

湘西植烟土壤 pH 时空变异及其主要驱动因素

李强^{1,2}, 闫晨兵^{1,2}, 田明慧³, 向德明³, 蒲文宣⁴, 黎娟¹

(1 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; 2 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南长沙 410128; 3 湖南省烟草公司湘西自治州公司, 湖南吉首 416000; 4 湖南中烟工业有限责任公司, 湖南长沙 410014)

摘要:【目的】研究湘西州烟区土壤 pH 时空变异特征, 为湘西烟区土壤 pH 调节提供科学依据。【方法】以湘西州 2000 年和 2015 年耕层土壤 pH 值为研究对象, 利用多元统计学和地统计学方法分析了土壤 pH 时空变异特征及其影响因素。【结果】湘西植烟土壤 pH 均值由 6.21 下降至 6.12, 同时表现出最小值变小, 而变异系数、最大值、极差均变大的规律, 说明湘西植烟土壤 pH 在大幅下降的同时, 其变异也在增大。地学统计分析结果显示, 2000 年和 2015 年植烟土壤 pH 空间结构模型分别符合指数模型和球状模型, Moran's I 变小, 分形维数变大, 块金效应由 58.17% 增加至 64.13%, 表明空间变异主要由结构因子和随机因子共同决定, 且随机因子的影响效应在增强; 空间分布表现为不同等级插花状分布, 土壤 pH “极低”、“低”、“高”和“极高”等级的面积显著增加, 分别增加了 2.61、6.48、4.39 和 0.17 个百分点, 而“适宜”等级的面积则下降了 13.65 个百分点。影响因素的分析结果显示, 交换性钙、交换性镁、有效硫、有机质、粘粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.02~0.002 mm) 和碱解氮是植烟土壤 pH 的主控因素, 7 项指标对植烟土壤 pH 的累计解释能力达 83.8%, 其中以交换性钙的独立解释能力最大, 可解释其变异的 60.6%, 交换性钙、交换性镁和有机质为主要控酸因子, 有效硫和碱解氮为土壤主要致酸因子。【结论】长期施用不同化学肥料和有机物料, 湘西植烟土壤的 pH 变异程度在加大, 适宜等级的土壤面积总体上减少。交换性钙是土壤 pH 升高的主要驱动因素, 而有效硫和碱解氮是土壤 pH 降低的主要驱动因素。因此, 湘西植烟土壤需要增加含钙物料的投入, 控制含硫物料的投入以及化学氮肥的使用, 以维持土壤的可持续利用。

关键词: 湘西; 植烟土壤; pH; 时空变异

Spatio temporal variability of soil pH and main impact factors in tobacco-planting soils in Xiangxi area

LI Qiang^{1,2}, YAN Chen-bin^{1,2}, TIAN Ming-hui³, XIANG De-ming³, PU Wen-xuan⁴, LI Juan¹

(1 College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128; 2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3 Hunan Provincial Tobacco Company Xiangxi Branch, Jishou, Hunan 416000, China; 4 Hunan Tobacco Industry Co., Ltd., Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: 【Objectives】To reveal the temporal and spatial variability of soil pH in tobacco-planting areas in Xiangxi, and to provide scientific basis for soil pH regulation. 【Methods】The spatial and temporal variability of soil pH and its impact factors in top soil of Xiangxi tobacco-planting soils in 2000 and 2015 were analyzed by multivariate statistics and geostatistics. 【Results】The average pH of tobacco planting soils in Xiangxi decreased from 6.21 to 6.12 from 2000 to 2015. The low pH soil became more acid, while high pH soil kept improving, leading to increased coefficient of variation of the soil pH in the whole tested area. Geostatistical analysis showed that the spatial structure models of soil pH for tobacco planting area in 2000 and 2015 fit exponential model and spherical model, respectively. Moran's I became smaller, fractal dimension became larger, and the nugget effect increased from 58.17% to 64.13%, indicating that spatial variability mainly

depends on structural and random factors, and the different pH levels were interlaced in spatial distribution both in 2000 and 2015. The area of soil pH in “very low”, “low”, “high” and “very high” levels was increased by 2.61, 6.48, 4.39 and 0.17 percentage points, respectively, while the area of soil pH in “suitable” level decreased by 13.65 percentage points. Exchangeable calcium, exchangeable magnesium, available sulfur, organic matter, clays (< 0.002 mm), slits (< 0.02–0.002 mm) and alkali-hydrolyzable nitrogen were the main factors affecting the pH of tobacco-planting soils, and these seven factors explained 83.8% of soil pH variations. Of the seven factors, the exchangeable calcium was the main impact factor which could explain 60.6% of pH variation. Exchangeable calcium, exchangeable magnesium and organic matter were the main acid controlling factors, while available sulfur and alkali-hydrolyzable nitrogen were the main soil acidifying factors. **【 Conclusions 】** The difference in long-term application of chemical and organic materials has caused more varied soil pH in the tobacco planting soils across Xiangxi area, with general decrease of pH suitable soil area. The soil acid controlling factors are exchangeable Ca, as well as exchangeable Mg and organic matter, while the soil acidifying factors are available S and N. So sulfur-containing chemicals should be carefully applied, and nitrogen fertilizer input rate should be studied for a sustainable tobacco production in Xiangxi area.

Key words: Xiangxi; tobacco planting soil; soil pH; spatio-temporal variability

pH 是土壤重要的化学特性之一,它是成土母岩/母质以及许多化学性质特别是盐基离子状况的综合反映,是评价土壤肥力的一项重要指标^[1-2]。pH 影响着土壤中诸多重要的物理、化学及生物过程,进而影响土壤养分的有效性、土壤的理化性质和微生物活性,以及土壤在农林生态系统中的功能^[3-4]。pH 也是影响烤烟产质量的一个重要因素,优质烤烟的适宜 pH 大致为 5.5~7.0^[5-6]。烟田土壤 pH 一直受到国内的广泛关注,利用中国知网(CNKI)进行的相关检索表明,迄今涉及烟田土壤 pH 空间分布及其影响因素的文献已有 40 多篇。湘西州是湖南主要烤烟区之一,基本烟田面积达 $3.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中水旱轮作烟田 $1.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$,旱地烟田面积 $1.75 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。有关湘西烟区土壤 pH 空间分布等方面也有较多报道^[7-11]。邓小华等^[11]的研究表明,湘西烟田 pH 值低于 5.5 的样品占 37.27%,pH 值高于 7.5 的土壤样品占 18.20%,成土母岩、土壤类型、水土流失状况、灌溉能力、海拔高度、耕作层厚度、有机质含量、土壤颗粒组成均显著影响植烟土壤 pH。但相比之下,有关湘西植烟土壤 pH 时空变异及其驱动因素的研究却未见报道。鉴于此,本研究系统分析了湘西植烟土壤 pH 值时空变异及其驱动因素,以期进一步为湘西植烟土壤 pH 调节和烤烟养分管理提供参考,为优质烟叶生产奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区域自然概况

研究区位于湖南省西北部的湘西土家族苗族自

治州,该自治州面积 15462 km^2 ,耕地面积 $1.99 \times 10^6 \text{ hm}^2$,地势呈西北高,东南低的趋势。地形地貌以山原山地为主,兼有丘陵和小平原。湘西州属亚热带季风湿润气候,大陆性气候特征明显,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年均气温为 $16.5 \sim 17.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降雨量 $1290 \sim 1600 \text{ mm}$,年均日照时数在 $1406 \sim 1219 \text{ h}$ 。

湘西州是湖南主要烤烟区之一,基本烟田 $3.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中水旱轮作烟田 $1.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$,旱地烟田面积 $1.75 \times 10^5 \text{ hm}^2$,全州年均烟叶产量 $2.25 \times 10^4 \text{ t}$ 。植烟土壤有水稻土、红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土和紫色土等。烟田种植模式主要为烤烟—玉米—烤烟,烤烟—绿肥—烤烟和烤烟—空闲—烤烟、烤烟—水稻—烤烟;其中烤烟施氮量为 $105 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$,氮磷钾比例为 $1.0 : 1.0 \sim 1.5 : 2.5 \sim 3.0$;玉米施肥量为纯氮 $150 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$ 、 P_2O_5 $150 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$ 、 K_2O $150 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$;水稻施肥量为纯氮 $100 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 、 P_2O_5 $30 \sim 50 \text{ kg/hm}^2$ 、 K_2O $120 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$ 。

1.2 样品采集

两次采样分别在 2000 年和 2015 年的 11—12 月进行,2000 年按每 400~500 亩布置一个取样点,2015 年按每 200~300 亩布置一个取样点(两期样点的空间分布见图 1)。在烟田冬翻前,选取面积在 667 m^2 以上的田块进行样品采集,用手持式 GPS 定位,记录田块中心的经纬度和海拔,根据采样田块的形状,采取“X”形或“W”形取样法,用土钻采集耕层土壤(0—20 cm),每个田块确保 5 个样点以上,

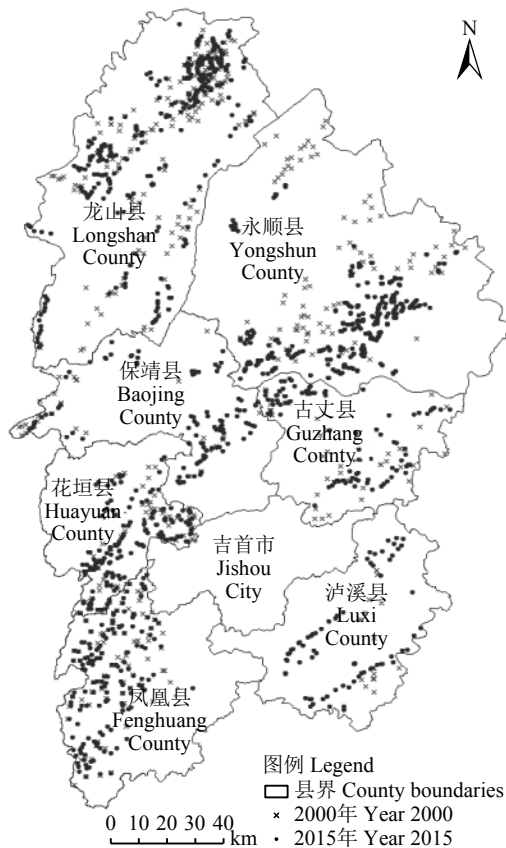


图 1 样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in 2000 and 2015

将多点的土样混合均匀后用四分法取大约 1.5 kg 土样带回实验室。2000 年采集土壤样品 446 个, 2015 年采集土壤样品 1242 个。

1.3 样品分析

采集的土样经去杂、风干、研磨后分别过 1.7 mm、0.25 mm 和 0.15 mm 筛制成待测样品备用。土壤 pH 采用电位计法测定, 土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑

抗比色法测定, 有效磷采用氢氧化钠提取—钼锑抗比色法测定, 全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定, 速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定, 交换性钙和交换性镁采用乙酸铵交换—EDTA 络合滴定法测定, 有效硫采用磷酸盐浸提—硫酸钡比浊法测定, 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定, 土壤机械组成采用比重计法分别测定粗砂 (2~0.2 mm)、细砂 (0.2~0.02 mm)、粉砂 (0.02~0.002 mm) 和粘粒 (<0.002 mm) 等土壤颗粒的含量。以上指标具体测定方法详见参考文献^[2]。

1.4 土壤 pH 评价标准

参照相关文献^[11, 13-15]制定了湘西烟区土壤 pH 的分级标准, 具体分为以下 5 个等级: 极低 (< 5.0)、低 (5.0~5.5)、适宜 (5.5~7.0)、高 (7~7.5)、极高 (> 7.5)。

1.5 数据分析

多元统计分析利用 IBM Statistics SPSS17.0 完成, 等样本数回归分析具体流程参照文献^[16], 逐步回归分析方法参照文献^[17]进行, 半方差函数的计算和拟合在 GS+9.0 中完成^[18], Kriging 插值、面积统计和图片绘制在 ArcGIS10.22 软件中进行^[19]。

2 结果与分析

2.1 pH 基本统计特征和年代变化

表 1 表明, 湘西州植烟土壤 15 年期间 pH 略有下降, 2015 年 pH 均值较 2000 年下降了 0.09 个单位, 下降幅度为 1.45%, 但仍然均为适宜水平。pH 变异系数由 2000 年的 12.87% 上升到 2015 年的 18.30%, 增加了 5.43 个百分点。最小值变化较大, 下降了 0.33 个单位, 而最大值变化较小, 仅上升 0.07 个单位。极差由 2000 年的 3.60 上升到 2015 年的 4.00, 增加了 0.40 个单位。表明 pH 均值虽变化

表 1 2000 和 2015 年湘西植烟土壤 pH 状况

Table 1 Soil pH values in tobacco production soils in Xiangxi area in 2000 and 2015

年份 Year	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最小值 Min.	最大值 Max.	极差 Range	分布频率 Percentage (%)				
							极低 Very low <5.0	低 Low 5.0~5.5	适宜 Proper 5.5~7.0	高 High 7.0~7.5	极高 Extremely high >7.5
2000	6.21	0.80	12.87	4.50	8.10	3.60	3.36	16.14	59.42	12.56	8.52
2015	6.12	1.12	18.30	4.17	8.17	4.00	20.77	16.51	34.06	10.47	18.20
增量 Increase	-0.09	0.32	5.43	-0.33	0.07	0.40	17.41	0.36	-25.36	-2.09	9.68

较小,但其变异却有所增大。进一步对 pH 等级分布情况进行分析(表 1)可见,与 2000 年相比,2015 年 pH “极低”和“低”的样品比例分别增加了 17.41 和 0.36 个百分点,相应地“适宜”、“高”等级的土壤样品比例分别下降了 25.36 和 2.09 个百分点,“极高”等级的样品比例增加了 9.68 个百分点。表明 pH 两极分化渐趋严重。

2.2 pH 时空变异特征

2.2.1 空间结构 采用多种函数模型对 pH 拟合的结果表明(表 2),2000 和 2015 年 pH 的最佳函数模型分别是球状模型(Sph.)和指数模型(Exp.),模型具有较高的拟合精度(RMSSE \approx 1, MSE \approx 0),能够很好地反映 pH 的空间结构特征。2000 和 2015 年 pH 的块金效应分别为 58.17% 和 64.13%,块金效应数值增大,反映出随机性因素对 pH 作用变大,表明 pH 的空间结构性减弱,随机变异性增强,可能与养分管理、栽培技术及土壤改良措施有关。此外还发现,15 年期间 pH 的 Moran's I 值也有较大下降。经标准化计算,两个年份 Moran's I 的标准化 Z 值均大于 2.58,说明两个时期 pH 表现为显著空间自相关,2015 年标准化 Z 值低于 2000 年,表明 pH 的空间自相关性在减弱,随机性因素对 pH 的影响在增强。进一步利用分形维数 D 对两个时期 pH 的空间结构特点进行了定量分析(见表 2),2015 年 pH 的分形维数比 2000 年增加了 0.005,表明 pH 呈现出更多较小尺度上的变异特点,其随机变异所占比例增加。

2.2.2 时空分布 采用普通克里格插值法获取 2000 年和 2015 年 pH 空间分布图(图 2),并利用 ArcGIS 软件自带的 Arctool box 模块统计 pH 空间分布不同等级的面积。两个时期 pH 空间分布规律均不明显,2015 年 pH 分级面积与 2000 年相比发生一定变化(图 2 和表 3)。2000 年 pH 总体较适宜,“适宜”的植烟土壤面积高达 94.94%，“低”和“高”的植烟土壤面积比例分别仅为 3.91% 和 1.15%。2015 年 pH 较 2000 年有两级分化的趋势,新增了 2000 年未出现的“极高”等级和“极低”等级,面

积分别为 0.17% 和 2.61%，“高”和“低”等级亦由原来的零星分布分别增加至 5.55% 和 10.40%，相应地“适宜”等级的面积下降至 81.28%。综上,2015 年 pH “极低”、“低”、“高”和“极高”等级的面积显著增加,分别增加了 2.61、6.48、4.39 和 0.17 个百分点;而“适宜”等级则大幅下降,比 2000 年下降了 13.65 个百分点。15 年来湘西植烟土壤 pH 两极分化严重,这可能与不同区域的改土措施差异有关。

2.3 土壤酸化的影响因素

2.3.1 土壤其他属性与 pH 的简单相关分析 采用简单相关分析的方法分析了 pH 与主要养分指标的相关性(表 4),发现 pH 与全钾、碱解氮、有效硫和粘粒(< 0.002 mm, 国际制,下同)呈显著或极显著负相关,与全氮、全磷、有机质、交换性钙、交换性镁、CEC、粗砂粒(2~0.2 mm)、细砂粒(0.2~0.02 mm)和粉粒(0.02~0.002 mm)呈显著或极显著正相关。

2.3.2 各因素对土壤 pH 影响效应分析 相关分析虽能够说明土壤其他属性与 pH 的相关性,但不能定量解析各属性对 SOM 含量的影响效应大小。因此,以与 pH 相关性达显著或极显著水平的海拔、全钾、全氮、全磷、碱解氮、交换性钙、交换性镁、有效硫、有机质、CEC、砂粒(2~0.2 mm 和 0.2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)、粘粒(< 0.002 mm)等指标为自变量,以 pH 为因变量进行逐步回归分析,定量分析各属性对 pH 空间变异的综合解释能力和不同属性对 pH 空间变异的独立解释能力。各属性对 pH 的逐步回归分析结果见表 5,进入回归方程的因素有 7 项,分别为交换性钙、交换性镁、有效硫、有机质、粘粒、粉粒、碱解氮;表中 ΔR^2 为在其他变量的基础上增加该变量时回归方程判定系数的增量, ΔR^2 越大,说明该变量在回归方程中越重要;校正决定系数,是各回归方程中所有属性对 pH 变异的解释比例。由 R^2 、Adjusted R^2 和 ΔR^2 可知,土壤交换性钙对 pH 空间变异的影响最大,能够独立解释其变异的 60.6%,其次是交换性镁、有效硫、有机

表 2 土壤 pH 半方差函数模型及相关参数比较

Table 2 The semi-variogram models of soil pH and its parameters

年份 Year	模型 Model	块金值	基台值	块金效应 (%)	变程 Range	分形维数 Fractal dimension	自相关指数 Moran's I	标准化 Z 值 Standardized Z	插值精度	
		Nugget C_0	Sill C_0+C	Nugget effect $C_0/(C_0+C)$					Interpolation precision	
									RMSSE	MSE
2000	Sph.	0.81	1.40	58.17	0.385	1.982	0.203	9.13	0.982	0.007
2015	Exp.	0.44	0.69	64.13	0.173	1.987	0.084	6.62	0.968	0.005

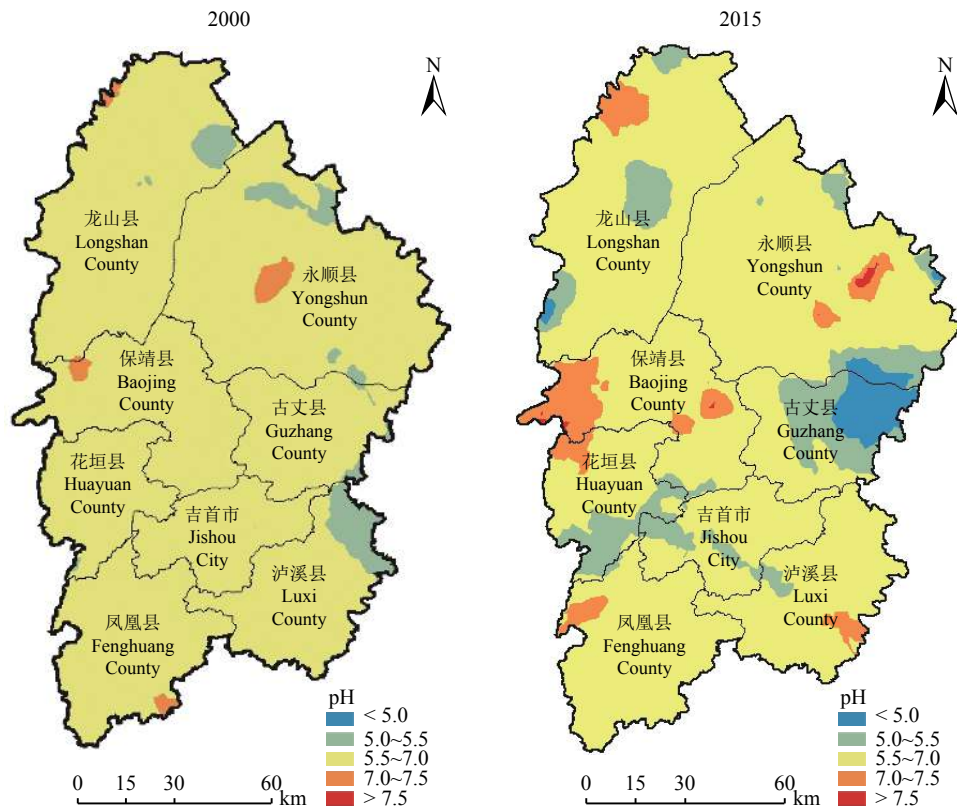


图 2 2000 和 2015 年湘西植烟土壤 pH 时空分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil pH in Xiangxi in 2000 and 2015

表 3 2000 和 2015 年湘西土壤酸碱度各等级面积统计及变化

Table 3 Area statistics and changes of soil pH in 2000 and 2015

pH 等级 Grade	pH	面积比例 Percentage (%)		2015 年较 2000 年变化 (%) Change from 2000 to 2015
		2000	2015	
极低 Extremely low	<5.0	0	2.61	2.61
低 Low	5.0~5.5	3.91	10.40	6.48
适宜 Suitable	5.5~7.0	94.94	81.28	-13.65
高 High	7.0~7.5	1.15	5.55	4.39
极高 Extremely high	>7.5	0	0.17	0.17

表 4 土壤 pH 与土壤主要养分指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil pH and other properties

全钾 Total K	全氮 Total N	全磷 Total P	碱解氮 Avail. N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	交换性钙 Exch. Ca	交换性镁 Exch. Mg	有效硫 Avail. S
-0.151**	0.058*	0.063*	-0.081**	-0.030	0.046	0.779**	0.607**	-0.378**
海拔 Altitude	有机质 OM	Cl ⁻	CEC	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay	
-0.129**	0.128**	-0.032	0.196**	0.112**	0.105**	0.077**	-0.228**	

注 (Note) : *— $P < 0.05$, **— $P < 0.01$.

表 5 各因素与土壤 pH 的逐步回归分析结果
Table 5 Stepwise regression analysis of soil properties contributing to pH variability

回归模型 Regression model	变量 Source of variance	R ²	校正决定系数 Adjusted R ²	ΔR ²
模型 1 Model 1	Exch. Ca	0.606	0.606	0.606
模型 2 Model 2	Exch. Ca, Exch. Mg	0.754	0.754	0.148
模型 3 Model 3	Exch. Ca, Exch. Mg, Avail. S	0.796	0.796	0.042
模型 4 Model 4	Exch. Ca, Exch. Mg, Avail. S, OM	0.814	0.813	0.017
模型 5 Model 5	Exch. Ca, Exch. Mg, Avail. S, OM, < 0.002 mm particle	0.831	0.830	0.017
模型 6 Model 6	Exch. Ca, Exch. Mg, Avail. S, OM, < 0.002 mm and 0.02–0.002 mm particles	0.834	0.834	0.003
模型 7 Model 7	Exch. Ca, Exch. Mg, Avail. S, OM, < 0.002 mm and 0.02–0.002 mm particles, Alkali-hydrolyzable N	0.838	0.838	0.004

质、粘粒、粉粒和碱解氮，对 pH 的累计解释能力达 83.8%。综上，pH 是多个因子共同作用的结果，结合前文相关分析结果可知，有效硫和碱解氮是湘西植烟土壤的主要致酸因子，交换性钙、交换性镁和有机质是湘西土壤酸化的控制因子，质地对 pH 亦有较大影响。

2.3.3 各土壤属性对 pH 的影响 各土壤属性对 pH 影响的平滑回归分析在明确 pH 主控因素的基础

上，进一步采用平滑回归的方法探讨交换性钙、交换性镁、有效硫、有机质和碱解氮对 pH 的影响(图 3)。结果表明，pH 与交换性钙含量符合分段线性模型，随交换性钙增加，pH 表现为先快速升高后缓慢升高的趋势，模型拐点为 13.1 cmol/kg；pH 与交换性镁符合二次曲线模型，随交换性镁增加，pH 表现为先快速升高后趋于稳定的趋势；pH 与有机质符合线性模型，随有机质增加，pH 呈直线升高趋势，但方程

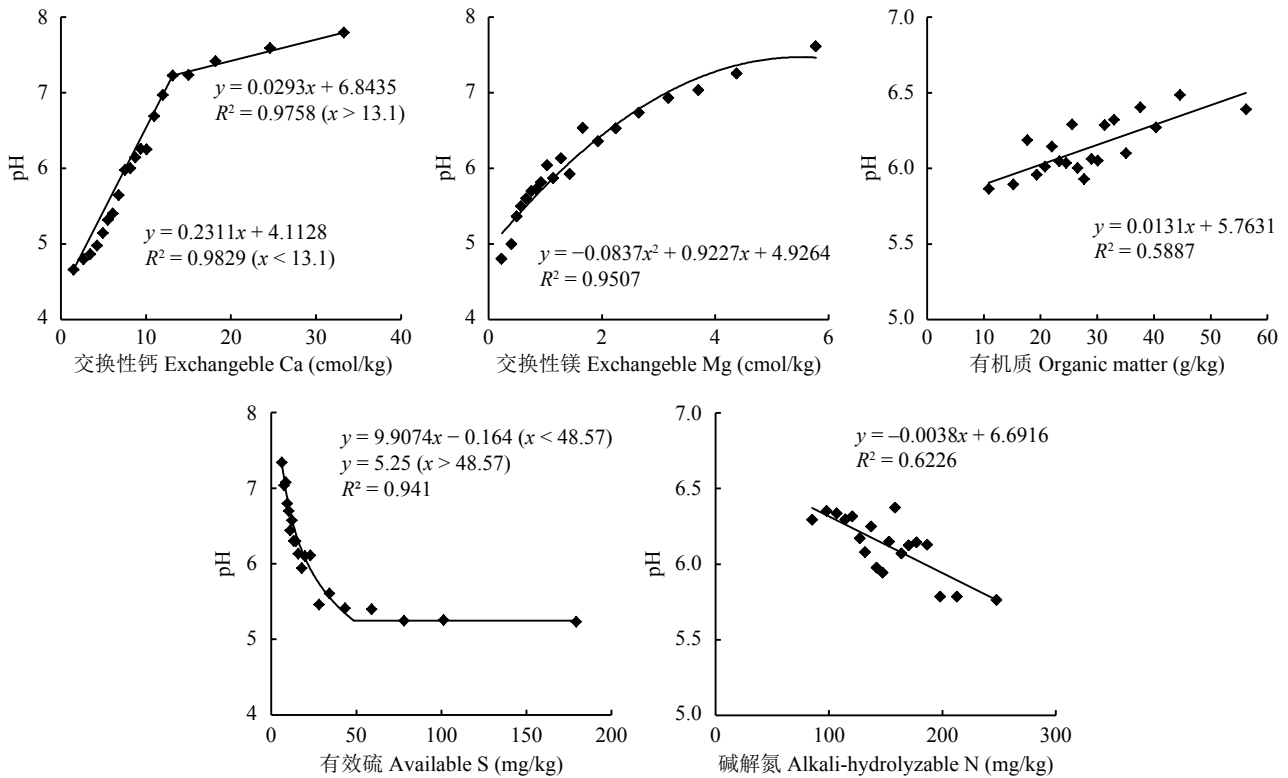


图 3 土壤 pH 与其主控驱动因素的平滑回归分析
Fig. 3 Smooth regression analysis of soil pH and its main controlling factors

斜率较小; pH 与有效硫符合线性加平台模型, 随有效硫增加, pH 表现为先下降后趋于稳定的趋势, 模型拐点为 48.57 mg/kg; pH 与碱解氮符合线性模型, 随碱解氮增加, pH 呈直线下降趋势。与前文相关分析及逐步回归分析的结果一致。

2.3.4 影响 pH 的其他环境因素 前文的逐步回归分析表明, 土壤理化指标可解释土壤 pH 变异的 83.8%, 但仍有 16.2% 的变异未得到解释, 这也印证了土壤 pH 影响因素的复杂性。因而进一步采用方差分析和多重比较分析地形地貌、成土母质和成土母岩对 pH 的影响。

1) 地形地貌 湘西烟区的地形地貌主要有山地、丘陵和平原, 土壤 pH 在不同地形地貌间存在显著和极显著差异 (图 4), 其中低山最高, 其次是山地, 均极显著高于丘陵土壤的 pH 值。

2) 成土母质和成土母岩 郴州植烟土壤主要成土母质为坡积物、洪积物、残积物和冲积物, 冲积物主要分布在泸溪县和凤凰县, 坡积物在各植烟县均有分布, 残积物主要分布在龙山县、永顺县、凤凰县和泸溪县, 洪积物主要分布在永顺县, 土壤 pH 在 4 种成土母质间存在极显著差异 (图 5), 最高的是冲积物和洪积物, 其次是坡积物, 最低的是残积物; 从变异程度来看, 4 种土壤母质均表现为中等程度变异。湘西植烟土壤主要成土母岩为板页岩、石灰岩和紫色砂页岩, 龙山和花垣县主要为石灰岩, 保靖县和凤凰县主要为板页岩, 古丈县主要为板页岩和紫色砂页岩, 永顺县主要为板页岩和石灰岩, 土壤 pH 在 3 种成土母岩间存在极显著差异 (图 5),

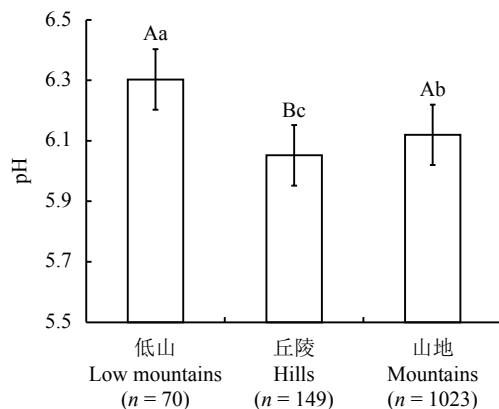


图 4 地形对土壤 pH 值的影响

Fig. 4 Effects of topography on soil pH

[注 (Note): 柱上不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著 Different capital and small letters above the bars indicate significantly different at 0.01 and 0.05 levels among treatments, respectively.]

由高到低依次为板页岩、石灰岩和紫色砂页岩; 从变异程度来看, 3 种成土母岩均表现为中等程度变异。

3 讨论

烤烟对土壤 pH 的适应能力较强, 在 pH 4~9 的土壤上均能正常完成其生长和发育, 但要获得品质优良的烟叶, 烟草须种植在特定的 pH 值范围的土壤上^[20]。不同的研究得到的烤烟种植的最佳土壤 pH 虽因地域的不同而略有差异^[21], 但普遍认为弱酸性到中性的土壤更利于获得优质烟叶^[22]。总体上, 15 年来湘西植烟土壤 pH 时空变异较大, 酸化和碱化问题同时发生, 以酸化问题更为严重, 以古丈县植烟土壤 pH 下降幅度较大, 以保靖县植烟土壤 pH 升高幅度较大。

本文着重研究了全钾、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效硫、海拔、有机质、氯离子、阳离子交换量、土壤砂粒、粉粒和粘粒等因素对土壤 pH 的影响。海拔高度主要通过母岩、母质、水热条件影响着土壤的发育进程, 从而造成土壤理化性状在垂直梯度上的差异^[23]; 湘西州海拔高度呈现北高南低的趋势, 植烟土壤 pH 与海拔呈显著负相关关系, 这与邓小华等^[11]及杜薇等^[24]的研究结果一致。龙山海拔 500 m 以下的区域、保靖大部分区域、花垣北部、古丈海拔 600 m 以下的区域、凤凰和泸溪等地降水量在 800 mm 以下; 龙山中北部、永顺中海拔以下的区域、古丈中高海拔区域、花垣中南部、吉首南部等地降水量为 800~1000 mm; 只有龙山、永顺两县海拔 1000 m 以上的区域降水量超过 1000 mm; 但湘西烟区降雨量与土壤 pH 关系如何尚未作深入研究。土壤 pH 与全钾、碱解氮、有效硫和粘粒呈显著或极显著负相关, 与全氮、全磷、有机质、交换性钙、交换性镁、CEC、砂粒和土壤粉粒呈显著或极显著正相关。我们特别注意到, 逐步回归分析结果表明, 土壤交换性钙对湘西土壤 pH 空间变异的影响最大, 能够独立解释其变异的 60.6%, 其次是交换性镁、有效硫、有机质、粘粒、粉粒和碱解氮, 对土壤 pH 的累计解释能力达 83.8%, 值得注意的是交换性钙与交换性镁对 pH 的累计解释能力便达到了 75.4%, 这与 Drohan 等^[25]的研究结果一致。但和 Guo 等的研究得到的氮肥过量施用是土壤酸化的主要因素不完全一致^[26], 本研究中硫元素的致酸作用更为突出, 这可能与烟草种植中硫酸钾的超量施用带入大量硫酸根离子有关^[27]。综上, 本研究基本探明了湘西植烟土壤

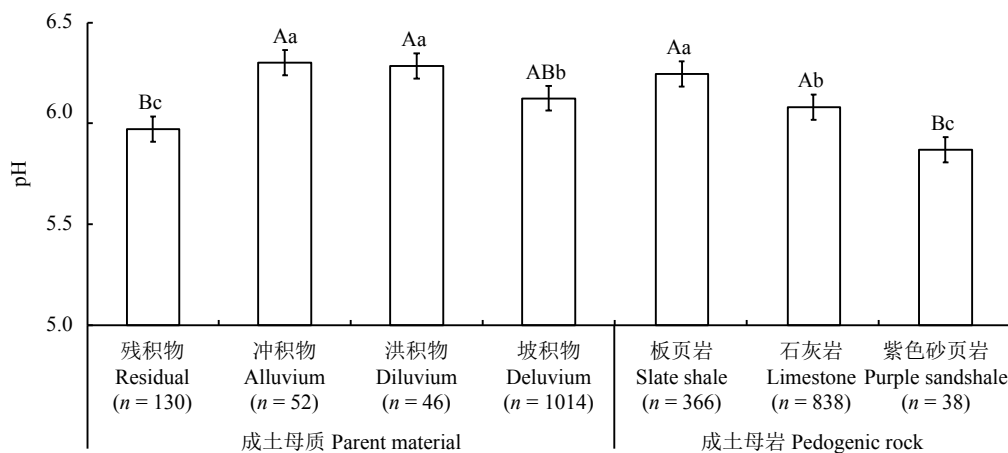


图 5 成土母质和成土母岩对土壤 pH 的影响

Fig. 5 Effects of parent materials and parent rocks on soil pH

[注 (Note): 柱上不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著]

Different capital and small letters above the bars indicate significantly different at the 0.01 and 0.05 levels among treatments, respectively.]

pH 的主控因素, 阐明了土壤有效硫和碱解氮是湘西植烟土壤的主要致酸因子, 土壤交换性钙、交换性镁和有机质是湘西土壤酸化的控制因子。此外, 我们注意到一些区域 pH 时空变异明显, 如保靖县西部 pH 明显升高、古丈县中东部 pH 明显降低, 从以上酸化驱动因子入手进行解析, 发现 15 年来保靖县植烟土壤交换性钙、交换性镁和有机质等土壤酸化的控制因子分别升高了 26.16%、94.71% 和 10.56%, 而致酸因子有效硫含量则下降了 51.11%; 相应地, 15 年来古丈县植烟土壤交换性钙和交换性镁等土壤酸化的控制因子分别下降了 49.91% 和 16.82%, 而致酸因子有效硫含量则上升了 51.11%; 因此认为, 土壤酸化的控制因子和致酸因子含量的变化是导致这两个典型区域土壤 pH 出现明显变化的重要原因, 同时也进一步验证了前文的土壤 pH 驱动因素的研究结论。

综上, 湘西植烟土壤和我国其他很多烟区一样^[14, 24]存在较为严重的酸化问题, 目前湘西烟区主要采取施用生石灰的方法改良酸性土壤 (750~1500 kg/hm²), 手段较为单一。而对于碱性植烟土壤目前尚未采取措施进行改良。目前尚未有来自工业企业的由于土壤酸化或碱化导致湘西烟叶质量变差的反馈, 但有关酸性土壤导致病害加重已被当地广泛认可, 但 pH 进一步下降后是否对烟叶品质造成不良影响尚不得而知, 这一问题应当引起足够关注。一方面应继续关注土壤 pH 变化, 在当地开展酸性土壤对烟叶品质影响的研究, 为植烟土壤管理决策提供参考。另一方面, 应针对植烟土壤不同 pH 状况采取差异化方案, 针对 pH “极高” 的区域, 应暂时停

止施用石灰, 是否需要施用碱性土壤调理剂则应谨慎对待; 针对土壤 pH “低” 和 “极低” 的区域应杜绝过磷酸钙的施用, 替代施用钙镁磷肥作为磷肥来源, 并适当投入石灰粉、白云石粉和有机物料进行酸性土壤改良。此外, 应同时适当减少氮肥用量, 并采用其他钾肥部分替代硫酸钾, 以减少氮肥和硫酸根离子对植烟土壤的致酸作用。

4 结论

由于长期施用不同化学肥料和有机物料, 湘西植烟土壤的 pH 变异程度在加大, 适宜等级的土壤面积在减少。影响因素的分析结果显示, 交换性钙、交换性镁、有效硫、有机质、粘粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.02~0.002 mm) 和碱解氮是植烟土壤 pH 的主要影响因素, 交换性钙、交换性镁是土壤 pH 升高的主要驱动因素, 而有效硫和碱解氮是土壤 pH 降低的驱动因素。因此应根据土壤 pH 区域差异, 从增加含钙物料的投入, 控制含硫物料以及化肥氮的使用, 以维持土壤的可持续利用。

参考文献:

- [1] Gubry-rangin C, Nicol G W, Prosser J I. Archaea rather than bacteria control nitrification in two agricultural acidic soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 74(3): 566-574.
- [2] Roy S, Singh S B. Effect of soil type, soil pH, and microbial activity on persistence of clodinafop herbicide[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 77(2): 260-266.
- [3] Bekele A, Hudnall W H. Spatial variability of soil chemical properties of a prairie-forest transition in Louisiana[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1/2): 7-21.
- [4] Cohen M J, Dunne E J, Bruland G L. Spatial variability of soil

- properties in cypress domes surrounded by different land uses[J]. *Wetlands*, 2008, 28(2): 411–422.
- [5] 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.
- Cao Z H. Soil and fertilization for quality tobacco production[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1991.
- [6] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Wang Y T, Xie J P, Li Z H. Tobacco planting regionalization in China[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [7] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西州植烟土壤 pH 和中微量元素分布及其相关关系[J]. *烟草科技*, 2017, 50(5): 24–30.
- Deng X H, Zhang Y, Tian F, et al. Distribution characteristics of pH and medium/trace elements in tobacco planting soils in Xiangxi Autonomous Prefecture and their relationship[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2017, 50(5): 24–30.
- [8] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 49–56.
- Deng X H, Zhang Y, Tian F, et al. pH and main nutrients of tobacco-growing soils and their relations in Xiangxi[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 49–56.
- [9] 张明发, 田峰, 巢进, 等. 湘西植烟土壤 pH 特征与土壤有效养分的相关性研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(25): 267–272.
- Zhang M F, Tian F, Chao J, et al. The correlation study on nutrition and pH characteristics of tobacco-growing soil in Xiangxi prefecture of Hunan[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(25): 267–272.
- [10] 周米良, 邓小华, 黎娟, 等. 湘西植烟土壤 pH 状况及空间分布研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(9): 80–85.
- Zhou M L, Deng X H, Li J, et al. Spatial distribution and pH condition of tobacco-growing soil in Xiangxi[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(9): 80–85.
- [11] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 308–313.
- Deng X H, Cai X, Zhang M F, et al. Distribution characteristics of tobacco-growing soil pH and its influencing factors in karst region of Xiangxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 308–313.
- [12] 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, 2000.
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [13] Liang L Z, Zhao X Q, Yi X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 161–168.
- [14] 符云鹏, 王小翠, 陈雪, 等. 毕节烟区土壤 pH 值分布状况及与土壤养分的关系[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 46–51.
- Fu Y P, Wang X C, Chen X, et al. Distribution of soil pH and its relationships with soil nutrients in Bijie tobacco-growing area[J]. *Soils*, 2013, 45(1): 46–51.
- [15] 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, 45(11): 69–73.
- Li Q, Zhou J H, Zang Y Y, et al. Geostatistics-based evaluation of main nutrients in Qujing tobacco planting soil[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2012, 45(11): 69–73.
- [16] 李强, 张一扬, 程昌新, 等. 曲靖烤烟钾含量特征及其与主要生态因子关系研究[J]. *核农学报*, 2017, 31(5): 918–926.
- Li Q, Zhang Y Y, Cheng C X, et al. Characteristics of potassium content in flue-cured tobacco and its relationship with main ecological factor in Qujing, China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 918–926.
- [17] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 1–11.
- Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-huai alluvial plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 1–11.
- [18] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 65–132.
- Wang Z Q. Geo-statistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999. 65–132.
- [19] 吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改, 等. ArcGIS9 地理信息系统应用与实践(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- Wu X Q, Zhang H Y, Li R G, et al. Application and practice of ArcGIS 9 geographic information system(Vol. 2)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [20] 胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Hu G S, Zheng W, Wang Z D, et al. Principle for flue-cured tobacco nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [21] 周冀衡, 朱小平, 王彦亭, 等. 烟草生理与生物化学[M]. 安徽合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- Zhou J H, Zhu X P, Wang Y T, et al. Physiology and biochemistry of tobacco[M]. Hefei, Anhui: University of Science and Technology of China Press, 1996.
- [22] Dick A C, Malhi S S, O'sullivan P A, et al. Influence of interactions of barley cultivars with soil and fertilizer K, and soil pH on grain yield and quality[J]. *Plant and Soil*, 1985, 86(2): 265–271.
- [23] 麻泽宇, 王丹, 戴伟, 等. 阿尔泰山不同海拔梯度天然冷杉林土壤特征及肥力综合评价[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 134–140.
- Ma Z Y, Wang D, Dai W, et al. Soil characteristics and fertility evaluation of abies forest at different altitude gradients in Altai mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 134–140.
- [24] 杜薇, 王昌全, 李冰, 等. 基于 GIS 和地统计学的攀枝花烟区土壤 pH 空间变异特征研究[J]. *核农学报*, 2012, 26(6): 924–929.
- Du W, Wang C Q, Li B, et al. Spatial variability of soil pH based on GIS combined with geostatistics in Panzhuhua tobacco area[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(6): 924–929.
- [25] Drohan J R, Sharpe W E. Long-term changes in forest soil acidity in Pennsylvania, U.S.A[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1997, 95(1–4): 299–311.
- [26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [27] Tang C. Factors affecting soil acidification under legumes I. effect of potassium supply[J]. *Plant and Soil*, 1998, 199(2): 275–282.