

# 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

张登奎, 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:** 为了提高半干旱区土地生产可持续性, 选择垄沟集雨覆盖种植红豆草较佳覆盖耕作措施。通过完全随机设计大田试验, 以传统平作为对照, 研究3种覆盖材料(普通地膜, 生物可降解地膜和土壤结皮)和3种沟垄比[(60:30, 60:45和60:60(cm:cm))对土壤水分、红豆草越冬率、株高、分枝数、产量、耗水量和水分利用效率的影响。结果表明: 垄沟集雨种植红豆草各处理40~140 cm土层深度土壤含水量在红豆草返青前无明显差异, 而在红豆草收获后差异较大。红豆草全生育期, 与传统平作相比, 普通地膜, 生物可降解地膜和土壤结皮种植的土壤贮水量(0~200 cm)分别提高10.64, 9.36和2.09 mm, 红豆草越冬率分别提高23.6%, 18.1%和8.2%, 株高分别提高56.6%, 47.7%和21.9%; 分枝数分别提高30.6%, 25.8%和7.8%, 净干草产量分别提高184.9%, 161.5%和109.3%, 作物耗水量分别提高40.5%, 30.1%和16.1%, 水分利用效率分别提高23.4, 22.7和17.8 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。同一覆盖材料, 垄沟集雨种植红豆草的土壤水分、越冬率、株高、分枝数、产量和耗水量均随垄宽增加而增加。由于生物可降解地膜比普通地膜覆盖具有更好的环保效应, 生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植可作为半干旱区种植红豆草的最佳途径之一。

**关键词:** 垄沟集雨; 覆盖材料; 红豆草; 土壤水分; 生长特性

**中图分类号:** S541 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2019)03-0026-09

干旱少雨是我国西北半干旱地区主要气候特征, 频繁的干旱和不规则的降雨加剧该地区土壤干化和侵蚀风险<sup>[1]</sup>。土壤干化和侵蚀导致土地生产力不可逆转的下降, 进而影响我国西北半干旱地区土地利用和农业生产的可持续性<sup>[2]</sup>。因此, 有效管理有限水资源和提高降水利用效率在雨养农业生产系统中至关重要。此外, 全球气候变暖增加陆面蒸发损失, 提高植物需水要求, 加重水资源利用压力, 因此, 优化用水成为保障该区旱地农业发展和粮食安全生产的首要任务<sup>[3]</sup>。近

年来, 垄沟集雨覆盖种植作为半干旱地区一种重要的节水耕作措施, 具有优化作物用水模式和控制土地退化等特点, 有效保障了半干旱地区的粮食安全和可持续生产<sup>[4-5]</sup>。

垄沟集雨种植系统将降雨产生的垄面径流收集于沟中, 增加沟内(种植区)土壤水分含量, 有效提高作物对降水和土壤水分的利用效率<sup>[6]</sup>。目前, 垄沟集雨种植系统, 尤其是结合覆盖材料的垄沟集雨覆盖种植系统已广泛应用于我国旱地农业生产<sup>[7]</sup>。垄沟集雨覆盖种植系统可以减少土壤蒸发, 增加降水入渗时间, 从而提高种植区内土壤水分含量<sup>[8]</sup>。前人研究发现, 采用垄沟集雨覆盖种植可以维持土壤水分平衡, 显著增加农作物和牧草的产量及水分利用效率<sup>[9-10]</sup>。近年来, 垄沟集雨覆盖种植材料多采用普通地膜<sup>[11]</sup>, 普通地膜覆盖阻止近地空间与膜下土壤热量交换, 使膜下土壤吸热增多, 改变土壤水分动态, 改善土壤生态微环境; 但普通地膜作为一种聚乙烯化学材料, 易产生白色污

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(41461062)和(41661059)资助

作者简介: 张登奎(1991-), 男, 甘肃靖远人, 在读硕士。

E-mail: 2605867938@qq.com

王琦为通讯作者。

E-mail: wangqigsau@gmail.com

染和农田地膜残留,造成土壤通气性变差,影响作物生长发育,过度使用普通地膜会造成严重的环境问题和社会问题<sup>[12]</sup>。生物可降解地膜原材料是一类生物质材料,易被土壤微生物分解,田间应用生物降解地膜可以培肥土壤和提高作物产量,具有较好的环保效应<sup>[13]</sup>。

红豆草(*Onobrychis viciifolia*)是一种抗寒抗旱特性较强的多年生深根型豆科牧草,其根系强大,主根粗壮,侧根繁多并着生大量根瘤,能有效地提高土壤肥力和控制水土流失<sup>[14]</sup>。红豆草的营养价值较高,适口性较好,其饲料价值与紫花苜蓿类似,是较佳的饲料牧草作物之一<sup>[15]</sup>。与其他豆科牧草相比,红豆草在各个生育阶段均含较高的浓缩单宁,可沉淀在瘤胃中形成大量持久性泡沫的可溶性蛋白质,使反刍家畜在青饲、放牧利用时不易发生膨胀病<sup>[16]</sup>。此外,与紫花苜蓿(*Medicago sativa*)相比,红豆草具有更强的抗旱性<sup>[17]</sup>,是半干旱地区种植紫花苜蓿的良好替代品。

垄沟集雨覆盖种植模式作为提高干旱半干旱地区作物生产力的有效措施,相关学者已对其进行了广泛研究。但研究主要集中于垄沟集雨种植玉米(*Zea mays* sp.),小麦(*Triticum aestivum*),马铃薯(*Solanum tuberosum*)和紫花苜蓿等作物<sup>[18-21]</sup>,对于垄沟集雨种植红豆草有关方面研究较少。通过研究垄沟集雨种植红豆草对土壤水分、越冬率、株高、分枝数和地上生物量的影响,为半干旱区豆科牧草栽培提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

2016年3月29日~10月1日在中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象与生态环境试验基地(甘肃定西 35°33'N, 104°35'E, 海拔 1 896.7 m)进行大田试验。试验区属典型的半干旱地区,大陆性季风气候明显,光能较多,热量资源不足,降水稀少且变率大,气象灾害频繁。年日照时间为 2 433 h,年均气温 6.7℃,年均降水量 386 mm(图 1),年均蒸发量是年均降水量的 4.0 倍,年平均无霜期 140 d。试验地表层土壤为重壤土,田间持水量为 25.6%,作物调萎系数为 6.7%,0~120 cm 土壤平均容重 1.38 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验以甘肃红豆草为指示作物,采用田间沟垄覆盖集雨种植设计,垄覆盖普通地膜(CPF),生物可降解地膜(BMF)和土壤结皮(MCS)作为集雨区,沟无覆盖

为种植区,试验采用单因素完全随机设计,共设 10 个处理:3 种垄宽(30 cm, 45 cm 和 60 cm)×3 种覆盖材料(CPF、BMF、MCS)+传统平作(TFP),垄沟集雨种植各处理沟宽均为 60 cm,传统平作作为对照,重复 3 次。普通塑料地膜厚度和生物可降解膜厚度均为 0.008 mm,宽度为 1.4 m。土壤结皮为原土拍打而成。根据当地种植经验,垄的坡度约为 40°,垄高 15~20 cm,每小区有 4 条垄和 3 条沟。

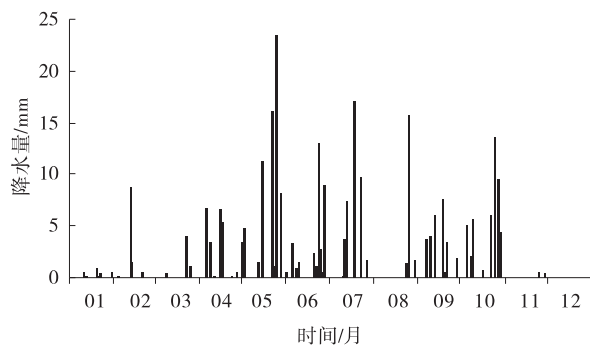


图 1 2016 年试验区降水量

Fig. 1 Precipitation at the experimental station in 2016

### 1.3 种植管理

2015年4月9日条播红豆草,对于垄沟集雨种植处理,每小区有3条沟,每条沟面积为 6 m<sup>2</sup>(长 10 m×宽 0.6 m),每个试验小区的红豆草播种量均为 100 kg/hm<sup>2</sup>,小区播种面积(3条沟面积)为 18 m<sup>2</sup>,播种深度为 3~5 cm,行距为 20 cm,每条沟种植 3 行红豆草,每小区共播种 9 行红豆草。对于传统平作处理不设垄沟措施,种植面积为 36 m<sup>2</sup>(长 10 m×宽 3.6 m),红豆草播种量为 100 kg/hm<sup>2</sup>,每小区播种 18 行红豆草(图 2)。在 2015 年 10 月 12 日红豆草收获后,对垄沟进行维护,保持垄和沟的完整性,在第 2 年龄红豆草返青前(2016 年 4 月 3 日),垄沟集雨种植处理重新覆盖生物可降解地膜和普通塑料地膜,土垄维持不变。在 2015 和 2016 年红豆草的整个生育期不施肥和灌溉,及时人工清除杂草。

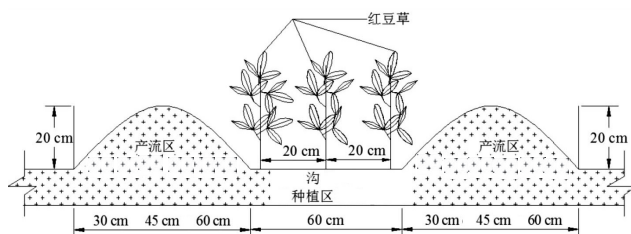


图 2 红豆草垄沟集雨覆盖种植

Fig. 2 Schematic diagram in ridge-furrow rainwater harvesting for sainfoin production

## 1.4 样品采集和测定

1.4.1 土壤水分测定 用烘干法(105℃, 10 h)测定土壤含水量,测定时间为红豆草返青前,收获后和降水大于 5 mm 后,测定深度 200 cm(0~20 cm 以 10 cm 为分层、20~200 cm 以 20 cm 为分层),在每个小区沟中同一土层取 3 钻土样均匀混合后装入铝盒用于测定。土壤贮水量( $W$ , mm)计算公式<sup>[22]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^{10} \theta_i \times BD_i \times H \times 10 \quad (1)$$

式中: $W$  为土壤贮水量,  $\theta$  为土壤质量含水量(%),  $BD$  为土壤容量( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $H$  为土壤深度(cm), 10 为系数。

1.4.2 越冬率测定 红豆草返青后用 60 cm×60 cm 的样方定点测定各处理红豆草越冬后存活的株数和死亡株数。

$$\text{越冬率}(\%)^{[23]} = \text{存活总株数} / \text{植株总数} \times 100\% \quad (2)$$

1.4.3 株高,分枝数和产量测定 在红豆草盛花期(2016 年 6 月 14 日),每个种植区内随机选取 20 株红豆草测量株高;在红豆草盛花期,每个小区随机选取 60 cm×60 cm 的样方,重复 3 次,将样方内红豆草齐地刈割测定分枝数,将刈割后的红豆草风干至恒重,计算其净干草产量。作物耗水量( $ET$ , mm)和水分利用效率 $[(WUE, \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm}))]$ 计算公式<sup>[24]</sup>:

$$ET_1 = P + R_e \times P \times \frac{h_1}{h_2} + (W_1 - W_2) \quad (3)$$

$$ET_2 = P + (W_1 - W_2) \quad (4)$$

$$WUE = \frac{NFY}{ET} \quad (5)$$

式中: $ET_1$  为垄沟耕作种植红豆草生育期耗水量(mm); $ET_2$  为传统平作种植红豆草生育期耗水量(mm); $P$  为红豆草生育期降水量(mm); $R_e$  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  $W_2$  分别为红豆草返青前一天和刈割后一天测定 0~200 cm 土壤深度的土壤贮水量; $NFY$  为红豆草净干草产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );垄沟耕作种植净干草产量是基于沟面积的干草产量,传统平作种植净干草产量是基于小区总面积的干草产量。

## 1.5 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 对数据进行统计分析和图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 垄沟集雨种植红豆草对土壤贮水量的影响

土壤贮水量与降水、灌溉、蒸散、径流和下渗等因素有关,红豆草全生育期无灌溉,降水量较小,由于测定土层较深(200 cm),土壤水下渗忽略不计。垄沟集雨种植红豆草各处理 0~200 cm 土层土壤贮水量随生育期延伸而变化(图 3)。在红豆草返青期(3~4 月),气温较低,红豆草越冬后返青,生长缓慢,耗水量小,各

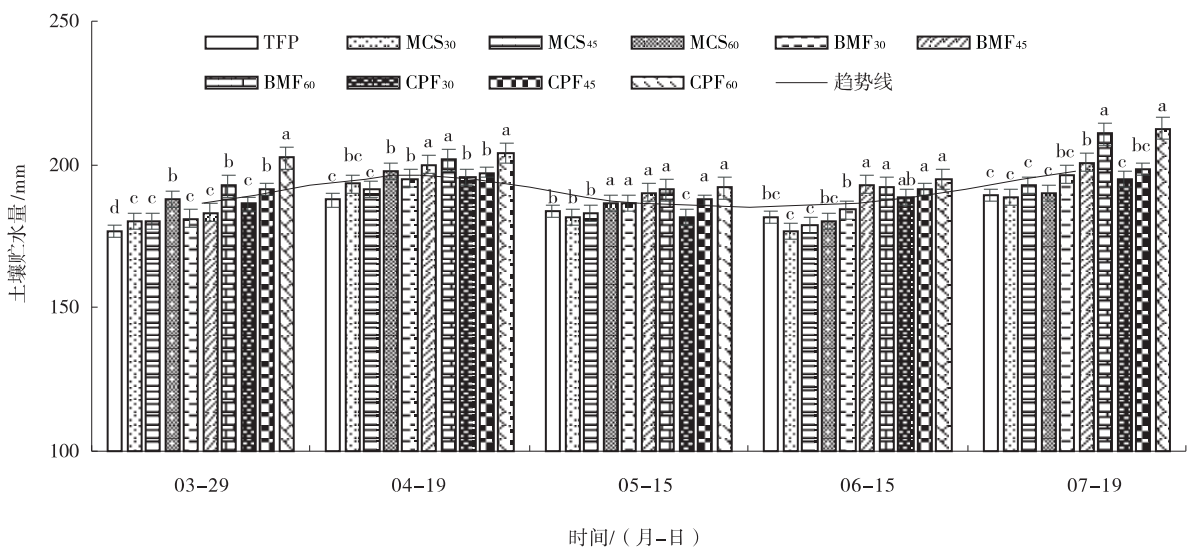


图 3 红豆草生育期 0~200 cm 土壤贮水量

Fig. 3 Soil water storage in 0~200 cm soil depth in sainfoin growing season

注:TFP:传统平作;MSC:土垄;BMF:生物可降解膜垄;CPF:普通膜垄;下标 30,45 和 60 表示垄宽(cm)。根据 Duncan 多重比较,不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同

处理贮水量呈增加趋势。在红豆草分枝期和初花期(5~6月),红豆草进入旺盛生长阶段,降水开始增多,但红豆草耗水增加,土壤贮水量开始减小且各处理间差异较大。在红豆草收获期(6~7月),红豆草进入生长停止期,作物生长对水分的需求减少,且此时期降水量较多,蒸腾耗水减少,各处理的土壤贮水量逐渐升高。红豆草全生育期,在同一覆盖材料下,不同垄宽处理的土壤贮水量排列次序为垄宽 60 cm>垄宽 45 cm>垄宽 30 cm。就不同覆盖材料平均值而言,各处理土壤贮水量的排列次序为 CPF>BMF>MSC>TFP,其中 CPF<sub>45</sub> 和 BMF<sub>45</sub> 土壤含水量显著大于 MCS<sub>45</sub> 和 TFP, CPF<sub>45</sub> 与 BMF<sub>45</sub> 和 MCS<sub>45</sub> 与 TFP 之间差异不显著。与传统平作相比,CPF, BMF 和 MSC 土壤贮水量分别提高 10.64, 9.36 和 2.09 mm。

## 2.2 垄沟集雨种植红豆草对土壤含水量空间变化的影响

为了更好的揭示垄沟集雨种植红豆草的土壤水分空间变化特征,选取垄宽均为 45 cm 的不同覆盖材料土壤含水量与传统平作进行比较。在红豆草返青前一天(2016年3月29日),各处理(0~200 cm)土壤含水量随土层深度的增加呈现先增大后减小的趋势。在 0~200 cm 土层深度,各处理土壤含水量整体表现为

CPF<sub>45</sub>>BMF<sub>45</sub>>MCS<sub>45</sub>>TFP(图 4a)。不同处理间在 0~40 cm 和 140~200cm 土层深度的土壤含水量大于在 40~140 cm 土层深度。说明垄沟集雨覆盖种植红豆草对返青前 40~140 cm 土层的土壤含水量影响不大。红豆草返青前 0~200 cm 土层深度平均土壤含水量, CPF<sub>45</sub>, BMF<sub>45</sub> 和 MCS<sub>45</sub> 土壤含水量均高于 TFP, CPF<sub>45</sub>, BMF<sub>45</sub> 和 MCS<sub>45</sub> 土壤含水量较 TFP 分别高了 8.68%, 8.14% 和 5.13%。

在红豆草刈割后一天(2016年6月14日),各处理(0~200 cm)的土壤含水量随土层深度的增加呈现先增加后减小再增加的趋势。在 0~200 cm 土层,不同处理同一土层的土壤含水量,均表现为 CPF<sub>45</sub> 和 BMF<sub>45</sub> 大于 MCS<sub>45</sub> 和 TFP。红豆草刈割期,与传统平作相比,土壤结皮覆盖垄沟集雨种植增加了 0~120 cm 土层的土壤含水量,减少了 120~160 cm 土层的土壤含水量。红豆草刈割后 0~200 cm 土层平均土壤含水量,各处理的排列次序为 CPF<sub>45</sub> ≈ BMF<sub>45</sub> > MCS<sub>45</sub> ≈ TFP, CPF<sub>45</sub>, BMF<sub>45</sub> 和 MCS<sub>45</sub> 的土壤含水量与 TFP 相比,分别提高了 8.8%, 7.1% 和 1.5%。普通地膜和生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植增加了 0~200 cm 各土层的土壤含水量(图 4)。

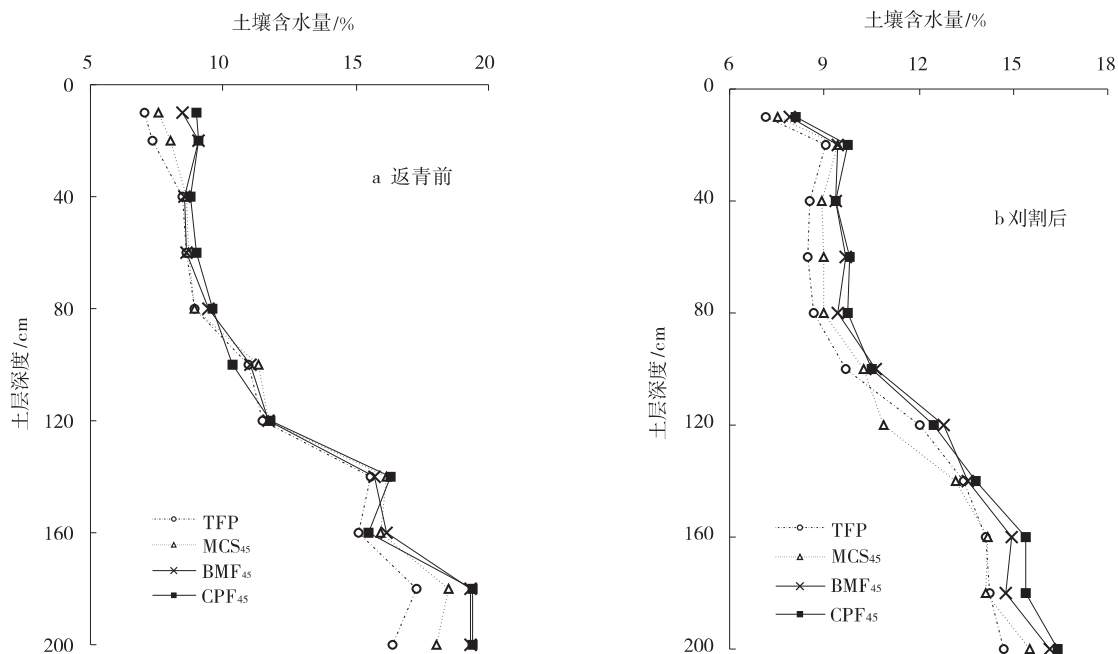


图 4 红豆草不同时期不同土层的土壤含水量

Fig. 4 Soil moisture content varied with soil depth in different sainfoin growing seasons

## 2.3 垄沟集雨种植对红豆草越冬率的影响

越冬率是衡量红豆草生产性能的一个重要指标,

越冬前幼苗状态、植株形态、营养物质积累等导致垄沟集雨种植各处理红豆草的越冬率出现差异(图 5a)。

在同一覆盖材料下,红豆草越冬率随垄宽的增加而增加,排列次序为垄宽 60 cm > 垄宽 45 cm > 垄宽 30 cm。在土壤结皮覆盖种植中,MSC<sub>60</sub> 红豆草越冬率显著高于 MSC<sub>45</sub>, MSC<sub>45</sub> 红豆草越冬率显著高于 MSC<sub>30</sub>。在生物可降解地膜覆盖和普通地膜覆盖种植中, BMF<sub>60</sub> (CPF<sub>60</sub>) 显著高于 BMF<sub>45</sub> (CPF<sub>45</sub>) 和 BMF<sub>30</sub> (CPF<sub>30</sub>), BMF<sub>45</sub> (CPF<sub>45</sub>) 和 BMF<sub>30</sub> (CPF<sub>30</sub>) 之间红豆

草越冬率相差不显著。就不同覆盖材料平均值,普通地膜覆盖种植红豆草越冬率显著高于生物可降解地膜覆盖种植,生物可降解地膜覆盖种植红豆草越冬率显著高于土壤结皮覆盖种植。土壤结皮覆盖种植红豆草越冬率显著高于平作。与传统平作相比, CPF, BMF 和 MSC 红豆草越冬率分别提高 23.6%, 18.1% 和 8.2%。

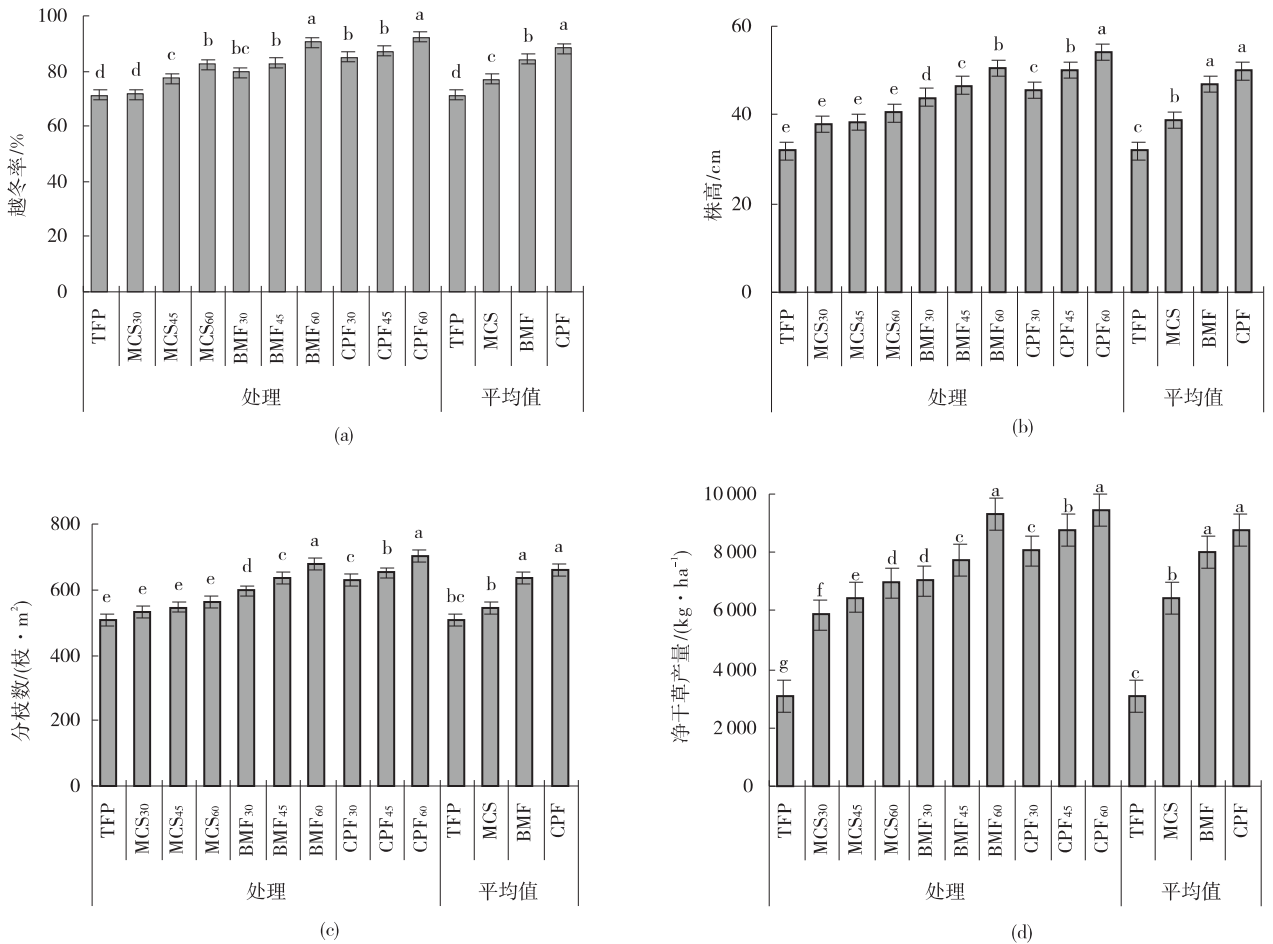


图 5 垄沟集雨覆盖种植下红豆草的生长特性

Fig. 5 Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with mulching on sainfoin growth characteristics

#### 2.4 垄沟集雨覆盖种植对红豆草株高,分枝数及产量的影响

垄沟集雨种植红豆草株高,分枝数和产量因覆盖材料和耕作措施不同而出现差异(图 5b、5c、5d)。在同一覆盖材料下,红豆草株高,分枝数和产量随垄宽的增加而增加,排列次序为垄宽 60 cm > 45 cm > 30 cm。红豆草的株高和分枝数,在土壤结皮覆盖种植中, MSC<sub>30</sub>, MSC<sub>45</sub> 和 MSC<sub>60</sub> 之间差异不显著,在生物可降解地膜覆盖和普通地膜覆盖种植中, BMF<sub>60</sub> (CPF<sub>60</sub>) 显著高于 BMF<sub>45</sub> (CPF<sub>45</sub>), BMF<sub>45</sub> (CPF<sub>45</sub>) 显著高于

BMF<sub>30</sub> (CPF<sub>30</sub>)。红豆草产量在 3 种覆盖材料种植中,均表现为垄宽 60 cm 种植处理显著高于垄宽 45 cm, 垄宽 45 cm 种植处理显著高于垄宽 30 cm。就不同覆盖材料红豆草株高,分枝数和产量的平均值而言,以上指标均表现为普通地膜覆盖种植和生物可降解地膜覆盖种植显著高于土壤结皮覆盖种植,土壤结皮覆盖种植显著高于传统平作。与传统平作相比, CPF、BMF 和 MSC 红豆草株高分别提高 56.6%、47.7% 和 21.9%;分枝数分别提高 30.6%、25.8% 和 7.8%, CPF、BMF 和 MSC 红豆草净干草产量分别是传统平

作的 2.8, 2.6 和 2.1 倍。

## 2.5 垄沟集雨种植对红豆草耗水量的影响

垄沟集雨覆盖种植影响红豆草生育期耗水量。红豆草全生育期,在同一覆盖材料下,红豆草耗水量随垄宽的增加而增加,排列次序为垄宽 60 cm > 45 cm > 30 cm。在土壤结皮覆盖种植中, MSC<sub>30</sub>, MSC<sub>45</sub> 和 MSC<sub>60</sub> 之间红豆草耗水量差异不显著。在生物可降解地膜覆盖种植中, BMF<sub>60</sub> 红豆草耗水量显著高于

BMF<sub>45</sub> 和 BMF<sub>30</sub>, BMF<sub>45</sub> 和 BMF<sub>30</sub> 之间相差不显著。在普通地膜覆盖种植中, CPF<sub>60</sub> 红豆草耗水量显著高于 CPF<sub>45</sub>, CPF<sub>45</sub> 红豆草耗水量显著高于 CPF<sub>30</sub>。不同覆盖材料红豆草耗水量的平均值,普通地膜覆盖种植和生物可降解地膜覆盖种植显著高于土壤结皮覆盖种植,土壤结皮覆盖种植显著高于传统平作。与传统平作相比, CPF, BMF 和 MSC 处理红豆草生育期耗水量分别提高 40.5%, 30.1% 和 16.1% (图 6a)。

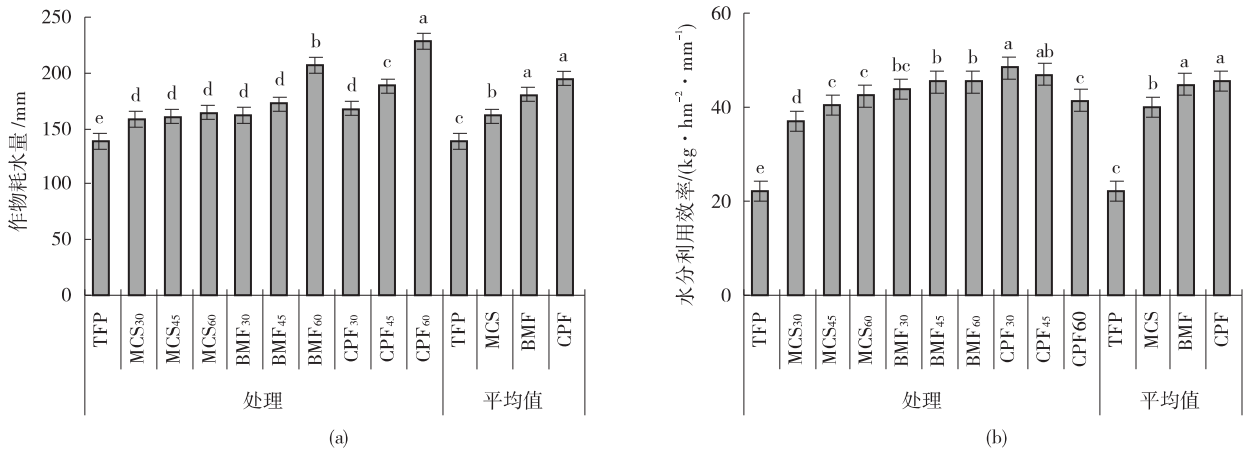


图 6 垄沟集雨种植下红豆草的耗水量和水分利用效率

Fig. 6 Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with mulching on sainfoin growth characteristics

## 2.6 垄沟集雨种植对红豆草水分利用效率的影响

垄沟集雨种植对红豆草水分利用效率因各处理作物产量和耗水量的不同而出现差异(图 6b)。红豆草全生育期,在土壤结皮覆盖种植中, MSC<sub>45</sub> 和 MSC<sub>60</sub> 红豆草水分利用效率显著高于 MSC<sub>30</sub>, MSC<sub>45</sub> 和 MSC<sub>60</sub> 之间红豆草水分利用效率差异不显著, 3 种垄宽处理红豆草水分利用效率排列次序为 MSC<sub>60</sub> > MSC<sub>45</sub> > MSC<sub>30</sub>。在生物可降解地膜覆盖种植中, BMF<sub>30</sub>、BMF<sub>45</sub> 和 BMF<sub>60</sub> 之间红豆草水分利用效率相差不显著, 3 种垄宽处理红豆草水分利用效率排列次序为 BMF<sub>60</sub> ≈ BMF<sub>45</sub> > BMF<sub>30</sub>。在普通地膜覆盖种植中, CPF<sub>30</sub> 和 CPF<sub>45</sub> 红豆草水分利用效率显著高于 CPF<sub>60</sub>, CPF<sub>30</sub> 和 CPF<sub>45</sub> 之间红豆草水分利用效率相差不显著, 3 种垄宽处理红豆草水分利用效率排列次序为 BMF<sub>30</sub> > BMF<sub>45</sub> > BMF<sub>60</sub>。就不同覆盖材料红豆草水分利用效率的平均值而言,普通地膜覆盖种植和生物可降解地膜覆盖种植显著高于土壤结皮覆盖种植,土壤结皮覆盖种植显著高于平作。CPF、BMF、MSC 和 TFP 红豆草水分利用效率分别为 45.6、44.9、40.0 和 22.2 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。

## 3 讨论

研究不同集雨垄宽和不同覆盖材料的集雨种植与传统平作种植差异,以寻求半干旱区种植红豆草较佳措施。结果表明,降水分布和垄沟集雨覆盖系统(耕作系统和覆盖系统)对土壤水分储存及红豆草产量有显著影响。杜轶等<sup>[25]</sup>研究发现,垄沟集雨覆盖种植比传统平作截留更多降雨,并允许截留的降雨渗入种植区土壤,从而增加了种植区土壤水分含量。试验结果表明,红豆草全生育期与传统平作相比,普通地膜,生物可降解地膜和土壤结皮覆盖的垄沟集雨种植均可提高种植区内土壤水分,且表现为普通地膜和生物可降解地膜覆盖种植显著高于土壤结皮覆盖种植。试验还发现垄沟集雨覆盖种植红豆草对返青前 40~140 cm 土层的土壤含水量影响不大。这是由于冬季降雨较少,表层土壤没有降雨径流流向种植区,且多年生牧草冬季地上部分停止生长,植物蒸腾较少,土壤水分损失主要来源于土壤蒸发<sup>[26]</sup>。此外,我国西北降雨大部分发生在夏末秋初,该时间段内的土壤蒸发和植物蒸腾也达到最高,因此,在高蒸发需求条件下,垄沟集雨系统中土壤结皮表层增加一定覆盖物,可以减少水分蒸

发损失和增加作物可用土壤水分<sup>[27]</sup>。与传统耕作相比,垄沟集雨种植使土壤具有更强蓄水能力,且差异性随干旱程度增加而增加<sup>[28]</sup>。试验表明,在红豆草收获后,与传统平作相比,土壤结皮覆盖垄沟集雨种植增加了0~120 cm 土层深度的土壤含水量,减少了120~160 cm 土层深度的土壤含水量;普通地膜和生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植增加0~200 cm 各土层深度的土壤含水量。

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的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>[29]</sup>。垄沟集雨通过改变田间微地形减缓风速,减少土壤蒸发,增加种植区内土壤水分含量,促进植株生长,提高作物产量。同时,地膜覆盖显著增加了植物对温度、水分和养分的可获得性,提高多年生作物的越冬能力<sup>[30]</sup>。试验表明,与传统平作相比,普通地膜覆盖、生物可降解地膜覆盖和土壤结皮覆盖种植红豆草越冬率分别提高23.6%,18.1%和8.2%;株高分别提高56.6%,47.7%和21.9%;分枝数分别提高30.6%,25.8%和7.8%。普通地膜覆盖、生物可降解地膜覆盖和土壤结皮覆盖种植红豆草的净干草产量分别是传统平作的2.8,2.6和2.1倍。红豆草越冬率、株高、分枝数和净干草产量均表现为普通地膜覆盖高于生物可降解地膜覆盖,生物可降解地膜覆盖种植高于土壤结皮覆盖。

垄沟集雨种植系统作为一种保护性耕作系统,可以提高作物产量和优化水分利用效率<sup>[31]</sup>。传统平作种植水分有限,作物长势较弱,植物通过蒸腾作用散失的水分较少;塑料覆盖的垄沟种植系统增加土壤水分含量,使得覆膜土地能够支持更好的植物生长。通过延长植物冠层的遮荫效应,植物生长得到了积极的反馈,从而降低了风速、到达土壤的太阳辐射量和土壤温度,最终减少了蒸发水分损失<sup>[32]</sup>。随着植物冠层的生长,蒸腾逐渐增加,因此,垄沟集雨种植增加作物耗水量<sup>[33]</sup>。试验结果表明,与传统平作相比,普通地膜覆盖,生物可降解地膜覆盖和土壤结皮覆盖种植红豆草生育期耗水量分别提高40.5%,30.1%和16.1%。在半干旱区干旱胁迫持续增加的情况下,垄沟集雨覆盖种植是一种同时提高作物水分利用率和产量的有效节水耕作措施。霍海丽等<sup>[34]</sup>研究表明,普通地膜和生物可降解地膜平均水分利用效率比传统平作分别提高

35%和31%。试验结果表明,与传统平作相比,普通地膜覆盖,生物可降解地膜覆盖和土壤结皮覆盖种植红豆草水分利用效率分别提高23.4,22.7和17.8 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。通过分析,消除或减少非生产性水的使用,是增加西北干旱半干旱区作物水分利用效率和产量的有效方法。在干旱半干旱区,地膜覆盖可能是提高作物效益的一个有效措施,但大量的塑料残留物可能会导致土壤结构恶化,从而导致农业生产不可持续。生物降解地膜覆盖可以作为半干旱地区垄沟集雨种植和其他旱作系统提高水分利用效率和作物产量短期可行的选择。

## 4 结论

普通地膜和生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植技术是提高半干旱区红豆草产量和水分利用效率的有效技术。普通地膜和生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植可以显著提高种植区土壤含水量。通过改善作物根区土壤水分微环境,普通地膜和生物可降解地膜覆盖垄沟集雨种植显著提高了红豆草越冬率、株高、分枝数、净干草产量、作物耗水量和水分利用效率。但普通地膜和生物可降解地膜覆盖种植之间在以上指标中差异不显著。与普通地膜覆盖相比,生物可降解地膜覆盖较大可能减少土壤残留和土壤污染,是半干旱地区垄沟集雨种植红豆草和实现农业生产可持续的有效措施之一。

### 参考文献:

- [1] 胡子瑛,周俊菊,张利利,等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报,2018,38(6):1908-1919.
- [2] 成婧,吴光艳,云峰,等. 渭北旱塬侵蚀退化土壤生产力的恢复与评价[J]. 中国水土保持科学,2013,11(3):6-11.
- [3] 姚俊强,杨青,毛炜峰,等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究,2018,35(2):269-276.
- [4] 阎旭东,王秀领,徐玉鹏,等. 旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应[J]. 中国生态农业学报,2018,26(1):75-82.
- [5] 李洁,晋凡生,李晓平,等. 施肥和覆膜对旱地垄沟种植红芸豆耗水特征及产量效应的研究[J]. 中国农学通报,2018,34(13):19-23.
- [6] 何峰,王堃,李向林,等. 垄沟集雨对干旱半干旱区土壤水热条件及老芒麦产草量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(12):122-126.
- [7] 王晓凌,陈明灿,李凤民,等. 垄沟覆膜集雨系统膜垄保墒

- 增温对马铃薯产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3):11-16.
- [8] 寇江涛, 师尚礼. 旱地垄沟集雨种植紫花苜蓿最佳沟垄宽比的确定[J]. 草地学报, 2011, 19(2):247-252.
- [9] 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.
- [10] 李强, 王琦, 张恩和, 等. 生物可降解地膜覆盖对干旱灌区玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9):155-159.
- [11] 曾秀存, 陈其鲜, 许耀照, 等. 地膜覆盖种植方式的土壤水效应及对春油菜生长的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 32(2):1-8.
- [12] 白雪, 周怀平, 解文艳, 等. 不同类型地膜覆盖对玉米农田水热状况及产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2):414-420.
- [13] 王建武, 张雄, 段义忠. 生物可降解地膜对马铃薯生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(24):97-102.
- [14] 李立, 周泽生. 红豆草根系的研究[J]. 水土保持通报, 1993(6):39-42.
- [15] 周艳春, 王志峰, 樊奋成, 等. 10个紫花苜蓿产草量及营养价值比较分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 33(6):73-73.
- [16] 张晓庆, 李勇, 李发弟, 等. 红豆草单宁含量对绵羊养分消化率及氮利用的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2009, 40(3):356-362.
- [17] 阿尼克江, 杨莉, 别肯. 红豆草高产栽培技术[J]. 农村科技, 2007(8):75-76.
- [18] 刘璐璐, 张雪玲, 郝洛延, 等. 沟垄集雨种植和氮肥对春玉米生长及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5):675-684.
- [19] 杨震. 集雨种植条件下不同补灌模式对土壤水分、养分及冬小麦产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [20] 王友生, 王多尧. 不同覆盖种植模式对马铃薯土壤温度、水分及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6):59-64.
- [21] 宋兴阳, 王琦, 胡广荣, 等. 垄沟集雨种植对土壤贮水量和紫花苜蓿生长特性的影响[J]. 草原与草坪, 2017, 37(3):60-67.
- [22] Wang Qi, Li F C, Zhang D K, *et al.* Sediment control and fodder yield increase in alfalfa (*Medicago sativa*) production with tied-ridge-furrow rainwater harvesting on sloping land[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225:55-63.
- [23] 王伟东, 邓波, 王显国, 等. 末次刈割时间对科尔沁沙地苜蓿越冬率及根系营养物质含量的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(4):810-813.
- [24] Li X Y, Gong J D. Effect of different ridge: furrow ratios and supplement irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54:243-254.
- [25] 杜轶, 董晓辉, 张勇, 等. 垄沟耕作条件下液膜覆盖对土壤水热状况及玉米生长的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):72-77.
- [26] 张磊, 张晓煜, 卫建国, 等. 宁南山区不同种植体系土壤水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):104-108.
- [27] 吴兵, 高玉红, 李映, 等. 不同覆膜方式对西北旱地麦田土壤水热特征和产量形成的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5):741-749.
- [28] Wu J, Xiao K, Zhao C, *et al.* Ridge-furrow cropping of maize reduces soil carbon emissions and enhances carbon use efficiency[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 256:153-162.
- [29] 李青峰, 杜文华. 陇东旱塬区不同宽度垄沟集雨种植对玉米营养生长的影响[J]. 草原与草坪, 2013, 33(4):54-57.
- [30] 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.
- [31] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 等. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10):113-123.
- [32] Wang Q, Ren X, Song X Y, *et al.* The optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-covering material in rain-water harvesting for oats production in semiarid regions of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 172:1-13.
- [33] Zhao H, Xiong Y C, Li F M, *et al.* Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104(2):68-78.
- [34] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 等. 不同集雨种植方式对干旱区紫花苜蓿种植的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10):2770-2778.



# Effects of ridge-furrow rainfall harvesting with ridge mulching on soil moisture condition and growth characteristics of sainfoin

ZHANG Deng-kui, WANG Qi

*(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)*

**Abstract:** In order to improve the sustainability of land production, and select a suitable ridge-mulching material for sainfoin production in ridge-furrow rainwater harvesting system in semi-arid regions of China. A field experiment was conducted to determine the effects of three ridge mulching materials (common plastic film, CPF; biodegradable mulching film, BMF; manually compacted soil, MCS) and furrow to ridge ratios (60:30, 60:45 and 60:60 cm) on soil moisture, winter survival rate, plant height, branch number, fodder yield, water consumption and water use efficiency during sainfoin growing seasons in 2016, and the traditional flat planting (TFP) was used as a control. The results showed that the soil moisture of 40~140 cm soil layer was not significantly different among all treatments in the greening period, but it was significant after harvest. Compared with TFP, the soil water storage (0~200 cm) increased by 10.64, 9.36 and 2.09 mm, winter survival rate increased by 23.6%, 18.1% and 8.2%, plant height increased by 56.6%, 47.7% and 21.9%, branch number increased by 30.6%, 25.8% and 7.8%, net hay yield increased by 184.9%, 161.5% and 109.3%, water consumption increased by 40.5%, 30.1% and 16.1%, water use efficiency increased by 23.4, 22.7 and 17.8 kg/(ha·mm) during the sainfoin growth season, respectively for CPF, BMF and MCS. Under the same mulching material, the soil moisture, winter survival rate, plant height, branch number, hay yield, water consumption increased with the increasing of ridge width. Due to the better environmental protection effect of biodegradable mulching film, the ridge-furrow rainfall harvesting with ridge mulching biodegradable mulching film was the best way for sainfoin production in semi-arid area.

**Key words:** ridge-furrow rainwater harvesting; mulching materials; sainfoin; soil moisture; growth characteristics