

非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型*

韩用德

(河南省信阳市建筑勘测设计研究院 信阳 464000)

罗毅 于强

张海林

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)(中国农业大学农学部 北京 100094)

摘 要 给出了相应条件下的 Green-Ampt 模型,入渗量、入渗速率、湿润层深度以及入渗时间的具体表达式,并对 1 次实测灌水入渗过程进行了模拟。结果表明,Green-Ampt 模型计算的入渗时土壤水分剖面与水流连续方程的计算结果存在较大差别,但这种差别经过再分布后逐渐消失。在作较长时段的土壤水分动态模拟时利用 Green-Ampt 模型模拟入渗过程是适用的,特别是在已知入渗总量而未知入渗强度过程的情况下具有优越性。

关键词 入渗 土壤水 Green-Ampt 模型

Green-Ampt model of non-uniform layered soil profile. HAN Yong-De(Institute of Survey and Design of Civil Engineering, Henan Province, Xinyang 464000), LUO Yi, YU Qiang(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101), ZHANG Hai-Lin(China Agricultural University, Beijing 100094), *CJEA*, 2001, 9(1): 31~33

Abstract The Green-Ampt model, formulas of infiltration rate and time under the condition of the layered soil profile were given in this paper. Both the equation and the continuity equation of soil water flow were used to simulate a field infiltration case and the simulated soil profiles were compared. The result show that there existed a great difference between the soil profiles simulated by the Green-Ampt equation and the continuity equation, but the difference disappeared quickly after some hours of redistribution of soil moisture. This indicates that the Green-Ampt equation can simulate the soil moisture profile of infiltration for the long-term simulation of soil moisture dynamics. Especially, when the infiltration water amount is available only, it is more advantageous than other methods.

Key word Infiltration, Soil moisture, Green-Ampt model

Green 和 Ampt 于 1911 年提出了基于毛管上升理论的入渗模型,即 Green-Ampt 模型^[1],且该模型在描述入渗过程中的应用至今仍然十分广泛,模型研究均匀土壤质地和初始含水量剖面上的入渗过程,其基本假定是入渗时存在明显的湿润锋面将湿润区与干燥区分开,湿润区土壤达到饱和。水文学常应用 Green-Ampt 模型计算降水入渗率、入渗量与时间关系和径流的形成。Richard 方程和水流连续方程常用于模拟计算土壤水分剖面在交替入渗与再分布过程中的变化规律。无论是采用 Richard 方程还是水流连续方程计算入渗过程均需要相应的上边界入渗条件,如降水或灌水强度变化过程或上边界水头变化过程。而事实上可获得的灌水和降水信息通常是灌水或降水总量,对漫灌尤其如此,这给上边界条件的确定带来困难。Green-Ampt 模型在已知灌水或降水总量条件下可比较方便地确定入渗深度和时间,因而得到广泛应用。但 Green-Ampt 模型存在两个问题,即一是均匀的土壤质地和初始含水量剖面假设;二是饱和的湿润区假设。针对第 1 个假设和田间土壤质地和含水量剖面通常不均匀情况,本研究推导了适用于非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型,并针对第 2 个假设,通过对比 Green-Ampt 模型、水流连续方程的计算结果和田间实测结果,探讨利用 Green-Ampt 模型模拟入渗过程土壤水分剖面分布的可行性。

1 理论方法

1.1 Green-Ampt 模型

假设入渗时地表积水深度为 H_0 ,湿润锋面位置为 Z_f ,湿润锋面处的吸力为 S_f ,以下推导入渗率 i ,入渗

* “九五”中国科学院重大项目(KZ951-A1-301)和特别支持项目(KZ95T-04-01)及国家自然科学基金重大项目(49890330)共同资助
收稿日期:2000-08-03 改回日期:2000-09-26

量 I 和入渗时间 t 之间的关系。将位置坐标 Z 的 0 点取在地表, 向下为正, 由 Darcy 定律:

$$i = \bar{K}_i \times \frac{S_f + Z_f + H_0}{Z_f} \quad (1)$$

式中, $\bar{K}_i$ 为湿润土层有效饱和导水率。对均质土层而言, 有效饱和导水率即为土层饱和导水率, 对非均质土层而言, 有效饱和导水率为各湿润土层饱和导水率的均值^[2~3]。如果下 1 层土壤饱和导水率比其上各层的都大, 则可用其以上各层的有效饱和导水率控制该层土壤的入渗过程^[4]。累计入渗量 (I) 可表示为:

$$I = \sum_{j=1}^M D_j (\theta_{i,j} - \theta_{0,j}) + \left(Z_f - \sum_{j=1}^M D_j \right) (\theta_{i,M+1} - \theta_{0,M+1}) \quad (2)$$

式中, D 、 θ 分别为土壤土层厚度和土壤体积分水率, 下标 0、s、j、M 分别为初始状态、饱和状态、土壤层次和已完全饱和的土层数目。在已知入渗总量 I 和入渗初始时刻含水量剖面的情况下, 可根据上式直接求出入渗前锋面位置 Z_f 。则已湿润土层总厚度为:

$$D = \sum_{j=1}^M D_j \quad (3)$$

入渗率与湿润锋面位置关系为:

$$i = \frac{dI}{dt} = (\theta_{i,M+1} - \theta_{0,M+1}) \frac{dZ_f}{dt} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)进行整理并在 $[t_M, t]$ 时段上积分得到:

$$\int_D^{Z_f} \frac{Z_f}{Z_f + S_f + H_0} dZ_f = \int_{t_M}^t \frac{\bar{K}_i}{\theta_{i,M+1} - \theta_{0,M+1}} dt \quad (5)$$

式中, t_M 为 M 土层湿润完成时总入渗时间。进一步假定积水深度在入渗过程中为常数, 则:

$$t - t_M = \frac{\theta_{i,M+1} - \theta_{0,M+1}}{\bar{K}_i} \left[(Z_f - D) - (S_f + H_0) \ln \frac{Z_f + S_f + H_0}{D + S_f + H_0} \right] \quad (6)$$

湿润锋面处的土壤吸力采用湿润锋面处土壤含水率和土壤基质势曲线计算。上述方程可用来计算非均质土壤剖面、非均匀土壤含水率剖面在地表积水或无积水时入渗过程, 确定其入渗率、入渗量及湿润锋面随时间的变化过程。在已知入渗总量情况下可直接推算湿润锋面位置和入渗时间。

1.2 水流连续方程

当不考虑土壤蒸发和作物蒸腾时, 土壤剖面水流运动采用如下方程描述:

$$D_i \frac{d\theta_i}{dt} = -q_i - Q_{i+1} \quad (7)$$

$$D_i \frac{d\theta_i}{dt} = Q_{i-1} - Q_{i+1} \quad (8)$$

$$D_N \frac{d\theta_N}{dt} = Q_{N-1} - Q_N \quad (9)$$

式中, i 为土层, $i=2, 3, \dots, N-1$, N 为土层总数, D_i 为第 i 层土层厚度, θ_i 为第 i 层土壤体积分水率, Q_{i+1} 为第 i 层与第 $i+1$ 层土壤界面上的水流量, Q_N 为自第 N 层土壤向下的水流量, 规定流量向下时为正, t 为时间, q_i 为地表入渗强度。相邻 2 层间的水流量按下式计算:

$$Q_{i+1} = -2K_{i+1} \frac{h_i - h_{i+1}}{D_i + D_{i+1}} + K_{i+1} \quad (10)$$

$$K_{i+1} = \frac{D_i K_i + D_{i+1} K_{i+1}}{D_i + D_{i+1}} \quad (11)$$

式中, K_i 为第 i 层土壤导水率, h_i 为第 i 层土壤基质势。假定表土含水量恒为饱和含水量, 利用上述方程可模拟计算地表含水量为定值时的入渗过程; 当假定 $q_i=0$ 时, 可模拟计算土壤水分再分布过程。

2 结果与讨论

利用上述理论方法模拟 1 次灌水入渗过程。灌水实验在中国科学院禹城综合试验站联合观测场冬小麦田内进行。1999 年 4 月 17 日上午 9:00 时采用中子水分仪测定土壤含水率剖面, 而后实施地表灌溉。4 月 18 日 16:00 再次测定土壤含水率剖面, 测定时每 10cm 土层 1 个读数。忽略 2 次测定期间的土壤蒸发和作物蒸腾, 利用测得的土壤水分剖面得出实际入渗水量近似相当于 73mm 土层厚度。取地表下 150cm 土层, 并按每 10cm 1 个层次划分, 采用第 1 次测定土壤含水率剖面作为初始剖面, 按 2 种方式模拟入渗过程: 一是用

Green-Ampt 模型模拟入渗过程,由于灌水过程中地表积水很薄,假定积水厚度为 0mm,根据 73mm 的入渗总量确定入渗锋面位置和入渗时间;将入渗结束时土壤水分剖面作为初始值,利用水流连续方程计算再分配过程至 18 日 16:00 止,将此时的土壤水分剖面与实测值对比;二是利用水流连续方程模拟入渗过程,当假定地表入渗强度恒定时,分别假设入渗时间为 4h 和 6h 来计算入渗强度,以比较不同入渗强度对入渗过程的影响;当假定地表为饱和含水率时,假定地表 1cm 厚土层的入渗开始瞬间由初始含水率达到饱和,模拟计算入渗过程直至土壤剖面增加水量为 73mm 总入渗量为止,这样同时确定了入渗时间和入渗结束时刻土壤水分剖面。土壤基质势曲线和导水率曲线采用吴肇龙(1993 年)的测定结果。图 1 给出模拟计算入渗初始时刻和结束时刻土壤水分剖面。Green-Ampt 模型的入渗深度为 30cm,

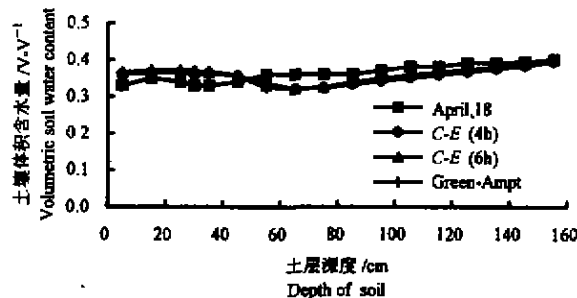


图 2 计算的土壤水分再分布与实测值对比

Fig. 2 Comparison of the calculated soil moisture profile to the measured one

均相对偏差为 7%。

3 小 结

利用 Green-Ampt 模型和水流连续方程模拟计算的入渗时间和入渗终止土壤水分剖面之间存在明显差别;经过再分布后这种差别逐渐消失。这说明如果作较长时段的土壤水分剖面动态模拟,利用 Green-Ampt 模型模拟入渗过程是可行的。特别是在未知降雨或灌水强度的变化,而仅知入渗总量时,利用 Green-Ampt 模型模拟入渗过程可方便地计算入渗深度和入渗时间,故 Green-Ampt 模型有其优越性。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Hachum A. Y., Alfaro J. F. Rain infiltration into layered soils. Journal of irrigation and drainage division, ASCE. 1980, 106, 311~321
- 3 Childs E. C., Bybordi M. The vertical movement of water in a stratified porous material. Water resources research, 1969, 5, 446
- 4 Hanks R. J., Bowers S. A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1962, 26, 530~534

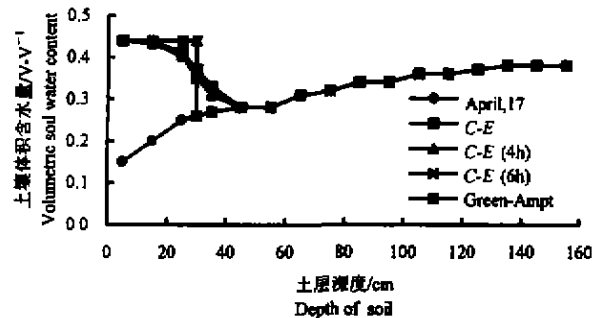


图 1 入渗初始及终止时的土壤水分剖面 *

Fig. 1 The soil moisture profiles when the infiltration started and ended

* 图中 C-E 表示水流连续方程计算结果,4h 和 6h 表示入渗历时为 4 小时、6 小时的情形,恒定地表含水量情形用 C-E 表示,以下同。

入渗时间为 0.4h,水流连续方程模拟计算的入渗深度均为 50cm 左右,二者水分剖面差异很小。假定入渗时地表均为饱和状态时的入渗时间为 2.77h,则 Green-Ampt 模型与水流连续方程模拟的土壤水分剖面 and 入渗时间差别明显。模拟计算的再分布剖面 and 实测土壤剖面见图 2,无论是用 Green-Ampt 计算入渗过程,还是用水流连续方程计算入渗过程,经过一定时间的再分布,二者模拟计算的土壤水分剖面十分接近,相对偏差平均值为 1% 左右。与实测结果对比,上部土层模拟结果比实测结果偏大,而下部土层的则偏小,最大相对偏差为 12%,整个剖面平