

喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响

王进^{1,2}, 刘子琦^{1,2}, 鲍恩侯^{1,2}, 张国^{1,2}, 李渊^{1,2}, 孙建^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 为研究喀斯特高原峡谷石漠化治理区林草植被恢复对土壤团聚体的粒径分布, 土壤结构稳定性及各粒径团聚体有机碳的影响, 以期对喀斯特石漠化治理区土壤结构改善, 植被重建, 土壤碳库的维持与提高提供理论依据。以贵州喀斯特高原峡谷石漠化治理示范区 5 种常见林草植被(金银花、火龙果、花椒、荒草地和原生灌木林地)为研究对象, 通过湿筛法对土壤团聚体粒径进行分组, 对比分析 5 种林草植被模式下 0—40 cm 土层垂直剖面各土层土壤中团聚体和有机碳含量的分布规律。结果表明: 在 0—40 cm 土层垂直剖面中, 5 种林草植被的土壤团聚体在 $>5, 2\sim 5, 0.25\sim 2, <0.25$ mm 4 个粒径中的分布特征, 金银花地分别为 31.89%, 32.85%, 28.48%, 6.78%; 火龙果地为 19.11%, 32.68%, 37.72%, 8.49%; 花椒地为 10.42%, 18.39%, 57.90%, 13.29%; 草地为 40.38%, 20.68%, 30.34%, 8.61%; 原生灌木林为 47.04%, 17.80%, 30.25%, 4.91%。水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量表现为原生灌木林地(95.09%) $>$ 金银花地(93.22%) $>$ 火龙果地(91.51%) $>$ 荒草地(91.39%) $>$ 花椒地(86.71%)。5 种林草植被均以大团聚体(>0.25 mm)为主; 其中, 原生灌木林地大团聚体(>0.25 mm)含量最高, 花椒地最低。在整个土壤剖面中, 土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 均以原生灌木林地较高, 说明二者土壤结构较好, 稳定性较强。在 0—40 cm 土层剖面中, 各粒径团聚体有机碳含量均随着土层深度的增加而降低, 表现出表层富集现象; 团聚体有机碳以 <0.25 mm 粒径含量最高, >5 mm 粒径最低。总体而言, 原生灌木林地土壤团聚体稳定性较好, 原生灌木林地在各层土壤中各粒径团聚体有机碳含量最高。

关键词: 喀斯特石漠化; 林草植被; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 稳定性

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0249-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.035

Effects of Forest and Grass Restoration on Soil Aggregates and Its Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Areas

WANG Jin^{1,2}, LIU Ziqi^{1,2}, BAO Enyu^{1,2}, ZHANG Guo^{1,2}, LI Yuan^{1,2}, SUN Jian^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001)

Abstract: To study the effects of forest and grass vegetation restoration on soil aggregate size distribution, soil structure stability, and aggregate soil organic carbon in rocky desertification control area of karst plateau, in order to provide theoretical basis for improving soil structure, revegetation, maintaining, and improving soil organic carbon pool, five common forest and grass vegetation (honeysuckle, pitaya, *Zanthoxylum bungeanum*, wild ground grass, and native shrubbery) in the demonstration area of rocky desertification control in the Karst Plateau of Guizhou were taken as the research object, soil aggregate grain diameter were grouped by wet sieving method, the distribute of aggregates and soil organic carbon content in each soil layer in the vertical profile of 0—40 cm soil layer under five forest and grass vegetation modes was comparatively analyzed. The results showed that in the vertical profile of 0—40 cm soil layer, the distribute characteristic of the soil aggregates in four grain sizes of $>5, 2\sim 5, 0.25\sim 2$, and <0.25 mm were shown as: honeysuckles 31.89%, 32.85%, 28.48%, 6.78%; pitaya 19.11%, 32.68%, 37.72%, 8.49%; *Z. bungeanum* 10.42%, 18.39%, 57.90%, 13.29%; wild ground grass 40.38%, 20.68%, 30.34%, 8.61%; native shrubbery 47.04%, 17.80%, 30.25%, 4.91%. The water-stable macro aggregate content (>0.25 mm)

收稿日期: 2019-06-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502606); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726-28号); 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 LH 字[2017]7372号); 贵州师范大学博士科研启动项目(11904/0517058)

第一作者: 王进(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事喀斯特生态建设与区域经济研究。E-mail: 1328285972@qq.com

通信作者: 刘子琦(1979—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事喀斯特地貌演化、石漠化治理与监测评价研究。E-mail: 124294329@qq.com

showed as native shrubbery (95.09%) > honeysuckle (93.22%) > pitaya (91.51%) > wild ground grass (91.39%) > *Z. bungeanum* (86.71%). In general, aggregates in the five forest and grass vegetation were dominated by macro aggregates (>0.25 mm); among them, soil from the native shrubbery had the highest content and soil from the *Z. bungeanum* had the lowest content. In the whole soil profile, the soil aggregate stability indicators MWD and GMD of the native shrubbery were higher, which indicated that the soil structure is better and the stability is stronger. In the 0—40 cm soil profile, the organic carbon of each aggregate level decreased with the increase of soil depth, and showed surface layer enrichment. The organic carbon of aggregate showed the highest content in <0.25 mm level, and the lowest content in >5 mm level. Generally speaking, the soil aggregates of native shrubbery land had a better stability, and had the highest content of organic carbon in each layer of each aggregate level.

Keywords: karst rocky desertification; forest and grass vegetation; soil aggregate; soil organic carbon; stability

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,是土壤养分、土壤微生物等存在的主要场所^[1]。大团聚体(>0.25 mm)含量的多少是评价土壤结构稳定性的重要指标之一^[2],也是土壤不稳定有机质含量较多的场所,具有速效养分多、供肥能力强的特点,而微团聚体(<0.25 mm)是有机碳长期储存的主要场所。土壤结构性能的下降通常与土壤有机碳的损失后团聚体稳定性的降低相关,团聚体的稳定性通常与土壤性质有关,包括有机碳、质地、黏土矿物学和单价与多价阳离子的比例有关^[3]。土壤团聚体对维持土壤中水肥气热的平衡,维持土壤微生物和酶的活性具有重要的作用^[4],同时团聚体的数量和质量不但能保持土壤结构的稳定,而且还能保护土壤有机质,有利于维持土壤质量^[5]。植被恢复是喀斯特石漠化区生态环境恢复的重要措施,因此,研究喀斯特石漠化区不同土地利用方式土壤团聚体的组分、分布及团聚体有机碳的含量,是了解和掌握植被恢复效果,土壤结构好坏的主要途径,同时也为提升土壤肥力和质量提供科学依据。

近年来,国内外众多学者^[6-8]开展了大量关于团聚体稳定性及其有机碳含量的研究,主要集中在耕作方式、施肥、管理、秸秆还田和土地利用方式对团聚体稳定性及有机碳含量的影响。不同的土地利用方式由于不同的管理措施以及人为干扰程度的差异会影响土壤的团聚体稳定性和有机碳含量。有研究^[9]表明,经济林土壤团聚体稳定性低于针阔混交林,果园土壤团聚体稳定性及有机碳含量高于农耕地^[10]。林地被开垦会造成大团聚体的破坏,而耕地闲置为撂荒地会增加大团聚体含量,土壤结构趋于改善^[11]。张曼夏等^[12]通过对比研究得出,退耕还林能增加土壤有机碳含量和土壤团聚体稳定性,但仍与天然次生林有一定的差距。李燕燕等^[13]在研究红壤退化区林草恢复对团聚体和有机碳的影响表明,草地转换为林地后,大团聚体含量增加,植被恢复能提高土壤地力。

而王小红等^[14]研究表明,天然林转变为人工林会导致土壤大团聚体含量减少,土壤团聚体有机碳含量下降和团聚体稳定性减弱。可见,土地利用方式的改变对土壤团聚体及有机碳含量的影响较大。喀斯特石漠化区是我国侵蚀退化最严重的地区之一,植被恢复与生态重建是恢复石漠化区生态系统的重要措施^[15]。而关于喀斯特高原峡谷石漠化治理区,人工经济林与原生林及土层深度对土壤团聚体及有机碳的影响研究较少。因此,本文以贵州典型喀斯特高原峡谷石漠化治理区金银花地、火龙果地、花椒地、荒草地和原生灌木林地 5 种典型林草植被为研究对象,分析这 5 种样地土壤团聚体在 0—40 cm 土壤垂直剖面的分布规律、团聚体稳定性和团聚体有机碳含量的分布规律,以期对喀斯特高原峡谷石漠化治理区土壤结构的改善和有机碳库的维持与提升以及森林生态系统恢复和植被重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省关岭县与贞丰县交界处的北盘江河谷两岸(25°39'13"—25°41'00"N, 105°36'30"—105°46'30"E)。研究区岩石多属三叠系的白云岩、泥质白云岩及页岩,是典型的喀斯特高原峡谷地貌。该区域地势起伏大、山高谷深、地表岩石裸露破碎、土壤贫瘠、植被稀疏、水土保持较差^[16],石漠化较为严重,是石漠化治理的重点核心示范区^[17]。该区域年均降水量 1 100 mm,降雨主要集中在 5—10 月。研究区是高原峡谷石漠化治理示范区,研究区以黄色石灰土和黄壤为主。样地基本概况见表 1。土壤基本理化性质见表 2。植被主要以人工林花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)、火龙果(*Hylocereus undulatus* Britt.)、金银花(*Lonicera japonica* Thunb.)、柚木(*Tectona grandis* L. F.)、核桃(*Juglans regia* L.)以及野生的香椿(*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.)、救军粮(*Pyracantha fortu-*

neana)、光皮桦(*Betula luminifera* H. Winkl.)和小叶榕(*Ficus concinna* (Miq.) Miq.)等为主。

表1 样地基本概况

样地	土壤类型	坡度/(°)	海拔/m	坡位	盖度/%	土地利用	管理措施
金银花地	石灰土	15	629	坡中部	72	退耕地,2010年种植	密植,施少量肥,无翻耕
火龙果地	石灰土	16	627	坡中部	20	退耕地,2008年种植	种植密度为4 m×2 m,施肥(化肥和牲畜粪便),有翻耕
花椒地	石灰土	13	630	坡中部	32	退耕地,2009年种植	种植密度为2 m×2 m,施肥,有翻耕
荒草地	石灰土	13	624	坡中部	70	2010年撂荒至今	未施肥,无翻耕
原生灌木林地	石灰土	17	631	坡中部	86	原生林地	未施肥,无翻耕

表2 不同林草植被土壤基本理化性质

样地	pH	容重	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
金银花地	7.07	1.35	4.32	0.88	13.66	80.64	6.31	101.66
火龙果地	7.56	1.47	2.86	0.64	12.87	42.42	8.25	210.23
花椒地	7.54	1.28	3.61	0.81	15.23	52.52	3.68	130.11
荒草地	7.35	1.33	3.63	0.69	14.26	92.69	4.26	82.33
原生灌木林地	7.68	1.32	6.85	0.52	16.42	60.63	5.37	100.81

1.2 样品采集与试验方法

2018年12月中旬,在研究区选择具有典型代表性的林草植被金银花、火龙果、花椒、荒草地和原生灌木林这5种样地为研究对象。每一种样地设置3个采样点,每个采样点按照“S”形采样方法采取5个重复样,并将每个样点的5个重复样混合。土壤剖面深度为40 cm(不足40 cm的点,采取离该点较近土深足40 cm的土样)。分为0—10,10—20,20—30,30—40 cm 4层采取土壤样品并放入塑料盒子中,保持原有的结构并带回实验室。按照其原有的自然结构剥成能通过8 mm筛子的土样,除去动植物残体,碎石等杂质,待自然风干后,测定土壤团聚体。

土壤团聚体的分离采用Elliott^[18]的湿筛方法,分为>5,2~5,0.25~2,<0.25 mm 4个粒级团聚体。

土壤团聚体有机碳的测定:将上述湿筛收集到的各粒级团聚体土壤样品烘干后磨细过0.25 mm筛,测定各粒级团聚体土壤有机碳的方法采用土壤有机碳的测定方法。

平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD和GMD在反映土壤团聚体稳定性指标中,其数值越大,表明土壤团聚体的稳定性越强^[19]。计算公式为:

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

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

式中: \bar{x}_i 为土壤各粒级团聚体的平均直径(mm); w_i 为土壤各粒级的质量百分比(%)。

1.3 数据处理与分析

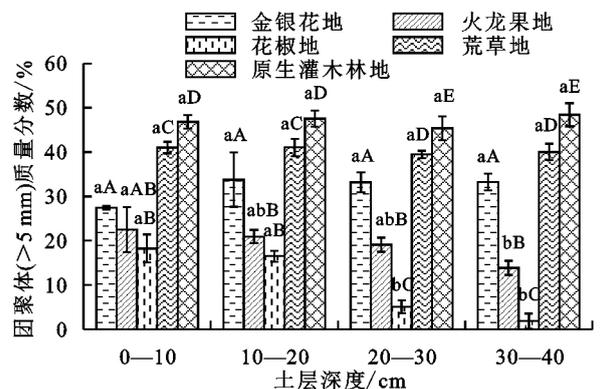
文中所有数据利用Excel 2013和Origin 2017软件进行相关分析与作图,采用SPSS 19.0软件进行

单因素方差分析(ANOVA)和Duncan新复极差法对各变量进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同林草植被类型下不同粒级土壤团聚体分布特征

从图1可以看出,在0—40 cm土层下,原生灌木林地(47.04%)和荒草地(40.38%)在土壤粒级(>5 mm)团聚体里平均含量较高,花椒地(10.42%)含量最低。在0—10 cm土层中,原生灌木林地(46.83%)含量最高,显著高于其他样地($P<0.05$)。在10—20 cm层,除火龙果地和花椒地>5 mm粒级团聚体含量不显著外,其他样地之间均表现出差异性显著($P<0.05$),在20—30,30—40 cm土层中5种样地都表现出显著性差异($P<0.05$)。在同一样地中,火龙果地0—10,30—40 cm土层表现出差异性显著($P<0.05$);花椒地表现出0—10,10—20 cm和20—30,30—40 cm土层中差异性显著($P<0.05$);其余样地各土层间均未表现出明显差异。



注:图中不同小写字母表示同一样地不同土层深度差异性显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一土层深度下不同样地差异性显著($P<0.05$)。下同。

图1 不同林草植被类型土壤团聚体>5 mm粒级质量分数

从图 2 可以看出,0—40 cm 土层金银花地(32.85%)和火龙果地(32.68%)在粒级(2~5 mm)团聚体中含量最高,火龙果地土层越深含量越高;0—10 cm 土层,花椒地和原生灌木林地的 2~5 mm 含量明显低于其他处理,其中金银花地的 2~5 mm 含量最大;10—20 cm 土层,5 种样地变化趋势与 0—10 cm 相似;20—30 cm 土层,火龙果地 2~5 mm 含量最高(36.87%),但与金银花地(35.61%)间的差异不显著;30—40 cm 土层,金银花地和火龙果地在 2~5 mm 含量显著高于花椒地、荒草地和原生灌木林地。随着土壤剖面的加深,金银花地、荒草地和原生灌木林地在 2~5 mm 含量在不同深度内差异不显著。

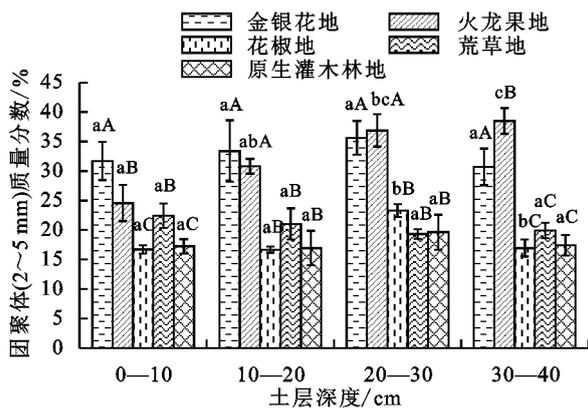


图 2 不同林草植被类型土壤团聚体 2~5 mm 粒级质量分数

从图 3 可以看出,在整个土壤剖面中,花椒地粒级(0.25~2 mm)含量都显著高于其他 4 种样地。5 种样地在粒级(0.25~2 mm)表现出花椒地(57.90%)>火龙果(37.22%)>荒草地(30.34%)>原生灌木林地(30.25%)>金银花(28.48%)。随着土层深度的增加,花椒地和荒草地在 0.25~2 mm 粒级含量逐渐增加,金银花地先减少后增加,原生灌木林地逐渐减少,火龙果地在不同土壤深度内则没有明显变化。在 0—40 cm 土壤剖面的 4 个土层中,除火龙果地和花椒地在 0.25~2 mm 粒级中含量显著高于其他样地,其他 3 种样地间则无明显差异。

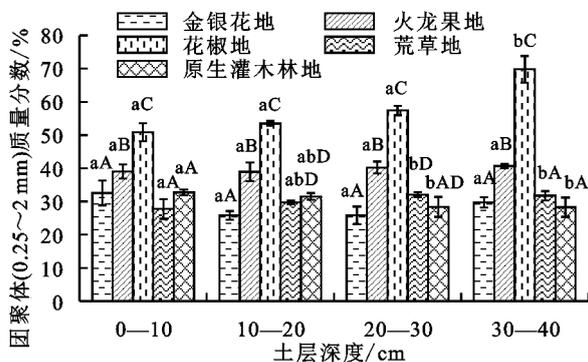


图 3 不同林草植被类型土壤团聚体 0.25~2 mm 粒级质量分数

从图 4 可以看出,除火龙果地在不同土层深度团聚体(<0.25 mm)粒级中含量存在显著差异外($P < 0.05$),其他样地均无明显差异。在 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层中,花椒地在 <0.25 mm 粒级中含量均为最高,其中 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层中,花椒地 <0.25 mm 粒级含量均显著高于其他样地($P < 0.05$),分别为 13.32%, 14.24% 和 11.38%; 在 0—10 cm 土层内,仅原生灌木林地 <0.25 mm 含量显著低于其他样地($P < 0.05$)。在 10—20 cm 土层中,荒草地和原生灌木林地无明显差异。20—30, 30—40 cm 土层中除花椒地外,其他 4 种样地均无明显差异。

从图 4 可以看出,除火龙果地在不同土层深度团聚体(<0.25 mm)粒级中含量存在显著差异外($P < 0.05$),其他样地均无明显差异。在 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层中,花椒地在 <0.25 mm 粒级中含量均为最高,其中 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层中,花椒地 <0.25 mm 粒级含量均显著高于其他样地($P < 0.05$),分别为 13.32%, 14.24% 和 11.38%; 在 0—10 cm 土层内,仅原生灌木林地 <0.25 mm 含量显著低于其他样地($P < 0.05$)。在 10—20 cm 土层中,荒草地和原生灌木林地无明显差异。20—30, 30—40 cm 土层中除花椒地外,其他 4 种样地均无明显差异。

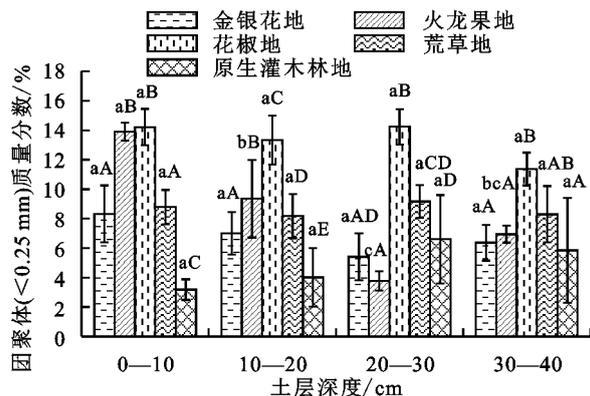


图 4 不同林草植被类型土壤团聚体 <0.25 mm 粒级质量分数

2.2 不同林草植被下的土壤团聚体稳定性特征

从表 3 可以看出,仅荒草地的土壤水稳性团聚体的平均质量直径(MWD)随着土层的加深而降低,其他 4 种样地在各个土层之间则差异不显著。在 0—40 cm 土层内,原生灌木林地(3.27~3.34 mm)和荒草地(3.02~3.17 mm)的水稳性团聚体 MWD 均显著高于其他样地($P < 0.05$),其中 0—10 cm 荒草地最大为 3.17 mm,原生灌木林地最大为 3.34 mm。

土壤水稳性团聚体平均几何直径(GMD)同样是荒草地随着土层的不断加深而降低,其他样地则无明显差异;原生灌木林地和金银花地平均含量最高,分别为 2.39, 2.15 mm,花椒地和火龙果地最低,分别为 1.12, 1.70 mm。5 种样地中同一样地类型各土层间除火龙果地 20—30 cm 土层 GMD 与其他土层存在差异外($P < 0.05$),其他样地该土层均差异不显著。在 0—40 cm 土层内,花椒地 GMD 均与其他样地存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.3 不同林草植被下的土壤团聚体有机碳含量

从表 4 可知,在 >5 mm 粒级土壤团聚体中,5 种样地的土壤团聚体有机碳含量均随土层的加深而降低;且 0—10 cm 层土壤团聚体有机碳含量显著高于其他土层($P < 0.05$)。原生灌木林地和金银花地在 >5 mm 粒级中各土层土壤团聚体有机碳含量均显著高于其他样地($P < 0.05$)。在 2~5 mm 粒级团聚体中,不同样地团聚有机碳平均含量表现为:原生

灌木林地(45.15 g/kg) > 金银花地(36.26 g/kg) > 荒草地(15.80 g/kg) > 火龙果地(11.37 g/kg) > 花椒地(11.21 g/kg)。在 0—10 cm 土层中,原生灌木林地有机碳含量最高,火龙果地最低,且火龙果地和金银花地差异不显著;在 10—20 cm 土层内,花椒地在 2~5 mm 粒级有机碳含量显著低于其他样地($P < 0.05$),在 20—30, 30—40 cm 土层内,金银花地和原生灌木林地在 2~5 mm 粒级有机碳含量显著高于其他样地($P < 0.05$),火龙果地、花椒地和荒草地间没有明显差异。在 0.25~2 mm 粒级团聚体中,原生灌木林地除 30—40 cm 土层外,其他土层团聚体有机碳

含量均显著高于其他样地($P < 0.05$)。在 0—40 cm 土壤剖面内,金银花地、花椒地、荒草地和原生灌木林地在 0.25~2 mm 粒级团聚体中有机碳含量分别是火龙果地的 3.30, 1.26, 1.28, 3.70 倍。在 <0.25 mm 粒级团聚体中,原生灌木林地和金银花地团聚体有机碳含量显著高于其他 3 种样地。

总体上,土壤团聚体各粒级有机碳含量随着土壤深度的加深而降低,土壤团聚体粒级越小,有机碳含量越高,原生灌木林地和金银花地各粒级团聚体有机碳含量高于其他 3 种样地,而火龙果地各粒级团聚体有机碳含量最小。

表 3 不同林草植被土壤团聚体平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)

单位:mm

项目	样地	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
MWD	金银花地	2.82±0.11aA	3.14±0.12bA	3.18±0.05bA	3.05±0.02abA
	火龙果地	2.40±0.11aB	2.56±0.12abB	2.70±0.01bB	2.47±0.01bB
	花椒地	1.97±0.13aC	1.96±0.04aC	1.71±0.08bC	1.49±0.07bC
	荒草地	3.17±0.06aD	3.14±0.03abA	3.02±0.04bcAD	3.03±1.33abA
	原生灌木林地	3.31±0.05aD	3.34±0.07aA	3.27±0.06aAE	3.34±0.08aD
GMD	金银花地	1.88±0.14aA	2.22±0.11aA	2.34±0.06aA	2.14±0.07aA
	火龙果地	1.41±0.04aB	1.68±0.15bB	2.00±0.02cB	1.70±0.02bAC
	花椒地	1.09±0.07aC	1.13±0.04aC	1.07±0.06aC	1.17±0.29aB
	荒草地	2.16±0.06aD	2.13±0.09aA	1.99±0.06aB	1.97±0.13aA
	原生灌木林地	2.44±0.08aE	2.47±0.21aA	2.29±0.15aA	2.37±0.20aAD

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示同一样地下不同土层在 0.05 水平上的差异显著性;同列不同大写字母表示同一土层下不同样地在 0.05 水平的差异显著性。下同。

表 4 不同林草植被下各土壤团聚体粒径的有机碳含量

单位:g/kg

团聚体粒径/mm	样地	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
>5	金银花地	41.55±1.01aA	37.07±0.57bA	30.62±1.01cA	24.62±1.04dA
	火龙果地	13.14±3.38aB	12.50±1.11aB	11.19±0.47aB	6.65±1.00bB
	花椒地	17.28±1.01aC	13.84±1.62bB	10.58±0.84cB	9.32±0.59cB
	荒草地	19.10±1.38aC	14.81±1.53bB	9.37±1.49cB	5.33±1.29dB
	原生灌木林地	49.17±1.42aD	44.77±1.31bC	39.42±0.99cC	32.59±2.09dC
2~5	金银花地	46.72±0.98aA	41.72±1.01bA	27.49±0.99cA	29.09±1.70cA
	火龙果地	11.34±0.91aB	14.36±0.85bB	11.14±1.21aB	8.64±0.98aB
	花椒地	14.93±1.47aB	9.47±0.81bC	12.10±1.31abB	8.33±0.58bcB
	荒草地	22.22±1.52aC	17.18±3.12abcB	12.54±3.06bB	11.25±2.09cB
	原生灌木林地	54.51±0.83aD	46.92±1.49bD	42.59±0.96cC	36.60±0.96dC
0.25~2	金银花地	51.21±1.65aA	46.49±1.20bA	42.28±1.53bcA	38.50±1.95cA
	火龙果地	16.92±1.42aB	13.84±0.45bB	12.84±0.71bcB	10.47±0.80cBC
	花椒地	22.12±1.60aC	17.61±1.06bC	15.49±1.15bcB	12.86±0.62cB
	荒草地	24.62±1.60aC	22.30±1.30aD	13.76±1.40bB	8.66±1.00cC
	原生灌木林地	59.78±1.15aD	52.36±2.07bE	46.79±1.00cC	40.93±1.52dA
<0.25	金银花地	55.32±0.58aA	50.99±0.60bA	46.47±0.67cA	43.38±0.62dA
	火龙果地	23.33±0.88aB	19.14±1.22bB	16.33±0.64bB	12.07±1.68cB
	花椒地	31.03±0.72aC	27.96±1.54bC	19.93±0.63cC	15.71±0.52dC
	荒草地	28.24±2.06aC	25.02±2.08aD	19.21±1.53bC	16.42±1.72bC
	原生灌木林地	65.59±1.99aD	60.77±2.03bE	51.63±0.95cD	47.67±1.16cD

3 讨论

3.1 林草植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的组成和分布特征对土壤肥力的保持与供应、通透性、持水性、土壤生物的运动等具有重要的影响^[20]。大团聚体含量的多少在一定程度上反映了土壤结构的好坏,是决定土壤肥力、土壤抗侵蚀能力和土壤稳定性的关键因素。因此,大团聚体含量和质量越高,土壤结构越稳定^[21]。同时,由于土壤团聚体的形成受土壤有机质等含量的影响,因而土壤团聚体的变化可以反映出土壤的理化性质和土壤环境状况^[22]。前人^[23]研究表明,土地利用方式、植被类型、土壤微生物、土地管理措施、铁铝氧化物、土壤有机质含量等因素显著影响土壤团聚体稳定性。MWD 和 GMD 是常用来评价土壤团聚体稳定性的主要参数,其值越大,表明土壤团聚度越高,稳定性越强。本研究中,在 0—40 cm 土壤剖面各粒级团聚体中,大团聚体(>0.25 mm)含量表现出原生灌木林地(95.09%) $>$ 金银花地(93.22%) $>$ 火龙果地(91.51%) $>$ 荒草地(91.39%) $>$ 花椒地(86.71%)。可见,5 种样地均以大团聚体(>0.25 mm)为主。原生灌木林地和荒草地以 >5 mm 粒级为主,金银花地以 2~5 mm 粒级为主,火龙果地和花椒地以 0.25~2 mm 粒级为主。通过相关性分析(表 5),可知水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量与土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 值呈极显著正相关关系($P<0.01$)。在 0—40 cm 土层中,原生灌木林地水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量最高,为 95.09%,花椒地含量最低,为 86.71%。原生灌木林地在 0—40 cm 土层各粒级团聚体中 MWD 值均最大,GMD 值除 20—30 cm 外,其余土层均高于其他样地。说明原生灌木林地土壤结构最好,稳定性最强。

Tisdall 等^[3]认为,微团聚体主要是由持久性的介质作用而稳定,大团聚体是由瞬时的和暂时的介质黏结在一起,且大团聚体由粒级小的团聚体在多糖和根际真菌菌丝的胶结作用下形成的^[24]。因此,人为扰动或耕作等容易造成大团聚体遭到破坏而形成微团聚体。原生灌木林地覆盖度大,人为干扰较少,加之原生灌木林地植物种类多,物种丰富度高,地表大量凋落物、微生物被分解为多糖等胶结物质,促进小团聚体的形成,同时促进真菌菌丝体等胶结物质的生长,有利于菌丝对原生灌木林土壤的固结作用,从而促进大团聚体(>0.25 mm)的形成^[3,25],增加土壤结构的稳定性。其次,原生灌木林覆盖度高,植物冠层对降雨的截留作用较大,减弱了降雨直接对土壤的溅蚀和淋溶作用,同时,地表大量的凋落物覆盖,增强了土壤的抗侵蚀能力,也有利于提高土壤的大团聚体

(>0.25 mm)的稳定性。对于荒草地和金银花地而言,耕地撂荒后,土壤受人为活动的干扰减弱,凋落物和植物根系增多,增加土壤有机质的来源,增强土壤微生物的活动,有利于提高土壤团聚体的形成^[26]。金银花匍匐生长,人类活动干扰少,高度的覆盖度及大量的凋落物削弱了降雨对土壤溅蚀和淋溶作用,同时增加土壤有机质的来源,促进团聚体的形成,最终增加土壤大团聚体的数量,提高土壤结构的稳定性。而火龙果地和花椒地,由于火龙果和花椒是该石漠化治理区域的主导产业,翻耕施肥频率高,土壤受人类活动影响较大,水稳性大团聚体由于人类的干扰容易遭到破坏而减少,导致土壤团聚体稳定性急剧减弱。这与魏亚伟等^[27]的研究基本一致。因此,在喀斯特高原峡谷石漠化治理示范区 5 种样地中,火龙果地和花椒地团聚体含量较低,土壤结构稳定性最差。

表 5 不同林草植被大团聚体(>0.25 mm)含量与团聚体稳定性之间的相关系数

指标	大团聚体 (>0.25 mm)	MWD	GMD
大团聚体(>0.25 mm)	1	0.742**	0.865**
MWD		1	0.957**
GMD			1

注:采用所有土层的数据进行相关性分析,共 20 对数据; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。下同。

3.2 林草植被恢复对土壤团聚体有机碳的影响

在 0—40 cm 土壤剖面中,5 种样地总体表现出随着土层深度的加深土壤有机碳含量逐渐降低,团聚体粒级越减小,土壤团聚体有机碳的含量呈越高的趋势。在不同粒级团聚体中 <0.25 mm 粒级的有机碳含量最高, >5 mm 粒级团聚体的有机碳含量最低,这与谭秋锦等^[28]的研究结果相似。这是由于大团聚体内颗粒有机质的分解,而使大团聚体分解成为微团聚体^[29],而有机碳在微团聚体中更能受到很好的物理保护^[30],因此, <0.25 mm 粒级的有机碳含量最高。5 种样地中,0—10 cm 土层土壤团聚体有机碳含量最高,表现出显著的表层富集现象。其原因可能是金银花地、荒草地和原生灌木林地大量的凋落物积累在表层(0—10 cm),枯枝落叶、动物残体、土壤生物残体及根系分泌物等有机质的输入,同时植物的根系通过穿透土壤等作用方式改善土壤孔隙度,调节土壤水分,提高土壤表层生物活性,提高微生物对凋落物等的分解作用,从而提高土壤有机碳的含量^[31]。而火龙果地和花椒地由于人为施肥,增加土壤有机质的来源而提高土壤表层的有机碳含量。

有机质是土壤团聚体形成过程中的主要胶结物质^[32],而团聚体对有机质具有保护作用,二者相辅相成。本研究中,在 0—40 cm 土层中,土壤团聚体有机碳

含量 MWD、GMD 呈极显著相关关系 ($P < 0.01$, 表 6)。原生灌木林地各粒级团聚体有机碳含量显著高于其他样地,主要是原生灌木林地受人为活动干扰极少,土壤团聚体稳定性高,同时表层大量的凋落物和根系分泌物通过分解增加土壤团聚体的有机碳的含量,从而也增强土壤团聚体的稳定性。而金银花地和荒草地同样受人类干扰较少,团聚体结构稳定,表层凋落物及根系分泌物分解同样有利于有机碳的积累和固定,金银花地人工施肥也在一定程度上增加土壤团聚体有机碳含量。对火龙果地和花椒地而言,一方面,由于耕作活动的影响,水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 易遭到破坏而减少,土壤团聚体稳定性降低,同时大团聚的破坏导致活性有机质分解释放,提升了土壤微生物活性,微生物活性的提高会进一步消耗土壤有机质,致使土壤团聚体有机碳含量降低^[31];另一方面,农户在对火龙果和花椒管理的过程中,火龙果和花椒果实及枝叶的修剪带走,会减少火龙果地和花椒地物质能源的输入,土壤团聚体有机碳含量降低。尽管施肥措施会对土壤团聚体有机碳含量有一定的增加,但补充量是有限的。而花椒地相对于火龙果地土壤团聚体稳定性稍差,可能是因为火龙果地施肥较多,增加了有机质含量,对土壤团聚体的稳定性有一定的稳固作用。而花椒地有机碳含量相对高于火龙果地是因为花椒在果实采摘后,10 月会有一次施肥,增加土壤有机碳含量。而火龙果地的施肥主要在生长季。

表 6 不同林草植被土壤有机碳(SOC)含量与团聚体稳定性之间的相关系数

指标	SOC 含量	MWD	GMD
SOC 含量	1	0.609**	0.639**
MWD		1	0.957**
GMD			1

4 结论

(1) 在 0—40 cm 土层中,5 种样地土壤各粒级团聚体含量,原生灌木林地和荒草地均以 > 5 mm 为优势粒级,金银花地以 2~5 mm 为优势粒级,火龙果地和花椒地则以 0.25~2 mm 为优势粒级。水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 含量表现出原生灌木林地 (95.09%) $>$ 金银花地 (93.22%) $>$ 火龙果地 (91.51%) $>$ 荒草地 (91.39%) $>$ 花椒地 (86.71%)。因此,原生灌木林地的水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 含量最高。而团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 值在整个土层深度中,原生灌木林地均最高,原生灌木林地土壤团聚体稳定性优于其他样地。

(2) 在 0—40 cm 土层中,5 种样地土壤团聚体均以 < 0.25 mm 粒级有机碳含量相对较高, > 5 mm 粒级含量最低。表层(0—10 cm)土层有机碳含量相对

较高,呈表层富集现象。而在 0—40 cm 土壤剖面中,原生灌木林地 4 个土层有机碳含量均高于其他样地。

综合以上,喀斯特高原峡谷石漠化治理区,原生灌木林地土壤结构较好,抗侵蚀能力较强,土壤有机碳含量较高,对维持土壤养分有较好的促进作用;因此,在该区域应加强生态环境保护,减少人为干扰,对于人工经济林地,应注重用养结合,在增加人工施肥的同时,实行免耕或少耕等措施;鉴于本研究耕地撂荒后变成荒草地土壤结构相对较好,实行自然恢复也是喀斯特石漠化治理区一种有效的退化生态系统修复方式。

参考文献:

- [1] Yan Y, Cheng H L, Zhong J P. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China[J]. *Catena*, 2015, 133: 412-419.
- [2] Zhou P, Liu G B, Hou X L. Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the Hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 75-82.
- [3] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [4] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 18-25.
- [5] 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.
- [6] 田慎重,王瑜,张玉凤,等.旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 133-140.
- [7] 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.
- [8] 潘艳斌,朱巧红,彭新华.有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 209-214.
- [9] 林杰,张阳,朱艳芳,等.淮北土石山区不同土地利用方式对土壤团聚体组成的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(4): 133-142.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张曼夏,季猛,李伟,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 598-604.
- [13] 李燕燕,刘亮英,张志坚,等.亚热带红壤区自然恢复草地转换为人工林后对土壤团聚体有机碳周转的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 80-85.

- [14] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):177-182,189.
- [15] 肖华,熊康宁,张浩,等.喀斯特石漠化治理模式研究进展[J].中国人口·资源与环境,2014,24(增刊1):330-334.
- [16] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社:2002:17-30.
- [17] 容丽,熊康宁.花江喀斯特峡谷适生植物的抗旱特征 I:顶坛花椒根系与土壤环境[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2007(4):1-7.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1980,50(3):627-633.
- [19] 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.
- [20] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J].Soil and Tillage Research,1988,11(3/4):199-238.
- [21] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [22] Blanco C H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J].Critical Reviews in Plant Sciences,2004,23(6):481-504.
- [23] 聂文婷.土壤团聚体稳定性及其影响因素研究进展[A].中国水土保持学会,台湾中华水土保持学会.2014 年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集[C].中国水土保持学会,台湾中华水土保持学会:中国水土保持学会,2014:5.
- [24] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australia Journal of Soil Science,1991,29(6):815-828.
- [25] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management[J].Plant and Soil,1984,76(1/3):319-337.
- [26] 王富华,吕盛,黄容,等.缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J].环境科学,2019,40(3):1504-1511.
- [27] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):971-978.
- [28] 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.
- [29] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J].Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [30] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2642-2650.
- [31] 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.
- [32] 贾重建,刘红宜,卢瑛,等.土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J].热带地理,2014,34(5):681-689.

(上接第 248 页)

- [10] 王晓芳,夏江宝.黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的降盐改土功能[J].水土保持学报,2012,26(3):141-144.
- [11] 张雯莉,刘玉冰,刘立超.盐胁迫对枸杞(*Lycium barbarum*) 叶片生理的影响[J].中国沙漠,2018,38(2):294-299.
- [12] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西幼龄苹果×大豆间作的土壤中水分、养分空间分布特征及对大豆的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):36-42.
- [13] 张玉龙,姜同轩,杨涛,等.盐碱地枸杞间作不同作物的土壤水盐变化及盐平衡[J].水土保持通报,2019,39(3):46-50.
- [14] 周宣,王若水,李超楠,等.不同水分调控对晋西黄土区苹果×大豆间作系统细根分布与耗水特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):118-126.
- [15] 银敏华,李援农,杨洋,等.水分处理及覆膜历时对春玉米生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):199-207.
- [16] Forey O, Metay A, Wery J. Differential effect of regulated deficit irrigation on growth and photosynthesis in young peach trees intercropped with grass[J].European Journal of Agronomy,2016,81:106-116.
- [17] 李发永,劳东青,孙三民,等.滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):119-129.
- [18] 冯晓敏,杨永,任长忠,等.豆科—燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J].作物学报,2015,41(9):1426-1434.
- [19] 赵建华,李浩霞,安巍,等.干旱胁迫对宁夏枸杞叶片蔗糖代谢及光合特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(5):970-975.
- [20] 徐利岗,王怀博,鲍子云,等.基于土壤水分下限控制的宁夏枸杞滴灌灌溉制度试验研究[J].排灌机械工程学报,2019:1-10.
- [21] 郑国保,张源沛,朱金霞,等.灌水频率对枸杞品质、产量和耗水特性的影响[J].中国农学通报,2013,29(31):206-210.
- [22] 史晓巍,齐广平,汪精海,等.甘肃引黄灌区枸杞间作豆科牧草对土壤温度及枸杞产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2018,53(6):105-113.