

垄覆膜集雨对苜蓿草地土壤水分动态及利用效率的影响^{*}

寇江涛^{1,2} 师尚礼^{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 中-美草地畜牧业可持续研究中心 兰州 730070)

摘 要 我国西北黄土高原干旱半干旱区年降雨稀少和土壤水分周期性亏缺, 导致人工草地生产力低下、水分利用效率低。本试验在旱作条件下, 将垄覆膜集雨措施应用于紫花苜蓿种植, 研究了沟垄宽比和覆膜方式对 2 年轮苜蓿草地土壤水分动态及水分利用效率的影响。结果表明: 垄覆膜集雨在集雨前期(4 月中旬至 6 月上旬)显著提高 0~20 cm 土层土壤含水量, 在集雨中后期(6 月中旬至 9 月下旬)显著提高 0~120 cm 土层平均含水量, 越冬期增加土壤水分入渗能力, 提高 20~120 cm 土层平均含水量; 且垄覆膜处理的集雨效率高于土垄处理。随着生育时期的延伸, 垄覆膜处理 0~120 cm 土壤平均贮水量呈先降后升的趋势, 土垄处理 0~120 cm 土壤平均贮水量呈由高到低的趋势; 在苜蓿生长后期垄覆膜处理的蓄墒能力显著高于土垄处理。垄覆膜处理的平均水分利用效率为 $34.91 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为对照(平作, CK)的 2.25 倍, 土垄处理的平均水分利用效率为 $28.47 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为 CK 的 1.83 倍, 垄覆膜相对土垄处理平均水分利用效率提高 22.62%; 垄覆膜处理以沟垄宽比为 60 cm : 60 cm 和 60 cm : 75 cm 的水分利用效率最高。

关键词 苜蓿草地 垄覆膜集雨 土壤水分 水分利用效率

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)01-0047-07

Effect of rainwater harvesting via plastic film-covered ridge on soil moisture in *Medicago sativa* grassland and water use efficiency

KOU Jiang-Tao^{1,2}, SHI Shang-Li^{1,2}

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

Abstract The productivity and water use efficiency of cultivated pastures are low in arid and semiarid areas of the Loess Plateau due to low annual rainfall and periodical deficit of soil moisture. In this study, the rainwater harvesting system via plastic film-covered ridge was applied in production of biennial *Medicago sativa* grassland in dryland. And the impact of ditch/ridge ratio and mulching patterns on the trends and use efficiency of soil moisture were determined. Results showed that rainwater harvesting by plastic film-covered ridge significantly improved soil moisture content in 0~20 cm soil at early stage of rainwater harvesting (from the middle ten-day of April to the first ten-day of June). It also greatly enhanced average soil moisture content in 0~120 cm soil at mid-late rainwater harvesting stage (from the middle ten-day of June to the last ten-day of September). During winter, rainwater harvesting via plastic film-covered ridge increased soil infiltration capacity and improved average soil moisture content in 20~120 cm soil. Further, the rainwater harvesting efficiency of plastic film-covered ridge was higher than that of compacted bare ridge. The moisture storage in 0~120 cm soil with rainwater harvesting via plastic film-covered ridge initially dropped, and then rose during the growth period of *M. sativa*. At late growth stage, soil moisture storage with rainwater harvesting via plastic film-covered ridge was evidently higher than that via compacted bare ridge. Average water use efficiency with plastic film-covered ridge was $34.91 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 2.25 times that of CK (flat field without ridge and mulch). Average water use efficiency with compacted bare ridge was $28.47 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 1.83 times that of CK. Average water use efficiency of plastic film-covered ridge

* 农业部行业专项(nyhyzx07-022)、农业部黄土高原牧草种质资源收集保护项目和农业部现代农业产业技术体系建设专项资助

** 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其牧草栽培方面的教学与研究。E-mail: shishl@gsau.edu.cn
寇江涛(1986~), 男, 硕士研究生, 主要从事牧草栽培及其牧草种质资源与育种方面的研究。E-mail: koujiangtao@st.gsau.edu.cn

收稿日期: 2010-04-01 接受日期: 2010-08-27

increased by 22.62% compared with that of compacted bare ridge, and the highest ones were in plastic film-covered ridges with 60 cm/60 cm and 60 cm/75 cm ditch/ridge ratios.

Key words *Medicago sativa* grassland, Rainwater harvesting by plastic film-covered ridge, Soil moisture, Water use efficiency (Received April 1, 2010; accepted Aug. 27, 2010)

干旱半干旱的黄土高原区地下水位较深, 植物生长过程中水分的补给主要来源于降水。但该地区属温带大陆性季风气候, 地貌类型复杂多样, 年降水量少且集中在 7~9 月份, 小于 5 mm 的无效和微效降雨多, 径流损失与蒸发损失并存, 土壤水分基本处于全年亏缺状态^[1], 从而导致人工草地生产力低下、水分利用效率低^[2]。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。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为黄土高原地区刈割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^[3]。但西北黄土高原干旱半干旱区降雨稀少和土壤水分周期性亏缺, 旱作条件下苜蓿种植出苗难、成苗难, 往往缺苗断垄, 达不到设计密度, 且因干旱影响生长, 产量低、草质差、生产力低下; 还因有效降雨少, 水分入渗浅, 蒸发速度快等造成水分利用效率低^[2]。实施垄覆膜集雨种植, 能够使垄上降雨流入沟中, 产生水分叠加, 同时田间沟垄可以减小风速, 抑制蒸发, 提高入渗深度^[4-5], 达到蓄积雨水、增加土壤含水量、提高作物水分利用效率的目的^[6-8], 但有关垄沟集雨种植对苜蓿草地土壤水分动态及其利用情况的报道较少^[9-10]。本文通过连续 2 年垄覆膜种植紫花苜蓿试验, 研究不同覆膜方式和不同沟垄宽比处理对 2 年龄苜蓿草地土壤水分动态及其水分利用效率的影响, 旨在为提高干旱半干旱区苜蓿草地产草量和延长草地高产年限提供有效的途径和方法, 并为干旱半干旱区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, 属典型的大陆性气候, 处于半干旱向干旱区过渡地带; 年降水量 230.0~435.8 mm, 年蒸发量 1 230.4~1 879.8 mm; 年平均日照 2 659.3 h, 年最低气温 -28.1℃, 最高气温 34.3℃, 年平均气温 5.9℃; 年平均相对湿度 56%, 干燥度 3.1, 年均无霜期 121 d; 全年多为西北风, 夏季阴雨天气亦有东南风, 风力一般为 2~4 级, 最大 9 级, 频率为 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 年苜蓿整个生长期(4 月 11 日~9 月 20 日)降雨量为 211.9 mm, 其中第 1 茬生长期(4 月 11 日~7 月 11 日)降雨量为 56.7 mm, 第 2 茬生长期(7 月 11 日~9 月 20 日)降雨量为 155.2 mm。

1.2 试验设计

供试紫花苜蓿品种为“陇东”。采用田间垄覆膜沟种植方式, 垄为集雨区, 沟为种植区。设垄覆膜(Plastic film-covered ridge, MR)和土垄(Compacted bare ridge, SR)2 种集雨面处理形式: 集雨垄坡度 40°, 垄高 25 cm; 垄覆膜处理垄上覆盖宽 1.2 m、厚度 0.08 mm 的塑料薄膜, 边缘用土固压, 以防被风损害; 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苜蓿整个生长期和越冬期。两种垄处理方式均设 60 cm: 30 cm、60 cm: 45 cm、60 cm: 60 cm 和 60 cm: 75 cm 4 种沟垄宽比(沟宽: 垄宽), 以平作为对照(CK), 共 9 个处理, 编号分别为 MR30、MR45、MR60、MR75、SR30、SR45、SR60、SR75、CK, 小区随机排列, 每个处理重复 3 次, 垄长 6 m, 每个小区有 4 条垄 3 条沟, 小区面积及编号见表 1。本试验数据测定自 2009 年 4 月 11 日至 9 月 20 日。

1.3 田间管理

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, 播种深度 1~2 cm, 播种量 22.5 kg·hm⁻²。播种前施基肥, 施肥深度 1~2 cm, 纯 N[CO(NH₂)₂, 含 N 46%]和纯 P[重过磷酸钙, 含 P₂O₅ 46%]的用量分别为 34.5 kg·hm⁻²和 8 kg·hm⁻²。田间无灌溉, 播种后松土, 人工除草, 以免苜蓿幼苗受杂草危害。

1.4 项目测定

1.4.1 测定时期

2009 年苜蓿生育期(第 1 茬生长期)测定时间为返青前(4 月 11 日)、返青期(5 月 2 日)、分枝期(5 月 16 日)、现蕾期(6 月 26 日)、盛花期(7 月 11 日)、再生期(第 2 茬生长期)测定时间为分枝前(7 月 22 日)、分枝期(8 月 8 日)、现蕾期(8 月 23 日)、初花期(9 月 20 日)。

1.4.2 土壤含水量测定

于紫花苜蓿种植第 2 年的各生育期及刈割后用土钻在沟内采取土样, 深度 120 cm 内每 20 cm 为 1

表 1 试验设计参数
Tab. 1 Design parameters of experiment

处理 Treatment	沟垄比 Ditch width ridge width (cm)		小区面积 Plot area (m ²)	产流面积 Runoff area (m ²)	沟面积 Ditch 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 and mulch

层, 每个小区取 3 钻, 同一层次 3 个土样混合均匀, 采用烘干法(105 °C, 10 h)测定土壤质量含水量, 并按下式计算土壤贮水量^[11]:

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

式中, W 为土壤贮水量(mm), h 为土层深度(cm), p 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), b 为土壤质量含水量(%)。

1.4.3 水分利用效率测定

由于苜蓿生长期间无灌溉, 加之试验区地下水位较深, 因此苜蓿生长过程中利用地下深层水量可忽略不计; 假设垄下土壤与种植沟内土壤水分处于平衡状态, 根据“地膜覆盖后垄面集雨效率为 90%、土垄集雨效率为 16.8%”^[12], 土壤供水量(W_s , mm)、作物耗水量(W_c , mm)和水分利用效率(WUE , $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)可按式计算^[13-14]:

$$\text{沟垄集雨处理: } W_s = \frac{h_1 + h_2}{h_2} \times (W_1 - W_2) \quad (2)$$

$$W_c = W_s + \frac{h_2 + E_r h_1}{h_2} \times P \quad (3)$$

$$WUE = \frac{Y}{W_c \times \frac{h_2}{h_1 + h_2}} \quad (4)$$

$$\text{平作处理: } W_s = W_1 - W_2 \quad (5)$$

$$W_c = W_s + P \quad (6)$$

$$WUE = \frac{Y}{W_c} \quad (7)$$

式中, W_1 、 W_2 为相邻 2 次取样 120 cm 土层贮水量(mm), E_r 为垄面集雨效率(%), P 为作物生长期降水量(mm), h_1 、 h_2 为垄宽和沟宽(cm), Y 为按沟垄总面积计算的干草产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据统计

采用 Excel 2003 进行数据处理和图表绘制, 并采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差数(LSD)法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理 0~120 cm 土层土壤水分动态

由图 1a 可知, 沟垄集雨种植紫花苜蓿第 2 年返青期前(2009 年 4 月 11 日)0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm 土层土壤平均含水量, 垄覆膜处理为 13.79%、16.31%、18.76%、19.26%、16.74%、15.42%, 土垄处理为 13.06%、15.63%、15.87%、17.61%、15.39%、14.59%, CK 为 12.68%、13.61%、15.24%、18.57%、16.38%、15.56%, 垄覆膜、土垄及 CK 处理 0~120 cm 土层平均含水量均随土层加深呈先增加后降低趋势, 但 CK 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 土层土壤平均含水量显著低于垄覆膜处理, 表明垄覆膜集雨能够在苜蓿越冬期(2008 年 10 月~2009 年 4 月)增加土壤水分入渗能力, 减少土壤水分的非目标性损失, 提高土壤深层含水量, 所以垄覆膜和土垄处理 60~80 cm 土层平均含水量最高。试验区冬季风多且风速较大, 地表蒸发量大, 苜蓿越冬期内, 垄覆膜和土垄处理 0~20 cm 土层含水量最低, 随着土层深度增加, 土壤平均含水量不断提高。沟内水分富集区以垂直入渗为主, 同时向垄下侧向扩散^[5], 所以在越冬期有限的水分到达 100~120 cm 土层的能力减弱, 垄覆膜和土垄 60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm 土层平均含水量随土层深度的增加而减小。垄覆膜处理 0~120 cm 土层平均含水量以 MR45 最高, MR60 次之, MR30、MR75 显著降低, 表明垄覆膜 MR45、MR60 处理能在苜蓿越冬期显著提高土壤蓄墒保墒能力, 有效改善苜蓿草地的土壤水分生态环境。土垄处理各垄沟比间 0~120 cm 土层平均含水量差异不显著。

由图 1b 可知, 第 1 茬苜蓿于盛花期(7 月 11 日)刈割后, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、

80~100 cm、100~120 cm 土层平均含水量, 垄覆膜处理为 18.24%、16.34%、14.58%、14.54%、13.82%、12.34%, 随土层加深而降低; 土垄处理为 15.97%、13.23%、13.87%、13.88%、12.63%、10.93%, 0~20 cm 土层平均含水量最高, 20~40 cm 土层平均含水量较 0~20 cm 土层显著降低, 40~60 cm、60~80 cm 土层平均含水量较 20~40 cm 土层有所提高, 但增幅不显著, 60~120 cm 土层平均含水量随土层加深而降低。由于种植第 2 年苜蓿返青前到第 1 茬刈割期间, 沟内有生长植株覆盖, 可减小地面风速和抑制地表蒸发, 同时接纳沟内降雨和垄上径流, 故垄覆膜和土垄处理 0~20 cm 土层平均含水量较返青前增幅显著。在第 1 茬生长期当地降雨量仅为 56.7 mm, 无法满足苜蓿正常生长需求, 但因苜蓿根系发达, 种植后第 2

年可达 1 m 深^[3], 对土壤深层的水分利用效率有所提高, 使得垄覆膜和土垄处理 40~120 cm 土层平均含水量较返青前降低, 并随土层深度的增加而减小, 100~120 cm 土层平均含水量最低。

由图 1c 可知, 第 2 茬苜蓿于初花期(2009 年 9 月 20 日)刈割后, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm 土层平均含水量, 垄覆膜处理为 21.21%、19.65%、19.80%、18.20%、16.72%、13.20%, 0~20 cm 土层平均含水量最高, 20~40 cm、40~60 cm 土层平均含水量较 0~20 cm 土层有所降低, 40~120 cm 土层平均含水量随土层加深而降低, 100~120 cm 土层平均含水量最低; 土垄处理为 16.32%、16.39%、16.81%、16.65%、13.57%、12.55%, 0~80 cm 土层平均含水量无显著差异,

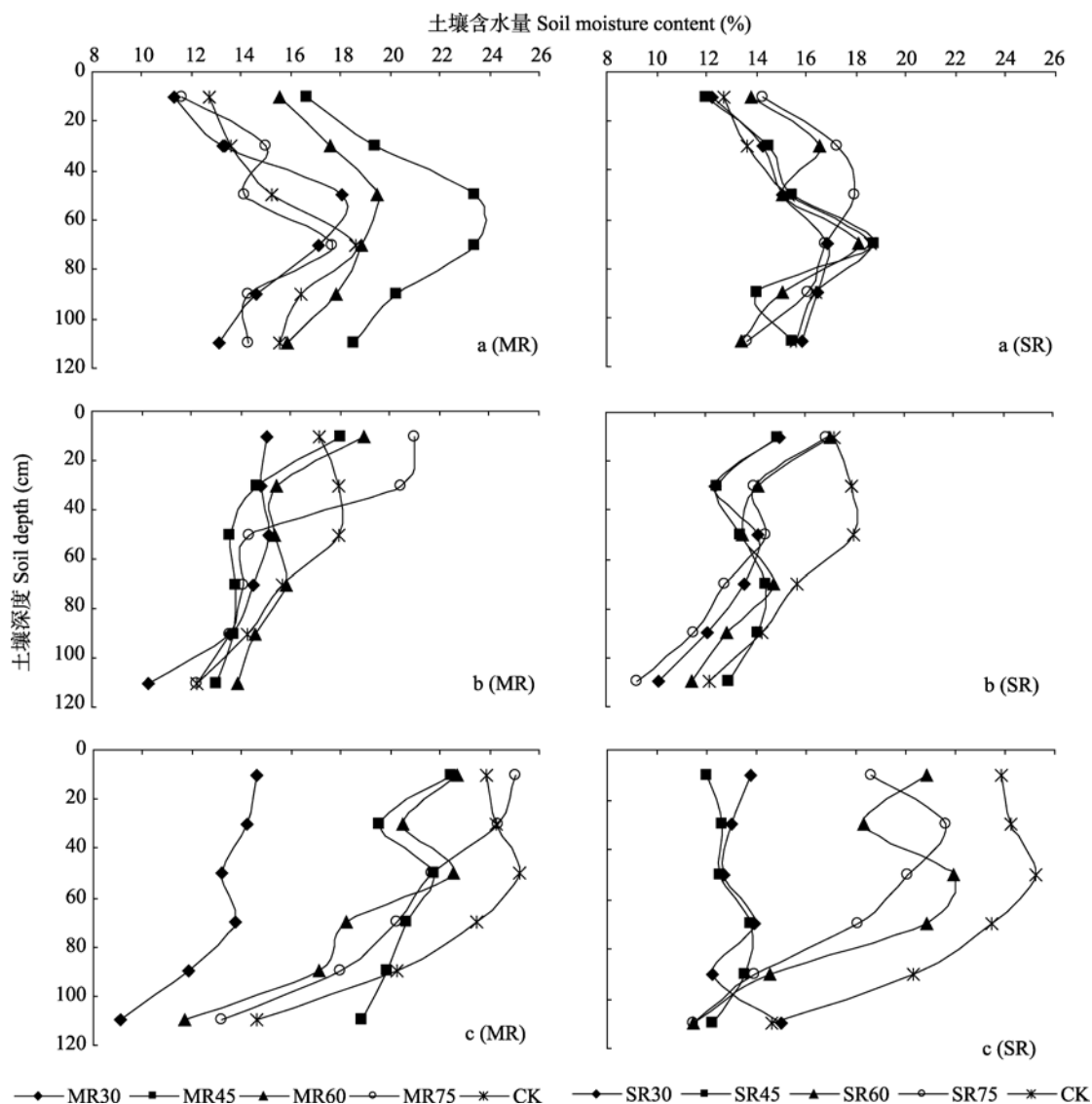


图 1 苜蓿生长期间垄覆膜(MR)和土垄(SR)处理 0~120 cm 土层土壤水分变化动态

Fig. 1 Soil moisture dynamics along soil profile of 0~120 cm with plastic film-covered ridge (MR) and compacted bare ridge (SR) during *M. sativa* growth period

a: 返青前(2009 年 4 月 11 日) Before turning green (April 11, 2009); b: 第 1 茬刈割后(2009 年 7 月 11 日) After cutting of the first crop (July 11, 2009); c: 第 2 茬刈割后(2009 年 9 月 20 日) After cutting of the second crop (September 20, 2009).

80~100 cm、100~120 cm 土层平均含水量显著降低。苜蓿第 2 茬生长期, 试验区降雨量较第 1 茬生长期有所增加, 为 155.2 mm, 同时该地区 7~9 月份风速降低, 地表蒸发减少; 第 2 茬苜蓿刈割后, 垄覆膜和土垄处理 0~120 cm 土层平均含水量均较返青前和第 1 茬生长期有所增加, 且垄覆膜处理中 MR45、MR60 和 MR75 的增幅均显著高于 MR30, 土垄处理 SR60 和 SR75 的增幅显著高于 SR30 和 SR45。

由图 1 可知, 紫花苜蓿返青期前, CK 处理 0~120 cm 土层平均含水量为 15.34%, 与土垄处理 SR30、SR45、SR60、SR75 及垄覆膜处理 MR30、MR75 均无明显差异, 但 CK 处理 0~120 cm 土层平均含水量显著低于垄覆膜处理 MR45、MR60。到第 2 茬刈割后, CK 处理 0~120 cm 土层平均含水量为 21.95%, 比返青前提高 43.09%, 显著高于垄覆膜和土垄处理。这是由于垄覆膜和土垄处理能明显提高苜蓿越冬保存率, 次年苜蓿返青后, 垄覆膜和土垄处理的植株密度显著高于 CK, 因此 CK 处理对土壤水分的利用减少, 使 0~120 cm 土层土壤平均含水量增加。

2.2 不同生育期 0~120 cm 土层土壤贮水量动态

垄覆膜能够在苜蓿越冬期增加深层土壤蓄水量, 在 2 年生苜蓿第 1 茬生长期依靠深层水分对浅层的输送作用满足浅层的蒸散失墒。由图 2 可以看出, 垄覆膜 0~120 cm 土壤平均贮水量苜蓿返青前(4 月 11 日)为 241.86 mm, 返青期(5 月 2 日)为 248.17 mm, 较返青前增加 7.69 mm, 由于苜蓿返青后至分枝前气温低、降水少, 植株生长缓慢, 个体小, 叶面积系数小, 水分蒸发量小, 苜蓿日耗水强度较低, 耗水量较少, 此阶段为全生育期耗水量最低时期。分枝期至开花期苜蓿日耗水强度增大, 耗水量增多, 主要用于营养生长; 盛花期苜蓿日耗水强度最大, 耗水量最多。从现蕾期到盛花期(7 月 11 日), 苜蓿的生殖生长达到最旺盛, 耗水量也达到最大, 垄覆膜处理 0~120 cm 土壤平均贮水量降至 216.80 mm。当第

1 茬苜蓿刈割后, 地面裸露, 地表蒸发量增加, 所以第 2 茬苜蓿分枝前(7 月 22 日)垄覆膜 0~120 cm 土壤平均贮水量降至 172.69 mm, 为整个生长季的最低值。当地的年降雨量主要分布在 7 月底到 9 月初, 第 2 茬苜蓿分枝前到初花期刈割期间, 夏末和秋季降水的补偿作用使垄覆膜 MR45、MR60 和 MR75 处理土壤水分得以补充和恢复, 垄覆膜 MR30 处理的集雨面积小, 集雨量小, 土壤贮水量显著低于 MR45、MR60 和 MR75 处理, 所以第 2 茬苜蓿于初花期(9 月 20 日)刈割后, 垄覆膜 0~120 cm 土壤平均贮水量提高到 269.85 mm, 为整个生长季节的最高值。在苜蓿整个生长时期内, 垄覆膜 0~120 cm 土壤平均贮水量表现出先降低后升高的总体趋势。

苜蓿种植第 2 年返青前期(4 月 11 日), 垄覆膜 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量分别为 210.80 mm、293.34 mm、253.47 mm、209.83 mm(表 2), MR45 的土壤贮水量显著高于 MR60, MR60 又显著高于 MR75 和 MR30, 表明 MR45 在苜蓿越冬期对土壤的保墒增墒效果明显优于 MR75 和 MR30, MR60 次之。第 1 茬苜蓿于盛花期(7 月 11 日)刈割后, 垄覆膜 MR30、MR45、MR60 和 MR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量分别为 200.79 mm、209.10 mm、226.65 mm、230.66 mm(图 2), MR75、MR60 的土壤贮水量显著高于 MR45 和 MR30, 表明苜蓿第 1 茬生长期 MR75 和 MR60 的集雨效率高于 MR45 和 MR30。第 2 茬苜蓿于初花期(9 月 20 日)刈割后, 除 MR30 外, MR45、MR60 和 MR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量达到整个生长季节的最高值, 分别为 297.17 mm、301.86 mm、295.36 mm(表 2), MR45、MR60 和 MR75 的土壤贮水量显著高于 MR30, 表明苜蓿第 2 茬生长期 MR75、MR60、MR45 的集雨效率高于 MR30。就蓄墒效果而言, 垄覆膜 MR45、MR60 处理在苜蓿越冬期对土壤的保墒增墒效果比较明显, 苜蓿第 1 茬生长期 MR75、

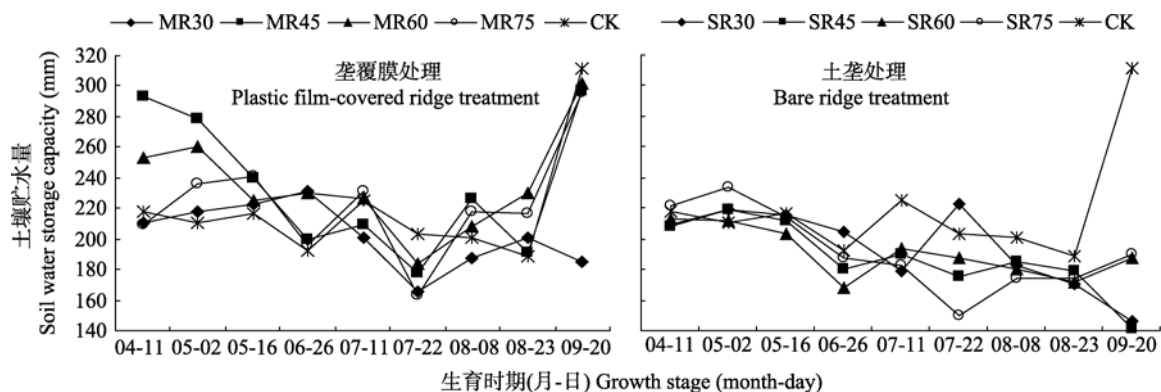


图 2 不同苜蓿生育期土壤贮水量动态变化

Fig. 2 Soil water storage dynamics in different growth stages of *M. sativa*

表 2 苜蓿垄覆膜和土垄处理的水分利用效率

Tab. 2 Water use efficiency of *M. sativa* with plastic film-covered ridge and compacted bare ridge

	项目 Item	CK	MR30	MR45	MR60	MR75	SR30	SR45	SR60	SR75
1.2 m 土壤	第 1 茬苜蓿返青前									
贮水量	Before turning green of the first crop	217.43cd	210.08de	293.34a	253.47b	209.83de	209.47de	208.42e	212.42de	221.68c
1.2 m soil	第 2 茬苜蓿刈割后									
water stor-	After cutting of the second crop	311.03a	185.00e	297.17c	301.86b	295.36c	146.47f	141.52g	187.37de	190.18d
age (mm)	集雨量 Rainfall harvesting (mm)	211.90	307.26	354.93	402.61	450.29	229.70	238.60	247.50	256.40
	耗水量 Water consumption (mm)	118.30	345.97	348.24	305.82	257.85	324.20	355.68	297.60	327.27
经济产量	Economic output (kg · hm ⁻²)	1 837.36f	4 831.43d	5 731.27b	6 215.24a	5 641.52b	3 988.14e	4 895.19d	5 319.22c	5 176.70c
水分利用效率	Water use efficiency (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)	15.53g	20.95ef	28.80d	40.65b	49.23a	18.45fg	24.08e	35.75c	35.59c

同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。Different small letters in one line indicate significant difference at 0.05 level.

MR60 的蓄墒效果好于 MR45 和 MR30, 第 2 茬生长期 MR75、MR60、MR45 的蓄墒效果好于 MR30。

由图 2 可以看出, 土垄 0~120 cm 土壤平均贮水量在苜蓿返青前(4 月 11 日)为 213.00 mm, 在返青期(5 月 2 日)为 220.95 mm, 较返青前增加 7.95 mm。从返青期到第 2 茬苜蓿刈割期(9 月 20 日), 土垄 0~120 cm 土壤平均贮水量不断降低至 166.38 mm, 达到整个生长季节的最低值。虽然苜蓿第 2 茬生长期, 降雨量较返青前和第 1 茬生长期有所增加, 并且在集雨后期, 土垄经过多次降雨的冲溅作用, 逐渐形成垄面的结皮层, 集雨效率逐渐变大, 但土垄的集雨效率较垄覆膜低。在苜蓿整个生育期内, 土垄 0~120 cm 土壤平均贮水量表现出由高到低的总体趋势, 与垄覆膜处理表现不一致。

苜蓿种植第 2 年返青前期(4 月 11 日), 土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量分别为 209.47 mm、208.42 mm、212.42 mm、221.68 mm(表 2), 处理间差异不显著, 说明苜蓿越冬期土垄对土壤的保墒增墒效果较垄覆膜差。第 1 茬苜蓿盛花期(7 月 11 日)刈割后土垄 SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量分别为 178.61 mm、190.38 mm、193.49 mm、182.20 mm(图 2), 较返青前明显降低, 且各处理间差异不显著, 这是由于第 1 茬生长期降雨量有限(仅为 56.7 mm), 而且在土垄集雨初期, 垄面的结皮层尚未形成, 集雨效果差。第 2 茬苜蓿初花期(9 月 20 日)刈割后, SR30、SR45、SR60 和 SR75 处理 0~120 cm 土壤贮水量分别为 146.47 mm、141.52 mm、187.37 mm、190.18 mm(表 2), SR60 和 SR75 的土壤贮水量显著高于 SR30 和 SR45, 由此可见, 在第 2 茬苜蓿生长期, SR60 和 SR75 的集雨效率高于 SR30 和 SR45, SR60 和 SR75 0~120 cm 土壤贮水量处于平衡状态, SR30 和 SR45 处理 0~120 cm 土壤贮水量显著低于返青前和第 1 茬苜蓿刈割后。就蓄墒效果而言, 土垄在苜

蓿越冬期对土壤的保墒增墒效果较差, 整个生长期, SR60、SR75 的集雨效率高于 SR30、SR45。

2.3 不同处理对水分利用效率的影响

为了准确评价集雨对因集雨面积导致种植面积减少的补偿效应, 用全部面积(沟面积+垄面积)计算苜蓿干草产量, 并进一步计算水分利用效率。2009 年苜蓿整个生长期(4 月 10 日~9 月 20 日), 降雨量为 211.9 mm。由表 2 可知, 垄覆膜处理 0~120 cm 水分利用效率从高到低排列顺序为 MR75、MR60、MR45、MR30, 各处理间差异显著, 且各处理均显著高于 CK, 分别高出 217.00%、161.75%、85.45%、34.90%。土垄处理 0~120 cm 水分利用效率从高到低排列顺序为 SR60、SR75、SR45、SR30, SR60 和 SR75 间无显著差异, SR60 和 SR75 均显著高于 SR45 和 SR30, 除 SR30 外, 其他土垄处理的水分利用效率均显著高于 CK; SR75、SR60、SR45、SR30 的水分利用效率分别较 CK 提高 129.17%、130.20%、55.05%、18.80%。所有处理中, MR75、MR60 的水分利用效率最高, CK 处理的水分利用效率最低。

3 结论与讨论

一般情况下, 小于 5 mm 的降雨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, 苜蓿第 1 茬生长期小于 5 mm 的降雨次数为 18 次, 占此期间总降雨次数的 82%, 降雨量占总降雨量的 33%; 大于 5 mm 的降雨次数仅 4 次, 降雨量仅为 38.1 mm, 远不能满足苜蓿的生长需求。无效、微效降雨有效化对于干旱半干旱区作物的返青及其提高第 1 茬苜蓿草产量具有重大的现实意义。

试验表明, 垄覆膜集雨能够在苜蓿越冬期增加土壤水分入渗能力, 减少苜蓿在越冬休眠期土壤水分非目标性损失, 提高 20~120 cm 土层平均含水量, 保证苜蓿返青, 并在苜蓿第 1 茬生长期将小于 5 mm 的无效、微效降雨有效化^[15], 显著提高 0~20 cm

土层的含水量。该措施使沟内的水分产生叠加^[16], 并可在第2茬生长期显著提高苜蓿草地0~120 cm 土层平均含水量, 从而保证苜蓿越冬休眠期的土壤水分供应。在苜蓿的整个生长期, 垄覆膜0~120 cm 土层平均含水量显著高于土垄, 而且垄覆膜0~120 cm 土层平均含水量随降雨量变化的增幅较土垄明显, 说明垄覆膜的集雨效率高于土垄。

在干旱半干旱区, 60%以上的降水集中在7、8、9月^[1]。沟垄集雨种植建立的垄沟产流、集水、蓄墒系统, 优化了苜蓿人工草地的土壤水分生态环境。根据土壤水动力学原理, 微集水种植构建的沟垄系统, 使降水通过垄面产生的径流首先抵达沟侧, 然后通过侧渗逐渐向沟中央汇集, 并同时向垄下扩渗, 同时通过重力作用向深层土壤下渗, 使降雨得到有效蓄存, 在农田内部实现作物在时空上对水分的有效调控利用^[17-18]。整个生长期, 垄覆膜0~120 cm 土壤平均贮水量呈现先降低后升高的趋势, 土垄0~120 cm 土壤平均贮水量呈现由高到低的趋势, 与垄覆膜表现不一致。表明垄覆膜的蓄墒效果优于土垄, 垄覆膜处理中, 以MR45、MR60蓄墒效果最好。

在我国干旱半干旱地区, 雨水利用效率低下, 作物生产潜力由于缺水而下降60%~75%^[19]。沟垄集雨效率较高, 垄覆膜的平均集雨效率为90%, 土垄的平均集雨效率为16.8%^[12], 采用沟垄集雨种植能够使无效、微效降雨有效化, 增加土壤有效水分供应量, 使集于沟中的降雨入渗更深, 同时在沟中和垄下均匀分布, 促进苜蓿对水分的有效利用, 提高有限降水资源的利用效率, 从而缓解苜蓿生长过程中的水分供需矛盾, 减小苜蓿在生长期由于土壤水分亏缺造成的生产损失程度, 增强苜蓿的抗旱能力, 显著提高苜蓿的水分利用效率。本试验表明, 垄覆膜处理平均水分利用效率为 $34.91 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为CK的2.25倍, 土垄处理的平均水分利用效率为 $28.47 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为CK的1.83倍, 垄覆膜处理的平均水分利用效率较土垄处理提高22.62%, 明显高于土垄处理, 其中垄覆膜处理中MR75、MR60的水分利用效率最高。

沟垄集雨对土壤水分动态变化及其土壤水分利用效率的影响在干旱年份较为显著, 而且会随当地降雨量的多少及降雨特点而变化, 另外还与当地的土壤质地、地形地貌、机械条件、耕作方式以及作物品种等诸多因素有关。要进一步研究沟垄集雨对土壤水分动态变化及其土壤水分利用效率的影响,

还需在不同地区根据当地自然条件进行长时间定点观测研究。

参考文献

- [1] 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
- [2] 王俊, 徐进章. 半干旱地区发展集水型生态农业模式研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 207-209
- [3] 万素梅, 胡守林, 贾志宽, 等. 黄土高原地区苜蓿生产力动态及其土壤水分消耗规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 30-34
- [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] 李晓雁. 人工集水面降雨径流观测实验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 1-4
- [6] 崔欢虎, 王娟玲, 靖华, 等. 田间微集雨种植方式及播种行距对小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 914-91
- [7] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀, 等. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 208-214
- [8] 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
- [9] 贾宇, 徐炳成, 王晓凌, 等. 半干旱黄土丘陵区沟垄集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 470-475
- [10] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 等. 宁南山区旱地苜蓿沟集水种植生物群体生长特征及其水分利用效率[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 199-204
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 王琦, 张恩和, 李凤民, 等. 半干旱地区沟垄微型集雨种植马铃薯最优沟垄比的确定[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 38-41
- [14] 陈志雄. 农田水量平衡[J]. 土壤学进展, 1985(1): 1-5
- [15] 王俊鹏, 韩清芳, 王龙昌, 等. 宁南半干旱地区农田微集水种植技术效果研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(4): 16-20
- [16] 李军, 王龙昌, 孙小文, 等. 宁南半干旱偏旱区旱作农田沟垄径流集水蓄墒效果与增产效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 8-13
- [17] 李永平, 秦爱红, 穆兰海, 等. 旱坡地截流蓄水种植沟耕作技术及其水肥效益研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(5): 1-6
- [18] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 等. 旱作农田微集水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
- [19] 李凤民, 徐进章. 黄土高原半干旱地区集水型生态农业分析[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 101-103