

垄沟集雨对紫花苜蓿草地土壤水分、 容重和孔隙度的影响*

寇江涛^{1,2} 师尚礼^{1,2**} 王 琦^{1,2} 尹国丽^{1,2}

(1. 甘肃农业大学草业学院 兰州 730070; 2. 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研究中心 兰州 730070)

摘 要 在旱作条件下, 将垄沟集雨措施应用于紫花苜蓿种植, 研究沟垄宽比和覆膜方式对 2 年轮紫花苜蓿草地土壤水分状况、土壤容重及孔隙度的影响。结果表明: 全越冬期, 膜垄和土垄处理 0~120 cm 土壤水分平均散失量分别低于 CK(平作)28.43 mm 和 13.61 mm。膜垄处理整个集雨期的蓄墒增加率为 59.03%~99.27%, 产流效率为 53.43%~91.72%; 2009 年集雨前期(4 月上旬~6 月上旬)土垄处理的蓄墒增加率、产流效率分别为 1.92%~2.74%和 1.71%~2.55%, 2009 年集雨中后期(6 月中旬~9 月下旬)土垄处理的蓄墒增加率、产流效率较集雨前期显著升高, 分别为 8.85%~36.77%和 8.01%~35.82%; 膜垄和土垄处理的蓄墒增加率、产流效率均随垄面宽度增加而显著增加, 且膜垄的蓄墒增加率、产流效率显著高于土垄处理。垄沟集雨种植能够显著降低 0~40 cm 土壤层容重, 且 0~20 cm 土壤层容重降幅表现为膜垄大于土垄。垄沟集雨种植也能够显著增加 0~40 cm 土壤层孔隙度, 且 0~20 cm 土壤层孔隙度增幅表现为膜垄大于土垄。

关键词 紫花苜蓿 垄沟集雨 沟垄宽比 土壤水分 容重 孔隙度 蓄墒增加率 产流效率
中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)06-1336-07

Effect of ridge/furrow rain harvesting on soil moisture, bulk density and porosity in *Medicago sativa* field

KOU Jiang-Tao^{1,2}, SHI Shang-Li^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, YIN Guo-Li^{1,2}

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Ecosystem Laboratory of the Ministry of Education; Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province; Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract Experiment on rain harvesting under dry farming was conducted to determine the effects of ridge/furrow width ratio and mulching modes on soil moisture, soil bulk density and porosity in *Medicago sativa* cultivation fields. Based on the study, average water loss in the 0~120 cm soil layer was lower by 28.43 mm for plastic film covered ridges and 13.61 mm for compacted bare soil ridges than CK (flat field). The increase rate of rain water storage was 59.03%~99.27% in plastic film covered ridges with runoff generation efficiency of 53.43%~91.72% during the whole rainy season. From early April to early June (when was prior to 2009 rainfall collection period), the increase rate of rain water storage in compacted bare soil ridges was 1.92%~2.74% with corresponding runoff generation efficiencies of 1.71%~2.55%. From mid June to late September (when was mid-to-late rainfall collection period), the increase rate of rain water storage (8.85%~36.77%) and runoff generation efficiency (8.01%~35.82%) increased significantly. The increase rate of rain water storage and runoff generation efficiency on both plastic-film covered and soil-compacted ridges increased with increasing ridge surface area. However, increment in the increase rate of rain water storage and runoff generation efficiency on plastic-film covered ridges was remarkably higher than that on compacted bare soil ridges. Soil bulk density in the 0~40 cm soil layer significantly dropped in ridge/furrow rain harvesting system. The degree of drop in soil bulk density in plastic film covered ridges was higher than that in compacted bare soil ridges in the 0~20 cm soil layer. Accordingly, soil porosity in the 0~40 cm

* 农业部行业专项(201003023)、全国种质资源保种项目(NB2130135)和国家现代牧草产业技术体系建设专项(CARA-35)资助

** 通讯作者: 师尚礼(1962~), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事牧草种质资源与育种及栽培教学与研究工作。E-mail: shishl@gsau.edu.cn
寇江涛(1986~), 男, 硕士生, 研究方向为牧草栽培及其牧草种质资源与育种。E-mail: koujiangtao@st.gsau.edu.cn

收稿日期: 2010-11-11 接受日期: 2011-05-31

soil layer significantly increased in ridge/furrow rain harvesting system. Also the degree of rise in soil porosity in plastic film covered ridges was larger than that in compacted bare ridges in the 0~20 cm soil layer.

Key words *Medicago sativa*, Ridge/furrow rain harvest, Ridge/furrow width ratio, Soil moisture, Soil bulk density, Soil porosity, Rain water storage increasing rate, Runoff generation efficiency

(Received Nov. 11, 2010; accepted May 31, 2011)

我国西北黄土高原处于干旱半干旱区,是我国北方农牧交错带的北界和雨养农业的下限区,也是生态环境变化的敏感区。该区域气候属温带大陆性季风气候,地貌类型复杂多样,地下水位深,植物生长过程的水分补给主要来自天然降水,年降水总量少且集中在7~9月份,小于5 mm的无效和微效降水多,径流损失与蒸发损失并存,使得作物对天然降水资源的转化效率低^[1-2],土壤水分基本处于全年亏缺状态^[3-4],从而导致人工草地生产力低下。因此,合理有效地利用黄土高原地区有限水资源是该地区进行人工草地建植和提高产量的关键。

垄沟集雨种植使垄上降水流入沟中,产生水分叠加,同时沟垄可以减小风速,抑制蒸发,提高入渗深度^[5-6],从而对天然降水资源实现空间调控,满足作物对水分的生长需求。在我国垄覆膜集雨种植的研究和应用多集中在北方干旱半干旱雨养农业区,这些研究主要针对土壤蓄水供水、农田水热环境、水肥效应以及集雨效率等方面,并最终落脚于作物产量,而且大多数垄沟集雨的研究均以一年生作物为主^[5-9],对多年生牧草的研究报道较少^[10-11]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为黄土高原区人工草地建植的首选草种,具有高产、优质、抗逆性强、蛋白质含量高和适口性好等特点,在我国干旱半干旱区农业结构调整和生态建设中发挥了重要作用,在建立干旱半干旱区草田轮作和舍饲养殖相结合的农业经营模式中占有重要地位^[12]。本文针对黄土高原干旱半干旱区降水稀少和土壤水分周期性

亏缺而导致人工草地生产力低下,对天然降水资源的转化效率低等问题,通过垄沟集雨保墒种植紫花苜蓿,研究不同覆膜方式和沟垄宽比对2龄紫花苜蓿人工草地土壤水分状况、容重和孔隙度的影响,旨在为干旱半干旱区旱作紫花苜蓿生产和草地改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本概况与自然条件

试验于2008年4月~2009年10月在甘肃省永登县武胜驿镇霍家湾村(36.73°N, 103.25°E)进行,该区海拔2 624 m。该区域属典型的大陆性气候,处于干旱半干旱区,年降水量230~435.8 mm,年蒸发量1 230.4~1 879.8 mm,年蒸发量是降水量的2.8~8.2倍。年均日照2 659.3 h,年最低气温-28.1℃,最高气温34.34℃,年均气温5.9℃,年均相对湿度56%,干燥度3.1,年均无霜期121 d。全年多为西北风,风力一般2~4级,最大9级,频率19%,年均风速2.3 m·s⁻¹,定时最大风速20 m·s⁻¹,8级以上大风年均11.3 d,最多年份达26 d。境内沟壑纵横,气候干燥,植被稀少,土壤为钙砾土,土质疏松。2009年紫花苜蓿生长期(4月10日~9月20日)试验区降水量为211.9 mm,详见图1所示。

1.2 试验设计

试验紫花苜蓿品种为“陇东”(M. sativa L. cv. “Longdong”),种子净度为99%,发芽率为98%。采用垄沟种植方式,垄为集雨区,沟为种植区。设覆膜

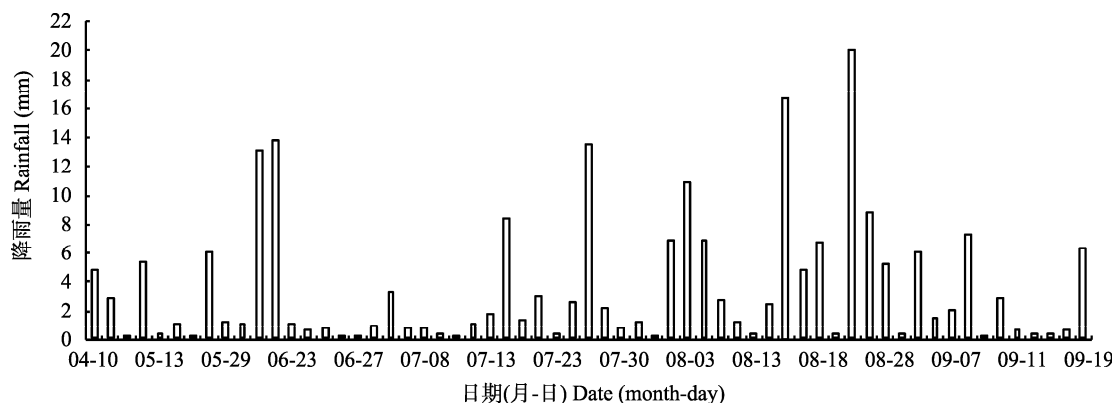


图1 2009年4月10日~9月20日试验区降水量

Fig. 1 Rainfall in tested area from April 10 to September 20, 2009

垄(plastic film-covered ridge, MR)和土垄(compact bare ridge, SR)两种集雨面处理, 集雨垄坡度 40°, 垄高 25 cm, 覆膜垄上覆盖宽 1.2 m、厚 0.08 mm 的塑料薄膜, 边缘用土固压, 以防被风损坏; 土垄为人工原土夯实。2008 年于紫花苜蓿种植前(4 月 10 日)起垄覆膜, 直至 2009 年紫花苜蓿返青前(4 月 11 日)更换塑料薄膜, 膜覆盖垄的持续时间为紫花苜蓿整个生长期和越冬期。试验设 9 个处理(4 种沟垄宽比×2

种垄覆盖方式+1 个对照), 其中平作为对照(CK), 4 种沟垄宽比(沟宽: 垄宽)为 60 cm: 30 cm、60 cm: 45 cm、60 cm: 60 cm 和 60 cm: 75 cm。小区随机排列, 每处理重复 3 次, 垄长 6 m, 每小区有 4 条垄 3 条沟, 试验小区编号分别为 MR30、MR45、MR60、MR75、SR30、SR45、SR60、SR75、CK, 其中 MR 为膜垄, SR 为土垄, CK 为平作。小区面积及编号见表 1。

表 1 试验各处理的设计参数
Table 1 Design parameters of every treatment of the experiment

处理 Treatment	沟垄宽比 Ridge width (cm) : furrow width (cm)	小区面积 Plot area (m ²)	产流面积 Runoff area (m ²)	沟面积 Furrow area (m ²)	垄覆盖方式 Mulching pattern of ridge
MR30	60 : 30	18.0	7.2	10.8	覆膜 Plastic film cover
MR45	60 : 45	21.6	10.8	10.8	覆膜 Plastic film cover
MR60	60 : 60	25.2	14.4	10.8	覆膜 Plastic film cover
MR75	60 : 75	28.8	18.0	10.8	覆膜 Plastic film cover
SR30	60 : 30	18.0	7.2	10.8	原土夯实 Compacted bare soil without mulch
SR45	60 : 45	21.6	10.8	10.8	原土夯实 Compacted bare soil without mulch
SR60	60 : 60	25.2	14.4	10.8	原土夯实 Compacted bare soil without mulch
SR75	60 : 75	28.8	18.0	10.8	原土夯实 Compacted bare soil without mulch
CK	—	21.6	0	0	平作 Flat field without ridge

MR: 膜垄 Plastic film-covered ridge; SR: 土垄 Compacted bare ridge; 下同 The same below.

1.3 田间管理

试验地于 2008 年 4 月 13 日播种, 每小区沟内条播 4 行紫花苜蓿, 行距 15 cm, 播深 1~2 cm, 播种量 22.5 kg·hm⁻²。播种前施基肥, 基肥采用条播方式与紫花苜蓿种子同时施入, 基肥用量: 纯氮(尿素, 含 N 46%)和纯磷(重过磷酸钙, 含 P₂O₅ 46%)的用量分别为 34.5 kg·hm⁻²和 80 kg·hm⁻²。田间无灌溉, 播种后松土, 人工除草, 以免紫花苜蓿幼苗受杂草的危害。

1.4 测定项目

1.4.1 土壤含水量

紫花苜蓿种植第 1 年生长季末期(2008 年 9 月 20 日)、第 2 年返青前(2009 年 4 月 11 日)、生长季末期(2009 年 9 月 20 日), 及第 2 年整个生长期当内降水量大于 5 mm 时, 于降水前和降水后用土钻在种植沟内采取土样, 深度 120 cm, 每 20 cm 为 1 个层次, 每小区取 3 钻土样, 同一层次 3 个土样混合均匀, 采用烘干法(105 °C, 10 h)测定各处理的土壤质量含水量。土壤贮水量^[13]采用下式计算:

$$W = h \times p \times b \times 10 \quad (1)$$

式中, W 为土壤贮水量(mm), h 为土层深度(cm), p 为土壤容重(g·cm⁻³), b 为土壤质量含水量(%)。

越冬期 0~120 cm 土层土壤水分散失量=第 1 年秋季刈割后(2008 年 9 月 20 日)0~120 cm 土层土壤贮水量-第 2 年返青前(2009 年 4 月 11 日)0~120 cm 土层土壤贮水量。

1.4.2 蓄墒增加率

蓄墒率是指在一定时间内土壤贮水增量占降水量的百分比^[14], 计算公式为:

$$P = \frac{W_2 - W_1}{R} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P 为蓄墒率(%), W_1 为降水前土壤贮水量(mm), W_2 为降水后土壤贮水量(mm), R 为 2 次测定间的降水量(mm)。

蓄墒增加率是指在一定时间内降水通过垄面产生径流使种植沟内土壤水分叠加后的贮水增量较对照(CK)贮水增量所提高的百分比^[14], 计算公式为:

$$\Delta P = \frac{\Delta W_{\text{处理}} - \Delta W_{\text{CK}}}{\Delta W_{\text{CK}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ΔP 为蓄墒增加率(%), ΔW 为降水后土壤贮水量之增量(mm)。

1.4.3 产流效率

产流效率是指降水通过垄面产生径流使种植沟内土壤水分叠加后的贮水增量较对照(CK)增加值占降水量的百分比^[14], 计算公式为:

$$Er = \frac{\Delta W_{\text{处理}} - \Delta W_{\text{CK}}}{R} \times 100\% \quad (4)$$

式中, Er 为产流效率(%), ΔW 为降水后土壤贮水量之增量(mm), R 为 2 次测定间的降水量(mm)。

1.4.4 土壤容重、孔隙度

紫花苜蓿种植第 2 年返青前(2009 年 4 月 11 日)、第 1 茬紫花苜蓿刈割后(2009 年 7 月 11 日)及生长季末期

(2009年9月20日), 各小区内按S型设置3个采样点(取样点均在种植沟内), 在土壤剖面7.5~12.5 cm和27.5~32.5 cm深度, 用容积为100 cm³的环刀取样带回室内烘干测定土壤容重, 分别代表0~20 cm和20~40 cm土层的容重。容重计算公式^[15]为:

$$d_i = \frac{(W_1 - W_0) \times (1 - W\%)}{V} \quad (5)$$

式中, d_i 为土壤容重(g·cm⁻³), W_0 为环刀重量(g), W_1 为环刀与自然结构土壤总重量(g), $W\%$ 为以新鲜土样为基础的土壤含水量, V 为环刀容积(cm³)。

孔隙度^[16]计算公式为:

$$P = \left(1 - \frac{d_i}{\rho}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中, P 为土壤孔隙度(%); d_i 为土壤容重(g·cm⁻³); ρ 为土壤密度(g·cm⁻³), 采用“常用密度值”(2.65 g·cm⁻³)。

1.5 数据处理

采用Excel 2003进行数据处理和图表绘制, 并采用SPSS软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 越冬期不同集雨处理 0~120 cm 土层土壤贮水量和水分散失量比较

由表2可知, 垄沟集雨种植紫花苜蓿, 第1年秋季刈割后(2008年9月20日)0~120 cm土层CK平均贮水量为259.36 mm; 膜垄平均贮水量为255.36 mm, 低于CK 4.00 mm; 土垄平均贮水量为241.31 mm, 低于CK 18.05 mm。第2年返青前(2009年4月11日)0~120 cm土层CK平均贮水量为217.43 mm; 膜垄平均贮水量为241.86 mm, 高于CK 24.43 mm; 土垄

平均贮水量为213.00 mm, 低于CK 4.43 mm。

全越冬期 0~120 cm 土层, CK 水分散失量为41.92 mm, 显著高于膜垄和土垄处理; 膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理的水分散失量分别为16.37 mm、13.52 mm、12.89 mm 和 11.21 mm, 处理间差异不显著, 但均显著低于土垄处理, 膜垄处理平均水分散失量为 13.49 mm, 低于 CK 28.43 mm; 土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理的水分散失量分别为 36.03 mm、32.89 mm、24.02 mm 和 20.31 mm, 随着垄宽度的增加, 水分散失量显著降低, 平均水分散失量为 28.31 mm, 低于 CK 13.61 mm。

2.2 垄沟处理对蓄墒增加率和产流效率的影响

紫花苜蓿第2年生长期, 膜垄及土垄处理在降水前后 0~120 cm 土壤的贮水增量、蓄墒增加率、产流效率见表3。膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理在不同强度降水后, 0~120 cm 土壤贮水增量均显著高于相应的降水量, 表明膜垄处理能够使垄面和沟内的水分产生叠加, 而且随着垄面宽度的增加, 水分的叠加效应也明显加强, 集雨量大幅增加。在不同降水量下, MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理的蓄墒增加率分别为 59.03%~69.04%、67.00%~80.45%、85.26%~95.11%和 93.20%~99.27%, 产流效率分别为 53.43%~66.41%、60.64%~77.25%、79.04%~85.36%和 85.14%~91.72%, 蓄墒增加率和产流效率均随着垄面宽度增加显著增加。

土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理在 2009 年集雨前期(4 月上旬~6 月上旬), 不同强度降水后 0~120 cm 土壤贮水增量均低于相应的降水量, 表明土垄处理在集雨前期的集雨效果不明显; 在 2009 年

表2 越冬期不同垄沟处理 0~120 cm 土壤层水分散失量
Table 2 Water loss of 0~120 cm soil layers in winter period under different treatments mm

处理 Treatment	第1年秋季刈割后(2008年9月20日) 1 st year after autumn mowing (September 20, 2008)		第2年返青前(2009年4月11日) Before turning green in the 2 nd year (April 11, 2009)		越冬期 Wintering period	
	土壤贮水量 Soil water storage	相比 CK 增减 Compared to CK	土壤贮水量 Soil water storage	相比 CK 增减 Compared to CK	土壤水分散失量 Soil water loss	相比 CK 增减 Compared to CK
MR30	227.17	-32.19	210.80	-6.63	16.37±2.19fg	-25.55
MR45	306.86	47.50	293.34	75.91	13.52±0.88g	-28.40
MR60	266.36	7.00	253.47	36.04	12.89±1.24g	-29.03
MR75	221.03	-38.33	209.83	-7.60	11.21±1.63g	-30.71
膜垄平均值 Mean of MR	255.36	-4.00	241.86	24.43	13.49	-28.43
SR30	245.50	-13.86	209.47	-7.96	36.03±1.73b	-5.89
SR45	241.32	-18.04	208.42	-9.01	32.89±2.21c	-9.03
SR60	236.44	-22.92	212.42	-5.01	24.02±2.05d	-17.90
SR75	241.99	-17.37	221.68	4.25	20.31±1.29e	-21.61
土垄平均值 Mean of SR	241.31	-18.05	213.00	-4.43	28.31	-13.61
CK	259.36	—	217.43	—	41.92±1.89a	—

不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。Different small letters indicate significant difference ($P < 0.05$) among treatments. The same below.

表 3 2009 年不同降水量条件下不同膜垄和土垄处理的蓄墒增加率和产流效率
Table 3 Increase rates of rain water storage and runoff generation efficiency of plastic film-covered ridges and compacted bare ridges under different treatments and rainfalls in 2009

降水量 降雨日期(年-月-日) Rainfall date (year-month-day)	项目 Item	处理 Treatment								
		CK	SR30	SR45	SR60	SR75	MR30	MR45	MR60	MR75
5.2 mm 2009-05-08	A (mm)	4.65e	4.74e	4.76e	4.75e	4.74e	7.49d	7.83c	8.76b	9.09a
	B (%)	—	1.95f	2.37e	2.23e	1.92f	61.22d	68.43c	88.43b	95.47a
	C (%)	—	1.74f	2.12e	2.00e	1.71f	54.72d	61.17c	79.04b	85.34a
6.0 mm 2009-05-27	A (mm)	5.59d	5.71d	5.73d	5.74d	5.74d	9.08c	9.36c	10.54b	10.83a
	B (%)	—	2.17g	2.52f	2.74e	2.69e	62.51d	67.51c	88.71b	93.96a
	C (%)	—	2.02g	2.35f	2.55e	2.51e	58.20d	62.85c	82.59b	87.48a
26.9 mm 2009-06-18~19	A (mm)	25.71f	28.55e	29.74de	31.48d	32.86d	41.95c	43.42c	47.63b	49.67a
	B (%)	—	11.05h	15.69g	22.45f	27.81e	63.15d	68.87c	85.26b	93.21a
	C (%)	—	10.56h	15.00g	21.46f	26.58e	60.36d	65.82c	81.49b	89.09a
8.3 mm 2009-07-16	A (mm)	7.51g	8.18f	8.50e	8.97de	9.38d	11.95c	12.55c	14.25b	14.70a
	B (%)	—	8.85h	13.10g	19.44f	24.81e	59.03d	67.00c	89.72b	95.73a
	C (%)	—	8.01h	11.86g	17.60f	22.46e	53.43d	60.64c	81.21b	86.65a
16.0 mm 2009-07-25~26	A (mm)	14.73e	16.93d	17.26d	18.60cd	19.80c	23.51b	24.80b	28.04a	29.10a
	B (%)	—	14.94h	17.21g	26.33f	34.47e	59.69d	68.44c	90.42b	97.62a
	C (%)	—	13.75h	15.84g	24.24f	31.73e	54.93d	62.99c	83.21b	89.85a
17.7 mm 2009-08-02~03	A (mm)	16.33e	19.52d	20.16d	20.92cd	22.24c	27.51b	28.80b	31.04a	32.40a
	B (%)	—	19.57h	23.49g	28.17f	36.22e	68.54d	76.43c	90.13b	98.47a
	C (%)	—	18.05h	21.67g	25.98f	33.41e	63.22d	70.50c	83.13b	90.82a
23.5 mm 2009-08-14~16	A (mm)	22.41f	26.94e	27.42e	28.76de	30.26d	37.48bc	39.35b	42.20a	43.30a
	B (%)	—	20.19h	22.35g	28.32f	35.01e	67.24d	75.56c	88.29b	93.20a
	C (%)	—	19.26h	21.32g	27.01f	33.39e	64.13d	72.07c	84.21b	88.89a
28.7 mm 2009-08-25~26	A (mm)	27.96h	33.79g	35.06f	36.42ef	38.24e	47.02d	50.13bc	52.46ab	54.28a
	B (%)	—	20.86h	25.39g	30.24f	36.77e	68.17d	79.29c	87.62b	94.14a
	C (%)	—	20.32h	24.73g	29.46f	35.82e	66.41d	77.25c	85.36b	91.72a
5.9 mm 2009-09-05	A (mm)	5.06g	5.69f	5.87f	5.95f	6.24e	8.55d	9.13bc	9.87ab	10.28a
	B (%)	—	12.53h	15.92g	17.61f	23.37e	69.04d	80.45c	95.11b	99.27a
	C (%)	—	10.75h	13.65g	15.11f	20.04e	59.21d	69.00c	81.57b	85.14a

A: 贮水增量 Increase rate of soil water storage; B: 蓄墒增加率 Increase rate of rainfall storage; C: 产流效率 Runoff generation efficiency.

集雨中后期(6月中旬~9月下旬), 不同强度降水后 0~120 cm 土壤贮水增量均高于相应的降水量, 且随着垄面宽度的增加显著增加。在集雨前期, SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理的蓄墒增加率、产流效率均较低, 蓄墒增加率分别为 1.95%~2.17%、2.37%~2.52%、2.23%~2.74% 和 1.92%~2.69%, 产流效率分别为 1.74%~2.02%、2.12%~2.35%、2.00%~2.55% 和 1.71%~2.51%; 在集雨中后期, SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理的蓄墒增加率、产流效率较集雨前期显著增加, 不同降水量下的蓄墒增加率分别为 8.85%~20.86%、13.10%~25.39%、17.61%~30.24% 和 23.37%~36.77%, 产流效率分别为 8.01%~20.32%、11.86%~24.73%、15.11%~29.46% 和 20.04%~35.82%, 蓄墒增加率和产流效率均随着垄面宽度的增加显著增加。不同强度降水后, 膜垄处理 0~120 cm 土壤的贮水增量、蓄墒增加率、产流效率均显著高于土垄处理, 表明膜垄的集雨效率高于土垄。

2.3 不同垄沟处理对土壤容重和孔隙度的影响

紫花苜蓿种植第 2 年返青前(2009 年 4 月 11 日)、第 1 茬紫花苜蓿刈割后(2009 年 7 月 11 日)及生长季末期(2009 年 9 月 20 日)土壤容重见表 4。膜垄和土垄处理的土壤容重 0~20 cm 均小于 20~40 cm。生长季末期膜垄和土垄处理 0~20 cm、20~40 cm 土壤容

重均显著低于返青前, 即随着生育时期的延伸, 膜垄和土垄处理 0~40 cm 土壤容重均降低。整个生长季内 0~20 cm 容重 CK 降低 0.03 g·cm⁻³, 膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理分别降低 0.06 g·cm⁻³、0.07 g·cm⁻³、0.07 g·cm⁻³ 和 0.06 g·cm⁻³, 降幅大于 CK; 土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理容重分别降低 0.04 g·cm⁻³、0.04 g·cm⁻³、0.05 g·cm⁻³ 和 0.05 g·cm⁻³, 降幅大于 CK, 但小于膜垄处理。整个生长季 20~40 cm 土层, CK 容重降低 0.03 g·cm⁻³, 膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理土壤容重分别降低 0.04 g·cm⁻³、0.04 g·cm⁻³ 和 0.05 g·cm⁻³, 降幅大于 CK; 土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理容重分别降低 0.05 g·cm⁻³、0.04 g·cm⁻³、0.05 g·cm⁻³ 和 0.04 g·cm⁻³, 降幅大于 CK。表明垄沟集雨种植能够显著降低 0~40 cm 土壤容重, 且 0~20 cm 土壤容重膜垄处理的降幅显著大于土垄处理。

由土壤孔隙度测定值(表 4)可知, 膜垄和土垄各处理 0~20 cm 土壤孔隙度均大于 20~40 cm 土壤孔隙度。生长季末期膜垄和土垄处理 0~20 cm、20~40 cm 土壤孔隙度均显著高于返青前, 即随着生育时期的延伸, 膜垄和土垄处理 0~40 cm 土壤孔隙度均增大。整个生长季内 0~20 cm 土层, CK 孔隙度增加 0.85%, 膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75

表 4 2009 年不同垄沟处理的土壤容重和土壤孔隙度
Table 4 Soil bulk density and porosity of different treatments in 2009

项目 Item	土壤深度 Soil depth (cm)	测定日期(年-月-日) Date (year-month-day)	CK	MR30	MR45	MR60	MR75	SR30	SR45	SR60	SR75
容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	0~20	2009-04-11	1.37e(c)	1.34c(c)	1.34c(c)	1.33b(c)	1.32a(c)	1.37e(b)	1.37e(c)	1.36d(c)	1.34c(c)
		2009-07-11	1.36e(b)	1.32c(b)	1.31b(b)	1.31bc(b)	1.30a(b)	1.36e(b)	1.36e(b)	1.34d(b)	1.32c(b)
		2009-09-20	1.34g(a)	1.28b(a)	1.27b(a)	1.26a(a)	1.26a(a)	1.33f(a)	1.33e(a)	1.31d(a)	1.29c(a)
	20~40	2009-04-11	1.44e(b)	1.38b(c)	1.38b(c)	1.37a(c)	1.37a(c)	1.43d(b)	1.42c(c)	1.42c(c)	1.39b(c)
		2009-07-11	1.44f(b)	1.36b(b)	1.36bc(b)	1.35a(b)	1.35a(b)	1.42e(b)	1.40d(b)	1.40d(b)	1.37c(b)
		2009-09-20	1.41f(a)	1.34c(a)	1.34c(a)	1.33b(a)	1.32a(a)	1.38e(a)	1.38e(a)	1.37d(a)	1.35c(a)
孔隙度 Porosity (%)	0~20	2009-04-11	48.43e(c)	49.30d(c)	49.43cd(c)	49.70b(c)	50.10a(c)	48.14f(c)	48.24f(c)	48.55e(c)	49.50c(c)
		2009-07-11	48.59f(b)	50.08c(b)	50.44b(b)	50.39b(b)	51.08a(b)	48.54f(b)	48.86e(b)	49.30d(b)	50.07c(b)
		2009-09-20	49.28h(a)	51.60c(a)	51.90b(a)	52.30a(a)	52.30a(a)	49.63g(a)	49.89f(a)	50.61e(a)	51.15d(a)
	20~40	2009-04-11	45.69h(b)	47.78c(c)	47.84c(c)	48.16b(c)	48.41a(c)	45.88g(b)	46.30f(c)	46.30f(c)	47.62e(c)
		2009-07-11	45.74f(b)	48.54b(b)	48.53b(b)	48.98a(b)	48.90a(b)	46.23e(b)	47.24d(b)	47.00d(b)	48.15c(b)
		2009-09-20	46.65g(a)	49.27c(a)	49.28c(a)	49.67b(a)	50.07a(a)	47.82f(a)	47.74f(a)	48.16e(a)	48.90d(a)

同行中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 括号内不同小写字母表示各处理每次测定结果差异显著($P < 0.05$)。Different small letters in the same line indicate significant difference ($P < 0.05$) among different treatments. Different small letters in the brackets indicate significant difference ($P < 0.05$) among determination results of different times.

处理孔隙度分别增加 2.30%、2.47%、2.60%和 2.20%，增幅大于 CK；土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理孔隙度分别增加 1.49%、1.65%、2.06%和 1.65%，增幅大于 CK，但小于膜垄处理。整个生长季内 20~40 cm 土层，CK 孔隙度增加 0.96%，膜垄 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理孔隙度分别增加 1.49%、1.44%、1.51%和 1.66%，增幅大于 CK；土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理 20~40 cm 土壤孔隙度分别增加 1.94%、1.44%、1.86%和 1.28%，增幅大于 CK。表明垄沟集雨种植能够显著增加 0~40 cm 土壤孔隙度，且 0~20 cm 土壤孔隙度膜垄处理增幅显著大于土垄处理。

3 讨论

一般情况下，小于 5 mm 的降水对于作物生长基本属于无效降水，不能供作物吸收利用。本试验区，紫花苜蓿第 1 茬生长期降水量为 56.7 mm，占整个生长季节降水量的 26.8%；其中小于 5 mm 的降水次数为 18 次，占紫花苜蓿第 1 茬生长期总降水次数的 82%，小于 5 mm 的降水量为 18.6 mm，占紫花苜蓿第 1 茬生长期总降水量的 33%；大于 5 mm 的降水次数仅仅为 4 次，降水量仅为 38.1 mm，远不能满足紫花苜蓿的生长需求。无效、微效降水有效化对于干旱半干旱区作物返青及其提高产量具有重大现实意义。

试验表明，垄沟集雨能够在紫花苜蓿越冬期(2008 年 9 月~2009 年 4 月)增加土壤水分入渗量，并具有明显的蓄墒保墒作用，减少土壤水分非目标性损失，改善土壤水分状况，使得膜垄和土垄处理在非生产季节 0~120 cm 土层土壤贮水量较 CK 大幅增加，且垄上覆盖的地膜与土壤之间形成一个隔离层，阻止土壤水分的蒸发损失，所以膜垄处理对土壤的保

墒增墒效果明显优于土垄处理。因试验区大陆性季风气候显著，冬季多为西北风，风速较大，冬季地面无覆盖物，地表蒸发量大，0~120 cm 土壤层水分散失量 CK 高于膜垄和土垄处理。采用垄沟集雨种植方式，越冬期田间沟垄可以减小风速，抑制蒸发，提高水分入渗深度，且沟内水分富集区以垂直入渗为主，同时向垄下侧向扩散，有利于土壤保墒，使土壤水分的非目标性损失量明显低于 CK。在沟宽度不变的情况下，随着垄宽度的增加，垄面抑制蒸发的相对面积增加，抑制作用增强，因此膜垄和土垄随着垄宽度的增加，水分散失量均显著降低。

垄沟集雨能够将小于 5 mm 的无效、微效降水通过人工产流形式形成坡面径流，使之有效化，从而对有限降水资源进行再分配，而且垄越宽，集流面积越大，产生径流越多^[17]。田间起垄及垄上覆膜能使两个集雨面上的降水集中到一个面上，沟中的水分产生叠加，同时垄具有抑制蒸发作用，膜垄沟内水分产生的叠加作用大于土垄，其垄面对水分蒸发的抑制作用也大于土垄^[18]，因此在紫花苜蓿的整个生长季内，膜垄处理在不同降水之后 0~120 cm 土壤贮水增量均明显高于相应降水量，且随着垄面宽度增加，土壤贮水增量大幅增加。由于膜垄无渗漏象，一定高度的垄体又形成均一的集水面，在整个集雨期一直能有效集雨，所以在不同强度降水后膜垄处理的蓄墒增加率及产流效率均显著高于土垄，且二者均随垄面宽度增加而增加。

在 2009 年集雨前期(4 月上旬~6 月上旬)，土垄垄面的结皮层尚未形成，集雨效果差，土垄处理不同降水之后 0~120 cm 土壤贮水增量均低于每次降水量，而且蓄墒增加率、产流效率均较低。虽然紫花苜蓿

第2茬生长期,降雨量较返青前和第1茬生长期有所增加,且在2009年集雨中后期(6月中旬~9月下旬),土垄经过多次降雨的冲溅作用,垄面结皮层逐渐形成,集雨效率逐渐变大,土垄各处理不同降水之后0~120 cm土壤贮水增量均高于每次降水量,但明显低于膜垄各处理^[18];蓄墒增加率、产流效率较集雨前期有所增加,但明显低于膜垄各处理,并不能完全满足紫花苜蓿的生长需求。

容重与孔隙度是土壤的基本物理指标,是衡量土壤结构和评价土壤质量的重要参数,直接影响着土壤蓄墒效果和透气性,并间接影响着土壤肥力和植物生长状况^[19],适宜的土壤容重和孔隙度对植物生长发育和产量及品质的形成都具有重要作用。一般情况下紫花苜蓿根系集中分布于0~30 cm耕层内,而其根系的穿插有利于打破长期耕作造成的犁底层^[20-21],从而影响土壤容重和孔隙度。垄沟集雨能对天然降水资源实现空间调控,可以满足紫花苜蓿对水分的需求。膜垄和土垄处理能明显提高紫花苜蓿的出苗率、成苗率及越冬率,次年苜蓿返青后植株密度显著高于CK^[22];且膜垄处理的苜蓿生长迅速^[22],根系发达,对土壤的穿插作用强于土垄处理和CK,使得膜垄和土垄处理随着生育期的延伸土壤容重均降低;膜垄处理0~20 cm、20~40 cm土壤容重降幅均大于CK,土垄处理0~20 cm土壤容重降幅也大于CK,但均小于膜垄处理,20~40 cm土壤容重降幅大于CK处理。膜垄和土垄处理0~20 cm、20~40 cm土壤孔隙度均增加,膜垄处理增幅大于CK处理,土垄处理0~20 cm土层增幅大于CK处理,但小于膜垄各处理,20~40 cm土壤孔隙度增幅大于CK处理。表明垄覆膜处理能够改善土壤的水分状况及物理性质,使土壤生态环境朝着更有利于紫花苜蓿生长的方向发展,为土壤水、肥、气、热的协调运转及早作紫花苜蓿的长期高产、稳产创造了条件。

4 结论

试验结果表明:越冬期膜垄和土垄处理 0~120 cm 土壤水分平均散失量分别低于 CK(平作)28.43 mm 和 13.61 mm,膜垄处理对土壤的保墒增墒效果明显优于土垄处理。膜垄和土垄处理的蓄墒增加率和产流效率均随着垄面宽度增加而显著增加,且膜垄的蓄墒增加率和产流效率显著高于土垄处理,膜垄的集雨效率明显优于土垄处理。垄沟集雨种植能够显著降低 0~40 cm 土壤层容重,增加 0~40 cm 土壤层孔隙度,且膜垄处理 0~20 cm 土壤层容重降幅及 0~20 cm 土壤层孔隙度增幅均大于土垄处理。

参考文献

- [1] 王俊,徐进章.半干旱地区发展集雨型生态农业模式研究[J].中国生态农业学报,2005,13(4):207-209
- [2] 樊廷录.旱地农田微集雨种植的水分生产潜力增进机理研究[J].水土保持研究,2003,10(1):54-57
- [3] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000
- [4] 李凤民,王静,赵松岭.半干旱黄土高原给水高效农业的发展[J].应用生态学报,1999,19(2):152-157
- [5] 李军,王龙昌,孙小文.宁南半干旱偏旱区农田沟垄径流集蓄保墒效果与增产效应研究[J].干旱地区农业研究,1997,15(1):16-20
- [6] 张德奇,廖允成,贾志宽,等.宁南旱区谷子集水保水技术效应研究[J].中国生态农业学报,2006,14(4):51-53
- [7] Tian Y, Su D R, Li F M, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas[J]. Field Crops Research, 2003, 84(3): 385-391
- [8] Wang Q, Zhang E H, Li F M, et al. Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas[J]. Water Resources Management, 2008, 22(10): 1431-1443
- [9] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47
- [10] 寇江涛,师尚礼.垄覆膜集雨对苜蓿草地土壤水分动态及利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(1):47-53
- [11] Jia Y, Li F M, Wang X L. Soil quality responses to alfalfa watered with a field micro-catchment technique in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2006, 95(1): 64-74
- [12] 洪浚曾.草业与西部大开发[M].北京:农业出版社,2001
- [13] 刘广才,杨祁峰,李来祥,等.旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤水分效应研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):18-28
- [14] 李永平,贾志宽,刘世新,等.旱作农田微集雨种植产流蓄墒扩渗特征研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):86-90
- [15] 路远,张万祥,孙榕江,等.天祝高寒草甸土壤容重与孔隙度时空变化研究[J].草原与草坪,2009(3):48-51
- [16] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000
- [17] 李小雁.干旱半干旱过渡带雨水集流实验与微型生态集雨模式[D].甘肃:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2000,65:143-147
- [18] 王琦,张恩和,李凤民.半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J].生态学报,2004,24(8):1816-1819
- [19] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56
- [20] 杨吉华,张光灿,刘霞,等.紫花苜蓿保持水土效益的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):91-96
- [21] 郭正刚,张自和,肖金玉,等.黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1007-1012
- [22] 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