



覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及枣果产量的影响

刘巧玲, 李王成, 赵广兴, 贾振江, 安文举, 王洁, 穆敏

引用本文:

刘巧玲, 李王成, 赵广兴, 贾振江, 安文举, 王洁, 穆敏. 覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及枣果产量的影响[J]. [农业资源与环境学报](#), 2022, 39(5): 940–947.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0133>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[水氮处理对复播油葵产量和水氮利用效率的影响](#)

谈建鑫, 景峰, 刘建国

农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 456–462 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0032>

[地膜厚度对马铃薯生长及农田水热条件和残膜污染的影响](#)

高宇, 王金莲, 赵沛义, 贾有余, 任永峰, 刁生鹏, 李焕春, 聂晶, 狄彩霞

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 439–446 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0311>

[生物降解地膜降解性能对南疆棉田籽棉产量形成的影响](#)

夏文, 林涛, 邓方宁, 何文清, 汤秋香

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 951–959 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0470>

[秸秆和植被覆盖对江苏滨海盐土土壤盐分变化的影响](#)

崔士友, 张蛟

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 509–516 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0112>

[新疆加工番茄应用PBAT全生物降解地膜可行性](#)

苏海英, 宝哲, 刘勤, 董道瑞, 严昌荣, 雷海, 薛颖昊, 徐志宇

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 615–622 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0140>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘巧玲, 李王成, 赵广兴, 等. 覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及枣果产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 940-947.

LIU Q L, LI W C, ZHAO G X, et al. Effects of gravel-sand mulching and irrigation on soil hydrothermal conditions and fruit yield in ecological jujube forests on degraded field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 940-947.



开放科学 OSID

覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及枣果产量的影响

刘巧玲¹, 李王成^{1,2,3*}, 赵广兴¹, 贾振江¹, 安文举¹, 王洁¹, 穆敏¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 3. 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021)

摘要:为探明覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及产量的影响,在宁夏中部干旱带开展大田试验,通过设置2种覆盖方式[覆砂(M)、裸土(N)]和3个灌水量[低水180 mm(W1)、中水210 mm(W2)、高水240 mm(W3)],研究覆砂和灌水量对土壤温度、土壤贮水量以及枣果产量和水分利用效率的影响。结果表明:与裸土相比,覆砂使0~10 cm土壤温度提高0.8~3.1℃。覆砂后土壤升温时段(10:00—14:00)明显滞后于裸土(8:00—14:00),升温速度比裸土处理快0.4℃·h⁻¹。覆盖方式及灌水量对枣树全生育期0~80 cm土壤贮水量影响显著($P<0.05$),覆砂处理较裸土处理平均提高10.97%,且在土壤含水率较低的萌芽展叶期增幅最高,达14.54%。覆砂条件下枣树生长指标、产量和水分利用效率均高于裸土,不同灌水量下枣果产量从高到低表现为W3>W2>W1,分别较裸土处理增加5.99%、10.54%、26.79%,其中MW2处理水分利用效率最高,为1.55 kg·m⁻³。综上,MW2处理(覆砂、灌水量210 mm)可作为宁夏中部干旱带退耕压砂地生态枣林适宜的种植模式。

关键词:覆砂;灌水量;土壤水热;枣树生长;产量

中图分类号:S665.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)05-0940-08

doi: 10.13254/j.jare.2022.0133

Effects of gravel-sand mulching and irrigation on soil hydrothermal conditions and fruit yield in ecological jujube forests on degraded field

LIU Qiaoling¹, LI Wangcheng^{1,2,3*}, ZHAO Guangxing¹, JIA Zhenjiang¹, AN Wenju¹, WANG Jie¹, MU Min¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In this study, we aimed to investigate the effect of amount of irrigation water under gravel-sand mulch conditions on hydrothermal parameters of soil and fruit yield of date palm forests in fallow gravel-sand mulched field. The field experiment was conducted in an arid zone in central Ningxia. To investigate the effects of gravel-sand mulch and irrigation on soil temperature, soil water storage, jujube fruit yield, and water use efficiency, we used two types of mulch (gravel-sand mulching (M) and bare soil (N)) and three different amounts of irrigation water (low water: 180 mm (W1), medium water: 210 mm (W2), and high water: 240 mm (W3)). The results showed that gravel-sand mulching increased the soil temperature at a depth of 0~10 cm by 0.8~3.1 °C compared with that of bare soil. The

收稿日期:2022-03-17 录用日期:2022-04-08

作者简介:刘巧玲(1998—),河南新乡人,硕士研究生,从事农业水资源高效利用研究。E-mail:lqldyx820@163.com

*通信作者:李王成 E-mail:liwangcheng@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(52169010,51869023);宁夏自然科学基金重点项目(2021AAC02008);国家重点研发计划项目(2021YFD1900600);宁夏重点研发计划项目(引才专项)(2019BEB04029);宁夏重点研发计划项目(2019BEH03010);宁夏大学研究生创新项目(CXXM202240)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(52169010,51869023);The Key Natural Science Projects of Ningxia(2021AAC02008); The National Key Research and Development Program(2021YFD1900600);Ningxia Key Research and Development Program(Special Talents)(2019BEB04029);Ningxia Key Research and Development Program(2019BEH03010);Ningxia University Graduate Student Innovation Program(CXXM202240)

soil warming period (10:00—14:00) after gravel-sand mulching was significantly shorter than that of bare soil (8:00—14:00), and the warming rate was $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ faster than that of the bare soil treatment. The method of mulching and the amount of irrigation water had a significant effect ($P<0.05$) on the amount of soil water stored at a depth of 0~80 cm during the entire fertility period of the jujube trees, and the gravel-sand mulching treatment increased by 10.97% on average with the amount of soil water stored compared with that of the bare soil treatment. The highest increase was 14.54% at the leaf bud stage, when the soil water content was low. The growth index, yield, and water use efficiency of jujube trees under gravel-sand mulch conditions were higher than those under bare soil, and the yield from high to low was $W3>W2>W1$, which increased by 5.99%, 10.54%, and 26.79%, respectively, compared with that of the bare soil treatment, with the highest water use efficiency of MW2 being $1.55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. In conclusion, the MW2 treatment is a suitable planting pattern for date palm forests on fallow and gravel-sand mulched field in the central arid zone of Ningxia.

Keywords: gravel-sand mulching; irrigation amount; soil hydrothermal conditions; jujube growth; yield

土表覆砂是我国西北干旱半干旱地区一种增温保墒及作物增产提质的保护性耕作方式^[1]。覆砂使土壤表面空气动力学粗糙度和空气湍流增强,增大了水汽流动阻力,从而减少了土壤蒸发^[2]。覆砂后土壤能够截蓄更多的水分,增强土壤蓄水能力、促进水分向深层运动^[3]。同时,地表覆砂还可以调节土壤温度,提高其土壤水分利用效率,促进作物生长,并最终达到增产提质的效果^[4]。随着科技的进步和人们生活的需要,宁夏中部干旱带在原种植面积基础上新增加了大量垦荒面积用于压砂瓜(*Citrullus lanatus*)的种植^[5]。但长此以往,区域种植作物单一化、病虫害率高的问题暴露。同时,压砂地退化问题也日渐凸显,如砂层细砂粒含量增加、土壤结构质地改变、生态化学计量比失衡、肥力下降、酶活性降低、微生物群落丰度减少等^[6-8]。压砂地保水保墒能力下降,引起水土流失,导致压砂瓜产量逐渐降低,甚至绝产^[9]。退化的压砂地被撂荒,造成土地荒漠化,成为当地生态治理难题。枣树(*Ziziphus jujuba* Mill.)作为一种生命力和适应性较强的耐旱植物^[10],广泛栽培于我国西北干旱半干旱地区,在水土保持方面发挥重要作用^[11]。因此,当地政府部门选择种植枣树来改造退化的压砂地,同时期望获得一定的经济效益以维护当地的生态持续稳定与发展。

目前,学者们主要围绕退耕压砂地生态枣林的土壤水分、枣树生长发育等方面展开研究^[12-14],而针对退耕压砂地的土壤条件、覆砂与灌水量复合措施对枣林土壤水热和枣果产量的影响研究鲜有报道。因此开展覆砂和灌水量对退耕压砂地枣林生长的影响研究对生态脆弱区的植被恢复和生态修复具有重要意义。鉴于此,本研究以宁夏中部干旱带退耕压砂地生态枣林为例,探讨不同覆盖模式下灌水量对土壤水热的时空动态变化规律,分析退耕压砂地枣树生长、产

量和水分利用效率特征,以期压砂地退耕还林后寻求高效合理的种植方式及宁夏中部干旱带经济和生态持续稳定发展提供思路和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2021年5—10月在宁夏中部干旱带中卫市香山乡红圈子村($36^{\circ}56'24''\text{N}$, $105^{\circ}13'44''\text{E}$)进行,研究区平均海拔1 697.8 m,地下水埋深在100 m以下,年均温度为7~8.5 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量为180~200 mm,且主要集中于5—9月,年均蒸发量为2 100~2 400 mm,全年无霜期140~150 d。试验期内日降雨量和气温如图1所示,有效降雨量为91.6 mm,日平均气温为25.9 $^{\circ}\text{C}$ 。试验区土壤为淡灰钙土,质地为砂壤土,田间持水量为23.3%。0~80 cm平均土壤容重为 $1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,全氮 $0.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $5.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $5.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验将42年退耕压砂地通过保持原状形成覆砂

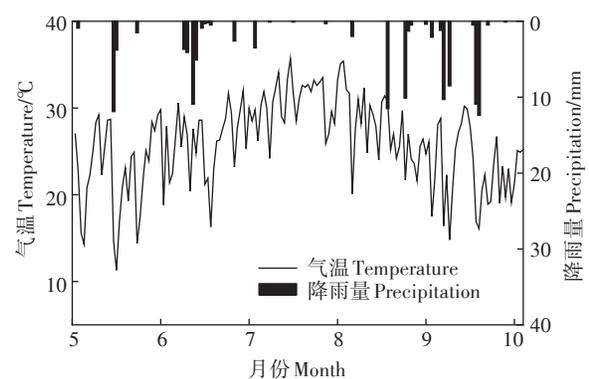


图1 研究区枣树生育期日平均温度和日降雨量

Figure 1 Average daily temperature and daily rainfall in the study area during the growth period

(M)、除去覆盖层形成裸土(N),这两种覆盖方式的覆砂厚度均为12 cm。灌水量依据当地枣树灌溉制度设为三个灌水量,分别为低水180 mm(W1)、中水210 mm(W2)、高水240 mm(W3),采用完全组合设计,共6个处理:裸土低水(NW1)、裸土中水(NW2)、裸土高水(NW3)、覆砂低水(MW1)、覆砂中水(MW2)、覆砂高水(MW3)。灌溉方式采用环绕式灌溉,一行一支管(管径16 mm,壁厚0.9 mm),在支管上接毛管以树干为中心形成直径约为1 m的圆环,每棵树4个滴头,滴头流量均为4 L·h⁻¹。全生育期灌溉制度如表1所示。供试枣树为树龄12年的同心圆枣,株行距为3 m×8 m,种植密度为40棵·亩⁻¹(1亩=667 m²)。各处理3次重复,共选取长势良好、大小一致的枣树18棵。各小区其他田间管理方式相同。

表1 枣树生育期灌水量

Table 1 Irrigation water during date palm fertility

生育时期 Growth stage	时间 Time	灌水量 Irrigation amount/mm			灌水次数 Irrigation time
		W1	W2	W3	
萌芽展叶期 Leaf bud stage	05-18至06-07	33.0	39.0	45.0	1
开花坐果期 Flowering and fruiting	06-08至07-12	57.0	66.0	75.0	3
果实膨大期 Fruit enlargement	07-13至08-15	45.0	52.5	60.0	3
果实成熟期 Fruit maturity	08-16至09-15	45.0	52.5	60.0	2
全生育期 Total growth period		180	210	240	9

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分

在枣树萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期分别采用土钻取土。取土位置距枣树主干50 cm处,取土深度为80 cm,每10 cm一层,每20 d测定一次。采用烘干法测定不同土层的土壤含水率,并根据公式(1)计算土壤贮水量 $W^{[15]}$ 。

$$W=H \times S \times \rho \times 10 \quad (1)$$

式中: W 为土壤贮水量,mm; H 为土层厚度,cm; S 为土壤质量含水率,%; ρ 为土壤容重,g·cm⁻³。

1.3.2 土壤温度

在枣树各生育时期前、中、后期选择晴天采用数显温度计(精确度为±0.5℃,分辨率为0.1℃)测定8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00土壤0~80 cm土层温度,每10 cm一层,每10 d测定一次。温度

计布设在各处理中间距枣树主干50 cm处,各处理各生育时期前、中、后期读数的平均值作为该生育时期的土壤温度。采用变异系数 C_v 和日间最大温差 T_i 表示土壤剖面温度变化程度。

变异系数采用公式(2)计算:

$$C_v = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: SD 为标准差; \bar{X} 为平均值。

日间最大温差采用公式(3)计算:

$$T_i = T_{i\max} - T_{i\min} \quad (3)$$

式中: $T_{i\max}$ 为试验期内第*i*层土壤8:00—18:00间的平均最高温度,℃; $T_{i\min}$ 为试验期内第*i*层土壤8:00—18:00间的平均最低温度,℃。

1.3.3 枣树生长指标和产量

使用卷尺和游标卡尺测量果实成熟期各处理的枣吊长、枣吊粗和新稍长、新稍粗。

盛花期初期在枣树东南西北四个方向分别选择长势一致的二次枝,每枝选择3个枣吊进行标记,统计其开花数量 N_1 ,在枣树果实成熟期统计标记枣吊上的枣果数量 N_2 ,坐果率 Z 采用公式(4)计算:

$$Z = \frac{N_1}{N_2} \times 100\% \quad (4)$$

枣果收获时,在枣树上中下三层、东南西北四个方向随机取样测定单果质量,并通过人工逐个采摘枣果进行测产,各处理产量(Y)采用公式(5)计算:

$$Y = \bar{Y} \times N \quad (5)$$

式中: Y 为单位面积产量,kg·亩⁻¹; \bar{Y} 为平均单株产量,kg; N 为平均单位面积植株数,株。

1.3.4 水分利用效率

根据公式(6)计算生育期耗水量:

$$ET = W_0 - W_t + P + I \quad (6)$$

式中: ET 为枣树全生育期耗水量,mm; W_0 、 W_t 分别为初始时刻、果实成熟期末0~80 cm土层土壤贮水量,mm; P 为时段*t*内的有效降水量,mm; I 为时段*t*内的灌水量,mm。由于本试验区水资源匮乏,地下水埋深较深,降雨量少,因而忽略了径流量、渗漏量和地下上升水的影响。

根据公式(7)计算水分利用效率:

$$WUE = Y/ET \quad (7)$$

式中: WUE 为水分利用效率,kg·m⁻³;其他参数与公式(5)和公式(6)一致。

1.3.5 气象资料

试验区设有小型气象站 Vantage Pro2(美国 DA-

VIS),用于观测气温(°C)、降雨量(mm)、风速(km·h⁻¹)、太阳辐射(μm)等气象数据。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 25.0软件进行数据整理和统计分析。通过双因素方差分析法研究覆砂和灌水量以及两者的交互作用对土壤水热、枣树生长和产量指标影响的显著性。不同处理间的差异采用单因素方差分析,均采用LSD法进行显著性检验(P<0.05),Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤温度时空变化特征

从图2中可以看出,各处理土壤温度变异系数和日间最大温差均随深度的加深而减小。各处理0~80 cm土壤剖面温度变异系数表现为裸土>覆砂,低水>中水>高水。所有处理组合0~80 cm土层平均日间最大温差从大到小表现为NW1>MW1>NW2>MW2>NW3>MW3。在图2a中,各处理0~10 cm土层受气温扰动较大(C_v>10%),因此选用0~10 cm土壤剖面的平均温度代表时刻温度。在图2b中,各处理最大温差平均值从大到小依次为0 cm(14.1 °C)>10 cm(7.2 °C)>20 cm(4.5 °C)>30 cm(2.7 °C)>40 cm(1.41 °C)>50 cm(1.20 °C)>60 cm(0.41 °C)>70 cm(0.32 °C)>80 cm(0.26 °C)。气温变化能够直接影响0~50 cm土壤剖面的温度(温差>1 °C),因此选用0~50 cm平均土壤温度代表日平均温度。

由图3可知,各处理0~10 cm土层土壤温度在8:00—16:00升温,8:00时土壤温度最低,各处理平均土壤温度为22.0 °C,16:00时最高,各处理平均土壤温度为31.5 °C。10:00时各处理土壤温度差异最小,16:00时各处理差异最大。在8:00—18:00,所有处理0~10 cm土壤温度从高到低表现为MW1>MW2>NW1>MW3>NW2>NW3。MW1处理较NW3处理最大温差和最小温差分别为5.5 °C和1.2 °C。覆砂处理0~10 cm土壤温度较裸土处理提高0.8~3.1 °C。裸土处理条件下地温的日变化与气温趋于一致,其地温上升速度主要集中在8:00—14:00,平均升温速度为1.5 °C·h⁻¹,最高升温时段为10:00—12:00;覆砂处理升温时段集中在10:00—14:00之间,平均升温速度

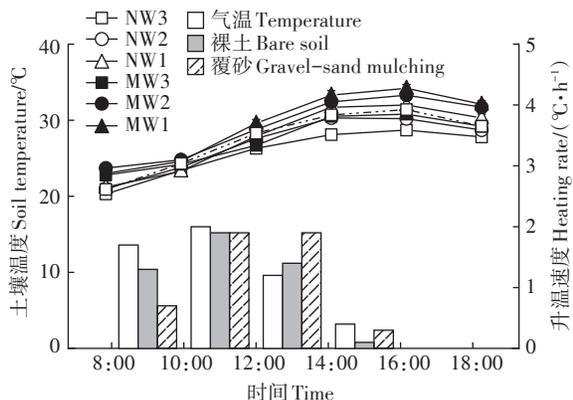


图3 土壤温度与气温日变化特征

Figure 3 Diurnal changes in soil temperature and air temperature

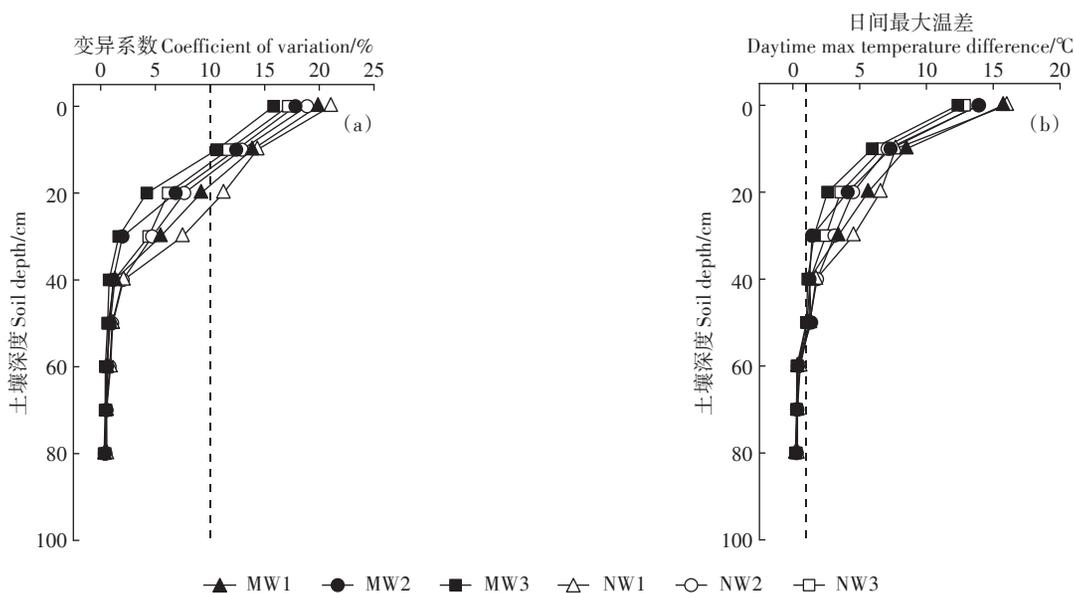


图2 土壤剖面温度变化特征

Figure 2 Soil profile temperature variation characteristics

为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,最高升温时段在 12:00—14:00。裸土处理和覆砂处理的升温时段表明覆砂处理的土壤温度升温集中且迅速,对气温的响应存在滞后效应。

不同生育时期各处理 0~50 cm 土层土壤日平均温度变化见表 2,各处理土壤温度与气温变化一致,均在果实膨大期最高,果实成熟期最低。不同生育时期内,覆砂和灌水量对土壤温度的影响均达到了显著水平($P<0.05$),而覆砂和灌水的交互作用对土壤温度的影响仅在果实成熟期达到了显著水平($P<0.05$)。在果实成熟期,相对 NW1 处理,MW1、MW2 处理和 MW3 处理分别使土壤温度升高 11.06%、9.13%、3.37%,而 NW2 处理和 NW3 处理使土壤温度分别下降 4.81% 和 6.25%。这说明在土壤增温方面,覆砂和灌水的交互作用减弱了单独覆砂对土壤增温的影响,

表 2 不同生育时期土壤日平均温度变化($^{\circ}\text{C}$)

Table 2 Change of daily average soil temperature in different growth stages($^{\circ}\text{C}$)

处理 Treatment	萌芽展叶期 Leaf bud stage	开花坐果期 Flowering and fruiting	果实膨大期 Fruit enlargement	果实成熟期 Fruit maturity
NW1	21.8±0.2b	23.6±0.3b	28.6±0.3bc	20.8±0.3d
NW2	21.5±0.3bc	23.5±0.3b	27.3±0.3d	19.8±0.3e
NW3	21.1±0.3c	22.9±0.3c	26.3±0.3e	19.5±0.2e
MW1	23.7±0.3a	25.4±0.3a	29.7±0.4a	23.1±0.3a
MW2	23.6±0.3a	25.4±0.3a	29.2±0.3ab	22.7±0.2b
MW3	23.4±0.3a	25.1±0.3a	28.1±0.3c	21.5±0.3c

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences among treatments at the $P<0.05$ level. The same below.

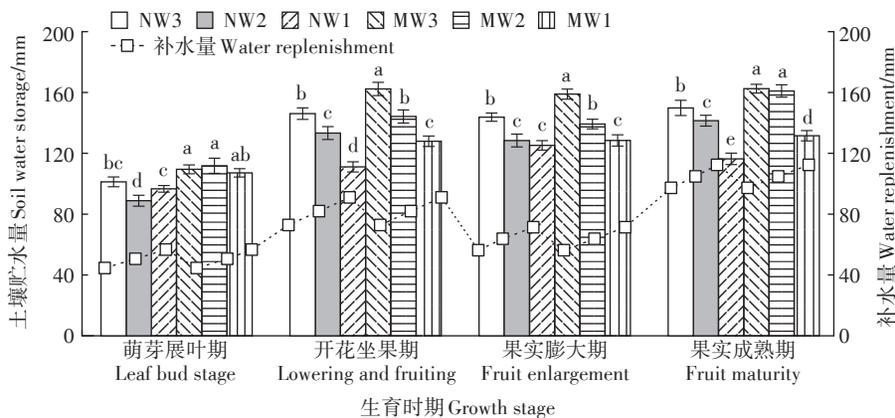
覆砂和灌水存在拮抗作用,且覆砂起主导作用。覆砂处理较裸土处理的增温度数在果实膨大期最低,果实成熟期最高,分别为 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 不同处理生育期内 0~80 cm 土壤贮水量变化

由图 4 可知,各处理 0~80 cm 土壤贮水量在果实成熟期最高,平均为 143.79 mm ,萌芽展叶期最低,平均为 102.54 mm 。补水量为各生育时期灌水量和有效降雨量总和。整个生育期内,覆砂和补水量显著影响土壤贮水量,其中,覆砂和灌水的交互作用对土壤贮水量的影响在萌芽展叶期达到了显著水平($P<0.05$)。覆砂和灌水的交互作用提升了单独灌水对土壤贮水量的增益效果。同一补水量下,覆砂处理土壤贮水量较裸土处理平均提高 10.97% 。各生育时期覆砂处理土壤贮水量较裸土处理增幅从大到小依次为萌芽展叶期(14.54%)>果实成熟期(11.62%)>开花坐果期(11.28%)>果实膨大期(7.35%)。同一覆盖条件下,土壤贮水量随补水量的增加而增加。果实成熟期补水量最高,萌芽展叶期最低。所有处理全生育期的平均土壤贮水量由大到小表现为 $\text{MW3}>\text{MW2}>\text{MW1}>\text{NW3}>\text{NW2}>\text{NW1}$ 。萌芽展叶期和果实成熟期 MW3 处理土壤贮水量较 NW1 处理分别提高 13.27% 和 39.67% 。

2.3 不同处理对枣树生长、产量和水分利用效率的影响

灌水量和覆盖方式能够影响枣果产量和枣树的生长指标。由表 3 可知,与裸土处理相比,覆砂处理能够显著提高枣果的坐果率和产量以及枣树的新梢长、新梢粗、枣吊粗($P<0.05$)。覆砂条件下高、中、低灌水量处理的产量较裸土处理分别提高 5.99% 、 10.54% 、 26.79% 。枣树各项生长指标和产量随灌水



同一生育时期不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Different letters at the same stage indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图 4 不同生育时期 0~80 cm 土壤贮水量和补水量

Figure 4 Soil water storage and recharge of 0~80 cm layer at different growth stages

表3 不同处理下枣树的生长及产量指标
Table 3 Growth and yield indicators of jujube under different treatments

处理 Treatment	坐果率 Fruiting rate/%	单果质量 Single fruit mass/g	产量/(kg·亩 ⁻¹) Yield/(kg·mu ⁻¹)	新梢长 New tip length/cm	新梢粗 New tip thickness/mm	枣吊长 Hanging fruit length/cm	枣吊粗 Hanging fruit thickness/mm	水分利用效率 WUE/(kg·m ⁻³)
NW1	8.68±1.19b	12.41±0.63b	180.94±10.08c	40.17±6.73c	5.33±0.42d	19.70±0.80b	1.39±0.11b	1.08±0.09c
NW2	8.96±2.65b	12.67±0.67b	236.56±15.77b	50.17±4.33bc	5.68±0.43cd	21.17±1.07b	1.43±0.09b	1.43±0.02b
NW3	12.78±1.59ab	14.69±0.63a	258.14±11.50a	51.20±7.69bc	6.77±0.22bcd	23.23±1.59b	1.54±0.07ab	1.37±0.02b
MW1	10.79±1.94b	13.12±0.68b	229.42±8.32b	60.90±11.11ab	7.05±0.59bc	20.70±2.52b	1.61±0.13ab	1.39±0.05b
MW2	14.76±1.72ab	12.75±0.74b	261.49±8.92a	65.70±8.65ab	8.11±1.67ab	22.97±1.16b	1.65±0.18a	1.55±0.09a
MW3	17.73±2.53a	15.75±0.86a	273.59±10.02a	73.77±11.87a	9.15±1.04a	30.80±4.33a	1.76±0.08a	1.47±0.05ab

注:1亩=667 m²。

Note: 1 mu=667 m².

量的增加而增加,且MW3处理最高,NW1处理最低。MW3处理各项生长指标和产量较NW1处理的增幅从大到小依次表现为坐果率(104.26%)>新梢长(83.62%)>新梢粗(71.67%)>枣吊长(56.35%)>产量(51.20%)>单果质量(26.91%)>枣吊粗(26.62%)。覆砂和灌水的交互作用对枣树生长和枣果产量的影响未达到显著水平($P>0.05$)。不同处理的水分利用效率从高到低依次为MW2>MW3>NW2>MW1>NW3>NW1。覆砂处理水分利用效率较裸土处理增加了7.30%~28.70%,说明覆砂的保墒抑蒸效果明显,是提高土壤水分利用效率的有效保护措施。

3 讨论

3.1 不同处理土壤水热变化

覆砂和灌溉能够直接引起土壤水热分布变化^[16],从而影响作物生长。与土壤本身相比,覆盖的砂层导热性较差,可作为保温层减少气温对下层土壤的扰动,从而降低0~80 cm土壤剖面的变异系数和日间最大温差。此外,由于砂层能够将更多的太阳辐射转换为热能,从而提高了土壤温度^[17]。覆砂处理0~10 cm的日间土壤温度比裸土处理高0.8~3.1℃,这与LI^[18]研究得到的覆砂条件下0~10 cm土层平均土壤温度比裸土高0.5~4.5℃的结果相似。0~10 cm土层的土壤温度日变化中,与裸土处理相比,覆砂处理的主要升温时段滞后,这与赵成政等^[19]研究得到的砾石覆盖后土壤呼吸峰值明显滞后于裸土的结果一致。与以往研究不同的是,本研究发现覆砂条件下土壤温度0~10 cm日变化主要升温时段比裸土更集中,升温速度比裸土平均高0.4℃·h⁻¹。这可能是因为砂层的导热性和蓄热能力相对裸土均较差:在早晨气温低时,覆砂处理中热量主要存蓄在砂层,仅有少部分热量传导至下层土壤,因而出现了覆砂后土壤温度对气温响

应的滞后效应;当中午至下午气温较高时,热量超过砂层的蓄热极限,导致砂层温度迅速升高,并将热量向周围环境和下层土壤传导^[20],从而出现覆砂后土壤集中升温的现象。土壤含水率与灌水量呈正相关,当土壤含水率低时,土壤中含有大量气体,导致土体导热性和热容较低,土壤温度更易受气温波动的影响,因此低灌水量时土壤温度变异系数和日间最大温差比高灌水量时大。在0~50 cm土壤温度的研究中发现,覆砂和灌水的交互作用在果实成熟期达到了显著水平,覆砂和灌水的交互作用既增加了土壤温度,也提高了土壤水分。覆砂能弱化灌水引起的土壤降温现象,两者具有拮抗作用^[21],覆砂升温的增益效果明显高于灌水导致的降温负效益,总体表现为升温,促进植物生长和成熟。

本研究表明覆砂可以提高0~80 cm土壤贮水量。覆砂促进了干燥表面的形成,并使蒸发锋更深地移位,减少蒸发,增加土壤水^[22]。覆砂处理的土壤贮水量相对裸土处理的增幅在萌芽展叶期最高,在果实膨大期最低。当土壤含水率较低时,较高的灌水量更易形成干燥表面,更快速地形成保护层^[23]。由于枣林试验前期主要靠自然降雨补充水分,土壤含水率低,对水分的输入更敏感^[24],因此,覆砂处理土壤贮水量增幅在萌芽展叶期最高。此外,覆砂和灌水的交互作用在该生育时期达到显著水平同样验证了此结果。覆砂后增加了土壤的截蓄能力^[25],本研究中果实膨大期降雨量在全生育期内最低,可能是导致果实膨大期覆砂处理较裸土处理增幅较低的原因。

3.2 不同处理生长指标、产量和水分利用效率的变化

土表覆砂作为一种传统的保护性耕作措施,能够抑制土壤水分蒸发,提高水分有效利用率,使土壤保持较高的含水率,具有增产提质的效果^[26]。土表覆盖可以改善枣树根部土壤环境,提高根系活力,从而促

进枣吊长、枣吊粗、单果质量等生长指标^[27],同时有明显的增产作用。土壤水分是释放土壤养分的基础,而大量的水分补给,对于作物增产效果不明显,且使水分利用效率降低^[28]。本研究结果表明,覆砂和增加灌水量均可提高枣树生长指标和产量。高灌水量处理下枣果产量最高,但较裸土处理产量增幅最低。且随着灌水量增加水分利用效率先增加后降低,覆砂处理和裸土处理均为中灌水量下水分利用效率最高。因此,综合考虑土壤水分、枣果产量、水分利用效率等指标,覆砂中水处理(MW2)为宁夏中部干旱带退耕压砂地枣林适宜的种植模式。

4 结论

(1)与裸土处理相比,覆砂处理降低了土壤温度变异系数和日间最大温差,提高了土壤保温能力和土壤温度。土壤覆砂后升温时间滞后,升温时段集中且速度快。此外,覆砂与灌水对土壤温度的影响具有拮抗作用,覆砂升温的增益效果明显高于灌水导致的降温负效益,总体表现为升温,覆砂土壤温度高于裸土温度。

(2)覆砂处理0~80 cm土壤贮水量在枣树各生育时期均高于裸土处理,且在土壤含水率最低的萌芽展叶期增幅最高,达14.54%。

(3)在三种灌水量下,覆砂处理的枣树生长指标、枣果产量和水分利用效率均高于裸土处理。其中,覆砂条件下灌水量210 mm时水分利用效率最高,为 $1.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,该种植模式可使产量提高10.54%,是宁夏中部干旱带退耕压砂地枣林适宜的种植模式。

参考文献:

- [1] XIE Z K, WANG Y J, CHENG G D, et al. Particle size effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency, and watermelon yield in fields mulched with gravel and sand in the semi-arid Loess Plateau of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 917-923.
- [2] 赵文举, 马宏, 郁文, 等. 不同覆盖模式对土壤水分蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(6): 539-544. ZHAO W J, MA H, YU W, et al. Effects of different mulching modes on soil moisture evaporation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(6): 539-544.
- [3] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 38-45. WANG X Y, LI Z X, CAI C F. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 38-45.
- [4] BU L D, LIU J L, ZHU L, et al. Effects of mulching on maize growth, yield, and water use in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 123: 71-78.
- [5] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1269-1277. DU S P, MA Z M, XUE L. Effects of different types of organic fertilizers on fruit yield, quality, and nutrient uptake of watermelon in gravel-mulched fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1269-1277.
- [6] 贾振江, 赵广兴, 李王成, 等. 宁夏中部干旱带砂土混合覆盖下土壤蒸发估算[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 219-227. JIA Z J, ZHAO G X, LI W C, et al. Estimation of soil evaporation under mixed sand cover in arid regions of central Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 219-227.
- [7] QIU Y, WANG Y J, XIE Z K. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass, and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of northwest China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2014, 64(4): 294-303.
- [8] ZHAO W J, CUI Z, ZHOU C Q. Spatiotemporal variability of soil-water content at different depths in fields mulched with gravel for different planting years[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 59(12): 52-53.
- [9] 王春燕, 李晓炜, 张雯莉, 等. 压砂西瓜连作土壤生物学特性和理化性质变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 659-664. WANG C Y, LI X W, ZHANG W L, et al. Changes in soil biological and physicochemical properties in continuous cropping of watermelon in sandy loam soil[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(5): 659-664.
- [10] WANG Y, YAN Y, YU J, et al. Different responses of photosystem II and antioxidants to drought stress in two contrasting populations of sour jujube from the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Research*, 2016, 31(6): 761-775.
- [11] ZHANG M, YANG L, HAO R Q, et al. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria isolated from jujube (*Ziziphus jujuba*) and their potential to enhance drought tolerance[J]. *Plant and Soil*, 2020, 452(1): 423-440.
- [12] 李晨, 李王成, 董亚萍, 等. 宁夏中部干旱带老压砂地枣树生物量模型研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(1): 161-166. LI C, LI W C, DONG Y P, et al. Biomass model of jujube trees in old gravel-mulched fields in the arid zone central Ningxia[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(1): 161-166.
- [13] 朱华. 宁夏老压砂地枣树灌溉制度试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016: 53-56. ZHU H. The research about irrigation procedure of Ningxia old-gravel mulched field jujube trees[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016: 53-56.
- [14] 赵文举, 崔珍, 马孝义, 等. 不同采样幅度和间距下压砂地枣树土壤水分的空间变异性研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(6): 1181-1189. ZHAO W J, CUI Z, MA X Y, et al. Effects of sampling extent and spacing on spatial variability of soil water content in a field with a gravel-mulched jujube tree[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(6): 1181-1189.
- [15] 侯贤清, 李荣. 秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 262-275. HOU X Q, LI R. Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature, and

- nutrient and potato growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12):262-275.
- [16] 徐天渊,贾振江,李王成,等.宁夏中部干旱带微咸水灌溉对砂土混合覆盖下土壤水盐运移的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):138-144. XU T Y, JIA Z J, LI W C, et al. Effects of brackish water irrigation on water and salt transport under mixed sand cover in the arid zone of central Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(5):138-144.
- [17] 王冬林,冯浩,刘晓青,等.砾石覆盖对小麦玉米轮作农田碳排放强度的影响[J].农业工程学报,2017,33(17):208-215. WANG D L, FENG H, LIU X Q, et al. Effects of gravel mulching on greenhouse gas emission intensity in wheat-maize rotation systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17):208-215.
- [18] LI X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2):105-127.
- [19] 赵成政,王亚军,谢忠奎,等.砾石长期覆盖对土壤呼吸的影响[J].中国沙漠,2020,40(2):232-239. ZHAO C Z, WANG Y J, XIE Z K, et al. Long-term effects of gravel sand mulch on diurnal variation of soil respiration in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2):232-239.
- [20] LÜ H S, YU Z B, HORTON R, et al. Effect of gravel sand mulch on soil water and temperature in the semi-arid Loess Region of northwest China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(11):1484-1494.
- [21] 王兴,钟泽坤,朱玉帆,等.增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响[J].环境科学,2022,43(3):1657-1667. WANG X, ZHONG Z K, ZHU Y F, et al. Effects of warming and increased precipitation on soil respiration of abandoned grasslands in loess-hilly regions[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1657-1667.
- [22] 谭军利,王西娜,田军仓,等.不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2018,344(17):100-108. TAN J L, WANG X N, TIAN J C, et al. Effect of gravel-sand mulching on movements of soil water and salts under different amounts of brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 344(17):100-108.
- [23] YAMANAKA T, INOUE M, KAIHOTSU I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2):145-155.
- [24] WANG J, GHIMIRE R, FU X, et al. Straw mulching increases precipitation storage rather than water use efficiency and dryland winter wheat yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 206:95-101.
- [25] 王冬林,冯浩,李毅,等.砾石覆盖条件下土壤水热效应对冬小麦田CO₂排放的影响[J].农业机械学报,2017,48(9):223-230. WANG D L, FENG H, LI Y, et al. Impacts of soil water and temperature effects on CO₂ emissions in winter wheat field under gravel mulching condition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9):223-230.
- [26] 冯浩,刘晓青,左亿球,等.砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J].农业机械学报,2016,47(5):155-163. FENG H, LIU X Q, ZUO Y Q, et al. Effects of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):155-163.
- [27] 赵思明,曹兵,万仲武,等.园艺地布和秸秆覆盖对枣园土壤温湿度与枣树生长的影响[J].核农学报,2021,35(5):1188-1195. ZHAO S M, CAO B, WAN Z W, et al. Effect of garden cloth covering and straw mulching on soil temperature, moisture and jujube growth in jujube orchard[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(5):1188-1195.
- [28] YE Y S, LIANG X Q, CHEN Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use [J]. *Field Crops Research*, 2013, 144:212-224.