

基于多源数据融合的洪涝淹没分析

张念强^{1,2}, 李娜^{1,2}, 俞茜^{1,2}, 王静^{1,2}

(1. 水利部防洪抗旱减灾技术创新中心; 2. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究所)

摘要:针对洪涝淹没分析中单一数据源覆盖不全、精度有限、时效不足等问题,利用证据权重法融合洪水模拟、遥感监测、社会化调查等多源异构数据,采用“水深×遥感”联合状态证据以避免重复加权,提出了基于多源数据融合的洪涝淹没分析方法。在海河流域兰沟洼蓄滞洪区的实例验证结果表明:在淹没概率阈值为 85% 时,该方法的召回率较单一的遥感监测、洪水模拟分别提高 8.2%、5.0%,F1 分数分别提高 4.2%、2.8%,准确率分别提高 3.4%、2.3%,减少漏报面积 5%~8%;将基于该方法的洪涝淹没范围与 192 个实地调查点进行对比,除边界点外的全部 179 个淹没点均落在淹没区内,一致性达 100%。

关键词:多源数据融合;洪涝灾害;淹没分析;证据权重法;海河流域

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0072-09

Flood inundation analysis based on multi-source data fusion//Zhang Nianqiang^{1,2}, Li Na^{1,2}, Yu Qian^{1,2}, Wang Jing^{1,2}
(1. Technology Innovation Center for Flood and Drought Prevention and Disaster Reduction, Ministry of Water Resources;
2. Institute on Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: To address the issues of incomplete coverage, limited accuracy, and insufficient timeliness of single data sources in flood inundation analysis, a flood inundation analysis method based on multi-source data fusion is proposed by using the weight of evidence method to fuse heterogeneous data such as flood simulation, remote sensing monitoring, and social investigation. The joint state evidence of “water depth × remote sensing” is adopted to avoid duplicate weighting. The verification results of the example in the Langouwa flood storage and detention area of the Haihe River Basin show that when the submergence probability threshold is 85%, the recall rate of the proposed method in this paper is 8.2% and 5.0% higher than that of single remote sensing monitoring and flood simulation, the F1 score is 4.2% and 2.8% higher, the accuracy is 3.4% and 2.3% higher, and the missed reporting area is reduced by 5% to 8%. Comparing the flood inundation range based on the method proposed in this article with 192 field survey points, all 179 inundation points except for boundary points fall within the inundation area, with a consistency of 100%.

Key words: multi-source data fusion; flood disaster; inundation analysis; weight of evidence method; the Haihe River Basin

近年来,国内外极端天气事件频繁发生,水旱灾害趋多、趋频、趋强、趋广,极端性、异常性、复杂性及不确定性增强^[1-3]。准确、及时的灾害信息是开展决策、抢险、救援的基础,其中洪水淹没范围和水深分布是最重要的灾害信息之一^[4]。洪涝模型模拟、遥感监测以及社会化数据采集是获取洪涝淹没数据的常用手段。其中,基于水文-水动力的洪涝仿真模拟、遥感监测等方法已被广泛用于开展洪涝过程分析或灾害影响评估,支撑应急抢险^[5-10]。近年来,基于并行计算算法,洪涝模型的计算效率明显提升,可基本实现洪涝淹没、水深、流速等洪水特征数据的实时获取^[11-12],但由于洪水发展过程中的实时工情等信息难以及时、全面获得,导致模拟结果不能完全真实地反映洪涝演进情况^[13-14]。卫星遥感监测具有覆盖范围广和易于获取淹没空间分布的优势,但受重访周期以及云、雨等天气条件的影响,难以实现对洪水演进过程的全天候实时监测^[15-16]。除技术手段外,社会化数据也能够对洪涝淹没信息进行校正和补充。我国推行灾害信息员上报制度^[17],编制了 YJ/T 40—2026《自然灾害灾情信息社会化采集技术规范》,要求上报灾害位置、影响范围和灾害损失等信息,这类信息具有内容全面、上传及时、格式标准

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3006403)
作者简介:张念强(1980—),男,正高级工程师,硕士,主要从事洪涝模拟与洪水风险管理研究。E-mail:zhangnq@iwhr.com

等特点^[18];社会公众会在社交媒体、网页上发布关于洪涝的照片和信息,当这些信息中提及地理位置、灾害描述时,对于本场洪涝灾害的反演具有一定价值^[19-20]。但社会化数据在空间上以散点形式居多,时间上常不连续,并存在去伪存真的技术难点^[21]。受外部因素影响,洪涝模拟、遥感监测和社会化数据等单一数据源在全面、准确、快速评估洪涝灾害现状和预测发展趋势方面存在短板,各类数据普遍存在壁垒,彼此相互割裂,尚未实现有效融合。

多源异构数据融合技术可通过构建数理关联,解决单一数据源信息要素不全、数据精度偏低等问题;在综合集成多源信息的基础上,生成新的洪涝灾害淹没范围,对提高淹没评估精度具有重要意义^[22-24]。当前涉及洪涝的多源数据融合研究主要集中在多源降雨统计、多源洪涝淹没预测、洪水淹没范围生成等方面。在多源降雨统计方面,张婷等^[25]总结了针对雨量站、雷达和卫星遥感等数据的客观分析法、地质统计学法、最优插值法、尺度递归估计法和贝叶斯模型平均法等 5 种常用的融合方法;吴泽宁等^[26]对比了贝叶斯方法、综合分析法、变分同化法、神经网络法等数据融合方法的优势和局限性,并提出了多源暴雨预报数据融合的概念性框架和基本流程;石朋等^[27]评估了最优插值法等 3 种融合算法对 CMORPH 卫星降水产品的改进效果。在多源洪涝淹没预测方面,朱辉等^[28]开展了多源遥感数据融合,提高了洪水淹没监测精度。在洪水淹没范围生成方面,常将遥感影像与社交媒体数据融合^[29-30],Schnebele 等^[31]采用机器学习方法将遥感影像、社交媒体数据、河道测量、DEM 数据等相结合,生成了接近实际的洪水灾害地图;邢子瑶等^[32]采用遥感和自发地理信息(VGI)等多源数据,构建了 Albert+CNN 的文本分类模型提取社交媒体洪涝信息,利用社交媒体和开放街道地图(OSM)数据提取洪涝范围,并将社交媒体数据与水位数据融合,模拟无可合成孔径雷达(SAR)数据时的洪涝淹没情况,提高了洪涝淹没范围的提取频次;Rosser 等^[33]使用社交媒体数据、遥感数据、高分辨率 DEM 及相关标记数据等,开发了贝叶斯统计模型,估计了洪水淹没概率。可见,现有研究在融合多源数据时多采用贝叶斯定理、机器学习、神经网络等方法。贝叶斯定理利用概率表示不确定性,避免了主观偏见和信息不全的弊端,计算量小且结果精度较高,但要求概率独立^[25];机器学习和神经网络方法具有较强的自学习和自适应能力,在信息提取和处理方面可发挥强大优势,但训练所需样本量大^[34-35]。证据权重法是一种基于贝叶斯定理与概率不确定性的统计分析

方法,将原始数据转化为“证据”对目标事件支持或反对的程度,表示特征与目标之间的统计关系,对于处理淹没与否的二分类问题具有优势^[36-37]。

对于场次洪水过程,尤其在水情、工情、灾情等关键信息不足的初期,融合多种数据源,获取全面灾情分布并预测其发展,对于支撑应急抢险和救灾具有重要意义。鉴于此,本文基于证据权重法融合洪水模拟、遥感监测、社会化调查等多源异构数据,提出基于多源数据融合的洪涝淹没分析方法,并在海河流域兰沟洼蓄滞洪区进行验证分析,以期应急抢险提供动态支撑。

1 研究方法

利用证据权重法融合多源数据用于洪涝淹没分析,主要包括 5 个步骤。

步骤 1 梳理各数据源的淹没特征,将其作为洪水淹没分析的证据。

步骤 2 计算各证据的正、负权重,用于表征各证据对洪水淹没分析的贡献程度,计算公式为:

$$\begin{cases} W_i^+ = \ln \left[\frac{A_{1i}/(A_{1i} + A_{2i})}{\bar{A}_{1i}/(\bar{A}_{1i} + \bar{A}_{2i})} \right] \\ W_i^- = \ln \left[\frac{A_{2i}/(A_{1i} + A_{2i})}{\bar{A}_{2i}/(\bar{A}_{1i} + \bar{A}_{2i})} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_i^+ 、 W_i^- 分别为第 i 级淹没证据的正、负权重; i 为各数据源淹没特征数据的层级; A_{1i} 为某淹没特征数据中达到第 i 级且实际发生淹没的面积; A_{2i} 为与 A_{1i} 对应的非该等级且实际发生淹没的面积; $\bar{A}_{1i}$ 为某淹没特征数据中达到第 i 级且实际未发生淹没的面积; $\bar{A}_{2i}$ 为与 $\bar{A}_{1i}$ 对应的非该等级且实际未发生淹没的面积。

在各数据源淹没特征数据的层级划分中,洪水模拟数据包括淹没水深、淹没历时、洪水流速等,遥感监测数据为淹没范围描述,社会化调查数据包括描述洪涝淹没的点位分布和淹没范围分布两类。其中,淹没水深具有较好的代表性,依据 SL 483—2017《洪水风险图编制导则》将其分为 6 个层级, $\leq 0.05\text{ m}$ 、 $>0.05 \sim 0.5\text{ m}$ 、 $>0.5 \sim 1.0\text{ m}$ 、 $>1.0 \sim 2.0\text{ m}$ 、 $>2.0 \sim 3.0\text{ m}$ 、 $>3.0\text{ m}$ 分别为 1~6 级;遥感监测数据和社会化调查数据均按淹没和非淹没分为 2 个层级,分别用 1 和 0 表示。

步骤 3 计算证据与事件发生的相关度,从而筛选出对预测结果最有价值的证据,计算公式为:

$$C_i = W_i^+ - W_i^- \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 级淹没证据与淹没事件发生的相关度。 $C_i > 0$ 表示证据利于事件发生, $C_i = 0$ 表示证据

与事件发生无直接关系, $C_i < 0$ 表示证据不利于事件发生, 一般以 0.5 作为临界阈值, 即 $C_i > 0.5$ 表明证据与事件发生之间存在密切关系。

步骤 4 通过组合所有证据的权重, 以二维洪水模拟模型的网格为单元, 计算各网格淹没事件发生的对数后验概率, 用于表征各网格被淹没的可能性, 计算公式为:

$$L_j = \ln\left(\frac{q}{1-q}\right) + \sum_{i=1}^n W_{ij} \quad (3)$$

其中 L_j 为第 j 个网格淹没事件发生的对数后验概率; q 为整个研究区的洪涝淹没事件发生的先验概率, 指未考虑任何证据之前的初始概率; W_{ij} 为第 j 个网格第 i 级淹没证据的权重值, 当网格的多源数据属性满足第 i 级淹没证据时取 W_i^+ , 不满足时取 W_i^- , 证据图层无数据时取 0; n 为淹没证据等级数; D 为已知淹没面积; T 为研究区总面积。

步骤 5 计算融合多源数据后网格的洪水淹没概率, 从而确定与真实情况最为匹配或接近的淹没范围, 计算公式为:

$$P_j = \frac{e^{L_j}}{1 + e^{L_j}} \quad (4)$$

式中: P_j 为第 j 个网格融合多源数据后的洪水淹没概率。

证据权重法要求各证据独立, 即任何一种证据的出现不会对事件发生的概率造成影响, 可通过计算证据之间的 Cramer's V 系数和 φ 系数进行判断, 两种系数均以大于 0.5 表示证据之间强相关。另外, 证据权重法用于洪涝淹没分析时, 还需要解决异构数据的融合基准问题。洪水模拟、遥感监测、社会化调查 3 类数据中, 洪水模拟数据结构相对固定, 可作为多源数据融合的底板。一般采用栅格数量代表证据的面积, 考虑到洪水模型计算单元的结构性和 GIS 的支撑作用, 对于栅格或非结构多边形均可统计面积, 本文按照淹没特征的实际范围统计面积。遥感监测、社会化调查数据均通过与洪水模拟模型网格空间叠加建立关联关系, 用以统计相应类别证据的面积。

2 实例验证

2.1 研究区概况

本文以海河流域兰沟洼蓄滞洪区作为实例应用的研究区。兰沟洼位于海河流域大清河北支下游, 北以小营横堤为界, 南界南拒马河左堤, 东界白沟河右堤, 西接自然高地, 是大清河防洪体系的重要组成部分。蓄滞洪区内地势西北高、东南低, 设计滞洪水

位 17.50 m 时, 淹没面积 228 km², 滞洪量 3.17 亿 m³。2023 年 7 月 28 日至 8 月 1 日, 受第 5 号台风“杜苏芮”残余环流和冷空气共同影响, 华北地区出现 1963 年以来最强降雨过程。连续降雨导致永定河干支流、大清河北支拒马河、滹沱河、滏阳河支流等 21 条河流发生超警戒水位洪水, 其中拒马河等 6 条河流发生超保证水位洪水; 7 月 31 日, 保定市防汛抗旱指挥部启用兰沟洼蓄滞洪区, 自启用至 8 月 2 日的 3 天内, 分别在小营横堤、西茨村(2 处)、东辛庄、朱庄、东务和里遗分洪, 随着北沟河、南拒马河洪水位回落, 蓄滞洪区于 8 月 6 日 13 时在东马营扒口退洪, 至 8 月 22 日洪水基本退完, 只有局部低洼处出现少量存水。兰沟洼蓄滞洪区分、退洪口门分布见图 1, 白沟河、南拒马河典型站点洪水过程见图 2。



图 1 兰沟洼蓄滞洪区分、退洪口门分布

Fig. 1 Distribution of flood diversion and discharge outlets in Langouwa flood storage and detention area

2.2 研究区多源数据

2.2.1 洪水模拟数据

为模拟分洪过程中的洪水演进和退水过程, 采用 FRAS 软件建立了白沟河、南拒马河、大清河和蓄滞洪区的一、二维洪水模拟模型, 白沟河采用东茨村站、南拒马河采用北河店站的实测和预报流量数据作为边界条件^[13], 下边界采用大清河水位-流量关系作为边界条件。建模范围北至小营横堤, 东至白沟河的右堤, 南至南拒马河的左堤, 西部以现设计蓄洪水位为界(图 1)。二维网格尺寸为 10~300 m, 建模考虑了高于地面的公路、堤防等阻水和防洪工程

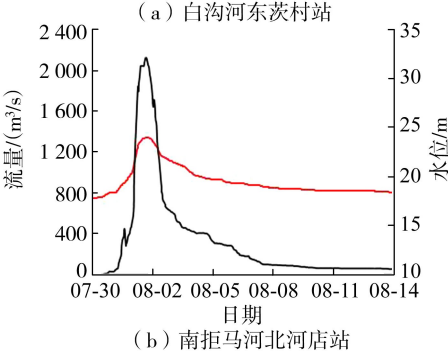
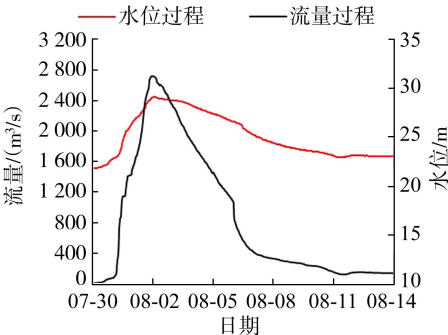


图2 白沟河和南拒马河典型站点洪水过程
Fig.2 Flood hydrographs at typical stations on the Baigou River and the Nanjuma River

调度。结合应急抢险现场人员传回的分洪和退洪信息开展滚动模拟,模拟时段为2023年7月30日00:00至8月25日00:00。模型基于蓄滞洪区内部地形、植被、阻水建筑物以及口门形状进行模拟^[13-14],得到兰沟洼蓄滞洪区模拟水深分布,如图3所示。

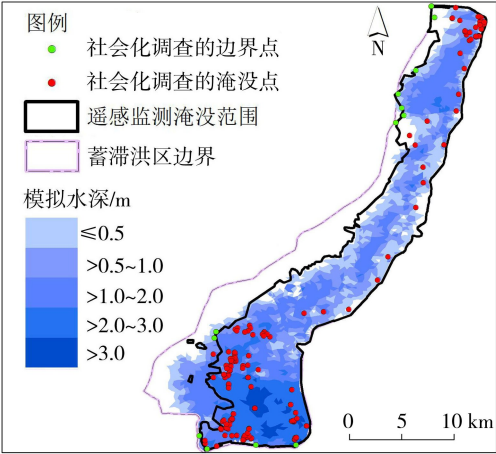


图3 兰沟洼蓄滞洪区多源数据分布

Fig.3 Distribution of multi-source data in the Langouwa flood storage and detention area

2.2.2 遥感监测数据

在兰沟洼蓄滞洪区运用过程中,应急技术支撑团队自7月23日至8月20日对洪水淹没过程进行了23期遥感监测,获取了分洪起始时刻至退水基本完成时间段的淹没范围和淹没面积,数据主要来自GF-3、GF-3C、巢湖一号、GF-1、HJ-2E等,分辨率为3~20 m,监测范围完全覆盖了全部蓄滞洪区,并向

外延伸。采用了面向对象分割和人工目视判读相结合的方法提取淹没水体,由于蓄滞洪区下垫面类型复杂,多源雷达与光学数据存在光谱特性不一致、云覆盖以及高秆作物影响等问题,难以获取精确的洪水淹没范围^[38]。此外,受卫星监测时间的影响,可能存在监测范围与实际不一致的情况。为获取最可能的淹没范围,合并各阶段的遥感监测解译数据,得到遥感监测的最大淹没范围,如图3所示。

2.2.3 社会化调查数据

收集7月31日至8月5日抢险现场上报和8月16—22日实地调查的灾害点数据,共有192个,其中淹没点179个,边界或非淹没点13个,数据内容包括受淹点的位置、水深估值等。社会化调查点位分布如图3所示。在实际淹没范围未知的情况下,假定蓄滞洪区外边缘与淹没边界点为真值边界,参与融合计算。由于部分点位无水深估值,本文将所有点位处理为淹没和非淹没两类。

2.3 结果与分析

2.3.1 证据独立性验证与权重

计算洪水模拟(6个层级证据)、遥感监测(2个层级证据)、社会化调查(2个层级证据)3类数据之间的Cramer's V系数和φ系数,按照10个层级证据融合时,洪水模拟与遥感监测、洪水模拟与社会化调查之间的Cramer's V系数分别为0.83、0.97,遥感监测与社会化调查之间的φ系数为0.98,表明3类数据之间强相关,在空间上高度关联。基于直接叠加融合形式计算10个层级证据的权重,结果见表1。同时,对证据层级进行改进,剔除了社会化调查数据,建立“水深×遥感”的联合状态(以下简称“联合状态”)融合形式,构成12个证据层级,其权重计算结果见表2。

表1 直接叠加融合形式下10个层级证据权重

Table 1 Evidence weights of 10 levels under direct superposition fusion form				
数据源	证据层级	正权重	负权重	相关度
洪水模拟	1	-1.56	3.22	-4.78
	2	2.19	-0.16	2.35
	3	3.40	-0.22	3.62
	4	4.05	-0.32	4.37
	5	4.38	-0.14	4.52
	6	3.82	-0.02	3.84
遥感监测	1	3.41	-1.40	4.81
	0	-1.40	3.41	-4.81
社会化调查	1	2.74	-17.49	20.23
	0	-17.49	2.74	-20.23

以直接叠加融合形式为例分析证据与洪水淹没的关系。表1中1级证据为洪水模拟结果中的较小水深,一般看作非淹没区域,正权重为-1.56,负权

表 2 联合状态融合形式下 12 个层级证据权重				
Table 2 Evidence weights of 12 levels under joint state fusion form				
洪水模拟数据层级	遥感监测数据层级	正权重	负权重	相关度
1	1	-1.90	3.00	-4.90
	0	1.74	-0.05	1.79
2	1	0.62	-0.01	0.63
	0	3.03	-0.14	3.17
3	1	2.11	-0.02	2.13
	0	3.84	-0.20	4.04
4	1	3.34	-0.03	3.37
	0	4.22	-0.27	4.49
5	1	13.91	0	13.91
	0	4.37	-0.14	4.51
6	1	3.83	-0.02	3.85
	0	-7.78	0	-7.78

重为 3.22,相关度为-4.78,表明模型模拟出的非淹没网格实际未发生淹没的可能性较大;2~6 级证据为模拟结果中较大水深,正权重为 2.19~4.38,相关度为 2.35~4.52,负权重均小于 0,表示模型模拟出的淹没网格实际发生淹没的可能性非常大。可见,洪水模拟的水深与实际洪水淹没情况呈正相关关系。遥感监测数据分为淹没和非淹没 2 个证据层级,淹没状态的正权重与非淹没状态的负权重相等,表明遥感监测的淹没情况与实际淹没情况关联性较强。社会化调查数据中,证据层级为 1 时,相关度为 20.23,表明社会化调查数据淹没点分布与实际淹没情况较一致。

2.3.2 两种融合形式对比

为定量评估直接叠加和联合状态两种融合形式

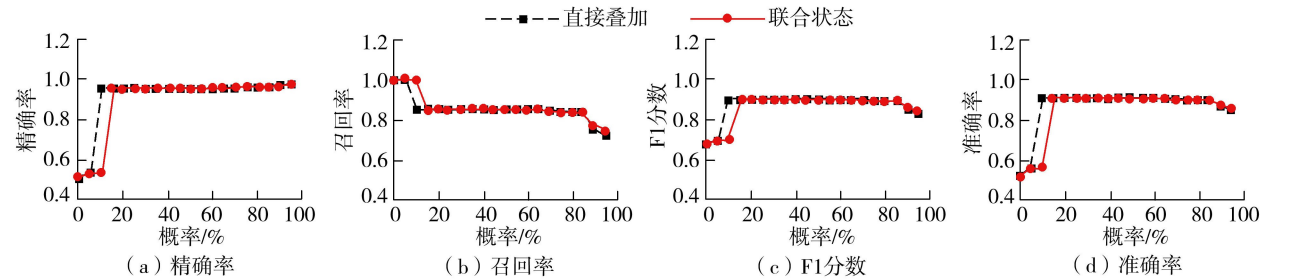


图 4 两种融合形式下的性能指标对比

Fig. 4 Comparison of performance indicators under two fusion forms

表 3 不同融合形式下基于 3 种淹没概率阈值的性能指标

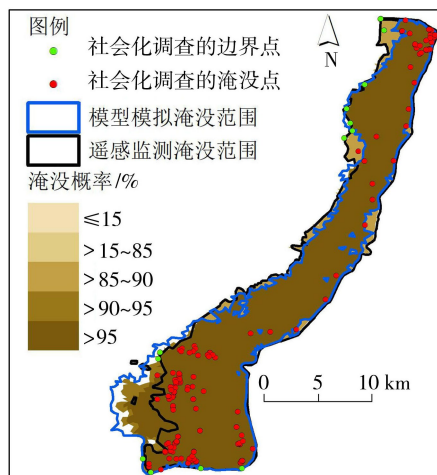
Table 3 Performance indicators based on three submergence probability thresholds under different fusion forms									
融合形式	淹没概率/%	TP/km ²	FP/km ²	FN/km ²	TN/km ²	精确率	召回率	F1 分数	准确率
直接叠加	85	224.92	7.92	44.25	245.96	0.966	0.836	0.896	0.900
	90	202.38	4.53	66.79	249.35	0.978	0.752	0.850	0.864
	95	192.89	4.21	76.28	249.67	0.979	0.717	0.827	0.846
联合状态	85	224.85	7.91	44.32	245.96	0.966	0.836	0.896	0.900
	90	208.60	5.23	60.57	248.65	0.976	0.776	0.865	0.875
	95	202.03	4.48	67.14	249.40	0.978	0.752	0.850	0.864

注:表中 TP 为模拟淹没且实际淹没面积;FP 为模拟淹没但实际未淹没面积;FN 为模拟未淹没但实际淹没面积;TN 为模拟未淹没且实际未淹没面积。

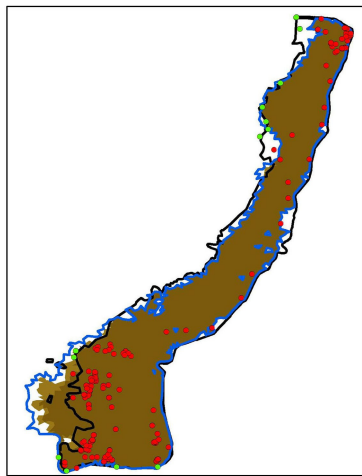
的洪水淹没识别能力,采用混淆矩阵分别计算两种融合形式下洪水淹没概率的精确率、召回率、F1 分数、准确率 4 项性能指标,并进行对比,结果如图 4 所示。由图 4 可见,两种融合形式下 4 项性能指标在洪水淹没概率 P 为 15%~85%时基本一致,指标值也基本无变化。当 $P>85\%$ 时,随着概率增加,精确率增大,表明预测为淹没的区域中,实际淹没的比例增大,即预测的可靠性提升,但召回率、F1 分数、准确率均呈下降趋势,表明对实际淹没区域成功预测的比例在减小,会丢失部分真实淹没区域。

选取 P 分别为 85%、90%、95%作为阈值,计算不同融合形式下基于 3 种淹没概率阈值的性能指标,结果见表 3。由表 3 可见, $P=85\%$ 时,直接叠加与联合状态的性能指标全部相等; $P=90\%$ 时,相比于直接叠加,联合状态的精确率略降,但召回率、F1 分数和准确率均有所提高; $P=95\%$ 时,与 $P=90\%$ 相比,联合状态的精确率略提高,但召回率、F1 分数和准确率有所降低。另外,计算了单数据源中洪水模拟和遥感监测的性能指标,洪水模拟和遥感监测的精确率、召回率、F1 分数、准确率分别为 0.964、0.796、0.872、0.880 和 0.968、0.773、0.860、0.870。可见,单数据源的性能指标除精确率外均低于融合数据,且联合状态在高淹没概率下表现优于直接叠加,其识别淹没范围的完整性和综合性能更优。

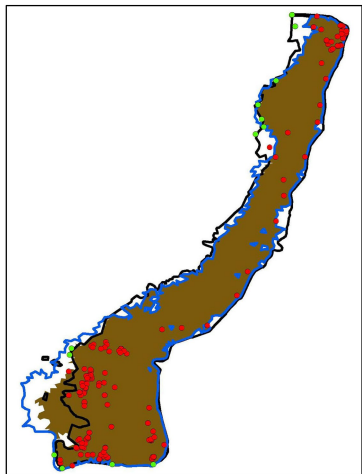
图 5 为基于 3 种淹没概率阈值的联合状态融合效果。由于联合状态融合形式剔除了社会化调查点,可利用社会化调查点位进行验证,辅助确定淹没



(a) $P=85\%$



(b) $P=90\%$



(c) $P=95\%$

图5 基于3种淹没概率阈值的联合状态融合效果

Fig.5 Joint state fusion effect based on three submergence probability thresholds

范围。另外,洪水模拟的淹没范围为 222.30 km^2 ,遥感监测的淹没范围为 215.0 km^2 。基于单数据源分析的情况,洪水模拟、遥感监测在研究区东北侧、西南侧的边缘区域差别较大,在中间洪水覆盖的区域稍有不同;社会化调查淹没点在东北侧和中部全部位于遥感监测的淹没范围内,西南侧有1个淹没点

在遥感监测的淹没范围外;社会化调查淹没点在东北侧和西南侧全部位于洪水模拟的最大淹没范围内,中部西侧有1个淹没点位于洪水模拟的最大淹没范围外。由图5可见,在联合状态融合形式下, $P=85\%$ 时,全部179个社会化调查淹没点均位于淹没区内,13个社会化调查的边界点与淹没边界一致,可见联合状态融合所得范围与实际调查点相符,统计其淹没面积为 232.7 km^2 。 P 为 90% 、 95% 时,均只有176个社会化调查淹没点位于淹没区内,联合状态融合所得范围在局部区域比社会化调查边界点标示范围小。

图6为基于3种淹没概率阈值的直接叠加融合效果。由图6可见, $P=85\%$ 时,全部179个社会化调查淹没点也全部位于直接叠加融合结果的淹没区内,并且13个社会化调查的边界点与淹没边界一致。但在 P 为 90% 、 95% 时,直接叠加融合效果的淹没范围相比于联合状态出现了明显缩小,尤其是在蓄滞洪区的西南侧,可见联合状态的融合形式更优。对比图5与图6,在3种淹没概率阈值下的淹没范围基本相似,印证了在证据权重法中,即便洪水模拟、遥感监测、社会化调查的证据因子之间存在强相关性,仍然能够有效反映洪水淹没的相对趋势。

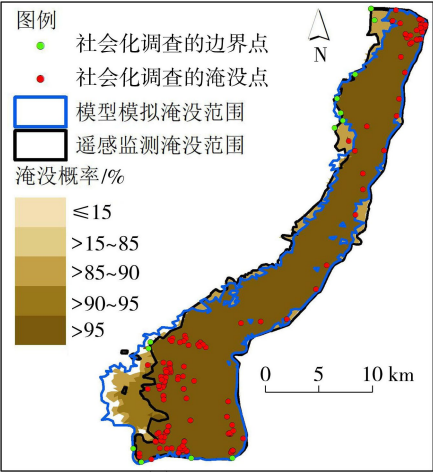
2.3.3 洪涝发展过程分析

水文监测和水文预报数据的快速更新以及洪涝模拟模型计算速度的提升,使获取任意时间点的淹没范围成为可能。另外,遥感影像的更新时间已缩短为数小时至1天。而且,随着社交媒体的发展,洪水发展过程中的社会化调查数据逐渐增多,尤其是互联网平台上快速传播的信息,能扩充信息获取渠道^[33],提高信息获取效率。在此基础上,将联合状态融合方法推广用于洪涝发展过程分析,结果如图7所示。由图7可见,分洪初、分洪中、退洪3个时间点上,联合状态融合得到的淹没范围与洪水模拟、遥感监测得到的淹没范围均吻合较好,可见联合状态融合多源数据可在洪水发展过程中对淹没范围进行预测,以提高区域应急抢险能力。

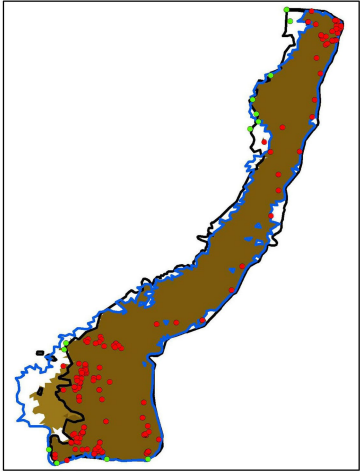
3 结论

a. 基于证据权重法,开展了洪水模拟、遥感监测、社会化调查3类数据的融合研究,提出了直接叠加和联合状态两种融合形式,并在海河流域兰沟洼蓄滞洪区进行了验证。

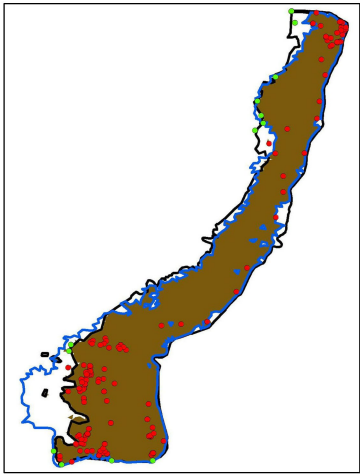
b. 融合方法得到的淹没范围优于单一数据源。在淹没概率阈值为 85% 时,联合状态和直接叠加的性能指标相同,精确率、召回率、F1分数、准确率分别为 0.966 、 0.836 、 0.896 、 0.900 ;在维持高精度的



(a) $P=85\%$



(b) $P=90\%$

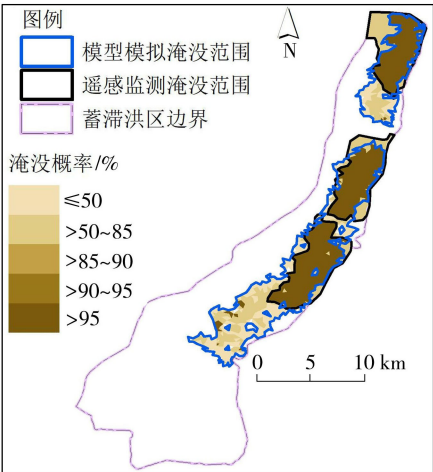


(c) $P=95\%$

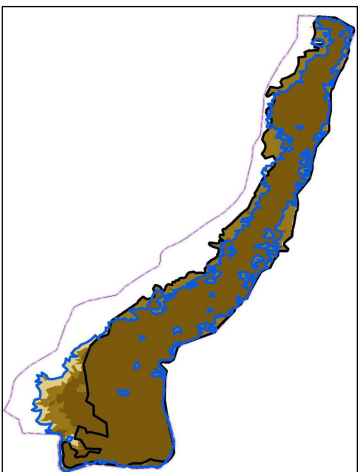
图 6 基于 3 种淹没概率阈值的直接叠加融合效果
Fig. 6 Direct superposition fusion effect based on three submergence probability thresholds

同时,相比单一的遥感监测、洪水模拟,融合方法的召回率分别提高了 8.2%、5.0%,F1 分数分别提高了 4.2%、2.8%,准确率分别提高了 3.4%、2.3%,多源数据融合能更完整地识别实际淹没区域,使漏报面积减少 5%~8%。

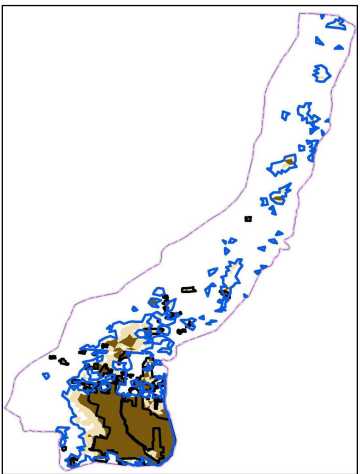
c. 融合方法在高淹没概率条件下更稳健,淹没



(a) 8月2日10时(分洪初)



(b) 8月5日16时(分洪中)



(c) 8月15日11时(退洪)

图 7 基于联合状态融合多源数据的洪水发展过程分析结果
Fig. 7 Analysis results of flood development process based on joint state fusion of multi-source data

概率阈值取 85%时,直接叠加和联合状态两种融合形式下,全部 179 个社会化调查淹没点均落在淹没区内,与地面实况一致。淹没概率阈值从 85%提高至 95%,联合状态的召回率从 0.836 降至 0.752,F1 分数从 0.896 降至 0.850,而精确率从 0.966 升至 0.978,联合状态的性能指标优于直接叠加。

d. 融合方法可扩展至洪水发展过程动态评估。利用联合状态融合多源数据对洪水发展过程进行分析,可实现关键时段的淹没范围更新,为应急抢险提供动态支撑。

参考文献:

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障:在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 中国水利, 2024(2):1-9. (Li Guoying. Safeguarding water security in a comprehensive way to strive for a strong country and great cause of national rejuvenation with Chinese path to modernization: speech at the 2024 National Working Conference on Water Resources[J]. China Water Resources, 2024(2):1-9. (in Chinese))

[2] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2024, 42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4):23-29. (in Chinese))

[3] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))

[4] 华庆莉,王苏,胡佩,等. 内部控制视角下江苏省水旱灾害防御物资储备管理水平评价研究[J]. 水利经济, 2025, 43(6):103-109. (Hua Qingli, Wang Su, Hu Pei, et al. The evaluation of Jiangsu Province’s management level of flood and drought disaster prevention materialsreserve from the internal control perspective [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(6):103-109. (in Chinese))

[5] 张念强,李娜,甘泓,等. 城市洪涝仿真模型地下排水计算方法的改进[J]. 水利学报, 2017, 48(5):526-534. (Zhang Nianqiang, Li Na, Gan Hong, et al. Improvement of underground drainage computation method for urban flood simulation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5):526-534. (in Chinese))

[6] 李聪好,刘家奇,刘欣鑫,等. 适应复杂区域的时序 SAR 影像洪水监测与分析[J]. 遥感学报, 2024, 28(2):346-358. (Li Congyu, Liu Jiaqi, Liu Xinxin, et al. Flood monitoring and analysis based on time-series SAR image for complex area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(2):346-358. (in Chinese))

[7] 沈伟豪,钟燕飞,王俊珏,等. 多模态数据的洪涝灾害知

识图谱构建与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12):2009-2018. (Shen Weihao, Zhong Yanfei, Wang Junjue, et al. Construction and application of flood disaster knowledge graph based on multi-modal data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12):2009-2018. (in Chinese))

[8] 吴滨滨,马奉泉,胡珊珊,等. 海河“23·7”流域性特大洪水东淀蓄滞洪区洪水演进复盘分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5):96-105. (Wu Binbin, Ma Fengquan, Hu Shanshan, et al. Retrospective analysis of flood propagation in Dongdian flood storage-detention area during “23·7” catastrophic flood in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5):96-105. (in Chinese))

[9] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5):13-19. (Li Zhijia, Zhang Xinyuan, Bai Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5):13-19. (in Chinese))

[10] 王兆礼,张文雄,雷向东,等. 基于多源遥感与深度学习的流域洪灾快速精准评估[J]. 水资源保护, 2026, 42(2):40-49. (Wang Zhaoli, Zhang Wenxiong, Lei Xiangdong, et al. Rapid and accurate flood assessment in river basins based on multi-source remote sensing and deep learning [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(2):40-49. (in Chinese))

[11] 张大伟,冯新政,林文青,等. 国内外不同 GPU 用于洪水模拟时加速性能对比分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(5):530-538. (Zhang Dawei, Feng Xinzheng, Lin Wenqing, et al. Comparison of acceleration performance of different graphic processing units used in flood simulation at home and abroad [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(5):530-538. (in Chinese))

[12] 黄国如,陈志威,曾博威. 城市洪涝模型及 CPU-GPU 异构并行计算技术研究进展[J]. 水利学报, 2023, 54(6):654-665. (Huang Guoru, Chen Zhiwei, Zeng Bowei. Research progress of urban flood model and CPU-GPU heterogeneous parallel computing technology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(6):654-665. (in Chinese))

[13] 张念强,王静,李娜. 洪水动态风险分析技术对防汛应急工作的支撑:以海河“23·7”流域性特大洪水期间兰沟洼蓄滞洪区运用为例[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9):39-44. (Zhang Nianqiang, Wang Jing, Li Na. The support of dynamic flood risk analysis technology for flood emergency work: taking the application of Langouwa Storage and Detention Area during the “23·7” extreme

- flood in the Haihe River Basin as an example[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9): 39-44. (in Chinese))
- [14] 王静,李娜,俞茜,等. 基于模型—遥感—调查的灾情信息动态精准获取系统设计:以洪涝灾害为例[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(10): 1-5. (Wang Jing, Li Na, Yu Qian, et al. Design of disaster information acquisition system dynamically and accurately based on model, remote sensing and investigation: taking flood disaster as example [J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(10): 1-5. (in Chinese))
- [15] 杨澄,崔倩,陈德清,等. 流域防洪天空地一体监测体系构建及特大洪水防御应用[J]. 测绘科学技术学报, 2025, 41(3): 268-274. (Yang Deng, Cui Qian, Chen Deqing, et al. Construction of integrated sky-air-ground monitoring system for flood control in river basins and its application in catastrophic flood prevention[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2025, 41(3): 268-274. (in Chinese))
- [16] Declaro A, Kanae S. Enhancing surface water monitoring through multi-satellite data-fusion of Landsat-8/9, Sentinel-2, and Sentinel-1 SAR [J]. Remote Sensing, 2024, 16(17): 3329.
- [17] 应急部 民政部 财政部关于加强全国灾害信息员队伍建设的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(15): 73-76. (Ministry of Emergency Management, Ministry of Civil Affairs, Ministry of Finance. Guidelines on strengthening the construction of the national disaster information officer team[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020(15): 73-76. (in Chinese))
- [18] GB/T 24438.4—2024 自然灾害灾情统计-第4部分:统计板表[S]. 北京:中国标准出版社, 2024.
- [19] Feng Yu, Brenner C, Sester M. Flood severity mapping from volunteered geographic information by interpreting water level from images containing people: a case study of Hurricane Harvey [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 169: 301-319.
- [20] 王德运,张露丹,吴祈. 基于社交媒体数据的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以郑州市“7·20”暴雨事件为例[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(3): 11-22. (Wang Deyun, Zhang Ludan, Wu Qi. Urban storm flood disaster risk assessment based on social media data: a case study of the “7.20” rainstorm event in Zhengzhou City [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(3): 11-22. (in Chinese))
- [21] 张扬,陈轶. 基于社交媒体数据的洪水风险信息提取与应用研究综述[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(2): 41-49. (Zhang Yang, Chen Yi. Review and application of flood risk information extraction based on social media data [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(2): 41-49. (in Chinese))
- [22] 张建云,谢康,金君良,等. 变化环境下洪水预报方法转变与创新[J]. 水科学进展, 2026, 37(3): 399-408. (Zhang Jianyun, Xie Kang, Jin Junliang, et al. Transformation and innovation of flood forecasting methods under a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2026, 37(3): 399-408. (in Chinese))
- [23] 康艳,艾慧茹,彭仁娟,等. 基于误差校正融合模型的自适应带宽洪水区间预报[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 106-114. (Kang Yan, Ai Huiru, Peng Renjuan, et al. Adaptive bandwidth flood interval forecasting based on error-corrected hybrid model [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 106-114. (in Chinese))
- [24] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 56-63. (Liang Xin, Hou Jingming, Wang Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 56-63. (in Chinese))
- [25] 张婷,李怡,李建柱,等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 15-28. (Zhang Ting, Li Yi, Li Jianzhu, et al. Research progress on multi-source rainfall data fusion and their hydrological application [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 15-28. (in Chinese))
- [26] 吴泽宁,申言霞,王慧亮. 多源城市暴雨预报数据融合研究进展[J]. 水利水电技术, 2018, 49(11): 15-21. (Wu Zening, Shen Yanxia, Wang Huiliang. Research progress on data fusion of multi-source urban rainstorm forecast [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(11): 15-21. (in Chinese))
- [27] 石朋,徐昕杰,瞿思敏,等. 多源融合降水对小尺度流域洪水模拟能力研究[J]. 水资源保护, 2026, 42(3): 48-56. (Shi Peng, Xu Xinjie, Qu Simin, et al. Flood simulation capability study multi-source precipitation fusion in small-scale watersheds [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(3): 48-56. (in Chinese))
- [28] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 50-57. (Zhu Hui, He Qisheng, Li Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 50-57. (in Chinese))
- [29] Wang Cuizhen, Li Zhenlong, Huang Xiao. Geospatial assessment of wetness dynamics in the October 2015 SC Flood with remote sensing and social media [J]. Southeastern Geographer, 2018, 58(2): 164-180.

(下转第 119 页)

[55] Li Fawen,Zhang Manjing,Zhao Yong, et al. Influence of irrigation and groundwater on the propagation of meteorological drought to agricultural drought [J]. Agricultural Water Management,2023,277:108099.

[56] Zhang Qiang,Kong Dongdong,Singh V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: spatiotemporal patterns, causes and implications [J]. Global and Planetary Change,2017,152:1-11.

[57] Jiang Guanghui,Guo Fang,Liu Fan, et al. Hydrogeological responses of karst compartments to meteorological drought in subtropical monsoon regions[J]. Journal of Hydrology, 2025,655:132940.

[58] Yang Fan, Duan Xingwu, Guo Qiankun, et al. The spatiotemporal variations and propagation of droughts in Plateau Mountains of China [J]. Science of the Total Environment,2022,805:150257.

[59] 张秀霞,韩丽莎,党星海,等. 西北干旱区近 30a 植被覆盖的时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区研究,2025,42(6):1067-1079. (Zhang Xiuxia,Han Lisha, Dang Xinghai, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in the arid regions of Northwest China over the past 30 years and their response to climatic factors [J]. Arid Zone Research, 2025, 42 (6): 1067-1079. (in Chinese))

[60] 张翔,黄舒哲,管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. 地球科学进展,2023,38(6):563-579. (Zhang Xiang,Huang Shuzhe,Guan Yuhang. Research progress, challenges, and prospects in drought propagation [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38 (6): 563-579. (in Chinese))

[61] Mukherjee S, Mishra A, Trenberth K E. Climate change and drought:a perspective on drought indices[J]. Current Climate Change Reports,2018,4(2):145-163.

[62] Zhou Yaoqiang,Li Jiayu,Jia Wenhao, et al. The evolution of drought and propagation patterns from meteorological drought to agricultural drought in the Pearl River Basin [J]. Water,2025,17(8):1116.

(收稿日期:2025 - 11 - 24 编辑:王芳)

+++++

(上接第 80 页)

[30] Wieland M,Schmidt S,Resch B, et al. Fusion of geospatial information from remote sensing and social media to prioritise rapid response actions in case of floods [J]. Natural Hazards,2025,121(7):8061-8088.

[31] Schnebele E, Cervone G. Improving remote sensing flood assessment using volunteered geographical data [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,13(3):669-677.

[32] 邢子瑶,董芯蕊,咎糈莉,等. 融合 VGI 和遥感等多源数据的洪涝范围提取与模拟方法[J]. 地球信息科学学报,2023,25(9):1869-1881. (Xing Ziyao,Dong Xinrui,Zan Xuli, et al. Flood inundation mapping and estimation using VGI,remote sensing images and other multi-source data [J]. Journal of Geo-information Science, 2023, 25 (9): 1869-1881. (in Chinese))

[33] Rosser J F, Leibovici D G, Jackson M J. Rapid flood inundation mapping using social media, remote sensing and topographic data[J]. Natural Hazards,2017,87(1):103-120.

[34] 童超,詹哈煜,崔罡,等. 融合 ResNet-18 与水动力模型的洪水演进快速预测[J]. 水资源保护,2026,42(1):129-136. (Tong Chao,Zhan Hanyu,Cui Gang, et al. Rapid flood evolution prediction by integrating ResNet-18 and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2026,42(1):129-136. (in Chinese))

[35] 康艳,艾慧茹,彭仁娟,等. 基于误差校正 HYMOD-LSTM 融合模型的自适应带宽洪水区间预报[J/OL]. 水资源保护,1-15[2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1753.045>. (Kang Yan,Ai Huiru,Peng Renjuan, et al. Adaptive bandwidth flood interval forecasting based on error-corrected HYMOD-LSTM HybirdModel[J/OL]. Water Resources Protection, 1-15 [2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1753.045>. (in Chinese))

[36] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F, et al. Weights of evidence modelling;a new approach to mapping mineral potential [R]. Ottawa: Geological Survey of Canada,1990:171-183.

[37] Weed D L. Weight of evidence;a review of concept and methods[J]. Risk Analysis,2005,25(6):1545-1557.

[38] 宋文龙,马建威,孙亚勇,等. 海河“23.7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):31-36. (Song Wenlong,Ma Jianwei,Sun Yayong, et al. Satellite remote sensing monitoring and analysis of the entire process of flood inundation in the activated flood storage areas of Haihe“23·7”basin-wide extreme flood[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33 (10): 31-36. (in Chinese))

(收稿日期:2026 - 04 - 08 编辑:王芳)