

姜智怀,章毅之,蔡哲,等. 2014. 基于嵌入河道栅格的山洪灾害淹没模拟. 气象, 40(8): 1013-1018.

基于嵌入河道栅格的山洪灾害淹没模拟^{* 1}

姜智怀¹ 章毅之¹ 蔡哲¹ 李 嫦²

1 江西省气候中心,南昌 330046

2 江西省大气探测中心,南昌 330046

提 要: 文章以江西省曹水作为山洪灾害淹没模拟的研究区域,通过嵌入河道栅格修订数字地形,采用 FloodArea 水文淹没模型对数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)对修订前后的同一降水过程进行模拟,结合实地考察流域内淹没痕迹和水文站水位资料对比分析两者的模拟结果,并利用确定性系数和 Nash-Sutcliffe 效率系数对 2000—2010 年间出现的强降水过程的模拟结果进行验证。结论表明:基于嵌入河道栅格的山洪灾害淹没模拟能较好地反映曹水流域内的因降水导致的山洪推进路线、淹没范围及淹没水深,该方法可作为推算曹水流域的山洪灾害致灾临界面雨量的基础。

关键词: 山洪灾害, 淹没模型, 嵌入河道栅格

中图分类号: P429, P333

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.012

Simulation of Flood Disasters Based on Embedded River Raster

JIANG Zhihui¹ ZHANG Yizhi¹ CAI Zhe¹ LI Chang²

1 Jiangxi Climate Centre, Nanchang 330046

2 Jiangxi Atmospheric Sounding Technology Centre, Nanchang 330046

Abstract: Flood disaster was simulated in Cao-Shui Basin in Jiangxi Province. By revising the Digital Elevation Model (DEM) with river raster layer in, flooding simulation results carried out by FloodArea hydrological model was compared by deterministic coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient with the actual flooded traces and hydrological data from hydrological observatories during 2000—2010. The results showed that based on the embedded river raster DEM, flood disasters simulation process is significantly associated with the moving route, submerged area and depths of floods are caused by severe precipitation. The method can be used as a basic way to simulate the flood disaster caused by critical areal precipitation.

Key words: flood disasters, FloodArea model, embedded river raster

引 言

山洪是指流域面积小于 200 km² 的山区溪沟中发生的暴涨洪水,是我国南方省份多发的灾害之一,具有区域性明显、易发性强等特点,且成灾快、破坏性强(赫振纯, 2002)。山洪灾害给社会经济发展带来了巨大的损失,仅以江西省为例,据不完全统计,

江西省在 1954—2004 年共发生山洪灾害 2267 次,死亡人口 1215 人,损毁房屋 28.9 万间,直接经济损失 76.092 亿元;威胁人口 830 万人次,威胁财产 325.8043 亿元。随着经济的发展,山洪灾害造成的损失愈来愈大,山洪灾害已经成为当前防洪减灾中的突出问题(樊建勇, 2012)。

针对暴雨洪涝及山洪等灾害的影响评估,许多学者作了有益的探讨。张游等(2011)和莫建飞等

* 江西省气象局重点项目“江西省山洪灾害风险评估业务系统研究”资助

2013 年 6 月 5 日收稿; 2014 年 5 月 19 日收修定稿

第一作者:姜智怀,从事气候评价和气候变化评估研究. Email:jiangzhihui123@sina.com

(2012)以自然灾害风险评估理论为基础,选取灾害风险评价指标,利用GIS技术构建灾害风险评估模型,对各自研究区域开展暴雨洪涝灾害风险综合评估。李兰等(2013)以1:250000地理信息数据为基础,采用基于GIS暴雨洪涝淹没模型,利用D8及曼宁公式计算不同重现期面雨量淹没范围和水深,绘制了漳河和湖北省钟祥市的流域暴雨洪涝风险区划图。苏布达等(2005)根据湖北省荆江分洪区1954年分洪情况和规划运用设计,以空间分辨率为1:50000数字地形图为基础,利用基于GIS的FloodArea淹没模型模拟了不同分洪方案下的洪水淹没范围、水深和相应的洪水淹没地物面积及其可能损失,取得了理想的效果。福建气候中心利用1:10000比例尺的数字地理信息,基于FloodArea淹没模型对福建上清溪流域2010年6月18日洪水淹没过程进行淹没模拟,推算出上清溪山洪淹没不同等级的风险雨量,取得了与实际较为一致的结果(章国材,2012)。

为进一步提高气象部门抵御山洪灾害业务服务能力,中国气象局组织实施了暴雨洪涝灾害风险评估试点、中小河流洪水和山洪地质灾害气象风险预警服务业务等工作,对山洪灾害风险评估技术有了新的认识,初步总结出基于承灾体损失数量的山洪灾害影响评估方法,即通过水文模型开展洪水淹没模拟,对山洪发生的演进路线、到达时间、淹没水深、淹没范围、浸水历时和流速大小等特征进行模拟,根据不同的淹没水深分析淹没范围可能影响的村庄、重要设施等承灾体的数量,对山洪灾害可能带来的风险进行评估,及时发出灾害预警信息,最大程度地减轻灾害带来的影响。这种评估方法要求要有足够精确的承灾体信息和准确的洪水淹没模型。FloodArea模型是中国气象局推荐使用的淹没模型之一,FloodArea模型模拟结果的好坏与DEM的空间分辨率有很大关系,对1:10000或更大比例尺的DEM数据能取得较好的效果(文明章等,2013),在1:50000分辨率DEM下,无论是从DEM提取的河网信息,还是矢量水系资料中均很难反映山洪沟宽度和深度信息,使得山洪模拟得不到准确的结果甚至模拟失败。本文针对这些问题,结合实地考察资料,采用嵌入河道栅格修订的DEM,探讨基于1:50000分辨率DEM的FloodArea淹没模型模拟,为开展山洪灾害风险评估提供技术支撑。

1 资料和方法

研究流域选取在江西省中部抚州市宜黄县曹水流域,该流域位于宜黄县和崇仁县交界处,流域地势南高北低,海拔落差达到800 m。水系发源于宜黄县云峰村,由南向北汇入宜黄河。根据遥感解译资料分析并结合实地考察的河道参数,可将流域划分为上、中、下游三段。河道上游起于云峰村止于双坑村,中游起于双坑村止于陈坊村,下游起于陈坊村止于新斜村,主沟全长约9 km,流域面积54 km²(图1)。上下游河道宽度、深度变化较大,现场考察部分河段的宽度变化范围为9~40 m。受亚热带湿润季风气候影响,流域内夏季炎热多雨,宜黄县新斜、官仓、龙井、东排村、陈坊村以及崇仁县双坑村6个行政村人口约1200人多沿河居住在下游地势开阔平坦的地方,极易受到因暴雨引发的山洪地质灾害的影响。

研究中使用的数据包括:

(1) 基础地理信息数据。包括:水系、居民点和等高线等矢量数据及DEM数据,这些数据来源于国家测绘局测绘资料,比例尺为1:50000,空间分辨率为25 m;土地利用资料采用2000年Landsat TM卫星遥感解译数据,分辨率为30 m。

(2) 雨量水文资料。流域内设有新斜、龙井、官仓、陈芳桥和云峰5个自动雨量站以及新斜水文站。本文使用了江西省水文局提供的2000—2010年部分强降水过程监测到的雨量、水位和流量数据。

(3) 现场考察数据。利用校准过的GPS记录了2010年6月18日02—24时一次由强降水引发的山洪灾害中该山洪沟流域内多个有淹没痕迹地点的经纬度;记录了上、中、下游河道3处河道断面有明显变化地点的经纬度,并将以上考察信息数字化到GIS中。有关信息见表1。

研究中采用的淹没模型为FloodArea淹没模型。该模型用Manning-Strickler公式计算每个栅格与周围8个栅格之间的洪水流量,水流宽度为1/2栅格,水流方向由相邻栅格高程差和最低水位差决定,水流运行时间由栅格单元中心点到对角单元中心点的距离决定的(Gemmer,2004)。在试验过程中,使用FloodArea模型中Rain Storm模式对山洪过程进行模拟。模型参数设定如下:根据土地利用数据,分别将林地、居民点、水田、旱田和水域的

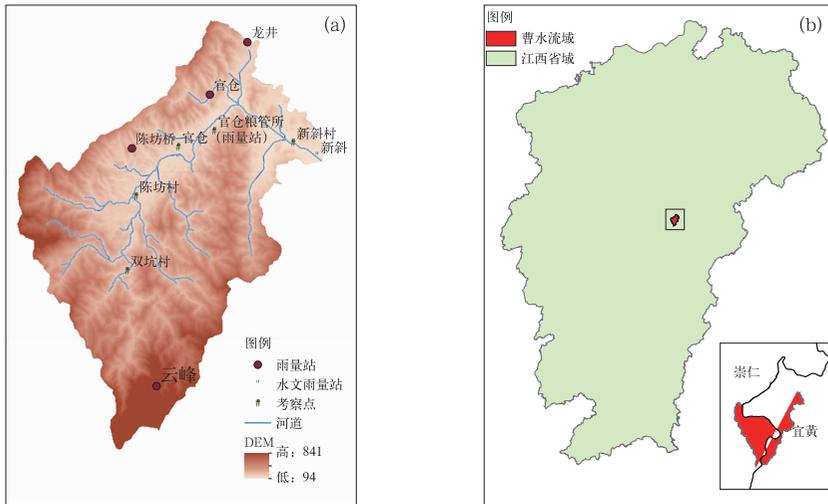


图 1 曹水流域地理信息示意图

(a)流域范围示意图, (b)流域位置示意

Fig. 1 Geographic information of Cao-Shui Basin

(a) watershed scale, (b) geographic location of basin

表 1 流域内考察点信息

Table 1 Information of investigated stations in basin

纬度/°N	经度/°E	记录地点	河道情况
27.32228	116.06843	上游双坑村	河宽 9 m, 深 3.5 m
27.33356	116.07434	中游陈坊村	河宽 25 m, 深 2.6 m
27.33276	116.11337	下游新斜村	河宽 40 m, 深 2 m

本个数。

2 嵌入河道栅格的淹没模拟

2.1 河道栅格的嵌入

图 2a 为曹水所经过的一段 1:50000 比例尺的 DEM 示意图。从图中可以看出,在河流经过的栅格的高程值和河流周围的高程值是相同的,河道和河道周围的高程值均为 113 m,河流所经过的高程值未低于河道周围的高程值,造成这种情况的原因主要是 DEM 的空间分辨率,1:50000 比例尺的 DEM 的空间分辨率为 25 m,而曹水的河宽大多不到 25 m,在重采样生成 1:50000 比例尺的 DEM 时把河道的高程和河道周围的高程混合到 25 m 分辨率的栅格中,因此淹没模型使用这样的 DEM 不能计算出河流的实际汇流情况。所以需要通过实地考察曹水的河宽和河深,将河道的高程信息嵌入到 DEM 中,使得嵌入河道的 DEM 反映出河流的汇水情况。

因为考察点位于河道断面明显变化的地方,所以可以假设在任何两考察点之间的一段河道深度和宽度大致等同。由实地考察的河道断面形状近似于规则的矩形,可计算出河道上、中、下游考察点之间的河道横截面积分别约为 31.5、65 和 80 m²。

将 DEM 进行填洼处理,利用 1:50000 的矢量河道栅格化并提取出 DEM 中河道高程信息,根据

Manning 系数分别赋值 18、25、33、40 和 50 (岳健等,2003);模型要求的面雨量分布图及雨强文件均由上文中所提到的 5 个雨量站小时雨量数据经计算所得;模型的最大交换率设置为 1,模拟步长设置为 1 h,采用由上一时次的积涝模拟结果作为下一时次初始积涝的方式进行模拟(Geomer,2003)。

根据新斜水文站实际淹没水深和模拟淹没水深,利用确定性系数(R)和 Nash-Sutcliffe 效率系数(N)作为验证指标,率定模型并检验模拟结果。R 和 N 值越接近 1,证明模拟效果越好(芮孝芳,1993)。R 和 N 的计算公式如下:

$$R = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, x_i 和 \bar{x} 分别为观测点实测水深序列及平均值, y_i 和 \bar{y} 为观测点模拟水深的平均值, n 为序列样

计算出的实际河道横截面积大小,将上游河道栅格高程降低 1 m,中游河道栅格高程降低 2 m,下游河道栅格高程降低 3 m(表 2)。DEM 河道栅格像素为 25 m,每降低 1 m 河道栅格的高程,河道栅格与水系两边栅格的高程差增加了 1 m,相当于增加了 25 m² 的河道横截面积,三段河道栅格修改后的横截面积分别增加约 25、50 和 75 m²,较为接近实际河道上、中、下游考察点之间的河道横截面积。

将修改后带有高程的河道栅格嵌入 25 m 分辨率的 DEM 中,降水会始终朝着高程值较低的河道

栅格方向汇流。分段修改河道栅格高程,又使得河道栅格从上游到下游有更加明显的坡降,降水更易顺着河道栅格朝河口位置汇流(图 2b),调整了模型对各栅格汇流方向的计算,从而改变各栅格水流量

表 2 河道栅格高程降低的高度
Table 2 The height of reduced DEM

河道栅格	降低高程高度/m
上游(双坑村以上河道)	1
中游(陈坊村至双坑村河道)	2
下游(新斜村至陈坊村河道)	3

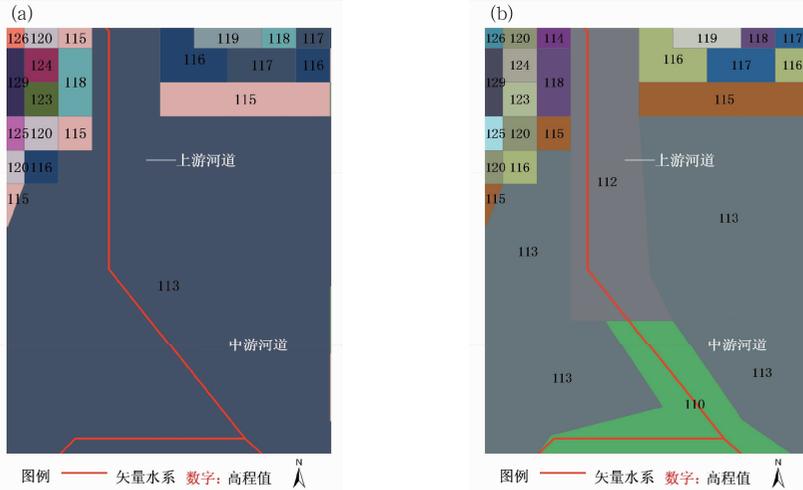


图 2 (a)修订前和(b)修订后的河道栅格比较

Fig. 2 The difference of grids before (a) and after modification (b)

计算的最终结果。

2.2 模拟结果分析

本文利用曹水山洪沟 2010 年 6 月 18 日 02—24 时的降水资料,在同样的模拟方式和相同模型参数配置下,采用 FloodArea 淹没模型对 1:50000 比例尺的 DEM(以下称方案 1)以及嵌入河道的 DEM(以下称方案 2)分别进行了淹没水深模拟,利用新斜水位站的水位观测资料,对二者的结果进行了对比分析。

图 3 给出了两种方案新斜站的水深模拟变化情况。从水深模拟的情况看,方案 1 模拟结果表明在河流上游地区淹没水深较大,新斜水文站栅格 22 h 的淹没水深无明显上升趋势,最大淹没不超过 0.5 m,每小时的淹没结果远小于新斜站的真实淹没水深,模拟的确定性系数 R 为 0.78, Nash-Sutcliffe 效率系数 N 仅为 0.11,最大水深误差达到约

1.3 m,无法真实模拟出山洪淹没情况。这是因为方案 1 中使用的 DEM 给出的河道栅格与周围的栅格相比没有出现明显的低洼现象(图 2a),导致河道栅格无法体现出真实河道的宽度和深度,影响了模型对汇流方向和汇流时间的计算,以致于降水多聚集在河道上游地区,难以通过河道栅格向下游汇流。

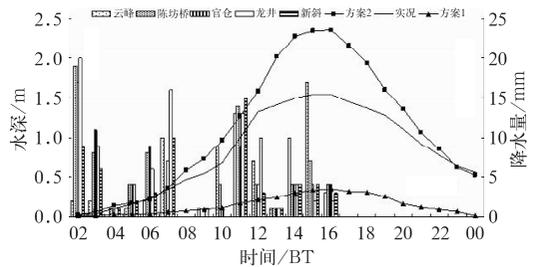


图 3 不同数字地形输入下新斜站 FloodArea 模拟结果

Fig. 3 The results of FloodArea model simulation by two kinds of DEM

方案 2 的结果表明通过将河道嵌入 DEM,能较好地反映河流的汇流情况,模拟结果表明下游的洪水汇流开始增多,淹没范围扩大,检验点新斜水文站的栅格点淹没水深出现明显变化,确定性系数 R 达到 0.93, Nash-Sutcliffe 效率系数 N 达到了 0.76,最大

水深误差不超过 0.8 m。方案 2 的模拟结果与实况较为一致。

我们对流域内其余各考察模拟淹没水深也进行了对比,结果见表 3。结果表明方案 2 比方案 1 的模拟结果与实况更接近。

表 3 2010 年 6 月 18 日 02—24 时考察点模拟淹没水深

Table 3 The simulated measurement points between 02:00 and 24:00 BT 18 June 2010

记录地点	25 m 分辨率 DEM FloodArea 模拟 结果(方案 1)/m	嵌入水系 DEM FloodArea 模拟 结果(方案 2)/m	实况淹没水深/m	备注
陈坊村	0.16	2.51	3.5	洪水漫桥(桥高约 3.5 m)
双坑村	0.29	0.98	1.2	洪水印记 1.2 m
官仓粮管所	0.01	0.42	0.8	洪水印记约 0.8 m
官仓雨量站	0.01	0.16	0.3	洪水漫沟,淹没农田,未淹没住房

为了进一步检验方案 2 的模拟效果,我们选取 2000—2008 年的 5 次强降水过程,对两种方案模拟出的新斜站的淹没水深变化情况进行了试验,并计算了模拟结果的确定性系数和 Nash-Sutcliffe 系

数,结果见图 4 和表 4。

结果表明,方案 2 模拟出的淹没水深趋势与实况基本保持一致。无论是单次强降水过程还是过程平均,模拟结果的确定性系数保持在 0.8 左右,其

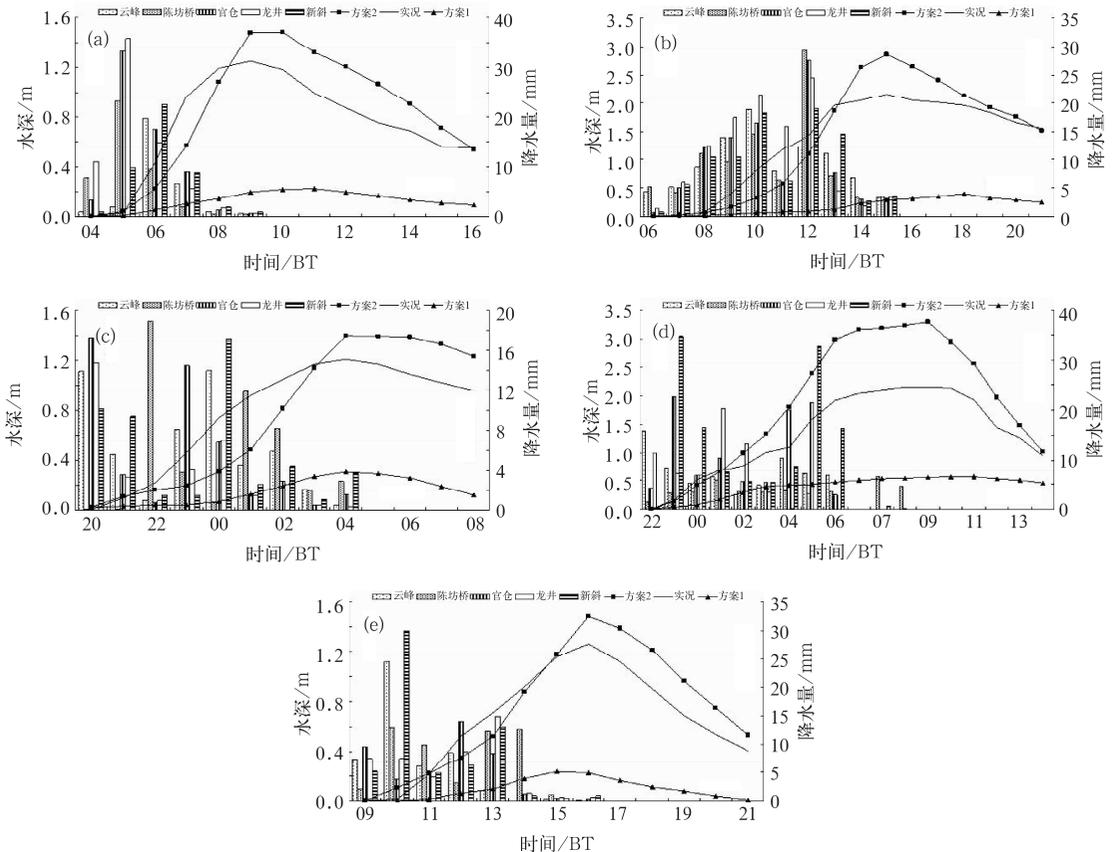


图 4 新斜站淹没水深曲线

(a)2000 年, (b)2002 年, (c)2004 年, (d)2005 年, (e)2008 年

Fig. 4 Depths of the flood water at Xinxie Station in

(a) 2000, (b) 2002, (c) 2004, (d) 2005, (e) 2008

表 4 确定性系数 R 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 N 检验结果

Table 4 The value of certainty coefficient and Nash-Sutcliffe coefficient

模拟时间	方案 1		方案 2	
	R 值	N 值	R 值	N 值
2000 年 6 月 6 日 04—16 时	0.55	-0.05	0.81	0.71
2002 年 6 月 14 日 06—20 时	0.63	0.17	0.90	0.77
2004 年 4 月 23 日 20 时至 4 月 24 日 8 时	0.23	0.03	0.73	0.67
2005 年 6 月 17 日 22 时至 6 月 18 日 14 时	0.66	0.01	0.93	0.73
2008 年 7 月 30 日 09—21 时	0.51	0.15	0.88	0.71
2010 年 6 月 18 日 02—24 时	0.78	0.11	0.93	0.76
6 次过程总样本计算值	0.49	0.07	0.85	0.70

Nash-Sutcliffe 效率系数基本保持在 0.7 附近,能较好地模拟出新斜水文站洪水过程中产汇流变化情况(芮孝芳,1993)。

3 结 论

通过实地考察确定受山洪灾害影响风险点,再通过淹没模型模拟出山洪灾害的淹没水深和淹没面积,得到受灾害影响的风险点数量,是山洪灾害风险评估的一种新思路。这要求利用先进的淹没模型来开展淹没模拟。FloodArea 模型在许多研究中得到应用,并且取得了较好的效果。本文基于 1:50000 比例尺的 DEM,以江西省宜黄县曹水为试验区域,对 FloodArea 进行了调试,得到以下结论:

(1) FloodArea 模型需要精细的 DEM 数据。目前我们得到的 1:50000 DEM 数据的空间分辨率为 25 m,由于山洪沟宽度窄,往往宽度达不到 25 m,因此 1:50000 比例尺的 DEM 不能够完全反映出山洪沟的河道信息,影响山洪沟的汇水模拟,导致模拟的误差较大,模拟结果十分不理想。

(2) 通过对山洪沟的宽度、深度等河道信息进行考察,将河流经过的 DEM 适当降低,从而使得河道的信息嵌入到 DEM 中,再进行 FloodArea 模拟。结果表明,模拟得出的不同地区模拟淹没水位与实际水深较为一致,能较好地模拟出曹水流域内因降水导致的山洪的推进路线、淹没范围及水深等。

(3) 通过嵌入河道栅格,可以得到较好的模拟

效果,本文通过对河流上、中、下游分别选取代表点进行考察,一定程度上提高了模拟准确程度,但如果对河道信息进行大量的现场考察,将河道的信息较好地嵌入到 DEM 中,将会更大程度地提高淹没模型的模拟效果。

参考文献

- 樊建勇,单九生,管琨,等. 2012. 江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析. 气象,38(9):80-84.
- 赫振纯. 2002. 基于 GIS 的数字水系的生成. 水文,22(4):8-11.
- 李兰,周月华,叶丽梅,等. 2013. 基于 GIS 淹没模型的流域暴雨洪涝风险区划方法. 气象,39(1):112-118.
- 莫建飞,陆甲,李艳兰,等. 2012. 基于 GIS 的广西农业暴雨洪涝灾害风险评估. 灾害学,27(1):40-45.
- 芮孝芳. 1993. 仅依据汇流系统流出资料确定 Nash 模型参数的研究. 水科学进展,4(2):141-146.
- 苏布达,姜彤,郭业友,等. 2005. 基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及其应用. 河海大学学报(自然科学版),33(4):18-22.
- 文明章,林昕,游立军,等. 2013. 山洪灾害风险雨量评估方法研究. 气象,39(10):1325-1330.
- 岳健,张雪梅. 2003. 关于我国土地利用分类问题的讨论. 干旱区地理,26(1):78-88.
- 张游,王绍强,葛全胜,等. 2011. 基于 GIS 的江西省洪涝灾害风险评估. 长江流域资源与环境,20(s1):169-175.
- 章国材. 2012. 暴雨洪涝预报与风险评估. 北京:气象出版社.
- Gemmer M. 2004. Decision support for flood risk management at the Yangtze River by GIS/RS based flood damage estimation. Giesen:Shaker,108-207.
- Geomer. 2003. FloodArea-Arcview extension for calculating flooded areas (User manual Version 2.4),13-14.