

# 岩溶区植烟土壤 pH、有效铁锰和交换性钙的空间异质性<sup>①</sup> ——以重庆市酉阳县为例

农金花<sup>1</sup>, 梁增芳<sup>2</sup>, 石永莲<sup>3</sup>, 倪九派<sup>1\*</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2 重庆市万州水务局, 重庆 404120; 3 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 西宁 810000)

**摘要:**本研究通过野外调查, 结合经典统计学和地统计学方法, 分析了重庆市酉阳植烟区土壤表层 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 的空间异质性及相关性特征, 以为岩溶区植烟土壤改良和平衡施肥以及特色优质烟叶开发提供理论依据。结果表明: 酉阳植烟区土壤总体呈酸性, 有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 含量丰富; pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 变异系数为 12.10%~47.86%, 属于中等变异性, 在土壤中比较稳定, 块金效应在 5.690%~7.338%, 具有很强的空间相关性; pH 和交换性 Ca 的空间分布为西高东低, 有效 Fe 空间分布为东高西低, 中部往西南方向含量最丰富, 有效 Mn 的空间分布大致为中间低、四周高的趋势; pH 与有效 Fe、有效 Mn 存在显著的负相关性, pH 与交换性 Ca 存在显著的正相关性。总之, 研究区营养元素空间变异性中等, 空间相关性强。

**关键词:** 岩溶区; pH; 中微量元素; 空间异质性

**中图分类号:** S158

烟草的生长及质量受多种因素共同影响, 其中土壤营养是最根本的影响因子, 土壤养分的供给状态直接关系到烟株的生长发育<sup>[1-2]</sup>。作为土壤酸碱度指示因子的 pH 是土壤重要的基本性质之一, 在农业生产中, 多数植物的生长对土壤的酸碱性有一定的适应范围和最适点, 土壤酸碱的失衡不利于某些特定农作物的生长<sup>[3-5]</sup>。铁(Fe)是作物必需的 17 种营养元素之一, 是某些酶和许多传递电子蛋白的重要组成, 调节叶绿体蛋白和叶绿素的合成, 而叶绿素、类胡萝卜素等细胞色素是烟叶重要的香气前体物质<sup>[6-10]</sup>。所以, 缺 Fe 不仅会影响烟叶品质, 甚至还会影响烟叶的正常生长代谢。锰(Mn)是烟草生长发育必需的微量营养元素之一, 在烟草的生长发育及代谢过程中参与重要的生理功能, 土壤 Mn 素含量的高低直接影响烟株的正常成长和烟叶品质的形成<sup>[11-12]</sup>。钙(Ca)是烟草生长需要量较大的中量元素, 在协调和平衡烟草对各种矿质营养吸收方面起着重要作用<sup>[13]</sup>。植烟土壤 Ca 含量及有效性不仅直接影响烤烟的正常生长发育, 而且由于元素间的相互促进和拮抗作用而影响烟草的其他元素营养<sup>[14-15]</sup>。

由于土壤不是一个均质体, 而是一个时空连续的

变异体, 具有高度的空间异质性<sup>[16-18]</sup>, 气候条件、土壤类型、地形地貌、耕作方式等是影响农田土壤营养元素分布的内因, 而农业生产过程中施肥、耕作方式、作物布局等是影响农田土壤营养元素分布的外因, 内、外因共同影响土壤的空间异质性, 使得各地区各年份土壤营养元素的分布状况各不相同, 因此有必要对烟田中营养元素的空间变异性进行研究。目前关于土壤中营养元素的空间异质性的研究日渐增多, 但大多都是进行单一营养元素的研究, 多种营养元素综合研究还比较少。

中国岩溶总面积达 137 万 km<sup>2</sup>, 约占国土总面积的 1/7, 是全球岩溶地貌分布最广、发育最为典型的国家之一。其中西南地区岩溶分布面积最大, 面积约 55 万 km<sup>2</sup>, 占全国岩溶面积的 40% 以上, 主要分布在以贵州为中心的滇黔桂湘鄂川渝地区。酉阳土家族苗族自治县(简称, 酉阳县)位于重庆市东南, 是重庆市幅员面积最大的区县。全县岩溶地貌分布面积达 3 087.83 km<sup>2</sup>, 约占全县国土面积的 60%, 居重庆市第三。因此, 本文采用经典统计学和地统计学方法, 以重庆市酉阳县岩溶区植烟土壤为研究对象, 通过对烟区土壤 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 进行

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371275)和中央高校基金科研业务费专项(XDJK2013A016)资助。

\* 通讯作者(nijiupai@163.com)

作者简介: 农金花(1990—), 女, 广西百色人, 硕士研究生, 主要从事水土保持、流域水文与水资源研究。E-mail: 519824561@qq.com

监测分析,结合烟区土壤的实际情况,对岩溶区植烟土壤 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 空间分布进行分析研究,可为岩溶区植烟土壤改良和平衡施肥以及特色优质烟叶开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

酉阳县位于重庆直辖市东南的黔江区,地处渝、鄂、湘、黔四省(市)边区的结合部。地理坐标为  $28^{\circ}19'28'' \sim 29^{\circ}24'20''N$ ,  $108^{\circ}18'30'' \sim 109^{\circ}19'02''E$ , 东西宽 98.3 km,南北长 119.7 km。全县地势中部高,东西两侧低,东北部一般海拔 300~700 m,西部为低中山区,一般海拔 400~600 m,中部为中高山区,海拔 600~1 800 m。全县最高海拔 1 895 m,最低海拔 260 m。全县年平均降雨量 1 344 mm,年平均气温  $14.9^{\circ}C$ ,年均日照时长 1 131 h,无霜期 261 天,雨热同期,四季分明,属亚热带季风气候,适宜种植烟草。全县土壤类型以黄壤、石灰土和潮土为主。

酉阳县土地利用状况如表 1 所示。林地占地面积最大,为  $269\,386.40\text{ hm}^2$ ,占总面积 52.21%,其次是耕地,为  $116\,939.01\text{ hm}^2$ ,占总面积 22.67%。2008 年酉阳全年收购烤烟 17.54 万担,为烟农创造收入 1.23 亿元,2013 年种植烤烟面积  $6\,133.33\text{ hm}^2$ ,收购烟叶 23 万担,上中等烟叶比例 96% 以上。

表 1 酉阳县土地利用现状  
Table 1 Land use types in Youyang County

土地利用类型	面积 (hm <sup>2</sup> )	占总面积 (%)	土地利用类型	面积 (hm <sup>2</sup> )	占总面积 (%)
耕地	116 939.01	22.67	城镇及工矿用地	8 955.73	1.74
园林	3 120.35	0.60	交通用地	2 338.41	0.45
林地	269 386.40	52.21	水域	5 191.53	1.01
牧草地	27 433.30	5.32	未利用土地	8 2567.16	16.00

### 1.2 土壤样品采集

2012 年 4 月对酉阳县植烟区利用 GPS 定位技术进行采样。根据酉阳县烟草分布情况、地形特征,遵循均匀性和代表性的原则,研究区内共布置 350 个取样点,采样点分布如图 1 所示。田间取样时,记录采样点的经纬度和高程,取样深度 0~20 cm,用四分法取约 1 kg 的土样带回实验室。对土样进行编码后,风干、研磨、过 2 mm 筛,测定 pH、有效 Fe、有效 Mn、交换性 Ca。

### 1.3 测定项目与方法

土壤 pH 用 pH 计在土水比 1:2.5 下测定。土壤有效 Fe 含量用 ICP-OES 法测定;土壤有效 Mn 采用

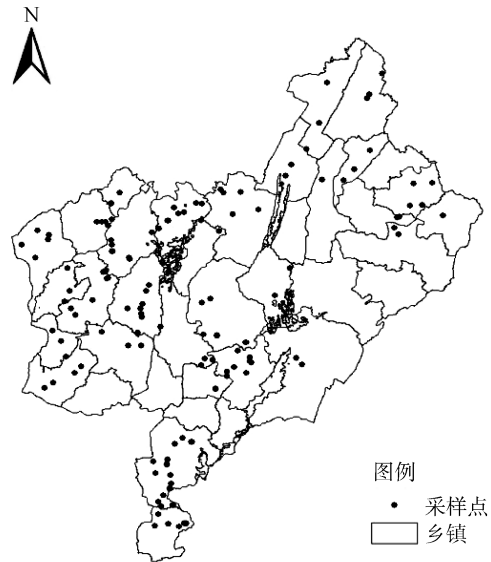


图 1 研究区土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in studied area

$\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提- $\text{KMnO}_4$  比色法测定<sup>[19-20]</sup>;土壤交换性 Ca 采用醋酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定<sup>[21-22]</sup>;实验重复 3 次。

### 1.4 特异值判断和处理

特异值的存在会导致空间变量连续表面中断,半方差函数发生畸变,甚至掩盖空间变量固有的空间结构,影响空间变量分布特征和结果分析<sup>[23]</sup>。本文采用域法识别特异值<sup>[24]</sup>,即样本平均值  $M \pm 3$  倍标准差  $s$ :  $M \pm 3s$ ,大于  $M + 3s$  和小于  $M - 3s$  的数据均视为特异值,分别用正常最大值和最小值代替特异值。

### 1.5 数据分析

经典统计学分析采用 SPSS17.0 软件,对数据进行描述性、相关性、回归分析和 K-S 正态分布检验。地统计学分析采用 GS+ 软件,采用半方差函数分析,并进行 Block-Kriging 插值。

在地统计学中,块金值( $C_0$ )、基台值( $C+C_0$ )、块金效应、变程( $A_0$ )、分维数( $D$ )和决定系数等是半方差函数的重要参数,可以用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度,是研究土壤特性空间变异性的关键,同时也是进行精确 Kriging 插值的基础。块金值是半方差函数在零点处的数值,表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异<sup>[25]</sup>;基台值通常表示系统内的总变异,包括结构性变异和随机性变异,基台值越高,表示系统总的空间异质性越高。块金效应是块金值与基台值之比  $C_0/(C+C_0)$ ,反映土壤养分的空间依赖性,可表明系统变量的空间相关性的程度。当块金效应  $<25\%$  时,空间相关性强;当块金效应在  $25\% \sim 75\%$  时,空间相关性中等;当块金效应  $>75\%$  时,空间相关性弱<sup>[26-27]</sup>。影响土壤性

质空间变异的因素可分为结构性因子和随机性因子,结构性因子有土壤母质、地形、气候、植被等,随机性因子主要是指人为活动如施肥、耕作、作物布局等。结构性因子使土壤性质具有较强的空间相关性,而随机性因子会降低其空间相关性<sup>[28]</sup>。变程是指变异函数在有限步长上达到基台值时对应的步长,也叫做自相关距离。分维数表示变异函数曲线的曲率,不同变量分维数之间的比较,可以确定空间异质性的程度,分维数值越大,说明有随机性因素引起的空间异质性程度越高。

对于区域化变量,半方差函数不仅与步长有关,还与方向有关。半方差函数在各个方向上区域化变量的变异性不同称为各向异性。各向同性是相对的,而各向异性是绝对的<sup>[29]</sup>。各向异性半方差函数分析时角度容差设为 $45^\circ$ ,角度以正北-南方向为 $0^\circ$ ,按顺时针方向旋转,最大旋转角度为 $180^\circ$ 。如 $45^\circ$ 方向为东北-西南方向, $90^\circ$ 方向为正东-西方向。在各向异性分析中,若某一方向的主轴变程和亚轴变程之间的差距越大,则区域化变量在该方向的变异越明显<sup>[30]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 描述性分析

由表2可知,在研究区域内,土壤pH为4.93~8.03,总体呈酸性。有研究认为pH 5.5~6.5最适于烟草生长<sup>[11,31]</sup>,变幅1.0左右较为理想,因此该地比较适合烟草生长;pH>7.5的地方需改酸。有效Fe的均值为43.92 mg/kg,与徐小逊等<sup>[32]</sup>研究的结果相近;根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,研究区土壤有效Fe平均含量远超过土壤有效Fe一级含量的标准(20 mg/kg),93.06%的样点>20 mg/kg,属于极丰富水平,其余6.94%的样点属于丰富水平(10~20 mg/kg)。有效Mn的均值为54.70 mg/kg,与湘西烟区一致<sup>[33]</sup>;根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,有效

Mn的平均含量也远超过土壤有效Mn一级含量的标准(30 mg/kg),81.94%的样点有效Mn含量>30 mg/kg,达到了极丰富水平,12.5%的样点有效Mn含量在20~30 mg/kg,属于丰富水平,仅5.56%的样品有效Mn含量在10~20 mg/kg,属于适量水平。交换性Ca的均值为6.75 cmol/kg,低于湖南烟区(8.87 cmol/kg),高于贵州烟区(5.13 cmol/kg)<sup>[34]</sup>,根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,交换性Ca的平均含量高于土壤交换性Ca一级含量的标准(4 cmol/kg),90.28%的样点交换性Ca含量4 cmol/kg,达到了丰富水平,8.33%的样点交换性Ca含量在2~4 cmol/kg,属于适宜水平,仅1.39%的样点的交换性Ca含量2 cmol/kg,属于缺乏水平,施肥时需注意添加钙肥。植烟土壤表层中有效Fe含量小于有效Mn含量,pH和交换性Ca的均值略大于中值且相差不大,而有效Fe和有效Mn的均值和中值相差较大,均值大于中值,说明了有效Fe和有效Mn可能受异常值的影响<sup>[35]</sup>。

变异系数CV是表示观察值变异程度或离散程度的统计量。CV 10%为弱变异性,10%<CV 100%为中等变异性, CV > 100%为强变异性<sup>[2]</sup>。pH、有效Fe、有效Mn和交换性Ca在空间上均表现为中等变异;pH变异系数最低,仅为12.10%,表明土壤酸度相对稳定,通常情况下受施肥、耕作等随机性因子影响程度很小;有效Fe、有效Mn和交换性Ca的变异系数不大且相近,说明其在土壤中比较稳定,主要受土壤母质、地形、气候、植被等结构性因子影响,受施肥、耕作等随机性因子影响比较小。

利用K-S检验法对土壤pH、有效Fe、有效Mn和交换性Ca的统计分布进行非参数检验,其显著性概率 $P_{K-S}$ (正态分布检验概率)均大于0.05,表明在0.05检验水平下,土壤pH、有效Fe、有效Mn和交换性Ca测定的数据均符合或近似符合正态分布的要求。因此,所测数据满足地统计学分析要求。

表2 描述性统计  
Table 2 Descriptive statistics of soil properties

项目	极小值	极大值	中值	均值	标准差	变异系数 CV(%)	K-S 值*
pH	4.93	8.03	6.26	6.32	0.77	12.10	0.66
有效 Fe(mg/kg)	11.61	106.91	40.99	43.92	18.38	41.86	0.20
有效 Mn(mg/kg)	11.69	143.88	54.72	57.40	27.47	47.86	0.55
交换性 Ca(cmol/kg)	0.41	14.70	6.40	6.75	2.68	39.70	0.15

注: \* 表示检验水平  $\alpha=0.05$ 。

### 2.2 空间变异性分析

鉴于经典统计分析仅分析了土壤养分变化的总体状况,不能准确反映其变化的局部特征,以及随机

性、结构性、独立性和相关性的具体情况,因此采用地统计学方法进行了进一步分析。

#### 2.2.1 各向同性半方差函数分析 用半方差函数

的各种模型对所测的数据进行了分析,得出了各自最优拟合模型,结果见表 3。研究区土壤 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 的  $C_0/(C+C_0)$  均  $<25\%$ , 表明其均具有很强的空间相关性, 主要受土壤母质、地形、气候、植被等结构性因素的影响。研究区土壤 pH、

有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 的变程  $A_0$  都比较小, 说明它们的自相关距离小, 分布不均一, 在小范围内的变异强烈, 整体分布比较复杂。有效 Mn 的分维数 D 值最大, 说明其由随机性因素引起的空间异质性程度比 pH、有效 Fe 和交换性 Ca 高。

表 3 各向同性半方差函数理论模型及有关参数  
Table 3 Theoretical models and corresponding parameters for isotropic semivariogram

项目	模型	$C_0$	$C+C_0$	$C_0/(C+C_0)(\%)$	$A_0(\text{km})$	RSS	D
pH	球状模型	0.035	0.477	7.338	0.06	0.0117	1.964
有效 Fe	球状模型	16.700	279.400	5.977	0.029	58605	1.920
有效 Mn	球状模型	39.000	685.400	5.690	0.03	85438	1.990
交换性 Ca	球状模型	0.430	6.803	6.321	0.029	17.7	1.960

注: RSS 表示残差, 最小值为最优值。

2.2.2 各向异性半方差函数分析 由表 4 可以看出, 各向异性分析中, pH 和有效 Mn 的最佳拟合模型为指数模型, 而有效 Fe 和交换性 Ca 的最佳拟合模型为高斯模型。从结构性因素来看, 有效 Mn 的  $C_0/(C+C_0) < 25\%$ , 具有很强的空间相关性, 说明其空间变异主要受土壤母质、地形、气候、植被等结构性因素影响; 而 pH、有效 Fe 和交换性 Ca 的  $C_0/(C+C_0)$  在  $25\% \sim 75\%$ , 空间相关性中等, 说明其空间变异受结构性因素(土壤母质、地形和气候等)和随机性因素(耕作制度、施肥和管理水平等)共同影

响。  $A_1$  为主轴变成,  $A_2$  为亚轴变程, 各向异性比  $A_1/A_2 > 1$  时, 空间变量具有各向异性; 各向异性比  $A_1/A_2 = 1$  时, 空间变量具有各向同性。 pH、有效 Mn 和交换性 Ca 的各向异性比均  $> 1$ , 表明其具有各向异性, 它们的空间相关性最大滞后距离为 8.39、8.51、8.6 km。有效 Fe 的各向异性比为 1, 表明有效 Fe 含量在各个方向上的变异不明显。 pH 和有效 Mn 较好的半方差函数理论模型为指数模型, 有效 Fe 和交换性 Ca 的半方差函数理论模型分别为球状模型和高斯模型。

表 4 各向异性半方差函数理论模型及有关参数  
Table 4 Theoretical models and corresponding parameters for anisotropic semivariogram

项目	模型	$C_0$	$C+C_0$	$C_0/(C+C_0)(\%)$	$A_1(\text{km})$	$A_2(\text{km})$	各向异性比 $A_1/A_2$
pH	指数模型	0.404	1.084	37.268	8.39	2.38	3.525
有效 Fe	高斯模型	272.900	768.784	35.498	94.38	94.38	1.000
有效 Mn	指数模型	549.000	1950.334	28.149	8.51	1.51	5.636
交换性 Ca	高斯模型	6.500	18.816	34.546	8.60	1.59	5.409

### 2.3 空间分布分析

空间变量的异质性是地统计分析的前提条件, 空间变量的非均匀空间分布才需要空间插值, 空间相关性则是空间插值研究的基础<sup>[36]</sup>。由上文分析可知, pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 均具有空间相关性, 满足 Kriging 差值条件, 插值结果如图 2 所示。

总体来看, 研究区 pH 空间分布具有明显的差异性, 大致呈中部偏西高、四周低、西高东低的分布趋势, 由西南向东北方向递减, 东西方向的变异大于南北方向的变异, 低经度区的西南和正西方向的中部偏西的区域土壤 pH 大于 7, 呈团状分布, 施肥时应施酸性肥料, 降低土壤碱性, 使土壤 pH 在 5.5~6.5。

有效 Fe 的分布在东西方向上差异比较大, 中间靠西南方向呈团状分布的区域有效 Fe 含量最高, 在

46.9 mg/kg 以上, 西南方向呈带状分布的区域含量也较高, 在 46.9~50.0 mg/kg, 西边由北向南呈带状分布的区域含量最低, 在 34.7~39.3 mg/kg; 总体分布是中间高、四周低、东高西低, 与 pH 的分布大致呈现相反的趋势, 这与酉阳县西北高、东南低的地势有关, 以 45.4 mg/kg 为界将东西对半分, 大概在 109.5°E 以东有效 Fe 含量比较高, 且分布比较均匀, 这是因为酉阳县毛盖坝以东为酉阳第一平坝, 地势比较平坦, 是粮食主产区, 受施肥、耕作等人为活动影响, 所以有效 Fe 空间变异比较小。

有效 Mn 的空间分布差异不是很明显, 含量在 67 mg/kg 以下的区域占大部分, 只有西南呈三角状的小区域含量在 67 mg/kg 以上, 而且超过 74 mg/kg 的区域占很小一部分, 东北和西北区域的含量在 54~

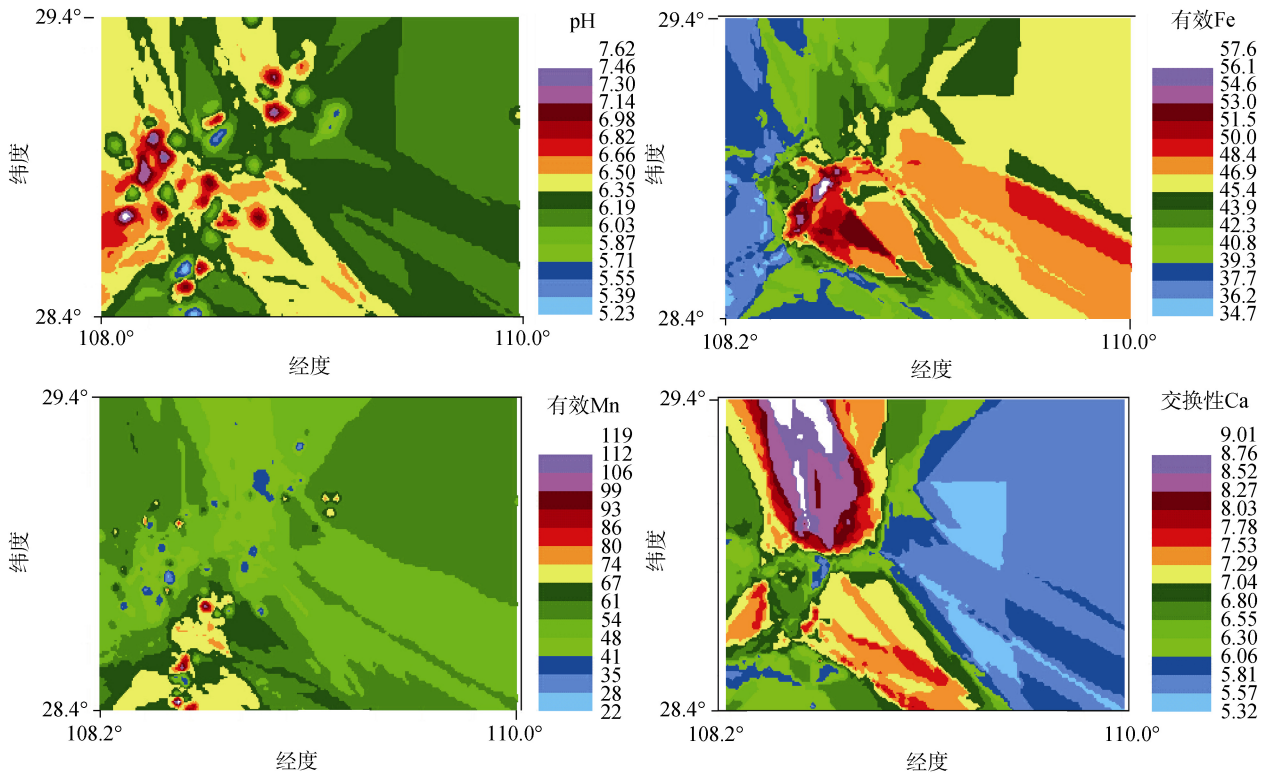


图 2 土壤 pH、有效 Fe(mg/kg)、有效 Mn(mg/kg)和交换性 Ca(cmol/kg)空间分布图  
Fig. 2 Spatial distributions of pH, Fe, Mn and Ca in soil

67 mg/kg, 由西南、西北和东北隔开的自北向西和向东南延伸呈三叉状的区域含量在 41 ~ 54 mg/kg, 中间靠西呈小团状分布的区域有效 Mn 含量最低, 为 41 mg/kg 以下, 但所占的面积很小; 总体来看, 有效 Mn 的空间分布是四周高、中间低, 与 pH 的空间分布呈现相反趋势。

交换性 Ca 的空间分布与 pH 的空间分布相似, 在东西方向上恰好与有效 Fe 的分布相反, 呈西高东低分布, 以 6.06 cmol/kg 为分界将东西对半分布; 西北方向交换性 Ca 的含量最高, 呈椭圆状分布, 四周含量逐渐降低; 正南方向交换性 Ca 的含量也比较高, 在 7.04 ~ 7.78 cmol/kg; 交换性 Ca 的空间分布总体上是由西北向东南逐渐降低, 这主要受酉阳县地势的影响, 其地势由西北向东南倾斜; 大概在 109.3°E 以东交换性 Ca 的含量比较低, 且分布比较均匀, 在 5.32 ~ 6.06 cmol/kg, 这是因为毛盖坝以东为酉阳第一长坝, 地势比较平坦, 是粮食主产区。

## 2.4 相关及回归分析

### 2.4.1 相关性分析

对研究区土壤 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 进行相关性分析 结果表明 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 存在显著或极显著的相关性(表 5)。土壤 pH 和有效 Fe、有效 Mn 存在极显著的负相关性, 而与交换性 Ca 存在极显著的正相

关性, 与空间分布分析的结果一致; 有效 Fe 与有效 Mn 存在显著的正相关性, 而与交换性 Ca 存在显著的负相关性; 有效 Mn 与交换性 Ca 存在显著的负相关性。由相关性可知, 土壤 pH 与有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 存在一定的相关性, 并且影响着有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 的含量。

表 5 相关性分析结果  
Table 5 Correlations between soil properties

项目	pH	有效 Fe	有效 Mn	交换性 Ca
pH	1	-0.392**	-0.595**	0.466**
有效 Fe	-0.392**	1	0.367**	-0.356**
有效 Mn	-0.595**	0.367**	1	-0.295**
交换性 Ca	0.466**	-0.356**	-0.295**	1

注: \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平(双侧)上显著相关。

### 2.4.2 回归分析

根据 pH 与有效 Fe 的空间分布和相关性分析结果, pH 与有效 Fe 存在极显著的相关性。因此以研究区土壤 pH 为自变量  $x$ , 以土壤有效 Fe 含量为因变量  $y_1$ , 进行一元线性回归分析(图 3), 建立关系方程:  $y_1 = 103.401 - 9.407x$ , 单侧检验显著性 Sig 0.000, 说明  $y_1$  与  $x$  有显著线性关系。方程的决定系数较小,  $R^2 = 0.153$ , 这是由于影响土壤中有效 Fe 含量和分布的因素除了 pH, 还有有机质、土壤黏粒等其他因素, 而且 pH 可能不是主要的影响因素。

结合 pH 与有效 Fe 的空间分布、相关性分析与回归分析, pH 与有效 Fe 存在极显著的负相关性, 土壤有效 Fe 含量随着 pH 的升高而降低, 这是由于土壤酸碱度(pH)直接关系着铁化物的溶解度, 是影响土壤有效 Fe 含量的重要因素。随着 pH 降低, Fe 的溶解度增大, 有效性也随之提高, 即有效 Fe 含量增大, 这可能是因为土壤中有有效 Fe 主要以难溶性化合物  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的形态存在, 每增加一个 pH 单位, 溶液中 Fe 的浓度会降低 1 000 倍, Fe 的溶度减小, 所以缺 Fe 现象一般都在碱性土壤中发生。pH 升高不仅会增加  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的沉淀, 而且还会影响其他的铁溶解途径, 比如降低了 Fe 的还原电位, 削弱了螯合铁的稳定性等等, 都是使溶解性 Fe 减少的重要因素<sup>[30]</sup>。

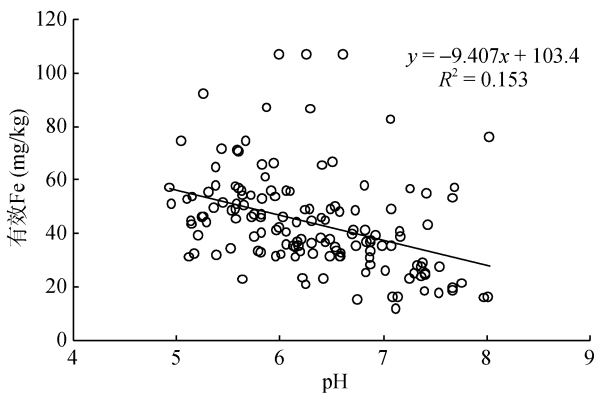


图 3 pH 与有效 Fe 的线性回归分析  
Fig. 3 Linear regression of pH and Fe

据 pH 与有效 Mn 的空间分布和相关性分析结果, pH 与有效 Mn 存在极显著的相关性。因此以研究区土壤 pH 为自变量  $x$ , 以土壤有效 Mn 含量为因变量  $y_2$ , 进行一元线性回归分析(图 4), 建立关系方程  $y_2=192.373-21.347x$  单侧检验显著性 Sig 0.000, 说明  $y_2$  与  $x$  有显著线性关系。方程的决定系数  $R^2=0.353$ , 拟合度比有效 Fe 与 pH 的拟合度好。

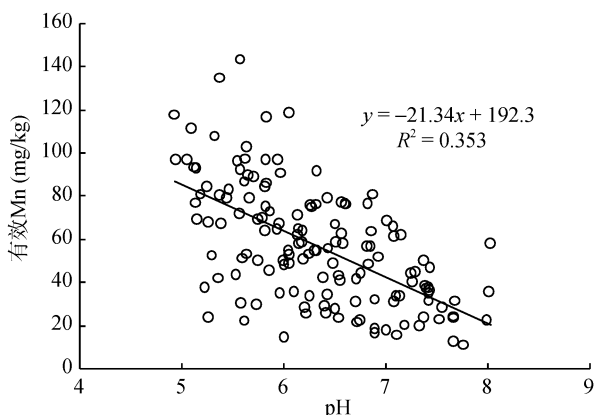


图 4 pH 与有效 Mn 的线性回归分析  
Fig. 4 Linear regression of pH and Mn

经过空间分布、相关性分析和回归分析, 结果表明土壤 pH 与有效 Mn 存在极显著的负相关性, 土壤有效 Mn 含量随着 pH 升高而降低, 因为土壤 pH 是制约土壤中 Mn 素化学行为与可给性的重要因素。pH 降低使可溶性 Mn 含量增加, pH 升高使还原态 Mn 含量增加, 可溶性 Mn 含量就会减少, 因而土壤中 Mn 的有效量一般随 pH 升高而下降<sup>[37-38]</sup>。土壤有效 Mn 含量还会受土壤有机质、质地、湿度、土壤的淋溶作用等因素的影响。

根据 pH 与交换性 Ca 的空间分布和相关性分析结果, pH 与交换性 Ca 存在极显著的相关性。因此以研究区土壤 pH 为自变量  $x$ , 以土壤交换性 Ca 含量为因变量  $y_3$ , 进行一元线性回归分析(图 5), 建立关系方程  $y_3=3.576+1.634x$ , 单侧检验显著性 Sig 0.000, 说明  $y_3$  与  $x$  有显著线性关系。方程的决定系数  $R^2=0.217$ , 拟合较弱, 说明 pH 可能不是影响交换性 Ca 含量和分布的主要因素, 还有土壤质地、胶体等其他因素。

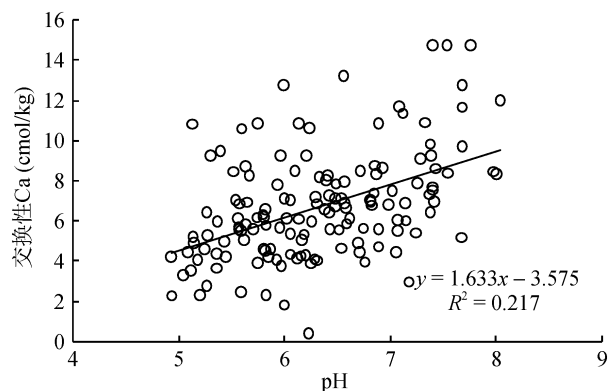


图 5 pH 与交换性 Ca 的线性回归分析  
Fig. 5 Linear regression of pH and Ca

土壤中交换性 Ca 含量和 pH 及盐基饱和度有关, 其一般随着土壤盐基饱和度的升高而增加。土壤的盐基饱和度又受 pH 的影响, 在中性或碱性土壤中 pH 较高, 盐基饱和度也较高, 一般都在 60% 以上。而酸性较强的土壤, 盐基饱和度一般低于 60%。胶体种类也会影响 pH 和盐基饱和度的关系。所以, pH 与盐基饱和度是从多方面来影响土壤交换性 Ca 的。首先, 土壤中 pH 和盐基饱和度低, 其交换性 Ca 的含量一般也较低; 其次, 土壤 pH 与盐基饱和度都会影响土壤交换性 Ca 的有效性, 通常交换性 Ca 的解离度随着 pH 升高而增加, 也随着饱和度的增高而增加<sup>[38]</sup>。因此土壤中的 pH 低和盐基饱和度低, 其交换性 Ca 的有效性也很小。

### 3 结论

1) 酉阳植烟区土壤总体呈酸性, 适宜烟叶的种植; 研究区土壤有效 Fe 含量和有效 Mn 含量都达到极丰富水平, 交换性 Ca 含量达到丰富水平。

2) 土壤 pH、有效 Fe、有效 Mn 和交换性 Ca 都属于中等变异, 具有很强的空间相关性; pH、有效 Mn 和交换性 Ca 各向变异明显, 有效 Fe 各向变异不明显。

3) 土壤 pH 和交换性 Ca 的空间分布随酉阳县地形变化而变化, 由西北向东南方向递减, 东西方向差异大; 有效 Fe 的空间分布东高西低, 东西方向差异明显; 有效 Mn 的空间分布为四周高于中间, 空间差异较小。

4) 土壤 pH 与有效 Fe、有效 Mn 存在显著的负相关性, 有效 Fe、有效 Mn 随着 pH 升高而降低, pH 与交换性 Ca 存在显著的正相关性, 交换性 Ca 随着 pH 升高而增加。

#### 参考文献:

- [1] 肖协中, 李德臣, 郭承芳, 等. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997
- [2] 江厚龙, 李华川, 王红锋, 等. 植烟土壤中微量元素空间变异性及适宜性评价[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(12): 12-17
- [3] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1990
- [4] 司江英, 汪晓丽, 陈冬梅. 不同 pH 和氮素形态对作物幼苗生长的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2007, 28(3): 68-71
- [5] 韩小斌, 杨超, 许安定, 等. 氨基酸有机肥对植烟土壤及烤烟生长的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 36(8): 6-11
- [6] 石河子农业信息网. 微量元素对植物生长的作用[EB/OL]. 2012-11-02. <http://www.shzny.gov.cn/news/njtg/2012/112/12112133713159F8847BFI3C3HKGAI2.html>
- [7] 浙江农业大学. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 147-148
- [8] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 146-151
- [9] 韦凤杰, 范艺宽, 刘国顺, 等. 饼肥对烤烟叶片发育过程中质体色素降解及相关酶类活性的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(5): 766-771
- [10] 韦凤杰, 刘国顺, 杨永锋. 烤烟成熟过程中类胡萝卜素变化与其降解香气物质关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1882-1889
- [11] 胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 231-240
- [12] 许自成, 王林, 关博谦, 等. 湖南烟区烤烟锰与土壤有效锰含量的分布特点及关系分析[J]. 中国烟草学报, 2007, 13(5): 27-32
- [13] 曹志洪. 优质烤烟生产的土壤与施肥[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991: 38-43
- [14] 邹文桐, 熊德中. 土壤交换性钙水平对烤烟生长发育的影响[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 96-99
- [15] 邹文桐, 熊德中. 土壤交换性钙水平对烤烟若干生理代谢的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(2): 369-373
- [16] 汪璇, 吕家格, 唐国祥, 等. 西南丘陵山区植烟土壤肥力空间分布及适宜性评价[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(7): 106-114
- [17] 王子芳, 高明, 魏朝富, 等. 植烟土壤养分空间变异特征及适宜性评价——以重庆市彭水县为例[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 98-103
- [18] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 944-952
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 135-139
- [20] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2003: 245-275
- [21] 罗建新, 石丽红, 龙世平. 湖南主产烟区土壤养分状况与评价[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 31(4): 376-380
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 166-187
- [23] 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
- [24] 张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41 (3): 53-58
- [25] Juang K W, Lee D Y, Ellsworth T R. Using rank-order geostatistics for spatial interpolation of highly skewed data in a heavy-metal contaminated site. Journal of Environmental Quality, 2001, 30: 894-903
- [26] 徐丽华, 谢德体, 魏朝富, 等. 案例推理和克里克插值在土壤养分预测中的比较研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(9): 105-110
- [27] 许红卫, 高克异, 王珂. 稻田土壤养分空间变异与合理取样数研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 37-43
- [28] 武德传, 陈永安, 张西仲, 等. 黔南山地植烟土壤有效铝空间变异分析[J]. 云南农业大学学报, 2012, 27(6): 851-857
- [29] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 102-149
- [30] 陈义强, 刘国顺, 习红昂. 微尺度下烟田铁的空间变异性及其与烟叶铁的相关分析[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1 449-1 458
- [31] 杨秀云, 韩有志, 宁鹏, 等. 采伐干扰对华北落叶松林下土壤水分、pH 和全氮空间变异的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 356-365
- [32] 徐小逊, 张世熔, 余妮娜. 沱江中游土壤有效铁空间分布及其影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 977-981
- [33] 田茂成, 黎娟, 田峰, 等. 湘西植烟土壤有效锰含量及变化规律研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(17): 4 013-4 016



- [34] 许自成, 黎妍妍, 肖汉乾. 湖南烟区土壤交换性钙、镁含量及对烤烟品质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4 425-4 433
- [35] 刘丹, 姜勇, 梁文举. 沈阳市郊耕地土壤交换性 Ca 含量的空间异质性特征[J]. 生态学杂志, 2003, 22(4): 6-9
- [36] 武德传, 周冀衡, 樊在斗. 云南烤烟多酚含量空间变异分析[J]. 作物学报, 2010, 36(1): 141-146
- [37] Mandal A K. Transformation of iron and manganese in waterlogged rice soil[J]. Soil Sci., 1981, 22(2): 97-121
- [38] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983

## Spatial Heterogeneity of Soil pH, Available Fe, Available Mn and Exchangeable Ca in Tobacco-growing Soils in Karst Area: A Case Study of Youyang County, Chongqing

NONG Jinhua<sup>1</sup>, LIANG Zengfang<sup>2</sup>, SHI Yonglian<sup>3</sup>, NI Jiupai<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Water Supplies Bureau of Wanzhou, Wanzhou, Chongqing 404120, China; 3 Environmental Hydrogeology and Engineering Geology, Institute of Geological Survey, Xining 810000, China)

**Abstract:** To provide a theoretical basis for tobacco-planting soil improvement, balanced fertilization and developing high-quality tobacco in Karst area, this study analyzed the spatial heterogeneity and correlation characteristics of surface soil pH, available Fe, available Mn and exchangeable Ca of tobacco-planting area in Youyang County of Chongqing by the combined methods of field surveys, classical statistical and geostatistical methods. The results showed that soil pH was generally acidic and available Fe, available Mn and exchangeable Ca were rich in the tobacco-planting area. pH, available Fe, available Mn and exchangeable Ca belonged to middle variation and were relatively stable in soil with variation coefficient between 5.690%–7.338%. The nugget effects of them were between 5.690%–7.338%, with strong spatial correlation. In the spatial distribution, pH and exchangeable Ca were high in the west and low in the east, available Fe was high in the east and low in the west, richest from the central to the southwest. Available Mn generally was low in the middle, but high around the periphery. pH had significant negative correlations with available iron and Mn, had significant positive correlation with exchangeable Ca. Overall, the nutrient elements belonged to middle spatial variability and had strong spatial correlation in the study area.

**Key words:** Karst area; pH; Medium trace element; Spatial heterogeneity