

# 基于遥感技术的地下水埋深和储变量 监测评估研究进展

孟俊贞<sup>1</sup>, 杨小权<sup>1</sup>, 李志萍<sup>1,2</sup>

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 河南水利与环境职业学院, 河南 郑州 450008)

**摘要:**【目的】地下水的分布、埋深及储变量监测是实现水资源可持续利用的关键,但由于复杂的地表环境和地质条件,如何利用遥感技术更准确地量化地下水资源仍然是一个技术难题。【方法】从综合评价方法角度,详细分析了水文地质遥感信息分析法、地学要素遥感信息分析法、热红外遥感地表热异常评估法、遥感信息定量反演模型、重力卫星数据测量及地表形变测量在地下水分布、埋深及储变量研究中的应用与进展。【结果】①现有遥感技术在地下水分布、埋深及储变量监测方面的应用已成为传统测量方式的有效辅助手段,是一种更高效全面的地下水信息获取方式。②综合多遥感评估因子并结合地面勘探数据建立地下水评估模型,既充分利用了遥感技术的广覆盖性和高效性,又具有传统勘探方式的准确性和可靠性,是当前应对特殊地理环境下地下水资源评估的首选。③多源遥感数据同化是遥感技术在地下水资源评估中的应用趋势,未来在遥感卫星技术及数据联合处理等方面的技术突破将大大提高地下水资源的监测与管理能力,为水资源综合治理提供更全面、更可靠的信息支撑。【结论】复杂地理环境下地下水分布、埋深及储变量遥感评估模型需综合多源遥感数据与地面勘探数据,通过数据同化突破遥感卫星硬件的局限性,获取更精确的地下水评估结果。

**关键词:**地下水埋深;地下水储变量;地下水评估;遥感

**中图分类号:**TV211.1<sup>+</sup>2

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-6792(2025)05-0023-11

“十四五”规划和2035年远景目标纲要明确提出要建设数字中国,提升水利智慧化、信息化水平。水利部部长李国英提出加快构建智慧水利体系。因此,随着数据挖掘技术的逐渐成熟、北斗导航系统的成功组网、卫星数据源的日益丰富和无人机低空遥感的深入应用,水利遥感“空、天、地”一体化监测与信息提取技术在水利事业新发展阶段将发挥更大的技术支撑作用,其应用范围更加广泛、精确度更高、操作更便捷,并为地下水资源的合理开发和可持续利用提供更好的支持。

地下水具有重要的资源属性和生态功能,在保障城乡生活生产供水、支持经济社会发展和维系良好生态环境中具有重要作用。地下水资源勘察是查明地下水埋深、资源量、储变量等信息的重要途径。1961年,首次利用热红外扫描探测器探测出

了美国黄石公园的热泉,标志着热红外遥感技术在地下水勘察中的应用突破<sup>[1]</sup>,为后来地下水遥感评估技术的发展奠定了基础。随着技术的不断迭代,如Landsat、WorldView、IKONOS、ALOS(Advanced Land Observing Satellite)、Sentinel、GNSS(Global Navigation Satellite System)、InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)、Lidar(Light Detection and Ranging)、GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)等遥感卫星的发射,其提供的包含植被、土壤、气候、地形地貌及地球重力场等多源遥感信息为地下水资源遥感评估技术的研究提供了更加丰富可靠的数据。通过整合分析这些多源数据,可以获取地下水埋深及储变量等关键信息,为地下水资源管理和保护提供科学依据。本文通过综合分析国内外地下水分布、埋深及储变量遥感评估技术的

收稿日期/Received: 2024-04-07

修回日期/Revised: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972261)。

第一作者: 孟俊贞(1984—),女,副教授,硕导,从事生态环境水文地质、3S技术集成及其应用等方面的研究。E-mail: mengjunzhen@ncwu.edu.cn。

通信作者: 李志萍(1971—),女,教授,博导,博士,从事地下水污染方面的研究。E-mail: lizhiping@ncwu.edu.cn。

研究进展,旨在有效利用遥感技术为地下水资源的合理开发和可持续利用提供科学支持。

## 1 地下水分布与埋深遥感评估

对地下水分布与埋深的评估是地下水资源管理的重要一环。传统地下水水位主要通过地下水井测量,其监测受限于地下水监测井的数量和空间分布以及测量频次<sup>[2]</sup>。遥感技术能够实现全区域、多时段、全天候的数据获取,特别是在分布场景复杂的地下水埋深监测中。遥感技术提供的全方位数据源对了解地下水分布与埋深变化情况、开展地下水资源的开发利用与保护以及水资源的合理配置与调度等研究都具有重要意义。目前,遥感评估地下水分布与埋深的方法主要分为水文地质遥感信息分析法、地学要素遥感信息分析法、热红外遥感地表热异常评估法以及遥感信息定量反演模型4种。

### 1.1 水文地质遥感信息分析法

水文地质遥感信息分析法是根据从影像中提取的地质岩性、构造、水文信息等来判断区域是否符合典型地下水富集区特征,从而确定该地区是否存在地下水。如:KRISHNAMURTHY J等<sup>[3]</sup>通过卫星影像提取地层岩性、构造等信息,结合地下含水层地质特征成功识别出研究区的地下水分布情况;盖利亚等<sup>[4]</sup>通过对地层岩性、水系分布的解译,成功圈定了地下水富集区。相较于传统的“撮箕地,找水最有利”“两山夹一沟,沟岩有水流”等依靠经验的地下水搜寻方式,水文地质遥感信息分析法大大提高了地下水勘察工作的效率。此外,相关研究发现水文地质信息中蒸散发还与地下水水位有密切的关系。NDOU N N等<sup>[5]</sup>利用陆面能量平衡算法(Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL)探讨了南非莫洛波河流域潜在蒸散发量在地下水埋深变化趋势模拟中的应用,发现蒸散发量与地下水位之间存在显著的正相关关系。该研究表明遥感反演蒸散发在地下水埋深的监测上具有一定可行性,但目前这一方法在国内外还未得到实际应用,可靠性还需进一步验证。

水文地质遥感信息分析法建立在遥感影像信息解译基础上,但在一些地表被完全覆盖/利用的区域,地质构造信息的提取存在一定难度,受遥感影像的质量、区域地表的限制较大。因此,水文地质遥感信息分析法的适用性受地域影响较大<sup>[6]</sup>。

### 1.2 地学要素遥感信息分析法

地学要素遥感信息分析法通过提取遥感影像中与地下水相关的环境因子信息,根据这些因子与

地下水的关系,来监测和反演区域地下水状况。如在干旱地区,地表降水、径流、冰雪分布等是判断地下水分布的重要因素,植被则是地下水分布的直接指示因素<sup>[6]</sup>。

不同植被的生长不仅受地表环境的影响,其与地下水的分布特征也有着密切的相关性。由于地下水资源的形成是一个复杂且动态变化的过程,利用植被信息构建地下水资源分布评估模型一般需结合当地的地质条件,选取不同的地质或地表因子作为补充。如:许颖砾等<sup>[7]</sup>选取岩性、地貌、坡度、植被覆盖度、地表温度、水域密度和土壤湿度7个指标,构建了岛屿环境下的浅层地下水富集性遥感评估模型,得出了浅层地下水富集性等级图;刘永新等<sup>[8]</sup>在内蒙古北部的干旱区选取地层岩性、地貌类型、地形坡度、汇流累积量和植被覆盖度5个指标构建的GRSFAI(Groundwater Remote Sensing Fuzzy Assessment Index)模型成功预测出浅层地下水富集分布情况。地下水的分布与埋深对植被覆盖有着不同程度的影响。一般情况下,区域的植被分布依赖于地下水的分布范围,植被生长则高度依赖于地下水埋深<sup>[9]</sup>。此外,地下水埋深不仅与植被覆盖息息相关,尤其在缺水的干旱环境中,地下水与植被生长、植物种群演替以及绿洲的存亡有着密切关系<sup>[10]</sup>。管子隆等<sup>[11]</sup>在格尔木河中游地区,利用MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)数据获取的植被覆盖度分级指标与地下水埋深的实地观测数据进行对比分析,得出适合植被生长的地下水埋深为4 m,且当地下水埋深超过8 m时,植被覆盖度急剧下降,地区生态环境会受到严重影响,进一步揭示了地下水埋深与植被覆盖的关系,探究了地下水对生态环境的影响。曹乐等<sup>[12]</sup>利用Landsat NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)数据结合地下水埋深空间分布图,通过分析二者的相关系数得出地下水浅埋区(埋深小于4 m)的生态水位,量化了地下水埋深对生态环境的影响,为地下水开采精准调控提供了参考依据。王超等<sup>[13]</sup>利用Landsat NDVI数据分析了地下水埋深与NDVI的定量响应关系及地下水对植被、生物群落的影响程度,确定了维持研究区植被正常生长的地下水埋深阈值,为研究区的地下水开发划定了三级敏感区。这是地学要素遥感信息在地下水埋深与开发管理上的进一步应用,对研究区生态环境保护有着重要意义。

一般情况下,根据植被信息评估地下水的分布或埋深适用于干旱半干旱且植被类型较为单一的

地区,该方法归类为单因子模型评估法,且通常用于评估地下水埋深。对于地下水富集性评估则需综合地下水补给和排泄、水文地质特征、地下水与地表水的相互作用等多个因素,因此植被信息在地下水富集性的评估中应用较少。

### 1.3 热红外遥感地表热异常评估法

热红外遥感地表热异常评估法主要根据地表温度的变化推断地下水的富集区。地表在白天吸收太阳辐射造成温度升高,夜间则开始向外散发热辐射,而水是自然界常见物质中热容量最大的物质之一,因此地下水的温度变化相比周围环境更加稳定,夜间地下水在毛细作用和热传导的作用下影响地表散热,使地表温度与周围环境之间产生温差。利用热红外波段(3~1 000  $\mu\text{m}$ )能够捕获地表温度的差异,据此进行地下水的勘探与评估。

热红外遥感可分为星载热红外和机载热红外两种技术,其中星载热红外的分辨率较低,如美国的 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)/AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)、MODIS 以及中国风云系列气象卫星所搭载的 MVIRS(Multi-channel Visible and Infrared Scanning Radiometer)和 VISSR(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)传感器分辨率普遍在几百米至千米水平上,因此在地下水探测中多使用 Landsat 系列卫星搭载的 TM(Thematic Mapper)/ETM<sup>+</sup>(Enhanced Thematic Mapper Plus)传感器。机载热红外通常是以飞机为平台搭载热红外传感器,其缺点是测量结果易受大气时空变化影响,在后期面临数据质量筛选等诸多问题,且在流域尺度的研究中该方法更容易受到干扰。此外,热红外遥感地表热异常监测法仅适于浅层地下水的监测和地下水溢出带的判断,无法实现地下水及其动态变化的量化研究。近些年,国内外学者利用热红外遥感监测陆地地下水的研究少之又少,更多的是将其应用于海底地下水排放监测研究中<sup>[14-15]</sup>。

### 1.4 遥感信息定量反演模型

遥感信息定量反演模型通过选取与地下水密切相关的地表因子,构建数学或物理模型,将遥感影像信息与地表目标参量联系起来,根据建立的定量评价模型反演地下水资源。

在降水量极少、蒸发量较大的干旱地区,土壤湿度受地下水埋深影响极大。当地下水富集程度较高且埋深较浅时,土壤通常表现出较为理想的湿度条件。因为表层土壤能够通过地下水的毛细管作用得到补充,从而维持较高的土壤湿度,因此判

断地下水存在的参数因子可选取土壤湿度进行表征。目前,利用 Landsat 不同波段数据、TM 多光谱数据和 MODIS 数据获取的植被指数、土壤湿度等建立的地下水监测模型,通过与实地考察对比,均能够较好地预测地下水的分布。如:郑璞等<sup>[16]</sup>以多年的地表土壤湿度信息分级图预测了辽宁省朝阳市的地下水富集范围;姜红等<sup>[17]</sup>以 Landsat-8 遥感图像作为数据源,通过引入土壤水分反演模型建立了地下水位分布遥感监测评价模型(GLDRS(Ground Water Level Distribution Using Remote Sensing)模型),获取了焉耆盆地的地下水位分布图;史晓亮等<sup>[18]</sup>利用长时间序列的 MODIS NDVI 和 LST(Land Surface Temperature)数据反演土壤含水量,建立了新疆阿克苏河流域基于土壤含水量的地下水监测模型,获得了研究区的地下水埋深空间变化特征图。土壤湿度不仅与地下水的分布范围、水位和埋深相关,还能够用于评估不同含水层的地下水资源。YU D H 等<sup>[19]</sup>利用遥感提取了土壤湿度、地表温度、植被覆盖度等与浅层地下水相关的 8 个指标,预测了平原孔隙水的富水靶区;HARTMANN A 等<sup>[20]</sup>利用全球土壤水分监测数据和岩溶地下水排放数据库对岩溶地下水资源进行了模拟,发现土壤水分是影响岩溶地下水排泄和补给过程中的关键一环,对岩溶地下水资源动态评估模型的建立和完善至关重要。但是,地下水影响土壤含水量的机制是一个复杂的过程,根据土壤湿度建立的地下水遥感评估模型,通常对浅层地下水的评估较为可靠,一般能准确预测出埋深 10 m 内的地下水分布。同时,土壤湿度评估法作为一种单因子评估模型,没有考虑土壤类型、土壤组成、降水等诸多因素对土壤湿度的影响,限制了其推广应用。因此,该方法通常用来评估特定区域的地下水分布情况,如一些植被依赖地下水的地区(干旱半干旱区、灌溉区和高渗透区)。近年来,随着评估模型与遥感技术的完善,全球范围尺度的浅层地下水评估模型已经得到验证<sup>[21-22]</sup>,大尺度地下水评估模型的应用不仅可以从宏观上提高人们对地下水与地球系统交互过程的理解,而且有助于气象预报、农业管理、流域治理和水文地质学等学科的研究。

需要指出的是,在地表因素中,地下水分布除了与植被覆盖、土壤湿度相关,还受到土壤组成、地层岩性等因素的影响,不同土壤类型及地层岩性的渗透性、持水能力、孔隙结构等都会影响地下水的聚集和流动,进而影响地下水的水位与分布。因此,在建立地下水评估模型时,需综合考虑多种因

素的影响。

## 2 地下水储变量遥感监测

相较于依赖地下水井的传统地下水储变量监测方式,遥感技术提供了一种高时效、非接触的监测途径。目前,利用重力卫星(GRACE)监测地下水储量变化是地下水遥感领域的主流,该卫星的应用在世界各地都有大量的成功案例。同时,时空监测频率更高的干涉合成孔径雷达(InSAR)、全球导航卫星系统(GNSS)和激光雷达(Lidar)能够更好地弥补重力卫星的缺陷,提供更加丰富的地下水位变化监测数据,为区域地下水资源管理与决策提供更全面的数据支撑。

### 2.1 重力卫星测量

重力卫星测量法主要是通过观测地球重力场位势的变化实现地下水储量的监测过程。由于地下水的储量变化会引起地球质量分布的微小变化,导致局部地区重力发生异常,重力异常改变引力场,导致两颗卫星之间的距离产生微小变化,据此可以推导出重力的变化值。重力卫星监测原理如图1所示。

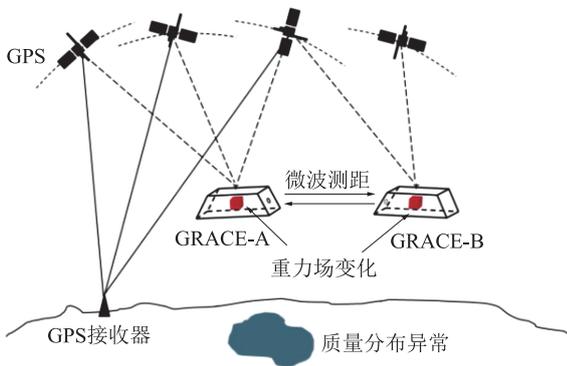


图1 GRACE卫星监测原理

Fig. 1 Monitoring principle of GRACE satellite

在这一过程中,GRACE卫星通过累积多次测量,最终计算得出一段时间内的地球重力场月值数据,据此反演出陆地水储量(Terrestrial Water Storage, TWS)变化。其反演原理是,根据GRACE卫星的位势测量值,将其转换为地表等效水高(Equivalent Water Thickness, EWT),以此表示TWS的变化量,即根据时变重力场反演出地球表面质量变化量,反演方法参考文献[23],而后根据转换方程计算TWS变化量,即:

$$EWT = \frac{\Delta\sigma(\theta, \phi)}{\rho_w} \quad (1)$$

式中: EWT为等效水高,表示TWS变化量, mm;

$\Delta\sigma(\theta, \phi)$ 为地球表面质量变化量,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $\rho_w$ 为水的密度(常数为  $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ )。

GRACE卫星在反演TWS过程中可能会受到地球固体质量变化的影响,在计算地下水变化的过程中需要用相应模型去除这部分影响<sup>[24]</sup>。同时,GRACE卫星反演的水储量无法识别出地表水、土壤水或地下水的占比,也不能区分出水、冰或雪等不同形态的水含量。因此,在获取地下水储量时需要相应的水文模型反演出地表、植被、土壤等介质的含水量,将其剔除后即可得到地下水变化量,即:

$$\Delta TWS = \Delta W_{\text{surface}} + \Delta W_{\text{veg}} + \Delta W_{\text{soil}} + \Delta W_{\text{snow}} + \Delta W_{\text{ET}} + \Delta W_{\text{ground}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta TWS$ 为地下水储量变化量, mm;  $\Delta W_{\text{surface}}$ 为地表水当量变化量, mm;  $\Delta W_{\text{veg}}$ 为植被水当量变化量, mm;  $\Delta W_{\text{soil}}$ 为土壤水当量变化量, mm;  $\Delta W_{\text{snow}}$ 为雪水当量变化量, mm;  $\Delta W_{\text{ET}}$ 为蒸散发变化量, mm;  $\Delta W_{\text{ground}}$ 为地下水变化量, mm。

GRACE卫星提供了2002年4月至2017年6月期间地球重力场变化估计值。2018年5月,GRACE卫星的后续任务GRACE Follow-On (GRACE-FO)也成功启动,为减小数据观测误差,GRACE-FO重力卫星还同时搭载了微波测距和激光测距系统,相较于GRACE卫星,其精度达到了纳米量级。2002年,RODELL M等<sup>[25]</sup>首次尝试利用GRACE卫星数据,将美国中部高原地区的地下水储量变化从TWS变化中分离了出来。一般情况下,GRACE和GRACE-FO卫星能够根据重力值测量计算出约  $300\text{ km}^2$ 的地下水储量变化,其精度能够达到  $2\text{ cmEWT}$ ,但其时间分辨率仍然较低(30 d),在更精细的时间尺度上无法获得对地下水储量的准确解译。由于GRACE卫星在空间测量尺度上具有其他卫星无法比拟的优势,非常适用于流域和陆地水资源变化监测及预测地下水的长期枯竭趋势<sup>[26-27]</sup>。一般来说,GRACE卫星对地下水数据贫乏地区具有更高的应用价值。利用GRACE卫星,研究人员能够获得全球范围内的地下水变动数据,不再受到监测站点的限制。在一些发达国家,通常可以使用密集的地下水监测网络系统监测地下含水层的水位变化。而在地下水数据匮乏地区,地下水水位主要是通过定期测量地下水井的水位获取,但这种方式存在成本高昂、数据单一、监测点限制等问题,且人工获取的数据质量难以得到有效保障,这对不同地区精准调控地下水开发与利用造成了一定困难。相比传统方式,通过GRACE卫星反演地下水储量,并结合水文地质资料则能够获得

更精确的地下水储量变化结果<sup>[28-29]</sup>。

## 2.2 地表形变测量

导致地表产生形变的原因是多样的,如地下水开采或补给、火山或地震产生的地质活动及人类工程建设等。在一些地下水开采区,这种地表形变主要是由于地下沉积物中的孔隙压力变化引起的。孔隙压力是维持地表有效应力平衡的关键,有效应力的变化会导致含水层基质发生固结或膨胀,该过程主要受地下水位变化的影响。当地下水位上升时,孔隙水压力增加,有效应力减小,含水层基质膨胀;反之,含水层基质固结。而孔隙压力可通过地下水位单位换算获得<sup>[30]</sup>,进而推导出有效应力的变化。因此,在实际计算中将有效应力的变化等效为地下水位的变化往往更为直观。

地表形变除了受应力的影响,孔隙压力变化导致的含水层弹性或压实性沉降也是影响因素之一。对地下水的过度抽取会导致地表产生压实性形变,且单位地下水位变化的压实性形变量比弹性形变量大 1~2 个数量级。因此,出现该类型地表沉降时通常伴随着地下水位的大幅下降和黏土层等类似深厚松散的可压缩沉积物的地质特征。在以上过程中,基质的形变量可以表示为弹性压缩量和应力的函数。在地下水开采区可利用 InSAR、GNSS、Lidar 等卫星,以高垂直精度测量地表形变,通过监测和分析地表形变的时间和空间变化模式,能够间接推断地下水位的变化,为地下水综合治理提供时空连续的数据支持。

### 2.2.1 干涉合成孔径雷达 (InSAR)

InSAR 可在不同时间向同一区域发射微波并记录地表反射信息的振幅和相位,获得同一目标区域成像的 SAR 复图像对,若复图像对之间存在相干条件,则 SAR 复图像对共轭相乘可以得到干涉图。根据干涉图的相位值,得出两次成像中微波的相位差,从而计算出目标地区的地形、地貌以及表面的微小变化(图 2)。

InSAR 用于测量地表形变最早基于 L 波段的 SEASAT 卫星实现。该技术评估地下水储量的精度取决于观测区的地质情况、地表覆盖度以及大气和电离层噪声等。由于其具备多时相监测且不受天气影响等优点,利用 InSAR 数据测量与地下水相关的地表形变在全球多个地区都在进行。BAWDEN G W 等<sup>[31]</sup>在洛杉矶盆地利用 InSAR 结合 GPS 数据监测到该地区因地下水抽取造成每年约 12 mm 的地表沉降;CALDERHEAD A I 等<sup>[32]</sup>在墨西哥托卢卡河谷利用基于差分干涉的合成孔径雷

达(D-InSAR)监测并验证得出该地区的最大总沉降量超过 2 m; ZHOU C F 等<sup>[33]</sup>采用 InSAR 时序分析法,对北京市东八里庄-大角亭和来广营地区的地面沉降进行了研究,发现地面沉降随着地下水位的降低而增加,最大相关系数可达 0.525。InSAR 虽然能够提供连续的地表形变图像,但由于地层的空间异质性及地表形变的非线性特征,该方法通常需结合相关水文数据作为评估地下水储量变化的补充<sup>[34]</sup>。

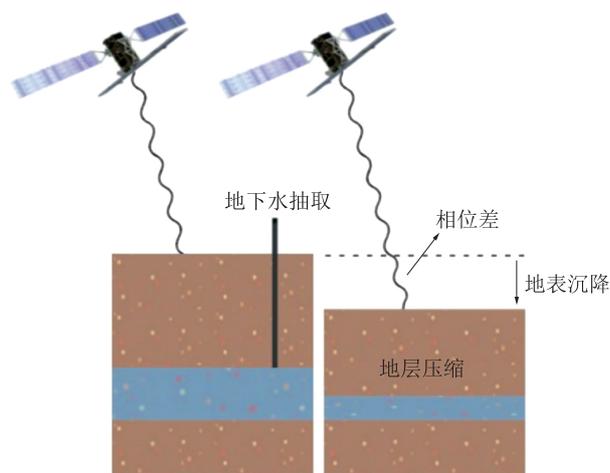


图 2 InSAR 测量地表形变原理

Fig. 2 The principle of measuring surface deformation using InSAR

高时空分辨率的 InSAR 产品是提高地表形变监测精度的关键。目前,国际上应用最为成熟的 D-InSAR 技术的观测精度能够达到厘米级<sup>[35]</sup>。在此基础上发展而来的多时相 InSAR (Multi-Temporal InSAR, MT-InSAR) 技术,包括永久散射体 InSAR (Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线集 InSAR (Small Baselines Subsets InSAR, SBAS-InSAR)、分布式散射体 InSAR (Distributed Scatterer InSAR, DS-InSAR) 等,进一步提高了 InSAR 的观测精度。通过对多景 SAR 影像的联合分析,MT-InSAR 技术可以更好地抑制干涉图中时空失相关和大气噪声的影响,并能提供地表在 SAR 影像获取时刻的形变序列。需要指出的是,MT-InSAR 与 D-InSAR 技术有着本质区别,后者属于干涉差分技术,而 MT-InSAR 中的 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 属于干涉叠加技术范畴,其测量精度可达到毫米级<sup>[36]</sup>,这就需要在实际情况下根据不同的应用场景选择合适的 InSAR 技术,以获取更符合工程应用的地表形变数据。

### 2.2.2 全球卫星导航系统(GNSS)

GNSS 能够提供连续、精确的地表高程监测数

据。当地下水被过量抽取时,地球表面水负荷的变化会引起地壳和地幔的弹性压缩,导致地表水负荷增加、地面下降、GNSS 站点向下并向负荷源方向移动;反之,当地表水负荷减少,地面反弹,GNSS 站点向上并远离负荷源方向移动。利用 GNSS 反演 TWS 变化的原理就是通过监测 GNSS 站点的垂直变化来推断地球表面的垂直运动,根据二者的变化关系了解区域 TWS 变化的情况,确定地表形变的空间分布模式,进而识别地表形变的驱动机制。

AMOS C B 等<sup>[37]</sup>应用垂直全球定位系统对加利福尼亚州圣华金河谷进行了监测,发现河谷南部周围每年有高达 1~3 mm 的岩石隆起,且该隆起与当前储水损失率弹性模型预测的挠度吻合得很好。该发现表明,地表形变的原因可能是由于地下水过度开采造成的。ARGUS D F 等<sup>[38]</sup>通过 GPS 垂直位移反演推断美国西部内华达山脉因干旱导致的储水量变化,结果显示该地区的地下水位受到干旱和降雨的影响产生很大浮动。这种变化在传统水文模型评估中很难被捕捉,进一步揭示了导致地表形变的不同驱动因素。此外,利用 GPS 垂直位移反演能够模拟 TWS 的演变趋势,其模拟结果可作为独立观测量用于其他卫星数据的补充。何思源等<sup>[39]</sup>采用 GPS 垂直位移反演进行的随机模拟试验表明:利用当前 GPS 台站数据可有效反演云南地区 TWS 变化;云南地区当前 GPS 台站能够用于 GRACE 卫星与 GRACE-FO 卫星衔接期间的 TWS 变化监测。近年来,WHITE A M 等<sup>[40]</sup>详细回顾了 GNSS 在水文大地测量中的应用,进一步说明 GNSS 网络用于地下水变化监测的可行性。

### 2.2.3 激光雷达(Lidar)

Lidar 通过对地面进行逐点扫描获取同一地物目标不同时段的两点云数据,生成两个 DEM 并求差得到地表形变量。美国宇航局的 ICESat (2003—2006 年)和 ICESat-2 (2018 年至今)能够通过激光高度计测量冰盖高度、海冰厚度、植被高度和陆地地形。AN K 等<sup>[41]</sup>在华北平原利用 ICESat 量化 GRACE 测量的地面沉降,定量证实了地下水过量开采是该地区产生沉降的主要原因。因此,将地表测量与 GRACE 数据集结合使用,能够更全面地了解地下水或含水层的变化情况。

Lidar 与 InSAR 都能够实现对地形形变的测量,但受限于时空分辨率,Lidar 更多是作为 InSAR 的辅助来测量地表形变<sup>[42-45]</sup>。二者不同的是,Lidar 注重模拟地表地形,InSAR 注重对地表运动的监测。在实际应用中,通常用 Lidar 来创建 DEM,

通过 InSAR 监测该地区地表随时间的变化过程。HU L R 等<sup>[46]</sup>对两项技术的优缺点进行了详细的对比,包括数据的获取方式、样点分布、测量精度等,同时提出了一种新的基于多尺度 M3C2 (The Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison) 的地表沉降监测方法。该方法仅基于开放的 Lidar 点云数据,能够实现大范围地下水开采引起的地面沉降评估,这对于一些有大量公开 Lidar 数据的地区,为其地表沉降及地下水位变化监测提供了新的可行方案。

## 3 主要限制和未来发展方向

本文所讨论的地下水分布与埋深或是储量变化的评估方法主要基于遥感卫星技术的发展和革新。在此,重点讨论用于地下水探测的 3 种主要卫星技术(重力卫星、InSAR 和 GNSS)面临的问题和未来发展趋势。

### 3.1 重力卫星

GRACE 卫星和 GRACE-FO 卫星的局限性在于数据处理误差、观测几何和轨道高度的限制。数据处理是时变重力解算的关键部分。目前 GRACE 的数据处理主要是由美国得克萨斯大学空间中心 CSR (Center for Space Research)、美国宇航局喷气推进实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 和德国地学研究中心 GFZ (GeoForschungs Zentrum) 共同负责。三大官方机构发布的重力场模型 CSR RL05、GFZ RL05a、JPL RL05 均采用 GPS 数据联合 K 波段星间测距数据反演时变重力场。自 2008 年开始,荷兰、法国、瑞士、德国、美国都发布了各自的重力场解算模型,其中瑞士伯尔尼大学 AIUB (Astronomical Institute, University of Bern) 模型、德国波恩大学 ITG (Institute of Theoretical Geodesy) 模型以及德国格拉茨大学 ITSG (Institute of Geodesy at Graz University of Technology) 模型均采用运动学轨道联合 K 波段星间测距数据反演时变重力场,这种方法的精度最接近官方模型且计算更为简便<sup>[47]</sup>。国内目前主要利用简动力学轨道联合 K 波段星间测距数据反演时变重力场,如中国科学院测量与地球物理研究所利用短弧长法和变分方程法分别解算得到的 IGG-CAS (Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences) 和 IGG 系列模型。但是,杨帆等<sup>[47]</sup>指出,基于简动力学轨道的反演方法存在“信号低估”现象,即未充分发掘 GRACE 信号,因此推荐采用运动学轨道方法反演重力场。

GRACE 和 GRACE-FO 均为极轨卫星,这使其

在全球重力测量中受到观测几何的限制,即对于东西方向的重力变化测量均有限,缺乏交叉轨道的灵敏性以及测量过程中产生的时间混叠误差会在重力解中表现出纵向的条纹噪声,严重影响了地球物理信号的提取。目前对噪声的去除主要通过滤波器实现<sup>[48]</sup>,这种方式虽然能在一定程度上剔除条纹噪声,但也会导致真实的地球物理信号丢失。研究表明,通过改变卫星的观测几何模式,即利用不同的卫星编队在多个方向采样,不仅可以大幅减小重力解中条带的影响<sup>[49]</sup>,还能通过更频繁的采样来提高重力场的空间分辨率和精度。值得注意的是,两种方式都有各自的优势,显然通过滤波器剔除条纹噪声是一种在技术和经济上更容易实现的方式。目前,通过不断改进滤波器也能够取得精度较高的反演重力解<sup>[50]</sup>。未来两种技术的融合发展是一种趋势,在大幅降低影像噪声的同时也能获得时空分辨率更高的地球重力场反演结果,从而更好地应用于与地下水相关的场景中。

卫星高度是限制 GRACE 和 GRACE-FO 使用寿命的主要因素。为更精确地测量重力变化,GRACE 和 GRACE-FO 轨道高度设定约为 500 km,在此高度下卫星轨道易受到大气阻力而不断衰减,虽然较低的轨道更方便重力测量,如获取更高分辨率的反演重力场,但这会增加大气阻力,从而影响卫星的使用寿命。为卫星提供主动阻力补偿系统是延长卫星寿命的一种可行方式<sup>[51]</sup>,我国目前也在积极探索下一代重力卫星的重力场观测模式,徐新禹等<sup>[52]</sup>在综合卫星使用寿命、观测精度的条件下提出了一种轨道高度 300 km 的重力卫星组合模式,由于当前硬件技术的限制,新的卫星组合模式或许成为提高重力场反演精度的另一途径。

2017 年,美国国家科学院、工程院及医学院提出了一项名为“质量变化”(Mass Change, MC)的十年战略任务,将作为继 GRACE-FO 卫星后的新一轮地球重力观测计划。2022 年,MC 观测系统体系结构的综合研究已经完成。随着观测体系的完善,MC 将带来更高分辨率和更高精度的地球质量变化数据,进一步提高地球水资源的监测能力。

### 3.2 InSAR

InSAR 在地下水监测应用上的限制主要在于数据的获取及重叠采样。在全球地下水监测方面,目前只有欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的 Sentinel-1 卫星提供了适合全球评估的覆盖范围。另外,由于典型地下含水层覆盖区通常为 100~200 km,重叠采样是获取大范围具有一致干

涉测量采样图的关键,这将有助于更好地跟踪由于地下水变化引起的地表形变。

从用户角度来看,当前对于广域高分辨率 SAR 图像来源主要依靠商用卫星,如欧洲航天局开放共享的中低分辨率 Sentinel-1 卫星数据,以及高价购置的国外商用 SAR 数据。全球商用 SAR 的发展正处于快速上升阶段,各国对合成孔径雷达任务的投入不断加大,如位于芬兰的世界上最大的雷达卫星运营商 ICEYE 已发射多达 34 颗 SAR 卫星,美国代表企业 Capella Space 已成功发射 13 颗 SAR 卫星。相比之下,我国 SAR 卫星发展起步较晚,自 2016 年高分三号卫星获取到第一幅 SAR 干涉影像以来,海丝一号(Hisea-1)、齐鲁一号(Qilu-1)等卫星在一定程度上弥补了我国商用 SAR 产业的空白,但目前仍然不具备全球高精度立体测图的能力。由于商用 SAR 卫星以小卫星、低成本卫星为主要发展方向,其波段覆盖范围(约 20 km)、分辨率和精度都足以满足与评估地下含水层相关的测量,这也使得合成孔径雷达成为未来探测地下水变化的一种很具潜力的技术。

### 3.3 GNSS

一般来说,GNSS 网络的密集程度决定了监测范围的大小。对于美国、欧洲等具有密集 GNSS 网络覆盖的国家来说,能够实现全国范围的 TWS 变化监测。不同于 GRACE/GFO 卫星,之所以需要更加密集的 GNSS 网络,是因为 GNSS 地表形变测量对站点 100 km 范围内的质量负荷变化更为敏感。而截至 2023 年,我国 2 300 余座 GNSS 基准站间距均值为 65.19 km,胡焕庸线西北半壁的 GNSS 基准站平均间距达到了 107.42 km<sup>[53]</sup>,整体网络面临着覆盖不均匀、卫星数量缺乏等问题,国内的 GNSS 网络建设仍然有很长的一段路要走。

GNSS 在地下水监测应用方面除了需要密集的卫星网络外,还需要对 GNSS 接收机成本效益做进一步考虑,发展紧凑、节能且便捷的接收机技术同样是部署海量 GNSS 网络的关键。此外,GNSS 网络还面临着更精细且连续的地表形变数据、三维地表形变数据的联合反演以及与其他大地测量数据的联合反演等挑战<sup>[54]</sup>。数据的精细化联合处理可为 GNSS 反演 TWS 提供更精确可靠的数据支撑。如何更好地将地表垂直和水平形变观测数据与 GNSS 和 GRACE/GFO 数据相结合,提高地下水监测的时空连续性,这是未来一段时间内需要解决的关键问题。

## 4 结论

遥感已成为地下水资源评估中较为可靠的技术手段,如何能够快速有效地监测和评估地下水变化是地下水遥感评估技术的关键。本文对地下水遥感埋深及储变量评估技术的应用现状和趋势进行了分析,得出以下几点结论:

1) 地下水遥感评估技术具备非接触性和非破坏性的特点,现已发展为一种可靠的手段,能够在大多数区域的地下水资源开发和保护中提供更高效率的服务。

2) 通过卫星遥感和地面观测等技术的结合,地下水遥感评估可以获取大范围、高分辨率的与地下水相关的地表和水文信息,并进行实时或近实时的监测和分析,为地下水资源监测和管理提供更全面的数据支撑。更重要的是,地下水遥感评估技术。

3) 由于地下水分布的时空复杂性,地下水遥感评估技术仍无法完全取代传统的地下水勘查方式,而需要其作为补充。综合多遥感评估因子并结合地面勘探数据建立地下水评估模型,既充分利用了遥感技术的广覆盖性和高效性,又具有传统勘探方式的准确性和可靠性,同时,两种技术的结合也是当前应对特殊地理环境下地下水资源评估的不二之选。

4) 不同的遥感技术在地下水资源评估中面临着不同的时空和技术限制,单一遥感技术的发展并不能满足地下水资源监测的需求,多源遥感数据同化才是遥感技术在地下水资源监测中的应用趋势。通过整合来自 GRACE/GRACE-FO 和 InSAR 或 GNSS 的数据,不仅可以提取出更全面的地下水信息,还能够应对涉及多学科的地下水变化过程。未来,突破以上技术限制将大大提高对地下水埋深与储变量的动态监测能力,从而为地下水资源的综合治理提供及时准确且全面有效的数据信息支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 陈礼宾. 七十年代美、加等国的热红外遥感技术在水文地质调查中的应用实例[J]. 国外地质勘探技术, 1981(7): 8-11. [CHEN L B. Application examples of thermal infrared remote sensing in hydrogeological surveys, 1970s, US, Canada, etc [J]. Foreign Geoexploration Technology, 1981(7): 8-11.]
- [2] 刘静, 宋梦林, 臧超, 等. 松辽平原地下水埋深变化及关键影响因子分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 58-65. [LIU J, SONG M L, ZANG C, et al. Research on variation of groundwater depth and key influencing factors in Songliao Plain [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 58-65.]
- [3] KRISHNAMURTHY J, SRINIVAS G. Role of geological and geomorphological factors in ground water exploration: a study using IRS LISS data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(14): 2595-2618.
- [4] 盖利亚, 孙银行, 李巨芬, 等. 遥感技术在基岩山区地下水勘查中的应用: 以太行山区为例[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 66-68. [GAI L Y, SUN Y H, LI J F, et al. Application of remote sensing in underground water exploration of bedrock area: case study of Taihang Mountains [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 66-68.]
- [5] NDOU N N, PALAMULENI L G, RAMOELO A. Modelling depth to groundwater level using SEBAL-based dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Africa [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2018, 21(3): 237-248.
- [6] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明. 地下水遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 184-188. [ABDUWASIT G, QIN Q M. Overview on methods and theories of remote sensing monitoring and exploration of groundwater [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 184-188.]
- [7] 许颖砾, 王大庆, 邓正栋, 等. 某岛屿 GF-1-RS 浅层地下水富集性评估[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 42-48. [XU H L, WANG D Q, DENG Z D, et al. Assessment of shallow groundwater potential in the island based on GF-1 and DEM data by remote sensing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 42-48.]
- [8] 刘永新, 姜琦刚, 刘伟, 等. 利用 GRSFAI 预测内蒙古北部干旱地区浅层地下水分布[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1142-1151. [LIU Y X, JIANG Q G, LIU W, et al. Prediction of shallow groundwater distribution in arid region of northern Inner Mongolia using GRSFAI [J]. Global Geology, 2019, 38(4): 1142-1151.]
- [9] 陈南祥, 杨杰, 屈吉鸿. 中牟县地下水生态水位研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 84-88. [CHEN N X, YANG J, QU J H. Ecological Groundwater Level of Zhongmou County [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 84-88.]
- [10] 钟华平, 刘恒, 王义, 等. 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 223-228. [ZHONG H P, LIU H, WANG Y, et al. Relationship between Ejina oasis and water resources in the lower Heihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2): 223-228.]
- [11] 管子隆, 吕爱锋, 贾绍凤, 等. 格尔木河中游地区植被覆盖与地下水埋深关系研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 86-93. [GUAN Z L, LYU A F, JIA S F, et

- al. Study on the relationship between vegetation cover and groundwater depth in the middle reaches of Golmud River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(3): 86–93. ]
- [ 12 ] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 25–33. [ CAO L, NIE Z L, LIU M, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 25–33. ]
- [ 13 ] 王超, 董少刚, 贾志斌, 等. 草原露天煤矿区植被对地下水埋深变化的响应 [J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6925–6937. [ WANG C, DONG S G, JIA Z B, et al. Response of vegetation to changes in groundwater level in open-pit coal mining areas of grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6925–6937. ]
- [ 14 ] KANG K, KIM D, KIM Y, et al. Quantitative estimation of submarine groundwater discharge using airborne thermal infrared data acquired at two different tidal heights [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(7): 1089–1100.
- [ 15 ] 台风. 利用热红外成像技术测量海底地下水排放量 [J]. *中国测绘*, 2020(9): 77–79. [ TAI F. Measurement of submarine groundwater discharge using thermal infrared imaging technology [J]. *China Surveying and Mapping*, 2020(9): 77–79. ]
- [ 16 ] 郑璞, 邓正栋, 王大庆, 等. 基于 TM 数据的土壤湿度指数预测半干旱地区浅层地下水的研究: 以朝阳地区为例 [J]. *水文*, 2015, 35(5): 23–29. [ ZHENG P, DENG Z D, WANG D Q, et al. Study on precipitation regionalization base on diversity sequence information entropy [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 35(5): 23–29. ]
- [ 17 ] 姜红, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 一种利用土壤水分反演地下水水位遥感方法 [J]. *遥感信息*, 2018, 33(5): 82–88. [ JIANG H, YUSUFUJIANG R, REYILAI K, et al. A remote sensing method for retrieving groundwater levels using soil moisture [J]. *Remote Sensing Information*, 2018, 33(5): 82–88. ]
- [ 18 ] 史晓亮, 周政辉, 王馨爽. 基于遥感技术的干旱区地下水监测研究 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(7): 87–91. [ SHI X L, ZHOU Z H, WANG X S. Study on groundwater monitoring based on remote sensing in arid region [J]. *Yellow River*, 2019, 41(7): 87–91. ]
- [ 19 ] YU D H, DENG Z D, LONG F, et al. Study on shallow groundwater information extraction technology based on multi-spectral data and spatial data [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52: 1420–1428.
- [ 20 ] HARTMANN A, LIU Y, OLARINOYE T, et al. Integrating field work and large-scale modeling to improve assessment of karst water resources [J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(1): 315–329.
- [ 21 ] SOYLU M E, BRAS R L. Detecting shallow groundwater from spaceborne soil moisture observations [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): e2020WR029102–e2020WR029102.
- [ 22 ] SOYLU M E, BRAS R L. Global shallow groundwater patterns from soil moisture satellite retrievals [J]. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 89–101.
- [ 23 ] WAHR J, MOLENAAR M, BRYAN F. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B12): 30205–30229.
- [ 24 ] HAN S, SAUBER J, LUTHCKE S B, et al. Implications of postseismic gravity change following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake from the regional harmonic analysis of GRACE intersatellite tracking data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B11): B11413.
- [ 25 ] RODELL M, FAMIGLIETTI J S. The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE; the high plains aquifer, central US [J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2002, 263(1/2/3/4): 245–256.
- [ 26 ] 张璐, 江善虎, 任立良, 等. 基于 GRACE 数据监测黄河流域陆地水储量变化 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(4): 47–51, 64. [ ZHANG L, JIANG S H, REN L L, et al. Explore and analysis variation of the terrestrial water storage in Yellow River Basin based on GRACE data [J]. *Yellow River*, 2020, 42(4): 47–51, 64. ]
- [ 27 ] GUO Y, GAN F P, YAN B K, et al. Evaluation of groundwater storage depletion using GRACE/GRACE Follow-On data with land surface models and its driving factors in Haihe river Basin, China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1108.
- [ 28 ] SKASKEVYCH A, LEE J, JUNG H C, et al. Application of GRACE to the estimation of groundwater storage change in a data-poor region: a case study of Ngadda catchment in the Lake Chad Basin [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(4): 941–955.
- [ 29 ] 曹杰, 肖云, 龙笛, 等. 联合重力卫星和水井资料监测华北平原地下水储量变化 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(5): 805–818. [ CAO J, XIAO Y, LONG D, et al. Combined gravity satellite and water well information to monitor groundwater storage changes in the North China Plain [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 805–818. ]
- [ 30 ] FETTER C W. *Applied hydrogeology* [M]. Long Grove: Waveland Press, 2018.
- [ 31 ] BAWDEN G W, THATCHER W, STEIN R S, et al. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects [J]. *Nature*, 2001, 412(6849): 812–815.
- [ 32 ] CALDERHEAD A I, MARTEL A, ALASSET P J, et al. Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36

- (1):9-23.
- [33] ZHOU C F, GONG H L, CHEN B B, et al. Land subsidence under different land use in the eastern Beijing plain, China 2005-2013 revealed by InSAR timeseries analysis[J]. *GI-Science and Remote Sensing*, 2016, 53(6):671-688.
- [34] LIU Z, LIU P, MASSOUD E, et al. Monitoring groundwater change in California's Central Valley using Sentinel-1 and GRACE observations[J]. *Geosciences*, 2019, 9(10):436.
- [35] KUMAR H, SYED T H, AMELUNG F, et al. Space-time evolution of land subsidence in the National Capital Region of India using ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data: evidence for groundwater overexploitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605:127329.
- [36] LIU Y, ZHANG Y, ZHAO F Q, et al. Multi-source SAR-based surface deformation monitoring and groundwater relationship analysis in the Yellow River Delta, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13):3290.
- [37] AMOS C B, AUDET P, HAMMOND W C, et al. Uplift and seismicity driven by groundwater depletion in central California[J]. *Nature*, 2014, 509(7501):483-486.
- [38] ARGUS D F, LANDERER F W, WIESE D N, et al. Sustained water loss in California's mountain ranges during severe drought from 2012 to 2015 inferred from GPS[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(12):10559-10585.
- [39] 何思源, 谷延超, 范东明, 等. 利用 GPS 垂直位移反演云南省陆地水储量变化[J]. *测绘学报*, 2018, 47(3):332-340. [HE S Y, GU Y C, FAN D M, et al. Seasonal variation of terrestrial water storage in Yunnan Province inferred from GPS vertical observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3):332-340.]
- [40] WHITE A M, GARDNER W P, BORSA A A, et al. A review of GNSS/GPS in hydrogeodesy: hydrologic loading applications and their implications for water resource research[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7):e2022WR032078.
- [41] AN K. Investigating the relationship between land subsidence and groundwater depletion in the north China plain using GRACE and ICESat[D]. Los Angeles: University of California, 2015.
- [42] MICHEL D K, JACCO K H, ROB R V B, et al. Determination of amount of land subsidence based on InSAR and Lidar monitoring for a dike strengthening project[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382:57-62.
- [43] HE Y F, XU G C, KAUFMANN H, et al. Integration of InSAR and Lidar technologies for a detailed urban subsidence and hazard assessment in Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12):2366.
- [44] SCOTT C, PHAN M, NANDIGAM V, et al. Measuring change at Earth's surface: on-demand vertical and three-dimensional topographic differencing implemented in OpenTopography[J]. *Geosphere*, 2021:1318-1332.
- [45] BERNARD T G, LAGUE D, STEER P. Beyond 2D landslide inventories and their rollover: synoptic 3D inventories and volume from repeat Lidar data[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2021, 9(4):1013-1044.
- [46] HU L R, NAVARRO-HERNÁNDEZ M I, LIU X J, et al. Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalentín Basin (Spain) using open-access aerial Lidar datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280:113218.
- [47] 杨帆, 王长青, 许厚泽, 等. 利用运动学轨道提高 GRACE 时变重力场解算[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(1):37-49. [YANG F, WANG C Q, XU H Z, et al. Towards a more accurate temporal gravity model from GRACE observations through the kinematic orbits[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(1):37-49.]
- [48] ANTONI M. A review of different mascon approaches for regional gravity field modelling since 1968[J]. *History of Geo-and Space Sciences*, 2022, 13(2):205-217.
- [49] ELSAKA B, RAIMONDO J, BRIEDEN P, et al. Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(1):31-43.
- [50] YI S, SNEEUW N. A novel spatial filter to reduce north-south striping noise in GRACE spherical harmonic coefficients[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4):23.
- [51] FLOBERGHAGEN R, FEHRINGER M, LAMARRE D, et al. Mission design, operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(11):749-758.
- [52] 徐新禹, 姜卫平, 张晓敏, 等. 一种新型重力测量卫星系统确定全球重力场的性能分析[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6):2227-2236. [XU X Y, JIANG W P, ZHANG X M, et al. Ability of recovering the global gravity field of a new satellite gravimetry system[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6):2227-2236.]
- [53] 徐彦田, 窦世标, 刘艳辉, 等. 我国 GNSS 基准站空间分布特征分析[J]. *测绘科学*, 2023, 48(6):33-37, 72. [XU Y T, DOU S B, LIU Y H, et al. Study on the spatial distribution characteristics of GNSS reference station in China[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(6):33-37, 72.]
- [54] 李建成, 李贤炮, 钟波. 利用 GNSS 地表形变反演区域陆地水储量变化的进展[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(11):1724-1735. [LI J C, LI X P, ZHONG B. Review of inverting GNSS surface deformations for regional terrestrial water storage changes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11):1724-1735.]

## Research Progress of Groundwater Depth and Storage Volume Monitoring and Assessment Based on Remote Sensing

MENG Junzhen<sup>1</sup>, YANG Xiaoquan<sup>1</sup>, LI Zhiping<sup>1,2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;  
2. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** **【Objective】** Monitoring the distribution, depth, and storage volume of groundwater is essential for achieving the sustainable utilization of water resources. However, due to the complex surface environment and geological conditions, how to use remote sensing technology to more accurately quantify groundwater resources remains a technical challenge. **【Methods】** This study provides a detailed analysis, from the perspective of comprehensive evaluation methods, of the applications and advancements of hydrogeological remote sensing analysis, geoscience-element remote sensing information analysis, thermal infrared remote sensing evaluation of surface thermal anomalies, quantitative inversion modeling of remote sensing information, GRACE satellite gravity data measurements, and surface deformation measurements in the study of groundwater distribution, depth, and storage volume. **【Results】** Firstly, the application of remote sensing technology in monitoring groundwater distribution, depth, and storage volume has become an effective auxiliary means to the traditional measurement method, providing a more efficient and comprehensive way to obtain groundwater information. Secondly, integrating multiple remote sensing evaluation factors and combining with ground exploration data to establish a groundwater evaluation model not only fully utilizes the wide coverage and efficiency of remote sensing technology, but also retains the accuracy and reliability of traditional exploration methods. It is currently the preferred choice for evaluating groundwater resources in special geographical environments. Thirdly, the assimilation of multi-source remote sensing data is a trend in the application of remote sensing technology in groundwater resource assessment. Future technological breakthroughs in remote sensing satellite technology and integrated data processing will greatly improve the monitoring and management capabilities of groundwater resources, providing more comprehensive and reliable information support for integrated water resource management. **【Conclusion】** Accurate remote sensing assessment models of groundwater distribution, depth, and storage volume in complex terrains require integrating multi-source remote sensing with ground exploration data, using data assimilation to overcome inherent satellite hardware limitations and achieve more precise groundwater assessment results.

**Keywords:** groundwater depth; groundwater storage volume; groundwater assessment; remote sensing

(编辑:乔翠平)