中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

生物炭覆盖垄沟集雨种植对集雨垄径流、土壤水热和红豆草产量的影响

张登奎， 王琦， 周旭姣， 王小赟， 赵晓乐， 赵武成， 雷俊

引用本文:
张登奎, 王琦, 周旭姣, 等. 生物炭覆盖垄沟集雨种植对集雨垄径流、土壤水热和红豆草产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 272−285.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190707

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响

Effects of furrow−mulching materials on soil temperature, crop yield and water use efficiency in ridge−furrow rainwater harvesting systems

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 590−599 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151064

旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应

Yield−increase effect of film−mulching and planting pattern on dryland spring maize

中国生态农业学报. 2018, 26(1): 75−82 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170236

半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响

Effect of straw strip covering on ridges on soil water content and potato yield under rain−fed semiarid conditions

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 874−882 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151371

陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究

Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province

中国生态农业学报. 2017, 25(5): 749−758 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160758

起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展

Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge−furrow cultivation with plastic film mulching

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1364−1374 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190153

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190707

张登奎, 王琦, 周旭姣, 王小赟, 赵晓乐, 赵武成, 雷俊. 生物炭覆盖垄沟集雨种植对集雨垄径流、土壤水热和红豆草产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 272−285

ZHANG D K, WANG Q, ZHOU X J, WANG X Y, ZHAO X L, ZHAO W C, LEI J. Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with biochar-soil crust mulching on ridge runoff, soil hydrothermal properties, and sainfoin yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 272−285

生物炭覆盖垄沟集雨种植对集雨垄径流、土壤水热和红豆草产量的影响*

张登奎[1], 王 琦[1**], 周旭姣[1], 王小赟[1], 赵晓乐[1], 赵武成[1], 雷 俊[2]

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室 兰州 730070; 2. 甘肃省定西市气象局 定西 744300)

摘 要: 为探索半干旱黄土高原区垄沟集雨种植的可持续性, 寻求垄沟集雨种植红豆草的适宜生物炭覆盖类型和最佳垄宽, 采用随机区组大田试验, 以传统平作为对照, 研究不同集雨垄覆盖材料[土壤结皮(土垄)、玉米秸秆炭土壤结皮(玉米秸秆垄)和牛粪炭土壤结皮(牛粪炭垄)]和不同垄宽(30 cm、45 cm 和 60 cm, 沟宽均为 60 cm)对径流系数、土壤水热、红豆草干草产量和水分利用效率的影响。结果表明: 土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的平均径流系数分别为 29.7%、26.2%和 25.1%。垄沟集雨种植增加根系层土壤含水量和垄上表层土壤温度, 缓和沟中表层土壤温度极值, 尤其生物炭覆盖垄沟集雨种植。与传统平作相比, 土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的土壤含水量分别增加 25.1 mm、24.7 mm 和 19.4 mm, 垄上表层土壤温度分别增加 1.4 ℃、2.0 ℃和 2.0 ℃。同一覆盖材料下, 集雨垄径流系数、土壤贮水量和表层土壤温度均随垄宽增加而增加。与传统平作相比, 土垄显著降低实际干草产量, 玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄显著增加实际干草产量, 垄宽 30 cm、45 cm 和 60 cm 土垄的干草产量分别减少 6.5%、12.1%和 13.8%, 玉米秸秆炭垄的干草产量分别增加 19.7%、24.4%和 22.5%, 牛粪炭垄的干草产量分别增加 8.0%、8.9%和 6.8%。玉米秸秆炭和牛粪炭覆盖种植显著提高水分利用效率。与传统平作相比, 玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的水分利用效率分别提高 6.8~9.7 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 4.4~4.8 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。玉米秸秆炭垄的实际干草产量和水分利用效率显著高于牛粪炭垄; 同一覆盖材料下, 不同垄宽对实际干草产量和水分利用效率的影响不显著。线性回归分析表明, 当玉米秸秆炭垄宽 49 cm (沟宽为 60 cm)与牛粪炭垄宽为 41 cm (沟宽为 60 cm)时, 红豆草的实际干草产量均达到最大值。因此, 在半干旱地区, 生物炭覆盖垄沟集雨种植红豆草具有较好的增产效益, 尤其秸秆生物炭覆盖种植。

关键词: 垄沟集雨; 红豆草; 生物炭覆盖; 土壤结皮; 径流系数; 干草产量; 水分利用效率

中图分类号: S-3; S27; S541+4 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of ridge-furrow rainwater harvesting with biochar-soil crust mulching on ridge runoff, soil hydrothermal properties, and sainfoin yield*

ZHANG Dengkui[1], WANG Qi[1**], ZHOU Xujiao[1], WANG Xiaoyun[1], ZHAO Xiaole[1], ZHAO Wucheng[1], LEI Jun[2]

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China; 2. Dingxi Meteorological Administration, Dingxi 744300, China)

* 国家自然科学基金项目(41661059, 41461062)资助

** 通信作者: 王琦, 主要从事旱区节水研究。E-mail: wangqigsau@gmail.com
张登奎, 主要从事旱区节水和牧草栽培研究。E-mail: 2605867938@qq.com

收稿日期: 2019-09-28 接受日期: 2019-11-15

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41661059, 41461062).

** Corresponding author, E-mail: wangqigsau@gmail.com

Received Sep. 28, 2019; accepted Nov. 15, 2019

Abstract: Ridge-furrow rainwater harvesting (RFRH) with mulch offers farmers a means to address drought, water loss, and soil erosion in arid and semiarid regions. The purpose of this study was to determine a suitable biochar type and optimum ridge width for sainfoin (*Onobrychis viciaefolia* Scop.) production using the RFRH system with biochar application in the semi-arid regions in China. A field experiment with a completely random block design was conducted during the 2017 sainfoin growing season to (1) estimate runoff coefficient of the RFRH system with three ridge widths (30, 45, and 60 cm) and the same narrow width (60 cm), and mulched with three materials (soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust) and (2) assess the effects of three ridge widths and three mulching materials on soil water storage, topsoil temperature, as well as fodder yield and water use efficiency (WUE) of the RFRH system planted with sainfoin, and a traditional flat planting (FP) system was used as the control. The results showed that the predicted runoff coefficient for ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust (MCS, MSB, and CMB, respectively) was 29.7%, 26.2%, and 25.1%, respectively, whereas the threshold rainfall to produce runoff was 4.2, 4.6, and 5.1 mm, respectively. The runoff coefficient of ridge, soil water storage, and soil temperature increased with increase in ridge width using the same mulching materials. The RFRH system, especially MSB and CMB treatments, increased soil water storage of the root layer and ridge topsoil (0–25 cm) temperature, and decreased the rate of change of furrow top soil (0–25 cm) temperature. Compared with that of FP, the mean soil water storage (0–200 cm) increased by 25.1, 24.7, and 19.4 mm, on an average, under MCS, MSB, and CMB throughout the sainfoin growth period, respectively; whereas the topsoil temperature increased by 1.4 ℃, 2.0 ℃, and 2.0 ℃, respectively, on an average. For the same mulching material, soil water storage and topsoil temperature increased with increase in ridge width. MCS significantly decreased the actual fodder yield of sainfoin, but MSB and CMB significantly increased the actual fodder yield. Compared with that under FP treatment, the actual fodder yield under MCS with 30, 45, and 60 cm ridge width decreased by 6.5%, 12.1%, and 13.8%, respectively. Whereas, the actual fodder yield under MSB with 30, 45, and 60 cm ridge width increased by 19.7%, 24.4%, and 22.5%, and that under CMB increased by 8.0%, 8.9%, and 6.8%, respectively. MSB and CMB significantly increased WUE of sainfoin. Compared with FP, MSB and CMB increased WUE by 6.8–9.7 and 4.4–4.8 kg·hm^{-2}·mm^{-1}, respectively. The ridge width had no significant effect on the actual fodder yield and WUE with the same mulching materials. When the ridge width (furrow width was 60 cm) was 49 cm for MSB and 41 cm for CMB, the forage yield reached the maximum. The actual fodder yield and WUE of sainfoin under MSB were significantly higher than those under CMB, which were significantly higher than those under MCS. In summary, RFRH with biochar-soil crust mulching has beneficial effects on soil water storage and yield of sainfoin in the region, especially ridges with maize straw biochar-soil crust mulching.

Keywords: Ridge-furrow rainwater harvesting; Sainfoin (*Onobrychis viciaefolia* Scop.); Biochar mulching; Soil crust; Runoff coefficient; Fodder yield; Water use efficiency

中国西北半干旱地区水资源短缺, 年均降雨少(250~550 mm)且变率大, 年潜在蒸发量较高(1 554 mm)[1], 较低的降雨和较高的蒸发导致土壤水年内和年际间不平衡, 降低土壤蓄水能力, 加剧土壤干化风险[2]。频繁的干旱和不合理的土地利用导致自然资源过度消耗和生态环境持续恶化, 加剧土地退化风险, 威胁该地区粮食安全生产和农业经济可持续发展[3]。近些年, 为充分利用降水资源、减缓土地承受压力和农田土壤侵蚀, 当地农民采取免耕、梯田耕作、地膜覆盖耕作、秸秆覆盖耕作、垄沟耕作等保护性耕作技术[4-5]。垄沟覆盖耕作能有效抑制土壤水分蒸发, 提高土壤蓄水和抗旱能力, 是半干旱地区发展可持续旱地农业较佳的耕作栽培方法之一[6]。

垄沟集雨种植通过地表微地形改造技术, 沿等高线设置交替的垄和沟, 将垄面上的雨水汇流入沟内, 实现降水在沟内叠加, 从而提高天然降水利用效率。垄沟集雨种植常结合各种覆盖技术, 实现保墒蓄墒、就地入渗和雨水收集等效果[7]。在半干旱地区, 垄沟集雨种植覆盖材料多采用普通地膜, 以维持土壤结构, 提高土壤温度, 促进雨水叠加入渗, 保持土壤水分, 抑制土壤水分蒸发, 提高作物产量和水肥利用效率[8-10]。然而, 长期地膜覆盖易造成地膜残留, 破坏土壤结构, 限制作物的出苗、生长和发育, 造成白色污染等环境负效应, 不利于生态环境可持续发展[11-12]。近年来, 许多地膜研究工作者对生物质降解农膜进行田间应用效应研究, 获得较好的环保效应, 但大多生物农膜因其拉伸强度较低, 寿命较短和生产成本较高, 大面积推广应用较难[13]。寻求新型生物质覆盖材料, 改进和优化生物农膜性能, 降低农业生产成本, 提高农业生产经济效益和生态效益, 成为半干旱区垄沟集雨覆盖种植系统中急需解决的问题。

生物炭是秸秆、木屑、粪便和其他农林有机废弃物为原材料, 在缺氧或无氧条件下, 高温(<700 ℃)裂解产生的一类含炭量丰富、结构高度多孔和性质稳定的生物质材料[14]。生物炭作为土壤改良剂, 在减缓土壤温室气体排放、修复农田土壤污染物、保

持土壤水分养分、增加土壤微生物数量和提高作物生产力等方面具有较大的潜力[15]。生物炭还田有利于改善土壤结构, 增加降雨入渗深度, 减少地表径流和土壤侵蚀, 提高土壤保水和保肥能力[16]。Lehmann 等[17]研究表明, 土壤中施加 10%的生物炭以促进农作物生长, 显著增加豇豆[*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]产量。此外, 与其他生物质材料相比, 生物炭稳定的力学特性可以有效延长土壤水分封存时间[18]; Rosenani 等[19]研究发现土壤施加榈生物炭显著增强土壤持水能力, 从而增加苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)和玉米(*Zea mays* L.)的产量。近年来, 人们对通过改进作物栽培方法以抵抗干旱、土壤盐碱化或其他形式的土壤退化方面较有兴趣。由于生物炭的力学稳定性和抗逆性, 生物炭覆盖结合垄沟集雨种植技术, 对旱区节水和维持农业生产稳定性等具有积极影响[20]。

生物炭覆盖垄沟集雨种植技术结合传统垄沟集雨种植和生物炭覆盖技术, 将一定量生物炭与湿土混合物均匀撒施人工起垄表面, 经过人工木板拍打和雨水冲击形成生物炭土壤结皮, 生物炭土壤结皮作为垄覆盖材料, 优化现有生物质覆盖材料性能, 对退化土壤生态系统产生积极的影响。近些年国内外关于生物炭的研究大部分停留于实验室(土柱或盆栽试验)阶段, 主要研究生物炭对土壤重金属吸附和土壤改良等方面[21-22]。目前将生物炭作为覆盖材料应用于大田试验研究较少, 尤其在垄沟集雨覆盖种植技术中。本试验研究不同生物炭覆盖材料和沟垄比对集雨垄径流系数、红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop.)产量和水分利用效率等影响, 为半干旱区抗旱牧草栽培和垄沟集雨种植提供新思路。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 试验区概况

2017 年 4—10 月在中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象与生态环境试验基地(35º33′N, 104º35′E, 海拔 1 896.7 m)布置大田试验。该基地位于甘肃省定西市西川农业科技园, 大陆性季风气候明显, 光能较多, 热量资源不足, 降水少且随季节变化大, 气候干燥, 气象灾害频繁, 属典型的干旱半干旱地区。试验区年极端最高和最低气温分别为 34.3 ℃和–27.1 ℃, 年平均气温为 6.7 ℃, 年均降雨量 386 mm, 年平均蒸发量(1 545 mm)远大于年均降雨量, 年平均无霜期为 140 d。试验地表层土壤为重壤土, 田间持水量和作物凋萎系数分别为 25.6%和 6.7%, 0~200 cm 土层平均土壤容重为 1.38 g·cm^{-3}。试验区表层土壤(0~40 cm)全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾和有机质平均含量分别为 0.78 g·kg^{-1}、0.77 g·kg^{-1}、23.59 g·kg^{-1}、54.3 mg·kg^{-1}、10.87 mg·kg^{-1}、245 mg·kg^{-1} 和 10.51 g·kg^{-1}, 土壤 pH 7.9。

1.2 试验设计

1.2.1 生物炭覆盖集雨垄红豆草种植试验

试验以‘甘肃红豆草’(*Onobrychis viciaefolia* Scop. *Gansu*)为指示作物, 采用随机区组设计, 设 10 个处理: 3 种垄面覆盖材料[土壤结皮(土垄; ridges with manually compacted soil, MCS)、玉米秸秆炭土壤结皮(玉米秸秆炭垄; ridges with maize straw biochar-soil crust, MSB)和牛粪炭土壤结皮(牛粪炭垄; ridges with cow dung biochar-soil curst, CMB)]×3 种垄宽(30 cm、45 cm 和 60 cm, 沟宽均为 60 cm)+1 种传统平作(traditional flat planting, FP), 沟中无覆盖作为种植区(表 1)。小区随机排列, 重复 3 次。集雨垄形状为半球形, 每小区设置 4 条垄和 3 条沟, 试验种植示意图见图 1, 浙江省生物炭工程技术研究中心提供玉米秸秆炭和牛粪炭。

1.2.2 生物炭覆盖集雨垄径流试验

生物炭覆盖集雨垄径流试验区距红豆草种植试验区约 3~5 m(图 2)。径流试验采用随机区组设计, 共设 9 个处理[3 种覆盖材料(土壤结皮、玉米秸秆炭

表 1 不同材料覆盖垄沟集雨种植红豆草试验设计

Table 1 Experimental design for sainfoin production of ridge-furrow rainwater harvesting with different mulching materials

处理 Treatment	垄宽 Ridge width (cm)	沟宽 Furrow width (cm)	垄面积 Ridge area (m^2)	沟面积 Furrow area (m^2)	小区面积 Plot area (m^2)	垄覆盖材料 Ridge mulching materials
FP	—	—	—	—	36	平作无覆盖 Flat planting without mulching
MCS_{30}	30	60	12	18	30	土壤结皮 Soil crust
MCS_{45}	45	60	18	18	36	
MCS_{60}	60	60	24	18	42	
MSB_{30}	30	60	12	18	30	玉米秸秆炭土壤结皮 Maize straw biochar-soil crust
MSB_{45}	45	60	18	18	36	
MSB_{60}	60	60	24	18	42	
CMB_{30}	30	60	12	18	30	牛粪炭土壤结皮 Cow dung biochar-soil crust
CMB_{45}	45	60	18	18	36	
CMB_{60}	60	60	24	18	42	

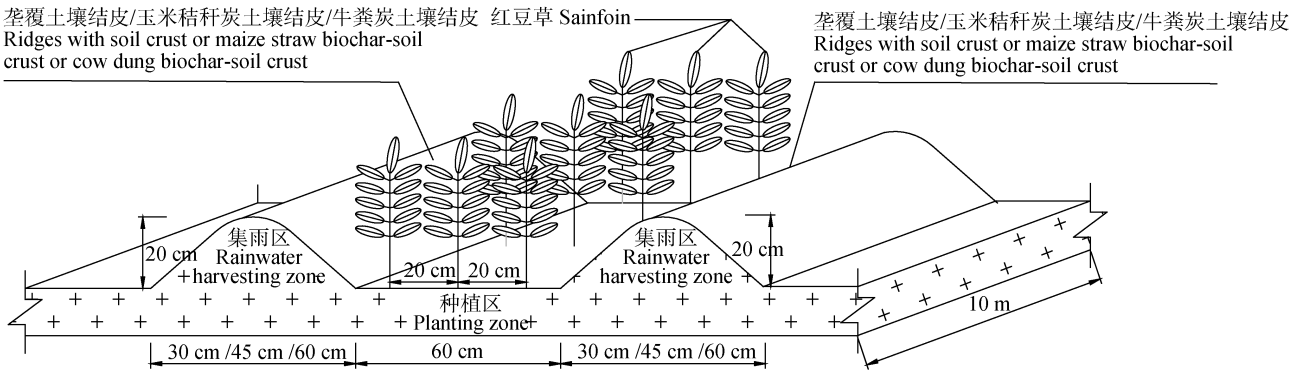

图 1　生物炭覆盖垄沟集雨种植示意图

Fig. 1　Schematic diagram of ridge-furrow rainwater harvesting with biochar-soil crust mulching of sainfoin planting

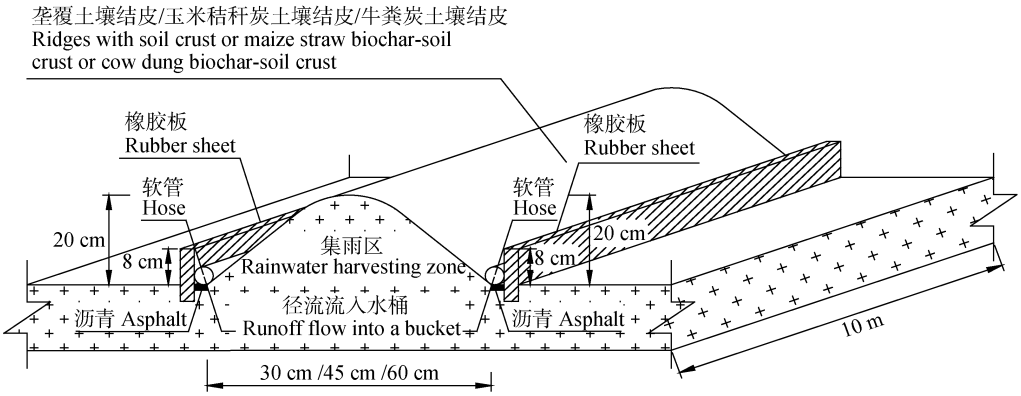

图 2　生物炭覆盖集雨垄径流观测示意图

Fig. 2　Schematic diagram of runoff measurement of ridge-furrow rainwater harvesting system with biochar-soil crust mulching

土壤结皮和牛粪炭土壤结皮)×3 种垄宽(30 cm、45 cm 和 60 cm)], 重复 3 次。根据当地种植经验, 标准集雨垄沿等高线修筑, 垄高为 20 cm, 垄长为 10 m。为便于收集径流, 垄纵向倾斜 0.2º~0.5º。径流试验集雨垄四周用高出地面 8 cm 预制板围起, 垄坡脚两边的沟槽内铺设沥青, 防止集雨垄收集降雨外溅、下渗和侧渗。两垄之间设置 1.5 m 隔离区。在集雨垄纵向较低一端开挖 1 m 深的田间沟槽, 沟槽内放置盖子带有 2 个小孔的 100 L 塑料桶, 用以收集集雨垄径流。每次降雨结束后, 测定降雨量和塑料桶中径流量, 并清理塑料桶便于下次径流收集。

1.3　种植管理

2017 年 3 月 28 日开始整地、人工划分小区和修筑垄沟。用原地湿土修筑集雨垄, 采用人工木板拍实土垄, 自然形成土壤结皮; 根据集雨垄面积, 牛粪炭或玉米秸秆炭施加量均为 3×10^4 kg·hm^{-2}, 牛粪炭或玉米秸秆炭与湿土体积混合比约为 1∶1, 生物炭与湿土混合物均匀撒施集雨垄表面, 采用人工木板拍实生物炭与湿土混合物, 拍实后的炭土混合物覆盖厚度为 1~1.5 cm, 经过降雨形成生物炭土壤结皮, 于 2017 年 4 月 5 日完成垄沟集雨布置和垄上覆盖生物炭等工作。根据当地红豆草种植经验, 播种时不施加基肥。2017 年 4 月 11 日条播播种红豆草, 播种量为 100 kg·hm^{-2}, 播种深度为 2~3 cm, 播种行距为 20 cm。对于垄沟集雨种植处理, 每小区设置 4 条垄和 3 条沟, 每条垄长为 10 m, 每条沟面积为 10 m(长)× 0.6 m(宽), 每条沟种植 3 行红豆草; 对于传统平作处理不设置垄沟, 种植面积为 10 m(长)× 3.6 m(宽), 每小区种植 18 行红豆草。2017 年手工刈割红豆草 2 次(2017 年 7 月 14 日和 10 月 11 日), 在红豆草全生育期(4 月 23 日—10 月 20 日)不施肥和不灌溉, 于 6 月 20 日和 9 月 6 日采用人工清除杂草。

1.4　样品采集和测定

降雨量数据由中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地自动气象站测定, 自动气象站距试验地 50~100 m。每次降雨后立即测定径流观测试验塑料桶中的水重, 称重后将桶内清理干净, 便于下次径流收集。

径流系数[23]按下式计算:

$$R_e = \frac{R}{P} \tag{1}$$

式中: R_e为径流系数, R为径流深度(mm), P为同期降水深度(mm)。

在红豆草播种前 1 d、刈割后 1 d 和降雨(降雨量

> 5 mm)后 1 d, 采用烘干法(105 ℃, 10 h)测定土壤含水量。土壤含水量测定深度 200 cm, 0~20 cm 土层按深度每 10 cm 分层, 20~200 cm 土层按深度每 20 cm 分层; 采集土样时, 在每小区种植区内(沟中)随机选取 3 个样点, 将 3 个样点同一土层段的土样均匀混合后装入铝盒后进行测定。

土壤贮水量(mm)、蒸散量 (ET, mm)和水分利用效率(WUE, kg·hm^{-2}·mm^{-1})计算公式[24]:

$$W=\sum_{i=1}^{11}\theta_i\times D_{Bi}\times H\times 10 \quad (2)$$

$$\mathrm{ET}=P+(W_1-W_2) \quad (3)$$

$$\mathrm{WUE}=\frac{\mathrm{AFY}}{\mathrm{ET}} \quad (4)$$

式中: W 为土壤贮水量(mm), θ 为土壤质量含水量(%), D_{Bi} 为土壤容量(g·cm^{-3}), H 为土壤深度(cm), 10 为系数。ET 为红豆草全生育期蒸散量(mm), P 为红豆草全生育期降水量(mm), W_1 和 W_2 分别为红豆草播种前 1 d 和最后 1 次刈割后 1 d 测定 0~200 cm 土壤深度的土壤贮水量(mm), AFY 为实际干草产量(kg·hm^{-2})。

采用曲管水银地温计(河北省武强县红星仪表厂制造)测定各处理的沟中和垄上不同深度(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 和 25 cm)土壤温度, 每个小区的沟中和垄上各设 1 套曲管水银地温计。红豆草生育期内, 每隔 5 d 测定 1 次垄上和沟中表层(0~25 cm)土壤温度, 测定时间为 8:00、14:00 和 18:00, 3 次测定的土壤温度平均值作为日平均土壤温度。测定当天若降雨, 测定时间向后顺延 1 d。

红豆草盛花期(2017 年 7 月 14 日)和停止生长期(2017 年 10 月 11 日), 手工刈割各区种植区内红豆草, 留茬高度为 2~3 cm。刈割后的红豆草平摊于垄上, 自然风干后测定干草产量。红豆草干草产量采用净干草产量(NFY, kg·hm^{-2})和实际干草产量(AFY, kg·hm^{-2})2 种方法表示。净干草产量是仅基于各小区内种植区(沟)总面积的产量; 实际干草产量是基于各小区(垄+沟)总面积的产量。传统平作的种植区面积等于小区面积, 所以传统平作的净干草产量与实际干草产量相等。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据统计, SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行回归分析、方差分析和显著性检验; 回归模型中自相关性检验通过德宾-沃森(Durbin-Watson)检验来完成, 方差分析和显著性检验采用 Tukey's-b 法(α=0.05), 采用 CAD 和 Excel 2016 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 试验期间降雨、径流特征和生物炭覆盖垄的集雨效率

降雨量和径流量是反映降雨和径流特征的主要参数。2017 年红豆草全生育期降雨和集雨垄平均径流分布如图 3 所示。2017 年试验区年降雨量为 402.9 mm, 红豆草全生育期降雨量为 359.6 mm。2017 年红豆草全生育期共发生降雨 73 次, 其中单次降雨量<5 mm、5~15 mm、15~30 mm 和>30 mm 的降雨次数分别占红豆草全生育期总降雨次数的 69.9%、27.8%、10.9%和 1.4%, 相同等级降雨量总和分别占红豆草全生育期总降雨量的 12.9%、35.2%、40.0%和 11.9%。2017 年红豆草全生育期共产生径流 20 次, 其中单次降雨量< 5 mm、5~15 mm、15~30 mm 和>30 mm 径流发生次数分别占同等级降雨次数的 0、92.3%、100.0%和 100.0%。当单次降雨量<5 mm 时, 集雨垄基本无法观测到径流; 集雨垄径流分布主要取决于>5 mm 的降雨分布。

采用线性回归方法对集雨垄径流量与同时段降雨量的线性关系进行模拟(图 4), 并对模拟结果综合分析和验证(表 2)。德宾-沃森(Durbin-Watson, DW)值检验残差中是否存在自相关。由表 2 可知, MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45} 和 CMB_{60} 的 DW 统计量都符合 du<DW<4−du

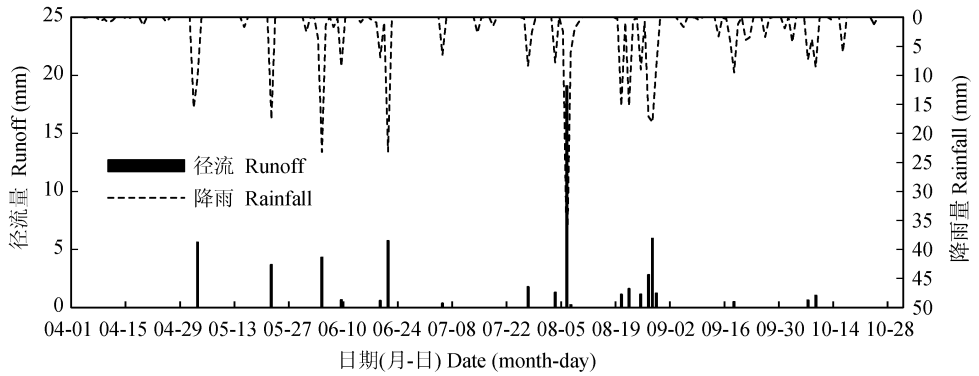

图 3 2017 年红豆草生育期降雨和径流特征

Fig. 3 Characteristics of rainfall and runoff during the growth stage of sainfoin in 2017

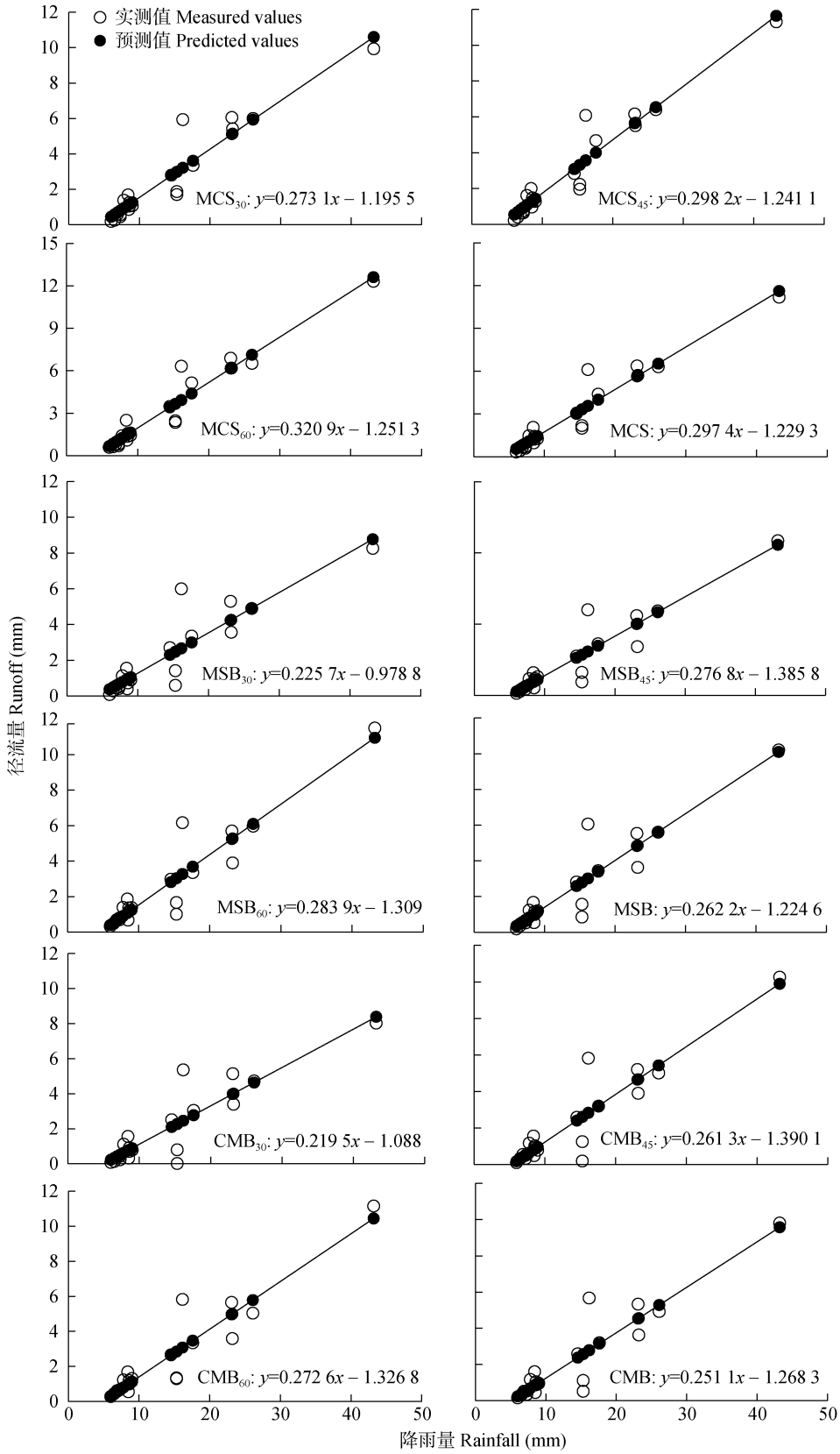

图 4　红豆草生育期内生物炭覆盖垄径流量与降雨量的关系

Fig. 4　Relationship between rainfall and runoff of ridges mulched with soil crust and different biochar-soil crusts during sainfoin growth season

MCS、MSB 和 CMB 分别表示土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄。下标数字表示垄宽，单位为 cm。MCS, MSB and CMB are ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust, respectively; their subscripts 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm.

表 2 红豆草生育期生物炭覆盖集雨垄的径流量与降雨量回归模型综合分析

Table 2 Analysis of regression models between rainfall and runoff of ridges mulched with soil crust and different biochar-soil crust during sainfoin growth season

处理 Treatment	R	R^2	德宾-沃森值 Durbin-Watson value (DW)	df	均方 Mean square	P
MCS_{30}	0.953	0.905	1.720	1	121.8	0.000
MCS_{45}	0.965	0.926	1.712	1	145.2	0.000
MCS_{60}	0.970	0.933	1.708	1	168.2	0.000
MSB_{30}	0.902	0.814	1.595	1	83.1	0.000
MSB_{45}	0.936	0.876	1.558	1	125.0	0.000
MSB_{60}	0.938	0.880	1.489	1	131.4	0.000
CMB_{30}	0.896	0.803	1.447	1	78.6	0.000
CMB_{45}	0.924	0.855	1.422	1	105.9	0.000
CMB_{60}	0.937	0.879	1.467	1	121.2	0.000
平均 Mean						
MCS	0.962	0.925	1.673	1	144.3	0.000
MSB	0.930	0.864	1.509	1	112.1	0.000
CMB	0.925	0.855	1.428	1	102.9	0.000

MCS、MSB 和 CMB 分别表示土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄; 下标数字表示垄宽, 单位为 cm。$|R|\rightarrow 1$ 表明两个变量线性相关性越强。德宾-沃森值(DW)检验因变量取值是否独立, 若 0<DW<dl 或 4–dl<DW<4, 则因变量之间存在自相关, 若 du<DW<4–du, 则因变量之间不存在自相关($dl_{20,\ 1}$=1.201 和 $du_{20,\ 1}$=1.411)。MCS, MSB and CMB are ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust, respectively; their subscripts 30, 45 and 60 refer to the ridge width in cm. $|R|\rightarrow 1$ indicates a stronger linear correlation between the independent and dependent variables. The Durbin-Watson statistic is a test statistic used to detect the presence of autocorrelation at the prediction errors from a regression analysis. If du < DW < 4–du, the error terms are not statistically autocorrelated; if 0 < DW < dl or 4–dl < DW < 4, the error terms are statistically autocorrelated ($dl_{20,\ 1}$ = 1.201, $du_{20,\ 1}$ = 1.411)。

($du_{20,1}$=1.411), 表明各处理径流量(因变量)取值具有独立性。由表 2 可知, 各集雨垄径流量-降雨量回归模型 R 值都接近 1, 表明各集雨垄的径流量与降雨量之间有较强线性相关性。根据回归模型检验结果的 P 值均小于 0.05, 表明各集雨垄径流量-降雨量回归模型具有统计学意义。

临界产流降雨量和径流系数是垄沟集雨种植系统设计的重要参数。通过对次降雨量和次径流量建立线性关系, 确定临界产流降雨量和产流后的集水效率(径流系数)。由图 4 可知, 线性回归方程 x 轴截距为集雨垄的临界产流降雨量, 线性回归方程斜率为集雨垄产流后的径流系数。MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45} 和 CMB_{60} 临界产流降雨量分别为 4.41 mm、4.16 mm、3.90 mm、4.37 mm、5.01 mm、4.61 mm、4.96 mm、5.32 mm 和 4.87 mm, 平均径流系数分别为 27.13%、29.82%、32.09%、22.57%、27.68%、28.39%、21.95%、26.13% 和 27.26%。同一覆盖材料下, 垄的集雨效率排列次序为垄宽 60 cm>45 cm>30 cm; 不同覆盖材料下, 垄的集雨效率表现为土垄>玉米秸秆炭垄>牛粪炭垄。土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的临界产流降雨量分别为 4.13 mm、4.67 mm 和 5.05 mm, 平均径流系数分别为 29.74%、26.22%和 25.11%。

2.2 生物炭覆盖垄沟集雨种植对土壤贮水量的影响

从图 5 可以看出, 在红豆草全生育期, 各处理 0~200 cm 土壤贮水量总体呈现先减少后增加的趋势。在红豆草播种前(2017 年 4 月 4 日), 该期气温较低, 降雨量较少, 土壤水分损失主要来自土壤蒸发, 各处理土壤贮水量较高, 且处理间差异不明显。在红豆草旺盛生长阶段(2017 年 5—6 月), 红豆草生长对水分的需求较大, 阶段降雨量较少, 且气温逐渐增高, 蒸散量较强, 蒸腾耗水进一步增加, 各处理土壤贮水量较播种前呈减小趋势。在红豆草进入生殖生长时期(2017 年 6—7 月), 阶段降雨量较多, 红豆草生长缓慢, 作物需水量较少, 植物蒸腾作用降低, 各处理土壤贮水量较前一阶段有所增加, 且各处理间差异较大。第 2 茬红豆草生长初期(2017 年 8 月初), 阶段降雨较少(13 mm), 红豆草生长迅速, 蒸腾耗水加强, 且气温达到年内最高, 蒸散量较强, 各处理土壤贮水量处于全生育期最低。2017 年 10 月红豆草进入第 2 茬生殖生长时期, 气温逐渐降低, 阶段降雨较多(200 mm)和作物需水量较少, 各处理土壤贮水量达全生育期最大值, 且各处理间差异较大。

生物炭垄沟集雨覆盖种植土壤贮水量随垄宽和

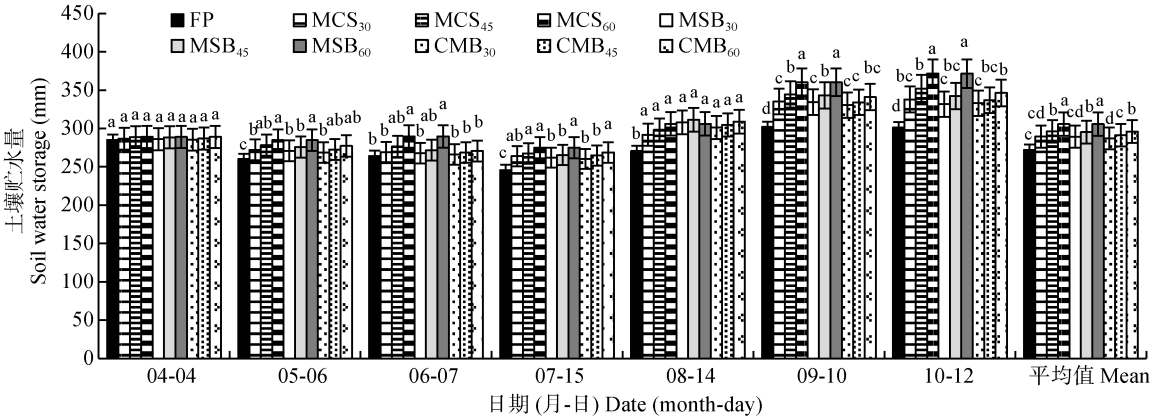

图 5　生物炭覆盖垄沟集雨种植对红豆草生育期土壤贮水量的影响

Fig. 5　Effects of mulching materials of ridge-furrow rainwater harvesting system on soil water storage during sainfoin growth season

FP、MCS、MSB 和 CMB 分别表示传统平作、土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄。下标数字表示垄宽, 单位为 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。FP is the traditional flat planting. MCS, MSB and CMB are ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust, respectively; their subscripts 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm. Different lowercase letters mean significant differences among treatments at $P < 0.05$ level.

覆盖材料类型而变化, 各处理土壤贮水量表现明显差异性。图 5 显示, 红豆草播种期(2017 年 4 月 4 日), 垄沟集雨覆盖种植措施初步形成, 各处理土壤贮水量无显著差异。随着红豆草生育期的延伸, 垄的集雨效应随着降雨的发生逐步显现。垄沟覆盖种植处理土壤贮水量显著高于传统平作, 不同垄沟覆盖种植处理之间差异明显。红豆草第 2 茬刈割后(2017 年 10 月 12 日), 垄沟集雨种植的土壤贮水量显著高于传统平作, 集雨种植的土壤贮水量随垄宽增加而增加。不同覆盖材料下, 土垄的土壤贮水量明显大于玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄, 玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄明显大于传统平作, 玉米秸秆炭垄与牛粪炭垄之间差异不明显。就红豆草全生育期平均值而言, FP、MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45}和CMB_{60}的土壤贮水量分别为 272.0 mm、289.4 mm、296.2 mm、305.7 mm、289.2 mm、295.2 mm、305.7 mm、287.1 mm、291.0 mm 和 295.9 mm。与传统平作相比, MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45} 和 CMB_{60} 土壤贮水量分别增加 17.4 mm、24.2 mm、33.7 mm、17.3 mm、23.3 mm、33.7 mm、15.1 mm、19.1 mm 和 23.9 mm。同一覆盖材料下, 集雨种植的土壤贮水量随垄宽增加而增加, 其中垄宽 60 cm 显著高于垄宽 30 cm, 垄宽 30 cm 与垄宽 45 cm 和垄宽 45 cm 与垄宽 60 cm 之间差异不显著。不同覆盖材料表现为土垄和玉米秸秆炭垄的土壤贮水量显著高于牛粪炭垄, 牛粪炭垄的土壤贮水量显著高于传统平作, 土垄与玉米秸秆炭垄之间差异不显著。

2.3　生物炭覆盖垄沟集雨种植对土壤温度的影响

持续的低温和高温不利于作物的生长, 红豆草全生育期表层(0~25 cm)土壤温度随空气温度变化而变化(图 6A)。在红豆草生育期苗期(4 月)和停止生长期(10 月), 空气温度较低, 各处理土壤温度处于生育期内最低值。4—7 月, 各处理表层土壤温度随着空气温度的升高逐渐升高; 7—9 月, 空气温度处于全年较高水平, 各处理表层土壤温度达最大值; 9—10 月, 各处理表层土壤温度随着空气温度的下降逐渐降低。与传统平作相比, 垄沟集雨覆盖种植明显增加垄上表层土壤温度, 尤其生物炭覆盖垄沟集雨种植(图 6B)。由于集雨垄增加太阳直接辐射面积和垄覆盖减少土壤热量向外散射, 同一垄作处理的垄上表层土壤温度显著高于沟中。与传统平作相比, 垄沟处理可缓和沟中土壤温度极值, 尤其生物炭覆盖垄沟集雨种植。在气温较低时(4—7 月和 9—10 月), 增加沟中表层土壤温度, 在气温较高时(7—8 月), 降低沟中表层土壤温度。MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45} 和 CMB_{60} 的沟中日平均表层土壤温度调节范围分别是 −1.6~0.4 ℃、−1.2~0.5 ℃、−1.3~0.7 ℃、−1.4~0.9 ℃、−1.3~0.9 ℃、−1.3~1.1 ℃、−1.3~0.8 ℃、−1.4~1.1 ℃和−1.1~1.7 ℃(图 6C)。就红豆草全生育期平均值而言, FP、MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45}和 CMB_{60} 的沟中表层土壤温度分别为 18.2 ℃、18.2 ℃、18.3 ℃、18.4 ℃、18.3 ℃、18.4 ℃、18.8 ℃、18.4 ℃、18.5 ℃和 18.9 ℃, 相同处理的垄上表层土壤温度分别为 18.2 ℃、19.1 ℃、19.6 ℃、20.2 ℃、19.7 ℃、20.1 ℃、20.7 ℃、19.7 ℃、20.2 ℃和 20.8 ℃。与传统平作相比, MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45} 和 CMB_{60} 沟中表层土

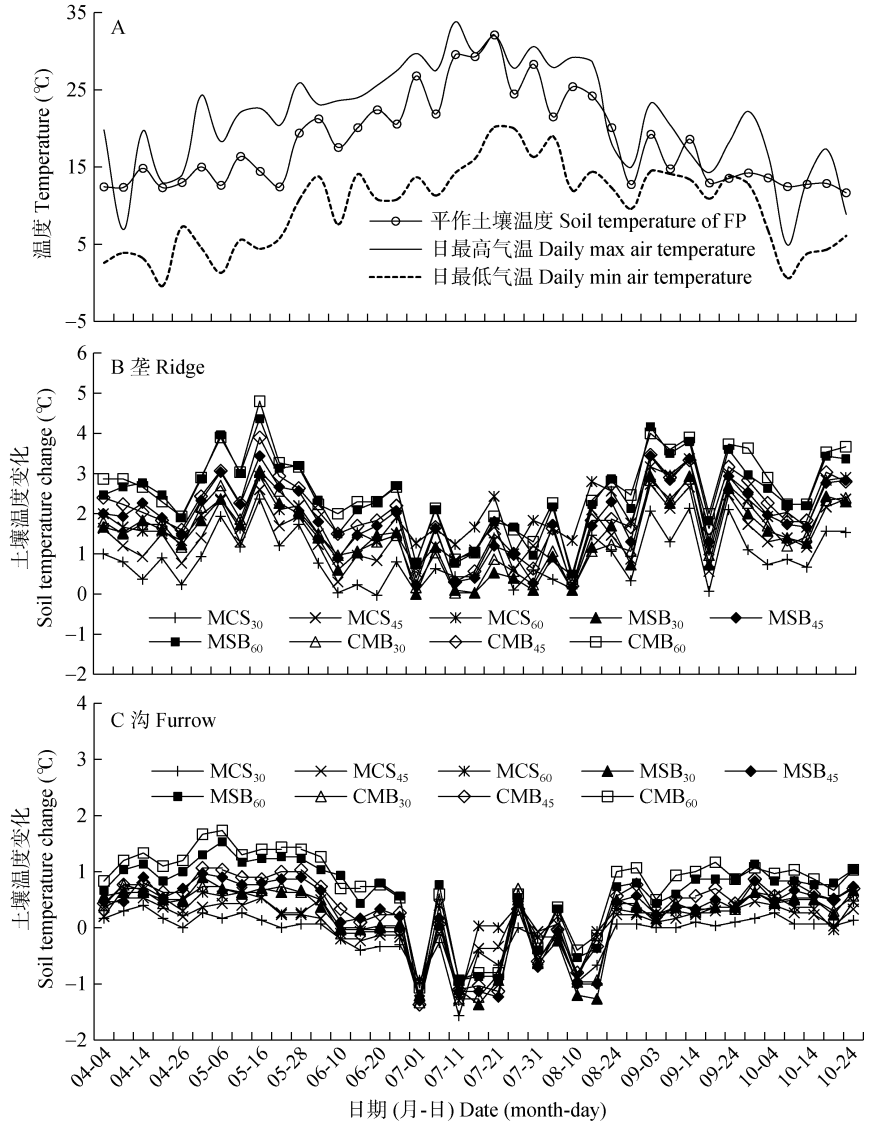

图 6 生物炭覆盖垄沟集雨种植对红豆草生育期表层(0~25 cm)土壤温度的影响

Fig. 6 Effects of mulching materials of ridge-furrow rainwater harvesting system on 0–25 cm soil temperature during sainfoin growth season

FP、MCS、MSB 和 CMB 分别表示传统平作、土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄。下标数字表示垄宽, 单位为 cm。图 A 为红豆草生育期传统平作的表层(0~25 cm)土壤温度变化, 图 B 和图 C 分别代表生物碳覆盖垄沟集雨种植与传统平作相比红豆草生育期垄沟集雨种植处理垄上和沟中表层土壤温度的变化量。FP is the traditional flat planting. MCS, MSB and CMB are ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust, respectively; their subscripts 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm. Fig. A is the topsoil (0–25 cm) temperature of FP. Fig. B and C are the variations of ridge and furrow topsoil temperature in ridge-furrow rainwater harvesting system during sainfoin growth season, respectively, compared with FP.

壤温度分别增加 0 ℃、0.1 ℃、0.2 ℃、0.1 ℃、0.2 ℃、0.6 ℃、0.2 ℃、0.3 ℃和 0.7 ℃, 垄上表层土壤温度分别增加 0.9 ℃、1.4 ℃、2.0 ℃、1.5 ℃、1.9 ℃、2.5 ℃、1.5 ℃、2.0 ℃和 2.6 ℃。垄沟集雨种植的垄上表层土壤温度显著高于沟中。同一覆盖材料下, 不同垄宽的沟中和垄上的表层土壤温度排列次序均为 60 cm>45 cm>30 cm。不同覆盖材料下, 沟中和垄上的表层土壤温度排列次序为牛粪炭垄≈玉米秸秆炭垄>土垄>传统平作。

2.4 生物炭覆盖垄沟集雨种植对红豆草干草产量的影响

单位面积牧草干草产量对于确定作物的生产力、规划畜牧和调整畜牧放养计划等非常重要。净干草产量是基于沟面积的干草产量, 能更好地反映单株生长状况; 实际干草产量是基于小区总面积(垄面积+沟面积)的干草产量, 实际干草产量能更有效地反映土地生产力。从表 3 可以看出, 各处理的净干草产量均大于实际干草产量。

从表 3 可知, 垄沟集雨种植的第 1 茬、第 2 茬及全生育期净干草产量(NFY)随垄宽增加而增加, 且不同覆盖材料净干草产量排列次序为玉米秸秆炭垄>牛粪炭垄>土垄>传统平作。同一覆盖材料下, 垄沟集雨种植全生育期净干草产量表现为垄宽 60 cm

表 3　生物炭覆盖垄沟集雨种植对红豆草干草产量、蒸散量(ET)和水分利用效率(WUE)的影响

Table 3　Effects of ridge-furrow rainwater harvesting system with biochar-soil crust mulching on fodder yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of sainfoin

处理 Treatment	第 1 茬 First cut ($kg·hm^{-2}$)		第 2 茬 Second cut ($kg·hm^{-2}$)		全生育期 Annual ($kg·hm^{-2}$)		ET (mm)	WUE ($kg·hm^{-2}·mm^{-1}$)
	NFY	AFY	NFY	AFY	NFY	AFY		
FP	3 620±226f	3 620±226de	3 611±127e	3 611±127bc	7 231±125g	7 231±125c	336±0.5a	21.5d
MCS_{30}	5 497±204e	3 298±123ef	5 778±609d	3 467±336cd	11 275±510f	6 765±306d	300±1.6c	22.5d
MCS_{45}	6 336±270de	3 168±135f	6 370±358cd	3 185±179d	12 707±450e	6 353±225de	288±2.5e	22.0d
MCS_{60}	7 068±114cd	3 029±49f	7 472±394b	3 202±169d	14 540±408d	6 231±175e	278±1.8g	22.4d
MSB_{30}	7 330±424cd	4 398±254b	7 093±112bc	4 256±67a	14 423±408d	8 654±245a	306±1.4b	28.3b
MSB_{45}	9 580±614b	4 790±307a	8 417±528a	4 208±264a	17 997±928b	8 998±464a	295±1.9d	30.5a
MSB_{60}	11 944±309a	5 119±133a	8 731±443a	3 742±190bc	20 676±572a	8 861±245a	284±1.8f	31.2a
CMB_{30}	6 454±231de	3 872±139cd	6 565±143c	3 939±86ab	13 019±363e	7 811±218b	302±0.8c	25.9c
CMB_{45}	8 136±417c	4 068±208bc	7 611±594b	3 806±297bc	15 747±415c	7 873±207b	300±1.6c	26.3c
CMB_{60}	9 503±934b	4 073±400bc	8 519±512a	3 651±220bc	18 022±484b	7 724±208b	296±1.8d	26.1c
平均 Mean								
FP	3 620±226c	3 620±226c	3 611±127c	3 611±127b	7 231±125c	7 231±125c	336±0.5a	21.5c
MCS	6 300±196b	3 165±102d	6 540±454b	3 285±238c	12 841±456b	6 450±235d	289±2.0b	22.3c
MSB	9 618±449a	4 769±231a	8 080±361a	4 069±174a	17 699±636a	8 838±318a	295±1.7b	30.0a
CMB	8 031±527a	4 004±249b	7 565±416a	3 798±201ab	15 596±421a	7 803±211b	299±1.4b	26.1b

NFY: 净干草产量; AFY: 实际干草产量。FP、MCS、MSB 和 CMB 分别表示传统平作、土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄。下标数字表示垄宽, 单位为 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。NFY: net fodder yield; AFY: actual fodder yield. FP is the traditional flat planting. MCS, MSB and CMB are ridge-furrow planting with the ridges mulched with manually compacted soil crust, maize straw biochar-soil crust, and cow dung biochar-soil crust, respectively; their subscripts 30, 45 and 60 refer to ridge widths in cm. Different lowercase letters mean significant differences among treatments at $P < 0.05$ level.

显著高于垄宽 45 cm, 垄宽 45 cm 显著高于垄宽 30 cm; 不同覆盖材料下, 玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄净干草产量显著高于土垄, 土垄的实际干草产量显著高于传统平作。与传统平作相比, MCS_{30}、MCS_{45}、MCS_{60}、MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45}和 CMB_{60}的全生育期净干草产量分别增加 55.9%、75.7%、101.0%、99.5%、148.9%、185.9%、80.0%、117.8%和 149.2%。垄沟集雨种植的第 1 茬、第 2 茬及全生育期实际干草产量(AFY)随垄宽增加而增加, 不同覆盖材料实际干草产量排列次序为玉米秸秆炭垄>牛粪炭垄>传统平作>土垄。与传统平作相比, MSB_{30}、MSB_{45}、MSB_{60}、CMB_{30}、CMB_{45}和 CMB_{60}的全生育期实际干草产量分别增加 19.7%、24.4%、22.5%、8.0%、8.9%和 6.8%。MCS_{30}、MCS_{45}和 MCS_{60}的实际干草产量分别降低 6.4%、12.1%和 13.8%。同一覆盖材料下, 垄沟集雨种植全生育期实际干草产量在不同垄宽之间差异不显著; 不同覆盖材料下, 全生育期实际干草产量表现为玉米秸秆炭垄显著高于牛粪炭垄, 牛粪炭垄显著高于传统平作, 传统平作显著高于土垄。与传统平作(7 231 $kg·hm^{-2}$)相比, MSB (8 838 $kg·hm^{-2}$)和 CMB 的实际干草产量(7 803 $kg·hm^{-2}$)分别提高 22.2% 和 7.9%, MCS 的实际干草产量(6 450 $kg·hm^{-2}$)降低 10.8%。

2.5　生物炭覆盖垄沟集雨种植对蒸散量和水分利用效率的影响

红豆草全生育期蒸散量(ET)是生育期初末土壤贮水量差值与全生育期降雨量的总和。在红豆草播种前, 各处理土壤贮水量差异不明显; 红豆草最后一次刈割后, 垄沟集雨种植的土壤贮水量显著高于传统平作。因此, 与传统平作相比, 垄沟集雨种植明显降低红豆草全生育期 ET。从表 3 可知, 同一覆盖材料下, 垄沟集雨种植的 ET 随垄宽增加而显著减少。不同覆盖材料下, 传统平作的 ET 显著高于土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄, 土垄、玉米秸秆炭垄与牛粪炭垄之间差异不显著; 土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的 ET 比传统平作分别降低 35.8 mm、47.8 mm 和 57.54 mm。水分利用效率(WUE)是单位 ET 下获得的作物产量。与传统平作相比, 生物炭垄沟集雨覆盖种植能在较低 ET 情况下获得较高作物产量, 提高了 WUE。同一覆盖材料下, 红豆草全生育期 WUE 随垄宽变化不显著。不同覆盖材料下, 玉米秸秆炭垄的 WUE 显著高于牛粪炭垄, 牛粪炭垄显著高于土垄和传统平作, 土垄与传统平作之间差异不显著; 土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄 WUE 比传统平作分别提高 0.8 $kg·hm^{-2}·mm^{-1}$、8.5 $kg·hm^{-2}·mm^{-1}$和 4.6 $kg·hm^{-2}·mm^{-1}$。

2.6 生物炭覆盖垄沟集雨种植最佳沟垄比确定

土垄的红豆草实际干草产量显著低于传统平作, 因此, 土垄种植技术不适合在该地区推广种植红豆草。玉米秸秆炭垄种植和牛粪炭垄种植的红豆草实际干草产量显著高于传统平作, 尤其玉米秸秆炭垄种植增加更为显著。为确定玉米秸秆炭垄种植和牛粪炭垄种植红豆草的最佳沟垄比(沟宽均为 60 cm), 以垄宽为自变量, 红豆草全生育期实际干草产量为因变量, 使用非线性回归(curve estimation)对单一变量垄宽进行简单的曲线回归拟合。得到玉米秸秆炭垄沟宽度(x)与红豆草产量(y)的回归方程为 y=–0.710 9x^2+70.249x+7 225 (R^2=0.997 7), 牛粪炭垄垄沟宽度(x)与红豆草产量(y)的回归方程为 y=–0.379 8x^2+31.102x+7 229.8 (R^2=0.998 8)(图 7)。对回归方程求极值, 在 2017 年, 当垄宽 x=49 cm 时, 玉米秸秆炭垄的红豆草全生育期实际干草产量达最大值(8 960 kg·hm^{-2}), 当垄宽 x=41 cm 时, 牛粪炭垄的红豆草全生育期实际干草产量达最大值(7 867 kg·hm^{-2})。

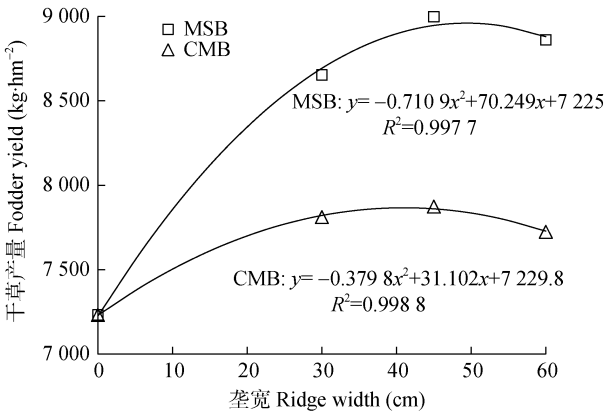

图 7 玉米秸秆炭结皮**(MSB)**和牛粪炭结皮**(CMB)**覆盖垄沟集雨种植的红豆草产量与垄宽的关系

Fig. 7 Relationships between of sainfoin fodder yield and ridge width of ridge-furrow rainwater harvesting system under mulching of maize straw biochar-soil crust (MSB) and cow dung biochar-soil curst (CMB)

3 讨论

降雨是限制干旱和半干旱地区农业生产最重要的环境因素。降雨量在时间序列的分布体现该地区降雨的变异性。宋兴阳等[25]在该试验区(定西干旱气象与生态环境试验基地)通过对连续 2 年内紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)生育期降雨量统计得出, 试验期间无效降雨次数是有效降雨的 1.98 倍, 无效降雨和有效降雨对总降雨量的贡献率分别为 19%和 81%。本试验结果表明, 2017 年红豆草全生育期单次降雨量<5 mm 的次数占红豆草全生育期总降雨次数的 69.9%; 单次降雨量<5 mm 降雨总量占红豆草全生育期总降雨量的 12.9%, 表明 2017 年红豆草生育期内降雨主要以无效降雨(<5 mm)为主。

垄沟集雨系统的径流系数反映集雨垄的集雨效率。径流发生和量主要取决于降雨事件的特征(强度、持续时间和分布等), 其次坡度、土壤类型和植被覆盖等对径流的发生和量也有直接影响[26]。垄沟集雨技术可以通过改变垄的集雨面积(垄宽)和土壤类型(不同类型结皮覆盖)提高集雨垄的产流量, 从而增加垄的集雨效率。本研究表明同一覆盖材料下, 垄的集雨效率随集雨面积(垄宽)增加而增加, 这是由于宽垄收集降雨的面积较大, 雨滴溅出损失较低, 降雨收集量较多, 从而使宽垄比窄垄具有更高的集雨效率[27]。土壤结皮是由雨滴击打原状土壤, 分散土壤团聚体, 形成一层具有较低透水能的表土层, 因此土壤结皮可以增加地表径流, 减小土壤入渗率[28]。本研究发现, 土垄的集雨效率显著高于玉米秸秆炭和牛粪炭垄。这是因为在特定的环境条件下, 具有较大保水性能的生物炭可以减少地面饱和流的发生[29], 土壤中添加生物炭形成生物炭土壤结皮后, 增加土壤的团聚性, 提高土壤入渗能力[30], 降低生物炭垄的集雨效率。Smetanova 等[31]研究表明, 土壤中添加 10%的生物炭可使径流系数减小 10%。本试验结果表明, 生物炭覆盖集雨垄的径流系数比土垄覆盖集雨垄的径流系数减少 3.5%~4.6%。

土壤贮水量是农业生产中表现土壤水分的重要参数, 对降雨、温度、作物生长状况和耕作措施等条件敏感。垄沟集雨种植技术可以通过改变田间微地形, 将降水和径流在种植区进行叠加, 从而增加种植区内作物根际土壤水分[32], 因此垄沟集雨种植的土壤水分显著高于传统平作。本试验表明, 同一覆盖材料下, 垄沟集雨种植的土壤水分随垄宽增加而增加, 这是由于集雨垄宽度越宽, 汇入种植区内的径流就越多, 沟内土壤含水量也就越高。生物炭土壤结皮覆盖有效改善表层土壤孔径分布和土壤孔隙度, 减少土壤容重, 降低土壤干燥收缩度, 增加降雨入渗深度, 减少土壤水分无效蒸发, 减少地表径流和土壤侵蚀[33]。本试验中, 与土垄相比, 生物炭垄的集雨效率较低, 垄上汇入沟中径流较少, 因此, 生物炭覆盖垄沟种植的土壤含水量显著低于土垄。

由于光的反射效应, 裸露的土壤通常比覆盖的土壤更快地变冷和变暖[34]。红豆草生育期内, 集雨垄较长时间不受作物冠层覆盖, 能更直接接受光照, 因此, 红豆草全生育期的垄上表层土壤温度显著高

于沟中。本研究发现生物炭覆盖垄沟集雨种植明显增加垄上表层土壤温度, 这可能是由于生物炭处理的土壤较低的土壤热导率, 其能量释放较对照缓慢, 从而导致土壤温度升高。生物炭土壤结皮降低土壤与空气之间的水热交换。在白天, 覆盖的土壤通常比未覆盖的土壤升温更快。晚上, 由于生物炭土壤结皮下较多水分减少了长波辐射, 表层土壤温度降低缓慢[35]。因此, 在红豆草生长初期和末期, 空气温度普遍较低, 生物炭覆盖可提高表层土壤温度, 而在盛夏时期, 空气温度普遍较高, 随着植物冠层的闭合, 暴露在空气中的土壤表面部分很小, 进入的太阳能大部分被作物冠层拦截, 生物炭覆盖降低沟中表层土壤温度。垄上覆盖生物炭材料, 防止表层土壤温度大幅波动, 降低红豆草生长过程中的高温或低温胁迫, 促进红豆草生长和发育。

垄沟集雨种植系统将垄面雨水汇入沟中, 使雨水在沟中入渗更深, 降低土壤水无效蒸发[36]。因此, 垄沟集雨种植的蒸散量显著低于平作。生物炭作为土壤调节剂, 可以提高土壤对水分保持能力[37]。与土垄相比, 生物炭垄集雨效率较低, 并且生物炭垄种植作物长势较好, 植物蒸腾作用较强, 因此, 本试验中生物炭垄种植的耗水量显著高于土垄。在田间种植系统中, 水分利用效率被定义为单位蒸散量(ET)下的作物产量[38]。与传统平作相比, 垄沟集雨覆盖种植能在消耗较低 ET 情况下获得较高产量, 不同覆盖材料下, 生物炭垄沟集雨覆盖种植的作物产量显著高于土垄, 土垄和炭垄种植的 ET 差异不显著。因此, 生物炭垄沟集雨种植的水分利用效率显著高于土垄, 土垄显著高于传统平作。在土壤水接近饱和的条件下, 土壤中施加生物炭可能会对土壤滞留雨水能力产生显著影响, 并通过保持多余的水分来促进植物生长[39]。垄面覆盖生物炭材料降低表层土壤温度波动幅度, 改善作物生长热环境, 促进作物生长发育[35]。因此, 生物炭垄沟集雨种植的红豆草产量显著高于土垄和传统平作。此外, 垄上覆盖的生物炭随径流部分会流入沟中, 生物炭混入沟内土壤改善沟内土壤理化性质, 提高植物对土壤水养分的利用效率, 从而促进作物生长。Zhang 等[40]研究表明, 与无生物炭土壤相比, 土壤中施加 4×10^4 kg·hm^{-2} 秸秆生物炭, 能使水稻(*Oryza sativa* L.)产量提高 14%。本试验结果表明, 秸秆生物炭覆盖和牛粪生物炭覆盖也具有提高红豆草产量的作用。与传统平作相比, 土垄种植降低红豆草实际干草产量, 这是由于土垄种植中集雨垄占用部分种植面积, 当土垄种植增加的产量无法弥补集雨垄布置所消耗的土地面积时, 就会造成单位面积内的作物减产。生物炭覆盖显著改善土壤水热状况, 土壤水热状况的改善可能是增加红豆草干草产量和水分利用效率的原因之一。但垄上覆盖的部分生物炭会随径流汇流入沟中, 必然改变沟中土壤的水热状况、肥力和微生物数量等, 进而改善作物生长的土壤微环境。因此, 生物炭覆盖垄沟集雨种植增产原因还需要进一步研究。

4　结论

本研究结果表明, 集雨垄径流分布特征主要取决于>5 mm 降雨分布, 土垄、秸秆炭垄和牛粪炭垄的临界产流降雨量分别为 4.13 mm、4.67 mm 和 5.05 mm, 平均径流系数分别为 29.7%、26.2%和 25.1%。与传统平作相比, 生物炭覆盖垄沟集雨种植显著增加红豆草全生育期土壤水分和垄上表层土壤温度, 减小沟中表层土壤温度波动幅度。土垄种植显著降低红豆草干草产量, 生物炭覆盖垄沟集雨种植显著增加红豆草干草产量和水分利用效率。与传统平作相比, 土垄种植的红豆草实际干草产量降低 10.8%, 玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄种植的实际干草产量分别提高 22.2%和 7.9%。土垄、玉米秸秆炭垄和牛粪炭垄的水分利用效率分别提高 0.8 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、8.5 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 4.6 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。回归分析表明, 研究区玉米秸秆炭覆盖垄沟种植红豆草的最佳垄宽为 49 cm(沟宽 60 cm); 牛粪炭覆盖垄沟种植红豆草的最佳垄宽为 41 cm(沟宽 60 cm)。生物炭, 尤其是作物秸秆炭覆盖垄沟集雨种植红豆草获得较高的产量和较好的环保效益, 适宜在半干旱地区推广应用。

参考文献 References

[1] 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2170– 2179
YAO Y B, YANG J H, XIAO G J, et al. Research advances in the impacts of climate warming on rainfed agriculture and agroecology in Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 2170–2179

[2] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1558–1568
XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1558–1568

[3] 白盛元, 汪有科, 马建鹏, 等. 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 218–223
BAI S Y, WANG Y K, MA J P, et al. Experimental study on rainfall infiltration in semiarid region of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 218–223

[4] WANG Q, REN X, SONG X Y, et al. The optimum

ridge-furrow ratio and suitable ridge-covering material in rainwater harvesting for oats production in semiarid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 106–118

[5] 董孔军, 刘天鹏, 何继红, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜方式对土壤水热环境及糜子耗水特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2274–2287
DONG K J, LIU T P, HE J H, et al. Effects of different film mulching-patterns on soil thermal-moisture and broomcorn millet water consumption characteristics in semiarid region on Northwest Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(12): 2274–2287

[6] 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[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 470–475
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[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 470–475

[7] 胡广荣, 王琦, 宋兴阳, 等. 沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 590–599
HU G R, WANG Q, SONG X Y, et al. Effects of furrow-mulching materials on soil temperature, crop yield and water use efficiency in ridge-furrow rainwater harvesting systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 590–599

[8] GAN Y T, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, et al. Ridge-furrow mulching systems — an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[M]//Advances in Agronomy. Elsevier, 2013: 429–476

[9] 寇江涛, 师尚礼, 王琦, 等. 垄沟集雨对紫花苜蓿草地土壤水分、容重和孔隙度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1336–1342
KOU J T, SHI S L, WANG Q, et al. Effect of ridge/furrow rain harvesting on soil moisture, bulk density and porosity in *Medicago sativa* field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1336–1342

[10] 王晓凌, 陈明灿, 易现峰, 等. 垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 40–47
WANG X L, CHEN M C, YI X F, et al. Effects of ridge width and planting density on corn yields in rainwater-harvesting system with plastic film mulching on ridge[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 40–47

[11] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 317–328
JIANG R, GUO S, MA D D. Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 317–328

[12] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269–272
YAN C R, MEI X R, HE W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269–272

[13] 王鑫, 胥国斌, 任志刚, 等. 无公害可降解地膜对玉米生长及土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 78–81
WANG X, XU G B, REN Z G, et al. Effects of environment-friendly degradable films on corn growth and soil environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 78–81

[14] PAETSCH L, MUELLER C W, RUMPEL C, et al. A multi-technique approach to assess the fate of biochar in soil and to quantify its effect on soil organic matter composition[J]. Organic Geochemistry, 2017, 112: 177–186

[15] PARMAR A, NEMA P, AGARWAL T. Biochar production from agro-food industry residues: A sustainable approach for soil and environmental management[J]. Current Science, 2014, 107(25): 1673–1682

[16] REDDY K R, YARGICOGLU E N, YUE D B, et al. Enhanced microbial methane oxidation in landfill cover soil amended with biochar[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(9): 04014047

[17] LEHMANN J, SILVA, J P D, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343–357

[18] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?[J]. Plant and Soil, 2014, 376(1/2): 347–361

[19] ROSENANI A B, AHMAD S H, NURUL ADILA S, et al. Biochar as a soil amendment to improve crop yield and soil carbon sequestration[J]. Acta Horticulturae, 2014(1018): 203–209

[20] BARONTI S, VACCARI F P, MIGLIETTA F, et al. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 38–44

[21] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 稻壳基生物炭对生菜 Cd 吸收及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 207–214
WANG Y H, LI M J, TANG M D, et al. Effect of rice husk biochar on lettuce Cd uptake and soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 207–214

[22] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436–442

[23] 魏小燕, 毕华兴, 霍云梅, 等. 高羊茅草地地表径流系数影响因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(5): 82–88
WEI X Y, BI H X, HUO Y M, et al. Study on the factors influencing surface runoff coefficient in F*estuca arundinacea* grassland[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(5): 82–88

[24] LI X Y, GONG J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243–254

[25] 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
SONG X Y, WANG Q, LI F C, et al. Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on soil moisture and alfalfa forage yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 798–809

[26] 黄国如, 芮孝芳. 流域降雨径流时间序列的混沌识别及其预测研究进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 255–260
HUANG G R, RUI X F. Study advances in diagnosis of chaotic behaviour and its prediction for rainfall and streamflow time

series in watershed[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 255–260

[27] 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: 186–196

[28] 吴秋菊, 吴佳, 王林华, 等. 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 303–311
WU Q J, WU J, WANG L H, et al. Effects of soil crust on infiltration in slope land in the loess area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 303–311

[29] SADEGHI S H, HAZBAVI Z, HARCHEGANI M K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 483–490

[30] LIU X H, HAN F P, ZHANG X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, 14(6): 975–979

[31] SMETANOVA A, DOTTERWEICH M, DIEHL D, et al. Influence of biochar and terra preta substrates on wettability and erodibility of soils[J]. Zeitschrift Für Geomorphologie Supplementary Issues, 2013, 57(1): 111–134

[32] 田媛, 李凤民, 刘效兰. 半干旱区不同垄沟集雨种植马铃薯模式对土壤蒸发的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 795–800
TIAN Y, LI F M, LIU X L. Effects of different ridge-furrow planting patterns of potato on soil evaporation in semiarid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 795–800

[33] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2988–2999
TIAN D, GAO M, HUANG R, et al. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2988–2999

[34] 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

[35] ZHANG Q Z, WANG Y D, WU Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1478

[36] LIU T N, CHEN J Z, WANG Z Y, et al. Ridge and furrow planting pattern optimizes canopy structure of summer maize and obtains higher grain yield[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 242–249

[37] PETTER F A, MADARI B E. Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian Savannah soils[J]. Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012, 16(7): 761–768

[38] 程思贤, 刘卫玲, 靳英杰, 等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2018, 26(9): 1355–1365
CHENG S X, LIU W L, JIN Y J, et al. Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in Lime Concretion Black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1355–1365

[39] AKHTAR S S, LI G T, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138: 37–44

[40] ZHANG A, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 469–475