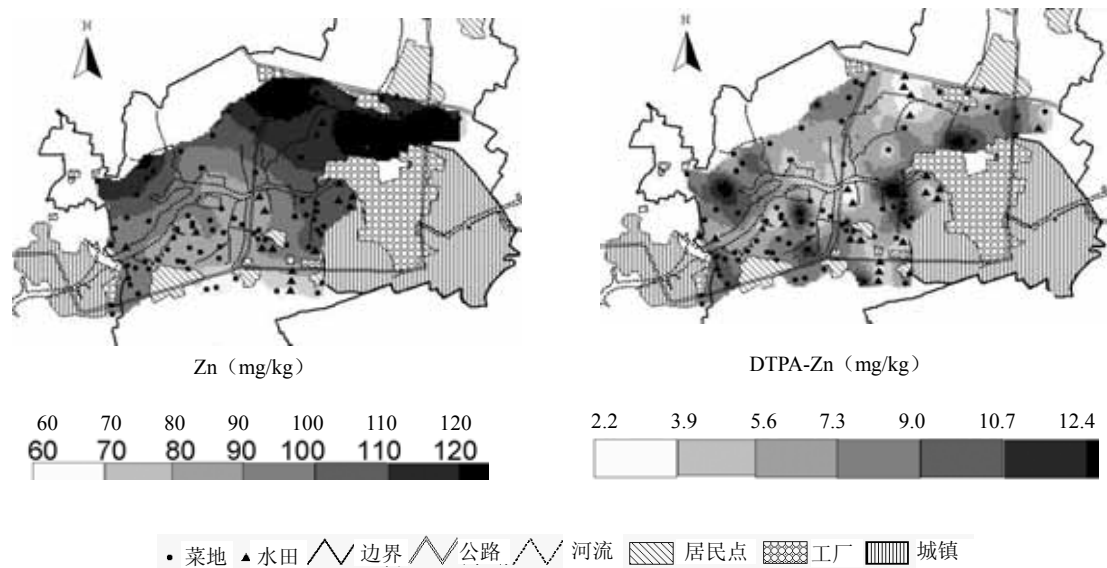


图 3 土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 的空间分布图

Fig. 3 Distribution patterns of total Zn and DTPA-Zn in topsoil

3.3 土壤 Zn 空间分布的影响因子

前面对变异函数的分析表明土壤全量 Zn 和 DTPA-Zn 分布主要受控于结构性因素，而不是随机性因素^[13]。结构性因素是指土壤、土地类型、母质、地形、气候等变化连续的变量，与城市或公路的距离也可能成为结构性因素。随机性因素则是指施肥、耕作、灌溉等具体的土壤管理措施。本研究区的总面积约 8 km²，研究范围内土壤类型和母质基本一

致，地形平坦，气象因素一致，影响土壤 Zn 变异的结构性因素，可能主要是土地利用和距可能的污染源的距。

土地利用方式的不同，往往导致土壤耕作、施肥、灌溉等管理措施的差异，不仅影响到土壤物质输入输出，也会引起土壤 pH、有机质含量等土壤理化性质的改变，并进而可能影响土壤重金属含量和有效性的差异。由表 2 可知，菜地和水田土壤全 Zn

量没有统计学上的显著差异，但菜地土壤 DTPA-Zn 含量 8.52 mg/kg，是水田土壤 DTPA-Zn 含量的 2.3 倍。同时菜地土壤 pH 和有机质含量显著低于水田。

因此，土壤 pH 和有机质含量的降低可能是导致菜地 DTPA-Zn 含量高的原因。这与很多文献报道是一致的^[14-15]。

表 2 蔬菜地和水稻田土壤属性的对比

Table 2 Soil properties of vegetable field and paddy field

土地类型	统计特征值	pH	CEC (cmol/kg)	OM (mg/kg)	黏粒 (%)	DTPA-Zn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
菜地	平均值	5.4b	19.34	28.57b	18.27	8.52a	98.90
	标准差	0.75	1.87	4.8	1.48	4.15	30.04
水田	平均值	6.3a	19.31	31.18a	19.05	3.64b	100.36
	标准差	0.39	1.33	3.69	1.75	2.37	23.20

注：字母不同表示两者差异显著。

由缓冲区分析结果（图 4）可知，土壤全 Zn 随与工厂距离的增加而下降的趋势十分明显，说明工厂是影响土壤全 Zn 分布的重要因素。但土壤 DTPA-Zn 与工厂距离无明显关系，其拟和曲线与实际值之间的决定系数只有 0.197。随与公路距离增加，土壤全 Zn 含量先升后降；而土壤 DTPA-Zn 含量则先降后升，说明公路对土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 含量的影响被工厂布局或土地利用等其他因素干扰

的可能较大。

4 结论

(1) 研究表明土壤全 Zn 的含量明显高于背景值。受人类活动影响，土壤 DTPA-Zn 的变异程度大于土壤全 Zn。本研究与原锡山市大尺度研究的结果相比发现，小尺度上土壤全 Zn 的变异幅度降低，而 DTPA-Zn 的变异幅度则明显增加。在研究区范围内，

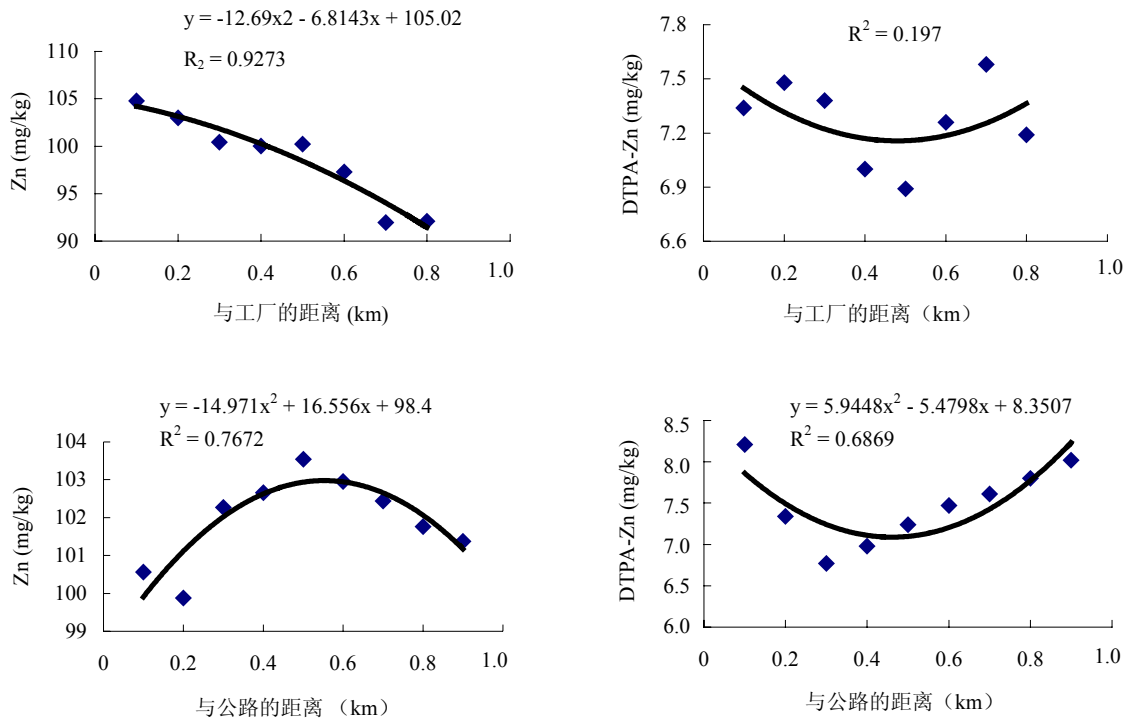


图 4 土壤 Zn 和 DTPA-Zn 与离工厂和公路距离的关系

Fig. 4 Relationship of Zn or DTPA-Zn in topsoil with distance to industry or road

土壤全 Zn 有较强的空间相关性, 而土壤 DTPA-Zn 含量仅具有中等的空间相关性。

(2) 研究区土壤全 Zn 和 DTPA-Zn 空间分布趋势有较大差异, 这不同于二者在锡山市县域尺度上分布具有相似趋势的结论。这可能是因为城乡交错区小尺度上的研究突出了人为因素对土壤属性的影响, 而较大尺度的研究主要反映土壤类型、母质等自然因素对土壤属性变异的影响。在本研究区, 影响土壤全 Zn 空间变异的主要因素是工厂, 工厂区附近土壤全 Zn 含量较高。并且随与工厂距离增加, 土壤全 Zn 含量有逐渐降低的趋势。土壤 DTPA-Zn 空间分布与工厂没有显著关系, 图斑也比较破碎, 但具有水田 DTPA-Zn 含量低于菜地的规律, 土地利用可能是影响其空间分布格局的主要因素。

(3) 控制土壤 DTPA-Zn 含量与分布的因素更复杂, 其空间分布的变异性也较大。因此, 在研究土壤重金属的风险性时, 应当更多地考虑研究其有效形态的含量和变化规律。

参考文献:

- [1] 廖金凤. 城市化对土壤环境的影响. 生态科学, 2001 (20): 91-95
- [2] Gocil PK, Reddy GLN, Krishna AK. Contamination of soil due to heavy metals in the Patancheru industrial development area, Andhra Pradesh, India. *Environmental geology*, 2001, 41: 461-469
- [3] Wong SC, Li XD, Zhang G, Qi SH, Min YS. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 2002, 119:33-44
- [4] Romić M, Romić D. Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban area. *Environmental geology*, 2003, 43: 795-805
- [5] Bloemen, ML, Markert B, and Lieth H. The distribution of Cd, Cu, Pb and Zn in topsoils of Osnabrück in relation to land use. *The Science of the Total Environment*, 1995, 166: 137-148
- [6] Zhang MK, Wang MQ, Liu XM, Jiang H, Xu JM. Characterization of soil quality under vegetable production along an urban-rural gradient. *Pedosphere*, 2003, 13(2): 173-180
- [7] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 董汉英, 陈玉娟, 龙祥葆, 罗妙榕, 向运荣, 周毛. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征. *中国环境科学*, 2003, 23(6): 592-596
- [8] 杨桂山, 王德建编著. 太湖流域经济发展·水环境·水灾害. 北京: 科学出版社, 2003: 56
- [9] 刘付程, 史学正, 王洪杰, 张庆利. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. *土壤*, 2003, 35(4): 330-333
- [10] Zhang CS, Zhang S, Zhang LC, Wang LJ. Background contents of heavymetals in sediments of the Yangtze River system and their calculation methods. *Journal of Environmental Sciences*, 1995, 7(4): 422-429
- [11] 国家环境保护总局, 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: 272
- [12] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究—以土壤全氮制图为例. *土壤学报*, 2004, 41(1): 20-27
- [13] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 64-67
- [14] Harter RD. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1983, 47: 47-51
- [15] Halina DN. The role of organic matter in association with zinc in selected arable soils from Kujawy Region, Poland. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 645-649

Spatial Variability of Zn in Agricultural Soils and Its Affecting Factors in Industrialized Peri-urban Areas

——A Case Study of Wuxi City

ZHAO Yan-feng^{1,2,3}, SHI Xue-zheng¹, HUANG Biao¹, YU Dong-sheng¹, WANG Hong-jie¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In peri-urban areas, industrialization may lead to accumulation of heavy metals in the soil, threatening food safety. In this paper, the concentrations of total Zn and DTPA-Zn in soil were determined in an area of 8 km² in a typical industrialized peri-urban region of Wuxi. Geostatistical theory was used to characterize spatial variability of total Zn and DTPA-Zn in soil and its affecting factors were discussed. Results showed that concentrations of total Zn in the soil exhibited strong spatial dependence, and the spatial variation was induced by industries, while effect of land use on total Zn in the soil was not found. High concentrations of total Zn were found in the soil near to industries. Concentrations of DTPA-Zn in soil exhibited moderate spatial dependence, and the spatial variation was not positively related to industries, but was greatly affected by land use pattern. And the concentrations of DTPA-Zn were significant higher in vegetable fields than in paddy fields.

Key words: Peri-urban region, Agricultural soil, Zn, Spatial variability