

陈海,朱大运,陈浒.石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].中国岩溶,2021,40(2):346-354.
DOI:10.11932/karst20210211

石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响

陈海^{1,2},朱大运¹,陈浒¹

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001; 2. 兰州市第六中学, 甘肃 兰州 730060)

摘要:以典型高原山地喀斯特石漠化6种土地利用方式土壤为研究对象,探讨不同生态恢复条件下,坡耕地转变为林地、草地及林草套种地后对表层土壤结构稳定性及其有机碳含量的影响。结果表明:在坡耕地实施石漠化治理措施,造林种草后,>0.25 mm团聚体含量显著增加,以人工林、次生林居多,坡耕地较少。在干湿筛处理下,采用平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)、>0.25 mm团聚体含量等指标来表征的团聚体稳定性显示,人工林和次生林土壤团聚体稳定性较强,坡耕地和林草套种地土壤团聚体稳定性较弱。总体上不同土地利用方式均以小粒级团聚体有机碳含量最高,>5 mm和2~5 mm水稳性团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率最大(除农耕地);土壤大团聚体对土壤有机碳的固定起主要作用。石漠化坡耕地退耕还林种草有利于促进土壤表层土壤结构的稳定及有机碳的积累。

关键词:土地利用;土壤团聚体;稳定性;石漠化地区

中图分类号:S152 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0346-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

喀斯特石漠化地区生态环境脆弱,表现为植被破坏、水土流失、土地生产力低、岩石裸露等,严重制约着中国西南地区社会经济的可持续发展^[1-3]。为修复和维护典型脆弱生态系统的稳定性,国家在21世纪后加大了石漠化治理力度,开展了林草植被恢复、草食畜牧业发展、水土保持、生态农业、生态移民、建立生态保护区开发旅游等石漠化综合治理工作^[4]。近些年随着石漠化治理工程中种草造林等措施的实施,传统种植玉米、土豆等粮食作物的坡耕地利用方式已发生转变。土地利用中,植被、土壤微生物和动物数量的改变,会使得枯落物的数量与性质产生差异,进而导致土壤物理性质和抗蚀性的差异^[5-6]。同时,植被或土地利用方式的改变,对生态系统稳定

性,特别是对土壤结构稳定性和抗侵蚀性也会产生影响,这需要进行定量评价,以便于指导未来的水土流失防治等石漠化综合治理工作。

在土壤生态系统中,团聚体一方面通过稳定土壤结构来减少水土流失;另一方面通过团聚体之间和团聚体内部空间中的植物和微生物衍生的有机物质来影响土壤有机碳的含量,其是土壤肥力的调节中心^[7-8]。土壤团聚体稳定性是土壤结构和土壤物理性状评价的重要指标之一^[9],近年来国内外有关土地利用与管理对土壤团聚体稳定机制影响的研究较多,认为土地利用方式在很大程度上影响土壤团聚体稳定性及有机碳含量。例如,李鉴霖等^[10]对比发现果园地比农耕地土壤团聚体稳定性及有机碳含量高;张伟等^[11]研究坡耕地实施水土保持措施后,灌

资助项目:国家十三五重点研发计划项目(2016YFC0502601);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2016]1101);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2018]2777);贵州教育厅青年科技人才成长项目(黔教教KY字[2018]127);贵州师范大学2016年博士科研启动基金

第一作者简介:陈海(1994—),硕士研究生,研究方向为喀斯特旅游资源评价与开发。E-mail:chenhai6064@163.com。

通信作者:陈浒(1965—),教授,主要从事动物生态和喀斯特环境研究。E-mail:gy_chenhu@163.com。

收稿日期:2020-03-23

木、草地等有效的促进了有机碳的积累;Blankinship 等^[12]发现在草地减少植被后,使土壤团聚体的平均粒径减少了 22%~33%,主要由大团聚体(2~9 mm)转变为小的团聚体(0.25~2 mm)。对于喀斯特典型脆弱生态区土壤团聚体稳定性及有机碳的研究,也发现土地利用对石漠化地区有机碳分布以及大团聚体有机碳矿化的影响较大^[13],如谭秋锦等^[14]对峡谷型喀斯特 6 种土地利用类型研究发现次生林和人工林的土壤团聚体稳定性最好,旱地稳定性较差。以往的研究表明土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响作用显著,但在石漠化治理环境下的土地利用方式,如退耕还林还草后的天然林草地以及人工种植的林草地等对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响需要进一步定量研究,且指标选择上一般采用湿筛的土壤团聚体几何平均直径(GMD)、平均质量直径(MWD)和分形维数(D)等指标来分析和评价土壤团聚体的结构特征和稳定性,而干湿筛法综合分析的文献报道较少,有待进一步深入探讨。

本文采用干筛、湿筛法分别测定石漠化区不同土地利用方式下表层土壤的风干性团聚体及水稳性团聚体,使用土壤团聚体 GMD、MWD 和 D 等指标来分析和评价土壤团聚体稳定性,并用团聚体有机碳含量、团聚体有机碳对土壤有机碳贡献率等指标来阐明不同土地利用方式对该地区土壤团聚体有机碳

的影响,以揭示研究区土壤结构的稳定状况及固碳能力,以期对石漠化地区生态环境的恢复提供科学依据和技术支持。

1 研究区概况

研究区为贵州省毕节市西南部撒拉溪示范区(图 1),喀斯特面积占全区总面积的 74.25%,平均海拔 1 600 m,属于喀斯特高原山地生态环境,主要以潜在和轻度石漠化为主,强度石漠化面积较小。该地区属于亚热带湿润季风气候区,年平均气温为 12℃,多年平均降水量为 984.40 mm。区域内主要出露石灰岩、灰岩和砂页岩,分布大量的峰丛洼地;土壤以地带性黄壤为主,石灰土和黄棕壤的分布范围较小;作物种植以玉米、土豆、大豆、烤烟为主,耕地细碎化现象明显,土层浅薄、肥力较低;土地利用类型以林地和耕地为主,两者共 8 269.99 hm²,占研究区总面积的 95.85%,有少量的草地分布,占 9.08%,属于典型的农耕区,生态环境脆弱;土壤 0~20 层有机碳含量为 14.72~21.36 g·kg⁻¹,全氮为 0.48~1.96 g·kg⁻¹,碱解氮为 119.69~158.49 mg·kg⁻¹,有效磷为 5.49~19.84 mg·kg⁻¹,速效钾为 75.72~178.24 mg·kg⁻¹,pH 值为 6.47~6.85,容重为 1.02~1.19 g·cm⁻³,土壤颗粒组成以粉砂粒为主,黏粒含量较低^[1-2,4]。

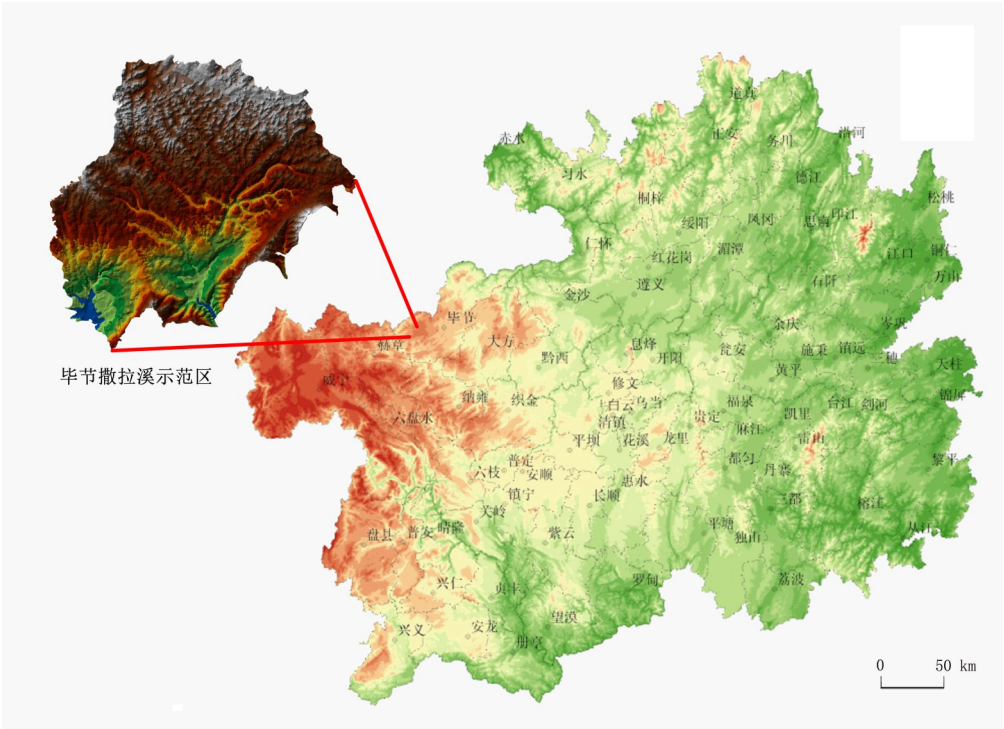


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic map showing location of study area

2 研究方法

2.1 样品采集

在全面调查的基础上,根据典型性和代表性原则,2018年4月,在贵州毕节市撒拉溪示范区高原山地型喀斯特小流域内,选择坡度、坡向和海拔基本一致的次生林地(CSL)、人工林地(RGL)、天然灌草地(GC)、

人工草地(RC)、林草套种地(LC)、农耕地(NG)6种不同的土地利用方式,设置20 m×20 m样地,在每个样地设置6个采样点,采集0~20 cm层土样(表1,表2)。原状土样尽量避免挤压,以保持其土壤结构,用塑封袋装好,带回实验室后,除去砾石和根系,室内风干,风干后过孔径10 mm筛子,用于土壤团聚体干筛测定。

表1 研究样地基本特征

Table 1 General characteristics of study sampled land

土地利用	植被群落类型	经纬度	海拔/m	坡度/°	坡向
CSL	青冈、毛栗等	105°05'55.69"E,27°14'33.62"N	1 761	19	半阴坡
RGL	核桃	105°06'42.96"E,27°10'41.10"N	1 765	15	半阴坡
GC	艾蒿、茅草等	105°06'00.10"E,27°14'47.72"N	1 890	18	半阴坡
RC	黑麦草	105°05'59.64"E,27°14'49.14"N	1 824	15	半阴坡
LC	核桃、黑麦草	105°06'14.95"E,27°14'53.71"N	1 897	15	半阴坡
NG	玉米	105°06'32.10"E,27°14'58.01"N	1 785	15	半阴坡

表2 不同土地利用方式下土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties under different land-use patterns

土地利用	pH	容重/g·cm ⁻³	有机质/g·kg ⁻¹	颗粒组成/%		
				砂粒	粉粒	黏粒
CSL	6.72	1.25	60.15	4.27	74.86	20.87
RGL	6.68	1.34	35.72	3.72	51.14	45.15
GC	6.62	1.07	56.76	2.07	43.37	54.56
RC	6.56	1.23	49.90	2.45	51.97	45.48
LC	6.70	1.31	48.35	3.70	47.97	48.33
NG	6.58	1.21	56.75	5.46	77.15	17.39

2.2 样品分析

2.2.1 理化性状测定

土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾容量法——外加热法(油浴)(GB7857-87);pH值采用2.5:1的水土比;容重用环刀法测定;颗粒组成测定:称取过1 mm筛的土壤样品0.5 g,加10 mL 10%过氧化氢溶液,在石墨电热板上150 ℃加热,煮沸使之充分反应,冷却后加入10 mL 10%盐酸溶液,煮沸,冷却后加入500 mL蒸馏水,再加入10 mL 0.05 mol·L⁻¹六偏磷酸钠溶液作为分散剂,用玻璃棒搅拌均匀,静置24 h后,用激光粒度分析仪测试。具体分析方法可见土壤农业化学分析方法^[15-16]。

2.2.2 团聚体处理

干筛处理:按照四分法原则选取风干混合土样500 g,以固定频率(300次·min⁻¹)震荡筛分5 min,称重得到>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm 6个级别的团聚体质量,并计算其百分比。

湿筛处理:按百分比称取干筛的各粒级团聚体总和50 g,于孔径为5、2、1、0.5、和0.25 mm的套筛上,将筛组置于团粒分析仪的震荡架上,放入已加入水的水桶中,水的高度至筛组最上面一个筛子的上缘部分,使土样湿润10 min使之逐渐达到饱和,开动马达,套筛在水中震荡30 min后提出套筛,等水淋干

后,将留在各级筛上的团聚体洗入铝盒,倾去上部清液,收集团聚体到烧杯后在60℃下烘干,称量(精确到0.01g)。

2.3 数据处理

采用Excel 2007和Spss 20.0软件对所有数据进行分析;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(LSD)对不同数据组间进行差异显著性比较($P<0.05$)。相关计算公式如下:

各粒级团聚体质量百分含量=(各处理中该团聚体质量/各处理土壤样品总质量)×100%

团聚体中有机碳贡献率=(该级团聚体中有机碳含量×该级团聚体含量)/土壤总有机碳含量×100%

MWD和GMD是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,MWD和GMD值越大,表示土壤的团聚度越高,团聚体的稳定性越强,土壤抵抗侵蚀的能力也越强^[14]。计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i / \sum_{i=1}^n w_i \right]$$

式中: x_i 为筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均直径; w_i 为任一粒径范围团聚体的质量占土壤样品干质量的分数。求和是所有粒径范围的团聚体数量。

分形维数(fractal dimension, D)采用杨培岭推导的公式计算:

$$\frac{w(\delta < \bar{d}_i)}{w_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} \quad \text{两边取以10为底的对数,}$$

得 $\lg \frac{w(\delta < \bar{d}_i)}{w_0} = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$, 分别以 $\lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$ 、 $\lg \frac{w(\delta < \bar{d}_i)}{w_0}$ 为横、纵坐标作图,即 $3-D$ 为直线的斜率,即可求出土壤 D 值。

式中: $\bar{d}_i$ 表示某级团聚体平均直径; $w(\delta < \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 $\bar{d}_i$ 的团聚体粒径; w_0 为团聚体总质量; $\bar{d}_{\max}$ 为团聚体最大粒径^[17]。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式土壤团聚体的数量特征

由图2可知,6种土地利用方式下,机械稳定性团聚体分布特征出现一定的差异,随着粒级的增大,机

械稳定性团聚体的组成比例呈逐渐增加趋势。次生林、人工林、农耕地均以大于5mm团聚体所占比例最大,显著高于其他粒径团聚体,分别高达44.94%、41.37%、34.67%;人工草地、灌草地、林草地则以2~5mm团聚体为主。通常将粒径>0.25mm的团聚体称为大团聚体,是维持土壤结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构稳定性越好。各土地利用方式下均以大团聚体含量最高,约占土壤总团聚体的90%以上,而小于0.25mm的团聚体所占比例非常小,以各种草地及农耕地较多,人工林、次生林较低,这说明在干筛处理条件下林地的土壤结构相对稳定。不同土地利用方式下相同粒级团聚体含量存在一定差异,但尚未达到显著水平,而同一土地利用方式下不同粒级土壤团聚体部分差异显著。

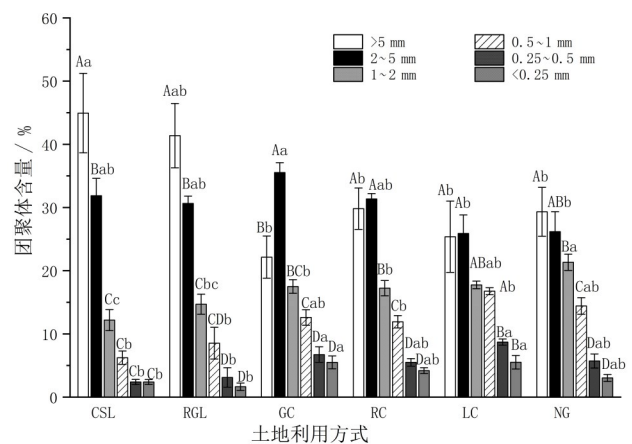


图2 不同土地利用方式土壤机械稳定性团聚体组成

Fig. 2 Composition of soil mechanical stability aggregates with different sizes under different land-use patterns

注:大小写字母分别代表同一土地利用方式下不同粒径团聚体和6种土地利用方式相同粒径团聚体含量在5%水平上的差异。

水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要作用,同时也是衡量土壤抗侵蚀能力的指标之一^[18]。由图3可知,各土地利用方式下水稳性团聚体含量随粒级的减小呈现先降低后增加的趋势,中间团聚体含量所占比例较少,>2mm及<0.25mm团聚体含量较多。次生林、人工林地、人工草地均以>5mm的土壤团聚体含量最高(最高可达40%,最低为25%),2~5mm团聚体含量次之,0.25~0.5mm团聚体含量最少,仅为5%~8%;而天然灌草地2~5mm团聚体含量最多,0.25~0.5mm团聚体含量最少,但也达到了将近10%;林草套种地和农耕地与其他4种利用方式相比,均以<0.25mm团聚体含量最多,高达25%以上。<0.25mm团聚体含量顺序为NG>LC>GC>RGL>RC>

CSL,说明在湿筛处理条件下农耕地土壤结构最不稳定,林地、人工草地较为稳定。

总体而言,2种团聚体均以大团聚体的数量占优势,其中,干筛处理条件下团聚体主要以>5 mm和2~5 mm粒径为主,含量在25.38%~44.94%;而湿筛处理条件下林地、草地均以>5 mm团聚体为主,而林草地和农耕地以<0.25 mm团聚体所占比例最高。

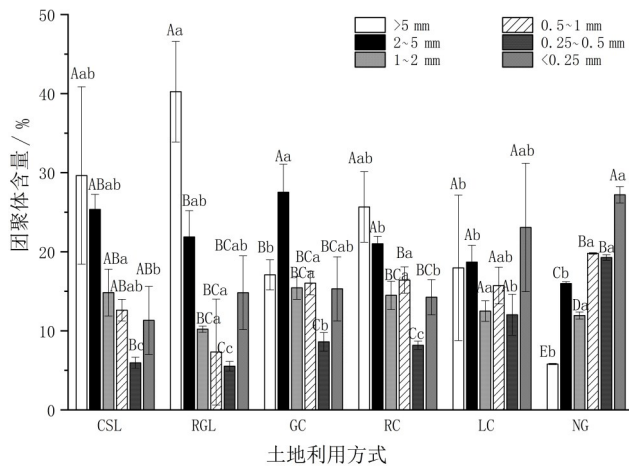


图3 不同土地利用方式土壤水稳性团聚体组成

Fig. 3 Composition of soil water stability aggregates with different sizes under different land-use patterns

3.2 不同土地利用方式土壤团聚体的稳定性特征

由表3可知,在干筛处理条件下,各土地利用方式的MWD值表现为:CSL>RGL>RC>NG>LC>GC, GMD值表现为:CSL>RGL>RC>NG>GC>LC,次生林、人工林与其他利用方式存在显著差异,说明在干筛处理下次生林和人工林的团聚体稳定性较强,灌草地和林草的稳定性较差。

在湿筛处理条件下,农耕地的MWD值与其他土地利用方式存在显著差异(除林草地),林草地与人工林地差异显著,其他利用方式之间差异不显著。次生林、人工林地与林草地、农耕地的GMD值存在显著差异,其他利用方式之间不显著。人工林地的MWD和GMD值最大,最小值则出现在农耕地内。由此表明人工林和次生林的稳定性最好,农耕地的稳定性最差。6种土地利用方式干筛法的MWD值分别是湿筛法的1.36、1.11、1.18、1.20、1.36和2.50倍, GMD值分别为1.78、1.58、1.54、1.62、1.81和3.67倍,这可能是因为大量的非水稳性团聚体遇水分解所致,也表明用干筛处理得到的指标来评价石漠化区不同土地利用类型的土壤团聚体质量差异表现不够灵敏,而用湿筛法作为评价土壤团聚体质量性状的指标更为精确。

表3 不同土地利用方式下土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径

Table 2 Average mass diameter and geometric mean diameter of soil aggregates under different land-use patterns

土地利用方式	干筛		湿筛	
	MWD	GMD	MWD	GMD
CSL	4.73±0.34a	3.55±0.35a	3.49±0.72ab	1.99±0.57a
RGL	4.48±0.38a	3.32±0.48a	4.03±0.31a	2.10±0.03a
GC	3.15±0.12b	2.15±0.23b	2.65±0.17b	1.40±1.92ab
RC	3.71±0.20b	2.46±0.18b	3.09±0.31ab	1.52±0.16ab
LC	3.24±0.30b	1.94±0.20b	2.38±0.63bc	1.07±0.36b
NG	3.57±0.21b	2.35±0.19b	1.43±0.01c	0.64±0.01b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.3 不同土地利用方式土壤团聚体的分形特征

土壤粒径分布受土地利用状况及环境因素的影响,加之时间和空间尺度效应的差异,导致各地类的粒径分形维数不同^[19]。土壤颗粒分形维数反映了水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,其分形维数越小,说明土壤结构与稳定性越好,抵抗侵蚀的能力越强。由图4可知,人工林与其他5种土地利用方式下机械稳定性团聚体的分形维数存在显著差异,而次生林、天然灌草地、人工草地、林草套种和农

耕地之间没有显著差异。农耕地分形维数值最大,人工林地最小,说明人工林地土壤团聚体状况较好,这可能是由于人工林土壤受到的人为干扰较少导致的。

对于土壤水稳性团聚体的分形维数而言,次生林与农耕地之间差异显著,其他土地利用方式之间没有显著差异,表现为NG>LC>RGL>RC>GC>CSL,其中,农耕地的分形维数最大,次生林最小,说明6种土地利用方式中,农耕地的土壤稳定性受人为扰动的影响最大,而次生林的稳定性最好。次生林、人工林、灌草地、

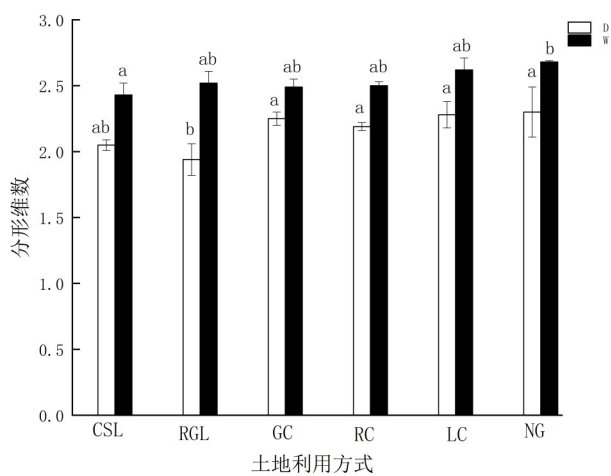


图4 土壤机械与水稳性团聚体分形维数
Fig. 4 Fractal dimension of soil mechanical stable aggregates and water stable aggregates

注:D—干筛;W—湿筛;不同小写字母表示不同土地利用方式之间差异显著。

人工草地、林草地、农耕地的水稳性团聚体分形维数分别是土壤机械团聚体分形维数的1.19、1.30、1.11、1.14、1.15和1.17倍。由表4可知,D与GMD呈显著负相关,MWD与GMD呈极显著正相关。土壤有机碳含量(SOC)与D、MWD、GMD呈负相关,说明土壤有机碳含量越高,D、MWD和GMD值有降低的趋势。

3.4 不同土地利用方式土壤团聚体的有机碳特征

3.4.1 有机碳含量

土壤团聚体是有机碳存在的主要场所,而有机碳是团聚体的主要胶结物质,两者密不可分,在表土中有近90%的土壤有机碳在团聚体内,因此研究表层土壤团聚体内的有机碳含量对揭示人为干扰对有

机碳的影响具有重要意义^[18-19]。由图5可知,各粒径团聚体中有机碳含量各异,不同利用方式之间差异不显著,各粒级间只有农耕地<0.25 mm团聚体有机碳含量和其他粒级间差异显著,其他不显著。次生林、人工林、人工草地、农耕地随粒径的减小团聚体有机碳含量呈递增的变化规律,0.25~0.5 mm团聚体有机碳含量最高,>5 mm和2~5 mm团聚体含量最低,0.25~0.5 mm团聚体有机碳含量是>5 mm有机碳含量的1.21、1.08、1.15和1.20倍,小粒径团聚体有机碳含量较大粒径团聚体有机碳含量稍高。而天然灌草地和林草地则随粒径的减小呈先降低后增加的趋势,其中>5mm团聚体有机碳含量最高,灌草地1~2 mm粒径团聚体有机碳含量最低,林草地0.5~1 mm团聚体含量最低。不同土地利用方式下,各粒径土壤团聚体有机碳含量最低的是人工林地。6种土地利用方式,基本上以小粒级团聚体有机碳含量最高,这说明不同的土地利用过程中小粒径团聚体更有利于有机碳的积累。

3.4.2 有机碳贡献率

团聚体有机碳贡献率反映了某一粒径团聚体中有机碳的相对数量,是影响其稳定性的重要因素之一。由表5可知,除农耕地外,土地利用方式均以>5 mm、2~5 mm团聚体粒径中有机碳的贡献率最大,占比17%~37%;0.25~0.5 mm粒级土壤水稳性团聚体有机碳的贡献最小,仅占5%~12%。农耕地因0.25~0.5 mm中有机碳含量最高,再加上其粒径团聚体占土壤总质量的比例大,使得其团聚体有机碳贡献率在0.25~0.5 mm这一级最大。总体上,有机碳贡献率随着水稳性团聚体粒径的减少呈逐渐降低的趋势。

表4 土壤水稳性团聚体各参数之间的相关性
Table 2 Correlation between parameters of soil water stable aggregates

		D	MWD	GMD	土壤有机碳					总量
					>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	
D		1								
MWD		-0.801	1							
GMD		-0.850*	0.977**	1						
SOC	>5 mm	-0.007	-0.564	-0.472	1					
	2~5 mm	-0.156	-0.426	-0.299	0.956**	1				
	1~2 mm	-0.065	-0.466	-0.334	0.880*	0.967**	1			
	0.5~1 mm	-0.189	-0.422	-0.293	0.911*	0.962**	0.939**	1		
	0.25~0.5 mm	-0.026	-0.528	-0.385	0.878*	0.950**	0.978**	0.968**	1	
	总量	-0.086	-0.497	-0.369	0.947**	0.990**	0.978**	0.981**	0.981**	1

注: * P<0.05; ** P<0.01。

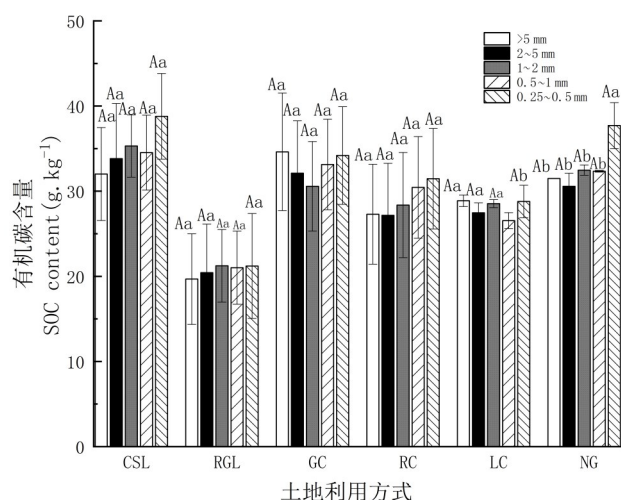


图5 不同土地利用方式土壤各粒径团聚体中有机碳含量

Fig. 5 Soil organic content in different aggregate sizes under different land use

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)研究区6种土地利用类型土壤团聚体数量特征,在干筛处理条件下,CSL、RGL、NG均以大于5 mm团聚体所占比例最大,而GC、GC、LC则以2~5 mm团聚体含量最高,总体上不同粒径土壤团聚体含量呈现随粒径减小而降低的趋势;在湿筛处理下,CSL、RGL、GC均以>5 mm的土壤团聚体含量最高,RC以2~5 mm团聚体含量最高,LC和NG以<0.25 mm团聚体含量最高,总体上不同粒径土壤团聚体含量呈现随粒径减小先降低后增加的趋势(除NG外)。

(2)研究区团聚体稳定性,在干筛处理下,MWD值最大的是次生林(4.73),最小的是灌草地(3.15);

GMD值最大的是次生林(3.55),最小的是林草地(1.94);D值顺序为NG>LC>GC>RC>CSL>RGL,在1.94~2.30之间。在湿筛处理下,MWD和GMD值最大的是人工林,最小的是坡耕地。D值顺序为NG>LC>RGL>RC>GC>CSL,在2.43~2.68之间。干筛法的MWD和GMD比湿筛法的大,但D值干筛比湿筛的值小。6种土地利用方式中,人工林和次生林的稳定性最好,农耕地和林草地的稳定性最差。

(3)研究区0.25~0.5 mm团聚体有机碳含量最高,>5 mm和2~5 mm团聚体含量最低。除农耕地、天然灌草地之外,其他土地利用方式下土壤均以>5 mm粒级土壤团聚体对土壤有机碳的贡献率最大,0.25~0.5 mm水稳性团聚体有机碳的贡献最小。

4.2 讨论

4.2.1 土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

不同土地利用方式由于植被覆盖、有机物质的输入等不同,导致了其土壤的物理性质和微生物活性的差异,进一步导致土壤抗侵蚀能力的差异。因此,同一地貌类型条件下发育的土壤因其利用方式的不同,土壤团聚体的稳定性和粒径分布具有明显差异^[20]。喀斯特地区地形破碎,生境异质性强,可能不同利用方式之间差异更大。本研究的喀斯特高原山地石漠化地区土壤团聚体组成一般以大粒径团聚体为主,此与前人在喀斯特区研究发现均以大粒径团聚体为主的结论相似。例如,谭秋锦等^[14]研究了峡谷型喀斯特水稳性团聚体均以大于5 mm团聚体含量最高(除旱地外);卢凌霄等^[21]发现喀斯特峰丛洼地不同植物群落土壤分布以大于2 mm的大粒径团聚体为主。本研究中人工林和次生林的稳定性较好,

表5 不同土地利用方式土壤团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

Table 5 Contribution rates of soil water-stable aggregate organic carbon to SOC under different land-use patterns

样地	粒级/mm				
	>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5
CSL	27.65±0.11ab	24.31±0.01ab	15.22±0.04a	12.54±0.02ab	6.61±0.01c
RGL	37.86±0.05a	21.51±0.04ab	10.58±0.00a	7.19±0.07b	5.63±0.01c
GC	17.13±0.01b	26.13±0.03a	14.26±0.01a	16.23±0.01a	8.86±0.01bc
RC	23.78±0.04ab	19.90±0.02ab	14.12±0.02a	18.34±0.02a	9.46±0.01bc
LC	18.59±0.10b	18.44±0.03ab	12.69±0.01a	14.93±0.03ab	12.20±0.02b
NG	5.55±0.00b	14.83±0.01b	11.77±0.00a	19.44±0.00a	22.10±0.02a

注:同列不同小写字母表示不同利用方式间差异显著($P<0.05$)。

农耕地的稳定性最差,主要原因可能是土壤中草和树木凋落物的分解程度影响着团聚体的形成与稳定,林地土壤结构疏松,容重较小,总孔隙度较大,枯枝落叶多,易促成有机质的形成,土壤结构较为稳定^[22],而农耕地受人为干扰较大,土壤结构易遭到破坏,稳定性较差,因此在农业生产中,应采取合理措施保护大团聚体,提高土壤稳定性和固碳能力。

4.2.2 土地利用方式对土壤团聚体有机碳的影响

土壤有机碳是有机质的重要组成部分,是影响团聚体形成和稳定的重要胶结剂,并且土壤的团聚作用影响土壤的固碳功能,因此土壤团聚体的稳定性与有机碳动态变化具有密切的关系。不同土地利用方式通过影响有机碳的分布状况来影响团聚体的稳定性,有研究认为0~30 cm的深度内土壤有机碳的平均含量为:撂荒地>次生林和人工林>灌草丛>农耕地,当撂荒地和林地转变为农耕地后,土壤有机碳含量减少^[23]。本研究中农耕地较其他土地利用方式的有机碳含量差别不大,说明农具的使用和人为活动对农耕地的有机碳含量还未造成较大的破坏。此外,在研究中发现人工林的有机碳含量与其他利用类型相比明显较低,这可能是人工林年限较少、经营管理不善对其造成破坏的缘故。总体上小粒径水稳性团聚体土壤有机碳含量较高,而大粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率最大。这与黎宏祥等^[24]研究不同林分土壤团聚体有机碳贡献率最小值均出现在0.25~0.5 mm或<0.5 mm粒级团聚体,贡献率最大值出现在>5 mm粒级团聚体的结论相似,而刘晶等^[25]对非喀斯特区的研究同样也发现不同土地利用方式下均以0.25~2 mm团聚体有机碳含量最高。因此,大粒径团聚体有利于增加土壤有机碳含量,大团聚体的固碳能力对土壤有机碳的固定起主要作用。

参考文献

- [1] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [2] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth—Science Reviews, 2014, 132(3):1-12.
- [3] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J].草业科学,2008,25(9):19-25.
- [4] 肖华,熊康宁,张浩.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(S1):330-334.
- [5] Rasmussen C, Southard R J, Horwath W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils[J]. Global Change Biology, 2010,12(5):834-847.
- [6] 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.
- [7] Six J, Elliott K E, Paustian K, et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14):2099-2103.
- [8] Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 167:39-45.
- [9] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.
- [10] 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(12):4695-4704.
- [11] 张祎,时鹏,李鹏,等.小流域生态建设对土壤团聚体及其有机碳影响研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(1):50-61.
- [12] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. Geoderma, 2016, 272:39-50.
- [13] 罗友进,魏朝富,李渝,等.土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J].生态学报,2010,31(1):257-266.
- [14] 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.
- [15] 马雪华.森林生态系统定位研究方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994:25-135.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:18-96.
- [17] 杨培岭.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.
- [18] 陈佳,陈洪松,冯腾,等.桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J].中国生态农业学报,2012,20(1):105-110.
- [19] 肖复明,范少辉,汪思龙,等.毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳储量影响研究[J].水土保持学报,2008,22(2):131-135.
- [20] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4-5):665-676.
- [21] 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.
- [22] Gelaw A M, Singh B R, Lal R. Organic carbon and nitrogen

- associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in tegray, northern ethiopia [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 16:690-700.
- [23] 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.
- [24] 黎宏祥,王彬,王玉杰,等.不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5):84-91.
- [25] 刘晶,田耀武,张巧明.豫西黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其矿化特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3):255-261.

Effects of land-use patterns on soil aggregate stability and organic carbon in rocky desertification areas

CHEN Hai^{1,2}, ZHU Dayun¹, CHEN Hu¹

(1.School of Karst, Guizhou Normal University/ State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2.Sixth Middle School in Lanzhou City ,Lanzhou ,Gansu 730060,China)

Abstract The Salaxi town of Bijie City, Guizhou Province is a representative karst mountainous demonstration district, where the karst accounts for 74.25% of the entire area. The exposed rocks are dominated by limestone, limestone and sand shale, with widespread potential and mild rocky desertification. This region hosts zonal yellow soil, dominated by arable and forest land, with a small amount of grassland. These lands are used in six types, secondary forest, artificial forest, natural shrub grassland, artificial grassland, forest and grass interplanting land and sloping farmland, which have largely same slope angle, slope facing direction and elevation. By monitoring the number of soil aggregate, soil aggregate stability, soil aggregate organic carbon and other indices, this work analyzes the influence of the conversion of slope farmland into forest land, grassland and forest-grass interplanting land on the stability of surface soil structure and the content of organic carbon under different land use patterns, and reveals the stability of soil structure and carbon sequestration capacity after implementing rocky desertification control measures in this area, providing a scientific basis for the prevention and control of soil erosion and the improvement of soil erosion resistance in rocky desertification areas. The results show that, (1) the aggregate content of >0.25 mm increased significantly after the implementation of forestation and planting, with more plantation and secondary forests and less sloping farmland. (2) After the dry and wet sieve treatment, the stability of aggregates and erosion resistance characterized by GMD, MWD and D indexes and >0.25 mm aggregate content show that the soil aggregate stability of plantation and secondary forests was strong, whereas the soil aggregate stability of sloping farmland and forest-grass interplanting land was weak. (3) In general, the content of soil organic carbon of small-grained aggregate is the highest for different land use patterns, and the contribution rate of water stable aggregate organic carbon of >5 mm and 2–5 mm to soil organic carbon is the largest (except for sloping farmland). Large soil aggregates play a major role in the sequestration of soil organic carbon. After the transformation of sloping farmland into forest and grass land in rocky desertification areas, the number of large soil aggregates (>0.25 mm) increases, the stability of soil aggregates is enhanced, and the organic carbon content of soil aggregates does not exhibit significant increase. On the whole, returning farmland to forest and planting grass in rocky desertification sloping land is beneficial to the promotion of the stability of soil surface soil structure and the accumulation of organic carbon.

Key words land-use patterns, soil aggregate, stability, karst rocky desertification area

(编辑 黄晨晖)