

土壤水分入渗的研究进展和评述

赵西宁¹, 吴发启²

(1. 中国科学院、水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 资环学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:从土壤水分入渗理论、入渗公式、入渗测定方法以及土壤入渗影响因素 4 个方面, 介绍了国内外有关土壤水分入渗研究的若干成果和进展, 并做了简要的分析和评述。

关键词:土壤水分入渗; 研究进展; 评述

中图分类号: S152.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2004)01-0042-04

Developments and Reviews of Soil Infiltration Research

ZHAO Xi-ning¹, WU Fa-qi²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources; 2. College of Resources and Environment, NW Sci-Tech Univ. of Agr. and For., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Some developments and results of the studies on soil moisture at home and abroad were introduced from four aspects: soil infiltration theory, infiltration models, infiltration methods and some affecting factors of infiltration, and some brief reviews and analysis were given.

Key words: soil infiltration; research development; review

入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程, 它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节。研究这一问题对于减少地表径流、增加土壤入渗、防止土壤侵蚀和搞好生态环境建设等方面具有重要的理论意义和现实意义。本文从不同方面对有关土壤水分入渗问题的研究进行归纳、分析和评述, 以供研究、应用时参考。

1 入渗基本理论

入渗过程是非饱和土壤水分的运动过程, 属于广义渗流理论的研究范畴, 其基础为法国工程师 Darcy 提出的达西定律。对于一维垂直入渗情况, 达西曾得到如下计算公式:

$$q = \frac{-kdH}{dz} = \frac{-kd(H_p - z)}{dz} \quad (1)$$

式中: q —通量, H —总水头, H_p —压力水头, z —入渗深度, k —导水率。在非饱和土壤中, H_p 是负值, 可用吸力势 ψ 表示:

$$q = \frac{kd\psi}{dz} + k \quad (2)$$

在此基础上, Richards^[1] 结合液体连续方程 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$ 导出了描述非饱和土壤水分运动的基本偏微分方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c} \times \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (3)$$

式中: θ —土壤含水量; t —时间; z —垂向坐标(入渗深度); k —饱和导水率, c —水容量, k 和 c 都是 θ 的函数, 第 1 项表示吸力梯度的作用, 第 2 项表示重力的作用。该式为入渗理论的基本表达式, 它可通过数值分析法求解。

2 入渗公式

2.1 Green—Ampt 公式

Green 和 Ampt^[2] 根据最简单的土壤物理模型, 推出了一维土壤水分入渗方程:

$$i(t) = at^{-1/2} + i_c \quad (4)$$

式中: $a = \sqrt{0.5i_c h_s \delta}$, h_s —湿润锋面处有效或平均基质吸力; δ —水分饱和差; i_c —土壤稳渗速率。该式

收稿日期: 2002-11-20

基金项目: 黄河基金“坡面措施减水减沙机理研究”(2001-03-01-03)

作者简介: 赵西宁(1976-), 男, 陕西渭南人, 博士, 主要从事水土资源高效利用方面的研究。

是在假设饱和入渗理论的基础上,经过数学推导得到的。

2.2 Kostiakov 公式

该公式是 Kostiakov^[3]提出:

$$f(t) = at^{-b} \quad (5)$$

式中: $f(t)$ —入渗速率; t —入渗时间; a, b —由试验资料拟合的参数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$, 当 $t \rightarrow 0$ 时, $f(t) \rightarrow \infty$, 而当 $t \rightarrow \infty$ 时, 只有在水平吸渗情况下才出现, 垂直入渗条件下, 显然不符合实际。但在实际情况下, 只要能确定出 t 的期限, 使用该公式还是比较简便而且较为准确。

2.3 Horton 公式

Horton^[4]从事入渗试验研究, 得出一个他认为与他对渗透过程的物理概念理解相一致的方程:

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad (6)$$

式中: i_c, i_0 和 k 是特征常数。 i_c 为稳渗速率。常数 k 决定着 i 从 i_0 减小到 i_c 的速度。这种纯经验性的公式虽然缺乏物理基础, 但由于其应用方便, 至今在许多试验研究仍然沿用。

2.4 Philip 公式

Philip^[5]对 Richards 方程进行了系统的研究, 提出了方程的解析解:

$$I(t) = \int_{\theta_i}^{\theta_0} z(\theta, t) d\theta = k(\theta_i)t$$

其中: $I(t)$ —累积入渗量; $z(\theta, t)$ —土壤含水量; θ_i —土壤初始含水量; θ_0 —土壤饱和含水量; $k(\theta_i)$ —初始含水率时的导水率; t —时间。在此基础上得出了 Philip 简化公式:

$$i(t) = i_c + \frac{s}{2t^{1/2}} \quad (7)$$

式中: $i(t)$ —入渗速率; s —吸渗率, $S = \int_{\theta_i}^{\theta_0} \eta_1(\theta) d\theta$; i_c —为稳渗速率, $i_c = \int_{\theta_i}^{\theta_0} \eta_2(\theta) + K(\theta_i)$, 其它符号同前。该式得到了田间试验资料的验证, 具有重要的应用价值, 但 Philip 公式是在半无限均质土壤、初始含水率分布均匀、有积水条件下求得的, 因此, 该式仅适于均质土壤—垂直入渗的情况, 对于非均质土壤, 还需进一步研究和完善。再者自然界入渗主要是降雨条件下入渗, 其和积水入渗具有很大的差异, 因而将其直接用于入渗计算不够确切。

2.5 Holtan 公式

Holtan^[6]入渗公式表示的是入渗率与表层土壤蓄水量之间的关系, 公式为:

$$i = i_c + a(w - i)^n \quad (8)$$

式中: i_c, a, n 是与土壤及作物种植条件有关的经验

参数, w 是厚度为 d 的表层土壤在入渗开始时的容许蓄水量, 该公式仅适用于 $i < w$ 的情况。总的说来, Holtan 入渗公式难以精确的描述一个点的入渗特征, 但用它来估算一个流域的降雨入渗也许是适用的。

2.6 Smith 公式

Smith^[7]根据土壤水分运动的基本方程, 对不同质地各类土壤, 进行了大量的降雨入渗数值模拟计算, 提出了一种入渗模型:

$$i = R \quad t \leq t_p$$

$$i = i_\infty + A(t - t_0)^{-\alpha} \quad t > t_p \quad (9)$$

式中: i_∞, A, t_0, α 是与土壤质地、初始含水量及降雨强度有关的参数, R —降雨强度, t_p —开始积水时间, i_∞ —土壤稳渗速率。

2.7 方正三公式

方正三^[8]在 Kostiakov 公式的基础上, 对大量野外实测资料进行分析, 提出的入渗公式。

$$k_1 = k + k_1/t^\alpha \quad (10)$$

式中: k, k_1, α 是与土壤质地、含水率及降雨强度有关的参数。

2.8 蒋定生公式

蒋定生^[9]在分析 Kostiakov 和 Horton 入渗公式的基础上, 结合黄土高原大量的野外测试资料, 提出了描述黄土高原土壤在积水条件下入渗公式:

$$f = f_c + (f_1 - f_c)/t^\alpha \quad (11)$$

式中: f 为 t 时间时的瞬时入渗速率; f_1 为第 1 min 末的入渗速率; f_c 为土壤稳渗速率; t 为入渗时间; α 为指数。当 $t=1$ 时, 式中左边等于 f_1 ; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f = f_c$, 因而该式的物理意义比较明确。但该公式是在积水条件下求得的, 与实际降雨条件还有一定的差异。

上述入渗公式, 无论是理论的、还是经验的, 在一定程度上都反映了土壤水分入渗规律, 因而都有其使用价值。

3 入渗测定方法

目前测定土壤入渗速率主要方法有注水法、水文法和人工降雨法。注水法通常采用同心环入渗装置, 一般常用的同心环为二同心铁环, 内外环中维持同样水层深度, 通过记录某一时段的入渗量来计算土壤入渗率变化过程。水文法是利用径流试验场或小流域中实测的降雨与径流过程资料, 通过水文分析的方法来推求其入渗方程, 由该方法求出的入渗

率为该径流场或小流域的平均入渗率。人工降雨法是通过人工降雨装置来模拟天然降雨,在降雨强度均匀不变条件下,观测地表径流过程,用人工降雨量和观测的径流资料计算。

注水法仅能反映土壤本身的入渗特性,对于不同坡度、不同雨强情况下的土壤入渗规律很难模拟。水文法可用于一个流域土壤平均入渗速率的测定,不能用于单点土壤入渗速率的测定,且误差较大。用人工降雨法进行实验时不受地形、坡度等条件的限制,可以较为真切地反映天然降雨过程中的土壤水分入渗变化。

4 影响入渗因素

4.1 土壤性质

土壤性质是影响土壤入渗的一个重要因素之一。田积堂、蒋定生^[10,11]等人研究认为,土壤入渗能力的影响主要取决于:土壤机械组成、水稳性团粒含量、土壤容重。土壤质地愈粗,透水性能愈强。土壤稳渗率随着大于 0.25 mm 的水稳性团粒含量的增加而增加。容重减小,其入渗速率增大;容重增大,土壤入渗率减小;Helalia^[12]对粘土、粘壤土、壤土进行了 50 个田间入渗试验,认为土壤质地与稳渗率的关系弱于结构因子与稳渗率的关系,特别是有效孔隙率与稳渗率的相关性非常显著,达极显著水平。

4.2 土壤表层结皮

结皮封堵了土壤水分入渗的通道,使土壤的入渗能力急剧衰减。从 20 世纪 20 年代开始,国内外先后有许多学者对该方面进行了研究。Hillel^[13]提出了结皮形成过程:由于雨滴打击,使土壤表层团聚体遭到破坏,分散的颗粒填充了土壤表面的孔隙,土壤表面被压实。Eigle、Moore^[14]的研究表明,土壤结皮对裸地入渗的影响大大超过其它因素的影响,其减少入渗量可达 80% 左右。江忠善^[15]、王燕^[16]认为雨滴动能是影响土壤表层结皮的重要因素,雨滴直径越大,其质量和着地动能越大,地表越易结皮。Baunhardt^[17]通过代数式不断修正降雨过程中表层土壤饱和含水率、孔隙度、进水土水势、比水容及布鲁斯指数,建立了以 Richards 方程为基础的假定结皮厚度为 5 cm 的数值模型。陈浩等^[18]也通过二次降雨得出有结皮的径流量是无结皮的 6.4 ~ 24.5 倍。

4.3 土壤初始含水率

土壤初始含水率的状况,直接影响着降雨后土

壤水分入渗状况。目前关于初始含水率对入渗的影响研究,大多是在含水率分布均匀的前提下研究其对入渗速率的影响。Bodman 和 Colman^[19]认为在入渗初期,随着含水率的增加,土壤入渗速率减小;随着时间的延续,含水率对入渗的影响变小,最终可予忽略。国内一些研究结果^[20]表明,土壤平均入渗率与土壤含水率呈负相关的线性关系;随着土壤初始含水率的增加,同一时间内非稳渗阶段的入渗速率迅速降低,趋于稳定入渗速率的时间缩短。

4.4 地面坡度

坡度是主要的地貌形态示量之一,历来是地貌学和土壤侵蚀学的重要研究领域。关于土壤水分入渗与坡度的关系,已经有许多学者^[21,22]根据各自的实验资料,进行过大量的研究,分别得到不同的函数关系,他们所建立的经验公式中坡度的差别较大,其原因可能是个人的统计方法和研究区域不同所致。有学者认为在渗透率较大的坡面上,入渗速率与坡度成反比关系^[22],也有学者指出,在渗透率较小的条件下,入渗速率与坡度无关^[21]也有一些学者对坡向、坡位进行了一些研究,得出了一些不同的结论。

4.5 降雨因素

从水土保持的角度来看,降雨对入渗的影响主要应通过雨型、雨滴直径和降雨强度来描述。雨型不仅对土壤的入渗过程有较大的影响,也是影响土壤侵蚀和洪峰流量的主要因素,其变化形式复杂多样,有学者^[29]曾利用统计分析的方法将黄土高原的暴雨雨型分为猛降型、递增型和间歇型 3 类。Rubin^[23]和 Aken、Yen^[24]的研究表明,不同降雨强度下,入渗曲线形式是相同的,如果降雨历时足够长,均质土壤的稳定入渗率、入渗总量与降雨强度无关,但瞬时入渗速率受降雨强度大小和雨强的时间变化影响较大。也有一些研究结果^[30]表明,随着降雨强度增大,土壤稳定入渗速率有增大的趋势。虽然许多学者对降雨因素作过大量的研究,但大多是以恒定雨强为前提,对于非恒定雨强的研究较少。

4.6 下垫面因素

对于改变下垫面增加入渗的研究非常广泛,从许多研究结果^[25,26]可以看出,随着植被覆盖度的增加,地表产流历时明显推迟,降雨入渗量显著增加,但当土壤含水量、降雨量和降雨强度很大时,随着植被覆盖度的增加,累积入渗量增加的幅度变小。在高强度的降雨条件下,连续 5 a 采用少耕法耕种的农地比采用常规法耕种的农地土壤平均入渗率高 24%^[27]。王晓燕^[28]用人工降雨法研究保护性耕作

下的地表径流与水分入渗得出,保护性耕作具有明显的减缓水土流失,增加入渗的结果,在秸秆覆盖、土壤压实及表土耕作3因素中,覆盖对径流和入渗的影响最大,压实次之,耕作的影响最小。

5 结语

从不同方面简要评述了有关土壤水分入渗研究的若干成果。可以看出,对土壤入渗模型的研究,多偏重机理方面,结构复杂,参数难于测定,给实际生产应用带来不便。虽然,不少学者也提出了许多半理论、半经验或纯经验性的入渗公式,但这些公式仅能描述入渗速率随时间的变化规律,且多属单点入渗,不能很好地定量分析土壤水分入渗的时空变异规律。对于入渗影响因素的研究,由于受试验条件的限制,所得结果差异也较大。因此,将来对土壤水分入渗的研究应转化为具有空间变异性的非均质入渗问题的研究,将单点入渗模型扩展到较大区域上的动态研究,高新技术和手段在增加土壤入渗上的应用研究。所有这些问题的研究,对于揭示土壤水分入渗机理和土壤侵蚀预报具有重要的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] Richards L A. Capillary conduction of liquid in porous mediums [J]. *Physics*, 1931, (1): 30-33.
- [2] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, flow of air and water through soils [J]. *J. Agr. Sci.*, 1911, 76(4): 1-24.
- [3] Kostikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [J]. *Soil Sci.*, 1932, 97(1): 17-21.
- [4] Horton R E. An approach to a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. *Soil Sci. Soc. AM. J.*, 1940, 5(3): 399-417.
- [5] Philip J R. The theory of infiltration about sorptivity and algebraic infiltration equations [J]. *Soil Sci.*, 1957, 84(4): 257-264.
- [6] Holton H N. A concept for infiltration estimates in watershed engineering [J]. *Dept. Agr. Res. Service*, 1961, 39(30): 41-51.
- [7] Smith R E. The infiltration envelope results from a theoretical infiltrometer [J]. *Journal of Hydrology*, 1972, 17(1): 1-21.
- [8] 方正三. 黄河中游黄土高原梯田的调查研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1958. 53-59.
- [9] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究 [J]. *土壤学报*, 1986, 23(4): 299-304.
- [10] 田积莹. 黄土地区土壤的物理性质与黄土成因的关系 [J]. 中国科学院西北水保所集刊, 1987, (5): 1-12.
- [11] 蒋定生, 黄国俊, 谢水生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试 [J]. *水土保持通报*, 1984, 4(4): 7-9.
- [12] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils [J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 24(8): 39-47.
- [13] Hillel D. Crust formation in lessies soils [J]. *International Soil Sci.*, 1960, 29(5): 330-337.
- [14] Egle J D, Moore I D. Effect of rainfall energy on infiltration into a bare soil [J]. *JRANS. of ASAE*, 1983, 26(6): 189-199.
- [15] 江忠善. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究 [J]. *中国水土保持*, 1983, 2(3): 32-36.
- [16] 王燕. 黄土表土结皮对降雨侵蚀和片蚀影响的试验研究 [D]. 中科院水利部西北水土保持研究所硕士学位论文, 1992.
- [17] Baunhards R L. Modeling infiltration into sealing soil [J]. *Water Resource Res.*, 1990, 26(1): 2497-2505.
- [18] 陈浩, 蔡强国. 坡度对坡面径流、入渗量影响的试验研究 [A]. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究 [C]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 17-25.
- [19] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during down-ward entry of water into soil [J]. *Soil Sci. Soc. AM. J.*, 1944, 8(2): 166-182.
- [20] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地产流影响的研究 [J]. *山西水土保持科技*, 1990, 22(4): 25-27.
- [21] 郭继志. 关于坡度与径流量和冲刷量的探讨 [J]. *黄河建设*, 1958, 4(3): 9-11.
- [22] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验 [J]. *水土保持通报*, 1984, 4(4): 10-13.
- [23] Rubin J. Theory of rainfall uptake by soil initially drier than their field capacity and its applications [J]. *Water Resour. Res.*, 1966, 2(4): 739-749.
- [24] Aken A O, Yen B C. Effect of rainfall intensity on infiltration and surface runoff rates [J]. *J. of Hydraulic Research*, 1984, 21(2): 324-331.
- [25] 罗伟祥. 不同覆盖度林地和草地的径流量和冲刷量 [J]. *水土保持学报*, 1990, 4(1): 29-36.
- [26] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及有关因素(四) [J]. *水土保持通报*, 1982, 2(3): 12-15.
- [27] 周辉福. 不同林地土壤水分入渗和入渗模拟的研究 [J]. *林业科学*, 1997, 33(1): 9-16.
- [28] 王晓燕. 人工降雨研究保护性耕作下的地表径流与水分入渗 [J]. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 23-25.
- [29] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律 [J]. *地理学报*, 1983, 38(4): 416-420.
- [30] 王玉宽. 黄土高原坡地降雨产流过程的试验分析 [J]. *水土保持学报*, 1991, 5(2): 25-29.