

# 线性水工设施（输水渠道 / 库岸）边坡多源数据融合监测的研究进展

舒胜 金汉林

四川省玉溪河灌区运管中心，四川 611500

四川省都江堰水利发展中心，四川 611830

**摘要：**输水渠道及库岸边坡是灌区和跨流域调水工程中最为典型的线性水工设施组成单元，其稳定性直接关系到工程运行安全与区域水资源调配效率。受复杂地形条件、工程扰动以及水文与环境因素长期作用影响，该类边坡在运行期往往呈现出变形过程缓慢、空间分布离散、影响因素多样等特征，单一监测手段难以全面刻画其稳定状态与演化趋势。随着对地观测技术和信息融合方法的发展，融合空—天—地多源监测数据以提升边坡整体识别与局部精细认知能力，逐渐成为运行期边坡安全监测的重要研究方向。本文在线性水工设施边坡工程特征与运行期监测需求的基础上，总结了当前常用的多源监测数据类型及其观测特性，重点综述了多源数据在数据层、特征层与模型层的融合方法及关键技术，并归纳分析了多源数据融合在输水渠道与库岸边坡形变监测、稳定性评估及风险识别中的典型应用进展。最后，围绕多源数据长期一致性、融合模型物理约束不足以及工程化应用适配性等问题，对未来发展方向进行了展望，研究可为线性水工设施边坡多源融合监测体系的完善与工程应用提供参考。

**关键词：**线性水工设施；输水渠道；库岸；边坡；多源数据；融合监测；InSAR

## 1 引言

输水渠道、调蓄水库及其沿岸边坡是大型灌区与跨流域调水工程的重要基础组成部分，在区域水资源配置、防洪减灾及生态保障中发挥着关键作用<sup>[1]</sup>。与点状或面状工程不同，输水渠道及库岸边坡具有显著的线性分布特征，其空间延伸范围长、工程环境差异大，受地形起伏、地质条件、水位变化及人类活动等多重因素共同影响，稳定性表现出明显的空间非均匀性与时间演化性<sup>[2]</sup>。近年来，随着工程服役年限增长和极端气候事件增多，运行期边坡变形及失稳风险问题日益凸显<sup>[3]</sup>，对监测技术与管理手段提出了更高要求。

传统的边坡监测主要依赖地基观测手段，如倾角仪、表面位移计、裂缝计及水文传感器等。这类方法在局部变形精细观测方面具有较高精度，但受制于布设成本和空间代表性，其监测范围和整体感知能力有限<sup>[4]</sup>。尤其对于输水渠道与库岸这类线性工程对象，仅依赖点尺度或局部监测手段，往往难以及时识别潜在不稳定区段，无法满足运行期风险识别由“被动响应”向“主动预警”转变的需求。

对地遥感技术的发展为大范围、非接触式的边坡监测提供了新的技术路径。其中，合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）在地表形变监测领域已被广泛应用，能够在较大空间尺度和较长时间序列上获取毫米级至厘米级的形变信息<sup>[5]</sup>。然而，单一遥感手段同样存在固有局限，例如受植被覆盖、水体分布及观测几何条件影响，部分区段监测结果存在不稳定性<sup>[6]</sup>。此外，不同传感器在空间分辨率、时间分辨率及物理敏感性上的差异，导致单源数据难以全面反映边坡稳定状态。

在此背景下，多源数据融合监测理念逐渐受到关注，其核心思想是在统一的工程对象与时空框架下，综合利用空基、天基和地基等多尺度监测信息，通过

信息互补弥补单一手段的不足，从而提升对边坡稳定性演化过程的综合认知能力<sup>[7]</sup>。多源数据融合已在滑坡灾害监测、城市地表形变分析等领域取得一定进展<sup>[8-9]</sup>，但针对输水渠道与库岸边坡这一具有显著线性特征和工程约束的对象，其系统性研究与方法总结仍相对不足。

基于此，本文围绕线性水工设施边坡运行期监测问题，重点综述多源监测数据类型及其特征、多源数据融合方法体系及典型应用进展，并在此基础上分析当前存在的主要问题与未来发展方向，以期对相关工程的监测与管理实践提供参考。

## 2 多源监测数据类型及其特征

### 2.1 地基监测数据

地基监测是传统边坡安全监测体系的重要组成部分，主要通过直接布设传感器获取边坡结构和水文环境的变化信息。常见的地基监测数据包括表面位移、深部位移、孔隙水压力、地下水位及降雨量等。这类数据能够直接反映边坡在工程尺度下的真实响应，监测精度高、物理意义明确，特别适用于关键部位和高风险区段的长期连续观测<sup>[10-11]</sup>。

然而，地基监测通常呈点尺度分布，其空间覆盖范围有限，难以全面反映沿线边坡的整体稳定状况。对于输水渠道和库岸这类延伸距离长、地质条件复杂的工程对象，监测点位布设往往具有选择性，容易忽略非重点区段潜在的渐进式变形风险。此外，地基监测系统在建设和维护方面成本较高，其规模化应用受到一定制约<sup>[12]</sup>。

### 2.2 天基遥感监测数据

天基遥感以卫星平台为载体，具备覆盖范围广、重复观测能力强的优势，在区域尺度地表形变监测中具有重要应用价值。InSAR技术通过对多时相雷达影像进行干涉处理，可获取地表沿视线方向的形变信息，已广泛应用于滑坡、地面沉降及基础设施形变监测研

究 [13-15]。

针对输水渠道与库岸边坡这类线性工程对象，天基 InSAR 能够提供连续的沿线形变分布特征，为潜在风险区段的识别提供重要线索。然而，受植被覆盖、水面散射及相干性衰减影响，部分区段难以获取稳定的形变结果。此外，InSAR 反映的是沿雷达视线方向的投影形变，其物理解释需结合工程几何和变形机制进行分析 [16-17]。

光学遥感数据在边坡表面形态 [18] 和环境信息 [19] 获取方面具有独特优势，高分辨率影像可用于识别裂缝、塌陷迹象以及工程防护设施变化。但受云雾和光照条件影响，光学遥感的时间连续性相对较弱，通常作为辅助信息与雷达遥感和地基监测数据结合使用 [20]。

2.3 空基遥感与近景测量数据

空基遥感主要包括无人机影像、机载 LiDAR 及倾斜摄影等技术手段，其特点是在局部尺度上可获取高分辨率的地形和表面形态信息 [21]。这类数据在边坡局

部精细调查、形态演变分析以及工程细节识别方面具有明显优势 [22-24]，可弥补天基遥感空间分辨率不足的问题。

然而，空基遥感数据获取通常依赖现场作业，其时间连续性和覆盖效率受制于气象条件和作业成本，在长距离线性工程中的常态化应用仍面临一定挑战。

2.4 辅助工程与环境数据

除直接观测数据外，地质资料、工程设计参数、历史灾害记录及数值模拟结果等辅助信息，在多源融合监测中同样具有重要价值 [25]。这类数据能够为形变结果的物理解释和风险判识提供背景约束，是连接监测信息与工程决策的重要桥梁。

2.5 多源数据融合的必要性分析

从表 1 可以看出，不同监测数据在空间覆盖、时间连续性及物理解释能力方面各具优势与局限，单一手段难以满足线性水工设施边坡运行期整体识别与局部精细认知并存的监测需求，多源数据融合具有明显必要性。

表 1 多源数据类型及其优劣势

数据类型	代表手段	空间尺度	时间分辨率	主要优势	主要局限
地基监测	GNSS、倾角仪、裂缝计、渗压计、雨量计	点—局部区域	连续	精度高、物理意义明确	空间覆盖有限，布设与维护成本高
天基雷达遥感	InSAR (PS-InSAR、SBAS 等)	区域—沿线连续分布	周期性	大范围形变获取	受植被、水体影响明显，相干性限制
天基光学遥感	高分系列、Sentinel-2、Landsat	区域—局部	间断	空间分辨率高，识别形态	受天气和光照制约，难以连续获取
空基遥感	无人机影像、LiDAR、倾斜摄影	局部—重点区段	按需获取	分辨率高	覆盖效率有限，依赖现场作业，连续性不足
工程与地质资料	工程设计参数、地质剖面、历史灾害记录	工程尺度	静态	提供物理与工程约束	更新频率低，难以反映动态变化

3 多源数据融合方法与关键技术

3.1 多源监测数据融合技术框架

针对线性水工设施边坡监测中多源数据在观测方式、时空尺度及物理响应机制上的显著差异，相关研究普遍采用分层融合策略，以降低数据异构性对综合分析结果的影响。从信息处理角度看，多源数据融合可概括为数据层、特征层与模型层三个层级，不同层级对应不同的信息抽象程度与技术目标 [26]。

在多源融合总体流程中（如图 1），不同来源的监测数据首先通过预处理与配准进入统一的分析框架，其核心目标并非简单数据叠加，而是通过层级递进的方式，实现信息由“观测量”向“状态量”的转换。数据层融合直接作用于原始观测数据，是多源融合的基础环节。该层级重点处理多源数据在空间参考系、时间采样间隔以及观测精度方面的差异。典型处理包括坐标系统一、时间重采样与观测误差校正等，其本质是将多源观测数据映射至统一的时空域：

$D_i(x, y, t) = T_i(D_i(x_i, y_i, t_i))$  (1)

其中  $D_i$  表示第  $i$  类原始观测数据， $T_i$  为对应的空间—时间转换与校正算子。通过该过程，可在最大限度保留原始信息的前提下，为后续分析提供一致的数据输入。

在完成基础数据协调后，融合过程进一步进入特征层融合阶段。该层级不再关注原始观测值，而是围绕边坡变形与环境响应过程构建具有物理或统计意义的特征向量。不同数据源通过特征抽取函数  $\Phi(\cdot)$  被映射至统一的特征空间：

$F = [\Phi_1(D_1), \Phi_2(D_2), \dots, \Phi_n(D_n)]$  (2)

在该空间中，多源数据的互补性得以显式表达，例如 InSAR 提供的时序形变特征可与地基监测获得的位移或水文特征共同参与分析，从而增强对边坡响应过程的描述能力。

在部分研究中，融合流程还进一步上升至模型层，通过多源特征输入约束分析模型或反演过程，以实现了对边坡状态参数的综合估计 [27]。需要指出的是，不同融合层级并非孤立存在，其选择通常与研究目标、数据条件及工程尺度密切相关。

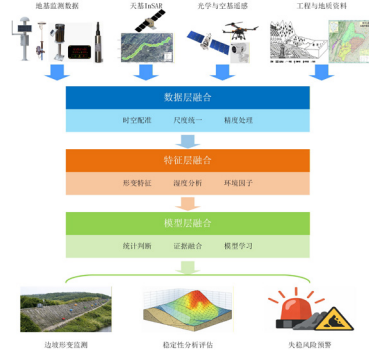


图 1 多源数据融合技术框架

3.2 多源数据融合中的时空不一致性与不确定性处理

在多源监测条件下，时空不一致性与观测不确定性是影响融合结果可靠性的核心问题之一。对于输水渠道与库岸边坡而言，不同监测手段在时间采样频率、

空间分辨率及观测方向上的差异尤为突出,若未经合理处理,容易在融合分析中引入系统偏差<sup>[28]</sup>。

在空间尺度方面,多源数据通常呈现由点尺度(地基监测)向面尺度(空、天基遥感)扩展的特征。针对该问题,现有研究多采用尺度转换或加权映射方法,将高分辨率信息聚合至工程分析单元,或将低分辨率信息作为背景约束引入局部分析框架。其基本思想可表示为:

$$F_{eff} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot F_i \quad (3)$$

其中  $F_i$  表示不同尺度下提取的特征集合,  $\omega_i$  为尺度相关权重,用以反映不同数据源在分析过程中的贡献程度。

在时间维度上,多源监测数据往往存在采样间断和观测周期不一致的问题。针对该特征,研究中通常引入时序插值、重构或平滑方法,以增强融合特征的时间连续性。在以 InSAR 为代表的周期性观测数据中,相关方法可有效缓解观测间断对长期演化分析的影响。

此外,不确定性建模在多源融合中逐渐受到重视。不同观测手段的误差特性和信噪比存在差异,其不确定性在融合过程中可能发生传播或放大。因此,在特征融合或模型约束阶段引入误差方差或置信区间描述,有助于提升融合分析结果的稳健性与可解释性。这一思路已在多源遥感数据融合与地表形变分析研究中得到验证<sup>[28]</sup>。

#### 4 多源数据融合在输水渠道与库岸边坡监测中的典型应用

多源数据融合技术在输水渠道及库岸边坡监测中的应用,已由单一指标获取逐步发展为对形变演化过程、致灾机理及风险状态的综合刻画。通过融合不同观测尺度和物理属性的信息源,可在空间连续性、时间稳定性及工程解释性等方面形成互补,为复杂线性水工设施的长期运行安全评估提供数据基础。现有研究主要围绕边坡形变监测、形变驱动因素识别及综合风险认知等方面展开。

##### 4.1 边坡形变监测与时序演化分析

在输水渠道与库岸边坡监测中,形变信息是反映工程稳定状态的核心观测量。多源数据融合通过联合地基雷达、地基监测与空基遥感数据,实现了从点尺度到沿线尺度的形变信息补充。InSAR 技术为大范围缓慢形变监测提供了连续观测能力,而 GNSS、倾角仪等地基手段则在关键部位提供高精度约束,两者融合有效提升了形变时序的完整性与可靠性。相关研究表明,在复杂地形与植被覆盖条件下,引入多轨道、多视角雷达数据,并结合地面监测结果进行时序约束,可显著降低相干性损失与大气误差对形变反演结果的影响,从而更真实地刻画边坡变形的时序演化特征<sup>[29-31]</sup>。此类融合应用推动了输水工程边坡监测由静态形变识别向动态演化分析的转变。

##### 4.2 形变控制因素识别与多源信息联合分析

库岸边坡受水位周期性涨落和长期侵蚀作用影响,其形变过程往往呈现出显著的时序特征。近年来,融合 InSAR、光学遥感与水文数据开展库岸边坡稳定性分析的研究逐渐增多。Suryabhagavan K V 等<sup>[32]</sup>根据 InSAR 的监测结果,对比分析了坡面形变与降水量之间的时间序列关系,可揭示边坡形变对水动力条件的响应规律。在国内,针对三峡库区等典型工程区域,已有多项研究将 InSAR 时序形变结果与地质结构<sup>[33]</sup>、降雨<sup>[34]</sup>与水位资料<sup>[35]</sup>进行联合分析。研究显示,多

源数据融合能够有效区分受水位波动控制的逆形变与潜在失稳前兆,为库岸稳定性评估提供重要信息支撑。这些研究表明,在库岸边坡监测中,多源数据融合的关键价值在于揭示驱动机制,而不仅是形变定量反演结果本身。

##### 4.3 边坡稳定性评估与风险认知应用

多源数据融合在边坡稳定性评估中的应用,体现为对空间异质风险的综合认知。通过将遥感获取的形变信息、地形地貌特征、地质条件以及工程结构参数进行融合,可构建多维度边坡稳定性评价指标体系。研究采用统计<sup>[36-37]</sup>、机器学习<sup>[38-41]</sup>或深度学习<sup>[39-40]</sup>方法,对多源特征进行联合建模,实现对潜在不稳定边坡的区域识别。Jin Y 等<sup>[41]</sup>改进特征提取网络,融合数字高程模型、地质测绘数据、河流分布数据及其他与地球观测信息相关的数据,实现像素级滑坡识别。桂小莉等<sup>[42]</sup>综合考虑地质和地表形变信息提出精细化滑坡易发性评价方法,取得了较好的预测性能并应用于玉溪河灌区。在输水渠道工程中,此类方法能够有效识别沿线风险差异,为巡检重点布设和工程维护提供科学依据。与传统单源评估相比,多源融合方法在风险空间表达和不确定性控制方面展现出明显优势。

##### 5 存在的问题与发展展望

现有多源数据融合研究在输水渠道与库岸边坡监测中的应用仍受到多方面约束,其根本原因在于异构监测信息在时间结构、空间尺度及误差特性上的差异尚未得到充分消解。多源观测数据在长期序列中的一致性难以保证,使融合分析结果对数据获取条件和处理策略表现出较强敏感性。与此同时,融合模型中对边坡变形物理机理的表达仍显不足,部分研究在方法选择上偏重统计或算法性能而弱化了工程过程约束,导致融合结果在物理解释层面存在不确定性。此外,不同尺度监测信息在融合过程中所涉及的尺度映射与特征综合问题尚缺乏统一理论框架,现有方法在复杂地形和非均质工程背景下的适用性仍有待系统验证,这在一定程度上限制了多源数据融合成果的通用性和推广性。

面向未来,输水渠道与库岸边坡监测领域的多源数据融合研究将持续向智能化建模与自动化分析方向演进。人工智能方法在高维特征表达、非线性关系建模及复杂时序模式识别方面展现出的能力,为多源遥感与地面监测信息的深度融合提供了新的技术路径。通过融合深度学习模型对多源形变、环境因子及工程运行信息的联合表征,有望在统一工程语境下实现对边坡变形演化特征的精细刻画。在此基础上,将物理约束嵌入智能模型结构,实现数据驱动方法与工程机理认知的协同表达,有望构建兼具表达能力与工程适用性的多源融合分析体系,从而为复杂线性水工设施的长期运行监测与综合认知提供更加稳健的技术支撑。

##### 参考文献:

- [1] 张钟元,郭翔宇,阚飞,等.灌区水利工程全方位安全监测探析[J].四川水利,2021,42(02):151-155.
- [2] 蔡宗霖.水库灌区边坡植被混凝土生态护坡技术[J].珠江水运,2023,(09):20-22.
- [3] 赵海亮.大型灌区渠道供水期的边坡防护技术[J].农业与技术,2021,41(13):63-65.
- [4] 何秀凤,李钢,夏诸葛,等.联合北斗/GNSS与InSAR技术监测高陡边坡形变的研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2026,54(01):61-69+93.