

基于 DEM 的有源淹没算法设计与实现 ——以种子蔓延法为例

赵秀英, 王耀强, 李洪玉, 张东华

内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018

摘要 针对传统有源淹没的递归、迭代算法占用计算机资源较多, 且当算法深度太深时易造成系统堆栈溢出, 从而导致程序崩溃等缺点, 以数字高程模型为基础, 研究了给定水位条件下洪水有源淹没模型和算法, 并在此基础上设计实现了种子蔓延算法。通过与原有的递归算法对比, 发现该算法在一定程度上提高了计算效率和稳定性, 最后在“南昌洪水淹没分析系统”中应用并得到验证。

关键词 DEM; 有源淹没; GIS; 淹没范围

中图分类号 P208

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.08.009

Design and Implementation of Seed Spread Algorithm for Calculations of Source Flood Submerge Area Based on DEM

ZHAO Xiuying, WANG Yaoqiang, LI Hongyu, ZHANG Donghua

Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract The recursion and iterative algorithms of source flood submerge area would take too much computer resource, and when the recursion depth is deep, the system would often collapse because of the system stack overflow. To deal with this problem, this paper proposes a source flood submerge model and the related algorithm based on DEM, on the condition of the given water level of the flood. A "seed spreading" algorithm for visiting every node of the stack is developed. First of all, a new empty submerged buffer stack is created, and from the flood source point, it is determined whether the source point's flood level is lower than the given water level. If it is true, the source point is put into the buffer stack and is marked as the submerged grid. Then the surrounding 8 neighborhood raster grids are searched, if a grid meets the condition, we put the grid into the flooded area buffer stack. At the same time, the first element of the stack is popped up. Repeat this operation until the flood buffer stack is empty, and extend this operation to all nodes of the stack, just like the "seed spreading" and eventually complete the inundated area calculation. Compared with the original recursion algorithm, this algorithm has improved the calculation efficiency and stability to a some extent. This algorithm was successfully applied in the "Nanchang flood submerge analysis system".

Keywords DEM; source flood; GIS; submerge area

0 引言

随着社会的发展,洪水灾害对我国经济的影响已由过去的农业扩展到城市、工业、生态等诸多领域,造成的损失日益严重。因此,研究利用新技术快速、准确、科学地模拟并预测洪水淹没范围已成为一个重要而紧迫的课题^[1]。

近年来,利用 GIS 强大的空间分析能力和可视化功能,模拟显示洪水淹没范围一直是一个研究热点,但是具体讨论实现淹没范围计算和显示的算法的研究不多^[2]。很多学者采用递归算法实现有源淹没范围的计算,虽然递归算法有其固有优点,如可以简单、直观的代码实现淹没分析的计算过程,容

收稿日期:2012-01-12;修回日期:2012-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51169016)

作者简介:赵秀英,实验师,研究方向为测绘工程,电子信箱:zdh@imau.edu.cn

易理解^[3],但是当递归深度太深时,其计算效率低和稳定性不高的缺点是致命的。为了解决递归算法的不足,本文重点研究了在给定水位条件下,如何达到基于数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)的有源淹没区域的算法的设计与实现,并在此基础上设计实现了种子蔓延算法,最后在“南昌市洪水淹没分析系统”中进行应用和验证。

1 基于格网 DEM 的淹没范围计算模型

1.1 数字高程模型

数字高程模型,是数字按一定结构组织在一起,表示实际地形特征空间分布的模型,也是地形形状大小起伏的数字描述。DEM的核心是地形表面特征点的三维坐标数据和一套对地表提供连续描述的算法,最基本的DEM由一系列地面点位置 (x,y) 及与其相联系的高程 Z 所组成,其数学函数表达式为 $Z=f(x,y)$,且 $(x,y) \in \text{DEM}$ 所在区域。DEM通常用地表规则网格单元构成的高程矩阵表示,广义的DEM还包括等高线、三角网等所有表达地面高程的数字表示^[4]。

栅格数据结构是用空间点密集而规则的排列表示整体空间现象的一种数据结构。该数据结构简单,定位存取性能好,可以与影像DEM数据进行联合空间分析,容易实现数据共享,对栅格数据的操作比较容易^[5]。但是由于栅格的数据量与格网间距的平方成反比,所以获得较高几何精度的代价是数据量的极大增加。因为栅格数据结构只使用行列来作为空间实体的位置标识,故难以获取空间实体的拓扑信息和进行网络分析等操作^[6]。

1.2 给定水位条件下的洪水淹没计算模型

这里的给定洪水水位可以是现状的洪水水位,也可能是来自水力-水文模型计算预测的结果,实际上是近似的计算洪水淹没范围的方法,更精确的淹没区计算还需考虑淹没过程的水动力学模拟和水面形状变化问题。然而,“给定水位”近似方法实用、便捷且便于实现,在实际抗洪应用中有较重要的实际意义^[7-8]。

基于DEM求解给定水位条件下的洪水淹没范围有2种情况:无源淹没和有源淹没。无源淹没是指凡高程值低于给定水位的栅格都计算进入淹没区域,不考虑连通性;有源淹没则是考虑地形连通性,即洪水只能淹没所能流经的区域^[9-10]。对某些地形,例如环形山地形,无源淹没计算可能导致环形山内外都生成淹没区;而在有源淹没中,外来洪水若未及山顶,则只能在山环外形成淹没区^[11]。这2种情形都具有实际意义,第1种相当于整个地区大面积均匀降水的情形,所有低洼处都可能积水成灾;第2种相当于高发洪水向邻域泛滥,例如洪水决堤或局部暴雨引起的暴涨洪水向四周扩散^[12-13]。

从计算机算法实现角度来看,无源淹没的实现较简单,基本不需要算法,只遍历所有栅格单元,找出低于给定水位的栅格即可。本文主要研究有源淹没算法即种子蔓延法,通过指定1个源点,然后向其周围8个方向扩展,凡是高程低

于给定水位的栅格都被计入淹没区域,当栅格遇到边界或高于给定水位的栅格便返回或标记为不可淹没栅格,这样最后提取的淹没区域栅格便是有源淹没范围^[14]。

2 种子蔓延算法模型的设计与实现

为了更好地表述种子蔓延算法,表1列出了规则网格单元DEM数据模型。其中,正整数 x 表示行号,正整数 y 表示列号, (x,y) 表示了1个中心 x 行 y 列处规则栅格单元的抽象模型。如表1所示,假设淹没源点是 $\text{RasterPoint}(x,y)$ 和其周围8个邻域栅格 $\text{RasterPoint}(i,j)$,其中 $x-1 \leq i \leq x+1, y-1 \leq j \leq y+1$ 。

表1 规则二维栅格数据模型

Table 1 Model of regular two-dimensional grid raster data

栅格模型第1列	栅格模型第2列	栅格模型第3列
$(x-1,y+1)$	$(x,y+1)$	$(x+1,y+1)$
$(x-1,y)$	(x,y)	$(x+1,y)$
$(x-1,y-1)$	$(x,y-1)$	$(x+1,y-1)$

已知给定水位高程是 FloodLevel ,种子蔓延算法的计算机实现原理是:首先新建1个淹没区缓冲堆栈,然后从淹没源点即栅格 $\text{RasterPoint}(x,y)$ 开始判断,如果源点栅格水位 $\text{RasterPoint}(x,y) \leq \text{FloodLevel}$,则将源点栅格放入淹没区缓冲堆栈中,标记为可淹没栅格;然后搜索其周围8个邻域栅格 $\text{RasterPoint}(i,j)$,将符合条件的栅格放入淹没区缓冲堆栈中,同时弹出堆栈中的第1个元素 $\text{RasterPoint}(x,y)$ 。此时,堆栈中的第1元素应该是 $\text{RasterPoint}(x,y)$ 邻域栅格中的1个,假设此栅格是 $\text{RasterPoint}(x-1,y-1)$,则第2次循环计算时的淹没源点便是 $\text{RasterPoint}(x-1,y-1)$,重复第1步运算。这样循环运算直到淹没缓冲区堆栈为空,遍历堆栈所有节点,最终完成淹没范围计算。

根据洪水实际动态过程,算法每次循环运算的源点应该是堆栈中高程最低的那个栅格元素,而不一定是堆栈中第1个元素。这里考虑到所需的是最终淹没范围,因为同一给定水位下最终淹没范围是固定的,为提高运算效率,并没有在堆栈中找出最低的栅格单元。

算法是收敛的,每次运算以堆栈中新的淹没源点搜索其邻域,标记可淹没的栅格,确保不重复计算,并将淹没栅格放进堆栈中,同时弹出源点栅格。因为某个水位下的淹没范围是固定的,所以堆栈中元素个数最终会递减,循环至堆栈为空,完成运算。

针对上述种子蔓延算法,有一段简短C#语言伪码表示,且

```
if(RasterPoint(i,j) ≤ FloodLevel(如果淹没源点栅格单元符合淹没条件,将其放入堆栈)
```

```
{ FloodList.Add(RasterPoint(stratX, stratY)); }
```

```
算法主函数 Flood(startX, stratY, FloodLevel)
```

```
{ 1. 判断堆栈是否有元素,若没有则表明计算结束
```

```
while (FloodList.Count! =0)
2. 获取堆栈第一个元素坐标
   { int rowX= FloodList[0].X
     int colmY= FloodList[0].Y
3. 标记可淹没
     isFlood [rowX,colmY]=true;
4. 弹出堆栈第一个元素
     FloodList.RemoveAt (0);
5. 向中心栅格单元的 8 个邻近方向搜索连通域
     for (int i = rowX-1;i ≤rowX+1;i++)
       for (int j=colmY-1;j ≤colmY+1;j++)
6. 判断是否达到栅格边界
       { if(i,j 下标没有越界)
7. 寻找可以淹没并且没有被标记过的栅格单元
       {if (RasterPoint(i,j)≤FloodLevel && isFlood[i,j]==false)
8. 将栅格单元 RasterPoint (i,j) 标记为淹没, 避免重复
   运算
```

```
{ isFlood[i,j]=true;
9. 将符合淹没条件的栅格单元 RasterPoint(i,j)加入堆栈
   FloodList.Add(RasterPoint(i,j));}}}
```

其中,算法所需变量:栅格淹没缓冲区堆栈 Ilist<RasterPoint>; FloodList;源点栅格行列号 :startX,startY;二维淹没区域 bool 数组 isFlood[,]用作记录符合淹没条件栅格;算法初始化:运算前初始化 bool 数组 isFlood 所有元素为 false。

种子蔓延主函数 Flood 运算完后, isFlood 数组中标记为 true 的栅格即是可以淹没的栅格,也就是得到的连通有源淹没范围。

3 实例应用

“南昌洪水淹没分析系统”是用 C# 语言,借助于 ESRI 的 ArcGIS Engine 平台而开发出来的用于抗洪分析的决策系统(图 1)。图 2 为假设淹没原点在明山闸,预测洪水水位高程为 20m 时的淹没范围分析,其中橘红色测站点表示水位实测值(数据来自水文数据库),具体数据见表 2。

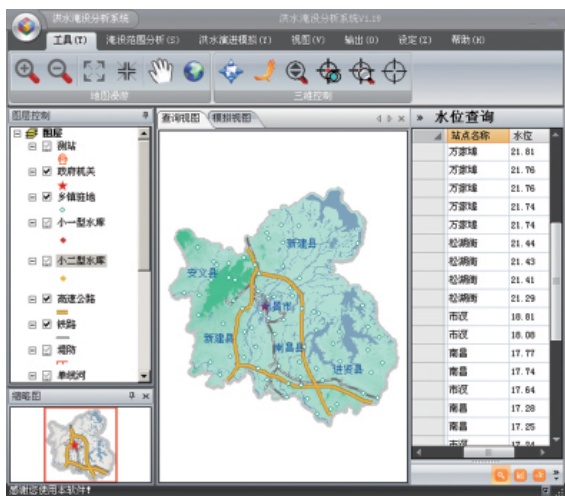


图 1 南昌洪水淹没分析系统主界面
Fig. 1 Main interface of Nanchang flood submergence analysis system

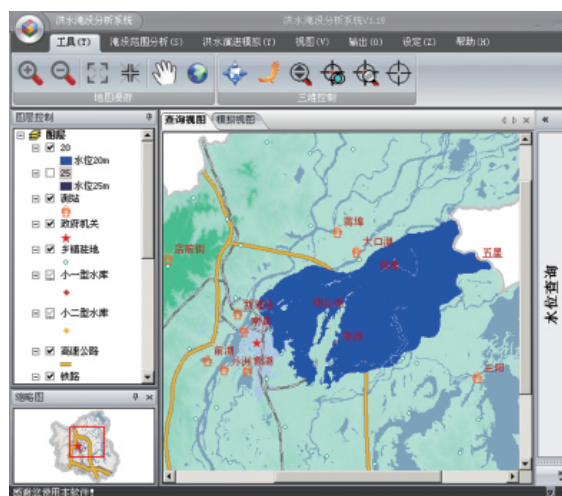


图 2 应用种子蔓延算法得到的洪水有源淹没范围
Fig. 2 Source flood submergence area by seed spread algorithm

表 2 相关站点高程数据
Table 2 Elevation data of related sites

ID	站点	站点高程/m	预测洪水水位/m	是否淹没
1	明山闸	16.47	20	是
2	瑶湖	17.63	20	是
3	滁差	18.14	20	是
4	南昌	18.47	20	否
5	新建县	20.12	20	否
6	大湖口	21.58	20	否
7	五星	14.35	20	是

明山闸、瑶湖、滁差、五星 4 个测站在淹没范围内,测站

高程低于 20m,这表明算法正确。南昌站相对水位为 18.47m,小于 20m 洪水高程,反而未被淹没,这是因为有防洪堤的存在。这也验证了用种子蔓延算法计算连通区域的正确性,同时对实验中处理的 DEM 数据(100M),算法运算稳定且计算时间约 5—8s。计算结果见图 2。其中,蓝色区域表示算法预测出的淹没范围,此次实例应用表明,种子蔓延算法提高了系统的分析模拟性能,能达到较为满意的精度,在防洪抗洪工作中有一定实际意义和较高应用价值。

4 结论

本文研究的种子蔓延算法可以对 DEM 数据进行给定水位下的有源淹没范围精确高效分析计算。与递归算法相比,

种子蔓延算法有一定改进,不仅不局限于递归深度,而且节省了系统资源,从而提高了计算效率和算法的稳定性。算法的准确性依赖于 DEM 数据的准确程度,对小范围 DEM 数据可以实现快速简便计算;对较大范围的 DEM 数据,算法仍然准确可靠,只是计算效率略有下降。

参考文献 (References)

- [1] 张尚弘, 赵登峰, 姜晓明. 洪水淹没预报的虚拟仿真表达[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(6): 861-864.
Zhang Shanghong, Zhao Dengfeng, Jiang Xiaoming. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition*, 2010, 50(6): 861-864.
- [2] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 的复杂地形的洪水淹没区域计算方法[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 1-6.
Liu Renyi, Liu Nan. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 1-6.
- [3] 周品, 李勇, 谭建军, 等. 基于 DEM 的洪水淹没计算机算法优化研究[J]. 微型计算机信息, 2007, 23(1): 196-198.
Zhou Pin, Li Yong, Tan Jianjun, et al. *Microcomputer Information*, 2007, 23(1): 196-198.
- [4] 郭伦. 地理信息系统——原理, 方法和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 129-131.
Wu Lun. *Geographic information system—principle, method and application*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 129-131.
- [5] 胡鹏, 黄杏元, 华一新. 地理信息系统教程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 26-27.
Hu Peng, Huang Xingyuan, Hua Yixin. *Geographic information system course*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 26-27.
- [6] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 10-12.
Li Zhilin, Zhu Qing. *Digital elevation model* [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 2000: 10-12.
- [7] 杨军, 贾鹏, 周廷刚, 等. 基于 DEM 的洪水淹没模拟分析及虚拟现实

- 表达[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(10): 143-147.
Yang Jun, Jia Peng, Zhou Tinggang, et al. *Journal of Southwest University: Science and Technology Edition*, 2011, 33(10): 143-147.
- [8] 余晓, 李翀, 王昊, 等. 额尔古纳河洪水淹没模拟及湿地植被变化分析[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1308-1315.
Yu Xiao, Li Chong, Wang Hao, et al. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1308-1315.
 - [9] 郭利华, 龙毅. 基于 DEM 的洪水淹没分析[J]. 测绘通报, 2002(11): 25-27.
Guo Lihua, Long Yi. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2002 (11): 25-27.
 - [10] 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.
Ge Xiaoping, Xu Youpeng, Zhang Qi, et al. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 456-460.
 - [11] 孙海, 王乘. 利用 DEM 的“环形”洪水淹没算法研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(8): 948-951.
Sun Hai, Wang Cheng. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(8): 948-951.
 - [12] 李春红, 任立良, 左振鲁, 等. 基于 DEM 的三峡区间洪水淹没范围模拟[J]. 水文, 2005, 25(1): 1-4.
Li Chunhong, Ren Liliang, Zuo Zhenlu, et al. *Journal of China Hydrology*, 2005, 25(1): 1-4.
 - [13] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 技术的淹没区确定方法及虚拟现实表达[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2002, 29(5): 573-578.
Liu Renyi, Liu Nan. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2002, 29(5): 573-578.
 - [14] 张东华, 刘荣, 张咏新, 等. 一种基于 DEM 的洪水有源淹没算法的设计与实现[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(2): 183-184.
Zhang Donghua, Liu Rong, Zhang Yongxin, et al. *Journal of East China Institute of Technology: Science Edition*, 2009, 32(2): 183-184.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)

·学术动态·



“全国抗恶劣环境计算机 第二十二届学术年会”征文

“全国抗恶劣环境计算机第二十二届学术年会”拟于 2012 年 9 月 11—14 日在武汉市召开。会议由中国计算机学会主办。

征文范围: 抗恶劣环境计算机发展现状与趋势; 自主可控的计算机需求分析; 国产关键软硬件的适配技术; 自主可控的计算机工程化设计技术; 自主可控的计算机可靠性设计技术。

论文截稿日期: 2012 年 6 月 15 日。

联系电话: 010-88525524。

电子信箱: songly706@sina.com。

会议网站: <http://www.ccf.org.cn/sites/ccf/tbbodyly.jsp?contentId=2663513328969>。