

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181225.010

徐业梅,张超兰,黎宁,等.广西环江县农田土壤重金属空间变异及分布特征[J].广西科学,2018,25(6):701-708.

XU Y M,ZHANG C L,LI N,et al. Spatial variability and distribution characteristics of heavy metals in farmland soils in Huanjiang county,Guangxi[J]. Guangxi Sciences,2018,25(6):701-708.

广西环江县农田土壤重金属空间变异及分布特征^{*}

Spatial Variability and Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils in Huanjiang County, Guangxi

徐业梅^{1,2},张超兰^{1*},黎宁²,潘艳²,何东明²,何宇²,覃华芳²

XU Yemei^{1,2},ZHANG Chaolan¹,LI Ning²,PAN Yan²,HE Dongming²,HE Yu²,QIN Huafang²

(1. 广西大学,资源环境与材料学院,广西南宁 530004;2. 广西壮族自治区环境监测中心站,广西南宁 530028)

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Environment Monitoring Center Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi, 530028, China)

摘要:【目的】对环江县农田土壤重金属含量进行详细调查,摸清重金属含量、空间分布特征,为环江县农业土壤污染综合防治、农产品安全生产提供参考依据。【方法】通过土壤样品采集及重金属含量分析,结合地统计学及GIS技术,分析土壤重金属空间变异及分布特征。【结果】研究区土壤中的重金属含量除Cu外,其他均已超出广西背景值,土壤重金属含量的变异系数较大的是Cd、Pb和Zn,其余重金属变异系数相对集中。空间分布上,pH值、Zn的空间相关性较弱,Cd、As、Pb、Cu具有中等程度相关性。结果显示,土壤中pH值呈四周向中间降低的趋势,pH值较高的区域主要集中在水源镇、龙岩镇和长美乡;Cd的含量由西南向东北逐渐减少,高含量区主要是水源镇;As的含量呈西向东的减少趋势,高含量区主要分布在川山镇、水源镇和洛阳镇;Pb和Zn的空间分布相似,高含量区主要集中在川山镇;Cu的分布趋势是由东部、西部向中间减少,高含量区集中在水源镇。【结论】研究区域的Cd、As、Pb、Zn表现出一定的污染特征,其中Cd是研究区域农田土壤的主要污染元素。不同重金属的分布规律不同,主要是人类活动与土壤母质双重影响的结果。

关键词:环江县 农田土壤 重金属 空间分布 地统计学 ArcGIS

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2018)06-0701-08

Abstract:【Objective】A detailed survey was conducted on the heavy metal content of farmland soil in Huanjiang county, and the heavy metal content and spatial distribution characteristics were found out to provide a reference for the comprehensive prevention and control of agricultural soil pollution and the safe production of agricultural products in Huanjiang county.【Methods】

Based on soil sample collection and heavy metal content analysis and combined with geo-statistics and GIS technology, the spatial variability and distribution characteristics of soil heavy metals were analyzed.【Results】The content of heavy metals in the soil of the study area had exceeded the background value of Guangxi except for Cu. The coefficient of variation of soil

收稿日期:2018-08-29

作者简介:徐业梅(1987—),女,工程师,主要从事环境监测研究。

* 广西重金属重点防控区农产品质量及防控对策桂科项目(2014DD29)资助。

** 通信作者:张超兰(1971—),女,教授,主要从事土壤重金属修复研究,E-mail:zhangcl@gxu.edu.cn.

heavy metal content was Cd, Pb and Zn, and the coefficients of variation of other heavy metals were relatively concentrated. In spatial distribution, the spatial correlation of pH and Zn was weak, and Cd, As, Pb and Cu had moderate correlation. The results of interpolation showed that the pH value in the soil decreased from surroundings towards centre. The higher pH values were mainly concentrated in Shuiyuan town, Longyan town and Changmei town. The content of Cd decreased gradually from southwest to northeast, and the high content was mainly in Shuiyuan town. The content of As was decreasing from west to east, and the high content was mainly distributed in Chuanshan town, Shuiyuan town and Luoyang town. The spatial distribution of Pb and Zn was similar, and the high content area was mainly concentrated in Chuanshan town. The content of Cu was decreasing from the east and the west to the middle, and the high content area was concentrated in the Shuiyuan town. **【Conclusion】**The Cd, As, Pb, and Zn in the study area showed certain pollution characteristics, and Cd was the main pollution element of farmland soil in the study area. Different heavy metals are distributed differently, which is mainly the result of the dual effects of human activities and soil parent material.

Key words: Huanjiang county, farmland soil, heavy metal, spatial distribution, ArcGIS

0 引言

【研究意义】近几十年来随着我国经济社会的快速发展,农田重金属污染问题日趋突出^[1],2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国近1/5耕地受到重金属污染。农田土壤重金属污染不仅直接影响植物的生长、农产品的产量和质量,还可以通过食物链影响动物和人类的健康,引起一系列的次生环境问题,从而影响大气和水环境质量^[2],制约当地的经济和工农业的发展。因此,对农田重金属污染状况进行详细调查,摸清耕地重金属含量、空间分布,对于科学合理利用耕地,实现农业安全生产具有十分重要的意义。**【前人研究进展】**部分学者对广西环江县耕地土壤重金属开展了相关研究。蓝唯源等^[3]采样分析了广西环江县大环江河下游沿岸受重金属污染的4块农田土壤重金属含量,并进行了污染评价。陆素芬等^[4]采集了74个土壤样品,分析其砷、铅、镉的含量特征。唐成^[5]以大环江农田土壤为研究对象,通过野外调查取样和室内分析,获得大环江土壤重金属污染的现状,并探讨重金属和常规养分、微生物量之间的关系。**【本研究切入点】**环江毛南族自治县隶属广西河池市,喀斯特地貌广布^[6-7],耕地资源紧张,是生态环境脆弱、资源环境保护与社会经济发展矛盾比较突出的地区^[8]。河池市是我国有色金属之乡^[9],而环江县是铅锌矿之都,重金属采矿冶炼、环境污染事故导致环江县的耕地土壤重金属污染严重^[10]。目前虽然已有研究者对广西农田土壤重金属污染进行了调查^[11],但对环江县农田土壤重金属污染状况调查和空间分布的研究较少。**【拟解决的关键问题】**本研究以广西环江县的农田土

壤为研究对象,采用地统计学与GIS技术相结合的研究方法,综合分析其农田土壤中5种重金属含量空间变异及分布特征,旨在为环江县农业土壤污染综合治理、农产品安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

环江毛南族自治县位于广西西北部,地处云贵高原东南缘,九万大山南麓,总地势北高南低,四周山岭绵延。界于 $107^{\circ}51' \sim 108^{\circ}43'E$, $24^{\circ}44' \sim 25^{\circ}33'N$,行政区域面积 $4\,572.31\text{ km}^2$,所辖乡镇12个,2016年末人口37.72万。耕地面积 $6.06 \times 10^4\text{ hm}^2$,农田有效灌溉面积 $1.1 \times 10^4\text{ hm}^2$,粮食播种面积 $2.35 \times 10^4\text{ hm}^2$ ^[6]。境内主要河流为大环江、小环江^[7]。环江县土壤类型主要有红壤和石灰土。红壤面积 $1.612 \times 10^5\text{ hm}^2$,主要分布在450 m海拔以下的丘陵和低山区,占全县土壤总面积的36.74%,土壤水源涵养能力差。石灰土面积 $1.62 \times 10^5\text{ hm}^2$,主要分布在石山区,占土壤总面积的36.91%,土壤水土流失严重,保水能力差^[8]。玉米是环江县的主要粮食作物之一^[6]。大环江上游分布有矿山开采区,2001年由于洪水,矿渣随洪水流入下游农田,大部分农田被淹没,洪水退后,大部分农田减产^[5]。

1.2 土壤样品采集和分析方法

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)相关要求,本研究以环江县12个乡镇42个行政村的农田土壤作为研究对象,采用网格法布点,采集100个点位(图1)的土壤表层(0~20 cm)样品。每个样品在采集过程中,采用GPS精确定位,采样时选取有代表性的地块,并以该点为中心,在周边采集

3~5 个土壤样品,混合均匀,用四分法取约 1 kg 左右样品。土壤样品于实验室内自然风干,除去石块、植物根系和凋落物后,磨碎,过 100 目筛,装入塑料密封袋备用,并做好记录。

从图 2 可见,由于环江县处于石灰岩地区,土地资源分布零散不均,交通不方便,在实际采样过程中无法完全按照网格法进行布点,部分采样点位结合耕地分布面积、土地利用现状及污染源分布状况进行布

点。采样点与环江县水田分布区域一致,因此所采集样品能代表环江县水田中土壤环境质量。

用 pH 计(水土比 2.5 : 1)测定土壤 pH 值。土壤重金属总量消解采用美国 EPA 制定的标准方法,利用 HNO_3 和 30% H_2O_2 消解^[12-13]。土壤 Cd、As、Pb、Cu、Zn 采用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent7700E ICP-MS)进行上机测定,土壤、Hg 采用冷原子吸收测录仪[RA-915+]进行测定。

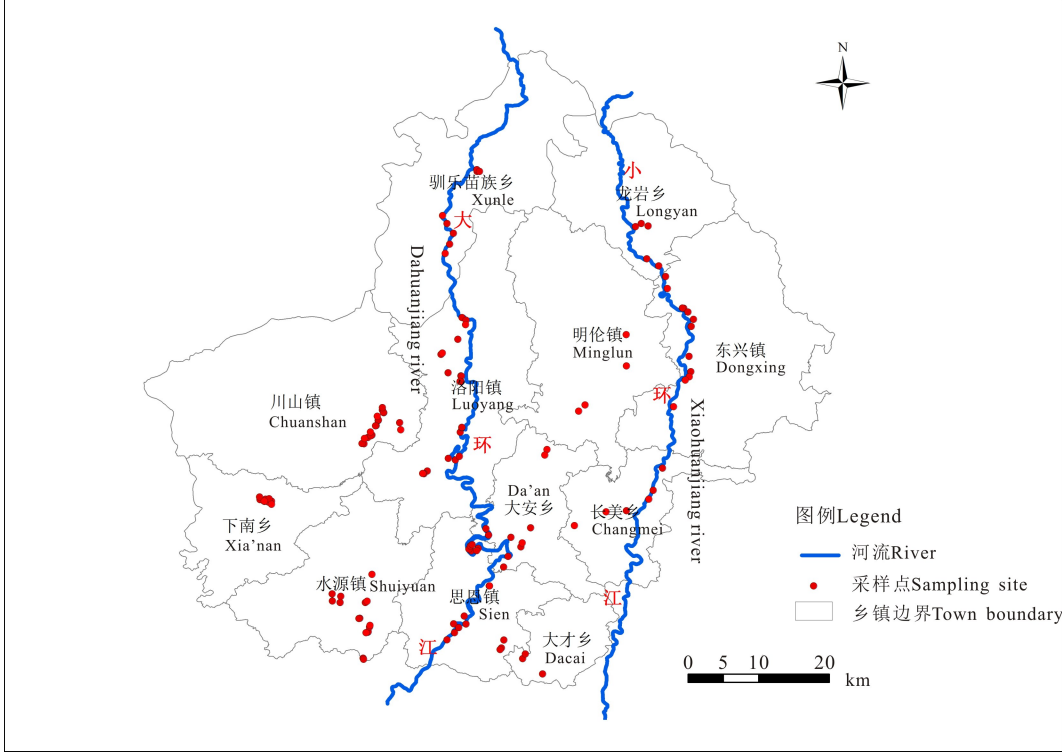


图 1 研究区域位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Diagram of study area location and sampling point distribution

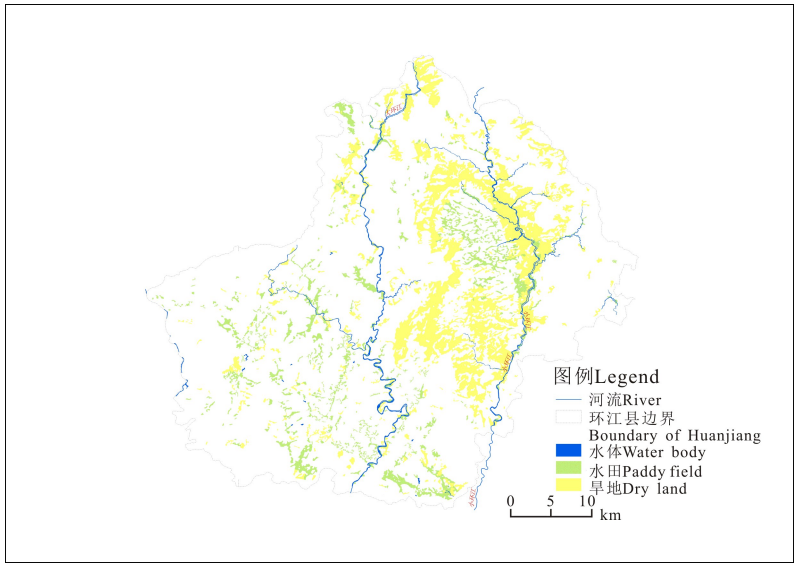


图 2 环江县土壤利用类型图

Fig. 2 Soil use type of Huanjiang county

1.3 数据处理及分析方法

采用统计学软件 SPSS20.0 进行各项指标的描述性统计分析,采用地统计学软件 GS+9.0 进行空间变异特征分析,应用 ArcGIS 软件的地统计分析模块进行探索性空间数据分析,空间插值处理及图形输出。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量描述性统计

经检测,研究区域土壤 pH 值为 4.3~8.15,本研究以 pH 值 5.5~6.5 为例,重金属含量的统计特征见表 1。参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)(表 2),研究区域农田土壤中除了 Cd 的平均含量是标准值的 2.61 倍外,As、Pb、Cu、Zn 的平均含量均未超出标准值。

表 1 广西环江县农田土壤中重金属含量的统计特征($n=100$)

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in Huanjiang county($n=100$)

项目 Item	极小值 Min ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极大值 Max ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 Mean ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中值 Median ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数 CV	双尾 P 值* Asymp. Sig	对数转换后双尾 P 值 Log transformation of Asymp. Sig
Cd	0.116	7.307	1.042	0.42	1.379	1.903	1.324	0	0.092
As	0.459	44.235	12.01	9.646	8.029	64.467	0.669	0.001	0.285
Pb	1.675	875.304	78.723	35.531	122.014	14 887.5	1.55	0	0.056
Cu	7.249	42.086	18.631	16.696	7.361	54.18	0.395	0.023	0.567
Zn	28.839	1 320.413	169.263	102.933	185.637	34 461.21	1.097	0	0.136

注: * $\alpha=0.05$ 的双侧检验

Note: * Two tailed test of K-S in $\alpha=0.05$

表 2 土壤重金属环境背景值及土壤环境质量标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Soil heavy metal environmental background value and soil environmental quality standard($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

项目 Item	广西土壤背景值 ^[14] Background value of Guangxi soil ^[14]	土壤环境质量农用地土壤污染 风险管控标准(试行) Soil environmental quality agri- cultural land risk control stand- ards (Trial)
Cd	0.08	0.4
As	11.26	30
Pb	18.82	100
Cu	20.79	150
Zn	46.43	200

2.2 农田土壤重金属地统计学特征

地统计学分析要求所分析的数据呈正态分布,否则可能存在比例效应,即抬高块金值和基台值,降低估算精度,使某些潜在的特征不明显,用原始数据进行对数转换的方法消除比例效应^[15]。由于特异值的

土壤中除了 Cu 的含量未大于广西土壤背景值,而 Cd、As、Pb、Zn 的平均含量分别是广西土壤背景值的 13.17 倍、1.07 倍、4.18 倍和 3.65 倍,说明 Cd 在农田土壤中累积明显,As、Pb、Zn 有少量累积,表明土壤已受到了重金属污染。

变异系数(CV)可以代表污染物分布的均匀程度和受人为影响程度,当变异系数大于 1.0 时,属于强变异;介于 0.1 和 1.0 之间的属于中等变异;小于 1.0 时属于弱变异。变异系数越大,元素在土壤中的含量分布越不平均,说明人类活动影响越大。本研究中 Cd、Pb、Zn 的变异系数分别为 1.324, 1.550, 1.097,属于强变异水平;As、Cu 变异系数分别为 0.669 和 0.395,属于中等变异,表明 Cd、Pb、Zn 含量受人类活动影响较大。

存在会造成连续表面的中断,直接影响变量的分布特征,致使变异函数失去了结构性。因而本文采用域法识别特异值,即按标准方差的倍数来识别特异值,一般特异值定为样品均值 m 加 3 倍标准差 δ ,即 $m+3\delta$,然后用正常值最大值替代特异值^[16]。

数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验^[17],双尾 P 值大于 0.05,说明数据呈正态分布,经对数转换双尾 P 值大于 0.05,说明数据呈对数正态分布。由表 1 可见,广西环江县农田土壤 pH 值服从正态分布,土壤重金属 Cd、As、Pb、Cu、Zn 服从对数正态分布。因此,在对数据进行地统计分析前,将所有数据进行对数转化,并进行特异值剔除。对数转化与特异值剔除后,利用 GS+ 软件拟合土壤中 pH 值及 Cd、As、Pb、Cu、Zn 含量的半方差函数模型及其相关参数(表 3),这些参数反映了土壤中 pH 值及重金属含量的变异特征,通过对比分析这些参数,能够从理论上认识土壤重金属的空间分布特征。

表 3 广西环江县农田土壤重金属变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Best-fitted semivariogram models of heavy metal in farmland soil and corresponding parameters in Huanjiang county, Guangxi

项目 Item	模型 Model	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C_1$	块金值/基台值 $C_0 / (C_0 + C_1)$ (%)	变程 Range(m)	残差 RSS
pH	Spherical	0.098	1.106	91.1	43	0.412
Cd	Gaussian	0.070 8	0.220 6	67.9	149	0.047 6
As	Gaussian	0.044 5	0.133	66.5	634	0.018 4
Pb	Exponential	0.047 2	0.141 4	66.6	156	0.023 6
Cu	Exponential	0.012 04	0.024 48	50.8	138	0.000 306
Zn	Exponential	0.010 9	0.085 8	87.3	93	0.003 827

块金值 (C_0) 代表一种非采样点间距造成的变异,属随机变异,反映了随机因素(如社会经济因素)引起的空间变异。基台值($C_1 + C_0$)是指在不同采样间距中存在的半方差极大值,反映了自然因素(如成土母质、地形等)和社会经济因素(如施肥、种植制度等)共同引起的空间变异,其由随机性变异和结构性变^[18]。

块金值 (C_0) 与基台值 ($C_1 + C_0$) 之比是反映区域化变量空间变异程度的重要指标,又称为块金效应^[16]。当 $C_0 / (C_1 + C_0) < 25\%$ 时,表明变量的空间变异以结构性变异为主,变量具有强烈的空间相关性,主要受自然因素控制,受人为因素影响较小;当 $25\% \leq C_0 / (C_1 + C_0) \leq 75\%$ 时,表明变量具有中等程度的空间相关性;当 $C_0 / (C_1 + C_0) > 75\%$ 时,表明变量以随机性变异为主,变量的空间相关性很弱,变量受人为因素影响较大^[19]。由表 3 可见,土壤 pH 值、重金属中 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的 $C_0 / (C_1 + C_0)$ 值依次为 90.1%、67.9%、66.5%、66.6%、50.8%、87.3%,说明土壤 pH 值、Zn 空间相关性很弱,空间变异主要受灌溉、施肥、耕作措施等人为活动的影响;土壤中 Cd、As、Pb、Cu 具有中等程度的空间相关性,空间变异既有来自结构性因素的影响,例如土壤母质、地形等,又有来自随机因素的影响,例如灌溉、施肥、耕作措施等人类活动。

最大相关距离即变程指变异函数达到基台值所对应的距离,它表示元素的空间自相关范围,变程的变化也反映出土壤要素主要变异过程的变化。变程越大,说明土壤中该元素的均一性越强;变程越小,则意味着土壤中该元素的均一性越弱,在小范围内的变

异加强,整体分布也更复杂。由表 3 可以看出,土壤中变程最大的元素是 As,其次是 Pb、Cd 和 Cu,而 pH 值和 Zn 的变程较小。这说明土壤中 As 空间分布的均一性较强,而 pH 值和 Zn 在土壤中的分布在小范围内的变异不容忽视。

2.3 土壤重金属的空间分布特征

利用 ArcGIS 的 GS 扩展功能模块(Geostatistical Analyst)的地统计分析功能,采用普通克里格(Ordinary kriging)插值模式,输入上述半方差函数模型的参数,进行土壤中 pH 值和 5 种重金属元素空间分布研究,得出空间变异格局示意图(图 3)。

从图 3 可以看出,土壤 pH 值及 5 种重金属的空间分布格局如下:(1)研究区域土壤中 pH 值的空间格局呈四周到中间的减少趋势,土壤 pH 值只有局部出现大于 7,主要分布在水源镇、龙岩乡和长美乡,大部分区域土壤 pH 值呈酸性。(2)研究区域土壤中 Cd 的空间格局呈西南向东北的减少趋势,高含量 Cd 集中分布在水源镇,其次是川山镇,洛阳镇和下南镇土壤重金属 Cd 含量也相对较高。(3)研究区域土壤中 As 的空间格局呈西向东的减少趋势,高含量 As 主要分布在川山镇,水源镇和洛阳镇也有少量高含量 As 分布。(4)研究区域土壤中 Pb 的空间格局呈中间到四周的减少趋势,高含量的 Pb 主要分布在川山镇,其次分布在洛阳镇、大安乡和水源镇。(5)研究区域土壤中 Cu 的空间格局呈东、西部向中间的减少趋势,其中水源镇分布的 Cu 含量最高。(6)研究区域土壤中 Zn 的空间格局与 Pb 的空间格局相似,都是呈中间到四周的减少趋势,高含量的 Zn 主要分布在川山镇,其次分布在洛阳镇、大安乡和水源镇。

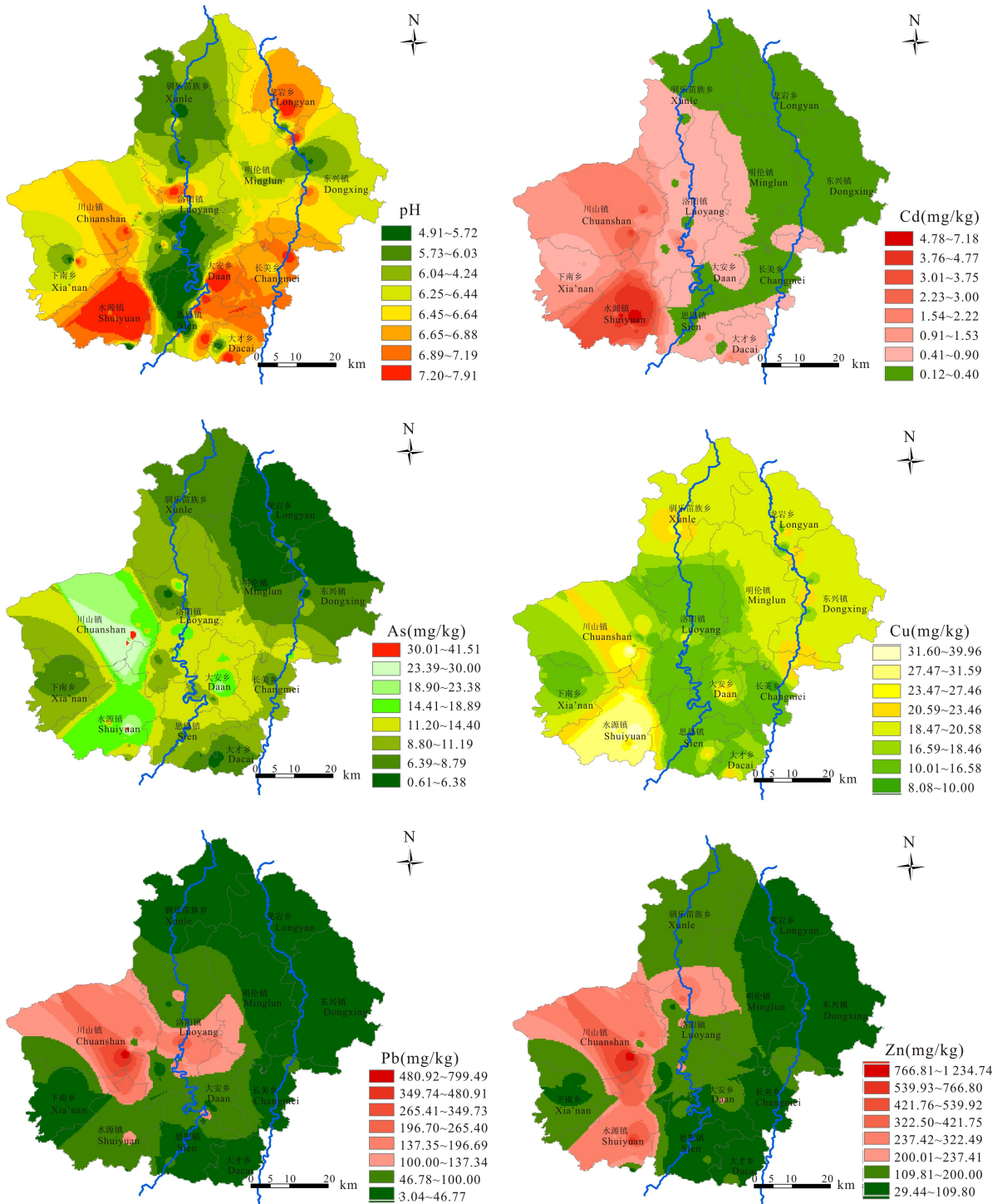


图3 农田土壤 pH 值、重金属含量空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of pH and heavy metals in farmland soil

3 讨论

从分布特征上比较来看,土壤中 pH 值和 Zn 的来源应和农业生产中的农药,化肥施用有密切的关系。从污染源分布图(图 3)可见,土壤中 Cd、As、Pb 和 Cu 的来源一方面与土壤母质有关,另外和研究区域的冶金、化工企业的点源污染有关。Borůvka 等^[20]在捷克东北部的研究也认为 Cu、Zn 主要为地

质来源。Pb 元素来源之一是交通车辆排放的尾气,另外还与土壤母质有关^[21]。土壤中 Cd 的来源和农业种植过程中施用复混肥和农药不无关系,Cd 一般可作为施用农药和化肥等农业活动的标识元素^[22],另外可能和环江的污水灌溉所带来的污染有关。可见,广西环江县土壤中的重金属元素,除土壤母质和土壤本身性质的影响之外,土地利用现状与农业生产的特点也是造成土壤重金属变异的另一重要因素。

本文仅分析了广西环江县农田表层土壤中重金属元素含量的空间变异特征与分布规律,尚无法对广西环江县的每一种重金属含量与工业企业的关系进行深入的定量分析。因此,要想掌握工业生产对土壤中重金属累积的贡献,还需要通过收集各工业企业的地理位置、生产规模、污染物排放量等方面的资料,结合土壤中重金属含量及分布情况进行深入研究。

4 结论

①以地统计学与 GIS 技术相结合的研究方法综合分析其农田土壤中重金属含量分布状况,研究区域的 Cd、As、Pb、Zn 表现出一定的污染特征,其中 Cd 是研究区域农田土壤的主要污染元素。

②研究区域农田土壤中不同重金属分布规律不同,除土壤母质和土壤本身性质的影响之外,土地利用现状与农业生产的特点也是造成土壤重金属变异的另一重要因素。主要原因是人类活动与土壤母质双重影响的结果。

参考文献:

[1] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.
SONG W, CHEN B M, LIU L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 293-298.

[2] 李瑞平,姜咏栋,李光德,等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究-以山东省泰安市为例[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2012,43(2):232-238.
LI R P, JIANG Y D, LI G D, et al. The spatial distribution of heavy metals in the cropland based on GIS[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2012, 43(2): 232-238.

[3] 蓝唯源,宋书巧,王德光,等. 环江县大环江下游沿岸重金属污染区农作物污染评价[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(4): 12-17.
LAN W Y, SONG S Q, WANG D G, et al. Evaluation of heavy metal pollution of crops in polluted soil region along lower reaches of the great Huanjiang River in Huanjiang County, Guangxi Province[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2010, 17(4): 12-17.

[4] 陆素芬,宋波,蒙冬柳,等. 环江尾矿库溃坝影响区农田土壤和蔬菜中重金属含量测定与健康风险评估[J]. 环境工程, 2015, 100(29): 130-133, 146.
LU S F, SONG B, MENG D L, et al. Heavy metal contents in soil and vegetables of a tailing spill in Huanjiang and human health risks assessment[J]. Environmental Engineering, 2015, 100(29): 130-133, 146.

[5] 唐成. 大环江两岸农田土壤重金属污染现状及其健康风

险评估[D]. 南宁:广西大学,2013.

TANG C. Status and health risk assessment of heavy metal pollution farmland soil in two sides of great Huanjiang River[D]. Nanning: Guangxi University, 2013.

[6] 广西壮族自治区统计局. 2017 广西统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Statistics. Guangxi statistical yearbook, 2017[J]. Beijing: China Statistics Press, 2017.

[7] 杨春华,王克林,陈洪松,等. 基于 RS 与 GIS 的喀斯特地区土地利用与保护格局探讨——以广西壮族自治区环江县为例[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 226-230.
YANG C H, WANG K L, CHEN H S, et al. Probing into the patterns of land use and protection in karst region based on RS & GIS-A case study from Huanjiang County in Northwest Guangxi[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 226-230.

[8] 许联芳,刘新平,杨勋林,等. 桂西北喀斯特区域的耕地安全性——以环江毛南族自治县为例[J]. 资源开发与市场, 2003, 19(5): 319-322.
XU L F, LIU X P, YANG X L, et al. The cultivated land security in the Northwest of Guangxi Province—A case study of Huanjiang County [J]. Resources Development & Market, 2003, 19(5): 319-322.

[9] 黄奎贤,覃柳妹,吴少珍,等. 广西河池市重金属污染现状分析与治理对策[J]. 广西科学院学报, 2012, 28(4): 320-324, 329.
HUANG K X, QIN L M, WU S Z, et al. Situation and remedial measures for heavy metals pollution in Hechi City of Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2012, 28(4): 320-324, 329.

[10] 蔡刚刚,李丽,黄舒城. 广西矿区重金属污染现状与治理对策[J]. 矿产与地质, 2015, 29(4): 541-545.
CAI G G, LI L, HUANG S C. Current status of heavy metal pollution in the mining area of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2015, 29(4): 541-545.

[11] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(4): 91-94.
LING N G. Analysis of heavy metal content in different types of farmland soils in Guangxi[J]. Agro-Environment & Development, 2010, 27(4): 91-94.

[12] 吴洋,杨军,周小勇,等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评估[J]. 环境科学, 2016, 36(8): 2964-2971.
WU Y, YANG J, ZHOU X Y, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China[J]. Environmental Science, 2016, 36(8): 2964-2971.

- [13] ZHAI L M, LIAO X Y, CHEN T B, et al. Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(6): 696-703.
- [14] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及其广西土壤背景值 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992. Guangxi Institute of Environmental Protection. Soil background value research method and soil background value of Guangxi [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1992.
- [15] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 20-27. LIU F C, SHI X Z, YU D S, et al. Mapping soil properties of the typical area of Taihu Lake watershed by geostatistics and geographic information systems—A case study of total nitrogen in topsoil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 20-27.
- [16] 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): 161-169. WANG S Q, ZHU S L, ZHOU C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161-169.
- [17] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程 [M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017. ZHANG W D. Basic course on statistical analysis of SPSS [M]. 3rd editim. Beijing: Higher Education Press, 2017.
- [18] 丛艳静. 基于 GIS 技术的兴化平原耕地土壤重金属污染空间分异与环境风险评 [D]. 福州: 福建农林大学, 2006. CONG Y J. Spatial variability and Environmental risk assessment of heavy metal pollution of cultivated land in Xinghua Plain based on GIS [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2006.
- [19] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central iowa soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [20] BORÜVKA L, VACEK O, JEHLICKA J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, 128(3/4): 289-300.
- [21] LOSKA K, WIECHULA D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8): 723-733.
- [22] FILZEK P D B, SPURGEON D J, BROLL G, et al. Pedological characterization of sites along a transect from a primary Cadmium/Lead/Zinc smelting works [J]. *Ecotoxicology*, 2004, 13(8): 725-737.

(责任编辑: 符支宏)