doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.035

滴灌条件下椰糠内部水分时空双维度动态变化规律研究

冯朝阳　程　曼　袁洪波
（河北农业大学机电工程学院，保定 071001）

摘要：椰糠是一种逐渐得到广泛应用的栽培基质，但是滴灌条件下椰糠内部含水率在时间和空间两个不同维度的动态变化规律，尤其是在细小尺度上的水分传输和分布特性目前还未得到深入研究。针对这一问题，本文利用传感器阵列对椰糠内部水分动态变化情况进行长时间监测，并从水分运移速率、湿润体形态、湿润体内含水率时空分布特点等方面进行了研究。试验结果表明，在滴灌过程中，湿润锋垂直方向运移速率远高于水平方向运移速率，其运移距离和垂直运移速率与入渗时间呈幂函数关系，湿润体内含水率随时间呈S形曲线增长，并在灌溉20 h后湿润体内含水率达到相对稳定状态。随着入渗时间增长湿润体形状由倒锥形向桶状形变化，灌溉结束后，湿润体内部含水率变化可分为两个阶段，短期含水率下降较快且符合幂函数关系，中长期含水率以指数衰减函数下降，湿润体呈锥形逐渐收缩。

关键词：椰糠；含水率；滴灌；湿润体；传感器阵列
中图分类号：S275.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S1-0325-11

Spatial and Temporal Dual Dimensional Dynamic Variation of Water Content in Coconut Coir under Drip Irrigation

FENG Zhaoyang　CHENG Man　YUAN Hongbo
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*)

Abstract: Coconut coir is a cultivation substrate that is gradually gaining widespread application; however, the dynamic changes of its internal water content under drip irrigation across temporal and spatial dimensions, especially at a fine scale, remain insufficiently studied. To address this issue, a sensor array to monitor long-term water content variations within coconut coir was employed. The water movement rate, morphology of wetted body, and spatiotemporal distribution characteristics of the wetted body's water content were investigated. Experimental results indicated that during drip irrigation, the vertical movement rate of the wetting front significantly exceeded the horizontal movement rate. The movement distance and vertical movement rate of the wetting front exhibited a power function relationship with infiltration time. The water content within the wetted body was increased in an S-shaped curve over time, reaching a relatively stable state after 20 hours of irrigation. As infiltration time increased, the shape of the wetted body transformed from an inverted cone to a barrel shape. Post-irrigation, the internal water content of the wetted body changed in two stages: a rapid short-term decline following a power function relationship, and a medium- to long-term decline following an exponential decay function, with the wetted body gradually shrinking in a conical form.

Key words: coconut coir; water content; drip irrigation; wetted body; sensor array

0　引言

在农业生产中，水资源的有效管理和利用是实现可持续生产的关键因素之一[1]。作为一种高效节水的灌溉方法，滴灌已经被广泛应用于多种作物的生产。通过滴灌系统精确控制水分和养分投放，可以显著提高水肥利用效率。明确土壤湿润体特征，即水平、垂直入渗距离和湿润体形状、大小、水分分布，是进行正确的滴灌系统设计和田间水分管理的前提[2]。国内外学者对滴灌下土壤水分运移特性进行了广泛研究，取得了一些重要

收稿日期：2024－07－15　修回日期：2024－09－13
基金项目：河北省自然科学基金项目(C2021204156)
作者简介：冯朝阳(1999—)，男，硕士生，主要从事精准灌溉及其装备研究，E-mail: 787478234@qq.com
通信作者：袁洪波(1980—)，男，副教授，主要从事智慧农业及智能农业装备研究，E-mail: yuanhongbo222@163.com

成果。探明了湿润锋的运移距离主要受滴头流量、土壤容重、土壤初始含水率、灌水量等要素影响[3-4]，其中与滴头流量、土壤容重、土壤初始含水率正相关，与土壤容重负相关，土壤初始含水率对湿润锋在不同方向上的运移影响效果差异显著[5-6]；有研究认为初始含水率愈大，湿润锋水平运移距离愈小[7]。土壤湿润锋的运移距离和速率与滴灌时间存在良好的幂函数关系[3,8-9]，这是由土壤内部孔隙尺度分布决定的[10]，在相同初始含水率下具有不同的基质势，土壤水运动的驱动力也因此存在差异。在入渗过程中不同的土壤质地表现出不同的湿润体特性[11-12]，土壤砂性越强，对水分的吸持作用越弱，受重力作用，垂直扩散距离与水平运移距离差异越大，湿润体呈现直立半椭球体，相反土壤粘性越强，毛细作用在水分运动中占主导作用，湿润锋在各方向差异越小，湿润体形状接近半圆形[13]。

目前，土壤内部水分运移规律的研究取得了丰硕成果，随着温室基质栽培模式的普及，学者们开始着眼于滴灌方式下基质内部湿润体的特征研究。杨成飞等[14]在地表滴灌系统下，对草炭、蛭石和珍珠岩混合配置的基质进行了研究，探究了不同滴头流量和滴灌量条件下基质垂向含水率的变化情况，并建立了相应的不同深度基质含水率预测模型；朱钊岑等[15]以泥炭土、蛭石和珍珠岩为基质材料，测定了不同配比基质的水分特征曲线；张乃于等[16]探究了不同粒径珍珠岩对土壤水分运移的影响；李莉等[17]通过室内温室试验分析了草炭、蛭石和珍珠岩混合基质在滴灌方式下灌溉过程和灌溉结束后短时间内基质含水率随时间的变化规律，并结合温度对含水率的影响制定了滴灌条件下草莓的灌溉策略。

椰糠具有较好的保水能力、通气性和环境友好性，近年来作为栽培基质得到广泛的应用。因此，对椰糠内部水分运移规律也逐步得到研究，如PAWLOWSKI等[18]开发了一种虚拟传感器，用于研究椰糠内部从灌溉到缺水过程中含水率的变化规律；RUBIO等[19]探究了不同灌溉方式对椰糠内部水分变化的影响；张照娓[20]研究了不同容重椰糠在不同滴灌速率下湿润体的湿润模式。然而，对于滴灌条件下椰糠内部含水率在时间和空间两个不同维度的动态变化规律，尤其是在细小尺度上的水分传输和分布特性，目前的研究仍相对欠缺。本研究旨在探究在滴灌条件下椰糠内部由干变湿，再由湿变干过程中湿润体内部含水率的动态变化规律，进而获取椰糠内部时间和空间双维度上的水分分布和运移特性，从而指导灌溉策略制定，提高灌溉水利用率，优化作物生长条件。

1 材料与方法

1.1 试验环境及条件

所有试验均在河北农业大学实验温室中进行，该温室为玻璃温室，采光充分，地面铺设了地暖管系统，年平均气温保持在20 ℃左右。温室内部配置了自动通风窗以确保空气流通。所采用的滴灌试验系统由矩形土箱和供水系统组成。土箱规格为78 cm × 78 cm × 60 cm（长×宽×高），底部设有排水口，可避免气阻现象对水分入渗的影响。供水系统包括水箱（40 L）、试验台（高1 m）、输水管（3 m × 5 mm硅胶管），采用蠕动泵（NKCP-C-S10B型）确保滴灌的恒定流速，滴头距椰糠基质表面2 cm。整个试验过程中，将10个建大仁科RS-*-N01-TR-5多层土壤参数检测仪竖直埋入椰糠中实时监测含水率变化。检测仪由5个FDR水分传感器构成，传感器间距为100 mm，如图1所示。检测仪可以实时监测基质含水率和温度，并利用RS485总线通过数据采集器传输到后台计算机系统进行存储，试验装置如图2所示。

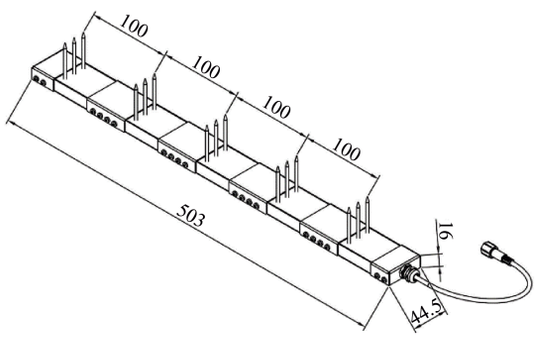


图1 多层土壤参数检测仪示意图

Fig. 1 Multi-layer soil parameter detector

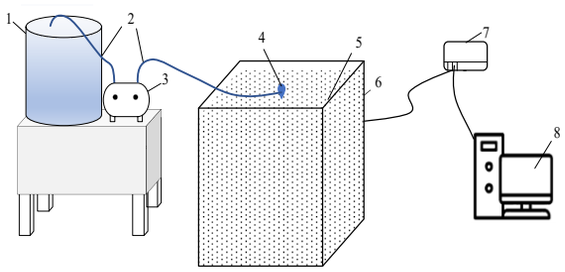


图2 滴灌试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of drip irrigation test setup

1. 水箱 2. 输水管 3. 蠕动泵 4. 滴头 5. 椰糠 6. 土箱 7. 数据采集器 8. 计算机

1.2 传感器校准

经过前期预试验，发现土壤水分传感器获取的结果受温度影响较大，当基质温度升高以及传感器长时间工作而发热时其获取数据会发生漂移，因此需要进行传感器校准和温度补偿。图3为传感器埋入完全干燥的椰糠基质中24 h测量的含水率和温度数据关系，从图中可以看出传感器数据随温度变化而变化，二者之间呈明显线性关系（决定系数R^2>0.97）且含水率变化为温度变化的0.1倍。利用线性回归可以得到传感器温度补偿模型

$$\theta = \theta_0 - 0.1(T - T_0) \tag{1}$$

式中 θ——修正后含水率，%

θ_0——传感器读取含水率，%

T——椰糠基质内部温度，℃

T_0——椰糠基质内部初始温度，℃

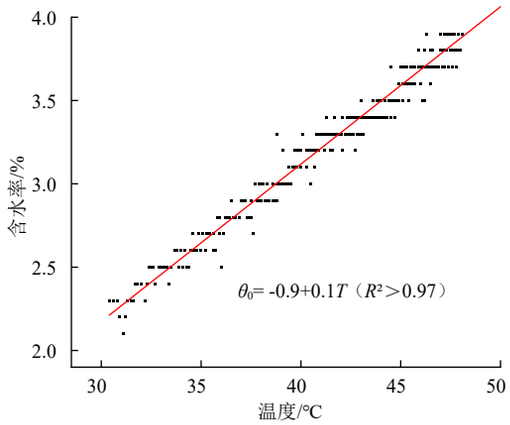


图3　传感器测量的基质含水率与温度关系

Fig. 3　Relationship between substrate moisture content measured by sensors and temperature

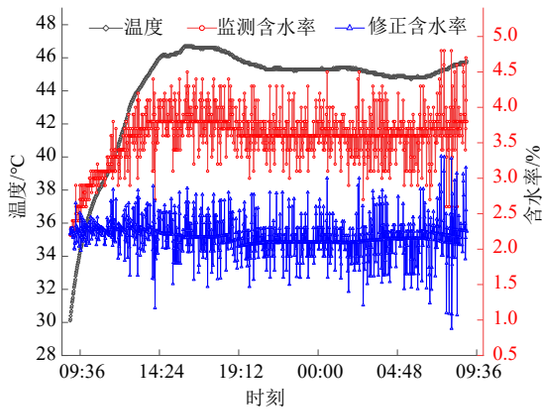


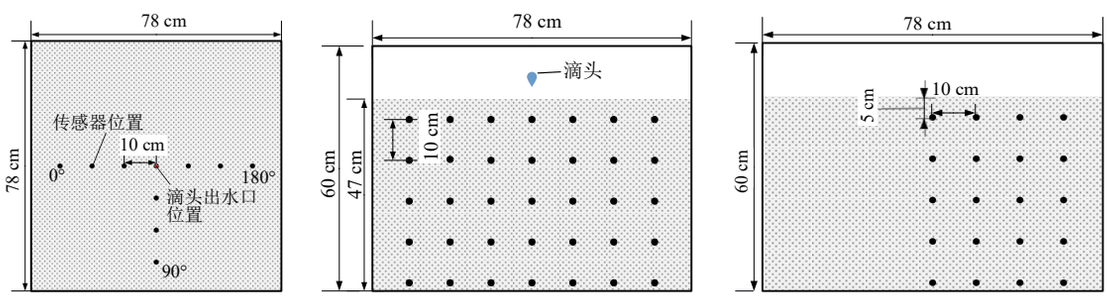
图4　经过温度补偿后传感器获取的基质含水率变化曲线

Fig. 4　Change curves of substrate moisture content obtained by sensors after temperature compensation

根据温度补偿公式对预试验中采集的24 h含水率数据进行修正，排除温度对水分传感器的影响，如图4所示。从图4中可以看出，未修正前，在完全干燥的椰糠中监测到的含水率随温度变化趋势波动；经过修正后，含水率不再受温度影响，而是在某一值附近波动，符合实际情况。

1.3　试验设计与方法

本研究重点为地表滴灌条件下椰糠内部水分的时空变化。试验采用单点源滴灌方式，滴头流速为2.5 L/h，连续滴灌24 h。在试验开始前，将经过自然风干处理的容重为0.08 g/cm^{3}的椰糠装入土箱中，装填高度为47 cm。装填椰糠的同时将传感器竖直埋置于土箱中，在滴头正下方部署一个检测仪，以此为中心向左侧水平方向部署3个检测仪并设定为0°方向；然后沿逆时针旋转90°和180°方向各部署3个检测仪；共部署10个检测仪，50个传感器。相邻两个检测仪之间距离均为10 cm，每个检测仪最高位置传感器距离椰糠表面5 cm，最低位置传感器距离土壤底部2 cm，如图5所示。



(a) 土箱俯视图　(b) 土箱主视图　(c) 土箱侧视图

图5　传感器部署位置示意图

Fig. 5　Schematics of sensor deployment location

试验时间为2023年5—12月，共进行了4次重复试验，每次试验均完整记录椰糠基质干燥、灌溉和再次自然干燥的全部过程。试验过程中每1 min采集1次传感器数据并进行保存。考虑到FDR土壤水分仪精度为±2%，因此当滴灌过程中某处含水率连续2个监测值与初始含水率监测值差值大于2时，即认为湿润锋到达了该处。在灌溉结束后的再次干燥过程中若某处含水率连续2个监测值与初始含水率监测值差值小于2%时，即认为该处已经到达初始的干燥状态。采用Microsoft Excel 2021进行数据统计分析，Origin 2018进行回归分析，采用Matlab R2022a绘制湿润体内部含水率分布图和湿润体形状三维图。

2　结果与分析

2.1　灌溉过程中椰糠内部水分时空变化规律

2.1.1　水分在椰糠中的运移速率

椰糠与土壤相比，其容重更小、孔隙更大，因此在滴灌试验过程中没有产生地表径流或积水。椰糠内部水分运移速率可以根据水分扩散到每个传感器检测点的时间进行计算，计算式[21]为

$$\begin{cases} v_x(t) = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} \\ v_z(t) = \dfrac{\Delta z}{\Delta t} \end{cases} \tag{2}$$

式中　$v_x(t)$、$v_z(t)$——水分水平和垂直运移速率，cm/min

Δt——时间间隔，min

Δx、Δz——该段时间内水分在水平和垂直方向运移距离，cm

对不同深度获取的不同水平运移速率进行计算，然后进行单因素方差分析，如表1所示。从表中可以看出在4次滴灌试验中的P值均大于0.05，表明在椰糠基质中水分水平向上的运移速率在不同角度上没有显著差异，滴灌条件下椰糠中水分的水平运移过程各向同性。

表1 椰糠中各方向水平运移速率单因素方差分析

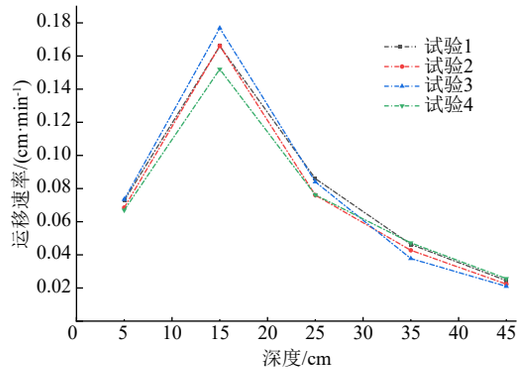
Tab. 1 Single factor ANOVA of horizontal transport rates in various directions in coconut coir

试验序号	传感器部署位置/(°)	样本量	平均值/%	标准差/%	F	P
1	0	9	4.03	5.68	1.301	0.243
	90	9	3.54	6.18		
	180	9	3.71	5.72		
2	0	9	3.66	4.44	1.213	0.312
	90	9	3.27	4.82		
	180	9	3.83	4.52		
3	0	9	4.06	5.42	1.843	0.440
	90	9	3.46	4.30		
	180	9	4.17	3.17		
4	0	9	3.79	4.61	1.488	0.105
	90	9	3.18	4.51		
	180	9	3.43	3.90		

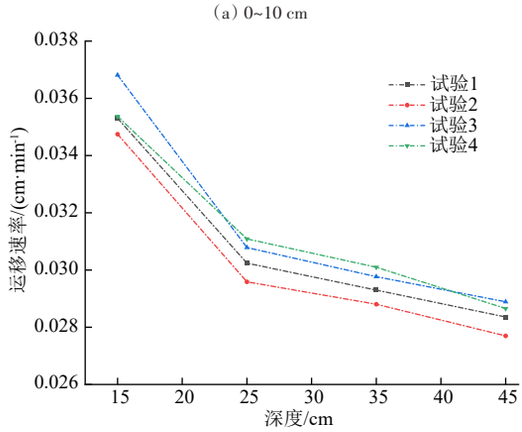
对4次试验结果分别取平均值，可得椰糠不同深度水平方向水分运移速率，如图6所示。从图中可以看出4次试验中水分运移规律相同，扩散过程受水分重力和基质势的共同作用[22]，在距离滴灌点0~10 cm范围内最大水平运移速率发生在深度15 cm，而随着深度的增加，水平运移速率逐渐减慢，各层水平运移速率差异较大；在距离滴灌点10~20 cm范围内最大水平运移速率仍在深度15 cm，但各层水平运移速率差异缩小。

通过式(2)计算水分在垂直方向上0~5 cm、5~15 cm、15~25 cm、25~35 cm、35~45 cm 5个深度的运移速率，结果如图7所示。在4次试验中水分在垂直向下运移过程中呈现一致的运移规律，即在5个深度中水分垂直运移速率逐渐减小，其中在深度0~5 cm的平均速率最快可达到8 cm/min左右，随着水分向下入渗，运移速率在深度35~45 cm下降至1.5 cm/min左右。

通过上述分析可知，水分在垂直方向的运移速率远大于水平方向运移速率，这是由于椰糠具有孔隙度高、连通性好、松散的结构，导致地表的水分更容易朝着垂直方向运动，重力势主导了水分的运移，在基质势和重力势的共同作用下深度15 cm处水平运移速率最大。水平运移速率和垂直运移速率均随入渗时间增加而逐渐减小，出现这一现象的主要原因为在滴灌初期，水势梯度较大，基质中水分运动较快，随着入渗时间不断增长，土壤含水率饱和范围增大，水分向周围基质的运移速率逐渐减小[23]。



(a) 0~10 cm



(b) 10~20 cm

图6 椰糠基质不同深度水平方向水分平均运移速率变化曲线

Fig. 6 Change curves of average horizontal transport rate of moisture at different depths in coconut coir substrate

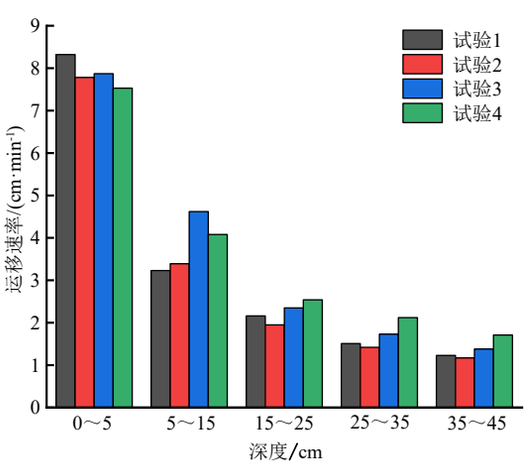


图7 不同深度下垂直运移速率变化曲线

Fig. 7 Changes of vertical migration rate variation at different depths

根据上述分析和试验结果可知，在滴灌方式下，椰糠内部水分运移各向同性、4次试验过程中水分在椰糠中运移速率基本一致，由此建立湿润体水平方向和垂直方向上湿润锋的运移速率与入渗时间幂函数模型，即

$$v = at^b \tag{3}$$

式中 a、b——拟合参数

t——入渗时间，min

v——湿润锋运移速率，cm/min

拟合结果如表2所示，湿润锋运移速率与入渗时间

呈现显著的幂函数关系，R^2均大于0.94。

表 2　湿润锋平均运移速率与时间幂函数拟合结果

Tab. 2　Fitting results of average transport rate of wet front with power function of time

试验序号	垂直运移速率	R^2	水平运移速率	R^2
1	$v_z = 4.375t^{-0.424\,7}$	0.983	$v_x = 0.624\,35t^{-0.536\,8}$	0.959
2		0.968		0.944
3		0.957		0.951
4		0.966		0.955

2.1.2　椰糠湿润体形态特征

滴灌入渗过程中湿润体形状是湿润体的重要特征，掌握入渗过程中椰糠湿润体形状时空变化特征是确定适宜滴灌参数的重要依据[24]。由 2.1.1 节分析可知4次试验中水分在椰糠中的运移规律一致，因此随机选择第4次试验数据对椰糠内部湿润体特性进行分析。椰糠基质不同深度在水平和垂直两个方向运移距离与时间关系如图8所示。从图中可以看出，随着灌溉时间的增加，水分在水平和垂直方向的运移速率逐渐减缓。这是由于在点源供水条件下入渗开始时，湿润范围较小，含水率较高，水势梯度和非饱和含水率较大，水分运移速率较快[25]；随着灌溉时间的增加，椰糠水分接近饱和的区域逐渐扩大，水分与夹杂的气泡在直径变化的椰糠颗粒间运动时穿过大小不一的孔隙，在运动时由于变形而产生的毛管阻力减缓了水分运动，最终达到稳定[26]。基于椰糠的物理特性，在重力势主要作用下，垂直方向上的湿润锋运移距离和速率大于水平方向。

此外，由图8可知，水平扩散半径和垂直入渗距离与入渗时间呈幂函数关系，对滴灌过程中水平扩散半径$X(t)$、垂直入渗距离$Z(t)$与入渗时间t进行幂函数拟合，拟合公式为

$$\begin{cases} X(t) = Mt^n \\ Z(t) = Dt^p \end{cases} \tag{4}$$

式中　D、M、n、p——拟合参数

根据式(4)获得不同深度下的水平扩散半径和垂直入渗距离与入渗时间的参数如表3所示，R^2均在0.96以上。

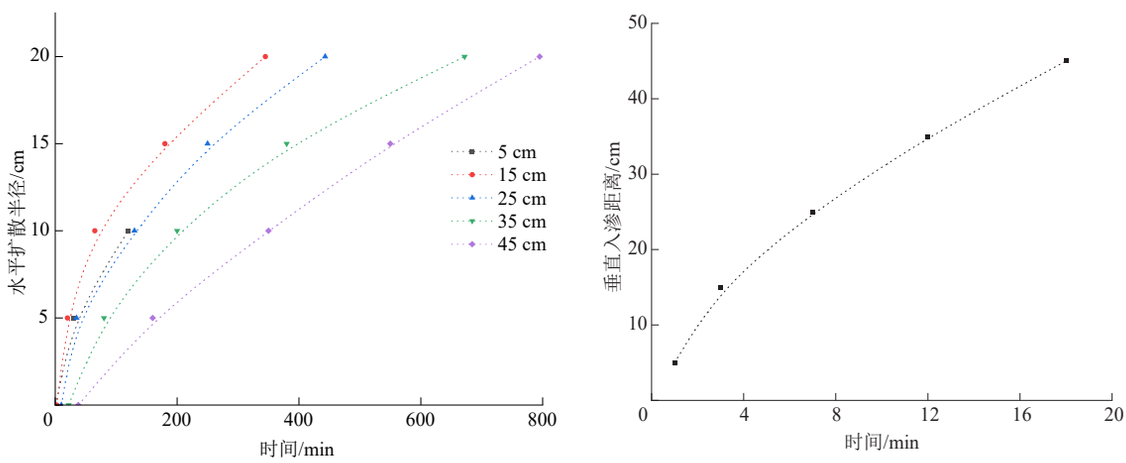


图8　椰糠基质不同深度下水分水平扩散半径和垂直入渗距离随时间变化曲线

Fig. 8　Change curves of over time horizontal diffusion radius and vertical infiltration distance of moisture at different depths in coconut coir substrate

表 3　水平扩散半径和垂直入渗距离与入渗时间拟合参数

Tab. 3　Fitting parameters of horizontal diffusion radius and vertical infiltration distance with infiltration time

项目	深度/cm	M	n	R^2
水平扩散	5	0.689	0.561	0.976
	15	1.144	0.493	0.976
	25	0.496	0.611	0.973
	35	0.269	0.666	0.966
	45	0.051	0.897	0.988
项目		D	P	R^2
垂直入渗		7.581	0.616	0.999

利用Matlab绘制水分扩散过程中湿润体的三维形状，如图9所示。从图中可以看出，灌溉初期，水分在椰糠基质中的垂直入渗速率较快，很快达到基质底部。这时，湿润体形状呈现为倒锥形，即水分主要集中在垂直方向，底部湿润区域相对较窄，顶部则较宽。随着灌溉时间的增加，湿润体各层水平扩散半径逐渐增大。之后水分水平运移速率差异逐渐减小，湿润体形状逐渐变化为桶状，使得湿润体形状变得更加均匀。在灌溉后期，湿润体几乎达到饱和状态，限制了水分在水平方向的进一步运移。随着水平扩散速率逐渐降低，直至接近零，基质底部出现积水现象。这种情况下，底部的水平扩散距离逐渐增大，超过了其他深度位置的扩散距离。

2.1.3　椰糠湿润体含水率时空分布和均匀性分析

随机选择与滴头水平距离为10 cm处的不同深度进行含水率变化分析，用以评估湿润体含水率的时空分布规律和均匀性。图10为滴灌持续24 h，该位置不同深度水分分布变化规律。从图10中可以看出，在不同深度，含水率均为从某一时刻开始，在短时间内快速上升，然

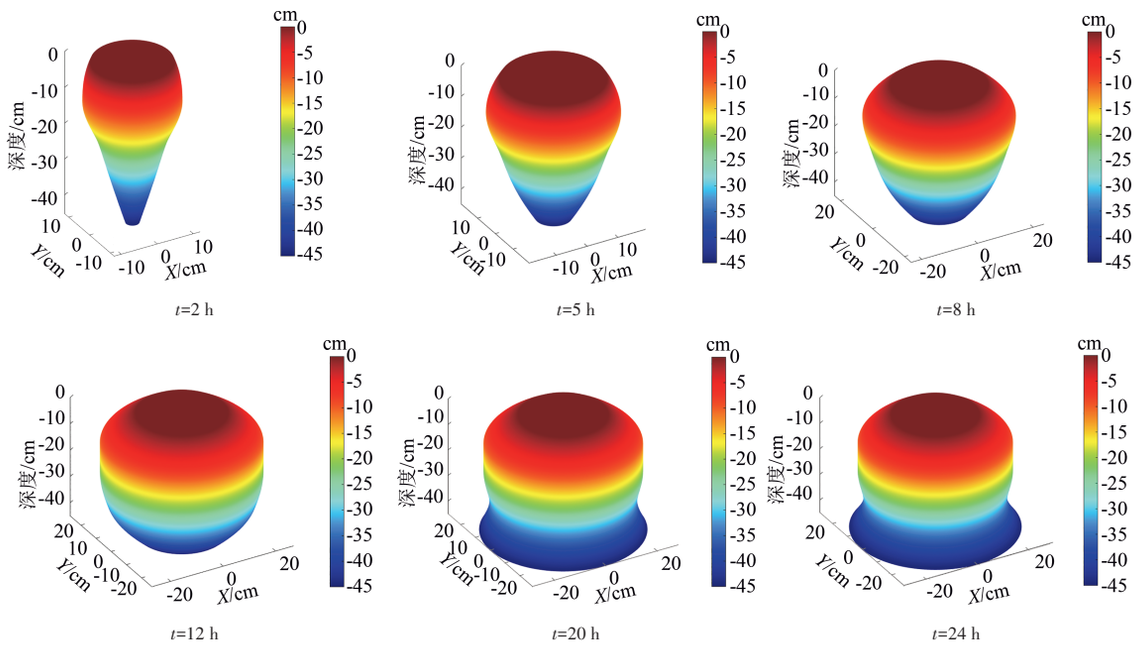


图9 灌溉过程中椰糠基质内部湿润体形状变化过程

Fig. 9 Process of shape change of moist body inside coconut bran matrix during irrigation

后随着时间的增加其上升速率逐渐减缓，最后达到平衡状态。整个灌水过程含水率随时间呈s形曲线变化。

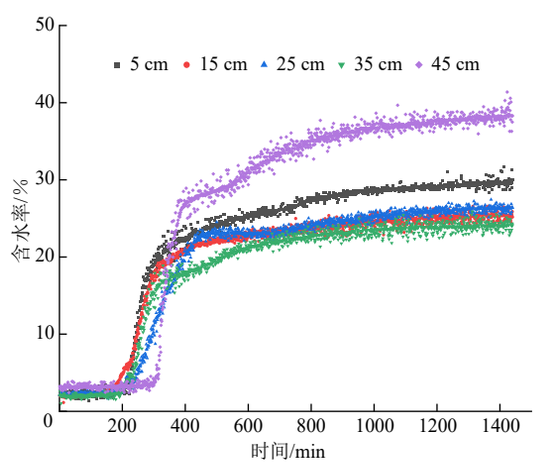


图10 与水平距离10 cm处不同深度含水率随时间变化曲线

Fig. 10 Change curves of moisture content variation over time at different depths of 10 cm horizontally from drip emitter

对不同深度含水率随时间的变化进行拟合，拟合公式为

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + e^{-k(t - t_c)}} \tag{5}$$

式中 k——增长率

t_c——时间中点值，min

θ_s——饱和含水率，%

其中只观察到水分在底层深度45 cm处水平扩散到30 cm处，其它深度水分水平扩散距离不超过25 cm。出现这一现象的主要原因是由于底层积水没有及时排出，水分开始沿底部向四周扩散。以滴头下方椰糠表层为原点位置(0,0)，对其它位置的含水率与时间关系进行拟合(式(5))，其结果如表4所示，R^2均大于0.93。

表4 椰糠基质不同深度位置含水率与时间的拟合结果

Tab. 4 Fitting results of moisture content in coconut coir substrate at different depth positions over time

位置/(cm,cm)	θ_s/%	k	t_c/min	R^2
(0,5)	33.274	0.801	2.113	0.972
(0,15)	32.661	0.018	30.680	0.989
(0,25)	31.629	0.016	70.732	0.979
(0,35)	30.108	0.010	150.663	0.955
(0,45)	35.368	0.008	220.108	0.990
(10,5)	28.739	0.011	294.400	0.970
(10,15)	29.594	0.014	270.425	0.984
(10,25)	28.485	0.013	322.060	0.983
(10,35)	27.545	0.011	299.805	0.980
(10,45)	34.367	0.010	380.963	0.976
(20,15)	26.553	0.012	520.316	0.989
(20,25)	27.832	0.009	630.663	0.978
(20,35)	27.790	0.007	750.276	0.936
(20,45)	35.636	0.003	900.329	0.941

根据含水率随时间的变化关系，利用Matlab绘制含水率分布剖面图，采用颜色渐变的热图来描述湿润体剖面含水率随时间的变化情况，如图11所示。基于椰糠的物理特征，灌溉初期水分在垂直方向上运移较快，在水平方向上运移相对缓慢；靠近滴头处含水率的等值线较密集，随着灌水时间的增加，含水率的分布逐渐趋向均匀。大约在8 h左右底层出现积水现象，并且含水率持续上升；滴灌进行至20 h后各处含水率几乎达到了平衡，垂直方向上的水分分布差异不再明显，但在水平方向上，随着距离滴头的位置越远含水率逐渐降低。

在滴灌结束后，针对水分在土壤剖面的分布情况进

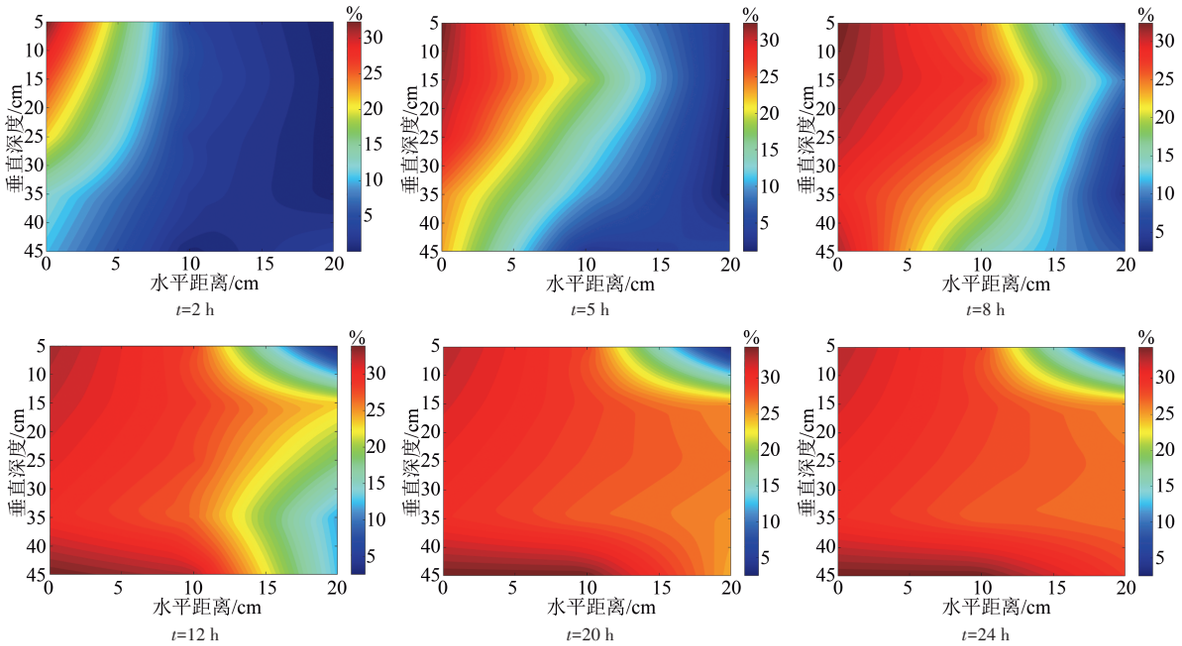


图 11　滴灌过程中椰糠基质内部含水率剖面图

Fig. 11　Moisture content profile inside coconut coir substrate during drip irrigation process

行评估，利用灌溉均匀度来评价滴灌的效果，计算式为

$$\begin{cases} \Delta\bar{\theta} = \dfrac{\sum_{i=1}^{N}\left|\theta_i - \bar{\theta}\right|}{N} \\ C_u = 1 - \dfrac{\Delta\bar{\theta}}{\bar{\theta}} \end{cases} \tag{6}$$

式中　θ_i——每个监测点的含水率，%

$\bar{\theta}$——平均含水率，%

N——监测点数量

C_u——均匀度系数

湿润体内部水分的均匀度系数为 0.83，当排除由于积水导致底层含水率偏高因素时，水分均匀度系数能提高至 0.92，可见在滴灌系统中，椰糠中水分分布离散程度较低，水分在椰糠中的运移较为稳定。

2.2　灌溉结束后椰糠内部水分时空变化规律

2.2.1　湿润体含水率时空分布特征

滴灌结束后含水率随时间的变化关系如图 12 所示，同样以与滴头水平距离 10 cm 处为例，湿润体内部水分再分布过程可以分为短期和中后期两部分。从图 12 中可以看出，灌溉结束后湿润体内部含水率均呈下降趋势。灌溉结束后短期内含水率下降趋势符合幂函数，变化较快。这是因为灌溉结束初期水分主要以重力水方式流失，水分急速向下渗透。随着时间推移，椰糠基质中的重力水逐渐减少，而基质中的毛细管效应逐渐显现，这一过程使得水分运移速率减缓，水分分布逐渐趋于动态平衡；在灌溉结束后中长期椰糠内部含水率以指数衰减函数下降，直到湿润体变干。灌溉结束后湿润体含水率随时间变化关系可以通过

$$\theta = \begin{cases} a_1 t^{b_1} & (t \leqslant 10\,000\ \text{h}) \\ a_2 \mathrm{e}^{-\frac{t}{b_2}} + y_0 & (t > 10\,000\ \text{h}) \end{cases} \tag{7}$$

式中　a_1、b_1、a_2、b_2、y_o——拟合参数

进行拟合，拟合结果如表 5 所示。

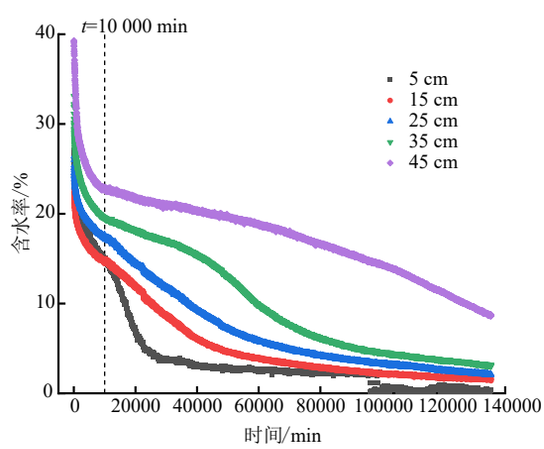


图 12　停止灌溉后与滴头水平距离 10cm 处不同深度下基质含水率随时间变化曲线

Fig. 12　Process of substrate moisture content variation over time at different depths of 10 cm horizontally from drip head after ceasing irrigation

根据含水率随时间的变化关系，利用 Matlab 绘制停灌后含水率分布剖面图，如图 13 所示。从图中可以明显观察到，在灌溉结束 24 h 内湿润体含水率下降速率较快，其中含水率等值线在垂直方向上分布比较密集。这是由于结束灌溉时，椰糠内部含水率较高，再分布过程水分主要以重力水的形式流动，水分在垂直方向的运移明显，最终在底层造成一定的积水从而使得底层含水率

表5 灌溉结束后基质内湿润体含水率与时间变化关系拟合结果

Tab. 5 Fitting results of relationship between moisture content in substrate and time after irrigation ends

位置/(cm,cm)	a_1/%	b_1	a_2	b_2	y_o/%	R^2
(0,5)	35.438	−0.063	19.329	14 571	2.367	0.934
(0,15)	44.774	−0.099	23.000	34 082	1.950	0.968
(0,25)	51.582	−0.109	22.757	43 068	1.087	0.977
(0,35)	51.599	−0.106	32.321	46 970	0.933	0.929
(0,45)	62.449	−0.119	−28.573	−292 151	50.366	0.971
(10,5)	44.190	−0.110	42.718	9 074	2.413	0.939
(10,15)	30.670	−0.071	17.742	32 687	1.332	0.955
(10,25)	36.314	0.077	21.185	39 397	1.514	0.942
(10,35)	42.617	−0.102	−15.488	−133 320	32.842	0.989
(10,45)	63.230	−0.125	−6.796	−118 734	26.939	0.941
(20,15)	25.426	−0.049	16.361	24 180	2.739	0.948
(20,25)	34.139	−0.078	19.277	38 413	1.821	0.936
(20,35)	40.797	−0.111	−22.249	−191 554	39.082	0.952
(20,45)	52.745	−0.110	−12.696	−169 927	32.659	0.967

出现短暂上升情况。在水平方向上含水率变化较为均匀,水分再分布过程中在水平方向的运移受到限制,主要以垂直方向的运移为主。随着时间推移湿润体内重力水排出,含水率下降速率变慢,在灌溉结束48 h之后湿润体内含水率等值线变得稀疏,椰糠湿润体由湿到干整个过程中含水率自表层向下由低到高分布,同深度处的含水率随与滴头距离增加,含水率依次降低。

2.2.2 湿润体形态特征

随着含水率的递减,湿润体逐步出现收缩现象,湿润体变化规律如图14所示。灌溉结束后初期,由于湿润体内部含水率较高,其收缩并不明显。随时间推移,基质上层在重力与蒸发的共同作用下首先从外围开始收缩。约20 d后,距表层5 cm的基质区域变干;40 d后,距表层15 cm基质区域变干,湿润体接着呈锥形开始向中心收缩,直到灌溉结束70 d后,35 cm以上的区域基质已经完全干燥。基质底层空气流动受限,水汽通过椰糠孔隙扩散到大气中的过程较长,蒸发速率较表层小很多,含水率下降速率缓慢,即使在90 d后,其含水率仍维持在15%。

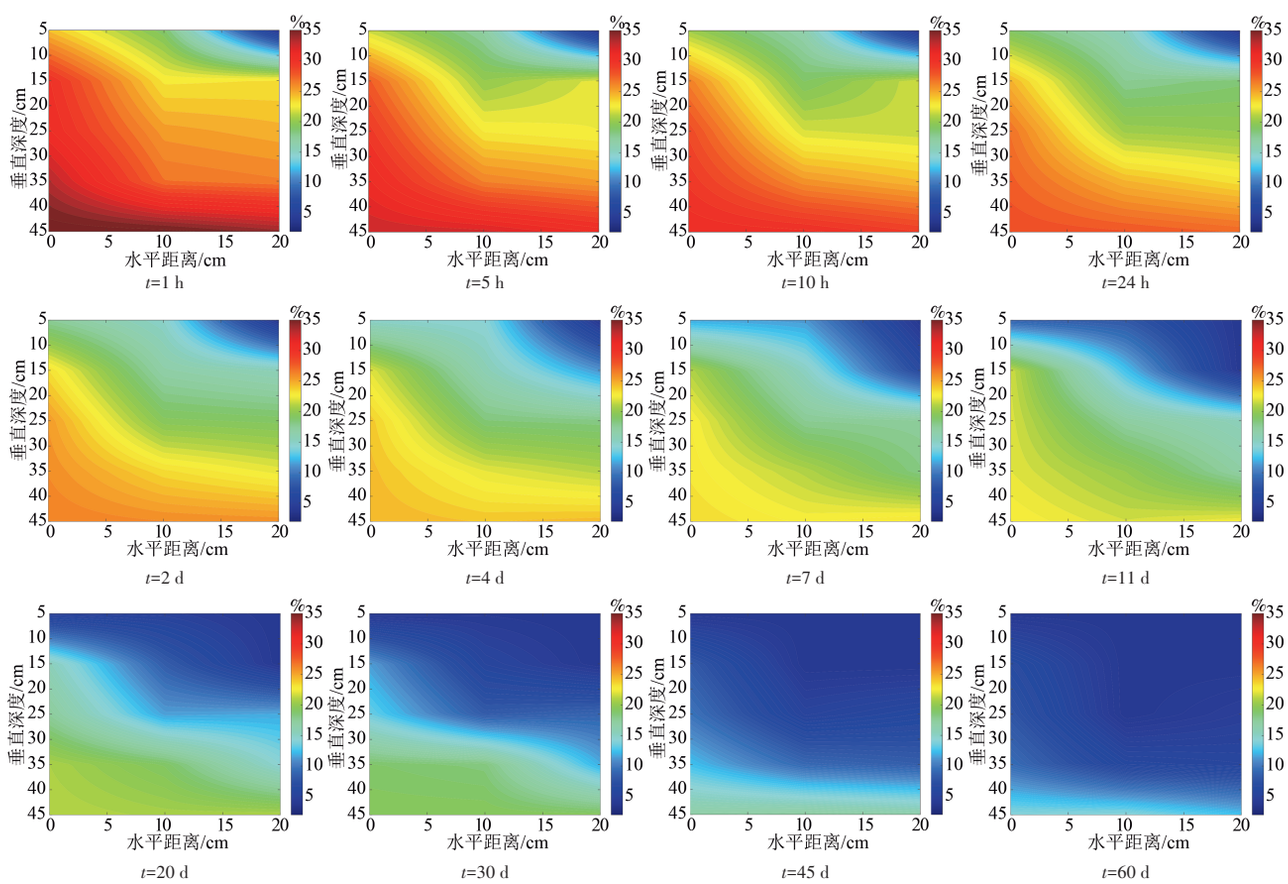


图13 湿润体由湿变干过程中含水率剖面图

Fig. 13 Moisture content profile during drying process of moist body

3 讨论

研究滴灌方式下的椰糠湿润体形态特征及其水分运动规律,对利用椰糠作为栽培基质时的灌溉策略有重要的指导意义。试验结果表明,椰糠内部湿润体水平扩散半径和垂直入渗距离均随灌溉时间的增加而增大,而运移速率随灌溉时间的增大而减小,这与何小梅[4]的研究结果一致;且湿润锋运移距离和灌水时间呈现幂函数关系,这与张照娓[20]的研究结果相吻合。水分在椰糠中垂直运移速率远大于水平运移速率,这与文献[27-29]

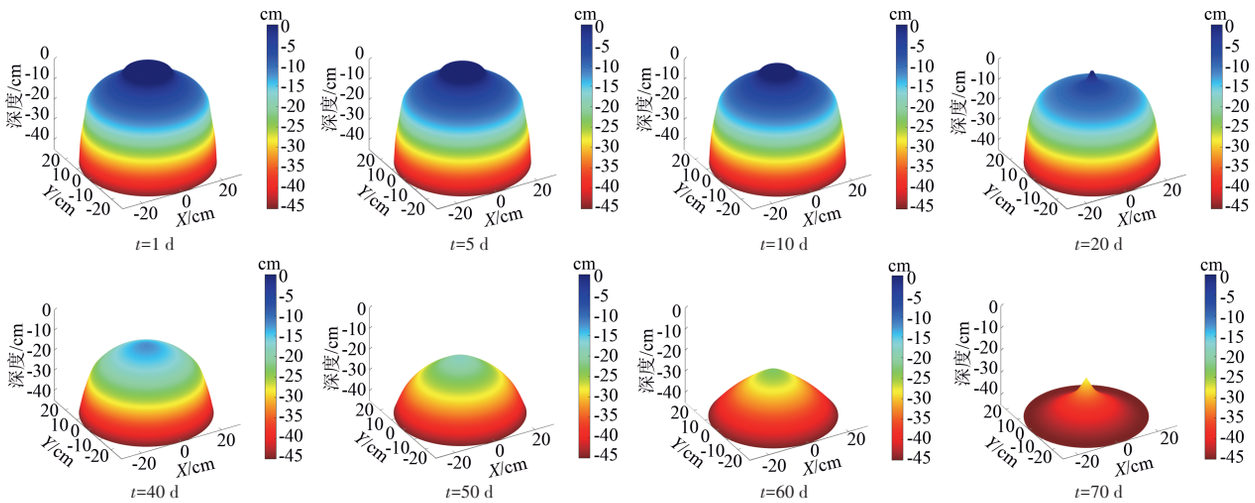


图 14　湿润体收缩过程

Fig. 14　Shrinkage process of moist body

的结论存在差异，这是由椰糠的容重较小，内部孔隙分布较多的物理结构所决定。在重力势和基质势的共同作用下，滴灌过程中湿润体形状由倒锥形向桶状形发展。

本研究试验过程中采用流速为2.5 L/h的滴灌方式，达到稳定状态之后，灌水均匀度系数不低于0.92，表明整个湿润体含水率分布相对均匀。然而，在滴灌过程中观察到深层出现了积水现象，可能是因为采用一般田间土壤的滴灌速率，对于椰糠基质下不太适用，从而加快了水分在垂直方向上的运移速率。因此，针对椰糠基质，可以适当降低灌溉流速，增加水分在水平方向的扩散范围，减少水分深层渗漏[30]。此外，通过长期监测椰糠基质内部含水率变化发现，椰糠基质表现出优异的保水性能。

本研究只探究了在单点源滴灌条件下，水分在椰糠基质中的运移情况，在今后的研究中，将增加根系吸水模型，并考虑多点源滴灌时湿润体交汇的演变规律。

4　结束语

椰糠基质灌溉初期水分在垂直和水平方向上运移速率随着灌水时间的延长逐渐降低。湿润锋水平、垂直运移距离与入渗时间具有良好的幂函数关系，决定系数R^2均大于0.93。湿润锋垂直运移速率与时间同样存在幂函数关系，湿润锋垂直方向的运移速率远大于水平方向运移速率。灌水过程中湿润体形状由倒锥形向桶状形转变，水分水平运移距离有限，滴头间距不宜超过15 cm。随着灌水量的增加，湿润体体积不断增大，湿润体含水率也随之增大，距离滴头越近含水率等值线越密，各处含水率随时间呈S形曲线增长，最终达到平衡状态，不考虑底部积水的情况下湿润体内部含水率均匀系数达到0.92。灌溉结束之后，短时间内水分快速向下渗透，主要以重力水方式流失，含水率呈幂函数下降，在垂直方向上含水率梯度变化明显；随着重力水排出，在7 d之后含水率达到相对稳定状态，以指数衰减函数下降，最终湿润体形状呈锥形逐渐收缩。

参　考　文　献

[1]　孙才志，王敬东，潘俊. 农牧业基地水资源可持续开发利用程度分析方法研究[J]. 农业系统科学与综合研究，2001(2)：81－83.

[2]　诸葛玉平，张玉龙，张旭东，等. 塑料大棚渗灌灌水下限对番茄生长和产量的影响[J]. 应用生态学报，2004，15(5)：767－771.
ZHUGE Yuping，ZHANG Yulong，ZHANG Xudong，et al. Effects of lower limit of subsurface drip irrigation on tomato growth and its yield in plastic tunnel[J]. Journal of Applied Ecology，2004，15(5)：767－771.（in Chinese）

[3]　王炳尧，韦伟，刘立超，等. 直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J]. 灌溉排水学报，2019，38(4)：1－10.
WANG Bingyao，WEI Wei，LIU Lichao，et al. Water movement and its potential for uptake by roots under plug-in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2019，38(4)：1－10.（in Chinese）

[4]　何小梅. 滴灌条件下土壤湿润体特征研究[J]. 节水灌溉，2017(8)：26－29.
HE Xiaomei. The laws of soil wetting front under the drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation，2017(8)：26－29.（in Chinese）

[5]　白丹，孙淑贞，任培琦，等. 地下灌竖管灌水器湿润体时空变化规律[J]. 农业工程学报，2018，34(7)：107－113.
BAI Dan，SUN Shuzhen，REN Peiqi，et al. Temporal and spatial variation of wetting volume under sub-irrigation with vertical emitter[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(7)：107－113.（in Chinese）

[6]　白丹，何靖，郭霖，等. 地下灌竖管灌水器直径压力对土壤水入渗特性的影响[J]. 农业工程学报，2016，32(14)：97－102.
BAI Dan，HE Jing，GUO Lin，et al. Effects of pressure head and vertical tube diameter on infiltration characteristics of soil moisture in

subsurface irrigation system with vertical tube emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 97 - 102. (in Chinese)

[7] 王振华,郑旭荣,任杰,等.土壤初始含水率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动影响的试验研究[J].灌溉排水学报, 2008, 27(5): 77 - 79.
WANG Zhenhua, ZHENG Xurong, REN Jie, et al. Influence of initial water content on soil water transport under line source permeation of SDI[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 77 - 79. (in Chinese)

[8] 何振嘉.涌泉根灌单点源入渗湿润体特性研究[J].灌溉排水学报, 2018, 37(增刊1): 34 - 37.
HE Zhenjia. Characteristics of wetting body under bubbled-root irrigation point source infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Supp.1): 34 - 37. (in Chinese)

[9] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗—再分布过程的影响[J].干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 224 - 231.
ZHANG Zhigang, LI Hong, LI Jiang, et al. Effects of different dripper discharges on soil water infiltration /redistribution under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 224 - 231. (in Chinese)

[10] 李卓. 水田土地整治前后耕地质量遥感监测与评价[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2022.
LI Zhuo. Research on remote sensing zone of cultivated land for site-specific management and productivity improvement strategy[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[11] APPELS W M, KARIMI R. Analysis of soil wetting patterns in subsurface drip irrigation systems—indoor alfalfa experiments [J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106832.

[12] WANG J J, HUANG Y F, LONG H Y. Water and salt movement in different soil textures under various negative irrigating pressures[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 15(8): 1874 - 1882.

[13] 张颢晖,严海军,惠鑫,等.移动滴灌系统土壤水分入渗试验与数值模拟[J].农业工程学报, 2023, 39(6): 158 - 168.
ZHANG Haohui, YAN Haijun, HUI Xin, et al. Experiments and numerical simulations of soil water movement under mobile drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 158 - 168. (in Chinese)

[14] 杨成飞,和寿星,孟繁佳,等.不同深度基质含水率变化规律与预测模型研究[J].农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 408 - 414.
YANG Chengfei, HE Shouxing, MENG Fanjia, et al. Variation law and prediction model of substrate moisture content at different depth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 408 - 414. (in Chinese)

[15] 朱钊岑,邵明安,赵春雷,等.不同盆栽基质水分特征曲线的对比分析与模拟[J].农业工程学报, 2023, 39(8): 197 - 204.
ZHU Zhaocen, SHAO Ming'an, ZHAO Chunlei, et al. Comparative analysis and prediction of the potting media water retention curve with different proportional compositions[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8): 197 - 204. (in Chinese)

[16] 张乃于,闫双堆,任倩,等.珍珠岩粒径对土壤水分运移的影响[J].灌溉排水学报, 2019, 38(2): 22 - 28.
ZHANG Naiyu, YAN Shuangdui, REN Qian, et al. Water movement in soil amended with perlite particles of different sizes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 22 - 28. (in Chinese)

[17] 李莉,王宏康,吴勇,等.基于K-means聚类算法的草莓灌溉策略研究[J].农业机械学报, 2020, 51(1): 295 - 302.
LI Li, WANG Hongkang, WU Yong, et al., Investigation of strawberry irrigation strategy based on K-means clustering algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 295 - 302. (in Chinese)

[18] PAWLOWSKI A, SÁNCHEZ-MOLINA J, GUZMÁN J, et al. Evaluation of event-based irrigation system control scheme for tomato crops in greenhouses[J]. Agricultural Water Management, 2016, 183: 16 - 25.

[19] RUBIO J, RUBIO F, MARTÍNEZ V, et al. Amelioration of salt stress by irrigation management in pepper plants grown in coconut coir dust [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1695 - 1702.

[20] 张照娓. 椰糠基质水分含量特性分析及检测系统设计[D]. 保定:河北农业大学, 2020.
ZHANG Zhaowei. Analysis of water content characteristics and design of detection system for cocopeat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[21] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 53 - 58,84.
ZHANG Zhigang, LI Hong, LI Jiang, et al. Effects of different dripper discharge on soil water infiltration under drip irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 53 - 58,84. (in Chinese)

[22] 范严伟,杨志伟,胡五龙.均质土微润灌湿润体模型构建及验证[J].农业工程学报, 2020, 36(13): 83 - 91.
FAN Yanwei, YANG Zhiwei, HU Wulong. Establishment and validation of wetting pattern model of moistube irrigation in homogeneous soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 83 - 91. (in Chinese)

[23] 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].排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 72 - 79.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Effects of soil initial water content on line-source infiltration characteristic in moistube irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 72 - 79. (in Chinese)

[24] 李耀刚,蒋存仁.滴灌双点源土壤水分入渗特性数值模拟研究[J].节水灌溉, 2021(1): 33 - 38.
LI Yaogang, JIANG Cunren. Numerical simulation of soil water infiltration under drip irrigation with double point source emitter[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1): 33 - 38. (in Chinese)

[25] 张松,李和平,郑和祥,等.地埋滴灌点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].节水灌溉, 2017(1): 25 - 27,32.
ZHANG Song, LI Heping, ZHENG Hexiang, et al. Study on soil water movement law of point source infiltration under buried drip

irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 25 - 27,32. (in Chinese)
[26] 姚约东,葛家理.低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 55 - 58,62.
YAO Yuedong, GE Jiali. Non-steady flow in low-permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 55 - 58,62. (in Chinese)
[27] 裴青宝,刘伟佳,张建丰,等.多点源滴灌条件下红壤水分溶质运移试验与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2017 ,48(12): 255 - 262.
PEI Qingbao, LIU Weijia, ZHANG Jianfeng, et al. Movement and numerical simulation of soil water solute migration under multipoint drip irrigation in red soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017 ,48(12): 255 - 262. (in Chinese)
[28] 贾洪涛,张鹏飞,代智光.容重对红壤区地下滴灌水分入渗能力影响研究[J]. 节水灌溉, 2019(4): 36 - 40.
JIA Hongtao, ZHANG Pengfei, DAI Zhiguang. Study on the influence of bulk density on water infiltration capacity under subsurface drip irrigation for red soil region[J]. Water Saving Irrigation, 2019(4): 36 - 40. (in Chinese)
[29] 费良军,康守旋,聂卫波,等.基于Green-Ampt的膜孔灌三维入渗模型建立与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 69 - 75.
FEI Liangjun, KANG Shouxuan, NIE Weibo, et al. Development and verification of 3D Green-Ampt based membrane pore infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 69 - 75. (in Chinese)
[30] 李斯. 基于HYDRUS模型不同土壤有效水边界对沙壤土滴灌湿润体特性影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
LI Si. Study of sandy soil drip irrigation wetting characteristic on different soil available water boundaries based on HYDRUS model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

(上接第176页)

[16] 侯加林,马端旭,李慧,等.气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):35 - 45.
HOU Jialin, MA Duanxu, LI Hui, et al. Design and experiments of a pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 35 - 45. (in Chinese)
[17] 祝清震,武广伟,陈立平,等.小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报,2019, 35(1): 1 - 11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1 - 11. (in Chinese)
[18] 牛琪,王庆杰,陈黎卿,等.秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):52 - 59.
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52 - 59. (in Chinese)
[19] 王超,李洪文,何进,等.稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5): 43 - 53.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 43 - 53. (in Chinese)
[20] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等.玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)
[21] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.基于TRIZ-AD的集成式油菜气力精量排种装置设计[J]. 农业工程学报,2023,39(14):49 - 59.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design of the integrated precision pneumatic seed metering device for rapeseed using TRIZ-AD[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 49 - 59. (in Chinese)
[22] 廖宜涛,廖庆喜,王磊,等.气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报,2018,34(24):10 - 17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10 - 17. (in Chinese)
[23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社,2007.
[24] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报,2022,38(24):1 - 13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1 - 13. (in Chinese)
[25] ZHAO Hongbo, HUANG Yuxiang, LIU Zhengdao, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery-a review[J]. Agriculture, 2021, 11: 425