

文章编号: 1672-3031(2005)03-0161-07

基于栅格 DEM 的沙兰河流域河网提取及局地暴雨洪水模拟

李¹, 陆吉康², 叶柏生³

(1. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院 防洪减灾研究所, 北京 100038;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文基于美国 Global Land Cover Facility (GLCF) 的全球 90m 精度的 DEM 数据源, 采用作者开发的 DEM 凹陷区域识别与处理、河网自动生成与流域划分软件, 提取了黑龙江省沙兰镇以上沙兰河流域河网相关信息。同时结合沙兰河暴雨洪水的相关报道, 采用内含简化水文过程的二维水动力学模型, 直接用假设的降水过程作为输入, 估算了沙兰河流域局地暴雨的洪水过程与低洼地的洪水淹没过程。结果表明, 从公开的高分辨率全球 DEM 数据自动提取指定流域信息, 并利用降雨数据作为模型输入, 采用上述模型, 可以为山洪灾害防治分析提供有力的技术工具和手段。

关键词: DEM; 河网提取; 二维水动力学模型; 局地暴雨; 山洪灾害

中图分类号: TV122

文献标识码: A

2005年6月10日14时许, 黑龙江省宁安市沙兰镇沙兰河上游局部地区突降200年一遇的特大暴雨。据报道, 这次暴雨降水强度大、历时短、雨量集中、成灾快, 平均降雨量123mm, 最大点降雨量200mm, 引发特大山洪。由于河道未设堤防, 河水漫出, 淹没了沙兰镇中心小学和大量民房, 其中沙兰镇中心小学校区最大水深超过2m。本次洪灾共造成109人遇难, 其中学生105人, 村民4人。受灾农户3645户, 受灾村民13899人, 受损耕地5698.9hm², 绝产耕地1333.3hm², 预计经济损失将达到2亿元以上^[1]。关于沙兰镇的这场悲剧, 人们更多是从电视新闻、报刊上获知相关的人员伤亡及财产损失的情况, 而关于洪灾的形成与灾害的演变, 尚处于研究与探讨之中。

数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM), 尤其是高精度的免费的全球 DEM 数据, 可为采用模型技术分析流域各种水问题提供必要的空间地形信息。2004年底, 美国联邦地质调查局(USGS)通过 Global Land Cover Facility (GLCF) 发布了 2004. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation 全球 90m 精度的 DEM 数据源, 基于这一高精度的 DEM, 采用作者开发的软件, 自动获取水系和子流域地形特性, 为进一步分析流域水问题提供了基础地形数据。

局地暴雨洪水的模拟通常采用水文学的方法^[2,3], 如 HEC-1、SWMM 等。这些软件在河道洪水演进中一般采用 Muskingum 法或运动波法, 对于洪水超出河道的漫溢、分流, 尚需完善。水动力学模型可以从更精细的层面刻画水体的流动, 能够提供洪水淹没的各种动力参数, 如淹没水深、历时、流速等, 因而成为洪水风险图制作的一个有力工具^[4]。但是, 水动力学模型受制于网格尺寸、机器内存等软硬件的制约, 模拟的流域尺度与离散网格的尺度需要认真匹配, 以期求得速度和精度间的平衡。本文采用内含简化水文过程的二维水动力学模型, 对水动力学方程的差分格式进行改造, 以提高模拟速度, 建立了一套从公开的高分辨率全球 DEM 数据自动提取指定流域信息, 并利用降雨数据作为模型输入, 采用内含简化水文过程的二维水动力学分析离散方法, 可用来模拟中小流域产、汇流及洪水淹没过程的模型系统。本文利用该系统, 提取了沙兰镇以上沙兰河流域河网等空间信息, 模拟“6.10”沙兰河局地暴雨洪水的淹没情况。

收稿日期: 2005-08-10

作者简介: 李 (1971-), 男, 广西桂林人, 博士, 高级工程师, 主要从事河川及流域环境灾害研究。E-mail: Lichong@iwhr.com

1 沙兰河数字河网提取

从 DEM 直接提取河网及相关流域信息,是本文系统开发与应用的基础。由 DEM 自动获取水系和子流域特征代表着流域参数化的方便而迅速的一种途径^[5]。河网生成的准确性直接影响模型模拟的精度,生成河网需尽可能反映区域地形。

美国联邦地质调查局(USGS)的 2004. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation 为 TIFF 文件格式,网上下载的数据集为带后缀.TIFF 的图形格式数据文件。本文以该 DEM 为数据源,按沙兰镇所处经、纬度剪裁出所需的间隔为 90m 的原始栅格型数字高程。应用本软件,首先将 DEM 凹陷区域及平坦区域进行处理,生成无凹陷点的栅格 DEM,然后按 D8 算法计算有效水流方向分布图,按给定的最小水道给养面积阈值确定河流水系,采用由巴西工程师 Pfafstetter 提出的河网分级编码方法对流域分区编码^[6]。通过对 DEM 数据进行填凹、计算汇水面积、勾划流域分水线、生成河网等处理,自动提取出沙兰河流域河网(见图 1),并进行流域河网分级与子流域划分。

本文提取的沙兰镇以上沙兰河流域面积为 114.3km²,为一从西北到东南走向的狭长山区流域,纵向长约 30km,横向宽为 3~6km。流域内西北部为海拔 500~900m 的山区,东南部为 300~400m 的河谷平地。文献[7]根据现场调研,得到沙兰镇以上沙兰河流域面积为 115 km²,其中和盛水库以上山区面积 45 km²,植被良好,覆盖率达 95% 以上。水库以下为丘陵,和盛水库至沙兰镇间河道平均比降为 6‰,落差 84m。根据上述信息,确定了和盛水库位置,并将全流域划分成 3 个降雨区域,一个为和盛水库以上流域,面积 42.6 km²;一个位于和盛水库至出山口区间,面积 49.9 km²;一个为出山口到沙兰镇区间,面积 21.8 km²。此外,和盛水库至沙兰镇间河道落差约 82m,与文献[7]数据接近。

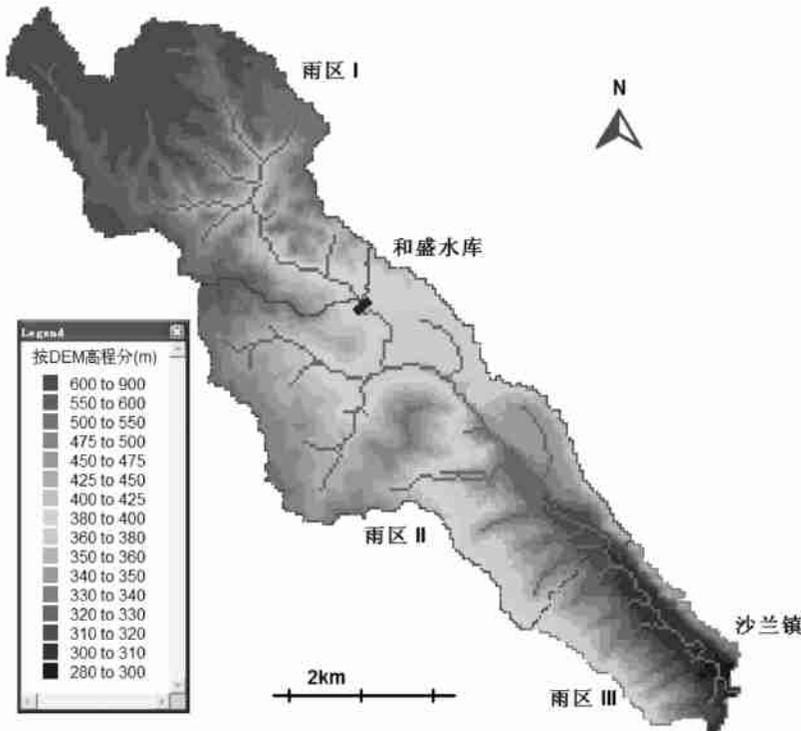


图1 沙兰镇以上沙兰河流域河网

2 内含简化水文过程的水动力学模型

水动力学模型在解决次暴雨洪水的生成中,面临的首要问题是降雨产流在水动力学模型中的引入

及体现,另一个则是小水深有效模拟的问题。由暴雨产生的地面流可能相当多区域的汇流后洪水水深超不过 10cm,而从目前现有数值模型的模拟技术来看,模型的计算网格普遍在 50m × 50m 之上,如此尺度网格内的高程差就有可能超过 10cm,达到几十厘米的量级。根据流体力学的原理,水深 10⁰cm 或 10¹cm 水的流动与 10²cm 水在同一区域上的流动是有很大区别的,后者有较成熟的数学模型,而在面临小水深时,以往的模型会有许多需要改进之处。如何改进以更贴近实际,可能需要通过不断的实践与探索。本文的基本思想是在水动力学数值模型相对精确模拟水体流动模拟技术的基础上,结合水文学的产、汇流,在模型中重点解决小水深的数值模拟、大坡降计算的稳定性等问题,以使模型能够有效模拟从降雨到产、汇流及形成坡面流到河道洪水演进的全过程。

2.1 水动力学模型 洪水模拟数学模型的主控方程由描述水流运动的水流连续性方程和沿 X 方向的动量方程及沿 Y 方向的动量方程所组成

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - k \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - k \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

式中: t 表示时间(s); x, y 表示直角坐标系的横、纵坐标(m); u, v 分别为 x, y 方向的流速分量(m/s); z, h 分别为 x, y 处的水位与水深(m); $g \frac{n^2 u}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2}, g \frac{n^2 v}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2}$ 分别为 x, y 方向的水流运动阻力,

其中 n 为曼宁糙率系数; $k \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x}, k \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y}$ 分别为 x, y 方向的水流运动局部阻力,当来水流速超过计算单元本地流速时 k 值为正,否则为零,本文模型中取为 0.4。

主控方程中动量方程的离散采用陆吉康^[8,9] 专为洪水研制的新一代具有高分辨率及高稳定性的特征离散格式,忽略了对流项。如图 2 所示:设单元计算格为 C ,其相邻计算格分别为 $E, S, W, N, ES, WS, WN, EN$ 。上一时刻各单元的流速分别为 $V_E^n, V_S^n, V_W^n, V_N^n, V_{ES}^n, V_{WS}^n, V_{WN}^n, V_{EN}^n$,在单元 C 边界上,下一时刻的流速 $V_{E,b}^{n+1}, V_{S,b}^{n+1}, V_{W,b}^{n+1}, V_{N,b}^{n+1}$ 可由下式表达

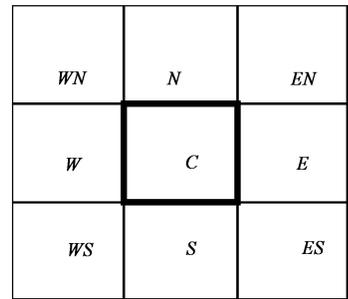


图 2 方程在单元上的离散

$$\begin{aligned}
 V_{i,b}^{n+1} = & \lambda^+ \left\{ \left(\frac{V_c^n + V_i^n}{2} \right) + \left[\text{sign}(C, i) g \frac{Z_i^n - Z_c^n}{\Delta D} + \right. \right. \\
 & k \frac{\sqrt{(V_c^n + V_{i,A}^n)_x^2 + (V_c^n + V_{i,A}^n)_y^2} V_{i,A}^n - V_c^n}{4 \Delta D} + \\
 & \left. \left. V_{i,b}^{n+1} \sqrt{(V_{i,b,x}^{n+1})^2 + (V_{i,b,y}^{n+1})^2} \left[g \left(\frac{n^2}{\left(\frac{h_i + h_c}{2} \right)^{4/3}} \right) \right] \Delta t \right\} + \right. \\
 & \lambda^- \left\{ \left(\frac{V_c^n + V_j^n}{2} \right) + \left[\text{sign}(C, j) g \frac{Z_j^n - Z_c^n}{\Delta D} + \right. \right. \\
 & k \frac{\sqrt{(V_c^n + V_{j,A}^n)_x^2 + (V_c^n + V_{j,A}^n)_y^2} V_{j,A}^n - V_c^n}{4 \Delta D} + \\
 & \left. \left. V_{j,b}^{n+1} \sqrt{(V_{j,b,x}^{n+1})^2 + (V_{j,b,y}^{n+1})^2} \left[g \left(\frac{n^2}{\left(\frac{h_j + h_c}{2} \right)^{4/3}} \right) \right] \Delta t \right\} \right.
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中: i, j 分别为 E, S, W, N , 如果 $i = E, W, \Delta D = \Delta x$, 如果 $i = S, N, \Delta D = \Delta y$; $\text{sign}(C, i), \text{sign}(C, j)$ 为符号函数,由 i, j 及相应于 C 的位置决定正负, i, j 分别位于单元 C 的两侧。

主控方程中连续性方程的离散采用时间上为二层的中心差分格式

$$Z_c^{n+1} = Z_c^n + \left[\frac{(V_{W,b}^n + V_{W,b}^{n+1})(h_W^n + h_W^{n+1}) - (V_{E,b}^n + V_{E,b}^{n+1})(h_E^n + h_E^{n+1})}{2\Delta x} + \frac{(V_{N,b}^n + V_{N,b}^{n+1})(h_N^n + h_N^{n+1}) - (V_{S,b}^n + V_{S,b}^{n+1})(h_S^n + h_S^{n+1})}{2\Delta y} \right] \Delta t \quad (5)$$

洪水漫过道路、流经涵洞的数值模拟采用宽顶堰堰流公式

$$Q = m_1 m_2 B_0 \sqrt{2gH}^{1.5} \quad (6)$$

式中: m_1 为流量系数; m_2 为淹没系数。

2.2 水文过程概化 局地暴雨洪水模拟中, 区域产、汇流过程可按图 3 所示过程由暴雨资料推求。

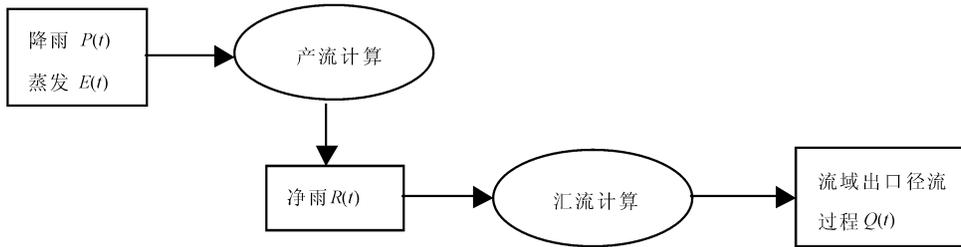


图3 由降雨过程推求径流过程的流程

对于汇流过程及随后的河道洪水演进, 水力学模型作为解决问题的一种技术手段, 模拟的结果可以满足工程实际的需要。对于产流过程, 其包含的复杂的水文机理需要进行一定的概化, 以求在水力学模型中体现。

水力学模型中降雨产流概念的引入可概述为: 降雨资料整理 → 降雨区域划分 → 分区确定水文参数 (蒸发能力、径流系数等) → 用类似地区水文资料率定参数 → 实际工程应用。

本文在水动力学模型中引入下述的蓄满产流模型法, 实际相当于在式(1) 等号右边引入一项 q , q 定义为: $q = (P - E) - (W'_m - W')$, 式中, P 、 E 为对应点的降雨量和雨期的蒸散发量(mm), W'_m 为对应点的蓄水容量(mm), W' 为对应点降雨开始时的实际蓄水容量(mm)。

2.3 技术难点的解决 在水动力学数值模拟中, 模型计算的时间步长受制于 $\Delta t \leq \Delta x / \sqrt{gh_{\max} + V_{\max}^2}$, 通常在 1min 以内。而在一个时间步长内由暴雨产生的净雨量, 往往不足 0.001mm, 这么小的量, 其值有可能湮没在数值计算的误差范围内, 使流量失衡, 从而不能准确模拟。本文的解决办法是将暴雨产生的净雨量按时间累积, 在达到一定累积量(比如 0.1mm)后, 方在流量平衡方程中按阈值加入 q , 剩余净雨量再重新按时间累积。模型模拟中将阈值从 0.1~1 逐渐改变, 发现本文方法虽然对流量的守恒性会产生阶跃干扰, 但不同阈值对出口流量的影响甚微。为此, 证实了本文方法的可行性。

由于通常情况下模拟地区的地形复杂, 地势起伏较大。在进行数值模型计算域概化时, 相邻计算网格单元的高程差可能会高达数十米, 如何合理处理这种大坡降并取得合理的模拟结果, 是水动力学模型扩展应用到次暴雨洪水模拟必须解决的一个问题。本文采用的具有高分辨率及高稳定性能的特征离散格式, 有效地解决了这一问题。

3 局地暴雨洪水模拟

3.1 模拟区域与初边条件 本文的模拟区域如图 1 所示。水动力学模型计算网格直接采用 DEM 源的正方形网格, 网格的边长为 90m。全流域共有网格 14 110 个, 模拟区域内相邻网格最大高程差达 45m。糙率采用曼宁系数表达。

根据文献[1]的调研, “6.10”暴雨为 200 年一遇突发性、局部高强度暴雨, 流域内平均降雨强度为 41.0mm/h, 点最大降雨强度为 120mm/h。降雨主要集中在沙兰河流域和盛水库至沙兰镇之间, 流域外的

降雨量相对较小,估算后的流域平均降雨量 123.2mm,是其流域多年平均 6 月份降雨总量(和盛水库,92.2mm)的 1.34 倍。洪水历时 6h,总量大约为 900 万 m³。为此,本文将整个流域分为 3 个雨区(图 1),每个雨区分别赋予不同的降雨过程(图 4),其中最大 1 h 各雨区的降雨强度量分别是, I 区: 80 mm/h, II 区: 100 mm/h, III 区: 120 mm/h; 降雨历时分别是, I 区: 1.5 h, II 区: 2.0 h, III 区: 1.5 h; 总降雨量分别是, I 区: 75.0 mm, II 区: 117.5 mm, III 区: 100.0 mm。

根据文献[1]调研的河道过洪能力,模型的出口边界 3 个单元给定一组假设的水位~流量关系,其余存在出流可能的单元按开边界设定。整个计算时间以分钟计,计算开始时间取为降雨开始时间。降雨过程采用 0.5h 的间隔数据,单位为 mm/h,共计算 36h。计算区域的径流系数按不同雨区、不同地形确定。

3.2 模拟结果分析 本文模型基于假设“6.10”的暴雨过程,模拟了沙兰河流域的局地暴雨洪水过程(图 5)及洪水的淹没分布情况(图 6、图 7)。流域出口处的最大流量为 415m³/s。沙兰镇附近淹没区域的最大水深接近 1.3m,淹没历时 5~6h,超过 1m 水深时间为 1~2h,主要的淹没范围集中在河道两旁 500m 内。由于缺乏进一步的验证资料,且流域的河道地形、地貌、植被、土壤等资料亦未获取,本文所模拟的结果只是提供对本次洪水的一个总体认识,模拟的结果与报道的结果可能有出入。但是,本文构建的研究局地暴雨洪水的平台与系统,可以为更进一步深入研究该问题提供技术支持。

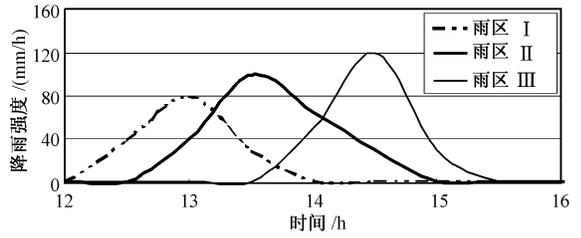


图 4 假设的各雨区降雨历时过程

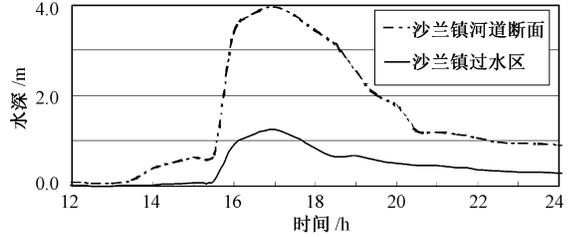


图 5 沙兰河流域各控制点洪水水深过程



图 6 沙兰镇以上流域最大洪水淹没水深分布

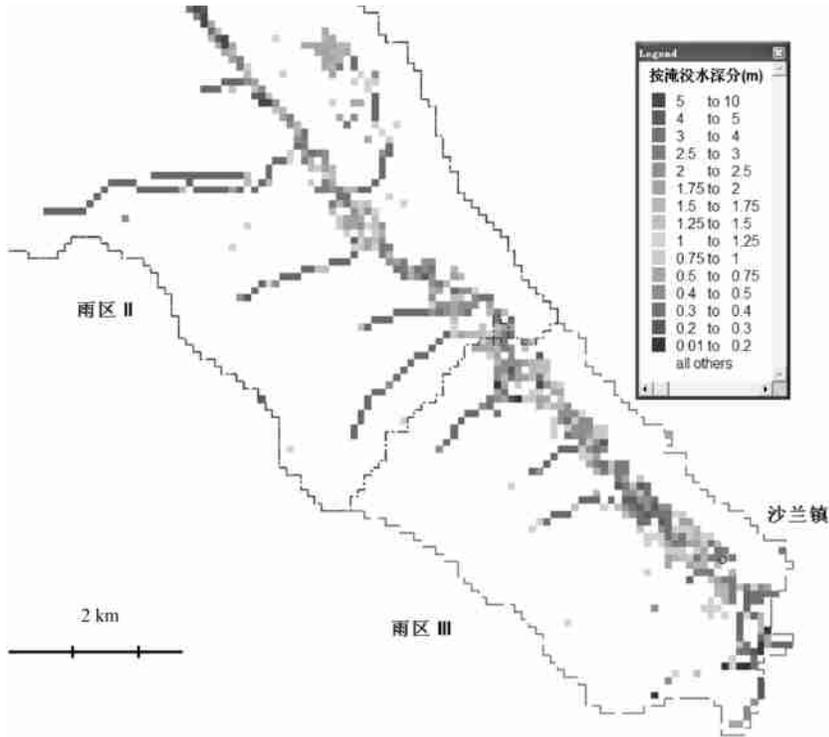


图7 沙兰镇以上流域最大洪水淹没水深局部细化分布

4 结论

本文基于美国 Global Land Cover Facility (GLCF) 的 2004.3 Arc Second SRTM Elevation 全球 90m 精度的 DEM 数据源,采用作者开发的 DEM 凹陷区域识别与处理、河网自动生成与流域划分软件,提取了黑龙江省沙兰镇以上沙兰河流域河网相关信息。

基于水动力学模型在河道洪水演进模拟的优势,建立内含简化水文过程的水动力学模型,并解决模型模拟的几个技术难点。结合“6.10”沙兰河暴雨洪水的相关报道,采用内含简化水文过程的二维水动力学模型,直接用假设的降水过程作为输入,估算了沙兰河流域局地暴雨的洪水过程与低洼地的洪水淹没过程。结果表明,从公开的高分辨率全球 DEM 数据自动提取指定流域信息,并利用降雨数据作为模型输入,采用内含简化水文过程的二维水动力学模型模拟中小流域的洪水淹没过程,这样一套模型系统,可以为山洪灾害防治分析提供有力的技术工具手段。

致谢: 作者在研究过程中得到了中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所信息室提供的帮助,特表谢意。

参 考 文 献:

- [1] 中国水利水电科学研究院. 中国水利水电科学研究院开展“沙兰河流域山洪灾害”调研工作[EB/OL]. <http://www.hwcc.com.cn>, 2005-07-12.
- [2] Vijay P S. 水文系统流域模拟[M]. 赵卫民等译. 郑州:黄河水利出版社, 2000.
- [3] Vijay P S. 水文系统降雨径流模拟[M]. 赵卫民等译. 郑州:黄河水利出版社, 2000.
- [4] 中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所. 七大江河洪水风险图与江河应急调度图制作研究报告[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2005.
- [5] Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models [J]. Computers Geosciences, 1992, 18(6): 747- 761.

- [6] 李 , 杨大文. 基于栅格数字高程模型 DEM 的河网提取及实现[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2 (3): 208- 214.
- [7] 程晓陶. 让沙兰悲剧不再重演[EB/OL]. <http://www.cws.net.cn>, 2005-07-14.
- [8] 中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所. 邯东 500kV 变电所所址洪水分析专题报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001.
- [9] 中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所. 保南 500kV 变电所所址洪水分析专题报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001.

Simulation of storm flood basing on deriving drainage networks from grid DEM and 2-D hybrid approach in Shalan river basin

LI Chong¹, LU Ji-kang², YE Bai-sheng³

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Department of Water Hazard Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Cold and Arid regions Environmental and Engineering Research Institute,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Digital data on the position and characteristics of river networks and catchment are important for the understanding of local river basin. They are necessary for the input of simulating hydraulic or hydrology model. Based on the 2004 (3) Arc Second SRTM Elevation, a digital elevation data with 90-m resolution, published by Global Land Cover Facility (GLCF), USGS, which is available at: <http://glcf. umiacs. umd. edu/data/srtm/>, a software on extracting drainage networks from raster DEM has been developed to extract river network of Shalan river basin of drainage area is 114. 3km². Good visual consistence was obtained to compare the extracted river networks information with field observation in other references, as well as the inter-basins boundary and drainage area. Using supposed rainfall process of "6. 10" storm in Shalan catchment and extracted drainage network, a hybrid approach which combines simplified hydrology process with 2-D hydraulic model was developed and used to simulate the storm flash flood in Shalan riverbasin in Heilongjiang Province. The result shows, the maximum flood discharge in outlet is 415m³/s, the maximum water depth nearby the Shalan town is 1. 3m, flash flood lasting period is 5~ 6 hr, and 1~ 2 hr for water depth over 1 m at the same location. The flood zone mainly locates along the Shalan River with width of 500m. Though default of flood observation and remote sensing data, the simulation shows reasonable agreement with real situation. The results imply that the proposed software and approach are apt to simulate storm flash flood with reliable resolution in mountainous area or valleys based on river networks extracted automatically from grid DEM and the hybrid approach which combines simplified hydrology process with 2-D hydraulic model. It can be served as a new tool for analysis of national storm flash flood in mountainous area or valleys

Key words: DEM; hybrid model; storm flash flood; river network extract

(责任编辑: 王冰伟)