

松嫩平原北部土壤重金属空间分异特征及生态安全评价

张 慧¹, 付 强², 赵映慧¹

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:以松嫩平原北部 8.15 万 km² 的范围为研究区域,以 20 701 个表层土壤样品的 As、Cd、Cr、Pb、Hg、Cu、Zn、Ni 共 8 种重金属元素含量为基础数据,利用地统计方法分析研究区内表层土壤重金属的空间分异特征。利用主成分分析法进行土壤生态安全质量评价。评价结果显示:松嫩平原北部表层土壤中重金属元素含量普遍低于世界土壤和中国土壤重金属平均含量;研究区内松花江、嫩江对表层土壤中重金属的水平迁移影响显著,表层土壤重金属含量由低及高呈现沿松花江嫩江的主要干支流向周围梯级过渡的趋势。表层土壤中重金属元素的空间分布主要受自然因素影响,其中 Pb、As 元素的空间分布受到一定程度的人为因素干扰。松嫩高平原区域土壤生态安全质量相对较低,松嫩低平原区域土壤生态安全质量相对较高。

关键词:松嫩平原; 重金属; 空间分异; 生态安全质量

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0165-05

Spatial Variability of Soil Heavy Metals and Ecological Quality Assessment in the Northern Songnen Plain

ZHANG Hui¹, FU Qiang², ZHAO Ying-hui¹

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the spatial variability of heavy metals and ecological quality, 20 701 surface soil samples of the northern Songnen Plain were collected. All samples were analyzed including As, Cd, Cr, Pb, Hg, Cu, Zn, Ni based on GeoStatistics, and soil ecological safety was evaluated based on principal component analysis method. The result showed that the heavy metal concentrations in surface soil of Songnen Plain were lower than average heavy metal levels in the world and in China. Songhua River and Nenjiang River had the significant impact on the horizontal transfer of heavy metals in surface soil. The study found an increasing trend for the concentrations of heavy metals from Songhua River and Nenjiang River mainstream to the surrounding area. The spatial variation of heavy metals in surface sediments was mainly affected by natural factors, and the spatial distribution of Pb, As was certainly affected by human interference. Ecological quality in highland area of Songnen Plain was better than in lowland area of Songnen Plain.

Key words: Songnen Plain; heavy metals; spatial variation; ecological quality

土壤是人类生存的基本资源和农业发展的重要基础,土壤的生态安全是保障整个生态环境安全及粮食安全的重要基础,对国民经济的可持续发展具有重要的战略意义。随着工业化和城市化进程的加快,全球土壤中重金属含量呈现急剧增加趋势^[1]。土壤中

重金属通过富集到植物体内进入食物中,从而危害人体健康^[2-3]。近年来,土壤中重金属的空间分布及土壤的生态安全质量受到广泛关注。本文以松嫩平原北部总面积为 8.15 万 km² 的区域为研究区,该区域为我国重要的商品粮生产基地和绿色食品生产基地,

收稿日期:2012-05-30

修回日期:2012-10-18

资助项目:国家自然科学基金“松嫩高平原黑土区耕地利用系统安全及其调控机制研究:以巴彦县为例”(41071346);国土资源部地质调查项目(1212010511217-04);黑龙江省博士后基金项目“黑龙江省松嫩平原南部土壤重金属空间分异特征及迁移机制研究”

作者简介:张慧(1976—),女,山东金乡人,讲师,博士生,主要研究方向为 3S 应用及土地质量评价。E-mail:2003zhanghui@163.com

通信作者:付强(1973—),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail:fuqiang@neau.edu.cn

对该区域土壤重金属含量的空间分异特征进行研究有助于理解土壤重金属的分布及迁移规律并加强该区域的土壤质量保护,为保障国家食品安全、制定农业区域规划和加速区域经济发展提供依据。

以往对土壤重金属的研究主要集中在中小尺度上的重金属污染评价,多以研究区的土壤背景值或《土壤环境质量标准》为评价依据,进行土壤重金属污染状况的评价,分析结果偏重于体现人为因素造成的土壤重金属污染^[4-7]。本研究在较大尺度上进行土壤重金属空间分异规律的分析,偏重于体现在自然因素的作用下土壤重金属的空间分布特征及土壤中重金属的迁移趋势。较常用的空间分异特征的分析方法主要包括传统的数量统计和地统计学法,地统计学方法在表现数据的空间相关性和空间趋势上有很大的优势,在模拟土壤重金属的空间分布上有较好的效果^[8-16]。

1 研究区概况

松嫩平原是由松花江和嫩江冲积而成的平原,跨黑龙江和吉林两省,与乌克兰大草原和美国密西西比河流域黑土带并称为世界三大黑土带。松嫩平原地处中温带,夏季温热多雨,冬季寒冷漫长。土地辽阔,土壤肥沃,耕种历史悠久。研究区为松嫩平原北部,地理坐标为东经 $122^{\circ}25'$ — $127^{\circ}45'$,北纬 $45^{\circ}35'$ — $48^{\circ}00'$ 。总面积为 8.15 万 km^2 ,位于黑龙江省内部,在哈尔滨、大庆、齐齐哈尔、绥化管辖范围内,共涉及 28 个市县。松嫩平原北部是我国粮食主产区之一,也是黑龙江省经济较发达、工业和农牧业生产相对集中的地区。

研究区地势总体上呈现出西北高、东南低的特征,区内地势平坦,仅在山脉与平原相接处发育有丘陵、漫岗。根据松嫩平原的气候、地形、地质地貌等特征,将松嫩平原北部划分为两个亚区,即松嫩高原区和松嫩低平原区。松嫩高原区分布在哈尔滨、绥化及齐齐哈尔北部一带,海拔高程约在 180~600 m,呈半环形包围松嫩低平原区。松嫩低平原区包括大庆、齐齐哈尔以南的地区,海拔高程约在 110~180 m,地表植被较薄,地势较低,易发生涝灾,土壤沙化较严重,该区大部分地带是大庆油田区,盐碱化、沙化面积较大,地下水中氟、砷等元素含量超标。

2 数据来源及研究方法

2.1 土壤样品采集及测定

本研究分别采集了表层土壤和深层土壤两种土壤样品。表层土壤采集深度为 0—20 cm,该土层的

As 元素含量对作物的产量、质量及人类健康影响较大,而且对人为干扰较为敏感^[17-18];深层土壤样本采样深度为 0.9~1 m,这个深度的土壤受人为干扰影响较小,受成土母质和自然成土因素影响较大,因此将其含量视为土壤背景值。

土壤样本采集时间为 2005—2007 年,分别用 4 km^2 和 16 km^2 的标准格网对研究区进行区域划分,采样点位于格网中心。表层土壤样本按 1 个点/4 km^2 的密度进行采集,共获得 20 701 个表层土壤样品。

根据土壤样品的特点,以 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 等元素,检出限分别为 5, 1, 2, 2, 4 $\mu\text{g/g}$; 以等离子发射光谱法(ICP-MS)测定 Cd 元素,检出限为 0.007 $\mu\text{g/g}$; 以原子荧光法(AFS)测定 As、Hg 等元素,检出限分别为 1, 0.5 $\mu\text{g/g}$ ^[19]。

2.2 研究方法

传统的描述性统计可以用来分析土壤重金属元素含量数据的分布特征、集中程度、离散程度,但很难揭示土壤重金属含量空间格局和变异特征,因此本研究采用地统计(Geostatistics)学的空间自相关分析重金属元素的空间变异特征及内在规律。空间自相关分析(Spatial Autocorrelation Analysis)是对某一地理变量空间分布相邻位置间的相关性进行检验的一种统计方法,它是通过检测一个位置上的变异是否依赖于邻近位置上的变异来判断该变异是否存在空间自相关性^[20-22]。表现空间相关性特征的指标主要包括块金值、结构方差、基台值、块金系数和变程等。其中,块金值(C_0)也叫块金方差,它是区域化变量随机性的体现,代表了随机因素造成的异质性;结构方差(C)代表由系统因素引起的变异,即本研究中土壤母质、地形、气候等非人为因素(空间自相关部分)引起的变异;基台值($C_0 + C$)表示系统内总的变异;块金系数 $[C_0 / (C_0 + C)]$ 是反映区域化变量空间异质性程度的重要指标,块金系数高,说明由随机因素引起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较小。变程(a)表示半方差达到基台值时的样本距离,即当距离超过变程时,土壤中的重金属含量不存在相关性。同时,利用 ArcGIS 10 软件对土壤重金属元素含量进行普通克里金插值,得到重金属元素在研究区范围内连续分布的预测图。

本文采用主成分分析法(Principal Component Analysis)进行土壤生态安全评价。主成分分析法是把多个变量转化为少数几个综合指标的统计分析方

法,而且这些指标既能尽量多地反映原来较多指标所反映的信息,同时它们之间又是彼此独立的。本研究通过主成分分析将影响土壤质量的 8 种土壤重金属元素指标转化为几个新的综合指标,可以较为全面地反映土壤重金属的主要信息,并去除有一定相关性的重复信息。根据主成分分析的结果筛选主要成分,利用方差贡献率对土壤重金属综合指标进行加权计算,以此作为划分研究区土壤生态安全质量等的依据。

3 结果与分析

3.1 研究区表层土壤重金属含量空间分异特征

3.1.1 表层土壤重金属含量特征 土壤环境背景值是指土壤在发育形成过程中,未受或较少受到人为活动影响,尤其是较少受到污染的情况下,土壤本身固有的化学组成和含量。它基本反映了土壤环境原有的物质组成、含量和结构特征。本研究将深层土壤样

本中重金属含量均值作为该区域的土壤环境背景值。由于土壤中的有机质对重金属元素有较强的吸附能力,因此各种污染活动带来的重金属元素多富集于表层土壤中,将表层土壤中重金属含量与土壤背景值对比分析来判别表层土壤重金属的变化特征(表 1)。

表 1 表明,松嫩平原北部表层土壤中 Cd,Cr,Pb,Hg,Cu,Zn,Ni 这 7 种元素含量均低于世界平均水平,As 元素含量高于世界平均水平;与中国土壤中重金属含量水平相比,以上 8 种土壤重金属含量都相对较低;相对于该研究区域的土壤背景值而言,表层土壤中 As,Zn,Ni 元素含量出现了不同程度的下降,Cd,Cr,Hg 元素含量出现了不同程度的升高,Pb,Cu 含量基本保持不变。从各重金属元素含量的变换区间和标准差可见,Cd,Hg 元素含量差异较小,Zn,Cr 元素含量差异较大,As,Pb,Cu,Ni 元素的含量变化相对适中。

表 1 松嫩平原北部表层土壤重金属含量特征 mg/kg

项目	As	Cd	Cr	Pb	Hg	Cu	Zn	Ni
世界土壤均值	6	0.350	70	35	0.06	30	90	50
中国土壤均值	11.2	0.097	61.0	26	0.065	22.6	74.2	26.9
研究区土壤背景值	9.33	0.078	50.62	22.96	0.016	18.69	57.23	24.08
研究区表层土壤重金属含量均数	8.68	0.095	53.60	22.00	0.026	18.59	55.89	23.33
研究区表层土壤重金属含量变化区间	1.4~41.0	0.01~4.20	2.29~131.85	1.9~119.5	0.004~2.55	1.8~80.5	4.1~191.5	0.16~59.09
研究区表层土壤重金属含量标准差	2.51	0.099	15.30	3.45	0.03	5.36	14.90	7.05

注:中国土壤背景值及世界土壤元素中值均引自中国环境监测总站。

3.1.2 表层土壤重金属含量的空间分异特征 通过对研究区土壤中的 As,Cd,Cr,Pb,Hg,Cu,Zn,Ni 这 8 种重金属元素进行空间自相关分析,结果表明:这 8 种重金属元素中块金值、方差和整体方差最大的均为 Cr,即 Cr 元素的随机变化和结构性变化都最为显著,说明该研究区域内由于地质、地貌等自然因素造成的变化最为显著;Cd,Cr,Hg,Cu,Zn,Ni 这 6 种重金属元素的块金系数<25%,说明以上几种元素具有强烈

的空间相关性,其中以 Cd 和 Cr 元素最为显著;As 和 Pb 的块金系数在 25%~50%之间,说明这两种元素具有明显的空间自相关性,相比较而言,As 和 Pb 两种元素的相关性相对较小,也说明这两种元素含量较易受到人为活动的干扰;以上 8 种元素的变程中 Hg 和 Cd 的变程较小,分别为 17.7 km 和 22.8 km,其余均在 150~200 km 之间,说明 Hg 和 Cd 两种元素在水平方向上的迁移能力最低(表 2)。

表 2 松嫩平原北部表层土壤重金属空间变异特征

重金属	模型	块金值 (C ₀)	结构方差 (C)	基台值 (C ₀ +C)	块金系数 [C ₀ /(C ₀ +C)]/%	变程/km
As	球形	0.0152	0.387	0.0539	28.2	161.0
Cd	指数	0.0000317	0.00024	0.00027	11.7	22.8
Cr	球形	37.7	249.4	287.1	13.1	195.9
Pb	指数	0.0069	0.0139	0.0208	33.2	177.3
Hg	指数	0.000186	0.000946	0.001132	16.4	17.7
Cu	球形	7.39	26.01	33.4	22.1	168.5
Zn	球形	0.0179	0.0999	0.1178	15.2	163.3
Ni	球形	8.9	43.32	57.75	15.8	154.5

利用 ArcGIS 10 软件对土壤重金属元素含量进行普通克里金插值,得到研究区土壤中 As,Cd,Cr,Pb,Hg,Cu,Zn,Ni 共 8 种重金属元素含量等级空间分布图,依据元素含量值进行等距分等。以上 8 种重金属的空间分布格局存在一定的相似性,都表现为松花江和嫩江流域重金属元素含量较低,并呈现出由西南向东北逐渐增大的趋势,说明松花江和嫩江对重金属元素的水平迁移影响显著。Zn,Cr,As,Ni,Cu 等元素含量等级分布显示出与松花江、嫩江主干流走向

显著相关的特征,说明河流对以上元素水平迁移的影响更为显著。Pb 元素含量不同等级区域图形相对完整,分布较为集中,说明虽然 Pb 的迁移范围较大,但是它的迁移速度较慢。Cd,Hg 这两种元素由于变程较小,迁移范围相对较小,因此含量等级图显示图形较为破碎,分布较为零散。从元素含量的空间差异分析,Cu,Ni,Cr,Zn 元素含量的地域差异较大,变化较为剧烈,说明以上地区地质差异造成的元素含量差异显著(图 1)。

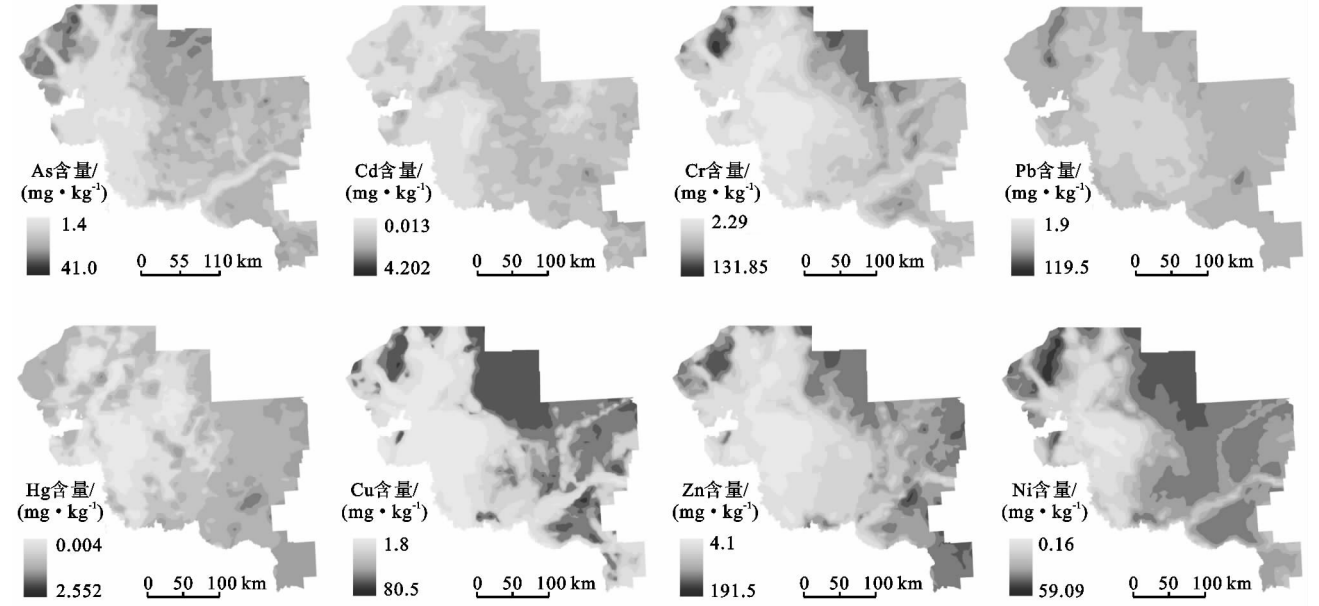


图 1 土壤重金属元素含量空间分布

3.2 松嫩平原北部表层土壤生态安全质量分析

3.2.1 松嫩平原北部表层土壤重金属元素含量主成分分析 本研究用 R 软件对 As,Cd,Cr,Pb,Hg,Cu,Zn,Ni 共 8 种重金属元素进行主成分分析,依据特征根大于 1 的标准提取前 3 个主成分,前 3 个主成分的累计贡献率达到 84%,能够充分表达以上 8 种重金属元素的主要信息。第一主成分的方差占总体方差的 59%,表达了 8 种重金属元素的大部分信息,其中 Ni,Cr,Cu,Zn 共 4 种元素在第一主成分上的载荷较大。表 3 主成分系数表征了各主成分在 8 种重金属元素含量上的载荷,可得到由主成分系数和标准化变量组成的 3 个主成分的表达式:

$$F_1 = 0.798ZX_1 + 0.255ZX_2 + 0.314ZX_3 + 0.950ZX_4 + 0.946ZX_5 + 0.951ZX_6 + 0.614ZX_7 + 0.930ZX_8$$
$$F_2 = -0.209ZX_1 + 0.794ZX_2 + 0.552ZX_3 - 0.131ZX_4 - 0.860ZX_5 - 0.185ZX_6 + 0.177ZX_7 + 0.690ZX_8$$
$$F_3 = -0.340ZX_1 - 0.450ZX_2 + 0.757ZX_3 + 0.018ZX_4 + 0.610ZX_5 + 0.023ZX_6 - 0.318ZX_7 + 0.002ZX_8$$

表 3 主成分系数、特征值和贡献率

	主成分 1	主成分 2	主成分 3
As	0.798	-0.209	-0.340
Hg	0.255	0.794	-0.450
Cd	0.314	0.552	0.757
Cr	0.950	-0.131	0.018
Cu	0.946	-0.860	0.610
Ni	0.951	-0.185	0.023
Pb	0.614	0.177	-0.318
Zn	0.930	0.690	0.002
特征值	4.7	1.07	1
方差贡献率	0.59	0.14	0.11
累计方差贡献率	0.59	0.73	0.84

3.2.2 松嫩平原北部表层土壤生态安全质量评价利用主成分分析结果中筛选出的 3 个主成分,根据其方差贡献率进行加权,构建土壤重金属元素含量综合指标。综合指标表达式为: $D = 0.59F_1 + 0.14F_2 + 0.11F_3$ 。利用克里金插值方法对土壤生态安全综合评价结果进行插值分析,并依据评价结果的累计频率的 33%,66%,100%,进行土壤环境综合质量分等。一等为土壤生态安全质量最高,二等其次,三等为土壤生态安全质量最差。研究区内土壤生态安全质量呈现出由西南向东北方向逐渐下降的趋势(图 2)。

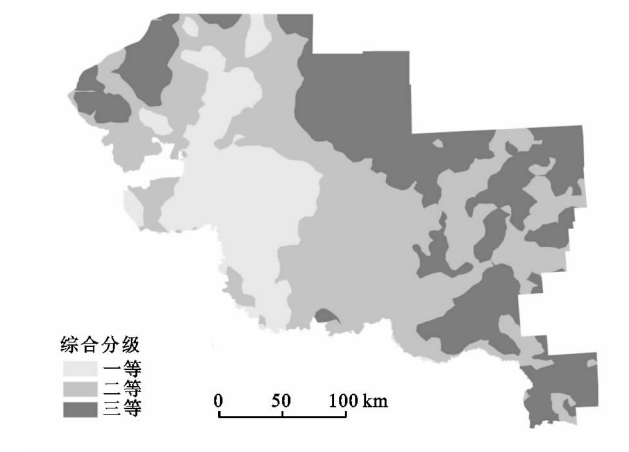


图2 土壤生态安全质量分级

4 结论

松嫩平原北部土壤重金属分异特征及生态安全评价研究表明,在世界和中国范围内研究区的表层土壤中重金属元素含量总体相对较低。表层土壤中8种重金属元素表现为较为一致的空间分布格局:即,由西南向东北含量逐渐增加。但由于各种元素迁移的影响因素和影响机制不同,因此表现出不同的过渡特征。松嫩平原北部表层土壤中部分重金属元素如Cd,Cr,Hg元素含量表现为一定程度的增加,重金属元素含量持续增加势必会影响土壤生态安全质量,进而威胁食品安全,因此今后应加强这些区域的表层土壤中重金属含量变化的监测。

区域内土壤生态安全质量的分布表现为松嫩高平原区域土壤生态安全质量相对较低,松嫩低平原区域土壤生态安全质量相对较高,邻接区域土壤质量介于二者之间,呈现过渡态势。

本研究仅对表层土壤中重金属元素的空间分异特征和生态安全评价进行了一定的研究,对土壤重金属的迁移的影响因素和作用机理分析未作探讨,因此还不能确定表层土壤中重金属元素含量增加的影响因素。

参考文献:

[1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients-food safety issues[J]. *Field Crops Research*,1999,60(1/2):143-163.

[2] Jones F. Abroad view of arsenic[J]. *Poultry Science*, 2007,86(1):2-14.

[3] Kaiser J. Toxicologists shed new light on old poisons[J]. *Science*,1998,279(5358):1850-1851.

[4] 周生路,廖富强,吴绍华,等.基于分等样地的江苏典型区农用地土壤重金属污染研究[J]. *农业工程学报*, 2008,24(5):78-83.

[5] 王纪华,沈涛,陆安祥,等.田块尺度上土壤重金属污染地统计分析及评价[J]. *农业工程学报*,2008,24(11):226-229.

[6] 李达,周生路,吴绍华,等.经济发达地区县域尺度土壤重金属污染区划[J]. *农业工程学报*,2011,27(10):282-286.

[7] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,等.地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2006,34(12):1657-1662.

[8] 李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等.地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. *土壤通报*,2006,32(2):265-268.

[9] 程街亮,史舟,朱有为,等.浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. *水土保持学报*,2006,20(1):103-107.

[10] 魏丹,迟凤琴,史文娇,等.黑龙江省南部黑土区重金属空间分异规律研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007,23(1):65-73.

[11] 刘庆,王静,史衍玺,等.绿色食品产地土壤重金属空间分布与污染评价[J]. *水土保持学报*,2007,21(3):90-94.

[12] 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.

[13] 宋启道,方佳,王富华.广东省主要蔬菜产地土壤中重金属含量调查与评价[J]. *环境污染与防治*,2008,30(5):91-93.

[14] 关伯仁.评内梅罗的污染指数[J]. *环境科学*,1997,4(4):67-71.

[15] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.经济快速发展区土壤重金属累计评价[J]. *环境科学*,2010,31(6):1608-1616.

[16] 吴传星,伍钧,杨刚,等.基于改进AHP法重金属污染因子权重的确定及其在农作物重金属安全性评价中的应用[J]. *四川农业大学学报*,2010,28(3):345-350.

[17] Reimann C, Filzmoser P, Garrett R G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination[J]. *The Science of the Total Environment*, 2005,346(1):1-16.

[18] Chirenje T, Ma L Q, Szulczewski M, et al. Arsenic distribution in Florida urban soils: comparison between Gainesville and Miami[J]. *Journal of Environmental Quality*,2003,32(1):109-119.

[19] 宋伟,张志,郑平,等.土壤中砷、汞、铅、镉、铬测定方法的研究[J]. *安徽农业科学*,2011,39(34):21001-21002, 21054.

[20] Cliff A D, Ord J K. *Spatial Processes: Models and Applications*[M]. London: Pion, 180-240.

[21] Martin D. An assessment of surface and zonal models of population[J]. *International Journal of Geographic Information Systems*,1996,10(8):973-989.

[22] 霍霄妮,李红,孙丹峰,等.北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析[J]. *环境科学学报*,2009,29(6):1339-1344.