

基于改进云模型的水利PPP项目风险分担研究

袁宏川, 张伟龙, 游佳成

(三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌443002)

摘要:为更好地解决水利PPP项目风险决策过程中存在的投资者心理和行为认知偏差、决策信息的模糊性以及风险发生的随机性等问题,建立了基于云模型和前景理论的水利PPP项目的风险分担综合决策模型。首先,综合分析水利工程和PPP项目的特征,并联合施工现场调研,构建风险分担决策指标体系;其次,通过改进云模型生成算法建立风险分担指标评语云模型,结合云距离、云可能度等概念,综合前景理论得到云前景价值函数;最后,应用离差最大化方法优选出各风险分担指标的权重,通过模糊合成算法对指标权重和云前景值进行合成计算,然后优选方案。结果表明:使用水利PPP项目风险分担方案决策方法,能够量化不确定性的决策信息,提高备选方案的可比性,使方案决策更加清晰直观。

关键词:水利工程;改进的云模型;前景理论;PPP项目;风险分担

中图分类号:TV512

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)06-0122-05

Research on risk sharing for water conservancy PPP project based on improved cloud model

YUAN Hongchuan, ZHANG Weilong, YOU Jiacheng

(College of Hydraulic & environmental engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve current issue about existing water conservancy public-private-partnership (PPP) project risk decision of the investors in the psychology and behavior of cognitive bias, fuzzy decision information and random risk, the PPP project risk sharing scheme model was put forward, which was based on the cloud theory and prospect theory. First, the characteristics of water conservancy project were analyzed, and along with the investigation of construction site, the index system of risk sharing decision-making was established. Second, risk sharing index reviews of the cloud model were established through improved cloud model generation algorithm and the cloud distance and cloud possible degree were put forward, cloud foreground value function was obtained by cloud theory and prospect theory. Finally, the optimal weight of each risk sharing index was calculated based on the deviation maximization method, the fuzzy synthesis algorithm was used to synthesize the index weight and the cloud foreground value, and then the optimal risk sharing plan was selected. The results show that the decision-making method of water conservancy PPP project risk sharing scheme can quantify the uncertain decision information, which can improve the comparability of options and make decision-making more intuitive and clear.

Key words: water conservancy engineering; improved cloud model; prospect theory; PPP(public-private-partnership) project; risk sharing

1 研究背景

水利工程是国家重要的基础设施建设,2017年,政府颁布《政府和社会资本合作建设重大水利

工程操作指南(试行)》,规范了水利PPP(Public Private Partnership)项目运作,进一步推进了PPP模式在我国水利行业的应用与发展。由于水利PPP项目投入资金大、合作周期长、作业条件差、利益方

收稿日期:2018-04-09; 修回日期:2018-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51379110)

作者简介:袁宏川(1968-),男,湖北宜昌人,博士,教授,硕士生导师,主要从事项目风险管理、工程招投标等方面的科研工作。

众多,导致政府和社会资本双方在实施过程中存在诸多风险。如何整合政府和社会资本的资源优势实现对风险的合理分担将显得至关重要,这关系到项目的安全、参与者的积极性及方案的合理设计,因此对水利工程 PPP 项目的风险分担问题进行研究具有重要意义^[1]。

目前,国内学者应用层次分析法和合作博弈理论^[2]、熵权法和模糊综合理论^[3]、粗糙集理论^[4]、云模型^[5]和效用理论^[6]等方法对 PPP 项目进行了风险分担问题的研究,取得了一定的研究成果。但现有研究方法未综合考虑风险分担决策的模糊性和随机性、行为认知偏差及自身的有限理性对风险分担方案决策的影响;同时,目前结合水利工程的 PPP 项目风险分担研究也不够完善。

水利 PPP 项目的风险分担指标具有突发性及演变性等特征,存在较强的模糊性和随机性等问题,而基于定性描述与定量数值间进行相互转换的云模型^[7-8],能够很好地解决该问题;同时,前景理论^[9-10]能够避免水利 PPP 项目评价专家在复杂多

变的决策环境下做出主观判断,能够有效反映其行为模式。

鉴于此,全文以水利 PPP 项目为切入点,充分考虑决策者的心理效用和不确定性的信息,建立基于改进云模型的风险分担方法,最后以案例验证了该方法的有效性。

2 风险分担决策指标体系的构建

水利工程规模大、地质条件复杂多变、作业人员和机械密集、横向和纵向交叉作业多、协同作业困难,这些因素导致水利工程在投资开发中会诱发较多的风险^[11]。PPP 项目具有投入资金大、实施周期长、合作方众多、统筹管理难度大等特征。因此,水利 PPP 项目投资主体在利益分配、契约合作协议、个体行为差异等方面存在较多的不确定因素。

鉴于此,综合参考文献[12-14],并结合水利 PPP 项目施工现场调研结果,从政治、法律、自然、投资、建设、运营 6 个方面建立水利 PPP 项目风险分担决策指标体系,如图 1 所示。

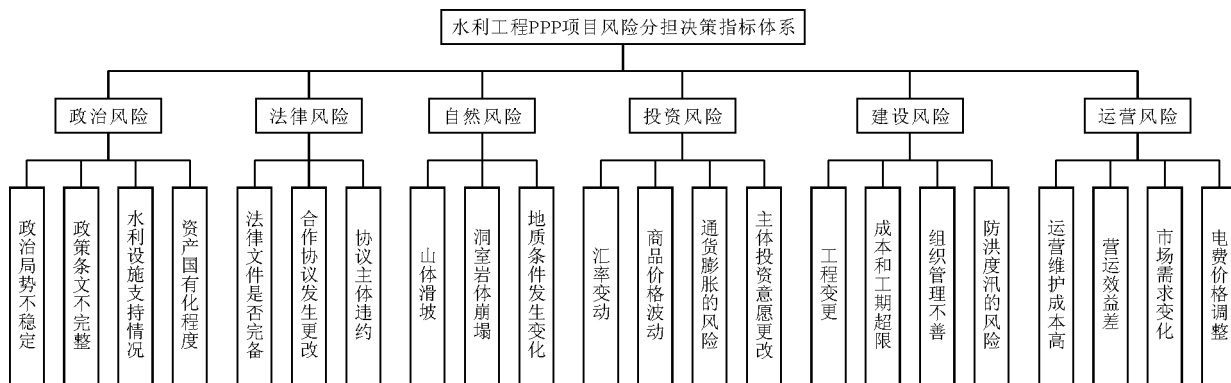


图 1 水利工程 PPP 项目风险分担决策指标体系

3 风险分担方案决策方法的构建

3.1 问题描述

假设针对某水利 PPP 项目,风险分担方案集为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 决策指标体系为 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$, 指标权重 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$, 其约束条件为 $\sum_{j=1}^n W_j = 1, W_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ 。

将水利 PPP 项目风险指标分担评语集分为完全由政府承担、主要由政府承担、双方平摊、主要由社会资本承担和完全由社会资本承担 5 种, 表示为 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, 风险按照发生概率高低存在 5 种自然状态, 即很高、高、中等、低、很低, 备选方案 A_i

在风险分担决策指标 Z_j 下自然状态 $\theta_k (1 \leq k \leq 5)$ 发生的概率为 $p_{ik}^j (0 \leq p_{ik}^j \leq 1)$, 得到决策指标评语为 V_{ij}^k , 即为 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, 其对应的评语云为 C_{ij}^k 。

3.2 指标评语云的构建

通过水利工程领域 PPP 项目库专家制定有效论域 $U = [X_{\min}, X_{\max}]$, 根据云模型生成算法^[15], 生成 5 朵云与相应决策指标评语一一对应。针对前文提出的 5 种风险分担决策指标评语, 参考水利 PPP 项目库专家设置的有效论域 $U = [0, 1]$, 按照上述云模型生成算法生成的 5 朵云分别对应 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, 具体参数见表 1。

表1 风险分担决策指标评语云

| 云模型 | 风险分担决策指标评语 | Ex | En | He |
|-------------------------------------|------------|-------|-------|-------|
| $C_{+2}(Ex_{+2}, En_{+2}, He_{+2})$ | S_1 | 1.000 | 0.104 | 0.079 |
| $C_{+1}(Ex_{+1}, En_{+1}, He_{+1})$ | S_2 | 0.691 | 0.064 | 0.049 |
| $C_0(Ex_0, En_0, He_0)$ | S_3 | 0.500 | 0.040 | 0.030 |
| $C_{-1}(Ex_{-1}, En_{-1}, He_{-1})$ | S_4 | 0.309 | 0.064 | 0.049 |
| $C_{-2}(Ex_{-2}, En_{-2}, He_{-2})$ | S_5 | 0 | 0.104 | 0.079 |

3.3 指标云前景价值的计算

3.3.1 云理论定义 两朵云 $C_1(Ex_1, En_1, He_1)$ 和 $C_2(Ex_2, En_2, He_2)$, 根据“3En”原则, 计算两朵云之间的距离^[15] $D(C_1, C_2)$ 为:

$$D(C_1, C_2) = \sqrt{\frac{d^2(C_1, C_2) + \bar{d}^2(C_1, C_2)}{2}} \quad (1)$$

其中:

$$d(C_1, C_2) = \left| \left(1 - \frac{3\sqrt{En_1^2 + He_1^2}}{Ex_1}\right)Ex_1 - \left(1 - \frac{3\sqrt{En_2^2 + He_2^2}}{Ex_2}\right)Ex_2 \right|$$

$$\bar{d}(C_1, C_2) = \left| \left(1 + \frac{3\sqrt{En_1^2 + He_1^2}}{Ex_1}\right)Ex_1 - \left(1 + \frac{3\sqrt{En_2^2 + He_2^2}}{Ex_2}\right)Ex_2 \right|$$

式中: $d(C_1, C_2)$ 为两朵云之间的水平最短间距; $\bar{d}(C_1, C_2)$ 为两朵云之间的水平最长间距。

由于云模型存在3个数字特征导致无法比较两朵云模型的大小, 鉴于此, 定义理想正态云为 $C^*(\max_i Ex_i, \max_i En_i, \max_i He_i)$, $i = 1, 2$; $C_1 \geq C_2$ 的云可能度为 $P(C_1 \geq C_2)$ ^[15], 得到其大小的比较方法为:

$$P(C_1 \geq C_2) = 1 - \frac{D(C^*, C_1)}{D(C^*, C_1) + D(C^*, C_2)} \quad (2)$$

式中: $D(C^*, C_1)$ 和 $D(C^*, C_2)$ 为正态理想云 C^* 与两朵云 C_1 和 C_2 之间的云距离。如果云可能度 $P(C_1 \geq C_2) \geq 0.5$, 则 $C_1 \geq C_2$, 否则, $C_1 \leq C_2$ 。

3.3.2 云前景价值函数 将云模型引入前景理论, 用云模型表示风险分担决策指标评语, 结合云距离和云可能度定义, 以云 C_1 和 C_2 为例, 其中 C_2 为心理参照点, 得到 C_1 的价值函数^[15] $v(C_1)$ 为:

$$v(C_1) = \begin{cases} (D(C_1, C_2))^\alpha, & C_1 \geq C_2 \\ -\lambda(D(C_1, C_2))^\beta, & C_1 \leq C_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 和 β ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$) 为决策者在不确定性条

件下面对损益值的感知程度, 决策者对损益值的感知程度与 α 和 β 大小成正相关; λ 为风险规避系数, 风险的敏感度随其增大而增大。

在面临复杂多变的的风险时, 决策者凭借主观感知作出判断, 会规避风险损失。因此, 对于风险偏好心理参考点的选取显得至关重要。根据投资人的心理偏好差异选择心理参考点, 通过下式得到各风险分担决策指标的云前景值 V_{ij} :

$$V_{ij} = \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1, l \neq i}^m \pi_{lji}(p_k) v(C_{lji}^k) \quad (4)$$

其中价值函数 $\pi_{lji}(p_k)$ 和权重函数 $v(C_{lji}^k)$ 的计算式分别为:

$$\pi_{lji}(p_k) = \begin{cases} \frac{p_k^\gamma}{(p_k^\gamma + (1-p_k)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}}, & C_{lj}^k \geq C_{ij}^k \\ \frac{p_k^\delta}{(p_k^\delta + (1-p_k)^\delta)^{\frac{1}{\delta}}}, & C_{lj}^k \leq C_{ij}^k \end{cases} \quad (5)$$

$$v(C_{lji}^k) = \begin{cases} (D(C_{lj}^k, C_{ij}^k))^\alpha, & C_{lj}^k \geq C_{ij}^k \\ -\lambda(D(C_{lj}^k, C_{ij}^k))^\beta, & C_{lj}^k \leq C_{ij}^k \end{cases} \quad (6)$$

式中: $p_k = p_{ik}^j$, $k = 1, 2, \dots, 5$, $0 \leq p_{ik}^j \leq 1$; C_{lji}^k 为考虑心理预期的风险分担决策指标评语云; γ 和 δ 为控制曲率的参数。

3.4 计算指标最优权重

考虑决策者对风险的心理承受能力及预期收益, 用离差最大化方法建立线性优化模型, 即:

$$\max Z = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{l=i+1}^m \sum_{j=1}^n |V_{ij} - V_{lj}| W_j \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n W_j = 1, W_j \in H$$

式中: H 为不完全确定的风险系数空间。

3.5 方案综合云前景值的计算

计算各方案的综合云前景值, 按照由大到小的方式排序, 择优选择方案。

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

4 案例分析

某水利工程 PPP 项目是一座以发电为主, 兼顾防洪、航运、灌溉等综合效益的枢纽工程, 设计总库容 $1.187 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 电站总装机容量 $3.6 \times 10^5 \text{ kW}$ 。总投资 99.22×10^8 元, 其中政府出资 40.17×10^8 元, 社会资本组成的联合体出资 39.16×10^8 元, 其余资金通过向金融机构借贷方式筹集。

双方在长时间的合同谈判中, 得出3套风险分担决策方案, 即方案集 $A = \{A_1, A_2, A_3\}$, 根据风险

指标集 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{22}\}$ 确定最佳备选方案。投资者充分考虑该项目的战略价值、功能定位、预期收益、可融资性、风险管理要求并参照以往水利工程风险偏好选择,结合该项目施工现场调研结果,得到

式(7)对应的不完全确定的风险系数空间 H 。根据此前确定的风险分担评语,决策者对各方案指标的评价数据见表 2,由于篇幅有限,在此仅列举 3 个风险分担方案的前 3 个指标的评语。

表 2 风险分担方案语言评价表

| 方案 | 准 则 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Z_1 | | | | | Z_2 | | | | | Z_3 | | | | |
| | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 |
| A_1 | S_1 | S_1 | S_1 | S_2 | S_2 | S_1 | S_2 | S_2 | S_2 | S_3 | S_1 | S_1 | S_3 | S_2 | S_1 |
| A_2 | S_1 | S_1 | S_2 | S_2 | S_3 | S_1 | S_1 | S_3 | S_4 | S_4 | S_2 | S_2 | S_2 | S_3 | S_3 |
| A_3 | S_1 | S_2 | S_2 | S_3 | S_1 | S_3 | S_3 | S_1 | S_1 | S_2 | S_1 | S_2 | S_3 | S_3 | S_3 |
| 概率 | 0.05 | 0.12 | 0.16 | 0.35 | 0.32 | 0.04 | 0.08 | 0.24 | 0.16 | 0.48 | 0.35 | 0.45 | 0.12 | 0.02 | 0.06 |

(1) 在各自然状态下,针对不同的风险组合方案,由于决策者对风险的感知存在差异,从而产生不同的心理参考点。以方案 A_1 的前 3 个风险分担决策指标为例,根据投资者的风险偏好心理,得到前 3 个风险分担决策指标的心理参考点分别为 $C_1 = \{0.5, 0.06, 0.04\}$, $C_2 = \{0.7, 0.05, 0.04\}$, $C_3 = \{0.6, 0.072, 0.04\}$,根据公式(5)和(6)得到价值函数结果和权重函数结果,各系数为: $\alpha = \beta = 0.88, \lambda = 2.25, \gamma = 0.61, \delta = 0.69^{[15]}$ 。通过计算得到各方案前 3 个风险分担决策指标的云前景值,如表 3 所示。

表 3 各方案部分风险分担决策指标云前景值

| 评价指标 | A_1 | A_2 | A_3 |
|-------|-------|-------|-------|
| Z_1 | 0.484 | 0.09 | 0.115 |
| Z_2 | 0.042 | -0.67 | 0.273 |
| Z_3 | 0.345 | 0.039 | 0.055 |

(2) 根据离差最大化方法及不完全确定的风险系数空间 H ,通过公式(8)得到最优化模型:

$$\begin{aligned} \max V(W) = & 0.419W_1 + 1.655W_2 + 0.322W_3 + \\ & 0.311W_4 + 0.588W_5 + 0.773W_6 + 0.797W_7 + \\ & 1.137W_8 + 0.291W_9 + 0.908W_{10} + 0.266W_{11} + \\ & 0.283W_{12} + 0.809W_{13} + 0.949W_{14} + 1.755W_{15} + \\ & 0.661W_{16} + 0.578W_{17} + 0.674W_{18} + 0.225W_{19} + \\ & 0.408W_{20} + 0.53W_{21} + 1.299W_{22} \\ \text{s. t. } & 0.15 \leq W_1 \leq 0.2, 0.049 \leq W_2 \leq 0.052, \\ & 0.125 \leq W_3 \leq 0.14, 0.028 \leq W_4 \leq 0.031, 0.043 \leq \\ & W_5 \leq 0.045, 0.046 \leq W_6 \leq 0.048, 0.115 \leq W_7 \leq \\ & 0.12, 0.026 \leq W_8 \leq 0.027 \end{aligned}$$

$$W_1 > W_3 > W_7 > W_{14} > W_2 > W_6 > W_5 > W_{13}$$

$$\begin{aligned} & > W_{11} > W_{12} > W_4 > W_8 > W_{18} > W_{19} > W_{17} > W_9 \\ & > W_{15} > W_{16} > W_{10} > W_{20} > W_{21} > W_{22} \end{aligned}$$

通过 Matlab 软件遗传算法 (genetic algorithm, GA) 工具箱模块,首先将自变量的约束条件导入,程序会自动模拟生成一组向量;然后,代入目标函数得到一个最大值;最后,如果最大值有提升空间,程序将自动迭代直至获得最优解,据此可计算出最优模型的权重系数向量:

$$W^* = \{0.2, 0.049, 0.14, 0.03, 0.045, 0.048, 0.12, 0.027, 0.019, 0.019, 0.03, 0.031, 0.034, 0.049, 0.02, 0.019, 0.019, 0.019, 0.02, 0.02\}$$

(3) 根据式(6)计算出 3 个方案的综合云前景值: $V_1 = -0.054, V_2 = -0.271, V_3 = -0.168$,得到 $A_1 > A_3 > A_2$,故 A_1 为最优方案。

该方案最终从 3 个备选方案中选择方案 A_1 为最优方案,进一步分析,将基于云模型和前景理论的方案决策方法与现有方法相比,从指标评语云模型的生成到各指标云前景值的确定以及各指标最优权重的计算都充分考虑了模糊性和随机性问题;同时,本研究充分考虑人获取信息和处理信息存在的局限性,现有方法所得决策结果无法反映这些问题。在整个项目方案实施中,采用方案 A_1 对该项目的风险进行分担,严格满足由风险控制力强的一方承担、考虑风险上限及风险与收益相对应等原则,最终有效控制了风险,达到了预期的分担效果。

5 结论与讨论

(1) 综合应用云模型和前景理论,结合人的行为和认知习惯,从指标评语云模型的生成到各指标云前景值的确定以及各指标最优权重的计算均充分

考虑决策信息的模糊性和随机性,保证了决策结果的客观、有效,符合实际结果。

(2)案例分析结果表明,该决策方法与现有方法相比,充分考虑人获取信息和处理信息存在的局限性,为后续确定项目收费定价机制、投融资方案及建设运营移交方案提供了有力的支持。

(3)综合云前景值的准确性依赖于投资者心理参考点的选取,而心理参考点的选取往往依靠决策者的主观感受和以往经验,存在差异性,如何科学合理的选取心理参考点将是以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 严景宁,刘庆文,项响. 基于利益相关者理论的水利PPP项目风险分担[J]. 技术经济与管理研究,2017(11):3-7.
- [2] 王蕾,赵敏,彭润中. 基于ANP-Shapley值的PPP模式风险分担策略研究[J]. 财政研究,2017(6):40-50.
- [3] 刘红勇,袁梦婷,吴之路,等. PPP模式下建筑垃圾资源化处理项目风险分担模型研究[J]. 科技进步与对策,2017,34(9):92-96.
- [4] 尹航,李远福,赵冬梅. 基于粗糙集的PPP项目风险分担方案选择研究[J]. 计算机工程与应用,2015,51(9):9-15.
- [5] 尹航,李远富,赵冬梅. 基于云模型的PPP项目风险分担方案决策方法[J]. 科技管理研究,2016,36(15):201-206.

- [6] 吴海燕,黄德春. 基于效用理论的水利工程PPP项目风险分担研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):152-157.
- [7] 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.
- [8] 李健,汪明武,徐鹏,等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):83-87.
- [9] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2):263-291.
- [10] LIU Peide, JIN Fang, ZHANG Xin, et al. Research on the multi-attribute decision-making under risk with interval probability based on prospect theory and the uncertain linguistic variables [J]. *Knowledge-based Systems*, 2011, 24(4):554-561.
- [11] 冶晓文. 基于模糊理论的水利工程施工工期风险分析评价[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016.
- [12] 袁宏川,游佳成,贺骏. 基于云模型的水利PPP项目投资风险评价[J]. 水电能源科学,2017,35(8):141-144.
- [13] 黄黎明,朱军,张可. 水利工程建设质量多阶段风险评估研究[J]. 水利水电技术,2017,48(9):117-125.
- [14] 田林钢,马成功,王绪. 基于AHP-熵权法的水利工程业主风险模糊评价[J]. 人民黄河,2017,39(12):117-122+130.
- [15] 江新,徐平,郑霞忠. 水电工程施工突发事件应急响应方案决策研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(4):161-167.

(上接第112页)

- [10] 熊立华,郭生练,王才君. 国外区域洪水频率分析方法研究进展[J]. 水科学进展,2004,15(2):261-267.
- [11] 谢平,陈广才,夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工业版),2005,38(6):6-9+15.
- [12] 叶长青,陈晓宏,张家鸣,等. 具有趋势变异的非一致性东江流域洪水序列频率计算研究[J]. 自然资源学报,2013,28(12):2105-2116.
- [13] 冯平,黄凯. 水文序列非一致性对其参数估计不确定性影响研究[J]. 水利学报,2015,46(10):1145-1154.
- [14] RIGBY R A, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location, scale and shape[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2005, 54(3):507-554.
- [15] 李文浩. 汉江上游流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(2):54-58.
- [16] 曹宇峰,刘高峰,王慧敏. 基于Mann-Kendall方法的淮河流域降雨量趋势特征研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2014,37(5):476-480+485.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [18] 宋松柏,李扬,蔡明科. 具有跳跃变异的非一致分布水文序列频率计算方法[J]. 水利学报,2012,43(6):734-739+748.
- [19] 谢平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J]. 水利发电学报,2010,29(1):85-91.
- [20] 高玉丹. 梅江松源河段非一致性水文频率分析[J]. 广东水利水电,2016(4):8-11+36.
- [21] 张家鸣,陈晓宏,叶长青. Pearson-III型频率曲线对负偏水文序列的计算[J]. 水利学报,2012,43(11):1296-1301.