

坡地打结垄沟集雨对水土流失、紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响

李富春¹, 王琦¹, 张登奎¹, 刘青林², 张恩和², 陈瑾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. 定西市水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000)

摘要: 为寻求半干旱区控制水土流失和提高降水资源利用率的最佳坡地垄沟集雨种植方式, 以传统平作为对照, 在坡度 5° 和 10° 的坡地布置大田试验, 研究打结方式(无打结垄和打结垄)对土壤贮水量、小区径流效率、径流量、泥沙流失量、紫花苜蓿干草产量和水分利用效率(WUE)的影响。结果表明: 在坡度 5° 时, 与平作相比, 无打结垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期土壤贮水量分别增加 9.3, 15.0 mm, 紫花苜蓿实际干草产量分别提高 20.4%, 8.9%, WUE 分别提高 4.78, 4.58 kg/(hm² · mm), 而径流量分别降低 21.9%, 41.2%, 泥沙流失量分别降低 80.8%, 83.3%。在坡度 10° 时, 与平作相比, 无打结垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期土壤贮水量分别增加 11.2, 16.2 mm, 紫花苜蓿实际干草产量分别提高 22.4%, 9.0%, WUE 分别提高 4.89, 4.06 kg/(hm² · mm), 而径流量分别降低 24.8%, 36.4%, 泥沙流失量分别降低 74.5%, 82.0%。采用平均径流法, 坡度 5° 时, 平作、无打结垄和打结垄的小区径流效率分别为 11.6%, 9.2%, 6.7%; 坡度 10° 时, 平作、无打结垄和打结垄的小区径流效率分别为 14.1%, 10.0%, 7.8%。就紫花苜蓿全生育期平均值而言, 坡度 5° 的平均土壤贮水量比坡度 10° 增加 4.3 mm, 坡度 5° 的净干草产量、实际干草产量和 WUE 与坡度 10° 相差不明显。坡度 10° 的径流量、泥沙流失量 and 小区径流效率均是坡度 5° 的 1.2 倍。无打结垄和打结垄集雨种植具有较好水土保持和增产效果, 其中无打结垄增产效果最为明显, 打结垄水土保持效果最为明显。

关键词: 坡地; 打结垄沟集雨; 水土流失; 紫花苜蓿; 干草产量

中图分类号: S271

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0147-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.024

Effects of Tied-ridging Rainwater Harvesting on Soil Erosion, Alfalfa Fodder Yield and Water Use Efficiency on Slope Lands

LI Fuchun¹, WANG Qi¹, ZHANG Dengkui¹, LIU Qinglin², ZHANG Enhe², CHEN Jin³

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu 743000)

Abstract: In order to seek the optimum tied-ridging tillage system with good controlling on soil erosion, and high utilization of precipitation in semi-arid area, a field experiment with a randomized complete block design was conducted on two slopes (5° and 10°) during alfalfa growing season. The experiment was designed to investigate the effects of different tillage systems (ridging without ties and tied-ridging) on soil water storage, plot runoff efficiency, runoff, sediment loss, alfalfa fodder yield and water use efficiency (WUE), and traditional planting (TP) was taken as control. On the 5° slope, compared with TP, average soil water storage, alfalfa fodder yields and the WUE for ridging without ties increased by 9.3 mm, 20.4% and 4.78 kg/(hm² · mm), respectively. The corresponding parameters for tied-ridging increased 15.0 mm, 8.9% and 4.58 kg/(hm² · mm), respectively. Runoff and sediment loss on the same slope for ridging without ties decreased by 21.9% and 80.8%, respectively, while these two parameters of tied-ridging decreased by 41.2% and 83.3%. On the 10° slope, compared with TP, average soil water storages, alfalfa fodder yields and the WUE for ridging without ties and tied-ridging increased by 11.2 and 16.2 mm, 22.4% and 9.0%,

收稿日期: 2017-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“坡地打结垄沟集雨种植的系统效率及关键技术研究”(41461062)

第一作者: 李富春(1987—), 男, 硕士, 主要从事半干旱区牧草集雨灌溉和水土保持研究。E-mail: 769506499@qq.com

通信作者: 王琦(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事半干旱区或干旱区农作物节水灌溉研究。E-mail: wangqisau@gmail.com

4.89 and 4.06 kg/(hm² · mm), respectively, while the runoffs and sediment losses of these two tillage systems ridging decreased by 24.8% and 36.4%, 74.5% and 82.0%, respectively. Average plot runoff efficiencies of TP, ridging without ties and tied-ridging were 11.6%~14.1%, 9.2%~10.0% and 6.7%~7.8%, respectively. Soil water storage in 5° slope increased by 4.3 mm compared with slope of 10°. The differences of net fodder yield, actual fodder yield and WUE between 5° and 10° slopes were not distinct. The runoff, sediment loss and plot runoff efficiency of 10° slope were 1.2 times greater than those of 5° slope. Ridge-furrow rainwater harvesting was good on water and soil conservation, and fodder yield increasing. Tied-ridging was particularly effective for water and soil conservation, while ridging without ties was particularly effective for increasing of fodder yield.

Keywords: slope land; tied-ridging rainwater harvesting; soil erosion; alfalfa; fodder yield

半干旱黄土高原丘陵区具有降水资源短缺、植被覆盖率低、土壤肥力层浅薄、地形沟壑纵横、水土流失严重、生态脆弱和生态环境恶化等特点^[1-2]。干旱和水土流失是制约该区粮食安全生产和经济发展的主要因素。该区域降雨量少,据甘肃省定西气象局统计,年均(1971—2015 年)降雨量为 384.8 mm,年潜在蒸发量(1 445 mm)是年降雨量的 3.76 倍,降雨季节(多集中于夏末和秋初)经常与作物需水季节(多集中于春末和夏季)错位,多数降雨的单次降雨量<5 mm,无法被作物吸收利用,有效降雨量主要依靠少数大强度降雨或暴雨,大强度降雨或暴雨易引起水土流失。水土流失降低土壤容重和表层土壤孔隙度,使土壤透水性和持水力下降,同时,导致大量土壤有机质和肥料等损失,使上游地形沟壑纵横、土壤盐碱化和贫瘠化,下游土壤淤积、土壤酸化和富营养化,加剧区域土壤质量退化和土地生产力下降,对区域和周边地区农牧业可持续发展产生威胁,尤其对坡地农牧业可持续发展^[3-6]。该区域以丘陵山地为主,坡耕地面积与总耕地面积的比例为 60%~70%,坡耕地土壤侵蚀量占总土地侵蚀量的比例为 50%~60%,坡耕地是该区域径流和泥沙流失产生的主要策源地^[7-8]。

为了收集降雨,减少地表径流和控制水土流失,当地农民采取修梯田、淤堤坝、挖鱼鳞坑、垄沟集雨覆盖等措施。垄沟集雨覆盖种植技术是在平地或缓坡地沿等高线修筑垄和沟交替的集雨系统。在通常情况下,垄覆膜作为集雨区,沟覆盖或无覆盖作为种植区,降雨和径流在沟内进行叠加,使无效或微效降雨变成有效降雨。同时,覆盖材料减少土壤水分无效蒸发,促进降水在沟内下渗,改善作物根区土壤水分状况,进而提高作物产量和水分利用效率(WUE)^[9]。垄沟集雨覆盖种植技术改变地表形状和减缓地表坡度,沿等高线修筑垄减缓径流在地表流动速度,增加径流在沟内滞留时间,降低地表径流和泥沙流失量,具有良好的水土保持效果^[10]。垄沟集雨覆盖种植技术将部分土地面积作为集雨区,收集径流,从而减少

作物种植面积和相对种植密度。在该技术中,作物生长前期通常消耗大量土壤养分和水分,导致作物生长后期出现脱水、脱肥等现象^[11]。在垄沟集雨覆盖种植技术中,长期连续采用普通地膜覆盖阻隔土壤与大气间的水气热交换,使土壤微生物活力和土壤肥力下降,影响作物正常水分和养分运移和吸收,抑制作物根系发育和产量形成^[12]。

打结垄(Tied-ridging)亦称盒垄(Boxed ridges)、沟筑堤(Furrow dyking)、沟筑坝(Furrow damming)、畦田耕作(Basin tillage)、微型畦田耕作(Micro basin tillage)等^[13-14]。在传统垄沟集雨种植系统中,沟内按一定距离设置打结垄,从而形成打结垄沟集雨种植系统。打结垄形状为半球形,打结垄高度略低于集雨垄高度。坡地设置打结垄主要目的是将降雨和径流进行沟内拦截,避免径流在沟内向低处局部汇集,尤其当遇到暴雨时,可以分散导流暴雨径流产生的多余水分,减缓水分在地表流动速度,增加径流在沟中滞留时间,使部分径流变为壤中流,提高坡地土壤入渗率和根区土壤含水量,从而有效减少地表径流、土壤侵蚀和土地退化^[15-16]。Al-Seekh 等^[17]研究表明,与传统平作相比,打结垄沟集雨种植的径流量和泥沙流失量分别减少 65%~85%,58%~69%,同时,打结垄沟集雨种植对于旱和半干旱区的土壤含水量增加效果明显高于半湿润区。与传统垄沟集雨种植相比,打结垄沟集雨种植在种植区沟内增加打结垄,打结垄减少农田作物有效种植面积,增加劳动力,减少小麦(*Triticum aestivum*)、燕麦(*Avena sativa*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等条播类作物群体数量,但不减少玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等穴播类作物群体数量。

紫花苜蓿为多年生豆科牧草,其覆盖度较高和根系较深。较高覆盖度可以减小和削弱降雨冲击表层土壤强度,提高土壤抗蚀性和抗冲性,截留更多降雨和拦截更多径流,改善坡面流的水动力特征,减小径流流速,有效控制水土流失和土壤侵蚀^[18]。较深根系可以加固疏

松土壤,提高土壤稳定性,增强土壤聚合力,有效防治水土流失^[19]。Wu 等^[20]研究表明,与裸地相比,缓坡(20°)地种植紫花苜蓿的径流系数(runoff coefficient)和沉积传导速率(sediment transportation rate)分别降低 28.3%和 78.4%,土壤水分入渗率增加 1.77 倍。紫花苜蓿作为半干旱黄土高原丘陵区植被恢复和生态重建首选牧草^[21]。

打结垄沟集雨种植不是一种新型保护性耕作措施,早在 20 世纪 60—70 年代,我国半干旱黄土高原丘陵区利用打结垄沟集雨植树造林等,打结垄沟集雨种植对我国半干旱黄土高原丘陵区植被恢复和生态重建起关键作用,但用于农作物和牧草种植的生产实践和研究较少。本试验研究不同坡度和不同打结方式对土壤贮水量、小区径流效率、径流量、泥沙流失量、紫花苜蓿干草产量和 WUE 等的影响,为确定半干旱黄土高原丘陵区坡地打结垄沟集雨种植紫花苜蓿适宜打结方式,有效控制水土流失和提高降水资源利用效率提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2015 年 4 月 12 日至 10 月 18 日在

甘肃省定西市水土保持科学研究所安家沟流域试验基地(35°34′ N,104°39′ E,海拔 2 075 m)进行。该试验基地位于甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟,为典型黄土丘陵沟壑地貌。该区光能较多,雨热同季,气候干燥,温差较大。年均≥5℃积温 2 782.5℃,年均≥10℃积温 2 239.1℃,年日照时间为 2 408.6 h,年均气温 6.3℃,极端最高和最低气温分别为 27.5℃和-7.6℃。多年年均降雨量 384.8 mm,潜在蒸散发量 1 510 mm。降水较少,不规律,其中 80%以上降雨主要集中在 5—9 月,该区域为典型的雨养农业区。空气相对湿度 65.8%,太阳辐射 592 kJ/(cm²·a),无霜期 141 d,干燥度 1.15,该区域气候属于中温带半干旱气候。试验地土壤类型为黄土母质发育而成的黄绵土,土质疏松,抗蚀性较差,黄土层厚度达 40—60 m。土壤平均孔隙率为 55%,田间持水量为 20%~21%。土地利用强度大,流域内自然植被较少,土壤侵蚀严重。土地利用类型主要有耕地、林地(灌木林地和乔木林地)和天然草地。当地耕作制度为一年一熟,主要种植牧草有紫花苜蓿和红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)。试验区土壤肥力状况见表 1。

表 1 试验区土壤肥力状况

土层 深度/cm	全氮/ %	全磷/ %	全钾/ %	有机质/ %	水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH
0—20	0.06	0.07	2.07	0.95	65.75	7.78	135	7.83
20—40	0.05	0.06	2.05	0.77	22.10	3.00	90	7.82

1.2 试验设计

试验采用紫花苜蓿(甘农 3 号)为指示作物,利用 2 因素完全随机区组设计试验,设 2 个区组,每个区组有 3 个处理(打结垄+无打结垄+平作),传统平作作为对照,2 个区组分别为地形坡度 5°和 10°,坡向为南北走向,重复 3 次,共有 18 个小区(2 个区组×3 个处理×3 个重复)。根据当地打结垄沟集雨植树造林等经验,集雨垄形状为半球形,上垄面与沟面夹角大约为 5°~10°,下垄面与沟面夹角大约为 50°~60°,垄高为 15~20 cm,垄宽为 45 cm,垄沿等高线修筑,垄覆盖生物可降解地膜,作为集雨区;沟宽为 60 cm,沟坡度接近 0°,沟无覆盖作为种植区,见图 1。打结垄无覆盖,形状为半球形,打结垄高度(10~15 cm)略低于集雨垄高度(15~20 cm),打结垄底宽为 20 cm,打结垄之间距离 2.5 m,打结垄排列方式为非交错排列。小区面积 50 m²(长 10 m,宽 5 m),各试验小区有 9 条垄和 10 条沟,垄的两端开口,为保持集雨垄和打结垄的完整性,尽量减少小区内践踏和中耕除草。为了防止小区内地表径流外溢和小区外地表径流入侵,小区四周修建围埂,围埂用高出地面 15 cm 混凝土砖块砌成,混凝土砖块埋入土壤深度

为 10 cm。小区两侧设 1.5 m 隔离区,上部设排水沟,排走小区顶端外围区域径流,下部安置集流槽,收集各试验小区径流,将径流收集于径流观测池内,径流观测池体积为 2.25 m³(长 1.5 m,宽 1.5 m,高 1 m),见图 2,径流观测池用厚度 12 cm 砖砌成,采用水泥砂浆抹面。

1.3 种植管理

在试验开始前,试验地为撂荒地,当土壤完全解冻后,2015 年 3 月 15 日开始整地和修筑试验小区,选取坡度 5°和 10°撂荒地,布置试验小区。在修筑试验小区前,清除枯叶、草根和杂物,平整土地。平整土地后,将小区表层 20—30 cm 土壤进行开挖和堆积,采用坡度测定仪对小区放线,根据坡度和小区边长确定小区 4 个角水平位置 and 高度,采用人工挖方和垫方方法,修建符合设计坡度、长度和宽度的小区,然后将堆积表土层土壤撒覆于小区表层。对于打结垄沟集雨种植而言,从坡顶向坡脚沿等高线依次修筑相间沟和垄。为了减少小区四周混凝土砖块下沉,用夯实机夯实混凝土砖块下垫面层。于 2015 年 4 月 10 日完成小区平整、垄沟布设和覆盖、围埂、径流观测池修建等。

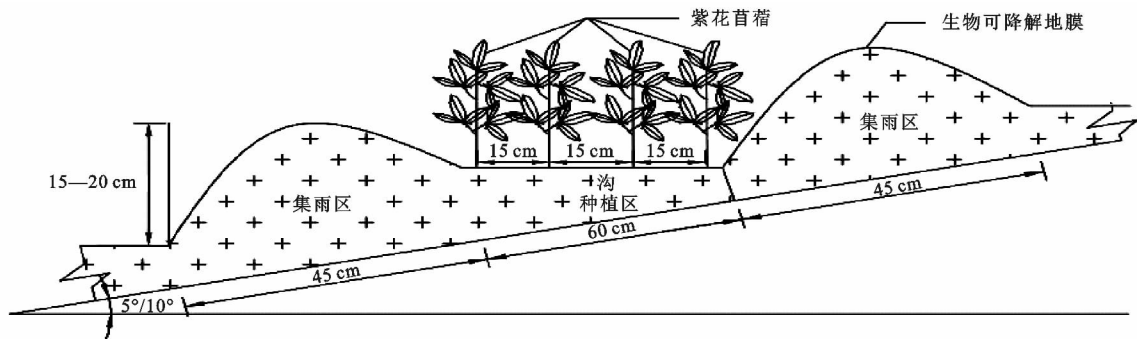


图 1 打结垄沟集雨种植紫花苜蓿示意

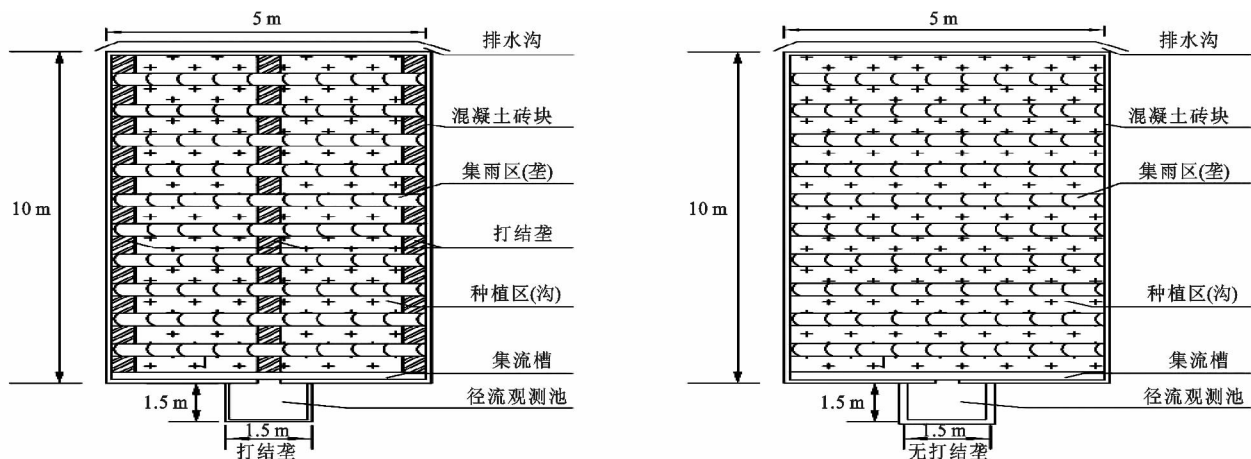


图 2 打结垄沟集雨种植小区示意

为了促进紫花苜蓿出苗,对试验小区进行翻地和耨地各 1 次。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,对于垄沟集雨种植而言,播种前将 2 种肥料混合施入沟中;对平作处理而言,将肥料均匀施入种植带。2015 年 4 月 12 日条播播种紫花苜蓿。根据当地紫花苜蓿播种经验^[21],对于垄沟集雨种植而言,每条沟面积为 3 m² (长 5 m,宽 0.6 m),每个试验小区种植面积(10 条沟×3 m²=30 m²)和播种密度(22.5 kg/hm²)相同,播种深度为 2~3 cm,每条沟种植 4 行紫花苜蓿,行距为 15 cm,每个试验小区共播种 40 行紫花苜蓿。对平作处理而言,无集雨区(垄),种植面积为 50 m² (长 10 m,宽 5 m),平作的相对施肥密度、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,每个试验小区种植 66 行紫花苜蓿。在紫花苜蓿幼苗健壮期(2015 年 6 月 10 日),采用铁锹修筑打结垄。紫花苜蓿整个生育期不追肥和不灌溉,及时除杂草,避免种植区(沟)土壤板结,为保持集雨垄和打结垄形状和覆盖材料完整性,尽量避免踩踏集雨垄和打结垄。除草时间分别为 2015 年 6 月 6 日和 7 月 28 日。紫花苜蓿采用手工镰刀齐地刈割,自然风干后称重,计算紫花苜蓿干草产量。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 降雨量、径流量、泥沙流失量和小区径流效率 采

用虹吸式自动雨量计测定降雨量,为保证降雨量数据准确性,安装 2 台手动雨量计,避免因连续阴天引起漏测。降雨后立即测定径流观测池的径流量和泥沙流失量。在径流量和泥沙流失量测定前,用扫帚清扫集流槽中沉积物,将沉积物扫入径流观测池。采用体积法测定径流量,用直尺量测径流深(m),径流量(m³)=径流观测池底面积(2.25 m²)×径流深(m)。在泥沙流失量测定前,用人工铲搅拌径流观测池径流,持续搅拌 5~10 min,使径流观测池沉积物均匀悬浮,立即用 1 000 mL 容量器采集 3 份径流悬浮液,对径流悬浮液进行沉淀、过滤、烘干和称重。在径流和泥沙流失量测定后,用水泵抽干径流观测池中径流,用清水冲洗径流观测池池底沉积物,人工清除沉积物,为下次收集和测定径流做好准备。径流量、泥沙流失量和小区径流效率计算公式为:

$$V_{\text{小区径流}} = S \times H \quad (1)$$

$$G_{\text{小区泥沙}} = V_{\text{小区径流}} \times \frac{G_{\text{样品}}}{V_{\text{样品}}} \quad (2)$$

$$D_{\text{径流}} = \frac{V_{\text{小区径流}}}{S_{\text{小区}}} \quad (3)$$

$$G_{\text{泥沙}} = \frac{G_{\text{小区泥沙}}}{S_{\text{泥沙}}} \quad (4)$$

$$ER = \frac{Rv}{Pt \times S_{\text{小区}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$PI_{30} = Pt \times I_{30} \quad (6)$$

式中: $V_{\text{小区径流}}$ 为小区径流量(m^3); S 为径流观测池底面积(2.25 m^2); H 为径流观测池水深(m); $G_{\text{小区泥沙}}$ 为小区泥沙流失量(g); $G_{\text{样品}}$ 为样品烘干泥沙流失量(g); $V_{\text{样品}}$ 为样品径流量(m^3); $D_{\text{径流}}$ 为单位面积径流量(L/m^2); $S_{\text{小区}}$ 为小区面积(50 m^2); $G_{\text{泥沙}}$ 为单位面积泥沙流失量(g/m^2); ER 为小区径流效率($\%$); Rv 为小区径流量(m^3); Pt 为总降水量(mm); PI_{30} 为综合降雨指数(mm^2/min); I_{30} 为最大30 min降雨强度(mm/min)。

1.4.2 土壤贮水量 在紫花苜蓿播种前1 d、刈割后1 d和降雨(降雨量 $>5 \text{ mm}$)后1 d测定种植区沟中土壤含水量。测定深度200 cm,深度0—20 cm按10 cm分层,深度20—200 cm按20 cm分层,采用烘干法测定土壤含水量,每个小区随机选取3个样点,相同层次3个样点的土样均匀混合。采用环刀法测定土壤容重,测定深度和分层与土壤含水量测定相同。土壤贮水量计算公式为:

$$W=\theta \times BD \times H \times 10 \quad (7)$$

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为换算系数。

1.4.3 干草产量和WUE 在紫花苜蓿初花期(8月14日)和停止生长期(10月18日),每小区的坡上、坡中和坡下各随机选取3个样方,每小区总共选取9个样方,样方大小为60 cm(长) $\times$ 60 cm(沟宽),人工镰刀齐地刈割紫花苜蓿,自然风干至恒重,根据样方紫花苜蓿干草产量计算小区紫花苜蓿干草产量(净干草产量和实际干草产量)。

净干草产量(NFY, kg/hm^2)反映紫花苜蓿单株生长状况和单株产量,等于小区干草产量除以小区沟面积。实际干草产量(AFY, kg/hm^2)反映土地生产力,等于小区干草产量除以小区总面积(垄面积+沟面积)。对平作而言,实际干草产量等于净干草产量。紫花苜蓿耗水量和WUE计算公式为:

垄沟集雨种植:

$$ET_1 = P + R_e \times P \times \frac{h_1}{h_2} + (W_1 - W_2) \quad (8)$$

$$WUE = \frac{NFY}{ET_1} \quad (9)$$

$$\text{平作种植: } ET_2 = P + (W_1 - W_2) \quad (10)$$

$$WUE = \frac{NFY}{ET_2} = \frac{AFY}{ET_2} \quad (11)$$

式中: ET_1 和 ET_2 分别为垄沟集雨种植和平作种植的紫花苜蓿耗水量(mm); P 为紫花苜蓿全生育期降水量(mm); R_e 为生物可降解膜垄的平均径流效率(同期径流量与降水量的比值)。生物可降解膜垄的径流效率随降

雨量和降雨强度变化而变化,Wang等^[8]对不同集雨垄的径流效率进行分析,集雨垄的径流效率随作物生育期延伸而变化,为了简化计算,该试验采用生物可降解膜垄全年径流效率平均值(74%); h_1 和 h_2 分别为垄宽(cm)和沟宽(cm); W_1 和 W_2 分别为播种前和收获后测定200 cm土层深度的土壤贮水量(mm)。

1.5 数据处理

试验数据利用SPSS 19.0和Excel 2010进行统计分析,采用one-way ANOVA和Duncan法多重比较检验同一区组不同处理间差异显著性($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

由图3可知,在紫花苜蓿全生育期(4月12日至10月18日),降雨次数为52次和降雨量为205.9 mm,占年总降雨次数和总降雨量的比例分别为55.3%和75.3%, <5 、 $5 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $>20 \text{ mm}$ 的降雨次数分别为42、6、2、2次,占总降雨次数的比例分别为80.8%、11.5%、3.8%、3.8%。大于5 mm降雨定义为有效降雨,紫花苜蓿全生育期无效降雨次数(42次)远大于有效降雨次数(10次),但无效降雨对紫花苜蓿全生育期降雨量贡献率(34%)明显小于有效降雨量贡献率(69%)。降雨分布不规则,其中4、5、6、7、8、9、10月降雨量分别为22.7、49.0、33.5、64.2、25.7、29.3、4.9 mm,分别占紫花苜蓿生育期降雨量的8.3%、17.9%、12.3%、23.5%、9.4%、10.7%、1.8%。通过对该地区多年(1971—2015年)降雨量统计,1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12月降雨量占年降雨量的比例分别为0.8%、1.2%、2.8%、6.6%、11.9%、13.5%、19.6%、20.9%、13.7%、7.1%、1.6%、0.4%。2015年4—7月降雨量与多年降雨量相当,而8月降雨量(25.7 mm)明显小于多年同期降雨量(80.9 mm)。

2.2 坡地打结垄沟集雨种植对土壤贮水量的影响

土壤贮水量和土壤水分运移影响植物根系分布和地上生物量合成。由图4可知,2015年4—5月紫花苜蓿处于播种期和苗期,月平均降雨量(35.9 mm)较大,气温较低,植株蒸腾和棵间蒸发较小,各处理土壤贮水量相对较高;2015年6—7月紫花苜蓿进入营养生长和生殖生长并进期,气温较高,植株蒸腾和棵间蒸发较大,虽然该期月平均降雨量(48.9 mm)较大,但各处理土壤贮水量增加不明显;2015年8月紫花苜蓿进入初花期,月降雨量(25.7 mm)中等,气温、植株蒸腾和棵间蒸发达到最大值,各处理土壤贮水量明显降低;2015年9—10月紫花苜蓿刈割后进入幼苗期生长,月平均降雨量(17.1 mm)较低,气温、植株蒸腾和棵间蒸发较低,各处理土壤

贮水量仍然保持较低。2015 年 5 月 28 日较高降雨量(降雨量为 23.4 mm)使不同处理的土壤贮水量差异显著。在大多数紫花苜蓿生育期,同一区组下,无打结垄和打结垄的土壤贮水量显著高于平作,无打结垄与打结垄相差不显著。垄沟集雨种植集雨垄的径流效率(74%)较高,较多径流流入沟中,显著增加种植区(沟)土壤贮水量,同时,垄覆盖生物可降解地膜减少垄面土壤水分无效蒸发,减少总面积蒸散量,使无打结垄和打结垄集雨种植的土壤贮水量显著高于平作。为比较不同区组间(坡度 5°和 10°)土壤贮水量差异,将同一区组下 3 个处理(平作、无打结垄和打结垄)的土壤贮水量求均

值(图 4)。在紫花苜蓿播种期(4 月 12 日)一现蕾期(7 月 11 日),不同区组之间土壤贮水量差异不明显;在紫花苜蓿初花期(8 月 14 日)一刈割后幼苗生长期(9 月 21 日),坡度 5°的平均土壤贮水量明显大于坡度 10°;在紫花苜蓿停止生长期(10 月 18 日),不同区组之间土壤贮水量差异不明显。就紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量而言,坡度 5°时,无打结垄和打结垄的土壤贮水量比平作分别增加 9.3、15.0 mm;坡度 10°时,无打结垄和打结垄的土壤贮水量比平作分别增加 11.2、16.2 mm;坡度 5°的平均土壤贮水量比坡度 10°的增加 4.3 mm。

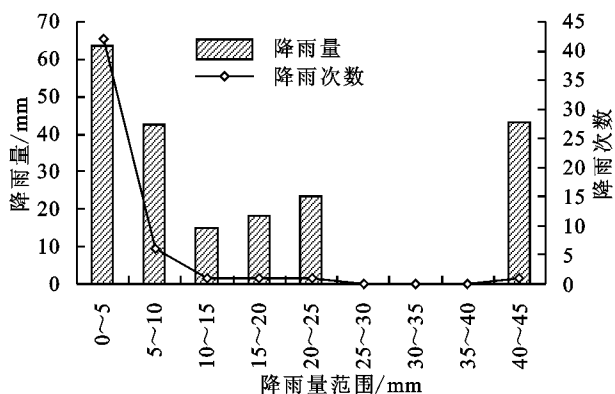
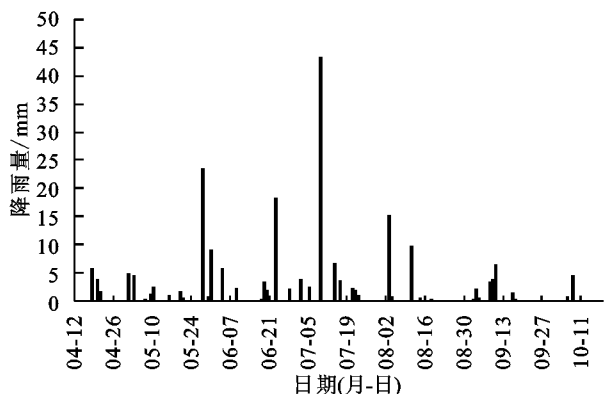


图 3 紫花苜蓿全生育期降雨量

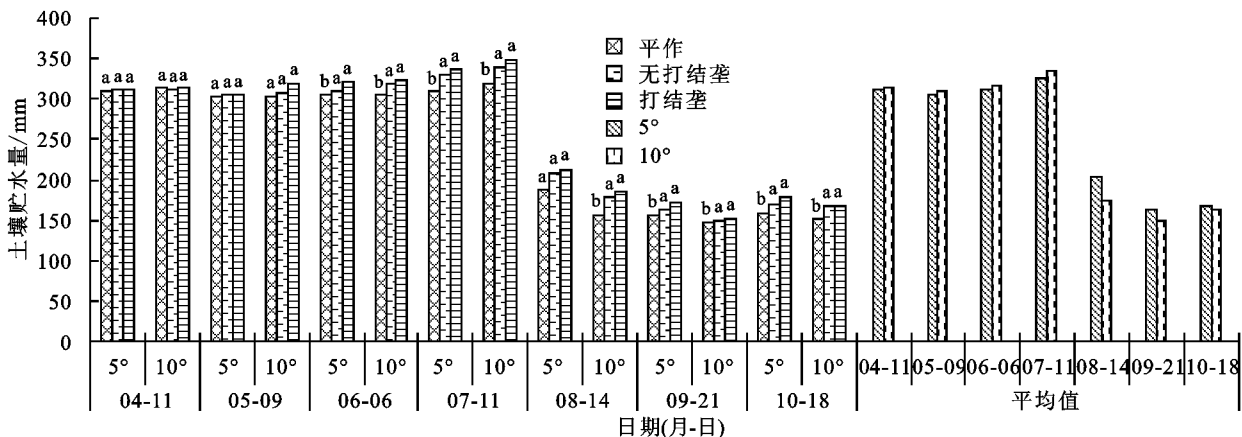


图 4 坡地打结垄沟集雨种植对土壤贮水量的影响

2.3 坡地打结垄沟集雨种植对径流和泥沙流失的影响

2015 年试验地年总降雨次数为 94 次和降雨量为 273.3 mm,其中收集 4 次径流和 2 次泥沙流失,径流产生时间分别为 7 月 9 日,7 月 14 日,8 月 3 日,8 月 11 日,降雨量分别为 43.3、6.5、15.0、9.5 mm,平均降雨强度分别为 0.07、0.11、0.02、0.32 mm/min,最大 30 min 降雨强度分别为 0.21、0.21、0.06、0.32 mm/min。泥沙流失产生时间分别为 7 月 9 日和 8 月 11 日。在 4 次径流产生过程中,7 月 9 日和 8 月 11 日的最大 30 min 降雨强度较大,该期径流产生泥沙流失。由图 5 可知,不同处理各次的径流量和泥沙流失量变化规律基本保持一致,平作的径流量和泥沙流失量显著大于无打结垄,无打结垄的径流量和泥沙流失量显著大于打结垄。就 4 次径流量

和 2 次泥沙流失量平均值而言,在坡度 5°时,与平作相比,无打结垄和打结垄的径流量分别降低 21.9% 和 41.2%,泥沙流失量分别降低 80.8% 和 83.3%;在坡度 10°时,与平作相比,无打结垄和打结垄的径流量分别降低 24.8% 和 36.4%,泥沙流失量分别降低 74.5% 和 82.0%。就同一区组不同处理平均值而言,坡度 10°的径流量和泥沙流失量分别是坡度 5°的 1.2、1.2 倍。垄沟集雨沿等高线修筑沟垄相间集雨系统,沿等高线修筑沟垄阻止降雨向低地势局部集中流动,尤其打结垄可以分散导流暴雨径流,使径流量和泥沙流失量排列次序为平作>无打结垄>打结垄。当降雨、植被、地形、耕作措施等相同情况下,坡面径流量和泥沙流失量随坡度增加而增加。

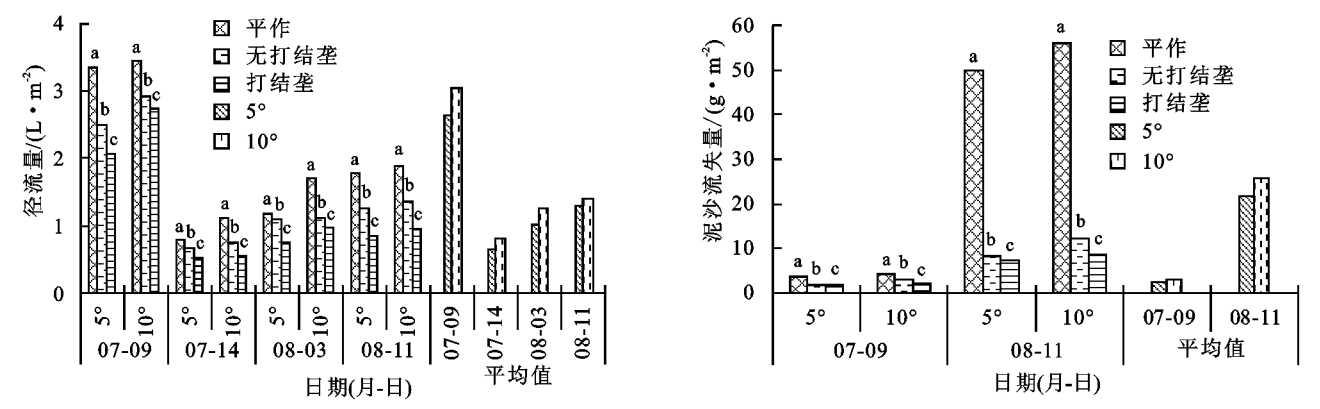


图 5 坡地打结垄沟集雨种植对径流量和泥沙流失量的影响

2.4 坡地打结垄沟集雨种植对小区径流效率的影响

径流效率(亦称径流系数)是一定时段一定降雨收集区产生径流量与降水量的比值。由图 6 可知,不同处理不同次的小区径流效率变化规律基本保持一致,平作的小区径流效率显著大于无打结垄,无打结垄的小区径流效率显著大于打结垄。就 4 次降雨的小区径流效率平均值而言,在坡度 5°时,平作、无打结垄和打结垄的平均小区径流效率分别为 11.6%, 9.2%, 6.7%,与平作相比,无打结垄和打结垄的小区径流效率分别降低 20.9%和 42.7%;在坡度 10°时,平作、无打结垄和打结垄的平均小区径流效率分别为 14.1%, 10.0%, 7.8%,与平作相比,无打结垄和打结垄的小区径流效率分别降低 29.3%和 45.1%。小区径流效率排列次序为平作>无打结垄>打结垄。就同一区组不同处理平均值而言,坡度 10°的小区径流效率是坡度 5°的 1.2 倍。当降雨、植被、地形、耕作措施等相同情况下,小区径流效率随坡度增加而增加。

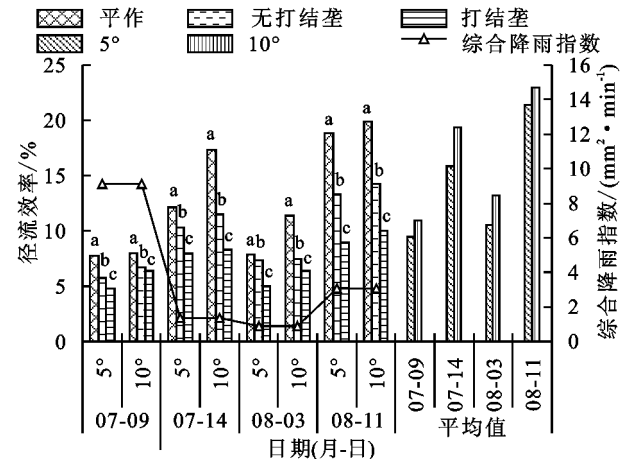


图 6 坡地打结垄沟集雨种植对小区径流效率的影响

综合降雨指数能较好反映降雨特征对径流的影响。在 2015 年试验期间,7 月 9 日,7 月 14 日,8 月 3 日,8 月 11 日的综合降雨指数分别为 9.09, 1.37, 0.90, 3.04 mm^2/min 。由图 6 可知,综合降雨指数与小区径流效率关系不明显。7 月 9 日综合降雨指数较高,但小区径流效率较小;7 月 14 日小区径流效率

大于 8 月 3 日,但该 2 次综合降雨指数变化不明显;从 8 月 3—11 日,小区径流效率随综合降雨指数增加而增加。

2.5 坡地打结垄沟集雨种植对紫花苜蓿干草产量的影响

由表 2 可知,在同一区组下,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,在坡度 5°时,无打结垄的紫花苜蓿净干草产量显著大于打结垄,打结垄的紫花苜蓿净干草产量显著大于平作。在坡度 10°时,紫花苜蓿净干草产量变化规律与坡度 5°类似。在实际生产中,整个土地生产力和整个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,在坡度 5°时,无打结垄的紫花苜蓿实际干草产量显著大于打结垄,打结垄的紫花苜蓿实际干草产量显著大于平作。与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿实际干草产量分别提高 20.4%和 8.9%;在坡度 10°时,紫花苜蓿实际干草产量变化规律与坡度 5°类似,与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿实际干草产量分别提高 22.4%和 9.0%。就同一区组不同处理紫花苜蓿全生育期净干草产量和实际干草产量平均值而言,与坡度 10°相比,坡度 5°的紫花苜蓿全生育期净干草产量和实际干草产量增加不明显。保持土壤水分、增加表土层温度、提高 WUE 和减少水土流失是坡地打结垄沟集雨种植增产的关键。垄沟集雨种植将垄面径流传导到沟中,提高沟中土壤含水量,从而增加紫花苜蓿干草产量。虽然坡地打结垄沟集雨种植减缓径流和泥沙流失,但沟内增设打结垄,从而减少农田有效种植面积和紫花苜蓿植株密度,降低紫花苜蓿干草产量,进而使紫花苜蓿实际干草产量排列次序为无打结垄>打结垄>平作。

2.6 坡地打结垄沟集雨种植对 WUE 的影响

在田间种植系统中,WUE 定义为每单位蒸散量生产干物质质量或籽粒产量,本研究采用地上干物质质量计算 WUE。我国半干旱黄土高原丘陵区农牧业生

产主要依靠天然降水,土壤水分深层渗漏和侧向运移忽略不计。由表 2 可知,在坡度 5°时,无打结垄和打结垄的 WUE 显著大于平作,无打结垄与打结垄之间相差不显著,与平作相比,无打结垄和打结垄的 WUE 分别提高 4.78、4.58 kg/(hm²·mm);在坡度

10°时,WUE 变化规律与坡度 5°类似,与平作相比,无打结垄和打结垄的 WUE 分别提高 4.89、4.06 kg/(hm²·mm)。就同一区组不同处理紫花苜蓿全生育期 WUE 平均值而言,与坡度 10°相比,坡度 5°的 WUE 增加不明显。

表 2 坡地打结垄沟集雨种植对紫花苜蓿干草产量和 WUE 的影响

坡度	处理	干草产量/(kg · hm ⁻²)						较平作 增加/%	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
		第 1 茬		第 2 茬		总干草产量			
		NFY	AFY	NFY	AFY	NFY	AFY		
5°	平作	1554c	1554c	328c	328c	1882c	1882c		5.07b
	无打结垄	3735a	1793a	985a	473a	4720a	2266a	20.4	9.86a
	打结垄	3555b	1638b	893b	411b	4447b	2049b	8.9	9.65a
10°	平作	1520c	1520c	300c	300c	1820c	1820c		5.15b
	无打结垄	3723a	1787a	917a	440a	4640a	2227a	22.4	10.04a
	打结垄	3456b	1593b	849b	391b	4305b	1984b	9.0	9.21a
平均值	5°	2948	1662	735	404	3683	2066	14.7	8.19
	10°	2900	1633	689	377	3588	2010	15.7	8.13

注:同列后的不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.7 坡地打结垄沟集雨种植对经济效益的影响

经济效益定义为经济产出与经济投入的差值。经济投入包括种子、地膜、肥料等材料投入和起垄、覆膜、播种、除草和收获等人工投入。打结垄与无打结垄的播种量、覆膜量和施肥量相同,平作的播种量和施肥量大于打结垄和无打结垄。经济产出为收获紫花苜蓿干草产量收益。根据 2015 年当地市场价格,紫花苜蓿种子、尿素、过磷酸钙、生物可降解地膜和紫花苜蓿干草价格分别为 60.00、2.15、0.67、20.00、1.70 元/kg。在不考虑人工投入情况下,各处理经济投入、经济产出和经济效

益见表 3。由表 3 可知,在坡度 5°时,紫花苜蓿经济投入排列次序为无打结垄=打结垄>平作,紫花苜蓿经济产出排列次序为无打结垄>打结垄>平作,与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿经济效益分别降低 12.5%和 46.1%;在坡度 10°时,紫花苜蓿经济投入和经济产出排列次序与坡度 5°类似,与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿经济效益分别降低 9.9%和 51.6%。经济效益是资源投入与生产成果之间的差值。就同一区组不同处理紫花苜蓿经济效益平均值而言,坡度 5°和 10°的经济效益分别为 881、787 元/hm²。

表 3 坡地打结垄沟集雨种植对紫花苜蓿经济效益的影响

单位:元/hm²

坡度	处理	经济投入				经济 产出	经济 效益
		种子	肥料	地膜	总投入		
5°	平作	1350	754	0	2104	3199	1095
	无打结垄	810	452	1632	2894	3852	958
	打结垄	810	452	1632	2894	3484	590
10°	平作	1350	754	0	2104	3094	990
	无打结垄	810	452	1632	2894	3786	892
	打结垄	810	452	1632	2894	3373	479
平均值	5°	990	553	1088	2631	3511	881
	10°	990	553	1088	2631	3418	787

3 讨论

在传统垄沟集雨种植系统中,沟内按一定距离和一定排列方式修筑打结垄,打结垄将自然流畅的径流渠道(沟)进行堵截,形成带间隔开系列微型畦田耕作系统。该微型畦田耕作系统可以将径流保持于沟内,有效减少地表径流,增加沟中土壤含水量^[13-14]。本研究表明,在坡度 5°~10°时,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期土壤贮水量比平作分别增加 9.3~11.2、15.0~16.2 mm;径流量分别降低 21.9%~24.8%、36.4%~41.2%,泥沙流失量分别降低 74.5%~80.8%、82.0%~83.3%。诸多实践证明,打结垄沟集雨种植有效减少地

表径流,提高土壤入渗速率,增加沟中土壤含水量,从而提高植树造林成活率和有效控制水土流失^[22-24]。打结垄沟集雨种植可以改变土壤水动力学特征,增加降水入渗深度,减少降雨蒸散损失,从而提高土壤含水量。当降雨量和降雨强度较小时,打结垄沟集雨种植可以将微型或无效降雨变成有效降雨,将降雨和径流贮存于作物根系层土壤,以供干旱期间作物利用;当降雨量和降雨强度中等时,打结垄沟集雨种植拦截中等暴雨产生径流,较少产生小区径流或产生较小的小区径流,提高打结垄沟内土壤含水量;当降雨量和降雨强度较大时,打结垄沟集雨种植聚集降雨和径流使沟内产生过度积水,当积水深度超过打结垄高度时,积水导致集雨垄溃坝效

应,产生更严重水土流失^[25-26]。林超文等^[27]研究结果表明,在坡度 10° 时,与平作相比,垄沟集雨种植的径流量和泥沙流失量分别减少45%和80%。

多数研究^[28-29]结果表明,打结垄沟集雨种植作物增产效果与降雨量、降雨分配、土壤类型、作物类型等有关。Wiyoa等^[13]研究表明,粗质土壤具有较小田间持水量、较大土壤孔隙率和土壤水下渗率,不易产生积水、地表径流和溃坝效应,打结垄沟集雨种植对粗质土壤的蒸散量和土壤贮水量增加不明显。本研究表明,在坡度 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿实际干草产量分别提高20.4%~22.4%,8.9%~9.0%,WUE分别提高4.78~4.89,4.06~4.58 kg/(hm²·mm)。Wiyoa等^[14]研究表明,在极端干旱年(降雨量<500 mm),打结垄沟集雨种植集雨效果无法满足玉米需水量,导致玉米减产;在干旱年(降雨量500~900 mm),打结垄沟集雨种植的杂交品种和当地品种的玉米籽粒产量分别为560~1 050,220~500 kg/hm²;在正常年和湿润年(降雨量>900 mm),与干旱年相比,打结垄沟集雨种植杂交品种和当地品种的玉米籽粒产量分别降低350~700 kg/hm²和60 kg/hm²。以上研究结果表明,打结垄沟集雨种植的打结距离和打结垄排列方式与降雨量和作物类型等有关。Araya等^[28]在埃塞俄比亚(Ethiopia)研究表明,当年降雨量小于多年平均降雨量时,打结垄沟集雨种植的大麦(*Hordeum vulgare* L.)籽粒产量比平作提高44%;当年降雨量大于多年平均降雨量时,打结垄沟集雨种植增产效果不明显。Brhane等^[29]在埃塞俄比亚研究结果表明,打结垄沟集雨种植高粱(*Sorghum bicolor* L.)籽粒产量比平作(790 kg/hm²)提高115%~216%,干草产量比平作(3 870 kg/hm²)提高76%~150%。

本研究发现,打结垄沟集雨种植径流减少量(36.4%~41.2%)明显大于无打结垄沟集雨种植径流减少量(21.9%~24.8%),但打结垄沟集雨种植紫花苜蓿干草产量增产效果(8.9%~9.0%)明显小于无打结垄沟集雨种植紫花苜蓿干草产量增产效果(20.4%~22.4%)。与无打结垄沟集雨种植相比,打结垄沟集雨种植在种植区沟内增设打结垄,打结垄减少农田作物有效种植面积和紫花苜蓿相对种植密度,从而减少紫花苜蓿干草产量。打结垄沟集雨种植将沟内径流进行拦截,避免径流局部汇集,减少溃坝发生频率。Gebrekidan^[30]在东埃塞俄比亚高原(Eastern Ethiopian Highlands)研究发现,打结垄沟集雨种植增加棉花(*Gossypium spp*)、玉米、豇豆(*Vigna unguiculata*)、谷子(*Setaria italica*)和高粱的生物产量;Hulugalle^[31]在苏丹撒哈拉布基纳法索(Sudan

Savannah of Burkina Faso)研究发现,打结垄沟集雨种植增加高粱、棉花、马铃薯和甜菜(*Beta vulgaris*)的生物产量。Hulugalle^[32]在苏丹撒哈拉布基纳法索研究发现,在干旱年,打结垄沟集雨种植显著增加豇豆的籽粒产量;在湿润年,打结垄沟集雨种植不显著增加豇豆的籽粒产量。Araya等^[28]研究发现,打结垄沟集雨种植作物增产效果主要与作物关键生育期干旱胁迫相关,作物关键生育期干旱胁迫引起打结垄沟集雨种植作物减产。

降雨是产生径流和土壤侵蚀的先决条件,径流量和泥沙流失量受降雨强度、降雨量、坡度、土壤前期含水量、地表植被覆盖度、土壤团聚体、耕作措施等的影响^[33]。水土流失和土壤侵蚀是导致土地资源退化、贫瘠化和盐碱化的主要根源。坡度是影响水土流失和土壤侵蚀的重要因素之一^[34]。大多数研究^[35-36]表明,在相同降雨条件下,土壤下渗率和土壤水入渗量随坡度增加而减小,径流量和泥沙流失量随坡度增加而增加。本研究表明,就紫花苜蓿全生育期平均值而言,坡度 5° 的平均土壤贮水量比坡度 10° 增加4.3 mm,坡度 10° 径流量和泥沙流失量均是坡度 5° 的1.2倍,坡度 5° 的净干草产量、实际干草产量和WUE与坡度 10° 相差不明显。

Wiyoa等^[14]在马拉维(Malawi)研究表明,在中耕除草时,采用铁锹或锄头修筑打结垄,修筑4 m非交错排列打结垄花费61个人工,修筑2 m交错排列打结垄花费147个人工。本研究表明,在坡度 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,与平作相比,无打结垄和打结垄的紫花苜蓿经济效益分别降低9.9%~12.5%,46.1%~51.6%,坡度 5° 和 10° 的经济效益相差不明显。尽管打结垄沟集雨种植具有提高土壤贮水量、控制水土流失和增加作物产量等效果,但打结垄沟集雨种植在非洲和亚洲等干旱和半干旱地区推广不普及,主要原因是打结垄沟集雨种植的作物增产效果随降雨量、降雨分配、作物类型变化而变化,同时作物产量提高与劳动力投入成本的相关性不明显。为推广打结垄沟集雨种植技术,今后研究将集中于打结垄沟集雨在不同降雨量、降雨分配、坡度、植被类型、土壤类型的增产效果、水土保持效应、经济效益、模型模拟等方面。

4 结论

无打结垄和打结垄集雨种植增加紫花苜蓿全生育期土壤贮水量、实际干草产量和WUE,减少径流量和泥沙流失量,尤其无打结垄增产效果最为明显,打结垄水土保持效果最为明显。在坡度范围 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,土壤贮水量随地形坡度增加而减少,径流量和泥沙流失量随地形坡度增加而增加,紫花苜蓿实际干草产量和WUE随地形坡度增加变化不明显。

参考文献:

- [1] Li X Y, Xie Z K, Yan X K. Runoff characteristics of artificial materials for rainwater harvesting in the semi-arid regions of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 211-224.
- [2] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [3] 魏小燕, 毕华兴, 霍云梅. 不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 44-48.
- [4] 刘松波, 庄春兰, 孟琳琳. 坡度对坡面侵蚀产沙响应的研究[J]. *中国水土保持*, 2009(5): 44-47.
- [5] 黄欢, 何丙辉, 鲍玉海, 等. 不同截排水布置方式下坡耕地坡面产流产沙的模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(10): 97-102.
- [6] 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 36-41.
- [7] 刘雪峰, 张富, 张佰林, 等. 安家沟流域不同植物措施坡耕地的产流产沙特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 17-20.
- [8] Wang Q, Song X Y, Li F C, 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(8): 186-196.
- [9] 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.
- [10] 吴伟, 廖允成. 中国旱区沟垄集雨栽培技术研究进展及展望[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(2): 1-9.
- [11] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131(1): 87-94.
- [12] 陈林, 杨新国, 翟德苹, 等. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 108-116.
- [13] Wiyoa K A, Feyen J. Assessment of the effect of tied-ridging on smallholder maize yields in Malawi [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 41(1): 21-39.
- [14] Wiyoa K A, Kasomekera Z M, Feyen J. Effect of tied-ridging on soil water status of a maize crop under Malawi conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(2): 101-125.
- [15] 刘目兴, 王静爱, 刘连友, 等. 旱作农田不同结构垄作的生态生产效益研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 114-118.
- [16] 宋兴阳, 王琦, 李富春, 等. 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[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 798-809.
- [17] Al-Seekh S H, Mohammad A G. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties [J]. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 37-45.
- [18] 于国强, 李占斌, 裴亮, 等. 不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 1-5.
- [19] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 7-12.
- [20] Wu S F, Wu P T, Feng H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2011, 5(1): 76-83.
- [21] 孙浩峰, 张丽萍, 高雅玉, 等. 半干旱黄土丘陵区坡地紫花苜蓿种植模式与径流的关系[J]. *草业科学*, 2014, 31(5): 922-926.
- [22] Carter D C, Miller S. Three years experience with an on-farm macro-catchment water harvesting system in Botswana [J]. *Agricultural Water Management*, 1991, 19(3): 191-203.
- [23] Piha M I. Optimizing fertilizer use and practical rainfall capture in a semi-arid environment with variable rainfall [J]. *Experimental Agriculture*, 1993, 29(4): 405-415.
- [24] Vogel H. Tillage effects on maize yield, rooting depth and soil water content on sandy soils in Zimbabwe [J]. *Field Crops Research*, 1993, 33(4): 367-384.
- [25] Biazin B, Stroosnijder L. To tie or not to tie ridges for water conservation in Rift Valley drylands of Ethiopia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124(4): 83-94.
- [26] Krishna J H. Modelling the effects of tied-ridging on water conservation and crop yields [J]. *Agricultural Water Management*, 1989, 16(1): 87-95.
- [27] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6091-6101.
- [28] Araya A, Stroosnijder L. Effects of tied ridges and mulch on barley (*Hordeum vulgare*) rainwater use efficiency and production in Northern Ethiopia [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 841-847.
- [29] Brhane G, Wortmann C S, Mamo M, et al. Micro-basin tillage for grain sorghum production in semi-arid areas of northern Ethiopia [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 124-128.
- [30] Gebrekidan H. Grain yield response of sorghum (*Sorghum bicolor*) to tied-ridges and sowing methods on Entisols and Vertisols of Alemaya Area, Eastern Ethiopian Highlands [J]. *Journal of Agriculture & Rural Development in the Tropics & Subtropics*, 2003, 104(2): 113-128.