

基于多源数据的智慧养老服务供需匹配研究

张语轩, 耿秀丽, 潘飞

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对智慧养老服务中供需双方评价信息的表达存在不确定性和模糊性以及供需不匹配的问题, 提出了一种基于多源数据的模块化双边匹配决策方法。该方法无需将信息统一, 减少了信息处理损失。考虑老年群体存在需求差异的情况, 利用两步聚类法对其进行分类; 针对智慧养老服务评价属性异质性特点, 采用概率语言术语、直觉模糊数处理定性评价信息, 用精确数处理定量评价信息; 通过改进离差最大化法计算属性权重; 运用折衷解决方法得到双边效用满意度, 构建双边匹配模型。最后通过上海市老年群体智慧养老供需匹配仿真实验对方法的可行性和合理性进行验证。结果表明, 所提方法识别出了 5 类老年群体, 可以为不同特征的老年群体匹配不同的智慧养老服务。

关键词: 多源数据; 两步聚类; 双边匹配; 智慧养老; 折衷解决方法

中图分类号: C 934

文献标志码: A

Supply-demand matching study of the intelligent old-age care services based on the multi-source data

ZHANG Yuxuan, GENG Xiuli, PAN Fei

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A modular bilateral matching decision method based on multi-source data was proposed to address the problems of uncertainty, fuzziness, and mismatch between the supply and demand in the evaluation of intelligent old-age care services. This method does not require the uniformity of information, which can reduce the loss of information processing. Considering the demand differences among the elderly population, a two-step clustering method was used to classify them. For the heterogeneous evaluation attributes of the intelligent old-age care services, the probability language terms and intuitionistic fuzzy numbers were used to conduct the qualitative evaluation information, while the precise numbers were used to conduct the quantitative evaluation information. The attribute weights were calculated by improving the maximum deviation method. The compromise solution using measurement alternatives and ranking was employed to achieve the bilateral utility satisfaction, and a bilateral matching model was constructed. Finally, the feasibility and rationality of the method were

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72271164); 教育部人文社会科学研究规划基金(19YJA630021)

第一作者: 张语轩(1999-), 女, 硕士研究生。研究方向: 多属性决策。E-mail: 961866690@qq.com

通信作者: 耿秀丽(1984-), 女, 教授。研究方向: 产品服务系统设计、决策理论与方法。E-mail: xiuliforever@163.com

verified through the simulation experiment on the supply and demand matching of intelligent old-age care for the elderly population in Shanghai. The results showed that the proposed method could identify five categories of elderly groups, and it could match different intelligent old-age care services for elderly populations with different characteristics.

Keywords: *multi-source data; two-step clustering; bilateral matching; intelligent old-age care; MARCOS*

目前，我国已经出现了整体社会“未富先老”、“无钱养老”、“无人养老”相叠加的问题，健康养老成为全社会关注的热点话题。智慧养老是由英国生命信托基金会提出的一种养老模式，即老年人在日常生活中可以不受时间和空间的限制，在熟悉的场域过上高质量的生活，利用互联网等现代科学技术，将信息资源有效整合，从而为有需要的老年群体提供个性化的养老服务^[1]。当前我国智慧养老服务存在供给和需求失衡的突出问题，主要表现在老年人对美好养老生活的需求和不完善不充分的养老服务供给之间的矛盾^[2]。社会、家庭和老年人在老龄化的困境之下，需要匹配更优质且具有针对性的养老服务，因此，很多老年人对“老有所养”的目标提出了更高的要求。同时，养老服务供给不适应养老服务需求还表现在供给结构失衡，仅提供居家养老、社区养老、机构养老等单一养老结构的现象十分普遍。基于此需要思考两方面：一是给需求主体即老年人提供何种养老模式才能更有效率，二是如何使养老服务有效供给。事实上，养老供需服务匹配属于双边匹配问题的范畴。双边匹配理论是1962年由Gale等^[3]首次提出，是多对一、一对一的典型匹配问题，后被广泛运用到经济生活等各个领域，用于解决双方匹配问题。目前关于供需服务匹配有一些研究成果：高宇璇等^[4]通过计算患者和医生双方满意度，构建满意且稳定的目标导向匹配决策模型；郑锦荣等^[5]将模糊匹配的方法与技术应用于计算机化的高校毕业生就业供需管理系统，实现毕业分配工作中学生和用人单位的双向选择，收到了良好的应用效果。以上研究成果从不同角度丰富、补充和发展了供需服务匹配的研究，但利用供需服务双边匹配模型，解决老年人对养老生活的需求和养老服务供给之间匹配问题的研究还较少。

老年人群体数量十分庞大，为了有效地为不

同特征的老年人提供养老服务，可将大量老年人分成具有不同特征的老年群体，明确不同老年群体的养老需求。针对大群体聚类研究，谢卫星等^[6]提出了一种基于惩罚竞争机制的混合属性顾客分类方法，根据数值型和分类型属性值的分布规律，给出了混合数据初始聚类中心的确定方法；陈梅梅等^[7]通过因子分析和聚类分析研究网络购买决策的关键影响因素。上述聚类方法难以对混合复杂的老年群体特征数据进行快速分类处理，更无法自动判断结果中的最佳聚类数。两步聚类法作为一种重要的数据挖掘综合分析方法，可以自动识别数据集中的相似人群或对象，同时处理分类变量和连续型变量，通过比较不同聚类结果的模型选择准则，程序自动确定最优聚类数，且可以有效地分析大样本数据^[8]。同时，它允许保留数据完整的信息，不需要进行数据转换，因而能对聚类后形成的不同老年群体所具有的不同特征提供丰富的解释。

在智慧养老服务供需匹配的过程中，由于评价者存在差异，需求方与供给方彼此的评价信息存在多种属性。关于不同属性信息的处理方式，常用的方法是将多种信息转化为同一种信息形式进行比较。但这样不仅不能正确反映不同信息的异质性，还可能在大量信息转化过程中出现信息缺失等问题。鉴于此，Lourenzutti等^[9]提出模块化(modular)思想，将不同属性的信息分成不同模块，对每个模块单独进行信息处理，从而可以更精确地获得双方的评价信息，避免了信息在处理过程中的损失。潘亚虹等^[10]基于模块化思想，通过计算各属性下群体效用最大化和个体遗憾最小化进行排序择优；Lourenzutti等^[11]考虑模块化思想，将逼近理想解排序法(TOPSIS)和交互式多准则决策方法(TODIM)相结合，提出了包含随机变量的混合多属性决策方法。上述研究表明，模块化思想与混合多属性决策方法结合是一种可行的

方案,具有一定的合理性。智慧养老服务供需匹配的目标是双方满意度最高,因此,处理不同的评价信息后需要计算满意度。折衷解决方法(measurement alternatives and ranking according to compromise solution, MARCOS)^[12]通过定义正负理想方案获得备选方案的效用函数,由效用函数表示评价对象最终效用值,即满意度。该方法的优点是在初始矩阵形成时就定义了正负理想解,可以更精确地确定评价对象与两种解之间相关的效用度,在保持方法稳定性的同时考虑大量准则,以及评价对象因权重不同而产生不同决策结果的可能性。因此,利用 MARCOS 计算得到的最终效用值来表示评价方对被评价方的效用满意度,效用满意度与期望备选方案的可能性成正比。

本文根据智慧养老服务所具有的特点,提出了基于多源数据双边匹配模型解决智慧养老服务供需不匹配的问题,通过两步聚类法对具有不同特征的大量老年人进行聚类。依据模块化折衷解决方法(Mo-MARCOS)对评价信息进行处理,并计算满意度,最终构建双边匹配的满意度测度模型,从而为解决智慧养老服务中的供需匹配问题提供了重要的决策支持。

1 智慧养老服务供需匹配模型

1.1 基于两步聚类的养老需求群体聚类算法

两步聚类法(two-step cluster, TSC)是一种揭示数据集自然分类的探索性分析方法,不需要提前预定聚类数目,可用来处理海量数据并且具有同时处理离散变量和连续变量的能力,包含预聚类和聚类两步^[13]。基于两步聚类算法的养老需求群体聚类如下:a.构建聚类特征树,通过贝叶斯信息标准(Bayes information criterion, BIC)和 Akaike 信息准则(Akaike information criterion, AIC)两个指标,从而自动识别最佳的养老需求群体类别数目;b.通过构建和修改聚类特征树对记录进行初步归类;c.对这些初步分类的结果再次进行层次聚类,获得最终养老需求群体聚类结果。通过分析 BIC 和 AIC 来确定最优类别数,为研究人员节省了大量的时间,同时面对包含大量离散变量和连续变量的养老需求群体,利用两步聚类法可以得到最优结果。

两步聚类分析使用对数似然标准来揭示群体数据中的自然分组。设聚类*i*与聚类*j*,*ij*表示它

们合并成的聚类,它们含有样本点的个数依次为 n_i, n_j, n_{ij} 。数据集中有 K 个连续变量,其中第 k 个变量, $k=1,2,\dots,K$ 在整个数据集、聚类*i*、聚类*j*及聚类*ij*的方差估计分别为 $\hat{\sigma}_k^2, \hat{\sigma}_{ik}^2, \hat{\sigma}_{jk}^2$ 及 $\hat{\sigma}_{ijk}^2$,则聚类*i*与聚类*j*之间的对数似然距离为

$$d_{ij} = n_{ij} \left(\sum_{k=1}^K \ln \left(\sqrt{\hat{\sigma}_{ijk}^2 + \hat{\sigma}_k^2} \right) \right) - n_i \left(\sum_{k=1}^K \ln \left(\sqrt{\hat{\sigma}_{ik}^2 + \hat{\sigma}_k^2} \right) \right) - n_j \left(\sum_{k=1}^K \ln \left(\sqrt{\hat{\sigma}_{jk}^2 + \hat{\sigma}_k^2} \right) \right) \quad (1)$$

显然,对数似然距离是一种基于概率的距离。当两个聚类合并为一个聚类时,它们之间的距离与对数似然性的减少有关。在预聚类步骤中,扫描数据中的所有情况,并测量它们之间的对数似然距离,以某个阈值距离准则确定它们是否将形成预簇。在第二步中,使用凝聚聚类算法,将来自于预聚类步骤的聚类集聚为最佳数量的聚类。这时第一步的每个子聚类被视为单个记录,如果它们满足式(1)中的最小距离阈值,则再被合并为一个大记录,直到所有数据记录被集聚成一个群集。

如果未预先确定所需的聚类数量,则算法可以使用 BIC 或 AIC 自动确定最佳量。设聚类数量为 J ,数据集总观测值个数(总记录)为 N ,则两种方法的聚类结果分别为

$$\lambda_{AIC}(J) = 2 \sum_{j=1}^J n_j \left(\sum_{k=1}^K \ln \left(\sqrt{\hat{\sigma}_{jk}^2 + \hat{\sigma}_k^2} \right) \right) + 4KJ \quad (2)$$

$$\lambda_{BIC}(J) = 2 \sum_{j=1}^J n_j \left(\sum_{k=1}^K \ln \left(\sqrt{\hat{\sigma}_{jk}^2 + \hat{\sigma}_k^2} \right) \right) + 2KJ \ln N \quad (3)$$

根据上述步骤,本文采用 SPSS 19.0 软件的两步聚类算法对集成后的数据进行分析,输入不同变量对大量养老需求群体进行聚类。

1.2 智慧养老服务供需双方混合评价信息处理

从我国老年人对养老照料服务的需求满足程度来看,较多研究揭示了目前我国老年人的照料服务需求得不到满足的情况较为严重。对于老年群体来说,生活照料服务能够满足社区老年人的最基本生活需求。患病老人不仅需要日常生活的照顾,而且需要疾病护理以及健康检测等特殊医疗服务,所以患病老年人群对于“医养结合-健康护理”的新型养老服务模式的需求日益迫切。随着我国失能及半失能老人的数量不断增加,日常

照料和医疗护理问题日益严峻。另外, 精神慰藉也至关重要, 要在保证减少老人孤独感的同时提高他们的生活质量; 《“健康中国 2030”规划纲要》中提到需要加强全民安全意识教育。预计到 2030 年, 我国要建立起覆盖全国范围的紧急救援服务机构, 对于突发事件卫生应急处置能力和紧急医学救援能力也以发达国家水平为目标, 进一步健全医疗急救体系, 提高救治效率。综上所述, 本文选取“生活照料服务”、“健康护理服务”、“精神慰藉服务”和“安全服务”4 方面作为养老服务供给维度。

在智慧养老服务需求方对供给方的评价过程中, 由于供给方的服务价格为定量指标, 需求方的满意程度可直接通过 0~10 打分评价, 因此选择精确数处理该指标。安全看护能力和健康管理能力为定性指标, 往往采用“差”、“中等”、“好”等模糊语言进行评估, 本文采用可以表达隶属度和非隶属度信息的直觉模糊数来处理这两个指标。亲情关爱能力和应急能力也属于定性指标, 并且这两个指标涉及更多的供给软实力, 不确定性更强。专家通常在多个语义术语之间犹豫不决, 因此, 本文采用概率语言术语集来处理这两个指标, 以便既能反映决策者的犹豫程度, 又能反映他们对语言术语的偏好程度。

1.2.1 概率语言术语集

在实际养老服务供需匹配中, 由于老年群体对具体养老服务认知不清晰, 以及表达判断能力的不同, 不能给出精确评价信息, Pang 等^[14]提出概率语言术语集 (probabilistic linguistic term set, PLTS) 对定性属性评价时, 通过对语义集赋予相对应的概率以精确地表达不同养老需求群体的偏好信息。概率语言术语集如定义 1 所示。

定义 1^[14] 设 $S = \{S_\alpha | \alpha = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \tau-1, \tau\}$ 为一个 LTS, 则称 $L(p) = \{L^{(k)}(p^{(k)}) | L^{(k)} \in S, 0 \leq p^{(k)} \leq 1, k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1\}$ 为一个 PLTS。其中 $L^{(k)}(p^{(k)})$ 表示第 k 个概率信息语言术语集 $L^{(k)}$ 的概率为 $p^{(k)}$, $\#L(p)$ 是所有 $L(p)$ 中包含的语义集的个数。

PLTS 中 $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}$ 的值表示该概率语言信息的所有语言信息概率总和。当 $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1$ 时, 表示专家给出的评价信息是不完整的概率分布, 需要对

PLTS 进行标准化。标准化可通过定义 2 和定义 3 得到。

定义 2^[14] $L(p)_1$ 和 $L(p)_2$ 为两个概率语言术语集, $L(p)_1 = \{L_1^{(k)}(p_1^{(k)}) | k = 1, 2, \dots, \#L(p)_1\}$, $L(p)_2 = \{L_2^{(k)}(p_2^{(k)}) | k = 1, 2, \dots, \#L(p)_2\}$, 如果 $\#L(p)_1 > \#L(p)_2$, 则需要在 $\#L(p)_2$ 中加入 $(\#L(p)_1 - \#L(p)_2)$ 个语言术语元素, 使两个语言集元素个数相同, 增加的语言集元素为 $L(p)_2$ 中最小的语言元素, 概率为 0。

定义 3^[14] 若 PLTS 中 $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1$, 则标准化概率语言 $\bar{L}(p)$ 可表示为

$$\bar{L}(p) = \{L^{(k)}(\bar{p}^{(k)}) | 0 \leq \bar{p}^{(k)} \leq 1, k = 1, 2, \dots, \#L(p)\} \quad (4)$$

其中, $\bar{p}^{(k)} = p^{(k)} / \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}$ 。令 $r^{(k)}$ 为概率语言术语

$L^{(k)}$ 的下标, 每一条 PLTS 信息内所有元素均按照 $r^{(k)} p^{(k)}$ 值的降序排列, 若 PLTS 内元素的 $r^{(k)} p^{(k)}$ 值相等, 则元素按照 $r^{(k)}$ 的降序排列。

关于两个 PLTS 之间的大小关系, 可以通过概率语言术语集的得分函数以及偏差度函数进行比较, 如定义 4~6 所示。

定义 4^[14] $L_1^{(k)}$ 和 $L_2^{(k)}$ 分别为 $L(p)_1$ 和 $L(p)_2$ 中第 k 个语义集, $p_1^{(k)}$ 和 $p_2^{(k)}$ 分别为语义集 $L_1^{(k)}$ 和 $L_2^{(k)}$ 的概率, 则 $L(p)_1$ 和 $L(p)_2$ 之间的距离公式为

$$d(L(p)_1, L(p)_2) = \sqrt{\sum_{k=1}^{\#L(p)_1} \frac{(p_1^{(k)} r_1^{(k)} - p_2^{(k)} r_2^{(k)})^2}{\#L(p)_1}} \quad (5)$$

定义 5^[14] 设 $L(p) = \{L^{(k)}(p^{(k)}) | k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$ 为一个 PLTS, $r^{(k)}$ 为概率语言术语 $L^{(k)}$ 的下标, 则 $L(p)$ 的得分函数为

$$F(L(p)) = S_{\bar{\alpha}} \quad (6)$$

其中, $\bar{\alpha} = \sum_{k=1}^{\#L(p)} r^{(k)} p^{(k)} / \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}$ 。对于概率语言术语集 $L(p)_1$ 和 $L(p)_2$, 如果 $F(L(p)_1) > F(L(p)_2)$, 则 $L(p)_1 > L(p)_2$ 。

定义 6^[14] 设 $L(p) = \{L^{(k)}(p^{(k)}) | k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$ 为一个 PLTS, $r^{(k)}$ 为概率语言术语 $L^{(k)}$ 的下标, 则 $L(p)$ 的得分函数为 $F(L(p)) = S_{\bar{\alpha}}$, 则 $L(p)$ 的偏差度为

$$\sigma(L(p)) = \sum_{k=1}^{\#L(p)} (p^{(k)} (r^{(k)} - \bar{\alpha})^2)^{\frac{1}{2}} / \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \quad (7)$$

1.2.2 直觉模糊集

养老服务供给方需要对老年群体的客观情况

作出判断, Atanassov^[15]引入了直觉模糊集(intuitionistic fuzzy set, IFS)作为处理决策问题中由于犹豫程度而产生模糊性的有效方法, 如定义7所示。

定义 7^[15] 设 X 是一个有限的非空集合, 则称 $I = \{x, \mu(x), \nu(x) | x \in X\}$ 为直觉模糊集。其中, $\mu(x)$ 和 $\nu(x)$ 分别表示元素 $x \in X$ 对于集合 I 的隶属度和非隶属度, $\mu(x) \in [0, 1]$, $\nu(x) \in [0, 1]$, 且满足 $0 \leq \mu(x) + \nu(x) \leq 1$ 。进一步地, $\pi(x) = 1 - \mu(x) - \nu(x)$, $\pi(x)$ 表示直觉模糊集 I 中元素 x 的犹豫程度。

本文设 $E = \{1, 2, \dots, e, \dots, f\}$ 是决策者的集合, 第 e 位决策者对养老需求群体的第 j 个属性的评估记作 P_{je} , 根据语义评价与直觉模糊数的对应关系得到 $\hat{P}_{je}$, $\hat{P}_{je} = (\mu_{je}, \nu_{je}, \pi_{je})$ 。其中,

$$\pi_{je} = 1 - \mu_{je} - \nu_{je} \quad (8)$$

Szmidt 等^[16]给出两个直觉模糊集 $\gamma = \{\langle x_i, \mu_\gamma(x_i), \nu_\gamma(x_i) \rangle | x_i \in X\}$ 和 $\beta = \{\langle x_i, \mu_\beta(x_i), \nu_\beta(x_i) \rangle | x_i \in X\}$ 之间的欧式距离 $d_{ED^{Sz}}(\gamma, \beta)$ 和标准化欧式距离 $d_{NED^{Sz}}(\gamma, \beta)$ 分别表示为

$$d_{ED^{Sz}}(\gamma, \beta) = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[(\Delta_\mu^{\gamma\beta}(i))^2 + (\Delta_\nu^{\gamma\beta}(i))^2 + (\Delta_\pi^{\gamma\beta}(i))^2 \right]} \quad (9)$$

$$d_{NED^{Sz}}(\gamma, \beta) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[(\Delta_\mu^{\gamma\beta}(i))^2 + (\Delta_\nu^{\gamma\beta}(i))^2 + (\Delta_\pi^{\gamma\beta}(i))^2 \right]} \quad (10)$$

1.3 智慧养老服务双边匹配建模与求解

针对老年群体对评价信息表达的不确定性和模糊性引入概率语言和直觉模糊数, 同时针对匹配过程中双方满意性、公平性及稳定性不高的问题, 提出了一种模块化双边匹配方法。首先根据属性性质确定其评价信息类型, 将评价信息矩阵按照属性分成多个独立模块, 然后利用 MARCOS 计算双边效用满意度。基于双边效用满意度, 同时考虑匹配结果的稳定性构建双边匹配模型, 最后对某地区老年群体进行仿真实验, 得到其智慧养老服务最优匹配方案。

1.3.1 双边评价信息模块化处理

信息的模块化处理不仅有效避免了因评价信息类型不同, 需要转化为同一种信息类型时造成的信息损失, 而且能够合理处理因混合评价信息无法转化为同一种类型而无法进行方案优劣比较的问题。

设老年群体对智慧养老服务的需求匹配中, 包含 n 个方案 A_i ; m 个评价属性 C_j ; x_{ij} 表示方案 A_i 针对属性 C_j 的评价信息; m 个模块 M_j , $M_j = (x_{1j}, \dots, x_{nj})^T$ 。 M^N 表示评价信息为精确数型(number, N)的模块; M^P 表示评价信息为概率语义型(PLTS)的模块; M^I 表示评价信息为模糊语义型(IFS)的模块。根据上文对不同属性评价信息的处理方法, 当评价信息为精确数型时, 方案 A_i 针对属性 C_j 的评价信息处理为 $\bar{y}_{ij}$; 当评价信息为模糊语义型时, 方案 A_i 针对属性 C_j 的评价信息处理为 $\hat{P}_{je}$; 当评价信息为概率语义型时, 方案 A_i 针对属性 C_j 的评价信息处理为 $\bar{L}(p)_{ij}$ 。评价信息处理后的矩阵为

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = (M_1, M_2, \dots, M_j) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

智慧养老服务对应老年群体的供给匹配中, 评价信息的模块化处理执行上述步骤。

1.3.2 运用改进离差最大化法确定属性权重

为了充分体现属性权重在不同方案中的差别, 利用改进离差最大化法^[17]计算属性的客观权重, 具体步骤如下:

步骤 1 计算属性值离差。在混合多属性决策中, 若第 j 个属性在不同方案中的属性值有差异, 表示该属性对不同方案的影响较大, 应赋较大权重; 反之, 其不同方案中的属性值无差异, 则赋较小权重。

对于属性 C_j , 用 $\Delta V_i(j)$ 表示方案 A_i 下属性值 x_{ij} 与其他方案下属性值 x_{lj} 之间的离差为

$$\Delta V_i(j) = |x_{ij} - x_{lj}|, l = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

其中: 概率语义型评价信息的离差通过式(5)计算得出; 直觉模糊型评价信息的离差通过式(7)~(8)计算得出。

方案 A_i 下属性值 x_{ij} 与其他方案下属性值的总离差为

$$V_i(j) = \sum_{l=1}^m |x_{ij} - x_{lj}|, l = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

步骤 2 基于离差最大化法, 得到相同方案下不同属性间总离差的判定矩阵。

步骤 3 求解方案 A_i 所对应判定矩阵对应的

特征向量 w_i , 对其归一化处理得到属性权重 w'_{ij} 。

$$w'_{ij} = w_{ij} / \sum_{j=1}^n w_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

步骤4 再对其他方案分别执行上述步骤, 得到不同方案下各属性的权重 w_{ij} 。

$$W = (w_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w'_{11} & w'_{12} & \dots & w'_{1n} \\ w'_{21} & w'_{22} & \dots & w'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w'_{m1} & w'_{m2} & \dots & w'_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

1.3.3 基于 Mo-MARCOS 的双边满意度测度模型

基于上述的评价信息处理以及属性权重, 本文通过 MARCOS 方法^[12]得到评价对象的效用满意度。基于 Mo-RMARCOS 对方案排序的具体计算步骤如下所示。

步骤1 形成模块化后的决策矩阵。

步骤2 定义正理想解决方案 AI(ideal solution, AI)和负理想解决方案 AAI(anti-ideal solution, AAI)。

若为效益型属性, 则效用值为

$$S_{AAI} = \min_i w'_{ij} \quad (15)$$

$$S_{AI} = \max_i w'_{ij} \quad (16)$$

若为成本型属性, 则效用值为

$$S_{AAI} = \max_i w'_{ij} \quad (17)$$

$$S_{AI} = \min_i w'_{ij} \quad (18)$$

步骤3 对属性权重 w'_{ij} 归一化处理得到权重 $\tilde{w}_{ij}$ 。

若为效益型属性

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{w'_{ij}}{w'_{idj}} \quad (19)$$

若为成本型属性

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{w'_{aij}}{w'_{ij}} \quad (20)$$

式中, w'_{idj} 和 w'_{aij} 分别表示属性 C_j 在正、负理想方案下的权重。

步骤4 确定加权矩阵。通过将归一化矩阵中各属性权重系数与属性权重系数 w_j 相乘得到加权权重 v_{ij} , 即

$$v_{ij} = \tilde{w}_{ij} \times w_j \quad (21)$$

步骤5 确定备选方案的效用值 $\tilde{S}_i$ 、正效用程

度 $\tilde{K}_i^+$ 、负效用程度 $\tilde{K}_i^-$, 则

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} \quad (22)$$

$$\tilde{K}_i^+ = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{id}} \quad (23)$$

$$\tilde{K}_i^- = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{ai}} \quad (24)$$

式中, $\tilde{S}_{id}$ 表示 AI 的效用值, $\tilde{S}_{ai}$ 表示 AAI 的效用值, 均依据式(20)计算得到。

步骤6 计算备选方案的正效用函数 $f(\tilde{K}_i^+)$ 、负效用函数 $f(\tilde{K}_i^-)$ 、总效用函数 $f(\tilde{K}_i)$ 并排序。

$$f(\tilde{K}_i^+) = \frac{\tilde{K}_i^-}{\tilde{K}_i^+ + \tilde{K}_i^-} \quad (25)$$

$$f(\tilde{K}_i^-) = \frac{\tilde{K}_i^+}{\tilde{K}_i^+ + \tilde{K}_i^-} \quad (26)$$

$$f(\tilde{K}_i) = \frac{\tilde{K}_i^+ + \tilde{K}_i^-}{1 + \frac{1 - f(\tilde{K}_i^+)}{f(\tilde{K}_i^+)} + \frac{1 - f(\tilde{K}_i^-)}{f(\tilde{K}_i^-)}} \quad (27)$$

1.3.4 双边匹配模型构建与求解

稳定匹配约束条件的构建, 甲方 A_i 对乙方 B_j 的匹配满意度为 p_{ij} , 对乙方 B_k 的匹配满意度为 p_{ik} , 若 $p_{ij} > p_{ik}$, 则 A_i 对 B_j 和 B_k 的满意偏好优先排序为 $B_j > B_k$ 。乙方 B_j 对甲方 A_i 的匹配满意度为 q_{ij} 。

引入 0-1 变量 x_{ij} : $x_{ij}=1$ 表示 A_i 与 B_j 在匹配方案中相匹配; $x_{ij}=0$ 表示 A_i 与 B_j 在匹配方案中不匹配。稳定匹配约束条件^[18]可以表示为

$$x_{ij} + \sum_{p_{ik} < p_{ij}} x_{ik} + \sum_{q_{lj} < q_{ij}} x_{lj} \geq 1 \quad (28)$$

$\sum_{p_{ik} > p_{ij}} x_{ik} = 1$, 则表示对于 A_i 必然存在一个乙

方 B_k 满足 $B_k > B_j (j \neq k)$, 并与 A_i 相匹配; 若

$\sum_{p_{ik} > p_{ij}} x_{ik} = 0$, 则表示在满足 $B_k > B_j (j \neq k)$ 条件的所有乙方主体 B 中, 不存在与 A_i 相匹配的主体 B_k 。乙方 B_j 对所有甲方主体 A 同理。因此, 如果 $x_{ij}=0$, 则表示 A_i 与 B_j 在匹配方案 μ 中未进行匹配, 上式中

$\sum_{p_{ik} > p_{ij}} x_{ik}$ 与 $\sum_{q_{lj} > q_{ij}} x_{lj}$ 中至少有一个为 1, 即存在 B_j , 且能够与满意偏好优于 B_j 的 B_k 相匹配, 或 B_j 与满意偏好优于 A_i 的 A_l 相匹配, 由此可以保证 A_i 与

B_j 不构成阻塞匹配对，确保了匹配方案为稳定双边匹配。

通过上文得到的效用值可知，效用值越大，评价方对被评价方的满意程度越大。根据甲方评价专家 A 对乙方评价对象 B 的匹配满意度 $P = [p_{ij}]_{m \times n}$ ，以及乙方评价专家 B 对甲方评价对象的匹配满意度 $Q = [q_{ij}]_{m \times n}$ 分析，引入 0-1 变量 x_{ij} ，考虑双边匹配的满意性、公平性和稳定性。基于双方的满意度矩阵，以双方主体匹配满意度最大化为目标，构建多目标双边匹配模型，即

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} \tag{29}$$

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij} \tag{30}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1 \tag{31}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \tag{32}$$

$$x_{ij} + \sum_{p_{ik} > p_{ij}} x_{ik} + \sum_{q_{lj} > q_{ij}} x_{lj} \geq 1 \tag{33}$$

$$x_{ij} \in \{1, 2\}, i \in M, j \in N \tag{34}$$

在上述模型中， Z_1 和 Z_2 分别表示甲方主体与乙方主体的总体满意度，目标函数表示实现双方主体各自匹配满意度之和最大。

该模型是一个多目标 0-1 整数规划模型，本文采用基于线性加权求和方法将上述模型转化为单目标规划模型。设 w_1 和 w_2 为目标函数 Z_1 和 Z_2 的权重，且 $w_1 \geq 0, w_2 \leq 1, w_1 + w_2 = 1$ ，则上述模型从多目标规划模型转化为单目标规划模型，即

$$\begin{aligned} \max Z^* &= w_1 Z_1 + w_2 Z_2 = \\ &w_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} + w_2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij} \end{aligned} \tag{35}$$

其余约束条件不变。依据优化模型可得到最优的双边匹配方案。

2 实例分析

2.1 养老需求群体聚类分布

本文收集上海市某综合养老服务中心近 5 年的电子档案 3 736 份，经数据预处理后剩余 2 312 份。从记录内容中抽取与养老需求相关的信息：“患

有慢性疾病”（1 035 人）、“独居”（570 人）、“精神良好”（555 人）、“身体处于失能或半失能状态”（863 人）等因素进行研究。若记录中无该因素时，相应的因素取值为 0，否则为 1。

步骤 1 利用式(1)~(3)以及 SPSS 19.0 软件的两步聚类算法对集成后的数据进行分析。

从生活照料服务、健康护理服务、精神慰藉服务和安全服务 4 方面出发，以“精神良好”、“独居”、“身体处于失能或半失能状态”、“患有慢性疾病”、性别作为分类变量，以年龄作为连续变量进行输入。总体输入 6 个变量（5 个分类变量，1 个连续变量），最终将数据聚成 5 类，5 类包含的样本数量和所占比例如图 1 所示。最小聚类大小：332(14.4%)；最大聚类大小 555(24%)；大小比率（最大聚类比最小聚类）1.67。

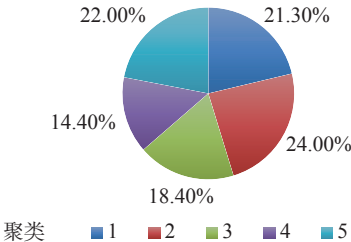


图 1 聚类大小分布
Fig.1 Size distribution of the cluster

步骤 2 预测变量重要性。从图 2 可以看出，在养老需求群体分类的预测变量重要性中，身体处于失能或半失能状态和患有慢性病是最重要的，值为 1.0，精神良好为 0.93，独居为 0.59，年龄值为 0.2，性别值为 0.02。

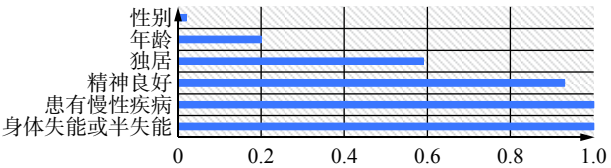


图 2 预测变量重要性排序
Fig.2 Ranking of predictors in importance

从表 1 可以看出，养老需求群体聚类总体分布及每类特征。第 1 类身体均处于失能或半失能状态，精神状况一般；第 2 类精神状况良好，独居老人占 26.1%，身体处于失能或半失能状态占 37.3%，患有慢性疾病占 45.6%，年龄均值为 75.35 岁；第 3 类精神状况一般，均为独居老人，身体处于失能或半失能状态占 38.6%，患有慢性疾病占 43.1%，年龄均值为 72.75 岁；第 4 类精神良好，不独居，身体不处于失能或半失能，均患有

表1 聚类总体分布

Tab.1 Population distribution of the cluster

聚类	占比	精神良好	独居	身体处于失能或半失能	患有慢性疾病	年龄	性别
1	21.3%(492)	0(100%)	0(100%)	1(100%)	1(55.7%)	68.63	2(63.8%)
2	24.0%(555)	1(100%)	0(73.9%)	0(62.7%)	0(54.4%)	75.35	2(52.6%)
3	18.4%(425)	0(100%)	1(100%)	0(61.4%)	0(56.9%)	72.75	2(50.4%)
4	14.4%(332)	1(100%)	0(100%)	0(100%)	1(100%)	72.52	2(63.6%)
5	22.0%(508)	0(100%)	0(100%)	0(100%)	0(100%)	63.28	2(60.4%)

慢性疾病, 年龄均值为 72.52 岁; 第 5 类精神一般, 不独居, 身体均处于失能或半失能状态, 无慢性疾病, 年龄均值为 63.28 岁。

2.2 基于 Mo-MARCOS 智慧养老服务双边满意度评价

通过上海市某综合养老服务中心所提供的相关信息, 进行智慧养老供需匹配研究。根据上文聚类分析后得到的 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 这 5 类养老需求群体, 以及由智慧养老服务相关研究得到的智慧机构养老 B_1 、智慧社区养老 B_2 、智慧居家养老 B_3 这 3 种智慧养老类型进行供需匹配。

从生活照料服务、健康护理服务、精神慰藉服务和安全服务 4 方面出发, 养老需求群体更关注养老服务供给的服务价格 C_1^A 、安全看护能力 C_2^A 、亲情关爱能力 C_3^A 、健康管理能力 C_4^A 、应急能力 C_5^A 等属性。同时给出每个属性权重系数 w_j 为 0.059, 0.367, 0.187, 0.187, 0.200。养老服务供给方较为关注需求群体的身体状况 C_1^B 、服务难度 C_2^B 、心理健康 C_3^B 、家庭情况 C_4^B 、收入水平 C_5^B 等属性, 属性权重系数 w_j 为 0.640, 0.231, 0.050, 0.029, 0.050。根据双方给出的偏好信息对双边进行优化匹配。针对安全看护能力 C_2^A 和健康管理能力 C_4^A 这两个定性属性选择 5 粒度语言术语集 $S^5 = \{S_{-2}^5(B), S_{-1}^5(MB), S_0^5(MG), S_1^5(VG), S_2^5(EG)\}$; 针对亲情关爱能力 C_3^A 和应急能力 C_5^A 这两个属性采用直觉模糊术语集 $S^{10} = \{S_0(EG), S_1(VVG), S_2(VG), S_3(G), S_4(MG), S_5(F), S_6(MB), S_7(B), S_8(VB), S_9(VVB)\}$ 进行评价。直觉模糊术语集对应的语义评价为: 特别好 (extremely good, EG); 非常好 (very very good, VVG); 一般好 (very good, VG); 好

(good, G); 一般 (medium good, MG); 不太好 (fair, F); 不好 (medium bad, MB); 差 (bad, B); 非常差 (very bad, VB); 特别差 (very very bad, VVB)。直觉模糊术语集对应的直觉模糊数为 $S^{10} = \{S_0\langle 1.00, 0.00 \rangle, S_1\langle 0.85, 0.10 \rangle, S_2\langle 0.80, 0.15 \rangle, S_3\langle 0.70, 0.20 \rangle, S_4\langle 0.60, 0.30 \rangle, S_5\langle 0.50, 0.40 \rangle, S_6\langle 0.40, 0.50 \rangle, S_7\langle 0.25, 0.60 \rangle, S_8\langle 0.10, 0.75 \rangle, S_9\langle 0.10, 0.90 \rangle\}$

针对定量评价信息选择 0~10 打分进行评价, 双方评价信息如表 2 和表 3 所示。

以需求方 A_1 对供给方 B 的评价信息为例, 根据表 2, 当评价信息属性为数值型时, 评价信息为 y_{ij} , 标准化后的评价信息为 $\bar{y}_{ij}$ 。若为成本型属性: $\bar{y}_{ij} = (y_{ij}^{\max} - y_{ij}) / (y_{ij}^{\max} - y_{ij}^{\min})$; 若为效益型属性: $\bar{y}_{ij} = (y_{ij} - y_{ij}^{\min}) / (y_{ij}^{\max} - y_{ij}^{\min})$ 属性 C_1^A 为精确数, $M_1^N = (0.667; 0; 1)$ 。

属性 C_2^A 为概率语义型, 利用 (4) 得到标准化后的概率语义集, 属性 C_2^A 的概率语义集为 $M_2^P = (\bar{L}(p)_{12}; \bar{L}(p)_{22}; \bar{L}(p)_{32})$, 其中 $\bar{L}(p)_{12} = \{S_1(0.25), S_2(0.75)\}$, $\bar{L}(p)_{22} = \{S_1(0.5), S_2(0.5)\}$, $\bar{L}(p)_{32} = \{S_0(0.375), S_1(0.625)\}$ 。

属性 C_3^A 为直觉模糊数, 利用式 (8) 得到 $M_3^I = \{\langle 0.7, 0.2, 0.1 \rangle; \langle 0.6, 0.3, 0.1 \rangle; \langle 0.5, 0.4, 0.1 \rangle\}$ 。

属性 C_4^A 为概率语义型, 利用式 (4) 得到标准化后的概率语义集, 属性 C_4^A 的概率语义集为 $M_4^P = (\bar{L}(p)_{14}; \bar{L}(p)_{24}; \bar{L}(p)_{34})$, 其中, $\bar{L}(p)_{14} = \{S_{-1}(0.6), S_1(0.4)\}$, $\bar{L}(p)_{24} = \{S_1(0.417), S_2(0.583)\}$, $\bar{L}(p)_{34} = \{S_1(1)\}$ 。

属性 C_5^A 为直觉模糊数, 利用式 (8) 得到 $M_5^I = \{\langle 0.4, 0.5, 0.1 \rangle; \langle 0.4, 0.5, 0.1 \rangle; \langle 0.5, 0.4, 0.1 \rangle\}$ 。

通过对不同属性评价信息的模块化处理, 得到需求方 A_1 对供给方 B 的评价信息矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.667 & \{S_1(0.25), S_2(0.75)\} & \langle 0.7, 0.2, 0.1 \rangle & \{S_{-1}(0.6), S_1(0.4)\} & \langle 0.4, 0.5, 0.1 \rangle \\ 0 & \{S_1(0.5), S_2(0.5)\} & \langle 0.6, 0.3, 0.1 \rangle & \{S_1(0.417), S_2(0.583)\} & \langle 0.4, 0.5, 0.1 \rangle \\ 1 & \{S_0(0.375), S_1(0.625)\} & \langle 0.5, 0.4, 0.1 \rangle & \{S_1(1), S_1(0)\} & \langle 0.5, 0.4, 0.1 \rangle \end{bmatrix}$$

根据评价信息矩阵, 利用式 (11)~(12) 计算 属性间离差, 其中概率语义型信息的离差计算利用式

(5)~(7)，直觉模糊型信息的离差计算利用式(9)~(10)。模块 M_1^N 中总离差为 $V(1)=(1, 1.667, 1.333)$ ； M_2^P 中总离差为 $V(2)=(1.038, 0.837, 1.085)$ ； M_3^I 中总离差为 $V(3)=(0.424, 0.283, 0.424)$ ； M_4^P 中总离差为 $V(4)=(2.066, 1.822, 2.464)$ ； M_5^I 中总离差为 $V(5)=(0.141, 0.141, 0.283)$ 。对总离差两两比较后，得到各方案下不同属性间总离差判断矩阵，求解对应的特征向量。根据式(13)~(14)得到属性权重，

表 2 智慧养老服务需求方对供给方原始评价信息

Tab.2 Original evaluation information of the demand side on the supplier of the intelligent old-age care services

需求方	供给方	服务价格	安全看护能力	亲情关爱能力	健康管理能力	应急能力
A_1	B_1	8.5	$\{S_1(0.2), S_2(0.6)\}$	G	$\{S_{-1}(0.9), S_2(0.6)\}$	MB
	B_2	7.5	$\{S_1(0.5), S_2(0.5)\}$	MG	$\{S_1(0.5), S_2(0.7)\}$	MB
	B_3	9.0	$\{S_0(0.3), S_1(0.5)\}$	F	$\{S_1(0.4)\}$	F
A_2	B_1	8.5	$\{S_2(0.6)\}$	B	$\{S_{-2}(0.4), S_0(0.4)\}$	B
	B_2	8.0	$\{S_0(0.7), S_1(0.4)\}$	B	$\{S_1(0.4), S_{-1}(0.8)\}$	B
	B_3	8.0	$\{S_{-1}(0.6), S_0(0.2)\}$	MB	$\{S_{-1}(0.5), S_0(0.7)\}$	F
A_3	B_1	7.0	$\{S_0(0.5), S_2(0.3)\}$	MG	$\{S_2(0.7)\}$	F
	B_2	8.0	$\{S_1(0.8), S_2(0.1)\}$	MG	$\{S_1(0.6), S_2(0.6)\}$	F
	B_3	7.0	$\{S_0(0.7)\}$	G	$\{S_0(0.5), S_2(0.3)\}$	MG
A_4	B_1	7.5	$\{S_1(0.4), S_2(0.3)\}$	VG	$\{S_{-2}(0.3), S_0(0.3)\}$	F
	B_2	8.0	$\{S_0(0.6), S_2(0.2)\}$	VG	$\{S_1(0.5), S_2(0.8)\}$	B
	B_3	8.0	$\{S_1(0.5), S_2(0.4)\}$	G	$\{S_2(0.5)\}$	MG
A_5	B_1	8.5	$\{S_0(0.8), S_2(0.4)\}$	G	$\{S_{-1}(0.4), S_{-2}(0.2)\}$	MG
	B_2	9.0	$\{S_{-1}(0.8)\}$	VG	$\{S_0(0.3)\}$	G
	B_3	8.0	$\{S_0(0.2), S_2(0.7)\}$	MG	$\{S_{-2}(0.8)\}$	F

表 3 智慧养老服务供给方对需求方原始评价信息

Tab.3 Original evaluation information of the supply side on the service providers of the intelligent old-age care

供给方	需求方	身体状况	服务难度	心理健康	家庭情况	收入水平
B_1	A_1	$\{S_1(0.2), S_2(0.7)\}$	F	$\{S_{-1}(0.9), S_1(0.6)\}$	F	8.5
	A_2	$\{S_0(0.4), S_2(0.5)\}$	F	$\{S_1(0.5), S_2(0.2)\}$	VG	9.0
	A_3	$\{S_0(0.3), S_1(0.6)\}$	MG	$\{S_0(0.6)\}$	G	8.0
	A_4	$\{S_{-2}(0.6), S_1(0.6)\}$	F	$\{S_{-2}(0.7), S_0(0.4)\}$	B	8.0
	A_5	$\{S_{-1}(0.7), S_0(0.2)\}$	B	$\{S_1(0.8), S_{-1}(0.6)\}$	MB	9.0
B_2	A_1	$\{S_{-1}(0.6), S_1(0.2)\}$	G	$\{S_{-1}(0.8), S_0(0.6)\}$	F	8.0
	A_2	$\{S_0(0.7), S_2(0.4)\}$	G	$\{S_2(0.7)\}$	G	8.5
	A_3	$\{S_1(0.8), S_2(0.4)\}$	F	$\{S_1(0.6), S_2(0.5)\}$	MG	8.5
	A_4	$\{S_2(0.3)\}$	F	$\{S_0(0.5), S_2(0.4)\}$	F	9.0
	A_5	$\{S_{-2}(0.2), S_0(0.2)\}$	VG	$\{S_{-2}(0.3), S_0(0.3)\}$	VG	7.0
B_3	A_1	$\{S_0(0.4), S_2(0.2)\}$	VG	$\{S_1(0.6), S_2(0.6)\}$	G	9.0
	A_2	$\{S_1(0.5), S_2(0.3)\}$	G	$\{S_2(0.9)\}$	MG	8.0
	A_3	$\{S_{-2}(0.8), S_2(0.7)\}$	MG	$\{S_{-1}(0.4), S_{-2}(0.2)\}$	VG	9.0
	A_4	$\{S_{-1}(0.6)\}$	MB	$\{S_0(0.5)\}$	B	7.5
	A_5	$\{S_0(0.7), S_2(0.7)\}$	F	$\{S_{-2}(0.8)\}$	G	7.5

利用式 (15)~(19)定义正理想方案(AI)和负理想方案(AAI), 得到属性加权重, 如表 4 所示。

表 4 需求方 A₁ 对供给方 B 的评价属性加权重
Tab.4 Weighted weight of the evaluation attributes of the demand side A₁ to the supply side B

需求方	供给方	服务价格	安全看护能力	亲情关爱能力	健康管理能力	应急能力	总和
A ₁	B ₁	0.035	0.351	0.187	0.157	0.100	
	B ₂	0.059	0.283	0.125	0.138	0.100	
	B ₃	0.047	0.367	0.187	0.187	0.200	
	S _{AAI}	0.059	0.367	0.187	0.187	0.200	1.000
	S _{AI}	0.035	0.283	0.125	0.138	0.100	0.681

利用表 4 和式 (22)~(27)计算需求方 A₁ 对供给方 B 的评价效用值, 如表 5 所示。

表 5 需求方 A₁ 对供给方 B 的评价效用值
Tab.5 Evaluation utility value of the demand side A₁ to the supply side B

需求方	供给方	S _i	K _i ⁺	K _i ⁻	f(K _i ⁺)	f(K _i ⁻)	f(K _i)
A ₁	B ₁	0.829	1.218	0.829	0.595	0.405	0.650
	B ₂	0.704	1.035	0.704	0.595	0.405	0.552
	B ₃	0.988	1.450	0.988	0.595	0.405	0.774

依据上述步骤, 分别计算需求方 A₂~A₅ 对供给方 B 和供给方 B₁~B₃ 对需求方 A 的评价效用值, 如表 6~7 所示。

表 6 需求方 A 对供给方 B 的评价效用值
Tab.6 Value of the evaluation utility of the demand side A to the supply side B

需求方	B ₁	B ₂	B ₃
A ₁	0.650	0.552	0.774
A ₂	0.658	0.490	0.709
A ₃	0.553	0.606	0.667
A ₄	0.531	0.688	0.619
A ₅	0.535	0.757	0.757

表 7 供给方 B 对需求方 A 的评价效用值
Tab.7 Value of the evaluation utility of the supply side B to the demand side A

供给方	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
B ₁	0.632	0.480	0.601	0.593	0.759
B ₂	0.507	0.707	0.625	0.685	0.671
B ₃	0.563	0.660	0.656	0.814	0.534

依据表 6~7 可以得到总体双边的满意度矩阵 $P = [p_{ij}]_{5 \times 3}$ 和 $Q = [q_{ij}]_{3 \times 5}$ 。

$$P = [p_{ij}]_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.650 & 0.552 & 0.774 \\ 0.658 & 0.490 & 0.709 \\ 0.553 & 0.606 & 0.667 \\ 0.531 & 0.688 & 0.619 \\ 0.535 & 0.757 & 0.757 \end{bmatrix}$$
$$Q = [q_{ij}]_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.632 & 0.480 & 0.601 & 0.593 & 0.759 \\ 0.507 & 0.707 & 0.625 & 0.685 & 0.671 \\ 0.563 & 0.660 & 0.656 & 0.814 & 0.534 \end{bmatrix}$$

构建多目标双边匹配模型的式 (28)~(34), 利用式 (35)将原模型转化为单目标规划模型, 取 $w_1=w_2=0.5$, 通过 LINGO 17.0 进行模型求解可得 $x_{11}=x_{22}=x_{31}=x_{42}=x_{53}=1$, 其余 $x_{ij}=0$, 如表 8 所示。故获得的匹配方案为: 养老需求群体 A₁ 与智慧机构养老 B₁ 匹配, 养老需求群体 A₂ 与智慧社区养老 B₂ 匹配, 养老需求群体 A₃ 与智慧机构养老 B₁ 匹配, 养老需求群体 A₄ 与智慧社区养老 B₂ 匹配, 养老需求群体 A₅ 与智慧居家养老 B₃ 匹配。

表 8 智慧养老服务供需双边匹配方案
Tab.8 Bilateral matching scheme for the supply and demand side of smart elderly care services

需求方	B ₁	B ₂	B ₃
A ₁	1	0	0
A ₂	0	1	0
A ₃	1	0	0
A ₄	0	1	0
A ₅	0	0	1

实际聚类情况中: 养老需求群体 A₁ 身体均处于失能或半失能状态, 需要给予高密度的护理服务, 智慧机构养老 B₁ 与其更适配; 养老需求群体 A₂ 精神状况良好, 独居老人占比较少, 因此更适合智慧社区养老 B₂; 养老需求群体 A₃ 精神状况一般, 均为独居老人, 且年龄均值偏高, 不适合智慧居家养老, 3 种智慧养老模式中智慧机构养老 B₁ 更匹配; 养老需求群体 A₄ 精神良好、不独居、身体不处于失能或半失能, 但均患有慢性疾病, 年龄均值偏高, 故智慧社区养老更为适合; 养老需求群体 A₅ 精神一般, 不独居, 身体均处失能或半失能状态, 需要特别护理关照, 在有人照顾的前提下更适合智慧居家养老。通过少量访谈数据发现, 实际情况下不同特征老年群体的养

老需求与双边匹配结果中匹配的智慧养老服务的供给吻合，符合实际情况。

3 结束语

针对智慧养老服务中供需不匹配且双方评价信息表达存在不确定性和模糊性的问题，提出基于多源数据的养老服务供需匹配决策方法。首先，针对混合供需评价信息转化为统一信息形式过程中信息损失的问题，依据模块化思想对不同属性的评价信息分别处理，避免信息转化；其次，考虑到实际智慧养老服务中供需不匹配问题，提出基于 MARCOS 方法的双边匹配模型，利用 MARCOS方法中的效用值计算双边匹配效用满意度；最后，通过上海某地区综合养老服务中心数据进行智慧养老服务匹配的仿真实验，验证了所提方法的合理性，使关于智慧养老供需服务的匹配更贴近现实情况。目前，智慧养老服务的双边匹配模型以及养老需求群体聚类还有一定的局限性，未来笔者将从模型优化问题出发，不断解决和优化智慧养老服务匹配过程中出现的问题。

参考文献：

[1] 张玉琼. 构建失能老年人的智慧养老服务平台——以社会网络为视角 [J]. *老龄科学研究*, 2015, 3(6): 48–57.

[2] 陈航, 韩文龙. 以人民为中心的养老模式创新: 以智慧养老为例 [J]. *改革与战略*, 2018, 34(9): 9–16.

[3] GALE D, SHAPLEY L S. College admissions and the stability of marriage[J]. *The American Mathematical Monthly*, 1962, 69(1): 9–15.

[4] 高宇璇, 杜跃平, 孙秉珍, 等. 考虑患者个性化需求的医疗服务匹配决策方法 [J]. *运筹与管理*, 2019, 28(4): 17–25.

[5] 郑锦荣, 徐福缘, 黄耽建, 等. 模糊匹配在高校毕业生供需管理中的应用 [J]. *华东工业大学学报*, 1997, 19(3): 36–44.

[6] 谢卫星, 王晓琳, 王旭阳, 等. 基于混合数据聚类算法的异质顾客群体识别 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(13): 130–137.

[7] 陈梅梅, 薛阳阳. 基于消费群体聚类的网络购买决策关键影响因素分析 [J]. *统计与决策*, 2015, 31(3): 49–51.

[8] NORUSIS M J. SPSS 16.0 guide to data analysis[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008.

[9] LOURENZUTTI R, KROHLING R A. TODIM based method to process heterogeneous information[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 55: 318–327.

[10] 潘亚虹, 耿秀丽. 基于 Mo-RVIKOR 的混合多属性决策方法 [J]. *中国管理科学*, 2019, 27(12): 143–151.

[11] LOURENZUTTI R, KROHLING R A, REFORMAT M Z. Choquet based TOPSIS and TODIM for dynamic and heterogeneous decision making with criteria interaction[J]. *Information Sciences*, 2017, 408: 41–69.

[12] STEVIĆ Ž, PAMUČAR D, PUŠKA A, et al. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS)[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 140: 106231.

[13] HERRERA F, HERRERA-VIEDMA E, VERDEGAY J L. A sequential selection process in group decision making with a linguistic assessment approach[J]. *Information Sciences*, 1995, 85(4): 223–239.

[14] PANG Q, WANG H, XU Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 128–143.

[15] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87–96.

[16] SZMIDT E, KACPRZYK J. Distances between intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 114(3): 505–518.

[17] 付亚男, 毛军军, 徐丹青. 基于离差最大化的 IITFN 多属性决策模型 [J]. *计算机工程*, 2013, 39(2): 202–206.

[18] VANDE VATE J H. Linear programming brings marital bliss[J]. *Operations Research Letters*, 1989, 8(3): 147–153.

(编辑：丁红艺)