

# 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响

张艳<sup>1</sup>, 刘彦伶<sup>1,2\*</sup>, 李渝<sup>1,2</sup>, 蒋太明<sup>2,3</sup>, 白怡婧<sup>1</sup>,  
张萌<sup>1,2</sup>, 张雅蓉<sup>1,2</sup>, 黄兴成<sup>1,2</sup>, 张文安<sup>1,2</sup>

(1. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵州 贵阳 550006;  
3. 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵州 贵阳 550006)

**摘要:** 分析石漠化地区三种常见的土地利用方式 (撂荒地, AL; 玉米地, CF; 果树地, FD) 对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响, 为喀斯特石漠化地区地力提升提供理论依据。采集同一区域不同土地利用方式土壤样品, 采用干筛法和湿筛法进行团聚体分级, 对比分析不同土地利用方式下土壤养分含量及土壤团聚体的粒径分布、结构稳定性、有机碳的分布特征。结果表明, FD 各土壤养分均高于 AL 和 CF, 其中 FD 的土壤有机碳含量分别较 AL 和 CF 显著提高 25.45% 和 21.86%, 全氮含量显著提高 22.42% 和 19.76%。FD > 5 mm 机械性和水稳性团聚体组成均显著高于 AL 和 CF, < 0.25 mm 的水稳性团聚体组成则显著低于 AL 和 CF。不同土地利用方式 > 0.25 mm 团聚体组成 ( $R_{0.25}$ )、平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 均表现为 FD > AL > CF, 团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 ( $E_{LT}$ ) 则表现出相反趋势。FD 不同粒径团聚体有机碳含量分别较 AL 和 CF 提高了 4.39% ~ 36.69% 和 8.11% ~ 27.51%, 且 > 5 mm 粒径团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率分别较 AL 和 CF 显著提高了 6.03% 和 9.64%, 而 < 0.25 mm 粒径团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率则显著降低了 46.02% 和 57.42%。相关分析表明土壤有机碳含量与 MWD、GMD、 $R_{0.25}$  呈显著正相关, 土壤有机碳含量是影响土壤团聚体稳定性最重要的土壤养分指标。在喀斯特石漠化较严重地区, 采取退耕还林可提高土壤养分和改善土壤团粒结构, 促进喀斯特石漠化生态环境的改善。

**关键词:** 喀斯特石漠化地区; 土地利用方式; 土壤团聚体; 稳定性; 土壤有机碳

**中图分类号:** S512.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0564-3945(2021)06-1308-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021042501

张艳, 刘彦伶, 李渝, 蒋太明, 白怡婧, 张萌, 张雅蓉, 黄兴成, 张文安. 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1308 - 1315

ZHANG Yan, LIU Yan-ling, LI Yu, JIANG Tai-ming, BAI Yi-jing, ZHANG Meng, ZHANG Ya-rong, HUANG Xing-cheng, ZHANG Wen-an. Effects of Land Use Patterns on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Distribution in the Karst Rocky Desertification Area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1308 - 1315

【研究意义】土壤有机碳 (SOC) 是土壤养分的核心, 也是全球碳平衡的影响因子, 对土壤结构、持水性能以及生物多样性的稳定等有重要的影响<sup>[1]</sup>。土壤团聚体是维持土壤肥力的基础, 也是影响土壤水、肥、气、热等平衡的重要指标<sup>[2]</sup>, 其组成对养分的供应、保持和转化能力等方面具有不同作用。土壤结构是影响土壤稳定性和土壤肥力的重要指标, 土壤结构良好, 可增强土壤的稳定性并提高土壤肥力<sup>[3-4]</sup>。因此, 研究土壤团聚体组成及其有机碳含量, 对于提高土壤结构的稳定性、土壤肥力和提升具有重要意义。【研究进展】含有多糖类的土壤颗粒与

微生物菌丝以及细根等物质是土壤团聚体结合的基础, 因此, 土壤团聚体的形成和稳定性受土壤中有有机碳的含量和性质的影响<sup>[5]</sup>。研究表明, 大团聚体组成 (> 0.25 mm) 是影响土壤团聚体稳定性的主要因素<sup>[6]</sup>, 也是土壤有机碳赋存主要场所。土壤团聚体与有机碳密不可分, 前者是后者存在的场所, 后者是前者存在的胶结物质<sup>[7-8]</sup>。相关研究表明, 团聚体稳定性主要受土地利用方式、有机质含量、土壤侵蚀等因素的影响<sup>[9]</sup>。不同的土地利用方式对土壤团聚体的影响不同, 在红壤上研究表明, 水田和林地利用方式可显著提高土壤团聚体稳定性, 而果园利用方

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金 (32060302)、贵州省农业科学院 2019-2020 年国家自然科学基金项目后补助资金专项 (黔农科院国基后补助 (2021) 52 号) 和中央引导地方科技发展专项 (黔科中引地 [2019]4003 号) 资助

作者简介: 张艳 (1995-) 女, 贵州纳雍人, 硕士研究生, 研究方向为耕地保育。E-mail: zhangyan3973@163.com

\*通讯作者: E-mail: ly1890615@163.com

式则大幅削弱了团聚体稳定性<sup>[10]</sup>。在黄土丘陵区的研究表明土壤团聚体稳定性的顺序为人工林地 > 人工草地 > 农田<sup>[11]</sup>。可见, 不同土地利用方式在不同土壤类型上对土壤团聚体稳定性的影响不尽相同。

贵州是我国西南喀斯特最为集中的地区, 石漠化面积居全国第一。由于喀斯特地貌特殊的环境条件, 喀斯特石漠化地区的农业生态环境脆弱, 土壤成土过程缓慢, 土层浅薄且不连续, 土壤结构稳定性差, 土壤持水能力弱, 抗侵蚀能力弱, 土壤养分极易流失<sup>[12-14]</sup>。研究表明, 土壤有机碳对喀斯特地区石漠化进程响应较明显, 是石漠化地区耕地退化的敏感性指标<sup>[15]</sup>。土壤有机碳含量与土壤团聚体稳定性相互影响, 因此, 研究土壤团聚体的组成对增强土壤结构稳定、提高土壤肥力具有重要意义<sup>[16]</sup>。此外, 研究表明, 石漠化地区林草复合治理能够提高土壤团聚体稳定性<sup>[17]</sup>, 森林的自然恢复有效改善了土壤团聚体结构和土壤有机碳的积累, 而翻耕会导致土壤大团聚体崩解<sup>[18]</sup>。可见, 合理的利用方式能够增加喀斯特石漠化地区土壤有机碳含量, 对石漠化生态治理具有积极作用, 而不合理的土地利用方式则可降低土壤有机碳含量, 加快石漠化进程<sup>[18-20]</sup>。【本研究切入点】目前关于不同土地利用方式对石漠化地区土壤有机碳的研究大多集中有机碳含量上, 对其影响机制的研究较少<sup>[21]</sup>。退耕还林是恢复石漠化地区植被的重要措施之一<sup>[22]</sup>, 而近年来随着城镇化进程推进, 进城务工人员增加, 农村劳动力越来越少, 土地撂荒现象时有发生。【拟解决的关键问题】因此, 本研究以贵州中度石漠化地区常见的几种土地利用方式(撂荒地, AL; 玉米地, CF; 果树地, FD)为研究对象, 深入探讨不同土地利用方式对土壤养分、土壤团聚体组成、团聚体稳定性及有机碳的影响, 探索适宜的土地利用方式, 以期对石漠化地区耕地质量提升提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于贵州省安顺市平坝区白云镇白云村凉山组(106°12'59.1"E, 26°22'10.5"N), 海拔 1338 m, 属亚热带湿润型季风气候。年均气温 13.3 °C, 1 月平均气温为 6.0 °C, 7 月平均气温为 23.5 °C, 年均降雨量为 1140.5 mm。研究区域地表裸露破碎, 岩石以白云质灰岩和泥质灰岩为主, 土壤以石灰土和黄壤为主。

### 1.2 采样地点及样品采集

采样时间为 2018 年 11 月。采样遵循一致性原则, 确保采样区域与周边环境布设相同, 每个取样点要求石漠化程度为轻度以上程度, 以半径 500 m 的圆形作为研究的设定范围, 且都在同一位置, 同时分布有撂荒地(撂荒 2~5 年)、玉米地(常年种植)、果树地(种植经果林 6 年以上), 玉米地每年均进行施肥(主要是化肥)及翻耕和中耕等农事活动, 撂荒地撂荒期间不进行任何农事活动, 果树地除采摘外也未进行任何农事操作活动。本研究共选择了 3 个取样点, 每个取样点每一种土地利用方式(撂荒地、玉米地、果树地分别记为 AL、CF、FD)取 3 个重复样品, 每个重复样品在 200~300 m<sup>2</sup> 范围内按 S 型布 5 点采集土样、采后混合而成, 采样深度为 0~20 cm。土壤类型均为黄壤。

### 1.3 测定项目与分析方法

机械稳定性团聚体(干筛法)<sup>[23-27]</sup>: 取 400 g 混合土样置于套筛(孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25 mm)顶部, 用振动筛分仪(GRINDER SS200)进行震荡筛分, 振幅 2.0 mm, 筛分时长为 10 min, 测定各孔径筛分后的土壤重量。

水稳性团聚体(湿筛法)<sup>[23-27]</sup>按照干筛后土壤各粒级重量比称取 50 g 混合土样, 将其置于套筛(孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25 mm)顶部, 放于恒温土壤团粒分析仪(Daiki DIK-2012)的配套桶内, 沿边缘缓慢加入去离子水至刻度线, 静置 10 min 后, 开启振荡开关并以 30 次 min<sup>-1</sup> 的频率振荡 10 min。收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒中, 烘干称重, 得到各级团聚体的质量百分含量。

土壤 pH、阳离子交换量、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾的测定方法参照土壤农化分析进行<sup>[28]</sup>。

### 1.4 计算公式

利用各粒级团聚体数据, 计算平均重量直径(Mean weight diameter,  $MWD$ , mm)、几何平均直径(Geometric mean diameter,  $GMD$ , mm)、> 0.25 mm 团聚体百分比( $R_{0.25}$ , %), 公式如下<sup>[23-24]</sup>:

$$MWD = \sum \left( x_i \times \frac{M_i}{M_t} \right) \quad (1)$$

$$GMD = E_{xp} \left[ \frac{\sum (M_i \times \ln X_i)}{\sum M_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  级团聚体平均直径 (mm),  $M_i$  为第  $i$  级团聚体质量 (g),  $M_t$  为团聚体总质量 (g),  $M_{r>0.25}$  为直径大于 0.25 mm 团聚体质量 (g)。

土壤团聚体破坏率 (Percentage of aggregate destruction, PAD, %) [25]、土壤团聚体不稳定团粒指数 (Unstable aggregate index,  $E_{LT}$ , %) [26]、团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率 ( $W$ , %) [26]:

$$PAD = \frac{(DR_{0.25} - WR_{0.25})}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$E_{LT} = \frac{(W_T - W_{0.25})}{W_T} \times 100\% \quad (5)$$

$$W = \frac{OC_i \times M_i}{SOC \times M_t} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $DR_{0.25}$  为 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量 (%);  $WR_{0.25}$  为 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量 (%);  $W_T$  为供试土壤总重量 (g);  $W_{0.25}$  为 > 0.25 mm 水稳

性团聚体重量 (g);  $W$  为团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率 (%);  $OC_i$  为第  $i$  级团聚体中有机碳含量 ( $g\ kg^{-1}$ ); SOC 为土壤有机碳含量 ( $g\ kg^{-1}$ )。

## 1.5 数据分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 19.0 进行数据处理和作图, 利用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析, 最小显著极差法 (Duncan 法) 进行多重比较, 显著性水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式土壤养分含量

不同土地利用方式能够显著影响土壤养分含量 (表 1), 果树地各土壤养分含量均较高, 其中土壤有机碳和全氮含量较撂荒地和玉米地差异达显著水平, 分别提高了 25.5%、21.9% 和 22.4%、19.8%。撂荒地除土壤速效钾显著高于玉米地外, 其他土壤养分含量均略低于玉米地。

表 1 不同土地利用方式土壤养分含量  
Table 1 Soil nutrient contents of different land use patterns

土地利用方式 Land use pattern	pH 值 pH value	阳离子交换量 Cation exchange capacity ( $cmol\ kg^{-1}$ )	有机碳 Organic matter ( $g\ kg^{-1}$ )	全氮 Total nitrogen ( $g\ kg^{-1}$ )	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen ( $mg\ kg^{-1}$ )	有效磷 Available phosphorus ( $mg\ kg^{-1}$ )	速效钾 Available potassium ( $mg\ kg^{-1}$ )
撂荒地 AL	5.57±0.47 a	21.12±3.56 a	20.80±3.91 b	2.63±0.37 b	135.26±14.76 a	21.59±16.83 a	159.80±39.47 a
玉米地 CF	5.52±0.45 a	22.80±5.44 a	21.84±1.63 b	2.72±0.08 b	142.55±5.79 a	23.37±17.17 a	82.00±28.62 b
果树地 FD	5.92±0.55 a	24.65±4.98 a	27.89±2.14 a	3.39±0.28 a	162.49±17.59 a	29.60±21.92 a	168.67±25.38 a

注: 不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平, 下同。

### 2.2 不同土地利用方式的土壤团聚体组成和稳定性

不同土地利用方式对土壤机械稳定性团聚体组成 (图 1a) 和水稳性团聚体组成 (图 1b) 测定结果基本相同, 差异不大。土壤团聚体均以 > 5 mm 的团聚体为优势团聚体, 果树地 > 5 mm 团聚体组成较撂荒地和玉米地均显著提高, 而撂荒地和玉米地 5 ~ 2 mm 团聚体组成则显著高于果树地。不同土地利用方式 < 0.25 mm 机械稳定性组成相当, 而 < 0.25 mm 的水稳性团聚体组成却表现为果树地显著低于撂荒地和玉米地。

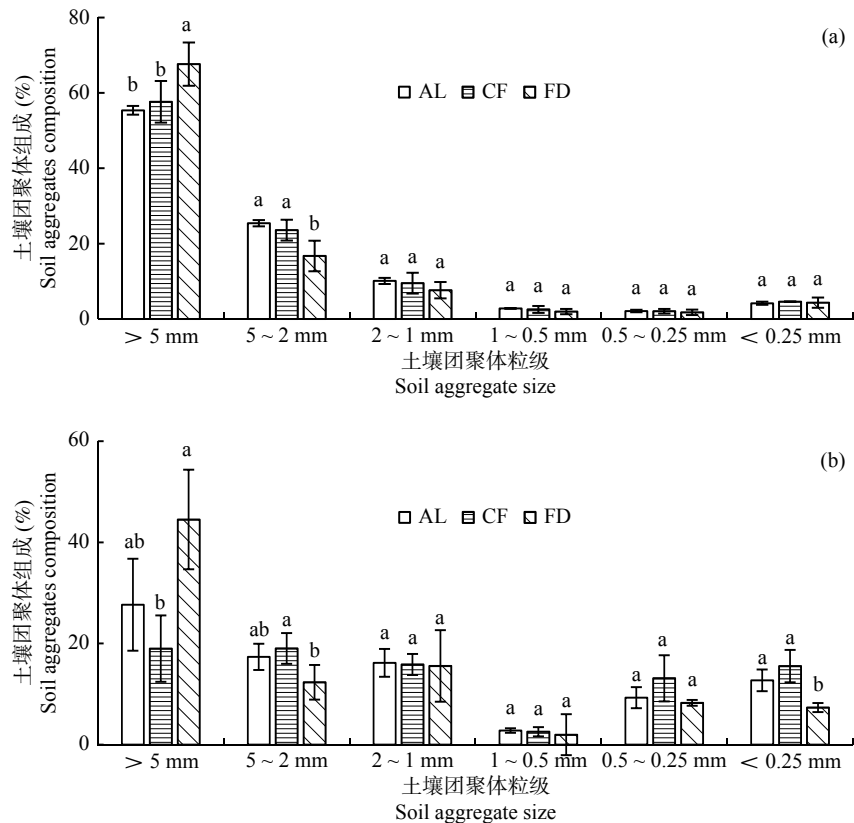
不同土地利用方式显著影响了土壤团聚体稳定性。果树地  $MWD$  和  $GMD$  均最高, 其中与玉米地差异达显著水平, 与撂荒地差异不显著 (表 2)。果树地 > 0.25 mm 水稳性大团聚体含量显著高于撂荒地和玉米地, 而  $PAD$  和  $E_{LT}$  则显著降低。可见, 果树地最有利于提高水稳性团聚体稳定性, 撂荒地其次,

玉米地最差。

### 2.3 不同土地利用方式对土壤团聚体有机碳含量及其对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

果树地不同粒径水稳性团聚体有机碳含量均高于撂荒地和玉米地 (图 2a), 各粒径团聚体有机碳含量分别比撂荒地和玉米地提高了 4.39% ~ 36.69% 和 8.11% ~ 27.51%, 其中 > 5 mm 团聚体有机碳含量差异达显著水平。玉米地 > 5 mm 团聚体有机碳含量显著高于撂荒地, 其他粒径有机碳含量则略低于撂荒地。

不同土地利用方式下不同粒径团聚体有机碳对土壤有机碳贡献率差异显著 (图 2b), 果树地 > 5 mm 团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率较撂荒地和玉米地分别显著提高了 6.03% 和 9.64%, < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率分别显著降低了 46.02% 和 57.42%。撂荒地和玉米地相比, > 5 mm 团聚体有机碳贡献率



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

图1 不同土地利用方式对土壤机械稳定性(a)和水稳性(b)团聚体组成的影响

Fig.1 Effects of different land use patterns on soil mechanical stability (A) and water stable aggregate (B) composition

提高了 3.85%, < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率降低了 26.78%, 但差异未达显著水平。

## 2.4 不同土地利用方式土壤养分与土壤团聚体稳定性指标间相关关系

由表 3 可知, 土壤有机碳含量与  $MWD$ 、 $GMD$ 、 $R_{0.25}$  呈显著正相关, 与  $E_{LT}$  呈显著负相关, 其他土壤养分与土壤团聚体稳定性指标无显著相关性。可见, 土壤有机碳含量是影响土壤团聚体稳定性的重要因子。

## 3 讨论

### 3.1 不同土地利用方式对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土地利用方式的不同, 会使土壤的微生态环境发生改变, 从而间接影响土壤团聚体的分布和稳

定<sup>[29-30]</sup>。本研究中, FD 土壤有机质和全氮含量较 AL 和 CF 显著增加, 这与大多研究结果一致<sup>[26-27]</sup>。其原因主要是农田向林地转化, 枯枝落叶物增加, 进而增加了土壤有机物归还量, 土壤有机质含量得到提高, 而土壤氮素通常与碳素耦合在一起。AL 与 CF 相比, 除土壤钾素外, 对其他土壤养分无明显提升作用。

稳定的团聚体可降低土壤可侵蚀性和提高土壤肥力, 因此, 评价土壤结构是否良好需要分析土壤团聚体的构成比例及稳定性<sup>[31]</sup>。本研究中, 不同土地利用方式下机械稳定性团聚体和水稳性团聚体组成均以 > 5 mm 的团聚体占比最高, 是土壤优势团聚体, 而不同土地利用方式对土壤团聚体组成的影响也主要表现在 > 5 mm 的团聚体上, FD 的 > 5 mm 机械稳

表 2 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性指标的影响

Table 2 Effects of different land use patterns on soil aggregate stability indices

土地利用方式 Different land use	平均重量直径 Mean weight diameter (mm)	几何平均直径 Geometric mean diameter (mm)	> 0.25 mm 团聚体 $R_{0.25}$ (%)	破坏率 Percentage of aggregate destruction (%)	不稳定团粒指数 Unstable aggregate index (%)
AL	2.43±0.45 ab	1.54±0.36 ab	87.28±2.15 b	8.90±1.83 a	12.72±2.15 a
CF	2.07±0.50 b	1.28±0.41 b	84.47±3.20 b	11.44±0.56 a	15.53±3.20 a
FD	3.03±0.33 a	2.07±0.36 a	92.66±0.91 a	3.21±1.28 b	7.34±0.91 b

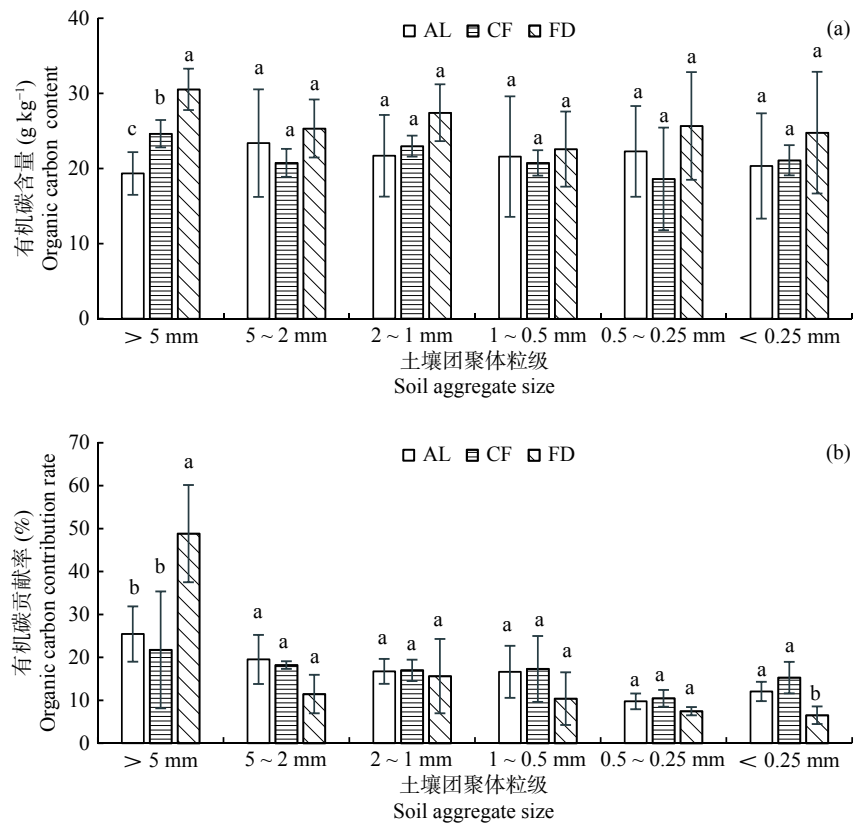


图 2 不同土地利用方式对水稳性团聚体有机碳含量(a)及团聚体有机碳贡献率(b)的影响

Fig.2 Effects of different land use patterns on organic carbon content (a) and its contribution rate (b) of water stable aggregates (B)

定性团聚体和水稳性团聚体组成均显著高于 AL 和 CF, 同时明显降低了 < 0.25 mm 的水稳性团聚体组成。与 CF 相比, AL 的 > 5 mm 的水稳性团聚体组成略有增加, < 0.25 mm 的水稳性团聚体也略有降低, 但差异不显著。说明三种土地利用方式下 FD 团聚体组成结构最优, AL 其次, CF 最差, 这与其他研究在该区域的研究结果基本一致<sup>[32-33]</sup>。其原因是耕地弃耕或还林后, 土壤微团聚体黏结成了粒径更大的团聚体, 其过程增强了土壤团聚体的水稳性, 进而使土壤结构得到改善<sup>[34]</sup>; 因为玉米常年翻耕, 扰动程度大, 且耕作频繁, 使土壤团聚体破碎, 所以 > 0.25 mm 水稳性团聚体容易被破坏<sup>[26]</sup>。此外, 有研究发现, 土

地利用方式的不同会影响土壤管理方式和区域环境发生变化。其中, 具有代表性的是农向林、农向草的转变, 此转变影响了土壤区域环境, 使土壤中枯枝落叶增加, 根系和菌丝以及微生物等多糖物质分解形成胶结物, 进而使土壤团聚体的分布发生改变, 这可能是导致传统农用地转变为经济林地和草地后, 大团聚体发生重大变化的主要原因<sup>[33-34]</sup>。

团聚体的稳定性具有重要意义, 其会影响土壤水分、养分的转化和保存。土壤团聚体稳定性越好, 则土壤质量越好。可通过  $R_{0.25}$ 、 $MWD$ 、 $GMD$ 、 $PAD$ 、 $E_{LT}$  等指标来评估团聚体的水稳性<sup>[34]</sup>。本研究中, 土地利用方式变化显著改变了上述指标,  $R_{0.25}$ 、

表 3 不同土地利用方式土壤养分含量与团聚体稳定性指标间相关关系

Table 3 Correlation between soil nutrient contents and aggregate stability indices in different land use patterns

指标 Index	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity	有机碳 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
平均重量直径	0.336	0.657	0.757*	0.511	0.516	-0.497	0.318
几何平均直径	0.331	0.661	0.783*	0.539	0.572	-0.481	0.294
> 0.25 mm 团聚体	0.374	0.512	0.742*	0.523	0.501	-0.195	0.285
团聚体破坏率	-0.293	-0.14	-0.592	-0.322	-0.408	-0.19	-0.326
不稳定团粒指数 $E_{LT}$	-0.374	-0.512	-0.742*	-0.523	-0.501	0.195	-0.285

注: “\*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, “\*\*”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

MWD、GMD 均表现为  $FD > AL > CF$ ，而 PAD 和  $E_{LT}$  则相反，说明不同土地利用方式土壤团聚体稳定性表现为  $FD > AL > CF$ ，这与前人研究结果一致<sup>[35-38]</sup>。其原因是因为农田弃耕或转为林地后，土壤扰动少，且枯枝落叶物在地表富集，可以降低雨水对土壤的冲刷，且这些有机残留物可以在分解过程中激活微生物群落，还可以增加真菌和细菌的数量，它们产生的根系分泌物和酶可以增强土壤团聚体的稳定性<sup>[39]</sup>。而频繁翻耕则会导致玉米地大团聚体破碎化，使大团聚体数量减少，进而降低土壤团聚体稳定性<sup>[26]</sup>。

### 3.2 不同土地利用方式对土壤团聚体有机碳分布的影响

影响土壤团聚体发育程度的因素有很多，土壤的固碳能力就是代表之一，团聚体的形成是有机胶体粘合作用的结果，且团聚体的形成可以使有机碳的损失大大减少<sup>[40-44]</sup>。土壤团聚体的形成和稳定性受土壤中有有机碳的含量和性质的影响，本研究相关分析也表明土壤有机碳含量与土壤团聚体稳定性各指标呈显著正相关。本研究中，不同土地利用方式下  $> 0.25$  mm 水稳性团聚体中有有机碳含量对总有机碳的贡献率均高于  $< 0.25$  mm 微团聚体，说明土壤有机碳主要来源于大团聚中，这与前人研究结论一致<sup>[45-46]</sup>。不同土地利用方式中，FD 不同粒径团聚体有机碳含量均高于 AL 和 CF，且  $> 5$  mm 团聚体中有有机碳含量对总有机碳贡献率显著提高，其原因是无人扰动，大团聚体破坏性减少，同时，团聚体能够显著降低微生物与其内部包被有机质接触的可能性，使有机碳含量得到提高<sup>[44]</sup>。此外，枯枝落叶物的地表富集，降低了土壤的侵蚀能力，有利于土壤水稳性大团聚体的形成，大团聚体具有较强的富集性质，可以富集有机碳源<sup>[3]</sup>，致使大团聚体有机碳含量增加较多。CF 与 AL 相比，人为扰动较少，因而  $> 0.25$  mm 团聚体有机碳贡献率有一定提升。CF 的  $< 0.25$  mm 的微团聚体中，有机碳贡献率最高，这可能是耕作方式会导致大团聚体被破坏，使有机物更容易被矿化和分解，而小团聚体中的有机碳通常较难被分解<sup>[26]</sup>。

## 4 结论

(1) 不同土地利用方式对土壤养分有显著影响，其中对有机碳和全氮的影响较大，果树地有机质和全氮含量显著高于撂荒地和玉米地。

(2) 与玉米地相比，农田撂荒或转变为林地可提高大团聚体含量，增加团聚体稳定性，其中果树地大团聚体及团聚体稳定性增加更为明显。

(3) 与玉米地相比，果树地各粒径水稳性团聚体中有有机碳含量增加，其中大于 5 mm 团聚体中有有机碳含量对总有机碳的贡献率显著增加，小于 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率显著降低。

(4) 土壤的团聚体稳定性与土壤有机碳含量呈显著正相关，团聚体的水稳性主要依靠土壤有机质的胶结作用，胶结作用的增强有利于土壤团聚体稳定性提高。退耕还林可以显著增加该研究区域的土壤团聚体有机碳含量并改善土壤团聚体稳定性指标，增强其土壤结构稳定性，提升耕地质量，是该区域较为合理的土地利用方式。

### 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] 程 欢, 宫渊波, 付雨欣, 等. 四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 112 - 118.
- [3] 李春越, 常 顺, 钟凡心, 等. 种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J]. *应用生态学报*: 1 - 11 [2020-12-15].
- [4] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991 - 6999.
- [5] 张 国, 曹志平, 胡娟娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1921 - 1930.
- [6] 吴梦瑶, 陈 林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*: 1 - 8 [2020-12-15].
- [7] 周方亮, 李 峰, 黄雅楠, 等. 紫云英添加对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 133 - 140.
- [8] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(35): 160 - 165.
- [9] 卢金伟. 土壤团聚体水稳性及其与土壤可蚀性之间关系研究[D]. 西北农林科技大学, 2002.
- [10] 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.
- [11] 韩新生, 马 璠, 郭永忠, 等. 土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 114 - 120.
- [12] 姜勇祥, 蓝家程, 龙家辉. 喀斯特石漠化地区退耕模式对土壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(4): 10 - 17.

- [ 13 ] 周常萍, 童立强, 雷 蓉. 贵州省土地石漠化形成与发展机理研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(2): 269 - 273 + 278.
- [ 14 ] 刘彦伶, 李 渝, 秦 松, 等. 西南喀斯特生态脆弱区实行轮作休耕问题探讨——以贵州省为例[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1117 - 1124.
- [ 15 ] 刘彦伶, 李 渝, 张 萌, 等. 基于文献计量的贵州喀斯特地区石漠化等级土壤养分状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 280(2): 177 - 186.
- [ 16 ] Cavagnaro T R, Jackson L E, Six J, et al. Arbuscular mycorrhizas, microbial communities, nutrient availability, and soil aggregates in organic tomato production[J]. *Plant & Soil*, 2006, 282(1-2): 209 - 225.
- [ 17 ] 陈 静, 陈 海, 朱大运, 等. 石漠化地区林草复合治理对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 1 - 7.
- [ 18 ] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 215 - 221.
- [ 19 ] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 等. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 185 - 194.
- [ 20 ] 田涟祯. 石漠化地区土壤性质对不同土地利用方式的响应研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [ 21 ] 王霖娇, 盛茂银, 杜家颖, 等. 西南喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1358 - 1365.
- [ 22 ] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 24 - 27.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 胡旭凯, 陈居田, 朱利霞, 等. 干湿交替对土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 141 - 149.
- [ 25 ] 张 琦, 王淑兰, 王 浩, 等. 深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2840 - 2851.
- [ 26 ] 胡 尧, 李 懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 22 - 29.
- [ 27 ] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 170 - 174.
- [ 28 ] 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社.
- [ 29 ] 周际海, 郜茹茹, 魏 倩, 等. 旱地红壤不同土地利用方式对土壤酶活性及微生物多样性的影响差异[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 330 - 335.
- [ 30 ] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422 - 429.
- [ 31 ] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2857 - 2865.
- [ 32 ] 李 娟, 廖洪凯, 龙 健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2147 - 2156.
- [ 33 ] 王 进, 刘子琦, 张 国, 等. 石漠化区林草恢复与传统农耕对土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(11): 133 - 143.
- [ 34 ] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7 - 31.
- [ 35 ] 刘 杰, 马艳婷, 王宪玲, 等. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3361 - 3368.
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] 徐国鑫, 王子芳, 高 明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 355 - 362.
- [ 38 ] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1350 - 1358.
- [ 39 ] Wei C F, Gao M, Shao J A, et al. Soil aggregate and its response to land management practices[J]. *China Particology*, 2006, 4(5): 211 - 219.
- [ 40 ] 赵 冀, 王 维, 张 鹏, 等. 轮耕对冬春休旱地土壤结构及团聚体稳定性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 52 - 58 + 115.
- [ 41 ] 窦莉洋. 秸秆还田对不同类型土壤团聚体稳定性、有机碳含量及其分布的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [ 42 ] 姜培坤, 周国模, 钱新标. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 12 - 14 + 30.
- [ 43 ] 李 伟, 代 镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高土团聚体稳定性及作物产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 782 - 791.
- [ 44 ] 罗晓虹, 王子芳, 陆 畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816 - 3824.
- [ 45 ] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 671 - 678.
- [ 46 ] 卢凌霄, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1167 - 1174.

## Effects of Land Use Patterns on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Distribution in the Karst Rocky Desertification Area

ZHANG Yan<sup>1</sup>, LIU Yan-ling<sup>1,2\*</sup>, LI Yu<sup>1,2</sup>, JIANG Tai-ming<sup>2,3</sup>, BAI Yi-jing<sup>1</sup>,  
ZHANG Meng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-rong<sup>1,2</sup>, HUANG Xing-cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-an<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. Guizhou Farmland Conservation and Agro-Environmental Science Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guiyang 550006, China; 3. Tea Research Institute of Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** The effects of three common land use patterns (abandoned land, Al; corn field, CF; fruit tree land, FD) on soil aggregate stability and organic carbon (C) distribution in rocky desertification area were analyzed, which will provide theoretical basis for farmland restoration and soil fertility improvement in karst rocky desertification area. Soil samples were collected from different land use patterns in the same area, and dry sieving method and wet sieving method were used for aggregate classification. The soil nutrient content, particle size distribution, structural stability and organic C distribution characteristics of soil aggregates under different land use patterns were compared and analyzed. The results showed that the soil nutrient indices of FD were higher than those of Al and CF. The soil organic C of FD was significantly increased by 25.45% and 21.86% compared with Al and CF, and the total nitrogen was significantly increased by 22.42% and 29.76%. The content of mechanical and water stable aggregates in FD > 5 mm was significantly higher than that in Al and CF, while the content of water stable aggregates < 0.25 mm was significantly lower than that of Al and CF. The aggregate content ( $R_{0.25}$ ), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of > 0.25 mm in different land use patterns were FD > AL > CF, while the aggregate failure rate (PAD) and unstable aggregate index ( $E_{LT}$ ) were opposite. Compared with Al and CF, the organic C content of FD aggregates with different particle sizes increased by 4.39% ~ 36.69% and 8.11% ~ 27.51% respectively, and the contribution rate of organic C of aggregates with particle size > 5 mm to soil organic C significantly increased by 6.03% and 9.64% compared with Al and CF, while the contribution rate of organic C with particle size < 0.25 mm decreased by 46.02% and 57.42%. Correlation analysis showed that soil organic C content was significantly positively correlated with MWD, GMD and  $R_{0.25}$ , and soil organic C content was the most important soil nutrient index affecting soil aggregate stability. Returning farmland to forest in the areas with serious karst rocky desertification can improve soil nutrients, soil aggregate structure, and promote the improvement of ecological environment of karst rocky desertification.

**Key words:** Key words: Karst rocky desertification area; Land use pattern; Soil aggregate; Stability; Soil organic carbon

[责任编辑: 张玉玲]