

Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析

王全九¹, 来剑斌², 李毅²

(11 中国科学院地理科学与资源研究所; 21 西安理工大学)

摘要: 土壤入渗是田间水循环的重要组成部分, 国内外学者提出了具有不同特点和用途的入渗模型。该文通过对比分析了具有明确物理意义的 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型, 建立了两模型参数间的内在关系, 并利用一维垂直入渗实验资料对理论关系进行了比较。发现 Philip 入渗模型对参数精度要求较高, 而 Green-Ampt 入渗模型对参数要求较低。

关键词: Philip 入渗模型; Green-Ampt 入渗模型; 积水入渗

中图分类号: S15217; S27617

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0220013204

土壤入渗过程是田间土壤水分循环的重要组成部分, 国内外学者已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, 并在水文产流计算、农田灌溉、农田排水、地下水补给等问题的研究中广泛应用。随着土壤水运动理论的发展, 人们试图通过对土壤入渗模型中特征参数的对比分析, 建立各种模型参数间关系, 并建立这些参数与土壤基本特征间关系, 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。目前常用的入渗模型较多^[2-4], 其中 Holton (1961) 入渗公式属于概念性模型, 而 Kosjiaikov, A. N 和 Horton 模型属于经验性公式, 没有明确物理基础。Green-Ampt 和 Philip 入渗模型具有明确物理意义, 便于建立其特征参数与土壤物理特征间关系, 并得以广泛应用。邵明安^[6]等利用 Philip 入渗公式推求土壤水分运动参数。而 Green-Ampt 入渗公式不仅用于均质土壤入渗过程的模拟研究, 而且用于研究层状土、浑水入渗问题^[7,8]。本文对两入渗模型进行对比分析, 建立参数间理论关系, 并利用室内模拟实验资料, 验证所建立的理论关系的合理性, 以及对比分析两模型的准确性。

1 基本理论

Green-Ampt (1911) 假定在积水入渗过程中, 土壤含水率剖面中存在陡的湿润锋面, 在湿润锋面与土表面间的土壤处于饱和状态, 同时湿润锋面处存在一个固定不变的吸力。Green-Ampt 入渗模型

具体表示为

$$i = k_{s1} \left(\frac{h_0 + h_f + z_f}{z_f} \right) \quad (1)$$

式中 i ——入渗率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; k_{s1} ——土壤表征饱和导水率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 有时称为饱和导水率, 主要取决于土壤封闭空气对入渗的影响程度; h_0 ——土壤表面积水深度, cm ; h_f ——湿润锋面吸力, cm ; z_f ——概化的湿润锋深度, cm 。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

$$i = k_{s1} \left(\frac{h_f}{z_f} \right) \quad (2)$$

在 Green-Ampt 入渗模型中主要包括两个特征参数, 即土壤表征饱和导水率和湿润锋面吸力。而表面积水深度可以根据实验条件来决定, 概化湿润锋深度可以根据累积入渗量确定, 具体表示为

$$I = (H - H_0) z_f \quad (3)$$

式中 I ——累计入渗量, cm ; H ——土壤饱和含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; H_0 ——初始土壤含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

对于 Green-Ampt 入渗模型而言, 只要获得土壤饱和导水率和湿润锋面吸力就可以计算土壤的入渗特性。

Philip (1957) 认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数关系, 具体入渗模型为

$$i_0 = \frac{1}{2} S t^{-0.15} + A \quad (4)$$

式中 i_0 ——入渗率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; S ——土壤吸湿率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.15}$; t ——入渗时间, min ; A ——常数, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

对于在短历时入渗, 且土壤基质势占优势的情况下, Philip 入渗模型可以简化为

$$i_0 = \frac{1}{2} S t^{-0.15} \quad (5)$$

累计入渗量 (I_0) 可以表示为

收稿日期: 20011212210 修订日期: 2002203204

基金项目: 国家自然科学基金重大项目、霍英东教育基金和土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室资助项目

作者简介: 王全九, 教授, 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101。

$$I_0 = S t^{0.15} \quad (6)$$

在 Philip 入渗模型中同样包括两个特征参数, 即土壤吸湿率和常数(A)。首先利用短历时入渗公式来寻求吸湿率与表征饱和导水率及概化湿润锋吸力间关系。对于确定的入渗率就有相对应的入渗时间和概化湿润锋深度, 因此式(2)与(5)所描述的土壤入渗率应该是相等的, 即

$$\frac{k_s h_f}{z_f} = \frac{1}{2} S t^{-0.15} \quad (7)$$

式(7)可以变为

$$S = \frac{2k_s h_f t^{0.15}}{z_f} \quad (8)$$

将式(3)和(6)代入等式(8), 有

$$S^2 = \frac{2k_s h_f I_0 (H - H)}{I} \quad (9)$$

对于确定入渗时间和相对应的概化湿润锋深度, I 应与 I_0 相等, 因此式(9)变为

$$S^2 = 2k_s h_f (H - H) \quad (10)$$

式(10)反映了吸湿率与表征饱和导水率和概化湿润锋吸力间关系。因此可以根据 GreenAmpt 公式推求 Philip 公式中参数。但这种推求方法所产生的误差需要进一步验证。

显然, 对于长历时入渗公式而言, 表征饱和导水率与 Philip 入渗模型中的 A 是相同的。将 $A = k_s$ 代入式(10), 有

$$S^2 = 2h_f A (H - H) \quad (11)$$

由式(11)可知, Philip 模型中的两个参数间也存在一定函数关系。概化湿润锋吸力可以表示为

$$h_f = \frac{S^2}{2A (H - H)} \quad (12)$$

对于一个积水入渗试验, 可以利用 Philip 和 GreenAmpt 模型分别处理短历时和长历时入渗资料, 并可以获得短历时和长历时条件下的 S 、 A 、 h_f 和 k_s 。同时可以利用式(10)对比分析短历时条件下两模型参数间一致性。也可以根据长历时入渗资料所获得的 S 和 A , 利用式(12)计算 h_f , 比较分析长历时条件下两模型的一致性。

White^[5](1987)通过对比分析土壤通量密度表达式与大毛管特征长度间关系, 得到了大毛管特征长度与吸湿率间关系。为了进一步验证上述分析的合理性, 下面利用上述短历时入渗模型来推求大毛管特征长度与吸湿率间关系。

Bouwer^[11](1964)认为概化湿润锋吸力是非饱和土壤导水率的函数, 即

$$h_f = - \int_{h_i}^{h_s} \frac{k(h) dh}{k_s} \quad (13)$$

式中 $k(h)$ ——非饱和土壤导水率, cm³in;

k_s ——饱和土壤导水率, cm³in; h_i ——初始土壤吸力, cm; h_s ——土壤表面含水率所对应的吸力, cm, 它与所选用的非饱和导水率函数形式有关。将式(13)代入式(10)有

$$S^2 = - 2k_s (H - H) \int_{h_i}^{h_s} \frac{k(h) dh}{k_s} \quad (14)$$

Philip (1985)提出了大毛管特征长度(L)概念, 这一概念为对比分析各种土壤非饱和导水率和扩散率表达式提供了重要手段。同时认为大毛管特征长度等于式(13)的右边, 这样式(14)变为

$$L = \frac{S^2}{2k_s (H - H)} \quad (15)$$

式(15)所表示的大毛管特征长度和吸湿率间关系与 White (1987)公式是相同的, 这间接说明上述分析的合理性。同时也说明大毛管特征长度就是 GreenAmpt 入渗模型中湿润锋面的吸力, 因此可以利用 GreenAmpt 公式推求大毛管特征长度。

同时式(11)也可以表示为

$$S^2 = 2LA (H - H) \quad (16)$$

式(16)反映了 Philip 入渗模型中特征参数与大毛管特征长度间关系。

2 实验方法

根据以上分析, Philip 入渗模型中的特征参数与 GreenAmpt 模型中的特征参数存在函数关系, 为了进一步验证这些理论关系的合理性, 比较分析两入渗模型的参数特征。选用 3 种不同质地土壤进行一维垂直积水入渗实验, 3 种土样分别取自安塞、榆林、西安, 经土壤颗粒分析, 3 种土壤的质地分别为砂壤土、壤质砂土和粉壤土。土样经风干、碾压和过筛后, 按设计容重(安塞、榆林、西安容重分别为 114、1165、1135 g/cm³)分层均匀装入实验土柱, 实验土柱高为 60 cm, 长为 1215 cm, 宽为 10 cm。利马氏瓶供水, 进行恒表面积水深度的入渗实验。在实验过程中, 通过记录马氏瓶水位变化来获得土壤累计入渗量。

3 结果分析

为了分析上述理论分析所建立的两种入渗模型间的关系, 进行了 3 种土壤的积水入渗试验, 图 1 显示了 3 种土壤积水入渗实验所获得的累计入渗量与时间关系。

利用式(1)和(4)对 3 种土壤的累积入渗量随时间变化过程的实验资料进行处理, 所得到的 Philip 入渗模型和 GreenAmpt 入渗模型的拟合参数列于表 1 中。

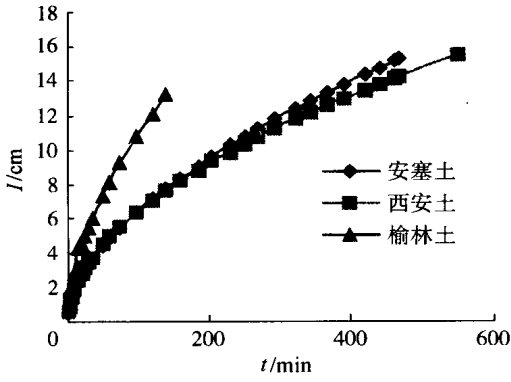


图 1 3 种土壤累积入渗量

Fig 1 Cumulative infiltration for three soils

表 1 两个入渗模型参数的拟合及计算值

Table 1 Fitted value for the parameters of the two infiltration models

	榆林土				安塞土				西安土				
	Philip		Green2Amp t		Philip		Green2Amp t		Philip		Green2Amp t		
	S	A	k _{st}	h _f	S	A	k _{st}	h _f	S	A	k _{st}	h _f	
拟合值	018	01041	01047	1815	01492	01017	01014	4	2213	0158	01011	0101	40
计算值	0178	01047	01041	2213	0155	01014	01017	1512	016	0101	01011	34	

长度小于利用 Philip 公式所得到的大毛管特征长度, 而安塞和西安土则反之。

为了比较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, 下面以西安土为例, 利用计算所得到的两个入渗模型的参数(如表 1 所列)计算土壤累积入渗量, 并利用计算的累积入渗量与实测的累积入渗量进行比较。图 2 显示了两个入渗模型所计算的累积入渗量和实测累积入渗量间关系, 并利用线性回归分析两个关系, 拟合结果如下

Philip 模型 $I_p = 11137I \quad R^2 = 01988$

Green2Amp t 模型 $I_g = 11023I \quad R^2 = 01996$

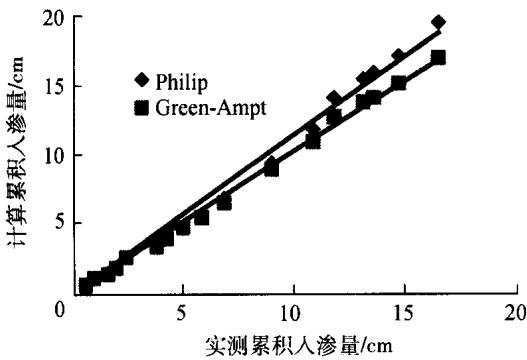


图 2 计算和实测的长历时累积入渗量

Fig 2 Calculated and measured long2time cumulative infiltration

由表 1 可知, 利用两个入渗模型对实验资料进行拟合所获得的 4 个参数中, A 和 k_{st} 随着土壤质地由粗变细而逐渐减小, 而 h_f 随着土壤质地由粗变细而逐渐增加。但 S 没有明显的变化规律。利用式 (10) 可根据 Green2Amp t 入渗模型参数计算 Philip 入渗模型参数或根据 Philip 入渗模型参数计算 Green2Amp t 入渗模型参数。实验参数值计算了两个模型的参数, 结果如表 1 所列。

由表 1 可知, 所计算的两个入渗模型参数仅有 A 和 k_{st} 随着土壤质地由粗变细逐步减小, 而 h_f 和 S 没有明显变化规律。同时由表 1 可知, 对于榆林土而言, 利用 Green2Amp t 入渗公式所得到的大毛管特征

量; I_g——利用 Green2Amp t 公式计算累积入渗量; R²——相关系数。由拟合结果可知, 虽然相关系数很高, 但两个公式所产生的相对误差相差较大, Philip 公式为 1317%, 而 Green2Amp t 公式为 213%。显然 Philip 模型计算结果偏差较大。也说明 Philip 公式对参数的精度要求比 Green2Amp t 公式高。

图 2 计算采用了总入渗时间为 550 min, 现在分析总入渗时间为 250 min 情况下, 两个入渗公式计算的精度, 结果如图 3 所示, 并利用线性回归分析两个关系, 拟合结果如下

Philip 模型 $I_p = 01969I \quad R^2 = 01995$

Green2Amp t 模型 $I_g = 11024I \quad R^2 = 01984$

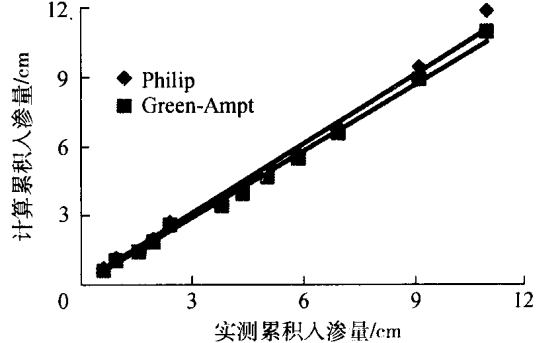


图 3 计算和实测的短历时累积入渗量

Fig 3 Calculated and measured short2time cumulative infiltration

式中 I_p——利用 Philip 公式计算的累积入渗

由拟合结果可知,对于总入渗时间为 250 min 情况下,两个公式的计算精度都比较高,Philip 公式相对误差为 -31%,而 GreenAmpt 公式为 213%。与总入渗时间为 550 min 相比,GreenAmpt 公式长短入渗时间所产生的相对误差比较稳定,而 Philip 模型所产生的相对误差变化较大。这说明利用 GreenAmpt 公式推求 Philip 公式的参数用于计算入渗时间较短情况具有较高精度,而对于长时间入渗会产生一定误差,而利用 Philip 模型推求的 GreenAmpt 公式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。

在理论分析部分对短历时入渗忽略重力作用情况下,Philip 模型和 GreenAmpt 模型参数关系进行了分析,下面以西安土为例利用入渗时间为 30 min 的入渗资料分析两个模型参数间关系。利用 Philip 模型和 GreenAmpt 模型拟合实验资料所得的参数列于表 2 中,并利用式(10)计算两个模型参数,结果也列于表 2 中。由表 2 可知,拟合值与计算值相对比较接近,因此可以利用两个模型相互计算参数。

表 2 短历时两个入渗模型的参数

Table 2 Parameters of two models for short infiltrating time

	Philip	GreenAmpt
	S	k_s/h_f
拟合值	01681	01426
计算值	0162	0147

4 结论

根据 Philip 入渗公式和 GreenAmpt 入渗模型的特点,分析了两个模型参数间内在关系。进行了 3 种质地土壤积水入渗实验,利用 Philip 入渗公式和

GreenAmpt 入渗模型对实验资料进行了处理,获得了两个模型各自参数。根据理论分析所得到的两模型参数关系和实验资料拟合结果计算了 Philip 入渗公式和 GreenAmpt 入渗模型参数。利用所得的两个模型参数计算了土壤累积入渗量,并与实测累积入渗量进行了比较。发现在入渗时间较短情况下,两个模型计算精度都比较高,而对于较长入渗时间 Philip 入渗模型偏差较大,说明 Philip 模型较 GreenAmpt 入渗模型所要求参数精度更高,对参数的灵敏性更强。

[参 考 文 献]

- [1] Bouwer H. Unsaturated flow in ground water hydraulics [J]. J Hydraul Div Amer Soc Civil Eng, 1964, 90: 121~ 144
- [2] Green W H, and Ampt G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils [J]. J Agric Sci, 1911, 4(1): 1~ 24
- [3] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1940, 3: 399~ 417.
- [4] Philip J R. The theory of infiltration: I the infiltration equation and its solution [J]. Soil Sci, 1957, 83(5): 345~ 357.
- [5] White and Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration [J]. Water Resour Res, 1987, 23(8): 1514~ 1522
- [6] 邵明安,王全九, Horton. 一个简单推求土壤水分运动参数的方法 [J]. 土壤学报, 2000, 1: 1~ 8
- [7] 王全九,王文焰,邵明安. 浑水入渗机制及模拟模型 [J]. 农业工程学报, 1999, 1: 135~ 138
- [8] 汪志荣,王文焰,王全九. 浑水波涌灌的入渗机制与 GreenAmpt 公式 [J]. 水利学报, 1998, 10: 44~ 48

Comparison of Green-Ampt Model With Philip Infiltration Model

Wang Quanjiu¹, Lai Jianbing², Li Yi²

(1) Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
(2) Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Soil water infiltration is a critical component of field water circulation, and numbers of infiltration models with different properties and functions were established. In the paper the theoretical relationship among the parameters of the Philip equation and GreenAmpt equation was analyzed, and the relations were illustrated with the experimental data of vertical one-dimensional infiltration. The results show that the Philip model requires more accurate parameters than the GreenAmpt model.

Key words: Philip infiltration model; GreenAmpt infiltration model; ponding infiltration