

生物炭施加打结垄沟集雨对土壤水分动态和紫花苜蓿生长特征的影响

赵武成¹,王小赞¹,张登奎¹,周旭姣¹,赵晓乐¹,孙元伟¹,王琦^{1*},陈瑾²

(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. 定西市水土保持科学研究所,甘肃 定西 743000)

摘要:【目的】探究生物炭施加垄沟集雨种植模式对土壤水分时空动态和紫花苜蓿生长特征的影响。【方法】采用裂区试验设计,主区模式为施加生物炭和不施加,副区耕作措施为打结垄、开敞垄和平作,探究不同生物炭施加模式和不同垄沟集雨耕作措施的影响效应。【结果】施加生物炭明显提高了土壤总贮水量和空间水分含量,促进紫花苜蓿生长、提高紫花苜蓿产量和品质;打结垄显著增加土壤贮水量,促进紫花苜蓿生长,提高产量。与不施加生物炭相比较,施加生物炭的0~200 cm土层土壤贮水量、平均土壤含水量、干草产量、株高、分枝数、根颈粗、粗蛋白含量、酸性洗涤纤维含量和中性洗涤纤维含量分别增加39.38 mm、15.46%、95 kg/hm²、25.19%、5.80%、29.24%、9.3%、12.3%和3.4%。与平作相比,打结垄的0~200 cm土层平均土壤贮水量、平均紫花苜蓿干草产量、平均株高、分枝数和根颈粗、平均粗蛋白、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量分别增加69.09 mm、332 kg/hm²、24.0%、21.0%、14.2%、17.7%、7.7%和4.0%;开敞垄的分别增加26.16 mm、267 kg/hm²、16.8%、10.2%、10.1%、14.2%、7.3%和3.4%。【结论】生物炭施加坡地打结垄沟集雨模式是雨养农业区紫花苜蓿种植的有效模式,也是雨养农业可持续种植饲草作物的推荐模式,该模式为我国西北黄土高原地区栽培饲草作物提供科学指导和理论依据。

关键词:生物炭;打结垄沟集雨;土壤水分;紫花苜蓿;生长特征

中图分类号:S541⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)02-0029-13

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.02.004



紫花苜蓿是多年生豆科牧草,富含蛋白质、粗脂肪、氨基酸和各类矿物质,在西部黄土高原地区广泛种植,栽培历史悠久,不仅是优质的退耕还林和发展畜牧业的首选牧草作物,而且在修复该地区的脆弱生态,改良土壤结构,提升土壤肥力以及水土保持等方面也发挥着重要作用^[1]。随着我国社会和经济的转型,国民对蛋白质的需求日益增长,使我国畜牧产业

发展迅速,苜蓿和其他优质饲草需求量激增。全国苜蓿主产区主要分布在我国西北地区的甘肃、内蒙和宁夏等省(区),但我国西北黄土高原区环境恶劣,降水量小,蒸散量大,夏季暴雨造成水土流失和径流流失,使土壤蓄水能力降低,土壤水分年内和年际间不平衡,逐渐出现土壤干化^[2-3]。此外,土壤盐碱化、沙化、侵蚀严重,春季温度偏低,冬季有极端低温天气^[4]。这些因素使紫花苜蓿的存活、生长和越冬等面临严峻挑战,限制了紫花苜蓿的产量和品质提升,难以满足当地的畜牧业需求,从而影响西北黄土高原地区土地利用和农牧业生产的可持续性,当地雨养农业面临严峻挑战^[5-6]。因此,如何提高紫花苜蓿的产量和品质,优化作物用水模式,提高降水资源利用效率和控制水土

收稿日期:2021-08-09;**修回日期:**2021-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42061050)和(41661059)

作者简介:赵武成(1996-),男,甘肃会宁人,硕士研究生。

E-mail:2505537631@qq.com

*通信作者。E-mail:wangqigsau@gmail.com

侵蚀等成为保障该区雨养农业发展和农牧业稳定生产的瓶颈性问题。近年来,垄沟集雨覆盖种植技术作为一种可持续人工优化收集自然降雨的农艺耕作措施被应用于西北黄土高原地区,该种植技术可高效利用降雨资源,拦蓄径流和泥沙流失,蓄积土壤有效水分,有效提高当地作物产量和水分利用效率,保障当地土地生产力和节水农业相对可持续发展^[7-8]。

垄沟集雨种植系统采用沟内耕作、垄上覆膜的种植集雨模式,实现对自然降水资源高效化利用,对降水的时空错位进行人工调配。垄上和沟内覆盖材料,增大了垄径流收集效率,降低沟内土壤无效蒸发^[9]。黄土高原特殊的沟壑纵横地貌造就大部分农田缓坡地或陡坡地状况,李富春等^[10]统计,试验区域坡耕地面积与总耕地面积的比例为60%~70%。打结垄沟集雨是在坡地上进行垄沟集雨种植的创新优化增产种植模式,通过在种植沟中纵向设置一定距离的打结垄,拦蓄沟中多余径流和降雨,改变沟中径流速率,使更多雨水下渗,提高沟内土壤持水量^[11]。赵晓乐等^[12]研究发现,打结垄沟集雨种植的紫花苜蓿,全年干草产量提高16.0%~18.7%,水分利用效率提高2.0~5.3 kg/(hm²·mm)。邓浩亮等^[13]在陇中旱塬地研究发现覆盖集雨种植显著提高春玉米产量、水分利用效率和经济效益。周永瑾等^[14]采用生物地膜、麻纤维地膜和液态地膜等作为覆盖材料,发现沟覆盖麻纤维地膜效果最佳,可降解地膜显著提高马铃薯产量。邢毅等^[15]研究表明,与平作相比,垄上覆盖普通白膜、普通黑膜和生物降解膜可明显增加油菜产量等。但是,随着塑料地膜和其他设施覆盖农业的发展,大量塑料地膜覆盖造成地膜残留于土壤,使土壤板结,降低土壤孔隙结构,破坏土壤团聚体结构,限制作物的出苗、生长和发育,不利于生态环境和农田的绿色可持续发展^[16]。前期研究表明,随着残膜增加,土壤中毛管水的运移路径易被残膜阻断,从而造成土壤过水能力降低,并破坏耕层土壤透气性及土壤物理性质,阻碍作物根系垂向发展,最终造成作物减产^[17]。因此,寻找环保可持续覆盖材料,改进和优化覆盖材料性能,降低农业生产成本,成为目前垄沟集雨种植系统需要解决的棘手问题。

生物炭具有孔隙结构发达、质轻、比重较小、比表面积较大和土壤保水力较强等优点,成为当前土壤改良和农田施加的热点环保覆盖材料^[18]。生物炭是以秸秆、树枝、粪便、木屑等易获取的农林有机废弃物为原材料制成的有机富碳材料,其制作成本低,只需在燃烧炉调控温度和空气阀门,是绿色可降解的环保型低廉覆盖材料^[19]。我国是秸秆资源大国,西北地区大量秸秆被直接焚烧,造成环境污染和秸秆资源的浪费。秸秆生物炭作为二次利用资源施入土壤,可改善土壤结构,淡化土壤污染,提高土地生产力,循环利用农业有机废弃物资源,对于发展绿色可持续生态农业和改善生态环境具有重要意义^[20]。王小赟等^[7]研究指出,生物炭土壤结皮可有效促进紫花苜蓿根系生长和增加根瘤数量。屈忠义等^[21]报道用生物炭改良盐碱土较对照提高番茄产量55.96%。施立善等^[22]发现施用小麦秸秆生物炭能够促进甘薯蔓长、茎粗的增长,并增加甘薯产量。李昌娟等^[23]得出施用生物炭基肥可促进茶树对氮、钾和镁的吸收,增强茶树光合作用,最终显著提高茶叶的质量。邵恩博等^[24]发现,施用生物炭可显著增加青椒的株高,对开花坐果期和结果期青椒叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度有显著的提高,最终提高青椒产量和水分利用效率。在江汉平原潮土区,刘美玲等^[25]研究发现施用生物炭后,小麦株高增高,结实率和千粒重增大,显著增加小麦产量。

综上所述,前期研究主要涉及生物炭施加种植经济作物玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)和水稻(*Oryza sativa*)等,但在大田试验条件下,生物炭施加在垄沟集雨坡地系统对紫花苜蓿的产量和品质影响的研究鲜有报道。本试验聚焦目前生物炭施加垄沟集雨和紫花苜蓿栽培的研究,在典型半干旱黄土高原丘陵区布置大田试验探究秸秆生物炭施加坡地垄沟集雨系统对紫花苜蓿生长状况和品质特征的影响,筛选适宜该地紫花苜蓿生长的生物炭施加模式和垄沟集雨种植措施,为紫花苜蓿高产和改善牧草品质提供新思路,为我国黄土高原雨养农业区寻求环保可持续覆盖材料提供科学指导和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 4 月 1 日—10 月 15 日在定西水土保持与科学研究所安家坡试验基地(N 34°35′, E 105°35′, 海拔 2 396.7 m)进行,该基地位于甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟流域,距离甘肃省定西市东南 5~6 km,为典型黄土丘陵沟壑区,平均海拔 2 000 m,该区光能资源较多,年均气温 6.4 °C,空气相对湿度 65.8%,气候干燥,温差较大。土壤类型属于黄绵土

状黏土,土质疏松,抗蚀性较差,平均田间持水量为 20%~23%,土壤 0~50 cm 土层平均土壤容重为 1.25 g/cm³,永久凋萎系数为 7.2%。该地区 1971—2019 年年均降水量 392 mm,多年平均潜在蒸发量 1 535 mm,降水量小且不规律,与作物生长季节严重错位,大部分降水主要集中在 5~9 月,是典型的雨养农业区。当地耕作制度为一年一熟,主要种植的农作物分别为玉米、春小麦和马铃薯等,主要种植的饲草作物为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)。试验区土壤肥力状况见表 1。

表 1 试验小区土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of soil in the experimental plots

土壤深度/ cm	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
0~20	0.62	0.76	20.70	9.56	65.7	7.78	135	7.83
20~40	0.54	0.64	20.51	7.68	22.1	3.17	90	7.82

1.2 试验设计

试验以甘农 3 号抗旱紫花苜蓿(*Medicago sativa* cv.)为供试作物,采用裂区设计,施加生物炭模式(施加生物炭和不施加生物炭)为主区,耕作措施(打结垄,开敞垄和平作)为副区,共设 6 个处理(2 主区×3 副区),重复 3 次。根据该地区种植经验,在坡度为当地平均坡度 10°的坡地上划分试验小区,修筑集雨垄。集雨垄形状为拱型,沿等高线修筑,集雨垄高为 20 cm,宽为 45 cm,长为 5 m。打结垄形状为半球形,打结垄高度 15 cm,略低于集雨垄高度,打结垄宽为 20 cm,打结位置位于沟中间。德国 BASF 化工厂提供生物可降解膜,生物可降解膜宽度为 1.4 m,厚度为

0.008 mm。集雨垄覆盖生物可降解地膜,作为集雨区,集雨垄上垄面与沟面夹角为 5°~10°,下垄面与沟面夹角 60°~70°,沟坡度接近 0°,沟宽为 60 cm,沟长 5 m,沟中施加秸秆炭作为紫花苜蓿种植区。小区长为 10 m,宽为 5 m,面积 50 m²,每个小区有 9 条垄和 10 条沟。为防止其他因素对试验结果造成影响,减小试验误差,用砖块在小区四周修建高出地面 20 cm 的围埂,围埂埋土深度 10 cm。小区与小区之间设 1.5 m 隔离区,用于试验期间采集数据。在小区周围修建一条急流槽,由小区上部延伸至小区左右两侧,用于暴雨期间导流小区外径流,避免小区外径流对试验结果产生影响。小区布置见图 1。

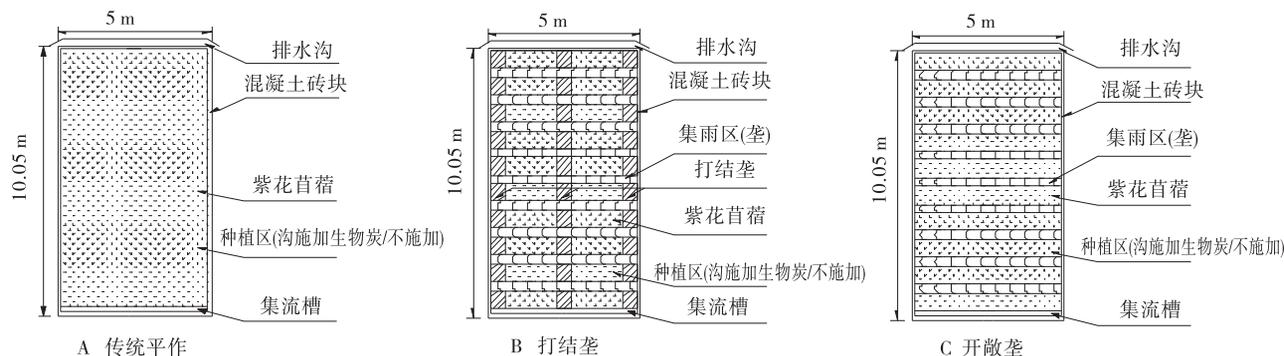


图 1 打结垄沟集雨施加生物炭种植紫花苜蓿小区布置图

Fig. 1 Diagram of plot layout for planting alfalfa in tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

1.3 种植管理

2019年3月下旬,在甘肃省定西市水土保持与科学研究所安家坡流域选择 10° 左右的适宜坡地作为试验小区。当土壤完全解冻后,人工铲除表层枯叶层、其他杂物垃圾及土壤结皮等,按照试验坡度,采用人工挖方和垫方方法平整土地,划分小区之后,先将开垦出来的土地用机器翻耕两遍,人工挑除树根、杂草根和其他杂质,人工将大块土块耙碎,放置3 d之后修建小区。根据小区、集雨垄和打结垄等设计尺寸,采用皮尺和水准仪等划分小区,对集雨垄和打结垄放线。放线之后,在小区四周开挖小型地基渠道,夯实地基,然后用水泥和砖块修建小区四周围梗,每个小区围梗高出地面15 cm。完成围梗修建之后,开始修筑小区内集雨垄和打结垄等,首先用铁锹堆积集雨垄基础形状,再根据设计尺寸拍打集雨垄,人工用木板拍实和拍光滑集雨垄表面,使集雨垄紧实和不易变形,最后在拍打好的集雨垄表面用喷雾器洒湿表面土壤,使集雨垄表面土壤含水量处于适宜土壤含水量水平,最后采用人工方法覆盖可降解地膜于集雨垄表面,拉平生物可降解膜,洒水使降解地膜与集雨垄

面之间紧密贴合,最后将生物可降解膜边角埋于集雨垄两侧。从小区坡顶向坡脚沿等高线依次修筑集雨垄和覆盖可降解地膜。2019年4月7日完成试验小区全部修建工作。

2019年4月10日,在覆盖生物炭之前,再将小区耕耙1遍,开始覆盖生物炭,先将表层0~10 cm用平铁锹铲起,堆积到一旁,然后将生物炭和10~40 cm土壤翻耕混合均匀,然后将堆积起来的0~10 cm表层土壤均匀撒施于土壤表层。完成生物炭施加后,按照当地种植经验和气候特征,2019年4月12日条播种植紫花苜蓿,播种密度为 22.5 kg/hm^2 ,对于开敞垄和打结垄而言,每沟种植面积为 3 m^2 ,小区种植面积 30 m^2 ($10 \text{ 条沟} \times 3 \text{ m}^2 = 30 \text{ m}^2$),无论平作和垄作,种植密度相同,播种深度为3~5 cm,每条沟播种4行紫花苜蓿,行距15 cm,平作种植66行紫花苜蓿,垄作种植40行紫花苜蓿。在紫花苜蓿幼苗发芽之后,在每条沟中修筑打结垄。整个紫花苜蓿生育期,不施肥不灌溉,除草时间为6月15日和8月4日,为了不改变沟中土壤容重和集雨垄完整性,尽量避免践踏沟中土壤和集雨垄。

表2 秸秆生物炭理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of straw biochar

项目	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机碳/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH值	孔隙度/ μm	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	灰分/%
生物炭	4.56	1.95	27.35	474.8	8.08	21.4	0.17	1.05	34.8

1.4 样品采集和测定

1.4.1 出苗率、存活率和越冬率测定 播种完成之后,在小区选取3个样方点,每天记录样方的出苗状况,每个幼苗均用红色橡皮筋标记,统计时间截至2019年6月10日。然后计算出苗率和存活率,计算公式如下^[26]:

出苗率 = 出苗总株数 \times 种子千粒重 \times 小区长度 \times (小区宽度 - 条播间距) / (1000 \times 总播种量 \times 条播间距) \times 100%

存活率 = (实际存活苗数 / 出苗总株数) \times 100%

越冬率测定时间为2019年生长季结束至2020年返青期,分别在坡顶、坡中和坡下,用60 cm \times 60 cm样方框随机选取3个样点,用小木桩标记样方4角,记录每个样方框内紫花苜蓿植株数,来年返青之后再记录

样方框内植株数,越冬率计算公式如下^[27]:

越冬率 (%) = 返青期植株数 / 生长季结束植株数 \times 100%

1.4.2 紫花苜蓿植株性状和产量测定 株高:自然情况下,随机选取20株健康紫花苜蓿植株,用直尺测量从地面至叶尖的绝对高度,20株紫花苜蓿的平均值为小区的株高。

颈粗:测量紫花苜蓿产量时,将60 cm \times 60 cm的样方内刈割的紫花苜蓿随机挑选9株,立即用游标卡尺测量最底部刈割处的紫花苜蓿颈粗,平均值作为小区紫花苜蓿颈粗。

分枝数:在紫花苜蓿刈割前,随机选择长势均一的紫花苜蓿10株,记录根颈处产生的分蘖数,取平均值即为各处理样方内一级分枝数。

茎叶比:每茬紫花苜蓿刈割前,每个小区选10株长势相当的紫花苜蓿1级分枝,将茎、叶和花序分离,花序归为叶的部分。105℃烘箱内杀青15min后在75℃烘至恒重后称重。茎叶比计算公式如下^[28]:

$$\text{茎叶比} = \text{茎干重} / \text{叶干重}$$

2019年为第1年种植紫花苜蓿,全年刈割2茬,在紫花苜蓿初花期(2019年8月30日)和生长停止期(2019年10月20日),随机选取每个小区上、中和下坡60cm×60cm的样方,手工刈割紫花苜蓿,留茬高度为5~8cm。将刈割紫花苜蓿均匀平摊于垄上,自然风干后测定干草产量。实际干草产量等于小区干草产量与小区总面积(垄面积+沟面积)的比值^[29]。

作物耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)计算公式如下:

打结垄和开敞垄:

$$ET = P + Re \times P \times \frac{h_1}{h_2} + (W_1 - W_2)$$

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

平作: $ET = P + (W_1 - W_2)$

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

式中:P为紫花苜蓿生育期降水量(mm);Re为集雨垄的平均径流效率(%); h_1 和 h_2 分别为垄宽和沟宽(cm); W_1 和 W_2 分别为紫花苜蓿返青前一天和刈割后一天测定的0~200cm土壤层的土壤贮水量;AFY为紫花苜蓿实际干草产量(kg/hm²)。

1.4.3 紫花苜蓿营养品质测定 将风干至恒重的紫花苜蓿用粉碎机粉碎,然后用0.45mm网筛筛滤后置于自封袋中密封干燥保存,带回实验室用于测定各项指标。各指标具体测定方法如下:粗蛋白质采用凯氏定氮法测定;粗脂肪采用索氏乙醚浸提法测定;粗灰分采用高温灼烧法测定;中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)均以范式洗涤纤维法测定^[30]。

1.5 数据处理

采用SPSS19.0和Excel2016进行数据整理、统计分析和图表绘制,采用one-way ANOVA和Duncan法多重检验同一区组不同处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 生物炭施加打结垄沟集雨对土壤水分动态特征的影响

2.1.1 生物炭施加打结垄沟集雨对土壤贮水量的影响 在坡地垄沟集雨种植中,降水是补充土壤水分的唯一来源。在紫花苜蓿返青期(2019年4月5日),黄土高原地区降水较少、气温低,紫花苜蓿受此因素影响生长缓慢,此阶段各处理土壤贮水量变化幅度较小;紫花苜蓿第1次刈割后(2019年8月29日),夏季气温升高和降水量逐渐增加,此阶段是紫花苜蓿产量形成期,耗水量增加,各处理土壤贮水量处于较低水平。第2次刈割后(2019年10月19日),因8~9月降水量较高,各处理土壤贮水量处于较高水平(图2)。就同一主区而言,打结垄的土壤贮水量显著($P < 0.05$)高于开敞垄,开敞垄显著($P < 0.05$)高于传统平作。在同一主区模式下,与平作相比,开敞垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量分别增加45.08和80.27mm;在不施加生物炭模式下,分别增加7.24和57.91mm。同一主区不同处理,相比不施加生物炭模式,施加生物炭模式的紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量增加39.38mm。

2.1.2 生物炭施加打结垄沟集雨对土壤含水量时空特征的影响 垄沟集雨系统中,降水在集雨垄面产生径流,径流与沟中的降水在沟中叠加,从而增加了沟内土壤水分,尤其是打结垄沟集雨种植。为了比较生物炭施加打结垄沟集雨的不同时空分布特征,在紫花苜蓿返青期、第1和2次刈割后,测量不同处理0~200cm土层土壤含水量(图3)。紫花苜蓿返青期,降雨较少,紫花苜蓿生长缓慢,土壤表层0~20cm土层含水量低于20~60cm土层,随着土层深度的增加,土壤含水量呈现先增加后降低的趋势,不同处理同一土层土壤含水量差异明显;在紫花苜蓿第1次刈割后,不同处理浅层(0~60cm)土壤含水量大于深层,随着土层深度的增加,土壤含水量呈现先逐渐降低后平稳上升的趋势;在紫花苜蓿第2次刈割后,变化规律与第1次刈割后类似。就紫花苜蓿返青期,第1和第2次刈割后平均值而言,在施加生物炭模式下,与平作相比,开敞垄和打结垄0~200cm土层平均土壤含水量分别增加30.62%和31.99%;在不施加生物炭模式下,与

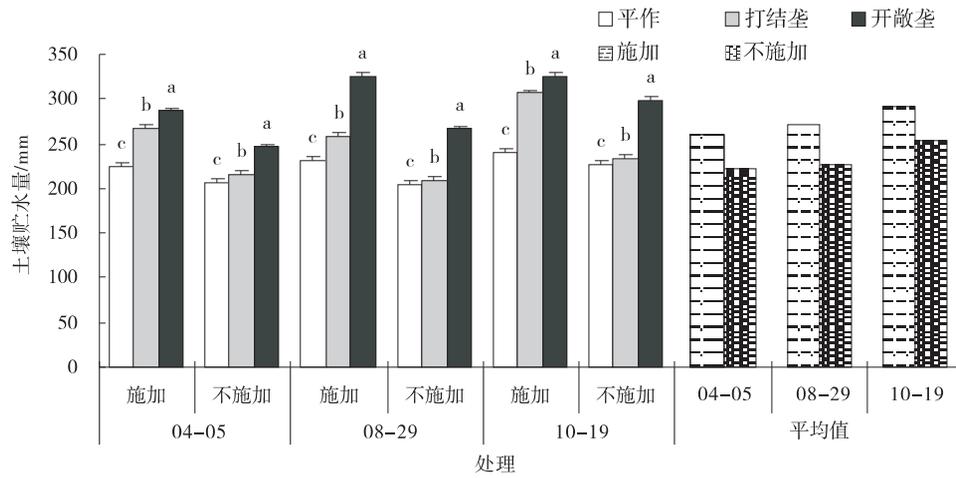


图2 紫花苜蓿生育期生物炭施加坡地垄沟集雨0~200 cm土层土壤贮水量

Fig. 2 Soil water storage in 0~200 cm soil depth in alfalfa growing season under tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

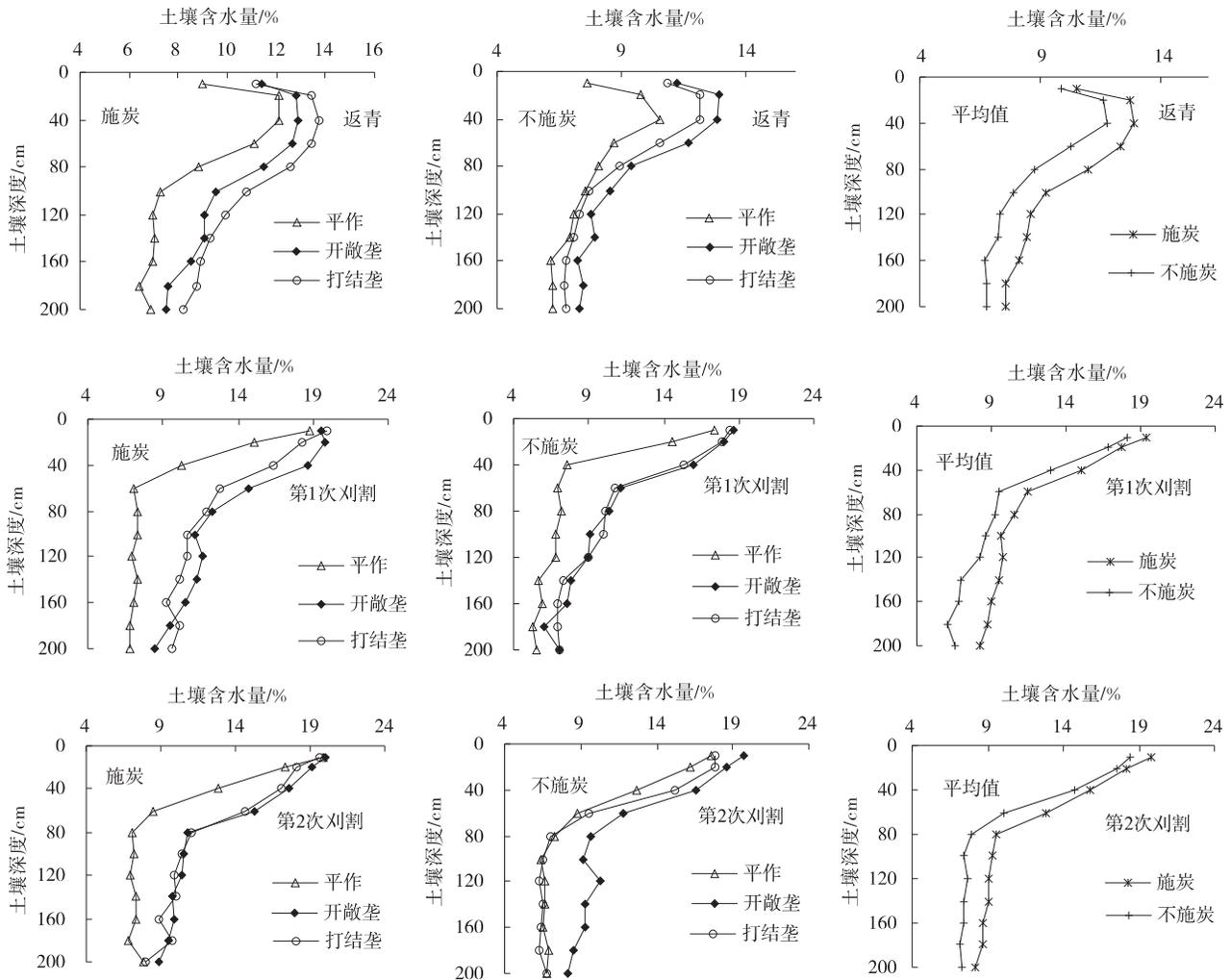


图3 生物炭施加打结垄沟集雨0~200 cm土层土壤空间含水量

Fig. 3 Soil moisture content of tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application in 0~200 cm soil depth

平作相比,开敞垄和打结垄0~200 cm平均土壤含水量分别增加16.56%和28.55%。就同一主区不同处

理平均值而言,与不施加生物炭处理平均值相比,施加生物炭增加15.46%。施加生物炭不同处理0~

200 cm 各土层的土壤含水量明显高于不施加生物炭处理;垄沟集雨种植明显提高 0~200 cm 各土层的土壤含水量,尤其打结垄沟集雨种植。

2.2 生物炭施加打结垄沟集雨对紫花苜蓿出苗率、存活率和越冬率的影响

与平作相比,对施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的出苗率分别增加 5.4% 和 3.4%,存活率分别增加 1.9% 和 0.7%,越冬率分别增加 3.9% 和 2.0%,对不施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的出苗率分别增加 3.1% 和 2.1%,存活率分别增加 1.7% 和 0.7%,越冬率分别增加 6.3% 和 2.9%(表 3)。就平均值而言,相比不施加生物炭,施加生物炭的出苗率、存活率和越冬率分别增加 5.2%、2.4% 和 8.9%。与平作相比,打结垄和开敞垄的存活率差异不显著,打结垄和开敞垄的出苗率差异不显著,打结垄和开敞垄的越冬率差异显著($P < 0.05$)。

2.3 生物炭施加打结垄沟集雨对紫花苜蓿生长特性的影响

与平作相比,对施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的平均株高分别增加 8.9 和 3.8 cm,分枝数分别增加 92 个/m² 和 44 个/m²,根颈粗分别增加 2.29 和 1.84 mm,茎叶比分别减小 0.35 和 0.18,对不施加生物炭

表 3 打结垄沟集雨施加生物炭种植紫花苜蓿的出苗率、存活率和越冬率

Table 3 Alfalfa seed germination rate, survival rate, and wintering rate under tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

处理	出苗率/%	存活率/%	越冬率/%	
施加生物炭	平作	87.3 ^a	93.6 ^a	83.4 ^{ab}
	打结垄	90.4 ^a	95.3 ^a	89.7 ^a
	开敞垄	89.4 ^a	94.3 ^a	86.3 ^b
不施加生物炭	平作	91.3 ^c	95.9 ^a	93.4 ^{ab}
	打结垄	96.7 ^a	97.8 ^a	97.3 ^a
	开敞垄	94.7 ^{ab}	96.6 ^a	95.4 ^a
平均	施加	89.0	94.4	86.5
	不施加	94.2	96.8	95.4

注:竖列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

而言,打结垄和开敞垄的株高分别增加 5.4 和 1.6 cm,分枝数分别增加 75 个/m² 和 38 个/m²,根颈粗分别增加 2.13 和 1.33 mm,茎叶比分别减小 0.39 和 0.23(图 4)。就平均值而言,相比不施加生物炭,施加生物炭的株高、分枝数和根颈粗分别增加 7.98 cm、27 个/m² 和 0.73 mm,茎叶比减小 0.1。与平作相比,打结垄和开敞垄的株高、分枝数、根颈粗和茎叶比差异显著。

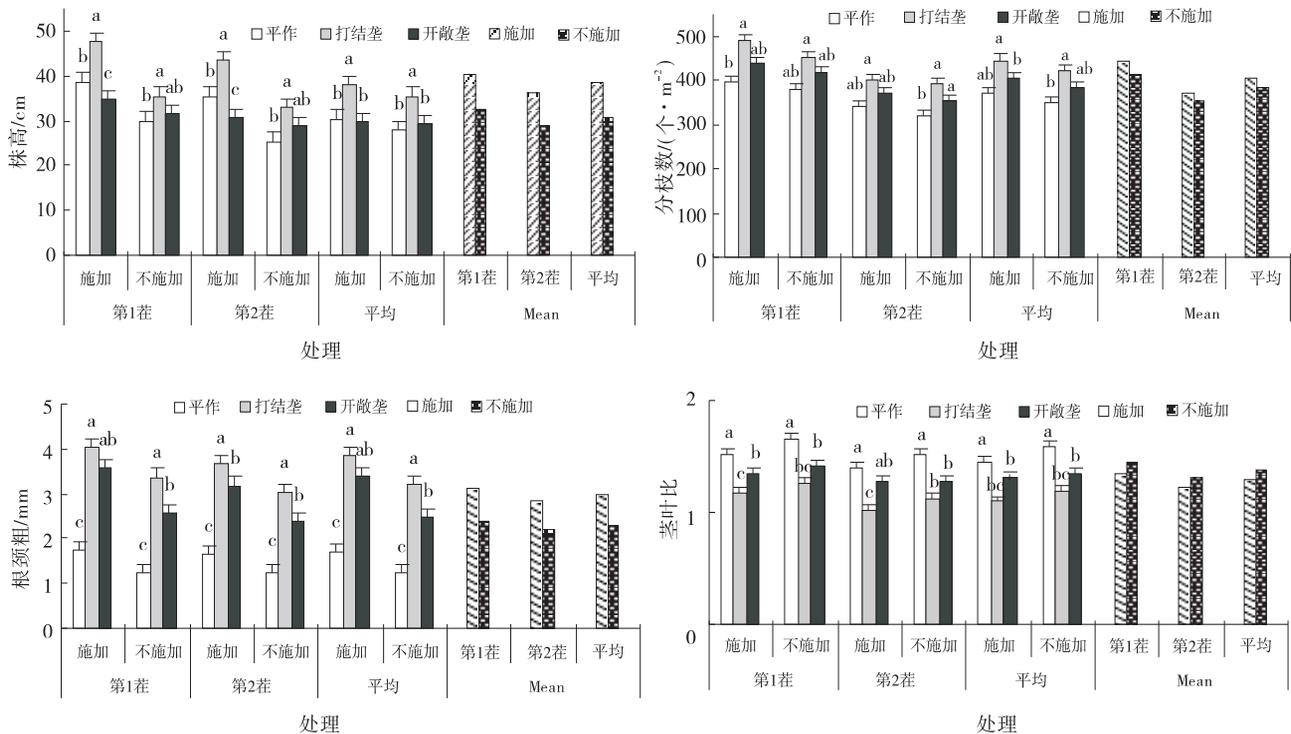


图 4 打结垄沟集雨种植施加生物炭紫花苜蓿的生长特性

Fig. 4 Botanical characteristics of alfalfa under tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

2.4 生物炭施加打结垄沟集雨对紫花苜蓿牧草品质的影响

与平作相比,对施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的粗蛋白含量分别增加15.7%和13.6%,粗脂肪含量分别增加42.1%和35.1%,酸性洗涤纤维含量分别增加7.4%和7.2%,中性洗涤纤维含量分别增加5.4%和5.9%,粗灰分含量分别增加1.5%和1.1%,对不施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的粗蛋白含量分别增加19.7%和14.7%,粗脂肪含量分别增加38.3%和31.0%,酸性洗涤纤维含量分别增加15.7%和13.6%,中性洗涤纤维含量分别增加2.5%和1.2%,粗灰分含量分别增加9.6%和2.8%(表4)。就平均值而言,相比不施加生物炭,施加生物炭的粗蛋白、粗脂肪和酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维和粗灰分含量分别增加9.3%、23.6%、12.3%、3.4%和13.8%。

2.5 生物炭施加打结垄沟集雨对紫花苜蓿产量和水分利用效率的影响

在同一施加生物炭模式下,第1茬和第2茬干草产量平作、开敞垄和打结垄之间差异显著,全年平作

干草产量与开敞垄和打结垄干草产量之间差异显著。与平作相比,对施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的第1茬紫花苜蓿干草产量分别增加286和211 kg/hm²,第2茬分别增加101和120 kg/hm²,全年干草产量分别增加387和331 kg/hm²;对不施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的第1茬紫花苜蓿干草产量含量分别增加175和83 kg/hm²,第2茬分别增加102和120 kg/hm²,全年干草产量分别增加277和203 kg/hm²。就平均值而言,相比不施加生物炭,施加生物炭的第1茬干草产量、第2茬干草产量和全年干草产量分别增加60、35和95 kg/hm²。水分利用效率是雨养农业区1个作物干物质形成和水分消耗之间关系的重要参数,同时反映作物生长过程中的水分转换为干物质的效率。就全生育期紫花苜蓿平均值而言,与不施加生物炭相比,施加生物炭的水分利用效率增加6.90 kg/(hm·m),与平作相比,对施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的水分利用效率分别显著提高16.45和17.46 kg/(hm·m);对不施加生物炭而言,打结垄和开敞垄的水分利用效率分别显著提高11.09和12.99 kg/(hm·m)。

表4 打结垄沟集雨系统紫花苜蓿品质特征

Table 4 Alfalfa quality characteristics under tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

处理	粗蛋白 %	粗脂肪 %	酸洗纤维 %	中洗纤维 %	粗灰分 %	
施加生物炭	平作	12.10 ^{ab}	2.85 ^{ab}	35.64 ^b	34.46 ^a	9.88 ^a
	打结垄	14.00 ^a	4.05 ^a	38.28 ^a	36.33 ^a	10.03 ^a
	开敞垄	13.75 ^a	3.85 ^a	38.21 ^a	36.51 ^a	9.78 ^a
不施加生物炭	平作	10.90 ^{ab}	2.35 ^{ab}	31.69 ^a	34.16 ^a	8.35 ^{ab}
	打结垄	13.05 ^a	3.25 ^a	33.90 ^a	35.01 ^a	9.16 ^a
	开敞垄	12.50 ^a	3.10 ^a	34.29 ^a	34.55 ^a	8.58 ^a
平均	施加	13.28	3.58	37.38	35.76	9.90
	不施加	12.15	2.90	33.29	34.57	8.70

3 讨论

黄土高原地区极端自然灾害频繁发生,作物的生长受苛刻的自然条件的影响,紫花苜蓿作为一种广泛种植在寒旱区的牧草作物,它的出苗、越冬和存活率是保证牧草产量和品质的前提。影响紫花苜蓿建植初期存活的因素包括紫花苜蓿品种、温度、水分、通气性和养分供给等^[31]。相关研究表明,目前较多关于抗

旱抗寒的紫花苜蓿品种已经在该地区种植和推广,但是苛刻和多变的气候条件限制了紫花苜蓿的生长^[29]。本研究利用秸秆生物炭作为外源添加剂,生物炭施加土壤表层,可改变黄绵土的土壤表面反射率和热导率,增大土壤热量保持能力,增加土壤温度,改变土壤物理、化学和代谢过程变化,提高冬季土壤热量吸收,促进紫花苜蓿幼苗出苗和提高越冬温度保障^[32-33]。生物炭施加在紫花苜蓿的生长、出苗和越冬中起到至

表 5 打结垄沟集雨种植施加生物炭紫花苜蓿的产量

Table 5 Alfalfa fodder yield under tied-ridge-furrow rainwater harvesting with biochar application

处理	实际干草产量/(kg·hm ⁻²)			水分利用效率 (kg·hm ⁻² ·m ⁻¹)	
	第一茬	第二茬	全年		
施加生物炭	平作	1 167 ^c	318 ^c	1 485 ^b	10.93 ^c
	打结垄	1 378 ^b	438 ^a	1 816 ^a	27.38 ^a
	开敞垄	1 453 ^a	419 ^b	1 872 ^a	28.39 ^b
不施加生物炭	平作	1 187 ^c	282 ^c	1 469 ^b	7.29 ^c
	打结垄	1 270 ^b	403 ^a	1 673 ^a	18.38 ^b
	开敞垄	1 362 ^a	385 ^b	1 747 ^a	20.28 ^a
平均	施加	1 333	392	1 724	22.20
	不施加	1 273	357	1 630	15.30

注:实际干草产量是基于整个小区面积的草产量(包括集雨垄和打结垄面积)

关重要的作用,前期研究发现,相比于对照,稀释后的梨木生物炭浸提液和酒糟生物炭浸提液处理分别使小白菜种子萌发率提高 16.67% 和 8.33%^[34]。李阳等^[32]研究表明,低剂量生物炭水浸提液较对照组促进了小麦发芽。宋婷婷等^[35]发现,与对照相比,花生壳生物炭添加量在 80 g/kg 时,小麦根长和茎长分别提高 101.7% 和 173.8%,黄瓜根长和茎长分别提高 31.6% 和 85.1%。本研究结果显示,与不施加生物炭相比,施加生物炭明显提高紫花苜蓿的出苗率、越冬率和存活率。垄沟集雨的集雨垄增大了降雨接触面积,增大了径流效率,集雨垄提高了地表起伏度,使地表垄沟交错,减小了春季季风风速,缓解了冬春季节表层土壤温度的急剧降低,膜覆盖增大了土壤温度,提高了紫花苜蓿出苗率和出苗后存活率。本研究结果发现,与平作相比,垄沟集雨的出苗率增加 2.75%~4.25%,越冬率增加 0.7%~1.8%,存活率增加 2.45%~5.10%;李倩等^[36]研究指出,垄覆盖普通塑料地膜和生物可降解膜使玉米出苗天数分别提前 3 d 和 2 d。寇江涛等^[37]在黄土高原研究发现,膜垄种植紫花苜蓿出苗率、成苗率和越冬率分别较平作提高 16.01%、16.03% 和 18.25%。

垄沟集雨系统种植作物比传统耕作种植具有更大的生产潜力,垄沟集雨覆盖系统在田间作物生产中增加种植区内土壤水分,促进植物幼苗建成和植株生长^[38]。在同期的降雨条件下,集雨垄覆盖降解膜增大径流系数和叠加降雨于沟中。当夏季高强度大降雨事件发生时,打结垄阻断沟中径流的流动和流失,增

加雨期时的雨水下渗和土壤持水量,补偿干早期土壤干化层,提高全生育期土壤贮水量。生物炭的施加增大土壤持水能力和下渗速率,在夏秋季高蒸散时期,表层生物炭层截断了土壤水分蒸发的通道,在土壤根系层更大程度地蓄积和吸持水分。郑云珠等^[40]发现,相比秸秆还田,当生物炭还田量为 3.42×10^3 kg/hm² 时,土壤 0~100 cm 土层的土壤含水量最高。李富春等^[10]得出,在坡地上,与平作种植相比,开敞垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期土壤贮水量分别增加 10.3 和 15.6 mm。邢毅等^[15]指出,西南旱地垄作覆盖膜处理土壤贮水量显著大于平作,就 0~60 cm 土层平均值而言,油菜花期平作、普通白膜垄作、生物降解膜垄作、普通黑膜垄作和不覆膜垄作的土壤含水量分别为 14.7%、17.4%、17.8%、17.3% 和 16.0%。本研究得出,在同一主区模式下,与平作相比,开敞垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期 0~200 cm 平均土壤贮水量分别增加为 26.16 和 69.09 mm,0~200 cm 平均土壤含水量分别增加 23.59% 和 30.27%;相比不施加生物炭模式,施加生物炭模式的紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量增加 39.38 mm,0~200 cm 平均土壤含水量增加 15.46%。

株高是反映紫花苜蓿生长发育状况和决定产草量的重要指标之一,较高的株高说明紫花苜蓿具有更高的草产量潜力^[41];分枝是紫花苜蓿根芽分蘖的结果,在紫花苜蓿出苗之后,如果温度和水分充足,会有更多的芽发育为颈芽,从而发育成分枝,分枝越多紫花苜蓿产量越高;紫花苜蓿茎叶比是衡量紫花苜蓿蛋

白质含量的主要指标,茎叶比越小紫花苜蓿品质越好,紫花苜蓿产量与紫花苜蓿株高、分枝数、根颈粗有显著的线性关系,产量的增加标志着水分利用效率的提升^[42]。生物炭施加沟中改变了沟中土壤孔隙度和土壤团聚体结构,进而影响土壤持水力,使土壤水分在时间和空间尺度上比传统平作保持更久和更大量,沟中紫花苜蓿生长的水分状况改善,促进养分吸收,极大地促进了沟中紫花苜蓿生长期根颈和叶片等的生长,最终提高紫花苜蓿的生长速率,促进干草产量的形成,提高紫花苜蓿对水分的利用效率^[43-44]。侯伟男等^[45]研究表明,生物炭适量施入土壤后增加大豆地上部分株高、茎叶鲜重及干重,提高作物生物量。李正鹏等^[46]得出结论,施加玉米秸秆炭能显著提高收获期植株总干物质量、根冠比和马铃薯块茎产量。郑云珠等^[40]研究表明,与对照相比,1.14 × 10³ kg/hm²施加量的处理显著增产8.72%。1.14 × 10³ kg/hm²施加量和2.28 × 10³ kg/hm²的处理均能够提高水分利用效率,其中1.14 × 10³ kg/hm²施加量的处理水分利用效率最大,高于对照12.14%。本研究结果显示,相比不施加生物炭,施加生物炭的全年平均紫花苜蓿干草产量增加95 kg/hm²,株高、分枝数和根颈粗分别增加7.98 cm、27枝/m²和0.73 mm。打结垄沟集雨系统为了减少白色污染,采用可降解地膜作为垄覆盖材料,显著增加了植物对温度、水分和养分的可获得性,提高紫花苜蓿的生长能力,在出苗之后,降雨逐渐增多,垄作叠加了双倍的降雨汇集沟中,雨季蓄积额外降雨,弥补干旱季节土壤水分的缺失,最终提高全年紫花苜蓿的生长能力。寇江涛等^[37]发现,垄沟集雨垄上覆膜种植紫花苜蓿生长高度、分枝数和干草产量分别较平作提高65.12%、29.04%和238.20%,茎叶比较平作降低22.45%,干草产量增加204.98%。本研究结果指出,与平作相比,打结垄和开敞垄的干草产量分别增加332和267 kg/hm²。

相同量的饲草产品生产最大化的肉蛋等畜牧产品是现代畜牧业发展的目标,这就要求牧草生产追求较高营养品质和产量^[31]。生物炭具有多孔性和巨大的比表面积,生物炭多孔结构降低坡地土壤养分的淋溶损失,能够增加土壤的持水量、增加对营养元素的吸附以减少其流失并改善土壤的结构,间接增加微

生物活性,进而促进植物对养分的吸收和利用,此外生物炭本身含有丰富的营养元素并能够缓慢释放以供作物吸收^[47]。有研究发现,生物炭能显著提高土壤全氮、有机碳含量,明显提高土壤全磷、有效磷含量、pH值等^[48]。因此,生物炭施加于土壤可改善土壤肥力,增大孔隙吸持水量,加速养分的转化与吸收,实现土壤养分从无效形式向有效形式转化^[49-51]。陈敏等^[52]发现增施生物炭可不同程度提高烟叶物理特性、外观质量、化学成分协调性和感官评吸质量。纪立东等^[53]研究指出,生物炭输入显著促进酿酒葡萄叶片的光合作用,优化了果穗长,进而提高了葡萄产量,改善了葡萄品质。本研究结果发现,与不施加生物炭相比,施加生物炭的粗蛋白含量、粗脂肪含量、酸性洗涤纤维含量、中性洗涤纤维含量和粗灰分含量分别增加1.13%、0.68%、4.1%、1.19%和1.2%。与平作相比,垄沟集雨的粗蛋白含量、粗脂肪含量、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维和粗灰分含量分别增加1.63%~2.03%、0.88%~1.05%、2.43%~2.59%、1.22%~1.36%和0.17%~0.48%。

在半干旱雨养农业区,生物炭施加土壤对农田物理化学和作物系统的影响目前还存在许多不一致性,但生物炭在农业领域的应用无疑促进了寒旱区雨养农业的可持续发展。进一步研究关于生物炭长期施加于垄沟集雨系统对土壤水力特性、温室气体排放、土壤保水性和碳固定效应等的作用机理是必要的,可为我国西北黄土高原旱地农牧业可持续发展和生态环境改善提升提供新的思路和指导方法。

4 结论

生物炭施加是一种有效提高紫花苜蓿生产的半干旱区土壤改良措施。生物炭施加明显地提高土壤表层含水量、总贮水量、紫花苜蓿株高、分枝数、颈粗和干草产量等,同时不同程度地提高紫花苜蓿的粗蛋白和粗脂肪等养分含量;相比平作种植,打结垄和开敞垄集雨模式显著增加土壤贮水量,打结垄土壤贮水量显著大于开敞垄,打结垄沟集雨模式对紫花苜蓿的增产作用显著,对紫花苜蓿生长特性和饲草粗蛋白、粗脂肪和纤维含量等有较明显的提高作用。因此,生物炭施加坡地打结垄模式是适宜该区紫花苜蓿种植的一种耦合的、可有效改善旱地可持续种植饲草作物

的模式,该模式为我国半干旱黄土高原区栽培饲草作物提供了新思路。

参考文献:

- [1] 于铁峰,刘晓静,郝凤,等. NO_3^- -N/ NH_4^+ -N 配比对紫花苜蓿营养品质及饲用价值的影响研究[J]. 草业学报, 2016, 25(12):102-110.
- [2] 张少宏,付鑫, Muhammad I, 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):239-244.
- [3] 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.
- [4] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, *et al.* Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. Field Crops Research, 2013, 151(9):9-18.
- [5] 刘雪峰,张富,张伯林,等. 安家沟流域不同植物措施坡耕地的产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 17-20.
- [6] 黄金柏,卢龙彬,付强,等. 黄土高原北部水蚀风蚀交错带沟壑地形的降雨反应特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):142-147.
- [7] 王小赞,王琦,张登奎,等. 生物炭土壤结皮覆盖垄沟集雨种植对红豆草根系和根瘤特征的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(5):225-235.
- [8] 赵武成,王琦,王小赞,等. 基于修正 SCS-CN 模型集雨垄径流预测[J]. 水土保持学报, 2020, 35(2):96-105.
- [9] Liu X, Wang Y, Yan X, *et al.* Appropriate ridge-furrow ratio can enhance crop production and resource use efficiency by improving soil moisture and thermal condition in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240(1):106289.
- [10] 李富春,王琦,张登奎,等. 坡地打结垄沟集雨对水土流失,紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1):147-156.
- [11] Wang Q, Li F C, Zhang D K, *et al.* 2018. Sediment control and fodder yield increase in alfalfa (*Medicago sativa* L) production with tied-ridge-furrow rainwater harvesting on sloping land [J]. Field Crops Research, 2018, 225: 55-63.
- [12] 赵晓乐,王琦,张登奎,等. 坡地打结垄沟集雨种植对泥沙,养分流失和紫花苜蓿草产量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11):105-120.
- [13] 邓浩亮,张恒嘉,肖让,等. 陇中旱塬不同覆盖集雨种植方式对春玉米生长特性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(3):135-141.
- [14] 周永瑾,普雪可,吴春花,等. 垄沟集雨种植下不同降解地膜沟覆盖对农田马铃薯产量和土壤水热的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(11):2664-2673.
- [15] 邢毅,张抗萍,王志远,等. 西南旱地油菜田土壤水分和作物光合特征对覆盖材料和垄沟比的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10):3461-3472.
- [16] 刘小兰,李世清,王俊,等. 半干旱黄土高原地区春小麦地膜覆盖研究概述[J]. 西北植物学报, 2001, 21(2): 198-206.
- [17] 王志超,李仙岳,史海滨,等. 含残膜土壤水分特征曲线模型构建[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):103-109.
- [18] Kumar H, Ganesan S P, Bordoloi S, *et al.* Erodibility assessment of compacted biochar amended soil for geo-environmental applications[J]. Science of The Total Environment, 2019, 672:698-707.
- [19] 张燕,铁柏清,刘孝利,等. 玉米秸秆生物炭对稻田土壤磷、镉形态的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 715-721.
- [20] Alba L, Stefania M, Juan C P, *et al.* Fresh biochar application provokes a reduction of nitrate which is unexplained by conventional mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2021, 755:142430.
- [21] 屈忠义,孙慧慧,杨博,等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4):311-318+350.
- [22] 施立善,朱蕴晨,尚赏,等. 不同用量生物炭对甘薯农艺性状及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(17): 112-115.
- [23] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2):387-397.
- [24] 邵恩博,张更元. 生物炭对辽宁中部地区温室青椒生理特性及产量的影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(3):19-23.
- [25] 刘美玲,刘悦,陈婷婷,等. 水稻秸秆生物炭对江汉平原麦区小麦养分吸收和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(15):7-13.
- [26] 舒朝成,刘彤,王倩,等. 不同盐浓度下播种量对紫花苜蓿植物学特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1889-1897.

- [27] 王彦华,王成章,李德锋,等. 播种量和品种对紫花苜蓿植株动态变化、产量及品质的影响[J]. 草业学报,2017,26(2):123-135.
- [28] 汪精海,齐广平,康燕霞,等. 干旱半干旱地区紫花苜蓿营养品质对水分胁迫的响应[J]. 草业科学,2017,34(1):112-118.
- [29] 周旭姣,王琦,张登奎,等. 垄沟集雨种植对土壤水热效应及紫花苜蓿产量的影响[J]. 草业学报,2019,28(11):60-74.
- [30] 王洋,崔国文,尹航,等. 施肥对紫花苜蓿生产性能及营养品质的影响[J]. 草业科学,2019,36(3):793-803.
- [31] 张玉霞,王显国,田永雷,等. 科尔沁沙地播种时期对不同紫花苜蓿品种抗寒性的影响[J]. 草业学报,2020,29(4):73-80.
- [32] 李阳,黄梅,沈飞,等. 生物炭对小麦种子萌发与幼苗生长的植物毒理效应[J]. 生态毒理学报,2017,12(1):234-242.
- [33] 侯伟男,刘靖愉,邢一唱,等. 生物炭施入量对大豆生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(15):14-19.
- [34] 夏红霞,朱启红,刘希东,等. 生物炭对小白菜幼苗生长及其生理生化特征的影响[J]. 贵州农业科学,2019,47(2):102-106.
- [35] 宋婷婷,陈义轩,李洁,等. 不同材料生物炭和施用量对小麦和黄瓜种子萌发和根茎生长的影响[J]. 农业环境科学学报,2019,38(2):297-306.
- [36] 李倩,张睿,贾志宽,等. 不同地膜覆盖对垄体地温及玉米出苗的影响[J]. 西北农业学报,2009,18(2):98-102.
- [37] 寇江涛,师尚礼,蔡卓山. 垄沟集雨种植对旱作紫花苜蓿生长特性及品质的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(24):5028-5036.
- [38] 张登奎,王琦. 垄沟集雨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,2019,30(3):26-34.
- [39] 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.
- [40] 郑云珠,孙树臣,翟胜. 生物炭与秸秆还田对潮土区夏玉米产量及土壤水分的影响[J]. 山东农业科学,2021,53(10):56-63.
- [41] 陆姣云,熊军波,张鹤山,等. 水分胁迫对紫花苜蓿产量、品质和微量元素的影响[J]. 草业学报,2020,29(8):126-133.
- [42] 刘纯,王亚东,崔鹏飞,等. 西北旱区不同灌水下限对紫花苜蓿生长与光合特征的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(4):1-12.
- [43] Hossain M Z, Bahar M M, Sarkar B, *et al.* Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J]. Biochar,2020,2(4):379-420.
- [44] 花可可,朱波,杨小林,等. 长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(10):167-174.
- [45] 侯伟男,刘靖愉,邢一唱,等. 生物炭施入量对大豆生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(15):14-19.
- [46] 李正鹏,宋明丹,韩梅,等. 覆膜与生物炭对青藏高原马铃薯水分利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(15):142-149.
- [47] 王倩,舒朝成,张静,等. 不同盐浓度和播种深度对紫花苜蓿亮苜二号植物学特征和生产性能的影响. 中国草地学报,2017,39(1):19-26.
- [48] 李亚娇,林星辰,李家科,等. 生物炭作为土壤/填料改良剂的应用研究进展[J]. 应用化工,2019,48(11):2688-2693.
- [49] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长,养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [50] Obia A, Brresen T, Martinsen V, *et al.* Vertical and lateral transport of biochar in light-textured tropical soils[J]. Soil & Tillage Research,2017,165:34-40.
- [51] Herliana O, Ahadiyat Y R, Cahyani W. Utilization of biochar and *Trichoderma harzianum* to promote growth of shallot and remediate lead-contaminated soil[J]. Journal of Degraded and Mining Lands Management,2021,8(3):2743-2750.
- [52] 陈敏,杜相革. 生物炭对土壤特性及烟草产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(1):80-83.
- [53] 纪立东,司海丽,李磊,等. 生物炭输入对砾石土水肥保蓄及酿酒葡萄产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):78-86.

Effects of biochar application and tied-ridge-furrow rainwater harvesting on soil moisture dynamics and growth characteristics of alfalfa

ZHAO Wu-cheng¹, WANG Xiao-yun¹, ZHANG Deng-kui¹, ZHOU Xu-jiao¹, ZHAO Xiao-le¹, SUN Yuan-wei¹, WANG Qi^{1*}, CHEN Jin²

(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. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China)

Abstract: **【Objective】** The study was conducted to investigate the effect of biochar addition and ridge-furrow-rainwater harvesting on soil moisture dynamics and growth characteristics of alfalfa. **【Method】** The experiment was set up in a split-plot design and replicated three times. The biochar application pattern (biochar and no biochar) was assigned as the main plot, while the ridge-furrow-rainwater harvesting (open-ridging, tie-ridging and flat planting) was assigned as the subplot. **【Result】** The results showed that the biochar application increased soil water storage and soil moisture in 0~200cm depth, improved the growth characteristics, quality and yield of the alfalfa. The tied-ridging significantly increased soil water storage in 0~200 cm depth, the growth characteristics and yield of alfalfa. Compared to no biochar application, soil water storage, soil moisture in 0~200 cm depth, alfalfa fodder yield, plant height, number of branches and stem diameter, crude protein content, acid detergent fiber content, and neutral detergent fiber content of biochar application increased by 39.38 mm, 15.46%, 95 kg/hm², 25.19%, 5.80%, 29.24%, 9.3%, 12.3%, and 3.4%, respectively. Compared to flat planting, with the tied-ridging soil water storage, soil moisture in 0~200 cm depth, alfalfa fodder yield, plant height, number of branches and stem diameter, crude protein content, acid detergent fiber content, and neutral detergent fiber content increased by 69.09 mm, 332 kg/hm², 24.0%, 21.0%, 14.2%, 17.7%, 7.7%, and 4.0%, respectively; with open-ridging, the increases of the same parameters were 26.16 mm, 267 kg/hm², 16.8%, 10.2%, 10.1%, 14.2%, 7.3%, and 3.4%, respectively. **【Conclusion】** According to the results, tied-ridging-furrow rainwater harvesting with biochar application would be the recommended planting methods, which could effectively improve the sustainable cultivation of forage crops in rain-fed land. The pattern will provide scientific guidance and theoretical basis for growing forage crops in the Loess Plateau of Northwest China.

Key words: biochar; tied-ridge-furrow rainwater harvesting; soil moisture; growth characteristics of alfalfa