

黔东山区茶产地土壤重金属污染建模评价研究*

黄登红^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 黄智灵^{1,2}, 陈亚娟^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:【目的】了解黔东山区茶产地的土壤环境质量,实现茶产地土壤环境质量评价的模型化和自动化。【方法】采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法,并结合 ArcGIS 中的地统计分析和 Model Builder 地理处理建模工具构建茶产地土壤重金属污染评价模型,通过选择典型研究区分析了土壤重金属 Hg, As, Cd, Pb, Cr 等的含量水平和空间分布特征。【结果】研究区内内梅罗综合污染指数 0.502,属清洁水平;土壤重金属元素 Hg, As, Cd, Pb, Cr 的均值均属清洁水平;Pb 的变异系数最大,说明受外源污染影响明显;Cd 和 Pb 相关系数最高,呈同源污染特征;Cd 含量高的区域分布于北部;研究区东部、北部和西部的个别地方存在不同程度的重金属点源污染,南部未受土壤重金属污染。【结论】该评价模型为相关部门的管理提供一定科学参考,具有一定的实用价值。

关键词:高原山区;茶产地;土壤重金属;GIS;地理处理;评价

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)02-0107-06

随着中国茶叶产业的不断发展壮大,茶产地质量安全已成为茶产业可持续发展的最根本保障和生命线。农业环境污染尤其是土壤重金属污染这一问题的日益突显,使茶园土壤重金属污染问题越来越受到重视^[1-3]。茶树的生长离不开土壤,土壤重金属通过茶叶富集进入食物链进而危害人类健康^[4]。在土壤污染的研究中,学者关注的重点是空间变化剧烈的区域^[5],并相继开展了典型茶产地的土壤重金属数理统计分析研究^[6-9]。此外,也有学者采用地统计分析与 GIS 技术相结合的技术手段研究了日照市和湄潭县茶树种植区土壤重金属含量的空间分布特征及变异规律^[10-11]。

本研究选取黔东山区某重要产茶县为研究区,当地低中山和中山地貌占研究区总面积 90.50%,垂直气候差异明显。区内属中亚热带季风湿润气候,大部分地区的山麓年均气温为 14~16℃,年降雨量为 1400~1600 mm,年平均相对湿度达 80%,土壤跨黄红壤、黄壤、黄棕壤、山地灌丛土等 4 个土带,发展茶产业极具优势。研究区受云雾笼罩,具有湿度大、气压低、日照较长等特点,因而为茶树提供了良好的生长条件;但当地复杂的地形和水文系统为土壤重金属的迁移扩散提供了有利条件。研究和评价研究区茶产地土壤环境质量,探索土壤重金属污染源和空间分布特征,将有助于控制污染源和进行土壤修复。本研究运用 GIS 中的地理处理(Geoprocessing, GP)可视化建模评价技术方法,分析茶产地土壤重金属元素的污染现状,为研究区综合防治土壤重金属提供科学依据,也为当地生态茶园的规划和建设提供一定的参考。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

根据研究区土地利用数据,综合考虑地质地貌、土壤等自然因素,加上人类活动区域如工业区、居民区等人为因素的影响,结合茶园分布特征,使用手持 GPS 进行非均匀布点采样,全部土壤样品采集深度 0~20 cm 的表层土壤,共采集 343 个土壤样品,样点分布如图 1 所示。采用扩散梯度薄膜(DGT)技术检测土壤样品中 Hg, As, Cd, Pb, Cr 等 5 种土壤重金属的含量。

1.2 评价标准

土壤重金属污染评价采用单项污染指数和内梅罗综合污染指数法相结合的方法进行评价。单项污染指数

* 收稿日期:2016-04-29 修回日期:2017-02-17 网络出版时间:2017-03-13 11:06

资助项目:贵州省重大科技专项计划(黔科合重大专项字[2013]6024号);贵州省重大应用基础研究项目(黔科合JZ字[2014]200201);贵州省高层次创新型人才培养计划“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674);贵州师范大学研究生创新基金(研创2014(26))

第一作者简介:黄登红,男,研究方向为地理信息系统与遥感,E-mail:736440408@qq.com;通信作者:周忠发,教授,E-mail:fa6897@163.com

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170313.1106.002.html

法根据特定土壤环境质量标准评价某一重金属元素的累积污染程度,内梅罗综合污染指数法兼顾单个重金属元素污染平均值,且突出高剂量污染物对环境质量的影响。单项污染指数评价法计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i。$$

式中 P_i 为污染物 i 的环境质量指数, C_i 为污染物 i 的实测值(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 是污染物 i 的评价标准(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。内梅罗综合污染指数法计算公式为:

$$P_n = \sqrt{\frac{(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2)}{2}}。$$

式中 P_n 为土壤综合污染指数, P_{\max} 为单项污染指数平均值的最大值, P_{ave} 为单项污染指数平均值的均值。

土壤环境质量评价标准采用国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) II 类标准值。土壤评级标准采用《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395-2000)为分级标准(表 1)。

1.3 分析方法

1.3.1 地统计分析 传统的统计分析只能表达变量的总体特征,不能定量反映变量的随机性、相关性、结构性等具体情况。相较于传统统计分析,地统计分析既考虑样本值的变化范围,且重视样本空间位置及样本间的距离,弥补了传统统计学在空间分析方面的缺失。土壤属性空间插值精度对面向 GIS 的土壤重金属污染评价至关重要, Laslett 认为针对 pH 值的插值效果反距离加权插值法比 Kriging 插值效果明显^[12]; Gotway 通过土壤有机物和 N 含量的试验,认为反距离加权插值法比 Kriging 插值的效果要好^[13]。在 ArcGIS 中对 Hg, As, Cd, Pb, Cr 等 5 种土壤重金属检测数据进行地统计探索分析,并进行 Log 变换处理,数据近似符合正态分布,存在个别离群点值(图 2)。研究区土壤重金属数据的离散度较高,正态分布性较差,采用反距离加权插值法适合研究区进行空间插值。

1.3.2 反距离加权插值法 反距离加权插值法(Inverse distance weighted, IDW)作为 GIS 空间插值中的一种常用方法,已经被广泛地应用于农业、海洋和草原畜牧业等方面的研究使用^[14],根据空间自相关性原理,已知土壤样点对未知土壤样点的权重随距离变远而减小,具体计算公式为:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)。$$

式中 $\hat{Z}(S_0)$ 为 S_0 处的预测值; N 为预测计算过程中要使用的预测点周围样点的数量; λ_i 为预测计算过程中使用的各样点的权重,该值随着样点与预测点之间距离的增加而减少; $Z(S_i)$ 为在 S_i 处获得的测量值。

2 建模与评价

2.1 建模

2.1.1 坐标系统变换 黔东山区茶产地土壤环境质量评价模型主要由输入数据、空间处理工具、输出评价结果等 3 部分组成,通过 ArcGIS 中 Model builder(模型构建器)和地统计分析模块,集成多个空间分析工具和数据,可视化编程茶产地土壤重金属污染评价模型。为实现土壤采样点源数据和目标评价数据的标准化地图显示和操

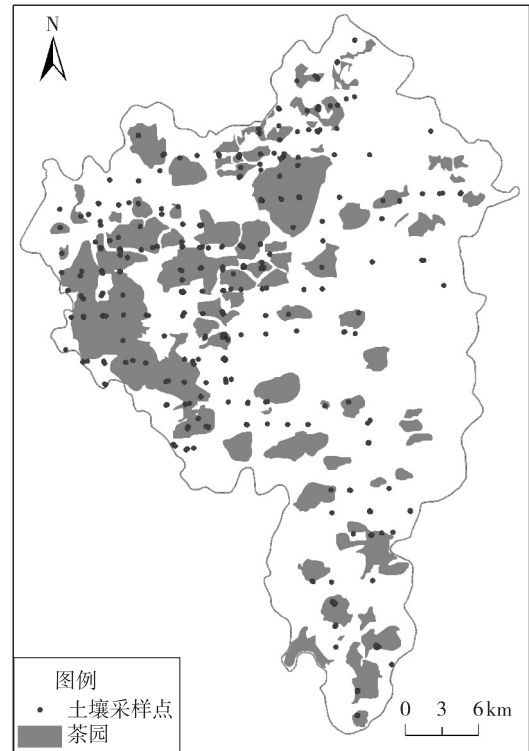


图 1 研究区土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil sampling points in the study area

表 1 土壤污染分级标准(NY/T395-2000)

Tab. 1 The classification standards of soil pollution (NY/T 395-2000)

等级划分	土壤综合污染指数 $P_{\text{综}}$	污染等级	污染水平
1	≤ 0.7	安全	清洁
2	$> 0.7 \sim 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$> 1 \sim 2.0$	轻污染	检测值超过背景值,轻污染
4	$> 2 \sim 3.0$	中污染	中度污染
5	> 3	重污染	重度污染

作,必须转换坐标系统。输入土壤采样数据,经过创建 XY 事件转为矢量文件,并自定义目标坐标系。关键源代码如下:

```
# Process: Make XY Event Layer
tempEnvironment0 = arcpy.env.outputCoordinateSystem
arcpy.env.outputCoordinateSystem = "GEOGCS[GCS_WGS_1984,DATUM
[D_WGS_1984,SPHEROID[WGS_1984,6378137.0,298.257223563]],PRIMEM[Greenwich,0.0],U-
NIT[Degree,0.0174532925199433]"
arcpy.MakeXYEventLayer_management(Input table data, Longitude, latitude, Output GPS points, Spa-
tial Reference, "")
arcpy.env.outputCoordinateSystem = tempEnvironment0
# Process: Create Custom Geographic Transformation
arcpy.Project_management (Output GPS points, Output projection file, Output coordinate system, "
WGS84-19
40",
Input coordinate system)
# Process: Definition projection
arcpy.DefineProjection_management(Projection output, coordinate system)
```

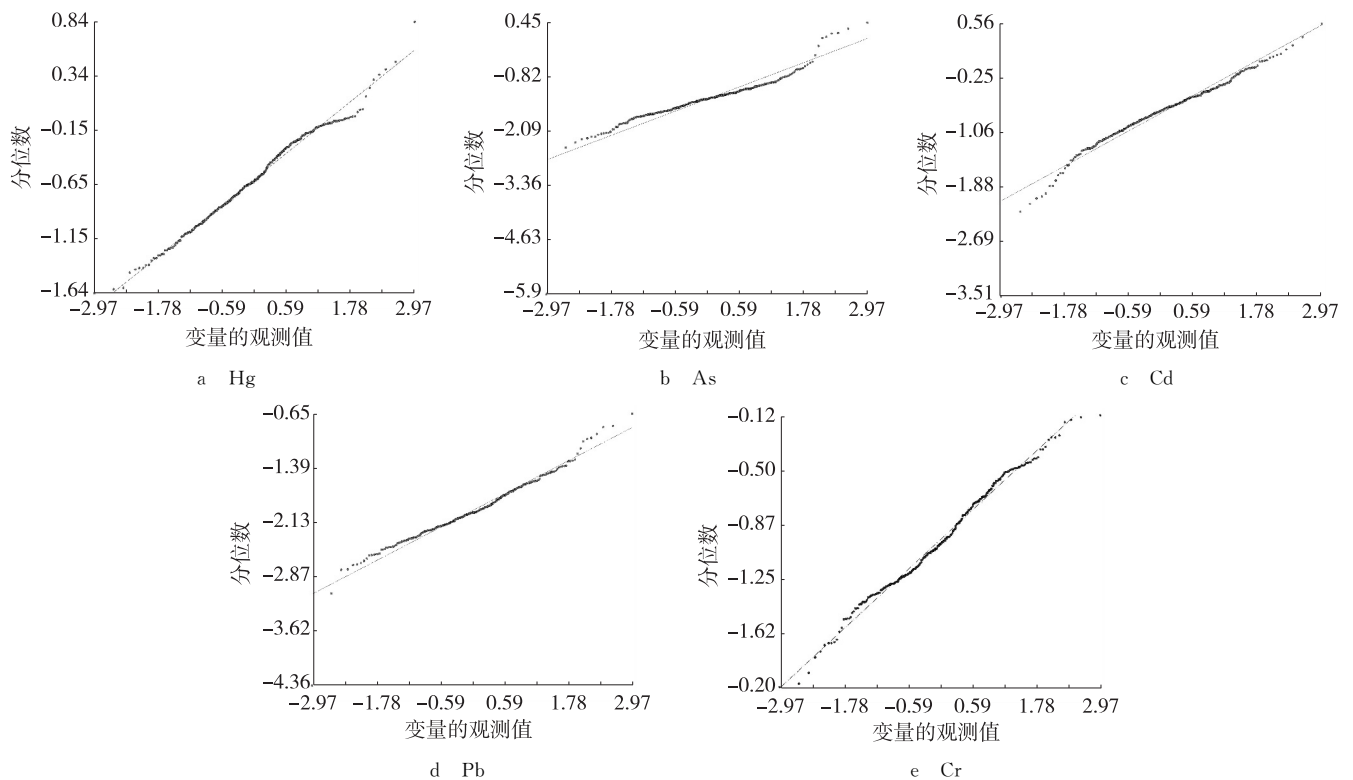


图 2 正态 QQ 图

Fig. 2 QQ-Plot

2.1.2 评价分析建模 基于自定义坐标系的 GPS 点文件,进行 IDW 插值, IDW 以已知样本点和未知内插点之间的距离为权重拟合表面,设定幂、搜索半径和像元等模型参数的窗口,实现运行模型时可以调整参数,采样点数据经内插后形成空间面状数据。参照《农田土壤环境质量监测技术规范》NY/T 395-2000 标准,设置 IDW 插值后土壤污染分级区间: $P_{综} \leq 0.7$, $0.7 < P_{综} \leq 1.0$, $1 < P_{综} \leq 2.0$, $2 < P_{综} \leq 3.0$, $P_{综} > 3$ 。评价分级结果经转换数据格式、裁剪研究区数据等地理处理后完成空间建模评价。主要源码如下:

```
# Process: IDW
tempEnvironment0 = arcpy.env.extent
```

```
arcpy.env.extent = "289969.98333151 2734169.6961513 331003.254337288 2793380.1895
2098"
```

```
arcpy.Idw_3d(Input point elements, Z_value field, Interpolation file output, Pixel size, "2", "VARIA-
BLE 12", "")
```

```
arcpy.env.extent = tempEnvironment0
```

```
# Process: Reclassify
```

```
arcpy.Reclassify_3d(Output interpolation file, "Value", Classification parameter, Output file, "DATA")
```

```
# Process: Converts rasters to polygons
```

```
arcpy.RasterToPolygon_conversion(Output file, Converts rasters to polygons, Simplified surface, "VALUE")
```

通过工作流生成的茶产地土壤重金属污染评价模型流程如图 3 所示。

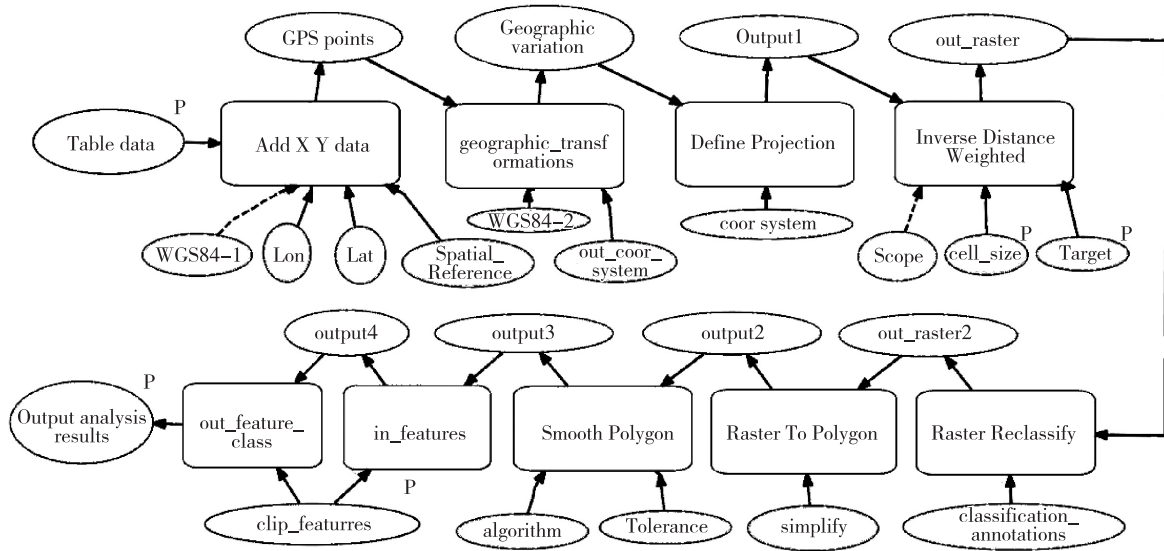


图 3 模型流程图

Fig. 3 Model interface

2.2 结果与分析

2.2.1 描述性统计分析 表 2 显示研究区土壤重金属 Hg, As, Cd, Pb 和 Cr 的单项污染指数平均值分别为 0.592, 0.291, 0.556, 0.159 和 0.396, 均在清洁范围内。检测值变量离散程度均较大, 其中 Pb 的变异系数最大, 然后依次为 Cd, As, Hg, Cr; Pb, Cd 和 As 的含量变幅极大, 分别是 3.2~727.3 mg·kg⁻¹, 0.009~2.535 mg·kg⁻¹ 和 0.11~62.58 mg·kg⁻¹; Hg 和 Cr 的含量变幅较大, 分别是 0.058~0.693 mg·kg⁻¹ 和 20.3~133 mg·kg⁻¹。数据特征表明, 茶产地土壤主要受外源重金属污染的影响。通过与《土壤重金属质量标准》(GB15618-1995) II 类值比较, 土壤重金属 Hg, As, Cd 和 Pb 的超标率分别为 2.91%, 2.040%, 4.664% 和 0.291%, 而 Cr 在清洁范围内。根据内梅罗综合污染指数法评价得出研究区的综合污染指数为 0.502, 研究区土壤重金属整体为清洁水平。

表 2 土壤重金属的描述统计特征

Tab. 2 Descriptive statistics of soil heavy metals

	Hg	As	Cd	Pb	Cr
检测平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.178	11.650	0.166	39.930	59.432
检测最大值/(mg·kg ⁻¹)	0.693	62.580	2.535	727.300	133.000
检测最小值/(mg·kg ⁻¹)	0.058	0.110	0.009	3.200	20.300
《土壤重金属质量标准》(GB15618-1995) II 级标准值/(mg·kg ⁻¹)	0.300	30.000	0.300	250.000	150.000
标准偏差	0.070	6.660	0.165	41.030	20.920
变异系数	0.394	0.571	0.988	1.027	0.352
超标率/%	2.910	2.040	4.664	0.291	—
均方根	0.073	6.536	0.0192	0.178	0.126

对 Hg, As, Cd, Pb, Cr 等重金属元素之间的相关性进行相关性检验,所有变量间皮尔逊相关系数如表 3 所示;Hg 与 As, Cd, Pb, Cr 呈现极弱相关;As 与 Cr 的相关性大于 As 与 Cd, Pb 的相关性;Cd 与 Pb 表现弱相关且大于 Cd 与 Cr 的相关性,表明 Cd 和 Pb 可能同时受到较小影响;Pb 与 Cr 存在极弱相关。

2.2.2 建模评价分析 运行模型输出评价结果,得到土壤环境质量等级空间分布图(封二彩图 4)。可以看出,茶产地的土壤重金属污染呈点源污染,研究区的土壤环境受外源因素影响极大。结合土地利用数据,Hg, As, Cd, Pb 均受到公路用地的影响。研究区的西部和中北部分布 Hg 轻度污染,污染面积为 1.564 km²,西部受中度污染,污染面积为 0.000 9 km²,说明 Hg 污染属点源污染。As 呈现轻度污染,污染面积为 0.283 km²,研究区东北部受居民点影响,东部受交通运输和居民区影响。Cd 呈现轻度、中度和重度污染,与研究区的高 Cd 背景值的地质特征有一定关系,轻度污染面积 0.685 km²,主要分布在中西部,污染源为居民点;中度污染在西部和北部有较小分布,受居民点和交通运输影响土地面积为 0.64 km²;北部的中度和严重污染区域呈不规则空间分布形状,主要原因是地处交通交汇处,且河网密度较大加速了土壤重金属的迁移和扩散,污染面积为 0.82 km²。Pb 呈现轻度和中度污染,分布在研究区的西部;Pb 和 Cd 均受居民点影响,空间分布特征表明 Pb 和 Cd 属同源污染;研究区的南部区域未受到土壤重金属污染。

研究区土壤中 Hg 和 Pb 均有轻度、中度污染,As 有轻度污染,Cd 出现轻度、中度和严重污染。通过结合土地利用数据进行叠加运算,受污染土地面积占茶园总面积的比例分别是 0.49%, 0.09%, 2.63% 和 0.13%, Cr 整体清洁,土壤环境受 Hg, As, Cd, Pb 等的较小面积污染。由此可知,研究区具有良好的土壤环境,对于发展茶产业具有得天独厚的条件,个别检测点出现重金属超标的问题,应采取土壤修复措施,对易受人类活动影响的区域开展跟踪监测。

研究区土壤中 Hg 和 Pb 均有轻度、中度污染,As 有轻度污染,Cd 出现轻度、中度和严重污染。通过结合土地利用数据进行叠加运算,受污染土地面积占茶园总面积的比例分别是 0.49%, 0.09%, 2.63% 和 0.13%, Cr 整体清洁,土壤环境受 Hg, As, Cd, Pb 等的较小面积污染。由此可知,研究区具有良好的土壤环境,对于发展茶产业具有得天独厚的条件,个别检测点出现重金属超标的问题,应采取土壤修复措施,对易受人类活动影响的区域开展跟踪监测。

3 结论

使用 ArcGIS 中的 Model Builder 进行可视化建模,按照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)与《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T395-2000)标准,采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数进行评价,构建黔东南山区茶产地土壤重金属污染评价模型,实现了土壤重金属污染现状评价过程的可视化。评价结果表明:研究区呈现点状污染与实际情况基本吻合。茶产地土壤重金属污染评价模型为相关管理部门提供一定科学参考,具有一定的实用价值。研究区地处高原山区,扰动科学评价土壤重金属污染状况的因素较多,可进一步探索在模型中引入土壤重金属有效态、作物重金属检测等评价因子。

参考文献:

- [1] 谭和平,陈能武,黄苹,等.四川茶区土壤重金属元素背景值及其评价[J].西南农业学报,2005,18(6):747-751.
TAN H P, CHEN N W, HUANG P, et al. Background and evaluation of heavy metal elements in the tea garden soil in Sichuan[J]. Southwest China Journal of agricultural Sciences, 2005, 18(6): 747-751.
- [2] 刘义,邵树勋.凤冈富硒富锌茶园土壤中的锌及其形态分析[J].地球与环境,2010,38(3):328-332.
LIU Y, SHAO S X. The concentrations and fractional analysis of zinc in Fenggang zinc and selenium enriched tea garden soils[J]. Earth and Environment, 2010, 38(3): 328-332.
- [3] 李张伟,易本梁,刘知翔.粤东凤凰山茶区土壤不同形态铅含量及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(4):149-153.
LI Z W, YI B L, LIU Z X. Distribution characteristics of lead and its affecting factors in the tea garden soils of Fenghuang mountain, east of Guangdong province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 149-153.
- [4] 林清,葛慈斌,陈尧荣,等.福安市社口镇茶园土壤重金属含量与安全质量评价[J].茶叶科学技术,2010(4):8-10.
LIN Q, GE C B, CHEN Y R. Contents and quality safety assessment of heavy metals in tea garden soil of Shekou township, Fu'an city[J]. Tea Science and Technology, 2010(4): 8-10.
- [5] 史舟,李艳,程街亮.水稻土重金属空间分布的随机模拟和不确定评价[J].环境科学,2007,28(1):209-214.
SHI Z, LI Y, CHENG J L. Stochastic simulation of spatial distribution and uncertainty assessment of heavy metal in paddy soil[J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 209-

表 3 土壤重金属皮尔逊相关系数

Tab. 3 Pearson correlation coefficient of soil heavy metals

	Hg	As	Cd	Pb	Cr
Hg	1				
As	0.088	1			
Cd	0.002 89	0.023 6	1		
Pb	0.027 6	0.025 9	0.303	1	
Cr	0.06	0.182	0.109 8	0.132	1

- 214.
- [6] 王大霞,谢锋,李荣华,等. 茶场土壤环境质量评价的未确知测度模型[J]. 科技资讯,2008(17):102-103.
WANG D X,XIE F,LI R H,et al. Unascertained measure model of soil environmental quality evaluation in tea plantation[J]. Science & Technology Information,2008(17):102-103.
- [7] 周国兰,罗显扬,赵华富,等. 贵州凤冈县宜茶区土壤重金属含量状况及评价[J]. 茶叶,2010,36(3):152-155.
ZHOU G L,LUO X Y,ZHAO H F,et al. Content status of heavy in soil and pollution assessment for tea in Fenggang county,Guizhou province[J]. Journal of Tea,2010,36(3):152-155.
- [8] 李灵,梁彦兰,张玉,等. 武夷岩茶核心种植区土壤重金属污染特征及土壤质量评价[J]. 土壤通报,2013(3):730-736.
LI L,LIANG Y L,ZHANG Y,et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and evaluation of soil quality of Wuyi rock tea[J]. Chinese Journal of Soil Science,2013(3):730-736.
- [9] 张慧,马立锋,伊晓云,等. 典型绿茶茶园土壤重金属空间分布特性及环境质量评价[J]. 浙江农业科学,2015,1(9):1385-1391.
ZHANG H,MA L F,YI X Y,et al. Spatial distribution characteristics and environmental quality assessment of soil heavy metals in typical green tea plantation[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2015(9):1385-1391.
- [10] 王学,张祖陆,王茂香,等. 日照市茶树种植区表层土壤重金属环境质量评价[J]. 水土保持通报,2011,31(3):219-224.
WANG X,ZHANG Z L,WANG M X,et al. Environmental assessment of heavy metals in surface soil of tea plantations in Rizhao city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(3):219-224.
- [11] 袁旭,赵为武,任玉娟,等. 湄潭县茶园土壤重金属铬元素含量的空间分布特征[J]. 贵州农业科学,2010,38(5):125-127.
YUAN X,ZHAO W W,REN Y J,et al. Spatial distribution characteristic of Cr in tea plantation soil of Meitan county[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2010,05:125-127.
- [12] LASLETT G M,MCBRATNEY A B,PAHL P J,et al. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH[J]. Soil Science,1987,38(2):325-341.
- [13] GOTWAY C A,FERGUSON R B,HERGERT G W,et al. Comparison of Kriging and inverse distance methods for mapping soil parameters [J]. Soil Science,1996,60(4):1237-1247.
- [14] 刘光孟,汪云甲,王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. 中国科技论文,2010,05(11):879-884.
LIU G M,WANG Y J,WANG Y. Impact of inverse distance weighted interpolation factors on interpolation error [J]. China Sciencepaper,2010,5(11):879-884.

Modeling and Evaluation of Heavy Metals Pollution in Soil of Tea Plantations in East Guizhou Mountainous Regions

HUANG Denghong^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, HUANG Zhiling^{1,2}, CHEN Yajuan^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Purposes]The paper aims to understand the soil environment quality of tea production areas in east Guizhou mountainous regions and realized modeling and automation of the soil environment quality evaluation of tea production areas. [Methods]The evaluation model of heavy metals pollution in soil of tea production areas was built by adopting both the single pollution index method and Nemerow multi-factor index method combined with ArcGIS Geostatistical Analyst and Model Builder Geoprocessing modeling tool. The content levels and spatial distribution characteristics of heavy metals such as Hg, As, Cd, Pb and Cr were analyzed though choosing a typical research area. [Findings]Nemerow multi-factor index in the research area was 0.502, belonging to clear level and the mean values of soil heavy metal elements such as Hg, As, Cd, Pb, Cr belonged to clear level. The variable coefficient of Pb was the biggest, which indicated that the external pollution was remarkable. The correlation coefficient of Cd and Pb was the biggest, presenting a character of the same source of pollution. Cd content was high in the north. There are different degrees of point source pollution of heavy metals in parts of the east, north and west, and there is no soil heavy metals pollution in the south. [Conclusions]The evaluation model provides a scientific reference for the relevant administrative departments, and has some practical value.

Keywords: plateau mountains; tea production areas; soil heavy metals; GIS; geoprocessing; evaluation

(责任编辑 方 兴)