

广西农田土壤重金属空间分布特征及污染评价



崔培鑫^{1,*}, 雷金艳², 于瀛³, 刘朝阳⁴

¹广西博世科环保科技股份有限公司, 广西南宁 530007

²广西大学林学院, 广西南宁 530225

³桂林理工大学南宁分校, 广西崇左 532100

⁴南宁园博园旅游开发有限责任公司, 广西南宁 530299

摘要: 农田土壤是农业发展的重要资源, 对重金属的空间分布和污染水平进行宏观上的分析, 可为未来农田污染治理提供科学的依据。基于 2014 年来广西农田土壤重金属实测数据, 探讨了农田土壤 Pb、As、Cd、Cr、Zn 和 Cu 共 6 种重金属的空间分布特征, 并采用地累积指数法对污染状况展开评价。结果表明广西农田土壤 Pb、As、Cd、Cr、Zn、Cu 的平均值均高于广西农田土壤背景值, 其中 Pb、As、Cd、Zn 元素的平均含量均超过土壤环境质量标准 (GB15618-2018), Cr 和 Cu 未超过该标准; 广西农田土壤重金属的空间分布特征差异较为明显, 总体上中北部地区土壤重金属含量高于南部地区; 地累积指数大小依次为: $Zn > Pb > Cd > As > Cu > Cr$, 其中农田土壤 As、Cu、Cr 的平均 I_{geo} 值均小于 0, 而受当地采矿活动影响, 土壤 Zn、Pb、Cd 的平均 I_{geo} 值较高。

关键词: 广西; 农田土壤; 重金属; 空间分布; 污染评价; 地质累积指数

DOI: [10.57237/j.wjese.2023.01.003](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2023.01.003)

Spatial Distribution Pattern and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Farmland Soil in Guangxi

Cui Peixin^{1,*}, Lei Jinyan², Yu Ying³, Liu Zhaoyang⁴

¹Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning 530007, China

²College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530225, China

³Guilin University of Technology at Nanning, Chongzuo 532100, China

⁴Nanning Yuanboyuan Tourism Development Co., Ltd., Nanning 530299, China

Abstract: Farmland soil is an indispensable natural resource in agricultural production. A macro analysis of the spatial distribution and pollution level of heavy metals can provide a scientific basis for future farmland pollution control. Based on the measured data of heavy metals in farmland soil in Guangxi since 2014, the spatial distribution characteristics of 6 heavy metals in farmland soil, namely Pb, As, Cd, Cr, Zn and Cu, were discussed, and the pollution status was evaluated using the geo accumulation index method. The results showed that the average values of Pb, As, Cd, Cr, Zn, Cu in farmland soil were higher than the background values of farmland soil in Guangxi. The average contents of Pb, As, Cd, Zn in farmland soil exceeded the soil environmental quality standard (GB15618-2018), and Cr and Cu did not exceed the standard; The spatial

*通信作者: 崔培鑫, ecocpx@163.com

distribution characteristics of heavy metals in farmland soils in Guangxi are obviously different. Generally, the content of heavy metals in the middle and north regions is higher than that in the south regions; The land accumulation index is in the order of $Zn > Pb > Cd > As > Cu > Cr$, in which the average I_{geo} values of As, Cu and Cr in farmland soil are all less than 0, while affected by local mining activities, the average I_{geo} values of Zn, Pb and Cd in soil are higher.

Keywords: Guangxi; Farmland Soil; Heavy Metals; Spatial Distribution; Pollution Evaluation; Geo-accumulation Index

1 引言

土壤是人类社会生存和发展的重要资源之一,也是陆地生态系统重要的组成部分。随着世界工业化进程的加快和农业现代化的发展,土壤重金属污染成为全球关注的突出环境问题[1]。我国矿产资源开发、金属加工冶炼、化工生产、污水灌溉以及不合理的化肥农药施用等人为因素,导致重金属进入农田土壤,致使土壤中重金属含量明显高于原有含量,造成生态环境风险及农产品危害[2-5]。

重金属是土壤环境中一种具有潜在危害的污染物,通常不随水淋滤,也不能被微生物所降解,具有易积累、难挥发、毒性大和隐蔽性强等特点[6-8]。重金属会对农作物的生长发育造成影响,导致作物产量和品质下降,还会通过根系吸收进入作物可食部位,通过食物链途径在人体内累积[9-11],直接危害人体健康。日本在 20 世纪中叶,由重金属中毒事件引发的“骨痛病”就是由于当地人群摄食重金属污染的农产品导致[12]。因此,对农田土壤重金属的富集特征、空间分布以及污染现状进行系统地评价至关重要。陈文轩等[13]对中国农田土壤 7 种重金属的研究得出,中国农田土壤重金属的空间分布特征差异较为明显,南方农田土壤重金属含量明显高于北方。宋波等[14]对广西西江流域农田土壤重金属的研究发现,西江流域农田土壤 7 种重金属元素在土壤中均有一定程度的富集,其中 Cd 存在较高的潜在生态风险。杨琼等[15]对广西岩溶地质区耕层土壤的研究发现,Cd 和 As 元素含量富集现象较为突出。

广西属于喀斯特地貌岩溶区域,土壤背景值高。同时,该地区成矿地质条件优越,矿产丰富,被称为有色金属之乡。由于当地管理不善和矿产资源的不适当开发利用,矿产的资源开发,给矿区周围的环境造成严重破坏[16]。因此,本文基于 2014 年以来可收集到的广西各地农田土壤重金属实测含量数据,探讨广西农田土壤不同重金属: Pb (铅)、As (砷)、Cd (镉)、Cr (铬)、Zn (锌)、Cu (铜) 的污染情况及空间分布

特征,同时采用地累积指数法对其污染状况展开评价。通过全面了解广西农田土壤重金属的整体污染现状,以为未来农田污染治理提供科学的依据。

2 材料与方法

2.1 数据来源

广西农田土壤重金属含量统计数据均通过“广西重金属”关键词搜索。排除城镇工业用地、河流沉积环境以及海洋沉积物等非农田土壤重金属研究,共选出 2014 年以来公开发表的文献 40 篇,具体的样本点分布见图 1。其中样本点坐标主要为文献中直接标注的采样点坐标,重金属数据通过提取文献中对应的农田土壤重金属含量。

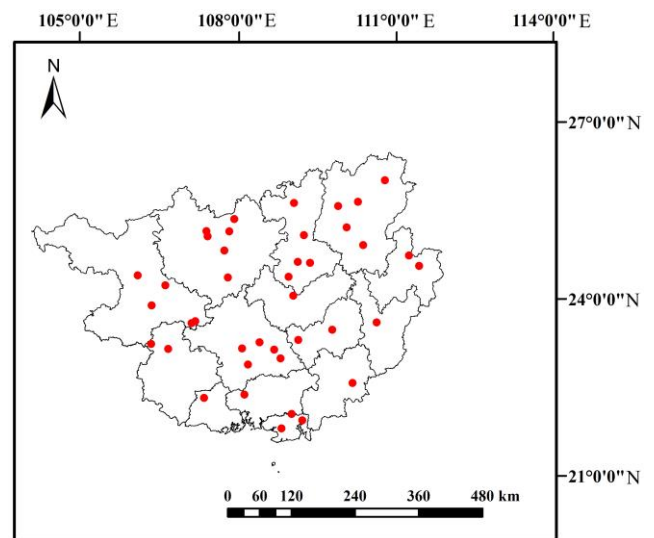


图 1 广西农田土壤重金属样本点分布示意图

2.2 研究方法

2.2.1 反距离权重插值法

由于土壤重金属的富集程度在区域内存在空间

分异,且部分地区无统计资料,简单利用样本数据展开分析评价难以准确反映土壤实际状况。反距离加权插值法,即 IDW (Inverse Distance Weight),是一种加权平均内插法,该方法认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响,且影响的大小随距离的增大而减小[17],该法可直接反映不同区域重金属的浓度大小。本文选取反距离加权插值法确定广西农田土壤重金属的空间分布特征。

2.2.2 土壤污染评价

土壤污染评价方法采用国内外普遍使用地累积指数法 (I_{geo}),该法是由 Muller 在 20 世纪 60 年代提出的一种能够定量评价土壤重金属污染水平的方法,地累积指数不仅能充分反映土壤各元素的自然分布特征和累积程度,而且还能判断土壤环境受自然背景和人类活动的影响[18-20],其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 为土壤重金属 n 实测值; B_n 为土壤重金属 n 背景参比值; K 为成岩作用可能对背景值的影响,修正值 K 取 1.5。背景参比值来源于中国环境监测总站调查数据[21]。

地累积指数分级标准见表 1,土壤重金属的 I_{geo} 值越大,污染越严重;当 I_{geo} 值大于 0 时,表明土壤重金属主要来源于人类活动而非成土母质等自然因素。

表 1 农用地土壤重金属描述性统计

污染等级	I_{geo}
无污染	$I_{geo} < 0$
轻度污染	$0 \leq I_{geo} < 1$
偏中污染	$1 \leq I_{geo} < 2$
中度污染	$2 \leq I_{geo} < 3$
偏重污染	$3 \leq I_{geo} < 4$
重污染	$4 \leq I_{geo} < 5$
严重污染	$I_{geo} \geq 5$

3 结果与讨论

3.1 土壤重金属含量的描述性统计

广西农田土壤重金属描述性统计结果见表 2,其中土壤环境质量标准采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值的较严格项。结果显示,农田土壤 Pb、As、Cd、Cr、Zn 和 Cu 的样本平均值分别为 234.13、55.87、1.76、112.35、762.75 和 47.72 mg kg⁻¹,均高于广西农田土壤背景值,超出倍数分别为 9.76、2.73、6.59、1.37、10.09 和 1.72,此外 Pb、As、Cd、Zn 元素的平均含量均超过土壤环境质量标准,Cr 和 Cu 未超过该标准。变异系数可以反映区域重金属元素的分布差异,所研究的种重金属元素的变异系数大小顺序为: Pb > Zn > As > Cd > Cu > Cr,其中 Cu 和 Cr 均属中等程度变异 (0.01 < CV < 1) [22],Pb、Zn、As、Cd 的变异系数均大于 1,表明受外界干扰比较大,含量分布不均匀,变异性较强,而 Cu 和 Cr 受外源影响相对较小。

表 2 农用地土壤重金属描述性统计

重金属	样本数	平均值/mg kg ⁻¹	标准差	变异系数	广西农田土壤背景值[21]/mg kg ⁻¹	土壤环境质量标准/mg kg ⁻¹
Pb	40	234.13	993.50	4.24	24.0	70.0
As	35	55.87	132.49	2.37	20.50	25.0
Cd	37	1.76	2.51	1.43	0.267	0.3
Cr	38	112.35	86.18	0.77	82.10	150.0
Zn	26	762.75	2577.41	3.38	75.60	200.0
Cu	38	47.72	42.79	0.90	27.80	50.0

3.2 广西农田土壤重金属空间分布特征

利用 ArcGIS 10.2 软件对收集的广西农田土壤重金属含量数据进行反距离权重插值,得到重金属含量的空间插值图(图 2)。结果显示,Pb 含量总体呈现由东北向西南递减的趋势,Pb 在广西东北部较高,高值区以柳州为中心向周边扩散,沿海区域如防城港市的含量较低;As 含量在广西东部出现高值区,在中部和西部出现次高值

区,南部和柳州市范围 As 含量较低;Cd 在河池市有明显高值区,而在柳州和桂林西部以及广西南部地区含量较低,其他区域 Cd 的含量均较高;Cr 含量在广西中南部和桂林东北区域含量较高,以南宁、钦州和贵港交界处为中心有大范围高值区;Zn 含量以柳州为中心出现大范围高值区,崇左市也有分布,而在百色中部、南宁和沿海地区则含量较低;Cu 在广西东部和西部含量较高,中部相对较低。总体上看,重金属的空间分布各有其特

点，南部地区重金属含量低于中部和北部。
通常土壤重金属主要来自成土母岩，自然成土过程中各种微量重金属在次生层中的再分配造成了土壤重金属富集[23]。广西是我国重要岩溶区，在其中北部分布大面积碳酸盐岩母质发育的土壤，由于碳酸盐岩

风化成土过程中，表现出了脱硅富铝铁的特点，土壤中铁锰氧化物和黏土矿物含量较高，对土壤重金属有着较强的吸附作用，土壤重金属含量较高，特别是 Cd [24-25]。这是导致广西中北部农田重金属含量普遍高于南部的重要原因。

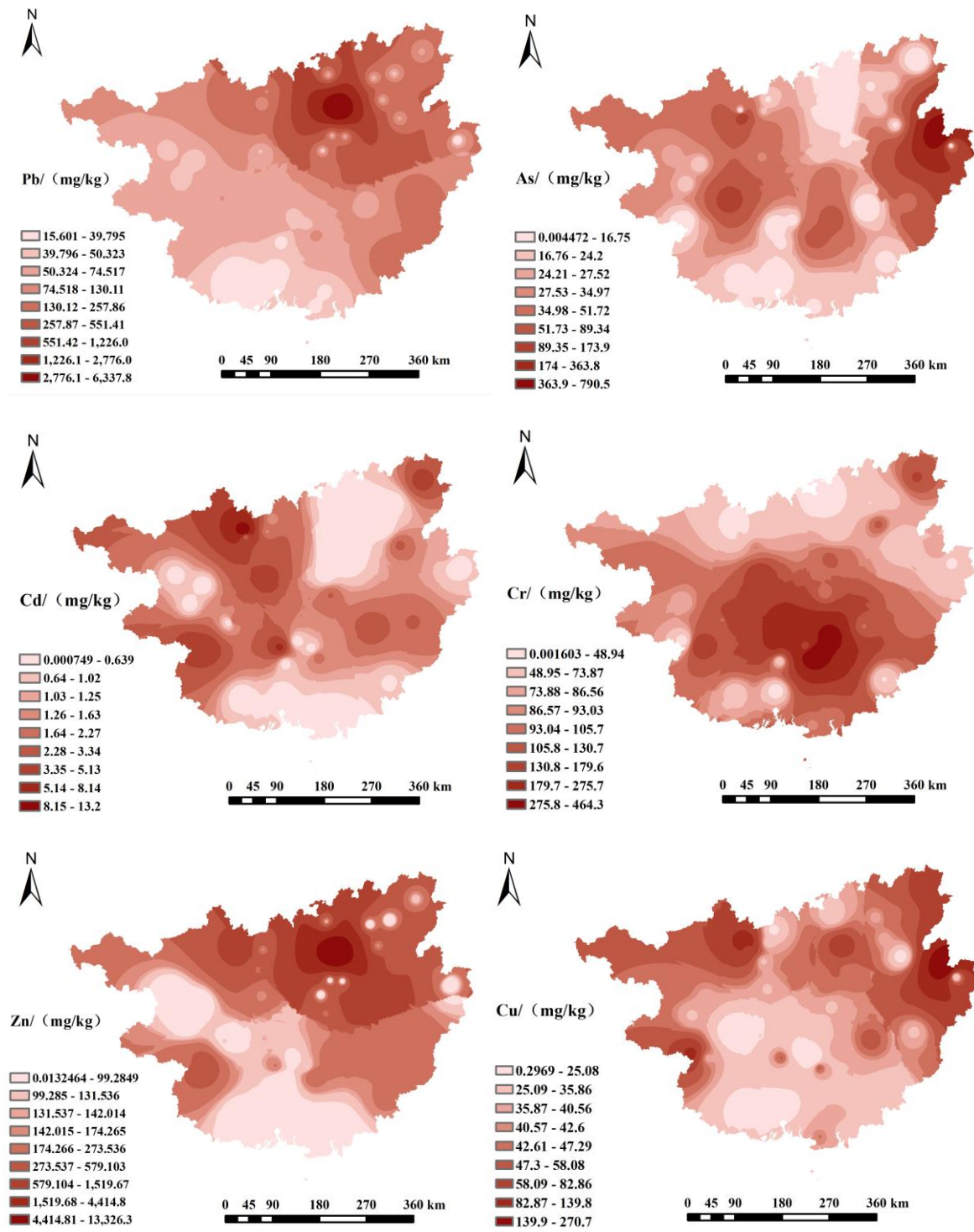


图 2 广西农田土壤重金属含量空间分布图

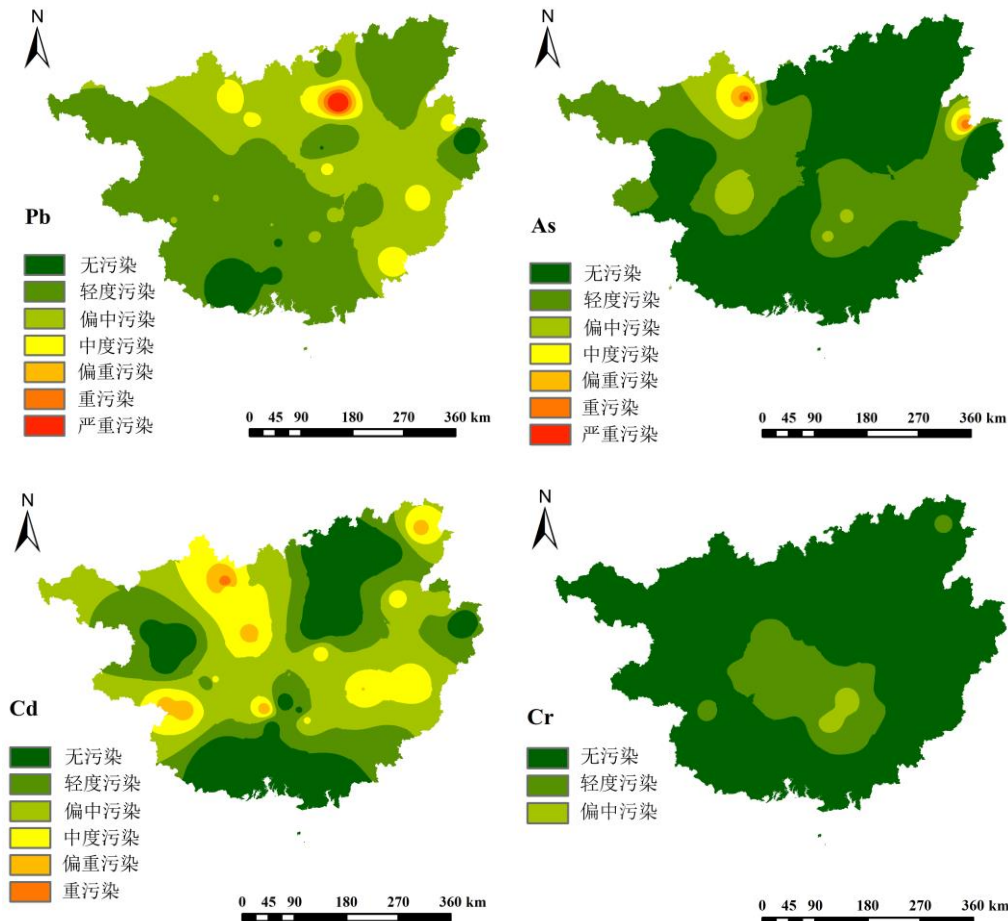
3.3 广西农田土壤重金属污染评价

以广西壮族自治区的土壤背景值为标准, 计算农田土壤 6 种重金属的地累积指数 (表 3)。从平均地累积指数来看, 农田土壤地累积指数大小依次为: $Zn > Pb > Cd > As > Cu > Cr$ 。其中农田土壤 As、Cu、Cr 的平均 I_{geo} 值均小于 0, 表明这 3 种重金属主要来源于地质因素; 土壤 Zn、Pb、Cd 的平均 I_{geo} 值均大于 0, 表明这 3 种元素主要来源于人类活动。其中, Pb 的轻度污染点位占比 50%, 偏中度和中度污染均占比 17.5%, 严重污染占比 2.5%; Cd 的偏中污染占比 10.8%, 中度污染占比 18.9%, 偏重污染占比 16.2%, 严重污染占比 2.7%; Zn 的轻度污染、偏中污染和偏重污染分别占比 26.9、30.8、11.5, 严重污染占比 3.8%。

利用 ArcGIS 10.2 软件对各重金属的地质累积指数进行反距离权重插值, 得到 I_{geo} 的空间插值图 (图 3)。由图可见, Pb 的污染主要在广西中东北部, 西南污染程度较轻, 污染中心集中在柳州河池交界处。As 的污染主要集中在河池和贺州。Cd 的污染分布相对复杂,

百色东南部、柳州、梧州以及沿海地区的污染较轻, 其他地区均有污染分布。Cr 在全区污染较轻, 中部地区有轻度和偏中污染。Zn 在广西北部地区有明显污染分布, 在柳州污染最重, 南部污染较轻。Cu 在广西东北和西北地区均有污染分布, 主要为轻度污染。

广西矿产资源丰富, 分布着大量的锰矿、铅锌矿及其它有色金属矿, 在选矿过程中大量的废渣堆放在尾矿库内, 由于尾矿库防渗设计不合理, 废渣中的重金属经降水淋溶向地表、地下及周边的土壤渗透, 导致矿区周边农田的严重污染[26]。本研究中广西农田土壤 Zn、Pb、Cd 的平均 I_{geo} 值均较高, 主要原因是受到采矿活动的影响, 释放了大量的重金属, 使得土壤中的重金属含量超过本底值。从 I_{geo} 值分布看, 重金属 Zn、Pb、Cd 污染较重的区域也主要分布在矿业较发达的河池和柳州。项萌等[27]对河池市的铅锑矿区周边土壤中重金属含量的研究发现, 土壤受到较高含量的 Pb、Zn 污染, Cd 也有一定的污染, 与本研究基本一致。



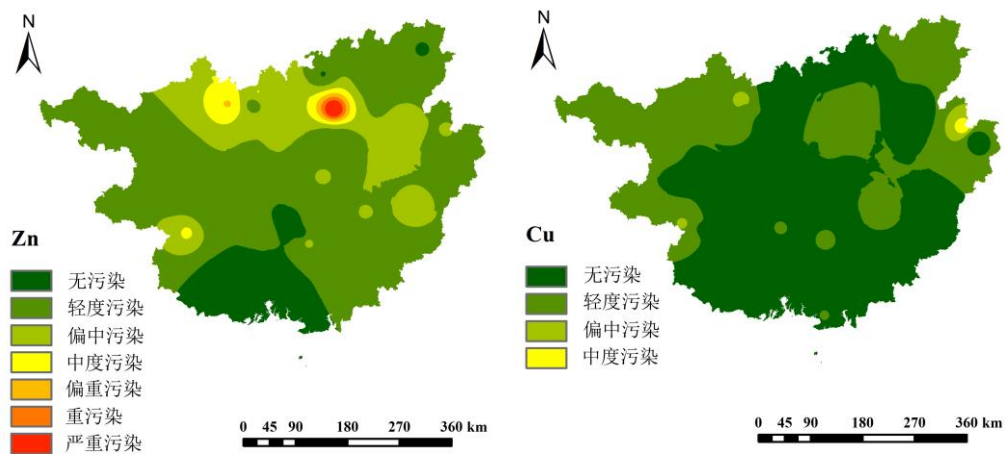


图3 广西农田土壤重金属污染分布图

表 3 广西农田土壤重金属污染状况 (I_{geo})

项目	Pb	As	Cd	Cr	Zn	Cu
I_{geo} 平均值	0.96	-0.08	0.89	-0.41	1.00	-0.09
最小值	-1.23	-2.71	-2.84	-2.33	-1.75	-1.88
最大值	7.46	5.45	5.05	1.92	6.88	2.70
无污染/%	12.5	65.7	48.6	76.3	23.1	60.5
轻度污染/%	50	14.3	2.7	18.4	26.9	31.6
偏中污染/%	17.5	11.4	10.8	5.3	30.8	5.3
中度污染/%	17.5	2.9	18.9	0	11.5	2.6
偏重污染/%	0	0	16.2	0	3.8	0
重污染/%	0	2.9	0	0	0	0
严重污染/%	2.5	2.9	2.7	0	3.8	0

4 结论

- (1) 广西农田土壤 Pb、As、Cd、Cr、Zn 和 Cu 含量的样本平均值分别为 234.13、55.87、1.76、112.35、762.75 和 47.72 mg kg⁻¹, 其中 Pb、Zn、As、Cd 的积累较高, 变异较大。
- (2) 反距离权重插值法显示, 广西农田土壤重金属的空间分布各有其特点, 但受碳酸盐岩成土母质的作用, 广西中部和北部地区重金属含量普遍高于南部地区。
- (3) 平均地累积指数大小依次为: Zn>Pb>Cd>As>Cu>Cr, 土壤主要受到重金属 Zn、Pb、Cd 的污染, 而 As、Cu、Cr 的污染较轻。

参考文献

[1] 唐成, 宋同清, 杨钙仁, 等. 大环江两岸农田重金属污染现状及健康风险评价 [J]. 农业现代化研究, 2013, 34 (5): 613-616.

[2] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32 (10):100-106.

[3] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (11): 1019-1026.

[4] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 153-159.

[5] 陈程, 陈明. 环境重金属污染的危害与修复 [J]. 环境保护, 2010, (3): 55-57.

[6] Wang C, Yang Z F, Zhong C, et al. Temporal-spatial variationand source apportionment of soil heavy metals in therepresentative river-alluviation depositional system [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 18-26.

[7] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review [J]. Environmental Pollution, 2012, 168: 44-53.

[8] 陈满怀. 土壤环境学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 216-273.

- [9] 刘红樱, 谢志仁, 陈德友, 等. 成都地区土壤环境质量初步评价 [J]. 环境科学学报, 2004, 24 (2): 297-303.
- [10] Burt R, Wilson M A, Mays M D, et al. Major and trace elements of selected pedons in the USA [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32 (6): 2109-2121.
- [11] Wong C S C, Wu S C, Duzgoren-Aydin N S, et al. Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China [J]. Environmental Pollution, 2007, 145 (2): 434-442.
- [12] 张舒玄, 卢海燕, 李优琴, 等. 农产品中重金属的检测方法研究进展 [J]. 理化检验 (化学分册), 2019, 55 (8): 976-983.
- [13] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价 [J]. 环境科学, 2020, 41 (6): 2822-2833.
- [14] 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.
- [15] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 等. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评价 [J]. 中国科学:地球科学, 2021, 51 (8): 1317-1331.
- [16] 李金城, 尹仁湛, 罗亚平, 等. 广西大新锰矿区土壤重金属污染评价 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (7): 183-185+190.
- [17] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用 [J]. 应用生态学报, 2007 (9): 2013-2018.
- [18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2 (3): 108-118.
- [19] Frstnerdr U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. GeoJournal, 1981, 5 (5): 417-432.
- [20] Ghrefat H A, Abu-Rukah Y, Rosen M A. Application of geo accumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra Dam, Jordan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178 (1-4): 95-109.
- [21] 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, 330-368.
- [22] 张敬雅, 李湘凌, 章凌曦, 等. 安徽庐江县砖桥潜在富硒土壤重金属元素空间变异与来源 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (9): 1594-1603.
- [23] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (12): 2365-2378.
- [24] Xia X, Ji J, Yang Z, et al. Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock [J]. Chemosphere, 2020, 254: 126799.
- [25] 陈彪, 卢炳科, 邱炜. 广西喀斯特地貌区土壤重金属来源与生态风险评价 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44 (5): 639-644.
- [26] 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.
- [27] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锑矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律 [J]. 矿物学报, 2011, 31 (2): 250-255.