

长沙城郊农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价研究

刘琼峰^{1,2}, 李明德^{1*}, 段建南², 魏文学³, 吴海勇¹

(1.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 3.中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要:采集长沙城郊 18 个乡镇 513 个农田土壤样点, 运用模糊综合评价法和层次分析法从农田土壤重金属 Pb、Cd 的含量、土壤理化特性(pH 值、有机质、碱解氮、有效磷)、土壤区位特征(土壤采样点离城镇的距离、离建设用地的距离、离河流的距离、离农村居民点的距离)3 个方面选取评价指标, 建立农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价模型, 并根据生态风险指数值(ERI)将生态风险等级划分为四级(I 级 $ERI > 0.70$ 、II 级 $0.6 < ERI \leq 0.70$ 、III 级 $0.4 < ERI \leq 0.60$ 、IV 级 $ERI \leq 0.40$)。结果表明, 22.9% 的土壤样点生态风险指数为 III 级和 IV 级水平, 具有较高的生态风险, 主要分布在河流、城镇、建设用地和农村居民点的聚集区。根据各乡镇生态风险等级的差异, 划分农田土壤重金属 Pb、Cd 的高、中、低生态风险区。农田土壤重金属的生态风险评价与分级、分区是建立农田土壤重金属生态风险防控体系的必要手段, 可为农田土壤的科学合理利用提供参考。

关键词:农田土壤; 重金属; Pb; Cd; 生态风险评价

中图分类号: S159.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)08-1564-07 doi:10.11654/jaes.2013.08.011

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals of Pb and Cd in the Suburban Cropland Soils in Changsha

LIU Qiong-feng^{1,2}, LI Ming-de^{1*}, DUAN Jian-nan², WEI Wen-xue³, WU Hai-yong¹

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: The purpose of this study was to assess the ecological risk of heavy metals Pb and Cd in suburban agricultural soils in Changsha, the capital city of Hunan Province. A total of 513 surface soil samples (0~20 cm) were collected from paddy fields and upland covering whole city region, and the concentrations of Pb and Cd were analyzed. Fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process were applied to establish ecological risk assessment models of Pb and Cd contamination, and evaluation indices (ERI) were set up based on Pb and Cd concentrations, soil physicochemical properties and soil location characteristics. The indices of soil physicochemical properties were soil pH, organic matter, alkali-hydro nitrogen and available phosphorus, while the indices of soil location characteristics were the distance from cropland to town, industrial construction land, river, and settlement. The ecological risk grade was divided to four ranks according to the values of ecological risk index, $ERI > 0.70$, $0.6 < ERI \leq 0.70$, $0.4 < ERI \leq 0.60$, and $ERI \leq 0.40$ were defined as class I, II, III and IV respectively. About 22.9% sampling points were distributed in class III and IV, most of high ecological risk soil samples were located at the surrounding area of riverside, town, industrial construction land and settlement. The ecological risk regions of farmland soil Pb and Cd were divided into high, middle, and low ranks. Therefore, the ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soil could be important in controlling and preventing soil heavy metal contamination.

Keywords: agricultural soil; heavy metal; Pb; Cd; ecological risk assessment

农田土壤重金属污染严重威胁农产品的产地环境, 成为影响食品安全与农业生态环境的突出问

题。研究区域农田土壤重金属含量的空间差异与污染源之间的关系、评估及预测区域土壤重金属污染风险, 对于农田土壤重金属的污染治理、污染风险分区以及作物种植的重金属污染规避等均具有重要的意义^[1]。

农田土壤重金属的生态风险评价是一种通过数据分析, 评价与自然因素及人类活动相关的一个或多个风险源对农田生态系统可能造成的生态效应的一

收稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B17)

作者简介: 刘琼峰(1979—), 女, 湖南邵东人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤资源利用与 3S 技术研究。

E-mail: lqf925@163.com

* 通信作者: 李明德 E-mail: limingde460@sohu.com

种方法,是管理、控制和治理土壤重金属污染的前提。国内外学者对于土壤重金属的污染风险评价已作了大量的研究,其中主要的研究方法有指数法如潜在风险指数法、内梅罗指数法等^[2-4];综合评价模型如模糊综合评价法、层次分析法等^[5];基于地统计理论的克里金插值方法^[6-7]、基于土壤景观模型的方法^[8]等。其中指数法将土壤污染程度用比较明确的界限加以区分,已在土壤重金属评价中得到了广泛的应用,而综合评价模型综合考虑了土壤环境质量的模糊性及各污染因素的权重,使评价更具有科学性^[9]。由于土壤重金属污染程度的界限是渐变、模糊的,引入模糊数学的概念是解决土壤重金属污染级别和风险程度的模糊边界的有效方法^[10]。但是,已往的研究多侧重于从污染物的浓度和毒性作用的角度来进行评价^[3-4],而很少结合土壤理化特性和区位特征来进行风险评价。

本文以长沙城郊有代表性的 18 个乡镇为例,运用模糊综合评价法和层次分析法开展农田土壤重金属生态风险评价研究,从农田土壤重金属 Pb、Cd 的含量、土壤理化特性、土壤区位特征三个方面选取因子构建评价指标体系,然后确定各个评价指标的隶属函数,建立农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价模型,以期探讨农田内部环境如土壤重金属含量与理化性状和外部环境如区位特征等综合因素作用下农田生态系统的风险程度,为农田土壤重金属的污染防控与作物种植布局提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集测定

长沙位于长江经济带和华南经济圈结合部,经济区位优势显著,是长株潭经济一体化的核心城市^[11]。长沙市农业产业布局总体规划按照近郊、中郊、远郊

三个农业环带进行布局,近郊为都市农业经济圈,中郊为特色优势农业经济圈,远郊为生态农业经济圈。

2008 年,长沙市耕地面积 2622 km²,占土地总面积的 22.19%,其中水田面积 2249 km²,占耕地面积的 85.77%,旱地面积 373 km²,占耕地面积的 16.59%。耕地主要分布在湘江、捞刀河、浏阳河、浏水河、楚江、乌江、靳江河、大溪河等河谷平原^[12]。由于长沙市的耕地资源主要分布在湘江流域周边的河谷平原,本研究根据长沙市流域的分布情况以长沙城区为中心,环城由近郊-中郊-远郊呈辐射状分西、东、南、西北、东北、东南 6 条路线设定采样点,沿主要河流的流向在长沙城郊岳麓区、天心区、开福区、望城区、长沙县、浏阳市、宁乡县 7 个县区 18 个乡镇设置了 513 个农田土样采集单元,各乡镇的耕地面积参见表 1,每个单元控制的采样面积为 667 m² 左右,每个单元按 2 km² 左右采集一个混合样点,各采样点均经 GPS 准确定位,水田采样深度为 0~15 cm,旱地采样深度为 0~20 cm,每一丘农田均匀随机采取 15~20 个样点土壤,充分混合后,采用四分法留取 1 kg 供分析测试用,其中采集水田土样 491 个,占 95.71%,旱地土样 22 个,占 4.29%,土壤类型主要为水稻土,占 94.35%^[13],土壤采样点的分布如图 1 所示。

土壤样品经自然风干,磨碎分别过 10 目、60 目和 100 目尼龙筛,参照美国国家环保局推荐的 HNO₃-H₂O₂ 方法消煮^[14],采用石墨炉原子吸收光谱仪(德国耶拿 EEnit600)按国家标准(GB/T 17141—1997)测定土壤 Pb 和 Cd 的总量;土壤理化性状指标的测定采用土壤农化常规分析方法^[15]检测。

1.2 数据处理

为了获取土壤区位特征的相关数据,在 Arc-GIS10.0 软件中建立长沙市 1:10 万土地利用现状图

表 1 土壤采样点所在乡镇耕地面积(hm²)

Table 1 The arable area of villages and towns that collecting soil sites(hm²)

乡镇名称	耕地面积	水田	旱地	乡镇名称	耕地面积	水田	旱地
天心区大托镇	730.41	547.31	87.35	长沙县福临镇	2 644.93	2 536.20	108.73
开福区捞刀河镇	2 601.12	2 531.37	63.08	长沙县北山镇	5 094.18	4 850.22	243.96
岳麓区雷锋镇	1 802.26	1 669.19	133.07	浏阳市溪江乡	1 514.20	1 343.37	170.83
望城区高塘岭镇	1 073.44	987.54	85.90	浏阳市永和镇	970.24	916.01	54.23
望城区格塘乡	2 386.88	2 243.90	142.98	浏阳市张坊镇	2 882.97	2 716.89	166.08
望城区白若铺乡	3 325.75	3 017.02	308.73	浏阳市大瑶镇	1 791.08	1 538.19	252.89
宁乡县回龙铺镇	3 263.75	2 991.59	272.16	浏阳市柞冲镇	2 703.88	2 361.35	342.53
宁乡县黄材镇	3 683.45	2 823.48	859.97	浏阳市永安镇	4 500.89	4 037.39	463.50
长沙县暮云镇	1 418.48	1 309.28	109.20	浏阳市北盛镇	3 284.70	3 140.67	144.03

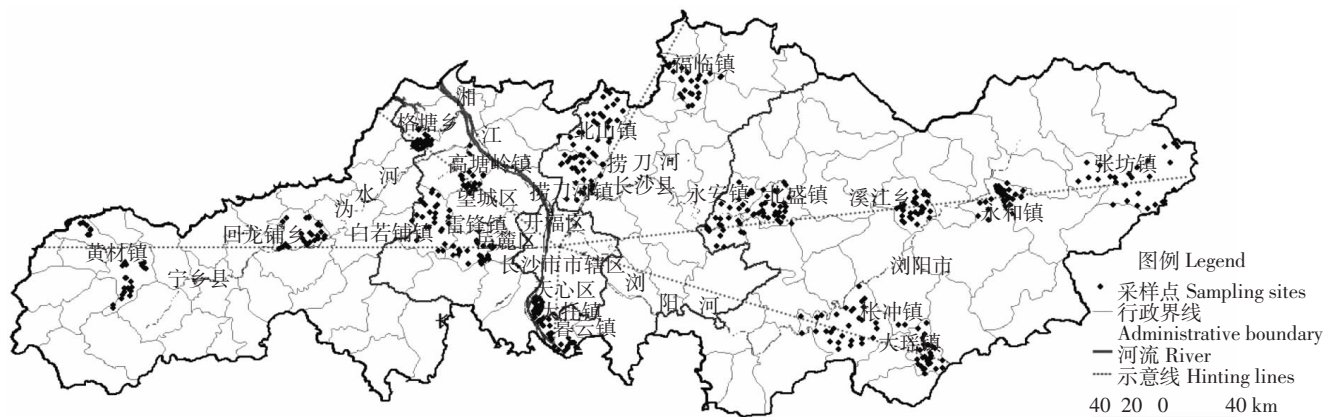


图 1 长沙城郊农田土壤重金属采样点分布图

Figure 1 Distribution of sampling sites for test of soil heavy metals in suburban cropland of Changsha Prefecture

空间数据库,运用距离量算等空间分析功能得到农田土壤采样点离城镇、建设用地、河流、农村居民点的距离数据。采用 ArcGIS 地统计学模块对土壤重金属生态风险指数值进行空间插值和图形绘制。

2 结果与分析

2.1 评价指标与权重的确定

运用层次分析法构建农田土壤重金属生态风险评价指标体系和确定指标权重。该体系由目标层、准则层和方案层构成,将农田土壤重金属生态风险指数定为目标层,土壤重金属的含量、土壤理化特性和区位特征设为准则层,各单项指标设为方案层。根据专家讨论分析,对所列指标两两比较重要程度而逐层进行判断评分,构造判断矩阵,然后利用方根法求得最大特征根对应的特征向量,得到单项指标对总目标的重要性权值,经过层次单排序及一致性检验和层次总排序及一致性检验,计算出农田土壤重金属生态风险评价指标权重(表 2)。

2.2 风险隶属度函数的确定

在模糊综合评价中,评价准则往往不能用解析表达式直接表示出来,只能通过模糊语言对风险系统的等级进行评判。一般采用特尔菲专家评估法建立各评价因子的隶属度函数类型,主要为抛物线型和 S 型隶属度函数。

抛物线型隶属度函数转换公式:

$$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x_2 < x < x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_3-x_1)+0.1 & x_1 \leq x < x_3 \\ 1.0 & x_3 \leq x \leq x_4 \\ 1.0-0.9(x-x_4)/(x_2-x_4) & x_4 < x \leq x_2 \end{cases}$$

S 型(戒上型)隶属度函数转换公式

表 2 农田土壤重金属 Pb、Cd 生态风险评价指标权重

Table 2 Weight of ecological risk assessment of heavy metals Pb and Cd in agricultural soil

因子	土壤重金属含量(0.600)	土壤特征(0.212)	区位特征(0.188)	组合权重
土壤重				
金属含量				
土壤理化特性				
Cd 含量	0.667			0.400
Pb 含量	0.333			0.200
pH 值		0.273		0.058
有机质		0.273		0.058
速效磷		0.273		0.058
碱解氮		0.182		0.039
区位特征				
离城镇的距离			0.300	0.056
离建设用地的距离			0.300	0.056
离河流的距离			0.200	0.038
离农村居民点的距离			0.200	0.038

$$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x > x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x < x_1 \end{cases}$$

函数中, x_1 为指标的函数下限, x_2 为上限,最优值为 $x_3 \sim x_4$ 。隶属度值大小在 0.1~1.0,取值越大表示土壤状况越好,农田土壤重金属的生态风险越小。根据参考已有研究成果^[16]和相关专家的经验、以及评价指标数据,确定各项评价指标的隶属度和隶属度函数曲线转折点的取值(表 3、表 4)。

表 3 中 P_i 为单项累积指数, $P_i=C_i/S$, C_i 为实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S 为土壤评价标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据长株潭地区土壤 Pb、Cd 的自然背景值^[17] 设定 $\text{Pb}=60.27$ 、 $\text{Cd}=0.52$ 作为评价参比值。

2.3 农田土壤重金属生态风险评价

2.3.1 农田土壤重金属生态风险评价方法

采用模糊综合评价法来进行农田土壤重金属的

表 3 土壤重金属 Pb、Cd 含量的隶属度专家打分值

Table 3 The expert scoring of membership function value for Pb and Cd

$0.6 \leq P_i$	$0.6 < P_i \leq 1.0$	$1.0 < P_i \leq 2.0$
0.9	0.7	0.5

表 4 土壤理化特性、区位特征各项指标所属隶属度函数及其阈值

Table 4 Membership function and threshold of soil physicochemical properties and location characteristic evaluation indicis

隶属度函数类型	指标	下临 界点 x_1	下限 最优值 x_3	上限 最优值 x_4	上临 界点 x_2
抛物线型	pH 值	4.5	6	7	8
	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	7.5	27.5	37.5	60
	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	30	180	210	360
	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	5	20	40	60
S 型 (戒上型)	离城镇的距离/km	2			20
	离建设用地的距离/km	2			40
	离河流的距离/km	2			20
	离农村居民点的距离/km	1			10

生态风险评价,用加权指数和法计算出土壤重金属生态风险指数,计算公式为:

$$ERI = \sum_{i=1}^n F_i \times C_i$$

式中:ERI (Ecological risk index of soil heavy metal)代表土壤重金属的生态风险指数; F_i 表示第*i*个因子的隶属度; C_i 表示第*i*个因子的组合权重;*n*为评价因子的总数目。

2.3.2 农田土壤重金属生态风险评价分级

表 5 农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险分级

Table 5 Ecological risk grading of heavy metals Pb and Cd in agricultural soil

生态风险分级	生态风险指数值范围	说明
I 级	$ERI > 0.70$	风险程度较低,农田土壤重金属的含量较低,土壤理化特性和区位特征指标的得分也相对较高。
II 级	$0.6 < ERI \leq 0.70$	中等风险程度,农田土壤重金属的含量、土壤理化特性与区位特征指标的得分为中等水平。
III 级	$0.4 < ERI \leq 0.60$	风险程度较高,重金属在土壤中出现一定程度的积累,土壤理化特性与区位特征指标的得分也相对较低。
IV 级	$ERI \leq 0.40$	风险程度很高,农田土壤重金属的含量较高,重金属在土壤中出现一定程度的积累,土壤理化特性与区位特征指标的得分也较低。

表 6 不同等级农田土壤重金属生态风险评价指标平均值统计

Table 6 The average value of ecological risk assessment index in agricultural soil of different class

分级	有机质	碱解氮	有效磷	离城镇的距离	离建设用地的距离	离河流的距离	离农村居民点的距离	pH 值	Pb	Cd
I 级	34.77b	164.63b	20.12b	6.19a	13.45a	10.74a	2.02a	5.52	32.29d	0.23d
II 级	35.71ab	163.65b	24.15bc	5.57a	7.93bc	7.78b	1.41bc	5.56	41.34c	0.34c
III 级	37.90a	175.73ab	30.03ac	4.07b	4.64b	4.76c	1.40bc	5.60	56.32b	0.61b
IV 级	39.05a	186.57a	40.99a	3.27b	7.44bc	4.97bc	1.38ac	5.75	88.10a	1.58a

注:不同小写字母表示 5%显著水平,下同。

根据农田土壤重金属生态风险指数的累积频率曲线图,确定等级数目和划分综合指数的临界点,将农田土壤重金属的生态风险等级划分为四级(表 5)。经统计,长沙城郊农田土壤 513 个采样点中,I 级占 44.81%、II 级占 32.29%、III 级占 18.59%、IV 级占 4.31%。从表 6 可以看出,生态风险等级为 I 级的土壤采样点重金属含量平均水平较低,土壤采样点所在区位距离风险源较远,生态风险程度较低;生态风险等级为 II 级的土壤采样点重金属 Pb、Cd 的含量均有所提高,与 I 级相比,在土壤理化特性指标上没有呈现显著差异,但在区位特征上离建设用地、河流、农村居民点的距离均要显著近于 I 级水平的土壤样点;III 级和 IV 级的土壤采样点,其重金属含量已出现一定程度的积累,除了在区位特征上离城镇的距离明显比 I 级、II 级的土壤样点近以外,在土壤理化特性指标上也呈现出差异,如土壤有效磷含量均显著高于 I 级、II 级的土壤样点,IV 级土壤样点的碱解氮含量也显著高于 I 级、II 级的土壤样点。

2.3.3 农田土壤重金属生态风险分区

在对长沙城郊 18 个乡镇农田土壤重金属生态风险分级的基础上,划分不同程度的农田土壤重金属生态风险区(表 7),其中高风险区主要有长沙近郊区的北山镇、捞刀河镇、大托镇、暮云镇和远郊区的黄材镇、永和镇。该区域 III 级和 IV 级的土壤样点较多,分别占 13.31%和 3.52%。土壤 Pb、Cd 含量平均水平相对较高,高风险等级的土壤样点主要分布在湘江、捞刀河、浏阳河流域周边城镇、建设用地和农村居民点聚

集的区域,如暮云镇、永和镇土壤采样点重金属 Pb、Cd 生态风险指数空间插值图(图 2)所示;中风险区主要有福临镇、回龙铺乡、高塘岭乡、雷锋镇、永安市、北盛镇、柘冲镇,土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险等级大多为 I、II、III 级,其中有 18.20% 的土壤生态风险等级为 II 级水平,如以生猪饲养业为主导产业的福临镇,由于受到生猪养殖废弃物排放污染的影响,生态风险等级普遍为 II 级水平;永安市、北盛镇靠近浏阳河流域的周边农田土壤采样点,由于受到水质的影响,生态风险等级也大多为 II 级水平(图 3);低生态风险区主要有白若铺镇、格塘乡、张坊镇、溪江乡、大瑶镇。该区域大部分土壤样点的生态风险程度为 I 级(占 23.87%),如白若铺镇、大瑶镇仅少数农田土壤其生态风险为 II、III 级(图 4)。

各乡镇农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险程度不仅呈现区域分布,还存在着零星的点状分布,尤其是高风险等级的土壤样点(IV 级、III 级),点状分布的土壤样点没有呈现明显的区位特征,但是在空间插值图上可以清晰地显示风险点的分布情况,如图 3 中的 IV 级土壤样点所示。

因此,农田土壤重金属的生态风险防控需要根据不同程度风险区的差异和风险源的分布采取相应的

修复和预防措施,以控制土壤重金属累积和风险扩散。

3 讨论

农田土壤重金属的生态风险防控是保障农产品产地环境安全与农业生态环境的关键,农田土壤重金属的生态风险不仅与内部环境如土壤重金属的含量、土壤理化性状有关,而且还受到农田土壤的外部环境如区位因素的影响。由于土壤重金属的污染程度的界限是渐变、模糊的,采用模糊综合评价法,考虑农田土壤的重金属含量、土壤理化特性、土壤的区位特征等综合因素选取指标进行农田土壤重金属的生态风险评价是土壤环境风险评价研究的新思路。在生态风险评价的基础上,科学划分农田土壤重金属生态风险等级和生态风险区,可为不同生态风险程度农田土壤的合理利用提供基础。通过 GIS 地统计学方法对农田土壤重金属生态风险指数进行空间插值,可以确定土壤重金属风险源的空间分布,是土壤重金属生态风险防控的有效方法。

不同程度土壤重金属生态风险等级和风险区农田的科学合理利用是防控土壤重金属污染的有效途径。高生态风险区和 III 级、IV 级的农田土壤,其风险程度很高,是土壤生态修复和治理的重点区域,需要采取农艺、生物、工程、物理化学等防控措施来降低重金

表 7 农田土壤重金属 Pb、Cd 生态风险分区与生态风险指数统计

Table 7 Ecological risk regionalization and ERI statistic of heavy metals Pb and Cd in agricultural soil

风险分区	乡镇	平均值	标准差	I 级(%)	II 级(%)	III 级(%)	IV 级(%)
高生态风险区	北山镇、捞刀河镇、大托镇、暮云镇、黄材镇、永和镇	0.57c	0.18	6.26	9.98	13.31	3.52
中生态风险区	福临镇、回龙铺乡、高塘岭乡、雷锋镇、永安市、北盛镇、柘冲镇	0.67b	0.10	14.68	18.20	4.89	0.59
低生态风险区	白若铺镇、格塘乡、张坊镇、溪江乡、大瑶镇	0.74a	0.07	23.87	4.11	0.39	0.20

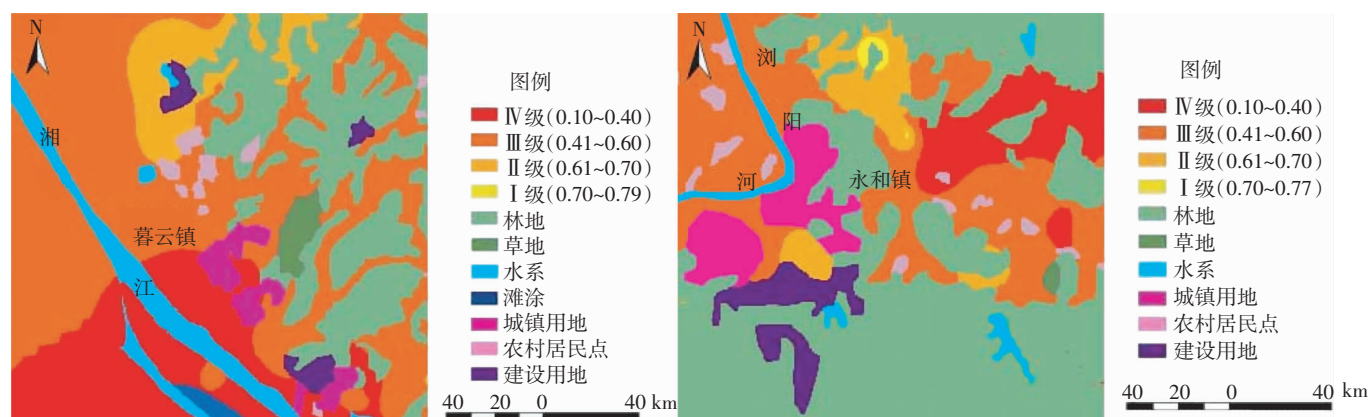


图 2 高生态风险区(暮云镇、永和镇)土壤采样点重金属 Pb、Cd 生态风险指数空间插值图

Figure 2 Spatial interpolation figures for ERI of Pb and Cd in high ecological risk regions (Muyun township and Yonghe township)

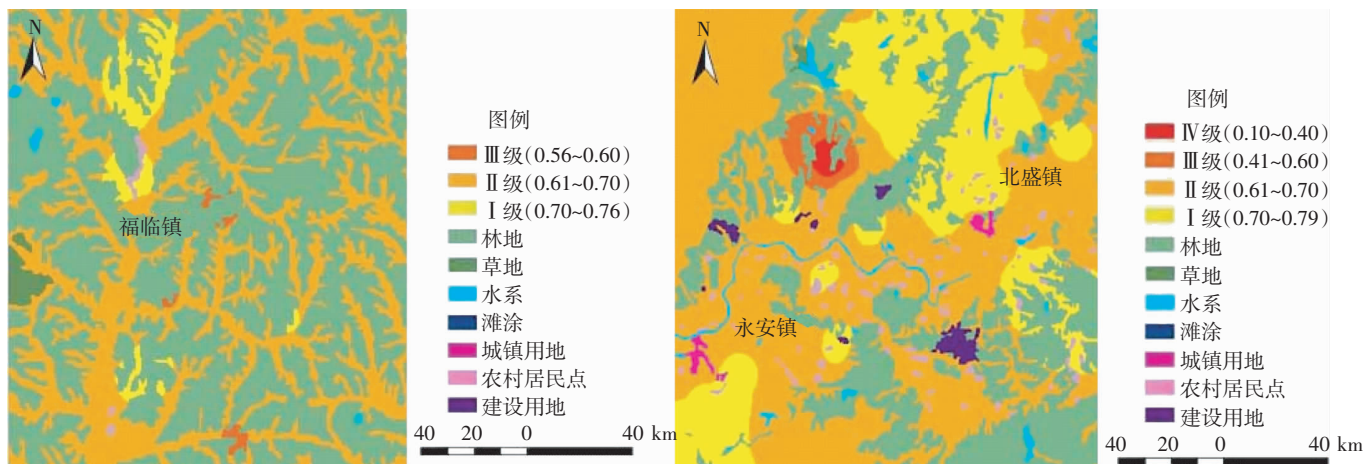


图3 中生态风险区(福临镇、永安市、北盛镇)土壤采样点重金属 Pb、Cd 生态风险指数空间插值图

Figure 3 Spatial interpolation figures for ERI of Pb and Cd in middle ecological risk regions
(Fulin township, Yongan township and Beisheng township)

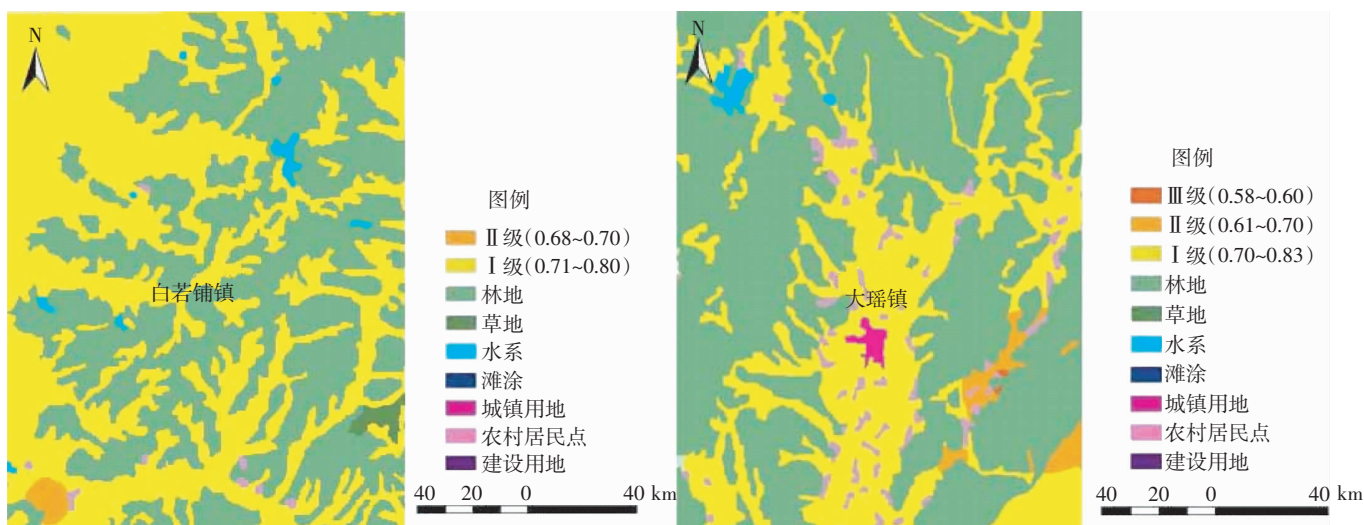


图4 低生态风险区(白若铺镇、大瑶镇)土壤采样点重金属 Pb、Cd 生态风险指数空间插值图

Figure 4 Spatial interpolation figures for ERI of Pb and Cd in low ecological risk regions
(Bairuopu township and Dayao township)

属的生态风险,同时也要通过合理施肥、土壤改良等措施保育农田生态系统环境。尤其是生态风险等级为Ⅳ级的土壤应将利用途径从农业生产逐渐向非农业生产的方向演替,规避农作物的重金属污染进入食物链。中等生态风险区的农田土壤,其风险程度虽然还不是很高,但存在着土壤重金属累积升级的潜在生态风险,在合理施肥、土壤改良的同时,应对重点区域如畜禽养殖主导产业区、河流周边区域和风险源采取相应的修复和防控措施,降低农田土壤重金属累积的生态风险。低生态风险区的农田土壤重金属含量平均水平较低,是农产品产地的重点保护区,可在维持农田生态环境的同时发展高质高值农业。

4 结论

(1)长沙城郊 18 个乡镇农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价表明,大部分农田土壤重金属的生态风险程度为Ⅰ、Ⅱ级(占 77.1%),生态风险相对较小;22.9%土壤样点的生态风险指数为Ⅲ级和Ⅳ级水平,具有较高的生态风险,主要分布在河流、城镇、建设用地区和农村居民点的聚集区。以农田土壤重金属生态风险评价为基础构建农田土壤重金属生态风险防控体系,对不同风险区和风险等级的农田土壤科学合理利用、逐步递进修复,是保障农田生态环境安全的有效途径。

(2)采用模糊综合评价法、层次分析法从农田土

壤的重金属含量、土壤理化特性、土壤的区位特征三方面选取评价指标,确定指标的隶属度函数和权重,进行农田土壤重金属的生态风险评价研究可以探明农田土壤重金属的生态风险等级、划分生态风险区,既丰富了土壤环境风险评价的理论研究,也可为区域农田土壤重金属的生态风险防控与合理利用提供科学依据。本研究方法可以通过调整评价指标做进一步更深入的探讨,也可为其他类似区域的相关研究提供参考。

参考文献:

- [1] 周脚根, 宋变兰, 尤冬梅. 土壤重金属污染风险预测研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10617-10619, 10622.
ZHOU Jiao-gen, SONG Bian-lan, YOU Dong-mei. Research progress on prediction of soil heavy metal contamination risk[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(22): 10617-10619, 10622.
- [2] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 等. 苏南某冶炼厂周边农田土壤重金属分布及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1546-1552.
BAO Dan-dan, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Distribution and risk assessment of soil heavy metals around a smelter in south Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(8): 1546-1552.
- [3] 贾琳, 杨林生, 欧阳竹, 等. 典型农业区农田土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2270-2276.
JIA Lin, YANG Lin-sheng, OUYANG Zhu, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the farmland soils in Yucheng City, Shandong Province[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2009, 28(11): 2270-2276.
- [4] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 824-830.
SHI Jia-chun, LIU Xing-mei, YU Chun-lan, et al. Spatial variability and risk evaluation of soil heavy metals in Taihu Lake region of North Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 824-830.
- [5] 窦磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105.
DOU Lei, ZHOU Yong-zhang, WANG Xu-ri, et al. Improvement and application of a fuzzy mathematical model for assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Journal of Science*, 2007, 38(1): 101-105.
- [6] Bai Jun-hong, Cui Bao-shan, Chen Bin, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 301-306.
- [7] Sun Yue-bing, Zhou Qi-xing, Xie Xiao-kui, et al. Spatial sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174: 455-462.
- [8] Zhang Xiu-ying, Lin Fen-fang, Jiang Yu-gen, et al. Assessing soil Cu content and anthropogenic influences using decision tree analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156: 1260-1267.
- [9] 高瑞英. 土壤重金属污染环境风险评价方法研究进展[J]. 科技管理研究, 2012, 32(8): 45-50.
GAO Rui-ying. Progress of environmental risk assessment methods on heavy metal contamination in soil[J]. *Science and Technology Management Research*, 2012, 32(8): 45-50.
- [10] 檀满枝, 陈杰, 徐方明, 等. 基于模糊集理论的土壤重金属污染空间预测[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 389-396.
TAN Man-zhi, CHEN Jie, XU Fang-ming, et al. Spatial prediction of soil heavy metal pollution based on fuzzy set theory[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 389-396.
- [11] 周国华, 贺艳华. 长沙城市土地扩张特征及影响因素[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1171-1180.
ZHOU Guo-hua, HE Yan-hua. Characteristics and influencing factors of urban land expansion in Changsha[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1171-1180.
- [12] 长沙市统计局. 长沙市统计年鉴 2009[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
Changsha Statistics Bureau. Changsha city statistical yearbook 2009 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.
- [13] 刘琼峰, 李明德, 吴海勇, 等. 城郊农田土壤 Pb、Cd 的空间变异与评价研究: 以长沙市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 195-203.
LIU Qiong-feng, LI Ming-de, WU Hai-yong, et al. Spatial variability characteristics and assessment of soil Pb and Cd in suburb cropland: Changsha City, Hunan, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(2): 195-203.
- [14] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 305-336.
LU Ru-kun. The chemical analysis methods for soil in agriculture[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 474-489.
- [16] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 67-72.
YU Tao, YANG Zhong-fang, ZHONG Jian, et al. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 67-72.
- [17] 龙永珍, 戴塔根, 邹海洋, 等. 长沙、株洲、湘潭地区土壤重金属污染现状及评价[J]. 地球与环境, 2008, 36(3): 231-236.
LONG Yong-zhen, DAI Ta-gen, ZOU Hai-yang, et al. The status quo and evaluation of heavy metal pollution of soils in the Changsha, Zhuzhou and Xiangtan areas[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(3): 231-236.