

不同改良剂对旱地苹果园壤土团聚体和水分的影响

刘帅^{1,2}, 赵西宁^{1,3}, 李钊^{1,2}, 丁艳宏^{1,2}, 高晓东^{1,3}, 王建平⁴

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.延安市宝塔区果业局, 陕西 延安 716000)

摘要: 为对比研究植物根际促生菌(枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌)和苹果树枝生物炭的施加对黄土丘陵区山地苹果园粉质壤土团聚体含量、稳定性以及土壤水分的影响, 采用田间定位试验, 设置 4 个处理: 施加 65 t/hm² 生物炭(BC)、20 t/hm² 枯草芽孢杆菌(PGBS)、20 t/hm² 胶质芽孢杆菌(PGBM)和对照(CK)。湿筛法获得土壤各粒径团聚体含量, 并计算水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)。结果表明: BC、PGBS 和 PGBM 处理有机碳含量(SOC)较 CK 提升 18.04%~206.91%, 全氮(TN)含量较 CK 提升 6.11%~66.56%。分析表明, BC、PGBS 和 PGBM 处理 0—60 cm 土层 >0.25 mm 团聚体含量显著增加; 各处理分形维数 D 较 CK 均降低, MWD、GMD 均高于对照 CK, 大小顺序为 PGBS>PGBM>BC, 施加改良剂可以增加土壤团聚体的稳定性。各处理 0—60 cm 土层土壤饱和导水率和土壤含水量均得到提升。施加生物炭和植物根际促生菌可以显著提升土壤有机碳和全氮含量, 增强土壤结构稳定性, 提升土壤含水量, 生物炭处理对于土壤有机碳和全氮含量的提升优于植物根际促生菌, 但植物根际促生菌施用对土壤结构稳定性的提升更佳。

关键词: 山地苹果园; 生物炭; 植物根际促生菌; 土壤团聚体

中图分类号: S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2021)02-0193-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.026

Effects of Different Amendments on Aggregate and Water Content of Loam Soil in Dryland Apple Orchard

LIU Shuai^{1,2}, ZHAO Xining^{1,3}, LI Zhao^{1,2}, DING Yanhong^{1,2}, GAO Xiaodong^{1,3}, WANG Jianping⁴

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Baota District Fruit Bureau, Yan'an, Shaanxi 716000)

Abstract: To comparatively explore the effects of the application of biochar and plant growth-promoting rhizobacteria (*Bacillus subtilis* and *Bacillus mucilaginosus*, PGPR) on the soil aggregate content, soil aggregate stability, and soil moisture of the silty loam soil of the mountain apple orchard on the loess hilly region, we adopted field research and set four treatments: 65 t/hm² biochar (BC), 20 t/hm² *B. subtilis* (PGBS), 20 t/hm² *B. mucilaginosus* (PGBM), and control (CK). The aggregate content of different soil particle size were examined by wet sieving method, and the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and fractal dimension (D) of water-stable aggregates were calculated. The results showed that compared with CK, the soil organic carbon (SOC) increased by 18.04%~206.91%, and the total nitrogen (TN) content increased by 6.11%~66.56% in BC, PGBS, and PGBM treatment. The content of >0.25 mm aggregates in the 0—60 cm soil layer increased significantly in treatment BC, PGBS, and PGBM. Compared with CK, the fractal dimension D was decreased and the MWD and GMD were increased in different treatments, of which the order of magnitude was PGBS>PGBM>BC and this indicated that the application of amendments can increase the stability of soil aggregates. The saturated hydraulic conductivity and soil water content of the 0—60 cm soil in each treatment were increased. The application of PGPR and biochar could significantly increase the content of soil organic carbon and total nitrogen, enhance the stability of soil structure, and

收稿日期: 2020-10-22

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400204); 国家自然科学基金项目(41771316); 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY07-04)

第一作者: 刘帅(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1164658818@qq.com

通信作者: 赵西宁(1976—), 男, 研究员, 主要从事农业水土资源调控与利用研究。E-mail: xiningz@aliyun.com

increase soil saturated hydraulic conductivity and water content. The improvements of soil organic carbon and total nitrogen content by biochar treatment was better than that by plant growth-promoting rhizobacteria, while the plant growth-promoting rhizobacteria treatment improved the stability of soil structure better.

Keywords: mountain apple orchard; biochar; PGPR; soil aggregate

黄土高原因独特的地理气候条件成为中国苹果优生区和主产区之一,以陕西省为例,2017年苹果种植面积为72.5万 hm^2 ,产量1153.94万t,约占中国总产量的1/4。该区土壤类型为黄绵土,质地疏松绵软,团聚状态差,土壤结构易遭受侵蚀破坏,养分和有机质含量低;再之,北部的黄土丘陵区果园多为旱作,地下水埋藏深,难以供给果园土壤^[1],降水少,且大部分以径流和无效蒸发的形式浪费掉,果树蒸腾耗水强烈,果园土壤水分亏缺较严重,制约苹果产业的持续健康发展^[2]。因此,改善果园土壤结构,提高土壤蓄水保墒能力,提升土壤肥力以增加苹果产量是目前亟待解决的重要问题。

土壤的结构状况受土壤团聚体含量及其稳定性影响,作为土壤结构的基本组成单元,不同粒径的土壤团聚体数量分布决定土壤孔隙的分布,反映土壤结构稳定性、持水性以及养分供储能力的高低,是评价土壤质量的重要指标。良好的土壤团聚体能有效改善土壤透气、透水性,增强土壤的抗侵蚀能力^[3]。为通过定量参数评价土壤团聚体的稳定性特征,Bavel^[4]对团聚体各粒级数据加权求和,提出平均重量直径(mean weight diameter, MWD)概念。在此基础上,Gardner^[5]提出团聚体分布服从对数正态分布,通过对团聚体直径取对数后加权求和,提出几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)。MWD和GMD在评价土壤团聚体稳定性发挥积极作用,得到广泛使用。另有学者^[6]认为,团聚体分布具有分形特征,将分形理论应用于土壤团聚体组成的研究中,采用分形维数(fractal dimension, D)定量描述土壤团聚体结构。已有研究^[7]表明,MWD和GMD值越大,则表示团聚体越稳定,分形维数(D)值越小,土壤结构和稳定性越好。

应用外源土壤改良剂是改善干旱地区易受侵蚀土壤的重要措施之一。土壤改良剂可以有效改善土壤结构、水热条件和养分状况,进而提升土壤生产力。当下,以天然材料如作物秸秆、禽畜粪便等农林废弃物为原料研制新型改良剂和新型生物改良剂是研究热点^[8]。在众多改良措施中,生物炭和植物根际促生菌在改善土壤状况方面更加环保、持久,成为学者研究的关注点。该地区苹果产业迅猛发展,修剪的苹果树枝资源未有效利用,可通过高温热解制备生物炭,生物炭由于自身丰富的孔隙结构,施加生物炭可以明显提升土壤总孔隙度,降低土壤容重,增加团聚体数

量及其稳定性,提高土壤含水量及降水的入渗量等,进而提高土壤抗侵蚀能力,还可以提升土壤养分和保肥能力^[9-10]。植物根际促生菌(PGPR)是在根际定殖的一类具有自生固氮、溶磷、分泌抗生素和植物激素、拮抗病原体的细菌。植物根际促生菌近年来作为一种高效生物菌肥施用于农业领域,PGPR施加可以改善土壤结构、增强土壤保水能力、活化土壤养分、提升植物对养分的吸收利用,增加作物产量^[11-12]。但是,根际促生菌对黄绵土的土壤团聚结构和土壤水分状况的提升作用尚不明确,并且其与生物炭改良效果的差异性研究鲜有报道;另外,已有研究^[12-13]主要针对农田和室内盆栽试验,针对旱地果园的研究较少。为此,本研究以黄土丘陵区山地苹果园为研究对象,对比分析2类改良剂施加对果园土壤团聚体稳定性和土壤水分状况的改良效果,以期为黄土高原土壤结构改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2019年4—10月在陕西省延安市宝塔区天河流域河庄坪镇余家沟村(36°41′15″N,109°21′24″E)的旱作山地果园内进行,海拔1277m,典型的黄土丘陵区,属半干旱区暖温带大陆性季风气候。研究区年平均气温约9.2℃,年内降雨主要集中在7—9月,占全年降水量的70%以上,多年平均降水量为506.5mm,年平均相对湿度为60.8%。土壤类型为黄绵土,属于粉质壤土,土层深厚,容重为1.3 g/cm^3 ,pH为7.81,土壤有机碳含量为2.69 g/kg ,全氮含量0.3 g/kg ,田间持水量约24%。2019年研究区总降水量为799.8mm,主要集中在6—9月,最大单次降水量为64.8mm。苹果生育期内最高气温34.6℃,最低气温-1℃,平均气温为17.5℃。降雨和气温分布情况见图1。

1.2 试验材料与试验设计

选用的生物炭为苹果树枝在500℃无氧条件下热解产物,购自陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司,粒径为0.02~2mm,pH为8.98,有机碳含量为306.25 g/kg ,全氮含量8.97 g/kg 。植物根际促生菌选用枯草芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌,购自济南金华峰辉生物科技有限公司,其有效活菌数分别为 $\geq 2.0 \times 10^{10}$ CFU/g和 $\geq 5.0 \times 10^9$ CFU/g。

试验设置4个处理:施加生物炭(BC)、枯草芽孢杆菌(PGBS)、胶质芽孢杆菌(PGBM)和空白对照

(CK),每个处理设 3 个重复。根据已有研究^[12,14]的最优施加量:生物炭施加量 65 t/hm²,枯草芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌均为 20 t/hm²。样地设置在同一水平梯田苹果园,选取 12 棵树体形态、生长状况相似且均为 15 年生旱作山地红富士(*Malus pumila* Mill.)苹果树,各处理修剪和土壤管理等措施一致,苹果树种植株行距为 4.5 m×4.5 m,树高平均 2.5 m,平均冠幅半径为 2.3 m。为使添加的改良剂发挥作用并降低对果树生长的影响,施加改良剂的位置为树冠 2/3 处,本试验以树干为圆心距离树干处 1.5 m,于 2019 年 4 月初对生物炭(BC)、枯草芽孢杆菌(PG-BS)、胶质芽孢杆菌(PGBM)、对照(CK)4 个处理人工开挖圆环状坑,圆环状坑宽、深均为 60 cm,将 3 种处理材料分别与开挖土搅拌均匀后,回填翻入环状坑中,CK 仅开挖回填不施加任何材料。在施加改良剂的环状区取 3 个相同弧度点布设水分监测点。

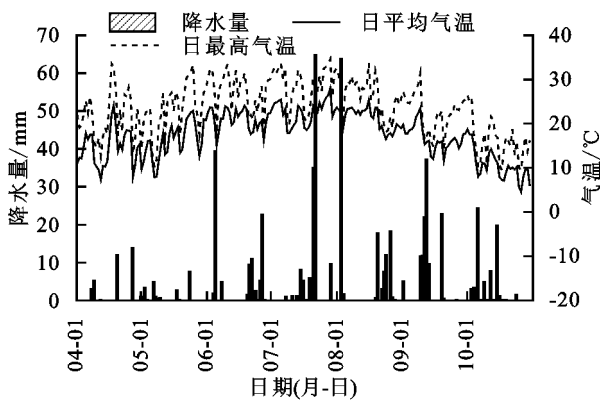


图 1 2019 年试验期间研究区气象资料

1.3 试验项目测定与计算方法

苹果生育期末使用环刀法测量 60 cm 深度土层容重,每 20 cm 为 1 层,共 3 层,每层取 3 个重复,称重后于恒温 105 °C 烘干,计算单位体积土壤重量,并取均值。使用 Guelph 2800K1 渗透仪测定 0—60 cm 土层土壤饱和和导水率,每 20 cm 为 1 层,共 3 层,每层取 3 个重复,取均值。土壤水分采用 Trime—TDR 长期监测,测量深度为 200 cm 土层,每 20 cm 土层测定 1 次,测定时段为 5 月初至 10 月底,测量频率为每月 1 次,每个处理在 120°方向上,布置 1 根 TDR 管,即 1 个处理布置 3 个监测点,共计 36 个土壤水分监测点。

生育期结束在施加改良剂的环状范围内,采用土钻法采集土壤样品,取样深度为 60 cm,每 20 cm 为 1 层,共分为 3 层土样,样品取出立即转入塑封袋密封,带回实验室,经过风干、研磨、筛分后,采用重铬酸钾外加热法测得各层土壤有机碳含量。土壤 pH 采用梅特勒 Five Easy Plus 28—Standard 测定。土壤全氮采用凯氏定氮法测定。土壤团聚体取样在施加改良剂的环状区域中心处,用直径为 10 cm、高度为 60

cm 的 PVC 管取原状土样,每个处理取 3 个重复,得到土壤团聚体样本,带回实验室后沿着土壤自然结构轻轻剥成小块,剔除植物根系和小石块等杂质,用干筛和湿筛法测定土壤非水稳性和水稳性团聚体。团聚体测定采用 TPF—100 团粒结构分析仪,筛上下摆动频率设置为 30 次/min,时间设定 10 min,得到不同粒径团聚体,转移到铝盒并与 105 °C 下烘干称重,得到各级粒径团聚体质量,取均值。土壤团聚体稳定性评价指标包含平均重量直径 MWD (mm)、几何平均直径 GMD (mm)、非水稳性团聚体含量 $DR_{0.25}$ (%) 和水稳性团聚体含量 $WR_{0.25}$ (%),计算公式为^[15]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

$$DR_{0.25} = \frac{M_{DR>0.25}}{M_D} \quad (3)$$

$$WR_{0.25} = \frac{M_{WR>0.25}}{M_W} \quad (4)$$

$$\bar{x}_i = (x_i + x_{i-1}) / 2 \quad (5)$$

式中: \bar{x}_i 为 i 粒级的平均直径(mm); x_i 为第 i 个筛子的孔径(mm), $x_0 = x_1, x_n = x_{n+1}$; w_i 为 i 粒级区间的团粒质量占团聚体总质量的百分比(%); $M_{DR>0.25}$ 和 $M_{WR>0.25}$ 分别为粒径 >0.25 mm 的干筛和湿筛团粒质量(g); M_D 和 M_W 分别为干筛和湿筛团聚体总质量(g)。

土壤分形维数 D 计算公式^[16]为:

$$\frac{M(\delta < \bar{x}_i)}{M} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: $M(\delta < \bar{x}_i)$ 表示粒径小于 \bar{x}_i 的团粒质量总和; \bar{x}_{\max} 为团粒最大粒级的平均粒径;通过对公式(6)两边取对数后,进行回归分析计算得分形维数 D 。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistic 22 统计软件对数据进行整理、统计分析;采用单因素(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行方差分析;利用 Origin Pro 2016、AutoCAD 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对果园土壤基本理化性质的影响

施加不同改良剂措施下,0—60 cm 土壤理化性质见表 1。与 CK 相比,施加 BC 和 PGBS 对土壤容重影响较小,PGBM 处理显著提高土壤容重,增加土壤紧实度。BC、PGBS 和 PGBM 显著提高土壤 pH,与 CK 相比分别提升 11.22%,3.71%,3.26%。与 CK 相比,

PGBS和 PGBM 处理 SOC 含量分别增加 27.3%, 18.04%, BC 处理 SOC 含量显著增加, 增幅为 206.91%。BC、PGBS 和 PGBM 处理显著提高土壤 TN, 分别提高 66.56%, 15.48%, 6.11%, BC 处理对于 TN 的提升作用最为显著, 分别高于 PGBS 和 PGBM 处理 44.23%, 56.97%。BC、PGBS 和 PGBM 处理显著提升土壤有机碳

密度, 与 CK 相比分别增加 204.41%, 28.68% 和 35.29%。施加 3 种不同改良剂对土壤全氮密度的提升作用十分显著, 提升作用表现为 BC>PGBS>PGBM。相较于 PGBS 和 PGBM, BC 处理对于土壤基础理化性质的提升作用最显著, PGBS 和 PGBM 处理对土壤基础理化性质的改善作用无显著差异。

表 1 0—60 cm 土层施加不同改良剂土壤基础理化性质

处理	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤 酸碱度	土壤有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤全氮含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤有机碳密度/ ($g \cdot m^{-2}$)	土壤全氮密度/ ($g \cdot m^{-2}$)
BC	1.15±0.01b	8.54±0.06a	12.08±0.33a	0.67±0.22a	8.28±0.28a	0.45±0.01a
PGBS	1.16±0.02b	7.97±0.02b	5.01±0.04b	0.46±0.05b	3.50±0.09b	0.32±0.01b
PGBM	1.32±0.01a	7.93±0.01b	4.65±0.06b	0.42±0.05c	3.68±0.08b	0.34±0.01b
CK	1.15±0.01b	7.68±0.06c	3.93±0.02c	0.40±0.01d	2.72±0.02c	0.28±0.01c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同改良剂对土壤团粒结构的影响

2.2.1 土壤团聚体含量

粒径 >0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体,具有良好的机械稳定性、水稳性以及养分蓄持性。通过干筛和湿筛法获得原状土中非水稳性和水稳性团聚体的质量。从图 2 可以看出,与 CK 相比,PGBS 和 PGBM 对 $DR_{0.25}$ 有所提升,但差异不显著,BC 处理 $DR_{0.25}$ 显著低于 CK,表明植物根际促生菌可以提高 0—60 cm 土层内团聚体数量,生物炭降低团聚体数量。本研究采用 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量变化来反映施加不同改良剂对土壤结构稳定性的影响,湿筛法得到的 $WR_{0.25}$ 结果中,最高含量为 21.30%,远低于干筛最低含量 72.58%,证明试验区土壤中团聚体主要为非水稳性团聚体。与 CK 相比,BC、PGBS 和 PGBM 都显著提升 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,分别提升 93.68%, 142.42%, 81.91%, PGBS 处理提升最多,说明施加生物炭和植物根际促生菌有利于土壤水稳性团聚体的形成。与 CK 相比,BC 处理降低非水稳性团聚体含量,降幅为 10.77%, PGBS 和 PGBM 的施加对于非水稳性团聚体含量提升较小,分别提升 5.50%, 3.08%。

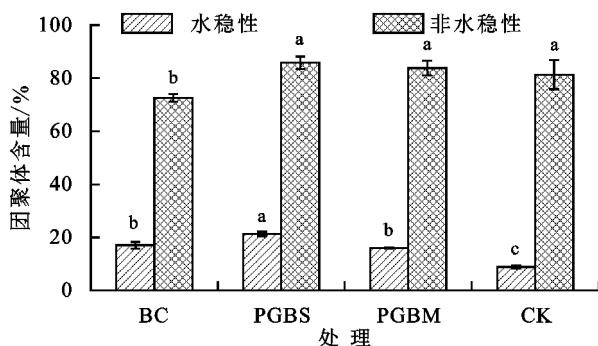


图 2 不同处理 >0.25 mm 水稳性和非水稳性团聚体质量比例

2.2.2 土壤团聚体结构稳定性

施加生物炭, 枯草芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌处理土壤水稳性团聚体 MWD、GMD 和分形维数 D 结果见表 2。各处理

MWD、GMD 和分形维数 D 存在显著差异。与 CK 相比,各处理均显著提高团聚体 MWD,大小顺序为 PGBS 处理>PGBM 处理>BC 处理>CK, BC 和 PGBM 处理团聚体 MWD 比 PGBS 处理显著降低 46.15% 和 21.15%, BC 处理 MWD 比 PGBM 处理低 31.70%。各处理团聚体 GMD 大小排序与 MWD 相同,不同处理之间 GMD 大小存在显著性差异,与 CK 相比,BC、PGBS 和 PGBM 的 GMD 分别提升 24.39%, 58.19% 和 43.21%。说明施加 BC、PGBS 和 PGBM 均提升团聚体的平均粒径团聚度,稳定性增强,其稳定性排序为 PGBS 处理>PGBM 处理>BC 处理。对照组 CK 分形维数 D 最大,表明其颗粒小稳定性最低,BC、PGBS 和 PGBM 土壤分形维数 D 均低于 CK,分别低 4.56%, 2.37% 和 4.49%, BC 和 PGBM 的分形维数 D 没有差异,但二者均显著低于 PGBS,说明与对照组相比,3 种处理土壤团粒结构更好、更稳定,与 MWD 和 GMD 结果不同,稳定性最高为生物炭和胶质芽孢杆菌处理,其次为枯草芽孢杆菌。

表 2 各处理 0—60 cm 土层水稳性团聚体稳定性

处理	MWD/mm	GMD/mm	D
BC	0.56±0.01c	0.357±0.002c	2.782±0.008c
PGBS	1.04±0.02a	0.454±0.009a	2.846±0.006b
PGBM	0.82±0.03b	0.411±0.006b	2.784±0.003c
CK	0.37±0.01d	0.287±0.002d	2.915±0.010a

2.3 不同时期各处理土壤水分状况

2.3.1 各处理饱和导水率

土壤饱和导水率是表征土壤入渗能力的重要指标之一。高水分入渗速率有助于减少降雨时地表径流量,降低径流对地表的冲刷,减轻土壤流失。施加生物炭和植物根际促生菌都能提升土壤饱和导水率,增加水分入渗量。由图 3 可知,在 0—20 cm 土层,不同处理对土壤饱和导水率的提升效果差异显著,相较于 CK,BC 处理对土壤饱和导水率提升效果最显著,为 166.92%,其次为 PGBM

提升 115.21%，施加 PGBS 对土壤饱和导水率无明显影响。在 20—60 cm 土层，各处理对与土壤饱和导水率的提升效果为 PGBM>BC>PGBS>CK。与 0—20 cm 土层相比，在 20—40, 40—60 cm 土层 BC 与 PGBM 处理对于饱和导水率的提升效果有所下降，且 2 个处理对于饱和导水率的提高程度无显著差异，但是与 CK 相比，BC 和 PGBM 处理均显著提升土壤饱和导水率。相较于 CK，PGBS 处理对土壤饱和导水率的提升在 20—40 cm 较为显著，在 40—60 cm 无显著差异。结果表明，施加生物炭和植物根际促生菌均可以提升土壤水分入渗速率。

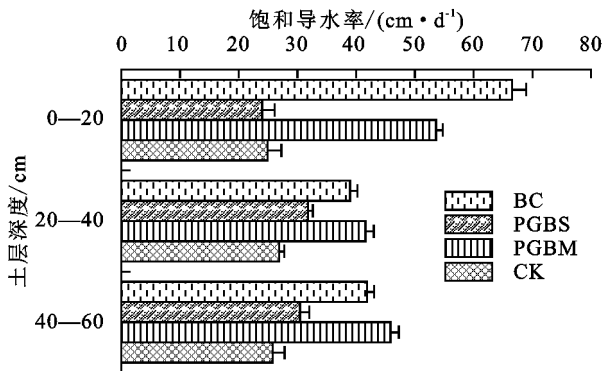


图 3 不同处理 0—60 cm 土壤饱和导水率

2.3.2 各处理垂直土壤水分变化 不同改良剂的施加会引起土壤结构的变化，进而影响土壤持水能力的变化。由图 4 可知，各处理苹果园土壤含水量在不同

时期、不同深度土层存在显著差异，在整个试验期植物根际促生菌 0—60 cm 土层土壤含水量始终高于生物炭处理。在 5 月坐果期施加生物炭、枯草芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌的 0—60 cm 土层，土壤含水量均高于对照组，最大差异在表层 0—20 cm 处，施加 PGBM 处理含水量最高，高于对照组 66.05%，BC、PGBS 高于对照组 50.57%，27.81%；在果实发育膨大期（6, 7, 8 月），6, 7 月各处理 0—60 cm 土层含水量差异逐渐缩小，0—20 cm 土层 BC 处理土壤含水量最高，20—60 cm 土层 PGBM 处理最高，PGBS 处理组土壤含水量较低，与 CK 差异较小。8 月表层 0—20 cm 土壤含水量最高处理组为对照 CK，在 20—60 cm 土层各处理土壤含水量表现为 PGBM>CK>PGBS>BC。进入果实成熟着色期（9, 10 月），降水增多，土壤含水量与夏季相比有所增加。9 月 0—60 cm 翻耕施加改良剂土层土壤含水量显著高于 CK，在 10 月取样前降水密集，土壤含水量进一步提升，在 0—20 cm 土层，枯草芽孢杆菌处理土壤含水量最高达到 21.95%，各处理 20—60 cm 土层土壤含水量差异较小。在施加处理 60—200 cm 土层，5—9 月 BC、PGBS 和 PGBM 处理土壤含水率大小均表现出稳定、一致的规律，为 PGBM>PGBS>BC，10 月 BC 处理组含水量有明显提升，含水率大小表现为 PGBM>BC>PGBS，CK 在整个试验期间含水率受降水影响变化波动大。

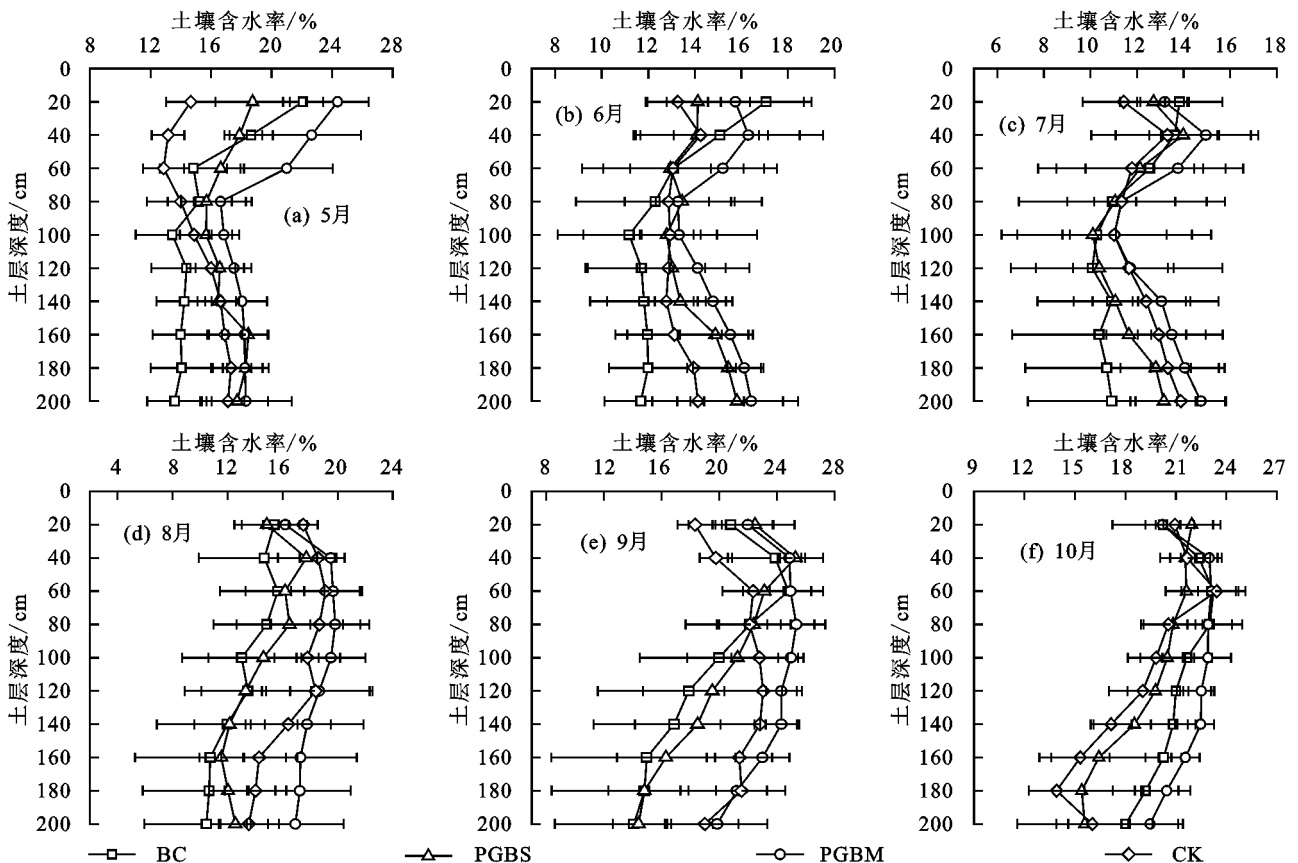


图 4 不同时期各处理土壤体积含水量变化

3 讨论

良好的土壤状况是植物可持续生长发育的关键前提。黄土丘陵区土壤结构差、贫瘠缺水,制约当地旱作经济林的发展。有学者^[17]研究发现,施加外源土壤改良剂可以通过改善土壤团粒结构分布,增加土壤有机质和养分含量,增强土壤持水性能等以改善作物生长的土壤状况。高温下制备的生物炭具有稳定的芳香化结构,显示出高度的化学稳定性和生物稳定性,本研究生物炭是 500 °C 高温制备产物,化学性质稳定,矿化极为缓慢,施加到土壤中明显增加土壤有机碳和全氮含量;植物根际促生菌的施加可以增加土壤酶活性,增加土壤细菌丰度,活化土壤养分,增加土壤肥力和有机碳含量。本研究结果也表明,无论是生物炭还是植物根际促生菌施加,土壤养分和有机碳含量都显著提高,表明施加外源物料对土壤养分和有机碳含量的提升有关键作用。

土壤稳定性大小与水稳性团聚体含量呈正相关关系,土壤稳定性随着水稳性团聚体含量的增高而提升。通过湿筛法获得的团聚体是水稳性团聚体,水稳性团聚体与土壤抗蚀性及土壤结构稳定性密切相关,稳定的土壤团聚体有利于保护其内部受团聚作用固持的有机碳库免受矿化分解^[18],因此水稳性团聚体更加重要。本研究结果表明,施加生物炭和植物根际促生菌均显著提高 0—60 cm 土层 $WR_{0.25}$ 和土壤的 MWD、GMD,并且不同处理的 MWD 和 GMD 结果一致,为枯草芽孢杆菌 > 胶质芽孢杆菌 > 生物炭,且各处理之间存在显著差异, $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 显著提高其原因主要包括:第一,生物炭自身蕴含较高的阳离子交换量和芳香族物质,生物炭处理土壤溶液 pH 显著提升表明团聚胶粒的表面羟基(—OH)增加,即阳离子交换量增加,土壤团粒的吸附性也进一步提升,所以生物炭施加进入土壤后可以有效促进土壤矿质颗粒与其聚合成团,进而土壤的稳定性也得到提高。Lin 等^[19]研究表明,这种凝聚作用源于生物炭表面芳香族物质所产生的“阳离子桥”。第二,植物根际促生菌的细胞外会产生一种亲水性胞外聚合物,这种聚合物具有一定的胶结能力,使团聚结构更加稳定,从而聚合吸附土壤颗粒^[12],增加土壤团聚体的含量。第三,生物炭和植物根际促生菌均提升土壤有机碳含量,土壤有机碳是形成土壤团聚体的主要胶结物质,其中存在许多长链的分子,对矿物颗粒具有很好的约束力,能够促进团聚体的形成并提升土壤水稳性团聚体的稳定性。李倩倩等^[14]研究结果表明,施加生物炭可以显著提升土壤 $DR_{0.25}$,与之相反,本研究 BC 处理 $DR_{0.25}$ 含量降低,是因为小颗粒状生物炭的施加增大 <0.25 mm 团聚体质量比例,且生物炭对土壤的改良

作用较为缓慢,其在分解过程中可能不会产生胶结物质去集聚 <0.25 mm 的微小团聚体颗粒^[20]。

本研究表明,用定量结构参数 MWD 和 GMD 可以较好地反映土壤结构状况的差异,但有一些学者^[21]认为,团聚体分布具有分形特征,定量参数分形维数 D 可以体现土壤团聚体粒径大小的影响,还可以反映土壤通透性和抗侵蚀性。分形维数与土壤水稳性团聚体含量有明显的对应关系,分形维数 D 越高,表征土壤水稳性团聚体含量越低,土壤结构越紧实。分形维数越低,表征土壤水稳性团聚体含量较高,土壤结构愈加松散、通透性良好。本研究中,施加生物炭和植物根际促生菌都显著降低土壤分形维数,说明施加这 2 类外源改良剂均可以提高土壤稳定性,其中生物炭处理土壤分形维数降低最多,即生物炭处理土壤稳定性最高,与结构稳定性参数 MWD 和 GMD 分析得到枯草芽孢杆菌处理稳定性最高的结果不一致,周虎等^[15]的研究结果也表明,水稳性团聚体 D 值变化同 GMD 和 MWD 趋势不一致。本研究虽未验证结构稳定性参数的优劣,但结合各处理间水稳性团聚体含量和土壤水分状况的差异认为,平均重量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 的结果更为可信。总之,生物炭和植物根际促生菌施加既可以提高团聚体的稳定性,又能提高土壤的通透性。

土壤的水分流动与蓄持取决于土壤孔隙的分布和连通性,在很大程度上受土壤粒径、结构特征和土壤有机质含量的限制。本研究表明,在施加改良剂的 0—60 cm 土层土壤水分的提升作用十分显著,与相关研究^[22]结果一致,生物炭施入土壤后,由于自身具有较大比表面积、多孔结构、亲水性、吸附力大等特点,通过改善土壤理化性质将更多水分留在土壤中。植物根际促生菌施加到土壤后,其生理活动分泌产生的酶、激素、维生素等会提升土壤的有机质含量^[23],进而对土壤团聚体吸附聚合过程和土壤孔隙结构等物理性状产生积极影响,增大土壤入渗能力,进而增加土壤持水贮水能力。本研究发现,在整个试验期间植物根际促生菌 0—60 cm 土层土壤含水量始终高于生物炭处理,到达生育期末生物炭处理组的含水量逐渐接近赶超植物根际促生菌处理,其原因可能是生物炭的改良作用较为缓慢;另外到果树生育末期该区降水增加,生物炭分解速率有所提升,对土壤结构的改良效果逐渐凸显出来。

生物炭和植物根际促生菌的施加对于土壤起到积极的作用,主要体现在有机质的提升促进土壤团聚结构等的改善,进而土壤水分蓄持能力增强,土壤表层水分的增加形成潮湿环境,有助于增强微生物活性,微生物的分解作用增加土壤表层有机质的腐殖化

程度,形成持久性的有机质,进一步增强团聚体的稳定性,最终形成一个良性的循环过程,保证土壤健康可持续发展。本研究中虽然生物炭和植物根际促生菌的施加可以改善土壤物理结构和水分状况,但其对于土壤中微生物活性和群落丰度影响以及对土壤的综合改良效应还需要进一步的研究。

4 结论

(1)与CK相比,施加生物炭和植物根际促生菌均能显著提高土壤有机碳、全氮含量及其密度,其中施加生物炭处理对有机碳和全氮密度提升最显著。

(2)通过对平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数 D 、 >0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)和团聚体稳定性参数分析表明,施加生物炭和植物根际促生菌处理均增加土壤团聚体含量,均对土壤结构稳定性有积极影响,且植物根际促生菌对土壤稳定性增效要优于生物炭处理。

(3)通过对土壤水分状况的研究分析发现,生物炭和植物根际促生菌均对0—60 cm 土层土壤饱和导水率和水分含量有显著的提升作用,且植物根际促生菌对土壤持水性能的提升较生物炭处理更加显著、更加灵敏迅速。

参考文献:

- [1] 王绍飞,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区盛果期苹果树土壤水分利用策略[J].林业科学,2018,54(10):31-38.
- [2] 贾如浩,杨建利,赵西宁,等.二元覆盖对苹果树低耗水生育期土壤水分的影响[J].应用生态学报,2019,30(12):4082-4090.
- [3] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):705-712.
- [4] Bavel C H M V. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J].Soil Science Society of America Journal, 1950,14(C):20-23.
- [5] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution[J].Soil Science Society of America Journal, 1956,20(2):151-153.
- [6] Giménez D, Karmon J L, Posadas A, et al. Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates[J].Soil and Tillage Research,2002,64(1/2):165-172.
- [7] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution. In: Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc., 2002:317-328.
- [8] 单瑞峰,宋俊瑶,邓若男,等.不同类型生物炭理化特性及其对土壤持水性的影响[J].水土保持通报,2017,37(5):63-68.
- [9] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- [10] Sandhu S S, Kumar S. Impact of three types of biochar on the hydrological properties of eroded and depositional landscape positions[J].Soil Science Society of America Journal,2017,81(4):878-888.
- [11] Akbar M, Aslam N, Khalil T, et al. Effects of seed priming with plant growth-promoting rhizobacteria on wheat yield and soil properties under contrasting soils[J].Journal of Plant Nutrition,2019,42(17):2080-2091.
- [12] Zheng W, Zeng S, Bais H, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) reduce evaporation and increase soil water retention[J].Water Resources Research,2018,54(5):3673-3687.
- [13] 房彬,李心清,赵斌,等.生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J].生态环境学报,2014,23(8):1292-1297.
- [14] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等.生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J].环境科学,2019,40(7):3388-3396.
- [15] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993(20):1896-1899.
- [17] 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.
- [18] Lal R, Kimble J M. Conservation tillage for carbon sequestration[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997,49(1/3):243-253.
- [19] Lin Y, Munroe P, Joseph S, et al. Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: An investigation using microscopy[J].Plant and Soil,2012,357(1/2):369-380.
- [20] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.
- [21] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: A review[J].Soil and Tillage Research,1995,36(1/2):1-20.
- [22] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J].Geoderma,2010,158(3/4):443-449.
- [23] Ul Hassan T, Bano A. The stimulatory effects of L-tryptophan and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on soil health and physiology of wheat[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2015,15(1):190-201.