

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.12.017

基于 FloodArea 模型的 重庆沙坪坝区内涝风险评估研究^①

康俊, 周杰, 程炳岩

重庆市气候中心, 重庆 401147

摘要: 基于 FloodArea 二维水动力模型、数字高程模型和土地利用数据, 以重庆市沙坪坝区为研究区域, 对其 24 h 历时 5 a 重现期暴雨雨型进行模拟计算, 得到面雨量与淹没水深关系, 并根据 3 个淹没等级计算出内涝隐患点的致灾临界雨量; 同时对 24 h 历时的 10, 20, 30, 50 和 100 a 重现期暴雨雨型进行了模拟, 并根据风险矩阵法研制了沙坪坝区城市内涝风险区划图. 实验结果表明: FloodArea 水文模型在城市内涝对于面雨量和地表径流关系上拟合较好, 为城市内涝风险区划计算也提供了物理基础.

关键词: FloodArea; 城市内涝; 致灾临界面雨量; 沙坪坝; 风险区划

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)12-0111-08

城市内涝是指强降水或连续性降水超过城市排水能力致使城市内产生积水灾害的现象. 内涝灾害发生时, 城市交通、网络、通信、水、电、气、暖等生命线工程系统瘫痪, 社会经济活动中断, 其灾害损失已远远大于因建筑物和物资破坏所引起的直接经济损失. 随着社会经济的迅猛发展, 城市规模不断扩大、人口快速增长, 大量的硬质铺装, 硬化路面越来越多, 使雨水无法下渗透或渗透慢, 容易造成积水, 城市内涝灾害日趋严重. 2007 年 7 月 16—19 日, 重庆出现了百年以来范围最广、持续时间最长、强度最大的强降雨天气, 道路中断积水严重, 造成的巨大损失已引起各级政府的高度重视, 故迫切需要针对城市内涝的有效预警和区划方法来为政府提供服务.

城市内涝预警预报的关键是确定城市内涝临界雨量, 目前有关临界雨量的计算方法主要有实测雨量分析法、降雨灾害频率分析法、产汇流对比分析法及暴雨临界曲线法、分布式水文模型法等^[1-12], 也有很多专家学者开发了针对城市内涝的仿真预警模型: 如天津市暴雨沥涝仿真模型^[13]、城市排水系统非恒定流模拟模型^[14]等. 应用这些方法可以计算出内涝发生时的临界雨量, 但是由于此类物理模型法涉及城市排水管网数据, 而城市管网的数据获取难度大, 且随着年代久远很可能由于杂物堵塞等因素造成其排水功能与设计不符.

重庆属山地城市, 地形分布复杂, 针对城市内涝预警和区划方面的研究较少. 本文采用了德国研发的二维水动力模型“FloodArea”(Geomer, 2003)建立城市内涝情景模拟, 以不同重现期下的暴雨雨型为输入, 研究沙坪坝区致灾临界雨量的计算方法和基于 GIS 栅格叠加运算原理的风险区划方法.

1 资料和方法

1.1 研究区概况

沙坪坝区属于川东平行岭谷低山丘陵区的一部分, 呈丘陵、台地和低山组合的地貌结构, 西部为缙

① 收稿日期: 2016-03-23

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506014).

作者简介: 康俊(1982-), 男, 湖北钟祥人, 工程师, 硕士, 主要从事气象灾害风险方面的研究.

云山低山区,中部歌乐山海拔高度在 550~650 m 之间,西面为中梁山.嘉陵江由北往东南流经沙坪坝区 19.3 km,国道、省道等高等级公路 5 条,成渝、渝长、渝遂、上界、绕城高速公路纵横域内.

1.2 数据源

地理信息数据:DEM 采用的 SRTM 空间分辨率为 30 m 数据,投影方式为 ALBERS 等面积圆锥投影,WCG1984 大地坐标系,中央经线为 105°E,双标准纬线分别为 25°N 和 47°N.与 DEM 相同投影的 1:25 万沙坪坝区土地利用数据.在选择模拟的范围上,对沙坪坝区行政边界进行了一定范围的扩大,以确保降水在整个沙坪坝区模拟范围内能够下渗和汇流,制作风险区划图时根据沙坪坝区的行政边界对模拟的结果进行了裁剪.气象观测数据:沙坪坝区、渝北区、巴南区、璧山县和北碚区逐分钟降水自记纸观测资料,资料年限为 1961—2013 年,由重庆市气象信息与技术保障中心提供.

1.3 方法

1.3.1 雨量数据处理

根据电子化后的逐分钟降雨量自记纸资料,采用皮尔逊—Ⅲ型分布曲线拟合计算得到沙坪坝 5,10,20,30,50 和 100 a 重现期的 24 h 历时设计暴雨量,见表 1.采用耿贝尔分布曲线拟合得到 24 h 历时各重现期设计暴雨量分布情况,见表 2.

表 1 沙坪坝皮尔逊—Ⅲ型分布曲线拟合的 24 h 历时各重现期设计暴雨量

重现期/a	5	10	20	30	50	100
设计雨量/mm	133.4	162	190	205.9	225.7	252.3

表 2 沙坪坝 24 h 历时设计暴雨过程雨量

时间/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	%
逐时雨量/总雨量	1.89	5.93	27.22	45.86	7.42	4.27	1.96	1.4	0.88	0.48	0.44	0.58	
时间/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
逐时雨量/总雨量	0.41	0.36	0.15	0.14	0.11	0.09	0.1	0.08	0.04	0.08	0.06	0.12	

1.3.2 FloodArea 模型

FloodArea 模型计算基于水动力方法,同时考虑了一个栅格的周围 8 个单元.对邻近栅格单元的泻入量由 manning-stricker 公式计算^[15].坡度由单元之间的最低的水位和最高的地形高程之间的差异所决定,对每一个单元都进行计算,相邻单元的流量长度被认为是相等的,位于对角线的单元,以不同的长度算法来计算.

水力糙度指的是流体力学上的粗糙度,是衡量河道或冲沟边壁形状不规则性和粗糙程度影响的一个综合性系数,目前关于水力糙度的研究较多^[16].利用地面覆盖类型,根据张洪江等人^[7]的研究结论对不同地面覆盖类型的水力糙度赋初值.图 1 使用了区域内土地利用类型及其糙率转变的数值进行赋值,表 3 为具体土地利用类型转变赋值.

表 3 土地利用类型及其糙率

土地覆盖分类	居民地	水体	旱地	水浇地	林地
Striker 系数	12.5	33	28	20	12

SCS(Soil Conservation Service)模型应用于无资料地区径流模拟,依据地表覆盖类型来确定 SCS 模型的参数.模型能够客观反映土壤类型、土地利用方式及前期土壤含水量对降雨径流的影响,其显著特点是模型结构简单、所需输入参数少,是一种较好的小型集水区径流计算方法^[17].SCS 模型计算公式如下:

$$S = \frac{25\ 400}{CN} - 254 \tag{1}$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{2}$$

$$k = \frac{Q}{P} \tag{3}$$

其中: Q 为产流量; P 为过程降水量; K 为产流系数; S 为潜在入渗量, CN 反映流域前期土壤湿润程度、坡度、土壤类型和土地利用现状的综合特性, 可以较好地反映下垫面条件对产汇流过程的影响, CN 值由地表覆盖类型确定, 可查表获得^[18]. 根据地面覆盖类型, 通过公式(1)–(3)计算得出流域地表产流系数值. 在计算整个过程降雨量时采用的是沙坪坝及其周边 4 个气象台站 5 a 重现期逐小时降雨量资料, 利用泰森多边形方法计算了整个降雨过程产流系数空间分布图(图 2).

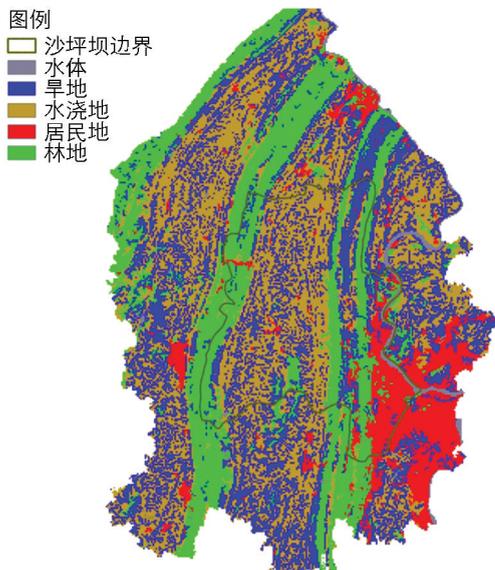


图 1 沙坪坝区地表糙率

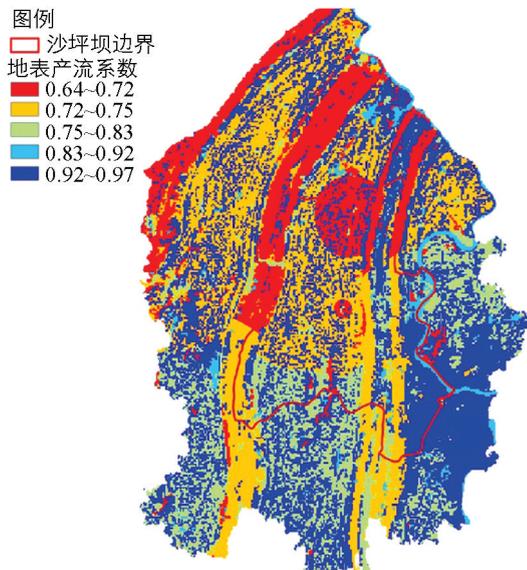


图 2 沙坪坝区地表产流系数图

1.3.3 风险区划

风险区划方法采用矩阵分析法如图 3 所示, 根据暴雨诱发的城市内涝影响因子等级条件(表 4)进行重采样划分, 然后通过矩阵法将影响因子进行叠加分析得到暴雨诱发的城市内涝风险等级区划图. 本文采用的城市内涝风险影响因子为积涝水深、DEM 和坡度. 积涝水深是基于不同重现期的设计暴雨雨型的二维水动力模型的动态模拟结果. 重庆市地形起伏大与平原地区不同, 地势的高低和坡度将直接影响降雨量的汇流情况. 将 DEM 和地表坡度作为城市内涝风险区划矩阵中的影响因子进行 4 个等级划分(表 4), DEM 越高处汇水风险较低, 反之越低地段越容易积水, 风险较高. 而坡度越小越容易汇流, 反之坡度越大越不容易积水. 采用重采样方法将 DEM 和坡度划分为 4 个级别(如图 4—图 5), 从图中可以看出嘉陵江、中梁山、缙云山以及山谷地段分布清晰且与坡度分布相互吻合.

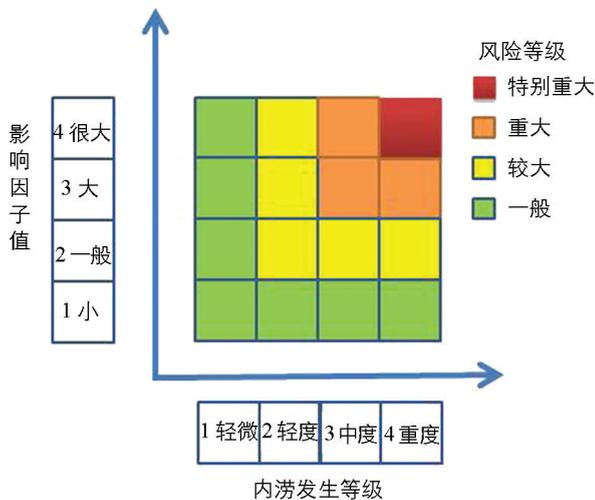


图 3 城市内涝风险区划矩阵法

表 4 淹没深度、DEM 和坡度分级

影响因素	等 级			
	1	2	3	4
淹没深度(h)/m	$h < 0.6$	$0.6 \leq h < 1.2$	$1.2 \leq h < 1.8$	$1.8 \leq h$
DEM 值/m	536~688	300~536	190~300	171~190
坡度影响因子/ $^{\circ}$	35~55	15~35	5~15	0~5

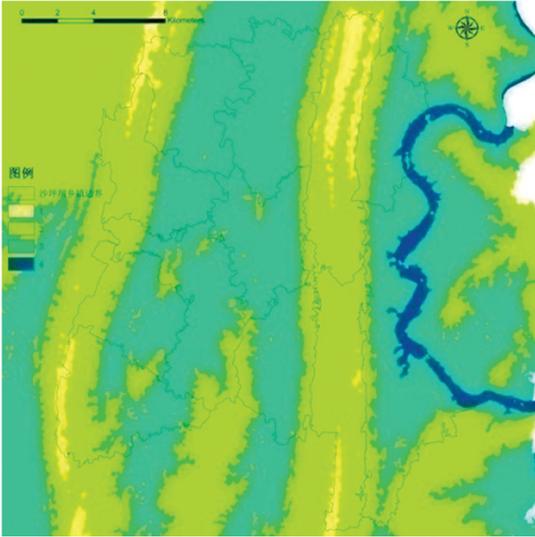


图 4 DEM 分级图

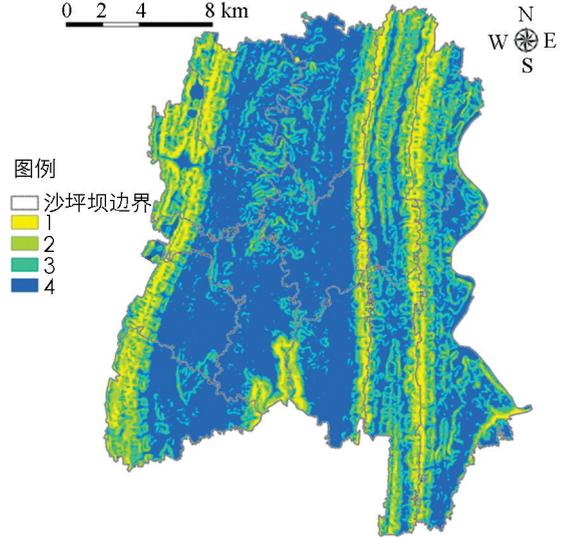


图 5 地形坡度分级图

2 结果与分析

2.1 沙坪坝区城市内涝致灾临界阈值计算

将 24 h 历时设计暴雨雨型 5 a 重现期逐时雨量作为模型输入雨量, 采用 FloodArea 水文模型中的暴雨模块进行动态模拟, 并对输出的淹没结果(图 6—图 9)进行分析, 从图中可以看出整个汇流和淹没过程非常清晰. 设计雨型的峰值区在第 3 h 和 4 h(表 2), 从淹没结果中可以看出在第 4~9 h 区间, 积水也达到此次过程的一个峰值水平, 之后积水开始逐渐减缓. 再统计沙坪坝区 5 a 重现期暴雨过程模拟分时淹没面积表(表 5), 在第 4 h, 超过 0.6 m 淹没水深的面积陡增. 由于降水大部分集中在过程前半段且降水的汇流需要时间, 第 9 h 之后淹没深度在 0.6~1.2 m 的面积开始逐渐减少, 1.2~1.8 m 淹没面积在第 19 h 也开始逐渐减少, 而淹没水深大于 1.8 m 的范围在继续增加. 由于城市排水管道数据的可获取性有限, 管网参数并未考虑, 仅通过调整地表渗透率来弥补排水管网的缺失, 可能导致模拟结果与真实情况存在误差.

表 5 沙坪坝区 5 a 重现期暴雨过程模拟分时淹没面积

km²

时间	淹没水深 < 0.6	0.6 ≤ 淹没 水深 < 1.2	1.2 ≤ 淹没水深 < 1.8	1.8 ≤ 淹没水深	淹没超 0.6 m 以上面积合计
1 h	418.7	0	0	0	0
4 h	402.8	12.1	3	0.8	15.9
7 h	395.4	16.7	4.4	2.2	23.3
9 h	393.7	17.6	4.9	2.5	25
14 h	392.1	16.9	7.1	2.6	26.6
17 h	391.8	16.4	7.7	2.8	26.9
19 h	391.5	16	8.2	3	27.2
24 h	391.3	15.9	7	4.5	27.4

配合隐患点的经纬度坐标提取整个模拟过程各个隐患点淹没水深数据, 建立雨量—淹没水深关系的回归方程. 本文分析了此次模拟过程中淹没较深的 5 个隐患点, 结果分析 2 h 累计降雨量与逐时的淹没深度的拟合相关系数最高, 均在 0.7 以上, 根据漫堤淹没预警点 0.6 m、1.2 m 和 1.8 m 的致灾临界条件, 计算得出不同等级累积雨量(表 6). 将本次 5 个隐患点模拟过程的逐时淹没深度与降水进行了对比(图 9), 可以看出此过程的淹没深度与降雨过程联系紧密, 当降雨量在第 4 h 达到峰值, 随着雨水汇流各隐患点淹没深度也达到峰值, 随着降雨量逐渐减小, 各隐患点淹没深度也开始逐步下降.

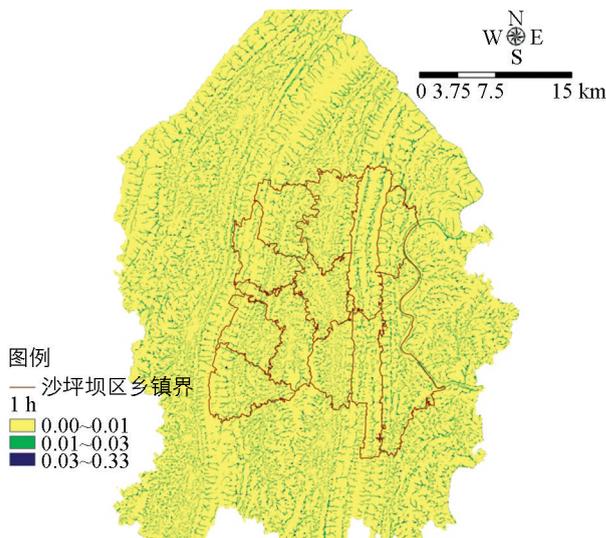


图 6 第 1 h 模拟淹没水深

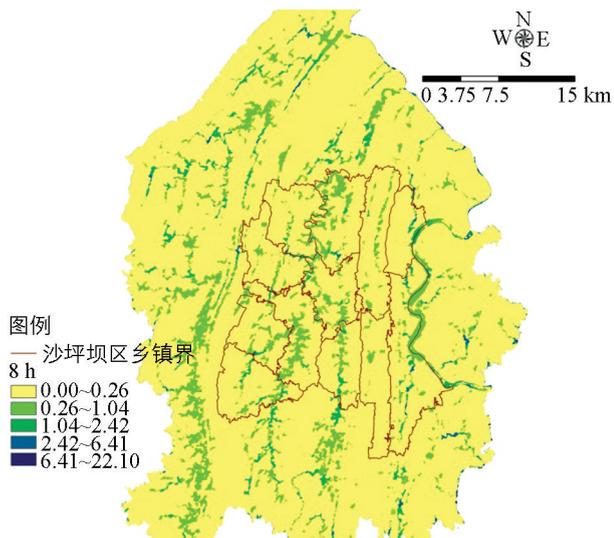


图 7 第 8 h 模拟淹没水深

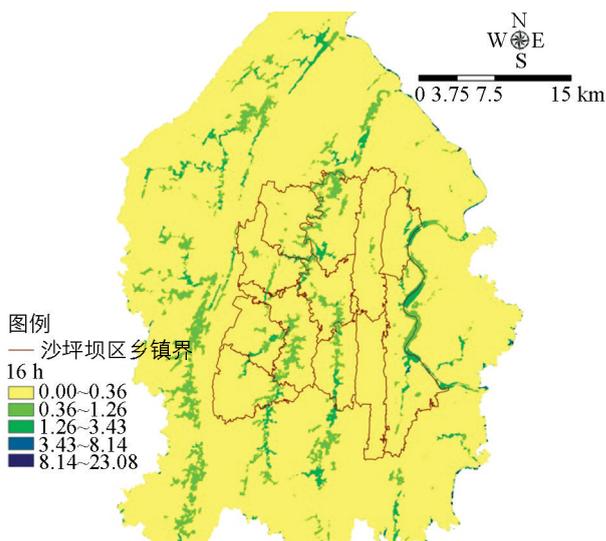


图 8 第 16 h 模拟淹没水深

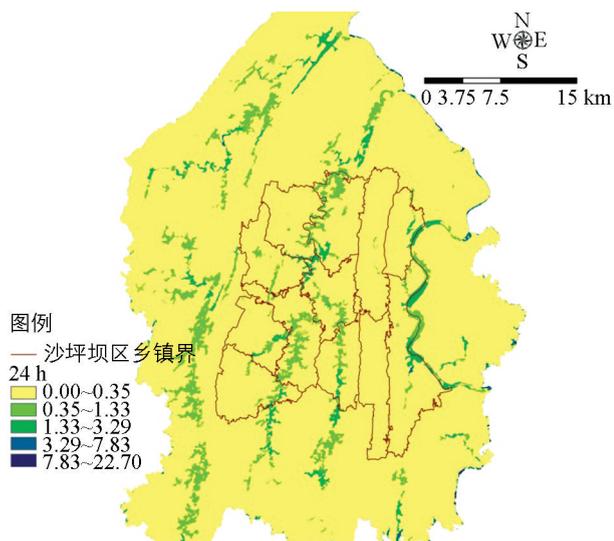


图 9 第 24 h 模拟淹没水深

表 6 5 a 重现期 24 h 历时暴雨过程模拟结果分析

隐患点名称	隐患点淹没深度与 面雨量关系式	相关系数 R^2	致灾临界阈值/mm		
			0.6 m	1.2 m	1.8 m
巴渝职业技术学院	$y = -6.515x^2 + 37.48x + 3.382$	0.811	23.5	39.0	49.7
磁器口街道	$y = -7.737x^2 + 40.35x + 3.558$	0.796	25.1	40.8	51.1
二十八中	$y = -13.68x^2 + 53.04x + 4.465$	0.784	31.4	48.4	55.6
重师地理及生命学院	$y = -6.923x^2 + 37.04x + 1.722$	0.732	21.5	36.2	46.0
沙坪坝区井口医院	$y = 22.76x^2 + 7.881x + 4.245$	0.944	17.2	46.5	92.2

2.2 沙坪坝区城市内涝风险分析

将 5,10,20,30,50,100 a 重现期 24 h 雨型的模拟结果按照表 4 中等级进行重采样划分,得到不同重现期的沙坪坝城市内涝淹没因子空间分布图(图 11—图 14)和不同等级淹没面积占整个沙坪坝区面积的比重表(表 7).从空间上可以看出不同重现期的淹没区域空间分布相似,易产生积涝地区分布在缙云山和中梁山之间低洼地,主要为梁滩桥、五福、白鹤、西永及磁器口街道.从重现期尺度来分析,重现期越大,1 级和 2 级淹没深度范围越小,而 3 级和 4 级淹没深度范围越大.

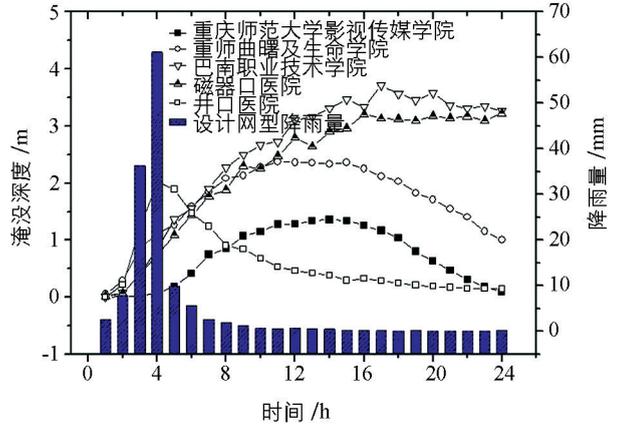


图 10 淹没深度模拟与降雨量对比图

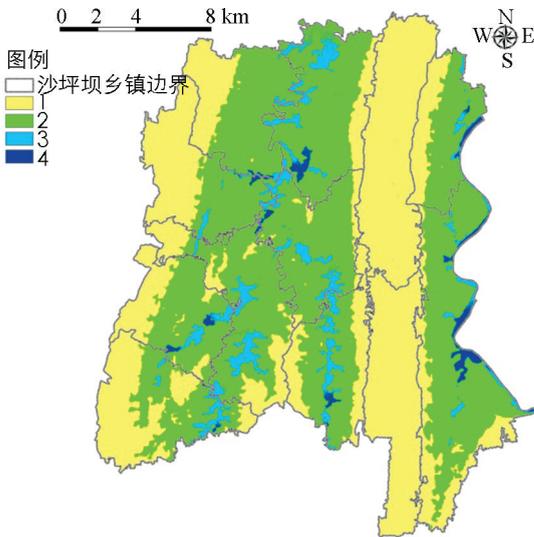


图 11 5 a 重现期沙坪坝城市内涝淹没因子

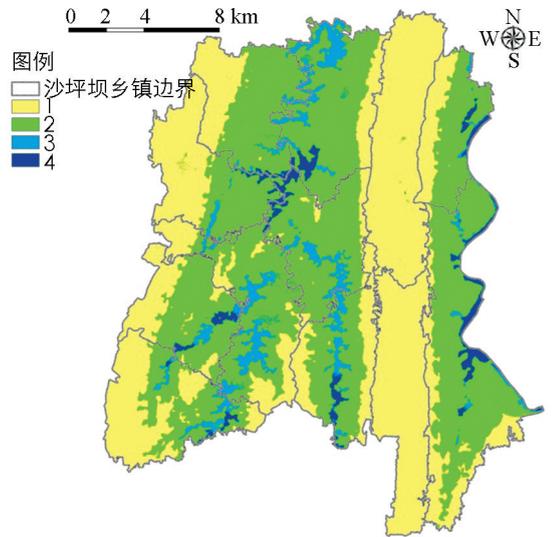


图 12 20 a 重现期沙坪坝城市内涝淹没因子

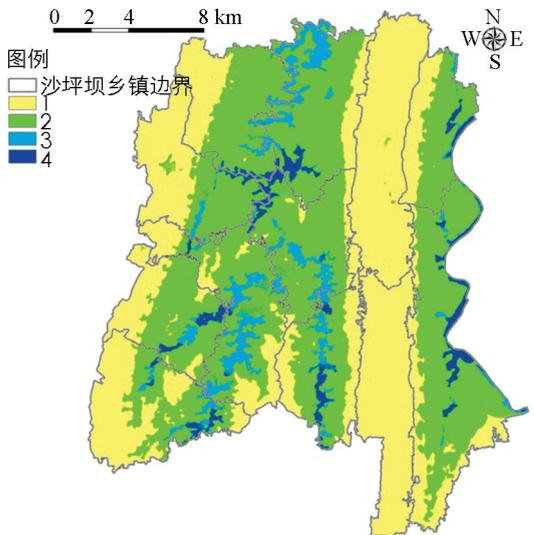


图 13 50 a 重现期沙坪坝城市内涝淹没因子

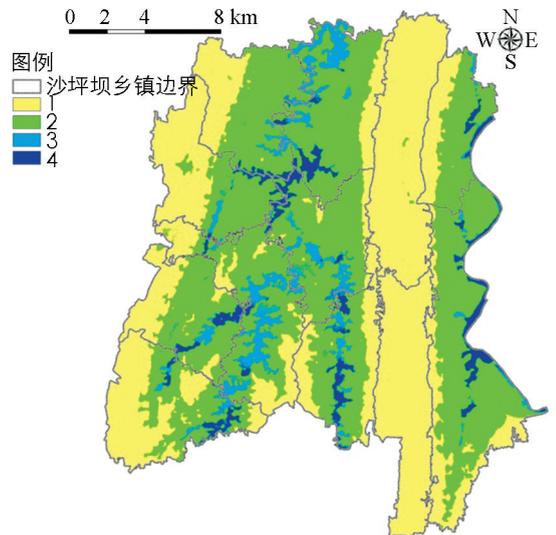


图 14 100 a 重现期沙坪坝城市内涝淹没因子

表 7 5,10,20,30,50 和 100 a 重现期不同淹没等级面积比重统计

等级	不同重现期淹没面积比重/%					
	5	10	20	30	50	100
1	43.45	43.45	43.43	43.39	43.33	43.25
2	49.67	48.86	48.25	47.88	47.54	47.04
3	5.50	5.51	5.76	5.96	5.92	5.96
4	1.38	2.19	2.55	2.77	3.21	3.75

2.3 沙坪坝区城市内涝风险区划分析

根据矩阵法将淹没等级、DEM 影响因子和坡度影响因子进行叠加计算, 得到沙坪坝区城市内涝风险区划图, 因为不同重现期的内涝风险区划图在空间分布上大致相似, 故仅展示了 5 a 重现期的沙坪坝城市内涝风险区划图(图 15)。从图中可以看出高风险区主要集中在贯穿沙坪坝区的梁滩河附近和磁器口街道附近, 这些区域海拔较低且坡度不大, 容易产生积涝。

3 讨论和不足

本文以重庆市沙坪坝区为例, 利用 FloodArea 二维水动力模型对 5,10,20,30,50,100 a 重现期 24 h 暴雨雨型进行了动态模拟, 得到不同隐患点致灾临界雨量和风险区划图。

结果表明: 1) FloodArea 在区域性山洪致灾动态模拟方面有大量的应用, 在城市内涝的动态模拟上运用较少, 由于缺乏城市管网数据, 过程的排水量可能存在误差, 但是通过增加模型中地表透水交流率参数设定进行相应弥补, 模拟结果能够反映出降雨过程的地表汇流情况。

2) 通过提取整个模拟过程各个隐患点淹没水深数据, 建立雨量—淹没水深关系的回归方程计算的致灾临界阈值具有一定的物理基础。

3) 从矩阵法计算的沙坪坝城市内涝风险区划图中可以看出, 高风险区主要集中在贯穿沙坪坝区的梁滩河附近和磁器口街道附近, 这些区域海拔较低且坡度不大, 容易产生积涝, 与实际情况相符。

由于城市排水管网数据较难获取, FloodArea 水文模型计算的淹没深度数值相对较大, 制作的致灾临界阈值和风险区划图仅限于技术研究。基于水文模型的风险临界雨量和风险区划的研究属于近年来开展的新兴研究, 对于水文模型的选择和优化还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 江锦红, 邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准 [J]. 水利学报, 2010, 41(4): 458—463.
- [2] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析 [J]. 水利规划与设计, 2009(2): 20—21, 57.
- [3] 刘 哲, 张鹏远, 刘广成. 黑龙江省山洪灾害防治临界雨量计算分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(5): 6.
- [4] 苏布达, 姜 彤, 郭业友, 等. 基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 370—374.
- [5] 叶 勇, 王振宇, 范波芹. 浙江省小流域山洪灾害临界雨量确定方法分析 [J]. 水文, 2008, 28(1): 56—58.
- [6] 王忠红, 赵贤产, 余 菲. 义乌降水气候分析中的面雨量计算及其应用比较 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2010, 22(1): 47—50.
- [7] 张洪江, 北原耀, 解明曙. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究 [J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(S4):

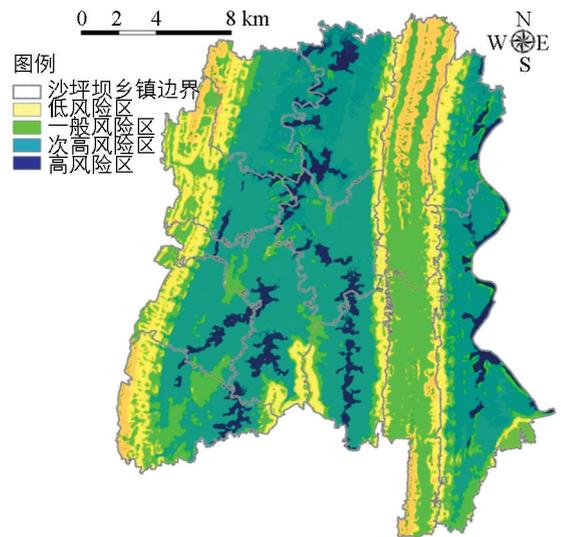


图 15 沙坪坝 5 a 重现期城市内涝风险区划图

86—91.

- [8] 刘树坤. 国外防洪减灾发展趋势分析 [J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 2—9.
- [9] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤. SCS 模型及其研究进展 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120—124.
- [10] 刘志雨, 杨大文, 胡建伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用 [J]. 北京师范大学学报, 2010, 46(3): 317—321.
- [11] 吴险峰, 王中根, 刘昌明, 等. 基于 DEM 的数字降水径流模型—在黄河小花间的应用 [J]. 地理学报, 2002, 57(6): 671—678.
- [12] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The Extraction of Drainage Network from Digital Elevation Data [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28(3): 323—344.
- [13] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城市暴雨沥涝仿真模拟系统 [J]. 水利学报, 2000, 11: 34—42.
- [14] 周玉文, 孟昭鲁, 宋军. 城市雨水管网非线性运动波法模拟技术 [J]. 给水排水, 1995, 21(4): 9—11.
- [15] 甘衍军, 李兰, 杨梦斐. SCS 模型在无资料地区产流计算中的应用 [J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 30—31.
- [16] 童星, 裴毅. 地表糙度与水力糙率间关系的试验研究 [J]. 湖南农机, 2011, 38(3): 35—37.
- [17] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤. SCS 模型及其研究进展 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120—124.
- [18] MOCKNS V, WOODWARD D E. National Engineering Handbook [J]. Washington: Natural Resources Conservation Service, 1985.

Risk Waterlogging Assessment Methods Based on the FloodArea Model ——A Case Study of Shapingba District of Chongqing

KANG Jun, ZHOU Jie, CHENG Bing-yan

Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China

Abstract: Based on the 2D hydrodynamic model FloodArea, Digital Elevation Model (DEM) and land-use data, taking the Shapingba District of Chongqing City as the study area, simulated calculation was made of its 24-hour short duration storm rainfall pattern of 5-year return period, and the relationship of area precipitation with submergence depth was obtained. Then, the disaster-causing critical precipitation of waterlogging potential spots was calculated based on the 3 grades of submergence. Meanwhile the 24-hour short duration storm rainfall patterns of 10-year, 20-year, 30-year, 50-year and 100-year return periods were simulated, and an Urban Waterlogging Risk Zoning Map of Shapingba District was developed based on the risk matrix method. The experimental results showed that the hydrological model FloodArea could well simulate the relationship of area precipitation and surface runoff in the urban waterlogging study area, and could be used to offer a physical basis in order to calculate the urban waterlogging risk.

Key words: FloodArea; urban waterlogging; disaster-causing critical area precipitation; Shapingba District; risk zoning

