

流域水文模型研究的进展

万洪涛^① 万庆^② 周成虎^②

(^①中国科学院遥感应用研究所, 北京, 100101)

(^②中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京, 100101)

摘要: 流域水文模型是对流域上发生的水文过程进行模拟计算的数学模型, 在水文过程模拟中, 对流域内的产流、坡面汇流以及河道汇流过程的模拟是很重要的。坡面产汇流模型模拟从降水到流域产流和流域坡面汇流的水文子过程, 河道演进模型模拟河网汇流水文子过程。现有的水文模型大多数是没有考虑水文变量和水文参数空间变化的概念性水文模型。随着地理信息技术的发展, 考虑水文变量和水文参数空间变化的分布式水文模型得到了极大的重视与发展, 而且, 遥感技术的发展满足了分布式水文模型对空间信息的需求。

关键词: 流域 水文模型 进展 地理信息系统 遥感

1 引言

流域水文模型是由描述流域降雨径流形成的数学函数构成的一种数学物理模型, 它严格满足流域水量平衡原理。流域水文模型的出现与计算机的诞生分不开, 70~80年代是流域水文模型的蓬勃发展时期。我国自70年代开始, 一方面积极引进国外有关的流域水文模型, 另一方面致力于新的流域水文模型的研制。流域水文模型属于数学模型, 即对一些经验规律加以物理解释, 用严密的数学方式表达出来, 再把各个水文过程综合起来, 形成全流域的水量平衡计算系统。经典水力学与计算机技术的结合, 已在70年代产生了计算水力学, 并在一定程度上替代了水力学模型试验。

不同的模型使用不同的数据集, 不同的数据集在时间上的详细程度和空间分辨率各不相同。非空间模型可在任意大小和形状的面状单元上运行 (Openshaw, 1981), 并可自由地由科学家所选择。而空间模型的应用范围较窄, 动态模型则需要将模拟计算区离散成更多的面状单元, 然后进行建模。随着地理信息系统与遥感技术的发展, 空间信息的获取与处理取得了极大的进展, 水文模型也慢慢从概念性水文模型向分布式水文模型发展。

2 水文模型

水文模型将流域概化成一个系统, 该系统根据输入条件求解输出结果, 其实质是对流域上发生的水文过程进行模拟计算。降雨到达地面之前, 部分

被树冠截流; 在降落到地面的雨水中, 一部分由于蒸发而损失, 一部分下渗到地下, 以串流和基流的形式汇集到河道中, 剩下的部分在满足地面填洼后, 以坡面流的形式汇聚到河道中, 进入河网汇流过程。水文模型为模拟该过程的数学物理模型。在水文模型中, 系统输入一般为降雨、融雪、水质、泥沙过程以及流域的蒸散发能力。系统的输出是流域出口断面的流量过程和流域实际蒸散发。在水文过程模拟中, 对流域内的产流, 坡面汇流以及河道汇流过程的模拟是很重要的。坡面产汇流模型模拟从降水到流域产流和流域坡面汇流的水文子过程; 河道演进模型模拟河网汇流水文子过程。

2.1 流域产流

最早的产流理论是由霍尔顿在1933年提出的, 即著名的下渗理论。当雨强小于下渗能力时, 所有降雨都被土壤吸收; 大于下渗能力时, 吸收率只能等于下渗能力, 其余部分就是产流量。土壤表面有如筛子, 能把降雨筛成两部分: 一部分形成坡面流以后进入河道; 另一部分先进入土壤, 然后或渗透而成为地下水, 或通过蒸散发而重新进入大气。

60年代以来的一些研究, 对古典的霍尔顿理论提出了许多不同的看法 (Dunne, 1978)。按霍尔顿概念, 在有超渗降雨期间, 坡面上要产生一种片状流。但根据许多学者在野外实地观测的结果, 只在荒坡与人工地面上看到过这种片状流, 一般情况下, 特别是在表土比较疏松, 有植被覆盖的地方, 很难出现这种片状流, 而通常产生壤中流。当土壤有分层结构, 土层的水力传导率随深度的变化出现不连续性时, 可以在每个土层的底部产生饱和带, 在饱

和带中形成串流, 在未饱和带中, 也可以产生串流, 但量很小。当饱和层增厚, 达到地面时, 土中已无空隙, 降雨易于形成地面径流, 称为饱和坡面流。饱和坡面流状态下的水量平衡关系, 决定于土层间的水分交换, 土层内的蓄量已无变化。即使雨强没有超过表土的下渗能力, 也可产生地面径流。壤中流与饱和坡面流的概念是古典的霍尔顿概念中所没有的, 这就是山坡水文学与古典霍尔顿概念的基本区别 (Dunne, 1978; Sivapalan M. 1987)。饱和坡面流很难在全流域上产生, 但却很容易在局部面积上产生。

总之, 在湿润有植被地区, 坡面流是饱和坡面流, 并且可以把饱和面积看成是永久性河道系统向蓄水容量较小地区的伸延。从坡顶到坡脚, 水深与流量不断增加, 但水深的增量不与流量的增量成正比, 因为流速也增加了。大体上水深的增量与流量增量的 $2/3$ 次方成正比。这些均成为分布式水文模型的基础。

2.2 坡面汇流

概念性坡面汇流模型和地貌瞬时单位线理论是研究流域汇流的两条不同途径 (Wood, 1986)。坡面汇流计算有两种方法: 一为单位线, 是黑箱子性质; 另一种是等流时线, 是概化推理性质。单位线的定义是系统的脉冲反应。这一概念属于数学范畴, 不涉及模拟对象的物理实质。如果系统是线性的, 单位线是不变的; 如果系统是时变的, 单位线也是时变的; 如果系统是非线性的, 单位线则随输入输出的变化而变化。单位线概念只注重系统反应, 不考虑系统的状态, 属于黑箱子模型。单位线的概念与方法简单, 要求的资料少, 又具有一定精度, 因此在水文上起了很大的作用。

Rodriguez-Iturbe 和 Valdes 于 1979 年首先提出了地貌瞬时单位线的概念, 单位线被解释为降落在流域上的净雨雨滴在流域上传播时间的概率密度函数。Gupta 等 (1980) 假设, 降落在流域上不同部位的雨滴按不同的路径汇集到流域出口, 路径由水质点在河网中的运动规律决定, 雨滴在任一路径上的传播时间等于该路径上各状态的传播时间之和, 在任一路径的传播时间概率密度函数等于组成该路径上各级状态的传播时间的概率密度函数的卷积。按各路径概率叠加这些路径传播时间的概率密度函数即得该流域瞬时单位线。任一状态传播时间和概率密度函数可以取任何形式, Beven (1983) 等建议采

用指数型分布, 其分布参数正比于该级河道长度的 $1/3$ 次方, 比例系数由流域平均滞时确定。由此可见, 地貌瞬时单位线理论, 显然把流域与河网结构和流速的空间分布联系起来, 从而提供了一个直接利用流域出口断面流速资料就可以确定流域瞬时单位线的新途径。

概念性流域汇流模型有如下几个问题: ①概念性元素的推移和坦化作用。洪水波在坡面、河道中的推移和坦化作用是客观存在的, 因此在汇流计算中同时考虑这两种作用是完全必要的。在概念性汇流模型中, 通常用“线性渠道”模拟洪水波的推移作用, 用“线性水库”模拟洪水波的坦化作用; ②流域单元的划分问题。在概念性流域汇流模型中, 为了考虑降雨分布的不均匀性, 或者为了考虑流域上不同位置具有不同的调蓄作用, 通常将流域按等流时线划分成若干个单元, 从而获得对整个流域的离散; ③汇流参数的自由度问题。在流域汇流计算中, 为了考虑汇流作用的空间变异性 (即流域调蓄作用的不均匀性), 通常用不同 (或不等) 概念性元素来模拟流域上不同单元的汇流作用, 这无疑有助于解决流域的空间变异性问题, 但随之而来由于增加了流域汇流参数的自由度, 使得定参问题变得复杂化, 在某种程度上, 限制了模型的应用。

2.3 河槽汇流

(1) 水文学方法。河槽径流是不稳定流水力学计算问题, 它的基本根据是圣维南方程组。由于圣维南方程组动力学求解方法过程复杂, 在水文模型中一般先对圣维南方程组进行简化, 然后再进行求解。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 (C. I. Dooge) 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 (Cunge) 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, 洪水演算法相当于求解扩散波方程。常见的洪水演算法有马斯京根法与特征河长法。

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。

(2) 水力学模型。始于 20 世纪 60 年代的流体力学数值模拟, 是在计算机问世之后, 综合流体力学、计算数学以及各种生产应用技术而发展起来的一门新兴学科。流体运动数值模拟国外始于 60 年代, 国内始于 70 年代, 并于 70 年代末以后有大量研究成果问世。从总体情况而言, 70 年代以河口一维潮流计算为主, 进入 80 年代后, 除继续应用推广一维计算模型外, 大多已采用二维数值模拟模型, 并按需要配以泥沙、温度、盐度和污染物等物质输移模型, 三维模型也已逐步展开, 并取得了显著的进展(李孟国等, 1999; 程伍群, 1998; 沈焕庭, 1997)。数值计算的方法主要有有限差分法、有限元法、有限体积法和特征线法。

有限差分法是将微分方程中的微分用差分代替, 从而化微分方程为易于求解的代数方程。在二维水流模拟模型中, 差分方法是用得最多且最为成熟的一种方法。为了很好地模拟复杂的固岸边界和底地形, 并能随意布置和加密网格, 三角形网格差分法得到了广泛的推广。

用有限元法对二维水流进行数值模拟是为了克服最初的规则网格划分不适应复杂的边界及不能满足计算域内部的局部加密要求等缺点而发展起来的。有限元法具有网格划分灵活、拟合复杂岸边界和地形容易等优点, 但是数学推导繁琐, 公式众多, 不易编程, 特别是通常要求解庞大的代数方程组, 占用内存大, 耗费机时多, 不够经济, 这些都限制了有限元法的应用。

有限体积法为对微分控制方程的积分形式进行离散求解的方法。其最大优点是离散方程的解表示了变量(如质量、动量等)在任何数量的控制体积上的总体积分是守恒的, 因此在整个计算区域也是守恒的。有限体积法不仅能在精细的网格上获得很好的结果, 而且即使在较粗网格的情况下, 也可以得到很好的结果。有限体积法一般使用矩形交错网格, 也可以使用不规则网格(谭维炎, 1995)。

特征线法称为特征理论法或特征差分法。其基本思想是基于浅水波方程属一阶拟线性双曲线偏微分方程, 利用二维空间的特征理论, 可导出两簇特征曲面和相应的特征关系式, 对特征关系式进行离散求解可得到流速各分量的数值解。特征线法在水位、流速变化剧烈的强潮河口、海湾潮流计算中会取得较好的效果(汪德灌, 1987)。

3 分布式水文模型及其 GIS 应用

3.1 概念性水文模型的局限性

由于流域水文过程中的空间分异性和复杂性, 使得水文研究人员至今还不能采用数学物理方程来描述径流形成过程中的各个子过程, 在产流、汇流等环节上仍然主要借助于概念性水文模型、水量平衡方程或经验公式。在一些比较著名的模型, 如美国的斯坦福模型和萨克门托模型、日本的水箱模型以及中国的新安江和陕北模型等, 常采用简单的下渗经验公式、经验流域蓄水曲线或水箱侧孔、低孔出流等来模拟产流过程; 采用单位线、线性或非线性水库及渠道来模拟汇流过程。

由于仅涉及水文现象的表面而不涉及水文本质或物理机制, 概念性流域水文模型在结构上与实际水文空间分散性和不均匀性输入是不匹配的。流域降水是分散地、不均匀地降落在流域地面上, 各点产生的径流流至同一出口断面, 它具有分散性输入和集中性输出的特点, 只有采用数学物理偏微分方程才能全面描述水文过程的这一特点。在实际应用中考虑这一问题时, 几乎无一例外地采用划分单元面积的方法, 在该单元面积上采用集中输入和集中输出的流域水文模型, 最后将各单元线性叠加成出口断面的流量。这种处理方法是合理的, 如各单元雨量的空间变化、参数不同、产流机制有别、汇流过程不满足线性叠加原理等问题都未考虑。因此, 采用数学物理偏微分方程结构, 反映水文变量与参数空间变化的分布式流域水动力学模型进行水文产汇流研究是十分必要的。

分布式或半分布式流域水文模型是目前国际上水文研究的热点(Wood, 1988)。在分布式水文模型中, 考虑了降雨的空间变化, 计算区域的空间分异, 如土壤与地形的空间分布。这与以前的概念模型有了很大的差别。在分布式水文模型中仍有一些假定: 降雨空间分布不平衡, 但不考虑其时间变化。在暴雨期间, 土壤含水量的再分配不考虑, 土壤与降雨的空间相关关系被忽略。从技术上讲, 要构建分布式水文模型的框架并不难, 关键问题为水文单元划分、空间参数确定、产汇流机制确定和模型算法实现等, 地理信息系统技术与遥感技术有助于这些问题的解决。

3.2 水文模型与 GIS 的应用

水文模拟的任务为模拟地表和地下环境中的水

体流动及其溶解物输移。利用时间序列数据进行水文模拟的工作已开展多年, 利用上千个空间单元进行水文模拟已逐渐成为可能。GIS 中用于空间数据及非空间属性数据的获取、存储、分析和显示的功能已非常成熟, 可为水文模型提供非常详尽的背景环境描述(如DEM, 土地利用类型等)。由于GIS在水文中的应用, 基于过程的分布式水文模型得到了一定的注意与发展(Beven, 1992; Kovar, 1996), 这是由于其应用连续的空间单位(格网单元)用于数据存储和处理, 使数据易于进行叠加分析, 并且可从DEM中提取水文网络以用于建立水文模型。

影响河道变化的复杂因素对数据获取提出了很高的要求, 而这是常规方法所不能满足的。GIS可提供精确而有效的数据支持, 提取和处理功能, 对以上讨论的这些困难提供最实际可行的方法。GIS有能力处理不同源的数据: 地图、航空照片、卫星影像和研究区的监测与实测数据资料。其在水文模型中以下几方面能发挥重要作用: (1) 管理空间数据; (2) 由基础数据层生成新数据层; (3) 为模型参数的自动获取提供可能; (4) 为水文建模提供方便; (5) GIS有利于分析计算的过程及结果可视化表达。

3.3 遥感数据水文分析应用

复杂而又具有物理意义的分布式水文模型的发展极大地提高了对空间数据的要求。同时, 传统数据收集部门受到了极大的压力, 传统地面观测站网的密度远远不能满足模型对数据的要求。遥感方法被认为是花费较少的数据获取方法(Koblinksky et al., 1992)。自从美国于1972年发射了用于人类的试验遥感卫星之后, 卫星遥感数据的获取使得地球科学研究进入一个新的时代。许多国家使用卫星数据对其国内资源进行管理。在洪水演进模型中, 土地利用类型图可用于估算计算网格的糙率系数; 利用遥感数据估算降雨、土壤含水量的研究也取得了一定的进展。

现已有大量携带不同传感器的遥感卫星, 如高光谱传感器、高分辨率传感器、不同类型的雷达、微波辐射计等。将有更多不同来源的多光谱、多时态、多元数据可使用, 以改善其水文应用的效果。

遥感、GIS和水文模型集成的优势在于能较容易进行数据的输入输出、处理和解译, 特别对于重复性很强的研究项目, 集成系统具有更大的优势。为使遥感数据影像处理和GIS时空分析在水文中应用, 影像处理、GIS和DBMS的完全集成是必要的,

未来基于人工智能的解译系统(专家系统)先验专家知识, 都可存于数据库中, 使用者能用其解译结果和新发现(或认识)更新该数据库。遥感有大量的数据、重复的处理过程(时间序列数据分析)以及需要很多自然和地理方面的先验知识, 因此是专家系统应用的理想领域。GIS、遥感、水文模型和数据库管理系统的完全集成, 是GIS与水文模型集成的发展目标。

4 结语

在水文过程模拟中, 对流域内的产流、坡面汇流以及河道汇流过程的模拟是很重要的。坡面产汇流模型模拟从降水到流域产流和流域坡面汇流的水文子过程; 河道演进模型模拟河网汇流水文子过程。由于流域水文过程中的空间分异性和复杂性, 使得水文研究人员至今还不能采用数学物理方程来描述与模拟径流形成过程中的每一子过程, 在产流、汇流等环节上仍然主要借助于概念性水文模型、水量平衡方程或经验公式。概念性水文模型对水文现象时间变化过程模拟较成熟, 但模型计算域的空间离散不够, 没有考虑水文变量和水文参数的空间变化。

GIS中用于空间数据及非空间属性数据的获取、存储、分析和显示的功能已非常成熟, 可为水文模型提供非常详尽的背景环境描述。由于GIS在水文中的应用, 基于过程的分布式水文模型得到了很大的发展, 利用上千个空间单元进行水文模拟已逐渐成为可能。GIS在水文模型中以下几方面能发挥重要作用: (1) 管理空间数据; (2) 由基础数据层生成新数据层; (3) 为模型参数的自动获取提供可能; (4) 为水文建模提供方便; (5) GIS有利于分析计算的过程及结果可视化表达。同时, 复杂而又具有物理意义的分布式水文模型的发展极大地提高了对空间数据的要求, 使传统数据收集部门受到了极大的压力, 传统地面观测站网的密度远远不能满足模型对数据的要求, 而遥感方法是一种新的成本低廉的数据获取方法, 在水文模型中具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] Beven K. J. & Wood E. F. 1983a Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing area. J. hydrol. 65: 139~158

- [2] Beven K. J. and Moore I. D. 1992, Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology, Edited by K. J. Beven and I. D. Moore (Chichester: John Wiley and sons Ltd), 213~226
- [3] 程伍群 (Chen W.), 李大鸣 (1998). 近岸区波浪场数值模拟的研究与进展. 17 (4): 84~93
- [4] Dunne. T. 1978. Field studies of hillslope flow processes in hillslope hydrology. Edited by M. J. Kirkby pp. 227~293. John Wiley. New York
- [5] Koblinksky, C. J., Gaspar, P. & Lagerbief, G. (1992). The future of spaceborne altimetry: Oceans and climate change, Joint Oceanographic Institutions Incorporated, Washington, D. C. U. S. A
- [6] Kovar K. and Nachtnebel H. P. 1996, Application of Geographical Information System in Hydrology and Water Resources Management, IAH S Publication no. 235 (Wallingford: IAH S)
- [7] 李孟国 (Li M.), 曹祖德. (1999) 海岸河口潮流数值模拟的研究和进展. 海洋学报. 21 (1): 111~125
- [8] Openshaw, S., 1981, The modifiable areal unit problem. (Norwich: Geo Books)
- [9] Rodriguez- Iturbe I. & Valdes J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. Water resources research, 15 (6): 1409~1420
- [10] 沈焕庭 (Shen H.), 1997). 中国河口数学模拟研究的进展. 海洋通报. 16 (2): 81~85
- [11] Sivapalan M., Beven K., Wood E. F. (1987). On hydrologic similarity. 2. A scaled model of storm runoff production. Water Resour. Res. 23 (2). 2266~2278
- [12] 谭维炎 (Tan W.), 1998). 计算水动力学——有限体积法的应用. 清华大学出版社
- [13] 谭维炎, 胡四一等 (Tan W.), 1995). 钱塘江口涌潮的二维数值模拟. 水科学进展. 6 (2): 83~93
- [14] 汪德灌, 陈新建 (Wang D.), 1987). 长江口南支流场的平面二维有限差分模拟. 河海大学学报. 15 (5): 34~46
- [15] Wood E. F. & Hanson C. S. 1986. On hydrologic similarity. 1. Derivation of the dimensionless flood frequency curve. Water Resour. Res. 22 (11): 1549~1554
- [16] Wood E. F., Sivapalan, M., Beven, K. & Band, L. (1988) Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling. J. Hydrol. 102, 29~47

The Development of Hydrological Model

Wan Hongtao^① Wan Qing^② Zhou Chenghu^②

(^①Institute of Remote Sensing Applications, Academy of Sciences, Beijing, 100101)

(^②LREIS, Institute of Geography, Academy of Sciences, Beijing, 100101)

Abstract

The hydrological model, which is a technology developed since 1960s, is a kind of mathematical methods for simulating the hydrological process in the watershed. The simulation of hydrological process can be divided into two sub-hydrological process, one is the runoff generation simulation and the other is the routing of flow. In the lumped hydrological model the hydrological variable and parameter are assumed as uniform in the whole basin. Due to the Geography Information System technology the distributed hydrological model, which can deal with variety of hydrological variable and hydrological parameter, had got more attention and development. In addition the spatial information, needed by the distributed hydrological model, can be got more easily because of the development of the Remote Sensing technology.

Keywords: Watershed Hydrological model development Geography information system Remote sensing