

DOI: 10.11766/trxb201907240386

田育天, 李湘伟, 谢新乔, 孙 华, 杨继周, 林云红, 戴勋, 胡保文, 孙维侠, 史学正, 沈晨. 云南典型植烟土壤通气孔隙及其主控因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (6): 1430–1438.

TIAN Yutian, LI Xiangwei, XIE Xinqiao, SUN Hua, YANG Jizhou, LIN Yunhong, DAI Xun, HU Baowen, SUN Weixia, SHI Xuezheng, SHEN Chen. Soil Aeration Porosity in Typical Tobacco-planting Soils and Its Main Controlling Factors in Typical Tobacco-planting Soil in Yunnan Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (6): 1430–1438.

云南典型植烟土壤通气孔隙及其主控因素研究*

田育天¹, 李湘伟¹, 谢新乔¹, 孙 华², 杨继周¹, 林云红¹, 戴 勋¹, 胡保文¹,
孙维侠^{3†}, 史学正³, 沈 晨³

(1. 红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南玉溪 653100; 2. 玉溪市烟草公司峨山县分公司, 云南玉溪 653200; 3. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 植烟土壤通气性对于烤烟生长发育和品质提升具有重要意义。了解云南典型植烟区土壤通气性质, 研究植烟土壤通气孔隙的物理适宜性, 探讨影响植烟土壤孔隙度的关键因子。以云南省玉溪市华宁县青龙镇、宁州镇和楚雄市子午镇的典型植烟区土壤为研究对象, 按照耕作层和犁底层分别采集典型植烟区土壤样品, 分析土壤基本理化性质, 并利用沙箱法测定土壤通气孔隙, 对土壤理化性质与通气孔隙进行方差分析和相关分析, 通过传递函数建立土壤通气孔隙的预估模型。三个典型植烟区土壤质地均以黏壤土为主, 占总样品数的 40%左右, 壤土次之; 土壤容重均值均介于 1.3~1.5 g·cm⁻³ 之间, 适宜烟叶生长; 土壤有机质含量较高, 供氮能力强, 可满足烤烟生长养分需求; 土壤通气孔隙均值在 5.9%~15.1% 之间, 整个研究区域土壤通气孔隙总体偏低, 且不同区域空间差异较大。相关分析结果表明, 土壤通气孔隙主要受土壤中粉粒和黏粒含量影响, 与粉粒含量呈极显著正相关, 而与黏粒含量呈显著负相关, 因此可根据粉粒和黏粒含量对土壤通气孔隙进行粗略预测。植烟区应尽可能选择壤土或砂质壤土, 以有效维持植烟土壤的通气性, 达到提升烟叶品质的目的。

关键词: 植烟土壤; 通气孔隙; 主控因素; 云南烟区

中图分类号: S152; S159 **文献标志码:** A

Soil Aeration Porosity in Typical Tobacco-planting Soils and Its Main Controlling Factors in Typical Tobacco-planting Soil in Yunnan Province, China

TIAN Yutian¹, LI Xiangwei¹, XIE Xinqiao¹, SUN Hua², YANG Jizhou¹, LIN Yunhong¹, DAI Xun¹, HU Baowen¹,
SUN Weixia^{3†}, SHI Xuezheng³, SHEN Chen³

(1. Hongta tobacco (group) Co. Ltd., Yuxi Yunnan 653100, China; 2. Eshan branch of Yuxi tobacco Co. Ltd., Yuxi Yunnan 653200, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

* 红塔烟草(集团)有限公司科技项目(HT2016-6221)资助 Supported by the Hongta tobacco (group) co., LTD. Technology project (No. ht2016-6221))

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wxsun@issas.ac.cn

作者简介: 田育天(1968—), 男, 四川内江人, 农艺师, 主要从事烟草农业科技研究和原料基地管理。E-mail: tyt@hongta.com

收稿日期: 2019-07-24; 收到修改稿日期: 2019-11-26; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-12-13

Abstract: Soil air capacity is very important to growth and quality of tobacco. In soils poor in air capacity, tobacco has its leaves expanding slowly at its early growth stage and getting thickened and inadequately expanded at its late growth stage because of continuous nitrogen release from the soil, thus seriously affecting quality and flavor of its flue-cured leaves. **【Objective】** This study was oriented to investigate soil air capacity of the tobacco-planting areas typical of Yunnan Province, and explore relationship of soil aeration porosity and soil physical properties with tobacco growth and main factors influencing soil aeration porosity so as to find effective ways to improve quality and yield of the tobacco in Yunnan Province. **【Method】** For this study, field experiments were laid out in three tobacco planting areas typical of Yunnan Province, i.e. in Qinglong Town, Ningzhou Town of Huanning County, Yuxi City and Ziwu Town in Chuxiong City. A total of 38 soil samples were collected from the topsoil and subsoil layers of the experimental tobacco fields for analysis of basic physico-chemical properties, including soil texture, soil bulk density, soil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) contents, pH and so on. Soil aeration porosity of the soil samples was measured with the sand-kaolin box method. Variance analysis and correlation analysis were performed of the obtained data to explore relationship of soil aeration porosity with soil physico-chemical properties. In the end, a soil aeration porosity prediction model was established based on transfer function of the soil physico-chemical properties. **【Results】** Results show that in line with the USDA standard for soil texture classification, the soil samples collected from the three areas were dominantly of clayey loam in soil texture, making up about 40% of the total, then of loam and the least of silty loam, which accounted only for 7.9% of the total; bulk density of the soils in the three areas varied from 1.3 to 1.5 g·cm⁻³, a suitable range for tobacco growth in Yunnan Province; soil organic matter (SOM) content and soil nitrogen supply capacity were high enough to meet the nutrient needs of tobacco for growth and to ensure quality and yield of the crop; and soil aeration porosity was found in the range of 5.9%-15.1%, being on the low side as whole for the areas and varied quite much spatially between areas, with the one in Qinglong Town being the highest, at about 15.1%, which was followed by the one in Ningzhou Town and then the one in Ziwu Town, the lowest at about 9.4%, which is obviously inadequate to meet the need for cultivation of high quality tobacco. Correlation analysis shows that aeration porosity in tobacco-planting soils is mainly affected by silt and clay contents and ultra-significantly and positively related to silt content and negatively to clay content. Consequently, soil aeration porosity can be roughly estimated based on silt and clay contents in the soil. **【Conclusion】** The soils in the tobacco planting areas of Yunnan are mainly of loam and clayey loam in texture, and their soil bulk densities and nutrient contents are suitable for growth of flue-cured tobacco. But their soil aeration porosities are apparently inadequate for healthy growth and flavor development of tobacco. Soil aeration porosity is significantly related to silt and clay contents in the soil. Therefore, it is recommended that tobacco should be cultivated in soils, loam or sandy loam in texture, where high soil air capacity is available for healthy growth of quality tobacco. The findings in this study may serve as reference for local governments in zoning for cultivation of flue-cured tobacco.

Key words: Tobacco-planting soils; Soil aeration porosity; Main controlling factors; Tobacco Areas of Yunnan Province

烤烟是云南省的重要经济作物，其种植面积和产量常年居全国首位^[1]。植烟土壤物理性质对烤烟长势和品质有重要影响^[2]。云南植烟土壤多为黏性红壤，加上大田生长季雨热同期，土壤通透性差，这会制约烤烟生长的营养需求，导致生长前期叶片扩展慢，生长后期土壤持续释放氮素，烟叶增厚，开片不足，严重影响烤烟品质风格的形成^[3]。因此，深入研究云南典型植烟土壤的通气孔隙状况及其主要影响因子，进而综合评估植烟土壤物理性状的区域适宜性，可为当地优质烤烟种植区划、区域烤烟总体品质提升等提供理论依据。

近年来有关植烟土壤物理性质的研究，主要集中在土壤质地、容重和通气孔隙等方面。在土壤质地研究方面，宋莹丽等^[4]对全国 8 个省份的植烟土壤质地与烟叶品质的关系研究表明，适宜的高砂粒和低黏粒含量的土壤有利于烟叶优质品质的形成。在土壤容重研究方面，祖朝龙等^[5]在皖南烟区水稻土中掺播体积比为 5%~50%稻壳后，土壤容重由 1.3~1.4 g·cm⁻³降至 0.9~1.2 g·cm⁻³，烟株农艺性状显著提高。贾国涛等^[6]研究发现腐熟秸秆可以显著降低土壤容重，降低土壤紧实程度。邓小华等^[7]研究表明绿肥翻压 3 年后植烟土壤容重最高可降低

23.87%。在土壤通气孔隙研究方面,李云飞等^[8]对陕西宝鸡黏土烟区进行掺砂(10%、20%、30%和40%)后发现,与不掺砂相比,掺砂处理可提高土壤孔隙度10.2%~11.5%。孙益权等^[9]在贵州毕节黏重植烟黄壤上添加7.5%、15.0%和22.5%的多孔改良剂后,土壤通气孔隙度分别增加了2.7%、8.6%和10.6%,多孔改良剂的体积比每增加1%,土壤通气孔隙将增加0.5%。

虽然对植烟土壤物理性状的研究受到国内外学者的广泛关注,且有较多报道,但迄今为止,对我国植烟区土壤通气性量化表征的研究报道并不多见。因此,为了解云南典型植烟土壤的通气状况以及物理适宜性,本研究从云南省玉溪市和楚雄州中分别选取华宁县和楚雄市作为研究区,采集典型片区的代表性烟田的耕作层和犁底层土样(之所以同时研究犁底层,是因为调查发现,由于烟田耕作普遍采用小型旋耕机,其耕作深度仅为8~10 cm,加之云南近年来干旱频发,烤烟根系生长更加难以穿透犁底层),并测定分析了土壤理化性质,旨在通过分析云南典型烟区植烟土壤的物理性质,尤其是通气孔隙的特征、规律和区域特点,为植烟土壤物理性质改良和烟叶品质提升提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

华宁县地处云南省中部,位于23°59'~24°34'N,102°49'~103°09'E之间,海拔介于1 110~2 663 m,平均海拔1 620 m,属于亚热带半湿润高原季风气候,年均气温16℃,降雨量916 mm左右,日照时数2 115~2 289 h,是典型的山区农业县,主要种植甘蔗、烤烟、油麻、蔬菜和柑桔等作物。在华宁县代表烟区选择青龙镇和宁州镇作为采样点,青龙镇土壤类型主要有红壤、紫色土和水稻土,成土母质为冲积岩、页岩和紫红色砂岩;宁州镇土壤类型主要有红壤和水稻土,成土母质为冲积岩和紫红色砂岩。

楚雄市位于云南省中部偏北,处于24°13'~26°30'N,100°43'~102°32'E之间,平均海拔约1 773 m,属亚热带低纬高原季风气候,年均14.8~21.9℃,降水量864 mm,日照时数2 414 h。土壤类型共有19类,以紫色土分布最广,红壤次之,主要

种植烤烟、茶叶、薯类、豆类等作物^[10]。地势西北高,东南低,从西北到东南倾斜,全市海拔区间在691~2 916 m。该地区气候冬干夏湿,气温日差较大,年降雨量为864 mm,年均气温为15.6℃。在楚雄市代表烟区选择子午镇作为采样点,子午镇土壤类型主要为紫色土和水稻土,成土母质为页岩和紫红色砂岩。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采自华宁县代表性烟区的青龙镇、宁州镇和楚雄市代表性烟区子午镇,分别选择16、13和9块典型烟田,各采样点按深度将土层划分为耕层(表土层, Topsoil)和犁底层(表下层, Subsoil),各层分别采集环刀样(100 cm³)3个,分析样1份。在各采样点区域内,按五点混合取样随机采集土壤,用四分法制成分析样约1 kg,带回室内风干、磨碎,过2 mm筛备用。按云南植烟区主要样品采集地进行分类分析,每个采样区的采样点数大于等于3。

1.3 测定项目与方法

土壤容重采用环刀法(100 cm³);土壤通气孔隙采用砂箱法^[11-12],将原状土壤环刀置于水中浸泡至饱和(24 h)后称重,再放入Eijkelkamp Sandbox(08.01)砂箱,将压力水头设置为60 cm,饱和含水量与60 cm压力水头下的含水量差即为>50 μm的通气孔隙度;土壤机械组成采用吸管法测定,土壤质地分类标准采用美国制;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定;土壤pH采用电位测定法测定^[13]。

1.4 数据处理与分析

数据采用Microsoft Excel 2016软件进行统计分析并作图,采用IBM SPSS 22.0对土壤各项指标进行显著性检验与分析。采用单因素ANOVA进行方差分析,Duncan法进行多重比较;相关分析采用Spearman法。

2 结 果

2.1 云南典型植烟土壤基本理化性质

土壤基本理化性质描述统计结果如表1所示。土壤容重是指田间自然状态下单位容积土体(包括土粒和孔隙)的质量或重量,是衡量土壤结构的重要指标。郝葳等提出,适宜烟草生长的土壤容重为1.1~1.4 g·cm⁻³^[14]。由表1可知,青龙、宁州和子午

耕作层容重均值为 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 数值均小于 $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 临界值。青龙、宁州和子午的犁底层容重均值分别为 1.3 、 1.5 和 $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其中宁州犁底层容重超出临界值。耕作层和犁底层的土壤均表现为青龙地区的土壤容重更小。

根据中国土壤养分评价标准^[15], 适宜烤烟生长的土壤 pH 范围为 $5.5\sim 7.0$ 。从表 1 可以看出, 青龙、宁州和子午的耕作层 pH 均值分别为 7.2 、 6.8 和 6.6 。其中, 宁州地区土壤 pH 的变幅较大, 为 $4.8\sim 8.2$ 。在犁底层中, 青龙地区的土壤 pH 变幅较大, 为 $5.3\sim 8.3$, 均值为 7.5 。三个采样区域中, 子午地区犁底层土壤 pH 最低, 为 6.8 。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要因子。已有研究表明, 植烟土壤有机质含量过高, 烟叶贪青晚熟; 有机质含量过低, 烤烟香气不足^[16]。从表 1 可以看出, 宁州地区耕作层土壤有机质含量在 $12.38\sim 30.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $23.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。比较三个采

样区的耕作层有机质含量, 子午地区耕作层土壤有机质含量最高, 为 $31.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在犁底层中, 青龙地区土壤有机质含量最高, 达 $26.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次为子午地区, 宁州地区土壤有机质含量最低, 仅为 $20.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。一般认为, 适宜烤烟生长发育的土壤有机质含量为 $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。青龙、宁州和子午地区有机质含量较高, 能满足烤烟生长的需求。

氮是烤烟生长发育必需的营养元素之一^[17]。由表 1 可知, 青龙耕作层土壤全氮含量处在 $0.83\sim 2.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $1.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。子午地区全氮含量变幅最大, 介于 $0.52\sim 3.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $1.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在犁底层中, 青龙地区的全氮极大值为 $2.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $1.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 宁州地区土壤全氮含量在 $0.62\sim 1.93 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $1.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。植烟土壤全氮含量最适范围为 $1.1\sim 1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。云南典型植烟区土壤全氮含量在 $1.3\sim 1.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 土壤供氮能力强。这表明云南典型植烟区土壤养分含量充足。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of the studied soils

采样地点 Sampling sites	层次 Layer	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		pH		有机质 SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		全氮 TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
		范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
		青龙 Qinglong	耕作层 ^①	1.02~1.42	1.3±0.1a	5.3~8.0	7.2±0.7a	13.08~42.10	26.4±9.0ab
	犁底层 ^②	1.10~1.50	1.3±0.1a	5.3~8.3	7.5±0.8a	11.53~47.44	26.6±9.5a	0.80~2.72	1.7±0.5a
宁州 Ningzhou	耕作层 ^①	1.12~1.68	1.3±0.2a	4.8~8.2	6.8±1.1a	12.38~30.88	23.0±6.2b	0.78~1.94	1.5±0.4a
	犁底层 ^②	1.35~1.73	1.5±0.1a	6.8~8.1	7.5±0.5a	8.76~30.27	20.9±7.8a	0.62~1.93	1.3±0.5a
子午 Ziwu	耕作层 ^①	1.19~1.47	1.3±0.1a	5.7~7.9	6.6±0.9a	11.66~47.86	31.0±12.9a	0.52~3.11	1.9±1.0a
	犁底层 ^②	1.32~1.51	1.4±0.1a	5.5~8.1	6.8±0.9b	8.21~39.74	25.7±12.4a	0.50~2.68	1.7±0.9a

注: 平均值±标准差, 同一列中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。Note: Average±standard difference. Different letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$). The same below. ①Topsoil, ②Subsoil

2.2 云南典型植烟土壤颗粒组成

根据美国农业部 (USDA) 土壤颗粒分级 (砂粒, $0.05\sim 2.00 \text{ mm}$; 粉粒, $0.002\sim 0.05 \text{ mm}$; 黏粒, $< 0.002 \text{ mm}$) 和质地分类, 由表 2 可知, 青龙地区耕作层土壤砂粒、粉粒和黏粒比例均值分别为 34.3% 、 42.0% 和 23.7% , 以粉粒为主。犁底层土壤的粉粒占比为

41.3% , 三者中占比最高。宁州地区的耕作层土壤砂粒、粉粒和黏粒比例均值分别为 32.2% 、 39.6% 和 28.2% , 以粉粒为主。在犁底层中, 粉粒含量最高, 达 39.6% , 其次为砂粒, 黏粒含量最低。子午地区的耕作层土壤以粉粒含量最高, 变化范围为 $25.88\%\sim 56.16\%$, 均值为 39.0% 。犁底层同样粉粒含量最高, 达 37.7% 。

表 2 土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle size composition

层次 Layer	采样地点 Sampling sites	颗粒组成 Particle composition					
		砂粒 Sand		粉粒 Silt		黏粒 Clay	
		范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
耕作层 Topsoil	青龙 Qinglong	13.88~61.96	34.3±12.1a	23.16~61.24	42.0±10.1a	14.88~31.88	23.7±4.6a
	宁州 Ningzhou	16.68~58.6	32.2±11.0a	33.12~51.00	39.6±5.9a	17.56~39.80	28.2±7.8a
	子午 Ziwu	12.48~54.52	33.7±15.6a	25.88~56.16	39.0±10.4a	17.96~34.08	27.3±6.1a
犁底层 Subsoil	青龙 Qinglong	21.24~60.56	33.5±10.2a	24.76~56.32	41.3±7.8a	14.68~36.72	25.2±5.0a
	宁州 Ningzhou	16.00~62.32	32.8±13.8a	28.96~43.08	38.2±5.3a	8.72~36.40	29.0±9.2a
	子午 Ziwu	12.28~56.72	34.9±17.0a	24.16~55.24	37.7±10.9a	18.44~36.08	27.5±6.9a

将云南典型植烟区全部采样点的土壤质地进行分类统计, 计算各类所占比例, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 云南典型植烟区土壤质地主要有砂质壤土、粉砂壤土、壤土、粉砂质黏壤土、黏壤土 5 类, 其中以黏壤土占比最高, 达 39.5%; 壤土次之, 占 31.6%; 粉砂壤土仅占 7.9%。

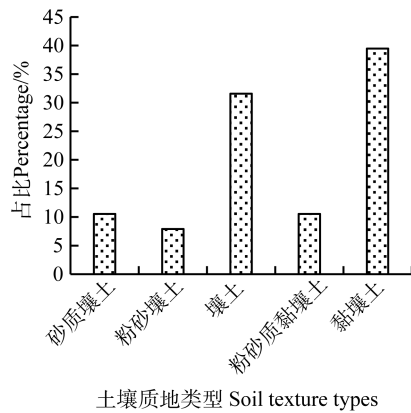


图 1 云南典型植烟区土壤质地占比

Fig. 1 Proportion of soils by texture in the tobacco planting areas typical of Yunnan Province

2.3 云南典型植烟土壤通气孔隙

土壤通气孔隙度是指气体填充土壤孔隙的体积比例^[13], 一般定义为>50 μm 的孔隙度^[18]。从表 3 云南典型植烟区土壤通气孔隙度来看, 青龙、宁州和子午的耕作层土壤通气孔隙度均值分别为 15.1%、10.6%和 9.4%, 青龙地区的通气孔隙度最高,

宁州和子午地区与青龙地区相比, 通气孔隙度分别减少了 11.3%和 29.8%。

在犁底层土壤中, 青龙地区的土壤通气孔隙度最高, 达 10.8%, 宁州和子午地区与青龙地区相比, 通气孔隙度分别减少了 40.7%和 45.4%。其中, 宁州地区土壤通气孔隙最小值仅为 0.75%。

郝葳和田孝华^[14]提出, 适宜烟草生长的土壤通气孔隙度介于 15.9%~19.6%。从图 2 可以看出, 云南典型植烟区土壤通气孔隙度均值最大为 15.1%, 最小为 5.9%, 均低于临界值 15.9%。因此, 青龙、宁州和子午地区存在通气孔隙不足的问题。

表 3 土壤通气孔隙度

Table 3 Soil aeration porosity

层次 Layer	采样地点 Sampling sites	通气孔隙度	
		Soil aeration porosity/%	
		范围 Range	均值 Mean
耕作层 Topsoil	青龙 Qinglong	6.82~23.72	15.1±5.1a
	宁州 Ningzhou	6.67~12.90	10.6±2.3b
	子午 Ziwu	4.12~13.65	9.4±3.5b
犁底层 Subsoil	青龙 Qinglong	2.27~17.97	10.8±4.4a
	宁州 Ningzhou	0.75~12.70	6.4±3.5b
	子午 Ziwu	3.25~8.60	5.9±1.9b

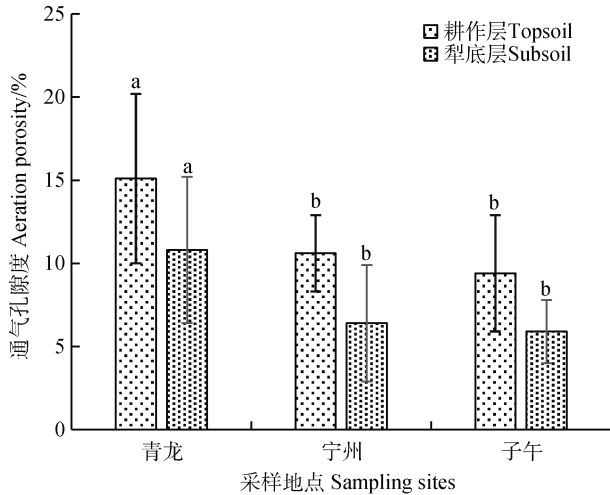


图 2 云南典型植烟区土壤通气孔隙度

Fig. 2 Soil aeration porosity in the major tobacco planting areas in typical of Yunnan Province

3 讨 论

3.1 云南典型植烟土壤物理性质适宜性评价

土壤质地是影响烤烟品质的重要因子之一。郝葳和田孝华^[14]认为优质烟区适宜的土壤质地为砂壤土至中壤土。陈江华等^[15]认为最适宜的植烟土壤是壤砂土和砂壤土，黏粒含量在 10%~20%之间；美国研究则认为在砂土和砂壤土上种植的烟草最好。亢贵霞等^[19]研究表明砂土抗旱能力弱，保肥性能差；黏土通气性差，有机质含量丰富；壤土兼有两者的优点，是理想的植烟土壤。云南地区 11 月至次年 5 月的冬春季节为旱季，降水量较少，砂土保肥能力差，养分易流失。因此在云南地区，不能套用美国的标准。根据实地调查结果表明，壤土适宜，黏壤土和粉黏壤土较适宜，砂质壤土为不适宜。统计研究区土壤质地占比发现，青龙、宁州和子午地区土壤质地以黏壤土占比最高，占比达 39.5%；壤土次之，粉砂壤土占比最低，此地区耕性优良，土壤质地适合烟叶生长。

通气孔隙是指主要充满空气的孔隙，这部分孔隙不具有毛管引力，水分不能在其中保持，在重力作用下迅速排出或下渗补充地下水，成为通气的通道、故称为通气孔隙^[13]。玉溪地区地处低纬度高原区，大、暴雨集中于 6—8 月，此时正是烤烟生长的关键时期，高密度降雨量会导致土壤水分饱和，通气孔隙堵塞，不利于烤烟的生长。郝葳和田孝华^[14]

提出，适宜烟草生长的土壤通气孔隙度介于 15.9%~19.6%。本研究认为郝葳和田孝华的标准符合云南典型植烟区的情况，采用 15.9%作为临界值。从图 2 可以看出，云南典型植烟区土壤通气孔隙最高达 15.1%，最低仅为 5.9%，远远低于 15.9%的临界值，因此，华宁和楚雄地区均存在土壤通气不足的问题。

综合土壤质地和通气孔隙度等数据分析，可知 3 个典型研究区中青龙镇植烟土壤物理性质最好，结构疏松，孔隙结构良好，宁州和子午的土壤物理性质仍有待改善。

3.2 土壤通气孔隙度影响因子

土壤通气孔隙度受多种因素影响，主要包括土壤质地、土壤颗粒组成、土壤容重、施肥方式等。土壤质地是土壤通气孔隙大小的影响因子之一。土壤质地通过改变土壤的通气性能，对养分供应产生间接影响，进而影响烟叶产质量^[20]。植烟区土壤质地类型对烟草生长具有显著影响。云南典型烟区土壤主要质地类型为：粉砂壤土、粉砂质黏壤土、砂质壤土、壤土和黏壤土，根据不同土壤质地类型下土壤通气孔隙度统计结果（图 3）可知，在 5 种质地类型的植烟土壤中，耕层土壤，砂质壤土、壤土和粉砂壤土的通气孔隙度均较高，分别为 14.7%、12.8%和 12.2%，粉砂质黏壤土通气孔隙度最低，仅为 6.6%，耕层砂质壤土、壤土和粉砂壤土通气孔隙度较粉砂质黏壤土分别提高 121%、92.6%和 83.3%。犁底层土壤中，砂质壤土的通气孔隙度仍为最高，可达 10.7%，其次是壤土，其通气孔隙度也可达 10.0%，其余三种土壤的通气孔隙度均低于 10%，黏壤土、粉砂质黏壤土和粉砂壤土的通气孔隙度较砂质壤土分别降低了 30.9%、52.2%和 62.8%。综上可知通气孔隙对土壤质地影响较显著。

值得注意的是，粉砂质黏壤土质地的土壤通气孔隙度无论是在耕作层还是犁底层，孔隙度均较低，而粉砂壤土的犁底层通气孔隙相比耕作层明显减少，说明粉粒多的土壤更容易受到植烟过程中的耕作扰动，造成犁底层细颗粒堆积，阻塞通气孔隙。类似的结论也在一些研究中被发现，例如，Tester^[21]认为砂质土壤中具有较多的大孔隙是因为土壤的颗粒较大，且排列松散，颗粒间的孔隙不易受扰动而阻塞。王德盛等^[23]提出，相同容重条件下，不同类

型土壤导气率不同,即使土壤类型相同,土壤导气性能也不一定相同,河南郑州的砂粉土导气率约为鹤壁砂粉土的3倍~5倍,是由于郑州砂粉土的砂粒含量较鹤壁砂粉土高15.3%。这说明土壤类型中的土壤粒径含量不同对土壤通气性能也具有显著影响。

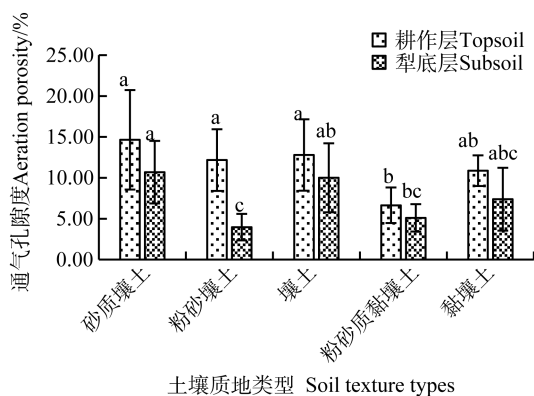


图3 不同质地条件下的云南典型植烟土壤通气孔隙度

Fig. 3 Soil aeration porosity of the tobacco fields relative to soil texture

为了验证土壤颗粒组成对土壤通气孔隙度的影响,对云南典型植烟土壤通气孔隙度和基本物理性质进行了相关性分析。一般认为砂土类粒间孔隙大,通气透水能力强,但本研究发现,土壤通气孔隙度与砂粒含量无关,而与粉粒含量呈显著正相关,相关系数为0.965;与黏粒含量呈负相关,相关系数为-0.818。这可能与土壤中的有机质含量有关,Brady和Weil^[23]认为当细质土壤中有有机质含量高于粗质土壤时,土壤中的总孔隙和大孔隙(>50 μm)较多,

有机质与细粒结合形成较大的团粒结构,团粒结构再排列形成较大的通气孔隙^[24]。与本研究的结论相同,五种质地的土壤中有有机质含量在同一水平,此时土壤通气孔隙度受质地影响最为显著,云南典型烟区中,质地较粗的砂质壤土和壤土通气性最好,其他土壤质地较细的植烟区可以通过增加有机质输入来提高土壤通气孔隙度。

比较三个采样区域耕作层和犁底层的通气孔隙度,发现从耕作层到犁底层,土壤通气孔隙度逐渐减小,这与人为的耕作活动有关。何海燕等^[25]在研究不同土壤利用方式下黑土的孔隙特征时发现,耕地土壤通气孔隙度随着取土深度逐渐减小,撂荒地土壤通气孔隙度高于耕地,因为撂荒后杂草生长,植物根系穿插有利于土壤通气孔隙恢复。

3.3 土壤通气孔隙预估

土壤通气孔隙度的传统测定方法是先测定出土壤总孔隙度和毛管孔隙度,再根据相关公式计算出^[18]。但关于通气孔隙度的计算公式标准不一,加之测定比较繁琐,在常规植烟土壤区域调查中,土壤通气孔隙一直被忽略,在烟叶产区很难收集到相关数据。因此,可以考虑根据土壤其他易获属性的数据建立土壤通气孔隙度的传递函数来预测。

这里选择影响较大且容易获取数据的粉粒和黏粒含量2个因子。在模型1中,以粉粒(Silt)含量为源数据,建立土壤通气孔隙度(AP)与粉粒含量的回归关系式(表4);在模型2中,以黏粒(Clay)含量为源数据,建立土壤通气孔隙度(AP)与黏粒含量的回归关系式。

表4 土壤通气孔隙度的回归方程

Table 4 Regression equation of aeration porosity (AP)

层次 Layer	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2	P
耕作层 Topsoil	1	$AP = -0.16 \times \text{Silt} + 18.19$	0.126	0.031
犁底层 Subsoil	2	$AP = -0.26 \times \text{Clay} + 18.22$	0.164	0.013
耕作层 Topsoil	1	$AP = -0.156 \times \text{Silt} + 14.22$	0.092	0.064
犁底层 Subsoil	2	$AP = -0.224 \times \text{Clay} + 14.08$	0.143	0.019

尽管本研究提出通过相对易获取的粉粒或黏粒含量,可以对土壤通气孔隙度进行粗略预测,但由于影响土壤通气孔隙度的因素较为复杂,不仅与土

壤本身的性状有关,不同耕作方式及种植制度等也会影响土壤的通气孔隙,这些因素导致其预测精度仍然较低(表4)。因此,对植烟土壤通气孔隙度的

精确预测，需要做进一步更加深入的研究。

4 结 论

云南典型植烟区土壤通气孔隙不足，土壤质地以壤土和黏壤土为主，土壤容重适宜，养分含量充足。土壤通气孔隙度受土壤质地类型影响显著，其中砂质壤土耕层和犁底层土壤通气孔隙度均为最高。土壤中粉粒和黏粒含量是土壤通气孔隙的主要影响因素。

参考文献 (References)

- [1] Ma W G, Zhou Y H, Liu X F, et al. Current status and outlook of flue-cured tobacco variety development in China[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, 24(1): 116—122. [马文广, 周义和, 刘相甫, 等. 我国烤烟品种的发展现状及对策展望[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(1): 116—122.]
- [2] Lin Y P, Zhou Q M, Wang Y J. Research progress on factors affecting growth, yield and quality of tobacco[J]. *Crop Research*, 2006, 20(5): 490—493. [林跃平, 周清明, 王业建. 影响烟草生长、产量和品质的因子的研究进展[J]. *作物研究*, 2006, 20(5): 490—493.]
- [3] Huang H G, Ban G J, Chen Y, et al. Effects of porous soil amendments on soil properties, yield and quality of flue-cured tobacco in Bijie[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1427—1437. [黄化刚, 班国军, 陈垚, 等. 多孔改良剂对毕节烟区土壤性状及烤烟产质量的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1427—1437.]
- [4] Song Y L, Chen C L, Jiao Z H, et al. Relationship of soil makeup in growing areas with quality and style character of tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2014, 47(7): 75—78. [宋莹丽, 陈翠玲, 焦哲恒, 等. 土壤质地分布与烟叶品质和风格特色的关系[J]. *烟草科技*, 2014, 47(7): 75—78.]
- [5] Zu C L, Xu J N, Niu Y, et al. Effects of rice-husk on soil texture and tobacco production[J]. *Soils*, 2011, 43(1): 107—112. [祖朝龙, 徐经年, 牛勇, 等. 稻壳掺播对土壤质地及烟叶生产的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 107—112.]
- [6] Jia G T, Yang Y F, Yang X L, et al. Influence of rotten straw on physical and chemical properties and enzyme activity of soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(9): 138—145. [贾国涛, 杨永锋, 杨欣玲, 等. 腐熟秸秆对植烟土壤理化性质和酶活性的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(9): 138—145.]
- [7] Deng X H, Shi N, Zhou M L, et al. Effects of green manure on physical and chemical properties of tobacco planting soils[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(2): 7—10, 20. [邓小华, 石楠, 周米良, 等. 不同种类绿肥翻压对植烟土壤理化性状的影响[J]. *烟草科技*, 2015, 48(2): 7—10, 20.]
- [8] Li Y F, Zhang L X, Liao C Y, et al. Effects of sand-mixed clay on nitrogen and potassium contents, photosynthetic characteristics and yields of flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(2): 85—89. [李云飞, 张立新, 廖超英, 等. 粘土掺砂对烤烟氮、钾含量和光合特性及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(2): 85—89.]
- [9] Sun Y Q, Wang M Y, Huang H G, et al. Study on aeration enhancement of yellow soil by a novel porous amendment[J]. *Soils*, 2019, 51(1): 121—126. [孙益权, 王美艳, 黄化刚, 等. 新型多孔改良剂增强黄壤通气性能研究[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 121—126.]
- [10] Pang T, Lin Q, Li Y. Effects of different soil type on tobacco main chemical component of K326 variety in Yunnan[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(16): 8897—8898, 8914. [逢涛, 林茜, 李勇. 云南烟区不同土壤类型对 K326 烤烟主要化学成分的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 8897—8898, 8914.]
- [11] Moret D, Arrúe J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 103—113
- [12] Wang H L, Tang X Y, Xian Q S, et al. Comparison of laboratory methods for determining water retention curves in purple soil[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2): 240—248. [王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 240—248.]
- [13] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[J]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[J]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [14] Hao W, Tian X H. Analysis and study on soil physical characters in high-quality tobacco-growing areas[J]. *Tobacco Science & Technology*, 1996, 29(5): 34—35. [郝葳, 田孝华. 优质烟区土壤物理性状分析与研究[J]. *烟草科技*, 1996, 29(5): 34—35.]
- [15] Chen J H, Liu J L, Li Z H. Integrated management of tobacco soil and tobacco nutrients in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [陈江华, 刘建利, 李志宏. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [16] Li T H. Effects of soil conditions on growth and quality of flue-cured tobacco[J]. *Seed Technology*, 2019, 37(4): 47—48. [李堂慧. 探析土壤条件对烤烟生长及品质的影响[J]. *种子科技*, 2019, 37(4): 47—48.]
- [17] Xu R, Wang X L, Chen L C, et al. Analysis of main soil nutrients state at tobacco planting area in Zaoyang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(25):

- 106—108. [徐锐, 王晓丽, 陈良存, 等. 枣阳市植烟土壤主要养分分析[J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (25): 106—108.]
- [18] Li Y Q, Zeng J Y. Discussion on the concept of soil ventilation pore and its determination method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1990, 21 (2): 87—88. [李映强, 曾觉延. 关于土壤通气孔隙概念及其测定方法的商榷[J]. 土壤通报, 1990, 21 (2): 87—88.]
- [19] Kang G X, Xu Y H, Wang Y C, et al. Analysis and zoning of tobacco planting soil in Bijie[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41 (20): 8496—8500. [亢贵霞, 徐宇航, 王玉川, 等. 毕节市植烟土壤分析与区划研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(20): 8496—8500.]
- [20] Li Y, Shao M A, Wang H Y, et al. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19 (4): 62—65. [李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 62—65.]
- [21] Tester C F. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil[J]. Soil Science Society American Journal, 1990, 54 (3): 827—831.
- [22] Wang D S, Zhang Z H, Lei H J, et al. Typical soil air conductivity of Henan Province[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2015, 31 (2): 162—166, 171. [王德胜, 张振华, 雷宏军, 等. 河南省代表性土壤导气性能研究[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2015, 31 (2): 162—166, 171.]
- [23] Brady N, Weil R. The nature and properties of soils[J]. 13th Ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [24] Zhang S Q, Wang P P, Wang C Q, et al. Effects of different tobacco cropping years on soil aggregate stability and its influential factors[J]. Soils, 2017, 49(6): 1229—1236. [张世祺, 王沛裴, 王昌全, 等. 不同植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响及其相关因素分析[J]. 土壤, 2017, 49 (6): 1229—1236.]
- [25] He H Y, Zhang D, Zhang Y, et al. Study of black soil micromorphological characters in different land-use type at Heilongjiang Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29 (4): 883—890. [何海燕, 张丹, 张瑜, 等. 不同土地利用方式下黑土土壤微形态特征研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29 (4): 883—890.]

(责任编辑: 檀满枝)