

添加 γ -聚谷氨酸条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 入渗模型的对比分析

梁嘉平¹, 史文娟¹, 王全九^{1,2}

(1. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地(西安理工大学), 陕西 西安 710048;

2. 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)

摘要: 干旱加剧及土壤退化严重, 使新型保水剂 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)的应用在农田节水灌溉中开始崭露头角。基于室内垂直一维入渗试验, 在分析了 γ -PGA 对土壤水分入渗能力的影响的同时还对 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型进行对比分析。结果表明: 与未施加聚谷氨酸的处理(对照组)相比, 随着 γ -PGA 施量的增加, 累积入渗量和入渗率均呈单调递减趋势; 两个入渗模型的拟合结果显示: Philip 公式中, 吸渗率呈减小趋势, Green-Ampt 公式中, 饱和导水率、饱和导水率与土壤水吸力的乘积都呈减小趋势, 但土壤水吸力无明显变化。Philip 模型与 Green-Ampt 入渗模型的对比分析结果表明: 利用模型参数互推关系计算的 Philip 模型计算参数与拟合参数的一致性较好, 而 Green-Ampt 模型的计算参数与拟合参数的一致性较差; 利用 Philip 模型计算参数计算的累积入渗量与实测累积入渗量之间的吻合程度高, 均方根误差小于 0.5, 而利用 Green-Ampt 模型计算参数计算的累积入渗量与实测累积入渗量之间的吻合程度较差, 均方根误差均大于 0.5。说明在添加保水剂的条件下采用 Philip 入渗模型确定入渗参数时较为精确。

关键词: γ -聚谷氨酸; Philip 模型; Green-Ampt 模型; 土壤入渗

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Comparison analysis of Philip model and Green-Ampt infiltration model under condition of added γ -PGA

LIANG Jia-ping¹, SHI Wen-juan¹, WANG Quan-jiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Area (Xi'an University of Technology), Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-Land Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, China)

Abstract: The application of γ -poly glutamic acid is gradually budding in water-saving irrigation, because of aggravating drought and severe soil degradation. Based on the vertical one-dimensional infiltration experiment in laboratory, analyzed the effect of γ -PGA on soil water infiltration and carried out the comparative analysis of Philip model and Green-Ampt infiltration model. The results indicated that: Compared with the control group as the treatment of no added γ -PGA, both the cumulative infiltration volume and infiltration rate total presented a monotonic decreasing trend along with increasing γ -PGA amount. The fitting results by two infiltration models were showed that: The suction and infiltration rate was presented a decreasing trend in Philip formula. The saturated hydraulic conductivity, the product by saturated hydraulic conductivity with soil water suction total presented a decreasing trend, but the soil water suction was no obvious change in Green-Ampt formula. Moreover, the results of comparison analysis by Philip model and Green-Ampt infiltration model were indicated that: The consistency of fitting parameters and calculating parameters were good in Philip model, but the consistency of parameters in Green-Ampt model was poor. The coincidence degree of the cumulative infiltration volume calculated by Philip model parameter with the measured cumulative infiltration volume was high, the root mean square error was less than 0.5. But the coincidence degree of the cumulative infiltration volume calculated by the Green-Ampt model parameters with the measured cumulative infiltration volume was poor, the root mean square error was large than 0.5. It was explained that using the Philip infiltration model should be more accurate to determine the infiltra-

收稿日期: 2016-03-09

修回日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379173); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(2011301033)

作者简介: 梁嘉平(1990—), 男, 硕士生, 研究方向为农业水土资源与生态环境。E-mail: liangjpxaut@163.com。

通信作者: 史文娟(1972—), 女, 陕西人, 博士, 教授, 主要从事农业水土资源与生态环境方面的研究。E-mail: shiwi@xaut.edu.cn。

tion parameters under the conditions of added γ -PGA.

Keywords: γ -poly glutamic acid; Philip model; Green-Ampt model; soil water infiltration

土壤水分运动旨在确定土壤含水量的分布状况、土壤水分布特性、土壤蓄水能力以及作物对土壤水分的利用程度等,为农业生产和生态环境建设提供理论基础^[1-2]。而如今土壤水分运动理论的发展已经日趋简单化、理论化、模型化,使土壤水分运动特性参数的模拟结果差异较大。因此,许多学者正试图通过各模型特点建立与土壤水分入渗特征之间的关系来获取土壤水分入渗参数,为土壤入渗模型更科学地应用提供理论依据。

Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型具有明确的物理意义及计算简单等特点,在土壤水分入渗、浑水入渗、层状土壤入渗等^[3-9]问题中得到广泛应用。同时为了获取土壤入渗参数,便于模型的推广和应用,许多学者试图通过对土壤入渗模型中的特征参数进行对比分析,进而建立模型参数间的理论关系。如在淡水入渗条件下,王全九等^[10]人首次建立了 Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型参数之间的互推理论关系,对比分析两模型,发现利用参数互推理论计算的 Philip 入渗模型计算参数来计算短历时条件下的累积入渗量时精度较高,但长历时入渗会产生一定误差,利用 Green-Ampt 模型计算参数来计算长、短时间的累积入渗量时精度都较高。为了使 Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型更好地应用于微咸水灌溉领域,史晓楠等^[11]根据王全九等^[10]建立的模型参数互推理论,利用微咸水入渗条件下的试验资料对 Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型进行对比分析,发现利用模型参数互推理论计算的 Philip 模型计算参数来计算长、短历时的累积入渗量时产生的相对误差都较大,入渗模型对参数的反应更为灵敏。这一研究结果与淡水入渗条件下的研究结果有一定的差异,可能是由于在微咸水入渗时,矿化度对入渗的影响主要表现为对粘粒的絮凝作用,有助于团粒结构的形成,导致土壤有效孔隙增多,改变了土壤的结构特性,进而使 Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型在微咸水入渗条件下的对比分析结果与淡水入渗条件下的比较结果产生了差异。

而如今干旱加剧,土壤退化现象严重,保水剂的应用已经成为农业节水灌溉的新方法和新途径,尤其是高吸水环保型新材料的应用直接关系着节水农业抗旱节水的发展方向。如许多学者^[5,12-15]认为保水剂在应用当中势必会影响到土壤结构特性发生改变,进而影响到土壤水分入渗过程和入渗参数确立的准确性。最近,史文娟等^[16]人对新型保水剂 γ

-聚谷氨酸(Poly- γ -glutamic acid, γ -PGA)进行了初期探索研究,发现添加 γ -PGA可增加土壤(0~10 cm 土层)的含水率,减小深层土壤($\geq 10 \sim 40$ cm 土层)的含水率,而含水率是影响土壤水分入渗的重要因素^[17]。也就是说, γ -PGA 改变土壤水分分布的特殊性的同时是否会影响入渗模型求解入渗参数的准确性呢?基于此,该文根据王全九等^[10]建立的模型参数互推理论,利用添加新型保水剂 γ -聚谷氨酸的入渗实验资料,就 γ -PGA 施量对土壤水分入渗能力的影响以及 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型进行了对比分析,以期入渗模型更科学地推广应用提供理论依据。

1 入渗模型

1.1 Philip 入渗模型

Philip^[1-2]入渗公式是根据垂直入渗的级数解获得的,具体入渗公式为:

$$I = St^{0.5} + At \quad (1)$$

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (2)$$

在入渗历时短和土壤基质势占优势的情况下,Philip 入渗公式可以简化为:

$$I = St^{0.5} \quad (3)$$

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} \quad (4)$$

其中, I 为累积入渗量(cm); i 为入渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); S 为土壤吸湿率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$); A 为稳渗率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为入渗时间(min)。

1.2 Green-Ampt 入渗模型

Green-Ampt^[1]入渗公式具体表示为:

$$i = K_s \frac{z_f + s_f + H}{z_f} \quad (5)$$

累积入渗量和概化湿润锋深度之间的关系为:

$$I = (\theta_s - \theta_i)z_f \quad (6)$$

当入渗时间较短,积水深度较小,基质势占主导地位的情况下,式(5)可以简化为

$$i = K_s \frac{s_f}{z_f} \quad (7)$$

入渗时间与概化湿润锋之间的关系为:

$$t = \frac{\theta_s - \theta_i}{K_s} \left[z_f - s_f \ln \frac{z_f + s_f}{s_f} \right] \quad (8)$$

联立式(6)和式(8)得到 $t \sim I$ 之间的关系式为:

$$I = K_s t + s_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I}{s_f (\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (9)$$

式中, θ_s 为饱和含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_i 为初始含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土柱表面积水深度(cm); s_f 为湿润锋面吸力(cm); K_s 为饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); z_f 为概化湿润锋深度(cm); 其它物理意义同上。

1.3 模型参数互推关系

根据王全九^[2] 等人建立两模型理论关系的假定: (1) 认为入渗历时较短情况下 Green-Ampt 入渗公式和 Philip 入渗公式中的入渗率相等, 累积入渗量也相等; (2) 长入渗历时情况下, Green-Ampt 入渗公式中的饱和导水率和 Philip 入渗公式中的稳渗率是相等的。则令式(4) 和式(7) 相等, 得:

$$S = \frac{2s_f K_s t^{0.5}}{z_f} \quad (10)$$

再将式(3) 和式(6) 代入式(10), 得:

短历时情况下:

$$S^2 = 2s_f K_s (\theta_s - \theta_i) \quad (11)$$

当入渗历时较长时 $K_s = A$, 代入式(11) 得:

长历时情况下:

$$s_f = \frac{S^2}{2A(\theta_s - \theta_i)} \quad (12)$$

2 材料与方法

2.1 供试土样

供试土样取自中国科学院长武农业生态试验站田间试验小区(35°12'N、107°40'E), 土壤容重采用环刀法测定, 为 $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 初始含水率采用烘干法测定, 为 $0.0157 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。取回土样放在干燥的实验室内风干, 并去除土样中的枯枝、残留物等, 过 2 mm 筛以留备用。采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定其机械组成, 土壤质地为粉砂质壤土, 黏粒、粉粒、砂粒体积分数分别为 3.47%、92.26% 和 4.27%。

2.2 γ -PGA 来源及其理化特性

土壤添加剂是由西安瑞林生物科技有限公司生产的分子量为 2 万的农业级别的聚谷氨酸(γ -poly-glutamic acid, γ -PGA), 别名为多聚谷氨酸或纳豆菌胶。其外观为白色粉末, 易溶于水, 主要成分为蛋白质、矿物质、维生素等, 具有超强的吸水能力和生物降解性, 其最大自然吸水倍数可达到 1 108.4 倍, 比目前市售的聚丙烯酸盐类吸水树脂高 1 倍以上, 对土壤水分的吸收倍数为 30~80 倍, 自身和降解产物无毒, 可作为土壤、植物调理剂^[16]。

2.3 试验方法

为便于观察入渗过程, 试验土柱和马氏瓶均采用厚 0.5 cm、内径 5 cm、高 46 cm 的透明有机玻璃, 供水水头控制在 1.5 cm 左右。将 γ -PGA 与上述土样按 0、0.5%、1%、2% 和 4% 配比混合均匀, 然后按容重为 $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 分层(每层 5 cm)装入有机玻璃柱内, 装填过程中, 层间刮毛以保证土壤装填均匀, 填装高度为 40 cm。此外, 在装土之前, 在有机玻璃柱底部填放滤纸, 防止土壤颗粒堵塞玻璃柱底部的出流孔口, 填装完之后, 在土壤表面再放置一层滤纸, 防止供水时期水流冲击破坏土壤表面, 并保证均匀供水。入渗过程中, 用秒表计时, 并记录湿润锋运移距离和马氏瓶中水位下降高度, 通过计算获得湿润锋和累积入渗量随入渗时间的变化关系。

3 结果分析

3.1 γ -PGA 施量对土壤入渗能力的影响

累积入渗量和入渗率均能反映土壤的入渗能力^[16,18]。因此, 对不同 γ -PGA 施量下累积入渗量和入渗率随时间的变化关系进行了分析(图 1)。由图 1a 可以看出, 入渗历时达到 100 min 时, 累积入渗量随着 γ -PGA 施量的增加逐渐拉开差距, 当入渗结束时, 累积入渗量分别减小了 22.99%、38.61%、41.49% 和 57.95%。

由图 1b 可以看出, 随着入渗的进行, 入渗率逐渐减小, 最终趋于稳定, 但随着 γ -PGA 施量的增加稳渗率表现出明显减小的趋势, 且与对照组相比, 稳渗率分别减小了 20.7%、33.02%、41.78% 和 53.85%。综上所述, 随着 γ -PGA 施量的增加, 土壤的入渗能力减弱。可能是由于 γ -PGA 在吸水饱和后呈凝胶状态, 增加了水分的黏滞性, 从而减缓了水分的流动, 降低了土壤的入渗能力^[16]。

3.2 γ -PGA 施量对 Philip 模型与 Green-Ampt 入渗模型参数的影响

为了分析 γ -PGA 施量对两个入渗模型参数的影响, 利用式(2)、式(4)、式(5)和式(7)对长、短入渗历时条件下的实测数据进行拟合处理, 分别获得 Philip 模型的拟合参数 S 、 A 及 Green-Ampt 模型的拟合参数 K_s 和 s_f , $K_s \cdot s_f$, 拟合结果见表 1。由表 1 可知, 长、短历时条件下两入渗模型的拟合效果较好, 决定系数 R^2 均在 0.966 以上。Green-Ampt 模型中, 随着 γ -PGA 施量的增加, 饱和导水率 K_s 呈减小趋势, 并且短历时条件下饱和含水率与湿润锋面吸力的乘积($K_s \cdot s_f$)也逐渐减小, 但湿润锋面吸力 s_f 无明

显变化规律;Philip 模型中,随着 γ -PGA 施量的增加,吸渗率 S 和稳渗率 A 均呈逐渐减小的变化规律,且长入渗历时条件下吸渗率 S 的拟合值略小于短历时条件下的拟合值。

3.3 Philip 模型与 Green-Ampt 入渗模型参数计算值与拟合值一致性分析

为了对比分析 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型,利用模型参数互推理论^[10]计算两个入渗模型的计算参数。根据式(11)和式(12)(模型参数互推理论),利用上述长、短历时条件下两个入渗模型的拟合参数计算 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型的计算参数(表 2)。由表 2 可知,在 Philip 模型中,计算参数吸渗率 S' 大于其拟合值,且随着 γ -PGA 施量

的增加呈减小趋势;在 Green-Ampt 模型中,计算参数湿润锋面吸力 s_f' 和 $K_s' \cdot s_f'$ 均小于其拟合值。

对两入渗模型的计算参数和拟合参数进行线性回归分析(表 3)。由表 3 可知,线性拟合效果较好,决定系数 R^2 均大于 0.97,并对两入渗模型的计算参数和拟合参数进行误差分析,发现长、短历时条件下 Philip 模型计算参数吸渗率 S' 与拟合参数 S 之间的相对误差分别为 8.4%和 12.78%,计算参数与拟合参数一致性较好;而 Green-Ampt 模型的计算参数湿润锋吸力 s_f' 和 $K_s' \cdot s_f'$ 与其拟合值之间的相对误差分别为 14.6%和 -18.35%,计算参数与拟合参数一致性较差。

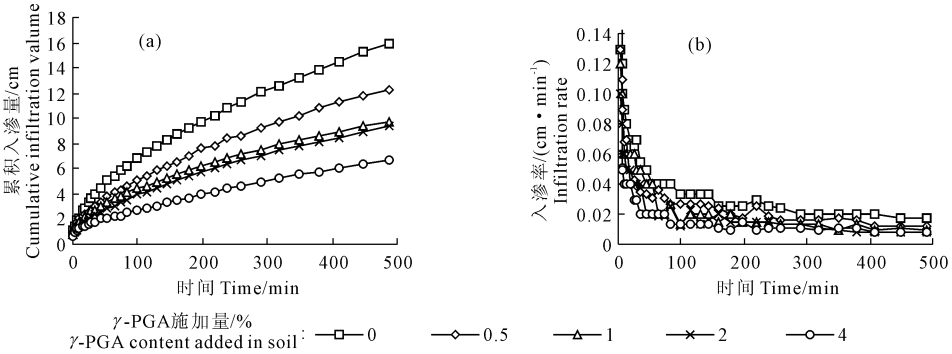


图 1 γ -PGA 施量对累积入渗的影响

Fig.1 Influence of γ -PGA amount on cumulative infiltration

表 1 长、短历时条件下 Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型参数的拟合值

γ -PGA 施加量 Added γ -PGA amount/%	Green-Ampt 模型参数 Parameters of Green-Ampt model					Philip 模型参数 Parameters of Philip model				
	500 min			250 min		500 min			250 min	
	K_s	s_f	R^2	$K_s \cdot s_f$	R^2	S	A	R^2	S	R^2
0	0.0043	107.93	0.98	0.5214	0.99	0.605	0.0044	0.993	0.641	0.993
0.5	0.0041	57.25	0.99	0.3082	0.99	0.441	0.0038	0.966	0.471	0.968
1	0.0034	47.85	0.98	0.2137	0.98	0.371	0.0031	0.984	0.396	0.983
2	0.0032	41.18	0.96	0.1788	0.98	0.317	0.003	0.982	0.343	0.978
4	0.0011	66.97	0.98	0.0836	0.98	0.243	0.001	0.983	0.25	0.984

表 2 长、短历时条件下 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型参数的计算值

γ -PGA 施加量 Added γ -PGA amount /%	Green-Ampt 模型参数 Parameters of Green-Ampt model			Philip 模型参数 Parameters of Philip model		
	500 min		250 min	500 min		250 min
	S'	A'	S'	K_s'	s_f'	$K_s' \cdot s_f'$
0	0.6504	0.0043	0.6894	0.0044	91.15	0.4504
0.5	0.4701	0.0041	0.5387	0.0038	54.33	0.2356
1	0.3929	0.0034	0.4503	0.0031	46.69	0.1652
2	0.3639	0.0032	0.4238	0.0030	33.41	0.1168
4	0.2778	0.0011	0.2960	0.0010	56.44	0.0598

表 3 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型参数拟合值与计算值回归分析

Table 3 The regression analysis of calculated value and fitting value for the parameters of Green-Ampt model and Philip model

入渗模型 Infiltration model	Green-Ampt 模型参数 Parameters of Green-Ampt model		Philip 模型参数 Parameters of Philip model	
	500 min	250 min	500 min	250 min
回归方程 Regression equation	$S = 1.084S'$	$S = 1.128S'$	$s_f = 1.146s'_f$	$K_s \cdot s_f = 0.8165 K'_s \cdot s'_f$
决定系数 R^2 Determine coefficient	0.99	0.97	0.97	0.98
相对误差 Relative error/%	8.4	12.78	14.6	-18.35

3.4 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型参数计算值对累积入渗量计算精度的影响分析

为了进一步对 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型进行对比分析,根据式(1)、式(3)和式(9),利用 Philip 模型计算参数和 Green-Ampt 模型计算参数(S', A', K'_s, s'_f 和 $K'_s \cdot s'_f$)计算长、短历时条件下的累积入渗量(见图 2)。由图 2a 和图 2b 可知,在长、短历时条件下,利用模型参数互推理论得到的 Philip 模型计算参数(S', A')计算的累积入渗量(I_p)与实测累积入渗量(I)吻合较好;而由图 2c 可知,利用 Green-Ampt 模型计算参数(K'_s, s'_f)计算长历时条件下的累积入渗量(I_c)与实测累积入渗量(I)吻合较差。

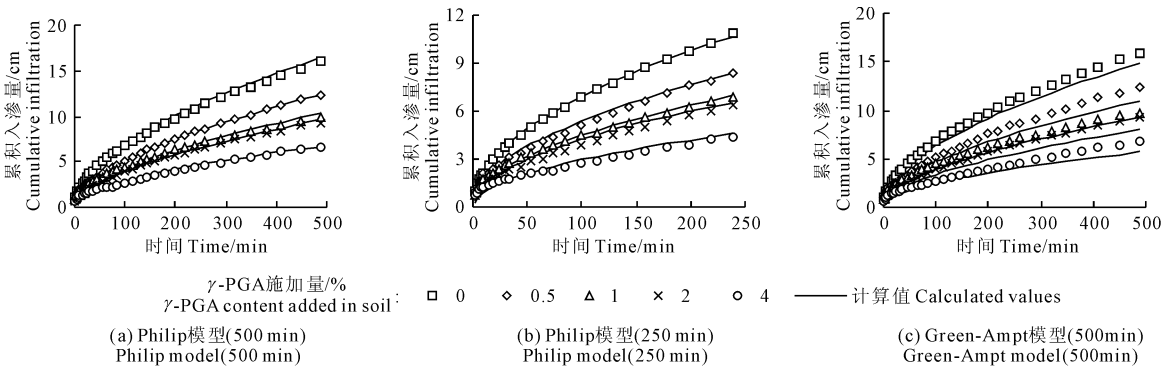
为了更全面地分析(图 2),对计算累积入渗量与实测累积入渗量进行线性回归(结果见表 4)。由表 4 可知,线性回归效果较好,决定系数 R^2 均大于 0.963。发现利用 Philip 模型计算参数(S', A')计算长、短历时条件下的累积入渗量(I_p)与实测累积入渗量(I)符合 $I_p = mI$ (其中, m 为常数)的线性关系。其中常数 m 基本接近于 1,再对 I_p 与 I 进行误差分析,均方根误差(RMSE)均小于 0.5,说明 I_p 与 I 吻合程度较高。同时利用 Green-Ampt 模型计算参数(K'_s, s'_f)计算长历时条件下的累积入渗量(I_c)与实测累积入渗量(I)也符合 $I_c = nI$ (其中, n 为常数)

的线性关系,但 n 与 1 的偏离程度较大,再对 I_c 与 I 进行误差分析,发现均方根误差(RMSE)均大于 0.5,说明 I_c 与 I 的吻合程度较差。也就是说,利用模型参数互推理论计算的 Philip 模型计算参数对累积入渗量的计算精度影响不大,而 Green-Ampt 模型计算参数对累积入渗量的计算精度影响较大。

综上所述,利用模型参数互推理论计算的模型参数对 Philip 模型的影响较小,对 Green-Ampt 模型的影响较大,也就是说与 Philip 入渗模型相比,Green-Ampt 模型对参数精度的要求更高,对参数的灵敏性更强。因此,在添加保水剂的条件下使用 Philip 入渗模型确定入渗参数的准确性更好。这一结果与淡水入渗条件下^[10]及微咸水入渗条件下^[11]的结果不一致。可见,在添加保水剂的条件下对 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型的对比分析及应用具有重要的意义。

4 结 论

该文在添加保水剂(γ -PGA)的条件下,分析了 γ -PGA 施量对土壤入渗能力及 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型参数的影响,同时还利用王全九^[10]等提出的模型参数互推理论对不同 γ -PGA 施量条件下 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型进行对比分析,得到如下结论:



注:点为实测值,线为计算值。 Note: Points represent measured values, the lines represent calculated values.

图 2 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型参数的计算值对累积入渗量计算精度的影响

Fig.2 The influence of calculated parameters of Green-Ampt model and Philip model on calculating precision of cumulative infiltration volume

表 4 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型累积入渗量的计算值与实测值回归分析
Table 4 The regression analysis of calculated and measured cumulative infiltration volume for
Green-Ampt infiltration model and Philip model

γ -PGA 施加量 Added γ -PGA amount/%	Green-Ampt 模型参数 Parameters of Green-Ampt model						Philip 模型参数 Parameters of Philip model		
	500 min			250 min			500 min		
	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determine coefficient	均方根 误差 RMSE	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determine coefficient	均方根 误差 RMSE	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determine coefficient	均方根 误差 RMSE
0	$I_p = 1.0243I$	0.999	0.262	$I_p = 0.9988I$	0.999	0.117	$I_G = 0.9288I$	0.999	0.63
0.5	$I_p = 0.993I$	0.996	0.226	$I_p = 1.0197I$	0.991	0.238	$I_G = 0.8933I$	0.997	0.74
1	$I_p = 1.0041I$	0.987	0.334	$I_p = 0.9962I$	0.988	0.219	$I_G = 1.0994I$	0.988	0.57
2	$I_p = 1.013I$	0.996	0.180	$I_p = 1.055I$	0.992	0.257	$I_G = 0.854I$	0.997	0.75
4	$I_p = 1.0105I$	0.985	0.233	$I_p = 1.0343I$	0.963	0.264	$I_G = 0.8684I$	0.985	0.51

(1) 添加 γ -PGA 降低了土壤的入渗能力。与对照组相比,随着 γ -PGA 施量的增加,累积入渗量呈减小趋势,且分别减小了 22.99%、38.61%、41.49% 和 57.95%;入渗率也呈逐渐减小的趋势,且稳渗率分别减小了 20.7%、33.02%、41.78% 和 53.85%;利用长、短历时条件下的 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型对入渗资料进行拟合处理,其结果显示,随着 γ -PGA 施量的增加,Philip 入渗模型中吸渗率 S 呈减小趋势,Green-Ampt 入渗模型中饱和导水率 K_s 及 $K_s \cdot s_f$ 也呈减小趋势,湿润锋面吸力 s_f 无明显变化规律。

(2) Philip 入渗模型计算的累积入渗量更为精确,与 Philip 模型相比,Green-Ampt 模型对参数的敏感性更强,计算的累积入渗量偏差较大,在添加保水剂的条件下使用 Philip 入渗模型确定水力参数准确性较好。利用长、短历时条件下模型参数互推关系计算的 Philip 模型参数吸渗率 S' 与拟合值 S 产生的相对误差分别为 8.4% 和 12.78%,一致性较好,而计算的 Green-Ampt 模型参数湿润锋吸力 s'_f 和 $K'_s \cdot s'_f$ 与拟合值之间的相对误差分别为 14.6% 和 -18.35%,一致性较差;分别利用长、短历时条件下 Philip 模型和 Green-Ampt 模型的计算参数计算累积入渗量,发现 Philip 模型计算参数计算的累积入渗量与实测累积入渗量之间的均方根误差小于 0.5,而 Green-Ampt 模型计算的累积入渗量与实测累积入渗量之间的均方根误差均大于 0.5,这说明 Philip 入渗模型计算的累积入渗量更为精确,而 Green-Ampt 模型次之。可见,在添加保水剂的条件下对 Philip 模型和 Green-Ampt 入渗模型进行比较对促进模型的改进及保水剂的推广应用具有重要的意义。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤水分运动与溶质迁移[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[3] 裴青宝,赵新宇,张建丰,等.容重对红壤水平入渗特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):111-114.

[4] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2014,28(1):53-57.

[5] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.

[6] 王文焰,汪志荣,王全九,等.黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J].水利学报,2003,34(5):30-34.

[7] 李援农,费良军.土壤空气压力影响下的非饱和入渗格林-安姆特模型[J].水利学报,2005,36(6):733-736.

[8] 汪志荣,王文焰,王全九,等.浑水波涌灌溉入渗机制及其 Green-Ampt 模型[J].水利学报,1998,29(10):44-48.

[9] 王全九,邵明安,汪志荣,等.Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):66-70.

[10] 王全九,来剑斌,李毅.Green-Ampt 模型与 Philip 模型比较[J].农业工程学报,2002,18(2):13-16.

[11] 史晓楠,王全九,巨龙.微咸水入渗条件下 Philip 入渗模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析[J].土壤学报,2007,44(2):360-363.

[12] 白文波,宋青青,李茂松,等.保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):18-23.

[13] 王成志,杨培岭,任树梅,等.保水剂对滴灌土壤湿润体影响的室内实验研究[J].农业工程学报,2006,22(12):1-7.

[14] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等.保水剂对土壤持水性状的影响[J].水土保持通报,2003,23(6):44-46.

[15] 王慧勇,张宏,刘世虹,等.保水剂混施用量对沙质土壤水分垂直入渗特性的影响[J].水土保持研究,2011,18(6):22-24.

[16] 史文娟,梁嘉平,陶汪海,等.添加 γ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J].农业工程学报,2015,31(23):94-100.

[17] 王全九,叶海燕,史晓南,等.土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J].水土保持学报,2004,18(1):51-53.

[18] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力 & 参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.