

基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价

王媛¹, 刘佳豪², 郝泽嘉³, 任杰², 魏志坚², 王佟童¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100
3. 南水北调中线干线工程管理局, 北京 100038)

摘要:针对现阶段倒虹吸安全评价不够全面、未能综合反映工程的随机性和复杂性,且基于解析公式的评价指标隶属函数偏向于保守的问题,运用 AHP 法构建包括多维度因素的层次分析体系,利用云模型理论构造评价指标隶属函数,提出了一种基于 AHP-云模型、依据现场监测与检测信息融合的综合评价方法,并将其应用于南水北调中线工程黄水河支河倒虹吸安全评价。结果表明:基于 AHP-云模型的倒虹吸安全评价方法合理可行,其评价结果能反映该倒虹吸运行期间的综合安全状态,可为倒虹吸安全管理提供参考。

关键词:倒虹吸;安全评价;层次分析法;云模型;信息融合

中图分类号:TV672⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0079-06

Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model//WANG Yuan¹, LIU Jiahao², HAO Zejia³, REN Jie², WEI Zhijian², WANG Tongtong¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the randomness and complexity of inverted siphons cannot be comprehensively reflected by safety evaluation at the present stage, and the membership function of evaluation index based on analytical formula tends to be conservative, AHP method was used to construct the analytic hierarchy process system including multi-dimensional factors, in which the membership function of evaluation index was constructed by using cloud model theory. A comprehensive evaluation method based on AHP-cloud model with on-site monitoring and detection information fusion was then proposed, which was applied to the safety evaluation of an inverted siphon at the Huangshui River branch in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project. The results show that the inverted siphon safety evaluation method based on AHP-cloud model is reasonable and feasible. The evaluation results can reflect the comprehensive safety state of the inverted siphon during operation, which can provide reference for its safety management.

Key words: inverted siphon; safety evaluation; analytic hierarchy process; cloud model; information fusion

实施南水北调等长距离引调水工程是优化我国水资源时空分布的重要手段。南水北调工程调水线路长、工程规模大,沿线有众多大型跨(穿)河建筑物,这些建筑物受暴雨洪水、地质灾害、老化破损等因素影响,面临较大的失事风险^[1]。倒虹吸是典型的穿河建筑物,具有工程体量大、结构横向宽度大、结构受力复杂等特点^[2],是输水线路上的关键节点工程,其破坏形式多样、涉及因素广泛,若发生破坏将影响调水工程正常运行,因此对倒虹吸在运行期间的安全状态进行综合评价具有重要意义。

倒虹吸运行期的安全状态涉及多方面因素,具

有一定的模糊性和随机性,当前对倒虹吸的运行状态分析多以有限元计算为主。毕然^[3]通过三维数值建模计算验证了穿桥倒虹吸加固方案的可行性;刘光华等^[4]采用三维数值模拟技术对倒虹吸在附近其他工程施工阶段的结构应力应变、变形响应进行了动态模拟,验证了倒虹吸的安全性;张淙皎等^[5]应用三维有限元方法对倒虹吸在不同荷载组合下的应力状态进行了计算分析,计算结果能够反映结构应力状态分布及变化规律并选出了安全控制工况。但采用有限元计算对倒虹吸的运行状态进行分析通常要对工程实际情况进行简化处理,难以反

映工程实际的随机性和复杂性,具有一定的局限性。

层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)是一种可实现多因素、多准则相结合的方法,可实现对评价目标的多维度、多工况的综合评价,结合监测与检测指标可有效反映工程实际的随机性和复杂性,较好规避有限元计算的局限性。罗日洪等^[6]针对渡槽安全状态建立了基于AHP法的评价体系,并采用自然指数标度法对其评价因子权重计算进行优化,该渡槽安全综合评价方法降低了主观偏差,具有较强的可操作性;何进等^[7]运用AHP法对隧洞塌方风险进行了评价,其评价结果真实有效地反映了某隧洞塌方情况,为塌方预防提供了新思路。以上研究运用AHP法进行综合评价时,通常采用解析公式表达隶属函数,使评价结果失去了模糊性。云模型是实现定性概念与定量描述的不确定转换模型,可兼顾隶属函数的模糊性和随机性。何杨杨等^[8]在主、客观组合赋权的基础上运用云模型创建了水闸工程安全评价方法,有效减小了不确定因素对整体水闸工程安全评价的影响;刘精凯等^[9]基于云模型理论建立了输水系统竖井水位差风险预警体系,依托景洪水力式升船机预测其风险指标阈值,可为水力式升船机的运行风险防控决策提供参考。AHP法与云模型相结合的综合评价方法可实现两种理论优势互补,AHP法能克服有限元计算简化处理的局限性,引入云模型则保证了监测、检测等信息的模糊性和随机性,可提高安全评价的有效性和可靠性。目前,AHP法与云模型相结合的评价方法已在生态环境评价^[10]、工程成本风险评估^[11]、移民信息化标准度评价^[12]等方面得到成功应用,但针对倒虹吸运行期间安全综合评价的应用则鲜有研究。

本文基于AHP法,从倒虹吸在运行过程中面临的管身裂缝、管线坡体失稳、渗漏等问题出发,筛选出影响其安全运行的多维度因素,利用云模型理论计算评价指标隶属函数,提出了基于AHP-云模型的倒虹吸安全综合评价方法,可对运行期倒虹吸安全状态进行综合评价。

1 倒虹吸安全综合评价体系构建

倒虹吸为地下U形有压管道,分为进口段、管身段和出口段,其中管身段是倒虹吸的主体部分,其安全程度直接关系着整个建筑物的安全使用和效益发挥^[13]。管身段常见的破坏形式有裂缝或脱节、止水破坏、镇墩断裂或失稳以及钢筋锈蚀等(图1)。本文以倒虹吸管身段常见破坏问题为导向,筛选出涉及工程建筑质量、水文地质等多维度的评价因素,依据AHP法原理分层建立评价体系,并运用云模型

构建评价指标隶属函数,从而构建AHP-云模型倒虹吸安全综合评价体系(图2)。

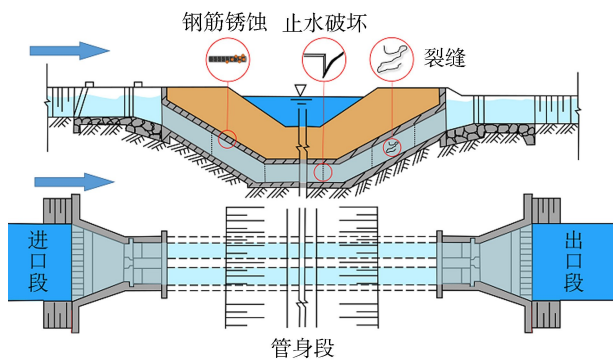


图1 倒虹吸管身段典型问题示意图

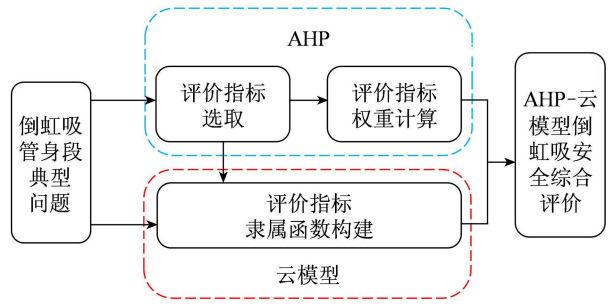


图2 倒虹吸安全综合评价体系构建示意图

1.1 评价体系指标筛选

本文针对文献[13]提出的倒虹吸管身段典型破坏形式,依据DL-T 5057—2018《水工混凝土结构设计规范》、JJF 1334—2012《混凝土裂缝宽度及深度测量仪校准规范》等规范以及文献[7]评价体系构建方式,构建包括目标层、准则层和指标层的多维度多层次的倒虹吸安全综合评价体系如图3所示(括号中数据为指标权重)。准则层由建筑质量、地层特性、管内水力和河道环境4个因素组成。指标层由混凝土强度保证率、钢筋锈蚀率、混凝土缺损率等检测信息和混凝土应变、钢筋应力、过水流量等监测信息及地基承载力比值、地震烈度等工程设计信息共14个因素组成。

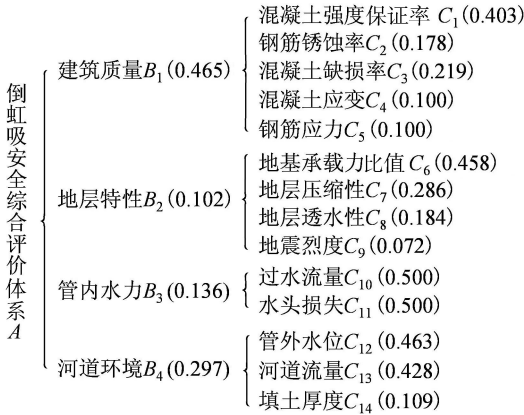


图3 倒虹吸安全综合评价体系

1.2 评价体系权重设置

评价体系中各准则、指标均需赋予权重,指标权重的确定方法有二项系数法、环比评分法、变异系数法、差值法等^[9],本文采用常见的 AHP 法与熵权法组合计算各评价指标权重。AHP-熵权组合构权法计算权重既可保证评价体系中各评价指标重要程度的有效区分,又使权重计算结果具备客观性。

步骤 1 应用 AHP 法对指标层和准则层各评价指标进行打分,经归一化处理、一致性检验后得到 AHP 法评价指标权重分配^[7,14]。

步骤 2 运用熵权法对 AHP 法初步计算的指标权重进行修正,构建包含 m 个评价指标、 n 个评价对象的判断矩阵 A ,经归一化处理、熵值计算求得熵权法评价指标权重分配^[15]。

步骤 3 计算各评价指标的组合权重 w :

$$w = (w_o, w_i) / \sum_{i=1}^m (w_o, w_i) \quad (1)$$

式中: w_o 为 AHP 法所得权重; w_i 为熵权法所得权重。

2 倒虹吸安全评语等级划分及隶属函数计算

2.1 评语等级划分

考虑倒虹吸在输水工程中的工作特点以及评价指标的数据来源,参照文献[7,8,16]安全等级划分标准,设置 I ~ IV 共 4 级倒虹吸安全评语等级,安全程度递减,评定标准如表 1 所示。

表 1 倒虹吸安全评语等级

等级	评定标准
I	指标均达到正常运行标准;工程安全运行,无安全隐患
II	指标基本达到正常运行标准;工程基本安全,但存在安全隐患,需加强监控
III	指标未达到正常运行标准;工程存在安全问题,需及时进行修补
IV	指标无法达到正常运行标准;工程存在严重安全问题,需停水修补或部分重建

2.2 隶属函数计算

隶属函数是模糊集合理论的基石,它是度量模糊程度的函数。常见的隶属函数有线性隶属函数、 Γ 隶属函数、凹(凸)形隶属函数、柯西隶属函数、岭形隶属函数和正态隶属函数 6 种^[15]。隶属函数是评价体系的重要组成部分,隶属函数构造是否合理将直接影响到评价结果的准确性。

2.2.1 隶属云模型

在构建基于解析公式的隶属函数过程中需对指标初始数据进行筛选和剔除,在一定程度上削弱了输水建筑物运行状态的复杂性和随机性,使隶属函数偏于保守。云模型是基于模糊数学和统计学演变而来的评价模型,可以解决定性语言中的模糊性、随

机性问题,在决策分析、智能控制、图像处理等很多领域得到了成功应用^[17-18]。用云模型代替解析公式表达隶属函数,可更好地反映评价指标隶属函数的模糊性和随机性,提高评价结果的准确性和有效性。云模型运用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 反映评判对象的随机性和关联性, E_x 表示论域的中心,在云图中表现为云滴的重心; E_n 是对不确定性定性概念的度量,表示云滴的离散程度; H_e 反映云层的厚度及离散程度^[19],即

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| \quad (3)$$

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \quad (4)$$

其中 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2$ 式中: x_i 为样本云滴数值; n 为样本数; S^2 为样本方差。

云的生成算法称为云发生器,包括正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器是实现定性概念到定量数值的转换模型,它可以凭借云数字特征(E_x, E_n, H_e)生成一定数量的数据云点。逆向云发生器是实现定量数值到定性概念的转换模型,它可以将一定数量的精确数据转换为以云数字特征(E_x, E_n, H_e)表示的定性概念^[20-21]。

2.2.2 评价指标隶属函数

图 3 所示的倒虹吸安全综合评价体系的指标层包括检测信息、监测信息及部分工程设计信息。依据 DL-T 5057—2018《水工混凝土结构设计规范》、JJF 1334—2012《混凝土裂缝宽度及深度测量仪校准规范》等规范以及文献[16],针对混凝土强度保证率 C_1 、钢筋锈蚀率 C_2 、混凝土缺损率 C_3 、地基承载力比值 C_6 等检测信息,混凝土应变 C_4 、钢筋应力 C_5 、过水流量 C_{10} 、水头损失 C_{11} 、管外水位 C_{12} 、河道流量 C_{13} 、填土厚度 C_{14} 等监测信息运用 Matlab 编写云模型代码处理数据构建各安全等级隶属云模型,即

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_n^2}\right] \quad (5)$$

针对地层压缩性 C_7 、地层透水性 C_8 、地震烈度 C_9 等已有相关规范确定分级的指标^[22],直接采用现有等级划分方法。每个指标安全程度由 I 级至 IV 级递减,具体数据如表 2 所示(混凝土应变 C_4 、钢筋应力 C_5 为结构应力应变监测指标,因监测点布置位置不同,不同监测点的受拉受压情况、应力应变大小各不相同,因此不同位置的监测数据具有不同的数据

表 2 评价指标隶属度分级

等级	C_1	$C_2/\%$	$C_3/\%$	C_6	C_7	C_8	C_9	$C_{10}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_{11}/m	C_{12}/m	$C_{13}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_{14}/m
I	≥ 1	[0,5)	[0,5)	≥ 1.1	极低	极低	4 级	[260,247]	[0.150,0.158]	≤ 77.0	≤ 686	[5.4,3.0)
II	[0.95,1)	[5,10)	[5,10)	[1.0,1.1)	低	低	5 级	[247,234]	[0.158,0.165]	(77.0,87.1]	(686,968]	[3.0,1.0)
III	[0.90,0.95)	[10,15)	[10,15)	[0.9,1.0)	中	中	6、7 级	[234,221]	[0.165,0.173]	(87.1,95.4]	(968,1250]	[1.0,0.5)
IV	(0,0.90)	[15,100)	[15,100)	(0,0.9)	高	高	8 级	[221,0)	≥ 0.173	>95.4	>1250	[0.5,0]

分布范围,依据隶属云模型法处理各监测点监测数据,在表中不做统一说明)。根据等级划分标准,应用云模型计算各指标的隶属函数,图 4 为混凝土强度保证率、钢筋锈蚀率等指标的隶属函数图。

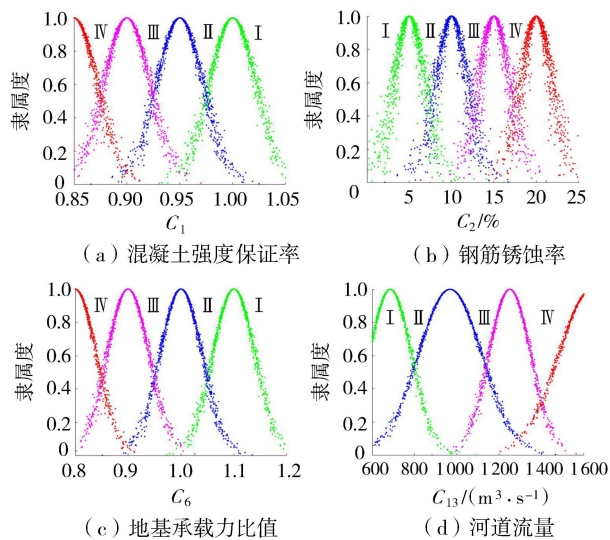


图 4 评价指标隶属函数

3 工程应用

3.1 工程概况

黄水河支河倒虹吸为南水北调中线工程总干渠穿河的交叉建筑物(图 5)。该倒虹吸与渠道交叉断面以上集流面积 74.9 km²,天然情况下河道百年一遇洪峰流量 1 930 m³/s。倒虹吸总长 361 m,其中管身段水平投影长 230 m;设计流量 260 m³/s,加大流量 310 m³/s,设计总水头损失为 0.15 m。根据建筑物的结构布置以及工程地质情况,在管身段设有 2 个监测横断面,监测应力应变、土压力及内外水位等信息。目前,该倒虹吸主要依赖监测信息读取、人工巡检等方式对其安全状态进行评判。

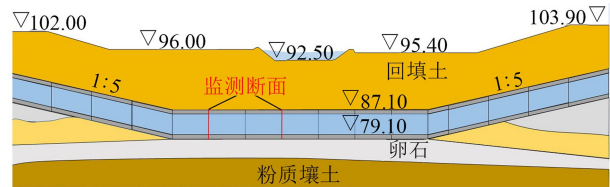


图 5 黄水河支河倒虹吸管身段示意图(单位:m)

3.2 AHP-云模型计算分析

取黄水河支河倒虹吸 2019 年某次检测结果和监测信息进行分析。该时段内管身段混凝土强度保证

率 $C_1=1.07$ 、钢筋锈蚀率 $C_2=5.32\%$ 、混凝土缺损率 $C_3=6.54\%$ 、地基承载力比值 $C_6=1.08$,同时混凝土应变 $C_4=18.649\times 10^{-6}$ 、钢筋应力 $C_5=2.933\text{ MPa}$ 、过水流量 $C_{10}=257.80\text{ m}^3/\text{s}$ 、水头损失 $C_{11}=0.153\text{ m}$ 、管外水位 $C_{12}=87.54\text{ m}$ 、河道流量 $C_{13}=0\text{ m}^3/\text{s}$ (管外水位低于河床)、填土厚度 $C_{14}=5.02\text{ m}$,结合该段地层压缩性、透水性及地震烈度信息进行计算。将数据代入隶属函数得到隶属度,再各自与其对应指标权重相乘得到评价结果。表 3 为隶属度计算结果。

表 3 隶属度计算结果

评价指标	隶属度			
	I 级	II 级	III 级	IV 级
A	0.580	0.377	0.043	0.000
B ₁	0.592	0.378	0.029	0.000
C ₁	0.573	0.427	0.000	0.000
C ₂	0.677	0.323	0.000	0.000
C ₃	0.563	0.437	0.000	0.000
C ₄	0.143	0.751	0.106	0.000
C ₅	0.191	0.631	0.178	0.000
B ₂	0.588	0.266	0.146	0.000
C ₆	0.896	0.104	0.000	0.000
C ₇	0.622	0.378	0.000	0.000
C ₈	0.000	0.600	0.400	0.000
C ₉	0.000	0.000	1.000	0.000
B ₃	0.960	0.040	0.000	0.000
C ₁₀	0.946	0.054	0.000	0.000
C ₁₁	0.974	0.026	0.000	0.000
B ₄	0.517	0.434	0.049	0.000
C ₁₂	0.000	0.894	0.106	0.000
C ₁₃	1.000	0.000	0.000	0.000
C ₁₄	0.815	0.185	0.000	0.000

根据 AHP 法最大隶属度原则^[7],选取隶属度最大的安全等级作为评价结果。黄水河支河倒虹吸管身段在运行期间的安全等级为 I 级,偏向于 II 级(表 3 目标层 A 的各安全等级隶属度),即该工程管身段整体处于安全状态,但有较大可能存在安全隐患。其中监测指标信息中钢筋应力、混凝土应变指标评价等级较低,应对具体监测设备的过程曲线、设备运行状态进行检查,分析指标评价等级较低的原因。

对该倒虹吸监测数据分析表明,部分监测数据存在波动较大或数据异常情况,若按该倒虹吸现阶段监测信息为依据判断其安全状态,则评价结果为该倒虹吸存在安全问题。本文评价结果该倒虹吸安全等级为 I 级,表明该倒虹吸处于安全运行状态,仅

钢筋应力、混凝土应变安全等级较低(表3),其余评价指标评价结果均处于正常安全等级。对现场安全问题进行逐一排查,判定该倒虹吸处于安全状态,可能存在部分监测仪器失准失效情况,应及时处理。

本文评价结果反映了该倒虹吸运行期间的综合安全状态,可为该倒虹吸安全管理提供参考。

4 结 语

为了综合全面地评价倒虹吸在运行期的安全状态,本文提出了大型输水倒虹吸运行期安全状态的主要影响因素,基于 AHP-云模型建立了倒虹吸安全综合评价体系,实现了工程安全监测检测等多源信息的有效融合。本文方法充分考虑了工程运行中的复杂性和模糊性,运用云模型理论构建倒虹吸安全综合评价模型中评价指标隶属函数,克服了传统线性、岭形等隶属函数难以反映数据模糊性和随机性的问题。采用 AHP-熵权组合构权法计算评价指标的权重,尚未运用云模型进行构权,如何运用云模型理论计算倒虹吸安全综合评价体系中指标的权重还需要进一步研究。在南水北调中线工程黄水河支河倒虹吸工程的应用表明,评价结果可准确反映该倒虹吸运行状态,可为大型输水倒虹吸运行安全管理提供参考。

参考文献:

[1] 韩迅,安雪晖,柳春娜. 南水北调中线大型跨(穿)河建筑物综合风险评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58 (7): 639-649. (HAN Xun, AN Xuehui, LIU Chunna. Integrated risk evaluation of large river-crossing buildings in the Middle of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58 (7): 639-649. (in Chinese))

[2] 裴松伟,刘树玉,赵顺波,等. 地质变化对大型预应力混凝土倒虹吸结构受力影响的分析[J]. 长江科学院院报,2006,23(1):38-41. (PEI Songwei, LIU Shuyu, ZHAO Shunbo, et al. Influences of foundation changes on behaviors of large prestressed concrete inverted siphon [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23 (1): 38-41. (in Chinese))

[3] 毕然. 某倒虹吸箱涵穿桥计算分析及其修补加固[J]. 人民黄河,2020,42(增刊1):82-83. (BI Ran. Analysis and reinforcement of a box culvert siphon across the bridge [J]. Yellow River, 2020, 42 (Supl): 82-83. (in Chinese))

[4] 刘光华,魏红. 电力隧道近距离底穿输水方涵应力变形分析[J]. 人民黄河,2020,42(4):108-111. (LIU Guanghua, WEI Hong. Stress and deformation analysis of power tunnel across a box culvert siphon from the bottom

in short distance [J]. Yellow River, 2020, 42 (4): 108-111. (in Chinese))

[5] 张滨皎,马军,骆原,等. 姜河渠道大型倒虹吸结构三维有限元分析[J]. 人民黄河,2011,33(7):110-111. (ZHANG Congjiao, MA Jun, LUO Yuan, et al. The three dimensional finite element analysis of large box culvert siphon in Feihe channel [J]. Yellow River, 2011, 33 (7): 110-111. (in Chinese))

[6] 罗日洪,黄锦林,李兆恒. 基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):162-169. (LUO Rihong, HUANG Jinlin, LI Zhaohe. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2): 162-169. (in Chinese))

[7] 何进,郭延辉,王建国,等. 模糊综合评价法在隧洞塌方风险评价中的应用[J]. 水力发电,2019,45(2):83-88. (HE Jin, GUO Yanhui, WANG Jianguo, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in risk assessment of tunnel collapse [J]. Hydropower Generation, 2019, 45 (2): 83-88. (in Chinese))

[8] 何杨杨,苏怀智. 考虑规范分级的水闸安全云评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):29-35. (HE Yangyang, SU Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2): 29-35. (in Chinese))

[9] 刘精凯,胡亚安,薛淑. 基于云模型的水力式升船机输水系统运行风险分析[J]. 水运工程,2020(9):14-18. (LIU Jingkai, HU Yaan, XUE Shu. Risk assessment of water conveyance system in hydraulic ship lift based on cloud model [J]. Port and Waterway Engineering, 2020 (9): 14-18. (in Chinese))

[10] 张金林,骆茂林,张强,等. 基于 AHP-云模型的隧道地下水疏排对植被生态影响评价研究[J]. 环境科学与管理,2020,45(10):163-167. (ZHANG Jinlin, LUO Maolin, ZHANG Qiang, et al. Effect of groundwater drainage in tunnel on vegetation ecological based on AHP-cloud model [J]. Environmental Science and Management, 2020, 45 (10): 163-167. (in Chinese))

[11] 周兰庭,袁志美,徐长华,等. 基于改进云模型的水利工程项目成本风险管理研究[J]. 水电能源科学,2019,37(4):152-154. (ZHOU Lanting, YUAN Zhimei, XU Changhua, et al. Research on cost risk management of water conservancy project based on modified cloud model [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (4): 152-154. (in Chinese))

[12] 孙少楠,邢义龙,崔颢. 基于 AHP-熵值法和云模型的移民信息化的标准度研究[J]. 水力发电,2021,47(3):5-9. (SUN Shaonan, XING Yilong, CUI Hao. Research on the standard degree of resettlement informationization based on AHP-entropy weight method and cloud model

- [J]. Hydropower Generation, 2021, 47 (3): 5-9. (in Chinese))
- [13] 张劲松,徐云修. 倒虹吸管的破坏分析及修补措施[J]. 中国农村水利水电, 2000 (3): 6-8. (ZHANG Jinsong, XU Yunxiu. Damage analysis and repair measures of inverted siphon[J]. China Rural Water and Hydropower, 2000 (3): 6-8. (in Chinese))
- [14] 赵博,李趋,张勤,等. 基于层次分析与模糊综合评价的辽宁省《行业用水定额》评价[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (1): 45-48. (ZHAO Bo, LI Qu, ZHANG Qin, et al. Evaluation of *Industry Water Quota* in Liaoning Province based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (1): 45-48. (in Chinese))
- [15] 章穗,张梅,迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7 (1): 34-42. (ZHANG Hui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10th Five-Year of China [J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7 (1): 34-42. (in Chinese))
- [16] 张永清,冯忠居. 用层次分析法评价桥梁的安全性[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21 (3): 52-56. (ZHANG Yongqing, FENG Zhongju. To evaluate the bridge safety by AHP[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21 (3): 52-56. (in Chinese))
- [17] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6 (8): 28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Strategic Study of CAE, 2004, 6 (8): 28-34. (in Chinese))
- [18] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32 (6): 15-20. (LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Subordinate cloud and subordinate cloud generator [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32 (6): 15-20. (in Chinese))
- [19] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (3): 29-34. (SHI Xiaojing, ZHA Xiaochun, LIU Jiahui, et al. Cloud model-based risk assessment of flood disasters in Ankang City on upper reaches of Hanjiang River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3): 29-34. (in Chinese))
- [20] 高玉琴,陈鸿玉,刘云苹. 基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38 (6): 38-43. (GAO Yuqin, CHEN Hongyu, LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (6): 38-43. (in Chinese))
- [21] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 60-66. (YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 60-66. (in Chinese))
- [22] 卢廷浩. 土力学[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社, 2005.

(收稿日期:2021-04-24 编辑:熊水斌)

(上接第 71 页)

- [48] IRVINE D J, LAUTZ L K, BRIGGS M A, et al. Experimental evaluation of the applicability of phase, amplitude, and combined methods to determine water flux and thermal diffusivity from temperature time series using VFLUX 2[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 728-737.
- [49] NARANJO R C, SMITH D W. Quantifying seepage using heat as a tracer in selected irrigation canals, Walker River Basin, Nevada, 2012 and 2013 [R]. Reston: U. S. Geological Survey Nevada Water Science Center, 2016.
- [50] IRVINE D J, LAUTZ L K. High resolution mapping of hyporheic fluxes using streambed temperatures: recommendations and limitations [J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 137-146.
- [51] 吴志伟,宋汉周. 由温度时序资料反演地下水流速的两种解析解及其比较[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44 (2): 610-618. (WU Zhiwei, SONG Hanzhou. Analysis and contrast of two analytic solutions of inverting groundwater velocity by temperature time-series records [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44 (2): 610-618. (in Chinese))
- [52] 任杰,张文兵. 潜流带地表水与地下水相互作用研究[M]. 北京:科学出版社, 2020.
- [53] 程嘉强. 基于温度示踪的瞬态温度场解析模型研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [54] ZHANG W B, SHEN Z Z, REN J, et al. Modeling and comparative analysis of a flow and heat coupling model of the riparian zone based on thermal conductivity empirical models[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: W124539.
- [55] ZHANG W B, SHEN Z Z, REN J, et al. A hydrothermal coupling model for estimating temperature variations in the riparian zone[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 34: 1-12.
- [56] REN J, ZHANG W B, YANG J, et al. Using water temperature series and hydraulic heads to quantify hyporheic exchange in the riparian zone[J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27: 1419-1437.

(收稿日期:2020-12-14 编辑:骆超)