

坡度和坡位对紫色土有机碳形态变化及团聚体组成的影响^①

张爽¹, 张伟², 李榕汇¹, 韩利红³, 陈玉蓝^{1,4}, 王攀宇¹, 黄容¹, 李冰¹, 王昌全^{1*}

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川省烟草公司攀枝花市公司, 四川攀枝花 617000; 3 四川诚至诚烟草投资有限责任公司, 成都 611130; 4 四川省烟草公司凉山州公司, 四川凉山彝族自治州 615050)

摘要: 本文选取凉山会东典型植烟区域, 通过分析土壤总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化态有机碳(ROC)、颗粒态有机碳(POC)及团聚体的平均重量直径(MWD)、>0.25 mm 团聚体百分含量($R_{0.25}$), 研究了坡度(<5°、5°~10°、10°~15°、15°~20°)和坡位(上坡位、中坡位、下坡位)对土壤团聚体组成和稳定性以及有机碳组分的影响, 并分析了有机碳组分与团聚体组成之间的相互关系。结果表明: 随坡度增大, 土壤 TOC 平均含量逐步下降, 相较于坡度 0~5°, 5°~10°、10°~15°、15°~20° 坡度土壤 TOC 含量分别显著下降 18.43%、23.09%、37.24%; 土壤 POC 平均含量表现为坡度 0~5°>5°~10°>15°~20°。随坡度增加, >2 mm 水稳性团聚体含量呈下降趋势, $R_{0.25}$ 和 MWD 随之降低, 土壤结构的稳定性下降; 随坡位上升, $R_{0.25}$ 和 MWD 同样呈下降趋势, 其中 MWD 在下坡位坡度 0~5° 处最高, 表明该区域土壤团聚体稳定性更高。0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级团聚体是影响土壤 DOC 与 ROC 变化的主要因素。综上, 随着坡度增加, 土壤有机碳含量减少, 土壤团聚体稳定性也呈下降趋势, 而坡位对土壤有机碳库的影响不显著。

关键词: 坡度; 坡位; 土壤团聚体; 土壤有机碳

中图分类号: S152.4; S158

文献标志码: A

Effects of Slope and Slope Position on Organic Carbon Forms and Aggregate Composition in Purple Soil

ZHANG Shuang¹, ZHANG Wei², LI Ronghui¹, HAN Lihong³, CHEN Yulan^{1,4}, WANG Panyu¹, HUANG Rong¹, LI Bing¹, WANG Changquan^{1*}

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Panzhihua Company of Sichuan Tobacco Company Panzhihua, Sichuan 617000, China; 3 Sichuan Chengzhicheng Tobacco Investment Limited Liability Company, Chengdu 611130, China; 4 Liangshan Prefecture Company of Sichuan Tobacco Company, Liangshan, Sichuan 615050, China)

Abstract: In this study, a typical tobacco-growing area in Huidong County of Liangshan Prefecture was selected, and soil total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), readily oxidizable organic carbon (ROC), particulate organic carbon (POC), mean weight diameter (MWD) of aggregates, and the percentage of >0.25 mm aggregates ($R_{0.25}$) were analyzed, in order to investigate the effects of slope gradient (<5°, 5°–10°, 10°–15°, 15°–20°) and slope position (upper, middle, lower) on soil aggregate composition, stability, organic carbon fractions, and their interrelationships. The results showed that as slope gradient increased, average TOC content gradually decreased. Compared to slopes of 0–5°, TOC content significantly decreased by 18.43%, 23.09% and 37.24% for slopes of 5°–10°, 10°–15° and 15°–20°, respectively. Average POC content showed that slopes of 0–5°>5°–10°>15°–20°. With increasing slope gradient, the content of >2 mm water-stable aggregates decreased, along with $R_{0.25}$ and MWD, indicating reduced soil structural stability. As slope position ascended, $R_{0.25}$ and MWD decreased, with the highest MWD observed at the lower position with slopes of 0–5°, indicating that greater aggregate stability in these areas. Aggregates of 0.5–1 mm and 0.25–0.5 mm were the primary factors influencing changes in soil DOC and ROC. In conclusion, as slope gradient increased, soil organic carbon content decreased, and aggregate stability declined, whereas slope position had no significant impact on soil organic carbon pool.

Key words: Slope; Slope position; Soil aggregates; Soil organic carbon.

①基金项目: 四川省烟草公司科技项目(SCYC202407, SCYC202415)资助。

* 通信作者(w.changquan@163.com)

作者简介: 张爽(2000—), 女, 重庆巫溪人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染治理研究。E-mail: 2513960733@qq.com

土壤有机碳是维持土壤持水力、养分可利用性、粮食生产以及土壤食物网能源等土壤功能的核心。土壤有机碳含量不仅影响作物生产,其微小变化也会引起大气 CO₂ 浓度的显著变化。团聚体是土壤结构基本单元,在调节土壤通气性和保水性,以及减缓土壤侵蚀等方面具有重要作用^[1-3]。其形成和稳定性受各种胶结物质的复杂作用影响,而土壤有机碳是影响大团聚体形成和稳定性的主要有机胶结物质^[4-5]。不同组分有机碳所发挥的胶结作用功能不同,对团聚体稳定性影响差异明显。因此,关注土壤有机碳组分及其与团聚体的关系,对于土壤有机碳库的稳定性和指导农业生产具有重要意义^[6]。

地形部位和土地利用方式的改变直接影响土壤理化性质^[7]。其中,坡度和坡位是重要的地形因子,一方面可以通过影响植被分布和物种丰富度,影响土壤有机碳的输入和输出;另一方面,坡度和坡位可以通过调节地面水文情况以及土壤微生物活性来影响土壤有机碳的分布^[8]。研究表明,土壤有机质含量随坡度增大而减小^[9-10];坡位变化显著影响土壤碳氮比,随坡位升高,土壤有机碳和全氮含量降低,但土壤碳氮比提高^[11]。目前,较多研究集中于土壤有机碳变化对海拔、坡度、坡位等的响应或是以坡度、坡位为参照评估土壤侵蚀程度^[12-13]。土壤活性有机碳组分对外界的响应较为敏感,然而,不同坡度和坡位是否也会影响土壤活性有机碳组分及土壤团聚体稳定性,目前尚不清楚。

作为四川烤烟的主产区,凉山烟区的烟田多沿山地分布,地形条件空间异质性显著,土壤有机碳含量和组分,以及团聚体组成和稳定性的变化对区域土壤肥力维持和烟叶生产质量带来的影响值得深入剖析。因此,本研究以凉山州典型植烟区紫色土为研究对象,探究坡度和坡位对山地紫色土有机碳与团聚体组成的影响,以期对四川山区烟田土壤肥力分区改良培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省西南部主要的优质烤烟产区凉山州会东县姜州乡,地理坐标为 26°33'21"N、101°29'05"E,地表起伏大,地质结构复杂,地貌多样。该区域属于亚热带季风气候,干湿分明,日温差大,年温差小,年均气温 16~17 °C。土壤类型以紫色土为主,母质主要来源于侏罗系和白垩系紫色砂页岩,

土壤酸碱度适中(pH 5.30~6.72)。

1.2 样品采集

在会东县姜州乡以典型植烟区紫色土为研究对象,在同一植烟年限下进行样点布设,分别在不同坡位、不同坡度条件下布点采样,根据田块形状采用“S”法或五点法在同一采样单元内取 5~8 个土样构成一个混合土样,采集深度 0~20 cm。地形条件依据野外调查实际情况,按照 Qin 等^[14]的方法划分坡位为下坡位(距离坡顶大于 2/3 处及其以下的坡面)、中坡位(上坡位与下坡位之间的坡面部分)、上坡位(距离坡顶 1/3 处及其以上的坡面) 3 个等级(图 1)。坡度等级参照邓欧平等^[15]的方法,划分为<5°、5°~10°、10°~15°、15°~20° 共 4 个等级,分别标记为 I、II、III、IV。

土样采集完毕后,剔除异物与植物残体,置于阴凉通风处自然风干,待测。

1.3 分析测试方法

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定^[16],可溶性有机碳(DOC)参考何玉亭^[17]的方法测定,易氧化有机碳(ROC)采用高锰酸钾-分光光度计比色法测定^[18],颗粒有机碳(POC)通过粒径分级方法分离测定^[19];土壤团聚体组成参照张世祺等^[20]的方法测定,团聚体稳定性采用团聚体平均重量直径(MWD)和 >0.25 mm 团聚体百分含量(R_{0.25})来评价,其中,MWD 可反映土壤整体结构,而 R_{0.25} 侧重水稳性,反映土壤抗侵蚀能力,将二者结合可更好地反映评估土壤团聚体稳定性。

1.4 数据处理与统计分析

团聚体平均重量直径(MWD)、>0.25 mm 团聚体含量(R_{0.25})计算方法如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$R_{0.25}(\%) = \frac{M_{R > 0.25}}{M_T} \times 100 \quad (2)$$

式中: \bar{R}_i 为某粒径团聚体平均直径(mm), w_i 为某粒径团聚体的质量分数; $M_{R > 0.25}$ 为 >0.25 mm 的团聚体总质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

采用 SPSS 27 软件对土壤中各形态有机碳及团聚体数据进行统计分析,其中,组间差异显著性通过单因素方差分析进行检验,并利用 LSD 法进行多重比较;相关性分析采用 Origin 相关性 reuse 分析;图表制作使用 Origin2019 和 Excel 2016 完成。

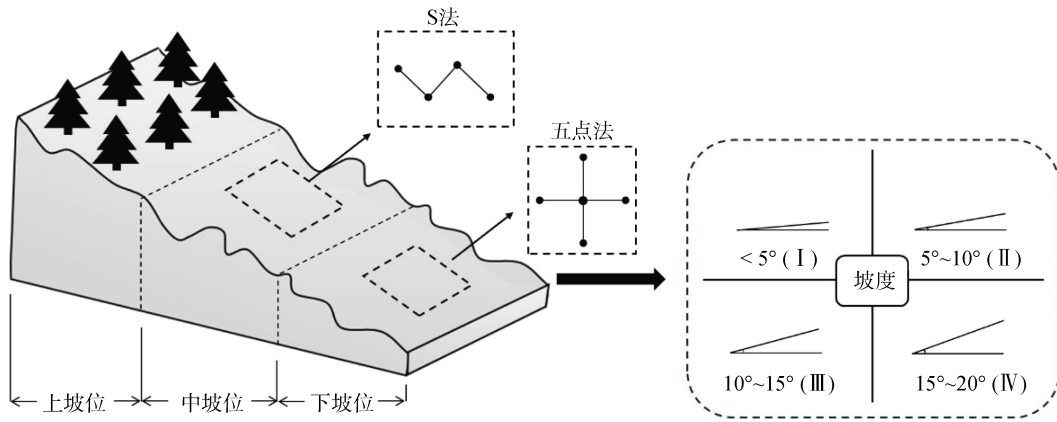


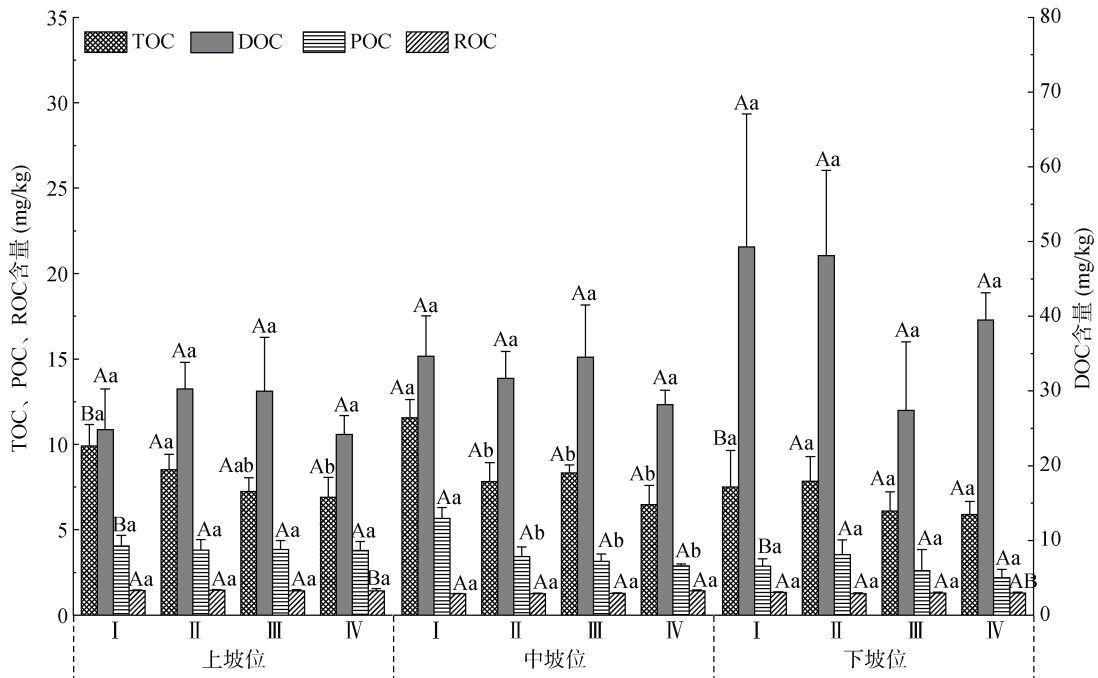
图 1 样品采集示意图
Fig.1 Diagram of sampling

2 结果与分析

2.1 坡度和坡位对土壤有机碳含量的影响

如图 2 所示,土壤总有机碳(TOC)含量呈随坡度增加而降低的趋势。在上坡位, TOC 表现为随坡度增加逐渐降低, 其中在 $0\sim 5^\circ$ 坡度含量为 9.91 g/kg 。在中坡位, TOC 在 $0\sim 5^\circ$ 坡度内含量最高, 达 13.22 g/kg ,

$5^\circ\sim 20^\circ$ 范围内变化不显著。而在下坡位, TOC 在 $5^\circ\sim 10^\circ$ 坡度内含量最高, 达 8.96 g/kg 。从不同坡位来看, TOC 含量整体上表现为中坡位>上坡位>下坡位。结合坡位与坡度来看, 坡度 $0\sim 5^\circ$ 时, TOC 在中坡位的含量(13.22 g/kg)明显高于上坡位(9.91 g/kg)和下坡位(8.57 g/kg); 坡度为 $5^\circ\sim 20^\circ$ 范围, 中坡位与上下坡位间无显著差别。



(I、II、III、IV 分别表示坡度 $0\sim 5^\circ$ 、 $5^\circ\sim 10^\circ$ 、 $10^\circ\sim 15^\circ$ 和 $15^\circ\sim 20^\circ$; 图中小写字母不同表示同一坡位不同坡度间差异显著($P<0.05$), 大写字母不同表示相同坡度下不同坡位间差异显著($P<0.05$); 下同)

图 2 不同坡位和坡度土壤有机碳含量

Fig.2 Soil organic carbon contents at different slope positions and slopes

整体来看, 土壤可溶性有机碳(DOC)含量在下坡位较高。在 $0\sim 5^\circ$ 、 $5^\circ\sim 10^\circ$ 和 $15^\circ\sim 20^\circ$ 坡度下, 不同坡位间土壤 DOC 含量都表现出下坡位>中坡位>上坡位的规律, 即随着坡位下降, DOC 含量增加, 表现

出积累效应。而在 $10^\circ\sim 15^\circ$ 坡度内, DOC 则表现为中坡位>上坡位>下坡位。在上坡位, DOC 在 $0\sim 5^\circ$ 的含量小于 $5^\circ\sim 10^\circ$, 在 $10^\circ\sim 15^\circ$ 的含量大于 $15^\circ\sim 20^\circ$, $5^\circ\sim 15^\circ$ 坡度范围内差异不明显; 而在下坡位, $0\sim 5^\circ$

与 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 坡度范围内 DOC 含量最高, 分别达 49.27 mg/kg 和 48.10 mg/kg 。

土壤易氧化有机碳(ROC)对坡度和坡位变化的响应不明显, ROC 的变化整体来看无差异。

从不同坡度来看, 土壤颗粒态有机碳(POC)含量总体呈随坡度增加而降低的趋势。但从不同坡位来看, POC 的变化整体差异不显著。结合坡位与坡度来看, 在 $0\sim 5^{\circ}$ 坡度范围内, POC 在中坡位含量最高(6.48 g/kg), 显著高于上坡位(4.04 g/kg)和下坡位(3.28 g/kg); 其他坡度范围内, POC 在 3 个坡位间差异均不显著。

2.2 坡度和坡位对团聚体组成和稳定性的影响

如图 3 所示, 在上坡位, $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $0\sim 5^{\circ}$ 时最高; $1\sim 2\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时最高; $<0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时最高; 而 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 和 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量则在坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时最高。在下坡位, $>2\text{ mm}$ 和 $1\sim 2\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $0\sim 5^{\circ}$ 时最

高; $0.5\sim 1\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时最高; $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体质量百分含量在坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时最高。

在上坡位与下坡位中, $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体表现为随坡度增大含量降低; 而在中坡位, 不同坡度间则表现为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}>0\sim 5^{\circ}>15^{\circ}\sim 20^{\circ}>10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。总体上, 当坡度增加, 水稳性团聚体含量呈下降趋势, 表明随着坡度的增加, 土壤中大团聚体稳定性下降; 并且, 坡度对上坡位的土壤大团聚体影响最大, 其稳定性在 3 个坡位中最低。

$R_{0.25}$ 为土壤水稳性团聚体粒径 $>0.25\text{ mm}$ 部分的含量, 是土壤中具有良好结构的部分, $R_{0.25}$ 越大, 土壤结构越好。平均重量直径(MWD)表示土壤团聚体的团聚性, 其值越大, 说明土壤结构越稳定。由图 4 可知, 随坡度增加, 土壤中 $R_{0.25}$ 与团聚体 MWD 均呈下降趋势; 而从不同坡位来看, 中坡位的 $R_{0.25}$ 与团聚体 MWD 整体上比上坡位和下坡位小, 说明中坡位土壤的抗蚀性相对较差。

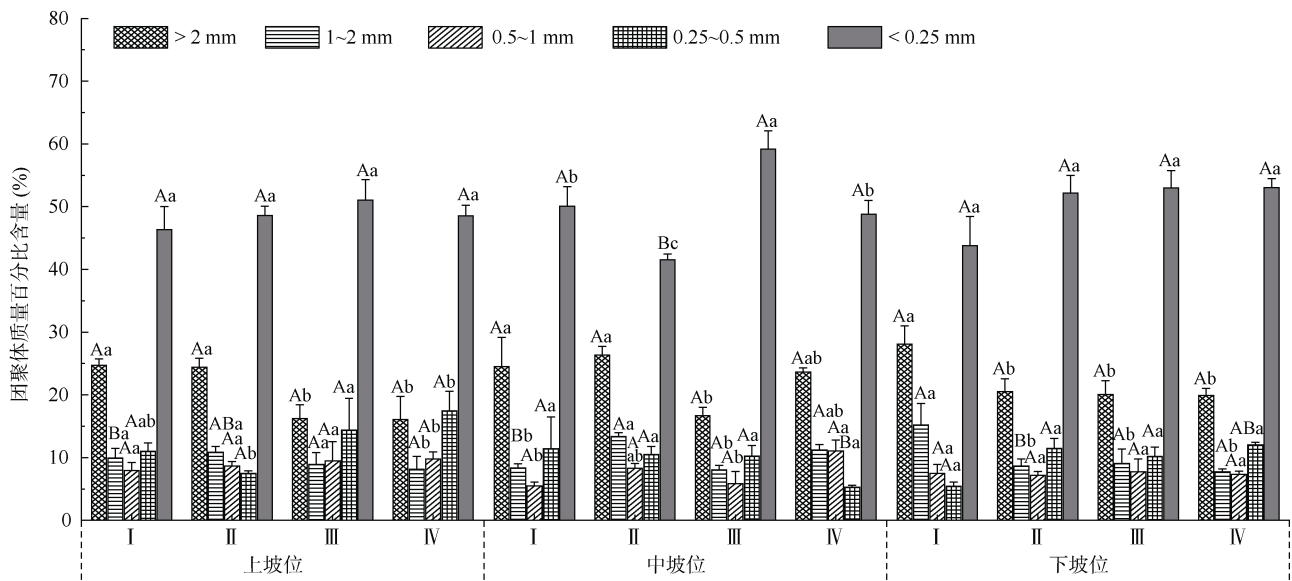


图 3 不同坡位和坡度土壤水稳性团聚体组成

Fig. 3 Compositions of soil water-stable aggregates at different slope positions and slopes

结合坡位和坡度来看, 在坡度为 $0\sim 5^{\circ}$ 范围内, 土壤中 $R_{0.25}$ 最高值出现在下坡位(56.19%), 高于上坡位(53.66%)与中坡位(49.71%), 差异不显著; 在 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 坡度范围内, 土壤中 $R_{0.25}$ 以中坡位最高(58.45%), 且显著高于上坡位(51.51%)和下坡位(47.85%)($P<0.05$); 在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度范围内, 土壤中 $R_{0.25}$ 由高到低依次为上坡位(48.97%)>下坡位(47.05%)>中坡位(40.85%), 差异不显著; 在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 坡度范围内, 土壤中 $R_{0.25}$ 由高到低顺序与 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$

坡度一致, 分别为上坡位(51.46%)>下坡位(46.98%)>中坡位(41.22%)。

对于土壤 MWD, 结合坡位与坡度来看, 在 $0\sim 5^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 坡度范围内, 均表现为下坡位(1.38 、 1.04 、 1.02 mm)>上坡位(1.21 、 0.93 、 0.98 mm)>中坡位(1.16 、 0.91 、 0.94 mm), 坡位间差异均不显著; 在 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 坡度范围内, 不同坡位间表现为中坡位(1.32 mm)>上坡位(1.20 mm)>下坡位(1.05 mm), 且中坡位和下坡位间差异显著($P<0.05$)。

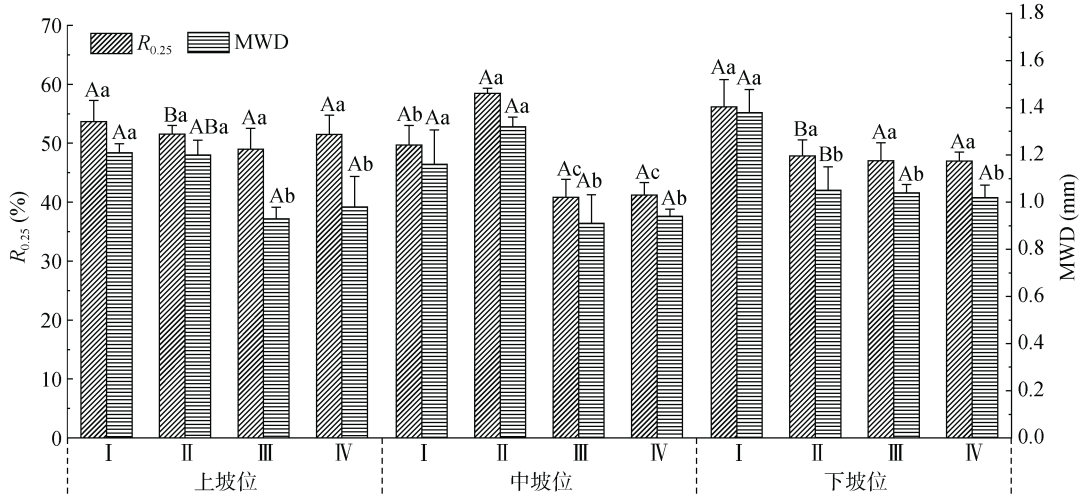


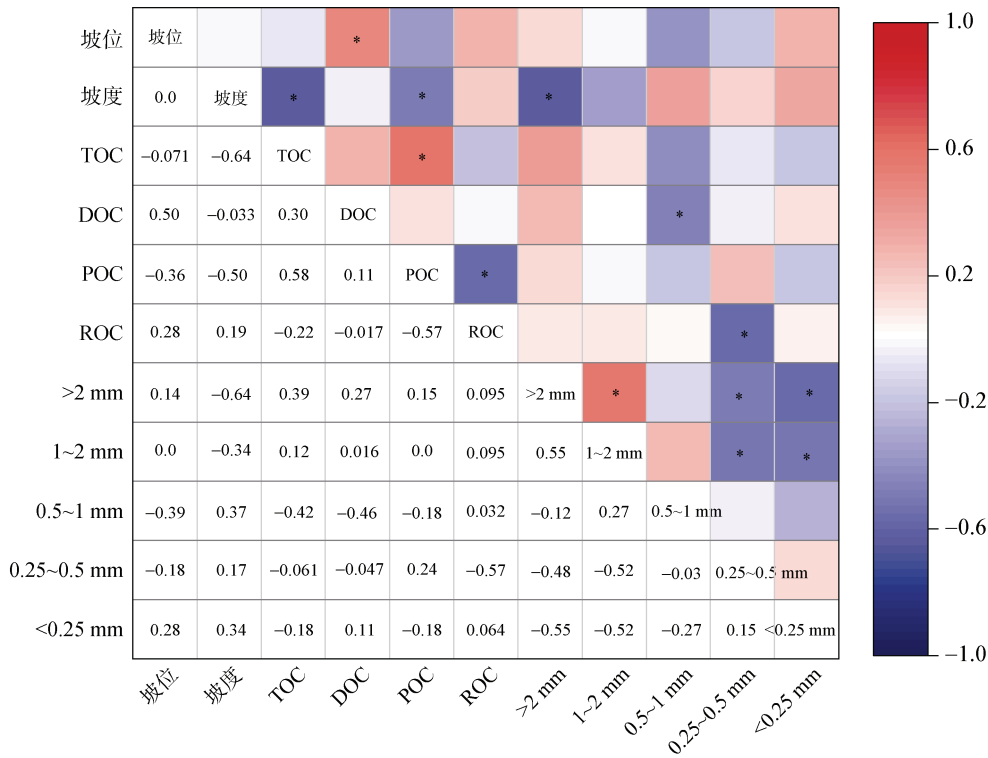
图 4 不同坡度和坡位土壤团聚体稳定性

Fig. 4 Stability of soil aggregates at different slope positions and slopes

2.3 团聚体与有机碳组成的相关性

由图 5 可知, 坡位的变化与土壤 DOC 呈显著正相关($r=0.50, P<0.05$), 而坡度与 TOC($r=-0.64$)、POC ($r=-0.50$)和 >2 mm 粒径团聚体含量($r=-0.64$)呈显著负相关($P<0.05$), 说明坡度和坡位的变化对土壤 ROC 以及 <2 mm 粒径团聚体的影响不大。土壤 ROC 与 0.25~0.5 mm

粒径团聚体呈显著负相关($r=-0.57, P<0.05$), 说明该粒径团聚体的变化可能会影响 ROC 的变化。此外, >2 mm 粒径团聚体与 1~2、0.25~0.5、 <0.25 mm 粒径团聚体存在显著相关关系, 1~2 mm 粒径团聚体与 0.25~0.5 mm($r=-0.52$)和 <0.25 mm($r=-0.52$)粒径团聚体呈显著负相关, 说明不同粒径的团聚体间存在共变化。



(*表示相关性达 $P<0.05$ 显著水平)

图 5 土壤有机碳与团聚体组成的相关性

Fig. 5 Correlations between soil organic carbon with aggregate compositions

3 讨论

坡度和坡位是重要的地形因素, 坡度能影响地表

径流的流量和流速以及土壤含水量, 从而影响侵蚀程度, 是影响土壤水分梯度的关键^[21], 从而造成土壤有机碳含量的差异。坡位可以通过影响坡体的水分条

件、温度与植被类型,导致土壤侵蚀堆积发生,从而影响土壤有机碳含量。一般而言,坡位的增加也会使得太阳辐射增强,减弱水分对土壤的固持,导致土壤侵蚀堆积作用发生,将上坡位土壤有机碳转移至下坡位。彭晓滢等^[22]的研究表明,下坡位土壤有机碳含量通常较上坡位高;赵明月等^[23]的研究中发现,在小流域视角下,土壤有机碳含量和坡位呈负相关。不同坡度土壤有机碳含量出现差异主要是由于重力作用和土层厚度不同。本研究中,随着坡度增加,土壤 TOC 含量减少,且坡度相同时,中坡位的 TOC 含量最高,整体表现为中坡位>上坡位>下坡位。TOC 受坡度和坡位影响,而 DOC 则受坡位影响较大,与钟兆全^[24]的研究结果相似。坡体所受侵蚀程度随坡度增加而增大,侵蚀程度增大,导致水土流失加剧,土壤有机碳加速流失,其生物可利用性下降,致使土壤微生物分解其中的稳定态碳。此外,本研究中,中坡位 TOC 含量最高的原因可能是本研究区域为坡耕地,中坡位经过平整后产生了减缓坡度的效果,使得地表径流减缓,导致上坡位流失的 TOC 在中坡位沉积,另外重力和淋洗作用使得中坡位土层较厚,土壤有机质聚集,最终表现为有机碳含量在中坡位最大。下坡位土壤 TOC 含量最小,其原因可能是因为下坡位位于河谷底部,水分易积聚,影响土壤通气性,进而影响了微生物活性及有机碳转化过程。POC 的含量在坡位上的表现与 TOC 一致,不仅是由于土壤团聚体在坡度减缓条件下沉积于中坡位导致二者含量最高,也可能是因为中坡位的植被生长条件优越,提供了大量的植物残体,为土壤 POC 提供直接来源;同时,中坡位土壤侵蚀作用弱于上坡位,使得 POC 不易流失;并且中坡位水热条件适宜,使得凋落物可快速破碎转化为 POC 而不过度矿化。土壤 POC 在下坡位的含量最低可能是因为下坡位处于河谷底部,在积水条件下形成了缺氧环境,使得好氧微生物活性低,植物残体难以分解为土壤 POC,同时部分 POC 可能转化为 DOC 随水流失。

土壤团聚体是土壤结构的基本组成单元,土壤团聚体稳定性与土壤抗蚀性、肥力及有机碳封存关系密切。土壤团聚体含量与其稳定性关系显著^[25],和土壤可蚀性间存在显著的负相关性^[26-27]。总体来看,随着坡度增加,土壤团聚体的 MWD 呈降低趋势,说明坡度与团聚体的稳定性呈负相关,其原因可能是因为坡度的增加使得地表径流的侵蚀搬运能力增强,地表径流对土壤颗粒的分散作用增强,使得土壤团聚体结构稳定性降低。大团聚体含量越高,土壤团聚体的稳

定性越高,在不同坡位与坡度中,大团聚体含量越高的土壤中 MWD 越大。土壤有机碳是土壤团聚体的重要胶结物质,对土壤团聚体的组成和稳定性有重要影响^[28-29],在土壤有机碳含量较高的坡度和坡位的样点中,MWD 相对较高,这与曹盛等^[30]的研究结果一致。有研究发现,<0.25 mm 的微团聚体是土壤团聚体流失的主要部分,当坡位降低,侵蚀强度减弱,地表径流速度减慢,致使中下坡位沉积小颗粒团聚体^[31-32],小颗粒团聚体的含量增加使得大团聚体含量相对减少^[33]。本研究发现,土壤水稳性团聚体中>2 mm 的大团聚体含量表现出随坡位的上升而降低,这与冯晓彤等^[34]的研究结果一致。造成该现象是因为随着坡位的上升,土壤受到的侵蚀加剧,上坡位的大团聚体因侵蚀而破碎成为微团聚体,通过搬运作用移动至下坡位,随后这些微团聚体通过有机质胶结作用重新团聚成为大团聚体^[35]。同时,下坡位的 $R_{0.25}$ 与 MWD 整体上最大,说明下坡位具有较好的团聚体稳定性。其原因可能是因为降水、植被与重力作用等多种因素共同导致上坡位与中坡位土壤微团聚体、有机质等受到侵蚀与迁移,最终在下坡位聚集。

坡度越大,坡面受到水的侵蚀程度越大,从而会影响土壤团聚体的稳定性,微地形的不同致使土壤有机碳与土壤团聚体发生变化。不同坡位及坡度的土壤有机碳与土壤团聚体稳定性不同,可能是因为地形因子共同作用导致的小气候差异可影响土壤温度、含水量等因素,从而形成不同的小生境,导致不同坡位、坡度间土壤有机碳与团聚体分布不均。而土壤有机碳与土壤团聚体之间存在物理保护作用与化学保护作用,可防止其分解,同时,土壤有机碳与土壤团聚体的结合可增强团聚体的稳定性^[36]。本研究中,DOC 主要存在于 0.5~1 mm 粒径团聚体中,0.25~0.5 mm 粒径团聚体主要影响 ROC 的变化,说明有机碳与团聚体二者之间相互关联,密不可分,二者之间的相互作用构成了土壤碳循环的物质基础^[37]。

在山区紫色土烟草种植中,优化土壤有机碳含量和团聚体稳定性是提升土壤肥力、改善土壤结构、增强土壤抗侵蚀能力的关键,对烟草产量与质量的提升十分重要。可通过以下措施提高土壤有机碳含量,增强团聚体稳定性:①通过增施腐熟有机肥以及烟杆还田的同时配合施用腐解菌剂和采取轮作等方式提高土壤有机碳含量;②通过接种菌根真菌或施用功能菌剂的方式促进土壤团聚体形成,通过减少机械碾压、控制灌溉强度来减少对土壤团聚体的破坏。

4 结论

土壤 TOC 与 POC 受坡度的影响显著,随着坡度增加,二者均呈下降趋势;中坡位的土壤 TOC、POC、ROC 最高。坡度和坡位共同作用对 TOC 和 POC 含量影响较大,DOC 则受坡位影响较大。总体上,坡度能显著影响土壤有机碳及其组分,坡度越大土壤有机碳组分含量越低,中坡位经平整后利于土壤有机碳积累和稳定性提升。

坡度变化显著影响 >2 mm 水稳定性团聚体含量,随坡度增大, >2 mm 粒径团聚体含量呈增加趋势;土壤 $R_{0.25}$ 和 MWD 也随之降低,土壤结构趋于不稳定。坡位降低, >2 mm 粒径团聚体百分含量增加,下坡位和中坡位土壤具有更好的结构稳定性。平整耕作在增加土壤有机碳含量的同时提高有机碳活性组分占比,对改善凉山地区植烟紫色土肥力供应具有重要意义。

参考文献:

- [1] Zhao J S, Chen S, Hu R G, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 73–79.
- [2] Li J Y, Yuan X L, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 304: 107126.
- [3] Meena S K, Dwivedi B S, Meena M C, et al. Impact of long-term nutrient supply options on soil aggregate stability after nineteen years of rice–wheat cropping system[J]. *Land*, 2022, 11(9): 1465.
- [4] Bai Y X, Zhou Y C, He H Z. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 376: 114548.
- [5] Méndez-López M, Jiménez-Morillo N T, Fonseca F, et al. Mercury mobilization in shrubland after a prescribed fire in NE Portugal: Insight on soil organic matter composition and different aggregate size[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 167532.
- [6] Dad J M, Abdollahi L. Changes in soil organic carbon, nitrogen and sulphur along a slope gradient in apple orchard soils of Kashmir Himalaya[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(9): 2377–2387.
- [7] Eun C. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability[J]. *Engineering Geology*, 2007, 92(3/4): 97–109.
- [8] 张小芳. 坡向及坡度对黄土高原植树造林区土壤有机碳的影响研究——以会宁南部为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [9] 陈冲, 周卫军, 郑超, 等. 红壤丘陵区坡度与坡向对耕地土壤养分空间差异的影响[J]. *湖南农业科学*, 2011(12): 53–56.
- [10] 何淑勤, 宫渊波, 武万华, 等. 不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 91–97.
- [11] 谢柠杲, 王棋, 李冰, 等. 坡度和坡位对植烟坡地紫色土有机碳氮变化的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(9): 2245–2252.
- [12] 吴鸿宇. 耕作方式和坡度对黑土肥力特征的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [13] Holz M, Augustin J. Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 397: 115045.
- [14] Qin C Z, Zhu A X, Shi X, et al. Quantification of spatial gradation of slope positions[J]. *Geomorphology*, 2009, 110(3/4): 152–161.
- [15] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2434–2443.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 何玉亭. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [18] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1379–1384.
- [19] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [20] 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.
- [21] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1306–1312.
- [22] 彭晓滢, 郭赓, 蒯杰, 等. 坡位对杉木人工林土壤有机碳及其活性组分特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(10): 1319–1327.
- [23] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(5): 1105–1113.
- [24] 钟兆全. 闽北毛竹林土壤有机碳含量特征及其影响因素[J]. *福建林业科技*, 2017, 44(2): 36–42, 81.
- [25] Cao S, Zhou Y Z, Zhou Y Y, et al. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of *Citrus* orchards plantations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112847.
- [26] Thomaz E L, Araujo-Junior C F, Vendrame P R S, et al. Mechanisms of aggregate breakdown in (sub) tropical soils: Effects of the hierarchical resistance[J]. *Catena*, 2022, 216: 106377.

- [27] Ju T H, Yang K, Chang L, et al. Microplastics sequestered in the soil affect the turnover and stability of soil aggregates: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166776.
- [28] Liu S W, Wang R T, Yang Y, et al. Changes in soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different slope positions in a karst region of Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 928: 172534.
- [29] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 756–763.
- [30] 曹胜, 曾斌, 邓素枫, 等. 柑橘大豆间作对土壤团聚体结构及其有机碳、氮分布的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(4): 735–741.
- [31] 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 100–104.
- [32] 高冉, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2964–2974.
- [33] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2847–2854.
- [34] 冯晓彤, 翟车宇, 刘昌杰, 等. 东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(1): 43–49, 69.
- [35] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 157–164.
- [36] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [37] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627–643.

(责任编辑: 毛小芳)