

污灌条件下农田土壤重金属的空间变异与模拟

孟 涛, 周 非, 聂庆华, 刘光媛

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要:土壤重金属污染影响农田环境质量及食品安全。以天津市武清区北部农产品商品基地(包括 10 个乡镇)为例,运用地统计学方法和 ArcGIS 技术,分析了农田土壤中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 5 种重金属元素含量的空间变异性和相关性;借助最优空间插值模型模拟它们的空间分布特征。结果表明,Hg 元素属于空间弱相关,Cu、Zn、Pb 和 As 元素有中等程度的空间相关性。插值结果进一步表明,在研究区北部 5 种重金属元素含量均较高;Cu 含量以北京排污河为中心,向其两侧递减;Zn 和 As 含量呈岛状区域分布,高值区主要分布在排污河附近;Pb 和 Hg 含量分布表现为北部和东南部较高,与污灌范围和强度有明显关联。其中主要污灌区大沙河乡的土壤重金属污染最为严重。

关键词:土壤重金属;空间分析;地统计学;ArcGIS;污灌

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-0867-06

Spatial Variation of Heavy Metal Contents in Farmland Soils Under Permanent Irrigation from Polluted River Water

MENG Tao, ZHOU Fei, NIE Qing-hua, LIU Guang-yuan

(College of Environmental Science & Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Heavy metal contents of farmland soils under permanent irrigation from polluted river water affect seriously the quality of farmland environment and food safety. In this paper, with Tianjin urban fringe zone (Wuqing County) as the case study, where the farmland was irrigated permanently using polluted river water, the spatial variation and distribution correlations of five heavy metals in farmland soils, including Cu, Zn, Pb, As and Hg are computed and analyzed based on geostatistics and ArcGIS techniques. The optimal spatial interpolation models of the soil heavy metals are discovered by means of the comparison analysis among the different interpolation methods, such as kriging and other certainty spatial interpolation methods. Then the distributions of the five soil heavy metal contents are mapped by using the optimal spatial interpolation models. The results show that the high values of the five heavy metal contents are located in the northern area of our research region, and Cu content in farmland soils decreases gradually with the irrigation distances along the sides of the Beijing sewage river. The contents of the soil Pb and Hg have high value centers in northern and southeastern area of this region. The high value centers of the soil Zn and As content are distributed just like some island shapes located in this region. Comparing with other towns, the administrative region of Dashahe town is the most serious polluted area in soil heavy metals, and here is the irrigated center using the polluted river water too.

Keywords: soil heavy metals; spatial analysis; geostatistics; ArcGIS; irrigation from polluted river water

近年来,农田土壤重金属污染问题日益突出。因土壤的异质性特点,以及土壤特性与重金属间非常复杂的理化过程等诸多因素的影响,使得农田土壤重金属空间分布的量化描述相当困难^[1]。地统计学方

法(Geostatistics)的引入,使土壤重金属空间分布及变异分析有了进展^[2]。它以局部变量为理论基础,借助空间相关和变异函数,通过变异函数的变化揭示变量空间分布的结构和方向性特征,克服了应用一般统计方法在研究土壤性质空间变异性规律方面的不足^[3-7]。针对天津近郊土壤重金属方面的研究,目前仅限于对土壤重金属污染状况的调查分析或是环境质量评价,而使用地统计学与 GIS 技术对该地区土壤重金属含量的空间变异性及空间分布特征研究却鲜有涉及。

收稿日期:2007-09-08

基金项目:科技部基础性专项资金资助项目(2001DEB30065);南开大学科技创新基金资助项目:“城市边缘带土壤健康与农产品安全的空间分析”

作者简介:孟 涛(1983—),男,硕士研究生,主要研究方向为环境信息技术与遥感。E-mail: mengtao@mail.nankai.edu.cn

本文以天津市武清区北部农产品商品基地为例,运用地统计学方法,结合 ArcGIS 中的地统计分析(Geostatistical Analysis)扩展模块,分析农田土壤中 5 种重金属的空间变异性和相关性。通过对比不同插值方法的结果,确定该区域土壤重金属空间变异的最优插值模型,模拟土壤重金属的空间分布特征,为区域污染的综合防治提供科学依据,也为农产品商品基地的合理规划布局、优质农产品开发、耕地环境保护及可持续土地利用提供参考。

1 研究材料

1.1 研究区概述

研究区位于天津市武清区北部,属于武清农产品商品基地的一部分。地跨东经 116.79°~117.04°,北纬 39.50°~39.70°之间,总面积约 43 626 hm²,包括武清区的 10 个乡镇,如图 1 所示。其中耕地面积约占总面积的 88.90%;水域面积约占 1.18%;城乡、工矿用地及居民地面积约占 9.10%。主要土壤类型为普通潮土,pH 值在 8.0~8.5 之间,弱碱性。研究区处于海河水系下游,河流较多,是季节性河流,自净能力很差。其中,北运河、北京排污河等过境河水量少、水质恶劣,常年处于超标状态。从土地利用上,该区域属于天津“武宝宁”污灌区的上游部分^[8],择其为研究区对分析天津城郊污灌区土壤重金属污染状况具有一定的代表性。

1.2 样本采集与分析

1.2.1 样本采集

本研究主要针对研究区耕作面积最大的粮食作物——小麦用地和主要蔬菜基地土壤进行采样。综合考虑研究区行政区划、农田土壤环境及作物分布特点,在具有代表性、反映区域土壤环境质量的地区均匀布点,并对有污染源的地区进行加密采样,以达到准确反映研究区域土壤质量的目的。

根据上述布点原则,本次调查共布设样点 271 个,获取土壤样品 271 个,样点布设示意图如图 1 所示。按照《农田土壤环境质量监测技术规范(NY/T395—2000)》的要求采集、制备土壤样品。在拟定采样区内选择有代表性的田块,使用土钻进行采样,钻头处剔除,采用梅花形法或对角线法采集 0~20 cm 的耕作层土壤,每个样品由同一田块中的 3~5 个表层土样混合而成,现场混合均匀,四分法取约 1 kg 混合样做为该点土壤样品。采样同时用 GPS 定位样点坐标,记录各个采样点附近的地形、土壤和土地利用状况。采样时间为 2002 年 6 月—2005 年 6 月。

1.2.2 样本处理与数据分析

将土壤样品在室内自然风干,除去砂砾及植物残体,用木棒研磨混合均匀,磨细过筛(2 mm、0.15 mm 尼龙筛),搅匀后装瓶,贴上标签供分析。对 5 种土壤重金属元素(Cu、Zn、Pb、As、Hg)进行全量分析,具体方法如

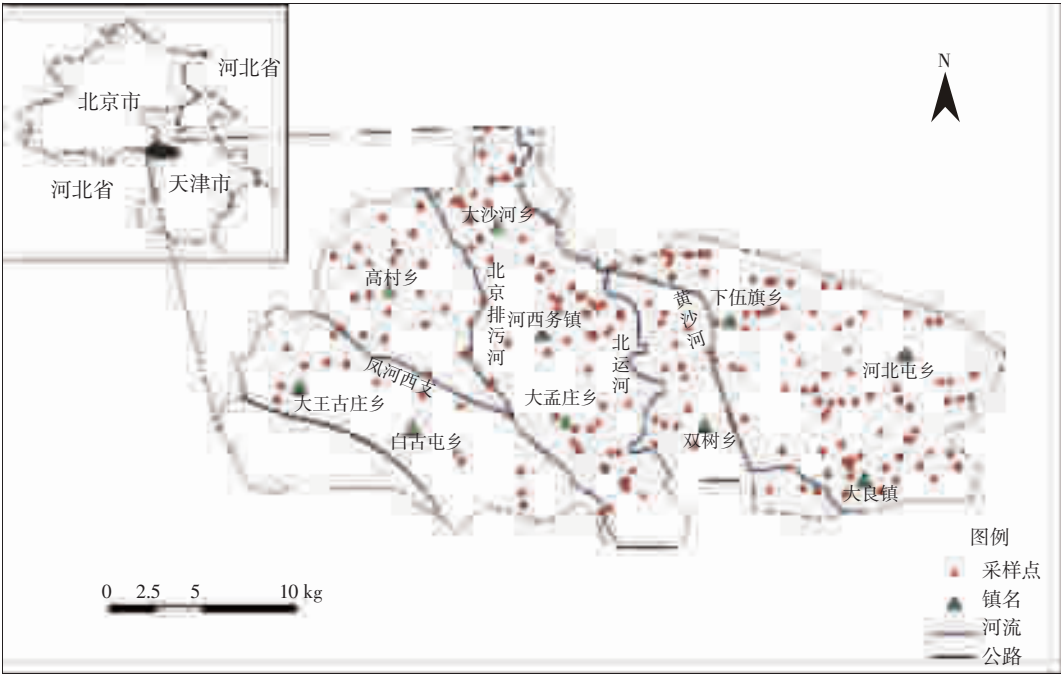


图 1 研究区域与土壤样点分布示意图

Figure 1 The location of the soil sampling points

下:准确称取 0.2 g 土样,置于聚四氟乙烯烧杯中;加 7 mL 优级纯 HNO₃,再加 2 mL 优级纯 HF(氢氟酸),于炉上低温溶解;待澄清后加 2 mL 优级纯高氯酸HClO₄;当冒白烟时,取下冷却,用 7% HNO₃约 1 mol·L⁻¹ 溶液)溶解,定容 15 mL 体积的比色管。用上述溶解方法,溶解 GSD-6 标准物质,用来控制实验中仪器误差。如果标准物质的测量值偏差太大,就要重新进行标准化。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES,仪器型号为 ICP-AES9000),测定 Cu、Zn、As、Pb、Hg 5 种重金属的含量,重复进样 4 次,统计平均值。

1.3 数据处理与正态分布性检验

在数据预处理(数据格式转换,剔除特异值等)的基础上,应用 ArcGIS 9.1 的地统计分析扩展模块进行空间变异性和相关性分析,确定最优空间插值模型后,对研究区 5 种土壤重金属进行空间模拟。

检验数据的正态分布性是使用地统计学 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提^[9,10]。只有当数据服从正态分布时,Kriging 方法才有效,否则有可能会使变异函数产生比例效应。而最优空间插值模型的确定,正是通过对比 Kriging 插值法和确定性插值法来进行的,因此在此之前必须进行正态分布性的检验。借助 ArcGIS 9.1 的地统计分析扩展模块,由计算机将 271 个采样点数据随机生成 170 个插值样点(训练数据集)

和 101 个检验样点(检验数据集),并对 170 个训练数据集进行正态分布性检验,训练数据集的土壤重金属含量的统计特征值如表 1 所示。采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验法发现,土壤 As 元素符合正态分布,土壤 Cu、Zn、Pb、Hg 符合对数正态分布。因此,可以进行后续的空间变异性分析和使用 Kriging 方法进行插值。

2 典型土壤重金属含量的空间分析与模拟

2.1 空间变异性与相关性分析

应用 ArcGIS 9.1 的地统计分析扩展模块,通过对不同模型及参数的试验、拟合和比较,确定 5 种重金属元素的最优半方差函数拟合模型及变异参数,见表 2。

块金值 C₀ 与基台值 C+C₀ 的比例可以表明系统变量的空间相关性程度。如果比例小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比例在 25%~75%之间,说明系统具有中等的空间自相关性;大于 75%,说明系统空间相关性很弱。

从表 2 可以看出,5 种重金属元素的空间变异指标(C₀/C+C₀)的大小顺序为:Hg>Cu>Zn>As>Pb。其中,Hg 为 77.44%,大于 75%,属于空间弱相关,表明 Hg 的空间变异绝大部分是由人为随机因素引起的;其他 4 种重金属均在 25%~75%的范围内,属于中等程度

表 1 训练数据集 170 个插值样点土壤重金属含量的统计特征值
Table 1 Descriptive statistics of the soil heavy metals concentrations

项目	Cu	Zn	Pb	As	Hg
样点数	170	170	170	170	170
最大值/mg·kg ⁻¹	88.100	302.900	100.970	19.361	1.135
最小值/mg·kg ⁻¹	2.332	4.946	0.326	0.576	0.005
平均值/mg·kg ⁻¹	28.284	114.355	34.647	9.230	0.212
中值/mg·kg ⁻¹	25.300	97.263	28.243	8.986	0.659
标准差/mg·kg ⁻¹	19.359	67.762	20.469	3.686	0.301
变异系数/%	68.443	59.256	59.078	39.929	142.077
偏度	1.057	1.156	1.144	0.369	1.906
峰度	1.122	0.825	1.000	-0.317	2.566
分布类型	对数正态分布	对数正态分布	对数正态分布	正态分布	对数正态分布

表 2 半方差函数拟合模型及变异参数对比
Table 2 Semi-variance function fitting model & comparing of the validation coefficient

元素	拟合模型	偏基台值 C	块金值 C ₀	基台值 C+C ₀	块金值/基台值/(C ₀ /C+C ₀)	标准均方根预测误差	变程/m
Cu	有理二次方程式	0.199 5	0.535 6	0.735 2	72.856 4	0.727 2	6 443.9
Zn	有理二次方程式	0.125 2	0.322 6	0.447 9	72.038 8	0.834 9	3 083.4
Pb	球状模型	0.341 1	0.236 4	0.577 6	40.936 7	0.910 7	7 391.9
As	指数模型	3.978 6	9.729 4	13.708	70.976 1	0.977 3	4 738.8
Hg	孔穴效应	0.398 1	1.366 4	1.764 4	77.440 6	0.974 9	20 312

的空间相关,其中 Cu、Zn 和 As 均大于 50%,表明这 3 种元素的空间变异原因侧重于人为随机因素,受人类活动的影响稍大,从而削弱了空间自相关的影响;Pb 则表现出不同于其他元素的特征,其块金值与基台值的比值小于 50%,表明 Pb 虽然也属中等程度的空间相关,但其空间变异原因侧重于空间自相关因素,受人为随机因素影响较小。

变程指变异函数达到基台值所对应的距离,它表明土壤各要素的空间自相关尺度。变程越大,说明土壤中该元素的均一性越强;变程越小,则意味着土壤中该元素的均一性越弱,在小范围内的变异加强,空间自相关度强,整体分布也更复杂。表 2 中变程大小的比较表明,5 种重金属元素的空间自相关范围为 Zn>Hg>Pb>Cu>As。

2.2 最优空间插值模型的确定

应用 ArcGIS 地统计分析扩展模块,对 5 种土壤重金属含量进行不同方法的空间插值分析,筛选出各元素的最优空间插值模型,然后使用最优空间插值模型模拟其空间分布特征。

采用地统计 Kriging 插值法和确定性插值法分别对训练数据集(170 个样点)进行插值,将插值所得检验数据集 (101 个样点) 的拟合值与其实测值进行比较,采用下面的原则来进行插值精度的比较。对于 Kriging 插值方法,选取平均误差(ME)、标准化平均误差(MSE)最接近于 0,标准化均方根误差(RMSSE)最接近于 1 的插值模型作为较优的 Kriging 模型;对于确定性插值方法选取均差(ME)和均方根误差(RMSE)较小的模型作为较优插值模型。最后采用 ME 最接近于 0、RMSE 最小(优先考虑)的原则来确定最优空间插值模型。

各土壤重金属元素经筛选后得到最优 Kriging 插值法和最优的确定性插值法,它们之间的误差纵向比较如表 3 所示。

综上所述,研究区域土壤重金属元素 Cu、Zn、Pb、As、Hg 含量的最佳空间插值模型分别为张力样条函数插值法、3 次反距离权重插值法、2 阶趋势效应的析取 Kriging 插值法、3 次反距离加权插值法,以及 2 次局部多项式插值法。

2.3 土壤重金属含量的空间分布模拟

应用 ArcGIS9.1 的地统计分析扩展模块,采用最优空间插值模型,分别对 5 种土壤重金属元素进行空间插值,其插值结果如图 2 所示。

从中可以看出,5 种重金属元素中,Cu 含量以北京排污河为中心,向其两侧递减,高含量区主要分布在大沙河乡、河西务镇和河北屯乡,低含量区主要分布在双树乡;Zn 和 As 含量呈岛状区域分布,在大沙河乡、河西务镇、大孟庄乡北部、下伍旗乡北部地区和大良镇含量较高,双树乡、大王古庄乡和河北屯乡含量较低;Pb 和 Hg 含量分布呈北部和东南部较高、中部向东西方向递减的趋势,高含量区主要分布在大沙河乡和大良镇,低含量区分布在白古屯乡和河北屯乡。

分析结果表明,研究区中土壤重金属污染较重的区域主要集中在大沙河乡、河西务镇和大王古庄,其中大沙河乡的污染最为严重。通过实地调查分析可知,其主要原因是大沙河乡位于研究区北部,北京排污河和北运河等排水水系进入天津境内后首先经过大沙河乡的农田耕地,故其受污灌的影响较其他乡镇大。另外,大沙河乡内各种工厂种类和数目较研究区内其他乡镇多,如水泥厂、砖厂、木厂等,从一定程度也造成了大沙河乡的重金属含量相对较高。

表 3 研究区各土壤重金属元素最优 Kriging 插值法和最优确定性插值法的预测误差比较
Table 3 Comparing of the predicted errors for the optimal Kriging interpolation & certainty spatial interpolation

元素	插值方法		预测误差		
	参数	最优内插方法	均差	均方根误差	标准均方根预测误差
Cu	—	张力样条函数	0.570 9	17.62	—
	常量	泛 Kriging	1.304 0	18.51	0.982 6
Zn	P=3	反距离加权	1.662 0	22.92	—
	0阶	普通 Kriging	1.652 0	64.52	0.834 9
Pb	P=4	全局多项式	0.031 3	19.67	—
	2阶	析取 Kriging	0.520 1	19.44	1.032 0
As	P=3	反距离加权	0.022 9	0.36	—
	2阶	析取 Kriging	0.000 7	3.47	1.011 0
Hg	P=2	局部多项式	-0.002 1	0.293 7	—
	0阶	普通 Kriging	-0.008 2	0.300 3	0.974 9

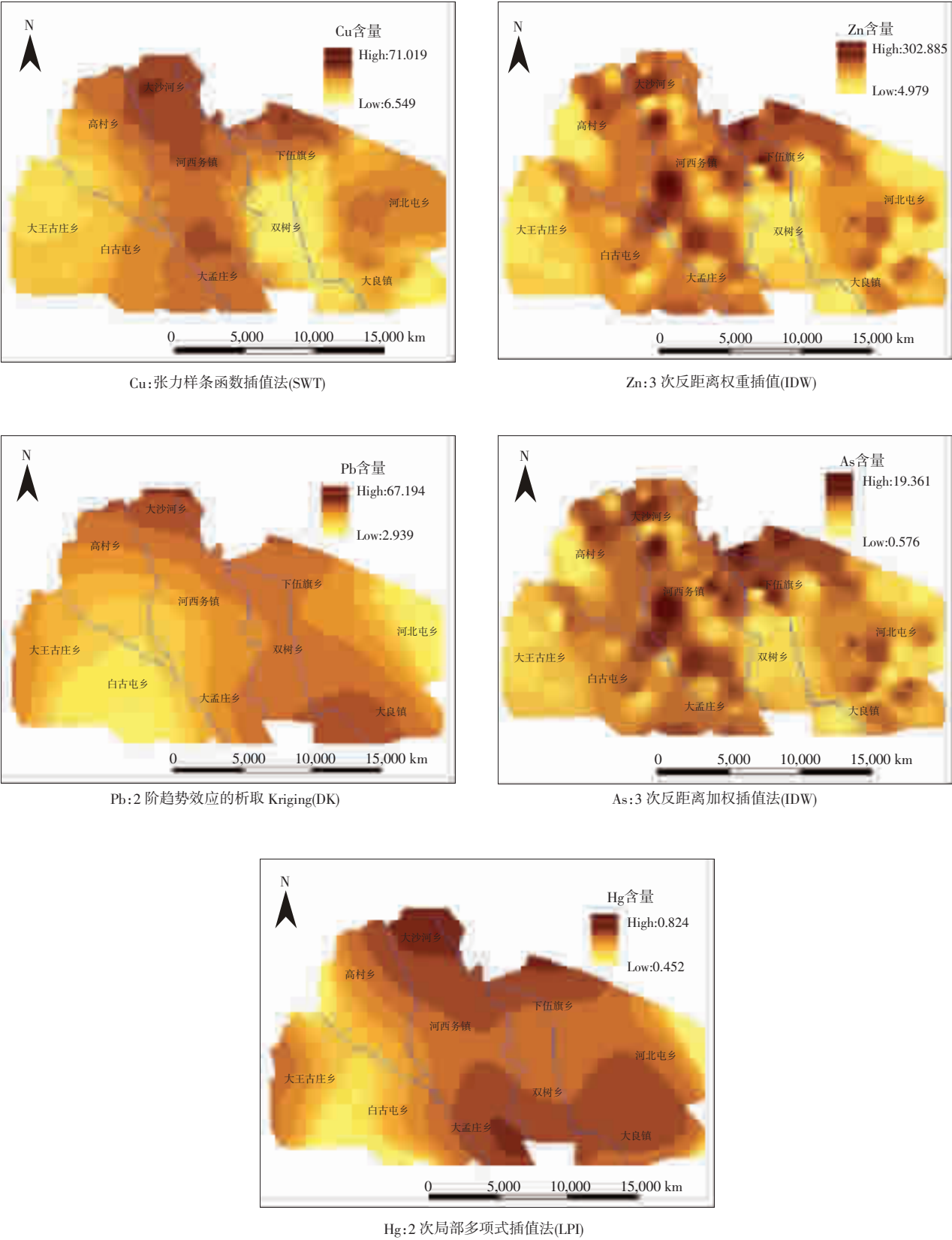


图 2 研究区各土壤重金属元素的空间分布插值结果

Figure 2 Heavy metals distribution by using the optimal spatial interpolation models

3 结论与讨论

(1) 研究区 5 种土壤重金属元素的空间变异指标 ($C_0/C+C_0$) 的大小顺序为: $Hg > Cu > Zn > As > Pb$ 。其中, Hg 为 77.44%, 大于 75%, 属于空间弱相关, 表明 Hg 的空间变异绝大部分是由人为随机因素引起的; 其他 4 种重金属均在 25%~75% 的范围内, 属于中等程度的空间相关, 其中 Cu 、 Zn 和 As 均大于 50%, 表明这 3 种元素的空间变异原因侧重于人为随机因素, 受人类活动的影响稍大, 从而削弱了空间自相关的影响; Pb 则表现出不同于其他元素的特征, 其块金值与基台值的比值小于 50%, 表明 Pb 虽然也属中等程度的空间相关, 但其空间变异原因侧重于空间自相关因素, 受人为随机因素影响较小。

(2) 研究区土壤重金属元素 Cu 、 Zn 、 Pb 、 As 、 Hg 含量的最优空间插值模型分别为张力样条函数插值法、3 次反距离权重插值法、2 阶趋势效应的析取 Kriging 插值法、3 次反距离加权插值法, 以及 2 次局部多项式插值法。

(3) 插值结果表明, 研究区 5 种土壤重金属元素在北部含量均较高, Cu 含量以北京排污河为中心, 向其两侧递减; Zn 和 As 含量呈岛状区域分布; Pb 和 Hg 含量分布呈北部和东南部较高、中部向东西方向递减趋势。研究区土壤重金属污染主要集中在大沙河乡、河西务镇和大王古庄。其中大沙河乡的污染最为严重, 其主要原因是受污灌以及该地区其他人类活动的影响。

(4) 因为受采样时间、范围、天气、路线等因素的影响, 所有研究样点是通过 3 次采样数据汇总而成的, 3 次采样时间分别为: 2002 年 6 月、2004 年 7 月和 2005 年 6 月。3 次采样的范围没有变, 只是对原有样点进行了补充。而且, 每次采样时, 都对部分样点进行了重复采样。经过对比发现, 该地区土壤重金属污染状况比较稳定, 没有突变, 所以可以将 3 次采样数据汇总后再进行分析。但这种短时期内多次采样的汇总数据, 必然会对最终的模拟结果造成一定影响。如何才能尽量地减小这种多源数据误差, 以及在模拟过程中定量地考虑这种误差因素, 值得我们进行更深入的探讨研究。

参考文献:

- [1] Vicente Sousaa, Luis Santos Pereirab. Regional analysis of irrigation water requirements using kriging Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at TraÂs-os-Montes[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 40:221-233.
- [2] 黄 勇, 郭庆容, 任 海, 等. 地统计学在土壤重金属研究中的应用及展望[J]. 生态环境, 2004, 13(4):681-684.
HUANG Yong, GUO Qing-rong, REN Hai, et al. Application and perspective of Geostatistics in the study on soil heavy metals [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 681-684.
- [3] Wang X J, Tao S. Spatial structures and relations of heavy metal content in wastewater irrigated agricultural soil of Beijing's eastern farming regions[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1998, 61:261-268.
- [4] 刘 庆, 王 静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(2):109-113.
LIU Qing, WANG Jing, SHI Yan-xi, et al. On the spatial distribution of heavy metal in the cropland based on GIS [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7 (2): 109-113.
- [5] C Soh's a, E Andrade a, A Mireles a, et al. Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2005, 241:351-355.
- [6] A Mireles a, C Sol_1s a, E Andrade a, et al. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, 219-220:187-190.
- [7] Liu Wen-hua, Zhao Jing-zhu, Ouyang Zhi-yun, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing[J]. *China Environment International*, 2005, 31:805-812.
- [8] 王祖伟, 张 辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. 生态环境, 2005, 14(2):211-213.
WANG Zu-wei, ZHANG Hui. Environmental quality and biological effects of heavy metals in soils in the regions of sewage irrigation in Tianjin[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 211-213.
- [9] Tim W Payna, Reece B Hillb, Barbara K Hoëcka, et al. Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition—a New Zealand example[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122:187-196.
- [10] 谢正苗, 李 静, 王碧玲, 等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, 27(10):2110-2116.
XIE Zheng-miao, LI Jing, WANG Bi-ling, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in soils and vegetables based on Geostatistics and GIS[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10):2110-2116.