

分布式流域水文模型研究中的几个问题

芮孝芳, 朱庆平

(河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:指出数值计算、GIS、雷达测雨和卫星云图等技术的进步为分布式流域水文模型的发展及实际应用提供了条件. 论述分布式流域水文模型的结构有概念性和具有物理基础之分, 也有耦合式和非耦合式之分. 为了确定分布式流域水文模型的参数, 对现有几种建立产汇流参数与自然地理因子之间的理论关系的途径进行了初步分析.

关键词:分布式流域水文模型; GIS; 雷达气象学; 地貌水文学

中图分类号: P338⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)03-0056-03

模拟并预测流域对气候输入所产生的水文响应, 是科学水文学和工程水文学的基本问题. 自 17 世纪末建立了水文循环和流域水量平衡的基本概念后, 流域对暴雨的响应, 即产汇流问题, 就成为地表水文学的一个中心课题^[1]. 长期以来, 由于受科学技术发展水平的制约, 水文学一般只能将流域作为一个整体, 由流域的平均降雨量过程和平均状态参数来推求流域出口断面的流量过程. 这种集总式流域水文模型虽然对水文学的发展起到了历史性的作用, 但与实际流域的情况并不相符. 因为不仅暴雨具有随时变化的空间分布, 流域的土壤、植被、地形、地貌、地质、水文地质等条件在空间上也呈不均匀分布, 人类活动的影响一般也是时空变化的, 因此, 将这种下垫面条件本不均匀的流域硬性地作为一个空间均化的整体来处理, 显然只能提供流域产汇流过程空间均化的结果, 因此, 集总式流域水文模型的使用精度往往不能令人满意. 分布式流域水文模型有望尽可能真实地模拟流域产汇流过程的空间变化, 故已成为流域水文模型新的发展方向.

1 模型的技术支撑

分布式流域水文模型之所以能成为近年来具有吸引力的水文学研究热点之一, 一是因为地理信息系统(GIS)技术的不断完善, 使得描述下垫面因子复杂的空间分布有了强有力的工具; 二是因为计算机技术和数值分析理论的进一步发展, 为用数值方法求解描述复杂的流域产汇流过程的偏微分方程组奠

定了基础; 三是因为雷达测雨技术和卫星云图技术的进步, 为提供降雨量实时空间分布创造了条件.

GIS 是一种在计算机硬件和软件支持下, 基于系统工程和信息科学的理论, 进行管理和综合分析具有空间分布性质的地理数据的系统. 与流域产汇流有关的地理数据主要有地面高程和反映土壤、植被、地质、水文地质特性的参数等. 其中以数字高程模型(DEM)最为有用, 因 DEM 不仅表达了地面高程的空间分布, 而且据此可以自动生成流域水系和分水线、自动提取地形坡度和其它地貌参数. 将 DEM 与表达土壤、植被、地质、水文地质特性的参数的空间分布叠加在一起, 还可以描述这些下垫面参数与地面高程之间的关系.

描述流域产汇流过程的偏微分方程组一般是耦合的, 至今没有解析解, 数值解法也很困难, 但近十多年来情况有了变化, 例如, 据文献[1]报导, Goodrich 和 Woolhiser 在 1989 年研制成功了演算超渗雨沿坡面流动的二维数值方法; 同年, Brath 等人使用表征河网水力几何学的比尺特性, 研制成功了演算河网中单一河道水流的一维数值方法; 1991 年, Paniconi 等人提出了分布式流域水文模型中三维非饱和水流的非线性 Richards 方程的数值解法. 偏微分方程组的数值解法的前提是实施时、空离散化是与分布式流域水文模型的要求相一致的.

传统的观测降雨量的方法是在流域上布设雨量站网, 试图通过布设若干个固定点雨量的观测来推知降雨量的空间分布. 由于降雨量的空间分布随时

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助项目(50099620)

作者简介: 芮孝芳(1939—), 男, 江苏溧阳人, 教授, 从事水文学及水资源研究.

都在变化,因此,雨量站网的布设是很难适应这一情况的.测雨雷达和卫星云图可随时跟踪雨区范围、暴雨走向和降雨量的变化.从理论上可知,利用雷达气象方程可以求得流域上每个网格单元的暴雨强度,因而能直接给出降雨量的空间分布情况.测雨雷达和卫星云图作为一种能直接获取降雨量空间分布的测雨技术日益受到关注,但就目前雷达气象学的发展水平,测雨雷达和卫星云图在探测雨区范围和暴雨走向上是比较可靠的,而对暴雨强度的定量不及地面雨量站精确,近期可采用雷达-雨量站网组合系统来获取降雨量的空间分布,即用测雨雷达或卫星云图来跟踪雨区范围和暴雨走向,而用地面雨量站来校正每个网格单元的降雨量.

2 模型的结构

分布式流域水文模型总是将一个流域划分成足够多的不嵌套的单元面积,以考虑流域降雨输入和下垫面条件客观上存在的空间分布不均匀性.划分单元面积的基本方法有4种:①按雨量站控制面积划分;②按流域内自然分水线划分;③按有限差分法矩形网格划分;④按有限单元法剖分单元划分.由于流域被划分成足够多单元面积,故可认为其中任一单元面积的降雨输入和下垫面条件都呈空间均匀分布,因而可按空间分布的条件来分析每个单元面积的产汇流过程,然后再由各单元面积的分析结果确定整个流域的产汇流过程.

按单元面积的产汇流过程的分析方法,可将分布式流域水文模型划分为概念性和具有物理基础两类.概念性模型通过一些概念性元素如“水库”、“渠道”等,来构成分布式流域水文模型,着重于产汇流过程的宏观表现,而不详细涉及产汇流物理机理.常见的概念性模型有SAC模型、TANK模型和新安江模型等^[2],事实上,这些模型的作者都认为自己的模型既可作为集总式也可作为分布式的.具有物理基础的模型一般是在揭示产汇流物理机理的基础上,通过有关的物理定律如质量守恒定律、能量守恒定律等,导出描述产汇流过程的偏微分方程组,从而建立分布式流域水文模型.目前,从文献上可以查到的具有物理基础的分布式流域水文模型例子有SHE模型^[3]、TOPOMODEL^[4]和DBSIN模型^[5]等.

按由单元面积产汇流过程转变为整个流域产汇流过程的方法,可将分布式流域水文模型划分为非耦合式和耦合式两类.非耦合式的分布式流域水文模型假设流域中每个单元面积对流域总响应的贡献是相互独立的,因此,在分别求得各单元面积的贡献后,通过叠加就可得到流域的总响应.耦合式的分布

式流域水文模型则考虑产汇流过程中各单元面积贡献之间的相互作用,为此,一般必须通过联立求解各单元面积产汇流过程的偏微分方程组,才能求得流域的总响应.

概念性分布式水文模型大多是非耦合式的,而具有物理基础的分布式流域水文模型有些是耦合式的.概念性非耦合式的分布式流域水文模型,由于对产汇流机理作了较大的概化,故理论上不够完善,但求解计算比较简单.具有物理基础的耦合式的分布式流域水文模型,由于比较尊重产汇流的物理机理,故理论上较为完善,但求解复杂的偏微分方程组是比较困难的.

3 模型的参数

分布式流域水文模型包含的参数在空间上一般是不均匀分布,也就是说每个单元面积的产汇流参数一般是不相同的.由于每个单元面积不可能都具有实测水文气象资料,因此传统的主要依赖于实测水文气象资料率定模型参数的方法难以得到全面应用.这样,确定单元面积产汇流问题就转变成成为缺乏水文气象资料情况下如何推求模型参数的问题.

水文过程与流域下垫面尤其是流域地形地貌的相互作用是自然界客观存在的现象.虽然水文过程对流域地形地貌的作用十分缓慢,甚至只有地质年代上的意义,但流域地形地貌的改变对水文过程的影响常常是比较快速的.寻求水文过程与流域地形地貌的相互作用及其定量关系,不仅是为了揭示科学的真谛,而且是为了找出在缺乏水文气象资料情况下确定模型参数的方法.

经过长期努力,水文学家和地貌学家发现,流域的产汇流过程除了受控于降雨特性外,与流域下垫面的地形、地貌、土壤、植被、地质、水文地质等特性有明显的因果关系.早在20世纪30~40年代,水文学家就试图通过实测水文气象资料和流域地形地貌资料的分析,借助统计方法来寻求流域单位线的主要特性如单位线峰值、单位线滞时、单位线历时等,与流域地形地貌参数和降雨强度之间的经验关系,以解决缺乏水文气象资料情况下流域水文响应的推求问题.但由于这种经验关系缺乏严格的物理基础,所以不仅精度难以保证,而且不便于外延和移用.

从理论上揭示水文过程与流域下垫面的因果关系是水文学家长期追求的目标,直到20世纪70年代末,这个问题才有了突破性的进展.例如,就流域汇流而言,现在至少有3种理论可用来解释它与地形地貌之间的关系:其一是“粒子学说”,它由Rodriguez-Iturbe^[6]和 Gupta^[7]创立;其二是“扩散学

说”,它由 Rinaldo^[8]创立;其三是“波动学说”.根据“粒子学说”得出了若水滴之间存在着弱相互作用,则流域瞬时单位线与水流的流域汇流时间的概率密度函数等价的结论.根据“扩散学说”得出的结论是流域汇流是地貌扩散与水动力扩散共同作用的结果.根据“波动学说”,净雨经过由坡面和河网组成的水道网传播就成为流域出口断面流量过程线.由于根据这些理论导出的流域水文响应与地形地貌参数有关,为区别计,称这样流域水文响应为地貌瞬时单位线(GIUH).目前已形成3类具有实用性的推求地貌瞬时单位线的基本途径^[9]:一是以 Horton-Strahler 河流分级理论为基础,应用统计物理学中处理大量“粒子”随机运动宏观表现的方法来建立^[6,7];二是以水系生成的随机理论为基础,通过水系的链分布函数导出宽度函数的期望值来建立^[8];三是通过分析将 Nash 模型瞬时单位线改造成地貌瞬时单位线^[10].

地貌瞬时单位线的研究反过来又促进了定量地貌学的发展.目前已在河系拓扑、分形及随机模拟方面取得了一批重要的研究成果,例如揭示了河系分叉规律及河系、坡度、集水面积等分布规律,发现并解释了面积与河长之间的定量关系.随着 DEM 技术的发展,人们已能方便地利用 DEM 来自动生成河系及流域形状,自动提取河系拓扑参数和流域地形地貌参数.

水文学与地貌学的交叉和相互渗透正在导致地貌水文学的兴起.

参考文献:

- [1] Rosso R. An introduction to spatially distributed modeling of basin response [A]. In: Eosso R. Advances in Distributed Hydrology [C]. Bergamo: Water Resources Publication, 1992. 3 ~ 30.
- [2] 赵人俊. 流域水文模拟 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. 131 ~ 138.
- [3] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the european hydrological system [J]. J Hydrol, 1986(87): 45 ~ 77.
- [4] Ambroise B, Freer J, Beven K J, et al. Application of a generalized TOPMODEL to the small Ringelbach catchment, Vosges, France [J]. Wat Resour Res, 1996(32): 2147 ~ 2159.
- [5] Garrote L, Bras R L. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models [J]. J Hydrol, 1995 (167): 274 ~ 306.
- [6] Rodriguez-Iturbe I, Valdes J B. The geomorphological structure of hydrologic response [J]. Wat Resour Res, 1979(15): 1409 ~ 1420.
- [7] Gupta V K, Wagmire E, Wang C T. A representation of an

instantaneous unit hydrograph from geomorphology [J]. Wat Resour Res, 1980(16): 855 ~ 862.

- [8] Rinaldo A, Marani A, Rigon R. Geomorphological dispersion [J]. Wat Resour Res, 1991(27): 513 ~ 525.
- [9] 芮孝芳. 地貌瞬时单位线研究进展 [J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 345 ~ 350.
- [10] 芮孝芳. 利用地形地貌资料确定的 Nash 模型参数的研究 [J]. 水文, 1999(3): 6 ~ 10.

(收稿日期: 2002-03-05 编辑: 张志琴)

(上接第 43 页)

案合理,选用的材料、工艺先进,工序安排周密,技术关键明确等特点.20 世纪 60 ~ 70 年代,江苏省内采用素混凝土反拱底板的工程较多,大部分都存在类似隐患,黄沙港闸反拱底板水下修补加固技术为江苏省同类型工程的加固走出了一条新路.

参考文献:

- [1] 姚立宏. 水下回流缝灌浆技术在水闸加固中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(6): 51 ~ 52.
- [2] DL/T5100-1999, 水工混凝土外加剂技术规范 [S].
- [3] SL27-91, 水闸施工规范 [S].

(收稿日期: 2002-01-22 编辑: 张志琴)

(上接第 47 页)

3.2 检测

a. 平面尺寸. 营船港闸全部板桩施工结束,经施工单位和监理工程师共同检测,闸室底板、上游翼墙底板下板桩轴线偏差在 1 ~ 2 cm,高程偏差最大为 2 cm;下游翼墙底板下轴线偏差 2 ~ 3 cm,高程偏差最大在 4 cm,满足设计要求.

b. 接缝试水. 在接头两侧各挖深度在 1.5 m 左右的坑,一侧注水,另一侧检查是否渗漏,若出现渗漏现象可凿除上部重浇或在两侧重注混凝土,本工程 36 个接头基本无渗漏现象.

4 结 语

预制冲沉板桩是钢筋混凝土板桩施工的另一种方法,它具有接头少,防渗效果好,施工工期短,价格便宜等特点,主要适用于粉、砂性地基.本闸最大冲沉深度 7.5 m,目前为江苏省冲沉最深的.估计冲沉深度可达到 10 m 左右,但板两侧的倒塌范围会增加,起吊设备需加强.

参考文献:

- [1] 徐琬. 冲沉防渗板的设计与施工 [J]. 江苏水利, 1999(3): 17 ~ 18.

(收稿日期: 2001-02-15 编辑: 熊水斌)