

运行期灌区输水渠道与库岸边坡安全风险研究进展

舒 胜¹ 金汉林²

1.四川省玉溪河灌区运管中心 四川 邛崃 611500

2.四川省都江堰水利发展中心 四川 都江堰 611830

【摘要】：运行期灌区输水渠道与库岸边坡在长期运行过程中持续受到水位调控、渗流条件演化及环境扰动等多重因素影响，其稳定状态具有显著的时间相关性和渐进演化特征。运行期库岸边坡的安全风险更多体现为安全状态在长期尺度上的持续偏移与累积演化，使得传统基于单一工况或静态稳定判据的分析方法难以全面刻画其风险内涵。近年来，随着多源监测技术的发展以及风险评估理论不断完善，围绕运行期边坡安全风险的研究逐步由单因素分析向多维状态综合认知转变。本文在既有边坡安全风险研究成果的基础上，结合运行期灌区渠岸边坡的工程特性，对相关研究在风险理论框架、研究进展及评估方法体系等方面的成果进行系统梳理与评述，并对未来研究发展方向进行讨论，以为运行期渠岸边坡安全风险研究提供参考。

【关键词】：风险评估；运行期边坡；灌区工程；不确定性；多源监测

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.018

1 引言

运行期灌区输水渠道及库岸边坡作为典型的线性水工设施组成单元，在长期运行过程中持续受到复杂水文条件与工程运行方式的共同影响。灌渠水位周期性调控、渠道渗漏与坡体渗流作用、降雨入渗及地质条件差异等多种因素叠加，使渠岸边坡长期处于非稳态受力与渗流环境中，其变形与稳定性表现出显著的时间相关性及演化特征。大量工程实践表明，此类边坡失稳事件往往并非由单一极端工况直接触发，而是多种不利因素在长期运行过程中逐步累积、耦合放大的结果。这种以渐进演化为主导的风险特征，使运行期灌区渠岸边坡在安全问题的性质上明显区别于施工阶段工程边坡及突发性自然滑坡。

本文围绕运行期灌区输水渠道及库岸边坡安全风险问题，在综述既有研究成果的基础上，系统梳理该领域在风险理论框架、研究进展与评估方法体系等方面的发展脉络，重点分析多源信息条件下风险表征与评估方法的演进特征，并讨论面向复杂运行环境的风险研究发展方向。通过对相关研究的综合评述，旨在为运行期灌区渠岸边坡安全风险的科学认知与后续研究提供参考。

2 运行期边坡安全风险内涵与理论框架

运行期灌区输水渠道及库岸边坡的安全问题，本质上表现为工程体在长期运行条件下，其结构状态在多因素持续驱动作用下偏离稳定区间的可能性及其演化趋势。与施工期或突发性滑坡问题不同，运行期边坡风险更强调状态变化的时间连续性与累积效应，其安全隐患往往并非源于单一极端工况，而是多种水文条件、渗流过程及工程运行扰动长期叠加的结果。因此，对运行期边坡安全的认知不宜局限于静态稳定性判别，而应从动态过程出发，对边坡状态演化及其不确定性进行综合刻画。

在风险科学框架下，工程边坡风险通常由危险性、暴露度和易损性等要素共同表征，但针对运行期边坡而言，仅基于静

态指标的风险描述难以反映其长期演化特征。边坡结构参数、水文边界条件及材料性能均可能随时间发生变化，使风险表现出明显的动态属性。基于此，运行期边坡安全风险可理解为：在环境与工程载荷持续作用下，边坡状态向临界失稳条件演化的概率特征及其潜在影响的综合表达，其中状态变量的时间演化是风险形成的关键。

在理论层面，运行期边坡风险评估的发展与可靠度理论和概率方法密切相关。通过将边坡安全状态映射至随机空间，极限平衡条件或功能函数可用于刻画失稳概率。然而，该类方法多以简化工况为前提，难以系统反映长期运行过程中水位波动、渗流演化及材料劣化等时序效应。随着监测技术的进步，基于时间序列和状态演化的分析思想逐渐被引入边坡研究，为风险评估提供了新的理论支撑。

状态空间方法为运行期边坡安全风险提供了一种具有统一意义的理论框架。在该框架下，边坡安全状态被描述为由若干状态变量构成的向量，这些变量在环境扰动和工程运行条件的共同驱动下随时间演化。多源监测信息通过对状态变量的观测与更新，对系统状态进行持续约束，从而使风险评估由单一安全裕度判别转向对状态演化路径及不确定性的分析。正如图1所示，环境与工程因素构成状态驱动源，监测信息作为观测约束嵌入状态演化过程，而风险则体现为系统状态接近或进入失稳区域的动态特征。

在这一理论框架下，运行期边坡安全风险不再被视为孤立结果，而是与状态变量选择、演化模型及观测不确定性密切相关的动态过程。这种以状态演化为核心的风险认知，为后续多源监测信息融合、风险量化方法及预测模型研究奠定了理论基础。

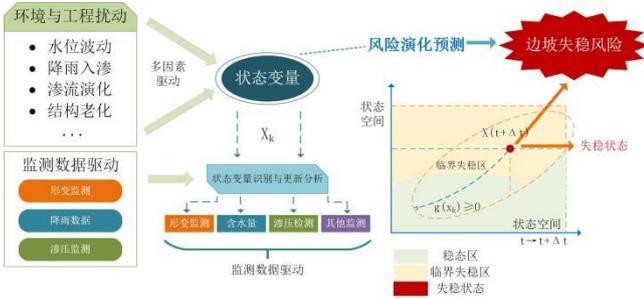


图1 运行期边坡安全风险内涵与理论框架

3 运行期边坡安全风险研究进展

3.1 风险认知与建模范式的发展

运行期边坡安全研究最初主要基于确定性稳定分析方法，其研究重点集中于极限平衡条件下的安全系数计算与潜在滑动面的判定。在这一范式中，边坡安全状态通常被视为在给定工况下的静态结果，风险概念隐含于安全裕度是否满足设计要求之中。然而，该类方法难以反映边坡在长期水文加载与工程运行条件作用下所表现出的时间相关行为。

随着概率理论与可靠度方法在岩土工程中的引入，边坡安全研究逐步转向基于随机变量的风险建模框架。通过将强度参数、几何条件及外部荷载视为随机变量，研究者得以在概率意义上量化失稳可能性，从而实现了对模型不确定性与参数不确定性的显式描述。然而，此类方法在多数情况下仍基于单一分析时刻，未能系统刻画运行期边坡安全状态的时间演化特征。近年来，围绕边坡时间演化的研究逐渐增多，边坡安全被重新理解为状态变量随时间演化的过程，为动态风险评估理论的发展提供了重要基础。

3.2 状态获取与风险感知技术的研究进展

运行期边坡风险研究对安全状态表征提出了更高要求，使得监测技术在风险认知中的地位不断提升。随着监测手段由离散点观测向空间连续观测拓展，多源监测数据逐渐成为描述边坡状态演化的重要信息载体。其中，基于合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）的形变时间序列分析，因其具备大范围、高精度和长期连续观测能力，在运行期边坡风险研究中得到广泛应用。

相关研究表明，InSAR 形变时间序列能够有效揭示边坡表层变形的时空分异特征，并为潜在不稳定区域的识别提供直接依据。然而，仅依赖表层形变信息难以全面反映边坡内部响应机制。为弥补这一不足，部分研究尝试将 InSAR 观测结果与地质结构、水文条件及数值模拟结果相结合，通过多源监测信息的协同约束，实现对边坡安全状态的综合感知。在这一过程中，监测数据逐渐由“异常识别工具”转变为风险模型中的状态获取，为后续动态风险分析提供数据基础。

3.3 风险表征与定量评估方法的研究进展

在风险建模与状态获取能力提升的基础上，运行期边坡风

险评估方法逐步由经验型和单指标分析向多状态量化表征方向发展。统计分析方法与概率模型在处理监测数据不确定性和状态变量随机性方面表现出明显优势，可用于分析不同状态变量及其演化过程对风险水平的影响机制。

近年来，围绕多状态变量的风险定量方法不断丰富。一方面，研究者通过构建多指标综合评价体系，对边坡不同响应特征进行集成分析；另一方面，基于状态空间理论的风险评估方法逐渐受到关注，该方法通过显式描述状态变量、观测变量及其误差结构，实现对边坡安全状态的动态估计。在这一框架下，风险被视为状态演化轨迹及其不确定性在时间维度上的综合体现，为运行期边坡由静态安全判定向动态风险量化转变提供了理论支撑。

4 风险评估方法体系

运行期输水渠道及库岸边坡在长期水文作用和工程服役条件下，其安全状态具有显著的时间演化特征和不确定性。为系统刻画边坡安全状态在运行期内的动态变化过程，本章在统一状态空间框架下，对现有风险评估方法进行理论归纳与方法梳理，并重点讨论多源监测条件下风险量化与建模的主要技术路径。图2示意了运行期边坡风险评估的总体方法框架，各类方法在该统一框架下体现为状态变量表征方式、演化模型及风险判据的差异。

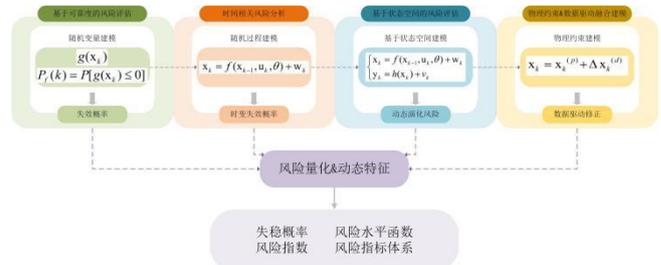


图2 运行期边坡风险评估方法体系概览

4.1 基于可靠度理论的风险评估

可靠度理论是工程结构风险评估的重要理论基础，其核心在于通过功能函数描述系统安全状态，并在概率空间中量化失效事件发生的可能性。在运行期边坡风险分析中，边坡安全状态可由状态向量式(1)加以表征：

$$x_k \in R^n \quad (1)$$

其中，\$k\$ 表示离散时间步，状态分量可包括几何变形、强度参数及环境响应等变量。在此基础上，定义功能函数式(2)：

$$g(x_k) \quad (2)$$

用于表征边坡在时刻 \$k\$ 的稳定状态，当 \$g(x_k) > 0\$ 时系统处于安全状态，而当 \$g(x_k) \le 0\$ 时则视为发生失稳或进入高风险区间。基于该判据，运行期边坡失稳风险可通过失效概率式(3)进行量化：

$$P_f(k) = P[g(x_k) \le 0] \quad (3)$$

可靠度方法能够在统计意义上刻画参数不确定性对风险水平的影响，但其分析结果通常对应于单一时刻或简化工况，难以直接反映边坡安全状态随时间演化的连续特征，在长期运行风险研究中存在一定局限。

4.2 时间相关风险分析与随机过程建模

针对可靠度方法在时间维度表达上的不足，部分研究引入时间相关风险分析思想，将边坡安全状态视为随时间演化的随机过程。在该框架下，边坡安全状态在相邻时间步之间的演化关系可表示为：

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \theta) + \mathbf{w}_k \quad (4)$$

其中 $f(\bullet)$ 为状态演化函数， \mathbf{u}_k 表示外部作用因素（如水位变化、降雨过程）， θ 为模型参数， \mathbf{w}_k 为过程噪声项，用以反映未建模不确定性。

在时间相关分析框架中，风险不再仅被视为某一时刻的失稳概率，而是通过状态变量在时间序列中的演化轨迹进行刻画，使得风险评估结果能够反映边坡逐步逼近临界状态的过程特征。这种方法在理论上更契合运行期边坡的长期演化属性，但其实现通常依赖于对状态演化规律的合理建模，模型复杂度和参数不确定性仍是主要挑战。

4.3 多状态变量表征与状态空间风险模型

在多源监测条件下，运行期边坡安全状态往往难以通过单一指标充分描述。为此，状态空间方法逐渐成为风险评估研究的重要工具。该方法将边坡安全状态统一表示为多维状态向量 \mathbf{x}_k ，并通过状态方程与观测方程构建动态风险分析框架，其基本形式为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \theta) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (5)$$

其中， \mathbf{y}_k 为多源观测量， $h(\bullet)$ 为观测映射函数， \mathbf{v}_k 观测误差项。

在该框架下，监测数据通过观测方程不断约束状态变量的估计结果，使得风险评估能够在多源信息支撑下实现动态更新。状态空间方法通过显式区分系统演化不确定性与观测不确定性，为运行期边坡风险评估提供了统一的数学描述平台，也为后续引入数据驱动与融合建模方法奠定了理论基础。

参考文献：

- [1] 李玉林,彭业宣,黄德宽,等.不同降雨条件下土质边坡的稳定性分析[J].中国水运,2025,(10):152-154.
- [2] 陈世壮,徐卫亚,石安池,等.高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J].水利水电科技进展,2023,43(03):83-93.
- [3] 钟登华,安娜,李明超.库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究[J].岩石力学与工程学报,2007,(02):360-367.
- [4] 蒋权,陈希良,肖江剑,等.云南黄坪库区滑坡运动及其失稳模式的离散元模拟[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(03):53-59.

4.4 物理约束与数据驱动融合建模

在复杂运行环境和长期演化背景下，单一物理模型或纯数据驱动模型均难以兼顾风险评估的精度与工程可解释性。为此，近年来逐渐形成将物理约束引入数据驱动模型的融合建模方法，其基本思想是在统一状态空间框架内协同描述边坡安全状态的物理演化规律与监测数据所反映的非线性特征。

在该框架中，边坡状态演化仍服从统一的状态方程式(4)，其中 $f(\bullet)$ 状态演化函数由力学平衡、渗流控制或经验破坏准则等物理约束主导。针对物理模型难以显式刻画的非线性扰动或参数演化，可引入数据驱动修正项，对状态预测结果进行补偿，其形式可表示为：

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k^{(p)} + \Delta \mathbf{x}_k^{(d)} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{x}_k^{(p)}$ 为基于物理模型得到的预测状态， $\Delta \mathbf{x}_k^{(d)}$ 为由数据驱动模型估计的修正量。通过在模型训练或状态更新过程中施加物理约束条件，可以有效限制模型解空间，避免风险判别结果偏离工程可行区间。

该类融合建模方法在多源监测条件下能够实现对边坡安全状态的动态识别与风险量化，在兼顾物理一致性和预测能力方面具有明显优势，为运行期边坡风险评估提供了一种介于机理模型与经验模型之间的统一建模路径。

5 存在的问题与发展方向

当前多源数据融合在运行期输水渠道及库岸边坡安全风险评估中的应用仍面临显著理论与方法挑战。边坡作为复杂工程系统，其安全状态在时间、空间与物理机制层面具有高度异质性，不同监测数据在分辨率、尺度及误差结构上的差异，使得长期状态变量的统一表达与动态一致性难以保证，风险结果对数据条件与模型假设表现出较强敏感性。在模型层面，部分研究偏重统计相关性与算法性能提升，对渗流-力学耦合过程、材料时变特性等关键物理机制的刻画相对不足，导致风险量化结果在工程解释层面仍存在不确定性。同时，多尺度信息在风险建模中的映射关系尚缺乏统一理论支撑，不同尺度状态变量的集成多依赖经验处理，复杂地质条件下的方法适用性仍有待验证。数据驱动与人工智能方法为高维状态识别与演化预测提供了新的技术路径，但其有效应用应建立在明确的工程物理约束基础之上，通过与力学、水文模型融合构建可解释的混合建模框架，实现风险评估由经验依赖向机理-数据协同支撑转变。