

流域性暴雨洪涝灾害风险预警模型与应用分析

廖永丰¹, 聂承静^{2,3}

(1. 民政部国家减灾中心, 北京 100124; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 洪涝灾害是我国影响范围最广、持续时间最长、造成的损失最大的一类自然灾害。暴雨是洪涝灾害的最主要致灾因素, 所以, 暴雨洪涝灾害风险预警研究是洪涝灾害防灾减灾的重要基础。本文立足洪涝灾害应急管理工作要求, 对洪涝灾害系统空间仿真模拟研究模式进行改进, 采用流域地表径流模拟代替控制断面水位模拟, 彻底解决流域地表产流及河道水位模拟限制, 建立“地表径流—流域淹没分析—灾害损失预评估”风险预警模型, 提高模型适应性。该模型具有较高的准确性、时效性、可操作性, 能够为防灾避难提供科学依据。

关键词: 暴雨洪涝; 灾害风险; 预警; 模型

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00354

1 引言

据统计, 目前全球各种自然灾害所造成的损失, 洪涝占 40%, 热带气旋占 20%, 干旱占 15%, 地震占 15%, 其余占 10%^[1], 其中洪涝灾害所造成的损失最大。洪涝灾害的致灾因子包括暴雨、台风、海啸、冰雪融水、溃堤等, 其中暴雨是最主要洪涝致灾因素^[2-3], 暴雨洪水是最常见、威胁最大的洪水^[4]。加强暴雨洪涝灾害的监测预警是做好防灾减灾工作的重中之重^[5-7]。

21 世纪以来, 我国暴雨洪涝灾害监测预警研究进展迅速, 在技术方法研究方面主要形成了 3 种模式: 一是暴雨预警, 直接采用降雨强度预警洪涝灾害发生风险。2006 年, 中国气象局正式颁布了黄、橙、红 3 级暴雨警报标准; 二是生态系统承灾极限理论预警洪涝灾害风险及其损失; 三是模拟洪水演进和成灾过程, 评估灾害损失, 预警洪涝灾害风险。其中, 第三种模式近年来研究最多, 将遥感、地理信息系统等空间信息技术与数值模拟技术相结合, 建立洪水灾害系统空间仿真模型^[8]。

洪涝灾害系统空间仿真模拟研究模式总体包

括 3 个环节: 首先, 采用流域水文模型预报洪水, 一维河道洪水演进模型计算河道断面上的洪水水位; 然后, 采用二维洪水演进模型进行淹没分析, 获得可能的洪水淹没状况; 最后, 基于社会经济背景基础数据库, 利用洪灾损失评估模型计算洪水淹没范围内可能的灾害损失。其基本流程为“控制断面水位—流域淹没分析—灾害损失预评估”。这种技术模式模拟精度相对较高, 但是地面产流与洪水演进模拟技术复杂, 模型参数较多, 模型适应性较差, 难以满足灾害应急管理工作对可操作性、时效性、适应性的要求。

本研究试图立足洪涝灾害应急管理工作要求, 对洪涝灾害系统空间仿真模拟研究模式进行改进, 采用流域地表径流模拟代替控制断面水位模拟, 彻底解决流域地表产流及河道水位模拟限制, 建立“地表径流—流域淹没分析—灾害损失预评估”风险预警模型, 提高模型适应性。

2 洪涝灾害风险预警的评估技术

灾害系统由致灾因子、孕灾环境、承灾体等要

收稿日期: 2011-01-24; **修回日期:** 2011-05-27.

基金项目: 国家科技支撑计划课题“综合风险防范救助保障与保险体系示范”(2006BAD20B04); 国家科技支撑计划课题“承险过程分析与承险脆弱性综合评估技术”(2008BAK50B05); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“重大自然灾害风险评估技术”(KZCX2-YW-Q03-01)。

作者简介: 廖永丰(1974-), 男, 甘肃人, 博士, 副研究员。主要从事灾害风险评估、灾害管理研究。

E-mail: liaoyongfeng@ndrcc.gov.cn

素构成。其中,致灾因子强度变化是灾害系统变动的驱动因素,承灾体响应与反馈是灾害的具体结果与表象,致灾因子与承灾体之间的影响与反馈机制是灾害致灾机理。灾害风险预警涵盖灾害系统各个组成要素,以致灾因子变化作为输入、输出承灾体响应与反馈结果。

暴雨洪涝灾害预警以过程降雨量作为输入,通过模拟洪水成灾机理,评估灾害可能造成的损失。洪水灾害成灾机理模拟依次包括地表径流过程、洪水淹没、承灾体易损性分析等 3 个环节。其中,地表径流过程与洪水淹没过程,即洪水水情模拟是洪水成灾过程模拟的关键。近年来,洪涝灾害预警技术方法研究主要采用地表径流模型模拟洪水的形成、演进和空间淹没过程。根据生态系统承灾极限理论,洪水成灾的成因主要是超过流域承灾极限的新增洪水水量,因此,通过估算流域新增洪水流量可以成功评估洪水灾害风险^[9]。与以地表径流模型的洪涝灾害预警方法相比,基于流域新增洪水流量估算的洪涝灾害预警方法不受流域地表径流形成、演进的影响,可以模拟雨影区范围内多个流域的洪涝灾害风险情况。

本研究拟建立基于流域新增洪水流量估算的洪涝灾害预警技术方法体系。流域暴雨洪涝灾害成灾过程模拟流程(图 1),根据暴雨洪涝灾害预警基本流程,可得到具体灾害风险预警评估技术流程图(图 2)。



图 1 暴雨洪涝灾害预警基本流程

Fig. 1 The basic process of flood disaster warning

3 暴雨洪涝灾害预警模型

流域洪涝灾害预警基本流程中,超限水量估算、流域淹没分析、灾害损失评估等 3 个环节是核心。故此,采用 GIS 空间分析技术^[10]分别建立超限水量估算模型、流域洪水淹没分析模型、灾害损失评估模型,以流域预报面雨量作为输入,评估流域灾害损失,发布灾害预警。

3.1 超限水量估算模型

超限水量是指超过流域承灾极限的水量,即流域降雨产水量减去流域承灾极限水量的差值。

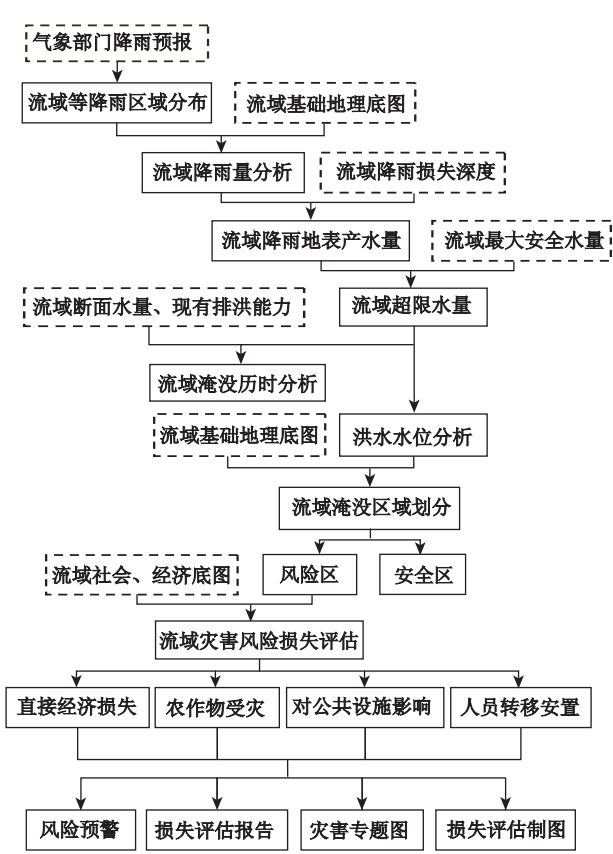


图 2 灾害风险预警评估技术流程图

Fig. 2 Flowchart of disaster risk warning assessment

$$Q_{over} = Q_{rain} - Q_{up}$$

其中, Q_{rain} 为流域降雨地表产水量, Q_{up} 为流域承灾极限水量。

(1)流域降雨地表产水量

流域一次降雨过程产生的地表产水量通常采用地表水文模型来估算。地表水文模型参数多,算法复杂,软硬件条件要求较高。灾害风险预警工作时效性要求较高,本研究在前人研究的基础上^[11-13],采用流域降雨量的简化方法估算地表产水量。

地表产水量采用如下方法估算:

$$Q_{rain} = 10^{-2}(P - L)A$$

其中, P 为流域降水深度(mm), L 流域降水损失深度(mm), A 为流域面积(km²)。

(2)流域承灾极限水量估算

喻光明等^[9]研究认为,承灾极限是指流域所能承受的最大水量和最长淹没时间,取决于流域的淹水调蓄能力、电排能力、主要作物的生理特性及人口与资财的空间分布;承灾极限等于流域安全水量极限与流域最大损失水量极限之和,综合考虑了孕

灾环境、承灾体共同影响。本研究拟以孕灾环境估算流域承灾极限水量,将承灾极限定义为流域最大安全水量(Q_{cap})。流域最大安全水量采用如下方法计算:

$$Q_{ap} = L_{ap} + R_{ap} + D_{ap}$$

其中, L_{cap} 为流域湖泊调蓄水量, R_{cap} 为流域河网调蓄水量, D_{cap} 为流域现有排洪能力。

(3)水量时间序列分配

在不同时间段,根据流域降雨地表产水量模型、流域承灾极限水量模型和超限水量估算模型对超限水量进行时间序列估算。

3.2 洪水淹没分析模型

超过流域安全极限的超限水量引发流域的淹没过程。洪水淹没是一个动态过程,通常采用二维洪水演进模型进行模拟,这种模型运算量大,较大范围的洪水淹没过程模拟软硬件条件难以满足。本研究拟采用 GIS 空间分析技术构建洪水淹没分析模型。

洪水淹没分析主要研究 3 个方面的内容:一是洪水淹没范围;二是洪水淹没历时;三是洪水淹没深度。

(1)洪水淹没空间范围和水深估算

洪水淹没过程是由流域超限洪水水量引发的。因此,本研究拟建立模型,以洪水总量作为输入,估算洪水的淹没范围和淹没水深。具体方法如下:

不断给定洪水水位,求出对应淹没区域的容积与超限洪水水量比较,采用二分法逼近算法,找出与超限洪水水量最接近的容积,求出洪水淹没范围和水深分布。淹没区容积采用 GIS 空间格网模型方法计算:

$$V = \sum_i^n (H + h_i) a_i$$

其中, H 为给定洪水水位, h_i 为淹没单元格高程, a 为淹没单元格面积, n 为淹没的连通单元格数量。

二分法逼近算法构建如下收敛函数:

$$F(H) = Q_{over} - V = Q_{over} - \sum_i^n (H + h_i) a_i$$

已知 $F(H_0) = Q(H_0)$ 为入口单元对应的高程),目标是求得一个 H 使得 $F(H) = 0$ 。

(2) 洪水淹没历时估算

本文假定流域为独立系统,降水是流域洪水的

唯一来源,则流域洪水淹水时间可以采用如下方法估算:

$$T_{inun} = \frac{Q_{over}}{D_{ap} - D_t}$$

其中, D_t 为监测流域断面水量; t 为暴雨后的淹水时间;其余指标含义同前。

(3)洪水淹没空间范围模拟

采用 GIS 空间分析技术,依据洪水淹没空间范围和水深估算模型,以及洪水淹没历时模型对研究区洪水淹没空间范围进行模拟。

3.3 灾害风险评估模型

灾害损失评估模型以洪水淹没范围、淹没历时、流域社会经济分布作为输入,评估洪水淹没可能造成的损失。具体方法是将流域社会信息采用空间栅格模型进行空间展布,与流域洪水淹没范围叠加,评估流域社会经济遭受洪水影响的范围^[14];采用承灾体脆弱性分析方法评估承灾体可能遭受的损失和影响。

(1)流域社会经济空间展布

目前,我国的人口、房屋、农作物、经济指标等承灾体信息主要是以行政单元统计;在行政单元内,社会经济等承灾体信息的空间分布是不均匀,无法直接与受淹范围叠加评估灾害损失。根据行政区内人口、房屋、农作物、经济指标的空间分布特点,本文采用 GIS 空间分析方法将各类承灾体信息在行政区单元内进行空间展布,拟合各类承灾体信息的空间分布状况^[15]。

空间拟合的基本依据是不同的承灾体信息必然分布于与其相对应的土地利用类型中,并假定:在特定的土地利用空间,其承灾体数量在空间上平均分布。具体方法为:

① 采用遥感方法提取流域土地利用分布

遥感是精确提取区域土地利用分布的最有效手段,本文首先对遥感影像进行几何纠正等预处理,然后采用人工解译方法进行土地利用分类。洪涝灾害损失预评估主要估算人口、房屋、农作物、区域经济指标等 4 大类,与此相应,从影像上提取居民地、农作物用地、林地、水产养殖用地、工业用地等 5 类(表 1)。

② 行政区土地利用信息统计

将行政区划图与土地利用图叠加,统计各行政区居民地、农作物用地、林业用地、水产用地、工业

用地的面积。首先,将行政区划矢量图与土地利用矢量图叠置生成新的矢量图层,然后,获得行政区划属性统计区域内各类土地利用类型的面积信息。

表 1 土地利用类型及相应统计指标

Tab. 1 Land use type and its corresponding statistical indicators

类 型	具体利用方式	统计指标
居民地	住宅用地、公共管理与公	人口指标、房屋指标、
	共服务用地、商服用地、工	
	矿仓储用地	第三产业生产总值
农作物用地	耕地	种植业生产总值
林业用地	林地	林业生产总值
水产用地	水域	渔业生产总值
工业用地	工矿仓储用地	工业生产总值

特定行政区域土地利用类型面积采用如下模式计算:

$$A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}$$

其中, a_{ij} 是行政区内 j 类土地利用 i 地块的面积。

③ 社会经济统计信息的空间展布

将基于行政单元的人口、房屋、农作物及其他经济指标统计总量展布于特定的土地利用类型中,估算出行政区内各地块人口、房屋、农作物等的空间分布密度。为简化计算,假设人口、房屋、农作物等指标在相关的土地利用类型中呈均质化分布,指标密度采用如下方法计算:

$$D_i = \frac{I_{ij}}{A_j}$$

其中, I_{ij} 为与 j 类土地利用相对应的 i 类指标统计总量, A_j 为 j 类土地利用的总面积。

人口、房屋、农作物、经济指标等社会经济统计要素空间分布密度基于相应的土地利用类型分层组织存储,数据格式采用栅格格式。

(2)灾害风险预警评估

采用地图代数算法,将淹没信息图层和社会经济统计信息图层进行空间叠加分析,评估人口、房屋、农作物及直接经济损失风险情况,输出灾害预警信息。

以洪水淹没范围,提取淹没区域内各种土地利用类型的面积,采用各类土地利用人口、房屋、农作物及 GDP 密度分布估算遭受洪水淹没的人口、农作物数量与 GDP 损失风险,具体方法如下:

$$P_j = \sum_{i=1}^n A_{ij} D_{ij}$$

其中, P_j 为 j 承灾体影响数量; A_{ij} 为洪水淹没区域 i 土地利用中 j 承灾体成灾面积; D_{ij} 为洪水淹没区域 i 土地利用中 j 承灾体分布密度。

4 模型评估案例分析

本文预警区选自湖南省临澧县,位于湘西北,澧水中下游,东、西、南三面环山,地形地貌以丘陵为主,地理坐标位处东经 111°24′~111°49′,北纬 29°17′~29°46′。临澧属中亚热带向北亚热带过渡的湿润季风气候。雨水充沛,但分布不匀,春末夏初雨水集中,并多暴雨,伏秋干旱常见,四季分明,季节性 强。临澧地表水资源总量为 16.318 亿 m³,除去渗透、蒸发、过境水量,实际拥有地表水资源 13.48 亿 m³。澧水两岸是临澧县工农业生产较为发达的地区,其主要农业产品有稻谷、棉花、食油等,工业生产主要有化工、建材、电子、塑制品、石膏等行业。

4.1 预警数据分析

案例分析中采用的数据主要有临澧县的 DEM 数据、Landsat TM/ETM 影像数据、降水数据和临澧县社会背景数据。所采用的 DEM 数据为 SRTM 数据。SRTM 数据主要是由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的,数据每经纬度方格提供一个文件,精度有 2 种,一种数据文件中包含 3601×3601 个采样点的高度数据;另一种文件中包含 1201×1201 个采样点的高度数据。目前能获取我国境内的数据是第二种数据文件,是 90m 的数据,每个 90m 的数据点是由 9 个 30m 的数据点算术平均得来的。土地利用类型解译的遥感数据为 Landsat TM/ETM 影像。降水数据为 2010 年 7 月气象部门的降雨数据矢量图。社会背景数据主要包括了临澧县的行政区划边界,境内的道路、河流、湖泊、水库,人口数量、区划面积,以及社会经济背景数据(包括了各产业经济收入、农作物面积及产量、公共设施等)。其中部分数据已经数字化,以矢量图层的形式作为背景数据参与模型中的分析。

4.2 灾害预警应用分析

预警模块的实现以气象部门的降雨数据矢量

图层作为输入,由气象部门发布的降雨预报主要为流域预报降雨量分布和流域监测降雨量实况分布 2 种,均以等值线分布形式表示。将研究区域降雨等值线进行数字化,以矢量图层的形式作为输入进行降雨量计算,得到研究区内的降雨量。

根据降雨数据及流域背景数据进行分析,可以获得流域最大安全水量,进一步分析可以获得洪水水位。以洪水水位作为划分标准,对临澧县 DEM 数据进行淹没风险区域划分,将高程小于洪水水位的地区提取出来,作为风险区域;反之,则为相对的安全区域。风险区域划分结果(图 3)。

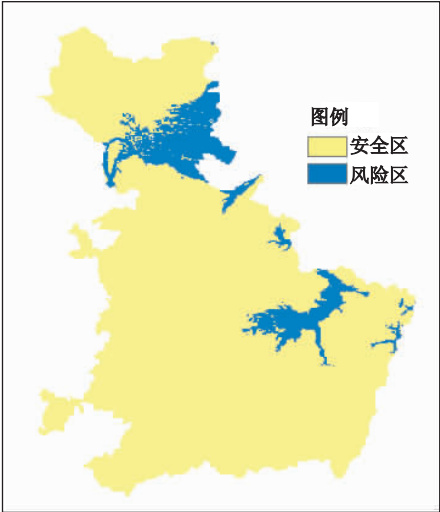


图 3 洪涝风险区示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the flood risk area

分析得到了风险区域的划分结果,可以发现临澧县暴雨洪涝灾害主要分布在北部和东部部分地区。以风险区域的分布情况作为依据,可对灾害进行预警,指导人员转移安置,并为可能发生的灾害救援提供参考。同时,利用当地的遥感影像对土地利用进行分类,得到临澧县土地利用/覆盖类型分布(图 4),并通过了实际调查检验,具有较高的精度。利用上面得到的风险区域划分结果和土地利用类型分布,可以根据不同的需求,与临澧县背景数据的矢量图层进行叠加分析,得到预期结果。将土地利用/覆盖类型分布图与淹没风险区域叠加,得到洪涝灾害风险分布(图 5),并可对风险区域进行损失评估分析。从图 5 可发现:临澧县北部的风险区内主要是耕地和建筑用地,将对该地区的粮食生产和人类生产、生活带来影响,东部的风险区内主要是林地和耕地,将一定程度地影响该地区林业

和粮食的生产。通过淹没风险区与临澧县暴雨洪涝灾害的分布范围进行对比分析,发现了两者具有较好的一致性。

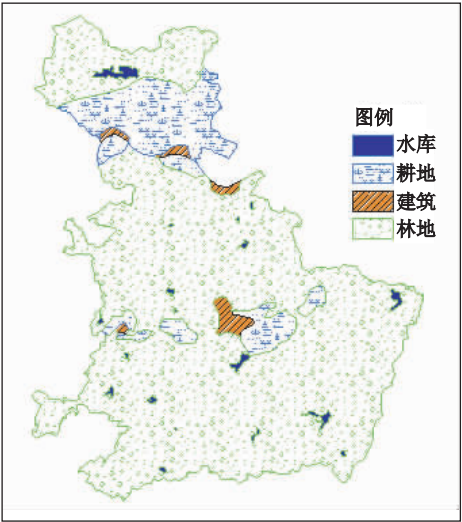


图 4 临澧县土地利用/覆盖类型分布示意图
Fig. 4 Distribution of land use and land cover types in Linli County

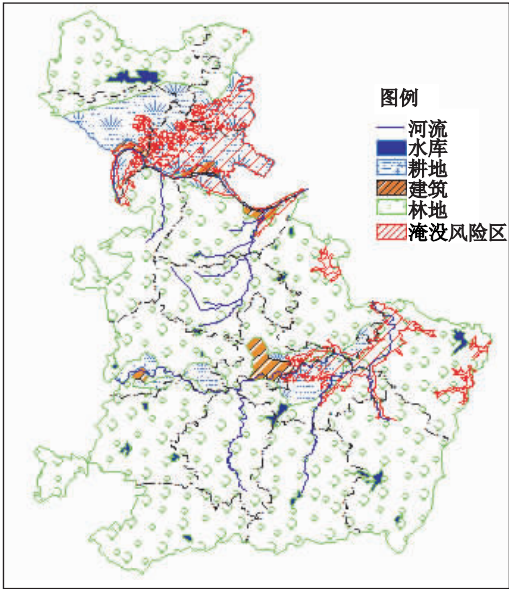


图 5 土地利用/覆盖类型分布图与淹没风险区域叠加示意图

Fig. 5 Overlaying of land use map, land cover map and flood risk map

5 结 论

(1)“控制断面水位-流域淹没分析-灾害损失

预评估”风险预警模式模拟精度相对较高,但是地面产流与洪水演进模拟技术复杂,模型参数较多,在模型参数数据充足的情况下,该模型具有较高的评估精度。本研究采用流域地表径流模拟代替控制断面水位模拟,彻底解决流域地表产流及河道水位模拟限制,建立了“地表径流—流域淹没分析—灾害损失预评估”风险预警模型,数据较容易获取,可提高模型适应性,更好地满足灾害应急管理工作对可操作性、时效性的要求。

(2)本研究将 GIS、RS 应用到暴雨洪涝灾害风险预警模型研究中,结合实际调查检验,具有较高的精度。

(3)对临澧县的暴雨洪涝灾害风险评估可知,其主要风险是对粮食生产、人类居住、工业生产、商业服务等方面的影响。

参考文献:

[1] 张继权,李宁 著. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2007,123-124.

[2] 王博,崔春光,彭涛. 暴雨灾害风险评估与区划的研究现状与进展[J]. 暴雨灾害,2007,26(3):281-286.

[3] 梁钰,布亚林,王蕊,等. 致洪暴雨预报模型应用研究[J]. 气象科技, 2005, 33(4): 305-310.

[4] Drobot S and Parker D J. Advances and Challenges in Flash Flood Warnings[J]. Environmental Hazards, 2007, 7(3): 173-178.

[5] Hayden M H, Drobot S, *et al.* Information Sources for Flash Flood Warnings in Denver, CO and Austin, TX [J]. Environmental Hazards, 2007,7(3): 211-219.

[6] Handmer J. Improving Flood Warnings in Europe: A Research and Policy Agenda[J]. Global Environmental

Change Part B: Environmental Hazards, 2001, 3(1): 19-28.

[7] Parker D J, Tunstall S M, *et al.* New Insights into the Benefits of Flood Warnings: Results from a Household Survey in England and Wales[J]. Environmental Hazards, 2007,7(3): 193-210.

[8] 李宗花,叶正伟. 洪泽湖流域洪涝灾害预警系统的构建[J]. 水利水电技术,2009,40(7):111-114.

[9] 喻光明,王朝南. 洪涝灾害承灾极限与灾情估算模式[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996,4(4):371-377.

[10] Carpenter T M, Sperflage J A, *et al.* National Threshold Runoff Estimation Utilizing GIS in Support of Operational Flash Flood Warning Systems[J]. Journal of Hydrology, 1999, 224(1-2): 21-44.

[11] Seller P J, Bounoua L, Collatz G J, *et al.* Comparison of Radioactive and Physiological Effects of Doubled Atmospheric CO₂ on Climate[J]. Science, 1996, 271(8):1402-1406.

[12] Norbiato D, Borga M, *et al.* Flash Flood Warning Based on Rainfall Thresholds and Soil Moisture Conditions: An Assessment for Gauged and Ungauged Basins[J]. Journal of Hydrology, 2008, 362(3-4): 274-290.

[13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[14] UNEP. Environmental Needs Assessment in Post-Disaster Situations: A Practical Guide for Implementation[R], New York, UNEP, 2008.

[15] 李纪人,丁志雄,黄诗峰,等. 基于空间展布式社经数据库的洪涝灾害损失评估模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(2):104-110.

A Disaster Risk Warning Model for the Basin-wide Rainstorm Flood Management

LIAO Yongfeng¹, NIE Chengjing^{2,3}

(1. National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Along with global warming, rainstorm flood disaster is increasing, and the loss is more and more serious, so the warning of flood disaster risk is an important foundation for flood disaster prevention

and mitigation. In order to meet the demands of flood risk warning and flood emergency management, we improved the spatial simulation of flood system in this study. Based on the combination of numerical simulation technology and spatial technology, such as remote sensing and geographic information systems, we established a risk warning model to improve the model adaptation, which is “surface runoff-basin submerged analysis-disaster risk assessment”, using watershed surface runoff simulation instead of water level simulation in controlling section, that completely broke the constraints of watershed surface runoff and river water level simulation. Through the case study, this model shows higher accuracy and better timeliness. It would supply reliable and efficient method for flood disaster prevention and reduction.

Key words: rainstorm flood; disaster risk; early warning; model