

河槽汇流曲线法在北方中小河流水文预报的应用研究

杨 邦, 刘玉晶, 安会静

(水利部海河水利委员会水文局, 天津 300170)

摘 要:作为一种“黑箱”河道演算方法,河槽汇流曲线具有原理简单,应用灵活的特点,应用研究结果表明:①若不考虑基流,进行陡涨陡落洪水演算时,利用马斯京根法所推求的河槽汇流曲线与马斯京根法的精度是相当的;②调整河槽汇流曲线上的值,能有效地模拟河道下渗,提高模拟精度;③曲线可模拟洪水滞后现象及流量分配过程;④河槽汇流曲线时段转换中,应用三次样条插值拟合S累积曲线可有效避免转换的河槽汇流曲线出现时段值“均化”现象,同时需对拟合中出现的凸形与凹形的“特殊”情况进行修正,以保证拟合S累积曲线的合理性。

关键词:河槽汇流曲线;马斯京根;河道汇流;三次样条插值;单位线

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)01-0046-05

1 引言

河道汇流在流域产汇流体系中属于最下游的阶段,在流域洪水预报中有着十分重要的作用。河道汇流演算是以圣维南方程为基础,利用上断面流量演算下游断面流量的过程^[1],可分为动力波、运动波、扩散波等计算形式^[1-2]。水文学的河道演算方法对圣维南方程进行了简化,利用近似得到的水量平衡方程和槽蓄方程进行求解,或应用经验关系进行计算,算法相对简便,因而应用较为广泛,典型的如马斯京根法^[1]、特征河长法^[1]、滞后演算法^[1]、河槽汇流曲线等;其中,河槽汇流曲线定义为某瞬时上游断面一个单位入流,经河槽调蓄作用,传到下游断面的出流过程线,因其类似于流域汇流单位线,也称河段单位线,具有方法原理简单,应用灵活方便的特点。

2 方法原理概述

洪水波在河道演进过程中,受河槽断面形状不规则、河底糙率分布不均、水流内部摩阻力等因素影响,流速的分布是不均匀的^[3],因而,同一时刻上游断面入流水体,往往不是同一时刻到达下游断面。换言之,某时刻下游断面流量是由不同时刻的上游断面入流水体

分量累加而成的。根据水量平衡原理,上游断面入流 Q 可表达为下式:

$$Q=q(t_1)+q(t_2)+\dots+q(t_n) \quad (1)$$

式中: $q(t)$ 为 t 时刻到达下游断面的流量,如果入流 $Q=1$,该公式即表示为上游断面瞬时单位入流,在河槽推移坦化的调蓄作用下,到下游断面的流量过程。河槽汇流曲线(河段单位线)与流域汇流单位线相似,上断面入流替代了降雨输入项,河槽充当了流域下垫面的角色,下游断面出流则相当于流域出口断面出流,显然也满足同倍比和线性叠加的原则。

河槽汇流曲线可以通过马斯京根法、瞬时单位线法等方法^[4]来计算求得,利用马斯京根法推求河槽汇流曲线是在得知河段稳定流传播时间 k 和流量比重因子 x 的情况下,计算出参数 C_0 、 C_1 、 C_2 ,利用上断面入流为1,通过马斯京根流量演算方程计算下游断面的出流过程,因而推求的河槽汇流曲线也叫马斯京根河槽汇流曲线。详细推算过程见表1。表1内仅为1个河段的演算,如果河道较长,可以进行分段演算,将上段的出流作为下段的入流。

应用河槽汇流曲线进行汇流演算,与单位线类似,即根据单位线同倍比和线性叠加的原则,将曲线上各值乘以上游入流,逐时段演算并线性叠加,可得

收稿日期:2015-12-15

作者简介:杨邦(1982-),男,浙江江山人,高级工程师,主要从事水文水资源方面工作。E-mail:boboyoung@263.net

下游断面出流过程。

具体应用中,该法具有较大灵活性,主要体现在以下几个方面:①模拟河道下渗。根据水量平衡原理得到的河槽汇流曲线上各值的总和应等于1,如果河道存在下渗,通过调整曲线数值,使曲线上各值总和小于1,可以有效地模拟河道下渗。②通过调整曲线上各数值可以调整推移坦化的过程。将曲线上数值整体后移几个时段,可以增加滞时,可以更好地模拟因河道下垫面变化或水工建筑物阻碍引起的洪水滞后现象。③模拟河道流量分配过程。通常河网汇流呈现“树型”结构,即分散的多个入流,逐级集中汇至流域出口断面,但偶尔也会出现“根状”结构,即存在流量分配的特殊河道,可按照分流比例简单处理分流量。④时段转换满足不同演算方案时段要求。河槽汇流曲线具有单位线的特性,也可以进行时段转换,以满足不同的计算时段要求。

表1 利用马斯京根法推求河槽汇流曲线

Table1 Using the Muskingum method to deduce the channel routing curve

时段	入流	$C_0Q_{上,2}$	$C_1Q_{上,1}$	$C_2Q_{下,1}$	出流
1	1	C_0	-	-	C_0
2	-	-	C_1	0	C_1
3	-	-	-	$C_1 \times C_2$	$C_1 \times C_2$
4	-	-	-	$C_1 \times C_2^2$	$C_1 \times C_2^2$
...	-	-	-
n	-	-	-	$C_1 \times (C_2)^{n-2}$	$C_1 \times (C_2)^{n-2}$

3 曲线时段转换

类似单位线,河槽汇流曲线时段转换也是通过S曲线来实现的^[1,5],S曲线是河槽汇流曲线纵坐标(流量)值沿时程的累积曲线,具体转换中,将S曲线内插成1h的曲线,即生成1h的S累积曲线,可满足任意整时段河槽汇流曲线转换。

S曲线内插时,线性分段拟合内插最简单,但是经由其内插后的S曲线转换的河槽汇流曲线会出现时段值“均化”现象(通常由大时段转为小时段),与实际情况出入较大。如图1所示,转换后曲线在内插时段内出现了明显的值“均化”现象,因而,S曲线必须实现非线性拟合,才能避免上述情况的出现。常用的曲线拟合方法有基于最小二乘法的多项式拟合,但其并不适应复杂的S曲线拟合。更好的方法是采用“分段”低次多项式拟合的思路^[6],才能较完美实现整条复杂曲线的拟合,但前提是必须确保各段拟合曲线在相互连接处是

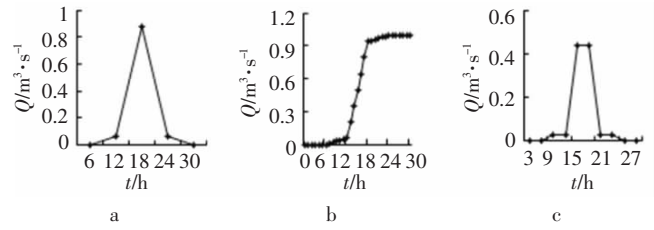


图1 线性插值转换河槽汇流曲线出现“均化”现象:a.原6h河槽汇流曲线;b.线性分段内插拟合S累积曲线;c.转换后3h河槽汇流曲线

Fig.1 The “mean value” phenomenon of the channel routing curve converted by linear interpolation

光滑连续的,采用三次样条插值^[7-8]可满足上述要求。

三次样条插值是由分段三次曲线组并接而成的光滑曲线,其在连接点上要求二阶导数连续^[7]。实际求解计算中需考虑边界条件才能完成。边界条件通常有自然边界(边界点的二阶导数为0),固定边界条件(给定边界点一阶导数),非扭结边界(边界点三阶导数等于相邻点三阶导数值)^[7,9]。三次样条插值计算机实现方法这里不再赘述,详细参考文献^[8]及文献^[10]。

使用三次样条插值有时也会出现不符合实际的“特殊”情况,即在S曲线低值端部分可能会出现凹形拟合曲线,样条内插后出现小于0的值;或者在高值端出现凸形拟合曲线(见图2a),样条内插后出现大于原S曲线最大值的值;并且使得S曲线上值并不完全满足单调递增或相等,从而使转换后的河槽汇流曲线出现负值(见图2b),这就需要进行修正,用线性内插的值代替样条内插后小于0的值和内插后大于原S曲线最大值的值(见图2c),如果S曲线出现后值小于前值,则令后值取值等于前值。修正后S曲线得到的转换河槽汇流曲线比较符合实际情况(见图2d)。

4 汇流演算应用分析

4.1 关于前期模拟

以滦河支流柳河石佛站为例,其上游入流断面为李营站。利用2011~2013年共计3场汛期长序列1h资料,经分析,区间汇流主要以河道汇流为主。率定李营站至石佛站间河道的马斯京根参数,得到河段稳定流传播时间 $k=1$,流量比重因子 $x=0.297$,河道分段数 $mp=10$,平均确定系数为0.861。根据表1流程,利用马斯京根法推求河槽汇流曲线,结果如下:(0,0,0,0,0,0.01,0.02,0.06,0.13,0.19,0.20,0.17,0.11,0.06,0.03,0.01,0.01,0),利用两种方法汇流演算结果精度对比详见表2。

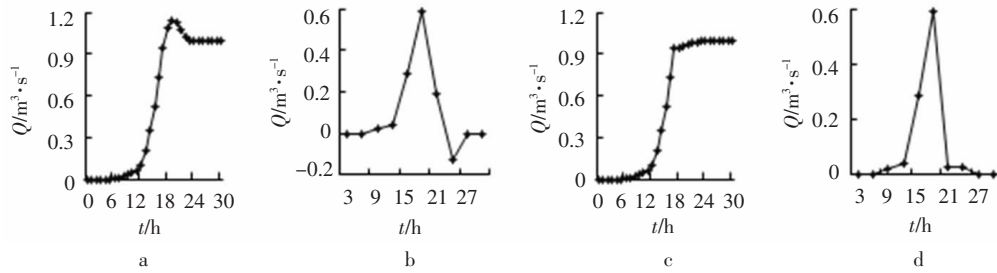


图2 三次样条差值后修正 S 曲线与不修正 S 曲线结果对比:

a. 不修正 S 累积曲线; b. 不修正 S 累积曲线得到的转换后河槽汇流曲线; c. 修正 S 累积曲线; d. 修正 S 累积曲线得到的转换后河槽汇流曲线

Fig.2 Comparison between the revised S accumulation curve and non-revised S accumulation curve after cubic spline interpolation

表2 石佛站汇流演算结果确定系数对比

Table2 Comparison of the Nash - Sutcliffe efficiency coefficients of the flow routing results at the Shifo station

时间	马斯京根	河槽汇流曲线
2011-7-1~2011-8-30	0.914	0.915
2012-7-1~2012-8-30	0.954	0.954
2013-6-1~2013-8-20	0.712	0.713
平均	0.860	0.861

就河道汇流而言,由马斯京根法推求的河槽汇流曲线与马斯京根法是一脉相承的,其区别在于河槽汇流曲线仅考虑后期来水的演算,本身没有考虑河道中的底水,而马斯京根法则不存在这个问题;因而,河槽汇流曲线更适用于前期河道较干燥,后期来水的情况(这种情况在北方河流常见,非汛期缺水甚至断流,汛期来水陡涨陡落)。在不考虑基流,进行陡涨陡落洪水演算情况下,河槽汇流曲线与马斯京根法的效果是相当的(见图 3a-3b,模拟时间为 2012 年 7 月 21 日 8 时~2012 年 8 月 10 日 8 时);一旦河道本身存较大基流,应用河槽汇流曲线进行河道演算必须考虑底水^[4],否则计算结果偏小,在计算过程的早期阶段,这种偏差尤为明显(见图 3c,模拟时间为 2013 年 7 月 10 日 8 时~2013 年 7 月 14 日 1 时)。一般在实际洪水预报中,建议在实时预报前采用“预热期”模拟,预热期的时间跨度至少要大于河槽汇流曲线本身的时间跨度(建议 2~3 倍曲线时间跨度以上),这样可以避免因底水造成的影响。

4.2 关于下渗模拟

河槽汇流曲线的灵活性在于其可以根据实际情况调整曲线上的值,使得曲线的水量不平衡(即曲线值总和小于 1,存在水量损失),从而模拟河道的下渗,而基

于水量平衡的河道演算方法不具备这种能力。以石佛站为例,汛期初期,河道较干,河道下渗较大,到了汛期中后期,经历多次降水及河流汇流后,河道下渗趋于稳定,甚至几乎没有下渗;因而,单纯应用马斯京根法等水量平衡法进行汇流演算,往往会出现前期洪峰模拟偏大,后期模拟相对较好的情况。根据这一特点,采用河槽汇流曲线进行河道演算时,尤其是在汛期初期时,可通过减小曲线值模拟河道下渗,提高演算精度(图 3d,模拟时间为 2012 年 7 月 21 日 8 时~2012 年 8 月 10 日 8 时)。图 3d 中可以看出,调整后曲线在前期洪水模拟中精度明显提高,但后期如果继续考虑下渗,模拟精度反而下降(后期河道饱和,更适合水量平衡演算),因而,河槽汇流曲线在使用中需考虑汇流演算的时机,不同的时期可以采用不同下渗程度的河

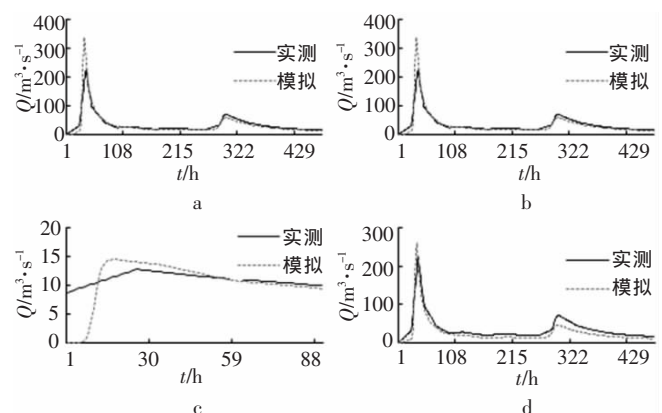


图3 石佛站模拟与实测结果对比

a. 马斯京根法; b. 河槽汇流曲线; c. 不考虑基流时河槽汇流曲线模拟结果; d. 考虑下渗的河槽汇流曲线模拟结果

Fig.3 Comparison between the simulated and observed results at the Shifo station

(a. Muskingum method; b. channel routing curve method; c. channel routing curve without considering base flow; d. channel routing curve method considering infiltration)

槽汇流曲线进行河道演算,这种多方案的选择方式,使其应用更加灵活。

以石佛站历年汛期首场洪水洪峰为例,由于前期河道干旱,若汛期首场洪峰模拟没有考虑下渗等损失量,预报经常偏大,通过计算石佛站历年汛期首场洪峰实测值与模拟值的比值平均为 0.624,进而调整河槽汇流曲线上的值(由于通常“预热期”较长,所以只需同倍比缩小曲线上所有值),可以更好地模拟久旱后汛期首场洪水洪峰。如表 3 所示,将河槽汇流曲线上的值均按 0.624 同倍比缩小,久旱后汛期首场洪水洪峰模拟精度有明显提高。

表3 石佛站汛期首场洪峰模拟精度对比

Table3 The simulation accuracy of the first flood peak values during flood season at the Shifo station

年份	实测洪峰 /m ³ ·s ⁻¹	曲线未调整		曲线调整	
		模拟洪峰 /m ³ ·s ⁻¹	相对误差 /%	模拟洪峰 /m ³ ·s ⁻¹	相对误差 /%
2000	22.6	39.7	75.7	24.8	9.7
2001	133.0	217.6	63.6	135.8	2.1
2004	9.4	16.0	70.2	10.0	6.4
2011	170.0	234.0	37.6	146.1	-14.1
2012	225.0	339.5	50.9	212.0	-5.8
2013	28.7	49.8	73.5	31.1	8.4

4.3 关于滞后模拟

河槽汇流曲线可以通过“平移”增加河道演算的推移作用,从而反映因下垫面变化或由于前期河道干旱引起的洪水滞后现象。

以石佛站为例,由于前期河道干旱,利用马斯京根法推求的河槽汇流曲线模拟,汛期首场洪峰的计算峰现时间常先于实测峰现时间出现(见表 4),若将河槽汇流曲线值“平移”滞后 2~3h,整体模拟精度将有所提高。

表4 石佛站汛期首场洪峰实测与模拟峰现时间

Table4 The first gauged and simulated flood peak appearance time during flood season at the Shifo station

年份	实测峰现时间	模拟峰现时间	时差
2011	7-26 8:00	7-26 6:00	-2
2012	7-22 21:00	7-22 18:00	-3
2013	7-3 8:00	7-2 22:00	-10

4.4 关于流量分配模拟

流量分配模拟常用于“根状”河段或是闸坝调节河段。具体为:将河槽汇流曲线时段数定义为 1,即只有

1 个曲线值,曲线值取值范围(0,1),可模拟各分叉河道的流量分配过程,原则是各分叉河道的分流比例值总和为 1,即各分叉河道的河槽汇流曲线上的值取值总和为 1。

以大清河支流南北拒马河为例,上游流量经张坊站分流至南拒马河落宝滩南站及北拒马河落宝滩北站,根据经验,南北拒马河遭遇大洪水时流量分配比例大致为 4:6,两河段的河槽汇流曲线分别定义为 1 个时段的曲线,即 0.4 和 0.6,即可模拟大洪水时南北拒马河的流量分配过程,图 4 为“96.8”洪水南拒马河落宝滩南站模拟与实测(含张坊)结果。

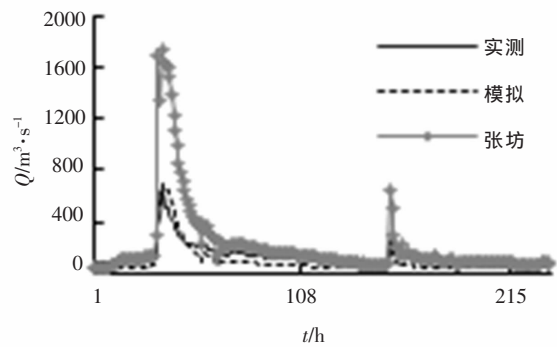


图 4 落宝滩南站“96.8”模拟与实测洪水(含张坊)

Fig.4 The simulated and observed results of flood “96.8” in the south Luobaotan station (including Zhangfang)

4.5 关于时段转换模拟

河槽汇流曲线的另一灵活性在于其可以通过时段转换,满足不同计算时段的要求,这一点非常适合缺乏高时间分辨率水文资料地区。

以石佛站为例,通过河段稳定流传播时间 $k=3$,流量比重因子 $x=0.297$,河道分段数 $mp=4$,求得 3h 的河槽汇流曲线(0, 0.06, 0.25, 0.41, 0.19, 0.06, 0.02, 0.01, 0),通过三次样条插值获得 1h S 曲线为 (0, 0, 0, 0.00888889, 0.03111111, 0.06, 0.112593, 0.200741, 0.31, 0.431111, 0.566667, 0.72, 0.835926, 0.885185, 0.91, 0.937407, 0.96037, 0.97, 0.975185, 0.984815, 0.99, 0.992222, 0.996667, 1); 转换后的 1h 河槽汇流曲线为 (0, 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.09, 0.11, 0.12, 0.14, 0.15, 0.12, 0.05, 0.02, 0.03, 0.02, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0)。基于转换后的河槽汇流曲线模拟 2011~2013 年汛期洪水过程确定系数分别为:2011 年 0.899,2012 年 0.937,2013 年 0.717,平均为 0.851,接近于马斯京根法推求的 1h 河槽汇流曲线模拟精度。可见,通过时段转换,河槽汇流曲线的应用是满足精度要求的。

5 结语

作为一种“黑箱”河道演算方法,河槽汇流曲线具有原理简单,应用灵活的特点,可以较好地模拟河道的推移坦化过程,通过曲线值的调整可以模拟河道的下渗,进行河道分流演算,通过时段转换,满足不同演算方案时段要求。应用研究结果表明:①通过马斯京根法推求的河槽汇流曲线在不考虑基流,进行陡涨陡落洪水演算情况下,与马斯京根法的效果是相当的,若河道本身存较大基流,应用河槽汇流曲线进行演算时必须考虑底水。②通过调整河槽汇流曲线上的值,可以有效地模拟汛期初期的河道下渗,提高模拟精度,相比马斯京根等水量平衡演算方法优势明显,但在使用过程中需把握好汇流演算的时机。③曲线可模拟洪水滞后现象及流量分配过程,使用较为灵活。④河槽汇流曲线时段转换中,应用三次样条插值拟合S累积曲线可以有效地避免转换的河槽汇流曲线出现时段值“均化”现象,同时,需要对拟合过程中出现的凸形与凹形的“特殊”情况进行修正,以保证拟合S累积曲线的合理性。

参考文献:

- [1] 包为民. 水文预报(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (BAO Weimin. Hydrological Forecasting (third edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 芮孝芳. 水文学原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (RUI Xiaofang. The Principle of Hydrology [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 长江水利委员会. 水文预报方法(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993. (Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources. Hydrology Forecast Method (second edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 孙卓,魏艳凤. 河槽汇流曲线预报方法应用分析[J]. 黑龙江水利科技, 2015,43(5):27-30. (SUN Zhuo, WEI Yanfeng. Analysis and application of the forecasting method of channel routing curve [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2015,43(5):27-30. (in Chinese))
- [5] 李伟,刘洋. 流域汇流单位线时段转换应用分析[J]. 黑龙江水利科技, 2012,40(1):66-68. (LI Wei, LIU Yang. Analysis and application of unit hydrograph time conversion for catchment routing [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012,40(1):66-68. (in Chinese))
- [6] 韩继伟,孔凡哲,宋小孟,等. 不同插值方法绘制断面图效果分析[J]. 水文, 2012,32(1):65-68. (HAN Jiwei, KONG Fanzhe, SONG Xiaomeng, et al. Effectiveness analysis of different interpolation methods for cross section drawing [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(1):65-68. (in Chinese))
- [7] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析(第4版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. (LI Qingyang, WANG Nengchao, YI Dayi. Numerical Analysis (fourth edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese))
- [8] 陈文略,王子羊. 三次样条插值在工程拟合中的应用[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2004,38(4):418-422. (CHEN Wenlue, WANG Ziyang. The application of cubic splines interpolation in the project fitting [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2004,38(4):418-422. (in Chinese))
- [9] 邢丽. 三次样条插值端点约束条件的构造与Matlab实现[J]. 上海第二工业大学学报, 2012,29(4):319-323. (XING Li. Structure and Matlab implementation of cubic spline interpolation endpoint constraints [J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2012,29(4):319-323. (in Chinese))
- [10] 许小勇,钟太勇. 三次样条插值函数的构造与Matlab实现[J]. 兵工自动化, 2006,25(11):76-78. (XU Xiaoyong, ZHONG Taiyong. Construction and realization of cubic spline interpolation function [J]. Ordnance Industry Automation, 2006,25(11):76-78. (in Chinese))

Application of Channel Routing Curve Method in Hydrological Forecasting for Medium- and Small-sized Rivers in Northern Part of China

YANG Bang, LIU Yujing, AN Huijing

(Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China)

Abstract: As a “black box” channel routing method, the channel routing curve has the feature of simple in principal and flexible using. The application results in this paper show that: ① If the base flow is ignored, the routing accuracy of the precipitously fluctuant flood using the channel routing curve deduced by the Muskingum method is the same with the Muskingum method itself. ② It can simulate the channel infiltration effectively and improve the precision of the simulation by adjusting the value of the channel routing curve. ③ The curve can simulate the flood lag phenomenon and the discharge distribution process. ④ It can effectively avoid the “mean value” phenomenon of the converted channel routing curve that applying cubic spline interpolation to fit the S accumulation curve in time conversion of the channel routing curve, also it is necessary to revise the “special” situation of convex and concave shape in curve fitting to guarantee the rationality of the S accumulation curve.

Key words: channel routing curve; Muskingum; channel routing; cubic spline interpolation; unit hydrograph