

用 Philip 模型参数推求湿润锋平均基质吸力 S_f 准确性

王红闪, 黄明斌, 董翠云

(中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 修改的适用自然降水入渗的 Green-Ampt 模型是模拟坡面降水入渗、产汇流的常用手段, 该模型中一个重要参数——湿润锋平均基质吸力 S_f 的准确取值对提高计算精度有重要作用。在分析 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型的基础上, 建立了两模型参数间的转化关系, 并尝试用 Philip 模型参数间接推求 Green-Ampt 模型中的参数 S_f 。通过对积水入渗资料的处理和用降水入渗资料进行准确性检验, 结果发现, 对黄土高原黑垆土而言, 用 Philip 模型参数间接推求 Green-Ampt 模型中的湿润锋平均基质吸力 S_f 是可行的, 与直接用 Green-Ampt 模型获得的 S_f 值具有相同的精度。

关键词: Philip 入渗模型; Green-Ampt 入渗模型; 湿润锋平均基质吸力; 黑垆土

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2004)02-0041-05

中图分类号: S157.1

Validity of Average Potential Suction S_f of Wetting Front Calculated by Parameters in Philip Infiltration Equation

WANG Hong-shan, HUANG Ming-bin, DONG Cui-yun

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: The modified Green-Ampt infiltration equation which is suitable to describe infiltration during an unsteady rain is widely used to simulate infiltration and runoff on the slope land. The average potential across the wetting front S_f is one of the most important parameters in it, whose validity is dependent on S_f . The theoretical relationships among the parameters of the Philip equation and Green-Ampt equation are analyzed, and parameter S_f in Green-Ampt equation can be calculated by the parameters values of the Philip equation. The infiltration experiments with surface ponding and unsteady rain were carried at the Changwu Agro-ecological Station in 1996, and the different values of S_f calculated by Green-Ampt equation and parameters of the Philip equation were obtained based on the infiltration data with surface ponding. The validity of different S_f 's values was compared by the runoff data of unsteady rain on a plane via the modified Green-Ampt equation by Chu (1978). The results showed that S_f calculated by the parameters of Philip equation was valid for simulating the infiltration and runoff on a plane on the Heilu soil of the Loess Plateau.

Keywords: Philip infiltration equation; Green-Ampt infiltration equation; average potential across the wetting front; Heilu soil

入渗是田间水分循环的重要组成部分, 对于分析地表产流、农田灌溉排水、降水在土壤中的再分布以及地表污染物迁移过程等问题具有极其重要的价值, 因而入渗模型的研究、改进、参数确定和误差分析等一直是水文学、土壤物理学等相关学科的研究重点^[1-4]。Green-Ampt 入渗模型是由 W. H. Green 和 G. A. Ampt^[5] 基于毛管理论提出的近似积水入渗模型。由于该模型计算简单, 并且又有一定的物理基础而被广泛应用。1973 年 Mein 和 Larson^[6] 将其推广

用到稳定降雨入渗情况, 1978 年 Chu^[7] 又将改进的 Green-Ampt 模型推广应用于自然变雨强的降雨入渗过程, 从而大大拓展了早期 Green-Ampt 模型的应用范围, 成为模拟坡面降雨入渗、产流过程常用的手段。但是在应用 Green-Ampt 入渗模型时, 常常要为确定湿润锋平均基质吸力 (S_f) 大费周折, 该参数不易直接测定, 在无积水入渗资料的情况下常利用 Mein 和 Larson^[6] 提出的如下公式计算:

$$S_f = \frac{1}{k_s} \int_0^1 s dk(s) \quad (1)$$

收稿日期: 2003-07-21

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX3-SW-442); 中国科学院水土保持研究所领域前沿专项经费项目“坡面土壤侵蚀预报物理模型”资助

作者简介: 王红闪 (1978—), 男 (汉族), 湖北襄樊人, 研究方向为土壤水环境。电话 (029) 87010505, E-mail: whsnr@sohu.com。

式中: k_s ——表征饱和导水率; $k(s)$ ——当吸力为 s 时的导水率。由于导水率很难准确测定, 从而限制了湿润锋平均吸力 S_f 计算精度, 进而降低了 Green-Ampt 入渗模型的准确性。

Philip^[8]入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型有相似的物理基础, Stone 等^[9]和王全九等^[10]对它们进行了对比分析, 并推导出 2 公式参数间的转化关系。这样在有人工降雨入渗或积水入渗资料的前提下, 可根据 Philip 入渗模型建立入渗速率与时间的关系, 间接推求 Green-Ampt 模型中参数 S_f , 为获求 Green-Ampt 模型中湿润锋基质吸力提供了一条新途径。本文将通过积水入渗试验资料对这一方法进行检验, 分别利用 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型推求湿润锋平均基质吸力 (S_f), 并利用自然降水产流试验资料和修改的适用于自然降水产流的 Green-Ampt 模型对 2 种方法计算出来的 S_f 值进行准确性检验, 以期寻求适合我国西北地区主要土类——黑垆土湿润锋平均基质吸力 (S_f) 的取值, 这对于正确模拟自然降水入渗、产流过程具有重要意义。

1 Green-Ampt 和 Philip 模型比较

Green-Ampt(1911)入渗模型研究的是初始干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题, 其假定入渗时存在着明确的水平湿润锋面, 湿润锋面处存在一个固定不变的吸力。由达西定律, 推出水分从地表进入土壤的流量如下:

$$f(t) = K_s \left(\frac{Z_f + H + S_f}{Z_f} \right) \quad (2)$$

式中: $f(t)$ ——土壤入渗速率 (cm/m in); Z_f ——湿润锋深度 (cm); S_f ——湿润锋处平均基质吸力 (cm); H ——地表积水深度 (cm)。根据模型假定, 由水量平衡原理, 可推出累积入渗量 F_p 与湿润锋 Z_f 的关系如下:

$$F_p = (\Theta - \theta) Z_f \quad (3)$$

式中: F_p ——累积入渗量; Θ ——饱和含水量; θ ——初始含水量。当地表积水很浅, H 相对于湿润

锋平均基质吸力可忽略不计。此时, 结合 (2)、(3) 式可推导出 Green-Ampt 如下入渗模型:

$$f(t) = K_s \left[1 + \frac{(\Theta - \theta) S_f}{F_p} \right] \quad (4)$$

Philip (1957) 认为在入渗过程中任意时刻的入渗速率与时间呈现幂级数关系, 其入渗模型可表示为

$$f(t) = \frac{1}{2} S_e t^{-\frac{1}{2}} + A \quad (5)$$

式中: $f(t)$ ——入渗速率 (cm/m in); S_e ——土壤吸湿率 (cm/m in^{0.5}); t ——为入渗时间 (m in); A ——稳定入渗率 (cm/m in)。对短历时入渗, 且基质势占优势的情况下, Philip 模型入渗模型可简化为:

$$f(t) = \frac{1}{2} S_e t^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

相应的累积入渗量为:

$$F_p = S_e t^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

显然, 对长历时入渗而言, (4) 式中的表征饱和导水率 K_s 和 (5) 式中的稳定入渗速率 A 是相等的; 而对于确定的入渗过程, 入渗时间和累积入渗量, (4) 式和 (5) 式所描述的土壤入渗速率应是相等的, 即:

$$\frac{1}{2} S_e t^{-\frac{1}{2}} = \frac{K_s (\Theta - \theta) S_f}{F_p} \quad (8)$$

将 (6) 式代入 (7) 式再经适当变形后可得:

$$S_f = \frac{S_e^2}{2K_s (\Theta - \theta)} \quad (9)$$

由于实际计算 K_s 值和 A 值并不完全相等, 因此 S_f 也可由下式计算:

$$S_f = \frac{S_e^2}{2A (\Theta - \theta)} \quad (10)$$

2 试验材料和方法

2.1 试验地点和土壤物理性质

田间积水入渗试验位于陕西省长武县王东沟小流域, 土壤是中壤质马兰黄土母质上发育而成的黑垆土, 颗粒组成以粗粉粒为主, 土壤质地为中壤土, 详见表 1。饱和含水量 Θ 为 0.49 cm³/cm³, 凋萎湿度 θ 为 0.12 cm³/cm³, 0~3m 平均容重为 1.30 g/cm³。

表 1 黑垆土的机械组成

组成	砂粒	细砂粒	粗粉粒	中粉粒	细粉粒	黏粒	物理性黏粒
粒径/mm	1.000~0.250	0.250~0.050	0.050~0.010	0.010~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
百分含量/%	1.080	2.400	57.000	8.600	17.700	13.200	39.500

2.2 试验方法

2.2.1 积水入渗试验 1996 年用双环入渗法在长武王东沟塬面上分别选择小麦地、撂荒地、撂荒农田、

油菜地、苹果地、苹果幼林地进行积水入渗试验。观测入渗水量随时间的动态变化, 累积入渗时间为 120 min 左右。入渗前测定 0~40 cm 土壤含水量。

2.2.2 自然降雨入渗产流试验 径流小区长 20m, 宽 5m, 坡度为 0.30, 1996 年 6—9 月 (冬小麦收割后) 共收集了 6 场降雨产流资料, 用来检验由 Philip 模型参数推求 S_f 的准确性。

3 准确性检验

3.1 检验模型

一场连续的降雨过程可根据雨强的变化分割为不同的时段, 同一时段内雨强是一常数, 用如下公式计算:

$$i(t) = [P(t_n) - P(t_{n-1})] / (t_n - t_{n-1}) = I \quad (11)$$

式中: $P(t_{n-1})$ 和 $P(t_n)$ —— 分别是 t 时段初和末的累计降水量 (mm); t_{n-1}, t_n —— 分别是时段初和末的时间; $i(t), I$ —— 时段 t 的平均雨强。

根据时段平均雨强 I 和土壤表征饱和导水率 K_s 的大小以及时段降水时间 t , 任一时段地表水分状态分为 4 种情况:

(1) 开始无积水, 结束无积水, 条件是: 时段 t 平均雨强 $I < K_s$; 时段 t 平均雨强 $I > K_s$, 同时:

$$P(t_n) - R(t_{n-1}) - SM / (I - K_s) < 0$$

$$F_p(t_n) < SM / (I - K_s), \quad SM = K_s S_f (\theta - \theta_0)$$

式中: $R(t_{n-1})$ —— t 时段初的累计径流量; $F_p(t_n)$ —— t 时段末的累计入渗量。

(2) 开始无积水, 结束有积水, $I > K_s$, 并且:

$$P(t_n) - R(t_{n-1}) - SM / (I - K_s) < 0$$

$$F_p(t_n) > SM / (I - K_s)$$

(3) 开始有积水, 结束有积水, 条件是 $I > f(t_{n-1})$, 并且 $P(t_n) - F_p(t_n) - R(t_{n-1}) > 0$

(4) 开始有积水, 结束无积水, 条件是 $I > f(t_{n-1})$, 并且 $P(t_n) - F_p(t_n) - R(t_{n-1}) < 0$ 。

$f(t_{n-1})$ 是 t 时段初的入渗速率。模型详细介绍和计算方法可参见文献^[7]。

3.2 评价指标

在用上述检验模型计算径流量前, 有如下 4 参数需要事先确定: 表征饱和导水率 K_s 、湿润锋平均基质吸力 S_f 、饱和含水量 θ 和降雨前平均土壤含水量 θ_0 。为检验用 Philip 模型参数推求 S_f 的准确性, 对同一降水事件在其它 3 参数取值相同的条件下, S_f 分别取 (9) 式的计算值和 (4) 式的拟合值, 并以 6 场径流量模拟值和实测值的平方根误差 (RMSE) 作为评判标准。RMSE 的计算公式如下:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2 \right]^{1/2}$$

式中: M_i —— 第 i 场降雨的实测径流深; S_i —— 模拟径流深; n —— 指所监测的降雨场数。

4 结果与讨论

4.1 积水入渗过程分析

在同一土壤类型 (黑垆土) 不同土地利用状况的 6 种田块分别进行了 120min 的积水入渗试验, 其中苹果地和小麦地的积水入渗过程如图 1 所示。对不同土地利用类型的地块, 入渗速率随时间均存在相似的变化规律: 随着入渗时间 t 的增加, 入渗率 $f(t)$ 逐渐变小, 最终趋于稳定状态。但不同土地利用类型的地块, 这一相对稳定的入渗速率有一定的差异, 对于苹果地和小麦地而言, 小麦地的稳定入渗率明显高于苹果地 (图 1)。不同地块稳定入渗率的差异主要是由剖面土壤结构和空隙特性的差异引起的。

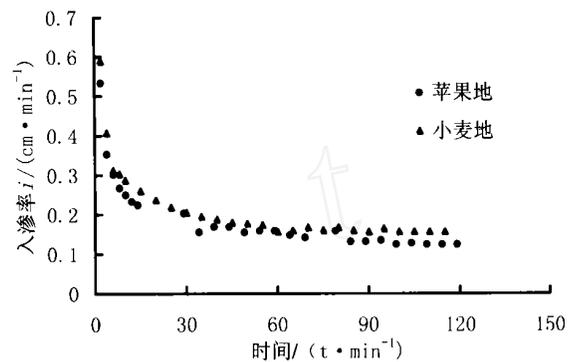


图 1 积水入渗过程

4.2 湿润锋平均基质吸力的计算结果

由 (4) 式和 (5) 式可知, 对 Green-Ampt 模型而言, 入渗速率与累计入渗量的倒数 ($1/F_p$) 呈直线关系; 而对 Philip 模型而言, 入渗速率和时间平方根的倒数 ($t^{-1/2}$) 呈直线关系。通过对 6 块地的积水入渗资料进行分析, 发现它们均能很好地符合上述规律, 结果如图 2, 3 和表 2, 3 所示。从表中可以看出, 用 Green-Ampt 模型计算出来的 6 种地块的平均表征饱和导水率要略大于用 Philip 模型计算出来的稳渗率, 两者的平均值分别是 0.14 和 0.12 cm/m in, 因而用方程 (1) 计算出来的湿润锋平均基质吸力要小于用方程 (2) 式的计算结果, 两者平均相差 3.6 cm。而直接用 Green-Ampt 模型计算出来的湿润锋平均基质吸力介于二者之间, 6 块地的平均值为 14.5 cm。Mein 和 Larson 用方程 (1) 计算同一土壤不同初始含水量的湿润锋平均基质吸力后发现, 当初始土壤湿度在田间持水量到凋萎湿度范围内变化时, S_f 值变化很小, 一般可看作为常数, 但不同质地的土壤 S_f 变化很大。在我们测定的 6 种不同土地利用类型的地块内, S_f 虽然受初始含水量的影响较小, 但不同地块间的差异很大, 撂荒地的 S_f 值较油菜地大 2 倍多, 这可能是由土壤容重、人工不同耕作方式等因素引起的。

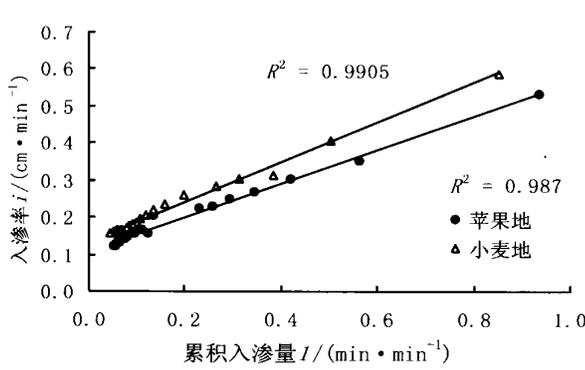


图 2 入渗速率与 $1/F_p$ 的关系

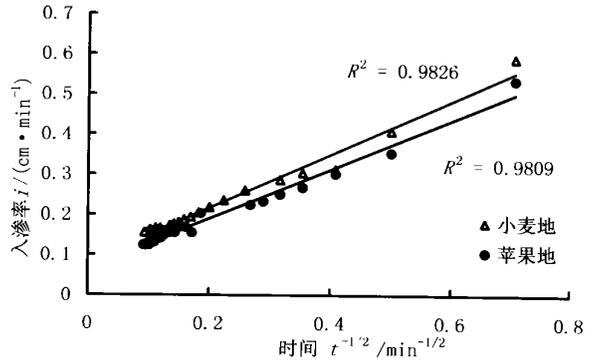


图 3 入渗速率与 $t^{-1/2}$ 的关系

表 2 由 Green- Ampt 入渗模型推求吸力参数 S_f

类 型	拟合方程式	R^2	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	$\theta / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\Theta / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	S_f / cm
小麦地	$f(t) = 0.6518/F_p + 0.1231$	0.991	0.1231	0.11	0.49	13.9
撂荒地	$f(t) = 1.0022/F_p + 0.1477$	0.988	0.1477	0.17	0.49	21.2
撂荒农田	$f(t) = 0.4711/F_p + 0.1704$	0.956	0.1797	0.22	0.49	9.7
油菜地	$f(t) = 0.4749/F_p + 0.2271$	0.940	0.2293	0.24	0.49	8.3
苹果地	$f(t) = 0.4516/F_p + 0.1114$	0.987	0.1114	0.21	0.49	14.5
苹果幼林地	$f(t) = 0.2979/F_p + 0.0712$	0.881	0.0650	0.25	0.49	19.1
平均值	—	—	0.1400	—	—	14.5

表 3 由 Philip 入渗模型参数间接推求吸力参数 S_f

类 型	拟合方程式	R^2	$A / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	$\theta / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\Theta / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	S_f / cm	S_f / cm
小麦地	$f(t) = 0.6236 t^{1/2} + 0.0912$	0.9826	0.0912	0.11	0.49	22.4	16.6
撂荒地	$f(t) = 0.7949 t^{1/2} + 0.1283$	0.9712	0.1283	0.17	0.49	30.8	26.7
撂荒农田	$f(t) = 0.4715 t^{1/2} + 0.1422$	0.9683	0.1422	0.22	0.49	11.6	9.2
油菜地	$f(t) = 0.4682 t^{1/2} + 0.1976$	0.8841	0.1976	0.24	0.49	8.9	7.7
苹果地	$f(t) = 0.5487 t^{1/2} + 0.0777$	0.9809	0.0777	0.21	0.49	27.7	19.3
苹果幼林地	$f(t) = 0.3267 t^{1/2} + 0.0531$	0.9272	0.0531	0.25	0.49	16.8	13.7
平均值	—	—	0.12	—	—	16.9	13.3

4.3 S_f 计算值准确性检验

因为径流小区内的土壤经过人工扰动,且修建后刚种了一季冬小麦,剖面土壤结构不同于上面研究的任一土地类型,为减少不同土地利用方式对 S_f 的影响,本文将以 6 种土地利用类型的平均基质吸力作为径流小区土壤湿润锋平均基质吸力代入修改的适用自然降水入渗的 Green- Ampt 模型进行准确性检验。除 S_f 外,对同一降水产流过程模型其它 3 参数的取值完全相同,见表 4。表中降水入渗过程的表征饱和和导水率取值参考了陈洪松等人的测定结果^[11],许多人研究发现雨滴打击地表皮和积水深度等因素对表征饱和和导水率影响很大,其值一般远小于由积水入

渗资料获得的 K_s 值^[12]。利用 6 场降雨资料和 3 个平均 S_f 值,结合 Chu 改进的 Green- Ampt 模型计算出各场降雨径流深,计算值与测定值的比较结果如表 4 所示。由表可见,用 Green- Ampt 入渗模型直接推求的 S_f 和用 Philip 模型参数由公式(2)式间接推求的 S_f 有较高的准确性,计算出的径流深与测定值相近,有较小而且几乎相同的 RMSE 值,而用 Philip 模型参数由公式(1)式间接推求的平均基质吸力 S_f 准确性偏低, RMSE 值为 0.83mm。因此,本次试验研究结果证实,对黄土高原黑垆土用 Philip 模型参数间接推求 Green- Ampt 入渗模型的湿润锋平均基质吸力 S_f 是可行的。

表 4 6 次降雨实测径流值与计算径流值比较

日期	初始含水量/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$)	饱和含水量/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$)	K_s / ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	实测径流深/ mm	计算径流深/mm		
					$S_f = 14.5 \text{ cm}$	$S_f = 16.9 \text{ cm}$	$S_f = 13.3 \text{ cm}$
--0628	0.29	0.49	4.02	1.39	1.71	1.13	2.04
--0710	0.35	0.49	4.02	6.10	6.16	5.50	6.53
--0720	0.38	0.49	4.02	25.24	25.28	24.57	25.65
--0811	0.29	0.49	4.02	3.14	4.61	3.99	4.95
--0812	0.39	0.49	4.02	5.02	4.65	4.24	4.87
--0823	0.30	0.49	4.02	5.02	5.21	4.59	5.31
RM SE	—	—	—	—	0.64	0.63	0.83

5 结 论

根据 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型的特点, 推导出 2 模型参数间的相互关系。在黄土高原长武王东沟试区对 6 种土地利用类型的地块进行了积水入渗试验, 分别利用 Philip 入渗模型和 Green-Ampt 入渗模型对试验资料进行了处理, 获得了 2 模型各自的参数, 并用 Philip 模型参数间接推求出 Green-Ampt 入渗模型中湿润锋平均基质吸力 S_f , 然后用 Chu 改进的适用于自然降水入渗的 Green-Ampt 模型和 6 场降水产流资料对计算准确性进行检验。结果显示, 对黄土高原黑垆土而言, 用 Philip 模型参数间接推求 Green-Ampt 入渗模型中的湿润锋平均基质吸力 S_f 是可行的, 与直接用 Green-Ampt 模型获得的 S_f 值具有相同的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 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(5): 30—34
- [2] John S, Selker H. Green-Ampt infiltration into soil of variable pore size with depth[J]. Water Resources Research, 1999, 35(5): 110—113
- [3] 邵明安, 王全九, R. Horton. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 1—8
- [4] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 坡地单元降雨产流分析及平均产流速率计算[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 63—68
- [5] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1—24
- [6] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384—394
- [7] Chu S. Infiltration during an unsteady rain. Water Resources Research[J]. 1978, 14(3): 461—466
- [8] Philip J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345—357.
- [9] Stone J J, Lane L J, Shirley E D. Infiltration and runoff simulation on a plane[J]. Transactions of ASAE, 1992, 35(1): 161—170
- [10] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Green-Ampt 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13—16
- [11] 陈洪松. 黄土区坡地土壤水分运动与转化试验研究[D]. 西北农林科技大学博士论文, 2003
- [12] Moore P H. Effects of surface sealing on infiltration[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24: 123—130