

朱德军, 李浩博, 王晓明. GNSS 遥感技术在智慧水利建设中的应用展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10): 33-57.  
ZHU Dejun, LI Haobo, WANG Xiaoming. Application prospects of GNSS remote sensing technique in the development of smart water conservancy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10): 33-57.

# GNSS 遥感技术在智慧水利建设中的应用展望

朱德军<sup>1,2</sup>, 李浩博<sup>1,2</sup>, 王晓明<sup>3,4</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 智慧水利建设作为新阶段水利现代化与高质量发展的重要实施路径之一, 已成为快速提升水资源效能及水旱灾害防御能力、改善水环境及水生态现状的强力抓手和必然选择, 而其扎实推进则需要综合利用各类先进的空间信息技术。随着我国北斗系统的全面建成以及新一代 GNSS 系统的飞速发展, GNSS 技术与其他学科不断融合, 应用领域也得以不断扩展。多频多模多卫星系统的 GNSS 遥感技术作为一种融合了 GNSS 卫星导航与遥感技术的新型遥测手段, 主要包括 GNSS 折射遥感及 GNSS 反射遥感两部分, 对该技术的有效利用能够为水利领域各项应用及智慧水利建设提供有力支撑。首先介绍了智慧水利建设的发展沿革, 并从政策指引、实践需求以及现实意义等层面充分揭示了推动智慧水利建设的重要性、必要性及迫切性, 系统总结了 GNSS 折射遥感与反射遥感技术在水旱灾害防护、水工建设监管、水循环过程监测及水文参数反演等水利领域各项应用中的研究进展。最后, 面向 GNSS 遥感技术在新时期智慧水利建设中的应用提出了一些建议和想法, 以期借此综述, 使领域内专家学者对 GNSS 遥感的技术优势、在水利领域应用中的研究现状以及在智慧水利建设中的应用展望形成一个较为系统的了解。

**关键词:** GNSS; 北斗; GNSS 折射遥感; GNSS 反射遥感; 智慧水利

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2022)10-0033-25



## Application prospects of GNSS remote sensing technique in the development of smart water conservancy

ZHU Dejun<sup>1,2</sup>, LI Haobo<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoming<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As one of the most important implementation approaches for spurring the modernization and high-quality development

收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0196000); 国家自然科学基金项目(52179069)

作者简介: 朱德军(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水沙运动、水动力-水环境模拟、水利量测与遥感等研究。E-mail: zhudejun@tsinghua.edu.cn

通信作者: 李浩博(1995—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事 GNSS 气象学与数值天气预报模型中的数据同化等研究。E-mail: lihaobo@tsinghua.edu.cn

of water conservancy, the construction of smart water conservancy has become an inevitable tendency for rapidly enhancing the utilization efficiency of water resources and the prevention capability of flood and drought disasters, as well as improving the current situations of water environment and water ecology. However, to make solid progresses for smart water conservancy construction, it is necessary to comprehensively adopt various types of cutting-edge spatial information techniques. With the establishment of BeiDou navigation satellite system and the unprecedented development of the next generation GNSS, GNSS has constantly intersected and fused with other disciplines, and its applications have also greatly advanced. Multi-mode, multi-frequency and multi-constellation GNSS remote sensing technique, as a new type of remote sensing method and the deep fusion of the conventional GNSS-based navigation and satellite-based remote sensing techniques, generally comprises GNSS refractometry and GNSS reflectometry. The innovative and effective use of GNSS remote sensing technique can provide powerful technical support for hydrological and hydraulic applications and the construction of smart water conservancy. The importance, necessity and urgency of promoting the construction of smart water conservancy are fully revealed by firstly introducing its history evolution from the aspects of policy guidance, actual demands and practical significance. Then, the research progresses of using GNSS refractometry and GNSS reflectometry techniques in numerous applications regarding the mitigation of floods and droughts, engineering construction, hydrological cycle monitoring, water conservancy planning and etc are systematically summarized. Finally, the future prospects including the challenges, opportunities and research advice are also proposed regarding the use of GNSS remote sensing technique in the construction of smart water conservancy. Hoping sincerely that this review can help experts and scholars to form a more systematic understanding of the technical superiority of GNSS remote sensing, as well as the current status and future prospects of using this technology in water conservancy fields.

**Keywords:** Global Navigation Satellite Systems (GNSS); BeiDou Navigation Satellite System; GNSS refractometry; GNSS reflectometry; smart water conservancy

## 0 引言

智慧水利的设计构想通常被认为是源于智慧地球、智慧社会、智慧城市等理念的提出与实践<sup>[1-3]</sup>, 主要包括新一代信息及通信技术应用、多源全要素监测信息融合以及多功能系统集成等内涵<sup>[4]</sup>。在信息化浪潮席卷全球的大背景下, 虽然我国经过近 20 年的水利信息化建设发展, 已在水利综合信息采集、水文水资源监测、水环境保护治理、水土保持管理、气候变化分析以及水旱灾害防护等方面取得了一系列重要研究进展<sup>[5-7]</sup>, 但随着经济社会的飞速发展和人们生活方式的不断变化, 水利行业发展所需的专业化、精细化、科学化的管理要求也不断提升, 我国仍面临着诸如水资源短缺<sup>[8]</sup>、水旱灾害频发<sup>[9]</sup>、水环境污染<sup>[10]</sup>及水生态损害等问题。发展智慧水利, 推进水治理体系和治理能力智能化和现代化发展, 已成为快速提升水资源效能及水旱灾害防御能力、改善水环境及水生态现状的强力抓手和必然选择<sup>[5-12]</sup>。

从智慧水利建设的具体探索实践来看, 近年来, 我国首先出台了大量政策导向性文件: 2017 年 5 月, 水利部印发《关于推进水利大数据发展的指导意见》, 提出将推进水利大数据获取、整合、共享与创新应用作为发展目标; 2019 年 7 月, 《加快推进智慧水利指导意见》中指出应将全方位推进智慧水利建设作为实

现水利现代化的着力点和突破口; 2021 年 3 月, 十三届全国人大通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中也明确提出应构建智慧水利体系, 并以流域为单元提升水情测报和智能调度能力。而 2022 年至今先后印发的《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》《智慧水利建设顶层设计》及《“十四五”智慧水利建设规划》等一系列纲领性文件, 则进一步明确了推动智慧水利建设、驱动新阶段水利高质量发展的重要性<sup>[5-13]</sup>。其中, 根据《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》文件指示要求, 新时期推进智慧水利建设应主要开展如下工作: 一是加强数字孪生流域的建设, 基于传统监测体系使用新一代智能感知与通信技术, 构建融合智能监测与分析功能的天空地一体化水利感知网, 并在此基础上充分利用精细化模型在虚拟空间中完成对智慧水利系统的映射<sup>[14-15]</sup>; 二是全面推进“2+N”水利智能业务应用体系, 即建设流域防洪、水资源管理与调配以及 N 项支撑其他水利相关工作的业务应用; 三是强化水利网络安全体系, 主要由水利网络安全管理、防护与监督三部分组成。通过以上工作的开展与落实, 以进一步提升流域管理的智能化水平, 构建具有预报、预警、预演、预案功能的智慧水利体系, 进而切实保障人民生命财产安全和生态环境的健

康发展<sup>[6-13]</sup>。除了以上政策文件的颁布,我国福建省<sup>[16]</sup>、江西省<sup>[17]</sup>、辽宁省<sup>[18]</sup>等地在其多年水利信息化建设的基础上也积极地对智慧水利建设进行了大量探索;此外,诸如浙江省<sup>[19-20]</sup>、江苏省<sup>[21]</sup>、深圳市<sup>[22]</sup>等也都面向智慧水利建设的全面推进提出了其总体框架<sup>[23-24]</sup>,这些举措都有效地推动了新时代水利高质量发展与现代化进程。然而,由于我国智慧水利建设处于初级阶段,仍存在全方位立体监测感知程度不高、信息全面互联不畅、资源整合共享不足、发展平衡度不够、智能化应用欠缺、运维能力薄弱、规范化程度不高等诸多尚未解决的问题<sup>[16-25]</sup>,还需集成利用各类成熟有效的技术手段以实现既定建设目标。

从智慧水利建设的现实意义来看,虽然我们同各类范围广、突发性强、破坏性高、危害性大的极端天气及由其引发的水旱灾害事件在不断“交锋”,但我们对它们的认识了解以及预防应对措施还远远不够,防汛抗旱备体系建设整体上还相对滞后,保障范围和手段有待进一步充实完善;虽然我国近年来通过应用新一代信息化技术,在国家、省市地方以及流域层面已初步构建了国家水资源管理平台、智慧水务体系等系统平台,并开展了包括数字长江、数字黄河、数字太湖等一系列水务监管实践<sup>[18]</sup>,但目前仍尚未形成切实有效的水文监测体系。因此,科学认识极端天气及水旱灾害发生的机理及其演化规律、加强抗御防护体系建设,对于及时掌握水旱灾害情势、有效开展预警预报工作、着力提升防灾减灾和动态应急管理的能力;充分利用各类新技术手段,发展完备的“空天地”一体化监测系统,提升对水循环全过程的感知能力,为水资源规划、配置和管理提供有效数据支撑,进而将适量适质的水适时送到适当的地方,保障水循环系统健康有序发展,不仅是推进智慧水利发展的核心目标,更是建设智慧水网、美丽中国的重要诉求<sup>[12-18]</sup>。

因此,通过以上分析可以发现,无论是在政策指引、实践需求,还是在现实意义层面,都清晰揭示了推动智慧水利建设的重要性、必要性及迫切性。近年来,随着新一代 GNSS 系统的飞速发展以及我国北斗系统的全面建成,GNSS 遥感技术已成为一种多学科交叉融合的新型遥测手段,具有很多其他技术无法比拟的优势,可以作为水利领域各项应用的有力补充。本文将首先介绍 GNSS 遥感技术的发展概况,并从 GNSS 遥感技术特点出发,分别阐述近年来 GNSS 遥感技术在水利领域相关应用中的主要研究进展以及在

新时期智慧水利建设中的应用展望。

## 1 GNSS 遥感技术概述

### 1.1 遥感技术及其在水利建设中的应用

新阶段智慧水利建设的扎实推进需要综合利用包括 5G、遥感、时空大数据、云计算、物联网、人工智能等新一代空间信息技术。在这些技术中,作为自 20 世纪 60 年代发展起来的一类综合性探测手段,遥感技术通过搭载于飞行器上的传感器收发电磁波信号,从而对远距离、大范围的勘测目标开展精细化的信息收集、处理与分析工作<sup>[26]</sup>。虽然遥感技术在我国发展起步较晚,但随着多年来技术水平的不断提高,尤其是包括风云、高分、天绘等系列卫星的先后发射<sup>[27]</sup>,以及近年来测绘技术、计算技术及空间信息科学技术的飞速进步,遥感技术以其准确度高、时效性好、监测范围广以及动态性强等优势<sup>[28-29]</sup>,已广泛用于包括水利、测绘、农业、环境、气象等在内的各个领域之中<sup>[30-32]</sup>。以水利领域为例,自 20 世纪 80 年代至今的 40 余年里,遥感技术已有效地服务于洪涝灾害与<sup>[33-38]</sup>旱情监测<sup>[39-44]</sup>防护、水资源与水环境规划调查<sup>[45-48]</sup>、水文与水循环过程管理<sup>[49-54]</sup>、水土流失评估<sup>[55-57]</sup>、水位监测反演<sup>[58]</sup>、河湖演变分析<sup>[59-61]</sup>、流域调查监管<sup>[62]</sup>、土地利用调查评价<sup>[63-64]</sup>、水利工程建设管理与地质调查<sup>[65-66]</sup>等几乎所有的水利业务应用中,为传统水利科学研究注入了新的活力,取得了良好的社会效益<sup>[67-71]</sup>。值得一提的是,我国水利部遥感中心是国内最早的一个行业遥感技术应用研究机构<sup>[72]</sup>。由于卫星遥感图像能够较好地解译出水体的边界信息,因此,遥感中心自 1980 年成立起就将利用遥感技术开展洪涝灾害监测作为其工作重心<sup>[73]</sup>,先后建立了“洪涝灾情遥感速报系统”<sup>[30]</sup>“重大自然灾害监测评估业务运行系统”等<sup>[74]</sup>系统平台,并面向 1998 年长江、松花江特大洪涝、2003 年淮河洪水、2005 年梧州洪水、2008 年汶川堰塞湖、2017 年茂县滑坡、2021 年黑龙江洪水等重大灾害开展了卓有成效的监测评估工作<sup>[75-76]</sup>。路京选<sup>[72]</sup>、宋文龙等<sup>[77]</sup>也对遥感中心成立至今的主要创新性工作和成果进行了系统性的介绍和总结,可以说该中心的发展历程及主要工作也是我国遥感技术在水利领域应用中的缩影。总的来说,在技术及应用层面,遥感技术经过多年发展,在时空分辨率、覆盖范围、载荷性能、重访时效等各个方面有了极大提升,成为当前业务对地观测技术中的重要组成部分;在数据层面,目前全球在轨遥感卫星超过 1 000 颗,我国

也已拥有如风云系列气象卫星、资源卫星、环境减灾小卫星近 200 颗遥感卫星, 数据类型覆盖可见光、近红外、多光谱、雷达等多个维度, 能够为各行业应用提供强大的数据支撑。然而, 以遥感技术在水利领域中的应用而言, 虽然近年来各类应用的广泛性及有效性均取得了长足进步, 有效地丰富了现代水文学内涵, 但仍然面临着操作水平较低、解译水平欠缺、适用性有局限、定量分析不足并且数据精度严重依赖数据源和信息提取算法等问题<sup>[7]</sup>。以洪涝监测应用为例, 由于洪涝事件往往伴随着连续的阴雨天气, 如 MODIS 等光学遥感卫星的可见光或红外波段难以透过源地上空厚重的云层、雨雾而监测地物及水体动态变化过程, 此外, 各类地物的光谱灰度值也会受到季节、气象等条件的影响<sup>[78]</sup>。虽然当前以合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 为代表的主动微波遥感技术具备穿透云层和植被并全天候地获取信息的能力<sup>[79]</sup>, 但其重访周期长且成本较高, 同样难以满足突发性洪涝灾害对时效性的较高要求<sup>[80-81]</sup>。此外, SAR 图像在包含山体建筑物的区域也往往存在信息偏差较大的问题。由此可见, 遥感技术, 尤其是卫星遥感, 在水利领域中的应用还存在诸多有待完善之处, 因此, 当前一方面应针对上述存在的各项问题进行深入探究, 另一方面还需统筹利用其他各项有效技术手段与多源数据, 以进一步推动水利遥感技术的发展与业务化应用<sup>[28]</sup>。

## 1.2 GNSS 技术及其在水利建设中的应用

近半个世纪以来, 各类先进的卫星大地测量与空间信息技术的飞速发展以及基础性地理信息设施的逐步完善都使得人类对大气圈、水圈以及冰冻圈的认识和研究不断加深, 而其中则少不了被誉为重要空间基础设施的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的提出、建设与实践。自美国于 20 世纪 70 年代提出建立全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 以来, 其经历了不断地发展与完善, 并于 1995 年实现全面运作, 在满足最初军事应用功能需求的基础上, 已逐步发展为多频多模多卫星系统的 GNSS 体系, 为全球范围内用户提供全天候以及高效能的导航、定位以及授时服务。而随着新一代 GNSS 的高速发展, 特别是我国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 于 2020 年全面建成并开通服务, 以及包括国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 基准站网及中国大陆构造环境监测网络等在内的全球、国家及区域级卫星连续运行参考站 (Continuously Operating Reference Sys-

tem, CORS) 网络的大规模建设, 都为我们开展多系统 GNSS 监测研究和各领域的创新应用奠定了重要的空间基础设施条件。目前, GNSS 系统主要包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 和我国 BDS 四大全球 GNSS 系统, 以及日本的准天顶卫星导航系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)、印度的区域卫星导航系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) 等区域 GNSS 系统, 基本形成了四大全球系统及其他区域系统兼容并存的多系统模式。以我国 BDS 为例, 截至目前共有包括 15 颗 BDS-2 卫星以及 29 颗 BDS-3 卫星在内的共 44 颗卫星正常运行并为全球用户免费提供高精度定位及独特的短报文功能等服务<sup>[82]</sup>。总的来说, 由于 GNSS 技术较好地融合了自动、快速、全天候、无漂移、高精度、高时空分辨率以及运维成本低等优点<sup>[83-88]</sup>, 可较好地与常规的地面观测及遥感手段形成互补, 从而使其不仅在水利、农业、交通运输、国土资源、工程监测及公共安全等诸多行业发挥着重要支撑作用<sup>[89]</sup>, 也为位置服务乃至地球科学和空间科学带来了革命性变化。正如“两弹一星”元勋孙家栋院士所说, 四大卫星导航系统正在进行全球化合作与竞争, 谁是最最终的赢家还是要看谁的地面应用更广泛、更深入、更成功。因此, GNSS 数据的信息挖掘以及 GNSS 技术在各领域内的创新应用已成为国内外学者当前面临的重大机遇和挑战。

GNSS 技术在水利中的应用由来已久, 最初主要是面向水利工程建设, 而其中最典型的一类应用便是水工设施的精密形变监测。通常情况下, 水库、大坝等水利工程建设及应用往往会破坏地球的动态平衡状态 (如水体的聚集), 并导致地壳形变, 其最集中的体现便是相关区域水准、重力等因素均会产生一定变化<sup>[90]</sup>。而 GNSS 形变监测作为大坝、滑坡、桥梁安全监测的重要技术手段<sup>[91-93]</sup>, 通过面向各类大型水利工程构建完备的 GNSS 监测站网便能够对于重点区域的重力场变化、地壳形变等开展有效的监测, 国内外学者基于此也先后开展了大量研究<sup>[94-96]</sup>。例如, 张克非等<sup>[90]</sup>通过针对三峡水库开展形变监测分析研究, 提出了水库 GNSS 监测站网的布设要求, 同时也明确了水库蓄、放水的基本准则; 姜卫平等<sup>[97]</sup>则面向西龙池上水库研制了一套 GPS 变形监测软件, 建立了西龙池上水库连续运行监测系统, 实现了对水库形变的实时连续、高精度以及自动化监测。此外, 张小红等<sup>[98]</sup>和徐绍铨等<sup>[99]</sup>通过详细分析湖北清江隔河岩大坝外观变形 GPS 自动监测系统, 分别对于系统

的灵敏度和可靠性进行了评定, 研究也均表明该系统能够较好地用于大坝外观形变监测。随着新时期水利行业的发展对水库、大坝等重大工程的事故风险防范需求不断加大, 大坝形变监测工作也显得愈发重要。为了有效顾及水工设施形变连续、缓慢、量级小等特点, 目前在建设区域以及设施的关键结构上已布设了密集的静态 GNSS 监测站网, 进行高采样率的信息获取及高精度的数据处理工作, 从而为水利工程形变及位移的实时安全监测监管提供重要的技术和数据支持。

### 1.3 GNSS 遥感技术的提出与发展

虽然最初 GNSS 技术在水利领域的应用研究主要关注于施工放样、竣工测绘、水工精密监测、数字化测图等水工建设性工作, 但随着 GNSS 技术的不断发展, 其在水利中的应用远不止于此。如 1.2 节所述, GNSS 卫星在其运行过程中全天候地面向全球用户提供导航、定位及授时服务, 然而, 作为一类低成本、非合作的信号源<sup>[100]</sup>, 卫星所持续发射的海量、高时空分辨率、高精度的微波信号(尤其是 1~2 GHz 的 L 波段信号)还可以被有效用于遥测地表、大气等地理空间参数<sup>[101-102]</sup>, 由此也衍生出 GNSS 遥感技术这一 GNSS 与遥感的交叉延伸学科。例如, 当 GNSS 卫星信号穿过地球大气时, 会受大气折射的影响使得信号在传输过程中产生较大的延迟误差, 而该延迟量在不同应用中所带来的影响是不一样的: 在 GNSS 精密定位相关研究中, 该误差会在一定程度上影响定位精度, 需要通过模型方法进行消除; 而在大气环境感知及目标检测的相关研究中, 该延迟量便成了遥感探测的关键信号源, 可以被有效地用于反演大气水汽等相关信息<sup>[103-106]</sup>。陈锐志等<sup>[100]</sup>在理论层面从协同、集合和融合三个层面论述了 GNSS 导航与遥感融合的技术及应用, 其中, GNSS 遥感技术被其定义为利用导航信号开展遥感任务的深层次融合, 成功实现了两类技术功能的跨界。同传统的卫星微波遥感相比, GNSS 遥感在成本功耗、时间分辨率等方面有着无可比拟的独特优势, 有效拓展了海量 GNSS 数据在各学科领域的交叉研究和创新应用。此外, 当前我国所建立的大量密集 GNSS 观测站网不仅可以用于开展地壳形变、大坝形变、滑坡、地震等精密监测研究, 还可以扩展到包括大气/水文/气象全过程监测、水位测量、气象预警预报、水旱灾害防护、水文管理及水土保持分析等水利领域的各类应用中, 在提供独立的高质量信息源和校准基准、提升水利业务信息支持功能与服务范围的基础上, 也将节省大量的人力、物力和

财力。

根据 GNSS 遥感技术对卫星信号的传播及应用方式, 通常可以将其分为 GNSS 折射遥感(GNSS Refractometry)和 GNSS 反射遥感(GNSS Reflectometry, GNSS-R)两大类。其中, GNSS 折射遥感主要通过利用大气对卫星信号的折射效应来反演地表及大气参数; GNSS-R 则是通过获取卫星信号到达各类反射面后得到的反射信号的波形后延、峰值功率等参量, 进而探测分析不同反射面的性质<sup>[100-102]</sup>。下面将分别对 GNSS 折射遥感及 GNSS 反射遥感技术在水利领域的研究应用进展进行介绍。

## 2 GNSS 折射遥感技术在水利领域的研究应用进展

由于 GNSS 卫星信号在穿过大气层时, 会因受到大气中自由电子和大气分子折射的影响而出现传播路径弯曲和传播速度衰减的现象, 这些也都将造成信号传播过程中的时延, 进而转化为传播路径的增长导致大气延迟的产生。如 1.3 节所述, 虽然这些延迟信息对定位的直接影响有时甚至可达 10 m 以上误差, 但由于该延迟量同大气参数间有较好的相关关系, 通过对该延迟信息的高精度观测能够反演出大气水汽等参数的含量及其变化情况<sup>[107-108]</sup>。因此, 这种利用大气对 GNSS 卫星信号的折射效应来反演大气参数的技术被称为 GNSS 折射遥感技术<sup>[100]</sup>。根据所使用的大气参数反演方法及接收机所放置的位置, GNSS 折射遥感技术主要可分为地基和空基 GNSS 折射遥感技术。其中, 地基 GNSS 折射遥感主要使用地面上静止的 GNSS 接收机来接收 GNSS 卫星信号, 获取信号纵穿大气层到达地面接收站时因大气层结不同所引起的大气延迟, 进而获取天顶或斜路径方向上的大气水汽等参数; 在空基 GNSS 遥感技术中, GNSS 接收机则主要安装在低地球轨道卫星上, 其主要通过测量 GNSS 卫星信号横穿大气层时引起的折射角和多普勒频移, 从而由其反演得到信号路径在近地点高度处的大气折射率, 进而最终获取温湿压等大气参数的垂直分布<sup>[109-110]</sup>, 这种技术也被称为 GNSS 掩星探测技术(GNSS Radio Occultation, GNSS RO)<sup>[111]</sup>。下面将分别从地基和空基 GNSS 折射遥感技术的角度阐述其技术原理以及在水利领域中的研究应用进展。

### 2.1 地基 GNSS 折射遥感技术

总的来说, GNSS 卫星信号在其穿过地球大气层到地面 GNSS 接收机的过程中产生的误差主要包括三部分, 即信号分别经过电离层和对流层时受折射影响

所产生的误差, 以及信号接收过程的多路径效应误差。其中, 信号在经过大气层时产生的误差(大气总延迟)是影响最大且无法避免的, 而它主要由电离层延迟及对流层延迟组成, 由此也可将地基 GNSS 折射遥感技术分为对流层和电离层遥感技术<sup>[100]</sup>。具体来看, 对电离层延迟而言, 由于该层大气(约为 50~1 000 km)为频散型介质, 其中大量自由电子和正离子会影响 GNSS 信号的传播速度与路径而造成信号延迟。SPLIKER 的研究表明电离层延迟会随高度角的降低而不断增大<sup>[112]</sup>, 其在天顶方向为 1~15 m, 而当高度角为 20°时, 该数值可达 10 倍以上。然而, 由于该延迟量与电磁波频率的平方为反比关系, 因此可以采用接收双频观测信号的方式, 对不同频率信号进行差分或线性组合来有效消除该误差或订正到 mm 级。对流层延迟往往指高度在 50 km 以下的非电离层大气(中性大气)对 GNSS 信号的折射效应。和电离层不同的是, 对流层主要是由各种气体、大气水汽及尘埃等固体物质组成, 可认为是非频散型介质, 因此该延迟误差无法通过上述的双频观测进行消除。与此同时, 该层大气中成分复杂, 除了包含大量氮气和氧气外, 还有水汽和二氧化碳等气体, 且各类成分分布不均并随着地面气象条件的变化而不断变化(尤其是 10 km 以下的水汽), 因此, 对流层延迟量监测也变得异常复杂。通常情况下, 天顶方向的对流层总延迟量(Zenith Total Delay, ZTD)为 2.5 m 左右, 其中由于空气造成的静力延迟(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)约占 90%; 虽然水汽在大气中的含量仅占 0.1%~4%, 然而由于每摩尔水汽的折射率为干空气的 17 倍<sup>[113]</sup>, 因而由水汽造成的对流层湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)也在总延迟中占比 10%以上<sup>[114]</sup>; 而其他的包括液态水、冰晶以及各类凝结物造成的影响则微乎其微可以忽略<sup>[113-115]</sup>。对于占主要比重的静力延迟而言, ELGERED 等的研究表明, 若地面气压的观测精度达到 0.5 hPa, 则 ZHD 的估算精度可优于 1 mm<sup>[116]</sup>; 而与之相比, 由水汽所导致的湿延迟则无法通过一种模式对其精确地估计, 是一种无法去除的误差源。但由于湿延迟可以基于成熟的经验函数有效转换为用于表征大气水汽含量的大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV), 因而对流层湿延迟也被看作一种反演大气水汽含量重要信息源, 所获取的大气水汽也在水文学、测绘科学、气象学、空间科学等众多领域中都发挥着极其重要的作用<sup>[117-123]</sup>。下面将具体阐述地基 GNSS 折射遥感技术面向水利领域几个典型应用的研究进展。

### 2.1.1 高精度水汽反演及水循环过程监管

由于水循环主要包括海洋河湖水体蒸发形成水汽、水汽由气流输送至上空发生相变形成降水、降水通过各类河流水体汇入海洋等过程, 因此, 及时准确地了解大气中的水汽含量及其变化情况将有助于进行水循环过程的高效监管<sup>[124-125]</sup>与水资源科学管理和调控<sup>[126]</sup>。众所周知, 水汽作为地球大气层中一种重要的温室气体以及大气中最活跃的成分之一, 能贡献约 60%的温室效应<sup>[127]</sup>并极大地影响着全球水文循环及气候系统<sup>[128-130]</sup>。然而, 由于大气水汽主要分布在对流层内, 其复杂的时空分布且快速的时空变化特性使得对其进行高精度监测极具困难。传统的大气水汽监测手段主要包括数值天气预报模式(Numerical Weather Prediction Model, NWP)<sup>[131-132]</sup>、水汽辐射计<sup>[133-134]</sup>、无线电探空仪<sup>[135-136]</sup>及卫星遥感<sup>[137]</sup>等。然而由于这些技术手段存在运维成本较高、时空分辨率有限、易受系统偏差和漂移影响、精度有限、需要人工干预、无法全天候工作等致命缺点<sup>[138-139]</sup>, 使得它们无法较好地满足大气水汽实时快速监测的应用需求<sup>[140-141]</sup>。虽然基于地基 GNSS 折射遥感技术高精度反演如 ZTD、PWV 等大气信息的研究历史较为短暂, 但由于其较好地融合了高精度、高时空分辨率、长时序稳定、全球覆盖以及全天候等特性, 因此自该理论提出以来, 高精度 GNSS 大气水汽反演研究便受到了学者们的广泛关注<sup>[142-145]</sup>。

首先, 基于 GNSS 原始观测数据中解算出 ZTD 是反演获取高精度大气水汽产品的前提。从处理策略上来看, 当前最常见的方法为双差网解法及非差法。其中, 双差网解具有模型简单、待估参数少、整周模糊度易固定等优势, 而该方法通常需引入距离大于 500 km 的地面参考站且需要约 30 min 的时间间隔<sup>[146-147]</sup>。从反演精度的角度, 基于 Bernese 软件通过双差法获取的 ZTD 同 IGS 提供的 ZTD 产品相比, 其误差大约为 5~7 mm<sup>[148]</sup>。随着 GNSS 技术的发展, 许多误差项能精确地被精细化模型估计得到, 整周模糊度的解算策略也得到了进一步改进, 因而双差网解法已逐渐被非差法所取代。利用非差法反演 ZTD, 尤其是基于精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术, 具有很大的灵活性, 其在处理大规模数据时不需引入其他参考站便能快速获取高精度 ZTD 信息<sup>[149-150]</sup>。例如, 何锡扬等<sup>[151]</sup>利用武汉大学研发的 TriP 软件解算了 7 个 IGS 站的 ZTD, 通过与 IGS 提供的产品进行比较发现利用 PPP 处理策略得到的 ZTD 误差不超过 4 mm。此外, 自 2007 年起, IGS 开

始以 5 min 的分辨率提供解算精度达到 1.5~5 mm 的 ZTD 产品<sup>[152-153]</sup>, 为各项研究提供了良好的数据支撑。在获取 ZTD 观测资料后, 通过利用地表气压观测基于给定的经验模型, 如 SAASTAMOINEN 模型<sup>[154]</sup>, 即可高精度地计算得到 ZHD, 进而可以获取 ZWD, 最后再利用温度信息及经验转换因子即可反演出 PWV<sup>[108-133]</sup>。自 BEVIS 等<sup>[107-155]</sup>首次提出该反演流程后, 对于利用 GNSS 反演 PWV 的可行性以及所获得的产品精度分析研究同样受到了国内外学者的极大关注<sup>[114-157]</sup>, 其中, 毛节泰详细论证了 GPS 在大气水汽遥感方面的精度和可行性, 奠定了将 GPS 应用于大气遥感及气象学领域的研究基础<sup>[103]</sup>; NIELL 等比对分析了由 GNSS、无线电探空仪及水汽辐射计获取的 PWV, 验证了 GNSS 探测大气水汽的可行性<sup>[158]</sup>; 王小亚等<sup>[159]</sup>利用中国区域 23 个以及周边区域 6 个 CORS 站网的数据反演获取的 PWV 的精度可以达到 1~2 mm, 能较好地满足大气参数监测要求。随着 GNSS 卫星星座的不断完善, 现有研究充分表明, 多系统 GNSS 极大地增加了可观测卫星的数目, 使得反演得到的大气资料结果更加稳健<sup>[149-162]</sup>。此外, 在我国 BDS 系统全面组网完成后, 我国学者们也研究分析了利用北斗三代卫星和其他 GNSS 卫星在不同研究区域采用不同处理策略反演的大气水汽精度<sup>[163-164]</sup>。上述研究充分表明基于地基 GNSS 折射遥感技术反演以水汽为代表的大气信息的技术手段已逐渐成熟, 各项基础设施也逐渐完备, 能够较好地开展大气水汽监测及其应用研究。

### 2.1.2 气象事件预警预报及水旱灾害防护

大气水汽除了是上述水循环过程的重要组成部分, 也是云和降水形成的物质基础, 更被认定是一种“必要的气候变量”<sup>[165-166]</sup>。由于在水汽相变过程会释放/吸收大量潜热, 从而影响地面和空气温度, 进而影响大气垂直稳定度和对流系统的形成和演变<sup>[129-167]</sup>, 所以包括强降水、对流风暴及台风等事件在内的众多极端气象事件及水旱灾害的形成演变都与水汽含量及运移息息相关<sup>[168-171]</sup>, 因此, 对水汽开展高精度、高时空分辨率的监测也是实现对极端天气事件及各类水旱灾害预警预报和应急防护的重要前提与关键所在, 这一应用通常也被称为 GNSS 气象学 (GNSS Meteorology, GNSS/MET)<sup>[172-173]</sup>。值得一提的是, 当前我国仅用于气象监测服务的 GNSS 观测站已达 1000 多个, 基本形成了规模化、运行业务条件成熟的观测网络, 国内外学者们近年来面向这一应用也开展了大量研究。首先, 众多学者系统性探讨了

PWV 同各大气参数及气象事件间的相关关系, 例如, SINGH 等<sup>[174]</sup>发现阿拉伯海和孟加拉湾逐月以及季节性 PWV 变化同季风的发生紧密相关, 并提出可以使用 PWV 来预报季风的发生<sup>[175]</sup>; 曹云昌等<sup>[144]</sup>对 PWV 与局地降水之间关系开展了定量分析; 李国平<sup>[176]</sup>通过研究 GNSS 大气水汽在如暴雨、冰冻雨雪等典型天气中的演变特征, 有效揭示了 GNSS 大气产品在气象预报业务应用中的有效性; VAN BAELEN 等<sup>[167]</sup>研究了降水事件发生的完整周期内 PWV 的时序变化情况, 说明了水汽含量及运移在降水事件形成过程的作用。基于此, 国内外关于利用地基 GNSS 折射遥感技术反演的大气资料进行极端气象事件的预报也开展了大量研究<sup>[177-180]</sup>。例如, BENEVIDES 等<sup>[181]</sup>通过分析暴雨事件发生前 PWV 的时序特征提出了一种降水预报模型。验证结果表明该模型的正确预报率为 75%。随后, YAO 等<sup>[182]</sup>、ZHAO 等<sup>[183-184]</sup>、MAN-ANDHAR<sup>[185]</sup>以及 LI 等<sup>[186-187]</sup>均先后对此类模型进行优化和改进, 模型的性能也取得了较大的突破, 正确预报率已达到 96% 以上。此外, 基于三维/四维水汽层析技术<sup>[188-190]</sup>以及 ZTD 等其他 GNSS 大气产品<sup>[191-192]</sup>等来开展气象应用研究也成为了近年来的研究热点, 但需要指出的是, 上述模型属于气象预报专家系统模型, 该类预报方法主要依赖于所使用的气象预报因子同特定气象事件间的响应关系而构造, 但其预报精度往往具有不稳定性, 且需要根据特定区域、特定时段设定不同的预报阈值, 因而通常主要面向某一小范围区域进行气象事件预警预报应用。NWP 是天气预报应用中不可或缺的一种工具, 由于其具有完善的大气物理模型, 因而能有效加强对天气和气候系统演变规律的认识。NWP 模式对于 GNSS 大气信息的利用主要是基于数据同化的方式, 即通过三维、四维变分法对 PWV、ZTD 等非常规观测资料进行同化应用。英国气象局的评估结果显示, 由地基 GNSS 折射遥感技术反演的大气产品对 NWP 预报效果改进的贡献度排在各类产品中的第二位。因此, 当前国内外学者也都相继开展了一系列基于 PWV 及 ZTD 等产品的同化研究<sup>[193-196]</sup>, 结果表明加入 GNSS 大气资料能有效改善模式初始场精度, 进而提升模型对各类气象事件定性/定量预报的精度和实时性。然而, NWP 往往难以用于极端气象事件的短临预报, 这也在一定程度上限制了其在突发性灾害事件应急管理上的广泛应用。此外, 目前神经网络等大数据分析挖掘技术在地学领域的应用越来越受到人们的关注。由于各类神经网络模型具有独立学习、并行处理和自适应能力强等

优点, 并且 GNSS 反演的长时序大气资料也具有实测独立的特点, 因而这些都为研究多类型气象信息内在关系、开发基于神经网络的极端气象与灾害预报模型提供了前所未有的契机。近年来, 国内外学者也开展了大量将神经网络技术应用于气象预报与灾害应急防控的研究中<sup>[197-200]</sup>。例如, 李永华等<sup>[201]</sup>采用误差反向传播神经网络建立了汛期降水预测模型, 结果表明该模型无论是对历史样本的拟合还是对独立样本的预报检验都取得了较高的精度; 焦阳<sup>[202]</sup>也基于卫星遥感图像的降雨监测系统, 利用遗传优化反向传播神经网络对云团移动和降水量的预测进行了分析。然而, 如何针对实际应用场景、实际气象信息优化利用机器学习技术构造更具鲁棒性的模型仍需进一步的探究。

总的来说, 上述各类模型方法均能有效地利用地基 GNSS 折射遥感反演的大气产品开展极端降水等气象事件的预警预报, 有效提升降水预报精度并精准确定事件落区, 进而形成监测精密、服务精细的预警预报平台。而降水作为水文模型模拟预报中最为重要的输入变量, 其准确性也在很大程度上决定了水文模型模拟预报的成败<sup>[203-204]</sup>, 通过获取高精度的降水资料以及大气模型的有效利用, 能为水文模型提供可靠的边界条件, 最终充分提升洪涝等灾害事件的预报精度, 达到满足防灾减灾决策响应需求的目的。此外, 从政策上来看, 智慧水利建设指导意见中明确指出应在当前防洪应用的基础上, 进一步补充旱情综合监测预测功能<sup>[13]</sup>; 从实际需求来看, 采取有效措施抗御旱情也是包括水利、气象、农业等各部门的迫切需求, 而在近年来的大量研究中, 地基 GNSS 折射遥感技术获取的各类大气产品也同样证明具备有效服务于这一功能需求的能力<sup>[205-207]</sup>。

## 2.2 天基 GNSS 折射遥感技术

天基 GNSS 折射遥感技术(GNSS 掩星探测技术)作为 21 世纪 GNSS 导航卫星应用的新兴技术, 主要利用搭载在低轨卫星上的 GNSS 接收机对穿过地球大气的 GNSS 信号进行捕获跟踪。实际上自二十世纪六七十年代起, 行星无线电掩星探测便已成为研究行星及其卫星大气的重要探测手段, 但由于无合适的信号收发端、卫星技术发展欠缺等因素使得面向地球大气的掩星探测计划迟迟并未开展。而随着 GNSS 技术的发展以及大量 GNSS 卫星的发射, 从 GPS/MET 试验计划有效地从理论和技术上验证了 GNSS 掩星技术用于探测地球大气的可行性后, 针对地球无线电掩星大气探测的研究便大量涌现<sup>[208-209]</sup>。而经过至今近 40 a 的不懈研究与技术创新, 无论是 GNSS 卫星和低轨观

测卫星星座数量, 还是接收机性能<sup>[210]</sup>和无线电掩星反演技术<sup>[211]</sup>都得到了飞速发展。当前, 面向地球大气的 GNSS 无线电掩星探测技术可确保各轨道面上的接收机每天至少进行 500 次相对稀疏的采样(南半球高垂直分辨率的掩星剖面数目甚至可增加 1 倍以上), 从而保障获取全球覆盖密度且间隔均匀的测量数据。相较于传统的探测手段, GNSS 掩星探测技术具有高精度、高分辨率、覆盖范围广、长期稳定以及分布均匀等优势, 能稳定获取从地面至 800 km 高空的大气参量, 近年来也迅速在大气/水文参数反演、气象及气候变化、大气场及大气边界分析研究等方面得到了充分应用并取得了显著成果。下面将具体阐述天基 GNSS 折射遥感技术面向水利领域几个典型应用的研究进展。

### 2.2.1 大气/水文参数监测

基于天基 GNSS 折射遥感技术的最重要应用之一便是进行多类型大气/水文参数的高精度监测。首先, 如 2.1 节所述, 水汽这一大气/水文参数, 无论是对于水循环过程, 还是气象事件的形成发展都有较大影响, 基于 GNSS 掩星数据同样能够获取高精度的低对流层水汽观测<sup>[212-213]</sup>。其次, GNSS 掩星事件测得的折射率或弯曲角剖面能提供平流层和中上对流层的温度和气压场的水平和垂直结构。再次, 利用掩星资料求得的气压、温度和风场是上对流层斜压波、平流层风场的重要信息(斜压波又能驱动表面气旋和锋从而导致相应的气象变化)。以高空风场为例, 天基 GNSS 折射遥感技术为地面上空 20~60 km 区域的风场变化研究提供了一种新型数据源, 特别是在 2006 年“气象、电离层及气候观测星座”(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, COSMIC)发射后, 每天能提供约 2 000 个掩星观测廓线, 这些数据包括折射指数、温度、气压等, 对全球平流层大气风场的相关研究产生了积极的影响。COSMIC 卫星星座迄今已积累了大量高空大气温度数据, 而在平均状态下, 大气温度与风场间满足自由大气运动规律, 利用温度观测便可以推算出大气的平均风场。例如, 肖卫华等<sup>[214]</sup>选用 2007 年四个月的 COSMIC 掩星数据构建了三种推算大气高空风场的方法, 探究了风场的纬度-高度分布、经度-纬度分布及纬圈平均纬向风在不同季节的特性, 其计算结果与欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的高精度再分析数据基本一致, 能较好地反映中高纬度大气风场的变化规律, 这也揭示了利用 GNSS 掩星数据探测

高空风场具有巨大的发展前景。最后, 锋面分析此前一直是气象领域的研究难点, 但由于峰面往往会造成被称为“天空河流”(或称为“大气河流”)[215]的天气现象, 具体表现为大气中水分集中的狭窄走廊, 可以显著增强大气水汽输送, 因而锋面分析也成为水利领域当前的研究热点之一。KUO 等[216]研究发现 GPS/MET-RO 剖面能够区分一个锋面系统。NEIMAN 等[217]也证明了在“大气河流”事件期间由 COSMIC 掩星事件可探测到相应的温度和水汽的强水平梯度。因此, 充分利用天基 GNSS 折射遥感技术在新的时期也将有利于推动我国“天河工程计划”的开展与实施。

## 2.2.2 气象预报与气候变化研究

虽然这一应用内容同样可以利用地基 GNSS 折射遥感技术来开展, 但由于其无法在极地、海洋、沙漠以及部分恶劣的观测区域布设完备的地基 GNSS 观测站网, 因而相较于 GNSS 掩星探测技术, 无法实现全球范围内的应用。而即使是在观测手段较为充足的地区, 通过利用天气 GNSS 折射遥感技术, 也能进一步对于应用进行优化。

在气象预报应用中, 自 GPS/MET 计划开展以来, 人们对 GNSS 掩星技术在全球范围观测潜力的认识显著增加, 2006 年发射的 COSMIC 和 GRAS on MetOp 星座每天能够提供超过 3 000 个近实时无线电掩星剖面信息, 作为面向全球天气监测应用的密集采样, 这对改进全球和区域天气预报具有重大意义。而通过在 NWP 模式中同化高时空分辨率的如折射率、弯曲角等掩星资料能弥补海洋、极地等地区大气观测资料的不足, 有效改善数值天气预报模式的温度场、湿度场以及其他要素初始场的质量, 对提高模式的预报能力能起到积极的作用。例如, 洪振杰等研究发现在探空资料稀缺的地区, 通过将 GPS 掩星折射率观测数据同化到 NWP 中能有效改善这些地区的预报精度, 而即使是在其他各类观测较为丰富的地区, 无线电掩星数据的加入也能在一定程度上提升各类气象事件的预报精度。HUANG 等[218]对 2001 年的 Nari 台风和 2002 年的 Nakri 台风进行了同化实验, 发现同化 GNSS 掩星折射率能有效改善台风路径预测和降水预报精度。陈舒雅等[219]面向 NWP 模式构造了非局地折射率同化算子, 探讨了 GPS 掩星数据对 2006 年珊珊台风预报的影响, 结果表明同化后能提高对大雨预报精度。蔡其发等[220]将云海-2 掩星资料的折射率同化到 NWP 模型中, 并开展了区域同化预报实验, 结果表明, 模式的位势高度场、湿度场、温度场和风场

得到了有效调整, 降水的预报结果也得以改善。余江林等[221]则面向暴雨天气将 GPS 掩星弯曲角资料同化到 NWP 预报模型中, 结果表明同化后强降水的预报准确性得到了有效提高。因此, 通过上述各国学者对于掩星折射率、弯曲角以及其他各类大气观测资料的同化应用研究, 可以发现, 通过对于 GNSS 掩星观测资料的同化, 在提升各大气参数反演精度的同时, 能有效提高对各类气象事件的预报精度, 进而服务于各类灾害事件的抗御工作。

在气候变化分析应用中, 首先, 全球变暖是当前全球面临的重要气候问题之一, 由于温度同水文循环、气象灾害事件等有着密切联系, 因此当前急需对温度进行全球尺度范围的观测。大气温度廓线作为大气热力状态的重要参数, 其分布及变化监测是气候变化的前提, 也是其他大气痕量气体精确反演的基础, 而天基 GNSS 折射遥感技术的出现和发展使得全球范围内高垂直分辨率温度资料的获取成为可能。例如, LIU 等[222]介绍了通过 GNSS 掩星技术进行温度探测的模式, 对其在红外、微波波段及两者联合测量方式的原理及方法进行总结, 并对上述手段的气温探测能力进行评估; LI 等[223]利用高分五号卫星上搭载的红外甚高光谱分辨率探测仪采用掩星探测方式, 利用大气成分在红外波段的吸收特性, 获取包括臭氧在内的多种痕量气体垂直廓线分布。此外, 除了全球温度变化监测外, 无线电掩星大气探测技术也能够较好地为全球气候环境监测应用提供充分的数据源[224]。然而需要明确的是, 虽然利用无线电掩星大气探测技术研究全球气候变化问题具有广阔的应用前景, 但我国目前仍处于该项技术应用领域的起步阶段, 还有大量问题有待进一步探索。

因此, 通过以上分析可以发现, GNSS 折射遥感在水利领域具有其特有的技术优势与广阔的发展空间, 并能够与传统监测方式及常规地面观测互为补充, 具备成为水利领域新时期发展应用的一种有效技术手段的潜力, 而通过对数值天气预报模式以及各类水文模型的有效利用, 不仅能为人类认识大气/水文过程机理提供了更为广阔而全面的视角, 也将有效提升面向极端天气事件和水旱灾害的预警预报防护能力以及面向气候变化的分析水平。

## 3 GNSS 反射遥感技术在水利领域的研究应用进展

虽然无论是 GNSS 折射遥感技术还是反射遥感技术, 其实质均是主要利用 GNSS 卫星 L 波段信号的微

波遥感技术, 但与第 3 节中介绍的 GNSS 折射遥感技术不同的是, GNSS-R 技术主要利用搭载在地基静止平台以及飞机/卫星等移动平台的接收机测量 GNSS 直达和经目标物反射的信号, 并通过分析信号的时延、频率、相位等参数来估算不同目标物性质<sup>[225-226]</sup>。

从观测模式的角度来看, GNSS-R 遥感技术主要包括双天线模式(Double Antenna Pattern, DAP)和单天线模式(Single Antenna Pattern, SAP)。其中, DAP 模式是此前研究应用中的主要模式<sup>[227-228]</sup>, 但该模式需要使用特定的接收机, 即具备两个天线以分别接收 GNSS 的直射及反射信号, 其中一副向天顶方向接收低增益右旋圆极化(Right Hand Circular Polarization, RHCP)的直射波信号, 另一副向下接收高增益左旋圆极化(Left Hand Circular Polarization, LHCP)的反射和散射信号, 并基于双基雷达方程进行参数估计<sup>[100]</sup>。SAP 模式是随着近年来对 GNSS-R 信号的认识不断加深而发展起来的, 该模式仅需采用一副常规定位应用所使用的 GNSS 信号接收天线以同时接收直射及反射信号, 进而通过信号干涉理论方法进行参数的测量<sup>[229]</sup>。由于在 SAP 模式中, 会接收到在信号直射、反射以及多路径效应影响下产生干涉后的混合信号, 因而该模式也引申出了 GNSS 干涉反射遥感(GNSS Interferometric Reflectometry, GNSS-IR)<sup>[230-231]</sup>及 GNSS 多路径反射遥感(GNSS Multipath Reflectometry, GNSS-MR)技术<sup>[232-233]</sup>等具体研究内容。近年来, 国内外众多学者均开展大量研究验证了这些技术的可行性和有效性, 例如, 2013 年, LARSON 等<sup>[234]</sup>提出了一种通过处理包含 GNSS 直射与反射信号叠加的干涉信息信噪比(Signal to Noise, SNR)数据反演水位的方法。YU 等<sup>[235]</sup>也利用 GPS 多频观测信号基于 GNSS-MR 技术提出了一种雪深测量方法, 结果显示该方法明显优于当前的各类技术方法。总的来说, 这些新兴技术手段为水位监测、雪深变化分析以及各类近地表环境参数反演等应用都提供了良好的技术支撑与发展机遇。从观测平台的角度来看, 当前 GNSS-R 接收机主要有地基、空基和星基三类主要搭载方式, 其中, DAP 观测模式同时适用于上述各类观测平台, 而 SAP 模式则仅适用于地基静态观测平台, 基于这一特性也可以发现, DAP 模式相较 SAP 更适合捕捉目标的空间分布特性, 而 SAP 则在长时序连续观测方面优势突出<sup>[229]</sup>。

总的来说, GNSS-R 技术作为一种新型的双/多基外辐射源雷达探测手段, 随着近几十年的发展, 其

理论架构体系、信号处理技术以及参数反演模型等均在不断完善; 而基于 GNSS-R 技术良好观测特性与技术优势, 其应用领域也早已从自建设之初面向的海洋领域<sup>[236]</sup>过渡到复杂的陆地应用, 当前已基本实现包括海面风场<sup>[237-238]</sup>、海面高度<sup>[239]</sup>、海冰监测<sup>[240]</sup>、陆表土壤湿度<sup>[241-243]</sup>、湿地遥感<sup>[244-245]</sup>、水旱灾害<sup>[246-248]</sup>、内陆水体监管<sup>[249]</sup>、河流流量<sup>[250]</sup>、植被<sup>[251]</sup>、生物量<sup>[252]</sup>、土壤冻融<sup>[253]</sup>、积雪<sup>[235-254]</sup>及形变监测<sup>[255-256]</sup>等在内的各类应用, 有效提升了对海洋、地表环境要素的监测能力, 具有十分重要的应用推广价值。尽管 GNSS-R 遥感技术并非为水利领域应用而设计, 但从上述诸多应用也可看出, 该技术能够较好地满足水利各项应用的需求。它不仅对土壤水分等陆表参数反演、水位监测等应用具有极强的敏感性, 较短的重访时间也使其能有效适用于洪水灾害监测等对时效性要求较高的应用。因此, 下面我们将具体阐述 GNSS 反射遥感技术在水利领域几类主要应用的研究进展。

### 3.1 土壤湿度反演分析

土壤水分含量通常被视为是控制地表和大气相互作用的一类关键因子, 也是控制陆表能量交换、调整土壤排水和地表径流、调节植被蒸发和碳吸收等应用的重要参量, 反演获取高精度的土壤水分含量将有助于确定出更为精确的陆气耦合模式; 从另一方面来讲, 由于土壤水分也是流域产汇流计算中主要的水文下垫面因素之一, 若能准确获取土壤湿度, 再加之降水量、蒸发量等参数, 便能进一步提升水文模型数据同化效果, 得到准确的产汇流和径流量, 从而有效改进水文过程模拟能力, 实现对洪水等事件的预测、预报和预警<sup>[126]</sup>。当前, 虽然如土壤湿度计、重量水分法以及电阻法等传统的测量方法能够获取到相对精确的测量结果, 但将其运用到大范围水文模型以及各类衍生应用中仍存在较大困难, 如何进行大范围区域土壤湿度的高精度连续观测仍是一项亟待解决的问题。近年来, GNSS-R 技术在陆面应用领域取得了长足发展, 基于不同状态下的土壤介电常数, 通过测量直射与反射信号的强度(功率峰值比值), 即可获取到可靠的土壤湿度数据, 其测量精度基本接近土壤湿度计的结果。值得一提的是, GNSS 遥感所主要利用的 L 波段信号正是获取土壤水分含量的最佳频段<sup>[89]</sup>。因此, 近年来大量国内外学者针对这一应用开展了大量研究<sup>[257-259]</sup>。其中, CHEW 等<sup>[260]</sup>利用星基 GNSS-R 数据分析了反射信号对土壤湿度的敏感性, 并利用土壤湿度主被动卫星数据(Soil Moisture Active Passive,

SMAP)数据对 GNSS-R 土壤湿度探测结果进行了评估。孙波等<sup>[261]</sup>利用粒子群优化算法和随机森林算法开展了基于 GNSS-IR 技术的土壤湿度反演算法研究,结果显示所提出的新方法能有效提高土壤湿度反演精度,实现长时序连续观测。LARSON 等<sup>[241]</sup>则成功利用常规 GNSS 接收机获取多路径反射信号(即 GNSS-MR 技术),反演获取了高精度土壤湿度信息。WAN 等<sup>[262]</sup>也基于星载 GNSS-R 技术提出了一种通过地表水和云模型分别校正不同卫星发射功率及植被引起的偏差,进而估算获取土壤湿度的方法。此外,单个 GNSS 观测站点利用 GNSS-R 技术通常可获取约 1 000 m<sup>2</sup> 的大尺度、长时序土壤湿度产品,因而该技术手段不仅为土壤湿度反演提供了新的可信赖方式,也可以成为各类卫星遥感土壤湿度产品的有力补充。

### 3.2 水位监测

水位监测历来在水文水资源以及水利工程管理中都具有重要意义。无论是船只的安全运输,还是水库、大坝等水利工程设施的安全运行,都离不开高精度的水位状态监测信息。水位计是最常见的水位测量方式,其能有效测量特定区域的相对水位信息,但该方法往往存在成本较高、空间分辨率较低等问题。GNSS-R 技术通过同时获取 GNSS 卫星直射信号及水面的反射信号开展信噪比数据分析,从而实现自动化、高精度、全天候且近实时的水位信息读取<sup>[234]</sup>。诸多研究对于该技术手段应用于水位变化监测的有效性和可靠性进行了验证和实践<sup>[263-264]</sup>。例如,张弛等<sup>[265]</sup>利用 GNSS 静态观测的 SNR 数据实现了对苏州石湖水面高度变化的实时监测,验证结果表明 GNSS-R 技术在平静水面上的水位反演精度可达厘米级。LOWE 等<sup>[227]</sup>在湖面和海上开展机载 GNSS-R 实验,通过利用 3~5 cm 的高仰角卫星,达到了 5 cm 左右的水位测量精度;吴继忠等<sup>[266]</sup>提出一种利用 GNSS-R 技术进行水面高度变化反演的方法。根据信号振幅与 SNR 的联系,建立了 SNR 与接收机天线相位中心到水面垂直距离的函数模型,结果显示测量的标准偏差为正负 3 cm。吕铮等<sup>[267]</sup>基于 GNSS 信号经水面反射后的多路径特征,通过采集 SNR 数据分析了如信号频率、高度角范围等因素对大坝水位反演结果的影响,结果显示大坝水位变化反演结果同实测水位数据有良好的一致性。宋敏峰等<sup>[268]</sup>给出了一种基于 GNSS-IR 技术的水位监测方法,并基于双王城水库大坝的 GNSS 形变监测网测站数据进行了分析,结果显示监测精度能达到 2 cm。从该研究也可以看出,对于各类水库、大坝等大型基础工程而言,由于此前已

在此类基础设施周围布设了大量 GNSS 观测站网,且水位监测所采用的主要是 SAP 模式,因此,现有的观测站网可以直接基于 GNSS-R 技术进行高精度水位监测,无需重新建设大量站点或使用新型 GNSS-R 接收机,从而在节省大量的人力物力财力的同时,既能拓展为坝体形变监测而建立的各站点的实际应用,也能辅助现有水文测量技术手段进行高精度水位监测。

### 3.3 洪涝探测

洪涝作为重大的灾害性事件,对社会发展和人类生命财产安全具有极大威胁。本文 2.1.2 节论述了利用 GNSS 折射遥感技术进行水旱灾害防护的应用进展,然而利用 GNSS-R 技术开展此类应用研究目前尚处于初级阶段,仍有诸多问题有待探索解决。虽然国内外学者们对此应用展开了大量研究,但主要是分析洪水水体分布情况并绘制洪水地图,严格来说这也属于水文调查的一种特殊形式<sup>[246-247]</sup>。例如,陈璞等<sup>[80]</sup>提出了一种基于星基 GNSS-R 技术的洪涝灾害监测方法,通过构建地表反射率与洪水分布模型分析了安徽省 2020 年的洪水分布情况,结果充分揭示了 GNSS 反射信号对洪水探测应用极强的敏感性。RAJABI 等<sup>[248]</sup>同样利用星基 GNSS-R 数据绘制了伊朗东南部洪水分布情况,准确计算出了洪水的淹没面积。刘奇等<sup>[269]</sup>则通过利用 GNSS-IR 技术监测南亚洪水,分析了洪水发生前后的空间范围和时间序列,结果表明该方法简单易操作且精度较高。汪俊涛等<sup>[270]</sup>利用低轨卫星采集的 GNSS 反射信号提取出地表反射率,并将其作为特征参数进行 2020 年鄱阳湖洪水淹没范围的识别研究,结果有效证明了星基 GNSS-R 技术用于洪水探测的可行性。因此,通过以上研究可以进一步发现,目前 GNSS-R 技术的洪涝探测应用研究主要基于 GNSS-R 技术获取的地表反射率对反射面(水分)的敏感性以及该技术较广阔的监测范围,然而,地表反射率的计算往往忽略地形、植被以及地表粗糙度等的影响而导致误差的产生<sup>[269]</sup>,因此,今后还需要进一步基于 GNSS-R 的技术特性开展深入研究,以期能进一步深化 GNSS-R 技术在洪涝灾害探测中的应用。

### 3.4 形变监测

当前在形变监测应用中,传统的 GNSS 空间大地测量方法(如 1.2 节所述)虽已作为一种常规手段服务于业务应用,并取得了广泛的认可,然而该技术也存在如观测范围有限以及部分形变体周围难以布设监测站等问题;星载 SAR 作为一种地质灾害监测的主要手段<sup>[271]</sup>,虽然能够长时观测,但由于卫星重访周期较长而无法快速提供短时形变信息<sup>[272]</sup>;地基干涉

合成孔径雷达虽然时间分辨率较高, 但因其运维成本较大而难以广泛使用。随着 GNSS-R 技术的发展, 由于其不仅具备传统地基 GNSS 形变监测的诸多优点, 还在该基础上有了新的应用拓展和提升, 因此传统诸多学者们开始探讨 GNSS-R 在形变监测中的应用潜力<sup>[255-256]</sup>。例如, 严颂华等<sup>[272]</sup>将 GNSS-R 形变监测技术归为基于成像、镜反射以及目标探测的形变监测三种类型, 分别阐述了他们的优缺点与适用范围。但需要指出的是, GNSS-R 技术在形变监测中的应用目前仍不成熟, 无论是从信号体制、反射功率、带宽比、相位稳定度以及成像方式上均存在诸多有待完善的地方, 在未来的研究中, 应一方面提升测量的精度, 满足精密形变监测的应用需求; 另一方面提高监测的连续性和时空分辨率, 以满足长时、连续、大范围的观测要求, 从而有效提升该技术应用于形变监测中的适用性和鲁棒性。

总的来说, 以上各类应用研究进展充分体现了 GNSS 反射遥感技术在水利领域应用中的技术特点和发展潜力, 虽然部分应用还尚在发展阶段, 但在今后一个时期内, 随着 GNSS 卫星数目的不断增加, 低轨卫星及有效载荷的进一步发展、数据分析及处理能力的有效提升, 也必将会有更多更高质量的 GNSS-R 数据、更为优化的陆表参数估算及水位监测方法, 以及更加合理的洪涝探测与形变监测方式, 从而使得飞速发展的 GNSS-R 技术能够充分提升其在水利领域各项应用中的可用性、实用性以及有效性。

## 4 GNSS 遥感技术在智慧水利建设中的应用展望

在新一代 GNSS 系统愈发完善、时空大数据日益丰富、数据挖掘技术突飞猛进以及包括通信、导航、遥感在内的空天信息技术的不断发展的大背景下, GNSS 遥感作为融合了 GNSS 卫星导航与遥感技术的一个跨学科研究方向, 由于其高时空分辨率、高精度、低成本、全球覆盖、全天候观测等技术优势, 在诸多行业及应用领域扮演着越来越重要的角色。GNSS 遥感技术在水利领域的广泛应用不仅有效解决了水旱灾害预警预报、水文水资源监测及水利工程监管中存在的诸多实际问题, 也展现出了其在新阶段智慧水利建设中发挥更大支撑作用的潜力。因此, 本文首先阐述了智慧水利建设发展的基本概况与政策要求, 并给出了当前我国水旱灾害防控及水文水资源监管的基本情势, 同时, 基于 GNSS 遥感的技術特点从 GNSS 折射遥感与反射遥感两个方面对它们在水利领

域诸多核心应用中的研究进展进行了梳理和回顾。然而, 智慧水利建设虽然是推动新阶段水利高质量发展的六大实施路径之一, 但目前仍处于“1.0 版”的建设阶段, 还有大量的问题与研究工有待探索与开展。其中, GNSS 遥感技术作为一类有效的技术手段, 为了更有效地推动其在智慧水利建设中的应用, 本文将当前所面临的机遇与挑战归纳总结如下, 以期为领域内专家学者们提供一些有益借鉴。

### 4.1 信息的高精度获取、处理及分析

众所周知, 信息是智慧水利建设的基础, 系统、整体以及多类型地进行信息获取、构建完善的水利感知网是一切应用高效开展的前提条件, 通过开展信息的高精度获取、处理以及分析工作, 从而提升空天地一体化立体感知的完整性和智能水平。我国北斗系统于 2020 年全面建成使用, 但其后续的延展性应用研究工作仍有待进一步开展, 在智慧水利建设蓝图背景下, 应进一步挖掘其在水利领域的应用潜力, 加快引领我国 GNSS 遥感技术在水利领域的创新应用发展。对于常规 GNSS 高精度定位技术而言, 应完善各 GNSS 观测站网的规范化建设, 基于各重点水工设施周围的观测站网持续推进其在形变监测及安全监管中的应用。对于地基 GNSS 折射遥感技术而言, 北斗系统目前在大气水汽等多类型大气/水文产品反演中的贡献度尚不明确, 如何发挥北斗系统特别是卫星增强系统在我国区域范围内的精度优势, 提高数据产品的反演精度和稳健性仍有待探索。因此, 应进一步完善融合北斗的多系统 GNSS 观测高精度反演各类大气/水文产品的处理策略, 探究不同映射函数、误差模型、信号频率与组合、对流层约束方式以及多系统定权策略等因素对反演过程及产品精度的影响, 进而形成一套优化的数据反演处理方法; 融合 GNSS 大气水汽反演技术与逐步完善的层析技术, 构建全国范围高精度、高时空分辨率三维/四维大气水汽场; 设计优化的融合算法, 开展包括探空、水汽辐射计以及常规水文监测等在内的多源多类型水文/气象观测值的实时融合研究, 进一步提升各类产品的精度及时空分辨率。对于空基 GNSS 折射遥感技术而言, 应逐步完善山基、机载以及低轨卫星平台下的 GNSS 掩星技术, 深度跟踪包括 Spire、GRACE-RO、GNOMES、COSMIC2/FORMOSAT-7 以及 FY-3E 等掩星探测计划的发展。对于 GNSS 反射遥感而言, 由于北斗系统相较于 GPS 等系统有更丰富的卫星轨道, 理论上其中地球轨道卫星和倾斜地球同步轨道卫星均可用于 SAP 模式下的 GNSS-R 遥感, 应进一步探索并拓展北斗导航卫

星星座在 GNSS-R 技术中的应用; 进一步发展空基(尤其是无人机平台)及星基 DAP 模式下的 GNSS-R 技术及应用, 开展载荷研制、接收机研发以及软硬件集成等工作, 逐步完善“空-天-地”平台下的 GNSS-R 技术体系。

#### 4.2 新技术的融合应用

从技术融合的角度来说, 本文所分析的 GNSS 遥感本就是卫星导航与遥感技术的深层次融合, 虽然 GNSS 遥感技术在近年来取得了快速发展, 但作为两类技术手段, 其各自仍存在一些技术约束与发展瓶颈, 因此 GNSS 遥感技术的发展也应进一步完善其功能、平台乃至信号端的集成应用。此外, 智慧水利建设指导意见中明确要求其应与当前 5G、人工智能、大数据、物联网、云计算等现代前沿科学技术进行深度融合, 因此应充分利用各类新技术手段, 加强各类信息的挖掘提取和积累应用, 实现水利综合管理能力和智慧化水平的全面提升。对于人工智能与空间大数据挖掘技术而言, 随着空天地一体化空间信息网络的逐步形成, 目前已进入时空大数据时代, 海量多源异构数据出现了爆发式增长。以 GNSS 数据为例, 自 20 世纪 90 年代以来, 世界范围内的 GNSS 观测站上已积累了近 30 a 的观测数据。由于这些数据中均蕴藏着丰富的知识、规律和各类变化的前兆信息, 因而如何深入挖掘提取这些数据中蕴含的信息, 并将其有效应用到相关领域中是当前急需解决的问题。人工智能算法与机器学习技术的兴起使其广泛地应用到地学领域的研究中, 但目前利用 GNSS 遥感大数据面向水利领域尤其是智慧水利建设而构造的各类智能化算法较少。因此, 应充分利用包括反向传播神经网络、卷积神经网络、长短期记忆网络以及循环神经网络等模型, 挖掘气象事件发展演变过程中的大气水汽变化特征、识别各类重大灾害事件的致灾因子、分析多源多类型大气产品间的相关关系以及它们长时序历史大数据中所蕴含的大气/水文/气候/气象信息; 在充分顾及学科特点以及模型物理机制的基础上, 因地制宜地服务于极端气象预警预报、水旱灾害防护评估以及小流域下垫面数据分类等典型应用; 研究神经网络模型初始权值、网络结构及各类超参数的优化确定问题, 加强对模型构造及训练机理的理解, 有效解决网络结构和各种参数反复训练而导致的过拟合现象, 提升模型的泛化与智能解译能力。对于新一代 5G 通讯技术而言, 其超低时延通信、增强移动宽带以及海量通信存储等特性都有效地解决了传统水利所使用的通讯技术存在的低速率、高时延、小容量及高成本等问题。

从 GNSS 遥感技术的角度出发, 进一步推进 5G 技术的使用也能有效提升实时定位精度, 应进一步完善 5G 基础设施的建设, 这不仅将提升水位以及水工形变监测等应用水平, 在水利行业也能有效服务于如流速、泥沙及水质情况的高精度、高时效性监测。对于物联网技术而言, 高精度时空基准作为其发展的核心要素之一, 主要来自 GNSS 卫星导航技术, 在未来研究中应进一步加强物联网技术与 GNSS 遥感技术以及水利行业应用的深度融合, 不断拓展其应用范围及场景。

#### 4.3 水利应用的成熟化与业务化发展

通过此前对于 GNSS 遥感技术在水利领域中的研究现状分析可以发现, 虽然目前已开展了大量且卓有成效的研究工作, 但如 GNSS 折射遥感干旱监测、GNSS 反射遥感形变监测及洪水探测等部分应用仍处探索阶段, 距离推动成熟的业务化应用还有较大发展空间。智慧水利应用的有效开展离不开相关规律及模型方法的不断开发与积累, 人工智能大数据分析挖掘技术虽然是一种新型技术手段, 但传统的地球系统模型也是不可或缺的一部分。而如水汽、降水、土壤湿度和蒸散发等各类参数信息在大气及水文模型中的应用主要是基于数据同化的方式。因此, 对于数值天气预报模型而言, 应通过改进数据同化模块, 优化包括 PWV、ZTD 以及 GNSS 反演的各类对流层斜路径产品、三维/四维层析产品以及 GNSS 掩星产品的同化技术水平, 弥补常规地面及高空探测资料的不足; 明确各类产品的观测误差特性, 研究反演误差对模式代价函数中权重确定的影响, 通过顾及时空相关性而获取更合理的误差协方差矩阵, 提升各类产品在模式中的可用性与有效性; 为水文模型的数据同化提供高精度的边界条件以及如降水等输入参数信息。对于各类水文模型而言, 应充分考虑各类物理机制以及人为活动的影响, 提升水文模型对水文过程模拟概化的确定性, 完善水文模型结构及各功能属性; 融合 GNSS 遥感技术获取更高质量的土壤湿度、降水、蒸散发以及积雪等水文模型输入参数, 进一步提升水文模型面向流域水文过程的模拟和预报能力, 延长对洪涝灾害等事件的预见期, 进而为防灾减灾应急管理争取更多时间。此外, 对于任何应用以及所构造的模型方法来说, 只有实现了业务化运行, 才能发挥该技术手段的最大效益, 为社会发展以及人类生产生活提供实质性便利, 因此, 推进各类成熟应用的业务化运行也是智慧水利建设在新时期的重点内容之一。

总的来说, 智慧水利建设的最终目的在于流域监

测、灾害“四预”、调度决策和运行管理等各项研究水平及应用能力的全面提升, 本文通过对 GNSS 遥感技术在水利领域研究现状进行了系统的总结, 并对其在智慧水利建设中的应用进行了展望。随着 GNSS 遥感技术的不断发展, 它将持续为水利领域应用提供前所未有的高精度、高时空分辨率以及大尺度监测数据, 目前仍存在的诸多问题也会随着研究的不断深入而解决, GNSS 遥感技术也必将为新阶段水利高质量发展以及智慧水利建设提供有力支撑和强力驱动。

### 参考文献 (References):

[1] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(2): 127-132.  
LI Deren, GONG Jianya, SHAO Zhenfeng. From digital earth to smart earth[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(2): 127-132.

[2] 李德仁, 邵振峰. 论物理城市、数字城市和智慧城市[J]. 地理空间信息, 2018, 16(9): 1-4.  
LI Deren, SHAO Zhenfeng. Research of physical city, digital city and smart city[J]. Geospatial Information, 2018, 16(9): 1-4.

[3] 水利部参事咨询委员会. 智慧水利现状分析及建设初步设想[J]. 中国水利, 2018(5): 1-4.  
Adviser and Consultant Committee of MWR. Current situation and preliminary ideas of smart water conservancy construction[J]. China Water Resources, 2018(5): 1-4.

[4] 艾萍, 王沙沙, 牟萍. 水信息学与水利信息化的协同发展模式分析[J]. 水利信息化, 2012(5): 1-3.  
AI Ping, WANG Shasha, MOU Ping. Analysis about coordination development pattern of hydroinformatics and water resources informatization[J]. Water Resources Informatization, 2012(5): 1-3.

[5] 张建云, 刘九夫, 金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 1-7.  
ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-science and Engineering, 2019(6): 1-7.

[6] 程益联, 曾焱. 智慧水利应用体系及其应用梳理评价研究[J]. 水利信息化, 2021(6): 5-9.  
CHENG Yilian, ZENG Yan. Study on smart water conservancy application system and its application sorting and evaluation[J]. Water Resources Informatization, 2021(6): 5-9.

[7] 蔡阳. 现代信息技术与水利信息化[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 133-138.  
CAI Yang. Modern information technology and water resources informatization[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 133-138.

[8] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301.  
XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301.

[9] 陈茂山, 吴浓娣, 廖四辉. 深刻认识当前我国水安全呈现出新老问题相互交织的严峻形势[J]. 水利发展研究, 2018, 18(9): 2-7.  
CHEN Maoshan, WU Nongdi, LIAO Sihui. Understanding of water security in China presents a severe situation of new and old problems interwoven[J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(9): 2-7.

[10] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9.  
WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9.

[11] MOLKENTHIN F, LI C Y, NOTAY K V. Information handling in interdisciplinary, hydroenvironment engineering projects[M]. Singapore: Springer, 2014.

[12] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 等. 智慧水利解析[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1355-1368.  
JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Analysis of smart water conservancy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1355-1368.

[13] 水利部印发关于推进智慧水利建设的指导意见和实施方案[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(1): 5.  
Guiding opinions and implementation plans on promoting smart water conservancy construction were printed and distributed by ministry of water resources[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(1): 5.

[14] 史良胜, 查元源, 胡小龙, 等. 智慧灌区的架构, 理论和方法之初探[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1212-1222.  
SHI Liangsheng, ZHA Yuan Yuan, HU Xiaolong, et al. A preliminary exploration of framework, theory and method for intelligent irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1212-1222.

[15] 张万顺, 王浩. 流域水环境水生态智慧化管理云平台及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 142-149.  
ZHANG Wanshun, WANG Hao. Cloud platform and application of watershed water environment and aquatic ecology intelligent management[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 142-149.

[16] 付瑞平. 建智慧水利体系 提智能调度能力——访中国工程院院士, 水文学及水资源学家王浩[J]. 中国应急管理, 2021(8): 28-31.  
FU Ruiping. Constructing smart water conservancy system, improving intelligent scheduling capacity-interview with wang hao, academician of the chinese academy of engineering[J]. China Emergency Management, 2021(8): 28-31.

[17] 徐卫明, 胡应龙, 平其俊, 等. 江西省智慧水利现状分析及建设思考[J]. 江西水利科技, 2019, 45(1): 64-67.  
XU Weiming, HU Yinglong, PING Qijun, et al. Status analysis and construction thinking of smart water conservancy in jiangxi province[J]. Jiangxi Hydraulic Science and Technology, 2019, 45(1): 64-67.

- [18] 王东. 面向智慧水利的数据资源池构建[J]. 东北水利水电, 2022, 40(2): 58-60.  
WANG Dong. Construction of data resource pool for intelligent water conservancy[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 2022, 40(2): 58-60.
- [19] 包志炎, 姜小俊, 黄康, 等. 浙江水利数字化转型总体框架和关键技术研究[J]. 水利信息化, 2020(2): 1-8.  
BAO Zhiyan, JIANG Xiaojun, HUANG Kang, et al. Research on basic architecture and key technologies for zhejiang digital transformation of water conservancy[J]. Water Resources Informatization, 2020(2): 1-8.
- [20] 程海洲, 余丽华, 孙春奇. 新时期宁波市智慧水利建设框架研究[J]. 浙江水利科技, 2019, 47(2): 72-74.  
CHENG Haizhou, YU Lihua, SUN Chunqi. Research on smart water construction framework for ningbo in the new period[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2019, 47(2): 72-74.
- [21] 叶健. 深化信息资源整合 推进智慧水利建设[J]. 江苏水利, 2019(S1): 11-14.  
YE Jian. Deepening the integration of information resources and promoting the construction of smart water conservancy[J]. Jiangsu Water Resources, 2019(S1): 11-14.
- [22] 王晓辉, 殷峻暹. 深圳市智慧水务建设总体框架研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S1): 192-196.  
WANG Xiaohui, YIN Junxian. Study on the overall framework of shenzhen smart water platform construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019(S1): 11-14.
- [23] YE Y, LIANG L, ZHAO H, et al. The system architecture of smart water grid for water security[J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 361-368.
- [24] LI J, YANG X, SITZENFREI R. Rethinking the framework of smart water system: A review[J]. Water, 2020, 12(2): 412.
- [25] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 等. 水利大数据研究现状与展望[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 1-32.  
JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Research status and prospects on water conservancy big data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(10): 1-32.
- [26] 杜培军. 遥感原理与应用[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2006.  
DU Peijun. Remote sensing principle and application[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006.
- [27] 王晋年, 顾行发, 明涛, 等. 遥感卫星数据产品分类分级规则研究[J]. 遥感学报, 2013, 17(3): 566-577.  
WANG Jinnian, GU Xingfa, MING Tao, et al. Classification and gradation rule for remote sensing satellite data products[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(3): 566-577.
- [28] 洪勇豪, 亓郑男, 张丽丽. 遥感大数据在水利中的应用及发展[J]. 水利信息化, 2019(3): 25-31.  
HONG Yonghao, QI Zhengnan, ZHANG Lili. Application and prospect of large remote sensing data in hydrology[J]. Water Resources Informatization, 2019(3): 25-31.
- [29] 王毅. 国际新一代对地观测系统的发展[J]. 地球科学进展, 2005(9): 980-989.  
WANG Yi. The development of the earth observation system[J]. Advances in Earth Science, 2005(9): 980-989.
- [30] 潘世兵, 李纪人. 遥感技术在水利领域的应用[J]. 中国水利, 2008(21): 63-65.  
PAN Shibing, LI Jiren. Application of remote sensing technology in water management[J]. China Water Resources, 2008(21): 63-65.
- [31] 毛本明. 水利信息化中遥感技术的运用及问题分析[J]. 科学与信息化, 2019(30): 5, 8.  
MAO Benming. Application and problem analysis of remote sensing technology in water conservancy informatization[J]. Kexue yu Xinxihua, 2019(30): 5, 8.
- [32] 左梦颖. 遥感技术在水利领域的实际应用探析[J]. 工业设计, 2017(2): 155-156.  
ZUO Mengying. Analysis of the practical application of remote sensing technology in water conservancy[J]. Industrial Design, 2017(2): 155-156.
- [33] 杨存建, 魏一鸣, 王思远, 等. 基于 DEM 的 SAR 图像洪水水体的提取[J]. 自然灾害学报, 2002(3): 121-125.  
YANG Cunjian, WEI Yiming, WANG Siyuan, et al. Extracting the flood extent from sar imagery on basis of DEM[J]. Journal of Natural Disasters, 2002(3): 121-125.
- [34] 汤玲英, 刘雯, 杨东, 等. 基于面向对象方法的 Sentinel-1A SAR 在洪水监测中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 377-384.  
TANG Lingying, LIU Wen, YANG Dong, et al. Flooding monitoring application based on the object-oriented method and Sentinel-1A SAR data[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(3): 377-384.
- [35] 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.  
CAO Shuhu. China's flooding monitoring remote sensing system and its application[J]. Remote Sensing Information, 1992(1): 11-14.
- [36] 郑彩芳, 杨前进, 张文波. 遥感技术在防汛抗旱中的应用研究[J]. 中国高科技, 2021(22): 92-93.  
ZHENG Caifang, YANG Qianjin, ZHANG Wenbo. Research on application of remote sensing technology in flood control and drought resistance[J]. China High-Tech, 2021(22): 92-93.
- [37] 黄诗峰. 遥感技术在我国洪涝灾害监测评估中的应用[J]. 中国减灾, 2013(24): 36-37.  
HUANG Shifeng. Application of remote sensing technology to flood monitoring and assessment[J]. Disaster Reduction in China, 2013(24): 36-37.
- [38] 李小涛, 黄诗峰, 孙涛. 洪涝灾害遥感监测与评估系统的实现和应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 115-118.  
LI Xiaotao, HUANG Shifeng, SUN Tao. Implementation and application of remote sensing monitoring and assessment system for flood disaster[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 115-118.
- [39] 王丽涛, 王世新, 周艺, 等. 旱情遥感监测研究进展与应用案例分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(6): 1315-1330.  
WANG Litao, WANG Shixin, ZHOU Yi, et al. Advances and application analysis of drought monitoring using remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(6): 1315-1330.

- [40] 宋清泉. 水旱灾害遥感监测技术及应用研究进展[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(9): 143-146.  
SONG Qingquan. Progress in remote sensing monitoring technology and application of flood and drought disaster [J]. Environment Science and Management, 2020, 45(9): 143-146.
- [41] 黄诗峰, 辛景峰, 杨永民. 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.  
HUANG Shifeng, XIN Jingfeng, YANG Yongmin. Construction and prospect of drought remote sensing monitoring system in ministry of water resources [J]. Water Resources Informatization, 2017(5): 1-5.
- [42] 杨永民, 辛景峰, 黄诗峰, 等. 基于卫星遥感的旱情监测方法及应用[J]. 卫星应用, 2019(11): 18-22.  
YANG Yongmin, XIN Jingfeng, HUANG Shifeng, et al. Drought monitoring methods and applications based on satellite remote sensing [J]. Satellite Application, 2019(11): 18-22.
- [43] 雷添杰, 李世灿, 李小姐, 等. 旱情遥感监测指标研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S2): 25-31.  
LEI Tianjie, LI Shican, LI Xiaohan, et al. Progress of study on remote sensing monitoring index of drought[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(S2): 25-31.
- [44] 黄诗峰, 辛景峰, 杨永民. 旱情遥感监测业务化应用现状、问题与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(3): 18-21.  
HUANG Shifeng, XIN Jingfeng, YANG Yongmin. Status, issues and prospects of operational application of drought remote sensing monitoring[J]. China Flood and Drought Management, 2020, 30(3): 18-21.
- [45] 朱鹤. 遥感技术在地表水源地水体监测中的应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.  
ZHU He. Study of water body monitoring of surface water source region by remote-sensing technology[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.
- [46] KLOIBER S M, BREZONIK P L, BAUER M E. Application of land-sat imagery to regional-scale assessments of lake clarity[J]. Water Research, 2002, 36(17): 4330-4340.
- [47] 陈文倩, 丁建丽, 李艳华, 等. 基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1166-1172.  
CHEN Wenqian, DING Jianli, LI Yanhua, et al. Extraction of water information based on China-made GF-1 remote sense image[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1166-1172.
- [48] 冯沛华, 刘振华, 胡月明. 基于 TM 遥感优化模型的地表水体信息提取[J]. 科技通报, 2016, 32(8): 176-181.  
FENG Peihua, LIU Zhenhua, HU Yueying, et al. Surface waterbodies extraction optimized model based on TM remote sensing image[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(8): 176-181.
- [49] 曲伟, 路京选, 宋文龙, 等. TRMM 遥感降水数据在伊洛瓦底江流域的精度检验和校正方法研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1262-1270.  
QU Wei, LU Jingxuan, SONG Wenlong, et al. Research on accuracy validation and calibration methods of TRMM remote sensing precipitation data in irrawaddy basin[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1262-1270.
- [50] 庞治国, 路京选, 卢奕竹, 等. 基于遥感和地面测量的多尺度土壤水分产品验证分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 271-278.  
PANG Zhiguo, LU Jingxuan, LU Yizhu, et al. Multi-scale soil moisture product verification analysis based on ground monitoring and remote sensing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 271-278.
- [51] XUE X, HONG Y, LIMAYE A S, et al. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite precipitation analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? [J]. Journal of Hydrology, 2013, 499: 91-99.
- [52] VINUKOLLU R K, WOOD E F, FERGUSON C R, et al. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3): 801-823.
- [53] LONG D, LONGUEVERGNE L, SCANLON B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites [J]. Water Resources Research, 2014, 50(2): 1131-1151.
- [54] NORMAN J M, ANDERSON M C, KUSTAS W P, et al. Remote sensing of surface energy fluxes at 10<sup>1</sup>-m pixel resolutions [J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 1221.
- [55] 李小涛, 黄诗峰, 李琳, 等. 嘉陵江流域土壤侵蚀变化遥感分析[J]. 泥沙研究, 2006(6): 65-69.  
LI Xiaotao, HUANG Shifeng, LI Lin, et al. Remote sensing analysis on soil erosion in the Jialingjiang Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2006(6): 65-69.
- [56] 孙涛, 范福新, 梁藉, 等. 水土保持生产建设项目扰动遥感分析[J]. 中国水利, 2017(20): 38-40.  
SUN Tao, FAN Fuxin, LIANG Ji, et al. Studies on remote-sensing disturbance analysis for soil and water conservation projects [J]. China Water Resources, 2017(20): 38-40.
- [57] 李琳, 宝柱, 庞治国, 等. 遥感技术在水土保持上的应用[J]. 卫星应用, 2019(11): 13-17.  
LI Lin, BAO Zhu, PANG Zhiguo, et al. Application of remote sensing technology in soil and water conservation [J]. Satellite Application, 2019(11): 13-17.
- [58] 翟国君, 黄漠涛, 欧阳永忠, 等. 卫星测高原理及其应用[J]. 海洋测绘, 2002(1): 57-62.  
ZHAI Guojun, HUANG Motao, OUYANG Yongzhong, et al. Principle and application of satellite altimetry [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002(1): 57-62.
- [59] HARRIS A R, MASON I M. Lake area measurement using AVHRR A case study [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(4-5): 885-895.
- [60] GUIRGUIS S K, HASSAN H M, EL-RAEY M E, et al. Technical note multi-temporal change of lake brullus, egypt, from 1983 to 1991 [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(15): 2915-2921.
- [61] 马建威, 黄诗峰, 许宗男. 基于遥感的 1973—2015 年武汉市湖泊水域面积动态监测与分析研究[J]. 水利学报, 2017, 48(8):

903-913.

MA Jianwei, HUANG Shifeng, XU Zongnan. Satellite remote sensing of lake area in Wuhan from 1973 to 2015[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 903-913.

- [62] 曲伟, 庞治国, 雷添杰, 等. 中小河流治理及监测监管中的遥感技术应用综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 23-32.

QU Wei, PANG Zhiguo, LEI Tianjie, et al. Research on the application of remote sensing technology in the management and supervision of small and medium rivers[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(7): 23-32.

- [63] 陈子丹. 有效灌溉面积遥感调查方法研究与应用—以河南省试点工作为例[J]. 遥感信息, 1997(2): 19-24.

CHEN Zidan. Research and application of remote sensing survey for effective irrigation—A case study for the pilot project in Henan Province[J]. Remote Sensing Information, 1997(2): 19-24.

- [64] LU Y, SONG W, LYU J, et al. A pixel-based spectral matching method for mapping high-resolution irrigated areas using EVI time series[J]. Remote Sensing Letters, 2021, 12(2): 169-178.

- [65] 刘绿林, 刘晓东, 王永恺. 遥感技术在水利工程领域的应用[J]. 才智, 2010(28): 77-78.

LIU Lyulin, LIU Xiaodong, WANG Yongkai. Application of remote sensing technology in the field of water resources projects[J]. Ability and Wisdom, 2010(28): 77-78.

- [66] 张保力, 袁方. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用[J]. 中国高科技, 2021(22): 100-101.

ZHANG Baoli, YUAN Fang. Application of digital surveying and mapping technology in water conservancy engineering survey[J]. China High-Tech, 2021(22): 100-101.

- [67] 黄诗峰. 遥感技术在水利上的应用[J]. 高科技与产业化, 2013(11): 62-66.

HUANG Shifeng. Application of remote sensing technology in water conservancy[J]. High-Technology and Commercialization, 2013(11): 62-66.

- [68] 钟劭南. 水利遥感的应用现状与未来[J]. 中国航天, 1999(9): 9-13.

ZHONG Shaonan. Application and prospect of water conservancy remote sensing technology[J]. Aerospace China, 1999(9): 9-13.

- [69] 王妍. 水利信息化中遥感技术的运用及问题分析[J]. 粘接, 2021, 45(2): 94-97.

WANG Yan. Application and problem analysis of remote sensing technology in water conservancy informatization[J]. Adhesion, 2021, 45(2): 94-97.

- [70] 李纪人. 与时俱进的水利遥感[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 436-442.

LI Jiren. Advance of hydrographic remote sensing with time[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 436-442.

- [71] 唐国强, 龙笛, 万玮, 等. 全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1013-1023.

TANG Guoqiang, LONG Di, WAN Wei, et al. An overview and outlook of global water remote sensing technology and applications[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1013-1023.

- [72] 路京选. 水利遥感应用技术研究进展回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008(3): 224-230.

LU Jingxuan. Review on 30 Year's achievement of remote sensing application in water resources[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008(3): 224-230.

- [73] 访中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心副主任路京选. 遥感技术在防汛抗旱减灾中得到广泛应用[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(10): 5-7.

Application and achievement of remote sensing technology in flood management and drought relief[J]. China Flood and Drought Management, 2018, 28(10): 5-7.

- [74] 李纪人, 苏东升, 杜龙江. 重大自然灾害监测评估业务运行系统的建立[J]. 中国水利, 2000(7): 29-30.

LI Jiren, SU Dongsheng, DU Longjiang. The Establishment of Operating System of Major Natural Disaster Monitoring and Assessment System[J]. China Water Resources, 2000(7): 29-30.

- [75] 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(1): 15-16.

CAO Shuhu. The research and application of the remote sensing system of flood control[J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2004(1): 15-16.

- [76] 李纪人. 遥感技术在 1998 年洪涝灾害监测与评估中的应用[J]. 中国航天, 1998(11): 4-6.

LI Jiren. Application of remote sensing technology in the monitoring and assessment of the flood disaster in 1998[J]. Aerospace China, 1998(11): 4-6.

- [77] 宋文龙, 杨昆, 路京选, 等. 水利遥感技术及应用学科研究进展与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(1): 34-40.

SONG Wenlong, YANG Kun, LU Jingxuan, et al. Research progress and prospects of water conservancy remote sensing technology and application[J]. China Flood and Drought Management, 2022, 32(1): 34-40.

- [78] 饶品增, 蒋卫国, 王晓雅, 等. 基于 MODIS 数据的洪涝灾害分析研究—以 2017 年洞庭湖区洪水为例[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 203-207.

RAO Pinzeng, JIANG Weigu, WANG Xiaoya, et al. Flood disaster analysis based on MODIS data-taking the flood in dongting lake area in 2017 as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 203-207.

- [79] ASNER G P. Cloud cover in landsat observations of the brazilian amazon[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3855-3862.

- [80] 陈璞, 杨鑫丽, 汪俊涛. GNSS 反射遥感在安徽省洪涝灾害监测中的应用研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(1): 176-177.

CHEN Pu, YANG Xinli, WANG Juntao. Research on the application of gnss reflectometry technique in the monitoring of flood disaster in Anhui province[J]. Anhui Architecture, 2022, 29(1): 176-177.

- [81] KUENZER C, GUO H, HUTH J, et al. Flood mapping and flood dynamics of the mekong delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 687-715.

- [82] 陈谷仓. 北斗应用产业化进展与发展总体考虑[J]. 卫星应用, 2021(4): 8-11.

- CHEN Gucang. Overall consideration of the improvement and development of beidou application industrialization[J]. *Satellite Application*, 2021(4): 8-11.
- [83] WANG X, ZHANG K, WU S, et al. Determination of zenith hydrostatic delay and its impact on GNSS-derived integrated water vapor [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(8): 2807-2820.
- [84] YUAN L L, ANTHES R A, WARE R H, et al. Sensing climate change using the global positioning system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D8): 14925-14937.
- [85] ROCKEN C, WARE R, VAN HOVE T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(23): 2631-2634.
- [86] JIN S, LI Z, CHO J. Integrated water vapor field and multiscale variations over China from GPS measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(11): 3008-3015.
- [87] NILSSON T, ELGERED G. Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D19101): 1-12.
- [88] HAGEMANN S, BENGTSSON L, GENDT G. On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D21): 1-11.
- [89] 万玮, 陈秀万, 李国平, 等. GNSS-R 遥感国内外研究进展 [J]. *遥感信息*, 2012(3): 112-119.  
WAN Wei, CHEN Xiuwan, LI Guoping, et al. GNSS reflectometry: A review of theories and empirical applications in ocean and land surfaces [J]. *Remote Sensing Information*, 2012(3): 112-119.
- [90] 张克非, 边少锋, 陶本藻. 三峡水库的建立对库区地球重力场及地壳形变的影响 [J]. *地球物理学报*, 1994(2): 260-267.  
ZHANG Kefei, BIAN Shaofeng, TAO Benzao. Gravity field variation and earth crustal deformation in the three gorges area due to the water loading of the yangtze river [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994(2): 260-267.
- [91] 韩军强. 高精度 GNSS 实时滑坡变形监测技术及环境建模分析研究 [J]. *测绘学报*, 2020, 49(3): 397-397.  
HAN Junqiang. Research on high precision GNSS real time landslide deformation monitoring technology and environmental modeling [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(3): 397-397.
- [92] 余加勇. 基于 GNSS 和 RTS 技术的桥梁结构健康监测 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(10): 1177-1177.  
YU Jiayong. GNSS and RTS technologies based structural health monitoring of bridges [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(10): 1177-1177.
- [93] 李征航, 刘志超, 王泽民. 利用 GPS 定位技术进行大坝变形观测的研究 [J]. *武汉水利电力大学学报*, 1996(6): 26-29.  
LI Zhenghang, LIU Zhizhao, WANG Zemin. Study on monitoring dam deformation with GPS positioning [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1996(6): 26-29.
- [94] 朱庆旭. 基于高频 GNSS 的桥梁变形监测研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
ZHU Qingxu. Research on bridge deformation monitoring based on high rate GNSS [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [95] 李小微, 冯永祥. GNSS 多基站数据融合技术在水电站大坝精密变形监测中的应用 [J]. *大坝与安全*, 2021(1): 28-32.  
LI Xiaowei, FENG Yongxiang. Application of data fusion technique for GNSS multi-base station to precise deformation monitoring of hydropower dams [J]. *Dam and Safety*, 2021(1): 28-32.
- [96] 黄凯, 陈渠森, 鞠博晓. GNSS 自动化监测系统的大坝变形预测方法研究 [J]. *测绘通报*, 2018(1): 147-150.  
HUANG Kai, CHEN Qusen, JYU Boxiao. Study on prediction method of dam deformation for GNSS automatic monitoring system [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(1): 147-150.
- [97] 姜卫平, 刘鸿飞, 刘万科, 等. 西龙池上水库 GPS 变形监测系统研究及实现 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(8): 949-952.  
JIANG Weiping, LIU Hongfei, LIU Wanke, et al. CORS development for Xilongchi Dam deformation monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 949-952.
- [98] 张小红, 李征航, 李振洪. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的灵敏度分析 [J]. *测绘通报*, 2000(11): 10-12.  
ZHANG Xiaohong, LI Zhenghang, LI Zhenhong. Sensitivity analysis of the GPS-based automatic dam deformation monitoring system for the geheyan Dam [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2000(11): 10-12.
- [99] 徐绍铨, 李征航, 刘经南, 等. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的可靠性分析 [J]. *全球定位系统*, 2000, 25(1): 25-28.  
XU Shaoquan, LI Zhenghang, LIU Jingnan, et al. Reliability analysis of the GPS-based automatic dam deformation monitoring system for the Geheyan Dam [J]. *GNSS World of China*, 2000, 25(1): 25-28.
- [100] 陈锐志, 王磊, 李德仁, 等. 导航与遥感技术融合综述 [J]. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1507-1522.  
CHEN Ruizhi, WANG Lei, LI Deren, et al. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1507-1522.
- [101] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述 [J]. *导航定位学报*, 2013(1): 3-8.  
NING Jinsheng, YAO Yibin, ZHANG Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013(1): 3-8.
- [102] 万玮, 陈秀万, 彭学峰, 等. GNSS 遥感研究与应用进展和展望 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 858-874.  
WAN Wei, CHEN Xiuwan, PENG Xuefeng, et al. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 858-874.
- [103] 毛节泰. GPS 的气象应用 [J]. *气象科技*, 1993(4): 45-49.  
MAO Jietai. Meteorological applications of GPS [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1993(4): 45-49.
- [104] 丁金才, 袁招洪, 杨引明, 等. GPS 气象学及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.  
DING Jincai, YUAN Zhaohong, YANG Yinming, et al. GPS meteorology and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009.

- [105] 李国平, 黄丁发, 郭洁, 等. 地基 GPS 气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
LI Guoping, HUANG Dingfa, GUO Jie, et al. Ground-based GPS meteorology[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [106] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.  
SHENG Peixuan, MAO Jietai, LI Jianguo, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [107] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [108] ASKNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379-386.
- [109] 张京江, 楚艳丽, 张朝林, 等. 地基 GPS 实时水汽反演系统建设速成[M]. 北京: 气象出版社, 2011.  
ZHANG Jingjiang, CHU Yanli, ZHANG Chaolin, et al. Rapid development of ground-based GPS real-time water vapor retrieval system[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.
- [110] 王勇, 刘严萍. 地基 GPS 气象学原理与应用研究[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.  
WANG Yong, LIU Yanping. Principle and application of ground-based GNSS meteorology[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012.
- [111] 严豪健, 符养, 洪振杰, 等. 天基 GPS 气象学与反演技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.  
YAN Haojian, FU Yang, HONG Zhenjie, et al. Space-based GNSS meteorology and atmospheric sounding technique[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2007.
- [112] SPILKER JR J J. GPS Signal structure and performance characteristics[J]. *Navigation*, 1978, 25(2): 121-146.
- [113] BUSINGER S, CHISWELL S R, BEVIS M, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(1): 5-18.
- [114] ROCKEN C, HOVE T V, JOHNSON J, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(3): 468-478.
- [115] DUAN J, BEVIS M, FANG P, et al. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1996, 35(6): 830-838.
- [116] ELGERED G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry[J]. *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, 1993(6): 215-258.
- [117] TROLLER M. GPS Based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere[D]. Zurich: ETH Zurich, 2004.
- [118] DAI A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(15): 3589-3606.
- [119] WAGNER T, BEIRLE S, GRZEGORSKI M, et al. Global trends (1996—2003) of total column precipitable water observed by global ozone monitoring experiment (GOME) on ERS-2 and their relation to near-surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D12): 2193-2214.
- [120] MOHANAKUMAR K. Stratosphere troposphere interactions: An introduction[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [121] RAJA M K R V, GUTMAN S I, YOE J G, et al. The validation of airs retrievals of integrated precipitable water vapor using measurements from a network of ground-based GPS receivers over the contiguous united states[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(3): 416-428.
- [122] MATTAR C, SOBRINO J A, JULIEN Y, et al. Trends in column integrated water vapour over Europe from 1973 to 2003[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(12): 1749-1757.
- [123] 曹玉静, 刘晶森, 梁宏, 等. 基于地基 GPS 层析大气水汽资源的方法研究[J]. *自然资源学报*, 2010(10): 1786-1796.  
CAO Yujing, LIU Jingmiao, LIANG Hong, et al. Progress in ground-based GPS tomography atmospheric water vapor resource[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010(10): 1786-1796.
- [124] ZANGVIL A, PORTIS D H, LAMB P J. Investigation of the large-scale atmospheric moisture field over the midwestern united states in relation to summer precipitation. Part II: Recycling of local evapotranspiration and association with soil moisture and crop yields[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(17): 3283-3301.
- [125] PARK H J, SHIN D B, YOO J M. Atmospheric water balance over oceanic regions as estimated from satellite, merged, and reanalysis data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(9): 3495-3505.
- [126] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 483-491.  
LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 483-491.
- [127] AHRENS C D, SAMSON P J. Extreme weather and climate[M]. Boston: Cengage Learning, 2010.
- [128] NING T. GPS meteorology: With focus on climate application[M]. Sweden: Chalmers Tekniska Hogskola, 2012.
- [129] TRENBERTH K E, DAI A, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.
- [130] TRENBERTH K E, FASULLO J T, KIEHL J. Earth's global energy budget[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 311-324.
- [131] ANDERSSON E, HÖLM E, BAUER P, et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, 2007, 133(627): 1473-1485.
- [132] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.

- [133] ELGERED G, DAVIS J L, HERRING T A, et al. Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96 (B4): 6541-6555.
- [134] ENGLAND M N, SCHMIDLIN F J, JOHANSSON J M. Atmospheric moisture measurements: A microwave radiometer-radiosonde comparison [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(2): 389-398.
- [135] VEY S, DIETRICH R, RÜLKE A, et al. Validation of precipitable water vapor within the NCEP/DOE reanalysis using global gps observations from one decade [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1675-1695.
- [136] BRETTLE M J, GALVIN J F P. Back to basics: Radiosondes; Part 1-the instrument [J]. *Weather*, 2003, 58(9): 336-341.
- [137] BUEHLER S A, KUVATOV M, JOHN V O, et al. An upper tropospheric humidity data set from operational satellite microwave data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113 (D14110): 1-16.
- [138] ELLIOTT W P. On detecting long-term changes in atmospheric moisture [J]. *Climatic Change*, 1995, 31(2): 349-367.
- [139] GUI K, CHE H, CHEN Q, et al. Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS Ground-based GPS measurements over China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 197: 461-473.
- [140] BRENOT H, NEMÉGHAIRE J, DELOBBE L, et al. Preliminary signs of the initiation of deep convection by GNSS [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(11): 5425-5449.
- [141] BAKER H C, DODSON A H, PENNA N T, et al. Ground-based GPS water vapour estimation: Potential for meteorological forecasting [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63(12): 1305-1314.
- [142] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析 [J]. *测绘学报*, 1998(2): 22-27.  
CHEN Junyong. On the error analysis for the remote sensing of atmospheric water vapor by ground based GPS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998(2): 22-27.
- [143] 李建国, 毛节泰, 李成才, 等. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析 [J]. *气象学报*. 1999(3): 28-37.  
LI Jianguo, MAO Jietai, LI Chengcai, et al. The approach to remote sensing of water vapor-based on GPS and linear regression  $T_m$  in eastern region of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999(3): 28-37.
- [144] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 54-59.  
CAO Yunchang, FANG Zongyi, XIA Qing. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(1): 54-59.
- [145] WANG X, ZHANG K, WU S, et al. Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(2): 833-852.
- [146] 盛峥, 黄思训, 张流青, 等. 利用 GPS 技术探测大气中的水汽含量 [J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2005(1): 33-37.  
SHENG Zheng, HUANG Sixun, ZHANG Liuqing. Observation of atmospheric water vapor content with GPS technology [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2005(1): 33-37.
- [147] CHEN J, ZHANG Y, WANG J, et al. A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 125-134.
- [148] WILGAN K. Zenith total delay short-term statistical forecasts for GNSS precise point positioning [J]. *Acta Geodynamica Geomaterialia*, 2015, 12(4): 335-343.
- [149] YUAN Y, ZHANG K, ROHM W, et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(16): 10044-10057.
- [150] 叶世榕, 张双成, 刘经南. 精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008(8): 788-791.  
YE Shirong, ZHANG Shuangcheng, LIU Jingnan. Precision analysis of precise point positioning based tropospheric delay estimation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008(8): 788-791.
- [151] 何锡扬, 张小红, 李星星, 等. PPP 估计天顶对流层延迟方法与结果分析 [J]. *测绘信息与工程*, 2010, 35(1): 3-5.  
HE Xiyang, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, et al. Data processing strategy and results analysis of PPP based tropospheric zenith path delay estimation [J]. *Journal of Geomatics*, 2010, 35(1): 3-5.
- [152] CAISSY M, AGROTIS L, WEBER G, et al. The international GNSS real-time service [J]. *GPS World*, 2012, 6(23): 52-58.
- [153] HADAS T, KAPLON J, BOSY J, et al. Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5): 055003.
- [154] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 1972, 105(1): 279-298.
- [155] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, et al. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386.
- [156] 郭洁, 李国平. 地基 GPS 探测水汽的发展与气象业务应用 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2007(S1): 35-42.  
GUO Jie, LI Guoping. Ground-based GPS in remote sensing of water vapor: Development and application [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007(S1): 35-42.
- [157] 李国平, 陈娇娜, 黄丁发, 等. 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(11): 1328-1331.  
LI Guoping, CHEN Jiaona, HUANG Dingfa, et al. Real-time monitoring system of precipitable water vapor derived from ground-based GPS and its applications in meteorology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1328-1331.

- [158] NIELL A E, COSTER A J, SOLHEIM F S, et al. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 830-850.
- [159] 王小亚, 朱文耀, 严豪健, 等. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. *大气科学*, 1999(5): 605-612.  
WANG Xiaoya, ZHU Wenyao, YAN Haojian, et al. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999(5): 605-612.
- [160] LI X, TAN H, LI X, et al. Real-time sensing of precipitable water vapor from beidou observations: Hong kong and CMONOC networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(15): 7897-7909.
- [161] SHI J, XU C, GUO J, et al. Real-time GPS precise point positioning-based precipitable water vapor estimation for rainfall monitoring and forecasting[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(6): 3452-3459.
- [162] LU C, LI X, NILSSON T, et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and beidou observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(9): 843-856.
- [163] 施闯, 张卫星, 曹云昌, 等. 基于北斗/GNSS 的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析[J]. *测绘学报*, 2020, 49(9): 1112-1119.  
SHI Chuang, ZHANG Weixing, CAO Yunchang, et al. Atmospheric water vapor climatological characteristics over indo-china region based on beidou/GNSS and relationships with precipitation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(9): 1112-1119.
- [164] 尹恒毅, 郭春喜, 惠哲, 等. 不同 BDS 星历反演大气可降水量精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(11): 1182-1187.  
YIN Hengyi, GUO Chunxi, HUI Zhe, et al. Precision analysis of precipitable water vapor in different BDS ephemeris[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(11): 1182-1187.
- [165] STOCKER T. *Climate Change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [166] FELLOUS J L. Towards a global climate observing system[J]. *Interdisciplinary Science Reviews*, 2008, 33(1): 83-94.
- [167] VAN BAELEN J, REVERDY M, TRIDON F, et al. On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(S1): 204-223.
- [168] SEKO H, KAWABATA T, TSUYUKI T, et al. Impacts of GPS-derived water vapor and radial wind measured by doppler radar on numerical prediction of precipitation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Serial II*, 2004, 82(1B): 473-489.
- [169] CHOY S, ZHANG K, WANG C S, et al. Remote sensing of the earth's lower atmosphere during severe weather events using GPS technology: A study in victoria, australia[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). 2011: 559-571.
- [170] MANANDHAR S, DEV S, LEE Y H, et al. Systematic study of weather variables for rainfall detection [C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018: 3027-3030.
- [171] SUPARTA W, ZULKEPLE S K, PUTRO W S. Estimation of thunderstorm activity in tawau, sabah using GPS Data[J]. *Advanced Science Letters*, 2017, 23(2): 1370-1373.
- [172] 徐绍铨, 张华海, 杨志强, 等. *GPS 测量原理及应用*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017.  
XU Shaoquan, ZHANG Huahai, YANG Zhiqiang, et al. *GPS surveying and its applications*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017.
- [173] 金双根, 王新志. *GNSS 气象学原理与应用*[M]. 北京: 气象出版社, 2021.  
JIN Shuanggen, WANG Xinzhi. *GNSS meteorology and its applications*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021.
- [174] SINGH R P, MISHRA N C, VERMA A, et al. Total precipitable water over the arabian ocean and the bay of bengal using SSM/I Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(12): 2497-2503.
- [175] SINGH R P, DEY S, SAHOO A K, et al. Retrieval of water vapor using SSM/I and its relation with the onset of monsoon [C]//Annales Geophysicae. Copernicus GmbH, 2004, 22(8): 3079-3083.
- [176] 李国平. 地基 GPS 水汽监测技术及气象业务化应用系统的研究[J]. *大气科学*, 2011, 134(4): 385-392.  
LI Guoping. Research of remote sensing technology of atmospheric water vapor by using ground-based GPS and application system of meteorological operations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 134(4): 385-392.
- [177] SHOJI Y. Retrieval of water vapor inhomogeneity using the japanese nationwide GPS array and its potential for prediction of convective precipitation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Serial II*, 2013, 91(1): 43-62.
- [178] LE MARSHALL J, NORMAN R, HOWARD D, et al. Using global navigation satellite system data for real-time moisture analysis and forecasting over the australian region I. the system[J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2020, 69(1): 161-171.
- [179] MULLER C J, BACK L E, O'GORMAN P A, et al. A model for the relationship between tropical precipitation and column water vapor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(16).
- [180] BONAFONI S, BIONDI R, BRENOT H, et al. Radio occultation and ground-based gnss products for observing, understanding and predicting extreme events; A review [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 230: 104624.
- [181] BENEVIDES P, CATALAO J, MIRANDA P M A. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(12): 2605-2616.
- [182] YAO Y, SHAN L, ZHAO Q. Establishing a method of short-term

- rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11.
- [183] ZHAO Q, LIU Y, MA X, et al. An improved rainfall forecasting model based on GNSS observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(7): 4891-4900.
- [184] ZHAO Q, YAO Y, YAO W. GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, 167: 124-133.
- [185] MANANDHAR S, LEE Y H, MENG Y S. GPS-PWV based improved long-term rainfall prediction algorithm for tropical regions [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2643.
- [186] LI H, WANG X, WU S, et al. Development of an improved model for prediction of short-term heavy precipitation based on gnss-derived PWV[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4101.
- [187] LI H, WANG X, WU S, et al. A new method for determining an optimal diurnal threshold of gnss precipitable water vapor for precipitation forecasting[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1390.
- [188] ZHAO Q, MA X, YAO Y. Preliminary result of capturing the signature of heavy rainfall events using the 2-d-/4-d water vapour information derived from GNSS measurement in Hong Kong[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(7): 1537-1550.
- [189] MANNING T, ZHANG K, ROHM W, et al. Detecting severe weather in australia using GPS tomography[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2012, 11(1): 58-70.
- [190] ŁO M, SMOLAK K, GUEROVA G, et al. GNSS-based machine learning storm nowcasting[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2536.
- [191] LI H, WANG X, WU S, et al. An improved model for detecting heavy precipitation using GNSS-derived zenith total delay measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5392-5405.
- [192] ZHAO Q, YAO Y, YAO W, et al. Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-12.
- [193] ZUS F. Application of global positioning system slant path delay data for mesoscale model verification and four-dimensional variational assimilation[D]. Graz: Institut für Physik und Meteorologie, 2011.
- [194] 袁招洪, 丁金才, 陈敏. GPS 观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究[J]. *气象学报*, 2004(2): 200-212.  
YUAN Zhaohong, DING Jincai, CHEN Min. Preliminary study on applying gps observations to mesoscale numerical weather prediction model[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004(2): 200-212.
- [195] ROHM W, GUZIKOWSKI J, WILGAN K, et al. 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays and precipitable water into a numerical weather prediction model WRF[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(1): 345-361.
- [196] DE HAAN S. Assimilation of GNSS ZTD and radar radial velocity for the benefit of very-short-range regional weather forecasts[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(677): 2097-2107.
- [197] BENEVIDES P, CATALAO J, NICO G. Neural network approach to forecast hourly intense rainfall using gnss precipitable water vapor and meteorological sensors[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 966.
- [198] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195-204.
- [199] BOUKABARA S A, KRASNOPOLSKY V, PENNY S G, et al. Outlook for exploiting artificial intelligence in the earth and environmental sciences[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(5): E1016-E1032.
- [200] LI H, WANG X, ZHANG K, et al. A neural network-based approach for the detection of heavy precipitation using GNSS observations and surface meteorological data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, 225: 105763.
- [201] 李永华, 刘德, 金龙. 基于 BP 神经网络的汛期降水预测模型研究[J]. *气象科学*, 2002(4): 461-467.  
LI Yonghua, LIU De, JIN Long. Study on rainfall prediction model in rain season based on bp neural network[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2002(4): 461-467.
- [202] 焦阳. 基于卫星遥感图像的降雨监测系统[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.  
JIAO Yang. Rainfall monitoring system based on satellite remote sensing image[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013.
- [203] LIEN G Y, MIYOSHI T, KALNAY E. Assimilation of TRMM multi-satellite precipitation analysis with a low-resolution NCEP global forecast system[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(2): 643-661.
- [204] LIN L F, EBTEHAJ A M, FLORES A N, et al. Combined assimilation of satellite precipitation and soil moisture: A case study using TRMM and SMOS data[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(12): 4997-5014.
- [205] ZHAO Q, MA Y, LI Z, et al. Retrieval of a high-precision drought monitoring index by using GNSS-derived ZTD and temperature[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 8730-8743.
- [206] BHARDWAJ J, KULESHOV Y, WATKINS A B, et al. Building capacity for a user-centred integrated early warning system (I-EWS) for drought in the northern murray-darling basin[J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(1): 97-122.
- [207] ZHAO Q, MA X, YAO W, et al. A drought monitoring method based on precipitable water vapor and precipitation[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(24): 10727-10741.
- [208] HARDY K R, HAJJ G A, KURSINSKI E R. Accuracies of atmospheric profiles obtained from GPS occultations [J]. *International Journal of Satellite Communications*, 1994, 12(5): 463-473.
- [209] ZOU X, WANG B, LIU H, et al. Use of GPS/MET refraction angles in three-dimensional variational analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(570): 3013-3040.
- [210] BAI W H, SUN Y Q, DU Q F, et al. An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(6): 1817-1823.
- [211] BEYERLE G, SCHMIDT T, WICKERT J, et al. Observations and

- simulations of receiver-induced refractivity biases in GPS radio occultation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D12101): 1-13.
- [212] 刘丽, 梁月, 徐晓华, 等. 利用星载 GPS 无线电掩星数据分析全球水汽分布[J]. *测绘地理信息*, 2014, 39(1): 19-22.  
LIU Li, LIANG Yue, XU Xiaohua, et al. Analysis with spaceborne GPS radio occultation data the global water vapor distribution[J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(1): 19-22.
- [213] 吴昊, 鄂盛龙, 夏朋飞, 等. 联合地基 GNSS 及空基 GNSS 掩星探测水汽三维分布[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(1): 92-97.  
WU Hao, E Shenglong, XIA Pengfei, et al. Remote sensing the atmospheric water vapor using observations from the ground-based GNSS network and space-based radio occultation[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(1): 92-97.
- [214] 肖卫华, 符养, 杜晓勇, 等. 利用 COSMIC 掩星资料计算平流层大气风场方法分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(2): 199-204.  
XIAO Weihua, FU Yang, DU Xiaoyong, et al. Analysis of deriving stratospheric atmospheric winds from COSMIC radio occultation data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 199-204.
- [215] 王光谦, 钟德钰, 李铁键, 等. 天空河流: 发现, 概念及其科学问题[J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(6): 649-656.  
WANG Guangqian, ZHONG Deyu, LI Tiejian, et al. Sky river: discovery, concept, and implications for future research[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2016, 46(6): 649-656.
- [216] KUO Y H, ZOU X, CHEN S J, et al. A GPS/MET sounding through an intense upper-level front[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(4): 617-626.
- [217] NEIMAN P J, RALPH F M, WICK G A, et al. Diagnosis of an intense atmospheric river impacting the pacific northwest: Storm summary and offshore vertical structure observed with COSMIC satellite retrievals[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(11): 4398-4420.
- [218] HUANG C Y, KUO Y H, CHEN S H, et al. Improvements in typhoon forecasts with assimilated GPS occultation refractivity[J]. *Weather and Forecasting*, 2005, 20(6): 931-953.
- [219] 陈舒雅. GPS 掩星观测资料同化及对区域天气预报模拟之影响[D]. 台湾: 国立中央大学, 2008.  
CHEN Shuya. Assimilation of GPS radio occultation data and its impact on regional weather prediction[D]. Taiwan: National Central University, 2008.
- [220] 蔡其发, 王业桂, 张斌, 等. 云海-2 掩星资料在区域数值预报中的同化应用评估[J]. *大气科学*. 2021, 45(1): 217-228.  
CAI Qifa, WANG Yegui, ZHANG Bin, et al. Evaluation on assimilation application of Yunhai-2 occultation data in regional numerical weather prediction model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(1): 217-228.
- [221] 余江林, 寇正, 项杰, 等. 掩星弯角资料同化在一次暴雨过程中的应用[J]. *暴雨灾害*. 2014, 33(2): 181-186.  
YU Jianglin, KOU Zheng, XIANG Jie, et al. Application of GPS bending angle data assimilation in a rainstorm event[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2014, 33(2): 181-186.
- [222] LIU C L, KIRCHENGAST G, SYNDERGAARD S, et al. A review of LEO-LEO occultation techniques using microwave and infrared-laser signals[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2776-2811.
- [223] LI X, XU J, CHENG T, et al. Monitoring trace gases over the antarctic using atmospheric infrared ultraspectral sounder onboard GaoFen-5: Algorithm description and first retrieval results of O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, and HCl[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1-18.
- [224] LEROY S S. Measurement of geopotential heights by GPS radio occultation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D6): 6971-6986.
- [225] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007(11): 955-960.  
LIU Jingnan, SHAO Lianjun, ZHANG Xunxie. Advances in GNSS-R studies and key techniques[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 955-960.
- [226] 杨东凯, 李晓辉, 王峰. GNSS 反射信号海洋遥感应用现状分析[J]. *无线电工程*, 2019, 49(10): 843-848.  
YANG Dongkai, LI Xiaohui, WANG Feng. Analysis of application status of GNSS reflected signal in ocean remote sensing[J]. *Radio Engineering*, 2019, 49(10): 843-848.
- [227] LOWE S T, ZUFFA D C, CHAO Y, et al. 5-cm-precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 1-13.
- [228] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964.
- [229] 万玮, 李黄, 洪阳, 等. GNSS-R 遥感观测模式及陆面应用[J]. *遥感学报*, 2015, 19(6): 882-893.  
WAN Wei, LI Huang, HONG Yang, et al. Definition and application of GNSS-R observation patterns[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(6): 882-893.
- [230] 金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1389-1398.  
JIN Shuanggen, ZHANG Qinyun, QIAN Xiaodong. New progress and application prospects of global navigation satellite system reflectometry (GNSS+R)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1389-1398.
- [231] LARSON K M, LÖFGREN J S, HAAS R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1301-1310.
- [232] 张双成, 南阳, 李振宇, 等. GNSS-MR 技术用于潮位变化监测分析[J]. *测绘学报*, 2016, 45(9): 1042-1049.  
ZHANG Shuangcheng, NAN Yang, LI Zhenyu, et al. Analysis of tide variation monitored by GNSS-MR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9): 1042-1049.
- [233] WANG X, HE X, ZHANG Q. Evaluation and combination of quadrangle constellation multi-GNSS multipath reflectometry applied to sea level retrieval[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231(2):

- 111229.
- [234] LARSON K M, RAY R D, NIEVINSKI F G, et al. The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from kachemak bay, alaska [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200-1204.
- [235] YU K, BAN W, ZHANG X, et al. Snow depth estimation based on multipath phase combination of GPS triple-frequency signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 5100-5109.
- [236] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry [J]. *ESA journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [237] HAMMOND M L, FOTI G, GOMMENDINGER C, et al. Temporal variability of GNSS-reflectometry ocean wind speed retrieval performance during the UK techDemoSat-1 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111744.
- [238] 路勇, 杨东凯, 熊华钢, 等. 基于 GNSS-R 的海面风场监测系统研究 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2009, 34(4): 470-473.  
LU Yong, YANG Dongkai, XIONG Huagang, et al. Study of ocean wind-field monitoring system based on GNSS-R [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 470-473.
- [239] NGUYEN V A, NOGUÉS-CORREIG O, YUASA T, et al. Initial GNSS phase altimetry measurements from the spire satellite constellation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): e2020GL088308.
- [240] CARTWRIGHT J, BANKS C J, SROKOSZ M. Sea Ice detection using GNSS-R data from TechDemoSat-1 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(8): 5801-5810.
- [241] LARSON K M, SMALL E E, GUTMANN E, et al. Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results [J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(3): 173-177.
- [242] CAMPS A, PARK H, PABLOS M, et al. Sensitivity of GNSS-R spaceborne observations to soil moisture and vegetation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4730-4742.
- [243] 梁勇, 杨磊, 吴秋兰, 等. 地表粗糙度影响下的 GNSS-R 土壤湿度反演仿真分析 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43(10): 1546-1552.  
LIANG Yong, YANG Lei, WU Qiulan, et al. Simulation of soil roughness impact in GNSS-R soil moisture retrieval [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1546-1552.
- [244] MORRIS M, CHEW C, REAGER J T, et al. A novel approach to monitoring wetland dynamics using CYGNSS: Everglades case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111417.
- [245] CARRENO-LUENGO H, LUZI G, CROSETTO M. Above-ground biomass retrieval over tropical forests: A novel GNSS-R approach with CYGNSS [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1368.
- [246] CHEW C, REAGER J T, SMALL E. CYGNSS data map flood inundation during the 2017 atlantic hurricane season [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [247] WAN W, LIU B, ZENG Z, et al. Using CYGNSS data to monitor China's flood inundation during typhoon and extreme precipitation events in 2017 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 854.
- [248] RAJABI M, NAHAVANDCHI H, HOSEINI M. Evaluation of CYGNSS observations for flood detection and mapping during sistán and baluchestan torrential rain in 2020 [J]. *Water*, 2020, 12(7): 2047.
- [249] GERLEIN-SAFDI C, RUF C S. A CYGNSS-based algorithm for the detection of inland waterbodies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21): 12065-12072.
- [250] WARNOCK A, RUF C. Response to variations in river flowrate by a spaceborne GNSS-R river width estimator [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2450.
- [251] WAN W, LARSON K M, SMALL E E, et al. Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 237-248.
- [252] SANTI E, PALOSCIA S, PETTINATO S, et al. Remote sensing of forest biomass using GNSS reflectometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2351-2368.
- [253] WU X, DONG Z, JIN S, et al. First measurement of soil freeze/thaw cycles in the tibetan plateau using CYGNSS GNSS-R data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2361.
- [254] OZEKI M, HEKI K. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(3): 209-219.
- [255] YANG Y, ZHENG Y, YU W, et al. Deformation monitoring using GNSS-R technology [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(10): 3303-3314.
- [256] LIU F, ANTONIOU M, ZENG Z, et al. Coherent change detection using passive GNSS-based BSAR: Experimental proof of concept [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(8): 4544-4555.
- [257] 宋学忠, 徐爱功, 杨东凯, 等. GNSS 反射信号在土壤湿度测量中的应用 [J]. *测绘通报*, 2013(11): 61-64.  
SONG Xuezhong, XU Aigong, YANG Dongkai. Details of soil moisture measuring utilizing GNSS reflected signals [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(11): 61-64.
- [258] GRANT M S, ACTON S T, KATZBERG S J. Terrain moisture classification using GPS surface-reflected signals [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 41-45.
- [259] LARSON K M, BRAUN J J, SMALL E E, et al. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 3(1): 91-99.
- [260] CHEW C C, SMALL E E. Soil moisture sensing using spaceborne GNSS reflections: Comparison of CYGNSS reflectivity to SMAP soil moisture [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 4049-4057.
- [261] 孙波, 张弛, 尹世超, 等. 基于 PSO-RF 的 GNSS-IR 土壤湿度反演方法研究 [J]. *无线电工程*, 2021, 51(10): 1080-1085.  
SUN Bo, ZHANG Chi, YIN Shichao. Research on GNSS-IR soil

- moisture inversion method based on PSO-RF[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(10): 1080-1085.
- [262] WAN W, JI R, LIU B, et al. A two-step method to calibrate CYGNSS-derived land surface reflectivity for accurate soil moisture estimations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 19: 1-5.
- [263] 窦邵华, 何骞, 龚春龙, 等. GNSS 反射测量技术在水位变化探测中的应用[J]. *导航定位学报*, 2021, 9(1): 94-101.  
DOU Shaohua, HE Qian, GONG Chunlong, et al. Application of GNSS reflectometry in water level change detection[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2021, 9(1): 94-101.
- [264] 南阳, 张双成, 黄亮, 等. GPS-IR 技术用于河水面测高实验分析[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(2): 126-131.  
NAN Yang, ZHANG Shuangcheng, HUANG Liang, et al. Analysis of GPS-IR water level altimetry experiment on river[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(2): 126-131.
- [265] 张驰, 张书毕, 陈国栋. GNSS-R 水位反演的技术精度研究[J]. *测绘科学*, 2020, 45(6): 31-36.  
ZHANG Chi, ZHANG Shubi, CHEN Guodong. Research on the technical accuracy of GNSS-R water level inversion[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(6): 31-36.
- [266] 吴继忠, 杨荣华. 利用 GPS 接收机反射信号测量水面高度[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(6): 135-138.  
WU Jizhong, YANG Ronghua. Measuring water surface height by using reflected signal of geodetic-quality GPS receiver[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(6): 135-138.
- [267] 吕铮, 冯威, 黄丁发. GNSS SNR 信号反演大坝水位变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(2): 146-151.  
LYU Zheng, FENG Wei, HUANG Dingfa. Using GNSS signal-to-noise ratio to measure dam water level changes[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 146-151.
- [268] 宋敏峰, 何秀凤. 基于 GNSS-IR 技术高精度水库水位监测研究[J]. *无线电工程*, 2021, 51(10): 1099-1103.  
SONG Minfeng, HE Xiufeng. High-precision reservoir water level monitoring based on GNSS-IR technology[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(10): 1099-1103.
- [269] 刘奇, 张双成, 南阳, 等. 利用星载 GNSS-R 相干信号探测南亚洪水[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(11): 1641-1648.  
LIU Qi, ZHANG Shuangcheng, NAN Yang, et al. Flood detection of south asia using spaceborne GNSS-R coherent signals[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1641-1648.
- [270] 汪俊涛, 朱勇超, 李江洋, 等. 星载 GNSS-R 在洪水探测中的应用研究[C]//. 第十二届中国卫星导航年会论文集——S01 卫星导航行业应用, 2021: 178-182.  
WANG Juntao, ZHU Yongchao, LI Jiangyang, et al. Application of spaceborne GNSS-R in flood detection[C]//. *The 12<sup>th</sup> China Satellite Navigation Conference-S01 Industrial Application of BeiDou Navigation Satellite System*, 2021: 178-182.
- [271] 袁霜, 何平, 温扬茂, 等. 综合 InSAR 和应变张量估计 2016 年  $M_w 7.0$  熊本地震同震三维形变场[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(4): 1340-1356.  
YUAN Shuang, HE Ping, WEN Yangmao, et al. Integrated InSAR and strain tensor to estimate three-dimensional coseismic displacements associated with the 2016  $M_w 7.0$  kumamoto earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1340-1356.
- [272] 严颂华, 唐风雨, 陈永谦, 等. GNSS-R 形变监测技术综述[J]. *无线电工程*, 2021, 51(10): 1086-1092.  
YAN Songhua, TANG Fengyu, CHEN Yongqian, et al. Review of deformation monitoring based on GNSS-R technology[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(10): 1086-1092.

(责任编辑 康健)