

基于 GIS 和数学形态学的洪水淹没研究

李发文¹ 张行南¹ 杜成旺²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 北京京西发电有限责任公司, 北京 100041)

摘要 根据数学形态学原理, 利用“膨胀算子”分析洪水淹没区域的连通性, 运用 GIS 栅格数据格式建立淹没区内离散的高程数据, 最后根据体积法原理, 计算出洪水淹没区水深和淹没范围。

关键词 洪水 淹没范围 淹没水深 膨胀算子 GIS 数学形态学

中图分类号 P333.9 **文献标识码** A **文章编号** 1006-764X(2005)06-0014-03

Study on flood submergence based on GIS and mathematical morphology // LI Fa-wen¹, ZHANG Xing-nan¹, DU Cheng-wang² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Beijing Jingxi Power Generation Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract : The continuity of flooded region was analyzed by use of the expansion operator in mathematical morphology, and the discrete elevation data of flooded region were obtained by GIS lattice data. Based on the calculated result, the water depth distribution and flooded region were computed by the principle of volumetric method.

Key words flood; flooded range; flooded water depth; expansion operator; GIS; mathematical morphology

洪水灾害对人类的严重影响由来已久。就灾害发生的时空范围、时空强度以及对人类生存与发展的威胁程度而言,洪水灾害居各种自然灾害之首^[1~4]。据统计,目前全球因洪水灾害所造成的经济损失占各类自然灾害总损失的 30% 以上^[5],因洪水灾害死亡的人数也在所有自然灾害死亡人数中占有较大比例。我国是一个洪涝灾害频繁的国家,全国有 1/2 的人口、1/3 的耕地受洪水威胁,这些地区的工农业产值占全国的 2/3。1949 年以来,我国每年因自然灾害造成的损失按 1990 年不变价格约为 500 亿~600 亿元,其中洪水灾害约占 60%,伤亡人口仅次于地震,居第二位^[5]。

防洪工作中一项基础性的工作是对洪水发生前、发生时和发生后的淹没范围进行模拟分析。洪水淹没范围模拟实质上是模拟各种洪水设计水平下洪水在地理空间上的蔓延过程及造成的淹没范围、淹没水深和受灾程度^[6]。20 世纪 90 年代以来,特别是近几年来,在水动力-水文模型基础上利用 GIS 强有力的空间分析和可视化功能模拟显示洪水淹没区,一直是一个研究热点^[7]。

本文以 GIS 栅格数据格式建立的离散高程数据为基础,利用数学形态学中的“膨胀算子”来模拟洪水淹没范围,然后根据洪水的来水量与洪水淹没范围内

水量体积相等的原理,结合模拟出的洪水淹没范围和地形栅格数据,计算出洪水淹没区水深的分布。

1 基于 GIS 的洪水淹没连通性分析

1.1 地形的概化

目前,表示地理对象空间特征的数据主要有两种格式:①矢量格式:用点、线、面 3 种主要的图形元素来表示地理对象,点和线由 X, Y 坐标定义,而面由线边界组成的多边形表示;②栅格格式:通过给覆盖其位置的格网赋予一定的值而不是通过给出 X, Y 坐标来表示地理特征。

本文采用的“体积法”中的离散方法和 GIS 中的栅格数据格式能够很好地吻合起来,所以采用栅格格式的高程数据。将洪泛区划分为一定大小的正方形网格,网格点间距不能太小,否则计算量太大;同时网格点间距也不能太大,否则试验区中的堤防、道路等概化就存在较大的误差,利用 mapbasic 编程自动生成网格。根据离散高程点,确定计算域内各处网格单元地面高程,同时对沟渠、道路、村庄、厂房以及泵站等进行概化,确定其相应的高程。沟渠以及高程与地面高程比较接近的道路,由于阻水不明显,认为与地面高程相同;主要道路、防汛道路以及堤防,则沿网格按实际的高程概化;对比较集中的村庄认为

相应的网格均为村庄占据,无洪水流入;厂房、泵站等设施均按村庄概化。

1.2 数学形态学中的膨胀运算^[8]

设 A 是被研究的图像, B 是另一个图像, 这里把 B 当作结构元素来使用。假设 B 中共包括 3 个点, 即 $b_1(0,0)$, $b_2(1,0)$ 和 $b_3(0,1)$, 见图 1。分别求 A 被 b_1 , b_2 和 b_3 平移的结果, 得到 3 个新图像 A_{b_1} , A_{b_2} 和 A_{b_3} , 其中 A_{b_1} 和 A 重合, A_{b_2} 相当于 A 向右平移一个单位, 而 A_{b_3} 相当于 A 向上平移了一个单位。 A_{b_1} , A_{b_2} 和 A_{b_3} 合并起来得到一个新的图像 A_{b_4} , 称它为 A 被 B 膨胀的结果, 记作 $A \oplus B$ 。

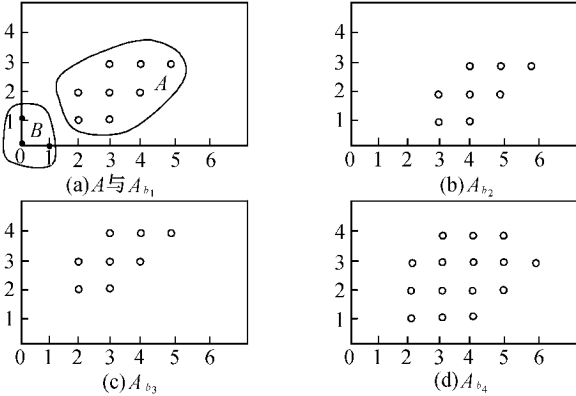


图 1 图像 A 被结构元素 B 膨胀的结果
因此, A 被 B 膨胀的结果可以定义为

$$A \oplus B = \bigcup_{b_i \in B} A_{b_i} \tag{1}$$

$A \oplus B$ 还有一些等价的形式, 其中之一是

$$A \oplus B = \{p \mid \exists b_i \in B, \exists a_j \in A (p = a_j + b_i)\} \tag{2}$$

式中: $\exists$ 表示“存在”, 式(2)表示 $A \oplus B$ 是所有满足以下条件的点 p 的集合: 在 A 中存在一点 a_j , B 中存在一点 b_i , 使 $p = a_j + b_i$ 。

在考察图像各部分之间的关系时, 需要设计一种收集信息的“探针”, 称为结构元素。在图形中不断移动结构元素, 便可考察各个部分之间的关系。结构元素选择得好坏, 直接影响着基本运算结果。

在栅格图像中, 连通图分为四连通图与八连通图(图 2, 图 3)。四连通即按其邻域关系为 4 点相邻, 如图 2 中, P 点与 A, B, C 和 D 相邻, 构成了四连通图; 八连通是按其邻域关系为 8 点相邻, 如图 3 中 P 点可与周围所有的方向 A, B, C, D, E, F, G, H 相

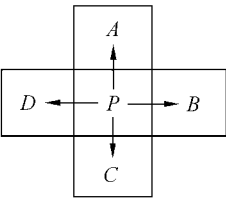


图 2 四连通图

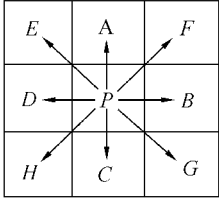


图 3 八连通图

邻, 构成八连通图。

1.3 基于形态学的洪水淹没连通性分析

以膨胀方式扩散的溃堤洪水, 认为洪水是匀速向四周扩散的, 这主要是因为随着经济的发展, 不透水地表面面积不断增大, 致使洪水传播时速度加快^[6], 同时地表糙率值随着水深的不断上升而降低; 而洪水向四周扩散时, 其洪峰、洪量、流速都有一定的衰减, 因此当洪水行进时, 其加速度可以忽略不计, 认为洪水作匀速行进。

二值形态学适用于二值图像, 所谓二值图像是指那些灰度只取两个可能值的图像, 这两个灰度值通常取为 0 和 1。习惯上认为取值为 1 的点对应景物中的物体, 而取值为 0 的点构成背景。这类图像的集合表示非常直接, 考虑所有 1 值点的集合 X , 则 X 与图像是一一对应的, 然后我们就可以对 X 集合进行膨胀分析。

在实际应用中, 遇到的绝大多数都是灰度图像, 如遥感图像、显微图像、照片等。与二值图像相对应, 灰度图像是指像素点的灰度值多于两个的图像。因此, 必须将本文的高程栅格图(相当于灰度图像)变化成容易处理的二值图像, 采用模糊隶属函数来解决。

根据高程栅格图, 可得到 m 行、 n 列目标特征值^[9]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \tag{3}$$

根据越小越优型指标相对隶属度公式 $r_{ij} = \frac{x_{i\min}}{x_{ij}}$, 将目标特征值矩阵变换为目标相对优属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \tag{4}$$

水平截集是在模糊集合与普通集合相互转化中的一个很重要的概念。设给定模糊集合 Y , 对任意 $[0, 1]$ 闭区间的实数 λ , Y 的 λ 水平截集定义为

$$Y_\lambda = \{y \in U \mid r_Y(y) \geq \lambda\} \tag{5}$$

所谓取一个模糊集的 λ 水平截集, 也就是将隶属函数按式(6)转化为特征函数:

$$C_{y\lambda}(y) = \begin{cases} 1 & r_Y(y) \geq \lambda \\ 0 & r_Y(y) < \lambda \end{cases} \tag{6}$$

创建一个专门存储淹没信息的判别图层, 图像与高程栅格图相同, 其每个栅格单元与高程栅格网单元一一对应, 并根据下面所求出的淹没水深 E_w , 设定 λ 值。从选定堤防溃口单元开始, 进行栅格网连通性分析, 把所有栅格单元的隶属度 $r_{ij} \geq \lambda$ 的单

元全部赋值“1”,所有栅格单元的隶属度 $r_{ij} < \lambda$ 的单元全部赋值“0”。这时所得到连通区域认为任何地势低洼的区域同时进水,实际洪水水位只有达到一定高度之后,洪水才能越过某一地势较高的区域到达另一洼地,因此要剔除所有洪水到达不了的“局部洼地”,同时将剔除的所有“局部洼地”所在单元全部赋值“0”,这些问题可以采用膨胀算法来处理。

洪水膨胀扩散与所选结构元相关,对于离散的栅格图,主要采用四方向结构元和八方向结构元,本文根据洪水在洪泛区中扩散的特点,采用八方向的结构元,更能反映洪水行进的规律。根据上面所得到判别图层即洪水淹没区域,采用八方向结构元作为膨胀算子,将结构元中心点作为“热点”,并与判别图层中被处理点即堤防溃口所处的单元点重合,考察结构元中各点在判别层中当前位置,记相应各点的灰度值为 V_i ,用 λ 同周围的网格 r_{ij} 值比较,只有在该点周围有不小于其灰度值时,才膨胀该点。这样遍历整个区域,就可以剔除所有“局部洼地”,找到与溃口单元相连的连通区域。

设结构元图像 B 对 A 进行膨胀时,记 A 中被处理点 (x, y) 的灰度为 V_0 ,于是,有若 $V_i \geq V_0$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 则膨胀 V_0 点。取二点之差 $\Delta V_i = V_i - V_0$ 与 b_i 的乘积 $\Delta V_i b_i$ 作为膨胀值,再取 V_0 的诸邻点膨胀值的均值作为 V_0 的最终膨胀值 V_0' ,即

$$V_0' = V_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (V_i - V_0) b_i \quad (7)$$

式中: n 为 $V_i \geq V_0$ 的邻点数。

2 基于 GIS 的“体积法”洪水淹没分析

本文提出了基于 GIS 的“体积法”洪水淹没范围水深计算模型。“体积法”的基本思想是:根据洪水的来水量与洪水淹没范围内水量体积相等的原理来模拟洪水淹没范围的水深。运用 GIS 方法获取淹没水深,需要数字地面高程模型的支持,水深由水面高程与地面高程共同决定。由于洪泛区域地形复杂,各淹没单元洪水水面和地面高程各不相同,因此可得

$$D(x, y) = E_w(x, y) - E_g(x, y) \quad (8)$$

式中: (x, y) 为淹没区单元位置; $D(x, y)$ 为淹没区单元位置处水深; $E_w(x, y)$ 为淹没区单元位置处洪水水面高程; $E_g(x, y)$ 为淹没区单元位置处地面高程。

针对研究区域——洪水淹没区 M ,考虑到洪水淹没区的陆面高程 $E_g(x, y)$ 的离散性,由水量平衡原理可得

$$Q_b = \sum_M D(x, y) \Delta \sigma \quad (9)$$

式中: Q_b 为溃坝流量; $\Delta \sigma$ 为洪水淹没区小方块的面积。

从理论上分析,洪水水面可能是水平平面、倾斜平面,甚至是一个复杂曲面,尤其对较大洪水波而言,为了便于分析,对于湖泊、水库、蓄滞洪区或局部低洼地等,水面可以近似简化为水平平面,表面高程可由一个或几个水面高程的均值决定^[10]。因此,式(9)可以简化为

$$Q_b = \sum_{i=1}^N [E_w - E_g(i)] \Delta \sigma \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

式中: E_w 为淹没水深; N 为洪水淹没区 M 所划分的小方块数; $M = \sum_{i=1}^N \Delta \sigma$; $E_g(i)$ 为第 i 个小方块的高程。

式(10)中 $Q_b, E_g(i)$ 都是已知量,只有 N 和 E_w 为未知量。本文认为 N 不仅与 E_w 有关,还与洪水演进的速度有关,具体的求解过程如下:

a. 溃坝流量为 Q_b ,溃坝历时为 t ,假设 $E_g(i)$ 均在 E_w 之下,利用上述“膨胀算子”方法确定在时段 t 内的淹没范围 M' ,此时所确定的淹没范围为该时段最大淹没范围。

b. 由式(10)可得

$$E_w = \frac{Q_b}{N \Delta \sigma} + \frac{\sum_{i=1}^N E_g(i)}{N} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

代入各参数,求出淹没水深 E_w' 。

c. 用 E_w' 与淹没范围内的 $E_g(i)$ 比较,如果 $E_w' > E_g(i)$,则所取出的 M' 和 E_w' 就是洪水淹没范围和淹没水深,如果 $E_w' \leq E_g(i)$,说明淹没范围内有与溃口不相连通的区域,根据 E_w' 值,利用膨胀算法重新计算洪水淹没范围 M_0 ,将式(10)转化为

$$f(E_w) = Q_b - \sum_{i=1}^N [E_w - E_g(i)] \Delta \sigma \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

$f(E_w)$ 函数为单调递减函数,函数变化趋势见文献[11],将 E_w' 和 M_0 代入式(12)中求出 $f(E_w)$,将 M' 代入,并代入 $-E_w''$ 使得 $f(E_w) < 0$,通过二分法迭代^[11]求解出 $f(E_w)$ 在 (E_w', E_w'') 范围内趋近于零的 E_w ,最后根据膨胀算法求出与 E_w 相应的洪水淹没范围。

3 结 语

根据本文提出的基于 GIS 的体积法和数学形态学相结合的方法,可以迅速地计算出淹没区范围和各个时刻各淹没区域单元的洪水淹没水深,为洪水灾害的客观、准确评估和预测分析提供了重要基础和依据。

(下转第 24 页)

3.5 试验结果分析

根据试验结果,可分析如下:

a. 如图 6 所示,当防渗墙深度相同,试样在第 1 次、第 2 次和第 3 次试验时,管涌口处的出砂量逐次变少.主要是由于随着试样放置时间的加长,以及土体扰动等方面的原因,土体变得越来越密实.越是密实的砂土越不容易发生管涌.

b. 当其他条件都相同时,防渗墙的深度对于管涌口出砂量有明显影响.将不同防渗墙深度和管涌口出砂面积进行线性拟合发现,两者具有较明显的线性关系(见图 7),即 $S = a + bh$,相关系数在 0.97 以上.

c. 随着防渗墙深度的增加,土体内部的砂粒越来越难以从土体中被带出(表 3).可能有两方面的原因:①防渗墙截断了最不利的渗透破坏通道;②防渗墙对于出水量的影响,即防渗墙的加深使流量逐步减小,管涌通道内水的流速降低.根据泥沙动力学相关知识,流速的降低将导致水的携砂能力下降,无法将砂颗粒冲走.

d. 防渗墙的作用不仅仅体现在保护防渗墙外的土体,通过表 3 也可以看到,当防渗墙达到一定深度时,彩色砂中,仅仅只有紫色砂发生运动,其他颜色的砂都静止不动了.即随着防渗墙的加深,发生渗透破坏的土体就仅仅局限在堤脚附近的狭小区域了,而内部的堤基则没有破坏.

4 结 论

通过本文试验可以得到一些初步结论,同时也

还存在一些值得进一步研究的问题:①二元结构堤基的渗透破坏很大一部分实际上是:首先在弱透水层中发生流土,然后在两层土之间发生接触冲刷.②试验成果说明悬挂式防渗墙对于管涌出砂量有控制作用,并且在试验中管涌口环形出砂面积与防渗墙深度线性相关.③砂土的密实程度对于管涌的发生和发展有一定的影响.试验中,同一防渗墙深度条件下,取同一试样做第 2 次、第 3 次试验时,由于砂层中水头反复变化,并且试验过程中有方方面面的扰动,砂层逐渐变得密实.从试验观测结果来看,管涌的发展趋势也越来越弱.④试验中悬挂式防渗墙对于堤基的保护作用不仅仅体现在上游侧,对下游侧堤基内部管涌的发展也有一定的抑制作用.

参考文献:

[1] 李广信,周晓杰.土的渗透破坏及其工程问题[J].工程勘察,2004(5):10—14.
[2] 吴昌瑜,丁金华.九江长江干堤溃口段破坏机理及处理措施[J].岩土工程学报,2001,23(5):557—562.
[3] 张家发.堤防加固工程中防渗墙的防渗效果及应用条件研究[J].长江水利水电科学院院报,2001(5):56—60.
[4] 张家发,吴昌瑜,朱国胜.堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J].水利学报,2002(9):108—111.
[5] Chi Fai Wan, Robin F. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dam[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004(4):373—380.

(收稿日期 2005-02-28 编辑:马敏峰)

(上接第 16 页)

参考文献:

[1] 王劲峰.中国自然灾害影响评价方法研究[M].北京:中国科技出版社,1993.
[2] 贺军,谈为雄.基于 GIS 的水电规划决策支持系统框架设计[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):78—80.
[3] 周成虎.洪水灾害评价信息系统研究[M].北京:中国科技出版社,1993.1—32.
[4] 中国防汛抗旱总指挥部办公室,水利部南京水文水资源研究所.中国水旱灾害[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
[5] 魏一鸣,金菊良,杨存建,等.洪水灾害风险管理理论[M].北京:科学出版社,2002.
[6] 向素玉,陈军.基于 GIS 城市洪水淹没模拟分析[J].中国地质大学学报,1995,20(5):575—580.
[7] 刘学,王兴奎,王光谦.基于 GIS 的空间过程模拟建模方法研究[J].中国图像图形学报,1999,4(6):476—480.

[8] 唐常青,吕宏伯.数学形态学方法及其应用[M].北京:科学出版社,1990.
[9] 董朝霞,张少军,王乘,等.数字流域防洪模糊优化调度的应用研究[J].水利水电技术,2004,4(4):60—62.
[10] 白薇.城市洪水风险分析及基于 GIS 的洪水淹没范围模拟方法的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2001.
[11] 丁志雄,李纪人,李琳.基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析[J].水利学报,2004(6):56—60.

(收稿日期 2004-09-17 编辑:骆超)

