

泸州植烟土壤有效态微量元素含量空间变异及其影响因素^①

李 珊¹, 李启权^{1*}, 张 浩¹, 王昌全¹, 谢云波², 李 冰¹, 蒋欣焯¹

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川省烟草公司泸州市公司, 四川泸州 646000)

摘要: 基于泸州 180 份植烟土壤样品 6 种微量元素有效态含量数据, 采用地统计方法分析了其空间变异特征, 并利用相关分析探讨了其与土壤肥力因子和地形因子之间的关系, 旨在为泸州烤烟生态适宜区规划和微肥施用提供参考依据。结果表明, 研究区土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn、B 及 Mo 平均含量分别为 70.42、46.72、2.33、1.75、0.34 和 0.17 mg/kg, 总体呈现出南高北低、东高西低的空间分布格局。有效 B 和 Mo 符合球状模型, 其余元素均符合指数模型; 6 个元素块金值与基台值之比在 25%~75% 之间, 具有中等强度的空间相关性, 其空间变异受结构性因素和随机性因素共同影响。相关性分析表明, 土壤有效态微量元素与全钾之间无相关性, 与有机质、氮素、磷素及速效钾总体呈正相关; 坡度和坡向与土壤有效态微量元素含量之间无相关性, 海拔与有效 Mn、Cu 及 Mo 呈显著或极显著的正相关关系。肥力因子对研究区土壤有效态微量元素含量空间变异的影响强于地形因子。

关键词: 微量元素; 植烟土壤; 空间变异; 影响因素; 泸州

中图分类号: S151.9

土壤 Fe、Mn、Cu、Zn、B 及 Mo 等微量元素的有效态含量是影响烤烟产量和品质的重要因子^[1-2]。对成土母质和地形复杂的山区而言, 土壤微量元素含量具有较高的空间异质性^[3-5]。准确把握植烟区土壤微量元素含量空间变异特征和其影响因素, 对科学制定烤烟生态适宜区规划和精准施肥具有重要意义。

研究表明, 在相同的气候背景下成土母质、地形因素、土壤条件以及外源输入是导致植烟区土壤有效态微量元素空间异质性的主要因素^[6-9]。但这些研究多从定性的角度揭示了各因素的影响作用, 在定量表达上尚显不足。此外, 不同烤烟生态适宜区土壤有效态微量元素空间变异的影响因素及其影响程度有所差异。娄翼来等^[10]对昌图县植烟土壤 6 种有效态微量元素含量空间变异的研究表明, Cu、Zn、B 空间变异受结构因素和随机因素共同影响, Fe、Mn、Mo 则主要受随机因素影响; 但李强等^[11]对曲靖植烟土壤的研究则表明, B 的空间变异主要受随机因子影响, 其余 5 种元素则同时受结构性因素和随机性因素影响。王昌全等^[12]对西昌植烟土壤微量元素研究发现, 土壤有效 Fe 含量与有机质之间表现出显著的正相关

关系, 但有效 Mn 的变化与有机质间关系较为复杂; 王影影等^[13]在山东典型烟区的研究则表明, 土壤有效 Fe 和 Mn 含量与有机质相关性并不显著。

泸州烟区位于四川南部, 主要包含古蔺和叙永两个植烟区县, 是四川省重要的烤烟生产基地。近年来, 针对这一区域土壤养分状况与土壤 pH 及烤烟品质的关系开展了一定研究^[14-15], 但关于土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素的报道相对较少。因此本文应用地统计方法和 GIS 技术分析了泸州烟区 6 种土壤有效态微量元素空间变异特征, 采用相关分析探讨微量元素含量与土壤肥力因子和地形因子间的相关关系, 以期科学指导烟区施肥和制定烤烟生态适宜区规划提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泸州烟区处于四川盆地南部边缘向贵州高原过渡地带, 地理坐标介于 105°8′~106°28′E, 27°39′~29°20′N(图 1B)。全区面积 6 159 km², 主要包含叙永和古蔺两个典型植烟区县(图 1C)。区内地势南高北低, 地形地貌以盆周中、低山为主, 平均海拔 1 000 m

基金项目: 四川省教育厅科研项目(16ZB0048)和中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC201402006)资助。

* 通讯作者(liqq@lreis.ac.cn)

作者简介: 李珊(1992—), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事土壤性质时空变化研究。E-mail: wgylishan@163.com

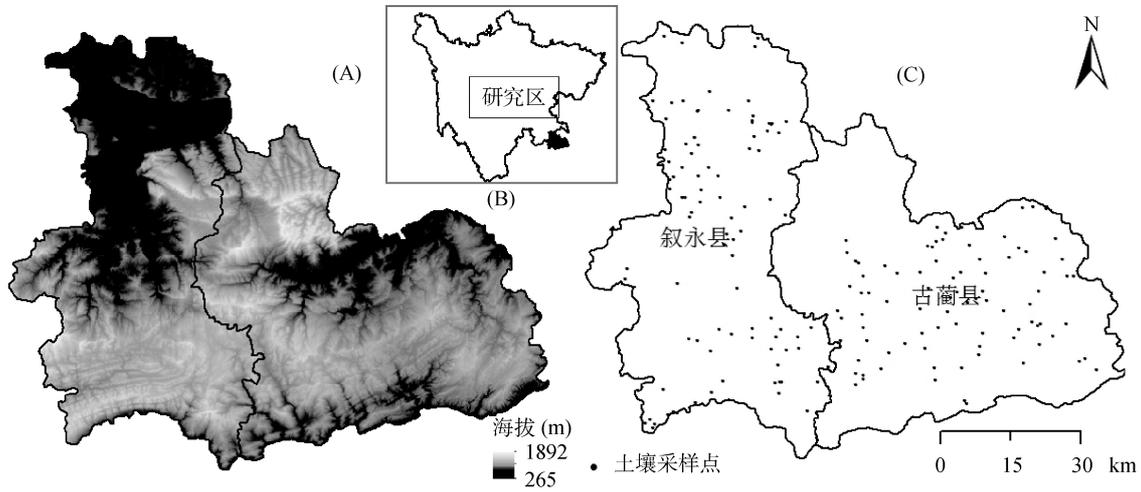


图 1 研究区数字高程图(A)、研究区位图(B)以及土壤样点分布图(C)

Fig. 1 Diagrams for the DEM (A), study area (B) and soil samplings sites (C)

左右(图 1A)。其中,叙永县地势由东南向西北倾斜;古蔺县西高东低,南陡北缓。全区属亚热带湿润季风气候,年均气温 $17.8 \sim 18.1^{\circ}\text{C}$,年均降雨 $748.4 \sim 1172.6 \text{ mm}$,日照可达 1170.3 h ,无霜期 $232 \sim 363$ 天。受四川盆地气候和贵州高原气候影响,南部山区表现出明显的立体气候特征。区内成土母质复杂,植烟土壤类型以侏罗系、志留系及三叠系岩石发育形成的黄壤、紫色土及水稻土为主。烤烟种植历史悠久,农地利用程度高,主要包含一年一熟及两熟 2 种典型熟制。全区耕地面积 88526 hm^2 ,常年种植烤烟 13333 hm^2 ,收购烤烟 2.5 万 t 。

1.2 样品采集与分析

综合考虑研究区地形、成土母质、土壤类型及土地利用方式等因素,兼顾代表性与随机取样原则,采用多点混合法于 2011 年采集耕地表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤样品共 180 份(图 1C 和表 1)。其中,古蔺 88 份,叙永 92 份。利用手持 GPS 记录采样点经纬度和海拔,并详细记录土壤类型、地形以及土地利用情况等环境信息。土壤样品带回实验室,挑出动植物残体和碎屑,经自然风干后碾磨过筛,用于测定土壤有机质,全氮,全磷,全钾, pH,有效态 Fe、Mn、Cu、Zn、B 及 Mo,各指标的测定方法见参考文献[16—17]。

表 1 土壤采样点背景

Table 1 Background informations of soil sampling sites

| 要素 | 样点分布 | | | | | | | |
|-------------------|------------|--------------|---------------|------------|----------|----------|---------|---------|
| 坡向 | 北 (19) | 东北 (25) | 东 (29) | 东南 (23) | 南 (15) | 西南 (21) | 西 (19) | 西北 (29) |
| 坡度 ($^{\circ}$) | <2 (13) | 2~5 (29) | 5~15 (98) | >15 (40) | | | | |
| 海拔 (m) | <500 (40) | 500~900 (48) | 900~1300 (76) | >1300 (16) | | | | |
| 土地利用 | 一年一熟 (171) | 一年两熟 (7) | 一年三熟 (2) | | | | | |
| 成土母质 | 侏罗系 (54) | 志留系 (39) | 三叠系 (33) | 二叠系 (19) | 奥陶系 (16) | 寒武系 (10) | 白垩系 (9) | |

注:表格中括号内数据为对应要素下样点数。

1.3 数据处理与分析方法

1.3.1 地统计分析

用地统计方法分析研究区 6 种土壤有效态微量元素的空间变异特征。该方法首先通过半方差分析结果揭示变量的空间结构特征,再在 ArcGIS10.2 软件中利用普通克里格法进行空间插值,得到研究区土壤有效态微量元素的空间分布趋势图。半方差分析参数中,变程 A 反映了变量的空间自相关范围,块金值与基台值之比($C_0/(C_0+C)$)则揭示了变量的空间自相关程度。如果 $C_0/(C_0+C) < 25\%$,说明该变量具有强烈的空间自相关性,主要受结构性因素影

响;如果比值在 $25\% \sim 75\%$,说明该变量具有中等强度的空间自相关性,受结构因素和随机因素共同影响;如果比值 $> 75\%$,则说明该变量空间自相关性较弱,主要受随机因素影响。其中,结构性因素主要是指成土过程中的气候、母质和地形因子,以及土壤形成后的土壤类型等自然因素;随机性因素则是指耕作、施肥及种植制度等各种人为活动因素^[18]。

1.3.2 影响因素分析

根据研究区实际情况选择土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾及 pH 作为肥力因子,选择坡度、坡向及海拔

作为地形因子,用于影响因素分析。各影响因素的统计特征见表 2。研究区主要土壤肥力因子中除全磷和有效磷含量偏低外,其余 6 个指标平均含量均处于烤烟适宜生长营养水平内,为优质烤烟栽培创造了良好的土壤条件^[19]。土壤 pH 平均值为 5.87,在 5.5~6.5,

处于烤烟生长最适 pH 范围^[20]。地形因子中,土壤采样点的平均海拔为 868.91 m,平均坡度为 10.26°,平均坡向为 168.39°,说明泸州烟区植烟区域总体上分布在低山南向缓坡处,为烤烟种植创造了优厚的水热和耕作条件。

表 2 土壤肥力因子和地形因子的描述性统计特征
Table 2 Descriptive statistical characteristics of fertility and topographic factors for soil available microelement contents

| 指标 | | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数(%) |
|------|-------------|------|-------|--------|--------|---------|
| 肥力因子 | 有机质 (g/kg) | 5.00 | 63.80 | 28.68 | 11.39 | 39.71 |
| | 全氮 (g/kg) | 0.45 | 3.23 | 1.69 | 0.52 | 30.72 |
| | 碱解氮 (mg/kg) | 57 | 286 | 146.14 | 42.84 | 29.31 |
| | 全磷 (g/kg) | 0.19 | 2.67 | 0.83 | 0.37 | 44.79 |
| | 有效磷 (mg/kg) | 0.2 | 72.2 | 9.287 | 10.86 | 116.90 |
| | 全钾 (g/kg) | 3.00 | 46.00 | 20.00 | 6.68 | 33.41 |
| | 速效钾 (mg/kg) | 15 | 582 | 106.3 | 73.907 | 69.52 |
| | pH | 4.2 | 8.0 | 5.87 | 1.02 | 17.46 |
| 地形因子 | 海拔 (m) | 320 | 1422 | 868.91 | 341.25 | 39.27 |
| | 坡度 (°) | 0.32 | 36.87 | 10.26 | 6.75 | 65.80 |
| | 坡向 (°) | 0 | 351 | 168.39 | 106.80 | 63.42 |

数据分析过程中,采用相关系数描述土壤有效态微量元素之间及其与主要养分因子和地形因子间的相关关系变化。地形因子中的坡度和坡向利用研究区 90 m 分辨率 DEM 图提取生成。由于地统计分析要求因变量(土壤有效态微量元素)符合正态分布,故先对研究区 6 种土壤有效态微量元素含量进行正态性检验,将不符合正态分布的数据进行对数转换,以满足数据分析要求^[21]。

1.3.3 软件平台 常规数理统计分析、相关性分析以及数据正态性检验均在 SPSS19.0 软件中完成。使用 GS+7.0 软件进行半方差分析。利用 ArcGIS10.2 软件提取地形因素,并绘制研究区土壤采样点分布图和 6 种土壤有效态微量元素空间分布趋势图。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态微量元素统计特征

参照相关植烟土壤有效态微量元素含量评价标准(表 3)^[22],结合数理统计结果(表 4)可以看出,泸州烟区土壤有效 Fe 和 Mn 含量丰富,平均含量均达到极丰富水平。其次是有效 Cu、Zn 及 Mo,平均含量均达到丰富水平。有效 B 平均含量为 0.34 mg/kg,处于中等水平。从变异性来看,6 种土壤有效态微量元素含量均属于中等强度的变异,说明 6 个指标含量分布不均,具有较高的空间异质性。数据正态性检验结果表明,有效 Zn 和 B 符合正态分布,有效 Fe、Mn、Cu 及 Mo 符合对数正态分布。

表 3 土壤有效态微量元素含量评价标准(mg/kg)
Table 3 The evaluation criteria of soil microelement contents

| 等级 | 有效 Fe | 有效 Mn | 有效 Cu | 有效 Zn | 有效 B | 有效 Mo |
|----|---------|-------|---------|---------|----------|-----------|
| 极低 | <2.5 | <5 | <0.2 | <0.5 | <0.15 | <0.05 |
| 低 | 2.5~4.5 | 5~10 | 0.2~0.5 | 0.5~1.0 | 0.15~0.3 | 0.05~0.10 |
| 中等 | 4.5~10 | 10~20 | 0.5~1.0 | 1.0~2.0 | 0.3~0.6 | 0.10~0.15 |
| 高 | 10~60 | 20~40 | 1.0~3.0 | 2.0~4.0 | 0.6~1.0 | 0.15~0.20 |
| 极高 | >60 | >40 | >3.0 | >4.0 | >1.0 | >0.20 |

从不同植烟区县来看,除有效 Zn 外,古蔺县土壤有效态微量元素含量总体上高于叙永县,也高于全区的平均水平。其中,古蔺县有效 Fe、Mn 及 Mo 平均含量分别高出叙永县 42.21%、40.62% 和 38.10%。

有效 Cu 和 B 平均含量在两个区县间差异并不明显。从变异系数来看,6 个指标在古蔺县的变异系数总体上要高于叙永县,说明古蔺县土壤有效态微量元素含量的变异程度总体上强于叙永县。

表 4 研究区 6 种土壤有效态微量元素含量统计特征(mg/kg)
Table 4 Descriptive statistical characteristics of soil available microelement contents in study area

| 区域 | 样本数 | 指标 | 平均值 | 标准差 | 变异系数 (%) | 偏度 | 峰度 | 数据分布类型 |
|----|-----|-------|-------|-------|----------|--------|---------|--------|
| 古蔺 | 88 | 有效 Fe | 90.13 | 77.53 | 86.03 | -0.34* | -0.24* | 对数正态 |
| | | 有效 Mn | 57.85 | 45.97 | 79.47 | -0.03* | -0.85 * | 对数正态 |
| | | 有效 Cu | 2.45 | 1.73 | 70.75 | 0.14* | -0.72* | 对数正态 |
| | | 有效 Zn | 1.72 | 0.91 | 52.83 | 0.00* | -0.52* | 对数正态 |
| | | 有效 B | 0.35 | 0.14 | 40.13 | 0.58 | -0.30 | 正态 |
| | | 有效 Mo | 0.21 | 0.11 | 51.78 | 0.85 | 0.11 | 正态 |
| 叙永 | 92 | 有效 Fe | 51.99 | 27.94 | 53.74 | 0.60 | 0.68 | 正态 |
| | | 有效 Mn | 36.35 | 18.88 | 51.93 | 0.77 | 0.25 | 正态 |
| | | 有效 Cu | 2.22 | 1.61 | 72.51 | 0.17* | -0.36* | 对数正态 |
| | | 有效 Zn | 1.78 | 1.05 | 58.95 | 0.90 | 0.88 | 正态 |
| | | 有效 B | 0.34 | 0.13 | 39.87 | 0.99 | 0.63 | 正态 |
| | | 有效 Mo | 0.13 | 0.07 | 55.19 | 0.23* | -0.29* | 对数正态 |
| 合计 | 180 | 有效 Fe | 70.42 | 60.45 | 85.84 | -0.44* | 0.74* | 对数正态 |
| | | 有效 Mn | 46.74 | 36.26 | 77.57 | -0.46* | 1.26* | 对数正态 |
| | | 有效 Cu | 2.33 | 1.67 | 71.64 | 0.15* | -0.56* | 对数正态 |
| | | 有效 Zn | 1.75 | 0.98 | 56.07 | 0.98 | 0.90 | 正态 |
| | | 有效 B | 0.34 | 0.14 | 39.92 | 0.77 | 0.09 | 正态 |
| | | 有效 Mo | 0.17 | 0.10 | 58.90 | 0.08 * | -0.61* | 对数正态 |

注：*为对数转换后的偏度和峰度。

2.2 空间分析

常规数理统计只能粗略概括研究区土壤有效态微量元素含量变化的整体趋势,不能较好地揭示其空间分布的随机性与结构性、独立性与相关性。因此,进一步采用地统计学方法分析其空间结构特征和分布趋势。

2.2.1 空间结构特征 根据模型的拟合决定系数(R^2)最大、残差(RSS)最小确定最优插值理论模型和参数(表 5、图 2)。结果表明,研究区土壤有效 Fe、Mn、

Cu 和 Zn 均符合指数模型,有效 B 和 Mo 符合球状模型。从模型的拟合决定系数来看,以有效 Mn 的拟合决定系数最高, R^2 在 0.90 以上,能较好刻画研究区土壤有效 Mn 的空间结构特征。从块金值与基台值之比($C_0/(C_0+C)$)来看,6 个指标块金值与基台值之比均在 25%~75%,说明研究区土壤有效态微量元素含量均具有中等强度的空间相关性,其空间变异受结构性因素和随机性因素共同影响。

表 5 土壤有效态微量元素半方差函数及其拟合参数
Table 5 Theoretical semi-variogram model and corresponding parameters of soil available microelement contents

| 指标 | 模型 | 块金值 C_0 | 基台值 C_0+C | 块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$ | 变程 A | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|-------|----|--------------|----------------|--------------------------|-----------|---------------|-----------|
| 有效 Fe | 指数 | 0.482 | 0.712 | 67.70 | 19.0 | 0.780 | 0.012 |
| 有效 Mn | 指数 | 0.293 | 0.606 | 48.35 | 25.3 | 0.907 | 0.00 871 |
| 有效 Cu | 指数 | 0.250 | 0.455 | 54.95 | 17.0 | 0.832 | 0.00 649 |
| 有效 Zn | 指数 | 0.566 | 0.950 | 59.58 | 12.7 | 0.799 | 0.025 |
| 有效 B | 球状 | 0.012 | 0.021 | 57.97 | 28.6 | 0.815 | 0.000 015 |
| 有效 Mo | 球状 | 0.225 | 0.309 | 72.82 | 45.5 | 0.712 | 0.00 314 |

2.2.2 空间分布趋势 根据半方差分析结果参数,利用普通克里格法在 ArcGIS 软件的地统计模块中插值,绘制研究区土壤有效态微量元素含量空间分布趋势图(图 3)。可以看出,研究区 6 种土壤有效态微量元素含量总体上呈现出南高北低的空间分布格局。其中,有效 Zn 含量高值区主要呈面

状或斑块状分布在研究区西部的叙永县,呈带状分布在东部古蔺县的东南区域有效 B 含量主要处于 0.3~0.6 mg/kg;有效 Fe、Mn、Cu 及 Mo 含量高值区则集中分布在研究区东部的古蔺县,形成了东高西低的空间分布趋势,与数理统计结果基本一致(表 3)。

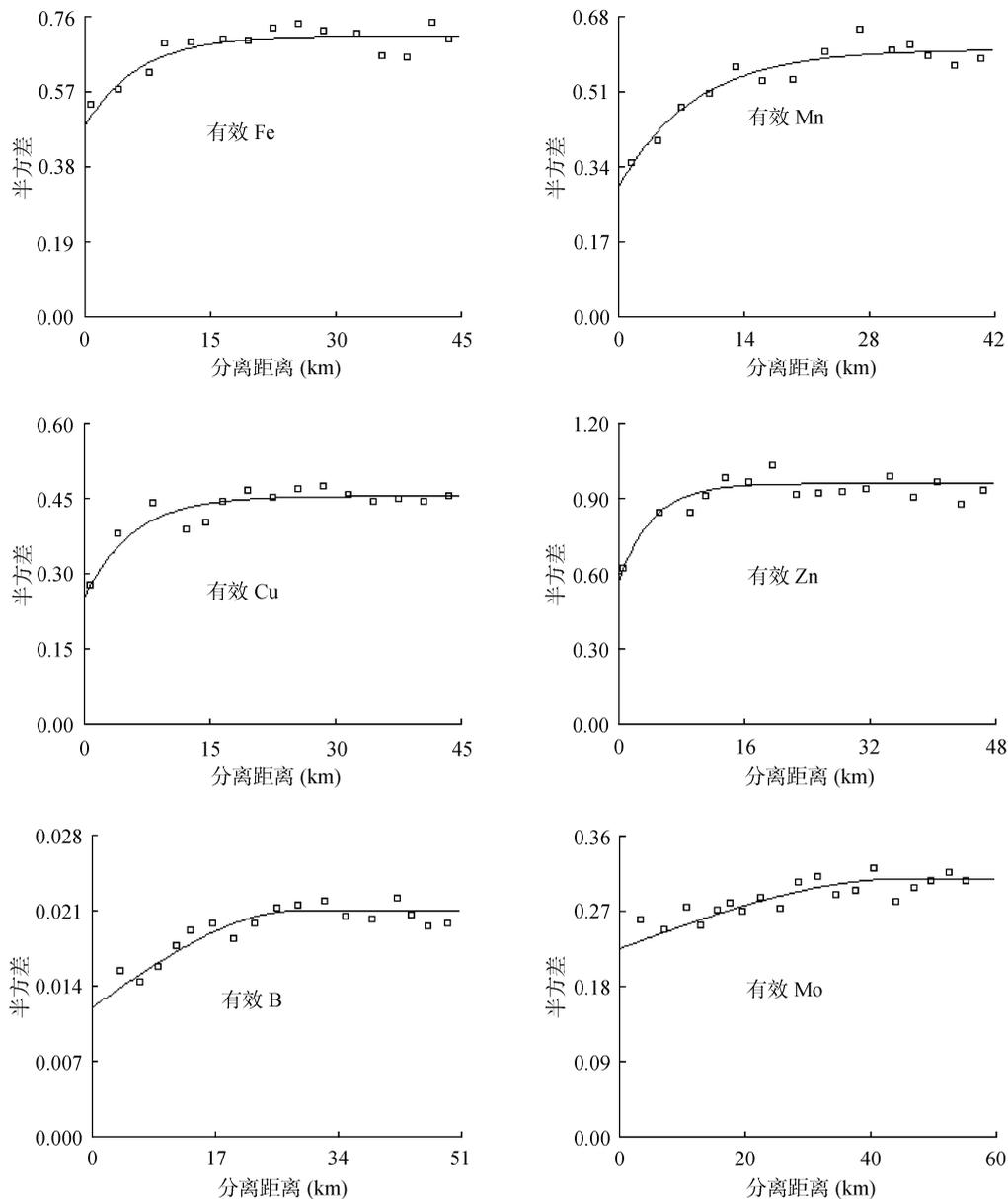


图 2 土壤有效态微量元素半方差函数图

Fig. 2 Semi-variogram diagrams for soil available microelement contents

2.3 微量元素与肥力因子和地形因子的相关性

土壤肥力因子间的交互作用是影响土壤理化性状的重要因素, 从而对微量元素有效形态的转化具有重要作用^[13]。由表 6 可知, 肥力因子中土壤有机质、全氮及碱解氮与微量元素含量的相关性总体上具有相似性。其中, 有效 Cu 含量与这 3 个肥力因子的相关关系达到极显著水平($P < 0.01$)。除有效 Fe 外, 全磷和有效磷与其余 5 个指标均表现出正相关关系。除有效 Zn 与速效钾呈极显著正相关外 ($P < 0.01$), 土壤全钾和速效钾与有效态微量元素的相关性并不显著。除有效 Cu 外, 其余 5 个指标与土壤 pH 均表现出负相关关系, pH 越低微量元素的有效性越高。其中, 有效 Fe 和 Zn 含量与 pH 的相关关系达到极显著水平

($P < 0.01$), 表明这 2 个指标对土壤酸碱性的敏感程度要高于其余微量元素。

地形因子通过影响水热资源的再分布进而控制着土壤微量元素的分布、迁移及有效养分的转化, 同时也是限制农业耕作条件的重要因素。地形因子中的坡度和坡向与土壤有效态微量元素含量间的相关性并不显著; 而海拔与有效 Mn、Cu 及 Mo 含量表现出显著或极显著的正相关关系。可以看出, 肥力因子对研究区土壤有效态微量元素含量的影响作用强于地形因子。

3 讨论

成土母质对土壤微量元素的初始含量起着决定

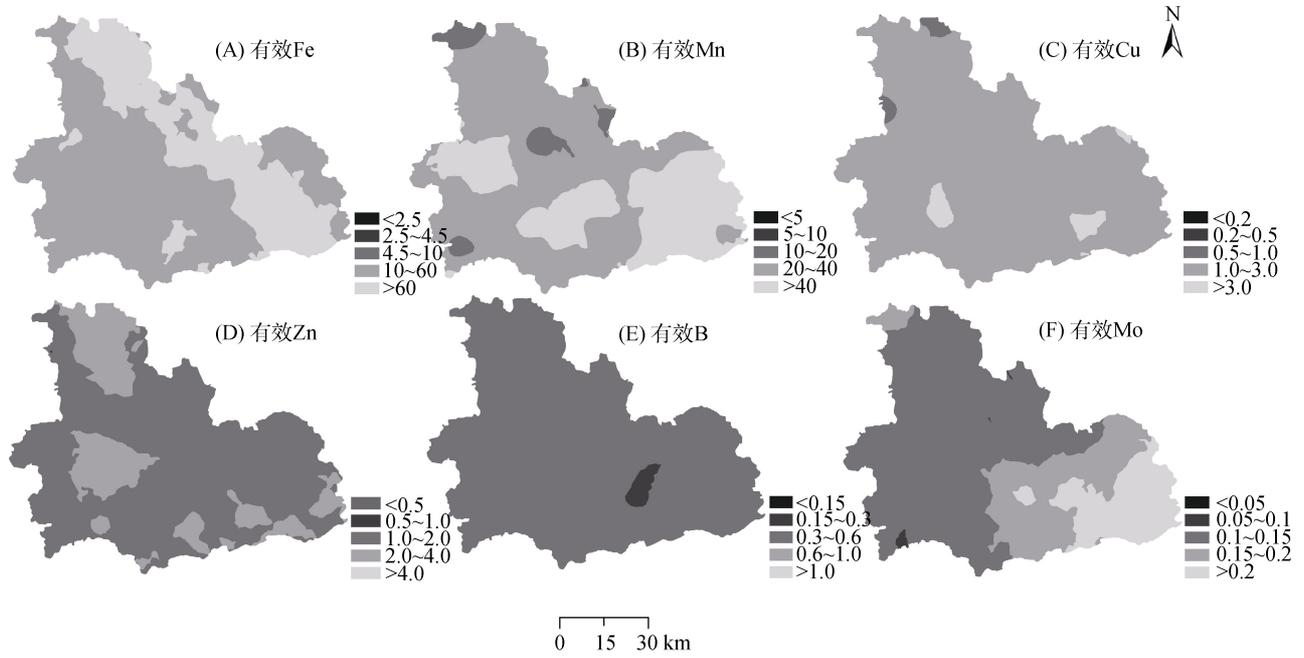


图 3 研究区土壤有效态微量元素含量(mg/kg)空间分布趋势图

Fig. 3 Spatial distribution diagrams for soil available microelement contents in study area

表 6 研究区土壤有效态微量元素含量与影响因子间的相关性

Table 6 The correlations between soil available microelement contents and influencing factors in study area

| 影响因素 | | 有效 Fe | 有效 Mn | 有效 Cu | 有效 Zn | 有效 B | 有效 Mo |
|------|-----|----------|---------|---------|----------|--------|---------|
| 肥力因子 | 有机质 | 0.011 | 0.105 | 0.515** | 0.230** | 0.072 | 0.171* |
| | 全氮 | 0.042 | 0.144 | 0.433** | 0.167* | 0.085 | 0.269** |
| | 碱解氮 | 0.117 | 0.019 | 0.374** | 0.249** | 0.111 | 0.073 |
| | 全磷 | -0.192** | 0.148* | 0.149* | 0.129 | 0.047 | 0.018 |
| | 有效磷 | -0.086 | 0.005 | 0.053 | 0.214** | 0.127 | 0.053 |
| | 全钾 | 0.052 | 0.00 | 0.111 | -0.143 | -0.037 | -0.096 |
| | 速效钾 | -0.094 | 0.04 | 0.121 | 0.207** | 0.052 | 0.03 |
| | pH | -0.368** | -0.153* | 0.055 | -0.222** | -0.075 | -0.014 |
| 地形因子 | 海拔 | -0.068 | 0.188* | 0.212** | -0.022 | 0.085 | 0.170* |
| | 坡度 | -0.111 | 0.011 | -0.012 | -0.047 | -0.092 | -0.016 |
| | 坡向 | -0.024 | 0.072 | 0.096 | -0.055 | -0.06 | -0.024 |

注：*表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平，**表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平。

性作用，而成土过程、成土条件及外源输入等复杂的自然和人为过程是影响微量元素空间分布、元素迁移及有效养分转化的重要因素^[7, 23]。川南泸州烟区土壤有效态微量元素平均含量丰富，总体上处于中等以上水平，和同一区域其他学者的研究结果^[14]基本一致，这与研究区各系河湖相沉积母质发育形成的土壤中微量元素初始含量较高有关(表 7)。根据第二次土壤普查资料^[24]，泸州市土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 及 B 平均含量分别为 89.42、39.83、1.81、1.88 及 0.092 mg/kg，土壤有效 Mn 和 B 含量较第二次土壤普查显著提高，说明近 30 年来更加精细的田间管理改善了土壤养分状况。空间分布上，土壤有效态微量元素总体上呈现出

南高北低、东高西低的空间分布格局。一方面与研究区成土母质分布有关，西北部主要分布着白垩系的夹关组砂、页岩风化物，水分渗透快，淋溶强；东南部主要分布着二叠系、奥陶系和寒武系的石灰岩或白云质灰岩风化物以及志留系的砂页岩夹石灰岩风化物，土壤有效态微量元素含量较高(表 7)。另一方面是因为研究区地势南陡北缓、东高西低。在海拔较低、坡度较缓的地区，土地利用程度大、耕地复种指数高，熟制多以一年两熟为主，导致作物对土壤养分的摄取量大于海拔较高、坡度较大的山区，从而形成了研究区土壤有效态微量元素含量东南高、西北低的空间分布格局。

表 7 不同成土母质土壤有效态微量元素含量(mg/kg)
Table 7 Soil available microelement contents of different soil parent materials in study area

| 母质 | 有效 Fe | 有效 Mn | 有效 Cu | 有效 Zn | 有效 B | 有效 Mo |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 侏罗系 | 77.74 | 36.60 | 1.82 | 1.48 | 0.31 | 0.14 |
| 志留系 | 72.77 | 45.54 | 2.46 | 1.98 | 0.34 | 0.18 |
| 三叠系 | 49.78 | 50.28 | 2.39 | 1.73 | 0.32 | 0.18 |
| 二叠系 | 85.28 | 62.25 | 3.47 | 1.92 | 0.40 | 0.18 |
| 奥陶系 | 61.49 | 45.41 | 2.46 | 1.88 | 0.36 | 0.16 |
| 寒武系 | 92.88 | 84.95 | 2.97 | 1.77 | 0.40 | 0.26 |
| 白垩系 | 51.59 | 26.98 | 1.23 | 1.79 | 0.40 | 0.17 |

本研究中土壤有效态微量元素含量与坡度和坡向间相关关系并不显著,这与武婕等^[25]研究的结果类似。这是因为烟草是喜温作物,对热量条件要求较高,烟田多位于水热条件较好的南向缓坡,这削弱了坡度和坡向与植烟土壤有效态微量元素含量间的相关性,从而导致地形因素对微量元素空间变异性的影响作用弱于土壤肥力因子。一般情况下,土壤有效态微量元素含量与有机质呈正相关,与 pH 呈负相关^[11,13]。这是因为有机质在分解矿化过程中产生有机酸,增强了土壤微量元素的溶解性,从而增加了土壤中有效态微量元素含量^[13,26];而 pH 是影响土壤微量元素溶解性的重要因素。本研究中,有机质与土壤有效态微量元素呈正相关,这与他人研究结果^[11]基本一致;土壤 pH 与有效 Cu 含量表现出正相关关系,与其他学者的研究结果^[13]有所差异。这可能是由研究区的耕作施肥方式、田间管理水平以及其他复杂的自然和人为因素引起的。土壤有机质的转化与氮素循环及磷素转化密切,使得三者与研究区土壤有效态微量元素含量的相关性总体上具有一致性^[27]。本研究中,全磷与有效 Fe 含量呈极显著的负相关关系,与其他元素的分析结果有所差异。这是因为在 pH 处于 4.5 ~ 6.5 范围时,土壤中的铁和磷易形成磷酸铁导致可溶性铁有效性降低^[14]。土壤全钾与微量元素含量间的相关性并不显著,这可能与研究区土壤钾素缺乏有关。

肥料投入是人为活动影响微量元素外源输入的重要方式。微肥的施用量及其微量元素的比例对烤烟生长发育及维持土壤养分平衡具有重要作用。泸州烟区烤烟种植历史悠久,不断完善的田间管理水平改善了土壤养分状况,使得研究区土壤有效 B 含量缺乏的状态得到缓解。通过长期实践,泸州烟区形成了相对成熟的微肥施肥技术,每 667 m²施用烟草专用微肥 5 kg。结合本研究结果,可适当提高微肥中 B 元素含量比例,降低 Fe 和 Mn 元素含量比例,以平衡土壤所需微量元素,为优质、特色烤烟栽培提供基础。

4 结论

1) 川南泸州烟区土壤有效态微量元素平均含量总体处于中等以上水平,其中有效 Fe 和 Mn 含量丰富,平均含量达到极丰富水平;有效 Cu、Zn 及 Mo 含量均达到丰富水平。土壤有效态微量元素含量呈现出南高北低、东高西低的空间分布格局。

2) 6 种土壤有效态微量元素含量均具有中等程度的空间相关性,其空间变异受成土母质、土壤类型及地形因素等结构性因素和耕作、施肥及管理水平的随机性因素共同影响。

3) 土壤肥力因子对研究区土壤有效态微量元素含量空间变异的作用强于地形因子。有效态微量元素与有机质、氮素、磷素及速效钾总体呈正相关,与 pH 总体呈负相关;海拔与 Mn、Cu 及 Mo 呈显著或极显著的正相关关系。

参考文献:

- [1] 任杰,柯美福,饶智,等. 陕南山地烟田不同植烟年限土壤养分的变化[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(1): 68-71
- [2] 霍沁建,李家俊,梁永江,等. 贵州遵义植烟土壤微量元素含量状况及分析[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(4): 37-42
- [3] 李启权,王昌全,岳天祥,等. 基于定性和定量辅助变量的土壤有机质空间分布预测——以四川三台县为例[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 259-269
- [4] 常栋,徐明康,王勇,等. 缓坡植烟田土壤微量元素的空间变异特征[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(3): 34-41
- [5] 周金仙. 不同生态条件下烟草品种产量与品质的变化[J]. 烟草科技, 2005(9): 32-35
- [6] 赵爽,许自成,解燕,等. 曲靖市植烟土壤有效锌含量状况及与土壤因素的关系分析[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(1): 26-31
- [7] 李军,梁洪波,宛祥,等. 烟田土壤养分状况及其与成土母质的关系研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(3): 21-26
- [8] 黎娟,邓小华,王建波,等. 喀斯特地区植烟土壤有效硼含量分布及其影响因素——以湘西州烟区为例[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1 055-1 061

- [9] 高鹏, 付同刚, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地小流域表层土壤微量元素的空间异质性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2 133-2 139
- [10] 娄翼来, 颜丽, 郝长红, 等. 植烟土壤有效态微量元素的空间变异及分布特征[J]. 烟草科技, 2009(3): 49-52
- [11] 李强, 周冀衡, 张永安, 等. 曲靖植烟土壤有效微量元素的空间变异和影响因子[J]. 烟草科技, 2013(10): 63-68
- [12] 王昌全, 李冰, 龚斌, 等. 西昌市土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 有效性评价及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 447-451
- [13] 王影影, 梁洪波, 徐宜民, 等. 山东典型植烟土壤微量元素有效态含量研究[J]. 土壤, 2014, 46(1): 172-177
- [14] 宋文峰, 刘国顺, 罗定棋, 等. 泸州烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系[J]. 江西农业学报, 2010, 22(3): 47-51
- [15] 谢强, 史双双, 张永辉, 等. 泸州植烟土壤中微量元素含量与烟叶品质的关系[J]. 南方农业学报, 2012, 43(2): 200-204
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [17] 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
- [18] 吴德勇, 张新, 李启权, 等. 德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 814-820
- [19] 李强, 周冀衡, 张一扬, 等. 基于地统计学的曲靖植烟土壤主要养分丰缺评价[J]. 烟草科技, 2012(11): 69-73
- [20] 黄婷, 周冀衡, 李强, 等. 不同海拔高度植烟土壤 pH 值分布情况及其与土壤养分的关系——以云南省曲靖市为例[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 5-10
- [21] Duan X W, Zhang G L, Rong L, et al. Spatial distribution and environmental factors of catchment-scale soil heavy metal contamination in the dry-hot valley of Upper Red River in southwestern China[J]. Catena, 2015, 13: 59-69
- [22] 黎根, 吴风光, 汪健, 等. 植烟土壤有效态微量元素分析评价及对策[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(z1): 87-92
- [23] 孟霖, 宋文静, 王程栋, 等. 贵州中部山区植烟土壤微量元素分布特征[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(3): 57-62
- [24] 四川省土壤普查办公室. 泸州土壤[M]. 四川: 四川省泸州市农牧局, 1986
- [25] 武婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1 596-1 605
- [26] 徐小逊, 张世熔, 余妮娜, 等. 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
- [27] 江厚龙, 张保全, 李钠钾, 等. 重庆植烟土壤有效养分含量及其影响因素[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(5): 67-73

Spatial Variability of Soil Available Microelement Contents and Their Influencing Factors in Luzhou's Tobacco Planting Area, Southwestern Sichuan

LI Shan¹, LI Qiquan^{1*}, ZHANG Hao¹, WANG Changquan¹, XIE Yunbo², LI Bing¹, JIANG Xinye¹

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Luzhou Tobacco Company of Sichuan Province, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: Based on the 180 soil samples collected from Luzhou's tobacco planting area, the spatial variability characteristics of soil available microelement contents (available Fe, Mn, Cu, Zn, B and Mo) as well as their influencing factors for instance fertility factors and topographic factors with correlation for ecological suitability zone planning of tobacco and microelement fertilizer apply were analyzed using by geostatistics and GIS technology. The results showed that the average contents of soil available Fe, Mn, Cu, Zn, B and Mo were 70.42, 46.72, 2.33, 1.75, 0.34 and 0.17 mg/kg, respectively, showing the spatial distribution pattern with high contents in south and east regions while low contents in north and west regions on the whole. Semi-variance analysis revealed available B and Mo fit for the spherical model while the other elements for the exponential model. The ratios of nugget to sill were between 25% and 75%, indicating the spatial variabilities of the six soil available microelements were affected by both the structural and random factors. For fertility factors, soil available microelement contents had no significant correlation with total potassium, but positively correlated with soil organic matter, nitrogen, phosphorus and available potassium and negatively correlated with pH on the whole. For topographic factors, slope and aspect had no significant correlation with soil available microelement contents while altitude had significant or extremely significant correlations with available Mn, Cu and Mo. In comparison, soil fertility factors played a more important role on the spatial variabilities of soil available microelement contents in the study area.

Key words: Microelement; Tobacco planting soil; Spatial variability; Influencing factors; Luzhou