#### DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.025

杨树明, 余小芬, 邹炳礼, 等. 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素. 土壤, 2021, 53(6): 1299-1308.

# 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素<sup>①</sup>

杨树明<sup>1</sup>, 余小芬<sup>1</sup>, 邹炳礼<sup>1</sup>, 解 燕<sup>2</sup>, 刘加红<sup>2\*</sup>, 王瑞宝<sup>2</sup>, 吕亚琼<sup>2</sup>, 蔡永占<sup>2</sup>, 张素华<sup>3</sup>, 邱学礼<sup>1\*</sup>

(1 云南省农业科学院农业环境资源研究所,昆明 650205; 2 云南省烟草公司曲靖市公司,云南曲靖 655002; 3 云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所,昆明 650205)

摘 要: 2017—2020 年用 GPS 定位采集云南省曲靖市 9 个县区核心烟田耕层(0~20 cm)土壤样品 6 685 个,测定 pH、有机质、水解性氮、有效磷和速效钾,运用地统计学和地理信息系统(GIS)分析上述指标的空间分布特征及其变异主控因素。结果表明:土壤 pH、有机质、水解性氮、有效磷和速效钾变幅分别介于 4.16~8.50、2.23~99.93 g/kg、14.88~393.36 mg/kg、2.45~142.78 mg/kg 和 19.65~991.33 mg/kg,均值分别为 6.30、32.83 g/kg、125.42 mg/kg、29.92 mg/kg 和 270.38 mg/kg,变异系数分别为 11.59%、33.54%、29.93%、64.54% 和 35.18%,均为中等程度变异。pH 集中在微酸至中性,较适宜烤烟种植,有机质、有效磷和速效钾含量集中在中等至极高等级,共占研究区总面积的 70% 以上。半方差分析表明,土壤 pH 空间自相关性较强,变异受自然因素(土壤类型、质地和降雨)的主导;有机质、水解性氮和速效钾空间自相关性中等,变异受自然和人为因素(施肥)共同影响;有效磷的空间自相关性很弱,人为因素是造成其空间差异的主控因素。克里格空间插值结果揭示土壤 pH 空间连续性好,整体呈聚集分布,强酸和极强酸土壤主要分布在马龙、宣威和会泽;有机质、水解性氮、有效磷、速效钾呈不规则的块状分布,随机性较强,其中有机质、水解性氮、速效钾的高值区主要在富源、罗平,有效磷较高的区域集中在陆良、罗平。

关键词: 植烟土壤; 土壤养分; 地理信息系统; 空间变异; 影响因素

中图分类号: S15; S572 文献标志码: A

# Spatial Regional Variability Characteristics and Influential Factors of pH and Main Nutrient Contents in Tobacco-growing Soils in Qujing

YANG Shuming<sup>1</sup>, YU Xiaofen<sup>1</sup>, ZOU Bingli<sup>1</sup>, XIE Yan<sup>2</sup>, LIU Jiahong<sup>2\*</sup>, WANG Ruibao<sup>2</sup>, LÜ Yaqiong<sup>2</sup>, CAI Yongzhan<sup>2</sup>, ZHANG Suhua<sup>3</sup>, QIU Xueli<sup>1\*</sup>

(1 Agricultural Resources & Environment Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2 Qujing Branch of Yunnan Tobacco Company, Qujing, Yunnan 655002, China; 3 Biotechnology and Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

**Abstract:** From 2017 to 2020, a total of 6 685 soil samples were collected from the plough layers (0–20 cm) of core tobacco fields in nine tobacco-growing counties in Qujing, Yunnan Province, and then pH, organic matter, hydrolytic nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium of the soil samples were measured. By GPS positioning, geostatistics and geographic information system (GIS) were used to investigate the status, regional variation characteristics and spatial distribution of the above soil fertility indexes. Correlation analysis and variance analysis were used to assess the effects of major factors (soil type, soil texture, climate and fertilization) on soil fertility indexes. The results showed that: soil pH ranged from 4.16 to 8.50, organic matter from 2.23 to 99.93 g/kg, hydrolytic nitrogen from 14.88 to 393.36 mg/kg, available phosphorus from 2.45 to 142.78 mg/kg, and rapidly available potassium from 19.65 to 991.33 mg/kg, with mean values of 6.30, 32.83 g/kg, 125.42 mg/kg, 29.92 mg/kg, and 270.38 mg/kg, respectively. The coefficients of variation of the above indexes were 11.59%, 33.54%, 29.93%, 64.54% and 35.18%, respectively, showing moderate spatial variation. Soil pH ranged from slightly acid to neutral, which was more suitable for growing flue-cured tobacco. The contents of organic matter, available phosphorus and rapidly available potassium

①基金项目:中国烟草总公司云南省公司科技计划项目(2019530000241014)资助。

<sup>\*</sup> 通讯作者(nkyqx101@126.com; 1015333785@qq.com)

作者简介:杨树明(1973—),男,云南武定人,博士,研究员,主要从事土壤肥料与农业环境研究。E-mail: 1569885088@qq.com

concentrated in the medium to the very high levels, accounting for more than 70% of the total area of the study area. The results of semi-variance analysis showed that the spatial autocorrelation of soil pH was strong, and the variation was dominated by natural factors (soil type, texture and precipitation). The spatial autocorrelation of soil organic matter, hydrolytic nitrogen and rapidly available potassium were moderate, and their variations were affected by both natural and anthropic factors (fertilization). The spatial autocorrelation of soil available P was weak, and anthropic activities were main controlling factors that caused the spatial difference. The results of ordinary kriging interpolation revealed that spatial continuity of soil pH was good, and the overall distribution was aggregated. The strong acid and very strong acid soils were mainly distributed in Malong, Xuanwei and Huize. The distribution of organic matter, hydrolytic N, available P and rapidly available K were irregular block with strong randomness. The high value areas of organic matter, hydrolytic N and rapidly available K were mainly in Fuyuan and Luoping, while the high value areas of available P were concentrated in Luliang and Luoping.

Key words: Tobacco-planting soil; Soil nutrient; GIS; Spatial variability; Influential factors

土壤 pH、有机质、氮、磷、钾是衡量土壤肥力 及质量的重要指标[1], 直接影响烟株生长发育和烟叶 的产质量<sup>[2]</sup>。探明植烟土壤 pH 和养分丰缺状况、空 间变异规律及其主控影响因素,是提升耕地质量和烟 叶生产力的基础,对土壤可持续利用及指导精准施肥 促进烤烟高质量发展具有重要意义。土壤作为一个时 空连续的变异体,其理化属性空间分布及格局变化都 可能受到结构性因素(土壤母质、地形条件、气候等)[3] 和人为因素(土地利用方式、耕作、施肥等)的影响, 在特定区域空间尺度上形成特有的空间异质性[4]。我 国烟草行业在植烟土壤理化属性空间变异方面开展 了大量研究<sup>[5-6]</sup>,据中国知网上以"土壤"、"空间 变异"和"烟"为关键词进行的检索表明,相关的中 文研究报道约 70 余篇。一些研究表明,在田块尺度 上,施肥、有机物料投入、秸秆还田是土壤有机质变 异的成因[6-7]; 在县域尺度上, pH 变异受结构因子(海 拔、地形、土壤质地)和随机因子共同作用[8];在区 域尺度上,土壤碱解氮含量空间变异的主导因子因其 所处环境条件不同而有所差异[9-10];土壤类型和前作 是有效磷变异的主控因素, 而速效钾则为海拔和坡 度[11]。目前,关于植烟土壤 pH、有机质及氮、磷、 钾分布特点和影响因素已有研究[6-11], 但在自然环境 中,各因子间交互作用复杂,随着时间尺度、采样范 围、样本量大小的变化,解析土壤养分变异规律不尽 相同[12]。同时,不同烟区间的地域差异,导致土壤 养分空间变异的主导因子不同,使得研究结果应用区 域性较强。曲靖是云南主产烟区, 年均种植烤烟约 8.67×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 年产烟叶 1.8×10<sup>5</sup> t, 是中式卷烟最大 的核心基地<sup>[8]</sup>。已有 2008 年曲靖市植烟土壤 pH 和 养分方面的研究报道<sup>[13]</sup>,揭示 pH、有机质、有效硫 和水溶性氯含量适宜,全氮和碱解氮含量偏高,速效 钾、有效钙、有效镁、有效铜、有效铁、有效锌、有

效钼和有效锰含量丰富,有效磷含量中等,全磷、全钾和有效硼含量偏低;各指标均表现为各向异性分布,其中有效磷和有效硼的空间变异主要受随机性因素的影响,其他养分指标的空间变异是结构性因素和随机性因素共同作用的结果。但植烟土壤肥力现状如何尚不明确,为此,本研究运用 GIS 技术和地统计学方法,分析曲靖主要土壤养分 2017—2020 年的丰缺状况、空间分布特征及其变异主控因素,旨在为实现烟区土壤可持续利用及精准施肥提供技术支撑。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

曲靖烟区地处云南省东部,介于 24°19′~27°03′N、102°42′~104°50′E,海拔介于 563~3 675 m,地势由西北部向东南部倾斜,属低纬高原亚热带季风气候区,年均气温 14.24 ℃,降雨量 800~1 700 mm,日照时数 1 584~2 195 h,无霜期 204~282 d。耕地总面积 72.9×10⁴ hm²,年均种植烤烟约 8.67×10⁴ hm²,按成土母质,土壤类型主要有红壤、紫色土、黄壤、水稻土、冲积土、新积土和石灰岩土[1⁴]。根据卡庆斯基土壤质地分类制,曲靖土壤质地以壤土占比较高,其次是黏土、砂土[15]。耕作方式为冬闲、玉米、绿肥、油菜与烤烟轮作为主。

#### 1.2 土壤采集与制备

2017—2020 年在曲靖市的会泽县、马龙区、罗平县、陆良县、师宗县、沾益区、麒麟区、富源县、宣威市 9 个区域采集具有代表性的植烟土壤样品 6 685 个,在每年 4 月份烤烟移栽前,平坝区每 30 ~ 40 hm²取一个混合土样,丘陵区域或山区每 13 hm²左右取一个混合土样;每个田块采样点按"梅花形"随机 5 点采集 0~20 cm 耕层土壤,剔除根系、砾石

等杂质均匀混合后按四分法获取 0.5 kg 左右,在同一 采样单元内每 8~10个点的土样构成混合土样,经登 记编号后带回实验室,风干、混匀、磨细、过筛留存 待测,GPS 定位采样点经纬度、海拔。

#### 1.3 测定项目与方法

土壤 pH 测定采用电位法(水土比 2.5:1, V:m) (NY/T1377—2007) <sup>[16]</sup>;有机质采用重铬酸钾氧化法 测定(NY/T1121.6—2006) <sup>[17]</sup>;水解性氮采用碱解扩散 法测定(LY/T1228—2015) <sup>[18]</sup>;有效磷采用钼锑抗比色 法测定(NY/T1121.7—2014) <sup>[19]</sup>;速效钾采用醋酸铵浸 提-火焰光度法测定<sup>[20-21]</sup>。

#### 1.4 植烟土壤有效养分分级标准

根据以往研究<sup>[14,22]</sup>,土壤 pH、有机质、水解性 氮、有效磷和速效钾分级分别见表 1 和表 2。

表 1 植烟土壤 pH 等级划分标准

Table 1 Classification standard of tobacco-growing soil pH

指标	极强酸性	强酸性	微酸性	中性	碱性
pН	<4.5	4.5 ~ 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	7.5 ~ 8.5

表 2 植烟土壤养分划分标准

Table 2 Classification standard of tobacco-growing soil nutrients

指标	极高	高	中等	低	极低
有机质(g/kg)	>40	30 ~ 40	$20\sim30$	10 ~ 20	<10
水解性氮(mg/kg)	>150	$120\sim150$	90 ~ 120	$60 \sim 90$	<60
有效磷(mg/kg)	>40	$20\sim40$	$10\sim20$	5 ~ 10	<5
速效钾(mg/kg)	>200	$150\sim200$	$100\sim150$	$50 \sim 100$	< 50

#### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM Statistics SPSS 19.0 软件对土壤 pH 及主要养分元素含量特征 进行描述性统计和正态分布检验(K-S 检验),对不服 从正态分布的数据,进行对数转换,使其服从对数正

态,再采用 ArcGIS 10.2 软件对数据进行半方差函数 计算、模型拟合、克里格空间插值(Kriging)和绘制土 壤养分空间分布图。

# 2 结果与分析

#### 2.1 土壤养分含量统计特征值及等级分布

2.1.1 土壤 pH 由表 3 可知, 曲靖市植烟土壤 pH 均值 6.30, 变幅 4.16 ~ 8.50, 变异系数 8.71% ~ 12.84%。9个植烟县(区)土壤 pH均值范围 5.52 ~ 6.67, 从高到低依次为: 罗平>师宗>富源>宣威>麒麟>会泽>陆良>沾益>马龙,除马龙外,其他县区差异未达显著水平。强酸性土壤区域在马龙、沾益、麒麟和会泽分布相对多一些,强酸性土壤的比例占 20% 以上;中性土壤师宗、罗平占比最高,分别为 58.06% 和50.57%。曲靖土壤 pH 绝大多数分布在偏酸和中性等级,分别占 25.19% ~ 50.24% 和 7.19% ~ 58.06%,整体处于适宜种植烤烟水平。

2.1.2 土壤有机质 由表 4 可知, 曲靖市植烟土壤有机质含量均值为 32.83 g/kg, 变幅 2.23 ~ 99.93 g/kg, 全市有 72.45% 的烟区土壤有机质处于中高和高等级, 低等级比例较少。9 个植烟县土壤有机质含量均值范围 27.76 ~ 40.37 g/kg, 变异系数 27.33% ~ 39.27%, 属于中等变异; 从高到低依次为: 富源>罗平>马龙>宣威>沾益>师宗>麒麟>陆良>会泽; 马龙与罗平、师宗与沾益间土壤有机质含量差异不显著, 其他县区之间差异达极显著水平(P<0.01)。从各县土壤有机质含量等级分布来看, 会泽整体较低, 共有26.57% 集中在低和极低级别; 其他县区集中在高和极高级别, 分别占 22.30% ~ 42.28%、22.52% ~ 59.25%, 有机质处于丰富水平。

表 3 植烟土壤 pH 统计信息
Table 3 Statistical information of tobacco-planting soil pH

		Table 3	Statistical illioning	ation of tobacco-	-pianting son pri			
区域	样本数	平均值±标准差	变幅		分	布频率 (%)		
				7.5 ~ 8.5	6.5 ~ 7.5	5.5 ~ 6.5	4.5 ~ 5.5	<4.5
会泽	685	$6.23 \pm 0.74 \text{ aA}$	4.35 ~ 7.91	7.46	30.97	40.57	20.90	0.10
马龙	547	$5.52 \pm 0.63 \text{ bB}$	$4.26 \sim 7.54$	0.26	7.19	50.24	38.72	3.59
罗平	449	$6.67 \pm 0.72 \text{ aA}$	$4.16 \sim 8.06$	14.55	50.57	25.19	9.57	0.12
陆良	978	$6.22 \pm 0.66 \text{ aA}$	$4.28 \sim 7.73$	4.25	31.40	46.43	16.03	1.88
师宗	780	$6.66 \pm 0.58 \text{ aA}$	$4.76 \sim 7.87$	6.40	58.06	28.53	7.01	0.00
沾益	700	$6.20 \pm 0.74 \text{ aA}$	$4.22 \sim 8.50$	1.12	35.14	41.43	21.93	0.39
麒麟	685	$6.31 \pm 0.81 \text{ aA}$	$4.27 \sim 7.97$	13.21	30.13	33.67	21.05	1.94
富源	771	$6.49 \pm 0.72 \text{ aA}$	$4.32 \sim 8.26$	8.07	37.29	38.62	15.73	0.29
宣威	1 090	$6.41 \pm 0.74 \text{ aA}$	$4.55\sim8.37$	12.38	32.15	40.23	15.25	0.00
全市	6 685	$6.30 \pm 0.73$	4.16 ~ 8.50	7.52	34.77	38.32	18.47	0.92

注:同列数据小写字母、大写字母不同分别表示差异达 P<0.05 和 P<0.01 显著水平,下表同。

表 4 植烟土壤有机质含量统计信息

Table 4 Statistical information of tobacco-planting soil organic matter content

区域	样本数	平均值±标准差	变幅			分布频率(%)		
		(g/kg)	(g/kg)	>40 g/kg	$30\sim 40~g/kg$	$20\sim30~g/kg$	$10\sim 20~g/kg$	<10 g/kg
会泽	685	$27.76 \pm 10.90 \text{ gG}$	3.17 ~ 65.49	11.01	20.92	41.62	26.47	0.10
马龙	547	$37.62 \pm 10.28 \text{ bB}$	$2.23 \sim 79.62$	37.20	22.30	36.77	0.26	3.59
罗平	449	$38.43 \pm 12.76 \text{ bB}$	$5.71 \sim 86.11$	50.63	25.22	9.58	14.56	0.12
陆良	978	$29.49 \pm 8.76 \text{ fF}$	$4.42 \sim 74.96$	22.52	26.36	42.91	5.34	2.91
师宗	780	$32.85 \pm 11.71 \text{ dD}$	$2.53 \sim 83.13$	59.25	29.11	7.16	6.53	0.00
沾益	700	$33.77 \pm 11.49 \text{ dD}$	$7.29 \sim 93.70$	35.87	42.28	22.37	1.14	0.39
麒麟	685	$31.56 \pm 9.62 \text{ eE}$	$4.78 \sim 83.41$	30.75	34.36	21.49	13.49	1.98
富源	771	$40.37 \pm 12.28 \text{ aA}$	$11.18 \sim 99.93$	37.10	38.42	15.65	8.03	0.30
宣威	1 090	$35.64 \pm 11.27 \text{ eC}$	$7.46 \sim 81.7$	31.98	40.02	15.17	12.31	0.00
全市	6 685	32.83 ± 11.01	2.23 ~ 99.93	35.10	37.35	19.89	7.57	0.93

2.1.3 土壤水解性氮 由表 5 可知,曲靖市植烟土壤水解性氮含量均值为 125.42 mg/kg,变幅 14.88~393.36 mg/kg,水解性氮整体水平较高,共81.38%集中在中等至很高等级。9 个植烟县土壤水解性氮含量均值范围 111.31~143.93 mg/kg,变异系数 24.15%~36.68%,属于中等变异;从高到低依次为:富源>罗平>宣威>沾益>陆良>师宗>会泽>麒麟>马龙;富源与罗平间土壤水解性氮差异显著(P<0.05),宣威、沾益、

陆良之间差异达极显著水平(P<0.01),陆良与师宗间差异不显著,会泽、麒麟和马龙间未达极显著水平。从各县土壤水解性氮含量等级看,马龙、沾益、师宗集中在中等级别,分别占63.78%、61.72%、57.64%;罗平、富源和宣威集中在高和很高等级,共计分别占60.32%、47.32%、44.24%;会泽、陆良和麒麟土壤水解性氮整体较低,缺乏的比例分别占35.94%、26.73%、26.88%。

表 5 植烟土壤水解性氮含量统计信息

Table 5 Statistical information of tobacco-planting soil hydrolytic nitrogen content

区域	样本数	平均值±标准差	变幅			分布频率(%)		
		(mg/kg)	(mg/kg)	>150 mg/kg	120 ~ 150 mg/kg	90 ~ 120 mg/kg	$60\sim 90~mg/kg$	<60 mg/kg
会泽	685	$113.89 \pm 41.78 \text{ eE}$	16.77 ~ 218.29	6.59	16.16	43.76	23.61	12.33
马龙	547	$111.31 \pm 39.35 \text{ fE}$	$14.88 \sim 251.06$	2.82	15.74	63.78	18.96	2.70
罗平	449	$141.80 \pm 43.17 \text{ bAB}$	18.13 ~ 306.73	16.83	43.49	33.33	8.49	2.31
陆良	978	$119.52 \pm 35.88 \text{ dD}$	$25.11 \sim 308.12$	9.87	18.55	45.81	16.10	10.63
师宗	780	$118.65 \pm 39.45 \text{ dD}$	19.67 ~ 393.36	0.98	20.59	57.64	20.46	4.30
沾益	700	$126.56 \pm 35.62$ cC	29.94 ~ 272.86	1.92	21.14	61.72	18.58	0.61
麒麟	685	$112.61 \pm 33.75 \text{ eE}$	$17.22 \sim 224.78$	6.13	17.6	50.37	18.07	8.81
富源	771	$143.93 \pm 34.76 \text{ aA}$	$46.01 \sim 279.26$	11.04	36.28	44.61	10.70	4.89
宣威	1 090	$140.48 \pm 34.08 \text{ bB}$	$18.35 \sim 301.83$	13.14	31.10	41.39	18.37	3.53
全市	6 685	$125.42 \pm 37.54$	14.88 ~ 393.36	7.70	24.52	49.16	17.04	5.57

2.1.4 土壤有效磷 由表 6 可知,曲靖市土壤有效 磷含量均值为 29.92 mg/kg,变幅 2.45 ~ 142.78 mg/kg,有效磷整体处于中偏高水平,共 85.93% 集中在中等至很高等级。9 个植烟县土壤有效磷含量均值为 21.48 ~ 41.00 mg/kg,变异系数 51.82% ~ 78.86%,属于中偏高变异;从高到低依次为:陆良>罗平>马龙>宣威>师宗>沾益>会泽>麒麟>富源;陆良、罗平和马龙土壤有效磷含量极显著高于其他县

(P<0.01), 宣威与师宗间差异不显著, 沾益、会泽、麒麟和富源间差异极显著。从各县土壤有效磷含量等级比例看, 除富源缺磷比例最高外(占18.55%), 其他县土壤有效磷分布于高和很高的等级比例较高, 占比为52.71%~69.85%。

**2.1.5** 土壤速效钾 由表 7 可知, 曲靖市土壤速效钾 含量均值为 270.38 mg/kg, 变幅 19.65~991.33 mg/kg, 速效钾整体偏高, 共 84.76% 集中在中等至很高等

级。9 个植烟县土壤速效钾含量均值为 222.13 ~ 385.53 mg/kg,变异系数 24.27%~55.88%,属中偏高变异;从高到低依次为:罗平>富源>师宗>麒麟>沾益>盲威>陆良>会泽>马龙;其中罗平与富源、师宗

间土壤速效钾含量差异极显著(P<0.01),麒麟与沾益间差异不显著,沾益、宣威、陆良、会泽间差异不显著。9个县土壤速效钾含量在每个等级都有分布,总体集中在高和很高等级,占比为55.06%~84.57%。

表 6 植烟土壤有效磷含量统计信息

Table 6 Statistical information of tobacco-planting soil Olsen-P content

区域	样本数	平均值±标准差	变幅			分布频率(%)		
		(mg/kg)	(mg/kg)	>40 mg/kg	$20\sim 40~mg/kg$	10 ~ 20 mg/kg	5 ~ 10 mg/kg	<5 mg/kg
会泽	685	$26.83 \pm 19.34 \text{ fE}$	5.89 ~ 129.39	17.14	40.67	29.50	11.04	2.13
马龙	547	$32.30 \pm 21.06$ cC	4.13 ~ 131.15	29.02	39.62	20.44	9.27	2.14
罗平	449	$37.08 \pm 25.58 \text{ bB}$	$3.37 \sim 108.71$	34.19	29.97	18.24	10.19	8.34
陆良	978	$41.00 \pm 23.78 \text{ aA}$	$6.46 \sim 125.60$	42.02	27.83	18.29	2.75	9.60
师宗	780	$29.90 \pm 23.58 \text{ deD}$	$3.47 \sim 102.66$	21.65	46.06	25.71	6.37	0.72
沾益	700	$28.69 \pm 17.81$ eD	$2.45 \sim 151.10$	20.26	42.49	20.68	10.74	6.33
麒麟	685	$23.07 \pm 15.18 \text{ gF}$	5.33 ~ 107.57	21.92	41.36	24.66	11.65	0.90
富源	771	$21.48 \pm 11.13 \text{ hG}$	$3.24 \sim 83.05$	6.57	38.01	34.37	18.39	0.16
宣威	1 090	$30.90 \pm 16.33 \text{ dD}$	2.95 ~ 142.78	13.29	39.42	28.85	16.8	2.14
全市	6 685	$29.92 \pm 19.31$	2.45 ~ 142.78	19.86	37.32	28.75	11.47	3.05

表 7 植烟土壤速效钾含量统计信息

Table 7 Statistical information of tobacco-planting soil rapidly available K content

区域	样本数	平均值±标准差	变幅			分布频率(%)		
		(mg/kg)	(mg/kg)	>200 mg/kg	150 ~ 200 mg/kg	100 ~ 150 mg/kg	50 ~ 100 mg/kg	<50 mg/kg
会泽	685	229.51 ± 59.92 eD	35.84 ~ 683.33	22.77	48.36	12.41	10.37	6.09
马龙	547	$222.13 \pm 115.91 \text{ fD}$	$39.80 \sim 734.15$	29.70	42.10	14.65	9.50	4.05
罗平	449	$385.53 \pm 97.28 \text{ aA}$	$19.65 \sim 904.27$	51.42	33.15	6.91	5.05	3.47
陆良	978	235.22 ± 131.44 eCD	$31.67 \sim 834.56$	26.15	28.91	35.67	7.75	1.52
师宗	780	$301.70 \pm 99.94 \text{ cB}$	$41.82 \sim 875.34$	39.11	30.48	13.52	6.36	10.53
沾益	700	$243.59 \pm 61.57 \text{ deC}$	$24.55 \sim 991.33$	31.74	29.45	21.43	11.43	5.95
麒麟	685	$259.07 \pm 120.01 \text{ dC}$	$46.78 \sim 687.19$	36.22	28.18	18.51	7.72	9.37
富源	771	$318.54 \pm 77.31 \text{ bB}$	$62.73 \sim 847.56$	37.74	25.85	17.16	10.98	8.27
宣威	1 090	$238.13 \pm 92.74 \text{ eC}$	35.49 ~ 926.35	27.32	31.51	22.43	12.68	6.06
全市	6 685	$270.38 \pm 95.12$	19.65 ~ 991.33	32.46	33.11	19.19	9.09	6.15

#### 2.2 土壤养分的空间变异特征及分布格局

由表 8 可知, 土壤 pH 为指数模型, 有机质和水溶性氮均为高斯模型, 有效磷、速效钾为线性模型。其中有机质、水溶性氮拟合较好, R²分别为 0.905 和 0.876; pH、有效磷和速效钾拟合性次之, R²分别为 0.612、0.714 和 0.627。土壤 pH 的块基比小于 25%, 表明空间自相关性较强, 其变异以土壤母质、地形和气候等自然因素为主导; 土壤有机质、水解性氮和速效钾的块基比介于 25%~75%,表明其空间自相关性中等,变异由自然和人为共同作用产生; 土壤有效磷块基比大于 75%,表明其空间自相关性很弱,施肥、耕作等人为因素对其变异起主导作用。在曲靖市尺度上,5种土壤养分含量的变程较大,介于 2.456~

4.368 km, 其中土壤 pH 变程最小。从图 1 可以看出, 土壤 pH 空间连续性好,整体呈聚集分布,强酸和极 强酸土壤主要分布在马龙、宣威和会泽,微碱(pH 介于 7.5~8.5)土壤较少。土壤有机质、水解性氮、有 效磷、速效钾呈不规则的块状分布,随机性较强。土 壤有机质、水解性氮、速效钾的高值区主要在富源、 罗平;土壤有效磷较高的区域集中在陆良、罗平。上 述分析可见,在曲靖烟区应大力推行分区划片精准施 肥,促进区域间土壤养分平衡,为优质烟叶生产创造 适宜的土壤条件。

# 2.3 土壤养分空间变异的影响因素

**2.3.1** 土壤类型 由表 9 可知, 6 种类型土壤 pH 均值为 6.15~6.78, 黄壤 pH 最高, 红壤最低, 变异

表 8 土壤 pH 和主要养分含量的空间变异特征

Table 8 Geospatial feature values of soil pH and main nutrients

土壤养分	理论模型	块金值	基台值	块基比(%)	变程(km)	决定系数 R <sup>2</sup>	残差 RSS
pН	指数模型	0.001 6	0.006 7	23.88	2.456	0.612	$6.012 \times 10^{-6}$
有机质	高斯模型	0.022 5	0.073 4	30.65	3.907	0.905	$3.257 \times 10^{-4}$
水解性氮	高斯模型	0.031 0	0.073 5	42.18	4.102	0.876	$2.643 \times 10^{-4}$
有效磷	线性模型	0.074 1	0.089 2	83.07	4.368	0.714	$7.627 \times 10^{-4}$
速效钾	线性模型	0.065 4	0.092 1	71.01	4.291	0.627	$1.282 \times 10^{-3}$

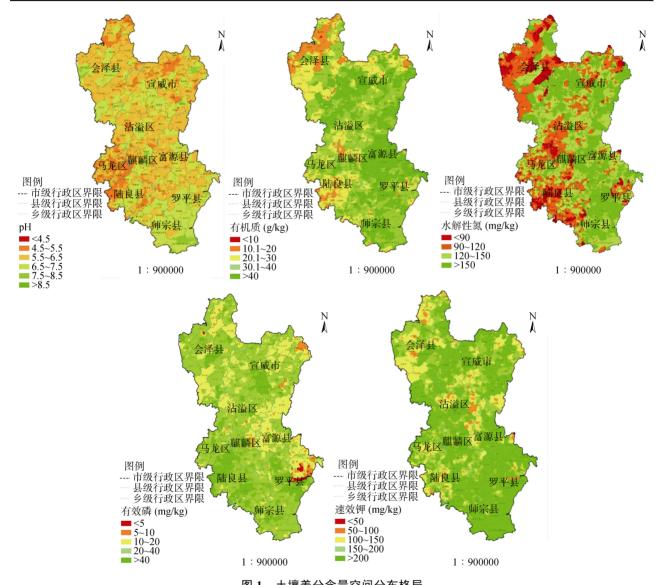


图 1 土壤养分含量空间分布格局
Fig.1 Spatial distribution of soil nutrients

系数 3.86% ~ 9.22%,属弱变异程度。土壤有机质以石灰岩土最高,紫色土最低,各类土壤均值范围为29.04~44.83 g/kg,变异系数23.54%~39.05%,达中等变异程度。土壤水解性氮以黄壤最高,紫色土最低,各类土壤均值为117.95~159.21 mg/kg,变异系数21.72%~33.93%,属中等变异程度。各类土壤有效磷均值为27.57~41.43 mg/kg,以紫色土最高,新积

土次之,石灰岩土最低,变异系数 34.93%~79.90%,属中偏强变异。各类土壤速效钾均值为 204.49 ~312.02 mg/kg,以紫色土最高,新积土次之,红壤最低,变异系数 25.04%~51.01%,属中等变异程度。总体来看,新积土水解性氮、有效磷、速效钾含量丰富;紫色土有机质低,有效磷、速效钾含量高;土壤类型的差异可为烤烟施肥提供参考。

表 9 不同	司类型土壤 pH	和主要养分	含量统计信息
--------	----------	-------	--------

Table 9	Statistical information	of pH and main	nutrient contents	in different tobacc	o-planting soil types

土壤	рН		有机质(g/	kg)	水解性氮(m	g/kg)	有效磷(mg	/kg)	速效钾(mg/l	kg)
类型	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系
	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)
红壤	$6.15 \pm 0.25 \text{ d}$	3.86	$34.71 \pm 8.17$ c	23.54	$125.15 \pm 42.46 d$	33.93	$31.48 \pm 14.73$ c	46.79	$204.49 \pm 104.32 \text{ f}$	51.01
黄壤	$6.78 \pm 0.57 \text{ a}$	9.22	$37.46 \pm 10.25 \text{ b}$	27.36	$159.21 \pm 36.71$ a	23.06	$34.95 \pm 25.62 \text{ b}$	73.30	$251.37 \pm 84.91$ c	33.78
紫色土	$6.39\pm0.42\ b$	6.28	$29.04 \pm 11.34 \ d$	39.05	$117.95 \pm 30.15$ e	25.56	$41.43 \pm 17.45 a$	42.12	$312.02 \pm 78.13$ a	25.04
新积土	$6.34 \pm 0.39 \ b$	5.99	$38.49 \pm 12.06 \ b$	31.33	$145.92 \pm 40.27 \text{ b}$	27.60	$36.84 \pm 12.87 \ b$	34.93	$271.56 \pm 92.47 \text{ b}$	34.05
水稻土	$6.27\pm0.48~c$	7.23	$35.27 \pm 9.49$ c	26.91	$131.44 \pm 38.34$ c	29.17	$35.72 \pm 28.54 \text{ b}$	79.90	$216.78 \pm 65.24$ e	30.10
石灰岩土	$6.72 \pm 0.61$ a	9.08	$44.83 \pm 10.92 \ a$	24.36	$154.57 \pm 33.58 a$	21.72	$27.57 \pm 20.98 \ d$	76.10	234.71 ± 113.56 d	48.38

2.3.2 土壤质地 由表 10 可知,各类质地土壤 pH 均值为 6.15~6.84,砂壤土 pH 最高,中壤土最低,变异系数 7.93%~18.57%,为弱变异程度。土壤有机质以重壤土最高,砂壤土最低,各种质地土壤均值为 28.54~42.57 g/kg,变异系数 4.45%~9.27%,属弱变异程度。土壤水解性氮以重壤土最高,砂壤土最低,不同质地土壤均值为 104.27~131.61 mg/kg,变异系

数 23.14% ~ 40.89%,为中等变异程度。土壤有效磷均值为 29.16~41.49 mg/kg,以中壤土最高,砂壤土最低,变异系数 39.75%~55.71%,属中等变异。土壤速效钾均值为 164.91~275.46 mg/kg,以轻黏土最高,中壤土最低,变异系数 36.50%~73.62%,变异程度较高。重壤土和轻黏土的水解性氮、速效钾含量显著高于其他土质。

表 10 不同土壤质地土壤 pH 和主要养分含量统计信息 Table 10 Statistical information of pH and main nutrients in soils with different textures

质地	pН		有机质(g/kg)		水解性氮(mg	水解性氮(mg/kg)		有效磷(mg/kg)		kg)
	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系	平均值±	变异系
	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)	标准差	数(%)
砂壤土	$6.84 \pm 1.27 \text{ a}$	18.57	28.54 ± 1.27 e	4.45	$104.27 \pm 32.56$ c	31.23	$29.16 \pm 13.46 \text{ f}$	46.16	$179.25 \pm 93.18$ e	51.98
轻壤土	$6.43 \pm 0.51$ c	7.93	$41.36 \pm 2.62$ a	6.33	$112.38 \pm 41.82 \text{ b}$	37.21	$38.71 \pm 20.27 \text{ b}$	52.36	$193.67 \pm 102.29 \ d$	52.82
中壤土	$6.15 \pm 0.92$ e	14.96	$35.16 \pm 1.81 d$	5.15	$113.59 \pm 29.31 \text{ b}$	25.80	$41.49 \pm 17.81$ a	42.93	$164.91 \pm 121.41 \text{ f}$	73.62
重壤土	$6.26 \pm 0.81$ e	12.94	$42.57 \pm 2.09$ a	4.91	$131.61 \pm 35.15$ a	26.71	$35.85 \pm 14.25 \text{ c}$	39.75	$237.12 \pm 86.55 \text{ b}$	36.50
中黏土	$6.54 \pm 0.95 \ b$	14.53	$37.23 \pm 3.45$ c	9.27	$109.52 \pm 44.78$ c	40.89	$32.51 \pm 18.11 d$	55.71	$215.38 \pm 111.94 c$	51.97
轻黏土	$6.37 \pm 0.72 d$	11.30	$39.48 \pm 1.91 \text{ b}$	4.84	$127.45 \pm 29.49$ a	23.14	$30.27 \pm 12.63$ e	41.72	$275.46 \pm 81.37$ a	29.54

- 2.3.3 气候因素 由表 11 可知,不同植烟区域内, 气候因素对土壤养分含量影响不同。平均气温与会泽土壤有机质、水解性氮及罗平土壤的 pH、有机质、水解性氮、有效磷、速效钾呈显著负相关。年降雨量与 9 个植烟县土壤 pH 呈显著负相关,与有机质(罗平)、水解性氮(罗平)、有效磷(会泽、罗平、宣威)、速效钾(沾益、麒麟)呈显著负相关。年蒸发量与 9 个植烟县土壤有机质、水解性氮呈显著或极显著负相关,与罗平、沾益和麒麟的土壤有效磷呈显著或极显著页相关,与罗平、沾益和麒麟的土壤有效磷呈显著或极显著页相关,与
- **2.3.4** 施肥因素 根据调查,曲靖罗平烟区平均 氮、磷和钾投入量分别为 69.3、138.6 和 207.9 kg/hm², 其他烟区平均氮、磷和钾施用量分别为 105.0、210 和 315 kg/hm²。部分农户以追求最大的单叶重提高单

株生产力,持续过量地施用氮磷钾依然普遍。由表 12 可知,土壤 pH 与施钾量(硫酸钾)呈极显著负相关,有机质、水解性氮与施氮磷量(普通过磷酸钙)呈极显著负相关,土壤有效磷与施磷、钾量分别呈显著和极显著正相关,速效钾与施钾量呈极显著正相关。

# 3 讨论

#### 3.1 土壤 pH

在本研究中,植烟土壤 pH 变幅 4.16~8.50,均值 6.30,集中分布在弱酸性至中性等级,处于适宜水平,在马龙、会泽和宣威土壤有酸化趋势,这与李强等<sup>[8]</sup>研究结果相似。从半方差分析结果看,结构因子(土壤类型、质地和降雨量)是引起 pH 空间变异性强的主导因素,随机因子(施肥、耕作)次之。一方面,曲靖土壤类型分红壤(48.87%)、黄壤(5.85%)、紫色土

表 11 土壤 pH 和主要养分含量与气象因素的相关性

Table 11 Correlation of soil pH and main nutrients with meteorological factors

区域	影响因素	pH	有机质	水解性氮	有效磷	速效钾
会泽	平均气温	-0.018	-0.778**	-0.736**	0.147	-0.274
	年降雨量	-0.455**	-0.129	-0.115	-0.555**	-0.194
	年蒸发量	-0.102	-0.463**	-0.432**	0.091	-0.535**
马龙	平均气温	-0.295	-0.114	-0.082	-0.102	-0.231
	年降雨量	-0.693**	-0.094	-0.060	-0.114	-0.263
	年蒸发量	-0.251	$-0.340^{*}$	$-0.227^{*}$	-0.136	-0.223
罗平	平均气温	-0.452**	-0.451**	$-0.430^{**}$	-0.544**	-0.535**
	年降雨量	$-0.370^{**}$	-0.583**	-0.594**	-0.438**	-0.340**
	年蒸发量	-0.246	$-0.189^*$	$-0.327^*$	0.423*	$-0.398^*$
陆良	平均气温	-0.263	-0.007	0.159	0.012	-0.142
	年降雨量	-0.075	0.098	0.093	0.137	-0.068
	年蒸发量	-0.255	$-0.233^*$	$-0.341^*$	0.002	-0.163
师宗	平均气温	0.079	0.081	-0.093	-0.273	-0.064
	年降雨量	-0.572**	-0.156	-0.181	0.065	-0.171
	年蒸发量	-0.169	$-0.412^*$	$-0.297^{*}$	0.118	0.157
沾益	平均气温	-0.221	-0.247	-0.223	0.229	-0.310
	年降雨量	$-0.362^*$	0.017	0.011	0.174	-0.695**
	年蒸发量	-0.239	$-0.349^*$	-0.693**	0.716**	0.017
麒麟	平均气温	-0.248	-0.301	-0.192	0.201	$-0.345^*$
	年降雨量	-0.567**	0.105	0.156	0.192	-0.718**
	年蒸发量	-0.319	$0.403^{*}$	0.781**	0.618**	0.019
富源	平均气温	0.231	0.095	-0.142	-0.304	-0.081
	年降雨量	-0.785**	-0.215	-0.189	0.095	-0.213
	年蒸发量	-0.307	$-0.472^{*}$	$-0.393^*$	0.211	0.268
宣威	平均气温	-0.201	-0.653**	-0.714**	0.149	-0.245
	年降雨量	-0.614**	-0.182	-0.136	-0.579**	-0.216
	年蒸发量	-0.119	-0.483**	-0.467**	0.085	-0.732**

注:表中相关分析所需气象数据来源于各县(区)气象局:\*、\*\*分别表示相关性达 P<0.05 和 P<0.01 显著水平(双侧),下表同。

表 12 土壤 pH 和主要养分含量与施肥量的相关性 Table 12 Correlation of soil pH and main nutrients with applied amounts of fertilizers

_	肥料	pН	有机质	水解性氮	有效磷	速效钾
	施氮量	0.095	-0.246**	0.197**	-0.015	-0.073
	施磷量	-0.127	-0.183**	$-0.122^{**}$	$0.088^*$	0.008
	施钾量	-0.369**	-0.029	-0.036	0.204**	0.311**

注:表中施肥量数据来源于曲靖市烟草公司每年供应量及生产调查。

(16.70%)、新积土(12.17%)、水稻土(15.92%)和石灰岩土(0.49%)<sup>[20]</sup>,成土母质与土壤类型有关,也影响土壤pH。如石灰岩、砂岩和页岩发育的石灰岩土 pH 较高;水稻土富含铁、锰氧化物,pH 缓冲范围接近中性,紫色砂页岩发育的紫色土、脱硅富铝化强的红壤 pH 相

对较低,水稻土的酸缓冲容量和缓冲强度均强于红壤<sup>[21]</sup>;研究区黄壤 pH 最高,红壤 pH 最低,其他土壤类型 pH 接近中性(表 9),这就是与不同母质有关。另一方面,按"卡庆斯基质地制"的双级分类法,曲靖土壤质地以砂壤土(0.68%)、轻壤土(2.78%)、中壤土(19.35%)、重壤土(47.30%)、中黏土(1.11%)、轻黏土(28.68%)和重黏土(0.11%)为主<sup>[14]</sup>,研究区内砂土和黏土 pH 相对较高,这可能是砂质土颗粒间空隙大通气透水,黏土胶体比表面积大,两类土吸附阳离子较多的缘故<sup>[21]</sup>。其次,较多的降雨导致土壤胶体上的代换性盐基大量淋失,氢离子取而代之,造成土壤 pH 降低<sup>[8]</sup>。土壤酸化受长期施用硫酸钾、过磷酸钙等生理酸性肥料,造成土壤有机质、盐基饱和度下降,H<sup>+</sup>和AI<sup>3+</sup>增加所致<sup>[23]</sup>。从影响因素看,土壤类型、土壤质

地、气候和施肥因素等结构性因子均对土壤 pH 产生影响,这与前人研究结果一致[8]。

#### 3.2 土壤养分

土壤有机质、水解性氮、有效磷和速效钾是影响 烟叶产质量的主控肥力因子[1], 研究区内土壤养分总 体较丰富。从半方差分析结果看,土壤有机质、水解 性氮和速效钾的变程大, 块基比为 25%~75%, 表明 各指标具有中度的空间自相关性,变异受自然(土壤 质地、气候)和人为因素共同作用。土壤有效磷块基 比大于 75%, 说明其区域分布随机性强, 随机因素是 导致土壤有效磷空间变异的主要因子。一方面, 曲靖 复杂的土壤质地是主控因子。有研究显示,土壤颗粒 大可增强土壤通透性,促进有机质矿化,高黏粒含 量的土壤对养分的吸收和固定力强, 质地越重的土 壤有机质、有效磷和速效钾含量越高,土壤养分富 集明显[6-7],本文结果与此一致(表 10)。另一方面, 土壤养分形成受雨热条件的影响。研究表明, 雨热格 局控制着土壤有机质合成和分解动态平衡,土壤有机 质含量随蒸发量增加而递减[6]。高温和多雨影响土壤 矿物的分化速率、养分淋溶强度,从而影响有效磷产 生[24],降雨对红壤表层和下层有效磷的空间分布大 于棕壤、褐土[25]。高降雨量和蒸发量促进速效钾在 土体中的淋洗,使钾素不易被土壤固定[11]。但在本研 究中, 土壤水解性氮、有效磷、速效钾含量受雨热条 件的影响与其所处环境条件不同而异(表 11)。其次, 农户过量施用氮磷钾肥是造成土壤异质性加大的重 要因子(表 12)。据报道,在曲靖中高肥力植烟土壤上, 减施当前氮磷钾用量的 10%, 可显著提高烟叶产值、 烟叶品质及肥料利用率[26]。磷肥施入土壤后被土壤 矿物吸附固定,造成磷素移动性差,当季利用率低, 在土壤中不断积累,磷的容量和强度增加[27]。综上 所述,在曲靖中高肥力植烟土壤上,应控制氮磷钾施 肥量,增加有机肥替代化肥或有机无机复混肥投入, 注意营养元素间的互作关系(表 12), 其中磷可尝试应 用"启动性施磷"和"隔年施磷技术"[28],以促进 土壤可持续利用和保障烟叶提质增效。

#### 3.3 土壤养分动态变化

将本研究结果与李强等<sup>[13,29]</sup>研究结果进行比较,显示 2017—2020 年土壤 pH 达 6.30,较 2008 年下降 0.21,总体呈现下降趋势,其中马龙、会泽和宣威部分土壤有酸化趋势,这主要与在这时期内硫酸钾、过磷酸钙施用量较大,以及前作玉米、马铃薯收获带走大量盐基离子<sup>[30]</sup>有着密切联系。曲靖土壤有机质含量均值由 2008 年的 27.36 g/kg 提高到 32.83 g/kg,总

体呈现上升趋势,这与这期间研究区推广有机肥、绿肥还田有关。土壤水解性氮、有效磷和速效钾含量均值分别由 2008 年的 97.37、20.45 和 180.29 mg/kg 提高到 125.42、29.92 和 270.38 mg/kg,总体呈现上升趋势,主要原因在于研究区烟田土壤的利用强度较高,为获得稳定的烤烟产质量,磷肥、复合肥、钾肥(硫酸钾、硝酸钾)施用量较大。

# 4 结论

曲靖植烟土壤 pH处于适宜水平,但在马龙、会泽和宣威土壤有酸化趋势。有机质、水解性氮、有效磷和速效钾含量总体较丰富。在全市尺度上,土壤pH 的空间变异受自然因素(土壤类型、质地和降雨)的影响;土壤有机质、水解性氮和速效钾的空间变异受自然和人为因素(施肥)共同作用;土壤有效磷的空间变异受人为因素(肥料施用)主控。土壤养分存在明显的空间分布和局部空间聚集,养分失衡严重,烤烟生产中应控制氮磷钾施肥量,采用推行分区划片精准施肥,有机肥替代化肥或有机无机复混肥,确保烤烟优质适产和降低环境污染。

### 参考文献:

- [1] 吴杰,李向鹏,陈鑫,等. 重庆市涪陵区植烟土壤养分的适宜性评价及变异分析[J]. 土壤, 2020, 52(1): 106-112
- [2] 张久权,张瀛,黄一兰,等. 土地整理后土壤理化性状和烤烟产质量空间变异[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1232-1239.
- [3] Bui E N, Henderson B L. C: N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 553-568
- [4] Lin H S, Wheeler D, Bell J, et al. Assessment of soil spatial variability at multiple scales[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 271–290.
- [5] 安永龙, 万利勤, 李霞, 等. 承德市土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 119-131.
- [6] 张一扬, 粟深河, 林北森, 等. 靖西市植烟土壤有机质含量的时空变异特征[J]. 土壤, 2020, 52(1): 202–206.
- [7] 毛伟, 李文西, 陈明, 等. 扬州市耕地土壤有机质含量 30 年演变及其驱动因子[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(4): 25-31.
- [8] 李强, 张芸萍, 解燕, 等. 曲靖植烟土壤 pH 分布特征及 其影响因素研究[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 887-895.
- [9] 朱梓弘,朱同彬,杨霖,等.中国土壤碱解氮含量与影响因子的空间关系研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2199-2207.

- [10] 向德明, 闫晨兵, 黎娟, 等. 湘西植烟土壤主要养分时 空变异特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(5): 852-859.
- [11] 金明清, 彭月月, 王佩, 等. 四川省盐源县植烟土壤氮 磷钾空间变异特征及影响因素[J]. 土壤, 2016, 48(5): 984-991.
- [12] 潘瑜春, 刘巧芹, 阎波杰, 等. 采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(2); 257-262.
- [13] 李强,周冀衡,杨荣生,等.曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价[J].应用生态学报,2011,22(4):950-956
- [14] 杨荣生. 曲靖市植烟土壤分析与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 70-71.
- [15] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [16] 王敏, 南春波, 王占华, 等. NY/T 1377—2007 土壤 pH的 测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [17] 任意,辛景树,田有国,等.NY/T1121.6—2006 土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [18] 焦如珍, 董玉红, 孙启武. LY/T1228—2015 森林土壤氮的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [19] 辛景树,郑磊,钟杭,等.NY/T1121.7—2014土壤检测第7部分:土壤有效磷的测定[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [20] 侯小东, 刘新民, 杜咏梅, 等. 曲靖土壤类型分布及养分特征[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(1): 45-50.

- [21] 张东, 扈强, 杜咏梅, 等. 植烟土壤酸化及改良技术研究进展[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(5): 113-118.
- [22] 陈江华, 李志宏, 刘建利, 等. 全国主要烟区土壤养分丰缺状况评价[J]. 中国烟草学报, 2004, 10(3): 14-18.
- [23] 周碧青, 邱龙霞, 张黎明, 等. 基于灰色关联-结构方程模型的土壤酸化驱动因子研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1233-1242.
- [24] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其 影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 945-952
- [25] 脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 等. 滇中高原降雨对不同地 类土壤磷素、有机质和pH变化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 942–950.
- [26] 余小芬,解燕,杨树明,等.减施氮磷钾肥和氮肥基追比对云南曲靖烤烟产质量及养分利用的影响[J].西南农业学报,2020,33(4):848-854.
- [27] 李寿田,周健民,王火焰,等.不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J].土壤学报,2003,40(6):908-914.
- [28] 李强, 戴美玲, 向德明, 等. 湘西喀斯特区植烟土壤有效 磷时空变异及风险评估[J]. 土壤, 2018, 50(1): 181–189.
- [29] 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.
- [30] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1497–1505.