孙晖，姬军红，林智韬，等. 农业洪涝灾害多源遥感监测研究进展与展望[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(S2)：823-832.
SUN Hui, JI Junhong, LIN Zhitao, et al. Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring and research on flood disasters [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 823-832.

农业洪涝灾害多源遥感监测研究进展与展望

孙 晖[1]，姬军红[2]，林智韬[3]，吴清华[4]，梁万杰[5]，雷添杰[2]，李东伟[6]

(1. 北京京能建设集团有限公司，北京 102308；2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；3. 北京戍光科技有限公司，北京 102615；4. 北京城建远东建设投资集团有限公司，北京 102200；5. 江苏省农业科学院 农业信息研究所，江苏 南京 210014；6. 中国农业科学院 农田灌溉研究所，河南 新乡 453002)

摘 要：洪涝灾害作为常见的自然灾害，对人类生命安全、基础设施、房屋建筑、农业、自然环境和经济有着广泛影响。在气候变化的大背景下，极端降水事件及其诱发的洪涝灾害日益频繁和严重。因此，科学监测与评估对防灾减灾决策至关重要，提升其时效性和准确性是加强灾害管理的迫切需求。综述了洪涝灾害监测评估的核心技术与流程，将其监测工作细化为四个核心模块：遥感数据获取、灾害信息提取技术、洪涝灾害时空特征分析及风险评估。进一步深入分析了各模块的机制、方法、应用实践，并探讨了其优势与局限。最终，展望了农业洪涝灾害遥感监测的未来发展方向，强调了跨学科研究的重要性，并提倡综合运用遥感、GIS和人工智能技术，以提升农业洪涝灾害监测能力，减轻其对农业生产的影响。

关键词：洪涝灾害；遥感数据；灾害信息提取；时空特征；农业

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.123

中图分类号： S422 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-0860(2025)S2-0823-10

Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring and research on flood disasters

SUN Hui[1], JI Junhong[2], LIN Zhitao[3], WU Qinghua[4], LIANG Wanjie[5], LEI Tianjie[2], LI Dongwei[6]

(1. Beijing Jingneng Construction Group Co., Ltd., Beijing 102308, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Beijing Shuguang Technology Co., Ltd., Beijing 102615, China; 4. Beijing Urban Construction Far East Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 102200, China; 5. Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 6. Institute of Irrigation and Drainage, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, Henan, China)

Abstract: Flood disasters, as common natural disasters, have a wide range of impacts on human life safety, infrastructure, housing construction, agriculture, natural environment, and economy. Against the backdrop of climate change, extreme precipitation events and the flood disasters induced by them are becoming increasingly frequent and severe. Therefore, scientific monitoring and assessment are crucial for disaster prevention and mitigation decisions, and enhancing their timeliness and accuracy is an urgent need for strengthening disaster management. This article summarizes the core technologies and processes of

收稿日期：2024-11-25

基金项目："十四五"国家重点研发计划项目(2023YFD2300300)

作者简介：孙 晖(1985—)，男，工程师，学士，主要从事风光储能农一体化建设。E-mail：zksunhui@126.com.

通信作者：姬军红(1967—)，女，研究员，硕士，主要从事农业灾害及人事人才管理方面研究。E-mail：jijunhong@caas.cn
林智韬(1997—)，男，硕士，主要从事宏观经济应用和灾害经济评估研究等。E-mail：derrick-lin@vip.163.com.

flood disaster monitoring and assessment, refining its monitoring work into four core modules: remote sensing data acquisition, disaster information extraction technology, flood disaster spatiotemporal feature analysis, and risk assessment. It further analyzes the mechanisms, [Methods] and application practices of each module, and explores their advantages and limitations. Finally, the article looks forward to the future development direction of remote sensing monitoring of agricultural flood disasters, emphasizes the importance of interdisciplinary research, and advocates the comprehensive application of remote sensing, GIS, and artificial intelligence technologies to enhance the monitoring capability of agricultural flood disasters and mitigate their impact on agricultural production.

Keywords: flood disaster; remote sensing data; disaster information extraction; spatiotemporal characteristics; agricultural

0　引　言

洪涝灾害是一种常见的自然灾害，严重威胁着人们的生存和社会经济的发展。受全球气候变暖的影响，近年来我国洪涝灾害呈现的特点可总结为：洪涝灾害发生频率更高、灾害强度更大且对农业影响范围更广[1-2]。因此，为了有效减少洪涝灾害带来的损失，如何科学有效地开展洪涝灾害监测和风险评估研究，不仅成为国内外专家学者关注的热点问题，也是国家防洪减灾工作的重要组成部分[3-5]。

传统的洪涝灾害监测方式，多为人工实地调查，这种方法费时费力，难以满足大范围、快速实时洪涝监测需求。遥感技术凭借其高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率的地表信息获取能力，为宏观、准确、动态、实时的洪涝灾害监测带来了前所未有的机遇[6-8]。通过遥感技术，可以获取灾区在不同时刻的水体信息，再结合影像处理技术即可提取洪水灾情数据，这种方法能够更加准确地了解洪涝灾害的发展情况和影响范围，从而提高实时监测和快速响应的能力，减少灾害损失。众多学者基于遥感数据开展了洪涝灾害监测，尤其是多源数据的使用，其在很大程度上弥补了使用单一数据源的不足的问题，大大提高了洪涝监测的范围和效率。如李纪人通过航天遥感与航空遥感相结合的手段，结合地理信息系统，对长江、嫩江以及松花江流域的洪涝灾害进行了9次监测，在此基础上制作了淹没范围分布图[9]。ANUSHA 等[10]使用 Sentinel-1 和 AWiFS 光学影像相结合实现了多种数据源之间的信息互补，绘制了拉普蒂河和加哈拉河的洪涝监测。随着卫星遥感技术的进步，以及智能化信息处理技术与分析水平的提高，耦合卫星遥感、无人机遥感和地面灾情调查等多源数据构建“空-天-地”三位一体监测体系，实现对洪涝灾害的全方位、全时段、全要素立体动态监测，已成为洪涝灾害研究的必然趋势。

目前，在洪涝灾害监测研究方面已有不少学者进行了深入细致的综述，但他们较多侧重于农业洪涝灾害数据源的使用情况以及由洪涝灾害造成的损失评估等方面[11-13]。与这些综述不同的是，本文首先从洪涝灾害监测评估原理出发，阐述了洪涝灾害监测的基本思路，接着从有什么(洪涝灾害数据)，怎么提取(洪涝灾害信息提取)，有什么特征(洪涝灾害时空特征分布)以及造成什么影响(洪涝灾害风险评估)这几个角度全面细致地阐释了洪涝灾害监测评估的相关研究进展，以期为洪涝灾害监测评估的深入研究提供借鉴和参考[14-15]。

1　洪涝灾害遥感监测评估原理

洪涝灾害通常具有突发性、破坏性强以及范围广的特点，如何高效、快速地获取灾害信息，掌握灾害空间分布情况以及灾害程度等信息是洪涝灾害监测评估的重要内容[16-17]。洪涝灾害监测评估的基本流程是：首先依据研究区大小、研究目的等因素选择合适的数据源并进行预处理，接着采取相关算法进行洪涝信息提取，在此基础上分析洪涝灾害时空格局的分布特征和成因。最后，选择合适的评估方法，构建风险评估体系对洪涝灾害进行风险评估，为相关部门制定科学的防灾减灾决策提供信息参考，也为政府对农民因灾害造成的损失予以补偿提供参考帮助(见图1)。

2　洪涝灾害遥感监测数据研究进展

遥感数据是进行洪涝灾害监测的基础，从数据源的角度来看，洪涝灾害监测可以分为光学遥感、微波遥感、无人机以及多源数据融合。

2.1　光学遥感在洪涝灾害中的应用情况

光学遥感影像具有高空间分辨率、重访周期短和获取地物信息丰富等优点。根据分辨率的不同可以分为高、中、低三种分辨率[18]。

低分辨率的影像数据有 MODIS、NOAA/AVHRR 等，其主要应用于大范围地表信息监测[19-20]。其中 MODIS 影像数据的光谱信息丰富，重返周期最短为

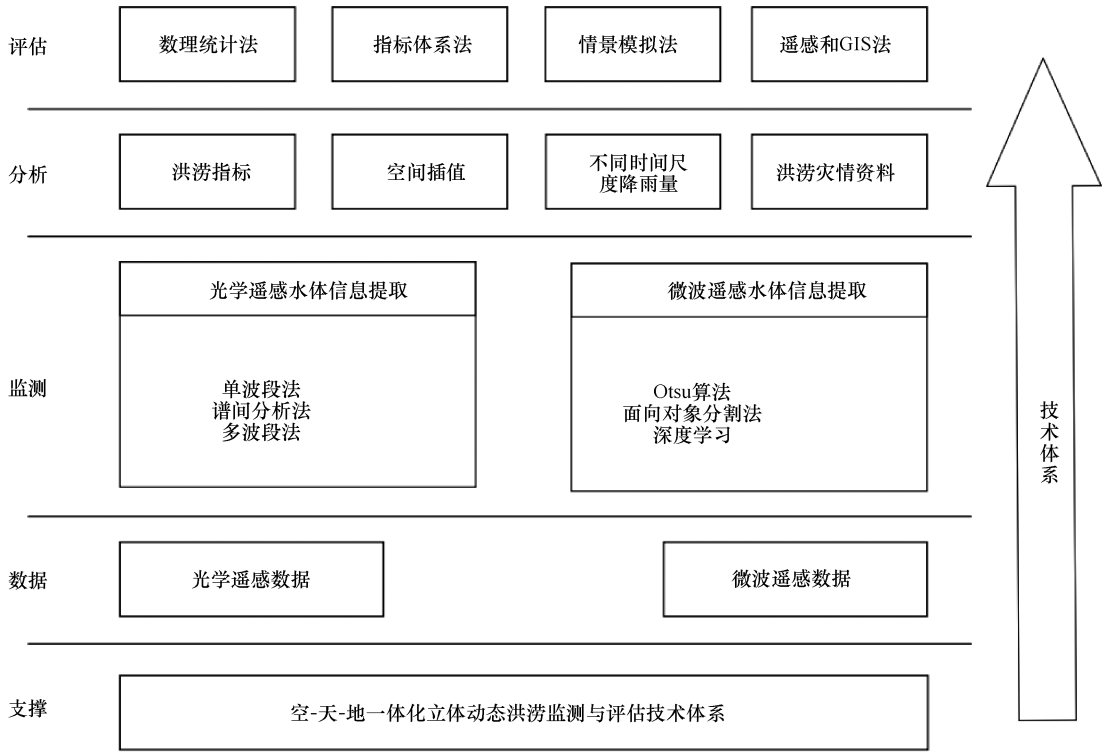

图 1　洪涝灾害遥感监测与评估技术体系

0.5 d，影像扫描范围广，在大范围、中大尺度洪水信息提取应用中发挥了重要作用。如李斌等[21]基于 MODIS 数据，通过遥感技术对长江中游 2000 年以来发生的洪涝灾害信息进行了提取。吴黎等[22]基于 MODIS 影像提取了黑龙江省 2013 年特大洪涝灾害信息，发挥了该数据在特大洪涝灾害中及时、高效特性。但是该类数据的空间分辨率并不高，在细节区域的信息表达方面相对较差。

中等分辨率的影像数据有 Sentinel-2、环境系列卫星(HJ-1A/1B)、SPOT 系列以及 Landsat 系列等，其主要于区域尺度的监测应用[23-24]。该类数据的时间、空间分辨率相对均衡，能够满足大部分地表信息监测的需求。如蒋猛等基于 Sentinel-2 光学遥感影像，通过遥感分类、指数反演等手段，研究了光学遥感影像在洪涝灾害研究中的表现[25]。ETY 等[26]基于 Landsat-8 提出了一种 10 m 分辨率自动生成周期性地表水的方法，监测了孟加拉国北部的洪水灾害信息，该方法有助于及时监测地表水，在国内外新出现的重大自然灾害监测和预警中发挥着重要作用。

高分辨率的影像数据有 QuickBird、WorldView 等以及我国的 GF 系列、北京系列卫星、吉林一号等，其具有较高的空间分辨率，这使得精细化地表信息监测成为可能。李双双等[27]基于北京系列绘制了 1924 年以来永定河流域的最大洪涝灾害信息，为灾后信息的综合治理提供支撑。吴玮[28]基于 GF-4 提取了江西省鄱阳县的洪涝灾害信息。虽然高分辨率卫星能够提供高质量的地表信息，但同时也面临着数据成本和监测范围等方面的挑战。因此在实际的洪涝灾害监测应用中会受到一定限制。

虽然基于光学遥感的洪涝灾害监测取得了一定的研究进展，但洪涝发生期间往往伴随着多云、多雨、多雾等恶劣天气，导致光学卫星观测数据会丢失大量的洪水信息。部分学者借助云去除算法来消除光学影像中云的影响，但由于缺乏足够的邻域信息，仍然会存在监测效果不理想的问题。

2.2　微波遥感在洪涝灾害中的应用情况

合成孔径雷达(synthetic aperture radar，SAR)卫星数据的出现解决了云干扰这一难题。相较于光学影像，SAR 具有强大的穿透能力，可以突破云雾的障碍，不受天气影响。此外，其全天时全天候独特成像能力受到了越来越多学者的关注[29-31]。

在众多雷达遥感数据集中，Sentinel-1 影像数据具备较高的时间和空间分辨率且数据免费的特点已成为洪涝监测中使用最广泛的遥感数据源。郭山川等[32]借助 GoogleEarthEngine 云计算平台和具有短重访周期的 Sentinel-1 数据，采用阈值法对 2020 年长

江中下游地区汛期进行动态监测。UDDIN 等[33]基于多时相 Sentinel-1 影像，开发一种快速洪水淹没信息提取方法，获取了孟加拉国 2017 年不同月份的洪涝淹没范围，其制图结果可为灾害评估提供理论及技术支撑。随着 SAR 影像空间分辨率的不断提高，其影像的质量和信息量也不断增多，表现为影像的亮度更高，纹理结构信息增多。当前众多研究集中于利用灰度共生矩阵提取 SAR 影像中的纹理信息并使用机器学习的方法对洪涝灾害信息进行提取和制图。如孙诚等[34]结合 8 种灰度共生矩阵纹理特征与 LightGBM 模型实现了淮河流域洪涝发生期间淹没范围的快速监测。TAVUS 等[35]基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2，利用灰度共生矩阵特征、植被和水指数以及主成分分析结合随机森林模型绘制了乌兹别克斯坦萨尔多巴的洪水灾害信息。

以上研究均凸显了 SAR 数据在洪涝灾害监测中的巨大潜力。但是在使用单源 SAR 数据进行洪涝灾害提取时仍存在一定的不足，比如光谱信息缺乏，纹理信息在量化过程中也存在缺失等问题。因此，需要充分利用多期雷达影像数据、其他光学影像数据以及 DEM 等辅助资料的多源数据进行水体信息提取将会使得洪涝灾害的监测精度更精确。

2.3　无人机在洪涝灾害中的应用情况

无人机遥感作为一种新兴的洪涝灾害监测手段，具有空间分辨率高、响应及时、不受地形地貌影响等优势，在灾情评估分析、现场救援、救助受困人员等作业中凸显了其他手段无法替代的作用，被称为“六边形战士”。不同种类的无人机各有特点(见表 1)，应根据实际需要，选取合适的平台。在进行无人机作业时首先需要确定监测目标和拍摄范围，接着再通过相关软件设置飞行轨迹、飞行高度等参数，并设定地面控制点来保证拍摄精度，最后收集整理拍摄影像对其进行内业处理即可得到灾情信息。王梦梓等[36]构建了基于 *NDWI* 的多光谱无人机影像在洪涝应急测绘中自动提取水体范围的方法，获取了水体范围的空间分布、变化大小等信息。杨坤等[37]基于无人机遥感获取了灾情信息以及发展态势，为高效应对台风“杜苏芮”引发的洪涝灾害提供了保障。鉴于无人机在洪涝灾害中的显著成效和广泛需求，众多学者将无人机遥感与机器学习、深度学习相结合，进一步发挥了无人机遥感在抗洪抢险救灾中的优势，为相关人员做出及时准确的救灾决策提供参考。

无人机遥感监测同时也有续航时间短的缺点，而监测点常布设在电网普及率不高的人烟稀少地区。以北京为例，洪涝灾害多发于门头沟区，该区山区面积占比 98%，一旦发生洪涝灾害，本就覆盖率不高的电力供应又面临随时切断的风险，为此在常用监测点附近投建分布式光伏以及配套电化学储能项目，实现光储一体化，能显著提高无人机的续航能力。在山区安装光伏板，面临地势环境复杂、山体陡峭、材料运输艰难、安装施工作业面小等困难。吴建鹏等[38]研究了山地光伏电站的应用特点及难点，通过指定运输和安装过程中的控制措施，保证了项目顺利竣备。卢成龙等[39-40]自研了光伏支架专用钻孔机，以及新型光伏板安装平台，克服了分布式光伏地形复杂的局面，减少施工准备时间，提高安装效率，降低了施工安全风险。张洋等[41]针对山地环境，为光伏板安装平台增加了自动安装装置、防偏移装置以及防变形装置，实现了光伏板的快速、精准、安全安装，经现场测试验证，该设备显著提高了光伏板安装效率和精度。

综上所述，在复杂地形条件下安装光伏板，除了在运输和安装过程中加强质量与安全控制措施，还需要积极使用新型自动化安装设备，提高效率，降低风险。

2.4　多源数据融合在洪涝灾害中的应用情况

受云雨、雾气、传感器等因素的影响，仅使用单源遥感数据往往存在时间“有缝”，空间“有洞”的难题，数据不完整导致难以全方位、全天时、全维度认知洪涝灾害。多源遥感数据融合以解决时空谱优化问题为宗旨在洪涝灾害中发挥日益重要的作用[42]。

根据前人的研究，将不同类型遥感数据融合方式总结为光学数据的融合、光学数据与微波数据的融合

表 1　无人机飞行平台的种类与特点

飞行平台	模　式	续航时间	载　荷	优　势	劣　势
无人直升机	螺旋桨+旋翼	中	载荷适中	同时具备固定翼无人机与多旋翼无人机的特点，承载力与续航能力强等	控制系统复杂、维护成本昂贵等
固定翼无人机	固定翼+摆翼直	长	载荷大	效率高，航速快，承载力与续航能力较强、携带方便等	起飞降落有场地限制，且不能悬停拍照，速度过快会造成图像质量受损
多旋翼无人机	多个旋翼	短	载荷小	成本低、安全性强、操作方便、可空中悬停拍照，适用于低空、低速监测等	飞行速度慢，承载力与续航能力较弱

以及遥感与非遥感数据的融合。近年来，由于云层覆盖以及传感器自身限制的影响，多源遥感数据的融合研究逐渐从光学数据的融合转移到了以光学数据与微波数据的融合研究为主，并取得了一些研究进展。比如在洪涝遥感监测中 TM/Sentinel-2 和 SAR 结合是最为常见的，这样既可以利用光学遥感数据的多光谱信息又可以利用 SAR 数据全天时全天候的优势，使得融合后的影像在特征提取和精度解译等方面更有效。不同数据源在融合的过程中可能会产生冗余信息，反而会降低影像质量。因此，许多学者提出了具有容错性和鲁棒性较强的融合算法对其进行处理，根据融合级别的不同，可分为像素级别、特征级别和决策级别[43-44]。最初应用的融合算法主要集中在像素级和特征级，融合方法有 HSV 色彩变换法、小波变换以及主成分变换等，主要目的是提高目视解译和增强影像识别的能力。为了满足不同的应用需求，研究方向从像素级和特征级融合逐渐转向决策级融合，决策级融合能够为不同的遥感应用需求提供更为详细的细节信息。越来越多的学者开始使用决策融合算法以实现不同影像之间的互补。如孙岩等[45]使用 Sentinel-2 和 SAR 两种遥感数据利用决策融合算法解决了使用单一数据源存在的数据缺失和时间分辨率不足的问题，实现了对鄱阳湖 2020 年夏季洪涝和 2022 年秋季干旱期间湖水面积动态变化的实时监测。潘祖燕等[46]基于淮河流域洪灾后的 TM 数据和灾中的 RadarsatSAR 数据为例，对比了假彩色合成法、HSV 色彩变换法、色彩标准化变换法(Brovey)、主成分变换在影像增强和融合中的效果，结果表明使用假彩色合成法得到融合后的影像，其洪水淹没区的亮度、空间纹理信息和光谱扭曲度都优于其他融合方法。

综上所述，单一数据源存在局限性，因此，仅使用单一数据源很难满足相关部门对洪涝灾害时效性和监测精度的要求。随着遥感技术和平台的不断发展，数据源呈现多元化，已形成基于卫星、无人机、地面监测站的“空-天-地”一体化的协同观测体系，这就需要将不同类型遥感数据相互结合以实现卫星资源的优势互补，提高监测效率，为洪涝灾害监测与应急评估提供全过程、全方位的洪水演进动态与灾情发展过程信息。

3　遥感监测洪涝灾害信息提取研究进展

洪涝灾害监测的关键在于洪灾发生时淹没区的识别，即受灾地区水体的识别。根据使用数据源的不同，主要分为基于光学遥感的水体提取和基于微波遥感的水体提取。

3.1　基于光学遥感的水体信息提取方法

水体在近红外或中红外波段的特征表现与其他地物不同，依据高吸收率、低反射率的特点来识别水体信息，这类方法主要有单波段法、谱间分析法以及多波段法。

(1)单波段法。单波段法主要是利用在光学遥感卫星某一波段上设定一个阈值来分割获得水体信息。毕海芸等[47]利用 LandsatTM 影像的 B5 波段设置阈值提取水体信息，结果表明该方法仅适用于地形起伏较小且背景简单的平原区域。FRAZIER 等[48]对 TM 影像的 3 个近红外波段(B4、B5、B6)分别采用单波段阈值法对水体进行提取，通过对比发现 B5 在所有波段中提取效果最佳。虽然单波段方法简单易操作，但其表达信息有限，水体的提取精度和稳定性通常受光学影像质量、影像数据预处理方法、阈值选择等因素的影响。

(2)谱间分析法。谱间分析法是借助水体与其他地物光谱曲线的特征差异来提取水体信息。相较于单波段阈值法其稳定性和精度均有所提升。李飞等[49]基于高分一号卫星遥感数据，对比了基于单波段阈值法、归一化水体指数法与谱间关系法在复杂水体信息提取中的效果。研究结果发现谱间关系法对不同尺度和多种类型的水体进行提取时提取结果最为完整。陈华芳等[50]将 TM2+TM3>TM4+TM5 的谱间分析法和阈值法相结合提取了香格里拉市区域的水体信息，研究结果表明单一采用阈值法很难将灰度值较为接近的山体阴影和水体区分开来，谱间分析法的加入可以较好地去除山体阴影的影响，但是最优阈值需要通过不断的试验调试来确定。

(3)多波段法。多波段法是一种应用较多的水体提取方法。它是根据在光学影像中各种地物在不同波段上的波谱特征差异，采用加减乘除等运算放大水体与其他地物的差异，进而提取出水体的边界、面积、深度等关键信息。现有较多成熟的水体指数是由多波段法构建而来，目前使用较多的是通过归一化指数法、比值法或依据实际情况，基于不同背景地物下的水体光谱特征，构建各种新型水体指数来提取水体信息[51]。国内外较有影响力的水体指数主要包括以下几种：归一化差异水体指数(*NDWI*)、改进的归一化差异水体指数(*MNDWI*)以及自动提取水体指数(AWEIsh)等[52]。这些指数都是先根据水体在不同波段上反射率差异从而进行水体信息的增强，然后再通过阈值法再设定某一阈值来区分水体。然而，水体指

数法在识别水体的时候常受到影像中阴影的影响，并且阈值的设定也存在主观性。随着遥感图像处理技术的不断突破，提取方法朝着自动化、智能化方向发展。机器学习能够从大量数据中挖掘有用信息，多波段法和机器学习相结合被证实是提高水体信息的有效方法。常用的机器学习如随机森林、最大似然、支持向量机以及神经网络等。尽管 ML 算法种类繁多，但如何更深层次地挖掘遥感信息，高效学习和优化训练方法是水体提取亟须解决的关键问题。此外，受天气原因的影响，洪涝发生时通常伴随着大量云雨且云层较厚，难以为不同水体提取方法提供有效的数据支持，使得水体信息提取研究存在一定的局限性。虽然国内外学者在去除薄云干扰方面也进行了诸多努力，但是如何简单、快速、准确地进行薄云校正算法研究是未来洪涝灾害遥感监测研究的重要课题的重要方向。

3.2　基于微波遥感的水体提取法

相比于光学遥感，微波遥感能够有效穿透云层，实现全天时、全天候获取高精度影像，在云雨天气条件下的水体提取中具有明显优势[53]。基于雷达影像最常使用的水体提取方法主要有 Otsu 算法、面向对象分割法以及基于深度学习等方法。

(1)Otsu 算法。Otsu 算法是利用单波段阈值法提取水体信息，本质上就是对微波影像进行“二值化”的过程。其阈值判定方法通常是根据 SAR 影像中的双峰直方图来寻找最佳阈值，即当影像中的水体比例最大时，直方图显示出双峰形状，此时得到的阈值为最佳阈值。李熠[54]采用多期 Sentinel-1SAR 影像，使用 Otsu 算法提取了 2020 年巢湖流域洪水范围。该方法原理简单易懂，计算量小、速度快、效率高，适合应用于具有双峰直方图特征的影像，而对于大范围区域的影像来说效果不是很理想。

(2)面向对象分割法。面向对象分割法是首先对影像进行尺度分割，接着根据水体的光谱(均值、方差、灰度比值等)、形状(面积、长度、宽度、形状因子等)及纹理(对称性、灰度共生矩阵等)等特征进行水体特征选取，最后建立规则得到分类结果。目前面向对象分割法通常和高分辨率影像结合使用，主要是因为高分辨率影像缺少中红外波段或者短波红外波段，无法构建出合适的水体指数，而面向对象分割法能够从多个包含相同或相似信息的同质对象出发，同时考虑到水体的形状以及大小等相关信息。因此，提高了水体的提取精度。贾波等[55-56]基于高分辨率影像对比了多种方法在水体信息提取中的效果，结果均表明面向对象分割法比单波段阈值法、水体指数法提取精度要高。需要注意的是，面向对象法分割结果的质量和分类规则的有效性会影响到分类精度。因此，面向对象法的核心问题在于如何选择最优分割参数和分割尺度以及如何建立有效的分类规则，这需要研究人员具备一定的经验和实践积累，综合考虑多种因素，并通过反复试验来确定。

(3)深度学习。随着人工智能和地理大数据的迅猛发展，基于语义分割网络进行遥感影像水体信息提取已成为新的发展趋势[57-58]。它主要利用卷积神经网络从人工标注的数据集学习纹理、光谱及其他高维度特征，然后利用学习的特征对影像的感兴趣区域进行提取。与前面几种方法相比，深度学习算法不需要复杂的光谱分析和特征选择，其准确性和通用性更高。在水体提取方面，王宁等[59]分别对比了随机森林模型和 U-Net 模型在水体提取中的效果，研究结果认为 U-Net 具有更高的提取精度且能有效消除阴影的影响，在小样本区域的水体信息提取中展现出了巨大的潜力。董臻[60]结合微波遥感技术，将深度学习中语义分割和变化检测的最新成果应用在 2020 年夏季鄱阳湖湖区洪涝监测上，研究结果表明，该文新提出的 HRNet 语义分割模型比经典卷积神经网络算法(DenseNet，SegNet，ResNet 和 DeepLabv3+)以及传统方法(双峰阈值分割法和 OTSU 方法)识别性能要好。注意力机制作为深度学习中最重要的组成部分，具有即插即用、简便有效的特点，它可以通过调节特征权重大小，帮助深度学习模型在背景复杂，覆盖范围广的遥感图像上增强与目标对象相关的有效特征以及抑制无关特征，进而提高遥感图像的信息提取精度。

综上所述，在影像数据方面，光学遥感易受云雨天气的影响，影像数据获取的时效性和监测精度尚不能满足国家减灾救灾发展的需求。而微波遥感具有全天时全天候且穿透能力强的特点，但是在成像中散斑噪声较多，给水体信息的提取造成了很大的信息损失和信息干扰。因此，在实际应用中，应当充分结合两者优势，将不同类型、不同时相、不同光谱分辨率、不同时间分辨率以及不同空间分辨率的多源遥感影像来提高水体提取精度。在水体提取方法方面，传统的水体提取方法通常需要人为干预设置阈值，在复杂环境和大范围的应用上存在局限，目前水体提取技术的发展主要依赖于遥感技术、机器学习算法和人工智能技术等方面的进步，常用的水体提取方法都各有独特的优势，但也存在不足之处，因此，在实际的洪涝监测应用中，应结合多种方法以进行洪水水体提取[61-63]。

4　洪涝灾害时空特征分布研究进展

洪涝灾害具有突发性强、灾害强度大、时空分布不均衡等特点。洪涝灾害发生的时空分布决定了灾害损失的变化，因此，掌握洪涝灾害的时空分布特征有利于深入了解气象灾害的发生规律，同时对于实施洪涝灾害风险管理和精准防控具有重要意义。

洪涝灾害的发生与降水关系密切，受地理位置、地形以及季风气候等因素的影响，导致降水在时间分布和空间分布不均衡。目前，国内外学者已经在洪涝灾害时空分布规律方面取得了一定的研究进展[64-65]。常用的洪涝灾害时空分布研究方法主要有 3 种。第一种是基于气象站点资料计算相关洪涝指标值，然后对指标值进行时间变化趋势分析，接着再结合 GIS 分析技术对相关指标进行空间插值与展布，通过目视解译或聚类分析洪涝灾害的空间分布特征。常用的洪涝指标有降水量距平百分率、降水量、*Z* 指数等。如曲辉辉等[66]基于黑龙江省 1971—2016 年的气象站点数据，通过极端降水指数（*EPI*）、方差分析、M-K 检验、GIS 等技术手段，明确了黑龙江省水稻生长季洪涝灾害的时空演变特征。王新龙等[67]基于淮河流域 1953—2007 年主汛期（6—8 月）降水资料，采用 *Z* 指数法、数理统计方法和经验正交函数分解（EOF）分析了淮河流域洪涝的时空分布规律，研究结果可为淮河流域洪涝灾害防治提供参考。第二种是主要依赖于历史灾情资料来研究洪涝灾害时空分布特征。如管新建等[68]利用 1950—2018 年历史洪涝灾情数据，选取农业受灾、成灾面积 2 个指标结合九点二次平滑法、时间序列分析法及空间聚类技术分析了对中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律。郭帷等[69]根据新疆维吾尔自治区民政厅记载的暴雨洪涝灾情信息，通过构建洪涝灾损指数，结合概率密度分布函数确定的危害性等级，分析了近 39 年北疆洪涝灾害的时空变化特征。该类方法主要依赖于历史灾情统计资料，受社会条件影响，统计手段及通信技术发展不完善等因素的影响，部分洪涝灾情数据会被遗漏，对统计结果的准确性造成一定影响。第三种是利用不同时间尺度的致灾雨量阈值划分洪涝等级分析洪涝时空演变特征。洪涝灾害大多由短时间内（1～3 d）急剧的强降水造成的。白蕤等[70]通过 1 d 过程降雨量、2 d 过程降雨量以及 3 d 过程降雨量小涝、中涝以及大涝的阈值，在此基础上分析了海南岛近 50 年农业洪涝灾害时空分布特征。高阳华等[71]以单站 1 d、2d、3 d 或以上的过程降水量阈值划分洪涝等级标准分析了重庆市洪涝灾害时空演变规律。

5　洪涝灾害风险评估研究进展

洪涝灾害风险评估是洪涝灾害监测的重要组成部分，科学合理的风险评估结果可以帮助农民和政府及时了解灾情，采取有效的应对措施，降低灾害损失[72]。通过对国内外洪涝灾害风险评估方法的梳理与分析，根据评估理论、数据来源以及数据处理技术等方面的不同，将评估方法归纳为 4 大类：数理统计法、指标体系法、情景模拟法、遥感和 GIS 法。

（1）数理统计法。数理统计法是基于历史洪涝灾害数据（如受灾面积、受灾人数和房屋倒塌等）采用数理统计方法建立数学模型，实现灾害风险评估和预测。如 ROBERT 基于历史洪水资料，构建卷积网络模型对洪水的最高水位进行预测，研究结果表明，与其他数学模型进行对比，发现该模型精度提高了 17%[73]。卞洁等[74]基于长江中下游 6 个省份的洪涝灾情数据，通过信息扩散评估模型对当地的洪涝灾害风险进行评估。数理统计法洪涝灾害评估法极度依赖于历史资料数据，但某些地区的历史灾情以及历史降雨等数据难以收集，且数据的准确性难以保证，因此该方法难以被广泛应用。

（2）情景模拟风险评估方法。情景模拟风险评估方法是通过水文水动力模型对地区自然灾害受灾过程进行动态模拟，实现对洪涝灾害风险的动态评估。AMELLAH 等[75]建立摩洛哥北部流域的二维水动力学模型，结合地形湿度指数（TWI-KS）制作了该流域的洪水风险图。赵华青等[76]使用分布式水文模型，以雨情数据、土地利用类型、数字高程以及土壤类型等为主要数据对平原区流域洪涝过程进行了模拟。情景模拟法具有模拟精度高、直观等优点，因此，被常应用于灾害评估研究中，但是该方法对地理数据和水文资料要求较高，且模型的构建过程复杂、普适性较差，很难在较大尺度上得到应用。

（3）指标体系风险评估法。指标体系风险评估法在现实宏观区域或较大尺度区域的洪涝风险情况具有较好的效果，因而在所有风险评估方法中应用最多。目前认可度较高的是由张继权等[77]提出的风险四因子论，即包括致灾因子危险性、承灾体脆弱性、孕灾环境暴露性和区域防灾减灾能力。依据研究的目标不同和研究数据的特点，众多的学者基于不同的风险体系采用层次分析法或主成分分析等方法确定各项指标的权重，构建洪灾风险评估模型对研究区域洪涝灾害进行评估与分析。不过常见灾害风险体系框架的计算

形式主要有以下几种：(1)风险=危险度+易损度；(2)风险=危险度×易损度；(3)风险=概率×损失；(4)风险=概率×易损度；(5)风险=概率×结果；(6)风险=致灾因子危险性∩承载体暴露性∩承载体脆弱性；(7)风险=孕灾环境∩致灾因子∩承载体；(8)危险=危险性×暴露性×脆弱性×防灾减灾能力。如谢捷等[78]基于地理、社会经济和气象因素等13个指标，通过AHP-熵权组合法对西宁5区2县进行了洪涝风险评估。该方法简单易行，操作灵活，可根据不同区域的特征和洪灾具体情况有针对性地构建指标体系，适用于区域的综合风险评估。

(4)遥感与GIS。RS技术可实时大范围获取洪涝灾害相关信息，GIS技术在多源数据处理和空间可视化表达方面具有很强的优势，因此，将两者相结合在洪涝监测和评估中的应用越来越多。如基于长时续的MODIS遥感影像数据、地理背景数据、社会经济数据等从洪涝灾害危险性、暴露性、脆弱性和抗灾救援能力4个方面构建洪涝灾害风险评估模型，绘制洪灾综合风险评价图。王小笑等[79]从山洪灾害的驱动因素视角出发，利用GIS技术构建山洪灾害风险评估模型，从危险性和易损性两个方面建立评价指标，将陕西省划分为高、中、低三个风险区域，最后与实际调查数据进行对比，结果较为可靠。遥感与GIS方法具有实时性强、覆盖范围大等特点，但是缺点也比较明显，受天气条件和传感器等因素的影响，数据通常存在缺失。

综上所述，不同的灾害风险评估方法所侧重的角度不同，目前还没有一个统一的指标体系进行综合评估，这就要求在选择方法时综合考虑多方面因素，结合研究区实际情况选择最佳评估方法。

6　总结与展望

本文聚焦于洪涝灾害监测与评估方面的研究进展，在分析前人研究成果的基础上，将洪涝灾害监测评估分为洪涝灾害数据源、洪涝灾害信息提取方法、洪涝灾害时空分布规律以及风险评估4个模块，分别对它们的概念、研究内容以及研究方法作了概括和评述。虽然这几个方面均取得了显著的研究进展，但是未来有以下问题仍需进一步探究：

(1)多源数据融合研究。由于洪涝灾害的多样性、时间需求的紧迫性以及数据精度的要求，单一类型的遥感数据源通常很难满足及时全面了解洪涝灾害信息的需求，通过多种类型数据耦合提取洪涝灾害信息已成为一种趋势。因此，充分利用各种数据源提供的丰富、互补和全面的信息，同时解决与数据解释和数据源不兼容相关的挑战至关重要，未来农业洪涝灾害监测将更加依赖于气象、水文、遥感、地形等多源数据的集成，以构建反映致灾过程空间异质性和时序动态变化的物理模型。

(2)基于人工智能、大数据的洪涝信息提取研究。随着大数据时代的到来，社交媒体数据、监控摄像头数据以及各种综合数据源在洪水监测中的应用逐渐引起了研究人员的关注。虽然在优化算法方面取得了重大进展，但在数据采集、信息过滤、数据分析和确保数据可靠性等领域仍存在挑战。利用“天空地”一体化立体动态监测技术手段，将水动力模型作为计算引擎，结合灾损脆弱性曲线，利用数值模拟与机器学习相结合的方法，面向致灾过程的农作物洪涝灾害损失评估框架，是未来的一个重要发展方向。

(3)洪涝灾害时空演变规律研究。及时准确地掌握涝灾害的时空特点和分布规律对于抗灾减灾部门了解不同程度灾害空间分布情况至关重要，而洪涝指标的构建是分析洪涝时空规律的基础。目前已有众多洪涝灾害指标，但尚未明确哪种最为有效。鉴于洪涝灾害的形成机理复杂，且影响因素众多，未来需综合考虑多方因素，构建合适的洪涝指标模型，以揭示洪涝灾害的时空演变规律。

综上所述，本文加深了对洪涝灾害监测技术的理解，指出了未来农业洪涝灾害监测的发展方向，旨在通过科技进步和政策支持，提高对洪涝灾害的监测、评估和应对能力，以保障农业生产和国家粮食安全。

参考文献：

[1] SHARMA T P P, ZHANG J, KOJU U A, et al. Review of flood disaster studies in Nepal: A remote sensing perspective [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 34: 18-27.

[2] TRALLI D M, BLOM R G, ZLOTNICKI V, et al. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 59(4): 185-198.

[3] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展：在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究，2023，23(1)：1-11.

[4] 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]. 水利发展研究，2024，24(1)：1-10.

[5] 邱奕翔. 以习近平总书记治水重要论述为指引扎实推动水旱灾害防御工作高质量发展[J]. 水利发展研究，2024，24(12)：24-28.

[6] 范一大，吴玮，王薇，等. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报，2016，20(5)：1170-1184.

[7] BELLO O M, AINA Y A. Satellite remote sensing as a tool in disaster management and sustainable development: Towards a synergistic approach[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 120: 365-373.

[8] DING L, MA L, LI L, et al. A survey of remote sensing and geographic information system applications for flash floods [J]. Remote Sensing, 2021, 13: 1818.

[9] 李纪人. 遥感技术在防汛抗旱中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 15-18.

[10] ANUSHA N, BHARATHI B. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020, 23(2): 207-219.

[11] 李超超, 田军仓, 申若竹. 洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 131-136.

[12] 赵阳, 程先富. 洪水灾害遥感监测研究综述[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 106-109.

[13] 李国一, 刘家宏, 邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. 水文, 2023, 43(4): 15-20.

[14] 左其亭, 王子尧, 马军霞. 我国现代治水研究热点与发展展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 13-19.

[15] 李肇桀, 张旺, 刘璐. 大力发展新质生产力 助推水利高质量发展: 关于水利行业发展新质生产力的认识和思考[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 1-6.

[16] [1]王章立, 邱奕翔, 杨光, 等. 台风“格美”暴雨洪水防御实践与思考[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 43-47.

[17] [1]刘志雨, 张同强. 水旱灾害防御雨水情监测预报技术研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 48-55.

[18] 黄诗峰, 马建威, 孙亚勇. 我国洪涝灾害遥感监测现状与展望[J]. 中国水利, 2021(15): 15-17.

[19] 许小华, 黄萍, 黄诗峰, 等. 鄱阳湖洪涝灾害卫星雷达遥感应急监测应用[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(4): 10-14.

[20] DUAN C, ZHENG X, JIN L, et al. Study on the remote sensing spectral method for disaster loss inversion in urban flood areas[J]. Water, 2022, 14: 2165.

[21] 李斌. 长江中游洪涝灾害的 MODIS 时序监测与分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.

[22] 吴黎, 解文欢, 宋丽娟, 等. 基于 MODIS 数据的黑龙江省洪涝灾害监测研究[J]. 现代化农业, 2023(6): 49-51.

[23] EKEU-WEI I T, BLACKBURN G A. Applications of open-access remotely sensed data for flood modelling and mapping in developing regions[J]. Hydrology, 2018, 5: 39.

[24] LIM J, LEE K S. Flood mapping using multi-source remotely sensed data and logistic regression in heterogeneous mountainous regions in North Korea[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 1036.

[25] 蒋猛, 吴坤泽, 高梦飞, 等. 光学遥感影像在洪涝灾害监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(12): 73-76.

[26] ETY N J, CHU Z, MASUM S M. Monitoring of flood water propagation based on microwave and optical imagery[J]. Quaternary International, 2021, 574: 137-145.

[27] 李双双, 李君超, 张旭东, 等. 北京系列高分辨率卫星在永定河流域洪涝灾害分析中的应用[J]. 中国水利, 2024(3): 69-72.

[28] 吴玮. 高分四号卫星在溃决型洪水灾害监测评估中的应用[J]. 航天器工程, 2019, 28(2): 134-140.

[29] MAHYOUB S, FADIL A, MANSOUR E M, et al. Fusing of optical and synthetic aperture radar (SAR) remote sensing data: A systematic literature review (SLR)[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2019, 42: 127-138.

[30] GENSR R, VAN GENDEREN J L. Review article SAR interferometry issues, techniques, applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(10): 1803-1835.

[31] 黄敏敏. 基于 Seminel-1/2 数据的寿光市洪涝灾害监测与预测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.

[32] 郭山川, 杜培军, 蒙亚平, 等. 时序 Sentinel-1A 数据支持的长江中下游汛情动态监测[J]. 遥感学报, 2021, 25(10): 2127-2141.

[33] UDDIN K, MATIN M A, MEYER F J. Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh[J]. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1581.

[34] 孙诚, 沈芳, 唐儒罡. 基于 SAR 纹理和 LightGBM 的洪水淹没地区遥感应急监测[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2023(3): 82-92.

[35] TAVUS B, KOCAMAN S, GOKCEOGLU C. Flood damage assessment with Sentinel-1 and Sentinel-2 data after Sardoba dam break with GLCM features and Random Forest method[J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151585.

[36] 王梦梓, 刘全海, 王重天, 等. 基于低空 UAV 的多光谱遥感在洪涝应急测绘中的应用[C]//江苏省测绘地理信息学会. 江苏省测绘地理信息学会 2023 年学术年会论文集. 南京: 江苏省测绘地理信息学会, 2023: 37-41.

[37] 杨坤, 王薇, 罗伟儿, 等. 无人机遥感应急监测高效应对台风“杜苏芮”引发的洪涝灾害[J]. 中国减灾, 2023(19): 16-17.

[38] 吴建鹏, 尹杰. 山地光伏电站大尺寸光伏组件应用难点及控制措施[J]. 新能源科技, 2022(5): 21-23.

[39] 卢成龙, 胡庆明, 王超, 等. 光伏支架安装辅助定位施工技术[J]. 安装, 2024(S2): 23-25.

[40] 卢成龙, 严才乐, 王维生, 等. 新型光伏板安装平台在光伏发电项目中的应用[J]. 安装, 2024(S2): 107-109.

[41] 张洋, 杨波, 莫鹏程. 山地光伏发电板安装设备的研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025(12): 78-80.

[42] 邢子瑶, 董芯蕊, 昝糈莉, 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.

[43] 石月婵, 杨贵军, 李鑫川, 等. 融合多源遥感数据生成高时空分辨率数据的方法对比[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 92-99.

[44] 成其换. 基于多源遥感数据的时空数据融合算法研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.

[45] 孙岩. 基于多源卫星数据的地表水体提取研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.

[46] 潘祖燕, 宫阿都, 周廷刚, 等. 基于 TM 与 SAR 影像融合的洪水淹没范围提取研究[C]//Intelligent Information Technology

Application Association. Proceedings of 2011 International Conference on Ecological Protection of Lakes-Wetlands-Watershed and Application of 3S Technology (EPLWW3S2011V3). Nanchang: International Industrial Electronic Center, 2011: 253-256.

[47] 毕海芸，王思远，曾江源，等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. 遥感信息，2012，27(5)：77-82.

[48] FRAZIER P S, PAGE K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1461-1468.

[49] 李飞，桑国庆，孙盈，等. 基于高分一号卫星遥感数据的复杂水体信息提取方法研究[J]. 济南大学学报(自然科学版)，2021，35(6)：572-579.

[50] 陈华芳，王金亮，陈忠，等. 山地高原地区 TM 影像水体信息提取方法比较：以香格里拉县部分地区为例[J]. 遥感技术与应用，2004(6)：479-484.

[51] 张珂，吴星宇，吴南，等. 基于高分一号遥感影像的水体提取方法对比分析与改进[J]. 水资源保护，2024，40(4)：9-16.

[52] 方悦. 基于 Landsat8OLI 遥感影像的水体信息提取方法研究[D]. 合肥：安徽建筑大学，2023.

[53] LIU C, CHEN Z X, YUN S, et al. Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(3): 506-525.

[54] 李煜. 基于 Sentinel-1 数据的巢湖流域洪涝灾害信息提取与分析[J]. 安徽地质，2022(S1)：76-81.

[55] 贾波. 基于高分一号卫星影像的水体信息提取方法初探[J]. 经纬天地，2024(3)：6-10.

[56] 杜斌. 基于面向对象的高分辨率遥感影像水体信息提取优势研究[D]. 昆明：云南师范大学，2014.

[57] 武建. 人工智能技术在水利行业中的应用实践与展望[J]. 水利发展研究，2024，24 (8)：44-49.

[58] 宁方贵. 数字孪生嫩江防洪“四预”应用研究[J]. 水利发展研究，2024，24 (9)：33-37.

[59] 王宁，程家骅，张寒野，等. U-net 模型在高分辨率遥感影像水体提取中的应用[J]. 国土资源遥感，2020，32(1)：35-42.

[60] 董臻. 基于深度学习与哨兵一号影像的洪涝灾害遥感监测[D]. 南京：南京信息工程大学，2022.

[61] 乔建华. 新阶段完善海河流域防洪工程体系的思考[J]. 水利发展研究，2024，24 (3)：48-52.

[62] 姚文广. 守牢水旱灾害防御底线 护航长江经济带高质量发展[J]. 水利发展研究，2024，24 (2)：10-15.

[63] 褚明华，杜晓鹤，何秉顺. 我国水旱灾害防御应对[J]. 水利发展研究，2024，24 (8)：1-8.

[64] 秦鹏程，闫彩霞，周月华，等. 农作物洪涝灾害致灾机理与评估方法研究进展与展望[J]. 暴雨灾害，2023，42(1)：67-78.

[65] 郭恩亮，张继权，孙仲益，等. 农业洪涝灾害风险评价研究综述[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 风险分析和危机反应中的信息技术：中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集. 呼和浩特：东北师范大学环境学院，2014：643-648.

[66] 曲辉辉，王冬冬，王萍，等. 黑龙江省水稻生长季极端降水及洪涝时空演变特征[J]. 中国农学通报，2020，36(14)：119-129.

[67] 王新龙，钟平安，万新宇，等. 淮河流域洪涝时空分布规律[J]. 水电能源科学，2013，31(3)：45-49.

[68] 管新建，刘源，孟钰，等. 中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律[J]. 水资源保护，2022，38(4)：21-25.

[69] 郭帷，谢海涛，王旭，等. 1981—2019 年北疆暴雨洪涝灾害的时空变化特征分析[J]. 暴雨灾害，2022，41(1)：101-108.

[70] 白蕤，李宁，陈汇林，等. 海南岛农业洪涝灾害监测指标修订与灾害时空分布特征[J]. 干旱气象，2019，37(6)：1012-1020.

[71] 高阳华，唐云辉，冉荣生，等. 重庆市洪涝指标及其发生规律研究[J]. 西南农业大学学报，2002(6)：551-554.

[72] 何萍，刘佳灵. 云南楚雄彝族自治州洪涝风险评估[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2023，45(5)：1056-1064.

[73] 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.

[74] 卞洁，李双林，何金海. 长江中下游地区洪涝灾害风险性评估[J]. 应用气象学报，2011，22(5)：604-611.

[75] AMELLAH O, EL MORABITI K, MAFTOI C, et al. Topographic indices and two-dimensional hydrodynamic modelling for flood hazard mapping in data-scarce plain areas: A case study of Oued Laou catchment (Northern Morocco) [J]. Geocarto International, 2022, 37(26): 13596-13617.

[76] 赵华青，周璐，赵然杭，等. 基于 MIKE 耦合模型的平原区流域洪涝过程模拟[J]. 中国农村水利水电，2022(7)：97-102.

[77] 张继权，荣广智，李天涛，等. 多致灾因子诱发地质灾害链综合风险评价技术[J]. 中国减灾，2022(7)：23-26.

[78] 谢捷，刘玮，徐月顺，等. 基于 AHP-熵权法的西宁地区汛期暴雨灾害风险评估[J]. 自然灾害学报，2022，31(3)：60-74.

[79] 王小笑，雷声，傅群. 基于 GIS 反演技术的鄱阳湖蓄滞洪区洪水风险图绘制研究[J]. 中国农村水利水电，2014(5)：170-172.

（责任编辑　王海锋）