

基于遥感与 GIS 技术的洪水淹没状况分析

——以安徽省安庆市望江县为例

徐 韧¹, 吉阳光², 赵东儒², 罗 静², 董张玉²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: [目的] 以安徽省安庆市望江县为研究区, 设计 20 a 一遇洪水灾情, 为遥感与 GIS 相结合在灾情分析上的应用提供科学依据。[方法] 结合遥感与地理信息系统 (GIS) 技术, 以遥感、DEM 为数据基础, 对土地进行监督分类, 采用种子蔓延算法, 推算淹没范围, 与土地类型相叠加, 得到淹没范围内各类型土地淹没比例。建立洪水灾情评估模型, 通过类比法对 20 a 一遇的洪灾进行模拟分析。[结果] 望江县在 20 a 一遇的洪水影响下, 受灾面积超过总面积的 50%, 受影响人口超过 90%, 利用淹没数据结合案例进行灾情评估可定性为较大洪涝灾害, 与评估系数相近的台风“珍珠”进行类比, 利用试验数据设计出救灾抢险措施。[结论] 遥感与 GIS 技术相结合为洪灾设计提供了平台, 利用淹没数据, 在面对洪灾时可以第一时间对灾情等级进行评估, 通过与同等级灾情类比分析并结合实际, 能够快速准确地拟定救灾措施, 评估损失, 并作为案例便于参考分析。

关键词: 望江县; 遥感与 GIS; 灾情评估模型; 类比法; 灾情分析

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)05-0282-06

中图分类号: TV213.9, S127

文献参数: 徐韧, 吉阳光, 赵东儒, 等. 基于遥感与 GIS 技术的洪水淹没状况分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 282-287. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.045. Xu Ren, Ji Yangguang, Zhao Dongru, et al. Flood inundation analysis based on remote sensing and GIS technology[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 282-287.

Flood Inundation Analysis Based on Remote Sensing and GIS Technology

—A case study in Wangjiang County, Anqing City, Anhui Province

XU Ren¹, JI Yangguang², ZHAO Dongru², LUO Jing², DONG Zhangyu²

(1. College of School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 2. College of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: [Objective] Taking Wangjiang County, Anqing City of Anhui Province as the research area, this study designed twenty year flood disaster in order to provide a scientific basis for the application of remote sensing and geographic information system (GIS) in disaster analysis. [Methods] Using remote sensing and GIS technology, land use was supervised and classified based on remote sensing and DEM data base. The submerged area was calculated by seed spread algorithm, calculation, and the proportion of each type of land use in the submerged area was obtained. A flood disaster assessment model was established, and the flood disaster in 20 years was simulated and analyzed by analogy method. [Results] With the influence of the flood disaster in Wangjiang County in 20 years, the affected area was more than 50% of the total area, and the affected population was more than 90%. Using submerged data combined with cases data, the case could be characterized as large flood disaster. By analogy with typhoon “Pearl” with similar evaluation coefficients, disaster relief and rescue measures were designed with test data. [Conclusion] The combination of remote sensing and GIS technology provides a platform for flood design. By using submerge data, the disaster level can be evaluated as soon as possible. Through analogy analysis with the same level of disaster and combining with the actual situation, the disaster relief measures can be drawn up quickly and accurately, and the case

收稿日期: 2018-04-13

修回日期: 2018-04-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向生态服务能力提升的沼泽湿地空间格局优化方法研究”(41601452); 中国博士后科学资助项目“SAR与可见光图像融合关键技术研究”(2016M602005); 大学生创新创业训练项目(2017CXCY534)

第一作者: 徐韧(1996—), 男(汉族), 江苏省无锡市人, 本科在读生, 研究方向为水利信息系统。E-mail: 619235203@qq.com。

通讯作者: 董张玉(1986—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 副教授, 主要从事 GIS 与遥感应用研究。E-mail: dzyhfut@hfut.edu.cn。

can be assessed as a case for reverence.

Keywords: Wangjiang County; remote sensing and GIS; disaster assessment model; analogy method; disaster analysis.

洪灾频繁是中国数千年来无法回避的问题,从两个方面可以说明洪灾对中国的巨大影响。第一,洪水是中国成灾频率最高的灾害,平均每两年就会发生一次洪水灾害,对中国抗洪技术提出了挑战。其次,洪灾造成经济损失为各大灾害之首。根据民政部门的统计,1991—2008 年短短不到 20 a 间,中国洪水灾害所造成的直接经济损失就超过 2.1×10^{12} 元,严重减缓了中国经济迅速发展的步伐^[1]。洪水淹没分析在洪水泛滥之前就对灾情进行模拟,能够做好灾害的防范与处置工作,使灾害处于可控状态,让各项工作有序进行,减少灾害带来的损失。

水文方法设计洪水通常分为两类,一是通过历年水文数据(统计结果)对指定区域洪水进行设计,另一种则是通过气象及其他影响因素推求设计洪水^[2],但是两种方法在反映洪水带来的影响和损失方面都不够直观。过去的几十年中,遥感技术和地理信息系统进一步发展完善^[3-4],遥感技术和 GIS 技术在洪水淹没灾情分析上的应用更为成熟可靠^[5],这也为实现洪水预警与设计的立体化与可视化,为更加高效地设计洪水、评估损失、拟定救灾措施提供了技术支持。中国关于遥感与 GIS 的研究起步较慢,开始于 20 世纪 80 年代末,但发展迅速,短短 20 a 多内达到了一定的高度。通过查阅相关文献^[6-9]我们可以总结得到,目前国内外洪水淹没研究主要分为 3 大类。第 1 类,通过传统的水文分析与计算,将结果带入风险评估模型中对洪水进行定性分析。第 2 类则是通过建立水文数据模型,与风险评估模型相结合,能够更加客观直接地看到洪水淹没的范围,准确评估损失,衡量风险性。而第 3 类则是应用遥感与 GIS 技术,利用水文数据直接模拟洪水淹没范围,再通过与地理信息数据相结合,定量地对洪水淹没情况展开分析,准确地计算损失,评估风险。这种方法由于其强大的可操作性正在慢慢成为主流。

本文拟在运用遥感与 GIS 技术的基础上,利用历史水文数据设计望江县 20 a 一遇的洪水水位,与遥感处理影像相叠加,得到淹没范围数据。在试验数据及相关资料支持下,使用风险及灾情评估模型对望江县地区 20 a 一遇的洪水进行灾情评估与分析,利用类比法提出相应的减灾措施。

1 研究区概况及数据准备

1.1 研究区概况

望江县坐落于安徽省西南角,皖鄂赣 3 省交界处,总面积 $1\,357.37 \text{ km}^2$,地势西高东低,西北部是山

地丘陵地区,最高海拔达 489 m(香茗山南尖),东南为滨江滨湖平原,最低海拔为 8.5 m(大湾稻香圩底)。县内有武昌湖、青草湖、泊湖、焦赛湖、岚杆湖等 5 个大湖泊,皖河、华阳河两大河流,自西向东流入长江。望江县属亚热带季风气候区,气候温和,四季分明^[10],年平均气温 $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 $1\,300 \text{ mm}$,地表径流量近 $6.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。望江县统计总人口达 6.39×10^5 人,分布于 8 县、2 乡之中,目前望江县 GDP 已突破 1.00×10^{10} 元。

1.2 数据预处理

(1) 水文数据处理。武昌湖位于望江县中部,是望江县最大水体,但望江县洪水多发区却在南部平原,其中西南部尤为突出。杨湾闸位于望江县西南部杨湾镇,处于洪水多发带。南部平原水文状况及气候条件相似,通过水文比拟法,可将杨湾闸设计洪水资料用于广大南部平原地区。

通过参数 EX(样本均值,反映洪峰水位系列的平均情况), C_v (变差系数,反映洪峰水位系列的离散程度), C_s (偏态系数,反映洪峰水位系列的不对称程度)确定水文频率曲线,从而得到相应频率的洪峰水位。本试验中在确定了 3 个参数后得到当 $p=5\%$ 时的洪峰水位为 16.85 m,后面的研究将把 16.85 m 作为淹没阈值。

(2) 土地分类。本文将通过监督分类对土地利用类型进行划分,划分为水体、林地、建设用地和耕地。分类前需对研究地区有一定的认识,然后结合实际选择合适的样本建立分类函数,才能达到较高的分类精度^[11]。

通过查阅望江县土地规划资料,并进行实地考察,对望江县地区土地类别属性有了一定的了解。参考土地规划图以及实地考察结果对不同的训练样本进行选取。望江县地区草地仅占总面积的 2.5% ^[12],所以本次研究选择了林地、耕地、建设用地和水体 4 个样本。对选取的训练样本的离散化程度进行检验,分离性指标 Jeffries-Matusita 距离,transformed divergence(转换分离度)^[13]可以直观反映所选择的样本之间的离散化程度。2 个参数取值范围都在 $0 \sim 2.0$,0 表示样本完全混淆,2.0 表示样本完全分离,检验结果越靠近 2.0 则分类效果越好。经过检验,本试验样本离散程度均在 $1.8 \sim 2.0$,分离效果较好,整体精度达到了 93.056% ,满足要求。

根据分类数据的分散程度的不同和波段对精度的需求等确定使用最合适的分类方式。本次研究选用最大似然法(maximum likelihood)来进行监督分

类。最大似然法因为与贝叶斯理论相结合,能够清晰地展示出分类结果^[14],而且对于较少波段的 TM 图像,最大似然法在精度上有很大优势,与本次研究数据相契合。最终土地分类结果如表 1 所示。

表 1 望江县监督分类土地类型统计

土地类型	栅格数/个	总面积/km ²	百分比/%	总精度/%
建设用地	354 977	319.48	24.0	93.056
林地	654 207	588.79	44.3	
耕地	296 773	267.10	20.1	
水体	171 895	154.70	11.6	

2 研究方法

2.1 伪洼地的去除

在 DEM 数据中,高程低于周围栅格的区域就称为洼地。洼地分为天然洼地和伪洼地两种,天然洼地则是实际存在的洼地,伪洼地则是来自插值误差、数据读入错误等因素^[15]。由于天然洼地实际数目远小于伪洼地,而伪洼地在地理数据处理的过程中会产生很大误差,所以我们对其进行了填洼处理,削弱了伪洼地的影响,很大程度上保证了精度。

2.2 灾情评估流程

结合望江县土地分类结果,通过种子蔓延淹没法,将淹没范围在 DEM 数据上呈现出来。通过将淹没范围与各种地理信息数据相叠加,建立灾情评估模型,通过与评估值相近的历史灾害相类比,对灾情进行模拟,提高灾害可控性,试验过程如图 1 所示。

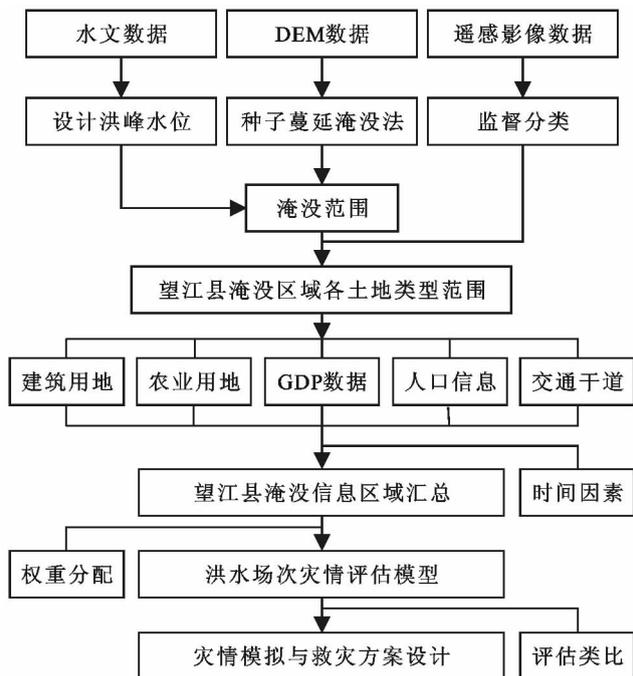


图 1 安徽省安庆市望江县洪水灾情设计流程

2.3 洪水淹没算法

在模拟洪水淹没范围时,本试验采用基于水位(H)的洪水淹没范围计算,在伪洼地填充后,可以近似将淹没区域地看作 1 个完整的水平面^[16]。

水位 H 通过重要水文站点实测得到,或者是经由水文水力学模型推算得到的数值。如果需要对指定程度的灾情进行模拟,可以根据试验要求设置淹没阈值。

判断区域淹没的条件。格网高程值低于所给水位 H ,并且格网单元之间以及区域格网和洪水淹没入口区域(指坝堤溃口或山洪径流源头等洪灾发源地)相连通。

采用扫描线种子填充算法模拟洪水淹没范围。首先在河岸边线、水库坝坝等特征点处选择一个起始点作为种子点,并且保证该种子点所在扫描线位于给定区域内。将该种子点放入一个初始化的堆栈容器中。同时建立一张与研究区域格网大小相同的二维表,为淹没的点作标记,帮助在判断淹没分析过程中查找,避免重复判断同一点淹没。然后开始算法主要过程:当堆栈不为空时,从栈顶弹出一个种子点,求出种子点所在的扫描线,然后从上下相邻的扫描线中找出淹没到的子区段,并把能代表该子区段的端点压入栈。重复扫描,直到堆栈容器为空,即可得出总的淹没范围。

2.4 洪水灾情模型评估权重选取

结合水利洪水评估规范,针对各指标选取合适的权重对于洪水的准确分析意义重大。下面给出洪水灾情评估值的计算公式。

$$C = D \times W_1 + P \times W_2 + A \times W_3 + L \times W_4 + F \times W_5 + H \times W_6 + R_1 \times W_7 + R_2 \times W_8 + S \times W_9 + T \times W_{10} \quad (1)$$

参考国家《中华人民共和国水利行业标准》,将洪涝灾害分为江河洪水灾害、台风灾害、山洪灾害、城市洪涝灾害 4 类^[17],此次洪灾还造成了房屋倒塌、设施破坏,损失超过一般城市洪涝灾害,所以定性为江河洪水灾害。规范中对于江河洪水灾害具体参数含义及权重值 W 见表 2。望江县地区县城位于南部平原,耕地多分布于东南部平原,主要经济产出、人口和耕地分布地区都在淹没范围内,受洪灾影响较大,权重选择对于研究地区较为合理。

3 结果及分析

3.1 试验结果

在 20 a 一遇的洪水条件下,由种子蔓延法得出的淹没情况如图 2 所示。由于望江县最大水体,武昌

湖靠近南部平原,且平原地区地势普遍较低,南部受灾严重。望江县政府位于南部华阳镇,是望江县行政中心,虽然华阳镇较周边地区地势较高,仍然受到较大影响,将望江县人口按密度分布到各地后与淹没

范围进行叠加可以得到,超过 90%人口将受到如此规模洪灾影响,超过 100 hm² 农田绝收,超过 60% 建筑用地难以正常使用,受灾程度远大于遭遇相似程度洪涝侵害地区。受灾情况如表 3 所示。

表 2 望江县灾情评估模型权重分配

类型	决定因子权重				次要因子权重			
	参数	实际值	权重系数	权重值	参数	实际值	权重系数	权重值
江河洪水灾害	D	死亡人口	W_1	0.3	H	倒塌房屋	W_6	0.06
	P	受灾人口	W_2	0.1	R_1	城镇骨干交通中断历时	W_7	0.01
	A	农作物受灾面积	W_3	0.1	R_2	乡村骨干交通中断历时	W_8	0.01
	L	直接经济损失	W_4	0.3	S	城市受淹历时	W_9	0.01
	F	水利设施经济损失	W_5	0.1	T	生命工程中断历时	W_{10}	0.01

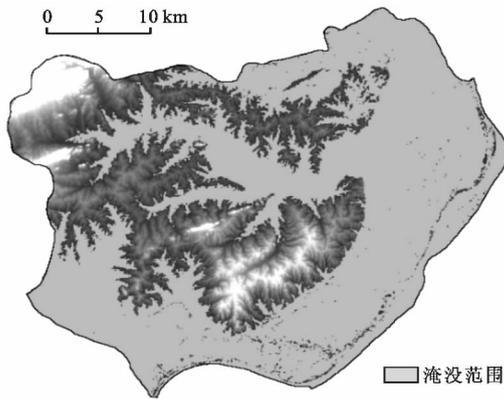


图 2 望江县设计洪水淹没范围

表 3 望江县洪水淹没受灾土地类型统计

受灾情况	总面积/ km ²	受灾面积/ km ²	受灾 比例/%
建设用地	319.48	211.59	66.23
农用地	855.89	374.39	43.74
整体受灾情况	1 357.37	739.67	54.49

3.2 望江县洪水淹没现状

望江县地形非常容易造成洪水发生,水利工程在其中起到了至关重要的作用^[18]。在 1998 年长江中下游特大洪涝灾害后,望江县开始通过水利工程建设改善内外洪涝状况。即使如此,望江县的洪涝灾害依旧对当地经济发展与人民的生活产生了巨大的负面影响,当前防洪、除涝设施远远不能满足发展的需求。防洪工程建设速度缓慢加上围湖垦田现象严重导致目前望江县地区抗洪形势依旧不容乐观,而通过灾情评估可以快速估算损失,参考类似等级的各地区洪灾情况并结合研究地区实际情况提出合适的抗灾措施,以求减少灾害带来的损失。

3.3 模型计算与灾情分析

如图 3 所示,2016 年 6 月下旬,7 月上旬于望江

县发生了持续降水,最高水位达到了 16.9 m,淹没实际情况与本试验设计淹没水深 16.85 相似,此处利用本试验淹没范围与调查受灾数据相结合对此次灾情进行设计分析。利用综合指数的洪水灾情评估模型可以快速对洪水等级进行评估,在最快时间得出应对洪水的方案,通过参考灾情模型指数相似的洪灾处理方法可以迅速合理地给出解决方案,减少损失。

由试验数据淹没范围与望江县人口密度分布图相叠加可以得到受灾人口及受灾人口占总人口的比例,用淹没范围与土地利用类型相叠加可以得到农作物受灾面积以及受灾面积占总耕地面积的比例。

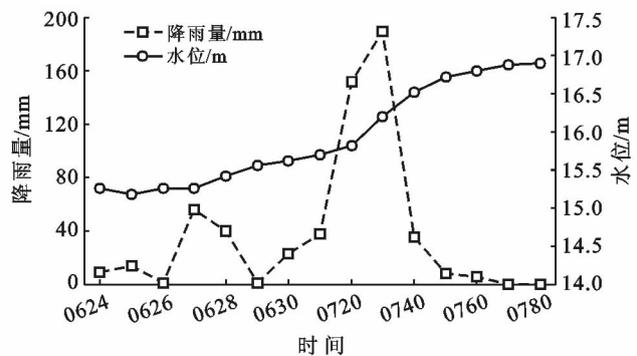


图 3 2016 年望江县设计洪水期间降雨量水位关系

通过调查暴雨持续时间内降水量以及水位数据如图 3 所示,可以直观反映出洪水水位升降快慢及变化趋势,便于针对灾情提出解决方案,并能够直观反映受灾持续时间以及各时段受灾程度大小。

根据调查资料得知截止 7 月 5 日,全县约 50 万人受到洪水影响,无人遇难,受灾面积超过 4.00×10^4 hm²,成灾面积超过 3.00×10^4 hm²。洪灾期间 5 条省级道路因路面低洼而积水严重,望江县华阳镇内 9 条城区主交通干道无法投入使用,严重阻碍县城发展,影响人民正常生活。洪水期间倒塌房屋 170 多

间, 县城区超过四成地区受灾。望江县在此次洪灾中整体经济损失超过 7.70×10^8 元, 其中仅农业损失一项就超过 6.30×10^8 元, 水利设施经济损失达到 32 192 元。通过水位时间图 4 可以得知水位在 7 月 5 日

已经接近最高点, 以上信息较具有代表性。

通过以上试验数据及调查资料, 得到最终洪灾评估值如表 4 所示, 其中在计算参数取值时利用直线插值法。

表 4 望江县灾情评估模型结果

参数	指标名称	实际值	阈值区间	参数取值	洪涝灾情评估值
D	死亡人口/人	0	0	0	
P	受灾人口/万人	51.08	0~100	51.08	
	受灾人口占区域人口比例/%	85.13	>20	100	
A	农作物受灾面积/ 10^3 hm^2	37.44	0~500	1.87	$C=51.78$
	农作物受灾面积占区域耕地面积的比例/%	43.74	30~60	77.48	
L	直接经济损失/亿元	7.71	0~10	19.28	
	直接经济损失占上一年区域 GDP 比例/%	7.83	>3	100	
H	倒塌房屋/万间	0.017 9	0~1	0.45	
F	水利设施经济损失占直接经济损失比例/%	4.2×10^{-3}	0~10	0	
R_1	城镇骨干交通中断历时/h	480	>48	100	$40 < C < 60$ 属于较大洪涝灾害
R_2	乡村骨干交通中断历时/h	480	>24	100	
S	城市受淹历时/d	20	>3	100	
T	生命线工程中断历时/h	480	>72	100	

注: 同一参数内不同取值取较大的作为参考值。参数上限采用参数取值 50~75 段构造出的插值直线外延取值, 超出上限参数取 100。

通过查阅相关资料得知, 台风“珍珠”洪涝灾情评估值为 48^[17], 与本次试验受灾程度相似, 下面本文参考“珍珠”的抢险救灾措施并结合望江县地形与本次试验数据提出合理救灾方案。

首先, 对洪灾的预警与防范能够提高应对和处理灾情的能力。在对抗“珍珠”的过程中, 汕头各市在预知了台风的到来之后对辖区内危房逐一检查, 加强对各个施工地点的安全监控, 及时发现问题加以修复。为了减少潜在的威胁, 针对堤坝、山区径流、蓄水设施等水工建筑进行全面安全排查, 并且准备了充足的救灾物资。在望江县地区, 除了对房屋、路标、供电设施等进行质量检查, 还可以通过试验数据判断受灾范围, 设立灾害庇护中心, 转移可能受灾严重地区的人民, 增派医护人员支援, 及时地对受灾人口提供医药救护。通过对城镇、低洼区域淹没水位试验数据的分析, 可以提前做好排涝准备, 检查地下排水系统, 保证排水能力最大限度满足排涝需要。

其次, 专业人员的指导对于救灾至关重要。在“珍珠”抢险救灾过程中, 专家组第一时间赶到沿海各市受灾区, 在抗洪救灾现场进行指挥, 力求正确应对突发情况, 避免因救灾不当而造成损失。在本试验中, 通过分析遥感与 GIS 试验数据, 专家组可以在到达现场之前就对灾情有一定的认识。对于淹没范围、淹没深度、洪水蔓延趋势的准确认知可以帮助专家组决策, 提出最优方案, 进一步减少损失。

对于灾后重建工作, 根据试验数据, 对受灾范围进行卫生防疫、全面检修, 可提高重建效率。试验数据可以直接记录到档案作为样本, 有助于在以后的研究、灾情分析中快速准确地提供数据支持。另外, 淹没模拟可以用于防洪演习中, 提高人民群众对于洪灾的处置能力, 减少人员伤亡。

4 结论

本次研究通过对望江县地区 20 a 一遇的洪水灾情进行分析, 体现了遥感与 GIS 在洪水灾情分析中对于灾情范围的精确掌握, 展现了其在洪水灾情分析中能够起到的重要作用。

试验结果表明, 遥感技术与 GIS 技术在洪水灾害的预警方面有着很强的能力, 可以呈现设计水位下洪水淹没范围, 表现淹没蔓延趋势, 缩小防灾范围, 有针对性地进行预防, 提高灾情处理能力。在抢险救灾时, 可以根据淹没数据提出最佳救灾方案, 减小损失。遥感与 GIS 数据记入档案能比数字数据更直观地反映灾情, 为后续研究、抗洪救灾等提供支持。

由此可见, 遥感与 GIS 技术强大的洪灾模拟能力正是洪灾泛滥的中国所需要的, 科学合理地处置洪灾可以减少大量损失, 用于建设发展。在未来的抗洪救灾道路上, 遥感与 GIS 技术应当被更加广泛地利用, 为中国抵御洪灾提供科学技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] 周欣,朱丹丹.国内外设计洪水研究进展与评价[J].黑龙江科技信息,2012,15(5):43-43.
- [2] 来全.三维可视化洪水淹没分析与灾情评估系统的实现[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2011.
- [3] Cui Lijian, Anna V P, Zhang Manyin. Applications of RS, GIS and GPS technologies in research, inventory and management of wetlands in China[J]. Journal of Forestry Research, 2005,16(4):317-322.
- [4] Brian L B, David P L, Qi Jianguo. A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,108(1):111-120.
- [5] 万新宇,王光谦.近 60 a 中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J].人民黄河,2011,33(8):1-4.
- [6] 黄立贤,沈志学.高光谱遥感图像的监督分类[J].地理空间信息,2011,9(5):81-83.
- [7] 陈西亮,张佳华.基于 TM 影像的喀什地区土地利用分类[J].湖北农业科学,2016,55(15):4001-4005.
- [8] 赵春霞,钱乐祥.遥感影像监督分类与非监督分类的比较[J].河南大学学报:自然科学版,2004,34(3):90-93.
- [9] 徐卫星.望江县防洪减灾的非工程措施[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2011,11(4):41-43.
- [10] 王元东.基于 GIS 的洪水淹没灾害评估方法研究[D].广州:中山大学,2007.
- [11] 张妞.干支流洪水遭遇下的黄河宁夏段溃漫堤洪水风险分析[D].天津:天津大学,2015.
- [12] 冉有华,李新,卢玲.基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J].地球科学进展,2009,24(2):192-203.
- [13] 毕学进.望江县新农村建设研究[J].安徽农学通报,2011,17(17):16-18,32.
- [14] 黄巧盟.基于 GIS 数据—模型集成的洪水风险评估[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [15] 王培法,都金康,冯学智. DEM 不确定性影响评价中的填洼分析[J].地理与地理信息科学,2007(1):24-26.
- [16] 金哲,肖旒旒.基于 GIS 的洪水淹没区分析[J].吉林水利,2014(6):30-32,37.
- [17] 中华人民共和国水利部. SL579-2012 中华人民共和国水利行业标准[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [18] 王思懿.基于 GIS 的北部湾经济区洪灾风险评估及风险变化研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [19] 薛丰昌.一种基于 DEM 的汇水区降雨积水深度的计算方法, CN102902893 B[P]. 2015.
- [20] 薛丰昌,黄敏敏,唐步兴,等.三维 GIS 的城市暴雨积涝灾害模拟[J].测绘科学,2017,42(2):53-58.
- [21] Julia Bartens. Transpiration and Root Development of Urban Trees in Structural Soil Stormwater Reservoirs [J]. Environmental Management, 2009, 44(4): 646-657.
- [22] 车伍,张鹏,张伟,等.初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J].中国给水排水,2016,32(6):9-14.
- [23] 马刚. UX5 无人机不同航高的精度分析[J].北京测绘, 2015(3):18-20,37.

(上接第 274 页)

- [16] 周晓敏,薛争光.大区域数字表面模型快速生产关键技术研究[J].测绘技术装备,2016,18(4):26-29.
- [17] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Soil Research, 1989,27(3):511-523.
- [18] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学, 2008,29(6):1495-1501.
- [19] 张成才,黄河,朱祖乐,王金鑫.基于高精度 DEM 的城市道路积水淹没计算方法研究[J].水利水电技术, 2017,48(12):1-6.