

# 变温度-风速模拟条件下微润灌工况自适应调节机理

朱成立 李 依 王 策 库热西·吾尔开西 段正宇  
(河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100)

**摘要:** 通过模拟光照、吹风改变蒸发强度,对比分析了4种蒸发条件(CK、光照(L)、吹风(W)、光照+吹风(LW))下微润灌入渗速率以及湿润体变化特征。结果表明,常温下微润灌累积入渗量与时间呈显著线性相关关系(决定系数 $R^2 > 0.99$ ),符合 Philip 入渗模型水平吸渗项入渗规律;微润管出流速率因多孔介质管壁穿透入渗、管周土壤水分入渗分别随时间呈现出初期骤增、线性减小的演变规律;改变上边界条件后各处理蒸发均显著增大,然而入渗速率只随温度增加而提高,吹风带走土表热量,入渗速率反而减小;光照期间,L、LW 处理入渗速率分别增长 56.56%、29.51%;撤去光照 2 h 后,LW 处理蒸发强度不变,入渗速率骤降 5.90%,揭示了微润灌对温度响应的敏感性远高于上边界蒸发。湿润锋运移距离与时间呈显著幂函数关系,温度提高后入渗速率增加促进了湿润锋运移,温差和重力势共同驱动下水分向背离热源方向移动,光照处理中湿润锋水平运移距离  $D_{\text{horiz}}$ 、垂直向下运移距离  $D_{\text{down}}$  较预测值分别增长 75.81%、99.30%。该研究揭示了源于辐射的地温变化在微润灌入渗中的关键驱动效应,有效补充了微润灌在温差、辐射骤变区域的管出流及土壤水分动态运移机理,研究结果可为基于气象数据、作物需水和墒情的微润灌智慧调控模式设计提供理论依据。

**关键词:** 微润灌; 温度; 蒸发; 自适应灌溉; 水分运移

中图分类号: S274.3      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)03-0347-09      OSID: 

## Mechanism of Self-adaptive Moistube Irrigation at Different Simulative Temperatures and Wind Speed Factors

ZHU Chengli LI Yi WANG Ce KUREXI Wuerkaixi DUAN Zhengyu  
(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The evaporation intensity was changed by simulating light and blowing wind. Comparing the characteristics of moistube irrigation infiltration rate and wetting body changes under four different evaporation conditions (CK, Light (L), Wind (W), Light + Wind (LW)), it was found that the cumulative infiltration of moistube irrigation at room temperature was significantly linearly correlated with time (coefficient of determination  $R^2 > 0.99$ ), which was consistent with the infiltration law of the horizontal absorption term of the Philip infiltration model. The infiltration rate of moistube outflow showed an initial sudden increase and then linear decrease with time due to the penetration of infiltration through the wall of porous medium and infiltration of soil water around the tube respectively. The evaporation of each treatment was increased significantly after changing the upper boundary conditions. However, the infiltration rate was increased only with the increase of temperature as the infiltration rate even decreased when the wind carried away the heat from the soil surface. During the light period, the infiltration rates of L and LW treatments were increased by 56.56% and 29.51%, respectively. After the withdrawal of light for 2 h, the evaporation intensity of LW treatment remained unchanged, and the infiltration rate plummeted by 5.90%, which revealed that the sensitivity of moistube irrigation to temperature response was much higher than that of evaporation at the upper boundary. The transport distance of wetting fronts

收稿日期: 2022-11-26    修回日期: 2023-01-11  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52109053、51879071)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20200523)、国家科技奖后备培育项目(20212AEI91011)、江西省水利科学院开放研究基金项目(2021SKTR03)、中国博士后基金面上项目(2021M690874)和国家重点研发计划项目(2020YFD0900701)  
**作者简介:** 朱成立(1966—),男,教授,博士,主要从事水土资源规划、高效灌排理论与技术研究,E-mail: clz@hhu.edu.cn  
**通信作者:** 王策(1989—),男,讲师,博士,主要从事微润灌溉节水理论与技术、农田裂隙及其优先流理论研究,E-mail: wangce@hhu.edu.cn

showed a significant power function relationship with time and the increase of infiltration rate after the temperature increase promoted the transport of wetting fronts, which was driven by both temperature difference and gravitational potential in the direction of moving away from the heat source. Compared with the prediction, the horizontal migration distance  $D_{\text{horiz}}$  and vertical downward migration distance  $D_{\text{down}}$  in the light treatment were increased by 75.81% and 99.30%, respectively. The research result can provide theoretical basis for the design of smart regulation model of moistube irrigation based on meteorological data, crop water demand and moisture conditions.

**Key words:** moistube irrigation; temperature; evaporation; self-adaptive irrigation; moisture transport

0 引言

基于水资源紧缺的现状,有学者提出可根据作物不同生长期的需水量调节供水压力实现精确灌溉,即实现作物需水触动式自适应灌溉<sup>[1-2]</sup>。不同于喷灌、滴灌这些传统的定量灌溉方式,微润灌线源灌水器由高分子聚合物半透膜制作而成,在管内工作水头和管外基质吸力之间产生的水势梯度驱动作用下,将水和可溶性肥溶液缓慢输送至作物根区,从而实现精准控制灌溉。微润管出流量与周围土壤含水率具有动态响应特性,理论上能根据作物的耗水需求实时自动调节供水强度<sup>[3]</sup>。这种精准灌溉技术不仅显著提高了灌溉水利用效率<sup>[4]</sup>,在自动化、智慧化融合方面也具有可探索性的前景。

影响微润灌入渗的重要因素包括埋深、初始含水率、土壤质地、工作水头等。国内针对微润灌的大部分研究集中在工作水头以及土壤水分动态特征上<sup>[5]</sup>。工作水头设置为零或负压时,微润灌入渗主要由基质势驱动,负压微润灌技术就是通过作物吸水将土水势降至指定水势使灌水器主动给水;存在正压工作水头时,微润灌入渗则受基质势、工作水头双重影响。试验发现入渗初期流量由土壤初始含水率和工作水头共同决定,然而初始含水率对微润灌的影响时间不足 2 d,此后由工作水头单独驱动<sup>[6-9]</sup>,对比大多数作物超过 60 d 的生长期,含水率能够发挥作用的时长有限。微润灌的入渗量、湿润体剖面面积、湿润体含水率和均匀系数均与工作水头呈正相关,若水头保持恒定,上述参数则与容重、土壤初始含水率分别呈负相关和正相关<sup>[10-11]</sup>,此外湿润体形状受初始含水率影响较小<sup>[12]</sup>。尽管国内外学者已针对微润灌的诸多因素做过研究,但这些预测都基于恒定水温理论,考虑到微润灌设计参数的实用性需求,尤其针对干旱区域昼夜温差较大的情况,仍需对温度在微润灌入渗中所起的作用进一步探索。

DIRWAI 等<sup>[13]</sup>将零水头微润管置于聚氯乙烯导管中,通过三速热鼓风机人工诱导蒸发和负压,用空气的实际蒸汽压力  $e_a$  和观察到的蒸汽压力  $e$  的差

值,即蒸汽压差 (Vapor pressure deficit, VPD) 模拟土壤基质势。试验从小到大设置了 3 种不同的风速处理,各处理对应的平均温度  $T_{\text{ave}}$  逐次递增,试验结果发现蒸发强度增加 VPD 增大,出流速度也随之增大,归因于施加的蒸发会导致负压进而诱发出流。针对自由蒸腾发的大田试验,微润管对于蒸腾发响应的敏感性研究,有助于揭示微润管自适应灌溉可行性,不过该研究是一个露天试验,并未进行实际埋设的探索。本文以不同蒸发条件的微润灌试验为基础,将温度、风速作为蒸发主要驱动因素,观测土壤地埋微润管出流特征对土壤基质势变化的响应规律,分析微润灌入渗根据蒸发强度进行改变的可能性,探讨微润灌对于风速、温度的响应机制,以期有效补充微润灌在昼夜温差较大地区(西北旱区)的水力机理,为后续微润灌水头、埋深设计以及精确灌溉需求提供水力机理理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土样

本试验用土取样自河海大学节水园区试验大田,取表层 40 cm 土壤过筛去除杂质,置于通风处自然风干至质量含水率为 3%。室内试验所用土样二次过筛,按照国际制土壤质地分类,供试土样为黏壤土。

1.2 试验装置

室内土箱试验(图 1a),土箱尺寸为 50 cm × 30 cm × 50 cm (长 × 宽 × 高),将供试土样过 5 mm 筛后分层均匀填入土箱,每层精准控制 5 cm,层间打毛,填土干容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>,填土高度 35 cm。微润管埋深 10 cm,马氏瓶底部阀门接上硅胶管后通过滴灌接头与土箱内微润管相连,工作水头统一设定为 1.0 m。入渗时间设为 111 h,入渗前 96 h 不加任何处理,96 h 后分别给土柱施加不同处理,分别为 CK 处理(不加额外处理);L 处理(光照):在距离土表 50 cm 处架设 1 120 W 四灯泡浴霸灯模拟光照;W 处理(吹风):使用风扇模拟吹风;LW(光照 + 吹风):同时使用风扇与浴霸灯。此外,分别进行两次微润管在空气中的出流试验,不同室温中管周温度

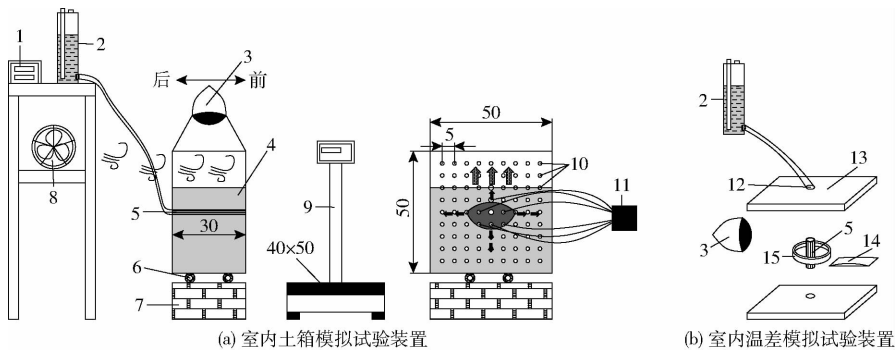


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

1. TH20BL 型温湿度记录仪 2. 马氏瓶 3. 浴霸灯 4. 土箱 5. 微润管 6. 滑轮 7. 增高垫砖 8. 电风扇 9. 电子秤 10. 取土孔 11. TDR 12. 小孔 (直径 2 cm) 13. 亚克力板 14. 冰袋 15. 亚克力环

分别设置为 15、20℃,光照状态管周温度统一加热到 30℃。

温差模拟试验(图 1b),将供试土样填入夹在两块厚度较大的亚克力板间的亚克力环中,土样高度为 2 cm。为实现各向同性,所用土样过 0.8 mm 筛且不进行压实,填土干容重为 1.15 g/cm<sup>3</sup>。微润管穿过两块亚克力板中心的孔,与地面垂直,上方接上硅胶管与 1.0 m 水头马氏瓶相连,水平方向两侧全程分别进行光照加热以及冰袋冷却处理,试验重复 6 次。

测量过程中按照先密后疏原则,读取马氏瓶液面高度进而推算微润灌累积入渗量和入渗率数据,使用佳能 EOS 60D 型数码相机拍照记录湿润锋变化,采用 Photoshop 软件将所拍图像裁剪至与实际尺寸一致,之后导入 AutoCAD 获得湿润锋数据。该过程中采用时域反射仪器(TDR)长期连续监测土壤体积含水率数据,用电子秤(200 kg,精度 1g)多次称量求得蒸发量。试验结束后立即通过背部孔挖取土样用干燥称量法测量质量含水率。为保证试验数据结果的重现性,每组处理设置 3 个重复,采用 SPSS 软件对试验数据进行平均值、方差分析,采用 OriginPro 和 AutoCAD 软件绘图。采用决定系数  $R^2$  评价实测值和模拟值之间的相关性<sup>[14]</sup>, $R^2$ 越趋向于 1,实测值和模拟值之间相关性越显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 变边界条件下微润灌入渗速率

试验结果表明,相同工作水头下微润灌在空气中的入渗速率远小于在土壤中,该现象与牛文全等<sup>[7]</sup>研究结果相一致,即地表铺设微润管入渗速率显著小于地埋微润管,其原因为微润管由管内正压工作水头和管外土壤基质势共同驱动,其土壤基质势效应显著提升了水分运移所需要的水势梯度。当

微润管埋入地下时,微润管外壁表面水分在聚集过程中,被非饱和的土壤在基质吸力作用下充分吸收,从而加速了水分入渗过程。

通过对不同试验的实测数据,绘制累积入渗量及入渗速率与时间的关系线。图 2a(图中 AIR 表示空气中出流)中,试验未加处理的前 96 h,各处理的决定系数  $R^2$ 均无限趋近于 1,累积入渗量与入渗时间呈现极显著线性相关。一般情况下含水率低的土壤基质吸力极大,对水分拥有极强的吸引力,如林地草地的降雨入渗试验中初始入渗率可达稳定值的 4 倍<sup>[15]</sup>。与这种充分供水入渗不同,微润管材质可视为质地黏重的粘土,可将其入渗特征假定为多孔介质饱和和土壤入渗相关机理进行分析和推算<sup>[16]</sup>。

试验中微润灌入渗速率随时间演变曲线分为微润管多孔管壁穿透入渗、管周土壤水分入渗和变上边界条件的自适应工况入渗 3 个阶段。第 1 阶段即初始入渗时,微润纳米材料管出流决定于其纳米孔隙密度或者其等效粘土孔隙特征,受到高致密纳米孔隙限制,未被水浸透的位置在多孔介质中渗透缓慢,微润管的初始流量呈现出较低的状态;待到微润管中水分子穿透纳米管接触并浸润土壤能够正常出流时,微润管附近含水率仍处于非饱和状态,其原理为粘土初始含水率较低,沿湿润锋向外的水分扩散速率高于微润管出流速率,吸力作用下渗出微润管的水迅速被吸走;吸力作用下,入渗速率迅速上升到达峰值,随后呈现出逐渐递减趋势。

第 2 阶段,入渗速率保持在峰值附近一段时间后,将以极缓的幅度减小,该现象可归因于微润管附近土壤含水率达到近饱和和后土壤水分向外扩散率逐渐减小,随着微润管周围土壤含水率增加水分运移受到阻碍,当土壤入渗速率小于灌水器出流速率,灌水器附近会出现水分近饱和状态,使得出流速率减小至低于自由出流速率<sup>[17]</sup>。该现象表明微润灌在

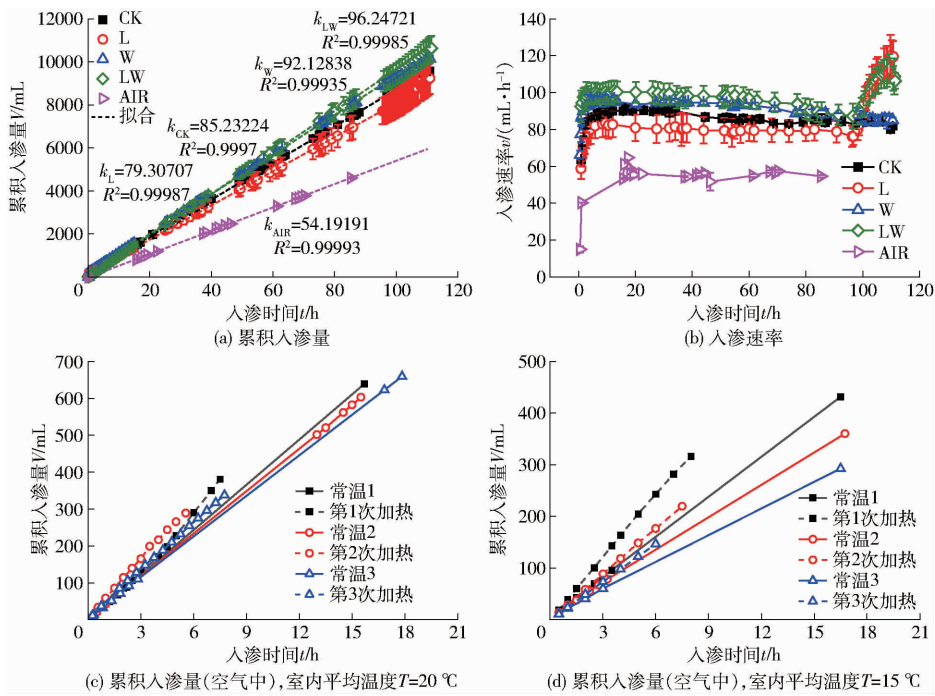


图 2 微润管累积入渗量和入渗速率

Fig. 2 Cumulative infiltration volume and infiltration rate of moistube

入渗末期, 仍符合入渗规律的普遍规律, 即根据 Philip 模型假设, 在边界条件恒定情况下入渗速率随时间呈指数型减小规律。仅靠水势差调节, 第 1 阶段、第 2 阶段入渗速率的变化幅度极小, 这与依靠水势差出流的痕量灌溉面临的问题相似, 这种自适应灌溉形式不能满足作物高峰期的用水需求, 并且非高峰期还面临供水过量的问题<sup>[18-19]</sup>。

第 3 阶段自累积入渗 96 h 起至试验结束, 这一阶段给土柱添加不同处理, 蒸发强度变化见图 3b。采用间接法计算作物需水量时, 通常采用联合国粮农组织提出的 FAO 56 Penman - Monteith 公式法进行推算, 此外有干土层时常用蒸发阻力模型, 据此本文选取温度、风速因素作为控制变量<sup>[20-22]</sup>。假设蒸发或作物蒸腾效应能够显著促进微润管出流、改变微润灌的工况特征。试验中, CK 入渗速率维持缓慢减小趋势; 增加吹风处理时, W 处理入渗速率有一个小幅度下跌, 之后与 CK 相似; 施加光照、光照 + 吹风

外界条件后, L 或 LW 处理入渗速率均急剧增加, L 处理在 109 h 达到最大速率 (120.07 mL/h), 相当于前 96 h 平均速率的 150.60%, 之后保持 120 mL/h 的入渗速率至结束, 光照期间, 入渗速率增加 56.56%; LW 处理入渗速率在 109 h 达到 112.97 mL/h, 相当于前 96 h 平均速率的 117.37%, 光照期间, 入渗速率增加 29.51%; LW 入渗速率增长幅度较 L 偏小, 其原因一是 LW 本身入渗速率较大, 二是风带走了土表热量。W 处理下蒸发强度增加, 然而其对应的入渗速率相对施加吹风处理前反而加快下降, 后期接近 CK 的瞬时入渗速率 (图 2b), 主要原因为施加吹风后土壤表面温度降低近 3℃, 使得 W 与 CK 的地表温度相近。由此可见, 表面蒸发对微润管入渗速率并不存在直接影响, 然而入渗速率却与温度显著相关。为进一步验证此结论, LW 处理在累积入渗时间 109 h 时撤去光照, 只保留吹风处理, 结果显示入渗过程的后 2 h, 该处理

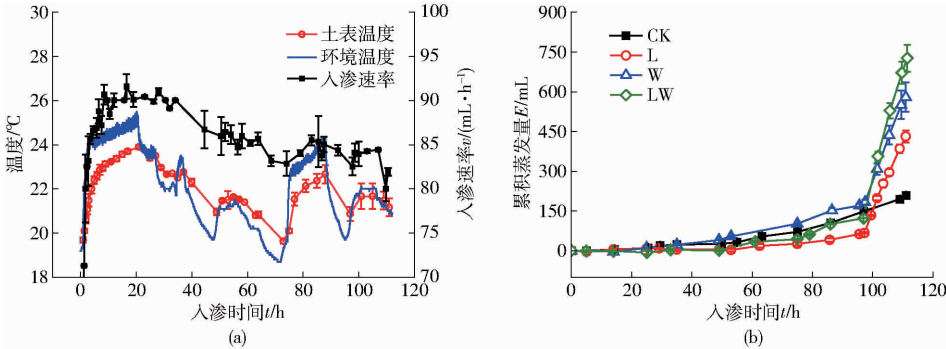


图 3 CK 入渗速率与温度关系以及累积蒸发量变化曲线

Fig. 3 Relationships between infiltration rate and temperature of CK and changes of cumulative evapotranspiration

蒸发强度几乎不变,但入渗速率从 112.97 mL/h 减小至 106.3 mL/h,降低 5.90%。现象可归因于:排除温度影响,微润管出流速率主要取决于微润管的工作压力,在一定程度上响应于微润管四周的土壤含水率状态,蒸发强度改变引起的土壤含水率状态波动极小,表现为微润管的出流量未见有显著影响,因此蒸发促进微润管出流速率的假设不适用于本文试验设计。

室内光照条件因室外光照改变,使得各处理间测得的室内温度存在差异<sup>[23]</sup>。CK、L、W、LW 试验期间,室内的平均气温分别为  $(21.99 \pm 1.742)^\circ\text{C}$ 、 $(23.33 \pm 0.764)^\circ\text{C}$ 、 $(26.25 \pm 0.627)^\circ\text{C}$ 、 $(26.27 \pm 0.988)^\circ\text{C}$ ,与各处理的平均入渗速率呈正相关关系。图 3a 记录 CK 试验过程中入渗速率随大气温度以及土表温度变化的曲线,可知入渗速率整体随时间呈现下降的趋势,但中途受到温度升高的影响,呈现几次小幅度回升。此外,微润管自身对于温度较为敏感,LEI 等<sup>[24]</sup>研究了热定型温度对拉伸聚丙烯微孔膜性能的影响,结果表明渗透率和孔隙率随温度升高先升高后降低,微润管表现出相似的变化趋势。以空气中出流试验为例,全程不加任何处理,微润管出流速率始终保持不变(图 2b);加入光照处理,微润管出流速率随每次升温显著增大,且每次升温再冷却后,微润管出流速率都会相对之前轻微下降(图 2c)。

微润管入渗情况随温度变化的原理可以解释为:土壤的热量传输和水分迁移间存在相互耦合作用。温度升高影响土壤水分的表面张力和动力学粘度系数、相同含水率土壤的非饱和导水率随之增大、而温差又会驱使土体中的水分迁移,从而影响微润管出流和土壤水分扩散过程,改变土壤含水率。含水率的变化又会影响土体的物理特性(热扩散系数、密度、饱和度等),从而导致土体中热量传输及温度分布发生变化<sup>[25-27]</sup>。上述研究均证实了微润管出流对于温度变化的敏感性,该现象及相关理论对于昼夜温差较大地区具有指导意义。

总体而言,前期提出微润灌可根据作物蒸腾发或者气象条件的改变而自适应调整工况的假设,对于该研究中的低初始含水率和低工作水头不成立,相关假设有待进一步在多种初始和边界条件下进行印证。例如高初始含水率和高水头条件,此时微润管周围土壤可达到近饱和或者饱和状态,从而限制微润管出流,表面蒸发产生蒸发拉力使水分向表面快速传输,管壁周围含水率随之降低,土壤由饱和向非饱和转变,预期可加速微润管的出流。在进行精确灌溉方案制定时,微润灌工作水头设计不仅要考

虑土壤、埋深等技术参数,还要考虑温度波动的影响,同时微润管自身水力特性对温度的敏感性响应也应纳入设计考虑范围<sup>[28]</sup>。

## 2.2 湿润锋

将湿润体水平运移距离记为  $D_{\text{horiz}}$ ,垂直向上运移距离记为  $D_{\text{up}}$ ,垂直向下运移距离记为  $D_{\text{down}}$ ,图 4 为土壤湿润锋  $D_{\text{horiz}}$ 、 $D_{\text{up}}$ 、 $D_{\text{down}}$  随入渗时间的变化曲线。从图 4 可以看出, $D_{\text{horiz}}$ 、 $D_{\text{up}}$ 、 $D_{\text{down}}$  均随入渗时间  $t$  的增加呈增加趋势,运移速率随着时间增加减小,符合土壤入渗模型(Kostiakov 模型)的趋势,可用幂函数描述湿润锋运移距离  $D$  随入渗时间  $t$  的变化,即

$$D = At^B \quad (1)$$

式中  $A$ ——扩散系数,第一单位时间末的湿润锋运移速率,cm/h

$B$ ——扩散指数

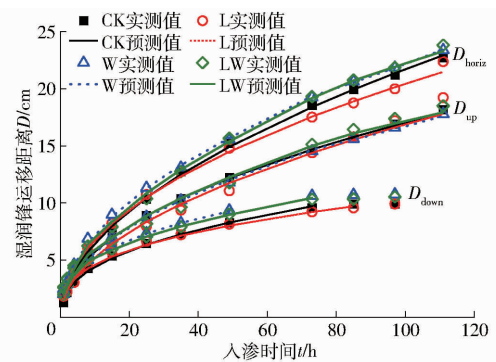


图 4 湿润锋随时间的运移曲线

Fig. 4 Wetting front movement with time

图 4 不同处理的拟合结果见表 1。由表 1 可以看出,未加处理时, $D_{\text{horiz}}$  与幂函数吻合良好,但  $D_{\text{down}}$  在入渗后期实际运移距离偏大。因为微润管作为一种低流量半透膜灌水器,其出流量较小且管壁周边土壤呈现出非饱和状态,土壤水分运移由重力势和基质势所驱动,实际入渗过程中,重力势造成湿润体形心和微润管中心的偏差,重力作用导致水势梯度在 3 个方向由大到小依次为:向下、水平、向上,该现象在砂性土中更为显著<sup>[29-31]</sup>。

由图 4 可以看出,入渗初期, $D_{\text{horiz}}$ 、 $D_{\text{up}}$ 、 $D_{\text{down}}$  相近,湿润体形状接近正圆,接着由圆形逐渐发展为“倒梨”形,三者间的差距随时间增大。试验中不同入渗速率的水平运移距离之间差距明显,入渗距离与平均速率成正比,不同入渗速率的垂直向下运移距离差距较小。使用容重大于  $1.35 \text{ g/cm}^3$  的试验土样进行点源滴灌试验,也出现湿润锋水平运移距离随滴头流量而增大,但垂直运移距离对滴头流量反应不明显<sup>[32]</sup>。该现象同样反映在稳定大流量滴灌试验中,大容重土壤水平方向扩散速率大于小容

表 1 湿润锋运移距离与时间拟合参数与模型评价

| 处理 | $D_{\text{horiz}}$                |       |       | $D_{\text{down}}$                 |       |       | $D_{\text{up}}$                   |       |       |
|----|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|
|    | $A/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$ | $B$   | $R^2$ | $A/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$ | $B$   | $R^2$ | $A/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$ | $B$   | $R^2$ |
| CK | 1.927                             | 0.526 | 0.999 | 1.965                             | 0.469 | 0.999 | 1.77                              | 0.397 | 0.993 |
| L  | 2.231                             | 0.481 | 0.999 | 1.635                             | 0.507 | 0.992 | 2.079                             | 0.347 | 0.991 |
| W  | 2.333                             | 0.49  | 0.999 | 1.936                             | 0.469 | 0.999 | 2.343                             | 0.354 | 0.998 |
| LW | 2.051                             | 0.518 | 0.998 | 1.914                             | 0.477 | 0.987 | 2.237                             | 0.357 | 0.998 |

重土壤,而垂直方向扩散速率小于小容重土壤<sup>[33]</sup>。该现象可解释为,在进行分层填土压实的过程中,垂直方向土样压缩度远超过水平方向,导致土壤产生空间异质性,水平截面土颗粒接触面积大于垂直截面,即水平截面孔隙率小于垂直截面,导致通过水平截面的水力传导度小于通过垂直截面的水力传导度。

图 5 为处理施加后水平、垂直湿润锋的预测值与实测值对比。CK、W 处理湿润锋的运移规律与预

测相差不大,L 处理的  $D_{\text{horiz}}$  运移距离较预测值增长 75.81%, $D_{\text{down}}$  较预测值增长 99.30%;非饱和导水率随着温度升高增加,对入渗速率较为敏感的  $D_{\text{horiz}}$  随之增大,顶部受热在温差和重力势作用下水分向下方运移;LW 处理湿润锋运移距离的变化幅度小于 L 处理, $D_{\text{horiz}}$  较预测值增长 22.79%, $D_{\text{down}}$  无明显差异,原因为 LW 光照时长较短加上吹风带走了热量,且 LW 原始入渗速率较高入渗速率相对变化更小。

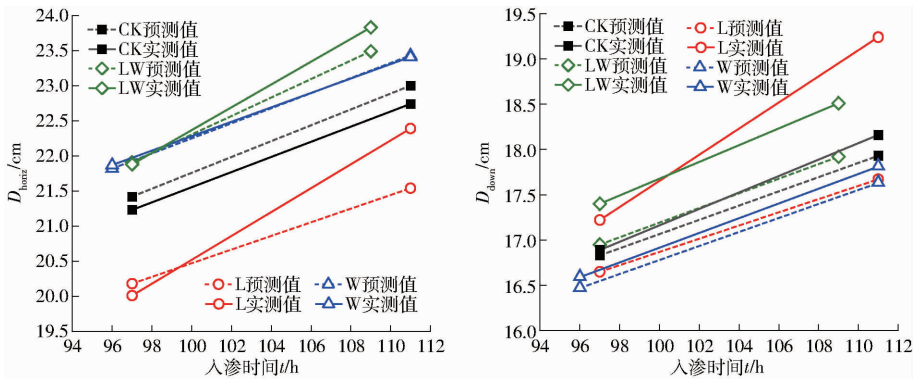


图 5 处理前后湿润锋运移距离预测值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of predicted and measured wetting front transport distance before and after treatment

2.3 含水率

图 6 为 CK、L 处理体积含水率 (%) 分布等值线图,坐标(0,0)为微润管所在位置,垂直向上方向为正。湿润体内含水率等值线围绕微润管分布,每一圈等值线的形状与湿润锋相似。微润管顶部等值线较为密集,两侧较为稀疏,湿润体内部含水率分布情况与湿润锋相关。湿润体大小与入渗速率正相关<sup>[34]</sup>。加入光照、吹风处理后,L 处理土柱顶部受热,土壤剖面形成温度场,土表与底部

土壤的温差超过 30℃。温差下的水分迁移表现为冷端含水率增大,热端减小,温差越大水分迁移特征越明显,且中等含水率时达到最大<sup>[35-36]</sup>,对比可以发现,CK 处理含水率分布图均匀向外扩散,而 L 处理水分运动整体呈现向下的趋势;光照前,CK 处理各部分含水率均大于 L 处理,光照结束后,L 处理垂直向下部分含水率已经超过 CK 处理;而表层土在温差以及含水率分布对水分扩散的共同作用下,离光照加热端不远处的土壤含水

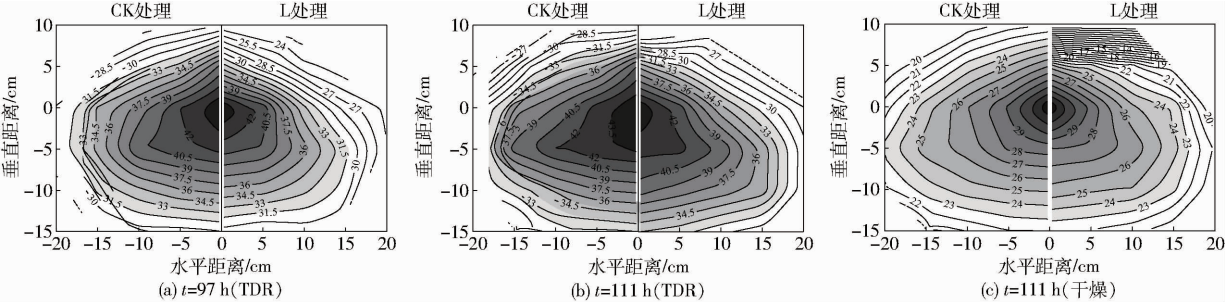


图 6 光照处理后含水率分布变化

Fig. 6 Changes in moisture content distribution after light treatment

率没有减小,反而达到一个高于初始值的峰值,与张玲等<sup>[37]</sup>的研究结论一致。图 7 为垂直、水平方向含水率变化折线图。相隔相同时长,CK 处理同

一点处含水率变化数值相近;L 处理在光照 14 h 期间的含水率变化远大于未加光照 20 h 期间的含水率变化,且垂直向下方向变化幅度最大。

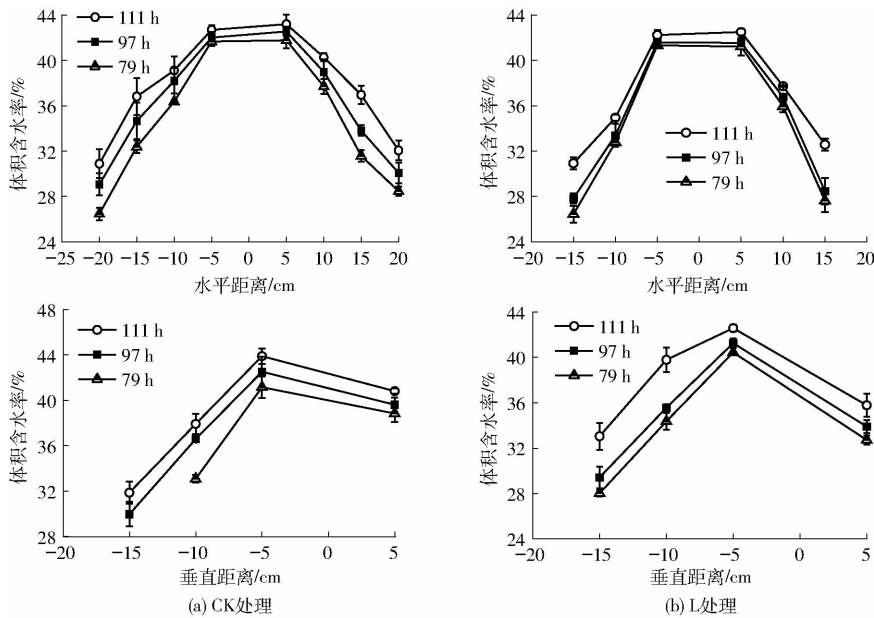


图 7 光照处理与无处理垂直以及水平方向体积含水率变化对比  
Fig. 7 Comparison of change in volumetric water content in vertical and horizontal directions between light treatment and no treatment

为进一步验证温差对微润灌湿润体运移的影响,同时考虑消除重力势能影响,进行了垂直微润管入渗试验,同时在左右侧分别设置热源和冷源(图 1b)。

湿润体试验结果如图 8(共设置 6 个重复,图中内外圈分别为试验结束时微管形状和湿润锋形状。横纵坐标代表不同方向湿润锋与微管管壁的距离 (cm))所示。结果表明,垂直布置的微润管在水平面的湿润锋形状整体趋于圆形,湿润锋运移距离由大到小依次表现为靠近冷源处、两侧、靠近热源处,比例接近 13: 12: 11。证明在由纳米微润管供水的情况下,土壤中的水分也倾向于向远离热源处运移,

证实非等温情况,温差在水分运移的过程中有不可忽视的影响。

土壤水运动中的孔隙水分由孔隙液态水和孔隙水蒸气组成,土样中水分会以不同的形态进行迁移。在含水率较低的情况下,水分运移受孔隙水蒸气迁移控制<sup>[38]</sup>。温度增加对土体内水分迁移的影响体现在:气态水的蒸汽压增加、液态水的动力粘度降低和水-气交界面表面张力降低。而这 3 个变化因素中,蒸汽压对温度的变化最为敏感,温度对孔隙水蒸气迁移的影响远大于孔隙液态水<sup>[39]</sup>。

本试验采用风干后初始质量含水率仅为 3% 左右的土样,因此水分运移主要受气态水迁移影响。根据 TETENS 所提出的饱和蒸汽压计算经验公式<sup>[39]</sup>

$$u_{v, \text{sat}} = 0.611 \exp \left( 17.27 \frac{T - 273.2}{T - 36} \right) \quad (2)$$

式中  $u_{v, \text{sat}}$ ——饱和蒸汽压, kPa  
 $T$ ——温度, K

可知光照使得土柱垂直方向产生温度梯度,高温处蒸汽压远大于低温处蒸汽压,在气压差作用下,孔隙水蒸汽加快迁移,直观表现为湿润锋运移加快。这一现象解释了图 6 中在表面施加高温条件下,微润灌湿润体呈现整体向下迁移趋势,该结论有助于对微润灌在昼夜温差过大地区的实际应用进行补充,修正相应的技术参数,据此对埋深进行改良设计,避免水分向下运移导致的渗漏问题。

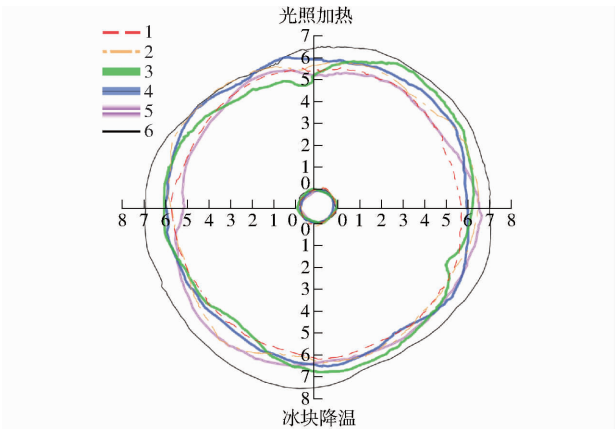


图 8 温差作用下湿润锋在水平面的运移

Fig. 8 Transport of wetting fronts in horizontal plane under effect of temperature difference

### 3 结论

(1)微润灌在空气中的入渗速率小于地埋入渗速率;累积入渗量与灌水时间呈显著的线性函数关系;初期因为高致密孔隙材质,微润管出流受限,后期周围土壤含水率增加,出流速率大于向外扩散速率,管周形成水压,抑制了微润管出流,不过这种因基质势引起的变化较为缓慢。

(2)因蒸发导致的微润管出流能力提升在低水头和极低初始土壤含水率条件下效果不显著,微润灌对于温度响应敏感性远高于上边界蒸发,温度提高可显著促进微润管出流。

(3)重塑土各向异性导致水平方向对入渗速率的敏感度更高,土壤湿润锋运移表现为  $D_{\text{horiz}} > D_{\text{down}} > D_{\text{up}}$ ;水平、垂直方向湿润锋运移距离均与时间符合幂函数关系,可采用 Kostiakov 经典模型进行模拟。微润灌湿润体含水率等值线形状与湿润锋类似,等值线水平方向稀疏,垂直方向密集。

(4)温度升高,微润灌入渗速率及土壤和水的相关参数随之变化,进而加快土壤水分运移、湿润锋扩散。在非等温面中,温差导致较大的蒸汽压差,驱动孔隙水蒸汽由高温处向低温处迁移,水平微润灌中表现为顶部受热辐射后,微润管下方水分运移速率加快。

### 参 考 文 献

- [1] 朱燕翔,王新坤,程岩,等.半透膜微润管水力性能试验的研究[J].中国农村水利水电,2015(5):23-25,30.  
ZHU Yanxiang, WANG Xinkun, CHENG Yan, et al. Research on the hydraulic performance of semi-permeable membrane moistube[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5):23-25, 30. (in Chinese)
- [2] 张锐,刘洁,诸钧,等.实现作物需水触式自适应灌溉的痕量灌溉技术分析[J].节水灌溉,2013(1):48-51.  
ZHANG Rui, LIU Jie, ZHU Jun, et al. Trace quantity irrigation technology with crop water-requirement triggering and self-adaptive function[J]. Water Saving Irrigation, 2013(1):48-51. (in Chinese)
- [3] 杨文君,田磊,杜太生,等.半透膜节水灌溉技术的研究进展[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):60-63.  
YANG Wenjun, TIAN Lei, DU Taisheng, et al. Research prospect of the water-saving irrigation by semi-permeable film[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(6):60-63. (in Chinese)
- [4] 张明智,牛文全,路振广,等.微润灌对作物产量及水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1671-1683.  
ZHANG Mingzhi, NIU Wenquan, LU Zhenguang, et al. Effect of moistube-irrigation on crop yield and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11):1671-1683. (in Chinese)
- [5] DIRWAI T L, MABHAUDHI T, KANDA E K, et al. Moistube irrigation technology development, adoption and future prospects: a systematic scoping review[J]. Heliyon, 2021, 7(2):e06213.
- [6] 徐俊增,刘玮璇,卫琦,等.基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟[J].农业机械学报,2021,52(8):287-296.  
XU Junzeng, LIU Weixuan, WEI Qi, et al. Simulation of soil moisture movement under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):287-296. (in Chinese)
- [7] 牛文全,张俊,张琳琳,等.埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J].农业机械学报,2013,44(12):128-134.  
NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):128-134. (in Chinese)
- [8] 魏永霞,马瑛瑛,刘慧,等.调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J].农业机械学报,2018,49(3):252-260.  
WEI Yongxia, MA Yingying, LIU Hui, et al. Effects of soil water, plant, water saving and yield increasing of maize under regulated deficit drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):252-260. (in Chinese)
- [9] 牛文全,张明智,许健,等.微润管出流特性和流量预报方法研究[J].农业机械学报,2017,48(6):217-224,241.  
NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, XU Jian, et al. Prediction methods and characteristics of flow for moistube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):217-224, 241. (in Chinese)
- [10] 朱益飞,刘小刚,何红艳,等.青枣荫蔽栽培下微润灌溉对小粒咖啡生长和水光利用的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):806-811.  
ZHU Yifei, LIU Xiaogang, HE Hongyan, et al. Effects of moistube irrigation on growth and moisture radiation use of *Coffea arabica* under jujube shading cultivation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9):806-811. (in Chinese)
- [11] 刘小刚,朱益飞,余小弟,等.不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性[J].农业机械学报,2017,48(7):189-197.  
LIU Xiaogang, ZHU Yifei, YU Xiaodi, et al. Water salinity distribution characteristics in wetted soil of moistube irrigation under different pressure heads and soil bulk densities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):189-197. (in Chinese)
- [12] 张俊,牛文全,张琳琳,等.初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J].排灌机械,2014,32(1):72-79.  
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration

- characteristics of soil[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(1):72–79. (in Chinese)
- [13] DIRWAI T L, SENZANJE A, MABHAUDHI T. Moistube irrigation (MTI) discharge under variable evaporative demand[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(12): e0236211.
- [14] 王策, 张展羽, 陈晓安, 等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 314–326, 348.  
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CHEN Xiaolan, et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of water volume balance and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 314–326, 348. (in Chinese)
- [15] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 871–878.  
LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 871–878. (in Chinese)
- [16] 齐伟, 张展羽, 王策, 等. 基于水势差驱动出流机制的微润灌水分运动模型构建及模拟[J]. *水利学报*, 2021, 52(9): 1091–1102.  
QI Wei, ZHANG Zhanyu, WANG Ce, et al. Model construction and simulation of soil water movement under moistube irrigation based on water potential difference-driven outflow mechanism[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1091–1102. (in Chinese)
- [17] GIL M, RODRÍGUEZ S L, JUANA L, et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(6): 451–458.
- [18] 张志新. “痕量”无法灌溉——对“痕量灌溉”的思考[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 1–4.  
ZHANG Zhixin. ‘Trace quantity irrigation’ is impossible: thinking about ‘trace quantity irrigation’[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(18): 1–4. (in Chinese)
- [19] 张国祥, 赵爱琴. “痕量灌溉”理论支撑与技术特点的质疑[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 1–7.  
ZHANG Guoxiang, ZHAO Aiqin. Query about theory and technical properties of trace quantity irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6): 1–7. (in Chinese)
- [20] 邢贞相, 喻熠, 李凤昱, 等. 建三江主要作物需水量变化趋势与关键影响因子识别[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 308–315, 346.  
XING Zhenxiang, YU Yi, LI Fengyu, et al. Change trend and key influencing factors identification of main crops water demand in Jiansanjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 308–315, 346. (in Chinese)
- [21] SHRIYANGI A, KUNIO W. Measurement of evaporation on bare soil and estimating surface resistance[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2003, 129(12): 1157–1168.
- [22] 孙庆远, 张宗超, 贾振超, 等. 玉米果穗深床层热风干燥特性试验研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(增刊 2): 285–292, 337.  
SUN Qingyun, ZHANG Zongchao, JIA Zhenchao, et al. Hot air drying characteristics in deep bed of corn ear[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(Supp. 2): 285–292, 337. (in Chinese)
- [23] 吕欢欢, 牛源艺, 张漫, 等. 日光温室光照强度与空气温湿度变化趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(增刊): 410–417.  
LÜ Huanhuan, NIU Yuanyi, ZHANG Man, et al. Analysis of variation trend of light intensity and air temperature and humidity in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(Supp.): 410–417. (in Chinese)
- [24] LEI Caihong, WU Shuqiu, CAI Qi, et al. Influence of heat-setting temperature on the properties of a stretched polypropylene microporous membrane[J]. *Polymer International*, 2014, 63(3): 584–588.
- [25] 李腾风, 王志良, 申林方, 等. 基于格子 Boltzmann 方法非饱和土体水热耦合模型研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(9): 154–160, 196.  
LI Tengfeng, WANG Zhiliang, SHEN Linfang, et al. A coupled moisture-heat model for unsaturated soil based on lattice Boltzmann method[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9): 154–160, 196. (in Chinese)
- [26] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 484–494.  
GAO Hongbei, SHAO Ming'an. Effect of temperature on soil moisture parameters[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 484–494. (in Chinese)
- [27] NASSAR I N, HORTON R. Water transport in unsaturated non-isothermal salty soil: II. Theoretical development[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(5): 1330–1337.
- [28] SOLOMON K, KELLER J. Trickle irrigation uniformity and efficiency[J]. *Journal of the Irrigation & Drainage Division*, 1978, 104(3): 293–306.
- [29] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 115–124.  
FAN Yanwei, ZHAO Tong, BAI Guilin, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 115–124. (in Chinese)
- [30] GIUSEPPE P. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2007, 133(4): 342–349.

- [19] MANJAKKAL L, SZWAGIERCZAK D, DAHIYA R. Metal oxides based electrochemical pH sensors: current progress and future perspectives[J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 109: 100635.
- [20] 张西良, 胡国强, 徐云峰. 固相浓度电容传感器特性分析与结构参数优选[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(6): 589–595.  
ZHANG Xiliang, HU Guoqiang, XU Yunfeng. Characteristic analysis and structural parameter optimization of solid-phase concentration capacitance sensor[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(6): 589–595. (in Chinese)
- [21] 陈东初. Ir、W 金属/金属氧化物  $H^+$  选择性电极的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
CHEN Dongsheng. Study on  $H^+$  selective electrode of Ir/IrO<sub>x</sub> and W/WO<sub>3</sub>[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] WANG Y, ZHANG M, LI K, et al. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106987.
- [23] 黄菲菲. 铱氧化物 pH 电极制备、响应机理及其应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.  
HUANG Feifei. IrO<sub>x</sub> pH electrode fabrication, response mechanism and its application study[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016. (in Chinese)
- [24] YATES D E, LEVINE S, HEALY T W. Site-binding model of the electrical double layer at the oxide/water interface[J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1974, 70: 1807.
- [25] HUANG Y, TSAI F S, WANG S. Preparation of TiO<sub>2</sub> nanowire arrays through hydrothermal growth method and their pH sensing characteristics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(6S): 06JG02.
- [26] GAO K, WANG X, YANG B, et al. A novel wearable sweat rate sensor for both dominant and recessive sweat rate measurement[C] // 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). Berlin, Germany, 2019.
- [27] 王康. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [28] 余红, 檀文炳, 席北斗. 土壤腐殖质电子转移过程及其环境影响[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [29] OHTO T, MISHRA A, YOSHIMUNE S, et al. Influence of surface polarity on water dynamics at the water/rutile TiO<sub>2</sub>(110) interface[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2014, 26(24): 244102.
- [30] KOME G K, ENANG R K, YERIMA B, et al. Models relating soil pH measurements in H<sub>2</sub>O, KCl and CaCl<sub>2</sub> for volcanic ash soils of Cameroon[J]. *Geoderma Regional*, 2018, 14: e00185.
- [31] OLESEN T, MOLDRUP P, GAMST J. Solute diffusion and adsorption in six soils along a soil texture gradient[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(3): 519–524.
- [32] ADAMCHUK V, LUND E, REED T, et al. Evaluation of an on-the-go technology for soil pH mapping[J]. *Precision Agriculture*, 2007, 8(3): 139–149.

(上接第 355 页)

- [31] ELMALOGLU S, DIAMANTOPOULOS E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 1587–1595.
- [32] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 32–35.  
LI Mingsi, KANG Shaozhong, SUN Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 32–35. (in Chinese)
- [33] 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 等. 滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 17–20.  
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, GUO Yongchang, et al. Experimental study on factors effecting soil wetted volume of clay loam under drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 17–20. (in Chinese)
- [34] QI W, ZHANG Z, WANG C, et al. Prediction of infiltration behaviors and evaluation of irrigation efficiency in clay loam soil under moistube irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106756.
- [35] LIU B C, LIU W, PENG S W. Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(21): 4579–4589.
- [36] 王铁行, 李宁, 谢定义. 非饱和黄土重力势、基质势和温度势探讨[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 715–718.  
WANG Tiexing, LI Ning, XIE Dingyi. Discussion on gravity potential, matrix potential and temperature potential of unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(5): 715–718. (in Chinese)
- [37] 张玲, 陈光明, 黄奕沅. 土壤一维热湿传递实验研究与数值模拟[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(4): 771–776.  
ZHANG Ling, CHEN Guangming, HUANG Yiyun. Experimental study and numerical simulation of one dimensional heat and moisture transfer in soil[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2009, 43(4): 771–776. (in Chinese)
- [38] 杨代泉, 沈珠江. 非饱和土孔隙气、水、汽、热耦合运动之模拟[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 357–361.  
YANG Daiquan, SHEN Zhujiang. Modelling fully coupled moisture air and heat transfer in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 357–361. (in Chinese)
- [39] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2839–2844.  
LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2839–2844. (in Chinese)