

降雨入渗和产流问题研究的 若干进展及评述*

刘贤赵 康绍忠

(中国科学院水利部水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

摘要 20 世纪以来,入渗与产流研究取得了长足进展。该文从入渗影响因素、入渗计算与分析、坡地产流、流域产流 4 个方面,着重介绍了国内外研究的若干成果和进展,并做了简要的评述。

关键词 入渗 产流 进展 评述

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(1999)02-0057-06 中图分类号: S157.1

Some Developments and Review of Rainfall-Infiltration-Runoff Yield Research

LIU Xian-zhao KANG Shao-zhong

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of
Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, PRC)

Abstract Since the 20th century, a great progress has been made in research on infiltration and runoff yield. Some developments and results in influence factors of infiltration, computation and analysis of infiltration, hillslope runoff yield and watershed runoff yield in China and other countries are introduced, and some brief reviews on them are given.

Keywords infiltration runoff yield development review

降雨入渗产流是“四水”转化研究的中心课题之一。研究这一问题对于增加土壤蓄水,减小地表径流,防止土壤侵蚀和搞好水土保持最优配置、农田水分最优调控等方面具有重要的理论和现实意义。本文从不同方面对有关入渗和产流问题的研究做一归纳、分析和评述。

1 入渗影响因素

1.1 土壤因素

大量的试验研究证明,土壤的均质程度、土壤质地对入渗有较大的影响。质地越粗,透水性越强,尤其对缺乏土壤结构和成土作用的土壤来说更是如此,结构疏松的土壤要比密实的土壤渗透能力大得多,疏松的土壤被压实后,其入渗速率可以减小到压实前的 2%。Helalia (1992)^[1]对 3 种不同质地的土壤(粘土,粘壤土,壤土)进行了 50 个田间双环入渗试验,分析了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明显,达极显著水平,并将有效孔隙率定义为总孔隙率与 33 kPa 时的体积含水率之差。

1.2 土壤初始含水率

目前关于初始含水率对入渗影响的研究,大多是在含水率分布均匀的前提下研究不同大小含水率值对入渗的影响^[2]。研究结果表明:随着初始含水率的增大,初损值降低,初渗率变

小,趋于稳定入渗速率的时间变短;土壤越干燥,初始入渗速率越大。原因是初始含水率越低,基质势梯度量值越大,需要较多水分进入较大充气孔隙以接近饱和。

1.3 地表结皮

降雨入渗过程中雨滴的打击,使土壤表层趋于密实,容重增加,一些细小颗粒堵塞表层土壤孔隙,形成结皮,阻塞水流入渗。从 40 年代开始,国外先后有 Duley(1940), Ellision(1945), McIntyre(1958), Hillel(1960), Manning(1967)以及 Sharma(1980)等进行了这方面的研究。Morre(1982)通过试验表明:表土结皮能减少入渗量达 80% 左右。对于裸地,结皮对入渗的影响大大超过其它因素对入渗的影响。对于结皮形成过程中的入渗问题, Baunhardt(1990)^[3]通过用代数式不断修正降雨过程中表层土壤饱和导水率、孔隙率、进水土水势值、比水容及布鲁克斯指数建立了以 Richards 方程为基础假定结皮厚度为 5 cm 的数值模型。

1.4 降雨因素

降雨对入渗的影响可分为直接影响和间接影响。直接影响即为雨型、降雨强度对积水前入渗过程、开始积水时间、积水持续时间和积水后入渗过程的影响。蒋定生(1990)曾就雨型的影响做过研究, Mein-Larson(1973)^[4]分析了降雨强度对入渗速率的影响,指出地表积水前后计算入渗速率的方法不同,并给出了计算积水时间的数学公式。然而直接影响中最关键的问题还是开始积水的时间和积水后入渗速率的确定,虽有许多学者对此做过大量的研究,但大多是以恒定雨强为前提^[5-7]。对于非恒定雨强的研究,虽然也取得了一些成果,但应用起来很不方便。降雨的间接影响表现在降雨使地表产生结皮,从而影响入渗过程。R. Lal在《土壤侵蚀研究方法》一书中指出:雨滴的大小组成、雨滴的终点速度和降雨强度是影响结皮的关键因素。

1.5 下垫面因素

天然的下垫面由于其植被、坡度、坡向、耕作措施不同对降雨入渗的影响效果也不同。石生新(1992)的研究表明:随着植被盖度的增加,不同时间段的累积入渗量呈指数增加;不同的植被类型,以封育荒坡的土壤入渗率最大,乔木林次之,灌木林和农田较小。吴长文(1995)对同一植被 8 种林分的坡面土壤入渗指标采用双环入渗仪和针条式人工降雨器同时进行了测试,得出了同一种植被类型不同林分的入渗速率也不一样的结论。对于草地而言,草地密度对入渗影响较大,不同密度草地入渗性能不一样。

1.6 其它因素对入渗的影响

除上述因素外,不少学者对灌水方法、温度等因子对入渗的影响做了研究。Duck(1992)^[11]通过研究温度对灌水流下渗的影响,发现正午时水从沟口流到沟尾温度升高了 2.2℃,导水率提高了 70%。Healy 和 Warrick(1988)^[12]对滴灌条件下的土壤湿润锋面和湿润区随时间的变化情况做了研究,波涌灌由于采取了间歇的灌水方式,使表层土壤结构状态发生了改变,在地表形成了致密层,使土壤入渗能力和田面糙率减小。大流量水平畦灌时,气阻对入渗的影响不能忽视,李援农(1994)的研究表明,不同的空气阻力大小对入渗的影响不同,不平畦灌时,土壤中空气使入渗速率减小,灌水均匀程度有所提高。

2 入渗计算与分析

降雨入渗过程是非饱和土壤水分的运动过程,它属于渗流理论的范畴。对于渗流理论的定量研究,最早的成就要归于法国工程师 Darcy 提出的达西定律,由此开始了产流机制的土壤物理学途径,为非饱和渗流理论研究起到了奠基和推动作用。1931年 Richards 以达西定律和连续方程为基础导出了描述非饱和土壤水分运动的基本偏微分方程。

$$\theta / \partial t = \partial / \partial z [D(\theta) (\partial \theta / \partial z)] - [\partial k(\theta) / \partial z] \quad (1)$$

式中: θ ——土壤含水量; t ——时间; z ——垂向坐标; k ——水饱和导水率; D ——扩散率
Childs 和 George (1950) 通过试验证实了 Richards 方程 Philip (1957) 对 Richards 方程进行了系统地研究, 得出了方程的解析解:

$$I(t) = \int_{\theta_i}^{\theta_0} z(\theta, t) d\theta = k(\theta_i) t \quad (2)$$

将 Philip 级数解代入 (2) 式得到:

$$I(t) = \int_{\theta_i}^{\theta_0} [Z_1(\theta) t^{1/2} + Z_2(\theta) t + Z_3(\theta) t^{3/2} + \dots] d\theta + k(\theta_i) t \quad (3)$$

式中: $I(t)$ ——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; $k(\theta_i)$ ——相应于初始含水量的导水率; t ——时间; $Z_i(\theta) t^{i/2}$ ——Philip 级数解 在此基础上 Philip 提出了简化公式:

$$I(t) = st^{1/2} + At \quad (4)$$

相应的入渗率为:

$$i(t) = 1/2st^{-1/2} + A \quad (5)$$

式中: $i(t)$ ——入渗速率; s ——吸渗率, $s = \int_{\theta_i}^{\theta_0} Z_1(\theta) d\theta$; A ——稳定入渗率, $A = \int_{\theta_i}^{\theta_0} Z_2(\theta) d\theta + k(\theta_i)$, 其它符号含义同上。

Philip 入渗公式得到了田间入渗试验资料的验证, 具有重要的应用价值, 但是 Philip 的垂直入渗级数解及其系数 $Z_1(\theta)$, $Z_2(\theta)$ 是对半无限均质土壤, 初始含水率 θ_i 分布均匀, 有薄层积水条件下求得的, 因此该入渗公式只适用于均质土壤一维垂直积水入渗的情况, 若将 Philip 入渗公式应用于非均质土壤, 还须进一步研究和完善 再者自然界的入渗主要是降雨条件下的入渗, 供水条件与积水入渗具有很大的差异 雨强变化的天然降雨条件下, 降雨并不是充分的, 而 Philip 建立的入渗模型是以积水入渗试验为基础的, 因而将其直接用于产流计算不够确切, 在降雨入渗过程中, 影响入渗的主要因素是降雨强度 Mein - Larson (1973) 在分析降雨入渗机理的基础上, 结合 Green-Ampt (1911) 入渗公式得到积水前后 2 个时段的入渗率为:

$$f = \begin{cases} R & t \leq t_p \\ k_s [1 + (\theta_0 - \theta_i) s_f] / I_p & t > t_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: f ——入渗速率; k_s ——饱和导水率; f_s ——湿润锋面平均吸力; R ——降雨强度; t_p ——开始积水时间, $t_p = I_p / R$; I_p —— t_p 时的累积入渗量, $I_p = [(\theta_0 - \theta_i) s_f] / (R / k_s - 1)$ 。

Chu (1978) 提出了变动雨强条件下入渗的计算方法。在变雨强条件下, 积水入渗和非积水入渗交替发生, Chu 将天然降雨过程按强度划分成若干时段, 使各时段内雨强相对稳定, 然后用 Mein - Larson 方法分时段计算。Smith Parlange (1978)^[13] 从土壤水分运动的基本方程出发, 导出了任一降雨强度下入渗的计算公式。其方法是先确定积水时间, 然后分别计算积水前后的入渗率 范荣生、张炳勋 (1980) 提出在黄土地区用水文参数取代 Mein - Larson 方程中土壤物理参数的方法 近年来 Bardossy 和 Disse (1993) 分别以 Green - Ampt 方程为基础运用模糊数学的有关法则得出了模糊入渗模型^[13]。郝振纯 (1994) 以饱和入渗理论为基础, 考虑新入渗水驱替旧入渗水的作用, 根据力学原理提出了一个简明入渗模型。Chu (1994) 利用 Green - Ampt 分析法对地面半球形入渗源进行分析, 得出了三维入渗模型。E. Smith (1993)^[33] 以 Parlange 等 (1982) 方程为基础, 提出了一个复杂降雨条件下的入渗概念性模型 Barry (1995)^[15] 建

立了一个积水条件下最大误差不到 1% 的简明入渗模型

尽管人们对降雨入渗进行了较深入的研究,并提出许多计算入渗的公式,但它们只是一种概念性模型,大多是在没有考虑滞后作用、土壤均匀无结皮、降雨均一等一系列基础上进行的,不能反应真实的产流过程,而且它们没有涉及到径流运动的基本条件,也没有考虑到降雨入渗的时空变异性。因此未来对降雨入渗的研究将逐渐转向为具有水平垂直空间变异性的非均质土壤入渗问题的研究;初始含水率随机分布情况下的入渗问题的研究;有植物根系活动情况下的入渗及根区土壤水分运动的研究以及降雨过程中入渗的动态模拟和把单点入渗模型扩展到较大区域上应用问题的研究,并逐渐摆脱过去借助于双环法测定单点降雨入渗的局面,所用的数学手段也将不断更新^[16]。

3 坡地产流

坡地产流实质上是水分在不同下垫面中各种因素综合作用下的发展过程,也是下垫面对降雨的再分配过程。国内外学者对坡地产流过程做了大量的野外观测和试验研究。

我国学者从水土保持和水文学的角度出发,通过人工降雨研究了黄土高原坡耕地不同水土保持措施对降雨入渗产流的影响。蒋定生等通过模拟人工降雨试验得到了入渗率与地面坡度之间的关系。石生新(1992)根据水量平衡原理得出了不同雨强与不同水土保持措施的坡地产流模型。陈浩(1988)通过人工降雨试验提出了产流、产沙的临界坡度,不同坡度的产沙量、产流量与降雨历时的回归方程以及不同降雨历时的产流量与坡度之间的回归方程。沈冰、王文焰等^[17]对黄土坡地产流、土壤水分运动进行了试验研究,并借助于 Richards 方程和一定的初始边界条件进行了数学模拟,结果表明:降雨初期,入渗受控于黄土吸力,湿润锋大致平行于坡面,长历时降雨及雨后土壤水分再分布则不能忽视重力的作用。王百田等(1994)^[18]应用坡面流的运动波理论分析了黄土区坡面实施防渗剂处理、拍光处理和自然坡面的产流过程,确定了模型的参数。张书函(1996)用运动波原理简化圣·维南方程组建立了坡面产流模型。笔者根据 1996-1997 年长武王东沟坡地径流小区的实测资料,以运动波方程和 Richards 方程为基础建立了考虑滞后作用的二维坡地水量转化数学模型,该模型表述如下:

$$\begin{cases} c(h_m) \left(\partial h_m / \partial t \right) = \partial / \partial x \left[k(h_m) \left(\partial h_m / \partial x \right) \right] + \partial / \partial z \left[k(h_m) \left(\partial h_m / \partial z \right) \right] - \left[\partial k(h_m) / \partial x \right] \sin \Gamma \\ \quad \quad \quad \partial k(h_m) / \partial z \cos \Gamma \\ \partial h / \partial t + v \left(\partial h / \partial x \right) + h \left(\partial v / \partial x \right) = b R r(t) - f(x, t) \\ v = 1/n \frac{1}{\sin \Gamma} h^{2/3} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c(h_m)$ ——比水容; h_m ——基质势; k ——非饱和导水率; x ——水平距离; z ——垂向距离; Γ ——坡面坡度; t ——时间; h ——坡面水深; v ——坡面流速; n ——有效糙率; f ——入渗率; $Rr(t)$ ——坡面承雨强度; b ——植被截留衰减系数。

国外研究者对坡地产流的研究也主要是从水文学、土壤侵蚀与水土保持的角度进行的。Dunne(1978)汇集了大量的野外观测和试验资料,对坡面径流现象、坡面流速等做了系统的论述,为坡地水文研究奠定了基础。Freeze(1978)系统地提出了坡地水文模型。著名的土壤物理专家 Philip 近年对山坡入渗问题进行了研究,表明了坡面的非平面性对入渗和坡地土壤水分运动影响很小,只有坡面的曲率半径小于某一值时才需要考虑^[8~10]。山坡水文学产流理论使人们对自然界复杂的产流现象有了深入的认识。M. Hly 和 J. Mis(1996)在假定坡宽无限、降雨强度、入渗率在坡面一致且仅仅是时间的函数的基础上,建立了一个考虑坡长、坡度、土

壤初始含水率、土壤入渗性能、降雨强度、降雨历时等要素的坡面产流模型:

$$\begin{cases} \partial(vh) / \partial x(x, t) + \partial h / \partial t(x, t) = r(t) - i(t) & \text{(连续方程)} \\ h(x, t) (\partial v / \partial t)(x, t) + h(x, t) v(x, t) (\partial v / \partial x)(x, t) = g \sin \Gamma h(x, t) - g \cos \Gamma h(x, t) \\ (\partial h / \partial x)(x, t) - g \cos \Gamma h^*(t) (\partial h / \partial x)(x, t) - [f(h, v)] / \rho + r(t) v^* \sin \Gamma & \text{(运动方程)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: h ——坡面水深; v ——坡面流速; Γ ——坡面坡度; r ——降雨强度; i ——入渗率; t ——时间; g ——重力加速度; h^* ——雨滴降落到土壤表面产生的压力增量确定的高度; f ——切应力; ρ ——水的密度; v^* ——雨滴降落速度

求解上述各种坡地水文模型的主要方法是有限差分法和有限元法,这两种方法目前都得到了广泛的应用;研究坡地产流问题的另一个重要途径是利用随机模拟方法研究坡面降雨入渗和产流过程。国内外对坡地产流进行了大量的研究,取得了许多有价值的成果。不足之处是研究方法多偏重于人工降雨试验,降雨强度与野外相差很大;研究的入渗量、产流量为整个坡面的入渗量和产流量,没有反应其沿坡的变化特征;对于坡面径流、入渗、土壤水分运动的内在联系考虑不够;对地形坡度、土层各向异性对产流的影响以及非饱和侧向流在壤中流和地下水流中的作用也注意不够。因此针对上述存在的问题进行深入的试验和分析,不仅对揭示坡地产流过程机理具有重要的学术价值,而且对土壤侵蚀的防治、评价不同水土保持措施的作用、提高坡地林木成活率和坡地农作物产量都具重要的应用价值。

4 流域产流

天然流域是由各种不同地形、地貌、不同地质构造、不同土壤分布、不同植被覆盖和各种人类活动因素所构成的一个复合体。降落在流域上的雨水经产流机制的作用一部分转化成地表径流。流域产流的突出特点是产流面积的空间变化和降雨的空间变化,对其变化规律的揭示和定量描述是流域产流定量计算的关键。近年来对降雨的空间变化问题进行了较多的研究,并对暴雨的移动速度和方向以及降雨空间变化的结构特征进行了研究,这些研究均有助于提高产流计算的精度。在产流面积空间变化方面,60年代就有学者提出局部产流面积和变动产流面积的概念。Engman Rogowzki(1974)研究表明:全流域产流是罕见的,流域中产流是不同步的,产流最先发生于透水性较差或土壤湿度较高的地方,产流面积的变化取决于降雨特性和下垫面特性空间分布的不均匀性及其配合关系。于维忠(1985)、芮孝芳(1995)提出了界面产流机理的重要论述。在处理流域内不均匀性时主要采用2种模型,即分散性模型和反映某些因素空间变化的概率分布模型。

目前比较常见的流域产流机制有蓄满、超渗以及二者相结合的综合产流机制。蓄满产流受控于田间持水量;超渗产流受控于入渗强度,雨强超过入渗强度则产流。二者相比,蓄满产流考虑了流域内各地缺水量不同对产流的影响,但没有考虑蓄满前雨强大于入渗强度时也可能产流的情况;超渗产流虽考虑了不同土壤的吸水性能及产流的物理成因,但忽略了各地土壤含水量不同对入渗的影响。事实上流域的产流过程极其复杂,简单的蓄满与超渗概念都不能反应流域产流的实际情况,于是人们结合二者的特点在分析超渗产流时引进流域下渗容量分配曲线,在分析蓄满产流时引进流域蓄水容量曲线,从而使计算精度大大提高。王佩兰(1988)将小流域划分成单元面积,用霍顿入渗曲线计算产流,用滞后演算法以及马斯京根连续演算法计算汇流,建立了具有物理成因的概念性产、汇流模型。袁作新(1996)^[19]通过2个半干旱地区流域资料的对比分析,获得了明确结论:在超渗产流模型中增加下渗流域分配曲线可以使模型精度大

大提高。范荣生^[20]从确定性与随机性相结合的途径出发,将超渗产流模型与空间变化的频率特性有机结合起来,引入流域产流计算中,建立了物理意义明确、弹性大且考虑空间变化的流域产流模型

在上述模型中加入流域蓄水容量分配曲线和流域下渗容量分配曲线虽有助于提高模型精度,但它们并不能指明流域中具体位置的包气带田间持水量和地面下渗能力,因此它们不能在降雨空间分布不均匀情况下使用,如何从物理成因上解决产流面积变化的计算问题仍需进一步努力。

参 考 文 献

- 1 Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils. *Agricultural Water Management*, 1993, 24: 39- 47
- 2 Philip J R. The theory of infiltration: 5, the influence of the initial moisture content. *Soil Sci.*, 1958, 84: 329- 339
- 3 Baunhards R L. Modeling infiltration into sealing soil. *Water Resources Res.*, 1990, 26(1): 2497- 2505
- 4 Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resource Res.*, 1973, 9(2): 384- 394
- 5 Akan A O. Horton infiltration equation revisited. *J Irrig. and Drain Eng.*, 1991, 118(5): 828- 830
- 6 Broadbridge P, White I. Constant rate rainfall infiltration: A versatile nonlinear model, 2, Application of solutions. *Water Resource Res.*, 1988, 24(1): 145- 154
- 7 Smith R E, Parlange J Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resource Res.*, 1978, 14(3): 533- 538
- 8 Philip J R. Hillslope infiltration: Planer slope. *Water Resource Res.*, 1991, 27(6): 1035- 1040
- 9 Philip J R. Hillslope infiltration: Divergent and convergent slopes, *Water Resource Res.*, 1991, 27(6): 1035- 1040
- 10 Philip J R. Infiltration and downslope unsaturated flows in concave and convex to topograpy. *Water Resource Res.* 1991, 27(6): 1041- 1048
- 11 Duck H R. Water temperature fluctuations and effect irrigation infiltration, *Trans. ASAE*, 1992, 34(2): 193- 199
- 12 Healy R W, Warnick A W. A generalized solution to infiltration from a surface point sour. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1988, 52(1): 1245- 1251
- 13 Bardossy A, Disse M. Fuzzy rule-based models for infiltration. *Water Resource Res.*, 1993, 29(3): 373- 382
- 14 Smith E. Modeling infiltration for multistorm runoff events. *Water Resource Res.*, 1993, 29(1): 133- 144
- 15 Barry D A. Infiltration under ponded conditions: An explicit predictive infiltration. *Soil Sci.*, 1995, 160(1)
- 16 Ross D J. Efficient numerical methods for infiltration using Richards equation. *Water Resource Res.*, 1990, 26(2): 279- 290
- 17 沈冰,王文焰. 植被影响下黄土坡地降雨漫流数学模型. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 23- 28
- 18 王百田,王斌端. 黄土坡面地表处理与产流过程研究. *水土保持学报*, 1994, 8(2): 19- 24
- 19 袁作新. 超渗产流模型中增加下渗流域分配曲线的数值检验. *武汉水利电力大学学报*, 1996, 29(2): 1- 6
- 20 范荣生,李长兴,李占斌. 考虑降雨空间变化的流域产流模型. *水利学报*, 1994(3): 33- 39