

文章编号：1672-3317(2024)05-0045-10

膜调控润灌在不同土壤类型下的技术参数确定

马建国¹, 杨莹², 董娜³, 程伍群¹, 绳莉丽¹, 吴现兵¹, 张西平^{1*}

(1.河北农业大学, 河北 保定 071000; 2.陡河水库事务中心, 河北 唐山 063022;
3.张家口兴垣投资发展集团有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要:【目的】探究膜调控润灌在不同土壤类型和滴头流量下的土壤水分运移规律, 确定不同土壤类型下的技术参数。【方法】基于室内试验数据建立 HYDRUS-2D 模型, 设置 4 种土壤类型(砂土、壤土、砂质黏壤土、粉土)和 3 个滴头流量(0.9、2.1、3.2 L/h), 探究膜调控润灌在不同土壤类型和滴头流量下的技术参数。【结果】HYDRUS-2D 模型可以准确模拟膜调控润灌条件下的土壤水分运移及分布, 相对误差在 5% 以内, 决定系数(R^2)和均方根偏差(RMSE)分别为 0.97 和 0.007; 砂土因其饱和导水率大易造成渗漏, 在膜调控润灌系统下需要进一步调整滴灌管理深和流量, 膜调控润灌能较好地适应其余 3 种土壤, 灌水结束时膜上水量占总灌水量的比例高于 70%, 大大减少了灌溉水渗漏量; 随着滴头流量的增加, 壤土膜上水量的占比逐渐减小。【结论】砂土条件下, 需要调整滴灌管理深以减少水分深层渗漏; 推荐在砂质黏壤土和壤土条件下采用 2 L/h 的滴头流量进行灌溉; 随着流量的增加, 粉土膜上水量占比不会降低, 推荐采用 3 L/h 的滴头流量进行灌溉。

关键词:土壤类型; 膜调控润灌; 水分运移; HYDRUS-2D 模型

中图分类号: S275.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023330

马建国, 杨莹, 董娜, 等. 膜调控润灌在不同土壤类型下的技术参数确定[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 45-54.

MA Jianguo, YANG Ying, DONG Na, et al. Determining the technical parameters of the membrane-regulated subsurface irrigation for different soil types[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 45-54.

0 引言

【研究意义】地下滴灌作为一种高效的节水灌溉技术, 具有可将水肥直接输送到作物根系的优点, 被广泛应用于大田种植及设施栽培中。地下滴灌减少了地表蒸发损失, 可以达到节水、节肥、增产的效果^[1-3]; 与地面滴灌相比, 地下滴灌易造成水分和肥料的深层渗漏, 地下滴灌较地面滴灌的土壤湿润深度平均下降 10~20 cm^[4-6]。分析新型地下滴灌技术在不同土壤类型和滴头流量下的水分运移规律, 对于推进节水灌溉技术的发展具有重要意义。**【研究进展】**随着实际生产中对灌溉技术要求的提高, 以往研究提出了一系列改进措施和新型地下灌溉方式, 对地下滴灌的发展具有推动作用。白丹等^[5]、王炳尧等^[7]、胡兰^[8]、Fan 等^[9]研究了竖管条件下的地下滴灌技术, 这一灌溉方式虽然解决了地下滴灌检修困难、施工复杂、滴头易堵塞等问题, 但又带来了新的妨碍大型机械耕作、灌溉水渗漏等问题; 王伟

等^[10]通过在滴灌带下铺设阻水塑料布的方式减少水分的向下运移, 但地下滴灌易堵塞滴头、水分深层渗漏量大、向上运移量不足等问题还未得到彻底解决。**【切入点】**针对以上问题, 本研究在前期基于地下滴灌技术提出了一种新型地下膜调控润灌技术^[11], 通过在滴头上上下增加不透水膜的方式来增加水分的向上运移量, 同时减少向下运移量, 进而提高灌溉水利用率。然而, 目前尚未明确膜调控润灌技术在不同土壤类型下的技术参数, 由于膜调控润灌的装置布设复杂、试验周期长, 因此基于 HYDRUS-2D 模型的模拟试验是一种潜在的技术参数确定方法。Grecco 等^[12]基于 HYDRUS-2D 模型模拟了土壤水分和钾的运移过程, 潘云龙等^[13]基于 HYDRUS-2D 模型模拟了暗管排水条件下淋洗制度对土壤水盐运移的影响, Iqbal 等^[14]基于 HYDRUS-2D 模型估算了巴基斯坦灌溉土壤堆肥后的氮素淋溶损失。段启蒙等^[15]基于 HYDRUS-2D 模型模拟了膜调控润灌条件下灌溉水的运移与分布。然而, 目前应用该模型在膜调控润灌条件下针对不同土壤类型和不同滴头流量的模拟研究尚不多见。**【拟解决的关键问题】**本研究旨在验证 HYDRUS-2D 模型对膜调控润灌条件下不同土壤类型和滴头流量的适应性, 并明确不同土壤类型和滴头流量对水分运移、分布的影响, 提出膜调控润灌在不同土壤类型下的适宜滴头流量。

收稿日期: 2023-07-22 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 河北雄安新区农业节水试验示范项目(2020-11); 河北省水利科研计划项目(2018-30); 河北省水利厅专项(HBAT02242202010-CG)

作者简介: 马建国(1997-), 男, 河北张家口人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail: njg2839217441@163.com

通信作者: 张西平(1978-), 男, 陕西周至人。副教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail: xpzhang1@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 室内试验装置

试验装置由自循环恒位水箱、供水箱、水泵、电子秤、输水软管、滴灌管、调控膜及试验土箱组成。通过调节水箱高度实现设计流量；输水装置为橡胶软管和 1 m 长的滴灌管（ $\phi 16$ ）；试验土箱基于亚克力板裁切组装而成，规格为 90 cm×45 cm×70 cm（长×宽×高），在距箱顶 35 cm 处设置直径 20 mm 的对称小孔，滴灌管从小孔穿过，滴头位于土箱长边中心，并在距离土箱顶边缘 35 cm 的下部打孔，方便取膜下部分土壤；调控装置为双层结构，上层为不透水聚乙烯薄膜和透水基质层过滤棉（长×宽=20 cm×10 cm），下层为不透水聚乙烯薄膜（长×宽=40 cm×20 cm），将调控膜的上层和下层结构分别放置在滴头上、下方，上膜和下膜的对称中心与滴头重合。试验装置见图 1。

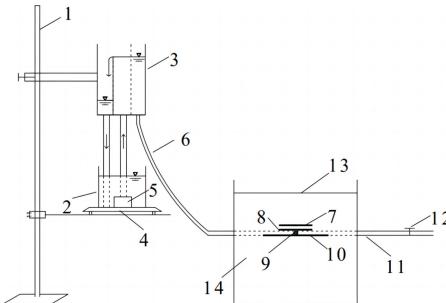
1.2 室内试验目的

室内试验的目的是为 HYDRUS-2D 模型模拟试验提供物理参数，并利用所测得的试验结果对模型参数进行校验，以确保所建立的模型具有较高的精度，为后续的模型应用提供可靠基础。

1.3 现场试验设计

试验土壤取自雄安试验田，经过颗粒分析仪得到其粒径组成。将粒径组成和体积质量（表 1）输入

到 HYDRUS-2D 内置的神经网络预测模型，即可得到土壤水力参数（表 2）。试验前将土壤风干并过 2 mm 筛，土壤按体积质量 1.38 g/cm³ 进行分层装土，进行层间打毛，将土壤均匀装入土箱内，采用带舌片的地下滴灌管灌水，管径为 16 mm。截取中间有一个滴头的 1 m 长管道，沿着土箱长边一侧布置，埋深 35 cm，所有处理均供水 9 h。供水结束后在膜上土壤进行垂直取样，膜下土壤从土箱侧边的开孔进行取样，采用烘干法测定土壤含水率。



注 1.支架；2.供水箱；3.恒位水箱；4.电子秤；5.水泵；6.输水软管；7.上膜（聚乙烯薄膜）；8.透水夹层（过滤棉）；9.滴头；10.下膜（聚乙烯薄膜）；11.滴灌管；12.止水夹；13.土壤表面；14.试验土箱。

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the testing device

表 1 土壤颗粒级配

Tab.1 Soil particle result table

颗粒占比	砂土/%	粉土/%	黏土/%	体积质量/(g cm ⁻³)
砂质黏壤土	54.31	30.24	15.45	1.38

表 2 土壤水力参数

Tab.2 Soil hydraulic parameter table

相关参数	残留土壤含水率 θ_r	饱和土壤含水率 θ_s	土壤持水函数中的参数 a/cm^{-1}	土壤持水函数中的参数 n	饱和导水率 $K_s/(cm h^{-1})$	电导率函数中的弯曲参数 l
砂质黏壤土	0.05	0.39	0.02	1.48	1.31	0.5

2 HYDRUS-2D 模型的建立及验证

2.1 水分运移方程

采用 HYDRUS-2D^[16-17] 进行水分运移模拟，假定土壤为均质、各项同性的刚性多孔介质，不考虑温度和空气湿度对土壤水分运移的影响，采用二维 Richard 方程描述水分运动过程，方程中的土壤水分特征参数采用 VG 模型描述，详见文献[17]。

2.2 饱和区半径的确定

对于试验土壤，在假设饱和区半径为一定值 R (cm) 和饱和区内积水厚度为 0.15 cm 的条件下，应用 HYDRUS-2D 模拟土壤水分运动（水量平衡误差为 0.5%），土体增加水量与时间的比值为滴头流量 q (L/h)， q 和 R 之间的关系为：

$$R=5.60q^{0.8}, \quad (1)$$

2.3 初始与边界条件

依照试验土箱尺寸，建立膜调控润灌水运移模拟计算区域为一横向 45 cm、纵向 90 cm 的矩形区域。

假设区域内初始土壤均匀分布于试验区域，则土壤水分的初始体积含水率为 26%。边界条件共包含 3 种，其中零通量边界模拟土箱外围亚克力板，变通量边界条件模拟滴头出水后在透水夹层边缘向土壤渗水口，大气边界模拟土箱顶上的开放状态。为分析模型中各点含水率变化和各处理之间的区别，在模型中设置了 17 个观测点（表 3），便于对含水率进行分析与和比较，观测点坐标见表 3。

2.4 模型验证

采用相对误差、决定系数 (R^2) 和均方根偏差 (RMSE) 评价 HYDRUS-2D 模型的模拟效果。 R^2 越高、RMSE 值越小，说明模拟效果越好。

图 2 为不同滴头流量下土壤含水率模拟值和实测值的柱状图。实测值与模拟值的相对误差<5%，HYDRUS-2D 模拟结果与实测值相差不大，因此 HYDRUS-2D 模型可以较为准确地模拟膜调控润灌条件下的水分运移。

表 3 观测点坐标

Tab.3 Coordinates of observation points

观测点编号	观测点坐标	观测点编号	观测点坐标	观测点编号	观测点坐标
N1	(5, 17.5)	N7	(10, 7.5)	N13	(15, -2.5)
N2	(5, 12.5)	N8	(10, -2.5)	N14	(15, -7.5)
N3	(5, 7.5)	N9	(10, -7.5)	N15	(5, 2.5)
N4	(5, -2.5)	N10	(15, 17.5)	N16	(10, 2.5)
N5	(10, 17.5)	N11	(15, 12.5)	N17	(15, 2.5)
N6	(10, 12.5)	N12	(15, 7.5)	-	-

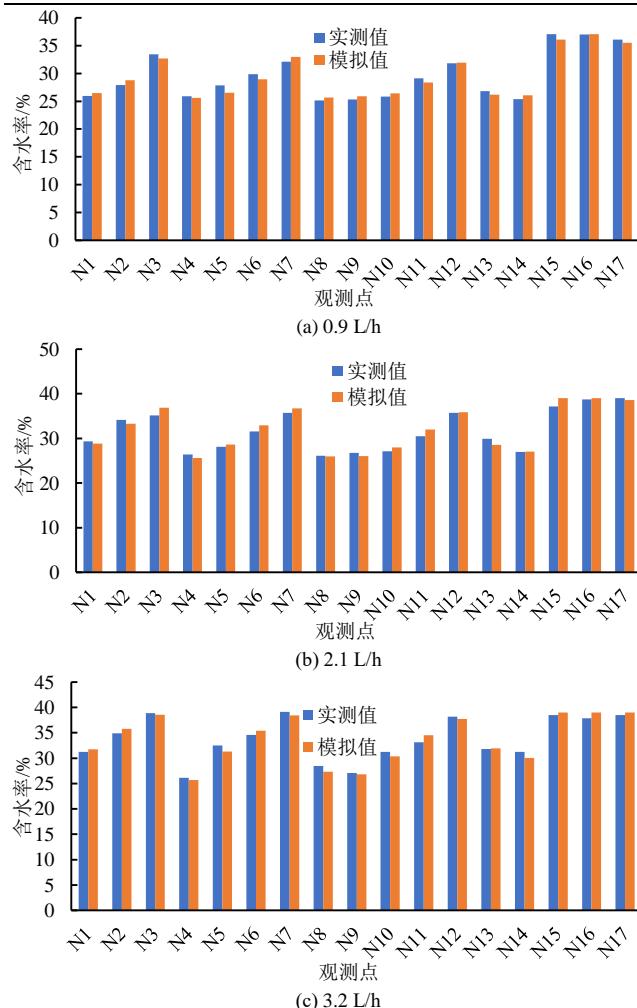


图 2 不同流量下土壤含水率模拟值/实测值

Fig.2 Simulation value/measured value of soil moisture content under different flow rates

2.5 模拟试验的设计

膜调控润灌系统主要依靠土壤毛管吸力实现水分的向上运移。因此, 土壤孔隙度是影响膜调控润灌灌溉性能的一个关键参数, 土壤孔隙度是指土壤中的孔隙体积占总体积的比例。土壤孔隙度主要受到土壤类型的影响。灌溉水流量也会影响灌溉效果, 模拟试验的因素为土壤类型和滴头流量, 土壤类型分为砂土、壤土、砂质黏壤土和粉土, 滴头流量分为: 0.9、2.0、3.2 L/h (表 4)。土壤水力参数见表 5。

表 4 模拟试验方案

Tab.4 Simulation value/measured value of soil moisture content under different flow rates

处理	土壤类型	滴头流量/(L h ⁻¹)
T1	砂土	0.9
T2	砂土	2.1
T3	砂土	3.2
T4	壤土	0.9
T5	壤土	2.1
T6	壤土	3.2
T7	粉土	0.9
T8	粉土	2.1
T9	粉土	3.2
T10	砂质黏壤土	0.9
T11	砂质黏壤土	2.1
T12	砂质黏壤土	3.2

表 5 土壤水力参数

Tab.5 Soil hydraulic parameter table

土壤类型	残留土壤含水率 θ_r	饱和土壤含水率 θ_s	土壤持水函数中的参数 a/cm^{-1}	土壤持水函数中的参数 n	饱和导水率 $K_s/(cm h^{-1})$	电导率函数中的弯度参数 l
砂土	0.045	0.43	0.145	2.68	29.7	0.5
壤土	0.078	0.43	0.036	1.56	1.04	0.5
粉土	0.034	0.46	0.016	1.37	0.25	0.5
砂质黏壤土	0.050	0.39	0.020	1.48	1.31	0.5

3 结果与分析

3.1 膜调控润灌条件下不同土壤类型对水分运移的影响

由图 3 可知, 随着灌水时间的延长, 除砂质土壤因导水率过大而造成水分大量渗漏外, 其他 3 种

土壤的湿润峰均向四周扩散, 各处理在灌溉 24 h 后的湿润范围基本稳定, 除砂土条件外, 所有处理下的水分均向右的运移距离最大; 灌水 24 h 后, 除 T5、T12 处理外, 其他处理下的水分向上运移距离均 \geq 向下运移距离, T4、T7、T8、T9、T10 处理下的向上运移距离比向下运移距离大 5 cm, 大大减少了灌

溉水的向下渗漏量。因此, 膜调控润灌可增加灌溉水的向上和横向运移量。壤土和砂质黏壤土均在 30

h 时的湿润距离最大, 粉土湿润峰运移距离在模拟灌溉 87 h 后尚未减小。

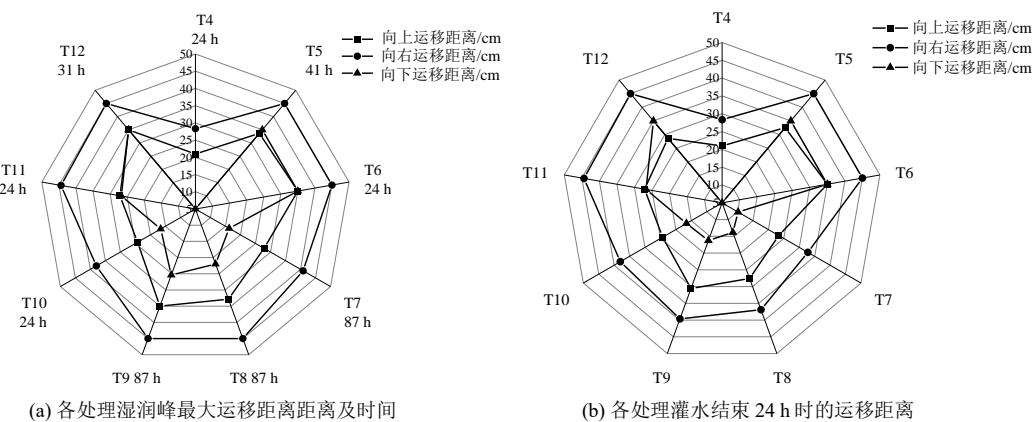


图 3 各处理下的湿润峰运移距离

Fig.3 Moisture peak transport distance of each treatment

相同流量条件下, 灌溉结束时, 砂土因导水率较大而造成严重渗漏, 其他 3 种土壤在加膜后水分有明显向上运移趋势, 其中砂质粘壤土的湿润范围最大, 粉土的湿润范围最小, 壤土的湿润范围介于二者之间。

在 0.9 L/h 流量条件下 (图 4), 砂质黏壤土的水分运移范围最大, 不会出现滴头上方湿润距离小于横向运移距离的情况; 粉土在灌水结束后, 滴头上方湿润不均匀, 但随着流量的增大, 这一现象逐渐消失; 壤土的水分运移距离介于砂质黏壤土和粉土之间。在 2.1 L/h 流量条件下 (图 5), 除砂土外, 其他土壤类型下的水分运移范围均相比 0.9 L/h 流量条件下的水分运移范围有所增加。壤土的向上湿润距离达到 20.06 cm, 横向运移距离达到 30.15 cm; 粉土出现滴头上方灌溉不均现象, 但湿润范围有所增加。在 3.2 L/h 流量条件下 (图 6), 砂质黏壤土的水分运移范围最大, 向上可达 25.14 cm, 向右可达 35.58 cm; 运移距离最小的土壤类型仍为粉土, 向上

运移 19.70 cm, 横向运移距离为 29.76 cm。由于粉土的土壤含水率最高, 因此土壤水分向下运移的距离和水量也最小。

3.2 膜调控润灌条件下不同滴头流量对水分运移的影响

相同土壤类型下, 随着滴头流量的增大, 土壤湿润范围逐渐增大。由图 7 可知, 砂土在 3 种流量下均发生了严重渗漏。壤土湿润体呈半圆形分布, 随着流量的增大, 湿润范围逐渐增大, 湿润峰向上和向右运移范围大于向下运移范围, 向上运移距离最大为 25.29 cm, 向右运移距离最大为 35.06 cm, 均大于向下运移距离 (13.90 cm), 但随着滴头流量的增加, 向下运移距离也逐渐增加 (图 8)。在砂质黏壤土条件下, 与壤土类似, 随着滴头流量的增加, 湿润范围逐渐增加 (图 9)。在粉土条件下, 流量较小时, 在滴头上方出现灌溉不均现象, 在流量达到 3.2 L/h 时, 这种现象消失 (图 10), 所以在粉土情况下, 建议采用较大流量进行灌溉。

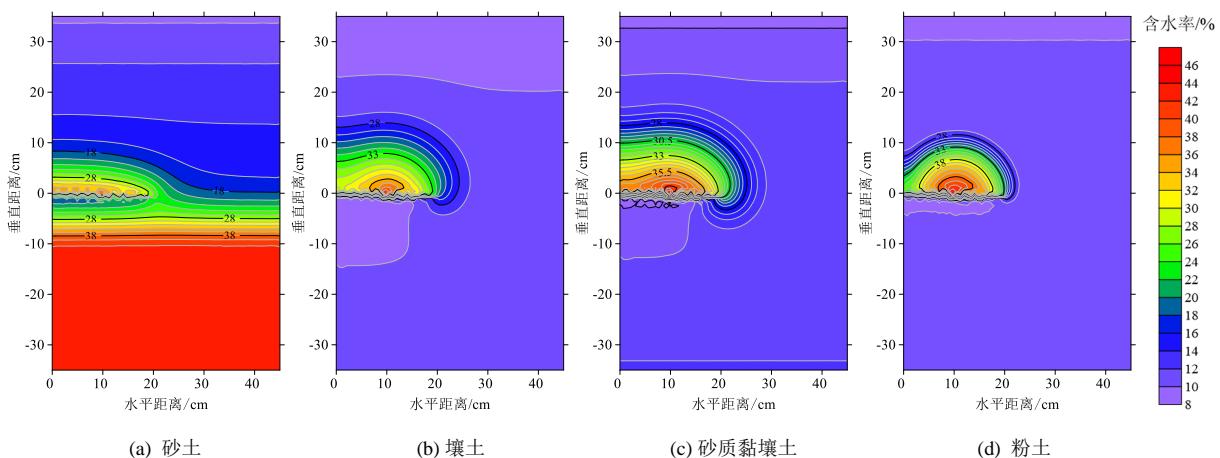


图 4 0.9 L/h 灌水结束时含水率等值线图

Fig.4 Contour map of moisture content at the end of 0.9 L/h irrigation

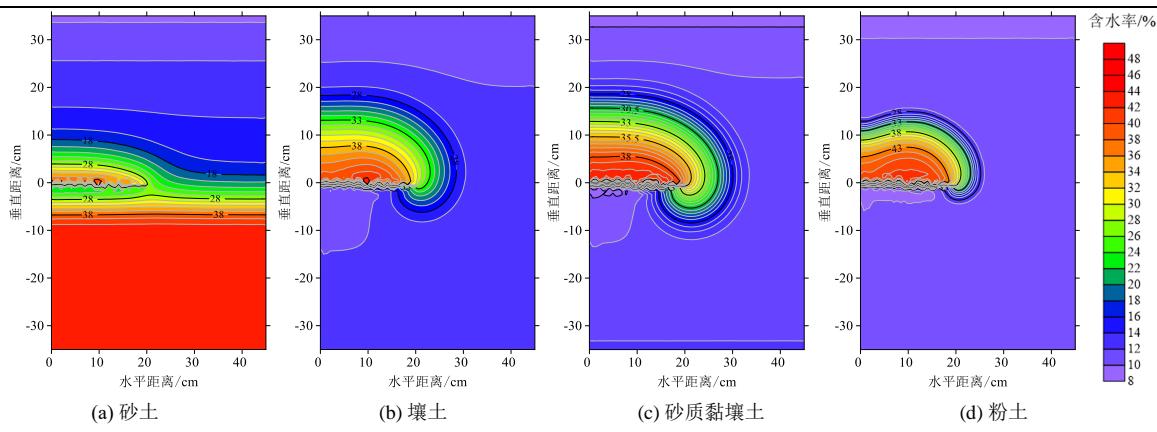


图 5 2.1 L/h 灌水结束时含水率等值线图

Fig.5 Contour map of moisture content at the end of 2.1 L/h irrigation

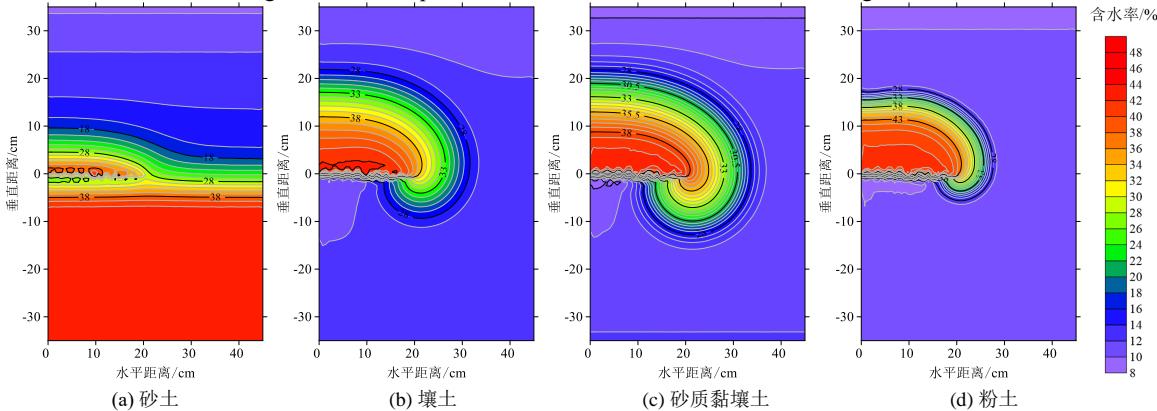


图 6 3.2 L/h 灌水结束时含水率等值线图

Fig.6 Contour map of moisture content at the end of 3.2 L/h irrigation

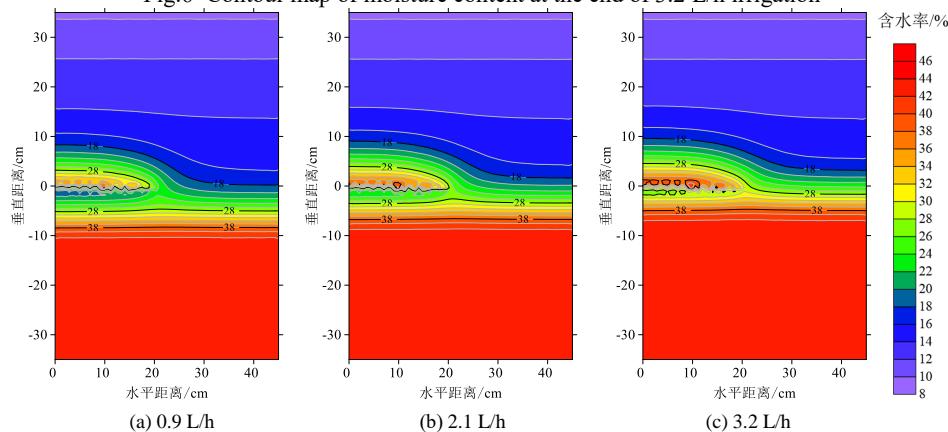


图 7 砂土灌水结束时含水率等值线图

Fig.7 Contour map of moisture content at the end of sand irrigation

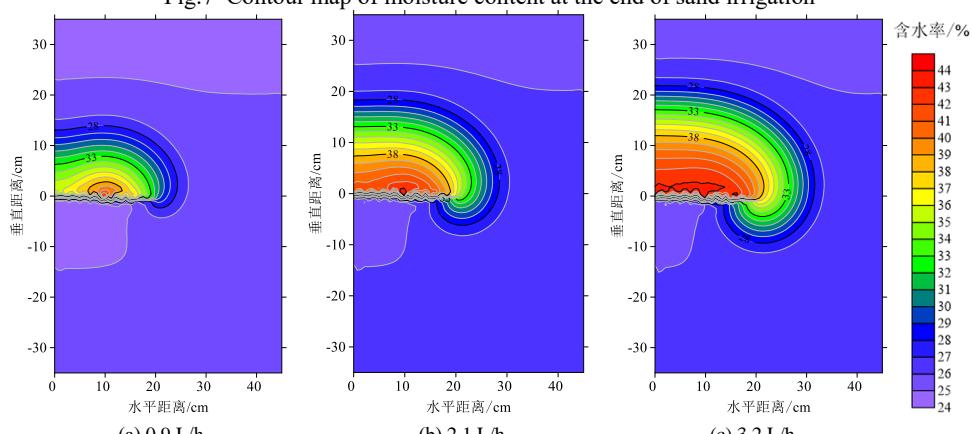


图 8 壤土灌水结束时含水率等值线图

Fig.8 Contour map of moisture content at the end of loam irrigation

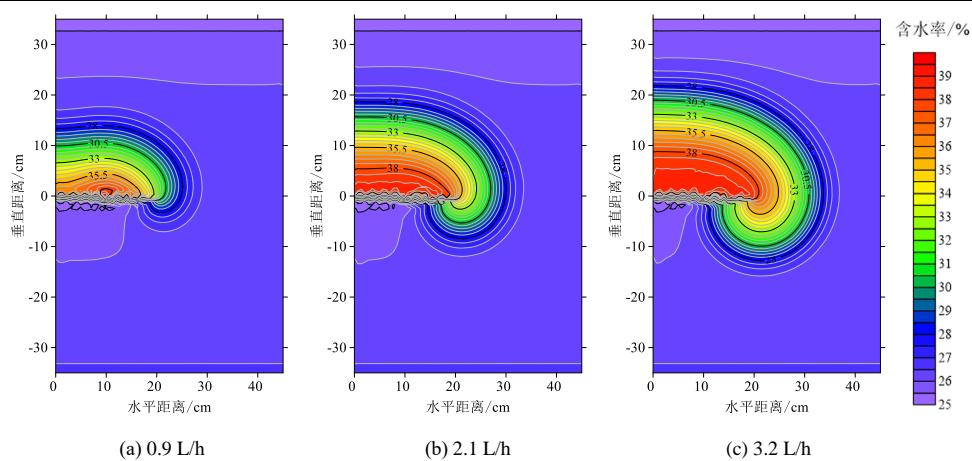


图9 砂质黏壤土灌水结束时含水率等值线图

Fig.9 Contour map of water content at the end of irrigation of sandy clay loam

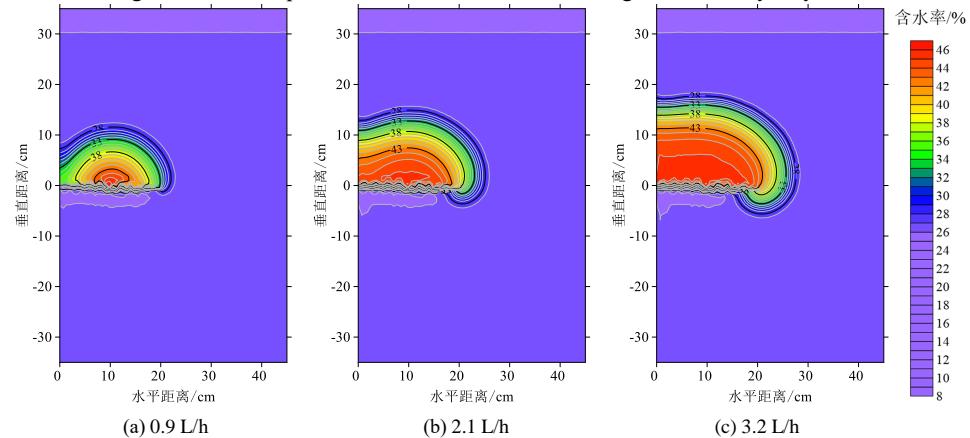


图 10 粉土灌水结束时含水率等值线图

Fig.10 Contour map of moisture content at the end of silt irrigation

由图 11 可知, 砂土条件下, 除土箱底部的观测点外, 其他观测点均在灌溉时有明显的土壤含水率下降过程, 表明砂土条件下更容易造成渗漏。由图 12 可知, 0.9 L/h 流量条件下, 灌溉结束时观测点流量呈明显分层现象, N15、N16、N17 (膜上 2.5 cm 处) 的土壤含水率最高达 37%, N3、N7、N12 (膜上 7.5 cm 处) 的土壤含水率最高达 32%, N2、N6、N11 (膜上 12.5 cm 处) 的土壤含水率最高达 29.5%, 说明膜调控润灌条件下灌水量的水平分布较为均匀, 垂直方向上越靠近膜的位置含水率越高, 随着滴头

垂直方向上越靠近膜的位置含水率越高，随着滴头

流量的增加，含水率分层现象逐渐消失。3.2 L/h 流量条件下，除膜下观测点外，膜上观测点的含水率都在灌溉结束时超过 30%，且没有明显分层现象，整体呈离膜越远含水率越小的趋势。砂质黏壤土条件下的观测点含水率总体与壤土类似（图 13）。粉土条件下，3 种流量均表现出了明显的分层现象，且随着滴头流量的增大，含水率高的观测点明显增加，故粉土更适宜用大滴头流量灌溉，可以达到更大的灌溉范围（图 14）。

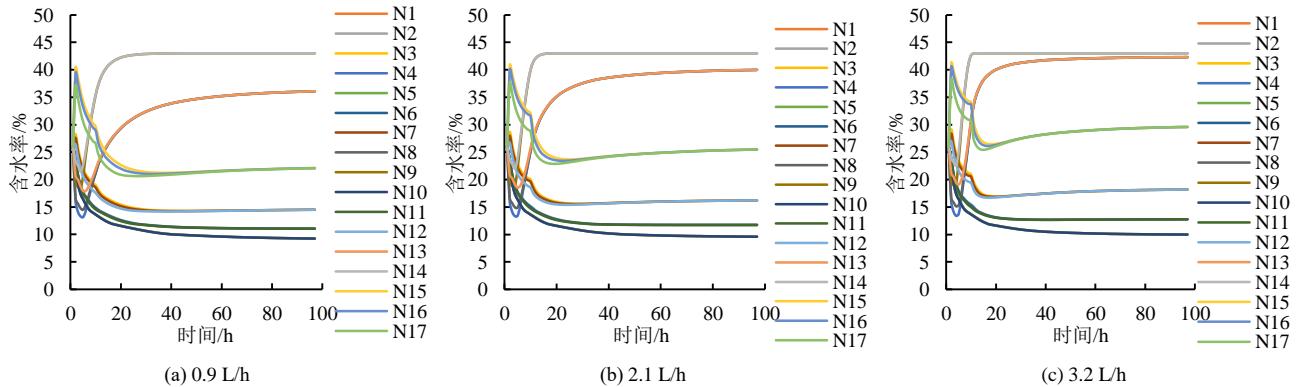


图 11 砂土观测点含水率随时间的变化图

Fig.11 Change chart of moisture content of sand observation point with time

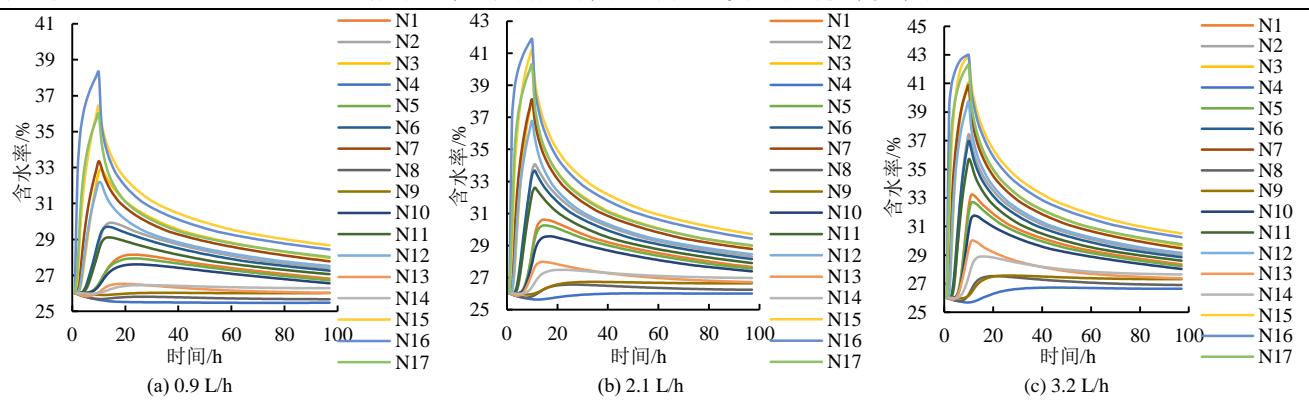


图 12 壤土观测点含水率随时间的变化图

Fig.12 Change chart of moisture content of loam observation point with time

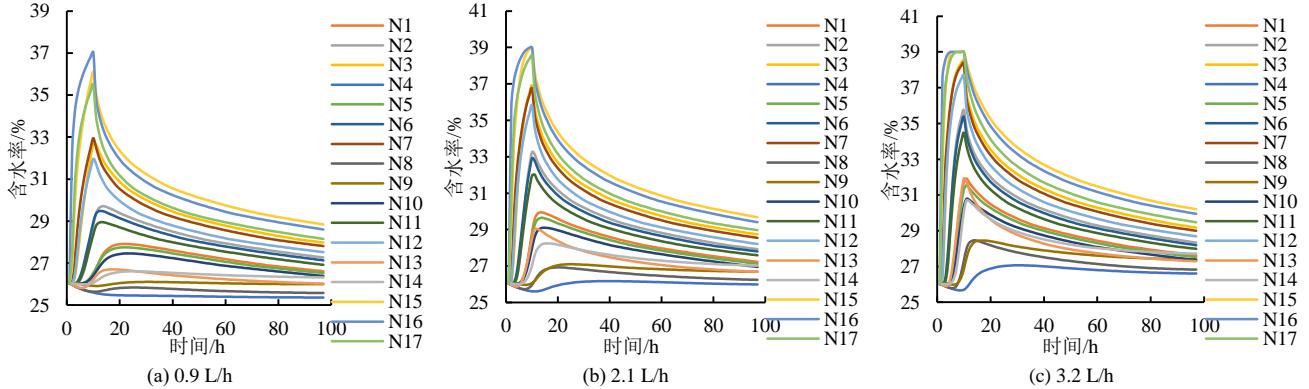


图 13 砂质黏壤土观测点含水率随时间的变化图

Fig.13 Change chart of moisture content of sandy clay loam observation point with time

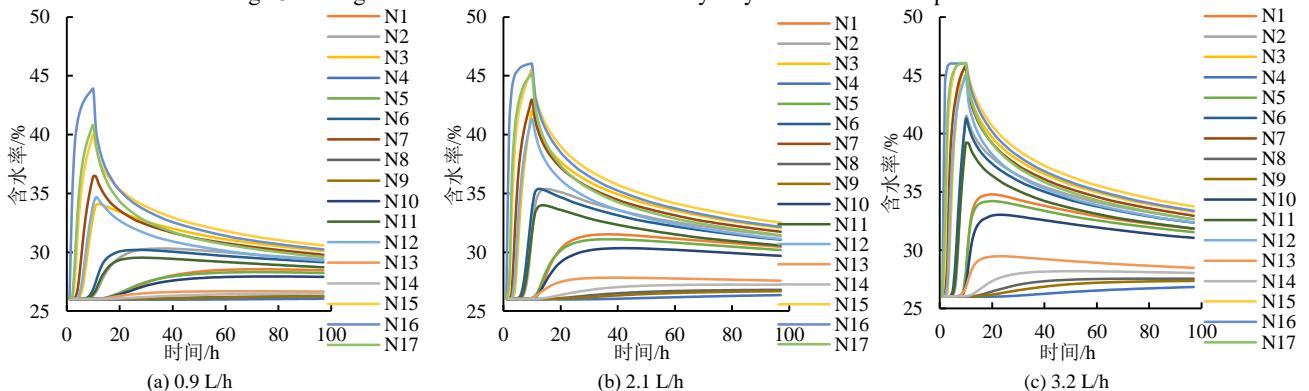


图 14 粉土观测点含水率随时间的变化图

Fig.14 Moisture content change chart of silt observation point with time

3.3 膜调控润灌条件下不同土壤类型和滴头流量对土壤水分分布的影响

将试验区域划分为膜上区域和膜下区域。在壤土、砂质黏壤土和粉土条件下(图 15—图 17)，膜上水量占总灌水量的比值均可达到 70%以上，其中粉土可达到 90%以上。

随着滴头流量的增加，壤土(图 15)和砂质黏壤土(图 16)膜下水量占总灌水量的比值逐渐增大。粉土条件下(图 17)，虽然膜上水量占比随着滴头流量的增大而减小，但仍保持 90%以上的占比，可以适当加大滴头流量来增加湿润范围。

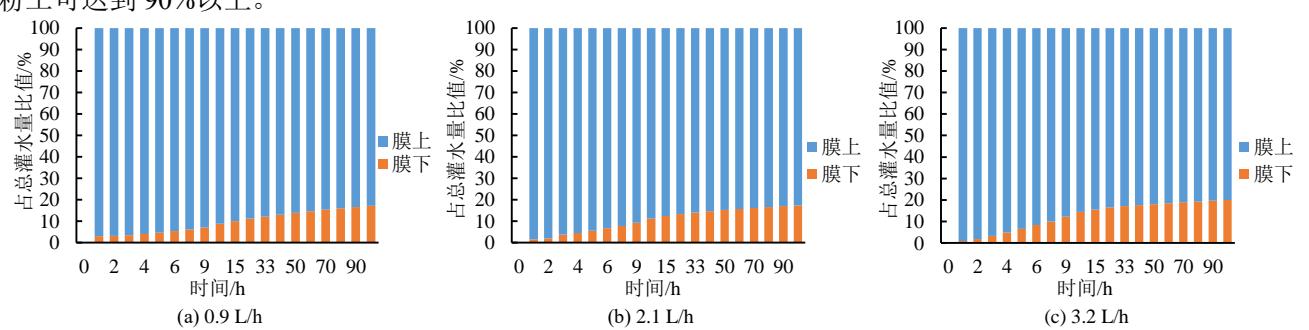


图 15 壤土膜上膜下水量占比图

Fig.15 Proportion diagram of water volume on and under loam film

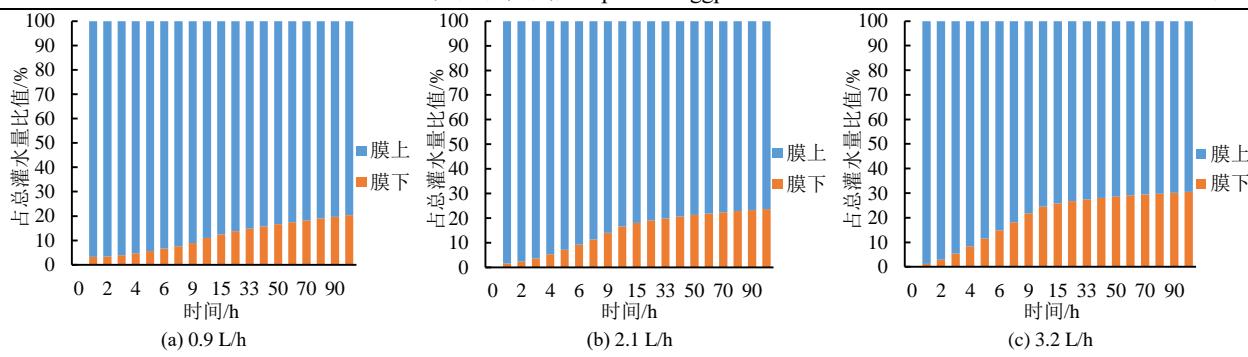


图 16 砂质黏壤土膜上膜下水量占比图

Fig.16 Proportion of water in sandy clay loam on and under the film

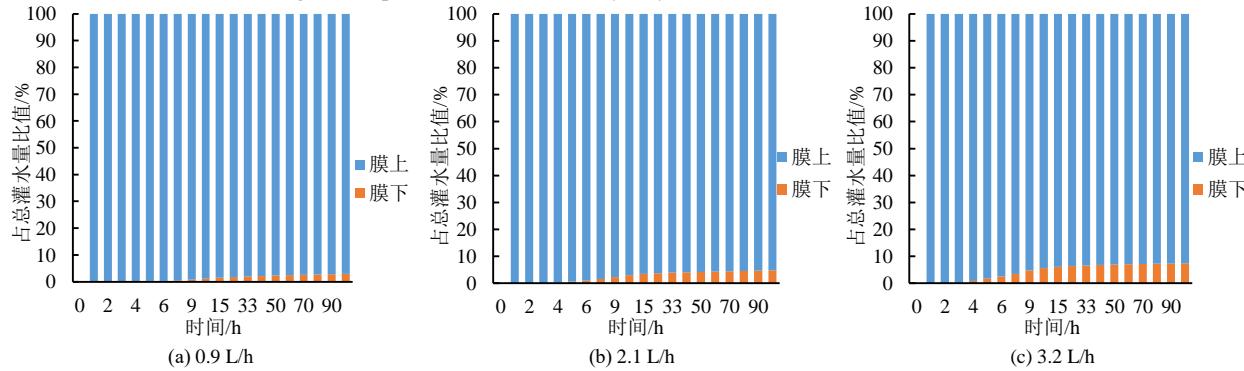


图 17 粉土膜上膜下水量占比图

Fig.17 Proportion diagram of water volume on and under silt film

随着灌水时间的延长,各处理膜上水量占比逐渐减小,直到灌水结束 24 h 后渐渐趋于平缓,此时各处理膜上水量占比远大于膜下水量占比。综上,膜调控润灌大大减少了灌溉水的深层渗漏,壤土和砂质黏壤土推荐采用 2 L/h 左右的滴头流量进行灌溉,粉土推荐采用 3 L/h 的滴头流量进行灌溉。

4 讨论

本研究分析了膜调控润灌条件下不同土壤类型和滴头流量下的土壤水分运移和分布规律。在运移距离、运移范围和膜上下水量占比等方面,不同土壤类型和滴头流量下的情况差异显著。从湿润峰运移距离来看,除砂土外,另外 3 种土壤湿润峰运移范围均随着时间的增大而增大,且运移速度由快到慢。这与白丹等^[5]试验结果一致。相较于传统地下滴灌^[18],膜调控润灌大大增加了水分向上和水平方向的运移范围。从湿润范围方面来看,除砂土因渗漏量较大外,其他土壤类型均呈左右宽、上下小的椭球体湿润范围,这与其他地下滴灌方式^[19-21]相比差异显著。例如,覆膜滴灌^[10]、竖管滴灌^[5,7-8]、微孔灌^[22]条件下的湿润体均呈上下长、左右窄的纺锤体。这种现象表明,膜调控润灌可以增加灌水量在水平方向上的分布,减少深层渗漏,更有利于将水分保持在作物根区附近。在膜上、膜下水量占比方面,壤土、砂质黏壤土、粉土的膜上水量占比均可达到 70%以上,其中粉土则达到 90%以上,大大增

加了根区含水率。随着滴头流量的增加,膜上水量占比有所下降,这与安巧霞等^[23]研究结果相似。根据本试验结果,膜调控润灌技术在拓展湿润峰运移距离和增加根区含水率方面具有显著优势,在面对不同土壤类型和滴头流量时都有较好的适应性。

5 结论

1) HYDRUS-2D 模型可以较为准确地模拟膜调控润灌条件下不同土壤类型和滴头流量的水分运移过程。

2) 在砂土中,膜调控润灌需要改变毛管埋深或膜的大小来进行灌溉,从而避免灌溉水深层渗漏。

3) 砂质黏壤土和壤土条件下,推荐采用 2 L/h 左右的流量进行灌溉。在粉质土壤中,可采用较大的滴头流量进行灌溉。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 张艳霞. 地下滴灌的发展与优缺点[J]. 甘肃农业, 2020(5): 83-85.
- [2] 郭山强, 莫彦, 吴忠东, 等. 华北地区地下滴灌春玉米出苗及生长对沟播开沟深度的响应[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 27-34.
GUO Shanqiang, MO Yan, WU Zhongdong, et al. The effects of furrow depth in alternate row planting on germination and yield of spring maize under subsurface drip irrigation in North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 27-34.
- [3] 要家威, 齐永青, 李怀辉, 等. 地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1 502-1 511.
YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, et al. Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation[J]. Chinese Journal of

- Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1 502-1 511.
- [4] 陈春来. 宽垄沟灌土壤肥液入渗水氮运移特性及数值模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- CHEN Chunlai. Study on water and nitrogen transport characteristics and numerical simulation of soil fertilizer infiltration under wide ridge furrow irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 107-113.
- [6] 陈琳. 膜孔灌土壤水氮运移转化特性及作物耦合效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- CHEN Lin. Study on the soil water-nitrogen transport and transformation characteristics and crop coupling effects[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [7] 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.
- [8] 胡兰. 插入式地下滴灌水分运移特征研究及在温室蔬菜栽培中的应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- HU Lan. Water transport characteristics and application in greenhouse vegetables planting of inserted subsurface drip irrigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [9] FAN Y W, MA L J, WEI H J, et al. Numerical investigation of wetting front migration and soil water distribution under vertical line source irrigation with different influencing factors[J]. Water Supply, 2021, 21(5): 2 233-2 248.
- [10] 王伟, 李光永, 段中瑛, 等. 利用工程措施改变地下滴灌土壤湿润模式的试验[J]. 节水灌溉, 2000(3): 22-24.
- [11] 程伍群, 绳莉丽, 张西平, 等. 一种水肥一体化润灌系统: CN110249984A[P]. 2019-09-20.
- [12] GRECCO K L, DE MIRANDA J H, SILVEIRA L K, et al. HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 334-347.
- [13] 潘云龙, 许伟健, 高琛. 基于 HYDRUS-2D 模拟暗管排水条件下淋洗制度对土壤水盐运移的影响[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(9): 12-18.
- PAN Yunlong, XU Weijian, GAO Chen. Effects of leaching system on soil water and salt migration under pipe drainage based on HYDRUS-2D simulation[J]. Water Resources Development and Management, 2021, 19(9): 12-18.
- [14] IQBAL S, GUBER A K, KHAN H Z. Estimating nitrogen leaching losses after compost application in furrow irrigated soils of Pakistan using HYDRUS-2D software[J]. Agricultural Water Management, 2016, 168: 85-95.
- [15] 段启蒙, 绳莉丽, 程伍群, 等. 基于 HYDRUS-2D 的膜调控润灌湿润锋运移数值模拟研究[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(2): 120-130.
- DUAN Qimeng, SHENG Lili, CHENG Wuqun, et al. Numerical simulation of wetting front transport in membraneregulated subsurface drip irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2022, 45(2): 120-130.
- [16] 韩明明. 膜调控润灌对土壤水分运移特征及冬小麦生长的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- HAN Mingming. Effect of membrane control irrigation on soil-water transport characteristics and winter wheat growth[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
- [17] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. The HYDRUS software package for simulating one-, two-, three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media: Version 5.0[M]. Prague: PC Progress, 2022.
- [18] 王荣莲, 张智超, 嘉晓辉, 等. 地下滴灌水分运移规律及滴灌带适用性初步研究[J]. 节水灌溉, 2017(10): 31-34.
- WANG Ronglian, ZHANG Zhichao, JIA Xiaohui, et al. A preliminary research on water movement rule under subsurface drip irrigation and applicability of drip irrigation belt[J]. Water Saving Irrigation, 2017(10): 31-34.
- [19] 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 51-57.
- ZAI Songmei, WU Feng, WEN Ji, et al. Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 51-57.
- [20] 王超, 李援农. 地下滴灌土壤水分运移分布规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 136-138.
- WANG Chao, LI Yuannong. Laboratory experimental study on soil-water movement of subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 136-138.
- [21] 孙连宝, 罗金耀, 李小平. 流量对地下滴灌土壤水分运动的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(9): 41-44.
- SUN Lianbao, LUO Jinyao, LI Xiaoping. Effects of dripper discharge on soil-water movement under subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2012(9): 41-44.
- [22] 蔡耀辉, 吴普特, 张林, 等. 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分运移特性对比[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 242-249.
- CAI Yaohui, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Comparison of characteristics of soil moisture transfer for porous ceramic infiltration irrigation and subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 242-249.
- [23] 安巧霞, 孙三民, 徐铭, 等. 不同流量对间接地下滴灌湿润体特征的影响[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 154-156.
- AN Qiaoxia, SUN Sanmin, XU Rong, et al. Effects of different dripper discharge on wetting soil characteristics of indirect subsurface drip irrigation[J]. Yellow River, 2016, 38(6): 154-156.

Determining the technical parameters of the membrane-regulated subsurface irrigation for different soil types

MA Jianguo¹, YANG Ying², DONG Na³, CHENG Wuqun¹, SHENG Lili¹, WU Xianbing¹, ZHANG Xiping^{1*}

(1. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Douhe Reservoir Affairs Center, Tangshan 063022, China;

3. Zhangjiakou Xingyuan Investment Development Group Co., Ltd, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: 【Objective】 Membrane-regulated subsurface irrigation is a water-saving irrigation technique for water-scarce areas, and this paper is to experimentally determine its technical parameters for irrigation in soils with different textures. 【Method】 The studies were based on laboratory experiment and the HYDRUS-2D model. Infiltration of irrigation water into sandy soil, loam soil, sandy clay loam and silt soil under membrane -regulated

irrigation was conducted experimentally with the dripping rate ranging from 0.9 to 3.2 L/h. The measured data were used to calibrate the HDYDRUS-2D model. 【Result】 The HDYDRUS-2D model can accurately simulate water flow in all soils under membrane regulated irrigation, with the relative errors less than 5%, the coefficient of determination and root mean square deviation being 0.97 and 0.007, respectively. The sandy soil was prone to leakage due to its elaborated hydraulic conductivity. In the membrane-regulated irrigation, adjusting the flow rate in the drip irrigation pipe was needed to improve irrigation efficiency in different soils. On average, the membrane-regulated irrigation worked well for all three soil types. At the end of the irrigation, the ratio of the water on the membrane to the total irrigation amount was more than 70% in all soils, indicating a reduction in water leakage loss. As the dripping rate increased, the proportion of water on the film in the loam soil decreased gradually; the dripping rate in irrigation for this soil should be controlled below a critical value. In the sandy soil, it was required to adjust the buried depth of the drip irrigation pipes to reduce leakage loss. The optimal dripping rate for the sandy clay loam soil and the loam soil was 2 L/h. As the flow rate increased, there was no significant change in the proportion of water on the membrane in the silt soil; the optimal dripping rate for the silt soil was 3 L/h. 【Conclusion】 Our experimental and numerical studies showed the optimal dripping rate for the membrane - regulated surface drip irrigation was 2 L/h for the sandy clay loam soil and the loam soil, and 3 L/h for the silt soil.

Key words: soil types; membrane-regulated irrigation; water transport; HYDRUS-2D model

责任编辑：韩 洋

(上接第 21 页)

Effects of livestock wastewater irrigation on growth, yield, and water and nitrogen use efficiency of garlic

XIANG Meng¹, LI Ying^{1,2}, HAN Huanhao³, CHEN Manyu¹, LIAO Bin¹, CUI Yuanlai^{1*}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co., Ltd, Wuhan 430056, China;

3. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】 Garlic is a cash crop in Dali, but its irrigation with livestock wastewater risks environmental pollution. This paper studies the combined effect of livestock wastewater irrigation and nitrogen fertilization on growth, yield, water and nitrogen utilization efficiency of garlic, as well as soil nitrogen in attempts to screen a sustainable livestock wastewater irrigation schedule for garlic production in this region. 【Method】 The experiment was conducted at the National Agricultural Environmental Dali Observation and Experimental Station. There were five treatments: freshwater irrigation without nitrogen application (CK), freshwater irrigation with 390 kg/hm² of nitrogen application (C1), freshwater irrigation with 312 kg/hm² of nitrogen application (C2), livestock wastewater irrigation without nitrogen application (R1), livestock wastewater irrigation with 150 kg/hm² of nitrogen application (R2). In each treatment, we measured the growth indexes, including dry weight, height, stem diameter and leaf area index of the garlic at different growing stages, as well as yield, and water and nitrogen use efficiency of the garlic and soil nitrogen content. 【Result】 The growth of the garlic was the best in R2, but was comparable with that in R1 and C1; R2 gave the highest yield. Compared to CK, C1, C2, R1 and R2 increased the bulb yield by 111.30%, 81.23%, 98.19%, and 142.01%, respectively. The nitrogen absorption and use efficiency of R1 and R2 was 154.71% and 92.25% higher than that of C1, respectively; the nitrogen partial factor productivity of R1 and R2 was 110.75% and 47.63% higher than that of C1, respectively. Compared to C1, R1 reduced the irrigation water productivity and soil nitrogen in the 0-40 cm of soil layer by 29.19%, while R2 increased the irrigation water productivity by 2.34% and reduced soil nitrogen in the 0-40 cm of soil by 3.89%, respectively. Compared to C1, R1 and R2 increased nitrogen in the 0-20 cm of soil layer by 170.90% and 255.93% respectively. 【Conclusion】 Livestock wastewater irrigation combined with appropriate base nitrogen fertilization can sustain garlic growth and yield. Livestock wastewater irrigation improved the nitrogen use efficiency and nitrogen partial factor productivity, with limited effect on average soil total nitrogen.

Key words: livestock wastewater; irrigation; garlic; production; water and nitrogen use efficiency

责任编辑：赵宇龙