

文章编号: 0559-9350(2004)06-0056-05

## 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法

恽雄, 李纪人, 李琳

(中国水利水电科学研究院 遥感中心, 北京 100044)

**摘要:** 在遥感与 GIS 技术的基础上, 应用数字高程模型(DEM)生成的格网模型进行洪水的淹没分析。在给定洪水水位和洪量两种条件下, 对基于三角形格网模型和任意多边形格网模型, 分别得出洪水淹没结果。并对洪水遥感监测获得的淹没范围, 利用格网模型进行水深分布计算。结果表明, 以 GIS 技术为支持, 采用平面模拟方法进行洪水淹没范围和水深分布的模拟是可行的, 使遥感监测与一般洪涝灾害损失评估模型比较好地结合, 得出更准确的灾情损失评估结果。

**关键词:** 洪水淹没; DEM; 格网模型

**中图分类号:** P333.2

**文献标识码:** A

自然灾害在我国发生非常频繁, 其中以洪涝灾害尤为严重。近十几年来, 自然资源的开发利用不断扩大, 城乡经济建设飞速发展, 洪水出现的频率及其造成的损失也不断地增加。因此, 快速、准确、科学地模拟、预测洪水淹没范围, 对防洪减灾具有重要意义。特别是对于一些重点防洪城市和行蓄洪区, 如果能够预先获知洪水的淹没范围和水深的分布情况, 对于预先转移受灾区的生命财产, 减少损失具有非常重要的价值, 而且对于洪水造成的灾害损失进行评估也是非常有用的。

20 世纪 90 年代以来, 利用 GIS 技术为手段进行洪水淹没研究一直是一个研究热点, 许多学者在这方面做过研究, 并取得一定的进展。如刘仁义等人的基于 GIS 复杂地形洪水淹没区计算方法<sup>[1]</sup>, 葛小平等人的 GIS 支持下的洪水淹没范围模拟<sup>[2]</sup>。本文以数字高程模型(DEM)为基础, 将地形的连通性与三角单元或者任意多边形格网模型技术相结合。尝试把三维地形能够较真实反映的地形地貌要素, 和二维 GIS 技术中矢量栅格一体化的空间分析功能, 相结合应用到洪水淹没范围的模拟研究中。采用平面模拟方法模拟淹没范围, 能够比较准确、科学地确定洪水淹没范围和水深分布, 为洪水风险图制作、防洪指挥调度和洪涝灾害的损失评估提供准确的评判依据。

### 1 洪水淹没分析方法及其与洪水模拟演进的比较

洪水淹没是一个很复杂的过程, 受多种因素的影响, 其中洪水特性和受淹区的地形地貌是影响洪水淹没的主要因素。对于一个特定防洪区域而言, 洪水淹没可能有两种形式, 一种是漫堤式淹没, 即堤防并没有溃决, 而是由于河流中洪水水位过高, 超过堤防的高程, 洪水漫过堤顶进入淹没区; 另一种是决堤式淹没, 即堤防溃决, 洪水从堤防决口处流入淹没区。无论是漫堤式淹没还是决堤式淹没, 洪水的淹没都是一个动态的、变化的过程。

对于洪水的淹没分析可以概化为两种情况, 一是在某一洪水水位条件下, 它最终会造成多大的淹没范围和怎样的水深分布, 这种情况比较适合于堤防漫顶式的淹没情况。另外一种情况是在给定某一洪量条件下, 它又会造成多大的淹没范围和怎样的水深分布, 这种情况比较适合于溃口式淹没。对于第 1

收稿日期: 2003-07-04

作者简介: 丁志雄(1976—), 男, 江西南城人, 博士生, 主要从事水文水资源及洪涝灾害方面的研究。

种情况, 需要有维持给定水位的洪水源, 这在实际洪水过程中是不大可能发生的, 处理的办法是, 可以根据洪水水位的变化过程, 取一个合适的洪水水位值作为淹没水位进行分析。对于第 2 种情况, 当溃口洪水发生时, 溃口大小是在变化的, 导致分流比也在变化。另外, 在这种情况下, 一般都会采取防洪抢险措施, 溃口大小与分流比在抢险过程中也在变化, 洪水淹没并不能自然地发生和完成, 往往有人为防洪抢险因素的作用, 如溃口的堵绝, 蓄滞洪区的启用等。这种情况下要直接测量溃口处进入淹没区的流量是不大可能的, 因为堤防溃决的位置不确定, 决口的大小也在变化, 测流设施要现场架设是非常困难, 也是非常危险的。所以实际应用时, 考虑使用河道流量的分流比, 来计算进入淹没区的洪量。

归根到底, 洪水淹没的机理是由于水源区和被淹没区有通道(如溃口、开闸放水等)和存在水位差, 就会产生淹没过程, 洪水淹没最终的结果应该是水位达到平衡状态, 这个时候的淹没区就应该是最终的淹没区。基于水动力学模型的洪水演进模型可以将这一洪水淹没过程模拟出来, 即可以模拟出不同时间洪水淹没的范围, 这对于分析洪水的淹没过程是非常有用的。但对最终的淹没结果与淹没的概化分析模型没有多大的区别, 另外由于洪水演进模型建模过程复杂, 特别是对于江河两侧大范围的农村地区模型的边界难于确定。所以上述两种概化的处理方法也是经常使用的有效手段。

## 2 基于格网模型的淹没分析思想

基于 DEM 的洪水淹没分析, 可以解决上述两种洪水最终淹没范围和水深分布的问题。但是由于 DEM 数据量大, 对于较大范围的洪水淹没分析, 在目前的计算机硬件技术水平上还不能较快地计算出结果, 对于防洪减灾决策实施等方面的应用, 这种计算速度是不能够忍受的。格网模型的思想很早就已经提出, 并且在各个领域得到广泛的应用, 如有限元计算的离散单元模型。目前所能见到的较先进的洪水模拟演进模型, 如基于水动力学的洪水演进模型<sup>[3]</sup>, 是一种格网化的模型。基于空间展布式社会经济数据库的洪涝灾害损失评估模型也是基于格网模型的思想<sup>[4]</sup>。由于格网本身对模型概化的优越性, 同时考虑到与洪水演进和洪涝灾害损失评估模型更好地结合, 所以采用基于格网的洪水淹没分析模型是比较好的选择。

由 DEM 可以较方便地生成三角单元网格和任意多边形网格。生成的这两种格网模型, 其网格的大小分布情况反映了高程的变化情况, 即在高程变化小的区域其网格大, 在高程变化大的区域其网格小。利用这样的格网模型进行洪水淹没分析, 具有以下特点: (1)洪水淹没的特性与格网的这种大小分布特性是一致的, 即在平坦的地区淹没面积大, 在陡峭的区域淹没面积小, 所以采用这种格网能更好地模拟洪水的淹没特性。(2)洪水的淹没边界和江河边界都是非常不规则的, 采用三角单元格网和任意多边形格网模型比规则的四边形格网模型, 能够更好地模拟这种不规则的边界。(3)网格大小疏密变化不一致, 既能满足模型物理意义上的需求, 也能节省计算机的存储空间, 提高计算速度。

由 DEM 产生三角单元格网模型对于高程有一个概化过程, 即在三角单元内认为高程是均匀的, 单元的高程由 3 个点的高程平均取得。而由 DEM 转换为多边形生成任意多边形格网模型, 在处理时将具有相同高程并且相邻的单元合并为一个多边形, 这样可以大大减少多边形的数量, 同时又能保证 DEM 的高程数据原始精度完全不损失。这样得到的格网模型比之三角单元格网模型, 虽然单元数量要多, 但单元的高程值要比三角单元的高程值更接近实际, 所以三角单元的格网模型可以用于较粗要求的分析, 而由 DEM 直接转化为多边形的格网模型可以用于较高要求的分析。

## 3 基于格网模型的淹没分析方法

### 3.1 淹没分析研究区域的确定

针对一个特定地区的洪水淹没分析, 为了减少数据量和便于分析, 一般根据洪水风险, 预先圈定一个最大的可能淹没范围, 并且将沿江两岸分成左右两半分别进行处理分析, 靠江边的边界处理为淹没区的进水边界。这样处理对于防洪减灾来说是合理的, 一般在防洪区域, 沿江两岸堤防建设的洪水保证率是不一样的, 有重点地保护一些地区和放弃一些地区, 所以需要将两岸

分开处理。

目前国家测绘局能够提供七大江河周边地区 1:1 万的 DEM 数据,在实际应用中需要根据特定的防洪区域的微地形修正该 DEM 数据,以保证地形数据的准确。根据实测微地形(如堤防、水利工程等)数据修正 DEM 的栅格(GRID)高程值。将一系列实测数据进行自动快速修正 GRID 的程序已经在 ARC/INFO DESKTOP 8.1 平台上开发完成,可以直接进行交互式使用。将修正后的 DEM 数据用上面提到的洪水最大可能淹没范围进行剪裁,得到的区域就是所需要进行淹没分析研究的范围。

3.2 格网模型的生成 (1)三角单元格网模型。将研究区的 DEM 转换为 TIN 模型,提取三角单元格网,并对每个三角网格赋高程值,高程值按 3 个顶点从 GRID 上取得的高程值取平均求得。生成的三角格网就是要进行洪水淹没分析的三角单元格网模型,如图 1 所示。

(2)任意多边形格网模型。将研究区的 DEM 转换为几何特征图层,在处理时自动将具有相同高程并且相邻的单元合并为一个多边形,多边形的高程自动取 GRID 的高程值,这样保证 DEM 的高程数据原始精度完全不损失。生成的多边形格网就是要进行洪水淹没分析的任意多边形格网模型,如图 2 所示。

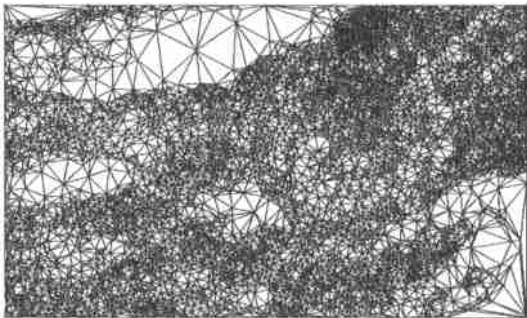


图 1 三角形格网模型

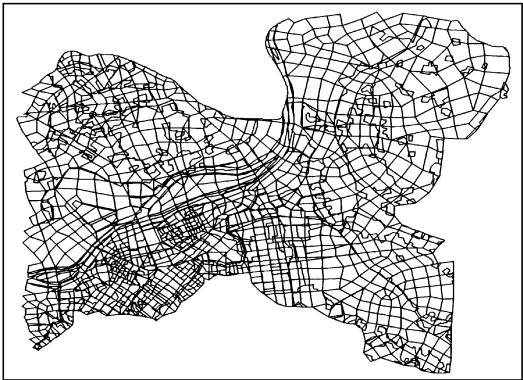


图 2 任意多边形格网模型

3.3 两种洪水淹没概化方式下的淹没分析 (1)给定洪水水位( $H$ )下的淹没分析。选定洪水源入口,设定洪水水位,选出洪水水位以下的三角单元,从洪水入口单元开始进行三角格网连通性分析,能够连通的所有单元即组成淹没范围,得到连通的三角单元,对连通的每个单元计算水深  $W$ ,即得到洪水淹没水深分布,图 3 是基于三角单元格网模型在给定洪水水位条件下的一个淹没分析例子。

单元水深的计算公式为

$$W = H - E \tag{1}$$

式中:  $W$  为单元水深;  $H$  为水位;  $E$  为单元高程。

(2)给定洪量( $Q$ )条件下的淹没分析。进行灾前预评估分析时可以根据可能发生的情况给定一个洪量,或者取洪水频率对应的流量的百分数。灾中评估分析时洪量  $Q$  值可以根据流量过程曲线和溃口的分流比计算得到,有条件的地方,可以实测,不能实测的可以根据上、下游水文站点的流量差,并考虑一定区间来水的补给误差计算得到。

在前述洪水水位分析方法的基础上,通过不断给定洪水水位  $H$  条件,求出对应淹没区域的容积  $V$  与洪量  $Q$  的比较,利用二分法等逼近算法,求出与  $Q$  最接近的  $V$ ,  $V$  对应的淹没范围和水深分布即为淹没分析结果。

容积与水位的关系可以描述为

$$V = f(H) \tag{2}$$

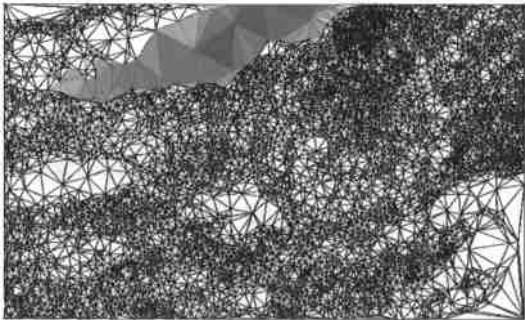


图 3 三角单元水深分布

在格网模型的基础上式(2)可简化为

$$V = \sum_{i=1}^m A_i (H - E_i) \tag{3}$$

式中： $V$ 为连通淹没区水体体积； $A_i$ 为连通淹没区单元面积，由连通性分析求解得到； $E_i$ 为连通淹没区单元高程，由连通性分析求解得到； $m$ 为连通淹没区单元个数，由连通性分析求解得到。

定义函数：

$$F(H) = Q - V = Q - \sum_{i=1}^m A_i \cdot (H - E_i) \tag{4}$$

显然该函数为单调递减函数，函数变化趋势如图4所示。

有已知  $F(H_0) = Q$ ， $H_0$  为入口单元对应的高程，要求得一个  $H$ ，使得  $F(H) \rightarrow 0$ 。为利用二分逼近算法加速求解，在程序设计时考虑变步长方法进行加速收敛过程。需要预先求得一  $H_1$  使  $F(H_1) < 0$ 。 $H_1$  的求解可以设定一较大的增量  $\Delta H$  循环计算，直到  $F(H_1) < 0$ ，( $H_1 = H_0 + n \Delta H$ )。再利用二分法求算  $F(H)$  在  $(H_0, H_1)$  范围内趋近于零的  $H_q$ 。 $H_q$  对应的淹没范围和水深分布即为给定洪量  $Q$  条件下对应淹没范围和水深(见图5)。

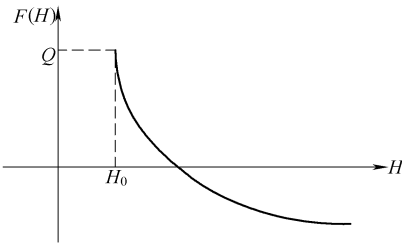


图4  $F(H)$  函数变化趋势示意

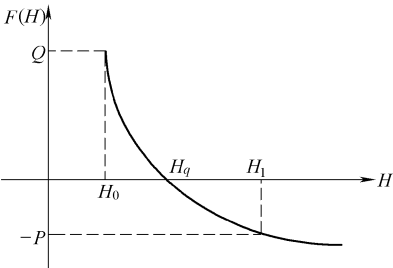


图5  $H_q$  求解示意

图6是基于任意多边形格网模型，在给定洪量条件下的一个洪水淹没分析例子。

**3.4 基于格网模型的洪水淹没连通算法** 对洪水淹没区域连通性的考虑，在一些淹没分析软件中，仅考虑高程平铺的问题，即在任何地势低洼的区域都同时进水，实际上从洪水本身淹没的角度来说这是不准确的，洪水首先是从洪水源处开始向外扩散淹没，只有水位高程达到一定程度之后，洪水才能越过某一地势较高的区域到达另一个洼地。洪水淹没的连通性算法可以采用有种子点的填充算法，这种算法可以从投石问路的原理来理解。

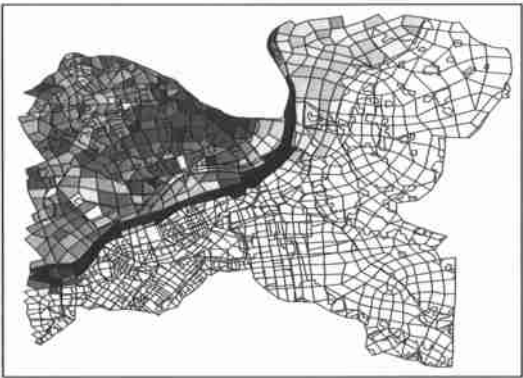


图6 任意多边形格网模型洪水淹没分析结果

假设有一个高程标准(洪水水位高程)需要将这一高程以下所有能够相互连通的区域探寻出来，并且假定这片区域由不同大小的格网组成，格网是由边数一样多(当然也可以不一样多，但那样会使问题更复杂)的多边形组成，为讨论问题的方便假定为三角形(其他格网单元的多边形可作类似考虑)，前进的方向即为投石问路的石子。假定有一个袋子，袋子里装着前进方向的石子。开始，只有一颗石子，某一个表明能够进入的边界单元的石子，能够从这一边界单元进入的条件是，所带的高程标准表明这一单元的高程比高程标准低。投出这颗石子从这一边界单元进入，进入该单元后(对该单元做标记，表明已经走过)，又得到两颗石子，即两个可能前进的方向，需要在这两颗石子检验是否可以继续用于投石问路，首先检验石子指明方向的单元是否具有已走过的标志，如果有则丢弃之，如果没有则保留，继续下一步检验。继续检验的条件是石子指明前进方向的单元高程比所带的高程标准是高还是低，如果高则该石子不合格，丢弃之，是低则合格，放入袋子中，袋中石子个数自动增加。检验完后，判断袋子中的石头个数，如果不为零，则可以继续往下探寻，再从袋子中取出一颗石子(袋中石子个数减一)，继续投石问

路,直到袋子中没有石子为止。这样就能遍历整个区域,找出与入口单元相连的满足高程标准的连通区域。

从问题的收敛性上来看,这种算法是完全可以收敛的,因为开始时只有一颗石子,每前进一步,得到的石子个数可能为 0, 1, 2(别的多边形数目可能不一样,一定包括零),但一定得消耗一颗用于探路的石子,所以如此不断探寻下去,最后石子用完,连通区域也就找出来了。

任意多边形格网模型的洪水淹没分析方法与三角单元格网模型相似,也可以采用投石问路算法,但与三角单元格网模型不同,在算法上需作一些技巧上的处理。因为每一个单元相邻的单元数量是不确定的,在算法上将每个单元的相邻单元编号,预先生成一个序列。在对每一个单元进行投石问路时,从预先生成的序列中提取出相邻单元的编号,完成投石问路的整个算法过程,每个单元的相邻单元数量虽然是不确定的,但是有限的,所以投石问路算法一定可以收敛。

#### 4 基于格网模型的遥感监测淹没范围水深分布分析

遥感监测的手段对于洪水淹没范围的确定是非常有效的,对于水深的分布的确定通常比较困难。根据遥感监测的洪水淹没范围,利用本文提出的洪水淹没分析算法,可以确定洪水淹没的水深分布。具体方法如下:由 DEM 生成任意多边形网格模型,该模型保证了网格单元上的高程是均等的,将遥感监测洪水淹没范围与该多边形网格模型叠加,认为淹没边界线所在的单元水深为零,淹没边界线以内的单元水深即为边界单元高程减去所在单元的高程值。这种做法是在假定淹没边界单元上的高程是相等的,实际上可能不是这样,这时可以考虑求每一个淹没边界单元相对于该单元产生的水深,然后再用距离倒数平方和加权求得该点的水深。图 7 是这种方法的一个实例,洪水遥感监测的淹没范围通过圈定一个范围来模拟,多边形区域为模拟的洪水遥感监测的淹没范围,淹没范围内水深分布通过颜色梯度表现。

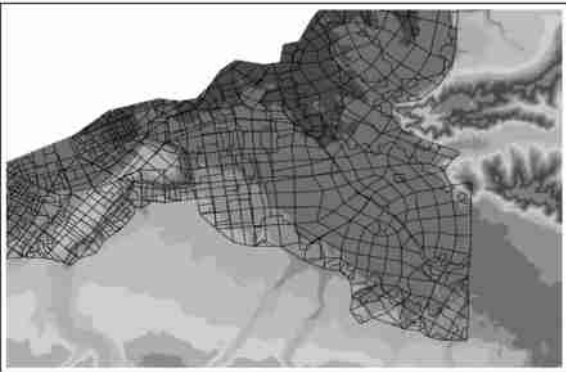


图 7 遥感监测淹没范围水深分布结果

#### 5 结语

根据本文提出的淹没区计算模型和方法,可以快速、准确地计算出淹没范围和水深分布,为洪涝灾害的客观、准确评估和预测分析提供了重要的基础和依据,洪涝灾害的损失评估模型<sup>[4]</sup>可以直接利用这一分析评估结果进行洪涝灾害损失评估,特别是对遥感监测洪水淹没范围水深分布的处理,使得遥感监测与一般洪涝灾害损失评估模型可以比较好地结合,得出更准确的灾害损失评估结果。以 GIS 技术为支持,采用分区平面模拟方法进行洪水淹没范围的模拟是可行的。淹没区计算精度主要取决于空间数据(DEM)精度的优劣。研究结果表明:地理信息系统技术为流域防洪减灾研究提供了一个有力的工具,使得流域洪水淹没分析模型的应用更加方便、准确和科学;同时,GIS 支持下的洪水淹没范围模拟为快速、准确及科学地进行洪灾评估洪水风险图的制作提供了良好的基础,也为中小流域防洪减灾决策支持创造了条件,可以有力地提高流域防洪决策能力。

(下转第 67 页)

- systems [ J ] . IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46 (2): 233—240.
- [ 31] Mantawy A H, Abdel-Magid Youssef L, et al. A simulated annealing algorithm for unit commitment [ J ] . IEEE Transactions on Power Systems 1998, 13 (1): 197—205.

## Estimation of water quality model parameters with simulated annealing algorithm

WANG Wei<sup>1</sup>, ZENG Guang-ming<sup>1</sup>, HE Li<sup>2</sup>

(1 Hunan University, Changsha 410082, China; 2 University of Regina, Saskatchewan, Canada S4S0A2)

**Abstract:** The simulated annealing (SA) algorithm is applied to simultaneously estimate the parameters of water quality in multiple river sections, and the BOD-DO coupling model is used to simulate the water qualities. In order to optimize the estimation of river water quality the difference of the sum of weighted square between predicted and measured BOD and DO is adopted as the target function. The maximum and minimum optimal estimation of the parameters are deduced after 30 times repeated estimation calculation. The result shows that the errors of estimated BOD and DO value are in the acceptable range. Accordingly, the optimal planning of water pollution control can be carried out.

**Key words:** simulated annealing algorithm; water quality model; parameter estimation; optimization

---

(上接第 60 页)

### 参 考 文 献:

- [ 1] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 复杂地形洪水淹没区计算方法 [ J ] . 地理学报, 2001, 56 (1): 1—6.
- [ 2] 葛小平, 许有鹏等. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟 [ J ] . 水科学进展, 2002, 13 (2): 456—460.
- [ 3] 程晓陶, 杨磊. 分蓄洪区洪水演进数值模型 [ J ] . 自然灾害学报, 1996, 5 (1): 85—91.
- [ 4] 李纪人, 丁志雄, 黄诗峰, 等. 基于空间展布式社会经济数据库的洪涝灾害损失评估模型研究 [ J ] . 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1 (2): 104—110.

## Method for flood submergence analysis based on GIS grid model

DING Zhi-xiong, LI Ji-ren, LI Lin

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on remote sensing technology the GIS grid model generated by digital elevation model (DEM) is utilized to analyze the flood submergence. By means of this method the flooding situation including the extent of flood submergence and water depth distribution is attained, if the flood level and discharge are given. This method combines the remote sensing technology with the model for assessing the flood loss and gives the more precise assessment of the flood loss.

**Key words:** flood submergence; digital elevation model (DEM); grid model