

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.034.

董天富, 邓志豪, 杨静, 等. 喀斯特退耕地不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 33-42.

Dong Tianfu, Deng Zhihao, Yang Jing, et al. Characteristics of Stability of Soil Aggregates at Different Vegetation Restoration Stages in Karst Reclaimed Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 33-42.

## 喀斯特退耕地不同植被恢复阶段 土壤团聚体稳定性特征

董天富<sup>1,2</sup>, 邓志豪<sup>1</sup>, 杨静<sup>1,2</sup>, 戴全厚<sup>1</sup>, 聂云鹏<sup>2,3</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站,  
广西 环江 547100; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

**摘要:** [目的] 探究黔中喀斯特地区黄壤和石灰土发育区耕地退耕对土壤结构和稳定性的影响, 为喀斯特区水土流失防治和退耕地恢复植被效益评价提供理论依据。 [方法] 基于干湿筛法, 对耕地(YM)和退耕后不同植被恢复阶段草地(CD)、灌丛(GC)、林地(LD)浅层(0—30 cm)土壤团聚体组成和稳定性差异特征进行了研究。 [结果] 两种土壤类型发育区土壤机械团聚体含量随粒径减小而降低, 水稳性团聚体含量随粒径减小先降低后上升, 且土壤机械团聚体均以 $>1\text{ mm}$ 为主, 黄壤和石灰土占比分别为 82.45%, 84.01%; 水稳性团聚体以 $>2\text{ mm}$ 为主, 占比分别为 53.53%, 54.61%。黄壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)随土层深度增加而降低, 石灰土则相反; 黄壤退耕地的团聚体稳定性相对于石灰土更好; 两种土壤 MWD, GMD 总体上均为 YM 最低, 土壤结构破坏率(PAD)最高, 即 YM 土壤团聚体稳定性最低, 不同退耕植被恢复阶段土壤团聚体稳定性相对于 YM 皆有所提高。黄壤土壤 MWD 与有机质含量(SOM)、全氮(TN)显著正相关, GMD 与 SOM 显著正相关, PAD 则是与粉粒显著正相关( $p<0.05$ ); 石灰土 MWD, GMD 与砂粒、全钾(TK)显著正相关( $p<0.05$ ), 和全磷(TP)极显著负相关, PAD 与砂粒、TK 极显著负相关, 与 TP 极显著正相关( $p<0.01$ ), 与黏粒显著正相关( $p<0.05$ )。多因素方差分析结果表明: 植被类型、土层深度和土壤类型均对土壤团聚体稳定性有显著( $p<0.05$ )影响。 [结论] 在两种土壤发育区, 退耕后不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性指标均高于耕地, 可见退耕还林还草有效提高了土壤团聚体稳定性, 增强了土壤抵抗侵蚀的能力, 研究结果能为喀斯特区水土保持措施布设和退耕地效益评价提供理论依据。

**关键词:** 喀斯特; 黄壤; 石灰土; 不同退耕植被; 团聚体稳定性

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0033-10

## Characteristics of Stability of Soil Aggregates at Different Vegetation Restoration Stages in Karst Reclaimed Land

Dong Tianfu<sup>1,2</sup>, Deng Zhihao<sup>1</sup>, Yang Jing<sup>1,2</sup>, Dai Quanhou<sup>1</sup>, Nie Yunpeng<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Huanjiang Observation  
and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100,  
China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the effects of cropland fallowing on soil structure and stability in the development areas of yellow and calcareous soils in Qianzhong Karst Region, and to provide theoretical basis for the prevention and control of soil erosion and evaluation of the benefits of revegetation of fallowed cropland in karst region. [Methods] Differential characteristics of soil aggregate composition and stability in shallow (0—30 cm) soil layers of cropland (YM) and different stages of vegetation resto-

收稿日期: 2023-02-25

修回日期: 2023-04-19

资助项目: 国家自然科学基金(42161009, 41807175, 31971438); 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2021]一般 223)

第一作者: 董天富(1998—), 男, 贵州大方人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。E-mail: 395102130@qq.com

通信作者: 杨静(1987—), 女, 重庆合川人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文研究。E-mail: kinty920@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

ration after fallow [grassland (CD), scrubland (GC), and woodland (LD)] were investigated based on the wet-dry sieve method. [Results] The contents of soil mechanical aggregates in the two types of soil development areas decreased with the decrease of particle size, and the content of water stable aggregates decreased at first and then increased with the decrease of particle size, and the main content of soil mechanical aggregates was  $>1$  mm aggregate, and the proportions of yellow loam and lime soil were 82.45% and 84.01%, respectively. The water stable aggregates were mainly  $>2$  mm aggregate, accounting for 53.53% and 54.61%, respectively. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of aggregates in yellow soil decreased with the increase of soil depth, while the opposite trend in calcareous soil to that in yellow soil was found. Cluster stability of yellow soil fallow land was better compared to calcareous soils. In general, the MWD and GMD of the two soils were the lowest in YM, and the soil structure damage rate (PAD) was the highest, the stability of soil aggregates in YM was the lowest, and the stability of soil aggregates in different stages of vegetation restoration was improved compared with that in YM. MWD of yellow soil was significantly positively correlated with organic matter content (SOM) and total nitrogen (TN), GMD was significantly positively correlated with SOM, and PAD was significantly positively correlated with silt ( $p<0.05$ ). MWD and GMD of calcareous soil were significantly positively correlated with sand and total potassium (TK) ( $p<0.05$ ), and negatively correlated with total phosphorus (TP). PAD was significantly negatively correlated with sand and TK, positively correlated with TP ( $p<0.01$ ), and positively correlated with clay ( $p<0.05$ ). The results of multivariate analysis of variance showed that vegetation type, soil depth and soil type had significant effects on soil aggregate stability ( $p<0.05$ ). [Conclusion] In the two soil development areas, the soil aggregate stability indexes of different vegetation recovery stages after fallow are higher than those of cultivated land, which shows that fallow returning forest to grass effectively improves the stability of soil aggregate and strengthens the ability of soil to resist erosion, and the results of this study can provide theoretical basis for the deployment of soil and water conservation measures and the evaluation of the benefits of fallow land in the karst area.

**Keywords:** karst; yellow soil; calcareous soil; different vegetation for returning farmland; aggregate stability

黄壤和石灰土是贵州省最主要的土壤类型,其中黄壤分布面积最广,占贵州省土壤总面积的 41.21%;石灰土次之,占比为 26.10%<sup>[1]</sup>。贵州省地处西南喀斯特中心,其土层浅薄、基岩裸露率高,极易发生水土流失<sup>[2-3]</sup>。近代以来,由于人为活动的影响,导致该区植被破坏、水土流失加剧、产生了以石漠化为代表的严重的生态问题<sup>[4]</sup>。为此,我国实施了“退耕还林还草工程”和一系列的石漠化综合治理工程,喀斯特区植被得以明显恢复,水土流失得到有效控制,石漠化得到有效遏制<sup>[5]</sup>。很明显,退耕还林还草工程取得了巨大成效,但在同一区域内,不同土壤类型下退耕效益是否有差异还尚不清楚。

退耕还林还草可以明显改善土壤理化性质,提高土壤生产力和抵抗侵蚀的能力<sup>[6-7]</sup>。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,对土壤的孔隙性、持水性、渗透性和抗蚀性有极大影响,其稳定性是决定土壤抗侵蚀能力和退化速率的重要因素<sup>[8-9]</sup>。因此,土壤团聚体特征常被作为评价土壤抗蚀能力的重要指标。研究

发现,退耕可以增加土壤有机质含量,促进土壤团聚体的形成,且退耕后不同植被措施下的土壤团聚体有所不同,团聚体稳定性存在差异<sup>[10]</sup>。袁瀛等<sup>[11]</sup>发现,随着退耕植被演替程度加深, $>5$  mm 团聚体含量显著增加,团聚体平均重量直径(MWD)显著增大,其稳定性提高;由政等<sup>[12]</sup>也发现类似的结果。但是,王妙倩等<sup>[13]</sup>发现虽然退耕后土壤团聚体 MWD 有所增加,但并未呈现随演替程度增加而增加的趋势。在喀斯特地区,也有研究发现坡耕地退耕还林后,土壤水稳性大团聚体含量有明显提高,且小粒径团聚体有向大粒径明显转化的趋势<sup>[14]</sup>;随着退耕地植被的不断恢复,土壤团聚体越来越稳定,抗侵蚀能力越来越强<sup>[15]</sup>。由此可知,退耕可以影响土壤的团聚体特征和分布,增强土壤团聚体稳定性。但是,土壤团聚体稳定性是否会随退耕后的植被演替加深而增加还没有定论;同一气候条件下,黄壤和石灰土退耕后各阶段土壤团聚体稳定性是否有差异也尚不明确。

因此,本研究在黔中喀斯特黄壤和石灰土发育

区,选择耕地和退耕后不同恢复阶段 3 种典型植被类型下的土壤为研究对象,对比 0—30 cm 土层土壤团聚体的组成特征,探讨不同土壤类型退耕后在不同恢复阶段下的土壤团聚体稳定性差异,以期能为喀斯特区水土流失防治和退耕地恢复植被效益评价提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区内,其中所选石灰土发育区 4 种植被类型位于花溪区花溪水库附近(北纬 26°26′—27°22′,东经 106°38′—107°42′),黄壤发育区 4 种植被类型位于花溪区歪脚村(北纬 26°17′—26°22′,东经 106°42′—106°45′)。花溪区位于黔中地区,该区总面积 964.32 km<sup>2</sup>,属中亚热带湿润温和型气候,气候温和,年均气温 15.6℃,全年日照 1 162.2 h,降雨充沛,年降雨量约为 1 215.7 mm,降

水多集中于 5—6 月。该区多山地丘陵,成土母质以石灰岩、白云岩、砂页岩等为主,地表土壤以黄壤和石灰土为主,平均土层厚度为 20—40 cm。耕地以坡耕地为主,面积为 202.37 km<sup>2</sup>。

1.2 样地设置和土样采集

结合土壤类型分布图和实地走访调查,于研究区选择了黄壤和石灰土条件下 3 种不同退耕年限、处于不同恢复阶段〔草地(CD)、灌丛(GC)和林地(LD)〕的地块作为研究对象,并以耕地(YM)作为对照。分别设置 3 个 20 m×20 m 的重复样地,调查并记录样地基本信息(表 1)。在 2021 年 5—6 月在各样地沿“S”曲线随机选取 5 个 1 m×1 m 样方,去除表面枯落物,按 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 分层取原状土和扰动土各 1 kg。原状土带回实验室后将土块沿自然缝隙掰成直径约为 10 mm 小土块后风干,用于土壤团聚体性质测定;扰动土风干研磨过筛后用于土壤理化性质的测定。

表 1 研究样地基本信息  
Table 1 Basic information of the study sample sites

土壤类型	样地	样地概况
黄壤	YM	种植玉米,行距约 1 m,株距约 40 cm,每年在 3 月中上旬播种,7 月中下旬收获
	CD	退耕 3~5 a,主要草本植被为白茅〔 <i>Imperata cylindrica</i> (L.) Beauv.],高 25~90 cm
	GC	退耕约 20 a,以马桑( <i>Coriaria nepalensis</i> Wall)为主要植被,株高 1.5~2.5 m,冠幅 3~18 m <sup>2</sup>
	LD	退耕 30~40 a,主要树种有刺槐( <i>Robinia pseudoacacia</i> L.)、盐肤木( <i>Rhus chinensis</i> Mill.)、构树( <i>Broussonetia papyrifera</i> ),株高 2.5~12 m,冠幅 7~40 m <sup>2</sup>
石灰土	YM	种植玉米,行距约 1 m,株距约 40 cm,每年在 3 月中上旬播种,7 月中下旬收获
	CD	退耕约 5 a,主要草本植被为白茅〔 <i>Imperata cylindrica</i> (L.) Beauv.],高 50~150 cm
	GC	退耕约 20 a,主要植被有火棘( <i>Pyracantha fortuneana</i> )、马桑( <i>Coriaria nepalensis</i> Wall)、修枝荚蒾( <i>Viburnum burejaeticum</i> Regel et Herd),株高 1.5~2.5 m,冠幅 5~20 m <sup>2</sup>
	LD	退耕约 40 a,主要树种有盐肤木( <i>Rhus chinensis</i> Mill.)、构树( <i>Broussonetia papyrifera</i> )、栎树( <i>Koeleruteria paniculata</i> ),株高 3.5~12 m,冠幅 7~40 m <sup>2</sup>

注:YM 为耕地;CD 为草地;GC 为灌丛;LD 为林地,下同。

1.3 土壤指标测定方法

(1) 土壤机械稳定性团聚体测定:称取 100.0 g 风干土样,置于孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛上,利用电动筛分仪震荡 5 min 计算各粒级团聚体的质量百分比,每份土样 3 个重复。

(2) 土壤水稳性团聚体测定:将干筛法测定各粒径团聚体按比例配置 50 g 土样,放入土壤团粒分析仪,调整套筛水面高度,使土样充分湿润,5 min 后启动土壤团粒分析仪(XDB0601 型),以 30 次/min 的频率、3 cm 振幅上下振动 30 min。用清水将各粒级筛中的团聚体洗入铝盒中,在 65℃下烘干至恒重,计算得到各粒级水稳性团聚体含量。

(3) 土壤理化性质采用常规测定方法<sup>[16]</sup>;有机质采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定;土壤全氮(TN)

采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用钼锑抗比色法;全钾(TK)采用熔融-火焰光度计法测定,土壤机械组成采用鲍氏比重计法测定。

1.4 数据分析与处理

为探究两种土壤类型退耕地不同植被恢复阶段对土壤团聚体稳定性特征的影响,本文选取土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和团聚体结构破坏率(PAD)作为评价指标,其计算公式如下。

(1) 平均重量直径(MWD,mm)、几何平均直径(GMD,mm)计算公式为<sup>[17-18]</sup>:

MWD=∑<sup>n</sup><sub>i=1</sub>M<sub>i</sub>X<sub>i</sub> (1)

GMD=exp(∑<sup>n</sup><sub>i=1</sub>M<sub>i</sub>lnX<sub>i</sub>) (2)

式中:M<sub>i</sub>为第 i 粒级中的土壤团聚体质量分数(%);

$X_i$  为相邻两粒级团聚体的平均粒径 (mm)。

(2) 土壤团聚体破坏率 (PAD, %) 计算公式为:

$$PAD = \frac{R_{>0.25} - WR_{>0.25}}{R_{>0.25}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $R_{>0.25}$  为  $>0.25$  mm 机械团聚体含量 (%);  $WR_{>0.25}$  为  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量 (%)。

原始数据利用 Excel 软件进行整理, SPSS 20 软件的 Pearson 相关系数法进行相关性分析, One way ANOVN 和 Duncan 法对数据进行差异性分析, Origin 2018 软件进行制图。

表 2 黄壤不同恢复阶段土壤理化指标

Table 2 Physicochemical indicators of soils in different recovery stages of loess

土层 深度/cm	植被 类型	机械组成/%			SOM/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TN/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TP/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TK/ (g · kg <sup>-1</sup> )
		砂粒	粉粒	黏粒				
0—10	YM	15.66±1.39Ba	28.41±0.69Aa	55.93±1.20ABa	41.03±1.03BCa	1.74±0.03Aa	0.71±0.04Aa	10.35±0.47ABa
	CD	15.66±1.83Ba	13.17±3.67Ba	71.17±5.41Aa	36.67±2.17Ca	1.47±0.08Ba	0.70±0.05Aa	9.98±0.83Ba
	GC	20.51±1.39ABa	20.10±2.78ABa	59.39±3.67ABa	43.28±1.04Ba	1.49±0.02Ba	0.59±0.01Aa	10.44±0.72ABa
	LD	23.28±1.20Aa	24.95±1.20Aa	51.77±0.00Ba	49.95±1.36Aa	1.74±0.03Aa	0.67±0.02Aa	11.76±0.81Aa
10—20	YM	19.82±0.69Aa	25.64±0.69Aa	54.54±0.69Ba	38.95±3.31Aa	1.47±0.05Ab	0.65±0.01Aa	9.58±0.32Ba
	CD	14.28±3.02Aa	13.17±3.67Ba	72.56±6.68Aa	26.45±2.67Bb	1.21±0.05Aa	0.59±0.01ABab	9.14±0.75Ba
	GC	19.13±3.18Aa	20.79±1.20ABa	60.08±3.60ABa	28.25±0.80Bb	1.31±0.05Ab	0.53±0.01Bb	10.03±0.56ABa
	LD	17.05±1.20Ab	27.03±1.20Aa	55.93±1.20ABa	35.38±0.79ABb	1.47±0.08Ab	0.61±0.03Aa	11.14±0.63Aa
20—30	YM	18.43±1.83Aa	27.03±0.00Aa	54.54±1.83Ba	38.95±2.84Aa	1.42±0.07Ab	0.62±0.02Aa	9.38±0.51Ba
	CD	12.20±1.39Aa	13.17±4.86Ba	74.64±6.00Aa	24.95±1.67Bb	1.19±0.11Aa	0.51±0.03BCb	8.19±0.28Ca
	GC	16.35±3.02Aa	19.40±0.69ABa	64.24±3.60ABa	22.54±1.38Bc	1.21±0.07Ab	0.47±0.01Cc	9.17±0.49Ba
	LD	18.43±1.39Ab	27.72±1.83Aa	53.85±1.20Ba	33.89±1.54Ab	1.34±0.10Ab	0.59±0.02ABa	10.43±0.45Aa

注:表中数据为平均值±标准误,不同大写字母表示同一土层深度不同植被类型间差异显著,不同小写字母表示同一植被类型不同土层深度间差异显著,SOM 为土壤有机质;TN 为土壤全氮;TP 为土壤全磷;TK 为土壤全钾,下同。

在石灰土发育区(表 3),砂粒含量随植被恢复程度加深而增加,黏粒则降低;其中,LD 砂粒含量最高,而 YM 黏粒含量最高。各土层 YM 的 TP 均最高,而 TK 最低;SOM 和 TN 仅略高于 CD。退耕后,SOM, TN 和 TP 随植物恢复程度加深先减小后增加,而 TK 随植物恢复程度加深逐渐增加;各养分指标均随土层加深而降低。

综合可知,黄壤和石灰土各植被恢复阶段土壤机械组成均以黏粒为主,且黄壤黏粒含量高于石灰土,砂粒则相反。石灰土不同植被恢复阶段的各养分含量整体均高于黄壤同种植被类型下的含量,黄壤和石灰土各养分含量均在表层最高,随土层深度的增加而逐渐降低。

## 2.2 不同恢复阶段退耕地土壤团聚体特征

由图 1 可知,在黄壤发育区,土壤机械团聚体以  $>1$  mm 团聚体为主,其平均占比为 82.45%; $<0.25$  mm 团聚体占比最小,均值为 2.99%,各粒径团聚体含量随粒径减小而降低。 $5\sim 2$  mm 团聚体含量随土层加深而增

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复阶段退耕地土壤基本理化性质

由表 2 可知,在黄壤发育区,砂粒、粉粒含量均随植被恢复程度加深而增加,黏粒则相反;砂粒含量随土层加深而降低,而粉粒、黏粒含量增加。总体而言,YM 的 TN 和 TP 最高,SOM 和 TK 含量高于 CD 而低于 GC 和 LD。退耕后不同恢复阶段土壤表现为 SOM, TN 和 TK 随恢复程度加深先减小后增加;各养分指标均表现出随土层深度增加而降低的趋势。

加,同土层各恢复阶段退耕地的不同粒径团聚体占比无显著差异。湿筛后,团聚体以  $>5$  mm 和  $5\sim 2$  mm 为主,其平均占比分别为 24.49% 和 29.04%; $0.5\sim 0.25$  mm 团聚体含量最低,平均占比为 5.72%。水稳性团聚体含量随粒径减小表现为先降低后增加, $>1$  mm 团聚体相较于同粒级机械团聚体占比减少。 $<0.25$  mm 团聚体含量 YM 最高,其他粒级 YM 和不同恢复阶段退耕地间无显著差异。

与黄壤类似,石灰土发育区土壤机械团聚体也以  $>1$  mm 团聚体为主,平均占比为 84.01%; $<0.25$  mm 团聚体占比最小,均值为 1.97%,各粒级团聚体含量随粒径减小而降低。 $2\sim 1$  mm 和  $1\sim 0.5$  mm 团聚体随土层加深而增加, $>1$  mm 团聚体在 YM 中最高,而  $<0.5$  mm 团聚体在 YM 中最低。湿筛后,团聚体以  $>5$  mm (27.55%) 和  $5\sim 2$  mm (27.06%) 为主, $0.5\sim 0.25$  mm 团聚体最少,平均占比为 5.34%。水稳性团聚体含量随粒径减小先降低后增加, $>1$  mm 团聚体相较于同粒级机械团聚体占比减少, $<1$  mm 团



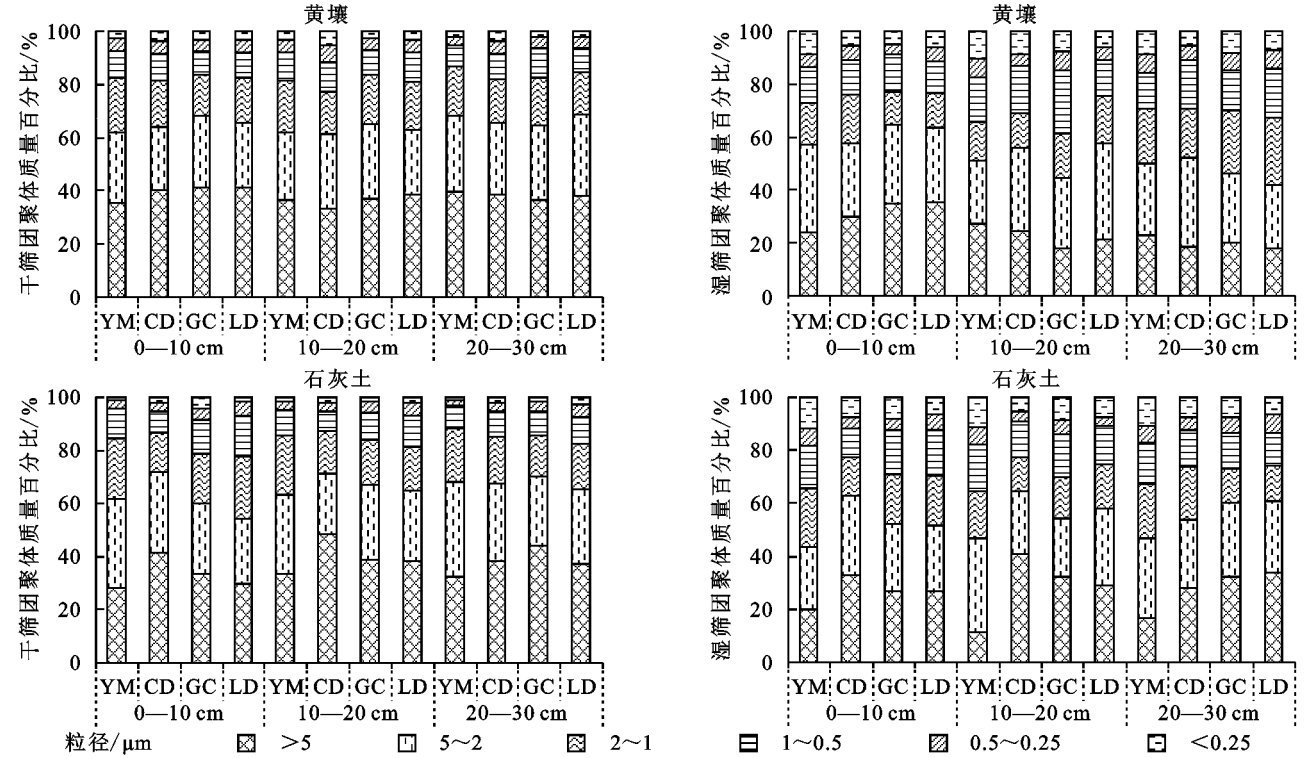
聚体占比则增加。各土层>5 mm 团聚体在 YM 中最低,而<0.25 mm 团聚体在 YM 最高。

总体上,黄壤和石灰土耕地和各恢复阶段退耕地土壤机械团聚体以>1 mm 团聚体为主,各粒级团聚体含量随粒径减小而降低;湿筛后>1 mm 团聚体相

较于同粒级机械团聚体占比减少,且>0.25 mm 水稳性团聚体含量黄壤整体上要高于石灰土。两种土壤条件下,>0.25 mm 机械团聚体含量均为 YM 最高,而>0.25 mm 水稳性团聚体含量则表现为 YM 最低,由此可见退耕后土壤抵抗水蚀的能力有所增加。

表 3 石灰土不同恢复阶段土壤理化指标

Table 3 Physicochemical indicators of soils in different restoration stages of lime soils								
土层深度	植被类型	机械组成/%			SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	TK/(g·kg <sup>-1</sup> )
		砂粒	粉粒	黏粒				
0—10 cm	YM	14.97±1.20Ba	25.64±2.50Aa	59.39±3.02Aa	47.97±0.52Ca	1.75±0.04Ca	1.37±0.03Aa	11.16±0.45Aa
	CD	29.52±0.00Aa	22.18±3.02ABa	48.30±3.02Ba	42.58±0.52Ca	1.83±0.15Ca	0.84±0.02Ca	12.09±0.48Aa
	GC	30.21±1.83Aa	26.33±0.69Aa	43.45±1.20Ba	70.18±1.31Ba	2.73±0.10Ba	0.96±0.02BCa	12.63±0.71Aa
	LD	29.52±2.40Aa	24.95±2.08Aa	45.53±1.20Ba	85.49±1.86Aa	3.36±0.10Aa	1.03±0.04Ba	12.87±0.75Aa
10—20 cm	YM	14.28±1.83Ba	24.95±2.40Aa	60.78±1.83Aa	46.78±0.60BCa	1.64±0.18BCa	1.22±0.09Aa	10.59±0.57Aa
	CD	22.59±4.22ABa	22.18±4.54Aa	55.23±6.83Aa	40.48±1.31Ca	1.47±0.05Cab	0.71±0.02Cb	11.89±0.73Aa
	GC	23.98±1.39ABa	26.33±1.39Aa	49.69±2.40Aa	59.38±0.79Bb	2.09±0.08Bb	0.85±0.02BCb	11.93±0.53Aa
	LD	28.83±0.69Aa	24.95±1.20Aa	46.22±1.39Aa	69.11±1.95Ab	2.65±0.10Ab	0.97±0.03Bab	12.36±0.81Aa
20—30 cm	YM	15.66±1.83Ba	25.64±1.39Aa	58.70±3.02Aa	45.29±1.55Ba	1.47±0.15Ba	1.14±0.03Aa	9.24±0.39Ba
	CD	18.43±7.62ABa	24.26±6.61Aa	57.31±7.72ABa	32.49±0.79Cb	1.18±0.09Bb	0.56±0.05Cc	11.13±0.59Aa
	GC	28.14±1.83ABa	30.49±0.69Aa	41.37±2.40ABa	45.58±1.31Bb	1.96±0.07Ab	0.78±0.03Bb	11.76±0.47Aa
	LD	33.68±2.08Aa	27.03±1.20Aa	39.29±1.20Ba	53.33±1.86Ac	2.28±0.10Ab	0.82±0.05Bb	12.11±0.64Aa



注:图中 YM 为玉米耕地;CD 为退耕草地;GC 为退耕灌丛;LD 为退耕林地,下同。

图 1 两种土壤不同恢复阶段土壤团聚体组成特征

Fig. 1 Composition characteristics of soil aggregates at different restoration stages for two soils

2.3 不同恢复阶段退耕地土壤团聚体稳定性

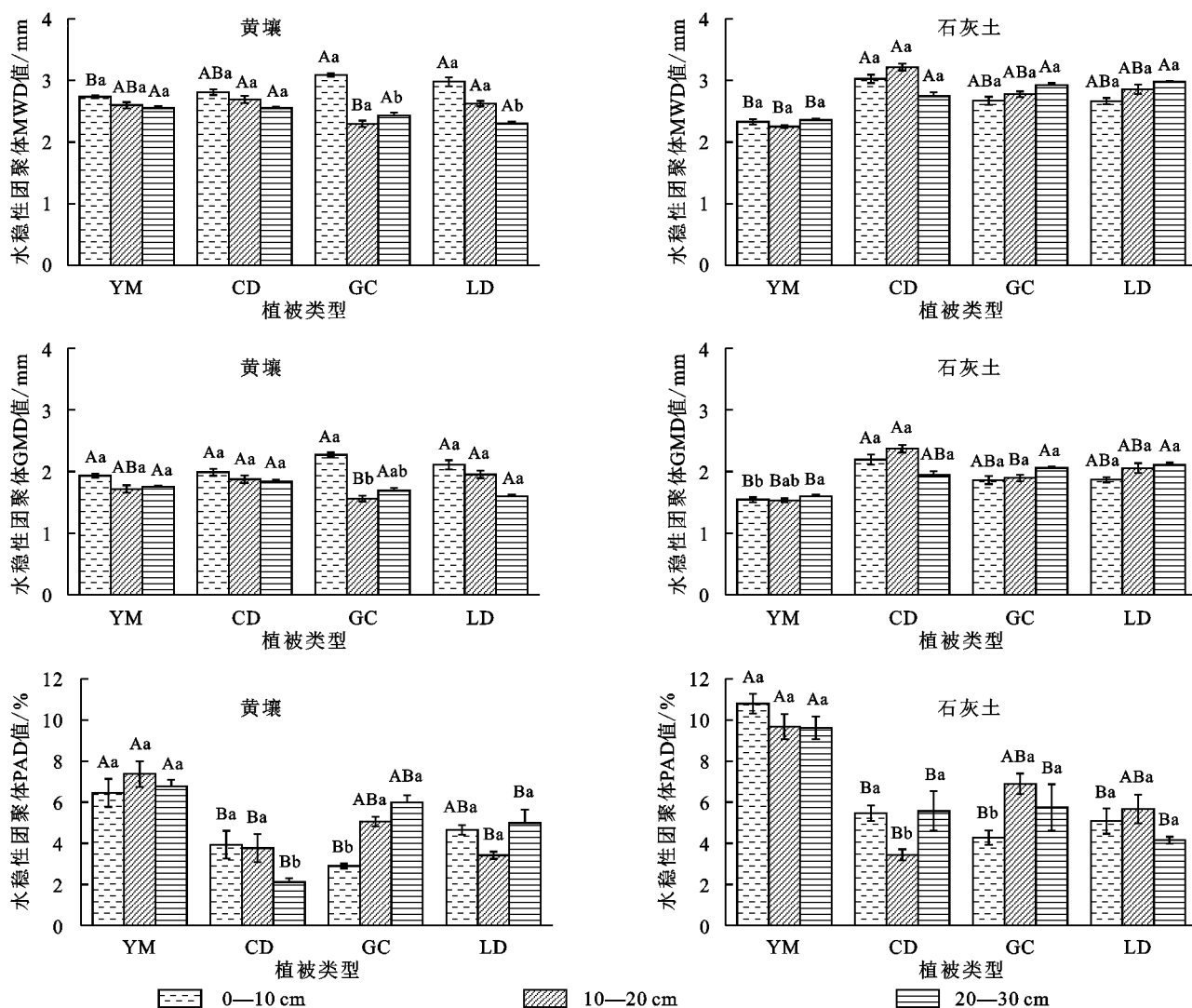
由图 2 可知,在黄壤发育区,土壤水稳性团聚体 MWD 均值变化范围为 2.30~3.09 mm,随土层加深

有减小的趋势,YM 和各恢复阶段退耕地间差异不明显;GMD 均值变化范围为 1.56~2.27 mm,其变化趋势与 MWD 相似。PAD 变化范围为 2.11%~8.21%,

其各层最高值均出现在 YM 中,说明其稳定性最差。在石灰土发育区,水稳性团聚体 MWD 变化范围为 2.10~3.22 mm,退耕后各恢复阶段各层 MWD 均高于 YM,其中 GC 和 LD 有随土层加深 MWD 增大的趋势;GMD 变化范围为 1.34~2.37 mm,其变化趋势与 MWD 相似。PAD 变化范围为 3.44%~10.80%,各层均以 YM 最高,说明其稳定性最差;各

恢复阶段退耕地间无显著差异,其稳定性相当且均高于 YM。

整体而言,两种土壤类型下均表现为 YM 的 MWD 和 GMD 最低而 PAD 最高,说明其稳定性最差。两种土壤退耕后各恢复阶段 MWD 和 GMD 无显著差异,而石灰土各阶段的 PAD 整体上均高于黄壤,说明黄壤退耕地的团聚体稳定性相对更好。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层深度不同植被类型间差异显著,不同小写字母表示同一植被类型不同土层深度间差异显著。

图 2 两种土壤不同恢复阶段退耕地土壤团聚体稳定性特征

Fig. 2 Stability characteristics of soil aggregates in fallow land at different restoration stages for two soils

## 2.4 土壤团聚体稳定性影响因素分析

由表 4 可知,在黄壤发育区,MWD 与 SOM, TN 显著正相关,GMD 与 SOM 显著正相关,PAD 与粉粒显著正相关( $p < 0.05$ )。在石灰土发育区,MWD, GMD 与砂粒、TK 显著正相关( $p < 0.05$ ),与 TP 呈极显著负相关,PAD 与砂粒、TK 极显著负相关( $p < 0.01$ ),与 TP 极显著正相关,与黏粒显著正相关( $p < 0.05$ ), $WR_{>0.25}$ 与砂粒极显著正相关,与 TP 极显著负相关( $p < 0.01$ ),与 TK 显著正相关,与黏粒显著负相关( $p < 0.05$ )。

根据多因素方差分析可知(表 5 和表 6),土层深度、植被类型和土壤类型均对团聚体稳定性指标影响的主体效应显著( $p < 0.05$ ),从不同影响因素的交互作用对土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 的影响来看,土壤类型×植被类型、土壤类型×土层深度、植被类型×土层深度、土壤类型×植被类型×土层深度对 MWD 和 GMD 均有显著影响( $p < 0.05$ )。这说明土壤类型、植被类型和土层深度均为喀斯特区土壤团聚体稳定性特征的主要因素。

表 4 土壤水稳性团聚体稳定性指标与土壤理化性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil water stability agglomerate stability indicators with soil physicochemical properties

指标	黄壤				石灰土			
	MWD	GMD	PAD	WR <sub>&gt;0.25</sub>	MWD	GMD	PAD	WR <sub>&gt;0.25</sub>
SOM	0.679 *	0.604 *	0.183	−0.117	−0.076	−0.086	−0.218	0.143
砂粒	0.290	0.200	0.319	−0.171	0.684 *	0.662 *	−0.796 **	0.728 **
粉粒	−0.129	−0.141	0.600 *	−0.301	−0.160	−0.230	0.108	−0.169
黏粒	−0.012	0.030	−0.566	0.288	−0.571	−0.531	0.687 *	−0.608 *
TN	0.595 *	0.534	0.273	−0.187	0.080	0.067	−0.359	0.280
TP	0.531	0.431	0.253	−0.349	−0.799 **	−0.792 **	0.782 **	−0.818 **
TK	0.394	0.416	0.027	0.090	0.600 *	0.582 *	−0.733 **	0.665 *

注: \*\* 代表在 0.01 级别相关性显著; \* 代表在 0.05 级别相关性显著。

表 5 影响水稳性团聚体 MWD 值变化的各因素主体间效应

Table 5 Inter-subject effects of factors affecting the variation of MWD values of water-stable agglomerates

误差来源	Ⅲ类平方和	df	均方	F	Sig.
修正模型	5.967	23	0.259	8.432	0.000
截距	533.062	1	533.062	17324.880	0.000
土壤类型	0.379	1	0.379	12.304	0.001
植被类型	1.275	3	0.425	13.812	0.000
土层深度	0.476	2	0.238	7.740	0.001
土壤类型×植被类型	0.737	3	0.246	7.985	0.000
土壤类型×土层深度	1.226	2	0.613	19.922	0.000
植被类型×土层深度	0.596	6	0.099	3.227	0.010
土壤类型×植被类型×土层深度	1.279	6	0.213	6.928	0.000
误差	1.477	48	0.031		
总计	540.506	72			
修正后总计	7.444	71			

注:  $R^2=0.802$ (校正的  $R^2=0.707$ ), 因变量为水稳性团聚体 MWD 值。

表 6 影响水稳性团聚体 GMD 值变化的各因素主体间效应

Table 6 Inter-subject effects of various factors affecting the variation of GMD values of water-stable agglomerates

误差来源	Ⅲ类平方和	df	均方	F	Sig.
修正模型	4.774	23	0.208	5.814	0.000
截距	274.996	1	274.996	7702.479	0.000
土壤类型	0.236	1	0.236	6.598	0.013
植被类型	1.321	3	0.440	12.335	0.000
土层深度	0.319	2	0.159	4.461	0.017
土壤类型×植被类型	0.320	3	0.107	2.983	0.040
土壤类型×土层深度	0.793	2	0.397	11.112	0.000
植被类型×土层深度	0.649	6	0.108	3.028	0.014
土壤类型×植被类型×土层深度	1.137	6	0.190	5.309	0.000
误差	1.714	48	0.036		
总计	281.484	72			
修正后总计	6.488	71			

注:  $R^2=0.736$ (校正的  $R^2=0.609$ ), 因变量为水稳性团聚体 GMD 值。

3 讨论

3.1 土壤团聚体组成特征

土壤团聚体组成、分布以及稳定性特征对形成良好的土壤结构起重要作用,进而有利于土壤抵抗侵蚀和保持养分<sup>[18]</sup>。土壤团聚体组成和稳定性特征是多种因素综合作用的结果,其中植被类型和土壤理化性质可以直接影响土壤团聚体特征<sup>[19]</sup>。本研究发现,在黄壤区和石灰土区,土壤机械团聚体均以>1 mm 团聚体为主,<0.25 mm 粒径团聚体分布最少,团聚体含量随粒径减小而降低,该结果与白怡婧<sup>[20]</sup>和俞月凤<sup>[21]</sup>等对喀斯特地区所得黄壤和石灰土团聚体分

布规律和组成的研究结果相似。其主要原因可能是黄壤具有很高的黏粒含量,易粘结形成黏团<sup>[22-23]</sup>,加之黄壤 pH 值呈弱酸性,可降低土壤负电荷物质中的静电排斥作用<sup>[24-25]</sup>,提高铝化合物、水合铁以及黏土矿物等对有机质的吸附能力,增强有机物质和矿物的结合作用<sup>[26]</sup>,从而增加黄壤大团聚体含量。而石灰土中有大量游离的盐基粒子和有机质形成的胶结物质,促进了大团聚体的形成导致的<sup>[27]</sup>。

在黄壤和石灰土发育区,不同恢复阶段退耕地 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量均高于 YM,说明退耕可以促进土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体的形成,增加其含量,该结果与董亚辉等<sup>[14]</sup>和林立文<sup>[15]</sup>研究结果相似。这主要是由于耕地退耕后,土壤植被覆盖类型发生改变,土壤大气环境、土壤输入有机碳量和土壤微生物群落改变,以及缺少了耕作和人为活动的影响,改变了土壤理化性质,促进团聚体的聚集。

### 3.2 土壤团聚体稳定性特征

土壤水稳性团聚体 MWD, GMD 和 PAD 是评价土壤团聚体稳定性的主要指标, MWD 和 GMD 值越大, PAD 值越小, 土壤团聚体越稳定, 抗蚀能力越强<sup>[28]</sup>。本研究发现, 在黄壤发育区, 土壤水稳性团聚体 MWD 变化范围在 2.30~3.09 mm, GMD 在 1.56~2.27 mm, PAD 在 2.11%~8.21%, 随土层加深 MWD 和 GMD 表现为减小的趋势, 且表层土壤 PAD 值最低。石灰土发育区水稳性团聚体 MWD 变化范围在 2.10~3.22 mm, GMD 在 1.34~2.37 mm, PAD 在 3.44%~10.80%, MWD, GMD 随土层加深 GC, LD 有逐渐增加的趋势, PAD 变化趋势与黄壤相似。两种土壤类型的 MWD, GMD 值均较大, PAD 较小, 表明两种土壤均有较好的稳定性和抵抗侵蚀的能力。

不同土壤类型下退耕地植被恢复过程中土壤团聚体稳定性存在差异, 对比两种土壤类型下土壤团聚体稳定性指标发现, 两种土壤退耕后各恢复阶段 MWD 和 GMD 无显著差异, 而石灰土各阶段 PAD 整体上均高于黄壤, 说明黄壤退耕地的团聚体稳定性相对更好。这可能是因为石灰土发育区母质改变了土壤游离的盐基粒子量, 黏粒含量较黄壤低, SOM 较高导致大孔隙较高, 养分容易迁移到深层土壤导致的<sup>[29-30]</sup>。

对不同退耕恢复阶段植被的土壤团聚体稳定性指标进行分析得出, 在黄壤和石灰土发育区, 退耕后各恢复阶段 MWD 和 GMD 均高于 YM, PAD 均低于 YM, 说明 YM 稳定性最差, 退耕后植被恢复提高了土壤团聚体的稳定性。结果与前人相似<sup>[15]</sup>, 进一步确认了退耕后植物恢复各阶段土壤团聚体相较耕地更稳定的结论, 可见在喀斯特区同气候不同土壤类型

上退耕措施依然可以提升土壤稳定性。研究也有与前人不同之处, 本研究得出 3 种恢复阶段间土壤团聚体稳定性不存在显著差异, 与王妙倩等<sup>[13]</sup>结果有所不同, 这可能是地域差异导致的。

## 4 结论

(1) 黄壤和石灰土发育区 4 种不同植被类型的土壤机械团聚体含量随粒径减小而降低, 以 > 1 mm 团聚体为主, 湿筛过后则是以 > 5, 5~2 mm 为主, 团聚体含量随粒径减小表现为先降低后上升。

(2) 两种土壤类型 4 种不同植被类型水稳性团聚体 MWD, GMD 值均较大, PAD 值较小,  $WR_{>0.25}$  较大, 说明黄壤和石灰土发育区土壤均有较高的稳定性。黄壤退耕地的团聚体稳定性相对于石灰土更好, 耕地退耕后不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性均比耕地要好, 退耕利于土壤大团聚体形成, 提高了土壤的稳定性。

(3) 相关性分析得出, 在黄壤发育区, MWD 与 SOM, TN 显著相关, GMD 与 SOM 显著正相关, PAD 则是与粉粒显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与 SOM 相关系数最高, SOM 对土壤团聚体稳定性影响最大; 在石灰土发育区, MWD, GMD 与砂粒、TK 显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与 TP 呈极显著负相关, PAD 与砂粒、TK 极显著负相关, 与 TP 极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与黏粒显著正相关 ( $p < 0.05$ )。多因素方差分析得出, 植被类型、土层深度和土壤类型均是影响土壤团聚体稳定性的重要因素。

### 参考文献 (References):

- [1] 杨青, 杨广斌, 戴丽, 等. 喀斯特地区石漠化与土壤类型的空间相关分析: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 80-87.  
Yang Q, Yang G B, Dai L, et al. Spatial correlation analysis of rocky desertification and soil types in karst area: A case study of Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(1): 80-87.
- [2] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 365-370.  
Li Y B, Hou J J, Xie D T. The recent development of research on karst ecology in southwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 365-370.
- [3] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [4] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 10-16.  
Chen H S, Feng T, Li C Z, et al. Characteristics of soil



- erosion in the karst regions of southwest China: Research advance and prospective[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(1):10-16.
- [5] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等.21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J].*中国岩溶*,2016,35(5):461-468.  
Jiang Z C, Luo W Q, Tong L Q, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21<sup>st</sup> century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016,35(5):461-468.
- [6] Yuan Y S, Zhao W Q, Zhang Z L, et al. Impacts of oxalic acid and glucose additions on N transformation in microcosms via artificial roots[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,121(121):16-23.
- [7] 韦许梅.桂西北退耕还林不同植被恢复模式的植被效益调查研究[D].南宁:广西大学,2008.  
Wei X M. Investigation and Study on Vegetation-Effect in Different Vegetation Restoration Patterns of Returning Land for Farming to Forestry in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [8] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].*水土保持研究*,2002,9(1):81-85.  
Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002,9(1):81-85.
- [9] 韩贞贵,毛天旭,屠丹,等.长江源区草地覆盖变化对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].*草地学报*,2020,28(3):801-807.  
Han Z G, Mao T X, Tu D, et al. Effects of vegetation change on the distribution and stability of soil aggregate in the source of the Yangtze River[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020,28(3):801-807.
- [10] Goh K M. Carbon sequestration and stabilization in soils: Implications for soil productivity and climate change[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004,50(4):467-476.
- [11] 袁瀛,肖列.退耕植被演替过程中土壤团聚体与胶结物质的协同响应[J].*西南林业大学学报:自然科学*, 2018,38(3):116-122.  
Yuan Y, Xiao L. Synergetic response of soil aggregates and binding agents in the process of vegetation restoration succession[J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*,2018,38(3):116-122.
- [12] 由政,姚旭,景航,等.不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J].*水土保持研究*,2016,23(6):20-25,31.  
You Z, Yao X, Jing H, et al. Coordinated variation between root distributions and soil aggregate characteristics at different successional stages[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(6):20-25,31.
- [13] 王妙倩,许小明,王浩嘉,等.黄土高原次生林植被演替过程中土壤团聚体动态特征分析[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2023,51(10):107-117.  
Wang M Q, Xu X M, Wang H J, et al. Dynamic characterization of soil aggregates during secondary forest vegetation succession in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*,2023,51(10):107-117.
- [14] 董亚辉,戴全厚,邓伊晗,等.喀斯特山区退耕地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应[J].*水土保持通报*, 2010,30(2):138-141.  
Dong Y H, Dai Q H, Deng Y H, et al. Dynamics of soil water stable aggregates and their relationship with soil nutrients on converted land in karst areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010,30(2):138-141.
- [15] 林立文.喀斯特区植被恢复对土壤有机质组分及团聚体稳定性的影响[D].南宁:广西大学,2021.  
Lin L W. Effects of Karst Vegetation Restoration on Soil Aggregate Stability and Organic Matter Composition[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2008.  
Bao S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [17] 邓志豪,杨静,戴全厚,等.喀斯特区土地利用方式对石灰土团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].*水土保持学报*,2021,35(5):114-121.  
Deng Z H, Yang J, Dai Q H, et al. Effects of land use patterns on aggregate stability and organic carbon of calcareous soil in karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(5):114-121.
- [18] 韦慧,邓羽松,林立文,等.喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究[J].*生态学报*,2022,42(7):2751-2762.  
Wei H, Deng Y S, Lin L W, et al. Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(7):2751-2762.
- [19] Tang F K, Cui M, Lu Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region[J]. *Solid Earth*, 2016,7(1):141-151.
- [20] 白怡婧,刘彦伶,李渝,等.长期不同施肥和耕作对坡耕地黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J].*中国水土保持科学(中英文)*,2021,19(2):52-60.  
Bai Y J, Liu Y L, Li Y, et al. Effect of long-term different tillage and fertilization measures on aggregates composition and organic carbon in yellow soil slope cultivated land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021,19(2):52-60.

- [21] 俞月凤, 卢凌霄, 杜虎, 等. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(5): 1011-1019.
- Yu Y F, Lu L X, Du H, et al. Distribution of organic carbon and aggregation of calcareous soil in different forest types [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(5): 1011-1019.
- [22] 冷暖. 南亚热带赤红壤团聚体稳定性及其降雨溅蚀响应[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- Leng N. Aggregate Stability of Lateritic Red Soil and Its Response to Rainfall Splash Erosion in South Subtropical Zone[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [23] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- Wang B. Dynamic Mechanism of Soil Erodibility and Soil Erodibility Calculation Model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [24] Nguetnkam J P, Dultz S. Soil degradation in Central North Cameroon: Water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(1): 38-47.
- [25] Tombácz E, Szekeres M. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes[J]. Applied Clay Science, 2004, 27(1/2): 75-94.
- [26] Weng L P, Van Riemsdijk W H, Hiemstra T. Humic nanoparticles at the oxide-water interface: Interactions with phosphate ion adsorption [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(23): 8747-8752.
- [27] 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.
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [28] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3647-3656.
- Lin L W, Deng Y S, Wang J Y, et al. Effects of plantation on aggregate distribution and stability of lateritic red soil in south subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [29] 赵国政. 典型喀斯特地区小流域石灰土与黄壤理化特征及其水分调节技术研究[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- Zhao G Z. Soil Physical Characteristics of Calcareous Soil and Yellow Soil in a Small Catchment of Typical Karst Area and Their Water Regulation Techniques [D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2021.
- [30] 孙兆地. 石灰岩、花岗岩母质发育的土壤-油松林生态系统有机碳、氮、磷、钾的垂直分布特征: 以松山自然保护区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- Sun Z D. Vertical Distribution Characters of Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Soil-Chinese Pine Forest Ecosystem Developed from Limestone and Granite Parent Materials: Taking Song Mountain Nature Reserve for Example [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

~~~~~

(上接第32页)

- [29] Zak D R, Holmes W E, Burton A J, et al. Simulated atmospheric  $\text{NO}_3^-$  deposition increases soil organic matter by slowing decomposition[J]. Ecological Applications, 2008, 18(8): 2016-2027.
- [30] 王泽西, 陈倩妹, 黄允优, 等. 川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7197-7207.
- Wang Z X, Chen Q M, Huang Y Y, et al. Response of soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen to nitrogen application in subalpine forests of western Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7197-7207.
- [31] 陈雨岑, 陈冠陶, 王宇, 等. 10 年模拟氮沉降对苦竹林根际与非根际土壤铝组分的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1368-1374.
- Chen Y Q, Chen G T, Wang Y, et al. Effect of ten-year simulated nitrogen deposition on aluminium fractions of rhizospheric and bulk soils in a *Pleioblastus amarus* plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(7): 1368-1374.
- [32] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 139-143.
- Geng Y Q, Bai C X, Zhao G L, et al. Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 139-143.