

DOI: 10.5846/stxb201509081853

宋兴阳,王琦,李富春,胡广荣,张登奎,张恩和,刘青林,王鹤龄.覆盖材料和沟垄比对土壤水分和紫花苜蓿干草产量的影响.生态学报,2017,37(3): - .

Song X Y, Wang Q, Li F C, Hu G R, Zhang D K, Zhang E H, Liu Q L, Wang H L. Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on soil moisture and alfalfa forage yield. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

覆盖材料和沟垄比对土壤水分和紫花苜蓿干草产量的影响

宋兴阳¹, 王琦^{1,*}, 李富春¹, 胡广荣¹, 张登奎¹, 张恩和², 刘青林², 王鹤龄³

1 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070

2 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070

3 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020

摘要:为寻求半干旱黄土高原区种植紫花苜蓿的适宜覆盖材料和最佳沟垄比,采用完全随机设计布置大田试验,以传统平作为对照,研究不同垄覆盖材料(土壤结皮、生物可降解地膜和普通地膜)和不同沟垄比(沟宽:垄宽分别为 60:30、60:45 和 60:60,单位是 cm)对土壤水分和紫花苜蓿干草产量等的影响。结果表明:通过对 2012 年和 2013 年紫花苜蓿生育期降雨量统计,2 年平均值显示,无效降雨次数(53 次)大于有效降雨次数(27 次),无效降雨对总降雨量的贡献率(19%)小于有效降雨(81%)。就紫花苜蓿全生育期而言,与平作相比,SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀(SR、BMR 和 CMR 分别代表土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄,下标分别表示垄宽为 30、45 和 60cm)连续 2 年的平均根层(0—140 cm)土壤贮水量分别提高 12.8、19.2、24.4、26.0、30.7、40.5、29.9、37.1 和 47.7 mm。垄沟集雨种植第 1 年龄和第 2 年龄紫花苜蓿根层没有出现明显干层。与平作相比,SR₃₀、SR₄₅ 和 SR₆₀ 的连续 2 年紫花苜蓿平均实际干草产量分别降低 3%、8% 和 13%,WUE 分别提高 52%、58% 和 55%;BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀ 的连续 2 年紫花苜蓿平均实际干草产量分别提高 14%、12%、7%、17%、19% 和 9%,WUE 分别提高 49%、62%、59%、51%、67% 和 56%。当紫花苜蓿生育期降雨量为 380.7—427.6 mm 和沟垄比为 60 cm:35—36 cm 时,生物可降解膜垄和普通膜垄的紫花苜蓿实际干草产量达到最大值,为该地区垄沟集雨种植紫花苜蓿提供参考。

关键词: 垄沟集雨;紫花苜蓿;土壤水分;干草产量;水分利用效率

Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on soil moisture and alfalfa forage yield

SONG Xingyang¹, WANG Qi^{1,*}, LI Fuchun¹, HU Guangrong¹, ZHANG Dengkui¹, ZHANG Enhe², LIU Qinglin², WANG Heling³

1 College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3 Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province/Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

Abstract: To determine the optimum furrow-to-ridge ratio and a suitable ridge-mulching material for alfalfa production in a ridge-furrow rainwater harvesting system in the semi-arid Loess Plateau, a field experiment with a randomized complete block design was conducted during the 2012 and 2013 alfalfa growing seasons. The experiment was designed to investigate the effects of different mulching materials (manually compacted soil crust, biodegradable mulch film, and common plastic

基金项目:国家自然科学基金(41461062, 41161090)

收稿日期:2015-09-08; 网络出版日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangqigsau@gmail.com

film) and furrow to ridge ratios (60:30, 60:45, and 60:60 [cm:cm]) on soil moisture and alfalfa forage yield, with traditional flat planting (TFP) as a control. The average number of ineffective rainfall events (53) was greater than that of effective rainfall events (27) over these two years, and the contribution rate (19%) of the ineffective rainfall to annual rainfall was less than that (81%) of the effective rainfall. Compared with TFP, increases in the soil water storage at depths of 0 - 140 cm were 12.8, 19.2, 24.4, 26.0, 30.7, 40.5, 29.9, 37.1, and 47.7 mm in SR₃₀, SR₄₅, SR₆₀, BMR₃₀, BMR₄₅, BMR₆₀, CMR₃₀, CMR₄₅, and CMR₆₀ (SR, BMR, and CMR were ridges with manually compacted soil, covered with bio-degradable mulch film, and covered with common plastic film, respectively, and subscripts 30, 45, and 60 refer to ridge widths (cm), all with 60 cm furrow width), respectively. There was no distinctive dry soil layer found within the root zone among ridge-furrow rainwater harvesting treatments during 2 consecutive years. Compared with TFP, forage yields decreased by 3%, 8%, and 13% for SR₃₀, SR₄₅, and SR₆₀, respectively, while water use efficiency (WUE) increased by 52%, 58%, and 55% over the two years in these ridge-furrow systems. Forage yields increased by 14%, 12%, 7%, 17%, 19%, and 9% for BMR₃₀, BMR₄₅, BMR₆₀, CMR₃₀, CMR₄₅, and CMR₆₀, respectively, while WUE increased by 49%, 62%, 59%, 51%, 67%, and 56% in these ridge-furrow systems in the same period. Optimum furrow width was 35—36 cm for BMR and CMR in the ridge—furrow rainwater harvesting system with 60 cm furrows for alfalfa production in this region that has an annual 380.7—427.6 mm rainfall. This information is useful for alfalfa production in ridge-furrow rainwater harvesting systems in this region.

Key Words: ridge-furrow rainwater harvesting; alfalfa; soil moisture; forage yield; water use efficiency

半干旱黄土高原区对气候变化敏感,位于生态环境脆弱带,该区域水资源缺乏和水土流失严重,农牧业生产主要依赖天然降雨^[1],多年(1972—2012年)年平均降雨量为383.3 mm,同时,降水时空分布不均匀,60%年降水集中于7—9月^[2],多数降雨量 < 5 mm,不能被植物有效吸收利用,年潜在蒸发量(1445 mm)较大,年降雨量主要依靠少数大强度降雨或暴雨,大强度降雨或暴雨通常导致水土流失。王晓娟等^[3]研究表明,半干旱区作物吸收和利用降雨量占总降雨量25%—30%,而70%—75%降雨以无效蒸发和径流损失,干旱和水土流失严重制约该区农牧业发展。近些年,随着全球气候变暖,干旱和极端气候对该区域农牧业生产产生更大威胁^[4]。种植模式单一、干旱和黄土层支离破碎加剧该区域植被退化、水土流失和土壤沙漠化。提高农牧业生产力和保持农牧业可持续发展最佳途径是通过集雨和覆盖措施提高降水利用效率和控制水土流失^[5]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是我国西北地区种植面积最大的牧草,具有较高干草产量、营养价值、抗旱性等特性,同时,适应不同土壤和气候等^[6]。Zhao等^[7]研究表明,紫花苜蓿种植可以控制水土流失和固定空气氮素,但紫花苜蓿耗水量大于普通作物,当紫花苜蓿种植多年后,较高蒸散量导致土壤形成干层,土壤干层不仅影响现存紫花苜蓿对水分需求和产量提高,而且影响后茬作物的选择和生存。Asseng和Hsiao^[8]研究结果显示,紫花苜蓿具有较长根系,能吸收深层土壤水分,较高植被覆盖能截流更多降雨,减少水土流失和提高土壤水分入渗,从而在短期内增加土壤含水量。

垄沟集雨种植技术是平地或缓坡地沿等高线修筑相互交替垄和沟集雨系统,垄覆盖作为集雨区,沟覆盖或不覆盖作为种植区,垄产生径流流入沟中,径流和降雨在沟中进行叠加,从而使无效降雨变为有效降雨或小雨变为大雨,同时,覆盖材料减少土壤水分蒸发,垄降低风速,为作物出苗和生长提供有利条件^[9-11]。Jia等^[12]研究表明,垄沟集雨种植技术增加表层(0—20 cm)土壤水分和温度,与传统平作相比,垄宽30 cm和垄宽60 cm普通膜垄的紫花苜蓿干草产量分别增加10.7%和40.3%,水分利用效率(WUE)分别增加8.12 kg/(hm²/mm)和9.97 kg/(hm²/mm);垄宽30 cm和垄宽60 cm土垄的紫花苜蓿干草产量分别减少14.2%和28.3%,WUE分别减少6.26 kg/(hm²/mm)和5.38 kg/(hm²/mm)。

国内外垄沟集雨种植技术覆盖材料大多采用普通地膜,普通地膜在自然条件下较难降解,造成大量地膜残留,恶化土壤结构,阻碍土壤水分、养分和空气等传输,对土壤微生物生长造成严重威胁,从而影响作物生产

和区域农牧业可持续发展^[13]。

国内外垄沟集雨种植研究多数集中于马铃薯和玉米等一年生穴播类作物^[14-15],对紫花苜蓿等多年生条播类作物研究相对较少,尤其应用生物可降解地膜。本试验研究不同覆盖材料和不同沟垄比对土壤水分、干草产量和 WUE 等影响,确定我国半干旱黄土高原垄沟集雨种植紫花苜蓿技术的参数。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2012—2013 年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, 海拔 1896.7 m) 进行,该区地处黄土高原西部丘陵区,属半干旱区,光能较多,热量资源不足,雨热同季,气候干燥,属典型温带大陆性季风气候。经过对该区域 40 a(1972—2012 年)降雨量统计,年均降雨量 383.3 mm,降雨少,且分配不规律,5—10 月降雨量占年降雨量的 86.9%;蒸发强烈,年潜在蒸发量(1445 mm)是年均降雨量的 3.8 倍;年平均日照时间为 2659.3 h,年平均气温 6.7 °C,月平均最高和最低气温分别出现在 7 月(25.9°C)和 1 月(-13.0°C);平均无霜期 140 d。试验地地势平坦,土壤为重壤土,0—100 cm 土壤平均容重为 1.38 g/cm³,田间持水量为 25.6%,永久萎蔫系数为 6.7%。供试土壤肥力状况如表 1。当地耕作制度为 1 年 1 熟制,主要农作物为春小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、燕麦(*Avena sativa*)、蚕豆(*Vicia faba*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、谷子(*Panicum miliaceum*)和胡麻(*Sesamum indicum*),主要牧草为紫花苜蓿和红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)。

1.2 试验设计

试验以紫花苜蓿甘农 3 号为供试作物,采用田间垄沟集雨覆盖种植技术,垄覆盖作为集雨区,沟无覆盖作为种植区,小区随机排列,共设 10 个处理(3 种覆盖材料×3 种沟垄比+1 平作),重复 3 次。3 种覆盖材料分别为生物可降解地膜、普通地膜和土壤结皮,3 种沟垄比分别为 60:30、60:45 和 60:60 (cm: cm),各处理沟宽均为 60 cm,传统平作(traditional flat planting)作为对照。土垄(ridges with manually compacted soil)、生物可降解膜垄(ridges covered with biodegradable mulch film)、普通膜垄(ridges covered with common plastic film)和传统平作(traditional flat planting)的代表符号分别为 SR、BMR、CMR 和 TFP,SR₃₀、SR₄₅ 和 SR₆₀(BMR₃₀、BMR₄₅ 和 BMR₆₀或 CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀)的垄宽分别为 30、45 和 60 cm。根据当地种植经验,垄坡约为 40°,垄高约为 20 cm,每 1 小区有 4 条垄和 3 条沟,试验种植示意图见图 1,试验处理编号、垄面积、沟面积和垄覆盖材料见表 2。普通地膜生产于石家庄市开发区永盛塑料制品有限公司,生物可降解地膜生产于德国 BASF 公司,生物可降解地膜基料为淀粉和其他生物材料,淀粉和其他生物材料来源于玉米秸秆和其他可再利用原材料,普通地膜和生物可降解地膜厚度均为 0.008 mm,宽度均为 1.4 m。土垄为人工木板拍实原土,经过风吹雨打形成土壤结皮。

表 1 试验区土壤化学特性

Table 1 Soil chemical properties of the experimental plots

深度 Depth /cm	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	碱解氮 Available N/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
0—40	0.78	0.69	22.40	10.37	48	13.35	204

1.3 种植管理

前期研究者^[16]对试验种植管理进行详细介绍。在 2012 年紫花苜蓿播种前 30 d 开始整地、人工划分小区、起垄和覆膜,于 2012 年 3 月 28 日完成垄沟布置和垄上覆膜等工作。根据当地施肥经验,过磷酸钙(420 kg/hm²)和尿素(220 kg/hm²)作为基肥,播种前将 2 种肥料混合后条播施入垄沟集雨种植的沟中,而对平作处理,将肥料用条播机施入整个小区,施肥深度约为 20 cm。2012 年 4 月 10 日条播播种紫花苜蓿。对于垄沟

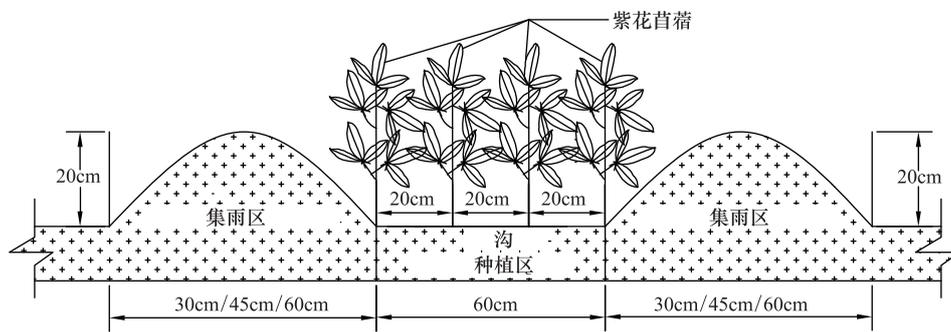


图1 紫花苜蓿种植图

Fig.1 Schematic diagram showing ridge-furrow rainwater harvesting for alfalfa production

集雨种植处理,每1试验小区有3条沟和4条垄,每1条沟面积为 $10\text{ m (长)} \times 0.6\text{ m (宽)} = 6\text{ m}^2$,每个试验小区种植面积(3条沟 $\times 6\text{ m}^2$ (每条沟面积) $= 18\text{ m}^2$)和播种密度(22.5 kg/hm^2)相同,播种深度为2—3 cm,行距为20 cm,每1条沟种植4行紫花苜蓿,每1小区种植12行紫花苜蓿;平作处理无集雨区,种植面积为 $10\text{ m (长)} \times 3.6\text{ m (宽)} = 36\text{ m}^2$,平作的施肥密度、施肥深度、播种密度、播种深度和种植行距与垄沟集雨相应种植区(沟)相同,每1小区种植24行紫花苜蓿。在2012年10月16日紫花苜蓿收获后,保持和维护垄和沟的造型和结构,在第2年龄紫花苜蓿返青前(2013年4月7日),重新覆盖生物可降解地膜和普通地膜,土垄维持不变。在第1年龄紫花苜蓿整个生育期(2012年4月10日—2012年10月16日)和第2年龄紫花苜蓿整个生育期(2013年4月13日—10月27日)不施肥和灌溉。采用人工除草,禁止人为踩踏集雨区(垄)和破坏垄覆盖材料,2012年除草时间分别为6月17日、7月18日和8月19日,2013年除草时间分别为5月12日、6月20日、7月23日、8月20日和9月10日。

表2 垄沟集雨种植紫花苜蓿试验设计

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

处理 Treatment	沟垄比/cm Furrow; ridge	垄面积/m ² Ridge area	沟面积/m ² Furrow area	小区面积/m ² Plot area	垄覆盖材料 Ridge mulch material
TFP	—	—	—	36	—
SR ₃₀	60: 30	12	18	30	土壤结皮
SR ₄₅	60: 45	18	18	36	
SR ₆₀	60: 60	24	18	42	
BMR ₃₀	60: 30	12	18	30	生物可降解地膜
BMR ₄₅	60: 45	18	18	36	
BMR ₆₀	60: 60	24	18	42	
CMR ₃₀	60: 30	12	18	30	普通地膜
CMR ₄₅	60: 45	18	18	36	
CMR ₆₀	60: 60	24	18	42	

TFP: 传统平作 Traditional flat planting; SR: 土垄 Ridge with manually compacted soil; BMR: 生物可降解膜垄 Ridge covered with bio-degradable mulch film; CMR: 普通膜垄 Ridge covered with common plastic film; 下标 30、45 和 60 表示垄宽 Subscript 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm

1.4 样品采集和测定

降雨量数据由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自动气象站测定,自动气象站距试验地 50—100 m。在第 1 年龄紫花苜蓿播种前(2012 年 4 月 9 日)或第 2 年龄紫花苜蓿返青前(2013 年 4 月 13 日)、刈割后(2012 年刈割日期为 8 月 19 日和 10 月 16 日,2013 年刈割日期为 7 月 11 日、8 月 20 日和 10 月 27 日)和降雨(降雨量 $> 5\text{ mm}$)后测定土壤含水量。土壤含水量采用烘干法(105°C , 10 h)测定,测定深度 140 cm,在 0—20 cm 土壤深度,分层深度为 10 cm;在 20—140 cm 土壤深度,分层深度为 20 cm,

每 1 小区随机选取 3 个样点,同 1 层次 3 个样点的土样均匀混合。

土壤贮水量和 WUE 根据以下公式计算

$$W = \theta \times BD \times H \times 10 \quad (1)$$

膜垄和土垄:
$$ET_1 = P + R_e \times P \times \frac{h_1}{h_2} + (W_1 - W_2) \quad (2)$$

$$WUE = \frac{FY_1}{ET} \quad (3)$$

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

$$WUE = \frac{FY}{ET_2} \quad (5)$$

式中, W 为土壤贮水量(mm); θ 为土壤质量含水量(%); BD 为土壤容重(g/cm^3); H 为土壤深度(cm);10 为系数; ET_1 为垄沟集雨种植(土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄)的作物耗水量(mm); ET_2 为平作的作物耗水量(mm); P 为紫花苜蓿全生育期降水量(mm); R_e 为垄的平均径流效率(%); h_1 和 h_2 分别为垄宽和沟宽(cm); W_1 和 W_2 分别为第 1 年龄紫花苜蓿播种前(或第 2 年龄紫花苜蓿返青前)1 d 和最后 1 次刈割后 1 d 测定 140 cm 土壤深度的土壤贮水量(mm); FY_1 为垄沟集雨种植的紫花苜蓿年净干草产量(kg/hm^2); FY 为平作种植的紫花苜蓿年干草产量(kg/hm^2)。

在紫花苜蓿初花期(2012 年初花期为 8 月 19 日,2013 年初花期为 7 月 11 日和 8 月 20 日)和停止生长期(2012 年停止生长期为 10 月 16 日,2013 年停止生长期为 10 月 27 日),手工齐地刈割紫花苜蓿,刈割后将紫花苜蓿地上部分均匀平摊于垄上,自然风干至恒重,测定干草产量。为了更有效分析垄沟集雨种植技术的增产效果,采用 2 种方法计算紫花苜蓿干草产量,净干草产量(FY_1)等于小区干草产量除以小区沟面积,净干草产量反映紫花苜蓿单株生长状况和单株产量,实际干草产量(FY_2)等于小区干草产量除以小区总面积(垄面积+沟面积),实际干草产量反映土地生产力。

1.5 数据处理

数据采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 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 紫花苜蓿生育期降雨量特征

2012 年和 2013 年试验地年降雨量分别为 414.4 和 448.8 mm,与近 40 a (1972—2012 年)年平均降雨量(383.3 mm)相比,2012 年和 2013 年均是湿年。由图 2 可以看出,在 2012 年和 2013 年紫花苜蓿全生育期,降雨发生次数分别为 77 和 82 次,降雨量分别为 380.7 和 427.6 mm,分别占年降雨量的 91.9% 和 95.3%。通过对 2 a 降雨量数据统计,2012 年,<5 mm 降雨为 50 次,占总降雨次数的 64.9%;5—10 mm 的降雨 13 次,占总降雨次数的 16.9%;10—20 mm 降雨 10 次,占总降雨次数的 13.0%;>20 mm 的降雨 4 次,占总降雨次数的 5.2%。2013 年,<5 mm 降雨为 56 次,占总降雨次数的 68.3%;5—10 mm 的降雨 12 次,占总降雨次数的 14.6%;10—20 mm 降雨 7 次,占总降雨次数的 8.5%;>20 mm 的降雨 7 次,占总降雨次数的 8.5%。大于 5 mm 降雨定义为有效降雨,2a 平均无效降雨次数(53 次)大于有效降雨次数(27 次),但有效降雨对总降雨量贡献率(81%)大于无效降雨贡献率(19%),2 年降雨分布不规则,其中 2012 年 4、5、6、7、8、9 和 10 月降雨量分别为 19.9、49.1、58.1、78.1、93.8、68.5 和 13.2 mm,分别占紫花苜蓿全生育期降雨量的 5.2%、12.9%、15.3%、20.5%、24.6%、18.0% 和 3.5%,2013 年 4、5、6、7、8、9 和 10 月降雨量分别为 24.7、68.9、36.1、139.3、85、63.7 和 9.9 mm,分别占紫花苜蓿全生育期降雨量的 5.8%、16.1%、8.4%、32.5%、19.9%、15.0% 和 2.3%。

2.2 垄沟集雨种植对土壤贮水量的影响

为了比较垄沟集雨种植技术对不同深度土壤贮水量的影响,将 0—140 cm 土层深度分为 0—40、40—100

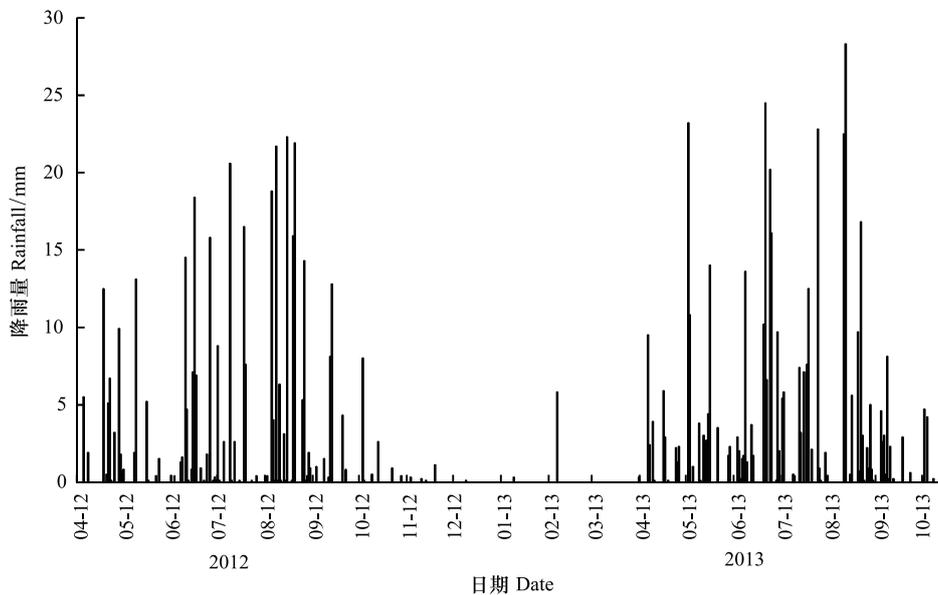


图2 2012年和2013年紫花苜蓿生育期降雨量

Fig.2 Rainfall during alfalfa growing seasons in 2012 and 2013

和100—140 cm,见图3。从图3可以看出,随紫花苜蓿生育期延伸和气温增加,各土层深度的土壤贮水量逐渐降低,降雨后,尤其大强度降雨或暴雨,土壤贮水量骤然增加。2012年8—9月和2013年6—7月是紫花苜蓿现蕾期和开花期,生长旺盛,对土壤水分需求较大,较低降雨和较高蒸散使土壤贮水量处于全生育期最低。2012年9—10月和2013年7—8月降雨量较大,各层次土壤贮水量处于全生育期高峰。通过对0—40、40—100和100—140 cm土壤贮水量进行比较,不同处理之间土壤贮水量差异随土壤深度增加而增加,表层(0—40 cm)土壤贮水量随作物生育期、气温、降雨量等变化较明显。就根层(0—140 cm)土壤贮水量而言,在同1覆盖材料下,对不同垄宽的土壤贮水量求平均值,得到平作、土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的平均土壤贮水量。就紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量而言,2012年平作、土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的土壤贮水量分别为246.8、265.7、286.9和290.9 mm,2013年值分别为172.6、191.3、197.4和205.1 mm。连续2年试验结果显示,普通膜垄的土壤贮水量明显大于生物可降解膜垄,生物可降解膜垄的土壤贮水量明显大于土垄,土垄的土壤贮水量明显大于平作。同时,土壤贮水量随垄宽增加而增加,土壤贮水量排列次序为60 cm 垄宽 > 45 cm 垄宽 > 30 cm 垄宽。就紫花苜蓿全生育期而言,2012年TFP、SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀(SR、BMR和CMR分别代表土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄,下标分别表示垄宽为30、45和60cm)的平均土壤贮水量分别为246.8、259.8、266.0、271.1、277.7、289.1、293.9、283.1、288.5和301.0 mm,2013年值分别为172.6、185.3、191.7、197.0、193.8、191.7、206.6、196.2、205.3和213.8 mm。

2.3 垄沟集雨种植对剖面土壤含水量的影响

紫花苜蓿是1种高耗水牧草,紫花苜蓿对土壤水分消耗存在争议。为了比较垄沟集雨种植技术对剖面土壤含水量的影响,在第1年龄紫花苜蓿播种前(或第2年龄紫花苜蓿返青前)和最后1次刈割后,将不同处理的剖面土壤含水量进行比较(图4)。在第1年龄紫花苜蓿播种前(或第2年龄紫花苜蓿返青前),不同处理的剖面土壤含水量差异不明显,尤其在表层(0—40 cm)土壤;在最后1次刈割后,土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的剖面土壤含水量明显高于平作,尤其第2年龄紫花苜蓿。在最后1次刈割后,2012年TFP、SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀的深0—140 cm平均剖面土壤含水量分别为13.49%、15.58%、16.17%、16.13%、16.98%、17.60%、18.13%、16.92%、17.10%和18.80%,2013年值分别为8.76%、10.50%、10.57%、10.73%、10.75%、11.18%、11.45%、10.80%、11.61%和11.82%。剖面土壤含水量随垄宽增加而增加,排列次序为60 cm 垄宽 > 45 cm 垄宽 > 30 cm 垄宽;不同覆盖材料剖面土壤含水量排列次序为普通膜垄 > 生

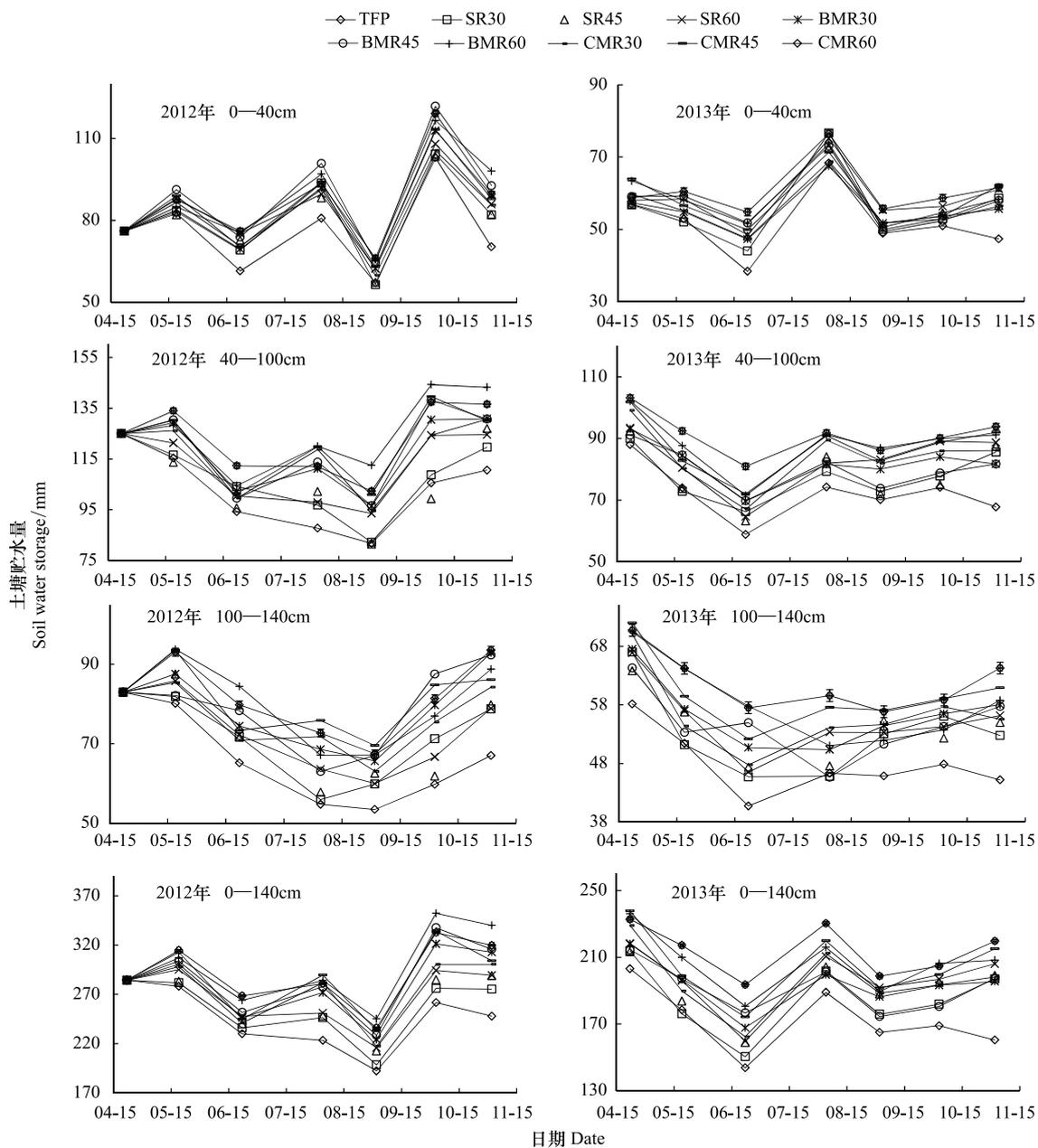


图3 2012和2013年紫花苜蓿生育期不同处理土壤贮水量变化

Fig.3 Dynamics of soil water storage in various treatments during alfalfa growing season in 2012 and 2013

TFP: 传统平作 Traditional flat planting; SR: 土垄 Ridge with manually compacted soil; BMR: 生物可降解膜垄 Ridge covered with bio-degradable mulch film; CMR: 普通膜垄 Ridge covered with common plastic film; 下标 30、45 和 60 表示垄宽 Subscript 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm

物可降解膜垄 > 土垄 > 平作。垄增加径流, 垄覆盖材料减少垄面土壤水分蒸发, 从而增加垄沟集雨种植沟中剖面土壤含水量。紫花苜蓿根系较长, 能吸收深层土壤水分, 其耗水量大于普通牧草和作物。本研究结果显示, 土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的剖面土壤含水量明显高于平作, 在垄沟集雨种植 1—2 龄紫花苜蓿在根层均没有形成明显干层。

2.4 垄沟集雨种植对干草产量的影响

从表 3 可以看出, 各处理的净干草产量大于实际干草产量。就紫花苜蓿全生育期净干草产量而言, 2012 年普通膜垄和生物可降解膜垄的净干草产量显著大于土垄, 土垄的净干草产量显著大于平作, 普通膜垄与生

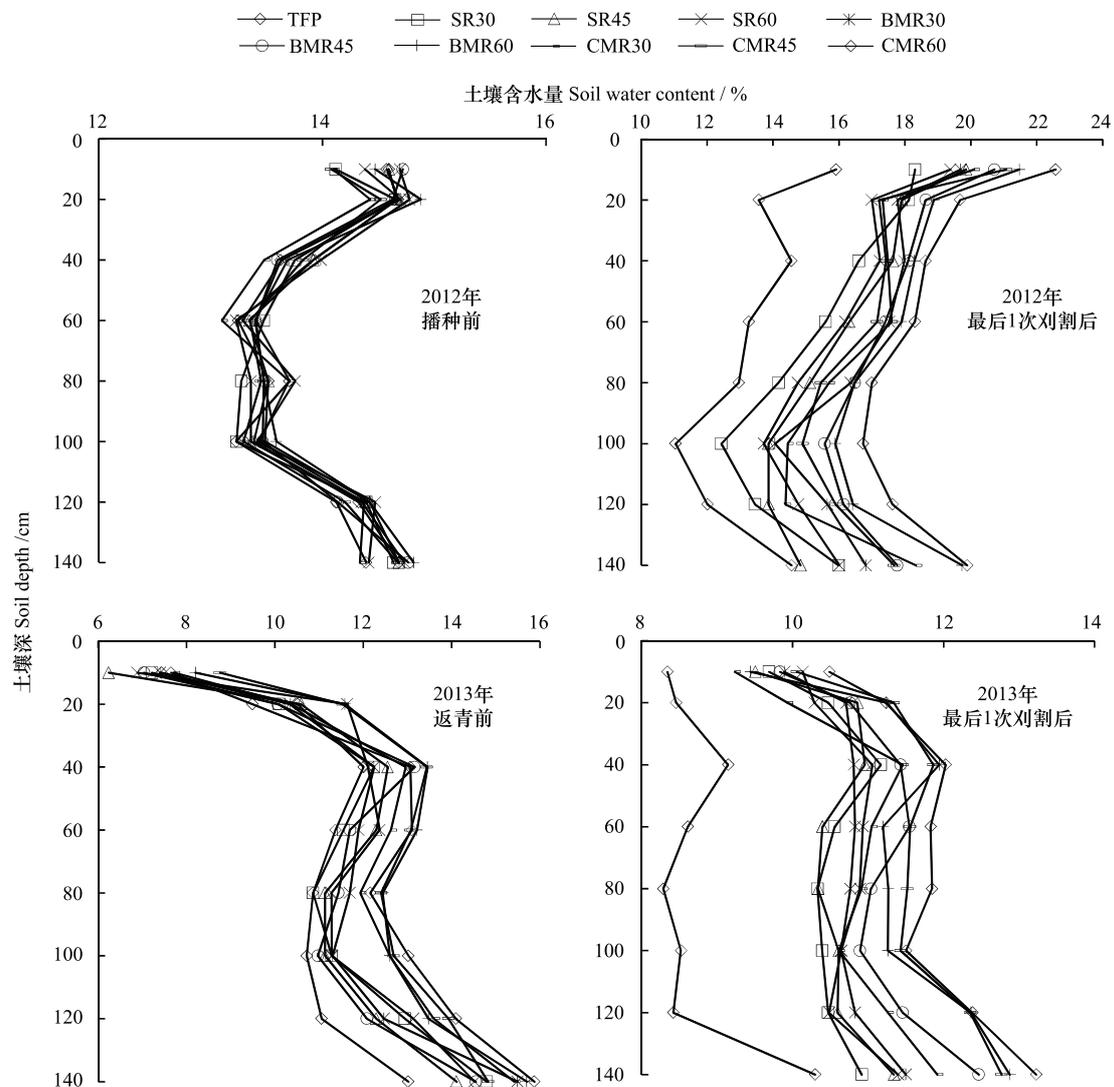


图4 播种前(或返青期前)和最后1次刈割后不同处理剖面土壤含水量比较

Fig.4 Comparison of soil moisture between various treatments before sowing (before post dormant emergency) and after last cutting

物可降解膜垄之间相差不显著;2013年普通膜垄的净干草产量显著大于生物可降解膜垄,生物可降解膜垄的净干草产量显著大于土垄,土垄的净干草产量显著大于平作。同1覆盖材料下,净干草产量随垄宽增加而增加。与平作相比,2012年SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀的净干草产量分别增加54%、64%、72%、72%、120%、138%、81%、132%和146%,2013年的净干草产量分别增加65%、88%、104%、131%、154%、176%、139%、161%和182%。在垄沟集雨种植系统中,土壤水分和土壤养分在沟中进行聚集,使垄沟集雨种植的净干草产量显著大于平作。在实际生产中,土地生产力和土地经济效益是种植者最关注的焦点,就紫花苜蓿全生育期实际干草产量而言,2012年,在土垄种植中,SR₃₀的全生育期实际干草产量显著高于SR₄₅,SR₄₅的全生育期实际干草产量显著高于SR₆₀;在生物可降解膜垄和普通膜垄种植中,BMR₄₅(CMR₄₅)的全生育期实际干草产量显著高于BMR₃₀(CMR₃₀)和BMR₆₀(CMR₆₀),BMR₃₀(CMR₃₀)与BMR₆₀(CMR₆₀)之间差异不显著。2013年,在土垄种植中,SR₃₀的全生育期实际干草产量显著高于SR₆₀,SR₄₅与SR₃₀之间、SR₄₅与SR₆₀之间差异不显著;在生物可降解膜垄和普通膜垄种植中,BMR₃₀(CMR₃₀)的全生育期实际干草产量显著高于BMR₄₅(CMR₄₅),BMR₄₅(CMR₄₅)的全生育期实际干草产量显著高于BMR₆₀(CMR₆₀)。与TFP相比,2012年SR₃₀、SR₄₅和SR₆₀的实际干草产量分别降低8%、18%和26%,2013年分别降低1%、6%和13%;2012年BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀的实际干草产量分别提高3%、10%、2%、9%、16%和5%,2013年分别提

高 39%、27%、18%、43%、31% 和 21%。在同 1 覆盖材料下,对不同垄宽的实际干草产量求平均值,得到平作、土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的平均实际干草产量。就紫花苜蓿全生育期平均实际干草产量而言,2012 年普通膜垄的实际干草产量显著高于平作,平作的实际干草产量显著高于土垄,生物可降解膜垄与普通膜垄之间、生物可降解膜垄与平作之间相差不显著;2013 年普通膜垄和生物可降解膜垄的实际干草产量显著高于平作,平作的实际干草产量显著高于土垄,普通膜垄与生物可降解膜垄之间相差不显著。与 TFP 相比,2012 年土垄的实际干草产量降低 17%,2013 年降低 7%;2013 年生物可降解膜垄和普通膜垄的实际干草产量分别提高 5% 和 10%,2013 年分别提高 28% 和 32%。土垄增加土壤含水量和表层温度,从而增加紫花苜蓿单株产量。土垄的径流效率比较小,垄面积减小作物种植面积,使土垄的实际干草产量显著低于平作。生物可降解膜垄和普通膜垄具有较高径流效率,增加土壤含水量和表层温度,径流增产效果高于种植面积减少减产效果,从而使生物可降解膜垄和普通膜垄的实际干草产量显著高于平作。

表 3 垄沟集雨种植对紫花苜蓿全生育期干草产量和水分利用效率的影响

Table 3 Effects of ridge-furrow rainwater harvesting on annual total alfalfa forage yield and water use efficiency

处理 Treatment	2012			2013				
	干草产量/(kg hm ⁻²) Forage yield		增加 Increase/%	Water use efficiency/ (kg hm ⁻² mm ⁻¹)	干草产量/(kg/hm ²) Forage yield		增加 Increase/%	Water use efficiency/ (kg hm ⁻² mm ⁻¹)
	FY ₁	FY ₂			FY ₁	FY ₂		
TFP	4112g	4112d	—	9.62b	8440g	8440e	—	18.40d
SR ₃₀	6323f	3794e	-8	14.65a	13951f	8370e	-1	30.20c
SR ₄₅	6746ef	3373f	-18	15.17a	15832e	7916ef	-6	32.43abc
SR ₆₀	7060de	3026g	-26	14.87a	17198d	7371f	-13	33.02ab
BMR ₃₀	7069de	4241cd	3	14.33a	19495c	11697a	39	33.65a
BMR ₄₅	9034c	4517b	10	15.56a	21458b	10729bc	27	32.02abc
BMR ₆₀	9788ab	4195d	2	15.32a	23327a	9997d	18	30.14c
CMR ₃₀	7454d	4472bc	9	14.52a	20174c	12104a	43	33.50a
CMR ₄₅	9543b	4772a	16	16.11a	22032b	11016b	31	32.38abc
CMR ₆₀	10098a	4328bcd	5	15.01a	23822a	10209cd	21	30.67bc
	平均值 Mean							
TFP	4112c	4112b	—	9.62b	8440d	8440b	—	18.40b
SR	6710b	3397c	-17	14.89a	15660c	7886c	-7	31.89a
BMR	8630a	4318ab	5	15.07a	21427b	10808a	28	31.94a
CMR	9031a	4524a	10	15.21a	22009a	11110a	32	32.18a

根据 Duncan 多重比较,同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); FY₁: 净干草产量 forage yields based on furrow area; FY₂: 实际干草产量 Alfalfa forage yields based on land areas of ridges and furrows

2.5 垄沟集雨种植对 WUE 的影响

从表 3 可以看出,2012 年,SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀ 的 WUE 显著高于 TFP,SR₃₀ 与 SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀ 之间相差不显著;2013 年,在土垄种植中,SR₆₀ 的 WUE 显著高于 SR₃₀,SR₄₅ 与 SR₃₀ 之间、SR₄₅ 与 SR₆₀ 之间相差不显著;在生物可降解膜垄和普通膜垄种植中,BMR₃₀(CMR₃₀) 的 WUE 显著高于 BMR₆₀(CMR₆₀),BMR₄₅(CMR₄₅) 与 BMR₆₀(CMR₆₀) 之间、BMR₄₅(CMR₄₅) 与 BMR₃₀(CMR₃₀) 之间相差不显著。与 TFP 相比,2012 年 SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅ 和 CMR₆₀ 的 WUE 分别提高 52%、58%、55%、49%、62%、59%、51%、67% 和 56%,2013 年分别提高 64%、76%、79%、83%、74%、64%、82%、76% 和 67%。在同 1 覆盖材料下,对不同垄宽的 WUE 求平均值,得到平作、土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的平均 WUE。就平均 WUE 而言,2012 年和 2013 年土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄 WUE 显著高于平作,普通膜垄与生物可降解膜垄和土垄之间相差不显著。与平作相

比,2012年土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的WUE分别提高55%、57%和58%,2013年分别提高73%、74%和75%。

2.6 最佳沟垄比确定

土垄种植的紫花苜蓿实际干草产量显著低于平作,在2012年和2013年紫花苜蓿全生育期降雨量分别为380.7和427.6 mm,土垄种植技术不能增加紫花苜蓿干草产量,而生物可降解膜垄和普通膜垄种植技术显著增加紫花苜蓿实际干草产量。

为确定同1覆盖材料垄沟集雨种植紫花苜蓿的最佳沟垄比,增加模拟方程的精确度,以生物可降解膜垄和普通膜垄每个重复的全生育期实际干草产量(FY_2)为y轴,以垄宽为x轴(x值分别为0、30、45和60 cm,其中0代表平作),对全生育期实际干草产量与垄宽进行回归分析,得到生物可降解膜垄的回归方程为 $y = -0.2096x^2 + 15.299x + 4091.9$ ($R^2 = 0.314$, 2012)和 $y = -2.4558x^2 + 169.72x + 8493.9$ ($R^2 = 0.8666$, 2013),普通膜垄的回归方程为 $y = -0.4051x^2 + 29.395x + 4089.6$ ($R^2 = 0.6654$, 2012)和 $y = -2.7505x^2 + 190.47x + 8501$ ($R^2 = 0.9172$, 2013),见图5。对回归方程求极值,在2012年,当垄宽 $x = 36$ cm时,生物可降解膜垄(4371 kg/hm²)和普通膜垄(4623 kg/hm²)的紫花苜蓿全生育期实际干草产量达到最大值,在2013年,当垄宽 $x = 35$ cm时,生物可降解膜垄(11426 kg/hm²)和普通膜垄(11798 kg/hm²)的紫花苜蓿全生育期实际干草产量达到最大值。

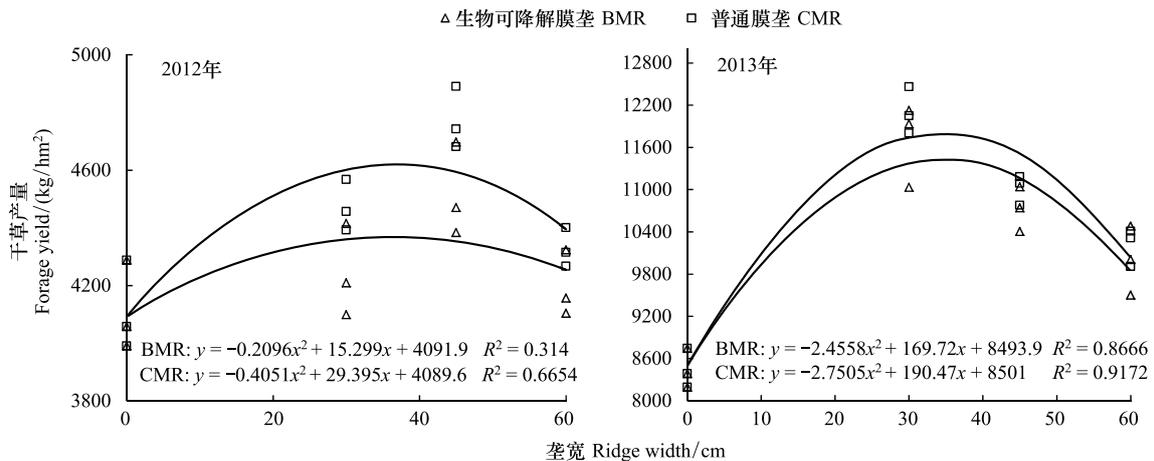


图5 生物可降解膜垄和普通膜垄的紫花苜蓿干草产量与垄宽回归方程

Fig.5 Regression equations for alfalfa forage yield and ridge widths under ridges covered with biodegradable mulch film (BMR) and with common plastic film (CMR)

3 讨论

土壤水分是限制农田作物和草地植物生长和发育的重要因素之一^[17]。在垄沟集雨种植系统中,垄径流和沟中降雨在沟中产生叠加,增加沟内降雨量,降雨量越大,入渗深度更深,蒸发损失越少,同时垄覆盖材料减少垄面无效蒸发,从而提高沟中土壤水分和降雨资源利用效率^[18-20]。本试验结果表明,与平作相比,SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀的2a紫花苜蓿全生育期平均根层(0—140 cm)土壤贮水量分别增加12.8、19.2、24.4、26.0、30.7、40.5、29.9、37.1和47.7 mm。垄沟集雨种植系统使降水得到重新分配,降雨后,沟中部分土壤水分侧入渗到垄下土壤,当遇到持久干旱时,沟中土壤水势低于垄下土壤水势,垄下土壤水分回归到沟中,供干旱时作物吸收和利用,从而提高降雨资源利用效率。

在2012年紫花苜蓿全生育期,TFP、SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀沟中集雨量(沟中降雨+垄上径流)分别为427.3、426.0、439.1、463.4、485.6、569.2、623.5、505.6、586.6和669.1 mm;在2013年紫花苜蓿生育期,TFP、SR₃₀、SR₄₅、SR₆₀、BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和CMR₆₀沟中集雨量分别为459.2、458.4、482.6、511.0、560.5、641.1、739.1、586.5、654.0和741.6 mm,普通膜垄的沟中集雨量略高于生

物可降解膜垄,生物可降解膜垄的沟中集雨量明显高于土垄,土垄的沟中集雨量明显高于平作,沟中集雨量随垄宽增加而增加。紫花苜蓿根系较长、生长旺盛和耗水量较大,随着生长年龄增加,根系不断向下延伸,利用更深层土壤水分。当土壤含水量低于凋萎系数时,土壤形成干层,土壤干层随植物生长和降雨量等变化而变化,不同降水补充不同深度土壤水分,不同年龄紫花苜蓿消耗不同深度土壤水分,从而在不同土壤深度形成土壤水分消耗差异。本研究结果表明,垄沟集雨种植 1 年龄和 2 年龄紫花苜蓿 0—140cm 深度的土壤含水量明显高于平作,垄沟集雨种植能显著增加土壤剖面含水量,在根层没有形成明显干层。

紫花苜蓿干草产量与其全生育期蒸腾量相关,全生育期蒸腾量与土壤含水量、植物生长状况、温度、风速、太阳辐射等有关。垄沟集雨种植改变沟中土壤水分、风速、土壤温度等,进而影响紫花苜蓿干草产量形成^[21]。垄沟集雨种植改善沟中土壤水分和土壤养分等状况^[22-23],从而使土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的净干草产量显著高于平作。实际干草产量更能反映土地生产力和种植者利益,Li 等^[24]研究表明,垄沟集雨种植膜垄和土垄的紫花苜蓿年平均干草产量较平作分别提高 171%和 52%。本研究表明,与平作相比,土垄的紫花苜蓿全育期连续 2a 平均实际干草产量降低 12%,WUE 提高 64%,生物可降解膜垄和普通膜垄的紫花苜蓿全育期连续 2a 平均实际干草产量分别提高 17%和 21%,WUE 分别提高 66%和 67%。紫花苜蓿干草产量和 WUE 随垄宽增加而减少。霍海丽等^[16]研究表明,土垄、生物可降解膜垄和普通膜垄的平均径流效率分别为 32.0%、90.7%和 96.4%。较高降雨、较小径流效率和种植面积减少使土垄的实际干草产量低于平作。普通膜垄和生物可降解膜垄具有较高径流效率,较高土壤含水量和土壤温度使紫花苜蓿出苗或返青期提前 5—7 d,同时植株生长旺盛和生长速率较快。任小龙等^[25]研究表明,与传统平作相比,当降雨量为 230、340 和 440 mm 时,垄沟集雨种植春玉米籽粒产量分别增加 83%、43%和 11%,WUE 分别提高 77%、43%和 10%,垄沟集雨种植的玉米籽粒产量增长率随降雨增加而减少。霍海丽等^[16]研究表明,与平作相比,土垄的紫花苜蓿实际干草产量降低 7.7%—26.4%,生物可降解膜垄和普通膜垄的紫花苜蓿实际干草产量分别提高 2.0%—9.9%和 5.2%—12.0%。Moreno 和 Moreno^[26]研究表明,在风吹、太阳照射、杂草生长和微生物等作用下,生物可降解地膜降解较快。本试验观察显示,生物可降解地膜覆盖 70—75 d 开始降解,该区域 6 月中旬进入雨季,在作物生长前期,生物可降解地膜与普通地膜具有类似保水、增温和增产效果,在牧草刈割后,生物可降解地膜无需人工回收,具有省时、省力、无污染等优点,有利于环境保护。

4 结论

连续 2 a(2012 年和 2013 年)紫花苜蓿全生育期平均值显示,无效降雨次数(53 次)大于有效降雨次数(27 次),无效降雨对总降雨量的贡献率(19%)小于有效降雨(81%)。垄沟集雨种植第 1 年龄和第 2 年龄紫花苜蓿根层均没有出现明显干层。与传统平作相比,SR₃₀、SR₄₅和 SR₆₀的连续 2 年紫花苜蓿平均实际干草产量分别降低 3%、8%和 13%,WUE 分别提高 52%、58%、55%;BMR₃₀、BMR₄₅、BMR₆₀、CMR₃₀、CMR₄₅和 CMR₆₀的连续 2 年紫花苜蓿平均实际干草产量分别提高 14%、12%、7%、17%、19%和 9%,WUE 分别提高 49%、62%、59%、51%、67%和 56%。当紫花苜蓿生育期降雨量为 380.7—427.6 mm 和沟垄比为 60 cm:35—36 cm 时,生物可降解膜垄和普通膜垄的紫花苜蓿全生育期实际干草产量达到最大值。

参考文献 (References):

- [1] 龚建福,王毅荣. 黄土高原气候响应全球变化的敏感区. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 6-11.
- [2] 邓振镛,王强,张强,王润元,白虎志,王劲松,徐金芳. 甘肃黄土高原旱作区土壤贮水量对春小麦水分生产力的影响. 冰川冻土, 2011, 33(2): 425-430.
- [3] 王晓娟,贾志宽,梁连友,韩清芳,杨保平,丁瑞霞,崔荣美,卫婷. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响. 农业工程学报, 2012, 28(6): 144-149.
- [4] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, Wang D, Li D M. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 87-94.

- [5] 莫非, 周宏, 王建永, 赵鸿, 张恒嘉, 吴姍, 陈应龙, 杨通, 邓浩亮, Asfa B, 王润元, Simon N N, 李凤民, 熊友才. 田间微集雨技术研究及应用. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1-17.
- [6] 何有华. 紫花苜蓿在陇中地区生态环境建设中的作用分析. 草业科学, 2002, 19(7): 17-18.
- [7] Zhao C Y, Feng Z D, Chen G D. Soil water balance simulation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the semiarid Chinese loess plateau. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 101-114.
- [8] Asseng S, Hsiao T C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. Field Crops Research, 2000, 67(3): 191-206.
- [9] Wang Q, Zhang E H, Li F M, Li F R. Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas. Water Resources Management, 2008, 22(10): 1431-1443.
- [10] 马育军, 李小雁, 伊万娟, 崔步礼, 李岳坦. 沟垄集雨结合砾石覆盖对沙棘生长的影响. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 188-194.
- [11] 韩清芳, 李向拓, 王俊鹏, 蒋骏, 丁瑞霞, 刘正辉, 贾志宽. 微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究. 农业工程学报, 2004, 20(2): 78-82.
- [12] Jia Y, Li F M, Wang X L, Yang S M. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment. Field Crops Research, 2006, 97(2/3): 167-175.
- [13] Liu X E, Li X G, Hai L, Wang Y P, Fu T T, Turner N C, Li F M. Film-mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(4): 1434-1441.
- [14] Tian Y, Su D R, Li F M, Li X L. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. Field Crops Research, 2003, 84(3): 385-391.
- [15] Kayombo B, Hatibu N, Mahoo H F. Effect of micro-catchment rainwater harvesting on yield of maize in a semi-arid area. Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions, 2004.
- [16] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 师尚礼, 任祥, 王鹤龄, 王田涛, 刘青林. 不同集雨种植方式对干旱区紫花苜蓿种植的影响. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2770-2778.
- [17] 赵鸿, 李凤民, 熊友才, 王润元, 杨启国, 邓振镛. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展. 干旱气象, 2008, 26(3): 67-71.
- [18] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, Long T D. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. Field Crops Research, 2006, 95(2/3): 115-125.
- [19] Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, Mohanty M. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut. Field Crops Research, 2006, 99(2/3): 76-86.
- [20] 陈林, 杨新国, 翟德莘, 宋乃平, 杨明秀, 候静. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(2): 108-116.
- [21] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [22] 周昌明, 李援农, 银敏华, 谷晓博, 赵玺. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量. 农业工程学报, 2015, 31(7): 109-117.
- [23] 王晓凌, 陈明灿, 易现峰, 付国占. 垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响. 农业工程学报, 2009, 25(8): 40-47.
- [24] Li X L, Su D R, Yuan Q H. Ridge-furrow planting of alfalfa (*Medicago sativa* L.) for improved rainwater harvest in rainfed semiarid areas in Northwest China. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 117-125.
- [25] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 韩清芳, 李荣. 模拟不同雨量下沟垄集雨种植对春玉米生产力的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1006-1015.
- [26] Moreno M M, Moreno A. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop. Scientia Horticulturae, 2008, 116(3): 256-263.