

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.019

## SWMM下渗模型算法改进研究

贺娟<sup>1</sup>, 梁小光<sup>2,3</sup>, 温卫华<sup>1</sup>, 殷乐福<sup>1</sup>, 盛旺<sup>1</sup>

(1. 佛山市城市规划设计研究院, 广东 佛山 528000; 2. 福州水字节科技有限公司, 福建 福州 350100; 3. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

**摘要:** SWMM下渗模型无法处理模拟开始时土壤处于不完全干燥状态的情况。通过在Horton模型中引入初始下渗速率参数、在Green-Ampt模型中引入初始湿度亏损参数、在曲线数模型中引入初始曲线数参数,使土壤初始状态得以被考虑进模型计算过程中。针对SWMM中不同类型的下渗模型,给出了初始累积下渗量、初始下渗时间、初始累积降雨量等过程状态参数的计算方法。以单一降雨事件为例,说明改进算法的可行性。案例计算结果表明,在土壤处于初始不完全干燥状态时,土壤下渗能力出现了明显降低。

**关键词:** SWMM; 下渗模型; 算法改进

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0122-04

### Algorithm Improvement of SWMM Infiltration Model

HE Juan<sup>1</sup>, LIANG Xiao-guang<sup>2,3</sup>, WEN Wei-hua<sup>1</sup>, YIN Le-fu<sup>1</sup>, SHENG Wang<sup>1</sup>

(1. Foshan Urban Planning and Design Institute, Foshan 528000, China; 2. Fuzhou Waterbyte Technology Co. Ltd., Fuzhou 350100, China; 3. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** Infiltration model of SWMM cannot handle the situation that the soil is not completely dry at the beginning of the simulation. The initial state of soil was considered in the calculation process of the model by introducing initial infiltration rate parameter in Horton model, initial moisture deficit parameter in Green-Ampt model, and initial curve number parameter in curve number model. According to different types of infiltration model in SWMM, this paper introduced the methods for calculation of intermediate state parameters, such as initial cumulative infiltration volume, initial infiltration time and initial cumulative rainfall volume. A single rainfall event was taken as an example to illustrate the feasibility of the improving algorithm. The results showed that the infiltration capacity of soil was obviously reduced when the soil was in initial incompletely dry state.

**Key words:** SWMM; infiltration model; algorithm improvement

下渗是水文过程的重要环节,理论上可通过Richards方程进行求解<sup>[1]</sup>。但由于Richards方程属于高度非线性偏微分方程,求解难度大,实际应用中下渗过程一般采用经验或半经验公式计算。美国环保局开发的SWMM软件提供了5种下渗模型,分别是Horton模型、修正Horton模型、Green-Ampt

模型、修正Green-Ampt模型和曲线数模型,这些模型均假定模拟开始时土壤处于完全干燥状态<sup>[2]</sup>。但是,这个要求在实际情况中是无法得到保证的,对于某些设计工况其计算结果也是不安全的。因此,有必要改进求解算法,以便能适应土壤的各种初始状态。

## 1 Horton 模型

Horton 模型是最经典的下渗模型,它是一种经验模型,其原始形式为<sup>[3]</sup>:

$$f_p = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})e^{-k_d t} \quad (1)$$

式中: $f_p$ 为下渗速率,mm/h; $f_{\min}$ 为最小下渗速率,mm/h; $f_{\max}$ 为最大下渗速率,mm/h; $k_d$ 为衰减系数, $h^{-1}$ ;  $t$ 为降雨历时,h。

在大多数参考资料中, $f_{\max}$ 均表述为“最大或初始下渗速率”<sup>[4-5]</sup>。对于不考虑下渗速率恢复的情况,采用初始下渗速率代替最大下渗速率进行计算是可行的,此时 $f_{\max}$ 可以是初始下渗速率。但是,对于需要考虑下渗速率恢复的情况(如长期降雨事件模拟),假如 $f_{\max}$ 取初始下渗速率,则在下渗速率恢复过程中,由于缺乏最大下渗速率参数,恢复计算无法正确进行。因此,式(1)中 $f_{\max}$ 需表述为“最大下渗速率”,而非“最大或初始下渗速率”,这在初始下渗速率不等于最大下渗速率时非常有必要。

Horton 模型的原始形式要求降雨强度总是大于式(1)计算得到的潜在下渗速率,但在实际中该要求几乎不成立,因为降雨强度通常在降雨刚开始时较小,但此时潜在下渗速率却较大。对于很小的降雨强度,Horton 模型的原始形式中下渗速率仍然随着降雨历时指数衰减,这明显不符合常理。为了解决该问题,SWMM 采用了 Horton 模型的积分形式<sup>[6]</sup>:

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f_p dt = f_{\min} t_p + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{k_d} (1 - e^{-k_d t_p}) \quad (2)$$

式中: $F$ 为时刻 $t_p$ 的累积下渗量,mm。

当降雨强度小于式(1)计算得到的潜在下渗速率时,实际下渗速率等于降雨强度。由于该情况的存在,当降雨历时为 $t_1$ 时,其真实的累积下渗量很可能并不是 $F(t_1)$ ,而是 $F(t_2)$ ,且 $t_2$ 必定小于或等于 $t_1$ 。相应地,降雨历时为 $t_1$ 时的潜在下渗速率就应将 $t_2$ 代入式(1)计算,而非 $t_1$ 。这种处理方法实际上就是将 Horton 模型从下渗速率随降雨历时衰减转变为下渗速率随累积下渗量衰减。

在 SWMM 引擎源代码中,累积下渗量 $F$ 是一个状态,它是求解 Horton 模型的关键,会在每一个计算时间步长中得到更新。同时,由于下渗速率恢复计算的需要, $F$ 对应的下渗时间 $t_p$ 也是一个状态,也会在每一个计算时间步长中得到更新。

SWMM 假设模拟开始时土壤处于完全干燥状态,累积下渗量 $F$ 及其对应的下渗时间 $t_p$ 初始值均为0。如果模拟开始时土壤并未处于完全干燥状态,此时应对 Horton 模型进行改进,增加初始下渗速率 $f_0$ 。采用式(1)计算出 $f_0$ 对应的 $t_p$ 值,采用式(2)计算出 $t_p$ 值对应的 $F$ 值,即为改进后算法的 $F$ 及 $t_p$ 的初始值。对于修正 Horton 模型,由于未使用状态 $t_p$ ,因此仅需修改累积下渗量 $F$ 的初始值。

综上所述,为适应土壤各种初始状态,Horton 模型和修正 Horton 模型算法改进主要包括:① Horton 模型和修正 Horton 模型需要5个输入参数,分别为最大下渗速率、最小下渗速率、衰减系数、干燥时间和最大蓄水量,改进算法增加1个初始下渗速率参数,即改进后需要6个输入参数。② $F$ 及 $t_p$ 的初始值由0改进为需要根据初始下渗速率 $f_0$ 计算。

## 2 Green-Ampt 模型

Green-Ampt 模型是半经验模型,在下渗的过程中,该模型假设存在一个水平的湿润锋,湿润锋以上土壤(湿润区)处于湿润状态,含水率随降雨过程从初始状态增加至饱和含水状态,湿润锋以下土壤(非湿润区)处于非湿润状态,含水率维持在初始状态。Green-Ampt 模型形式如下<sup>[1,5-6]</sup>:

$$f_p = K_s \left[ 1 + \frac{(\Psi_s + d)\theta_d}{F} \right] \quad (3)$$

式中: $f_p$ 为下渗速率,mm/h; $K_s$ 为饱和导水率,mm/h; $\Psi_s$ 为吸入水头,mm; $d$ 为地面积水深度,mm; $\theta_d$ 为当前湿度亏损; $F$ 为累积下渗量,mm。

下渗受最上层土壤控制,其厚度计算式为<sup>[6]</sup>:

$$L_u = 20.16 \sqrt{K_s} \quad (4)$$

式中: $L_u$ 为最上层土壤厚度,mm。

$\theta_d$ 等于最上层土壤饱和含水率与当前含水率的差值。模拟开始时,最上层土壤当前含水率等于初始含水率。随着模拟时间的增加,最上层土壤当前含水率指每一个计算时间步长开始时的含水率,其大于或等于初始含水率、小于或等于最大含水率。

累积下渗量 $F$ 是一个状态,会在每一个计算时间步长中得到更新。同时,为了计算每个时间步长开始时的当前湿度亏损,最上层土壤当前蓄水量 $F_u$ 也是一个状态,它等于 $L_u$ 乘以最大湿度亏损与 $\theta_d$ 的差值。当最上层土壤完全饱和,即 $\theta_d=0$ 时,Green-Ampt 模型的下渗速率 $f_p$ 等于饱和导水率 $K_s$ 。

SWMM假设模拟开始时土壤处于完全干燥状态,此时 $F$ 和 $F_u$ 均为0。如果模拟开始时土壤并未处于完全干燥状态,此时应对Green-Ampt模型进行改进,增加初始湿度亏损参数,用符号 $\theta_{d0}$ 表示。对应于 $\theta_{d0}$ 的 $F$ 和 $F_u$ 的计算式为:

$$F = F_u = L_u (\theta_{dmax} - \theta_{d0}) \quad (5)$$

式中: $F$ 为累积下渗量(初始),mm; $F_u$ 为最上层土壤当前含水量(初始),mm; $\theta_{dmax}$ 为最大湿度亏损; $\theta_{d0}$ 为初始湿度亏损。

修正Green-Ampt模型与Green-Ampt模型的唯一区别在于判断一场新降雨出现的标准不同,而这和初始湿度亏损无关。因此对Green-Ampt模型的改进同样适用于修正Green-Ampt模型。

综上所述,为适应土壤各种初始状态,Green-Ampt模型和修正Green-Ampt模型算法改进主要包括:①Green-Ampt模型和修正Green-Ampt模型需要3个输入参数,分别为吸入水头、饱和导水率与最大湿度亏损,改进算法增加1个初始湿度亏损参数,即改进后需要4个输入参数。② $F$ 和 $F_u$ 的初始值由0改进为需要根据 $\theta_{d0}$ 计算。

### 3 曲线数模型

原始曲线数模型属于综合模型,其形式为<sup>[6-7]</sup>:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S_{max}} \quad (6)$$

式中: $Q$ 为总径流量,mm; $P$ 为总降雨量,mm; $I_a$ 为初始损失,mm; $S_{max}$ 为土壤最大可用蓄水量,mm。

由于SWMM已经通过洼地蓄水参数考虑了初始损失 $I_a$ ,因此式(6)可不再考虑初始损失,变为<sup>[6]</sup>:

$$Q = \frac{P^2}{P + S_{max}} \quad (7)$$

最大可用蓄水量 $S_{max}$ 是饱和含水土壤与完全干燥土壤所含水量的差值,计算式如下<sup>[7]</sup>:

$$S_{max} = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (8)$$

式中:CN为曲线数。

将降雨量减去径流量(假设不考虑蒸发),即为累积下渗量,计算式为<sup>[6]</sup>:

$$F(t) = P(t) - \frac{P(t)^2}{P(t) + S_e} \quad (9)$$

式中: $F(t)$ 为 $t$ 时刻的累积下渗量,mm; $P(t)$ 为 $t$ 时刻的累积降雨量,mm; $S_e$ 为 $t$ 时刻所属降雨事件开

始时的可用蓄水量,mm。

曲线数模型的下渗速率计算式为<sup>[6]</sup>:

$$f = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \quad (10)$$

式中: $f$ 为 $t \sim (t + \Delta t)$ 时段内的下渗速率,mm/h; $F(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的累积下渗量,mm; $\Delta t$ 为计算时间步长,h。

土壤初始含水率的差别可以用曲线数CN来反映,曲线数越大,初始含水率越高。与初始曲线数有关的状态为 $F$ 、 $P$ 和 $S_e$ 。

SWMM假设模拟开始时土壤处于完全干燥状态,曲线数为对应土壤的最小曲线数 $CN_{min}$ ,此时 $F=0$ 、 $P=0$ 、 $S_e=S_{max}$ 。如果模拟开始时土壤并未处于完全干燥状态,则应对曲线数模型进行改进,增加初始曲线数参数,用符号 $CN_0$ 表示,此时:

$$S_{max} = 25.4 \left( \frac{1000}{CN_{min}} - 10 \right) \quad (11)$$

$$S_e = 25.4 \left( \frac{1000}{CN_0} - 10 \right) \quad (12)$$

$$F = S_{max} - S_e \quad (13)$$

$$P = S_{max} (S_{max} - S_e) / S_e \quad (14)$$

综上所述,曲线数模型算法改进主要包括:①SWMM的曲线数模型需要2个输入参数,分别为最小曲线数和干燥时间,改进算法增加1个初始曲线数,即改进后需要3个输入参数。② $F$ 、 $P$ 和 $S_e$ 的初始值改进为需要根据初始曲线数 $CN_0$ 计算。

### 4 计算案例

本案例中,降雨时间为1h,0~5min的降雨强度为5mm/h,每5min降雨强度增加5mm/h;30~35min降雨强度降为25mm/h,之后每5min降雨强度下降5mm/h,55~60min时降雨强度降至0。积水深度为0mm。

Horton模型:假设最小下渗速率为2mm/h,最大下渗速率为30mm/h,衰减系数为4h<sup>-1</sup>。改进算法需要的初始下渗速率为20mm/h,对应的初始累积下渗量为2.72mm、初始下渗时间为0.11h。改进前和改进后的下渗速率见表1,当土壤初始不完全干燥时,下渗速率明显较低。

Green-Ampt模型:假设吸入水头为165mm、饱和导水率为6.35mm/h、最大湿度亏损为0.2。改进算法需要的初始湿度亏损为0.1,对应的初始累积下渗量和最上层土壤蓄水量均为5.08mm。改进前

和改进后的下渗速率见表 2,当土壤初始不完全干燥时,下渗速率明显较低。

表 1 Horton 模型改进前后下渗速率对比

Tab.1 Comparison of infiltration rate before and after Horton model improvement

时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )
0~5	5.00	5.00	30~35	7.88	5.04
5~10	10.00	10.00	35~40	6.21	4.18
10~15	15.00	13.54	40~45	5.02	3.56
15~20	17.99	10.27	45~50	4.16	3.12
20~25	13.45	7.92	50~55	3.55	2.80
25~30	10.21	6.24	55~60	0.00	0.00

表 2 Green-Ampt 模型改进前后下渗速率对比

Tab.2 Comparison of infiltration rate before and after Green-Ampt model improvement

时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )
0~5	5.00	5.00	30~35	12.40	6.43
5~10	10.00	10.00	35~40	9.47	6.35
10~15	15.00	15.00	40~45	7.60	6.35
15~20	20.00	12.91	45~50	6.35	6.35
20~25	25.00	9.77	50~55	5.00	5.00
25~30	17.89	7.80	55~60	0.00	0.00

曲线数模型:假设最小曲线数为 80,对应的最大可用蓄水量为 63.5 mm。改进算法需要的初始曲线数为 85,对应的降雨事件开始时的可用蓄水量为 44.82 mm,初始累积下渗量为 18.68 mm,初始累积降雨量为 26.46 mm。改进前和改进后的下渗速率见表 3,当土壤初始不完全干燥时,下渗速率明显较低。

表 3 曲线数模型改进前后下渗速率对比

Tab.3 Comparison of infiltration rate before and after curve number model improvement

时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	时间/ min	改进前下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	改进后下 渗速率/ (mm·h <sup>-1</sup> )
0~5	4.97	0.00	30~35	18.77	7.64
5~10	9.74	0.00	35~40	14.28	5.84
10~15	14.15	0.00	40~45	10.30	4.23
15~20	18.06	0.00	45~50	6.68	2.75
20~25	21.36	2.80	50~55	3.29	1.36
25~30	24.00	9.71	55~60	0.00	0.00

5 结论

为解决 SWMM 中下渗模型无法用于土壤初始不完全干燥情况的问题,通过在 Horton 模型中增加初始下渗速率参数、在 Green-Ampt 模型中增加初始湿度亏损、在曲线数模型中增加初始曲线数,来反映土壤初始的不完全干燥状态。通过修改算法,给出了和这些土壤初始值有关的计算状态的初始化方法。这些问题的解决,有助于更好地建立符合实际情况的水文模型。同时,问题的解决方法也对水文学下渗理论的发展做出了一定贡献。

参考文献:

[ 1 ] VIJAY P S. Handbook of Applied Hydrology [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.

[ 2 ] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.1) [M]. Washington D. C. : United States Environmental Protection Agency, 2015.

[ 3 ] BEVEN K. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes [J]. Hydrological Processes, 2014, 18:3447-3460.

[ 4 ] MULETA N B. Comprehensive Urban Hydrologic Modeling Handbook for Engineers and Planners [M]. California: MWH Soft, 2006.

[ 5 ] AKAN A O, HOUGHTALEN R J. Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality Engineering Applications and Computer Modeling [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2003.

[ 6 ] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model Reference Manual—Volume I : Hydrology (Revised) [M]. Washington D. C. : United States Environmental Protection Agency, 2016.

[ 7 ] Natural Resources Conservation Service. Urban Hydrology for Small Watersheds [M]. Washington D. C. : United States Department of Agriculture, 1986.

作者简介:贺娟(1987- ),女,湖南衡阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政排水工程规划设计、海绵城市规划设计、排水模型模拟。

E-mail:2460633980@qq.com

收稿日期:2020-03-19

修回日期:2020-08-25

(编辑:任莹莹)