

文章编号:1672-3317(2012)02-0073-05

Philip模型与修正的Green-Ampt模型 互推参数的特性分析

范文涛¹, 牛文全^{1,2}, 张振华³, 甲宗霞¹(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院/水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 鲁东大学 地理与规划学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 通过室内试验方法利用 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型对 3 种土壤水平一维入渗进行了分析, 对 Green-Ampt 入渗模型的含水率分布进行了修正从而改进二模型参数的互推公式, 根据互推参数分别计算累积入渗量, 并与实测值进行比较。结果表明, 修正模型能很好地反应土壤入渗性能, 随着土壤粘性的增加, Philip 模型参数吸湿率 S 和 Green-Ampt 模型参数 k_s, s_f 都逐渐减小, 用 Philip 模型推求修正的 Green-Ampt 模型参数 k'_s, s'_f 具有较高的精度, 且对于不同质地土壤的入渗表现出不同程度的正效应, 此互推公式可应用于不同土壤水平入渗的试验研究。

关键词: Philip 模型; 修正 Green-Ampt 模型; 互推参数

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

范文涛, 牛文全, 张振华, 等. Philip 模型与修正的 Green-Ampt 模型互推参数的特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 73-77.

国内外许多学者都试图通过对土壤水分入渗模型中特征参数的对比分析, 建立不同模型参数间的相关关系, 以便土壤水分入渗模型在实际生产中得到更加广泛的应用^[1-2]。一些学者通过垂直入渗试验分析了 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型^[2-4], 对于水平入渗及测试方法方面, 毛丽丽等^[5]通过对 Green-Ampt 模型中含水率分布进行了修正, 同时分析了该修正模型在水平入渗中的计算精度; 但是只对一种质地土壤进行了测试, 其具体的应用扩展性如何, 以及经过修正后参数间的关系如何还有待于进一步的探讨和验证。基于上述问题, 利用 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型分别对 3 种不同土壤质地进行水平一维入渗短历时试验, 根据测试结果对 Green-Ampt 入渗模型中含水率分布进行修正, 建立二模型参数的相互关系, 并验证修正模型对水平入渗精度的影响及产生误差的原因分析。

1 基本理论

应用 Green-Ampt 模型分析水平土柱一维入渗时, 由达西定律可以建立入渗率的关系式:

$$i = k_s \frac{S_f}{x_f} \quad (1)$$

式中: i 为入渗率 (cm/min); k_s 为土壤饱和导水率 (cm/min); s_f 为湿润锋面吸力 (cm); x_f 为湿润锋水平推进距离 (cm)。

根据 Green-Ampt 模型的基本假定, 累积入渗量与概化的水平湿润锋推进距离的关系:

$$I = (\theta_s - \theta_0) x_f \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量 (cm); θ_s, θ_0 分别为土壤饱和及初始含水量 (cm³/cm³)。

Green-Ampt 模型计算误差主要是由于该模型的假定所导致, 文献[6]提出了 Green-Ampt 模型的含水

* 收稿日期: 2011-07-16

基金项目: “十二五”国家 863 计划课题(2011AA100507); 农业转化资金项目(2010GB2G000470)

作者简介: 范文涛(1983-), 男, 山西长治人。硕士研究生, 研究方向为节水灌溉新技术。E-mail: fwentao_good@163.com

通讯作者: 牛文全(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事灌溉理论与节水新技术研究。E-mail: nwq@vip.sina.com

量修正方法,并引入了临界含水量与平均饱和含水量的概念,较好地解决了 Green-Ampt 模型对含水量分布夸大假定引起的误差问题:

$$I = (\bar{\theta}_s - \theta_0)x_f = \left(\frac{\theta_s + \theta_i}{2} - \theta_0\right)x_f \quad (3)$$

式中: $\bar{\theta}_s$ 为线性均化的饱和含水量(cm^3/cm^3); θ_i 为临界含水量(cm^3/cm^3)。

Philip 入渗模型:

$$I_0 = St^{1/2} \quad (4)$$

其入渗率为:

$$i_0 = \frac{1}{2}St^{-1/2} \quad (5)$$

式中: I_0 为累计入渗量(cm); i_0 为入渗率(cm/min); S 为土壤吸湿率($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$)。

文献[2]通过分析 Philip 模型和 Green-Ampt 模型,建立了 k_s 、 s_f 、 S 三个参数间的理论关系,从而把二模型有机地结合起来,并在垂直试验中进行试验验证。按照以上思路联立式(1)和式(5)并结合式(3)和式(4)得到短历时水平一维入渗 Philip 模型和修正的 Green-Ampt 模型参数间的互推关系,如式(6):

$$S^2 = 2k_s s_f (\bar{\theta}_s - \theta_0) \quad (6)$$

2 试验装置及方法

试验在西北农林科技大学农业水土工程教育部重点实验室进行。采用扰动土进行室内水平土柱一维入渗试验。整个试验系统包括水平土柱、供水装置和升降台,测定时室内温度控制在 $18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验土柱由长 40 cm 、直径 5 cm 的有机玻璃圆柱制成。内有长 8 cm 的供水水室保证入渗处于充分供水状态,侧壁每隔 2 cm 开一个直径为 6 mm 的圆形取土孔,用于提取土样测定土柱含水量;供水装置采用马氏瓶,保证恒定水头自动供水。装置如图 1 所示。

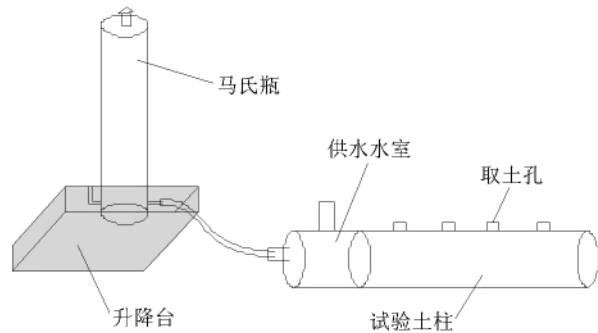


图 1 水平土柱入渗装置示意图

试验选用 3 种不同质地的土壤,分别取自杨凌、烟台和安塞,利用筛分法和吸管法进行土壤颗粒分析。按照国际土壤分类标准,3 种土样质地分别为粉质粘壤土、砂壤土、沙壤土,分析结果如表 1 所示。土样经风干、碾压、过筛后,分别按照设计土壤密度分层(2 cm)均匀装入试验土柱,在试验过程中根据由密到疏的原则,用秒表定时,记录马氏瓶水位变化,计算得到土壤的累积入渗量,同时观测湿润锋的位置变化。试验结束后取土样测定含水量,确定其含水量分布。为了保证试验资料的合理性,对于每种供试土壤进行了 3 次重复试验,经分析重复试验结果基本一致。

表 1 供试土壤的机械颗粒组成

土样	土样来源	机械颗粒组成			土壤质地 (国际制)
		黏粒($<0.001 \text{ mm}$) 质量分数	粉粒($0.001 \sim 0.05 \text{ mm}$) 质量分数	砂粒($0.05 \sim 2 \text{ mm}$) 质量分数	
壤土	杨凌	3.62	78.80	16.58	粉粘壤土
棕壤土	烟台	3.98	51.00	45.01	砂壤土
黄绵土	安塞	15.72	51.47	32.81	沙壤土

3 结果与分析

3.1 修正的 Green-Ampt 模型含水量分布

为对比分析 Green-Ampt 修正模型含水量分布的优越性,点汇含水量与湿润锋推进距离之间的变化关系(图 2)。此简化模型通过对湿润区含水量分布的线性拟合,忽略了湿润锋厚度,同时假定临界含水量(θ_i)为恒定值,只与土壤本身特性相关。由图 2 可以直观地看出阴影部分面积为 Green-Ampt 模型对含水量夸大后比实际入渗增加的水量。修正模型平均饱和含水量($\bar{\theta}_s$)可更加精确地反应水平土柱中水分的入渗能力。

根据 3 种土壤水平入渗试验数据,对 Green-Ampt 模型的含水量进行线性修正,其修正后的参数见表 2。

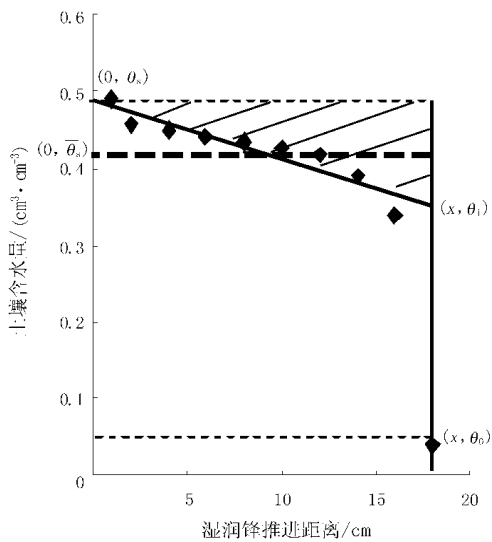


图2 修正的含水率分布示意图

表2 不同土样含水量参数 cm^3/cm^3

土样	θ_0	θ_s	θ_i	$\bar{\theta}_s$	$\theta_s - \theta_0$	$\bar{\theta}_s - \theta_0$
壤土	0.04	0.48	0.35	0.42	0.44	0.38
棕壤土	0.07	0.48	0.36	0.42	0.41	0.35
黄绵土	0.02	0.45	0.35	0.40	0.43	0.38

由表2可以看出,3种土壤的饱和含水量 θ_s 维持在0.45~0.48的范围内,湿润锋处的含水量即临界含水量 θ_i 在0.35左右相差不大。

为对比分析 Green-Ampt 修正模型含水量分布同实际土壤入渗能力的关系和其对3种不同土壤的适用性,由式(2)中实际累计入渗量和水平湿润锋之间的线性关系(图3)可以拟合得出湿润体土柱的平均含水量 $\bar{\theta}_0$ 。

由图3可知,水平一维入渗条件下,壤土、棕壤土、黄绵土3种不同土壤的累积入渗量和湿润锋之间呈良好的线性关系,其拟合直线斜率的物理意义为 Green-Ampt

模型的平均含水量 $\bar{\theta}$,分别为0.3742、0.3180、0.3715 cm^3/cm^3 ;拟合方程的决定系数(R^2)分别为0.9978、0.9960、0.9977,达极显著水平,说明由累积入渗量和水平湿润锋拟合得到的平均含水量,可以很好的反应水平入渗特性。由表2所得到的 Green-Ampt 模型修正模型含水量分别为0.38、0.35、0.38 cm^3/cm^3 ,与上述平均含水量 $\bar{\theta}$ 相比略微偏大,其相对偏差分别为1.55%、9.14%、2.29%。以上分析表明对含水量模型线性修正和假定的 Green-Ampt 模型虽然同实际的入渗能力相比还是略微偏大但相对偏差较小,比传统的 Green-Ampt 模型更接近土壤真实的入渗能力。

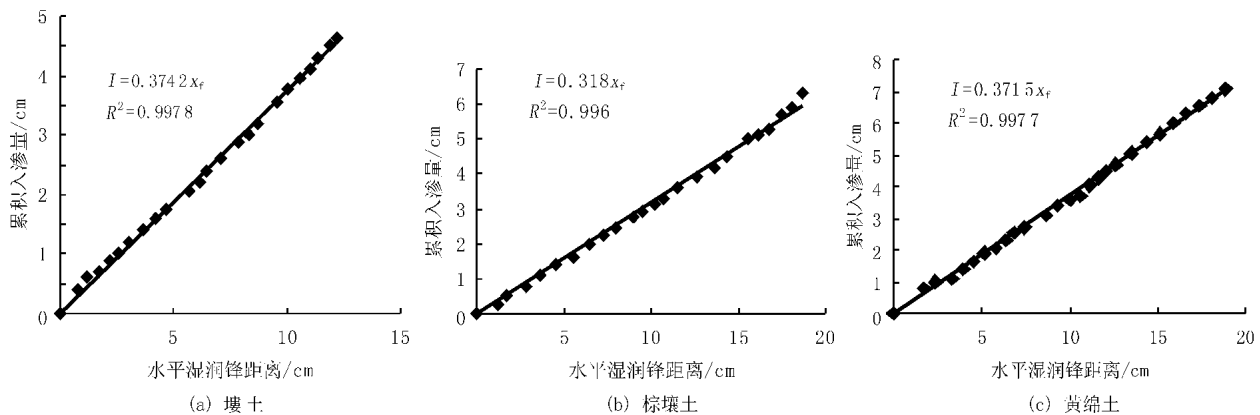


图3 累积入渗量与水平湿润锋的关系

3.2 不同土壤对入渗特征参数的影响

利用3种不同土壤进行水平土柱一维入渗试验,得到累计入渗量与时间的关系,如图4所示。分别用 Philip 模型和 Green-Ampt 模型对实测的入渗资料进行处理、拟合,用式(1)和式(5)对3种不同土壤的短历时数据进行拟合,拟合参数如表3所示。

表3 二模型参数的拟合关系

土样	Philip 模型参数		Green-Ampt 模型参数	
	S	R^2	$k_s s_f$	R^2
壤土	0.203	0.9495	0.119	0.9155
棕壤土	0.285	0.9739	0.237	0.9717
黄绵土	0.302	0.9527	0.240	0.9347

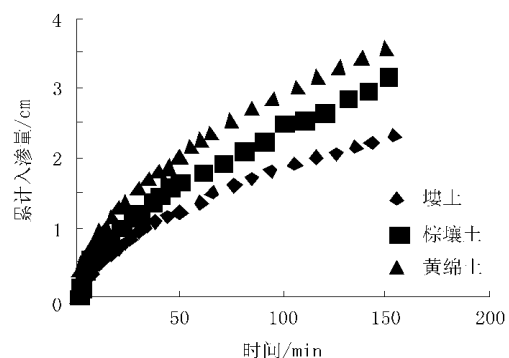


图4 累计入渗量与时间的关系

由表3可知,Philip 入渗模型拟合效果较好,其拟合的决定系数 R^2 均在0.95以上。吸湿率(S)随着土

壤粘性的增加逐渐减小,土壤由粘性土变为沙性土时其值逐渐增大。而传统的 Green-Ampt 模型拟合的决定系数 R^2 在 0.91 以上,拟合的 $k_s s_f$ 值也具有相同的规律,随着土壤粘性的增加而逐渐减小。

平均土壤水分扩散率受土壤质地的影响,随着土壤粘性的增加平均水分扩散率逐渐减小,因此累积入渗量随土壤粘性的增加而减小。

3.3 二模型互推参数的精度分析

根据表 3 中二模型拟合的参数并结合式(6)分别相互推求经过含水率修正后的参数值,修正 Green-Ampt 推求 Philip 参数 $S'(G-P)$,壤土为 0.214,棕壤土为 0.302,黄绵土为 0.318;Philip 推求修正 Green-Ampt 参数 $k'_s s'_f(P-G)$,壤土为 0.114,棕壤土为 0.226,黄绵土为 0.234。

通过互推参数 $S', k'_s s'_f$ 的数据分析,利用修正 Green-Ampt 入渗模型推求 Philip 模型参数 S' 值较拟合值 S 偏大,其相对误差在 6%左右;而利用 Philip 模型推求修正的 Green-Ampt 入渗模型参数 $k'_s s'_f$ 值较拟合值 $k_s s_f$ 偏小,相对误差小于 5%。

为准确分析二模型互推参数的精度和对 3 种不同土壤的入渗效应,利用互推参数分别计算 3 种土壤的累积入渗量,将实测值也点绘在图上,结果如图 5 所示。

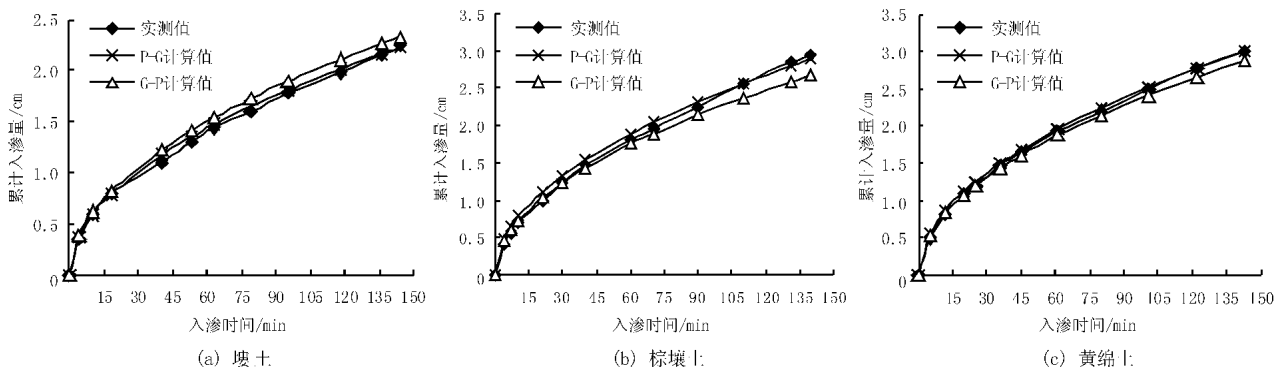


图 5 不同土壤入渗测试对比

由图 5 可知,2 种模型互推参数计算的累积入渗量同实测值都比较接近,但对于不同的土壤略有不同。从总的入渗情况来看,杨凌壤土中由二模型互推参数所计算的累积入渗量均大于实测值,而其他 2 种土壤则没表现出类似的规律。这可能与土壤质地有一定的关系,杨凌壤土属于粉质壤土,有比较强的持水能力,并且在土壤组成方面有其特殊的构成,所以在 2 种模型应用到此种土壤入渗时会出现计算值比实测值偏大的现象。从土壤局部的入渗情况可以看出,在入渗的初始阶段,壤土、棕壤土和黄绵土 3 种土壤的入渗速度都比较快,在入渗 10 min 时由 Philip 推求修正的 Green-Ampt 参数所计算的累积入渗量与实测值的相对误差分别为 -2.62%、13.17%、6.03%;而由修正的 Green-Ampt 推求 Philip 的计算值与实测值的相对误差分别为 2.5%、4.61%、1.39%。由此可知前者的相误差较高,这是因为入渗初期水分通量比较大,使前段土壤的结构发生了变化,导致水动力发生突变,这种变化对前者参数的反应比较敏感,对后者参数的反应弱一些,随着入渗历时的延长,入渗速率趋于稳定,3 种土壤达到一种稳定的入渗状态。在入渗到 80 min 时,由 Philip 推求修正的 Green-Ampt 参数所计算的累积入渗量与实测值的相对误差分别为 2.4%、4.14%、2.04%,与入渗 10 min 时相比相对误差明显减小,并且这种误差减小的趋势随着时间的延长更加突出,入渗到 150 min 时,其相对误差分别为 -1.05%、-3.18%、-1.07%,而由修正的 Green-Ampt 推求 Philip 计算值与实测值在入渗 80 min 和 150 min 时的相对误差分别为 8.05%、-3.74%、-2.43%和 3.69%、-12.41%、-4.54%,其相对误差随着入渗历时的延长波动性比较强,并且有增大的趋势。以上这些差异在不同质地的土壤中规律一致,但是表现的却不尽相同,其中烟台棕壤土表现更明显,杨凌壤土次之,安塞黄绵土最小。

4 结论

1)水平入渗条件下累积入渗量和水平湿润锋呈良好的线性关系,其斜率为湿润体土柱的平均含水量($\bar{\theta}$),能反应土壤的实际入渗能力;修正的 Green-Ampt 模型含水量分布与平均含水量相比虽略微偏大,但相对偏差较小,能很好的反应土壤的水平入渗特性,对不同的土壤质地具有应用扩展性。

2)随着土壤粘性的增加,Philip 模型参数吸湿率(S)和传统的 Green-Ampt 模型参数 $k_s s_f$ 都逐渐减小,土壤的平均水分扩散率也相应减小,从而使相同入渗历时内的累积入渗量也具有同样的规律。

3)在入渗的初始阶段,由于水分通量较大,导致土壤结构突变,使互推参数所得到的累积入渗量与实测值的相对误差偏大一些,并且参数对土壤的入渗具有时效性,随着入渗历时的延长,由 Philip 推求修正的 Green-Ampt 参数对入渗表现出一定的正效应,计算精度相对较高;而修正的 Green-Ampt 推求 Philip 参数对入渗则表现出负效应,对参数的敏感性较强计算值与实测值相比不稳定,且波动性较大。

参考文献:

- [1] 汪志荣,王文焰,王全九. 浑水波涌的入渗机制与 Green-Ampt 公式[J]. 水利学报,1998,(10):44-48.
- [2] 王全九,来建斌,李毅. Green-Ampt 与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):13-16.
- [3] 张振华,潘英华,蔡焕杰,等. Green-Ampt 模型入渗率显式近似解研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(4):308-311.
- [4] 史晓楠,王全九,巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报,2007,44(2):360-363.
- [5] 毛丽丽,雷廷武,刘汉,等. 用水平土柱和修正的 Green-Ampt 模型确定土壤的入渗性能[J]. 农业工程学报,2009,25(11):35-38.
- [6] 毛丽丽,雷廷武. 用水平土柱估算土壤入渗性能和水分布简化模型方法[J]. 农业机械学报,2011,42(1):49-58.

Characteristic Analysis of Philip Model and Modified Green-Ampt Model Push Each Parameters

FAN Wen-tao¹, NIU Wen-quan^{1,2}, ZHANG Zhen-hua³, JIA Zong-xia¹

(1. College of water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Geography and Planning Department of Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: The analyses of one-dimensional soil water infiltration in 3 soils were studied through laboratory testing methods used by Philip and Green-Ampt infiltration model. The moisture content of Green-Ampt infiltration model was adjusted to improve the distribution of two model parameters. According to the push each formula, the cumulative infiltration was calculated respectively and was compared with the measured values. The results showed that the modified model can well reflect the soil infiltration properties. The absorption rate (S) of Philip model parameters and Green-Ampt model parameters ($k_s s_f$) were gradually reduced with the soil viscosity increased. The accuracy of Green-Ampt model parameters ($k'_s s'_f$) were high by Philip model modified and showed different degrees of positive effect. It is confirmed that this push each formula could be used to different levels of soil infiltration studied.

Key words: Philip model; modified Green-Ampt model; push each parameters