

# 用土壤物理特性推求 Green-Ampt 入渗模型中吸力参数 $S_f^*$

张光辉<sup>1,2</sup> 邵明安<sup>2</sup>

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

## USING SOIL PHYSICAL PROPERTIES TO DETERMINE THE ABSORPTIVE PARAMETER $S_f$ IN Green-Ampt INFILTRATION MODEL

Zhang Guang-hui<sup>1,2</sup> Shao Ming-an<sup>2</sup>

(1 Department of Resource and Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling Shaanxi 712100)

关键词 Green-Ampt 入渗模型, 土壤吸力参数  $S_f$

中图分类号 S152.72

Green-Ampt 模型是 1911 年由 Green-Ampt 基于毛管理论提出的入渗模型<sup>[1]</sup>, 国外在 50 年代就有广泛的应用, 70 年代以后又有了新的发展和完善。该模型形式简单, 且具有一定的物理学基础。虽然它是基于均质土壤推导而来, 但 70 年代以后被普遍用于非均质土壤或初始含水量分布不均匀的情况, 结果均较为满意<sup>[2]</sup>。土壤质地较为均一的假定对分布极广、水平层理发育较好的黄土是完全可以满足的。1973 年 Mein 和 Larson 提出了将 Green-Ampt 模型应用于降雨入渗的研究领域, 并推导出了相应的修正模型<sup>[3]</sup>。自此 Green-Ampt 模型被广泛应用于降雨入渗、坡面产流、土壤侵蚀预测预报模型等研究领域, 在欧洲的 LISEM 模型<sup>[4]</sup>和美国的 WEPP 模型<sup>[5]</sup>中均有应用。实际应用 Green-Ampt 模型时, 如何准确、迅速确定饱和导水率  $K_s$  和土壤吸力参数  $S_f$  具有一定的难度。一般  $K_s$  可用常水头法测定, 而  $S_f$  则不易用实验直接测定, 在国外一般先假定  $S_f$  值, 利用土壤入渗试验结果进行反推, 这种方法既费时费力, 又精度不高, 而在国内还没有现成的推求方法, 从而限制了 Green-Ampt 模型在我国的应用和发展。

\* 中国科学院资源与生态环境研究重大项目(批准号: KZ951-B1-211)资助和国家杰出青年科学基金资助项目(49725103)

收稿日期: 1999-05-12; 收到修改稿日期: 2000-02-22

本文以 Brooks 和 Corey 持水模型条件下的 van Genuchten 导水模型为基础,首次用土壤物理特性推导出 Green-Ampt 入渗模型中土壤吸力参数  $S_f$  的计算公式,经用人工模拟降雨土壤累积入渗量检验,相对误差在 2.2%~13.7% 之间变化,从而表明应用土壤物理特性可以较为准确地推求土壤吸力参数  $S_f$ ,进而应用于土壤入渗、坡面产流、土壤侵蚀等研究领域。

## 1 $S_f$ 的推求

根据 Neuman<sup>[2]</sup> 的定义,  $S_f$  可表示为:

$$S_f = \int_0^{S_i} k_r ds = \frac{1}{K_0} \int_0^{S_i} k(s) ds \quad (1)$$

式中  $K_r$  为相对导水率,它是土壤导水函数  $K(s)$  与饱和导水率  $K_s$  的比值,  $S_i$  为对应于初始含水量度  $\theta_i$  的土壤吸力,  $K_0$  为与土壤初始含水量相对应的导水率,  $S$  为土壤吸力。

根据 Brooks 和 Corey 条件下的 van Genuchten 导水模型,  $K(s)$  可表示为<sup>[6]</sup>:

$$K(s) = k_s (\alpha s)^{-[\lambda(l+2)+2]} \quad (2)$$

式中  $\alpha$ 、 $l$ 、 $\lambda$  均为持水曲线形状系数,其中  $\alpha$  为经验常数,其倒数通常被视为土壤进气值,  $l$  为土壤孔隙连接参数,  $\lambda$  为土壤孔隙分布参数,它影响土壤持水曲线的斜率。

Bouwer<sup>[7]</sup> 经过研究发现,  $K_0$  为饱和导水率  $K_s$  的 0.4~0.6, 在计算  $S_f$  时可采用平均值 0.5, 因而(1)式变为:

$$S_f = \frac{1}{2} \int_0^{S_i} (\alpha s)^{-[\lambda(l+2)+2]} ds \quad (3)$$

对(3)式积分得:

$$S_f = -\frac{1}{2\alpha[\lambda(l+2)+1]} (\alpha s)^{-[\lambda(l+2)+1]} \Big|_0^{S_i} \quad (4)$$

(4)式给出了土壤吸力参数  $S_f$  的计算公式,但其中的变量为土壤吸力  $S$ ,而土壤吸力  $S$  因测定过程复杂且精度低而不易直接测定,而土壤含水量是一容易测定且测定精度高的参数,因而需要转换为容易测定的土壤含水量作为参变量。根据 Brooks 和 Corey 持水模型<sup>[8]</sup>有:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (\alpha s)^{-\lambda} \quad (5)$$

式中  $\theta$  为土壤含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_s$  为饱和含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_r$  为残余含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), 亦即调萎常数。

将(5)式变形

$$S = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (6)$$

将(6)式样代入(4)式:

$$S_f = -\frac{1}{2\alpha[\lambda(l+2)+1]} \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{-\left(l+2+\frac{1}{\lambda}\right)} \Big|_{\theta_i}^{\theta} \quad (7)$$

(7)式的积水上限为初始含水量  $\theta_i$ , 积分下限为  $\theta_s$ , 将(7)式进行简化, 整理得:

$$S_f = \frac{1}{2\alpha[\lambda(l+2)+1]} \left[ 1 - \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_i - \theta_r} \right)^{-\left(l+2+\frac{1}{\lambda}\right)} \right] \quad (8)$$

由 van Genuchten 导水模型<sup>[6]</sup>可知,  $\lambda = mn$ , 将其代入(8)式即得  $S_f$ 的表达式:

$$S_f = \frac{1}{2\alpha[mn(l+2)+1]} \left[ 1 - \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_i - \theta_r} \right)^{-\left(l+2+\frac{1}{mn}\right)} \right] \quad (9)$$

式中  $m, n, l$  均为无量纲参数,  $\alpha$  为经验参数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) 所以由(9)式计算所得  $S_f$  的单位为  $\text{cm}$ 。在实际应用中利用实测的土壤持水曲线, 用 RETC 程序进行模拟, 预测出参数  $m, n, l, \alpha, \theta_s, \theta_r$  及  $K_s$ , 同时将测定的土壤前期含水量代入(9)式, 即可计算出土壤吸力参数  $S_f$ 。但值得注意的是, 由于 RETC 程序中导水模型的限制, 一般很难准确预测饱和导水率  $K_s$ <sup>[6]</sup>, 此时可用常水头法测定出饱和导水率, 进而计算出  $S_f$ 。

## 2 $S_f$ 精度检验

为了检验  $S_f$  的计算精度, 在中国科学院、水利部水土保持研究所安塞水土保持综合试验站进行了 9 场人工模拟降雨试验, 降雨由 4 个侧喷式降雨器提供, 用均匀分布的 9 个雨量筒对降雨均匀性进行了监测, 均匀系数达 0.94。降雨小区长 10m、宽 2m、坡度为  $15^\circ$ , 降雨高度为 5m, 基本满足野外人工模拟降雨对降雨高度的要求, 各场降雨的基本参数见表 1。降雨前用带孔的 PVC 塑料环(直径 11cm、高 8cm)在小区任意位置采集 2 个土样, 同时用不锈钢环(直径 11cm、高 12cm)采集 2 个饱和导水率土样, 在实验室分别用蒸发法和常

表 1 9 场人工模拟降雨基本参数

| 降雨场次                                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 径流起始时间(s)                           | 35    | 51    | 38    | 28    | 61    | 58    | 44    | 53    | 25    |
| 前期含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | 0.205 | 0.174 | 0.217 | 0.187 | 0.186 | 0.115 | 0.227 | 0.234 | 0.211 |
| 降雨强度(mm/min)                        | 1.43  | 1.43  | 1.43  | 2.00  | 2.00  | 2.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
| 降雨历时(min)                           | 30    | 45    | 60    | 20    | 30    | 40    | 30    | 45    | 60    |

水头法测定, 用 APPIA 软件分析获得  $\theta_s, \theta_r, \alpha, m, n, l$ , 同时在降雨前利用便携式 TDR 在小区任意 12 个位置测定 0~20cm 的土壤含水量, 平均后作为该次降雨的前期含水量, 将所有参数代入(9)式计算出各场降雨的  $S_f$ (表 2)。降雨开始后测定径流起始时间, 径流出现后每 3 分钟测定 1 次径流量, 试验结束后用径流量反推出降雨过程小区实际入渗量。

为了检验  $S_f$  的计算精度, 将降雨量减去实测的累积径流量, 得到每场降雨的累积入渗量, 同时将计算的每场降雨的  $S_f$  值代入修正的 Green-Ampt 入渗模型, 采用试算、迭代方法模拟出每场降雨的土壤入渗过程, 获得预测的累积入渗量, 计算过程用 Qbasic 完成, 试算的时间步长为 0.5 分钟<sup>(1)</sup>, 将预测的土壤累积入渗量与实测的累积入渗量进行比较, 计算模拟的相对误差(表 3)。

表2 9场模拟降雨土壤物理特性

| 降雨场次   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7      | 8     | 9     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| $m$  | 0.492  | 0.662  | 0.452  | 0.666  | 0.562  | 0.345 | 0.252  | 0.445 | 0.458 |
| $n$  | 3.081  | 2.959  | 3.652  | 2.328  | 3.257  | 0.363 | 4.121  | 3.124 | 2.894 |
| $l$  | -5.080 | -1.260 | -1.930 | -1.230 | -2.270 | 0.000 | -1.060 | 0.500 | 0.500 |
| $\alpha$ (1/cm)                                | 0.101  | 0.005  | 0.009  | 0.007  | 0.006  | 0.005 | 0.008  | 0.008 | 0.007 |
| $\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) | 0.417  | 0.419  | 0.402  | 0.410  | 0.410  | 0.424 | 0.396  | 0.412 | 0.414 |
| $\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) | 0.100  | 0.100  | 0.100  | 0.100  | 0.100  | 0.100 | 0.100  | 0.100 | 0.100 |
| $K_s$ (cm/d)                                   | 3.402  | 10.50  | 6.00   | 12.37  | 11.06  | 6.00  | 6.00   | 6.00  | 6.00  |

表3  $S_f$ 精度检验结果

| 降雨场次              | 1   | 2   | 3   | 4    | 5   | 6   | 7    | 8   | 9   |
|-------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 土壤吸力参数 $S_f$ (cm) | 21  | 34  | 24  | 28   | 47  | 29  | 25   | 42  | 52  |
| 相对误差 (%)          | 2.2 | 5.3 | 3.6 | 10.0 | 4.6 | 4.5 | 13.7 | 4.9 | 4.6 |

从表3可以看出,以土壤物理特性为基础,应用文中推导的方法计算土壤吸力参数 $S_f$ ,具有较高的计算精度,相对误差仅为2.2%~13.7%,且9场降雨中8场的模拟精度在10%以内,充分说明了 $S_f$ 计算公式的合理性,值得在土壤入渗、坡面产流模型、水土流失预测预报模型建立等生产和科研活动中应用。

### 3 土壤物理参数的获取

在计算土壤吸力参数 $S_f$ 时,需要已知土壤物理参数 $m$ 、 $n$ 、 $l$ 、 $\alpha$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 及 $K_s$ ,文中应用了蒸发法测定非饱和土壤物理参数,而作为一般的应用可采集未扰动土样,用离心机、压力膜、张力计或其它方法,测定土壤持水特征曲线,用幂函数计算出导水曲线<sup>[9]</sup>,用van Genuchten模型模拟出土壤物理参数<sup>[10]</sup>。另一途径是利用更易测定的土壤质地、干容重或有机质含量计算出土壤持水曲线和导水曲线<sup>[11~13]</sup>,再用van Genuchten模型拟合出土壤物理参数,代入文中推导的计算公式即可获得土壤吸力参数 $S_f$ ,进一步应用于土壤入渗、节水灌溉、坡面产汇流分析等研究领域。

### 参 考 文 献

- Green W H, Ampt G A. Studies in soil physics. I. The flow of air and water through soils. J. Agr. Sci., 1911, 4:1~24
- 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. 86~92
- Mein R, Larson C. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resource Res., 1973, 9:384~394
- DE ROO, Wesseling G, Ritsema J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output hydrological processes, 1996, 10:1107~1117
- Lane L, Nearing M, Laflen M. Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction

(1) 张光辉. 小流域土壤物理性状时空变异及坡面产流过程模拟. 中国科学院、水利部水土保持研究所99届博士学位论文, 1999, 61~68

- project (WEPP) model. In Parsons A J, Abrahams A D. eds. Overland Flow: Hydraulic and Erosion Mechanics. London: UCL Press Limited, 1992. 377~391
6. Van Genuchten M, Leij J, Yates R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Robert S. Kerr Environmental research laboratory office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency ADA, Oklahoma, 74820. 1991. 9~17
  7. Bouwer H. Infiltration of water into nonuniform soil. *Peoc. ASCE*, 1969, 95(IR4):451~462
  8. Brooks R H, Corey A T. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper No.3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado. 1964. 27
  9. 邵明安, 李开元, 钟良平. 根据土壤水分特征曲线推求土壤的导水参数. 中国科学院. 水利部西北水土保持研究所集刊(SPAC中水分运动与模拟研究专集), 1991. 18: 26~32
  10. van Genuchten M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.*, 1980, 44:1042~1050
  11. Woten J H, van Genuchten M. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Am. J.*, 1988, 52:1762~1770
  12. Campbell G S. Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-plant Systems. Amsterdam:Elsevier, 1985. 50~57
  13. Rawls J C, Brakensiek D L, Saxton K E. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*. 1982, 25(5): 1316~1320