候沁言,张世熔,马小杰,等.基于GIS的凯江流域农田重金属污染评价研究[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1514-1522. HOU Qin-yan, ZHANG Shi-rong, MA Xiao-jie, et al. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of the Kaijiang watershed based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1514-1522.

基于GIS的凯江流域农田重金属污染评价研究

侯沁言1,2,张世熔1,2*,马小杰1,潘小梅1,王贵胤1,2,钟钦梅1

(1.四川农业大学环境学院,成都 611130; 2.四川省土壤环境保护重点实验室,成都 611130)

摘 要:采用单因子污染指数法(*P_i*)对四川盆地丘陵区凯江流域农田耕层土壤(0~20 cm)中4种重金属污染风险进行评价,并基于GIS平台,结合反比距离权重法(IDW)、径向基函数法(RBF)、普通克里格法(OK)、析取克里格法(DK)和概率克里格法(PK)分析研究区重金属的空间分布特征。结果表明,凯江流域土壤Cd、Hg、As和Pb平均含量分别为0.35、0.10、7.77 mg·kg⁻¹和22.54 mg·kg⁻¹,在空间分布上土壤Cd、As和Pb总体呈现以两个高值为中心向四周递减的趋势,土壤Hg则呈现西部高、东部低的特征。单因子污染指数评价结果表明,土样Cd、As和Pb的污染超标率(*P_i*≥1)分别为7.5%、0.5%、0和0。前4种空间插值的分级面积统计结果表明,研究区域土壤Pb、Hg和As均无污染超标,土壤Cd超标面积(*P_i*≥1)为0.14%~1.06%;概率克里格法风险评估结果表明, 土壤Hg、Pb分别在*P_i*>0.3和*P_i*>0.2条件下无高风险概率,在阈值为1.0条件下,受到As污染的高概率(0.8~1.0)区域有1.05%,0.16%的区域面积有Cd污染超标风险(*P*=1.0)。因此,该区部分农田土壤主要受到Cd污染。

关键词:重金属;农田;空间分布;污染评价;概率克里格

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1514-09 doi:10.11654/jaes.2019-0172

Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of the Kaijiang watershed based on GIS

HOU Qin-yan^{1,2}, ZHANG Shi-rong^{1,2*}, MA Xiao-jie¹, PAN Xiao-mei¹, WANG Gui-yin^{1,2}, ZHONG Qin-mei¹

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Protection, Chengdu 611130, China)

Abstract: Evaluation of heavy metal pollution is important for planning of regional–soil heavy metal contamination control and implementation of remediation projects. In this study, we employed a single–factor pollution index method (P_i) to assess the pollution of farmland topsoil (0~20 cm) of the Kaijiang watershed in the hilly area of the Sichuan basin by heavy metals. The inverse distance weighted method (IDW), radial basis function method(RBF), ordinary kriging method(OK), disjunctive kriging method(DK), and probability kriging method(PK) were applied to analyze the spatial distribution of heavy metals in the soil. The average contents of soil cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic(As), and lead(Pb) were 0.35, 0.10, 7.77 mg·kg⁻¹, and 22.54 mg·kg⁻¹, respectively. With respect to the spatial distribution, soil Cd, As and Pb showed a decreasing trend from two high–value centers, and the soil Hg content was higher in the west and lower in the east. Statistical evaluation of single–factor P_i of all sampling points demonstrated that the over–standard rates($P_i \ge 1$) of soil Cd, As, Hg and Pb were 7.5%, 0.5%, 0, and 0, respectively. The area ratios of spatial interpolation based on the IDW, RBF, OK, and DK methods indicated that the soil Pb, Hg and As had no over–standard area, whereas the percentages of the soil Cd over–standard area($P_i \ge 1$) were in the range of 0.14%~1.06%. According to the risk assessment of probability kriging, soil Hg ($P_i > 0.3$) and Pb ($P_i > 0.2$) had no area with high–risk probability. When the threshold value of P_i was set to 1.0, 1.05% of the research area had high probabilities(0.8~1.0) of being polluted by As, and 0.16% of the soil in the survey zones carried a risk of Cd pollution(P=1.0). Therefore, some farmlands in the watershed were mainly polluted by Cd.

Keywords: heavy metal; farmland; spatial distribution; pollution evaluation; probability kriging

收稿日期:2019-02-20 录用日期:2019-05-05

*通信作者:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

基金项目:四川省重点研发项目(19ZDYF2427);四川省环境保护科技项目(2018HB30)

作者简介:侯沁言(1996—),男,四川渠县人,主要从事土壤污染修复研究。E-mail:hqy494257500@163.com

Project supported: The Key Research and Development Program of Sichuan Province, China (19ZDYF2427); The Science and Technology Project for Sichuan Environmental Protection (2018HB30)

2019年7月 侯沁言,等:基于GIS的凯江流域农田重金属污染评价研究

近年来,由于人类活动强度的提高,农田土壤重 金属污染已成为全球关注的环境问题之一[1-2]。在污 染土壤的重金属元素中,Cd、Pb、Hg、As、Cr、Zn、Cu、Ni 等8种元素的研究报道较多四6,值得关注的是,即使 在较低含量水平条件下,土壤Cd、Pb、Hg和As也不仅 会影响农产品的产量和品质,还会通过食物链传递, 对人体健康造成潜在威胁^[5]。作为我国粮食、油料等 作物主要生产区之一的四川盆地丘陵地区,其农田土 壤重金属的研究已有少量报道[7-9]。例如,在尚二萍 等四的研究结果中,四川盆地耕地点位超标率为 43.55%, 而严明书等¹⁸¹和刘洁等¹⁹¹对重庆都市经济圈 土壤及沱江中游土壤质量的研究表明,其点位重金属 超标率分别为13.59%和0.6%。尽管样点超标率可以 描述土壤重金属的污染状况,但不同研究结果较大的 空间异质性也增大了准确评估区域尺度重金属污染 分布特征的难度。因此,进一步开展该区域土壤重金 属空间分布及污染评价研究,为区域土壤环境质量管 理提供参考依据是十分必要的。

关于区域土壤重金属污染评价方法,传统上多采 用基于样点的单因子污染指数法(Pi)、内梅罗综合指 数法(P_N)、地累积指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法 (RI)等方法进行评价^[10-12]。然而,重金属在土壤中的 移动性较差,基于样点的指数法难于提供其污染空间 分布的真实信息[13]。特别是在丘陵地区,重金属在同 一农田地块内及不同地块间的迁移易受地形的限制。 随着丘陵地区土壤重金属污染防治进入规划与工程 实施阶段,提供更准确的污染空间分布信息成为必然 要求。因此,近年来一些研究者基于GIS、GPS和地统 计学等空间分析方法研究了区域土壤重金属的空间 分布特征[9,14-16]。同时,也有研究者将这些空间分析法 与指数法结合对其进行评价[17]。然而,迄今基于点位 的污染超标率与基于空间分布的超标率之间的关系 研究仍少见报道。此外,在相同的研究尺度(丘陵区)、 采样方案及软件平台下,系统性地对比不同空间插值 方法对农田土壤重金属超标率的影响仍鲜见报道。

凯江流域为四川盆地丘陵区涪江流域的一级支流,是四川盆地典型的粮油及蔬菜生产基地之一。流域内种植业和畜禽养殖业发达,人口密度高达500~700人·km⁻²。近年来,随着农业集约化程度的提高和乡镇企业的发展,其农田土壤重金属的含量水平及污染状况尚不清楚。因此,本文根据我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[18],采用单因子指数法,在GIS和GPS软件平台

上,系统对比研究反比距离权重法(Inverse distance weighted, IDW)、径向基函数法(Radial basis function, RBF)、普通克里格法(Ordinary kriging, OK)、析取克 里格法(Disjunctive kriging, DK)和概率克里格法(Probability kriging, PK)5种空间插值方法对该区域 农田土壤重金属污染评价结果的影响,旨在为区域 土壤污染治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域地处东经104°40′~105°6′和北纬30° 56′~31°4′,面积约471 km²,属亚热带湿润性季风性 气候,年平均气温15℃,年均降水量800 mm,具有气 候温和、四季分明、雨水充沛等特点。研究河段处于 四川盆地丘陵低山地区,其土地利用方式主要为耕 地,以种植水稻、小麦、棉花和油菜等为主。成土母质 以侏罗系蓬莱组紫色砂泥岩、白垩系城墙岩群黄色砂 岩、厚砂薄页岩风化坡残积物为主,凯江主流及支流 沿岸有部分地区为第四系新冲积物。

1.2 土壤样品采集与分析方法

根据该区地形地貌、成土母质、土壤类型、土地利 用等条件,按随机网格法和分层抽样法进行样点的布 设,共187个采样点及20个检查点(图1)。在每个样 点按五点采样法采集同一地块0~20 cm表层土样,混 合均匀后用四分法保留土样约1 kg;样点位置采用 GPS进行定位,并调查记录地形、母质、土壤类型等自 然环境条件,以及作物、灌溉、施肥等社会经济信息。

土壤样品于实验室自然风干后,去掉砾石、动植物残骸等,进行研磨,再分别过20目、100目筛,待测。 土壤 pH 值在水土比为2.5:1条件下采用复合电极法



图1 样点空间分布图 Figure 1 Distribution of soil sampling points

进行测定;土壤Cd、Pb的总量用HNO₃-HF-HClO₄体系(V:V:V=1:2:2)消解,消解液冷却后,加入5mL2mol·L⁻¹HCl溶解,并转移至25mL容量瓶,定容、过滤。待测液采用石墨炉原子吸收分光光度法测定;土壤Hg和As总量采用HCl与HNO₃混合液体系(V:V=1:1)消解,原子荧光法测定^{119]}。在分析过程中所用试剂均为分析纯,所有土壤样品中每个重金属全量测定时均设置3个重复,并设置空白样,检测过程中采用国家标准土壤样品(GSS-3)进行质量控制,Cd、Hg、As和Pb的平均回收率分别为106.8%、92.5%、96.8%和102.3%。

1.3 单因子污染指数法

单因子污染指数法作为最简单的评价方法之一, 通过实际含量和评价标准的比值直接表现出重金属 的污染级别及危害程度。其计算公式¹⁷¹为:

 $P_i = C_i / S_i$ (1) 式中: P_i 为第i种土壤重金属的环境质量指数; C_i 为土 样中第i种重金属的实测含量,mg·kg⁻¹; S_i 为第i种重金 属的农用地土壤污染风险筛选值(试行)(GB 15618— 2018)^[18],mg·kg⁻¹。本文评价分为两个等级:当 P_i <1 时,土样重金属含量低于筛选值,样点基本未受到污 染;当 $P \ge 1$ 时,土壤样点受到污染,指数值越高,污染 的程度越高。

1.4 空间插值方法

本研究基于样点 GPS 坐标和 ArcGIS 10.2 地理信息系统软件平台,采用地统计学的普通克里格法进行空间插值获得区域土壤4种重金属含量的空间分布图。同时,为系统对比研究不同插值方法对空间分布的影响,在相同的样点 GPS 坐标和 ArcGIS 10.2 平台上,分别采用反比距离权重法和径向基函数法两种确定性方法,以及普通克里格法和析取克里格法两种地统计学方法对单因子指数 P_i进行空间插值^[20],以研究不同空间插值方法对该区域农田土壤重金属污

染评价结果的影响。其中,基于地统计学的普通克 里格法和析取克里格法均要求数据为正态分布。此 外,本研究还采用概率克里格法^[20]对单因子指数*P*_i 进行了不同污染水平的风险分析。最后,根据以上 5种空间插值方法获得的信息,综合讨论该区域农 田土壤重金属污染超标状况。

1.5 数据处理方法

本研究所有数据统计均在 SPSS 19.0 平台上进行;样点分布图和各类空间插值图利用 ArcGIS 10.2 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属含量统计

研究区土壤样点 pH范围为4.90~8.25。土壤中 Cd、Hg、As和Pb4种重金属均呈正态分布(表1),平 均含量分别为0.38、0.10、7.77 mg·kg⁻¹和22.54 mg· kg⁻¹。其中,土壤Cd、Hg、As和Pb的平均含量分别为 当地土壤环境背景值的1.58、1.43、1.27倍和1.11倍, 表明该区域存在不同程度的重金属累积情况。根据 GB15618—2018^[18],4种重金属元素的平均值均低于 其风险筛选值,但有部分土壤样点的Cd和As含量超 过其污染风险筛选值。变异系数(CV)相较于标准差 更能反映出数据的离散性^[21],土壤Cd、Hg、As、Pb的变 异系数分别为50%、40%、29%和13%,均处于中度变 异程度(10%<CV<100%)^[13,22],表明这几种元素数据 的离散性较小,分布相对较为均匀。

2.2 土壤重金属含量空间特征分析

由于该区域土壤Cd、Hg、As和Pb含量均符合正态分布,因此本研究在ArcGIS 10.2平台上选择地统计学模块中的普通克里格法进行空间插值,获得它们含量的空间分布图(图2)。研究区土壤Cd(图2a)含量在西北角和凯河一带有两个高值中心(>0.8 mg·kg⁻¹),同时呈现向四周递减的趋势。研究区西北角靠

表1	土壤重金属含量统	计	分	析
----	----------	---	---	---

Table 1 Statistical analysis of soil heavy metals

重金属 Heavy metals	样点数 Sampling No.	分布类型 Distribution type	最小值 Min/ mg•kg ⁻¹	最大值 Max/ mg·kg ⁻¹	均值 Mean/ mg•kg ⁻¹	标准差Std.Dev./ mg·kg ⁻¹	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	背景值 Background value/mg·kg ⁻¹
Cd	187	正态	0.13	1.09	0.38	0.19	1.800	2.749	0.24
Hg	187	正态	0.02	0.23	0.10	0.04	0.673	-0.063	0.07
As	187	正态	2.19	20.02	7.77	2.22	1.350	5.347	6.14
Pb	187	正态	17.00	32.90	22.54	2.82	0.697	0.971	20.30

注:背景值为2007年土壤污染调查中该元素的土壤环境背景值(该报告未公开)。

Note: The background values are the soil environmental background values of these elements in the soil pollution survey in 2007 (The report was unpublished publicly).

近县城,工业活动频繁;同时,在凯河附近曾有一养猪 场,其养殖废弃物可能是造成污染的主要原因。土 壤 Hg的空间分布(图 2b)呈现以南华北部为高值区 (>0.17 mg·kg⁻¹),向东、向北逐渐减少到 0.06~0.10 mg·kg⁻¹的低值区,并在东南部最低(<0.06 mg·kg⁻¹)。 由于研究区土壤 Hg平均含量较低,因此该分布可能 与土壤母质因素有较大关系。土壤 As 的空间分布 (图 2c)呈现以南华和万安的两个高值中心(>11 mg· kg⁻¹),向四周递减的趋势。研究区内土壤 Pb(图 2d) 的高值中心(>25 mg·kg⁻¹)位于南华、凯河处,并向周 围呈现递减趋势,其东北及西北部属于低值区(<20 mg·kg⁻¹)。有研究表明,土壤中 As 和 Pb 主要源于交 通污染和大气沉降^[23-24]。研究区土壤 As 和 Pb 的高值 区均处于交通较好的区域,同时在南华附近存在一个 垃圾焚烧厂,这也可能是造成高值的原因。

2.3 土壤重金属污染评价

2.3.1 基于样点的单因子污染指数评价

研究区内土壤Cd、Hg、As和Pb的单项污染指数的平均值分别为0.487、0.111、0.381和0.102(表2),其

中仅土壤Cd和As存在P≥1的超过风险筛选值的样点,其占比分别为7.5%和0.5%。因此,Cd是研究区农田土壤中主要的重金属污染物。

2.3.2 基于空间的单因子污染指数评价

为进一步探究研究区重金属污染指数的空间分 布特征,分别采用反比距离权重法、径向基函数法、 普通克里格法和析取克里格法对4种重金属的Pi进 行空间插值,并分级统计其面积占总面积的百分比 (表3)。

总体上4种插值方法的平均误差(ME)、标准化 平均误差(MSE)和20个校验点的检验误差(MEP)均 较小(表3),表明它们用于插值是可行的,但普通克 里格法的误差相对较小。从土壤重金属种类分析, Hg和Pb的4种空间插值分析方法的统计结果完全相 同,全区域均为*Pi*<0.4等级的面积分布。因此,这两 种土壤重金属在研究区内无污染风险。然而,不同空 间插值方法所得的土壤Cd和As的面积统计结果却 呈现一定差异(表3)。

土壤As仅存在Pi<0.4、0.4<Pi<0.6和0.6<Pi<0.8



图 2 凯江流域土壤重金属空间分布图 Figure 2 Spatial distribution of soil heavy metal in the Kaijiang Valley

农业环境科学学报 第38卷第7期

这3个污染指数等级的空间分布。因此,尽管这4种 空间插值方法所得的分布等级相同,但在前3个等级 各自分布的面积却呈现一定差异。例如,在0.6<P,< 0.8等级的分布中,占区域面积百分数由小到大依次 为析取克里格法面积(仅0.07%)<径向基函数法 (0.10%)<普通克里格法(0.67%)<反比距离权重法 (0.89%),与基于样点污染指数的评价结果(2.7%)不 同。此外,4种空间插值方法皆因仅有1个超标样点 而无法形成超标等级的面积分布。

土壤 Cd 污染指数的空间分布则因插值方法不同 呈现明显差异。但无论哪一种空间插值方法,其超标 区域占研究区总面积的百分比(0.14%~1.06%)均明 显低于基于样点统计的百分比(7.5%)。 为进一步观察4种空间插值方法对其污染指数, 特别是超标指数空间分布的影响,本文选取在土壤质 量环境评价研究中采用最频繁的反比距离权重法^[25] 和普通克里格法^[9]作图,进行辅助分析(图3和图4)。 对比图3、图4和表3可知,反比距离权重法和径向基 函数法中土壤Cd的Pi≥1超标等级面积(1.06%和 0.67%)明显高于普通克里格法(0.42%)和析取克里 格法(0.14%),这是由于算法公式上的差异所致^[26-27]。 前两种方法属确定性插值方法,均突出高值点对其邻 近空间区域影响,其权重更大,所以插值土壤Cd的超 标面积偏大(图3a);反之,基于地统计学的普通克里 格法和析取克里格法并不强调高值点对其邻近空间 区域的影响权重,且不同含量样点取等权重,因而插

表2 基于样点的单因子指数评价

Table 2 Assessment of	f single	factor	indexes	based	on	sampling	points
-----------------------	----------	--------	---------	-------	----	----------	--------

重金属	样点数	分布类型	类型 最小值 最大任		最小值 最大值 均值	频率 Frequency/%				
Heavy metals	Sampling No.	Distribution type	Min	Max	Mean	$P_i < 0.4$	$0.4 \le P_i < 0.6$	$0.6 \le P_i < 0.8$	$0.8 \le P_i < 1.0$	$P_i \ge 1$
Cd	187	正态	0.167	1.363	0.487	44.9	35.8	6.4	5.4	7.5
Hg	187	正态	0.025	0.317	0.111	100.0	0	0	0	0
As	187	正态	0.110	1.001	0.381	57.2	39.6	2.7	0	0.5
Pb	187	正态	0.071	0.275	0.102	100.0	0	0	0	0

表3 基于不同插值方法的单因子指数分级面积比

Table 3 Area ratios of single factor index based on the different interpolation method	Table 3	Area ratios of sing	gle factor index	based on the different	interpolation methods
--	---------	---------------------	------------------	------------------------	-----------------------

重金属	插值方法	误差分析 Error analysis			占区域面积百分数 Percent of area/%					
Heavy metals	Interpolation method	ME	MSE	MEP	$P_i < 0.4$	$0.4 \le P_i < 0.6$	$0.6 \le P_i < 0.8$	$0.8 \le P_i < 1.0$	$P_i \ge 1$	
Cd	IDW	_	_	2.8×10 ⁻³	25.91	50.19	18.38	4.46	1.06	
	RBF	—	—	2.5×10 ⁻³	24.69	49.89	22.91	1.84	0.67	
	OK	0.001 0	0.005 4	-1.3×10 ⁻³	20.36	48.98	27.07	3.17	0.42	
	DK	-0.001 3	-0.009 6	2.8×10 ⁻³	18.11	64.31	15.55	1.89	0.14	
Hg	IDW	—	—	2.0×10 ⁻⁴	100.00	0	0	0	0	
	RBF	_	_	0.5×10 ⁻⁴	100.00	0	0	0	0	
	OK	-0.000 4	-0.008 9	0.5×10 ⁻⁴	100.00	0	0	0	0	
	DK	-0.000 2	0.004 0	1.5×10 ⁻⁴	100.00	0	0	0	0	
As	IDW	—	—	-1.4×10 ⁻⁴	71.78	27.33	0.89	0	0	
	RBF	_	_	-2.8×10^{-4}	73.73	26.17	0.10	0	0	
	OK	-0.000 2	-0.001 5	-0.7×10^{-4}	75.26	24.07	0.67	0	0	
	DK	0.001 1	0.010 4	-1.5×10 ⁻⁴	81.72	18.21	0.07	0	0	
Pb	IDW	_	_	5.0×10 ⁻⁵	100.00	0	0	0	0	
	RBF	—	—	1.4×10 ⁻⁵	100.00	0	0	0	0	
	OK	0.000 2	0.003 4	-0.6×10 ⁻⁵	100.00	0	0	0	0	
	DK	0.000 4	0.012 6	1.4×10 ⁻⁵	100.00	0	0	0	0	

注: IDW 为反比距离权重法; RBF 为径向基函数法; OK 为普通克里格法; DK 为析取克里格法; ME 为平均误差; MSE 为标准化平均误差; MEP 为 20 个校验点的检验误差。

Note: IDW, Inverse distance weighted; RBF, Radial basis functions; OK, Ordinary kriging; DK, Disjunctive kriging; ME: Mean error; MSE: Mean standardized error; MEP: Mean error of 20 checking points.



图 3 基于反比距离权重法的单因子指数空间分布 Figure 3 Spatial distribution of single factor index for soil heavy metals by inverse distance weighting method

值结果具有一定的平滑效应[20,28]。特别是析取克里 格法,其平滑效应明显,导致其超标面积仅为反比距 离权重法和普通克里格法的13.2%和33.3%。

2.4 单因子指数的风险概率评价

与前面4种研究单因子污染指数值空间分布特 征的插值方法不同,概率克里格法四能基于污染指数 的某一阈值水平来观察研究区超过该阈值水平概率 的空间分布特征[29]。毛竹等[30]利用该方法分析了汉 源富泉铅锌矿区土壤重金属的概率空间分布,预测出 研究区各区域重金属的超标概率。本研究基于土壤 Cd、Hg、As、Pb的含量水平及单因子污染指数统计结 果(表2),通过预测概率分析,将Cd和As的阈值设定 为1.0,而Hg和Pb的最大阈值分别为0.3和0.2,以超 过这些阈值为条件,用概率克里格法依次进行空间插 值获得它们的风险概率分布图(图5)。其中,Hg在 P>0.3及Pb在P>0.2条件下均无高风险概率,因此整 个研究区农田土壤受Hg和Pb污染的概率很低,该高 值区域评价结果与前面基于样点或空间的单因子指 数评价结果均一致。

土壤Cd与As污染超标(P>1)的风险概率区域占 整个研究区面积的比例则与前面几种评价不完全一 致。其中,在万安附近,有一小块农田土壤As的超标 概率达到 0.8~1.0 的水平(图 5c,占研究区面积的 1.05%),即该区域土壤有80%的概率受到As污染。 其评价结果与基于样点的单因子污染指数评价相似, 而未像基于空间的前4种插值方法一样漏掉有1个样 点土壤As超标的信息。同时,土壤Cd存在两个概率 为1.0的高值区域,其空间分布与P.值的超标区域空 间分布特征相似,但面积约为区域面积的0.16%,更 接近基于空间的析取克里格法的评价结果。

结论 3

(1)研究区土壤Cd、Hg、As和Pb均呈正态分布, 平均含量依次是当地土壤环境背景值的1.58、1.43、 1.27 倍和1.11倍,存在不同程度的重金属累积情况, 其中有部分土壤点位Cd和As含量超过GB 15618— 2018中的风险筛选值。

(2)采用普通克里格法获得区域土壤中4种重金



图4 基于普通克里格法的土壤重金属单因子指数空间分布 Figure 4 Spatial distribution of single factor index for soil heavy metals by ordinary kriging method

属含量的空间分布图。研究区内土壤Cd、As和Pb的 含量总体上呈现以两个高值中心向四周递减的趋势; 土壤Hg则总体呈现西部高、东部低的趋势。

(3)基于样点的单因子指数评价得出土壤污染程度为 Cd>As>Hg>Pb。基于空间的面积统计结果表明,研究区仅土壤 Cd存在超标面积。4种方法中,普通克里格插值方法的误差最小,更接近于真实情况。

(4)概率克里格空间插值表明研究区仅有土壤 Cd和As存在高污染风险概率区域,其空间分布特征 与Pi的高值区域空间分布特征基本一致。

参考文献:

- Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207;159-168.
- [2] Niu L L, Yang F X, Xu C, et al. Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176:55–62.
- [3] 宋 波, 张云霞, 庞 瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特

征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(9):4317-4326.

SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, et al. Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (9) : 4317– 4326.

- [4] José M N, José P, Sergi D. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia[J]. *Environmental Research*, 2017, 154:380–388.
- [5] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. *Chemosphere*, 2018, 193:189–197.
- [6] 尹国庆, 江 宏, 王 强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染 成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):96-104. YIN Guo-qing, JIANG Hong, WANG Qiang, et al. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):96-104.
- [7]尚二萍,许尔琪,张红旗,等.中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J].环境科学,2018,39(10):4670-4683.
 SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, et al. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. Envi-



图 5 基于概率克里格法的土壤重金属单因子指数概率空间分布 Figure 5 Probability distribution of single factor index for soil heavy metals by probability

ronmental Science, 2018, 39(10):4670-4683.

[8] 严明书,张茂忠,唐 将,等.重庆都市经济圈土壤Cd元素含量分 布特征与评价[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(11):118-124.

YAN Ming-shu, ZHANG Mao-zhong, TANG Jiang, et al. Distribution characteristics and assessment of Cd contents in the Chongqing metropolitan economic zone[J]. *Journal of Southwest University* (*Natural Science Edition*), 2011, 33(11):118–124.

- [9] 刘 洁,张世熔,李 婷,等.基于GIS和GPS的沱江中游土壤镉和 铅空间变异研究[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2035-2041.
 LIU Jie, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Spatial distribution characteristics of soil cadmium and lead in the middle reaches of Tuojiang River basin based on GIS and GPS[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10):2035-2041.
- [10] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690– 700.
- [11] Zhang Z Y, Li J Y, Mamat Z, et al. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, northwest China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126:94-101.
- [12] 宋凤敏, 张兴昌, 王彦民, 等. 汉江上游铁矿尾矿库区土壤重金属

污染分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1707-1714.

SONG Feng-min, ZHANG Xing-chang, WANG Yan-min, et al. Heavy metal pollution in soils surrounding an iron tailings in upstream areas of Hanjiang River, Shanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1707-1714.

- [13] 赵 杰,罗志军,赵 越,等.环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分 布及污染评价[J].环境科学学报,2018,38(6):2475-2485. ZHAO Jie, LUO Zhi-jun, ZHAO yue, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6):2475-2485.
- [14] Pan L B, Ma J, Wang X L, et al. Heavy metals in soils from a typical county in Shanxi Province, China: Levels, sources and spatial distribution[J]. *Chemosphere*, 2016, 148:248–254.
- [15] 李春芳,王 菲,曹文涛,等.龙口市污水灌溉区农田重金属来源、 空间分布及污染评价[J].环境科学,2017,38(3):1018-1027. LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, et al. Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1018-1027.
- [16] 戴 彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 507-515.

DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sourc-

农业环境科学学报 第38卷第7期

es, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507-515.

- [17] 秦鱼生,喻 华,冯文强,等.成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2013, 33(19):6335-6344. QIN Yu-sheng, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19):6335-6344.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风 险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land in soil environment quality: GB 15618— 2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.

- [19] 中华人民共和国农业部. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子 荧光法:GB/T 22105—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
 The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil quality: Analysis of total mercury, arsenic and lead contents in soils Atomic fluorescence spectrometry: GB/T 22105—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] Johnston K, Hoef V J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS geostatistical analyst[M]. America: ESRI, 2001:113–159.
- [21] 刘 硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1):270-279.
 LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils

of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1):270-279.

- [22] Bai Y R, Wang Y K. Spatial variability of soil chemical properties in a jujube slope on the loess plateau of China[J]. Soil Science, 2011, 176 (10):550–558.
- [23] 黄春雷, 宋金秋, 潘卫丰. 浙东沿海某地区大气干湿沉降对土壤重 金属元素含量的影响[J]. 地质通报, 2011, 30(9):1434-1441. HUANG Chun-lei, SONG Jin-qiu, PAN Wei-feng. Impact of dry and

wet atmospheric deposition on content of heavy metals in soils along coastal areas of eastern Zhejiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(9):1434-1441.

- [24] 秦先燕,李运怀,孙 跃,等.环巢湖典型农业区土壤重金属来源 解析[J]. 地球与环境, 2017, 45(4):455-463.
 QIN Xian-yan, LI Yun-huai, SUN Yue, et al. Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(4):455-463.
- [25] 宋金茜,朱 权,姜小三,等.基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究:以南京市八卦洲为例[J].土壤学报,2017,54(1):81-91. SONG Jin-xi, ZHU Quan, JIANG Xiao-san, et al. GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils: A case study of Baguazhou, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1):81-91.
- [26] Xie Y F, Chen T B, Lei M, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis[J]. *Chemosphere*, 2011, 82:468–476.
- [27] 秦耀东,李保国.应用析取克里格方法估计区域地下水埋深分布
 [J].水利学报, 1998, 29(8):28-34.
 QIN Yao-dong, LI Bao-guo. Estimation of ground water depth distribution by disjunctive kriging[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(8):28-34.
- [28] Yasrebi J, Saffari M, Fathi H, et al. Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters[J]. *Research Journal of Biological Sciences*, 2009, 4(1):93–102.
- [29] Liu X M, Wu J J, Xu J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141:257–264.
- [30] 毛 竹, 张世熔, 李 婷, 等. 铅锌矿区土壤重金属空间变异及其 污染风险评价:以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J]. 农业环境科学 学报, 2007, 26(2):617-621.

MAO Zhu, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Spatial variability and environmental pollution assessment of soil heavy metal in the vicinity of a lead/zine mine: A case study from Fuquan lead/zine mine in Hanyuan County[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26 (2):617-621.