

砾石覆盖对土壤水热过程及旱作小麦玉米产量的影响

王冬林^{1,2}, 冯浩^{1,2,3*}, 李毅^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为了揭示砾石覆盖对农田土壤水热变化及作物产量形成的影响, 2013—2015年采用小区试验法研究冬小麦-夏玉米轮作条件下土壤水分变化、温度效应以及作物生长和产量之间的相互作用关系。田间试验设置无覆盖(CK)、25%砾石覆盖(GM1)、50%砾石覆盖(GM2)、75%砾石覆盖(GM3)和100%砾石覆盖(GM4)5个处理。结果表明: 砾石覆盖度与土壤水分呈显著正相关, 100%砾石覆盖处理土壤贮水量最高; 干旱胁迫条件下砾石覆盖度越高土壤的保水性越好, 降雨条件下砾石覆盖度越高土壤截留雨水的的能力越大。砾石覆盖具有明显的增温效应, 4个砾石覆盖处理的土壤平均温度大于CK处理, GM4处理土壤平均温度最大; 砾石覆盖处理可以认为是一种有效的温度调节方式, 具体表现在低温(-5~0℃)条件下GM4处理较CK处理土壤温度增加5℃, 高温(40~45℃)条件下GM4处理较CK处理土壤温度降低3.7℃; 在寒冷气候和水分亏缺的情况下4个砾石覆盖处理增温能力均大于对照。此外, 夏玉米叶面积指数随着砾石覆盖度增加而增大。100%砾石覆盖处理的2季冬小麦和夏玉米平均产量较对照处理分别增加了58.55%和22.50%。可见, 砾石覆盖技术可以有效保持土壤水分、增加土壤温度、促进作物生长和提高产量, 是干旱半干旱地区应对水分胁迫和气候变化、实现农业增产的有效途径。

关键词: 砾石; 土壤水分; 温度; 产量; 响应机制; 冬小麦; 玉米

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.017

中图分类号: S152.7⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0132-08

王冬林, 冯浩, 李毅. 砾石覆盖对土壤水热过程及旱作小麦玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 132-139. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.017 http://www.tcsae.org

Wang Donglin, Feng Hao, Li Yi. Effects of gravel mulch on soil hydro-thermal process and rain-fed wheat-maize yields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 132-139. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.017 http://www.tcsae.org

0 引言

砾石覆盖技术是中国西北干旱半干旱地区经过长期生产实践形成的一种独有的保护性耕作方法, 在改善土壤环境、增加粮食产量、提高作物品质等方面具有显著作用^[1]。Li等^[2-4]研究表明, 砂石覆盖在高度侵蚀的黄土高原地区为植物生长提供了更好的生长环境, 且石子粒径越小对雨水拦截效果越好。作物在生长过程中, 土壤能够稳定而均匀地供给农作物生长所需要的水分, 有利于作物品质的提高^[5-6]。砾石覆盖不同于秸秆覆盖及塑料覆盖膜, 其土壤水分和土壤温度的形成必然区别于其他覆盖方式^[7-10]。农田表面的砾石覆盖层使得其土壤水分特征及分布规律不同于没有覆盖处理的土壤, Ma等^[11]通过田间试验研究表明, 卵石和砂子混合覆盖厚度越大, 越能保持土壤水分, 吕忠恕等^[12]通过试验测得砂田10 cm处土层的土壤含水率比土田高1.28%~2.96%。农田地表覆

盖砾石能够增加土壤温度^[13-15]。Fairbourn^[16]研究表明, 白天砾石覆盖土壤的温度比砂覆盖及无覆盖土壤的高。王金牛等^[17]研究不同砂砾组成条件下的土壤蒸发特征和温度变化, 结果表明4 cm厚度砂砾层覆盖条件下昼夜平均增温幅度2~30℃。砾石覆盖还具有明显的生态防护效果, 许强等^[18]以连续使用17 a年的砂田及撂荒砂田为研究对象, 结果表明连续种植可增加砂田土壤含水量, 养分含量在连续种植4~5 a后达到最高。Gale等^[19]指出砾石覆盖技术可以为相似作物生长环境下的农业措施提供一种思路。

国内外关于砾石覆盖的研究多在室内条件下进行, 砾石覆盖技术在大田实践上的理论研究尚不完善, 没有在农村土壤水分、温度以及作物产量等研究方面形成系统的成果, 有待于进一步地深入探究。因此有必要开展砾石覆盖大田试验研究, 并结合其历史地位、实际生产影响对其重要性做出评价^[20]。刘晓青等^[21-22]的研究结合了当地灌溉习惯, 侧重对砾石覆盖条件下的土壤蒸发、作物系数及水分利用效率进行研究, 认为砾石覆盖能减少蒸发促进入渗, 增加土壤剖面5 cm深处土壤温度, 提高作物产量和水分利用效率。考虑到水分是西北干旱半干旱地区农业发展的主要限制因素, 本文通过2 a旱作田间试验, 研究冬小麦-夏玉米轮作条件下, 砾石覆

收稿日期: 2016-08-26 修订日期: 2017-03-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA102904); 高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 王冬林, 女, 河南焦作人, 博士生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: wangdonglin@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 冯浩, 男, 陕西延安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用以及节水灌溉新技术、新方法和新材料研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

盖对土壤水分、温度以及作物生长和产量的影响, 分析土壤水分及温度的季节性变化规律以及土壤剖面水分运动规律和逐层温度变化规律, 探讨各处理应对干旱胁迫、雨水胁迫以及应对极端气候变化的能力, 旨在揭示砾石覆盖保水增温以及促进作物生长的机理, 为丰富农田覆盖耕作技术和完善砾石覆盖理论在农业生产方面的应用提供一种研究思路和方法。

1 材料与方法

1.1 试验地点及试验设计

2013 年 10 月—2015 年 10 月在陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉试验站 (108°24'E、34°20'N) 进行连续 2 a 的冬小麦-夏玉米轮作大田试验。试验站海拔 521 m, 站内设有国家一般气象观测站。该区光热资源充足, 年日照时数 2 163.8 h, 多年平均气温 12.9 °C; 降水主要集中在 7—10 月, 多年平均降水量为 635.1 mm, 年蒸发量为 993.2 mm, 属于半湿润干旱地区。

试验设置 5 个砾石覆盖度水平, 形成无覆盖 (CK)、25%覆盖度 (GM1)、50%覆盖度 (GM2)、75%覆盖度 (GM3) 和 100%覆盖度 (GM4) 5 个处理, 各重复 3 次, 共 15 个小区。试验小区东西走向, 长 5 m, 宽 3 m, 面积为 15 m², 各小区随机排列分布, 周围布置 1 m 宽的保护行。砾石粒径为 2 cm, 田间铺设方式为按照 8 kg/m² 的覆盖水平在植株行间进行均匀条状铺设, 于每季收获后清理, 第 2 年重新铺设砾石。砾石覆盖度的定义参考覆膜开孔度^[23]的计算。

$$\delta = A_{GM} / A_{plot} \times 100\% \quad (1)$$

式中 δ 为砾石覆盖度, 即砾石在试验小区铺设的面积 A_{GM} 占试验小区总面积 A_{plot} 的比例, %。

按照试验设计要求, 除砾石覆盖度不同外, 其他田间管理方式相同。供试土壤为中壤土, 1 m 土层平均田间持水量为 23%~25%, 凋萎含水量为 8.5%, 土壤平均容重为 1.44 g/cm³。供试小麦品种为小偃 22 号, 2014 年播种时间为 10 月 19 日, 2015 年播种时间为 10 月 17 日, 分别于 2014 年 6 月 7 日和 2015 年 6 月 5 日收获。冬小麦-夏玉米全生育期雨养不灌水, 于播种前将基肥一次翻入土壤, 施用量分别为氮肥 150 kg/hm²、磷肥 100 kg/hm²。锄草方式为定期人工锄草, 耕作方式为免耕。

1.2 测定项目及方法

采用管式土壤水分测定仪 TRIME-IPH TDR (德国 IMKO 公司, 精度±3.0%) 分层测定不同生育期的土壤剖面体积含水率。曲管水银地温计均埋设在小区中心位置, 分别记录 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 时 5、10、15、20、25 cm 土层的土壤温度数据, 监测频率为 7 d 1 次。

每个生育期内监测植株生长状况 (株高、根长、叶面积指数) 和生物量 (干物质)。株高、根长用直尺和游标卡尺测量; 叶面积指数 (leaf area index) 用英国 Delta T 仪器公司生产的 Sunscan 2000 冠层分析仪测定; 根区干物质用水洗和烘干法测定。成熟后的小麦人工单打单收、脱粒测产, 并计算单位面积产量。

对 2 a 土壤水分试验数据进行回归分析 (样本数为 105), 结合 Li 等^[2]和彭江涛^[24]研究结果, 本文选取差异较大的表层 1 m 土壤贮水量随时间的变化来描述土壤的保水能力, 见式 (2)。

$$\Delta w = A \cdot \delta + B \cdot T_1$$

$$\eta = 1.0 - \frac{\Delta w}{w_0} \quad (2)$$

式中 η 反映砾石覆盖层保水能力, 其值越大, 保水能力越强; Δw 为 2 次测量之间土壤贮水量变化量, mm; w_0 为土壤初始贮水量, mm; T_1 为 2 次测量间隔的时间, d; A 和 B 分别为计算系数。

砾石覆盖层截留雨水的过程比较复杂, 用降雨后表层土壤贮水量随时间的减少来描述土壤的降雨截蓄能力, 见式 (3)

$$\Delta w = a \cdot \delta - b \cdot P_r + c \cdot T_1 + d \cdot T_2$$

$$\zeta = 1.0 - \frac{\Delta w}{w_0} \quad (3)$$

式中 ζ 反映砾石覆盖层截留雨水能力的大小, 其值越大, 截留雨水能力越大; P_r 为最近一次的降雨量, mm; T_2 为该次测量距离降雨发生的时间, d; a 、 b 、 c 、 d 均为计算系数。

从土壤温度对气温的响应和土壤温度对土壤含水率的响应 2 个方面入手, 分别用土壤温度相对气温增加的百分比、土壤温度相对气温的增加幅度与土壤含水率的比值计算砾石覆盖层的增温能力, 见式 (4) 和式 (5)。

$$E_r = \frac{T_s - T_a}{T_a} \quad (4)$$

$$E_\theta = \frac{T_s - T_a}{100 \cdot \theta} \quad (5)$$

式中 E_r 为土壤温度 T_s 相对于气温 T_a 的增温能力, 其值越大, 土壤温度对气温的响应越敏感; E_θ 为土壤温度 T_s 相对于气温 T_a 和土壤水分的增温能力, °C/%, 其值越大, 土壤温度相对气温的变化对土壤水分的响应越敏感; θ 为土壤体积含水率, %。

1.3 资料统计与分析

利用 Microsoft Excel V2010 进行数据分析, 采用 SPSS22.0 软件中的 Duncan 新复极差法进行显著性检验 ($P < 0.01$ 或 0.05), Origin9.0 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤水分的影响

2.1.1 土壤水分的变化规律

2 季冬小麦-夏玉米生育期土壤水分具有相似的季节性变化规律, 出苗至拔节期的土壤贮水量较低, 拔节至成熟期受降雨增加的影响土壤贮水量显著增加, 以 2013—2014 年为例, 冬小麦-夏玉米生长季各处理土壤水分变化如图 1 所示。各处理 1 m 土壤贮水量年间差异表现为出峰时间、出峰次数以及峰值大小的不同, 这与降雨频次、降雨量大小有关。图 1 中土壤贮水量变化随着砾石覆盖度的增加而增大, 4 种砾石覆盖处理条件下 1 m 土壤贮水量总

体高于对照无覆盖处理,当砾石覆盖度为100%时,即GM4处理土壤贮水量平均最高。由表1可知,各处理间差异大部分时候达显著水平($P<0.05$),在不同生育期,GM4处理的土壤贮水量均最高,对照处理土壤贮水量均最小。

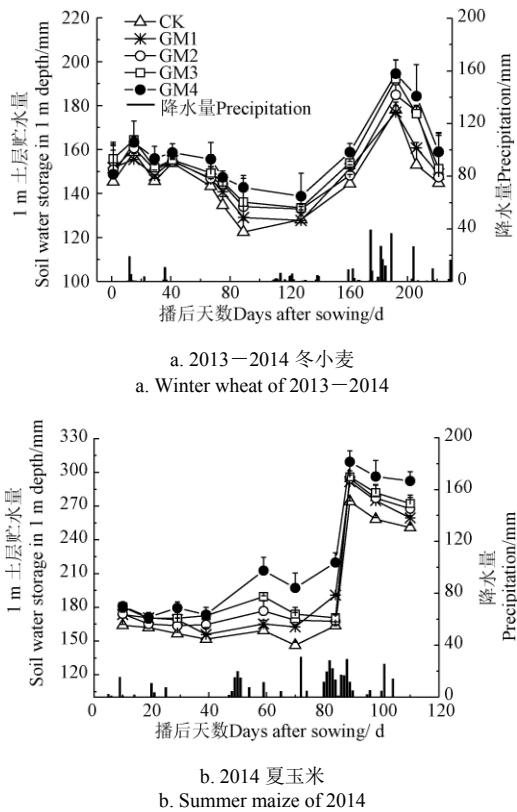


图1 冬小麦-夏玉米轮作条件下1 m土壤贮水量季节变化
Fig.1 Seasonal variation of soil water storage in 1 m depth in winter wheat and summer maize rotation system

表1 不同砾石覆盖处理1 m土壤贮水量变化

Table 1 Soil water storage in 1 m soil profile of different gravel mulch treatments

		mm			
作物	处理	拔节	抽穗	灌浆	成熟
Crops	Treatments	Jointing	Heading	Filling	Maturity
冬小麦 Winter wheat	CK	144.44b	178.10c	153.04b	144.81c
	GM1	151.26b	177.01bc	160.69b	148.83b
	GM2	148.28ab	184.84b	177.42ab	147.43b
	GM3	153.91a	192.16ab	176.28ab	151.36a
	GM4	158.80a	194.57a	184.31a	158.93a
玉米 Summer maize	CK	146.26c	163.63b	274.06c	250.91b
	GM1	162.53b	190.83a	291.75b	259.44bc
	GM2	168.49b	167.49b	294.37b	267.64b
	GM3	173.93ab	170.61b	295.90b	272.28b
	GM4	197.21a	219.82a	309.33a	292.32a

注: CK、GM1、GM2、GM3和GM4分别为无覆盖、25%覆盖度、50%覆盖度、75%覆盖度和100%覆盖度处理;不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下同。

Note: CK, GM1, GM2, GM3 and GM4 indicate control with no mulch, 25% of surface gravel mulch, 50% of surface gravel mulch, 75% of surface gravel mulch and 100% of surface gravel mulch, respectively; Different letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$); the same below.

对砾石覆盖度和表层土壤贮水量进行相关性分析表明,砾石覆盖度和第1季冬小麦播后41、67、75、221 d表层土壤贮水量的相关系数分别为0.71、0.75、0.78、0.77 ($P<0.01$)。砾石覆盖度和第2季冬小麦播后89、221 d

表层土壤贮水量的相关系数分别为0.57、0.60 ($P<0.05$)。砾石覆盖度和第1季玉米播后59、70 d表层土壤贮水量的相关系数为0.55和0.56 ($P<0.05$)。砾石覆盖度和第2季玉米播后80 d表层土壤贮水量的相关系数为0.55 ($P<0.05$)。结合物候期记录数据,可知砾石覆盖度与冬小麦越冬期、返青期和拔节期土壤贮水量呈极显著性正相关 ($P<0.01$),砾石覆盖度与夏玉米拔节期、灌浆期土壤体积分水率呈显著正相关 ($P<0.05$)。

该试验2季冬小麦和夏玉米全生育期内无灌溉,2013-2014年冬小麦出苗至拔节期(播后10~150 d)出现连续70 d(播后40~110 d)几乎无降雨(图1a),认为该生育期阶段(播后40~110 d)受到一定程度的水分胁迫,选取期间4次测量的平均值研究冬小麦干旱期土壤剖面水分变化;2014-2015年冬小麦拔节至成熟期(播后150~230 d)雨水充足,选取期间4次测量的平均值研究冬小麦丰水期土壤剖面水分变化。图2为两季冬小麦0~1 m土壤剖面水分变化。从图2可以看出,表层土壤含水率低于1 m土层土壤含水率,各处理间差异较显著 ($P<0.05$),砾石覆盖度越高土壤含水率越大,GM4处理平均土壤含水率最大。

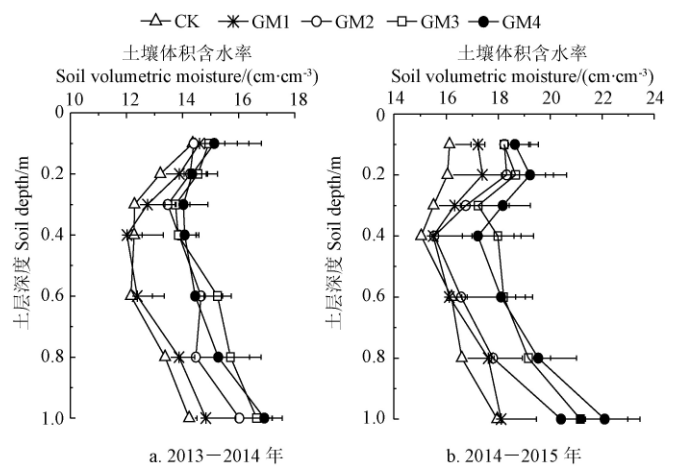


图2 冬小麦土壤剖面水分变化

Fig.2 Variation of soil moisture along profile for winter wheat

2.1.2 各处理土壤保水能力和截蓄雨水能力

分别对干旱期和丰水期各处理土壤水分变化规律进行研究。2013-2014年干旱期选取差异较大的表层土壤含水率随时间的变化描述土壤的保水能力。根据式(2)计算的干旱胁迫条件下各处理土壤保水能力如图3a所示,砾石覆盖度越高,土壤的保水能力越大。由于土壤水分随时间不断减少,各处理保水能力呈下降趋势,100%砾石覆盖处理保水能力的减小较其他处理缓慢。

降雨发生时,有砾石覆盖层的农田雨滴在砾石覆盖层进行二次重分布,无砾石覆盖层的农田降雨直接落在土壤表面并随蒸发和入渗过程流失^[24]。砾石覆盖层截留雨水的过程比较复杂,本文用降雨后表层土壤贮水量随时间的减少来描述土壤的降雨截蓄能力(式(3)),如图3b所示。降雨后100%砾石覆盖度截蓄雨水能力大于其他处理,且减小趋势平缓。砾石覆盖度越高,2次测量之间土壤贮水量增加越多,土壤截蓄雨水的的能力越大。

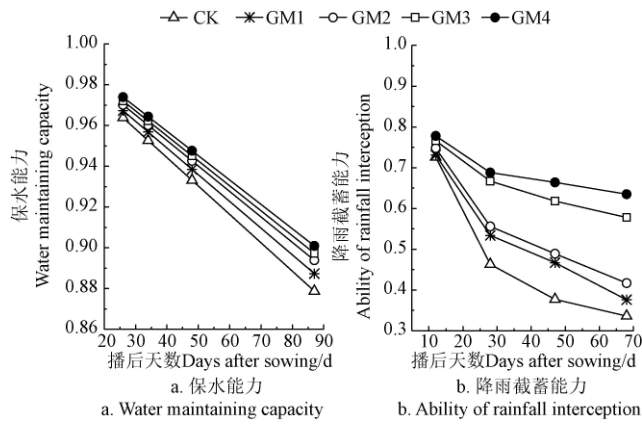


图 3 各处理土壤保水能力和降雨截蓄能力

Fig.3 Soil water maintaining capacity and ability of rainfall interception under different treatments

2.2 不同处理对土壤温度的影响

2.2.1 土壤温度变化规律

2 季冬小麦—夏玉米土壤温度变化均表现为夏季高冬季低，年际差异不大，以 2014—2015 年冬小麦—夏玉米轮作条件下土壤日平均温度的季节变化为例（图 4），从图中可以看出，砾石覆盖度越高土壤日平均温度越高，4 种砾石覆盖处理条件下的土壤日平均温度均高于对照，100%砾石覆盖，即 GM4 处理的土壤日平均温度最高。由表 2 可知，各处理间差异大部分时候达显著水平 ($P < 0.05$)，在冬小麦和夏玉米的拔节期、灌浆期增温效果显著，成熟期则差异不明显。

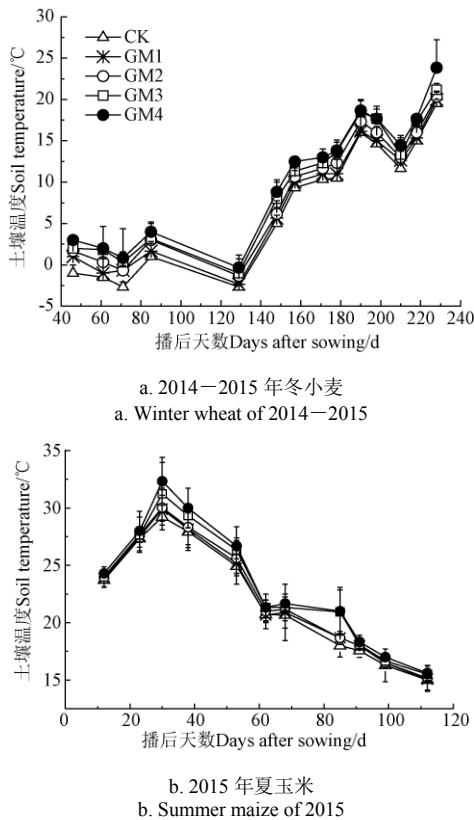


图 4 冬小麦-夏玉米轮作条件下土壤日平均温度变化
Fig.4 Variation of daily average of soil temperature in winter wheat and summer maize rotation system

表 2 不同砾石覆盖处理土壤日平均温度变化
Table 2 Change of daily average soil temperature under different gravel mulch treatments

作物 Crops	处理 Treatments	拔节 Jointing	抽穗 Heading	灌浆 Filling	成熟 Maturity
冬小麦 Winter wheat	CK	9.33d	16.17c	14.67c	19.50b
	GM1	10.31cd	16.67c	15.00c	20.11b
	GM2	10.67bc	17.33b	16.00b	20.33b
	GM3	11.33b	18.50a	17.67a	21.17b
	GM4	12.50a	18.67a	17.67a	23.83a
夏玉米 Summer maize	CK	13.98bc	15.31a	27.35b	21.52a
	GM1	14.27b	16.74a	27.10b	24.65a
	GM2	16.78ab	16.99a	28.51ab	24.15a
	GM3	17.60a	16.20a	28.81ab	26.93a
	GM4	17.82a	18.38a	29.76a	27.00a

为了研究砾石覆盖应对气候变化的作用，用 1 a 中测得的土壤最低温度（12 月 3 日 8:00）代表寒冷期温度，最高温度（8 月 2 日 14:00）代表高温期温度，分析各处理土壤逐层温度变化动态，如图 5 所示。研究表明，低温条件下（土壤温度 $-5 \sim 0$ °C）GM4 处理较 CK 处理土壤温度增加 5 °C，其他处理均高于对照处理；高温条件下（土壤温度 $40 \sim 45$ °C）GM4 处理较 CK 处理土壤温度降低 3.7 °C，其他处理均低于对照处理。从图中还可以看出 4 个砾石覆盖处理土壤逐层温度变化差值基本小于 CK 处理，GM4 处理温度变化最小，说明砾石覆盖处理具有保温能力，可以较好地应对气候变化。

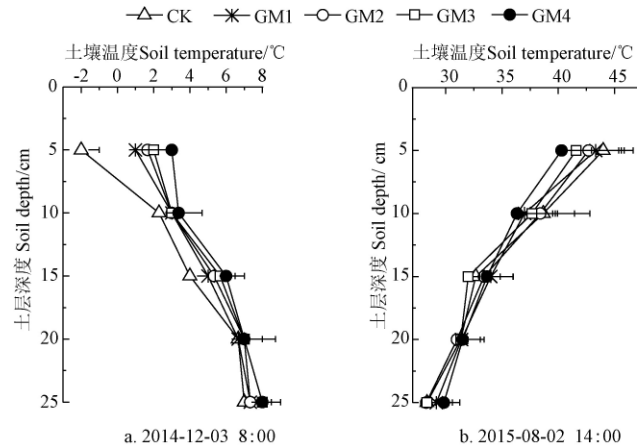


图 5 极端气候条件下土壤逐层温度变化

Fig.5 Variation of soil temperature at different soil depths in extreme weather conditions

2.2.2 土壤温度对气温和水分的敏感性分析

图 6 对比了不同砾石覆盖度条件下土壤增温能力对气温和水分的响应（式（4）和式（5））。由图 6a 看出，当气温低于 20 °C 时，砾石覆盖各处理增温能力均大于 CK 处理，GM4 处理的增温能力最大；当气温高于 20 °C 时，所有处理土壤温度随着气温的升高而增加，CK 处理的土壤温度对气温升高响应迅速，各处理间增温能力差异不大，且砾石覆盖处理的增温能力有降低趋势。由图 6b 看出，当体积含水率低于 22% 时，砾石覆盖各处理增温能力均大于 CK 处理，GM4 处理的增温能力最大；当体积

含水率高于22%时,各处理间增温能力差异不大。在寒冷气候和水分亏缺的情况下各处理增温能力差异较大,4个砾石覆盖处理的增温能力均大于对照,GM4处理的增温能力更大。

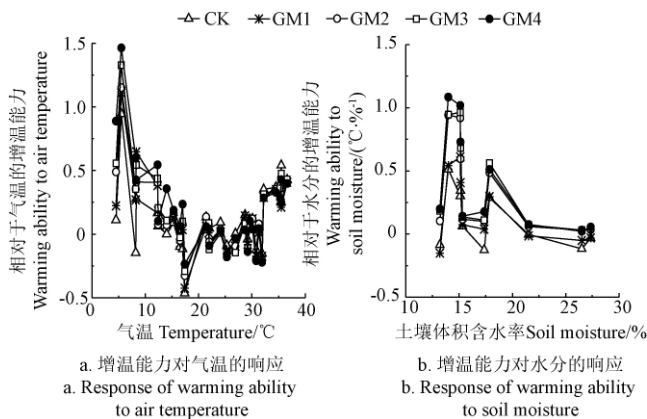


图6 各处理土壤增温能力敏感性分析

Fig.6 Sensibility analysis on soil warming ability of different treatments

2.3 不同处理对作物生长及产量的影响

2.3.1 作物生长指标的变化

2013—2014年冬小麦-夏玉米生长季各试验处理条件下的株高和叶面积指数的变化如图7。

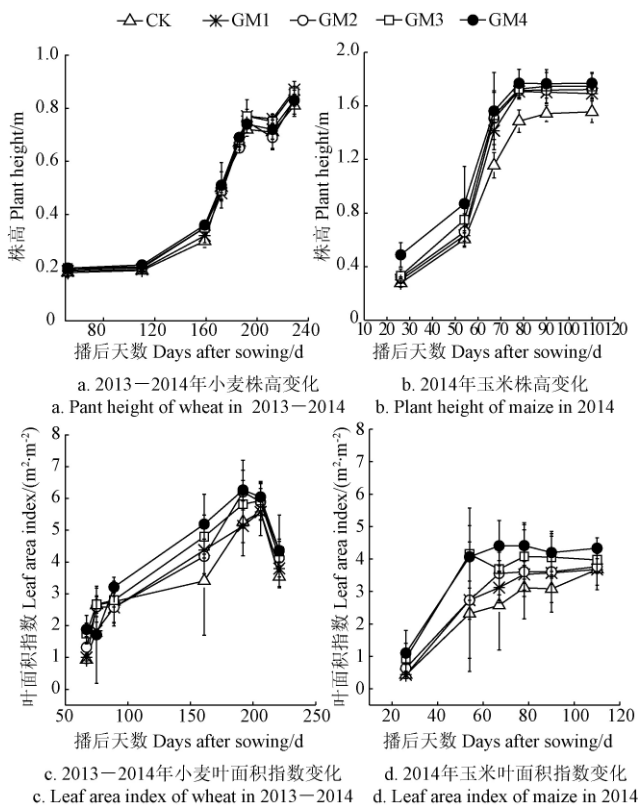


图7 冬小麦-夏玉米轮作条件下株高和叶面积指数随播后天数的变化

Fig.7 Variations of plant height and leaf area index with days after sowing in winter wheat and summer maize rotation system

图7表明,各处理冬小麦株高差异不明显,叶面积指数随着砾石覆盖度增加而显著增加;夏玉米表现为砾

石覆盖度越高,株高和叶面积指数越大。各处理叶面积指数在冬小麦-夏玉米整个生育期的变化整体呈现先升高后降低的趋势,这是由于作物进入灌浆期之前叶片不断生长,叶面积指数升高,直至灌浆期达到最大值;灌浆期之后叶片开始衰老,叶面积指数随之降低。

2013—2015年冬小麦-夏玉米不同生育期地上部分干物质质量汇总见表3。由表3可知,CK处理各生育期地上部分干物质质量均最低,GM4处理最高,这可能与砾石覆盖处理的干旱期保水、寒冷期增温效应有关,影响了干物质质量的积累。由表3还可以看出,冬小麦拔节期到灌浆期地上部分干物质质量不断增加,直至灌浆期达到最高,成熟期较灌浆期略有降低,这一结果与冬小麦叶面积指数变化规律一致。

表3 冬小麦-夏玉米轮作条件下地上部分干物质质量

		kg·hm ⁻²				
作物	处理	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	
Crops	Treatments	Jointing	Heading	Filling	Maturity	
2013—2014 冬小麦 Winter wheat in 2013— 2014	CK	4 997.92c	10 393.75c	13 984.37c	12 784.23c	
	GM1	4 650.00c	10 431.25c	14 284.38bc	13 415.4b	
	GM2	5 628.12bc	11 025.00b	15 853.12b	13 838.83b	
	GM3	6 918.75ab	11 891.05b	16 718.75a	14 484.26a	
	GM4	8 418.75a	12 925.00a	16 134.38a	14 699.47a	
2014—2015 冬小麦 Winter wheat in 2014— 2015	CK	4 862.81d	7 848.75c	12 672.71d	12 715.62d	
	GM1	5 845.94c	9 144.01bc	13 461.87c	13 383.03c	
	GM2	6 305.00c	10 647.13ab	15 643.02b	14 015.62b	
	GM3	7 137.81b	11 821.87ab	17 056.67a	14 392.85b	
	GM4	7 925.94a	12 070.57a	17 215.83a	14 973.21a	
2014 玉米 Maize in 2014	CK	4 135.75c	6 305.52c	7 500.58c	8 649.08c	
	GM1	4 221.1c	6 487.8c	9 847.94bc	9 893.94b	
	GM2	6 370.2ab	7 520.76bc	10 344.15bc	10 517.21b	
	GM3	6 708.2a	8 225.1b	11 176.26b	11 494.94a	
	GM4	6 771.9a	10 352.94a	13 181.17a	11 617.73a	
2015 玉米 Maize in 2015	CK	4 062.5d	6 078.00d	9 566.1d	9 607.76c	
	GM1	4 906.25c	8 724.00c	11 031.3c	10 160.11bc	
	GM2	6 300.00b	9 147.99bc	11 477.1c	11 036.15b	
	GM3	6 508.25b	10 734.00b	12 498.1b	11 853.67b	
	GM4	7 181.25a	12 567.99a	14 678.1a	12 446.94a	

2.3.2 产量的变化

冬小麦-夏玉米连续2个生长季经济产量的变化如图8所示,连续2a砾石覆盖田间管理措施条件下,第2季冬小麦和夏玉米的产量较第1季都有所增加。砾石覆盖GM2、GM3、GM4处理2季冬小麦平均产量较对照处理分别增加了23.02%、41.51%和58.55% ($P<0.05$)。砾石覆盖GM3、GM4处理2季夏玉米平均产量较对照处理分别增加了18.20%和22.50% ($P<0.05$)。分析砾石覆盖度和冬小麦-夏玉米产量之间的关系,发现二者具有极显著的相关性 ($P<0.01$),砾石覆盖度与第1、2季冬小麦产量、第1、2季夏玉米产量的相关系数分别为0.73、0.80、0.68、0.75 ($P<0.01$)。

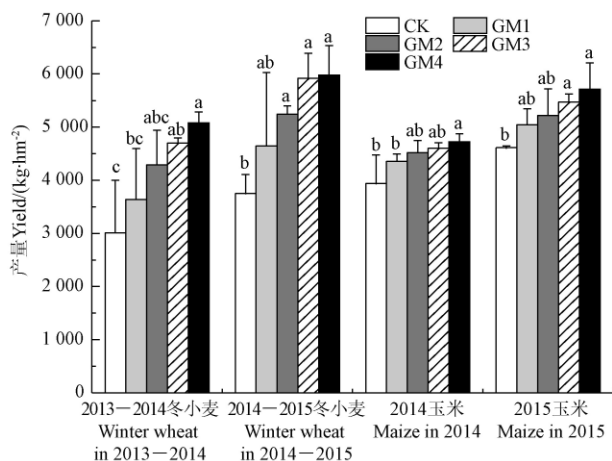


图 8 不同处理对 2013-2015 冬小麦和夏玉米产量的影响
Fig.8 Effects of different treatments on yield of winter wheat and summer maize in 2013-2015

3 讨论

3.1 砾石覆盖对土壤水热过程的影响

砾石覆盖不同于其他农业覆盖技术, 其土壤水热特征及分布规律也有所不同^[25-26]。农田表面的砾石覆盖层, 可以抑蒸保墒, 改善土壤水分状况, 有效促进水分入渗, 同时砾石覆盖层使得土壤接收太阳辐射的能力增强, 使得表层土壤温度更易提高, 有利于热量的传递。本研究对 2 a 轮作条件下各处理土壤水分和温度变化进行连续监测, 2 季冬小麦和夏玉米土壤贮水量变化均表现为出苗期至拔节期较低, 拔节至成熟期受降雨增加的影响土壤贮水量显著增加。各处理间贮水量的差异表现为, 砾石覆盖度越高, 土壤贮水量越大, 其中 GM4 处理条件下的土壤贮水量最大, CK 处理最小。各处理表层土壤含水率变化差异显著, 分析表明砾石覆盖度与作物生长关键生育期的土壤含水率显著正相关, 且干旱胁迫条件下 GM4 处理土壤保水性最好, 降雨条件下 GM4 处理土壤截留雨水的能力更大, 说明 100%覆盖度的砾石覆盖处理有利于土壤保水蓄水。砾石覆盖相当于土壤的保温层, 各处理间土壤温度差异显著, 砾石覆盖处理高于对照, 且 GM4 处理土壤平均温度最高。分析土壤逐层温度变化, 砾石覆盖处理的保温作用使得土壤表层和深层的土壤温度变化差值小于对照处理, 砾石覆盖的增温能力可以更好地应对水分胁迫和气候变化。与以往研究的不同表现在, 砾石覆盖可以认为是一种有效的温度调节方式, 对冬小麦越冬期-拔节期的土壤具有增温作用, 对夏玉米各生育期可有效抑制土壤温度升温过快, 这一提法与 Lamb 等^[27-28]研究结果一致。砾石覆盖具有使冬小麦耐寒和夏玉米抑高温伤害的作用, 这一研究结果对作物的生长是有利的。以上分析还表明, 砾石覆盖有一个有效作用期, 在作物关键缺水期可抑制水分减少速率, 高温天气可抑制高温, 在有丰富降雨和适宜温度时期砾石覆盖的作用不明显, 这一思路与严昌荣等^[29]提出作物覆膜安全期的概念有相似之处, 还需进一步研究。

3.2 砾石覆盖对作物生长及产量的影响

研究砾石覆盖对作物生长及产量的影响, 应从叶片生长速度 (叶面积指数)、植株生长情况 (株高、生物量增长率) 以及对产量的影响 3 个方面入手^[30]。已有研究表明, 砾石覆盖的农作物都比较高、强健, 具有较大的根系与叶面积指数, 本研究中各处理不同生育期株高和叶面积指数大小表现为随着砾石覆盖度增加而增加。不同处理冬小麦株高差异不明显, 夏玉米株高间差异较大; 叶面积指数在冬小麦-夏玉米整个生育期的变化整体呈现先升高后降低的趋势; 冬小麦拔节期-灌浆期地上部分干物质质量不断增加, 直至灌浆期达到最高, 成熟期较灌浆期略有降低, 这与余坤等^[31-32]研究结果一致。对冬小麦-夏玉米不同生育阶段株高、叶面积指数和地上部分生物量与产量之间的关系进行显著性分析, 株高与产量无显著相关 ($P>0.05$), 冬小麦分蘖期和灌浆期叶面积指数与产量的相关系数分别为 0.70 ($P<0.01$) 和 0.62 ($P<0.05$), 夏玉米拔节期和成熟期叶面积指数与产量相关系数分别为 0.77 ($P<0.01$) 和 0.57 ($P<0.05$); 冬小麦各生育期生物量与产量极显著相关 ($P<0.01$), 夏玉米拔节期和灌浆期生物量与产量显著相关 ($P<0.05$)。综上, 砾石覆盖度越高, 作物生长各项指标 (株高、叶面积指数、生物量) 越大, 100%砾石覆盖处理产量连续 2 a 最高, 且第 2 季冬小麦和夏玉米产量均高于第 1 季产量, 砾石覆盖处理有利于作物生长及产量形成, 100%砾石覆盖处理效果最好, 这与冯浩等^[33-34]研究结果一致。

4 结论

1) 砾石覆盖具有保水蓄水的功能。砾石覆盖度与土壤水分呈显著正相关, 砾石覆盖处理的土壤贮水量显著高于对照处理。砾石覆盖度越高, 干旱胁迫条件下土壤保水性越好, 降雨条件下土壤截留雨水的能力越大, 100%砾石覆盖处理较其他处理更有利于作物应对干旱胁迫, 改善土壤水分条件。

2) 各处理间土壤温度差异显著, 100%砾石覆盖处理土壤平均温度最高。砾石覆盖度越高, 土壤剖面逐层温度变化差异越小, 土壤的保温效果越好。在寒冷气候和水分亏缺的情况下各处理增温能力差异较大, 100%砾石覆盖处理的增温能力最明显。砾石覆盖的温度调节作用还具有使冬小麦耐寒和降低夏玉米高温伤害的作用。

3) 砾石覆盖通过调节关键生育期水分和温度, 进而影响作物生长的各项指标, 最终影响产量形成。砾石覆盖度越高, 作物各项生长指标越大, 产量越高, 100%砾石覆盖处理两季冬小麦和夏玉米平均产量较对照处理分别增加了 58.55%和 22.50%。

[参考文献]

- [1] 吴宏亮. 宁夏中部干旱区砾石覆盖对土壤水热特性及西瓜生长发育的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
Wu Hongliang. Characteristics of Soil Hydro-thermal Property and Effect on Watermelon Growth on Gravel-sand Mulching in the Arid Zone of Central Ningxia, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese with

- English abstract)
- [2] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2): 105–127.
- [3] Li XiaoYan, Gong Jiadong. 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.
- [4] Li Xiaoyan, Shi Peijun, Liu Lianyou, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1): 70–78.
- [5] Wang Yajun, Xie Zhongkui, Sukhdev S Malhi, et al. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 101(1): 88–92.
- [6] Wang Zhaohui, Li Shengxiu, Cecil L Vera, et al. Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(11/12): 1405–1419.
- [7] Gouranga Kar, Ashwani Kumar. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in eastern India[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1): 109–116.
- [8] Zhang Shulan, Lars Lövdahl, Harald Grip, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 78–86.
- [9] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 玉米田地温的时空变化特征及其预报[J]. *水利学报*, 2003, 1(1): 103–108.
Li Yi, Shao Ming an, Wang Wenyan, et al. Temporal and spatial variation and forecast of soil temperature in maize fields[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 1(1): 103–108. (in Chinese with English abstract)
- [10] 时连辉, 韩国华, 张志国, 等. 秸秆腐解物覆盖对园林土壤理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 113–117.
Shi Lianhui, Han Guohua, Zhang Zhiguo, et al. Effect of mulching with straw composts on soil properties of landscape[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(1): 113–117. (in Chinese with English abstract)
- [11] Ma Yujun, Li Xiaoyan. Water accumulation in soil by gravel and sand mulches: Influence of textural composition and thickness of mulch layers [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(5): 432–437.
- [12] 吕忠恕, 陈邦瑜. 甘肃砂田的研究[J]. *农业学报*, 1955, 6(3): 299–312.
- [13] 毛云玲, 邓佳, 陆斌, 等. 不同覆盖方式对云南干热河谷油橄榄园土壤温度、水分和容重的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(1): 150–154.
Mao Yunling, Deng Jia, Lu Bin, et al. Effects of different mulching on soil temperature, moisture and unit weight of olea europaeal garden in dry and hot valley of Yunnan[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(1): 150–154. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴姝, 张树源, 沈允钢. 昼夜温差对小麦生长特性的影响[J]. *作物学报*, 1998, 24(3): 333–337.
Wu Shu, Zhang Shuyuan, Shen Yungang. Influence of temperature difference between day and night on the growth characteristics in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(3): 333–337. (in Chinese with English abstract)
- [15] 贺欢, 田长彦, 王林霞. 不同覆盖方式对新疆棉田土壤温度和水分的影响[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(6): 826–831.
He Huan, Tian Changyan, Wang Linxia. Effect of different coverings on soil temperature and soil Moisture content in cotton field in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(6): 826–831. (in Chinese with English abstract)
- [16] Fairbourn M L. Effect of gravel mulch on crop yields[J]. *Agronomy Journal*, 1973, 65(6): 925–928.
- [17] 王金牛, 谢忠奎, 郭志鸿, 等. 砂田退化对土壤温度和蒸发影响的模拟研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 388–393.
Wang Jinniu, Xie Zhongkui, Guo Zhihong, et al. Simulating the effect of gravel-sand mulched field degradation on soil temperature and evaporation[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 388–399. (in Chinese with English abstract)
- [18] 许强, 吴宏亮, 康建宏, 等. 旱区砂田肥力演变特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 37–41.
Xu Qiang, Wu Hongliang, Kang Jianhong, et al. Study on evolution characteristics of sandy-field in arid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 37–41. (in Chinese with English abstract)
- [19] Gale W J, McColl R W, Xie Fang. Sandy field traditional farming for water conservation in China[J]. *Soil Water Conservation*, 1993, 48(6): 474–477.
- [20] Yang Qidong, Zuo Hongchao, Xiao Xia, et al. Modeling the effects of plastic mulch on water, heat and CO₂ fluxes over cropland in an arid region[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452: 102–118.
- [21] 刘晓青. 轮作条件下砾石覆盖量对农田水分及作物生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Liu Xiaoqing. Effects of Gravel Mulching Degree on Farmland Moisture and Growth of Crop Roation System[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [22] 左亿球. 砾石覆盖对农田土壤水热及作物生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Zuo Yiqiu. Effects of Sand-gravel Mulching on Soil Water and Growth and Development of Field Crop[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李毅, 邵明安. 新疆农田作物覆膜地温极值的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2039–2044.
Li Yi, Shao Mingan. Spatial and temporal variation of soil temperature extremum under plastic mulch in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2039–2044. (in Chinese with English abstract)
- [24] 彭红涛. 砂砾覆盖层截留降雨的机理研究[D]. 北京: 中国科学院, 2016.
Peng Hongtao. Study on the Mechanism of Rain water Interception by the Pebble and Sand Mulches[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [25] Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Gao Qianzhao, et al. Rainfall interception loss by pebble mulch in the semiarid region of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228: 165–173.
- [26] Wang Yajun, Xie Z K, Li Fengmin, et al. The effect of supplemental irrigation on watermelon production in gravel and sand mulched fields in the Loess Plateau of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(1): 29–41.
- [27] Lamb J, Chapman J E. Effect of surface stones on erosion, evaporation, soil temperature, and soil moisture[J]. *Agronomy Journal*, 1943, 35(7): 567–578.
- [28] Jury W A, Bellantuoni B. Heat and water movement under surface rocks in a field soil: I. Thermal effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(4): 505–513.
- [29] 严昌荣, 何文清, 刘恩科, 等. 作物地膜覆盖安全期概念和估算方法探讨[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 1–4.
Yan Changrong, He Wenqing, Liu Enke, et al. Concept and

- estimation of crop safety period of plastic film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [30] 马树庆, 王琪, 陈凤涛, 等. 春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 171-179.
Ma Shuqing, Wang Qi, Chen Fengtao, et al. Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 171-179. (in Chinese with English abstract)
- [31] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103-111.
Yu Kun, Feng Hao, Zhao Ying, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 103-111. (in Chinese with English abstract)
- [32] 何立谦, 张维宏, 杜雄, 等. 土下覆膜与适宜灌水提高冬小麦水分利用率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 94-104.
He Liqian, Zhang Weihong, Du Xiong, et al. Soil-coated ultrathin plastic-film mulching and suitable irrigation improve water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp.1): 94-104. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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 Hao, Liu Xiaoqing, Zuo Yiqiu, et al. Effect 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. (in Chinese with English abstract)
- [34] 赵丹, 李毅, 冯浩. 砾石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1058-1068.
Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao. Dynamics of soil water evaporation from soil mulch with sand-gravels in stripe[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(5): 1058-1068. (in Chinese with English abstract)

Effects of gravel mulch on soil hydro-thermal process and rain-fed wheat-maize yields

Wang Donglin^{1,2}, Feng Hao^{1,2,3*}, Li Yi^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Rain-fed farming in semi-arid areas of the Loess Plateau in China is constrained by low temperatures and water limitations at the early crop growth stage, and the gravel mulch technology as an effective strategy has been used for centuries to conserve soil water and increase soil temperature. To reveal the effects of gravel mulch on soil moisture, soil temperature, rain-fed crop growth as well as yield, a field study of consecutive wheat-maize rotation was conducted in Shannxi Province in the year of 2013-2015. The field experiment was arranged under natural rain-fed conditions with 5 gravel mulching levels, including control with no mulch (CK), surface gravel mulch of 25% (GM1), surface gravel mulch of 50% (GM2), surface gravel mulch of 75% (GM3) and surface gravel mulch of 100% (GM4). The results showed that soil moisture was significantly and positively correlated with gravel mulch degree (GMD), and soil moisture increased with the increase of GMD; compared with the other 4 gravel mulch treatments, GM4 treatment obtained the maximum soil water storage. Gravel mulch acted as a layer with water holding capacity, which not only reduced water loss in the drought period, but also intercepted rainfall in the wet period. Along with the increase of GMD, the water maintaining capacity in the dry period and the ability of rainfall interception in the rainy period were both enhanced. Gravel mulch had an effective effect on soil temperature conservation; the daily average soil temperatures in the different depths of the 4 gravel mulch treatments were all higher than the control, and 100% gravel mulch was the maximum. In order to investigate how gravel mulch affected soil temperature in the hot and cold period, we tested the soil temperature in the extreme coldest (from -5 to 0 °C) and hottest (40-45 °C) weather conditions during the winter wheat and summer maize growing season. Gravel mulch acted as a regulator of soil temperature, and thus soil temperature could actively respond to extremely cold or hot weather. In the extremely cold period, air temperature was around from -5 to 0 °C, soil temperature of GM4 was 5 °C higher than CK, and soil temperatures of the other 3 gravel mulch treatments were all higher than CK; in the extremely hot period, air temperature was around 40-45 °C, soil temperature of GM4 was 3.7 °C less than CK, and soil temperature of the other 3 gravel mulch treatments was all less than CK. Soil warming ability responding to air temperature and soil moisture was greatly different; the 4 gravel mulch treatments were all higher than the control treatment, and 100% gravel mulch was the maximum. So gravel mulch could effectively stabilize soil temperature. As for the effects of gravel mulch on crop growth and yield, plant height and leaf area index were not significantly different in the winter wheat growing season, while in summer maize growing season, plant height and leaf area index of the 4 gravel mulch treatments were all significantly higher than the control, and the 100% gravel mulch was the maximum. Study also showed that wheat and maize yields increased with the increase of GMD, and the average yield of 2 growing seasons for winter wheat and summer maize under 100% gravel mulch treatment was 58.55% and 22.50% higher than the control, respectively. These results demonstrated that the gravel mulch technology could effectively increase soil moisture and maintain soil temperature and was beneficial to promote crop growth and ultimately affect the crop production. Overall, we conclude that gravel mulch technology provides a new idea to positively cope with water limitation and climate change and promote agricultural production in arid and semi-arid area of Northwest China.

Keywords: gravels; soil moisture; temperature; yield; response mechanism; winter wheat; maize