

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.027

王政, 刘久羽, 彭博, 等. 云南红壤坡耕地烤烟生长季土壤养分迁移特征. 土壤, 2023, 55(4): 918–924.

## 云南红壤坡耕地烤烟生长季土壤养分迁移特征<sup>①</sup>

王政<sup>1</sup>, 刘久羽<sup>1</sup>, 彭博<sup>1</sup>, 李博<sup>2</sup>, 阙宏伟<sup>1</sup>, 敖金成<sup>2\*</sup>, 刘加红<sup>3\*</sup>

(1 广西中烟工业有限责任公司, 南宁 530001; 2 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 3 云南省烟草公司曲靖市公司, 云南曲靖 655002)

**摘要:** 为实现坡耕地土壤保育和可持续利用, 探究了云南红壤坡耕地烤烟生长季土壤主要养分迁移特征。结果表明: 红壤坡耕地剖面土壤 pH、阳离子交换量(CEC)及主要养分含量随土层深度的增加线性降低, 土壤容重则线性增加, 碱解氮、有效磷和速效钾含量在 30 cm 土层以下变幅较小; 随着烤烟生育期进程, 剖面土壤化学性质均有不同程度的提高。红壤坡耕地烟田垄土和冲积土主要养分含量随坡位自上而下呈降低趋势, 垄土降幅小于冲积土, 且相同坡位土壤团聚体结构的有机质含量以垄土较高。红壤坡耕地不同坡位烟株生长特性表现为下坡位>中坡位>上坡位。总体上, 云南红壤坡耕地土壤主要养分在耕作层(30 cm)以下下移潜力较弱, 坡位因素会加速上坡位土壤贫瘠化。

**关键词:** 红壤坡耕地; 养分迁移; 烤烟; 坡位; 土壤理化性状

**中图分类号:** S154 **文献标志码:** A

## Soil Nutrient Migration in Flue-cured Tobacco Growing Season in Red Soil Slope Farmland in Yunnan Province

WANG Zheng<sup>1</sup>, LIU Jiuyu<sup>1</sup>, PENG Bo<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, QUE Hongwei<sup>1</sup>, AO Jincheng<sup>2\*</sup>, LIU Jiahong<sup>3\*</sup>

(1 *China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530001, China*; 2 *College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China*; 3 *Qujing Branch of Yunnan Tobacco Company, Qujing, Yunnan 655002, China*)

**Abstract:** In order to realize soil conservation and sustainable utilization of sloping farmland, the main nutrient transportation characteristics of red slope soil in flue-cured tobacco growing season in Yunnan Province were explored. The results showed that soil pH, cation exchange capacity (CEC) and contents of main nutrients decreased linearly while soil bulk density increased with the increase of soil depth. The contents of alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium varied little under soil depth of 30 cm, and with the growth period of flue-cured tobacco, soil chemical properties of profile were improved to varying degrees. The main nutrient contents of ridge and alluvial soils decreased from top to bottom of the slope, and the decrease was smaller in ridge soil than in alluvial one, the contents of organic matter in same size aggregates under same slope position condition were higher in ridge soil than in alluvial one. The tobacco plant growth characteristics in red soil slope farmland were lower slope>middle slope>upper slope. In conclusion, the downward potential is weak for major soil nutrients below the tilled layer (30 cm) in Yunnan red soil slope farmland, and the slope position factor will accelerate the impoverishment of upper slope soil.

**Key words:** Red soil slope farmland; Nutrients transportation; Flue-cured tobacco; Slope position; Soil physiochemical properties

云南省是我国最大的烟叶产区, 常年种植面积 400 万  $\text{hm}^2$  左右, 烟叶年产量 80 余万吨, 占全国生产总规模的 40% 左右。陈正发等<sup>[1]</sup>研究结果显示, 云南坡耕地面积达 472 万  $\text{hm}^2$ , 占总耕地面积的 69.79%。受坝区耕地资源萎缩的影响, 近年来云南植

烟区域由适宜区向山区及不适宜区转移趋势加快, 烟叶品质下降, 尤其是上部烟叶工业可用性偏低等问题已引起行业的广泛关注。当前, 坡耕地土壤质量和可耕性降低是普遍存在的突出问题<sup>[2-3]</sup>, 土壤质量和可耕性降低主要体现在土壤犁底层浅化、养分贫瘠化、

①基金项目: 广西中烟工业有限责任公司科技项目(GXZYCX2019B004, GXZYCX2021B010)和中国烟草总公司云南省公司科技计划项目(2019530000241014)资助。

\* 通讯作者(89693180@qq.com; 1015333785@qq.com)

作者简介: 王政(1978—), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事烟叶原料配套生产技术研究及管理。E-mail: 16627843@qq.com

结构板结化等，是限制作物生长发育重要的非生物因子。

研究表明，坡耕地土壤养分迁移与流失是一个复杂的物理化学过程<sup>[4]</sup>，也是各种因素综合作用的过程，受径流量<sup>[5]</sup>、土壤质地<sup>[6]</sup>、地形地貌<sup>[7]</sup>、坡位<sup>[8]</sup>、坡度<sup>[9]</sup>等因素的影响。坡面水土流失是导致坡耕地土壤质量退化和生产力下降<sup>[10]</sup>、造成不同坡位土壤性质变异<sup>[11]</sup>的重要原因。可见，研究红壤坡耕地土壤特征，探究坡面耕层土壤质量退化原因，对其进行土壤改良、保护性耕作模式制定，将有助于阻控红壤坡耕地土壤退化，提高地力和耕性，促进红壤坡耕地资源的可持续利用。目前，关于红壤理化性状在土层上的变化特征已有一定的研究报道<sup>[12-14]</sup>，但关于红壤坡耕地养分在烤烟生长季土壤剖面及坡面上的分布特征研究鲜见报道。基于此，本研究以云南省文山州典型烟区红壤坡耕地为对象，分析土壤剖面理化性状和不同坡位养分迁移特征，探索红壤坡耕地土壤养分在垂直方向和坡面上的迁移规律，为红壤坡耕地烟田土壤改良和合理耕层培育提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

试验区域概况及烤烟施肥水平见文献<sup>[15]</sup>。试验区域位于云南省文山州丘北县天星乡(104°18'E, 23°56'N)，以岩溶山地地貌为主，土壤类型为红壤和少量水稻土，区域总体属于中亚热带高原季风气候，年均温 13.2 ~ 19.7 °C，烤烟生育期降水量 800 ~ 1 000 mm，为典型的旱地雨养农业。试验地块坡度 6° ~ 8°，供试土壤为红壤，基础理化性质为：pH 4.9(水土质量比为 2.5 : 1)，有机质 20.4 g/kg，碱解氮 72.7 mg/kg，有效磷 31.0 mg/kg，速效钾 292.1 mg/kg，容重 0.9 g/cm<sup>3</sup>，总孔隙度 60.8%，水稳性团粒结构>5、5 ~ 2、2 ~ 1、1 ~ 0.5、0.5 ~ 0.25、<0.25 mm 占比分别为 1.29%、2.95%、2.50%、8.93%、14.56%、69.77%。

### 1.2 试验设计

试验于 2020 年 4 月至 9 月进行。于烤烟移栽前，随机选取 3 块坡度大小、土壤类型和施肥水平相近的坡耕地用于剖面土壤和不同坡位垄土及冲积土取样，每个试验地块面积约 1 334 ~ 2 001 m<sup>2</sup>。分别于 5 月 20 日烤烟团棵期(T)、5 月 31 日旺长期(W)、6 月 25 日盛花期(S)取剖面 0~15、15~30、30~60、60~90 和 90~120 cm 土层土样。每个地块固定 1 个取样点，为便于剖面取样，每个监测井挖掘规格长宽高分别为 120、100 和 150 cm，每个取样点对应剖面深度样本

为 1 个重复样，每个土层 3 次重复。另外，在烤烟封顶后 7 d(7 月 19 日)依次取坡耕地上坡位、中坡位和下坡位垄沟中的冲积土和垄面上的垄土样品并调查相应坡位烟株农艺性状。每个坡位随机取 5 个点，制成混合样，设 3 次重复。供试烤烟品种为当地主栽品种 K326。

### 1.3 测定项目及方法

土壤化学性质：测定了 pH 和阳离子交换量(CEC)、有机碳、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量 6 项指标。各指标测定方法均参照文献<sup>[16]</sup>进行，即采用电位法(水土质量比 2.5 : 1)测定土壤 pH，重铬酸钾容量法-外加热法测定有机质，碱解扩散法测定碱解氮，NaHCO<sub>3</sub> 提取-钼锑抗比色法测定有效磷，NH<sub>4</sub>Ac 提取-火焰光度法测定速效钾和 NH<sub>4</sub>OAc 提取法测定 CEC。

土壤物理特性：土壤容重采用环刀法<sup>[16]</sup>测定，土壤团聚体结构采用土壤团聚体分析仪托普 TPF-100(浙江托普)进行测定。

农艺性状：于烤烟初花期参照行业标准 YC/T 142—1998<sup>[17]</sup>调查烟株株高、有效叶数，第 7、11、17 叶位烟叶的叶长和叶宽，计算叶面积(cm<sup>2</sup>)=叶长×叶宽×0.634 5(叶面积系数)。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 分别进行数据分析和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 红壤坡耕地土壤剖面主要理化性质

**2.1.1 红壤坡耕地土壤化学性质剖面变化** 红壤坡耕地烤烟不同生育期土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、CEC 均随土层深度的增加整体呈线性降低趋势(图 1)。从图 1A 可以看出，烤烟团棵期、旺长期、盛花期土壤 pH 随土层深度的增加明显呈线性降低趋势，线性方程决定系数( $R^2$ )分别为 0.840 5、0.644 3 和 0.819 8，且随着生育期进程，pH 有所升高。从图 1B ~ 1E 中分别可以看出，有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均随土层深度的增加呈线性降低趋势，均以土层 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层含量最高，30 ~ 120 cm 土层整体较低且变化趋势缓慢，说明红壤坡地土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾具有明显的表聚性现象。土壤 CEC 随着剖面土层深度的增加呈线性降低趋势，而在 15 ~ 90 cm 土层随烤烟生育期的进程，CEC 含量整体呈增加趋势(图 1F)。

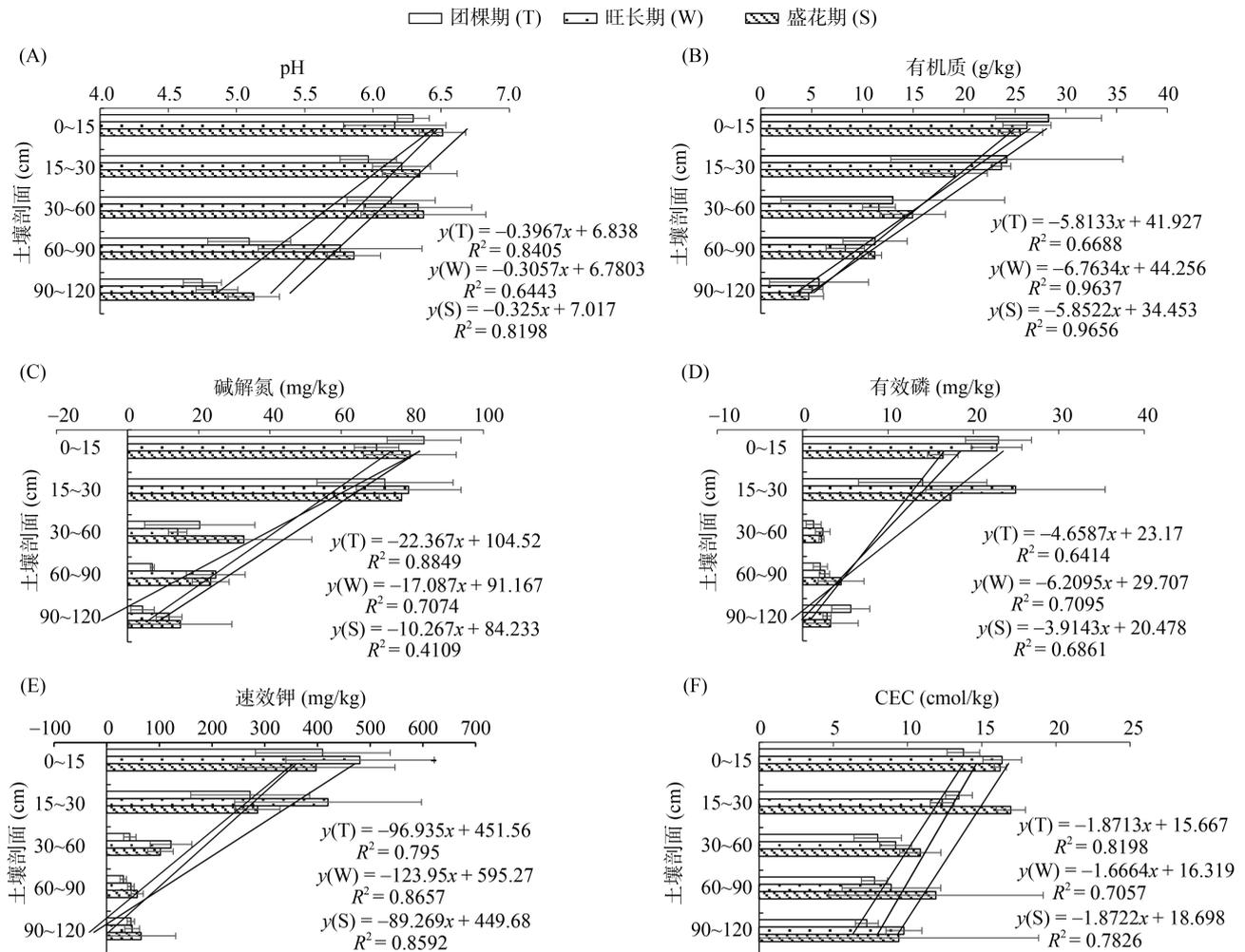


图 1 红壤坡耕地烤烟不同生育期土壤剖面化学性质变化

**2.1.2 红壤坡耕地土壤剖面容重变化** 从图 2 可以看出,红壤坡耕地烤烟团棵期、旺长期和盛花期土壤剖面容重随土层深度的增加而增加,线性方程决定系数  $R^2$  分别为 0.894、0.983、0.929 7,均表现出较好的线性正相关关系。不同时期 0~15 cm 土层土壤容重介于 1.01~1.17 g/cm<sup>3</sup>,15~30 cm 土层土壤容重介于 1.27~1.49 g/cm<sup>3</sup>,30~60 cm 土层土壤容重介于 1.47~1.54 g/cm<sup>3</sup>。说明红壤坡耕地不同土层土壤容重差异较大,在烤烟不同生育期剖面土壤容重也存在差异性。

## 2.2 红壤坡耕地不同坡位冲积土与垄土的理化性质

**2.2.1 化学性质** 随坡耕地坡位的升高,垄土和冲积土主要养分含量呈降低趋势(图 3)。从图 3 可以看出,随坡位的升高,垄土的有机质、碱解氮、速效钾含量呈降低趋势,但差异不显著( $P>0.05$ );随坡位的降低,冲积土的碱解氮、有效磷含量呈增加趋势,但

差异不显著( $P>0.05$ ),有机质和速效钾含量呈显著性增加( $P<0.05$ )。以上结果说明,坡耕地不同坡位土壤养分含量异质性较高,土壤养分从上坡位向下坡位迁移是上坡位土壤贫瘠和耕层变浅的主要原因之一。

**2.2.2 团聚体结构特征** 坡耕地坡位不同,垄土和冲积土土壤团聚体结构存在差异(表 1)。从表 1 可以看出,对于垄土,随坡位的升高,1~5 mm 团聚体结构比例呈增加趋势,<0.25 mm 团聚体结构比例呈

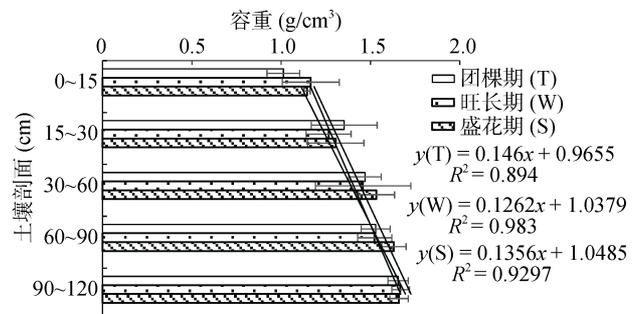
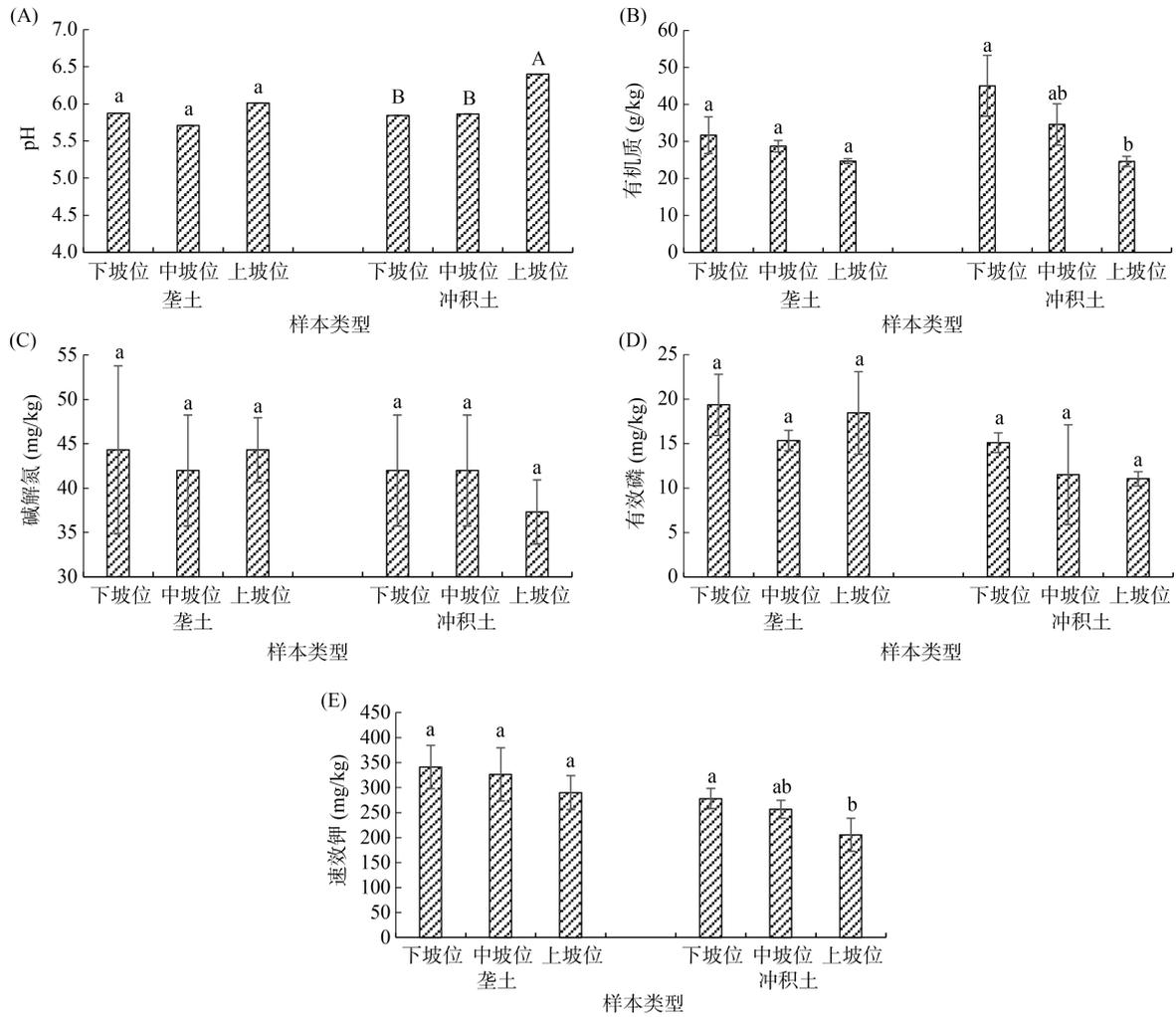


图 2 红壤坡耕地烤烟不同生育期土壤剖面容重变化



(柱图上方不同大、小写字母分别表示不同样品间差异在  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平上显著, 下同)

图 3 不同坡位垄土和冲积土主要化学性质

表 1 不同坡位垄土和冲积土团聚体结构特征

样本类型	坡位	团聚体结构(%)				
		2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	< 0.25 mm
垄土	下坡位	1.6 ± 0.5 a	2.0 ± 1.1 a	6.0 ± 1.2 B	26.5 ± 4.8 a	33.1 ± 2.6 a
	中坡位	1.9 ± 0.5 a	2.3 ± 0.1 a	6.0 ± 0.9 B	33.2 ± 1.5 a	30.8 ± 5.8 a
	上坡位	3.6 ± 2.7 a	2.7 ± 1.3 a	16.5 ± 6.2 A	26.6 ± 3.7 a	28.3 ± 3.9 a
冲积土	下坡位	1.3 ± 0.5 a	0.9 ± 0.6 b	2.2 ± 0.1 B	26.8 ± 3.2 a	40.3 ± 4.0 a
	中坡位	1.0 ± 0.1 a	1.6 ± 0.4 ab	5.3 ± 1.1 A	25.5 ± 5.4 a	34.3 ± 9.5 a
	上坡位	2.6 ± 1.5 a	1.9 ± 0.1 a	5.2 ± 1.2 A	28.9 ± 7.9 a	37.8 ± 9.9 a

注：表中同列不同大、小写字母分别表示不同坡位间差异在  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平上显著；下同。

降低趋势。对于冲积土，不同坡位 1 ~ 2 mm 团聚体结构随坡位增加呈增加趋势，下坡位和上坡位 2 ~ 3、0.25 ~ 0.5 和 < 0.25 mm 团聚体结构所占比例均大于中坡位，但差异不明显。另外，不同坡位垄土和冲积土的 0.5 ~ 1 mm 团聚体结构均以上坡位极显著高于下坡位 ( $P < 0.01$ )。

2.2.3 团聚体结构中有有机质含量 不同坡位垄土

和冲积土团聚体结构中的有机质含量存在差异(表 2)。从表 2 可以看出，对于垄土，随坡位的增加，2 ~ 5 mm 团聚体结构的有机质含量呈降低趋势，但差异不明显 ( $P > 0.05$ )；0.25 ~ 2 mm 团聚体结构中的有机质含量关系均表现为下坡位 > 上坡位 > 中坡位，其中下坡位 0.25 ~ 0.5 mm 和 < 0.25 mm 团聚体结构中的有机质含量显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著高于 ( $P < 0.01$ ) 中坡位和上坡

表 2 不同坡位垄土和冲积土团聚体结构中有机质含量特征(g/kg)

样本类型	坡位	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
垄土	下坡位	19.6 a	19.8 a	19.1 a	18.9 a	19.8 A
	中坡位	15.4 a	16.5 a	12.8 a	9.3 b	7.4 B
	上坡位	14.2 a	19.1 a	18.3 a	11.1 ab	9.1 B
冲积土	下坡位	20.0 a	17.1a	19.1 a	13.8 a	7.8 b
	中坡位	12.8 a	15.4 a	13.2 a	8.9 a	10.7 a
	上坡位	14.6 a	18.1 a	15.2 a	10.3 a	5.8 b

位。在 0.25~5 mm 团聚体结构中, 下坡位不同团聚体结构垄土有机质含量基本一致, 而中坡位和上坡位垄土 0.5~2 mm 团聚体结构有机质含量较高。对于冲积土, 2~5 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 团聚体结构中的有机质含量关系均表现为下坡位>上坡位>中坡位, 仅<0.25 mm 团聚体结构中的有机质含量关系表现为中坡位>下坡位>上坡位, 且达到显著水平( $P<0.05$ )。

### 2.3 红壤坡耕地不同坡位烟株农艺性状

烟株田间长相与坡耕地坡位有关(表 3)。从表 3 可以看出, 随着坡位的增加, 烟株株高、有效叶数极

显著性降低( $P<0.01$ )。相较于下坡位, 中坡位和上坡位株高降幅分别为 11.8% 和 31.0%, 有效叶数关系表现为下坡位>中坡位>上坡位, 下坡位烟株第 7 叶位、第 11 叶位和第 17 叶位的叶面积系数以及第 11 叶位和第 17 叶位烟叶的叶长和叶宽均极显著大于中坡位和上坡位烟株( $P<0.01$ ); 相较于下坡位, 中坡位和上坡位第 7 叶位叶面积降幅分别为 20.8% 和 26.7%, 第 11 叶位叶面积降幅分别为 14.1% 和 19.7%, 第 17 叶位叶面积降幅分别为 16.4% 和 23.0%。上述结果说明坡耕地烟田烟株长势随坡位的增加而减弱。

表 3 不同坡位烟株农艺性状特征

坡位	株高 (cm)	有效叶数 (片)	第 7 叶位			第 11 叶位			第 17 叶位		
			叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶面积 (cm <sup>2</sup> )	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶面积 (cm <sup>2</sup> )	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶面积 (cm <sup>2</sup> )
下坡位	133.3 A	27.0 A	66.2 a	32.0 A	1 347.3 A	69.2 A	28.0 A	1 230.8 A	67.8 A	27.0 A	1 161.1 A
中坡位	117.6 B	26.0 B	64.2 a	26.2 B	1 066.5 B	66.0 AB	25.2 B	1 057.5 B	63.6 AB	24.0 B	970.5 B
上坡位	92.0 C	23.0 C	61.4 a	25.3 B	987.8 B	65.2 B	24.4 B	988.8 B	61.3 B	23.0 B	893.7 B

## 3 讨论

### 3.1 烤烟大田期红壤坡耕地剖面土壤理化性质变化特征

红壤是在高温多雨条件下矿物加速风化、盐基大量淋失及脱硅富铁铝化形成的发育程度较高的土壤<sup>[18]</sup>, 因而其本身呈酸性。本研究发现, 红壤坡耕地土壤随剖面深度的增加 pH 整体呈降低趋势, 而随着烤烟生育期进程, 剖面土壤 pH 呈增加趋势, 这说明随着土层深度的增加, 植被类型或施肥对土壤酸度的影响越来越小<sup>[19]</sup>; 但与南方典型红壤旱地土壤 pH 随土层深度的增加呈增加趋势相反<sup>[5]</sup>, 其原因可能与土壤内部氧化还原水平有关。不同剖面土壤 CEC 随着烤烟生育期进程也呈升高趋势。试验中, 烤烟生长季红壤坡地土壤养分自上而下发生垂直迁移, 且随着生育期进程剖面养分都有不同程度的增加, 在耕作层(0~30 cm)富集效应明显, 这说明坡耕地养分出现壤

中流失问题<sup>[20]</sup>。刘兆辉等<sup>[21]</sup>研究指出, 硝态氮在土壤剖面中淋洗下移明显, 磷、钾在剖面也表现出下移现象, 指出土壤速效钾含量与土壤质地有密切关系。试验中, 随土层深度的增加, 烤烟不同生育期土壤容重均呈线性增加(图 2), 该结果与柴华和何念鹏<sup>[22]</sup>研究认为土壤容重随土层深度增加而增加的结论一致。土壤容重可较好地反映土壤透气性、入渗性、持水能力和溶质迁移潜力<sup>[23-24]</sup>。随土层深度的增加, 红壤坡耕地土壤溶质下移潜力减弱, 剖面 30 cm 以下土壤氮、磷、钾淋洗下移损失量降低, 其主要原因可能与水分的向下运移能力减弱有关。王彩绒等<sup>[26]</sup>研究太湖地区土壤磷素迁移规律指出, 当 Bray-P 超过 60 mg/kg 后, 会发生磷的淋溶。可见, 红壤坡耕地养分在深层土壤垂直淋洗损失较小, 深翻改土有降低养分水平和 pH、增加土壤容重的风险。

### 3.2 红壤坡耕地不同坡位土壤理化性质变化特征

本研究结果表明, 红壤坡耕地土壤主要养分含量

随坡位自上而下存在明显的递增趋势。有研究指出,在山地坡面,地形部位与土地利用方式是决定土壤物理化学性质变化的重要因素<sup>[26]</sup>,坡向与坡位的交互作用对流域有机碳含量的空间分布及土壤碳氮比值(C/N)影响显著<sup>[27]</sup>,而有机质是反映土壤退化的重要指标之一<sup>[28]</sup>。该研究中,垄土主要养分含量随坡位的升高而降低,整体以有机质和速效钾降幅最大,但垄土降幅较冲积土小。说明随着肥沃土壤被侵蚀,使得坡耕地坡位较高的区域养分趋于贫瘠化,耕层浅化,进而导致烟株无法获得充足的养分需求,因而坡耕地中上坡位的烟株长势偏弱,叶片开片差(表3)。垄土土壤1~3 mm团聚体结构比例随坡位的下移而降低,冲积土土壤整体表现出随团粒结构的减小,有机质含量呈降低趋势,说明坡位自上而下的土壤化学性质变异明显,包括对干扰扩散的影响,对水土流失和养分流失的影响<sup>[11]</sup>,也说明土壤物理特性与养分特征在坡面上的差异特征是山地坡面利用类型与地形部位共同作用的结果<sup>[29]</sup>。垄土团聚体结构上坡位主要以大团聚体结构为主,冲积土则相反,说明在上坡位小团聚体更容易被淋失,因而下坡位冲积土小团粒结构占比高。可见,上坡位提高土壤团粒结构,不仅有助于降低土壤的侵蚀损失,同时也有利于阻控土壤有机质的损失。

### 3.3 红壤坡耕地耕作保护措施

耕作侵蚀过程引起土壤再分布<sup>[30]</sup>,而红壤坡耕地土壤再分布往往受到重力搬运、雨水侵蚀和耕作侵蚀等多重因素的影响。韦建玉等<sup>[15]</sup>研究结果表明,秸秆覆盖+破膜培土模式有利于提高坡耕地养分水平和烟叶品质。周怡雯等<sup>[31]</sup>研究也发现,植物篱和稻草覆盖措施能够更有效地拦截径流中的粗颗粒。袁久芹等<sup>[32]</sup>研究认为,不同植物篱模式均不同程度地改善了土壤理化性质,减少了水土流失量,且以组合篱模式的减流减沙效益最优。套种作物增加红壤坡耕地覆盖是防治果园水土流失的有效措施<sup>[33]</sup>。因此,结合本研究红壤坡耕地剖面土壤养分垂直迁移特征和不同坡位垄土和冲积土养分分布特征,认为云南红壤坡耕地在中上坡位可适当提高耕作深度并增加有机肥、氮磷钾肥的施用量,同时辅助秸秆覆盖、覆膜、植物篱等措施,以阻控坡耕地土壤养分的运移损失。

## 4 结论

1) 红壤坡耕地剖面土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾在30 cm以下土层垂直淋洗损失量较

少,土壤pH随剖面深度的增加缓慢降低,容重则缓慢增加。

2) 红壤坡耕地垄土和冲积土有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量随着坡位自上而下降低,垄土降幅小于冲积土。坡位越高,垄土大团聚体结构占比越多,冲积土则相反。土壤团聚体大则有机质含量高,反之则低。

3) 坡耕地烟田烟株长势及开片特性与坡位有关,中、上坡位烟株长势弱,叶片开片差。

### 参考文献:

- [1] 陈正发,史东梅,何伟,等. 1980—2015年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 256-265.
- [2] 金慧芳,史东梅,钟义军,等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84-93.
- [3] 金慧芳,史东梅,陈正发,等. 基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [4] 王全九,王力,李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 109-114, 119.
- [5] 陈安磊,王卫,张文钊,等. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 101-106.
- [6] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 10-13, 18.
- [7] 邢伟民,王懿潼,徐浩林,等. 坡形和PAM对黄土坡地水土养分迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 135-142.
- [8] 周萍,刘国彬,侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
- [9] 陈晓安,杨洁,汤崇军,等. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 141-146.
- [10] 史衍玺,唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 12(1): 28-33, 40.
- [11] Miller M P, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Science of America Journal, 1988, 52(4): 1133-1141.
- [12] 潘博,段良霞,张凤,等. 红壤剖面土壤养分对土地利用变化响应的敏感性[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2707-2716.
- [13] 赵凯丽,徐明岗,周晓阳,等. 南方典型红壤区旱地与水田土壤酸度的剖面差异性[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1010-1015.
- [14] 朱海滨,杨应明,张晓龙,等. 不同土壤类型养分垂直分布特征[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(5): 55-60.

- [15] 韦建玉, 王政, 徐天养, 等. 秸秆覆盖与揭膜互作对坡耕地烟田土壤细菌群落及烟叶品质的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 82-89.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 感官评价方法:YC/T138—1998. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [18] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [19] 姬钢, 徐明岗, 文石林, 等. 不同植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2639-2645.
- [20] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 41-45, 70.
- [21] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮、磷、钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 537-542.
- [22] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [23] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [24] 李志洪, 王淑华. 土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 55-57.
- [25] 王彩绒, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 76-80.
- [26] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, et al. Soil properties associated with landscape position[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 235-239.
- [27] 南雅芳, 郭胜利, 张彦军, 等. 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 595-601.
- [28] Li Y Q, Zhao X Y, Zhang F X, et al. Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 328-340.
- [29] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 53-56, 60.
- [30] 贾红杰, 傅瓦利. 岩溶区坡地耕作侵蚀过程中的土壤再分布研究[J]. 土壤, 2008, 40(6): 986-991.
- [31] 周怡雯, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 49-54.
- [32] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.
- [33] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 81-86.