

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.007

洪水淹没范围数据与动力学模型的融合

赖锡军¹,李纪人²

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008;
2.北京大学数字中国研究院数字流域研究中心,北京 100871)

摘要:为将遥感数据定量地应用于洪水动力过程的分析,拓展遥感数据的应用潜力,开展了洪水淹没范围数据与洪水动力学模型融合的方法研究.以糙率作为控制变量,构建了基于新形式代价函数的变分模型来融合洪水淹没范围数据和洪水动力学模型.采用溃堤洪水过程的合成观测数据,在敏感性分析基础上开展了淹没范围数据同化试验.结果表明,不同区块的糙率对洪水过程的影响是不同的,洪水漫滩范围对在滩地入流口近区主流向上的糙率最为敏感.运用研制的变分模型可以将洪水淹没范围的数据信息自动融入洪水动力学模型,识别糙率参数,更好地实现洪水过程的分析.

关键词:变分数据同化 洪水淹没范围 水动力学模型 代价函数 敏感性分析

中图分类号:TV131.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)05-0529-05

卫星、航空遥感具有高效、快速和全面的特点,它在洪水监测、洪水灾害评估和风险分析方面发挥着越来越重要的作用,这些遥感数据已被广泛应用于灾害的监测、预警和灾害的损失评估,以及平原湖泊和洪泛平原的蓄水量等水文水资源的科学研究工作中^[1-5].洪水遥感监测数据也已逐步应用于日常的业务运行,其中洪水淹没范围的遥感监测已具有较高的精度和分辨率.目前,洪水遥感数据在辅助模型结果率定方面开始得到应用^[6-7],而且出现了遥感数据在洪水动力学模型上同化应用的初步尝试^[8-9].针对洪水遥感监测的特点,为将遥感监测数据定量地应用于洪水动力过程的分析,拓展遥感监测数据的应用潜力,开展了洪水淹没范围数据与洪水动力学模型融合的方法研究.本文以糙率为控制变量,通过提出的新代价函数建立了洪水淹没范围数据的变分同化模型,基于溃堤洪水过程的合成观测数据,开展了数值试验对比研究.结果表明,洪水淹没范围的数据信息自动融入洪水动力学模型,识别糙率参数,更好地实现洪水过程的分析.

1 二维洪水变分模型

变分模型由直接模拟模型(direct model)或正向积分模型(forward model)、伴随模型(adjoint model)或反向积分模型(inverse model)和相应的代价函数与控制变量等要素构成.

1.1 洪水动力学模型

以二维浅水方程作为基本方程的洪水动力学模型常被用于分析、评估与预测洪水的工程应用中.其常用的守恒型方程可写成

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = B(U) \tag{1}$$

其中 $U = (h, hu, hv)^T$ $F = (hu, hu^2 + gh^2/2, huv)^T$ $G = (hv, huv, hv^2 + gh^2/2)^T$
 $B = (0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}))^T$ $S_{0x} = -\partial Z_b/\partial x$ $S_{0y} = -\partial Z_b/\partial y$

式中: x, y ——笛卡儿直角坐标系的横坐标和纵坐标; t ——时间; U ——方程的状态变量向量; h ——水深; u, v —— x, y 方向的流速; F, G —— x 和 y 方向的通量向量; B ——源项向量; S_{0x}, S_{0y} —— x 和 y 方向的底坡项; Z_b ——床底高程.阻力坡降项 S_{fx} 和 S_{fy} 用曼宁公式计算,其表达式为

$$S_{fx} = \frac{n^2 hu \sqrt{(hu)^2 + (hv)^2}}{h^{7/3}} \qquad S_{fy} = \frac{n^2 hv \sqrt{(hu)^2 + (hv)^2}}{h^{7/3}} \tag{2}$$

收稿日期:2009-04-01

基金项目:国家自然科学基金(50709034) 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK2007611)

作者简介:赖锡军(1977—),男,浙江遂昌人,副研究员,博士,主要从事环境水力学研究.

式中 n 为糙率.

应用非结构网格有限体积法可有效求解二维浅水方程,构建洪水动力学模型.水陆界面动态变化模拟是洪水动力学模型的一个关键环节.为了使该研究更具实用价值,本文以常用的干湿判别法模拟动边界(即以水深为判别标准设定单元界面的类型,并运用相应的方法计算跨界面的法向通量,以保证水量平衡)开展淹没范围的数据同化研究.

1.2 伴随模型

洪水计算中最为关键的参数是糙率.为此,以反映糙率的曼宁系数 n 为控制参数开展研究.对于某一代价函数 $J = \int_0^T \varphi(x, y, t) dt$,可导出与洪水动力学模型相应的伴随模型^[10]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \mathbf{U}} \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}^T}{\partial \mathbf{U}} \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial y} = - \frac{\partial \mathbf{B}^T}{\partial \mathbf{U}} \mathbf{U}^* + \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{U}} \tag{3}$$

并具有相应的终端(初始)条件 $\mathbf{U}^*|_{t=T} = (0, 0, 0)^T$ 和边界条件 $\mathbf{U}^*|_{\Gamma} = 0$. 其中,伴随方程的系数矩阵:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \mathbf{U}} &= \begin{bmatrix} 0 & -u^2 + c^2 & -uv \\ 1 & 2u & v \\ 0 & 0 & u \end{bmatrix} & \frac{\partial \mathbf{G}^T}{\partial \mathbf{U}} &= \begin{bmatrix} 0 & -uv & -v^2 + c^2 \\ 0 & v & 0 \\ 1 & u & 2v \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \mathbf{B}^T}{\partial \mathbf{U}} &= \begin{bmatrix} 0 & gS_{0x} + \frac{7}{3}gS_{fx} & gS_{0y} + \frac{7}{3}gS_{fy} \\ 0 & -gS_{fx} \frac{2u^2 + v^2}{u(u^2 + v^2)} & -gS_{fy} \frac{u}{u^2 + v^2} \\ 0 & -gS_{fx} \frac{v}{u^2 + v^2} & -gS_{fy} \frac{u^2 + 2v^2}{v(u^2 + v^2)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

代价函数对糙率的梯度:

$$\frac{\partial J}{\partial n} = \int_0^T \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} - \frac{\partial \mathbf{B}^T}{\partial n} \mathbf{U}^* \right) dt \tag{4}$$

其中 $\frac{\partial \mathbf{B}^T}{\partial n} = \left(0, -\frac{2}{n}ghS_{fx}, -\frac{2}{n}ghS_{fy} \right)$

伴随方程的引入可显著地减少计算代价函数关于控制参数梯度的花费.只需通过沿时间正向积分二维浅水方程和反向积分其伴随方程各一次,就可求得代价函数的梯度.

1.3 敏感性因子

代价函数对糙率的梯度反映了糙率 n 的变化对代价函数 J 变化的影响程度,即 J 对 n 的敏感性^[11].定义敏感性因子 $S_n = \frac{\partial J}{\partial n}$,则通过 S_n 数值的大小即可判断 n 的影响.

1.4 变分模型

模型方程(1)和其对应的伴随方程(3)结合在一起称为正则方程,加上必要的定解条件构成一个最优控制系统^[12].在该系统内,可通过定义合适的代价函数将动力方程、观测资料 and 统计信息都包含其中.因此,利用正则方程可构建一个融合多种不同信息源的变分模型.其实现框架可参见文献[9].

2 代价函数

干湿判别法是在实践中最为常用的模拟洪水淹没过程的方法,但是由于洪水淹没边界是根据水位判断出来的,而不是关于控制变量可微的函数,故该方法不能直接应用于洪水淹没范围的同化.

为了能够有效地把淹没范围数据加以利用,本文引入新的代价函数形式

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T |f - f_{\text{obs}}|^2 dt \tag{5}$$

其中 $f = \sum_i h_i A_i$

式中: f ——计算区域内的水体体积; i ——有水单元编号.此外,还可引入计算区域内的水流机械能 $f' = \sum_i (h_i + u^2/2g)$ 等量.

值得注意的是, f_{obs} 不是一个直接能够观测到的变量,一可以通过遥感淹没范围数据从历史资料中统计求取(这适合于水流变化比较平缓的湖泊等水域计算);二可以直接引入准观测量,即由观测的淹没范围确定水域边界组合计算结果得到,其思路可参考文献[9]。

3 洪水淹没范围数据变分同化分析

通过本文定义的代价函数,引入了洪水淹没范围的观测信息.为了说明可通过控制变量 n ,基于该代价函数定义来实现洪水淹没范围数据的同化,通常需针对选定的控制变量 n 开展必要的敏感性分析工作,弄清该代价函数对 n 的响应,明确控制变量与代价函数是否与实际问题相匹配.敏感性因子 S_n 的数值大小可以判断定义的代价函数与控制变量的选择是否合适.可从两方面理解:对于给定控制变量的情形, S_n 量值越大,则表明代价函数受控制变量影响程度越大,越有利于观测数据的同化;对于给定代价函数的情形, S_n 值越大,则表明所选取的控制变量对该代价函数越敏感,控制变量准确识别的可能性越高,从而越有助于数据的有效同化和过程的准确分析。

3.1 实验算例

设有一 $10.0\text{m} \times 8.0\text{m}$ 的矩形的平底滩地,如图 1(a)所示,左侧为堤岸,有一宽为 0.4m 小型固定溃口.已知溃口的流量过程(图 1(b)),分析洪水在滩地内的演变过程和计算参数对其的影响.假定计算区域内有 5 种土地利用类型,各地块的糙率从左至右分别为 $0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$ 。

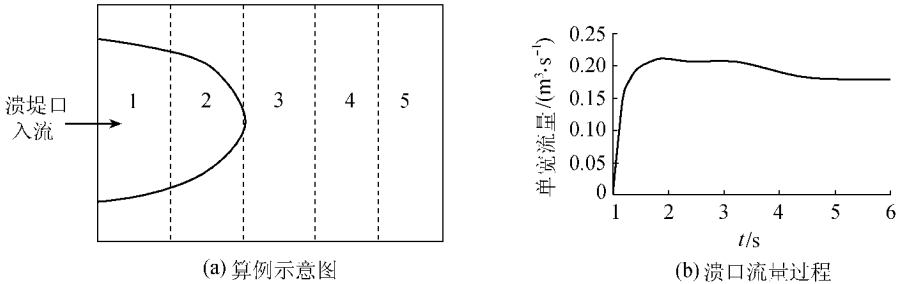


图 1 数值算例
Fig. 1 Dyke breach case for numerical analysis

3.2 敏感性分析

设置由式(5)定义的代价函数作为敏感性分析的响应.以 $t = 5\text{ s}$ 的洪水淹没范围作为观测数据.运行一次伴随模型,即可获取模型参数对响应函数的影响程度,即敏感性因子 S_n 的值。

对于给定的基于土地利用类型的分布式糙率参数,其相应的糙率敏感性见表 1.明显地,临近溃口第一区块的模型对整个洪水淹没范围的影响最大,之后依次有递减趋势。

为了更好地说明分布式糙率参数对洪水淹没范围的影响,计算各网格尺度上糙率参数的敏感因子在整个同化窗内的累积值,并对其进行归一化处理,结果如图 2 所示.可以看出,主流附近糙率参数的影响对洪水淹没范围起主要作用,同时,从纵向的糙率分布看,与按土地利用类型分割得到的结果是一致的。

3.3 淹没范围数据同化分析

利用表 1 所列的糙率参数,取模拟时间为 5 s .运行正向模型计算得到溃堤洪水在滩地上的演进过程.在本文试验中,采用合成数据(由直接模拟模型计算的结果作为观测资料)开展数据同化数值试验,以便扣除观测和数值误差等因素的干扰.根据洪水观测的可能选择,假设可能的观测数据为滩地某一位置处的水位过程(本文试验假设位于滩地中心位置处)和通过遥测手段获取的淹没范围数据。

为了说明洪水淹没范围同化对模型分析结果的影响,以糙率 n 为控制参数,并取 $n = 0.02$ 作为任一区块的初始值代入模型,开展了 5 个方案的数据同化数值试验,见表 2。

每个方案在约 40 步左右的迭代后,代价函数趋于极小化,迭代结束.此时,各数值试验方案获得了理论上最佳的 n 值,对应的洪水过程为同化后的最佳分析.图3为观测数据与不同同化试验方案和基于估计糙

表 1 糙率 n 敏感性			
Table 1 Sensitivities of n			
土地利用 地块	糙率 n	S_n	占总敏感因子的 比例/%
1	0.03	-0.77	59.3
2	0.04	-0.35	12.3
3	0.05	-0.33	10.9
4	0.06	-0.25	6.3
5	0.07	-0.34	11.6

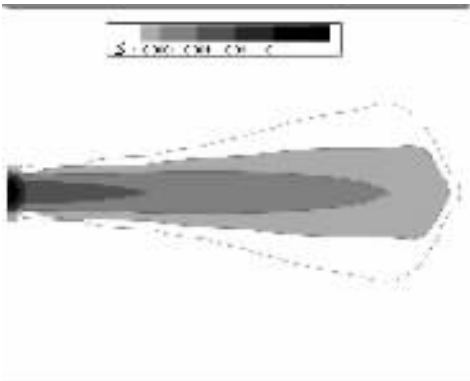


图 2 糙率正则敏感性因子分布
Fig. 2 Spatial distribution of normal sensitivities of n

实际值. 说明淹没范围数据有助于改善洪水过程在空间上的计算精度.

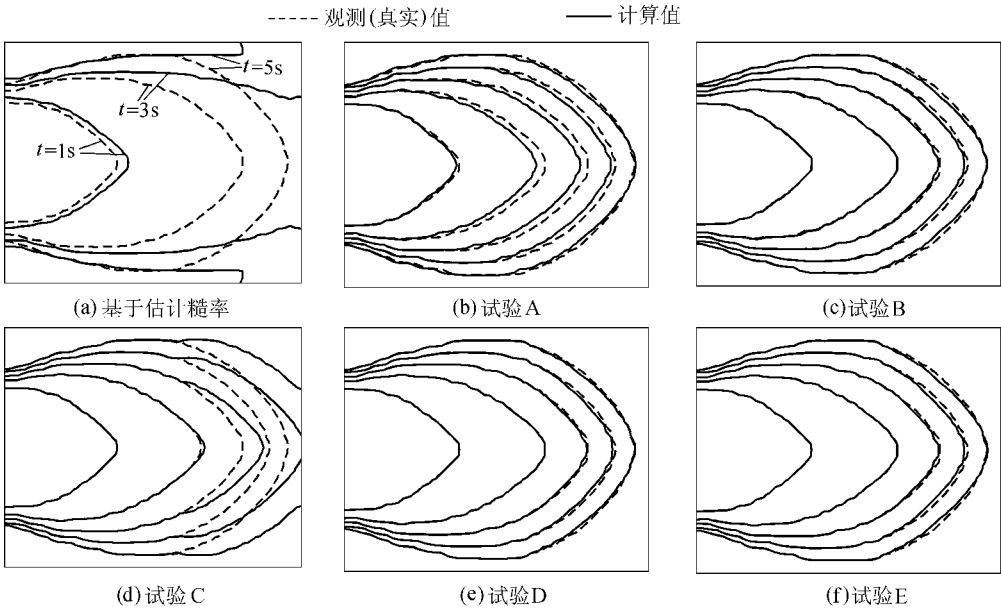


图 3 淹没范围比较
Fig. 3 Comparison of flood extents between observed(dashed line) and calculated(solid line) vaues in different experiments

同化结果的优劣也反映在糙率识别的结果上,见表 3. 从表 3 可以看出,不管同化的是淹没范围还是水位数据,地块 1 的糙率都得到了准确的识别. 但是,中心点水位过程数据只包含上游信息,对其下游的地块 4 和 5 不起作用,因此地块 4 和 5 的糙率保持初始预估值 0.02 不变. 这也可以说明试验 C 在 $t = 3 \sim 5\text{ s}$ 时段内洪水过程计算值与真实值有较大差异(图 3 (d))的原因所在.

试验表明,利用本文提出的方法,单独的淹没范围数据能被用于同化,改善洪水动力过程的预测结果,并识别出各地块糙率 n . 尽管单纯的淹没范围数据所能同化的信息有限,所识别的 n 精度有所欠缺,但是可通过综合同化不同种类数据来弥补相互之间的不足,从而更为准确地分析洪水过程.

4 结 论

a. 不同区块的糙率对洪水过程的影响是不同的,洪水漫滩范围对在滩地入流口近区主流向上的糙率最

表 2 数据同化数值试验方案描述

Table 2 Description of data assimilation experiments	
试验方案	说 明
A	仅有 $t = 5\text{ s}$ 时的淹没范围
B	仅有 $t = 1\text{ s}, 3\text{ s}, 5\text{ s}$ 时的淹没范围
C	仅有中心点的水位观测过程 $Z(t)$ (间隔 1 s 有一个数据点,下同)
D	$t = 5\text{ s}$ 时的淹没范围和 $Z(t)$
E	$t = 1\text{ s}, 3\text{ s}, 5\text{ s}$ 时的淹没范围和 $Z(t)$

率计算过程的比较. 由图 3 可见,经同化后的分析结果有了显著改善. 在仅同化水位过程数据的试验 C 中,水深为 1 mm 的等深线在 $t = 3 \sim 5\text{ s}$ 的时段内与真实值有较大的差异. 尽管由于同化的观测数据不同使得不同试验方案的洪水过程分析结果与实际情况有所差异,但是总体上看,同化淹没范围数据的数值试验计算结果更接近

表 3 糙率优化值比较

Table 3 Optimum values of Manning's roughness coefficients n in different experiments

土地利用 区块	糙率优化值				
	试验 A	试验 B	试验 C	试验 D	试验 E
1	0.031	0.030	0.03	0.030	0.030
2	0.053	0.038	0.040	0.040	0.040
3	0.053	0.054	0.050	0.050	0.050
4	0.028	0.036	0.020	0.042	0.038
5	0.042	0.074	0.020	0.070	0.072

为敏感,该区域的糙率参数影响最为显著.

b. 提出的洪水淹没范围数据同化方法可以将洪水淹没范围的信息自动融入洪水动力学模型. 尽管运用本文变分模型同化淹没数据所识别的糙率 n 精度仍较为欠缺,但是对缺少数据地区洪水过程分析而言仍具有重要价值. 而且,作为面域数据,可以与水位过程等的分析相互弥补不足,改善洪水过程的分析精度.

参考文献:

- [1] SMITH L C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(10): 1427-1439.
- [2] 傅国斌, 刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 547-557. (FU Guo-bin, LIU Chang-ming. Advances in applications of remote sensing data to hydrology[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 547-557. (in Chinese))
- [3] 李纪人, 潘世兵. 信息技术在水利领域应用与展望[J]. 中国水利, 2004(22): 40-42. (LI Ji-ren, PAN Shi-bing. Implementation and outlook of the information technology for water conservancy[J]. China Water Resources, 2004(22): 40-42. (in Chinese))
- [4] 彭定志, 熊立华, 郭生练, 等. MODIS 在水文水资源中的应用与展望[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 683-688. (PENG Ding-zhi, XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian, et al. Advances in applications of MODIS to hydrology and water resources[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 683-688. (in Chinese))
- [5] ALSDORF D E, LETTENMAIER D P. Geophysics tracking fresh water from space[J]. Science, 2003, 301: 1491-1494.
- [6] HALL J W, TARANTOLA S, BATES P D, et al. Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 31(2): 117-126.
- [7] HUNTER N M, BATES P D, HOMITT M S, et al. Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9(4): 412-430.
- [8] ROUX H, DARTUS D. Parameter identification using optimization techniques in open-channel inverse problems[J]. J Hydraul Res, 2005, 43: 311-320.
- [9] 俞云利, 赖锡军. 二维平面非恒定流数学模型的遥感水位数据同化[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 224-231. (YU Yun-li, LAI Xi-jun. 2D Horizontal unsteady flow model for assimilating remote sensing water levels[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 224-231. (in Chinese))
- [10] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 应用最优控制理论自动率定二维浅水方程的糙率参数[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 383-388. (LAI Xi-jun, JIANG Jia-hu, HUANG Qun. Calibration of manning roughness coefficients in two-dimensional shallow water flows using optimal control theory[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 383-388. (in Chinese))
- [11] CACUCI D G. Sensitivity and uncertainty analysis, Volume 1: theory[M]. Virginia Beach: Chapman & HALL/CRC, 2003.
- [12] DIMET L F X, TALAGRAND O. Variational algorithms for analysis assimilation of meteorological observations: theoretical aspects[J]. Tellus A, 1986, 38: 97-110.

Assimilation of flood extent data into hydrodynamic model

LAI Xi-jun¹, LI Ji-ren²

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Digital Basin Center, Institute of Digital China, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to quantitatively apply the remote sensing data in the analysis of hydrodynamic process of flood and to expand their applied potential, the assimilation of the flood extent data into hydrodynamic models was studied. The Manning's roughness coefficient n was selected to be the control variable, the assimilation of flood extent data into a hydrodynamic model was performed by use of the variation data assimilation model based on new cost functions. The assimilation tests on the flood extent data were carried out based on the sensitivity analysis by means of the synthetic data of flood routing in a floodplain induced by a dyke breach case. Numerical results show that the effects of n in different blocks on the flood routing is different, and the flood extent is more sensitive to the value of n in the main stream of inflow area of the floodplain. The developed variation model can realize the automatic assimilation of the flood extent data into the hydrodynamic model of flood, identify the roughness coefficient and improve the analysis of flood routing process in floodplains.

Key words: assimilation of variation data; flood extent; hydrodynamic model; cost function; sensitivity analysis