

基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及其应用

苏布达^{1 4}, 姜 彤¹, 郭业友², Marco GEMMER³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008 ; 2. 湖北省荆江分蓄洪区工程管理局, 湖北 公安 434300 ;
3. Institute of Geography , Justus-Liebig University , Giessen 35390 , Germany ; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 :以 GIS 栅格数据为基础,建立了二维水动力洪水动态演进模型.以湖北省荆江分洪区为实验区,在数字地形模型和 Landsat ETM 遥感影像等数据的基础上,根据分洪区 1954 年分洪情况和规划运用设计,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等.模拟结果表明,基于 GIS 栅格数据的洪水淹没风险模拟模型,可以对长江流域分洪区运用预案的制订、土地利用的规划及洪水科学管理提供定量的科学依据.

关键词 荆江分洪区;洪水演进动态模拟;Floodarea 模型;洪水风险管理

中图分类号 :P333.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2005)04-0370-05

在联合国关注的 15 种主要自然灾害中,洪水灾害是破坏程度最严重和因灾死亡人口最多的一种灾害^[1].随着社会经济的迅猛发展,洪水灾害造成的社会影响和经济损失呈不断增大趋势^[2].洪水风险图是风险识别的基础,通过风险图在风险管理中的合理应用,可减少洪水损失,降低洪水对社会经济的负面影响.

我国自 20 世纪 80 年代中期开始定量评估洪水风险,并对一些蓄滞洪区、城镇、水库与流域进行洪水风险图的绘制^[3~6].1990 年以来,在运用遥感技术的实时和宏观性进行洪水检测和淹没范围的划定^[7,8],基于 GIS 空间分析技术进行二维平面的洪水淹没分析^[9,10],基于 DEM 三维空间分析技术进行给定淹没高程下的洪水淹没区绘制^[11,12]等方面已做了较多研究.但所绘制的风险图多是静态的,在洪水淹没区尚不能快速给出不同破坏地点、不同入流量的淹没状况(如不同时相的水深、淹没的土地状况、可能的受灾人口和可能的经济损失情况等).

本文采用的洪水演进动态模拟模型是基于 GIS 栅格数据的水动力学模型.由于洪泛平原洪水漫溢过程不同于河渠中向下游演进的洪水过程,需要进行流量、流速横向与垂向分布的计算,淹没过程的水动力由二维非恒定流洪水演进模型模拟.与国内外现有的静态洪水风险区划图不同,本文所选用的模型每个时相的运行过程,即运行时间与相应淹没范围、水深、水位都以栅格形式呈现和存储(图 1),直观明了,易于查询.

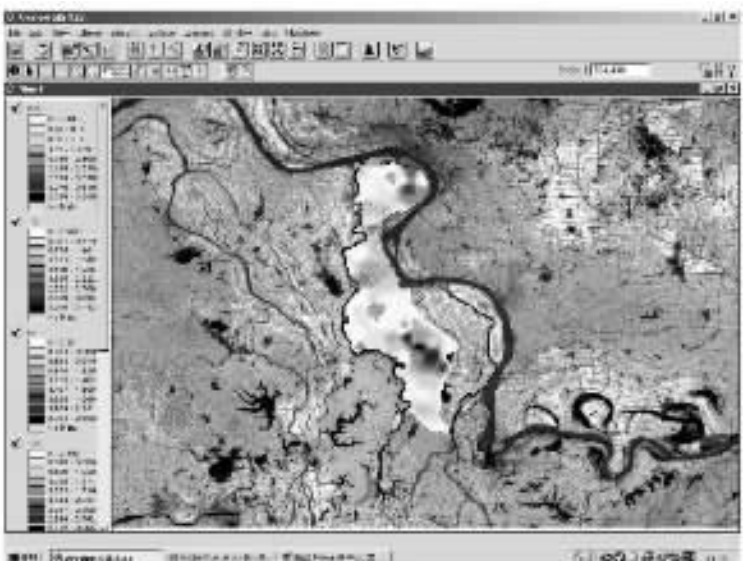


图 1 洪水风险动态模型运行示意图
Fig.1 Simulation of dynamic flood risk model

1 模型简介

鉴于世界许多自然洪泛平原被用于居住或发展工业,堤防保护区内人们洪灾防范意识淡漠,德国 Geomer 公司研制了基于 GIS 的水动力模型——Floodarea 模型.该模型用于界定洪水淹没范围,可预警可能的洪水风险.Floodarea 模型设计在 ArcView GIS 环境下运行.其运行利用了 GIS 矢量栅格一体化的空间分析功能.根据研究区数字地形、表示模拟起始位置的河网水位、表示洪水进入圩区起始位置的破坏点、由曼宁系数获取的糙率、表示模拟边界的堤防等数据,模拟溃口式或堤防漫顶式的淹没情况,准确地反映洪水演进过程.通过该软件编制的风险图已在德国莱茵河流域得到广泛应用,在 2002 年莱茵河洪水减灾中取得了较大的社会效益^[13].德国 Giessen 大学和中国科学院南京地理与湖泊研究所根据长江流域地形和河道特征,通过对洪湖分洪区的洪水演进实验^[13],对该模型模拟过程的水动力参数进行了修改,从而使该模型能用于长江流域洪泛区的洪水淹没风险模拟.

20 世纪 50 年代初设立的荆江分洪工程起到了洪水影响区域的空间转移作用,在长江流域防洪体系中占有重要地位.1954 年长江发生全流域性水灾时,先后 3 次开闸分洪,解除了洪水对荆江大堤的威胁,减轻了洞庭湖的灾情^[14].2009 年三峡工程建成后,三峡水库拥有 221.5 亿 m³ 的防洪库容,但三峡水库的防洪库容比之长江巨大洪量要小得多.若遇 1870 年型洪水,枝城下泄流量虽由建库前的 11 万 m³/s 削减到 8 万 m³/s,但仍远远超过荆江河段安全泄量^①.因此,对保障中下游重点地区的防洪安全来说,荆江分蓄洪工程的存在和建设仍然是十分必要的.荆江分洪区是我国现有 97 处分蓄洪区中安全建设最完备的分洪区.然而,由于人口和经济总量的增长,分洪区运用难度逐年增大.1998 年,长江流域发生了 1954 年以来的一次罕见的历史大洪水,尽管分蓄洪区 33 万人在 16 小时内全部转移到了安全地区,但转移过程中仍出现了相当程度的混乱拥挤和治安问题^[15].因此,1998 大洪水后,为了开展荆江分洪区的科学发展规划、合理调度方案、普及宣传及实施保险等问题的研究,将洪水动态风险图的绘制问题提到了议事日程.

本文根据荆江分洪区的特点和荆江分洪预案,设计了荆江分洪区洪水动态演进模型.该模型运行所需基础信息库的建立过程(图 2)是(a)根据公安县测绘局提供的地面高程资料,在 2 258 km²

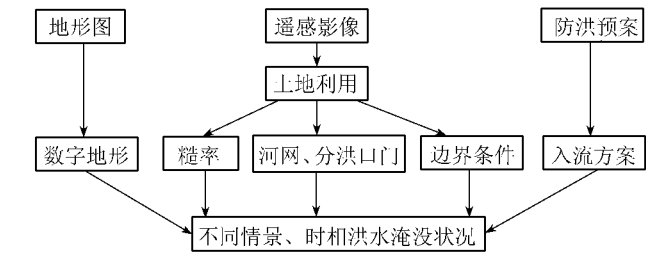


图 2 荆江洪水演进模型基础数据

Fig.2 Basic data set of Jingjiang flood evolution model
面积上采集了 751 个高程点,并参考 1:50 000 地形图,利用 IDW(反距离加权)空间内插方法生成了栅格形式的数字高程模型(图 3).(b)由于糙率系数影响行洪能力,需根据研究区土地利用结构进行糙率系数的率定.我国 2002 年 1 月 1 日起开始试行的全国土地分类系统,将我国土地利用分为农用地、建设用地和未利用地 3 大类^[16].本文以 2002 年 9 月轨道号为 124-39 的地球资源卫星 ETM 遥感影像为数据基础,用 1:50 000 地形图对影像数据进行几何校正,然后按照曼宁系数经验值的划分类型将土地利用分为建筑用地、水域、旱田、水田和林地 5 大类并进行目视解译.同时根据各类土地利用所赋予的曼宁值,将土地利

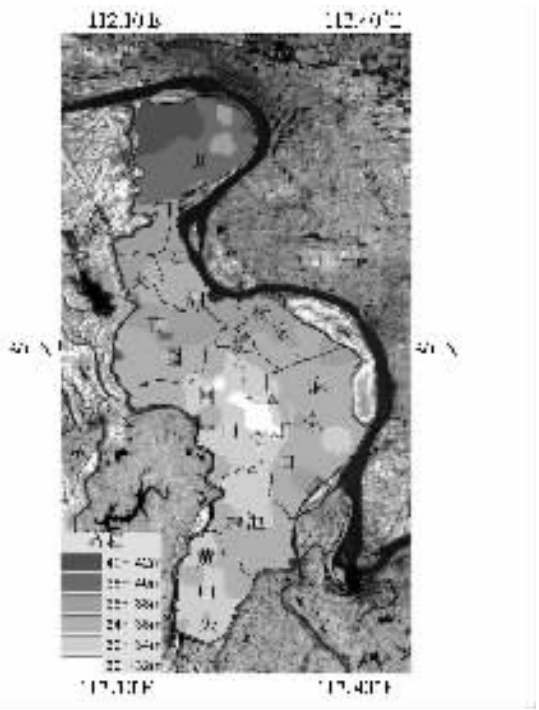


图 3 荆江分洪区地形

Fig.3 Topography of Jingjiang flood diversion area

① 郑守仁.三峡工程建设与长江水资源综合利用及治理开发.见:贯彻实施水法既长江治理开发战略研讨会论文集.2003.266—272.

用矢量数据转换为栅格糙率数据.(c)在土地利用解译的基础上提取分洪区围堤(模拟过程中带高程的阻水建筑物)和分洪口门信息,并将其作为模拟运行的边界条件和起始位置.

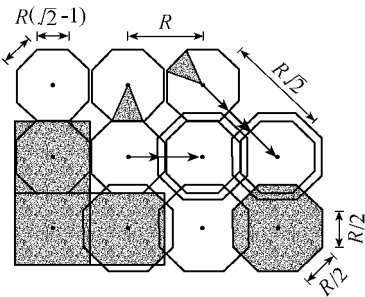


图4 Floodarea 计算方法^①

Fig.4 Calculation method of Floodarea

具体的模拟演进以栅格为单位,用 Manning-Strickler 公式计算每个栅格单元与周围 8 个单元之间的洪水流量.模拟在虚拟 8 边形栅格间进行,水流宽度为 1/2 栅格宽度.水流方向根据栅格单元之间的最高地形高程与最低水位差来确定.由于单元中心点到对角单元中心的距离大于横向或纵向相邻单元距离,对角单元间和相邻单元间的水流运行时间被赋予了不同的长度^①(图 4).

2 动态风险图在荆江分蓄洪区防洪管理中的应用

2.1 荆江分蓄洪区洪水演进模拟结果

图 5 是依据分洪区洪水演进模拟结果绘制的洪水淹没面积-历时曲线.从北闸开启进洪开始,模拟运行的前 8 h,洪水推进速度很快,淹没了位于北部的埠和镇和中部的夹竹园镇大部,小、中、大入流方案洪水淹没范围分别达 36%(320 km²)、40%(360 km²)和 47%(420 km²).继而进入分洪区地势最低洼的闸口镇、崇湖地区,推进速度略有下降,3 种方案的填洼作用分别持续至 36 h、28 h 和 20 h,淹没范围分别为 63%(570 km²)、68%(610 km²)和 67%(600 km²).此后连续分洪的 8 h,洪水以较快速度推进到分洪区最南段,3 种方案的淹没范围分别扩展到 77%(687 km²)、84%(755 km²)和 88%(790 km²).由于流速差异,3 种入流方案分别模拟至 100 h、60 h 和 36 h 时淹没分洪区超过 95% 的地区,只剩高亢地区露出在外.模拟至 160 h、80 h 和 44 h 时淹没范围超过 99%.根据洪湖分洪区的洪水模拟计算,由于长江干堤分洪量大,分洪区内土地利用方式的变化对洪水演进影响并不是很大.本文 Floodarea 模型模拟的现状洪水演进速度和范围,与 1954 年实际淹没情况大体一致.

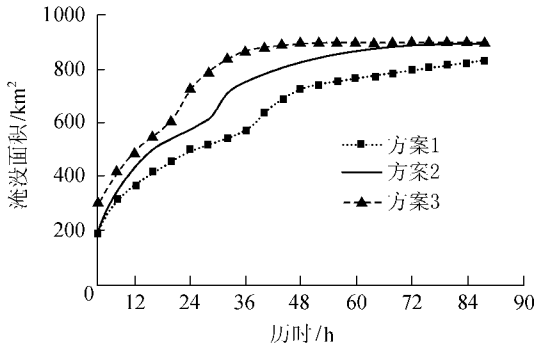


图5 洪水淹没面积-历时曲线

Fig.5 Flood inundated area for different flood durations

分洪区洪水位是影响围堤和安全区安危的重要因子.荆江分洪区安全区的围堤堤顶高程为 42 m,可分别定义小于 38 m、38~40 m、40~42 m、大于 42 m 的水位为分洪区的低、中、高和超高洪水位.本文以 24 h、48 h、72 h、96 h 和 192 h 模拟结果来说明区内不同洪水位淹没面积的变化趋势(图 6).模拟运行的前 24 h,分洪区大部分洪水淹没地区水位在 38 m 以下,小、中、大 3 种不同入流方案的低水位面积分别为 365 km²、420 km²、530 km²,占淹没面积的 70% 以上.之后的 24 h,分洪区低水位面积分别扩展到 580 km²、660 km² 和 630 km².运行至 72 h 时,小、中入流方案洪水淹没范围仍以低水位为主,占有面积分别为 660 km² 和 770 km²,而大入流方案大部分淹没范围已由中水位所覆盖,面积达 510 km².运行至 96 h 时,小入流进洪方案低水位面积继续扩展为 710 km²,中入流方案低水位淹没范围开始由中水位范围所取代,大入流方案则不见低水位,出现了 460 km² 的中水位地区、250 km² 的高水位地区和 180 km² 的超高水位地区.运行至 192 h 时,由于洪水已淹没了整个分洪区,淹没面积不再扩大,水位抬升迅速,小入流方案出现 677 km² 的中水位地区,中入流方案出现 320 km² 的中水位、435 km² 的高水位和 140 km² 的超高水位地区,大入流方案分洪区全部处于超高水位状态.

① GEOMER. Floodarea-Areview extension for calculating flooded area(User manual Version 2.4). Heidelberg 2003.

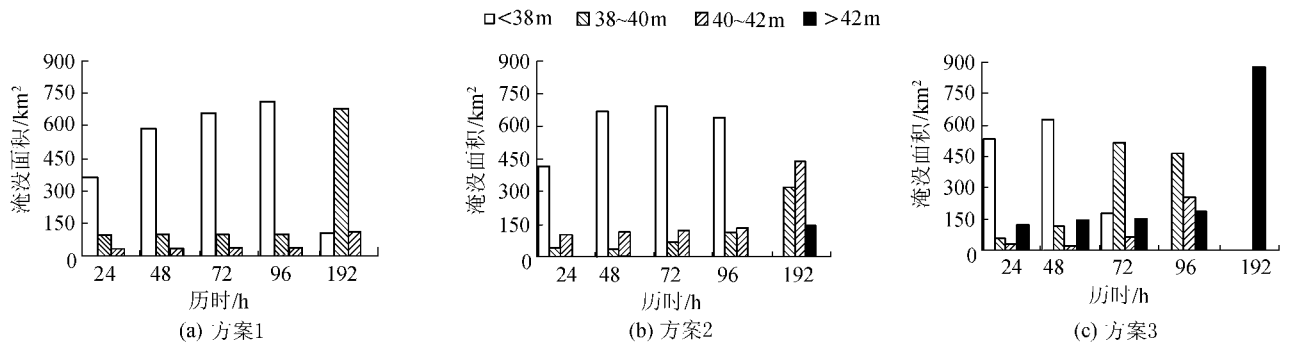


图 6 模拟至 24 h 48 h 72 h 96 h 和 192 h 时不同洪水位淹没面积

Fig. 6 Flood inundated area for simulation intervals of 24 h 48 h 72 h 96 h and 192 h

2.2 基于动态模拟结果的荆江分蓄洪区防洪管理

分洪区洪水管理的主要目的是通过制订合理的分洪预案,协调与土地利用相关的人类活动,以减少洪水损失.分洪预案制订的原则是,在考虑减轻荆江大堤压力和确保分洪区安全运用的前提下降低分洪损失.荆江分洪区分洪过程模拟结果显示,小、中、大 3 种入流方案洪水都需要一定的时间才会演进到分洪区下游地区.因此,可以有计划地实施分批转移居民以避免 1998 洪水 16 小时全体人员大转移时的拥挤和混乱状况的发生,减少盲目抢险造成的人力和物力损失.另一方面,荆江分洪区安全区围堤顶高 42 m,因此分洪水位应控制在 42 m 以内.然而,大入流方案分洪开始不久,洪水位大于 42 m 的范围自分洪口门迅速向外扩展,直接威胁到位于分洪区围堤内的北部 4 个安全区的安危.因此,现行分洪预案中 17 000 m³/s 的大入流方案并非分洪最佳选择.

对洪灾风险的量化研究,通常要根据频率、水深、流速、历时要素对洪泛区进行洪灾程度划分,在此基础上估算不同风险水平下的淹没损失.洪水演进动态模拟反映的各时相淹没范围、水深,是进行水深等级划分的可靠基础.分洪区工商业发达、人口密集的城镇一般都在安全区,蓄洪区基本上为农业区.因此,本文将模拟结果叠加在 2002 年土地利用现状信息上,应用荆江分洪区历年社会经济调查资料和 2000 年人口普查资料等信息,参考洪湖分洪区损失率指标^[13],计算了荆江分洪区分洪直接经济损失(侧重于农户损失,未包括基础设施损毁等方面的损失).表 1 是分洪运行 96 h 时不同水深淹没地物面积统计及损失估算.由表 1 可知,在小、中、大入流方案下,分洪 96 h,可能损失分别达到 23 亿元、34 亿元和 42 亿元.根据动态模拟提供的不同给定进洪量或给定开闸时段下的淹没水深信息,可以了解分洪损失分布情况,合理调整居民点分布和土地利用规划等,制订出以洪水损失最低为目标的分洪区洪水管理方案.

表 1 洪水演进 96 h 不同水深洪水淹没地物面积及其可能损失估算

Table 1 Direct economic losses and flood inundated ground surface for different inundation depths for simulation interval of 96 h													
入流 方案	水深/m	居民点			旱田		水田		林地		水域		可能损 失/万元
		面积/ km ²	户数/ 户	财产损失/ 万元	面积/ km ²	损失/ 万元	面积/ km ²	损失/ 万元	面积/ km ²	损失/ 万元	面积/ km ²	水产损 失/万元	
方案 1 (分洪流量 为 4400 m ³ /s)	< 0.5	36.33	24 740	9 896	61.74	6 421	56.85	2 729	5.14	63	3.56	705	19 813
	0.5~2	75.12	36 860	73 720	74.81	9 726	210.76	16 861	12.39	226	34.00	13 471	114 004
	2~4	31.36	15 417	61 668	16.82	2 186	163.71	13 096	4.72	115	33.26	13 178	90 244
	> 4	0.70	762	3 048	0.76	99	6.60	528	0.15	4	17.88	7 085	10 764
方案 2 (分洪流量 为 7700 m ³ /s)	< 0.5	8.32	4 398	1 759	13.00	1 352	7.29	350	1.13	14	0.97	192	3 667
	0.5~2	56.19	27 942	55 884	84.84	11 030	104.46	8 357	6.94	127	9.17	3 632	79 029
	2~4	80.79	42 561	170 244	68.89	8 956	274.85	21 988	13.34	325	48.22	19 105	220 618
	> 4	11.48	5 705	22 820	5.47	711	68.38	5 471	1.58	39	32.03	12 691	41 732
方案 3 (分洪流量 为 17000 m ³ /s)	2~4	21.56	12 984	51 936	25.80	3 354	46.36	3 709	1.99	49	4.31	1 709	60 756
	> 4	135.22	68 656	274 624	146.41	19 033	408.62	32 690	20.99	511	86.07	34 104	360 962

3 结 论

基于 GIS 栅格数据的洪水演进模型能够准确地反映不同分洪方案下的洪水路径、到达时间和淹没深度,结合社会经济资料还可以获取洪水演进不同时间、不同深度的洪水淹没地物面积及其可能损失等信息.该模

型可以根据土地利用状况、分洪区内积水情况、上游来水条件的变化及时调整参数.对荆江分洪区进行的洪水风险分析,在制订分洪区科学发展规划和调度方案方面起着极其重要的作用.

a. 荆江分洪区 $4\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $17\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 3 种不同入流方案的模拟结果显示 (a) 从开闸算起,经过一段时间,洪水演进到分洪区下游.这样的时滞,为防洪调度赢得了宝贵的时间,既可以有计划地防洪抢险,减少损失,又可以分批转移居民,避免拥挤和混乱.(b) 分洪区地势北高南低,大流量的注入,会在短时间内引起威胁到围堤安全的高位洪水的出现.考虑到充分运用分洪区有效容量,不应采用大流量进洪方案.而中入流量和小入流量的进洪方案,可以延缓超高水位的出现时间,但在连续进洪情况下,也要注意对入流量的实时控制和其他分洪区的联合调用,才能确保分洪区的安全运用.

b. 依据不同分洪量的淹没深度空间分布进行的洪水灾害损失评估,可以提供分洪区土地利用规划的基础信息,避免规划不当引起的洪灾损失.

c. 人口和资产的累积是分洪区运用最大的障碍.动态风险图的绘制宣传,可使人们了解分蓄洪区的风险概率和受灾程度,增强全民抗洪减灾的意识,避免分蓄洪区人口和资产的继续增加.

参考文献:

- [1] 史培军.中国自然灾害、减灾建设与可持续发展[J].自然资源学报,1995,10(3):267—278.
- [2] 刘树坤.国外防洪减灾发展趋势分析[J].水利水电技术,2000,20(1):2—10.
- [3] 刘树坤,周魁一,富曾慈,等.全民防洪减灾手册[M].沈阳:辽宁人民出版社,1993.1—10.
- [4] 周毅.编制城镇洪水风险图 减轻洪水灾害损失[J].防汛与抗旱,1996(2):3—10.
- [5] 张硕辅,薛光达,曾务书.湖南省洪水风险分析防洪风险图编制及其应用[J].湖南水利水电,2001(1):22—24.
- [6] 赵咸榕.黄河流域洪水风险图的分析与制作[J].人民黄河,1998,20(7):4—6.
- [7] 陈秀万.洪水灾害损失评估系统——遥感与GIS技术应用研究[M].北京:中国水利水电出版社,1997.38—74.
- [8] 李观义.基于GIS的洪灾损失评估技术及其应用[J].地理与地理信息科学,2003,19(4):97—100.
- [9] 王腊春,周寅康,许有鹏,等.太湖流域洪涝灾害损失模拟及预测[J].自然灾害学报,2000,9(1):33—39.
- [10] 陈德清,杨存建,黄诗峰.应用GIS方法反演洪水最大淹没水深空间分布研究[J].灾害学,2002,17(2):1—6.
- [11] 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—5.
- [12] 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(2):456—460.
- [13] GEMMER M. Decision support for flood risk management at the Yangtze River by GIS/RS based flood damage estimation[M]. Giessen: Shaker, 2004. 108—127.
- [14] 《荆江分洪工程志》编纂委员会.荆江分洪工程志[M].北京:中国水利水电出版社,1999.249—257.
- [15] 向立云,刘巍,姜付仁,等.荆江分蓄洪区1998年洪水转移调查分析[J].自然灾害学报,2000,9(4):80—85.
- [16] 岳健,张雪梅.关于我国土地利用分类问题的讨论[J].干旱区地理,2003,26(1):78—88.
- [17] 孙桂华,王善序,王金奎,等.洪水风险分析制图使用指南[M].北京:水利电力出版社,1992.54—82.

GIS raster data-based dynamic flood risk simulation model and its application

SU Bu-da^{1,4}, JIANG Tong¹, GUO Ye-you², Marco GEMMER³

- (1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;
2. Engineering Management Bureau of Jingjiang Flood Diversion Area, Gongan 434300, China;
3. Institute of Geography, Justus-Liebig University, Giessen 35390, Germany;
4. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract A 2-D dynamic flood evolution model was established based on GIS raster data, and a case study was performed for Jingjiang flood diversion area of Hubei Province. With the help of the digital topographical map and Landsat ETM remote sensing image, the flood inundated area, water depth, flood inundated ground surface, and economic loss which might occur were calculated under different flood diversion schemes according to the flood diversion situation and its hydrological planning in 1954. The simulated results show that the flood inundation risk simulation model provides a scientific basis for formulation of diversion schemes, planning for land utilization, and scientific management of flood.

Key words Jingjiang diversion area; dynamic flood evolution simulation; Floodarea model; flood risk management