充分供水条件下点源入渗参数影响因素及其简化模型

范严伟[1]，马孝义[2]，赵文举[1]

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730050；
2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100)

摘　要：以非饱和土壤水分运动理论为基础，建立了充分供水条件下点源入渗的土壤水分运动数学模型，并应用 SWMS-3D 软件对模型进行了求解，模拟并分析了充分供水条件下多种典型土壤的点源入渗特性及其影响因素。结果表明，充分供水条件下点源入渗累积入渗量曲线符合 Philip 模型；在相同土壤质地、容积密度下，吸渗率与稳渗率随着膜孔直径的增大而增大；稳渗率随灌溉水深的增大而略有增大。基于 Philip 模型，提出了包含膜孔直径、灌溉水深的充分供水条件下点源入渗简化模型。并利用黄土高原典型土壤的室内试验资料与已有文献资料对简化模型进行了验证。验证结果表明，所建简化模型能较简单地确定吸渗率和稳渗率，可较准确地反映充分供水条件下点源入渗特点。

关键词：膜孔灌；充分供水；点源入渗；Philip 模型；数值模拟

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2012)04-0190-06　　**中图分类号**：S275.9

Influencing Factors of Point Source Infiltration Parameters and Simplified Model Under Adequate Water Supply

FAN Yan-wei[1], MA Xiao-yi[2], ZHAO Wen-ju[1]

(1. *College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*; 2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Based on the theory for water movement in non-saturated soil, a mathematical model of point source infiltration under adequate water supply was established and solved by using SWMS-3D software. The point source infiltration characteristics were simulated with several typical soils under adequate water supply. According to the simulation results, the infiltration characteristics and related affecting factors was analyzed. It was shown that the cumulative infiltration curve can be well described using Philip model. With same soil texture and bulk density, the sorptivity(A) increased with film hole diameters. The steady infiltration rate (S) increased with film hole diameter and slightly increased with irrigation depth. Furthermore, the simplified infiltration model was proposed for point source infiltration under adequate water supply, including film hole diameter and irrigation depth as parameters. The simplified model was then tested by infiltration experiments using typical soils from Loess Plateau and experimental data reported in the studies of the other researchers. It was concluded that the simplified infiltration model accurately reflects the point source infiltration characteristics under adequate water supply and can therefore be applied readily to determine the sorptivity and steady infiltration rate.

Keywords: film hole irrigation; adequate water supply; point source infiltration; Philip model, numerical simulation

土壤水分入渗模型的研究、改进和参数确定等方面一直是水文学和土壤物理学等相关学科的研究重点[1]。国内外学者对土壤入渗特性进行了大量研究，提出了具有不同特点和用途的入渗模型，其中，Philip 入渗模型具有明确的物理意义，在田间入渗试验资料中得到很好的验证，故应用较广泛[2-5]。吴军虎等[6]

收稿日期：2011-07-16　　修回日期：2012-05-08
资助项目：国家“十一五”科技支撑计划项目“灌区用水管理及量水技术研究与产品开发”(2006BAD11B04)；日本日立建机株式会社资助项目；国家自然科学基金项目“压砂地土壤水分时空变异理论与模型研究”(51269008)
作者简介：范严伟(1982—)，男(汉族)，山东省聊城市人，硕士，讲师，主要从事节水灌溉理论与设备研发方面研究。E-mail：fanyanwei24@163.com。

建立了充分供水条件下点源入渗的 Philip 模型,但该模型需测定一维垂直入渗参数;随着计算机技术的发展,人们试图通过数值模拟方法来研究土壤水分入渗规律,并建立入渗参数与灌水技术要素间的关系,从而为获取相关土壤入渗参数提供手段,以便土壤入渗模型的实际应用[7]。马孝义等[8]提出了包含开孔率、膜孔直径的膜孔灌平均入渗水深简化模型,该模型在交汇入渗条件下能较准确地反映膜孔灌入渗特性,而描述单点源入渗特性精确度稍差。

为此,本研究对多种典型土壤在充分供水条件下的单点源入渗特性进行数值模拟,并基于 Philip 模型,拟合入渗参数,研究吸渗率 S 和稳渗率 A 与影响因素之间的关系,建立包括主要影响因素的点源入渗简化计算模型,为改进膜孔灌灌水技术、提高灌水质量提供理论依据。

1　数学模型与模拟分析方法

1.1　数学模型

充分供水条件下点源入渗为三维入渗,假设土壤为各向同性均质介质,忽略水分流动时的空气阻力和温度势作用,则充分供水条件下点源入渗的土壤水分运动基本方程为:

$$C(\varphi_m)=\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K(\varphi_m)\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left[K(\varphi_m)\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\varphi_m)\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right]+\frac{\partial K(\varphi_m)}{\partial z}\tag{1}$$

式中:$C(\varphi_m)$——比水容重;φ_m——基质势;φ——总水势;t——入渗时间;$K(\varphi_m)$——非饱和导水率(cm/min)。

累积入渗量的表达式为:

$$I(t)=\int_0^V[\theta(x,y,z,t)-\theta(x,y,z,0)]\mathrm{d}v\tag{2}$$

式中:$I(t)$——膜孔累积入渗量(ml);V——试验土壤体积(比湿润体范围为大);$\theta(x,y,z,t)$——灌水结束各剖面含水率(cm^3/cm^3);$\theta(x,y,z,0)$——各剖面初始含水率(cm^3/cm^3)。

土壤水分特征曲线 和非饱和土壤导水率 采用 Van Genuchten(VG)模型拟合[9]。

$$\theta(h)=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/(1+|\alpha h|^n)^m\tag{3}$$

$$K(\varphi_m)=K_s\frac{\{1-|\alpha h|^{n-1}[1+|\alpha h|^n]^{-m}\}^2}{[1+|\alpha h|^n]^{ml}}\tag{4}$$

式中:$\theta(h)$——土壤含水率(cm^3/cm^3);θ_s——土壤饱和含水率(cm^3/cm^3);θ_r——土壤残余含水率(cm^3/cm^3);h——负压水头(cm);K_s——饱和土壤导水率(cm/min);α,n,m——与土壤物理特性有关的拟合参数;$n>1$;$m=1-1/n$;$l=0.5$,其他符号意义同上。

为简化研究工作,膜孔采用相等的行距和株距。由于膜孔的对称性,只考虑 1/4 膜孔控制面积部分的土壤水分运动,如图 1 所示。模型定解的初始条件为:

$$\begin{cases}\varphi=\varphi_0\\ t=0\\ 0\leqslant x\leqslant d\\ 0\leqslant y\leqslant d\\ -h\leqslant z\leqslant 0\end{cases}$$

式中:φ_0——土壤的初始总水势;d,h——模拟计算区域边界长度(图 1)。

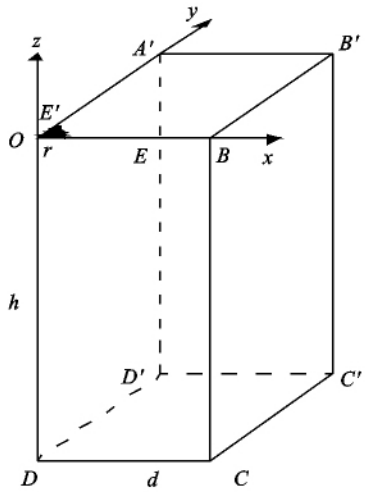


图 1　数值模拟区域简化图

试验中膜孔 OEE′保持恒定水头,上边界 EE′A′B′B 由于有地膜覆盖,没有蒸发现象,为零通量面,边界 OBCD 和边界 ODD′A′为膜孔中心入渗面,由于膜孔为轴对称,为零通量面;由于计算区域较大,故边界 A′B′C′D′,边界 BCC′B′和 CDD′C′可认为水分无法到达,边界无水量交换,故保持恒定的总水势。因此,边界条件为:

$$\text{边界 OEE}'\text{:}\begin{cases}\varphi=H\\ z=0\\ 0\leqslant\sqrt{x^2+y^2}\leqslant r\\ 0\leqslant t\leqslant T\end{cases}$$

$$\text{边界 EE}'\text{A}'\text{B}'\text{B:}\begin{cases}-K(\varphi_m)\left[\dfrac{\partial\varphi}{\partial z}+1\right]=0\\ x\leqslant d\\ y\leqslant d\\ z=0\\ r\leqslant\sqrt{x^2+y^2}\\ t\geqslant 0\end{cases}$$

边界 OBCD：$\begin{cases} -K(\varphi_m)\dfrac{\partial \varphi}{\partial y}=0 \\ -h\leqslant z\leqslant 0 \\ 0\leqslant y\leqslant d \\ x=0 \\ t\geqslant 0 \end{cases}$

边界 ODD′A′：$\begin{cases} -K(\varphi_m)\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}=0 \\ -h\leqslant z\leqslant 0 \\ 0\leqslant x\leqslant d \\ x=0 \\ t\geqslant 0 \end{cases}$

边界 A′B′C′D′：$\begin{cases} \varphi=\varphi_0 \\ -h\leqslant z\leqslant 0 \\ 0\leqslant x\leqslant d \\ y=d \\ t\geqslant 0 \end{cases}$

边界 BCC′B′：$\begin{cases} \varphi=\varphi_0 \\ -h\leqslant z\leqslant 0 \\ 0\leqslant y\leqslant d \\ x=d \\ t\geqslant 0 \end{cases}$

边界 CDD′C′：$\begin{cases} \varphi=\varphi_0 \\ 0\leqslant x\leqslant d \\ 0\leqslant y\leqslant d \\ z=h \\ t\geqslant 0 \end{cases}$

式中：H——灌溉水深；r——膜孔半径；t——灌水时间。

1.2 模型求解方法

利用三维有限元土壤水模型(SWMS-3D)对数学模型进行数值求解。模拟充分供水条件下的点源入渗特性。三维土壤水模型软件(SWMS-3D)由美国农业部农业研究服务中心的 Simbnek 等人[10]开发，可用于模拟分析非饱和、非饱和或完全饱和多孔介质水和溶质的运动。将模拟计算区域剖分为三角形单元，其中在膜孔处，由于水流量变化梯度较大，故加密网格，而在膜孔点源较远处，适当减小网格密度。考虑到田间实际和计算精度要求，有限元计算区域的深度为 100 cm，半径为 25 cm。

1.3 典型土壤特性

为保证研究土壤的广泛性和成果的普适性，模拟中的典型土壤水分运动参数取自文献[8]及典型土质 Van Genuchten(VG)模型参数(表 1)。

2 单点源入渗 Philip 模型参数的确定

2.1 典型土壤入渗特性模拟结果与分析

充分供水条件下点源入渗特性主要受土壤质地、容积密度、膜孔直径和灌溉水深等因素的影响[11-13]，但在实际工程中，土壤质地、容积密度已确定且变异较大，必须依具体情况予以考虑，因此考虑田间实际，可将膜孔直径和灌溉水深作为主要影响因素进行研究。利用三维有限元土壤水模型(SWMS-3D)对数学模型进行数值求解，模拟不同膜孔直径 D 和灌溉水深 H 条件下的点源入渗累积入渗量与时间的关系曲线如图 2 所示，由于篇幅有限，此处仅列举部分模拟图(图 2)。

由图 2 可以看出，土壤质地、容积密度对膜孔累积入渗量影响很大；同一质地土壤容积密度大时，土壤愈密实，大孔隙数量愈少，导水率愈小，累积入渗量减小；膜孔直径对累积入渗量影响较大，土壤质地越细，累积入渗量减小，且灌溉水深对其影响越小。

表 1 不同土质 Van Genuchten(VG)模型水力特性参数

土壤类型	容 重/(g·cm^{-3})	残余含水率/(cm^3·cm^{-3})	饱和含水率/(cm^3·cm^{-3})	α	n	l	饱和导水率/(cm·min^{-1})
杨凌中壤土	1.30	0.113	0.492	0.014	1.715	0.5	0.021
杨凌中壤土	1.40	0.122	0.456	0.017	1.546	0.5	0.015
杨凌砂壤土	1.35	0.057	0.380	0.025	1.759	0.5	0.041
杨凌砂壤土	1.45	0.049	0.362	0.024	1.689	0.5	0.026
典型壤土	—	0.078	0.430	0.036	1.560	0.5	0.017
典型砂壤土	—	0.065	0.410	0.075	1.890	0.5	0.074
典型砂土	—	0.045	0.430	0.145	2.680	0.5	0.495

注：α、n、l 取自确定模型参数的通用软件 RETC；α、n 为与土壤物理特征有关的拟合数，l 为经验系数。

为定量分析膜孔入渗速率的变化关系，确定合理灌水技术要素，研究表明充分供水条件下点源入渗可采用 Philip 入渗模型拟合[6]，即

$$I(t)=St^{\frac{1}{2}}+At \tag{5}$$

式中：S——吸渗率；A——稳渗率。

对表 1 中所有土壤模拟的入渗量资料拟合结果

如表 2 所示。表 2 中 S 和 A 的相关系数 R^2 均大于 0.99,说明充分供水条件下的点源入渗累积入渗量与入渗时间之间的关系均可以用 Philip 模型表达。由表 2 可以看出,在相同土壤质地、容积密度、膜孔直径条件下,随着灌溉水深的增大,吸渗率 S 变化很小,而稳渗率 A 变化较大,说明在相同土壤质地、容积密度条件下,吸渗率 S 变化与膜孔直径有关,而稳渗率 A 变化与膜孔直径和灌溉水深存在一定的关系。

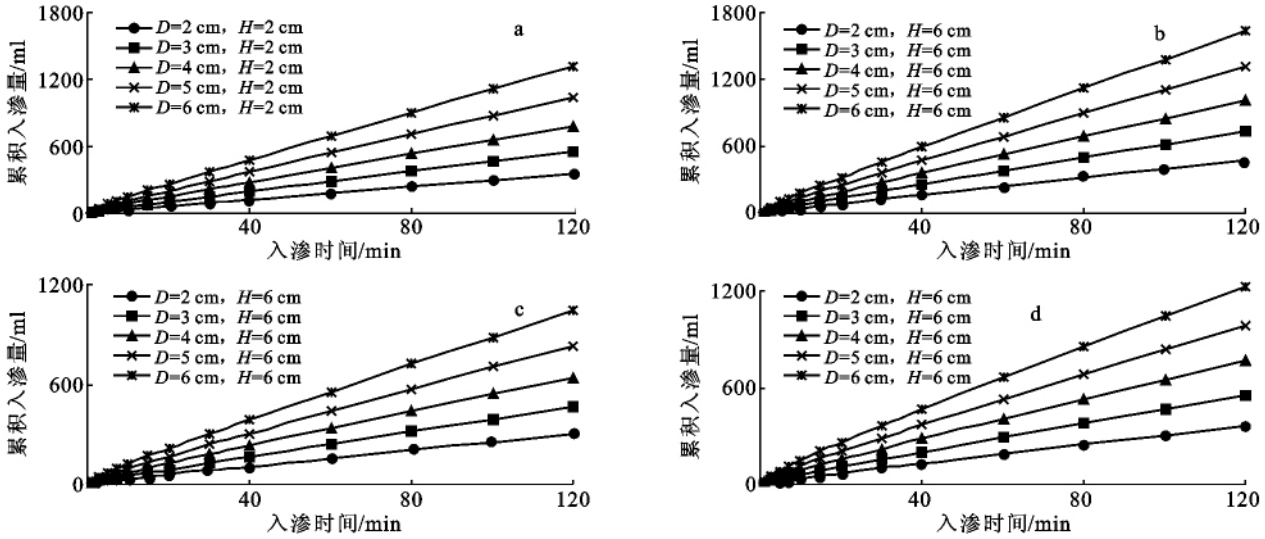


图 2　典型土壤不同膜孔直径 D 与灌溉水深 H 下的累积入渗量与时间的关系

a 典型砂壤土; b 杨凌砂壤土(γ_d=1.35 g/cm³); c 杨凌砂壤土(γ_d=1.45 g/cm³); d 杨凌中壤土(γ_d=1.30 g/cm³)

表 2　模拟的典型土壤不同膜孔直径与灌溉水深条件下的入渗参数拟合值

膜孔直径/	灌溉水深/	杨凌中壤土 (1.30 g/cm³)		杨凌中壤土 (1.40 g/cm³)		杨凌砂壤土 (1.35 g/cm³)		杨凌砂壤土 (1.45 g/cm³)		典型壤土		典型砂壤土		典型砂土	
cm	cm	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
	2	3.32	2.35	3.19	1.17	2.56	3.00	2.37	1.82	2.60	0.73	3.01	2.97	3.46	19.39
	3	3.32	2.44	3.19	1.23	2.55	3.18	2.37	1.92	2.59	0.83	3.08	3.39	3.61	22.71
2	4	3.33	2.52	3.18	1.29	2.54	3.38	2.36	2.05	2.56	0.94	3.08	3.83	3.88	25.99
	5	3.32	2.61	3.17	1.36	2.52	3.60	2.34	2.19	2.57	1.04	2.94	4.35	4.35	29.12
	6	3.31	2.71	3.13	1.45	2.59	3.79	2.37	2.30	2.57	1.14	2.81	4.88	4.90	32.14
	2	6.20	3.50	5.57	1.70	4.81	4.53	4.43	2.71	4.47	1.09	5.44	4.44	7.30	29.53
	3	6.21	3.62	5.57	1.80	4.82	4.82	4.43	2.89	4.44	1.25	5.50	5.10	7.97	34.27
3	4	6.18	3.77	5.55	1.90	4.79	5.14	4.41	3.09	4.48	1.38	5.37	5.87	8.96	38.75
	5	6.23	3.90	5.54	2.03	4.90	5.42	4.46	3.28	4.52	1.52	5.32	6.62	9.90	43.11
	6	6.18	4.07	5.55	2.13	4.96	5.72	4.52	3.45	4.51	1.68	5.34	7.34	10.72	47.42
	2	10.36	4.62	9.07	2.19	8.08	6.09	7.39	3.62	7.32	1.40	9.03	6.01	12.82	40.72
	3	10.38	4.80	9.04	2.33	8.07	6.52	7.43	3.87	7.31	1.60	9.07	6.95	14.01	46.88
4	4	10.39	5.00	9.05	2.49	8.11	6.94	7.46	4.14	7.38	1.79	9.05	7.94	15.86	52.56
	5	10.47	5.19	9.00	2.66	8.17	7.32	7.57	4.39	7.39	2.00	9.10	8.93	16.81	58.55
	6	10.46	5.41	9.09	2.80	8.16	7.77	7.63	4.64	7.39	2.22	9.18	9.87	18.21	64.17
	2	14.91	5.82	12.69	2.74	11.78	7.74	10.69	4.58	10.22	1.75	12.86	7.77	19.77	52.77
	3	14.96	6.06	12.72	2.91	11.76	8.30	10.73	4.92	10.28	2.00	13.05	8.97	21.90	60.40
5	4	15.02	6.30	12.61	3.14	11.90	8.82	10.75	5.27	10.34	2.26	13.14	10.23	23.92	67.71
	5	15.06	6.57	12.73	3.32	12.06	9.35	10.86	5.59	10.29	2.56	13.43	11.42	25.93	74.86
	6	15.11	6.84	12.78	3.52	12.09	9.93	10.98	5.94	10.36	2.85	13.74	12.55	27.54	81.95
	2	20.66	7.04	17.15	3.31	16.45	9.47	14.76	5.59	13.92	2.10	17.96	9.62	28.89	65.73
	3	20.77	7.33	17.23	3.52	16.51	10.15	14.85	6.00	13.91	2.44	17.97	11.19	31.61	74.94
6	4	20.78	7.66	17.17	3.79	16.69	10.82	14.96	6.43	13.91	2.80	18.31	12.67	35.03	83.66
	5	20.84	8.01	17.25	4.04	16.85	11.51	15.05	6.87	14.00	3.12	18.66	14.10	37.74	92.22
	6	20.94	8.33	17.31	4.31	17.04	12.20	15.11	7.34	14.06	3.45	19.00	15.49	40.54	100.71

注:括号内为土壤容重,下同; S,A 分别为吸渗率和稳渗率,相关系数 R^2 均大于 0.99。

2.2 吸渗率 S 的变化规律分析

在相同土壤质地、容积密度下，灌溉水深 H 对吸渗率 S 影响微弱，膜孔直径 D 对其影响作用增大，分析发现，吸渗率 S 与膜孔直径 D 符合幂函数关系。建立吸渗率 S 与膜孔直径 D 的简化模型为

$$S=aD^b \tag{6}$$

式中：a，b——拟合参数。

用表 2 中的多种典型土壤单点源入渗参数吸渗率 S 值，通过公式(6)拟合确定参数 a 和 b 值(表 3)。

2.3 稳渗率 A 的变化规律分析

在相同土壤质地、容积密度下的稳渗率 A 随膜孔直径的增大而增大，随着灌溉水深的增大而略有增大。分析结果表明，稳渗率 A 与膜孔直径 D 的比值与灌溉水深 H 符合指数函数关系。建立稳渗率 A 与膜孔直径 D 和灌溉水深 H 的简化模型为

$$A=D\cdot me^{nH} \tag{7}$$

式中：m，n——拟合参数。

用表 2 中的多种典型土壤单点源入渗参数稳渗率 A，通过式(7)拟合确定参数 m 和 n 值(表 3)。

2.4 单点膜孔入渗简化计算模型

联合公式(5)—(7)建立多种土壤质地、容积密度条件下，充分供水条件下点源入渗简化计算模型为

$$I(t)=aD^bt^{\frac{1}{2}}+D\cdot me^{nH}t \tag{8}$$

表 3 典型土壤的拟合参数

参 数	杨凌中壤土 (1.30 g/cm³)	杨凌中壤土 (1.40 g/cm³)	杨凌砂壤土 (1.35 g/cm³)	杨凌砂壤土 (1.45 g/cm³)	典型壤土	典型砂壤土	典型砂土
a	1.018	1.057	0.763	0.721	0.859	0.909	1.037
b	1.676	1.548	1.711	1.685	1.546	1.665	1.951
R^2	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.973
m	1.078	0.496	1.362	0.807	0.287	1.209	8.284
n	0.039	0.060	0.061	0.063	0.115	0.123	0.115
R^2	0.980	0.961	0.932	0.963	0.984	0.967	0.956

将表 3 中的 a，b，m，n 值代入式(8)，可得典型土壤点源入渗简化计算模型：

杨凌中壤土(容重 $\gamma_d=1.30$ g/cm³)：

$$I(t)=1.018D^{1.676}t^{\frac{1}{2}}+1.078D\cdot e^{0.039H}t$$

杨凌中壤土($\gamma_d=1.40$ g/cm³)：

$$I(t)=1.057D^{1.548}t^{\frac{1}{2}}+0.496D\cdot e^{0.06H}t$$

杨凌砂壤土($\gamma_d=1.35$ g/cm³)：

$$I(t)=0.763D^{1.711}t^{\frac{1}{2}}+1.362D\cdot e^{0.061H}t$$

杨凌砂壤土($\gamma_d=1.45$ g/cm³)：

$$I(t)=0.721D^{1.685}t^{\frac{1}{2}}+0.807D\cdot e^{0.063H}t$$

典型壤土：

$$I(t)=0.859D^{1.546}t^{\frac{1}{2}}+0.287D\cdot e^{0.115H}t$$

典型砂壤土：

$$I(t)=0.909D^{1.665}t\,\frac{1}{2}+1.209D\cdot e^{0.123H}t$$

典型砂土：

$$I(t)=1.037D^{1.951}t^{\frac{1}{2}}+8.284D\cdot e^{0.115H}t$$

3 模型验证

为了验证简化计算模型的普适性，分别采集黄土高原 4 种不同分区土壤和相关文献资料对所建模型进行验证。分别取榆林沙土、安塞沙壤土、洛川中壤土、武功重壤土进行不同膜孔直径、灌溉水深的室内单点源入渗试验，得到入渗模型为

榆林砂土($\gamma_d=1.45$g/cm³)：

$$I(t)=0.874D^{1.704}t^{\frac{1}{2}}+1.054D\cdot e^{0.09H}t \tag{9}$$

安塞砂壤土($\gamma_d=1.35$g/cm³)：

$$I(t)=1.026D^{1.676}t^{\frac{1}{2}}+0.723D\cdot e^{0.058H}t \tag{10}$$

洛川中壤土($\gamma_d=1.30$g/cm³)：

$$I(t)=0.954D^{1.675}t^{\frac{1}{2}}+0.61D\cdot e^{0.056H}t \tag{11}$$

武功重壤土($\gamma_d=1.30$g/cm³)：

$$I(t)=0.847D^{1.66}t^{\frac{1}{2}}+0.377D\cdot e^{0.052H}t \tag{12}$$

点源 4 种土壤在不同膜孔直径、灌溉水深条件下膜孔入渗试验值与计算值的对比分析结果可以看出，计算值与试验值一致性良好，说明简化模型能有效地描述充分供水条件下的点源入渗规律。

为验证本模型的可靠性，取文献[6]的定边粗沙土在土壤容积密度为 1.52 g/cm³，灌溉水深为 3 cm 时入渗试验资料对公式(8)进行验证，拟合得点源入渗模型为：

$$I(t)=5.038D^{1.427}t^{\frac{1}{2}}+4.265Dt \tag{13}$$

为便于与本模型比较，将文献中的单位膜孔面积

入渗参数值折算为单膜孔累积入渗量上入渗参数 S, A 值。将计算结果与原文献折算的 S 和 A 值对比列于表 4。可以看出,模型计算值和文献值误差较小,个别相对误差较大,可能是由于试验过程中灌溉水深变化等误差造成的。

为进一步验证模型的可靠性,用文献[14]的榆林壤土在土壤容积密度为 1.40 g/cm^3,灌溉水深为 1.5 cm时入渗试验资料用式(8)拟合得单点源入渗模型为:

$$I(t)=1.38D^{1.63}t^{\frac{1}{2}}+1.365Dt \qquad (14)$$

由入渗试验值与模型计算值对比分析结果可以看出,计算值与试验值一致性较好,说明模型能有效地描述充分供水的点源入渗规律。

表 4　典型土壤膜孔入渗 Philip 参数值与简化模型计算值对比

膜孔直径/cm	S			A		
	原文献	模型计算	相对误差/%	原文献	模型计算	相对误差/%
2	13.03	13.55	3.99	6.89	8.53	23.80
3	25.20	24.16	4.12	13.49	12.79	5.19
4	37.15	36.42	1.97	18.46	17.06	7.58
5	51.50	50.07	2.78	21.46	21.32	0.65
6	61.67	64.95	5.32	26.84	25.59	4.66

4　结论

(1) 膜孔累积入渗量与入渗时间之间的关系可以用 Philip 入渗模型表达。

(2) 在不同土壤质地、容积密度条件下,吸渗率 S 和稳渗率 A 随膜孔直径的增大而增大,稳渗率 A 随膜孔直径的增大而增大,随着灌溉水深的增大略有增大。

(3) 提出了包含膜孔直径、灌溉水深的单点源膜孔入渗简化模型。

(4) 采用多种典型土壤试验及已有文献资料验证了所建点源入渗简化模型。验证结果表明,所建简化模型待定参数少,精度较高,能较准确地反映膜孔灌点源入渗特性,可为确定合理的膜孔灌灌水技术要素组合提供理论依据。

[参 考 文 献]

[1] 王全九,来剑斌,李毅. Green—Ampt 入渗模型和 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):13-16.

[2] 邵明安,王全九,Horton R. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 I:理论分析[J]. 土壤学报,2000,37(1):1-8.

[3] 王红闪,黄明斌,董翠云. 用 Philip 模型参数推求湿润锋平均基质吸力 准确性[J]. 水土保持通报,2004,24(2):41-45.

[4] 穆天亮,王全九,王辉. 基于短历时 Philip 入渗公式的产流模型[J]. 水土保持学报,2008,22(4):62-64.

[5] 聂卫波,马孝义. 畦田 Philip 入渗参数和田面综合糙率同步推求[J]. 农业机械学报, 2009,40(5):39-44.

[6] 吴军虎,费良军,李怀恩. 充分供水条件下膜孔入渗的 Philip 模型[J]. 灌溉排水学报,2003,22(4):18-22.

[7] 虎胆·吐马尔白,木拉提. 沟底膜孔灌水条件下土壤水入渗规律的数值模拟[J]. 水科学进展,2002,13(1):69-73.

[8] 马孝义,范严伟,王术礼,等. 膜孔灌平均入渗水深简化计算模型建立与验证[J]. 农业机械学报,2009,40(8):67-73.

[9] van Genuchten M Th, Lei F J, Yates S R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils[R]. California: U. S. Salinity Laboratory, 1999.

[10] Simbnek J, Huang K, van Genuchten M Th. The SWMS-3D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Three-Dimensional Variably-Saturated Media Version 1.0[R]. California: U. S. Salinity Laboratory, 1995.

[11] 范严伟,马孝义,王波雷,等. 膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(11):35-41.

[12] 范严伟,赵文举,冀宏. 膜孔灌自由入渗土壤水分运动数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2011,37(5):61-67.

[13] 费良军,程东娟,雷雁斌,等. 膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007,35(5):212-216.

[14] 缴锡云,王文焰,张建丰. 单点膜孔入渗特性的试验研究[J]. 水利学报,1999(7): 33-39.