

三维数值模拟下的溶洞安全水位提取方法

潘乙榕^{1,3}, 夏永华^{2,3*}, 杨明龙^{2,3}, 陈若^{1,3}, 查陆九^{1,3}, 朱琪^{1,3}

¹昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

²昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650051;

³云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093

摘要 为确保安全合理地开发岩溶洞穴, 往往需要考虑洞内的洪水情况。基于此, 提出一种基于三维地理空间信息与洪水数值模拟的溶洞安全水位提取方法。首先采用 Green-Ampt 法、SCS 单位线法和动波法构建山洪模型并验证该模型的可靠性。其次将设计的十年一遇暴雨输入洪水模型计算溶洞入口处洪水过程线, 并将该洪水过程数据作为洞内洪水模拟的输入条件。最后选取较为高效的三维湍流模型在溶洞三维模型中进行洪水模拟进而提取溶洞安全水位坐标。结果表明, 模拟洪痕和实际调查洪痕位置基本吻合, 此次构建的山洪模型适用于该研究区域的洪水计算, 且基于大涡模拟的洞内洪水三维模拟结果基本符合实际洞内水位变化特性。该方法可为溶洞开发提供更合理的安全水位参考数据。

关键词 遥感; 三维地理信息; 洪水数值模拟; 岩溶洞穴; 安全水位; 洪水演进

中图分类号 P258

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212937

Extraction Method of Safe Water Level in Karst Caves Based on Three-Dimensional Numerical Simulation

Pan Yirong^{1,3}, Xia Yonghua^{2,3*}, Yang Minglong^{2,3}, Chen Ruo^{1,3}, Zha Lujiu^{1,3}, Zhu Qi^{1,3}

¹Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

²City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan, China;

³Surveying & Mapping Technology and Application Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract To ensure the safe and reasonable development of karst caves, it is often necessary to consider the flood situation in the caves. Based on this, a method for determining the safe water level of karst caves based on three-dimensional (3D) geospatial information and flood numerical simulation is proposed. First, the Green-Ampt, soil conservation service unit hydrograph, and dynamic wave methods were used to build a mountain torrent model and verify its reliability. Second, flood hydrograph at the entrance of the karst was calculated using the designed 10-year rainstorm input flood model, and the flood data served as the input parameter for the flood simulation in the cave. Finally, a more efficient 3D turbulence model was selected to simulate the flood in the 3D model of the karst cave, then the safe water-level coordinates of the karst were extracted. Results show that the simulated flood mark is consistent with the observed flood mark. Therefore, the mountain flood model is suitable for flood calculation in the study area, and the 3D simulation results of the flood in the tunnel, based on large eddy simulation, are consistent with the actual water-level change characteristics in the tunnel. Thus, this method can provide more valid reference data on safe water levels for karst cave development.

Key words remote sensing; three-dimensional geographic information; flood numerical simulation; karst cave; safe water level; flood routing

1 引言

我国石灰岩分布广泛, 瑰丽多姿的岩溶洞穴遍布

各地, 是一笔重要的旅游财富。然而对大部分溶洞进行开发和研究时往往需要克服许多不利因素, 其中, 水文因素尤为突出。溶洞因其结构的特殊性, 洞内河流

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-01-06; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

通信作者: *617073761@qq.com

水位变化特性对溶洞的地质研究、景观开发设计等有很大的影响。因此计算可靠的洪水过程并输入溶洞,从而开展溶洞水位变化特性研究具有很强的现实意义。

模拟岩溶系统是一项复杂的任务,是一项全球持续研究的课题^[1]。国内外很多学者采取了多种方法对岩溶地区的洪水进行了大量研究。任后伟^[2]在分析岩溶地下河系的径流过程和特点的基础上,论证了岩溶地下河流域与地表流域的相似性,通过改进 SWAT 模型构建了双重尺度的岩溶流域分布式水文模型。梁桂星等^[3]以桂林市漓江流域为例,在碳酸盐岩和碎屑岩交叉分布的流域建立的水文模型较好地体现了表层岩溶带的调蓄作用并且能适用于碎屑岩与碳酸盐岩分布不均的岩溶流域水分循环模拟。Yu^[4]在美国佛罗里达岩溶地区运用 MODFLOW-DCM 模型模拟地下水流,并分析了含水层介质和补给条件对岩溶水动力特性的影响。前人的研究有助于岩溶地区水文模型的改进,但依旧存在缺乏关于流动路径和补给过程的关键知识的问题。2020 年, Nannoni 等^[5]证实只有长期和好的综合监测和取样才能帮助解开岩溶系统的复杂行为。但是,我国水系众多,受资金、地形和气候等条件限制,正如此次研究区域的许多地方并不具备长期水文要素监测的条件,这使得资料短缺或无资料地区的洪水数值模拟陷入了困境。当研究区域不具备长期良好的综合监测时,还需寻求其他有效途径进行洪水计算。为此,此次研究以大量的物理参数为支撑减少对实测资料率定的依赖,在有限条件下构建合适的洪水模型计算溶洞入口处的洪水过程。

从目前的研究看,数值模型仍然是溶洞水流最好的量化工具之一,可以较好地重现溶洞的水位变化过程。在计算机生成的虚拟流域环境中可以直观、动态地模拟真实河道中洪水的时空演变过程和淹没状况。对自然地物进行三维建模已不是难题,随着三维激光扫描技术的发展,激光点云处理方法也日新月异。赵亮等^[6]提出了一种基于语义分割特征的激光雷达三维(3D)目标检测算法。谭舸等^[7]针对地面三维激光扫描点的多测站配准问题,提出了一种利用激光跟踪仪来辅助实现点云配准的新方法。雷相达等^[8]提出了一种整合迁移学习与全卷积神经网络(FCN)的小样本机载激光雷达点云分类方法。由 Hirt 等^[9]提出的 volume of fluid (VOF) 法通过跟踪计算网格中每个计算单元相对于其中一个流体相的体积分数来捕获界面位置,是研究多相流最常见的方法之一,已被大多数洪水演进模型所采用。Zhang 等^[10]通过构建拓扑三角网格,利用水深比较方法实现洪水淹没范围的计算和可视化。冶运涛等^[11]提出了一种基于河势贴体网格的实时高效流域水流演进可视化仿真方法。以观测数据和水文水动力模型计算驱动流域洪水三维数值模拟已逐渐成为现阶段研究洪水演进的热门方法,但基于三维

模型结合湍流模型和自由面追踪法系统地研究溶洞水位和水流演进的还较少。

此次研究以宜良三脚洞为例,通过在洞前河槽处的洪水模拟数据和实际调查的洪痕数据对比验证针对研究区域构建的山洪模型的适用性。以计算的十年一遇($P=10\%$)设计洪水作为溶洞安全水位的输入条件,在溶洞三维模型中使用合适的三维湍流模型进行洪水演进,从而为溶洞开发提供溶洞安全水位参数。

2 研究区域概况

此次研究区域位于滇东南岩溶地貌区,地处低纬度地带,汛期(5—10月)降雨量占年降雨量的 85% 左右,尤以 6—8 月所占比重为大,若冷空气南下,往往易形成强度较大的暴雨,故水汽丰沛的夏半年暴雨洪水频繁。流域地貌主要是丘陵山地,高程范围在 1779~1980 m 之间,河流高差较大下游洪水频繁导致溶洞内水位变化较大。土壤以山原红壤为主,红壤表层 0~30 cm 的土壤容重和旱季含水量分别为 0.84~1.20 g/cm³ 和 34.21%~24.11%^[12]。云南各地月平均土壤湿度的气候平均值显示土壤湿度最小值(约 320~350 mm)出现在 4 月,较降水最小月份偏晚约 3 个月。气候平均的土壤湿度最大值(约 530~570 mm)出现在 9 月,较降水气候平均值最大值出现月份滞后约 2 个月,其年变幅(即 9 月的气候平均值减去 4 月的气候平均值)与降水的年变幅大致相同^[13]。研究流域面积较小,共 4 个子流域,包括约 12 km² 的地表河流所在的 3 个地表子流域[图 1(a)]和 1 个洞内流域[图 1(c)],植被覆盖广泛、不透水面积较少[图 1(b)]。地表河流长约 1.2 km,平均宽约 3.5 m,河道形状类似梯形断面,河槽有杂草和小鹅卵石。

研究对象三脚洞全长约 2.5 km,洞内河流高差 17.9 m,洞内通风良好,空气潮湿,常年有水流,部分地区积水较深,空间大小变化有致,钟乳石资源十分丰富,有七彩钟乳,洞口景观奇特,具有很好的景观开发条件。此次研究节选三脚洞入口处约 30 m 长三维模型[图 1(d)],数据源于云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心,2017 年年底工程研究中心利用三维激光扫描技术已完成宜良九乡三角洞三维立体测绘的试验项目,建成的高分辨率的三维模型如图 1(c)所示,详细的溶洞三维重建技术细节见参考文献[14-16]。此次研究使用的三维模型为三角网格格式(.stl),为将三维模型转入有限元软件进行数值分析对三维模型格式进行转换,利用三角网生成 NURBS 曲面输出 step 格式后导入 Fluent 中进行三维数值模拟。溶洞点云数据采集时间为旱季,接溶洞入口的来水河流未供水,洞内水流均来自复杂难测的地下水,根据激光扫描水面的散射特性,以暗河来水水面为基底建模即可在一定程度上减少暗河来水在洪水演进水位变化研究中的影响。

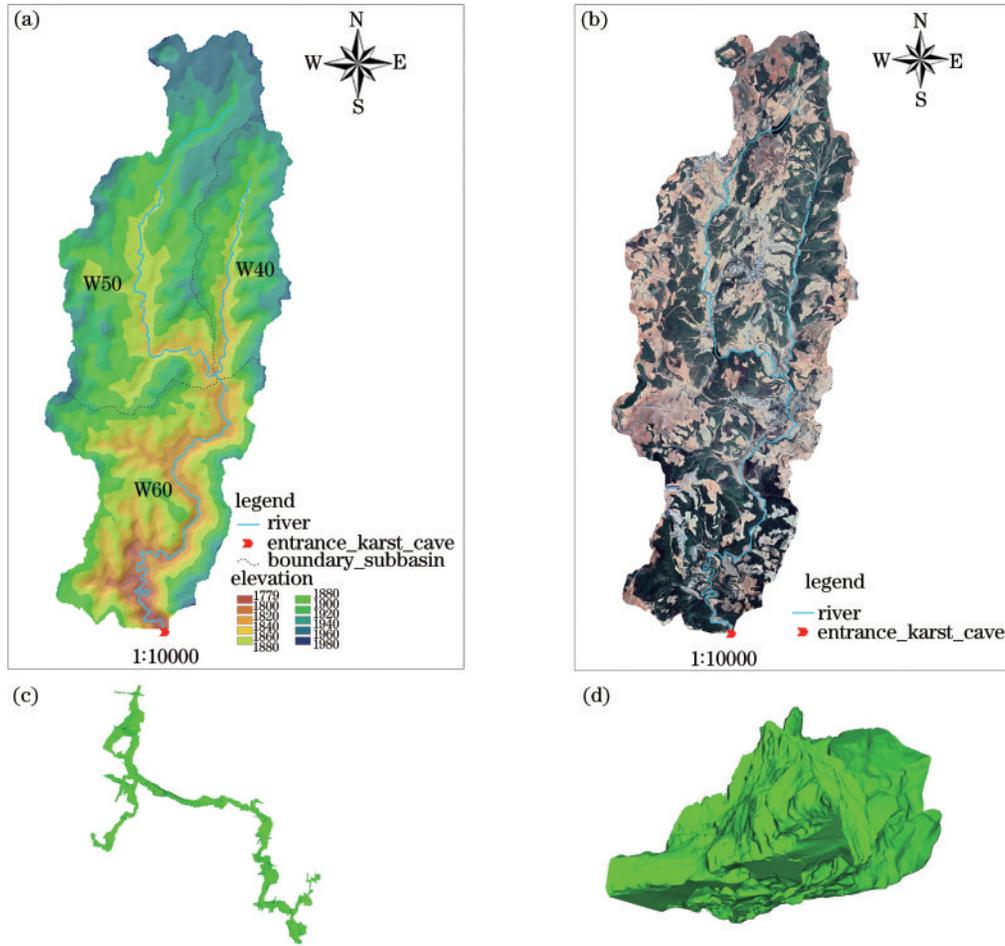


图 1 研究区基本信息。(a)高程;(b)土地利用;(c)溶洞流域;(d)实验段模型

Fig. 1 General information of study area. (a)Elevation; (b) land use; (c) karst cave basin; (d) model of experimental section

3 研究方法

此次研究以宜良三脚洞为例,首先基于云南暴雨洪水查算手册进行小流域设计暴雨计算,其次将设计

暴雨结果输入 HEC-HMS 计算研究区域地表河流出水口即三脚洞入口处的洪水过程,最后在有限元分析软件 Fluent 中建立溶洞内的三维洪水演进模型提取安全水位的坐标。具体过程如图 2 所示。

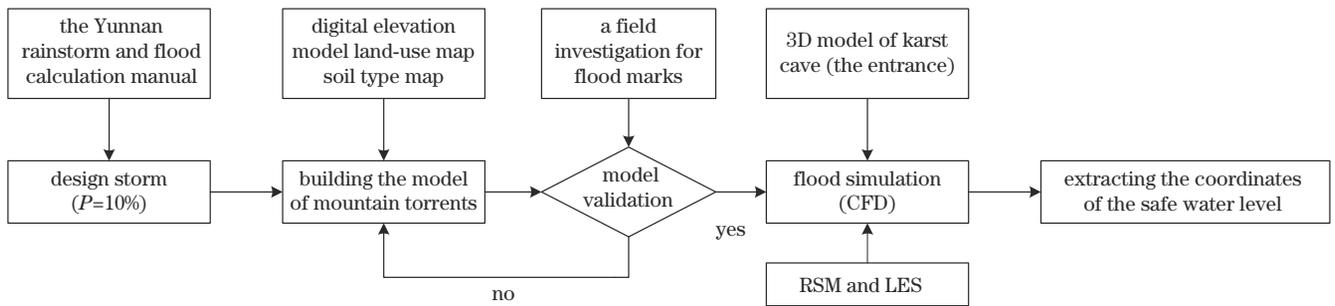


图 2 溶洞安全水位提取流程图

Fig. 2 Flow chart for extracting safe water level of karst cave

3.1 设计暴雨

据我国最新旅游设施的防洪标准,市县级或一般保护价值知名度低、受淹后损失较小,其防洪标准[重现期(年)]为 10~30^[17]。基于此标准及溶洞设施维护较频繁的特点此次研究涉及的暴雨设计取十年一遇($P=10\%$)。此次研究基于云南暴雨洪水查算手册进行小

流域设计暴雨计算。按云南暴雨洪水查算手册计算 24 h 设计暴雨量,1、6、24 h 设计点暴雨量的计算公式为

$$H_p = K_p \overline{H}_t, \quad (1)$$

式中: H_p 是暴雨历时 t 分别为 1、6、24 h、频率为 P 的设计点暴雨量,单位为 mm; \overline{H}_t 是 t 分别为 1、6、24 h 的暴雨均值; K_p 是倍比系数查表值。计算参数及结果如

表 1 所示。其中, C_{vt} 为变差系数, C_{vs} 为偏差系数, $H_{t10\%}$ 为十年一遇设计点暴雨结果。

表 1 设计点暴雨参数及结果(1、6、24 h)
Table 1 Design parameters and results of point rainstorm (1, 6, 24 h)

t/h	\bar{H}_t/mm	C_{vt}	C_{vs}	$H_{t10\%}/mm$
1	35.0000	0.3993	$3.5C_{v1}$	53.55
6	59.9962	0.4479	$3.5C_{v6}$	95.99
24	74.7485	0.4496	$3.5C_{v24}$	119.6

其他历时的设计点暴雨量的表达式如下。 t 为 2、3、4、5 h 时,

$$H_{tp} = H_{24p} 4^{-N_{2p}} 6^{-N_{3p}} t^{N_{2p}}, \quad (2)$$

$$N_{2p} = 1.285 \lg \frac{H_{6p}}{H_{1p}} \quad (3)$$

t 为 7, 8, ..., 23 h 时,

$$H_{tp} = H_{24p} 24^{-N_{3p}} t^{N_{3p}}, \quad (4)$$

$$N_{3p} = 1.661 \lg \frac{H_{24p}}{H_{6p}} \quad (5)$$

面雨量(H_{Ftp})的表达式为

$$H_{Ftp} = \alpha_{Ft} H_{point, tp}, \quad (6)$$

式中: α_{Ft} 是集水面积(F)的不同 t 的点面雨量折算系数。把点暴雨量按式(6)转换为面暴雨量后的结果如表 2 所示。

3.2 构建山洪模型

HEC-HMS 程序可以模拟自然或者人工状态下流域降雨——径流及洪水演进过程,对于不同的水文过程可以有针对性地选择合适的模型建模。本研究选用 HEC-HMS 计算研究区域地表河流出水口即三脚洞入口处的洪水过程。由于研究区域面积较小、缺乏实测资料,所以要尽量精简模型,同时为能准确提取溶洞安全水位,选择的模拟方案还要能够快速准确地模拟洪峰、洪量和峰现时间。基于以上原则,此次研究选取 Green-Ampt 损失模型、SCS 单位线法、动波模型进行地表河流的产汇流计算。通常情况下,洪水预防和响应不需要考虑基流,因本研究的目的是为溶洞的开发、营运提供安全水位的参考数据,故在此次研究中不考虑基流。选取模型的参数大部分可从下垫面信息和地表河流的几何特征中提取,参数获取难度不大。

3.2.1 Green-Ampt 模型

Green-Ampt 模型基于 Darcy 定律描述初始均匀干燥土体在恒定水头作用下的入渗过程,即湿润锋面(土体干湿分界面)不断推进的过程。该模型中, t 时段内透水地表的降雨损失的表达式为

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\varphi - \theta_i) S_f}{F_t} \right], \quad (7)$$

式中: f_t 为时段内的降雨损失; K 为饱和渗透系数; $\varphi - \theta_i$ 为土壤湿度亏缺量; S_f 为浸润面负压; F_t 为 t 时段内

表 2 面雨量转换结果

Table 2 Results of transformation of areal rainfall

t/h	$H_{point, tp}$	α_{Ft}	H_{Ftp}
24	119.6	98.03	117.2439
23	118.7953	97.99	116.4075
22	117.9605	97.98	115.5777
21	117.0932	97.97	114.7162
20	116.1904	97.96	113.8201
19	115.2488	97.95	112.8862
18	114.2646	97.86	111.8193
17	113.2332	97.91	110.8666
16	112.1494	97.87	109.7606
15	111.0071	97.83	108.5982
14	109.7988	97.79	107.3722
13	108.5156	97.76	106.0849
12	107.1464	97.69	104.6713
11	105.6776	97.66	103.2047
10	104.0918	97.58	101.5728
9	102.3665	97.51	99.8176
8	100.4716	97.45	97.9096
7	98.3658	97.37	95.7788
6	95.99	97.4	93.4943
5	90.4553	97.22	87.9406
4	84.1144	97.13	81.7003
3	76.5909	97.11	74.3774
2	67.1156	96.92	65.0484
1	53.55	96.7	51.7829

的累积损失。

HEC-HMS 中的 Green-Ampt 损失模型具有可从土壤信息和土地利用现状信息中估算无仪器记录集水区参数的优点^[18],使用该模型时需要指定的参数有土壤初始含水量、饱和土壤含水量、湿润锋水吸力、饱和水力传导度和不透水面积比。

3.2.2 SCS 单位线模型

无量纲单峰的单位线是 SCS 单位线模型的核心,单位线峰值(U_p)和峰现时间(T_p)的关系为

$$U_p = C \times \frac{A}{T_p}, \quad (8)$$

式中: A 为流域面积; C 为单位转换常数(SI 单位时为 2.08)。

峰现时间 T_p 与单位净降雨历时(Δt)、洪峰滞时(t_{lag})的关系为

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (9)$$

HEC-HMS 通过子流域洪峰滞时 t_{lag} 找出单位线峰值,洪峰滞时的表达式为

$$t_{lag} = CC_t (LL_c)^{0.3}, \quad (10)$$

式中: L 为流域干流长度; L_c 为流域中心至流域出口的

距离; C 为转换常数 (SI 单位时为 0.75); C_i 为停滞系数, 一般情况取 1.8~2.2。

3.2.3 动波模型

动波模型可以在平面上表示地面流的特性, 也能够用于模拟集水区河道中水流的特性, 并且该模型所需信息都是基于集水区的物理特性, 可以通过测量和观测获取。由于缺乏研究区域的历史水文资料和连续观测资料, 动波模型因其参数特点成为此次研究计算的最佳选择。

假设河床坡度等于摩擦坡降, 将圣维南方程组简化得到动波模型^[19]。使用动量方程和连续方程可以定义动波模型。一维动量方程为

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (11)$$

式中: S_f 为能量梯度; S_0 为底坡度; V 为流速; y 为水力深度; x 为径流长度; t 为时间, g 为重力加速度; $\frac{\partial y}{\partial x}$ 为压力梯度; $\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$ 为对流加速度; $\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}$ 为局部加速度。

在动波模型中, 动量方程一般采用曼宁方程:

$$Q = \frac{CR^{2/3} S_f^{1/2}}{N} \cdot A_h, \quad (12)$$

式中: Q 为流量; R 为水力半径; A_h 为横断面积; N 为阻力系数。

对于浅水流, 底坡和能量梯度近似相等, 加速度效

应可以被忽略, 因此式 (11) 可以简化为

$$S_f = S_0. \quad (13)$$

故式 (12) 可以简化为

$$Q = \alpha A_h^m, \quad (14)$$

式中: α 和 m 是水流几何和表面粗糙度有关的参数。

一维连续方程表现形式如下:

$$A_h \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + VB \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + B \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = q, \quad (15)$$

式中: B 为水面宽; q 为单位长度河道的侧向入流量; $A_h \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$ 为棱柱体蓄水量; $VB \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$ 为楔形蓄水量; $B \cdot \frac{\partial y}{\partial t}$ 为上升速率。

适合平面浅水流的一维连续方程可简化为

$$\frac{\partial A_h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q. \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (14) 中可得运动波近似方程:

$$\frac{\partial A_h}{\partial t} + \frac{1}{\alpha m} A_h^{m-1} \cdot \frac{\partial A_h}{\partial x} = q. \quad (17)$$

动波河道演进的依据是连续方程和动量方程的有限差分近似法, 有限差分近似法可保证方程解的精度和稳定性。使用动波模型计算河道水流演进的所需参数如表 3 所示, 这些参数可从上一部分的净雨计算、卫星影像、数字高程模型 (DEM) 量测及现场调查等途径获取。

表 3 动波模型所需参数

Table 3 Parameters of kinematic wave

Overland flow planes	Collector channels and subcollector channels	The main channel
Typical length	Area drained by channel	Channel length
Representative slope	Representative channel length	Description of channel shape
Overland-flow roughness coefficient	Description of channel shape	Principle dimensions of channel cross section
Area represented	Principle dimensions of representative channel cross section	Channel slope
by plane	Representative channel slope	Representative Manning's roughness coefficient
Loss model parameters	Representative Manning's roughness coefficient	Identification of upstream inflow hydrograph (if any)

3.4 溶洞洪水三维演进方法

基于有限元分析建立溶洞内的三维洪水计算模型, 采用 VOF 模型对水流进行自由表面追踪, 相同解算条件下使用 Reynolds 应力方程模型 (RSM) 和大涡模拟 (LES) 两种湍流模型模拟水流的演进过程。

3.4.1 VOF 模型

VOF 模型是一种在固定欧拉网格下的表面跟踪方法, 可有效克服静压假定和刚盖假定对自由水面剧烈变化引起的压力场畸变, 更详细地描述洪水过程中水面的变化特性。在计算域内, 模型中的每一个相都引入体积分数 F (空间和时间的函数), 即

$$F = F(x, y, z, t). \quad (18)$$

在离散网格内, F 取值是网格内各相流体的体积与能够被流体通过的空间体积的比值。可以通过求解 F 的输运方程来实现水汽界面的追踪:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial F}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial F}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial F}{\partial z} = 0, F \in [0, 1], \quad (19)$$

式中: u, v, w 为笛卡儿坐标系下速度矢量在 x, y, z 方向的分量; t 为时间。

3.4.2 Reynolds 应力方程模型

RSM 模型主要应用在特征为 Reynolds 应力各向异性的流动中, 相对于单方程和双方程模型, RSM 更加严格地考虑了流线曲率、漩涡、有旋流场和应变率的快速变化带来的影响, 具有使对复杂流动的模拟具有

更高精度的可能性。

RSM 直接构建表示 Reynolds 应力的方程,然后联立求解时均连续方程、Reynolds 方程、时均运输方程及新建立的 Reynolds 应力方程^[20]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i, \quad (21)$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' \phi'} \right) + S, \quad (22)$$

式中: u 是流速; ρ 是密度; μ 是动力黏度; ϕ 是标量; Γ 是广义扩散系数; S 是广义源项; $i, j=1, 2, 3$ 。

在使用 RSM 之前必须先求得 Reynolds 应力运输方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = & -\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_i' u_j' u_k'}) + \\ & \overline{p' u_i'} \delta_{kj} + \overline{p' u_j'} \delta_{ik} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i' u_j'}) \right] - \rho (\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \\ & \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}) - \rho \beta (g_i \overline{u_j' \theta} + g_j \overline{u_i' \theta}) + p' \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) - \\ & 2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u_i' u_m'} e_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} e_{jkm}), \quad (23) \end{aligned}$$

式中: δ_{ij} 是 Kronecker delta; e_{ikm} 是转换符号; β 是热膨胀系数; g_i 是重力加速度在第 i 方向的分量; θ 是变量,可用温度、能量的湍动 Prandtl 数等求解; p 是压力。

Reynolds 应力运输方程含有湍动能 k 和耗散率 ϵ , 需补充 k 和 ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \epsilon, \quad (24)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{1}{2} (P_{ij} + C_{3\epsilon} G_{ij}) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (25)$$

式中: P_{ij} 是剪应力产生项; G_{ij} 是浮力产生项,分别对应 Reynolds 应力运输方程中等号右边第 3、4 项; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ϵ 为常数,取值分别为 1.44、1.92、0.09、0.82、1.0。

3.4.3 大涡模拟

相较于 Reynolds 平均法 (RANS), LES 可以模拟更大范围的湍流大尺度运动, LES 所用的湍流亚网格应力模型受边界的几何形状和流动类别的影响较小,比 RANS 方法所用的 Reynolds 应力模型更具普适性。在有限的计算资源下,相对于直接数值模拟方法, LES 可以计算更大雷诺数的算例,节省计算资源的同时又能够保证足够的计算精度。

在 LES 中不对全尺度范围上涡的运动进行模拟,而是将湍流场分离为由大尺度解析结构和小尺度非解析结构的贡献。湍流中的大尺度涡用瞬时的 Navier-Stokes 方程直接模拟,小尺度涡不直接模拟,而是通过近似的模型来考虑小涡对大涡的影响,这实际上是降低计算资源。然而, LES 也存在方程封闭问题,例如亚格子应力。这些物理量由许多模型来模化,在这方面 Rogallo & Moin (1984)^[21], Lesieur & Metais (1996)^[22] 和 Meneveau & Katz (2000)^[23] 曾有杰出的文章表述。

大涡运动方程。在 LES 中使用滤波函数 $G(x, x')$ 将每个瞬时变量 ϕ 分成大尺度的平均分量 $\bar{\phi}$ 和小尺度分量 ϕ' :

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V} \int_D \phi dx', \quad (26)$$

式中: D 是流动区域; x' 是实际流动区域中的空间坐标; x 是滤波后的大尺度空间上的空间坐标; V 是表示控制体积所占几何空间的大小。

用 $\bar{\phi}$ 表示的滤波函数处理瞬时状态下的 Navier-Stokes 方程和连续方程得到 LES 中的控制方程组如下:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (27)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (28)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i' u_j'} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad (29)$$

式中: τ_{ij} 为亚格子尺度应力 (SGS), 表达了小尺度涡的运动对所求解的运动方程的影响。

为了封闭 LES 中的控制方程组引入亚格子尺度模型,根据 Smagorinsky 的基本 SGS 模型,假定 SGS 应力形式如下:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2u_t \bar{S}_{ij}, \quad (30)$$

式中: u_t 是亚格子尺度的湍动粘度,具体计算参见文献[24]。

3.4.4 瞬态 PISO 解算

压力的隐式算子分割 (PISO) 算法是 Issa^[25] 于 1986 年建立针对非稳态可压流动的无迭代计算的压力速度计算程序时提出的,如今 PISO 算法也广泛应用于稳态问题的迭代计算中。PISO 算法在解决瞬态问题时有明显优势,即使在大时间步长和动量、压力松弛因子为 1 的时候也能保证计算稳定。PISO 算法比较适合瞬态不可压缩流体。当时间步长足够小时,就不需要人工增加对角矩阵系数,使之对角占优,只需要做一次动量方程求解,然后对压力方程及速度修正方程进行迭代循环即可收敛。图 3 为调用 PISO 算法计算瞬态问题的流程。

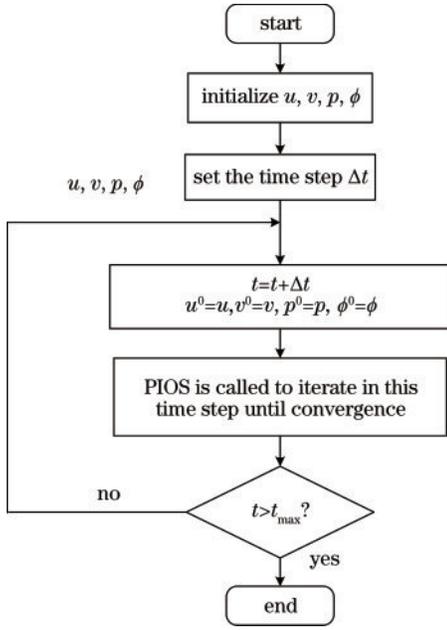


图 3 PISO 算法计算瞬态问题流程图

Fig. 3 Flow chart of transient problems calculated by PISO

4 分析与讨论

4.1 山洪模型分析

此次研究从地理信息中提取物理参数输入山洪模型,通过实地调查确定土壤类型及流域初始土壤含水量,模型参数如表 4 所示。从地理信息中提取物理参数在 ArcGIS 完成。在卫星影像上完成不透水地物如公路、房屋等及河流的矢量化,获取不透水区域面积在流域面积中的占比及河流的长度、宽度等参数信息。为对流域进行物理描述,基于流域所在区域的高精度 DEM (12.5 m) 使用 ArcGIS 插件 HEC-GeoHMS 提取研究对象所在流域的集水范围、物理特性并划分各子流域,提取结果如图 1(a) 所示。以十年一遇设计暴雨数据为计算对象,利用该模型计算溶洞入口处的洪水过程线,设计暴雨数据及模拟结果如图 4 所示,再通过该场次在洞前 12 m 三维河槽的洪水演进痕迹和实地调查洪水痕迹比对验证洪水模型的可靠性,图 5 为比对结果。结果表明,洞前河槽三维洪水演进痕迹和实际调查洪痕基本吻

表 4 山洪模型参数

Table 4 Parameters of model of mountain torrents

Sub-basin number	Initial content	Saturated content	Suction /mm	Conductivity / $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	Impervious /%	Lag time /min
W60	0.304	0.41	446	2.6	3.33	194.33
W50	0.304	0.41	446	2.6	3.44	271.49
W40	0.304	0.41	446	2.6	1.54	267.67

4.3 安全水位坐标提取

追踪洞内洪水演进过程,从溶洞入口 8 m 处开始每间隔 4 m 记录共 5 个横截面,5 个横截面处模拟结

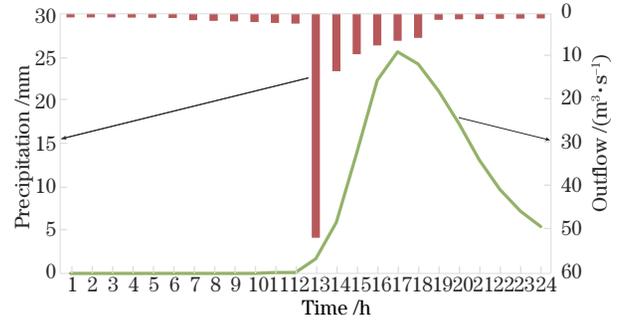


图 4 设计暴雨数据及模拟结果

Fig. 4 Design storm data and simulation results

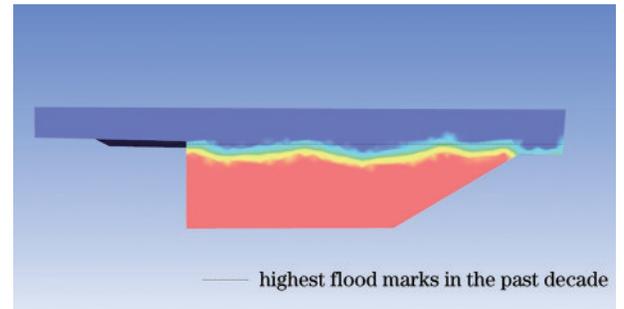


图 5 模拟洪水与实调洪痕关系图

Fig. 5 Relationship between flood simulation and real flood marks

合,此次构建的洪水模型在一定程度上适用于该研究区域的洪水计算。

4.2 洞内洪水演进分析

通过上述构建的山洪模型计算溶洞入口处十年一遇的洪水过程,并将该洪水过程作为洞内洪水演进的输入条件,在相同解算条件下,分别使用 RSM 和 LES 这两种三维湍流模型在溶洞三维模型中进行水流过程的数值模拟,模拟结果显示基于这两种湍流模型的洪水模拟符合水流一般特性及溶洞束水的特性,最终模拟结果基本一致,如图 6 所示。但是基于计算时间、收敛速度及收敛效果、模拟结果的准确性等原则对比两种湍流模拟结果时发现,LES 相对 RSM 计算时间减少了约 1/4,二者计算步长不足 100 步已收敛到 1×10^{-6} ,但是 LES 的收敛效果及收敛速度都高于 RSM (图 7)。基于此次实验结果,此次研究推荐溶洞三维湍流模拟使用 LES 模型。

果如图 8 所示。以横截面水位信息为基准,结合模拟结果的节点坐标提取结果,将洪水演进到达的最高位置映射到溶洞三维模型上,提取洪水最高位置的

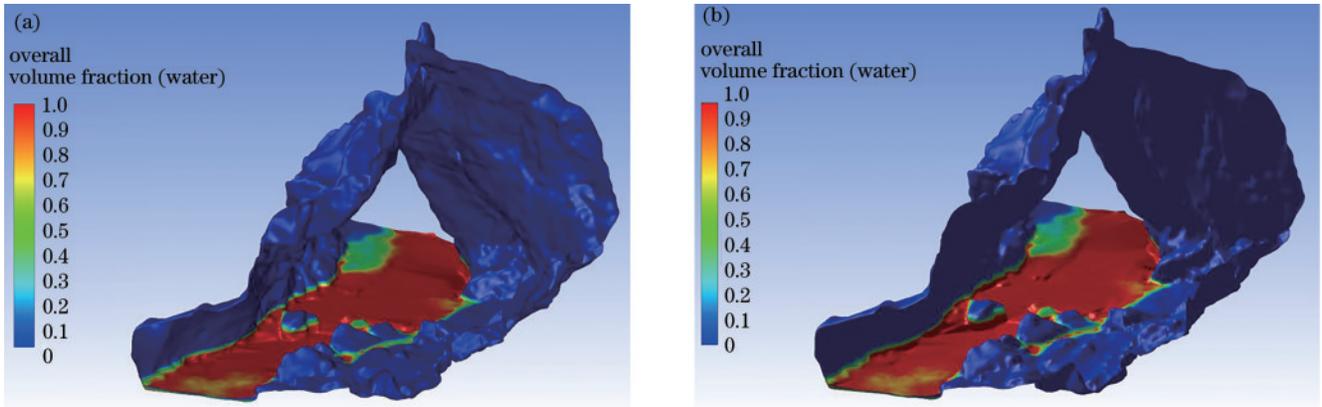


图 6 LES 和 RSM 模拟结果图。(a) RSM; (b) LES
Fig. 6 LES and RSM simulation results. (a) RSM; (b) LES

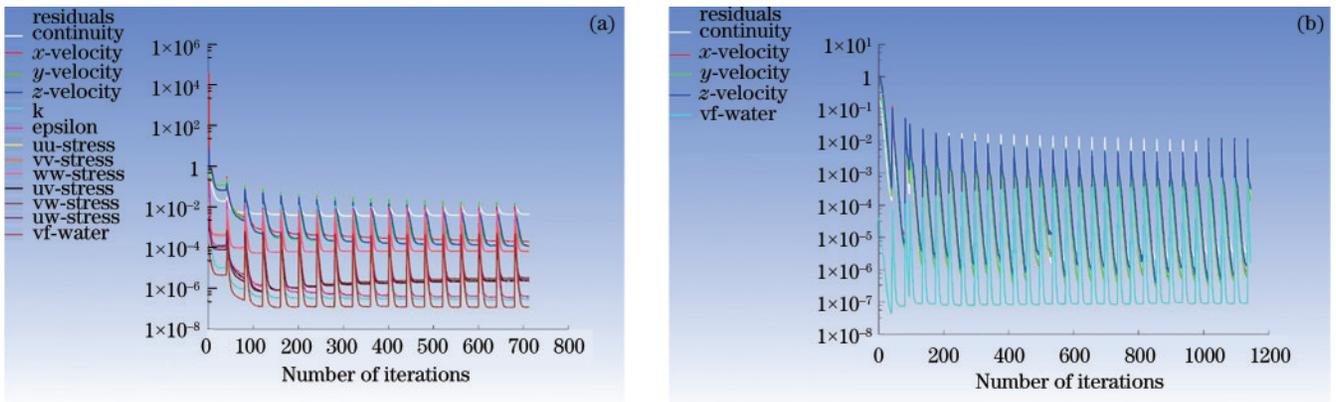


图 7 RSM 和 LES 残差收敛曲线图。(a) RSM; (b) LES
Fig. 7 Convergent curves of residuals of RSM and LES. (a) RSM; (b) LES

三维地理空间坐标,如表 5 所示,由此给出该溶洞段的十年一遇水位安全坐标,为溶洞开发提供更合理的安全水位参考数据,表 5 中*用于隐去地理坐标的信息。

表 5 安全水位坐标

Table 5 Coordinates of the safe water level

No.	X /m	Y /m	Z /m	No.	X /m	Y /m	Z /m
1	****031.711	****69.153	1806.111	26	****045.615	****51.687	1806.125
2	****032.149	****68.719	1806.11	27	****046.776	****50.032	1806.134
3	****032.306	****68.326	1806.116	28	****048.017	****48.741	1806.134
4	****032.941	****67.642	1806.133	29	****053.65	****51.118	1806.146
5	****033.465	****66.856	1806.118	30	****053.289	****51.718	1806.134
6	****033.388	****65.901	1806.12	31	****052.374	****52.657	1806.146
7	****033.419	****64.715	1806.113	32	****051.465	****53.578	1806.132
8	****033.217	****63.963	1806.119	33	****050.276	****54.595	1806.135
9	****034.029	****61.804	1806.115	34	****048.856	****55.186	1806.126
10	****034.683	****60.311	1806.129	35	****047.65	****56.127	1806.128
11	****034.478	****59.737	1806.131	36	****046.026	****58.943	1806.13
12	****034.048	****59.416	1806.125	37	****044.629	****60.552	1806.127
13	****034.22	****58.97	1806.118	38	****044.065	****61.891	1806.126
14	****034.996	****58.432	1806.117	39	****043.311	****62.555	1806.13
15	****035.897	****57.593	1806.129	40	****042.581	****62.991	1806.124
16	****036.437	****56.66	1806.143	41	****042.432	****63.419	1806.12
17	****037.084	****55.758	1806.136	42	****041.649	****63.825	1806.119

表 5 (续)

No.	X /m	Y /m	Z /m	No.	X /m	Y /m	Z /m
18	****037.986	****55.974	1806.14	43	****041.017	****65.098	1806.118
19	****038.369	****55.433	1806.123	44	****040.611	****66.751	1806.116
20	****038.726	****54.45	1806.127	45	****040.089	****67.768	1806.115
21	****039.302	****53.898	1806.126	46	****037.905	****72.199	1806.155
22	****040.287	****53.611	1806.125	47	****037.72	****71.536	1806.132
23	****042.722	****51.514	1806.12	48	****038.256	****70.318	1806.129
24	****043.523	****53.058	1806.112	49	****038.833	****69.497	1806.112
25	****045.007	****53.68	1806.133	50	****039.521	****69.203	1806.11

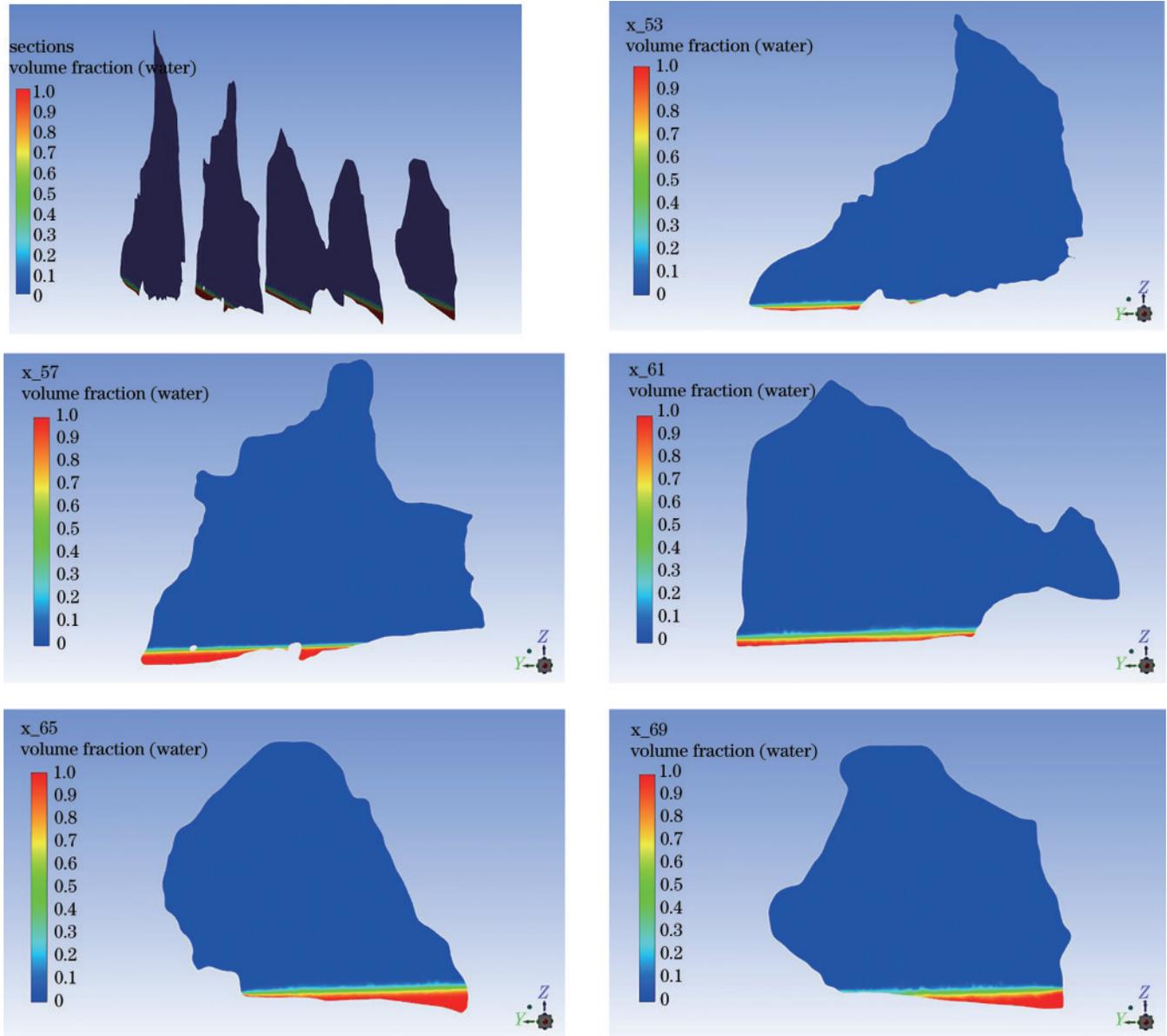


图 8 模拟结果横截面图

Fig. 8 Cross-sections of simulation results

5 结 论

此次研究以云南省昆明市三脚洞为实验对象,构建了适用于缺乏详细水文资料区域的山洪模型和岩溶

洞穴内的洪水演进模型。结果表明,洪水过程计算和洪水演进过程中各断面水位无异常,整体流态稳定。三维的溶洞模型为溶洞的洪水分析提供了真实的模拟场所,计算机数值模拟则有效地量化了溶洞洪水,通过

二者的结合可以直观、动态地重现溶洞的水位变化过程。基于三维地理空间信息建立的以洪水数值模拟分析为基础的溶洞安全水位提取方法为溶洞开发与研究提供了新的安全水位获取思路,解决了溶洞防洪中决策不易展示的难题,可有效辅助溶洞科学合理开发。缺乏详细的水文资料导致溶洞洪水研究极具挑战性,因此,长期良好的综合监测及从多种途径寻找有效的输入条件是溶洞洪水分析计算的重点。

参 考 文 献

- [1] Hartmann A. Experiences in calibrating and evaluating lumped Karst hydrological models[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2017, 466(1): 331-340.
- [2] 任启伟. 基于改进 SWAT 模型的西南岩溶流域水量评价方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
Ren Q W. Water quantity evaluation methodology based on modified SWAT hydrological modeling in southwest Karst area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2006.
- [3] 梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60-67.
Liang G X, Qin X Q, Cui Y L, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in Karst regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 60-67.
- [4] Yu L L. Investigation of groundwater flow in Karst aquifer and application of geomorphologic Karst model [D]. Gainesville: University of Florida, 2010.
- [5] Nannoni A, Vigna B, Fiorucci A, et al. Effects of an extreme flood event on an alpine Karst system[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125493.
- [6] 赵亮, 胡杰, 刘汉, 等. 基于语义分割的深度学习激光点云三维目标检测[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710004.
Zhao L, Hu J, Liu H, et al. Deep learning based on semantic segmentation for three-dimensional object detection from point clouds[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710004.
- [7] 谭舸, 花向红, 陶武勇, 等. 基于激光跟踪仪的多测站地面激光扫描点云配准方法[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710002.
Tan G, Hua X H, Tao W Y, et al. Multiview terrestrial laser scanning point cloud registration method based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710002.
- [8] 雷相达, 王宏涛, 赵宗泽. 整合迁移学习与全卷积网络的小样本机载激光雷达点云分类[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1610001.
Lei X D, Wang H T, Zhao Z Z. Small-sample airborne LiDAR point cloud classification based on transfer learning and fully convolutional network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1610001.
- [9] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [10] Zhang S H, Wang T W, Zhao B H. Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network[J]. Journal of Hydrology, 2014, 509: 406-415.
- [11] 冶运涛, 梁犁丽, 曹引, 等. 流域洪水演进实时高效可视化仿真方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 271-286.
Ye Y T, Liang L L, Cao Y, et al. A real-time and efficient method of visual simulation of flood routing in river basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 271-286.
- [12] 李莲芳, 王慷林, 段安安, 等. 昆明宜良尖山云南松林的土壤理化特性[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(1): 146-152.
Li L F, Wang K L, Duan A A, et al. Physical and chemical properties of pinus yunnanensis forest soil in Jianshan, Yiliang, Kunming[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(1): 146-152.
- [13] 樊风, 段玮, 杨家康. 云南土壤湿度长期变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 2015, 26(4): 409-421.
Fan F, Duan W, Yang J K. Preliminary results on long-term soil moisture variation in Yunnan[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(4): 409-421.
- [14] 柏宏强. 岩溶洞穴多分辨率三维重建技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
Bai H Q. Research on multi-resolution 3D reconstruction technology of Karst cave[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [15] 柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 基于三维激光点云特征线提取的溶洞多分辨率三维重建方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 202802.
Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. Multi-resolution 3D reconstruction of Karst caves based on the feature line extraction of 3D laser point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 202802.
- [16] 柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 基于岩溶洞穴复杂表面的三角网格拼接与融合方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152802.
Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. Splicing and fusion of triangular meshes for complex surface of Karst cave[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 152802.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 防洪标准: GB 50201—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for flood control: GB 50201—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [18] 李向新. HEC-HMS 水文建模系统原理·方法·应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 34-41.
Li X X. Principle, method and application of HEC-HMS hydrological modeling system[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015: 34-41.
- [19] Lighthill M J, Whitham G B. On kinematic waves I.

- Flood movement in long rivers[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1955, 229(1178): 281-316.
- [20] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 132-137.
Wang F J. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 132-137.
- [21] Rogallo R S, Moin P. Numerical simulation of turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16: 99-137.
- [22] Lesieur M, Metais O. New trends in large-eddy simulations of turbulence[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1996, 28: 45-82.
- [23] Meneveau C, Katz J. Scale-invariance and turbulence models for large-eddy simulation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32: 1-32.
- [24] Felten F, Fautrelle Y, Terrail Y D, et al. Numerical modelling of electromagnetically-driven turbulent flows using LES methods[J]. Applied Mathematical Modelling, 2004, 28(1): 15-27.
- [25] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40-65.