

土地利用方式对喀斯特峡谷区土壤水稳性团聚体的影响

肖盛杨¹, 舒英格^{2*}

(1. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 2. 贵州大学 农学院, 贵阳 550025)

摘要:【目的】全面评价土地利用方式对喀斯特峡谷区土壤结构退化的影响。【方法】采用空间代替时间的方法, 开展了不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性的研究。【结果】①不同土地利用方式均以 $>0.25\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体为主, 其量变化、MWD、GMD 均表现为林草间作地 $>$ 荒草地 $>$ 退耕还草地 $>$ 耕地; ②在不同土层中, 不同土地利用方式土壤水稳性团聚体量总体上随粒径的减小呈先增加后减少再增加的变化趋势, 其中 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层, 土壤各粒级水稳性团聚体量分布及稳定性差异具有一定显著相关性, 20 cm 至母质层差异不显著; ③ 5 mm 粒径团聚体成为土壤团聚体从微团聚体向大粒径团聚体团聚化过程中关键的临界点; ④GMD 可以作为喀斯特峡谷区整个剖面土壤水稳性团聚体稳定性评价指标。【结论】林草间作模式能够增强喀斯特峡谷区土壤结构的稳定性, 对防止土壤结构退化具有重要作用。

关键词: 土地利用方式; 水稳性团聚体; 稳定性指标; 喀斯特峡谷区

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020600

OSID:



肖盛杨, 舒英格. 土地利用方式对喀斯特峡谷区土壤水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 73-79.

XIAO Shengyang, SHU Yingge. The Effects of Land Usage on Water-stable Soil Aggregates in Karst Canyon Region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 73-79.

0 引言

【研究意义】土壤水稳性团聚体是评价土壤结构稳定性、抗侵蚀性和径流产生的关键指标, 对防治土壤表层发生侵蚀和水土流失至关重要^[1-2]。喀斯特峡谷区在喀斯特高原、峰丛洼地、槽谷等八大喀斯特地貌类型中面积较大, 主要位于云、贵高原内的南、北盘江河谷地带^[3]。该区地表裸露、土层较薄、生态环境较脆弱, 由于不合理的土地利用, 土壤结构变差, 水土流失严重, 最后石漠化问题凸显, 土壤质量恶化^[4]。因此, 全面评价不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体的影响, 对该区土壤结构稳定性、土壤侵蚀退化以及土壤质量恢复具有重要的科学意义。

【研究进展】相比于喀斯特高原、峰丛洼地、槽谷等喀斯特地貌类型, 喀斯特峡谷区锥、塔峰喀斯特地貌不发育, 是南、北盘江及其主要支流挽近地质时期的强烈下切, 没有足够长的地形稳定期, 以裸露型喀斯特为主, 夷平面上的丘陵坡地下部为覆盖型喀斯

特^[3]。该区以高强度农业活动为主, 导致石漠化面积较大, 植被群落稳定性差, 土壤退化严重。目前喀斯特峡谷区的研究主要集中在土壤养分^[5-6]、土壤微生物活性^[7]、土壤抗蚀性^[8-9]、土壤质量^[10]等方面。不同土地利用方式对团聚体的粒径分布及稳定性的影响一直是研究的热点。不同土地利用方式因其植被类型与管理方式的差异改变土壤动物、微生物以及枯枝落叶的数量与性质, 从而导致土壤性质的差异, 影响土壤团聚体稳定性^[11]。如: 李会等^[12]研究了喀斯特高原区土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应, 发现稀疏灌丛地和灌草地土壤结构破坏率极低, 水稳性团聚体质量分数较高。杨慧等^[13]研究了桂林峰丛洼地区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响, 发现灌丛和林地 2 种自然土壤明显提高了土壤团聚体稳定性。罗晓虹等^[14]对重庆市北碚区喀斯特槽谷区 6 种土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳量的影响研究发现, 竹林和荒草地土壤团聚体稳定性较好。【切入点】长期以来, 对喀斯特地区退耕还草地和林草间作模式下水稳性团聚体研究较少。喀斯特峡谷区是我国西南生态安全屏障关键区域和生态文明建设核心区域的重要组成部分, 目前对该区域各种土地利用方式下的水稳性团聚体特征及其物理保护机制仍不清楚。【拟解决的关键问题】为此, 本文以喀斯特峡谷区不同土地利用方式的土壤为研究对象, 运用分形理论、相关性分析及敏感性分析, 系统评价不同土地利用方式变化对土壤水稳性团聚体的影响, 并

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460133); 贵州科学院创新人才团队项目(黔科院人才[2019]07 号); 贵阳国家高新区科技计划项目(GXYF-2018-003); 贵州省土地绿色整治工程研究中心资助

作者简介: 肖盛杨(1995-), 男, 贵州思南人。研究实习员, 硕士, 主要从事农业资源与环境、土地资源与水土保持研究。E-mail: 1269093654@qq.com

通信作者: 舒英格(1973-), 男, 贵州镇宁人。副教授, 硕士生导师, 博士研究生, 主要从事农业资源与环境、土地利用与规划研究。E-mail: maogen958@163.com

分析二者之间的相互关系。研究结果为喀斯特峡谷区土壤结构稳定性、土壤侵蚀退化以及选择合适的土地利用方式恢复土壤质量提供科学依据和应用指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省晴隆县莲城镇和光照镇,地理坐标为 25°49'—25°51'N, 105°11'—105°15'E, 平均海拔为 1 478 m, 属于高原亚热带季风气候, 年均日照时间为 1 462 h, 年均气温约 14 °C, 总降水量在 1 500~1 600 mm, 无霜期约 320 d, 是典型的喀斯特峡谷区。岩性主要为石灰岩, 且地表层为第四系薄层沉积物。土壤主要以石灰土为主, 土层较薄, 土壤质地较黏, 多为壤质黏土和黏壤土。该区属于贵州省内典型的高山石漠化贫困地区, 耕地多呈条状形小块坡地, 保水保肥能力差, 自然灾害频繁, 石漠化面积占全县土地总面积的 66.7%。

1.2 样品采集与处理

研究区是典型石漠化治理示范区, 目前主要以退耕还草和林草间作 2 种恢复措施为主。根据研究区域的主要植被和土地管理方式, 选择具有代表性的 4 种土地利用方式, 以耕地为对照, 其中荒草地植被有三叶草 (*Trifolium repens*)、车前草 (*Plantaginaceae*)、淡竹叶 (*Lophatherum gracile*)、青蒿 (*Artemisia caruifolia*) 等; 退耕还草地恢复之前多为有长期耕作历史的坡耕地, 水土流失较严重, 退耕还草模式实施后, 生态环境恢复良好, 主要种植皇竹草 (*Pennisetum sinense Roxb*) 和黑麦草 (*Lolium perenne*) 为主, 退耕年限 8~10 a; 林草间作地多为草本与乔木相间生长, 乔木散生, 植株较高, 研究区以柏树 (*Platycladus orientalis*) 与茅草 (*Stipa bungeana*) 间作和楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Mey.) 与黑麦草为主, 种植年限 10 a 左右; 耕地均为旱地, 长期进行耕作并常规施肥, 主要种植玉米 (*Zea mays*) 和烤烟 (*Nicotiana tabacum*)。于 2018 年 1 月在晴隆县根据植被类型选取典型的石灰土耕地、退耕还草地、荒草地、林草间作地等不同生态恢复模式为研究对象, 其中耕地为对照, 选取典型地块设置不同生态恢复模式土壤剖面, 在土壤母质上面自下到上采用沟槽方式采集距地面 0~10、10~20 cm、20 cm~母岩, 剖面深度根据土体深度确定, 以开挖到母岩 (基岩) 为止, 同层土混合为一个样品。本研究共采集 13 个剖面 39 个土样, 其中耕地 3 个剖面 9 个土样, 退耕还草地 4 个剖面 12 个土样, 荒草地 3 个剖面 9 个土样, 林草间作地 3 个剖面 9 个土样。样地情况见表 1。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 土壤水稳性团聚体的测定

将采回的原装土样沿着土壤自然结构面剥成直径约 10~20 mm 大小的小土块, 除去植物残体、小石

块以及动物遗体, 自然风干后, 通过 5、2、1、0.5、0.25 mm 的筛组进行干筛, 然后根据干筛求得的各级团聚体的百分量, 把干筛分取的风干土按比例配成 100 g 得到湿筛样品, 再将所得的 100 g 土样放置于水桶中的套筛 (孔径依次为 5、2、1、0.5 和 0.25 mm) 顶部, 开启震荡仪振荡 30 min, 最后将各粒级土壤烘干称质量^[15]。

表 1 土壤采样点基本信息

土地类型	样本数	采样点	土层深度/cm	体积质量/(g cm ⁻³)	pH 值	有机质/(g kg ⁻¹)	黏粒/%
耕地	3	耕地 1	50	1.06	6.44	31.87	21.84
		耕地 2	30	0.94	6.96	51.34	31.40
		耕地 3	38	0.91	6.89	31.88	21.00
退耕还草地	4	退耕还草地 1	40	1.26	6.32	35.31	35.86
		退耕还草地 2	40	0.99	7.02	78.15	24.81
		退耕还草地 3	30	1.32	6.82	50.22	26.62
		退耕还草地 4	38	1.15	6.53	45.06	31.49
荒草地	3	荒草地 1	50	0.96	6.95	46.55	43.30
		荒草地 2	46	0.93	6.33	70.47	33.71
		荒草地 3	39	0.95	7.05	80.23	40.32
林草间作地	3	林草间作地 1	30	1.01	7.17	48.26	49.43
		林草间作地 2	33	0.88	6.96	84.04	23.54
		林草间作地 3	46	1.00	6.91	83.74	38.32

1.3.2 土壤理化性质的测定

土壤体积质量采用环刀法测定; 土壤机械组成采用比重计速测法测定; 土壤 pH 值采用电位计法, 水土比为 (2.5:1) 测定; 有机质采用硫酸-重铬酸钾外加热法^[15]。

1.3.3 稳定性指标及敏感性指标计算

1) 平均重量直径:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (W_i \times \bar{X}_i), \quad (1)$$

式中: W_i 为某粒级团聚体的质量比 (%); $\bar{X}_i$ 为某粒级的平均直径 (mm)。

2) 几何平均直径:

$$GMD = \exp \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (2)$$

式中: GMD 几何平均直径 (mm); w_i 为某一粒级水稳性团聚体质量 (%); x_i 为某一粒级团聚体平均直径 (mm)。

3) 土壤团聚体分形维数 FD :

$$FD = 3 - \frac{\log \left(\frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_t} \right)}{\log \left(\frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_{\max}} \right)}, \quad (3)$$

式中: $M(r < \bar{X}_i)$ 为粒径小于 $\bar{X}_i$ 的团聚体的质量 (%);

M_t 为测定团聚体的总质量 (%)； $X_{\max}$ 为团聚体的最大直径； FD 为分形维数。

4) 土壤水稳性团聚体稳定性特征参数的敏感性分析

为了减少土壤水稳性团聚体稳定性评价指标的选取,提高工作效率,通过对团聚体稳定性特征的参数进行了敏感性计算,敏感性指标值越大,越能较好反映土壤水稳性团聚体稳定性。

计算式^[16]为:

敏感性指标=(最大值-最小值)/最小值。 (4)

1.3.4 数据处理及分析

采用 Office 2016 和 SPSS 19.0 进行数据处理,利用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析和相关性分析、Origin 9.0 软件进行作图。不同土地利用方式之间多重比较采用 Duncan 新复极差方法,然后经过 t 检验。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体量的分布特征

不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体各粒径量分布有很大的影响(表 2)。不同土地利用方式下

主要以 $>2\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体为优势级别, $<0.25\text{ mm}$ 粒径次之, $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体量最低,说明研究区土壤总体结构性能普遍不好。在 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层,耕地和退耕还草地土壤水稳性团聚体量组成总体上随粒径的减小呈先增加后降低再增加趋势,荒草地和林草间作地土壤水稳性团聚体量则随着粒径的减小呈先减少后增加趋势。在 $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\text{ cm}\sim$ 母质层,不同土地利用方式土壤水稳性团聚体量总体上随粒径的减小呈先增加后减少再增加的波浪形变化趋势。在 $0\sim 10\text{ cm}$ 和 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层, $>2\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体量变化均为林草间作地 $>$ 荒草地 $>$ 退耕还草地 $>$ 耕地;在 $20\text{ cm}\sim$ 母质层, $>2\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体量变化为林草间作地 $>$ 荒草地 $>$ 耕地 $>$ 退耕还草地。 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层,不同土地利用方式下同粒级土壤团聚体量存在部分差异显著;而同一土地利用方式下不同粒级土壤团聚体量差异显著; $20\text{ cm}\sim$ 母质层,不同土地利用方式下不同粒级土壤团聚体量差异不显著,说明不同土地利用方式对表层土壤各粒级水稳性团聚体量分布的影响较大。

表 2 不同土地利用方式土壤水稳性团聚体量分布特征

Table 2 The contents of soil water-stable aggregates under different land-use patterns

土层厚度/cm	土地类型	各粒级土壤水稳性团聚体量/%					
		$>5\text{ mm}$	$2\sim 5\text{ mm}$	$1\sim 2\text{ mm}$	$0.5\sim 1\text{ mm}$	$0.25\sim 0.5\text{ mm}$	$>0.25\text{ mm}$
$0\sim 10$	耕地	16.52 $\pm$ 4.61b	22.94 $\pm$ 4.64a	16.86 $\pm$ 4.34a	18.01 $\pm$ 0.84a	3.20 $\pm$ 2.73ab	77.53 $\pm$ 0.25b
	退耕还草地	22.87 $\pm$ 3.38b	25.29 $\pm$ 5.71a	15.24 $\pm$ 1.21a	15.60 $\pm$ 1.44a	4.88 $\pm$ 2.77a	83.88 $\pm$ 4.52ab
	荒草地	37.63 $\pm$ 8.14ab	21.35 $\pm$ 3.36a	11.56 $\pm$ 1.30a	12.24 $\pm$ 4.03ab	2.33 $\pm$ 1.64b	85.11 $\pm$ 4.21a
	林草间作地	39.61 $\pm$ 3.79a	25.60 $\pm$ 1.48a	11.19 $\pm$ 0.32a	8.95 $\pm$ 0.35b	3.01 $\pm$ 1.13ab	88.36 $\pm$ 1.76a
$10\sim 20$	耕地	9.79 $\pm$ 9.11a	25.34 $\pm$ 3.96a	16.33 $\pm$ 7.28a	16.58 $\pm$ 1.89a	6.99 $\pm$ 3.72a	75.03 $\pm$ 1.24b
	退耕还草地	27.95 $\pm$ 7.49a	23.14 $\pm$ 3.66a	13.86 $\pm$ 2.25a	15.09 $\pm$ 0.55a	6.36 $\pm$ 0.71ab	86.41 $\pm$ 2.03a
	荒草地	26.79 $\pm$ 8.40a	29.25 $\pm$ 3.27a	12.05 $\pm$ 5.51a	15.02 $\pm$ 3.76a	5.31 $\pm$ 1.01ab	88.52 $\pm$ 1.50a
	林草间作地	24.49 $\pm$ 9.24a	27.54 $\pm$ 2.10a	15.09 $\pm$ 4.42a	15.01 $\pm$ 2.53a	3.29 $\pm$ 0.35b	85.43 $\pm$ 2.29a
$20\sim$ 母岩	耕地	17.52 $\pm$ 14.24a	28.96 $\pm$ 8.19a	14.25 $\pm$ 3.41a	17.99 $\pm$ 5.18a	5.97 $\pm$ 2.00a	84.69 $\pm$ 2.25a
	退耕还草地	14.13 $\pm$ 4.26a	23.89 $\pm$ 5.84a	17.06 $\pm$ 0.08a	21.01 $\pm$ 3.39a	3.51 $\pm$ 1.03a	79.58 $\pm$ 5.96a
	荒草地	9.03 $\pm$ 4.86a	39.01 $\pm$ 7.18a	18.64 $\pm$ 3.22a	14.76 $\pm$ 1.40a	5.11 $\pm$ 0.49a	86.54 $\pm$ 1.28a
	林草间作地	25.03 $\pm$ 14.52a	25.51 $\pm$ 7.99a	16.19 $\pm$ 3.57a	14.05 $\pm$ 3.10a	4.71 $\pm$ 0.64a	85.49 $\pm$ 2.81a

注 表中的数据为平均值 $\pm$ 标准差。同列不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$)。

$>0.25\text{ mm}$ 水稳性大团聚体量既是衡量土壤抗蚀性的重要指标,也是评价土壤质量的关键因子,其数量越多,土壤结构性越稳定;而 $<0.25\text{ mm}$ 水稳性微团聚体量过多会影响土壤通气透水性和微生物活性。由表 2 可知,在 $0\sim 10\text{ cm}$ 和 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层,相对于耕地,退耕还草地、荒草地和林草间作地水稳性大团聚体量分别增加 8.19%、9.78%、13.97%和 15.17%、17.98%、13.86%。随着土层深度的增加,耕地水稳性大团聚体量呈先减少后增加趋势, $<0.25\text{ mm}$ 水稳性微团聚体量呈先增加后减少趋势;随土层深度的增

加,退耕还草地和荒草地水稳性大团聚体量先增加后减少;林草间作地水稳性大团聚体量先减少后增加。在 $20\text{ cm}\sim$ 母质层中,耕地土壤水稳性大团聚体量高于表层土,主要是由于该层次受到耕作等外界影响少,破坏小;耕还草地、荒草地和林草间作地土壤水稳性大团聚体量低于表层土壤,原因是底层土壤根系减少,微生物活动较弱,有机质量低,导致土壤团聚体水稳性下降。

2.2 土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 的变化特征

由表 3 可知,不同土地利用方式下土壤水稳性团

聚体 *MWD* 和 *GMD* 的差异主要体现在 0~20 cm 表层土壤,大体上表现为林草间作地>荒草地>退耕还草地>耕地,与>0.25 mm 粒径量分布一致。与耕地相比,林草间作地显著大于耕地 ($P<0.05$),退耕还草地、荒草地和林草间作地团聚体 *MWD* 和 *GMD* 在 0~10 cm 土层分别提高了 33.04%、69.20%、82.14% 和 6.47%、31.65%、58.99%; 在 10~20 cm 土层分别提高了 51.39%、51.39%、30.56%和 35.29%、43.70%、222.69%; 20 cm~母质层各土地利用方式间 *MWD* 和 *GMD* 的差异不显著。

表 3 土壤水稳性团聚体 *MWD* 和 *GMD*Table 3 *GMD* and *MWD* of water-stable aggregates

稳定性 指标	土地类型	土层深度/cm		
		0~10	10~20	20~母岩
<i>MWD</i> / mm	耕地	2.24±0.17bA	2.16±0.29bA	2.62±0.65aA
	退耕还草地	2.98±0.81abA	3.27±0.70aA	2.35±0.57aA
	荒草地	3.79±0.56abA	3.27±0.60aAB	2.33±0.48aB
	林草间作地	4.08±0.32aA	2.82±0.25abB	3.10±0.74aAB
<i>GMD</i> / mm	耕地	1.39±0.09bA	1.19±0.09bA	1.11±0.31aA
	退耕还草地	1.48±0.57abA	1.61±0.34aA	1.09±0.28aA
	荒草地	1.83±0.49abA	1.71±0.37aA	1.28±0.10aA
	林草间作地	2.21±0.24aA	1.46±0.08bB	1.56±0.42aAB

注 表中不同小、大写字母分别代表同一土层不同土地利用方式和同一利用方式不同土层之间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

随着土层厚度的加深,荒草地土壤水稳性团聚体 *MWD* 和 *GMD* 呈逐渐下降的趋势,退耕还草地呈先增加后减小,林草间作地和耕地呈先减少后增加,而耕地 *MWD* 和 *GMD* 各土层间无显著差异。退耕还草地 10~20 cm 土层 *MWD* 和 *GMD* 值分别高于 0~10 cm 和 20 cm~母质层 9.73%、39.15%和 8.78%、47.71%倍;林草间作地基本表现为 0~10 cm 土层显著高于 10~20

cm ($P<0.05$)。因此,不同土地利用方式,0~10 cm 表层土壤,林草间作地土壤水稳性团聚体稳定性强于其他土地利用方式,耕地土壤水稳性团聚体稳定性最差;20 cm~母质层,不同土地利用方式下团聚体 *MWD* 和 *GMD* 差异均不显著(表 3)。

2.3 土壤水稳性团聚体分形维数 (*FD*)

由图 1 可知,研究区不同土地利用方式土壤水稳性团聚体 *FD* 的范围在 2.27~2.85 之间,在 0~10 cm 土层和 20 cm~母质层,不同土地利用方式下 *FD* 表现为耕地>退耕还草地>荒草地>林草间作地,其中 0~10 cm 土层,耕地高于退耕还草地、荒草地和林草间作地 4.81%、18.13%和 20.43%,且显著高于林草间作地 ($P<0.05$); 20 cm~母质层,不同土地利用方式间 *FD* 差异不显著。在 10~20 cm 土层,不同土地利用方式下 *FD* 表现为耕地>林草间作地>荒草地>退耕还草地,这与 *GMD* 和 *MWD* 的变化趋势相反。在剖面上,随土层深度增加,耕地和林草间作地土壤水稳性团聚体 *FD* 均呈先增加后降低,退耕还草地呈先降低后增加趋势,荒草地呈逐渐增加的趋势。

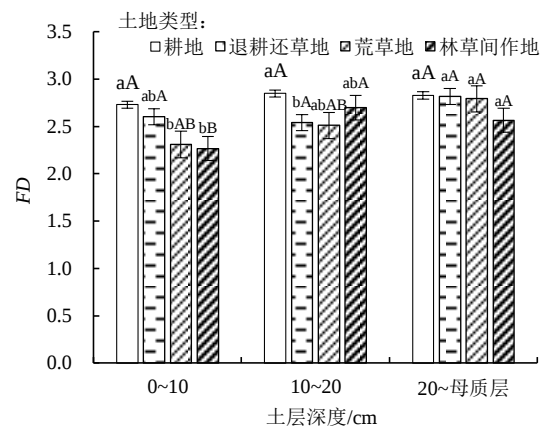
图 1 土壤水稳性团聚体的 *FD*Fig.1 *FD* of water-stable aggregates

表 4 土壤水稳性团聚体各参数间相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil water stable aggregate parameters

参数	<i>MWD</i>	<i>GMD</i>	<i>FD</i>	不同粒径土壤水稳性团聚体					
				>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
<i>MWD</i>	1	0.966**	-0.964**	0.963**	-0.388*	-0.771**	-0.805**	-0.361*	-0.631**
<i>GMD</i>	-	1	-0.931**	0.916**	-0.255	-0.710**	-0.840**	-0.373*	-0.741**
<i>FD</i>	-	-	1	-0.997**	0.568**	0.795**	0.712**	0.325*	0.502**

2.4 土壤水稳性团聚体各参数间相关性分析

相关性结果表明(表 4),水稳性团聚体 *MWD* 和 *GMD* 值均与 *FD* 值呈极显著负相关,其相关系数分别为-0.964 和-0.931,说明土壤水稳性团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 值越大, *FD* 值越小。*MWD* 和 *GMD* 值均与 1~2、0.5~1、<0.25 mm 粒径的土壤水稳性团聚体量间呈极显著负相关关系,与 2~5 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体呈负相关性但不显著;但>5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体与 *MWD*

和 *GMD* 均极显著正相关,相关系数分别为 0.963 和 0.916。土壤水稳性团聚体 *FD* 值与 2~5、1~2、0.5~1、<0.25 mm 粒径的土壤水稳性团聚体量间呈极显著正相关关系,与>5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体呈极显著负相关关系(-0.997**)。由此可知,水稳性团聚体 *MWD*、*GMD* 和 *FD* 值与各粒径团聚体量的正负相关性以 5 mm 粒径为界。

2.5 土壤水稳性团聚体稳定性指标敏感性分析

由表 5 可以看出, *GMD* 的敏感性值在整个土壤

剖面上都是最高的,在 0~10 cm 土层分别高出 *MWD* 和 *FD* 的 51.02%和 362.50%; 10~20 cm 土层分别高出 *MWD* 和 *FD* 的 5.79%和 228.21%; 20 cm~母质层分别高出 *MWD* 和 *FD* 的 8.78%和 436.67%。*FD* 在整个土壤剖面上的敏感性值均较低。因此, *GMD* 能够较好地描述该研究区整个剖面土壤水稳性团聚体的稳定性;而 *FD* 作为评价土壤水稳性团聚体稳定性特征的指标效果较差。

表 5 土壤水稳性团聚体稳定性指标的敏感性

Table 5 Sensitivity analysis of soil water stable aggregate stability index

土层/cm	<i>MWD</i>	<i>GMD</i>	<i>FD</i>
0~10	0.98	1.48	0.32
10~20	1.21	1.28	0.39
20~母质	1.48	1.61	0.30

3 讨论

不同土地利用方式会改变土壤的微环境,进而对土壤水稳性团聚体分布及稳定性产生影响^[17]。研究发现,在 0~20 cm 土层,与耕地相比,林草间作地、荒草地和退耕还草地>2 mm 粒径水稳性团聚体量出现不同幅度上升,可能是小粒径团聚体向粒径更大团聚体聚合过程提高了土壤团聚体的水稳性,改善了土壤的结构^[18]。而水稳性大团聚体量也是耕地最低,说明耕地土壤结构状态相对较差,土壤出现了明显的“疲劳”症状。这与肖霜霜等^[19]在喀斯特峰丛洼地区的研究结果一致,由于耕地没有灌木林地和草地的地表枯落物来增加有机质来源,加之耕作干扰破坏了耕地表层土较大团聚体,促使土壤原先的有机质氧化分解,最终有机胶结物质减少,土壤团聚体形成作用减弱^[20-21]。而灌木林地和草地土壤干扰程度较低,减少有机质氧化分解,减缓了有机质的周转速度,土壤有机质有明显增加(表 1),增强土壤水稳性团聚体团聚的胶结性。因此,在喀斯特峡谷区的耕地多为坡耕地的情况下,土壤团聚体结构性较差,抗蚀能力弱,有必要实行退耕。随着土层深度的增加,退耕还草地和荒草地水稳性大团聚体量先增加后减少的趋势,10~20 cm 土层水稳性大团聚体量最高。该结果与刘梦云等^[22]和李欣雨等^[23]研究结果不一致,可能是随着土层深度的加深,荒草地和退耕还草地在 10~20 cm 土层分布大量根系,植物根系对土壤具有机械固持、改良土壤结构和改善土壤结构的功能,以及根系分泌的有机物质对土壤颗粒团聚过程起重要作用^[24-25]。

土地利用方式的变化也会影响土壤水稳性团聚体的稳定性。土壤的 *MWD* 和 *GMD* 是表征土壤水稳性团聚体稳定性以及物理性质优劣的指标,其值越大,表明团聚体结构性越稳定,物理特性越好^[26]。在 0~10 cm 土层,与耕地相比,其他 3 种土地利用方式水稳性

团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 值均有不同幅度的增加,且林草间作地显著($P<0.05$)增加了 82.14%和 58.99%。主要是一方面耕地常年采用玉米与烤烟轮作,耕作频率和使用强度较高,土壤处于长期运作过程,土壤结构极易遭受破坏^[27];加之雨水冲刷,土壤表层大团聚体被分散,土壤结构稳定性变差^[28-29];另一方面林草间作地和草地枯枝落叶回归土壤,减少了雨水对土壤的冲刷,维持土壤有机质量水平和微生物种群数量,对土壤水稳性团聚体的形成极其重要^[30]。在 10~20 cm 土层,土壤的 *MWD* 和 *GMD* 值大小为荒草地>退耕还草地>林草间作地>耕地,这可能与植物的根系数量和根系分泌物有关,具体原因有待进一步研究。

本研究还发现,水稳性团聚体 *MWD*、*GMD* 和 *FD* 值与各粒径团聚体量的正负相关性以 5 mm 粒径为界。这与史正军等^[31]和姜敏等^[32]在非喀斯特地区的研究结果类似,说明喀斯特地区与非喀斯特地区在土壤团聚化过程中,土壤水稳性团聚体从微团聚体(<0.25 mm)向大粒径团聚体(>5 mm)的转化过程中,5 mm 粒径是较为关键的临界点,影响土壤团聚体稳定性和土壤结构性。因此,可将>5 mm 粒径水稳性团聚体作为土壤团聚化过程的特征团聚体。

4 结论

1) 不同土地利用方式均以>0.25 mm 粒径水稳性团聚体为主,其量变化为林草间作地>荒草地>退耕还草地>耕地;总体上随着粒径的减小呈先增加后减少再增加趋势;随着土层深度增加,耕地土壤水稳性大团聚体呈先减少后增加趋势,其余 3 种土地利用方式呈先增加后减少趋势。

2) 不同土地利用方式下,林草间作地土壤水稳性团聚体 *MWD*、*GMD* 相对较高,*FD* 值相对较低,土壤结构稳定性较好,抗蚀能力较强;在 0~20 cm 土层,土壤各粒级水稳性团聚体量分布及稳定性差异具有一定显著相关性,20 cm~母质层差异不显著。

3) 土壤团聚体从微团聚体(<0.25 mm)向大粒径团聚体(>5 mm)的转化过程中,5 mm 粒径是较为关键的临界点。

4) *GMD* 的敏感度相对于 *MWD* 和 *FD* 在整个土壤剖面上值是最高的,能够较灵敏地描述喀斯特峡谷区整个剖面土壤水稳性团聚体稳定性,可以作为今后喀斯特峡谷区整个土壤剖面土壤团聚体稳定性的表征指标。

参考文献:

- [1] LI Z X, CAI C F, SHI Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 129-136.
- [2] 陆铸畴,包析怡,LIU Xiao, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5):

- 115-120.
- LU Zhuchou, BAO Xinyi, LIU Xiao, et al. Stability of soil aggregates in riparian zone of the three gorges reservoir studied using the le bissonnais method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 115-120.
- [3] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. *山地学报*, 2013, 31(1): 18-24.
- WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong. Discussion on nomenclature of the karst desertification regions and illustration for their environment characteristics in southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(1): 18-24.
- [4] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 274-279.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [5] 喻阳华, 钟欣平, 王颖. 喀斯特高原峡谷区土壤大/中/微量元素的生态化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(9): 2 068-2 072.
- YU Yanghua, ZHONG Xiping, WANG Ying. Ecological stoichiometric characteristics of macro-element, secondary-element and micro-element in soil in valley area of karst plateau[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(9): 2 068-2 072.
- [6] 黄珂瑜, 舒英格, 肖盛杨, 等. 喀斯特山区不同草地土壤养分与酶活性特征[J]. *草业学报*, 2020, 29(6): 93-104.
- HUANG Yufan, SHU Yingge, XIAO Shengyang, et al. Quantification of soil nutrient levels and enzyme activities in different grassland categories in karst mountains[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 93-104.
- [7] 文小琴, 舒英格, 何欢. 喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(6): 1 227-1 233.
- WEN Xiaoqin, SHU Yingge, HE Huan. Soil nutrients and microbial characteristics under different land utilization patterns in karst mountainous area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(6): 1 227-1 233.
- [8] 肖盛杨, 舒英格, 陈梦军. 喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 30-35, 81.
- XIAO Shengyang, SHU Yingge, CHEN Mengjun. Soil anti-erodibility under different vegetation types in karst plateau gorge region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(4): 30-35, 81.
- [9] 刘志, 杨瑞, 裴仪岱. 喀斯特高原峡谷区顶坛花椒与金银花林地土壤抗侵蚀特征[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 466-474.
- LIU Zhi, YANG Rui, PEI Yidai. Soil erosion resistance characteristics of *zanthoxylum bungeanum* and *lonicera japonica* forest land in canyon areas of karst plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 466-474.
- [10] 李开萍, 刘子琦, 李渊, 等. 喀斯特高原峡谷区花椒林土壤质量评价[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(4): 391-397.
- LI Kaiping, LIU Ziqi, LI Yuan, et al. Evaluation of fertility characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* forest soil in karst plateau gorge areas[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, 40(4): 391-397.
- [11] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 180-185.
- WANG Yong, ZHANG Jianhui, LI Fucheng. Tillage erosion influences on soil water-stable aggregate and moisture properties on the hillslope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 180-185.
- [12] 李会, 周运超, 刘娟, 等. 喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 16-23.
- LI Hui, ZHOU Yunchao, LIU Juan, et al. Responses of Karst soil anti-erodibility to different land use types[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 16-23.
- [13] 杨慧, 张连凯, 于爽, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 265-271.
- YANG Hui, ZHANG Liankai, YU Shi, et al. Effects of different land-uses on the features of water-stable aggregates in karst and clastic areas in Maocun, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 265-271.
- [14] 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): 3 816-3 824.
- LUO Xiaohong, WANG Zifang, LU Chang, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3 816-3 824.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 218-226.
- LIU Mengyun, CHANG Qingrui, QI Yanbing, et al. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the loess plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 218-226.
- [17] 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): 6 991-6 999.
- REN Rongxiu, DU Zhangliu, SUN Yiheng, et al. Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6 991-6 999.
- [18] 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 and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [19] 肖霜霜, 叶莹莹, 张伟, 等. 干扰/利用方式对喀斯特石灰土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1 140-1 146.
- XIAO Shuangshuang, YE Yingying, ZHANG Wei, et al. Carbon and nitrogen contents in calcareous soil aggregates affected by disturbance and land use in karst region, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(5): 1 140-1 146.
- [20] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [21] 张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 90-95.
- ZHANG Xiaocun, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slope land with different reclamation years in black soil region[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(5): 90-95.
- [22] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1 564-1 576.
- LIU Mengyun, WU Jianli, LIU Liwen, et al. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns on the loess plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1 564-1 576.
- [23] 李欣雨, 夏建国, 田汶艳. 稻田植茶后土壤团聚体水稳性变化特征及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 148-153, 204.
- LI Xinyu, XIA Jianguo, TIAN Wenyan. Research on the water stability and the driving forces of soil aggregate after paddy field switched to tea garden[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 148-153, 204.

- 148-153, 204.
- [24] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2 387-2 396.
- GAN Zhuoting, YE Jia, ZHOU Qi, et al. Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2 387-2 396.
- [25] GYSSELS G, POESEN J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.
- [26] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 723-733.
- WANG Jing, HE Zhongjun, WANG Lidong, et al. Properties of humus and content of soil aggregates in soils on gaoligong mountain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 723-733.
- [27] 杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 52-59.
- YANG Bo, QU Zhongyi, SUN Huihui, et al. The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 52-59.
- [28] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, LU Xinchun, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- [29] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 98-105.
- CHEN Lin, WANG Jian, SONG Pengshuai, et al. Effect of rainfall on water stability aggregates of crust soil on slope surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 98-105.
- [30] DIAZ E, ROLDÁN A, LAX A, et al. Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat[J]. Geoderma, 1994, 63(3/4): 277-288.
- [31] 史正军, 张朝, 卢瑛. 深圳不同植被类型城市土壤团聚体组成与分形特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 124-127.
- SHI Zhengjun, ZHANG Chao, LU Ying. Aggregate composition and fractal characteristics of urban green space soils under different vegetation types in Shenzhen[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 124-127.
- [32] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 265-270.
- JIANG Min, LIU Yi, LIU Chuang, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 265-270.

The Effects of Land Usage on Water-stable Soil Aggregates in Karst Canyon Region

XIAO Shengyang¹, SHU Yingge^{2*}

(1.Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China; 2.College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: 【Objective】 Aggregate is a basic functional unit in soil to characterize the impact of soil structure on soil functions. It changes with agricultural practice and land management. The aim of this paper is to investigate the impact of land usage on water-stable aggregates in Karst Canyon regions. **【Method】** Space-for-time method was used to study distribution and stability of water-stable aggregates under four land managements: forest and grassland, grassland, turning farmland to grassland, and cultivated agricultural land. **【Result】** The aggregate sizes in all land managements were larger than 0.25 mm although the aggregate fractions varied between treatments. The MWD and GMD were ranked in the order of: forest and grass>grassland>returning farmland to grassland>cultivated agricultural land, as opposed to the FD. Regardless of soil depth and land management, the volumetric fraction of water-stable aggregates increased with their size first, followed by a decline before increasing again. In particular, in the 0~20 cm soil, the distribution of aggregates sizes and its stability is positively correlated. The critical aggregate size separating micro aggregates and large aggregates was 5 mm. GMD can be used as an index for evaluating stability of water-stable aggregates. **【Conclusion】** Forest-grass land enhanced the stability of soil aggregates in the Karst canyon region and plays an important role in preventing soil structure degradation.

Key words: land usage; water-stable aggregates; stability indexes; karst canyon region

责任编辑：白芳芳