

国家自然科学基金资助项目综合评价： 基于 Vague 集多准则决策^①

张恩瑜¹, 王 珏², 张 奇², 郑永和³, 汪寿阳^{1,2}

(1. 中国科学院研究生院管理学院, 北京 100190; 2. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 3. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

摘要: 采用基于 Vague 集的多准则决策方法, 对国家自然科学基金 11 类主要竞争性资助项目的实施情况进行综合评价和排序. 首先, 通过问卷调研的方式, 由国家自然科学基金项目评审专家采用“高”、“不高”和“不清楚”三类语义, 对各类项目按照“评审公正性”、“管理规范性”、“科研创新性”和“社会影响力”四个准则进行评价; 然后, 根据问卷统计结果, 将语义评价转化为 Vague 估计值, 并利用一种新的评分函数计算各类项目在各准则下的得分; 最后, 采用正态分布的 OWA 算子集结各准则下的得分, 得到所有项目的综合评价和排序. 本文的研究结果将为完善国家自然科学基金的资助结构与管理模式提供重要参考依据.

关键词: Vague 集; 多准则决策; 评分函数; OWA 集结算子; 国家自然科学基金(NSFC)

中图分类号: F290 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2015)02-0076-09

0 引 言

经过二十余年的发展, 国家自然科学基金建立了包含“项目”、“人才”和“环境条件”三大系列, 二十多类资助项目的多样化资助格局. 为总结各类项目在管理执行方面的经验与不足, 本文以国家自然科学基金各学科评审专家为调研对象, 从“评审公正性”、“管理规范性”、“科研创新性”和“社会影响力”四个方面对科学基金主要竞争性研究项目的实施情况进行深入调研, 采用基于 Vague 集的多准则决策方法进行了综合评价, 其主要目的是发现科学基金实施和管理中的相关问题, 为调整和完善科学基金的资助结构与管理模式提供实践方面的依据.

在设计调查问卷中, 受访专家分别用三类语义评价——“高”、“不高”和“不清楚”来描述

各类项目的实施情况, 如何量化这些语义评价以及度量专家对各类项目的满意程度是一个很重要的问题. 1993 年, Gau 和 Buehere 提出了 Vague 集理论^[1]. 随着智能系统的进一步研究和发展, Vague 集与模糊集、粗糙集、人工神经网络、遗传算法等作为重要的软计算方法, 其用途将会越来越广泛^[2]. 与模糊集理论不同的是, Vague 集理论可以同时表示“支持”、“反对”和“不确定”的信息, 目前已广泛应用于模糊控制、决策、故障诊断等领域. 由于 Vague 集的上述特征, 常被应用于模糊决策领域, 形成了一类基于 Vague 集的多准则模糊决策问题^[11]. 在解决这类问题时, 将真假隶属度二维变量转变可比较的一维变量是最关键的, 也是争论最多的工作. Chen 和 Tan 在文献[3]中, 通过引入评分函数, 提出了一类解决 Vague 集的多准则模糊决策问题的方法. 但文献[4-7]均

① 收稿日期: 2012-11-15; 修订日期: 2013-05-10.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271202; 70801058).
通信作者: 王 珏(1978—), 女, 山东青岛人, 博士, 副研究员. Email: wjue@amss.ac.cn

认为,文献[3]定义的评分函数对 Vague 集除真假隶属度以外表示“弃权”的未知信息处理失当,其评价结果在一些情况下与人们的直观判断不符.为此,很多研究者先后在 Chen 和 Tan 的基础上做了改进.刘华文在文献[8-9]先后以 Vague 集和 IFS 集为研究对象定义了新的评分函数.但由于这种评分函数将弃权部分进行多次细分,实际上是将 Vague 集退化为 Fuzzy 集,人为夸大了 Vague 集未知信息对于评价结果的影响,所以在有些情况下也不能得到与人们的直观判断完全相符的评价结果.

在调查问卷统计过程中发现受访专家们对各类项目的了解程度差异很大,96%的专家对“面上项目”给出了“高”或“不高”的明确评价,但仅有 22%的专家对“青少年科技活动专项”项目给出明确评价.实际上,专家了解程度超过 50%的只有“研究项目系列”和“人才项目系列”中的 11 类主要竞争性研究项目(见 3.1 节),其他项目由于不直接资助科学研究活动、无法体现竞争性特征、受众面窄、经费比例低等原因,社会认知度和影响力较小,专家了解程度较低,对其综合评价的意义不及竞争性研究项目.因此,本文仅选择了解程度超过 50%的 11 类主要竞争性研究项目作为综合评价对象.

即使是对于主要的竞争性研究项目,专家了解程度的差异也很大,显然直接采用现有的评分函数进行综合评价是不合理的.为此,本文在前人研究的基础上,提出一种新的评分函数,既完整地反映了现有评分函数的优势,又较好地弥补了存在的不足,仿真实例证明能够获得与人们直观判断更一致的评价结果.同时,本文还结合 OWA 集结算子理论,对调研的资助项目进行了综合评价和排序,为国家自然科学基金委资助结构与管理模式改革提供了重要依据.

1 Vague 集概念

令 U 是一个点(对象)的空间,其中任意一个元素用 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示. U 上 Vague 集 A 由真隶属函数 t_A 和假隶属函数 f_A 所描述: $t_A: U \rightarrow$

$[0, 1], f_A: U \rightarrow [0, 1]$, 其中 $t_A(u_i)$ 是由支持 $u_i \in A$ 的证据所导出的肯定隶属度的下界, $f_A(u_i)$ 则是由反对 $u_i \in A$ 的证据所导出的否定隶属度的下界,且 $t_A(u_i) + f_A(u_i) \leq 1$, 则 u_i 隶属于 Vague 集 A 的程度可表示为 $[t_A(u_i), 1 - f_A(u_i)]$. 将其定义为 Vague 集 A 在 u_i 的 Vague 值. 当 U 离散时,有 $A = \sum_{i=1}^n [t_A(u_i), 1 - f_A(u_i)] / u_i, \mu_i \in U$; 当 U 连续时,有 $A = \int_U [t_A(u), 1 - f_A(u)] / u, \mu \in U$.

定义 Vague 集的包含关系和等价关系如下 [1]: 设 U 为一论域, $\mu \in U, A, B$ 为 U 的两 Vague 集, μ 关于 A, B 的隶属度记为 $[t_A(u), 1 - f_A(u)], [t_B(u), 1 - f_B(u)]$, 则 $A \subseteq B \Leftrightarrow t_A(u) \leq t_B(u) \& f_A(u) \geq f_B(u), A = B \Leftrightarrow t_A(u) = t_B(u) \& f_A(u) = f_B(u)$.

当 $t_A(u) + f_A(u) < 1$ 时, Vague 值中存在着对隶属情况没有明确判断的未知信息,为了度量这部分表示“弃权”的未知信息,文献[1]定义 $\pi_A(u) = 1 - t_A(u) - f_A(u)$ 为 u 关于 Vague 集 A 的 Vague 度. $\pi_A(u)$ 是 u 属于 A 的未知信息度量, $\pi_A(u)$ 值越大,说明 u 对 A 的未知信息越多. 显然 $\pi_A(u) \in [0, 1]$.

2 基于 Vague 集的多准则决策方法

设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为方案集, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为评价准则集, 设方案 u_i 满足评价准则 C_j 下可表示为 Vague 值 $A_{ij} = [t_{ij}, 1 - f_{ij}]$, 则方案 u_i 在评价准则 C 下的特征可表示为^[12]

$$\{(C_1 [t_{i1}, 1 - f_{i1}]), (C_2 [t_{i2}, 1 - f_{i2}]), \dots, (C_n [t_{in}, 1 - f_{in}])\}$$

其中 t_{ij} 表示方案 u_i 满足评价准则 C_j 的程度, f_{ij} 表示方案 u_i 不满足评价准则 C_j 的程度, 其中 $t_{ij}, f_{ij}, t_{ij} + f_{ij} \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$.

假设决策者要在方案集 U 中选择一个目标同时满足评价准集 C 中的所有评价准则, 文献[3]提出了一种以评分函数为基础的加权评价方法. 定义 $S(A_{ij}) = S([t_{ij}, 1 - f_{ij}]) \in [-1, 1]$ 为一个由 Vague 集向实数集合 $[-1, 1]$ 映射的评分函数, 则每个方案的综合评价值为

$$W_C(u_i) = \sum_{j=1}^n w_j S(A_{ij}) \quad (1)$$

其中 $w_1, \dots, w_j, \dots, w_n$ 是评价准则 $C_1, \dots, C_j, \dots, C_n$ 的重要程度 $w_j \in [0, 1], j = 1, 2, \dots, n$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. 如果 $W_C(u^*) = \max\{W_C(u_i) | i = 1, 2, \dots, m\}$ 则方案 u^* 为最佳方案.

在基于 Vague 集的多准则决策方法中, 评分函数 $S(A_{ij})$ 和权重 w_j, w_k, \dots, w_p 对评价结果具有决定性作用. 在对国家自然科学基金资助项目的管理执行情况进行综合评价的实践中, 本文发现已有评分函数对未知信息的处理不恰当, 均存在评价结果与人们直观判断不符的情况, 因此本文在前人研究的基础上设计了一种新的评分函数, 较好地弥补了前人方法的不足.

2.1 现有评分函数回顾

总的来看, 现有评分函数可分为两类, 一类具有代表性的是文献 [3] 中提出的基于真假隶属度绝对差距的评分函数, 另一类是文献 [9] 中基于真假隶属度相对差距的评分函数.

设某一方案满足决策者需求的程度可表示为 Vague 值 $A = [t_A, 1 - f_A]$ 其中 $t_A, f_A, t_A + f_A \in [0, 1]$. 文献 [3] 定义的一个评分函数 $S(A)$ 为

$$S(A) = t_A - f_A \quad (2)$$

式中 $S(A) \in [-1, 1]$. $S(A)$ 反映了真假隶属度的绝对差距, $S(A)$ 的值越大越满足决策者的要求. 但在实际中, 常常出现 $S(A)$ 的评价结果与人们直观判断不符的情况, 如下例所示.

例 1 若三个方案的它们满足评价者需求的程度可分别表示为 Vague 值 $A_1 = [0.2, 1]$, $A_2 = [0.4, 0.8]$ 和 $A_3 = [0.6, 0.6]$, 则由式 (2) 可得 $S(A_1) = S(A_2) = S(A_3) = 0.2$, 这表明三个方案满足决策者要求的程度是一样的.

但如果按照 10 人“投票模型”来分析上例 2 人赞成选择方案 1, 0 人反对, 8 人弃权; 4 人赞成选择方案 2, 2 人反对, 6 人弃权; 6 人赞成选择方案 3, 4 人反对, 人们直觉上往往认为方案 1 才是最优方案.

刘华文在总结了前人对直觉模糊集研究的基础上, 在文献 [9] 中对评分函数进行了进一步拓

展, 提出新的评分函数

$$J_n(A) = t_A + t_A \pi_A + t_A(1 - t_A - f_A) \pi_A + \dots + t_A(1 - t_A - f_A)^{n-1} \pi_A$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 上式记为

$$J_\infty(A) = t_A + \frac{t_A}{t_A + f_A} \pi_A = \frac{t_A}{t_A + f_A} \quad (3)$$

式 (3) 表示对弃权部分按照 $t_A : f_A : (1 - t_A - f_A)$ 的比例细分多次, 直到未知信息不影响对方案的偏好判断. 然而, 对弃权部分进行多次细分的方法实际上是将一个 Vague 集退化为 Fuzzy 集, 人为夸大了 Vague 集未知信息对于评价结果的影响. 另外, 这种评分函数在某些情况下也会得到违背人们直观判断的结果, 如下例所示.

例 2 若 $A_1 = [0.92, 0.96]$, $A_2 = [0.83, 0.97]$, 则由式 (3) 可得 $J_\infty(A_1) = 0.958$, $J_\infty(A_2) = 0.965$, $J_\infty(A_1) < J_\infty(A_2)$, 则方案 2 是最优方案.

按 100 人“投票模型”来分析上例, 92 人赞成选择方案 1, 4 人反对, 4 人弃权; 83 人赞成选择方案 2, 3 人反对, 14 人弃权. 直观来看, 方案 1 才是最优方案, 这与 $J_\infty(A)$ 的评价结果是相悖的.

2.2 新评分函数的提出

文献 [10] 提出了 Vague 集是 L^* -模糊集的思想, 其中 L^* 是一个完备格. 因此, 可利用二维直角坐标系直观地表示 L^* . 对任意 Vague 值 A , 评分函数 $S(A)$ 与 $J_\infty(A)$ 可看作是映射 $T \times F \rightarrow R$. 如图 1 所示, 在 TF 平面中, 函数 $S(A)$ 的等分数线为一簇斜率均等于 -1 的平行线, 沿其梯度方向由全局最劣点 $F(0, 1)$ 点向全局最优点 $T(1, 0)$ 点移动, 是单调递增的过程; 而函数 $J_\infty(A)$ 的等分数线为一簇过 $O(0, 0)$ 的等斜率直线, 以 $O(0, 0)$ 点为轴由 OF 向 OT 转动, 是单调递增的过程. 直线 OP 为 $S(A)$ 的一条等分数线, 同时也是 J_∞ 的一条等分数曲线, 对线段 OP 上的任意点 A 来说, $S(A) = 0, J_\infty(A) = \frac{1}{2}$.

设 A_0 为三角形 TOF 内任意点, 过 A_0 点做 OP 的平行线 BC, 连接 $O A_0$ 并延长与 TF 交于 D 点. 对于任意点 A 来讲, BC 为等分数线 $S(A) = S(A_0)$, 而 OD 为等分数线 $J_\infty(A) = J_\infty(A_0)$.

$S(A)$ 与 $J_\infty(A)$ 这两种评分函数分别反映了

真隶属度和假隶属度的绝对和相对差距,人们在对于 Vague 集进行直观评价过程中,通常既会考虑绝对差距,也会考虑相对差距. 在图 1 中,若 A 为梯形区域 A_0CPO 内的不同于 A_0 的任一点,则有 $S(A) \leq S(A_0)$ $J_\infty(A) \leq J_\infty(A_0)$, 因此 A_0 点代表的方案无异议地优于 A_0CPO 内所有点代表的方案. 若 A 为多边形区域 A_0BTD 内不同于 A_0 的任意一点,则有 $S(A) \geq S(A_0)$ $J_\infty(A) \geq J_\infty(A_0)$, 则 A_0 点代表的方案无异议地劣于 A_0BTD 内所有点. 若 A 为三角形 A_0OB 内不同于 A_0 的任意一点,则有

$S(A) \leq S(A_0)$ $J_\infty(A) \geq J_\infty(A_0)$, 三角形 A_0OB 内的点真假隶属度的绝对差距比 A_0 点小,而相对差距比 A_0 大,两种评分函数评价结果相互矛盾. 若 A 为三角形 A_0DC 内不同于 A_0 的任意一点,则有 $S(A) \geq S(A_0)$ $J_\infty(A) \leq J_\infty(A_0)$, 三角形 A_0DC 内的点真假隶属度的绝对差距比 A_0 点大,而相对差距比 A_0 小,也出现了相互矛盾的结果. 综上,三角形 A_0OB 或三角形 A_0DC 内的点与 A_0 点比较,如果采用的单一的评分函数 $S(A)$ 或 $J_\infty(A)$ 就会出现争议性结论.

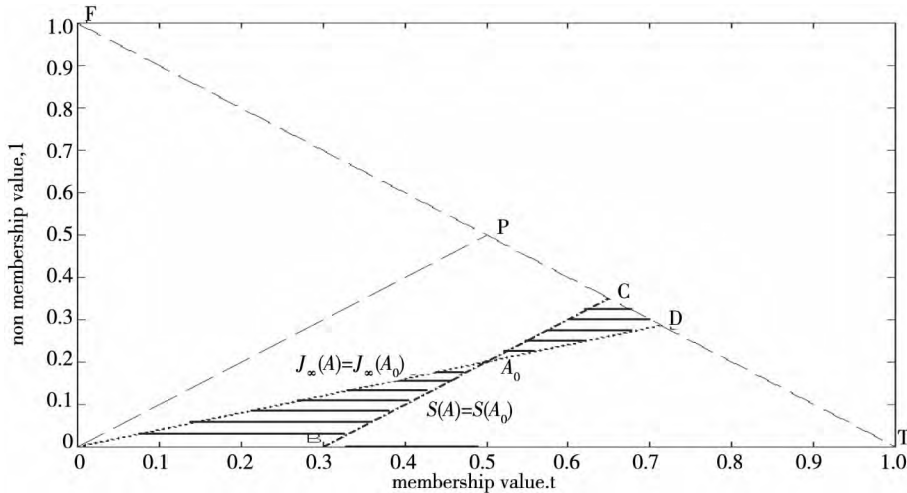


图 1 T - F 坐标系下的 Vague 集

Fig. 1 Vague sets in T-F coordinate system

在 Vague 集的评价过程中,人们既要求真隶属度和假隶属度的绝对差距越大越好,也要求相对差距越大越好. 故可在 $S(A)$ 与 $J_\infty(A)$ 的基础上定义一个新的评分函数 $P(A) = F(S(A), J_\infty(A))$ 使得对任意 Vague 值 $A = [t_A, 1 - f_A]$ 有 $\frac{\partial P(A)}{\partial S(A)} \geq 0$ $\frac{\partial P(A)}{\partial J_\infty(A)} \geq 0$.

定义 1 若方案的评价可表示为 Vague 集 $A = [t_A, 1 - f_A]$ 其中 $0 \leq t_A \leq 1$ $0 \leq f_A \leq 1$ 且 $t_A + f_A \leq 1$ 则方案满足决策者需求的程度可定义为

$$P(A) = \begin{cases} 0, & t_A = f_A = 0 \\ \frac{1}{2} S(A) + J_\infty(A) - \frac{1}{2} = \frac{t_A - f_A}{2} + & (4) \\ \frac{t_A - f_A}{2(t_A + f_A)}, & \text{否则} \end{cases}$$

显然 $P(A) \in [-1, 1]$. 新的评分函数 $P(A)$ 较好的集成了反映 Vague 集真假隶属度的绝对差距的评分函数 $S(A)$ 和反映相对差距的评分函数

$J_\infty(A)$ 综合了上述两评分函数的共性特征,并能得到更符合人们直观判断的结果. 对于新函数合理性的验证可参考文献 [14].

2.3 OWA 集结算子

文献 [12] 提出了有序加权平均 (ordered weighted averaging operator, OWA) 算子,其本质是对数据按从大到小的顺序重新进行排序,并根据数据所在的位置赋权再进行集结.

OWA 算子 f 是从 $R^n \rightarrow R$ 的映射,与之相关联的是一个 n 维加权向量 $W: W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$,

其中 $w_j \in [0, 1]$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 则 OWA 算子

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j b_j \quad (5)$$

其中 $(a_1, a_2, \dots, a_n) \in R^n$ b_j 是 a_j 从大到小排序后第 j 个值.

此后,确定 OWA 算子权重的方法逐渐成为 OWA 理论研究的重要内容. 文献 [13] 提出一种

服从离散化标准正态分布的 OWA 算子权重算法，如式 (7) 所示。

$$w_j = e^{-\frac{(j-\frac{n+1}{2})^2}{2\sigma_n^2}} / \sum_{k=1}^n e^{-\frac{(k-\frac{n+1}{2})^2}{2\sigma_n^2}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中 $\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (i - \mu_n)^2}$, $\mu_n = \frac{1+n}{2}$.

式(6) 对处于中间位置的得分给予较高的权重,而对最高分 b_1 和最低分 b_n 则给予较低的权重,降低了最大值和最小值对决策结果的影响.本文采用此算子对项目在各准则下的得分进行综合集成.

3 基于 Vague 集多准则决策的科学基金资助项目综合评价

3.1 问卷调研

为了全面了解国家自然科学基金各类资助项目的管理执行情况,采用问卷调研的方式,邀请国家自然科学基金评审专家对各类资助项目的“评审公正性”、“管理规范”、“科研创新性”和“社会影响力”四方面表现进行了评价.调研过程中共发放问卷 1 850 份,回收有效调查问卷 1 500 份.

从问卷统计的结果来看,受访专家对于这 19 类项目的了解程度差别很大.将专家们对项目在各评价准则下给出“高”或“不高”的明确评价的最高比率定义为专家们对项目的了解程度,统计结果显示,专家们对“面上项目”的了解程度最高,了解程度为 96%,只有 4% 的专家回答“不清楚”.但专家们对“国家基础科学人才培养基金”和“环境条件项目系列”等几类项目了解程度较低,尚不足 50%.这些项目类型并未被深入了解的原因包括:(1) 经费总额不高,基本不超过国家自然科学基金总经费的 1%.(2) 项目定位并不直接资助科研工作或研究人员,无法体现竞争性特征.(3) 资助范围相对狭窄等.

基于以上原因,本文只对专家了解程度在 50% 以上的前 11 个主要竞争性研究项目进行分析 and 评价.这 11 类项目分别是: u_1 : 面上项目; u_2 :

重点项目; u_3 : 重大项目; u_4 : 重大研究计划; u_5 : 联合基金项目; u_6 : 国际(地区)合作研究项目; u_7 : 青年科学基金; u_8 : 地区科学基金; u_9 : 创新研究群体科学基金; u_{10} : 国家杰出青年科学基金(含外籍); u_{11} : 海外及港澳学者合作研究基金.

3.2 综合评价

本文采用基于 Vague 集多准则决策方法对上述资助项目进行综合评价的具体步骤如下:

步骤 1 统计问卷中对各类项目 $u_i (i = 1, \dots, 11)$ 在各准则 $C_j (j = 1, \dots, A)$ 下做出“高”、“不高”和“不清楚”评价的专家人数;

步骤 2 将专家在各准则下对各类项目的评价转化为 Vague 估计 A_{ij} ;

步骤 3 根据式 (4) 所定义的评分函数 $P(A)$ 度量专家们对各类项目在各准则下的得分 $P(A_{ij})$;

步骤 4 利用式 (6) 的 OWA 集结函数将各类项目在各准则下的得分集成项目的综合得分 $W_{C^*}(u_i)$;

步骤 5 根据 $W_{C^*}(u_i)$ 对项目进行估计和排序,从中选出最优项目 u^* ,满足 $W_{C^*}(u^*) = \max\{W_{C^*}(u_i) \mid i = 1, 2, \dots, m\}$.

令 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_4\}$ 为评价准则集,其中 C_1 为评审公正性, C_2 为管理规范性, C_3 为科研创新性, C_4 为社会影响力.将项目 u_i 在准则 C_j 评价为“高”、“不高”的专家人数占总人数比例分别表示为 t_{ij}, f_{ij} ,显然 $t_{ij} \in [0, 1], f_{ij} \in [0, 1], t_{ij} + f_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, 11, j = 1, \dots, A$,项目 u_i 在准则 C_j 的 Vague 评价表示为 $A_{ij} = [t_{ij}, 1 - f_{ij}]$.科学基金 11 类主要项目在各准则下的 Vague 估计如表 1 所示.

根据式 (4) 的评分函数,可得出受访专家们对项目 u_i 在评价准则 C_j 的得分 $P(A_{ij})$ 为

$$P(A_{ij}) = \frac{t_{ij} - f_{ij}}{2(t_{ij} + f_{ij})} (t_{ij} + f_{ij} + 1)$$

根据式 (6) 计算的 OWA 集结函数,计算权重为 $W = \{0.155, 0.345, 0.345, 0.155\}$,则可根据这组权重计算各类项目综合满意度评分 $W_{C^*}(u_i)$ 如表 2 所示.

表 1 科学基金项目主要竞争性研究项目在各准则下的 Vague 估计

Table 1 The Vague evaluations of the main competitive research funding programs of NSFC according to the four criteria

项目	评审公正性	管理规范性	科研创新性	社会影响力
面上项目	[0.92 0.96]	[0.91 0.97]	[0.85 0.91]	[0.79 0.89]
重点项目	[0.57 0.74]	[0.70 0.88]	[0.68 0.86]	[0.63 0.83]
重大项目	[0.36 0.65]	[0.53 0.84]	[0.51 0.83]	[0.50 0.84]
重大研究计划	[0.35 0.77]	[0.49 0.90]	[0.46 0.87]	[0.43 0.86]
联合基金项目	[0.36 0.83]	[0.43 0.91]	[0.34 0.84]	[0.28 0.80]
国际(地区)合作研究项目	[0.43 0.85]	[0.47 0.88]	[0.42 0.85]	[0.35 0.78]
青年科学基金	[0.83 0.97]	[0.81 0.97]	[0.70 0.88]	[0.64 0.86]
地区科学基金	[0.40 0.85]	[0.45 0.91]	[0.30 0.77]	[0.29 0.76]
创新研究群体科学基金	[0.41 0.83]	[0.48 0.90]	[0.43 0.86]	[0.43 0.86]
国家杰出青年科学基金(含外籍)	[0.61 0.86]	[0.64 0.91]	[0.63 0.91]	[0.66 0.93]
海外和港、澳青年学者合作研究基金	[0.42 0.91]	[0.44 0.93]	[0.40 0.91]	[0.32 0.85]

表 2 国家自然科学基金主要竞争性研究项目在各准则下的得分及综合得分

Table 2 The evaluation scores according to each criterion and the aggregated scores of main competitive research programs of NSFC

项目	综合评价		评审公正性		管理规范性		科研创新性		社会影响力	
	评分	排序	评分	排序	评分	排序	评分	排序	评分	排序
面上项目	0.83	1	0.90	1	0.90	1	0.77	1	0.72	1
青年科学基金	0.74	2	0.87	2	0.85	2	0.64	2	0.56	3
国家杰出青年科学基金(含外籍)	0.64	3	0.54	3	0.66	3	0.64	3	0.70	2
重点项目	0.54	4	0.35	6	0.64	4	0.59	4	0.52	4
海外和港、澳青年学者合作研究基金	0.45	5	0.49	4	0.55	5	0.46	5	0.26	8
创新研究群体科学基金	0.41	6	0.32	8	0.52	7	0.40	8	0.40	7
重大研究计划	0.39	7	0.16	10	0.52	6	0.43	6	0.40	6
国际(地区)合作研究项目	0.36	8	0.39	5	0.48	10	0.38	9	0.17	9
重大项目	0.36	9	0.01	11	0.45	11	0.41	7	0.42	5
联合基金项目	0.28	10	0.28	9	0.48	9	0.26	10	0.11	10
地区科学基金	0.24	11	0.34	7	0.51	8	0.09	11	0.07	11

3.3 综合评价结果分析

根据表 2 的评价结果,以位于中间位置的“创新研究群体科学基金”为基准,可将这 11 类主要竞争性研究项目分为综合评价较好和综合评价稍差两类。综合评价较好的项目包括“面上项目”、“青年科学基金”、“国家杰出青年科学基金项目(含外籍)”、“重点项目”和“海外和港、澳青年学者合作研究基金”。其中前三类项目表现最为突出,在评审公正性、管理规范性、科研创新性和社会影响力方面的得分都较高,“面上项目”的各项指标得分最高,说明该类项目是学术界最认可

的一类资助计划。

综合评价稍差的项目包括“重大研究计划”、“国际(地区)合作研究项目”、“重大项目”、“联合基金项目”和“地区科学基金项目”五类。其中,“重大研究计划”的短板主要是评审公正性,其评审公正性得分仅有 0.16 分,位于倒数第二位。“国际(地区)合作研究项目”的评审公正性获得了专家们的肯定,列第 5 位,但其管理规范性、科研创新性和社会影响力分值相对较低。“重大项目”的评审公正性和管理规范性得分较低,位于最后一位,但其科研创新性和社会影响力得

到了专家们的认可,分列第7位和第5位.与此形成反差的是,“地区科学基金”的评审公正性和管理规范性得到了专家们的充分认可,但其科研创新性和社会影响力较低,列第11位.“联合基金项目”各项指标得分均较低,位于第9-10位.

具体来说,在评审公正性方面,由于国家自然科学基金的主要竞争性研究项目基本都采用同行评议和专家会评相结合的评审方式,与国际上其他科学基金接轨,评审过程总体上规范性较强,该指标在评价结果上的差异与项目定位有关.最能反映国家自然科学基金“自主选题、自由申请”定位的三类项目——“面上项目”、“青年科学基金项目”和“地区科学基金项目”在评审公正性方面表现都比较好;而“重点项目”、“重大项目”、“重大研究计划”和“联合基金项目”都是有针对性地支持某些学科或领域,通常采用专家顶层设计和科研人员资助选题相结合的方式,属于“命题作文”.与自由申请项目相比,这些项目其针对性更强,资助面更窄,在一定程度上影响了评审公正性评价结果.

管理规范性方面,“重大项目”鼓励和倡导开展多学科综合研究和学科交叉,“国际合作项目”支持与国外科学基金和科研机构的协调与合作,“联合基金项目”则与有关部门、地方政府和企业开展协调与合作.这些项目的特殊定位,决定了其

管理执行在客观上比其他项目更具难度,管理规范性评价结果也相对较低.

科研创新性方面,受访专家明确指出了评价较低的几类项目的具体问题,如“地区科学基金”存在申请标准偏低的问题,科研成果的创新性有待加强.“联合基金项目”中需谨防联合资助的短视效应和纯粹应用研究.“国际(地区)合作研究项目”中实质性、高水平的国际合作仍比较少,而“重大项目”和“创新研究群体项目”中有个别研究工作存在成果重复现象等.

各类项目的社会影响力与经费比例有一定关系,一般而言,经费比例越高,目标资助对象越广,社会影响力越大.另外,目前越来越多的高校和科研单位把获得国家自然科学基金项目资助作为对科研人员学术能力的认可,各类项目的社会影响力正在逐步加大,“面上项目”和“国家杰出青年科学基金(含外籍)”是其中的典型代表.

3.4 三种评分函数评价结果对比分析

以“评审公正性”准则为例,表3列出了11类主要的竞争性研究项目在此准则下,分别由评分

$$S(A) = t_A - f_A, 2J_\infty(A) - 1 = \frac{t_A - f_A}{t_A + f_A}, P(A) = \frac{t_A - f_A}{2} + \frac{t_A - f_A}{2(t_A + f_A)}$$

计算得到的评分结果.

表3 评审公正性评分结果对比

Table 3 The comparison of scores based on three evaluation functions according to the assessment fairness criterion

项目	t_A	f_A	$S(A)$	$S(A)$ 排序	$2J_\infty(A) - 1$	$2J_\infty(A) - 1$ 排序	$P(A)$	$P(A)$ 排序
面上项目	0.92	0.04	0.88	1	0.92	2	0.90	1
青年科学基金	0.83	0.03	0.80	2	0.94	1	0.87	2
国家杰出青年科学基金(含外籍)	0.61	0.14	0.47	3	0.62	4	0.54	3
海外和港、澳青年学者合作研究基金	0.42	0.09	0.33	4	0.66	3	0.49	4
国际(地区)合作研究项目	0.43	0.15	0.29	6	0.5	5	0.39	5
重点项目	0.57	0.26	0.32	5	0.38	8	0.35	6
地区科学基金	0.40	0.16	0.24	7	0.44	6	0.34	7
创新研究群体科学基金	0.41	0.18	0.24	8	0.4	7	0.32	8
联合基金项目	0.36	0.17	0.19	9	0.36	9	0.28	9
重大研究计划	0.35	0.23	0.12	10	0.2	10	0.16	10
重大项目	0.36	0.35	0.01	11	0.02	11	0.01	11

从表3的对比结果看,可得到以下结论:

(1) 评分函数 $S(A)$ 与 $2J_{\infty}(A) - 1$ 的评分结果经常出现矛盾,有些甚至差别很大.如“重点项目”的 Vague 评价值为 $[0.57, 0.74]$,评分函数 $S(A)$ 的排序结果位于第5位,而评分函数 $2J_{\infty}(A) - 1$ 排序结果则位于第8位,这主要是受专家对项目的了解程度差异的影响.因此,单一的采用评分函数 $S(A)$ 或 $J_{\infty}(A)$ 往往会出现争议性的评价结果.

(2) 评分函数 $P(A)$ 合理的集成了反映 Vague 集真假隶属度绝对差距的评分函数 $S(A)$ 和相对差距的评分函数 $J_{\infty}(A)$,能得出与人们的直觉判断更加一致的评价结果.例如:对于“面上项目”与“青年科学基金” $P(A)$ 的评价结果是“面上项目”的评审公正性优于“青年科学基金”,与 $S(A)$ 的评价结果一致;对于“国家杰出青年科学基金(含外籍)”与“海外和港、澳青年学者合作研究基金”两类项目 $P(A)$ 的评价结果是“国家杰出青年科学基金(含外籍)”的评审公正性优于“海外和港、澳青年学者合作研究基金”,与 $2J_{\infty}(A) - 1$ 的评价结果一致.这两组评价结果都

符合科学基金的实际运行情况.

4 结束语

本文在总结前人对 Vague 集多准则决策评价研究的基础上,引入一种新的评分函数,较好地解决了现有评分函数评价结果与人们直观判断不符的问题,并采用这种方法对国家自然科学基金11类主要竞争性研究项目的实施情况进行了综合评价.结果表明,“面上项目”、“青年科学基金”和“国家杰出青年科学基金(含外籍)”是国家自然科学基金项目中管理实施最为成功的三类项目,“重点项目”、“海外和港澳青年学者合作研究基金项目”、“创新研究群体科学基金项目”和“重大研究计划项目”等也获得了大多数专家的认可,而“国际(地区)合作研究项目”、“重大项目”、“地区科学基金”和“联合基金项目”仍有可改进的空间.本文的研究结果为完善科学基金的资助结构与管理模式提供了参考依据和决策支持,提出的方法也可用于其他类似项目或计划的综合评价.

参考文献:

- [1]Gau W L, Buehrer D J. Vague sets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(2): 610-614.
- [2]卫敏,余乐安. 具有最优学习率的 RBF 神经网络及其应用[J]. 管理科学学报, 2012, 15(4): 50-57.
Wei Min, Yu Lean. A RBF neural network with optimum learning rates and its application[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(4): 50-57. (in Chinese)
- [3]Chen S M, Tan J M. Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on Vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67(2): 163-172.
- [4]Hong D H, Choi C H. Multi-criteria fuzzy decision making problems based on Vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(1): 103-113.
- [5]李凡,卢安,蔡立晶. 基于 Vague 集的多目标模糊决策方法[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(7): 123-125.
Li Fan, Lu An, Cai Lijing. Multicriteria decision making based on Vague sets[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(7): 123-125. (in Chinese)
- [6]周珍,吴祈宗,刘祥福,等. 基于区间值 Vague 集的多准则模糊决策方法[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(11): 1019-1023.
Zhou Zhen, Wu Qizong, Liu Xiangfu, et al. Multi-criteria decision-making based on interval-value Vague sets[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(11): 1019-1023. (in Chinese)
- [7]周晓光,张强. 模糊群决策中专家意见的汇总研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(10): 936-940.
Zhou Xiaoguang, Zhang Qiang. Research on the aggregation of experts opinions during Vague group decision making[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 936-940. (in Chinese)
- [8]刘华文. 多目标模糊决策的 Vague 集方法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(5): 103-109.

- Liu Huawen. Vague set methods of multi-criteria fuzzy decision making [J]. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2004, 24(5): 103 – 109. (in Chinese)
- [9] Liu H W, Wang G J. Multi-criteria decision-making methods based on intuitionistic fuzzy sets [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(1): 220 – 233.
- [10] Deschrijver G, Kerre E E. On the relationship between some extensions of fuzzy set theory [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 133(2): 227 – 235.
- [11] 王 珺, 刘三阳, 张 杰. 基于 Vague 集的模糊多目标决策方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(2): 119 – 122.
Wang Jue, Liu Sanyang, Zhang Jie. Fuzzymultiple objectives decesion making based on Vague set [J]. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2005, 25(2): 119 – 122. (in Chinese)
- [12] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1988, 18(1): 183 – 190.
- [13] Xu Z S. An overview of methods for determining OWA weights [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2005, 20(8): 843 – 865.
- [14] 张恩瑜, 王 珺, 汪寿阳. 一种新的 Vague 集多准则决策评分函数 [J]. *系统科学与数学*, 2011, 31(8): 961 – 974.
Zhang Enyu, Wang Jue, Wang Shouyang. A new score function in multi-criteria decision making [J]. *System Science and Mathematics*, 2011, 31(8): 961 – 974. (in Chinese)

A comprehensive evaluation of NSFC funding programs: Based on Vague set and multi-criteria decision-making

ZHANG En-yu¹, WANG Jue^{2*}, ZHANG Qi², ZHENG Yong-he³, WANG Shou-yang^{1,2}

1. Management School, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

Abstract: This paper presents a multi-criteria decision-making method based on Vague sets to evaluate the eleven main competitive research funding programs of the National Natural Science Foundation of China (NSFC). Firstly, panels of NSFC were asked to evaluate these funding programs by a questionnaire according to four criteria: assessment fairness, management normalization, scientific innovation, and social influence. Three linguistic terms, “HIGH”, “LOW” or “UNKNOWN”, are involved in the evaluation. Secondly, the linguistic evaluations associated with each funding program were translated into Vague evaluations, and the evaluation scores of each program according to each criterion were measured using a novel scoring function proposed in this paper. Finally, the normal distribution-based OWA operator was applied to aggregate the evaluation scores according to each criterion, and aggregated scores of each program were attained. The conclusion in this paper can provide an important decision support for improving the support structure and management mode of NSFC.

Key words: Vague set; multi-criteria decision making; scoring function; OWA aggregation operator; NSFC