

文章编号: 2097-096X(2023)-01-0010-13

追赶法在含闸分洪河道水动力计算中的改进研究

张晓波, 闪丽洁, 张瑶兰

(浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 基于追赶法的 Preissmann 隐式格式是对圣维南方程组进行离散的常见方法, 然而在包含有分洪闸等具有分洪功能的河道水动力计算中, 难以用传统的追赶法直接进行求解。本文针对分洪河道中闸门的不同出流情况, 对传统追赶法进行改进。首先将分洪河道断面反向编码, 将流出河道改为流入河道, 形成适用于传统追赶法计算思路的一般树状河网结构; 然后, 针对分洪闸不同出流方式, 分别讨论与之对应的模型概化的方法, 通过采取河网分割、边界类型转换衔接等方法进行特殊处理, 实现与传统树状河网计算思路的统一; 最后, 以东苕溪流域为例进行实例分析, 结果表明文中所提处理方法合理, 模型模拟效果较好, 可有效解决含闸分洪河道的树状河网水利计算问题, 便于推广应用。

关键词: 洪水预报; 水动力学; 圣维南方程组; 树状河网; 分洪河道; 追赶法

中图分类号: O352

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220209

1 研究背景

河道洪水预报通常采用水文学方法和水力学方法^[1], 其中水文统计法计算简单, 但未考虑洪水在河道内的演进过程^[2-3]; 而水动力学法是严格基于物理机制的水流预测模型, 可以较好的模拟河道的水流情况^[4-7]。在水动力模型中, 描述河道水流运动基本方程组是圣维南方程组^[8]。由于是复杂的双曲型非线性偏微分方程组, 无法用解析法进行求解, 寻求精确、快速的求解方法至关重要^[9]。20 世纪末, 由于计算水力学的兴起, 圣维南方程组的数值求解方法得到了迅速发展^[10-13]。郑国栋等^[14]采用实例对常用且较成熟的 Abbott 六点中心差分格式、Preissmann 隐式差分格式和柯朗格式等数值计算结果进行比较。结果表明 Abbott 格式计算过程中, 震荡较大, 收敛较慢, 在相同的时间和空间步长下, 计算精度较差, 且对边界条件类型具有较高的要求; Preissmann 隐式差分格式具有相当好的相容性、稳定性与收敛性。基于追赶法的 Preissmann 隐式差分格式得到广泛应用且可进行快速准确的计算^[15-16]。

传统的追赶法适用于无分汊简单河道以及“多个流入河道, 一个流出河道”的树状河网^[17], 虽然计算速度快, 但是在处理一些特殊河道(如汊河、环状河道等存在两个以上的流出河道)时, 一些断面的追赶系数很难推导, 故存在局限性而难以通用, 因此需对追赶法的适用性进一步研究。有关河网和汊河的水利计算, 以往有不少学者提出处理方法。雷正雄等^[17]针对平原河网中较为常见的环状河道和分汊河道提出相应的 Preissmann 计算格式, 用追赶法对各河道进行演算, 由水量平衡原理对各节点进行计算。古宇翔^[18]建立了适用于叙渝段航道长距离多支流特点的一维非恒定流数学模型, 并采用追赶法求解, 阐明了支流汇合口处追赶系数的求解方法, 突破了多支流条件下非恒定流计算的障碍。朱德军等^[19]描述了一个既能模拟树状河网, 也能模拟环状河网, 而且能处理潮汐流动的数值模型, 采用 Preissmann 格式离散圣维南方程组, 并采用 Newton-Raphson 方法求解非线性离散方程组, 汊点处的回

收稿日期: 2022-05-13; 网络首发时间: 2023-01-06

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20230106.1350.003.html>

基金项目: 浙江省水利厅重点科技项目(RB1804)

作者简介: 张晓波(1979-), 教授级高级工程师, 主要从事水利水电规划设计研究。E-mail: xiaobohu@126.com

通讯作者: 闪丽洁(1991-), 博士, 高级工程师, 主要从事洪水预报调度研究。E-mail: shanlijie0701@163.com

水效应采用 JPWSPC 方法处理。

以往研究多关注分汊的天然河道，较少关注包含闸门调度的分洪河道，而在现实的山区河道中，为保护下游防洪保护对象和城镇的安全，往往会在河道沿程设置分洪闸、泵站等水工建筑物。因此，本文在简要描述传统追赶法的基础上，分析在具有含闸分洪河道的情况下传统追赶法求解的局限性，从而对追赶法进行改进，分别针对河道内分洪闸的不同分洪方式提出了相应的特殊处理方法。同时以东苕溪流域为例，进行实例分析计算，探讨本文所提改进方法的合理性。

2 传统追赶法求解含闸分洪河道水动力问题的缺陷

追赶法的基本思想为：首先根据上边界已知条件计算起始断面的追赶系数，随后依次求出下一个断面直至末断面的追赶系数；与下边界条件联立求得相应的流量和水位，并依次回代求出河道各断面的水位和流量^[20-22]。

对于一般的树状河网，以图 1 为例，是单一河道的有序集合，节点①、②、④、⑤为流量边界，故河道 1、2、4 和 5 为已知流量边界的河道；⑦为水位边界，故河道 6 为已知水位边界的河道；河道 3 为内河道。因此树状河网水动力计算方法为：每条单一河道均可列出一组对角占优的矩阵方程，已知河道首末边界便可采用追赶法求解；在相邻河道的节点处增列流量平衡和水位相容方程，树状河网水流计算即可转化为单一河道的追赶求解问题。

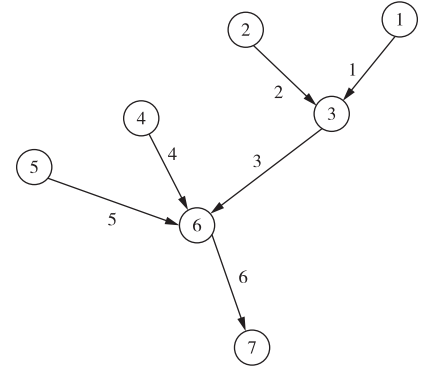


图 1 一般树状河网示意图

Fig.1 Schematic diagram of general tree-type river network

对于流量边界条件，各断面的未知量(Z 、 Q)均有以下追赶方程：

$$\begin{cases} Z_j = S_{j+1} - T_{j+1} Z_{j+1} \\ Q_{j+1} = P_{j+1} - V_{j+1} Z_{j+1} \end{cases} \quad (j = L_1, L_1 + 1, \dots, L_2 - 1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_{j+1} = \frac{G_j Y_3 - Y_4}{G_j Y_1 + Y_2} \\ T_{j+1} = \frac{G_j C_j - F_j}{G_j Y_1 + Y_2} \\ P_{j+1} = Y_3 - Y_1 S_{j+1} \\ V_{j+1} = G_j - Y_1 T_{j+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中： Z_j 、 Z_{j+1} 分别第 j 断面和第 $j+1$ 断面的水位； Q_{j+1} 为第 $j+1$ 断面的流量； P_{j+1} 、 V_{j+1} 、 S_{j+1} 、 T_{j+1} 均为第 $j+1$ 断面的追赶系数； L_1 为河网首断面； L_2 为河网末断面。 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 参数表达详见文献[10]和[18]，本文不再赘述。

其中，对于节点③和节点⑥，存在流量平衡和水位相容方程，即入汇点处入流量等于出流量，各断面水位相同。因此对于河道 3 首断面追赶系数，有以下关系：

$$\begin{cases} P_{\text{首断面}}^3 = P_{\text{末断面}}^1 + P_{\text{末断面}}^2 \\ V_{\text{首断面}}^3 = V_{\text{末断面}}^1 + V_{\text{末断面}}^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中：上标代表河道编号；下标为断面位置。

通过方程计算，若节点⑦的水位已知，即可回代求得节点⑥的水位；进而对河道 3、4、5 进行回代，获得节点③、④、⑤的水位；对河道 1、2 进行回代，获得节点①、②的水位。如此，整个树状河网的断面水位均可求得，这便是树状河网水流计算的“追赶法”原理。

需要指出，适用以上方法的“树状河网”的前提条件，即对于河道的任何节点，必须满足“一个流出河道”的原则。若存在两个或以上的流出河道，上述“追赶法”则无法求解。以图 2 为例，树状

河网中存在一个以分洪闸控制的分洪河道，节点④上游所有断面的追赶系数均可按上述方法获得，但断面 7 和 13 的追赶系数无法获得。这是因为对于节点④，断面 7 和 13 所处河道均为流出河道，且基于流量平衡原则， $Q_6 = Q_7 + Q_{13}$ 。然而由于无法判断 Q_7 与 Q_{13} 间的分配比例，下游断面的追赶系数无法计算。

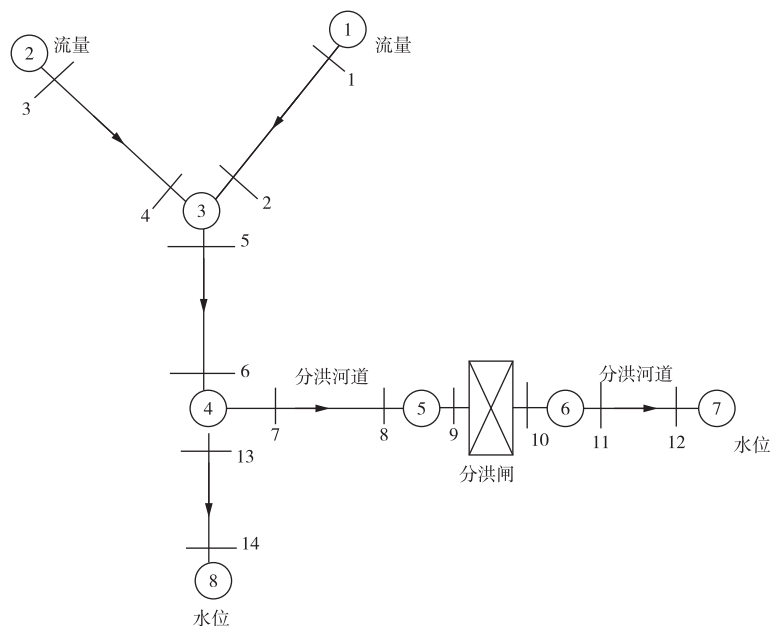


图 2 含有分洪河道的树状河网示意图

Fig.2 Schematic diagram of tree-type river network with flood diversion channel

另外，对于图 2 中包含分洪闸的河道，存在 $Q_9 = Q_{10}$ ，当分洪闸过流为淹没出流时，闸门过闸流量公式即为闸门前后断面的水位流量关系式，从而可推导出闸门前后断面的追赶系数，转化为一般河道求解。而当分洪闸关闸或者自由出流时，过闸流量与闸门前后断面水位没有直接关系或者仅与闸前（后）单一断面有关，因此无法建立闸前、后断面间的水位关系，故传统的追赶法无法适用。为解决上述两个重要的问题，本文提出了在含有分洪河道的树状河网水利计算中，追赶计算的特殊处理方法。

3 含闸分洪河道概化的处理方法

为适应传统的树状河网追赶法计算，本文将分洪河道进行特殊处理，如图 3 所示。基本思想如下：

(1) 将分洪河道断面反向编码，将流出河道改为流入河道，形成传统的树状河网结构；

(2) 针对分洪闸关闸、开闸自由出流、开闸淹没出流三种状态，分别采取不同的处理方法，详细推导分洪河道的追赶方程。

3.1 分洪闸关闸 解决思路：以分洪闸将整个分洪河道分割为分洪河道 1、分洪河道 2 及其他河道两个部分分别计算。对于分洪河道 1，具有已知条件下边界流量为 0，方程组可解；对于分洪河道 2 及其他河道组成的河网，具有已知条件下边界流量为 0，方程组可解。

关闸状态下，首先有 $Q_8 = Q_9 = Q_{10} = Q_{11} = 0$ 。对于分洪河道 1，首末断面的追赶方程为：

$$\begin{cases} Z_7 = P_7 - V_7 Q_7 \\ Q_7 = S_8 - T_8 Q_8 \\ Z_8 = P_8 - V_8 Q_8 \\ Q_8 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： Z_7 为上边界水位，作为已知条件； Q_8 为下边界流量，等于 0。因此分洪河道 1 的各断面未知量均可求得。

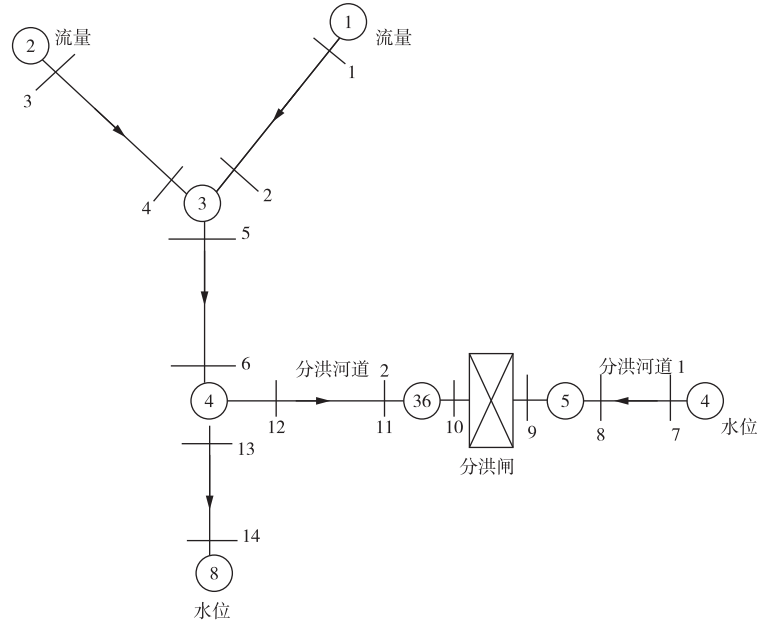


图 3 分洪河道反向编号的河网

Fig.3 Schematic diagram of tree-type river network with flood diversion channel reversely numbered

对于分洪河道 2，首断面 11 可作为流量边界处理，即 $Q_{11} = P_{11} - V_{11} Z_{11} = 0$ ，故 $P_{11} = 0$ ， $V_{11} = 0$ 。追赶系数确定后，下游断面的追赶系数即可按照一般河网统一求解。

3.2 分洪闸自由出流 解决思路：以分洪闸将整个分洪河道分割为分洪河道 1、分洪河道 2 及其它河道两个河网分别计算。

分洪闸过闸流量为自由出流时，过流公式为：

$$Q_i = Q_{i+1} = \epsilon m b \sqrt{2g} (Z_i - Z_d)^{3/2} \quad (5)$$

式中： ϵ 为侧收缩系数； m 为流量系数； b 为闸净宽； Z_i 为闸上水位； Z_d 为闸底板高程。为适应追赶系数的线性表达方式，对过闸流量公式线性化。假设分洪闸位于第 i 断面和第 $i+1$ 断面之间（距离短至可忽略），具体线性化方法见文献[16]。分离位置量 Z_i 如下形式：

$$Q_i = Q_{i+1} = \epsilon m b \sqrt{2g(Z_i^j - Z_d)} (Z_i - Z_d) = \epsilon m b Z_i \sqrt{2g(Z_i^j - Z_d)} - \epsilon m b Z_d \sqrt{2g(Z_i^j - Z_d)} \quad (6)$$

式中 Z_i^j 为第 i 个断面上时段的水位，为已知值。

根据实际工程调度，分洪闸自由出流包括两种情况：（1）在洪水前期和中期，主干河道向分滞洪区分洪，即 $Z_{10} > Z_9$ ，过闸流量与 Z_{10} 有关；（2）在洪水末期，分滞洪区退水至主干河道，即 $Z_9 > Z_{10}$ ，过闸流量与 Z_9 有关。该两种情况不仅闸门过流表达方式不同，对分洪河道的计算顺序和方法也有所不同，需分别阐述。

3.2.1 滞洪区退水 分滞洪区退水到主干河道，即 $Z_9 > Z_{10}$ 。

将过闸流量公式与分洪河道 1 的末断面 8 追赶方程联立，求得过闸流量和末断面水位；同时将此过闸流量作为分洪河道 2 的已知上边界条件，即可正常求解。

对于分洪河道 1 的下边界，联立方程如下。由于河道上边界水位已知，故河道下边界的追赶系数 P_8 、 V_8 亦为已知，因此联立过闸流量公式便可求得下边界的 Q_8 、 Z_8 。

$$\begin{cases} Q_8 = Q_9 \\ Z_8 = P_8 - V_8 Q_8 \\ Q_9 = \epsilon m b Z_9 \sqrt{2g(Z_9^j - Z_d)} - \epsilon m b Z_d \sqrt{2g(Z_9^j - Z_d)} \\ Z_8 = Z_9 \end{cases} \quad (7)$$

对于分洪河道 2 的上边界，联立以下方程，可求得上边界的追赶系数，即 $P_{11} = V_8$ ， $V_{11} = 0$ 。如此

河道下游断面均可按一般河道的追赶法求解。

$$\begin{cases} Q_{11} = P_{11} - V_{11} Z_{11} \\ Q_8 = Q_9 = Q_{10} = Q_{11} \end{cases} \quad (8)$$

3.2.2 主干河道分洪 主干河道向分滞洪区分洪，即 $Z_{10} > Z_9$ 。

虽然分洪河道 1 下边界的追赶系数 P_8 、 V_8 为已知，但是与滞洪区退水情况不同的是，此时过闸流量与 Z_9 无关，不存在过闸流量公式与之联立求解。因此需换另一种解决思路：将过闸流量公式作为分洪河道 2 的上边界条件，得到河道首断面的追赶系数 P_{11} 、 V_{11} ，便可按一般河道推求下游断面的追赶系数；经过回代后，分洪河道 2 首断面的 Q_{11} 、 Z_{11} 便可求得。继续利用过闸流量平衡原理，即可知分洪河道 1 的下边界流量，从而求得分洪河道 1 的各断面水位和流量。需注意的是，过闸流量与断面编号顺序相反，说明分洪的流向。

对于分洪河道 2 的首断面追赶方程可由以下方程求得 P_{11} 、 V_{11} 。之后便可按式(2)继续推求之后断面的追赶系数，并采用式(1)追赶方程回代求得 Q_{11} 、 Q_{10} 。

$$\begin{cases} Q_{10} = Q_{11} \\ Q_{11} = P_{11} - V_{11} Z_{11} \\ Q_{10} = \varepsilon mb Z_d \sqrt{2g(Z_{10}^j - Z_d)} - \varepsilon mb Z_{10} \sqrt{2g(Z_{10}^j - Z_d)} \\ Z_{10} = Z_{11} \end{cases} \quad (9)$$

对于分洪河道 1，则由下式取得边界条件，按水位边界条件进行回代计算。

$$\begin{cases} Z_8 = P_8 - V_8 Q_8 \\ Q_8 = Q_9 = Q_{10} = Q_{11} \end{cases} \quad (10)$$

3.3 分洪闸淹没出流 解决思路：无需分割成两个河网。利用过闸流量与闸前、后断面水位的关系，以及水位边界类型的转换，推导出闸前、后断面的追赶系数。

分洪闸过闸流量为淹没出流时，过流公式为：

$$Q_i = Q_{i+1} = \mu b (Z_{i+1} - Z_d) \sqrt{2g(Z_i - Z_{i+1})} \quad (11)$$

式中： μ 为综合流量系数，一般情况下 $\mu = 2.598$ m； b 为闸净宽； Z_i 为闸上水位， Z_d 为闸底板高程。同理，为适应追赶系数的线性表达方式，对过闸流量公式线性化，方法见文献[16]。

3.3.1 闸前断面追赶系数 对于分洪河道 1，由于是水位边界条件，末断面的追赶方程为：

$$Z_8 = P_8 - V_8 Q_8 \quad (12)$$

对于分洪闸所在河道的首断面追赶系数 P_9 、 V_9 ，根据水量平衡和水位相容原理可由下式求得。

$$\begin{cases} Q_8 = Q_9 = Q_{10} \\ Q_8 = PP_8 - VV_8 Z_8 \\ Z_8 = Z_9 \\ Q_9 = P_9 - V_9 Z_9 \end{cases} \quad (13)$$

3.3.2 闸后断面追赶系数 淹没出流也有两种情况：主干河道向分滞洪区分洪，即 $Z_{10} > Z_9$ ；分滞洪区退水到主干河道，即 $Z_9 > Z_{10}$ ，相应有不同的表达方式：

$$\begin{cases} Q_9 = P_9 - V_9 Z_9 \\ Q_9 = Q_{10} = \begin{cases} \frac{\mu b \sqrt{2g(Z_{10}^j - Z_d)}}{\sqrt{Z_9^j - Z_{10}^j}} Z_9 - \frac{\mu b \sqrt{2g(Z_{10}^j - Z_d)}}{\sqrt{Z_9^j - Z_{10}^j}} Z_{10} & (Z_9^j > Z_{10}^j) \\ \frac{\mu b \sqrt{2g(Z_9^j - Z_d)}}{\sqrt{Z_{10}^j - Z_9^j}} Z_9 - \frac{\mu b \sqrt{2g(Z_9^j - Z_d)}}{\sqrt{Z_{10}^j - Z_9^j}} Z_{10} & (Z_{10}^j > Z_9^j) \end{cases} \\ Q_{10} = P_{10} - V_{10} Z_{10} \\ Z_9 = S_{10} - T_{10} Z_{10} \end{cases} \quad (14)$$

式中 P_9 、 V_9 为首断面已知的追赶系数，未知追赶系数为 P_{10} 、 V_{10} 、 S_{10} 、 T_{10} ，可推导得出。

4 应用实例

4.1 流域概况和基础资料 苕溪水系属太湖流域，为浙江省八大水系之一。东苕溪是苕溪水系两源之一，主流长 151.4 km，平均比降 5.1‰^[23]，发源于天目山脉，经溪口、桥东村、临安，注入青山水库；余杭镇以下河道称为东苕溪，至何家陡门有中苕溪汇入，至瓶窑有北苕溪汇入，至德清城关镇接导流港。流域现状防洪格局为“上蓄、中滞、下泄”^[24-25]。“上蓄”即上游建有里畈、青山、水涛庄、四岭、对河口、老虎潭 6 座大中型水库，防洪总库容 2.4 亿 m³。“中滞”即中游布置蓄滞洪区，其中南湖、北湖滞洪区建有分洪闸，可控制洪水蓄泄，为正常滞洪区；七里、永建、潘板、张堰、澄清滞洪区需采取破堤方式分洪，为非常滞洪区。“下泄”即右岸建有西险大塘和导流东大堤，右岸自上而下建有 5 座分洪闸，控制导流入湖及东泄分洪。流域概况如图 4 所示。

苕溪流域降水丰富但时空分布不均匀，汛期雨量约占全年的 75%，是浙江省暴雨中心之一^[26]。流域地形复杂，干流中上游及支流均为山溪性河流，坡陡流急，水位暴涨暴落；中下游及尾间河道坡降平缓，洪水短时间难以排出，极易引发倒堤破圩，淹没大片农田和房屋，洪涝灾害频繁^[27-29]。历史上流域遭受较严重洪灾有 1954 年梅雨洪水、1984 年梅雨洪水、1996 年“6·30”洪水、2013 年“菲特”洪水、2019 年梅雨洪水等。考虑到流域下垫面一致性和洪水资料获取难易程度，本文选取率定样本为 2013 年 10 月 6 日—9 日、2019 年 7 月 12 日—15 日共 2 场洪水，检验样本为 2020 年 7 月 4 日—7 日洪水，包括 3 场洪水对应的流域内雨量站降雨资料、水库下泄流量资料、特征断面水位资料等。

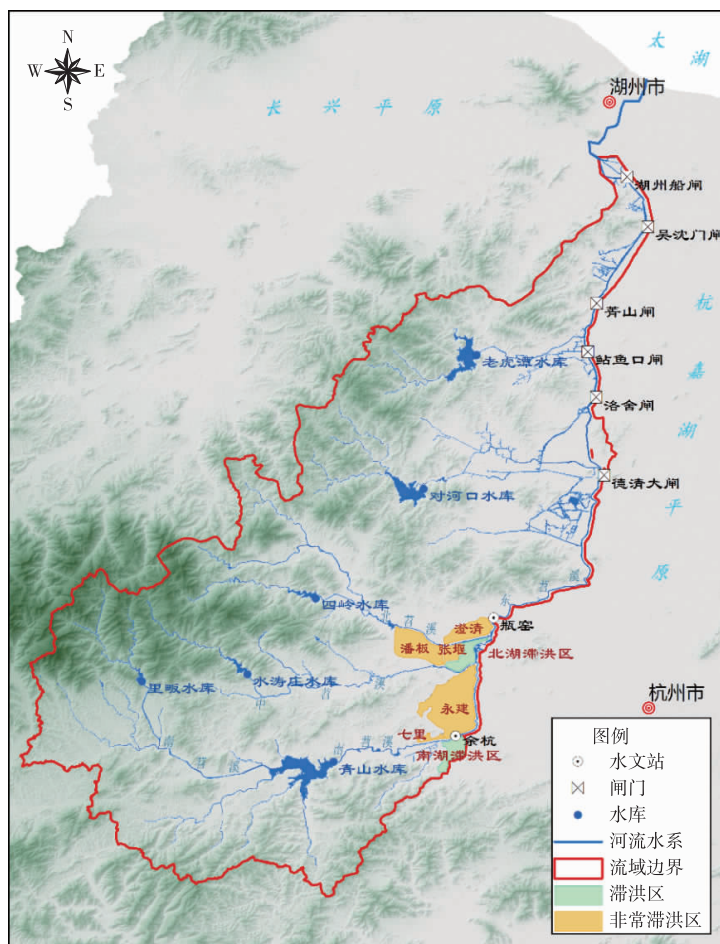


图 4 研究区域概况图

Fig.4 Location of the Dongtiaoxi Basin

4.2 模型概化 参考传统一维非恒定流模型的建模思路，首先对整个东苕溪流域河道现状水力条件进行分析，结合水文站和雨量站分布划分为子流域，建立产汇流模型模拟各子流域的降雨径流过程，作为水动力模型的输入边界，并在此基础上构建山区河网洪水计算模型。

4.2.1 水文分区产汇流模型构建 依据河流水系、分水岭及下垫面情况等要素，东苕溪流域可细化为 26 个山区分区和 20 个平原分区。采用泰森多边形法由流域内雨量站点的雨量加权计算得到各分区的面雨量，再分别对山区和平原分区采用不同的模型计算产汇流过程^[30]。

山区分区产流计算采用蓄满产流模型，根据分区集水面积大小选用不同的计算方法。集水面积大于 50 km² 的分区产流计算采用瞬时单位线法^[31-32]，小于 50 km² 的分区产流计算采用“浙江省推理公式法”^[33-34]。推算平原分区的产水过程需按照按不同地进行：水面产水量按照水量平衡方程由降雨扣除水面蒸发推求；水田产水量由降雨扣除水稻蒸腾及水田下渗并考虑水田最大持水深度推求；旱地产水量需根据前期土壤含水量由降雨扣除一定的损失及下渗，并考虑旱地最大持水深度推求；其它地类的产水量则采用径流系数法由降雨推求。

4.2.2 基于改进追赶法的一维非恒定流模型构建 根据流域内水系和水利工程空间分布情况，对东苕溪流域进行模型概化，主要情况如表 1 所示。模型共概化 90 个节点、89 个河道以及 339 个断面。已知流量边界条件 5 个，分别为青山、水涛庄、四岭、对河口、老虎潭水库下泄流量；已知水位边界条件 7 个，包括流域下游杭长桥水位边界和 6 个闸下水位边界。流域内的导流五闸、湖州船闸、南湖滞洪区、北湖滞洪区以及 5 个非常滞洪区均有分洪作用，属于分洪河道，传统的树状河网水流“追赶法”无法解决此类情况。因此本文将分洪河道进行特殊处理，概化方式采用前文第 2 节所描述的反向编号形式，如图 5 所示。

模型采用的河道断面数据由 2018 年实测断面资料整理得到，模型率定时选取河道综合糙率 0.025~0.038，基本符合山区性河道糙率系数取值规律。模型计算步长取 120 s。

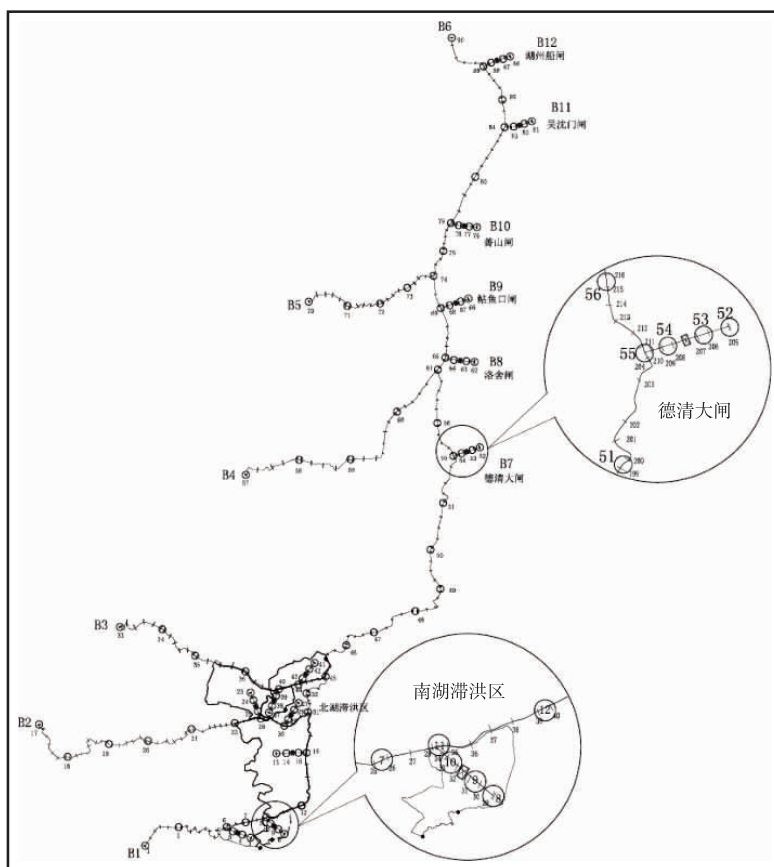


图 5 模型概化图

Fig.5 Model generalization diagram of the Dongtiaoxi Basin

表 1 模型概化信息表
Table 1 Model generalization information table

类型	数量	说明
水位边界	7	杭长桥水位、导流五闸和湖州船闸的闸下水位
流量边界	5	青山、水涛庄、四岭、对河口、老虎潭水库下泄流量
集中入流	20	山区分区产汇流过程
闸门设置	13	导流五闸、湖州船闸、南湖滞洪区、北湖滞洪区以及 5 个非常滞洪区

为了更准确分析模型精度，模型中分洪闸调度原则与实际洪水过程中所采用的调度手段一致。具体见表 2 所示。

表 2 模型所采用分洪闸调度原则
Table 2 Dispatching principle of flood diversion sluice in the model

洪水场次	蓄滞洪区	导流五闸
201310	瓶窑水位上涨至 6.47 m，开启庄村分洪闸和北湖分洪闸双路向北湖滞洪区分洪。其余滞洪区和非常滞洪区未开启。	德清大闸上水位上涨至 4.63 m，德清大闸开闸泄洪。其余分洪闸保持关闭。
201907	瓶窑水位上涨至 6.75 m，开启北湖分洪闸向北湖滞洪区分洪。其余滞洪区和非常滞洪区未开启。	德清大闸上水位上涨至 4.36 m，德清大闸开闸泄洪。其余分洪闸保持关闭。
202007	瓶窑水位上涨至 6.70 m，开启北湖分洪闸向北湖滞洪区分洪。其余滞洪区和非常滞洪区未开启。	德清大闸上水位上涨至 4.36 m，德清大闸开闸泄洪。其余分洪闸保持关闭。

4.3 结果分析 选取余杭站、瓶窑站和德清大闸为特征断面，对比三个场次洪水的实测与模拟过程，如图 6 和表 3 所示。可以看出，在率定期，3 个特征断面水位的模拟值与实测值演变趋势相同，且对水位峰值出现时间和峰值大小模拟效果较好，确定性系数均大于 0.81，其中 2013 年模拟效果最好；但对退水段模拟有待改进，尤其是 2019 年，退水段水位偏高。检验期除余杭断面水位预报确定性系数均小于 0.80 之外，瓶窑和德清大闸断面确定性系数大于 0.80，满足《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)中规定的乙级预报精度标准，可用于作业预报。

表 3 模型洪水位计算结果
Table 3 Flood level simulation results calculated by the method

断面名称	洪水场次	实测洪峰水位/m	模拟洪峰水位/m	峰值误差/m	峰现误差	确定性系数
余杭	201310	7.96	7.98	0.02	晚 1 h	0.81
	201907	7.87	8.05	0.18	晚 1 h	0.83
	202007	8.15	8.32	0.17	0	0.79
瓶窑	201310	7.21	7.35	0.14	0	0.84
	201907	6.85	6.80	-0.05	早 1 h	0.83
	202007	6.88	6.99	0.11	0	0.80
德清大闸	201310	4.63	4.66	0.03	早 3 h	0.85
	201907	4.44	4.54	0.10	晚 3 h	0.82
	202007	4.52	4.71	0.16	早 3 h	0.82

本文选取的 3 场历史洪水中，根据瓶窑洪水位上涨情况，均对北湖分洪闸进行开闸分洪，北湖滞洪区发挥了较大的滞洪作用。表 4 统计了 3 场历史洪水北湖滞洪区分洪情况。可以看出，将实际开闸时的瓶窑水位作为模型中北湖滞洪区的开闸条件，模型所判断的开闸时间与实际开闸时间接近，间隔均在 0.5 h 之内；模拟分洪水量比实际偏大，但相对误差均控制在 10% 以下。

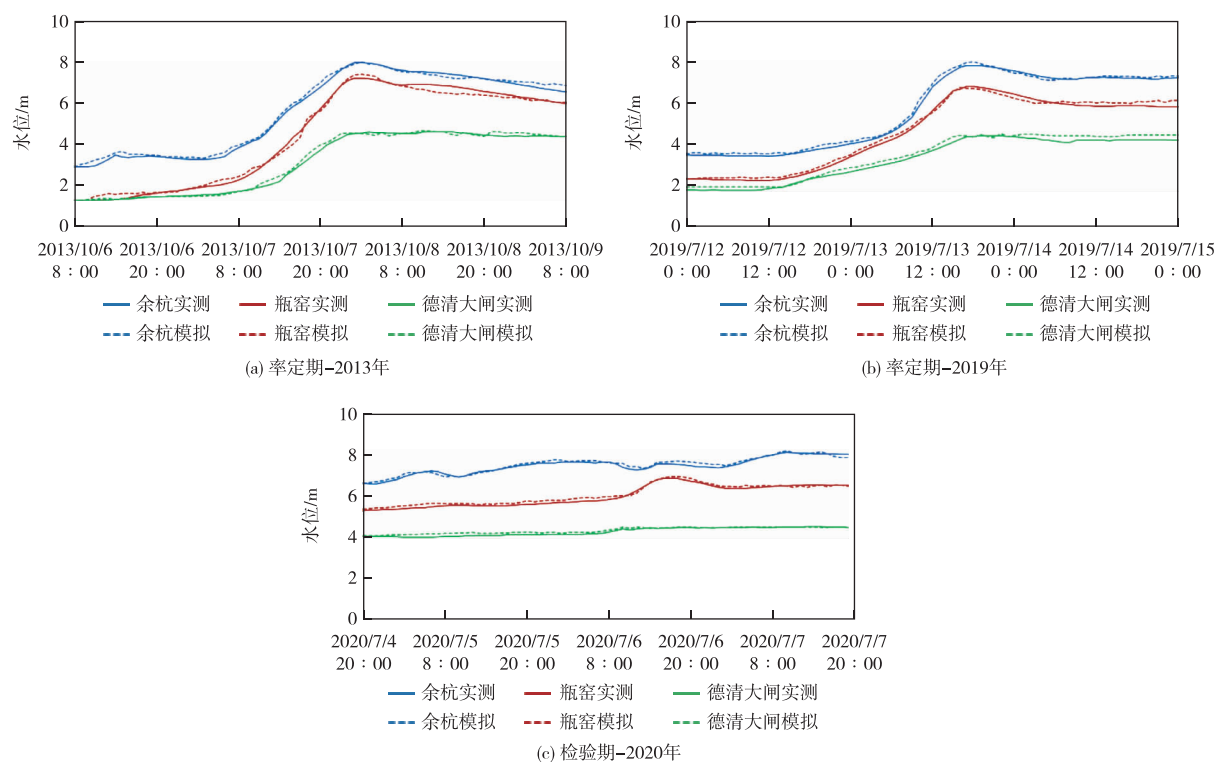


图 6 东苕溪流域特征断面洪水位实测与模拟对比图

Fig.6 Flood level predictions of characteristic sections in the Dongtiaoxi Basin

表 4 北湖滞洪区分洪情况对比

Table 4 Comparison of flood siverstion situation of Beihu flood detention area

洪水场次	开闸水位 (控制站为瓶窑站)	开闸时间			分洪水量		
		实际	模拟	误差	实际/万m ³	模拟/万m ³	相对误差
201310	6.47 m	7 日 22 : 00	7 日 22 : 10	晚 10 min	1200	1302	8.5%
201907	6.75 m	13 日 16 : 30	13 日 16 : 00	早 30 min	1400	1485	6.1%
202007	6.70 m	6 日 14 : 20	6 日 14 : 00	早 20 min	1100	1204	9.5%

另外，为了便于对比，本文同时搭建了丹麦 DHI 公司的 MIKE11 模型，所采用的基础数据保持一致。在计算效率方面，若采用计算时间步长为 120 s，采用 MIKE11 模型模拟东苕溪流域 72 h 洪水过程耗时 12 min；而基于改进追赶法计算时长仅需 45 s，计算效率大大提高。在稳定性方面，由于东苕溪上游为山区河道，坡度较大，加之洪水初期河道中为基流，使用 MIKE11 模型计算时出现露底情况，导致计算崩溃，采用人工挖深槽的方式加以解决，但是计算洪水过程震荡较大，收敛较慢；而改进追赶法过程线拟合较好，不存在明显的震荡过程。在精度方面，由于 MIKE11 模型计算过程中震荡较大，收敛较慢，故计算精度相对较差。综合来讲，本文所提出的“追赶”计算特殊处理方法计算效率相比 MIKE11 模型大大提高，同时模型稳定性强。

5 结论与展望

针对传统的追赶法无法解决含有分洪闸、分洪河道的树状河网水利计算问题，本文根据分洪闸不同出流情况，对传统追赶法进行改进。以东苕溪流域为实例，分析计算方法的合理性和准确性。得到以下结论：

(1)将分洪河道断面反向编码,将流出河道改为流入河道,此时分洪河道上边界条件为已知水位,即可形成一般的“多个流入河道、一个流出河道”的树状河网结构,可采用传统的追赶法思路求解。

(2)针对分洪闸关闸、开闸自由出流和开闸淹没出流三种情况,分别讨论与之对应的模型概化方法,通过对分洪河道采取反向编号、河网分割、边界类型转换衔接等方法进行特殊处理,实现采用追赶法的思路求解。

(3)在东苕河流域上进行实例计算,分别将模拟结果与实测洪水和 MIKE11 模型计算成果做对比分析得知,本文所提出的“追赶”计算特殊处理方法合理,拥有计算效率高、模型稳定性强等优势,适应山区河道坡度大的特性,可有效解决含有分洪河道的树状河网水利计算问题。

另外,在山区型河流中,水流的流态往往很复杂,受分洪闸启闭的影响,常伴随着临界流、急流等流态,甚至会出现水流间断的现象^[35],此类现象在计算方法改进时需全面考虑。因此,考虑到确保山区河道追赶法计算的稳定性,日后需要对计算方法做进一步改进优化,以适应分洪河道计算的需要。

参 考 文 献:

- [1] 张晶,冯宝飞,罗世冰.长江2017年第1号洪水莲花塘站洪水预报分析[J].长江科学院院报,2018,35(11):41-45. (ZHANG Jing, FENG Baofei, LUO Shibing. Flood forecast and analysis of No.1 flood of Changjiang River in 2017 at Lianhuatang Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(11): 41-45. (in Chinese))
- [2] 方新.长江感潮河段水位过程预报模型研究[D].南京:南京师范大学,2014. (FANG Xin. Study on the Forecast Model of Water Level Process of the Yangtze River's Tidal Reach[D]. Nan Jing: Nanjing Normal University, 2014. (in Chinese))
- [3] 周焕,闪丽洁,揭梦璇,等.基于混合回归模型的沿海平原河网洪水位预报研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2022,20(2):145-152. (ZHOU Huan, SHAN Lijie, JIE Mengxuan, et al. Research on flood level forecasting in coastal plain river network based on mixture regressive model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(2): 145-152. (in Chinese))
- [4] 吴天蛟,杨汉波,李哲,等.基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J].水力发电学报,2014,33(2):51-57. (WU Tianjiao, YANG Hanbo, LI Zhe, et al. Modeling of flood routing for Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))
- [5] 刘昌军,文磊,周剑,等.小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(4):262-270,278. (LIU Changjun, WEN Lei, ZHOU Jian, et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 262-270, 278. (in Chinese))
- [6] 王静,李娜,王杉.考虑圩区分布的平原河网区暴雨洪涝分析模型建立[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(1):70-79. (WANG Jing, LI Na, WANG Shan. Establishment of numerical model for simulation of storm flooding in flat river network area considering polders distribution: A case study of Jiaying City, China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(1): 70-79. (in Chinese))
- [7] 苑希民,田福昌,王丽娜.漫溃堤洪水联算全二维水动力模型及应用[J].水科学进展,2015,26(1):83-90. (YUAN Ximin, TIAN Fuchang, WANG Lina. Comprehensive two-dimensional associate hydrodynamic models for overflow and levee-breach flood and its application[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 83-90. (in Chinese))
- [8] 郑邦民,槐文信,齐鄂荣.洪水水力学[M].武汉:湖北科学技术出版社,2000. (ZHENG Bangmin, HUAI Wenxin, QI Erong. Flood Hydraulics[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 伍超,吴至维,刘绍中.圣维南方程组扩散差分格式的稳定性条件及数值验证[J].水利学报,1986(1):1-8. (WU Chao, WU Zhiwei, LIU Shaozhong. The stability criterion of the difference scheme of Saint-Venant

- equations and its numerical testing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(1): 1-8. (in Chinese))
- [10] PREISSMANN A. Propagation of translator waves in channels and rivers[C]//First Congress of French Assoc. for Computation, Grenoble, France, 1961: 433-442.
- [11] ABBOTT M B, LONESCU F. On the numerical computation of nearly horizontal flows[J]. J. Hydraulic Res., 1967, 5(5): 97-117.
- [12] HOLLY F M Jr, Preissmann A. Accurate calculation of transport in two dimensions[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1977, 103(HY11): 1259-1277.
- [13] 谢作涛, 张小峰, 谈广鸣. Holly-Preissmann 格式的改进[J]. 水利水运工程学报, 2002(1): 12-18. (XIE Zuotao, ZHANG Xiaofeng, TAN Guangming. Improvement of Holly-Preissmann scheme[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(1): 12-18. (in Chinese))
- [14] 郑国栋, 顾立忠, 李虎成. 浅析明渠非恒定流计算 Abbott 六点中心格式[J]. 广东水利水电, 2010(4): 15-18. (ZHENG Guodong, GU Lizhong, LI Hucheng. Analysis of the Abbott six-point center format for calculating non-constant flow in open channels[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(4): 15-18. (in Chinese))
- [15] 张二俊, 张东生, 李挺. 河网非恒定流的三级联合算法[J]. 华东水利学院学报, 1982(1): 1-13. (ZHANG Erjun, ZHANG Dongsheng, LI Ting. "Three Steps Method" to computer unsteady flow for river networks[J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1982(1): 1-13. (in Chinese))
- [16] 张晓波, 郑雄伟. 平原河网的开敞式水闸过流计算方法[J]. 中国农村水利水电, 2013(9): 104-107. (ZHANG Xiaobo, ZHENG Xiongwei. The discharge calculation methods of open sluices in plain river networks[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(9): 104-107. (in Chinese))
- [17] 雷正雄, 蒋艳. Preissmann 隐式格式在分汊和环状河道的应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 485-490. (LEI Zhengxiong, JIANG Yan. Application of the Preissmann implicit scheme to flow computation for reticular and branched river channels[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 485-490. (in Chinese))
- [18] 古宇翔. 长江上游宜宾-重庆河段日调节非恒定流条件下航道水深资源利用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021. (GU Yuxiang. Study on the utilization of channel water depth resources in the Yibin-Chongqing riverway of the upper reach of the Changjiang River under the condition of daily adjustment unsteady flow[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese))
- [19] 朱德军, 陈永灿, 王智勇, 等. 复杂河网水动力数值模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 203-207. (ZHU Dejun, CHEN Yongcan, WANG Zhiyong, et al. Hydrodynamic model for complex flow in open-channel networks[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 203-207. (in Chinese))
- [20] 王船海, 李光炽, 向小华, 等. 实用河网水流计算[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997. (WANG Chuanhai, LI Guangchi, XIANG Xiaohua, et al. Practical river network flow calculation[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997. (in Chinese))
- [21] 赖良魁. 河网水力数值模拟的追赶法模型的应用[J]. 东北水利水电, 2001, 19(10): 35-37. (LAI Liangkui. Application of chasing method model of river network hydraulic numerical simulation[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2001, 19(10): 35-37. (in Chinese))
- [22] 杨开林. 河渠恒定非均匀流准二维模型[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 1-8. (YANG Kailin. A quasi-2D model of steady non-uniform flows in open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 1-8. (in Chinese))
- [23] 裘骅勇, 胡尧文, 汪恒强. 加快东苕溪防洪工程建设, 完善浙西防洪体系构筑[C]//太湖高级论坛交流文集. 中国水利学会, 2004: 113-118. (QIU Huayong, HU Yaowen, WANG Hengqiang. Accelerate the construction of flood control project in Dongtiaoxi Basin and improve the construction of flood control system in western Zhejiang[C]//Exchange Collection of Taihu High-level Forum. Chinese Hydraulic Engineering Society, 2004: 113-118. (in Chinese))
- [24] 陈革强, 胡昌伟, 程晓陶, 等. 提高东苕溪防洪能力及河道治理分析研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(2): 53-56. (CHEN Geqiang, HU Changwei, CHENG Xiaotao, et al. Analytic study on enhancement of flood control capacity and channel improvement for Dongtiaoxi River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(2): 53-56. (in Chinese))

- [25] 陈竿舟, 黄宇峰, 朱晓莹. 东苕溪中上游防洪治理新思路探讨[J]. 浙江水利水电学院学报, 2019, 31(3): 42-46. (CHEN Ganzhou, HUANG Yufeng, ZHU Xiaoying. On flood control in upper and middle reach of Dongtiaoxi[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2019, 31(3): 42-46. (in Chinese))
- [26] 胡海英, 黄国如. 东苕溪流域暴雨洪水变化趋势分析[J]. 水力发电, 2012, 38(8): 14-16. (HU Haiying, HUANG Guoru. Variation trends of rainfall and flood in Dongtiaoxi basin[J]. Water Power, 2012, 38(8): 14-16. (in Chinese))
- [27] 陈杰. 东苕溪流域“08·11”洪水成因分析及减灾防御对策的思考[J]. 中国水利, 2010(3): 50-52. (CHEN Jie. Analysis on the reason of the flood in August 11 in Dongshaoxi basin and thoughts about disaster prevention measures[J]. China Water Resources, 2010(3): 50-52. (in Chinese))
- [28] 姬战生, 章国稳, 张振林. 基于卷积神经网络的东苕溪瓶窑水文站水位预报[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 46-49. (JI Zhansheng, ZHANG Guowen, ZHANG Zhenlin. Water level forecast of Pingyao hydrological station Dongtiaoxi based on convolutional neural network[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(8): 46-49. (in Chinese))
- [29] 姬战生, 章国稳, 黄薇. 基于 LS-SVM 的东苕溪洪水过程预报方法[J]. 浙江水利科技, 2021, 49(2): 5-8. (JI Zhansheng, ZHANG Guowen, HUANG Wei. Flood process forecasting method of East Tiaoxi Based on LS-SVM[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2021, 49(2): 5-8. (in Chinese))
- [30] 徐涛, 李哲, 周曼, 等. 新一代三峡水利枢纽短期洪水预报系统的构建与检验[J]. 水力发电学报, 2015, 34(3): 21-28. (XU Tao, LI Zhe, ZHOU Man, et al. Development and validation of next generation short-term flood prediction system for Three Gorges project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(3): 21-28. (in Chinese))
- [31] 闫宝伟, 郭生练, 周建中. Nash 瞬时单位线推演河道汇流的完整公式[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 428-434. (YAN Baowei, GUO Shenglian, ZHOU Jianzhong. Complete formula of river flow routing based on Nash instantaneous unit hydrograph[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 428-434. (in Chinese))
- [32] 申红彬, 徐宗学, 李其军, 等. 基于 Nash 瞬时单位线法的渗透坡面汇流模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 708-713. (SHEN Hongbin, XU Zongxue, LI Qijun, et al. Simulation of rainfall runoff on permeable slope based on Nash instantaneous unit hydrograph[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 708-713. (in Chinese))
- [33] 姜燕, 楼章华, 曹飞凤, 等. 浙江省无资料小流域设计洪水推求方法探讨[J]. 科技通报, 2016, 32(7): 56-61. (JIANG Yan, LOU Zhanghua, CAO Feifeng, et al. Study on the method for design flood calculating in Zhejiang ungauged basins[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(7): 56-61. (in Chinese))
- [34] 施征, 陈焕宝. 分布式水文模型在山洪雨量预警指标确定中的应用[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 79-81. (SHI Zheng, CHEN Huanbao. Application of distributed hydrological model in determination of mountain torrent warning index[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 79-81. (in Chinese))
- [35] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 应用 Godunov 格式模拟复杂河网明渠水流运动[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1088-1096. (ZHANG Dawei, QUAN Mian, MA Jianming, et al. Flows simulation in complex open channel networks using Godunov method[J]. Journal of Basic Science and engineering, 2015, 23(6): 1088-1096. (in Chinese))

Study on improvement of chasing method in hydrodynamic calculation of flood diversion channel with sluice gates

ZHANG Xiaobo, SHAN Lijie, ZHANG Yaolan

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power co., LTD, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The Preissmann Implicit Scheme based on the Chasing Method is one of the methods used commonly to discretize Saint-Venant Equation. However, it is difficult to use the traditional Chasing method to directly solve the

hydrodynamic calculation of flood diversion channel with sluice gates. In this paper, the traditional Chasing method was improved according to different outflow situations of gates in flood diversion channels. Firstly, the sections of flood diversion channel were reversely coded to form a general treelike river network structure suitable for the traditional Chasing method. Secondly, according to the different outflow modes of flood diversion gates, the corresponding model generalization methods were discussed. The unification with the traditional tree river network calculation idea was realized by adopting the methods of river network segmentation and boundary type conversion and convergence. With Dongtiaoxi watershed as an example, the results showed that the treatment method proposed in this paper is reasonable, and it is convenient for popularization and application.

Keywords: flood prediction; hydrodynamics; Saint-Venant Equation; tree-type river network; flood diversion channels; chasing method

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 9 页)

Analysis of rainstorm pattern characteristics in typical cities in the Yangtze River Basin

XU Junjie, YANG Zhiyong, GAO Xichao, GAO Kai

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The Yangtze River basin is one of the regions with frequent floods in China. The study of rainstorm pattern characteristics in the Yangtze River basin can provide a scientific basis for urban flood control and drainage in the basin. Based on hourly precipitation dataset from 11 urban stations covering the period of 1970—2020 cross the Yangtze River basin, we screened the rainstorm and identified the rainstorm pattern with the cumulative rainfall ephemeral curve and the fuzzy identification method. The rainstorm characteristics were analyzed by Mann-Kendall method and other methods after grouping different duration rainstorms. The results show that: (1) The frequency of single-peaked rainstorm accounts for 85%, while the average pattern and double-peaked pattern appear less frequently. The pre-concentration pattern occurred most frequently (50%), followed by the mid-concentration pattern and the late concentration pattern. (2) The rain peaks of short-duration (1–6 hours) rainstorm account for 70% of the total rainfall, while the rain peaks of long-duration (13–24 hours) and very long-duration (more than 24 hours) account for only 28% and 17%, respectively. The maximum hourly rain intensity dominates the characteristics of short-duration rainstorm, and for long-duration rainstorm, the persistence of rainfall is the main factor of the total rainfall. (3) From the upper basin to lower basin, the rainfall peak coefficient of the rainstorm gradually increases, and the rainfall peak appears later and later, which is especially significant for long-duration rainstorm and very long-duration storms.

Keywords: Yangtze River Basin; rainstorm; rain pattern; proportion of rain peak; rain peak coefficient

(责任编辑: 祁 伟)