

## 研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i02.15-25

### 亮点:

- 提出云模型驱动的定性-定量融合动态等级框架, 破解复合不确定性难题。
- 基于 3En 规则与云数字特征, 建立高分辨率四级安全区间及自适应预警边界。
- 构建状态-风险-规律三维协同评价模型, 为数字孪生智能管控提供新范式。

### \*通讯作者邮箱:

jay0957@163.com

**英文引用:** Li Yu et al., 2026. Research on Dynamic Evaluation and Grading Standards for Canal Seepage Safety Based on Cloud Model Theory. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (02), 15-25.

**中文引用:** 李豫等., 2026. 基于云模型的渠道渗流安全动态评价与等级标准研究. 工程科学与实践, 2 (02), 15-25.

### 稿件处理节点:

接收	2026年5月26日
修订	2026年6月3日
接受	2026年6月9日
发表	2026年6月24日

### 基金资助:

本研究未受到基金资助。

### 版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

## 基于云模型的渠道渗流安全动态评价与等级标准研究

李豫<sup>1,\*</sup>, 周峰明<sup>2,3</sup>, 赵新奇<sup>1</sup>, 陈守开<sup>4</sup>, 杨耀红<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 南阳豫资汉山水库建设管理有限公司, 南阳 473200

<sup>2</sup> 郑州大学, 郑州 450001

<sup>3</sup> 南阳豫资投资发展集团有限公司, 南阳 473200

<sup>4</sup> 华北水利水电大学, 郑州 450046

**摘要** 水工结构运行与智能监测领域长期面临海量多源监测数据复合不确定性的处理难题, 特别是在大型抽水蓄能电站的渠道渗流安全评价中, 如何突破传统静态模型的局限, 构建多环境因素耦合下的动态演化追踪机制, 是提升重大基础设施长期运行可靠性的关键科学问题。本研究引入非线性数学工具云模型理论, 旨在构建一套定性状态感知与定量指标映射深度融合的渗流安全动态等级标准框架。研究依托泰安抽水蓄能电站长期工程监测实践, 系统采集并处理了包含渠内水位、双向温度波动、孔隙水渗压以及结构沉降等多维时序序列数据。在方法论层面, 本研究界定了环境因素与表征因素的单双边致险机制, 并利用正逆向云发生器算法提取了期望、熵与超熵三大核心数字特征, 将复杂的复合不确定性转化为可视化的泛正态分布表达。研究发现, 基于“3En 规则”确立的动态标准能够以极高的分辨率将系统安全状态精确划分为四个层级区间(从 0%~25%至 75%~100%)。量化结果显示, 针对水位(均值 405.32 m)、温度(设定上限 41.50 °C, 下限 -15.60 °C)等环境指标, 模型成功输出了自适应的预警边界; 对于核心表征指标, 模型将 PB1 测点的渗压不确定度(期望值 328.37, 熵值 0.12)及 LDB3 测点的沉降特征有效降维, 转化为高度可解释的动态风险阈值区间。本研究构建了融合状态、风险与规律维度的三维协同评价模型, 该范式不仅为渠道渗流安全的定量诊断提供了强鲁棒性的新工具, 亦为数字孪生赋能下水利枢纽的智能化管控与风险预警提供了跨学科的理论参照与实践基础。

**关键词:** 渠道渗流安全; 动态评价; 云模型; 等级标准; 不确定性分析

## Research on Dynamic Evaluation and Grading Standards for Canal Seepage Safety Based on Cloud Model Theory

Li Yu<sup>1,\*</sup>, Zhou Fengming<sup>2,3</sup>, Zhao Xinqi<sup>1</sup>, Chen Shoukai<sup>4</sup> and Yang Yaohong<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Nanyang Yuzi Hanshan Reservoir Construction Management Co., Ltd. Nanyang, 473200.

<sup>2</sup> Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001

<sup>3</sup> Nanyang Yuzi Investment Development Group Co., Ltd. Nanyang, 473200

<sup>4</sup> North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046

**Abstract** The domain of hydraulic structure operation and intelligent monitoring has persistently confronted the challenge of processing complex uncertainties inherent in massive, multi-source monitoring data. Particularly in evaluating the canal seepage safety of large-scale pumped-storage hubs, breaking through the limitations of traditional static models to construct a dynamic evolution tracking mechanism under multi-environmental factor coupling remains a critical scientific imperative for

enhancing the long-term operational reliability of major infrastructure. To address this, the present study introduces the Cloud Model theory—a nonlinear mathematical tool—aiming to formulate a dynamic grading standard framework for seepage safety that profoundly integrates qualitative state perception with quantitative indicator mapping. Drawing upon long-term engineering monitoring practices at the Tai'an Pumped Storage Power Station, this research systematically collected and processed multidimensional time-series data, encompassing canal water levels, bidirectional temperature fluctuations, pore water pressures, and structural settlements. Methodologically, this study delineates the unilateral and bilateral risk-inducing mechanisms of environmental and characterizing factors. By employing forward and backward cloud generator algorithms, three core numerical characteristics—expectation, entropy, and hyper-entropy—are extracted, thereby transforming complex compound uncertainties into visualized pan-normal distribution representations. Findings indicate that the dynamic standards, established based on the 3En rule, can accurately partition the system safety state into four hierarchical intervals (ranging from 0%~25% to 75%~100%) with exceptionally high resolution. Quantitative results demonstrate that for environmental indicators such as water level (mean 405.32 m) and temperature (configured upper limit 41.50 °C, lower limit -15.60 °C), the model successfully outputs adaptive early-warning boundaries. Regarding the core characterizing indicators, the model effectively reduces the dimensionality of both the seepage pressure uncertainty at monitoring point PB1 (expectation value 328.37, entropy 0.12) and the settlement characteristics at point LDB3, translating them into highly interpretable dynamic risk threshold intervals. Ultimately, this study constructs a three-dimensional synergistic evaluation model that integrates state, risk, and regularity dimensions. This paradigm not only offers a highly robust, quantitative diagnostic tool for canal seepage safety but also establishes an interdisciplinary theoretical reference and practical foundation for the intelligent management and risk early-warning of water conservancy hubs empowered by digital twins.

**Keywords:** Canal seepage safety; Dynamic evaluation; Cloud model; Grading standards; Uncertainty analysis

## 1. 引言

渠道作为长距离引调水工程与抽水蓄能电站的核心输水构筑物，其渗流控制的有效性与结构稳定性直接决定了整个水利枢纽的长期安全运行寿命。在渠道服役周期内，受内部水动力交互及外部复杂环境荷载的交织作用，土体内部的渗压演化与沉降变形呈现出极高的不确定性。这些表征指标通常受到渠内水位波动、降雨激励、非均匀周期性温度场以及地下水位演变等多源环境因素的综合调控。由于环境激励与结构响应之间存在显著的迟滞特征与非线性交互，渠道渗流安全状态表现出强烈的随机性、模糊性与时序动态性。因此，如何科学构建适应多因素耦合效应的渗流安全动态评价体系，实现安全状态的精准定量诊断，已成为现代水利基础设施智能化运维领域亟待解决的关键问题。

针对渠道渗流行为与安全控制，国内外学者已开展了广泛而深入的研究<sup>[1,2,3]</sup>，现有成果主要聚焦于确定性分析框架，依托统计模型、极限平衡力学推演或有限元数值模拟等手段展开。例如，李延勋等<sup>[4]</sup>构建了三维渗流分析模型开展渠道渗流研究；刘卓等<sup>[5]</sup>基于 MIDAS 平台实现了边坡渠道的三维渗流数值模拟。然而，上述方法在应对监测数据固有的不确定性与时序动态特征方面尚存局限。

近年来，云模型作为一种有效处理复合不确定性的数学工具，在工程评价与智能诊断领域展现出显著优势。牛广利等<sup>[6]</sup>构建了测点与逐级评判规则，成功将其应用于数字孪生工程；满旺等<sup>[7]</sup>融合视频监控与三维模型，基于人工智能技术实现了小型水库大坝的入侵检测与安全管理；朱凯等<sup>[8]</sup>则利用云模型拟定大坝安全监控指标。

尽管既有成果在渠道渗流机理模拟和大坝安全指标拟定方面取得了重要进展，但现有的渠道渗流分析方法多依赖于静态或确定性的分析框架，在面对长序列、高噪声的原型监测数据时，难以有效解析数据内部固有的随机扰动与定性概念的模糊特征，缺乏对安全状态时序演化趋势的动态追踪能力。同时，大坝与渠道在几何尺度、边界条件以及环境交互机制上存在显著差异，现有的工程云模型评价方法尚未针对渠道渗流中环境激励与响应表征的异质性机理进行系统解耦。因此，发展一种能够兼容多重不确定性、具备时序自适应更新能力的渠道渗流安全动态评价等级标准，对满足现代水利工程的防

灾减灾具有重要意义。

鉴于此，本研究将云模型理论引入渠道渗流安全评价领域，旨在构建一套能够充分表征数据动态演化特征与多重不确定性的动态评价等级标准体系。主要研究内容涵盖以下三个方面：首先，系统梳理环境影响因素与渗流表征因素的本质区别，明确不同指标在安全边界界定中的单边与双边控制约束机制；其次，融合云模型理论，针对渠内水位、温度、孔隙水渗压及沉降变化等核心监测指标，研发基于期望、熵与超熵数字特征的动态化等级划分算法，实现定性安全语义与定量监测数据的深度映射；最后，依托抽水蓄能电站的长序列原型观测数据开展实例验证，校核动态评价模型在复杂工况下的解释力与稳健性，从而为渠道渗流安全的科学评估与智能化动态管理提供定量工具。

## 2. 综合评价指标等级标准构建

评价指标等级标准的构建可分为环境因素等级标准和表征因素等级标准集<sup>[9,10]</sup>。其中，环境因素等级标准主要依据“监控指标值”确立，并根据具体的指标类型进行单双边考虑<sup>[11]</sup>；在表征因素动态等级标准集的建立过程中，其数据范围应在大量实测数据的基础上，结合云模型方法来确立<sup>[12]</sup>，并跟随时间的变化不断更新数据。

### 2.1. 环境因素等级标准

在工程实践中，监控指标值常被用于评估工程运行的安全性与稳定性<sup>[13]</sup>。以渗流安全监测为例，通过分析渗压计的历史数据并建立数学统计模型，可有效解析渗压值的变化趋势与时效特征<sup>[14]</sup>。模型经与实测数据比对后，利用剩余标准差确定监控指标的合理阈值范围，再结合工程实际运行状况及可靠度理论，制定分级管理标准。通常，当实测值处于监控指标设定范围内时，工程运行视为正常；若超出该范围，则可能存在结构破坏风险。

基于评价指标值与可靠度理论，工程安全等级可细分为五个区域。划分以监控指标值为基准点，通过观测值的偏离方向确定具体区域：对于观测值过大或过小都非正常表现的观测项目如垂直位移等，需采用双边考虑；而对于渗压值等项目，测值偏大有问题，测值偏小反而有利，则应采用只作偏大的单边考虑。具体划分方案如图 1 所示。

在渠道渗流中，确立指标体系具体的单双边考虑情况如下表 1 所示。

渠内水位、降雨量、温度及地下水位是影响渠道渗流与沉降安全的关键因素，且这些参数均可通过监测设备实时获取。因此，在制定水位、降雨、温度及地下水位等指标的等级标准值时，可基于工程实际运行状况和实测数据，结合前述方法进行。利用实测数据解析其时间演变规律，在工程安全运行的前提下，计算数据的均值与方差，并参考工程设计报告，最终建立环境因素的等级标准集。

对于渠道水流而言，其水位数据通常相对稳定，但在渠道设计过程中，水位数据应设有警戒水位，当渠内水位数据高于警戒水位时，表明渠道存在安全隐患，需进行渠道安全评价，而水位较低时通常不会引起问题，故渠道水位做单边考虑。

对于渠道降雨而言，其降雨量的变化通常会随季节的变化而出现周期性变化，其数据的上下变化

幅度较大，但其对渠道安全的影响具有明显的单向危险性，即只有强降雨或持续降雨等降雨量过大时才构成威胁，少雨或无雨通常不直接导致安全问题，故亦做单边考虑。

对于温度而言，由于温度对渠道结构材料性能、土体物理状态以及整体稳定性具有双向敏感性，过高或过低都有可能引发不利甚至危险的工程响应，故应做双边考虑。

对于深挖方渠道而言，其地下水位数据与渠内水位类似，通常都会保持稳定，其数据的上下变化较小，而在渠道设计过程中，地下水位数据亦设有相应的警戒水位，水位升高是主要的结构安全威胁源，而水位偏低通常不会引起安全问题，因此亦做单边考虑。

具体环境因素等级标准的确定如表 2 所示。

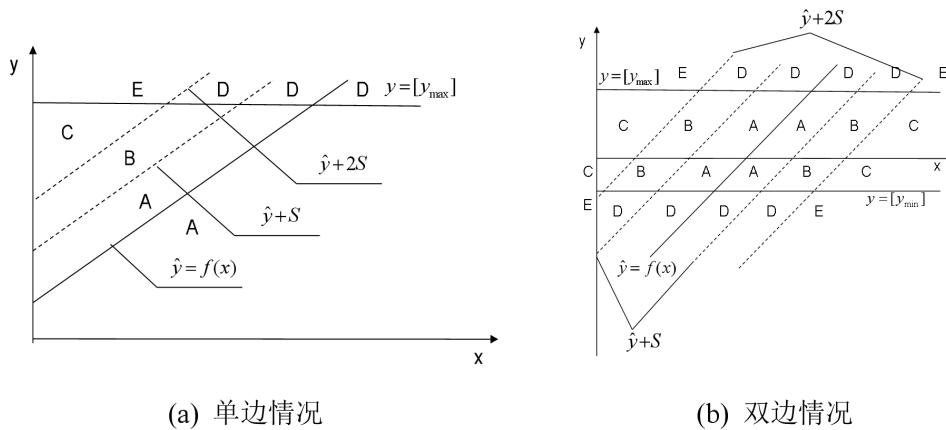


图 1 评价指标的数值表现

表 1 单双边情况

项目	环境因素			表征因素	
单边情况	渠内水位	降雨量	地下水位	渗压值	沉降变化值
双边情况		温度		/	

表 2 环境因素等级标准确立

安全度等级	等级标准				
	渠内水位	降雨	地下水位	温降	温度 温升
75%~100%	$y \leq [y_{max}]$ , 且 $y_{min} \leq y \leq \bar{y} + S$		$y \geq [y_{min}]$ , 且 $\bar{y} - S \leq y \leq y_{温降max}$		$y \leq [y_{max}]$ , 且 $y_{温升min} \leq y \leq \bar{y} + S$
50%~75%	$y \leq [y_{max}]$ , 且 $\bar{y} + S \leq y \leq \bar{y} + 2S$		$y \geq [y_{min}]$ , 且 $\bar{y} - 2S \leq y \leq \bar{y} - S$		$y \leq [y_{max}]$ , 且 $\bar{y} + S \leq y \leq \bar{y} + 2S$
25%~50%	$y \leq [y_{max}]$ , 且 $\bar{y} + 2S \leq y \leq y_{max}$		$y \geq [y_{min}]$ , 且 $y_{温降min} \leq y < \bar{y} - 2S$		$y \leq [y_{max}]$ , 且 $\bar{y} + 2S \leq y \leq y_{温升max}$
0%~25%	$y \leq [y_{max}]$ , 且 $y \geq y_{max}$		$y \geq [y_{min}]$ , 且 $y < y_{温降min}$		$y \leq [y_{max}]$ , 且 $y \geq y_{温升max}$

## 2.2. 表征因素动态等级标准

相比于水位、降雨、温度等数据变化，渗压值(孔隙水压力)和沉降变化值的不确定性更为显著，渗压值直接反映土体渗透压力状态，是判断渗流稳定性的核心指标，但其测量易受周边土体条件干扰，且与渠道水位、降雨量等外部因素紧密关联，导致数据存在较大的不确定性。同时，渗压计和沉降仪的仪器特性也会引入额外测量偏差。因此，在制定渗流与沉降安全等级标准时，需假设所有渗压计、沉降仪均保持精度一致，状态相同且监测数据的变化均由渗流状态、沉降变化所引起的。李德毅院士提出的云模型理论<sup>[15]</sup>通过云数字特征量化数据中的不确定性，实现定性表达与定量数据的融合，可有效支撑安全等级标准的科学确立。基于此，结合现有评价方法，利用云模型这一理论方法，实现渗流与沉降安全评价等级标准值的确立。

### 1) 云模型理论

云模型理论(Cloud Model)是李德毅院士团队在传统模糊集理论和概率统计理论基础之上，提出的一种专门研究复合不确定性的现代数学理论<sup>[16]</sup>。可较好地描述变量的随机性和模糊性及其关联性，实现定性定量不确定性之间的映射和转换，目前已在多个领域的状态诊断和综合评价中得到应用。

云模型用期望  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  三个数字特征来整体表征一个概念。云数字特征和云发生器是云模型理论的两个核心内容。云发生器是云模型中定性概念与定量数据之间相互转换的特定算法。正向云发生器实现从定性概念到定量数值的转换，由云的数字特征( $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$ )产生云滴，如图 2 所示；逆向云发生器实现从定量数值到定性概念的转换，它将精确的数据转换为以云数字特征( $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$ )表示的定性概念，如图 3 所示。

超熵  $H_e$  的存在使云模型分布存在两种状态，泛正态分布状态和雾化状态。通过相关研究表明<sup>[17,18]</sup>，云模型的形态在  $H_e = E_n/3$  时出现分界，即  $H_e < E_n/3$ ，云滴呈现出泛正态状态， $H_e > E_n/3$  时，则呈现雾化状态。

此外，云模型理论根据云滴分布情况，提出了正态分布下的云滴的“ $3E_n$  规则”，如图 4 所示。

根据上述分析可知，云模型理论将定量数据转化为定性概念的核心思想，是利用定性概念的数学特征，即云特征来刻画定量数据中所包含的不确定性。文献指出<sup>[19,20,21]</sup>，超熵是影响云模型分布形态的关键因素：通常超熵越大，数据不确定性越高，分布越离散，规律性也越难以维持。而期望与熵所确定的区间，则决定了不同数据对定性概念的贡献程度。因此，在建立表征因素动态等级标准时，主要

是将表达定性概念的云数字特征具体化，并通过分析渗压值、沉降变化值与云模型理论的适配程度，进而确定各表征因素的等级标准。

### 2) 渗压值动态等级标准

由于渗压计所反映的渗透压力具有不确定性，其变化规律已体现在具体的渗压值数据中。因此，通过对阶段性渗压值进行统计处理，包括计算其均值、分析数值的取值范围以及考察各数值的出现频率，即可有效揭示渗压值的变化特征与内在规律。渗压值主要通过监测仪器获取。在理想情况下，若无水位、降雨等外部环境因素的干扰，其变化应表现为一条平稳不变的曲线(理想渗压值曲线)。然而，实际观测数据显示，渗压值呈现出复杂且多变的波动趋势(实际渗压值曲线)，这主要是受水位、降雨、温度等环境变量共同作用的结果。如图 5 所示，这些外部因素的综合作用导致渗压值产生明显波动。

值得注意的是，渗压值与水位变化之间存在一定的滞后效应，使得二者之间的关联性并不显著；相比之下，降雨和温度对渗压值的影响具有更明显的滞后特征，是驱动其变化的主要外部因素。尽管如此，从整体趋势看，实际渗压值曲线仍围绕理想曲线上下波动，并维持在一定范围内，体现出相对的稳定性。

因此，此处设定的渗流安全评价等级标准值应根据云模型理论实现对基础数据的逆向云计算，并将云数字特征所表征的定性概念转化为可量化的数值数据。通过公式对数据分布特征进行判别，针对服从泛正态分布的渗压值数据，引入“ $3E_n$  规则”进行安全度划分。具体划分如下表 3 所示。

### 3) 沉降变化值动态等级标准集

渠道沉降值的变化受外部环境因素显著影响，如渠内水位波动及温度降低引发的土体冻胀效应均会导致渠道沉降变化，其数据呈现明显的随机性与不确定性。同时，沉降过程受历时影响较大，因此，为了体现历时对沉降的影响，本研究通过云模型理论，量化阶段性沉降数据的统计特征，计算阶段性沉降变化均值、分析数值分布区间及考察各数值的频次分布来构建沉降安全评价模型。

云数字特征在沉降评估中发挥关键作用，期望  $E_x$  直接反映渠道沉降状态与稳定性，可辅助判断阶段性沉降是否正常或沉降趋向最终值；熵  $E_n$  通过量化沉降变化值的数值范围，关联单次测定与安全程度，范围越小表明安全风险越低；超熵  $H_e$  则表征沉降规律性，规律性强意味着沉降过程更稳定、安全性更高。三者协同从状态、风险和规律三个维度，共同构建了渠道沉降的安全评估框架。具体等级标准划分如下表 4 所示。

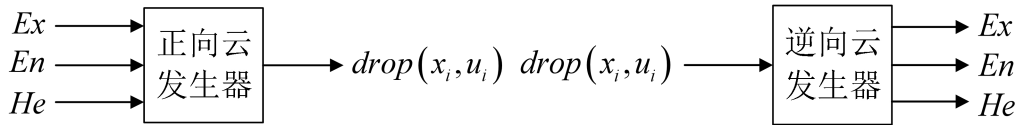


图2 正向云发生器

图3 逆向云发生器

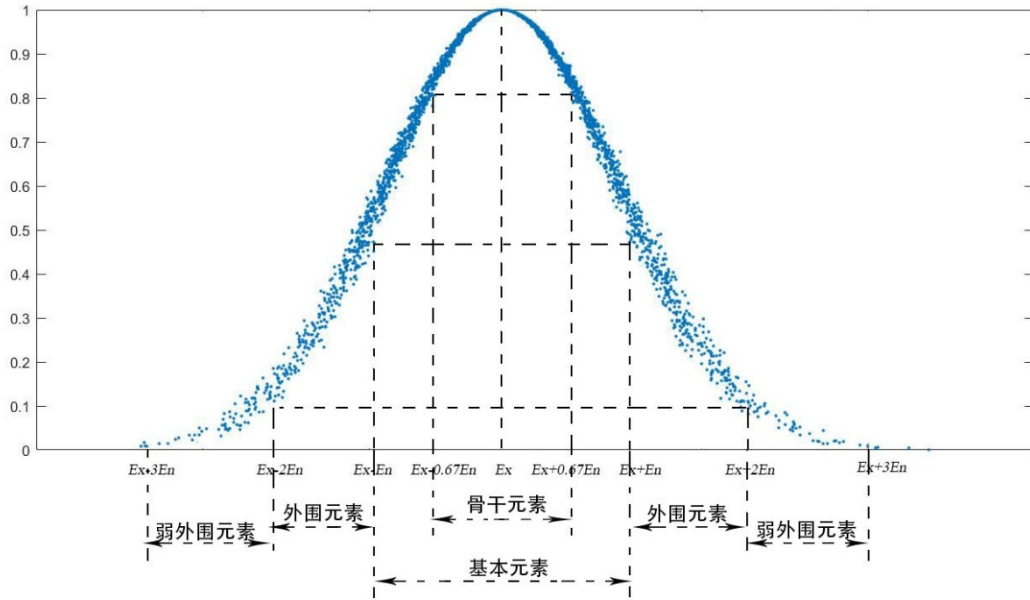
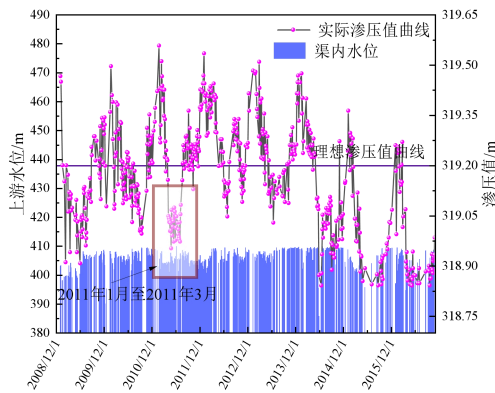
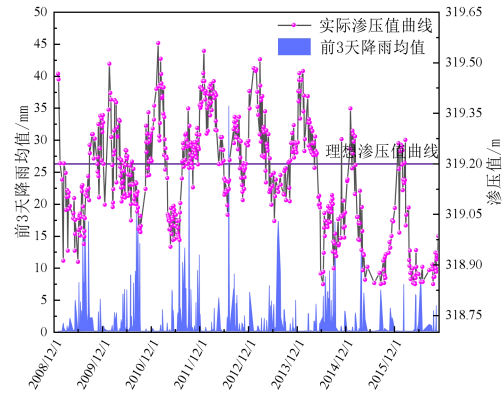


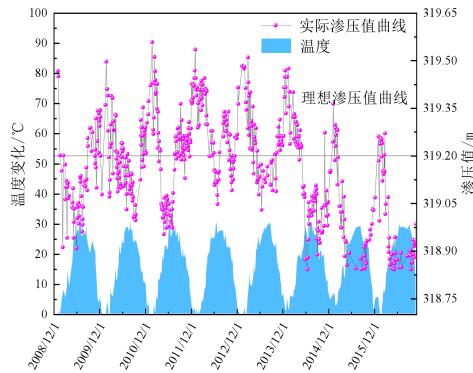
图4  $3E_n$  规则图



(a) 渠内水位与渗压值关系图



(b) 降雨影响渗压值变化曲线



(c) 温度影响渗压值变化曲线

图 5 渗压值变化曲线

表 3 渗压值动态等级标准集

安全度等级	等级标准	
	$H_e < E_n / 3$	$H_e \geq E_n / 3$
75%~100%	$[y_{\min}, E_x + E_n]$	$y_{\min} \leq y \leq \bar{y} + S$
50%~75%	$[E_x + E_n, E_x + 2E_n]$	$\bar{y} + S \leq y \leq \bar{y} + 2S$
25%~50%	$[E_x + 2E_n, E_x + 3E_n]$	$\bar{y} + 2S \leq y \leq \bar{y} + 3S$
0%~25%	$[E_x + 3E_n, y_{\max}]$	$\bar{y} + 3S \leq y \leq y_{\max}$

表 4 沉降变化值动态等级标准

安全度等级	等级标准	
	$H_e < E_n / 3$	$H_e \geq E_n / 3$
75%~100%	$[y_{\min}, E_x + E_n]$	$y_{\min} \leq y \leq \bar{y} + S$
50%~75%	$[E_x + E_n, E_x + 2E_n]$	$\bar{y} + S \leq y \leq \bar{y} + 2S$
25%~50%	$[E_x + 2E_n, E_x + 3E_n]$	$\bar{y} + 2S \leq y \leq \bar{y} + 3S$
0%~25%	$[E_x + 3E_n, y_{\max}]$	$\bar{y} + 3S \leq y \leq y_{\max}$

注： $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$  分别为沉降变化值的最大值与最小值。

### 3. 渠道渗流评价指标体系构建

#### 3.1 工程概况

泰安抽水蓄能电站工程位于泰山西南麓，距泰安市 5km，京沪铁路和 104 国道从工程区通过。本工程担负山东电网的调峰、填谷和调频、调相及事故备用等任务。

泰安抽水蓄能电站枢纽工程由位于樱桃沟的上水

库和改造加固后的大河水库作为下库及其间地下输水发电系统组成。

本工程上下水库的正常蓄水位和相应库容分别为 410m、165m 和 1107.6 万 m<sup>3</sup>、2234.7 万 m<sup>3</sup>。地下厂房总装机容量 1000 MW。

#### 3.2 工程实例数据计算与等级标准确定

为验证所构建动态等级标准方法的工程适用性，本节以泰安抽水蓄能电站长期监测数据为基础，分别对渠内水位、温度、渗压值和沉降变化值进行统计计算，并据此确定各评价指标的安全等级标准。

根据历史数据可知，水位数据最小值为 385.53 m，最大值为 410.57 m，均值为 405.32 m，水位标准差 S 为 2.26。得等级标准见表 5。

根据工程实际，设定温升阶段为 3 月至 11 月，温降阶段为 12 月至来年 2 月，可得以下数据：温升时期，最低温度为 2.30 °C，最高温度为 38.70 °C，均值为 21.11，温度标准差为 7.9，设定的上限温度为 41.50 °C。温降阶段，最高温度为 12.30 °C，最低温度为-

10.40 °C，均值为 2.93，温度标准差为 4.42，设定的下限温度为-15.60 °C，具体等级标准如表 6 所示：

根据坝基渗压布置情况可知，坝基渗压计共有 4 个，其均值、熵值及超熵计算结果如下所示，相应的等级标准亦如表 7 所示：

根据计算结果，可得渗压计动态等级标准集如表 8 所示。

沉降数据主要针对坝体、坝基处沉降展开沉降安全评估，如表 9 所示：

根据计算结果，可得沉降仪动态等级标准集如表 10 所示。

表 5 水位数据等级标准的确立

安全度等级	等级标准
75%~100%	[385.53, 407.58]
50%~75%	(407.58, 409.83]
25%~50%	(409.83, 410.57]
0%~25%	(410.57, 415.15]

表 6 温度等级标准的确立

安全度等级	等级标准	
	温降	温升
75%~100%	[-1.49, 12.30]	[2.30, 29.01]
50%~75%	(-5.91, -1.49]	(29.01, 36.91]
25%~50%	(-10.40, -5.91]	(36.91, 38.70]
0%~25%	[-15.60, -10.40]	(38.70, 41.50]

表 7 渗压计数据计算结果

渗压计编号	均值( $E_x$ )	熵( $E_n$ )	超熵( $H_e$ )	最小值	最大值
渗压计 PB1	328.37	0.12	0.01	327.87	328.85
渗压计 PB2	325.47	0.18	0.03	324.90	326.09
渗压计 PB3	319.12	0.19	0.06	318.59	320.52
渗压计 PB4	315.63	0.16	0.05	315.14	316.32

表 8 渗压值动态等级标准集( $H_e < \frac{E_n}{3}$ )

等级	等级标准			
	PB1	PB2	PB3	PB4
75%~100%	[327.87, 328.49)	[324.90, 325.65)	[318.59, 319.31)	[315.14, 315.79)
50%~75%	[328.49, 328.61)	[325.65, 325.83)	[319.31, 319.50)	[315.79, 315.95)
25%~50%	[328.61, 328.73)	[325.83, 326.02)	[319.50, 319.70)	[315.95, 316.11)
0%~25%	[328.73, 328.85]	[326.02, 326.09]	[319.70, 320.52]	[316.11, 316.32]

表9 沉降仪数据计算结果

沉降仪编号	均值( $E_x$ )	熵( $E_n$ )	超熵( $H_e$ )	最小值	最大值	标准差
沉降仪 LDB3	0.081	0.091	0.028	0	0.509	0.007
沉降仪 LDB4	0.064	0.078	0.038	0	0.403	0.018
沉降仪 LDB16	0.047	0.042	0.018	0	0.273	0.020

表10 沉降变化值动态等级标准集

安全度等级	等级标准		
	LDB3( $He < \frac{En}{3}$ )	LDB4( $He \geq \frac{En}{3}$ )	LDB16( $He \geq \frac{En}{3}$ )
75%~100%	[0,0.172)	[0,0.082)	[0,0.067)
50%~75%	[0.172,0.263)	[0.082,0.100)	[0.067,0.087)
25%~50%	[0.263,0.354)	[0.100,0.118)	[0.087,0.107)
0%~25%	[0.354,0.509]	[0.118,0.403]	[0.107,0.273]

#### 4. 讨论

本研究构建的基于云模型的渠道渗流安全动态评价体系，在处理多源监测数据的复合不确定性方面展现出显著的方法学优势。传统的渠道渗流安全分析多依赖于确定性数值模拟或数理统计模型，例如相关研究通过建立有限元模型剖析了渠道连缝及土工膜对渗流场空间分布和滑坡稳定性的调控规律。这些经典方法能够提供精确的确定性物理流场，但在面对长序列、伴随强噪声的原型实测数据时，往往难以直接消化数据内部固有的随机波动与定性概念的模糊特征。相比之下，本研究引入的云模型理论，通过提取期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )与超熵( $H_e$ )三大高阶数字特征，将定量测值与定性安全概念进行了深度双向映射。这一机制不仅完整保留了数据中由于环境干扰或仪器误差引起的随机离散性，更借助泛正态分布下的“3  $E_n$  规则”形成了一种具备平滑过渡特征的动态自适应阈值，有效克服了传统硬性静态边界在工程实际运维中极易触发误报或漏报的瓶颈。

在与已有不确定性评价研究的对比中，本模型的指标构建思路与前人利用云模型拟定大坝安全监控指标的基本科学逻辑保持了一致性，均证实了利用云数字特征刻画非线性不确定性边界的科学性与可行性。

然而，本研究根据渠道工程的结构异质性进行了针对性的深化。大坝工程通常具有巨大的结构体量和相对集中的调蓄边界，而渠道工程往往具有线型长、浅表土体交互剧烈的物理特征，对外部气象因子的波动更为敏感。因此，本研究没有直接套用泛化的大坝综合评价模型，而是系统解耦了环境激励因子与响应表征因子，并提出了针对渠内水位、降雨、深挖方地下水位的单边上限控制，以及针对土体冻胀和材料热应力的双边温度控制策略。这一改进有效解决了既有研究未充分考虑工程类型差异导致控制约束机制不同的缺陷。

尽管本模型在实证分析中表现出良好的稳健性，但在工程实际推广中仍存在一定的局限性。首先，模型在推演表征因素等级标准时，引入了假设所有监测仪器均保持精度一致且状态相同的理想化前提。在长周期的工程实际服役中，传感器的物理老化、零点漂移以及局部地质条件的极端非均匀性，都可能导致测值的异常离散，进而在逆向云计算中引发超熵的异常增大或退化为雾化状态，这需要引入更为精准的传感器健康诊断机制加以修正。其次，正如实际观测曲线所反映的，渗压值和沉降变形对水位及降雨的响应存在明显的时滞效应，本模型目前主要通过阶段性时间窗的数据统计来平抑这一影响，尚未在云发生器内部

建立完全基于物理-数理耦合的迟滞动力学响应方程，这在应对突发性极端暴雨或库容骤变等非稳态工况时的瞬态演化追踪能力仍有提升空间。

此外，本研究仍存在进一步完善的空间。首先，本文所构建的动态等级标准主要依托泰安抽水蓄能电站渠道工程的长期监测数据进行验证，虽然能够反映该工程在典型运行条件下的渗流安全演化特征，但不同渠道工程在地质条件、衬砌结构、运行水位调度方式及监测布设密度方面存在差异，模型参数的适用性仍需更多工程案例中进一步检验。其次，本文在建立表征因素动态等级标准时，主要基于阶段性监测数据提取期望、熵和超熵等云数字特征，对极端降雨、快速水位波动及突发性渗流异常等非平稳工况的瞬态响应刻画仍有一定不足。最后，监测数据质量对云模型计算结果具有直接影响，传感器老化、零点漂移、局部测点失效或异常噪声均可能导致云数字特征发生偏移，从而影响等级标准划分的准确性。

未来研究可从以下几个方面进一步拓展：一是结合更多不同类型渠道工程的长期监测资料，对模型参数的稳定性、迁移性和适用边界进行系统验证；二是引入时间序列预测、异常识别和传感器健康诊断方法，增强模型对突发异常和数据噪声的识别能力；三是将云模型动态评价方法与数字孪生平台、自动化监测系统和在线预警模块相结合，推动渠道渗流安全评价由阶段性分析向实时动态诊断转变。

## 5. 结论

本研究针对渠道渗流安全评价在应对数据随机性与模糊性方面的不足，提出并建立了一种融合单双边控制约束机制与云模型理论的动态等级标准体系。通过对泰安抽水蓄能电站原型观测数据的系统测算与实证分析，证实了该方法能够有效重构复杂服役环境下的安全评价边界。研究系统厘清了环境激励与结构响应的异质机理，利用逆向云发生器提取的期望、熵与超熵等高阶数字特征，成功实现了渗压与沉降时序序列的自适应降维表达。生成的动态标准体系不仅能够精确划分各因子的安全度层级，而且其平滑过渡的边界特征高度契合水工建筑物的物理运行状态，彻底克服了传统静态确定性阈值过度依赖先验知识且易引发误报的技术瓶颈，为现代水利枢纽渠道渗流安全的定

量诊断提供了强鲁棒性的定量化决策工具。

鉴于大范围长距离引调水工程边界条件的复杂性与时变特征，后续的研究工作应当在既有模型的基础上进行多维度的深化与拓展。未来的首要方向在于深度融合数据驱动的深度时序网络与云模型算法，在云发生器前端建立基于物理数理耦合的迟滞动力学响应机制，实现对强降雨或水位突变等极端工况下渗流滞后特征的精准物理补偿，以此提升非稳态瞬态演化的追踪能力。此外，亟需在动态评价体系内引入传感器健康状态的在线辨识与异常剔除机制，通过空间相邻测点的特征协同校核，自适应识别并剥离由设备物理老化、零点漂移或局部不均匀地质扰动引起的伪噪声，确保底层输入数据的数据质量。最后，后续研究将致力于将本套动态等级标准算法进行标准化、模块化的软件封装，使其能够深度嵌入大型水利枢纽的数字孪生运维平台与自动化安全监测系统中，从而实现渠道全线安全风险的实时在线侦测与智能化、全天候的管控决策。

后续研究可进一步结合多工程案例验证、传感器健康诊断和数字孪生平台集成，提升该动态评价方法在复杂运行环境下的实时适用性与工程推广价值。

## 参考文献

- [1] Dong K, Yang D, Yan J, et al. Anomaly identification of monitoring data and safety evaluation method of tailings dam[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 1016458.
- [2] 杨洁, 王国胤, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. *计算机学报*, 2018, 41(03): 724-744.
- [3] 刘禹, 李德毅. 正态云模型雾化性质统计分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(11): 1320-1324.
- [4] 李延勋, 李敬, 朱艳辉, 等. 渠道预制排桩连接缝隙对渗流场的影响研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2026, 54(01): 56-60.
- [5] 刘卓, 杨继松, 赫庆彬. 含土工膜的渠道边坡三维有限元渗流分析[J]. *水利水电工程设计*, 2025, 44(01): 42-45.
- [6] 牛广利, 胡雨新, 胡蕾, 等. 工程安全综合评价模型研究及数字孪生应用[J]. *人民长江*, 2024, 55(04): 239-243+261.
- [7] 满旺, 李宗梅, 聂芹, 等. 数字孪生技术在小型水库管理中的应用初探[J]. *测绘通报*, 2023, (01): 20-25.
- [8] 朱凯, 秦栋, 汪雷, 等. 云模型在大坝安全监控指标拟定中的应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(03): 65-68.

- [9] Wang Y, Liu G. Self-supervised dam deformation anomaly detection based on temporal-spatial contrast learning[J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5858.
- [10] Fazel Mojtahedi F, Hashem T, Yousefpour N. Detecting Internal Erosion in Earth Dams: Frequency-Domain Analysis with Mel Spectrograms and Convolutional Autoencoders[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2026, 40(2): 04025160.
- [11] Xie J, Shao Y, Li J, et al. Explainable Monitoring Model Based on AE-BiGRU and SHAP Analysis of Seepage Pressure for Concrete Dams[J]. *Water*, 2026, 18(5): 614.
- [12] Nasser M, Assefa E, Assefa S M, et al. Adaptive multihazard modeling predicts rainfall-driven dam failure: a case study[J]. *Scientific Reports*, 2026.
- [13] Ji Z, Yan G, Meng Y, et al. A Two-Dimensional Cloud Model for Early Warning of Tailings Dam Failure Risk Considering Probability and Consequence Coupling[J]. *Applied Sciences*, 2026, 16(5): 2324
- [14] 许昌林. 基于云模型的双向认知计算方法研究[D]. 西南交通大学, 2014
- [15] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*, 2004, (08): 28-34.
- [16] Mao Y, Hu L, Qi Z, et al. Spatial dependency enhanced dam safety evaluation: a digital-twin based monitoring platform integrating multi-sensor correlation analytics[J]. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2025, 11: 1712960
- [17] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. *中国工程科学*, 2000(10): 73-79.
- [18] 周剑, 朱耀琴, 等. 基于云模型与证据理论的共识分析方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(12): 2756-2763.
- [19] Li S, Cheng W, Liu Z, et al. Key technologies and applications of Digital Twin hydraulic engineering[J]. *Digital Twin*, 2025, 2(1): 2486862.
- [20] 李德毅, 刘常昱, 等. 不确定性人工智能[J]. *软件学报*, 2004(11): 1583-1594.
- [21] 张秋文, 章永志, 等. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. *水利学报*, 2014, 45(01): 87-95.