

# 华南花岗岩侵蚀区不同植被类型坡面土壤 有机碳分布和团聚体稳定性

马东方<sup>1,2,3</sup>, 袁再健<sup>2,3</sup>, 吴新亮<sup>2,3</sup>, 廖义善<sup>2,3</sup>, 黄斌<sup>2,3</sup>, 郑明国<sup>2,3</sup>

(1.广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2.广东省科学院, 广东省生态环境技术研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东省面源污染防治技术工程中心, 广州 510650; 3.华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心, 广州 510650)

**摘要:** 植物是影响土壤有机碳含量和土壤团聚体稳定性的重要因素。选取华南典型花岗岩侵蚀区荒草地、桉树林、湿地松林和木荷林 4 种植被类型径流小区的土壤为研究对象, 分析测定不同坡位、不同土层深度的土壤有机碳特性和团聚体稳定性等指标, 评价不同植被类型对土壤养分的分布特性以及团聚体稳定性差异, 明确花岗岩侵蚀退化区较为理想的生态恢复措施, 旨在为合理利用土壤、重建坡面植被和改善土壤结构提供科学依据。结果表明: 土壤总有机碳(TOC)、全氮(TN)和溶解性有机碳(DOC)含量随土层加深逐渐降低, 而林地小区土壤碳氮比(C/N)则相反, 荒草地碳氮元素的坡面变异系数(CV)显著高于其他 3 种林地, 其中桉树林地 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数较荒草地分别降低 40%, 56.18%, 68.5%和 25.81%; 湿地松林地 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数较荒草地分别降低 62.73%, 33.71%, 46.46%, 58.06%; 木荷林地 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数较荒草地分别降低 41.82%, 38.2%, 51.18%, 48.39%, 表明林地较荒草地更有利于土壤碳氮在坡面的均质化和有机质的积累。荒草地和木荷林地 0.25 mm 粒径以上的团聚体在上、中坡位的质量分数显著高于其他植被类型, 而林下植被生物量较高的木荷林地的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)显著高于其他植被类型。其中木荷小区水稳性团聚体平均质量直径(MWD)较荒草地、桉树和湿地松分别高 20.10%, 19.58%, 23.20%; 几何平均直径(GMD)较荒草地、桉树和湿地松分别高 20.00%, 19.54%, 22.23%, 表明在花岗岩侵蚀区林地空间结构较好的林草模式有利于土壤有机碳的积累和土壤结构的稳定。

**关键词:** 植被类型; 土壤有机碳; 水稳性团聚体; 溶解性有机碳

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0137-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.020

## Soil Organic Carbon Distribution and Aggregate Stability on the Slope of Different Vegetation Types in Granite Erosion Region of South China

MA Dongfang<sup>1,2,3</sup>, YUAN Zaijian<sup>2,3</sup>, WU Xinliang<sup>2,3</sup>,

LIAO Yishan<sup>2,3</sup>, HUANG Bin<sup>2,3</sup>, ZHENG Mingguo<sup>2,3</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology,

Guangzhou 510006; 2.Guangdong Engineering Center of Non-point Source Pollution Prevention Technology,

Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong

Institute of Eco-environment Technology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650; 3.National-Regional

Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangzhou 510650)

**Abstract:** Vegetation is an important factor affected soil organic carbon content and soil aggregate stability. In this study, the soil of runoff plots in four vegetation types, which were wasteland, Eucalyptus forestland, Slash pine forestland and *Schima superba* forestland in the typical granite erosion region of south China, was selected as the research objects. The characteristics of soil organic carbon and aggregate stability in different slope positions and soil depths were analyzed, and the effects of different vegetation types on the distribution characteristics of soil nutrients and the soil aggregates stability were evaluated. The ideal ecological restora-

收稿日期: 2020-02-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505404); 广东省省级科技计划项目(2018B030324001); 广东省重点领域研发计划(2019B110205003); 广东省科学院专项资金项目(2019GDASYL—0401003, 2019GDASYL—0502004, 2019GDASYL—0301002)

第一作者: 马东方(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与面源污染研究。E-mail: hjkdma@163.com

通信作者: 袁再健(1976—), 男, 研究员, 主要从事水土保持、面源污染与生态水文研究。E-mail: zjyuan@soil.gd.cn

tion measures for granite erosion and degradation region was identified, so as to provide a scientific basis for the rational use of soil, reconstruction of slope vegetation and the maintenance of soil structure stability. The results showed that the content of soil total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and dissolved organic carbon (DOC) gradually decreased with the increasing of soil depth, while the soil C/N ratio in the forestland plots was opposite, and the slope coefficient of variation (CV) of carbon and nitrogen elements in the wasteland plot was significantly higher than those in the other three kinds of forestland, among them, the CV in slope distribution of TOC, TN, DOC and C/N in Eucalyptus forest land was 40%, 56.18%, 68.5% and 25.81% lower than those in wasteland; the CV of the slope distribution of TOC, TN, DOC and C/N in Slash pine forestland decreased by 62.73%, 33.71%, 46.46% and 58.06%, respectively, compared to the wasteland; the CV in slope distribution of TOC, TN, DOC and C/N of *S. superba* decreased by 41.82%, 38.2%, 51.18% and 48.39%, respectively, compared to the wasteland, indicating that the forestland was more conducive to the accumulation of soil carbon and homogenization of nitrogen and carbon on the slope. The mass fraction of aggregates above 0.25 mm grain size on the upper and middle slopes in the grassland and *S. superba* forestland were significantly higher than that in other vegetation types, while the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the *S. superba* forestland with high biomass of understory vegetation were significantly higher than those of other vegetation types. The MWD of *S. superba* forest was 20.10%, 19.58% and 23.20% higher than that of wasteland, Eucalyptus and Slash pine forest, respectively; the GMD of *S. superba* forest was 20.00%, 19.54% and 22.23% higher than that of wasteland, Eucalyptus forest and Slash pine forest, respectively, which indicated that the forest grass model with better spatial structure of forest and grass in the granite erosion region was more conducive to accumulation of soil organic carbon and the stability of soil structure.

**Keywords:** vegetation type; soil organic carbon; water stable aggregate; dissolved organic carbon

植物在生长过程中对土壤生态系统产生显著影响,其对土壤养分的吸收和固定以及植物群落生物量的积累和分解过程,可以造成土壤养分在空间尺度上发生变化<sup>[1-2]</sup>。同时,植物凋落物经土壤微生物分解后,可以增加土壤有机质含量,改善土壤养分状况,进而促进植物生长<sup>[3]</sup>。土壤中的有机碳作为土壤团聚体的重要胶结物,可以通过物理、化学和生物等作用参与土壤团聚体的形成<sup>[4]</sup>。而团聚体也是土壤对水、肥循环与调节的物质基础,对维持土壤功能具有重要作用,不同粒级的团聚体对土壤养分循环和土壤结构稳定性以及生物学特性具有不同的作用<sup>[5-6]</sup>。土壤团聚体稳定性作为土壤结构稳定性的重要指标,能有效反映在土壤侵蚀过程中土壤的抗侵蚀能力<sup>[6]</sup>。团聚体稳定性下降,土壤结构在降雨击溅作用下易受破坏,土壤团聚体破碎产生更易迁移的土壤颗粒,从而加剧土壤侵蚀,恶化土壤维持水、热和养分平衡的功能<sup>[4,6]</sup>。因此,研究不同植被类型下土壤有机碳和团聚体的含量、分布,是了解与掌握植被生长对土壤肥力与土壤结构稳定性影响的重要途径,同时也为土壤管理和植被恢复提供依据。

植物措施是控制水土流失、提高土壤养分和增强生态系统稳定的重要途径<sup>[7]</sup>。近年来,在侵蚀退化丘陵区实施的水土保持植物措施在改善土壤结构,提高

土壤质量和维持生态系统稳定方面取得了突出成效<sup>[8]</sup>。为了有效控制侵蚀退化区的水土流失,改善土壤贫瘠的状况,各地采用了多种植被恢复措施。这些植被措施显著提高了当地的植被覆盖率,一定程度上减少了丘陵山区的水土流失,但植物可以改变土壤养分循环的强度,影响土壤质量,不同植物对土壤养分循环和团聚体稳定性的影响存在差异<sup>[7-9]</sup>。因此,不同植被类型对土壤肥力和结构的影响仍需进一步研究。目前,一些学者<sup>[8,10]</sup>对植物措施在减少土壤养分流失和土壤团聚体稳定性方面的研究,主要从植被类型、生长时间、管理方式等方面着手,对团聚体和有机质在不同土层深度的分布特征及其关系进行分析,对实施植物措施后土壤团聚体稳定性的坡面空间变化研究不多。而坡位是影响土壤理化性质和植被生长的重要因素<sup>[2,11]</sup>。由于植物、土壤有机质、土壤微生物等环境因子能作用于土壤团聚体形成的整个过程,因而土壤团聚体的变化一定程度上可以反映出土壤环境状况<sup>[4-5]</sup>。因此,本文以华南花岗岩侵蚀退化区为研究区域,分析不同植被类型下土壤有机碳和团聚体的坡位分布以及在不同土壤深度的变化特征,明确花岗岩退化丘陵区生态重建过程中,更有利于水土保持,改善土壤质量和维持区域生态系统稳定的适宜植被类型和生态恢复模式。这将有助于进一步揭示植

被类型对土壤肥力与结构特性的影响规律,为红壤侵蚀退化区的水土保持和生态重建与恢复以及维护生态系统稳定提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

以广东省五华县华城镇源坑水小流域(115°36′—115°38′E,24°05′—24°07′N)为研究区,该流域属于亚热带海洋季风区,多年平均气温 20.5℃,多年平均降水量约为 1 500 mm,4—9 月的降水量约占全年降水量的 73%;流域为典型的低山丘陵区,海拔为 140~310 m。流域土壤主要为花岗岩母质发育的红壤,土壤结构疏松,抗冲、抗蚀性差,pH 为 4.5~6.0。域内乔木有马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)和桉树(*Eucalyptus robusta*)等。灌木主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、油茶(*Camellia oleifera*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)。草本层以芒萁(*Dicranopteris dichotoma Bernh.*)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)为主。

表 1 各径流小区的基本情况

类型	小区大小 (长×宽)/m	树龄/ a	树密度 (行×列)	平均 树高/m	郁闭度	林下植被 类型
荒草地	20×5	—	—	—	—	杂草(盖度 0.3)
桉树	20×5	10	8×3	9.5	0.75	芒(盖度 0.1);少量马尾松
湿地松	20×5	10	8×3	3.8	0.45	狗牙根(盖度 0.3)
木荷	20×5	10	8×3	3.5	0.50	糖蜜草(盖度 0.4)

注:—为无数据。

### 1.3 样品分析

土壤总有机碳(TOC)用重铬酸钾氧化法、全氮(TN)采用凯氏定氮法、土壤容重采用环刀法、土壤含水量采用烘干法<sup>[13]</sup>测定;溶解性有机碳(DOC):鲜土样按液土比 5:1 的比例混合后置于盛有 100 mL 去离子水的锥形瓶中,并在往复式恒温振荡器中(250 r/min,20℃)振荡 1 h 后,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液,过 0.45 μm 滤膜,用 TOC 仪测土壤 DOC<sup>[14]</sup>。

团聚体稳定性采用干筛、湿筛法<sup>[15]</sup>,并计算衡量团聚体稳定性的指标:平均质量直径(MWD,mm)、几何平均直径(GMD,mm)和团聚体分散度(PAD,%).湿筛后用超声波细胞破碎仪对各粒级团聚体进行超声分散,筛分出砂砾、烘干并称重,湿筛后各粒级团聚体分别减去对应粒级的砂砾重,即为湿筛后的各粒级团聚体质量。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{r_{i-1} + r_i}{2} m_i$$

$$GMD = \exp \left\{ \frac{\sum m_i \ln (r_{i-1} + r_i / 2)}{\sum m_i} \right\}$$

式中: $n$  为套筛中筛子个数; $r_i$  为套筛中第  $i$  个筛的

### 1.2 样品采集

采样点为五华县水保站于 2009 年在源坑水小流域 30°自然坡面建立的径流小区<sup>[12]</sup>。包括 1 个撂荒处理形成的荒草地小区,其他 3 个小区分别挖穴种植的桉树、湿地松和木荷,形成桉树小区、湿地松小区和木荷小区。其中种植初期木荷小区林下种植糖蜜草,形成“林+草”的林地措施,桉树和湿地松小区林下裸露见表 1。

2019 年 3、6 月在 4 个试验小区内采集土壤样品,沿坡面方向分别在上、中、下(US、MS、BS)3 个坡位取环刀样,3 次重复;同时每个坡位分 0—5、5—10、10—20 cm 3 层采集原状土样,3 次重复。用五点取样法采集表层土壤(0—10 cm),制成混合样约 2 kg,分装于硬质塑料保鲜盒中(取土前去除表层杂物)。分层样用自封袋密封,于 4℃下避光保存,用于土壤理化性质分析;环刀样用于测定土壤容重。将混合样平铺于室内通风处,挑去植物根茎等杂质,并将块状土沿自然结构掰开,分成约 10 mm 的团粒,避光条件下自然风干。风干后的土样用于土壤团聚体分析。

孔径(mm), $r_0 = r_1$ , $r_n = r_{n+1}$ ;  $m_i$  为该粒级筛上的团聚体质量(g);

$$PAD = \frac{m_d - m_w}{m_d} \times 100$$

式中: $m_d$ 、 $m_w$  分别为干筛法测定 >0.25 mm 团聚体的质量和湿筛法测定 >0.25 mm 团聚体的质量(g)。

### 1.4 数据分析

数据的统计分析用 Microsoft Excel 2013、IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行,采用单因素方差分析和最小差异法进行差异显著性分析(LSD, $p < 0.05$ )。

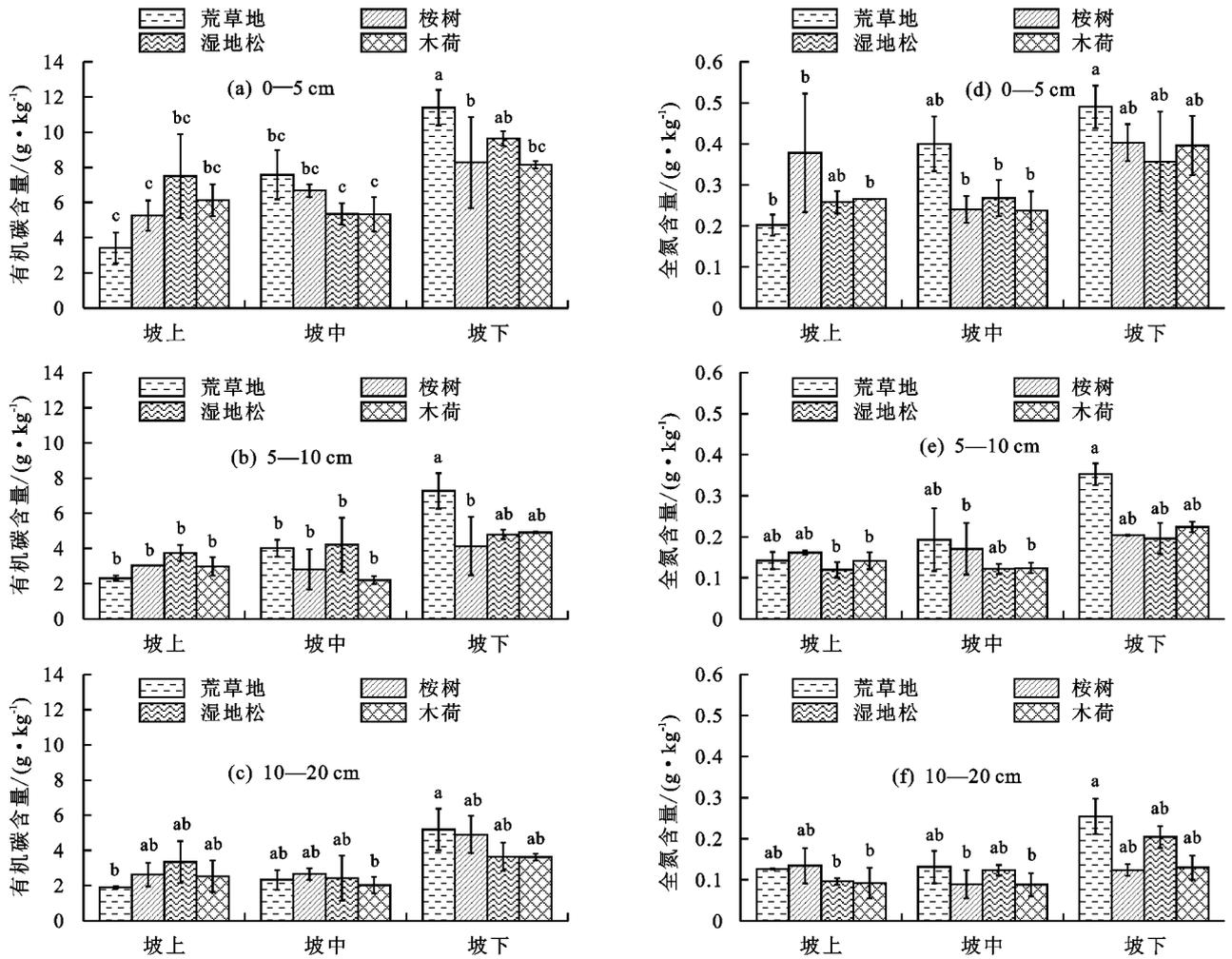
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 TOC、DOC 和 TN 坡面分布特征

不同植被类型下土壤 TOC 和 TN 在坡面的分布情况见图 1。在 4 个处理方式的不同土壤层次中,土壤 TOC 与 TN 在坡下部位均表现为荒草地含量最高,而坡上含量低于林地。在 0—5、5—10 cm 土层,除荒草地的坡下土壤 TOC、TN 含量显著高于其坡上含量外,其他类型 TOC 和 TN 含量在坡面分布差异不显著。不同坡位处,各植被类型土壤 TOC 和 TN 含量的层次差异显著,随土层深度的增加,土壤 TOC 与 TN 含量逐渐降

低。其中,各措施土壤 TOC、TN 在下坡位表上层(0—5

cm)的含量显著高于表下层(10—20 cm)。



注:不同小写字母表示同一土层深度下各植被类型、坡位间有显著差异( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同植被类型土壤有机碳与全氮的分布

各植被类型的 DOC 的坡面的分布情况与土壤 TOC 的分布特征类似(图 2)。不同土层深度荒草地坡下的土壤 DOC 含量显著高于坡上和坡中,桉树、湿地松和木荷 3 个植被类型的 DOC 含量在坡下的土壤 DOC 含量最高,但与坡上无显著差异。同一土层深度,荒草地下坡位的 DOC 含量显著高于同层次的其他 3 个林地类型( $p < 0.05$ )。随着土层深度加深,土壤中 DOC 含量逐渐降低,且其在 0—5 cm 的表上层含量显著高于 10—20 cm 的表下层含量( $p < 0.05$ )。而各植被类型不同坡位、土层的 DOC 含量和 TOC 含量之间存在显著的正相关关系(图 3),表明在土壤养分在迁移过程中土壤 DOC 与 TOC 在坡面的分布情况随坡位、土层深度的变化保持一致。此外,同一土层深度,3 个林地之间的 C/N 值基本一致且高于荒草地,但是未达到显著水平(图 2)。除荒草地,其他 3 个林地土壤 C/N 值表现为 10—20 cm 的土层  $>$  5—10 cm 的土层  $>$  0—5 cm 的土层。由于 C/N 可以作为反映土壤有机质分解能力的一个近似指标<sup>[16]</sup>。林地的土壤 C/N 随着

土层深度的增加而增加,说明相较于草本植物,木本植物有利于下层土壤有机质的积累。

在坡面尺度上,荒草地 TOC、TN、DOC 和 C/N 从坡上至坡下的坡面分布的变异系数分别为 53%~57%,41%~48%,60%~67%,14%~17%;桉树 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数分别为 21%~39%,13%~26%,8%~32%,8%~15%;湿地松 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数分别为 12%~29%,19%~40%,30%~38%,2%~11%;木荷 TOC、TN、DOC 和 C/N 的坡面分布的变异系数分别为 22%~42%,22%~33%,23%~39%,5%~11%。荒草地的各项指标在坡面分布的变异系数显著高于其他林地,其中土壤 DOC 坡面空间变异系数最大。总体而言,随着土层深度的增加,土壤有机碳、氮和溶解性有机碳含量逐渐降低,而且其在坡面空间分布差异性也相应地减小。木本植物比草本植物更有利于降低土壤碳氮的空间变异,这可能与其较低的侵蚀强度有关<sup>[12]</sup>。

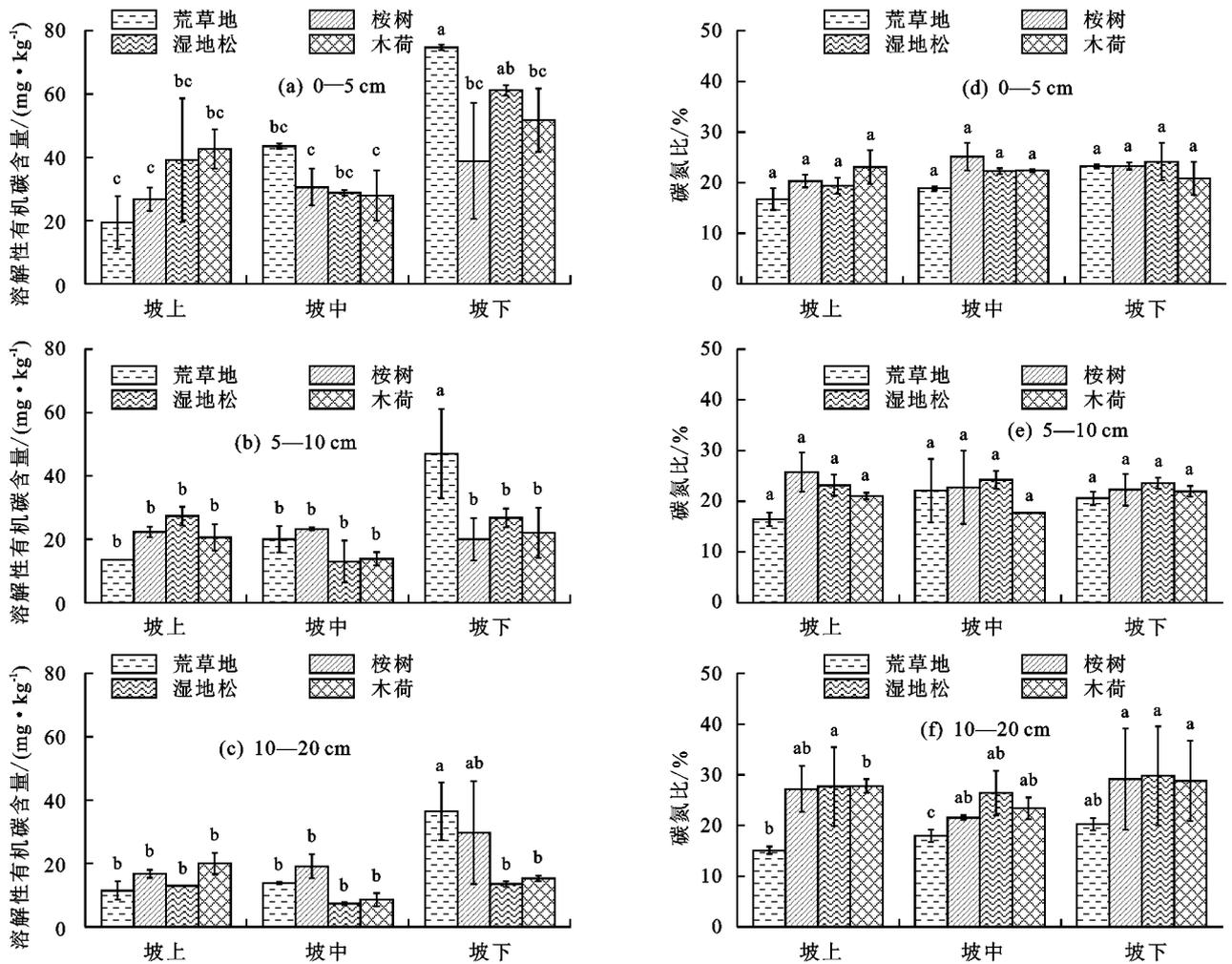


图 2 土壤溶解性有机碳与土壤 C/N

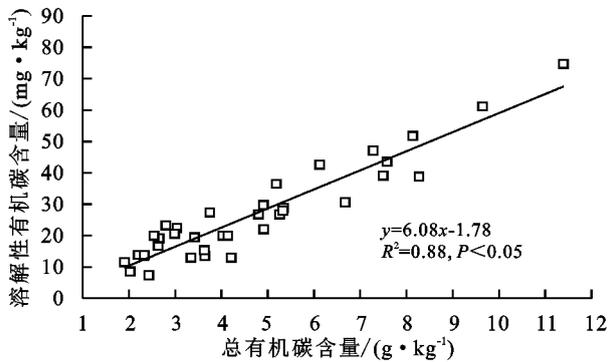


图 3 植物小区土壤溶解性有机碳与总有机碳含量的线性关系

### 2.2 不同植被类型红壤表层团聚体稳定性差异

在坡面尺度上, >2 mm 的水稳性大团聚体和 2~0.25 mm 中团聚体含量沿坡面向下逐渐增加, 但增加趋势不显著, 其含量为坡中<坡上<坡下(表 3)。在坡上位置, 荒草地和桉树 > 2, 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量显著高于湿地松, 其坡下位置的含量则无显著差异。木荷坡中位置 > 2, 2~0.25 mm 水稳性团聚体含量显著高于其他 3 个处理。

整体来看, 荒草地风干团聚体 MWD 与湿地松无显著差异, 与桉树和木荷具有显著差异 ( $p<0.05$ )。木荷水稳性团聚体 MWD 显著高于其他方式(表 4)。其

中木荷干筛、湿筛后的风干和水稳性团聚体 MWD 分别较荒草地高 15.28%, 20.10%; 分别较桉树高 18.01%, 19.58%, 较湿地松高 17.50%, 23.20%。此外, 各植被类型下团聚体 GMD 的变化情况与水稳性团聚体 MWD 的变化基本一致, 木荷团聚体 GMD 显著高于其他方式, 分别比荒草地、桉树、湿地松高 20.00%, 19.54%, 22.23%。同时木荷的团聚体分散度 PAD 显著低于其他方式, 较荒草地、桉树和湿地松分别少 21.29%, 14.05%, 18.50%。而 PAD 值越大, 表示湿筛过程团聚体破碎越多, 团聚体稳定性越差。因此, 木荷的团聚体水稳性高于荒草地、桉树和湿地松。

由表 4 可知, 在坡面尺度上, 不同植物类型的风干团聚体 MWD 的变化顺序为坡上<坡中<坡下。水稳性团聚体 MWD、GMD, 除木荷坡中位置显著高于坡上外, 其他处理均为坡中位置最小, 其次为坡上。而 PAD 和容重则表现出与 MWD、GMD 完全相反的变化。每个处理的坡下土壤初始含水率显著高于坡上 ( $p<0.05$ )。同时木荷的各坡位土壤含水率高于其他处理的对应坡位土壤含水率。表明具有较好空间结构的林地较自然恢复草地和林下植被较少的林地具有更好的涵蓄水分和水土保持作用。

表 3 不同植被类型各粒径水稳性团聚体占中团聚体质量的比例

单位: %

坡位	类型	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.05 mm	<0.05 mm
坡上	荒草	10.69±1.05a	39.58±0.92b	40.71±1.26b	9.02±1.76ab
	桉树	10.09±1.78a	38.77±2.09b	40.40±1.54b	10.74±0.45a
	松树	6.78±2.17b	30.04±0.68c	57.37±0.93a	5.81±3.36b
	木荷	9.23±1.16ab	46.52±2.12a	33.44±1.61c	10.81±0.30a
坡中	荒草	7.90±1.20b	35.18±3.35a	42.47±4.12b	14.45±0.98a
	桉树	6.59±1.34bc	29.77±1.04b	50.96±1.97a	12.68±0.76ab
	松树	4.36±0.76c	29.39±1.11b	53.67±1.90a	12.59±2.30ab
	木荷	13.92±3.78a	36.20±3.10a	38.31±0.64b	11.57±0.05b
坡下	荒草	9.07±2.32a	38.87±0.77ab	40.89±2.93a	11.18±1.38a
	桉树	13.11±2.72a	37.17±0.79b	39.40±1.37a	10.32±1.02a
	松树	12.55±1.32a	45.02±4.82a	31.25±3.90b	11.18±2.24a
	木荷	11.77±1.70a	39.27±2.89ab	36.85±0.56ab	12.11±0.64a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各植被类型、坡位间有显著性差异( $p<0.05$ )。下同。

表 4 不同植被类型对土壤团聚体指标的影响

类型	坡位	MWD/mm		GMD/mm	PAD/%	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	土壤 含水率/%
		干筛	湿筛				
荒草地	坡上	2.39±0.08c	0.77±0.04b	0.33±0.04b	0.63±0.02c	1.12±0.04ab	13.16±0.54f
	坡中	2.69±0.14bc	0.60±0.06c	0.25±0.02c	0.73±0.02a	1.15±0.02ab	14.81±0.26de
	坡下	2.91±0.08b	0.69±0.08bc	0.29±0.01bc	0.71±0.02ab	1.07±0.11b	16.84±0.30c
桉树	坡上	2.75±0.09bc	0.73±0.07bc	0.30±0.02bc	0.62±0.02c	1.09±0.23b	14.50±0.59e
	坡中	2.93±0.33b	0.52±0.05c	0.21±0.01c	0.69±0.01b	1.17±0.03ab	15.63±0.55d
	坡下	3.10±0.14ab	0.82±0.09b	0.33±0.03b	0.63±0.01c	1.14±0.03ab	15.63±0.74d
松树	坡上	2.27±0.18c	0.55±0.08c	0.24±0.04c	0.72±0.0a	1.28±0.02a	15.34±0.24de
	坡中	2.67±0.53bc	0.46±0.02c	0.21±0.01c	0.72±0.01a	1.04±0.03b	15.78±0.37d
	坡下	2.83±0.17b	0.98±0.15ab	0.43±0.06a	0.58±0.01d	1.07±0.01b	18.01±0.87b
木荷	坡上	2.72±0.18bc	0.83±0.13b	0.38±0.06ab	0.56±0.01e	1.10±0.10ab	17.56±0.25bc
	坡中	3.27±0.15ab	1.03±0.26a	0.41±0.10a	0.51±0.02f	1.11±0.09ab	18.55±0.36b
	坡下	3.44±0.34a	0.72±0.10bc	0.30±0.05bc	0.63±0.01c	1.15±0.03ab	20.07±0.03a

### 3 讨论

#### 3.1 植被类型对土壤有机碳和溶解性有机碳分布的影响

植物凋落物经微生物作用形成腐殖质进入土壤,进而增加土壤有机碳含量,随土层向下而递减<sup>[17]</sup>。而且表土层是供应植物生长的主要养分层,也是植物根系的集中层,因而呈现出随土层加深而递减的特征<sup>[18]</sup>。坡位也是影响土壤理化性质的重要因素<sup>[11]</sup>。土壤侵蚀过程坡上侵蚀区的土壤有机碳和养分随泥沙迁移,并在沉积区积累,从而造成沉积区土壤理化性质和生物特性不同于侵蚀区<sup>[2]</sup>。本研究中各植被类型下坡位土壤 TOC、TN 含量高于上坡位,且林地类型变异系数低于荒草地,表明林地的冠层结构和林下覆盖物能有效减少土壤侵蚀,并有利于土壤有机质和养分在坡面的均质化<sup>[3]</sup>。而荒草地与林地不同土壤层次 C/N 的差异也表明林地类型有助于深层土壤有机碳的积累。同时,不同处理间土壤含水率的差异,说明相较于自然恢复形成的草地,林地冠层对降水的截留作用以及林下覆盖对径流的拦截,不仅增强

了土壤持水能力,同时也降低了地表径流,减少土壤养分迁移<sup>[19]</sup>。林地类型各坡位之间无显著差异,可能受林下草本植物根系分布影响,根系的固土作用减少了有机碳随泥沙沿坡面向下迁移,导致不同林地类型的土壤 TOC、TN 在 0—20 cm 的土壤层未表现出显著坡面差异。王义祥等<sup>[20]</sup>的研究也表明,草本植物对土壤团聚体的影响主要集中在 0—20 cm;而且林地的木本植物根系对较深土层的土壤状况改善作用高于表层,也可能造成各林间土壤性质差异不显著。

溶解性有机质能快速反映出外界干扰对土壤有机质的影响,对土壤碳循环具有重要意义<sup>[16,21]</sup>。由于土壤 DOC 主要来源于土壤表层枯落物、根系分泌物和有机质的水解,土壤 DOC 与 TOC 常处于动态平衡,一定条件下土壤有机质的各组分之间可以相互转化<sup>[21]</sup>。本研究中,土壤 DOC 与 TOC 具有较高的相关关系也验证了这一点(图 3)。同时,不同植被类型下 DOC 含量均表现为土壤表层(0—5 mm)含量最高,且随土层深度增加而减少。一方面,表层土壤结构疏松,含有较高的土壤有机质和养分,微生物活

性较高,加速了外界有机质向土壤中输入与有机碳分解速率,从而产生较高 DOC 含量;另一方面,随着土层加深由于黏土矿物的物理吸附增强,造成表下层土壤 DOC 含量降低<sup>[22]</sup>。湿地松和木荷在 5—20 cm 土层的 DOC 含量低于桉树和荒草地,可能由于湿地松和木荷的冠层深厚且林下植被覆盖度大,林下土壤疏松,土壤 DOC 遇水向更深层淋溶造成的。

### 3.2 植被类型对土壤团聚体稳定性的影响

土壤结构稳定是维持动植物生长和土壤功能的重要基础,而土壤团聚体的水稳性是反映土壤结构稳定性的重要指标<sup>[4,6]</sup>。大团聚体( $>0.25$  mm)是维持土壤结构稳定的基础,其含量的高低一定程度上能反映土壤结构的好坏,大团聚体含量越高,土壤结构越稳定<sup>[10]</sup>。MWD 和 GMD 是评价土壤团聚体稳定性的主要参数,其值越大,表示团聚体稳定性越好,反之,团聚体稳定性越差。本研究中在坡上和坡中位置,荒草地和木荷 $>0.25$  mm 的水稳性团聚体含量显著高于桉树和湿地松,而两者之间无显著差异。但是木荷的团聚体 MWD 和 GMD 显著高于荒草地,表现出较强的水稳性。导致这一结果的原因可能是木荷林下一直保有较高的草本植物覆盖度,其表层枯落物和植物根系积累量要高于其他植被类型,从而强化了团聚体的水稳性<sup>[4]</sup>。同时坡位也是影响土壤理化性质的重要因素<sup>[11]</sup>。本研究中表层土壤 $>0.25$  mm 的水稳性团聚体含量随坡位变化不显著,其可能原因在于相较于深层土壤(20 cm 以下)而言,表层土壤受草本植物的根系作用强于深根的本木植物,表层根系的固结、缠绕增强了土壤抗蚀性,从而增强了土壤团聚体分布的均质化,该结果与钱婧等<sup>[23]</sup>得出的坡长对团聚体稳定性的影响不显著的结论基本一致。已有研究<sup>[9-10]</sup>表明,植被类型影响团聚体含量及其在土壤层次分布,然而土壤团聚体的粒径及其稳定性受到土壤微生物活性、土壤侵蚀程度以及气候等多种因素影响,而表现出不同的分布特征<sup>[5,24-25]</sup>。因此,针对不同土壤状况对团聚体性质的影响仍需要做进一步的研究。

## 4 结论

(1)在华南花岗岩侵蚀区,随着坡面土层加深,土壤碳氮元素含量逐渐降低,林地类型较荒草地更有利于土壤有机碳氮的均质化和有机碳在深层土壤的积累;而且林地致密的冠层结构和林下植被覆盖有利于提高土壤含水量。

(2)荒草地和木荷小区 $>0.25$  mm 的水稳性团聚体含量在坡上、坡中显著高于桉树和湿地松小区( $p < 0.05$ ),而荒草地与木荷之间无显著差异。

(3)具有较好的林下植被覆盖的木荷小区的团聚体稳定性显著高于单一地表覆盖的荒草地和林下植

被较少的湿地松和桉树小区。其中木荷小区水稳性团聚体平均质量直径(MWD)较荒草地、桉树和湿地松分别高 20.10%,19.58%,23.20%;几何平均直径(GMD)较荒草地、桉树和湿地松分别高 20.00%,19.54%,22.23%;团聚体分散度(PAD)较荒草地、桉树和湿地松分别低 21.29%,14.05%,18.50%。

(4)在花岗岩侵蚀退化区,植被类型对土壤肥力的影响主要表现在碳氮元素在坡面分布的均质化程度。而且林地团聚体稳定性均高于草本类型,其中具有乔+草植物空间结构的木荷林地的土壤结构优于其他自然恢复草地、湿地松和桉树林地。而具有较好空间结构的林地更有利于提高土壤结构稳定性,增强土壤抗侵蚀能力,减少土壤养分流失。因此,在侵蚀退化丘陵山区进行生态恢复时要注意构建多层次的植物空间结构,林草结合,增强植物群落稳定性。

### 参考文献:

- [1] Wang B, Zhang G, Duan J. Relationship between topography and the distribution of understory vegetation in a Pinus massoniana forest in Southern China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015, 3(4):291-304.
- [2] Nie X, Guo W, Huang B, et al. Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region[J]. Catena, 2019, 176:104-111.
- [3] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge D J, et al. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain[J]. Catena, 2013, 104:153-160.
- [4] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
- [5] Bailey V L, Bilskis C L, Fansler S J, et al. Measurements of microbial community activities in individual soil macroaggregates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 48:192-195.
- [6] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1):3-22.
- [7] 袁再健,马东方,聂小东,等.南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J].土壤学报,2020,57(1):12-21.
- [8] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124:17-23.
- [9] Cheng M, Xiang Y, Xue Z, et al. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2015, 124:77-84.
- [10] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤

- 团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [11] 赵汝东,樊剑波,何园球,等.坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响[J].生态环境学报,2010,19(12):2857-2862.
- [12] 廖义善,孔朝晖,卓慕宁,等.华南红壤区坡面产流产沙对植被的响应[J].水利学报,2017,48(5):613-622.
- [13] 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.
- [14] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J].Soil Biology and Biochemistry,2006,38(5):991-999.
- [15] 吴新亮.几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [16] Ostrowska A, Porębska G. Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils[J].Ecological Indicators,2015,49:104-109.
- [17] 王明慧,王国兵,阮宏华,等.苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征[J].生态学杂志,2012,31(5):1165-1170.
- [18] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等.北京山地森林的土壤养分状况[J].林业科学,2010,46(5):169-175.
- [19] Chandler K R, Stevens C J, Binley A, et al. Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation[J].Geoderma,2018,310:120-127.
- [20] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌,等.生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].热带亚热带植物学报,2012,20(4):349-355.
- [21] Ramesh T, Bolan N S, Kirkham M B, et al. Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review[M]. Advances in Agronomy: Academic Press,2019.
- [22] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J].Soil Science,2000,165(4):277-304.
- [23] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J].生态学报,2018,38(5):1590-1599.
- [24] Nie M, Pendall E, Bell C, et al. Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedbacks[J].Soil Biology and Biochemistry,2014,68:357-365.
- [25] 左继超,胡建民,王凌云,等.侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):112-117.
- (上接第136页)
- [11] 杨明义,徐龙江.黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J].水土保持学报,2010,24(2):30-34.
- [12] 赵括茵.复合指纹识别法研究黄土高原小流域泥沙来源[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [13] 林金石,黄炎和,张旭斌,等.南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J].水土保持学报,2012,26(3):53-57.
- [14] 常维娜,周慧平,高燕.基于复合指纹法的九乡河小流域泥沙来源解析[J].水土保持学报,2014,28(6):106-110,154.
- [15] 郑红雷.重庆南川石漠化地区可持续发展模式研究[D].重庆:西南大学,2010.
- [16] 郑必昭.土壤分析技术指南[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [17] 周慧平,陈玉东,常维娜.指纹技术识别泥沙来源:进展与展望[J].水土保持学报,2018,32(5):1-7.
- [18] Wilkinson S N, Hancock G J, Bartley R, et al. Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia[J].Agriculture, Ecosystems & Environment,2013,180:90-102.
- [19] Franz C, Makeschin F, Weiß H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasilia DF, Brazil-using the fingerprint approach[J].Science of the Total Environment,2014,466:513-523.
- [20] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia [J]. Water Resources Research,2003,39(3):1056-1069.
- [21] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J].Science of the Total Environment,2005,344(1/3):159-184.
- [22] 张果,胡雪峰,吴小红,等.上海城市土壤磁化率的垂向分布特征及环境指示意义[J].土壤学报,2011,48(2):429-434.
- [23] 程倩云,彭韬,张信宝,等.西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的<sup>137</sup>Cs和磁化率双指纹示踪研究[J].水土保持学报,2019,33(2):140-145,154.
- [24] 李安定,李苇洁,彭熙,等.贵州喀斯特区野生葛藤群落主要种群生态位[J].浙江农林大学学报,2012,29(4):491-497.