

# 侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响

左继超<sup>1,2</sup>, 胡建民<sup>1,2</sup>, 王凌云<sup>1,2</sup>, 李贇璟<sup>1,2</sup>, 万佳蕾<sup>1,2</sup>, 郑海金<sup>1,2</sup>

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029)

**摘要:** [目的] 探讨不同侵蚀程度下红壤团聚体和养分的变化规律, 为侵蚀红壤的肥力提升和合理开发利用提供理论依据。[方法] 将红壤表层按照不同深度剥离来模拟不同土壤侵蚀程度, 比较分析不同侵蚀程度下团聚体稳定性、有机质和各养分的变化规律及其相互关系。[结果] 各侵蚀程度红壤团聚体干筛粒级分布规律大体相似, 以 $\geq 2$  mm 粒级团聚体为优势粒级, 与无明显侵蚀土壤相比, 强烈侵蚀土壤 $\geq 2$  mm 水稳性团聚体含量降低近 1/3; 随着土壤侵蚀程度增加, 土壤碳、氮、磷等养分含量均表现出逐渐减少的规律, 其中强烈侵蚀土壤有机质、全氮和全磷含量减少了 30% 左右, 碱解氮含量减少了近 50%, 速效磷含量减少了 80% 以上。相关分析表明, 土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮含量均与 $\geq 2$  mm 团聚体含量、WSA、MWD 和 GMD 值具有较好的正相关性( $p < 0.05$ ), 与  $D$  和  $PAD$  值呈负相关。[结论] 不同侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量有一定影响, 可通过增加有机肥来改善侵蚀红壤结构, 提高土壤肥力。

**关键词:** 红壤; 侵蚀程度; 团聚体; 有机质; 氮; 磷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0112-06

中图分类号: S158

**文献参数:** 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. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 020; Zuo Jichao, Hu Jianmin, Wang Lingyun, et al. Effects of soil erosion intensity on aggregate size distribution and nutrient content in red soil region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 112-117. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 020

## Effects of Soil Erosion Intensity on Aggregate Size Distribution and Nutrient Content in Red Soil Region

ZUO Jichao<sup>1,2</sup>, HU Jianmin<sup>1,2</sup>, WANG Lingyun<sup>1,2</sup>, LI Yunjing<sup>1,2</sup>, WAN Jialei<sup>1,2</sup>, ZHENG Haijin<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the paper is to study the variation of soil aggregate distribution, nutrient content and their correlation under different soil erosion intensities in red soil region, and provide the theoretical basis for improving the soil fertility and reasonable development and utilization of red soil. [Methods] The tested soil was sampled from different layers below the surface to simulate the natural soil erosion of different intensities, and soil aggregate distribution, nutrient content and their correlation was investigated. [Results] The aggregate size showed similar pattern in red soil with different erosion intensities, and was dominated by the aggregate size  $\geq 2$  mm. Compared to CK,  $\geq 2$  mm water stable aggregate content decreased by 1/3. With the increase of erosion intensity, the contents of nutrients, including organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), and available phosphorus (AP), aggregate mechanical stability and water stability decreased. The content of OM, TN and TP in severely eroded soil decreased by 30%, AP by 50% and AN by 80%, respectively. Correlation analysis showed that the content of soil organic matter, TN, TP and AN significantly and positively correlated with

收稿日期: 2016-05-18

修回日期: 2016-06-20

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045), “红壤坡地雨洪资源利用水土保持技术研究”(201401051); 水利部技术示范项目“坡面整治与雨水集蓄利用技术在宁都果业生产中的推广应用”(SF-201623); 江西省水利科技项目(KT201421, KT201215)

第一作者: 左继超(1987—), 男(满族), 河北省承德市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持生态效应研究。E-mail: jczuo1121@163.com。

通讯作者: 胡建民(1974—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hjmhx@jx-sl.gov.cn。

$\geq 2$  mm aggregate,  $>0.25$  mm aggregate(WSA), the mean weight diameter(MWD) and geometric mean diameter(GMD)( $p < 0.05$ ), whereas correlated negatively with aggregate fractal dimension( $D$ ) and percentage of aggregate disruption(PAD). [Conclusion] The soil erosion intensity affects soil aggregate distribution and nutrient content, and the application of organic fertilizer in red soil plays an important role in improving soil structure and fertility.

**Keywords:** red soil; erosion intensity; soil aggregate; organic matter; nitrogen; phosphorus

红壤广泛分布于中国热带和亚热带地区,这些地区水、热、生物资源丰富,土地的生产潜力很大。但由于降雨量大,土壤淋溶作用强,加之人类对土地资源的长期不合理利用,部分地区出现不同程度的土壤侵蚀,导致土壤肥力衰退,土壤结构性状也受到破坏<sup>[1]</sup>。一般来讲,侵蚀越严重的区域,有机质含量越低<sup>[2]</sup>。有研究表明,红壤丘陵严重侵蚀地区的土壤在长期侵蚀作用下,完全失去有机质层的土壤可达山地面积的一半以上<sup>[3]</sup>。对不同侵蚀程度红壤结构和肥力的研究,对于防治红壤侵蚀和改善土壤肥力状况具有重要意义。

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,是土壤的重要组成部分<sup>[4]</sup>,土壤团聚体的稳定性对土壤肥力质量和土壤的可持续利用等有很大的影响<sup>[5]</sup>,有机质被认为是形成稳定土壤结构的重要条件,并且团聚体的变化与土壤养分含量密切相关。土壤团聚体颗粒组成的不同是造成养分差异的最主要内在原因,土壤质量的高低,不仅与大、小粒级团聚体自身的作用有关,而且与它们的组成比例相关<sup>[6]</sup>。团聚体的变化与土壤养分含量密切相关,研究表明,土壤中的氮素、磷素、钾素等含量与水稳性大团聚体( $>0.25$  mm)呈极显著正相关<sup>[7]</sup>,这些元素能提高土壤中有有机碳的含量和促进大团聚体的形成<sup>[8]</sup>。

目前,对影响土壤团聚体和土壤养分分布的因素探讨较多,对于红壤地区,主要研究了植被恢复、土地利用方式、施肥方式、开垦年限等对土壤团聚体组成及养分分布特征变化<sup>[9-10]</sup>,着重在促进团聚体形成和提高土壤养分水平方面,而对于不同侵蚀程度红壤中土壤团聚体分布特征与有机质和养分含量之间的关系的研究尚未见报道。因此,本文以第四纪红黏土母质发育的红壤为研究对象,将其表层按照不同深度剥离以模拟不同土壤侵蚀程度,对比分析不同土壤侵蚀程度中团聚体的分布情况以及土壤有机碳、氮、磷的含量,探讨水稳性团聚体与有机碳和养分的关系,以期为侵蚀红壤的肥力提升和合理开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验地点位于江西省九江市德安县的江西水土保持生态科技园( $115^{\circ}42'38''-115^{\circ}43'06''$  E,  $29^{\circ}16'37''-29^{\circ}17'40''$  N),处于中国南方红壤的中心分布区域,具有典型代表意义。该基地位于江西省北部鄱阳湖流域博阳河水系的燕沟小流域,属亚热带季风气候区,年日照时数 1 650~2 100 h,多年平均气温  $16.7^{\circ}\text{C}$ ,多年平均无霜期为 249 d,多年平均降水量 1 397.3 mm,4—8 月份降水约占全年降水量的 60%左右;地貌为浅丘岗地,海拔 30~100 m,坡度  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,水土流失严重;地带性植被为亚热带常绿阔叶林。土壤为第四纪红黏土发育的红壤,呈酸性至微酸性,土壤剖面从上至下典型土体构型为 Ah(腐殖质层)-Bs(铁铝淀积层)-C<sub>sv</sub>(母质层),其中 Ah 层厚度约为 0~30 cm,Bs 层厚度约为 30~200 cm<sup>[6]</sup>。

### 1.2 试验设计

土层厚度是土壤性质的基本属性,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),可按照土壤发生层的剥蚀厚度进行土壤侵蚀程度分级,即将土壤侵蚀程度分为无明显侵蚀(A,B,C 三层剖面保持完整)、轻度侵蚀(A 层保留厚度大于 1/2,B,C 层完整)、中度侵蚀(A 层保留厚度大于 1/3,B,C 层完整)和强烈侵蚀(A 层无保留,B 层开始裸露,受到剥蚀)等。

试验于 2015 年 4 月 14—15 日,在试验区原始林地同一坡面内取原状土柱。该坡面为第四纪红黏土发育的红壤,其 A 层(腐殖质层)厚度约 15 cm。根据现行部颁标准设计 4 个处理:① 无明显侵蚀:不剥蚀 A 层,使 A 层保留厚度为 15 cm;② 轻度侵蚀:剥蚀 A 层 5 cm,使 A 层保留厚度为 10 cm;③ 中度侵蚀:剥蚀 A 层 8 cm,使 A 层保留厚度为 7 cm;④ 强烈侵蚀:A 层剥蚀 15 cm,使 B 层出露。每个处理 3 次重复,共取 12 个原状土柱,每个土柱直径为 45 cm,高为 40 cm,分别装入塑料盆内;然后在各个塑料盆内取表层 0—10 cm 的土壤 0.5 kg 左右,置于通风、荫凉、干燥的室内风干过 2 mm 筛,用于测定土壤理化性状。

### 1.3 土壤样品测试方法

土壤化学性质测定采用土壤分析的常规方法:土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法,全氮采用半微量凯氏法,碱解氮采用扩散吸收法,全磷采用硫酸—高氯酸消化—钼锑抗比色法,速效磷采用盐酸—氟化铵法。

土壤团聚体结构特性:土壤团聚体采用沙维诺夫干筛法和湿筛法(分析仪器采用土壤团粒分析仪)<sup>[11]</sup>,并依次计算平均质量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、团聚体分散度(percentage of aggregate disruption, PAD)、大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量(water stable aggregate, WSA)和团聚体分形维数(aggregate fractal dimension, D)<sup>[12]</sup>。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}\right) \quad (2)$$

式中:  $x_i$  ——任一粒径范围内土壤团聚体的平均直径(mm);  $m_i$  ——对应于  $x_i$  的团聚体质量(g)。

$$WSA_{>0.25\text{mm}} = \frac{m_w}{\sum m_i} \times 100\% \quad (3)$$

$$PAD = \frac{m_d - m_w}{m_d} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $m_d$  ——干筛法测定的大于 0.25 mm 的团聚体的质量(g);  $m_w$  ——湿筛法测定的大于 0.25 mm 的团聚体的质量(g)。

$m_i$  ——对应于  $x_i$  的团聚体质量(g)。团聚体分形维数  $D$  采用以下计算公式:

$$D = 3 - \frac{\lg(\omega_i - \omega_0)}{\lg(\bar{d}_i / d_{\max})} \quad (5)$$

式中:  $\bar{d}_i$  ——团聚体相邻粒径  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间的平均直径(mm);  $d_{\max}$  ——最大粒径团聚体平均直径(mm);  $\omega_i$  ——直径小于  $\bar{d}_i$  的累积质量(g);  $\omega_0$  ——土壤样品质量(g)。先求出各土壤的不同粒径  $\bar{d}_i$  团聚体的  $\lg(\bar{d}_i / d_{\max})$  和值,再将两者进行线性拟合,求出斜率  $K$ ,则该团聚体分形值  $D = 3 - K$ 。

### 1.4 数据处理

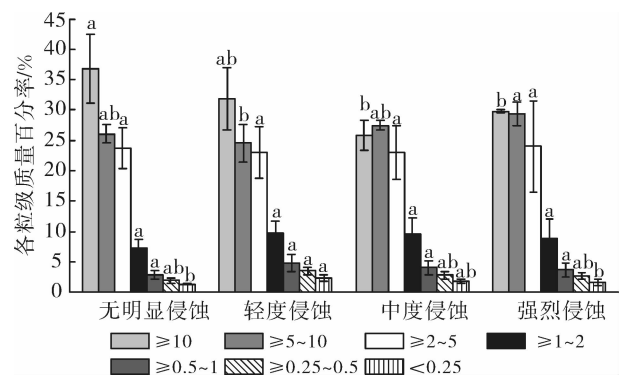
采用 Microsoft Excel 2010 进行数据分析及作图,SPSS Statistics 17.0 数据处理软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同侵蚀程度红壤团聚体粒径分布及稳定性

#### 2.1.1 干筛团聚体粒径分布 土壤团聚体抵抗外力

破坏的能力被称为团聚体机械稳定性,常用经过振荡干筛后团聚体粒径分布表征<sup>[13-15]</sup>。通过干筛法可以获得原状土壤中团聚体的总体数量,这些团聚体包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体。如图 1 所示,各侵蚀程度红壤团聚体干筛粒径分布规律基本相同,以  $\geq 10$  mm 粒径团聚体质量百分率最高,均在 22% 以上,轻度侵蚀甚至达到 37%;其次为  $\geq 5 \sim 10$  mm 粒径团聚体(中度侵蚀在  $\geq 5 \sim 10$  mm 除外)和  $\geq 2 \sim 5$  mm 粒径团聚体含量,分别占团聚体总量的 25%~29% 和 23%~24%,而 2 mm 以下粒径团聚体质量百分率相对较低,普遍低于 10%,且随着粒径的减小,团聚体含量也随之减少。表明  $\geq 2$  mm 粒径团聚体在不同侵蚀程度红壤结构组成中具有重要地位。不同侵蚀程度之间各粒径团聚体含量有所差异,与无明显侵蚀相比,中度侵蚀和强烈侵蚀红壤处理中  $\geq 10$  mm 粒径团聚体含量分别降低了 41.9% 和 65.3%,  $\geq 5 \sim 10$  mm 粒径团聚体含量则随着侵蚀程度的增加呈增加趋势,分别提高了 5.5% 和 13%,说明随着侵蚀程度的加强,  $\geq 10$  mm 粒径团聚逐渐破碎成  $\geq 5 \sim 10$  mm 粒径较小团聚体。



注:不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 不同侵蚀程度红壤干筛团聚体粒径分布特征

#### 2.1.2 水稳性团聚体粒径分布 湿筛法获得的团聚体

是土壤中的水稳性团聚体,水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性具有重要意义,因而比非稳性团聚体更为重要<sup>[16]</sup>。图 2 为湿筛法测得的不同侵蚀程度红壤水稳性团聚体粒径分布状况。结果由图可知,与干筛法相比(图 1),湿筛条件下各侵蚀程度红壤  $\geq 0.25 \sim 0.5$  mm 和  $< 0.25$  mm 粒径团聚体显著增加,在各种侵蚀程度下均分别增加 1.4 和 2.9 倍以上,说明有较大粒径团聚体在水的作用下较不稳定。

比较不同侵蚀程度下红壤团聚体粒径分布特征,发现随着侵蚀程度的增加,  $\geq 2$  mm 粒径团聚体含量逐步减少,而  $< 0.25$  mm 水稳性团聚体含量呈增加

趋势,且随着侵蚀程度的增加,趋势显著。与无明显侵蚀相比,在强烈侵蚀条件下,A 土层丧失殆尽时, $\geq 2$  mm 水稳性团聚体的质量百分量损失近 1/3, $< 0.25$  mm 水稳性团聚体含量增加 1.4 倍,达到显著差异( $p < 0.05$ ),这说明侵蚀程度较高时大粒级团聚体更容易破碎,这可能与有机质在侵蚀土壤中积累量较低有关<sup>[17-18]</sup>。

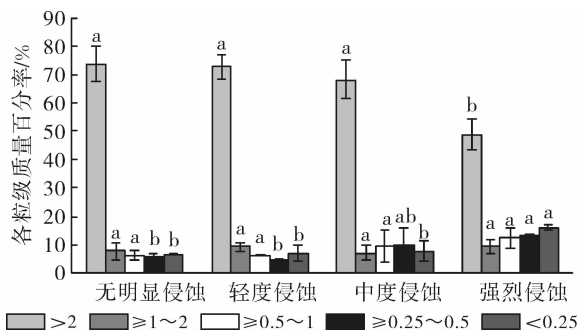


图 2 湿筛法测得的不同侵蚀程度红壤水稳性团聚体粒级分布状况

2.1.3 土壤团聚体主要水稳性指标 不同粒级团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物运动具有不同的作用<sup>[19-20]</sup>,因此在团聚体总量的基础上,团聚体大小分布状况与土壤的质量关系更

加密切。不同侵蚀程度下红壤团聚体水稳性指标变化见表 1。由表 1 可知,随着侵蚀程度增加, $> 0.25$  mm 大团聚体(WSA)含量有降低趋势,与无明显侵蚀相比,强烈侵蚀 WSA 的比例降低了 19.3%,差异显著( $p < 0.05$ )。这说明强烈侵蚀土壤团聚体分布发生明显改变,可能是由于侵蚀导致有机质含量降低,有机胶结物质减少,使得较高粒级团聚体破碎成为较低粒级团聚体。

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,MWD 和 GMD 值越大表示土壤团聚体的团聚度越高,稳定性越好。由表 1 可知,随着侵蚀程度增加,MWD 和 GMD 值逐渐减小,强烈侵蚀与其他 3 个处理相比达显著差异( $p < 0.05$ ),这一结果与其 WSA 变化一致。团聚体分形维数( $D$ )表征土壤结构组成及其均匀程度, $D$  值越小,土壤具有越良好的结构<sup>[21]</sup>;土壤团聚体破坏率(PAD)表示土壤团聚体在水蚀作用下的分散程度,PAD 越小,土壤团聚体的稳定性越高<sup>[22]</sup>。由表 1 可知, $D$  和 PAD 随着侵蚀程度的增加而增加,分别从无明显侵蚀 2.51%和 5.46%增加至强烈侵蚀的 2.68%和 14.69%。总体而言,随土壤侵蚀程度增加,土壤的稳定性和抗蚀性逐渐降低。

表 1 不同侵蚀程度土壤团聚体水稳性指标

侵蚀等级	团聚体水稳性指标				
	WSA/%	MWD/mm	GMD/mm	$D$	PAD/%
无明显侵蚀	87.82±1.97 <sup>a</sup>	1.68±0.07 <sup>a</sup>	2.10±0.46 <sup>a</sup>	2.51±0.02 <sup>b</sup>	5.46±0.39 <sup>b</sup>
轻度侵蚀	88.27±3.05 <sup>a</sup>	1.68±0.06 <sup>a</sup>	2.04±0.40 <sup>a</sup>	2.50±0.07 <sup>b</sup>	4.68±2.80 <sup>b</sup>
中度侵蚀	82.41±9.48 <sup>a</sup>	1.57±0.23 <sup>a</sup>	1.86±1.41 <sup>b</sup>	2.53±0.12 <sup>b</sup>	5.93±3.74 <sup>b</sup>
强烈侵蚀	70.83±0.90 <sup>b</sup>	1.31±0.05 <sup>b</sup>	0.67±0.12 <sup>b</sup>	2.68±0.01 <sup>a</sup>	14.69±1.30 <sup>a</sup>

注:WSA,MWD,GMD, $D$ ,PAD 分别表示表示水稳性团聚体含量,平均重量直径、几何平均直径、团聚体分形维数、团聚体分散度;同列数据后不同字母表示差异达显著水平( $p < 0.05$ )。下同。

## 2.2 不同侵蚀程度土壤有机质及养分变化

土壤养分和性质差异的主要原因之一在于团聚体颗粒组成的不同<sup>[23]</sup>。同时,有机质、氮、磷可以不同形态存在与土壤中,并在土壤结构和土壤肥力演变

中具有不同的变化趋势<sup>[24]</sup>。由表 2 可知,无明显侵蚀土壤有机质含量为 26.89 g/kg,轻度侵蚀土壤为 24.94 g/kg,中度侵蚀土壤为 18.26 g/kg,强烈侵蚀土壤的最低,为 18.23 g/kg。

表 2 不同侵蚀程度红壤有机质及各养分含量

侵蚀等级	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )
无明显侵蚀	26.89±11.19 <sup>a</sup>	0.72±0.19 <sup>ab</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	0.84±0.49 <sup>a</sup>	104.39±30.17 <sup>a</sup>
轻度侵蚀	24.94±4.81 <sup>a</sup>	0.83±0.05 <sup>a</sup>	0.13±0.02 <sup>a</sup>	0.48±0.17 <sup>ab</sup>	106.07±5.95 <sup>a</sup>
中度侵蚀	18.26±7.90 <sup>a</sup>	0.67±0.03 <sup>ab</sup>	0.11±0.02 <sup>ab</sup>	0.29±0.16 <sup>b</sup>	89.13±29.32 <sup>ab</sup>
强烈侵蚀	18.23±1.24 <sup>a</sup>	0.52±0.11 <sup>b</sup>	0.09±0.02 <sup>b</sup>	0.14±0.04 <sup>b</sup>	55.30±28.75 <sup>b</sup>

土壤全氮、全磷、速效磷、碱解氮含量变化规律与土壤有机质情况相似,均随土壤侵蚀程度的增加而呈

逐渐减小趋势,并随着侵蚀程度的增加,土壤养分流失加剧。当土层流失超过 8 cm 时(中度侵蚀),土壤

全氮、全磷、速效磷、碱解氮含量全部下降,分别下降了 6.78%,19.05%,65.61%和 30.77%;当 A 土层丧失殆尽时(剧烈侵蚀),全氮和全磷含量减少了 30%左右,碱解氮含量减少了近 50%,而速效磷含量减少了 80%以上。由此可见,侵蚀程度增加导致有机质含量减少的同时,还引起土壤氮、磷养分储量的减少。这可能与不同粒级团聚体中养分含量不同有关,有研究表明大团聚体中有机碳、氮、磷等养分含量明显高于小团聚体中的含量<sup>[25]</sup>。

### 2.3 土壤结构稳定性与土壤有机碳和养分的关系

土壤团聚体组成决定着土壤结构的好坏,良好的土壤结构往往依赖于直径 1~10 mm 的水稳性团聚体。在水稳性团聚体的形成过程中,有机胶结物质起着十分重要的作用,同时,土壤养分储量与土壤团聚体密切相关<sup>[10]</sup>。将各粒级土壤水稳性团聚体数量和稳定性指标与土壤有机质和各养分进行相关分析,结果见表 3。

由表 3 可以看出,各粒级团聚体均与土壤有机质含量存在显著相关关系( $p < 0.05$ ),并且随着土壤团聚体颗粒的变小,由正相关转变为负相关关系。这是

因为,红壤水稳性大团聚体的形成主要依靠有机质的胶结作用,大团聚体是由较小粒径团聚体通过有机无机胶结物质而形成的,同时,较大团聚体的增加又有利于有机物质的贮存<sup>[24]</sup>。因此,大团聚体中有机质含量较高,与有机质含量呈显著正相关关系。其他养分全氮、全磷和碱解氮同有机质类似,与各粒级团聚体存在相关关系( $p < 0.05$ ),与  $\geq 2$  mm 团聚体含量存在显著正相关关系( $p < 0.05$ ),而与  $< 0.25$  mm 微团聚体含量呈显著负相关关系,这说明  $\geq 2$  mm 粒级大团聚体能够赋存更多的有机质、全氮、全磷和碱解氮等养分,而小粒级团聚体赋存养分的能力较弱。速效磷与各粒级团聚体含量无显著相关,说明土壤速效磷对于水稳性团聚体的形成和稳定的影响低于土壤有机质和全氮<sup>[24]</sup>。同时,土壤有机质和养分含量与团聚体稳定性指标也具有良好的相关性。有机质、全氮、全磷、速效磷和碱解氮含量与 WSA, MWD 和 GMD 值均具有较好的正相关性( $p < 0.05$ ),与 D 和 PAD 值呈负相关,这说明土壤有机质促进团聚体形成、改善土壤结构,反之,土壤结构的改善可以调节土壤环境,促进有机质和养分的积累。

表 3 不同侵蚀等级土壤有机碳和养分与土壤结构指标间的相关关系

项目	不同粒级水稳性团聚体(mm)					WSA/%	MWD/mm	GMD/mm	D	PAD/%
	$\geq 2$	2~1	1~0.5	0.5~0.25	$< 0.25$					
有机质	0.727**	-0.051	-0.763**	-0.860**	-0.576*	0.759**	0.771**	0.811**	-0.672*	-0.565
全氮	0.614*	-0.117	-0.584*	-0.602*	-0.592*	0.630*	0.635*	0.742*	-0.549	-0.622*
全磷	0.585*	-0.019	-0.583*	-0.608*	-0.595*	0.636*	0.624*	0.809**	-0.552	-0.580*
速效磷	0.506	0.021	-0.469	-0.599*	-0.505	0.584*	0.558	0.752**	-0.475	-0.470
碱解氮	0.638*	0.003	-0.609*	-0.713*	-0.623*	0.706*	0.686*	0.833**	-0.595	-0.643*

注: \*\* 表示 1% 的差异显著性水平; \* 表示 5% 的差异显著性水平。

## 3 结论

(1) 各侵蚀程度红壤团聚体干筛粒级分布规律大体相似,  $\geq 2$  mm 粒级团聚体对保持不同侵蚀程度红壤结构稳定性具有重要作用;随着侵蚀程度的增加,大粒级团聚体逐渐破碎成较小粒级团聚体,红壤团聚体机械稳定性减弱。团聚体水稳性指标表明,随着侵蚀程度的增加土壤水稳性逐步降低。

(2) 在 A 土层厚度仅有 15 cm 的红壤坡地上,随着表土流失厚度的增加,土壤有机质、全氮、全磷、速效磷和碱解氮含量均呈逐渐减小规律,且随着侵蚀程度的增加,土壤养分流失加剧。

(3) 不同侵蚀程度土壤有机质、全氮、全磷、速效磷和碱解氮含量与 WSA, MWD 和 GMD 值均具有较好的正相关性,与 D 和 PAD 值呈负相关。有机质

可促进土壤团聚体形成、改善土壤结构;反之,土壤结构的改善可以调节土壤环境,促进有机质和养分的积累。因此,可通过增加有机肥来改善侵蚀红壤结构,提高土壤肥力。

### [参 考 文 献]

- [1] 张雪,李忠武,申卫平,等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 465-473.
- [2] 华路,张志刚,李俊波,等. 基于土壤<sup>137</sup>Cs 监测的土壤侵蚀与有机质流失:以密云水库为例[J]. 核农学报, 2005, 19(3): 208-213.
- [3] 谢宝平,牛德奎. 华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(1): 135-139.
- [4] Paul B, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate

- stability, soil carbon and crop productivity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013,164:14-22.
- [5] Gunina A, Ryzhova I, Dorodnikov M, et al. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils[J]. *Plant and Soil*, 2015,387(1/2):265-275.
- [6] Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012,148:22-28.
- [7] 程曼,朱秋莲,刘雷,等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. *生态学报*, 2013,33(9):2835-2844.
- [8] 耿瑞霖,郁红艳,丁维新,等. 有机无机肥长期施用对潮土团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2010,42(6):908-914.
- [9] 陈山,杨峰,林杉,等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012,26(5):211-216.
- [10] 杨莹莹,魏兆猛,黄丽,等. 不同修复措施下红壤水稳性团聚体中有机质分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012,26(3):154-158.
- [11] 张甘霖,龚子同. *土壤调查实验室分析方法*[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [12] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993,38(20):1896-1899.
- [13] 张琪,方海兰,史志华,等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. *林业科学*, 2007,43(S1):77-82.
- [14] 陈芳,王硕,吴新亮,等. 不同侵蚀程度下地带性土壤的结构及渗透性能分析[J]. *农业工程学报*, 2014,30(22):137-146.
- [15] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011,27(1):340-347.
- [16] Arai M, Minamiya Y, Tsuzura H, et al. Changes in water stable aggregate and soil carbon accumulation in a no-tillage with weed mulch management site after conversion from conventional management practices [J]. *Geoderma*, 2014,221:50-60.
- [17] 聂小东,李忠武,王晓燕,等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. *土壤学报*, 2013,50(5):900-908.
- [18] 王文欣,庄义琳,庄家尧,等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013,27(4):62-66.
- [19] Algayer B, Le Bissonnais Y, Darboux F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014,78(4):1168-1176.
- [20] 王海霞,孙红霞,韩清芳,等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2012,23(4):1025-1030.
- [21] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. *土壤学报*, 1999,36(2):162-167.
- [22] 宫阿都,何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. *水土保持学报*, 2001,15(3):112-115.
- [23] Peng X, Yan X, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an ultisol under long-term fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015,146:89-98.
- [24] 刘晓利,何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. *土壤*, 2009,41(1):84-89.
- [25] Mikha M M, Hergert G W, Benjamin J G, et al. Long-term manure impacts on soil aggregates and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015,79(2):626-636.