

重力式地下滴灌点源入渗特征的数值模拟与验证

李娟, 马孝义, 甘学涛, 康银红

(西北农林科技大学 教育部干旱地区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基于非饱和土壤水动力学理论, 建立了重力式地下滴灌条件下土壤水分运动轴对称三维数值模拟模型, 利用 Galerkin 有限元法进行了数值模拟。通过试验对比验证, 表明所建模型可以用于分析地下滴灌土壤水分入渗规律, 具有较高的精度。对不同灌水技术要素条件下的地下滴灌湿润特征及入渗规律进行了数值模拟。结果表明, 在相同灌水量下, 供水压力与滴孔孔径对湿润圈影响微弱, 重力式地下滴灌管道设计时可以不考虑其影响, 但它对滴孔出流量影响较大, 而其它因素对滴孔出流量的影响微弱。因此在地下滴灌管道设计时, 只需根据田块长度和渗水管损失设计孔径和供水压力, 并可选择较小的供水压力; 在相同灌水量情况下, 管道埋深对湿润圈具有较明显的影响, 应按田间实际进行合理选择, 这些结论可为地下滴灌合理的设计及运行提供理论依据。

关键词: 重力式地下滴灌; 土壤水分; 有限元法; 数值模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)06-0095-07

中图分类号: S275.4

Numerical Simulation and Validation of Soil Water Movement Under Gravity Subsurface Drip Irrigation from Point Source

LI Juan, MA Xiao-yi, GAN Xue-tao, KANG Yin-hong

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of

Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the theory of unsaturated soil water dynamics, a three-dimensional axisymmetric model is set up to simulate soil water movement under gravity subsurface drip irrigation(SDI). Soil water movement is simulated with the aid of Galerkin finite element method and the model is testified with experiments. The result shows that this model can be used to simulate soil water infiltration process with higher accuracy under SDI. Wetting pattern and infiltration process are simulated concerning different irrigation technique factors. Under the same irrigation quantity, pressure head and emitter diameters have a minute effect on the wetting distribution pattern and so they can be ignored in the process of SDI pipe design, while they have a significant impact on the emitter effluent. During the SDI pipe design, the emitter diameter and water pressure head can be determined according to the field length and the water loss of infiltration pipe. Moreover, the lower pressure can be adopted. The pipe depth has conspicuous influence on wetting distribution pattern and so its design can be based on the field practical situation. All the conclusions can provide a theoretical basis for reasonable gravity SDI design and operation.

Keywords: gravity subsurface drip irrigation; soil water; finite element; numerical simulation

地下滴灌由于可以将水分直接送入作物的根区, 能显著减少无效蒸发且水肥同步, 是一种国内外正在开发并迅速推广的低定额节水灌溉新技术。

目前, 我国地下滴灌的设计系统是按照地面滴灌或简单的孔口出流原理进行规划的, 但是地下滴灌的灌水器埋于地下, 田间滴头的实际出流过程无法

收稿日期: 2007-04-23

修回日期: 2007-05-30

资助项目: 国家自然科学基金(50479052); 教育部青年教师资助计划课题(2003-108); 西北农林科技大学青年学术骨干计划资助课题

作者简介: 李娟(1981-), 女(汉族), 甘肃省景泰县人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程方面研究。E-mail: juanli81125@163.com。

通讯作者: 马孝义(1965-), 男(汉族), 陕西省凤翔县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程方面研究。E-mail: xiaoyimasl@yahoo.com.cn。

直接观测,其土壤水分运动规律也有别于地面滴灌。因此研究地下滴灌点源入渗规律和土壤湿润特征对于指导地下滴灌工程的规划设计有着重要的意义。

数值模拟法由于具有无需建立复杂的专门设备即可在计算机上进行各种试验处理的优点,自 20 世纪 60 年代以来,它已成为研究土壤水分运动的主要方法。Phili 研究了二维地理点源滴灌非饱和土壤水分运动模型^[1],Tomas 等分析了模型中的水力传导度与毛管水势的关系,讨论了地下滴灌中毛管间距、毛管深度的设计问题^[2-3];Warrick 等研究了水源形式下描述有根系吸水的三维线性土壤水流的数学模型^[4],并考虑了作物吸水的地理点源滴灌稳态水分运动问题;Ben-Asher 和 Phene 提出了地表及地下滴灌系统水流的二维数学模型^[5];仵峰等将地下滴灌的土壤水分运动简化为垂直平面的二维流动^[6];李光永等对建立的轴对称条件下的 θ 方程进行了 ADI 法求解^[7];李道西利用模拟地下滴灌系统二维水流运动的 HYDRUS-2D 计算机模型^[8],对土壤水分分布的影响因素进行了模拟分析;许迪等对柱坐标系下的 h 方程进行了 Galerkin 求解^[9]。但上述研究大多是针对将普通滴头埋入地下的地下灌溉进行的,其供水压力和滴头阻力较大,滴水量主要由滴头控制,为恒定值,分析地下灌溉技术参数时都是基于滴孔出流量为等流量的假定下进行,这与黄土高原目前发展的重力式地下滴灌实际不相符,而重力式地下滴灌的供水压力和滴灌管阻力均较小,渗水量随土壤质地、容重、初始含水量和灌水时间而变,同时上述研究试验模拟通常是在风干土条件下进行的,与田间实际不是很符合,难以适用于重力式地下滴灌的实际。马孝义等将重力式地下滴灌水分运动简化为垂直平面的二维流运动^[10],并对建立的 φ 方程进行了 Galerkin 法求解。但实际上重力式地下滴灌水分运动为三维入渗,为此,本文研究柱坐标系下重力式地下滴灌土壤水分运动模型和不同条件下重力式地下滴灌的点源入渗和土壤水分运动规律,为重力式地下滴灌工程设计、运行和管理提供理论依据。

1 数学模型的建立

地下滴灌土壤水分运动属三维点源问题,假定土壤均质,各向同性时将其简化为轴对称的三维点源入渗问题进行处理,用水势表示的土壤水分运动的基本

方程如式(1)所示。即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: h ——土壤水势(cm); $K(\theta)$ ——土壤非饱和导水率(cm/min); Z ——坐标向下为正; r, z ——分别表示径向坐标和垂直坐标,这里不考虑根系的吸水速率。

考虑到地下滴灌土壤水分运动的轴对称特性,选取图 1 所示的求解区域。在灌水开始时 $t=t_0$,土壤水势为灌水开始时的土壤水势,即

$$h(r, z, t) = h(r, z, t_0) \quad (t_0 = 0) \quad (2)$$

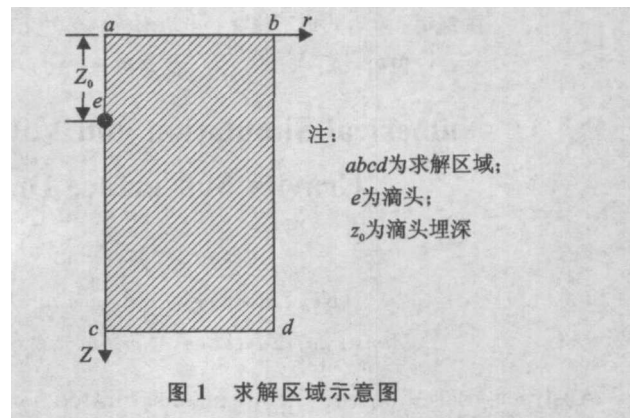


图 1 求解区域示意图

在灌水过程中, ac 和 bd 沿 x 方向上的水流量为零,即

$$\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (ac \text{ 和 } bd \text{ 边界}) \quad (3)$$

由于 cd 为区域下边界,它距地表有足够深度,不受灌水影响,故近似认为其含水量在灌水过程中保持不变,而 ab 为区域上边界,主要受蒸发和降雨影响,在灌水过程无降雨条件下,蒸发量相对于灌水影响较小,故模拟认为上边界的水流量为零。则

$$h = h_{t_0} \quad (cd \text{ 边界}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (ab \text{ 边界}) \quad (5)$$

由于滴水管道直径较小,对滴水管道处(e 点),可认为一个点源出流,其定解条件下为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} + Q \text{ (滴水孔 } e \text{ 处)} \quad (6)$$

式中: Q ——滴水孔出流量。据试验研究该值与孔径和滴水孔内外的水势差值相关,可近似表达为

$$Q = \alpha(H - h_e)^\beta \quad (7)$$

式中: H ——滴水管的供水压力; h_e ——滴水孔处的土壤水势; α, β ——滴水孔的出流参数,它主要取决于滴孔孔径和管材。

2 试验处理与模型检验

2.1 试验与处理

为验证模拟结果,在设计好的土槽中进行正交试验,土槽规格为 100 cm×100 cm×100 cm(长×宽×高),在安装于土槽中心位置的管道上打一个滴水孔,采用杨凌地区三道源的中壤土和渭河滩砂壤土,各试验处理如表 1 所示,进行试验模拟对比验证。

在模拟时,不同容重下的土壤水分特征曲线和土壤水分扩散率利用高速离心机和水平吸渗法测定。利用式(8),(9)的 Van Genuchten 和 Mualem 公式描述,曲线参数见表 2。不同容重下的土壤水分特征曲线和导水率关系曲线参数分别见表 2。

$$\theta(\varphi_m) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha |\varphi_m|)^n]^{-m} \quad (8)$$

$$k(\varphi_m) = \frac{k_s \{1 - (\alpha |\varphi_m|)^{n-1} [1 + (\alpha |\varphi_m|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha |\varphi_m|)^n]^{m/2}} \quad (9)$$

式中: φ_m ——土壤基质势(cm); θ_r, θ_s ——分别为土壤剩余含水量和饱和含水量(cm^3/cm^3); α, n 和 m ——曲线参数, $m = 1 - 1/n$; k_s ——土壤饱和导水率(cm/min)。

表 1 试验方案的滴水处理

土壤质地	孔径 d/mm	管道埋深/cm	供水压力/cm	容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	初始含水率/%	灌水量/L
中壤土	0.6	25	60	1.30	50	14.7
中壤土	1.2	40	60	1.30	60	29.5
中壤土	0.6	25	150	1.40	60	29.5
中壤土	1.2	40	150	1.40	50	14.7
砂壤土	0.6	40	150	1.35	50	29.5
砂壤土	1.2	25	150	1.35	60	14.7
砂壤土	0.6	40	60	1.45	60	14.7
砂壤土	1.2	25	60	1.45	50	29.5

注:初始含水率为初始含水量占田间持水量的百分比。

表 2 两种土壤水分特征参数

土壤质地	容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	θ_r	θ_s	α	m	n	k_s
中壤土	1.30	0.118 5	0.509 4	0.032 2	0.247 3	1.328 6	0.490 6
中壤土	1.40	0.008 5	0.471 6	0.050 9	0.143 4	1.167 5	0.513 3
砂壤土	1.35	0.069 8	0.490 6	0.031 4	0.449 8	1.801 7	1.248 4
砂壤土	1.45	0.049 1	0.452 8	0.041 7	0.450 3	1.819 4	0.434 8

注:表中各符号的含义同公式(9)。

通过试验得出重力式地下滴灌在不同孔径和压力条件下滴水孔出流量服从下式

$$Q = 6.816 9 d^{2.393 6} (H - h_e)^{-0.218 3 d + 0.716} \quad (10)$$

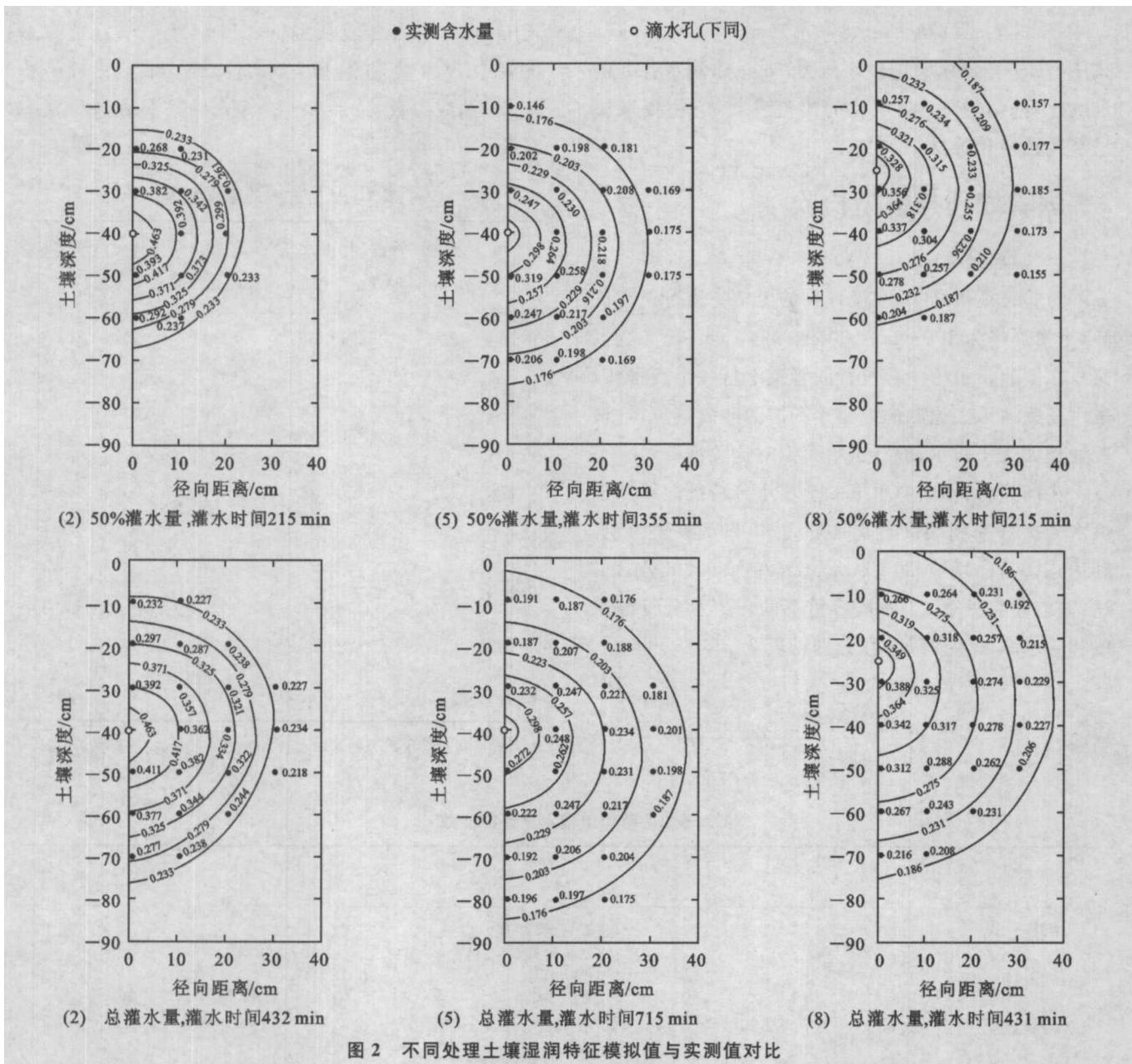
式中: H, h_e 符号意义同式(7); d ——滴水孔孔径(mm)。

2.2 土壤湿润特征的模拟值与实测结果对比分析

本文利用 Galerkin 有限元法完成对数学模型的数值求解,将模拟计算区域剖分为三角形单元^[11],其中在滴头处,由于出流量等变量的梯度较大,故加密网格,而在离滴头较远处,适当减小网格密度。本文在模拟计算过程中,根据指定的初始时间步长

(10^{-10} h),及求解情况自动调整时间步长。对表 1 中的各试验处理用有限元进行模拟。模拟过程是用公式(8)及表 1 中的参数进行土壤含水量与水势的相互转换,在灌水过程中测定每灌 1/2 水量和最终灌水量后不同距离处的含水率与模拟结果进行对比,分别将处理 2,处理 5,处理 8 处的模拟值与实测值进行对比(如图 2 所示)。

研究结果显示除滴头附近误差较大外,其它处误差较小,其它处理的结果也类似,表明所建模型的模拟值与实测值基本吻合,表明所建模型可准确反映重力式地下滴灌土壤水分入渗规律。



3 重力式地下滴灌土壤水分运动规律

利用所建立模型对不同供水压力、土壤质地、滴孔孔径、管道埋深、初始含水量等灌水技术要素条件下的地下滴灌土壤水分运动规律进行模拟分析。

3.1 供水压力与滴孔孔径的影响

图 3 中使用的中壤土容重为 1.3 g/cm^3 , 砂壤土容重为 1.35 g/cm^3 , 初始含水率均控制在田间持水量的 50%, 滴管埋深为 35 cm, 采用不同孔径、不同供水压力, 相同灌水量时(单滴孔灌水量为 22.5 L)滴水孔径和供水压力对滴孔出流量和土壤湿润特征的影响。对比图 3 中(a)–(c)和(e)–(g), 可以看出, 孔径和压力对土壤湿润圈影响微弱。对比图 3 中(d), (h)二图可以看出, 滴孔出流量随时间迅速减小并很快趋于稳定, 且滴孔出流量随供水压力和孔径的增大而增大。

3.2 初始含水率的影响

图 4 中土壤为中壤土(容重为 1.3 g/cm^3)和砂壤土(容重 1.35 g/cm^3), 滴管埋深为 35 cm, 孔径为 0.9 mm, 供水压力水头为 100 cm, 灌水量相同(单滴孔灌水量为 22.5 L)时, 土壤初始含水量分别为田间持水量的 50%, 70%时(中壤土、砂壤土的田间持水量分别为 $0.243, 0.202 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的滴孔出流量和土壤湿润特征。对比图 4 中(a), (b)和(d), (e)两组结果可以看出, 初始含水量对土壤湿润圈有一定的影响, 在相同的灌水量条件下, 土壤初始含水率越高, 湿润圈较大, 初始含水率对中壤土的影响较砂壤土小。从图 4 中(c), (f)可看出, 土壤初始含水率在开始灌水时对滴孔出流量有一定影响, 土壤初始含水量小时滴孔出流量大, 初始含水量大时滴孔出流量小, 最终滴孔出流量趋于相同且稳定。

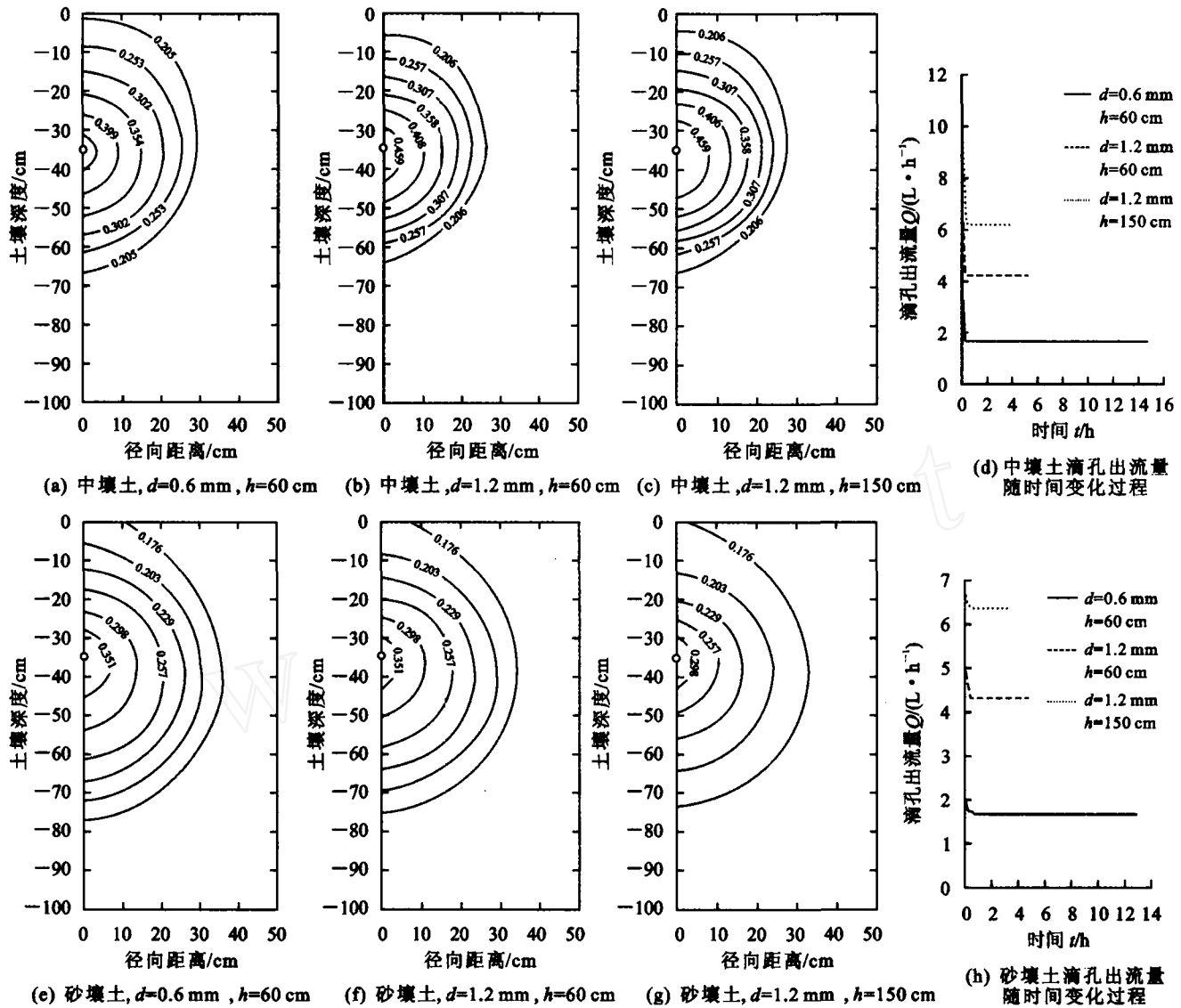


图 3 供水压力与滴孔孔径对土壤湿润圈及滴孔出流量的影响

3.3 土壤容重影响

采用同样方法分析供水压力水头为 100 cm, 滴水孔径为 0.9 mm, 埋深 35 cm, 在初始含水量相同和灌水量相同时(单滴孔灌水量为 22.5 L, 初始含水量为 60% 的田间持水量), 模拟得出砂壤土在不同容重下的土壤湿润圈和滴孔出流量的变化图(略)。结果表明, 土壤容重对砂壤土湿润圈的影响较大, 但对滴孔出流量影响微弱。

3.4 管道埋深的影响

图 5 为中壤土容重为 1.3 g/cm³, 砂壤土容重为 1.35 g/cm³, 供水压力水头为 100 cm, 滴水孔径为 0.9 mm, 灌水量相同(单滴孔灌水量为 22.5 L) 时不同管道埋深对土壤湿润特征和滴孔出流量的模拟结果。可以看出, 管道埋深对土壤湿润特征影响明显, 随着埋深下移湿润圈同步下移, 湿润圈内固定点的土壤含水量也有下移趋势, 管道埋深使得砂壤土湿润圈向下推移程度较中壤土大, 所以对于砂壤土地下滴灌

应尽可能采用较小埋深, 以免造成深层渗漏; 图 5 中 (c), (f) 为中壤土和砂壤土在不同埋深时滴孔出流量随时间的变化规律, 可以看出管道埋深对滴孔出流量影响微弱。

3.5 滴水孔出流量的分析

由于重力式地下滴灌与其它普通地下滴灌不同, 供水压力和滴灌管阻力均较小, 滴孔出流量随土壤特性和灌水时间而变。

通过对上述不同灌水要素对滴孔出流量的影响结果分析可以看出, 影响滴孔出流量的因素主要为供水压力和滴孔孔径, 其它要素对滴孔出流量的影响均微弱。为此利用流量公式(10)计算了不同供水压力和滴孔孔径下其在空气中的滴孔出流量, 并与在土壤中的滴孔出流量进行了对比, 发现其比值关系均在 85%~97% 之间, 其平均值为 90% (如表 3 所示)。因此可近似按这一平均值进行重力式地下滴灌管道水力计算, 但这一结论还有待深化。

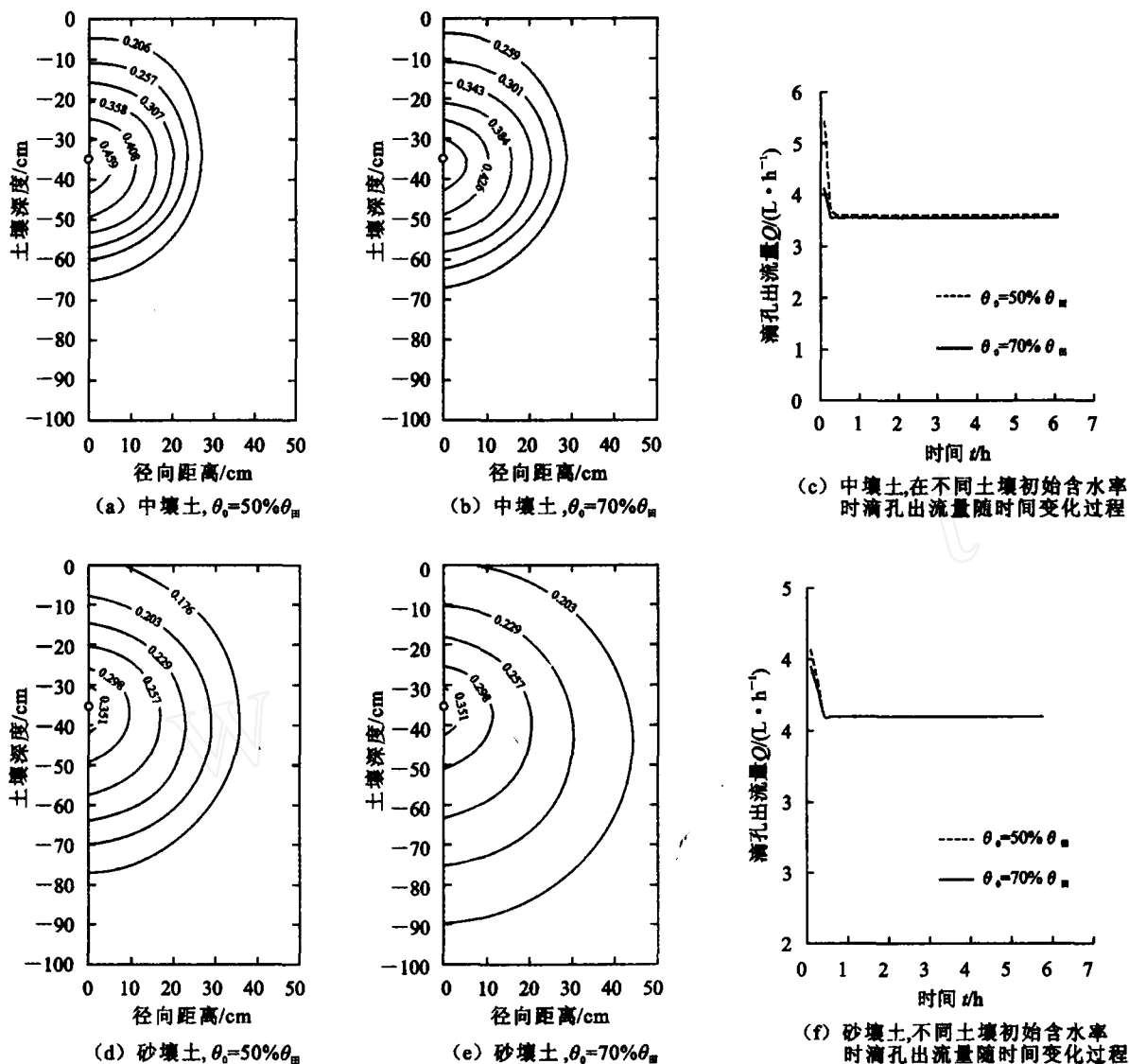


图 4 不同初始含水率对土壤湿润圈与滴孔出流量的影响

表 3 在空气中与土壤中滴孔出流量的比值关系

滴孔孔径/mm	供水压力/cm	空气中出流量/(L·h ⁻¹)	土壤中出流量/(L·h ⁻¹)	比值关系
0.6	95	1.728	1.670	0.966
0.9	125	3.904	3.600	0.921
0.9	135	4.064	3.600	0.885
0.9	145	4.218	3.600	0.853
1.2	185	6.771	6.200	0.915
1.2	95	5.003	4.230	0.863

4 结论

本文建立了重力式地下滴灌土壤水分运动模型,应用有限元法对不同情况下的地下滴灌土壤入参与水分分布进行数值模拟,并进行了试验验证。通过比

较发现二者具有较好的一致性。研究结果表明所建模型可准确反映重力式地下滴灌土壤水分入渗规律。利用模型对土壤不同质地、滴孔孔径、滴头埋深、供水压力和初始含水率等因素对土壤湿润特征和滴孔出流量的影响进行了模拟分析,结果表明,在相同灌水量情况下,供水压力和滴孔孔径对湿润圈的影响微弱,可以不考虑其影响,但对滴孔出流量影响较大。因此重力式地下滴灌管道设计时可根据滴水孔出流量计算渗水管水头损失,以此确定滴水孔孔径和供水压力。由于供水压力对土壤湿润圈影响微弱,从经济性考虑可选择较小的供水压力;管道埋深和初始含水量对湿润圈具有较明显的影响,对滴孔出流量的影响微弱。对于砂壤土,滴水孔应尽可能浅埋,并选择流量稍大的滴水孔;对于中壤土,允许较大的滴水孔埋深,选择流量较小的滴孔。但由于简易滴灌的管材变化较大,其出流规律变化复杂,在试验中仍有一些误差,本文研究结论还有待进一步深化。

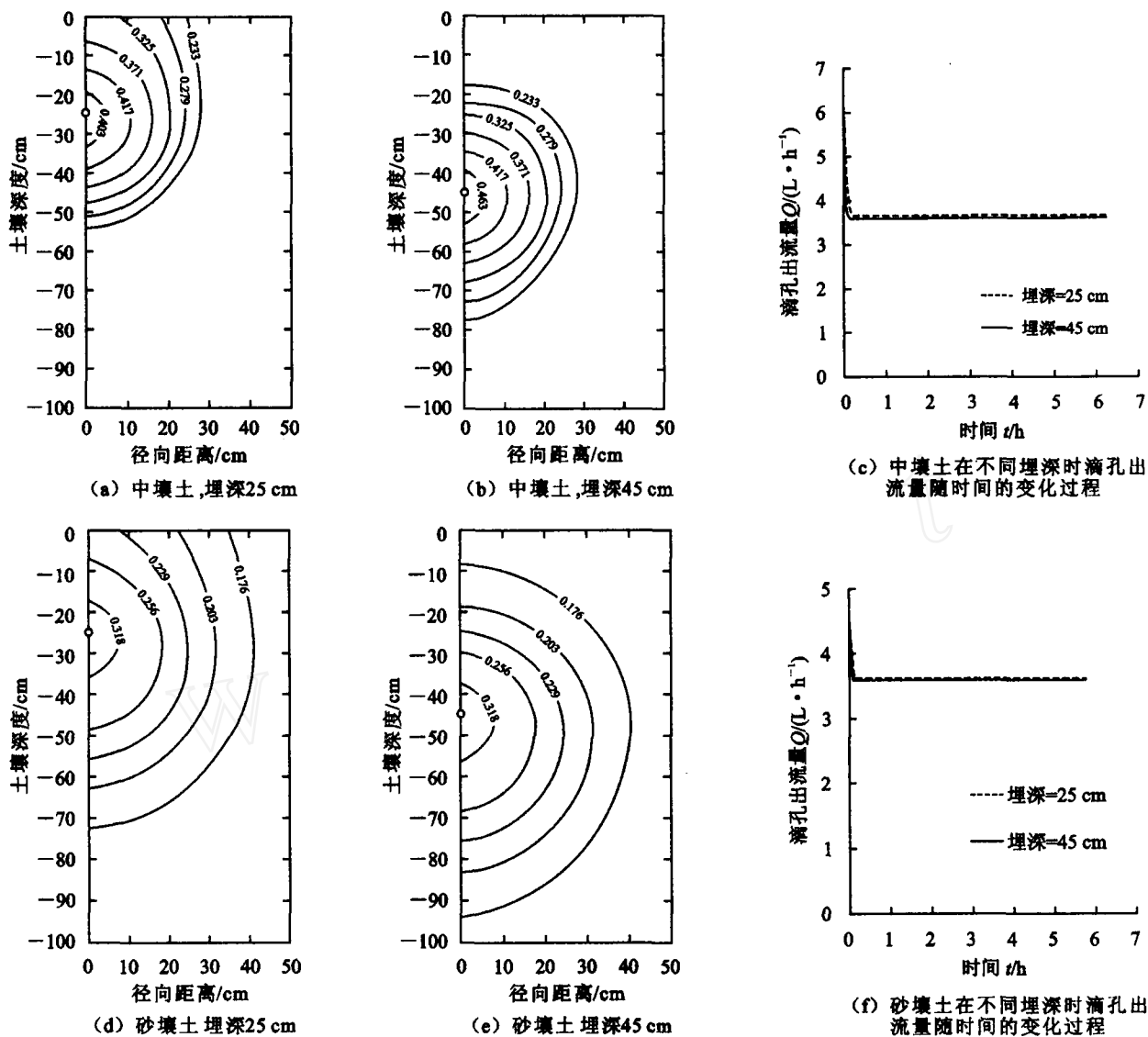


图5 不同管道埋深对土壤湿润特征与滴孔出流量的影响

[参 考 文 献]

[1] Philip J R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities[J]. Water Resource Res. ,1972,4 (5):1039—1047.

[2] Thomas A. W. Comparisons of calculated and measured capillary potentials from line source[R]. 1975.

[3] Thomas A W S. teadys. infiltration from line source buried in soil[J]. Transactions of the ASAE, 1974,17 (1):125—128,133.

[4] Warrick A W, Lomen D O, Amoozegar—Farda. Lin-eaized moisture flow with root extraction for 3 dimensional, steady conditions [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980,44(5):911—914.

[5] Ben—Asher J, Phene C J. An alysis of surface and sub-surface drip irrigation using a numerical mode [M]// Subsurface Drip Irrigation—Theory, Practice and Appli-cation. Stjoseph, Mich; Irrigation & Drainage Press, 1993:185—202.

[6] 仵峰,彭贵芳. 地下滴灌条件下土壤水分运动模型[J]. 灌溉排水,1996,15(3):24—29.

[7] 李光水,郑耀泉,曾德超,等. 地埋点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J]. 水利学报,1996,12(3):67—71.

[8] 李道西,罗金耀. 地下滴灌土壤水分运动数值模拟[J]. 节水灌溉,2004(4):4—7.

[9] 许迪,程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001,17(6):1—4.

[10] 马孝义,谢建波,康银红. 重力式地下滴灌土壤水分运动规律的模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(6):5—10.

[11] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社,1988.