

新疆与中亚融雪型洪水监测、预警调研及对策建议

刘艳^{1,2,3} 卢新玉^{1,2} 郑奕^{1,3} 霍文^{1,2}

(1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2 新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 乌鲁木齐 830002;
3 新疆乌兰乌苏绿洲生态与农业气象野外科学观测研究站, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 全球变暖背景下融雪型洪水灾害时空特征正发生重大变化。首先概述国内外融雪型洪水遥感监测与预警研究进展, 探讨了融雪型洪水监测预警研究及应用面临的挑战。其次, 总结了现有融雪型洪水监测模型预测效果及其存在不足, 以及研究应用中存在的机遇。再次, 分析了融雪型洪水监测业务应用现状及其在新疆和中亚地区应用存在的问题。最后, 为进一步开展新疆和中亚地区融雪型洪水监测预警服务, 提出加强重点区域科学布站组网、加强高分系列卫星应用和构建多尺度、多维、实时更新的中亚生态环境数据库等建议。

关键词: 新疆, 中亚, 融雪型洪水, 监测, 预警, 综合观测试验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.004

Investigation and Countermeasures on Monitoring & Early-Warning of Snowmelt Flood in Xinjiang and Central Asia

Liu Yan^{1,2,3}, Lu Xinyu^{1,2}, Zheng Yi^{1,3}, Huo Wen^{1,2}

(1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002 2 Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002 3 Field Scientific Experiment Observation Research Station on Oasis Ecology and Agrometeorology of Wulanwusu in Xinjiang, Urumqi 830002)

Abstract: Under the background of global warming, the temporal and spatial characteristics of snowmelt flood disaster are changing greatly. This paper summarized the progress and development in snowmelt flood monitoring and early warning using remote sensing technology, and analyzed the challenges the scholars are facing in the application to practice. Secondly, the prediction effect of the existing snowmelt flood monitoring models and their issues need to be solved were summarized, as well as the opportunities and challenges in the future research and applications. Thirdly, the open issues of snowmelt flood monitoring models existing in the application to Xinjiang and Central Asia regions were analyzed. Finally, the research focuses and business development countermeasures were put forward so as to further improve snowmelt flood monitoring and warning service in Xinjiang and Central Asia.

Keywords: Xinjiang, Central Asia, snowmelt flood, monitoring, early-warning, comprehensive observation test

0 引言

新疆和中亚地区(本文特指哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦等五个国家)是地球陆地上面积最大的干旱区。由于远离海洋,气候干旱,其独特的山地—绿洲—荒漠生态系统格局具有全球意义,是气候变化的敏感区

域^[1-3]。与其他中纬度山区不同^[4],新疆和中亚地区拥有大量的冰川(图1a)和雪盖^[5](图2)。该地区主要为温带大陆性气候,受西风环流、北冰洋高纬气团和印度洋暖湿气流交汇作用,温度、湿度变化较大,易受寒潮、旱涝袭击,冬季降雪过多,春夏容易出现融雪型洪水。哈萨克斯坦南部、塔吉克斯坦东部杜尚别等地、吉尔吉斯斯坦南部是融雪型洪水的常发地。新疆融雪型洪水约占洪水类型总量的39%,冰雪融水和暴雨混合型洪水占34%^[6]。新疆北部阿尔泰山额尔齐斯河流域、天山北坡奎一玛流域、呼图壁河流域、乌鲁木齐河流域及天山北麓东段小河区流域、伊犁河谷、塔城地区北部的额敏河流域,以及新疆南部阿克苏河流域、渭干河流域、喀什噶尔河流域、吐尔羌河

收稿日期: 2021年3月18日; 修回日期: 2022年1月5日

第一作者: 刘艳(1978—), Email: liuyan@idm.cn

通信作者: 郑奕(1975—), Email: Zhengyi@idm.cn

资助信息: 国家自然科学基金面上项目(42071075); 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2021002); 科技基础资源调查专项(2017FY100503); 新疆维吾尔自治区“天山青年计划”(2019Q039)

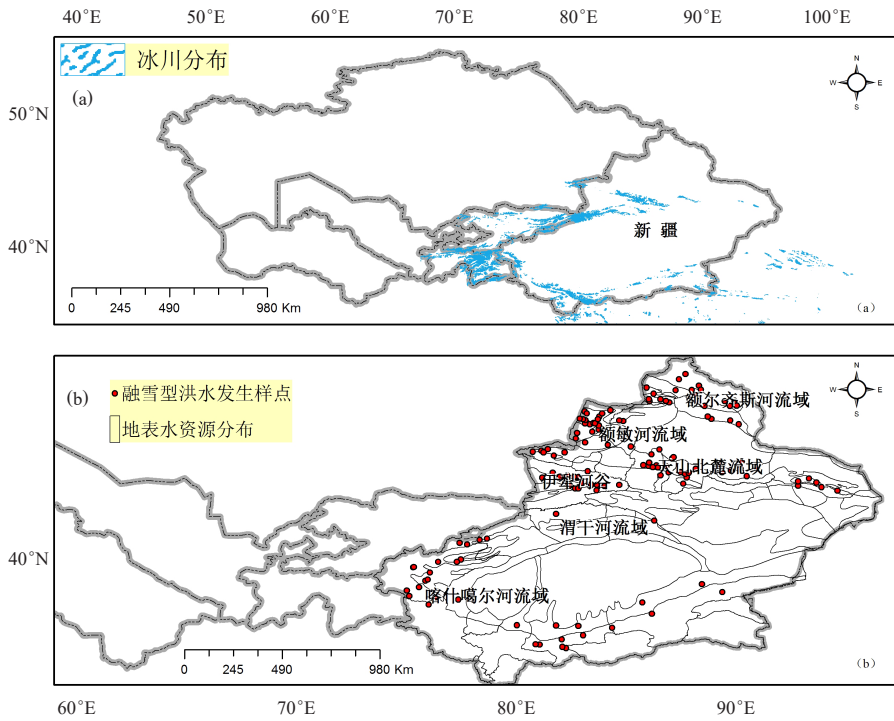


图1 新疆和中亚地区冰川分布 (a) 及新疆历史融雪型洪水位置示意图 (1980—2018) (b)
Fig. 1 Distribution of glaciers in Xinjiang and Central Asia (a) and the locations of historical snowmelt flood events in Xinjiang (1980-2018) (b)

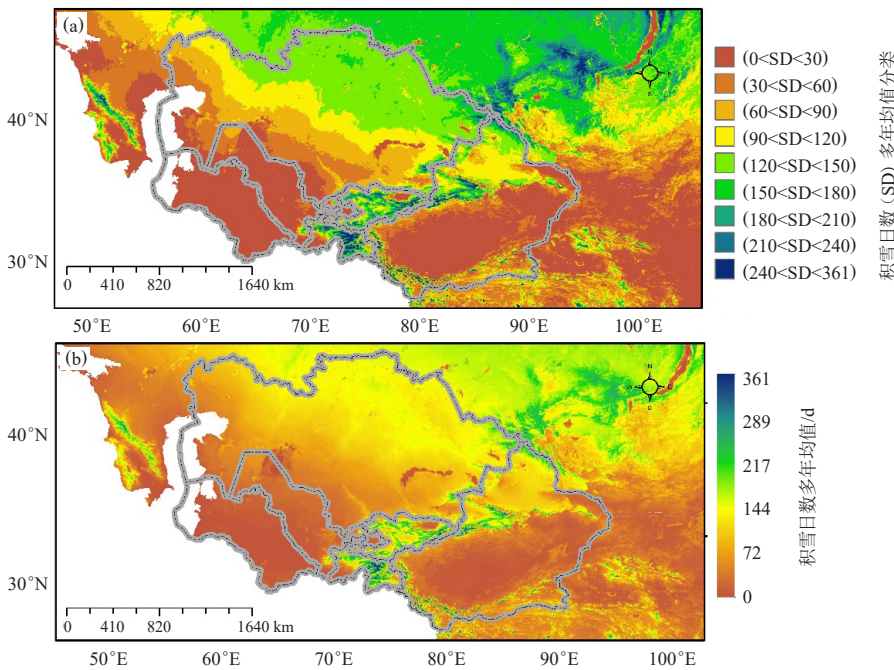


图2 新疆和中亚地区2000—2016年积雪日数年均值 (a) 及积雪日数分类 (b)
Fig. 2 Average number (a) and classification of days (b) with snow cover in Xinjiang and Central Asia from 2000 to 2016

流域等主要河流中下游平原地区为融雪型洪水易发区 (图1b)。近年来, 新疆融雪型洪水发生频次和强度明显增加, 春季融雪型洪水呈易发、高发、危害性加剧

雪型洪水形成关键因素, 结合遥感数据和地面观测及调查等非遥感专题数据反演雪冰盖度、积雪深度及融雪径流量等尤为重要, 对新疆和中亚融雪型洪水监测

等特征^[7-9]。中亚地区作为我国天气上游的关键区, 对我国西北及东部地区灾害性天气发生和区域气候变化具有重要影响。例如, 2010年3月, 哈萨克斯坦阿拉木图州突降特大雨雪, 发生融雪型洪水灾害, 导致哈国境内多处铁路和公路中断^[10], 同期新疆北部伊犁、塔城、阿勒泰等地也遭遇融雪型洪水袭击致130.5万人受灾。

融雪型洪水可分为高山冰川融水洪水和季节性积雪融水洪水^[6]。前者主要分布在高山地区, 主要发生在夏季 (6—8月); 与高空气温具有很好的相关性, 若遇较强高温天气过程, 高空0℃层高度迅速抬升, 高山积雪或冰川快速融化, 超过河流承载量便会产生洪水; 洪水过程中洪峰不高、呈一日一峰型。后者集中发生在春季 (3—5月), 与前期积雪量大小和气温密切相关。气温骤升、积雪快速融化是形成春季融雪型洪水的直接原因。与暴雨洪水相比季节性积雪融水洪峰不高但历时时间较长, 一般为4~5 d, 个别达10 d以上^[6]。土壤温湿度变化是融雪水径流产流机制和融雪洪水发生关键因子, 影响季节性冻土冻融过程, 进而影响融雪水下渗^[11]。季节性冻土存在条件下, 融雪水出流时间比没有季节性冻土要提前2 d^[12]。季节性融雪过程中, 积雪盖度、雪水当量、雪面温度、雪深、雪层含水率、雪孔隙率等积雪特征均发生变化^[9]。因此, 精细监测土壤含水量、冬季降雪量、春季土壤冻结状态、积雪融化率及温度、降雨量、风速等融

积雪日数 (SD) 多年均值分类

积雪日数多年均值/d

与预警研究将发挥重大数据支撑作用。

开展新疆和中亚融雪型洪水监测与预警研究具有重要意义。新疆水资源遥感、雪冰灾害监测领域取得一系列研究成果。房世峰^[13]在新疆天山北坡典型流域开展了基于“3S”的分布式融雪径流模型设计和应用研究,初步建立了分布式融雪径流模型。刘永强等^[14]开展了新疆融雪洪水预警DSS关键技术及实现方式研究,研发了基于C/S的融雪洪水预警决策支持系统。张璞等^[15]在新疆天山北坡玛纳斯河流域应用SRM(融雪径流模型)进行日径流量预报,引入中国气象局T213数值产品进行流域分带温度和降水预报,为融雪径流预报开辟了新数据的应用。

融雪型洪水较一般洪水在形成、监测和预警等方面具有一定的特殊性。现有研究主要针对新疆局部地区或典型流域融雪型洪水过程^[16-21]或新疆主要支流洪水过程和重大洪水灾害个例开展^[22-23],主要以统计结果表现融雪型洪水强度等历史分布特征。依赖灾情的统计分析,难以揭示洪水灾害形成变化的物理过程与机制,对于全面分析认知新疆融雪型洪水特征规律和定量揭示洪水过程发展演化的研究工作还存在不足。洪水灾害遥感监测研究仅限于某一地区或流域某一洪水期的监测和研究,基于长时间序列数据开展的区域融雪型洪水时空特征和预警研究较少。此外,中亚融雪型洪水灾害研究比较薄弱。因此,新疆和中亚地区融雪型洪水在监测和预警等方面还面临着严峻的挑战。

本研究综述了国内外融雪型洪水遥感监测预警研究进展,探讨了融雪型洪水监测遥感数据源及监测预警研究应用面临的挑战。总结了现有融雪型洪水监测模型或方法及其存在不足,以及研究应用面临的机遇。分析了融雪型洪水监测业务应用现状及存在问题,以目前开展的大量融雪洪水观测为突破,计划开展融雪型洪水观测试验,为新疆和中亚地区融雪型洪水监测预警提出研究和业务发展建议,努力做到监测精密、预报精准、服务精细,进一步加强新疆和中亚地区融雪型洪水监测预警科技支撑能力,切实发挥气象防灾减灾“第一道防线”作用。

1 国内外融雪型洪水监测预警研究进展

1.1 融雪型洪水遥感监测、数据源及差异

融雪型洪水呈突发性、持续时间短、灾害风险加剧、损失加重等特点。新疆和中亚地形复杂,高山、沙漠、戈壁等广泛分布,气象测站稀少,常规监测手段容易漏测或难以获取灾害信息。遥感信息是国家灾害风险防范和灾情评估工作开展的重要基础信息^[24]。

利用遥感信息快速从混合型遥感电磁波信息中获取淹没范围、历时及淹没水深等信息,是进行宏观尺度洪涝灾情分析的基础性工作^[25],也是新疆和中亚地区融雪型洪水灾害监测精度得以提高的技术关键。

洪涝遥感监测应用始于1972年,由NASA Landsat-1搭载多光谱扫描仪MSS影像数据应用洪水淹没范围制图^[26]。MSS数据多次用于美国爱荷华州、亚利桑那、弗吉尼亚及密西西比河洪水淹没范围制图^[27]。之后Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM+在洪水淹没范围分析中显示出巨大优势^[28-30]。NOAA/AVHRR、EOS/MODIS、FY-3A/MERSI等时间分辨率相对较高的遥感数据在洪水灾害研究中也广泛采用^[31-38]。中巴地球资源卫星(CBERS)、法国SPOT等空间分辨率相对较高的遥感数据应用于洪灾发生前土地利用信息提取,进行洪涝监测背景数据分析^[38-39]。但是,受遥感数据时间、空间分辨率影响,单一遥感数据源很难实现洪涝灾害有效监测^[40]。从空间分辨率角度看,大尺度洪涝灾害需要大幅宽、中低分辨率遥感观测能力,而由其引起的房屋、道路等承灾体损毁,更加需要米级甚至亚米级空间辨识能力进行精细化评估。近年来,随着中国航天事业的快速发展,国产高分辨率遥感卫星也得到了快速发展,一批高分遥感卫星陆续升空,推动了国内遥感行业的蓬勃发展。高分遥感影像以其突出的高空间分辨能力,可以实现精细对地观测,获取地物目标的几何结构、纹理大小、空间布局等特征信息,为解译分析提供了良好的条件和基础^[41-42]。高分数据将是融雪型洪水灾害定量遥感监测向小尺度、精细化发展的基础。

如何充分利用高分卫星数据的高空间分辨率、高时间分辨率的“绝对”优势,成为积雪及融雪型洪水监测预警及防御研究的热点。中分辨率遥感卫星重访时间一般在1~7 d,高时效的遥感卫星少。因此,不同波段、极化方式的微波遥感卫星成为全天候灾害监测不可或缺的重要探测手段^[43]。ERS-1 SAR、ENVISA-1 ASAR等雷达卫星遥感影像具有不受天气影响及全天候监测的特点,适于恶劣天气及小区域灾情快速监测^[44-47]。SSM/I等微波遥感影像适合特大洪水和较恶劣环境条件的洪水监测^[48-49]。FY-3C/MWRI能够实现大气、海洋和陆地的全天时监测^[50],必将在洪水监测工作中发挥巨大作用^[51-52]。高空间、高时间、高光谱分辨率等新型卫星遥感数据的应用,将为新疆和中亚地区融雪型洪水遥感监测预警提供一个有利契机^[53-54]。

目前,无论是科学研究还是行业应用,都对大范

围高精度积雪遥感数据产生了巨大需求^[55]。卫星积雪遥感产品能客观反映大范围积雪覆盖状况和变化，尤其是在气象情报不足、气候条件恶劣的山区和牧区。表1给出国内外发展的一系列积雪产品制备算法及积雪产品数据集，将有望为新疆和中亚地区融雪型洪水遥感监测提供数据支撑^[56-65]。

表1 国内外发展的一系列积雪遥感产品及其参数
Table 1 A series of snow remote sensing products and their parameters at home and abroad

产品类型	卫星名称	传感器类型	空间分辨率	参考文献
光学遥感 积雪范围产品	NOAA	AVHRR	1100 m	[56]
	Suomi NPP	VIIRS	400 m	[57-58]
	EOS	MODIS	500 m	[59]
微波遥感雪深/ 雪水当量产品	Seasat-A & Nimbus	SMMR	25 km	[60-62]
	DMSP	SSM/I	25 km	
	Aqua	AMSR-E	25 km	[63]
	GCOM-W1	AMSR2	10 km	
	Aqua	AMSR-E	10 km	
	ESA	GlobSnow	25 km	
FY-3	MWRI	25 km	[65]	

1.2 融雪型洪水监测模型和方法及其差异

目前，可用于融雪型洪水监测的模型和方法主要有流域水文和水力学模型、指标综合模型、机器学习模型以及遥感定量监测模型。流域水文和水力学模型利用圣维南方程进行洪水演算来模拟淹没范围和淹没水深等要素^[66]。该模型的优点是计算精度高，缺点是需要高精度的地形、降水、水位数据。但对于山洪易爆发的山区小流域而言，水文气象观测站点稀缺、人工测量高分辨率地形数据成本高，流域尺度地形数据难以获取。这些数据因素限制了水文和水力学模型流域尺度和区域尺度应用^[67-68]。除此以外，冻土深度及土壤相变水量等信息大大影响了流域水文模型在冰雪水文模拟中的应用^[69]。

相对于流域水文和水力学模型难标定和区域尺度应用的局限性，指标综合模型可用于区域和流域尺度洪水强度特征、预测研究^[70-75]。该模型的优点是计算量小、计算效率高、速度快，缺点是它通过专家打分等对选取的降雨、高程、集水面积、河网和土地利用等指标进行综合，得到的综合指标存在很大的不确定性和区域特性，从而缺乏可比性和推广性。此外，指标综合模型不能解决评价指标和灾害风险水平的非线性关系，传统线性回归模型并不能精准预测目标值。

相对于指标综合模型在评价指标和灾害风险水平非线性关系方面的不足，机器学习算法有望为此带来突破。机器学习基于仿生学发展而来，通常由一系列数值算式和数学变换组成，通过计算机及程序实现其

功能，具备非线性和不确定性数据处理、预测和推广的能力^[76]。人工神经网络(ANN)、随机森林(RF)、K近邻法(KNN)、支持向量机(SVM)、梯度提升决策树(GBDT)和极端梯度提升(XGBoost)等机器学习算法已在水文预报领域取得丰硕成果^[77-81]。SVM在回归分析、模式识别、概率分布估计等方面表现出良好的性能，针对小样本，在有限信息条件下可获得较好的学习和推广能力。RF作为一种基于分类与回归树的机器学习算法适用于多变量预测，较好地解决了非线性问题。Wang等^[79]构建RF模型对江西省东江流域洪灾风险进行评价，指出RF具有较强数据挖掘能力。此外，伴随样本数据量的不断增加和数据的多元化，发展组合分类算法、进行单个学习器组合学习提高分类器的分类性能将在分类问题中显示出强大优势。其中，Stacking堆叠(元组合)作为一种多层的多模型集成学习技术，通过元分类器或元回归聚合多个分类或回归模型，在医学、计算机学科中得到很好的应用^[82-83]。Stacking模型融合策略可以较好地融合不同分类器与不同特征的学习能力，目的是最大限度地提高预测精度和通用性。

遥感定量监测模型是从遥感影像中快速获取淹没范围、历时及淹没水深等信息^[25]，重点需要解决多源遥感数据融合、排除云干扰、准确识别水体和精确提取灾情信息等问题^[24, 34]。目前，利用不同类型遥感数据已经发展了很多方法并制备了不同时空分辨率的地表水探测产品，为决策部门提供了大量淹没过程的实时信息^[84-89]。随着社会经济持续发展，灾害特征不断发生变化，洪涝灾害遥感监测与评估存在一些不足，如云层等因素影响、卫星遥感难以直接穿透水体测得水深等。因此，未来研究中要深化光学与微波数据的融合应用^[89-92]、运用遥感与地理信息系统技术，结合高分辨率遥感资料获取高精度DEM数据科学计算洪水水深，加强灾害遥感应用机理研究和评估方法研究，开发遥感区域水文模型，提高洪涝灾情数据的时效性和准确性，提升防灾减灾综合空间信息服务能力。

1.3 融雪型洪水业务应用现状及存在问题

近年来，许多国家利用空间技术建成“灾害预警系统”“数据收集平台”和应急终端等并将其广泛应用于洪涝信息的获取。美国地质调查局(USGS)开发早期预警系统(FEWS)，美国国家水文研究中心研发的大范围山洪早期预警系统(Flash Flood Guidance System)、中美洲山洪早期预警临界雨量指标系统(CAFFG)和洪水预报与管理综合业务系统(INFORM)，对洪水可能造成的灾害能够进行及时准

确的预测、发布警示信息。近年来我国加强了灾害遥感基础性标准的制定工作,构建了涵盖数据产品、信息产品和专题产品在内的灾害遥感分类分级产品体系。在应用系统研发与服务方面,开发了一批灾害风险预警、灾害遥感评估系统,大大提高了灾害遥感业务化水平^[24]。全国流域机构和省(区、市)水情部门共有26个单位先后建立了洪水预报系统。魏成阶等开发的“洪涝灾害遥感速报系统”在1998年全国特大洪涝灾害监测评估中得到成功应用^[93]。

新疆和中亚地区作为融雪型洪水的主要发生地区,由于洪水致灾因素、成灾环境条件复杂、地区差异大等因素影响,融雪型洪水灾害遥感监测结果不完整,遥感监测和地面监测间没有建立有机的内在联系;融雪型洪水灾害监测不系统,没有完整成熟的指标体系。新疆和中亚地区遥感监测系统应用功能水平还有待扩展和提高,亟待建立新疆和中亚地区融雪型洪水遥感监测业务运行系统,以便进一步提高评估的准确度和时效性。

新疆和中亚地区辽阔的地域、独特的地理景观给遥感技术提供了广阔的应用空间。生态与环境条件复杂、区域广阔、人烟稀少,又使遥感技术应用面临许多挑战。如何利用遥感技术,提取融雪型洪水发生区域土地利用、土壤含水量、植被组成、结构、覆盖度等下垫面参数,并在GIS支持下建立新疆和中亚地区空间数据库?如何监测和定量反演冻结时期土壤含水量、冬季降雪量、春季土壤冻结状态、早春时候由 $>0^{\circ}\text{C}$ 气温决定的积雪融化率及春季降雨量,这些对春季融雪洪峰具有直接、间接影响的因素以及影响路径等因子信息^[94]?结合高分多源遥感数据和地面观测、地面调查等非遥感专题数据反演雪冰盖度、积雪深度及融雪径流量尤为重要,精细监测温度、降水、风等融雪型洪水形成关键气象要素显得尤为重要。因此,科学系统的在中亚地区建立试验区开展融雪型洪水灾害监测与评估研究,可为遥感技术应用提供发展空间,也是生态环境研究新热点之一。

2 新疆融雪型洪水监测预警强化观测试验进展

2.1 观测现状

影响融雪洪水大小和频率的因素主要有积雪面积、雪深、雪密度、持水能力和雪面冻深、融雪的热量以及积雪场的地形、地貌、方位、气候和土地使用情况。春季融雪洪峰多发生于3—4月,气温和降水是影响春季融雪洪峰的两个重要因素。一是存在积雪并具有一定的储量,它是融雪洪水发生的前提。二是温

度,包括温度升高的时间、大流域尺度是否上下游温度同时急速升高,它是融雪洪水发生的有力推手。基于此,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所(以下简称“沙漠所”)在新疆北疆地区开展了大量积雪参数综合观测试验,在新疆北部和中亚典型流域陆续开展了观测基地建设(图3)。

2010年10月,沙漠所在新疆天山北麓玛纳斯河流域乌兰乌苏、早卡子和白杨沟安装了3套雪特性观测系统,实时测量不同下垫面、不同海拔梯度雪深、雪水当量、积雪密度和雪表面温度。积雪累积消融过程和辐射、降水、地形等因素有关。具有较强物理机制的物质和能量平衡模型是积雪过程模拟最有效、最精确的方法。图4为积雪能量模型对玛纳斯河流域2011年3月突发融雪型洪水过程中冰川消融量(SWIGM)、积雪消融量(SWISM)及降雨量(SWIR)的定量估算。2016年,沙漠所在吉尔吉斯斯坦建立了Kara-Batkak冰川气象站。2019年7月,沙漠所在塔吉克斯坦建立了Bardar冰川气象站。Kara-Batkak安装了固态降水观测仪用于观测降雪量、Bardar冰川气象站安装了SR50A-L超声雪深传感器用于雪深数据的自动观测采集。中亚冰川气象监测系统关注冰川末端空气温湿度、风向风速、大气压、雨量、雪深等气象参数变化,目前各设备运行正常,数据通过北斗卫星传输至新疆气象信息中心。

同期完成塔吉克斯坦库尔干丘别地区塔菲尼甘水文站主体建设和苦盖地区锡尔河水文站雷达观测长度调整,用于监测河流水位、流速变化、液态降水。锡尔河水文站通过雷达监测河流水位与流速2个参数,另外增加了雨量监测。这些观测数据拓展了中亚地区气象水文监测数据集,更重要的是可用于观测参数空间尺度变化分析、风云卫星等定量遥感产品的真实性检验、确定融雪洪水监测预警因子及其反演模型的构建和精度评估,以期将成果辐射至中亚地区,为产品算法精度改进或辅助开发新算法提供信息支撑,满足“一带一路”防灾减灾服务需求。

2.2 观测计划

基于现有气象业务观测网在新疆北部阿尔泰山“两河流域”(特指额尔齐斯流域上游地区和乌伦古河流域)开展“融雪型洪水监测预警综合观测试验”计划,拟以阿勒泰气象站为核心,沿额尔齐斯河五条北向支流深入山区开展断面布网观测积雪。目前,在克兰河流域初步建成了基础观测网,包括8个区域观测站,其中3个站点安装了常规六参数自动气象站、DSS1雪深观测仪和称重式雨雪量计,其他5个站点仅

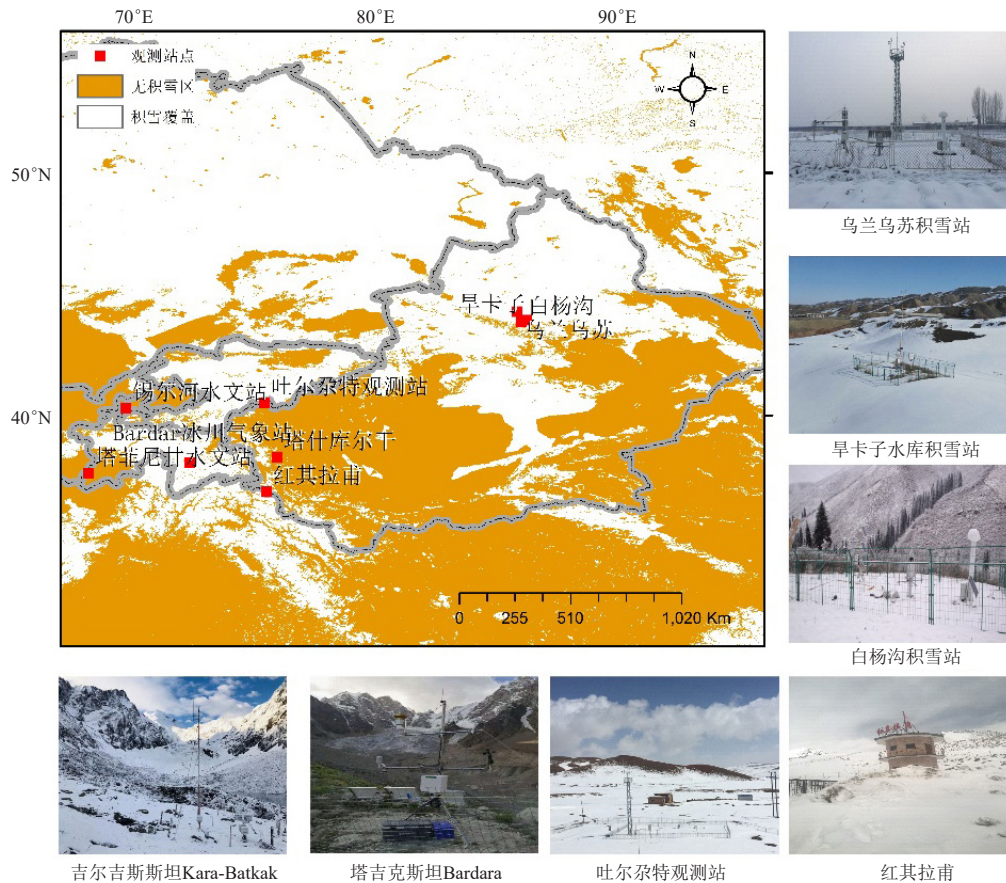


图3 玛纳斯河流域、昆仑山脉、中亚地区强化观测试验基地位置示意图及场地照片

Fig. 3 Location and photos of the strengthened observation test base in Manas River Basin, Kunlun Mountains and Central Asia

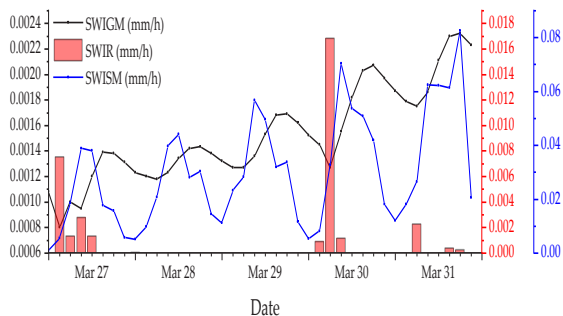


图4 2011年3月27—31日融雪型洪水过程3小时SWISM、SWIR和SWIGM时间序列

Fig. 4 Time series of the 3 h SWISM, SWIR and SWIGM from 27 to 31 March 2011

有风向、风速、气温、气压、降水、相对湿度6要素观测(图5)。为增强卫星遥感产品区域应用与验证分析工作,需增设GMON伽马射线雪水当量观测系统、冻土温湿度传感器、CNR4四分量辐射传感器和红外雪面温度传感器、FlowCapt风吹雪传感器等设备,综合开展气温、降水、雪面温度、雪深、雪水当量、冻土湿度和四分量辐射等要素的精细化连续观测,以

实现风云卫星陆表积雪产品验证、融雪型洪水预警模型构建基础数据实时采集,建立观测数据共享平台,及时掌握山区降雪、积雪状况,有效防范地区融雪型洪水,提高防灾减灾效益。

3 讨论与建议

全球变暖背景下气象灾害时空分布特征正发生重大变化,生态环境相对脆弱的中亚地区气象防灾减灾形势日趋严峻。为适应国家发展战略和安全战略新要求,有必要通过实施各类科学计划,完善中亚地区气象综合观测体系,提高中亚地区气象灾害监测、预警和服务能力。提出以下三点研究和业务发展建议:

1) 加强重点区域科学布站组网,提升中亚和新疆灾害性天气精细化监测、机理研究和预警服务能力。新疆和中亚地区地形复杂,山区、乡镇气象水文观测稀缺,人工观测、遥感监测、模型预测能力均有不同程度的限制。逐步恢复中亚地区气象探测站网,在中亚高寒山区建设气象环境监测站,开展中亚山地气象环境综合观测试验,逐步完善和获取各类观测数据,特别是高寒山区气象环境监测数据,验证和改进相关

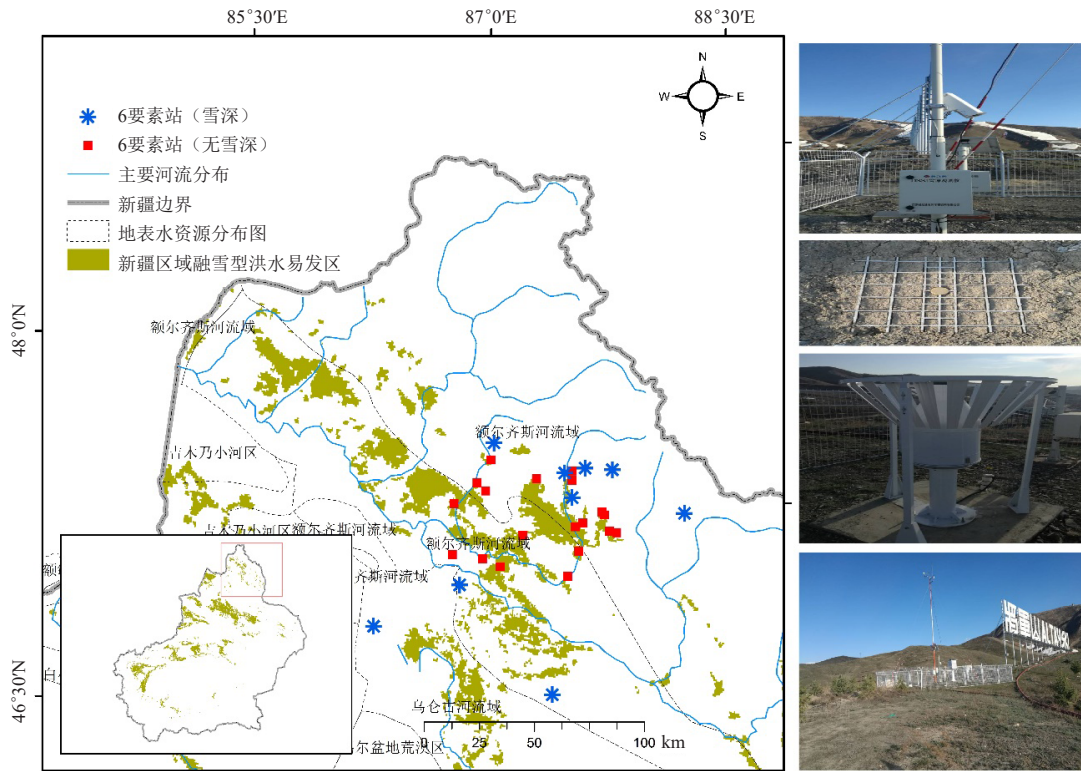


图5 额尔齐斯河流域(境内)观测试验计划
Fig. 5 Ertys River Basin in China observation plan

遥感产品以对融雪洪水监测预警提供数据支撑。推进重点区域科学布站组网建设步伐,促进地面与遥感观测有效结合,掌握融雪洪水过程中积雪参数、地表变化等特征,为构建融雪洪水监测预警模型和提升遥感产品监测应用能力提供技术支撑。

2) 加强高分系列卫星应用,推动中亚和新疆灾害遥感从研究应用型向业务服务型转变。目前,我国已基本建成“环境与灾害监测预报小卫星星座”“风云”“海洋”“资源”等卫星系列,以高分系列卫星为代表的新一代新型遥感卫星正加速发展。GF-1卫星突破了高空间分辨率、多光谱与高时间分辨率结合的光学遥感技术,实现在同一颗卫星上高分辨率和宽幅成像能力结合,有效地解决了空间分辨率和时间分辨率的矛盾,在国土资源调查、灾害监测、精准农业等方面发挥重要作用^[95]。结合其他高分多源遥感数据和地面观测、地面调查等非遥感专题数据,将在新疆和中亚地区融雪型洪水监测预警中发挥重要作用。

3) 构建多尺度、多维、及时更新的中亚生态环境数据库,推进中亚和新疆融雪型洪水监测预警系统建设。推进整合新疆和中亚地区现有多源遥感数据、相关地面数据,构建多尺度、多维、及时更新的中亚生态环境数据库;加强灾害遥感应用机理研究、灾害监

测评估方法研究,开发一套时效性强、监测范围和对象比较广、精度相对较高、地面常规监测与空间遥感监测相结合的立体融雪型洪水监测预警系统,在灾害发生过程中及成灾后,及时将灾害发生、发展、结束及影响程度等信息向有关单位和部门和公众传递,以便采取有效对策和防范措施。

参考文献

- [1] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [2] 鲜丽菊, 穆振侠, 姜卉芳, 等. 塔吉克斯坦近31年气候要素时空变化特征分析. *水资源与水工程学报*, 2015(2): 44-50.
- [3] Li Z, Chen Y, Fang G, et al. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1316.
- [4] Hagg W, Braun L, Weber M, et al. Runoff modelling in glacierized Central Asian catchments for present-day and future climate. *Hydrology Research*, 2006, 37(2): 93-105.
- [5] Sun Y H, Zhang T J, Liu Y J, et al. Assessing snow phenology over the large part of Eurasia using satellite observations from 2000 to 2016. *Remote Sensing*, 2020, 12: 2060.
- [6] 温克刚, 等. 中国气象灾害大典(新疆卷). 北京: 气象出版社, 2006.
- [7] Fang S F, Pei H, Liu Z H, et al. Study on snowmelt flood forecasting based on 3S technologies and DSS. *Geoinformatics & Joint Conference on GIS & Built Environment: Monitoring & Assessment of Natural Resources & Environments*. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [8] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应 I: 水文效应. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 5-19.
- [9] 杨金明, 李诚志, 房世峰, 等. 新疆地区季节性融雪洪水模拟与预报研究. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(1): 80-88.

- [10] 李东, 童云. 天气影响阿拉山口通关. 中亚信息, 2010, (3): 25.
- [11] 贺青山, 刘志辉, 魏召才. 基于水热平衡的融雪过程研究. 新疆大学学报(自然科学版), 2012, 29(2): 132-136.
- [12] 魏天锋, 刘志辉, 王元. 积雪覆盖下的季节性冻土对融雪水出流的影响. 干旱区研究, 2015, 32(3): 435-441.
- [13] 房世峰. 基于“3S”技术的分布式融雪径流模型的设计和应用. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007.
- [14] 刘永强, 刘志辉. 新疆融雪洪水预警决策支持系统研究. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 110-113.
- [15] 张璞, 王建, 刘艳, 等. SRM模型在玛纳斯河流域春季洪水预警中的应用研究. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 456-461.
- [16] 姜逢清. 20世纪下半叶新疆洪水灾害的新趋向. 灾害学, 2004, 19(2): 29-35.
- [17] 董玉文, 胡江, 杨胜发. 新疆洪水成因及特性分析. 重庆交通学院学报, 2004, 23(2): 118-122.
- [18] 陆智, 刘志辉, 闫彦. 新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究. 水土保持研究, 2007, 14(6): 256-261.
- [19] 田华, 杨晓丹, 张国平, 等. 2009年3月中旬新疆融雪型洪水气象成因分析. 气象, 2011, 37(5): 590-598.
- [20] 阿不力米提江·阿不力克木, 陈春艳, 玉素甫·阿不都拉, 等. 2001—2012年新疆融雪型洪水时空分布特征. 冰川冻土, 2015, 37(1): 226-232.
- [21] Yang S Q, He H X, Chen W T, et al. Direct tangible damage assessment for regional snowmelt flood disasters with HJ-1 and HR satellite images: a case study of the Altay region, northern Xinjiang, China. Natural Hazards, 2018, 94(3): 1099-1116.
- [22] 隗经斌. 新疆军塘湖河典型融雪洪水过程研究. 冰川冻土, 2006, 28(4): 530-534.
- [23] 张俊兰. 2011年4月下旬托什干河融雪洪水的气象成因. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(4): 1-6.
- [24] 范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 1170-1184.
- [25] 李加林, 曹罗丹, 浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述. 水利学报, 2014, 4(3): 253-260.
- [26] Deutsch M, Ruggles F. Optical data processing and projected applications of the erts-1 imagery covering the 1973 Mississippi River Valley floods. Journal of the American Water Resources Association, 1974, 10(5): 1023-1039.
- [27] Wiesnet D R, Deutsch M. Flood monitoring in South America from the Landsat NOAA and nimbus satellites. Advances in Space Research, 1987, 7(3): 77-84.
- [28] Wang Y. Using Landsat 7 TM data acquired days after a flood event to delineate the maximum flood extent on a coastal floodplain. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(5): 959-974.
- [29] Volpi M, Petropoulos G P, Kanevski M. Flooding extent cartography with Landsat TM imagery and regularized kernel Fisher's discriminant analysis. Computers and Geosciences, 2013, 57: 24-31.
- [30] Gareth I, Michele V, George P. Examining the Capability of Supervised Machine Learning Classifiers in Extracting Flooded Areas from Landsat TM Imagery: a case study from a Mediterranean flood. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3372-3399.
- [31] Rango A. Spaceborne remote sensing for snow hydrology applications. Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques, 1996, 41(4): 477-494.
- [32] Rango A. The response of areal snow cover to climate change in a snowmelt-runoff model. Annals of Glaciology, 1997, 25: 232-236.
- [33] Nyborg L, andholt I. NOAA-AVHRR based flood monitoring. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 4: 1696-1698.
- [34] Sheng Y, Gong P, Xiao Q. Quantitative dynamic flood monitoring with NOAA AVHRR. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(9): 1709-1724.
- [35] Senthilnath J, Bajpai S, Omkar S N, et al. An approach to multi-temporal Modis images analysis using image classification and segmentation. Advances in Space Research, 2012, 50(9): 1274-1287.
- [36] 郭立峰, 殷世平, 许佳琦, 等. 基于FY-3A/MERSI的2013年夏秋间松花江和黑龙江干流洪水遥感监测分析. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 77-84.
- [37] Ahamed A, Bolten J D. A MODIS-based automated flood monitoring system for Southeast Asia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 61: 104-117.
- [38] Tømmervik H, HøGda K A, Solheim I. Monitoring vegetation changes in Pasvik (Norway) and Pechenga in Kola Peninsula (Russia) using multitemporal Landsat MSS/TM data. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3): 370-388.
- [39] 王嘉芾, 刘婷, 俞志强, 等. 基于COSMO-SkyMed和SPOT-5的城镇洪水淹没信息快速提取研究. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 564-571.
- [40] Papa F, Prigent C, Rossow W B. Monitoring Flood and Discharge Variations in the Large Siberian Rivers From a Multi-Satellite Technique. Surveys in Geophysics, 2008, 29(4-5): 297-317.
- [41] 杨红卫, 童小华. 中高分辨率遥感影像在农业中的应用现状. 农业工程学报, 2012, 28 (24): 138-149.
- [42] 吴玮, 秦其明, 范一大, 等. 高分四号卫星减灾应用在轨测试设计与评价. 航天器工程, 2016, 25(z1): 181-185.
- [43] Kouraev A V, Zakharova E A, Samain O, et al. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992-2002). Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1-2): 238-245.
- [44] Smith L C, Isacks B L, Forster R R, et al. Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS 1 synthetic aperture radar: First Results. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1325-1329.
- [45] Tholey N, Clandillon S, Fraipont P D. The contribution of spaceborne Sar and optical data in monitoring flood events: examples in northern and southern France. Hydrological Processes, 1997, 11(10): 1409-1413.
- [46] Mallinis G, Gitas I Z, Giannakopoulos V, et al. An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. International Journal of Digital Earth, 2013, 6: 1-13.
- [47] Claudia K, Huadong Guo, Juliane H, et al. Flood mapping and flood dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses. Remote sensing, 2013, 5(2): 687-715.
- [48] Tanaka M, Sugimura T S, Tamai, et al. Flood-drought cycle of Tonle Sap and Mekong Delta area observed by DMS-SSM/I. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (7): 1487-1504.
- [49] 钟仕全, 莫建飞, 罗永明, 等. 基于GF-1遥感数据监测的岩溶洼地洪涝灾害特征分析. 气象研究与应用, 2016, 1: 83-87.
- [50] 吴琼, 窦芳丽, 郭杨, 等. FY-3C微波成像仪海上大气可降水产品质量检验. 气象, 2020, 46(1): 73-79.
- [51] 中国气象局. 风云三号松嫩流域洪涝水体监测. (2013-08-21). http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxw/201308/t20130821_223866.html.
- [52] 中国气象局. 风云气象卫星监测伊朗西南部法尔斯省等地洪涝灾害. (2009-03-28). http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xtpxw/201903/t20190328_519081.html.
- [53] 黄鹤声. 结合高分辨率遥感影像进行洪水水文监测研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [54] 张磊. 高分四号卫星在洪泽湖汛期水体范围变化监测中的应用. 航天器工程, 2018, 2(2): 129-134.
- [55] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题. 气候变化研究进展, 2009, (4): 187-195.
- [56] Chen X, Long D, Liang S, et al. Developing a composite daily snow cover extent record over the Tibetan Plateau from 1981 to 2016 using multisource data. Remote Sensing of Environment, 2018, 215: 284-299.
- [57] Hutchison K D, Iisager B D, Mahoney R L. Enhanced snow and ice identification with the UIIRS cloud mask algorithm. Remote Sensing Letters, 2013, 4(9): 929-936.
- [58] 夏浪, 毛克彪, 孙知文, 等. 针对NPP VIIRS数据的云检测方法研究. 中国环境科学, 2014, 34(3): 574-580.
- [59] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 181-194.
- [60] 车涛, 戴礼云. 中国雪深长时间序列数据集 (1978-2012). 寒区旱区科学数据中心, 2011. <https://doi.org/10.3972/westdc.001.2014.db>.
- [61] Biancamaria S, Mognard N M, Boone A, et al. A satellite snow depth

- multi-year average derived from SSM/I for the high latitude regions. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2557-2568.
- [62] Dai L Y, Che T, Wang J, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSRE data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 127: 14-29.
- [63] Imaoka K, Kachi M, Kasahara M, et al. Instrument performance and calibration of AMSR- and AMSR2. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Special Information Science*, 2010, 38(Part 8).
- [64] Metsämäki S, Pulliainen J, Slininen M, et al. Introduction to GlobSnow Snow Extent products with considerations for accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 96-108.
- [65] Jiang L M, Wang P, Zhang LX, et al. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China. *Science China Earth Science*, 2014, 57(6): 1278-1292.
- [66] Te Chow V. *Applied hydrology*. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- [67] 姜智怀, 巩志宇, 李婷, 等. 基于降水时空分布情景模拟的暴雨洪涝致灾危险性评价. *暴雨灾害*, 2016, 35(5): 464-470.
- [68] Löwe, R, Urich C, Domingo N S, et al. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations—a new generation of urban planning tools. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 355-367.
- [69] Swenson S C, Lawrence D M, Lee H. Improved simulation of the terrestrial hydrological cycle in permafrost regions by the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(3): 1942-2966.
- [70] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于GIS的洪水灾害风险区划研究. *地理学报*, 2000, 1: 17-26.
- [71] 黄诗峰, 徐美, 陈德清. GIS支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用. *自然灾害学报*, 2001, 4: 129-132.
- [72] 闫彦, 刘志辉, 叶朝霞, 等. 新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证. *干旱区地理*, 2009, 32(4): 552-557.
- [73] 潘安定, 刘会平, 陈碧珊, 等. 广州市洪水灾害危险性评价初步研究. *自然灾害学报*, 2010, 4: 23-28.
- [74] Ntajal J, Lamptey B L, Mahamadou I B, et al. Flood disaster risk mapping in the lower Mono River Basin in Togo, West Africa. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 23: 93-103.
- [75] Patrikaki O, Kazakis N, Kougiass L, et al. Assessing flood hazard at river basin scale with an index-based approach: the case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 2018, 8: 2076-3263.
- [76] 阚光远, 洪阳, 梁珂. 基于耦合机器学习模型的洪水预报研究. *中国农村水利水电*, 2018, 10: 165-169, 176.
- [77] Abraham R J, Anctil F, Coulibaly P, et al. Two decades of anarchy? emerging themes and outstanding challenges for neural network modelling of surface hydrology. *Progress in Physical Geography*, 2012, 36(4): 480-513.
- [78] Kan G Y, Yao C, Li Q L, et al. Improving event-based rainfall-runoff simulation using an ensemble artificial neural network based hybrid data-driven model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29: 1345-1370.
- [79] Wang Z, Lai C, Chen X, et al. Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 2015, 27: 1130-1141.
- [80] Mojaddadi H, Pradhan B, Nampak H, et al. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2017, 8(2): 1080-1102.
- [81] Babaei M, Moeini R, Ehsanzadeh E. Artificial neural network and support vector machine models for inflow prediction of dam reservoir (Case Study: Zayandehroud Dam Reservoir). *Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA)*, 2019, 33(6): 2203-2218.
- [82] 周星, 丁立新, 万润泽, 等. 分类集成算法研究. *武汉大学报(理学版)*, 2015, 61(6): 503-508.
- [83] Wolpert D H. *Stacked generalization*. Boston: Springer, 2017: 6-10.
- [84] Yamazaki D, Trigg MA, Ikeshima D. Development of a global ~90m water body map using multi-temporal Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 337-351.
- [85] Sakamoto T, Nguyen N V, Kotera A, et al. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 295-313.
- [86] Ogilvie A, Belaud G, Delenne C, et al. Decadal monitoring of the Niger Inner Delta flood dynamics using MODIS optical data. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 368-383.
- [87] Lim JB, Lee K S. Investigating flood susceptible areas in inaccessible regions using remote sensing and geographic information systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189: 1-13.
- [88] Mohammadi A, Costelloe J F, Ryu D. Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 70-82.
- [89] Dao P D, Mong N T, Chan H P. Landsat-MODIS image fusion and object-based image analysis for observing flood inundation in a heterogeneous vegetated scene. *GIScience and Remote Sensing*, 2019, 56(8): 1148-1169.
- [90] Prigent C, Papa F, Aires F, et al. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D12107.
- [91] Papa F, Prigent C, Rossow W B. Ob' River flood inundations from satellite observations: a relationship with winter snow parameters and river runoff. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112, <https://doi.org/10.1029/2007JD008451>.
- [92] Mallinis G, Gitas I Z, Giannakopoulos V, et al. An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6: 1-13.
- [93] 魏成阶, 王世新. 1998年全国洪涝灾害遥感监测评估的主要成果——基于网络的洪涝灾情遥感速报系统的应用. *自然灾害学报*, 2000, 9(2): 16-25.
- [94] Li L, Simonovic S P, et al. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. *Hydrological Processes*, 2010, 16(13): 2645-2666.
- [95] 中国资源卫星应用中心. 高分一号. (2014-01-06). <http://www.cresda.com/n16/n1130/n188475/188494.html>.