

泊头市重金属元素空间变异规律研究

朱建宁, 崔江慧, 文宏达, 张毅功

(河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘要:采用 GIS 与地统计相结合的方法对泊头市表层土壤(0~20 cm)全量 Zn、Cu、Pb、Hg、Cr、Cd、Ni、As 8 种重金属的空间变异特征进行了分析。结果表明:从相关系数来看,8 种重金属中除 Hg 以外,其它重金属在研究区内都呈现显著的正相关关系,土壤数据中除了全 AS 属于正态分布,其余元素数据经对数转换后符合正态分布,通过元素的块金效应分析,元素 Ni 和 Cr 在研究区的空间相关性最为强烈;用 Kriging 内插法对 8 种重金属进行最优估计,从空间插值图可以直观地看出,某些地区重金属含量由于受到人类活动的影响表现出局部的异常性,中东部大于西南部,主要集中在洼里王镇和王武庄乡、郝村乡,其它乡镇相对含量较低,这一方面受河流影响,重金属在水中难存留,另一方面就是东部工业发达,因此受到的重金属污染可能较大。

关键词:特色农产品;重金属;空间变异;地统计学;GIS

中图分类号:S 158 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2011)02-0171-05

随着生活水平的提高,人们的自我保护意识逐渐增强,消费观念也悄然发生了变化。人们越来越担心由于环境污染而引发的食品污染。从而凸显了绿色食品的潜在市场。开发有机绿色食品,可以唤起人们对生态环境的关注,发展有机绿色食品工程必然带来生态条件的变化,可限制工业污染,限制农药、化肥的使用,减少其对环境的人为污染,从而实现农业经济效益、生态效益的良性循环。农业是国民经济自然再生产与经济再生产结合的基础产业部门,立足资源与环境的永续利用,走优质化的绿色有机食品生产之路,既是生态农业的本质特征,又是当前我国农业发展的总趋势^[1]、符合我国国情发展的客观必然性。

目前我国发展绿色、无公害和有机农产品的一个重要瓶颈就是土壤重金属污染问题。重金属作为一种典型的土壤污染物,具有隐蔽性、难降解性和易于富集性等特点,因此对于土壤中重金属的含量及其空间分布、可能来源及控制因素、环境质量及风险评价等都受到了人们的广泛关注和重视^[2-3]。目前国内外对土壤质量的

研究,特别是针对特色农产品,尤其是特色果品产区土壤环境质量的区域性研究很少。

地统计学是基于区域化变量理论基础上的—种空间分析方法,而半方差函数是地统计学中研究区域化变量空间结构的主要工具^[4]。运用地质统计学是研究土壤元素空间分布规律最有效,应用比较广泛的工具之—^[5]。

该研究以鸭梨、红枣之乡盛誉的河北省泊头市为研究区域,对研究区土壤进行公里网格取样分析,利用 ArcGIS 中的地统计学模块对土壤重金属数据进行空间变异分析。重点阐述了该地区土壤重金属含量及其空间分布特征,同时对土壤重金属污染进行了评价并讨论了重金属污染源及污染物进入土壤环境的途径及机制。并对研究区内种植有机绿色农产品给予合理化建议,既揭示其生物体优质的生态环境地质特征与土壤背景,又使其由资源优势转化为经济优势,扩大该名特优果品资源的种植面积,提高果品品质,增加农民收入。

1 研究区概况

泊头市处于河北平原东部,东接滨河平原,西连山前平原,地势平坦,属典型平原地貌,平均海拔 13.2 m (黄海高程),自然坡降仅为万分之一;该市属暖温带湿润大陆性季风气候区,年均温 12.7℃,年均降水 543 mm。市境总面积 1 006.5 km²,折合 10 余万 hm²,土壤由古河流冲积形成,土层深厚,矿物质养分含量较高。清代以前,黄河、漳河、滹沱河等河流多次流过市境,遗留下纵横交错的河流故道和较为丰富的地下水资源,今境内大

第一作者简介:朱建宁(1984-),女,河北高碑店人,在读硕士,研究方向为土地资源。E-mail: zhujianning1984@163.com。

通讯作者:张毅功(1963-),男,辽宁法库人,博士,教授,博士生导师,现主要从事土壤和植物营养方面的教学科研工作。E-mail: zhangyg63@hebau.edu.cn。

基金项目:国土资源部及农业厅河北省农业地质调查资助项目(200040007-3-5)。

收稿日期:2010-11-25

小河流 13 条,浅层淡水储量平均值为 $5\,465\text{ m}^3$ 。气候属暖温带大陆性季风气候,四季分明,日照充足,年平均气温 12.6°C ,多年平均无霜期 187 d。平均日照时数 $2\,783.6\text{ h}$,年平均降水 529.8 mm 。土壤肥沃,属两年三熟或一年两熟耕作区。

研究区泊头到目前为止已获得“铸造之乡”、“鸭梨之乡”“金丝小枣”、“汽车模具之乡”在内的 9 个国家及省级荣誉称号。泊头更是被定名为“鸭梨原产地”,种植规模及产品产量质量在全省均占首位。梨总面积为 1.67 万 hm^2 ,其中总果树面积 1.13 万 hm^2 ,年总产量 28 万 t。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集和处理

研究对土壤样品采用 $2\,000\text{ m}\times 2\,000\text{ m}$ 规格的公里网格采样。土壤样品由河北省地质调查院采集,即在 $1:5\text{ 万}$ 地形图上按 1 样点/ km^2 采集,自地表向下采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤样品,且取样点以 GPS 精确定位,共采集土壤样品 250 个。样品室内预处理是在阴凉通风处自然风干后,剔除样品中植物根系、有机残渣以及砖块等杂质,然后过 100 目尼龙筛,密封待测。利用 GIS 技术将土壤点位图数字化,并根据相应土壤表层 $0\sim 20\text{ cm}$ 的数据资料,绘成地统计分析的土壤取样点分布图(图 1)。

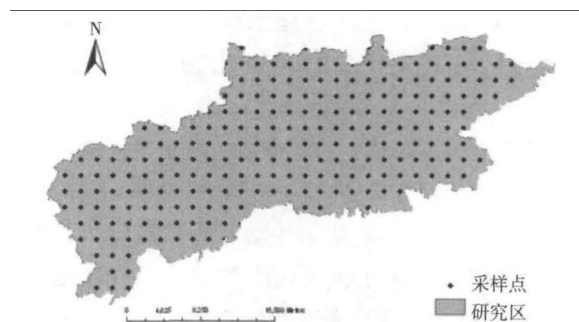


图 1 研究区取样点分布图

2.2 测定方法与数据处理

土壤全量 Pb、全量 Zn 采用 X 射线荧光光谱法测定,土壤全量 Ni、全量 Cr、全量 Cu 元素采用电感耦合等离子光谱测定,土壤全量 As 和全量 Hg 先用王水水浴加热消解,后用原子荧光光谱仪测定,土壤全量 Cd 用 KI-MIBK 萃取—火焰原子吸收法连续测定。土壤样品均由国土资源部保定矿产资源监督检测中心测试。

样品数据分析采用 SPSS 11.5 软件,地统计学方法中半方差图和 Kriging 插值法广泛应用土壤特性空间预测,半方差图是利用变异函数研究土壤特性空间变异所产生的一个空间变异模型,而 Kriging 插值法则是利用半方差模型进行测定点之间最优内插的一种方法。ArcGIS 的地统计分析模块将地统计学分析工作嵌入地

理信息系统软件中,使地理信息系统同时具有较强的数据管理功能和较强的空间分析功能,能够很好的进行空间变异性研究,所以地统计分析及图件绘制采用 ArcGIS 9.2 软件。

3 结果与分析

3.1 重金属之间的相关关系

为了解研究区重金属含量分布之间的关系,对 8 种重金属含量用 SPSS 11.5 软件作了简单的相关关系分析,其间的 Pearson 相关系数见表 1。8 种重金属中 Hg 和 Cr、Cd 无明显相关关系,Hg 和 As 呈现 5% 水平显著负相关关系,Hg 和 Ni 是 1% 水平显著负相关关系,其他重金属在研究区内都呈现 1% 水平显著的正相关关系。其中重金属 Cr 和 Ni 的相关系数最大为 0.819,它们之间存在一定的复合相关关系,而元素 Hg 与其它几种重金属元素的相关关系均相对较小,其中与元素 Cd 的相关系数最小为 0.034。而从 8 种重金属之间的显著相关关系来看,除 Hg 可能受人为因素影响较大外,其余 7 种重金属可能受相同或相似的母质、气候和植被类型的影响比较小。

表 1 土壤重金属含量相关系数矩阵

| | Zn | Cu | Pb | Hg | Cr | Cd | Ni | As |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| Zn | 1 | | | | | | | |
| Cu | 0.413** | 1 | | | | | | |
| Pb | 0.676** | 0.257** | 1 | | | | | |
| Hg | 0.198** | 0.197** | 0.256** | 1 | | | | |
| Cr | 0.562** | 0.209** | 0.390** | -0.106 | 1 | | | |
| Cd | 0.524** | 0.330** | 0.441** | 0.034 | 0.395** | 1 | | |
| Ni | 0.612** | 0.208** | 0.388** | -0.17** | 0.819** | 0.332** | 1 | |
| As | 0.516** | 0.224** | 0.284** | -0.148* | 0.562** | 0.287** | 0.692** | 1 |

注:**表示 1% 的显著水平,*表示 5% 的显著水平。

3.2 土壤重金属元素 Fisher 统计特征和正态分布检验

地统计学分析要求所分析的数据呈正态分布。特异值的存在会导致插值连续表面中断,从而掩盖变量的空间结构特征,使插值结果偏离实际值,将严重影响 Kriging 插值结果,所以在插值前需对实测值中的数据进行检查,剔除特异值。现采用域法^[6]将泊头市土壤 8 种重金属的数据进行处理,此特异值大于泊头市平均值加 3 倍的标准差,在后续半方差函数分析中分别用正常最大值代替相应的特异值。

域法处理后的数据统计特征值见表 2。从表 2 中的 8 种重金属的统计特征值看出,这 8 种重金属变异系数范围为 5.68%~36.19%,均属于中等变异强度水平,其中 Cr 元素的变异系数最小,为 5.68%,说明土壤中 Cr 元素含量在研究区内变化不大,其在土壤中含量受环境因素影响较小;Hg 元素的变异系数最高,为 36.19%,说明研究区土壤 Hg 元素含量差异较大,其含量与母质、地

形地貌以及人为活动等条件的关系相对比较密切。从其偏度值上来看,8种元素的偏度值大于0,说明这些元素分布的峰向右倾斜。Cu向右倾斜比较大,而Ni倾斜比较小,从其峰度值上看,8种重金属的峰值均大于0,说明其分布的高峰为尖峰。在8种重金属中,Zn、Cu、Cd、As几种重金属含量最大值均略大于我国土壤环境质量标准的一级标准值,存在一定重金属的污染,而其它几种重金属含量的最大值均小于我国土壤环境质量标准

的一级标准值。一级土壤重金属含量区是指区域内土壤重金属元素含量接近背景值,基本未受外界污染,可作为绿色农作物的种植开发区和集中式饮用水源地的区域。8种重金属含量都在绿色食品产地土壤质量二级标准值的范围内,总的来说该区土壤环境质量较好,有4个重金属有轻度污染,在研究区的范围内大部分是可以种植绿色和有机农作物的。

表 2 研究区土壤重金属的统计特征值

| | 分布类型 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/% | 偏度 | 峰度 | 一级标准值 ^[7] | 二级标准值 ^[8] |
|----|------|-------|-------|-------|------|--------|----------|--------|----------------------|----------------------|
| Zn | 对数正态 | 63.9 | 100.5 | 78.62 | 6.62 | 8.42 | 0.45761 | 3.4775 | 100 | — |
| Cu | 对数正态 | 19.9 | 46.5 | 28.12 | 5.84 | 20.78 | 1.0198 | 3.6167 | 35 | 35~60 |
| Pb | 对数正态 | 18.8 | 31.4 | 24.35 | 2.24 | 9.19 | 0.18828 | 3.6763 | 35 | 35~50 |
| Hg | 对数正态 | 0.021 | 0.093 | 0.046 | 0.02 | 36.19 | 0.3831 | 2.4352 | 0.15 | 0.15~0.35 |
| Cr | 对数正态 | 58.8 | 78.6 | 67.77 | 3.85 | 5.68 | 0.11205 | 2.795 | 90 | 90~120 |
| Cd | 对数正态 | 0.14 | 0.25 | 0.18 | 0.02 | 12.18 | 0.791 | 3.989 | 0.20 | 0.2~0.4 |
| Ni | 对数正态 | 25.2 | 38 | 30.85 | 2.50 | 8.09 | 0.072613 | 2.6353 | 40 | — |
| As | 正态 | 9.37 | 16.6 | 13.44 | 1.40 | 10.42 | 0.10649 | 2.5433 | 15 | 15~20 |

3.3 重金属空间变异特征

运用地统计学方法分析重金属的空间变异特征。经过数据检查剔除特异值后根据半方差函数图和各拟和参数的检验情况选择适当的 Kriging 插值模型。在用地统计学模块进行分析后,得到各种模型拟合的各种参数值。符合以下标准的模型是最优的:标准平均值(Mean Standardized)最接近于0,均方根预测误差(Root-Mean-Square)最小,平均标准误差(Average Standardized Error)最接近于均方根预测误差(Root-Mean-Square),标准均方根预测误差(Root-Mean-Square Standardized)最接近于1^[9-10]。然后用交叉验证法(Cross-validation)来修正模型的参数^[11]。8种重金属各要素变异函数理论模型得出的相应参数见表3。从表3可以看出,通过参数对比进行模型拟合,元素Zn、Cu、Pb、Hg、Cr符合指数模型,Cd、Ni符合高斯模型,As符合球状模型。8种重金属的块金值在0.002714~1.0069之间,其中Cr元素块金值最小,为0.002714,说明该元素由试验误差和小于试验取样尺度引起的变异很小;而As元素块金值最大为1.0069,表明该元素由试验误差和小于试验取样尺度引起的变异在所研究的8种重金属中最大。而基台值通常用来表示系统内总的变异,Cr的基台值最小为0.00352,表示Cr元素在研究区内总的变异程度较小;相对来说As的基台值最大为2.1607,证明As元素在研究区总的变异程度最大。从结构性因素的角度来看,块金值与基台值的比值可以表明系统变量的空间相关性程度,如果比值小于25%,说明系统具有强烈的空间相关性,比值在25%~75%之间,表明系统具有中等的空间相关性,而比值大于75%说明系统空间相关性很弱。其中元素Cd、Cr的块金值与基台值

的比值大于75%,空间相关性很弱,表明这2种元素随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱,朝均一化方向发展。另一方面,土壤中元素如果具有易移动特征,容易流失和淋溶损失,其含量的随机变异就大,而对于相对稳定、不易被流失的元素,其随机变异相对就小。其余6种重金属的块金值与基台值的比值均处于25%~75%之间,呈现中等强度空间相关性^[12],其空间相关程度较为一致,表明这6种元素主要受管理措施和种植制度等人为活动引起的空间变异程度较高。而中等强度的空间相关性是因为土壤元素分布是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。结构性因素如气候、母质、地形、土壤类型自然因素等可以导致土壤养分强的空间相关性,8种元素的变程均大于步长值,说明该区域采样设计在克立格插值时显示了较好的空间相关性。8种重金属元素的变程范围处于57 290.4~14 380.6 m之间,其中元素Cu、Hg、Cr的变程最大,为57 290.4 m,而元素Pb的变程最小,仅为14 380.6 m。

表 3 土壤重金属变异函数理论模型及相关参数

| 元素 | 理论模型 | 块金值 | 基台值 | 块金值 / 基台值 | 变程/m | 步长/m |
|----|------|-----------|----------|-----------|----------|---------|
| Zn | 指数模型 | 0.003493 | 0.007648 | 45.67% | 28 402.9 | 4 833.3 |
| Cu | 指数模型 | 0.014669 | 0.049026 | 29.92% | 57 290.4 | 4 833.3 |
| Pb | 指数模型 | 0.0055398 | 0.008487 | 65.28% | 14 380.6 | 4 833.3 |
| Hg | 指数模型 | 0.093109 | 0.128718 | 72.34% | 57 290.4 | 4 833.3 |
| Cr | 指数模型 | 0.002714 | 0.00352 | 77.10% | 57 290.4 | 4 833.3 |
| Cd | 高斯模型 | 0.012236 | 0.014769 | 82.85% | 43 505.9 | 4 833.3 |
| Ni | 高斯模型 | 0.0047924 | 0.00692 | 69.25% | 18 446 | 4 833.3 |
| As | 球状模型 | 1.0069 | 2.1607 | 46.60% | 21 766.9 | 4 833.3 |

对8种重金属进行普通 Kriging 插值。根据空间结

构分析所得的变异函数模型进行普通 Kriging 插值得到土壤重金属含量的空间分布见图 2。由图 2 可以看出,除变程最小的 Cd 元素呈现斑块较小外,其余 7 种重金属由于元素变程较大,研究区 8 种土壤重金属均呈现明显的斑块状分布特点。土壤中除了 Cd 之外,其他 7 种元素空间变异的总体特征基本相同,表现为与地势和研究区内水流流向相关的元素含量分布特征,即在研究区中东地区 and 西北部分区域表现为含量较高的特点,且 8 种重金属在研究区西部和东北部含量普遍偏高,中东部高值区可能由于工厂等排污造成的。从元素 Hg 的空间差值图看,其高含量区域均集中在研究区中东部,而西南部含量

普遍较低,这与研究区工厂分布和交通影响有关,使得中东部地区 Hg 含量明显高于西南部;土壤 Cd 元素分布明显呈小斑块状分布的特点,高值区分布相对比较零散,仅在研究区东部分有较大区域的相对高值区,这与研究区东北部分农场农药化肥施用造成 Cd 在土壤中含量增高有关。整体来看,研究区重金属含量中东部大于西南部,主要集中在洼里王镇和王武庄乡,其它乡镇相对含量较少,这一方面泊头市有黑龙港河、清凉河、老盐河 3 条主干河流自西南向东北方向通过,河流冲积作用明显,重金属在水中也较难存留,另一方面就是东部工业发达,因此受到的重金属污染可能较大。

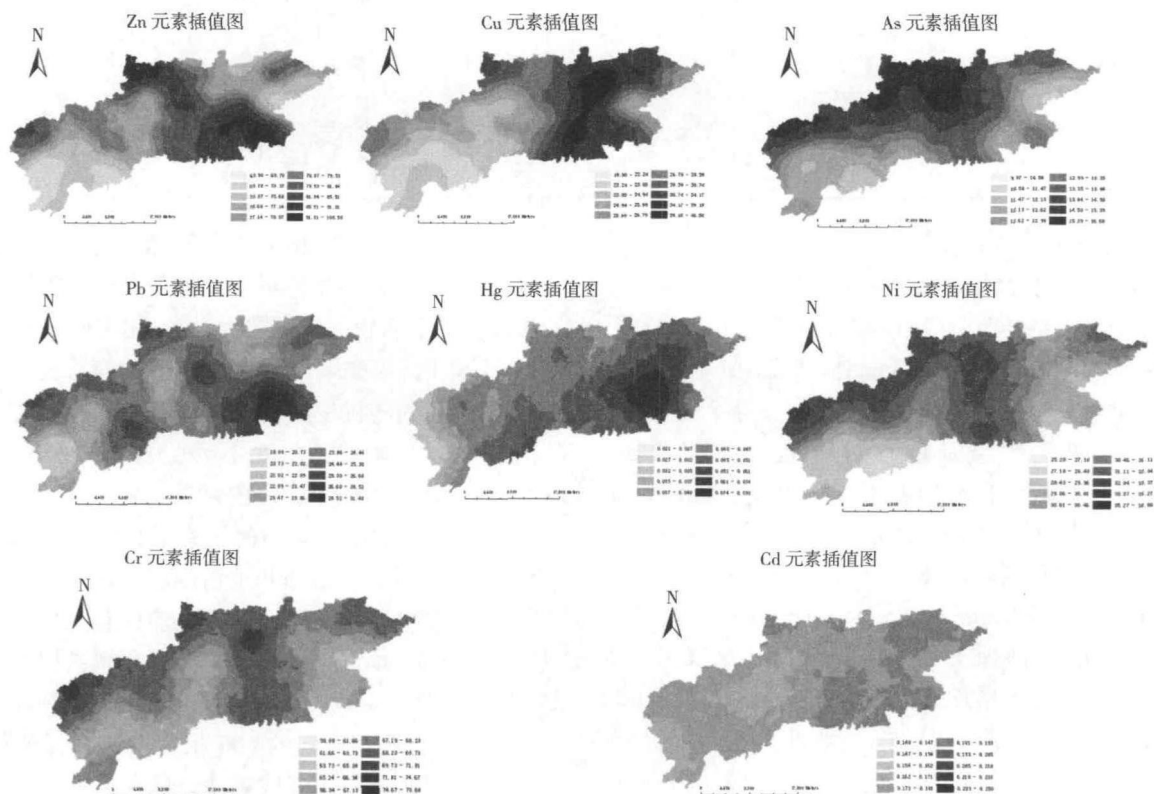


图 2 土壤重金属元素 Kriging 插值图

4 结论

8 种重金属变异系数范围为 5.68%~36.19%,均属于中等变异强度水平,其中 Cr 元素的变异系数最小,为 5.68%,说明土壤中 Cr 元素含量在研究区内变化不大,其在土壤中含受环境因素影响较小;Hg 元素的变异系数最高为 36.19%,说明研究区土壤 Hg 元素含量差异较大,其含量与母质、地形地貌以及人为活动等条件的关系相对比较密切。

元素 Cd、Cr 的块金值与基台值的比值大于 75%,空间相关性很弱,表明这 2 种元素随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等可能的各种人为活动使得土壤养分

的空间相关性减弱,也有可能是土壤中元素如果具有易移动特征,容易流失和淋溶损失,其含量的随机变异就大,而对于相对稳定、不易被流失的元素,其随机变异相对就小。其余 6 种重金属的块金值与基台值的比值均处于 25%~75%之间,呈现中等强度空间相关性,其空间相关程度较为一致,表明这 6 种元素主要受管理措施和种植制度等人为活动引起的空间变异程度较高。

在 8 种重金属中,Zn、Cu、Cd、As 这几种重金属含量最大值均略大于我国土壤环境质量标准的一级标准值,存在一定重金属的污染风险,因此由于工厂人为排污和农药化肥施用造成的重金属污染应从源头上予以有效

防治。而其它几种重金属含量的最大值均小于我国土壤环境质量标准的一级标准值,一级土壤重金属含量区是指区域内土壤重金属元素含量接近背景值,基本未受外界污染,可作为绿色农作物的种植开发区和集中式饮用水源地的区域。总的来说该区土壤环境质量较好,8种重金属含量都在绿色食品产地土壤质量二级标准值的范围内可以实现农作物绿色生产,地域内一级标准值区域可以实行有机种植。

参考文献

- [1] 梁燕君. 试论中国绿色食品的发展及其前景[J]. 粮食科技与经济, 2000(1):30-33.
- [2] 唐发静,祖艳群. 土壤重金属空间变异的研究方法[J]. 云南农业大学学报,2008,23(4):558-561.
- [3] 霍霄妮,李红,张微微,等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报,2009,25(3):223-229.
- [4] 王忠. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [5] Isaaks E H, Srivastava R M. Applied Geostatistics [M]. New York: Oxford University Press,1989.
- [6] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究,2001,20(2):161-170.
- [7] 土壤环境质量标准,GB15618-1995[S]. http://www.thshxx.net/huanbao/huanbao/file/hbfg_bz6.htm.
- [8] 刘连馥. 绿色食品产地环境质量标准,NY/T391-2000[EB/OL]. 食品商务网,2005-03-15.
- [9] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:420-430.
- [10] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报,2000,55(5):555-566.
- [11] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS Geostatistical Analyst[M]. GIS by ES-RI, 2001.
- [12] 王子芳,高明,魏朝富,等. 植烟土壤养分的空间变异特征及适宜性评价—以重庆市彭水县为例[J]. 西南大学学报(自然科学版),2008,30(1):98-103.

Study on the Spatial Variability Law of the Heavy Metals in Featured Agricultural Growing Areas in Botou

ZHU Jian-ning, CUI Jiang-hui, WEN Hong-da, ZHANG Yi-gong

(Department of Environment Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001)

Abstract: The paper made an analysis on the spatial variability character of eight heavy metals total volume in Botou's surface soil, Zn, Cu, Pb, Hg, Cr, Cd, Ai, As, by the Geostatistics method combined with the GIS, and gave a forecast on the partition of the organic green agricultural products base. The results showed that in Botou's surface soil the as total volume belongs to the normal distribution, and other element belong to the normal distribution with a logarithmic transform. In the view of variation coefficient, Cr had the minimum variation coefficient of 5.68%, and the Hg had the max variation coefficient of 36.19%. In the view of correlation coefficient, the Hg, Cr and Cd had no significant correlation. The Hg and As had a significant minus correlation by 1%. Other elements had a significant correlation by 1% within the study Area. Via the nugget effect analysis of the elements, the Ni and Cr had the most intensity spatial correlation, while the Cu, Hg, Cr have the longest change process of 57 290.4 m, which meant these elements had a close relationship with the soil parent material, and the Pb had the shortest change process of 14 380.6 m which meant the distance of the Pb spatial autocorrelation was longer than the sampling interval distance of this element. The spatial interpolation picture directly showed that there was some partial abnormality in the volume of the heavy metals in some area caused by the human activity, in the central and eastern the volume of the heavy metals was high while the southern was low. Besides the parent material and other natural factors, the heavy metal residues caused by human activities such as traffic exhaust and pesticides and fertilizers was the main reason of the heavy metals spatial variability.

KeyWords: featured fruit; heavy metals; spatial variability; geostatistics; GIS