

水文过程及模型研究主要进展

黄新会,王占礼,牛振华

(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 杨陵 712100)

摘 要: 揭示水文过程, 发展水文模型不仅在暴雨洪水预报及坝库工程设计等方面具有重要作用, 而且也是研发土壤侵蚀物理模型必须的基础性工作。从入渗、产流和汇流等水文物理过程出发, 综述了国内外水文过程与水文模型的主要进展, 并指出, 建立基于 GIS 的分布式水文过程模型是水文模型研究的趋势。
关键词: 水文模型; 入渗; 产流; 汇流
中图分类号: P332. 1; S152. 7 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0105-04

Main Progress of Research on Hydrologic Processes and Prediction Models

HUANG Xin-hui, WANG Zhan-li, NIU Zhen-hua

(The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: Revealing hydrologic processes and developing hydrology prediction models not only have great effect on flood prediction and design of dam and reservoir engeering, but also form the foundation of developing physically-based soil erosion model. Based on the physical hydrology processes of infiltration, runoff producing and runoff converging, main progress of hydrologic processes and prediction models at home and abroad was generally introduced. Meanwhile, it was pointed out that the tendency of study on hydrology prediction models is establishment of distributed hydrology process models based on GIS.
Key words: hydrology prediction models; infiltration; runoff yield; runoff collection

揭示水文过程, 发展水文模型不仅在暴雨洪水预报及坝库工程设计等方面具有重要作用, 而且也是研发土壤侵蚀物理学模型必须的基础性工作。水文模型从最初的概念性水文模型发展到现在的分布式水文过程模型, 现代信息技术(GIS、RS)的应用起到了重要的作用。与概念性模型相比, 分布式模型能更准确地描述水文过程, 并能充分反映参量和变量的空间变异性, 因而在模拟水土流失对水文过程的响应, 及土地利用、土地覆盖、水土保持措施的水文效应评价等方面起到重要作用。

水文过程研究与水文模型研发密切相关, 水文过程主要包括降雨入渗、产流及汇流过程, 是水文模型的主要模拟内容。国内外学者在该领域做了大量的研究。

1 入渗过程模型

降雨入渗贯穿于产流前期及产、汇流过程中, 是发生在非饱和土壤中的水分运动。水文模型中降雨入渗的计算有三种途径: 经验性方法、半经验性方法和数学物理方法。Horton 通过入渗实验研究, 认为入渗过程是个消退的过程, 且消退

的速率与该时刻的下渗率到稳渗率的改变量成正比。Horton 得到降雨入渗的经验方程为:

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

式中: i —— 入渗速率; i_c —— 稳定入渗速率; i_0 —— 初始入渗速率; t —— 时间; k —— 常数。

Horton 公式是从实验中得到的纯经验性方程, 虽然入渗机理的研究正在向物理过程型转变, 但 Horton 公式由于使用简便, 至今仍然在许多研究领域应用。

近年来国外经常应用改进的 Green- Ampt 模型进行入渗计算。Green 和 Ampt 对实验数据进行回归, 建立起一种具有一定物理基础的反映入渗速度与水势梯度之间关系的半经验模型。该方程为:

$$i(t) = k[1 + (\theta - \theta_0)S/I]$$

$$I = Kt + s(\theta - \theta_0)\ln[1 + \frac{1}{S(\theta - \theta_0)}]$$

式中: $i(t)$ —— 入渗率; K —— 土壤有效饱和导水率; θ —— 土壤饱和含水率; θ_0 —— 土壤初始含水率; S —— 湿润锋平均基质吸力; I —— 累积入渗量; t —— 时间。

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3- SW- 442); 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿项目
作者简介: 黄新会(1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文及土壤侵蚀预报模型。

该公式是在湿润层饱和且沿深度分布均匀的假设条件下得到的,而实际降雨很难满足此假设条件,因而在实际应用时受到限制。Main-Larson(1973)在分析降雨入渗机理的基础上,对 Green-Ampt 公式加以改进,使其应用到定雨强条件下的入渗计算。在计算累积入渗量时,由于不是降雨开始时即有积水,故应将无积水的入渗时间换算到有积水的时间。这样,从降雨开始,换算的积水入渗时间 t_c 为:

$$t_c = t + \frac{I_p - S(\theta_s - \theta_i) \ln[1 + \frac{I_p}{S(\theta_s - \theta_i)}]}{K}$$

式中: I_p —— 有积水时的累积入渗量; t_p —— 开始积水的时间; 其它物理量同上。

非恒定降雨条件下的累积入渗量计算公式为:

$$I = K t_c + S(\theta_s - \theta_i) \ln[1 + \frac{I}{S(\theta_s - \theta_i)}]$$

Chu(1978)对 Main-Lason 修正过的公式进一步改进,提出了变雨强条件下入渗的计算方法。Chu 将天然降雨过程按照强度分成若干时段,使各时段内雨强相对稳定。对每个时段用 Main-Lason 方法计算。这样,Chu 改进后的公式可以用于变雨强多次积水情况下入渗量的计算,在入渗计算方面前进了一大步。

1856 年法国工程师 Darcy 用达西定律对非饱和土壤水运动进行了描述,由此开始了对入渗水运动的物理模拟。最早推出的具有物理学基础的土壤水运动的数学方程是 Richards 1931 年以达西定律和连续方程为基础提出的非饱和土壤入渗水运动的偏微分方程,即:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

$$\text{或 } C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \frac{\partial h}{\partial z}] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (2)$$

式中: θ —— 土壤含水量; h —— 毛管势(或称吸力势、压头等); t —— 时间; z —— 垂向坐标; K —— 饱和导水率; D —— 扩散率; C —— 土壤水容量。

Philip(1957)对 Richards 方程进行了系统研究,得到了方程的解析解,并加以简化得到 Philip 入渗方程:

$$I(t) = s t^{1/2} + A t \quad \text{相应的入渗率为}$$

$$i(t) = s t^{-1/2} + A$$

式中: $I(t)$ —— 累积入渗量; s —— 渗吸率; A —— 稳定入渗率; t —— 时间; $i(t)$ —— 入渗速率;

Philip 入渗公式得到了田间入渗实验资料的验证,具有重要的应用价值,但该公式是在半无限均质土壤、初始含水率分布均匀、有薄层积水的条件下求得的,因此该公式只适用于积水条件下一维垂直入渗的情况,具有一定的局限性。

在应用较为广泛的 Horton 入渗方程、Green-Ampt 入渗方程、Philip 入渗方程的基础上,中外有关研究在以上入渗研究的基础上又提出了许多入渗模型,如 Smith、Parlange(1978)从土壤水分运动的基本方程出发,导出了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。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。E.Smith(1993)以 Parlange 等方程为基础,提出了一个复杂降雨条件下的入渗概念性模型。范荣生、张炳勋在黄土地区用水文参数取代 Mein-Larson 方程中物理参数提出入渗模型。包为民(1997)等根据蓄满产流和超渗产流的产流机制,结合半干旱地区产流的实际情况,提出了垂向混合产流模型。郭瑛(1982)利用 Horton 入渗方程,结合流域下渗分配曲线,提出了非饱和产流的产流计算方法。郝振纯(1994)基于饱和和下渗理论,考虑新入渗雨水驱替旧土壤水分的作用,根据力学原理提出了一个简明入渗模型。但这些模型大多都是在没有考虑土壤的垂向水平变异性、前期含水量、以及入渗作用、土壤结皮对入渗的影响等前提下得到的,因此未来对入渗的研究应在研究降雨入渗物理机制的基础上,经验性模型与物理模型相互对照,相互改进,建立反映时空变化的分布式入渗模型。

2 产流理论

产流实质上是降雨在不同下垫面中各种因素综合作用下的再分配过程。根据产流面积,产流可分为坡面单点产流和流域产流,由于单点产流不需要考虑时空变异性,因而最初的产流研究是从研究单点产流开始的。经典产流理论是由 Horton(1935)提出的。Horton 指出,降雨强度超过地面下渗能力和包气带缺水量得到满足,是产流发生的基本物理条件。前者产生地面径流,后者产生地下径流。Horton 理论提出了产流的主导因素,概括了径流生成的基本条件和均质包气带超渗产流的形成机制,成为后来产流理论发展的基石,但不能解释非均质或表层透水性极强的包气带的产流机制。在一些表土十分疏松、下渗能力很大的地区,即使降雨强度不够大,也可以观测到地面径流现象,这些现象为经典的 Horton 理论所不能解释。20 世纪 70 年代,Dune 等在大量观测与实验基础上证实,非均质包气带具备产生壤中径流的条件,表层透水性极强的包气带具备产生饱和和地面径流的条件。Kirkby(1978)在 Dune 的观测与实验基础上提出的山坡水文学以不透水界面理论为基础,提出了壤中径流和饱和地面径流,对 Horton 的产流方式做了补充。

在以上国外研究的基础上,我国对产流理论也进行了不懈的探索。60 年代我国学者提出湿润地区以蓄满产流为主,干旱地区以超渗产流为主的理论(赵人俊,1984)。近年来的研究表明,仅以气候来划分蓄满产流区或是超渗产流区是不够的,产流机制的变化还与降雨的季节特性有关。不仅如此,在同一降雨时间同一特定流域,既不可能完全是超渗产流,也不可能完全是饱和和产流。芮孝芳(1996)分析不同径流成分的形成机制,认为任何一种径流成分都是在两种透水性不同的介质界面上产生的,而且上层介质的透水性必须大于下层介质的透水性,不同径流成分的产流机制可以用界面产流规律来统一。

关于界面产流规律,我国学者于维忠(1985)对此进行了

阐述,提出了 5 种径流成分和 9 种产流模式。这 5 种径流成分分为: (1) 地面径流(R_s), 发生于包气带上界面的超渗地面径流; (2) 壤中流(R_{sub}), 发生于非均质土壤或有层理土壤中相对不透水界面上的超渗壤中径流; (3) 潜水径流(R_g), 是潜水位较高, 包气带较薄的地下径流; (4) 饱和地面流(R_{sat}), 是壤中流的进一步发展, 即出现壤中流后, 上层相对透水路达到饱和后出现的地表径流; (5) 回归流(R_r), 是由壤中流派生出来的径流成分, 是壤中流在较易渗出的地形及坡度条件下渗出地表形成地表径流。这五种径流生成机制在不同下垫面条件下的不同组合, 形成九种产流模式: (1) 总径流只包括超渗地面径流(R_s), 发生的基本条件是包气带很厚, 土壤含水量小, 透水性差, 降雨强度很大; (2) 总径流由超渗地面径流(R_s) 和壤中径流(R_{sub}) 构成, 发生的基本条件是相对不透水路埋深很浅, 但下层很厚, 两层间透水性差异较大, 降雨强度较大; (3) 总径流由饱和地面径流(R_{sat}) 和壤中径流(R_{sub}) 组成, 发生的基本条件大致同上, 但上层更易透水; (4) 总径流由壤中径流(R_{sub}) 和潜水径流(R_g) 组成, 发生的基本条件是包气带厚度中等以上, 相对不透水路埋藏较深, 降雨强度几乎不超过土壤的下渗能力; (5) 总径流由超渗地面径流(R_s) 和潜水径流(R_g) 组成, 发生的基本条件是包气带较薄, 土壤透水性弱且为均质; (6) 总径流由饱和地面径流(R_{sat}) 和潜水径流(R_g) 组成, 发生的基本条件是包气带较薄, 土壤透水性强且均质; (7) 总径流由超渗地面径流(R_s)、壤中径流(R_{sub}) 和潜水径流(R_g) 组成, 发生的基本条件是包气带厚度中等, 存在相对不透水路, 地面透水性差, 下层土壤透水性更差, 降雨强度大且降雨历时长; (8) 总径流由饱和地面径流(R_{sat})、壤中流(R_{sub}) 和潜水径流(R_g) 组成, 发生的基本条件是包气带厚度中等, 存在相对不透水路, 上层土壤透水性强, 下层土壤透水性中等, 降雨强度小于地面下渗能力, 降雨历时长; (9) 总径流只有壤中流(R_{sub}), 发生的基本条件是包气带厚度中等, 土壤透水性强且均质, 下有基岩。

于维忠指出, 对某一固定点来说, 产流机制并不是一成不变的, 而是随着下垫面情况及降雨情况的变化而变化的。在实际流域产流计算的应用中, 要考虑产流模式在流域空间中的分布以及流域产流面积的空间发展。解决产流模式的分布问题, 对小流域要进行实际调查, 对大、中流域只能对现有资料进行统计、分析、判断, 或借助遥感技术来解决较大流域产流模式的空间变异性问题。对产流面积的空间发展问题, 考虑建立流域饱和容量面积分配曲线和流域下渗能力面积分配曲线, 但这两种曲线都是流域平均面积分配曲线, 不能指明流域中具体位置的包气带饱和容量和地面下渗能力。因此, 研究怎样有效地利用现代信息技术工具, 动态地模拟流域产流面积的发展, 是流域水文模型的研究方向之一。

流域面积上降雨及包气带土壤的空间差异性, 决定了流域产流计算的复杂性。解决办法有两种: 一是采用分散性模型, 将流域分散成较小单元, 在每个小单元上降雨及土壤的空间差异性可以忽略。GIS 及 RS 在侵蚀研究中的应用为分

散性模型的发展提供了有力的工具。这里存在着分辨率的问题, 分辨率的高低取决于计算的精度要求和资料的来源丰富性, 同时也取决于计算时间和经费的要求。二是引入反映某些因素空间变化的概率分布。我国学者在这些方面进行了一些有益的探索。范荣生、李长兴等(1994)从降雨的空间变异性出发, 建立了考虑降雨空间变异的流域模型。在这个流域产流模型中, 他将超渗产流模型与降雨空间变化的频率特性有机结合起来, 引入到流域降雨产流计算中, 经过黄土高原四个流域的初步应用, 结果表明在下垫面均一的情况下具有良好的适应性。李长兴、沈晋等(1989)在考虑土壤特性空间变异的流域产流模型中, 将标定理论引入流域产流计算中, 用一个反映土壤特性空间变异程度且符合对数正态分布的标定因子将流域划分单元, 通过对单元下渗曲线的标定和应用, 建立了一个反映流域土壤空间变异的流域产流模型。肖琳等(1995)提出了开始积水时间流域分配曲线的概念, 实质上反映了产流面积大小的变化过程, 为准确计算产流量奠定了基础。

3 汇流计算

汇流计算的目的是任务就是把产流计算得到的净雨过程转变为出口断面的流量过程, 为水文计算和水文预报服务。

流域汇流计算包括坡面汇流计算和河槽汇流计算。坡面汇流计算多采用单位线法和等流时线法。单位线是 L. K. Sherman 于 1932 年提出的, 并创建了用单位线推求流域汇流的方法。单位线的基本假定是: 降雨时空分布均匀, 流域为线性系统, 产流过程符合倍比和叠加原理。Clark 于 1945 年将等流时线与线性水库两种概念相结合, 建立了瞬时单位线方法。Nash 于 1957 年提出了具有 Gamma 函数分布形式的瞬时单位线。Dooge 于 1960 年明确将系统概念引入流域汇流, 提出了一般性流域汇流单位线, 并相继提出时变水文系统概念和各种流域非线性汇流理论和计算方法。Rodriguez-Iturbe 和 Gupta 等人于 1979 年则基于流域河网定理提出地貌瞬时单位线。

国外近年来广泛运用由圣维南(Saint-Venant)方程简化而成的非线性运动波方程来描述坡面汇流, 它包括水流连续方程和动量方程。国内有关研究也已经以圣维南方程为基础建立了不同的数学模型, 但在方程的适用条件上仍有分歧。如赵人俊(1984)认为运动波方程只适用于陡坡; 而吴长文则认为只适用于缓坡($< 3^\circ$); 汤立群(1994)认为圣维南方程组的运动波特别适用于表面粗糙、坡度陡、旁侧来流少的水流运动, 他认为几乎所有的坡面流都可以用运动波方程来描述。胡世雄(1998)认为该方程具有较大的坡度适用范围。沈冰等(1992)等通过黄土坡面漫流实验发现黄土坡面采用运动波方程来描述坡面降雨漫流过程是恰当的。

河槽汇流的基本依据仍然是圣维南方程组。在计算河槽汇流时, 通常将圣维南方程组简化为运动波、扩散波或惯性

波方程,然后再进行求解。杜格将忽略惯性项的圣维南方程组线性化,求得了扩散方程与马斯京根洪水演算法,并导出了马斯京根法 x 值的理论公式。孔奇对扩散方程进行差分离散,取其二阶近似,也得到了马斯京根洪水演算法及马斯京根法 x 值的理论公式。由此可知,马斯京根法洪水演算相当于求解扩散波方程。常见的洪水演算方法还有特征河长法。此外,水文中还经常使用经验槽蓄曲线法进行洪水演进计算。由于河道与邻近的蓄滞洪区水流交换非常复杂,而且最终有部分洪水滞留在蓄滞洪区内,不能进入河道,此时洪水过程变形严重,属于非正常演进洪水。用一般的洪水演进方法进行模拟很难得到满意结果,为解决此类洪水的预报,常采用经验槽蓄曲线法。

4 水文模型研究展望

水文模型是对水文过程进行模拟计算的数学模型。在对水文过程机理研究的基础上,许多学者开展了水文模型的研究和开发。现有的水文模型多是集总式的概念性模型和具有经验函数的关系模型,模型在结构上主要借助于概念性元素和经验函数对水文过程进行模拟。这种模拟只涉及现象的表面而不能反映现象的本质和物理机制,难以揭示水文过程的内在机制。与概念性模型相比,分布式模型采用数学物理方程来描述水文过程的各个子过程,考虑降雨和水文过程的分

参考文献:

- [1] Bardossy A, Disse M. Fuzzy rule-based models for infiltration[J]. Water Resource Res., 1993, 29(3): 373– 382.
- [2] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resources Research, 1978, 14(3): 461– 466.
- [3] Horton R E. The role of infiltration in hydrologic cycle[J]. Trans. A. G. U., 1931, 12: 189– 202.
- [4] Horton R E. Surface runoff phenomena[M]. Michigan: Horton Hydrology Laboratory Publication 101, Ann Arbor, 1935. 1– 73.
- [5] Kirby M J. Hillslop hydrology[M]. New York: John wiley & Sons, Ltd., 1978. 389.
- [6] Mein R G, Lason C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384– 394.
- [7] Philip J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Sci, 1957, 83: 345– 357.
- [8] Smith E. Modeling infiltration for multistorm runoff events[J]. Water Resource Res., 1993, 29(1): 133– 144.
- [9] Smith R E, Parlange, J Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model[J]. Water Resource Res., 1978, 14(3): 533 – 538.
- [10] 包为民, 王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文, 1997, (3): 18– 21.
- [11] 范荣生, 李长兴, 李占彬, 等. 考虑降雨空间变化的流域产流模型[J]. 水利学报, 1994, (3): 33– 39.
- [12] 郭瑛. 一种非饱和产流模型的探讨[J]. 水文, 1982, (1): 1– 7.
- [13] 郝振纯. 黄土地区降雨入渗模型初探[J]. 水科学进展, 1994, (3): 186– 192.
- [14] 胡世雄, 靳长兴, 等. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 326– 334.
- [15] 李长兴, 沈晋, 等. 考虑土壤特性空间变异的流域产流模型[J]. 水利学报, 1989, (10): 1– 8.
- [16] 芮孝芳. 关于降雨产流机制的几个问题的讨论[J]. 水利学报, 1996, (9): 22– 26.
- [17] 沈冰, 沈晋. 坡地水文数学模型研究述评[J]. 西北水资源与水工程, 1992, 3(4): 1– 10.
- [18] 肖琳, 张国庆, 张成才, 等. 干旱半干旱地区产流模型的研究及应用[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(2): 143– 148.
- [19] 汤立群, 陈国祥. 坡面土壤侵蚀公式的建立及其在流域产沙计算中的应用[J]. 水科学进展, 1994, (2): 104– 110.
- [20] 于维忠. 论流域产流[J]. 水利学报, 1985, (2): 1– 11.
- [21] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.

散性和空间变异性,因而能更全面地描述水文过程,成为水文模型研究的热点。

分布式水文模型的数据与 GIS 中的矢量或栅格式数据模式有类似性,都以一定的空间分辨率划分研究区以减少数据量、简化计算。GIS 对空间数据的获取、存取、分析和显示,正迎合了分布式水文模型的空间变异性的技术要求。GIS 有处理和计算不同类型数据的能力,给分布式水文模型的三维数据计算带来了很大便利。另外, GIS 有图形显示的功能,它能在原有信息的基础上通过对空间数据和属性数据的分析计算得到新的信息,并以图形的形式直观显现,从而加深水文工作者对产汇流等水文物理过程的认识,促进水文模型及其模拟、预报技术的发展。因而,在 GIS 等新技术的支持下,建立 GIS 与水文模型的耦合模型成为水文模型研究的发展趋势。

本文对主要水文过程与水文模型的主要进展进行了探讨,指出建立基于 GIS 且揭示水文过程物理机制的分布式水文模型是水文模型研究的发展趋势。另外,以往水文模型主要将下垫面在地形特征上作为均匀面处理来进行水文过程模拟,而没有考虑细沟、浅沟、切沟、冲沟等侵蚀形态存在的事实,以致在建立坡面或流域土壤侵蚀物理模型中难以使用,这是发展水文模型需要考虑的另一个重要问题。