

洪水预报理论的新进展及现行方法的适用性

芮孝芳

(河海大学水文及水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:洪水预报是防洪减灾的重要非工程措施之一,其精度的提高主要依赖于科技进步.根据国内外文献资料,对近30年来流域产流理论、河道洪水波运动理论和流域汇流理论的新进展作了扼要介绍.根据我国近半个世纪以来开展洪水预报工作的经验,对现行河段洪水预报方法、水库洪水预报方法、流域降雨径流预报方法和实时洪水预报误差校正方法的适用性作了初步分析.

关键词:洪水;水文预报;产流;汇流;洪水波;综述

中图分类号:P338

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)05-0001-04

1 洪水预报理论的新进展

1.1 流域产流理论

从1935年Horton发表《地表径流现象》一文,初次提出产流的物理条件,到1978年Kirkby等的专著《山坡水文学》的出版,关于产流机制的研究已经历了近半个世纪.现在已知的关于产流的物理条件可概括为^[1]:降雨强度与下渗能力的对比,下渗到包气带的水量与其缺水量的对比,以及包气带岩土结构的均匀程度等.由此3个条件,已能合理解释自然界超渗地面径流、饱和地面径流、壤中水径流和地下水径流等4种径流成分的形成机制.不同径流成分一般存在于不同的介质中,研究不同径流成分的形成机理,对于合理划分水源及其提高流域汇流的计算精度有重要意义.

可能共生的径流成分即组成了总径流.自然界的总径流组成共有9种^[2],但如着眼于影响总径流的因素,则可简化为两类:第一类的影响因素为降雨量、雨期蒸散发和降雨开始时包气带含水量;第二类的影响因素为降雨量、降雨强度、雨期蒸散发和降雨开始时包气带含水量;或者说第一类的总径流与雨强无关,第二类则与雨强有关.这样就分清了三自然界存在的两种基本产流模式:第一类称为蓄满产流模式;第二类称为超渗产流模式.分清产流模式有利于总径流计算方法的建立.

现在关于产流机制还有一些未被认识的领域,例如坡度、土层各向异性、非饱和水流等对产流的作用

用至今还不太清楚^[2].

对于各种径流成分的产流面积变化,目前尚不确定,但对总径流的产流面积变化已有所了解,并且可以证明,当降雨空间分布均匀时,对蓄满产流可用流域蓄水曲线描述产流面积变化,而对超渗产流则可用下渗容量面积分配曲线描写产流面积的变化.流域蓄水曲线和下渗容量面积分配曲线均只能在统计意义上反映影响产流量的下垫面因素的空间分布.

1.2 河道洪水波运动理论

人们关于河道洪水波的物理性质和分类的研究,从1858年Kleitz提出洪水波是单斜上升波算起已有一个多世纪了.目前认为最有理论根据,并对实践有指导作用的分类方法是由Ponce于1977年提出的. Ponce的分类方法基于由连续性定律和能量守恒定律得到的St. Venant方程组,从而把洪水波分为运动波、扩散波、重力波、稳定动力波、动力波等5种^[3].

运动波发生在河底比降远大于惯性项与附加比降项之和的山区河流中,它的水位-流量关系为单一曲线,波速用Seddon公式计算,仅向下游传播,在传播过程中洪峰不变,但过程线形状可不变也可变,取决于波速是否随水力条件变化.扩散波发生在仅惯性项可忽略的河底比降比较平缓的河流中,它的水位-流量关系为绳套型曲线,波速也可用Seddon公式计算,也只向下游传播,在传播过程中不但洪峰衰减,而且过程线发生坦化.惯性波一般发生于河底比降和摩阻比降可以抵销、水面近乎水平的水库中,不存在水位-流量关系曲线,波速不能用Seddon公式计

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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.

算、可向下游和向上游两个方向传播,且向下游方向传播的速度远大于运动波或扩散波速。动力波发生在各种作用力量级相当的平原河流或河网中,也不存在水位-流量关系曲线,传播速度和方向与重力波相似。稳定动力波在天然洪水波运动中不多见。在洪水预报中,运动波和扩散波是最常见的,它们已成为河道洪水演算的理论基础。惯性波理论应当成为水库调洪演算的理论基础,但目前的研究尚不深入,动力波演算则已成功用于感潮河段和平原河网的洪水演算。运动波方程式为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中: q 为流量; c 为波速; x 为沿水流方向距离; t 为时间。

对于一定的初始条件,根据式(1)就可由已知的上断面洪水过程线,确定下断面洪水过程线。但最具有实用价值的是式(1)的数值解。可以证明,当采用数值解时,只要数值解所引起的数值扩散能模拟洪水波的物理扩散^[4],则得到的解与传统的 Muskingum 法一样,并可得到确定流量比重因次 x 的计算公式为

$$x = \frac{1}{2} - \frac{D}{c\Delta x} \quad (2)$$

式中: D 为扩散系数; Δx 为子河段长。

扩散波方程式为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中各项符号的意义同前。

对于一定的初始条件,若上断面入流为单位脉冲,则由式(3)可求得自由下边界情况下,下断面的出流过程为^[2]

$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D}} \frac{x}{t^{3/2}} \exp\left[-\frac{(ct - x)^2}{4Dt}\right] \quad (4)$$

式(4)实际上就是河段的瞬时单位线公式。用此式进行洪水演算将是十分方便的。式(3)的优点还在于可用于下游有回水顶托作用的河道的洪水演算。

1.3 流域汇流理论

流域汇流是一种比河道洪水波运动更复杂的水流运动,一般不宜用上述洪水波方程式来描写它,应采用特殊或独到的研究方法。

从现象上看,流域出口断面流量过程与形成它的流域净雨过程相比较,不仅重心出现时间推迟了,而且峰值降低了。前者称为流量过程的推移,后者称为流量过程的坦化。如果能找出一些概念性元件来完全或不同程度地模拟这些作用,则将这些概念性元件进行合理的排列组合,就可达到模拟流域汇流的目的。这就是概念性流域汇流模型的基本思想。常见的概念性元件有线性“渠道”、非线性“渠道”、线性

“水库”、非线性“水库”和面积-时间曲线等。 N 个相等蓄量常数的线性水库串联即为 Nash 模型;面积-时间曲线与线性水库串联即为 Clark 模型;线性渠道与线性水库串联即为滞时演算模型; N 个大小不同的线性水库并联还可以用来模拟地下水的流域汇流。概念性流域汇流模型是千变万化的^[2]。

地貌瞬时单位线理论是一条完全不同于概念性模型的研究途径。基于水的“粒子性”可以把降落到流域上的雨滴看作为“粒子”。从“粒子”观点处理流域汇流问题,就是着眼于某一时刻出口断面的流量是由流域上哪些雨滴所组成的。据此,应用统计物理学与水文学相结合的方法就可以证明当雨滴间具有弱相互作用时有下列关系^[5]:

$$u(t) = f_B(t) \quad (5)$$

式(5)表明,流域瞬时单位线 $u(t)$ 与雨滴流达流域出口断面花费时间的概率密度函数 $f_B(t)$ 是等价的。 $f_B(t)$ 可根据流域地貌、水系形状和地形等资料推求出来。地貌瞬时单位线理论的实质显然是认为降落在流域上的雨滴经由地貌扩散作用和水动力扩散作用即成为流域出口断面流量过程线,这就较好地揭示了流域汇流的物理本质。地貌瞬时单位线理论首先由 Rodriguez-Iturbe 等人于 1979 年提出,经过不断地发展,现已可用于实际。

2 现行洪水预报方法的适用性

2.1 河段洪水预报

河段洪水预报依据的是洪水波在河段中的运动规律,即洪水波的传播、坦化、变形规律。洪水波在河段中的传播时间是河段洪水预报可能获得的理论预见期。常用的河段洪水预报方法有相应水位法和洪水演算法。按照描写洪水波的数学方程式不同,洪水演算法可分为水文学方法、水力学方法和系统学方法;按照演算对象不同,可分为流量演算法和水位演算法。

相应水位法由相应洪峰水位(流量)关系和传播时间曲线两部分组成,最常见的形式是以下游同时水位为参变量的相应洪峰水位关系和传播时间曲线,因为下游同时水位可不同程度地反映附加比降、区间暴雨和回水顶托等因素对河段洪水波运动的影响。也可以采用涨差法作相应水位(流量)预报,其实质相当于采用图解形式的运动波方程的差分解来作相应水位(流量)预报。相应水位(流量)法一般只能作洪峰水位(流量)预报。对于多支流河段,可先作洪水波传播特性分析,然后采用多元回归法建立相应水位(流量)预报方法。

洪水演算法中的水文学方法,以求解河段水量平衡方程和槽蓄方程为基础,一般只能作流量演算。

如要预报水位,则要通过水位-流量关系曲线转换。常见的方法有 Muskingum 法、特征河长法和滞时演算法等。洪水演算法中的水力学方法,以求解完全 St. Venant 方程组或简化 St. Venant 方程组为基础,可同时求得断面的流量和水位过程。求解完全 St. Venant 方程组目前只有数值解法;求解简化 St. Venant 方程组,在某些情况下可采用解析解。

水文学方法一般不能考虑回水顶托对洪水波运动的影响,但计算中所需的资料比较容易取得,计算也比较简单。水力学方法,虽然所需的资料中有些不易取得,计算也较繁复,但能考虑回水顶托、闸坝及其它人类活动对洪水波运动的影响。

洪水演算法中的系统学方法,视河段为一个系统,河段上断面入流为其输入,河段下断面出流为其输出,认为上断面洪水过程经过河段这一系统的作用,就变为下断面的出流过程。模拟这个系统的具体方法不同,就产生了不同的系统学洪水演算方法,如时间序列分析法、线性系统分析法、人工神经网络分析法等。系统学方法,由于不必涉及系统的具体物理意义,故又称为“黑箱子”方法。

2.2 库区洪水预报

库区洪水预报依据的是洪水波在水库中的运动规律。现代研究初步认为,对于湖泊型水库,水库洪水波一般表现为惯性波特点,其传播速度与动力波波速相近;对于河川型水库,水库洪水波一般表现为扩散波特点,其传播速度与运动波波速相近。洪水波在库区中的传播时间是库区洪水预报可能获得的理论预见期。对于湖泊型水库,一般可采用基于静库容的水库调洪演算方法进行库区洪水预报,即联立求解水库水量平衡方程和水库蓄泄方程,求解方法可用图解法,也可用数值法;对于河川型水库,则应考虑动库容影响,即联立求解 St. Venant 方程组;对于小型水库,可采用简化的水库调洪演算法进行库区洪水预报,例如高切林(Д. И. Кочерин)公式等。对于有闸门控制的综合利用水库,还应考虑水库运用和闸门操作对水库洪水波运动的影响。

2.3 流域降雨径流预报

流域降雨径流预报依据的是流域降雨径流形成规律,即流域上一场具有一定时空分布的降雨,经由流域蓄渗过程、坡地汇流过程和河网汇流过程转换为流域出口断面洪水过程的规律,或者说流域产流和流域汇流规律。流域汇流时间是流域降雨径流预报可能获得的理论预见期。

传统上常将流域降雨径流预报划分为流域产流预报和流域汇流预报两个阶段。常用的流域产流预报方法主要有降雨径流相关图法、流域蓄水曲线法、

下渗曲线法、初损后损法等。常用的流域汇流预报方法主要有等流时线法、单位线法、概念性流域汇流模型、地貌瞬时单位线理论等。

采用流域水文模型可以根据落在流域上的降雨直接预报出口断面的洪水过程。常用的流域水文模型主要有新安江模型、陕北模型、水箱模型、SCLS 模型、连续 API 模型等。

降雨径流相关图以经验相关图的形式考虑了诸因素对降雨径流定量关系的影响,只要合理选择影响因素,既可用于计算蓄满产流的产流量,也可用于计算超渗产流的产流量。流域蓄水曲线法适用于蓄满产流,下渗曲线法适用于超渗产流,它们均以降雨空间分布均匀为计算前提,当降雨空间分布不均匀时,应考虑分雨量站或划分子流域来计算产流量。初损后损法是一种简化的下渗曲线法,且以经验相关图的形式表示之,一般适用于超渗产流。

使用等流时线法预报流域汇流的关键是合理选取流域平均流速,以及考虑平均流速随雨量或流量的变化。单位线法使用的条件是流域上净雨呈均匀分布,以及流域汇流系统满足倍比性和叠加性,因此,要考虑暴雨中心位置和降雨强度等对单位线的影响。概念性流域汇流模型是形形色色的,应根据流域的具体汇流特点,选择适用的或自行研制的流域汇流模型。地貌瞬时单位线方法是目前解决无资料流域汇流计算中有较好理论依据的方法。

流域水文模型是随着计算机的广泛使用而发展起来的新一代洪水预报方法。简言之,流域水文模型就是结构加参数。就结构而言,现有的流域水文模型都是概念性模型,其模拟流域产汇流过程的方式只有两类:一是先模拟总径流,然后划分径流成分并进行汇流模拟;二是径流成分及其汇流的模拟同时进行,从地面至深层分层进行模拟。前者以新安江模型为代表,后者以水箱模型为代表。新安江模型适用于蓄满产流情况,而水箱模型既适用于湿润地区,也可使用于半干旱及干旱地区。就参数而言,现有流域水文模型包含的参数中,具有明确物理意义的比较少,需要通过降雨径流资料来率定的参数一般较多。率定流域水文模型参数的基本方法的本质是求解反问题,具体多采用优选法,如采用目估优选法或最优化方法。上述现行流域水文模型的结构及其参数的确定方法,就决定了它必然存在一些局限性,例如:模型结构对流域产汇流物理过程过于简化,不能反映输入分散性与输出集中性这一实际情况;率定出的参数往往不具有唯一性等。克服流域水文模型的局限性,研制精度较高的流域水文模型仍是十分必要的。分布式流域水文模型的兴起与发展正源于此。

2.4 “流域-河道(水库)”系统洪水预报

一个流域总可以按自然分水线或水库控制范围划分成若干个子流域,各子流域之间由河道连接,或由水库-河道连接。各子流域的洪水预报属于流域降雨径流预报;各子流域产生的洪水过程通过河道洪水演算或水库-河道洪水演算就可得到流域出口断面的洪水过程。这类洪水预报称为“流域-河道(水库)”系统洪水预报,其理论依据是流域降雨形成规律和河道及水库洪水波运动规律的结合。子流域流域汇流时间、水库洪水波传播时间和河道洪水波传播时间之和就是这类洪水预报可以获取的理论预见期。当河段上、下断面间有较大区间面积时,为考虑区间降雨径流的影响,也应当采用“流域-河道(水库)”系统洪水预报方法。显然“流域-河道(水库)”系统洪水预报方法是流域降雨径流预报、河道洪水演算和水库洪水演算的组合,如用水文学处理这种组合,则可采用“先演后加”法或“先加后演”法;如用水力学方法处理这种组合,则可采用内边界为集中式人流、分布式人流和闸坝控制的 St. Venant 方程组数值解。

3 现行实时洪水预报误差校正方法的适用性

实时洪水预报是一种在联机水情测报系统中,使用实时雨、水情及其它有关水文气象信息作为洪水预报模型输入,并不断根据新信息校正或改善原有模型参数,力争预报结果逐步逼近真值的洪水预报。

与脱机洪水预报比较,实时洪水预报所使用的信息的质量一般较差。例如:实时洪水预报使用的遥测或报讯资料,一般就不及脱机洪水预报采用的整编水文资料完整、可靠;实时洪水预报采用的流量资料往往由水位-流量关系求得,一般也不及脱机洪水预报中使用的实测流量资料精确;在蒸发计算中,脱机洪水预报可采用实测资料,而实时洪水预报因无实测资料可用只得用近似方法估算。此外,在脱机洪水预报中,预见期内的降雨是已知的,但在实时洪水预报中,预见期内的降雨量是未知的,因而两者在处理预见期内降雨时有所不同。

预报总是有误差的。对于实时洪水预报,由于上述种种原因,预报误差更不可忽视。预报误差可表现为系统误差,也可表现为随机误差,因此,在发布实时洪水预报之前,对预报值进行误差实时校正是十分必要的。通常使用的实时校正方法有卡尔曼滤波法、递推最小二乘法、误差自回归法和自适应算法等。卡尔曼滤波法因对系统的状态变量进行最优估计,既可以达到最小方差,又不损失预见期,是一种比较理想的实时校正方法。在实时洪水预报中可选择作为状态变量的有洪水预报模型的参数、预报对

象和预报误差等。卡尔曼滤波实质上是一种线性无偏最小方差估计,可用于任何线性随机系统,并可综合处理模型误差和量测误差。但洪水预报系统通常不是线性随机系统,模型误差和量测误差通常也不是白噪声,这就限制了卡尔曼滤波法在实时校正中的应用。此外,使用此法时外推时段也不宜太长。

递推最小二乘法是根据最新输入与输出信息,给现时预报误差一定的权重以校正模型参数来进行实时预报的,属于参数在线识别(也称动态识别),能反映预报时刻的参数状态。该法简单易行,但跟踪实时洪水预报系统的能力不强,灵敏性较差。不过这种动态识别方法是优于现行时不变模型的。

误差自回归法是通过将输出的残差系列进行自回归分析,用前推若干个时刻的残差值作为实时校正系统的输入来推求当前时刻的输出误差,达到实时校正的目的。该法不涉及实时洪水预报模型本身的结构或数学表达式,仅从误差序列着眼进行校正,故可与任何实时洪水预报模型配合、有广泛的适应性。其校正效果主要取决于误差序列的自相关性,自相关密切则校正效果好,否则效果较差,而且当预报值与预报误差为同一量级时,实时校正的效果可能会大大下降。

自适应算法是指滤波器本身具有自动调整功能,可根据预报过程中模型所出现的偏差自动调整模型达到最优状态的一种算法。该法能细致地考虑噪声统计量的时变特性,是较为完善的滤波方法之一,有较好的发展前景。

应当指出,实时校正方法仅是对实时洪水预报产生的误差进行修正的一种技术方法。提高实时洪水预报精度的关键仍然在于建立一个能确切描述降雨径流形成规律和洪水波运动规律的洪水预报模型和获取精确、可靠的实时水文气象信息。

参考文献:

- [1] Kirkby M J. Hillslope hydrology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1978. 389.
- [2] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. 170.
- [3] Ponce V M, Simons D B. Shallow wave propagation in open channel flow[J]. J of Hydraul Div, ASCE, 1977, 103(12): 1461 ~ 1478.
- [4] Cunge J A. On the subject of a flood propagation method (Muskingum Method)[J]. J of Hydraul Res, 1969, 7(2): 205 ~ 230.
- [5] Rodriguez-Iturbe I, et al. The geomorphologic structure of hydrological response[J]. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1409 ~ 1420.

(收稿日期: 2001-06-22 编辑: 马敬峰)