

能够实时发出预警，通知相关人员进行进一步的处理。实时预警功能为施工和建筑维护人员提供了宝贵的时间，使其能够及时采取防范措施，减少灾难性事件的发生。

除了基础的监测和预警，实时数据分析还可以通过机器学习和人工智能技术进行趋势预测，分析建筑物未来的变形趋势。这一预测能够帮助预测建筑物在未来一段时间内可能发生的变形，提前发现潜在的结构问题，为预防性维护提供科学依据。例如，基于传感器采集的历史数据和当前的变化趋势，智能分析系统能够预测建筑物的疲劳程度，建议合适的维护时间和方式，以防止更大范围的损坏。

智能传感器结合实时数据分析与决策支持系统，能够显著提高建筑物变形监测的响应速度和预防能力。这不仅有助于保障建筑物的结构安全，也为建筑物的长期运营和维护提供了强有力的支持 [4]。通过系统化的数据分析，建筑行业能够更好地应对潜在的安全风险，确保建筑物在整个生命周期中的稳定性和安全性。通过这些高效、智能化的监测和决策支持系统，建筑安全管理进入了一个新的时代。

4 案例分析与实践效果

在某大型商业建筑项目中，智能传感器技术被成功应用于建筑物的变形实时监测。该项目共布设了 200 多个智能传感器，涵盖了建筑物的主要结构部分，包括基础、承重墙、梁柱等关键区域。这些传感器能够实时采集建筑物在施工过程及使用过程中的变形数据，数据包括建筑物的倾斜度、位移、振动等重要指标，实时反映结构的健康状态。通过无线通信技术，传感器将采集到的数据无缝传输到监控平台，避免了传统有线传输可能带来的麻烦和限制，确保了数据传输的高效性和可靠性。

在数据处理和分析系统的支持下，监控人员能够实时查看建筑物的变形情况，并根据实时数据动态调整施工方

案。例如，在项目的后期阶段，监测系统通过精准的数据分析，发现了建筑物局部结构出现的微小变形，这些变形在传统监测手段中可能会被忽视。由于实时监测系统的介入，施工团队及时发现了潜在问题，并进行了必要的加固处理，避免了可能产生的安全隐患。这个成功的案例不仅证明了智能传感器在建筑物变形监测中的有效性和优势，也为类似项目提供了宝贵的经验。通过这样的技术应用，建筑行业能够更好地保障建筑安全，提升项目管理的精细化水平，减少风险，并确保建筑物的长期稳定性 [5]。

5 结论

智能传感器在建筑物变形监测中的应用，为传统监测方法提供了更加高效、精准的解决方案。通过实时数据采集、传输和处理，智能传感器能够有效提高监测效率和精度，确保建筑物的安全性。尽管在实践中仍存在一些挑战，如成本、数据处理和传输等问题，但随着技术的不断发展，这些问题有望得到解决。未来，随着人工智能、物联网和大数据技术的不断进步，智能传感器在建筑物变形监测中的应用将会更加广泛，并为建筑安全管理提供更加可靠的技术支持。

参考文献

- [1] 杨珺,王浩渺,潘倩,等.北斗卫星导航系统在水库大坝变形监测中的应用[J/OL].南水北调与水利科技(中英文),1-5[2025-07-01].
- [2] 李高峰,刘晓鹏,陈震震,等.BIM+无人机在钢结构运维阶段变形监测中的应用研究[J].智慧城市,2024,10(11):4-7.
- [3] 周云,陈建炜,邹少豪,等.基于星载InSAR技术的城市建筑群变形监测与安全风险评估研究综述[J/OL].土木工程学报,1-25[2025-07-01].
- [4] 陈洪志.高层建筑物变形监测技术分析[J].中国住宅设施,2024,(07):112-114.
- [5] 徐坤.高回填土新建建筑变形监测技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(18):96-98.

Study on groundwater reserve assessment model of arid region based on multi-source remote sensing and ground hydrological measurement

Liangqing Huo

Shanxi Dezehou Geological Exploration Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 030600, China

Abstract

Groundwater resources in arid regions play a vital role in regional ecological and socio-economic development. However, traditional surface hydrological monitoring has limitations in comprehensively and dynamically reflecting storage variations. In recent years, multi-source remote sensing technology has opened new opportunities for groundwater reserve monitoring and assessment. This paper systematically reviews the theories, technologies, and model construction methods for groundwater reserve evaluation in arid regions based on the synergistic integration of multi-source remote sensing and surface hydrological observations, analyzing key implementation aspects. Case studies demonstrate that collaborative models exhibit significant advantages. The paper also explores emerging trends such as intelligent assessment models, providing support for water resource management and ecological conservation.

Keywords

multi-source remote sensing; surface hydrological monitoring; arid regions; groundwater reserves; model integration; water resource assessment

多源遥感与地面水文测量协同的干旱区地下水储量评估模型研究

霍亮清

山西德泽厚地质勘查有限公司，中国 · 山西 晋中 030600

摘要

干旱区地下水资源对区域生态与社会经济发展意义重大，但传统地面水文测量有局限，难全面动态反映其储量变化。近年来，多源遥感技术为监测和评估地下水储量带来新契机。本文以多源遥感与地面水文观测协同融合为基，梳理了干旱区地下水储量评估的理论、技术与模型构建方法，分析关键环节。经典型区域案例验证，协同模式优势明显。文章还展望了评估模型智能化等发展趋势，为水资源管理和生态保护提供支撑。

关键词

多源遥感；地面水文测量；干旱区；地下水储量；模型融合；水资源评估

1 引言

干旱区分布于我国西北、华北及部分中亚地区，是国家战略资源与生态屏障的关键部分。这里降水少、蒸发强、地表水有限，地下水是保障生态、农业、城市及工业用水的关键。但过度开发与气候变化致其储量锐减、水位下降、地面沉降，威胁水生态与社会可持续发展。科学评估地下水储量是水资源管理、调度及生态文明建设的基础。传统评估依赖地面水文测量，但受点位、空间、周期、成本等限制，难满足大尺度、动态化管理需求。多源遥感技术具大范围、周

期性、自动化观测优势，在区域水资源监测中潜力巨大。将多源遥感与地面测量融合，构建协同评估模型是前沿方向。本文梳理了模型构建路径等，为区域水资源管理提供理论与技术支持。

2 干旱区地下水储量评估的理论基础与技术现状

2.1 地下水储量评估的理论框架

地下水储量评估的理论基础主要依托地下水均衡原理和水量动态变化分析。通过定量描述地下水补给、径流、排泄与消耗等各环节的输入输出关系，实现区域水资源的科学核算。经典方法包括水量平衡法，通过长期监测降水、蒸发、地表径流与地下水位等指标，推算地下水储量的变化趋势；

【作者简介】霍亮清（1986-），女，中国山西长治人，本科，从事水文地质、测量研究。

地下水水流数值模拟(如 MODFLOW)则基于地下水流动方程,结合区域水文地质参数,对地下水系统进行空间动态模拟。SPAC(土壤—植被—大气连续体模型)和储水曲线法等方法进一步细化了水文过程的物理机制。上述模型的准确性依赖于充足的水文地质参数和高密度、长期的动态观测数据。然而,受限于干旱区地下水系统的复杂性和基础数据的空间代表性,传统方法在大范围、动态储量评估中存在一定局限,需与新兴技术深度融合加以改进。

2.2 地面水文测量的关键参数与技术特点

地面水文测量以高精度、物理属性明确为显著优势,主要包括地下水位动态观测、抽水试验、水文地质剖面分析、补给与排泄定量估算以及地面沉降监测等环节。这些测量手段不仅为模型提供权威的参数输入,也为水量平衡和流场模拟提供了实地校准依据。通过精确测量地下水埋深、补给量、排泄量等参数,能够反演区域水力传导性、储水系数等关键指标,显著提升模型定标和反演的可靠性。然而,地面水文测量受限于监测井点位分布和人工运维条件,难以实现干旱区大范围、长期连续观测。在地形复杂、交通不便或无人区,布设和维护监测设施面临技术与经济双重挑战。因而,地面水文数据更适于局部精细分析和遥感成果校正,是多源数据融合不可或缺的基础支撑。

2.3 多源遥感在地下水变化监测中的优势与不足

多源遥感技术突破了地面监测的空间和时效局限,为干旱区地下水变化的大尺度、动态化观测提供了全新途径。GRACE 重力卫星能够监测大范围内的总水储量变化,InSAR 技术则可对地表沉降进行高精度动态监测,从而间接反映地下水位波动。光学与微波遥感则侧重于反演地表水体、土壤湿度与植被覆盖等水文过程相关参数,便于综合分析区域水循环变化。遥感的主要优势在于空间覆盖无缝、自动化观测、时间分辨率高及历史数据可回溯,为地下水储量变化的动态监测与趋势分析提供有力支撑。然而,遥感数据在物理属性反演上存在一定的间接性和不确定性,空间分辨率有限,对地下水埋深及局部变化敏感度不足,需依赖地面观测数据进行辅助解译和误差校正。实现遥感与地面数据的深度融合,是提升干旱区地下水储量动态评估科学性和决策支撑力的关键技术方向。

3 多源遥感与地面水文测量协同评估模型构建

3.1 模型体系架构与参数集成思路

协同评估模型体系以区域地下水均衡理论为基础,强调多层次、多尺度参数的集成融合。模型首先通过遥感获取的区域水储量变化、地表沉降、植被覆盖等宏观变量,为整体水文变化提供边界条件。地面水文测量则补充了地下水位动态、补给与排泄关系、地质剖面等微观参数信息,实现对区域地下水系统结构和动态过程的细致刻画。整个模型体系划分为数据采集、预处理、参数反演、模型耦合和结果校

正五大环节,形成了遥感与地面数据优势互补、时空匹配、参数协同的多源信息集成框架。该思路能够充分挖掘不同数据源的互补性,通过多维参数的协同约束与动态优化,实现对干旱区地下水储量的高精度、多尺度动态评估,为区域水资源科学管理和决策提供坚实的技术支撑。

3.2 GRACE 与 InSAR 遥感数据的集成与利用

GRACE 卫星通过观测地球引力场变化,可大尺度反演区域水储量的总变化,尤其适用于干旱区地下水动态评估。InSAR 技术利用雷达干涉测量地表形变,能够灵敏捕捉因地下超采引发的地面沉降过程,为识别地下水抽采强度和空间分布提供有力证据。二者集成后,可实现“地表—地下”多维联动分析:GRACE 反映整体水量变化趋势,InSAR 则细化地面沉降分布和动态过程,通过二者的互约束增强地下水位变化和储量评估的科学性。为避免气象与水文过程的干扰,遥感数据需与降水、蒸散发、土壤湿度等气象与地表水文资料联合分析,精准剔除外源影响,提升模型的时空分辨率与动态响应能力。集成遥感技术不仅拓展了地下水储量监测的空间覆盖,也为模型评估提供了多源、动态、连续的数据支撑。

3.3 地面水文测量与遥感数据的协同建模

地面水文测量为协同模型提供了精准的初始条件、参数反演与空间约束,涵盖地下水埋深、补给区划分、水力传导性等关键指标。遥感监测则可修正地面数据的空间盲区和采样间隔,强化模型在区域尺度上的整体约束能力。协同建模采用分层参数优化,将遥感宏观反演与地面微观观测融合,通过数据同化、模型嵌套和误差反演等机制,实现储量估算的动态优化。进一步结合 GIS 空间分析、统计推断与机器学习等前沿方法,模型能够自动调整参数权重,实现对地下水储量时空变化的高精度模拟和前瞻性预测。该协同建模框架,有效提升了模型的适应性与鲁棒性,为干旱区地下水科学评估与可持续管理提供了可扩展的技术基础和创新思路。

4 干旱区地下水储量协同评估模型的关键技术环节

4.1 数据预处理与空间同化

多源遥感与地面水文测量数据因观测原理和采集手段不同,存在时空分辨率、采集频率、数据精度等多方面差异。协同评估前,需对所有数据进行标准化处理,包括格式统一、空间重采样、异常剔除、缺测填补和空间配准。科学的数据预处理不仅消除不同数据源间的系统性偏差,也为后续建模和融合奠定基础。空间同化技术,如卡尔曼滤波、集合平均等,能够将不同时空尺度、观测精度的数据纳入统一的空间参考框架,实现多源信息的互补融合,有效提升数据整体可用性与模型输入质量。预处理与空间同化的严谨性,直接影响协同评估模型的稳定收敛与最终储量评估精度,是整个系