

Green-Ampt 入渗模型及其应用

李 毅^{1,2}, 王全九^{2,3}, 邵明安², 巨娟丽¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3 西安理工大学 水资源研究所, 陕西 西安 710048)

[摘 要] 介绍了降雨条件下 Green-Ampt 模型的改进形式, 以及国内外利用实验和理论方法推求模型中湿润锋处吸力的方法, 对其在积水入渗、降雨入渗、结皮及侵蚀模型中的应用进行了探讨, 对该模型与其他模型进行了对比分析, 并展望了模型的应用前景。认为该模型可进一步被应用于植被覆盖条件、坡地降雨过程及坡地浑水入渗过程的分析; 在今后坡地水文的研究中, 可针对以上不同条件进行 Green-Ampt 模型应用于黄土坡地水文过程的修正和改进。

[关键词] Green-Ampt 模型; 坡面降雨; 积水入渗特征; 模型改进

[中图分类号] S152.7⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0225-06

Green-Ampt model and its application

LI Yi^{1,2}, WANG Quan-jiu^{2,3}, SHAO Ming-an², JU Juan-li¹

(1 College of Hydraulic and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,

China Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 Institute of Water Resources Research, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The modified Green-Ampt model was introduced under rainfall conditions, as well as the domestic and international methods to determine the parameter of soil water suction of wetting front in the model according to experiment and theory. The corresponding application of the model is discussed including ponding water infiltration, rainfall and infiltration, crust and erosion models, and the comparison between the model and the other models was analyzed. Based on the results obtained by the former studies, the applying prospects of the model was viewed. Green-Ampt model can be used under the conditions of vegetation cover, rainfall of sloped land and muddy water infiltration on slope land. In the later studies of slope land hydrology, Green-Ampt model can be modified and revised when studying Loess slope land hydrology process.

Key words: Green-Ampt model; rainfall on slope land; ponding water infiltration characteristics; model modification

入渗是指水分进入土壤的过程, 是田间水循环过程中降雨或灌溉水向土壤水分转化的重要环节。多年来, 许多学者就入渗特征提出了不同的模型^[1-6], 其中包括 Green-W-H 和 Ampt-G-A^[1] 早在

1911 年根据毛管理论提出的近似积水模型, 即 Green-Ampt 入渗模型。Green-Ampt 模型也称为活塞置换模型, 与描述非饱和土壤水分运动复杂形式的 Richards 方程相比, 该模型形式上较为简单。同

° [收稿日期] 2006-01-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40371057); 西北农林科技大学科研专项(05ZR043); 西北农林科技大学 2006“青年学术骨干支持计划”项目

[作者简介] 李 毅(1974-), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源和土壤物理研究。

时, Green-Ampt 入渗模型具有明确的物理意义, 便于建立其特征参数与土壤物理特征间的关系, 其计算结果也很精确, 因此得到了国内外学者的认同。

Green-Ampt 模型最初仅适用于土质均匀、初始干燥的薄层积水条件的入渗, 未考虑层状土入渗过程, 也不涉及浑水含沙量对入渗的影响, 更未详尽探讨土壤中禁锢空气对模型参数的影响, 也未明确给出不同条件下模型参数的变化范围, 因而模型的最初应用十分有限。基于 Green-Ampt 模型形式简单的优点, 为便于应用, 许多学者在特定条件下对其进行了改进, 本文介绍了降雨条件下 Green-Ampt 模型的改进形式, 并对其研究现状进行了综述, 对其应用前景进行了展望, 以期对坡面降雨及入渗特征的研究提供方法上的指导, 促进该模型在不同地域和降雨条件下的应用。

1 入渗(降雨)模型简介

通常非饱和土壤水分运动可以用 Darcy 定理和 Richards 方程进行描述, 但由于其模型表述形式复杂, 而且需要土壤水分运动参数, 其求解若非采用解析法或数值法则难以获得, 因而不便应用。为寻求描述土壤入渗特征的简单途径, 国内外学者提出了具有不同特点和用途的入渗模型来描述入渗规律。目前常用的入渗模型有 Green-Ampt 模型^[1]、Philip 模型^[4]、Horton 模型^[5]及 Kostiakov 经验模型^[6]等。

Philip 入渗模型^[4]是根据垂直入渗的级数解获得的, 可近似表示为:

$$f = 0.5 S t^{0.5} + B. \quad (1)$$

式中: f 为入渗率, cm/min ; S 为吸湿率, $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$; t 为入渗时间, min ; B 为常数, cm/min 。

Kostiakov 公式、Horton 公式及通用入渗公式均为经验型公式, 入渗参数无明确物理意义, 在此不再赘述。

Green-Ampt 模型假定在积水入渗过程中, 土壤含水量剖面中存在一个很陡的湿润锋面, 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 1 个固定不变的吸力 S_f ^[1], 若用几个较易获得的参数来表示入渗关系, 则有:

$$f = K_s [1 + (\theta - \theta_s) S_f / I]. \quad (2)$$

式中: f 为入渗率, cm/min ; K_s 为有效饱和导水率, cm/min ; θ 和 θ_s 分别为土壤初始含水量及饱和含水量, cm^3/cm^3 ; I 为累积入渗量, cm 。

Mein 和 Larson^[7]提出了降雨条件下 Green-

Ampt 模型的表达形式, 即设稳定的降雨强度为 R (cm/min), 降雨后开始积水的时间为 t_p (min), 入渗率 $f = R$ 时的累积入渗量计为 I_p (cm), 则 Green-Ampt 模型可表示为:

$$f = \begin{cases} R & t \leq t_p, \\ K_s [1 + (\theta - \theta_s) S_f / I_p] & t > t_p. \end{cases} \quad (3)$$

开始积水的时间 t_p 由下式给出:

$$t_p = I_p / R. \quad (4)$$

Green-Ampt 公式的主要优点为: (1) 基质作用通过概化湿润锋处的平均吸力 S_f 来体现, 在形式上类似于饱和 Darcy 定律, 具有 Darcy 定理的功能, 但比其形式简单, 同时能够反映非饱和土壤的入渗特征; (2) 将重力作用和基质作用完全分开, 而后者可通过简单代数形式进行描述, 因此便于通过简单分析来揭示不同条件下重力势和基质势的贡献及相应的影响因素; (3) 所需的参数不多, 其中饱和导水率的试验测定方法简单, 湿润锋处吸力的计算稍复杂, 但可采用不同的方法获取。

2 Green-Ampt 模型的改进

Green-Ampt 模型最初仅适用于前期干燥的均质土, 当研究的土壤特性、区域条件和目的有所变化时, 该模型的应用受到了限制, 为扩大模型的适用条件和范围, 不同学者依据不同的条件对其进行了改进。

令式(2)中 $M = \theta - \theta_s$, 该参数表明了前期土壤水分亏缺量, 则 Green-Ampt 模型可改写为:

$$f = K_s [1 + M S_f / I]. \quad (5)$$

Brakensiek 和 Rawls^[8]为模拟降雨期间地表黏闭的变化, 将导水率 K_s 表示为瞬变的导水率 K_c , 即有:

$$K_s = K_c = K_f + (K_i - K_f) \exp(-CE_s). \quad (6)$$

式中: K_i , K_f 分别为初始黏闭导水率和最终黏闭导水率, cm/min ; E_s 为累积降雨结皮动能, J/m^2 , 该参数为覆盖或糙率影响下的降雨动能; C 为形状系数, 可表示为:

$$C = (1/E_0') \ln [K_f / (K_i - K_f)]. \quad (7)$$

式中: E_0' 为时刻 t_1 的累积降雨动能, J/m^2 ; t_1 为 K_c 降低到 $2K_f$ 的时间, min 。则累积降雨结皮动能 E_s 可表示为:

$$E_{s(i)} = E_{s(i-1)} + B [1 - (RR/4)] E_{0R(i)} \quad (8)$$

式中: i 表示时间增量; B 为土表裸露面积的百分比; RR 为随机糙率, 定义为减去初始糙率后单个地表

高度的标准差, cm ; E_0 为单位深度的降雨动能, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。对人工模拟降雨而言, E_0 一般为 $23 \sim 32 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$; 而在天然降雨条件下, 可采用 Rosewell^[9] 针对 Brisbane 地区提出的公式, 根据雨强大小计算 E_0 , 即:

$$E_0 = 26.35[1 - 0.669\exp(-0.0349)I_0] \quad (9)$$

式(6)~(8)将黏闭导水率的降低趋势与累积降雨动能联系起来, 进而将其降低速率与形状系数、土表裸露比率及糙率相联系。当 $B = 0$ 或 $RR = 4.0$ 或 $K_f \geq 0.5K_i$ 时土表无黏闭, 则导水率为常数 ($K_c = K_i$), 入渗解又变为最初的 Green-Ampt 方程。

Silburn 等^[10]采用上述改进方法, 运用降雨模拟资料将分布参数水文模型(ANSWERS)应用于流域尺度范围进行研究。他们针对降雨条件下土壤中存在4个层(即表土层(新耕层)、表面黏闭层、耕作层和其下部土层)的情况, 用模拟降雨器在 1 m^2 小区内进行降雨试验, 结果表明, 对于新耕裸土, 表土黏闭能控制初始积水和后续入渗过程, 但是长历时的入渗则由下部土层特性控制; 此外, 他们还得出了层状土壤系统的一系列参数, 该参数在用于小区入渗特性的预测时效果较好。

3 Green-Ampt 模型的应用

3.1 Green-Ampt 模型参数的计算方法

在 Green-Ampt 模型中, 湿润锋处吸力 S_f 是一个重要参数。实质上 S_f 与实测土壤特性如持水或非饱和导水率之间并无直接的关系, 使该参数无法用直接的物理方法获取, 因此影响了模型的进一步应用。对此, 许多学者针对最初的 Green-Ampt 模型, 探求了湿润锋处吸力参数的经验和理论求解方法。Bouwer^[11]首先建议将湿润锋处吸力 S_f 表示为无量纲形式的相对导水率 K_r 与基质压力势 h 的函数, 即:

$$S_f = \int K_r(h) dh \quad (10)$$

但此式并非由理论推导得出, 而是将模拟水平流动的结果用于垂直情况。为此, 随后 Bouwer^[12]又建立了现场测量进气吸力的实验装置用于估计 S_f 值, 但由于需要获得水分运动参数与含水率的实测关系, 而使该方法的应用受到了限制。Mein 等^[13]提出另一种计算 S_f 值的方法, 即

$$S_f = \left[\int_{K(\theta)}^{K(\theta_0)} h dK(\theta) \right] / [K(\theta_0) - K(\theta)] \quad (11)$$

但该方法与 Bouwer 方法^[11]的结果相同, 殊途同归。

Morel-Seytoux 等^[14]假设空气是不可压缩的并保持在常温下不变, 在此条件下得到的湿润锋处吸力表达式为:

$$S_f = \int_{h_0}^{h_i} f_w dh_0 \quad (12)$$

式中: $f_w = (k_{rw}/\mu_w)/(k_{rw}/\mu_w + k_{ra}/\mu_a)$, 其中 k_{rw} 、 k_{ra} 分别为水和空气的相对导水率; μ_w 、 μ_a 分别为水和空气的动力黏滞系数。但 Morel-Seytoux 等^[14]的推导过程较为繁杂, 而且结果不够精确。

Newman^[15]从理论上推导了 Bouwer^[11]的公式, 与 Morel-Seytoux 等^[14]不同的是, 前者忽略了气体流动的影响, 因而无需确定气体相对渗透性与饱和含水率之间的函数关系。Brakensiek^[16]根据土壤水分特征曲线获得进气压力并探讨了其与 S_f 值的联系。Chong 等^[17]结合前人得出的导水率与湿润锋压力势的表达式, 推导出了具有物理基础而形式简单的几何方程来计算 S_f 值, 即:

$$S_f = m(\theta/a)^{nb}[(b-1)(b+n-1)] \cdot \left[\frac{1 - (\theta/\theta_0)^{(b+n-1)/b}}{1 - (\theta/\theta_0)^{(b-1)/b}} \right] \quad (13)$$

式中: m , n , a , b 均为常量。Chong 等^[17]结合实测入渗资料对该表达式进行了验证, 对比累积入渗量与双环入渗的结果后表明, 该方法对于初始干燥土壤的预测结果较为准确, 且仅适用于土壤脱水过程而不适用于入渗过程。张光辉等^[18]以 Brooks-Corey 持水模型条件下的 van Genuchten 导水模型为基础, 基于土壤物理特性推导出 Green-Ampt 模型 S_f 的计算公式, 并利用人工模拟降雨条件下的土壤累积入渗量资料对其进行了检验, 结果表明其相对误差较小, 说明应用土壤物理特性可以较为准确地推求 S_f 。

3.2 Green-Ampt 模型在积水入渗中的应用

最初的 Green-Ampt 模型仅适用于均质土壤, 为将 Green-Ampt 模型应用于不同土壤情况, 国内外学者对其做了相应的改进。Fok 和 Hansen^[19]推导了该模型的无量纲形式; Fok^[20]后又对其无量纲形式进一步进行了扩展; Hillel 和 Gardner^[21]假设结皮和土壤界面含水率为定值, 采用 Green-Ampt 方法获得了稳定结皮入渗问题的解析解, 实际上在入渗初期边界含水率变化很快, 入渗后期由于入渗率变化不大而可将含水量看作固定不变。Ahuja^[22]基于相应的物理概念, 针对结皮与土壤界面间含水率随时间变化的情况, 建立了结皮土壤的近似 Green-

Ampt 方程, 当剖面形状系数为定值时, 该近似解析方法与实测累积入渗量和有限差分数值解的比较表明, 其误差在允许范围内。

国内对 Green-Ampt 模型的研究起步较晚。汪志荣等^[23]根据不同含沙量波涌灌中连续和间歇供水条件下的入渗资料, 分析了 Green-Ampt 模型的假定在浑水间歇入渗过程中的适用性, 建立了清水、浑水、连续和间歇入渗之间的关系, 讨论了模型参数的确定方法, 结果表明, 该假定可有效用于间歇入渗的情况。王全九等^[24]通过对 Green-Ampt 模型特点的进一步总结, 分析了该模型在沙层阻水、浑水入渗、间歇入渗和降雨入渗方面的应用情况, 提出在浑水入渗特性分析中, 假定致密层在入渗过程中达到饱和, 由此可建立其入渗通量关系, 即:

$$q_n = k_m [1 + H_n(t) / L(t)] \quad (14)$$

式中: q_n 为致密层入渗通量, cm/min ; k_m 为致密层饱和导水率; $H_n(t)$ 为致密层下界面的吸力, cm ; $L(t)$ 为致密层的厚度, cm ; t 为时间, min 。

王文焰等^[25]提出仅将饱和层与传导层统一视为饱和区, 而将非饱和湿润层的含水量变化视为施加于饱和区的吸力势, 基于 Green-Ampt 模型的相关理论, 推导得出了适用于黄土区的入渗模型:

$$t = \frac{(4 + \pi)(\theta - \theta_s)}{16k\theta} [2L - 4(H + S_f) \cdot \ln(\frac{0.5L + H + S_f}{H + S_f})] \quad (15)$$

式中: H 为积水高度, cm ; k 为非饱和导水率, cm/min ; L 为湿润锋深度, cm 。王文焰等^[25]还利用甘肃秦王川地区实测入渗资料对上述模型进行了合理性检验。李援农等^[26]利用自制的入渗仪测定了土壤入渗过程中被禁锢土壤空气的压力大小及其变化, 研究了禁锢土壤空气压力对非饱和土壤入渗水流的阻碍作用, 通过自由入渗与恒定土壤空气压力入渗试验结果的对比, 认为研究入渗问题必须考虑禁锢土壤空气压力的影响作用, 并给出了禁锢土壤空气压力影响下的 Green-Ampt 模型。

3.3 Green-Ampt 模型与其他模型的对比

由于不同的入渗模型基于类似的物理概念, 故学者们对 Green-Ampt 模型与其他入渗模型的联系进行了一些探索。Fok^[27]基于 Darcy 定律和连续方程结合有关物理概念推导出了简单 Green-Ampt 公式, 同时与基于 Richards 方程的 Philip 二项式进行比较, 发现二者在形式上极为相似, 两模型最大差值

小于 17%; Fok^[27]认为该误差的形成有两方面原因: 一是 Philip 模型在推导过程中只取了级数的前两项; 二是 Green-Ampt 方程中有关参数为常量的假定与实际情况有出入。Fok^[27]同时还给出了模型适用的时间范围。Swartzendruber^[28]将土表积水高度表示为时间平方根的函数, 以二项入渗方程为基础, 使用积分方法推导出了 Green-Ampt 模型, 从而揭示了两模型的内在联系。王全九等^[29]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, 建立了两模型特征参数间的理论关系, 利用一维垂直入渗实验资料对该理论关系进行了比较, 验证了其合理性, 并对比分析了两模型的准确性, 发现 Philip 入渗模型对参数精度要求较高, 而 Green-Ampt 模型对参数要求相对较低。

3.4 Green-Ampt 模型在降雨入渗及水文侵蚀过程中的应用

Green-Ampt 模型在水文和侵蚀等涉及入渗过程的计算中也有很多应用。由于地表结皮相对于土壤来说其水力阻力较大, 此时假定界面含水率为定值将导致很大的误差, Ahuja^[30]针对界面含水率随时间变化问题, 将 Green-Ampt 方程应用于降雨的初始阶段, 与 Richards 方程数值解结果比较后发现两者较为吻合, 但计算中需要实测同一时间的入渗率和入渗体积值, 因此限制了该方法的应用。Chu^[31]建立了非稳定降雨条件下, 运用 Green-Ampt 公式计算水蚀预报(W EPP)模型入渗特征的方法, 当初始入渗率与雨强相等时, 积水后的入渗率 f 采用下式计算:

$$f = K_e(1 + N_s/I) \quad (16)$$

式中: K_e 为有效导水率, mm/h ; N_s 为有效基质势, mm ; I 为累积入渗量, mm 。

Risse 等^[32]以 11 个地点的多年天然径流小区资料, 利用 W EPP 模型进行了径流的预报, 对 Green-Ampt 模型中的有效导水率参数进行了优化, 并建立了该参数与土壤结皮、降雨事件大小和前期水分状况之间的相关关系, 调试后表明该方法提高了模拟效率。张光辉等^[33]采用人工降雨, 用蒸发法测定了非饱和土壤物理参数, 将 Green-Ampt 模型与退水曲线法和坡面运动波模型相结合, 计算了产流过程, 其误差可满足一般精度要求。陈力等^[34]在坡面降雨入渗产流规律的研究中, 采用改进的 Green-Ampt 公式进行入渗特征的计算, 并结合运动波理论建立了坡面降雨入渗产流的动力学模型, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = R \cos \theta - f, \\ q = \frac{1}{n} h^{5/3} S_0^{1/2}; \\ \begin{cases} f = K_s [1 + (\theta - \theta_f) S_f / I], \\ I = K_s t + S_f (\theta + \theta_f) \ln \left(1 + \frac{1}{S_f (\theta - \theta_f)} \right). \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

$$(18)$$

式中: h 为水深, m; R 为雨强, cm/min; q 为单宽流量, m^2/s ; S_0 为坡度; n 为 Manning 糙率系数。陈力等^[34]采用数值方法对该模型进行了求解, 并利用实测资料进行了验证, 分析了雨强、土壤初始含水量、渗透系数、坡面阻力以及坡长和坡度等因素对坡面产流过程的影响。王千等^[35]在降雨入渗过程的计算中也使用了 Green-Ampt 模型。Rafael 等^[36]在模拟植被过滤带水文特征和泥沙输移过程中, 采用 Petrov-Galerkin 有限元动力波模型, 结合改进的 Green-Ampt 入渗子模型进行了田间试验, 得到了较为精确的结果。

此外, Chu^[37]研究中用 Green-Ampt 分析法对地面半球形入渗源进行了分析, 得出了三维空间的入渗模型。这表明 Green-Ampt 模型不仅可用于分析垂直入渗, 而且可用于研究三维空间中的水分运动。

4 结论与展望

由于 Green-Ampt 模型的描述形式比较简单且具有明确的物理意义, 因而在降雨入渗和其他涉及土壤水分运动特征的研究中得到了广泛的应用。在我国, 不同地域气候和土壤类型存在差异, 土壤水分管理采用的方式也不相同。以黄土高原为例, 由于多年的降雨和风力作用, 土壤侵蚀严重; 同时该地区的坡地面积较大, 据有关统计资料, 黄土高原坡耕地面积占我国总耕地面积的 71.3%; 此外, 该区坡地的坡度较大, 其中 $6^\circ \sim 25^\circ$ 的坡地占 25%~40%, $25^\circ \sim 35^\circ$ 的坡地占 15%~25%, 35° 以上的坡地占 25%~40%^[38]。近年来, 针对坡地水分运动的研究较多, 但国外的研究多针对 10 以下的缓坡进行, 而由于我国陡坡面积的大量存在, 使土壤水分运动的研究趋于复杂。Green-Ampt 模型基于典型的特点, 在坡地水分运动的研究中将具有巨大的发展潜力。但综观目前研究结果, Green-Ampt 模型在国内的应用, 尤其在坡地水文方面的应用还很有限, 而降雨雨水在接触土表时即开始入渗过程, 其对入渗过程的描述是必不可少的。在今后的研究中, 可就以下方面对

Green-Ampt 模型的研究及应用进行拓展:

1) Green-Ampt 模型自提出以来, 无论是最初在均质土中采用, 还是后来应用于层状土, 均为一维简单条件, 虽然有研究者将模型运用到坡地降雨过程, 但仍为简化的一维条件, 今后在坡地二维或三维条件下的应用方面, 还需要做更多的研究工作。

2) Green-Ampt 模型虽然形式简单, 但参数并不是普遍适用的。当土壤质地改变, 或土壤中有封闭空气时, 湿润锋处的吸力也有所不同。因此, 有必要对土壤颗粒粒径分布或空隙度变化条件下湿润锋吸力参数的相应变化规律做进一步的研究探讨。

3) 目前, 人们对植被覆盖条件下坡地水文过程进行了大量研究, 在影响水分入渗的同时, 植被覆盖也改变了地表的上边界条件, 因此在应用 Green-Ampt 模型时, 其形式也将有所变化, 研究 Green-Ampt 模型受植被覆盖影响的定量关系将具有重要的实际意义。

4) 对浑水入渗条件下 Green-Ampt 模型的研究还不够深入, 对于不同含沙量的浑水对模型参数的影响研究目前尚属空白。

综合以上因素, 对 Green-Ampt 模型的影响研究, 特别是对模型多因素影响的定量关系研究任重而道远, 需在完成以上各部分的研究之后作出系统的归纳与分析。

[参考文献]

- [1] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils[J]. J Agric Sci, 1911, 4: 1-24
- [2] Gardner W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Sci, 1958, 85: 228-232
- [3] Smith R E, Parlange J Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model[J]. Water Resour Res, 1978, 14 (3): 533-538
- [4] Philip J R. An infiltration equation with physical significance[J]. Soil Sci, 1954, 77: 153-157
- [5] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1940, 5: 399-417
- [6] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989: 130-131
- [7] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resour Res, 1973, 9: 384-394
- [8] Brakensiek D L, Raw s W J. Agricultural management effects on soil water process, part II: Green and Ampt parameters for crusting soils[J]. Trans Am Soc Agric Eng, 1983, 26: 1753-

- 1757.
- [9] Rosewell C J. Rainfall kinetic energy in eastern Australia[J]. J Clim Appl Meteorol, 1986, 25: 1695-1701.
- [10] Silburn D M, Connolly R D. Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data I: Infiltration modeling and parameter measurement[J]. J Hydro, 1995, 172: 87-104.
- [11] Bouwer H. Unsaturated flow in groundwater hydraulics[J]. J Hydraul Div Am Soc Civil Eng, 1964, 90: 121-144.
- [12] Bouwer H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis[J]. Water Resour Res, 1966, 2: 729-738.
- [13] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration component of the rainfall runoff process[R]. Minneapolis: Water Resour Research Center, University of Minnesota, 1971.
- [14] Morel-Seytoux H J, Khanji J. Derivation of an equation of infiltration[J]. Water Resour Res, 1974, 10(4): 795-800.
- [15] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt[J]. Water Resour Res, 1976, 12(3): 564-566.
- [16] Brakensiek D L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation[J]. Water Resour Res, 1977, 13: 680-682.
- [17] Chong S K, Green R E, Ahuja L R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution[J]. Soil Sci Soc Am J, 1982, 46: 235-239.
- [18] 张光辉, 邵明安. 用土壤物理特性推求Green-Ampt入渗模型中吸力参数 S_f [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 553-557.
- [19] Fok Y S, Hansen V E. One-dimension infiltration into homogeneous soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1966, 92: 35-48.
- [20] Fok Y S. Infiltration equation in exponential forms[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1967, 93: 125-135.
- [21] Hillel D, Gardner W R. Transient infiltration into crust-topped profiles[J]. Soil Sci, 1970, 109: 69-76.
- [22] Ahuja L R. Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration through surface crust[J]. Soil Sci, 1974, 118: 283-288.
- [23] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 浑水波涌灌机制及其Green-Ampt模型[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 44-48.
- [24] 王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-Ampt公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 66-70.
- [25] 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, 34(5): 30-34.
- [26] 李援农, 费良军. 土壤空气压力影响下的非饱和入渗格林-安姆特模型[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 733-736.
- [27] Fok Y S. A comparison of the Green-Ampt and Philip two-term infiltration equations[J]. Trans ASAE, 1975, 18(6): 1073-1075.
- [28] Swartzendruber D. Derivation of the two-term infiltration equation from the Green-Ampt model[J]. J Hydro, 2000, 236: 247-251.
- [29] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt模型与Philip模型比较[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.
- [30] Ahuja L R. Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach[J]. Soil Sci Soc Am J, 1983, 47: 412-418.
- [31] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resour Res, 1978, 14(3): 461-466.
- [32] Risse L M, Nearing M A, Zhang X C. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions[J]. J Hydro, 1995, 169: 1-24.
- [33] 张光辉, 蒋定生, 邵明安. 用非饱和土壤物理参数模拟坡面产流过程研究[J]. 山地学报, 2001, 19(1): 14-18.
- [34] 陈力, 刘青泉, 李家春. 坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2001(4): 61-67.
- [35] 王千, 许一飞, 雷廷武. 降水入渗过程的模型研究[J]. 北京农业工程大学学报, 1993, 13(4): 39-46.
- [36] Rafael M C, John E P, Wendell G J. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips[J]. J Hydro, 1999, 214: 111-129.
- [37] Chu S T. Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitters[J]. J Irrig And Drain Eng ASCE, 1994, 119(3): 443-456.
- [38] 张汉雄, 邵明安. 黄土高原生态环境建设[M]. 陕西西安: 陕西科学技术出版社, 2001: 1-16.