

基于遥感信息的淹没水深算法研究

易永红, 陈秀万, 吴欢*

(北京大学遥感与地理信息系统应用研究所, 北京 100871)

摘要: 该文针对遥感监测的洪水范围, 提出一种实用的洪水淹没水深算法。该算法视淹没区为静态水面分布, 将其与 DEM 叠加, 经系列误差处理与优化, 得到相对平滑的水陆边界高程, 再采用双线性插值计算淹没范围内的水深分布。以广东省北江流域清远地区 2002 年 10 月底的一次洪水为例进行验证, 结果表明该算法在计算精度和效率方面均能满足实际洪水评估要求。

关键词: 淹没水深; 遥感; DEM; 水陆边界; 双线性插值

中图分类号: TP79; P331.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-0504(2005)03-0026-04

0 引言

洪水淹没的范围与水深是洪灾评估不可缺少的信息。我国洪灾频繁, 在洪水期间及时准确地提供受灾信息尤为必要。遥感技术能够快速高效地监测洪水淹没的范围, 为抗洪救灾与决策提供信息^[1-3], 但通过遥感数据获取淹没范围水深的算法研究尚欠缺^[4]。

水文学中多是模拟流动水体的深度分布, 如求解圣维南方程计算非恒定水流的演进^[5]。利用 GIS 计算水深, 通常是基于 DEM, 采用种子点进行邻域搜索比较, 根据一定条件来判断边界与内部洼地, 得到一定流域的水体范围与水深^[6-10], 该类方法多针对动态水流, 适用于小范围水域。一些算法考虑了静态水体的水深, 并视水面为一水平面, 直接用该水平面切割 DEM 而得到水深分布^[9, 11], 该类方法要求水面范围不能太大。

本文试图利用遥感技术和 DEM 数据, 探讨一种适合于较大范围, 可近似为静态水体的水深分布算法, 以便迅速、准确地计算洪水淹没的水深分布。就洪灾损失评估而言, 水深要求的精度允许将水面简化为平面处理^[12], 这有助于运算效率的提高。本文讨论如何通过淹没范围同 DEM 叠加获得水陆边界的高程分布, 重点分析零水深边界高程点集的处理, 并由双线性插值推求淹没范围内部的水面高程, 得到淹没水深分布。

1 水深计算方法分析

1.1 水深算法基本思想

静态淹没水深的计算是在已知淹没范围的条件

下, 基于离散化的地面高程数据 (一般为 DEM), 使用不同的插值方式计算离散的水面高程分布, 进而计算淹没的水深分布。这种方法的逻辑比较清晰, 即借助高精度的 DEM 数据的支持, 由水面高程与地面高程之差来计算水深:

$$D = E_w - E_g \quad (E_w \geq E_g)$$

式中: D 为水深; E_w 为水面高程; E_g 为地面高程。该方法要求 DEM 的精度足够高。陈德清等认为, DEM 至少应由 1:1 万或更大比例的地形图生成^[9]。这是因为受淹地区多是相对低洼平坦的地区, 其高程起伏变化不大。如何计算水面高程是水深估算的核心, 笔者对其进行详细分析与讨论。

1.2 水面高程计算方法

计算水面高程首先要确定水面的范围与形态。水面范围从遥感信息获得, 受地势和水深的影响, 静态的自然水面应该是复杂的曲面, 用方程描述很复杂, 其求解计算量也很大。在计算洪水水深时, 一般将曲面简化为平面, 实践证明这能满足应用要求^[12]。

陈德清等将洪水淹没区划分为湖泊型和滩地型^[9]。前者在湖泊区, 包括水库、蓄滞洪区和局部低洼地等形成的淹没区, 其特点是水流缓慢、水面比降小, 可近似为水平平面; 后者是由于河水泛滥溢出河道, 在河道以外的滩地、低洼地形成淹没区, 其特点是泛滥洪水与河道水体混为一体, 水位主要沿水流方向变化, 水面存在一定比降, 相对复杂。但是将湖泊型水面视为水平平面, 只适合较小水面范围, 此时不必考虑其水面比降; 当淹没范围较大时 (如从遥感信息提取的淹没范围), 这种近似欠妥。滩地型沿水

收稿日期: 2005-04-06; 修订日期: 2005-04-21

基金项目: 中意国际合作资助项目“洪水风险规划、监测和实时预报集成系统”

作者简介: 易永红 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水利遥感、分布式水文模型等。*通讯作者 E-mail: wuhuan_pku@163.com

流方向划分为多个倾斜平面的连续体, 然后对各斜面分别进行插值计算^[13]。这种方法通过人工划分能较好地逼近实际水面情况, 但对于遥感监测的大片洪泛区水面, 静态的水流没有明显的水流方向, 不具有水面人工分区的可操作性。

本文方法强调利用遥感信息提取的淹没范围, 其水面范围可能是不规则的, 也可能是破碎的多个独立水面。因此, 要满足实际应用就要求算法有很强的可操作性, 并且计算效率不能太低。可将水面简化为斜面(包括水平面), 这样能平衡精度与效率两方面的要求。首先, 将水体斜面的边界(即提取的淹没范围, 也即零淹没水深的水陆交界)同 DEM 复合可得洪水边界的高程点集。由水陆交界的高程向水面内部进行内插, 即可求得离散的水面高程分布。已有文献没有就洪水评估中水深插值作深入探讨, 笔者认为采用双线性内插比较理想。其一, 内插要逼近的目标对象为平面, 线性方法满足该条件; 其二, 双线性内插在逼近目标的同时, 计算效率能满足现有应用的要求; 其三, 双线性内插不需考虑倾斜面的走向, 可以利用遥感提取的洪水范围直接计算水深。

1.3 水陆边界的处理

使用遥感技术提取洪水范围已经比较成熟, 理论上 SAR 雷达影像最为理想, 天气条件允许情况下也可用 TM 和 SPOT 影像^[12]。这些影像提取的洪水边界在有的部位误差可达 1 个像元以上。而洪水边界除人工建筑外, 应该是具有高程变化的地方, 其二维平面上位置的误差导致第三维高程上的误差。此外, 水陆交界高程的另一误差源是 DEM 的精度。处于地势变化剧烈处的洪水边界, 由于 DEM 高程表示精度的限制, 即使洪水范围边界准确, 也不能精确反映边界点的高程。根据误差产生原因, 可以从技术角度尽可能抑制上述两种误差。水面高程计算的精度则取决于作为插值初始条件的边界点高程的精度, 因此在计算水面高程之前应对边界高程作必要的处理。

当水陆边界地势起伏不大时, 一两个像元尺度(假设 20 m)的位置误差导致的高程变化不会太大, 应在 0.1 m 内; 当水陆交界地势起伏较大时, 同样的位置误差会导致 1~2 m 的高程误差, 致使局部水面高程插值结果严重失真。对水陆交界高程点分析, 发现失真的水陆交界高程一般不超过 3 个连续的像元, 其表现为局部范围内的异常高值或低值。若边界点高程同邻域像元相差达 0.5 m 以上, 可判断为失真边界点。静态的淹没水面的倾斜度不可能太大, 在 10 m 分辨率 DEM 上相邻像元中心位置的距离

为 10 m, 一般情况其高差不应超过 1 cm(此时静态水体的比降为 0.1%)。因此, 可以参考相邻边界点的高程来平滑失真点, 失真点高程可使用邻域边界点的均值来替代。

在邻域平滑中开窗尺度的选择是比较重要的因素, 过大会压抑信息, 过小则平滑效果不理想。在水陆交界点高程平滑中, 落在平滑窗口中的为边界曲线而非通常的矩形阵列, 因此开窗尺度应适当大一些, 平滑效果才比较明显。而整个算法基于假设整个静态的淹没水面是一个斜面, 并且倾斜度接近于水平, 所以适当放大开窗对边界高程不会过分平滑。从多次试验看, 开窗半径在不超过 100 m 的情况下, 平滑操作不会抑制正常的边界高程变化。

2 洪水淹没的静态水深算法

本研究利用 Visual Basic、ESRI ArcObject 组件的栅格、矢量基本操作, 编程实现了洪水淹没的静态水深算法。该算法分为边界平滑、边界简化、边界高程提取、高程插值和水深计算 5 个步骤。

2.1 边界平滑

边界平滑是为抑制遥感监测的洪水范围误差以及 DEM 表示精度引起的水面边界高程的误差。平滑操作相对比较简单, 但需把握平滑窗口的适当大小。本文试验中, 选用 70 m 的开窗半径, 平滑选用 15 m×15 m 的窗口。异常边界高程点的判断阈值选择与窗口高程均值相差 0.5 m 较理想, 用窗口内其他边界点的均值替代异常的边界高程点。

2.2 边界简化

利用水面边界对内部进行双线性插值, 需要在上、下、左、右 4 个方向分别搜索离插值点距离最近的边界点, 运算量很大。利用 DEM 栅格表示的边界高程点, 行(列)方向可能存在连续边界点情况(图 1), 这使得搜索边界点的运算量很大。为了提高 4 个参考边界点的搜索速度, 可分别按行(列)方向对连续边界点进行简化, 只保留连续片段最外侧或中间的边界点, 舍弃其余的连续边界点。

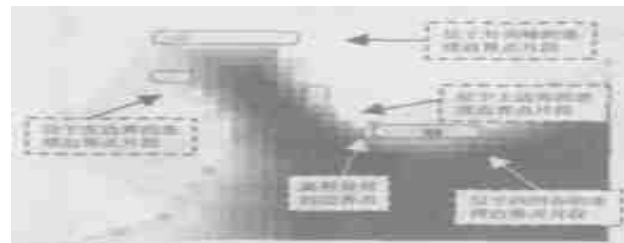


图 1 不同边界部位的连续边界点片段
Fig. 1 Edge node continuum at different edge part

按行方向简化边界点时,假设当前搜索到第 $nRow$ 行某处有 n 个($n \geq 1$)连续边界点,应保留其最左、最右还是中间点,需考察该片段所在的边界部位:左边界、右边界、内凹谷还是外突峰(图 1)。而边界部位的判断需结合水面范围的 DEM 栅格图斑,判别当前连续边界点片段左右两边分别是属于图斑内部还是外部。判断条件为:1)若左边是外部,右边是内部,则该边界点片段位于左边界部位,保留其最左边界点;2)若左边是外部,右边是外部,则该边界点片段位于边界外突峰,保留其中间边界点;3)若左边是内部,右边是外部,则该边界点片段位于右边界部位,保留其最右边界点;4)若左边是内部,右边是内部,则该边界点片段位于边界内凹谷,保留其中间边界点。以同样方法按列得到另一方向上的边界简化阵列。

淹没范围的 DEM 图斑用 IExtractionOp 的 polygon 函数切割 DEM 得到。ArcGIS 栅格图斑表示的一个特点是,图斑外部的无值像元其值表示为空,即判断某点是否在图斑内部,检查该点上栅格有没有值即可。所以,借助淹没范围的 DEM 图斑很容易实现上述边界判断。

2.3 边界高程提取

水陆交界点矩阵属于稀疏矩阵,若在具有两层嵌套的插值循环中直接利用其搜索 4 个方向的插值参考边界点,效率很低。因此需对此稀疏矩阵进行简化,将各行的边界点位置和高程值分别记录到二维数组 $rowArray$ 和 $rowArrayVal$ 。以记录某行边界为例,该行(设第 $nRow$ 行)的各边界点所在的行号为 $nRow$,所在的列号及其高程值记录为 $rowArray(nRow, nIndex)$ 和 $rowArrayVal(nRow, nIndex)$ 。 $nIndex$ (不小于 1)标识该边界点为本行左起的第 $nIndex$ 个边界点,该点所在的矩阵列号 $nColumn$ 为 $rowArray(nRow, nIndex)$,而 $rowArray(nRow, 0)$ 则记录该行的边界点个数;该点的高程值则为 $rowArrayVal(nRow, nIndex)$ 。边界高程点用这种方法简化后,其搜索速度大大提高。只需知道某一边界点为第 $nRow0$ 行的第 $nIndex0$ 个边界点,即可得到该点在 DEM 图斑中的位置 ($nRow0, rowArray(nRow0,$

$nIndex0)$)和高程 $rowArrayVal(nRow0, nIndex0)$ 。以同样方法,按列方式简化边界点矩阵的表示,也可得到两个二维数据 $colArray$ 和 $colArrayVal$ 。

2.4 高程插值

利用双线性插值需找到 4 个方向最近的边界点以及分别到 4 点的距离。对当前边界点 ($nRow0, nColumn0$),在行方向查找第一个不大于 $nColumn0$ 和不少于 $nColumn0$ 的边界点,分别得到其列号和高程值;在列方向查找第一个不大于 $nRow0$ 和不少于 $nRow0$ 的边界点,分别得到其行号和高程值。于是求出 4 个方向距当前插值点最近的高程与位置,实施双线性插值即可得到该点水面高程。应该注意的是,由于插值操作是在分别以水面范围 DEM 图斑栅格图层的行、列长度(常大于 3 000)为界的双重循环之中,此处操作应该保证最优的代码效率。两个方向的距离权重应该在插值前计算出,从而避免在公式中两次计算。

2.5 计算水深

将计算的水面高程同淹没范围的 DEM 图斑相减,即可得到淹没的水深分布。分析最后得到的结果,在边缘部分会因误差引起个别点水深为负。此外,在遥感提取的洪水范围中若有不能分辨而未提取的小块高地,其插值水深也为负,这是对水面高程的真实反映,是对遥感提取范围误差的修正。可以通过 ArcObject 对栅格的逻辑 (ILogicalOp) 和条件 (IConditionalOp) 操作剔除负值点。

3 实例验证

本文采用的洪水淹没范围从 2002 年 10 月底北江广东清远段洪水期间遥感影像上提取得到。图 2 是淹没区范围及 DEM,图 3 是计算的淹没水深分布。在水深计算结果中,大部分深度从边缘向内逐渐过渡,但也有个别部位过渡相对剧烈,出现破碎的条带或斑块。其原因可能是所提取的洪水范围误差过大,边界平滑不足以有效抑制边界点的高程误差。根据受灾记录信息,淹没水深观测值同计算值基本一致,能满足实际灾害评估和决策的精度要求。

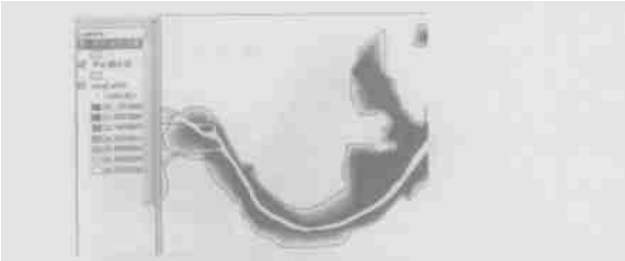


图 2 部分淹没范围及 DEM
Fig 2 Flood range and DEM in test site

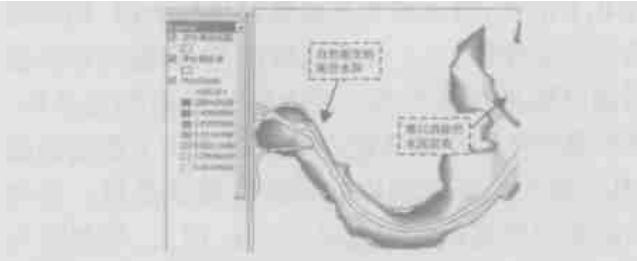


图 3 部分淹没水深分布
Fig. 3 Inundated depth distribution of test site

从结果分析可知, 如果洪水范围误差太大, 算法对之已不能消减; 如果 DEM 的精度不够, 则不能准确地表达边界高程值, 因此计算结果也有很大误差。

4 结语

本文研究旨在利用遥感信息提取洪水淹没范围, 设计一个高效实用的洪水淹没水深算法, 为洪灾损失评估和决策服务。该算法将静态洪水淹没水面简化为斜平面, 根据遥感提取水体范围的误差特点, 对水陆边界作误差抑制处理; 在保证无损前提下, 分别从行、列方向对冗余水陆边界点进行压缩; 同时, 从边界点的稀疏高程矩阵生成行、列方向的边界点查找表, 提高了两次嵌套循环中的插值操作效率。该算法计算精度和效率基本能满足业务的要求, 具有实用价值。

参考文献:

- [1] 童庆禧. 遥感在 1998 年洪水监测中的作用[J]. 气候与环境研究, 1998, 13(4): 314—322.

- [2] 张金存, 魏文秋, 马巍. 洪水灾害的遥感监测分析系统研究[J]. 灾害学, 2001, 16(1): 39—44.
- [3] 丁志雄, 李纪人. 流域洪水汛情的遥感监测分析方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 8—11.
- [4] 刘亚岚, 王世新, 阎守邕, 等. 遥感与 GIS 支持下的基于网络的洪涝灾害监测评估系统关键技术研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 53—58.
- [5] 邓绥林. 普通水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [6] 刘仁义, 刘南. 一种基于数字高程模型 DEM 的淹没区灾害评估方法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(2): 118—122.
- [7] 郭利华, 龙毅. 基于 DEM 的洪水淹没分析[J]. 测绘通报, 2002(11): 25—30.
- [8] 葛小平, 许有鹏, 张琪, 等. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 456—460.
- [9] 陈德清, 杨存建, 黄诗峰. 应用 GIS 方法反演洪水最大淹没水深的空间分布研究[J]. 灾害学, 2002, 17(2): 1—6.
- [10] MOLENA W H. Water depths at upper boundary for overland flow on small gradients[J]. Journal of Hydrology, 1995, 171(1—2): 93—102.
- [11] 阎国年, 钱亚东, 陈钟明, 等. 流域地形自动分割研究[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 288—304.
- [12] 万庆, 魏一鸣, 陈德清, 等. 洪水灾害系统分析与评估[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

An Algorithm for Inundated Depth Calculation of Flood Based on Remotely Sensed Data

YI Yong—hong, CHEN Xiu—wan, WU Huan

(Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The paper puts forward an algorithm to calculate the depth distribution within the inundated region extracted from the satellite imagery, which can be applied in the flood monitoring and loss evaluation. The algorithm combines the flood region with DEM and acquires a smooth elevation distribution in the flood borderlines after efficient error control due to inadequate precision in the satellite imagery processing and DEM itself. After assuming floodwater in the flood area to be an inclining plane, the depth distribution within the boundaries can be computed using a bilinear interpolation algorithm. The result in the test site shows the algorithm can meet the requirement of the flood loss estimation both in precision and computing speed.

Key words: flood depth; remote sensing; DEM; flood boundaries; bilinear interpolation

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] COLLISON A, WADE S. Modeling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England[J]. Engineering Geology, 2000, 55: 205—218.
- [2] XIE M W, ESAKI T, CAI M F. Three—dimensional stability evaluation of landslides and a sliding process simulation using a new geographic information systems component[J]. Environmental Geology, 2003, 43: 503—512.
- [3] CHEN H, LEE C F. A dynamic model for rainfall—induced landslides

- on natural slopes[J]. Geomorphology, 2003, 51: 269—288.
- [4] 樊红, 詹小国. ARC/INFO 应用与开发技术[M]. 武汉大学出版社, 2002. 222—241.
- [5] WU L X. Topological relations embodied in a generalized tri—prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30: 405—418.
- [6] ArcGIS 9.0 Desktop Help. <http://www.adobe.com/products/acrobat/readstep.html>, esri, 2004.
- [7] Ansys 7.0 Analysis Manual. <http://www.ansys.com>, 2004.

The Method of Automatically Generating FEM Based on GIS for the Slope

XU Bang—shu¹, XU Jian—hua¹, RUI Jian—xun^{1,2}, WANG Qiang¹

(1. Key Laboratory of Geographic Information Sciences, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062; 2. Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: GIS is widely used in the research of landslide hazard, but the literature that studies landslide hazard with the conjunction of GIS and numerical method is very less because the slope problem is the complicated physics—chemic process and the theory of 3D data model is immature. The key technique for the landslide hazard in the larger scale region simulated based on GIS is the automatical generating of 3D FEM. The paper studies the GIS—based data format for the slope numerical analysis and presents generating methods based on TIN and grid respectively. The automatic generating program is developed with the tools of ArcGIS 9.0 and Ansys 7.0. This paper will promote the application of GIS for the slope model and utilize the capability of GIS data management and operation to increase the precision of the slope FEM.

Key words: finite element mesh; geographic information system (GIS); automatic generation; tri—prism; hexahedron