

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.030

# 新疆于田县绿洲区土壤重金属空间分布特征与影响因素

陈云飞<sup>1,2</sup> 曾妍妍<sup>1,2</sup> 周金龙<sup>1,2</sup> 王松涛<sup>3</sup> 杜江岩<sup>3</sup> 刘延锋<sup>4</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052;  
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二水文工程地质大队, 昌吉 831100;  
4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

**摘要:** 以新疆于田县绿洲区为研究区,对1 165组表层土壤样品的重金属元素含量进行测定。通过综合运用多元统计分析、地统计学、空间自相关理论、空间分析和GIS技术相结合的方法,对研究区土壤重金属含量和空间分布特征及影响因素进行分析。结果表明:1 165组土壤采样点中,有3个取样点超过风险筛选值,非农用地土壤重金属元素含量均值均低于新疆土壤背景值,农用地中Cd、Hg、Cr含量均值大于新疆土壤背景值;Cd、Pb的变异函数理论模型为指数模型,Hg、As、Cr、Cu、Ni、Zn的变异函数理论模型为球状模型,Cd块金系数小于25%,说明Cd有较强的空间相关性,其他元素块金系数介于25%~50%之间,有明显的空间相关性;土壤重金属空间自相关莫兰指数均大于0。县域尺度内,土壤重金属具有一定的空间正相关分布,其空间分布格局总体呈从研究区中心向四周含量逐渐减小的趋势。土壤重金属元素含量在不同成土母质、土壤类型和土地利用类型下呈现的分布特征不同。Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn具有相同的来源,其含量还受土壤质地的影响。

**关键词:** 土壤重金属; 变异函数; 自相关; 空间分布特征; 新疆于田县

**中图分类号:** S153.6<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0263-11

## Spatial Distribution Characteristics and Influence Factors of Soil Heavy Metal Contents in Oasis Area of Yutian County, Xinjiang

CHEN Yunfei<sup>1,2</sup> ZENG Yanyan<sup>1,2</sup> ZHOU Jinlong<sup>1,2</sup> WANG Songtao<sup>3</sup> DU Jiangyan<sup>3</sup> LIU Yanfeng<sup>4</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China  
2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China  
3. No. 2 Hydrogeology and Engineering Geology Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji 831100, China  
4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Totally 1 165 surface soil samples for heavy metal analysis were collected in oasis area of Yutian County, Xinjiang. Spatial distribution and influence factors of heavy metal elements in soils in the study area were analyzed by means of multivariate statistical analysis, geostatistics, spatial autocorrelation, spatial analysis and GIS technology. Results showed that among 1 165 soil samples, three of which had As contents greater than the risk screening values. Average contents of heavy metal elements in non-agricultural lands were lower than that of soil background values in Xinjiang. Average values of Cd, Hg and Cr contents in agricultural land were greater than that of soil background values in Xinjiang. The theoretical models for variation function of Cd and PB were exponential model, while the theoretical models for variation function of Hg, As, Cr, Cu, Ni and Zn were spherical model. Nugget value of Cd was less than 25%, indicated a relatively strong spatial correlation. Nugget value of other elements ranged between 25% and 50%, indicated significant spatial correlations. As for soil heavy metals, the Moran's I indexes of spatial autocorrelation were greater than 0. There was a positive spatial correlation distribution of soil heavy metal elements in the county scale. And the spatial distribution of soil heavy metal contents in oasis area of Yutian County showed a general decreasing trend from the center

收稿日期: 2018-10-29 修回日期: 2018-12-30

基金项目: 中国地质调查局中央返还两权款资金项目(S15-1-LQ)

作者简介: 陈云飞(1993—),男,博士生,主要从事干旱区绿洲水土环境地球化学研究,E-mail: 892978365@qq.com

通信作者: 周金龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区地下水利用与保护、绿洲生态地球化学研究,E-mail: zjzhoujl@163.com

of the study area to surrounding areas. Distribution of soil heavy metal contents in the Yutian County varied in different parent materials, soil types and land use patterns. Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni and Zn in soils derived from the same source. However, the contents were affected by soil texture as well.

**Key words:** soil heavy metals; variogram; autocorrelation; spatial distribution characteristics; Yutian County, Xinjiang

## 0 引言

土壤重金属污染是土壤污染的主要形式之一,也是环境科学领域的热点问题<sup>[1-2]</sup>。2014年原国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,土壤总的点位超标率为16.1%,其中镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)8种无机污染物均有超标。土壤重金属含量主要受自然因素和人为因素的影响,过量的重金属积累也可能成为地表水、地下水和生物等的污染源<sup>[3]</sup>。因此,查明土壤重金属的空间分布特征对土壤生态环境保护和修复至关重要。

地统计学通过获得半变异函数而量化空间分布模式,已经被广泛应用于土壤重金属空间分布特征研究<sup>[4-5]</sup>。在地统计学中,由于空间数据的复杂性,为使半变异函数拟合精度高,在拟合时通常会从空间预测中删除异常值<sup>[6-7]</sup>。然而,在土壤重金属评估中,异常值可能代表潜在的严重污染区域<sup>[8]</sup>。空间自相关分析是另一种探求变量在空间内分布模式的方法,已被应用于多个领域<sup>[9-10]</sup>,它可以有效地识别出土壤重金属含量热点、空间聚类和空间异常值<sup>[11]</sup>。HUO等<sup>[12]</sup>克服半变异函数的拟合易受到主观因素的影响,结合空间自相关理论,提高了传统地质统计学在空间分布探究的准确性。

新疆维吾尔自治区(简称新疆)和田地区于田县全县耕地面积335.8 km<sup>2</sup>,人均耕地0.116 hm<sup>2</sup>,是

塔里木盆地南缘绿洲带中一个以农为主、农牧结合的国家级扶贫开发重点县。目前,许多学者从流域尺度、县域尺度和农田尺度等对新疆博斯腾湖流域、额尔齐斯河流域、渭干河-库车河绿洲、博尔塔拉河流域、艾比湖流域农田,以及若羌县、乌苏市、奎屯市、独山子区和各地州农田等开展了土壤重金属污染现状和空间分布等方面的研究<sup>[13-21]</sup>。而对于新疆塔里木盆地南缘绿洲带的土壤重金属相关研究较少。

本文基于新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二水文工程地质大队和新疆农业大学于2015—2018年在新疆和田-若羌绿洲带展开的1:25万土地质量地球化学调查工作成果,采用地统计学结合空间自相关理论和多元统计分析等技术手段,以于田县绿洲区为研究区,开展土壤重金属空间分布特征及影响因素研究,以为当地绿洲农田绿色或无公害农产品生产、土壤污染防治提供理论依据,同时为当地农业精准扶贫提供有力保障。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

于田县地处塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山中部北麓,研究区位于于田县中部绿洲区(东经81°9′~82°3′,北纬36°30′~37°5′),详见图1。于田县东临民丰县,西接策勒县,北与沙雅县接壤,南北长约466 km,东西宽30~120 km,中部一条主干公路

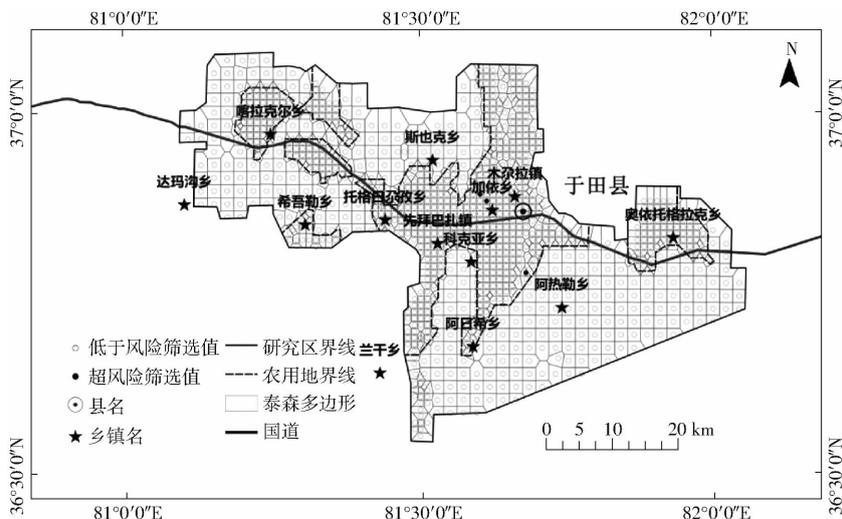


图1 研究区位置及采样点分布图

Fig.1 Location of study area and distribution of sampling points

(G315)横穿东西。于田县总面积  $4.032 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中沙漠、戈壁和山区面积之和约为总面积的 94%。研究区面积为  $2.42 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 占总面积的 6%。属暖温带大陆性干旱气候, 四季分明, 干旱少雨, 年降水量 33.5 mm, 多年平均气温为 12.2℃, 全年日照时数为 2 610.6 h, 太阳总辐射量 5 782 ~ 6 343 MJ/m<sup>2</sup>。春季多风, 多年平均风速 2.1 m/s, 年均大风 11.5 d, 多年平均沙尘 32.9 d, 一般集中在 3 月下旬至 5 月下旬。土壤类型主要为林灌草甸土、棕漠土和灌淤土。第四纪沉积类型主要为冲积物、风积物和残坡积物。土地利用方式多样, 以农业种植为主, 主要作物有小麦、水稻、玉米、核桃、红枣、玫瑰花、设施农业大棚蔬菜和肉苁蓉等。

## 1.2 土样采集与测试

取样时间 2016 年 7 月, 控制面积约 2 420 km<sup>2</sup>。土壤样品的采样深度为 0 ~ 20 cm, 按照网格法取样, 农用地取样 716 组, 取样密度为 1 点/km<sup>2</sup>; 非农用地取样 449 组, 取样密度为 1 点/(4 km<sup>2</sup>)。共计 1 165 组, 详见图 1。

样品由国土资源部乌鲁木齐矿产资源监督检测中心(新疆维吾尔自治区矿产实验研究所)进行测试。全量测试项目及其测试方法、检出限见表 1。

表 1 土壤重金属元素全量测试方法及检出限  
Tab.1 Determination and detection limit of soil heavy metal elements

元素	检测方法	检出限
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.049%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X 射线荧光光谱分析法	0.004%
Cr		3.505 mg/kg
Cu		0.952 mg/kg
Ni	电感耦合等离子发射光谱仪法	0.744 mg/kg
Zn		0.646 mg/kg
Cd		0.002 mg/kg
Pb	电感耦合等离子体质谱法	0.65 mg/kg
As		0.112 mg/kg
Hg	原子荧光法	0.005 mg/kg
pH 值	电位法	0.03

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 变异函数

变异函数是地统计学所特有的基本工具, 其能够清楚地描述区域化变量的结构特性和随机性变化, 是地统计学计算的基础<sup>[22-23]</sup>。关于地统计学的基本理论和具体计算方法详见文献[24]。

地统计学中的半变异函数计算公式为

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x'_i) - Z(x'_i + h))^2 \quad (1)$$

式中  $h$ ——两样本点空间分隔距离

$Z(x'_i)$ —— $Z(x')$  在空间位置  $x'_i$  上的土壤观测值

$Z(x'_i + h)$ —— $Z(x')$  在空间位置  $x'_i + h$  上的土壤观测值

$\gamma^*(h)$ ——实验变异函数

$N(h)$ ——样点对的个数

本文计算半变异函数借助 SPSS 23.0 软件中的 Kolmogorov - Smirnov 正态性检验模块对 1 165 组土壤重金属元素进行正态分布检验, 若服从正态分布, 则采用 GS<sup>+</sup> 9.0 软件进行半变异函数的计算和高斯模型、球状模型等理论模型的拟合。如果数据不服从正态分布, 则需对其进行对数转换使其接近于正态分布后进行相关计算分析。

### 1.3.2 空间自相关分析

空间自相关分析是指邻近空间区域单位上某变量的同一属性值之间的相关程度, 包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。全局空间自相关分析主要用莫兰指数 (Moran's  $I$ ) 来反映土壤重金属元素在整个研究区域范围内的空间聚集程度<sup>[25]</sup>。Moran's  $I$  计算公式为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中  $I$ ——莫兰指数

$n$ ——土壤重金属元素含量空间的区域数

$x_i$ ——第  $i$  个区域内的土壤重金属元素含量

$x_j$ ——第  $j$  个区域内的土壤重金属元素含量

$\bar{x}$ ——研究区域的土壤重金属元素含量的平均值

$W_{ij}$ ——空间权重矩阵, 一般为对称阵

局域空间自相关指标 (Local indicators of spatial association, LISA) 反映一个采样区域土壤有机碳与邻近采样区域土壤有机碳的相关程度<sup>[26]</sup>。Moran's  $I$  的 LISA 计算公式为

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中  $S$ —— $x_i$  的标准差

$I_i$ ——局域空间自相关指标

全局空间自相关分析主要由 Moran's  $I$  反映采样区域土壤重金属元素在于田县区域上的空间分布情况, Moran's  $I$  的范围在  $[-1, 1]$  之间。若 Moran's  $I$  大于 0, 则说明研究区域存在空间正相关; 反之 Moran's  $I$  小于 0, 则说明研究区域存在空间负相关; 若 Moran's  $I$  等于 0, 则说明研究区域不存在自相关性, 呈随机分布。为方便空间自相关计算分析, 本文

将取样点生成泰森多边形(图1)后借助 GeoDA 空间分析软件进行土壤重金属元素含量空间自相关分析,并将计算结果导入 ArcGIS 10.4 软件中进行相关图件的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量描述性统计特征

本文中于田县绿洲区全部土壤取样点个数为 1 165 个,其中农用地土壤取样点为 716 个,非农用地取样点 449 个。利用 SPSS 23.0 分别对于田县绿洲区土壤取样点、农用地土壤取样点和非农用地土壤取样点的 8 种重金属元素含量进行统计分析(表 2)。合理采样数由 95% 显著性水平对应的正态分布法确定,计算公式为

$$N = 3.84(C_v/k)^2 \quad (4)$$

式中  $C_v$ ——每种土壤重金属元素的变异系数

$k$ ——相对误差,取 5%<sup>[27]</sup>

由表 2 可看出,于田县绿洲区 8 种土壤重金属

含量均值整体上比较低,除 As 存在个别超标点外,其余元素均未超过风险筛选值。As 大于风险筛选值的采样点分布在农用地范围内的加依乡和阿热勒乡,详见图 1。整体上来看,土壤重金属含量均值与新疆背景值相比,除 Cd 和 Hg 外,其余 6 种重金属元素含量均值低于新疆土壤背景值;非农用地 8 种土壤重金属元素含量均值均低于新疆土壤背景值;农用地 8 种土壤重金属元素含量均值中 Cd、Hg 和 Cr 均值大于新疆土壤背景值,其余重金属元素均值低于新疆背景值。非农用地土壤重金属元素含量均值均低于农用地重金属元素含量均值。从变异系数来看,除 Pb 呈弱变异性( $C_v < 10%$ ),其余 7 种土壤重金属元素呈中等变异性( $10% < C_v < 100%$ )。合理采样数的计算结果表明,无论是于田县绿洲区整体土壤取样点还是非农用地土壤取样点或农用地土壤取样点所获取的数据量均大于显著水平为 95% 时所需的样品数据,说明这些数据能够反映于田县绿洲区土壤重金属元素的分布状况。

表 2 土壤重金属含量(质量比)描述统计特征

Tab. 2 Descriptive statistics of heavy metal content in soils

项目	元素	最小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	最大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系 数/%	新疆背景值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	风险筛选值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	N/个
全部取样点(n=1165)	Cd	0.070	0.270	0.130	0.020 0	18.54	0.120	0.6	53
	Hg	0.007	0.072	0.017	0.005 2	30.43	0.017	3.4	144
	As	3.300	39.600	9.120	2.590 0	28.41	11.200	25.0	124
	Pb	12.500	29.700	16.990	1.410 0	8.32	19.400	170.0	11
	Cr	27.100	97.100	47.690	7.640 0	16.03	49.300	250.0	40
	Cu	11.900	35.500	17.810	2.810 0	15.80	26.700	100.0	38
	Ni	15.300	67.200	23.160	4.120 0	17.77	26.600	190.0	49
	Zn	36.800	93.800	52.160	8.370 0	16.04	68.800	300.0	40
非农用地取样点(n=449)	Cd	0.070 0	0.180 0	0.120 0	0.020 0	16.89	0.120	0.6	44
	Hg	0.007 2	0.040 3	0.014 9	0.003 4	22.52	0.017	3.4	78
	As	3.300 0	15.600 0	7.800 0	1.470 0	18.82	11.200	25.0	54
	Pb	13.300 0	20.600 0	16.320 0	1.080 0	6.64	19.400	170.0	7
	Cr	31.400 0	80.100 0	44.030 0	6.100 0	13.86	49.300	250.0	30
	Cu	11.900 0	29.300 0	16.280 0	1.920 0	11.78	26.700	100.0	21
	Ni	15.300 0	31.900 0	20.900 0	2.560 0	12.24	26.600	190.0	23
	Zn	37.300 0	88.400 0	47.430 0	6.680 0	14.08	68.800	300.0	30
农用地取样点(n=716)	Cd	0.070 0	0.270 0	0.130 0	0.020 0	18.63	0.120 0	0.6	53
	Hg	0.007 0	0.071 8	0.018 4	0.005 7	30.92	0.017 0	3.4	147
	As	5.100 0	39.600 0	9.950 0	2.790 0	28.06	11.200 0	25.0	121
	Pb	12.500 0	29.700 0	17.410 0	1.430 0	8.23	19.400 0	170.0	10
	Cr	27.100 0	97.100 0	49.980 0	7.620 0	15.25	49.300 0	250.0	36
	Cu	12.300 0	35.500 0	18.770 0	2.860 0	15.25	26.700 0	100.0	36
	Ni	16.800 0	67.200 0	24.580 0	4.270 0	17.37	26.600 0	190.0	46
	Zn	36.800 0	93.800 0	55.120 0	7.950 0	14.43	68.800 0	300.0	32

注:风险筛选值依据 GB 15618—2018《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》,新疆背景值参照文献[28-32]。

### 2.2 土壤重金属含量的空间变异特征

通过 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验,表 3 可

以看出于田县绿洲区土壤重金属元素含量均属于正态分布( $P_{(K-S)} > 0.05$ )。基于 GS<sup>+</sup> 9.0 软件对土壤

重金属元素含量的变异函数和相关参数的计算结果详见表3。半变异函数理论模型主要为指数模型和球状模型等,主要参数包括块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0 + C$ )、决定系数( $R^2$ )和残差(RSS)等。空间变异性强弱可以根据块金值与基台值的比值,即块金系数进行划分。块金效应表示由随机部分引起的空间变异

性占总体变异的比,块金系数小于25%说明土壤重金属元素有很强的空间相关性,25%~50%说明土壤重金属元素有明显的空间相关性,50%~75%说明土壤重金属元素有中等的空间相关性,大于75%时土壤重金属元素空间相关性弱,变异主要由随机变异组成<sup>[32]</sup>。

表3 土壤重金属元素含量的理论变异函数模型及相关参数

Tab.3 Theoretical variogram model and related parameters of soil heavy metal content

元素	$P_{(K-S)}$	分布类型	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金系数/ %	变程/ km	$R^2$	RSS	ME/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	RMSSE
Cd	0.120	正态	指数	$6.50 \times 10^{-5}$	$5.27 \times 10^{-4}$	12.33	14.1	0.605	$6.24 \times 10^{-9}$	$3.98 \times 10^{-5}$	0.925
Hg	0.123	正态	球状	$7.34 \times 10^{-3}$	0.015	48.35	91.7	0.925	$5.72 \times 10^{-6}$	$-7.03 \times 10^{-4}$	0.911
As	0.122	正态	球状	$6.03 \times 10^{-3}$	0.013	45.48	83.0	0.823	$1.17 \times 10^{-5}$	$3.93 \times 10^{-3}$	0.905
Pb	0.062	正态	指数	0.966	2.064	46.80	30.3	0.656	$2.60 \times 10^{-3}$	$-7.91 \times 10^{-3}$	1.107
Cr	0.073	正态	球状	$1.75 \times 10^{-3}$	$5.10 \times 10^{-3}$	34.31	81.6	0.755	$3.88 \times 10^{-6}$	$-2.05 \times 10^{-3}$	0.962
Cu	0.103	正态	球状	$2.15 \times 10^{-3}$	$4.53 \times 10^{-3}$	47.46	78.4	0.893	$1.11 \times 10^{-6}$	0.017	0.964
Ni	0.093	正态	球状	$2.43 \times 10^{-3}$	$5.33 \times 10^{-3}$	45.59	81.8	0.817	$2.06 \times 10^{-6}$	$-3.71 \times 10^{-4}$	0.920
Zn	0.056	正态	球状	$2.28 \times 10^{-3}$	$4.84 \times 10^{-3}$	47.11	70.2	0.753	$2.06 \times 10^{-6}$	0.057	0.903

由表3可看出,Cd和Pb的变异函数理论模型为指数模型,Hg、As、Cr、Cu、Ni、Zn的变异函数理论模型为球状模型。于田县绿洲区土壤重金属元素中Cd块金系数小于25%,说明Cd有强的空间相关性,受到人为干扰影响较小,这主要是自然因素作用的结果;其他元素块金系数介于25%~50%之间,说明其是人为因素和自然因素共同作用的结果。所有土壤重金属元素的 $R^2$ 都在0.60之上且RSS均较小,说明8种土壤重金属元素变异函数理论模型拟合结果合理。

## 2.3 土壤重金属含量的空间自相关分析

### 2.3.1 土壤重金属含量全局相关性分析

于田县绿洲区土壤重金属元素含量全局自相关分析结果详见表4。于田县土壤重金属元素含量的Moran's  $I$ 均大于0,从全局角度来看,土壤重金属元素含量在于田县县域尺度内具有一定的空间正相关分布,即土壤重金属元素含量高的土壤周围土壤重金属元素含量也较高,土壤重金属元素含量低的土壤周围土壤重金属元素含量也较低。同时也说明土壤重金属元素含量在研究区存在一定的聚集分布,土壤重金属元素含量属于高高聚集和低低聚集,其中高值指该取样区域值大于均值,低值指该取样区域值小于均值。

为了验证Moran's  $I$ 是否显著,选取蒙特卡罗迭代法对Moran's  $I$ 系数进行假设检验,迭代次数为999次,得到土壤重金属元素全局自相关结果(表4): $Z$ 值均大于1.96, $P$ 值均小于0.05,表明研究对象的空间自相关Moran's  $I$ 指数具有统计学意义。

表4 土壤重金属元素含量Moran's  $I$ 和蒙特卡罗假设检验结果Tab.4 Moran's  $I$  of soil heavy metal content and results of Monte Carlo hypothesis test

元素	Moran's $I$	$Z$	$P$
Cd	0.256	12.90	0.001
Hg	0.439	21.09	0.001
As	0.457	24.20	0.001
Pb	0.308	15.93	0.001
Cr	0.508	25.96	0.001
Cu	0.464	22.84	0.001
Ni	0.432	21.55	0.001
Zn	0.476	23.13	0.001

### 2.3.2 土壤重金属含量局部空间相关性分析

对于田县绿洲区土壤重金属元素含量进行局部空间自相关分析,结果详见图2。从图2可看出土壤重金属元素含量分布呈现不同的特性。采样区域8种土壤重金属元素含量高、周围含量高(高-高),这类区域主要分布在研究区中部农用地;采样区域土壤重金属元素含量低、周围含量低(低-低),这类区域主要分布在研究区西北和东南非农用地;采样区域土壤重金属元素含量低、周围含量高(低-高)和采样区域土壤重金属元素含量高、周围含量低(高-低),这两类区域主要零星分布在高-高区或低-低区周围;其他区域则为无显著自相关性。

## 2.4 土壤重金属含量空间分布特征

平均误差和标准化均方根误差是判断插值模型精度的重要参数<sup>[33]</sup>。平均误差(Mean error, ME)越接近于0,标准化均方根误差(Root mean square

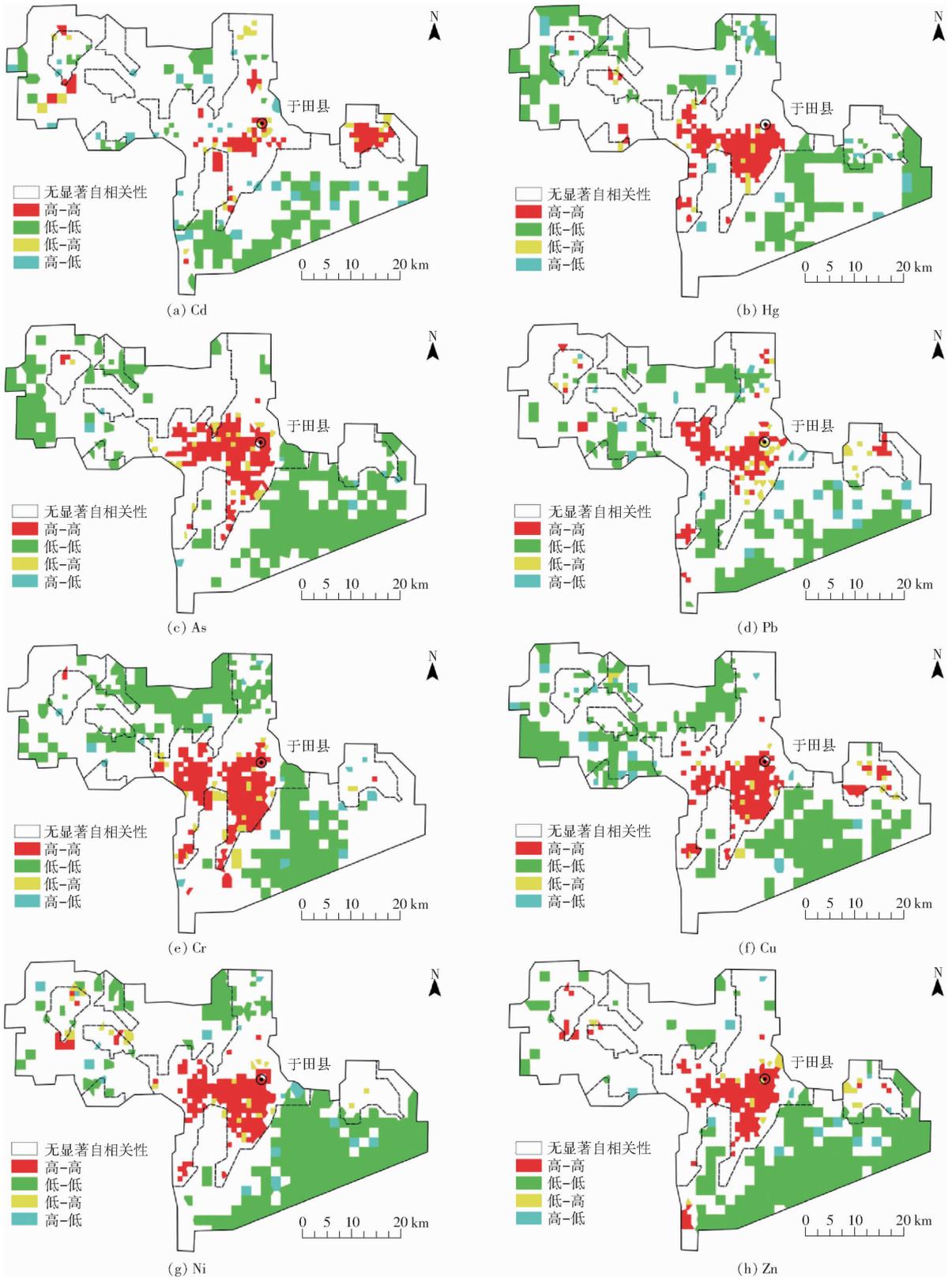


图2 局域空间自相关聚集图

Fig.2 Aggregation maps of local indicators of spatial association

standardized error, RMSSE) 越接近 1, 精度越高。由表 3 可知, 各元素预测平均误差都接近于 0, 标准化均方根误差都在 1 左右, 表明各土壤重金属元素含量在拟合的变异函数理论模型下的预测精度较高, 预测结果可反映出于田县绿洲区土壤重金属元素分

布状况。通过 GS+ 9.0 软件计算普通克里金插值, 将结果导入 ArcGIS 10.4 软件中进行各土壤重金属元素含量空间分布图绘制, 其含量分级标准采用等间距分级<sup>[34]</sup>, 结果详见图 3。

由图 3 可看出, 于田县绿洲区土壤重金属元素

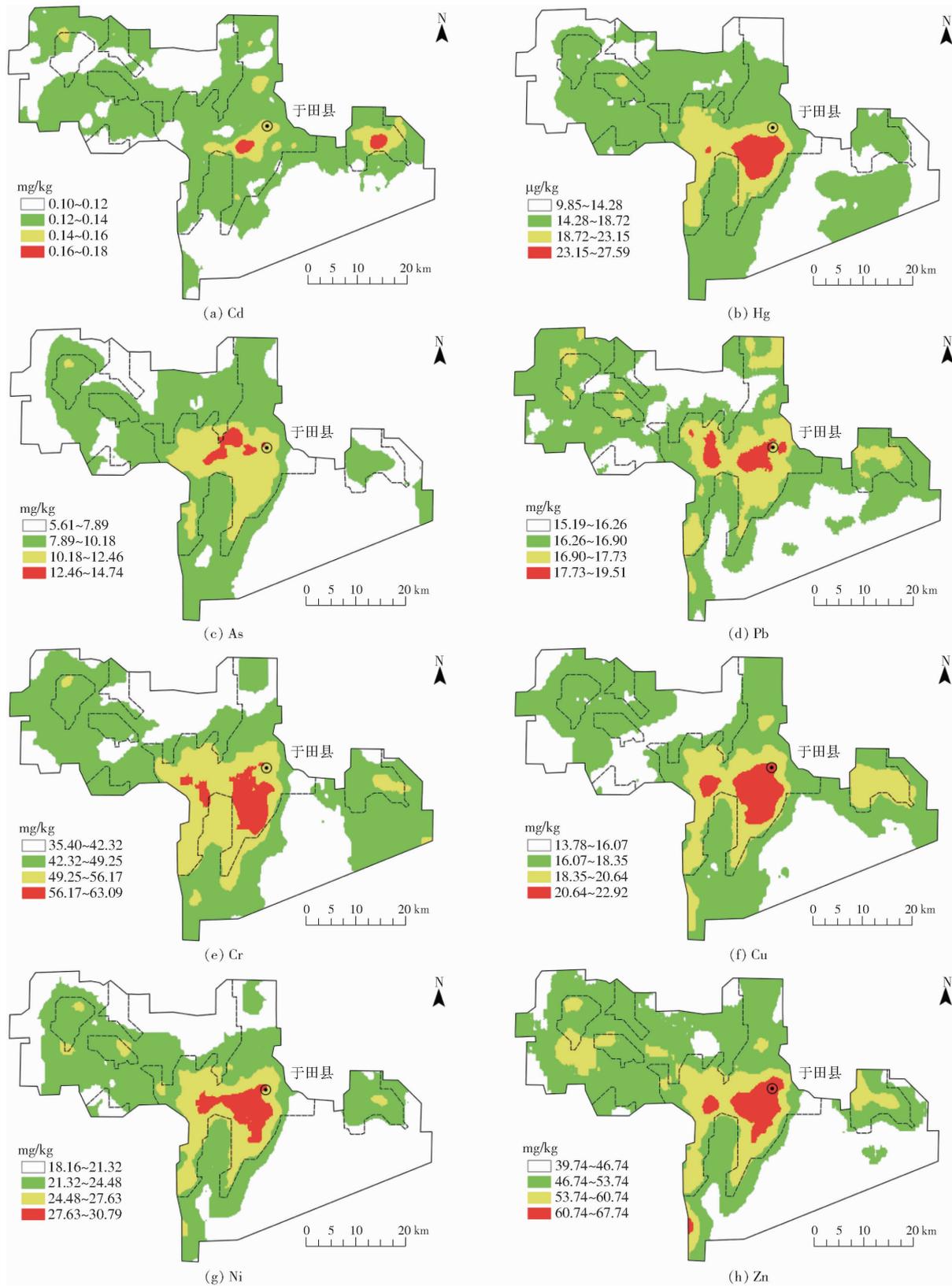


图 3 土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution maps of heavy metal content in soils

含量空间分布格局总体呈从研究区中心向四周含量逐渐减小的趋势,同时土壤重金属元素含量在农用地和非农用地呈现明显的分界性。Cd 高值区主要分布在县城区域、木孜拉镇和奥依托格拉克乡;Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 高值区主要分布在县城区域、

木孜拉镇和加依乡。另外,通过图 2 和图 3 的对比可以看出,由普通克里金插值法预测的土壤重金属元素含量的空间分布情况与局部空间相关性分布情况结果基本一致,说明在县域尺度下,于田县绿洲区土壤重金属元素在半变异函数计算范围和空间自相

关距离一致时含量呈现显著的空间异质性和空间相关性。

## 2.5 土壤重金属元素含量影响因素

土壤重金属元素分布主要受成土母质、土壤类型和土地利用方式等因素的影响<sup>[35-36]</sup>。由上文可知,于田县绿洲区土壤重金属元素含量中仅有3个取样点的As含量超过国家标准风险筛选值,从8种

土壤重金属元素含量分布特征可以看出,高值区域和空间自相关性的高-高区域集中分布在研究区农用地或人类活动频繁的县城区域。因此,本节仅针对农用地范围内的取样点开展土壤重金属元素含量影响因素分析,将8种土壤重金属元素均值含量按照不同成土母质、土壤类型和土地利用类型进行统计,结果详见表5。

表5 不同成土母质、土壤类型和土地利用类型的土壤重金属平均含量

Tab.5 Average content of heavy metals in soils of different soil parent materials, soil types and land use patterns

项目		Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
成土母质	沼泽沉积物	0.13	0.014 8	7.37	15.80	41.57	15.47	21.33	52.33
	残坡积物	0.13	0.017 5	8.90	17.34	49.16	19.01	23.96	52.96
	风积物	0.13	0.018 9	10.19	17.46	50.77	18.69	24.74	54.54
	冲积物	0.13	0.018 3	9.95	17.39	49.63	18.81	24.59	55.84
土壤类型	棕漠土	0.13	0.013 7	6.60	16.18	40.13	16.12	19.27	41.67
	林灌草甸土	0.12	0.015 1	8.30	16.34	43.89	15.96	25.15	49.05
	灌淤土	0.13	0.018 6	10.03	17.45	50.27	18.88	24.61	55.43
土地利用类型	高覆盖草地	0.13	0.014 1	7.60	16.13	41.72	15.95	21.73	52.03
	灌林地	0.12	0.016 5	8.17	16.60	44.30	17.18	22.10	47.50
	居民区	0.15	0.021 6	11.78	18.35	54.04	20.40	26.76	61.38
	沙滩地	0.11	0.018 8	9.25	16.73	53.51	18.95	24.05	52.86
	未利用土地	0.12	0.018 7	9.02	17.14	53.28	19.55	24.59	54.62
	其他林地	0.12	0.015 0	8.40	17.40	47.44	17.94	22.36	51.70
	疏林地	0.13	0.020 4	9.69	17.27	51.63	18.80	25.16	54.75
	低覆盖草地	0.12	0.016 5	9.51	16.82	48.39	17.52	22.66	50.80
	中覆盖草地	0.12	0.014 7	8.47	16.61	42.79	16.36	22.35	49.90
	果园林地	0.14	0.020 5	10.31	17.85	52.02	19.64	25.62	57.82
	旱田	0.13	0.019 0	10.37	17.58	51.03	19.24	25.20	56.44

由表5可以看出,Cd在4种成土母质类型下的含量均值一样,为0.13 mg/kg;Hg、As、Pb、Cr和Ni不同成土母质类型按照其均值由大到小排序为风积物、冲积物、残坡积物、沼泽沉积物;Cu不同成土母质类型按照其均值由大到小排序为残坡积物、冲积物、风积物、沼泽沉积物;Zn不同成土母质类型按照其均值由大到小排序为冲积物、风积物、残坡积物、沼泽沉积物。Cd、Cu和Ni在不同土壤类型下均值含量由大到小排序分别为棕漠土和灌淤土、林灌草甸土、灌淤土、棕漠土、林灌草甸土、林灌草甸土、灌淤土、棕漠土;Hg、As、Pb、Cr和Zn不同成土母质类型按照其均值由大到小排序均为灌淤土、林灌草甸土、棕漠土。土壤重金属元素含量在不同土地利用类型按照其均值的大小排序结果表明,土地利用方式为居民区、果园林地、高覆盖草地和旱田土壤重金属元素含量相对较高;土地利用类型为低覆盖草地、中覆盖草地和灌林地土壤重金属元素含量相对较低。综上所述,于田县绿洲区农用地土壤重金属在不同成土母质、土壤类型和土地利用类型下呈现的

分布特征也不同,这也间接表明于田县绿洲区农用地土壤重金属受自然因素和人为因素共同作用。

## 3 讨论

通过对于田县绿洲区土壤重金属含量进行统计,其含量总体较低,As点位超标率为0.26%,远低于《全国土壤污染状况调查公报》结果。根据普通克里金插值空间分布结果,可以看出高值区分布在农用地且靠近县城或周边人类活动密集区域。为进一步查明土壤重金属元素之间是否同源或者与土壤母质之间是否互相影响,对土壤重金属元素和 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 和Corg等土壤质地代表性元素做相关分析,结果见表6<sup>[37]</sup>。由表6可看出,除Cd以外,其余7种重金属元素之间存在一定的相关性,同时这7种重金属元素与 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 和Corg之间存在相对良好的相关性,说明它们具有相同来源的可能性较大,同时含量的高低受土壤质地的影响。前文提到As存在3个超风险筛选值取样点,3个点呈现点状分布,这可能是由人为农业活动作用叠加造成。

表6 土壤重金属、土壤质地指标间相关系数

Tab.6 Correlation coefficient between content of soil heavy metals and soil texture indicators

元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Corg
Cd	1										
Hg	0.227**	1									
As	0.172**	0.477**	1								
Pb	0.427**	0.398**	0.437**	1							
Cr	0.193**	0.582**	0.574**	0.517**	1						
Cu	0.378**	0.543**	0.545**	0.650**	0.723**	1					
Ni	0.263**	0.537**	0.521**	0.574**	0.684**	0.639**	1				
Zn	0.416**	0.566**	0.552**	0.687**	0.662**	0.774**	0.630**	1			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.219**	0.534**	0.470**	0.574**	0.795**	0.685**	0.606**	0.608**	1		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.315**	0.620**	0.630**	0.615**	0.903**	0.841**	0.719**	0.766**	0.846**	1	
Corg	0.333**	0.499**	0.455**	0.383**	0.460**	0.510**	0.477**	0.626**	0.420**	0.571**	1

注:\*\*表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

## 4 结论

(1)新疆于田县绿洲区土壤重金属含量较低,除As外,其余元素均未超过风险筛选值。非农用地土壤重金属元素含量均值均低于新疆土壤背景值;农用地中Cd、Hg和Cr含量均值大于新疆土壤背景值。Pb呈弱变异性,其余7种土壤重金属元素呈中等变异性。

(2)Cd和Pb的变异函数理论模型为指数模型,Hg、As、Cr、Cu、Ni、Zn的变异函数理论模型为球状模型。Cd块金系数小于25%,说明Cd有较强的空间相关性,受到人为干扰影响较小,这主要是自然因素作用的结果;其他元素块金系数介于25%~

50%之间,这是人为因素和自然因素共同作用的结果。于田县土壤重金属空间自相关Moran's I均大于0,在县域尺度内具有一定的空间正相关分布。

(3)于田县绿洲区土壤重金属元素含量空间分布格局总体呈从研究区中心向四周含量逐渐减小的趋势,同时土壤重金属元素含量在农用地和非农用地呈现明显的分界性。

(4)于田县绿洲区土壤重金属在不同成土母质、土壤类型和土地利用类型下呈现的分布特征也不同,Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn具有相同的来源,含量受土壤质地的影响,As元素存在点状污染,这可能与人为农业活动有关。

## 参 考 文 献

- [1] ZANG Fei, WANG Shengli, NAN Zhongren, et al. Accumulation, spatio-temporal distribution, and risk assessment of heavy metals in the soil-corn system around a polymetallic mining area from the Loess Plateau, northwest China[J]. Geoderma, 2017, 305:188-196.
- [2] BRYAN G W, LANGSTON W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review[J]. Environmental Pollution, 1992, 76(2):89-131.
- [3] GUAGLIARDI I, CICCHELLA D, DE ROSA R. A geostatistical approach to assess concentration and spatial distribution of heavy metals in urban soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 2012, 223(9):5983-5998.
- [4] WU Wei, XIE Deti, LIU Hongbin. Spatial variability of soil heavy metals in the Three Gorges Area: multivariate and geostatistical analyses[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(1-4):63-71.
- [5] BORKOWSKI A S, KWIATKOWSKA-MALINA J. Geostatistical modelling as an assessment tool of soil pollution based on deposition from atmospheric air[J]. Geosciences Journal, 2017, 21(4):645-653.
- [6] HUANG Zhigang, LI Baoguo, HU Kelin. Characteristics of the spatio-temporal changes of soil organic matter of sugarcane field in red soil hill areas[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11):58-63.
- [7] ZHANG Chaosheng, DAVID M. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. Geoderma, 2004, 119(3-4):261-275.
- [8] 李想,江雪昕,高红菊.太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):247-253. LI Xiang, JIANG Xuexin, GAO Hongju. Pollution assessment and source analysis of soil heavy metals in Taihu lake basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.):247-253. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s038&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s038&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.038. (in Chinese)
- [9] GRIFFITH D A, CHUN Yongwang. Spatial autocorrelation in spatial interactions models: geographic scale and resolution implications for network resilience and vulnerability[J]. Networks and Spatial Economics, 2015, 15(2):337-365.

- [10] ZHAO Xiaofeng, HUANG Xianjin, LIU Yibo. Spatial autocorrelation analysis of Chinese inter-provincial industrial chemical oxygen demand discharge[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2012, 9(6):2031–2044.
- [11] OVERMARS K P, KONING G H J D, VELDKAMP A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2–3):257–270.
- [12] HUO Xiaoni, ZHANG Weiwei, SUN Danfeng, et al. Spatial pattern analysis of heavy metals in Beijing agricultural soils based on spatial autocorrelation statistics[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2011, 8(6):2074–2089.
- [13] 杨奇勇,谢运球,罗为群,等. 基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 248–254.  
YANG Qiyong, XIE Yunqiu, LUO Weiqun, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metals content based on geostatistics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12):248–254. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171229&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171229&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.029. (in Chinese)
- [14] 蒲佳,马龙,吉力力·阿不都外力,等. 常规方法对新疆地方土壤元素空间分析及重金属风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6):1166–1176.  
PU Jia, MA Long, JILILI·Abuduwaili, et al. The spatial analysis of soil elements and a risk assessment of heavy metals based on regular methods in the Xinjiang local region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1166–1176. (in Chinese)
- [15] 史磊,周华荣,温彬. 额尔齐斯河土壤重金属含量空间变异特征[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6):147–151.  
SHI Lei, ZHOU Huarong, WEN Bin. Spatial variabilities of heavy metals and salt contents in soils of Irtysh River Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6):147–151. (in Chinese)
- [16] 麦尔耶姆·亚森,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,等. 渭干河-库车河绿洲土壤重金属分布特征与生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20):226–233.  
MAIERYEMU Yasen, MAMAT Sawut, NIGELA Taxipulati, et al. Distribution of heavy metal pollution and assessment of its potential ecological risks in Ugan–Kuqa River Delta of Xinjiang[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(20):226–233. (in Chinese)
- [17] 丁之勇,马龙,吉力力·阿不都外力,等. 新疆博尔塔拉河流域土壤元素空间变异性及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(6):939–948.  
DING Zhiyong, MA Long, JILILI·Abuduwaili, et al. Spatial variations and influence factor analysis of heavy metals in topsoil of Bortala River Basin, Northwest China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6):939–948. (in Chinese)
- [18] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,阿吉古丽·马木提,艾尼瓦尔·买买提. 新疆和硕绿洲农田土壤重金属污染及生态风险[J]. *地球与环境*, 2018, 46(1):66–75.  
EZIZ Mamattursun, MAMUT Ajigul, MOHAMMAD Anwar. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of farmland soils hoshut Oasis, Xinjiang uyghur autonomous region, China[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(1):66–75. (in Chinese)
- [19] 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清,等. 艾比湖流域农田土壤重金属的环境风险及化学形态研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(9):1198–1206.  
ZHANG Zhaoyong, JILILI·Abuduwaili, JIANG Fengqing, et al. Environment risk and chemical forms of heavy metals in farmland of Ebinur Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9):1198–1206. (in Chinese)
- [20] 曾妍妍,周金龙,王松涛,等. 新疆若羌县农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(9): 87–91.  
ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, WANG Songtao, et al. Distribution characteristics and assessment for farmland soil heavy metals pollution in Ruoqiang County of Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(9):87–91. (in Chinese)
- [21] 赖营帅,马媛媛,王卫,等. 新疆“金三角”地区重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境化学*, 2016, 35(7):1381–1389.  
LAI Yingshuai, MA Yuanyuan, WANG Wei, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in the “Golden Triangle” region, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(7):1381–1389. (in Chinese)
- [22] 任力民,贾登泉,王飞. 新疆农田土壤重金属含量调查与评价[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(9):1760–1764.  
REN Limin, JIA Dengquan, WANG Fei. Preliminary survey and evaluation of heavy metal content in farmland soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(9):1760–1764. (in Chinese)
- [23] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8):1246–1266.
- [24] 王圣伟,冯娟,刘刚,等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(6):128–135.  
WANG Shengwei, FENG Juan, LIU Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6):128–135. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130623&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130623&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.023. (in Chinese)
- [25] 刘爱利,王培法,丁园圆. *地统计学概论*[M]. 北京:科学出版社, 2012:50–95.

- [26] MORAN P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*,1950, 37(1-2):17-23.
- [27] 史海滨,陈亚新.土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. *水利学报*,1994(7):70-77,89.  
SHI Haibin, CHEN Yaxin. Combination structure model of soil moisture spatial variability and regional information estimation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994(7):70-77,89. (in Chinese)
- [28] 江贵荣.干旱区不同尺度土壤盐分空间变异特征及不确定性分析[D]. 武汉:中国地质大学,2012.
- [29] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*,1991,12(4):12-20.  
WEI Fusheng, CHEN Jingsheng, WU Yanyu, et al. Study on the background contents on elements of soils in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*,1991,12(4):12-20. (in Chinese)
- [30] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:329-492.
- [31] 文雯,侯振安,闵伟,等.石河子垦区耕地土壤重金属调查及评价研究[J]. *新疆农业科学*,2015, 52(1):137-144.  
WEN Wen, HOU Zhen'an, MIN Wei, et al. Investigation and evaluation of heavy metals in farmland soil in Shihezi reclamation area [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(1):137-144. (in Chinese)
- [32] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *地学前缘*,2014,21(3):265-306.  
CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. *Earth Science Frontiers*,2014,21(3):265-306. (in Chinese)
- [33] TENG Mingjun, ZENG Lixiong, XIAO Wenfa, et al. Spatial variability of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Science of the Total Environment*,2017,599-600:1308-1316.
- [34] 吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等.污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. *农业工程学报*,2013,29(4):165-173.  
WU Wenyong, YIN Shiyang, LIU Honglu, et al. Spatial structure and distribution characteristics of soil heavy metals in wastewater irrigation district [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 165-173. (in Chinese)
- [35] QISHLAQI A, MOORE F, FORGHANI G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran: a study based on multivariate data analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 374-384.
- [36] 张天蛟,刘刚,王圣伟.基于GIS/RS的不同土地利用类型重金属面源污染比较[J/OL]. *农业机械学报*,2014,45(增刊):124-132.  
ZHANG Tianjiao, LIU Gang, WANG Shengwei. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(Supp.):124-132. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2014s121&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s121&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.021. (in Chinese)
- [37] 代杰瑞,庞绪贵,王红晋,等.山东省平阴县土壤中重金属元素异常成因[J]. *物探与化探*,2010,34(5):659-663.  
DAI Jierui, PANG Xugui, WANG Hongjin, et al. The causes of the soil heavy metal anomalies in Pingyin County, Shandong Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*,2010,34(5):659-663. (in Chinese)

(上接第57页)

- [27] 丁为民,王耀华,彭嵩植.反转旋耕刀正切面分析及参数选择[J]. *农业机械学报*,2004,35(4):40-43.  
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Analysis on sidelong portion of up-cut rotary blade [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2004,35(4):40-43. (in Chinese)
- [28] YOU Y, WANG D, LIU J. A device for mechanical remediation of degraded grasslands [J]. *Soil and Tillage Research*,2012, 118(1): 1-10.
- [29] 丁为民,彭嵩植.旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]. *农业工程学报*,1995,11(4):67-72.  
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on grassremoving angles and equations of rotary blades [J]. *Transactions of the CSAE*, 1995,11(4):67-72. (in Chinese)
- [30] 张居敏,周勇,夏俊芳,等.旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. *农业工程学报*,2013,29(1):18-25.  
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller [J]. *Transactions of the CSAE*,2013,29(1):18-25. (in Chinese)
- [31] 张居敏,夏俊芳,张甜,等.旋耕埋草机螺旋横刀制造工艺误差及影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*,2014, 40(1):89-95.  
ZHANG Jumin, XIA Junfang, ZHANG Tian, et al. Process errors in manufacturing helical blade for stubble burying rotary tiller and their influences on tillage [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2014,40(1):89-95. (in Chinese)
- [32] 张秀梅,夏俊芳,张居敏,等.水旱两用秸秆还田组合刀辊作业性能试验[J]. *农业工程学报*,2016,32(9):9-15.  
ZHANG Xiumei, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Working performance experiment of combination blade roller for straw returning in paddy field and dry land [J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(9):9-15. (in Chinese)