

DOI:10.11686/cyxb2020004

http://cyxb.magtech.com.cn

赵晓乐, 王琦, 张登奎, 等. 坡地打结垄沟集雨种植对泥沙、养分流失和紫花苜蓿草产量的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 102—117.

Zhao X L, Wang Q, Zhang D K, *et al.* Effects of tied-ridging rainwater harvesting on sediment yield, nutrient loss and alfalfa fodder yield on sloping land. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 102—117.

坡地打结垄沟集雨种植对泥沙、养分流失和紫花苜蓿草产量的影响

赵晓乐¹, 王琦^{1*}, 张登奎¹, 周旭姣¹, 王小赞¹, 赵武成¹, 陈瑾², 雷俊³

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 定西市水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000;
3. 甘肃省定西市气象局, 甘肃 定西 743000)

摘要:为寻求控制水土流失适宜坡耕地利用方式,开展如下试验:1)采用完全随机设计,研究不同坡度(0°、5°和10°)集雨垄的径流效率和临界产流降水量;2)采用裂区设计,坡度(5°和10°)为主区,耕作模式(传统平作、开敞垄和打结垄)为副区,研究坡地打结垄沟集雨种植对土壤水分、径流、泥沙损失、养分损失、紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响。结果表明:0°、5°和10°集雨垄的临界产流降水量分别为1.55、1.33和1.00 mm,径流效率分别为88.2%、91.1%和92.7%;与传统平作相比,开敞垄和打结垄的小区径流量分别减少62.3%~67.9%和76.4%~79.9%,小区径流效率分别减少51.0%~54.5%和67.8%~68.2%;泥沙流失量分别减少95.6%~96.4%和98.4%,全氮流失量分别减少95.3%~96.2%和98.1%~98.2%,全磷流失量分别减少95.3%~96.1%和98.2%,有机质流失量分别减少94.1%~95.6%和97.8%~97.9%;开敞垄和打结垄明显增加浅层(0~60 cm)土壤剖面含水量;开敞垄和打结垄紫花苜蓿全年干草产量分别提高40.3%~50.4%和16.0%~18.7%,水分利用效率分别提高4.4~11.5 kg·hm⁻²·mm⁻¹和2.0~5.3 kg·hm⁻²·mm⁻¹。坡度10°的径流量、径流效率、小区泥沙流失量、全氮流失量、全磷流失量和有机质流失量分别是坡度5°的1.44、1.40、2.34、2.24、2.39和1.97倍;坡度5°的紫花苜蓿全生育期根层(0~200 cm)土壤贮水量、紫花苜蓿全年干草产量和水分利用效率分别是坡度10°的1.05、1.28和1.41倍。开敞垄增加紫花苜蓿干草产量和水分利用效率效果最为明显,打结垄减少径流、泥沙流失和养分损失效果最为明显。

关键词:打结垄沟集雨;径流;泥沙;养分;种植模式

Effects of tied-ridging rainwater harvesting on sediment yield, nutrient loss and alfalfa fodder yield on sloping land

ZHAO Xiao-le¹, WANG Qi^{1*}, ZHANG Deng-kui¹, ZHOU Xu-jiao¹, WANG Xiao-yun¹, ZHAO Wu-cheng¹, CHEN Jin², LEI Jun³

1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China; 3. Meteorological Bureau of Dingxi of Gansu Province, Dingxi 743000, China

Abstract: In this research two experiments were conducted to investigate the effects of slope and cultivation system on soil erosion control. In Experiment 1, a completely random design was used to study the runoff efficiency and the rainfall threshold to produce runoff for ridges along different slopes (0°, 5° and 10°). In Experi-

收稿日期:2020-01-06;改回日期:2020-03-03
基金项目:国家自然科学基金项目(41661059)资助。
作者简介:赵晓乐(1997-),男,甘肃永昌人,在读硕士。E-mail: 2454487744@qq.com
* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangqigsau@gmail.com

ment 2, a split-plot design with slope (5° and 10°) as the main plot factor and tillage method (traditional planting, open ridging and tied-ridging) as the split-plot treatment was adopted to study the effect of tied-ridging rainwater harvesting on soil moisture, runoff, sediment yield, nutrient loss, alfalfa fodder yield and water use efficiency (WUE). The mean runoff efficiencies for ridges along slopes of 0° , 5° and 10° were 88.2%, 91.1% and 92.7%, respectively. The threshold precipitation to produce runoff for the respective treatments was 1.55, 1.33 and 1.00 mm, respectively. Compared with traditional planting, the decreases in runoff, runoff efficiency, sediment yield, total nitrogen loss, total phosphorus loss and organic matter loss for open ridging were 62.3%–67.9%, 51.0%–54.5%, 95.6%–96.4%, 95.3%–96.2%, 95.3%–96.1% and 94.1%–95.6%, respectively, whereas the corresponding decreases for tied-ridging were 76.4%–79.9%, 67.8%–68.2%, 98.4%, 98.1%–98.2%, 98.2% and 97.8%–97.9%, respectively. The open ridging and tied-ridging increased shallow-layer (0–60 cm) soil moisture. The increase in alfalfa forage yield and WUE for open ridging were 40.3%–50.4% and $4.4\text{--}11.5\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, respectively. The corresponding increases for tied-ridging were 16.0%–18.7% and $2.0\text{--}5.3\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. The runoff, runoff efficiency, sediment yield, total nitrogen loss, total phosphorus loss and organic matter loss for the 10° slope were 1.44, 1.40, 2.34, 2.24, 2.39 and 1.97 times greater than those for the 5° slope. Lastly, average soil water storage, alfalfa fodder yield and WUE for the 5° slope were 1.05, 1.28, and 1.41 times greater than those for the 10° slope. Tied-ridging rainwater harvesting was particularly beneficial for reducing runoff, sediment yield and nutrient loss. Open-ridging was offered particular effects on increase of alfalfa fodder yield and WUE.

Key words: tied-ridging rainwater harvesting; runoff; sediment yield; nutrient; production pattern

我国黄土高原丘陵沟壑区是全球水土流失严重和生态环境脆弱的地区之一。该地区具有降水稀少、水土流失严重、地形破碎、土壤浅薄贫瘠、地下水位深、地表水匮乏等特点,属于典型雨养农业区,农牧业发展主要依靠天然降水^[1]。据甘肃省定西市气象局统计,该地区多年潜在年蒸发量(1510 mm)远大于多年平均年降水量(384.5 mm),夏、秋季的总降水量占全年降水量比例(60%~75%)较高,单次降水多为无效降水(降水量 $<5\text{ mm}$),无法被作物有效吸收利用。单次有效降水(降水量 $>5\text{ mm}$)多以大强度降水或暴雨为主,70%~80%降水以径流或蒸发损失,作物吸收利用降水量占总降水量的 20%~30%^[2]。该区黄土覆盖层厚,土质疏松,抗水蚀及风蚀能力差,大强度降水或暴雨易引起土壤侵蚀和水土流失。土壤侵蚀和水土流失破坏土壤耕作层,淋失土壤养分,加速土壤退化、沙化和荒漠化,降低土地生产力,同时,全球变暖、人口增加、经济发展、极端气候事件、不合理耕作模式等加剧区域生态环境恶化,增加粮食生产安全危机,阻碍当地经济增长和农牧业可持续发展,威胁当地生态安全^[3]。当大强度降水或暴雨发生时,传统耕作不能有效拦截坡地地表径流和泥沙,引起上游土壤水分和养分流失、土壤贫瘠化、盐碱化等,导致下游水域富营养化、藻化、污染等^[4-5]。为克服水资源短缺和水土流失等问题,当地农民和政府利用水土保持工程和农艺措施以提高降水入渗和拦截地表径流。

垄沟集雨种植技术是干旱和半干旱雨养农业区普遍应用的一种保护性耕作措施。在垄沟集雨种植技术中,水平沟通常作为种植区,用以种植作物、牧草、林木等,拱形垄作为径流收集区,收集降水和产生径流,集雨垄产生的径流沿垄面流入种植沟中,使降水和径流在水平沟中汇集入渗,提高沟中作物根系层土壤水分状况,促进作物根系发育,增加降水资源利用率。Zhao 等^[6]的研究结果表明,垄沟集雨种植可增加沟中土壤贮水量、表层土壤温度和作物生产潜力,与传统平作种植相比,垄沟集雨种植马铃薯(*Solanum tuberosum*)产量可提高 57.4%~78.2%,水分利用效率可增加 56.8%~70.3%。垄沟集雨种植技术通过沿等高线修筑相间垄和沟系统,增加地表粗糙度,实现降水资源时空调配,减少地表径流和增加雨水入渗,有效减缓地表径流流速和拦截土壤颗粒流失,达到控制水土流失的目的^[7]。Al-Seekh 等^[8]的研究结果表明,垄沟集雨种植系统可增加土壤湿度,延长作物生长季节,减少作物补给灌溉量,与传统平作种植相比,垄沟集雨种植的径流量和泥沙流失量分别减少 50%和 78%。

在传统垄沟集雨种植系统中,当发生大强度降水或暴雨时,降水强度大于土壤入渗强度,垄面产生径流,径流和降水在沟中向低处汇集,当沟内径流深度超过垄面高度,垄面低凹处产生沉降和塌陷,沟内径流进而引起溢垄和毁垄,加剧水分流失和土壤侵蚀。为避免沟内降水和径流向低处汇集,在传统垄沟集雨种植系统中,修筑拱形打结垄,拱形打结垄底宽 15~20 cm,拱形打结垄高度略低于集雨垄高度,该系统称为打结垄沟集雨种植。打结垄沟集雨种植也称为沟筑堤种植(furrow diking planting)、畦田耕作(basin tillage planting)、盒垄种植(boxed ridges planting)等^[9-10]。在打结垄沟集雨种植系统水分调控中,对于集雨垄而言,打结垄有助于分散径流和削减径流峰值,进而避免径流向低处聚集和提高径流分配均匀度;对于沟而言,打结垄有助于缩短径流流动距离和增加径流停滞时间,进而提高径流入渗速率和改善作物根系层水分状况。Brhane 等^[9]的研究结果表明,与传统平作相比,打结垄沟集雨种植的土壤水分和高粱(*Sorghum bicolor*)籽粒产量分别增加 25%和 40%。

坡度是影响土壤水分流失和土壤侵蚀的主要地形因素之一,在一定坡度范围内,降水入渗时间随坡度增加而减少,地表径流流速随坡度增加而增加,土壤营养元素伴随径流流失而损失^[11-12]。Grum 等^[13]研究发现,与传统平作相比,打结垄沟集雨种植的土壤侵蚀量、全氮和全磷损失量分别减少 82%~90%、82%和 83%。我国黄土高原区是紫花苜蓿(*Medicago sativa*)主要产区之一。紫花苜蓿茂密茎叶可有效减少雨滴击溅土壤强度,其深根性(入土深度 2~3 m)能有效抵抗径流剥蚀地表侵蚀力,垄沟集雨种植紫花苜蓿能减少土地退化和水土流失,尤其适合坡耕地种植^[14-15]。

打结垄沟集雨种植水土保持效果和增产效应与降水量、降水强度、土壤质地、坡度、景观位置、作物类型、起垄时间等有关。如果打结垄沟集雨种植设计不合理,大强度降水或暴雨将引起涝渍、溢垄、毁垄、作物减产等现象^[16]。基于此,本研究拟开展有关坡地打结垄沟集雨种植的径流损失、土壤侵蚀、养分流失和紫花苜蓿生长特性的评价体系研究,以期推广打结垄沟集雨种植技术和促进生态系统良性循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验布置于甘肃省定西市水土保持科学研究所安家沟流域试验基地(N 35°33′—35°35′, E 104°38′—104°40′),该基地位于黄土高原西部,占地面积 384 km²,海拔 1900~2250 m。研究区域气候类型属温带半干旱大陆性气候。根据定西市气象局的记录,46 年(1971—2016 年)的年平均降水量为 427 mm,年最大降水量为 547.9 mm(1979 年),年最小降水量为 245.7 mm(1982 年),大约 65%降水集中在 7—9 月,雨季(夏末~秋初)产生较多径流,而旱季(冬季~春季)基本不产生径流。年潜在蒸发量 1510 mm,夏季月潜在蒸发量 150~270 mm,冬季月潜在蒸发量 20~80 mm。极端最高气温 34.3 ℃(7 月),极端最低气温-27.1 ℃(1 月),年均气温 6.3 ℃,年平均日照时间 2409 h,年平均无霜期 141 d。春、夏、秋和冬季降水量占全年降水量的比例分别为 10.8%、45.1%、41.2%和 2.9%,降水季节与多数作物需水期错位^[17]。试验土壤质地为黄土母质上发育而成的黄绵土,0~200 cm 土壤容重为 1.09~1.36 g·cm⁻³,田间持水量为 20%~21%,永久萎蔫土壤含水量为 6.7%,土壤化学性质见表 1。作物生长季节积温较低,耕作制度为 1 年 1 熟,主要种植作物包括玉米(*Zea mays*)、马铃薯、燕麦(*Avena sativa*)、高粱、紫花苜蓿、红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)等。

表 1 试验区土壤化学性质

Table 1 Soil chemical properties in the experimental plots

土层深度 Soil depth (cm)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	水解氮 Alkali-hydrolyzable N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	0.62	0.76	20.70	9.56	65.75	7.78	135	7.83
20~40	0.54	0.64	20.51	7.77	22.10	3.00	90	7.82

1.2 试验设计

1.2.1 集雨垄径流试验 试验采用完全随机设计,共设 3 个处理,3 个坡度分别为 0°、5°和 10°,重复 3 次(图 1)。根据当地种植经验,在坡地上沿等高线修筑集雨垄,集雨垄形状为拱形,垄长、垄宽和垄高分别为 5.0 m、0.45 m 和 0.2 m。集雨垄下垄面与水平面夹角为 40°~60°;集雨垄上垄面与水平面夹角为 5°~10°。为了收集全部径流,集雨垄长度方向沿地面坡度为 1/500。集雨垄覆盖材料为生物可降解地膜,生物可降解地膜由德国 BASF 公司提供,主要由淀粉与其他生物可降解材料混合而成,厚度为 0.008 mm。为防止径流外溢,采用预制板在集雨垄两侧铺设高 8 cm 集流槽(图 1);为防止径流下渗,集流槽下铺设 0.2 cm 厚沥青,每 2 条集雨垄之间设置 1.5 m 隔离区和观测区。在每条集雨垄低端安置 100 L 集雨桶收集径流。

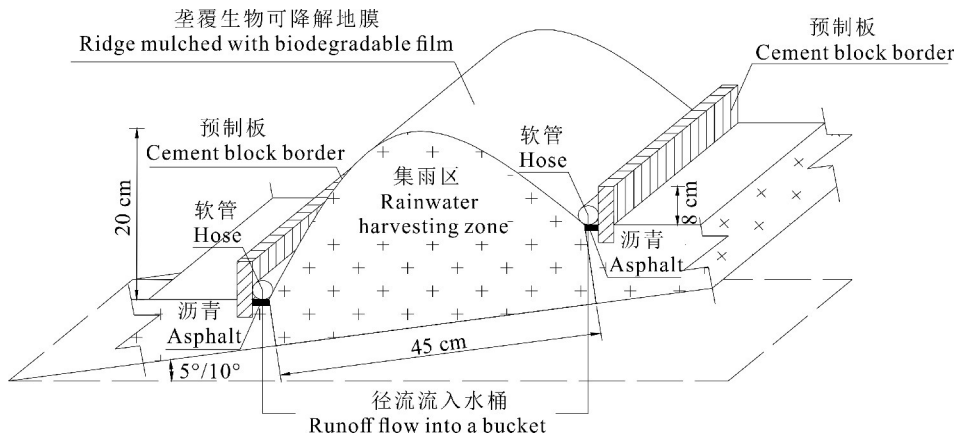


图 1 坡地集雨垄径流效率示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing ridge runoff efficiency in rainwater harvesting system on sloping land

1.2.2 坡地紫花苜蓿种植试验 试验采用裂区设计,坡度作为主区,种植模式作为副区,2 个坡度分别为 5°和 10°,3 个种植模式分别为传统平作、开敞垄和打结垄,重复 3 次,试验处理数目为 6 个(3 个种植模式×2 个坡度)(图 2 和图 3)。试验地坡度方向为南北走向,小区长和宽分别为 10.05 m 和 5.00 m,每个小区有 9 条垄和 10 条沟,种植试验的集雨垄尺寸、形状和覆盖材料与集雨垄径流试验完全相同。种植试验沟宽为 60 cm,沟内无覆盖材料,作为种植区。选择甘农 3 号紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Gannong No. 3)为供试作物,当其株高达到 2~3 cm 时,用原地土壤修筑打结垄,打结垄形状为拱形,打结垄长度、宽度和高度分别为 60 cm、20 cm 和 15 cm,每 2 条打结垄之间打结距离为 2.5 m。为收集小区内径流和阻止小区外径流流入,每小区 4 周用高出地面 15 cm 预制板围起。在小区上侧设置排水沟,排水沟导流小区外径流,在小区下侧设置集流槽,集流槽收集小区内径流和泥沙。在每小区坡脚处修建 1 个径流泥沙观测池,采用砖块和水泥砂浆修筑径流泥沙观测池,每个径流泥沙观测池容积为 3.375 m³(1.5 m×1.5 m×1.5 m)。

1.3 种植管理

试验种植管理参照李富春等^[18]的研究。2015 年 3 月 15 日—4 月 10 日进行试验小区修整、径流泥沙观测池修建等工作。2015 年 4 月 12 日种植紫花苜蓿,种植方式为条播,根据当地种植经验,对于垄沟集雨种植(开敞垄种植和打结垄种植)而言,播种密度为 22.5 kg·hm⁻²,播种深度 2~3 cm,行距 15 cm,每小区有效种植面积 30 m²(10 条沟×5 m 长×0.6 m 宽),每条沟种植 4 行紫花苜蓿,每小区种植 40 行;对于传统平作种植而言,播种密度、深度和行距与垄沟集雨种植完全相同,每小区有效种植面积 50.25 m²(5 m 宽×10.05 m 长),每小区种植 66 行紫花苜蓿。在 2017 年紫花苜蓿返青前(3 月 25 日),维修集雨垄和打结垄形状和尺寸,采用生物可降解地膜覆盖集雨垄,采用土壤结皮覆盖打结垄,拍实打结垄上原土,经降水、径流、干燥等作用形成土壤结皮。在紫花苜蓿全生育期不追肥和不灌溉,大约每隔 30 d 人工锄草。

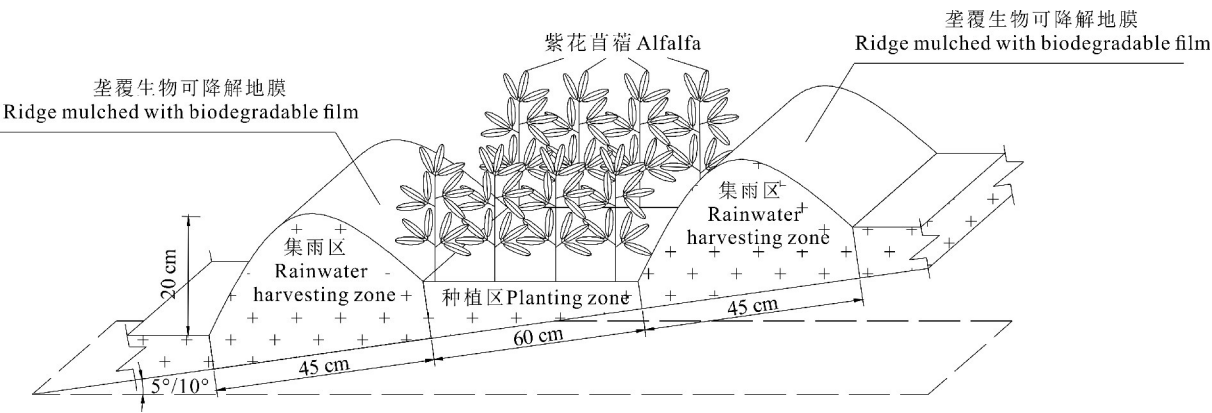


图 2 坡地垄沟集雨种植紫花苜蓿示意图

Fig. 2 Schematic diagram for alfalfa production in ridge-furrow rainwater harvesting system on sloping land

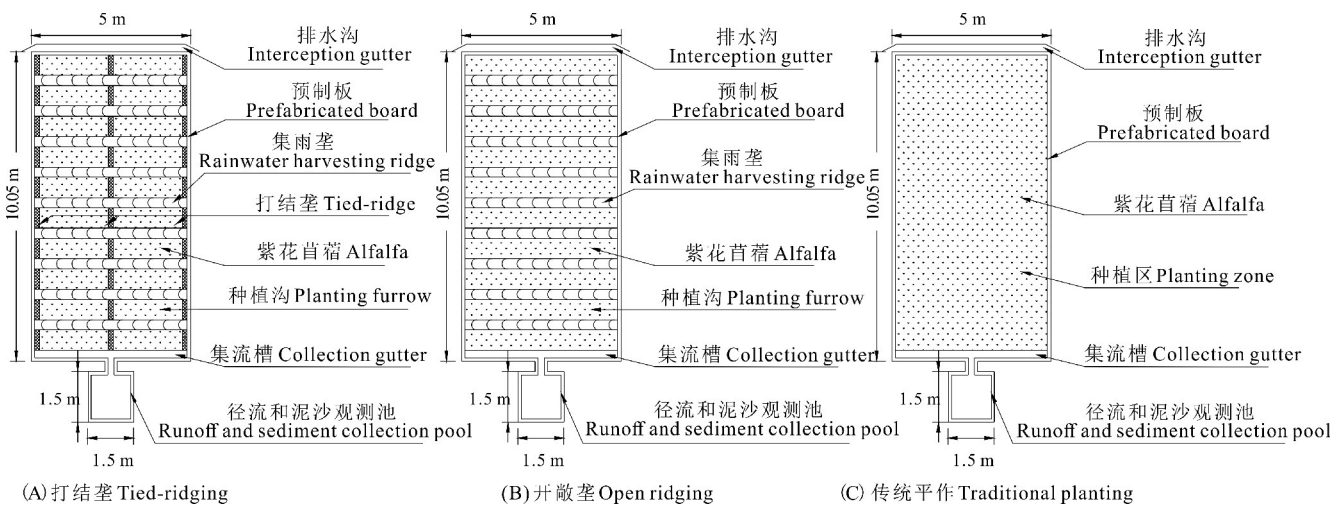


图 3 3 个种植模式种植紫花苜蓿示意图

Fig. 3 Schematic diagram for alfalfa production in three tillage methods

1.4 样品采集和测定

1.4.1 降水量和集雨垄径流效率 降水—径流观测时段为 2017 年 5—10 月。利用试验站安置自动虹吸式雨量计(WS-STD1,英国)测定试验区降水量,为避免偶然事件引起侧漏,同时安装 2 台手动雨量计(RS485,中国)测定试验区降水量。每次降水后,采用称重法测定集雨桶收集径流。采用以下公式计算集雨垄的径流效率(run-off efficiency, ER):

$$ER=\frac{Rv}{Pt\times Ac}\times 100\% \tag{1}$$

式中: Rv 为集雨桶收集径流量(m^3), Pt 为降水量(m), Ac 为集雨垄投影面积(m^2)。

1.4.2 小区径流量、小区径流效率和小区泥沙流失量 在紫花苜蓿全生育期(2017 年 4 月 3 日—2017 年 10 月 6 日),当发生高强度降水和小区产生径流时,通过观测径流泥沙观测池水深,计算小区的径流量[径流量(m^3)=水深(m) $\times$ 池底面积($2.25\ m^2$)]。在泥沙测定前,人工用铁铲连续搅拌径流泥沙观测池的径流 5~10 min,使泥沙颗粒均匀悬浮于径流液体中,立即用 6 个 1000 mL 量筒取样,使样品澄清 24~48 h,倒掉样品上层清液,其中 3 个样品下层浑浊液烘干和称重,计算小区泥沙流失量,另外 3 个样品下层浑浊液在自然条件下风干,测定土壤营养元素。小区径流量、小区径流效率和小区泥沙流失量采用以下公式计算:

$$V_{runoff}=A_{pool}\times D_{pool} \tag{2}$$

$$D_{\text{runoff}} = \frac{V_{\text{runoff}}}{A_{\text{plot}}} \tag{3}$$

$$Re_{\text{plot}} = \frac{V_{\text{runoff}}}{P_t \times A_{\text{plot}}} \tag{4}$$

$$W_{\text{sediment}} = V_{\text{runoff}} \times \frac{W_{\text{sample sediment}}}{V_{\text{sample}}} \tag{5}$$

$$W_{\text{sediment per area}} = \frac{W_{\text{sediment}}}{A_{\text{plot}}} \tag{6}$$

式中: V_{runoff} 为小区径流量(m^3), A_{pool} 为径流泥沙观测池池底面积(m^2), D_{pool} 为径流泥沙观测池水深(m), D_{runoff} 为单位面积小区径流量($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$), A_{plot} 为小区面积(m^2), Re_{plot} 为小区径流效率(%), W_{sediment} 为小区泥沙流失量(g), $W_{\text{sample sediment}}$ 为样品泥沙流失量(g), V_{sample} 为样品体积($1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$), $W_{\text{sediment per area}}$ 为小区单位面积泥沙流失量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.4.3 泥沙流失营养成分 自然风干泥沙浑浊液,采用凯氏定氮法、酸溶—钼锑抗比色法和重铬酸钾容量法分析全氮、全磷和有机质含量^[1]。

1.4.4 土壤水分 在紫花苜蓿返青期前(2017 年 4 月 3 日)、刈割后(2017 年 6 月 22 日和 10 月 6 日)和有效降水(降水量 $>5 \text{ mm}$)后 1 d,在每小区的上坡、中坡和下坡分别随机取 3 个样点,测定沟中土壤含水量,测定方法为烘干法,测定土层深度为 200 cm,在 0~20 cm 土层深度,每隔 10 cm 分层;在 20~200 cm 土层深度,每隔 20 cm 分层,共分 11 层。土壤容重测定方法为环刀法^[2],土壤容重测定深度和分层与土壤含水量测定深度和分层完全相同。土壤贮水量采用以下公式计算:

$$W = \sum_{i=1}^{11} \theta_i \times BD_i \times H \times 10 \tag{7}$$

式中: θ 为各层土壤质量含水量(%), BD (bulk density)为各层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H 为各层土壤深度(cm),10 为系数。

1.4.5 紫花苜蓿草产量和水分利用效率 紫花苜蓿刈割期为初花期(2017 年 6 月 22 日)和停止生长期(2017 年 10 月 6 日),在紫花苜蓿刈割期前 1 d,在每小区随机刈割 3 个样方($60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$),计算紫花苜蓿干草产量,3 个样方位置分别位于小区上坡、中坡和下坡,人工刈割紫花苜蓿,留茬高度约为 5 cm,将紫花苜蓿地上部分均匀平摊于集雨垄上,自然风干后,用称重法计算紫花苜蓿干草产量。采用以下公式计算紫花苜蓿耗水量(evapo-transpiration, ET)和水分利用效率(water use efficiency, WUE):

$$ET = P - \sum_1^6 Re_{\text{plot}} \times P_{\text{runoff}} + (W_1 - W_2) \tag{8}$$

$$WUE = \frac{AFY}{ET} \tag{9}$$

式中: P 为紫花苜蓿全生育期降水量(mm), P_{runoff} 为小区产生径流降水量(mm), W_1 和 W_2 分别为返青前期和最后 1 次刈割后土壤贮水量(mm), AFY (actual fodder yield)为紫花苜蓿实际干草产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据处理

利用 SPSS 19.0 进行统计分析,采用一般线性模型单变量分析不同主区和不同副区之间差异。

2 结果与分析

2.1 集雨垄的径流效率

在降水—径流观测期(2017 年 5 月 2 日—10 月 10 日),总降水量为 398.1 mm,总降水次数为 52 次,集雨垄产生径流次数为 29 次(图 4)。对降水与集雨垄径流进行回归分析,0°、5°和 10°坡度降水与集雨垄径流回归方程决定系数分别为 0.994、0.993 和 0.996,降水与径流具有较好的相关性(图 5)。0°、5°和 10°集雨垄的临界产流降

水量分别为 1.55、1.33 和 1.00 mm，产流后的径流效率分别为 88.2%、91.1% 和 92.7%。在降水量、降水强度、风速、风向、径流面等相同情况下，在一定坡度范围内(0°~10°)，集雨垄的临界产流降水量随集雨垄坡度增加而减少，产流后的径流效率随集雨垄坡度增加而增加。

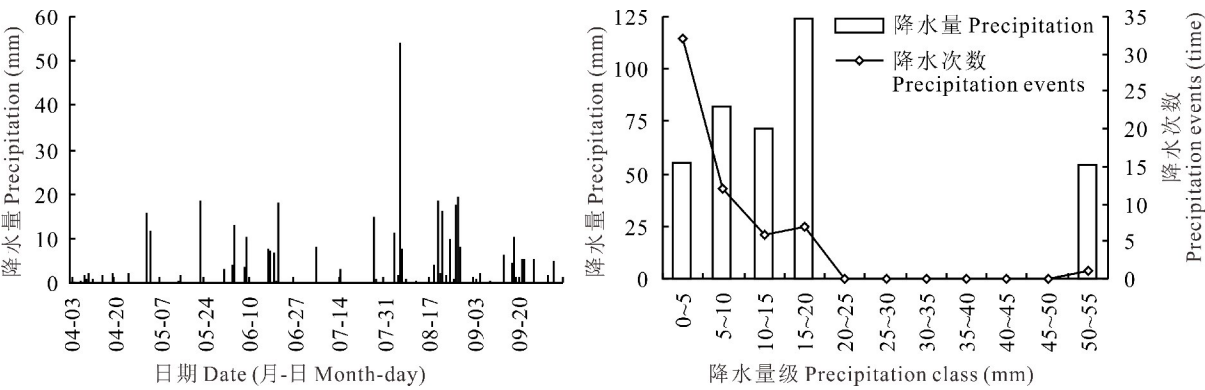


图 4 紫花苜蓿生育期日降水量和降水量级分布

Fig. 4 Precipitation and distribution of precipitation class during the alfalfa growing seasons

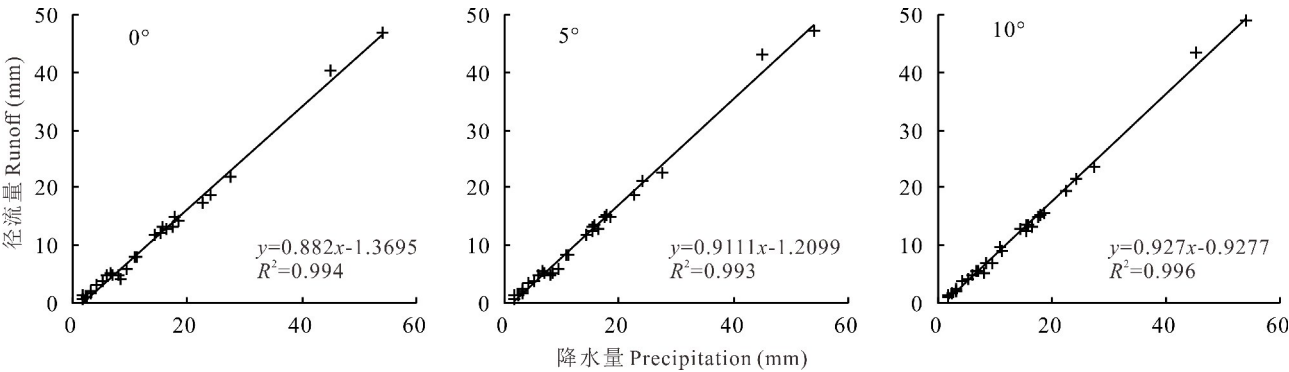


图 5 不同坡度集雨垄径流量与降水量的关系

Fig. 5 Correlations between runoff and precipitation for ridges on different slopes of land

2.2 小区径流量和径流效率

当大强度暴雨发生时，降水强度超过土壤入渗强度，降水无法全部入渗根区土壤，部分降水变成地表径流，地表径流冲刷土壤表层，造成土壤侵蚀和降低雨水利用效率。紫花苜蓿全生育期(2017 年 4 月 3 日—2017 年 10 月 6 日)总降水量为 387.5 mm，单次降水量>5 mm 的次数为 26 次，小区产生径流次数为 6 次(图 6)。6 次降水量分别为 10.5、7.8、17.9、14.8、11.2 和 54.2 mm，在不同降水量情况下，不同处理的小区径流量之间差异与小区径流效率之间差异基本一致。传统平作的小区径流量和小区径流效率显著($P<0.05$)高于开敞垄，开敞垄的小区径流量和小区径流效率显著($P<0.05$)高于打结垄。就 6 次径流量的平均值而言，在坡度 5°时，与传统平作相比，开敞垄和打结垄的径流量分别减少 62.3%和 76.4%，径流效率分别减少 51.0%和 67.8%；在坡度 10°时，与传统平作相比，开敞垄和打结垄的径流量分别减少 67.9%和 79.9%，径流效率分别减少 54.5%和 68.2%。就同一主区不同处理的平均值而言，坡度 10°的径流量和径流效率分别是坡度 5°的 1.44 和 1.40 倍。

2.3 泥沙流失量和营养元素流失量

降水侵蚀主要包括雨滴击溅地表、泥沙剥离、径流运移等过程，雨滴击溅地表破碎土壤结皮结构，减少土壤孔隙度和降低土壤入渗率；径流冲刷地表剥离表层土壤，导致土壤养分流失。在 6 次小区径流中，泥沙产生 3 次(图 7)。在 6 月 21 日和 8 月 6 日泥沙产生过程中，传统平作的泥沙流失量显著($P<0.05$)高于开敞垄和打结垄，开敞

垄与打结垄之间差异不显著;在 7 月 27 日泥沙产生过程中,传统平作的泥沙流失量显著($P<0.05$)高于开敞垄,开敞垄显著($P<0.05$)高于打结垄(图 7)。就 3 次泥沙流失量平均值而言,与传统平作相比,在坡度 5° 时,开敞垄和打结垄的泥沙流失量分别减少 96.4%和 98.4%;在坡度 10° 时,开敞垄和打结垄的泥沙流失量分别减少 95.6%和 98.4%。就同一主区不同处理平均值而言,坡度 10° 小区泥沙流失量是坡度 5° 的 2.34 倍。不同处理全氮、全磷和有机质流失量之间差异与泥沙流失量类似。就 3 次营养元素流失量平均值而言,与传统平作相比,在坡度 5° 时,开敞垄和打结垄的全氮流失量分别减少 96.2%和 98.1%,全磷流失量分别减少 96.1%和 98.2%,有机质流失量分别减少 95.6%和 97.9%;在坡度 10° 时,开敞垄和打结垄的全氮流失量分别减少 95.3%和 98.2%,全磷流失量分别减少 95.3%和 98.2%,有机质流失量分别减少 94.1%和 97.8%。就同一主区不同处理平均值而言,坡度 10° 小区全氮、全磷和有机质流失量分别是坡度 5° 的 2.24、2.39 和 1.97 倍(图 7)。

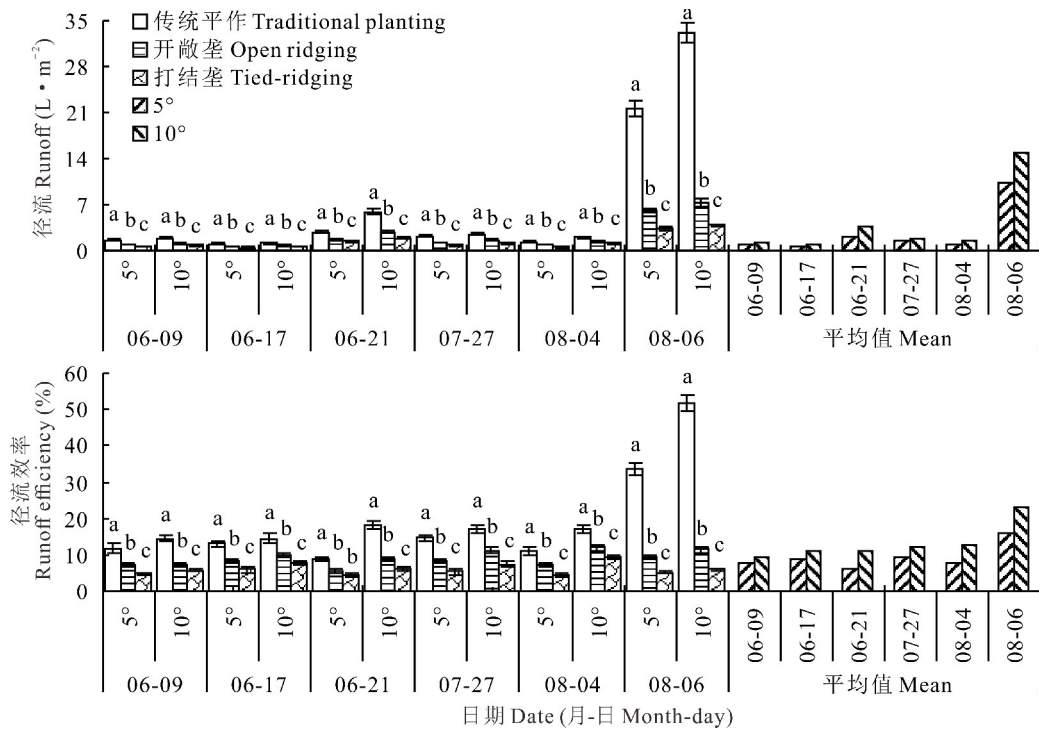


图 6 小区径流和小区径流效率

Fig. 6 Plot runoff and runoff efficiency in various treatments

根据 Tukey's-b 方差检验分析,每组中平均值标记不同字母代表差异显著($P<0.05$)。下同。The means (columns) labeled with the different letters within each group are significantly different at the 5% level (Tukey's-b test ANOVA). The same below.

2.4 土壤贮水量

土壤贮水量是反映土壤水分状况的一项重要指标,主要取决于土壤水库进水量与出水量平衡方程。在本试验中,降水是补充土壤水分的唯一来源。每一次降水后,当降水强度超过土壤入渗率时,降水和径流在重力作用下进行重新分配,上坡降水和径流通过壤中流(土壤表层或分层土层内界面上侧向流动的水流,又称表层流)和地表径流向中坡和下坡流动。在大多数情况下,就同一处理而言,下坡土壤贮水量明显高于中坡,中坡明显高于上坡(图 8)。2017 年 4—5 月,气温较低和降水较少,紫花苜蓿生长缓慢、土壤蒸发量和紫花苜蓿蒸腾作用较小,各处理土壤贮水量变化幅度较小,同时,各处理土壤贮水量处于紫花苜蓿全生育期中等水平;2017 年 6—7 月,气温较高和降水量中等,紫花苜蓿进入初花期和盛花期,土壤蒸发量较大和紫花苜蓿蒸腾速率较高,各处理土壤贮水量处于紫花苜蓿全生育期较低水平;2017 年 8—10 月,较高降水量补充紫花苜蓿较高蒸腾速率和较高土壤蒸发量,各处理土壤贮水量处于紫花苜蓿全生育期较高水平。在大多数情况下,打结垄的土壤贮水量显著($P<0.05$)

高于开敞垄,开敞垄显著($P<0.05$)高于传统平作。在坡度 5° 时,传统平作、开敞垄和打结垄的紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量分别为 204、226 和 237 mm;在坡度 10° 时,相应处理紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量分别为 201、213 和 220 mm。就同一主区不同处理平均值而言,坡度 5° 和 10° 的紫花苜蓿全生育期平均土壤贮水量分别为 223 和 211 mm。

2.5 土壤剖面含水量

在垄沟集雨种植紫花苜蓿中,降水在集雨垄面产生径流,径流与降水在沟中叠加,从而增加沟内土壤水分,尤其打结垄沟集雨种植。为清晰分析打结垄沟集雨种植增产机理,在紫花苜蓿返青期、第 1 和 2 次刈割后,比较不同处理 0~200 cm 土壤剖面含水量(图 9)。在紫花苜蓿返青期,不同处理同一土层土壤剖面含水量差异不明显;在紫花苜蓿第 1 次刈割后,不同处理浅层(0~60 cm)土壤剖面含水量差异明显;在紫花苜蓿第 2 次刈割后,不同处理浅层(0~60 cm)和深层(60~160 cm)土壤剖面含水量差异明显。同时,坡度 5° 不同处理土壤剖面含水量差异明显高于坡度 10° 。垄沟集雨种植明显提高土壤剖面含水量,尤其打结垄沟集雨种植。就紫花苜蓿返青期、第 1 和 2 次刈割后平均值而言,在坡度 5° 时,平作、开敞垄和打结垄 0~200 cm 平均土壤剖面含水量分别为 8.0%、9.2%和 9.5%;在坡度 10° 时,相应处理 0~200 cm 平均土壤剖面含水量分别为 8.0%、8.5%和 8.9%。就同一主区不同处理平均值而言,坡度 5° 和 10° 的 0~200 cm 平均土壤剖面含水量分别为 8.9%和 8.5%。

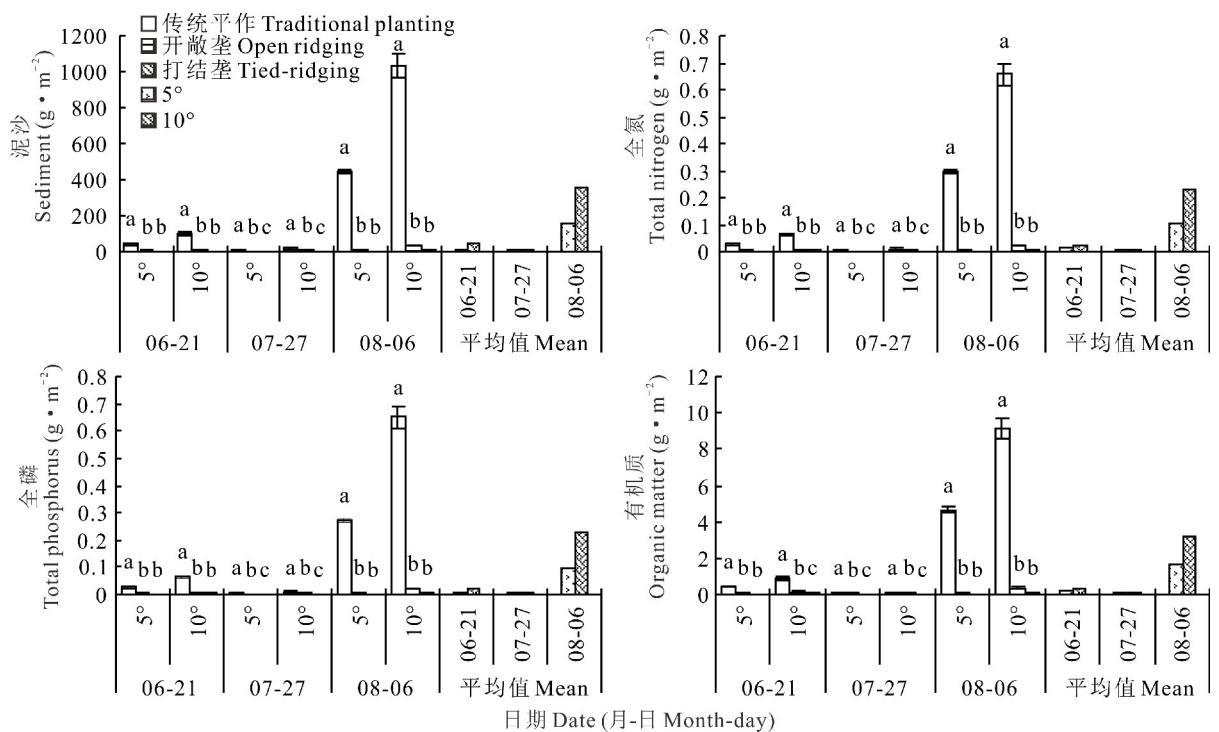


图 7 各处理泥沙、全氮、全磷和有机质流失

Fig. 7 Annual loss of sediment, total nitrogen, total phosphorus and organic matter in various treatments

2.6 紫花苜蓿干草产量和水分利用效率

干草产量随气候条件和耕作管理措施的变化而变化,反映种植区土地的作物生产力。净干草产量(net fodder yield, NFY)能反映单位净种植面积(沟面积)的生产力,实际干草产量(AFY)反映单位总种植面积(沟面积+垄面积)生产力。实际干草产量随处理变化规律与净干草产量类似,开敞垄的实际干草产量和净干草产量显著($P<0.05$)大于打结垄,打结垄显著($P<0.05$)大于传统平作。就全生育期实际干草产量而言(表 2),与传统平作相比,在坡度 5° 时,开敞垄和打结垄的实际干草产量分别增加 50.4%和 16.0%;在坡度 10° 时,分别增加

40.3%和18.7%。就同一主区不同处理平均值而言,坡度5°实际干草产量是坡度10°的1.28倍。紫花苜蓿水分利用效率是实际干草产量与蒸散量的比值,是衡量紫花苜蓿生产过程中土壤水分转化成植物干物质的指示性参数。开敞垄的水分利用效率显著($P<0.05$)大于打结垄,打结垄显著($P<0.05$)大于传统平作。与传统平作相比,在坡度5°时,开敞垄和打结垄的水分利用效率分别增加11.5和5.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$;在坡度10°时,开敞垄和打结垄水分利用效率分别增加4.4和2.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。就同一区组不同处理平均值而言,坡度5°的水分利用效率是10°的1.41倍。

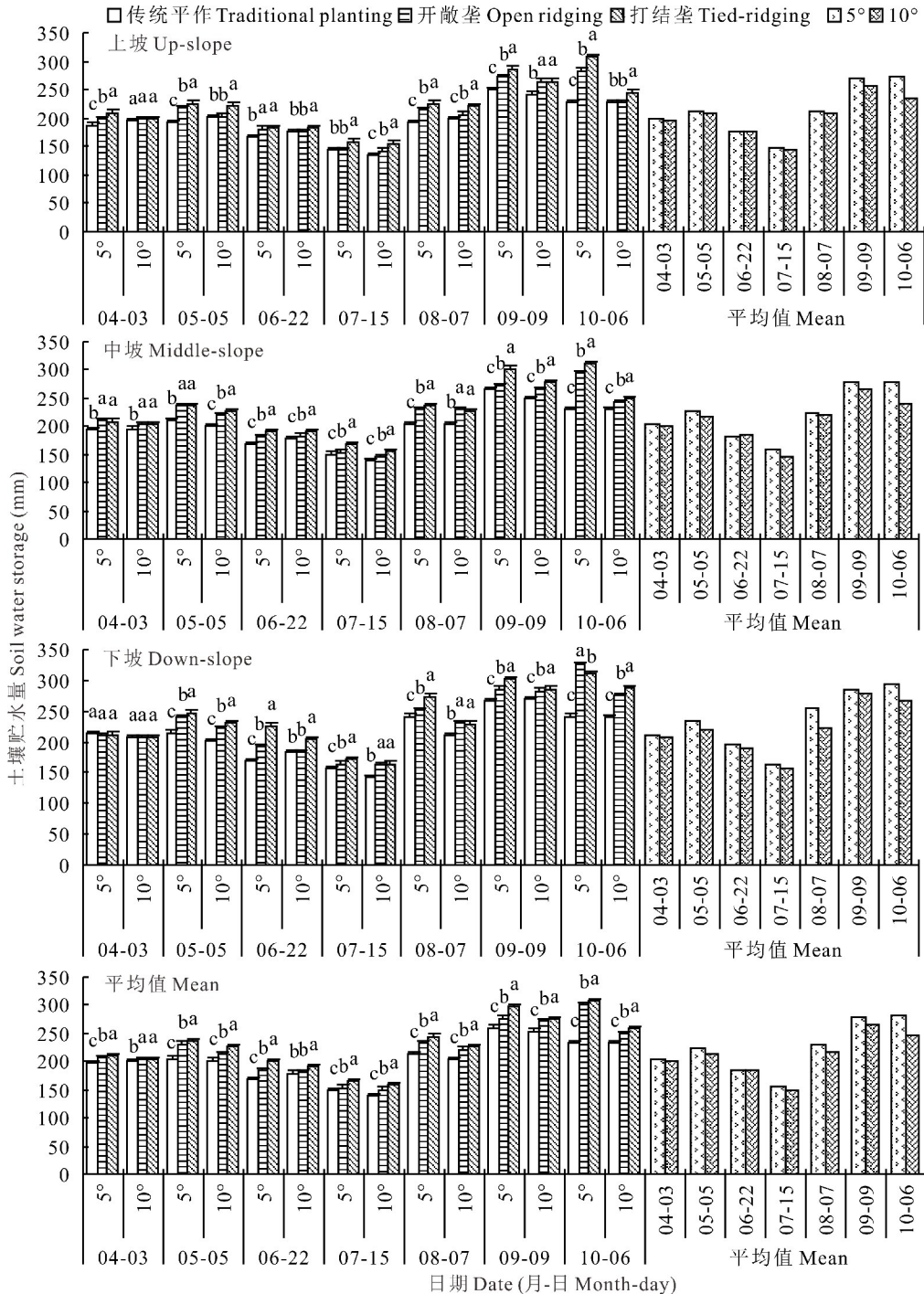


图 8 各处理种植区 0~200 cm 土壤贮水量

Fig. 8 Soil water storage at furrow bottoms in 0—200 cm soil depth in various treatments

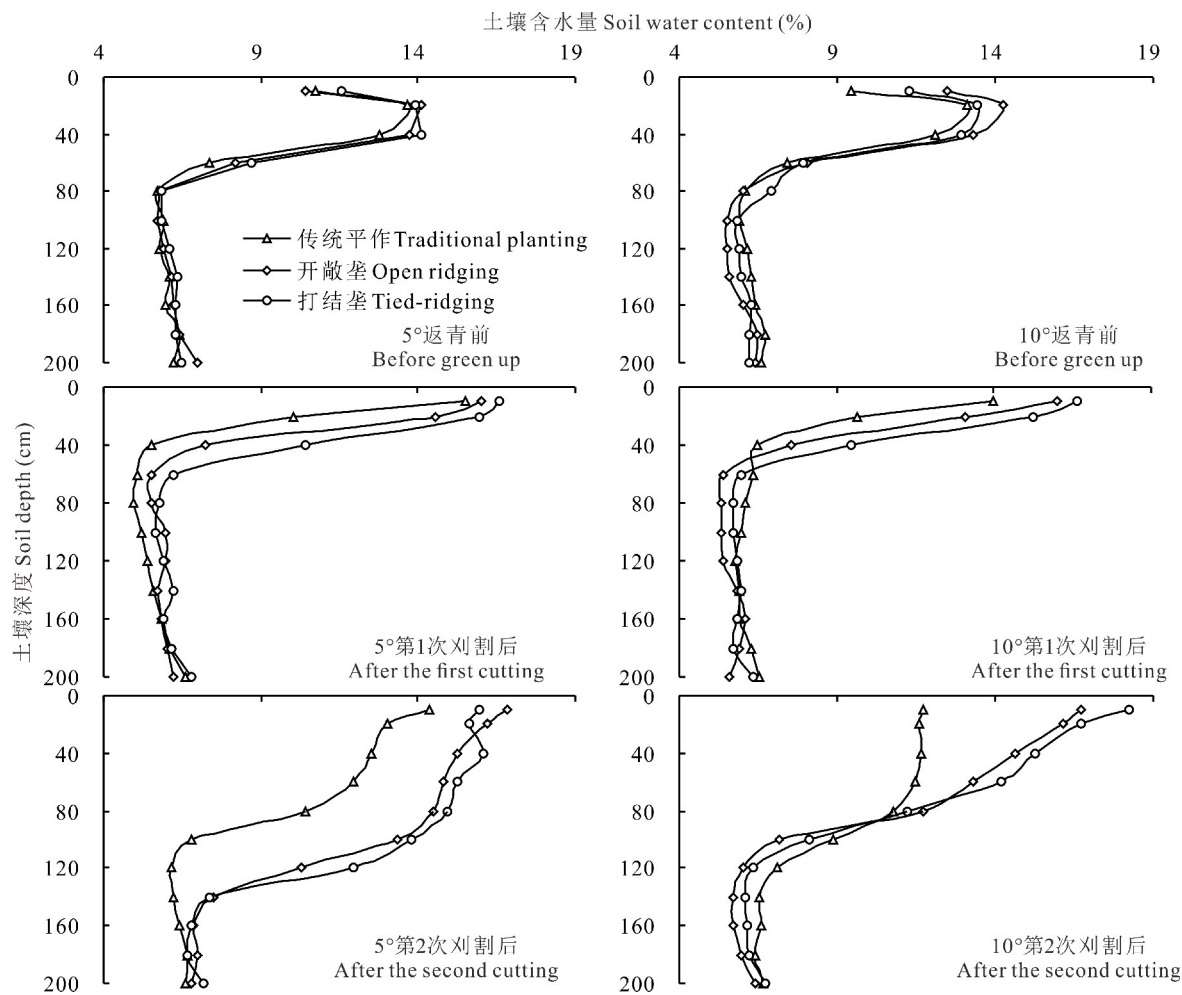


图 9 各处理返青前和刈割后种植区土壤含水量

Fig. 9 Soil water content at furrow bottoms before green up and after cutting in various treatments

表 2 紫花苜蓿干草产量和水分利用效率

Table 2 Alfalfa forage yield and water use efficiency (WUE)

坡度 Slope	处理 Treatments	干草产量 Forage yield (kg · hm ⁻²)						较平作增加	水分利用效率
		第 1 茬 First cutting		第 2 茬 Second cutting		总干草产量 Total forage yield		Increase	WUE (kg ·
		NFY	AFY	NFY	AFY	NFY	AFY	(%)	hm ⁻² · mm ⁻¹)
5°	TP	3722c	3722c	1380c	1380c	5102c	5102c	0	15. 7c
	OR	8546a	5102a	4306a	2570a	12852a	7673a	50. 4	27. 2a
	TR	7287b	4176b	3037b	1741b	10324b	5917b	16. 0	21. 0b
10°	TP	3019c	3019c	1056c	1056c	4074c	4074c	0	13. 0b
	OR	6481a	3870a	3093a	1846a	9574a	5716a	40. 3	17. 4a
	TR	6148b	3524b	2287b	1311b	8435b	4834b	18. 7	15. 0b
平均值	5°	6519	4334	2907	1897	9426	6231	/	21. 3
Mean	10°	5216	3471	2145	1404	7361	4875	/	15. 1

注:TP、OR 和 TR 分别代表传统平作、开敞垄和打结垄。NFY 是净干草产量,AFY 是实际干草产量。根据 Tukey's-b 方差检验分析,每组中平均值标记不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Note: TP, OR and TR were traditional planting, open ridging and tied-ridging, respectively. NFY was net fodder yield. AFY was actual fodder yield. The means (columns) labeled with the different letters within each group are significant difference at the 5% level (Tukey's-b test ANOVA).

3 讨论

降水是径流和泥沙流失的先决条件,径流、泥沙流失和营养元素流失受降水量、降水强度、坡度、下垫面、植被、土壤结构、前期土壤含水量等影响,其中降水量和降水强度是决定径流和泥沙流失重要的自然影响因素,坡度和下垫面是决定径流和泥沙流失重要的人为影响因素^[19]。当降水强度超过土壤入渗能力时,无法入渗的降水变成地表径流,地表径流侵蚀、剥蚀和运移,从而引起土壤水分和营养元素迁移和再分配。研究打结垄沟集雨种植的径流、泥沙流失和营养元素流失对垄沟集雨种植应用机理和农牧业可持续发展具有重要意义。垄沟集雨种植沿等高线修筑集雨垄,可降低地表径流流速,将径流拦截于种植沟内。在打结垄沟集雨种植系统中,打结垄缩短径流在沟内流动距离,避免沟内径流向低处局部汇集,以免引起溢垄和溃垄等现象,尤其在大强度降水或暴雨情况下,打结垄沟集雨种植通常不产生或较少产生地表径流,与传统平作相比,打结垄沟集雨种植可减少径流、泥沙和土壤养分损失。然而,在高强度降水或暴雨情况下,垄沟集雨种植,尤其打结垄沟集雨种植,多数降水来不及下渗,在沟内产生径流滞留和积水,可能导致水涝。当积水深度超过打结垄高度后,径流溢出打结垄,径流流线更长,积水量更多,降水和径流向沟内低处汇集;当积水深度超过集雨垄高度后,降水和径流将引起溢垄、溃垄、作物减产等^[16,20]。本研究结果表明,与传统平作相比,开敞垄和打结垄的径流量分别减少 62.3%~67.9%和 76.4%~79.9%,径流效率分别减少 51.0%~54.5%和 67.8%~68.2%;泥沙流失量分别减少 95.6%~96.4%和 98.4%,全氮流失量分别减少 95.3%~96.2%和 98.1%~98.2%,全磷流失量分别减少 95.3%~96.1%和 98.2%,有机质流失量分别减少 94.1%~95.6%和 97.8%~97.9%。开敞垄和打结垄沟集雨种植紫花苜蓿显著降低小区径流量、泥沙流失量和营养元素流失量。Schiettecatté 等^[21]研究结果表明,在相同降水和土壤环境条件下,垄沟集雨种植,尤其打结垄沟集雨种植可拦截降水和径流,增加降水入渗时间和入渗量。

控制坡耕地水分流失和土壤侵蚀是我国黄土高原丘陵沟壑区生态环境建设和修复的重点和难点,确定适宜坡耕地利用方式是实现流域水土流失治理和生态环境修复的重要措施^[22]。尽管前人在我国黄土高原丘陵沟壑区实施农业工程、农艺、耕作等措施,这些措施用以治理坡耕地水分流失和土壤侵蚀,但该区域控制水土流失成效不显著和植被建设速度较慢。评价水土保持措施的土壤水分环境对促进该区域水土流失综合治理和生态环境建设具有理论指导意义^[22-24]。土壤营养元素是土壤健康的重要标志,氮是植物体新陈代谢所必需的元素之一,土壤氮素水平不仅影响植物地下和地上形态发育和产量形成,而且影响植物根瘤、固氮能力等。磷是构成植物体内核酸、磷脂和核苷酸的重要元素,植物茎叶和根系发育、抗病能力、抗旱能力、越冬率等与其直接相关。土壤有机质是土壤固相的重要组成成分和土壤营养元素的主要载体,其可改良土壤结构性、通气性、渗透性、吸附性等特性,促进土壤动物和微生物活性^[25]。本研究结果表明,集雨垄径流量、小区径流量、径流效率、泥沙流失量和营养元素流失量随坡度的增加而增加,坡度 10°的径流量、径流效率、小区泥沙流失量、全氮流失量、全磷流失量和有机质流失量分别是坡度 5°的 1.44、1.40、2.34、2.24、2.39 和 1.97 倍。紫花苜蓿产量和水分利用效率随坡度的增加而减少,坡度 5°的紫花苜蓿产量和水分利用效率分别是坡度 10°的 1.28 和 1.41 倍。地表径流流速、径流流动动能、坡面土体不稳定性和雨滴破碎土壤颗粒能量随坡度的增大而增大,降水入渗量、土壤持水力随坡度的增大而减小。坡面土壤重力沿斜坡方向分力随坡度的增加而增加,表层土壤抗蚀性随坡度的增加而降低,降水和径流侵蚀、剥离和搬运土壤营养成分能力随坡度的增加而增加。潘忠成等^[26]研究表明,在坡度 0°~10°内,泥沙、有机氮、铵态氮和硝态氮流失量均随坡度的增大而增大。何淑勤等^[27]研究发现,产流时间随坡度和降水强度的增大而增大,降水入渗量随坡度和降水强度的增大而减少。Wang 等^[28]研究发现,坡度 10°的径流量和泥沙量分别为坡度 5°的 1.42 和 1.67 倍。在土壤因素中,土壤容重、土壤结构、土壤孔隙度、抗蚀性及抗冲性等物理性质明显影响径流、泥沙流失量和营养元素流失量。Fang 等^[29]研究发现径流量和泥沙沉积量随坡度的增加而增加,坡度 20°和 25°的泥沙沉积量比平地分别增加 17.6%和 26.8%。径流冲刷坡耕地表面速度随坡度的增大而增加,较大径流流速可减缓垄上结构结皮形成速度,而加速沟内沉积性结皮形成速度,沟内沉积性结皮可减缓降水和径流入

渗,导致沟内植物根系可利用水分减少,最终引起作物减产和水分利用效率降低。

土壤湿度是水文循环最重要的组成部分,尤其在降水量较少和蒸发量较高的干旱和半干旱地区,土壤湿度是植被盖度、高度、频度、密度、优势种、分布类型等的决定因素。不恰当的农业活动和强烈气候变化导致土壤干燥化、沙化和荒漠化,进而持续增加土壤蒸发量和降低土壤保水能力。土壤湿度是影响土壤退化敏感性和进程的重要因素,尤其风蚀和水蚀^[30-33]。土壤水分时空变化受地形、土壤类型、植被、土地利用方式、田间管理措施等因素的影响和控制。土壤湿度一般采用2种指标衡量,土壤贮水量和土壤剖面含水量。土壤贮水量反映一定深度土层持水力,土壤剖面含水量反映土壤湿度沿土层深度变化趋势。垄沟集雨种植,尤其打结垄沟集雨种植,沿等高线修筑沟垄,增加地表粗糙度和拦蓄径流能力,小强度降水及产生径流在沟内滞留和下渗,从而提高沟内土壤含水量;同时,垄上覆盖材料抑制土壤水分无效蒸发,促进土壤对天然降水资源有效蓄积,改善作物根区土壤水分状况,促进作物干物质积累。Wiyó等^[34]研究表明,打结垄沟集雨种植系统增加粘质土壤的土壤贮水量,但不增加沙质土壤的土壤贮水量。本研究结果表明,与平作相比,开敞垄和打结垄集雨种植紫花苜蓿的全生育期平均根系层(0~200 cm)土壤贮水量分别增加11.4~22.5 mm和18.7~33.3 mm,开敞垄和打结垄集雨种植紫花苜蓿的土壤贮水量随坡度的增加而减少;开敞垄和打结垄沟集雨种植可明显增加浅层(0~60 cm)土壤剖面含水量,而对深层(60~200 cm)土壤剖面含水量影响不明显。Araya等^[35]研究表明,与传统平作相比,打结垄沟集雨种植的土壤含水量可增加13%。

多数研究集中于打结垄沟集雨种植的起垄与作物产量间关系等方面,起垄与作物产量间关系取决于降水量、降水强度、土壤类型、地形、作物类型等^[16,36]。在坡地地表设置开敞垄和打结垄可以有效改变地表微地形,提高天然降水入渗率,限制径流在沟内自由流动,减少土壤颗粒分离和输送,从而控制坡耕地水分流失和土壤侵蚀。垄上覆盖增加土壤水分和表层土壤温度,促进紫花苜蓿生长发育和产量形成;同时,覆盖材料阻止降水击溅集雨垄和径流冲刷集雨垄,保护集雨垄形状完整性。Wiyó等^[37]研究表明,在湿润年(降水量>900 mm),打结垄沟集雨种植引发溃坝效应,减少玉米籽粒产量;在半干旱年(500 mm<降水量<900 mm),打结垄沟集雨种植汇集更多降水,增加玉米籽粒产量;在干旱年(降水量<500 mm),打结垄沟集雨种植汇集降水无法满足玉米生长需求,玉米籽粒产量增加不明显或减少。本研究结果表明,2017年紫花苜蓿全生育期降水量为387.5 mm,紫花苜蓿具有较高抗旱性,开敞垄和打结垄沟集雨种植可增加其干草产量。与传统平作相比,开敞垄和打结垄种植紫花苜蓿全年干草产量分别提高40.3%~50.4%和16.0%~18.7%,水分利用效率分别提高4.4~11.5 kg·hm⁻²·mm⁻¹和2.0~5.3 kg·hm⁻²·mm⁻¹。天然降水具有时空分布间歇性、波动性等特点,打结垄沟集雨种植系统将时空不连续和不稳定降水转化为具有持续供水特性的土壤水库,增加作物可利用水,改善作物立地条件,促进作物生长发育。坡地打结垄沟集雨种植系统具有减少种植区径流、提高土壤水分含量、控制水土流失、减少地表营养元素损失、增加作物产量等优点。Biazin等^[38]研究表明,在埃塞俄比亚等非洲半干旱热带地区,小农户不愿意投资建设打结垄沟集雨种植系统,主要原因是坡地打结垄沟集雨系统需要增加人工投入,且不稳定的降水量和干旱气候无法确保作物每年丰产,进而无法弥补多余人工投入。为更好研究坡地打结垄沟集雨种植在水土保持和作物增产方面的机理,今后研究将集中于降水分配、降水强度、坡度、打结垄排列方式和植被类型对坡地打结垄沟种植径流、泥沙、营养元素、作物产量等方面研究。

4 结论

集雨垄的临界产流降水量随集雨垄坡度的增加而减少,径流效率随集雨垄坡度的增加而增加。开敞垄和打结垄沟集雨种植紫花苜蓿明显增加浅层土壤剖面含水量,而对深层土壤剖面含水量影响不明显,同一小区含水量排列顺序为下坡>中坡>上坡。开敞垄和打结垄沟集雨种植紫花苜蓿能显著降低小区径流量、泥沙流失量和营养元素流失量,同时增加土壤贮水量、紫花苜蓿实际干草产量和水分利用效率。集雨垄径流量、小区径流量、小区径流效率、泥沙流失量和营养元素流失量随坡度的增加而增加,土壤贮水量、紫花苜蓿实际干草产量和水分利用效率随坡度的增加而减少。开敞垄增加紫花苜蓿干草产量效果最为明显,而打结垄水土保持效果最为明显。

参考文献 References:

- [1] Lü J L, Yan M J, Song B L, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in an oak forest and a black locust plantation in the Loess hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3385—3393.
吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 等. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(10): 3385—3393.
- [2] Ren X, Wang Q, Zhang E H, *et al.* Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on oat grain/hay yield and water use efficiency under rainwater harvesting cultivation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 945—954.
任祥, 王琦, 张恩和, 等. 覆盖材料和沟垄比对燕麦产量和水分利用效率的影响. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 945—954.
- [3] Gao J L, Zhang J G, Zhu L L, *et al.* Change characteristics of key measures of soil and water conservation in hill-gully region of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 114—118.
高健翎, 张建国, 朱莉莉, 等. 黄土丘陵沟壑区水土保持关键措施变化特征. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 114—118.
- [4] Ma L, Huang S Z, Huang Q, *et al.* Causes analyzing of the change of rainfall and rainfall erosivity in Weihe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 174—181.
马岚, 黄生志, 黄强, 等. 渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 174—181.
- [5] Wang Z H, Zhang F B, Yang M Y, *et al.* Effect of vegetation utilization on runoff and sediment production on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 19—28.
王子豪, 张凤宝, 杨明义, 等. 水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用对产流产沙的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 19—28.
- [6] Zhao H, Wang R Y, Ma B L, *et al.* Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem. *Field Crops Research*, 2014, 161(2): 137—148.
- [7] Jia Y, Xu B C, Wang X L, *et al.* Effect of ridge and furrow micro-catchment on soil water in seeded *Medicago sativa* grassland in the semiarid loess hill and gully region of Northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 470—475.
贾宇, 徐炳成, 王晓凌, 等. 半干旱黄土丘陵区垄沟集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 470—475.
- [8] Al-Seekh S H, Mohammad A G. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 37—45.
- [9] Brhane G, Wortmann C S, Mamo M, *et al.* Micro-basin tillage for grain sorghum production in semiarid areas of Northern Ethiopia. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 124—128.
- [10] Nuti R C, Lamb M C, Sorensen R B, *et al.* Agronomic and economic response to furrow diking tillage in irrigated and non-irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1078—1084.
- [11] Bai Y J, Zhang F B, Yang M Y, *et al.* Variation of hydraulic parameters of shallow flow on steep Loess Slope. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 118—126.
白玉洁, 张凤宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面薄层水流水力参数变化特征. *土壤学报*, 2018, 55(3): 118—126.
- [12] Xue X X, Wu X P, Wang W B, *et al.* Effects of varying slopes and depths on decomposition and infrared spectrum characteristics of leaf litter in a rubber forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 121—130.
薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 坡度和埋深对橡胶林凋落叶分解及红外光谱特征的影响. *生态学报*, 2019, 39(3): 121—130.
- [13] Grum B, Assefa D, Hessel R, *et al.* Effect of in situ water harvesting techniques on soil and nutrient losses in semi-arid Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(3): 1016—1027.
- [14] Zhao L B, Zhang B G. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 7—12.
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. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 7—12.
- [15] Peng L Q, Li X Y, Qi X, *et al.* The relationship of root traits with persistence and biomass in 10 alfalfa varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 147—153.
彭岚清, 李欣勇, 齐晓, 等. 紫花苜蓿品种根部特性与持久性和生物量的关系. *草业学报*, 2014, 23(2): 147—153.
- [16] Hailemariam A D. A review on: Effect of tie ridging on crop productivity in dry land agro-ecosystems of Ethiopia. *Agriculture and Healthcare*, 2016, 6(5): 1—6.
- [17] Liu X F, Zhang F, Zhang B L, *et al.* Characteristics of runoff and sediment yield of vegetation measures on slope farmland in Anjiagou watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4): 17—20.
刘雪峰, 张富, 张伯林, 等. 安家沟流域不同植物措施坡耕地的产流产沙特征. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 17—20.

- [18] Li F C, Wang Q, Zhang D K, *et al.* Effects of tied-ridging rainwater harvesting on soil erosion, alfalfa fodder yield and water use efficiency on slope lands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 147–156.
李富春, 王琦, 张登奎, 等. 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. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 147–156.
- [19] Guo X X, Lü C J, Chen D, *et al.* Effects of rainfall intensities and slope gradients on runoff and sediment yield on bare iron tailings sand slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 23–29.
郭星星, 吕春娟, 陈丹, 等. 降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 23–29.
- [20] Baechle B, Davis A S, Pittelkow C M. Potential nitrogen losses in relation to spatially distinct soil management history and biochar addition. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(1): 62–69.
- [21] Schiettecatte W, Ouessar M, Gabriels D, *et al.* Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: A case study on a micro catchment in southeastern Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(2): 297–313.
- [22] Li J, Han J C, Chen C, *et al.* Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 248–253.
李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248–253.
- [23] Ma J Y, Li Z B, Ma B, *et al.* Soil water characteristics under different vegetation recovery modes in hilly and gully region of the Loess Plateau: A case study of the Qiaozigou watershed. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 8–15.
马建业, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵区不同植被恢复方式下土壤水分特征—以桥子沟流域为例. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 8–15.
- [24] Zhang H, Chen J, Xiong P F, *et al.* Soil respiration response to simulated rainfall pulses in natural grassland communities in loess hilly-gully region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 3139–3148.
张鹤, 陈吉, 熊沛枫, 等. 黄土丘陵区 3 种典型天然草地群落土壤呼吸对模拟降雨的响应. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 3139–3148.
- [25] Yang F K, He B L, Zhang G P, *et al.* Impacts of different soil fertility improvement practices with film mulched ridge-furrow tillage on soil nutrient content, maize yield, and water use efficiency in Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 893–905.
杨封科, 何宝林, 张国平, 等. 土壤培肥与覆膜垄作对土壤养分、玉米产量和水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 893–905.
- [26] Pan Z C, Yuan X, Li M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 9–13.
潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 9–13.
- [27] He S Q, Gong Y B, Wu W H, *et al.* Characteristics of runoff and dissolved organic carbon loss in purple soil with different slope during gradients during maize growth stages. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 93–99.
何淑勤, 宫渊波, 武万华, 等. 不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 93–99.
- [28] Wang L H, Dalabay N, Lu P, *et al.* Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 2016, 166: 147–156.
- [29] Fang H Y, Sun L Y, Tang Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils. *Hydrological Processes*, 2015, 29(11): 2649–2658.
- [30] Yuan D H, Wang Z Q, Guo X B, *et al.* Properties of soil and water loss and organic carbon loss from small watershed under different land use patterns in red soil area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 24–28.
袁东海, 王兆骞, 郭新波, 等. 红壤小流域不同利用方式水土流失和有机碳流失特征研究. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 24–28.
- [31] Wang Y F, Xiao B, Wang B, *et al.* Effects of moss-dominated biological soil crusts on soil enzyme activities in water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3553–3561.
王彦峰, 肖波, 王兵, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮对土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3553–3561.
- [32] Wei H, Zhao W W, Wang J. Research progress on soil erodibility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2749–2759.
魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2749–2759.
- [33] Han X S, Wang Y H, Yu P T, *et al.* Temporal and spatial variation and influencing factors of soil moisture in *Larix principis-rupprechtii* plantation in semiarid Liupan Mountains, Northwest China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,

33(1): 111—117.

韩新生, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素. 水土保持学报, 2019, 33(1): 111—117.

- [34] Wiyo K A, Kasomekera Z M, Feyen J. Effect of tied-ridging on soil water status of a maize crop under Malawi conditions. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(2): 101—125.
- [35] Araya A, Stroosnijder L. Effects of tied ridges and mulch on barley (*Hordeum vulgare*) rainwater use efficiency and production in Northern Ethiopia. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 841—847.
- [36] Mesfin T, Tesfahunegn G B, Wortmann C S, *et al.* Skip-row planting and tie-ridging for sorghum production in semiarid areas of Ethiopia. *Semigroup Forum*, 2010, 102(2): 745—750.
- [37] Wiyo K A, Feyen J. Assessment of the effect of tie-ridging on smallholder maize yields in Malawi. *Agricultural Water Management*, 1999, 41(1): 21—39.
- [38] Biazin B, Sterk G. Drought vulnerability drives land-use and land cover changes in the Rift Valley dry lands of Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164(1): 100—113.