

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.2018.0125

李宛谕, 黄显峰, 阎玮, 等. 基于组合权重云模型的调水工程洪水资源利用风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 57-65. LI W Y, HUANG X F, YAN W, et al. Risk assessment of flood resources utilization in water transfer project based on combined weight and cloud model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 57-65. (in Chinese)

基于组合权重云模型的调水工程 洪水资源利用风险评价

李宛谕¹, 黄显峰¹, 阎玮², 方国华¹, 刘展志¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029)

摘要: 洪水资源利用在产生效益的同时, 也会带来风险, 有必要加强洪水利用风险评价研究, 最大限度降低洪水资源利用的负面影响。对调水工程洪水资源利用风险因素进行识别, 构建风险评价指标体系, 从蓄水工程、输水工程、提水工程三个方面展开评价。采用层次分析法计算主观权重, 熵权法和投影寻踪法计算客观权重, 引入云模型计算风险指标的隶属度, 最后得到洪水资源利用的风险等级。以南水北调东线工程江苏段为实例, 对丰、平、枯三种典型年的洪水资源利用风险进行了评价, 验证了评价方法的有效性与适用性。

关键词: 洪水资源利用; 风险评价; 云模型; 熵权; 投影寻踪; 调水工程

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0057-09

Risk assessment of flood resources utilization in water transfer project based on combined weight and cloud model

LI Wanyu¹, HUANG Xianfeng¹, YAN Wei², FANG Guohua¹, LIU Zhanzhi¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Water Source of the East Route of South to North Water Diversion Project Ltd., Co., Nanjing 210029, China)

Abstract: The utilization of flood resources will produce benefits, but it will also bring risks. Therefore, it is necessary to study the risk assessment of flood utilization so as to minimize the negative effects of flood resources utilization. We identified the risk factors of flood resources utilization in a water diversion project, and constructed an index system for risk assessment based on three aspects: water storage projects, water conveyance projects, and water pumping projects. The subjective weight was calculated by the analytic hierarchy process, and the objective weight was calculated by the entropy weight method and the projection pursuit method. The cloud model was adopted to calculate the membership degree of the risk index. Then, the risk grade of flood resources utilization can be obtained. The above method was applied to the Jiangsu Province segment of the East Route of the South to North Water Transfer Project. The risks of flood resources utilization in wet, normal, and dry years were evaluated, and the validity and applicability of the evaluation method were verified.

Key words: utilization of flood resources; risk assessment; cloud model; entropy weight; projection pursuit; water transfer project

收稿日期: 2018-05-01 修回日期: 2018-08-16 网络出版时间: 2018-08-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180823.1807.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0400909); 湖南省水利科技重点项目(湘水科计[2016]194-21); 湖南省水利科技项目([2015]245-13)

Funds: National Key Research and Development Program of China(2016YFC0400909); Key Project of Water Conservancy Science and Technique of Hunan Province([2016]194-21); Water Conservancy Science and Technique of Hunan Province([2015]245-13)

作者简介: 李宛谕(1994), 女, 四川人, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: liwanyu33@163.com

通讯作者: 黄显峰(1980), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 主要从事水资源规划与水库调度方面研究。E-mail: hxhhuang2015@163.com

近年来,社会经济快速发展,水资源供需矛盾加剧。跨流域调水工程能在一定程度上缓解水资源短缺问题,但调水一般是在非汛期进行,如果充分利用汛期的洪水资源,就能增加我国水资源可利用量,进一步解决问题。以南水北调东线工程为例,加强对洪水资源的利用和管理,可以提高东线水资源的利用率,为调水沿线带来巨大的经济效益。但洪水资源具有双重属性,带来效益的同时也存在风险,为了安全利用洪水资源,有必要对洪水资源利用进行风险分析。

国外学者在洪水资源利用方面的研究较少,侧重于对洪水风险、洪水灾害及损失的研究, Hall 等^[1]将 MC 方法应用到洪水风险评估中,取得了较好的效果。Kyungrock^[2]采用均值一次二阶矩法和改进的一次二阶矩法计算蓄滞洪区风险。Brenner 等^[3]将正射影像集成到洪水风险分析中,可以定期评估风险损失。Su 等^[4]提出了基于弹性目标的洪水风险管理多目标优化设计框架,将其应用到印度尼西亚流域中。我国学者对洪水资源利用的研究始于 20 世纪 70 年代,傅湘等^[5]采用系统分析法,对大型水库在不同汛限水位下的风险进行了分析。高波等^[6]从洪水资源安全利用的角度出发,提出了风险设计分析论证的框架和定量分析方法。胡庆芳等^[7]提出了能够保证防洪安全的流域洪水资源利用评价方法。王忠静等^[8]采用不同频率设计洪水,对洪水资源利用的适度性进行了分析。王宗志等^[9]对流域洪水资源的潜力、风险和效益进行了评价。

目前,洪水资源利用风险评价的研究主要集中在水库洪水资源利用^[10]、流域洪水资源利用^[11]以及区域洪水资源利用^[12],还没有关于调水工程洪水资源利用的评价体系。调水工程的洪水资源利用是一个复杂的过程,有众多的风险因素相互制约、相互作用。洪水资源利用风险,既包括洪水资源利用风险发生概率的大小(风险率),又包括工程失事的损失或严重性(风险度)。调水工程的水利工程结构、运行特征、在洪水资源开发利用中的作用、风险值高低及其对社会经济发展的影响力存在差异,不能采取简单的加权求和形式来评价其洪水资源利用风险。

本文根据调水工程洪水资源利用方式及其风险产生的特征,构建了风险评价指标体系。基于层次分析法计算主观权重,熵权法和投影寻踪法计算客观权重,主客观结合得到组合权重。洪水资源利用风险没有分明的界限,属于模糊概念^[13],所以采用云模型计算隶属度。以南水北调东线工程江苏段为例,对其在丰、平、枯三种典型年的洪水资源利用风险进行评价,验证评价方法的适用性。

1 风险指标体系与风险计算

1.1 指标体系

风险具有不确定性,也具有模糊性。通过对众多繁杂的风险指标进行分层、归类和筛选,识别出主要的风险因素,从而构建合理的风险指标体系。本文根据调水工程的特点,参考文献[14]构建调水工程洪水资源利用风险评价指标体系。评价体系分为三层,目标层是调水工程洪水资源利用风险,准则层包括蓄水工程风险、输水工程风险、提水工程风险三类风险,指标层由每类风险所包含的具体指标构成。对于蓄水工程,风险指标主要包括系统内的湖泊和水库;对于输水工程,风险指标主要是河道和渠道;对于提水工程,风险指标主要有泵站和水闸。

1.2 评价标准

1.2.1 风险率评价标准

在我国大坝安全评价的基础上^[15],结合工程实际运行条件,得到调水工程洪水资源利用风险率的评价标准,具体内容见表 1。

表 1 调水工程洪水资源利用风险率评价标准

风险率描述	评价取值	相应风险率	说明
小	(0, 1]	0.000001~ 0.0001	罕见的,风险极难出现
较小	(1, 2]	0.0001~ 0.01	偶然的,风险不大可能会出现
中等	(2, 3]	0.01~ 0.1	可能的,风险可能会发生
较大	(3, 4]	0.1~ 0.5	预期的,风险会不止一次发生
大	(4, 5]	0.5~ 0.99	频繁的,风险会频频发生

1.2.2 风险度评价标准

参考水利工程建设重大质量与安全事故等级划分^[16],得到调水工程洪水资源利用风险度评价标准,具体内容见表 2。

表 2 调水工程洪水资源利用风险度评价标准

影响程度	评价取值	说明
轻微	(0, 1]	风险不会带来明显损失或不造成延误
中等	(1, 2]	风险带来少量损失(10 万元以内)或造成 5 天以内的延误
严重	(2, 3]	风险带来可补偿的损失(100 万元内)或造成两周内的延误
重大	(3, 4]	风险带来相当大但可补偿的损失(1000 万元以内)或造成两月的延误
灾难性	(4, 5]	风险带来无法弥补的损失(人员死亡、1000 万元以上)或超过两月的延误

1.2.3 风险评价标准

调水工程洪水资源利用风险评价等级由风险率和风险度共同确定,分为5级,具体内容见表3。

表3 调水工程洪水资源利用风险评价标准与等级

Tab.3 Risk assessment criteria and grades for flood resources utilization in water transfer project

风险类别	风险等级	评价取值	说明
低风险	\bar{N}	(0, 1]	风险可忽略,保持工程现状即可
较低风险	$\bar{0}$	(1, 4]	风险可接受,宜加强风险监控
中等风险	$\bar{0}$	(4, 9]	风险可容忍,可能需要采取风险管理措施
较高风险	$\bar{0}$	(9, 16]	风险能接受,应明确并采取措施降低风险等级
高风险	$\bar{0}$	(16, 25]	风险不能接受,要不惜代价采取风险管理措施,使风险降到可容忍范围内

1.3 风险计算方法

根据风险的定义,把风险率和风险度的乘积作为洪水资源利用风险。在调水工程洪水资源利用过程中,蓄水工程、输水工程和提水工程承担了主要的工程风险,风险率和风险度的具体方法如下。

1.3.1 风险率计算方法

风险率采用式(1)、式(2)、式(3)计算,再将计算结果按表1中的标准换算成风险率评价价值。

(1) 蓄水工程风险率。

蓄水工程的蓄水量增加后,工程的调洪能力降低,加大了汛期水位超过工程允许最高水位的风险。对于某一洪水过程 $Q(t)$,按一定的调洪规则进行调度,工程可能达到的最高水位为 $H_m(t)$,所形成的防洪风险状态是 $H_m(t)$ 超过了允许最高水位 H_a ,蓄水工程的风险率 R_1 可表示为

$$R_1 = P\{H_m(t) \geq H_a\} \quad (1)$$

(2) 输水工程风险率。

输水工程的蓄洪能力是影响调水工程洪水资源利用的重要因素,输水工程为调水工程洪水资源利用提供了必要条件,当输水流量 Q_c 超过了工程允许的最大流量 Q_{cm} 时,就产生了风险,输水工程的风险率 R_2 可表示为

$$R_2 = P\{Q_c(t) \geq Q_{cm}\} \quad (2)$$

(3) 提水工程风险率。

提水工程应在设计工况内正常运行,增加的洪水资源量使工程运行水位升高,需校核其调水时的水位是否满足正常运行要求。当抽水水位 H_p 超过工程设计水位 H_{pm} 时,会带来风险,提水工程的风险率 R_3 可表示为

$$R_3 = P\{H_p(t) \geq H_{pm}\} \quad (3)$$

1.3.2 风险度计算方法

风险度评价是一个复杂的过程,用风险损失来度量各指标风险造成失事后果的严重性。对蓄水工程和输水工程,主要考虑洪水漫溢带来的淹没损失;对提水工程,主要考虑不能正常提水带来的供水延误导致供水保证率受到影响而造成的经济损失。风险度评价价值的确定应依据表2的标准,结合具体的工程参数、保护范围、调水量等因素综合考虑。

2 组合权重的计算

采用主客观结合的方式计算风险指标权重。由专家评判得出主观权重,再结合指标值的固有属性,可以得到客观权重。本文采用层次分析法计算主观权重,熵权法和投影寻踪法计算客观权重,用遗传算法求解主客观组合权重。

2.1 层次分析法

层次分析法是一种主观赋权的方法,计算步骤如下^[17]。

(1) 构造判断矩阵。对各层进行判断,整理得到风险因素的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$,求解 A 的特征值和特征向量。

(2) 一致性检验。用一致性指标 CI 检验判断矩阵 A 是否满足一致性要求, CI 越大,表明不一致性越严重。

(3) 计算指标权重。若递阶结构通过一致性检验,则可求出指标层各因素的最终权重 d_k ,其中 b_{kj} 是各指标的相对权重, c_j 是准则层的权重:

$$d_k = \sum_{j=1}^m b_{kj} c_j \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

2.2 熵权法

熵权法用信息无序化的程度来度量信息的多少,指标携带的信息越多,表示该指标对决策起的作用越大。熵值越小,系统的无序性越小。熵权法的判断矩阵由评价指标值构成,是一种客观赋权的方法^[18],计算步骤如下。

(1) 若评价对象有 m 个,评价指标有 n 个,采用极差法对指标值进行归一化处理,得到初始判断矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 计算各指标的熵值。

$$H_j = - \left(\frac{1}{\ln m} \right) \sum_{i=1}^m (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (6)$$

若 $f_{ij} = 0$, $\ln f_{ij}$ 无意义,则:

$$f_{ij} = \frac{(1+r_{ij})}{\sum_{i=1}^m (1+r_{ij})} \quad (7)$$

式中:若 $f_{ij} = 0$, 则取 $\ln f_{ij} = 0$ 。

(3) 计算各指标权重。

$$w_j = \frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^n H_j} \quad (8)$$

2.3 投影寻踪法

基本思路是:将高维数据投影到低维子空间里,用投影指标函数反映某种特征结构的可能性。投影方向向量反映了各个指标对投影值的贡献大小,把归一化后的投影向量作为评价指标的权重^[19]。投影寻踪法直接通过决策矩阵求得权重,是客观赋权的方法,计算步骤如下。

(1) 根据各指标原始数据,归一化处理后得到初始矩阵 $R = (x_{ij})_{m \times n}$ (m 为评价对象个数, n 为评价指标个数)。

(2) 构造投影指标函数,把初始指标投影到方向向量上,得到指标的投影值 Z_i 如下:

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, n) \quad (9)$$

式中: a 为投影方向向量, $a = (a_1, \dots, a_n)$ 。

投影函数 $Q(a)$ 的表达式为

$$Q(a) = S(a) \cdot d(a) \quad (10)$$

其中:

$$S(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2}{m-1}} \quad (11)$$

$$d(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) \cdot f(R - r_{ij}) \quad (12)$$

式中: $S(a)$ 为 Z_i 的标准差; $d(a)$ 为 Z_i 的局部密度; \bar{z} 为 Z_i 的均值; R 为局部密度窗口半径,通常 $R = 0.1 \times S(a)$; r_{ij} 为两投影值的距离, $r_{ij} = |Z_i - Z_j|$; $f(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数,当 $(R - r_{ij}) \geq 0$ 时取 1,反之取 0。

(3) 通过优化投影函数,构造适应度函数。

$$\max Q(a) = S(a) \times d(a) \quad (13)$$

$$s. t. \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \quad (14)$$

最后,用 RAGA 求解,权重值取重复 50 次的各代最优个体的平均值。

2.4 组合赋权法

组合赋权法将主观权重与客观权重进行结合,是一种科学合理的方法^[20]。组合权重通过遗传算法求解,遗传算法适应度函数的表达式为:

$$\min f(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |Y(i, j) - W(j)|^2 \quad (15)$$

$$s. t. \sum_{j=1}^n W(j) = 1 \quad (16)$$

式中: $Y(i, j)$ 为第 i 种方法的第 j 个指标的权重; $W(j)$ 为随机生成的第 j 个指标的权重; m 为评价方法数; n 为评价指标数。

3 云模型风险评价

3.1 云模型及其数字特征

云模型是由李德毅院士提出的处理定性概念与定量描述的不确定性数学模型^[21]。若 U 是用精确数字表示的一个论域, R' 是其对应的定性概念,那么对 U 中的任何元素 x 均有稳定的随机数 $y = UR'(x)$,这个随机数就是元素 x 对概念 R' 的确定度^[22]。

云的数字特征可以反映定性概念的定量特征,用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表示。 E_x 是定性论域的中心值, E_n 度量了定性概念的模糊性和随机性, H_e 对熵的不确定性进行度量^[23]。正态云及数字特征见图 1。

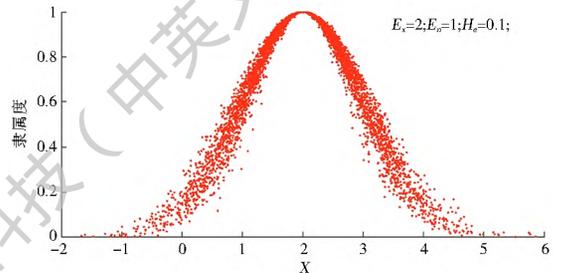


图 1 正态云及数字特征

Fig. 1 Normal cloud and digital feature graph

3.2 云发生器

云发生器是构成云模型的基本算法,主要有正向云发生器、逆向云发生器和条件云发生器^[24],能够实现定量数值和定性语言的不确定性转换。

正态云定义:若 x 满足 $x \sim N(E_x, E_n'^2)$,其中 $E_n' \sim N(E_x, E_n^2)$,且 x 对 C 的确定度满足

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n'^2)}\right] \quad (17)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云^[25]。

3.3 指标隶属度计算

本文通过 X 条件云发生器来计算风险指标的隶属度,计算步骤如下^[26]。

(1) 确定评价指标等级标准。

(2) 计算不同等级的特征值,求解各指标对不同等级的隶属度。

$$\begin{cases} E_x = \frac{B_{\min} + B_{\max}}{2} \\ E_n = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{6} \\ H_e = k \end{cases} \quad (18)$$

式中: B_{\min} 、 B_{\max} 分别表示指标评价等级的下限和上限; k 为常数, 可以依据变量的模糊阈值进行调整。本文评价等级的云数字特征见表 4。

表 4 云模型的数字特征计算规则

Tab. 4 Rules for computing the digital features of the cloud model

风险等级	E_x	E_n	H_e
\bar{N}	$E_{x_1} = (0+ a)/2$	$E_{n_1} = (a- 0)/6$	0. 2
$\hat{0}$	$E_{x_2} = (a+ b)/2$	$E_{n_2} = (b- a)/6$	0. 2
$\hat{0}$	$E_{x_3} = (b+ c)/2$	$E_{n_3} = (c- b)/6$	0. 2
$\hat{0}$	$E_{x_4} = (c+ d)/2$	$E_{n_4} = (d- c)/6$	0. 2
$\hat{0}$	$E_{x_5} = (d+ e)/2$	$E_{n_5} = (e- d)/6$	0. 2

通过 X 条件云发生器, 输入指标值, 对每个样本重复 1 000 次, 求得的平均值作为每个等级的隶属度, 输出的云模型隶属度矩阵是 $D = (\mu_{ij}^*)_{m \times n}$, 计算公式如下:

$$\mu_{ij}(x) = \frac{\sum_{k=1}^m \mu_{jk}^*}{m} \quad (19)$$

$$\mu_{ij}^*(x) = \frac{\mu_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^5 \mu_{ij}(x)} \quad (20)$$

组合权重 W 对 D 进行模糊转换, 就能得到评价集上的模糊子集 $C^{[27]}$, 本文采用最大隶属度准则进行等级评判。

$$C = WD = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (21)$$

3.4 洪水资源利用风险评价的步骤

本文对调水工程洪水资源利用风险评价的步骤分为 6 步, 评价流程见图 2。

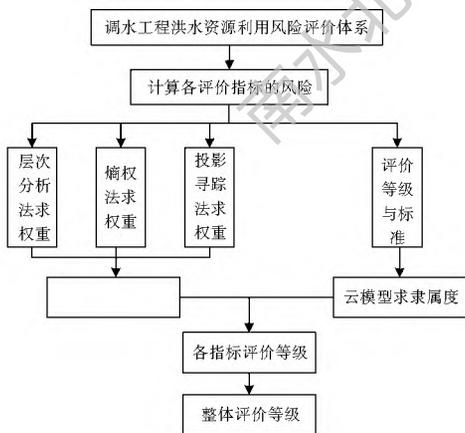


图 2 洪水资源利用风险评价流程

Fig. 2 Flow chart of risk assessment for flood resources utilization

4 实例研究

4.1 工程概况

南水北调东线一期工程于 2002 年 12 月开工建设, 2013 年建成通水, 供水范围是苏北、皖东北、鲁

南、胶东和鲁北地区。目前南水北调东线沿线地区尚有供水无法覆盖的区域, 实施洪水资源利用可以从一定程度上缓解供水不足问题, 洪水资源的开发利用有其必要性。在东线二期工程实施前, 采取联合调度管理措施, 把江苏段的洪水资源输送至京津冀地区, 实现水资源的合理利用和调配, 最大限度地发挥一期工程的效益。本文以南水北调工程江苏段为例, 对其洪水资源利用风险进行评价, 为南水北调工程江苏段洪水资源安全利用提供理论依据。根据南水北调江苏段的各级湖泊、输水路线和沿线的泵站情况, 对其进行概化, 工程概化图见图 3。

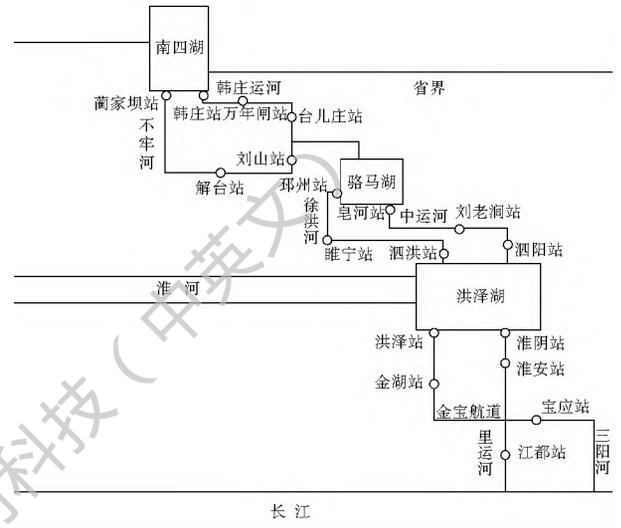


图 3 南水北调东线工程江苏段系统概化图

Fig. 3 Generalization of the Jiangsu segment of the East Route of the South to North Water Transfer Project

4.2 指标体系构建

由图 3 可知, 江苏段工程洪水资源利用的起点是洪泽湖, 再根据调水路线的湖泊、河道和闸站情况, 识别出风险指标。蓄水工程风险由洪泽湖、骆马湖和南四湖下级湖的风险组成; 输水工程风险由中运河、徐洪河、不牢河、韩庄运河的风险组成; 提水工程风险由泗阳站、泗洪站、刘老涧站、睢宁站、皂河站、邳州站、刘山泵站的风险组成, 评价指标体系见图 4。

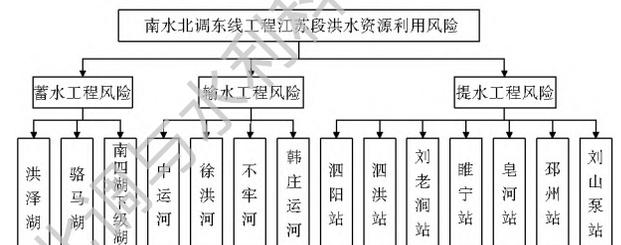


图 4 南水北调东线工程江苏段洪水资源利用风险评价指标体系

Fig. 4 Risk assessment index system for flood resources utilization in Jiangsu segment of the East Route of South to North Water Transfer Project

4.3 风险计算

一般而言,洪水汛期发生在每年的 6 月到 9 月,考虑到江苏省实际用水需求与湖泊的水资源调度等情况,将东线洪水资源利用调水时段调整为 7 月中旬到 9 月。在不同的来水条件下,洪水资源利用的风险存在差异,本文分别对丰水年、平水年和枯水年的洪水资源利用风险进行评价。

调水工程具有一定的空间跨度,需要正确划分风险评价的典型年,选择的典型年要能够反映出流域水资源的丰、平、枯变化情况,具有代表性。典型年选择的方法:根据流域水资源公报等资料,确定初步的洪水资源利用典型年(丰水年、平水年、枯水年的频率为 25%、50%、75%);考虑把湖泊汛期弃水作为洪水资源可利用量,还需结合湖泊的出湖流量对典型年划分作出适当调整。本文把洪泽湖的汛期弃水作为东线洪水资源供给,初定以洪泽湖流域为准划分典型年。通过对洪泽湖流域 2003 年至 2017 年的水文资料进行分析计算,所选取的丰水年代表是 2003 年,平水年代表是 2010 年,枯水年代表是 2014 年。

对丰、平、枯三种典型年的洪水资源利用汛期时段(七月中旬到九月)进行来水频率分析,验证合理性。丰水年汛期来水频率曲线见图 5,洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖的平均入湖流量分别是 $4\ 707\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $974\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\ 092\ \text{m}^3/\text{s}$;平水年汛期来水频率曲线见图 6,洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖的平均入湖流量分别是 $2\ 922\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $458\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $367\ \text{m}^3/\text{s}$;在枯水年,洪泽湖汛期平均入湖流量是 $1\ 218\ \text{m}^3/\text{s}$,骆马湖和南四湖下级湖几乎没有入湖流量。在同一时段内,洪泽湖来水量比骆马湖和南四湖下级湖大得多,弃水也最多,骆马湖和南四湖下级湖来水情况接近,因此以洪泽湖流域为准划分典型年有利于准确估计风险。

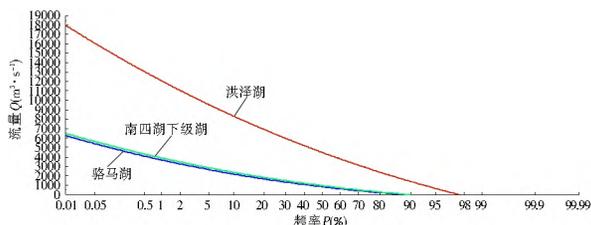


图 5 蓄水工程丰水年汛期来水频率曲线

Fig. 5 Inflow frequency curve of water storage project in flood season of wet years

根据南水北调东线工程实际运行调度情况,按照 1.3 节风险计算的方法,在充分分析各风险指标的水文资料和工程参数基础上,根据洪水资源可调

水量可以计算出风险率评价值,通过估计风险损失、分析造成后果的严重性可得到风险度评价值,将两者乘积作为风险评价值,各指标在丰、平、枯不同典型年的风险评价值见表 5,丰水年来水组合危险性最大,蓄水、输水、提水工程对应的风险值最大,应以丰水年来水组合来控制洪水资源利用风险,制定相应风险规避措施。

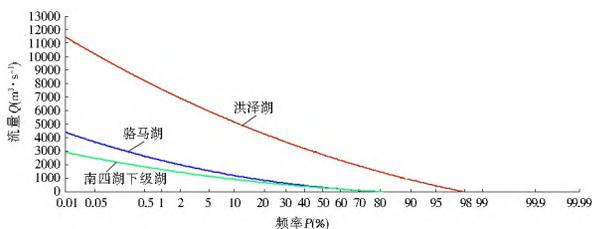


图 6 蓄水工程平水年汛期来水频率曲线

Fig. 6 Inflow frequency curve of water storage project in flood season of normal years

表 5 风险计算

Tab. 5 Risk calculation results

风险类别	风险指标	丰水年	平水年	枯水年
蓄水工程风险 B_1	洪泽湖 C_1	7.88	5.78	4.01
	骆马湖 C_2	4.58	3.91	3.15
	南四湖下级湖 C_3	5.08	3.44	2.21
输水工程风险 B_2	中运河 C_4	4.95	4.28	3.45
	徐洪河 C_5	3.45	3.18	2.66
	不牢河 C_6	3.02	2.59	2.14
	韩庄运河 C_7	3.39	2.96	2.45
	泗阳站 C_8	4.58	3.98	3.30
	泗洪站 C_9	3.72	3.21	2.64
	刘老涧站 C_{10}	1.58	1.38	1.13
提水工程风险 B_3	睢宁站 C_{11}	1.16	0.99	0.82
	皂河站 C_{12}	4.25	3.72	3.04
	邳州站 C_{13}	2.85	2.50	2.01
	刘山泵站 C_{14}	3.88	3.38	2.74

4.4 组合权重计算

请相关领域的专家对风险指标进行评分,从而构造出层次分析法所需的判断矩阵,计算得到主观权重。把各指标在 2003 年至 2017 年共 15 年的洪水资源利用风险评价值作为熵权法和投影寻踪法的初始判断矩阵,计算得到基于熵权法和投影寻踪法的客观权重。采用遗传算法求解组合权重,计算结果见表 6。根据表中的权重值得到由不同方法计算的指标权重变化曲线,见图 7 可以看出,组合权重介于三种方法算得的权重值之间,综合考虑了主观因素和客观因素。

表6 风险评价权重计算

Tab. 6 Weight calculation table for risk assessment

风险类别	风险指标	层次分析法	熵权法	投影追踪法	组合权重
蓄水工程 风险 B ₁	洪泽湖 C ₁	0.2960	0.0434	0.0381	0.1258
	骆马湖 C ₂	0.1136	0.1161	0.0851	0.1049
	南四湖下级湖 C ₃	0.1300	0.0458	0.0717	0.0825
输水工程 风险 B ₂	中运河 C ₄	0.1388	0.0937	0.0790	0.1038
	徐洪河 C ₅	0.0475	0.0554	0.0922	0.0650
	不牢河 C ₆	0.0823	0.0577	0.0727	0.0709
	韩庄运河 C ₇	0.0283	0.0837	0.0718	0.0613
	泗阳站 C ₈	0.0529	0.0457	0.0618	0.0535
	泗洪站 C ₉	0.0081	0.0555	0.0623	0.0420
	刘老涧站 C ₁₀	0.0119	0.1155	0.1030	0.0768
提水工程 风险 B ₃	睢宁站 C ₁₁	0.0055	0.0445	0.0387	0.0296
	皂河站 C ₁₂	0.0251	0.0921	0.0705	0.0626
	邳州站 C ₁₃	0.0286	0.0572	0.0740	0.0533
	刘山泵站 C ₁₄	0.0314	0.0938	0.0790	0.0681

表7 丰水年洪水资源利用风险隶属度计算

Tab. 7 Calculation table of risk membership of flood resources utilization in wet years

风险指标	指标值	隶属度					评价等级
		\tilde{N}	$\hat{0}$	$\acute{0}$	$\grave{0}$	$\bar{0}$	
洪泽湖 C ₁	7.88	0.0000	0.0000	0.9936	0.0064	0.0000	$\acute{0}$
骆马湖 C ₂	4.58	0.0000	0.0675	0.9325	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
南四湖下级湖 C ₃	5.08	0.0000	0.0054	0.9946	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
中运河 C ₄	4.95	0.0000	0.0121	0.9879	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
徐洪河 C ₅	3.45	0.0000	0.9677	0.0322	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
不牢河 C ₆	3.02	0.0001	0.9961	0.0038	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
韩庄运河 C ₇	3.39	0.0000	0.9748	0.0252	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
泗阳站 C ₈	4.58	0.0000	0.0722	0.9278	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
泗洪站 C ₉	3.72	0.0000	0.8750	0.1250	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
刘老涧站 C ₁₀	1.58	0.0670	0.9328	0.0002	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
睢宁站 C ₁₁	1.16	0.5444	0.4556	0.0001	0.0000	0.0000	\tilde{N}
皂河站 C ₁₂	4.25	0.0000	0.3145	0.6855	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
邳州站 C ₁₃	2.85	0.0001	0.9979	0.0020	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
刘山泵站 C ₁₄	3.88	0.0000	0.7775	0.2225	0.0000	0.0000	$\grave{0}$

表8 平水年洪水资源利用风险隶属度计算

Tab. 8 Calculation table of risk membership of flood resources utilization in normal years

风险指标	指标值	隶属度					评价等级
		\tilde{N}	$\hat{0}$	$\acute{0}$	$\grave{0}$	$\bar{0}$	
洪泽湖 C ₁	5.78	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
骆马湖 C ₂	3.91	0.0000	0.7352	0.2648	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
南四湖下级湖 C ₃	3.44	0.0000	0.9692	0.0308	0.0000	0.0000	$\grave{0}$
中运河 C ₄	4.28	0.0000	0.2920	0.7080	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
徐洪河 C ₅	3.18	0.0000	0.9913	0.0086	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
不牢河 C ₆	2.59	0.0002	0.9992	0.0006	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
韩庄运河 C ₇	2.96	0.0000	0.9968	0.0032	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
泗阳站 C ₈	3.98	0.0000	0.6528	0.3472	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
泗洪站 C ₉	3.21	0.0000	0.9893	0.0107	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
刘老涧站 C ₁₀	1.38	0.1828	0.8171	0.0001	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
睢宁站 C ₁₁	0.99	0.7788	0.2211	0.0000	0.0000	0.0000	\tilde{N}
皂河站 C ₁₂	3.72	0.0000	0.8811	0.1189	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
邳州站 C ₁₃	2.50	0.0004	0.9991	0.0005	0.0000	0.0000	$\acute{0}$
刘山泵站 C ₁₄	3.38	0.0001	0.9772	0.0227	0.0000	0.0000	$\acute{0}$

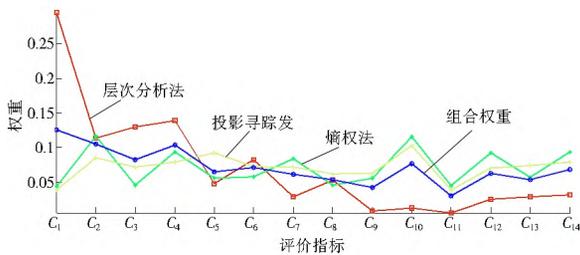


图7 采用不同方法的指标权重变化曲线

Fig. 7 The index weight variation curve of different methods

4.5 风险评价

对丰、平、枯三种典型年的水资源利用情况风险进行评价,采用X条件云发生器生成各个指标的隶属度,为了降低误差,重复计算1000次,根据最大隶属度原则得出评价等级,计算结果和各指标的风险等级评价见表7、表8、表9。从表中的计算结果可以看出,对于丰水年,风险较高的指标有:洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖、中运河、泗阳站和皂河站,对于平水年,风险较高的指标是洪泽湖、中运河,而对于枯水年,所有指标的风险均较低。

最后利用式(21),得出在丰、平、枯三种典型年下的洪水资源利用风险评价等级。最终的评价等级由最大隶属度准则得到,结果见表10。

由表10的评价结果可知,丰水年风险等级是 $\acute{0}$,对应中等风险,平水年和枯水年的风险等级是 $\hat{0}$,对应较低风险。从具体指标的风险等级可以发现,平水年存在 $\hat{0}$ 级风险指标,而枯水年风险均是 $\hat{0}$ 级或 \tilde{N} 级,可以进一步表明枯水年的洪水资源利用风险最低。本文的评价结果与专家评判相一致,但

本文评价方法更客观合理,主客组合权重考虑了人为因素和指标值本身的客观属性,云模型对风险做了模糊性处理,组合权重云模型理论对解决具有随机性的模糊风险评价问题有较好的适应性。

不同典型年型条件下洪水资源利用的特点与可能存在的问题:丰水年,湖泊汛期弃水丰富,向京津冀地区的可调洪水资源多,供水保证率高,能带来较

表 9 枯水年洪水资源利用风险隶属度计算

Tab.9 Calculation table of risk membership of flood resources utilization in dry years

风险指标	指标值	隶属度					评价等级
		\bar{N}	$\hat{0}$	$\acute{0}$	$\grave{0}$	$\bar{0}$	
洪泽湖 C_1	4.01	0.0000	0.6287	0.3713	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
骆马湖 C_2	3.15	0.0001	0.9925	0.0074	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
南四湖下级湖 C_3	2.21	0.0015	0.9982	0.0003	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
中运河 C_4	3.45	0.0001	0.9641	0.0358	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
徐洪河 C_5	2.66	0.0001	0.9991	0.0008	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
不牢河 C_6	2.14	0.0019	0.9979	0.0002	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
韩庄运河 C_7	2.45	0.0004	0.9992	0.0004	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
泗阳站 C_8	3.30	0.0000	0.9825	0.0175	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
泗洪站 C_9	2.64	0.0001	0.9990	0.0008	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
刘老涧站 C_{10}	1.13	0.5632	0.4368	0.0000	0.0000	0.0000	\bar{N}
睢宁站 C_{11}	0.82	0.9220	0.0780	0.0000	0.0000	0.0000	\bar{N}
皂河站 C_{12}	3.04	0.0001	0.9954	0.0046	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
邳州站 C_{13}	2.01	0.0040	0.9958	0.0002	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
刘山泵站 C_{14}	2.74	0.0001	0.9987	0.0012	0.0000	0.0000	$\hat{0}$

表 10 不同典型年的南水北调东线工程洪水资源利用风险评价结果

Tab.10 Risk assessment of flood resources utilization in the East Route of South to North Water Transfer Project in different typical years

典型年	隶属度					评价等级
	\bar{N}	$\hat{0}$	$\acute{0}$	$\grave{0}$	$\bar{0}$	
丰水年	0.0213	0.4536	0.5243	0.0008	0.0000	$\hat{0}$
平水年	0.0371	0.7045	0.2584	0.0000	0.0000	$\hat{0}$
枯水年	0.0711	0.8762	0.0527	0.0000	0.0000	$\hat{0}$

大的洪水资源利用效益,但洪水资源利用风险也高;平水年,可调洪水资源量适中,洪水资源利用风险和效益中等;对于枯水年,汛期弃水少甚至没有弃水,可调洪水资源少,导致供水得不到保证,洪水资源利用效益低,带来的风险也低。应根据不同典型年的洪水资源利用风险,结合工程实际,加强风险监控,必要时采取相对应的风险管理措施,同时制定风险应急预案,保证洪水资源利用风险在可控范围内。

5 结论

洪水资源的利用能在一定程度上缓解我国的水资源短缺问题,合理利用洪水资源要把风险控制一定范围内,必要时可采取风险规避措施。本文从工程角度出发,构建了调水工程洪水资源利用风险指标体系,引入了组合权重云模型理论。通过层次分析法、熵权法和投影寻踪法计算得到主客观组合

权重,基于云模型计算隶属度,考虑了模糊性和随机性,对调水工程洪水资源利用风险进行客观评价。对南水北调江苏段的计算分析可以发现,其洪水资源利用的工程风险较小,同时南水北调东线洪水资源利用会给京津冀地区带来巨大的经济和社会效益。调水工程的洪水资源利用风险评价对洪水资源安全利用具有实际意义,组合权重与云模型相结合的风险评价方法为调水工程洪水资源安全利用提供了重要的理论支撑。

调水工程系统复杂,影响洪水资源利用风险因素众多,本文只考虑了工程风险,对水质风险、管理调度风险还可做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] HALL J W, SAYERS P B, DAWSON R J. National scale assessment of current and future flood risk in England and Wales [J]. *Natural Hazards*, 2005, 36(1): 147-164.
- [2] KYUNGROCK P. Analytical derivation of reservoir routing and hydrological risk evaluation of detention basins [J]. *Journal of Hydrology*, 2008(352): 19F-201.
- [3] BRENNER C, MEISCH C, APPEL B, et al. Towards periodic and time referenced flood risk assessment using airborne remote sensing [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2016, 64(4): 438-447. DOI: 10.1515/johr-2016-0034.
- [4] SU H T, CHEUNG S H, LO E Y M. Multiobjective optimal design for flood risk management with resilience objectives [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(4): 1147-1162. DOI: 10.1007/s00477-017-1508-7.
- [5] 傅湘, 纪昌明. 水库汛期调度的最大洪灾风险率研究 [J]. *水电能源科学*, 1998, 16(2): 13-16. (FU X, JI C M. Study on the maximum flood hazard risk rate in reservoir flood season operation [J]. *Water Resources and Power*, 1998, 16(2): 13-16. (in Chinese))
- [6] 高波, 王银堂, 胡四一. 水库汛限水位调整与运用 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 326-333. (GAO B, WANG Y T, HU S Y. Adjustment and application of the limited level of reservoirs during the flood season [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 326-333. (in Chinese))
- [7] 胡庆芳, 王银堂. 海河流域洪水资源利用评价研究 [J]. *水文*, 2009, 29(5): 6-12. (HU Q F, WANG Y T. Assessment of flood resources utilization in the haihe river basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(5): 6-12. (in Chinese))
- [8] 王忠静, 朱金峰, 尚文绣. 洪水资源利用风险适度性分析 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 27-33. (WANG Z J, ZHU J F, SHANG S W. Determining the risk moderate criterion for flood utilization [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 27-33. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.004.
- [9] 王宗志, 王银堂, 胡四一, 等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 I: 定量解析 [J]. *水利学报*, 2017, 48(8): 883-891. (WANG Z Z, WANG Y T, HU S Y, et al. Theoretical framework of

- floodwater resources utilization in a basin I: Quantitative interpretation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(8): 883-891. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20161100.
- [10] 邹强, 胡向阳, 周曼. 三峡水库洪水资源利用: 风险分析和对策措施[J]. *人民长江*, 2018, 49(4): 1F16+ 22. (ZOU Q, HU X Y, ZHOU M. Comprehensive study on flood resources utilization of Three Gorges Reservoir: risk analysis and countermeasures[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(4): 1F16+ 22. (in Chinese) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.04.003.
- [11] 吴浩云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 太湖流域洪水识别与洪水资源利用约束分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(5): 1-8. (WU H Y, WANG Y T, HU Q F, et al. Flood identification and constraints analysis for flood resources utilization in Taihu Lake basin[J]. *Hydro Science and Engineering*, 2016(5): 1-8. (in Chinese) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.001.
- [12] 狄正烈. 城西湖蓄洪区及周边洪水资源综合利用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. (DI Z L. The research of flood resources utilization in chengxihu flood storage [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [13] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005. 12. (CHEN S Y. Variable fuzzy set theory and method for water resources and flood control system[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. 12. (in Chinese))
- [14] 耿雷华, 刘恒, 姜蓓蓓, 等. 南水北调东线工程运行风险分析[J]. *水利水运工程学报*, 2010(1): 16-22. (GENG L H, LIU H, JIANG B L, et al. Operating risk analysis on the east route of South-North Water Diversion Project[J]. *Hydro Science and Engineering*, 2010(1): 16-22. (in Chinese))
- [15] 李雷, 王仁钟, 盛金保, 等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 5. (LI L, WANG R Z, SHENG J B, et al. Dam risk assessment and risk management[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2006. 5. (in Chinese))
- [16] 李爱花. 南水北调东线工程蓄水系统运行风险分析[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009. (LI A H. Operating Risk Analysis of the Storage Subsystem in the East Route Project of South-North Water Diversion[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [17] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International journal of services sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [18] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(3): 257-262. (MENG X M, HU H P. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
- [19] 刘展志, 黄显峰, 方国华, 等. 基于改进云模型的堤坝除险加固效益后评价研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5): 223-231. (LIU Z Z, HUANG X F, FANG G H, et al. Post benefit evaluation of dam reinforcement based on modified cloud model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(5): 223-231. (in Chinese) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.37.
- [20] PENG T, ZU O W, LIU Y. Genetic algorithm for evaluation metrics in topical web crawling[J]. *Computational Methods*, 2006, (30): 1203-1208.
- [21] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*, 2004(8): 28-34. (LI D Y, LIU C Y. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28-34. (in Chinese))
- [22] 王润英, 李宇. 基于熵-云模型的城市洪灾风险评价模型[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(9): 6F-63, 86. (WANG R Y, LI Y. Risk evaluation of urban flood disaster based on entropy-cloud model[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 6F-63, 86. (in Chinese))
- [23] 罗赞骞, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和熵权的网络性能综合评估模型[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2009, 21(6): 77F-775. (LUO Z Q, XIA J B, CHEN T P. Network performance comprehensive evaluation model based on cloud model and entropy weight[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2009, 21(6): 77F-775. (in Chinese))
- [24] 杨光, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(6): 95-101. (YANG G, LIU D W, CHU F J, et al. Evaluation on risk grade of tunnel collapse based on cloud model[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(6): 95-101. (in Chinese) DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.06.015.
- [25] 石晓静, 查小春. 基于云模型的安康市洪水灾害风险评价[J]. *江西农业学报*, 2017, 29(1): 107-111. (SHI X J, ZHA X C. Risk assessment of flood disaster in Ankang city based on cloud model[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(1): 107-111. (in Chinese) DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2017.01.21.
- [26] 丁昊, 王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 25F-257. (DING H, WANG D. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 25F-257. (in Chinese) (DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.01.036.
- [27] 王贺, 刘高峰, 王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. *水利经济*, 2014, 32(2): 15-18. (WANG H, LIU G F, WANG H M. Urban extreme rainstorm flood loss based on cloud model[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2014, 32(2): 15-18. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1003-9511.2014.02.005.