



引文格式:李振洪,王建伟,胡羽丰,等.大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1039-1049.DOI:10.13203/j.whugis20220512

Citation:LI Zhenhong, WANG Jianwei, HU Yufeng, et al.Rapid Assessment of Traffic Inefficiency Under Flood Scenarios over Wide Regions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1039-1049. DOI: 10.13203/j. whu-gis20220512

大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估

李振洪^{1,2,3} 王建伟^{4,5} 胡羽丰^{1,2,3} 朱武^{1,2,3} 付鑫^{4,5}
张双成^{1,2,3} 余琛^{2,6} 王乐^{1,3} 张驰^{5,7} 杜建涛^{1,2} 黄武彪^{1,2}
吕夏合⁴ 张成龙^{1,2} 陈博^{1,2} 刘旭旭⁴ 岳雨晴⁴

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 长安大学地质与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

4 长安大学运输工程学院,陕西 西安,710064

5 公路基础设施数字化教育部工程研究中心,陕西 西安,710064

6 纽卡斯尔大学工程学院,英国 纽卡斯尔,NE1 7RU

7 长安大学公路学院,陕西 西安,710064

摘要:2021年7月,中国河南省遭遇极端强降雨天气,出现大范围洪涝灾害,河南省内各级交通网受到严重影响。为了快速、准确地获取极端气候条件下自然灾害对大范围交通网造成的损坏和运行影响情况,对哨兵1号、高分三号卫星遥感影像、欧洲中期天气预报中心的降雨和水汽数据、地质灾害调查数据等多源数据进行分析与融合,提出了大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估技术体系框架,解析了此轮河南暴雨引发的洪涝灾害发展过程,并评估了洪涝灾害对交通道路网危害及后续次生灾害的风险,利用空间可达性模型对路网受损后的连通性水平进行了评估。结果显示:此次洪涝灾害具有累计降雨量极大、高度集中且降水范围广的特点,河南省郑州市及周边地区的洪涝受灾面积约3 800 km²;三门峡市、登封市山区次生滑坡灾害发生可能性极高;公路交通网受洪涝灾害影响的道路总里程约为1 300.46 km;郑州等五市的公路网连通性下降了21.27%左右。其中,高速公路、国道、省道的连通性分别下降了34.22%、13.78%和14.86%。

关键词:交通网;河南暴雨;洪涝灾害;滑坡灾害;交通受损

中图分类号:P237;U491 文献标识码:A

收稿日期:2022-08-22

DOI:10.13203/j.whugis20220512

文章编号:1671-8860(2023)07-1039-11

Rapid Assessment of Traffic Inefficiency Under Flood Scenarios over Wide Regions

LI Zhenhong^{1,2,3} WANG Jianwei^{4,5} HU Yufeng^{1,2,3} ZHU Wu^{1,2,3} FU Xin^{4,5}
ZHANG Shuangcheng^{1,2,3} YU Chen^{2,6} WANG Le^{1,3} ZHANG Chi^{5,7} DU Jiantao^{1,2}
HUANG Wubiao^{1,2} LÜ Xiahe⁴ ZHANG Chenglong^{1,2} CHEN Bo^{1,2}
LIU Xuxu⁴ YUE Yuqing⁴

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

4 College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

5 Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization, Ministry of Education, Xi'an 710064, China

6 School of Engineering, Newcastle University, Newcastle, NE1 7RU, UK

7 School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Objectives: In July 2021, Henan Province of China suffered continuous extreme rainfalls, causing

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1512000);国家自然科学基金(41920104010,42041006);陕西省科技创新团队(2021TD-51)。

第一作者:李振洪,博士,教授,主要研究方向为影像大地测量、地质灾害、人工大型建筑物稳定性和精准农业。Zhenhong.Li@chd.edu.cn

通信作者:王建伟,博士,教授。wjianwei@chd.edu.cn

widespread flood and serious paralysis of the highway network. The flood caused by the heavy rainfalls brought enormous loss to people's lives and properties in Henan Province. **Methods:** We collectively used a range of earth observations, namely remote sensing images from Sentinel-1 and Gaofen-3 satellites, rainfall and water vapor data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, and geohazard survey data to investigate and analyze the evolving process of the flood caused by the heavy rainfalls in Henan Province, and proposed a new technical framework for rapid assessment of traffic inefficiency under flood scenarios over wide regions. **Results:** The application of the new framework to the case in Henan Province suggests that: (1) The cumulative rainfall was highly concentrated, reaching a historic high level and affecting a wide region. (2) The total affected area in Zhengzhou City, Henan Province and its surrounding areas reached 3 800 km². (3) The potential of secondary landslides in mountainous areas such as Sanmenxia City and Dengfeng City was highly increased. (4) About 1 300.46 km of major roads were affected by this flood, and the overall connectivity of major highway networks in Zhengzhou and its surrounding five cities decreased about 21.27%, with 34.22% for expressways, 13.78% for national highways, and 14.86% for provincial highways. **Conclusions:** This study shows how to integrate remote sensing, secondary landslide analysis, road network analysis, and other multi-field technologies to construct a framework for traffic inefficiency assessment under natural hazards. It is believed that this framework could be applied to other hazardous events and provide valuable information for emergency rescue.

Key words: traffic network; Henan heavy rainfall; flood hazard; landslide hazard; traffic inefficiency

洪涝作为强降雨或持续降雨而导致低洼地区溃水或淹没的一种自然现象,是世界上最主要的自然灾害之一^[1]。洪涝灾害因其发生速度快、影响范围广以及重现频率高等特点,对全球造成严重的伤亡与经济损失^[2]。中国是受洪涝灾害影响最为严重的国家之一,大约2/3的国土面积,超过1/2的人口以及2/3的工业和农业产值都受洪涝灾害的威胁^[3]。在全球气候变化的大背景下,极端降雨事件发生的频率增加、强度增大,洪涝灾害呈频发趋势^[4]。来自国际紧急灾难数据库的2000—2020年间中国自然灾害数据统计显示,近20年来洪涝灾害共发生204次,占自然灾害总次数的34.3%,为发生次数最多的灾种。2000年以来,洪涝灾害在中国5种主要自然灾害(洪涝、地震、地质灾害、台风、森林火灾)所造成的经济损失中占到8成以上,死亡人口数量也居于首位,约占60%^[5]。洪涝灾害对人民生命财产安全和社会稳定造成严重威胁,制约着中国经济社会的长期可持续发展。

洪涝灾害发生后,快速准确地获取降水时空演化、洪水淹没范围、次生地质灾害分布等灾情信息,对灾后应急处置具有极其重要的意义^[6]。遥感技术以其数据获取方便、时空分辨率高、数据覆盖范围广等优点逐渐成为洪涝灾害监测的主要手段^[7-8],可以为防洪决策和抗灾救灾工作提供重要数据和技术支撑。遥感监测洪涝的关键在于提取水体信息,其主要使用传感器主动或被

动地接收水体反射的信息,并利用灾前和灾后的水体信息进行叠加得到洪水淹没区域^[9-10]。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术可以全天候运行,能够穿透云、雨和雾,不受恶劣天气的影响,被广泛应用于洪涝灾害遥感监测^[11-12]。目前,用于暴雨洪水灾害监测的遥感数据除了美国的陆地资源卫星(Landsat)TM、ETM+、MSS和法国卫星SPOT,还包括美国地球观测系统的Terra卫星和Aqua卫星中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、欧洲空间局的哨兵卫星(Sentinel-1/2)数据和中国的環境减灾卫星(HJ-1A/1B),中巴地球资源卫星CBERS-2、CBERS-4,风云系列,高分系列等卫星数据^[13-14]。

严重的洪涝灾害会对城市道路交通网络的正常运行造成严重的影响。如2021年7月20日,河南暴雨引发了大范围的洪涝灾害,郑州市及周边地区受灾严重,公路、铁路、民航等交通网被迫中断。道路网络不仅是商业、贸易等正常运行的基础,还是在灾害发生后进行抢险救援、应急物资运输的必要基础设施^[15],因此评估道路网络在灾害影响下的通行损害程度即易损性显得尤为重要^[16]。文献[17]提出基于宏观基础图的易损性指数来测量道路交通网络的易损性。文献[18]采用经验统计法、非线性静力分析法等方法结合三亚市交通系统分析了地震发生后三亚市交通系统中桥梁、道路的通行效率情况;文

献[19]于2008年在汶川地震发生后提出使用区域交通可达性这一方法对震后的交通损失进行评估,通过评估损失程度得到道路交通网络的易损程度;文献[20]对中国南方城市低温、雨雪、冰冻灾害的承灾体进行了分类,并选定具体指标对郴州市道路交通网络易损性进行研究。

目前已有的关于灾害影响下道路交通网络通行效率的研究多集中于定性分析,技术方法较为单一,且时效性较差,本文利用多源数据进行分析与融合,建立交通网效率评价指标,提出了一种新的大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估技术体系框架,分析评估了2021年河南暴雨洪涝对交通网的影响,并给出了暴雨洪涝灾

害的监测和预警建议。

1 大范围洪涝灾害灾情信息快速获取技术体系

面向大范围洪涝灾害灾情信息快速获取的需求,本文提出了短临天气预报-洪涝灾害风险评估-地质灾害评估-交通受损评估的大范围洪涝灾害影响下交通网受损快速评估技术体系框架(见图1),并根据获取的灾情信息组织气象、灾害、交通等各行各业的专家协同开展应急会商,充分发挥专业优势,强化灾害链式过程的预测与分析,制定灾后应急预案并提交主管部门以供决策。

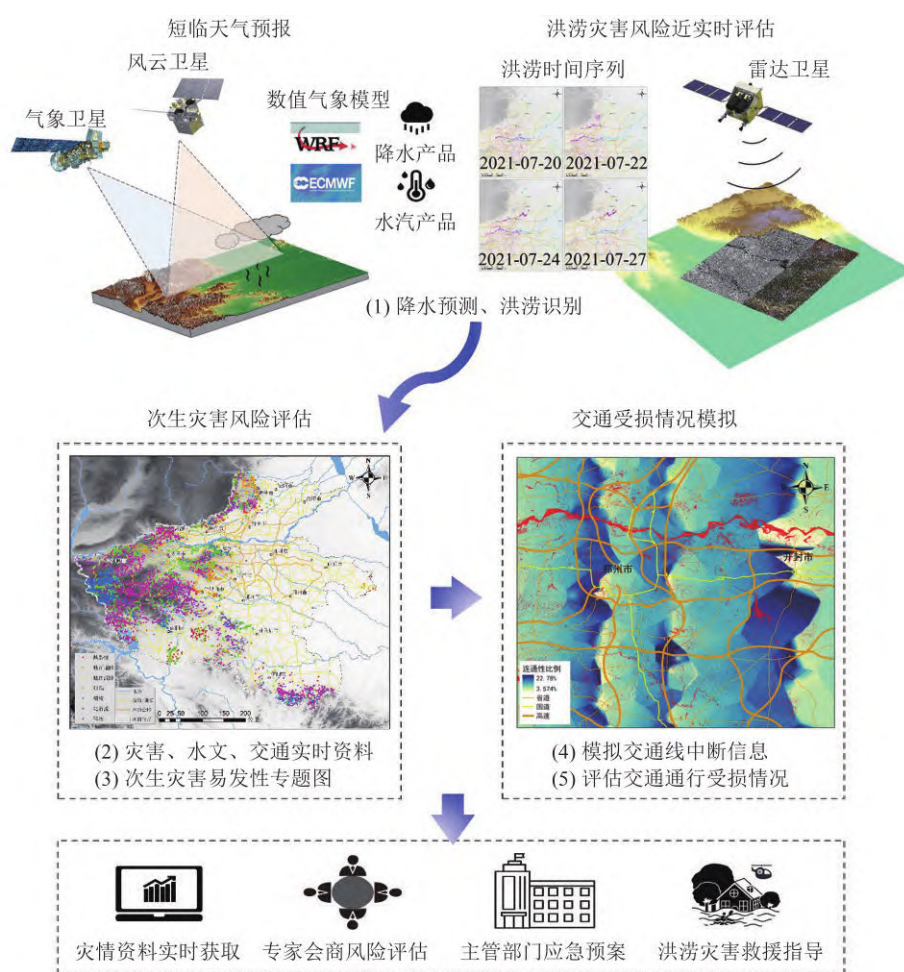


图1 大范围洪涝灾害灾情信息快速获取技术体系

Fig. 1 Technical Framework for Rapid Retrieval of Flooding Information over Wide Regions

1)洪涝灾害短临天气预报技术。采用在线雷达影像干涉系统和再分析资料实时传输与处理技术,获取近实时的高时空分辨率水汽和降水产品,协调气象部门获取卫星云图、风、气压、温度等实测气象数据资料,同时考虑地形地貌影响,推断天气系统演化过程,预测降水时刻、强度和区域,做好短临天气预报,并根据最新数据和

天气状况对短临预报做出实时修正和更新。

2)洪涝灾害风险近实时评估技术。利用卫星雷达和/或光学影像,重点区域可以利用无人机,采用基于阈值分割的水体提取技术获取洪涝淹没范围;根据降雨预测结果构建区域近实时降水背景场,结合区域地形信息,分析研判洪涝灾害的发展和影响区域,实现洪涝灾害风险的近实

时评估。

3) 次生灾害风险评估技术。暴雨会增加土体重量,降低土体抗剪强度,极易诱发滑坡、泥石流等次生地质灾害并形成灾害链。充分收集区域地质岩性、地形地貌、水文、人类活动等灾害因子数据,构建地质灾害风险背景场,结合地质灾害调查结果,通过深度学习方法评估区域次生灾害发生概率,制作易发性专题图,进而分析评估本轮降雨诱发次生灾害的风险。

4) 交通受损情况模拟技术。利用灾害的实时影响和次生灾害影响的判别区域和结果,从时空数据融合角度对灾害影响与交通网数据进行融合分析,甄别灾害引发的道路损毁阻隔的规模及程度信息,在此基础上,构建基于GIS的灾害缓冲区,对路网的连通性运行效率指标进行分析,以评估交通网受灾害影响产生的损毁与阻断情况。

2 2021年河南暴雨洪涝灾害灾情信息探测实践

2.1 降雨和水汽时空分布

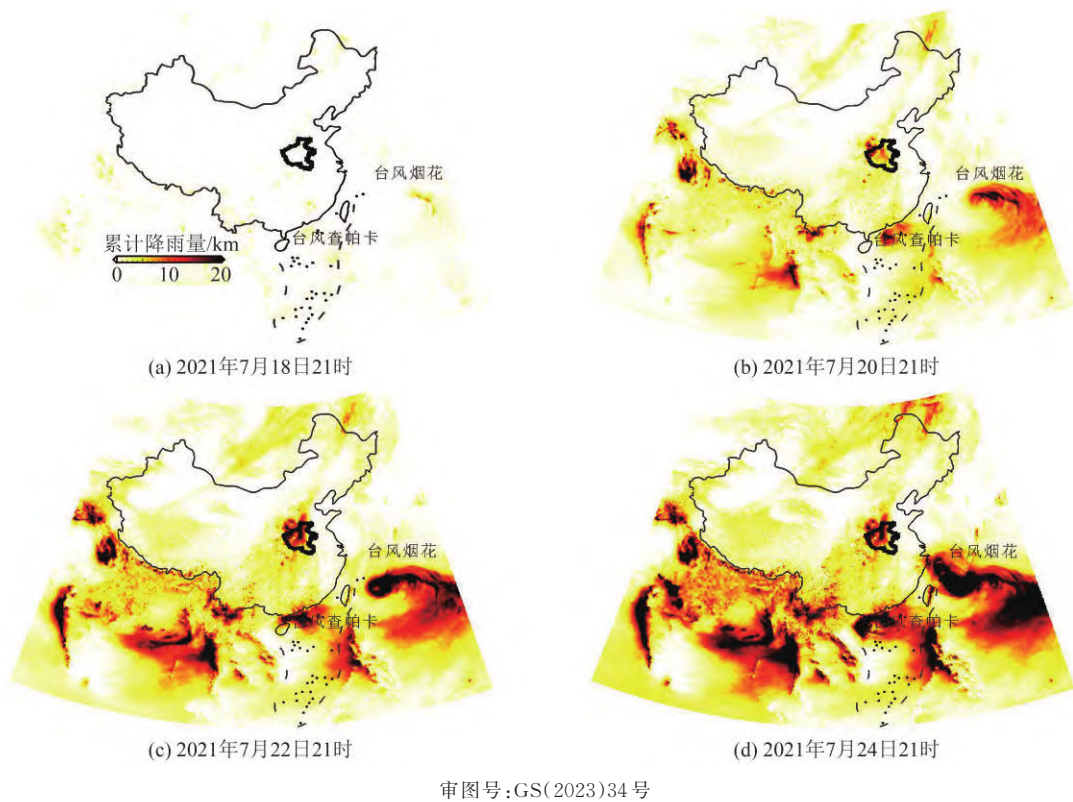
本文采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)降雨数据和水汽数据分析2021年河南暴雨的形成和发展过程,ECMWF降雨产品为近实时分析产品,该产品是由ECMWF通过数值天气模式对历史数据和预测数据加权耦合生成^[21],其中预测数据不超过数据时间节点之后12 h,计算得到的降雨量包含了观测点累积的液态水、冰、雨雪的总含量,降雨输出的时间分辨率为1 h,空间分辨率约为9 km。大气水汽产品由在线雷达影像干涉系统得到,计算采用了大气压、温度、水汽压及高程等参数^[22],是观测点的垂直水汽总含量,时间分辨率为6 h,空间分辨率均为9 km。

图2展示了自2021年7月18日10时起全国累计总降雨量时空分布变化,本文中中国地图的底图来自于自然资源部标准地图服务,原审图号为GS(2016)1554号,行政界线无修改。可以看出,7月18日河南全省已经开始出现大范围降水,以中到大雨为主,但总体降雨量普遍小于50 mm。至7月20日,河南省北部出现了明显的异常强降雨现象,全省普降大到暴雨,其中最大降雨出现在郑州、洛阳、平顶山三市的交界处,日累计降雨超过300 mm。中央气象台的监测显示,7

月20日14时至21时,河南省中北部等地出现暴雨,其中郑州市及新乡市、焦作市等地部分地区出现大暴雨,郑州市中部局部地区特大暴雨(250~462 mm),其中郑州20日16时至17时1 h降雨量达201.9 mm^[23],与ECMWF的预报结果较为吻合。7月22日,河南强降雨中心北移,新乡市成为新的暴雨中心,22日累计降水量迅速突破200 mm,此时郑州市降雨量有所减弱。至7月24日,以新乡市为中心的部分地区降雨仍在持续,但河南省其他大部分地区降水已经明显减弱。

水汽是降雨形成的前提,而充沛的水汽输送是持续性暴雨发生的必要条件^[24]。图3展示了7月18日—24日全国的水汽时空变化。可以看出,7月18日,全国中部和南部水汽含量较为丰沛,包括河南省在内的中部地区水汽超过60 mm,为强降雨的形成创造了条件。至7月20日,河南省水汽得到进一步补充,含量再次升高,尤其是降雨中心郑州市水汽含量接近80 mm。结合图2的降水分布可以看出,较高的水汽输送使得河南省出现持续性暴雨,并发生极端降雨事件。至7月22日,长时间的降雨之后水汽含量开始减少,至7月24日,河南大部分地区的水汽含量已经减少到了40 mm以下,此时河南省的降水也已经明显减弱。

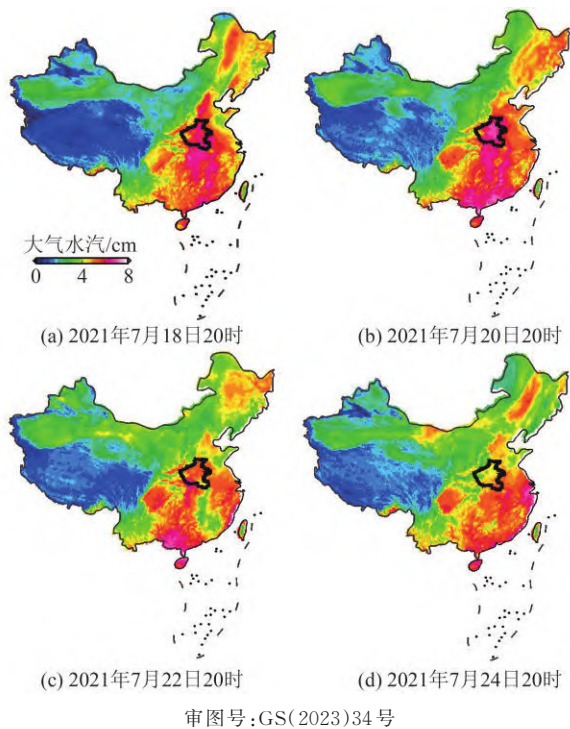
结合降雨和水汽的时空变化,从天气系统角度出发来看,7月中旬,西太平洋副热带高压和大陆高压分别稳定维持在日本海和中国西北地区,河南省正处于副高边缘,对流不稳定,能量充足,暴雨条件十分成熟。7月18日西太平洋台风烟花和南海台风查帕卡生成并向中国靠近,受台风外围和副高南侧的偏东气流引导,大量水汽向中国内陆地区输送,为河南省强降雨提供了充沛的水汽来源,水汽含量处于很高的水平(图3(a))。7月20日,受深厚的偏东风急流及低涡切变天气系统影响,加之河南省太行山区、伏牛山区特殊地形对偏东气流起到抬升辐合效应,强降水区在河南省西部、西北部沿山地区稳定少动,地形迎风坡前的郑州市及周边地区降水增幅明显,出现极端降雨。随着强降雨的持续,河南省水汽开始减少至50 mm左右,至7月24日时水汽已经明显减弱(图3(d))。ECMWF的结果很好地显示了天气系统影响下河南强降雨的降水和水汽的时空变化,此次降水过程表现出持续时间长、累积雨量大、强降水时段集中的特点,直接引发了河南省大范围的洪涝灾害。



审图号:GS(2023)34号

图2 2021年7月18日至24日ECMWF全国总累计降雨量分布变化图

Fig. 2 Evolution of ECMWF Derived Total Cumulative Rainfall over China During the Period from 18 to 24 July 2021



审图号:GS(2023)34号

图3 2021年7月18日至24日ECMWF全国水汽分布变化图

Fig. 3 Spatiotemporal Variations of Precipitable Water Vapor over China During the Period from 18 to 24 July 2021 Revealed by ECMWF

2.2 洪涝淹没遥感监测

洪涝灾害表现为水体的泛滥,因此利用遥感

影像监测洪水的主要工作在于水体信息的识别和提取。使用2景哨兵1号A星(Sentinel-1A) SAR影像和4景高分三号SAR影像共6景卫星雷达影像,采用阈值法提取水体信息并进行洪水淹没分析,影像具体信息见表1。以7月15日暴雨洪涝发生前的卫星影像水体识别结果作为参考和水体背景信息,分析7月20日暴雨后河南省被洪涝淹没的情况。

表1 本文使用的卫星雷达影像信息

Tab. 1 Satellite Radar Images Used in This Study				
编号	日期	卫星/传感器	升/降轨	分辨率/m
1	2021-07-15	Sentinel-1A	升轨	20
2	2021-07-20	高分三号	降轨	10
3	2021-07-22	高分三号	升轨	10
4	2021-07-24	高分三号	降轨	10
5	2021-07-27	Sentinel-1A	升轨	20
6	2021-07-31	高分三号	降轨	10

水体具有极低的后向散射系数,在强度图上表现出与其他地物类型明显的差异性,根据这一特征就可以设置一定阈值来实现水体范围的提取。本文采用双峰法对转换为灰度值的SAR强度影像进行分割,由于包含水体的灰度影像统计直方图会显示出双峰现象,将双峰之间谷底点对应的灰度值作为分割阈值,可以实现水体粗提取。本文中,高分三号影像的阈值为小于70,

Sentinel-1A 影像的阈值为小于 65。基于外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)计算得到的坡度因子以及 SAR 卫星航向角和入射角计算得到的阴影对粗提取结果掩膜,进而得到最终的洪涝水体范围。对 7 月 15 日的 Sentinel-1A 影像进行水体信息提取,结果表明,暴雨洪涝发生前监测范围内郑州市及周边区域原有水域面积约 200 km²。7 月 20 日郑州市特大暴雨引发了严重的洪涝灾害,图 4(a)显示,至 7 月 20 日 22 时监测显示水域面积扩大为 4 000 km²,郑州市及周边区域洪涝受灾面积约 3 800 km²。强降雨下郑州市区内涝严重,黄河干流河道整体变化较小,但多处河段和水库(黄河 G107 国道处河道,贾鲁河及其支流双洎河、索须河等河道,丁店水库和唐岗水库等)水面扩大严重,其中贾鲁河尉氏县段受灾严重,洪涝面积达 19.7 km²,此外郑州市周边郊县也出现了较为明显的洪涝灾情,如原阳县郊区农田积涝严重,面积达到 36.6 km²。

7 月 22 日强降雨中心向新乡市及周边各县转移,郑州市部分区域洪水消退,各水库、贾鲁河水域面积均有不同程度的缩小,黄河河道恢复正常,淹没面积由 290 km²减少为 250 km²。而新乡市共产主义渠大堤新乡牧野镇段出现决口,导致大面积农田被淹没,受灾面积 117.5 km²,黄河支流沁河武涉县段洪涝面积达 15.4 km²(图 4(b))。7 月 24 日,郑州市洪涝进一步缓解,各水库、黄河河道基本恢复正常。黄河支流沁河灾情加重,洪涝面积达 204.1 km²,共产主义渠、卫河周边洪水淹没面积也有所扩大,达 29.7 km²(图 4(c))。7 月 27 日,贾鲁河许昌段洪涝明显,淹没面积扩大到 69.6 km²。共产主义渠北岸和卫河南岸洪涝灾情加重,洪水淹没总面积达到 290.4 km²(图 4(d))。7 月 31 日,贾鲁河灾情减缓,洪涝集中于共产主义渠、卫河浚县段,洪水淹没面积达 325.6 km²,河南大部分地区洪水基本消退(图 4(e))。

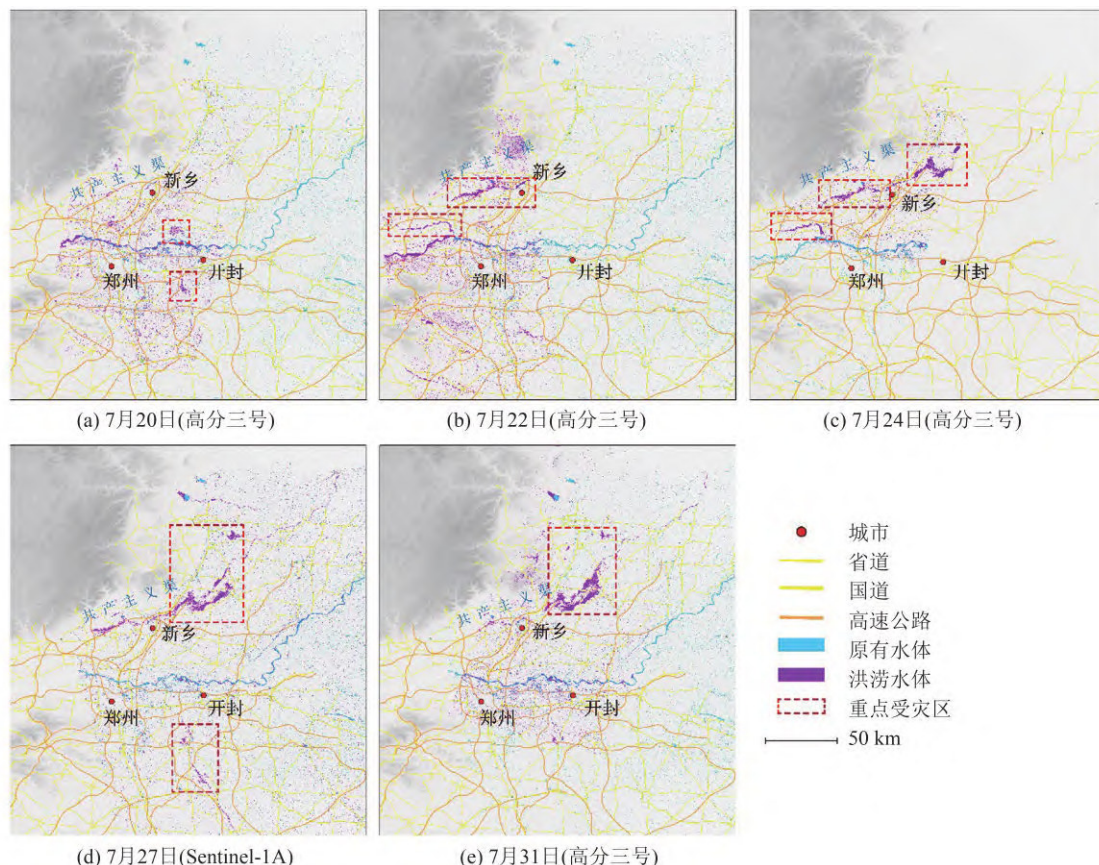


图 4 河南 7 月 20 日—31 日洪涝淹没图

Fig. 4 Flooding Maps of Henan from 20 July to 31 July 2021

采用高分三号和 Sentinel-1A 影像提取的淹没结果,定量描绘了此次暴雨洪涝的发生、发展、消退的完整过程和淹没区域的变化,清晰地展示了洪涝重灾区从 7 月 20 日的郑州市向 7 月 22 日

新乡市转移的情况。

2.3 次生灾害风险评估

河南省过往共发生地质灾害 8 940 处,其中,崩塌 2 347 处,地裂缝 150 处,地面塌陷 947 处,滑

坡 3 235 处,泥石流 653 处,斜坡 1 608 处(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=290>)。收集地形地貌、地质岩性、降雨、人类活动等 15 个灾害影响因子,通过深度卷积神经网络和长短期记忆网络学习灾害因子特征及其关联关系,通过全连通激活函数提取灾害因子与滑坡发生概率的回归关系,利用自然间断法对滑坡发生概率进行分级,绘制本轮暴雨条件下河南省滑坡易发性图。

深度学习样本是以滑坡点或非滑坡点一定距离缓冲区的最小外接矩形组成,模型训练及预测样本按照 7:3 的比例进行划分。本文所构建的滑坡易发性模型为卷积-长短期记忆网络(Conv-LSTM)模型基于 Python 语言和 PaddlePaddle 框架搭建,模型框架如图 5 所示。输入为 n 个 $m \times m$ 大小的影响因子组成的多通道图像,首先,对输入图像各通道进行分组卷积,每一个因子层使用 3 个卷积核大小为 3×3 、步长为 2 的卷积层,得到特征图,分别 reshape 至一维向量,按照顺序输入长短期记忆网络(long short-term memory network, LSTM)模型中,经全连接层后,最终输出层通过 Softmax 激活函数输出 2 个神经元 0 和 1,0 代表非滑坡,1 代表滑坡。

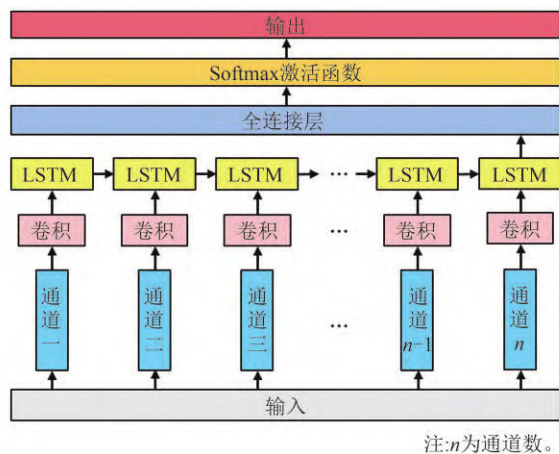


图 5 河南省地质灾害易发性评估模型

Fig. 5 Evaluation Model of Geohazards Susceptibility in Henan Province

河南省地质灾害分布、暴雨条件下的易发性分级图及易发性指数变化结果见图 6,河南省地图的底图来自于河南省地理信息公共服务平台,原审图号为豫 S[2022 年]003 号,行政界线无修改。如图 6 所示,滑坡灾害极高易发区面积约占全省总面积的 27.10%,主要集中在豫陕边界山区及登封市周围山区,河南省东部地区易发性水平较低,洛阳市、开封市等平原地区主要大城市

地质条件稳定、受滑坡威胁较小。将暴雨条件下滑坡概率与历史易发性图进行对比,郑州市、新乡市及鹤壁市部分区域发生滑坡的概率显著升高,次生灾害风险较大(图 6(c))。特别注意的是,受本次暴雨影响较大的郑州市历史地质灾害共 709 处,现存的 626 处隐患大部分分布在市区西南山区与市区北部黄河沿岸,其中西南山区受本轮降雨影响滑坡概率增大趋势明显;新乡市历史地质灾害共 315 处,现存的 242 处隐患点主要集中在新乡市北部地区与山西省交界处,本轮降雨对北部地区地质灾害影响尤为显著。

2.4 公路交通洪涝受损评估

在洪涝淹没遥感侦测以及次生灾害评估的基础上,将洪涝淹没动态变化和次生灾害风险的灾害信息与交通路网数据进行时空融合,建立交通网灾害缓冲区,分析路网连通性,对公路网受损情况进行评估。评估流程图如图 7 所示。

缓冲区分析法是根据不同等级公路宽度将路网抽象,将灾害点视为其中的坐标点,计算灾害坐标点一定半径距离内的路网面积。基于矢量数据计算,一定半径距离内区域为缓冲区,一般认为在缓冲区内路网会受到灾害影响。因此,本文利用 ArcGIS 缓冲区分析工具,生成灾害点缓冲区,进而计算出路网灾害区域覆盖率。另一方面,路网连通性评估采用空间可达性指标,该指标通过 GIS 可达性分析工具生成。通过以网络中节点到节点之间的道路网络时间为阻抗指标,反映受灾前后路网的连通水平变化程度。时间成本指标计算公式为:

$$Q_d(i, j) = C_{ij} + \min\{Q_d(i, k)\} \quad (k \in A(j)) \quad (1)$$

式中, $Q_d(i, j)$ 被定义为从 i 路网节点行驶到终点 d 所需要花费的最小成本; $i, j \in I$ 表示道路网络中所有节点集合; $d \in D$ 表示所有终点集合; C_{ij} 表示从 i 到 j 的线路成本; $A(j)$ 表示所有以 j 为起点路网节点的终点集合。

受损评估结论显示,此次暴雨洪涝造成大面积公路交通网瘫痪,其中受灾最严重的为郑州市、焦作市、新乡市、开封市、许昌市,以下简称郑州等五市。利用遥感影像的洪涝淹没情况,结合河南省骨干交通网(高速公路、国道、省道)信息,分析了本次极端降雨事件导致的大范围交通网受损及通行效率影响情况。

初步分析结果显示,2021 年 7 月 20 日,在极端降雨气候条件影响下,郑州等五市的公路交通网共出现了 59 289 处洪涝淹没路面的情况,受

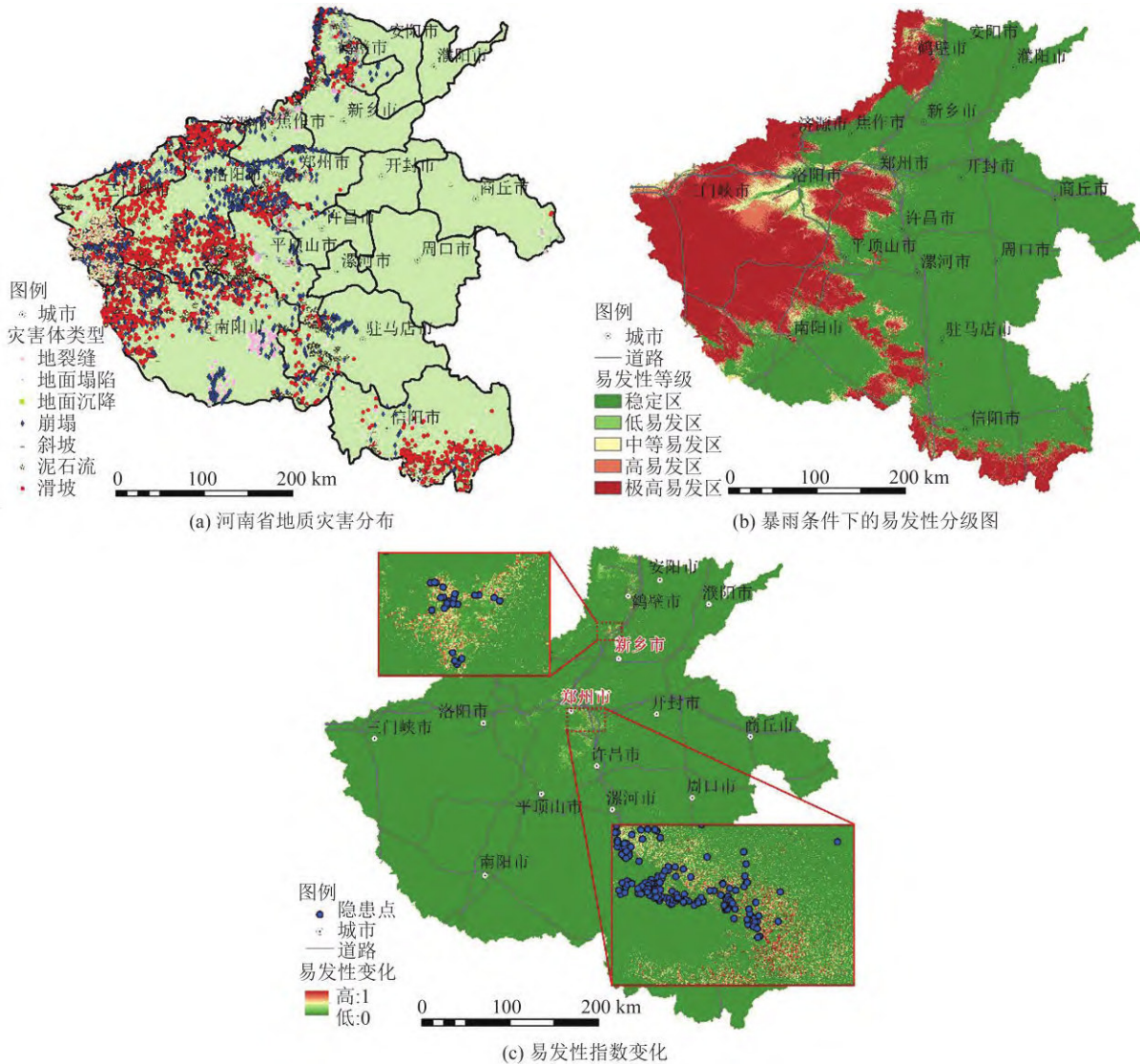


图6 河南省地质灾害分布、暴雨条件下的易发性分级图及易发性指数变化

Fig. 6 Distribution, Susceptibility and Change in Susceptibility Index of the Geohazards in Henan Province

影响道路总里程约为1 300.46 km,约占上述地区路网总里程的34%;根据前述遥感影像洪涝监测结果(图4(a)),上述地区多处出现较大规模的道路影响,其中新乡市东南部、焦作市东南部、郑州市东北部、开封市南部、许昌市北部受影响较为严重,上述地区交通网受灾害影响较大;受极端天气影响,各级道路网也同时出现显著的通行能力下降的情况(图8),基于受灾后各级道路路网节点的可达性,得到平均路网连通性结果。可达性计算结果越大,表示交路网连通性越好。对比路网受灾前后各节点连通性变化值进行统计特征分析,其结果的基本统计特征为:节点数量5 927,均值为21.27%,中位数为14.31%。

通过分析各节点连通性变化数值的基本统计特征可知,各级道路网通行能力显著下降,郑州等五市的路网连通性下降21.27%左右。经过

计算可以发现中位数都小于均值,大于平均值的路网节点共有951个,侧面反映了有一些离群的路网节点连通性变化较大,受洪涝灾害较为严重。高速公路、国道和省道的连通性水平分别下降了34.22%、13.78%和14.86%;其中,国家高速公路网和地方公路网受到了不同程度影响,郑州等五市高速公路受洪涝影响的里程约为1 275.5 km,国道受影响里程约为7.02 km,省道受影响里程约为17.94 km;共有53条国道受洪涝影响严重,其中107国道、311国道、郑新一级路、310国道、220国道均出现连续0.5 km以上路面过水;约126条省道受影响严重,其中受影响较严重的237省道、325省道和219省道均出现连续1 km以上的路面过水。

7月22日,暴雨中心转移至新乡市,造成卫辉共产主义渠大堤新乡牧野镇段出现决口,淹没大

面积农田,新乡市成为河南省洪涝中心。新乡市交通受损进一步加剧,其中新乡市高速公路过水长度约 20.47 km,包括荷宝高速等主要公路网通道,主要道路(国道、省道、环路等)的过水里程约为 14.64 km,二级道路(城市主干道)过水里程约为 27.68 km,其他道路(城乡街道)约为 203.5 km。

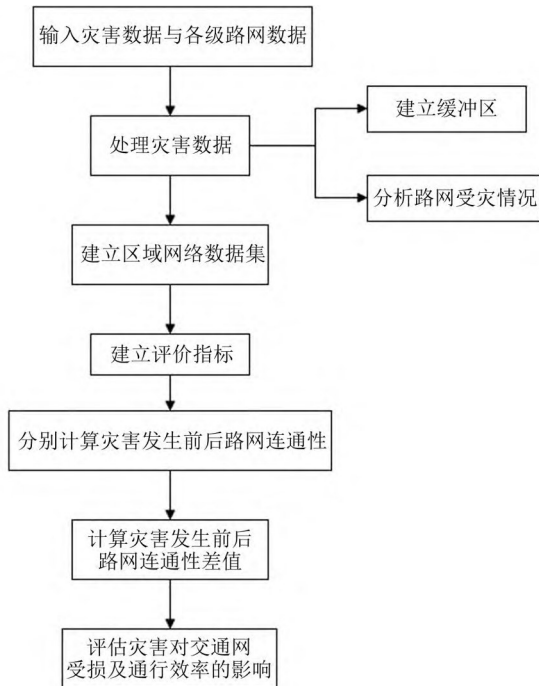


图 7 公路交通洪涝受损评估流程图

Fig. 7 Flowchart of the Damage Assessment for Highway Traffic Under the Flooding

3 讨论

3.1 暴雨洪涝水体识别精度验证

洪涝水体的识别是后续交通通行效率评价

方法的关键数据源之一,因此,其精度对于交通效率的评价准确性十分重要。本文采用 Sentinel-1A 雷达数据进行河南省洪涝水体范围提取,而对于雷达水体识别结果的验证通常使用同期或者时间接近的光学影像作为参考。本文采用 Aqua 卫星的 MODIS 数据 MYD09GA 红外和绿波段融合的水体识别结果作为真值进行 Sentinel-1A 的验证。因为暴雨期间云层分布较多,可用的光学影像十分稀少,本文用云层覆盖较少的 7 月 26 日新乡卫河洪涝 MODIS 识别结果和 7 月 27 日(见图 4(d))同区域的雷达识别结果进行对比,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,两者在水体范围上十分接近,统计结果显示雷达水体结果的准确率为 87.8%,两者在部分区域存在的差异性主要与两者时间并非完全匹配有关。总的来说,验证结果表明雷达结果具有较高的可靠性,而且相比于光学影像,雷达影像不受云雨影响,十分适合于暴雨洪涝下的淹没区域探测。

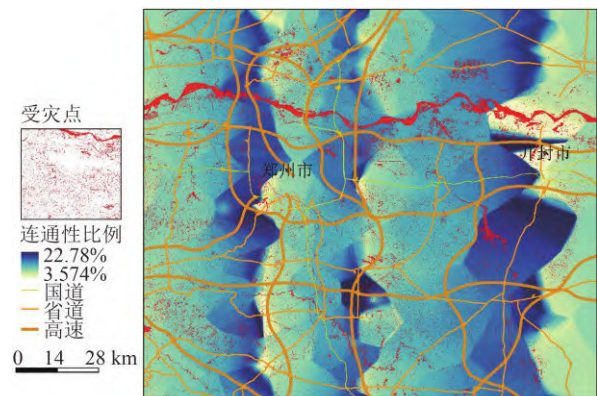
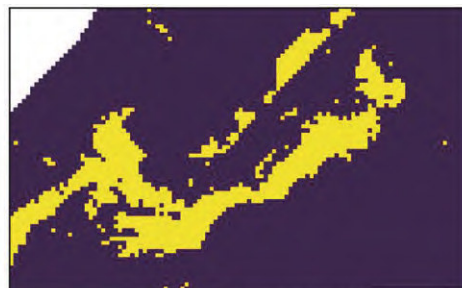


图 8 2021 年 7 月 20 日河南省骨干交通网连通性

Fig. 8 Connectivity of Major Highway Networks in Henan Province on 20 July 2021



(a) MODIS(2021年7月26日)



(b) Sentinel-1A(2021年7月27日)

图 9 MODIS 与 Sentinel-1A 新乡市卫河洪涝水体识别结果对比

Fig. 9 Comparison Between Flood Areas Identified by MODIS and Sentinel-1A over Wei River in Xinxiang City

3.2 本文技术框架的特点

本文针对自然灾害下大范围交通网产生的损坏和运行影响情况的快速有效获取,利用现有的遥感监测、次生灾害风险评估、交通路网分析

等先进技术和方法,提出了一种新的大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估技术体系框架,并在河南洪涝事件中对该技术框架进行了实践,证明了其有效性。已有的灾害下的交通连通

性评估方法数据源单一,时效性较差,难以为灾后的应急救援提供及时的数据和信息支撑。相比较而言,本文提出的大范围洪涝灾害影响下交通网受损快速评估技术体系框架可以实现交通网通行受损情况的快速有效获取,具有以下特点:(1)综合性。实现了再分析数据、模型数据、卫星遥感数据和地质灾害数据的数据综合,同时综合了洪涝灾害短临天气预报技术、洪涝灾害风险近实时评估技术、次生灾害风险评估技术和交通受损情况模拟技术,形成了一套完整的技术体系,可适用于不同洪涝灾害下的交通网受损评估;(2)快速性。主要体现在两方面,一是数据的近实时/实时性,二是评估方法系统的自动化,如技术框架体系的洪涝灾害短临天气预报技术使用的数据为预报产品,无时间延迟,结合自动化实时处理系统,实现高时效性的短临天气预报。

4 结 语

本文提出了一种大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估技术体系框架,并在2021年河南暴雨洪涝事件中进行了实践。河南省2021年7月18日开始的强降雨特别是20日极端降雨引发的洪涝使得人民生命财产遭受重大损失,在提出的技术体系框架下,本文利用雷达遥感影像对洪涝淹没情况进行了持续的监测,同时分析了公路交通网的受灾情况和次生滑坡灾害风险。

1)河南省此次强降水持续时间长、累积雨量大、降水范围广;此次降雨过程中,水汽十分丰沛,持续性的水汽输送导致了长时间的降雨。

2)暴雨引发了河南省大范围的城市内涝和农田积涝,7月20日洪涝最为严重的郑州市及周边地区共有3 800 km²被淹;7月22日,新乡市成为洪涝重灾区,受灾面积117.5 km²;此后至7月31日,随着降雨量的减少和抗灾救灾工作的推进,河南洪涝面积开始缩小。

3)河南省地质灾害风险较高,此次洪涝受灾严重的郑州市和新北市分别有626个和242个灾害隐患点,需要重点关注,做好防灾工作。

4)郑州市及周边地区高速公路、国道、省道及城市道路均受到不同程度洪涝灾害影响。新乡、焦作、郑州、开封、许昌交通网受灾严重,5个市骨干交通网共出现59 289处洪涝淹没路面情况,受影响道路里程约为1 300.46 km,约占路网总里程的34%。郑州等五市的公路网连通性下降了21.27%左右。

5)河南特大暴雨洪涝给人们造成了惨痛损失,警示人们需要在洪涝灾害监测预警和应急救援上加强工作部署。首先,亟需协调组织各级部门建立灾害交通应急机制,做好气象短临预报,近实时评估洪涝灾害风险和次生灾害风险,模拟交通受损情况并制定交通应急预案,保障救援道路的畅通。其次,此次持续性强降雨必然会诱发灾区滑坡、泥石流等地质灾害的发生,亟需加强群测群防和专业化监测相结合的策略,开展灾区广域范围内的隐患早期识别,布设空-天-地-体实时监测网络,评估灾害风险,精准预测灾害的发生,减少人民生命财产损失。

致谢:本文使用的高分三号数据由科技部国家遥感中心提供,降水和水汽数据由ECMWF提供,Sentinel-1A数据由欧洲空间局提供。

参 考 文 献

- [1] Shi Peijun, Yuan Yi. Integrated Assessment of Large-Scale Natural Disasters in China [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(9): 1145-1151. (史培军, 袁艺. 重特大自然灾害综合评估[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1145-1151.)
- [2] Liang J Y, Liu D S. A Local Thresholding Approach to Flood Water Delineation Using Sentinel-1 SAR Imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 159: 53-62.
- [3] Wu Junbin, Liu Leizhen, Tian Feng, et al. Dynamic Emergency Assessment of Flood Disaster with Emergency Disaster Index: Case of Shouguang, Shandong Province in August, 2018 [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(6): 846-855. (伍俊斌, 刘雷震, 田丰, 等. 面向重大洪涝灾害应急响应的灾情动态评估方法研究:以2018年8月山东寿光洪涝灾害为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 846-855.)
- [4] Gao L, Huang J, Chen X, et al. Contributions of Natural Climate Changes and Human Activities to the Trend of Extreme Precipitation [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 205: 60-69.
- [5] Cao Wei. The Research on the Evaluation of Economic Impact and Disaster Prevention and Mitigation Capacity for Flood Disaster [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (曹玮. 洪涝灾害的经济影响与防灾减灾能力评估研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.)
- [6] Li Jialin, Cao Luodan, Pu Ruiliang. Progresses on Monitoring and Assessment of Flood Disaster in Remote Sensing [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,

- 2014, 45(3): 253-260. (李加林, 曹罗丹, 浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 253-260.)
- [7] Palmer S, Kutser T, Hunter P D. Remote Sensing of Inland Waters: Challenges, Progress and Future Directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 157: 1-8.
- [8] Klemenjak S, Waske B, Valero S, et al. Automatic Detection of Rivers in High-Resolution SAR Data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(5): 1364-1372.
- [9] Silveira M, Heleno S. Separation Between Water and Land in SAR Images Using Region-Based Level Sets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 471-475.
- [10] Li Bin, Yan Qin, Zhang Li, et al. Flood Monitoring and Analysis over the Middle Reaches of Yangtze River Basin with MODIS Time-series Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 789-793. (李斌, 燕琴, 张丽, 等. 长江中游洪涝灾害特征的 MODIS 时序监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 789-793.)
- [11] Sui Haigang, Zhao Bofei, Xu Chuan, et al. Rapid Extraction of Flood Disaster Emergency Information with Multi-modal Sequence Remote Sensing Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1441-1449. (眭海刚, 赵博飞, 徐川, 等. 多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1441-1449.)
- [12] Zhang Wei, Yang Siqian, Wang Lei, et al. Review on Disaster Reduction Application Potentiality of Synthetic Aperture Radar [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(6): 904-911. (张薇, 杨思全, 王磊, 等. 合成孔径雷达数据减灾应用潜力研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 904-911.)
- [13] Torres R, Snoei P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24.
- [14] Huang Zhen, Zhao Shuangming, Chang Qing. Interferometric Test Using Domestic GF-3 Satellite [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(4): 7-11. (黄震, 赵双明, 常青. 国产高分三号卫星干涉测量试验[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(4): 7-11.)
- [15] El-Rashidy R A, Grant-Muller S M. An Assessment Method for Highway Network Vulnerability [J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 34: 34-43.
- [16] Berdica K. An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done and Should Be Done [J]. *Transport Policy*, 2002, 9(2): 117-127.
- [17] Kim S, Yeo H. A Flow-Based Vulnerability Measure for the Resilience of Urban Road Network [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 218: 13-23.
- [18] Jiang Shuzhen, Liu Chunguang. Vulnerability Analysis of Transportation System in City [J]. *Earthquake Resistant Engineering*, 2005, 27(S1): 243-247. (姜淑珍, 柳春光. 城市交通系统易损性分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(S1): 243-247.)
- [19] Li Jun, Zeng Ying, Li Yanfeng. Study on the Assessment of Post-Earthquake Traffic Damage Based on Wenchuan Earthquake [J]. *Management Review*, 2008, 20(12): 35-40. (李军, 曾鹦, 李妍峰. 基于汶川地震的震后交通受损评估研究[J]. 管理评论, 2008, 20(12): 35-40.)
- [20] Gao Ting, Xu Xiaoge, Wang Jing'ai, et al. Classification of Disaster-Affected Bodies and Vulnerability Assessment in Low-Temperature Freezing and Snow Disaster Occurred in South China, 2008: Case Study of Traffic Disaster-affected Bodies of Chenzhou City in Hunan, China [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 26(4): 14-21. (高廷, 徐笑歌, 王静爱, 等. 2008 年中国南方低温雨雪冰冻灾害承灾体分类与脆弱性评价: 以湖南省郴州市交通承灾体为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(4): 14-21.)
- [21] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 Global Reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [22] Yu C, Li Z H, Penna N T, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(10): 9202-9222.
- [23] Xin Yu, Zhang Shuanghu, Han Yangmei. Six Questions About the Torrential Rain in Henan Province [N]. *China Science Daily*, 2021-07-22(001). (辛雨, 张双虎, 韩扬眉. 六问河南特大暴雨[N]. 中国科学报, 2021-07-22(001).)
- [24] Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. The Advances in the Nowcasting Techniques on Thunderstorms and Severe Convection [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(3): 311-337. (俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.)

本期客座主编



姜卫平

武汉大学教授，博士生导师，武汉大学卫星导航定位技术研究中心主任。长期从事卫星大地测量学理论与工程应用研究，在高精度卫星定位、坐标框架、变形监测、卫星测高等领域做出了突出贡献。获国家科学技术进步二等奖3项，省部级科技进步特等奖3项，一等奖10项；发表论文240余篇，专著3部。是国家有突出贡献的中青年专家和国务院特殊津贴专家，获光华工程科技奖、中国青年科技奖，入选国家百千万人才工程、国家中青年科技创新领军人才。兼任中国卫星导航定位协会副会长、中国测绘学会位置服务工作委员会主任、自然资源部导航与位置服务重点实验室主任、湖北珞珈实验室首席科学家。



耿江辉

武汉大学教授，博士生导师，入选国际大地测量学会会士。长期钻研高精度卫星导航定位理论和方法，发表SCI论文80余篇，Elsevier英文专著1部。获英国皇家导航学会New Navigator称号，美国导航学会优秀论文奖，国家科技进步二等奖、教育部高等学校科研优秀成果一等奖和测绘科技进步一等奖等省部级以上奖励。主持国家重点研发计划、国家自然科学基金杰出青年基金、国际合作项目等十余项。兼任国际卫星导航服务组织（IGS）理事会数据中心代表和高精度定位工作组主席，IAG卫星导航完好性与质量控制委员会副主席，国际空间研究委员会会刊副主编。



李振洪

国家高层次人才入选者，长安大学二级教授，博士，博士生导师，测绘科学与技术学科带头人，地质工程与测绘学院院长，黄土科学全国重点实验室副主任，西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室主任，陕西省基础学科（地球系统科学）研究中心副主任和首席科学家，陕西省科技创新团队和陕西省“三秦”创新团队负责人，国家自然科学基金委重大项目首席科学家，科技部国家重点研发项目首席科学家。长期从事影像大地测量及其在地质灾害和环境变化监测方面应用的研究。