

南京江北地区菜地土壤有效态重金属的含量及空间分异特征

周文鳞, 李仁英, 岳海燕, 谢晓金, 朱红霞, 申双和

(南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:在南京市浦口和大厂的 5 大主要功能区(工业区、交通干线、居民区、蔬菜生产基地和风景区)内共采集了 75 个菜地表层土壤样品,以 Cd、Cu、Pb 和 Zn 等典型污染重金属的有效态含量为基础,运用经典统计分析、主成分分析和地统计分析相结合的方法对菜地土壤重金属污染进行了评估。结果表明,菜地有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的平均含量以交通干线沿线(宁六公路泰山新村-南信大段)最低,工业区(南钢或扬子石化)最高,其他功能区的均介于两者之间。主成分分析将菜地土壤有效态重金属大致分为农业源和工业、生活源。从功能区菜地土壤污染总得分排序结果可以看出,宁六公路沿线(泰山新村-南信大段)菜地土壤环境质量最高,以下依次是龙王山风景区、盘城蔬菜基地和盘城镇,老工业区的扬子石化和南钢周边菜地土壤环境质量较差。研究区内菜地土壤有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的空间分布均具有中等强度空间相关性,不同有效态重金属在空间上具有明显的各向异性,其空间变异主要发生在北-南方向。有效态 Pb 的空间分布较离散,有效 Cd、Cu 和 Zn 的高值区大致都位于老工业区内。

关键词:南京江北地区;菜地土壤;有效态重金属;主成分分析;地统计分析

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0451-07

Concentrations and Spatial Distribution Characteristics of Available Heavy Metals in Vegetable Soils in Jiangbei Area of Nanjing City

ZHOU Wen-lin, LI Ren-ying, YUE Hai-yan, XIE Xiao-jin, ZHU Hong-xia, SHEN Shuang-he

(College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: 75 surface samples were collected from vegetable soils located in or nearby 5 contrasting zones: industry, arterial highway, resident, vegetable production base and scenery site, across Pukou and Dachang districts of Nanjing City. Pollution characteristics of available heavy metal (Cd, Cu, Pb and Zn) in soils were assessed by methods of normal statistical analysis, principal components analysis and geostatistical analysis. The results showed that the average concentrations of available heavy metals in vegetable soils was the lowest along arterial highway (Ningliu Road from Village Taishan to Nanjing University of Information Science & Technology) and the highest in industrial area (Nanjing steel group or Sinopec Yangzi Petrochemical Company Ltd.) while those of other functional areas were between the two above. Two main sources of available heavy metals, agriculture and industry-resident, were obtained, by principal components analysis. The order of heavy metals pollution in vegetable soils in the functional areas was: Ningliu Road (from Village Taishan to Nanjing University of Information Science & Technology) < Longwang Mountain scenery site < Pancheng vegetable production base and Pancheng Town < the old industrial area (including Nanjing steel group and Sinopec Yangzi Petrochemical Company Ltd.). Available Cu, Cd, Pb and Zn exhibited moderate spatial dependence in vegetable soil in the studied area. The geostatistical analysis also showed a significant anisotropy in distribution of soil available heavy metals which demonstrated an azimuth angle in the long axis direction (N-S). The spatial distribution of available Pb was more discrete. The high-value area of available Cd, Cu and Zn was generally located in the old industrial area.

Keywords: Jiangbei area in Nanjing; vegetable soils; available heavy metals; principal components analysis; geostatistical analysis

收稿日期: 2009-07-08

基金项目: 江苏省社会发展项目(BS2006060); 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(07CX0004); 南京信息工程大学科研启动项目(QD48)

作者简介: 周文鳞(1982—), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 主要从事土壤重金属和土壤碳循环方面的研究。E-mail: lin726@sina.com

通讯作者: 李仁英 E-mail: ryli75@163.com

随着城市化、工业化的加剧和农业化学用品种类、数量的增加,土壤重金属污染日益严重。重金属在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解,并可经水、植物等介质影响人体健康。有研究表明,南京城郊菜地土壤已受到不同程度的重金属污染^[1-3]。陈亚华等调查了南京地区农田土壤的污染状况,发现矿区周边农田污染最为严重,其次为污灌地和公路沿线农田^[4]。丁爱芳等^[5]对南京城郊零散菜地的研究表明人为活动已对城郊土壤重金属产生了明显影响,城郊种植的青菜中 Pb、Cd 含量大大超过国家食品卫生标准。基础的重金属全量只能反映重金属在土壤中的潜在储量,土壤重金属的环境风险、生物有效性和毒性与其赋存的形态密切相关^[6]。南京江北地区是工业集中区,本文针对其不同功能区,在前期研究菜地土壤重金属全量空间变异的基础上,运用主成分分析对菜地土壤重金属污染进行评估,并用地统计分析和 GIS 空间分析相结合直观描绘了有效态重金属的空间分异特征,为南京江北地区土壤重金属污染评价、农产品安全生产和城郊环境修复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查范围

根据研究区(即浦口和大厂)土地利用现状,通过现场勘探、资料分析,选取 5 个能反映研究区主要污染特征的功能区,具体为:工业区——老工业区内的南钢和扬子石化周边;交通干线——宁六公路泰山新村-南京信息工程大学段交通沿线;居民区——盘城镇;蔬菜生产基地——盘城蔬菜基地;风景区——龙王山风景区。

1.2 土壤样品采集与处理

用不锈钢土钻随机采集 0~20 cm 菜地表层土壤 4~6 个,混为一个土样,并用手持 GPS 记录采样点坐标。共采集土壤样品 75 个,其中南钢周边 12 个、扬子石化周边 12 个、宁六公路泰山新村-南信大段沿线 15 个、盘城镇 17 个、盘城蔬菜基地 7 个和龙王山风景区 12 个。土壤采样点分布见图 1。土壤样品经自然风干,去除石头和植物残体等杂物,磨碎过 20 和 100 目备用。

1.3 土壤样品分析

土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,有效态重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 采用 DTPA 浸提,ICP-AES 测定^[7]。实验用水为超纯水,分析过程中所用的塑料瓶及玻璃容器均在 15%的 HNO₃ 溶液中浸泡 24 h 以上。

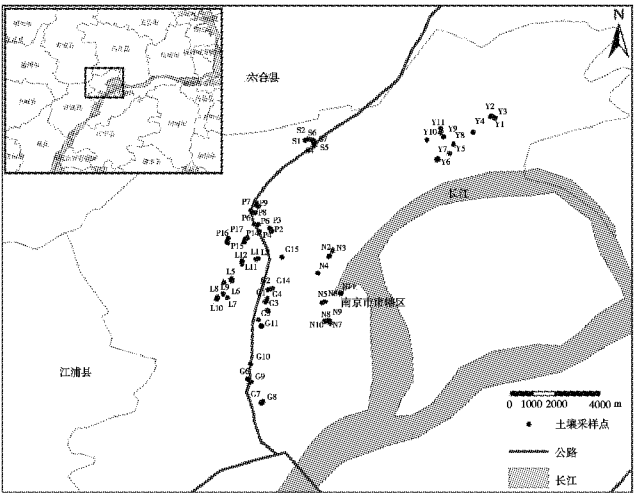


图 1 江北地区土壤样点分布
Figure 1 Distribution of soil sampling sites in Jiangbei area

2 结果与分析

2.1 土壤有效态重金属的总体特征及相关性分析

表 1 列出了研究区 75 个菜地土样有效态重金属的含量变化。菜地土壤有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.06、5.62、2.10 和 5.36 mg·kg⁻¹。4 种有效态重金属的变异系数大小依次为:Cu>Zn>Pb>Cd。其中有效态 Cu 和 Zn 的变异系数均大于 100%,属于强变异强度^[8],且极值比很大(分别达 247.29 和 99 倍),说明研究区土壤有效态重金属受施肥、管理措施、种植制度、污染等强烈人为活动的影响很显著,尤以 Cu 和 Zn 比较严重。利用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫(KS, P<0.05)对数据进行检验,有效态 Cd 为正态分布,其余均为对数正态分布。

表 1 土壤有效态重金属含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of available heavy metals in soils						
项目	范围/mg·kg ⁻¹	均值/mg·kg ⁻¹	变异系数	偏度	峰度	分布类型
Cd	0.01~0.17	0.06	49.88	0.82	1.02	正态
Cu	0.31~76.66	5.62	178.72	5.65	36.08	对数正态
Pb	0.20~5.85	2.10	53.28	0.90	0.97	对数正态
Zn	0.32~31.68	5.36	111.29	2.34	6.09	对数正态

相关性分析(表 2 和表 3)表明,有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 均与其对应全量呈极显著相关,土壤有机质与有效态重金属之间存在显著或极显著相关,可见重金属总量和有机质是控制有效态重金属含量的主要因素。有效态重金属间亦呈显著或极显著相关,说明污染区具有同源性的复合污染特征。

在本研究的 5 大功能区中(表 4),菜地有效态

表 2 土壤有效态重金属与其总量的相关系数
Table 2 Correlation coefficient between available and total heavy metals in soils

	Cd	Cu	Pb	Zn
R	0.56**	0.74**	0.64**	0.74**

注:**表示 $P<0.01$ 水平上相关,*表示 $P<0.05$ 水平上相关。下表同。

表 3 土壤有效态重金属与有机质的相关系数
Table 3 Correlation coefficient among available heavy metals and organic matter in soils

	OM	Cd	Cu	Pb	Zn
OM	1.00	0.67**	0.23*	0.47**	0.43**
Cd	—	1.00	0.40**	0.67**	0.47**
Cu	—	—	1.00	0.35**	0.63**
Pb	—	—	—	1.00	0.23*
Zn	—	—	—	—	1.00

Cd、Cu、Pb 和 Zn 的平均含量以交通干线沿线(宁六公路泰山新村-南信大段)最低,工业区(南钢或扬子石化)最高,其他功能区的均介于两者之间。经单因素方差分析可知,南钢周边有效态 Cd 和扬子石化周边有效态 Zn 含量在 0.05 水平显著高于宁六公路泰山新村-南信大段,其他两种有效态重金属含量在不同功能区之间均不存在差异。有效态重金属的含量与人为活动密切相关,近期无铅汽油的使用、工业区污染物

的排放及农事活动中有机肥、复合肥的大量施用造成了各功能区有效态重金属的含量差异。

2.2 土壤有效态重金属的主成分分析

主成分分析是在不损失或减少损失原有信息的前提下,把多指标转化为少数几个彼此之间不相关的综合指标的多元统计分析方法^[9]。目前已被引入土地资源保护、环境脆弱性评价等诸多研究领域。主成分分析可以揭示土壤因子的结构及其内在联系,描述土壤因子分布的主要特征。

根据文献[10]特征值 $\lambda>1$ 且累计贡献率大于70%或 80%的原则,运用 SPSS11.0 软件对有机质(OM)、有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 5 项指标进行主成分分析,用方差最大法进行正交旋转,其主成分的特征值、方差贡献率及累计方差贡献率见表 5。可以看出,前两个主成分已包含样本的大部分信息(累计贡献率为 76.83%)。

主要因子识别是通过土壤因子对主成分的贡献率即主成分载荷进行分析,载荷大的即可认为是主要

表 5 主成分特征值及贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.15	43.07%	43.07%
2	1.69	33.76%	76.83%

表 4 不同功能区土壤有效态重金属含量的统计分析

Table 4 Descriptive statistics of available heavy metals in soils in the different functional areas

采样区	重金属项目	Cd/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
扬子石化周边 n=12	含量范围	0.03~0.11	0.99~40.92	0.78~3.82	0.80~31.68
	平均值±标准差	0.07±0.02ab	10.12±12.38a	1.95±0.82a	10.28±8.39b
	变异系数	31.48	122.27	42.19	81.59
南钢周边 n=12	含量范围	0.02~0.17	0.48~9.74	0.67~5.85	0.34~20.63
	平均值±标准差	0.09±0.05b	3.97±2.76a	2.57±1.48a	5.69±5.93ab
	变异系数	56.27	69.67	57.52	104.23
宁六公路 n=15 (泰山新村-南信大段)	含量范围	0.01~0.07	0.31~7.66	0.57~3.64	0.32~7.39
	平均值±标准差	0.04±0.02a	2.27±1.85a	1.50±0.77a	2.39±1.94a
	变异系数	48.94	81.41	51.39	81.28
龙王山风景区 n=12	含量范围	0.02~0.12	0.86~5.23	0.66~3.61	0.98~5.00
	平均值±标准差	0.06±0.03ab	3.02±1.47a	2.18±1.02a	2.53±1.57a
	变异系数	51.05	48.68	47.10	62.11
盘城镇 n=17	含量范围	0.04~0.15	2.89~76.66	0.20~5.12	1.01~24.51
	平均值±标准差	0.07±0.02ab	9.20±17.44a	2.24±1.25a	6.16±7.05ab
	变异系数	35.00	189.63	55.64	114.42
盘城蔬菜基地 n=7	含量范围	0.04~0.10	2.84~4.77	1.22~4.53	1.94~10.45
	平均值±标准差	0.07±0.02ab	3.72±0.71a	2.38±1.10a	5.63±3.30ab
	变异系数	34.36	19.15	46.16	58.56

注:不同字母表示差异在 0.05 水平显著。

影响因子,其正负可以反映出因子的复合性。表 6 是旋转后的因子载荷矩阵,从表中可以看出:第一主成分在土壤有机质、有效态 Cd 和 Pb 上均有很大的正向载荷。研究表明^[11-12],随着磷肥及复合肥的大量施用,土壤有效态 Cd 的含量不断增加,作物吸收 Cd 量也相应增加。近年来大量使用的地膜在生产过程中加入了含有 Cd、Pb 的热稳定剂,以及菜农就近施用垃圾肥^[13]增加了菜地土壤重金属污染。所以上述变量在一定程度上可以作为反映农业活动水平的因子。第二主成分在有效态 Cu 和 Zn 上具有较大的正向载荷。冶炼、铜制品生产、镀锌等工业生产^[14-15]以及水管、建筑装饰材料等生活用料^[16]都对 Cu、Zn 污染有贡献。第二主成分在一定程度上可以解释为工业和生活水平因子。

根据上述分析,将原来的 5 项指标转化为两项综合因子,它们各自反映了现象的一个方面,而这两项综合因子指标已充分刻画了现象的主要特征。

表 6 方差最大旋转后的主成分因子载荷矩阵

Table 6 Principal component matrix with varimax rotation

	1	2
OM	0.80	0.19
Cd	0.86	0.31
Cu	0.17	0.88
Pb	0.83	0.11
Zn	0.24	0.87

对前两个主成分所表达的内涵进行解释后,再对研究区的菜地土壤重金属污染进行评价。主成分表达式系数用初始因子载荷矩阵第 i 列向量除以 λ_i 开平方就得到第 i 个主成分的系数向量。根据初始因子载荷矩阵表,利用公式 $A1=B1/SQR(2.15)$ (式中 $B1$ 为第一主成分因子载荷矩阵系数,2.15 为第一主成分特征值)可以计算出第一主成分系数,同理可以确定第二主成分系数。将主成分系数和标准化数据相乘再求和,可以计算出各项目两个主成分的得分,以每个主

成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重与各主成分得分相乘再求和,即可得到主成分的综合得分。

主成分得分可以反映重金属污染对土壤环境质量状况的影响程度,得分越低代表土壤重金属污染物含量越低,即土壤环境质量越好。从表 7 中功能区的菜地土壤污染总得分排序结果可以看出,宁六公路(泰山新村-南信大段)的菜地土壤环境质量最高,依次是龙王山风景区、盘城蔬菜基地和盘城镇,老工业区的扬子石化和南钢周边菜地土壤综合得分最高,反映出工业区重金属污染物含量较高,菜地土壤环境质量较差。

表 7 主成分因子得分及综合得分

Table 7 Factor and composite score of principal components

功能区	主成分		综合得分	得分排名
	1	2		
扬子石化周边	0.18	0.86	0.48	2
南钢周边	0.77	0.16	0.50	1
宁六公路(泰山新村-南信大段)	-1.22	-0.88	-1.07	6
龙王山风景区	-0.37	-0.60	-0.47	5
盘城镇	0.37	0.42	0.39	3
盘城蔬菜基地	0.53	0.03	0.31	4

2.3 土壤有效态重金属的空间变异分析

应用地统计学的方法和原理是国内外定量化研究土壤性质空间变异的趋势之一^[17-21]。本研究为不规则取样,选择步长应使步长大小乘以步长数小于或等于样点间最大距离的 $1/2$ ^[22],且相对于理论变异函数的范围,可根据拟合半变异模型的规模增减步长。研究区内样点间最大距离约 15 510 m,半方差函数拟合时设定最大步长约 1 069 m,最小步长约 137 m,步长数最大为 12,最小为 7。在 ArcGIS9.2 的地统计学组件中,评价模型及其参数是否合适或合适程度的方法参照文献[23-24]。此处仅选取最常用的球状模型、指数模型和高斯模型进行比较,表 8 是各要素半方差函

表 8 研究区土壤重金属半方差函数的拟合模型

Table 8 Semivariogram models of available heavy metals in soils in the studied area

项目	趋势效应	模型	变程(A_0)		长轴方向角	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	预测误差				
			长轴	短轴					Mean	RMS	ASE	MS	RMSS
Cd	二阶	G	3 673	2 134	27.8°	0.001	0.001	63.46%	0.000	0.032	0.028 9	0.006	1.089
Cu	二阶	S	7 446	5 942	346.4°	0.088	0.139	63.19%	0.006	0.358	0.323 9	0.016	1.089
Pb	二阶	E	1 625	320	313.8°	0.031	0.086	36.45%	0.004	0.285	0.285	-0.002	0.993
Zn	二阶	S	7 292	3 225	359.4°	0.089	0.120	74.32%	0.000	0.368	0.324	-0.003	1.124

注:G 代表高斯模型,S 代表球状模型,E 代表指数模型。

数的拟合模型及相应参数。

Cambardella 等运用块金值与基台值比值的大小来判定系统内变量的空间相关性程度,用比值 $<25\%$ 、 $25\%\sim 75\%$ 、 $>75\%$ 分别表示变量的空间相关性较强、中等、较弱^[25]。研究区内,块基比显示菜地土壤有效态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的空间分布均具有中等强度空间相关性,表明 4 种有效态重金属同时受地形等内在因素和人为因素共同作用的影响。结构性因素可以导致土壤特性的空间相关性加强,而随机性因素使得土壤特性的空间相关性减弱,朝均一化方向发展^[26]。有效态 Pb 的空间自相关尺度仅为 36.45%,说明影响其分布的因素中结构性因素所占比例大于其他 3 种有效态重金属。

研究区菜地表土中不同有效态重金属含量在空间上有明显的各向异性(表 8)。有效态 Cd、Cu、Pb 和

Zn 的长短轴之比依次为 1.72、1.25、5.07 和 2.26。4 种有效态重金属的长轴方位角接近(在 $359.4^\circ\sim 27.8^\circ$ 之间),其空间变异主要发生在北-南方向。

在各向异性的前提下,利用 ArcGIS9.2 空间分析模块,对数据以二阶剔除,根据所确定的半方差函数模型采用普通克吕格法进行最优内插,绘制出其空间分布图(图 2)。

空间分布图表明,研究区菜地土壤有效态 Pb 分布较离散,这与其有效变程小是一致的。有效态 Cd、Cu 和 Zn 的高值区分别位于大厂新城、盘城镇和泰山镇,大厂新城北的扬子石化公司,大厂新城及其北部。大厂新城由南向北坐落有扬子石化、南京钢铁集团、华能电厂和南京热电厂等特大型企业。以机械制造及加工、电子电信、橡胶塑料、物流、服装加工等行业为主的工业企业分布于盘城和泰山镇工业集中区。在土

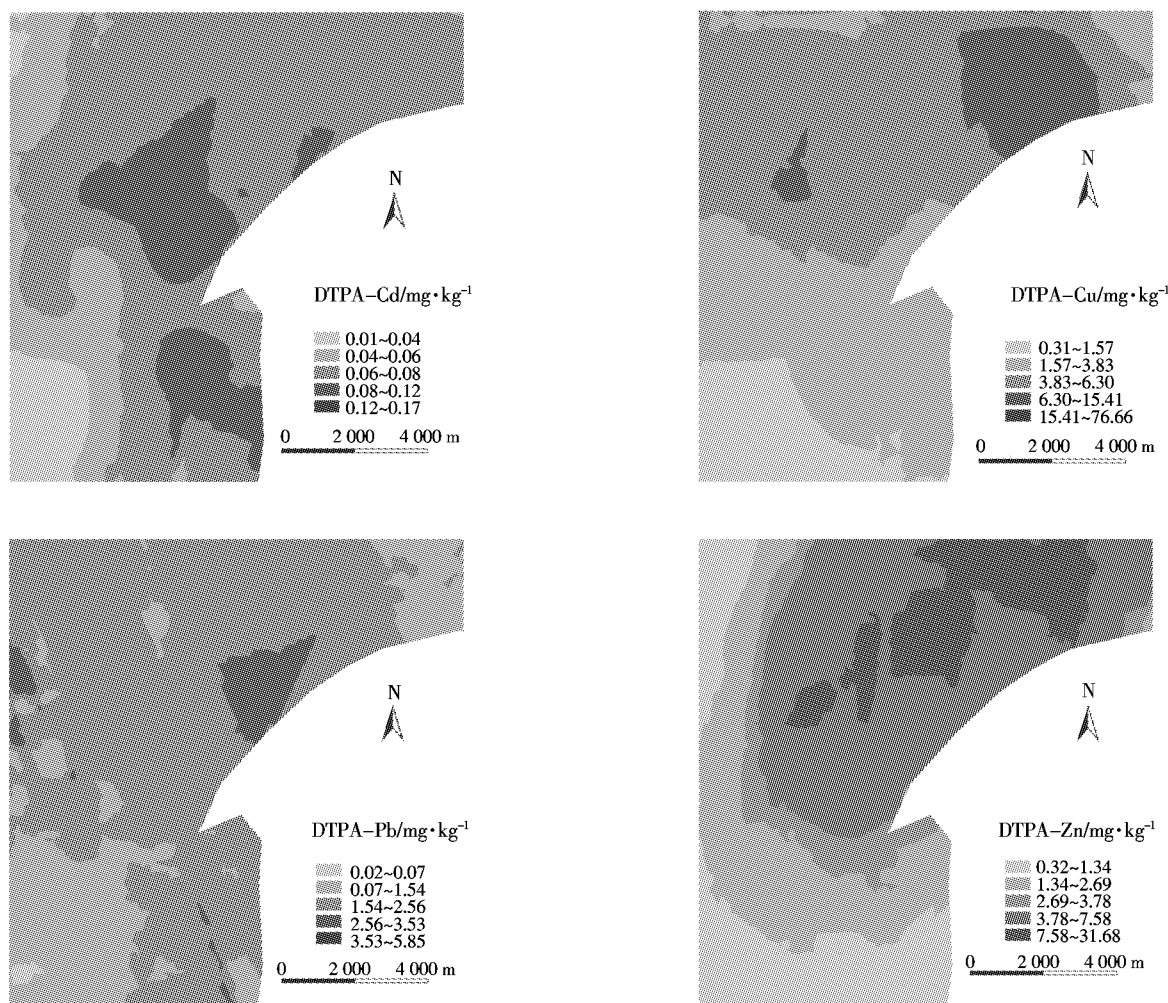


图 2 研究区表土有效态重金属含量的空间分布插值图

Figure 2 Kriging maps of available heavy metal concentrations in surface soil in the studied area

壤重金属全量以及土壤本身诸如土壤有机质、土壤pH、土壤质地等理化性质作用下,形成了土壤有效态重金属的空间分布格局。

3 结论

(1)在南京市江北地区,菜地有效态Cd、Cu、Pb和Zn的平均含量以交通干线沿线(宁六公路泰山新村-南信大段)最低,工业区(南钢或扬子石化)最高,其他功能区的均介于两者之间。重金属总量和有机质是控制有效态含量的主要因素,且重金属污染具有同源性的复合污染特征。

(2)主成分分析将菜地土壤重金属污染大致分为农业源和工业、生活源,从功能区的菜地土壤污染总得分排序结果可以看出,宁六公路(泰山新村-南信大段)的菜地土壤环境质量最高,以下依次是龙王山风景区、盘城蔬菜基地和盘城镇,老工业区的扬子石化和南钢周边菜地土壤环境质量较差。

(3)从半方差函数模型拟合的结果可见,菜地土壤有效态Cd、Cu、Pb和Zn的空间分布均具有中等强度空间相关性,不同有效态重金属在空间上有明显的各向异性,其空间变异主要发生在北-南方向。有效态Pb的空间分布较离散,有效Cd、Cu和Zn的高值区大致都位于老工业区内。

参考文献:

- [1] 张中一, 朱长会. 南京市郊菜地土壤重金属污染状况[J]. 金陵科技学院学报, 1995, 26(4): 6-11.
ZHANG Zhong-yi, ZHU Chang-hui. Investigation of heavy metals content of vegetable plots soil in suburbs of Nanjing[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 1995, 26(4): 6-11.
- [2] 房世波, 潘剑君, 成杰民, 等. 南京市郊蔬菜地土壤中重金属含量的时空变化规律[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 339-342.
FANG Shi-bo, PAN Jian-jun, CHENG Jie-min, et al. Spatio-temporal distributions of soil heavy metals in vegetable plots in Nanjing [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 339-342.
- [3] 陈峰, 尹春芹, 蒋新, 等. 基于GIS的南京市典型蔬菜基地土壤重金属污染现状与评价[J]. 中国环境监测, 2008, 24(2): 40-45.
CHEN Feng, YIN Chun-qin, JIANG Xin, et al. Evaluation of heavy metal pollution in representative vegetable soils in Nanjing based on GIS[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(2): 40-45.
- [4] 陈亚华, 黄少华, 刘胜环, 等. 南京地区农田土壤和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 356-360.
CHEN Ya-hua, HUANG Shao-hua, LIU Sheng-huan, et al. Study of the heavy metal contamination in soils and vegetables in Nanjing area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 356-360.
- [5] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 409-411.
DING Ai-fang, PAN Gen-xing. Contents of heavy metals in soils and Chinese cabbages (*brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the human health risks[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 409-411.
- [6] 张秀芝, 鲍征宇, 马忠社, 等. 土壤生态系统微量元素的生物有效性研究现状[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 15-22.
ZHANG Xiu-zhi, BAO Zheng-yu, MA Zhong-she, et al. Status quo of research on the bioavailability of trace elements in soil environmental ecosystem[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(3): 15-22.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 226-227.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 226-227.
- [8] 樊燕, 武伟, 刘洪斌. 土壤重金属与土壤理化性质的空间变异及研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2007, 32(4): 58-63.
FAN Yan, WU Wei, LIU Hong-bin. Study of the variations in the distribution of soil heavy metals and soil physico-chemical properties and their correlation[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2007, 32(4): 58-63.
- [9] 白仲林. 用主成分分析法对企业财务状况进行综合评价[J]. 天津商学院学报, 2000, 20(3): 41-43.
BAI Zhong-lin. Synthesis appraising on the enterprise financial state by principal components analysis[J]. *Journal of Tianjin University of Commerce*, 2000, 20(3): 41-43.
- [10] 林杰斌, 陈湘, 刘明德. SPSS11 统计分析实务设计宝典[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 230-244.
LIN Jie-bin, CHEN Xiang, LIU Ming-de. Statistical analysis handbook for SPSS11[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002: 230-244.
- [11] 肖军, 秦志伟, 赵景波. 农田土壤化肥污染及对策[J]. 环境保护科学, 2005(5): 32-34.
XIAO Jun, QIN Zhi-wei, ZHAO Jing-bo. Status and countermeasures of farmland soil polluted by chemical fertilizer[J]. *Environmental Protection Science*, 2005(5): 32-34.
- [12] 褚卫红, 石亚辉. 农用地膜在农业生产中的作用、影响及对策[J]. 内蒙古农业科技, 2007(7): 142-143.
ZHU Wei-hong, SHI Ya-hui. Effect, influence and countermeasures of plastic film in agricultural production[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2007(7): 142-143.
- [13] 周聪, 刘洪升, 冯信平, 等. 海南垃圾堆肥的重金属含量及对无公害果蔬的影响[J]. 热带作物学报, 2003, 24(2): 86-90.
ZHOU Cong, LIU Hong-sheng, FENG Xin-ping, et al. Heavy metal in garbage compost in Hainan and their influences on fruits trees and vegetables[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2003, 24(2): 86-90.
- [14] 朱长亮, 杨洪英, 范有静, 等. 辽宁省某冶炼厂铜锌生产区土壤锌污染研究[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 77-80.
ZHU Chang-liang, YANG Hong-ying, FAN You-jing, et al. Research on zinc pollution soils of a smeltery in Liaoning[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(4): 77-80.

- tection Science, 2007, 33(4):77-80.
- [15] 孟凡祥, 李琪, 闻大中. 金属加工厂附近农田土壤锌污染的地统计学分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(4):367-370.
- MENG Fan-xiang, LI Qi, WEN Da-zhong. Geostatistical analysis of soil zinc contamination in the vicinity of a metal-processing manufacturer[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2005, 21(4):367-370.
- [16] Allen P Davis, Mohammad Shokouhian, Ni Shubei. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources[J]. *Chemosphere*, 2001, 44:997-1009.
- [17] 刘世梁, 傅伯杰, 马克明, 等. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1):26-30.
- LIU Shi-liang, FU Bo-jie, MA Ke-ming, et al. Effects of vegetation types and landscape features on soil properties at the plateau in the upper reaches of Minjiang River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):26-30.
- [18] Bruland G L, Richardson C J. Spatial variability of soil properties in created, restored and paired natural wetlands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1):273-284.
- [19] Zhang C S, Selinus O. Spatial analyses for copper, lead, and zinc contents in sediments of the Yangtze River basin[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 204(3):251-262.
- [20] Zhang C S, Selinus O. Statistics and GIS in environmental geochemistry: Some problems and solutions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 64(1):339-354.
- [21] Zhang C S, Selinus O, Kjellstrom G. Discrimination between natural background and anthropogenic pollution in environmental geochemistry: Exemplified in an area of south-eastern Sweden[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 243/244:129-140.
- [22] 吴学文, 晏路明. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法——以福建省一月均温空间内插为例[J]. 地球信息科学, 2007, 9(3):104-108.
- WU Xue-wen, YAN Lu-ming. Setting parameters and choosing optimum semivariogram models of ordinary Kriging interpolation——A case study of spatial interpolation to January average temperature of Fujian province[J]. *Geo-Information Science*, 2007, 9(3):104-108.
- [23] Heuvelink G B M, Webster R. Modeling soil variation: past, present, and future[J]. *Geoderma*, 2001, 100:269-301.
- [24] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89:1-45.
- [25] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58:1501-1511.
- [26] Chien Yi-jun, Lee Dar-yuan, Guo Horng-yuh, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Tai Wan soils[J]. *Soil Science*, 1997, 162(4):291-298.