

文章编号: 1008-2786-(2017)6-826-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000283

# 黔南喀斯特地区植烟土壤有效态中 微量元素空间变异及影响因子 ——以黔南山区为例

武德传<sup>1</sup>, 施寒丰<sup>1</sup>, 王维洁<sup>1</sup>, 江玉平<sup>2\*</sup>, 宋泽民<sup>3</sup>

(1. 安徽农业大学 农学院, 合肥 230036; 2. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026;

3. 贵州省黔南州烟草公司, 贵州 都匀 558000)

**摘 要:** 为揭示喀斯特山地植烟土壤中微量元素空间变异特征及影响因素, 利用地统计学对黔南喀斯特山地植烟土壤有效态钙、镁、铜、锌等元素进行空间变异和影响因子分析。结果表明, 黔南植烟土壤交换性钙、有效铜和有效锌属中等强度变异, 交换性镁属强变异。交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌的半方差函数均为指数模型。交换性镁、有效铜和有效锌具有中等的空间相关性, 交换性钙空间相关性较弱。黔南州植烟土壤交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌总体含量较为丰富, 土壤交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌缺乏的面积分别只占统计面积的 1.22%、0.46%、0.21% 和 0.25%。土壤类型和土壤 pH 是影响黔南植烟土壤有效态中微量元素含量的重要环境因子。

**关键词:** 喀斯特山地; 植烟土壤; 中微量元素; 空间变异; 影响因子

**中图分类号:** S158.9

**文献标志码:** A

钙、镁、铜和锌是烟草生长发育所必需的营养元素, 与品质形成关系密切<sup>[1-2]</sup>。烟叶中钙镁具有一定的助燃能力, 促进烟叶燃烧, 使烟灰呈白色且不易散落<sup>[3-4]</sup>。铜锌能促进烟株健壮生长, 成熟时分层落黄, 烟叶易烘烤, 改善烟叶吸食品质<sup>[5-6]</sup>。烟草中微量元素主要来源于土壤, 土壤有效态中微量元素含量直接影响烟草对其吸收利用。

中国烤烟依据香型可分为清香型、中间香型和浓香型, 中间香型烟叶在中式卷烟配方中占有重要地位。黔南州有 380 多年的种烟历史, 是我国典型中间香型烟叶主产区之一, 出产的优质烟叶享有“金黄粉底色鲜亮, 油润光滑细如稠”的美誉, 深受

国内卷烟工业的青睐。黔南州年烤烟种植面积约 5.5 万公顷, 占耕地面积的 6.5%, 年产量约 12.5 万吨。黔南州境内喀斯特峰丛洼地广泛分布, 土壤养分呈现出多来源和高变异的特征<sup>[7]</sup>。研究表明, 贵州喀斯特山区村级尺度下农田土壤钙镁具有强烈的空间相关性, 铜锌具有中等的空间相关性<sup>[8]</sup>。黔南植烟土壤养分均具有明显的空间异质性<sup>[9-10]</sup>。黔南植烟土壤有效态钙镁铜锌空间丰缺状况目前仍不清楚, 导致烟草中微肥施用带有很大的随意性和盲目性。该文以黔南植烟土壤为研究对象, 用地统计方法对土壤有效态钙镁铜锌含量进行空间变异分析, 以期揭示其空间变异特征及影响因子, 为该地区

**收稿日期** (Received date): 2015-04-03; **改回日期** (Accepted date): 2017-08-18

**基金项目** (Foundation item): 安徽省高等教育省级振兴计划项目—作物学科高水平教师团队建设 (zwxkgsp-2015); 安徽农业大学引进人才科研启动基金 (2010031); 贵州省黔南州烟草公司资助项目 (201130) [Anhui Advanced Education Revitalization Program for High Level Teacher Team of Crop Science (zwxkgsp-2015); Scientific Research Foundation for Introduction of Talents, Anhui Agriculture University (2010031); Major Program of Tobacco Company of Qiannan Prefecture (201130)]

**作者简介** (Biography): 武德传 (1974-), 男, 博士, 讲师, 从事作物生理生态及精确农业研究 [Wu Dechuan (1974-), male, Ph. D., mainly engaged in the research of crop physiology, ecology and precision agriculture]

**\* 通信作者** (Corresponding author): 江玉平 (1958-), 男, 学士, 副教授 [Jiang Yuping (1958-), male, B. Sc., associate professor] E-mail: jiangyp@ustc.edu.cn

烟草中微肥合理施用提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黔南州位于贵州省中南部(106°13′48.0″~108°19′33.6″E,25°4′48.0″~27°27′21.6″N),地处云贵高原东南部向广西丘陵的过渡地带,喀斯特地貌遍布全境,地形以高原山地和丘陵为主。黔南州面积约2.62万km<sup>2</sup>,海拔400~2000m(平均997m),年均降水量约1500mm,年均气温约17.5℃,光热雨同季,属典型的亚热带湿润性季风气候。境内土壤可划分为9个土类、23个亚类和300多个土种,其中耕地土壤主要有黄壤、黄棕壤、石灰土和水稻土等类型。

1.2 土样采集与分析

2010年在贵州省黔南州采集1250份植烟土壤样品(图1),按照每10hm<sup>2</sup>左右采集一个耕作层土壤样品。采用网格布点法,采集0~20cm耕层土壤样品,各点土样充分混匀,以四分法留取2kg土壤作为待测样品。土壤样品风干后装塑料封口袋保

存。土壤交换性钙和交换性镁采用NH<sub>4</sub>OAc交换—原子吸收分光光度法<sup>[11]</sup>测定,有效铜和有效锌采用盐酸浸提—原子吸收分光光度法<sup>[11]</sup>测定。

1.3 土壤有效态中微量元素分级标准

参照中国土壤普查技术<sup>[12]</sup>和贵州烟草平衡施肥研究<sup>[13]</sup>制定植烟土壤有效态中微量元素分级标准(表1)。

| 表1 植烟土壤有效态中微量元素分级标准  |                 |                |            |                 |
|--|-----------------|----------------|------------|-----------------|
| Tab.1 Classification for tobacco soil available secondary and trace elements |                 |                |            |                 |
| mg·kg <sup>-1</sup>  |                 |                |            |                 |
| 变量<br>Variable   | 缺乏<br>Deficient | 适中<br>Moderate | 丰富<br>Rich | 很丰<br>Very rich |
| ECa  | <800            | 800~1200       | 1200~2000  | >2000           |
| EMg  | <50             | 50~100         | 100~200    | >200            |
| ACu  | <0.2            | 0.2~1.0        | 1.0~2.0    | >2.0            |
| AZn  | <0.5            | 0.5~1.0        | 1.0~3.0    | >3.0            |

ECa: 交换性钙 Exchangeable calcium; EMg: 交换性镁 Exchangeable magnesium; ACu: 有效铜 Available copper; AZn: 有效锌 Available zinc. 下同 The same below.

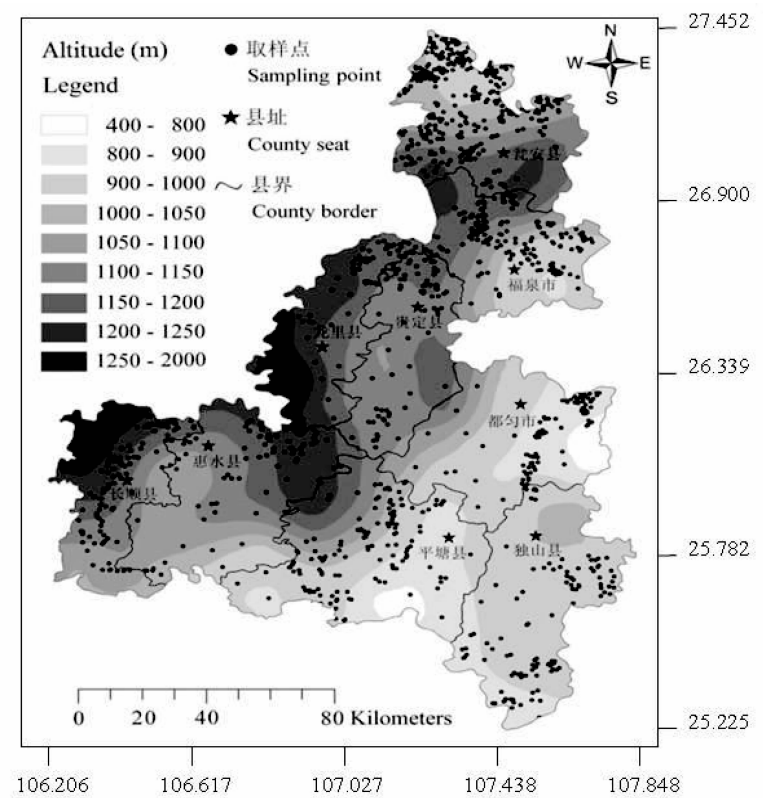


图1 土壤采样点分布图  
Fig.1 Distributions of soil samples

1.4 数据处理

采用 SPSS20.0 的 Descriptive Statistics-Descriptives 进行描述性统计统计分析, Compare Means-One-Way ANOVA-LSD 进行多重比较, Correlate-Bivariate-Pearson 进行相关分析, GS + V9.0 进行半方差函数模型拟合, ArcGIS9.3 的 ArcMap-Geostatistical Analyst 进行 Kriging 插值。特异值会引起空间变量连续表面中断和半方差函数畸变, 掩盖固有的空间结构, 影响空间分布特征。本文采用“域法”识别特异值, 即样本平均值  $\pm 3$  倍标准差, 超出正常值范围的数值均视为特异值, 并用正常最大值和最小值代替。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态中微量元素描述性统计

表 2 为土壤有效态中微量元素描述性统计结果。参照表 1 土壤养分分级标准, 从均值来看, EMg 和 AZn 含量很丰富, 平均值分别为  $207.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $4.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变幅分别为  $1.14 \sim 884.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.01 \sim 13.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; ECa 和 ACu 含量丰富, 平均值分别为  $1368.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变幅分别为  $50.90 \sim 4023.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

和  $0.01 \sim 6.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。ECa、EMg、ACu 和 AZn 含量缺乏的土壤样本数分别占总样本的 26.96%、15.28%、7.76% 和 5.20%。4 种元素变异系数范围在 59.97% ~ 102.81% 之间, ECa、ACu 和 AZn 属于中等强度变异, EMg 属强变异。K - S 检验表明, ECa、ACu 和 AZn 服从正态分布, EMg 经对数转换后服从正态分布。

2.2 土壤有效态中微量元素空间变异分析

2.2.1 土壤有效态中微量元素半方差函数

土壤养分半方差函数理论模型及相关参数见表 3。半方差函数理论模型是指用于拟合空间变量的曲线方程, 地统计学常用理论模型有线性模型、球状模型、指数模型和高斯模型等。土壤 ECa、EMg、ACu 和 AZn 理论模型均为指数模型。块金系数表示由随机部分引起的空间变异占总变异的比。由块金系数可知, EMg、ACu 和 AZn 具有中等的空间相关性, 而 ECa 的空间相关性较弱。变程是表示系统变量空间自相关的最大滞后距离, 即半方差达到基台值时的样本间距。变程大小揭示了结构性因素控制系统变量空间异质性距离的远近<sup>[14]</sup>。土壤中微量元素变程范围在 2.23 ~ 238.11 km 之间, 变程最大的是 EMg, 最小的是 ACu。

表 2 植烟土壤有效态中微量元素描述性统计分析

Tab. 2 Descriptive statistics of tobacco soil available secondary and trace elements

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

| 变量<br>Variable | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 变异系数<br>CV, % | 分布类型<br>Distribution type | 偏度<br>Skewness | 峰度<br>Kurtosis | $P_{K-S}$ |
|----------------|------------|------------|-------------|-----------|---------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------|
| ECa            | 50.90      | 4023.22    | 1368.83     | 820.89    | 59.97         | 正态 Normal                 | 0.27           | -0.16          | 0.236     |
| EMg            | 1.14       | 884.81     | 207.75      | 213.59    | 102.81        | 对数正态 Log-normal           | -0.32          | 0.48           | 0.129     |
| ACu            | 0.01       | 6.37       | 1.90        | 1.33      | 70.00         | 正态 Normal                 | 0.02           | 0.12           | 0.013     |
| AZn            | 0.01       | 13.36      | 4.01        | 2.54      | 63.34         | 正态 Normal                 | 0.09           | 1.02           | 0.059     |

表 3 植烟土壤养分半方差函数模型及相关参数

Tab. 3 Semi-variogram models and parameters of tobacco soil available secondary and trace elements

| 变量<br>Variable | 模型<br>Model    | 块金值<br>C0 | 基台值<br>C0 + C | 块金系数 <sup>#</sup><br>$C0/(C0 + C)$<br>% | 空间自相关<br>Spatial correlation | 变程 Range<br>km | $R^2$ | RSS  |
|----------------|----------------|-----------|---------------|---|------------------------------|----------------|-------|------|
| ECa            | 指数 Exponential | 5.80      | 6.83          | 84.92                                   | 弱 Weak                       | 70.80          | 0.87  | 2.35 |
| EMg            | 指数 Exponential | 0.70      | 1.29          | 54.26                                   | 中等 Moderate                  | 238.11         | 0.90  | 1.82 |
| ACu            | 指数 Exponential | 0.81      | 1.83          | 44.26                                   | 中等 Moderate                  | 2.23           | 0.93  | 1.10 |
| AZn            | 指数 Exponential | 5.19      | 7.12          | 72.89                                   | 中等 Moderate                  | 136.14         | 0.95  | 0.01 |

#:  $C0/(C0 + C) < 25\%$ , 变量具有强烈的空间相关性;  $25\% \leq C0/(C0 + C) \leq 75\%$ , 变量具有中等的空间相关性;  $C0/(C0 + C) > 75\%$ , 变量空间相关性弱<sup>[15-17]</sup>。  $C0/(C0 + C) < 25\%$  indicates strong spatial dependence;  $25\% \leq C0/(C0 + C) \leq 75\%$  indicates moderate spatial dependence;  $C0/(C0 + C) > 75\%$  indicates weak spatial dependence.

### 2.2.2 土壤有效态中微量元素空间变异

在获取半方差函数模型及相关参数的基础上,利用 Kriging 插值法对未知样点进行预测,获得了研究区土壤有效态中微量元素空间分布预测图(图2)。土壤4种元素都表现出明显的空间异质性。研究区绝大部分区域的 ECa、EMg、ACu 和 AZn 含量都处于适中至很丰富水平。ECa 含量很丰富的区域位于瓮安县北部很小范围,占统计面积的 1.14%;ECa 含量缺乏的区域位于独山县东部和南部很小范围,占统计面积的 1.22%;其余部分 ECa 含量均处于适中至丰富水平,占统计面积的 97.64%。EMg 含量很丰富的区域主要位于黔南州北部的瓮安县、福泉市、贵定县、龙里县和都匀市境内,占统计面积的 29.09%;EMg 含量缺乏的区域仅位于独山县东部很小范围,占统计面积的 0.46%;其余部分 EMg

含量均处于适中至丰富水平,占统计面积的 70.45%。ACu 含量很丰富的区域主要位于长顺县、惠水县、都匀市、龙里县和瓮安县境内,占统计面积的 30.15%;ACu 含量缺乏的区域仅位于福泉市东北部很小范围,占统计面积的 0.21%;其余部分 ACu 含量均处于适中至丰富水平,占统计面积的 69.64%。研究区绝大部分区域 AZn 含量很丰富,占统计面积的 91.46%;AZn 含量缺乏的区域位于贵定县南部很小范围,占统计面积的 0.25%;AZn 含量适中至丰富的区域位于贵定县南部、惠水县东北部和独山县东部较小范围,占统计面积的 8.29%。

## 2.3 土壤有效态中微量元素空间变异的影响因子

### 2.3.1 土壤类型

土壤样本中占比前4位的土壤类型分别是黄

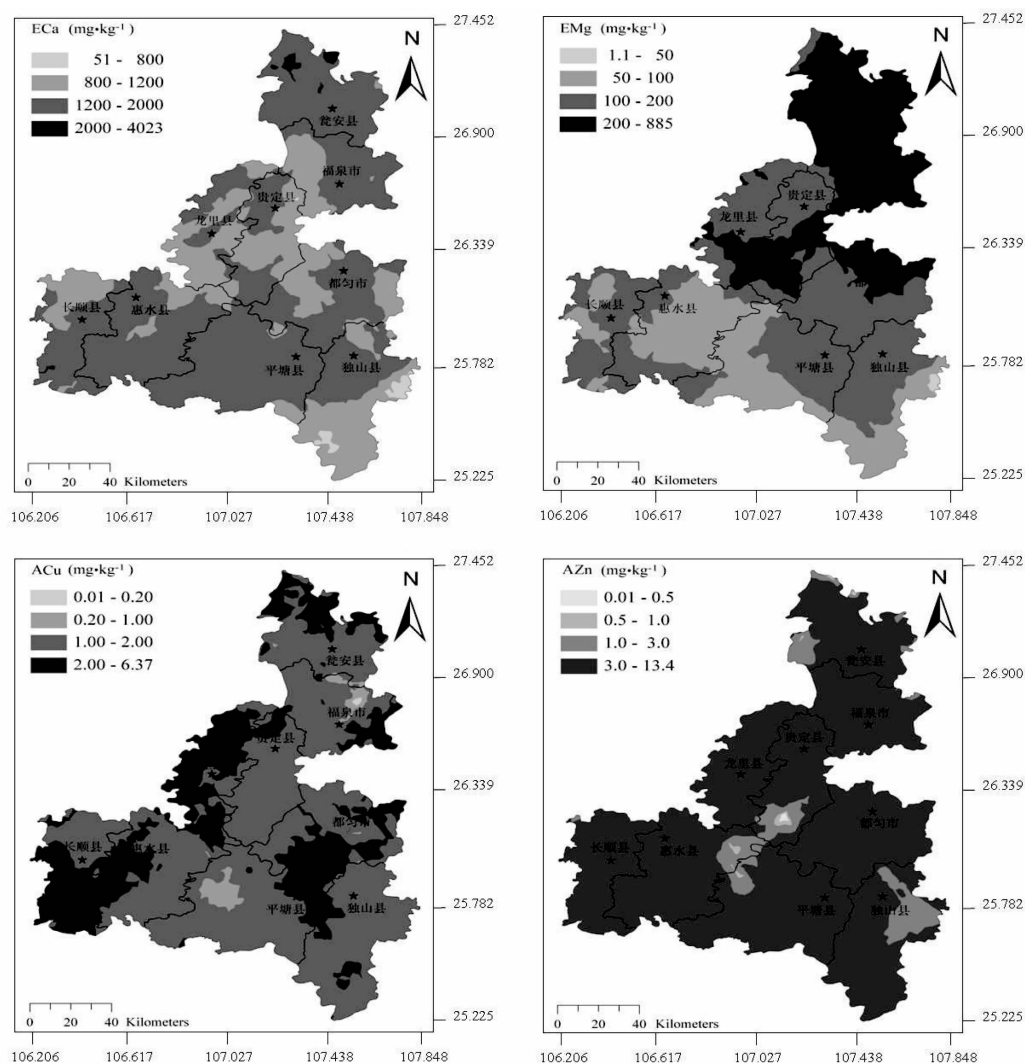


图2 植烟土壤有效态中微量元素空间分布预测图

Fig.2 Spatial distribution predicting map of tobacco soil available secondary and trace elements

壤、黄棕壤、水稻土和石灰土,占样本总量的 66.48%。用 LSD 法比较 4 类土壤中微量元素平均值差异(表 4)。ECa 含量大小顺序为黄壤>水稻土>石灰土>黄棕壤,ECa 含量最高的黄壤比最低的黄棕壤高出 68.74%,黄壤与黄棕壤、石灰土、水稻土之间 ECa 含量差异显著( $P<0.01$ )。EMg 含量大小为顺序为水稻土>黄壤>黄棕壤>石灰土,EMg 含量最高的水稻土比最低的石灰土高出 427.57%,4 类土壤之间 EMg 含量差异均显著( $P<0.01$ )。ACu 含量大小顺序为水稻土>黄棕壤>黄壤>石灰土,ACu 含量最高的水稻土比最低的石灰土高出 129.05%。黄壤、石灰土与水稻土、黄棕壤,水稻土与黄棕壤之间 ACu 含量差异均显著( $P<0.01$ )。AZn 含量大小为水稻土>石灰土>黄棕壤>黄壤,AZn 含量最高的水稻土比最低的黄壤高出 42.31%,水稻土与黄壤、黄棕壤之间 AZn 含量差异显著( $P<0.01$ )。

2.3.2 海拔

简单相关性分析表明,海拔与 ECa、EMg 和 ACu 负相关,与 AZn 正相关。但从相关系数 R 来看,海

拔与土壤 4 种元素线性相关性极弱,可视为无相关性(表 5)。按海拔高度对土样进行分组,用 LSD 法比较组间土壤中微量元素平均含量差异。随着海拔升高,土壤 ECa、EMg 和 ACu 含量总体上呈先增加后下降趋势,ECa 含量大小顺序为 E3>E2>E1>E4>E5,ECa 含量最高的 E3 比最低的 E5 高出 20.51%,海拔 E2、E3 与 E5 之间土壤 ECa 含量差异显著( $P<0.01$ );EMg 含量大小顺序为 E4>E3>E1>E2>E5,EMg 含量最高的 E4 比最低的 E5 高出 14.18%,所有海拔之间土壤 EMg 含量差异不显著;ACu 含量大小顺序为 E2>E1>E4>E3>E5,ACu 含量最高的 E2 比最低的 E5 高出 13.19%,所有海拔之间土壤 ACu 含量差异不显著。土壤 AZn 含量与海拔之间无明显的规律性,AZn 含量大小顺序为 E5>E1>E4>E3>E2,AZn 含量最高的 E5 比最低的 E2 高出 21.15%,海拔 E2 与 E5 之间土壤 AZn 含量差异显著( $P<0.01$ )。

2.3.3 土壤 pH

简单相关性分析表明,pH 与 ECa、EMg 呈显著正相关( $P<0.01$ ),与 ACu、AZn 呈负相关。但从相

表 4 土壤类型对植烟土壤有效态中微量元素的影响

Tab.4 Effect of soil types on tobacco soil available secondary and trace elements mg·kg<sup>-1</sup>

| 土壤类型 Soil type         | 样本数 Number | ECa              | EMg             | ACu         | AZn           |
|------------------------|------------|------------------|-----------------|-------------|---------------|
| 黄壤 Yellow earth        | 482        | 1475.11±646.28aA | 151.69±73.48bB  | 1.59±0.84cC | 4.16±1.74bB   |
| 黄棕壤 Yellow-brown earth | 154        | 874.18±396.95bB  | 102.48±56.23cC  | 1.98±0.92bB | 4.48±1.65bB   |
| 石灰土 calcareous soil    | 91         | 1081.21±472.61bB | 43.81±39.43dD   | 1.48±0.79cC | 4.59±1.76abAB |
| 水稻土 Paddy soil         | 104        | 1102.82±508.29bB | 231.13±106.49aA | 3.39±1.62aA | 5.92±1.69aA   |

小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,大写字母表示在 0.01 水平上差异显著。下同。

Lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, capital letters indicate significant differences at 0.01 level. The same below.

表 5 海拔对植烟土壤有效态中微量元素的影响

Tab.5 Effect of altitude on tobacco soil available secondary and trace elements mg·kg<sup>-1</sup>

| 海拔(m) Elevation | 样本数 Number | ECa                | EMg          | ACu       | AZn           |
|-----------------|------------|--------------------|--------------|-----------|---------------|
| E1(620~900)     | 243        | 1365.64±486.78abAB | 206.87±60.35 | 1.96±0.97 | 4.21±1.92abAB |
| E2(900~1000)    | 225        | 1456.87±491.69aA   | 201.94±68.37 | 2.06±0.84 | 3.64±1.89bB   |
| E3(1000~1100)   | 280        | 1472.25±502.57aA   | 218.50±74.39 | 1.83±0.91 | 3.82±1.74abAB |
| E4(1100~1200)   | 205        | 1347.76±439.61abAB | 221.05±65.28 | 1.87±0.79 | 3.89±1.85abAB |
| E5(1200~1470)   | 297        | 1221.71±504.24bB   | 193.60±59.63 | 1.82±0.96 | 4.41±2.19aA   |
| 相关系数(R)         | 1250       | -0.086             | -0.047       | -0.063    | 0.025         |

|R|≥0.8 为高度相关,0.5≤|R|<0.8 为中度相关,0.3≤|R|<0.5 为低度相关,|R|<0.3 为极弱相关。下同。

|R|≥0.8 indicates highly correlative, 0.5≤|R|<0.8 indicates moderately correlative, 0.3≤|R|<0.5 indicates lowly correlative, |R|<0.3 indicates weakly correlative. The same below.

表 6 土壤 pH 对植烟土壤有效态中微量元素的影响

Tab. 6 Effect of soil pH on tobacco soil available secondary and trace elements

mg · kg<sup>-1</sup>

| pH        | 样本数 Number | ECa                 | EMg               | ACu            | AZn             |
|-----------|------------|---------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| <5.0      | 237        | 585.21 ± 229.58eE   | 68.04 ± 38.79eE   | 2.05 ± 0.87abA | 3.55 ± 1.68cC   |
| 5.0 ~ 5.5 | 295        | 982.55 ± 393.71dD   | 116.74 ± 66.48dD  | 2.25 ± 0.99aA  | 4.12 ± 1.83bB   |
| 5.5 ~ 6.5 | 464        | 1464.36 ± 579.46cC  | 198.51 ± 75.29cC  | 2.03b ± 0.95A  | 4.63 ± 2.16aA   |
| 6.5 ~ 7.5 | 155        | 1991.51 ± 626.37bB  | 388.91 ± 130.23bB | 1.53 ± 0.79cB  | 4.21 ± 1.68abAB |
| >7.5      | 99         | 2744.27 ± 882.65.aA | 574.89 ± 215.41aA | 0.46 ± 0.28dC  | 1.60 ± 0.73dD   |
| 相关系数(R)   | 1250       | 0.779 **            | 0.672 **          | -0.289         | -0.089          |

\*. 在 0.05 水平上显著相关(双侧); \*\* . 在 0.01 水平上显著相关(双侧).

\*. Correlation is significant at 0.05 level(2-tailed). \*\* . Correlation is significant at 0.01 level(2-tailed).

关系数 R 来看,土壤 pH 与 ECa、EMg 达到中度相关性,而 pH 与 ACu、AZn 相关性极弱,可视为无相关性(表 6)。按土壤 pH 从低到高将土样分成 5 组,用 LSD 法比较组间土壤中微量元素平均含量差异。随着 pH 升高,ECa 和 EMg 含量呈增加趋势,ACu 和 AZn 呈先增加后下降趋势。不同 pH 范围间 ECa、EMg、ACu、AZn 含量差异均达极显著水平( $P < 0.01$ )。

3 讨论

耕作土壤是自然土壤通过人类长期的农业生产活动和自然因素综合作用,形成适于农作物生长的土壤。植烟土壤中微量元素含量受到自然因素和烟草生产活动共同影响。黔南州植烟土壤总体上偏酸性(表 7)。一般认为,我国南方酸性土壤地区因降雨丰沛,淋溶作用强烈,土壤中钙镁含量普遍较低。贵州土壤钙镁背景值较全国平均值分别低 59.74% 和 8.97%<sup>[18]</sup>。而本研究结果表明,黔南州绝大部分植烟土壤交换性钙镁含量处于适中至很丰富水平,缺乏的面积很小,与秦松<sup>[19]</sup>研究结果一致。耕作土壤元素来源有两种,一是来源于成土母质,二是来源于施用的肥料。烤烟生产过程中需要施用大量的肥料。据调查,黔南州烤烟生产主要施用烟草专用复合肥和自制有机肥。烟草专用复合肥中含有硝铵磷、磷酸一铵和磷酸二铵,生产这三种肥料的原料都有磷矿粉,磷矿粉中含有较高比例的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaO 和 MgO 等成分。烟草专用复合肥中添加了约 20% 的白云石粉作为填充料,白云石粉中约含有 30% 的 CaO 和 17% 的 MgO。自制有机肥的物料主要包括玉米秸秆、人畜粪便和油菜饼,这些物料中含有较多

的钙镁,而铜锌则相对较少<sup>[20-22]</sup>。施肥是黔南植烟土壤钙镁的重要补充。综上所述,黔南植烟土壤 ECa 和 EMg 含量是由土壤背景值、土壤 pH 和施肥共同作用的结果。黔南州大部分地区植烟土壤 ACu、AZn 含量丰富。因贵州土壤 Cu、Zn 背景值较全国平均值分别高出 41.59% 和 39.75%<sup>[18]</sup>。土壤中 Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 的溶解度随着 pH 值下降而增大,在酸性条件下有效性较高<sup>[23-26]</sup>。土壤 Cu、Zn 背景值高和酸性土壤是黔南植烟土壤 ACu、AZn 含量高的主要原因。烟草大田生长期施用 Cu(OH)<sub>2</sub>、CuSO<sub>4</sub>、甲霜锰锌、代森锌等含铜锌农药是植烟土壤铜锌的另一次要来源。另外,烤烟大田生长期与降水同季,黔南州烤烟整个大田生育期都覆盖地膜,减缓了土壤有效态矿质元素雨水淋溶损失<sup>[10]</sup>。

影响土壤养分的自然因素很多,本文选择土壤类型、海拔和土壤 pH 三种能够有效界定或精确测量的环境因子,对植烟土壤中微量元素进行比较分析。土壤类型、海拔和土壤 pH 都对黔南植烟土壤有效态钙镁铜锌含量有显著影响。黔南州实行标准化的烟草施肥和施药,即统一种类和施用量。烟草施肥施药增加了所有植烟土壤钙镁铜锌含量,对不同类型植烟土壤钙镁铜锌含量的差异并不构成决定性影响。耕作土壤元素除了来源于施用的肥料,另一个主要来源是成土母质。贵州不同类型成土母质钙镁铜锌背景值差异很大,钙含量变化范围在 0.05% ~ 2.72% 之间(CV = 129.2%),镁含量变化范围在 0.33% ~ 2.20% 之间(CV = 49.4%),铜含量变化范围在 6.0 ~ 129.0 mg/kg 之间(CV = 66.6%),锌含量变化范围在 18.0 ~ 375.0 mg/kg (CV = 66.6%)<sup>[18]</sup>。不同类型成土母质钙镁铜锌背景值的巨大差异是导致黔南不同类型植烟土壤

ECa、EMg、ACu、AZn 显著差异的主要原因。海拔与 ECa、EMg、ACu、AZn 之间没有相关性;不同海拔之间,只有 E2、E3 与 E5 之间土壤 ECa 含量及 E2 与 E5 之间土壤 AZn 含量差异显著。因黔南州地处云贵高原东南部向广西丘陵过渡的斜坡地带,境内喀斯特峰丛洼地广泛分布,土被不连续,各类土壤交错分布是该区域土壤的主要特征<sup>[8]</sup>。本研究土壤类型没有明显的水平地带性和垂直地带性分布。土壤 ECa、AZn 不同海拔之间的差异,可能是不同类型土壤样本量的差异而形成的统计误差,而非真实差异。土壤 pH 与 ECa、EMg 达到中度正相关 ( $R_{\text{ECa}} = 0.779$ ,  $R_{\text{EMg}} = 0.672$ ),与秦松<sup>[19]</sup>研究结果一致。交换态钙镁是指吸附在土壤胶体表面的钙镁离子,能够吸附钙镁离子的土壤胶体必须带有负电荷,土壤胶体所带负电荷的数量随着土壤 pH 值的上升而增加;土壤胶体带有负电荷数量越多,其表面吸附的钙镁离子数量就越多<sup>[27]</sup>。所以土壤交换性钙镁含量与土壤 pH 值呈正相关关系。土壤 pH 与 ACu、AZn 无相关性。决定土壤中有效态铜锌含量的首要因素是成土母质铜锌的背景值,其次是土壤 pH 值。酸性土壤铜锌的溶解度较高,而碱性土壤铜锌的溶解度下降。实际上黔南州植烟土壤有效态铜锌含量受到成土母质铜锌背景值和土壤 pH 双重影响。

综上,研究区大部分区域植烟土壤的 ECa、EMg、ACu 和 AZn 含量都处于适中至很丰富水平。对有效态钙、镁、铜、锌丰富的植烟土壤,应适当控制肥料用量,以节约烟草生产成本。

## 4 结论

黔南喀斯特山地植烟土壤交换性钙、有效铜和有效锌属中等强度变异,交换性镁属强变异。土壤交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌的半方差函数均为指数模型。交换性镁、有效铜和有效锌具有中等的空间相关性,而交换性钙空间相关性较弱。土壤交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌含量丰富,交换性钙、交换性镁、有效铜和有效锌缺乏的面积分别占统计面积的 1.22%、0.46%、0.21% 和 0.25%。土壤类型和土壤 pH 是影响黔南植烟土壤有效态中微量元素含量的重要环境因子。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国农业科学院烟草研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海科学技术出版社, 2005: 319 - 327 [Institute of Tobacco Research of Chinese Academy of Agricultural Science. Chinese tobacco cultivation [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005: 319 - 327]
- [2] 李明德, 肖汉乾, 余崇祥, 等. 湖南烟区土壤中、微量元素状况及施肥效应研究[J]. 中国烟草科学, 2005 (1): 25 - 27 [LI Mingde, XIAO Hanqian, YU Chongxiang, et al. Status of medium and minor elements in Hunan Province and effectiveness of fertilizer application in tobacco plants [J]. Chinese Tobacco Science, 2005 (1): 25 - 27]
- [3] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 上海: 上海远东出版社, 1993: 209 - 213 [ZUO Tianjue. Production, physiology and biochemistry of tobacco [M]. Shanghai: Shanghai Yuandong Press, 1993: 209 - 213]
- [4] 胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000, 153 - 177 [HU Guosong, ZHENG Wei, WANG Zhendong, et al. Nutrition principle of flue-cured tobacco [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2000, 153 - 177]
- [5] 聂新柏, 靳志丽. 烤烟中微量元素对烤烟生长及产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2003, 24 (4): 30 - 34 [NIE Xinbai, JIN Zhili. Effect of harmonization of medium and trace elements on growth, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 2003, 24 (4): 30 - 34]
- [6] 周毓华. 微肥施用对烟叶产质量的影响研究[J]. 中国烟草科学, 2000, 21 (4): 29 - 31 [ZHOU Yuhua. Study on the effect of trace elements on yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 2000, 21 (4): 29 - 31]
- [7] 李阳兵, 王世杰, 谢德体, 等. 西南岩溶山区景观生态特征与景观生态建设[J]. 生态环境, 2004, 13 (4): 702 - 706 [LI Yangbing, WANG Shijie, XIE Deti, et al. Landscape ecological characteristics and ecological construction of karst mountain areas in southwest China [J]. Ecology and Environment, 2004, 13 (4): 702 - 706]
- [8] 彭志良, 赵泽英, 李中元, 等. 喀斯特山区村级尺度下农田土壤中微量元素空间变异特性[J]. 贵州农业科学, 2008, 36 (6): 87 - 90 [PENG Zhiliang, ZHAO Zeyuan, LI Zhongyuan, et al. Study on the spatial variability of moderate microelement in soils of the village level in Karst regions [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2008, 36 (6): 87 - 90]
- [9] 武德传, 王维洁, 施寒丰, 等. 喀斯特山地植烟土壤养分空间变异及分区研究[J]. 核农学报, 2016, 30 (8): 1625 - 1632 [WU Dechuan, SHI Hanfeng, WANG Weijie, et al. Spatial variability and management zones of tobacco Soil nutrients in Qiannan Karst mountainous areas, southwestern China [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30 (8): 1625 - 1632]
- [10] 武德传, 罗红香, 宋泽民, 等. 黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区[J]. 应用生态学报, 2014, 25 (6): 1701 - 1707 [WU Dechuan, LUO Hongxiang, SONG Zemin, et al. Spatial variability and management zone of soil major nutrients in tobacco fields in Qiannan mountainous region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (6): 1701 - 1707]
- [11] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 141 - 189 [Agricultural

- Chemistry Committee Of China Soil Society. Conventional analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1983:141-189]
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 86-87 [National Soil Survey Office. Soil survey technology in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992: 86-87]
- [13] 冯勇刚, 石俊雄. 贵州烟草平衡施肥研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2005: 17-31 [FENG Yonggang, SHI Junxiong. Study on balance fertilization of tobacco in Guizhou Province [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2005: 17-31]
- [14] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101 [ZHANG Wei, LIU Shujuan, YE Yingying, et al. Spatial variability of soil nutrients and its influencing factors in typical karst virgin forest [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 93-101]
- [15] 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: 1501-1511
- [16] KRAVCHENKO A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1564-1571.
- [17] 盛建东, 杨玉玲, 陈冰, 等. 土壤总盐、pH及总碱度空间变异特征研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 69-73 [SHENG Jiandong, YANG Yuling, CHEN Bing, et al. Spatial variability of soil total salt, pH and total alkalinity[J]. Soil, 2005, 37(1): 69-73]
- [18] 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: 347-399 [China national environmental monitoring centre. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 347-399]
- [19] 秦松, 闫献芳, 冯勇刚, 等. 贵州植烟土壤交换性钙镁特征研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 143-144 [QIN Song, YAN Xianfang, FENG Yonggang, et al. Contents of exchangeable calcium and magnesium in tobacco-planting soils of Guizhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 143-144]
- [20] 孙勇, 杨刚, 张金平, 等. ICP-AES法测定玉米秸秆中的微量元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(2): 371-373 [SUN Yong, YANG Gang, ZHANG Jinping, et al. Analysis of trace elements in corn stover by ICP-AES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(2): 371-373]
- [21] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 应用ICP-MS测定双低与双高油菜籽的矿质元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(2): 2571-2573 [ZOU Juan, LU Jianwei, CHEN Fang, et al. Application of ICP-MS to detection of mineral elements in double-low and double-high rapeseed [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(2): 2571-2573]
- [22] 安彩泰, 马静芳. 油菜生物化学[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 1993: 213-214 [AN Caitai, MA Jingfang. Rape biochemistry [M]. Lanzhou: Gansu National Press, 1993: 213-214]
- [23] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 172-175 [GUAN Lianzhu. General pedology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007: 172-175]
- [24] MINNICH M M, MCBRIDE M B. Copper activity in soil solution: I. Measurement by ion selective electrode and Donnan dialysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(4): 568-572
- [25] ALEXANDER A P, HERBERT E A, AMANDA J A. Copper activity in soil solutions of calcareous soils [J]. Environmental Pollution, 2006, 145(1): 1-6
- [26] LOCK K, JANSSEN C R. Influence of ageing on zinc bioavailability in soils [J]. Environmental Pollution, 2003, 126(3): 371-374
- [27] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 88-104 [LV Yizhong, LI Baoguo. Pedology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006: 88-104]



# Spatial Variability and Impact Factors of Available Medium and Trace Elements in Karst Tobacco Soil

## ——A Case Study of Mountainous Area in Qiannan Municipality, Southwest China

WU Dechuan<sup>1</sup>, SHI Hanfeng<sup>1</sup>, WANG Weijie<sup>1</sup>, JIANG Yuping<sup>2</sup>, SONG Zemin<sup>3</sup>

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. College of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Tobacco Company of Qiannan Prefecture, Duyun 558000, Guizhou, China)

**Abstract:** Spatial variability and impact factors of available medium and trace elements in Qiannan Karst tobacco soil were analyzed using geostatistics. Results indicated that the variability coefficients of exchangeable calcium (ECa), available copper (ACu) and available zinc (AZn) were in moderate intensity, and exchangeable magnesium (EMg) was in strong intensity. Semivariogram models of ECa, EMg, ACu and AZn were described as exponential models. Spatial autocorrelation of EMg, ACu and AZn were in moderate intensity, and ECa was in weak intensity. In general, contents of ECa, EMg, ACu and AZn in tobacco soil were rich, and the areas with deficiency of ECa, EMg, ACu and AZn only accounted for 1.22%, 0.46%, 0.21% and 0.25% of total study area, respectively. Soil type and pH were key environmental factors that influenced tobacco soil available secondary and trace elements in Qiannan prefecture.

**Key Words:** Karst mountainous area; tobacco soil; secondary and trace element; spatial variability; impact factor