doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.027

基于可变集和云模型的河湖水系连通方案优选决策方法

冶运涛　梁犁丽　曹　引　蒋云钟　赵红莉　王建华
(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 河湖水系连通工程方案优选是一个具有确定性的评价指标和评价标准与具有不确定性评价因子及其权重变化相结合的分析过程,所涉及的资源准则类、经济准则类、社会准则类、环境准则类、工程准则类等各评价指标具有中介过渡性,导致不同的多属性决策方法得到的结果具有不确定性,需对这些决策方法进行稳定性评价。根据可变集的对立统一数学定理,提出河湖水系连通方案优选决策可变集原理与方法,并提出了基于云模型的可变集决策结果灵敏度分析方法。以浙北引水工程中的新安江方案(S1)、富春江方案(S2)和太湖-富春江方案(S3)为例,分综合评价和不同准则评价两种情况评价分析了 3 种方案的排序,同时分析了单一指标变化和多个指标权重变化下的可变模型评价结果鲁棒性。结果表明:利用级别特征值和相对差异度来分析多准则综合评价结果,说明 S3 优于 S1 和 S2;从指标灵敏度分析看,可变模型($\alpha=1$,$p=1$)和($\alpha=2$,$p=1$)综合评价的方案排序稳定性较好;从权重灵敏度分析看,4 种参数组合的可变模型综合评价的方案排序容易受指标权重变化的影响,尤其是 S2 和 S3;结合综合评价和不同准则评价的指标灵敏度和指标权重灵敏度分析来看,评价结果受指标体系的影响,说明该方法需要结合不同研究对象进行具体分析后选择合适的评价方法。

关键词: 河湖水系连通; 可变集; 云模型; 方案优选; 决策方法
中图分类号: TV212; TV213　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)12-0211-15

Optimal Decision Method for Interconnected River System Network Schemes Based on Variable Sets and Cloud Model

YE Yuntao　LIANG Lili　CAO Yin　JIANG Yunzhong　ZHAO Hongli　WANG Jianhua
(*Department of Water Resources*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Decision on optimal selection of interconnected river system network schemes is an analysis process which combines deterministic evaluation index and evaluation criteria with uncertain evaluation factors and their weight changes. The evaluation indexes involved include resource criteria, economic criteria, social criteria, environmental criteria, engineering criteria and so on. Intermediary transition of these evaluation indexes leads to uncertainty in the results of different multi-attribute decision-making methods. How to evaluate the stability of these decision-making methods is worth studying. According to the theorem of the unity of opposites of variable sets, the principle and method of variable sets for optimal selection of interconnected river system network schemes were proposed, and the sensitivity analysis method of variable sets decision results based on cloud model was proposed. Taking Xin'anjiang (S1), Fuchunjiang (S2) and Taihu-Fuchunjiang (S3) water diversion projects in northern Zhejiang Province as examples, the ranking of the three schemes was evaluated and analyzed in terms of comprehensive evaluation and different criteria evaluation, and the robustness of the evaluation results of variable model under change of single index and multiple index weights was analyzed. The main conclusions were as follows: using the rand feature values and relative difference degrees to analyze the results of multi-criteria comprehensive evaluation, it was indicated that S3 was superior to S1 and S2; variable model ($\alpha=1$, $p=1$) and ($\alpha=2$, $p=1$) comprehensive evaluation of the scheme ranking stability was better from the index sensitivity analysis. It can be seen from the weight sensitivity analysis that the ranking of the comprehensive evaluation schemes, especially S2 and S3, of the four kinds of variable models with

收稿日期: 2018-07-05　修回日期: 2018-07-27
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405804、2017YFC0405801)、国家自然科学基金项目(51309254)和中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WR0145B272016)
作者简介: 冶运涛(1983—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水信息与智慧流域、流域水循环模拟研究,E-mail: yeyuntao@iwhr.com

different parameter combinations was easily affected by the change of index weight. According to the analysis of index sensitivity and index weight sensitivity combined with the comprehensive evaluation and the evaluation of different criteria, the evaluation results were affected by the index system to some extent, which indicated that it was needed to make specific analysis on the research objects to choose the appropriate evaluation method.

Key words: interconnected river system; variable set; cloud model; optimal selection of schemes; decision method

0 引言

为应对我国水安全问题,2011 年中央 1 号文件和水利部提出了河湖水系连通战略,但目前河湖水系连通的理论与技术研究尚在摸索阶段,远未形成指导生产实践的完整体系,不少学者对此开展了相关研究[1-2]。河湖水系连通研究目的就是通过分析河湖水系及连通工程特性,考虑到工程规划具有多目标、多层次等特征,立足于国家、区域、流域 3 个层面的国家战略需求,形成河湖水系连通在多个目标和多约束条件下的可行性方案集,然后建立方案集的资源、社会、经济、生态、环境、工程等多属性组成的指标体系,通过模拟计算和评估分析,优选确定河湖水系连通的规划方案[3]。

河湖水系连通工程(简称“连通工程”)方案优选是一个具有定性定量指标及模糊不确定信息的多目标多属性多层次的综合评价问题。建立一个能充分反映影响连通工程方案的社会经济、生态环境等各种因素的、科学系统的综合评价体系,并采用有效评价方法是方案优选的核心。常用的综合评价方法仍存在不足[4-9],如人工神经网络法通过训练误差反馈反复修改网络权重,虽然一定程度上避免了评价者的主观影响,但往往导致花费时间多、收敛速度慢,且容易导致产生很多局部最小点;模糊综合评价法在评价过程中存在一定的不确定性,且模型难以自我调整与自我验证;灰色综合评价法在权重确定上过度依赖于不同级别的评价标准;集对分析和模糊集对分析分类方法在理论上存在基础性错误[10]。多数评价方法是将水资源系统评价对象作为模糊系统来处理,但影响它们的众多指标却是清晰的确定值,因此,水资源系统实质上是模糊清晰混合系统,需要新的评价原理与方法来对此进行评价。陈守煜[11]根据可变集辩证法基本规律数学原理,提出事物相对差异度演变定理,提出可变集模式识别矩阵,构建了水资源系统可变集评价原理与方法。

考虑连通工程优选评价各指标评价标准分级并没有明确的界限,具有模糊性,但是影响他们的众多指标却是清晰的确定值,因此河湖水系连通评价实质上是可变模糊清晰混合集,简称为可变集[11]。可变集是可变模糊集的发展,是对札德模糊集合论的突破,具有重要的理论意义[10],已在多个领域得到应用[12-18],并取得了很好效果,但是可变集在河湖水系连通工程方案优选中的适应性如何,尚未见文献报道;另外,现有文献将可变模型 4 种参数组合(可变模型中包括 α 和 p 参数,α 为优化准则参数,取值为 1 和 2 分别相当于最小一乘方准则和最二乘方准则;p 为距离参数,取值为 1 和 2 分别为海明距离和欧氏距离)计算结果的平均值作为最终评价结果,其合理性值得商榷。

针对上述问题,本文在已有成果基础上,首先,将对立统一、质量互变及否定之否定定理与河湖水系连通生产实践相结合,将“非此即彼”的清晰性指标与“亦此亦彼”的模糊概念辩证综合分析,提出基于可变集辩证法数学定理的科学、合理、快捷的河湖水系连通工程方案优选及排序方法;其次,为了客观评价不同参数组合的可变模型,分别以单一指标属性值变化和多个权重同时变化时采用不同参数组合的可变模型求得工程方案评价值作为样本数据,引入云模型进行灵敏度分析,对比可变模型决策结果的鲁棒性,帮助决策者选择决策结果鲁棒性更好的可变模型。最后,通过浙北引水工程算例分析,验证此方法在实际工程应用中的有效性和进行灵敏度分析的必要性。

1 河湖水系连通工程方案优选决策方法

基于可变集和云模型的河湖水系连通工程方案优选决策过程主要由两部分组成:①基于可变集的工程方案优选过程[11]。②基于云模型的工程方案评价灵敏度分析过程[19]。

1.1 基于可变集的工程方案优选过程

可变集优选过程流程如图 1 所示。具体描述如下:

(1)确定河湖水系连通工程的评价对象。

(2)根据评价对象的特点,在实地调研、文献调研的基础上,依据资源、经济、社会、生态、环境、工程等准则,建立评价指标体系,并计算评价指标值。

(3)在指标值已经确定的情况下,根据评价者对指标体系中指标重要程度的认识,由主观、客观权

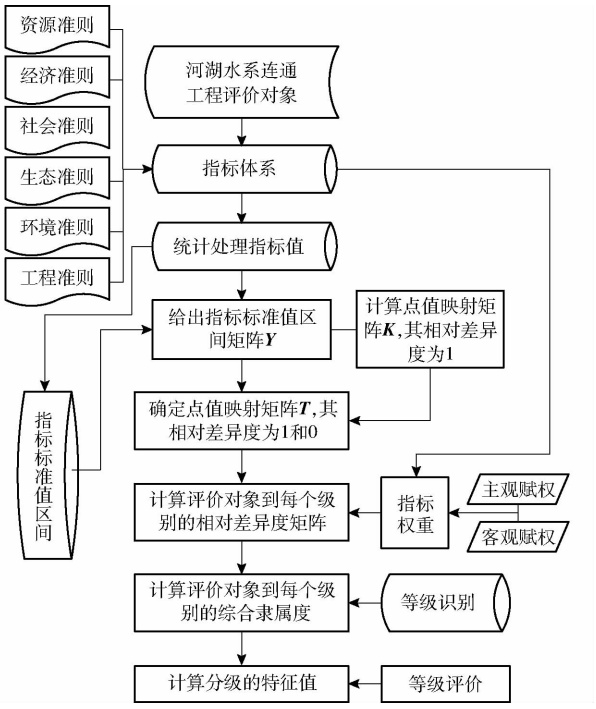

图 1　基于可变集的工程方案优选过程流程图

Fig. 1　Flow chart for optimal selection process for project schemes based on variable set

重计算方法有机结合确定指标权重，既能体现人的经验判断，又能体现指标的客观特性。

(4)根据现有评价标准、实际情况或专家经验，确定不同等级下的指标标准值区间，进而给出指标标准值区间矩阵。

(5)计算点值映射矩阵 $\boldsymbol{K}$，其相对差异度为 1，并确定点值映射矩阵 $\boldsymbol{T}$，其相对差异度为 1 和 0。

(6)结合指标权重，计算评价对象到每个级别的相对差异度矩阵。

(7)计算评价对象到每个级别的综合隶属度，并计算分级的特征值，进行等级评价。

在此需要指出的是，本文研究重点是对可变集方法的应用特性分析，暂不涉及指标体系建立和指标权重确定研究。对河湖水系连通工程来讲，其评判准则分为资源、经济、社会、生态、环境、工程等，所有指标体系的分类均可归结到六大准则下。

决策过程步骤如下：

设河湖水系连通工程方案的好差分为 c 个级别。令 h 表示河湖水系连通工程方案级别变量，设 $h=1$ 为好，$h=2$ 为较好，$\cdots$，$h=c$ 为差。

设由 n 个河湖水系连通工程方案组成集合 U，u 为其中一个识别河湖水系连通工程方案对象，$u\in U$，以河湖水系连通工程评判指标 i 的特征值 x_i 对 u 进行评判等级识别。已知的 m 个河湖水系连通工程方案评价指标 c 个级别的指标标准值区间矩阵为

$$\boldsymbol{Y}=[a_{ih}\quad b_{ih}]\ (i=1,2,\cdots,m;h=1,2,\cdots,c) \tag{1}$$

其中，a_{ih}、b_{ih} 分别为河湖水系连通工程评价指标 i 级 h 标准值上、下界。对于越小越优的河湖水系连通工程评价指标 $a_{ih}<b_{ih}$；对于越大越优的河湖水系连通工程评价指标 $a_{ih}>b_{ih}$；相邻两级的河湖水系连通工程评价指标 i 标准区间值的交点 b_{ih}，相当于对立统一与质量互变定理中 h 级向 $h+1$ 级转化的渐变式质变点，即交点的相对隶属度 $\mu(b_{ih})=\mu(a_{i(h+1)})=0.5$。由于存在渐变式质变点 $\mu(b_{ih})=0.5$，根据对立统一定理，质变点两侧必存在两级(两极)对立，即 h 与 $h+1$ 级构成对立级别，故 A 和 A' 可以分别以 ih 和 $i(h+1)$ 替代。根据对立统一定理，对象 u 指标 i 对 h 与 $(h+1)$ 级的相对隶属度之和为 1，有

$$\mu_{ih}(u)+\mu_{i(h+1)}(u)=1 \tag{2}$$

计算式(2)中的 $\mu_{ih}(u)$ 和 $\mu_{i(h+1)}(u)$，就可确定指标 i 级别 h 或 $h+1$ 的相对隶属度，其方法如下：

(1)设 1 级($h=1$)为好的河湖水系连通工程方案，根据标准值区间矩阵，评价指标 i 的 1 级标准值区间 $[a_{i1},b_{i1}]$ 的上界 a_{i1} 对 1 级的相对隶属度为 1，根据对立统一定理，则对对立级 2 级的相对隶属度为 0，设 k_{i1} 为对象 u 在区间 $[a_{i1},b_{i1}]$ 内对 1 级相对隶属度为 1 的点值，故 $k_{i1}=a_{i1}$。

(2)设 c 级($h=c$)为差的河湖水系连通工程方案，根据标准值区间矩阵，区间 $[a_{ic},b_{ic}]$ 的下界 b_{ic} 对 c 级的相对隶属度为 1，对对立级 $(c-1)$ 的下界 b_{ic} 对 c 级的相对隶属度为 1，根据对立统一定理，对对立级 $(c-1)$ 的相对隶属度为 0，设 k_{ic} 为对应 u 在区间 $[a_{ic},b_{ic}]$ 内对 c 级相对隶属度为 1 的点值，故 $k_{ic}=b_{ic}$。

(3)设 h 为 2 至 $(c-1)$ 的中间级别，可取指标 i 级别 h 标准区间 $[a_{ih},b_{ih}]$ 的中点为 h 级相对隶属度为 1 的点值，即 $k_{ih}=(a_{ih}+b_{ih})/2$，则有

$$\begin{cases}k_{i1}=a_{i1}\\ k_{ih}=\dfrac{a_{ih}+b_{ih}}{2}\quad (h=2,3,\cdots,c-1)\\ k_{ic}=b_{ic}\end{cases} \tag{3}$$

根据标准值区间矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 与式(3)，可得指标相对隶属度为 1 的点值映射矩阵为

$$\boldsymbol{K}=[k_{ih}] \tag{4}$$

根据式(4)与矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 中的 b_{ih} 可得到相对隶属度为 1 和 0.5 所对应的点值映射矩阵为

$$\boldsymbol{T}=[k_{i1}\quad b_{i1}\quad\cdots\quad b_{i(c-1)}\quad k_{ic}]_{m\times(2c-1)}\quad (i=1,2,\cdots,m) \tag{5}$$

设已知河湖水系连通工程方案对象 u 的指标特征值矩阵为

$$\boldsymbol{X}=[x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m]=[x_i] \quad (i=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

设 u 的指标 i 特征值 x_i 落入矩阵 $\boldsymbol{K}$ 中 h 与 $h+1$ 级指标 i 的特征值相对差异度 $D_{ih}(u)$ 和 $D_{i(h+1)}(u)$ 等于 1 对应的点值区间 $[k_{ih},k_{i(h+1)}]$ 内，区间内同时存在 $D_{ih}(u)=0$ 渐变式质变点 b_{ih}，则 x_i 对 h 和 $h+1$ 级的相对差异度 $D_{ih}(u)$ 为

$$D_{ih}(u)=\begin{cases}\dfrac{b_{ih}-x_i}{b_{ih}-k_{ih}} & (x_i\in[k_{ih},b_{ih}])\\ -\dfrac{b_{ih}-x_i}{b_{ih}-k_{i(h+1)}} & (x_i\in(b_{ih},k_{i(h+1)}])\end{cases} \tag{7}$$

为计算方便，陈守煜[11]将相对差异度模型转变为相对隶属度模型，则指标特征值 x_{ij} 级别 h 相对隶属度模型为

$$\mu_{ih}(u)=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{b_{ih}-x_i}{b_{ih}-k_{ih}}\right) & (x_i\in[k_{ih},b_{ih}])\\ 0.5\left(1-\dfrac{b_{ih}-x_i}{b_{ih}-k_{i(h+1)}}\right) & (x_i\in(b_{ih},k_{i(h+1)}])\end{cases} \tag{8}$$

根据物理概念，对于小于 h 级、大于 $h+1$ 级指标 i 的相对隶属度均应等于 0，即

$$\begin{cases}\mu_{i(<h)}(u)=0\\ \mu_{i(>(h+1))}(u)=0\end{cases} \tag{9}$$

当 x_i 落于模式识别矩阵 $\boldsymbol{T}$ 元素 k_{i1} 与 k_{ic} 范围之外时，根据物理概念，对于越小越优指标，指标 i 对 1 级和 c 级的相对隶属度为

$$\begin{cases}\mu_{i1}(u)=1 & (x_i\leqslant k_{i1})\\ \mu_{ic}(u)=1 & (x_i\geqslant k_{ic})\end{cases} \tag{10}$$

对于越大越优指标，指标 i 对 1 级和 c 级的相对隶属度为

$$\begin{cases}\mu_{i1}(u)=1 & (x_i\geqslant k_{i1})\\ \mu_{ic}(u)=1 & (x_i\leqslant k_{ic})\end{cases} \tag{11}$$

式(5)、(6)是单指标相对差异度或隶属度的计算公式。由于评价是多指标识别，因此需要导出以指标相对差异表示的多指标综合相对隶属度非线性模型。

式(10)、(11)是单指标模型，而水资源评价是多指标综合评价问题。参考文献[11]，评价对象 u 的指标特征值 x_i 对级别 h 的综合相对隶属度模型为

$$\upsilon_h(u_j)=\frac{1}{1+\left\{\dfrac{\sum_{i=1}^{m}[\omega_i(1-\mu_{ih}(u))]^p}{\sum_{i=1}^{m}(\omega_i\mu_{ih}(u))^p}\right\}^{\frac{\alpha}{p}}} \quad (h=1,2,\cdots,c) \tag{12}$$

根据文献[11]可知，式(12)满足对立统一定理。式中 α 为优化准则函数，$\alpha=1$ 相当于最小一乘方准则，$\alpha=2$ 为最小二乘方准则，p 为距离参数，$p=1$ 为海明距离，$p=2$ 为欧氏距离。当 $\alpha=2$ 时，无论采用 $p=1$ 的海明距离，还是 $p=2$ 的欧氏距离，式(12)都是非线性公式，对距离比值具有放大或缩小效应。不同参数组合下的计算模型，本文称之为可变模型。

根据式(12)可得评价对象 u 对各个级别的综合相对隶属度向量

$$\boldsymbol{\upsilon}(u)=(\upsilon_1,\upsilon_2,\cdots,\upsilon_c)=(\upsilon_h(u)) \tag{13}$$

应用文献[11]中的级别特征值公式

$$H(u)=\sum_{h=1}^{c}\boldsymbol{\upsilon}_h(u)h \quad (h=1,2,\cdots,c) \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{\upsilon}_h(u)$——$\upsilon_h(u)$ 的归一化向量

应用线性模型计算的向量值之和应等于 1，即自动归一化，可用于计算校核之用。对每个评价对象 u 都进行类似计算，得到 n 个评价对象的级别特征值：$H(u_1),H(u_2),\cdots,H(u_n)$，由此对评价对象逐一进行隶属等级的评定。

确定 u 的综合相对隶属度的计算公式为

$$\mu_H(u)=\frac{c-H(u)}{c-1} \tag{15}$$

根据式(7)可以计算 u 的相对差异度，根据质量互变定理可以进行方案的对比分析。

1.2 基于云模型的工程方案评价灵敏度分析过程

采用云模型理论对比可变集模型所得决策结果的数字特征期望 E_x、熵 E_n、超熵 H_e 以及云图重叠程度来分析其稳定性和随机性。首先利用逆向云发生器生成各自的云模型，其次通过正向云发生器生成云图，然后结合云模型和云图分析可变集模型的稳定性和随机性。具体生成算法见文献[14]。

1.2.1 评价指标值灵敏度分析

工程方案评判指标值的不确定性将直接影响到决策结果的稳定性，分析其变化对决策结果的影响是整个灵敏度分析的基础。本文仅对单指标灵敏度进行分析，即每次只考虑一个指标值的变化，其他指标值不变，统计各备选方案排序变化情况，确定保持最优方案不变的取值区间。引入云模型理论进行单指标灵敏度分析，具体步骤如下：

(1)假定评判指标 r'_{11} 的可能取值区间为 $(0,r'')$，指标归一化后值的区间在 $[0,1]$ 内。

(2)给 r'_{11} 赋初值 r_0，一般取 $r_0=0.01$，步长确定为 $\Delta r=0.01$。

(3)其他指标值不变，利用可变集模型计算备

选工程方案的综合评价值。

(4)令 $r'_{11}\rightarrow r'_{11}+\Delta r$,重复步骤(3),直到 $r'_{11}=r''$。

(5)重复以上步骤,依次统计在其他指标值变化的整个取值区间各备选方案的综合评价值。

(6)以各备选方案在指标值变化情况下所得的综合评价值为样本数据,通过逆向云得到各备选方案的云模型(E_x,E_n,H_e),然后生成云图,即可分析各备选方案在单个指标变化下排序结果的鲁棒性。

1.2.2 评价指标权重灵敏度分析

除了指标值的变化,研究指标权重的变化对决策结果的影响也尤为重要。指标权重之和应等于1,假设所有备选方案的指标属性值不变。

多个权重同时变化灵敏度分析具体步骤如下:

(1)给 ω_1 赋初值 ω_0,一般取 $\omega_0=0.01$。

(2)用计算机生成1组随机权重 $\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_j,\cdots,\omega_y$,满足权重之和为 $1-\omega_0$,形成1组随机权重集合 $W_1=\{\omega_0,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_j,\cdots,\omega_y\}$。

(3)根据以上得到的随机权重集合,利用可变模型计算备选方案的综合评价值。

(4)改变 ω_1 为 $\omega_1+\omega_0$,然后重复以上步骤(2)~(3),直到 $\omega_1=1$,即可得到各备选方案综合评价值矩阵集合。

(5)利用同样的方法分别对 $\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_j,\cdots,\omega_y$ 进行灵敏度分析。

(6)根据 $\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_j,\cdots,\omega_y$ 的各备选综合评价值作为样本数据,计算其云模型,生成云图即可分析不同综合评价方法的决策结果的权重变化下的鲁棒性。

1.2.3 基于云模型的工程方案灵敏度分析方法

对河湖水系连通工程方案决策结果在指标值和权重的整个取样空间进行灵敏度分析,首先通过指定各评判指标值或评判指标权重的变化范围,将可变集模型计算各备选方案评价值作为样本数据,通过1.2.1节和1.2.2节计算各备选方案的云模型参数,并生成对应的云图。

利用云模型参数和云图可以从以下两个方面分析工程方案决策结果的灵敏度:①在可变集模型评价法下横向对比各备选工程方案之间的排序稳定情况,首先根据方案的期望 E_x 排序,期望越大稳定性越好;若期望 E_x 相同,则熵 E_n 越小(即稳定性越好)排序稳定性越好,若期望 E_x 和熵 E_n 都相同,则超熵 H_e 越小(即随机性越小)排序稳定性越好。②当利用上述横向比较难以确定可变模型的鲁棒性时,进而根据云图纵向对比各可变模型之间决策结果的稳定情况,若最优方案的云分布与其他方案重叠越少,该方法得到的决策结果鲁棒性越好。

2　结果与分析

2.1　评价对象

浙北地区的水供需矛盾主要表现为嘉兴市水质型缺水、杭州市工程型缺水(局部资源型和水质型缺水),且已成为制约该地区经济和社会可持续发展的瓶颈。为此浙江省发展和改革委员会组织了水利厅、建设厅、环保局以及有关科研设计单位,从综合性、宏观性的层面,开展了浙北引水工程前期研究工作,形成了《浙北引水工程前期研究报告》,拟定了新安江方案、富春江方案和太湖-富春江方案3个浙北引水方案,见表1。有关工程的详细参数参见文献[20]。

表1　备选工程方案

Tab.1　Alternative project schemes

方案名称	方案代号	方案描述
新安江方案	S1	嘉兴市和杭州市区均从新安江水库直接引水。取水口位置拟定在新安江水电站大坝上游的富文湾。
富春江方案	S2	嘉兴市和杭州市区都从新安江(富春江)水电站下游取水,以利用电站的发电尾水作为引水水源。取水口位置初定富春江富阳里山附近。
太湖-富春江方案	S3	嘉兴市和杭州市区分别从太湖和富春江就近取水,即采用分区供水,嘉兴市从南太湖南浔附近的吴溇取水,杭州市区从富春江富阳里山附近取水。

2.2　综合评价结果分析

根据文献[20]提供的指标值,将河湖水系连通工程评判指标的优劣程度分为5个级:1级(好)、2级(较好)、3级(一般)、4级(较差)、5级(差)。

根据参数 $\alpha=1$ 和 $p=1$、参数 $\alpha=1$ 和 $p=2$、参数 $\alpha=2$ 和 $p=1$ 与参数 $\alpha=2$ 和 $p=2$,利用上述组合的4种综合相对隶属度模型计算隶属度,再对隶属度值进行归一化,可以得到归一化的隶属度,计算结果见表2。其中相对差异度用RDD(Relative difference degree)表示,综合相对隶属度用CRMD(Comprehensive relative membership degree)表示,级别特征值用RFV(Rank feature value)表示。

从表2可看出,不同参数 α 和 p 的组合计算的同种方案的级别特征值不同。对S1方案,计算的级别特征值分别为3.10、3.10、2.84和2.65,前2种组合计算的方案处于3级和4级之间,接近3级;后2种组合计算的方案处于2级和3级之间,接近于3级;级别特征值从大向小转变,即等级低向等级高的方案转移。对S2方案,计算级别特征值分别为

表 2 各方案综合评价的 RFV、RDD、CRMD

Tab. 2 RFV, RDD and CRMD of comprehensive valuation for three project schemes

参数取值	方案	RFV	CRMD	RDD
$\alpha=1,p=1$	S1	3.10	0.48	-0.05
	S2	2.53	0.62	0.24
	S3	2.23	0.69	0.39
$\alpha=2,p=1$	S1	3.10	0.48	-0.05
	S2	2.25	0.69	0.37
	S3	1.59	0.85	0.71
$\alpha=1,p=2$	S1	2.84	0.54	0.08
	S2	2.84	0.54	0.08
	S3	2.69	0.58	0.16
$\alpha=2,p=2$	S1	2.65	0.59	0.18
	S2	2.89	0.53	0.06
	S3	2.45	0.64	0.27

2.53、2.25、2.84 和 2.89,4 种组合计算的特征值均处于 2 级和 3 级之间,级别特征值先从大到小,然后从小变大。对太湖-富春江 S3 方案,计算级别特征值分别为 2.23、1.59、2.69 和 2.45,其中 1 种组合在 1 级和 2 级之间,另 3 种组合在 2 级和 3 级之间。

根据级别特征值,对相同参数的方案之间排序来看,前 2 种组合计算的方案由大到小排序:S3、S2、S1;第 3 种组合计算的方案由大到小排序:S3、S1、S2;第 4 种组合计算的方案是 S3 优于 S1 和 S2,S1 和 S2 没有差异。第 1 种组合计算的 S1 方案处于 3 级和 4 级之间,S2 和 S3 方案处于 2 级和 3 级之间;第 2 种组合计算的 S1 方案处于 3 级和 4 级之间,S2 方案处于 2 级和 3 级之间,S3 方案处于 1 级和 2 级之间;第 3 种和第 4 种组合计算的 S1、S2 和 S3 方案均处于 2 级和 3 级之间,三者之间没有明显差别。

从不同参数组合来看,不同参数组合对 3 种方案的可辨识度不同。第 1 种组合,将 S1 和 S2、S3 方案区分出来,能够识别出较差方案;第 2 种组合,将 S1、S2、S3 方案区分出来;第 3 种和第 4 种组合,没有很好的识别度,S1、S2、S3 方案基本处于同一类别,差别不是太大。

根据相对差异度分析,在前 2 种组合方案中,S1 方案相对差异度均为 -0.05,S2 方案相对差异度分别为 0.24 和 0.37,S3 方案相对差异度分别为 0.39 和 0.71;据相对差异度概念分析,新安江方案与其他两个方案具有质的区别,为不推荐方案,其他两个方案相比较,S3 方案优于 S2 方案;不同的参数组合计算出的相对差异度不同,第 2 种组合计算的相对差异度值比第 1 种计算的差异度值要大,且相对差异度值增加的倍数也不一样,通过第 2 种组合相对差异度计算,可知 S3 方案为最优方案。

目前其他领域在使用可变集进行评价时,将 4 种参数组合的可变模型的计算均值作为最终评价结果。而本文实例证明,由于不同的可变模型计算出来的排序不一致,求其平均值就会导致不能细致区分优劣,这也说明多属性指标的模糊性导致了采用不同的可变模型计算评价结果的不确定性。据质量互变定理,相对差异度是衡量备选方案与理想值 1 的差异程度,结合相对差异度与可变模型中最大相对差异度与最小相对差异度的差值,可以选择可变模型($\alpha=1,p=1$)和($\alpha=2,p=1$)计算结果均值作为评价结果,或者直接选择可变模型($\alpha=1,p=1$)计算结果为评价结果。

通过结合级别特征值和相对差异度值评价结果合理性分析,并最终确定可变模型,克服了传统的单纯以 4 种模型计算均值作为评价结果的局限性。

2.3 不同准则的评价结果分析

本文 2.2 节是综合资源、经济、社会、环境和工程等各准则后的综合评估结果,但是没有反映出不同方案各准则的优劣分析。在实际工程案例中,可能不同决策者侧重的角度不同,需要分别对五大准则下的评价结果进行分析,以增进对工程的了解程度。表 3 为针对各准则计算的级别特征值、综合相对隶属度和相对差异度。下面分资源准则情景、经济准则情景、社会准则情景、环境准则情景和工程准则情景分别加以解析。

(1)资源准则情景

在 4 种参数组合情况下,S1 和 S2 方案分别处于 3 级和 4 级之间,S3 方案处于 1 级和 2 级之间,从相对差异度来看,S1 方案的资源准则相对差异度 D_{Z1}、S2 方案相对差异度 D_{Z2}、S3 方案相对差异度 D_{Z3} 满足以下关系:$D_{Z1}D_{Z2}<0$ 和 $D_{Z2}D_{Z3}<0$,根据质量互变定理,S3 方案和 S1、S2 方案有质的变化,明显优于 S1 方案和 S2 方案。

(2)经济准则情景

从相对差异度来看,S1 方案的经济准则相对差异度 D_{J1}、S2 方案相对差异度 D_{J2}、S3 方案相对差异度 D_{J3} 满足以下关系:$D_{J1}D_{J2}<0$ 和 $D_{J1}D_{J3}<0$,根据质量互变定理,S2、S3 方案和 S1 方案有质的变化,两者明显优于 S1 方案。从参数组合情况来看,不同参数组合得到的结果略有差异,尤其表现在 S2 和 S3 方案的等级上,参数组合($\alpha=1,p=1$)和参数组合($\alpha=1,p=2$)情况下级别特征值 S2 方案小于 S3 方案,参数组合($\alpha=2,p=1$)和参数组合($\alpha=2,p=2$)情况下 S3 方案小于 S2 方案,但均表明 S2 方案和 S3 方案的等级较为接近,且明显高于 S1 方案。

表 3　各方案基于不同准则评价的 RFV、RDD、CRMD

Tab. 3　RFV, RDD and CRMD of evaluations based on different criteria for three project schemes

参数取值	备选方案	资源准则			经济准则			社会准则			环境准则			工程准则		
		RFV	CRMD	RDD	RFV	CRMD	RDD	RFV	CRMD	RDD	RFV	CRMD	RFV	CRMD	RFV	CRMD
$\alpha=1$, $p=1$	S1	3.76	0.31	−0.38	4.10	0.23	−0.55	2.84	0.54	0.08	2.05	0.74	0.48	4.46	0.14	−0.73
	S2	3.33	0.42	−0.17	1.93	0.77	0.54	1.86	0.78	0.57	2.83	0.54	0.08	1.98	0.76	0.51
	S3	1.67	0.83	0.67	2.04	0.74	0.48	1.84	0.79	0.58	3.12	0.47	−0.06	1.91	0.77	0.54
$\alpha=2$, $p=1$	S1	3.47	0.38	−0.24	4.51	0.12	−0.75	2.73	0.57	0.14	1.50	0.88	0.75	4.74	0.06	−0.87
	S2	3.17	0.46	−0.08	1.73	0.82	0.64	1.49	0.88	0.76	3.19	0.45	−0.09	1.94	0.77	0.53
	S3	1.67	0.83	0.67	1.28	0.93	0.86	1.41	0.90	0.80	3.41	0.40	−0.21	1.79	0.80	0.61
$\alpha=1$, $p=2$	S1	3.59	0.35	−0.30	3.90	0.28	−0.45	2.92	0.52	0.04	2.03	0.74	0.49	4.41	0.15	−0.71
	S2	3.31	0.42	−0.16	2.10	0.73	0.45	2.18	0.71	0.41	2.95	0.51	0.02	1.86	0.79	0.57
	S3	1.80	0.80	0.60	2.32	0.67	0.34	2.20	0.70	0.40	3.25	0.44	−0.13	1.82	0.80	0.59
$\alpha=2$, $p=2$	S1	3.26	0.43	−0.13	4.47	0.13	−0.74	2.94	0.52	0.03	1.50	0.88	0.75	4.73	0.07	−0.87
	S2	3.17	0.46	−0.09	1.82	0.80	0.59	1.69	0.83	0.66	3.36	0.41	−0.18	1.67	0.83	0.66
	S3	1.81	0.80	0.60	1.62	0.85	0.69	1.71	0.82	0.65	3.58	0.36	−0.29	1.61	0.85	0.70

(3)社会准则情景

从级别特征值看,参数组合($\alpha=1, p=1$)、($\alpha=2, p=1$)和($\alpha=2, p=2$)情况下,S1 方案在 2 级和 3 级之间且偏 3 级,S2 和 S3 方案在 1 级和 2 级之间且偏 2 级;参数组合($\alpha=1, p=2$)情况下,3 个方案在 2 级和 3 级之间,S1 方案距 3 级较近,S2 和 S3 方案距 2 级较近。从相对差异度来看,4 种参数组合计算的相对差异度值,S2 和 S3 方案远大于 S1 方案,S2 和 S3 方案相近。

(4)环境准则情景

从级别特征值来看,S1 方案优于 S2 和 S3 方案;参数组合($\alpha=1, p=1$)和参数组合($\alpha=1$、$p=2$)情况下,S1 方案接近 2 级,S2 和 S3 方案略优于 3 级和略劣于 3 级,S2 和 S3 方案接近;参数组合($\alpha=2, p=1$)和参数组合($\alpha=2$、$p=2$)情况下,S1 方案优于 2 级,S2 和 S3 方案均劣于 3 级,且两者较为接近。从相对差异度来看,4 种参数组合计算均表明,S1 方案优于 S2 和 S3 方案;参数组合($\alpha=1, p=1$)和参数组合($\alpha=1$、$p=2$)情况下,S1 方案的相对差异度 D_{H1}、S2 方案的相对差异度 D_{H2}、S3 方案的相对差异度 D_{H3}的关系:$D_{H1}D_{H3}<0$,$D_{H2}D_{H3}<0$,说明 S1 和 S2 方案优于 S3 方案,D_{H2}远大于 D_{H3},说明 S2 方案优于 S3 方案,但 S2 方案接近于 0,亦不是较优方案;参数组合($\alpha=2, p=1$)和参数组合($\alpha=2$、$p=2$)情况下,$D_{H1}D_{H3}<0$,$D_{H1}D_{H2}<0$,说明 S1 方案优于 S2 和 S3 方案,且有质的不同。

(5)工程准则情景

从级别特征值来看,4 种参数组合下的 S1 方案在 4 级和 5 级之间,S2 和 S3 方案在 1 级和 2 级之间,且两者较为接近;从相对差异度来看,4 种参数组合下的 S2 和 S3 方案较为接近,均优于 S1 方案,S1 方案的相对差异度 D_{G1}、S2 方案的相对差异度 D_{G2}、S3 方案的相对差异度 D_{G3}的关系为:$D_{G1}D_{G2}<0$,$D_{G1}D_{G3}<0$,说明 S2 和 S3 方案优于 S1 方案,且有质的变化。

2.4　指标灵敏度分析

2.4.1　综合评价的指标灵敏度分析

为使 4 种可变模型计算各方案的决策结果更加直观,以指标变动下的方案综合评价值为样本数据,通过逆向云和正向云计算各方案的云模型(E_x, E_n, H_e),结果如表 4 所示,生成的正态云图见图 2。

从综合评价结果来看,可变模型($\alpha=1, p=1$)计算结果 S3 期望最优,S2 方案次之,S1 方案较差,3 个方案的熵和超熵值接近,说明稳定性和随机性相差不大;可变模型($\alpha=2, p=1$)计算结果排序与可变模型($\alpha=1, p=1$)组合相似,但 S2 方案和 S3 方案的等级值有所提升,S1 方案期望变化不大;可变模型($\alpha=1, p=2$)和($\alpha=2, p=2$)计算结果表明,S2 方案期望最差,S1 方案次之,S3 方案最优。不同可变模型计算的排序有所变化。

从图 2 可看出,可变模型($\alpha=1, p=1$)计算结果表明,在单一指标变化情况下,S1 方案的云图和 S2、S3 方案的没有重叠,说明 S1 方案是较差方案,S2 和 S3 方案重叠较少,S3 方案比 S2 方案优;可变模型($\alpha=2, p=1$)计算结果表明,S3 方案和 S1、S2 方案的云图没有重叠,说明 S3 方案保持最优的稳定性没有改变,S2 和 S1 方案云图重叠少,说明指标变化情况下,S2 方案始终优于 S1 方案,S1 方案是差方案。可变模型($\alpha=1, p=2$)计算结果表明,S1 和 S2 方案重叠部分多,指标变化下,较易发生变化,S3 方案和 S1、S2 方案云图也有所重叠,在指标变化情况下,排序也有可能发生变化;可变模型($\alpha=2, p=2$)

表 4 指标变化下各方案评价值云模型参数

Tab. 4 Cloud model parameters of evaluation values under different index values

准则	参数取值	S1	S2	S3
综合	$\alpha=1,p=1$	(3.05,0.05,0.05)	(2.54,0.05,0.04)	(2.25,0.05,0.04)
	$\alpha=2,p=1$	(3.00,0.10,0.09)	(2.27,0.08,0.07)	(1.61,0.06,0.04)
	$\alpha=1,p=2$	(2.82,0.03,0.05)	(2.85,0.03,0.05)	(2.69,0.03,0.06)
	$\alpha=2,p=2$	(2.63,0.05,0.10)	(2.89,0.05,0.09)	(2.47,0.06,0.11)
经济	$\alpha=1,p=1$	(3.85,0.22,0.10)	(2.03,0.19,0.06)	(2.13,0.21,0.11)
	$\alpha=2,p=1$	(4.19,0.23,0.19)	(1.79,0.14,0.09)	(1.43,0.26,0.17)
	$\alpha=1,p=2$	(3.72,0.19,0.12)	(2.21,0.19,0.10)	(2.38,0.15,0.13)
	$\alpha=2,p=2$	(4.21,0.28,0.25)	(1.92,0.21,0.19)	(1.75,0.28,0.23)
环境	$\alpha=1,p=1$	(2.15,0.25,0.18)	(2.85,0.20,0.17)	(3.10,0.22,0.20)
	$\alpha=2,p=1$	(1.67,0.41,0.29)	(3.14,0.33,0.30)	(3.34,0.38,0.33)
	$\alpha=1,p=2$	(2.13,0.22,0.21)	(2.96,0.16,0.18)	(3.23,0.16,0.20)
	$\alpha=2,p=2$	(1.66,0.34,0.36)	(3.32,0.24,0.33)	(3.52,0.27,0.35)
资源	$\alpha=1,p=1$	(3.63,0.27,0.15)	(3.28,0.29,0.14)	(1.89,0.31,0.16)
	$\alpha=2,p=1$	(3.41,0.28,0.23)	(3.15,0.29,0.33)	(1.83,0.27,0.29)
	$\alpha=1,p=2$	(3.48,0.28,0.20)	(3.26,0.24,0.18)	(2.04,0.37,0.21)
	$\alpha=2,p=2$	(3.22,0.26,0.36)	(3.15,0.27,0.36)	(2.00,0.39,0.40)
社会	$\alpha=1,p=1$	(2.86,0.20,0.10)	(1.98,0.19,0.05)	(1.95,0.19,0.06)
	$\alpha=2,p=1$	(2.76,0.32,0.16)	(1.57,0.14,0.07)	(1.50,0.14,0.08)
	$\alpha=1,p=2$	(2.92,0.13,0.12)	(2.25,0.18,0.10)	(2.27,0.19,0.10)
	$\alpha=2,p=2$	(2.94,0.20,0.17)	(1.81,0.22,0.07)	(1.82,0.22,0.08)
工程	$\alpha=1,p=1$	(4.17,0.41,0.17)	(2.18,0.37,0.23)	(2.13,0.38,0.24)
	$\alpha=2,p=1$	(4.47,0.50,0.32)	(2.02,0.49,0.30)	(1.91,0.52,0.32)
	$\alpha=1,p=2$	(4.09,0.47,0.18)	(2.15,0.44,0.21)	(2.12,0.45,0.21)
	$\alpha=2,p=2$	(4.39,0.59,0.39)	(1.91,0.54,0.38)	(1.86,0.56,0.38)

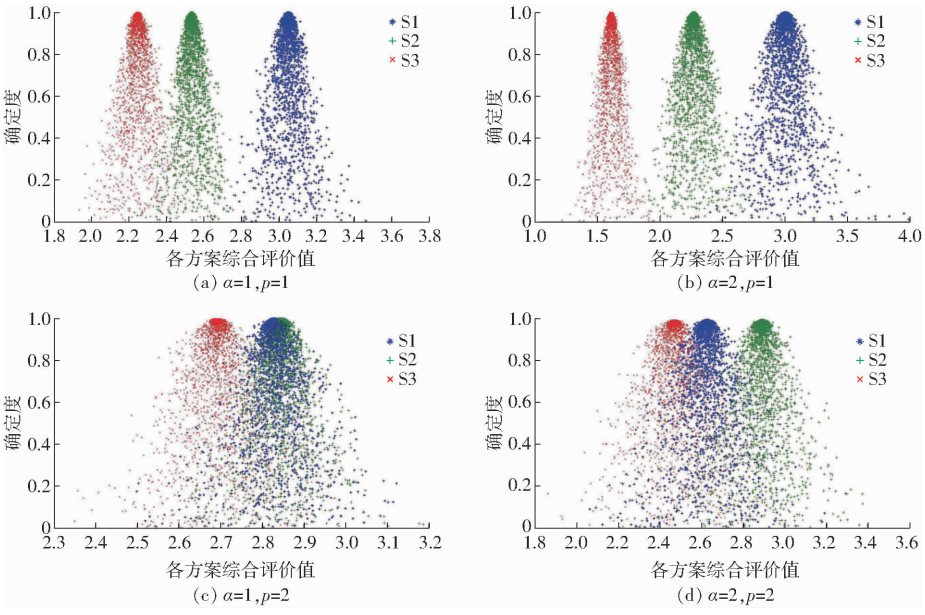

图 2 指标变化下的各方案综合评价值云图

Fig. 2 Cloud images of comprehensive evaluation values under different index values

计算结果表明,S3 和 S1、S2 方案均有多部分重叠,S2 和 S3 方案排序较易发生变化。

综上分析可以得出,可变模型($\alpha=1,p=1$)和($\alpha=2,p=1$)计算 3 个工程方案的排序较稳定,应用在工程方案优选结果鲁棒性更好,其排序稳定性几乎不受单一指标值变化的影响。这也证明了传统的以 4 种可变模型计算平均值作为评价结果存在不足。

2.4.2 不同准则评价的指标灵敏度分析

分析资源、经济、社会、环境和工程准则下的评

价图的敏感性。

(1)资源准则评价值分析

如表 4 所示，在指标值发生变化下，4 种可变模型计算结果，S3 方案期望最高，S2 方案期望略高于 S1 方案，对同一可变模型，3 个方案的熵值和超熵值较为接近，说明同一参数组合计算结果的稳定性和随机性较为一致。从图 3 分析，S3 方案云图和 S1、S2 方案重叠较少，说明 S3 方案维持最优方案的鲁棒性较强；S1 和 S2 方案云图有所重叠，可变模型($\alpha=2,p=2$)参数组合下几乎完全重叠。

(2)经济准则评价值分析

如表 4 和图 4 分析，在指标值发生变化下，S2 和 S3 方案的期望远高于 S1 方案，且这 2 个方案云图与 S1 方案重叠较少，说明 S2 和 S3 方案优于 S1 方案的排序鲁棒性强；S2 和 S3 方案不同可变模型计算结果略有不同，可变模型($\alpha=1,p=1$)和($\alpha=1,p=2$)计算的 S2 方案期望略高于 S3 方案，而可变模型($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=2,p=2$)的 S3 方案期望略高于 S2 方案，且 2 个方案不同可变模型计算结果云图的重叠度较高，说明这 2 个方案在指标变化下极易发生变化。

(3)社会准则评价值分析

如表 4 分析，在指标值发生变化下，S2 和 S3 方案的期望远高于 S1 方案；S2 和 S3 方案不同可变模型计算结果略有不同，但是级别特征值非常接近，不易区分 2 个方案的优劣。从图 5 分析，S2 和 S3 方

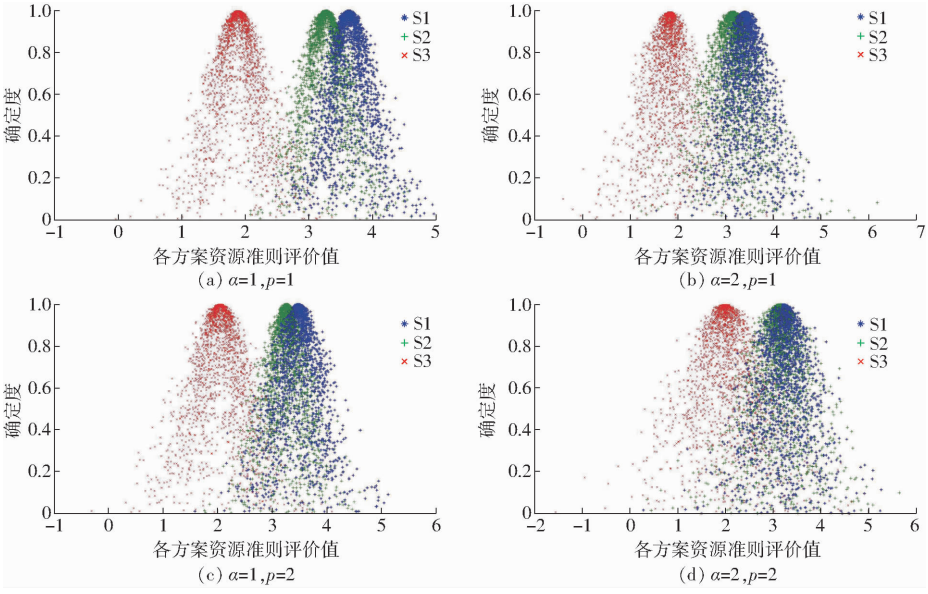

图 3　指标变化下的各方案资源准则评价值云图

Fig. 3　Cloud images of evaluations based on resource criteria under different index values

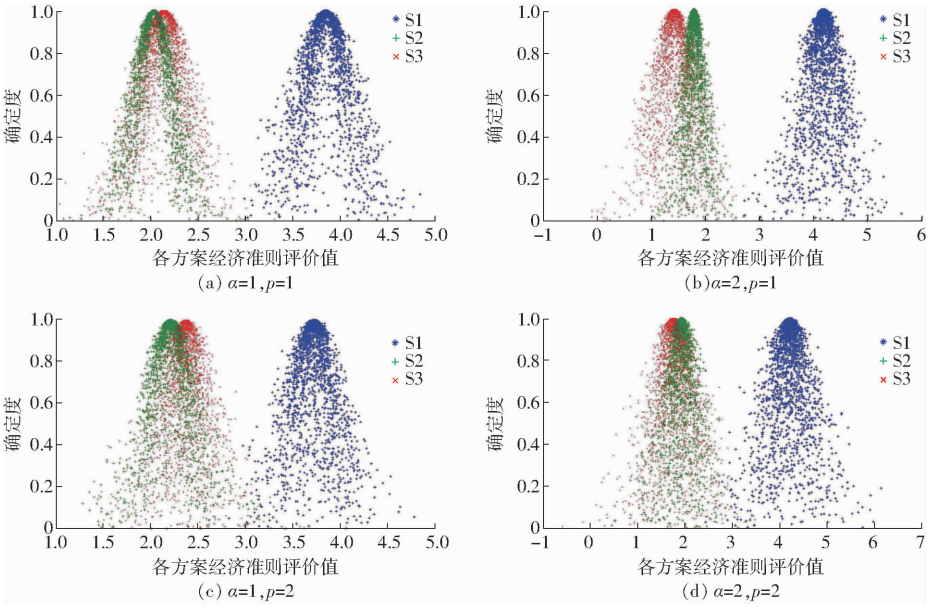

图 4　指标变化下的各方案经济准则评价值云图

Fig. 4　Cloud images of evaluations based on economical criteria under different index values

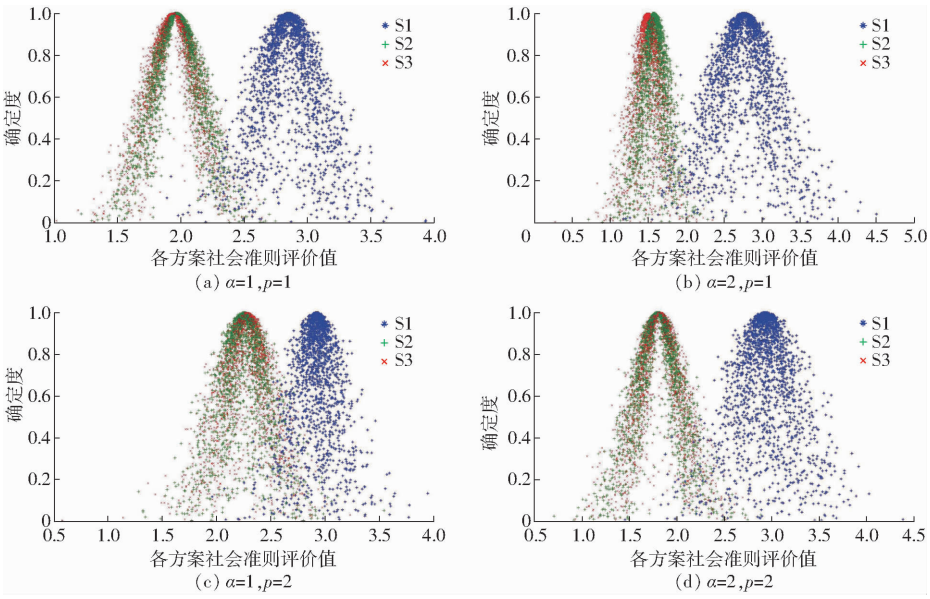

图 5 指标变化下的各方案社会准则评价值云图

Fig. 5 Cloud images of evaluations based on social criteria under different index values

案云图和 S1 方案重叠较少,说明 S2 和 S3 方案优于 S1 方案的排序不易发生变化,但是 S2 和 S3 方案的云图几乎完全重叠,说明这 2 个方案在指标变化下排序极易发生变化。

(4)环境准则评价值分析

如表 4 分析,在指标值变化下,S1 方案期望高于 S2 和 S3 方案,S2 期望略高于 S3 方案;可变模型在 α 相同下,$p=2$ 与 $p=1$ 相比,S1 方案期望略有增高,S2 和 S3 方案略有降低,但变化均不大;可变模型在 p 相同下,$\alpha=2$ 与 $\alpha=1$ 相比,S1 方案期望提升较多,S2 和 S3 方案期望有所降低。从图 6 分析,S1 方案维持排序稳定性要好于 S2 和 S3 方案,S2 和 S3 方案云图重叠度高,说明这 2 个方案在指标变化下排序极易发生变化。

(5)工程准则评价值分析

如表 4 分析,在指标值发生变化下,S2 和 S3 方案期望高于 S1 方案,S3 期望略高于 S2 方案。如图 7 所示,S2、S3 方案和 S1 方案重叠较少,说明这 2 个方案优于 S1 方案的排序稳定性强;S2 和 S3 方案重叠度高,这说明指标变化下,S2 和 S3 方案的排序极易发生变化。

2.5 权重灵敏度分析

2.5.1 综合评价的权重灵敏度分析

分别在 4 种参数组合下,以指标权重变动下的方案综合评价值为样本数据,通过逆向云和正向云计算各方案的云模型(E_x, E_n, H_e),结果如表 5 所示。

从综合评价结果来看,可变模型($\alpha=2$,$p=2$)

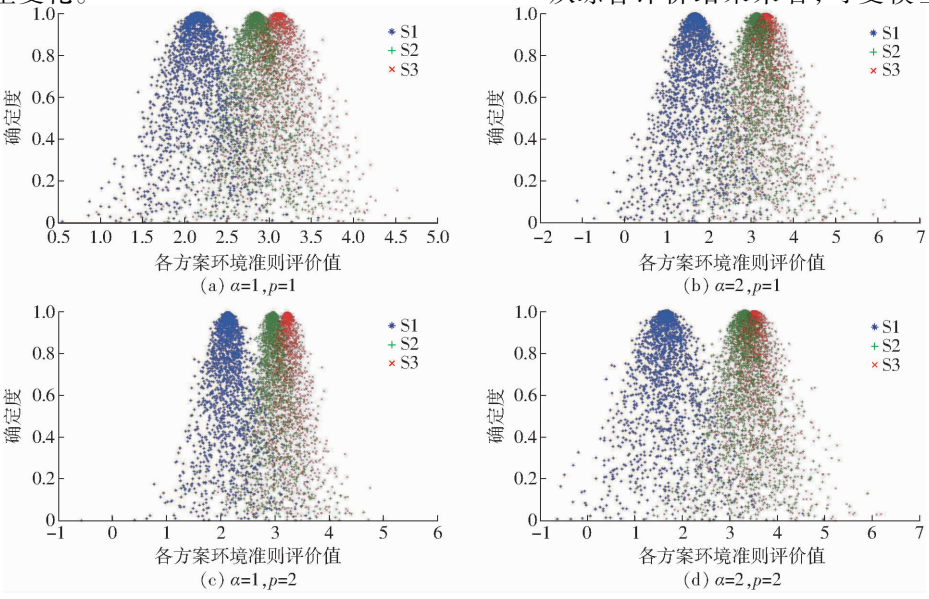

图 6 指标变化下的各方案环境准则评价值云图

Fig. 6 Cloud images of evaluations based on environmental criteria under different index values

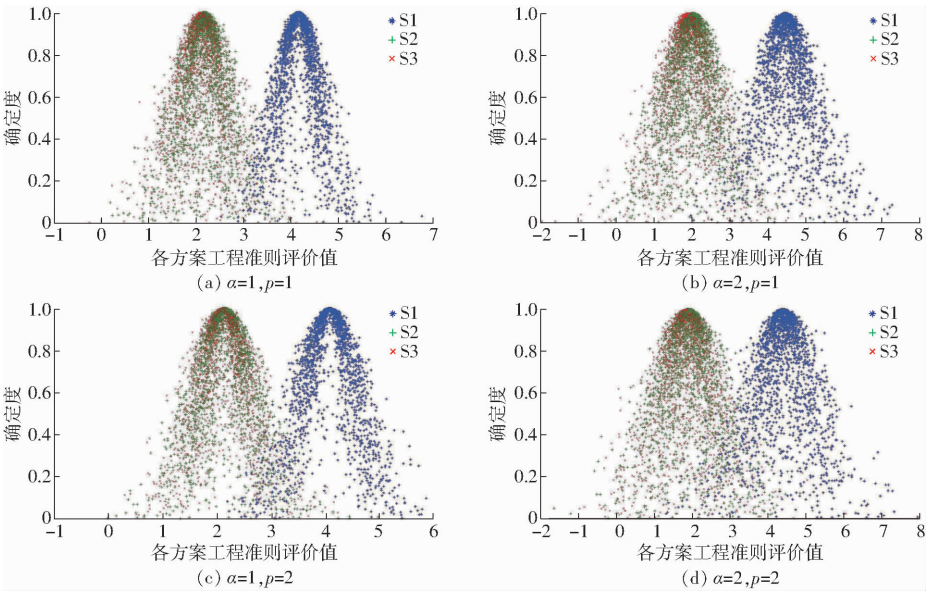

图 7　指标变化下的各方案工程准则评价值云图

Fig. 7　Cloud images of evaluations based on engineering criteria under different index values

表 5　指标权重变化下各方案评价值云模型参数

Tab. 5　Cloud model parameters of evaluation values under different index weights

准则	参数取值	S1	S2	S3
综合	$\alpha=1,p=1$	(3.42,0.72,0.27)	(2.27,0.61,0.24)	(2.12,0.67,0.31)
	$\alpha=2,p=1$	(3.51,1.07,0.12)	(2.09,0.85,0.22)	(1.83,0.93,0.38)
	$\alpha=1,p=2$	(3.33,0.93,0.15)	(2.38, 0.82, 0.10)	(2.29,0.92,0.12)
	$\alpha=2,p=2$	(3.38,1.20,0.21i)	(2.26,1.02, 0.13i)	(2.10,1.13,0.22)
经济	$\alpha=1,p=1$	(3.62,0.61,0.35)	(2.08, 0.54, 0.34)	(2.25,0.78,0.24)
	$\alpha=2,p=1$	(3.76,0.76,0.50)	(1.88, 0.65, 0.45)	(1.93,1.09,0.33)
	$\alpha=1,p=2$	(3.47,0.73,0.31)	(2.23, 0.67, 0.32)	(2.42,0.91,0.09)
	$\alpha=2,p=2$	(3.61,0.91,0.40)	(2.01, 0.77, 0.46)	(2.21,1.23,0.15i)
环境	$\alpha=1,p=1$	(2.83,0.67,0.30)	(2.45, 0.66, 0.12)	(2.47,0.76,0.08)
	$\alpha=2,p=1$	(2.69,0.99,0.11i)	(2.32,0.96, 0.28i)	(2.25,1.07,0.39i)
	$\alpha=1,p=2$	(2.85,0.72,0.32)	(2.55,0.72, 0.08)	(2.56, 0.81,0.07)
	$\alpha=2,p=2$	(2.73,1.01, 0.07)	(2.45,0.99,0.29i)	(2.40,1.08,0.38i)
资源	$\alpha=1,p=1$	(4.05, 0.48,0.13)	(3.04, 0.53, 0.22)	(2.00, 0.56, 0.38)
	$\alpha=2,p=1$	(4.25, 0.70, 0.14i)	(2.96,0.73, 0.21)	(1.78, 0.68, 0.59)
	$\alpha=1,p=2$	(3.95, 0.54, 0.05)	(3.05, 0.58, 0.22)	(2.18, 0.69, 0.34)
	$\alpha=2,p=2$	(4.11, 0.73, 0.15i)	(3.02, 0.79, 0.17)	(1.97, 0.86, 0.53)
社会	$\alpha=1,p=1$	(2.98, 0.78, 0.29)	(1.94, 0.50,0.31)	(1.80,0.49, 0.41)
	$\alpha=2,p=1$	(2.90, 1.19, 0.14i)	(1.70, 0.67, 0.35)	(1.58, 0.64, 0.52)
	$\alpha=1,p=2$	(2.99, 0.82, 0.32)	(2.13, 0.61, 0.27)	(2.01, 0.63,0.38)
	$\alpha=2,p=2$	(2.94, 1.18, 0.11)	(1.91,0.73, 0.40)	(1.79, 0.76, 0.53)
工程	$\alpha=1,p=1$	(4.24,0.32,0.19)	(2.09,0.41, 0.01i)	(2.02,0.46,0.06i)
	$\alpha=2,p=1$	(4.31,0.47,0.18)	(2.14,0.63,0.22i)	(2.02,0.71, 0.27i)
	$\alpha=1,p=2$	(4.18,0.35,0.18)	(2.08, 0.43, 0.04)	(2.02, 0.47, 0.05)
	$\alpha=2,p=2$	(4.22,0.51,0.16)	(2.13,0.630.20i)	(2.03,0.69,0.23i)

计算的熵值大于样本方差均方根值，说明该模型计算结果在指标权重变化下的稳定性非常差，不宜用作方案评价；可变模型（$\alpha=1,p=1$）、（$\alpha=2,p=1$）和（$\alpha=1,p=2$）计算的 S3 期望最优，S2 方案次之，S1 方案较差，其中 S2 和 S3 方案级别特征值相差不大，且各方案的熵值和超熵值较为接近，说明稳定性和随机性程度比较接近。

从图 8 可看出，S2 和 S3 方案的云图重叠较多，说明在指标权重变化下，2 个方案的排序较易发生变化；S1 方案和 S2、S3 方案云图也有重叠，说明这 3 种方案的情景下，S1 方案和 S2、S3 方案也有可能发生变化。与可变模型（$\alpha=1,p=1$）相比，可变模型

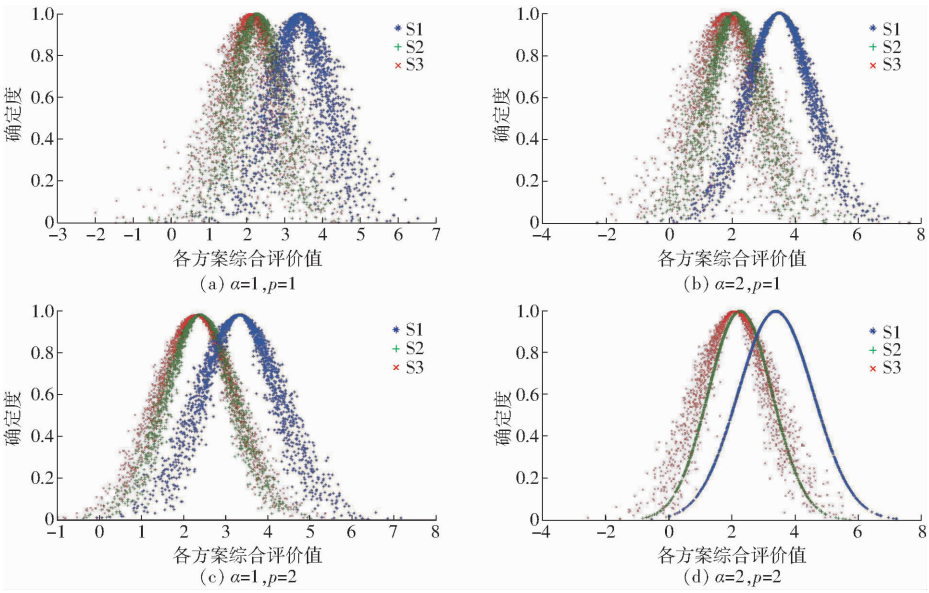

图 8 指标权重变化下的各方案综合评价值云图

Fig. 8 Cloud images of comprehensive evaluation values under different index weights

($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=1,p=2$)计算结果随机性不强,且各自维持稳定性的性质较好。

2.5.2 不同准则评价的权重灵敏度分析

分析资源、经济、社会、环境和工程准则下的评价图的敏感性。

(1)指标权重变化下的资源准则评价值分析

从表 5 可看出,在指标权重变化下,可变模型($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=2,p=2$)灵敏度高,导致计算结果不合理。可变模型($\alpha=1,p=1$)和($\alpha=1,p=2$)计算的 S3 方案期望最高,S2 方案次之,S1 方案期望最低。从图 9 可看出,3 个方案云图均有重叠,说明在指标权重变化下,3 个方案的排序也会发生变化。

(2)指标权重变化下的经济准则评价值分析

从表 5 可看出,在指标权重变化下,可变模型($\alpha=2,p=2$)灵敏度高,导致计算结果不合理。可变模型($\alpha=1,p=1$)、($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=1,p=2$)计算的 S2 方案期望最高,S3 方案次之,S1 方案期望最低,S2 方案期望略高于 S3 方案。从云图 10 可看出,3 个云图方案均有重叠,说明在指标权重变化下,3 个方案的排序也会发生变化,其中 S2 方案和 S3 方案重叠度高,排序更易发生变化。

(3)指标权重变化下的社会准则评价值分析

从表 5 可看出,在指标权重变化下,可变模型($\alpha=2,p=1$)灵敏度高,导致计算结果不合理。可变模型($\alpha=1,p=1$)、($\alpha=1,p=2$)和($\alpha=2,p=2$)计算的 S3 方案期望最高,S2 方案次之,S1 方案期望最低,S3 方案期望略高于 S2 方案。从图 11 可看出,3 个云图方案均有重叠,说明在指标权重变

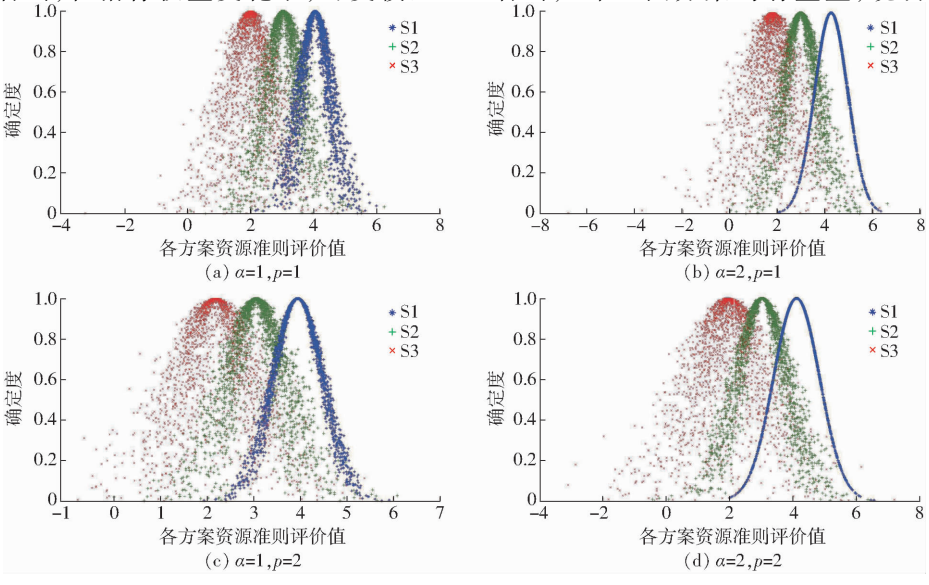

图 9 指标权重变化下的各方案资源准则评价值云图

Fig. 9 Cloud images of evaluations based on resource criteria under different index weights

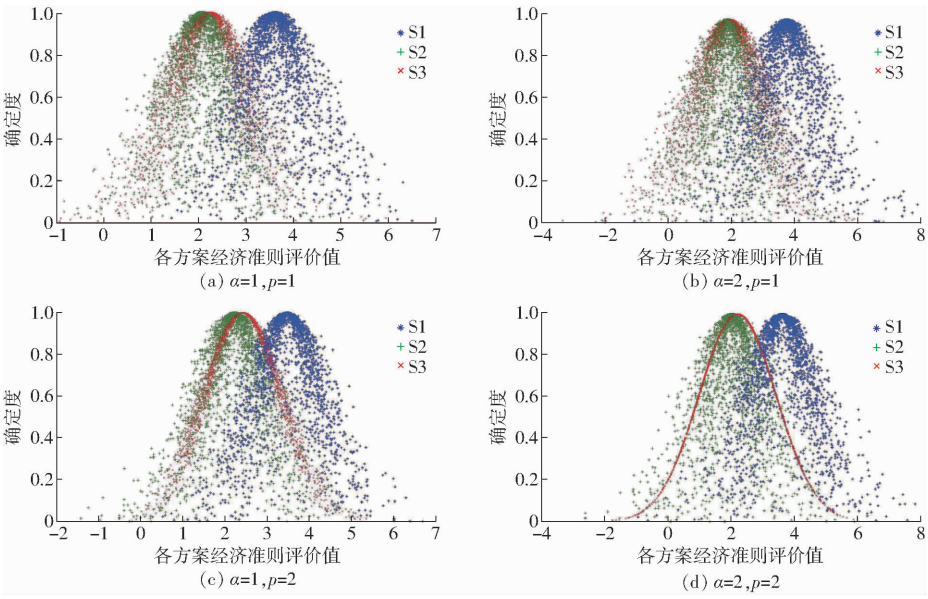

图 10　指标权重变化下的各方案经济准则评价值云图

Fig. 10　Cloud images of evaluations based on economic criteria under different index weights

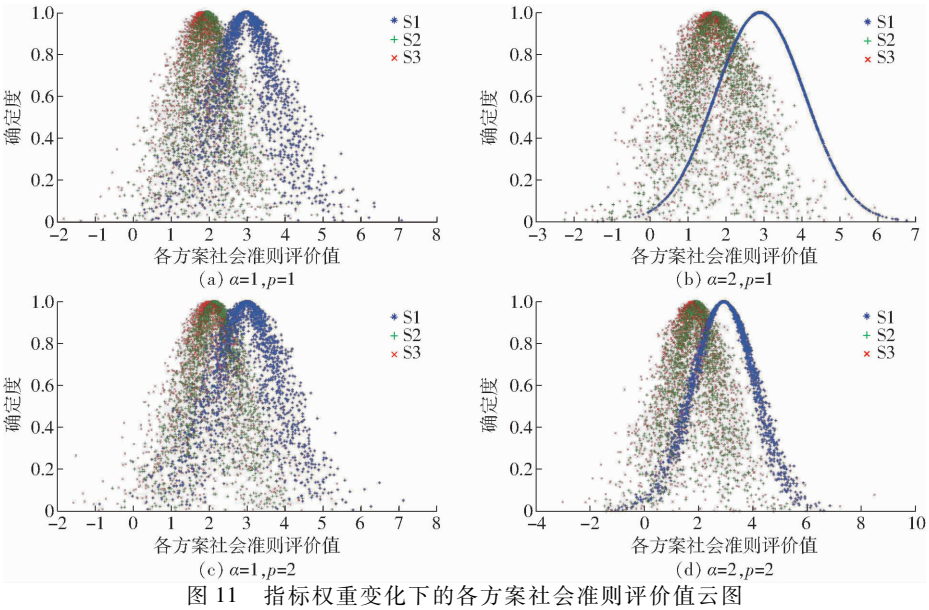

图 11　指标权重变化下的各方案社会准则评价值云图

Fig. 11　Cloud images of evaluations based on social criteria under different index weights

化下,3 个方案的排序也会发生变化,其中 S2 方案和 S3 方案重叠度高,排序更易发生变化。

(4)指标权重变化下的环境准则评价值分析

从表 5 可看出,在指标权重变化下,可变模型($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=2,p=2$)灵敏度高,导致计算结果不合理。可变模型($\alpha=1,p=1$)和($\alpha=1,p=2$)计算的 S3 和 S2 方案期望非常接近,均高于 S1 方案。从图 12 可看出,3 个云图方案均有重叠,说明在指标权重变化下,3 个方案的排序也会发生变化。

(5)指标权重变化下的工程准则评价值分析

从表 5 可看出,在指标权重变化下,可变模型($\alpha=1,p=1$)、($\alpha=2,p=1$)和($\alpha=2,p=2$)灵敏度高,导致计算结果不合理。可变模型($\alpha=1,p=2$)计算的 S3 和 S2 方案期望非常接近,均高于 S1 方案。从图 13 可看出,S2 和 S3 方案云图和 S1 方案几乎没有重叠,说明 S2 和 S3 方案优于 S1 方案的排序稳定性强;S2 和 S3 方案云图重叠度高,说明这 2 个方案排序极易发生变化。

3　结论

(1)提出河湖水系连通工程方案优选决策的可变集原理与方法以及基于云模型的指标值和指标权重灵敏度分析方法。以浙北引水工程的新安江、富春江和太湖-富春江等 3 种方案为研究对象,综合评价和分资源、经济、社会、环境、工程准则评价了 3 种

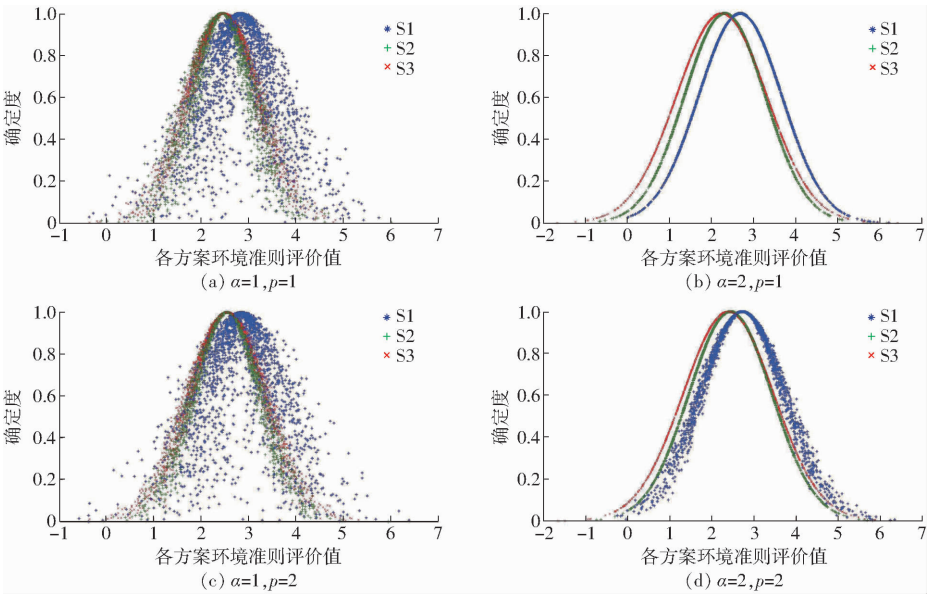

图 12 指标权重变化下的各方案环境准则评价值云图

Fig. 12 Cloud images of evaluations based on environmental criteria under different index weights

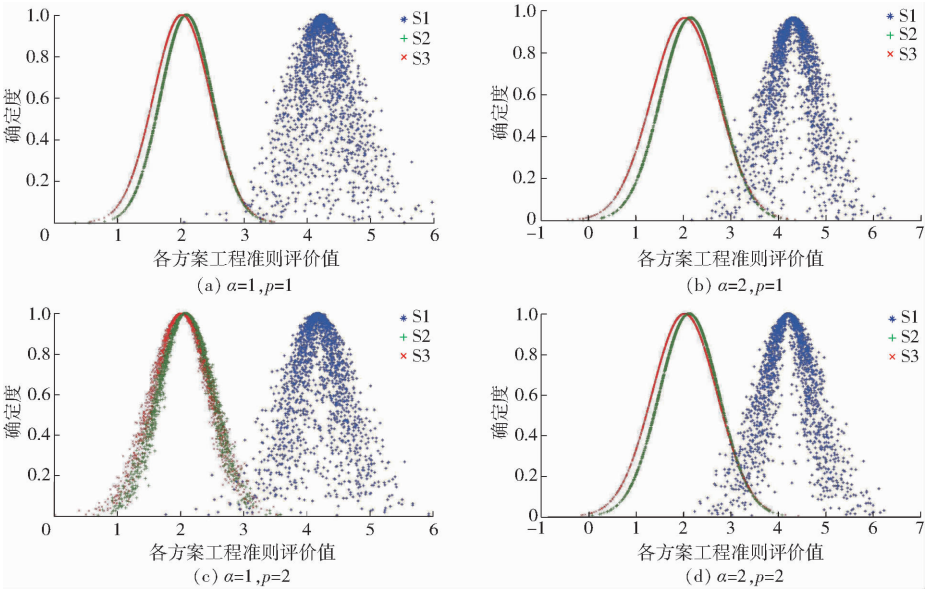

图 13 指标权重变化下的各方案工程准则评价值云图

Fig. 13 Cloud images of evaluations based on engineering criteria under different index weights

方案排序,并基于云模型进行了灵敏度分析。

(2)利用不同(α,p)参数的可变模型,综合评价了 S1、S2 和 S3 等 3 种方案。采用级别特征值和相对差异度相结合的方法进行分析,得出 S3 是最优方案,且说明了 S1 和 S2、S3 具有质的不同。同时,分准则评价了 S1、S2 和 S3 等 3 种方案;从评价结果来看,对同一准则评价,4 种可变模型的评价等级有一定差别,但是对 3 种方案的排序呈现相似性;在资源准则评价方面,S3 最优,S1 和 S2 差异不大;在环境准则评价方面,S1 最优,S2 和 S3 差异不大;在其他准则评价方面,S2 和 S3 均优于 S1,且 S2 和 S3 差异不大。

(3)在指标变化情况下,在综合评价方面,可变模型($\alpha=1$,$p=1$)和($\alpha=2$,$p=1$)的评价云图重叠性不大,说明 3 种方案的排序受指标变化影响不大,而可变模型($\alpha=1$,$p=2$)和($\alpha=2$,$p=2$)的评价云图重叠性较大,说明 3 种方案排序容易发生变化。在分准则评价方面,同一准则的 4 种可变模型的评价云图具有相似性:资源准则评价云图中,S3 和 S1、S2 重叠较少,S1 和 S2 重叠较多;环境准则评价云图中,S1 和 S2、S3 重叠少,S2 和 S3 重叠多;在经济、社会、工程等准则评价云图中,S2、S3 和 S1 重叠少,S2 和 S3 重叠多。云图重叠多,说明方案排序易受指标变化的影响,反之,则影响较少。从上述结果来看,不同指标集对评价结果具有一定的影响。

(4)在指标权重变化情况下,在综合评价方面,4 种参数组合的可变模型评价的云图均有重叠,且 S2 和 S3 重叠度高,说明方案排序易受指标权重的影响。在不同准则评价方面,工程准则评价云图中,S1 和 S2、S3 几乎没有重叠,说明 S1 在工程方面劣于 S2 和 S3;此外,其他准则评价的云图均有重叠,且 S2 和 S3 方案重叠度高,说明这些准则的排序评价易受指标权重的影响。

(5)结合综合评价和不同准则评价的指标灵敏度和指标权重灵敏度分析来看,指标体系对评价结果有一定的影响,这说明该方法需要结合不同的研究对象进行具体分析,选择合适的评价方法。因此,今后还应把建立的方法应用更多算例来验证,总结出普适性规律,深入论证此方法的有效性。

参 考 文 献

1 李原园,郦建强,李宗礼,等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学,2011,33(3):386 - 391.
LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Issues and challenges for the study of the Interconnected River System Network [J]. Resources Science, 2011,33(3):386 - 391. (in Chinese)

2 崔国韬,左其亭,窦明. 国内外河湖水系连通发展沿革与影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(4):73 - 76.
CUI Guotao, ZUO Qiting, DOU Ming. Development evolution and influences of the Interconnected River System Network at home and abroad [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011,9(4):73 - 76. (in Chinese)

3 冯顺新,李海英,李翀,等. 河湖水系连通影响评价指标体系研究 I:指标体系及评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(4):386 - 393.
FENG Shunxin, LI Haiying, LI Chong, et al. Study on the impact evaluation indicator system of River and Lake System Interconnection I: impact evaluation indicator system and evaluation method [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4):386 - 393. (in Chinese)

4 陈衍泰,陈国宏,李美娟. 综合评价方法分类及研究进展[J]. 管理科学学报,2004,7(2):69 - 79.
CHEN Yantai, CHEN Guohong, LI Meijuan. Classification and research advancement of comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(2): 69 - 79. (in Chinese)

5 杨建宇,欧聪,李琪,等. 基于云模型的吉林大安耕地土壤养分模糊综合评价[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):251 - 257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180131&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.031.
YANG Jianyu, OU Cong, LI Qi, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil nutrients in cultivated land based on cloud model in Da'an City, Jilin Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):251 - 257. (in Chinese)

6 王大海,张荣群,艾东,等. 基于 EES - PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 228 - 237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.036.
WANG Dahai, ZHANG Rongqun, AI Dong, et al. Empirical study on evaluation method of land ecological security matter-element model based on EES - PSR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 228 - 237. (in Chinese)

7 杨建宇,张欣,李鹏山,等. 基于物元分析的区域土地生态安全评价方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):238 - 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s037&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.037.
YANG Jianyu, ZHANG Xin, LI Pengshan, et al. Evaluation method of regional land ecological security based on matter-element analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):238 - 246. (in Chinese)

8 刘东,龚方华,付强,等. 基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA - TOPSIS 评价模型[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):218 - 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170527&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.027.
LIU Dong, GONG Fanghua, FU Qiang, et al. Evaluation model of irrigation water use efficiency based on game theory and GRA - TOPSIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):218 - 226. (in Chinese)

9 龚艳,张晓,刘燕,等. 基于层次分析法的植保机械适用性综合评价方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):73 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160911&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.011.
GONG Yan, ZHANG Xiao, LIU Yan, et al. Comprehensive evaluation method for applicability of plant protection machinery based on analytic hierarchy process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):73 - 78. (in Chinese)

10 陈守煜. 质量互变定理用于识别可拓学与集对分析的基础性错误[J]. 黑龙江大学工程学报,2014,5(1): 1 - 4.
CHEN Shouyu. Using the quantity-quality exchange theorem to identify fundamental mistakes of extenics and set pair analysis [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2014, 5(1): 1 - 4. (in Chinese)

11 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法[J]. 水利学报,2013,44(2):134 - 142.
CHEN Shouyu. Variable sets assessment theory and method of water resource system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2):134 - 142. (in Chinese)

(下转第 313 页)

34 PARDO N, SANCHEZ M L, PEREZ I A, et al. Energy balance and partitioning over a rotating rapeseed crop[J]. Agricultural Water Management, 2015, 161: 31 – 40.
35 WILSON K B, BALDOCCHI D D, AUBINET M, et al. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12), DOI: 10.1029/2001WR000989.
36 GONG D Z, MEI X R, HAO W P, et al. Comparison of ET partitioning and crop coefficients between partial plastic mulched and non-mulched maize fields[J]. Agricultural Water Management, 2017, 181: 23 – 34.
37 FANG Q X, MA L, FLERCHINGER G N, et al. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat-maize cropping system using the revised RZ – SHAW model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194: 218 – 229.
38 KANG S Z, GU B J, DU T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 239 – 254.
39 KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 56 – 70.
40 YOSHIFUJI N, KUMAGAI T, TANAKA K, et al. Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1 – 3): 333 – 339.
41 TANAKA N, KUME T, YOSHIFUJI N, et al. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5): 807 – 819.
42 MCCARTHY J J. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2001.
43 HILLEL D. Environmental soil physics[M]. London/San Diego: Academic Press, 1998.
44 BRUTSAERT W. Hydrology—an introduction[M]. New-York: Cambridge University Press, 2005.
45 张宝忠. 农田 ET 时空变异及尺度转换模式研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2011.
ZHANG Baozhong. Study on spatiotemporal variation and scale transformation of ET in farmland[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese)
46 刘健. 常用园林植物蒸腾耗水特性及生态效应研究[D]. 保定:河北农业大学,2007.
LIU Jian. Study on characteristic of transpiration and ecological function of familiar landscape plants[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007. (in Chinese)
47 ALBERTO M C R, QUILTY J R, BURESH R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with oveRHead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1 – 12.

(上接第 225 页)

12 CHEN S Y, XUE Z C, LI M, et al. Variable sets method for urban flood vulnerability assessment [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(12): 3129 – 3136.
13 CHEN S Y, XUE Z C, LI M. Variable sets principle and method for flood classification [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(9): 2343 – 2348.
14 DIAO Y F, WANG B D. Scheme optimum selection for dynamic control of reservoir limited water level [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(10): 2605 – 2610.
15 柯丽娜,王权明,孙新国,等. 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价[J]. 生态学报,2013,33(6):1889 – 1899.
KE Li'na, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al. The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6):1889 – 1899. (in Chinese)
16 邱林,王文川,陈守煜. 农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 2):61 – 65.
QIU Lin, WANG Wenchuan, CHEN Shouyu. Quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster using variable fuzzy analysis method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2):61 – 65. (in Chinese)
17 陈守煜,薛志春,李敏,等. 基于可变集的年径流预测方法[J]. 水利学报,2014,45(8):912 – 920.
CHEN Shouyu, XUE Zhichun, LI Min, et al. Annual runoff prediction method based on the variable sets [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8):912 – 920. (in Chinese)
18 陈守煜,祝雪萍,薛志春. 基于可变集辩证法数学定理的库群防洪优化调度方法[J]. 水力发电学报,2014,33(6):46 – 52.
CHEN Shouyu, ZHU Xueping, XUE Zhichun. Scheduling optimization of flood control systems based on the dialectics mathematical theorem of variable sets [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 46 – 52. (in Chinese)
19 金维刚,李勇,印永华,等. 不确定环境下特高压远距离风电专用通道落点方案决策的灵敏度分析[J]. 电网技术,2016,40(3): 889 – 896.
JIN Weigang, LI Yong, YIN Yonghua, et al. Sensitivity analysis for decision-making of UHV long distance power transmission site selection under uncertainty based on cloud model [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 889 – 896. (in Chinese)
20 王贞琴. 浙北引水工程方案选优综合评价[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
WANG Zhenqin. Comprehensive evaluation on project of water diversion to northern Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)