

# 垄沟集雨覆盖种植对红豆草根系特征和产量的影响

张登奎, 吕陇, 张晓娟, 周旭姣, 王琦\*

(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)

**摘要:**【目的】为选择集雨垄的环境友好型覆盖材料, 提高中国西北半干旱地区的降雨利用效率。【方法】通过随机区组大田试验, 以传统平作为对照, 研究3种材料(土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜)覆盖垄的垄沟集雨种植对土壤水热条件、红豆草根系特征、根瘤特征、干草产量和水分利用效率的影响。【结果】垄沟集雨种植显著改善土壤水热状况, 增加红豆草根系和根瘤特征值。土壤结皮覆盖垄沟集雨种植显著提高红豆草水分利用效率, 但降低红豆草干草产量; 生物降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植显著提高红豆草的干草产量和水分利用效率。与传统平作相比, 土壤结皮、生物降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的土壤贮水量分别提高10.64、9.36和2.09 mm, 垄上表层土壤温度分别增加2.0、3.4和4.2℃, 红豆草根干重分别提高27%、72%和87%, 有效根瘤数分别增加2.1、9.1和12.4个, 水分利用效率分别提高11.9、23.3和30.0 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。土壤结皮覆盖垄沟集雨种植的红豆草干草产量比传统平作降低13%, 生物降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草干草产量比传统平作分别提高11%和23%。由于普通地膜残留极易导致土壤结构恶化和环境污染, 不利于农业生产可持续性。【结论】在我国半干旱地区, 生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植可作为一种高效、可持续的农业节水生产技术。

**关键词:**生物可降解地膜; 红豆草; 根瘤; 干草产量; 水分利用效率

**中图分类号:**S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)02-0106-10

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2024.02.011



全球气候变化改变区域降水分布格局, 加剧水资源短缺与供需矛盾, 增加干旱和水土流失等自然灾害在我国西北半干旱区的发生频率和强度<sup>[1-2]</sup>。此外, 高强度的人类活动和不合理的水管理体制显著改变流域下垫面条件, 加剧土壤干旱和土地退化风险, 严重影响该地区粮食安全生产<sup>[3]</sup>。受极端温度和不规则降雨影响, 我国西北半干旱地区春冬季节冻害和风蚀严重, 夏秋季节干旱与暴雨频发, 季节性水源供应无

法满足作物正常生长的需水要求<sup>[4]</sup>。因此, 采用适宜的保护性耕作措施, 改善水资源管理和土地利用模式, 提高降水资源利用效率和作物产量, 对我国西北半干旱区农业可持续生产较为重要。目前, 垄沟覆盖种植技术作为一种适宜的农业耕作措施, 在我国干旱和半干旱区农作物玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等种植中被广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

垄沟集雨覆盖种植技术通过重新分配有限降雨资源, 增加水分入渗深度, 减小水分无效蒸发, 增加沟中土壤蓄水量, 延长土壤水分有效使用时间, 提高作物产量和水分利用效率<sup>[5-6]</sup>。同时, 垄上覆盖材料阻隔土壤界面与大气的水热交换, 降低土壤温度的昼夜波动幅度, 减缓霜冻和倒春寒危害, 促进作物出苗和生长<sup>[6]</sup>。然而, 普通塑料地膜具有非常稳定的分子结

收稿日期:2022-03-21; 修回日期:2022-06-07

基金项目:国家自然科学基金(41461062)和(41661059)

作者简介:张登奎(1991-), 男, 甘肃靖远人, 博士研究生。

E-mail:2605867938@qq.com

\*通信作者。E-mail:wangqigsau@gmail.com

构,自然条件下极难降解,大面积覆盖易造成地膜残留和白色污染<sup>[7]</sup>。地膜残留破坏土壤结构,影响土壤团粒结构的形成,导致土壤盐分积累和土壤硬化板结,降低土壤渗透性,阻碍土壤水养分运输,抑制作物出苗和生长,从而降低作物产量和土地生产力<sup>[8]</sup>。生物可降解地膜是一种可被环境微生物完全分解,无机化成水和二氧化碳的高分子材料<sup>[9]</sup>。在作物生长季节结束时,生物可降解地膜可以直接翻入土壤或进入堆肥系统,易被土壤微生物快速降解<sup>[9]</sup>。生物降解地膜覆盖垄沟集雨种植保留普通地膜覆盖垄沟集雨种植的高效集雨、增温和保水等优点,克服地膜残留不易回收或回收成本高等缺点,可作为普通塑料地膜的理想替代品。

红豆草(*Onobrychis viciifolia*)是一种多年生豆科牧草,具有保持水土、涵养水源、改良土壤等特点,被作为我国黄土高原半干旱区植被恢复和生态重建的重要牧草之一<sup>[10]</sup>。红豆草主根粗壮,侧根发达,粗壮主根入土较深,能有效抵御干旱和低温胁迫;发达侧根可以为根瘤的发育提供场所,固定大气中的氮,提高土壤肥力,控制水分流失,减少土壤侵蚀<sup>[11]</sup>。红豆草中高含量的多酚,特别是高含量的浓缩单宁,有效减少消化道寄生虫和反刍动物瘤胃膨胀,促进有机物和蛋白质的消化,进而改善饲喂动物的健康<sup>[12]</sup>。豆科植物与根瘤菌的共生固氮是农业系统生物固氮的主要来源。干旱和极端温度是限制豆科牧草根系生长和结瘤的主要环境因素<sup>[13]</sup>。干旱胁迫增加叶片气孔导度,增加植物蒸腾作用和土壤无效蒸发,加快根区土壤干燥速度,破坏豆科牧草结瘤的适宜水分环境<sup>[13]</sup>。短期或轻度干旱抑制结瘤和根瘤生长,长期或重度干旱抑制植物根系生长、根瘤固氮和地上生物量积累<sup>[14]</sup>。刘秀红等<sup>[15]</sup>研究表明,水分胁迫条件下大豆根瘤数和根系生物量均呈下降趋势。温度过低或过高都可能制约豆科植物结瘤和根瘤发育<sup>[16]</sup>。较低的土壤温度阻碍根系生长和根瘤的形成;较高温度增加

根系呼吸作用,导致根区CO<sub>2</sub>积累较多,影响根系有氧呼吸<sup>[16]</sup>。慈恩等<sup>[17]</sup>研究表明,土壤温度较低时,依赖固氮的植物的生长受到的阻碍大于吸收无机氮的植物。垄沟集雨覆盖种植系统有效减缓干旱和低温胁迫,促进豆科牧草根系生长和根瘤形成,提高豆科牧草与根瘤菌的共生固氮能力,保持较多土壤水分和肥力,提高牧草产量和水分利用效率<sup>[18]</sup>。

垄沟集雨覆盖种植是提高半干旱地区水资源利用效率和作物生产力的有效方法。目前关于垄沟集雨种植技术研究主要集中于普通地膜覆盖种植等对土壤水热特征、作物产量和水分利用效率等的影响<sup>[5-6,19]</sup>,而关于生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植对红豆草根系和根瘤特征的影响等研究较少。因此,本试验探究传统平作与不同垄覆盖材料的垄沟集雨种植对土壤水热条件、红豆草根系和根瘤特征、产量和水分利用效率的影响,以寻求我国半干旱区适宜的垄沟集雨种植红豆草模式。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

本试验于2016年3—10月在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(35°33' N, 104°35' E)进行。试验地位于甘肃省定西市安定区,属典型的温带大陆性季风气候,海拔1 896.7 m,多年平均降水量为390.0 mm,农业生产主要依靠天然降水。试验区2016年年降水量为312 mm,与近46 a(1971—2016年)年平均降水量(386 mm)相比,2016年为干旱年。红豆草生长季(4—10月)的总降水量为288.9 mm,占全年降水量的92.6%。2016年日平均气温为9.1℃,日最高气温为24.9℃,日最低气温为-15.3℃(图1)。试验地地势平坦,表层土壤为重壤土,土壤容重为1.38 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为25.6%,凋萎系数为6.7%。试验区土壤基本化学性质见表1。

表1 试验区土壤化学特性

Table 1 Soil chemical properties of the experimental plots

深度/cm	总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH值
0~40	0.89	1.65	23.59	6.02	54.30	14.8	245	7.8

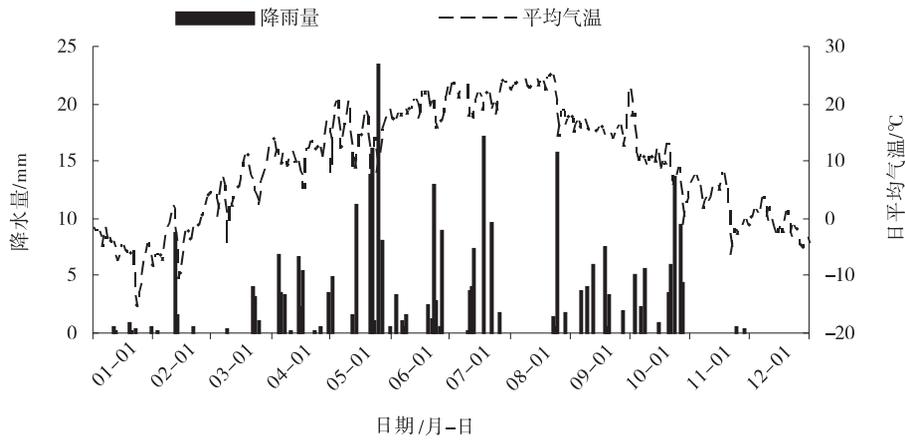


图1 2016年日降雨量与日平均气温变化图

Fig. 1 Precipitation and air temperature in 2016

1.2 试验设计

试验以甘肃红豆草为供试作物,采用随机区组设计,重复3次。试验共设4个处理:土壤结皮覆盖种植(SR),生物可降解覆盖种植(BR),普通地膜覆盖种植(PR),传统平作(TP)(表2)。3种垄覆盖材料分别为土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜。土壤结皮为原地土筑垄表面拍实后降雨冲打而成。普通地膜和

生物可降解地膜分别产自石家庄永盛塑料制品有限公司和德国 BASF 公司,厚度均为0.008 mm,宽度均为1.4 m。在垄沟集雨覆盖种植中,垄上覆盖土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜作为集雨区,沟中无覆盖作为种植区;垄长和沟长均为10 m,垄宽和沟宽分别为45和60 cm。根据当地种植经验,垄的坡度约为40°,垄的高度约为15~20 cm,(图2)。

表2 垄沟集雨种植红豆草试验设计

Table 2 Experimental design for sainfoin production in ridge-furrow rainwater harvesting system

处理	垄宽/cm	沟宽/cm	垄面积/cm <sup>2</sup>	沟面积/cm <sup>2</sup>	小区面积/cm <sup>2</sup>	垄覆盖材料
TP	—	—	—	—	36	无
SR	45	60	18	18	36	土壤结皮
BR	45	60	18	18	36	生物可降解地膜
PR	45	60	18	18	36	普通地膜

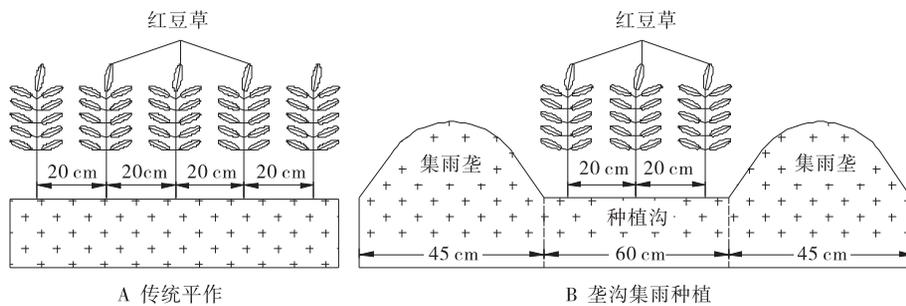


图2 红豆草种植试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram for sainfoin planting

1.3 种植管理

本试验开始于2015年3月,在红豆草播种前15 d开始整地、人工划分小区、起垄和覆膜。2015年4月9日条播播种红豆草,播种量为100 kg/hm<sup>2</sup>,播种深度为3~5 cm,行距为20 cm。垄沟集雨种植处理的各小区(长10 m × 宽3.6 m)共有4条垄和3条沟,每条沟内

种植3行红豆草,每个小区共播种9行红豆草。传统平作处理的小区共播种18行红豆草。在1龄红豆草收获后(2015年10月12日),人工维护试验小区,保持垄和沟的完整性,回收残留地膜。在2龄红豆草返青前(2016年4月3日),重新覆盖生物可降解地膜和普通地膜。在2龄红豆草盛花期(2016年6月10

日、8月16日)和停止生长期(2016年10月17日)手工刈割红豆草,留茬高度2~3 cm。试验期间试验地不灌溉、不施用化肥和农药。于2016年6月19日、7月13日和8月15日,人工及时清除杂草。

#### 1.4 样品采集和测定

1.4.1 土壤水分测定 在红豆草返青前1 d和收获刈割后1 d及生育期内(间隔15 d测定),采用烘干法(105 °C, 10 h)测定土壤含水量,测定深度为200 cm,其中0~20 cm土层按10 cm分层,20~200 cm土层按20 cm分层。每个小区随机在沟中取3钻土样,同一层次3个土样混合均匀,装入铝盒待测。土壤贮水量计算公式<sup>[20]</sup>:

$$SWS = \sum_i^{11} \theta_i \times BD_i \times H_i \times 10 \quad (1)$$

SWS为土壤贮水量(mm), $\theta_i$ 为*i*层土壤质量含水量(%), $BD_i$ 为*i*层土壤容量( $g \cdot cm^{-3}$ ), $H_i$ 为*i*层土层深度(cm),10为系数。

1.4.2 土壤温度测定 采用曲管水银地温计(河北省武强县红星仪表厂)测定各处理的沟中和垄上(0~25 cm)土壤温度。在红豆草生育期内,每隔5 d测定垄上和沟中表层土壤温度,测定当天分别记录8:00、14:00和18:00时的土壤温度。将3次记录平均值,作为当天的平均土壤温度。

1.4.3 根系测定 在红豆草第2茬刈割后(2016年8月16日),用平铲挖掘法取根样,开挖样方的长(沟宽)和宽分别为60 cm和20 cm,开挖样方深度为60 cm。为便于浸泡,按20 cm等距离将长60 cm(沟宽)切为3等分。先将挖出的根放入水池中浸泡1~1.5 h,然后用微喷头将根系冲洗干净,用吸水纸吸干表面水分,称出根鲜重。将冲洗干净的根系平铺(防止根系缠绕和重叠)于1个盛有水(10~15 mm)的透明托盘内,在实验室用扫描仪(Epson Perfection 4990 Photo型,分辨率300 dpi)进行扫描。用WinRHIZO根系扫描与分析系统测定根系有关特征指标,计算取样土体内总根长( $cm/cm^3$ )、总根表面积( $cm^2/cm^3$ )和总根体积( $cm^3/cm^3$ )等特征参数。

1.4.4 根瘤测定 在根系测定中冲洗根系时,用两个筛子,筛孔分别为2 mm和1 mm,上下放置,将根系样方放2 mm筛子上,加大水压冲洗,直到将泥沙冲尽,在筛子上留下根系和根瘤。用镊子摘取根系上附

着的和筛子上的所有根瘤,放入装有吸水纸的袋内,约30分钟后进行大小分级,以直径2 mm为分界,查其有效性,称重并记录个数。按照粉色且饱满为有效根瘤,发白干瘪多为无效根瘤判断根瘤有效性。

1.4.5 红豆草干草产量测定 在2龄红豆草盛花期(2016年6月10日、8月16日)和停止生长期(2016年10月17日)手工刈割各小区红豆草。将刈割后的红豆草平摊于垄上,自然风干后测定干草产量。对于垄沟集雨种植处理而言,干草产量(Fodder yield, FY)是基于小区总面积(垄面积+沟面积)的牧草产量。对于传统平作种植处理而言,干草产量是基于小区总面积的牧草产量。

水分利用效率(WUE,  $kg/(hm^2 \cdot mm)$ )计算公式<sup>[20]</sup>:

$$WUE = \frac{FY}{ET} \quad (2)$$

$$ET_1 = P + R_e \times P \times \frac{h_1}{h_2} + (SWS_1 - SWS_2) \quad (3)$$

$$ET_2 = P + (SWS_1 - SWS_2) \quad (4)$$

式中:FY为红豆草干草产量( $kg/hm^2$ ), $ET_1$ 为垄沟种植的蒸散量(mm); $ET_2$ 为平作的蒸散量(mm);P为红豆草全生育期降水量(mm); $R_e$ 为集雨垄的径流系数<sup>[20]</sup>,其中土垄、生物可降解地膜垄和普通膜垄的径流系数分别为0.151、0.885和0.888); $h_1$ 为垄宽45 cm, $h_2$ 为沟宽60 cm; $SWS_1$ 为红豆草播种前1 d沟中0~200 cm土壤贮水量(mm); $SWS_2$ 为红豆草最后1茬刈割后1 d沟中0~200 cm土壤贮水量(mm)。

#### 1.5 数据处理

采用SPSS 19.0与Excel 2019软件进行数据分析和绘图,单因素方差分析用Tukey test's法( $P < 0.05$ )进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 垄沟集雨种植对土壤水分的影响

土壤贮水量随种植方式和红豆草生育期的不同而变化(图3)。随着红豆草生长时期的延伸,各处理土壤贮水量呈先降低后增加趋势。在红豆草生长前期和生长后期,垄沟集雨种植的土壤贮水量显著高于传统平作( $P < 0.05$ ),不同垄沟集雨种植(土壤结皮、生物可降解地膜和常规地膜覆盖)处理之间差异不显著。就全生育期平均土壤贮水量而言,BR和PR的土

壤贮水量显著高于SR,且BR与PR之间差异不显著,SR的土壤贮水量显著高于TP。与传统平作相比,土

壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植

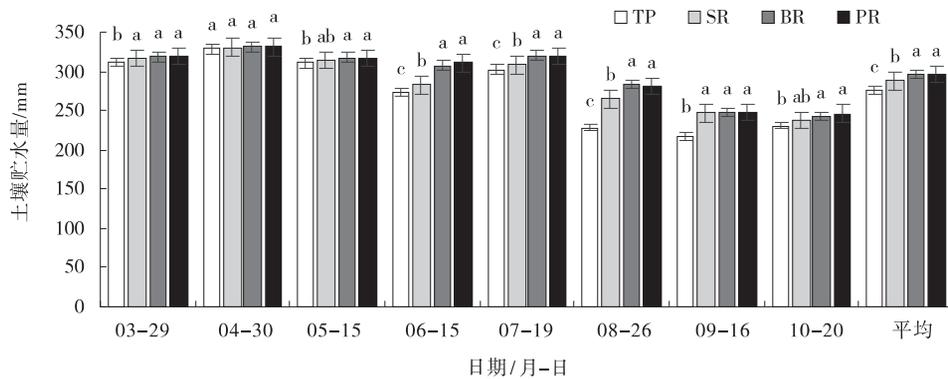


图3 不同处理的土壤贮水量(0~200 cm)变化

Fig. 3 Soil water storage of furrow in various treatments

注:TP:传统平作;SR:土壤结皮覆盖种植;BR:生物可降解地膜覆盖种植;PR:普通地膜覆盖种植。根据Duncan多重比较,不同字母表示处理之间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

2.2 垄沟集雨种植对土壤温度的影响

各处理的表层土壤温度(图4)随着气温的变化而变化。由于田间微地形和不同覆盖材料的影响,不同处理垄上表层土壤温度差异明显,沟中表层土壤温度差异不明显。TP、SR、BR和PR的沟中平均表层土壤温度分别为19.4、19.8、20.3和20.3℃;BR和PR

平均垄上表层土壤温度显著高于SR,且BR与PR之间差异不显著,SR的平均垄上表层土壤温度显著高于TP。与传统平作相比,土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的垄上表层土壤温度分别增加2.0、3.4和4.2℃。

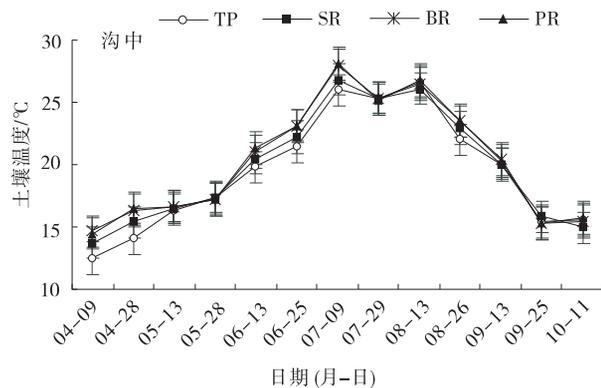
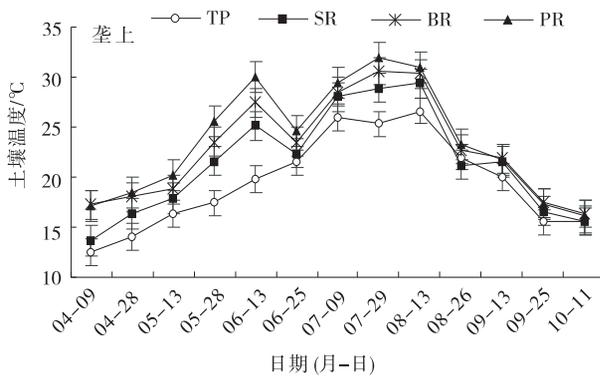


图4 不同处理的表层(0~25 cm)土壤温度

Fig. 4 Topsoil (0~25 cm) temperature in various treatments

2.3 垄沟集雨种植红豆草的浅根系特征

不同处理的红豆草总根长、根表面积和根体积分析结果表明。PR的总根长显著高于BR,BR的总根长显著高于SR,SR的总根长显著高于TP。不同处理的红豆草总根表面积和根体积差异性与总根长类似。与传统平作相比,土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草总根长分别提高24%、53%和79%;红豆草总根表面积分别提高15%、49%和65%;总根体积分别提高14%、25%和39%(图5)。

不同处理的红豆草根鲜重和根干重分析结果表明,PR的根鲜重和根干重显著高于BR,BR的根鲜重和根干重显著高于SR,SR的根鲜重和根干重显著高于TP。与传统平作相比,土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草根鲜重分别提高31%、78%和82%;红豆草根干重分别提高27%、72%和87%(图6)。

2.4 垄沟集雨种植红豆草的根瘤特征

不同处理的红豆草根瘤数量和根瘤鲜重分析结果表明,PR的有效根瘤数显著高于BR,BR的有效根

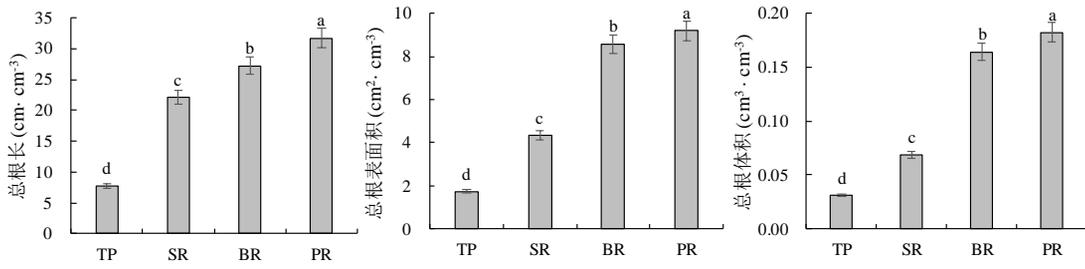


图 5 不同处理的红豆草总根长、根表面积和根体积

Fig. 5 The root length, root surface area, and root volume of sainfoin in various treatments.

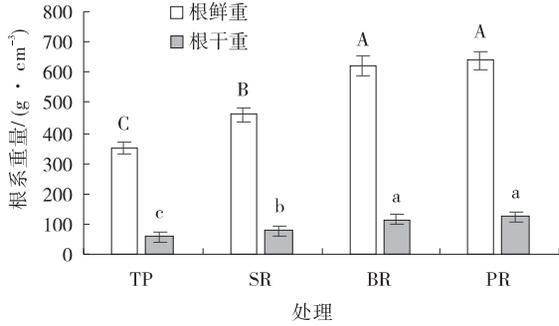


图 6 不同处理的红豆草根系重量

Fig. 6 The root weight of sainfoin in various treatments.

瘤数显著高于 SR 和 TP, SR 与 TP 之间差异不显著; PR 的总根瘤数显著高于 BR, BR 的总根瘤数显著高于

SR, SR 的总根瘤数显著高于 TP。与传统平作相比, 土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草有效根瘤数分别增加 2.1、9.1 和 12.4 个; 总根瘤数分别增加 7.0、24.7 和 33.1 个。PR 和 BR 的有效根瘤鲜重显著高于 SR, SR 的有效根瘤鲜重显著高于 TP, PR 和 BR 之间差异不显著; 不同处理的红豆草总根瘤鲜重差异性与有效根瘤鲜重类似。与传统平作相比, 土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草有效根瘤鲜重分别提高 21%、41% 和 41%; 总根瘤鲜重分别提高 12%、27% 和 29% (图 7)。

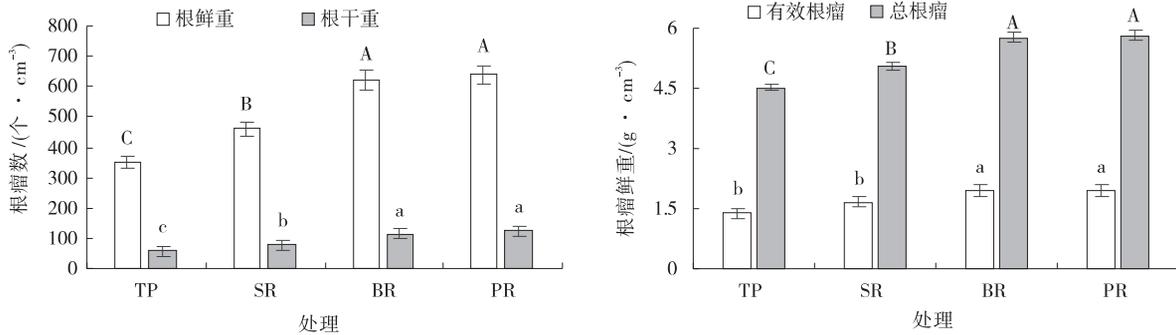


图 7 不同处理的红豆草根瘤数量和根瘤鲜重

Fig. 7 The root nodule number and fresh weight of sainfoin in various treatments

### 2.5 垄沟集雨种植红豆草的产量和水分利用效率

不同处理种植红豆草产量和水分利用效率因覆盖材料和耕作措施不同而出现差异 (表 3)。就同一处理不同茬次红豆草产量而言, 传统平作处理的第 2 茬产量最高; 垄沟集雨种植处理的第 1 茬产量最高。第 1 茬红豆草刈割时, PR 的干草产量显著高于 BR, BR 的干草产量显著高于 SR, SR 的干草产量显著高于 TP。第 2 茬和第 3 茬红豆草刈割时, PR 的干草产量显著高于 BR, BR 的干草产量显著高于 TP, TP 的干草产量显著高于 SR。就红豆草生育期总干草产量而言, PR 的干草产量显著高于 BR, BR 的干草产量显著高于

TP, TP 的干草产量显著高于土垄。与传统平作相比, 土壤结皮覆盖垄沟集雨种植的干草产量降低 13%, 生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的干草产量分别提高 11% 和 23%。

水分利用效率反映植物生产过程中的作物耗水与干物质积累之间的转化效率。垄沟集雨种植处理显著提高红豆草的水分利用效率, 尤其是普通地膜和生物可降解地膜覆盖的垄沟集雨种植 (表 3)。与传统平作相比, 土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草水分利用效率分别增加 11.9、23.3 和 30.0 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。

表3 不同处理红豆草的干草产量和水分利用效率

Table 3 Fodder yield and water use efficiency (WUE) of sainfoin in various treatments.

处理	第1茬/(kg·hm <sup>-2</sup> )	第2茬/(kg·hm <sup>-2</sup> )	第3茬/(kg·hm <sup>-2</sup> )	总产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	WUE/(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
TP	3 070 <sup>d</sup>	3 632 <sup>c</sup>	1 513 <sup>c</sup>	8 215 <sup>c</sup>	25.8 <sup>d</sup>
SR	3 234 <sup>c</sup>	2 505 <sup>d</sup>	1 390 <sup>d</sup>	7 129 <sup>d</sup>	37.7 <sup>c</sup>
BR	3 856 <sup>b</sup>	3 209 <sup>b</sup>	2 024 <sup>b</sup>	9 088 <sup>b</sup>	49.1 <sup>b</sup>
PR	4 380 <sup>a</sup>	3 319 <sup>a</sup>	2 433 <sup>a</sup>	10 132 <sup>a</sup>	55.8 <sup>a</sup>

### 3 讨论

在我国西北半干旱地区,垄沟集雨种植系统有利于收集降雨,减少水分无效蒸发,显著增加种植区(沟中)土壤水分<sup>[21]</sup>。本研究表明,与传统平作相比,垄沟种植处理尤其是生物可降解地膜和普通地膜覆盖的垄沟集雨种植处理显著提高土壤贮水量。这是由于垄沟集雨种植系统使降雨与径流在沟中耦合,增加水分在沟中的入渗深度,减少土壤表面蒸发,增加沟中土壤水分含量<sup>[22]</sup>。在降雨形式以小降雨为主的地区,集雨垄收集雨水的效率越高,其汇集到沟内的雨水就越多。本研究发现BR和PR土壤贮水量显著高于SR。这是由于与土壤结皮覆盖种植相比,普通地膜和生物可降解地膜覆盖的集雨垄表面光滑且无渗透作用,降雨在径流形成前仅通过蒸发和地面截留损失,使得收集雨水和防止蒸发的效率更高,增强水分入渗,最终改善沟中水分保持<sup>[20-22]</sup>。在垄沟集雨种植系统中,生物可降解地膜或普通地膜覆盖的集雨垄,有效防止土壤水分无效蒸发,提高沟中土壤贮水量。Wang等<sup>[22]</sup>研究同样发现,土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的土壤贮水量比平作分别提高12.2、20.7和21.3 mm。

土壤温度是影响土壤蒸发、土壤水分和养分输送及作物生长的重要因素之一<sup>[23]</sup>。垄沟集雨种植技术是减少土壤温度波动和提高作物产量的有效手段<sup>[20,23]</sup>。垄面比沟内吸收更多的太阳辐射,导致垄上表层土壤温度高于沟中。本研究结果表明,由于覆盖的集雨垄表面拦截更多长波辐射,垄沟集雨种植处理的垄上表层土壤温度显著高于传统平作。此外,BR和PR的垄上平均表层土壤温度显著高于SR。这是由于地膜覆盖可以阻碍土壤与大气之间的水气交换,减少热损失,增加对太阳辐射的吸收,从而改善土壤水热状况<sup>[20,22]</sup>。在红豆草生长初期,垄表面增加的土

壤热量传导至未覆盖沟区,增加沟中表层土壤温度;在红豆草生长后期,由于植物冠层较高,叶片截取更多的太阳辐射,使得到达地面的辐射更少,导致不同处理间沟中表层土壤温度差异不明显。

植物根系是植物地上部分生长发育的物质基础,为地上部分提供水分、矿质营养、激素等;植物地上部分维持根系生理生态活动,为根系提供光合同化物、激素、维生素等<sup>[24]</sup>。豆科植物与根瘤组成的共生固氮系统,刺激豆科植物根皮细胞分裂和生长,促进根瘤形成并固定大气中的氮,转化为作物能直接利用的含氮化合物<sup>[25-27]</sup>。吴清莹等<sup>[24]</sup>研究发现,根系在植物的生长发育中起着至关重要的作用,对土壤水分、温度和pH等环境因素较为敏感。较高的土壤温度和湿度已被证明可以提高植物的蒸腾和光合效率,促进植物根系发育<sup>[28]</sup>。在本研究中,由于土壤水热条件的改善,BR和PR的根系和根瘤特征值显著高于SR,SR显著高于TP。杨再强等<sup>[29]</sup>研究发现,当土壤含水量高于植物生长适宜土壤含水量时,土壤和植物根系呼吸降低,根系生长受阻和结瘤效果变弱;当土壤含水量低于植物生长适宜土壤含水量时,植物根系处于水分胁迫状态,根系吸收水分和养分受阻,根瘤菌侵染机会少,根系生长、结瘤和根瘤菌繁殖等生理功能受阻。相对而言土壤湿润有利于根系生长和根瘤形成,进而促进根瘤菌侵染根系形成根瘤。因此,本研究表明,在半干旱地区,生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植可有效提高红豆素的根系干物质和根瘤数量。

中国西北半干旱地区具有降水量少、蒸发量大、土壤贫瘠和耕作方式单一、作物产量和水分利用效率较低等特点<sup>[30]</sup>。在田间作物生产中,垄沟集雨覆盖系统最大优势是增加种植区内土壤水分,促进植物幼苗建成和植株生长<sup>[31]</sup>。因此,与传统耕作系统相比,垄沟集雨系统种植具有更大的生产潜力。本研究发现

生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植的红豆草干草产量显著高于传统平作。一方面垄覆盖生物可降解地膜和普通地膜,可显著改善沟内(种植区)土壤热状况,减少土壤水分无效蒸发,显著增加土壤水分可获得性,促进红豆草地上地下部分生长,提高作物产量和水分利用效率<sup>[32]</sup>;另一方面由于生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植红豆草的根瘤数量较多,通过生物固氮显著增加土壤氮素含量,结合其更佳的土壤水热环境,促进红豆草对收土壤中养分和水分等吸收,进一步提高红豆草干草产量和水分利用效率。然而,本研究中与传统平作相比,土壤结皮覆盖垄沟集雨种植显著降低红豆草干草产量。这是由于在垄沟集雨种植系统中,集雨垄布设占用部分种植面积,当土壤结皮覆盖垄沟集雨种植沟内增加的干草产量无法弥补土地面积占用造成的减产效应时,就会造成单位面积内的实际干草产量降低。

我国半干旱地区常通过增加作物产量和减少ET(包括土壤蒸发和植物蒸腾)来提高水分利用效率<sup>[31,33]</sup>。垄沟集雨种植的红豆草长势较好,较高的植物蒸腾逐渐抵消覆盖垄集雨增加的土壤水分,使红豆草种植总蒸散量(棵间蒸发和植株蒸腾)在处理之间差异较小。因此,与传统平作相比,生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植没有改变作物总蒸散量,但显著提高红豆草实际干草产量,从而增加红豆草水分利用效率。本试验发现,与传统平作相比,生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植红豆草的水分利用效率分别增加23.3和30.0 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。这些结果表明,普通地膜和生物降解膜覆盖的垄沟改善土壤水热状况,降低昼夜间的土壤温度波动和土壤无效蒸发,促进红豆草根系生长和根瘤形成,提高红豆草干草产量和水分利用效率。由于普通地膜难以降解,回收需要投入更多的人力,大面积残留会导致土壤结构恶化和严重的环境污染,不利于土壤耕作和农业生产可持续性。生物可降解地膜易被土壤微生物分解为二氧化碳和水,减少残留地膜回收的劳动力需求。本研究建议将生物可降解地膜覆盖的垄沟集雨种植作为半干旱地区红豆草生产的一种可持续高效节水方法。由于降雨、土壤类型、覆盖材料类型、覆盖方式、土地地形等影响,未来需要还需结合不同的

气候条件,综合分析后选择半干旱区适宜的垄沟集雨种植模式。

## 4 结论

与传统平作相比,土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植显著提高沟中土壤贮水量和垄上表层土壤温度,增加红豆草根长、根表面积、根体积、根瘤数和根瘤鲜重。在垄沟集雨种植系统中,集雨垄布置占用一定土地面积,土垄种植区增加的红豆草产量无法抵消土地面积占用带来的减产效应,导致土壤结皮覆盖垄沟集雨种植降低红豆草干草产量,而生物可降解地膜和普通地膜覆盖垄沟集雨种植显著提高红豆草干草产量和水分利用效率。生物可降解地膜覆盖保留普通地膜覆盖垄沟集雨种植的高效集雨、保水、增温和增产等优点,且易被土壤微生物快速降解,克服普通地膜残留和环境污染等缺点,可作为普通地膜的理想替代品。因此,在我国半干旱区红豆草种植和生产中,生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植可作为一种较佳的选择模式。

### 参考文献:

- [1] 李玉强,陈云,曹雯婕,等. 全球变化对资源环境及生态系统影响的生态学理论基础[J]. 应用生态学,2022,33(3): 603-612.
- [2] Huang, F Y, Liu Z H, Zhang P, *et al.* Hydrothermal effects on maize productivity with different planting patterns in a rainfed farmland Area[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205:104794.
- [3] 王艳芬,陈怡平,王厚杰,等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520-528.
- [4] 汪晓珍,吴建召,吴普侠,等. 2000-2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121,128.
- [5] Liu T N, Chen J Z, Wang Z Y, *et al.* Ridge and furrow planting pattern optimizes canopy structure of summer maize and obtains higher grain yield[J]. Field Crops Research, 2018, 219:242-249.
- [6] Qin S H, Cao L, Zhang J L, *et al.* Soil nutrient availability and microbial properties of a potato field under ridge-furrow and plastic mulch[J]. Arid Land Research and Man-

- agement, 2016, 30(2):181-192.
- [7] 叶元生, 黄彩霞. 西北旱地秸秆覆盖对小麦产量及农田生态效应的影响[J]. 农业工程, 2020, 10(8):106-113.
- [8] 孙文泰, 马明. 黄土高原长期覆膜苹果园土壤物理退化与细根生长响应[J]. 植物生态学报, 2021, 45(9):972-986.
- [9] 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.
- [10] 左胜鹏, 王会梅, 李凤民, 等. 半干旱区四种典型豆科牧草群落生理生态的分异研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1):167-173.
- [11] Tufenkc S, Erman M, Sonmez F. Effect of phosphorus and nitrogen application and Rhizobium inoculation on yield and nutrient uptake in sainfoin (*Onobrychis sativa*) [J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 75(5):261-264.
- [12] 李义海, 张效生, 张金龙, 等. 单宁对反刍动物机体功能调节作用的研究进展[J]. 中国草食动物科学, 2018, 38(5):44-48.
- [13] 刘敏, 龚吉蕊, 张梓瑜, 等. 北方干旱区优良牧草抗旱性和抗寒性研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3):56-62, 76.
- [14] 录亚丹, 郭丽琢, 李春春, 等. 干旱胁迫和氮素形态对豌豆根系生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3):19-25.
- [15] 刘秀红, 杜天庆, 郝建平, 等. 土壤水分对大豆根冠生长及生理特性和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1):74-76.
- [16] 王卫卫, 胡正海. 几种生态因素对西北干旱地区豆科植物结瘤固氮的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(7):1163-1168.
- [17] 慈恩, 高明. 环境因子对豆科共生固氮影响的研究进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(6):1269-1274.
- [18] 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):1328-1338.
- [19] Chen G Z, Wu P, Wang J Y, *et al.* Ridge-furrow rainfall harvesting system helps to improve stability, benefits and precipitation utilization efficiency of maize production in Loess Plateau region of China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 261:107360.
- [20] Zhang D K, Wang Q, Li G, *et al.* Optimum ridge width and suitable mulching material for sainfoin production with ridge-furrow rainwater harvesting in semiarid regions of China [J]. Arid Land Research and Management, 2019, 33(3):274-296.
- [21] Luo C L, Zhang X F, Duan H X, *et al.* Allometric relationship and yield formation in response to planting density under ridge-furrow plastic mulching in rainfed wheat [J]. Field Crops Research, 2020, 251:107785.
- [22] Wang Q, Song X, Li F, *et al.* Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for Alfalfa production in rainwater harvesting in semi-arid regions of China [J]. Field Crops Research, 2015, 180:186-196.
- [23] Li W W, Xiong L, Wang C J, *et al.* Optimized ridge-furrow with plastic film mulching system to use precipitation efficiently for winter wheat production in dry semi-humid areas [J]. Agricultural Water Management, 2019, 218:211-221.
- [24] 吴清莹, 林宇龙, 孙一航, 等. 根系分泌物对植物生长和土壤养分吸收的影响研究进展[J]. 中国草地学报, 2021, 43(11):97-104.
- [25] 郑亚萍, 郑永美, 孙奎香. 不同营养元素对共生固氮潜力影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5):49-52.
- [26] 张卫勤, 邹杭, 张妮娜, 等. 一氧化氮对豆科植物结瘤及固氮的影响机制[J]. 植物学报, 2020, 55(5):623-633.
- [27] 王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(Z1):142-149.
- [28] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux—A modified model [J]. Plant and Soil. 2005, 268:21-33.
- [29] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3):748-757.
- [30] Yang K Q, Wang K, Zhang X Y, *et al.* Change in soil water deficit and soil organic matter consumption over time in rain-fed apricot orchards on the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 314:107381.
- [31] Hu Y J, Ma P H, Wu S F, *et al.* Spatial-temporal distribution of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and water use efficiency under ridge-furrow dual mulching [J]. Agricultural Water Management, 2020, 240:106301.

- [32] 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.
- [33] Hou X Q, Li R, He W S, *et al.* Effects of planting density

on potato growth, yield, and water use efficiency during years with variable rainfall on the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230:105982.

## Effects of ridge–furrow rainfall harvesting with mulching on roots characteristic and fodder yield of sainfoin

ZHANG Deng-kui, LV Long, ZHANG Xiao-Juan, ZHOU Xu-Jiao, WANG Qi\*

(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)

**Abstract:** [Objective] In order to select environmentally friendly mulching materials in ridge–furrow rainwater harvesting system (RFRH) and to increase rainwater utilization in a semiarid region of Northwest China. [Method] A field experiment was conducted using a randomized complete design to determine effects three ridge–mulching materials (manually compacted soil (SR), biodegradable film (BR), and plastic film (PR)) on soil water storage, topsoil temperature, root characteristics (length, surface area, volume, and weight of roots) and nodule characteristics (number and weight of root nodules), fodder yield, and water use efficiency (WUE) of sainfoin in 2016, using traditional flat planting (TP) as a control. [Result] The results showed that the practice of RFRH, especially BR and PR, resulted in increased soil water storage at furrow bottoms and topsoil temperature at ridge tops, and improved root and nodule characteristics of sainfoin. SR increased WUE, but decreased fodder yield. BR and PR increased fodder yield and WUE. Compared with TP, the soil water storage increased by 10.64, 9.36 and 2.09 mm, respectively. Topsoil temperature at ridge tops increased by 2.0, 3.4 and 4.2 °C respectively. Dry root weight increased by 27%, 72% and 87% respectively. WUE increased by 11.9, 23.3 and 30.0 kg/(hm<sup>2</sup>·mm) during the sainfoin growth seasons, respectively for SR, BR and PR. The fodder yield for SR decreased by 13%, but the fodder yield for BR and PR increased by 11% and 23%, respectively. Intensive use of plastic films in agro–ecosystems had raised considerable concerns due to the increasing film residues in soils. [Conclusion] The ridge furrow rainwater harvesting mulching with biodegradable film was a suitable tillage technology for sainfoin production in semi–arid regions.

**Key words:** biodegradable film, sainfoin, root nodule, fodder yield, water use efficiency

(责任编辑 康宇坤)