

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.022

王月月, 任图生. 玉米农田行尺度土壤热特性变异特征及其对土壤含水量和温度的响应. 土壤, 2024, 56(2): 415–424.

# 玉米农田行尺度土壤热特性变异特征及其对土壤含水量和温度的响应<sup>①</sup>

王月月<sup>1</sup>, 任图生<sup>2\*</sup>

(1 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276000; 2 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

**摘要:** 本研究采用定位试验, 利用热脉冲技术监测了玉米农田行尺度 4 个位置处(1/2 行间、1/4 行间、棵下和棵间)以及两个深度(2 cm 和 4.5 cm)土壤热特性的时空变异规律, 并分析了土壤温度和含水量对土壤热特性的影响。结果表明, 在试验期间, 热导率、热容量和热扩散率的变化范围分别为 0.66 ~ 2.22 W/(m·K)、1.46 ~ 4.49 MJ/(m<sup>3</sup>·K) 和  $4.07 \times 10^{-7} \sim 6.88 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s。降雨之后, 热导率和热容量增加, 且随着时间推移逐渐降低。2 cm 深度的土壤热特性的波动较大, 棵下位置土壤热导率和热容量值最大, 波动最为明显; 土壤热扩散率在 1/2 行间位置最大。在 4.5 cm 深度, 各位置土壤热特性变化趋势基本一致, 土壤热导率和热容量值在 1/2 行间位置最大, 土壤热扩散率在棵间位置最大。综合两个土层数据得出 1/4 行间位置的热导率和热容量更具代表性。本研究中土壤热特性对土壤含水量的响应规律较为明显, 随着土壤含水量增加, 热导率和热容量线性增加, 热扩散率则表现出先增加后降低的规律。在测定的土壤温度范围内, 热扩散率随土壤温度增加呈上升趋势。该研究可以为农田水热管理提供科学依据。

**关键词:** 玉米农田; 行尺度; 土壤热特性; 时空变异; 表层土壤

**中图分类号:** S152.8      **文献标志码:** A

## Temporal and Spatial Variation of Thermal Properties in Row Scale and Their Responses to Soil Water Content and Temperature in Maize Field

WANG Yueyue<sup>1</sup>, REN Tusheng<sup>2\*</sup>

(1 Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China; 2 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In this study, an experiment was conducted in a maize field to explore spatial and temporal variability of soil thermal properties in row scale, and to determine the relationship between soil thermal properties with soil temperature and water content in maize field. On the 39<sup>th</sup> day after maize planted, soil thermal properties and water content were measured *in situ* at four positions (under the maize plant (U), interrow with one-fourth row spacing (1/4R), in the middle of interrow (1/2R), in the row between two maize plants (1/2IR)) and two depths (2 cm and 4.5 cm) using multi-needle heat-pulse probes and time domain reflectometry (TDR) technique. The results showed that soil thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity ranged from 0.66 to 2.22 W/(m·K), 1.46 to 4.49 MJ/(m<sup>3</sup>·K) and  $4.07 \times 10^{-7}$  to  $6.88 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, respectively. After rainfall, soil thermal conductivity and heat capacity were increased rapidly, then decreased gradually. The fluctuation of soil thermal characteristics was large at the depth of 2 cm soil depth, especially at the position under the maize plant. At 2 cm soil depth, the values of soil thermal conductivity and heat capacity were the largest at the position under the maize plant, while soil thermal diffusivity at the position in the middle of interrow was the largest. At 4.5 cm soil depth, the change trend of soil thermal characteristics was similar at each position. Soil thermal conductivity and heat capacity at 1/2R were the largest, and soil thermal diffusivity was the largest at 1/2IR. Combined soil thermal characteristics data of two depths, thermal conductivity and heat capacity were more

①基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD044), 国家自然科学基金项目(41907006)和山东省高等学校“青创团队计划”项目(2022KJ115)资助。

\* 通讯作者(tsren@cau.edu.cn)

作者简介: 王月月(1989—), 女, 山东德州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤水热过程。E-mail: beijingwoaini1015@163.com

representative at the location of 1/4R. In this study, soil water content was the key factor affecting soil thermal conductivity and heat capacity, soil thermal conductivity and heat capacity increased with the increase of soil water content, while soil thermal diffusivity increased at first (when soil water content lower than  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) then decreased. In the range of soil background temperature measured during the experiment period, no obvious relationship was found between soil thermal conductivity and soil background temperature, soil volumetric heat capacity decreased slightly with the increase of temperature at 4.5 cm soil depth, while soil thermal diffusivity increased with the increase of soil temperature. Therefore, the temporal and spatial variability of soil thermal properties should be considered when monitored at row scale in field. The results can provide an important theoretical basis for farmland hydrothermal management.

**Key words:** Maize field; Row scale; Soil thermal properties; Spatial and temporal variation; Topsoil

土壤热特性包括热导率、热容量和热扩散率 3 个参数, 不仅决定土壤中热量的保持、传导和分布状况, 而且影响土壤中的物质迁移转化和生物活动过程<sup>[1-3]</sup>, 是研究各种土壤物理过程(如土壤溶质运移、水热耦合和气体扩散)的基础和重要参数<sup>[4-5]</sup>。

土壤热特性受许多因素的影响, 包括土壤特性(如土壤质地、含水量、容重(孔隙度)、结构和温度等)<sup>[3, 6-13]</sup>、作物生长状况和农田管理措施<sup>[11, 14]</sup>。研究表明, 在相同含水量和容重的条件下, 不同质地土壤热容量和热导率的大小排序为砂土>壤土>粉壤土>黏土<sup>[8, 15]</sup>, 黏土颗粒粒径越小, 颗粒间热阻越大, 热导率越小<sup>[16]</sup>。在相同容重条件下, 随土壤含水量的增加, 土壤热导率和热容量不断增大<sup>[8]</sup>。土壤热导率在不同土壤温度下其变化规律也不同, 陆森和任图生<sup>[7]</sup>指出在中等含水率区域( $0.15 \sim 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), 高温下土壤热导率是相同含水率下常温热导率的 2 倍 ~ 4 倍。不同耕作管理措施下土壤热特性也会存在差异。研究者比较了不同耕作方式下土壤表层热导率差异, 指出翻耕或旋耕处理后, 土壤结构发生变化, 表层土壤孔隙度增大, 容重减小, 导致其表层土壤热导率显著小于免耕秸秆直立还田处理<sup>[3]</sup>, 且旋耕处理的土壤热导率最小<sup>[17]</sup>。Adhikari 等<sup>[16]</sup>研究还表明土壤有机质含量的增加能够降低土壤热导率和热扩散率, 而热容量值则会随之增大。

对于某一特定土壤, 其矿物组成和质地基本稳定, 而土壤含水量、容重和结构等土壤特性在作物生长期间会表现出空间差异<sup>[8, 18]</sup>。孙增慧<sup>[19]</sup>研究了玉米农田行间不同位置不同深度(10、30、50 和 70 cm)土壤含水量, 指出由于作物冠层覆盖及根系分布不均, 各位置土壤含水量均存在差异, 且在浅层土壤水分差异性更大, 选择 1/4 或 3/4 行间位置测定土壤水分更具代表性。对于农田土壤, 随土层深度增加, 土壤容重增大<sup>[20]</sup>, 从而影响土壤总孔隙度, 改变了土壤孔隙的连通性及孔隙比例<sup>[21-22]</sup>。在田间条件下, 由于土

壤特性、作物生长发育过程以及农田管理措施的时空变异性, 导致土壤热特性存在很大的时空变异特征<sup>[14]</sup>。Usowicz 等<sup>[23]</sup>以 10 m 为间距测定了田间条件下不同土地利用方式下土壤含水量和容重, 并模拟得到土壤热特性, 指出由于不同位置土壤含水量和容重差异, 土壤热特性也表现出不一致。王卫华等<sup>[6, 24]</sup>研究了区域尺度(陕西省泾惠渠灌区)和田间尺度(黑河中游绿洲麦田)土壤水热特性空间分布特征, 指出在区域尺度和田间尺度上, 土壤热特性参数的采样间距分别为 3 km 和 10 m。而在田间行尺度上, 受作物生长影响, 行内和行间土壤因素(如水分、容重、温度等)存在时空变异, 进而导致土壤热特性的空间差异。为了明确田间行尺度土壤热特性的时空变化特征, 本文以玉米农田为研究对象, 利用热脉冲技术原位动态监测行内和行间不同位置表层土壤热性质的变异特征, 为玉米农田水热管理提供重要理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于北京市海淀区中国农业大学科学园( $40^{\circ}1'59'' \text{ N}$ ,  $116^{\circ}17'17'' \text{ E}$ )。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温约为  $12^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量约 570 mm。试验田土壤类型为潮土, 土壤质地为壤土(依据国际制土壤分类标准), 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 42%、37% 和 21%, 土壤容重为  $1.23 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 有机质含量为  $12.83 \text{ g}/\text{kg}$ 。距试验田 3 m 处设有气象站, 自动记录太阳辐射、风速、风向、气温、相对湿度、降水量和地温等数据。

### 1.2 土壤热特性和含水量监测

2014 年 4 月 20 日在试验田播种玉米, 行距 60 cm, 株距 20 cm, 南北行向。5 月 29 日, 在棵间、棵下、1/4 行间和 1/2 行间 4 个位置安装多针热脉冲传感器<sup>[25]</sup>和时域反射(Time domain reflectometry, TDR)传感器, 如图 1 所示。

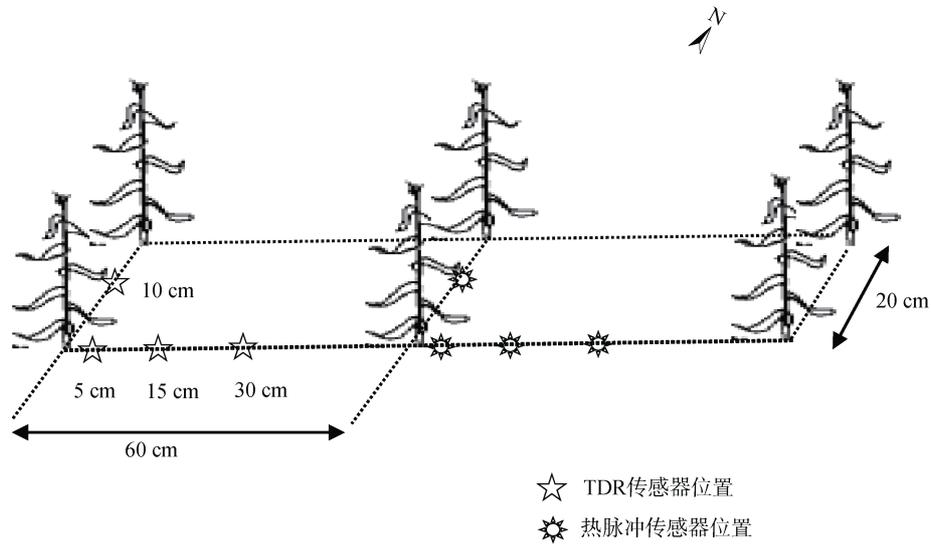


图 1 传感器安装位置示意图  
Fig. 1 Installation position of sensors

多针热脉冲传感器共有 11 个探针组成，均为直径为 1.3 mm 的不锈钢管，其中 4 个长针(加热探针)长度为 40 mm，内部包含热电偶(位于探针中部)和加热丝两种元件；7 个短针(温度探针)，长度为 20 mm，内部仅包含热电偶(位于探针顶端)(图 2)。安装时，需要用小铁铲挖掘 10 cm 深度的剖面，将热脉冲探针与地表平行且垂直土壤剖面插入，第一个温度针与地表齐平。在相邻行安装 TDR 探针，位置与热脉冲传

感器一致，安装深度为距离地表 2 cm 和 4.5 cm。将 TDR 探针的同轴电缆连接到 TDR100(Campbell Scientific, Logan, UT)，并利用数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, Logan, UT)控制，每 30 min 测定一次介电常数。同时通过数据采集器控制热脉冲传感器，每 30 min 收集一次土壤温度、电压数据等。测定时间从 6 月 1 日持续到 6 月 14 日。由于仪器故障，6 月 11 日之后裸下和 1/4 行间位置土壤热特性数据丢失。

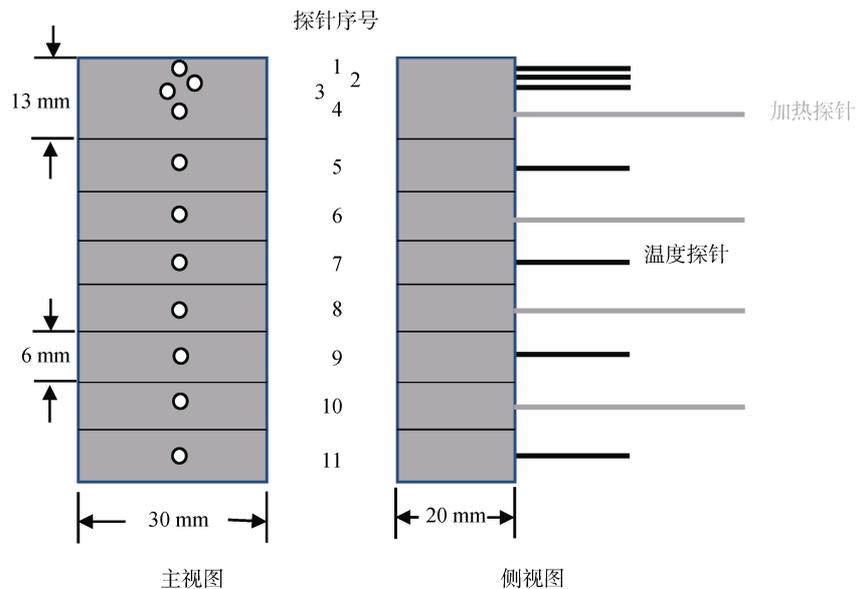


图 2 多针热脉冲传感器正视及侧视示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of front and side views of multi-pin thermal pulse sensor

### 1.3 土壤热特性计算

热脉冲技术基于脉冲无限线性热源理论计算得到热特性<sup>[26]</sup>。利用 Zhang 等<sup>[27]</sup>提出的方法消除背景温度的影响。根据消除背景温度影响后的探针温度

( $T_c$ )随时间( $t$ )的变化可以得到  $\Delta T_c(t)$  数据。通过脉冲无限线性热源(PILS)模型<sup>[28-29]</sup>(公式 1)，拟合 >85% 最大温度( $\Delta T_m$ )升高值的  $\Delta T_c(t)$  数据(图 3)得到土壤的热扩散率和容积热容量。土壤热导率由土壤的热扩

散率和容积热容量的乘积计算得到。

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi\alpha C} \left[ \text{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right) - \text{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad t > t_0 \quad (1)$$

式中： $\Delta T$  为温度升高值(°C)， $t$  为时间(s)， $q$  为单位时间内单位长度加热丝释放的热量(W/m)， $\alpha$  为土壤扩散率(m<sup>2</sup>/s)， $C$  为土壤容积热容量(MJ/(m<sup>3</sup>·K))， $t_0$  为热脉冲的时长(8 s)， $r$  为热电偶距线性热源的距离(m)， $\text{Ei}(x)$  为指数积分。

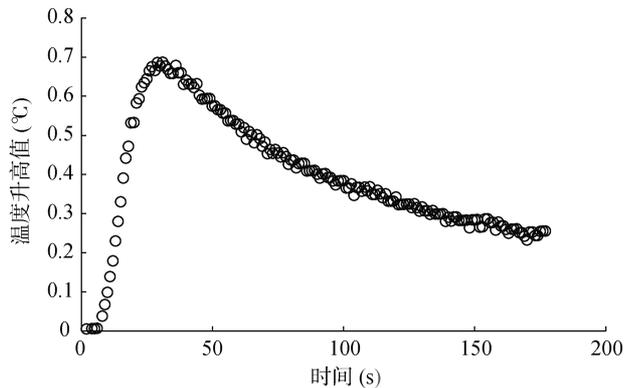


图 3 温度升高曲线图  
Fig. 3 Temperature rise curve

#### 1.4 土壤含水量计算

将 TDR 传感器测定得到的介电常数( $K_a$ )代入 TOPP 公式<sup>[30]</sup>计算得到土壤体积含水量。

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} \times K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2)$$

式中： $K_a$  代表土壤的介电常数， $\theta_v$  代表土壤体积含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。

#### 1.5 数据分析

利用 Matlab R2020a 和 Excel 2019 软件分析处理田间监测的热特性和含水量数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨和土壤含水量

研究期间共发生了 4 次降雨，分别为 6 月 1 日 9.2 mm，6 月 6 日 25.8 mm，6 月 8 日 15.6 mm，6 月 13 日 4.4 mm (图 4)。每次降雨之后，土壤含水量均迅速上升，尤其是 6 月 6 日降雨后，2 cm 土层的含水量由 0.18 增加到 0.32 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>，4.5 cm 土层的含水量由 0.22 增加到 0.32 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

在整个测定期间，土壤含水量的变化范围为 0.12 ~ 0.40 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>(图 4)。2 cm 土层不同位置的土壤含水量存在较大差异：棵下最大，1/2 行间次之，棵间最低。一方面归因于不同位置受地表太阳辐射强度不一样，

土壤水分蒸发量出现差异，导致不同位置土壤含水量不一致；另一方面，降雨时，棵间位置受玉米叶片遮挡，部分雨水被截留无法到达地面，而雨水会随茎秆流入棵下位置。在 4.5 cm 土层，4 个位置的含水量差异减小(图 4)，因为该土层受地表太阳辐射影响较小，相应的蒸发过程对该土层土壤含水量影响较小。

### 2.2 土壤热导率

研究期间，不同位置土壤热导率的变化趋势和含水量变化趋势基本一致，但由于 2 cm 土层土壤含水量变异大，热导率变化幅度比 4.5 cm 土层大。2 cm 和 4.5 cm 土层土壤热导率的变化范围分别为 0.66 ~ 2.22 W/(m·K) 和 0.90 ~ 1.59 W/(m·K)(图 5)。每次降雨之后，水分进入土壤孔隙中，增加了土壤热传导途径，土壤热导率迅速增加<sup>[8]</sup>。6 月 6 日降雨 25.8 mm 后，2 cm 和 4.5 cm 土层土壤热导率分别增加了 0.6 和 0.3 W/(m·K)。随着时间的推移，土壤水分通过蒸发过程进入大气，土壤含水量减少，土壤热导率也随之降低。

同一深度不同位置土壤热导率也存在时空差异。在 2 cm 土层深度，棵下位置处土壤热导率最高，其次是 1/2 行间位置，棵间位置处土壤热导率最低，这与土壤含水量的分布规律一致；每次降雨之后，土壤热导率均有所升高，尤其是 6 月 6 日降雨之后，棵下位置和 1/2 行间位置处土壤热导率分别升高了 1.00 和 0.57 W/(m·K)，而棵间位置和 1/4 行间位置分别增加 0.57 和 0.36 W/(m·K)。分析出现这种现象的原因可能是棵间位置玉米叶片遮挡较多，进入土壤的雨水少，导致棵间位置土壤含水量较低，而棵下位置雨水则可以沿玉米茎秆进入，土壤含水量较大。在 4.5 cm 土层，各位置土壤热导率的波动相对较小，1/2 行间位置土壤热导率最大，主要因为该位置土壤含水量最大；该土层棵间位置土壤含水量虽然最低，但其土壤热导率却不是最小的，这主要是因为土壤热导率除受含水量的影响外，还受其他因素影响，比如受玉米植株根系生长影响，土壤颗粒间接触面积增大，加快了土壤热传导速率<sup>[31]</sup>，具体原因有待进一步研究。相比 4.5 cm 土层深度，2 cm 土层深度土壤热导率波动较大，尤其是在高温时，2 cm 土层深度土壤水汽潜热运移过程相对活跃，对土壤热导率产生较大影响<sup>[32]</sup>。0 ~ 5 cm 土层棵间、棵下、1/4 行间和 1/2 行间位置处平均土壤热导率分别为 1.07、1.23、1.11 和 1.28 W/(m·K)，4 个位置土壤热导率的平均值为 1.17 W/(m·K)。因此，在此研究中测定时段内 1/4 行间和棵下位置处土壤热导率更接近几个位置处的平均值。

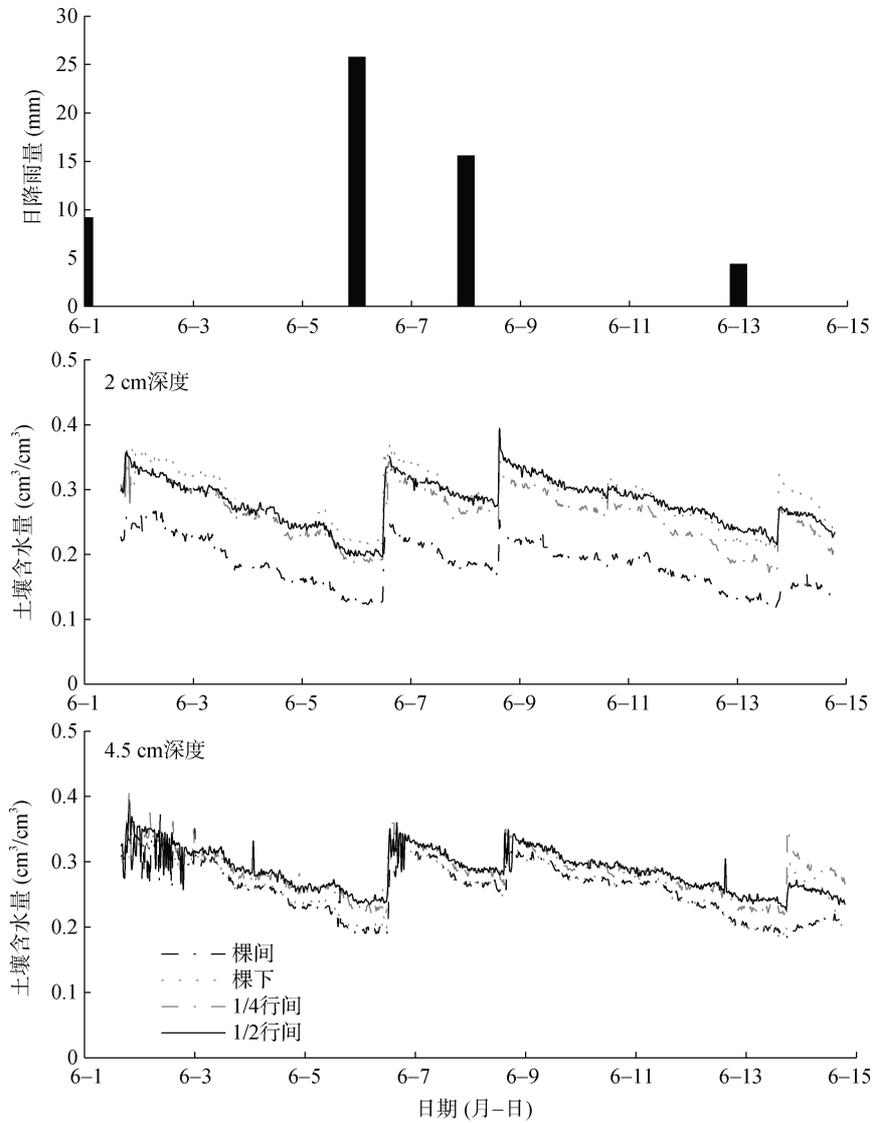


图 4 降雨量和两个深度(2 cm 和 4.5 cm)土壤含水量  
 Fig.4 Daily rainfall and soil water contents at two depths (2 cm and 4.5 cm)

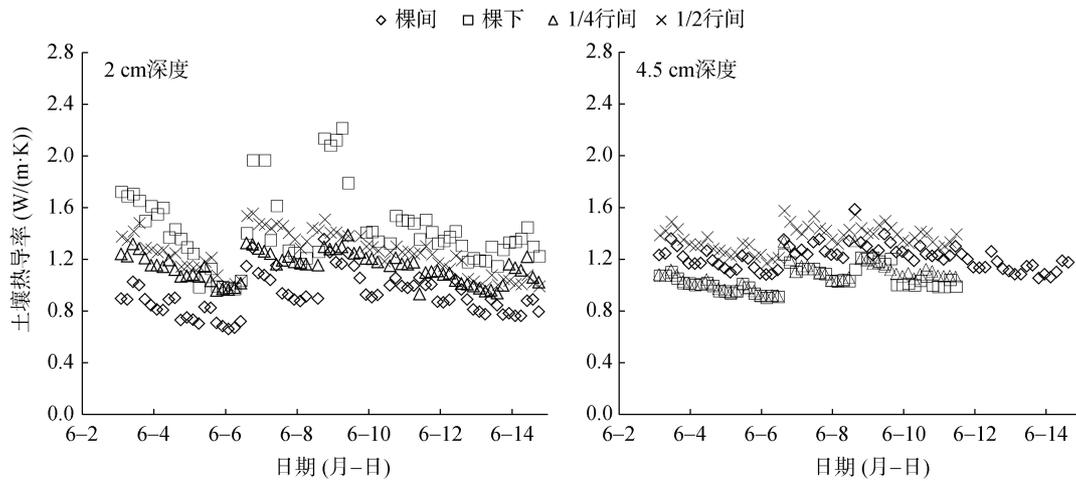


图 5 土壤热导率的时空变异特征  
 Fig. 5 Temporal and spatial variation of soil thermal conductivity

### 2.3 土壤热容量

整个测定期间, 2 cm 和 4.5 cm 土层土壤热容量的变化范围分别为 1.46 ~ 4.49 MJ/(m<sup>3</sup>·K)和 1.62 ~ 3.21 MJ/(m<sup>3</sup>·K)(图 6)。每次降雨之后, 土壤热容量迅速增加, 随着时间的进行热容量数值逐渐减小。土壤热容量的变化趋势与热导率相似, 这与 Heitman 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

在 2 cm 土层, 棵间、1/4 行间和 1/2 行间位置土壤热容量变化趋势基本一致, 棵下位置土壤热容量变化最大, 可能是因为受到玉米植株根系的影响, Fu 等<sup>[34]</sup>的研究指出距离根系位置越近热容量受影响越大。在 4.5 cm 土层, 各位置土壤热容量变化趋势基本一致, 且与土壤含水量的变化规律相同, 1/2 行间位置土壤热容量最大, 其次是 1/4 行间位置。相比 4.5 cm 土层土壤热容量, 2 cm 土层土壤热容量的波动较大, 与土壤热导率的变化相似, 分析原因主要是因为该土层受土壤-大气界面影响较大, 对土壤热容量产生一定影响<sup>[27]</sup>, 导致土壤水热特性发生较大

变化。0 ~ 5 cm 土层棵间、棵下、1/4 行间和 1/2 行间位置处平均土壤热容量分别为 1.97, 2.47, 2.24 和 2.42 MJ/(m<sup>3</sup>·K), 4 个位置土壤热容量的平均值为 2.28 MJ/(m<sup>3</sup>·K)。因此, 在此研究中测定时段内 1/4 行间位置处土壤热容量更接近几个位置处的平均值。

### 2.4 土壤热扩散率

由图 7 可以看出, 2 cm 和 4.5 cm 两个土层土壤热扩散率变化范围分别为  $4.07 \times 10^{-7} \sim 6.30 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  和  $4.18 \times 10^{-7} \sim 6.88 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , 两个土层土壤热扩散率变化均较平稳。土壤热扩散率为土壤热导率与热容量的比值, 因此其变化规律取决于土壤热导率和热容量随土壤含水量变化的幅度。在整个测定期间, 土壤热容量和热导率的变化趋势基本一致, 因此得出的土壤热扩散率波动较小。对比两个土层可以发现, 棵间位置 4.5 cm 土层土壤热扩散率大于 2 cm 土层。这可能是因为棵间位置 4.5 cm 土层土壤热容量相对较小, 而热导率相对较大; 另一方面, 棵间位置 4.5 cm 土层土壤含水量大于 2 cm 土层。

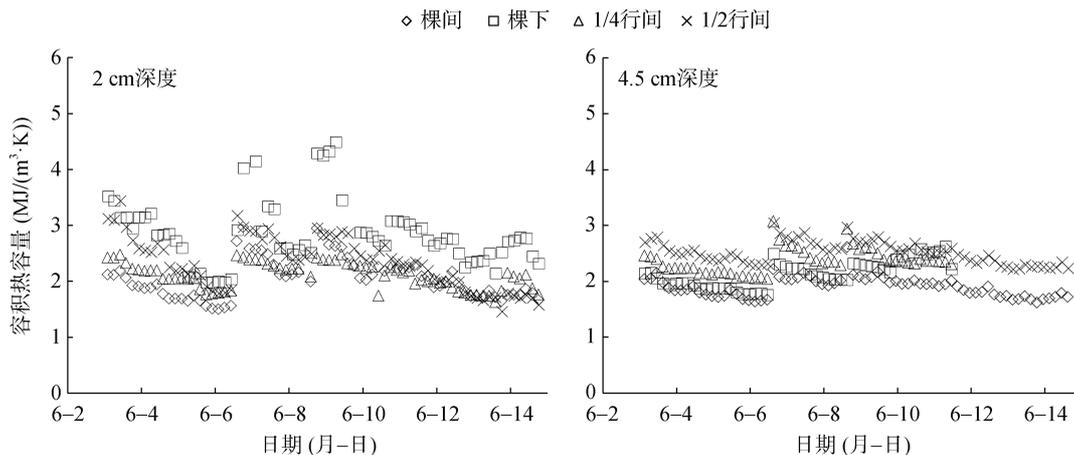


图 6 土壤容积热容量的时空变异特征

Fig. 6 Temporal and spatial variation of soil volumetric heat capacity

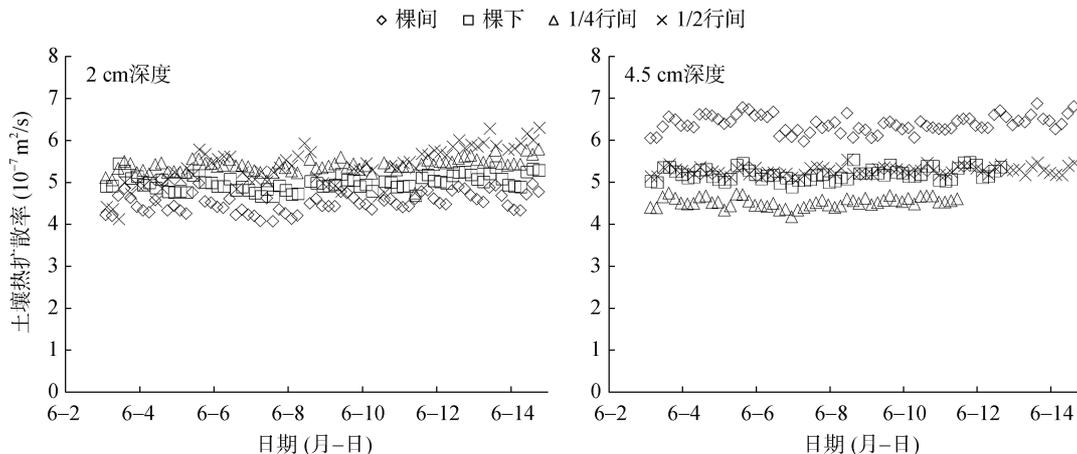


图 7 土壤热扩散率的时空变异特征

Fig. 7 Temporal and spatial variation of soil thermal diffusivity

### 2.5 土壤热特性与含水量、温度的关系

图 8 为整个试验期间 2 cm 和 4.5 cm 土层土壤热特性随土壤含水量的变化规律。从图中可以看出，两

个土层土壤热特性随土壤含水量的变化趋势一致，且同一土层不同位置处土壤热特性随土壤含水量变化也表现出相同的变化趋势。

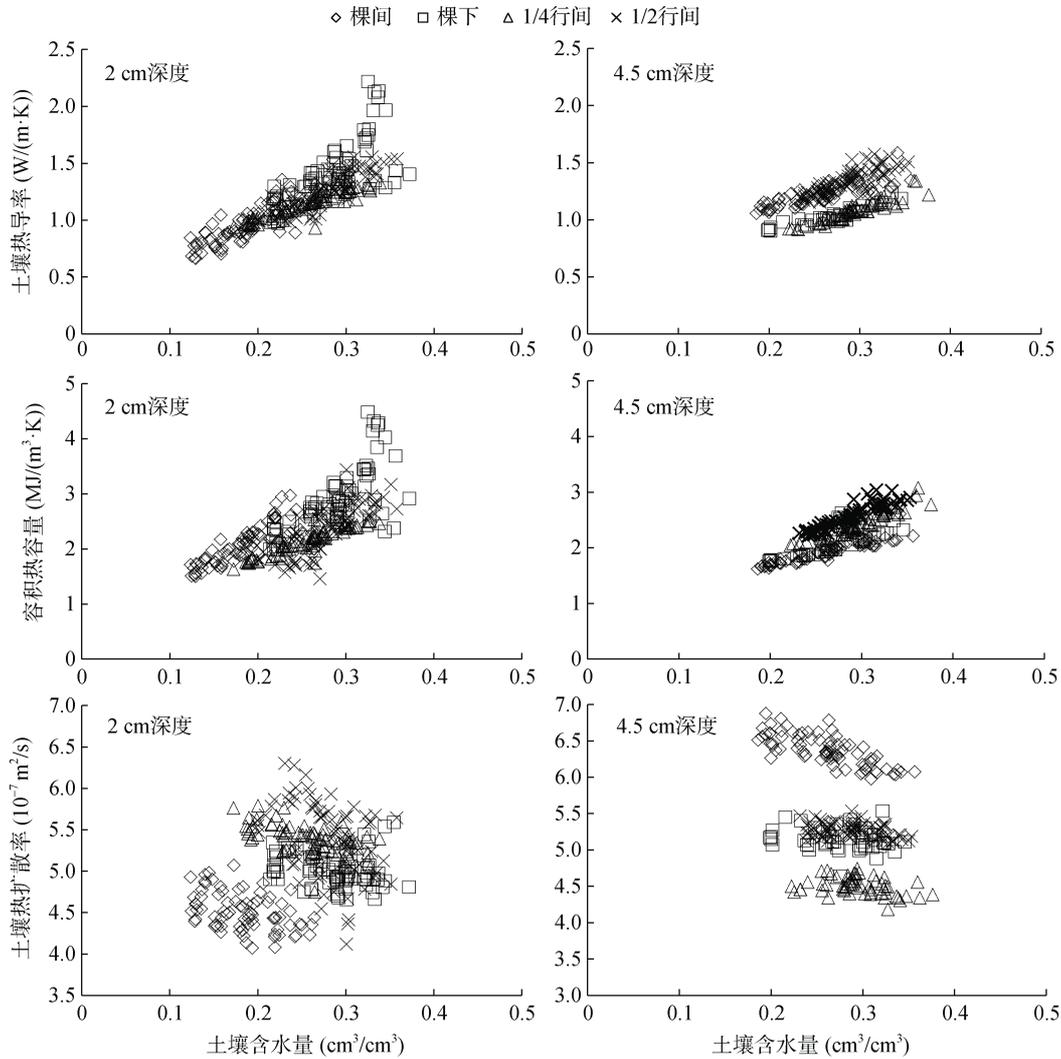


图 8 土壤热特性与含水量的关系

Fig. 8 Relationship between soil thermal properties and water content

土壤热导率随含水量的变化可分为 3 个阶段：土壤三相中热导率的大小顺序为固相>液相>气相，饱和土壤具有较好的水分连续性，热导率最大，随土壤水分蒸发，空气进入土壤大孔隙，土壤热导率迅速降低；之后随着水分损失速率减慢，热导率降低速率也变慢<sup>[35]</sup>；最后，当土壤含水量较低时，土壤颗粒之间的“水桥”消失，水分连续性差，土壤孔隙中空气所占体积大，土壤热导率呈指数降低<sup>[8]</sup>。本研究中土壤热导率随土壤含水量的变化介于第一和第三阶段之间。土壤热容量随含水量变化的规律与 de Vries<sup>[36]</sup>提出的热容量模型表现出的规律一致，即土壤容重一定时，土壤热容量与含水量呈线性关系。土壤三相中热容量的大小顺序为液相>固相>气相，因此土壤热

容量对含水量的响应更为敏感，尤其是降雨之后，土壤含水量增加，土壤热容量迅速增加。土壤热扩散率随含水量的变化呈现出先增加后降低的规律。当土壤含水量 $<0.15 cm^3/cm^3$  时，土壤热扩散率随含水量的增加而增加；当土壤含水量介于  $0.15 \sim 0.40 cm^3/cm^3$  时，随土壤含水量的增加，各位置土壤热扩散率均呈现出降低的趋势，主要是因为热扩散率随含水量的变化取决于土壤热导率和热容量随含水量变化的快慢，在 $>0.15 cm^3/cm^3$  土壤含水量范围内，土壤热导率随含水量增加的速率低于土壤热容量增加的速率。这一规律与张猛<sup>[8]</sup>和米美霞等<sup>[35]</sup>得到的结论一致。根据两个深度土壤热扩散率和含水量的关系可得出，本研究中潮土热扩散率达到峰值时的土壤含水量范围在

0.15 ~ 0.22 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。米美霞等<sup>[35]</sup>指出沙黄土热扩散率达到峰值时的土壤含水量在 0.20 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 左右, 本研究结果与此相近。

此外, 从土壤热特性与土壤含水量的关系曲线也可以看出, 不同位置不同深度曲线存在差异, 由此可以得出土壤热特性与含水量的关系也存在时空变异性。需要指出的是本研究只测定了两个深度的土壤含水量, 在试验期间所涉及的含水量范围内, 土壤热特性参数与含水量的关系只用于不同位置及深度的分析比较。对于该土壤类型下热特性参数与含水量的定量关系需要进一步研究确定。

从图 9 中可以看出, 两个深度 4 个位置处的土壤

热导率随对应时间土壤背景温度的变化没有表现出明显的变化趋势。本研究中测定的土壤温度变化范围为 16 ~ 34 °C, 在此温度变化范围内的研究结果与前人研究基本一致<sup>[7, 37]</sup>。董西好等<sup>[37]</sup>的研究表明在常温条件下(0 ~ 30 °C), 土壤热导率随着温度上升略有增加, 但基本保持不变。陆森等<sup>[7]</sup>的研究也指出在常温条件下模拟土壤热导率时可以忽略温度效应。但是对于变化范围较大的地表土壤温度, 土壤热导率与温度的关系有待进一步研究。4 个位置处 4.5 cm 土层深度的土壤热容量随温度升高略有下降, 2 cm 土层深度变化不明显。土壤热扩散率随土壤温度的增加表现出线性增加的趋势, 这可能是由于该土层土壤热导率随

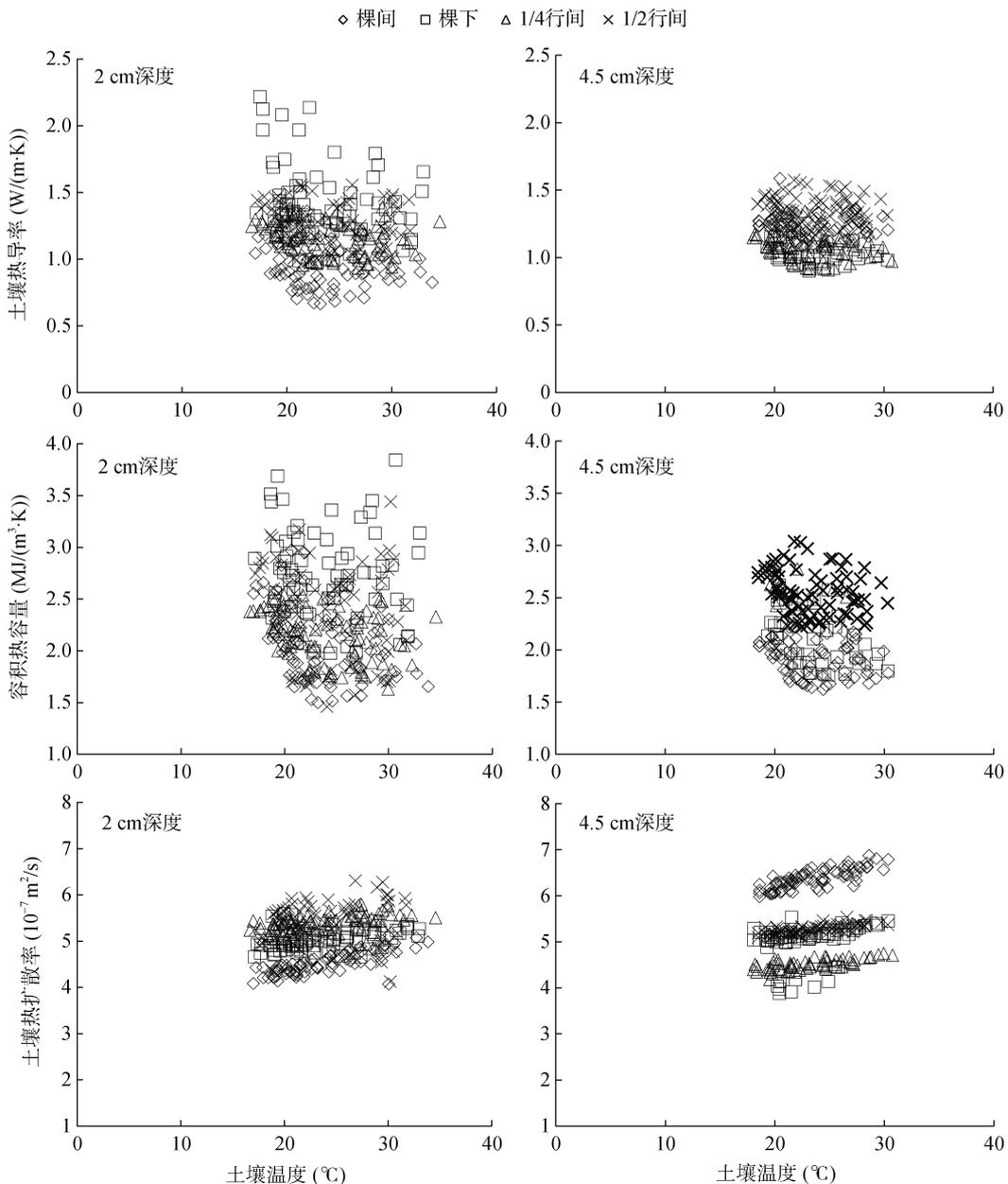


图 9 土壤热特性与土壤背景温度的关系

Fig.9 Relationship between soil thermal properties and background temperature

着温度的升高基本不变, 而土壤热容量有所下降, 土壤向下扩散的热量增多。从图9中还可发现不同位置土壤热扩散率随土壤温度增加快慢存在一定差异, 这可能是因为不同位置处土壤含水量、土壤孔隙状况存在差异, 具体原因有待进一步研究。

### 3 结论

1) 玉米农田行尺度土壤热特性存在时空变异性。降雨之后4个位置土壤热容量和热导率迅速增大, 随时间进行逐渐减小。4个位置间土壤热特性比较, 棵下位置处波动较大; 2 cm 土层土壤热特性比4 cm 土层波动大。

2) 在本研究中, 土壤含水量是土壤热特性的关键驱动因子, 土壤热导率、热容量与含水量均呈现出线性关系; 而土壤热扩散率随土壤背景温度的增加表现出增加趋势, 且不同位置不同深度增加速率有所不同。

3) 监测玉米农田土壤热特性时, 要考虑行尺度热特性的时空差异性, 注意选取具有代表性的监测位置, 在本研究中1/4行间位置的热导率和热容量更具代表性。

### 参考文献:

- [1] 彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1071-1087.
- [2] 邸佳颖, 刘晓娜, 任图生. 原状土与装填土热特性的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 74-79.
- [3] 卢奕丽, 张猛, 刘晓娜, 等. 含水量和容重对旱地耕层土壤热导率的影响及预测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 146-151.
- [4] 王卫华, 蔡礼良, 龚一丹. 土壤热导率影响因素及模型评估研究[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 124-132.
- [5] 王子龙, 孙秋雨, 李航, 等. SHAW 模型模拟积雪覆盖下土壤热过程的不确定性分析[J]. 土壤, 2023, 55(2): 419-425.
- [6] 王卫华, 李建波, 王铄, 等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 120-125.
- [7] 陆森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 13-18.
- [8] 张猛. 干湿交替过程中土壤容重、水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [9] 曾召田, 范理云, 莫红艳, 等. 土壤热导率的影响因素实验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 377-384.
- [10] Usowicz B, Lipiec J. Assessment of spatial variability of soil thermal properties in cultivated field[J]. Geophysical Research Abstracts, 2017, 19, EGU2017-13215.
- [11] Vidana Gamage D N, Biswas A, Strachan I B. Spatial variability of soil thermal properties and their relationships with physical properties at field scale[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193: 50-58.
- [12] Zaibon S, Anderson S H, Veum K S, et al. Soil thermal properties affected by topsoil thickness in switchgrass and row crop management systems[J]. Geoderma, 2019, 350: 93-100.
- [13] Mitchell-Forsyth B, Haruna S, Downs K. Variability of soil thermal properties along a *Catena* in middle Tennessee, USA[J]. International Agrophysics, 2021, 35(2): 209-219.
- [14] 陶涣壮, 甘磊, 马蕊, 等. 桂林地区不同土地利用方式下土壤热导率空间变化[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 226-230.
- [15] Abu-Hamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285-1290.
- [16] Adhikari P, Udawatta R P, Anderson S H. Soil thermal properties under prairies, conservation buffers, and corn-soybean land use systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(6): 1977-1986.
- [17] Abu-Hamdeh N H. Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(3/4): 145-151.
- [18] Hay R K M, Holmes J C, Hunter E A. The effects of tillage, direct drilling and nitrogen fertiliser on soil temperature under a barley crop[J]. Journal of Soil Science, 1978, 29(2): 174-183.
- [19] 孙增慧. 东北玉米农田行间土壤水分水平分布特性[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [20] 徐翠兰, 侯淑楠, 姚紫东, 等. 南方农田土壤容重空间变异性及其尺度效应[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 424-429.
- [21] Bruand A, Cousin I, Nicoulaud B, et al. Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 895-901.
- [22] Richard G, Cousin I, Sillon J F, et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(1): 49-58.
- [23] Usowicz B, Kossowski J, Baranowski P. Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields[J]. Soil and Tillage Research, 1996, 39(1/2): 85-100.
- [24] 王卫华, 王全九, 武向博, 等. 黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 94-102, 294.
- [25] Xiao Z, Lu S, Heitman J, et al. Measuring subsurface soil-water evaporation with an improved heat-pulse probe[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 876-879.

- [26] 王月月. 农田蒸散的测定与分解: 茎流计和热脉冲传感器的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [27] Zhang X A, Heitman J, Horton R, et al. Measuring near-surface soil thermal properties with the heat-pulse method: Correction of ambient temperature and soil-air interface effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1575–1583.
- [28] De Vries D A. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil *in situ*[J]. *Soil Science*, 1952, 73(2): 83–90.
- [29] Kluitenberg G J, Ham J M, Bristow K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(6): 1444–1451.
- [30] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574–582.
- [31] Jury W A, Gardner W R, Gardner W H. *Soil physics* (fifth edition)[M]. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- [32] 温敏敏. 热探针方法测量土壤水热特性的改进研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [33] Heitman J L, Xiao X, Horton R, et al. Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W00D05.
- [34] Fu Y W, Lu Y L, Heitman J, et al. Root-induced changes in soil thermal and dielectric properties should not be ignored[J]. *Geoderma*, 2020, 370: 114352.
- [35] 米美霞, 樊军, 邵明安, 等. 地表覆盖对土壤热参数变化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 58–66.
- [36] de Vries D A. *Thermal properties of soils*//Van Wijk W R. *Physics of plant environment*[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963: 210–235.
- [37] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 2888–2894, 2900.