

# 黄骅市土壤重金属空间变异特征及污染评价

臧亮, 张贵军, 张慧, 朱永明

(河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071001)

**摘要:**为研究工业和经济高速发展对环渤海滨海生态脆弱区土壤质量的影响,以黄骅市为研究区,利用地统计学方法对黄骅市表层土壤中的Pb, Hg, Cd, Cr, As, Cu, Zn, Ni共8种重金属空间分布特点和污染状况进行了分析。结果表明:(1) Pb, Cd, Cu元素样点平均含量超过河北省土壤背景值,其他元素含量平均值均未超过,所有元素含量平均值都在国家土壤质量二级标准的范围内。(2) 根据变异函数拟合发现,Pb, Hg, Cd, Cr, As, Cu共6种元素拟合于指数模型,Zn, Ni两种元素拟合于球状模型;Pb, Cd, Zn基底效应值为25%~75%,空间自相关程度一般,其空间分布格局受到一定外界干扰。其他元素基底效应值均在25%以下,空间自相关性比较强,空间分布格局受外部影响相对较小。(3) 根据克里格内插预测发现,Pb, Cd, Cu整体含量高,区域离散分布;Cr, Zn, Ni整体含量低,连续集中分布;As元素成岛状分布,分布集中于几个区域;Hg成散点状分布于黄骅全县。(4) 通过计算内梅罗污染指数可知,黄骅市土壤内梅罗污染指数大部分处于1.0~2.0,属于轻度污染状态;吕桥镇中部和齐家务乡西部污染指数最高,属于污染最严重的地区。工业生产和地质环境是影响土壤重金属元素空间分布的主要原因。

**关键词:**土壤; 空间分布; 半变异函数; 重金属污染; 黄骅市

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)05-0337-06

## Assessment on Spatial Variability and Pollution of the Heavy Metal in Soil of Huanghua City

ZANG Liang, ZHANG Guijun, ZHANG Hui, ZHU Yongming

(College of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

**Abstract:** To study the influences of the industrial and high-speed economic development on the soil quality in the ecologically fragile zones of Bohai Sea coast, we took Huanghua as the study area to analyze the spatial distribution and contamination situation of Pb, Hg, Cd, Cr, As, Cu, Zn and Ni, through geostatistical method. The results show that the average contents of Pb, Cd, Cu in the samples exceed the background values in Hebei Province, the other elements contents do not exceed the average value, and the average contents of all elements fall into the scope of the national soil quality secondary standards. According to variogram fitting, it is found that six elements of Pb, Hg, Cd, Cr, As, Cu fit to exponential model, and Zn, Ni fit to the spherical model. The basal effects of Pb, Cd, and Zn are between 75% and 25%, and the spatial autocorrelation is general, and the spatial distribution pattern is disturbed by the external environment. Other element matrix effect values are less than 25%, their spatial autocorrelation levels are higher, and the outside environment makes a small influence on their spatial autocorrelation. According to Nemerow pollution index and Kriging interpolation prediction it is found that the contents of Pb, Cd, Cu are high and discretely distribute in the region, the contents of Pb, Cd, Cu are low and continuously distribute in the region. The As as an island continuously distributes in several regions; and the Hg element distributes in Huanghua County as scattered dots. By calculating the Nemerow pollution index, the pollution indexes of soil in Huanghua City are mostly between 2.0 and 1.0, which is slightly polluted; the center of the town of

Lvjiao and the western part of the town of Qijiawu belong to the most polluted areas, whose pollution indexes are highest. Industrial production and the geological environment are the main reasons for heavy metal element spatial distribution.

**Keywords:** soil; spatial distribution pattern; semi variation function; heavy metal pollution; Huanghua City

土壤是人们生活生产必不可少的自然资源,土壤环境的生态安全是资源环境安全的重要环节。但是随着城市化和工业化进程的高速发展,重金属元素被大量释放到土壤中,使得土壤中重金属含量急剧增加<sup>[1]</sup>。据统计我国有30%~40%的农田受到了重金属污染<sup>[2]</sup>,对生态系统安全、粮食安全和食品安全构成了严重威胁。目前土壤重金属污染日益受到人们的关注,黄骅作为环渤海经济发展规划中重要的增长极和隆起带,近几年经济发展势头良好,尤其是模具生产、汽车产业、石油化工等重工业发展十分迅速,这一方面有利于提高黄骅综合经济实力和人民生活水平,另一方面也对黄骅的自然资源环境带来了严重的破坏,由于地理位置和地质条件的原因,黄骅市的生态环境本就十分脆弱,加之重工业污染带来的沉重负担,会严重威胁黄骅市的生态安全。而且土壤重金属污染通过种植作物会进入动物体内累积,威胁人类和动物的健康安全。因此本文选取黄骅作为研究区,重点研究黄骅土壤重金属空间分布特征并对其污染状况进行评价,为区域土地资源可持续利用、工业产业布局、生态红线划定提供依据。

## 1 研究区概况

黄骅市地处河北省东南部地区,位于38°09′—38°39′N,117°05′—117°49′E,东临渤海,北倚天津,属于沧州滨海平原,地势低平,海拔3~5 m,属于暖温带半湿润季风气候,具有明显的海洋气候特征,年平均降水量625 mm,年平均蒸发量1 908 mm。黄骅市受海洋影响,地下水矿化度高,淡水资源匮乏,土壤盐渍化现象明显。在第四纪沉积相中,黄骅市主要是全新统冲积海积相,南大港北部属于全新统湖积相。黄骅东南部的黄骅港是国家跨世纪工程——神华工程的龙头项目,是我国环渤海地区的重要港口,年吞吐量达到上亿吨,有河北省东出西联的出海口和桥头堡之称。

## 2 样品采集与数据处理

### 2.1 样品采集与测定方法

为了全面真实测定黄骅全市土壤重金属含量分布情况,根据黄骅市土地利用状况,2013年在全市均

匀布置539个采样点,采样位置利用GPS定位记录经纬度,其中南大港镇30个,齐家务乡33个,吕桥镇43个,骅西街道70个,官庄乡25个,羊三木乡17个,骅中街道67个,腾庄子50个,羊二庄回族乡70个,黄骅镇36个,骅东街道26个,旧城镇37个,常郭乡35个,土壤采样深度为0—20 cm,收集土壤样品后经风干、研磨、过筛后进行各重金属含量As和Hg的含量检测。王水水浴加热消解后采用氰化物发生—原子荧光光谱法(AFS)测定<sup>[3]</sup>;Cu,Zn,Ni的含量采用硝酸—高氯酸—氢氟酸联合消煮,原子吸收分光光度法测定<sup>[4]</sup>;Pb,Cd的含量采用硝酸—高氯酸—氢氟酸联合消煮,石墨炉原子吸收分光光度法测定<sup>[5]</sup>;Cr的含量采用硫酸—氢氟酸—高氯酸联合消煮,火焰原子吸收分光光度法测定。

### 2.2 数据处理

根据测定的各样点元素含量数据,首先去除异常值,然后利SPSS 18统计软件对样点数据的平均值、标准差等统计特征进行分析计算。利用半变异函数模型研究样点数据空间分布特点,根据不同的分布特点寻找最适宜的模型进行拟合,半变异函数的计算和拟合用GS+for Windows软件进行。各元素的空间分布模拟利用ArcGIS 10.0平台的地统计分析工具中的Kriging插值法获取。土壤污染评价方法采用内梅罗指数法,包括单因子评价和综合评价<sup>[6]</sup>。

半变异函数是区域化变量在抽样间隔下样本方差的数学期望,并且只在最大间隔1/2以内才有意义<sup>[7]</sup>,在数据符合二阶平稳假设和本征假设的情况下,半变异函数理论公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中: $h$ 表示步长,是样点的空间距离; $N(h)$ 为步长是 $h$ 时的样点数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 为区域变量在位置 $x_i$ 和 $x_i+h$ 的实测值。在进行半变异函数模拟中有三个重要参数,分别为块金值、基台值和变程。当 $h=0$ 时, $\gamma(h)=C_0$ 称为块金值。当随着 $h$ 的增大,半变异函数趋于一个稳定的状态, $\gamma(h)=(C_0+C_1)$ 称为基台值, $C_1$ 为结构方差。 $\gamma(h)$ 达到基台值的间隔距离 $a$ 称为变程。

克里格法又称空间局部估计,它是以变异函数理

论为基础,在有限区域内对变量进行无偏最优估计的一种方法。对于空间任一点其估计值  $Z_v^*(x)$ ,可以通过该待估点影响范围内的  $n$  个有效样本的线性组合来表示:

$$Z_v^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

2.3 土壤污染评价方法

本文采用内梅罗指数测算土壤污染程度,内梅罗指数兼顾了单因子污染指数的平均值和最大值,可以突出污染较重污染物的作用<sup>[8-10]</sup>,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i$$
$$P = \sqrt{\frac{\overline{P}^2 + P_{\max}^2}{2}}$$

式中: $P_i$  为单因子污染评价指数; $C_i$  为第  $i$  项重金属元素的实测值; $S_i$  为第  $i$  项重金属元素的评价标准; $\overline{P}$  为单因子污染指数  $P_i$  的平均值; $P_{\max}$  为单因子污染指数的最大值。本文选择河北省土壤元素背景值作为评价标准值,由于黄骅市大部分区域属于全新统冲积海积相,重金属元素含量应稍低于河北省土壤背景值,而黄骅东北部小部分区域属于全新统湖积相,是重金属元素富集区,多种重金属元素含量高于河北省土壤背景值,因此采用河北省土壤背景值作为评价标准较为合理。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属统计特征分析

根据表 1 可知,Pb,Cd,Cu 元素平均值略高于河北省土壤背景值,样点超标率分别为 64.50%,99.63%,57.14%。其他元素平均值接近河北省土壤背景值,有少量样本值超出河北土壤背景值。与国家土壤质量二级标准相比,各元素平均值均未超过国家土壤质量二级标准,说明黄骅市 8 种元素的含量基本不会对植物生长和人体安全构成威胁。但是这并不能说明黄骅市土壤重金属未造成累积和污染。8 种元素变异

系数均处于 0.1~1 的范围内,属于中等变异,Hg 元素的变异系数最大为 0.46,Pb 元素的变异系数最小为 0.13。说明整体分布上 Hg 的样点数据呈现更强的离散特性,数据波动性更强。Pb 则表现的比较平稳,数据连续性好。

表 1 样点统计分析

元素	范围/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差	变异 系数	背景值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	超标 率/%
Pb	15.6~37.6	23.02	2.95	0.13	21.50	64.50
Hg	0.007~0.09	0.03	0.01	0.46	0.04	11.17
Cd	0.08~0.27	0.15	0.03	0.17	0.09	99.63
Cr	43.2~118	67.11	9.30	0.14	68.30	40.26
As	7.2~19.6	11.69	2.10	0.18	13.60	15.77
Cu	13.6~45.9	23.47	4.86	0.21	21.80	57.14
Zn	49.4~137.3	74.11	10.82	0.15	78.40	30.43
Ni	18.3~47.4	29.55	4.83	0.16	34.10	17.44

3.2 土壤重金属空间结构分析

半变异函数是地统计学中的重要工具,可以同时描述区域化变量的随机性和结构性,可以很好地描述变量的空间特征。进行地统计分析前需要对数据进行检查和处理,以保证结果的准确性。半变异函数一般要求数据符合正态分布,消除比例效应产生的影响<sup>[11]</sup>。利用 SPSS 18 统计软件中的 K-S 法对数据进行正态分布检验,结果显示 8 种元素显著性均低于 0.05 不符合正态分布必须对数据进行转换,在对比 Square-Root,log 等转换结果的基础上,发现经 Log 转化后数据符合正态分布。

利用 GS+for windows 地统计软件对数据进行模型拟合,计算主要模型参数。根据决定系数最大和残差最小为原则选取最优拟合模型,结果见表 2。Pb,Hg,Cd,Cr,As,Cu 这 6 种元素拟合于指数模型,Zn,Ni 两种元素拟合于球状模型,8 种元素拟合残差均远远低于 0.1,决定系数除 Hg 元素较低 0.6 外,均达到了 0.8,说明各理论模型精度均符合要求。

表 2 半变异函数理论模型及参数

元素	渐近显著性	变换	模型	块金值	基台值	基底效应	决定系数	残差	变程/m
Pb	0.02	log	指数	0.01	0.02	0.34	0.99	0.00	77910.00
Hg	0.00	log	指数	0.01	0.16	0.09	0.60	0.00	4440.00
Cd	0.00	log	指数	0.01	0.03	0.39	0.94	0.00	19560.00
Cr	0.00	log	指数	0.01	0.03	0.23	0.99	0.00	72030.00
As	0.00	log	指数	0.00	0.03	0.09	0.88	0.00	8430.00
Cu	0.00	log	指数	0.01	0.07	0.21	0.99	0.00	93960.00
Zn	0.01	log	球状	0.01	0.03	0.34	0.99	0.00	47390.00
Ni	0.01	log	球状	0.01	0.03	0.23	0.99	0.00	46040.00

半变异函数的块金值是由测定误差和小于采样尺度的非连续性变异共同引起的,属于随机性变异。基台值是系统或系统属性中最大的变异,是结构性变异和随机性变异之和。基底效应是块金值和基台值之比,可以反映变量的空间自相关程度<sup>[12]</sup>。当自然因素主导变量的空间变异时,变量的空间自相关程度高,对应的基底效应值低,当人为因素主导变量的空间变异时,变量的空间自相关程度低,对应的基底效应值高<sup>[13-14]</sup>。根据 Cambardena 等提出的区域变量空间相关程度分级标准,基底效应值小于 25% 时表明空间自相关强烈;基底效应值在 25% 和 75% 之间时,表明变量空间自相关程度一般;当基底效应值大于 75% 时,变量的空间自相关很弱,以随机性为主。由表 2 可知,Pb,Cd,Zn 基底效应值在 25% 到 75% 之间,空间自相关程度一般,表明其空间分布格局受到外界干扰,使得原有的空间分布格局发生一些改变。其他元素基底效应值均在 25% 以下,空间自相关性比较强,表明其空间分布格局受人类活动影响相对较小。

变程表明了空间自相关的范围大小,在变程范围内变量有空间自相关性,反之则不存在。根据表 2 可知黄骅市 8 种元素的变程从大到小依次为 Cu>Pb>Cr>Zn>Ni>Cd>As>Hg,其中 Cu,Pb,Cr 的变程相对较大为 93 960.00 m,77 910.00 m,72 030.00 m,说明这些元素在较大的空间范围内都具有很强的空间相关性,Hg 和 As 变程较小为 4 440.00 m,8 430.00 m,只在相对较小的空间范围内存在自相关性。

### 3.3 土壤重金属空间分布特征

为了模拟出各元素的空间分布状况,运用 ArcGIS 10.0 对数据进行普通克里格插值模拟,模拟参数根据空间结构分析结果进行修改,然后进行交叉检验,交叉检验结果主要参数见表 3。当标准平均值接近于 0,均方根较小,平均标准误差接近于均方根且标准均方根接近于 1 的时候认为可以通过交叉检验,说明克里格插值效果较好<sup>[7]</sup>。根据表 3 可知,8 种重金属元素都可以通过交叉检验,表明上文计算的相关参数和模型可以很好地预测空间变量的分布特征,得到各元素的空间预测图见图 1。

根据图 1 可以发现黄骅市 8 种重金属元素总体上呈现东北地区高,西南地区低的趋势。Pb,Cd,Cr,Cu,Zn,Ni 这 6 种重金属元素在空间分布具有一定的相似性,其中 Pb,Cd,Cu 整体含量高,区域离散分布,Cr,Zn,Ni 整体含量低,连续集中分布。As 元素成岛状分布,分布集中于几个区域,Hg 元素成散点状分布。

表 3 各元素预测结果误差分析

元素	标准平均值	均方根	平均标准误差	标准均方根
Pb	-0.01	2.25	2.09	1.06
Hg	-0.02	0.01	0.01	1.14
Cd	0.01	0.02	0.02	0.94
Cr	0.01	6.24	6.29	0.97
As	0.00	1.57	1.61	0.96
Cu	0.01	3.35	3.31	0.99
Zn	0.01	7.81	7.81	0.99
Ni	0.01	2.95	3.05	0.94

Pb,Cd,Cu,Cr,Zn,Ni,As 这 7 种元素的高值区主要分布在吕桥镇中部、南大港北部、骅中街道中部和齐家务乡西部。主要原因可能是由于吕桥镇一直以来都是黄骅最重要的工业聚集区,主要产业包括石油化工、精细化工等高污染行业,而且吕桥镇地区整体地势低洼,容易造成重金属元素的富集;南大港北部地区在第四纪沉积相中属于湖积相,在地球化学演变中处于元素富集区,多种重金属元素在此累积,因此造成多种重金属元素含量普遍偏高,同时南大港是大港油田和渤海石油的重要工作区,石油生产及交通运输过程会造成土壤重金属元素的累积;骅中街道虽然并非工业重镇,但是骅中街道中部也有着大片工业产业区,很容易对周围土壤产生污染,齐家务乡本身并没有高污染的重工业基地,但是与其毗邻的青县金牛镇是有着发达的钢铁工业,因此齐家务乡与金牛镇接壤地区的土壤中显示出了重金属元素的较高含量。工业生产不仅造成了工业区周围土壤中重金属元素含量的累积,而且通过地下水、河流、交通等向周围扩散,对周围地区的土壤造成污染,尤其是在污染地下水和地表水的情况下,对人们的饮水安全、粮食安全构成严重威胁。

Hg 元素与其他元素不同,成散点状分布于黄骅全县,向四周扩散现象并不明显,只有少数几个点状区域含量超过河北省背景值,空间变异性强,连续性差,根据其平均值低,变异性高的特点可知黄骅县整体 Hg 含量应该处于较低水平,而局部高值区原因是部分地区农业生产化使用了含汞元素的化肥农药,但是使用面积较小,造成小规模地区的土壤 Hg 含量较高,但是相对而言对黄骅县整体影响较小,远不及工业生产带来的污染严重。

### 3.4 土壤重金属污染评价

根据内梅罗指数计算公式得到各重金属元素的单因素污染指数和综合污染指数,并根据综合污染指数进行分级见表 5。

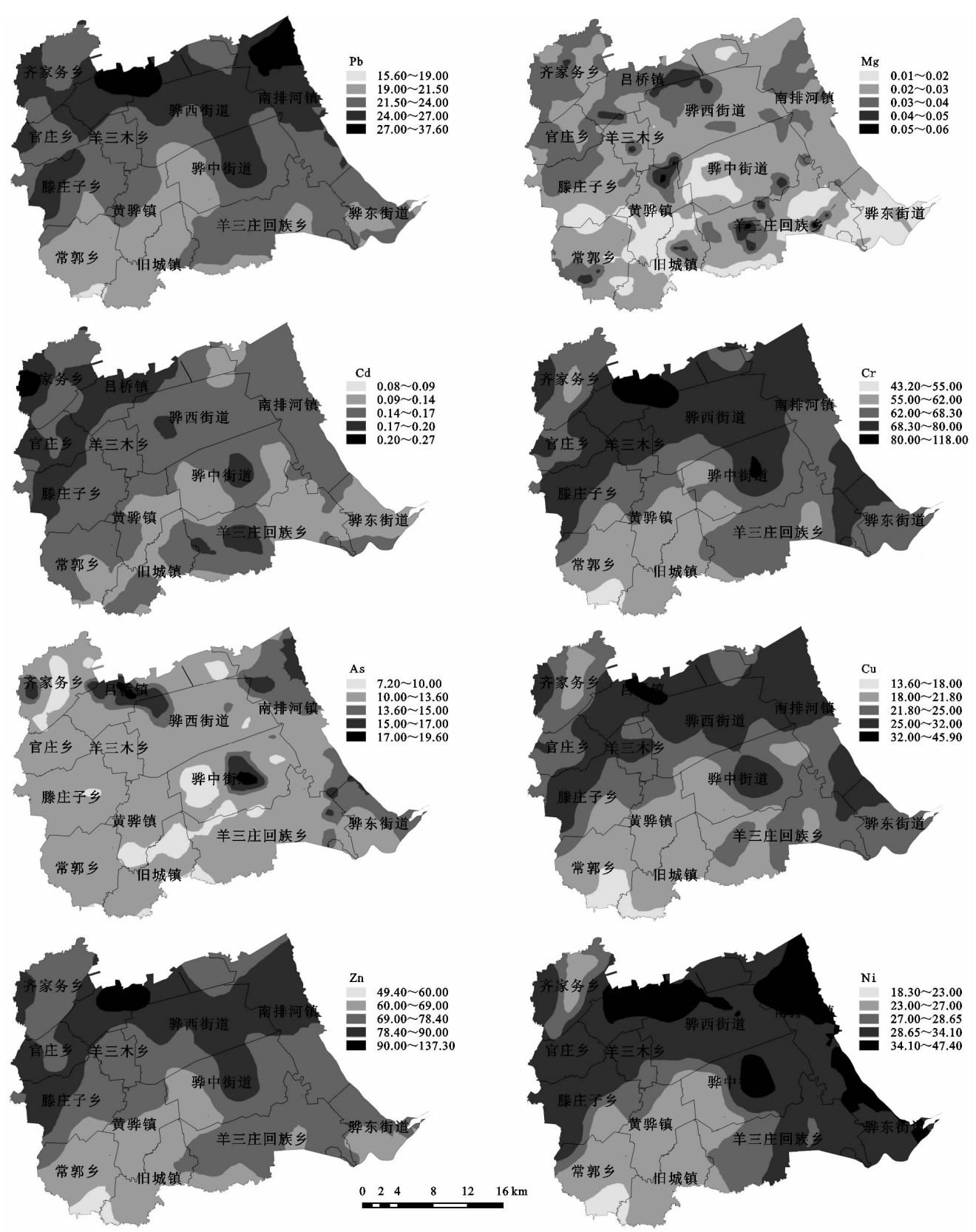


图 1 各重金属元素分布预测

进一步利用 ArcGIS 对黄骅市土壤重金属综合污染指数进行 Kriging 插值,模拟其空间分布,得到黄骅综合污染指数分布预测图。由表 4,表 5 可以看出,黄骅单一元素污染指数排序为  $Cd>Cu>Pb>Cr$

$>Zn>Ni>As>Hg$ 。Cd,Cu,Pb 对黄骅土壤重金属污染贡献率最高,土壤污染复合指数平均值达到了 1.41,处于轻度污染的样点比例达到了 98.14%,处于警戒水平的样点比例为 0.56%,还有 1.30%的样

点处于中度污染水平。根据图 2 可知黄骅市土壤重金属综合污染指数范围在 0.81~2.29 之间全部处于警戒、轻度污染和中度污染水平,污染最严重的地区位于吕桥镇和齐家务乡,西北地区污染水平较高,西南地区污染水平较低,但是已经不存在完全安全的地区,总体状况不容乐观,虽然并没有出现严重的污染现象,但是全市整体已经处于污染状况,需要及时采取措施防止污染进一步恶化。

表 4 污染指数描述性统计			
元素	平均值	标准差	变异系数
Pb	1.07	0.14	0.13
Hg	0.68	0.31	0.46
Cd	1.70	0.29	0.17
Cr	0.98	0.14	0.14
As	0.86	0.15	0.18
Cu	1.08	0.22	0.21
Zn	0.95	0.14	0.15
Ni	0.87	0.14	0.16
综合指数	1.41	0.22	0.16

表 5 综合污染指数分级					
污染程度分级	安全	警戒	轻度污染	中度污染	重度污染
综合污染指数	$p \leq 0.7$	$0.7 < p \leq 1.0$	$1.0 < p \leq 2.0$	$2.0 < p \leq 3.0$	$p > 3.0$
样点比例		0.56%	98.14%	1.30%	

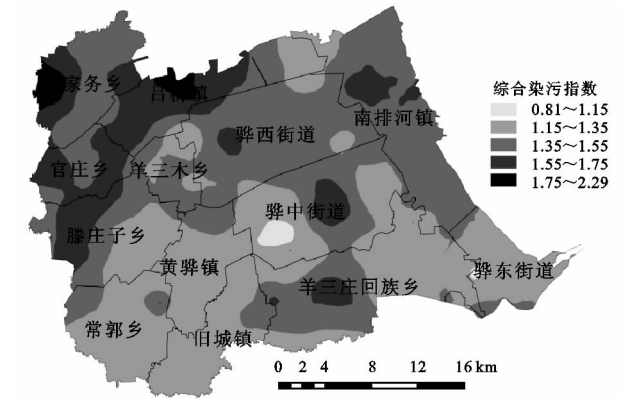


图 2 土壤重金属综合污染指数分布预测

4 结论

(1) 黄骅市土壤 8 种重金属元素中,只有 Pb, Cd, Cu 样点平均含量超过河北省土壤背景值,其他元素平均值均未超过,所有元素平均值都在国家土壤质量二级标准的范围内,因此目前来看黄骅市土壤重金属含量对于植物生长和人类健康还不构成危害,但是并不表示土壤重金属未产生累积污染。

(2) 黄骅市土壤 Pb, Hg, Cd, Cr, As, Cu 这 6 种元素拟合于指数模型, Zn, Ni 两种元素拟合于球状模型。Pb, Cd, Zn 这 3 种元素空间分布格局受到外界干扰,使得原有的空间分布格局发生一些改变。其他元素空间分布格局受非自然影响相对较小。

(3) 在黄骅市土壤重金属元素的空间分布预测图中, Pb, Cd, Cu 整体含量高,区域离散分布, Cr, Zn, Ni 整体含量低,连续集中分布。As 元素成岛状分布,分布集中于几个区域, Hg 成散点状分布于黄骅全县。工业生产和地质环境是影响重金属元素空间分布的主要原因。黄骅市土壤属于轻度污染状态,污

染最严重的地区是吕桥镇中部和齐家务乡西部。

参考文献:

[1] 钟巧,王勇辉,焦黎.夏尔希里地区土壤重金属含量特征及空间变异分析[J].水土保持研究,2016,23(3):360-365.

[2] 陈惠芳,李艳,吴豪翔,等.富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):164-169.

[3] 王本伟.长江中下游典型地区土壤:水稻系统重金属累计状况及影响因素分析[D].南京:南京农业大学,2012.

[4] 景丽洁,马甲.火焰原子吸收分光光度法测定污染土壤中 5 种重金属[J].中国土壤与肥料,2009,20(2):74-77.

[5] 杨亚鸽,崔立强,全桂香.原子吸收光谱法测定污染土壤中铅和镉的形态[J].光谱实验室,2013,30(2):991-994.

[6] 曲衍波.基于 GIS 的山区县域土地生态安全评价与土地利用优化调控研究[D].山东泰安:山东农业大学,2008.

[7] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.

[8] 陈宗娟,张倩,张强,等.天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J].生态与农村环境学报,2015,31(2):166-173.

[9] 周生路.土地评价学[M].南京:东南大学出版社,2006.

[10] 喻鹏,马腾,唐仲华,等.江汉—洞庭平原农业土壤重金属综合评价[J].江苏大学学报:自然科学版,2015,36(5):550-556.

[11] 庄腾飞,柳云龙,章立佳,等.上海城郊土壤重金属含量的空间变异与分布特征:以上海市闵行区为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(Z1):99-104.

[12] 许文强,罗格平,陈曦,等.天山北坡绿洲土壤有机碳和养分时空变异特征[J].地理研究,2006,25(6):1013-1021.

[13] 张敏.基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异研究[D].郑州:河南农业大学,2010.

[14] 刘爱利,王培法丁圆圆,等.地统计学概论[M].北京:科学出版社,2012.