

生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿根芽、干草产量和水分利用效率的影响

王小赞¹,王琦^{1*},周旭姣¹,赵武成¹,赵晓乐¹,张登奎¹,刘青林²,崔循臻³,李虹彩³

(1. 甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室;
3. 定西市水利科学研究所,甘肃 定西 744300)

摘要:【目的】探索半干旱区垄沟集雨种植紫花苜蓿根芽数量规律和紫花苜蓿高产栽培技术。【方法】采用随机区组设计,以平作为对照,研究了不同生物炭覆盖量[0×10^4 (土垄)、 3×10^4 (单倍生物炭垄)和 6×10^4 kg/hm²(双倍生物炭垄)]和不同垄宽(30、45和60 cm)对紫花苜蓿农田土壤水分、温度、紫花苜蓿根芽、分枝数、干草产量和水分利用效率的影响,处理为平作(FP)、垄宽30、45、60 cm的土垄(MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀)、垄宽30/45/60 cm的单倍生物炭垄(SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀)、垄宽30、45、60 cm双倍生物炭垄(DMSBA₃₀、DMSBA₄₅、DMSBA₆₀)。【结果】生物炭覆盖垄沟集雨种植提高垄上表层土壤温度和沟中土壤贮水量,增加紫花苜蓿根芽数(茎枝芽+根颈芽)、分枝数、干草产量和水分利用效率。随着垄宽的增加,土壤贮水量、紫花苜蓿根芽数和分枝数随之增加,紫花苜蓿实际干草产量和水分利用效率随之降低。紫花苜蓿茎枝芽数量是根颈芽数量的2.2~2.9倍。与平作相比,MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的土壤贮水量分别增加20.7、30.8、41.7、8.7、23.0、35.7、6.2、12.0和11.0 mm,根芽数分别增加了-0.4、0.4、2.0、1.2、0.7、4.1、0.4、3.0和4.6个/株,分枝数分别增加8、28、50、48、84、109、45、91和71个/m²,总干草产量分别增加3.34%、-0.52%、-0.70%、26.81%、17.11%、3.00%、18.28%、5.79%和-11.03%,水分利用效率分别增加-1.76、-0.04、2.67、5.77、4.26、2.99、4.66、1.62、0.10 kg/(hm²·mm)。【结论】垄宽30 cm的单倍生物炭垄具有较高紫花苜蓿根芽数量、紫花苜蓿产量和水分利用效率,是半干旱区种植紫花苜蓿的适宜栽培模式。

关键词:紫花苜蓿;垄沟集雨;生物炭;根芽;干草产量

中图分类号:S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)03-0001-13

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.03.001



我国黄土高原丘陵区属于典型雨养农业区,干旱和土壤贫瘠是限制该地区农牧业生产的主要因素^[1]。该区域年际潜在蒸发量(1 445 mm)远大于年平均降雨量(388 mm),天然降雨是黄土高原农牧业生产的主

要水源,大多数降雨为无效降雨(降水量<5 mm),无法被作物吸收利用,该地区降水量主要依靠少数高强度降雨或暴雨(降水量>15 mm),高强度降雨和暴雨易造成水土流失^[2-3]。黄土高原水土流失的主要形式是水蚀,该地区每年土壤侵蚀模数高达 1×10^4 kg/hm²,丘陵沟壑区每年土壤侵蚀模数高达 5×10^4 kg/hm²^[4-5]。水土流失容易引起土壤贫瘠、肥力层浅薄、透水性下降和保水力差,导致黄土高原地区水分损失、土壤养分流失、植被稀疏、土壤退化、沙化、荒漠化和生态环境恶化,加剧区域土壤质量退化和土地

收稿日期:2022-09-14;修回日期:2022-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(42061050和41661059)

作者简介:王小赞(1995-),男,甘肃山丹人,硕士研究生。

Email:1563291610@qq.com

*通信作者。E-mail:wangqigsau@gmail.com

生产力下降,威胁区域和周边地区农牧业可持续发展^[6]。为了提高降雨资源利用效率、控制水土流失和保持农牧业可持续发展,当地政府和农民已经发展和构建保护性耕作、覆盖种植和雨水收集等农业耕作措施。

垄沟集雨种植技术是1种在我国黄土高原丘陵区普遍应用的雨水收集农业耕作措施。在该耕作措施中,垄和沟沿等高线交替排列,垄上覆盖集雨材料(具有光滑、入渗速率低和吸光能力强等特点)作为集雨区和径流产生区,有利于径流产生、降雨径流叠加、种植区土壤水分增加和入渗深度加深,较深和较高土壤水分补偿干旱期作物水分亏缺和提高作物抗干旱胁迫能力^[7]。在垄沟集雨种植模式中,塑料地膜作为普遍覆盖材料,能增加表层土壤温度和提高降水利用效率等^[8],但长期塑料地膜覆盖产生大量塑料薄膜残留,阻塞土壤孔隙,破坏土壤结构,妨碍土壤养分和水分传输,对人类和动物健康产生威胁^[9]。闫实^[10]研究表明,我国半干旱和干旱区农田地膜残留导致作物减产10.5%~44.2%。近年来,生物可降解地膜和作物秸秆对半干旱区垄沟集雨覆盖种植带来新生机,然而,生物可降解地膜具有覆盖时间短、易破裂、成本高等缺点,作物秸秆易受气候、土壤、作物等限制,生物可降解地膜和作物秸秆推广应用受阻^[11-14]。因此,急需探寻垄沟集雨种植技术中具有易降解和能被土壤生物分解吸收特点的环保型覆盖材料,以期减少地膜污染和维护区域农业可持续发展提供支持。

生物炭是富碳生物材料(家畜粪便、农作物秸秆和其他有机物)在缺氧或无氧环境下高温热解的产物^[15]。将生物炭与湿土混合物撒施集雨垄表面,经过人工拍打、降雨、日晒、径流等形成生物炭-土壤结皮,生物炭-土壤结皮改变地表孔隙度、粗糙度和反光率,进而增加降雨入渗和减少土壤水分蒸发。张登奎等^[16]研究表明,生物炭覆盖垄沟集雨种植增加红苕草根系的土壤水分和提高垄上表层土壤温度,红苕草产量和水分利用效率分别提高6.5%~22.5%和4.4~9.7 kg/(hm²·mm)。生物炭-土壤结皮作为1种新型覆盖材料,对降雨入渗、蒸散、径流、作物生产等影响有待进一步研究。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)具有较高营养价值、

较强抗旱和抗病虫害等特点,其枝叶繁茂和根系较深,繁茂枝叶和密集株丛可以有效降低雨水对地表的击打,较深根系可以绑扎土壤细颗粒,形成土壤养分和水分运输通道,对土壤固结、防风固沙和减少水土流失具有关键作用,是我国半干旱黄土高原区种植面积较大的豆科牧草。紫花苜蓿茎枝芽为着生于地下残留老茎上的芽,根颈芽为着生于根颈部位的芽^[17],茎枝芽和根颈芽是紫花苜蓿1级分枝来源,紫花苜蓿繁殖方式主要依靠茎枝芽和根颈芽繁殖,茎枝芽和根颈芽数量和繁殖能力对紫花苜蓿返青、生长和生物量形成起关键作用,对紫花苜蓿抗寒、抗旱和越冬等起决定性作用^[18]。

本研究以紫花苜蓿为研究对象,采用生物炭覆盖垄沟集雨种植大田试验,研究不同垄宽和不同生物炭覆盖量对土壤水分、温度、紫花苜蓿茎枝芽、根颈芽、分枝数及干草产量等的影响,以期为我国黄土高原丘陵区推广生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2018年4—10月在甘肃省兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(N 35°33', E 104°35',海拔1 896.7 m)进行。该试验基地位于甘肃省定西市安定区西南方向2~3 km处,属于温带大陆性季风气候,年平均温度为6.7℃,年内最高温度和最低温度分别为34.3℃(8月)和-13.0℃(1月),年均日照时数为2 438 h,平均无霜期为150 d,年平均潜在蒸发量为1 445 mm,年均降水量为385 mm(1971—2017年),降水主要集中在夏末和秋初(5~9月),夏末和秋初降水量占全年降水量比例为80.0%。试验地地势平坦,土壤为黄绵土,凋萎系数为6.7%,田间持水量为25.6%,土壤深度0~100 cm平均容重为1.38 g/cm³,土壤pH值为7.9,表层土壤化学性质见表1。

1.2 试验设计

本试验以甘农3号紫花苜蓿为指示作物,采用2因素随机区组设计,共设10个处理(3种垄宽×3种生物炭覆盖量+1种平作),重复3次。3种垄宽分别为30、45和60 cm,3种生物炭覆盖量分别为0×10⁴(土壤

表 1 试验区土壤肥力状况

Table 1 Soil fertilities in the experimental plots

深度/cm	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
0~40	0.78	0.77	23.59	54.3	10.87	245	10.51

结皮)、 3×10^4 (单倍生物炭土壤结皮) 和 6×10^4 (双倍生物炭土壤结皮) kg/hm²。平作、土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的代表符号分别为 FP (flat planting)、MCS (ridges compacted with soil)、SMSBA (ridges compacted with soil mixed with single biochar application) 和 DMSBA (ridges compacted with soil mixed with double biochar application)。MCS₃₀ (SMSBA₃₀ 或 DMSBA₃₀)、MCS₄₅ (SMSBA₄₅ 或 DMSBA₄₅) 和 MCS₆₀ (SMSBA₆₀ 或 DMSBA₆₀) 的下标分别表示 30、45 和 60 cm 垄宽, 平作作为对照。垄形状呈拱形, 垄长 10 m, 垄高约 20 cm, 沟宽为 60 cm, 每 1 小区有 4 条垄和 3 条沟。种植试验设计见图 1, 试验处理、小区面积和垄覆盖材料见表 2。生物炭由浙江省生物炭工程技术研究中心提供。

1.3 种植管理

在 2017 年 3 月 28 日人工进行整地、耙地和划分小

区等工作。根据设计集雨垄尺寸, 对集雨垄放线, 人工铁锹堆积集雨垄基础形状, 用木板拍实基础集雨垄, 将原地湿土 (适宜土壤含水量为 14%~19%) 撒施于集雨垄表面, 当土壤含水量低于适宜土壤含水量时, 用喷雾器洒湿集雨垄表面土壤, 使集雨垄表面土壤含水量处于适宜土壤含水量, 用木板拍实集雨垄表面湿土, 经过降雨、径流和日晒等作用形成土壤结皮, 进而形成土垄。在基础集雨垄垄体修筑完成后, 生物炭与湿土按体积比 1:1 均匀混合, 为保证生物炭湿土混合物紧密贴合集雨垄表面, 用喷雾器洒湿集雨垄表面土壤, 使集雨垄表面土壤含水量处于适宜土壤含水量, 人工将生物炭与湿土混合物撒施在集雨垄表面, 用木板拍实集雨垄表面生物炭湿土混合物, 经过降雨、径流和日晒等作用形成生物炭—土壤结皮, 进而形成生物炭集雨垄。于 2017 年 4 月 4 日完成垄沟集雨种植试验布置。

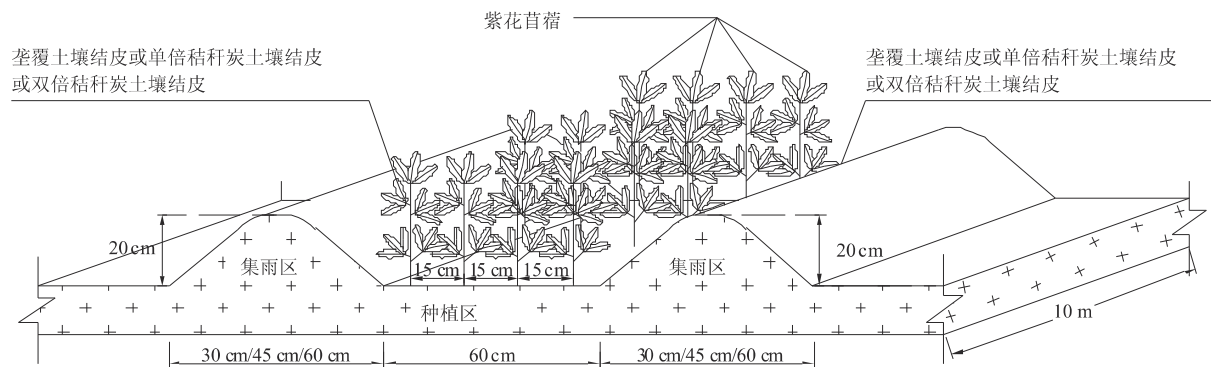


图 1 生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿示意图

Fig. 1 Schematic diagram with ridge-furrow rainwater harvesting using maize straw biochar-soil crust mulching for alfalfa production

在 2017 年 4 月 5 日, 根据当地紫花苜蓿种植经验, 条播播种紫花苜蓿, 播种时不施加基肥。垄沟集雨种植面积为 30~42 m², 根据沟面积计算播种量, 播种量为 22.5 kg/hm², 播种深度为 3~5 cm, 行距为 15 cm, 每条沟种植 4 行紫花苜蓿, 每 1 小区种植 12 行紫花苜蓿; 平作种植面积为 36 m² (10 m × 3.6 m = 36 m²), 播种密度和播种深度与垄沟集雨覆盖种植的相对播

量 (22.5 kg/hm²) 和播种深度 (3~5 cm) 相同, 每 1 小区种植 24 行紫花苜蓿。在整个紫花苜蓿生育期不施肥、灌溉、施加杀虫剂和除草剂, 采用人工除草和手工刈割紫花苜蓿。

在第 2 年紫花苜蓿返青前 (2018 年 3 月 28 日), 由于集雨垄破损, 人工修复生物炭—土壤结皮, 修复步骤与覆盖相似, 第 2 年紫花苜蓿管理方式与第 1 年紫

表2 生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿试验设计

Table 2 Experimental design with ridge-furrow rainwater harvesting using maize straw biochar-soil crust mulching for alfalfa production

处理	沟宽:垄宽 (cm:cm)	垄面积/m ²	沟面积/m ²	小区面积/m ²	生物炭覆盖量/ (kg·hm ⁻²)	垄覆盖材料
FP	/	/	/	36	/	/
MCS ₃₀	60:30	3.0	18	30		
MCS ₄₅	60:45	4.5	18	36	0 × 10 ⁴	土壤结皮
MCS ₆₀	60:60	6.0	18	42		
SMSBA ₃₀	60:30	3.0	18	30		
SMSBA ₄₅	60:45	4.5	18	36	3 × 10 ⁴	单倍生物炭土壤结皮
SMSBA ₆₀	60:60	6.0	18	42		
DMSBA ₃₀	60:30	3.0	18	30		
DMSBA ₄₅	60:45	4.5	18	36	6 × 10 ⁴	双倍生物炭土壤结皮
DMSBA ₆₀	60:60	6.0	18	42		

花苜蓿管理方式基本类似。

1.4 样品采集和测定

1.4.1 气温和土壤温度 中国气象局兰州干旱气象研究所的定西干旱气象与生态环境试验基地自动气象站提供气象数据。在第2年紫花苜蓿返青期(2018年4月8日)到第2茬刈割(7月12日)期间,采用曲管水银地温计测定各小区沟中和垄上表层土壤温度,测定深度分别为5、10、15、20和25 cm,测定间隔为5 d,测定时间分别为8:00 am、2:00 pm和6:00 pm,日平均表层土壤温度为当天3次测定表层土壤温度的平均值。

1.4.2 土壤水分、紫花苜蓿产量、分枝数和水分利用效率 在2年龄紫花苜蓿返青前1 d(2018年4月8日)、第1茬刈割后1 d(6月10日)和第2茬刈割后1 d(7月12日),采用烘干法(105 °C,10 h)测定土壤含水量,土壤含水量测定深度为140 cm,0~20 cm土层按10 cm分层,20~140 cm土层按20 cm分层。采集土样时,在每个小区种植区内(沟中)随机取3个样点,将3个样点的同层土样混合均匀后装入铝盒测定土壤含水量。土壤贮水量、蒸散量和水分利用效率计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^8 \theta_i \times BD_i \times H \times 10$$

$$ET = P + (W_1 - W_2)$$

$$WUE = \frac{FY}{ET}$$

式中:W为土壤贮水量(mm), θ 为土壤质量含水量(%),BD为土壤容量(g/cm³),H为土层深度(cm),10为系数。ET为试验期紫花苜蓿蒸散量,P为试验期试验区降水量,W₁为紫花苜蓿返青期土壤贮水量,W₂为紫花苜蓿第2茬刈割后土壤贮水量,WUE为紫花苜蓿水分利用效率,FY为紫花苜蓿自然晒干后全区实际干草产量(实际干草产量为全区干草产量除以小区总面积,在紫花苜蓿刈割后取样自然晒干至恒重,测得紫花苜蓿干草产量^[19])。

在紫花苜蓿盛花期(2018年6月10日和7月12日),手工刈割紫花苜蓿,留茬高度为3~5 cm,刈割后紫花苜蓿铺晒在集雨垄上,自然晒干后测定干草产量。紫花苜蓿实际干草产量为小区干草产量除以小区总面积,紫花苜蓿净干草产量为小区干草产量除以小区种植面积,平作实际干草产量与净干草产量相等。在紫花苜蓿刈割前,每1小区随机选取面积为0.36 m²(长60 cm×宽60 cm)样方,齐地刈割紫花苜蓿,测定样方内紫花苜蓿枝条数,测定结果即为各处理样方内一级分枝数。单位面积分枝数根据样方内一级分枝数除以样方面积获得。

1.4.3 紫花苜蓿地下芽数量测定 在2年龄紫花苜蓿返青期(2018年4月8日)、第1茬刈割后10 d(6月20日)和第2茬刈割后10 d(7月22日),测定紫花苜蓿地下芽数量,各小区随机选取10株正常生长紫花苜蓿定株观测,采用挖掘法挖取紫花苜蓿主根系半径20

cm 和深 10 cm 土壤,人工统计茎枝芽(stem buds)和根颈芽(root neck buds)的数量。

1.5 统计分析

采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和显著性检验,方差分析多重比较用 Duncan 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿生育期气温和降雨量

随紫花苜蓿生育期延伸,气温呈波动上升趋势,降雨量随气温增加而增加(图 2)。在试验期间,最高气温为 21.90 °C,最低气温为 1.70 °C,平均气温为

15.36 °C。试验期总降水量为 281.6 mm, ≤ 5 mm、5~10 mm、10~20 mm 和 ≥ 20 mm 的降雨次数分别为 19、13、5 和 3 次,降水量分别为 21.7、89.7、81.6 和 88.6 mm;无效降雨(< 5 mm)次数(19 次)占试验期总降雨次数(40 次)的比例为 47.5%,无效降水量占试验期总降雨量的比例为 7.71%;有效降雨(> 5 mm)次数(21 次)占试验期总降水次数(40 次)的比例为 52.5%,有效降水量占试验期总降雨量的比例为 92.29%。试验期多数降雨为无效降雨,较难被作物吸收;少数降雨为有效降雨,有效降雨缓解作物干旱胁迫。

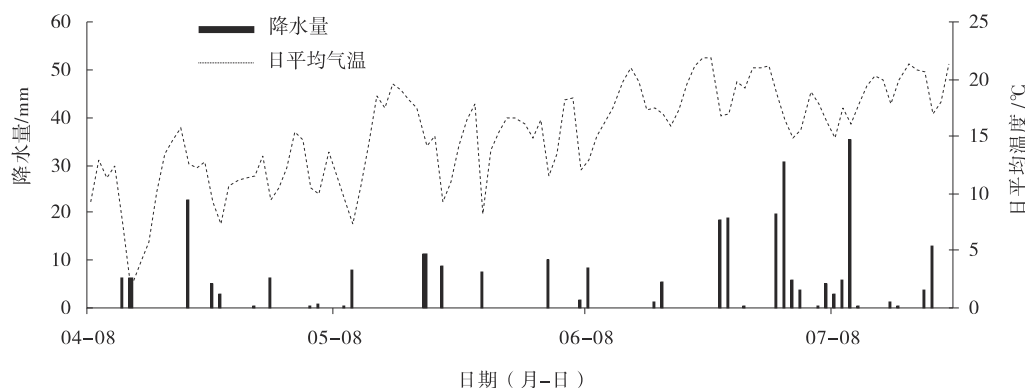


图 2 紫花苜蓿生育期降雨量和气温变化

Fig. 2 Temporal variation of precipitation and air temperature during alfalfa growth season

2.2 生物炭施加量、垄宽及其互作效应分析

由表 3 双因素方差分析结果显示,生物炭施加量对紫花苜蓿土壤贮水量、根芽、分枝数、实际干草产量和净干草产量影响极显著;垄宽对紫花苜蓿土壤贮水量影响不显著,对紫花苜蓿根芽、分枝数、实际干草产量和净干草产量影响极显著;生物炭施加量与垄宽的交互作用对紫花苜蓿土壤贮水量和根芽影响不显著,对紫花苜蓿分枝数、实际干草产量和净干草产量影响极显著。生物炭施加量和垄宽均对紫花苜蓿根芽、分枝数、实际干草产量和净干草产量影响显著,生物炭

施加量对紫花苜蓿土壤贮水量影响较垄宽显著,土壤贮水量影响着紫花苜蓿根芽、分枝数、干草产量和水分利用效率等,相较于垄宽,生物炭施加量具有主效应影响。

2.3 生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿对表层土壤温度的影响

各处理垄上和沟中表层土壤温度随气温变化而变化,垄上表层土壤温度明显高于沟中表层土壤温度,不同处理之间垄上表层土壤温度差异明显,沟中表层土壤温度之间差异不明显,垄上和沟中表层土壤

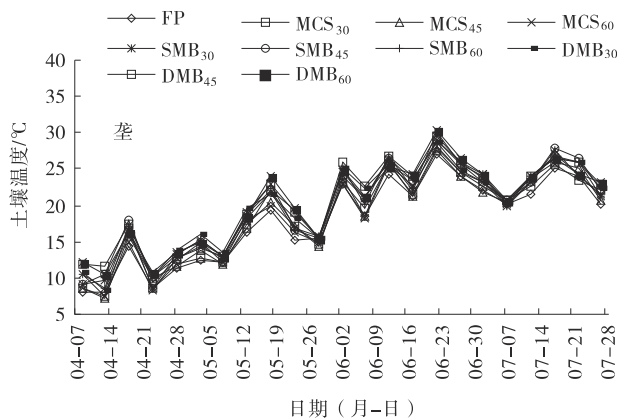
表 3 生物炭施加量、垄宽及其互作对垄沟集雨种植紫花苜蓿土壤贮水量、根芽、分枝数、实际干草产量和净干草产量影响的方差分析

Table 3 Results of two-way ANOVA characteristics by biochar application rate, ridge widths and their interactors on soil water storage, root buds, branch number, actual fodder yield and net fodder yield of alfalfa

因素	贮水量	根芽	分枝数	净干草产量	实际干草产量
生物炭施加量	10.564**	9.943**	150.275**	30.078**	30.417**
垄宽	6.900	24.663**	10.235**	38.145**	45.639**
生物炭×垄宽	1.068	2.163	12.802**	7.664**	7.685**

注:**表示显著水平为 $P < 0.01$ 。下同

温度随集雨垄宽度增加而增加(图3)。FP、MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的垄上平均表层土壤温度分别为17.93、18.62、18.55、18.77、19.49、19.64、19.83、19.85、20.25和20.17℃,沟中平均表层土壤温度分别为17.93、17.20、16.72、17.16、17.52、17.35、17.45、17.37、17.34和17.70℃。各处理垄上平均表层土壤温度(19.46℃)明显高于沟中平均表层土壤温度(17.31℃)。与平作相比,MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的垄



上层土壤温度分别增加0.69、0.63、0.84、1.57、1.71、1.90、1.92、2.32和2.24℃,沟中表层土壤温度分别降低0.73、1.21、0.77、0.41、0.58、0.48、0.56、0.59和0.23℃。在相同生物炭覆盖量下,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿垄上层土壤温度平均值分别为18.65、19.65和20.09℃,沟中平均表层土壤温度分别为17.03、17.44和17.47℃。与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的垄上平均表层土壤温度分别增加0.72、1.73和2.16℃,沟中平均表层土壤温度分别降低0.90、0.49和0.46℃。

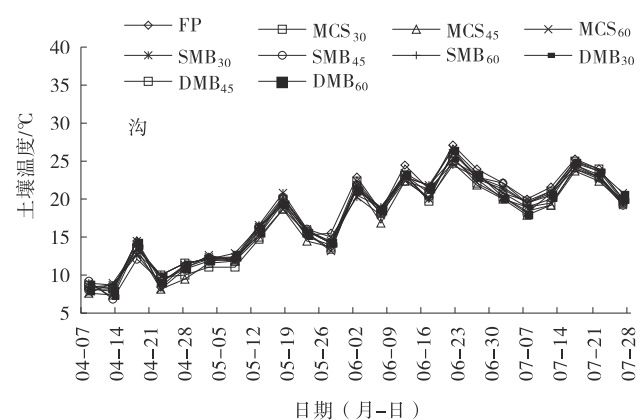


图3 垄上和沟中表层土壤温度变化特征

Fig. 3 Dynamics of soil temperature at ridge tops and at furrow bottoms

2.4 生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿对土壤贮水量的影响

土壤贮水量是土壤水分保持的重要参数,是影响作物生长的主要因素。各处理的紫花苜蓿0~140 cm土壤贮水量呈先减少后增加趋势(图4)。对各处理在试验期的紫花苜蓿土壤贮水量求平均值,得到FP、MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的土壤贮水量分别为202.4、223.1、233.2、244.1、211.1、225.4、238.1、208.6、214.4和213.0 mm,土壤贮水量随集雨垄宽度增加而增加,与平作相比,MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的土壤贮水量分别增加20.7、30.8、41.7、8.7、23.0、35.7、6.2、12.0和11.0 mm。在相同生物炭覆盖量下,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的土壤贮水量平均值分别为

233.5、224.9、212.0 mm,与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的土壤贮水量分别增加31.07、22.5和9.6 mm。

2.5 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿根芽数量的影响

在试验期间,各处理紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽数排列顺序为第2茬刈割>第1茬刈割>返青期,随紫花苜蓿生育期延伸,不同处理之间的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽数量差异变大(表4)。对各处理试验期的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽数量求平均值,各处理紫花苜蓿茎枝芽数量高于根颈芽数量,FP、MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的紫花苜蓿茎枝芽数分别是根颈芽数的2.2、2.4、2.4、2.2、2.9、2.6、2.7、2.9、2.6和2.8倍;在相同生物炭覆盖量下,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿茎枝芽数分别是根颈芽

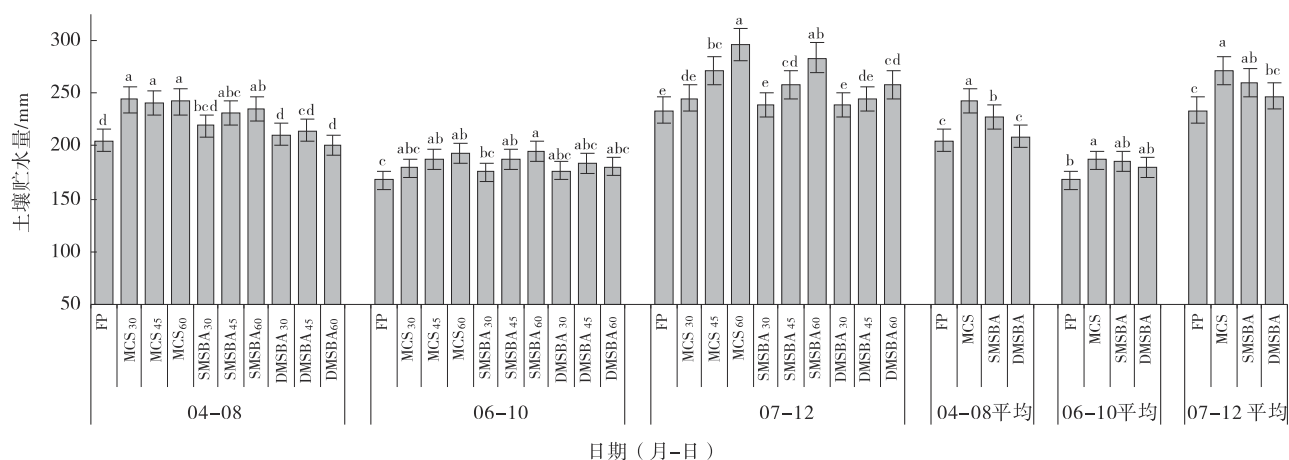


图 4 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿生育期土壤贮水量的影响

Fig. 4 Effect of ridge-furrow rainwater harvesting with maize straw biochar-soil crust mulching on soil water storage during alfalfa growth season

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

数的 2.4、2.7 和 2.7 倍;就紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数而言,与平作相比,MCS₃₀的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数减少 0.4/株, MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅ 和 DMSBA₆₀的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数分别增加

0.4、2.0、1.2、0.7、4.1、0.4、3.0 和 4.6 个/株,紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数随集雨垄宽度增加而增加。与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数分别增加 0.7、2.0 和 2.7 个/株。

表 4 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿根芽数量的影响

Table 4 Effect of ridge-furrow rainwater harvesting with maize straw biochar-soil crust mulching on the root buds of alfalfa

处理	返青期		第 1 茬刈割		第 2 茬刈割		平均值		总数
	茎枝芽	根颈芽	茎枝芽	根颈芽	茎枝芽	根颈芽	茎枝芽	根颈芽	
FP	11.0±1.1 ^a	4.3±0.4 ^a	14.0±1.4 ^b	6.7±0.7 ^{ab}	22.3±2.1 ^d	10.0±0.9 ^{ab}	15.8±1.5 ^d	7.0±0.7 ^a	22.8±2.2 ^d
MCS ₃₀	11.0±1.2 ^a	4.3±0.4 ^a	14.0±1.4 ^b	4.3±0.5 ^d	22.7±2.1 ^c	10.7±1.0 ^{ab}	15.9±1.6 ^{cd}	6.5±0.6 ^a	22.4±2.2 ^d
MCS ₄₅	11.3±1.2 ^a	5.4±0.6 ^a	15.3±1.7 ^{ab}	5.0±0.5 ^{bcd}	22.7±2.3 ^{cd}	10.0±1.0 ^{ab}	16.4±1.8 ^{cd}	6.8±0.7 ^a	23.2±2.5 ^{cd}
MCS ₆₀	11.7±1.1 ^a	5.7±0.6 ^a	15.7±1.5 ^{ab}	5.7±0.7 ^{abcd}	24.0±2.3 ^{bcd}	11.7±1.1 ^a	17.1±1.6 ^{bcd}	7.7±0.8 ^a	24.8±2.4 ^{bc}
SMSBA ₃₀	12.0±1.1 ^a	4.0±0.5 ^a	15.3±1.7 ^{ab}	5.3±0.5 ^{bcd}	26.0±2.8 ^{abc}	9.3±1.0 ^b	17.8±1.9 ^{bc}	6.2±0.7 ^a	24.0±2.6 ^{cd}
SMSBA ₄₅	12.0±1.3 ^a	4.0±0.4 ^a	14.0±1.5 ^b	4.7±0.4 ^{cd}	25.0±2.6 ^{bcd}	10.7±1.1 ^{ab}	17.0±1.8 ^{bcd}	6.5±0.6 ^a	23.5±2.4 ^{cd}
SMSBA ₆₀	13.3±1.3 ^a	5.3±0.5 ^a	18.3±2.0 ^a	6.0±0.7 ^{abcd}	27.0±2.7 ^{ab}	10.7±1.0 ^{ab}	19.6±2.0 ^a	7.3±0.7 ^a	26.9±2.7 ^a
DMSBA ₃₀	12.3±1.2 ^a	4.0±0.4 ^a	15.0±1.5 ^{ab}	5.0±0.5 ^{bcd}	24.3±2.3 ^{bcd}	9.0±1.1 ^b	17.2±1.7 ^{bcd}	6.0±0.7 ^a	23.2±2.4 ^{cd}
DMSBA ₄₅	12.3±1.1 ^a	5.3±0.6 ^a	17.3±1.6 ^b	7.3±0.7 ^a	26.0±2.6 ^{abc}	9.0±0.9 ^b	18.6±1.8 ^{ab}	7.2±0.7 ^a	25.8±2.5 ^{ab}
DMSBA ₆₀	13.3±1.5 ^a	4.0±0.4 ^a	18.3±1.8 ^a	6.3±0.6 ^{abc}	28.7±2.9 ^a	11.7±1.2 ^a	20.1±2.1 ^a	7.3±0.7 ^a	27.4±2.8 ^a
平均值									
FP	11.0±1.1 ^a	4.3±0.4 ^a	14.0±1.4 ^b	6.7±0.7 ^a	22.3±2.1 ^b	10.0±0.9 ^a	15.8±1.5 ^b	7.0±0.7 ^a	22.8±2.2 ^b
MCS	11.3±1.1 ^a	5.1±0.5 ^a	15.0±1.5 ^{ab}	5.0±0.6 ^a	23.1±2.3 ^b	10.8±1.0 ^a	16.5±1.7 ^b	7.0±0.7 ^a	23.5±2.4 ^{ab}
SMSBA	12.4±1.2 ^a	4.4±0.5 ^a	15.9±1.7 ^{ab}	5.3±0.6 ^a	26.0±2.7 ^a	10.2±1.0 ^a	18.1±1.9 ^a	6.7±0.7 ^a	24.8±2.6 ^{ab}
DMSBA	12.7±1.3 ^a	4.4±0.5 ^a	16.9±1.6 ^a	6.2±0.6 ^a	26.3±2.6 ^a	9.9±1.1 ^a	18.6±1.9 ^a	6.9±0.7 ^a	25.5±2.6 ^a

2.6 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿分枝数的影响

各处理的紫花苜蓿分枝数排列顺序为第 2 茬刈割

> 第 1 茬刈割 (图 5)。对各处理在试验期的紫花苜蓿分枝数求平均值,得到 FP、MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅

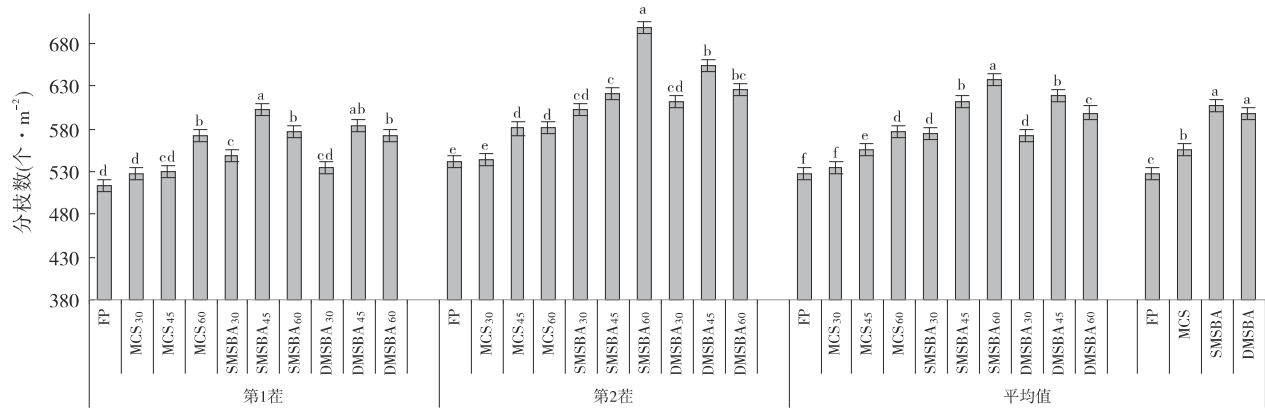


图5 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿分枝数的影响

Fig. 5 Effect of ridge-furrow rainwater harvesting with maize straw biochar-soil crust mulching on branch number of alfalfa during alfalfa growth season

和DMSBA₆₀的分枝数分别为528、535、555、557、575、611、637、573、619和599个/m²,紫花苜蓿分枝数随垄宽的增加而增加。与平作相比,MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的分枝数分别增加8、28、50、48、84、109、45、91和71个/m²。在相同生物炭覆盖量下,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的土壤贮水量平均值分别为556、608、597个/m²,与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的土壤贮水量分别增加28、80和69个/m²。

2.7 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响

各处理的第1茬紫花苜蓿实际干草产量和净干草产量均高于第2茬(表5)。就紫花苜蓿总干草产量而言,土垄紫花苜蓿实际干草产量随集雨垄宽度增加而降低,净干草产量和水分利用效率随集雨垄宽度增加而增加;单倍生物炭垄的紫花苜蓿实际干草产量和水分利用效率随集雨垄宽度增加而降低,净干草产量随集雨垄宽度增加;双倍生物炭垄的紫花苜蓿实际干草产量和水分利用效率随集雨垄宽度增加而降低,净干草产量随集雨垄宽度增加呈先增加后降低的趋势;与平作相比,MCS₃₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀和DMSBA₄₅的总实际干草产量分别增加3.34%、26.81%、17.11%、3.00%、18.28%和5.79%,MCS₄₅、MCS₆₀和DMSBA₆₀的总实际干草产量降低0.52%、0.70%和11.03%,MCS₃₀、MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、

DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的总净干草产量分别增加72%、99%、132%、111%、134%、140%、97%、112%和108%,MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的水分利用效率增加2.67、5.77、4.26、2.99、4.66、1.62、0.10 kg/(hm²·mm),MCS₃₀和MCS₄₅的水分利用效率分别降低1.76和0.04 kg/(hm²·mm)。在相同生物炭覆盖量下,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿干草产量和水分利用效率平均值,与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿实际干草产量分别增加0.71%、15.64%和4.35%,净干草产量分别增加101%、129%和105%,水分利用效率分别增加0.29、4.34和2.13 kg/(hm²·mm)。

2.8 紫花苜蓿根芽总数、分枝数和干草产量的相关性

对紫花苜蓿根芽总数(茎枝芽+根颈芽)、分枝数、净干草产量和干草产量进行相关性分析,分析结果如表5所示。根芽总数与分枝数相关性为极显著相关,分枝数和净干草产量极显著相关,根芽总数与净干草产量相关性不显著,与实际干草产量成负相关,分枝数与实际干草产量相关性不显著。实际干草产量是小区干草产量除以小区总面积,由于小区面积有无种植区(集雨垄),无种植区降低小区实际干草产量,与根芽总数和分枝数变化规律不一致,故根芽总数和分枝数与实际干草产量相关性不显著,甚至为负相关。

表 5 生物炭覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响

Table 5 Effect of ridge-furrow rainwater harvesting with maize straw biochar-soil crust mulching on alfalfa forage yield and WUE during alfalfa growth season

处理	第 1 茬 (kg·hm ⁻²)		第 2 茬/ (kg·hm ⁻²)		总产量/ (kg·hm ⁻²)		增加量/%		WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	增加量/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
	AFY	NFY	AFY	NFY	AFY	NFY	AFY	NFY		
FP	3 111 ^d	3 111 ^g	3 426 ^{ab}	3 426 ^g	6 537 ^c	6 537 ^d	0	0	25.84 ^{ef}	0
MCS ₃₀	3 521 ^{cd}	5 869 ^f	3 234 ^{ab}	5 390 ^f	6 755 ^c	11 259 ^c	3.34	72	24.09 ^f	-1.76
MCS ₄₅	3 334 ^{cd}	6 668 ^e	3 169 ^{ab}	6 338 ^{bc}	6 503 ^c	13 006 ^b	-0.52	99	25.81 ^{ef}	-0.04
MCS ₆₀	3 518 ^{cd}	8 210 ^{ab}	2 973 ^{bc}	6 937 ^{ab}	6 492 ^c	15 147 ^a	-0.70	132	28.52 ^{cd}	2.67
SMSBA ₃₀	4 706 ^a	7 843 ^{bc}	3 584 ^a	5 973 ^{cde}	8 289 ^a	13 816 ^b	26.81	111	31.61 ^a	5.77
SMSBA ₄₅	4 220 ^b	8 440 ^{ab}	3 435 ^{ab}	6 871 ^{ab}	7 656 ^b	15 311 ^a	17.11	134	30.10 ^{abc}	4.26
SMSBA ₆₀	3 635 ^c	8 481 ^a	3 099 ^{abc}	7 230 ^a	6 733 ^c	15 711 ^a	3.00	140	28.84 ^{bcd}	2.99
DMSBA ₃₀	4 310 ^{ab}	7 183 ^{de}	3 422 ^{ab}	5 703 ^{de}	7 732 ^b	12 886 ^b	18.28	97	30.50 ^{ab}	4.66
DMSBA ₄₅	3 660 ^c	7 320 ^{cd}	3 256 ^{ab}	6 512 ^{bc}	6 916 ^c	13 831 ^b	5.79	112	27.47 ^{de}	1.62
DMSBA ₆₀	3 141 ^d	7 329 ^{cd}	2 675 ^c	6 242 ^{cd}	5 816 ^d	13 571 ^b	-11.03	108	25.94 ^{ef}	0.10
平均值										
FP	3 111 ^b	3 111 ^c	3 426 ^a	3 426 ^b	6 537 ^b	6 537 ^c	0	0	25.84 ^b	0
MCS	3 458 ^b	6 916 ^b	3 125 ^a	6 222 ^a	6 583 ^b	13 137 ^b	0.71	101	26.14 ^b	0.29
SMSBA	4 187 ^a	8 255 ^a	3 373 ^a	6 691 ^a	7 559 ^a	14 946 ^a	15.64	129	30.19 ^a	4.34
DMSBA	3 704 ^{ab}	7 277 ^b	3 118 ^a	6 152 ^a	6 821 ^{ab}	13 430 ^b	4.35	105	27.97 ^{ab}	2.13

注:AFY:实际干旱量,NFY:净干草量

表 6 紫花苜蓿根芽总数、分枝数和干草产量的相关性

Table 5 Correlation between total number of roots buds, branch number and forage yield of alfalfa

	根芽总数	分枝数	净干草产量	实际干草产量
根芽总数	1			
分枝数	0.775 ^{**}	1		
净干草产量	0.524	0.786 ^{**}	1	
实际干草产量	-0.404	0.073	0.193	1

注:**表示不同处理间差异极显著($P < 0.01$)。

3 讨论

垄沟集雨种植模式作为 1 种高效节水农业措施,被广泛应用于我国干旱和半干旱地区农牧业生产,尤其在我国半干旱黄土高原丘陵区^[20]。在垄沟集雨种植模式中,垄覆盖材料具有粗糙度低、截流能力弱和吸热能力强等特点,能增加垄表面径流、调节沟中土壤水热状况和促进作物生长和发育,集雨垄垄体越宽,沟中土壤水热状况改善越明显^[21]。土壤温度影响作物种子发芽和产量形成,主要受太阳辐射、土壤热通量、土壤热学性质、地表覆盖、地形、海拔等影响^[22]。

当土壤温度低于作物生长适宜温度时,低温胁迫使细胞壁膜分离、代谢紊乱、作物根系分蘖受阻,降低微生物活性和作物光合作用,造成作物生育期缩短、减产和品质下降^[23];当土壤温度高于作物生长适宜温度时,高温胁迫引起细胞膜破坏、蛋白质变性、细胞脱水等,降低植物叶绿素含量、作物光合速率、水分利用率、抗病虫能力、产量和品质等^[24]。研究表明,在试验期间,生物炭覆盖垄沟集雨种植提高垄上表层土壤温度,而对沟中表层土壤温度改善不明显,垄上表层土壤温度随集雨垄宽度增加而增加。土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的垄上表层土壤温度分别增加

0.72、1.73和2.16℃,沟中平均表层土壤温度分别降低0.90、0.49和0.46℃。尚杰等^[25]研究表明,与不施加生物炭相比,土壤中施加生物炭可以缓冲土壤温度变化,增加土壤的保温能力。在生物炭覆盖垄沟集雨种植中,生物炭—土壤结皮增加土壤中有机碳含量,降低土壤反射率,土壤反射率随土壤有机碳含量增加而降低,土壤吸收太阳辐射量随有机碳含量增加而增加,双倍生物炭覆盖垄沟集雨种植增温效果高于单倍生物炭覆盖垄沟集雨种植,这与尚杰等研究结果一致。马效松等^[26]研究表明,施加生物炭能够有效改变土壤结构,增大土壤总孔隙度,提高机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量,降低土壤容重,提高土壤持水能力,降低表层土壤温度波动性,土壤导热率和热扩散率随生物炭含量增加而降低。

土壤湿度是表示土壤水分供应状况的重要指标,当土壤湿度低于适宜含水量时,土壤干旱胁迫降低作物光合作用和地上物质积累;当土壤湿度高于适宜含水量时,水涝胁迫降低土壤通气性,增加无氧呼吸和土壤有害物质积累,降低土壤微生物活性和作物根系活力,从而影响作物地上部分正常生长和发育^[27-28]。Fu等^[29]研究表明,生物炭覆盖改变土壤团聚体结构和土壤持水力,与不施加生物炭相比,生物炭覆盖提高植物可利用水 $0.0289\sim 0.1129\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。本研究中,土垄和生物炭垄增加沟中土壤贮水量,土壤贮水量随集雨垄宽度增加而增加,与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的土壤贮水量分别增加31.07、22.5和9.6 mm。Hafiz等^[30]表明,生物炭可以增加土壤孔隙度、降低土壤容重和改善土壤结构,具有土壤改良剂的作用,Fu等^[29]研究表明,在冻土中施加生物炭可以显著提高土壤孔隙度和增加直径大于0.25 mm的土壤团聚体数量。生物炭具有较高比表面积和较大孔隙度等特点,生物炭与湿土混合物撒施集雨垄表面,经过人为和自然因素形成生物炭—土壤结皮,与土壤结皮相比,生物炭—土壤结皮具有较低土壤容重和较高土壤孔隙度,生物炭—土壤结皮提高降雨入渗速率,较高降雨入渗速率降低集雨垄径流系数和径流量,垄较低径流量使得沟中汇集降水较少,水分在沟中入渗较浅,沟中土壤贮水量较低,这与上述研究结果一致。

根芽是植物繁殖、植被建植、植被恢复、植物群落结构维持等的基础,对维护种群稳定、改善群落结构和提高草地生产力等具有重要作用。在草地生态系统中,根芽数量及构成在一定程度上反映草地群落稳定性、演替规律和生产力^[31]。王俊杰等^[17]研究表明,茎枝芽、根颈芽和根孽芽共同组成黄花苜蓿芽库,茎枝芽、根颈芽和根孽芽占黄花苜蓿地下芽总数的比例分别为62.86%、36.78%和0.35%。本研究中,紫花苜蓿茎枝芽数是根颈芽数的2.2~2.9倍,茎枝芽数和根颈芽数占根芽总数的比例分别为71.74%和28.26%,就紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数而言,与平作相比,MCS₄₅、MCS₆₀、SMSBA₃₀、SMSBA₄₅、SMSBA₆₀、DMSBA₃₀、DMSBA₄₅和DMSBA₆₀的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数分别增加0.4、2.0、1.2、0.7、4.1、0.4、3.0和4.6个/株,MCS₃₀的紫花苜蓿茎枝芽和根颈芽总数减少0.4个/株,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的紫花苜蓿地下芽总数分别增加0.7、2.0和2.7个/株。

生物炭具有较高含碳量、较大比表面积、较多孔隙、稳定理化性质等特性,土壤施加生物炭能增加土壤肥力和持肥力,较强吸附力能抑制土壤营养元素淋失,从而促进了植物生长和增加作物产量^[32]。在生物炭覆盖垄沟集雨种植中,生物炭—土壤结皮形成于集雨垄表面,通过降雨溅蚀和径流侵蚀等作用,生物炭—土壤结皮等营养物质沿垄面流入沟中,改变沟中土壤理化性质,有利于紫花苜蓿地下芽生长、发育和产量的形成。方强恩等^[33]研究表明,紫花苜蓿根颈芽是再生枝主要来源,根颈芽在出土前完成营养器官生长,根颈芽出土后迅速过渡到开花期,对紫花苜蓿干草产量形成起关键作用。紫花苜蓿地下芽发育成分枝,进而影响地上生物量的形成和水分利用效率,本研究结果表明,紫花苜蓿根芽数与紫花苜蓿分枝数相关性极显著,紫花苜蓿分枝数与紫花苜蓿净干草产量相关性极显著。紫花苜蓿根芽随集雨垄宽度和生物炭施加量增加而增加,紫花苜蓿分枝数随集雨垄宽度增加而增加,随生物炭覆盖量增加而降低,紫花苜蓿净干草产量随集雨垄宽度增加而增加,随生物炭施加量增加而降低,实际干草产量随集雨垄宽度和生物炭施加量增加而降低。在垄沟集雨种植中,产量受土壤

水分、温度、营养物质、根芽数量和分枝数等影响,与单倍生物炭垄相比,双倍生物炭覆盖垄沟集雨种植施加较高生物炭,较高生物炭施加量增加营养物质含量,尤其土壤有机质含量,但降低径流量和土壤贮水量,从而引起紫花苜蓿分枝数和产量降低,进一步验证土壤水分是限制半干旱区作物生产关键因素。垄沟集雨种植模式作为一种有效调温蓄水农业措施,能明显改善土壤水分条件,沟中聚集径流量随集雨垄宽度增加而增加,有效种植面积随集雨垄宽度增加而减小,有效种植面积减少引起减产效应,当集雨垄集雨增产效果无法补偿集雨垄面积引起低产效果,生物炭覆盖垄沟集雨种植紫花苜蓿实际干草产量随集雨垄宽度增加而降低。本研究结果表明,除MCS₃₀和MCS₄₅处理外,其他处理的水分利用效率均高于平作。与平作相比,土垄、单倍生物炭垄和双倍生物炭垄的水分利用效率分别增加0.29、4.34和2.13 kg/(hm²·mm)。Zhang等^[34]研究表明,在垄沟集雨种植中,红豆草产量随着集雨垄宽度增加而降低,垄沟集雨种植红豆草最佳垄宽为36~42 cm。在我国黄土高原丘陵区,与土壤结皮相比,生物炭—土壤结皮降低沟中土壤贮水量,对沟中表层土壤温度改善不明显,但生物炭—土壤结皮覆盖垄沟集雨种植提高紫花苜蓿根芽数量、干草产量和水分利用效率,关于生物炭覆盖垄沟集雨种植对土壤养分和微生物活性等的影响有待进一步深入研究。

4 结论

生物炭覆盖垄沟集雨可以提高垄上土壤温度,增加沟中土壤贮水量,进而促进了紫花苜蓿根芽的发生,增加了紫花苜蓿分枝数、干草产量和水分利用效率;随着垄宽的增加,紫花苜蓿种内竞争降低,紫花苜蓿农田土壤贮水量、根芽、分枝数和净干草产量增加;生物炭本身具有植物生长所需营养元素,双倍生物炭垄较单倍生物炭垄的紫花苜蓿根芽数量高,可能是由于生物炭中含有养分,通过径流流入沟中,对根芽产生具有促进作用,但单倍生物炭垄比双倍生物炭垄沟内土壤贮水量高,故单倍生物炭垄的紫花苜蓿分枝数和产量较高,进一步验证土壤水分是限制半干旱区作物生产关键因素。综合分析紫花苜蓿干草产量和水分利用效率,单倍生物炭覆盖垄沟集雨种植和垄宽

30 cm是最佳栽培模式。

参考文献:

- [1] 赵艳霞,王馥棠,刘文泉. 黄土高原的气候生态环境、气候变化与农业气候生产潜力[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):142-146.
- [2] 王利娜,朱清科,仝小林,等. 黄土高原近50年降水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(3):206-212.
- [3] 王志强,杨萌,张岩,等. 暴雨条件下黄土高原陡坡耕地细沟侵蚀特征[J]. 农业工程学报,2020,36(12):129-135.
- [4] 李宗善,杨磊,王国梁,等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [5] 张改战,高海耀. 黄土高原水土流失现状与综合治理对策[J]. 农民致富之友,2018(22):240.
- [6] 李龙. 黄土高原区水土流失危害及其综合治理措施[J]. 中国非金属矿工业导刊,2018(S1):58-59+64
- [7] 张登奎,王琦. 垄沟集雨覆盖种植对土壤水分特征及红豆草生长特性的影响[J]. 草原与草坪,2019,39(3):26-34.
- [8] 张哲,张旭,冯良山,等. 秋覆膜对辽西春玉米水肥利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(15):150-158.
- [9] 严昌荣,梅旭荣,何文清,等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报,2006(11):269-272.
- [10] 闫实. 白色污染对农业生态环境安全影响研究[J]. 农业环境与发展,2012,29(5):40-42.
- [11] 胡琼恩,李婷,马丕明,等. 生物可降解地膜的研究进展[J]. 塑料包装,2017,27(3):34-41.
- [12] 潘越,郑敏超,周梓欣,等. 可生物降解农用地膜研究现状及发展[J]. 广州化工,2020,48(9):37-39.
- [13] 高亚军,李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报,2005(7):15-19.
- [14] 陈素英,张喜英,刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. 中国农业气象,2002(4):35-38
- [15] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳,沈阳农业大学,2012:11-13.
- [16] 张登奎. 生物炭覆盖垄沟集雨种植对红豆草生产效应的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2019:1-67.
- [17] 王俊杰,王明涛,王勇,等. 黄花苜蓿地下芽库构成及其数量特征研究[J]. 中国草地学报,2012,034(5):53-57.

- [18] 苏继平. 不同利用方式下紫花苜蓿根颈性状与生产力的关系[D]. 长春:东北师范大学,2018:3-5.
- [19] 苏力合,张凡凡,王旭哲,等. 积雪覆盖对不同休眠型紫花苜蓿产草量及营养品质的影响[J]. 草地学报,2021,29(2):356-363.
- [20] 胡广荣,王琦,宋兴阳,等. 沟覆盖材料对垄沟集雨种植饲草作物青贮品质和产量的影响[J]. 草原与草坪,2017,37(2):75-81.
- [21] 李富春,王琦,张登奎. 覆盖材料对垄沟集雨种植高粱生长特性及土壤水分、温度的影响[J]. 草原与草坪,2018,38(1):35-43.
- [22] 韩炳宏,周秉荣,孙瑛,等. 青海南部冻融区高寒草地土壤温度变化及热量传输特征[J]. 气候变化研究进展,2018,14(5):456-464.
- [23] 罗宁,魏焜,李晶,等. 低温胁迫对玉米苗期根系特征及电导率的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2694-2699.
- [24] 唐婷,郑国伟,李唯奇. 植物光合系统对高温胁迫的响应机制[J]. 中国生物化学与分子生物学报,2012,28(2):127-132.
- [25] 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.
- [26] 马效松,付强,徐淑琴,等. 生物炭对北方寒区农田土壤热性能参数的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(10):298-305.
- [27] 曹卫星,姜东,罗卫红. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 I. 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2004(4):315-320.
- [28] 田计均,唐媛,董雨,等. 水分胁迫对不同发育时期藜麦生理的影响[J]. 生物学杂志,2020,37(6):73-76.
- [29] Qiang Fu, Hang Zhao, Heng Li, *et al.* Effects of biochar application during different periods on soil structures and water retention in seasonally frozen soil areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694:133732.
- [30] Hafiz Abdur Rehman, Rohma Razzaq. Benefits of Biochar on the Agriculture and Environment[J]. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2017, 4(3)
- [31] 崔伟,赵凌平,赵芙蓉. 封育和放牧对黄土高原典型草原芽库的影响[J]. 草业科学,2017,34(1):9-15
- [32] 刘雪磊. 生物炭对土壤的作用与应用前景[J]. 农业工程技术,2020,40(20):89-90
- [33] 方强恩,张勃,师尚礼. 紫花苜蓿根颈芽发育成枝过程中叶元的发生模式研究[J]. 草业学报,2015,24(12):146-154
- [34] Dengkui Zhang, Qi Wang, Guang Li, *et al.* Optimum ridge width and suitable mulching material for sainfoin production with ridge-furrow rainwater harvesting in semi-arid regions of China[J]. *Arid Land Research & Management*, 2019, 33:274-296

Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application on root buds, fodder yield and water use efficiency of alfalfa

WANG Xiao-yun¹, WANG Qi^{1*}, ZHOU Xu-jiao¹, ZHAO Wu-cheng¹, ZHAO Xiao-le¹, ZHANG Deng-kui¹, LIU Qing-lin², CUI Xun-zhen³, LI Hong-cai³

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Dingxi Hydraulic Research Institute, Dingxi 744300, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of ridge furrow rainwater harvesting (RFRH) with biochar application on the number of root buds of alfalfa and cultivation techniques for high-yield of alfalfa in semi-arid region.

【Method】 A randomized block design was designed to investigate effects of different biochar rates 0×10^4 (ridges compacted with soil), 3×10^4 (ridges compacted with soil mixed with single biochar application), and 6×10^4 kg/hm^2 (ridges compacted with soil mixed with double biochar application) and different ridge widths (30, 45, and 60 cm) on soil moisture, temperature, root buds, branch number, fodder yield, and water use efficiency (WUE) of alfalfa in RFRH, and flat planting (FP) was used as a control. The treatments were flat planting (FP), 30/45/60 cm wide ridges compacted with soil (MCS₃₀, MCS₄₅, MCS₆₀), 30/45/60 cm wide ridges compacted with soil mixed with single biochar application (SMSBA₃₀, SMSBA₄₅, SMSBA₆₀), 30/45/60 cm wide ridges compacted with soil mixed with double biochar application (DMSBA₃₀, DMSBA₄₅, DMSBA₆₀). 【Result】 The number of stem buds of alfalfa was 2.2~2.9 times greater than that of root neck buds. The topsoil temperature at ridge top was affected by the ridges compacted with soil—biochar crust, but not at the topsoil temperature at the bottom of the furrow. With biochar application ridge—furrow rainwater harvesting increased soil water storage, the number of root buds (stem buds + root neck buds), branch number, fodder yield, and WUE of alfalfa. With the increase of ridge width, soil water storage, branch number and root buds increased, while fodder yield and WUE decreased. Compared with FP, soil water storage increased by 20.7, 30.8, 41.7, 8.7, 23.0, 35.7, 6.2, 12.0 and 11.0 mm, for MCS₃₀, MCS₄₅, MCS₆₀, SMSBA₃₀, SMSBA₄₅, SMSBA₆₀, DMSBA₃₀, DMSBA₄₅, and DMSBA₆₀ respectively. Root buds increased by -0.4, 0.4, 2.0, 1.2, 0.7, 4.1, 0.4, 3.0 and 4.6 per plant for MCS₃₀, MCS₄₅, MCS₆₀, SMSBA₃₀, SMSBA₄₅, SMSBA₆₀, DMSBA₃₀, DMSBA₄₅, and DMSBA₆₀, respectively. Branch number increased by 28, 50, 48, 84, 109, 45, 91 and 71 per square meter for MCS₃₀, MCS₄₅, MCS₆₀, SMSBA₃₀, SMSBA₄₅, SMSBA₆₀, DMSBA₃₀, DMSBA₄₅, and DMSBA₆₀, respectively; while fodder yield increased by 3.34%, -0.52%, -0.70%, 26.81%, 17.11%, 3.00%, 18.28%, 5.79% and -11.03%. For the same treatments, the WUE increased by -1.76, -0.04, 2.67, 5.77, 4.26, 2.99, 4.66, 1.62 and 0.10 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, respectively. 【Conclusion】 Optimum ridge width was 30 cm, and biochar application rate was 3×10^4 kg/hm^2 for ridge—furrow rainwater harvesting with biochar application in semiarid regions of China.

Key words: alfalfa; ridge—furrow rainwater harvesting; biochar; root bud; fodder yield