

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.001

基于网格的精细化降雨径流水文模型 及其在洪水预报中的应用

李致家¹,姚 成¹,张 珂¹,朱跃龙²,刘志雨³,李巧玲¹,童冰星¹,黄小祥¹,黄鹏年¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学计算机与信息学院,江苏 南京 210098;
3. 水利部水文局,北京 100053)

摘要:以正交网格降雨径流模型研究为基础,提出了用于洪水预报的精细化基于网格蓄满与超渗空间组合的降雨径流模型(Grid-XAJ-SATIN)。从模型的原理与结构、地理信息空间处理、参数空间分布估算、模型的驱动场分析、模型流域状态同化几个方面对该模型进行讨论,分析模型在湿润、半湿润流域的实际应用情况。结果表明,无论是湿润流域还是半湿润流域,所提出的精细化模型均能取得良好的模拟预报精度,且模型在输出流域出口断面流量过程的同时,可实现对流域内任意网格单元流量过程的精细预报。

关键词:降雨径流水文模型;精细化模拟;蓄满超渗空间组合;参数空间分布;模型驱动场分析;流域状态同化;洪水预报

中图分类号:P426.6 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)06-0471-10

Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting

LI Zhijia¹, YAO Cheng¹, ZHANG Ke¹, ZHU Yuelong², LIU Zhiyu³,
LI Qiaoling¹, TONG Bingxing¹, HUANG Xiaoxiang¹, HUANG Pengnian¹

(1. Collage of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources of China, Beijing 100053, China)

Abstract: Improving the spatial resolution and forecasting accuracy of rainfall-runoff model is one of the hotspots and difficulties in flood forecasting and hydrological research. To address this problem, a high-resolution rainfall-runoff model, Grid-XAJ-SATIN, considering the spatial combination of infiltration-excess and saturation-excess runoff is proposed in this paper, which is based on the existing study of the grid-based rainfall-runoff models. Several aspects of this model are discussed including its principle and structure, processing of the geographical information, spatial distribution of parameters, model forcing data and assimilation of basin states. The model is then applied to both humid and semi-humid catchments for flood simulation. The simulation results show that the accuracy of the flood forecasting is well realized in both conditions. Moreover, this model is demonstrated to be able to forecast not only the hydrograph at the catchment outlet but also the streamflow at any interior grid cells.

Key words: rainfall-runoff hydrological model; high-resolution simulation; spatial combination of infiltration-excess and saturation-excess runoff; spatial distribution of parameters; analysis of model forcing data; assimilation of basin states; flood forecasting

收稿日期: 2016-07-16

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501022); 国家自然科学基金(51679061); 国家重点研发计划(2016YFC0402705)

作者简介: 李致家(1962—),男,山西运城人,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

通信作者: 姚成,副教授。E-mail: yaocheng@hhu.edu.cn

降雨径流水文模型的发展经历了从数学物理方程解析或数值解—水文概化—水文概化+数学物理方程解析或数值解,用于水文或洪水预报的降雨径流水文模型发展经历了水文概化—水文概化+数学物理方程解析或数值解^[1]。精细化的水文模型有两个含义,一是空间分辨率要高,二是对产汇流过程有精确的描述。在实时洪水预报中由于实时水雨情资料及计算速度的制约,限制了采用数学物理方程数值解的高空间分辨率的水文模型的使用。随着遥感及计算机技术的飞速发展,使得在实时预报中以往的不可能变为可能。目前国内在水情部门降雨径流水文与洪水预报中采用的是概念性分布式水文模型,如新安江模型,流域划分采用泰森多边形或自然子流域的分块方法^[2]。生产上采用的 API 模型是集总式水文模型,流域不分块;由概念性水文模型组成的分布式水文预报方案的单元流域面积一般比较大,有的可达到上千平方千米^[3-7]。20 世纪 90 年代在水文预报中雷达测雨开始应用,反演的雷达测雨资料是以正交网格形式给出的,更易与正交网格的水文模型耦合应用^[8-20]。由于 GIS、DEM 及数字流域技术的普及应用,使正交网格降雨径流水文模型研究成为可能^[21-23]。基于数学物理方程数值解的降雨径流水文模型大都是网格模型,以正交网格为主,也有三角网格的,在目前的科学技术水平下这类模型还很难用于实时水文与洪水预报^[3-10]。李致家等^[11,14]进行了基于正交网格降雨径流水文模型的研究,提出精细化的基于网格的蓄满与超渗空间组合的降雨径流水文模型(Grid-XAJ-SATIN)并在实时洪水预报中应用。本文重点讨论模型的原理与结构、地理信息空间处理、参数空间分布估算、模型的驱动场分析、模型流域状态同化以及模型应用几个方面。

1 模型原理与结构

精细化模型 Grid-XAJ-SATIN 是在网格型新安江模型基础上^[24-37],进一步考虑了蓄满与超渗产流模式空间组合的分布式水文模型。模型以流域内每个 DEM 网格作为计算单元,先计算出每个网格单元的植被冠层截留量、河道降水量和蒸散发量;然后再根据流域水文分区情况对每个网格单元的产流模式进行识别,位于蓄满产流区的网格采用蓄满产流模式计算出单元产流量,而位于超渗产流区的网格采用超渗产流模式计算出单元产流量;最后再根据网格间的汇流演算次序,依次将各单元出流演算至流域出口。模型在进行网格单元产汇流计算时,同时考虑了网格间的水量交换问题以及河道排水网络的影响。

1.1 蓄超产流区空间分布

产流模式分为蓄满产流模式与超渗产流模式,发生哪一种取决于流域降雨特征、土壤湿度特征及下垫面特征。降雨及土壤湿度特征属于动态特征,每一场暴雨洪水的降雨及土壤湿度特征都不一样;下垫面特征属于静态特征,在较长时间内维持一定的稳定性,具体又可以细分为地形特征、植被特征、土壤特征与地质特征。Savenije^[38]认为地形因素是最重要的因素,包括坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、汇水面积等诸多地形因子。地形陡峭区域,降雨不易及时下渗,常形成超渗径流,地形平缓区域则易蓄满产流。平面曲率为正的区域,水流易四散流开,超渗产流发生;平面曲率为负的区域,则易水流汇聚,蓄满产流发生。剖面曲率为正的区域,水流流速减缓,易发生蓄满产流;剖面曲率为负的区域,水流加速流动,易产生超渗径流。汇水面积大的区域,长期湿润,下渗能力大,易发生蓄满产流;汇水面积小的区域,则土壤干燥易板结,地下水位埋深大,易发生超渗径流。

李致家等^[39]认为除地形因素外,植被与土壤对产流过程的影响不可忽略,提出了一种基于径流曲线数与地形指数的蓄超产流区空间分布的确定方法,首先根据任意网格单元的土壤及土地利用类型,确定各单元的径流曲线数,并计算任意单元的地形指数,再对径流曲线数与地形指数开展聚类分析,最终确定任意单元的主导产流模式,进而获取流域蓄满产流区与超渗产流区的空间分布。

1.2 单元产流及分水源

1.2.1 蓄满产流

土壤蓄满表示的是土壤含水量达到田间持水量,而不是饱和含水量。Grid-XAJ-SATIN 模型采用蓄满产流机制是指在降雨过程中,直到土壤包气带蓄水量达到田间持水量时才能产流,而在达到田间持水量之前,所有来水均被土壤吸收而不产流。对于流域内蓄满产流区的网格单元而言,可以采用张力水蓄水容量分布曲线来考虑土壤含水量在单元内的分布不均问题,也可以假定张力水含水量在单元内分布均匀,此时将计算时段内网格单元的实测降雨先扣除相应时段的蒸散发,植被冠层截留,河道降水后,再考虑上游入流是否补足当前单元的土壤含水量,即可得到实际用于产流计算的时段降雨量 P_e ,则

$$R = \begin{cases} 0 & (P_e \leq 0 \text{ 或 } P_e + W_0 \leq W_M) \\ P_e + W_0 - W_M & (P_e + W_0 > W_M) \end{cases} \tag{1}$$

式中: R ——时段产流量; P_e ——时段降雨量; W_0 ——网格单元实际的张力水含量; W_M ——栅格单元全土层的张力水蓄水容量。

任意网格单元内的产流量 R 均被划分为 3 种水源:地面径流 R_s 、壤中流 R_i 以及地下径流 R_g 。与产流计算一样,在进行分水源计算时,每个网格单元内不再考虑自由水蓄水容量面上分布不均问题。分水源计算所用公式为

$$R_i = K_i S \tag{2}$$

$$R_g = K_g S \tag{3}$$

$$R_s = \begin{cases} 0 & (R + S \leq S_M) \\ R + S - S_M & (R + S > S_M) \end{cases} \tag{4}$$

式中: S_M ——网格单元表层土自由水蓄水容量; K_i ——表层自由水含量对壤中流的出流系数; K_g ——表层自由水含量对地下水的出流系数; S ——网格单元实际的自由水含量。

1.2.2 超渗产流

超渗产流量由降雨强度和地面下渗能力共同决定。当降雨雨强大于地面下渗能力时,产流量等于降雨强度与地面下渗能力之差,土壤含水量的增加与下渗能力相同。当降雨雨强小于地面下渗能力时,产流量为零,降雨量全部补充土壤含水量。对于超渗产流计算而言,关键是确定出下渗能力。本模型提供了基于 Green-Ampt 方程与 Philip 下渗曲线的两种下渗能力计算方法。

1.3 汇流演算

Grid-XAJ-SATIN 模型提供了两种汇流演算方法,包括一维扩散波模型与基于网格的 Muskingum 汇流方法。在进行网格间扩散波汇流演算时,假设任意网格单元都由坡地和河道组成,即原来的坡地网格上也存在一个“虚拟河道”,地下径流与壤中流都直接汇入河道或“虚拟河道”中,因此网格间的汇流就由坡面汇流及河道汇流组成,均采用扩散波模型。其中,坡面汇流扩散波方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial (u_s h_s)}{\partial x} = q_s \\ \frac{\partial h_s}{\partial x} = S_{oh} - S_{fh} \end{cases} \tag{5}$$

式中: h_s ——坡面水流的水深; u_s ——坡面水流的平均流速; q_s ——单位时间内所计算的坡面径流深, S_{oh} ——沿出流方向的地表坡度; S_{fh} ——沿出流方向的地表摩阻比降。

在进行网格间汇流演算时,式(5)需要在每个网格单元上进行离散,其中的连续性方程为

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{1}{A_{gc}} [Q_{sup} + Q_s - Q_{sout}] \tag{6}$$

式中: A_{gc} ——网格单元的面积; Q_s ——网格单元的地表径流流量; Q_{sout} ——网格单元的地表径流出流量; Q_{sup} ——上游网格入流量。

对于河道汇流而言,其一维扩散波方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial A_{ch}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{ch}}{\partial x} = q_l \\ \frac{\partial h_{ch}}{\partial x} = S_{oc} - S_{fc} \end{cases} \tag{7}$$

式中: A_{ch} ——河道断面过水面积; Q_{ch} ——河道流量; q_l ——单宽旁侧入流; h_{ch} ——河道水深; S_{oc} ——河道坡度; S_{fc} ——河道摩阻比降。

本模型采用基于两步 MacCormack 算法的二阶显式有限差分格式进行坡面与河道水流扩散波方程组的求解。

2 地理信息的空间处理

精细化模型计算除了需要基本的水雨情数据外,还需要 DEM 高程、土壤类型、植被覆盖/利用等空间数

据。常见的 DEM 数据如由美国太空总署 (NASA) 与国防部国家测绘局 (NIMA) 联合测量的 SRTM (shuttle radar topography mission, 即航天飞机雷达地形测绘使命) 数据, 土壤类型数据如联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 所构建的世界土壤数据库 HWSD (harmonized world soil database version), 植被覆盖/利用数据如美国马里兰大学 (UMD) 提供的全球土地覆盖数据和欧洲太空总署 (ESA) 提供的 GlobCover 全球陆地覆盖数据。

3 模型参数与空间分布估算

精细化模型需要确定流域内任意网格单元的模型参数, 只依赖水文观测资料很难实现, 必需根据土壤、植被、地貌特征等下垫面信息对模型参数及其空间分布进行估算。利用下垫面空间信息估计模型参数及其空间分布, 也将有助于精细化模型在无资料地区洪水预报中发挥其更大的优势。Grid-XAJ-SATIN 模型中部分参数可直接通过每个网格单元的土壤类型和植被覆盖类型估计, 如植被冠层截留计算中植物叶面积指数、作物高度与坡面汇流的曼宁糙率系数; 地表坡度、河道坡度、河道长度等可直接通过地貌特征获取; 蓄水容量、土壤吸水率、稳定下渗率等参数则可以通过其物理意义, 与土壤类型及植被覆盖之间建立定量关系。

3.1 产流参数

3.1.1 蓄满产流及分水源参数

蓄满产流及分水源参数主要包括前文所述的 W_M 、 S_M 、 K_i 与 K_g 。可推导出:

$$W_M = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) L_a \tag{8}$$

$$S_M = (\theta_s - \theta_{fc}) L_h \tag{9}$$

式中: θ_{fc} ——田间持水量; θ_{wp} ——凋萎含水量; L_a ——包气带厚度; L_h ——腐殖质土层厚度。其中, θ_s 、 θ_{fc} 、 θ_{wp} 均可根据栅格单元的土壤类型通过查土壤参数统计表获取, 因此只要知道每个栅格单元的 L_a 与 L_h 即可获得 W_M 与 S_M 在流域的空间分布。在自然界中, 影响包气带厚度的因素较多, 很难进行直接推求。 L_a 与 L_h 可通过与地形指数及土壤类型对应的土壤水分常数进行估算^[35]。

K_i 与 K_g 这 2 个参数属于并联参数, 其和 $K_i + K_g$ 代表的是自由水出流的快慢, 应与单元的土壤类型有关, 而自由水指的是饱和含水量与田间持水量之间那部分可以在重力作用下自由流动的水, 因此可以将 θ_s 与 θ_{fc} 作为衡量自由水出流快慢的指标。 K_i/K_g 表示的是壤中流与地下径流的比, 此比值可以通过 θ_{wp} 来反映^[35-37]。

3.1.2 超渗产流参数

当采用 Green-Ampt 方程或 Philip 下渗曲线进行超渗产流计算时, 其主要参数如饱和水力传导度、毛管水头、土壤吸水率和稳定下渗率等均可根据物理意义及土壤类型估算确定。以 Philip 下渗曲线为例, 其主要参数包括土壤吸水率 S_e 与稳定下渗率 A_0 , 估算公式^[40]为

$$S_e = 2(1 - S_{ini}) \left[\frac{5\eta K_{shc} \psi \varphi}{3\lambda \pi} \right]^{0.5} \tag{10}$$

$$A_0 = 0.5 K_{shc} (1 + S_{ini}^\varphi) - K_{shc} B \left(\frac{\psi}{L_a} \right)^{\lambda \varphi} \tag{11}$$

式中: S_{ini} ——土壤的初始饱和度, $S_{ini} = \theta_{ini}/\theta_s$; θ_{ini} ——初始土壤含水量; ψ ——饱和土壤基模势, ψ 与参数 B 可由孔隙形状参数进行估算^[40]; φ ——指数, $\varphi = 3 + 2/\lambda$; K_{shc} 、 λ ——土壤参数。

3.2 汇流参数

当采用扩散波模型进行汇流计算时, 其参数估算主要是基于流域地貌特征以及河道断面信息。其中, 坡面汇流的曼宁糙率系数是根据栅格单元的植被类型由植被参数统计表确定, 而每个栅格单元河道汇流的曼宁糙率系数可由单元上游汇水面积与河道坡度估算得到^[38-39]。当考虑河道排水网络影响时, 其地表径流汇入河道比例参数可采用面积比例法进行计算^[40]。

4 模型驱动场估算

降水作为水文模型最关键的输入源, 其精度和时效性直接影响模拟结果的精度和可靠性^[41-43]。在洪水预报中, 模拟水文过程的不确定性 70% ~ 80% 归因于降水的时空变异性。目前降水数据的获取方式主要有

地面观测、卫星和雷达定量降水估计、模式定量降水预报。长期以来,降水的常规观测主要依赖于布设于地表的观测站点,采用有限的观测结果代表周边几十甚至几百平方千米范围内的真实降水。实际降水的大小、类型等具有显著的时空变异性,地面站点存在以点代面的问题,特别是站点稀少的区域观测降水不能有效反映空间降水的空间变异性^[41,44-47],降水观测的空间局限性成为水文研究中的难点^[42]。雷达定量降水估计具有空间分辨率高、实时性强的优点,但是因容易受覆盖物的影响,其覆盖范围有限^[43]。伴随着国内外卫星遥感技术的发展,基于天气雷达与卫星的遥感降水观测得以不断完善,弥补了地面站点空间分布的不足,也为降水的监测提供了新的手段。目前,卫星遥感在获取时空变化的全球降水方面具有独特的优势,提供了前所未有的卫星降水产品如 TRMM、GPM、COMRPH、PERSIANN、FY-3B、FY-3C 等。卫星定量降水估计具有覆盖面广、观测时间较连续的优势^[48],但是由于遥感探测仪器、反演算法等限制,卫星降水产品的精度相对较低,并且对固态降水的反演能力有限^[49-50]。

为了更好地描述降水的空间变化,充分发挥不同降水来源的优点,提高降水产品的质量,构建高精度、高时空分辨率的水文模型驱动场,采用将高时空分辨率的卫星定量降水估计作为背景场,与地面站点的降水或雷达降水进行融合,同时对卫星降水进行降尺度^[51-55]。

5 模型初始场、状态场估算与同化

模型的计算需要知道流域的初始状态。流域状态(如土壤含水量)有的可测,但地面观测时空分辨率不够,可以采用遥感反演与地面同化弥补不足。至于地表、壤中与地下径流等状态很难观测则只能估算了。土壤湿度控制着众多陆面水文通量和能量过程,在降水、径流、下渗、蒸散发等水文过程中起着至关重要的作用^[55-58]。常规站点虽然观测精度高,但站点稀少难以表征土壤水的大范围空间分布。星基遥感技术(如 SMAP、GSWP、SMOS、风云卫星等)因其能够在全局和区域尺度上获取土壤湿度而得到广泛的关注。卫星遥感反演虽然能够在日尺度上大范围地获取土壤水,但是只能观测表层(0~10 cm)的土壤水^[59-60]。土壤水可以通过具有基于物理机制或者概念性水文模型的模拟来获得,但受制于模型结构、驱动数据、参数等不确定性影响,模拟结果存在一定偏差。数据同化的优势在于能够将卫星和遥感探测数据、陆面过程模型模拟值、站点观测资料结合起来,能够有效提高土壤水的估算能力^[61-65],也是土壤水研究的一个重要方向^[66]。

数据同化技术在 20 世纪 90 年代被引入水文,尤其带动了土壤水陆面过程模型的发展^[67]。常用数据同化算法包括卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、粒子滤波、三维变分算法、四维变分算法等^[69-70]。同化算法仍然受到复杂的不确定性、观测的非线性等多方面的影响^[70]。首先,采用一个月前的卫星观测土壤相对湿度来设置模型土壤含水量的初始状态场;然后采用集合卡尔曼滤波方法将卫星观测表层土壤含水与模型表层土壤含水量进行融合来调整模型状态,从而实现模型状态场与卫星观测的同化。

6 模型应用

将 Grid-XAJ-SATIN 模型应用于浙江分水江昌化流域、於潜流域,黄河渭河支流陈河流域,汉江子午河大河坝流域以及海河于桥水库上游的前毛庄流域。这 5 个流域中昌化流域和於潜流域属于湿润流域,而陈河流域、大河坝流域以及前毛庄流域属于半湿润流域。以昌化流域为湿润流域的典型代表,陈河流域为半湿润流域的典型代表,对模型的洪水模拟预报能力进行分析。

昌化流域位于浙江省西北部,流域总面积 905 km²,流域多年平均年降雨量为 1 638.2 mm。陈河流域位于陕西省秦岭北麓,流域面积 1 395 km²,多年平均降水量 700~900 mm。

以昌化流域 1998—2010 年间的 24 场洪水(14 场洪水用于率定,10 场洪水用于检验)以及陈河流域 2003—2012 年间的 20 场洪水(14 场洪水用于率定,6 场洪水用于检验)为例进行模型的率定与验证计算。表 1 和表 2 分别为昌化、陈河两个流域的洪水模拟结果统计。

由表 1 可以看出,昌化流域用于率定的 14 场洪水中,13 场洪水的洪量与洪峰流量相对误差小于 20%,平均模拟径流深相对误差为 12.98%;模拟洪峰合格率为 92.8%,到达甲级预报方案。对于陈河流域而言(表 2),达到乙级方案。图 1 为摘录的昌化流域和陈河流域模拟洪水过程线比较。结果表明,无论是湿润流域还是半湿润流域,本文所提出的精细化模型 Grid-XAJ-SATIN 均能取得较高的洪水模拟精度与良好的实际应用效果。

表1 昌化流域次洪模拟计算结果

Table 1 Results of flood simulation in Changhua watershed

模型	序号	洪号	总雨量/ mm	实测径 流深/mm	计算径 流深/mm	洪量相对 误差/%	实测洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性 系数
率定	1	1998040700	77.39	64.85	72.94	12.47	557	568	1.92	-3	0.62
	2	1998051300	78.29	77.94	82.47	5.81	705	767	8.90	-2	0.84
	3	1998072221	67.46	21.78	27.71	27.23	413	435	5.35	-1	0.80
	4	1999062404	461.24	570.63	459.80	-19.42	2100	1702	-18.91	-3	0.86
	5	1999082923	52.02	71.61	57.52	-19.68	950	834	-12.85	-2	0.92
	6	2000053008	66.68	60.30	53.13	-11.89	760	643	-15.37	2	0.85
	7	2000060312	43.16	43.44	40.50	-6.77	548	490	-10.46	-1	0.85
	8	2000062108	105.12	76.45	72.94	-4.59	700	611	-12.65	2	0.82
	9	2000082407	112.21	86.67	84.91	-2.03	642	532	-17.22	4	0.55
	10	2001060923	59.37	55.78	48.89	-12.35	715	764	7.80	1	0.89
	11	2002061923	128.96	122.30	106.19	-13.17	1282	1268	-1.11	1	0.91
	12	2002062703	84.87	95.28	78.51	-17.60	1340	1285	-4.08	-2	0.92
	13	2002081600	50.29	52.15	43.56	-16.47	369	324	-12.16	1	0.81
	14	2003051207	65.48	71.04	62.29	-12.32	445	563	26.66	-1	0.86
验证	15	2004051205	88.41	85.85	81.46	-5.11	368	411	11.58	3	0.74
	16	2005020622	115.83	122.41	116.14	-5.12	342	285	-16.47	-4	0.69
	17	2006050814	76.02	67.15	71.41	6.34	368	431	16.97	0	0.82
	18	2007061308	59.33	33.86	31.39	-7.29	273	198	-27.22	-1	0.84
	19	2008060911	188.44	132.21	148.92	12.64	1820	1953	7.31	-1	0.88
	20	2008061303	40.96	45.66	35.61	-22.01	507	437	-13.77	0	0.78
	21	2008062612	50.83	45.30	41.99	-7.31	615	574	-6.64	-2	0.86
	22	2009072610	156.10	132.10	133.59	1.13	606	550	-9.14	-2	0.84
	23	2010022508	237.63	215.79	221.62	2.70	742	782	5.82	-1	0.89
	24	2010041400	31.29	25.31	29.54	16.71	239	280	16.96	2	0.77

表2 陈河流域次洪模拟计算结果

Table 2 Results of flood simulation in Chenhei watershed

模型	序号	洪号	总雨量/ mm	实测径 流深/mm	计算径 流深/mm	洪量相对 误差/%	实测洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性 系数
率定	1	2003082622	140.10	89.36	88.81	-0.61	628	560	-10.83	2	0.84
	2	2003090319	61.10	67.28	68.14	1.28	740	705	-4.67	-1	0.98
	3	2003091711	100.60	76.30	68.32	-10.46	694	625	-10.00	3	0.97
	4	2004090214	40.04	31.47	33.42	6.20	153	183	19.61	-1	0.80
	5	2005070106	89.00	38.05	38.80	1.95	373	430	15.18	-2	0.86
	6	2005092520	232.40	175.15	206.42	17.85	1740	1618	-7.04	1	0.76
	7	2006090308	24.84	18.77	21.64	15.28	328	311	-5.16	1	0.77
	8	2006092507	77.20	42.57	48.47	13.88	293	341	16.37	-2	0.78
	9	2007070404	81.33	40.08	40.55	1.18	341	304	-10.90	1	0.80
	10	2008071909	97.50	27.45	34.73	26.53	618	485	-21.50	2	0.86
	11	2009081814	51.10	36.62	43.10	17.71	267	316	18.20	3	0.87
	12	2010071508	40.30	15.05	11.45	-23.93	198	144	-27.37	1	0.51
	13	2010072101	85.60	53.48	42.83	-19.91	623	543	-12.82	0	0.70
	14	2010081820	71.60	29.41	30.42	3.44	647	755	16.64	-1	0.84
验证	15	2010082218	55.90	52.44	60.03	14.47	585	634	8.32	-1	0.75
	16	2011080301	43.90	34.62	38.50	11.22	390	408	4.57	-2	0.74
	17	2011091008	68.16	57.60	59.37	3.07	865	969	12.08	2	0.93
	18	2011091520	123.30	110.05	93.12	-15.39	1200	1129	-5.95	-1	0.86
	19	2012070720	72.50	31.03	22.57	-27.26	386	271	-29.78	2	0.50
	20	2012083013	133.80	84.51	97.95	15.91	1710	1371	-19.80	2	0.90

此外,Grid-XAJ-SATIN 模型是以每一个网格为计算单元进行产汇流计算,并基于下垫面特性的分布信息推求了参数的空间分布,因此模型可以实现对流量的时空变化进行精细模拟。图2为模型模拟的昌化流域2002062703号洪水过程与陈河流域2003090319号洪水过程洪峰时刻的流量空间分布。由此可以看出,Grid-XAJ-SATIN模型在输出流域出口断面流量过程的同时,也可以输出流域上任意网格单元的流量过程。

利用该特点,可将本模型用于流域上任意无资料地区的洪水预报。

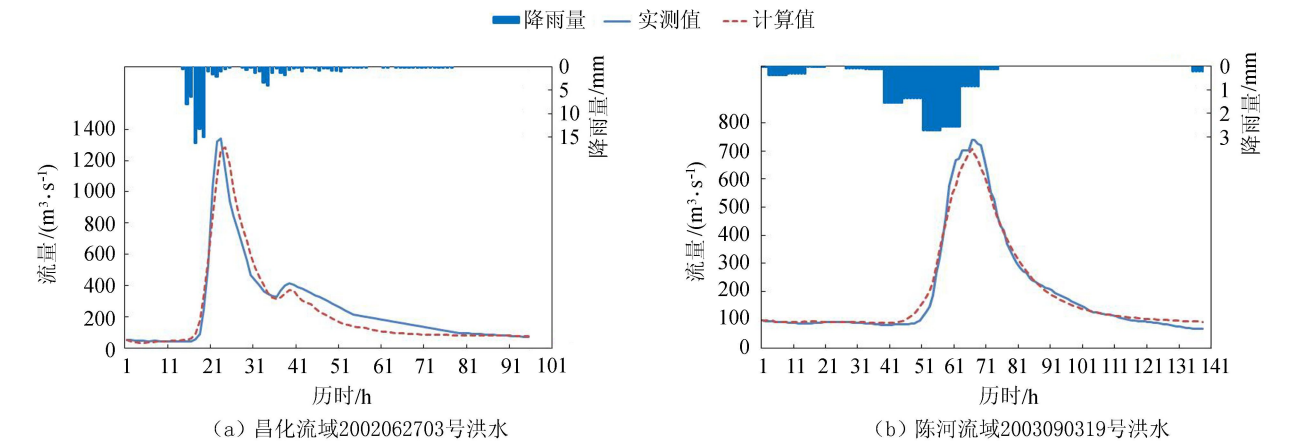


图 1 昌化流域和陈河流域模拟洪水过程线对比
Fig. 1 Comparison between simulated and measured results of flood in different catchments

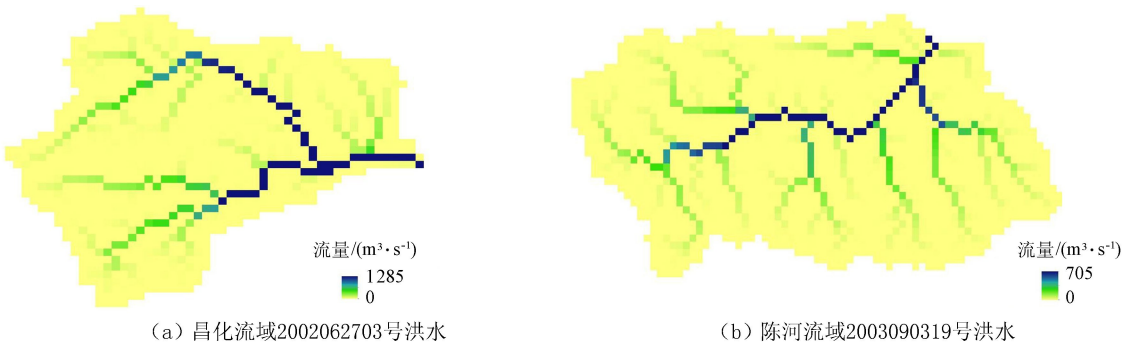


图 2 昌化流域与陈河流域模拟洪峰时刻流量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of discharge at flood peak time

7 结 语

为进一步提高中小流域及半湿润半干旱流域实时洪水预报精度,以网格型新安江模型为基础,增加了蓄满产流与超渗产流的空间组合框架,建立了基于网格蓄满与超渗空间组合的精细化洪水预报模型 Grid-XAJ-SATIN。本模型的主要特点包括:(a) 基于流域的地形、土壤、植被等因子,对任意网格单元的产流模式进行识别,确定了蓄满与超渗产流区的空间分布,进一步提高了产流模拟精度;(b) 在进行产汇流计算时,不仅考虑了网格单元之间的水流交换,同时考虑了网格与河道之间的水流交换,更好地描述了产汇流过程中沿程水流的再分配过程;(c) 可以结合多源数据信息与融合同化方法,为预报计算提供了高精度的驱动场及初始与状态场;(d) 利用流域地形特征和土壤属性的空间分布信息,建立了模型产汇流参数与土壤水文常数、土层厚度等流域下垫面特性间的定量关系,实现了模型参数空间分布的估算;(e) 模型在输出流域出口断面流量过程的同时,也可实现对流域内任意网格单元流量过程的精细预报。

Grid-XAJ-SATIN 模型已成功用于多个湿润、半湿润半干旱流域的洪水模拟及实时预报,已得到了良好的实际验证。随着水文大数据的日益丰富,模型可用的数据源越来越多,空间数据的分辨率也越来越高,为 Grid-XAJ-SATIN 模型更加精细地模拟流域水文过程提供了很好的数据支撑,在实时洪水预报中,模型也有着更加广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 赵人俊. 流域水文模型:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1983:40-45.
[2] 水利部水文局,长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术手册[M]. 北京:水利电力出版社,2010:105-110.
[3] ANDERSON M G, MCDONNELL J J. Encyclopedia of hydrological sciences[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2005: 207-215.

- [4] KIRKBY M J. Hillslope hydrology [J]. Hydrological Forecasting, 1985,42(1):37-75.
- [5] FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology,1969, 9(3):237-258.
- [6] ABBOTT M B, REFGAARD J C. Distributed hydrological modeling[M]. Dordrecht:Kluwer Academic, 1996:208-226.
- [7] 赵宏臻,陈鸣,吴永祥,等. 淮北平原分布式除涝水文模型及应用[J]. 水资源保护,2014,30(4):14-17. (ZHAO Hongzhen, CHEN Ming, WU Yongxiang, et al. Research and application of distributed waterlogging control hydrological model for Huaihei Plain[J]. Water Resources Protection, 2014,30(4):14-17. (in Chinese))
- [8] SINGH V P, FREVERT D. Mathematical models of small watershed hydrogy and applications[J]. Water Resources Publications, 2002,32(1):107-112.
- [9] BEVEN K. Rainfall-runoff modeling-the Primer[M]. Chichester: Wiley, 2000:115-121.
- [10] BEVEN K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modeling system[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 189-206.
- [11] 包红军,王莉莉,李致家,等. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):340-346. (BAO Hongjun, WANG Lili, LI Zhijia, et al. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016,44(4):340-346. (in Chinese))
- [12] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:水利水电出版社,2004:131-145.
- [13] 芮孝芳. 水文学研究进展[M]. 南京:河海大学出版社,2007:181-199.
- [14] 李致家, 李兰茹,黄鹏年,等. 流域分块对汇流参数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):283-288. (LI Zhijia, LI Lanru, HUANG Pengnian, et al. Effect of watershed subdivision on confluence parameter [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(4):283-288. (in Chinese))
- [15] JASPER K, GURTZ J, LANG H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model [J]. Journal of Hydrology,2002, 267(1):40-52.
- [16] COLLIER C G. Weather radar precipitation data and their use in hydrological modelling[J]. Distributed Hydrological Modelling, 1996,22(1):143-163.
- [17] REED S, KOREN V, SMITH M. Overall distributed model intercomparsion project results [J]. Journal of Hydrology,2004,298(1): 27-60.
- [18] MICHAEL S, DONG-JUN S, VICTOR K. The distributed model intercomparsion project (DMIP): motivation and experiment design[J]. Journal of Hydrology,2004, 298(1): 298-303.
- [19] LI Zhijia, GE Wenzhong, LIU Jintao, et al. Coupling between weather radar rainfall data and a distributed hydrological model for real-time flood forecasting[J]. Hydrological Journal Sciences, 2004, 49(6):945-958.
- [20] ANDERSON M G, BURT T P. Hydrological forecasting[M]. Hoboken:Wiley, 1985: 77-101.
- [21] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人,等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3):342-349. (LIU Xiaoyang, MAO Jietai, LI Jiren, et al. Radar rainfall estimation and its application on runoff simulation over Shiguanhe Catchments[J]. Journal of Peking Universit(Natural Sciences), 2002, 38(3):342-349. (in Chinese))
- [22] LIU Zhiyu, TODINI E. Towards a comprehensive physically based rainfall runoff model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(5): 859-881.
- [23] IVANONI V Y, VIVPNI E R, BRAS R L. Catch hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model[J]. Water Resources Research, 2004, 40(11):591-612.
- [24] 刘志雨. 基于 GIS 的分布式托普卡匹水文模型在洪水预报中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(4): 70-75. (LIU Zhiyu. Application of GIS-based distributed hydrological model to flood forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004, 35(4): 70-75. (in Chinese))
- [25] 张珂, 李致家, 包红军. GTOPOMODEL 与 TOPMODEL 模型的比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(5):509-512. (ZHANG Ke, LI Zhijia, BAO Hongjun. Comparison between GTOPOMODEL and TOPMODEL [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005, 33(5):509-512. (in Chinese))
- [26] 李致家, 张珂. 基于 GIS 的 DEM 和分布式水文模型的应用比较[J]. 水利学报, 2006,37(8):1022-1028. (LI Zhijia, ZHANG Ke. Comparison of distributed geological models based on GIS technology and DEM [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(8):1022-1028. (in Chinese))
- [27] 李致家, 姚成. 基于栅格的新安江模型与 GTOPOMODEL 模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2):131-134. (LI Zhijia, YAO Cheng. The study on Grid-Xin' anjiang model and GTOPOMODEL [J]. Jouranl of Hohai University(Natural

- Sciences), 2007, 35(2):131-134. (in Chinese))
- [28] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xinjiang)模型研究[D]. 南京:河海大学, 2009:210-227.
- [29] 李致家. 水文模型的应用与研究[M]. 南京:河海大学出版社,2008:31-36.
- [30] 李致家. 现在水文模拟与预报技术[M]. 南京:河海大学出版社,2010:78-89.
- [31] LI Zhijia,ZHANG Ke. Comparison of three GIS-based hydrological models[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(5):364-370.
- [32] YAO Cheng,LI Zhijia,BAO Hongjun,et al. Application of a developed Grid-Xinanjing Model to Chinese watersheds for Flood Forecasting Purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9): 923-934.
- [33] 李致家, 胡伟升, 丁杰,等. 基于物理基础与基于栅格的分布式水文模型研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2):5-13. (LI Zhijia, HU Weisheng, DING Jie,et al. Study on distributed hydrological model of solving physical equation on grids[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2):5-13. (in Chinese))
- [34] 许波刘,董增川,洪娴. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护,2017,33(2):37-42. (XU Boliu,DONG Zengchuan,HONG Xian. Lumped karst hydrological model and its application[J]. Water Resources Protection, 2017,33(2): 37-42. (in Chinese))
- [35] ZHANG He, LI Zhijia,SAIFULLAH M, et al. Impact of DEM Resolution and Spatial Scale Analysis of Influence Factors and Parameters on Physically Based Distributed Model[J]. Advances in Meteorology, 2016(4):1-10.
- [36] 刘志雨, 李致家. 中小河流洪水预警指标确定与预报技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 112-132.
- [37] YAO Cheng,LI Zhijia,YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468: 47-62.
- [38] SAVENIJE H. Opinions “Topography Driven Conceptual Modelling (FLEX-Topo)” [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14(12): 2681-2692.
- [39] 李致家, 黄鹏年, 张永平,等. 半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10):1-6. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, ZHANG Yongping,et al. Study on spatial combination MODEL of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds[J]. Yellow River, 2015, 37(10):1-6. (in Chinese))
- [40] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学, 2007:137-218.
- [41] LI Ming, SHAO Quanxi. An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data[J]. Journal of Hydrology, 2010,385(1-4):51-64.
- [42] ZAJACZKOWSKI J. A comparison of the BAWAP and SILO spatially interpolated daily rainfall datasets[C]//Anon. 18th World IMACS/MODSIM Congress. Cairns: Citeseer, 2009:3886-3892.
- [43] HUGHES D A. Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks[J]. Journal of Hydrology, 2006;327(3/4):399-410.
- [44] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))
- [45] JAIN M K, SINGH V P. DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 302(1/2/3/4):107-126.
- [46] BHATTACHARYA A, ADHIKARI A, MAITRA A. Multi-technique observations on precipitation and other related phenomena during cyclone Aila at a tropical location[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013,34(6):1965-1980.
- [47] LANGELLA G, BASILE A, BONFANTE A, et al. High-resolution space-time rainfall analysis using integrated ANN inference systems[J]. Journal of Hydrology, 2010,387(3-4):328-342.
- [48] 李致家, 刘金涛, 葛文忠,等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004,32(6):601-606. (LI Zhijia, LIU Jintao,GE Wenzhong, et al. Coupling of weather radar rainfall data with hydrological model and its application to flood forecast [J]. Journal of Hohai university: Natural Sciences, 2004, 32(6): 601-606. (in Chinese))
- [49] 阿迈德·迪狄安·迪阿罗, 刘晓阳, 毛节泰,等. 卫星雷达联合重构大尺度流域降水场[J]. 高原气象, 2004,23(1):11-17. (Ahmed Tidiane Diallo, LIU Xiaoyang, MAO Jietai, et al. Precipitation field of large scale catchment reconstructed by combination of GMS satellite and weather radar[J]. Plateau Meteorology, 2004,23(1):11-17. (in Chinese))
- [50] HSU K, GAO X, SOROOSHIAN S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997,36(9):1176-1190.

- [51] SHEN Yan, WANG Ying, XIE Pingping. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2010, 115: 198-227.
- [52] WU Lu, ZHAI Panmao. Validation of daily precipitation from two high-resolution satellite precipitation datasets over the Tibetan Plateau and the regions to its east[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(6): 735-745.
- [53] ADLER R F, HUFFMAN G J, CHANG A, et al. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)[J]. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4(6): 1147-1167.
- [54] XIE P, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al. GPCP pentad precipitation analyses: an experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates[J]. Journal of Climate, 2003, 16(13): 2197-2214.
- [55] XIE Pingping, XIONG Anyuan. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116: 21106-21119.
- [56] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1247-1258. (CHEN Dongdong, DAI Yongjiu. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 33(6): 1247-1258. (in Chinese))
- [57] MORAN M S, PETERS LIDARD C D, WATTS J M, MCELROY S. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 805-26.
- [58] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [59] 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化[J]. 中国科学: 地球科学. 2011, 41(3): 375-385. (SHI Chunxiang, XIE Zhenghui, QIAN Hui, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data[J]. Science China: Earth Science. 2011, 41(3): 375-385. (in Chinese))
- [60] VEREECKEN H, HUISMAN J A, BOGENA H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 253-270.
- [61] GAO H, WOOD E F, JACKSON T J, et al. Using TRMM/TMI to retrieve surface soil moisture over the Southern United States from 1998 to 2002[J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(1): 815-818.
- [62] ESCORIHUELA M J, CHANZY A, WIGNERON J P, et al. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: a case study. [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(5): 995-1001.
- [63] MARGULIS S A, MCLAUGHLIN D, ENTEKHABI D, et al. Land data assimilation and estimation of soil moisture using measurements from the Southern Great Plains 1997 Field Experiment[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 3-31.
- [64] REICHLER R H, KOSTER R D, LIU P, et al. Comparison and assimilation of global soil moisture retrievals from the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) and the Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D9): 139-155.
- [65] 兰鑫宇, 郭子祺, 田野, 等. 土壤湿度遥感估算同化研究综述[J]. 地球科学进展, 2015, 30(6): 668-679. (LAN Xinyu, GUO Ziqi, TIAN Ye, et al. Review in soil moisture remote sensing estimation based on data assimilation[J]. Advances in Earth Science, 2015 30(6): 668-679. (in Chinese))
- [66] CHRISTIAN E. Planning for the Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)[J]. Space Policy, 2005, 21(2): 105-109.
- [67] MCLAUGHLIN D. Recent developments in hydrologic data assimilation[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(S2): 977-984.
- [68] 李得勤, 段云霞, 张述文. 土壤湿度观测、模拟和估算研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 424-434. (LI Deqin, DUAN Yuanxia, ZHANG Shuwen. Soil moisture measurement and simulation: a review[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 424-434. (in Chinese))
- [69] 马建文, 秦思娟. 数据同化算法研究现状综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(7): 747-757. (MA Jianwen, QIN Sixian. Recent advances and development of data assimilation algorithms[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(7): 747-757. (in Chinese))
- [70] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203. (CHEN Shulin, LIU Yuanbo, WEN Zuomin. Satellite retrieval of soil moisture: an overview[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11): 1192-1203. (in Chinese))