

大理烟田土壤有效锌、钼和硼含量的时空变异及其影响因素

苏欣悦^{1,2}, 王晋峰², 孙楠^{1*}, 蒯雁³, 范志勇³, 张久权⁴, 徐明岗^{1,2*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081; 2 山西农业大学生态环境产业技术研究院 / 土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 山西太原 030031; 3 云南省烟草公司大理州公司, 云南大理 671000; 4 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101)

摘要:【目的】研究大理州烟田土壤有效锌、钼和硼含量时空分布及影响因素, 旨在为科学的施肥策略及优质烟叶生产提供理论指导。【方法】2012 和 2022 年, 在云南大理州平原地区选取连片烟田, 分别采集了 1131 和 4512 个烟田耕层 (0—20 cm) 土壤样品。调查采样点经纬度和海拔、地形、土壤质地和前茬作物等信息, 分析土壤理化性质。结合 1982 第二次土壤普查数据, 运用地统计学方法分析 1982、2012 和 2022 年土壤有效锌、钼和硼含量的时空分布, 利用回归分析和随机森林模型量化土壤有效锌、钼和硼含量变化的主要影响因素。【结果】1982、2012 和 2022 年土壤有效锌含量平均分别为 2.35、3.50、4.35 mg/kg, 呈上升趋势; 有效钼含量分别为 0.18、0.14、0.11 mg/kg, 呈下降趋势; 有效硼含量分别为 0.26、0.63、0.58 mg/kg, 呈先升后降趋势。空间上, 1982、2012、2022 年有效锌和硼块金效应分别为 50.8%、45.5%、31.8% 和 41.3%、39.4%、33.8%, 均呈中等空间自相关性, 总体呈现四周高、中部低的地理分布格局, 而有效钼的块金效应均小于 25%, 呈东南高、西北低的分布趋势。平原地貌土壤有效锌和硼含量显著高于山地; 黏土中有效钼含量显著高于砂土和壤土, 壤土中有效硼含量最高。土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔对 3 种元素的时空变异影响较强。土壤有效磷含量和海拔 (解释率 20.5% 和 16.8%) 是有效锌含量变化的主要影响因子, 海拔和碱解氮 (解释率 13.7% 和 12.8%) 是有效钼含量变化的主要影响因子, 碱解氮和速效钾 (解释率分别为 17.6% 和 15.6%) 是有效硼含量变化的主要影响因子。【结论】大理州植烟土壤有效锌、钼和硼含量与 40 年前相比, 均有不同程度的提高, 目前分别处于丰富 (V 级)、缺乏 (II 级) 和中等 (III 级) 水平。锌、钼和硼 3 种微量元素含量均同时受到地理环境、土壤质地和肥力的共同影响, 也受到前茬作物的影响。为保证优质烟叶生产, 总的原则是减锌保硼增钼, 前茬作物为粮食和油菜时应注意施锌、施硼, 前茬作物为豆科作物时应注意施钼。

关键词: 大理州; 植烟土壤; 微量元素; 时空变异; 影响因素

Temporal and spatial variation of soil available zinc, molybdenum and boron contents in Dali tobacco-growing fields and the influencing factors

SU Xin-yue^{1,2}, WANG Jin-feng², SUN Nan^{1*}, KUAI Yan³, FAN Zhi-yong³, ZHANG Jiu-quan⁴, XU Ming-gang^{1,2*}
(1 State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Shanxi Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Shanxi Institute of Ecological and Environmental Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 3 Tobacco Company Dali Prefecture, Dali, Yunnan 671000, China; 4 Institute of Tobacco Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China)

Abstract: 【Objectives】The spatial and temporal distribution and the influence factors of soil nutrient contents reflects the rationality during a certain period of tobacco cultivation. The study will provide theoretical basis for

收稿日期: 2023-05-23 接受日期: 2023-11-16

基金项目: 中国烟草总公司云南省公司重大项目 (2021530000241026); 中国烟草总公司重点研发项目计划项目 (110202102041)。

联系方式: 苏欣悦 E-mail: sxy1803713102@163.com

* 通信作者 孙楠 E-mail: sunnan@caas.cn; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

scientific fertilization strategy in high-quality tobacco production of Dali Prefecture. **【 Methods 】** In 2012 and 2022, total of 1131 and 4512 top soil samples were collected in the tobacco fields of the plain area in Dali Prefecture, Yunnan Province. The location, altitude, soil texture and pre-crop information of each sample were investigated, and the physical and chemical properties were analyzed. The data of the second soil census in 1982 was used as reference. Geostatistics were used to analyze the spatial and temporal distribution of available Zn, Mo and B contents in 1982, 2012 and 2022, and regression analysis and random forest model were used to quantify the main factors affecting the changes of soil available Zn, Mo and B contents. **【 Results 】** In 1982, 2012 and 2022, the average available Zn content was 2.35 mg/kg, 3.50 mg/kg and 4.35 mg/kg, respectively, showing an increasing trend; The available Mo content was 0.18 mg/kg, 0.14 mg/kg and 0.11 mg/kg, respectively, exhibiting a downward trend. The available B content was 0.26 mg/kg, 0.63 mg/kg and 0.58 mg/kg, respectively, showing a rising first and then decreasing trend. The nugget values of available Zn and B in 1982, 2012 and 2022 were 50.8%, 45.5%, 31.8% and 41.3%, 39.4%, 33.8%, respectively, showing moderate spatial autocorrelation, and the available Zn and B contents were low in the middle and high in the outskirts of the test area geographically. The nugget values of available Mo were less than 25%, and showed a decrease trend from high in the southeast to low in the northwest. The available Zn and B contents were significantly higher in the plains than in the mountainous areas; the available Mo content was significantly higher in the clay than in the sand and loam soil, and the available B content was higher in the loam than in the other textures of soils. Soil pH, organic matter, available N, P and K, and the altitude strongly affected the spatial and temporal variation of the three elements. The main influencing factors were available P and altitude (interpretation rate 20.5% and 16.8%) for Zn, altitude and available N (interpretation rate 13.7% and 12.8%) for available Mo, and available N and K (interpretation rate 17.6% and 15.6%) for available B. **【 Conclusions 】** The soil available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields in Dali Prefecture show a general increase, compared to 40 years ago, and are graded at V (rich), II (deficient) and III (moderate) levels at moment, respectively. All the Zn, Mo and B content were affected by topographic feature, soil texture and fertility. In general, Zn application should be appropriately controlled, B application be maintained, and Mo application be increased. However, Zn and B application should be considered when the previous crops are grain crop and rape, and Mo should be applied when following legumes crop, for the high-quality tobacco production in the test area.

Key words: Dali Prefecture; tobacco-planting soil; trace elements; spatio-temporal variation; influencing factor

土壤是优质烟叶生产的前提和基础^[1]。微量元素对烟叶生长具有重要作用。有研究表明,我国烟田存在不同程度的锌、钼和硼缺乏现象^[2-3],在一定程度上影响了烤烟的产量和品质^[4]。微量元素缺乏的土壤上合理施用微肥,可促进烟株生长发育,改善烟株品质^[5]。锌是多种酶的激活剂和蛋白质合成的催化剂,缺锌时会导致植株生长素合成受阻以及叶片数降低。钼是硝酸还原酶和固氮酶的重要组成部分,缺钼时烟株体内硝酸盐大量增加,对烟叶品质有较大影响。硼可参与烟株碳水化合物代谢和运输等过程,缺硼会造成烟株顶芽坏死,烤烟品质和产量下降等问题^[6]。但由于在一些烟区农民忽视微量元素肥料(微肥)的补充,导致土壤微量养分失衡,限制了烤烟品质的提高^[7]。因此准确认识烟田微量元素的时

空变异及其影响因素,有助于科学指导烤烟种植中微肥的施用。

近些年来在植烟土壤微量元素空间变异特征等方面开展了一些研究^[8]。表明植烟土壤微量元素受到地形、气候与施肥管理等的影响,其含量在一定区域内具有高度空间异质性^[9],如李珊等^[10]对2011年广元植烟土壤有效锌、钼和硼的空间变异的研究发现,有效锌和硼含量缺乏,均呈现西高东低的空间分布格局,钼含量适中,呈北高南低分布,建议应补充锌和硼肥。王影影等^[11]发现在山东6个典型县域植烟土壤中有有效锌含量较低且主要受有机质影响,建议适量增施含锌有机肥。目前对植烟土壤微量元素有效态含量时空变异的研究大多集中在短期一个时间段内或县域小尺度,关于长期多个时间段较大

尺度方面的研究鲜有报道。为此, 本研究突破以往的经典数理统计层面, 对植烟土壤有效态微量元素的长期时空演变进行评价, 并定量定性分析其影响因素, 旨在为烟田微肥科学施用和优质烟叶生产提供指导。

云南省是我国最重要烤烟产区, 大理州为烟草种植最适宜区之一。关于大理州植烟土壤营养元素的长期动态变化的研究较少, 且多集中在土壤大量营养元素时空演变特征, 缺乏对长期植烟土壤微量元素含量时空分布特征及其影响因素的相关报道。因此本研究基于 1982、2012、2022 年 3 个时期大理州植烟农田面上采样数据, 分析土壤微量元素时空变异及其影响因素, 为大理州烟田微肥科学施用和烟叶高质量生产提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大理白族自治州 (24°41′~26°42′N, 98°52′~101°03′E), 地处云南省中部偏西。地势西北高、东南低, 地貌复杂多样, 海拔在 730~4295 m, 属低纬度高原季风气候, 年均温 15.8℃, 日照时数 2332 h, 降水量 835.7 mm, 冬干夏雨, 河谷热, 坝区暖, 山区凉, 高山寒。烟区土壤类型主要为水稻土和红壤。全州国土面积 295 万 hm², 年均烤烟种植面积约 3.23 万 hm²。

1.2 样品采集与分析

2012 和 2022 年选取大理州具有代表性的连片烟田, 采用梅花形五点采样法分别采集 1131 和 4512 个烟田耕层 (0—20 cm) 土壤样品。不同年份土壤样品采集虽不是原位采样, 但均具有较强的代表性。利用 GPS 记录采样点经纬度和海拔等信息, 同时调查地形、土壤质地和前茬作物等信息。采集的土样于室内风干, 磨细过筛后保存, 用于土壤理化性质的测定。土壤质地是根据机械分析数据, 依据相应的土壤质地分类制来确定的。土壤 pH 测定采用 NY/T 1121.2—2006 玻璃电极法; 有机质测定采用

NY/T 1121.6—2006 重铬酸钾氧化法—外加热法; 碱解氮测定采用碱解扩散法; 有效磷测定采用 GB 12297—1990 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法; 速效钾测定采用 NY/T 889—2004 NH₄OAc 浸提—火焰光度法。有效锌的测定采用 NY/T 890—2004 原子吸收分光光度法, 有效钼的测定采用 NY/T 1121.9—2006 极谱法, 有效硼的测定采用 NY/T 1121.8—2006 甲亚胺比色法^[12]。1982 年的数据来源为大理州第二次土壤普查资料, 根据历史数据中每个采样点对应的村庄名称, 使用 GPS 重新定位, 确定其经纬度, 共计 125 个烟田耕层 (0—20 cm) 土壤样品。

1.3 研究方法

参考和借鉴《大理州植烟土壤分析评价及应用》^[12]和全国第二次土壤普查的养分分级标准^[13], 有效锌、钼和硼分为 I (低)、II (较低)、III (中)、IV (较高)、V (高) 5 个等级 (表 1), 其中 III 级为烟叶生长适宜等级。

地统计学是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法^[14]。半变异函数是地统计分析的特有函数, 其计算公式如下。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中: $\gamma(h)$ 是 h 的半方差函数值; h 为两样本点空间距离; $N(h)$ 是间隔距离等于 h 的样本点的对数; $Z(x_i)$ 为空间位置点 x_i 处指标的实测值; $Z(x_i+h)$ 为空间位置点 x_i+h 处指标的实测值。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 整理大理州数据。根据变异系数 (coefficient of variation, CV) 的大小, 可将其分为弱变异 (0%~10%)、中等变异 (10%~100%)、强变异 (>100%) 3 类^[15]。单因素方差分析 (One-Way ANOVA)、相关性分析均在 IBM Statistics SPSS 26.0 软件完成。使用 GS+10.1 获取最优半方差理论模型及参数, 其中块金效应 [nugget effect, C0/(C0+C)] 表示系统变量的空间相关性程度, 分为

表 1 植烟土壤养分指标等级划分标准
Table 1 Classification standards of soil available Zn, Mo and B in tobacco-growing fields

指标 Indicator	I	II	III	IV	V
有效锌 Available Zn (mg/kg)	<0.30	[0.30, 0.50)	[0.50, 1.00)	[1.00, 3.00)	≥3.00
有效钼 Available Mo (mg/kg)	<0.10	[0.10, 0.15)	[0.15, 0.20)	[0.20, 0.30)	≥0.30
有效硼 Available B (mg/kg)	<0.20	[0.20, 0.50)	[0.50, 1.00)	[1.00, 2.00)	≥2.00

3 类：强空间自相关性 (<25%)；中等空间自相关性 (25%~75%)；弱空间自相关性 (>75%)^[16]。运用 Arc GIS 10.1 中 Geostatistical Analyst 模块的普通克里金插值法进行插值并完成空间分布图，最后运用 Reclassify 工具计算每个等级的面积比例。应用随机森林模型 (random forest) 分析了各环境因素对有效锌、钼和硼影响的相对重要性。

2 结果与分析

2.1 植烟土壤有效微量元素的时间变化特征

40 年来，随着烟草种植年限的增加，有效锌含量呈现上升趋势，钼含量呈下降趋势，硼含量先上升后下降 (表 2)。3 个年份有效锌、钼和硼均近似服从正态分布 (K-S 检验， $P<0.05$)。1982—2022 年有效锌年均增加速率为 0.050 mg/kg，其中 2012—2022

年年均增加速率为 0.085 mg/kg，1982 和 2022 年变异系数 (分别为 120.8% 和 184.8%) 均属强变异，在空间中的分布呈不均匀。1982—2022 年有效钼年均下降速率为 0.002 mg/kg，其中 2012—2022 年年均下降速率最大 (0.003 mg/kg)。1982—2012 年有效硼年均增加速率为 0.012 mg/kg，2012—2022 年年均下降速率为 0.005 mg/kg，1982、2012 和 2022 年 3 个时期变异系数分别为 69.6%、86.1% 和 73.2%，均属中等变异程度。

2.2 植烟土壤有效微量元素的空间变异

大理州烟田有效微量元素地统计学分析的特征参数见表 3。1982、2012、2022 年植烟土壤有效锌和硼的块金效应分别为 50.8%、45.5%、31.8% 和 41.3%、39.4%、33.8%，均在 25%~75%，属中等空间自相关性。1982、2012 和 2022 年烟田有效钼的块

表 2 1982、2012 和 2022 年植烟土壤有效锌、钼和硼含量的描述性统计分析

Table 2 Descriptive statistics of soil available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields in 1982, 2012 and 2022								
元素 Element	年份 Year	样本数 Sample number	均值 Mean	变异系数 (%) Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	最小值 Minimum	最大值 Maximum
有效锌 Available Zn (mg/kg)	1982	125	2.35 b	120.8	3.22	14.37	0.00	20.20
	2012	1131	3.50 b	63.8	13.98	233.58	0.07	184.37
	2022	4512	4.35 a	184.8	24.98	907.93	0.02	351.92
有效钼 Available Mo (mg/kg)	1982	109	0.18 a	216.3	7.71	67.70	0.01	3.78
	2012	1131	0.14 b	64.9	5.25	37.68	0.00	2.11
	2022	4512	0.11 c	148.2	8.57	108.35	0.00	3.62
有效硼 Available B (mg/kg)	1982	108	0.26 c	69.6	1.94	5.84	0.00	1.12
	2012	1131	0.63 a	86.1	1.39	3.78	0.00	3.72
	2022	4512	0.58 b	73.2	6.40	98.35	0.01	9.15

表 3 1982、2012 和 2022 年植烟土壤有效锌、钼和硼含量的半方差函数模型及参数

Table 3 Semi-variance function models and the involved parameters for soil available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields in 1982, 2012 and 2022								
元素 Element	年份 Year	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金效应 (%) Nugget effect	变程 Range	R^2	残差平方和 Residual sum of squares
有效锌 Available Zn	1982	高斯 Guassian	0.33	0.65	50.8	42782	0.77	3.00E-02
	2012	指数 Exponential	0.39	0.85	45.5	337500	0.94	4.17E-03
	2022	指数 Exponential	0.22	0.70	31.8	7331	0.80	7.71E-02
有效钼 Available Mo	1982	指数 Exponential	0.11	0.80	13.9	6600	0.03	1.04E-01
	2012	球状 Spherical	2.60E-03	0.03	8.2	7300	0.19	1.74E-04
	2022	球状 Spherical	6.60E-04	0.02	3.1	10500	0.33	4.88E-05
有效硼 Available B	1982	球状 Spherical	0.01	0.03	41.3	38000	0.82	4.16E-05
	2012	指数 Exponential	0.03	0.07	39.4	54900	0.93	6.55E-05
	2022	指数 Exponential	0.18	0.53	33.8	11693	0.95	3.58E-02

金效应分别为 13.93%、8.2% 和 3.1%, 均属强空间自相关性。

2.3 植烟土壤有效微量元素的时空演变特征

各微量元素含量都表现出较为明显的空间分布格局(图 1), 有效锌和硼呈现四周含量高、中部含量低的分布趋势, 钼空间分布则表现为东南高、西北低。1982 年有效锌Ⅳ级面积占比最高(38.3%), 主要分布在剑川、云龙以及漾濞县, V 级面积占比最低(6.2%), 主要分布在祥云县中部; 2012 年Ⅳ、V 级面积占比分别增加至 61.4%、36.1%, 分布在各个县域; 2022 年 V 级面积占比最高(71.4%)。1982 年有效钼Ⅰ级面积占比最高(78.6%), 各个县域均有分布; 2012 年Ⅰ级面积占比降低为 47.4%, 但仍为最

高, 其次为Ⅱ级(22.6%); 2022 年Ⅱ级面积占比降低为 19.8%, 主要分布在鹤庆南部、祥云以及南涧县。1982 年有效硼Ⅰ级面积占比最高(79.5%), 分布于各个县域, 其次为Ⅱ级(20.5%), 主要分布在云龙、祥云和弥渡县北部; 2012 年有效硼Ⅱ级占比增加为 35.9%, 主要分布于剑川、永平、漾濞以及宾川县, Ⅲ级面积占比增加至 53.3%; 2022 年Ⅲ级面积占比降低至 52.1%, 但仍为最高, 主要分布在剑川、巍山、弥渡北部以及祥云中南部。

2.4 植烟土壤有效微量元素含量的影响因素分析

2.4.1 地形因子 表 4 显示, 3 种主要植烟土壤地形(山地、丘陵和平原)中, 有效锌均值含量达到了 V 级, 表现为平原有效锌含量(5.00 mg/kg)最高, 山

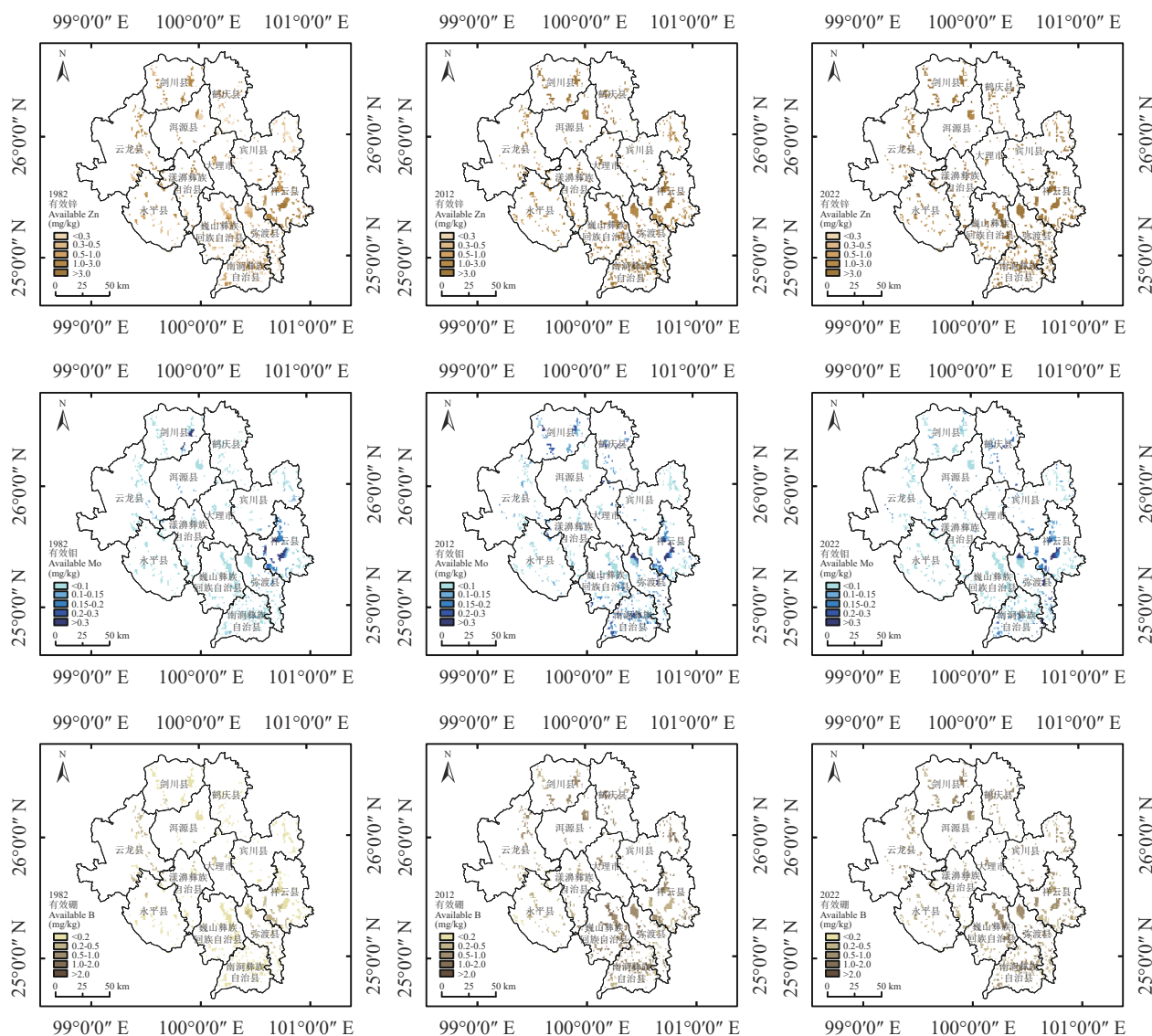


图 1 1982、2012 和 2022 年植烟土壤有效锌、钼和硼含量的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of soil available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields in 1982, 2012 and 2022

表 4 不同地形土壤中有效锌、钼和硼含量特征

Table 4 Variable characteristics of available Zn, Mo and B contents with topographies

地形 Topography	有效锌 Available Zn		有效钼 Available Mo		有效硼 Available B	
	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)
山地 Mountain	3.84 b	191.0	0.11 a	154.0	0.49 b	63.0
丘陵 Hill	4.40 ab	79.3	0.10 a	56.6	0.46 b	69.2
平原 Plain	5.00 a	169.7	0.12 a	178.4	0.67 a	74.8

注：同列数据后不同小写字母表示地形间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CV—Coefficient of variation. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among topographies ($P<0.05$).

地 (3.84 mg/kg) 最低。有效钼均值含量为Ⅱ级水平，但 3 种地形之间无显著差异。平原有效硼含量 (0.67 mg/kg) 显著高于山地与丘陵。丘陵地形的有效锌和有效钼变异系数均最低，分别为 79.3% 和 56.6%，为中等程度变异。有效硼含量在 3 种地形中均具有中等程度变异性。

2.4.2 土壤基础性质 3 种有效微量元素含量均与土壤基础理化性质和海拔关系密切 (表 5)。2022 年大理州植烟土壤 3 种土壤质地有效锌含量丰富，均值达到 V 级，有效钼含量均值处于Ⅱ级，有效硼含

表 5 有效锌、钼和硼含量与土壤理化性质和海拔的相关性

Table 5 Correlation of available Zn, Mo and B contents with soil physicochemical properties and altitude

影响因素 Influencing factor	有效锌 Available Zn	有效钼 Available Mo	有效硼 Available B
pH	0.085**	0.040**	0.190**
有机质 Organic matter	0.189**	-0.033**	0.517**
碱解氮 Available N	0.183**	-0.052**	0.529**
有效磷 Available P	0.250**	-0.012	0.450**
速效钾 Available K	0.208**	0.062**	0.429**
海拔 Altitude	0.049**	-0.057**	-0.004

Note: **— $P<0.01$.

量为Ⅲ级 (表 6)。不同土壤质地间有效锌和钼含量均具有强变异性，黏土中有效钼含量 (0.13 mg/kg) 最为丰富。砂土和黏土中有效硼含量较壤土中的含量低，在各土壤质地均具有中等强度的变异性。

2.4.3 前茬作物 由表 7 看出，不同前茬作物下土壤有效锌含量均处于 V 级，有效钼和有效硼含量较低，位于Ⅱ或Ⅲ级水平。前茬作物为大蒜时土壤有效锌含量均值显著高于前茬作物为烤烟、豆类和大麦及前茬作物为玉米、油菜和小麦。前茬作物为豆类时土壤有效钼平均含量 (0.09 mg/kg) 最低。不同前茬作物的土壤有效硼含量大小表现为大蒜>豆类>大麦>油菜、烤烟>玉米、小麦。从变异系数看，当前茬作物为烤烟时，土壤有效锌的变异系数最大 (285.7%)，属强变异。不同前茬作物的土壤有效钼的变异系数均属于强变异。除前茬作物为大麦时的变异系数外，其他前茬作物的土壤有效硼的变异系数均属于中等程度变异。为消除其他因素对 3 种有效微量元素的影响，通过偏相关分析控制变量地形、海拔和质地，结果发现前茬作物对土壤有效锌影响显著，3 种地形上相关系数分别-0.045、-0.048、-0.047，而对有效钼和有效硼影响较小。

2.4.4 影响因子重要性排序 土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和海拔对 3 种有效微量元

表 6 不同质地土壤有效锌、钼和硼含量 (mg/kg)

Table 6 Available Zn, Mo and B contents under different soil textures of the tobacco-growing fields

土壤质地 Soil texture	有效锌 Available Zn		有效钼 Available Mo		有效硼 Available B	
	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	平均值 Mean	变异系数 CV (%)
壤土 Loam	4.41 a	195.2	0.11 b	145.5	0.61 a	59.0
砂土 Sand	4.53 a	147.5	0.11 b	181.8	0.53 b	64.2
黏土 Clay	4.24 a	184.2	0.13 a	176.9	0.56 b	94.6

注：同列数据后不同小写字母表示土壤质地间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CV—Coefficient of variation. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference among soil textures ($P<0.05$).

表 7 前茬作物对土壤有效态有效锌、钼和硼含量的影响

Table 7 Effect of previous crops on available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields

前茬作物 Previous crop	有效锌 Available Zn		有效钼 Available Mo		有效硼 Available B	
	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)	平均值 Mean (mg/kg)	变异系数 CV (%)
大蒜 Garlic	6.65 a	72.4	0.14 a	139.1	0.74 a	43.3
玉米 Corn	4.22 bc	176.9	0.12 a	132.5	0.48 e	60.1
烤烟 Flue-cured tobacco	4.38 b	285.7	0.12 a	163.6	0.53 d	70.1
豆类 Legumes	4.38 b	114.7	0.09 b	174.7	0.67 b	66.8
油菜 Rape	4.61 b	86.3	0.13 a	190.8	0.56 cd	62.0
小麦 Wheat	3.38 c	111.7	0.12 a	195.4	0.47 e	67.3
大麦 Barley	4.26 b	93.7	0.13 a	167.3	0.62 c	100.9

注: 同列数据后不同小写字母表示不同前茬作物下土壤元素含量间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CV—Coefficient of variation. Different lowercase letters after data in the same column mean significant difference in element contents among different previous crop treatments ($P<0.05$).

素含量影响显著 (图 2)。有效锌含量的主要影响因子为有效磷和海拔, 其解释率分别为 20.5% 和 16.8%。海拔和碱解氮对有效钼影响较大, 其解释率分别为 13.7% 和 12.8%。碱解氮和速效钾对有效硼含量影响较大, 其解释率分别为 17.6% 和 15.6%。

3 讨论

烟叶生长所需的微量元素主要来自土壤和施肥供给, 微量元素的供给情况将直接影响烤烟的产量和品质^[17]。因此平衡植烟土壤微量元素含量, 制定合理施肥方案对培育优质高产的烟叶具有重要意义。

本研究发现, 1982—2022 年 40 年间大理州烟区有效锌含量丰富, 整体呈上升趋势, 到 2022 年Ⅳ、Ⅴ级以上面积占比高达 99.6%。这可能是因为全国第二次土壤普查以来, 有机肥的大量施用和秸秆还田政策的实施, 有机物料中锌的带入增加了土壤有效锌含量^[18]。据大理州烟田配方施肥资料显示, 有机肥中微量元素配比为 B : Mg : Zn=1 : 1 : 1。大理州 1 个设区市和 11 个县域土壤有效锌含量平均在 0.76~6.73 mg/kg, 其中宾川、弥渡和巍山呈显著增加趋势且含量较高。这些地区位于大理州中部且以平原为主, 一般种植烤烟、豆类和大蒜等作物导致氮肥施

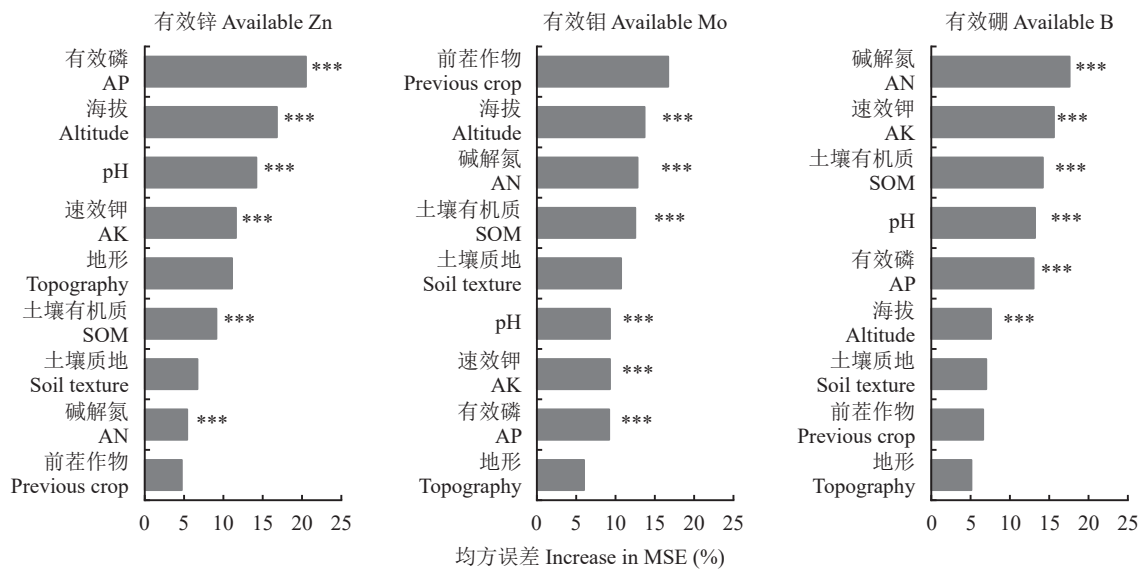


图 2 植烟土壤有效锌、钼和硼含量影响因子的重要性

Fig. 2 Importance of influencing factors on available Zn, Mo and B contents in tobacco-growing fields

Note: AP—Available P; AK—Available K; AN—Available N; SOM—Soil organic matter. ***— $P<0.001$.

用量过多,土壤氮含量充足,而氮源对土壤有效锌有直接促进作用,增加了有效锌含量^[19]。空间上,土壤有效锌的块金效应均在 25%~75%,属中等空间自相关性,总体呈现四周含量高、中部含量低的空间分布格局。土壤有效磷和海拔高度是影响有效锌含量的主要因素。土壤中磷与锌表现为协同效应,锌离子可与磷酸根发生络合反应,形成复杂的过渡态络合物,降低了土壤对锌离子的吸附作用从而提高了土壤中锌的有效性^[20]。海拔高度与烟田有效锌含量呈正相关,随海拔升高,植烟土壤有效锌含量呈上升趋势,可能由于中低海拔烟区土壤复种指数高,烤烟从土壤中摄取的锌量较多导致有效锌含量较低,与李强等^[21]在云南曲靖的研究结果相似。不同前茬作物对锌肥的需求量不同,烟田施用大量有机肥和含锌肥料,增加锌的投入量而导致有效锌含量较高,因而在精准施肥时要考虑前茬作物的影响。目前土壤有效锌含量均值(4.35 mg/kg)处于 V 级,因此烟区土壤需通过控制有机肥、含锌肥料以及调节土壤酸碱度等措施来降低锌含量,以节约成本和防止烤烟锌毒害现象的发生。

土壤的供钼能力受有效钼含量影响^[22],对提高烤烟产量和品质有显著作用。1982—2022 年大理州烟区土壤有效钼含量呈下降趋势,年均下降速率为 0.002 mg/kg。大理州烟田多为酸性土壤,酸性土壤导致土壤钼的有效性降低^[23]。并且烟田施用的大多为酸性肥料,长期使用会使土壤酸化加重,代换态钼被黏土矿物吸附作用增强,导致有效钼含量下降。大理州各县市植烟土壤缺钼现象严重,空间上总体呈现东南高、西北低的分布格局。1982—2022 年 I、II 级面积占比增加至 83.5%,而 1982、2012 和 2022 年 3 个时期 IV、V 级面积总占比分别为 6.7%、17.5% 和 9.3%,均主要分布在祥云县(大理州东南部),可能由于祥云土壤质地以黏土为主,保水保肥力强,有效钼不易淋失而含量较高^[24]。1982、2012 和 2022 年 3 个时期烟田有效钼的块金效应均<25%,表明土壤有效钼含量具有强空间自相关性,与武德传等^[23]研究黔南植烟土壤有效钼具有强烈空间相关性的结论基本一致。海拔和碱解氮对有效钼含量的影响贡献度较大且呈负相关关系,与张毅等^[25]研究的西昌市耕地土壤有效钼含量随海拔高度的增加而下降的结果一致。高海拔区域的土壤类型以沙壤为主,沙壤土属于砂质土壤,颗粒较大、孔隙度高,水分保持能力较差,导致沙壤土中的有效钼容易被冲刷或流失,含量较低。此外,钼元素是硝酸还原酶的

组成部分,在土壤中大多以钼酸根离子的形式存在,进入植株体内可通过形成铁钼蛋白分子参与生物固氮,土壤中碱解氮含量增加导致植物体内可吸收利用的氮增加,提高了植物对钼的吸收,土壤中残留的有效钼含量降低^[26]。鉴于目前土壤有效钼处于 II 级水平(0.11 mg/kg),烟区应适当补充钼肥,添加生物炭、石灰等碱性改良剂或施用腐殖酸等有机肥来改善土壤钼营养,以维持烟株正常生长。

烤烟的生长发育与土壤有效硼含量的丰缺密不可分^[27]。1982、2012 和 2022 年大理州植烟土壤有效硼均值分别为 0.26、0.63 和 0.58 mg/kg,呈先上升后下降趋势。早期 30 年(1982—2012)有效硼的年均增加速率为 0.012 mg/kg,由 II 级增加为 III 级水平,适宜烟叶生长的面积占比由 0% 增加为 53.3%,这可能是根据全国第二次土壤普查结果,大理州烟区大力推广商品有机肥长期定位施用和秸秆还田^[28],促进土壤有效硼含量大幅度增加,与田鹏等^[29]早期研究 2000—2015 年湘西烟区的结果基本一致。近 10 年(2012—2022)有效硼的年均下降速率为 0.005 mg/kg,但 2022 年含量均值(0.58 mg/kg)仍适宜烟叶生长,且主要分布在剑川、巍山、弥渡北部以及祥云县中南部。大理州长期使用酸性肥料使植烟土壤酸化加重,硼在酸性土壤中主要以硼酸形式存在,不易被土壤吸附而被雨水淋洗溶解^[30],导致土壤有效硼含量降低。空间上整体呈现四周高、中部低的趋势,漾濞、云龙东南部等中部区域有效硼含量较低。一方面可能由于这些区域大部分为黏土,质地较细的土壤对硼的吸附能力大,导致土壤中有效硼含量较低。姚旺等^[31]研究发现,黏土的有效硼含量低于壤土和黏壤土。另一方面,地形条件也是导致这些区域有效硼含量低的原因,山地容易造成水土流失导致土壤有效硼淋失。此外,碱解氮和速效钾对有效硼影响较大。当土壤中碱解氮和速效钾与硼共存时,两种离子间表现为拮抗作用,因此较高含量的土壤碱解氮和速效钾会抑制烤烟对硼的吸收,导致烟田有效硼含量增加^[32]。此外,不同前茬作物对有机肥需求量不同,有机肥料投入量较多增加了氮磷钾及微量元素的带入量,同时有机物料的分解产物又能与土壤中的硼结合,提高了土壤中有效态硼的含量^[33]。尽管不同前茬作物对有效硼的影响表现出一定的差异,但通过控制其他影响因素发现,前茬作物对有效硼的影响较小,可能主要由于其他因素所导致,如自然因素(海拔、地形、土壤等)及其交互作用。目前大理州植烟土壤有效硼适合烟草生长,但有部

分地区 (45.6%) 含量仍然偏低, 应继续保持硼素投入量, 而剑川县东部区域 (2.4%) 含量偏高, 应适当减少硼肥用量, 防止硼害现象的发生。

4 结论

1982—2022 年大理州植烟土壤有效锌、钼和硼含量均值分别呈上升、下降和先升后降趋势。有效钼表现为强空间自相关性, 而锌和硼呈中等空间自相关性。空间分布上土壤有效锌和硼表现为四周高, 中部低, 有效钼则呈现东南高、西北低的分布格局。土壤基础理化性质和海拔对 3 种有效微量元素的分布影响较强, 而土壤质地、地形和前茬作物的影响相对较弱。目前大理州烟田土壤有效锌、钼和硼含量分别处于 V、II、III 级水平, 因此应减少锌肥投入, 适量增施钼肥, 维持硼肥施入, 当前茬作物为粮食和油菜时, 应注意施锌、施硼, 为豆科作物时, 注意施钼。

参考文献:

- [1] 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 D C, Luo H X, Song Z M, *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.
- [2] 温心怡, 李良木, 高云, 等. 曲靖市植烟土壤有效钼含量状况及与土壤因素的关系分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 691–697.
Wen X Y, Li L M, Gao Y, *et al.* Distribution of soil available molybdenum and its relationship with soil factors in the tobacco planting areas of Qujing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 691–697.
- [3] 任志广, 张勇刚, 项波卡, 等. 植烟土壤有效硼、锌及其交互作用对烟叶硼、锌及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (7): 197–205.
Ren Z G, Zhang Y G, Xiang B K, *et al.* Effects of interaction between soil available boron and available zinc on B and Zn contents and quality of tobacco leaves[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (7): 197–205.
- [4] 李志军, 李平儒, 史银光, 张树兰. 长期施肥对关中塬土微量元素有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1456–1463.
Li Z J, Li P R, Shi Y G, Zhang S L. Effects of long-term fertilizer management regimes on availability of soil micronutrient elements [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(6): 1456–14.
- [5] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(10): 208–215.
Mu G Z, Luo J, Cai L M, *et al.* Relationship between soil trace elements with organic matter and pH in Jiexi County, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(10): 208–215.
- [6] 刘利, 欧志锋, 姜远茂, 魏绍冲. 钼对苹果砧木平邑甜茶幼苗硝态氮吸收、转化及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 727–733.
Liu L, Ou Z F, Jiang Y M, Wei S C. Effect of molybdenum on absorption transformation and distribution of nitrate-nitrogen of apple rootstock *Malus hupehensis* Rehd. seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(3): 727–733.
- [7] 李章海, 宋泽民, 黄刚, 等. 缺钼烟田施钼对烟草光合作用和氮代谢及烟叶品质的影响[J]. 烟草科技, 2008, (11): 56–59.
Li Z H, Song Z M, Huang G, *et al.* Effects of molybdenum applying in tobacco field on photosynthesis, nitrogen metabolism and quality of tobacco[J]. Tobacco Science and Technology, 2008, (11): 56–59.
- [8] 夏凡, 王永东, 郑子成, 等. 小尺度下茶园土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1047–1054.
Xia F, Wang Y D, Zheng Z C, *et al.* Spatial variability of soil microelements in a small scale tea garden and the influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(6): 1047–1054.
- [9] 刘永红, 倪中应, 谢国雄, 等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1710–1718.
Liu Y H, Ni Z Y, Xie G X, *et al.* Spatial variability and impacting factors of trace elements in hilly region of cropland in northwestern Zhejiang Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(6): 1710–1718.
- [10] 李珊, 张浩, 李启权, 等. 广元植烟土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1618–1625.
Li S, Zhang H, Li Q Q, *et al.* Spatial variability of soil available microelement contents and their influencing factors in tobacco growing area in Guangyuan City[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2017, 31(8): 1618–1625.
- [11] 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.
Wang Y Y, Liang H B, Xu Y M, *et al.* Contents of available microelements in typical tobacco-planting soils of Shandong Province[J]. Soils, 2014, 46(1): 172–177.
- [12] 大理州烟草专卖局. 大理州植烟土壤分析评价及应用[M]. 云南昆明: 云南人民出版社, 2014.
Dali Prefecture Tobacco Monopoly Bureau. Analysis, evaluation and application of Dali tobacco soil[M]. Kunming, Yunnan: Yunnan People's Publishing House, 2014.
- [13] 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.
National Soil Census Office. China soil census technology[M]. Beijing: Agricultural Press, 1992.
- [14] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246–1266.
- [15] 刘继龙, 刘璐, 马孝义, 等. 不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 305–312.
Liu J L, Liu L, Ma X Y, *et al.* Spatial variability of soil salt in different soil layers at different scales[J]. Chinese Journal of Basic and Engineering Science, 2018, 26(2): 305–312.

- [16] Kravchenko A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5): 1564–1571.
- [17] 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.
Zhao S, Xu Z C, Xie Y, *et al.* Distribution of available zinc and its relationship with soil characteristics in Qujing tobacco growing areas[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2013, 19(1): 26–31.
- [18] 张世昌. 福建主要耕作土壤有效锌含量分布及影响因素分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (9): 148–154.
Zhang S C. Distribution and influencing factors of available zinc in main cultivated soils in Fujian Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (9): 148–154.
- [19] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 898–902.
Liu H M, Zhang X C, Su S H. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 898–902.
- [20] 赵丽芳, 袁亮, 张水勤, 等. 锌与磷肥混合方式对土壤中磷、锌有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1614–1626.
Zhao L F, Yuan L, Zhang S Q, *et al.* Effects of combining zinc and phosphate fertilizers using different methods on the availability of zinc and phosphorus in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1614–1626.
- [21] 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素[J]. *烟草科技*, 2013, 46(10): 63–67.
Li Q, Zhou J H, Zhang Y A, *et al.* Spatial variability and influencing factors of available microelements in tobacco growing soils in Qujing[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2013, 46(10): 63–67.
- [22] 穆童, 卢秀萍, 许自成, 等. 罗平烟区土壤有效硼、钼含量与烟叶硼、钼含量的关系分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (6): 44–50.
Mu T, Lu X P, Xu Z C, *et al.* The relationship between the contents of available boron and available molybdenum in soil with the contents of boron and molybdenum of tobacco leaf in Luoping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (6): 44–50.
- [23] 武德传, 陈永安, 张西仲, 等. 黔南山地植烟土壤有效钼空间变异分析[J]. *云南农业大学学报*, 2012, 27(6): 851–857.
Wu D C, Chen Y A, Zhang X Z, *et al.* Spatial variability of tobacco-growing soil available Mo in Qiannan mountainous area[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2012, 27(6): 851–857.
- [24] 段淑辉, 刘天波, 李建勇, 周志成. 湖南浏阳植烟土壤肥力评价及土壤养分变化[J]. *中国烟草科学*, 2017, 38(2): 33–38.
Duan S H, Liu T B, Li J Y, Zhou Z C. Evaluation of soil fertility and variability of nutrient contents of tobacco growing areas of Liuyang County of Hunan, China[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2017, 38(2): 33–38.
- [25] 张毅, 王昌全, 薛国祥, 蔡艳. 西昌市耕地土壤有效钼空间变异特征及影响因素分析[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(13): 2701–2705.
Zhang Y, Wang C Q, Xue G X, Cai Y. Analysis on spatial variability and affecting factors of available molybdenum in cultivated soil of Xichang City[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(13): 2701–2705.
- [26] 孙学成, 胡承孝. 高等植物含钼酶与钼营养[J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41(3): 395–399.
Sun X C, Hu C X. Molybdoenzymes and molybdenum nutrition in higher plants[J]. *Plant Physiology communications*, 2005, 41(3): 395–399.
- [27] 孙敬国, 彭孟祥, 王昌军, 等. 烤烟对不同硼肥力土壤中硼的反应及丰缺值研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(24): 6406–6412.
Sun J G, Peng M X, Wang C J, *et al.* Study on response to boron nutrient of flue-cured tobacco and its abundance or deficiency in different fertility soil[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(24): 6406–6412.
- [28] 郭婷, 李宏光, 李文, 等. 湘南稻作烟区土壤有效硼的时空变异及影响因素分析[J]. *烟草科技*, 2019, 52(7): 27–34.
Guo T, Li H G, Li W, *et al.* Spatial-temporal variability and factors to influence boron availability in tobacco-planting soils of rotating paddy-upland fields in southern Hunan[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2019, 52(7): 27–34.
- [29] 田鹏, 闫晨兵, 田明慧, 等. 湘西植烟土壤有效硼时空变异及影响因素研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (3): 42–48.
Tian P, Yan C B, Tian M H, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of available boron in tobacco planting soil in Xiangxi[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (3): 42–48.
- [30] 王育军, 周冀衡, 张一扬, 等. 云南保山烟区气象因子与烤烟化学成分的相关性分析[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(2): 109–115.
Wang Y J, Zhou J H, Zhang Y Y, *et al.* Correlation analysis between climatic factor and chemical components of flue-cured tobacco leaves in Baoshan Yunnan Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(2): 109–115.
- [31] 姚旺, 黎娟, 向德明, 等. 龙山县植烟土壤有效硼含量空间分布及其影响因素[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (6): 64–70.
Yao W, Li J, Xiang D M, *et al.* Spatial fraction of effective boron content in tobacco growing soil and its influencing factors in Longshan County[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (6): 64–70.
- [32] 谭小兵, 杨焕文, 徐照丽, 等. 钾对高硼土壤烤烟生长及离子吸收的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(6): 113–121.
Tan X B, Yang H W, Xu Z L, *et al.* Influence of potassium on growth and ion uptake of flue-cured tobacco in high-boron soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(6): 113–121.
- [33] 彭月月, 余雪莲, 李启权, 等. 川西南高海拔烟区土壤微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(3): 39–47.
Peng Y Y, Yu X L, Li Q Q, *et al.* Spatial distribution and influencing factors of soil available microelements in high altitude tobacco planting areas in southwest Sichuan[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2018, 39(3): 39–47.