

文章编号:1672-3031(2018)05-0451-07

水旱灾害遥感监测技术及应用研究进展

杨 昆^{1, 2, 3}, 黄诗峰^{1, 2, 3}, 辛景峰^{1, 2, 3}, 马建威^{1, 2, 3}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部遥感技术应用中心, 北京 100038;

3. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 水旱灾害监测是遥感水利应用开展最早的领域之一。水利部遥感技术应用中心自1980年代开始开展防汛遥感试验, 1990年代开展旱情遥感监测方法研究。经过近40年不懈探索, 逐步解决了软件、数据、模型与方法等问题, 建立了水旱灾害遥感监测系统, 初步实现了水旱灾害遥感监测业务化。本文对遥感中心水旱灾害监测技术研究进行了回顾, 并对水旱灾害遥感监测研究进行了展望。

关键词: 水旱灾害; 遥感监测; 研究进展

中图分类号: TP79; S761.1

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.014

1 引言

1980年, 水利部遥感技术应用中心(以下简称“中心”)的建立是我国水利遥感拉开序幕的标志。我国洪涝灾害频繁, 洪涝灾害监测也是我国最早开展水利遥感的领域之一。1987年中心会同中国科学院、国家测绘局、国家气象局在永定河下游、黄河下游、长江荆江段、洞庭湖区、淮河干流开展了“防汛遥感应用实验”, 相关研究成果在1991年中国东部特大洪水监测中发挥了显著作用。由于灾害监测的时效性要求很高, 中心在“八五”和“九五”期间又会同中国科学院、国家遥感中心航空遥感一部等单位成功研制了“航空遥感实时传输系统”, 可准实时地滚动显示和打印洪涝遥感图像。该成果被列为“八五”科技攻关十大世界领先成果, 在1994、1995、1998、2003年的特大洪水监测中都发挥了重大作用^[1]。1990年代中期至2010年, 随着遥感技术发展, 水利遥感应用领域进一步扩展, 旱情遥感监测逐步开展。在“九五”科技攻关“旱灾监测与评估业务运行系统的建立与试运行”专题研究中, 分析研究了多种干旱宏观监测方法, 建立了基于NOAA/AVHRR数据的旱情遥感监测系统。基于NOAA/AVHRR和MODIS等数据, 对我国境内发生的重大干旱进行了遥感动态监测。2010年至今, 随着高分重大专项实施, 水利遥感朝着业务化应用方向发展, 水旱灾害遥感监测遥感应用初步实现业务化。每年汛期, 依托GF-3、RadarSat-2、COSMO-SkyMed等多种雷达卫星和GF1、GF2、BJ2等光学卫星等多源遥感数据, 可在1~3d对境内洪涝灾害开展应急监测, 并将监测结果及时上报国家防办。在干旱监测方面, 中心依托国家防汛抗旱指挥系统二期工程, 开展水利部旱情遥感监测系统建设, 目前实现了全国每旬一期旱情遥感监测图, 监测成果进入中央抗旱业务系统, 为抗旱工作提供科学的数据支持。

2 水旱灾害遥感监测研究进展

2.1 洪涝灾害遥感监测技术研究进展 遥感技术对于重大自然灾害的监测与评估具有特殊的优势和潜力, 尤其是对洪涝灾害的监测评估。利用遥感监测评估洪涝灾害在我国已有较长历史, 走在了其它遥感技术应用的前头, 为防洪减灾决策提供了有力技术支持。

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 中国水科院科研专项(JZ0145B1042017, JZ0145C122018)

作者简介: 杨昆(1969-), 男, 湖北荆州人, 教授级高级工程师, 主要从事防洪抗旱研究。E-mail: yangkun@iwhr.com

2.1.1 1980年代的防洪遥感试验 早在1983年,中心就用地球资源卫星的TM影像调查了发生在三江平原挠力河的洪水,成功地获取了受淹面积和河道变化的信息。1984年和1985年,用极轨气象卫星分别调查了发生在淮河和辽河的洪水。1987—1990年,在国家科委组织下,水利部、中国科学院、国家测绘局、国家气象局和国家遥感中心航空遥感一部等众多部门和单位合作,先后在永定河下游、黄河下游、长江荆江河段和洞庭湖区以及淮河干流,开展了大规模的防洪遥感应用试验。基于该试验,在我国首次建立了全天候和准实时监测洪水的遥感系统,使国家防汛指挥部门在远离洪水几百公里甚至几千公里之外的指挥部里就可及时了解洪水的现场情况^[2-3]。

1991年东部地区发生特大洪涝灾害时,利用该系统曾对太湖流域、淮河流域、滁河—巢湖流域以及武汉地区的洪水进行了监测,其中太湖流域与淮河流域的洪水图像还进行了准实时传输,对淮河流域、太湖流域、滁河—巢湖流域以及安徽、江苏、湖北三省的受灾面积进行了评估^[4]。雷达洪水图像准实时传输到水利部,用于国家防总召开的抗洪救灾会商,发挥了重大作用,效果显著,受到国务院领导和国家防汛指挥部的高度评价和国内外同行的广泛重视。该成果获得国家科技进步一等奖。

2.1.2 1990年代全天候实时航空遥感系统的研制 继防汛遥感应用试验之后,国家“八五”重大科技攻关和“863高技术”计划又共同支持了全天候实时航空遥感系统的研制。该项目由国家科委、水利部、中科院和国家遥感中心航空遥感一部等4个部门共同组织,1991年4月启动,1996年4月通过国家验收和鉴定。

该系统的总体设计采用机—星—地模式,由航空遥感平台分系统、雷达实时成像分系统、航空卫星通信分系统以及地面图像信息处理分系统几部分组成,实现了全天候工作、图像实时(秒级)传输、应用机动灵活、覆盖面积大以及灾情评估等5大功能。该系统在研制期间和研制成功后,于1994—1996年的汛期连续3年先后对广东、广西、江西、湖南、湖北、辽宁、河北7省区的洪水进行了实时监测,发挥了重大作用^[5]。项目成果被列为我国“八五”攻关十大世界领先水平项目的第一名。

在该项目基础上,“九五”期间,通过进一步的科技攻关,将雷达图像实时传输分辨率由6 m提高到3 m,并且在数据实时压缩、GPS数据与雷达数据的实时复合与传输、系统可靠性及工程化方面做了许多改进。2003年10月,航空遥感实时传输系统工程化与试运行成果获得中国水科院2000年度科技进步应用一等奖,2003年又获得大禹水利科学技术三等奖。

2.1.3 重大自然灾害监测评估业务运行系统的建立 “九五”期间,科技部在16个国家重中之重科技攻关项目之一的“遥感、地理信息系统、全球定位系统综合应用研究”中,列入“重大自然灾害监测与评估业务运行系统的建立”课题,将“水、旱灾害监测与评估业务运行系统的建立与试运行”作为一个专题。该专题按业务化和实用化的要求,对水旱灾害监测与评估中仍未解决的关键技术继续进行科技攻关,主要目标为建立一套的洪涝灾害监测与评估技术规程,使决策指挥调度、监测与评估的技术流程、数据管理、以及产品与成果的编制、输出和传输等更加标准,令决策、指挥、管理和运行更加科学和规范。

通过攻关研究,解决了星载和机载洪涝灾害遥感监测的系统集成关键技术,实现了软硬件、模型和方法以及数据的集成,建成了一个可业务化运行的集成系统。系统于1999年4月初步建成,并在1998、1999年及2000年开展了业务化试运行,为国家防汛抗旱总指挥部以及通过国家遥感中心向国务院办公厅秘书局提供了大量监测服务。1998年,在系统集成工作尚还未完成时就执行了9次监测任务,大多在36 h内完成任务,1999年4月系统集成之后,处理速度进一步提高,高分辨率卫星监测评估执行时间均不超过24 h,而用机载SAR的也缩短到36 h。2000年随着基础资料条件的完善,高分辨率卫星监测评估全部在12 h以内完成^[6]。

洪涝灾害监测评估集成系统成果2001年被评为“九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果,并获得中国水科院2000年度科技进步应用一等奖以及2003年度水利部大禹水利科学技术三等奖。

2.1.4 洪涝灾害监测预报与灾情评估技术 2002年2月至2004年8月,中心承担国家科技部公益研究专项“洪涝灾害监测、预报与风险管理系统研究”。系统地分析和研究了洪涝灾害的遥感监测技术,对基于SAR数据的快速纠正和洪涝水体的自动提取技术进行了研究。在利用Radarsat数据对

2003年淮河流域洪水进行遥感监测的应用中,为淮河流域防洪减灾决策提供了重要的参考。探讨了遥感与GIS在分布式流域水文模型中的应用,以淮河流域为例,建立了水文学与水力学相结合的洪水预报模型,并利用遥感技术获取了模型中的部分参数,模型的预报精度达到了防汛指挥调度的要求。全面、深入地探讨了基于遥感与GIS的洪涝灾害损失评估技术方法,重点研究了洪涝水体空间分布信息的获取与计算方法、社会经济数据的空间展布、洪灾损失率的确定与计算方法等。在上述研究的基础上,建立了基于GIS空间信息格网的洪涝灾害损失评估模型,并通过2003淮河流域洪水蓄洪区的洪灾损失评估验证了损失评估模型的可行性。该成果2004年获中国水科院科技进步一等奖,2005年获水利部大禹科技进步二等奖。

2.1.5 高分水利遥感应用示范系统(一期)—洪涝灾害监测 2013—2015年,依托高分水利遥感应用示范系统(一期)—水旱灾害监测子系统科研和示范应用项目,开展了针对我国自主高分系列卫星数据的洪涝灾害监测研究。该项目重点针对GF-3号卫星SAR影像特点,研发单极化SAR、双极化SAR和全极化SAR数据的水体自动提取方法;利用DEM等数据,研究影像山体阴影剔除方法,从而提高了洪涝灾害水体提取的精度^[7];在多时相洪水遥感监测基础上,基于改进变分水平集方法,量化反演洪水淹没历时,实现具有时空一致性的洪涝淹没历时专题图制作。

2.2 旱情遥感监测技术研究进展 干旱现象比较复杂,其遥感监测不像洪涝监测那样直接简单,但遥感技术以其宏观、快速、动态、经济等特点,是干旱监测研究的有效重要手段。

中心于1990年代初,在河南、山东和吉林就开始了旱情遥感监测的试验研究,利用ERS、JERS以及机载SAR图像在山东莱阳、招远等地进行三同步土壤水分监测试验研究。在“九五”科技攻关“旱灾监测与评估业务运行系统的建立与试运行”专题研究中,分析研究了多种干旱宏观监测方法,建立了基于NOAA/AVHRR数据的旱情遥感监测系统。

2001年起,中心承担了国家社会公益研究专项资金项目“旱情遥感监测实用方法与业务化实验研究”,在系统分析当前国内外干旱遥感监测研究现状及其发展趋势的基础上,探讨了现有模型方法的优势与不足,提出了改进的旱情遥感监测模型^[8-10]。通过在黑龙江省进行的试验研究,建立了旱情遥感监测信息系统以及基于新安江水文模型的墒情预报系统和网络信息发布系统。该项成果在理论方法以及系统集成方面具有突破和创新,获2004年度中国水科院科技进步应用二等奖。

从2003年开始,承担了科技基础性工作与社会公益研究专项“水旱灾害遥感监测预警技术体系研究与建立”项目。重点对旱情遥感监测模型的开发、旱灾评估方法、旱情预测与预警方法等进行了研究^[11]。建立了不同旱情遥感监测数据的预处理和处理方法,提出了夜间遥感图像云识别的新方法,并开发了基于BP神经网络和基于水量平衡的土壤墒情预报模型,建立了基于上述模型的土壤墒情预报方案。该项研究获2008年度中国水科院科技进步应用一等奖。

2006年起先后完成了科技部社会公益研究专项“官厅密云水源地安全遥感监测与评估”、水利部公益性行业科研专项“灾难性洪旱回溯模拟及对策评估关键技术研究”、863计划课题“面向服务的区域河流遥感监测关键技术”等研究任务,对水体面积提取、地表参数反演^[12-14]、历史旱情模拟等方法进行了深入研究,为干旱指数计算、旱情监测模型研制奠定了基础。

2013年承担了“高分水利遥感应用示范系统(一期)—水旱灾害监测”等高分辨率对地观测系统重大专项,对土壤含水量反演、旱情监测产品制作等进行了深入研究,建立了旱情监测产品生产流程与规范^[15-16]。

2015年起承担了国家防汛抗旱指挥系统二期工程“水利部旱情遥感监测系统建设”项目,对数据自动化处理、数据融合、模型方法、专题分析、技术集成等进行了深入研究^[17-19],在旱情遥感监测业务化应用上取得了显著进步。

通过近30年的技术研究,在多源数据处理、旱情指标、监测模型、旱情分析、旱情评估等方面有所突破,在大范围、宏观旱情监测方法研究取得了一定进展。旱情遥感监测研究成果总体上达到国内领先水平,在旱情评估方面达到世界先进水平。

3 水旱灾害遥感监测应用进展

3.1 洪涝灾害遥感监测应用进展 洪涝灾害的遥感监测评估业务运行系统在1999年4月初步建成,在2005、2008、2013、2015、2017年先后5次进行大的更新,使得其不断满足日益增长的卫星数据处理的需要和洪涝应急监测的需求,在1998年长江松花江流域洪水、2000年西藏易贡山发生特大滑坡、2003年淮河流域洪水、2008年四川省汶川地震、2010年青海玉树地震、2013年黑龙江流域洪水、2014年云南鲁甸地震、2016年长江中下游洪水、2017年吉林省永吉县特大洪水等一系列的突发涉水灾害中,该系统均发挥了重要作用。利用该系统开展洪涝灾害应急监测,为国家防汛抗旱总指挥部办公室以及通过国家遥感中心向国务院办公厅提供了一系列的信息服务。典型应用实例如下。

(1)1998年,长江、松花江流域发生严重洪涝灾害。中心通过卫星遥感与航空遥感相结合,动态获取长江流域和松花江流域洪涝影像,并将监测结果及时报送国家防办及相关部门,为防洪救灾提供重要支撑。其中基于航空遥感的大庆油田油井受淹情况监测成果第一时间送到现场,为油田防洪和生产调度提供了第一手资料,为油田在大灾之年超额完成生产任务贡献了力量。为此,大庆市委专门发来了感谢信。

(2)2008年5月12日四川省汶川地区发生了强烈地震,地震诱发了众多崩滑流灾害。部分沿江河两岸分布的大型滑坡堵塞河道,形成堰塞湖。中心采用福卫2、SPOT5、中巴资源卫星、北京1号小卫星、ALOS、遥感1号、Envisat和Radarsat等卫星遥感数据,对35个大型地震堰塞湖进行了监测,并对唐家山堰塞湖进行了连续动态监测,监测结果为国家防办地震堰塞湖科学处置与减灾决策提供了科学依据。

(3)2010年4月14日,青海省玉树藏族自治州发生了Ms7.1级地震。为了及时了解地震对当地水利工程造成的影响,中心利用灾后高分辨率航空影像,结合震前北京一号小卫星、SPOT正射影像,对水利工程损毁情况进行了应急监测,并编写监测简报报水利部,得到陈雷部长的批示。

(4)2016汛期,受超强厄尔尼诺现象影响,湖北、安徽等省发生了罕见的暴雨洪涝灾害。中心利用BJ-2号、COSMO-SkyMed等遥感数据,对湖北省新洲、童家湖等地区,安徽省安庆市、池州市等地开展了应急监测,监测结果提交至国家防总办公室,为准确了解灾情提供了数据支持。在这一系列的应急监测中,针对高分辨率遥感影像,采用面向对象分割的水体识别算法,显著提高了水体监测的效率和精度,大大缩短了数据处理时间。

(5)2017年7月13—14日,吉林省中部地区特别是吉林市出现强降雨,局部出现特大暴雨。降雨导致吉林市境内温德河发生超历史实测记录的特大洪水,吉林市辖区局部地区受灾,永吉县全方位受灾,道路桥梁中断,房屋倒塌,农作物受损严重,部分群众被困。中心迅速启动应急响应,于2017年7月14日5点31分获取了永吉县地区雷达图像,对吉林市市辖区及永吉县境内洪涝灾情进行了应急遥感监测。监测结果及时提交给水利相关部门,为准确了解淹没范围及救援工作提供了有力的数据支持^[20]。该次监测是利用国产高分三号雷达数据开展洪涝应急监测的典范,为后续进一步利用高分三号数据开展突发涉水灾害的监测提供了基础。

可以看出,随着国内外卫星数据的逐渐增多,洪涝灾害遥感监测评估业务运行系统的不断完善,对洪涝灾害的响应速度逐渐提高,对于我国国产雷达卫星,如高分3号,可以通过应急响应通道快速获取灾区影像。另外,产品空间分辨率逐渐提高,最高可达到米级,可以精确识别溃口信息。未来,随着我国《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》的不断实施,以及欧空局哥白尼计划的开展,越来越多的卫星开始组网观测,将进一步提高全球任一地区的影像覆盖频率。洪涝灾害遥感监测评估业务运行系统也将进一步更新和完善,适应新时代下的洪涝灾害监测高频次、高精度、快速响应的需求。

3.2 旱情遥感监测应用进展 通过旱情遥感监测技术研究,探讨了旱情指标、旱情指数、监测模型、技术流程、产品规范等问题,为系统开发及早情遥感监测应用奠定了基础。

1999年,与国家气象局合作,利用热惯量法、植被指数距平法、供水指数法和缺水指数法等干旱宏观监测方法,研发了基于气象卫星NOAA/AVHRR数据的“早情遥感监测评估业务运行系统”,从系统建成始,每当有区域性旱灾时,都进行了宏观早情监测评估,向国家防汛抗旱总指挥部办公室报告早情状况,并通过国家遥感中心向国务院办公厅提供早情信息服务。

2004年,在早情遥感监测模型、土壤墒情预报模型研究基础上,开发了“黑龙江省早情遥感监测预报系统”,该系统具有逐旬墒情监测、预报和发布的能力,成为利用遥感手段的全国第一个业务化的省级干旱监测系统。该系统自2004年投入运行,在黑龙江省抗旱减灾中发挥了重要作用。

2006年,集成早情遥感监测模型、旱灾评估模型、土壤墒情预测模型等,研发了“全国早情遥感监测评估预报系统”。利用该系统对2006年重庆和四川地区旱情、2010年西南五省干旱、2014年北方14省市旱情进行了动态监测。

2016年,在前期早情遥感监测应用研究基础上,开发了“水利部早情遥感监测系统”,该系统是国家防汛抗旱指挥系统二期工程的重要部分,自2017年起开始系统运行,每年为国家防办提供30多期全国和重点区域的早情监测产品以及典型水体的监测报告^[19]。特别是在黑龙江省早情监测中发挥了重要作用,为黑龙江省防办每旬提供1期早情监测信息。早情遥感监测技术及应用系统在我国东北区和华北区进行了应用示范,运行效果良好,对我国早情遥感监测方面的推广应用具有重要的示范作用,潜在的社会效益、经济效益、环境效益巨大,具有广阔的推广应用前景。

总之,在早情遥感监测技术研究基础上,逐步解决了软件、数据、模型与方法等问题,实现了早情遥感监测业务化应用。今后应综合遥感、气象、水文、农业、生态等因素,结合土地利用、灌溉条件、水利设施等对农业旱情、城镇干旱缺水、生态干旱等进行监测评估,为国家抗旱减灾提供重要依据。

4 水旱灾害遥感监测技术研究展望

经过多年的发展,水旱灾害遥感监测技术取得了很大进展,在防洪抗旱减灾中发挥了重要作用,但面对防洪抗旱减灾新形势与新要求,水旱灾害遥感监测技术离实用化、业务化的目标还有一定距离。目前急待解决的问题和发展趋势主要体现在以下几个方面。

4.1 全天候、全天时大范围洪涝灾害监测 随着我国国家基础空间设施的开展,越来越多的卫星发射升空,显著提高了我国的卫星遥感观测能力。当前,基于Sentinel-1号雷达数据,已经可以实现全国范围内12 d的重复观测,部分地区可以实现6 d的重复观测。未来,利用哨兵系列卫星,结合我国高分系列卫星,充分利用雷达、光学卫星组网观测,将可以实现我国境内1~3 d数据全覆盖,洪涝遥感监测将从应急,提升到全天候、近全天时的监测。由于我国地域辽阔,获取的海量数据的存储和快速处理也将是一个研究重点。

4.2 基于无人机遥感的洪涝灾害监测 作为星载卫星的补充,无人机遥感以其迅捷、可以组网观测等优势,已经越来越多的应用到了洪涝灾害应急监测中。针对流域范围内洪涝灾害动态监测与灾情快速评估的需要,利用长航时无人机+轻小型无人机+系留浮空器平台进行洪水灾前、灾中和灾后动态监测,获取视频、可见光、SAR正射影像数据,系留浮空器提供的区域场景连续动态监测数据,获取淹没范围等洪涝信息,居民地及房屋、道路、耕地等损毁灾情信息,满足实时防洪会商决策需要,满足小时级洪涝灾害应急响应。

4.3 城市洪涝灾害遥感监测与评估 采用高分辨率卫星遥感技术和无人机监测技术,建立城市洪涝灾害多频次、精细化监测体系,快速获取城市淹没面积等数据,结合城市基础地理信息数据库和经济社会数据库,获取受淹道路、房屋等受灾体分布信息;基于城市洪涝一体化模拟仿真系统,根据模拟或遥感获取的淹没水深、淹没范围,计算供水、供电、交通等生命线工程中断历时,建立基于淹没水深、淹没面积、淹没历时等洪涝灾害特征的城市洪涝灾害评估模型;开展城市洪涝灾害淹没范围快速影响评估,快速评估损失量,为调度决策提供依据。

4.4 基于光学遥感与微波遥感多源数据协同反演的旱情监测技术 基于光学、主动微波、被动微波等遥感数据,开展多源数据协同反演研究,解决监测产品覆盖范围、分辨率、云层影响等问题;重点研究多尺度数据融合、多源数据同化等关键技术,以及数据自动化、智能化、网络化快速处理技术,提高定量化遥感反演的水平和精度。

4.5 旱情监测综合模型研究 基于遥感、气象、水文、农业等干旱指数,结合灌溉、作物种植结构等信息,分析研究不同地理环境条件、地表覆盖类型、生长季等因素对各干旱指数的影响及相互关系,并考虑模型模拟结果,建立旱情监测综合模型,将提高模型的适用性、可靠性和实用性。

4.6 水旱灾害遥感监测业务化应用研究 从业务化和工程化出发研制适用的水旱灾害遥感监测综合模型,开发水旱灾害监测业务化应用系统,为防洪抗旱管理决策提供可靠的、稳定的、持续的水旱灾情信息,为防洪抗旱减灾提供全方位的服务。

参 考 文 献:

- [1] 李纪人. 与时俱进的水利遥感[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 436-442.
- [2] 曹述互. 一九八八年防汛遥感应用试验[J]. 中国水利, 1988(11): 19-21.
- [3] 曹述互. 1989年防汛遥感应用试验[J]. 中国水利, 1990(4): 44-45+21.
- [4] 曹述互. 中国的防洪遥感信息系统及其应用[J]. 遥感信息, 1992(1): 11-14.
- [5] 曹述互. 防洪救灾遥感信息系统的研制与应用[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2004, 14(1): 19-20+27.
- [6] 李纪人, 苏东升. 重大自然灾害监测评估业务运行系统的建立及应用[J]. 卫星应用, 2001(2): 39-41.
- [7] 孙亚勇, 李小涛, 杨锋杰, 等. 基于星载SAR数据的山区水体提取方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 258-263.
- [8] CARLSON T N, PERRY E M, SCHMUGGE T J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agriculture field[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1990, 52: 45-49.
- [9] CARLSON T, GILLIES R, PERRY E. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9: 161-173.
- [10] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49: 246-263.
- [11] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.
- [12] 田国良. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [13] XIN Jingfeng, TIAN Guoliang, LIU Qinhuo, et al. Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture status in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(10): 2071-2075.
- [14] 柳钦火, 辛景峰, 辛晓洲, 等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J]. 科技导报, 2007, 25(6): 12-18.
- [15] 李小涛, 黄诗峰, 宋小宁, 等. 卫星遥感结合地面观测数据的土壤墒情监测分析系统[J]. 水利学报, 2013, 44(S1): 116-120.
- [16] 马建威, 黄诗峰, 胡健伟, 等. 基于MODIS数据的山东省土壤墒情遥感动态监测与分析[J]. 水文, 2013, 33(3): 29-33.
- [17] 柳钦火, 辛晓洲, 唐娉, 等. 定量遥感模型、应用与不确定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 黄诗峰, 辛景峰, 杨永民, 等. 旱情遥感监测理论方法与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [19] 黄诗峰, 辛景峰, 杨永民, 等. 水利部旱情遥感监测系统建设与展望[J]. 水利信息化, 2017(5): 1-5.
- [20] 马建威, 孙亚勇, 陈德清, 等. 高分三号卫星在洪涝和滑坡灾害应急监测中的应用[J]. 航天器工程, 2017, 26(6): 161-166.

(下转第465页)

- [21] 熊海华, 徐耀, 贾金生, 等. 高混凝土面板堆石坝面板挤压破坏分析[J]. 水力发电, 2015, 41(1): 27-30.
- [22] 中国水利水电科学研究院. 布西大坝安全评估及处理措施研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [23] 孙志恒. 300 m级拱坝喷涂聚脲防渗仿真模型试验及应用[J]. 水利水电科技进展, 2009(29): 49-53.
- [24] 曹克明, 徐建军, 曹希章. 混凝土面板堆石坝设计经验法[C]//中国混凝土面板堆石坝30年. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

Development and prospect of slab joint waterstop technology of CFRDs

XU Yao, HAO Jutao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Resources, Beijing IWHR-KHL Co., Ltd, Beijing 100038, China)

Abstract: The slab joint waterstop is one of the key issues during the development of CFRDs, which is very important to the safety of CFRDs. In this paper, technical development of slab joint waterstop of CFRDs in the world has been reviewed and analysed, especially the integrated mechanical construction technology and the brush-coated flexible waterstop technology that have been developed in recent years. These two new technologies can effectively overcome the defects of the conventional waterstop and improve the safety and reliability of the whole waterstop system. It is pointed out that, the compressive spalling of concrete face is the new problem associated with slab joint waterstop of high CFRDs. In addition to the measures of soft vertical joint to reduce the compressive strain in the face, the protection coating over the potential compressive spalling area is also an effective method, but the essential measures still lies in the two aspects of controlling deformation compatibility of rockfill itself and also together with concrete face as well as improving concrete face resistance to the compressive spalling.

Keywords: CFRDs; slab joint waterstop; GB plastic filler; brush-coated flexible waterstop

(责任编辑: 王冰伟)

(上接第 456 页)

Research progress of flood and drought disaster monitoring technology and application based on remote sensing

YANG Kun^{1, 2, 3}, HUANG Shifeng^{1, 2, 3}, XIN Jingfeng^{1, 2, 3}, MA Jianwei^{1, 2, 3}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Remote Sensing Technology Application Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China

3. Research Center of Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Flood and drought disaster monitoring is one of the earliest applications of remote sensing in water resources field. Since the 1980s, Remote Sensing Technology Application Center of the Ministry of Water Resources has begun to carry out remote sensing experiment of flood control, and researched on drought monitoring by remote sensing in the 1990s. After nearly 40 years of unremitting exploration, some problems have gradually been solved such as software, data, model and method. Subsequently application system has been established for flood and drought disaster monitoring by remote sensing, and remote sensing monitoring system has been preliminarily put into operation in flood and drought disaster. This paper reviews the technical research of flood and drought disaster monitoring in the Remote Sensing Technology Application Center, and prospects the comprehensive operation of flood and drought disaster monitoring by remote sensing.

Keywords: flood and drought disaster; remote sensing monitoring; research progress

(责任编辑: 韩 昆)