

地表覆盖对土壤热参数变化的影响^{*}

米美霞¹ 樊军^{1,2†} 邵明安^{2,3} 高宇²

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 覆盖条件下土壤热性质的研究对于包气带水热运移及覆盖技术的应用均有重要意义。使用 11 针热脉冲探头对沙黄土不同深度(6 mm、18 mm、30 mm)的土壤热扩散率、热容量和热导率三个热参数进行测定, 并进行地表覆盖(石子覆盖、秸秆覆盖)处理, 旨在探究覆盖条件下表层土壤热性质动态变化过程及土壤热参数与水分的内在联系。结果表明:(1)相对于裸土, 石子和秸秆覆盖条件下土壤热参数增大, 且覆盖对于靠近表层土壤热参数的影响更加明显;(2)随降雨的发生, 土壤热参数均增大, 在两次降雨期间, 土壤热参数逐渐减小, 覆盖与裸土热参数差异逐渐增大;(3)三个热参数随降雨的发生, 其动态变化过程表现不同, 热容量对降雨的响应最为敏感, 热导率次之, 热扩散率开始减小的时间较热导率和热容量滞后, 三个深度滞后时间均在 48 h 以上, 而且覆盖以后热扩散开始减小的时间较裸土推迟(48 h 以上)。土壤容重不变的情况下, 在频繁干湿交替的过程中土壤水分为土壤热参数变化的最主要影响因素。覆盖条件下土壤热参数与土壤含水量关系研究表明: 石子和秸秆覆盖条件下土壤热参数与土壤含水量的变化关系与裸土条件下一致, 热导率与含水量呈幂函数增加的趋势, 热容量随含水量线性增加, 热扩散率随含水量增加先增后减, 本研究用沙黄土热扩散率峰值对应的含水量在 $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 左右。由以上结果可以发现覆盖对近表层土壤热参数的动态变化有显著的影响, 覆盖的保水效应直接影响土壤热参数的变化。

关键词 热参数; 热脉冲; 覆盖; 黄土高原

中图分类号 S152.7+3 **文献标识码** A

农业覆盖技术在旱地农业可持续发展中发挥重要作用, 覆盖秸秆、砂石、砾石等以后土壤水热状况会发生改变。地表覆盖具有保蓄水分、降低土壤温度变幅的效果。蔡太义等^[1]对春玉米田秸秆覆盖蓄水保墒效应进行研究, 得出覆盖以后玉米不同生长期 2 m 土层贮水量均高于无覆盖处理; 崔向新等^[2]研究表明砾石覆盖以后土壤降温速率整体上低于裸土, 2~4 mm 直径砾石温度降低幅度为裸土的 66%; 李月兴等^[3]研究秸秆覆盖条件下土壤增温效应结果表明, 与无覆盖相比随深度的增加秸秆覆盖温度变化表现出滞后性。上述土壤温度的变化受土壤热交换以及土壤本身热性质的影响。土壤热性质是决定土壤热状况的内在因素^[4], 影响土壤水分运动、能量转化, 微生物活动、种子萌芽、作物生长等^[5], 土壤热参数是决定土壤热传递的基本参数^[6]。

近年来热脉冲法已广泛用于测定土壤热参数(热扩散系数、热容量、热导率), 该方法具有精度高、成本低、对土壤扰动小、不易引起非饱和土壤中水分的重新分布, 而且所需样品体积小, 能够在田间进行自动连续定位测量等特点。Zhang 等^[7]首先使用 11 针热脉冲探头测定土壤热参数, 然后以显热平衡原理为基础研究近表层土壤蒸发。米美霞等^[8]认为覆盖以后土壤热导率和热容量均相对于裸土增加, 但并未对不同深度热参数动态变化以及覆盖以后热参数与水分变化关系进行分析。本研究基于热脉冲方法, 分别将裸土与石子覆盖、秸秆覆盖条件下土壤进行比较, 分析干湿循环过程中近表层土壤热参数变化, 对覆盖以后土壤热性质变化进行研究, 为土壤水热变化的研究以及覆盖技术的合理应用提供理论依据。

* 国家自然科学基金项目(41271239, 91025018, 51239009)资助

† 通讯作者: 樊军, 博士, 副研究员。E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 米美霞(1986—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为土壤物理。E-mail: meixiami@126.com

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-08-31

1 材料与方法

1.1 试验区概况

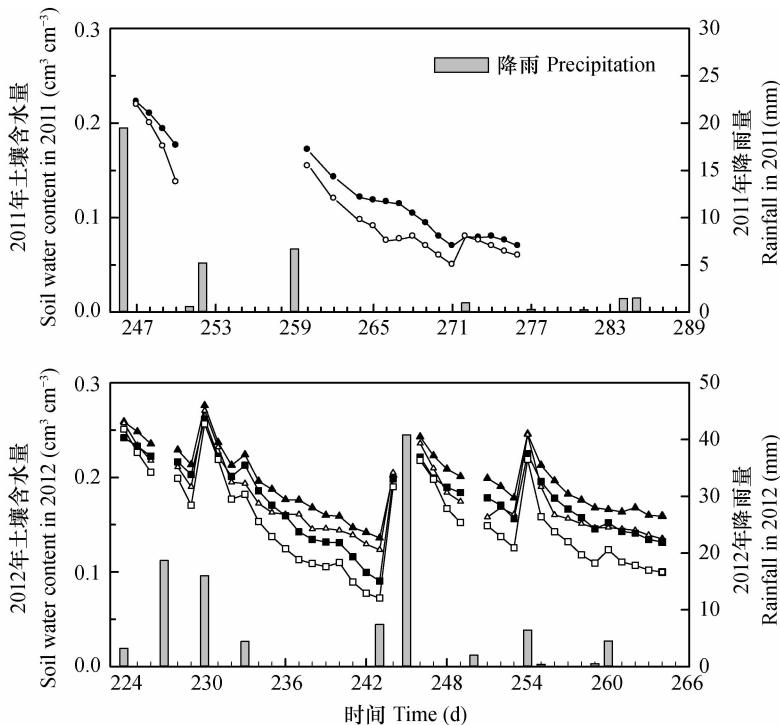
试验在神木侵蚀与环境试验站原状土上进行。该试验站位于陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟流域(东经 $110^{\circ}21' \sim 110^{\circ}23'$, 北纬 $38^{\circ}46' \sim 38^{\circ}51'$), 海拔为 1 094 ~ 1 274 m。本区属于中温带半干旱气候, 供试土壤为沙黄土, 土壤颗粒组成为黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 16%, 粉粒 ($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$) 44%, 砂粒 ($> 0.05 \text{ mm}$) 40%, 0 ~ 5 cm 平均土壤容重为 1.29 g cm^{-3} , 0 ~ 10 cm 平均有机质含量为 8.9 g kg^{-1} , 平均饱和含水量为 $0.43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 。

1.2 测定方法与实验布设

土壤热扩散率 ($\alpha, \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)、热容量 ($C, \text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)、热导率 ($\lambda, \text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) 三个热参数测定原理基于热传导定律, 使用 11 针热脉冲探头进行测定, 测定原理详见米美霞等^[8]的描述。根据米美霞等的描述得到的是加热针至上部热电偶针的热参数和

加热针至下部热电偶针的热参数, 加热针对应深度的热参数为上述两个热参数的平均值, 据此分别得到 6 mm、18 mm、30 mm 三个深度土壤热参数。

实验分为石子覆盖和秸秆覆盖两部分(均设定 3 次重复, 裸土为对照)。石子覆盖在 2011 年 9—10 月进行, 选取 9 月 4 日(第 247 天)至 10 月 15 日(第 288 天)的结果进行分析, 期间共降雨 9 次(包括第 246 天降雨), 其中降雨量超过 5 mm 的 3 次。试验期间采用 Hydra Probe II (SDI-12 / RS485) 测定降雨后土壤 0 ~ 6 cm 的平均容积含水量(探头垂直土壤剖面插入土壤)。石子的覆盖度约 80%, 石子为料姜石。秸秆覆盖在 2012 年 8—9 月进行, 选取 8 月 11 日(第 224 天)至 9 月 20 日(第 264 天)的结果进行分析, 期间共降雨 11 次, 其中降雨量超过 5 mm 的 4 次。试验期间采用 TDR100(美国 Campbell scientific 公司)探头测定土壤水分, 分别在 15 mm、30 mm 深度水平安装三针式 TDR 探头(针长 15 cm), 进行原位观测, 测定结果代表 0 ~ 3 cm、0 ~ 6 cm 的平均容积含水量。秸秆覆盖度约 80%, 秸秆为稻草。



注: ●代表2011年石子覆盖0~6 cm含水量, ○代表2011年裸土0~6 cm含水量, ▲代表2012年秸秆覆盖0~6 cm含水量, △代表2012年裸土0~6 cm含水量, ■代表2012年秸秆覆盖0~3 cm含水量, □代表2012年裸土0~3 cm含水量 Note: ● stands for water content in the 0~6 cm soil layer under gravel mulch in 2011, ○ for water content in the 0~6 cm soil layer of bare soil in 2011, ▲ for water content in the 0~6 cm soil layer under straw mulch in 2012, △ for water content in the 0~6 cm soil layer of bare soil in 2012, ■ for water content in the 0~3 cm soil layer under straw mulch in 2012, □ for water content in the 0~3 cm soil layer of bare soil in 2012

图1 试验期间降雨状况及土壤平均容积含水量变化

Fig. 1 Rainfall and mean soil volumetric water content during the test

试验期间降雨分布和水分测定结果见图 1。2011 年石子覆盖土壤含水量均在降雨后测定,针对性地测定几个干湿循环过程的水分变化。覆盖与未覆盖土壤前处理相同,未进行耕作处理。试验小区在 2011 年以前为撂荒农地,实验前清除杂草,平整土地,取样测定土壤基本性质,并于 2011 年、2012 年实验结束后分别测定覆盖与裸土的土壤容重。

2 结果与讨论

2.1 地表覆盖下土壤含水量的时空变异特征

本研究以近地表 0~3 cm、0~6 cm 土层为研究对象,试验小区无径流,水分进入土壤主要通过入渗,离开土体主要通过土表向外蒸发,对土壤水分的时空变化状况进行分析:随着降雨的发生,石子覆盖、秸秆覆盖、裸土 0~6 cm 平均含水量均增大,且降雨刚发生以后,覆盖土壤与裸土含水量均减小。降雨刚结束后,覆盖土壤与裸土含水量差异不明显,随降雨后土壤含水量的减小,覆盖土壤与裸土含水量的差异逐渐明显(图 1)。对 2011 年石子覆盖和裸土、2012 年秸秆覆盖和裸土分别进行成对数据的 t 检验,得到 p 值均为 0 ($p < 0.05$ 差异显著),所以覆盖能显著增加土壤含水量,并表现为石子覆盖和秸秆覆盖下降较裸土慢,前期含水量下降迅速,后期慢。本研究中影响土壤水分变化的因素主要为土壤蒸发,土表石子覆盖和秸秆覆盖均有抑制土壤蒸发保持土壤水分的作用^[9-10],地面铺设秸秆、割草、碎石或松土等覆盖物后,土壤表层的小气候发生了变化^[11],改变了土壤表面水、汽、热的交换条件^[12],从而改变了近地表的热学和动力学性质。地面有石子、秸秆覆盖以后,覆盖物阻止了土面与大气的直接接触,白天地表的温度降低,太阳辐射强度变小,空气流动速度减小,从而土壤蒸发减小。米美霞等研究认为石子覆盖以后,土壤蒸发不仅表现为速率减小,且土壤蒸发速率峰值出现的时间滞后,覆盖对于土壤蒸发的动态变化具有显著影响^[8]。土壤含水量的变化过程亦与土壤蒸发的过程密切相关。在降雨间期土壤含水量的变化主要受蒸发过程的控制,即土壤蒸发越大,土壤含水量减小越快。土壤蒸发具有阶段性,前期土壤含水量高,土壤蒸发的主要限制因子为大气蒸发力,土壤含水量降低很快,后期受土壤导水性质和水汽扩散能力限制,土壤蒸发速率较小,土壤含水量比较稳定。

2.2 地表覆盖下土壤热特性的时空变异特征

土壤热参数作为了解土壤热状况发生变化的内在因素,在不同土层深度和时间上均会发生变化。下述为以裸土为对照,对 6 mm、18 mm、30 mm 三个深度的土壤热参数在覆盖条件下动态变化进行分析,结果见图 2。随降雨的发生或降雨间期(两次降雨之间),土壤热参数呈阶段性的上升和下降。当降雨发生时,覆盖和裸土热参数均迅速增大;越接近表层增加幅度越大,离表层越远,热参数增加幅度越小。每次降雨后裸土与覆盖三个深度土壤热参数均呈现出减小趋势。由土表向下,相同时间内土壤热参数减小的幅度表现为 6 mm > 18 mm > 30 mm,所以上层土壤热参数逐渐小于下层。此外,降雨后热参数减小随时间的推移表现为阶段性的变化,前期减小的幅度大,后期减小幅度小(图 2)。

石子覆盖和秸秆覆盖各深度土壤热参数减小幅度小于裸土,覆盖相对于裸土具有增大热参数的效应。覆盖对于 6 mm 土壤热参数的影响最明显,18 mm 次之,30 mm 最小。覆盖以后随降雨的变化,覆盖对热参数具有阶段性的影响。下面选取石子覆盖和秸秆覆盖一个干湿循环过程中三个深度平均热参数变化来进行说明:石子覆盖选取第 259 天降雨后的结果进行分析,第 259 天降雨后,热参数均迅速增大,热扩散率、热容量、热导率分别增大 4%、16%、26%,对应时间的裸土热参数分别增大 17%、19%、43%;至第 271 天(第 272 天降雨),热扩散率、热容量、热导率分别减小 19%、15%、34%,对应时间裸土减小分别为 42%、18%、54%,所以石子覆盖对热参数的变化具有缓冲作用。石子覆盖热参数大于裸土,第 259 天降雨前,石子覆盖以后热扩散率、热容量、热导率三个热参数分别较裸土大 10%、5%、14%。第 259 天降雨后石子覆盖与裸土差异不明显,随降雨后时间的推移,土壤含水量减小,至 272 天降雨前石子覆盖以后热扩散率、热容量、热导率三个热参数分别较裸土大 36%、5%、43%,可见覆盖相对于裸土增大热参数的效应在干燥期表现最为明显。秸秆覆盖一个干湿循环内得出的结果与石子覆盖类似,即亦表现为秸秆覆盖以后土壤热参数变化较裸土小,而且在干燥期秸秆覆盖增大热参数的效应更为明显。

各深度土壤热参数随时间变化还表现为以下两个方面:(1)每次降雨后,热扩散率开始减小的时间相对裸土滞后,会维持比较稳定或有较小的波动,几天后开始减小。覆盖以后热扩散率开始减小

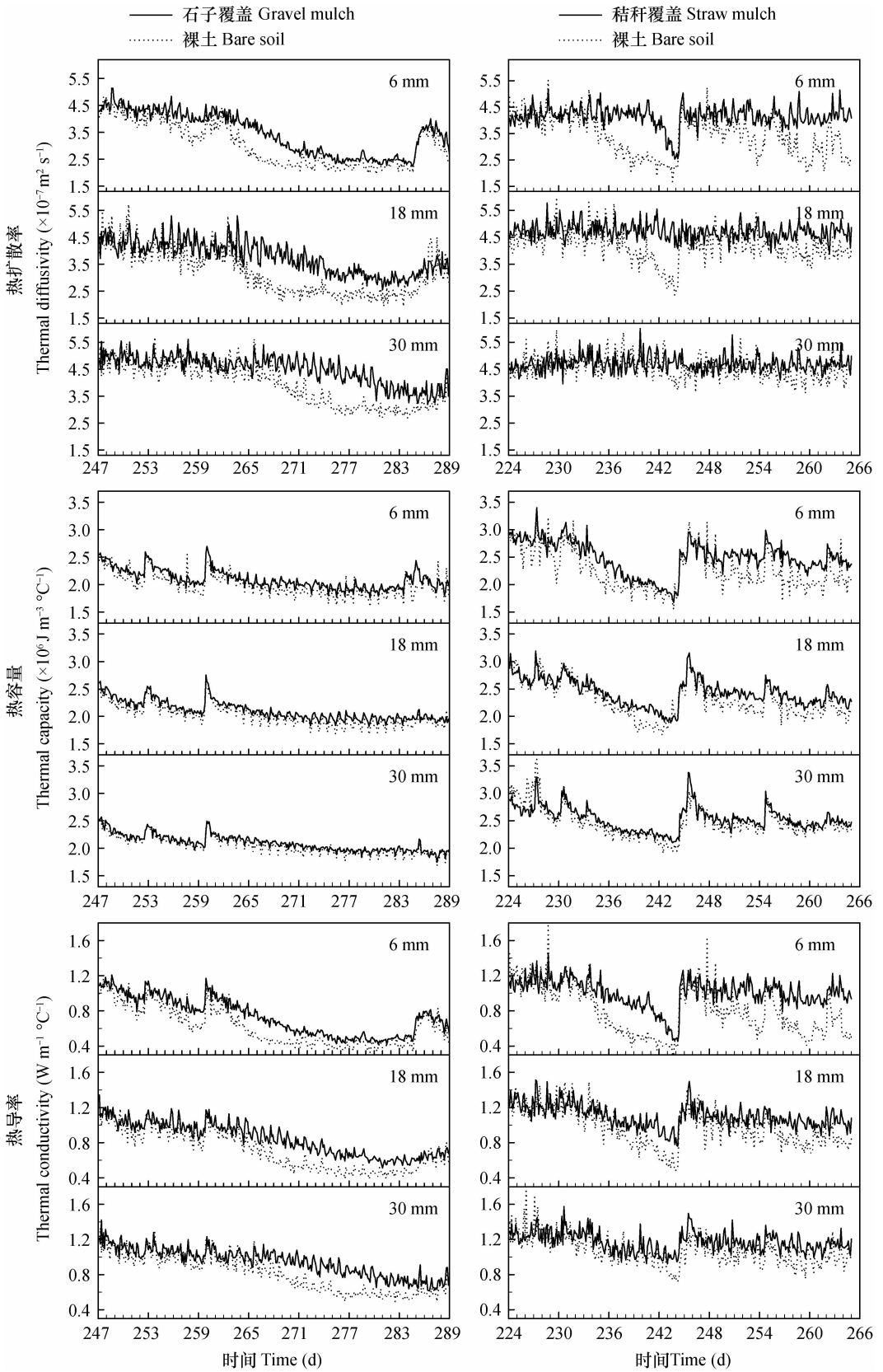


图2 土壤热参数随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of the soil thermal properties

的时间较裸土推迟。且离表层越远,开始下降的时间越迟。如图 2,2011 年第 259 天降雨后石子覆盖 6 mm、18 mm、30 mm 三个深度热扩散率开始下降的时间分别为第 263 天、第 265 天和第 267 天以后;裸土上述三个深度热扩散率开始下降的时间分别为第 261 天、第 263 天和第 265 天以后。2012 年第 233 天降雨后秸秆覆盖 6 mm、18 mm、30 mm 三个深度热扩散率减小的时间分别为第 240 天、第 242 天和未开始减小;裸土上述三个深度减小的时间分别为第 235 天、第 237 天和第 242 天以后。(2)热容量和热导率均在刚降雨后就开始减小,热容量对降雨的响应最为敏感,热导率次之,基本上每次降雨,均伴有热容量的明显升降,而热扩散率开始减小的时间滞后(48 h 或以上)。由以上分析可知,覆盖显著影响土壤中热性质及其动态变化过程。

土壤质地、含水率、容重、孔隙度、固体颗粒排列方式等均对热性质的变化有影响^[13-15],此外温度对土壤热导率也有影响,但陆森和任图生认为常温下一般可以忽略温度效应^[16]。本研究主要针对覆盖对土壤热参数的变化进行研究,试验前土壤无耕作处理,覆盖和无覆盖土壤条件基本一致。地表覆盖石子和秸秆除改变土壤水分外,对土壤温度、容重、孔隙度、地表结皮的产生等均可能产生影响^[17-20]。为确定覆盖期间容重的变化,在 2011 年、2012 年实验结束后(10 月)用环刀取样测定 0 ~ 5 cm 土壤容重。2011 年实验结束后石子覆盖土壤平均容重为 1.29 g cm⁻³,裸土平均容重为 1.28 g cm⁻³;2012 年实验结束后秸秆覆盖土壤平均容重为 1.28 g cm⁻³,裸土平均容重为 1.29 g cm⁻³,可见本研究中试验期间覆盖对土壤容重影响不大。本研究所得土壤热参数结果均在雨季,干湿交替频繁,土壤水分变化非常活跃,所以土壤含水量的时空变异对土壤热参数的动态变化有重要作用。

2.3 热特性变化对含水量的响应

土壤中水热传输通常是同时进行的,覆盖以后土壤的水热状况均发生了变化。土壤水分与热参数存在内在联系。土壤含水量决定土壤热导率和热容量,二者均随着含水量的增加而增加,热容量与含水量呈线性关系,热导率与含水量呈幂函数增加趋势,由于二者增加幅度不同,热扩散率与含水量呈先增加后减小的趋势^[21]。本研究旨在分析覆盖条件下土壤热参数的变化,探讨覆盖以后热参数发生变化的原因。在已有研究基础上,对覆盖以后土壤热参数与含水量的关系进一步进行分析。考

虑试验期内土壤含水量范围和测定时间,分别选取石子覆盖 2011 年第 224 ~ 226 天、第 260 ~ 273 天的结果,秸秆覆盖 2012 年第 230 ~ 243 天的结果进行分析,土壤含水量和土壤热参数均为每天 18:00 点测定结果,热参数为 6 mm、18 mm、30 mm 三个深度平均值,由于三个深度的热参数需要 3 个小时测定完成,18 mm 取每天 20:00 的结果,30 mm 取每天 19:00 的结果进行分析。

覆盖以后热参数与土壤含水量的关系与裸土条件下基本一致(图 3),均呈上述关系。Smits 等认为土壤中水分含量对土壤中热的传递方式有显著影响,热导率随土壤水分含量的变化分为三个阶段^[22]。在第一阶段土壤含水量高,土壤水分在物理上具有连续性,热传递主要路径为固/液、固/固接触传递,因一般热导率大小为固态 > 液态 > 气态,所以土壤热导率较大。热导率变化很小表明在此含水量范围内,土壤接近饱和,空气对热导率的影响较小。第二阶段随土壤含水量下降,空气逐渐进入土壤中,导致土壤水分不连续,热量传递路径从固/液向气/液/固或者气/固转变,热导率减小。第三阶段土壤含水量小于剩余含水量,热导率随含水量下降急剧减小,热量传递的途径只有气/液/固、气/固和固/固,土壤颗粒间热传导路径减少,土壤热导率减小。与裸土相比,土表覆盖石子和秸秆以后土壤能够维持较高含水量的时间较长,热能够在较长时间内以固/液、固/固途径传递,所以土壤热导率较大。本研究沙黄土饱和含水量为 0.43 cm³ cm⁻³,所以在研究期内土壤均处于非饱和状态(图 3),所以在土壤中热传导主要通过气/液/固、气/固、固/固途径。

土壤热容量依赖于以下两个因素:一是土壤本身(矿物组分、有机质含量),二是管理和控制措施(影响土壤含水量和土壤容重)^[23]。土壤中固、液、气三相热容量大小为液相 > 固相 > 气相,de Vries 建议将土壤矿物质的容积热容量定为 0.46 cal cm⁻³ °C⁻¹,土壤有机质的容积热容量定为 0.60 cal cm⁻³ °C⁻¹,水的容积热容量为 1 cal cm⁻³ °C⁻¹,而空气的容积热容量很小(0.000 3 cal cm⁻³ °C⁻¹,1 cal cm⁻³ °C⁻¹ ≈ 4.20 × 10⁶ J m⁻³ °C⁻¹),可以忽略^[24]。土壤中固相组成和容重不变的情况下,土壤含水量是影响土壤热容量的主要因素。与热导率变化类似,覆盖保水导致土壤热容量较裸土热容量大,因热容量与含水量变化呈线性关系,降雨增加土壤水分,所以热容量对降雨的响应最为敏感。土壤热扩散率指单位

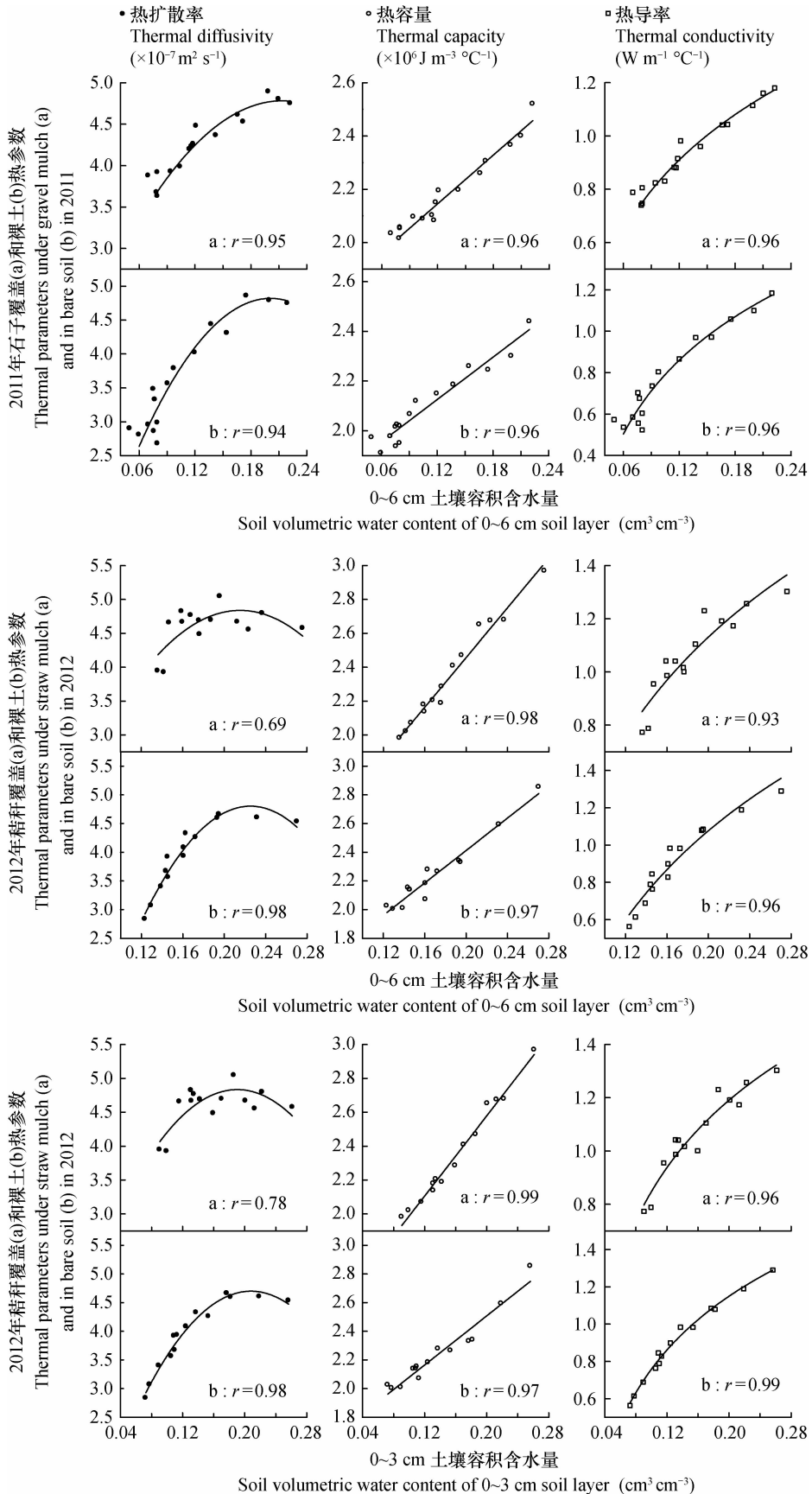


图 3 土壤热参数与土壤水分变化关系

Fig. 3 Relationships between soil water content and the soil thermal parameters

时间,在单位温度梯度作用下,单位体积土壤温度的变化,de Vries 定义其值为热导率和热容量的比值,热扩散率随含水量的变化与热容量和热导率随含水量增加的幅度有关,土壤热容量随土壤含水量增加稳定增大,而土壤热导率的变化则具有阶段性,从而土壤热扩散率随土壤含水量的增加出现峰值,之后随着含水量的增加,土壤热导率变化不大,所以土壤热扩散率开始减小。Ghauman 等对不同质地的 20 种土壤热参数随含水量变化进行了研究^[13],同一容重土壤热扩散率峰值对应的含水量因土壤质地不同而不同,其中砂土峰值明显,黏土峰值不明显,由他们研究还可得出不同质地土壤热扩散率峰值对应的含水量亦不同。本研究中当 0~3 cm 和 0~6 cm(图 3)含水量在 $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 左右热扩散率达最大值,这一趋势在 2012 年秸秆覆盖与裸土的结果中表现最为明显。由于 2011 年在试验期间土壤含水量较低(图 1),0~6 cm 最大土壤含水量为 $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,而 2012 年秸秆覆盖 0~6 cm、0~3 cm 最大含水量均为 $0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,土壤热扩散率达到峰值以后刚开始减小。降雨以后土壤含水量相对较大,此时如含水量正好在热扩散率峰值或者小于峰值对应的含水量,则降雨后随土壤含水量的降低,土壤热扩散率随之减小,但若土壤含水量大于峰值对应的含水量,随降雨后土壤含水量的降低,热扩散率则会逐渐接近峰值,这是降雨之后土壤热扩散率减小的时间出现相对滞后的原因。

需要指出的是本研究在分析黄土热参数与土壤含水量的关系时,2011 年石子覆盖与裸土只测定了 0~6 cm 含水量,土壤热参数与含水量的关系只用于覆盖与裸土比较。2012 年秸秆覆盖分别对 0~3 cm、0~6 cm 含水量与热参数的关系进行了分析,得到的结果类似。根据 0~3 cm 含水量与热参数关系可知对本研究所使用沙黄土热扩散率达到峰值时的含水量在 $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 左右。对于黄土热参数与含水量的定量关系以及热导率水分变化节点还需进一步确定。此外,本研究中只对干湿交替过程中土壤热参数的时空变异进行了描述和讨论,覆盖条件下土壤容重、空隙状况均会发生变化,需作深入探讨,而不同耕作方式、土壤质地下的覆盖对土壤热参数的效应亦是重要的研究内容。

3 结 论

土壤热参数变化研究是认识土壤中水热运移

及水热耦合过程的关键,本研究通过热脉冲法测定土壤热参数的变化,结合土壤水分变化,对两种覆盖条件下(石子覆盖和秸秆覆盖)土壤热性质的动态变化过程进行了探讨,得出以下结论:土壤热容量对降雨的响应最敏感,热导率次之,热扩散率在降雨后开始减小的时间较其他两个热参数滞后(48 h)。在土壤水分主要受降雨和蒸发的影响,土壤容重未发生变化的情况下,相对裸土石子覆盖和秸秆覆盖条件下土壤热参数增加,且热扩散率减小的时间出现滞后(48 h)。覆盖条件下土壤热参数与含水量的关系与裸土条件下类似,土壤水分对土壤热容量的影响最为直接,呈线性关系;热导率随含水量增加呈幂函数增加的趋势,在含水量较高时比较稳定;由于热导率和热容量随水分增大,二者增加幅度不同,导致土壤热扩散率增加的趋势为抛物线,这是土壤热扩散率减小出现滞后的原因。沙黄土热扩散率峰值对应的含水量在 $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 左右。

参 考 文 献

- [1] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响.农业工程学报,2011,27(增刊1):238—243. Cai T Y, Jia Z K, Huang Y W, et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (Suppl. 1): 238—243
- [2] 崔向新,蒙仲举,高永新,等.不同粒径砾石覆盖对土壤水分蒸发的影响.中国农村水利水电,2009(3):21—23. Cui X X, Meng Z J, Gao Y X, et al. Effect of different grain size gravel covered on soil evaporation (In Chinese). China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 21—23
- [3] 李月兴,张宝丽,魏永霞.秸秆覆盖的土壤温度效应及其对玉米生长的影响.灌溉排水学报,2011,30(2):82—85. Li Y X, Zhang B L, Wei Y X. Effects of straw mulching on ground temperature and growth relationship of maize (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2): 82—85
- [4] 李毅,邵明安.热脉冲法测定土壤热性质的研究进展.土壤学报,2005,42(1):134—139. Li Y, Shao M A. Latest advance of thermal-pulse method for measuring soil thermal properties (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 134—139
- [5] 王铄,王全九,樊军,等.土壤导热率测定及其计算模型的对比分析.农业工程学报,2012,28(5):78—84. Wang S, Wang Q J, Fan J, et al. Soil thermal properties determination and prediction model comparison (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 78—84
- [6] 李婷,王全九,樊军.土壤热参数确定方法比较与修正.农业工程学报,2008,24(3):59—64. Li T, Wang Q J, Fan J. Modification and comparison of methods for determining soil thermal

- parameters (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 59—64
- [7] Zhang X, Lu S, Ren T S, et al. Measuring subsurface soil-water evaporation with an improved heat-pulse probe. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76: 876—879
- [8] 米美霞,樊军,邵明安. 利用热脉冲技术研究石子覆盖对土壤内部蒸发的影响. *土壤学报*, 2013, 50(1): 75—82. Mi M X, Fan J, Shao M A. Study of effects of gravel mulch on soil evaporation using heat pulse technology (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 75—82
- [9] Fuchs M, Hadas A. Mulch resistance to water vapor transport. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 990—998
- [10] Diaz F, Jimenez C C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. *Agricultural Water Management*, 2005, 74: 47—55
- [11] 方文松,朱自玺,刘荣花,等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 123—127. Fang W S, Zhu Z X, Liu R H, et al. Study on microclimate characters and yield-increasing mechanism in straw mulching field (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(6): 123—127
- [12] 张瑜芳,沈荣开,任理. 田间覆盖保墒技术措施的应用与研究. *水科学进展*, 1995, 6(4): 341—347. Zhang Y F, Sheng R K, Ren L. Study of field mulching Techniques for soil moisture conservation (In Chinese). *Advances in Water Science*, 1995, 6(4): 341—347
- [13] Ghauman B S, Lal R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils. *Soil Science*, 1985, 139(1): 74—80
- [14] Abu-Hamdeh N H. Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(3): 145—151
- [15] Bristow K L. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(2): 75—84
- [16] 陆森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 13—18. Lu S, Ren T S. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 13—18
- [17] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena*, 1992, 19(5): 451—474
- [18] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15(7): 653—671
- [19] 余海龙,黄菊莹. 砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 284—287. Yu H L, Huang J Y. Research progress on influence of mulching gravel and sand on soil macropore characteristics and soil hydrological process of gravel-sand mulch field (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 284—287
- [20] 郭熙盛,鲁剑巍,王允青. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 587—594. Guo X S, Lu J W, Wang Y Q. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 587—594
- [21] 邵明安,王全九,黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006: 171—174. Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil physics* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006: 171—174
- [22] Smits K M, Sakaki T, Limsuwat A. Determination of the thermal conductivity of sands under varying moisture, drainage/wetting, and porosity conditions-applications in near surface soil moisture distribution analysis. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(1): 172—180
- [23] Abu-Hamdeh N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(1): 97—102
- [24] de Vries D A. *Thermal properties of soils*//van Wijk W R. *Physics of plant environment*. Amsterdam, the Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1963: 210—235

STUDY OF EFFECTS OF THE SURFACE MULCH ON SOIL THERMAL PROPERTIES USING HEAT PULSE TECHNOLOGY

Mi Meixia¹ Fan Jun^{1,2†} Shao Ming'an^{2,3} Gao Yu²

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The study on thermal properties of mulched soil is of some great significance to the study of water and heat transfer in the vadose zone and application of the mulching technology. A 11-needle heat-pulse probe was used to measure <http://pedologica.issas.ac.cn>

soil thermal diffusivity, thermal capacity and thermal conductivity at different depths, 6 mm, 18 mm and 30 mm in sandy yellow earth under different mulches, no mulch, straw and gravel, so as to explore dynamic variation of the soil thermal properties and inner relationship between the soil thermal parameters and soil moisture in mulched soils. Results show that (1) mulching increased the soil thermal parameters and the more significant the effects, the closer to the soil surface; (2) rainfall also increased the soil thermal parameters, which decreased between two rainfall events and the difference increased between the bare soil and the mulched soils in the thermal parameters; (3) after a rainfall event, the three thermal parameters differed in dynamic variation process, with thermal capacity being the most sensitive in response to rainfall, and followed by thermal conductivity, and with thermal diffusivity starting to decline later than the other two, over 48 hours later at all the three soil layers, and in the mulched soils than in the bare soil. In soils constant in soil bulk density, soil water content was the most important factor affecting the soil thermal parameters in the process of frequent alternation of wetting and drying. Analysis of the relationships between the soil thermal parameters and soil water content in mulched soils showed that the relationship in soils mulched with either gravels or straw was similar to that in the bare soil, and that thermal conductivity increased as an exponential function of soil water content, soil thermal capacity did linearly with soil water content and soil thermal diffusivity increased first and then decreased with increasing water content. The peak of soil heat diffusion rate occurred in the sandy yellow earth, $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in water content. Besides, from these above findings, it can be concluded that surface mulch had a significant impact on dynamic variation of the thermal properties and the water conservation effect of mulch would directly affect variation of the soil thermal properties.

Key words Soil thermal properties; Heat pulse; Mulch; the Loess Plateau

(责任编辑:陈德明)