

# 基于趋势面分析的洪水淹没水位分布模拟研究

崔灵周<sup>1</sup>, 李玉宝<sup>1</sup>, 陈锦雁<sup>2</sup>, 封毅<sup>3</sup>

(1. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035;

2. 温州市水文站, 浙江 温州 325403; 3. 温州大学 学报编辑部, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 洪水淹没水位空间分布是防洪科学决策和洪灾评估不可或缺的重要信息。依据趋势面分析基本原理,以“莫拉克”台风期间洪灾较为严重的温州市平阳县麻步镇为研究区域,结合洪水淹没水位调查,建立了该镇洪水淹没水位空间分布的一次和二次趋势面模拟模型,并利用调查点水位进行了模型验证。结果表明,麻步镇洪水淹没水位一次和二次趋势面模拟模型的拟合程度很好,拟合度系数  $R^2$  分别达到 0.95 和 0.96,  $F$  检验在 0.01 水平上均呈极显著;一次趋势面模型对各验证点洪水淹没水位模拟的平均绝对误差为 0.1 m,比二次趋势面模型对相应验证点淹没水位模拟的平均绝对误差减小了 0.3。

**关键词:** 趋势面; 洪水水位; 空间分布; 模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0138-04

中图分类号: P208

## Spatial Distribution of Flood Level Based on Trend Surface Analysis

CUI Ling-zhou<sup>1</sup>, LI Yu-bao<sup>1</sup>, CHEN Jin-yan<sup>2</sup>, FENG Yi<sup>3</sup>

(1. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang

325035, China; 2. Hydrological Station of Wenzhou City, Wenzhou, Zhejiang 325403, China;

3. Editorial Department of Journal of Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

**Abstract:** Flood level is important information for flood control decision and flood loss evaluation. Based on the principles of trend surface analysis and field survey of flooded areas of Mabu Town in Wenzhou City during typhoon Matsa, a simple and quadratic trend surface model of flood level was developed and validated. The results showed that the prediction of the model matched the field data of the flood levels quite well, indicating the strong coefficients of determination of 0.95 and 0.96 for the first and second order surface simulation ( $p < 0.01$ ), respectively. The average absolute error of the first-order model was 0.1 m in validation, while that of the second-order model was 0.3 m lower.

**Keywords:** trend surface; flood level; spatial distribution; simulation

洪水灾害是我国东南沿海地区在台风登陆期间发生频率较高的灾害类型,其所造成的灾害损失严重威胁当地人民生命财产安全和社会稳定发展,科学准确模拟和预测洪水淹没水位及分布对于防洪减灾决策和洪灾评估具有重要的现实意义。对于洪水淹没水位的模拟研究,由于洪水淹没面是一个复杂曲面,目前多以给定水位条件下的近似水平面模拟洪水淹没水位变化。孙阿丽等<sup>[1]</sup>采用无源淹没分析方法对给定水位条件丹江口库区大坝加高后洪水淹没范围进行了模拟;刘仁义等<sup>[2-6]</sup>对给定水位条件下洪水有源淹没范围源点格网蔓延算法、堆栈节点遍历算法、区域生长算法和基于水力演进模型的洪水淹没分区

平面模拟方法进行研究;陈鹏霄等<sup>[7]</sup>运用空间统计学中的 Kriging 插值方法将一维水力学模型计算的断面数据内插成水面高程数据,对水面高程数据和研究区域地形数据进行分析,获得洪水淹没信息的空间分布;杨茜等<sup>[8]</sup>应用数字高程模型 (DEM) 生成网格,通过给定洪水总量,在假定淹没水面为平面的情况下计算出洪水淹没范围和水深。可以看到,基于给定水位和断面数据内插的近似水平面洪水淹没水位模拟对于范围较小、地形均一的区域较为适合,但对于地形变化复杂的较大范围区域,洪水淹没水位模拟显然会产生一定误差。

趋势面分析是对空间数据的分布特征进行研究

收稿日期: 2011-12-11

修回日期: 2012-01-22

资助项目: 温州市科技局重大项目“温州台风暴雨预测预报及灾情模型研究”(S20080017); 浙江省教育厅项目“地貌形态多重分形特征与区域滑坡灾害空间分布关系研究”(20070527); 温州市软科学课题(kx2011-02)

作者简介: 崔灵周(1971—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 研究方向为洪灾评估与 GIS 应用。E-mail: clingzhou@126.com。

通信作者: 封毅(1978—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为洪水过程及预报。E-mail: wanfe@126.com。

和分析的一种数学方法,它常采用某种形式的函数所代表的曲面来逼近该空间数据的分布特征,由于该曲面抽象并过滤掉了一些局域随机因素的影响,使得该空间数据的分布规律更趋明显化<sup>[9]</sup>。对于洪水淹没范围研究来说,在获得洪水淹没区有限代表点位的淹没水位信息基础上,可利用趋势面分析方法建立洪水淹没水位分布趋势面模型并选配合适的趋势面,以该趋势面作为实际洪水淹没面的近似概化。本研究以温州市平阳县的麻步镇为例,在该镇2009年“莫拉克”台风期间洪水淹没水位调查基础上,利用趋势面分析方法对该场台风期间麻步镇的洪水淹没水位及分布进行模拟研究,为大范围复杂地形条件下洪水淹没水位分布模拟提供新探索。

## 1 研究区概况

麻步镇位于鳌江流域下游,行政隶属于浙江省温州市平阳县。该镇总面积42.8 km<sup>2</sup>,下辖39个行政村和2个社区,2009年总人口4.67万人。该镇交通便利,104国道、57省道、温福铁路和甬台温高速公路贯穿全境。由于地处鳌江流域的感潮河段,且三面低山丘陵环绕,中部为河谷平原,地势西高东低。该镇成为温州沿海夏秋两季台风暴雨所致洪水灾害较为严重的乡镇之一。2009年的“莫拉克”台风期间,麻步镇洪水水位达6.56 m,淹没水深最大为4.10 m,最长受淹时间超过38 h,2万余人被洪水围困。

## 2 洪水淹没水位趋势面模拟模型

趋势面模型是以多元回归分析为基础的多元统计模型,所谓的趋势面并不是空间要素实际分布面,而是近似曲面,通常将其分解为趋势面和偏差两部分,前者反映空间要素的区域分布规律,由确定性函数表达;后者反映了空间要素的局部变化特点,是随机因素影响的结果,由随机性函数表达<sup>[9]</sup>。对于趋势面的拟合,一般采用能够反映连续变化分布趋势的多项式函数,若多项式的次数为 $n$ 次,其趋势面称为 $n$ 次多项式趋势面,一般多项式次数越高,趋势面与实测值偏差越小。

### 2.1 模型建立

洪水淹没面可概化为由一系列地面点 $(x, y)$ 及其相联系的水位 $Z$ 所组成的曲面,该曲面可由数学函数 $Z=f(x, y)$ 以多项式定量表达,因此洪水淹没水位趋势面模拟模型建立成为寻求函数 $Z=f(x, y)$ 的多项式定量表达过程<sup>[10]</sup>。

设函数 $Z=f(x, y)$ 可由下列多项式趋势面表达,即:

$$Z=a_0+a_1x+a_2y+a_3x^2+a_4xy+a_5y^2+\dots+a_ky^p \quad (1)$$

令 $x_1=x, x_2=y, x_3=x^2, x_4=xy, x_5=y^2$ ,则公式(1)可变换为:

$$\hat{Z}=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_px_p \quad (2)$$

设实测水位为 $Z_i$ ,趋势面模型预测水位为 $\hat{Z}_i$ ,则有:

$$Q=\sum_{i=1}^n(Z_i-\hat{Z}_i)^2 \quad (3)$$

根据最小二乘法原理,求解公式(3)的最小值,得到公式(1)的正规方程组,解出正规方程组即得 $a_0, a_1, \dots, a_p$ ,从而得到趋势面方程。

### 2.2 模型拟合程度检验

2.2.1  $R^2$  检验法 拟合度系数 $R^2$ 是测定回归模型拟合程度的重要指标。一般用水位 $Z$ 的总离差平方和中的回归平方和所占的比重表示回归模型的拟合程度,其中总离差平方和等于回归平方和与剩余平方和之和,即:

$$S_T=S_D+S_R \quad (4)$$

$$R^2=\frac{S_R}{S_T}=1-\frac{S_D}{S_T} \quad (5)$$

式中: $S_D$ ——剩余平方和,表示随机因素对 $Z$ 的离差的影响; $S_R$ ——回归平方和,表示自变量对 $Z$ 的离差的总影响。 $S_R$ 越大(或 $S_D$ 越小)就表示水深(或水位) $Z$ 与相应地面点 $(x, y)$ 的关系越密切,回归的规律性就越强、效果就越好。同时, $R^2$ 越大,趋势面的拟合度就越高。

2.2.2  $F$  检验法  $F$ 检验是对趋势面回归模型整体的显著性检验,是利用变量 $Z$ 的离差平方和中剩余平方和与回归平方和的比值确定水深(或水位) $Z$ 与相应地面点 $(x, y)$ 回归关系是否显著,即:

$$F=\frac{S_R/k}{S_D/(n-k-1)} \quad (6)$$

式中: $k$ ——趋势面的项数(常数项除外),当在显著性水平 $\alpha$ 下,查 $F$ 分布表得 $F_\alpha$ ,若计算的 $F$ 值大于临界值 $F_\alpha$ ,则认为趋势面方程显著;否则,不显著。

## 3 结果分析

利用前文所建立的洪水淹没水位趋势面模型,以2009年“莫拉克”台风期间麻步镇洪水淹没水位调查数据为基础,建立了该镇洪水淹没水位分布的一次及二次趋势面模拟模型。

### 3.1 麻步镇洪水淹没特征

由麻步镇在“莫拉克”台风期间洪水淹没水位调查结果可以看出(表1)，“莫拉克”台风期间麻步镇的鳌江两岸平原地区均遭受了洪水的淹没。洪水淹没水位面呈现由西北向东南倾斜,其中麻步镇西北的西

岙村淹没水位达到 10.75 m, 沿着鳌江向东南方向, 洪水淹没水位逐步下降到斜港村的 6.44 m, 下降幅度达到 40%。淹没水深分布变化较大, 最大淹没水深出现在横山村, 为 4.1 m; 最小淹没水深为岙底村, 仅为 0.15 m, 平均淹没水深为 2.34 m。由于受地表高程的影响, 水深超过 3 m 的区域主要出现在西北方向的西岙村、显桥村、燕子村和西南方向的岭头尾村、水港村和横山村, 水深低于 2 m 的区域主要在该镇西南的欣雅村、雷峰村、雷读村、斜港村、华亭村等地, 其余地区的淹没水深大多在 2~3 m。

表 1 “莫拉克”台风期间麻步镇洪水淹没水位调查结果

序号	位置	高程/m	水深/m	水位/m	调查点
1	西岙村	7.45	3.30	10.75	建模点
2	燕子村	6.97	3.20	10.17	建模点
3	江边周村	6.83	3.25	10.08	建模点
4	郑家内村	6.81	2.63	9.44	建模点
5	外河边村	6.90	2.26	9.16	建模点
6	内下泛村	6.36	2.21	8.57	建模点
7	渔塘村	5.11	2.95	8.06	建模点
8	凤山头村	5.51	2.51	8.02	建模点
9	水港村	4.48	3.54	8.02	建模点
10	横山村	3.92	4.10	8.02	建模点
11	上周村	6.80	1.40	8.20	建模点
12	河古村	5.27	2.59	7.86	建模点
13	高阳村	5.25	2.65	7.90	建模点
14	仙垞村	5.75	1.90	7.65	建模点
15	江湾村	5.28	1.98	7.26	建模点
16	岙底村	7.20	0.15	7.35	建模点
17	盖竹村	5.53	2.10	7.63	建模点
18	东阳村	5.30	2.61	7.91	建模点
19	埠头村	6.10	1.90	8.00	建模点
20	西村	5.16	2.70	7.86	建模点
21	敖寒村	6.63	0.90	7.53	建模点
22	镇政府	5.42	1.58	7.00	建模点
23	雷峰村	5.67	1.15	6.82	建模点
24	华亭村	5.58	1.50	7.08	建模点
25	雷读村	5.21	1.48	6.69	建模点
26	斜港村	4.96	1.48	6.44	建模点
27	下泛村	6.21	2.50	8.71	验证点
28	富民村	5.99	1.79	7.78	验证点
29	下堡村	4.45	3.62	8.07	验证点
30	东坑村	5.41	2.60	8.01	验证点
31	陶贡村	6.61	3.07	9.68	验证点
32	新华村	6.62	2.55	9.17	验证点
33	沿口村	6.32	1.60	7.92	验证点
34	高沙村	5.36	2.43	7.79	验证点
35	范龙村	5.21	2.90	8.11	验证点
36	欣雅村	5.42	1.65	7.07	验证点
37	华龙村	6.14	2.90	9.04	验证点
38	岭头尾村	4.80	3.30	8.10	验证点
39	新桥村	4.78	2.00	6.78	验证点
40	显桥村	7.57	3.00	10.57	验证点
41	石马村	5.27	2.20	7.47	验证点

### 3.2 麻步镇洪水淹没水位分布趋势面模拟模型

依据洪水淹没水位趋势面模型基本原理, 利用“莫拉克”台风期间麻步镇洪水淹没水位调查数据中的西岙村等 26 组洪水淹没水位数据及相应调查点的投影坐标值, 建立了该镇洪水淹没水位空间分布的一次和二次趋势面模拟模型, 见公式(7)~(8)和表 2。

$$Z = -0.00038X + 0.00031Y - 765.66 \quad (7)$$

$$Z = 0.29X + 0.11Y - 3.45X^2 - 8.54XY - 1.1Y^2 - 235571.85 \quad (8)$$

式中:  $Z$ ——洪水淹没水位(m);  $X, Y$ ——研究区域内某调查点的投影坐标值(m)。

表 2 麻步镇洪水淹没水位分布趋势面模拟模型拟合度分析

趋势面类型	拟合度系数 $R^2$	$F$ 检验	标准误差/m
一次趋势面模拟	0.95	339.6**	0.25
二次趋势面模拟	0.96	199.2**	0.20

注: \*\*表示在 0.01 水平上相关关系极显著。

从表 2 可以看出, 麻步镇洪水淹没水位空间分布一次趋势面和二次趋势面模拟的拟合度系数很高, 表明“莫拉克”台风期间麻步镇的洪水淹没水位空间分布不是水平面, 而是倾斜曲面; 一次趋势面和二次趋势面模型均能很好地模拟其分布特征。

### 3.3 模型验证

为了进一步验证模拟精度, 利用洪水调查所得数据中的显桥村等 15 组水位数据及相应调查点投影坐标值, 对所建立的麻步镇洪水淹没水位趋势面模型进行了验证(表 3)。由表 3 可以看出, 一次趋势面模型模拟水位的最大绝对误差为 0.37 m(显桥村), 其次为 0.35 m(沿口村), 最小为 0.01 m(下泛村), 平均绝对误差为 0.1 m; 二次趋势面模型模拟水位的最大绝对误差为 0.93 m(新桥村), 其次为 0.73 m(沿口村), 最小为 0.15 m(华龙村), 平均绝对误差为 0.4 m。一次趋势面模型不仅模拟的洪水淹没水位总体小于二次趋势面模型, 而且模拟水位的平均绝对误差也比二次趋势面模型低了 0.3 m。

## 4 结论

(1) “莫拉克”台风期间麻步镇洪水淹没水位空间分布趋势面模拟比近似水平面模拟更接近洪水淹没的实际曲面, 其中一次趋势面模拟模型对洪水淹没水位的模拟平均绝对误差比二次趋势面模拟模型的低了 0.3 m。

(2) 基于趋势面分析的洪水淹没水位模拟依赖于一定数量且已知水位等信息的洪水淹没分布特征点, 可适用于灾后洪水淹没水位分布及灾情评估。

表 3 麻步镇洪水淹没水位分布趋势面模拟模型验证结果

m

序号	位置	调查水位	一次趋势面模拟模型		二次趋势面模拟模型	
			模拟水位	绝对误差	模拟水位	绝对误差
1	显桥村	10.57	10.20	0.37	11.18	0.61
2	陶贡村	9.68	9.60	0.08	9.95	0.27
3	新华村	9.17	9.03	0.14	9.42	0.25
4	华龙村	9.04	9.00	0.04	9.19	0.15
5	下泛村	8.71	8.70	0.01	9.00	0.29
6	范龙村	8.11	8.41	0.30	8.37	0.26
7	下堡村	8.07	8.18	0.11	8.63	0.56
8	岭头尾村	8.10	7.90	0.20	8.35	0.25
9	高沙村	7.79	7.80	0.01	8.39	0.60
10	沿口村	7.92	8.27	0.35	8.65	0.73
11	东坑村	8.01	8.02	0.01	8.42	0.41
12	富民村	7.78	7.79	0.01	8.13	0.35
13	石马村	7.47	7.50	0.03	7.83	0.36
14	欣雅村	7.07	7.06	0.01	7.78	0.71
15	新桥村	6.78	6.81	0.03	7.71	0.93

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孙阿丽,徐林山,石勇. 基于 GIS 的洪水淹没范围模拟[J]. 华北水利水电学院学报,2009,30(2):9-11.
- [2] 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.
- [3] 葛小平,许有鹏,张琪. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟[J]. 水科学进展,2002,13(4):456-460.
- [4] 张东华,刘荣,张咏新. 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):181-18.
- [5] 刘坤,吕学强,陈丹. 基于区域生长法的洪水淹没分析[J]. 北京机械工业学院学报,2009,42(1):1-3.
- [6] 李春红,任立良,左振鲁. 基于 DEM 的三峡区间洪水淹没范围模拟[J]. 水文,2005,25(1):1-4.
- [7] 陈鹏霄,申邵洪,谭德宝. 基于空间插值的洪水淹没空间分布快速获取[J]. 武汉大学学报:工学版,2010,43(6):727-729.
- [8] 杨茜,贾艾晨. 基于 ArcGIS 的洪灾淹没范围及避难撤离方案研究[J]. 水电能源科学,2011,29(1):34-37.
- [9] 王江萍,马民涛,张菁. 趋势面分析法在环境领域中应用的评述及展望[J]. 环境科学与管理,2009,34(1):1-5.
- [10] 吕义清,刘鸿福,李晓聪. 基于趋势面分析法的地质灾害危险性评价系统[J]. 水土保持通报,2011,31(2):155-158.

(上接第 137 页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 欧名豪. 土地利用管理[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [2] 张国平,刘纪远,张增祥. 近 10 年来中国耕地资源的时空变化分析[J]. 地理学报,2003,58(3):323-332.
- [3] 陈百明,张凤荣. 中国土地可持续利用指标体系的理论与方法[J]. 自然资源学报,2001(3):197-203.
- [4] 张惠远,赵昕奕,蔡运龙,等. 喀斯特山区土地利用变化的人类驱动力机制研究[J]. 地理研究,1999,18(2):136-142.
- [5] 王万茂,韩桐魁. 土地利用规划学[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [6] 傅丽华,刘楚玉. 土地可持续利用原则的伦理学思考[J]. 湖南工业大学学报,2010(10):43-46.
- [7] 刘梦云,李宝宏. 基于 RS 和 GIS 的小型城市土地利用动态分析:以杨凌示范区为例[J]. 水土保持通报,2007,27(1):34-38.
- [8] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用的时空分布及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报,2003,18(1):20-29.
- [9] 杨琨,常庆瑞,高欣,等. 基于 GIS 的县级土地利用现状分析[J]. 水土保持通报,2009,29(6):111-114.
- [10] 张丹丹,杨晓梅,苏奋振,等. 大亚湾近岸土地利用的时空分异及其与地貌因子关系分析[J]. 资源科学,2010,32(8):1551-1557.
- [11] 周万村. 三峡库区土地自然坡度和高程对经济发展的影响[J]. 长江流域资源与环境,2001,10(1):15-21.
- [12] 马泽忠,周爱霞,江晓波,等. 高程与坡度对巫山县土地利用覆盖动态变化的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(2):107-109.
- [13] 韦丽军. 地形因子对农牧交错带土地利用格局的影响研究[D]. 宁夏银川:宁夏大学,2008.
- [14] 林超,李昌文. 阴阳坡在山地地理研究中的意义[J]. 地理学报,1985,40(1):20-28.