

微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析*

史晓楠^{1,2} 王全九^{2,3} 巨龙²

(1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 10083)

(2 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

(3 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

PARAMETERS OF PHILIP AND GREEN-AMPT MODELS FOR SOILS INFILTRATED WITH BRACKISH WATER

Shi Xiaonan^{1,2} Wang Quanjiu^{2,3} Ju Long²

(1 College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2 Institute of Water Resource, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3 State Key Lab of Soil Erosion and Dry Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

关键词 微咸水; Philip 入渗模型; Green-Ampt 模型; 矿化度

中图分类号 S152.7; S276.7 文献标识码 A

近年来,国内外学者对土壤入渗特征进行了大量研究,提出了具有不同特点和用途的入渗模型^[1-5]。随着土壤水分运动理论的发展,模型的发展日益趋于简单化、数值化、理论化,各模型之间的关系越来越紧密,许多学者试图通过对土壤入渗模型中特征参数的对比分析,建立模型参数间的关系,从而为获取相关土壤入渗参数提供手段,便于土壤入渗模型的实际应用^[6-9]。描述土壤水分入渗过程的模型很多,其中 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型具有明确的物理意义,应用较广泛。王全九等建立了 Philip 和 Green-Ampt 两个入渗模型参数间的理论关系,并用实验结果进行了合理性验证^[8]。在利用淡水入渗的情况下,发现利用 Green-Ampt 参数推求 Philip 公式的参数适用于计算短历时的累积入渗量,而利用 Philip 模型推求的 Green-Ampt 参数对于长短入渗时间的累积入渗量计算的精度都比较高。利用淡水入渗得出如

上结论,那么当用微咸水入渗时,入渗过程中发生复杂的物理化学作用,所建立的参数关系是否仍然成立?入渗水的矿化度对计算精度的影响如何?都是值得探讨的问题,需要进一步分析研究。本文利用室内进行的垂直一维微咸水入渗实验资料,分别用 Philip 和 Green-Ampt 两个入渗模型处理实验资料,分析不同水质对入渗参数的影响,并应用王全九建立的理论关系式互推模型参数,验证该公式在微咸水入渗情况下的精度及分析水质对计算精度的影响。

1 基本理论

Green-Ampt^[1]模型对入渗过程及土壤水分分布情况进行了概化,具体公式表示为:

$$i = K_s \frac{h_0 + h_f + z_f}{z_f} \quad (1)$$

* 中国科学院“百人计划”项目、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050700001)、国家自然科学基金项目(No. 40371057)资助

作者简介:史晓楠,女,辽宁人,博士研究生,主要从事土壤物理方面的研究

收稿日期:2005-11-30;收到修改稿日期:2006-06-05

$$I = (\theta_s - \theta_i)z_f \quad (2)$$

式中, i 为入渗率, cm min^{-1} ; K_s 为土壤饱和导水率, cm min^{-1} ; h_0 为土壤表面积水深度, cm ; h_f 为湿润锋面吸力, cm ; z_f 为概化的湿润锋深度, cm , 可由式(2)确定; I 为累积入渗量, cm ; θ_s 、 θ_i 分别为土壤饱和含水率和初始含水率, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 。对于入渗时间比较短, 基质势起着主要控制作用, 式(1)可简化为:

$$i = K_s \frac{h_f}{z_f} \quad (3)$$

Philip^[3]入渗模型认为任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数关系, 具体模型为:

$$i = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}} + A \quad (4)$$

式中, S 为土壤吸湿率, $\text{cm min}^{-0.5}$; t 为入渗时间, min ; A 为稳渗率, cm min^{-1} 。对于短历时的入渗, 在土壤基质势占优势的情况下, Philip 入渗模型可简化为:

$$i = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

两个模型中的 4 个基本参数分别为 S 、 A 、 K_s 、 h_f , 王全九通过分析两模型间的关系, 建立了 4 个参数间的理论关系式。在入渗历时较长时, 认为 Greer Ampt 模型中的饱和导水率与 Philip 模型中的稳渗率相等, 从而建立两模型参数间的理论关系式(6)、式(7); 在入渗时间较短时, 联立简化式(3)和式(5)建立参数之间的互推关系, 如式(8)所示。

$$\text{长历时: } h_f = \frac{S^2}{2A(\theta_s - \theta_i)} \quad (6)$$

$$K_s = A \quad (7)$$

$$\text{短历时: } S^2 = 2K_s h_f (\theta_s - \theta_i) \quad (8)$$

在实测资料分析时, 可以利用 Philip 和 Greer Ampt 模型分别处理短历时和长历时的入渗资料, 从而获得短历时条件下的基本参数 S 和 $K_s h_f$ 的值和长历时下的 4 个参数值, 同时利用式(6)、式(7)互推模型参数, 比较分析长历时条件下两模型的一致性; 利用式(8)对比分析短历时条件下两模型参数间一致性。

2 实验方法

用 4 种矿化度的微咸水在室内进行了一维垂直土柱入渗实验, 入渗水的矿化度分别为 0.5、1.0、2.0、3.0 g L^{-1} 。试验土样经过风干、碾压、过筛(2 mm)后, 均匀混合制备而成。采用常规方法测定土壤的比重为 2.654, 初始含水量为 2.78% (质量含水量), 饱和含水量为 38.5%; 采用筛分与吸管法测

定颗粒组成, 并按国际标准划分为黏壤土。将供试土样按 1.3 g cm^{-3} 的容重分层(每层 5 cm)均匀地装入土柱, 试验土柱为透明有机玻璃制成, 直径 8 cm, 高 100 cm。在实验过程中, 利用马氏瓶供水以维持恒定水头, 通过观测马氏瓶水位随时间的变化来获得土壤累积入渗量变化过程。为了保证实验资料的合理性, 对于每种处理进行了重复试验, 经分析重复试验结果基本一致。

3 结果分析

3.1 矿化度对入渗特征参数的影响分析

采用 4 种矿化度的水质进行积水入渗试验, 得到系列累积入渗量随时间变化过程, 点绘于图 1 中。分别用 Philip 和 Greer Ampt 模型对实测资料进行处理、拟合, 用简化的式(3)和式(5)对 40 min 和 120 min 的短历时数据进行拟合, 用式(1)和式(4)对 600 min 长历时的资料进行拟合, 拟合参数如表 1 所列。

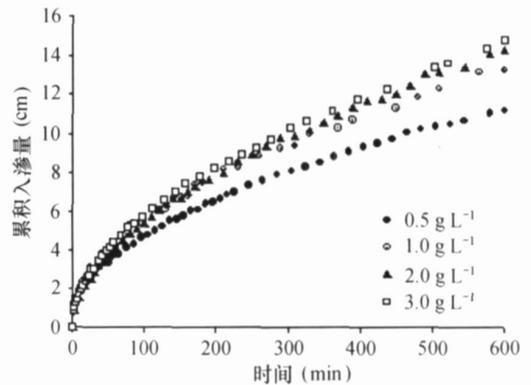


图 1 4 种水质入渗的累积入渗量

由表 1 可见, Philip 入渗公式拟合效果很好, 拟合系数 R^2 均大于 0.98。吸湿率 S 随入渗水矿化度的增大逐渐增大, 长历时拟合的稳渗率 A 亦逐渐增加, 但差异不是很明显。利用 Greer Ampt 模型拟合的拟合系数 R^2 均大于 0.95, 并且不论长、短历时资料获得的 $K_s h_f$ 值均随矿化度的增加而增大, 对于长历时资料, 拟合的 K_s 值随矿化度的增加有增大的趋势, 说明入渗水矿化度增加了土壤的透水性, 湿润锋面吸力 h_f 的值变化规律不是很明显, 可以近似认为是常数, 取平均值为 116.49。

雷志栋等^[10]曾定义 $\bar{D} = \frac{K_s h_f}{\theta_s - \theta_i}$ 表示湿润区某种平均的或有效的土壤水扩散率。由于 $(\theta_s - \theta_i)$ 为常

表1 两个入渗模型参数拟合结果

拟合参数	矿化度 (g L ⁻¹)	40 min		120 min		10 h			
		<i>S</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> ²	
Philip	0.5	0.505	0.999	0.507	0.999	0.484	0.0021	0.999	
	1.0	0.528	0.991	0.527	0.993	0.490	0.0022	0.988	
	2.0	0.536	0.999	0.539	0.998	0.510	0.0024	0.999	
	3.0	0.548	0.995	0.545	0.997	0.521	0.0026	0.994	
拟合参数	矿化度 (g L ⁻¹)	40 min		120 min		10 h			
		<i>K_s · h_f</i>	<i>R</i> ²	<i>K_s · h_f</i>	<i>R</i> ²	<i>K_s · h_f</i>	<i>K_s</i>	<i>h_f</i>	<i>R</i> ²
Greer Ampt	0.5	0.285	0.952	0.276	0.967	0.236	0.0020	117.9	0.997
	1.0	0.334	0.960	0.313	0.954	0.256	0.0022	116.2	0.979
	2.0	0.339	0.979	0.320	0.981	0.299	0.0026	115.2	0.991
	3.0	0.351	0.961	0.331	0.988	0.303	0.0026	116.6	0.985

数, 则 \bar{D} 与 $K_s h_f$ 的值呈正比, 可见参数 $K_s h_f$ 的变化直接反应土壤水扩散率的变化。由上述分析可知有效的土壤水扩散率 \bar{D} 受入渗水矿化度的影响, 随着入渗水矿化度的增加, 其值逐渐增大。可见在微咸水入渗情况下, 矿化度对土壤入渗特性的影响主要

体现在增加了土壤水扩散率, 因此相同历时下的累积入渗量随矿化度的增加而增大。

3.2 利用理论关系式互推参数的精度分析

根据表1中的拟合参数值, 利用式(6)、式(7)、式(8)分别推求 S' 、 A' 、 K'_s 和 h'_f , 计算结果见表2。

表2 两个入渗模型参数的计算值

矿化度 (g L ⁻¹)	40 min		120 min		10 h		10 h		
	S'	S'	S'	A'	$K'_s h'_f$	$K'_s h'_f$	$K'_s h'_f$	h'_f	K'_s
0.5	0.518	0.510	0.472	0.0020	0.271	0.273	0.248	118.1	0.0021
1.0	0.562	0.544	0.491	0.0022	0.295	0.294	0.255	115.8	0.0022
2.0	0.566	0.550	0.532	0.0026	0.304	0.308	0.276	114.9	0.0024
3.0	0.576	0.559	0.535	0.0026	0.318	0.315	0.288	110.6	0.0026

通过对表2数据分析, 从总的规律来看, 利用 Greer Ampt 模型参数推求的 Philip 模型参数 S' 值较拟合值 S 偏大, 相对误差不超过 7%, 且随着入渗时间的增长, 误差逐渐变小。推求的参数 A' 即 K_s 与实际拟合得到的 A 值很接近, 因此在建立理论关系式时认为两者相等是比较合理的。利用 Philip 模型参数推求的 Greer Ampt 模型参数 $K'_s h'_f$ 值较拟合值 $K_s h_f$ 均偏小 10% 左右, 推求的湿润峰面吸力 h'_f 值与拟合值较相当, 相对误差小于 5%。

为了进一步分析利用两个入渗模型相互推求参数的精度和对累积入渗量计算精度的影响, 利用计算所得到的两个入渗模型参数计算土壤累积入渗量, 并利用计算的累积入渗量与实测累积入渗量进行比较, 利用线性回归方程如式(9)分析两者的关

系, 拟合结果如表3所列。

$$I' = ml \quad (9)$$

由拟合结果可见, 根据推求参数计算的累积入渗量与实测值线性相关性很好。利用 Philip 模型参数推求 Greer Ampt 模型参数, 并计算的累积入渗量与实测数据一致性很好, 并略大于实测值, 相对误差小于 2%。同样用 Greer Ampt 模型推求 Philip 模型参数从而计算的累积入渗量与实测值相比较, 相对误差在 ±10% 之间, 计算值波动较大。

由上述分析可见, Philip 模型参数推求的 Greer Ampt 模型参数较拟合值小, 而计算的累积入渗量又比实测值大, 说明用 Philip 模型处理数据得到的参数值偏小, 而通过理论关系式换算成 Greer Ampt 模型参数再计算的累积入渗量值与实测值很接近, 拟

表 3 累积入渗量的计算值和实测值的拟合结果

矿化度 (g L ⁻¹)	Philip 推求 Greer Ampt 参数		Greer Ampt 推求 Philip 参数					
	10 h		40 min		120 min		10 h	
	<i>m</i>	<i>R</i> ²	<i>m</i>	<i>R</i> ²	<i>m</i>	<i>R</i> ²	<i>m</i>	<i>R</i> ²
0.5	1.016	0.957	0.986	0.969	1.054	0.978	1.094	0.992
1.0	1.000	0.981	0.920	0.982	0.935	0.986	1.000	0.995
2.0	1.019	0.976	1.034	0.966	1.021	0.993	1.025	0.999
3.0	1.012	0.994	0.955	0.980	0.979	0.986	1.027	0.995

合效果很好。用 Greer Ampt 模型参数推求的 Philip 参数均大于拟合值, 而计算的累积入渗量与实测值的大小变化规律不一, 其值很不稳定, 说明在微咸水入渗情况下 Philip 入渗模型所计算的入渗量对参数的反应更为灵敏。

4 结 论

本文分别利用 Philip 和 Greer Ampt 两个入渗模型对不同矿化度水质入渗条件下的试验资料进行了分析处理, 获得了两个模型的各自参数, 分析了矿化度对入渗参数的影响。应用王全九建立的理论关系式互推参数, 根据推求的参数计算累积入渗量, 并与实测累积入渗量进行了比较。得到以下结论:

1) 随着入渗水矿化度的增加, Philip 模型参数吸湿率和稳渗率逐渐增大, Greer Ampt 模型的参数 $K'_{s}h'_f$ 值和饱和导水率均有增大的趋势, h'_f 值变化幅度比较稳定。入渗水矿化度对土壤入渗特性的影响主要表现在增加了土壤水扩散率和饱和导水率, 从而使相同入渗历时内的累积入渗量随矿化度的增加而增大。

2) 拟合的稳渗率与饱和导水率相当, 利用理论关系式推求的吸湿率较拟合值偏大 7% 左右, 且随入渗历时的增加误差逐渐减小。推求的 $K'_{s}h'_f$ 值较拟合值偏小 10% 左右, 湿润峰面吸力与拟合值较接近。

3) 利用 Philip 模型参数推求 Greer Ampt 模型参

数, 并计算的累积入渗量与实测数据一致性很好, 并略大于实测值, 相对误差小于 2%。同样用 Greer Ampt 模型推求 Philip 模型参数从而计算的累积入渗量与实测值相比较, 相对误差在 ±10% 之间, 计算值波动较大, 说明 Philip 入渗模型计算入渗量对参数反应更为灵敏。

参 考 文 献

- [1] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 1911, 4(1): 1~ 24
- [2] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1940, 3: 399~ 417
- [3] Philip J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 1957, 83(5): 345~ 357
- [4] Smith R E. The infiltration envelope: Result from a theoretical infiltrometer. *Journal of Hydrology*, 1972, 17: 1~ 21
- [5] Smith R E, Parlange J Y. A parameter efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.*, 1978, 14(3): 533~ 538
- [6] 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. *土壤学报*, 2000, 37(1): 1~ 8
- [7] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. *Water Resour. Res.*, 1976, 12(3): 564~ 566
- [8] 王全九, 来建斌, 李毅. Greer Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 13~ 16
- [9] Haverkamp R, Vauclin M, Touma J, *et al.* A comparison of numerical simulation model for one dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1977, 41: 285~ 294
- [10] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*. 北京: 清华大学出版社, 1988