

石漠化区生态治理措施对土壤团聚体 稳定性及有机碳的影响

陈静 朱大运 陈浒 陈海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/

中国南方喀斯特生态环境学科创新引智基地(“111 基地”)/

贵州省喀斯特山地生态环境省部共建国家重点实验培育基地, 贵州 贵阳 550001)

【摘要】: 探究石漠化环境不同生态恢复措施下土壤团聚体粒径组成、稳定性水平及有机碳变化特征, 为石漠化生态治理模式优化配置提供理论依据。以农耕地为对照, 选择石漠化治理中具有代表性的人工核桃林、黑麦草地、刺梨地和天然恢复的灌草地为研究对象, 分析不同恢复环境中 0~20cm 土层土壤团聚体稳定性及其有机碳储量变化。结果表明: 相比农耕地, 核桃、黑麦草和天然灌草样地内水稳定性大团聚体含量增加, 微团聚体含量减少, 灌草地和核桃林地团聚体 MWD、GMD 分别显著高于农耕地, 表明利用方式转变为灌草地和核桃林后团聚体稳定性提高, 土壤结构得到改善。农耕地利用方式转变后, 人工核桃林、黑麦草地和天然灌草地各级团聚体有机碳含量及储量增加, 其中以灌草地尤为明显, 同时核桃林、黑麦草地和天然灌草地三者有机碳储量增量主要源于 >5 和 2~5mm 两个粒级团聚体贡献。总体而言, 相比人工林草治理措施, 天然灌草地在增强土壤团聚结构稳定性和促进有机碳积累方面更优。

【关键词】: 人工林草 自然恢复 土壤有机碳 石漠化治理

【中图分类号】: X53; X825 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2236-09

有机碳是碳循环过程的重要物质, 在保持水肥、维持土壤结构稳定方面有关键作用^[1]。土壤团聚体是土粒与各种有机-无机物质作用结合而成, 是土壤结构的基本构成单元^[2]。团聚体稳定性和有机碳分布状况是衡量土壤质量的指标之一^[3]。土壤团聚体与土壤有机碳二者相互作用, 有机碳是影响团聚体形成的有机胶结物质之一^[4], 而土壤团聚水平决定有机碳固定能力的高低^[5]。研究表明: 团聚体内有机碳含量高达表土层总量的九成^[6], 有机碳的物理保护机制有利于提高团聚体稳定性水平^[7]。随着全球变暖等环境问题进一步突出, 有关团聚体与土壤固碳的相关研究受到广泛关注。

IPCC 第 5 次评估报告指出: 过去 20 年, 不合理的土地利用方式造成了近四分之一的 CO₂ 释放^[8], 而合理的利用方式能有效增加碳汇^[9]。转变土地利用能引起有机质在物质循环过程中发生变化, 继而影响有机碳储量改变^[10]。刘杰等^[11]研究指出, 当坡耕地

作者简介: 陈静(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特地貌与洞穴. E-mail: wmc1wzs2@126.com

陈浒, E-mail: gy_chenhu@163.com

基金项目: 国家十三五重点研发计划项目(2016YFC0502601); 国家自然科学基金项目(41907042); 贵州教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2018]127); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2018]2777)

转变为果园后,土壤团聚体粒径指标显著提高,各粒级团聚体中的有机碳含量及储量明显增加;胡尧等^[12]研究发现,岷江流域不同利用方式对团聚体组成、有机碳含量特征以及储量变化具有重要影响。喀斯特石漠化地区由于独特的二元结构特征,地表-地下流失通道并存,土壤流失严重^[13],多数学者选择林草恢复模式对石漠化综合治理进行研究并取得一定成果^[14]。目前国内外关于团聚体稳定性及有机碳相关报道集中于农田生态系统^[15~17],且研究区域集中于黄土高原^[18~20]。从团聚结构及其有机碳的角度评价石漠化区人工林草和天然恢复两种治理措施的成效,对石漠化进一步治理选择较优的植被恢复模式具有重要意义。因此,本文选取贵州喀斯特高原山地撒拉溪石漠化综合治理区内具有代表性的利用方式,研究农耕地转变为核桃林地、黑麦草地、刺梨地和天然灌草地后土壤团聚体稳定性以及有机碳的变化特征,为评价研究区不同生态治理模式效益提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

撒拉溪高原山地石漠化综合治理区,隶属于长江流域乌江水系六冲河上游支流,经纬度范围 105° 02' E~105° 09' E, 27° 11' N~27° 18' N,区内喀斯特地貌占总面积的 74.26%,石漠化等级以潜在轻度为主。研究区内平均海拔 1600m,年均温 12.7℃,年均降水量 984.40mm。受水蚀作用影响,地表发育大量洼地、溶沟、石牙及落水洞等景观。植被主要有响叶杨(*Populus adenopoda*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、金丝桃(*Hypericum monogynum*)等,区内土壤以黄壤和石灰土为主,平均土层厚度为 20cm,部分洼地发育较厚的土壤,土壤机械组成以粉砂粒为主,主要的土地利用是传统农耕地和林地。该区域自石漠化治理工程开始,传统的玉米、土豆等粮食作物种植的利用方式逐渐转变为经济林、草地以及不同的混农林套种方式,目前规模较大的是林草植被恢复措施,其中核桃(*Carya cathayensis*)、刺梨(*Rosa roxburghii*)和黑麦草(*Lolium perenne*) 在石漠化治理初期生长速度较快,分布面积广。

1.2 样品采集与测定

结合石漠化生态治理工程中土地利用变化实际情况,以农耕地为对照,选择研究区内具有代表性的核桃林、刺梨地、黑麦草地和天然灌草地为研究对象。2019年4月,于研究区内5种典型环境中分别选择3个10m×10m样方,各样地按“S”形采样,重复3次,每个剖面按照0~10cm、10~20cm 2个不同层次采集土样,用于团聚体组分及其有机碳含量测定,所选择地详细信息见表1。由于湿筛法重现性更好,能更清晰的反映土壤团聚体分布和稳定性特征^[21],因此采用湿筛法对土壤样品进行预处理和筛分,共分成>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5和<0.25mm 6级。沿土块裂隙和结构掰为过10mm筛的土块,自然风干后,选取50g样品放入筛子,静置于水中,10min后使用团聚体分析仪(XY-100)进行筛分,震荡结束后取出,把各孔径筛子上的团聚体分级收入烧杯中,40℃烘干并称重,该操作重复3次取其均值。土壤容重采用环刀烘干法测定^[22],土样有机碳采用油浴-重铬酸钾加热测定^[23]。

表1 研究样地基本特征

样地类型	经度	纬度	海拔(m)	坡度(°)	坡向	土壤类型	利用状况
农耕地	105° 05' 42" E	27° 11' 48" N	1780	17.06	半阴坡	黄壤	至今仍种植玉米
核桃林	105° 06' 12" E	27° 16' 41" N	1765	15.24	半阴坡	黄壤	退耕地, 2010年种植
黑麦草地	105° 04' 33" E	27° 15' 17" N	1824	12.05	半阴坡	黄壤	退耕地, 2009年种植
刺梨地	105° 06' 23" E	27° 14' 22" N	1843	18.70	半阴坡	黄壤	退耕地, 2010年种植
灌草地	105° 06' 12" E	27° 15' 19" N	1830	15.41	半阴坡	黄壤	2009年撂荒至今

1.3 数据处理

为了进一步掌握不同林草环境中土壤团聚体稳定性特征，基于团聚体粒径组成计算直径指标。

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

$$GMD = EXP \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

式中：MWD^[24]为平均重量直径(mm)；GMD^[25]为几何平均直径(mm)； \bar{X}_i 为各级团聚体平均直径； W_i 为 \bar{X}_i 所对应的团聚体质量(g)。

土壤团聚体有机碳储量计算^[26]：

$$S_i = SOC_i \times SBD \times D \times P_i \times 10 \quad (3)$$

式中： S_i 为土壤团聚体有机碳储量(t/hm²)； SOC_i 是各粒级团聚体中有机碳含量(g/kg)；SBD是土壤容重(g/cm³)；D为土层厚度(m)； P_i 为第*i*粒级团聚体含量所占比例。

数据整理和分析主要运用 Excel2010 和 SPSS22 完成。通过 SPSS22 单因素分析对湿筛处理得到的实测数据进行多重比较；数据制图在 Origin2018 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 水稳性团聚体分布及稳定性特征

5 种土地利用中各级水稳定性团聚体组分见图 1。在 0~10cm 内(图 1a)，不同利用方式下土壤各粒径团聚体分布特征具有明显差别，相同利用方式中不同级别和不同土地利用中同一粒级的数量差异性水平不同。农耕地和刺梨地以<0.25mm 团聚体为主体，而核桃林、黑麦草地以及灌草地中>2mm 团聚体含量最高，大小排列表现为：黑麦草地(48.82%)>灌草地(47.46%)>核桃林(45.82%)>农耕地(23.36%)>刺梨地(16.97%)，核桃林、黑麦草地和灌草地的大团聚体含量差异未达到显著水平。土地利用方式从农耕地转变为人工林草地后，核桃林地和黑麦草地<0.25mm 团聚体含量呈下降趋势，而刺梨地与之基本持平；农耕地和刺梨地<0.25mm 团聚体含量显著高于其余 3 种样地，虽然核桃林、黑麦草地和灌草地 3 种利用方式中微团聚体分布特征明显不同，但并未达到显著性水平。在 10~20cm 范围内(图 1b)，除农耕地外的 4 种样地<0.25mm 含量均出现一定程度的下降，但 5 种土地利用方式其含量差异不明显，刺梨地和农耕地在 0.25~2mm 范围内含量有所增加，刺梨地分别与核桃林、天然灌草地出现显著性差异，而>2mm 级含量变化表现为核桃林(49.12%)>黑麦草地(44.28%)>灌草地(39.32%)>农耕地(25.48%)>刺梨地(18.90%)，相比 0~10cm 土层，核桃林、农耕地和刺梨地分别增加了 7.2%、9.08%和 11.73%，而黑麦草地和灌草地分别减少了 10.25%和 20.7%。研究区实行相应的生态治理措施后，土壤团聚体分布状况出现明显变化。在 0~20cm 深度内(图 2)，人工草地、林地以及天然灌草地的<0.25mm 级团聚体含量减少，与农耕地相比，3 种环境中>2mm 级含量分别提高了 89.46%、90.26%和 77.67%。

不同林草样地湿筛处理得到的团聚体 MWD 和 GMD 呈明显差异, 同样地团聚体 MWD 和 GMD 变化趋势具有一致性。在 0~10cm 中, 灌草地团聚体 MWD、GMD 值分别显著高于农耕地和刺梨地, 是农耕地 (1.62mm) 和刺梨地 (1.33mm) 的 1.80 和 2.20 倍, 但与黑麦草地和核桃林地不存在显著性差异。随着土层深度的增加, 除天然灌草样地外, 其余四种环境中的 MWD 和 GMD 值分别有不同程度的增加, 10~20cm 范围内团聚体 MWD、GMD 值表现为核桃林地>黑麦草地>灌草地>农耕地>刺梨地, 核桃林地与农耕地、刺梨地两者之间的差异性达到显著水平。

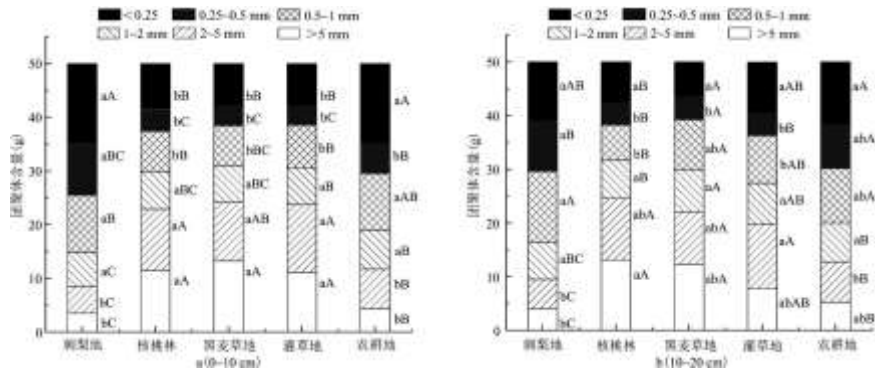


图 1 不同土地利用中土壤水稳性团聚体组成

注: 不同大写字母代表同样地中不同级别团聚体含量差异显著, 不同小写字母代表同样地内相同级别团聚体含量差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

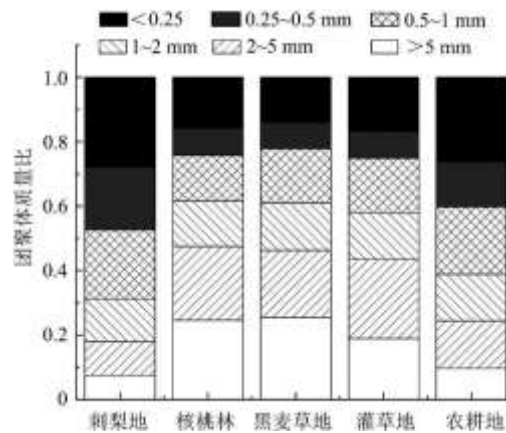


图 2 不同土地利用 0~20cm 土壤各级团聚体平均质量比

2.2 不同土地利用对团聚体有机碳的影响

2.2.1 不同粒径团聚体有机碳含量变化特征

传统农耕地各级团聚体中有机碳含量明显低于人工林草和天然灌草地 (表 2)。0~10cm 土层内, 5 种样地不同级别团聚体有机碳含量的变化范围是 $12.11 \sim 51.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 天然灌草地内各粒级团聚体有机碳含量均显著高于 3 种林草治理措施和农耕地, 核桃林地和刺梨地两者各级有机碳含量基本持平, 0.25~0.5 和 <0.25mm 两级的有机碳含量均高于其他粒级。相比 0~10cm 土层, 10~20cm 范围内原生灌草地和人工刺梨及草地各级团聚体有机碳含量呈现减少的特点, 但传统农耕地中两个土层各级有机碳含

量变化范围较小。在 10~20cm 土层, 各样地 6 级团聚体有机碳含量均值介于 13.31~39.94g · kg⁻¹ 之间, 不同样地相同粒级团聚体有机碳含量差异达到显著性水平。>2mm 大团聚体中有机碳含量排列为天然灌草地>核桃林地>黑麦草地>农耕地>刺梨地, 而 <0.25mm 微团聚体则表现为天然灌草地>核桃林地>农耕地>刺梨地>黑麦草地。

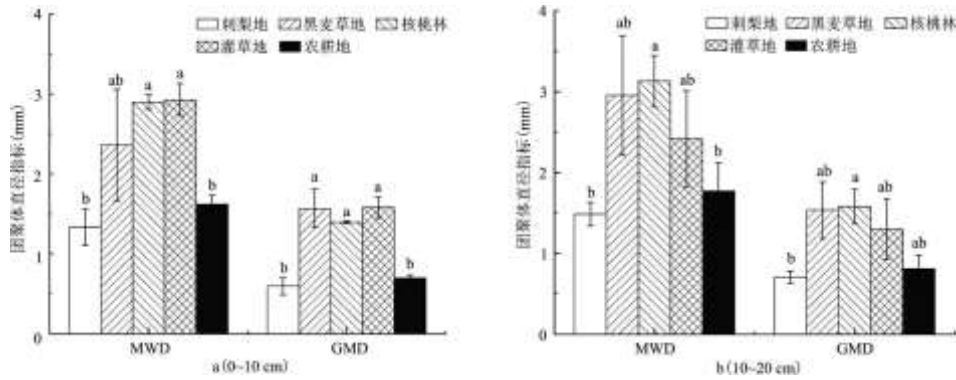


图 3 不同土地利用土壤团聚结构特征参数

表 2 不同土地利用土壤团聚体中有机碳含量 (g · kg⁻¹)

土层	样地	>5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	<0.25mm
0~10cm	刺梨地	18.10±1.64 ^c	19.07±2.50 ^{bc}	17.12±2.03 ^c	19.22±2.52 ^c	19.67±2.06 ^c	20.39±2.48 ^c
	黑麦草地	25.22±1.50 ^b	25.22±2.22 ^b	25.50±1.79 ^b	26.43±0.47 ^b	28.32±0.72 ^b	28.44±0.56 ^b
	核桃林	17.74±2.50 ^c	18.53±3.42 ^{bc}	18.26±1.41 ^c	20.62±2.32 ^c	20.59±1.97 ^c	19.95±1.79 ^c
	灌草地	46.21±1.78 ^a	47.32±1.18 ^a	51.13±0.55 ^a	50.35±0.19 ^a	51.92±0.51 ^a	51.89±0.30 ^a
	农耕地	12.11±0.84 ^d	14.60±0.44 ^c	15.15±1.09 ^c	16.03±0.63 ^c	18.26±0.79 ^c	16.13±2.14 ^c
10~20cm	刺梨地	13.31±0.14 ^b	16.93±0.87 ^{bc}	13.58±1.59 ^c	15.25±0.62 ^c	15.46±0.80 ^c	17.15±0.79 ^c
	黑麦草地	15.91±2.69 ^b	17.98±0.10 ^{bc}	17.64±0.91 ^{bc}	16.62±2.08 ^c	16.08±1.76 ^c	16.51±1.49 ^c
	核桃林	17.64±0.49 ^b	19.20±0.52 ^b	19.58±0.82 ^{bc}	21.57±0.99 ^b	22.08±1.16 ^b	21.81±1.06 ^b
	灌草地	36.62±0.67 ^a	38.21±0.80 ^a	37.48±0.45 ^a	39.43±0.92 ^a	39.51±0.57 ^a	39.94±0.58 ^a
	农耕地	15.17±1.80 ^b	15.60±1.44 ^c	17.27±2.39 ^{bc}	16.79±1.61 ^c	16.58±1.63 ^c	17.82±1.27 ^c

2.2.2 不同粒径团聚体有机碳储量变化特征

0~20cm 内, 天然灌草地各级团聚体有机碳储量明显高于人工林草和传统农耕地, 5 种样地在两个土层有机碳储量分配比例变化较大(表 3)。0~10cm 土层, 相较农耕地, 灌草地和黑麦草地>0.25mm 团聚体有机碳储量提高, 同时核桃林地、黑麦草地和灌草地有机碳储量分配比例在>2mm 团聚体均高于农耕地, 农耕地有机碳储量分配比例随团聚体粒级减小而增加, >2mm 团聚体有机碳储量表现为灌草地>黑麦草地>核桃林地>农耕地>刺梨地, 而农耕地<0.25mm 微团聚体有机碳储量最高值出现在灌草地, 核桃林地有机碳储量最低。随着土层深度的增加, 5 种样地团聚体有机碳储量及分配比例出现不同的变化, 灌草地和黑麦草地各级团

聚体有机碳储量下降，灌草地、刺梨地和农耕地有机碳储量分配比例最大值出现在<0.25mm 团聚体。<0.25mm 团聚体有机碳储量为灌草地>刺梨地>农耕地>核桃林>黑麦草地，核桃林地和黑麦草地>2mm 级团聚体有机碳储量明显高于其余三种样地，同时两者的分配比例与0~10cm 土层相差不大。由表4可知，对比农耕地，0~10cm 土层人工核桃林地、黑麦草地和天然灌草地有机碳储量增量主要源于>5和2~5mm 级团聚体贡献，1~2、0.5~1、0.25~0.5和<0.25mm 贡献减少量，而刺梨地则由0.25~0.5mm 级团聚体贡献增量；随着土层范围扩大，刺梨地和天然灌草地各团聚体对土壤有机碳储量增减量的贡献发生明显变化，刺梨地0.25~0.5和0.5~1mm 为增量的主要供给粒径，灌草地的有机碳储量增加主要由>5、2~5、1~2mm 三级团聚体贡献，分别贡献了1.91%、20.49%和4.25%。

表3 不同土地利用各粒级团聚体有机碳储量及分配比例

土层	样地	>5mm		2~5mm		1~2mm		0.5~1mm		0.25~0.5mm		<0.25mm	
		储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	储量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)
0~10cm	刺梨	1.19±0.46 ^c	6.7	1.79±0.47 ^c	10.08	2.04±0.64 ^c	11.49	3.53±0.42 ^b	19.88	3.96±0.55 ^b	22.3	5.25±0.20 ^{bc}	29.56
	黑麦草	7.55±1.47 ^b	25.41	6.40±1.50 ^b	21.54	4.06±0.95 ^b	13.67	4.45±0.60 ^b	14.98	2.43±0.28 ^{bc}	8.18	4.82±1.01 ^{bc}	16.22
	核桃林	4.25±0.59 ^b	21.17	4.47±1.04 ^{bc}	22.26	2.72±0.18 ^{bc}	13.55	3.29±0.54 ^b	16.38	1.86±0.20 ^c	9.26	3.49±0.21 ^c	17.38
	灌草地	12.68±1.37 ^a	20.72	14.88±1.35 ^a	24.32	8.78±0.73 ^a	14.35	9.98±0.94 ^a	16.31	4.97±0.61 ^a	8.12	9.90±1.50 ^a	14.86
	农耕地	1.20±0.40 ^c	7.08	2.22±0.05 ^c	13.1	2.27±0.21 ^{bc}	13.4	3.57±0.33 ^b	21.06	2.17±0.80 ^c	12.8	5.52±0.72 ^b	32.57
10~20cm	刺梨	1.34±0.31 ^a	6.94	2.29±0.37 ^c	11.87	2.33±0.11 ^b	12.07	5.07±0.64 ^{ab}	26.27	3.7±10.30 ^{ab}	19.17	4.57±0.41 ^b	23.68
	黑麦草	5.76±3.51 ^a	24.95	4.82±0.40 ^{bc}	20.87	3.69±1.07 ^b	15.98	4.09±0.36 ^{ab}	17.71	1.94±0.03 ^b	8.4	2.80±0.20 ^b	12.13
	核桃林	5.51±1.10 ^a	23.61	5.21±0.57 ^b	22.32	3.26±0.17 ^b	13.97	3.32±0.35 ^b	14.22	2.24±0.28 ^b	9.60	3.80±0.14 ^b	16.28
	灌草地	3.11±1.09 ^a	7.13	8.08±1.10 ^a	18.52	6.52±0.78 ^a	14.95	8.53±3.17 ^a	19.56	5.44±1.82 ^a	12.48	14.64±5.53 ^a	33.56
	农耕地	1.64±0.70 ^a	9.72	2.43±0.63 ^c	14.4	2.50±0.37 ^b	14.82	3.41±0.16 ^b	20.21	2.72±0.48 ^{ab}	16.12	4.17±0.51 ^b	24.72

表4 不同土地利用各级团聚体对土壤有机碳储量增减量的贡献度

土层	土地利用对比	增减量 (%)	不同粒级团聚体对土壤有机碳储量增减量的贡献度 (%)					
			>5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	<0.25mm
0~10cm	农耕—刺梨	2.68	-1.33	-8.02	-3.59	-0.50	16.73	-2.44
	农耕—黑麦草	75.32	17.07	8.89	-1.34	-21.63	-12.06	-60.04
	农耕—核桃	18.39	52.15	21.58	-0.97	-18.59	-10.73	-58.48
	农耕—灌草地	260.95	33.88	33.98	-0.39	-17.27	-12.07	-62.69
10~20cm	农耕—刺梨	13.45	-5.74	-7.33	-3.94	25.84	7.91	-2.80
	农耕—黑麦草	36.94	51.72	16.73	6.34	-6.72	-17.40	-35.76
	农耕—核桃	27.74	41.53	23.38	-1.75	-17.68	-16.93	-26.13
	农耕—灌草地	179.37	1.91	20.29	4.25	-4.74	-7.67	-8.12

3 讨论

转变土地利用方式能有效地改变地表植被覆盖及有机物质输入状况，由此影响土壤团聚体的结构形成、分布及稳定性等^[26]，水稳定性大团聚体分布和变化特征在一定程度上能反映土壤结构优劣，是影响土壤抗蚀性的重要因子^[11]。本研究，研究区内农耕地转变为核桃林地、黑麦草地和天然灌草地后，在0~20cm范围内，<0.25mm的微团聚体含量减少，这可能是利用方式转变后，人为干扰作用减弱，团聚结构体破坏能量输入减少，大团聚体破碎率降低，微团聚体向大团聚体转化率提高，土壤结构发生明显的改善^[27]；同时，这也说明土地利用及管理方式主要影响受真菌菌丝、根系等综合作用形成的大团聚体^[28]。土壤团聚体 MWD、GMD 两者是评价团聚结构稳定特征的重要参数，其中 MWD 和 GMD 越大，说明土粒团聚水平越高，稳定性越强^[29]。本研究中，在0~10cm土层，灌草地>0.25mm团聚体含量最高，MWD和GMD值最大，随着土层范围扩大，核桃林地大团聚体含量增加，团聚体MWD和GMD值上升至最大值，由此表明>0.25mm团聚体含量与团聚体MWD和GMD值变化具有一致性，大团聚体含量是影响团聚结构稳定性的重要因素，这与瞿晴等^[30]的研究结果一致，其中人工核桃林地MWD和GMD显著高于农耕地，说明农耕地转变为人工林后团聚体稳定性提高，这是因为相比农耕地，林地地表植被覆盖率较高，能有效的滞留水流，减缓雨滴对团聚体结构的冲击力^[31]。分析发现，研究区内核桃林和黑麦草两种样地内大团聚体含量增加，团聚体MWD、GMD值较高，说明研究区实施的人工林草措施有利于增强土壤团聚体稳定性，改善土壤质量；但刺梨地各级团聚体含量和团聚体MWD、GMD值却与其他3类生态恢复样地差异较大，更接近农耕地，这可能是因为刺梨作为该区域石漠化治理的主要产业之一，翻耕频率较高，强烈的人为扰动使得该环境中的水稳性大团聚体数量减少，从而使其MWD、GMD值偏低。

本研究中，黑麦草地和天然灌草地土壤团聚体中有机碳含量显著高于农耕地。与其他样地相比，农耕地植被覆盖率较低，发生降雨时，大团聚体容易被溅散，会使其内部有机质矿化，再加上农作物收割后植物中的有机碳无法返回土地，不利于土壤有机碳的积累^[32]，这也表明，传统耕作主要影响的是大团聚体内部的有机碳^[33]。虽然刺梨地团聚体分布状况和直径指标数值更接近农耕地，但其有机碳含量却高于农耕地，只是两者的差异未达到显著性，这可能是由于该样地的施肥措施增加了有机质的来源，从而提高了团聚体有机碳含量，而通过施肥补充的量始终是有限的。随着土层深度加深，灌草地、刺梨和黑麦草地各级团聚体有机碳含量明显下降，其表聚性明显，这主要是土壤表层环境中枯枝落叶和动植物残体的堆积为团聚体内部有机质的形成创造了良好的环境条件^[34]。同时，5种样地有机碳含量随着团聚体粒径变大而下降，谭秋锦等^[35]研究也得到相似的结论，可能是因为微团聚体中多为稳定性芳香族有机碳富集，其分子结构稳定不宜被分解^[28]，但也有部分研究^[36]发现，大团聚体内有机碳含量更高，这是由于微团聚体在多糖和植物根系分泌物等不同胶结剂的作用下形成大量临时性大团聚体所致。表2得出，在0~20cm

的范围内,天然灌草地各级团聚体有机碳储量明显高于人工林草和农耕地,这可能是天然灌草地环境中地表凋落物盖度和物种多样性显著影响有机碳活性,有效地加强了碳的固持能力所致^[30]。本文中,0~20cm范围内,农耕地转变为人工林草地和天然灌草地后,天然灌草地、核桃林和黑麦草地团聚体稳定性较高,而天然灌草地各级有机碳含量及其储量显著高于其他样地,鉴于此,石漠化区进行生态治理时,将自然恢复和人工林草相结合,能有效的修复退化的生态系统。

4 结论

人工核桃林、黑麦草地和天然灌草地团聚体组分以大团聚体(>2mm)和中间级团聚体(0.25~2mm)为主,刺梨地和农耕地团聚体主要由中间级团聚体和微团聚体(<0.25mm)组成。农耕地转变为人工草地、林地以及天然灌草地后>2mm大团聚体含量明显增加,灌草地和核桃林地团聚体MWD、GMD值显著高于农耕地,而天然灌草地各级团聚体有机碳储量明显高于人工林草和传统农耕地。综上,天然灌草地在改善土壤结构和提高有机碳储量方面较优,可在之后的石漠化治理中继续选择退耕,进行植被自然恢复。

参考文献:

- [1]王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.
- [2]MIKHA M M,RICE C W.Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J].Soil Science Society of America Journal,2004,68(3):809-816.
- [3]ABID M,LAL R.Tillage and drainage impact on soil quality:I.Aggregate stability,carbon and nitrogen pools[J].Soil and Tillage Research,2008,100(1-2):89-98.
- [4]陈建国,田大伦,闫文德,等.土壤团聚体固碳研究进展[J].中南林业科技大学学报,2011,31(5):74-80.
- [5]OADES J M.Soil organic matter and structural stability:Mechanisms and implications for management[J].Plant and Soil,1984,76(1-3):319-337.
- [6]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.
- [7]SIX J,ELLIOTT E T,PAUSTIAN K.Soil Macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation:A mechanism for c sequestration under no-tillage agriculture[J].Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [8]夏雪,车升国.陆地生态系统有机碳储量和碳排放的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(29):214-218.
- [9]LAL R.Soil management and rrestoration for c sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect[J].Journal of Social & Personal Relationships,1999,12(4):553-558.
- [10]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.
- [11]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.

-
- [12]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.
- [13]熊平生, 袁道先, 谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 355-362.
- [14]杨苏茂, 熊康宁, 喻阳华, 等. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 91-96.
- [15]向蕊, 伊文博, 赵薇, 等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 303-308.
- [16]周泉, 王龙昌, 邢毅, 等. 秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1235-1242.
- [17]刘秀, 司鹏飞, 张哲, 等. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7870-7877.
- [18]张少宏, 付鑫, IHSAN Muhammad, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 236-241, 248.
- [19]陈婧, 王誉陶, 张娟, 等. 黄土高原半干旱区不同土地利用方式下土壤结构特征[J]. 农业科学研究, 2019, 40(3): 27-31.
- [20]梁彩群, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤团聚体中不同活性有机碳从南到北的变化特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1095-1102.
- [21]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.
- [22]吴晓光, 刘龙, 张宏飞, 等. 砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 137-144.
- [23]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.
- [24]KATZ A J, THOMPSON A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12): 1325-1328.
- [25]王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 137-146.
- [26]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.
- [27]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.

-
- [28]徐香菇,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].土壤通报,2017,48(6):1523-1529.
- [29]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):1564-1576.
- [30]瞿晴,徐红伟,吴旋,等.黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J].环境科学,2019,40(6):2904-2911.
- [31]董莉丽.不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J].林业科学,2011,47(4):95-100.
- [32]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.
- [33]ELLIOTT E T,CAMBARDELLA C A.Physical separation of soil organic matter[J].Agriculture,Ecosystems & Environment,1991,34(1-4):407-419.
- [34]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.
- [35]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.
- [36]SIX J,ELLIOTT E T,PAUSTIAN K.Soil structure and soil organic matter II.A normalized stability index and the effect of mineralogy[J].Soil Science Society of America Journal,2000,64(3):1042-1049.