

不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力

柴冠群¹, 赵亚南¹, 黄兴成¹, 张跃强^{1,2}, 石孝均^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 农业部耕地保育重点实验室, 国家紫色土肥力与肥料效益监测站, 重庆 400716)

摘要: 通过连续2 a田间试验,研究了5种改良剂(秸秆、有机肥、生物炭、炭基改良剂I和炭基改良剂II)对紫色丘陵陵区坡耕地土壤水分库容、孔隙度和团聚体组成及稳定性的影响,分析了土壤水分特征参数与孔隙度和团聚体组成的关系,以为紫色土区水土保持和土壤改良提供科学依据。结果表明,与不施改良剂(对照)相比,5种炭基改良剂都能提高土壤对降水的截存和保贮能力,显著提高了土壤饱和含水量、田间持水量、水分总库容、有效水库容及重力水库容,降低了土壤凋萎点含水量和无效水库容;不同改良剂提升作用大小为改良剂II>改良剂I>生物炭>有机肥>秸秆>对照。施用改良剂I、改良剂II、生物炭和有机肥显著提高了土壤孔隙度,降低了土壤容重,秸秆的效果不显著。施用炭基改良剂降低了<0.25 mm的微团聚体含量,促进了小团聚体向大团聚体的转化,其中对粒径>5 mm的机械稳定性大团聚体提升幅度最大,比对照提高14.5%~60.7%;5种炭基改良剂都显著提高了团聚体的平均重量直径及稳定性指数,以炭基改良剂I、炭基改良剂II和生物炭的作用效果最大。土壤总库容、重力水库容和有效水库容与总孔隙度和毛管孔隙度以及土壤大团聚体含量呈正相关,而与土壤非毛管孔隙度和小团聚体呈负相关,土壤蓄水保水能力与土壤团聚体组成和孔隙度密切相关。因此,施用炭基改良剂通过促进土壤团聚作用,提高大团聚体含量和土壤孔隙度,进而增大土壤持水量和土壤有效水库容,是改善紫色土结构和提高紫色土坡耕地保水蓄水能力的有效措施。

关键词: 紫色土;坡耕地;改良剂;土壤水分库容;孔隙度;团聚体特征

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0296-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.01.049

Effects of Different Carbonaceous Conditioners on Water Retention Capacity of Purple Soil

CHAI Guanqun¹, ZHAO Yanan¹, HUANG Xingcheng¹, ZHANG Yueqiang^{1,2}, SHI Xiaojun^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Chongqing 400716; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Southwest China), Ministry of Agriculture, The National Monitoring Base for Purple Soil Fertility and Fertilizer Efficiency, Chongqing 400716)

Abstract: To investigate the effect of soil ameliorants on the composition and stability of soil aggregate and moisture storage capacity of slope cropland in purple hilly area, two-year field experiment was conducted by employing five kinds of soil ameliorants including straw, organic fertilizer, biochar, carbonaceous ameliorant I and II. The results showed that all these five carbonaceous ameliorants were also observed to have the ability on enhancing the sequestration and storage of soil for precipitation, which could further markedly increase the saturated soil moisture content and maximum effective water and flood detention storage and decrease the water content of wilting point. The effect of these five soil ameliorants on the maximum effective capacity followed the trend: Carbonaceous ameliorant II > carbonaceous ameliorant I > biochar > manure > straw > CK. The soil bulk density and soil porosity also received valid improvement after applying these ameliorants (besides straw), which significantly decreased and increased, respectively. In addition, the mechanical stability and the water stable aggregate content of soil with particle size >0.25 mm significantly increased after soil ameliorants applied, while the micro-aggregate (<0.25 mm) content decreased, suggested that the soil ameliorant could promote the conversion of small aggregate to large aggregate with the best promotion observed for >5 mm particle (increased 14.5% to 60.7% compared with the contrast). Employing these soil ameliorants had obvious effect (followed the trend: carbonaceous ameliorant I ≈ carbonaceous ameliorant II > biochar > organic fertilizer > straw > CK) on increasing the average weight diameter and stability index of aggregate. Correlative analysis showed that there was a positive correlation between total storage capacity,

收稿日期: 2016-08-29

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B04)

第一作者: 柴冠群(1990—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要从事土壤肥力与肥料研究。E-mail: chaiguanqun@163.com

通信作者: 石孝均(1964—),女,博士,研究员,主要从事土壤肥力与肥料研究。E-mail: shixj@swu.edu.cn

active storage capacity, flood detention storage capacity and total soil porosity, capillary porosity, content of large aggregate, and there was negative correlation with non-capillary porosity and content of small aggregate. Therefore, there was close relation between soil moisture preservation and soil porosity. Applying soil carbonaceous ameliorant was an important measure to improve the structure of purple soil and increase the ability of moisture holding and anti-erosion of purple sloping cropland by promoting the conversion of small aggregate to large one, decreasing the soil bulk density, increasing the soil porosity and enlarging the soil moisture holding and the soil effective water storage, which prevented sloping land from the damage of local seasonal drought. Moreover, the limiting factor of low soil moisture preservation in slope cropland of purple hilly area might be low organic matter content.

Keywords: purple soil; slope cropland; soil conditioners; soil moisture storage; soil porosity; soil aggregate

紫色土属风化发育较浅的矿质土壤,土壤有机质含量低、结构性差、蓄水保水能力弱,广泛分布于四川盆地。紫色丘陵区坡耕地是当地农业生产的主体,该区域降水量较大且集中^[1],在大暴雨条件下,土壤极易遭侵蚀,水土流失严重,导致土层浅薄、蓄水保水能力降低、季节性干旱等问题进一步恶化^[2]。前人关于坡耕地土壤水土保持的研究主要集中在坡改梯工程、农林复合种植、秸秆覆盖、植物篱等方式^[3],这些方式的主要目的在于防止土壤侵蚀,难以对土壤质量进行改良。土壤改良剂已被证实能够有效地改善土壤机械组成,提升土壤蓄水保水能力,增加农林业的产量和质量^[4-7]。土壤改良剂按材料来源可分为有机类、高分子类、矿物类和其他类型^[8],其中聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)等高分子类改良剂及沸石等天然矿物类改良剂均可通过自身吸附作用改善土壤结构,提升土壤蓄水保水能力;而含有机碳的土壤炭基改良剂由于原料廉价、资源丰富且能提高土壤有机质含量、改良土壤结构等,对其研究越来越多。秸秆还田及施用有机肥等可以提高农田土壤蓄水保水能力已被一些试验证实^[7,9];生物炭可以通过提升土壤孔隙度降低水分扩散率,从而提高土壤的保水能力^[10-12];但是关于含炭物质提高土壤保水能力的机制研究较少。土壤有机质是土壤团聚体的重要胶结物质,很多研究表明农田土壤施用有机肥可以提高土壤大团聚体含量和稳定性^[4],而土壤团聚体及其稳定性是影响土壤水分状况最重要的因素,对土壤渗透性和保水能力有直接影响^[13]。因此,施用炭基改良剂对土壤保水能力的影响可能与其对团聚体组成和孔隙度等土壤结构的影响有关。但是不同炭基改良材料对紫色土坡耕地土壤蓄水保水功能、土壤结构会有什么影响?其作用机制是什么?目前尚不清楚。本文以紫色土为对象,通过连续2 a 4茬的大田试验研究了秸秆、有机肥、生物炭和2种自制的炭基改良剂对紫色土坡耕地土壤蓄水保水功能的影响,并进一步分析了施用不同炭基改良剂后土壤容重、孔隙度和团聚体组成等土壤结构的变化及其与土壤保水能力的关

系,探讨了炭基改良剂对土壤蓄水保水功能的影响机制,以期为紫色丘陵区坡耕地土壤改良和水土保持提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟渠溪村,地理位置为107°29'43" N, 29°53'27" E,试验地区近30 a均气温22.1℃,其中8月最高均温28.6℃,1月最低均温7.1℃;年降水1 130 mm,降雨集中在夏秋两季,占全年的66%,冬春季占34%。试验地区为紫色土丘陵区,以紫色土旱坡地为主,占土地利用面积的73%。供试土壤为紫色土,试验区域坡度为5°,土壤pH为7.6,有机质14.5 g/kg,全氮、磷、钾含量分别为1.1, 0.81, 20.1 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为87.6, 15.5, 105.1 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于2012年10月至2014年7月进行了连续2 a 4茬作物的田间定位试验,种植方式为榨菜—玉米轮作,每年3—7月种植玉米,8—9月休闲,10月到翌年2月种植榨菜。试验设6个处理:对照(不施用改良剂)、秸秆、有机肥、生物炭、改良剂I、改良剂II。除对照不使用改良剂外,其他每个处理相应的改良剂用量为每季作物施用1 500 kg/hm²,秸秆为粉碎为5 cm左右小段的玉米秸秆,有机肥为牛粪,生物炭为燃烧发电后的稻壳灰,改良剂I和改良剂II是课题组研发的炭基改良剂(由秸秆、牛粪和生物炭按不同比例堆腐而成),试验改良剂材料基本性质见表1。每个处理3次重复,随机区组排列,小区面积2 m×7.5 m=15 m²。同时榨菜季施N 300 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 180 kg/hm², 玉米季施N 240 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²,于作物移栽前均匀撒施并翻耕入土,施用2周后移栽玉米或榨菜,其他田间管理一致。

1.3 土壤样品采集及测定

容重和孔隙度的测定:玉米收获后,在每个小区

内用环刀采集土壤样品加盖密封后带回室内,采用环刀法测定土壤饱和含水量、田间持水量、容重和孔隙度,非毛管孔隙度为总孔隙度与毛管孔隙度之差^[14];采用饱和硫酸钾法测定土壤凋萎含水量^[11]。

表 1 试验材料基本性质

材料	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	pH
秸秆	484.7	3.6	0.3	0.9	5.54
有机肥	184.4	24.5	12.2	49.6	8.9
生物炭	34.8	0.4	10.6	35.6	9.49
改良剂 I	79.7	7.6	11.1	39.8	9.12
改良剂 II	139.5	17.3	11.7	45.4	9.02

作物生长期降雨后土壤水分含量变化测定:2014 年 8 月 4-5 日降雨(降雨量 40.5 mm,降雨时长 38 h)后 1,3,5,7 d 分别进行土壤取样,每个小区取 10 个点表层土样(0—20 cm),混合后称取土样 50 g,装入密封容器内带回实验室,采用烘干法测定土壤水分含量^[14]。

土壤团聚体测定:玉米收获后,每个试验小区按“S”型采集 10 个点的耕层(0—25 cm)土壤样品,将 10 个采样点采集的大约 2 kg 原状土壤装入硬质密封容器内带回实验室,在风干过程中将大土块沿土壤自然裂痕轻轻地掰成直径约 1 cm 的土块,土样完全风干后进行团聚体的筛分。采用干筛法和湿筛法测定土壤机械稳定性团聚体与水稳性团聚体^[4],干筛法中,将风干土壤置于自上而下由 5,2,1,0.5,0.25 mm 孔径筛子构成的筛组上,2 min 内上下振动 50 次,振幅为 3 cm,收集筛子上的团聚体并称重,获取 >5,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,<0.25 mm 粒径的团聚体;湿筛法与干筛法相似,称取 60 g 干筛后各粒级土样置于上述孔径筛子构成的筛组上,放入蒸馏水中使水面淹没土样 2 cm 并浸泡 10 min,2 min 内上下振动 50 次,将保留于每个筛子上的土壤分别冲洗至铝盒中,在 50 ℃ 温度下烘干称重。

1.4 计算方法

1.4.1 土壤水分库容 土壤水分库容计算方法^[14-15]为:

$$Q=R \times h \times S$$

式中: R 表示土壤容重(g/cm³); h 表示有效耕层厚度(mm); S 表示土层含水率(%); Q 表示土壤水分库容(t/hm²)。其中,当 S 表示土壤饱和含水量时, Q 代表土壤总库容,总库容越大,土壤所能容蓄的水分总量越大;当 S 表示土壤饱和含水量与田间持水量之差时, Q 代表重力水库容,类似地面水库的滞洪库容,重力水库容越大,土壤滞洪能力越强;当 S 表示田间持水量与凋萎含水量之差时, Q 代表有效水库容,有效水库容越大,土壤存贮、调蓄水分的空间越大,可以为植物直接利用的水分越多; S 表示凋萎含水量时,

Q 代表土壤无效水库容,即植物生长期土壤对植物的供水达到凋萎点时根层土壤含水量,无效水库容越大,植物可利用水分越少。本文计算了玉米有效耕层($h=25$ cm)土壤水分库容量。

1.4.2 土壤团聚体组成 >0.25 mm 团聚体含量计算方法^[6]为:

$$R_{0.25} = \sum_{i=1}^n (m_i) \quad (2)$$

式中: $R_{0.25}$ 为 >0.25 mm 的团聚体质量分数(%); m_i 为 i 粒级团聚体质量分数(%)。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)的计算方法^[4]为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n B_i W_i$$

式中: B_i 为 i 粒级团聚体的平均直径(mm); W_i 为 i 粒级团聚体的质量分数(%)。

1.4.3 团聚体保存几率及稳定性指数 采用转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性^[16],即将干筛得到的 n 个粒径范围以内的团聚体百分含量用 X_n 表示,将其写成矩阵:

$$X_n = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$$

湿筛得到所对应的 n 个粒径范围以内的土壤团聚体百分含量 Y_n 写成矩阵:

$$Y_n = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n\}$$

假设团聚体筛分粒径依次为 1,2,3,..., n ,则对应筛分粒径内的团聚体保存几率分别用 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 表示,而团聚体破裂进入下一个筛分粒径的几率则用 $1-P_1, 1-P_2, 1-P_3, \dots, 1-P_n$ 表示,则 X_n 与 Y_n 之间可建立如下关系:

$$\begin{cases} X_1 P_1 = Y_1 \\ X_1 (1-P_1) P_2 + X_2 P_2 = Y_2 \\ X_1 (1-P_1) (1-P_2) P_3 + X_2 (1-P_2) P_3 + X_3 P_3 = Y_3 \\ \vdots \\ X_1 (1-P_1) (1-P_2) \dots (1-P_{n-1}) P_n + X_2 (1-P_2) \dots (1-P_{n-1}) P_n + \dots + X_n P_n = Y_n \end{cases}$$

土壤团聚体稳定性指数(ASI)为各个粒径保存几率之和:

$$ASI = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n$$

1.5 数据处理

处理间差异显著性检验采用单因素方差分析,多重比较采用 Duncan 法,显著水平为 $p < 0.05$ 或 $p < 0.01$ 。数据处理和统计分析在 Microsoft Excel 2010、SigmaPlot 和 SPSS 19.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 不同炭基改良剂对土壤水分含量及库容特征的影响

由表 2 可知,施用改良剂显著提高了土壤饱和含

水量和田间持水量,不同改良剂的效果存在差异,表现为:改良剂 I>改良剂 II>生物炭>有机肥>秸秆>对照。与不施用改良剂的对照相比,施用生物炭、改良剂 I 和改良剂 II 处理的饱和含水量分别提高 49.0%,56.7%,55.2%,田间持水量分别提高 15.8%,23.3%,23.5%。施用改良剂降低了土壤凋萎点含水量,提高了土壤水分的作物有效性,其中以生物炭、改良剂 I 和改良剂 II 效果最佳,分别比对照降低 15.7%,18.6%,19.2%。

施用改良剂的土壤水分总库容较对照显著增大,

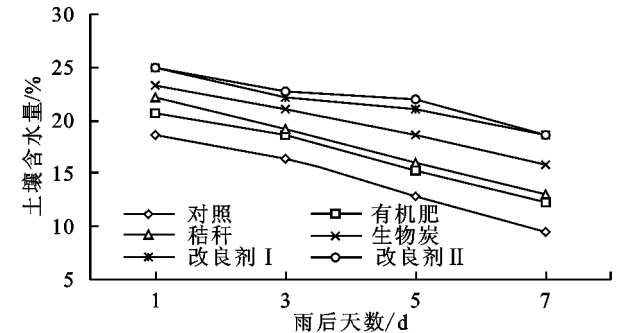
表 2 不同处理的土壤水分库容特征

处理	饱和含水量/ (g·kg ⁻¹)	田间持水量/ (g·kg ⁻¹)	凋萎点含水量/ (g·kg ⁻¹)	总库容/ (t·hm ⁻²)	重力水库容/ (t·hm ⁻²)	有效水库容/ (t·hm ⁻²)	无效水库容/ (t·hm ⁻²)
对照	336.8 d	202.6 d	93.8 a	1170.4 b	466.3 c	378.1 b	325.9 a
秸秆	405.5 c	216.7 c	92.7 ab	1378.7 a	641.9 b	421.6 b	315.2 b
有机肥	447.8 b	222.1 bc	90.7 b	1466.5 a	739.2 b	430.3 b	297.0 b
生物炭	501.9 a	234.7 ab	79.1 c	1631.2 a	868.4 a	505.7 a	257.1 c
改良剂 I	527.8 a	249.8 a	76.3 c	1675.8 a	882.6 a	550.9 a	242.2 c
改良剂 II	522.8 a	250.1 a	75.8 c	1659.9 a	865.8 a	553.4 a	240.7 c

注:同列数据不同小写字母表示处理在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2 不同炭基改良剂对土壤保水能力的影响

由图 1 可见,施用土壤炭基改良剂可不同程度提高土壤保水能力,降雨后第 1 天,不同处理土壤含水量为改良剂 I≈改良剂 II(25%)>生物炭(23.2%)>秸秆(22.1%)>有机肥(20.6%)>对照(18.6%),改良剂提升了对降雨的有效截存;降雨后第 1 天土壤含水量大多在田间持水量含量范围,随着天气转晴,土壤含水量逐渐下降,连续 7 个晴天后,对照处理土壤含水量已降到 9.5%,接近作物的凋萎含水量,而施用生物炭、改良剂 I 和改良剂 II 处理的土壤含水量达到 16%~18%,仍然在作物生长的最适宜含水量范围。因此,施用土壤改良剂后土壤失水速度减慢,即降低了土壤蒸发速度,提高了土壤保水能力和水分含量。



注:降水量 40.5 mm,降雨时长 38 h。

图 1 不同处理降雨后 1 周内土壤水分含量的变化

2.3 不同炭基改良剂对土壤物理特性及团聚体组成的影响

2.3.1 不同炭基改良剂对土壤容重和孔隙度的影响 连续施用不同改良剂 2 a 后,不同程度影响了土壤孔隙度和容重(表 3)。与对照 CK 相比,施用土壤

以生物炭、改良剂 I 与改良剂 II 提高幅度最大,但是不同改良剂之间差异不显著。施用改良剂对土壤重力水库容和有效水库容的影响与总库容一致,生物炭、改良剂 I 与改良剂 II 效果最显著,重力水库容分别较对照提升 86.2%,89.2%,85.6%,有效水库容分别提高了 33.7%,45.7%,46.4%。施用改良剂后土壤无效水库容下降,不同处理土壤无效水库容大小表现为:对照>秸秆>有机肥>生物炭>改良剂 I>改良剂 II,说明施用改良剂能够提高土壤蓄水能力和土壤水分对作物的有效性。

改良剂可提高土壤总孔隙度,其中施用秸秆效果提高不显著,其他处理提高了 6.5%~9.5%。各处理均比对照显著提高了毛管孔隙度,变化趋势与总孔隙度一致,改良剂 I 和改良剂 II 的毛管孔隙度分别提高 23.8%与 24.2%。施用秸秆和有机肥处理土壤非毛管孔隙度与对照物差异不显著,生物炭、改良剂 I 和改良剂 II 显著下降。与对照相比,施用秸秆处理的土壤容重没有显著变化,而施用有机肥、生物炭、改良剂 I 和改良剂 II 显著降低了土壤容重,改良剂 I 和改良剂 II 效果最明显。

表 3 不同处理的土壤孔隙度和容重

处理	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
对照	47.5 b	27.2 c	20.3 b	1.39 c
秸秆	48.5 b	28.5 b	20.0 b	1.36 c
有机肥	50.6 a	31.1 b	19.5 b	1.31 a
生物炭	51.1 a	32.5 a	18.6 a	1.30 ab
改良剂 I	52.0 a	33.7 a	18.3 a	1.27 b
改良剂 II	52.0 a	33.8 a	18.2 a	1.27 b

2.3.2 不同炭基改良剂对土壤团聚体及其稳定性的影响 由表 4 可见,不同炭基改良剂均显著提高>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量,秸秆、有机肥、生物炭、炭基改良剂 I 和炭基改良剂 II 分别比对照提高 4.9%,14.5%,14.7%,15.1%,15.9%。不同粒径团聚体中,改良剂对>5 mm 的大团聚体影响最大,以炭基改良剂 I 和炭基改良剂 II 效果较佳,较对照分别提高了 60.7%与 51.1%,且显著高于其他改良剂处理。施用炭基改良剂均降低了≤0.25 mm 机械稳定性团聚体含量,不同处理机械稳

定性团聚体含量表现为对照>秸秆>有机肥>生物炭>改良剂 I>改良剂 II。施用炭基改良剂显著增大了团聚体的平均重量直径,表现为改良剂 I>改良剂 II>生物炭>有机肥>秸秆>对照。

施用不同炭基改良剂对土壤各粒径水稳性团聚体含量的影响与机械稳定性团聚体一致(表 4),连续施用不同改良剂 2 a 后,土壤水稳性大团聚体含量(粒径

>0.25 mm)显著提高,比对照提高了 21.1%~66.7%,改良剂 I 和改良剂 II 效果最好。不同改良剂均显著降低水稳性微团聚体含量(≤ 0.25 mm),对 0.5~0.25 mm 水稳性团聚体没有显著影响,提高了其他各粒径团聚体比例,以改良剂 I 和改良剂 II 效果较明显。施用改良剂显著增大水稳性团聚体的平均重量直径,表现为改良剂 I>改良剂 II>有机肥>生物炭>对照。

表 4 不同炭基改良剂处理的土壤团聚体组成

土壤 团聚体	处理	不同粒径土壤团聚体/%							平均重量 直径/mm
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	≤ 0.25 mm	>0.25 mm	
机械稳定性 团聚体	对照	30.11 d	16.51 cb	13.49 b	14.01 b	5.21 a	20.67 a	79.33 c	3.19 c
	秸秆	34.53 c	16.48 cb	13.01b	13.11 b	6.10 a	16.77 b	83.23 b	3.50 b
	有机肥	35.49 bc	19.02 ab	15.51 a	17.30 a	3.49 b	9.19 c	90.81 a	3.71 b
	生物炭	39.02 b	18.60 ab	16.03 a	14.32 b	3.01 b	9.02 c	90.98 a	3.95 ab
	改良剂 I	48.40 a	17.42 b	12.02 b	11.00 c	2.48 b	8.68 c	91.32 a	4.52 a
	改良剂 II	45.50 a	19.46 a	12.30 b	11.99 c	2.69 b	8.06 c	91.94 a	4.39 a
水稳性 团聚体	对照	7.53 d	6.77 b	8.80 c	4.67 c	2.29 a	69.95 a	30.05 d	1.06 c
	秸秆	9.65 c	7.98 b	10.15 b	5.38 bc	3.23 a	63.60 b	36.40 c	1.29 c
	有机肥	12.49b	11.64 a	12.24 a	6.49 ab	2.27 a	54.86 c	45.14 b	1.65 b
	生物炭	12.19 b	11.51 a	11.47 ab	6.08 b	2.14 a	56.61 c	43.39 b	1.61 b
	改良剂 I	18.88 a	10.10 a	11.66 ab	7.59 a	2.03 a	49.74 d	50.26 a	2.07 a
	改良剂 II	17.75 a	10.67 a	11.93 a	7.55 a	2.18 a	49.92 d	50.08 a	2.01 a

不同粒径团聚体的保存几率差异较大,其中以粒径为 2~1 mm 团聚体保存几率最大,>5 mm 的大团聚体保存几率最低(表 5)。不同改良剂对团聚体的保存率有明显影响,与对照相比,连续 2 a 施用改良剂后,粒径>0.25 mm 的各粒径团聚体保存几率均

提高,团聚体的稳定性指数也明显高于对照,不同改良剂对团聚体保存和稳定作用大小为改良剂 I>改良剂 II>生物炭和有机肥>秸秆>对照,施用炭基改良剂 I 和改良剂 II 的土壤团聚体稳定性最好,分别比对照提高了 45.4%和 41.2%。

表 5 不同炭基改良剂处理土壤团聚体保存几率及稳定性指数

处理	土壤团聚体保存率						团聚体稳定性 指数 ASI
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	≤ 0.25 mm	
对照	0.25	0.41	0.65	0.33	0.44	1	3.08
秸秆	0.28	0.48	0.78	0.41	0.53	1	3.48
有机肥	0.35	0.61	0.79	0.38	0.65	1	3.78
生物炭	0.31	0.62	0.72	0.42	0.71	1	3.78
改良剂 I	0.39	0.58	0.97	0.69	0.82	1	4.45
改良剂 II	0.39	0.55	0.97	0.63	0.81	1	4.35

2.4 土壤水分库容与孔隙度、容重和团聚体的相关性

相关分析表明(表 6),土壤水分总库容、重力水库容和有效水库容与土壤总孔隙度及土壤毛管孔隙度呈极显著正相关,与土壤容重及非毛管孔隙度呈极显著负相关。土壤无效水库容与土壤总孔隙度及毛管孔隙度呈极显著负相关,与土壤容重和非毛管孔隙度呈极显著正相关。

土壤孔隙度和容重与机械稳定性团聚体的相关性分析表明(表 7),总孔隙度和毛管孔隙度与 2 mm 以上粒径的团聚体呈正相关,与 2 mm 粒径以下的团聚体呈负相关;相反,非毛管孔隙度和土壤容重与 2 mm 粒径以上的团聚体呈负相关,与 2 mm 粒径以下的团聚体呈正相关。对于水稳性团聚体、总孔隙度和毛管孔隙度与 0.5 mm 粒径以上的团聚体呈正相关,与 0.5 mm 以下的

团聚体呈负相关;而非毛管孔隙度和土壤容重与 0.5 mm 以上的团聚体呈负相关,与 0.5 mm 以下的团聚体呈正相关。其中,机械稳定性团聚体中>5 mm 和 ≤ 0.5 mm 的组分及水稳定团聚体中>5 mm,1~0.5 mm, ≤ 0.25 mm 的组分与土壤孔隙度和容重的关系更密切,相关性均达到显著水平。

表 6 土壤水分库容与土壤孔隙度和容重的相关性

指标	总库容	重力水库容	有效水库容	无效水库容
总孔隙度	0.968**	0.967**	0.929**	-0.949**
毛管孔隙度	0.975**	0.969**	0.956**	-0.974**
非毛管孔隙度	-0.963**	-0.947**	-0.986**	0.989**
土壤容重	-0.968**	-0.964**	-0.937**	0.949**

注: * 表示相关性显著($p<0.05$); * * 表示相关性极显著($p<0.01$)。下同。

土壤水分库容与机械稳定性团聚体的相关分析表明,总库容、重力水库容和有效水库容与 2 mm 粒径以上的团聚体呈正相关,与 2 mm 以下的团聚体呈负相关;无效水库容与 2 mm 粒径以上的团聚体呈负相关,与 2 mm 以下的团聚体呈正相关;其中土壤水分库容与>5 mm

和≤0.5 mm 的组分相关性均达到显著水平。对于水稳性团聚体,总库容、重力水库容和有效水库容与 0.5 mm 粒径以上的团聚体呈正相关,与 0.5 mm 以下的团聚体呈负相关;而无效水库容与 0.5 mm 以上的团聚体呈负相关,与 0.5 mm 以下的团聚体呈正相关。

表 7 土壤团聚体组成与土壤容重、孔隙度及水分库容的相关性

土壤 团聚体	团聚体 粒径	总孔 隙度	毛管 孔隙度	非毛管 孔隙度	土壤 容重	总库容	重力 水库容	有效 水库容	无效 水库容
机械稳定性 团聚体	>5 mm	0.903 *	0.922 **	-0.935 **	-0.921 * *	0.908 *	0.875 *	0.969 **	-0.942 **
	5~2 mm	0.757	0.733	-0.662	-0.738	0.661	0.688	0.563	-0.63
	2~1 mm	-0.063	-0.099	0.169	0.116	-0.073	0.005	-0.307	0.196
	1~0.5 mm	-0.279	-0.346	0.474	0.315	-0.376	-0.303	-0.596	0.507
	0.5~0.25 mm	-0.932 **	-0.932 **	0.907 *	0.917 *	-0.845 *	-0.849 *	-0.838 *	0.901 *
	≤0.25 mm	-0.972 **	-0.951 **	0.883 *	0.963 **	-0.935 **	-0.953 **	-0.829 *	0.864 *
水稳性 团聚体	>5 mm	0.925 **	0.929 **	-0.912 *	-0.943 **	0.883 *	0.856 *	0.932 **	-0.913 *
	5~2 mm	0.843 *	0.808	-0.715	-0.819 *	0.798	0.840 *	0.619	-0.685
	2~1 mm	0.906 *	0.866 *	-0.761	-0.900 *	0.853 *	0.879 *	0.706	-0.734
	1~0.5 mm	0.952 **	0.943 **	-0.900 *	-0.966 **	0.895 *	0.879 *	0.903 *	-0.893 *
	0.5~0.25 mm	-0.594	-0.603	0.605	0.567	-0.448	-0.452	-0.506	0.610
	≤0.25 mm	-0.982 **	-0.968 **	0.911 *	0.989 **	-0.939 **	-0.936 **	-0.895 *	0.899 *

3 讨论

3.1 炭基改良剂对紫色土蓄水保水能力的影响

土壤对水分容纳和转移的能力可以通过土壤水分库容来评价,其反映了土壤的蓄水保水性能,并直接影响坡耕地抵御季节性干旱的能力^[14-16]。本研究表明,施用改良剂的土壤饱和含水量和田间持水量以及水分总库容较对照均显著增大(表 2),说明施用改良剂后土壤所能容蓄的水分总量增加,蓄水能力均明显提高。全斌等^[17]和汪三树等^[14]研究认为重力水库容和有效水库容提高能够增大土壤透水性,有效截存降雨,减少地表径流,对预防涝害及季节性干旱有一定意义。本研究中,施用改良剂的土壤重力水库容和有效水库容变化均比对照显著提高,生物炭、改良剂 I 与改良剂 II 提升效果最为明显,因此在降雨过程中能够有效拦蓄降雨并减少地表径流量,有利于蓄洪排涝,降低土壤侵蚀。另一方面,土壤重力水库容和有效水库容提高可降低水分向深层下渗,限制土壤无效蒸发作用,抵抗季节性干旱能力增强^[15]。

曾爱等^[18]研究发现在其他外界条件一致的情况下,施用生物炭能显著提高壤土含水量。王欣等^[10]通过土柱试验表明,将秸秆炭和花生壳炭分别按 5%,10%和 15%添加比例施入砂土和粉砂壤土后,两类生物炭处理分别使土壤水分扩散率降低了 52%~89%和 83%~96%,从而显著提高了两类土壤的保水能力。袁耀等^[19]对核桃园土壤的研究也表明施用自制多功能土壤改良剂可提高土壤含水量;王晓娟等^[7]对旱地玉

米的研究表明施用有机肥 4 a 可显著提高玉米大喇叭口期土壤贮水 11.49%~21.63%,且高量有机肥处理(22 500 kg/hm²)比低量有机肥处理(7 500 kg/hm²)显著提高 9.09%。本研究中,施用炭基改良剂的处理在降雨后土壤含水量均高于对照(图 1),这与之前的研究结果一致,说明施用炭基改良剂可以提高土壤蓄水保水能力,是紫色土区坡耕地水土保持的有效措施。

3.2 炭基改良剂影响紫色土蓄水保水功能的机制

汪三树等^[14]研究了紫色丘陵区坡耕地生物梗的蓄水保土效应,发现土壤水分总库容和重力水库容与总孔隙度和毛管孔隙度显著正相关,与土壤容重和非毛管孔隙度显著负相关。本研究中,土壤水分总库容与总孔隙度显著相关,说明总孔隙度越大,土壤持水能力越强。土壤总库容包括重力水库容、有效水库容和无效水库容,前两者所占比例较大,且与土壤蓄水保水和截留雨水的能力有关。土壤重力水库容和有效水库容与毛管孔隙度正相关,与非毛管孔隙度负相关,土壤无效水库容则相反(表 6),说明毛管孔隙度决定了重力水和有效水库容,而非毛管孔隙度决定了无效水库容。因此,施用炭基改良剂下土壤蓄水保水能力的改善与土壤孔隙度的变化有关,通过提高土壤总孔隙度以及毛管孔隙度的比例是提高土壤蓄水保水能力的关键,而土壤孔隙度及其分配与土壤团聚体组成密切相关。安艳等^[12]研究了生物炭对果园土壤团聚体分布和保水性的影响,发现<0.25 mm 的团聚体与土壤孔隙度及田间持水量呈显著负相关。本

研究中,大团聚体与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、总库容、重力水库容和有效水库容正相关,与非毛管孔隙度和无效水库容负相关;相反,小团聚体与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、总库容、重力水库容和有效水库容负相关,与非毛管孔隙度和无效水库容正相关,说明通过促进小团聚体形成大团聚体可以提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度,进而提高总库容、有效水库容及重力水库容,降低无效水库容,提升土壤的蓄水能力。

本研究表明施用炭基改良剂后,土壤微团聚体及小团聚体减少,大团聚体尤其是粒径 $>5\text{ mm}$ 的土壤团聚体增多,这可能与施用炭基改良剂提升了土壤有机质含量有关。李辉等^[20]研究农业耕作对湿地土壤保水功能影响发现有机质的减少是导致土壤保水功能降低的重要原因。本研究中,施用 2 a 炭基改良剂后土壤有机质含量(15.8~16.4 g/kg)显著高于对照(14.6 g/kg),土壤有机质是土壤团聚体的重要胶结物质,在团聚体形成和稳定性方面有重要作用^[9],有机质累积有利于土壤矿物颗粒和小团聚体形成大团聚体^[6]。也可能是由于炭基改良剂含有的有机物质和多种矿物质形成较强的静电场,把周围较细的黏土颗粒吸附,聚成团聚体^[21]。土壤团聚体具有疏松多孔的特性,施用改良剂后土壤大团聚体数量增加,促使土壤孔隙度增大,土壤容重减小,土壤的透水性和透气性增强。改良剂 I 与改良剂 II 蓄水保水能力较秸秆、有机肥及生物炭单独使用效果显著,可能是因为秸秆、有机肥及生物炭在混配堆腐的过程中影响腐殖质官能团和表面电荷的类型和数量等^[12],施用后土壤团聚作用和孔隙度的影响更明显,进而有利于土壤蓄水保水能力的提高。

4 结论

(1)连续 2 a 施用炭基改良剂提升了土壤的蓄水保水能力,提高了土壤对降雨的有效截存。土壤饱和持水量、田间持水量、有效水库容及水分总库容均高于对照,而无效水库容降低。不同炭基改良剂效果表现为改良剂 I $>$ 改良剂 II $>$ 生物炭 $>$ 有机肥 $>$ 秸秆。

(2)施用炭基改良剂显著提高了土壤总孔隙度和毛管孔隙度,降低了土壤非毛管孔隙度和土壤容重,以改良剂 I 和改良剂 II 效果最明显。

(3)施用炭基改良剂显著提高粒径大于 0.25 mm 的团聚体含量,提高团聚体的平均重量直径,提高各粒径团聚体的保存几率和稳定性指数。不同类型改良剂效果总体表现为改良剂 I $>$ 改良剂 II $>$ 生物炭 $>$ 有机肥 $>$ 秸秆。

(4)土壤总库容、重力水库容和有效水库容与总孔

隙度和毛管孔隙度以及土壤大团聚体含量呈正相关,与非毛管孔隙度和小团聚体含量呈负相关;土壤总孔隙度和毛管孔隙度与土壤大团聚体正相关,与小团聚体呈负相关关系。因此,施用土壤炭基改良剂通过促进土壤团聚作用、提高大团聚体含量和土壤孔隙度,进而增大土壤持水量和土壤有效水库容,是改善紫色土结构和提高紫色土坡耕地保水蓄水能力的有效措施。

参考文献:

- [1] 谢俊齐. 中国坡耕地[M]. 北京:中国大地出版社,2005:7-10.
- [2] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(6):736-746.
- [3] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3):123-128.
- [4] 姜灿烂,何园球,刘晓利,等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):715-722.
- [5] Alagöz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2):419-424.
- [6] 张鹏,贾志宽,王维,等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8):1513-1520.
- [7] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):144-149.
- [8] 陈义群,董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. *生态环境*, 2008, 17(3):1282-1289.
- [9] 路文涛,贾志宽,高飞,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1):93-99.
- [10] 王欣,尹带霞,张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4):248-257.
- [11] 王浩,焦晓燕,王劲松,等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):253-257.
- [12] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(1):293-300.
- [13] Bissonnais Y L E. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4):425-437.
- [14] 汪三树,刘德忠,史冬梅,等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的蓄水保土效应[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(19):4091-4100.