

# 直觉模糊研究的知识结构及知识流动分析

余德建<sup>1</sup>, 潘天行<sup>1</sup>, 李登峰<sup>2†</sup>

(1. 南京审计大学 商学院, 南京 211815; 2. 电子科技大学 经济与管理学院, 成都 611731)

**摘要:** 为了全面分析直觉模糊领域的研究概况、知识结构、知识扩散路径以及活跃研究子领域, 基于主路径方法, 结合知识图谱工具, 对中国知网 (CNKI) 数据库中收录的与直觉模糊研究相关的文献进行系统分析. 研究结果表明: 直觉模糊领域已进入成熟阶段, 且 2007 年与 2014 年的研究成果受到了广泛关注; 从直觉模糊领域的知识结构看, 直觉模糊集合、直觉梯形模糊数以及区间直觉模糊集的研究为该领域的发展奠定了坚实的理论基础; 知识扩散路径表明, 研究重点已由理论研究转向应用研究, 尤其是多属性决策应用, 且近年来开始与其他决策理论、管理理论以及计算机算法广泛结合; 活跃研究子领域主要围绕信息集成、直觉模糊推理、双边匹配问题、Choquet 积分以及直觉正态模糊数展开. 研究有利于研究人员挖掘该领域的知识结构、有效把握该领域的发展脉络并识别最新的研究动态.

**关键词:** 直觉模糊; 共被引分析; 主路径分析; 知识结构; 知识扩散; 活跃子领域

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1603

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 余德建, 潘天行, 李登峰. 直觉模糊研究的知识结构及知识流动分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1015-1024.

## Knowledge structure and knowledge diffusion analysis in intuitionistic fuzzy field

YU De-jian<sup>1</sup>, PAN Tian-xing<sup>1</sup>, LI Deng-feng<sup>2†</sup>

(1. Business School, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China; 2. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** To understand the research overview, knowledge structure, knowledge diffusion path and active subareas in the intuitionistic fuzzy field comprehensively, this paper adopts the main path analysis to study the related literature included in the CNKI database with the science mapping tools. The research results show that the intuitionistic fuzzy field has entered the mature stage, and the papers published in 2007 and 2014 have been widely recognized. Based on the knowledge structure of this domain, it is found that the studies about intuitionistic fuzzy sets, intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers and interval-valued intuitionistic fuzzy sets lay a solid theoretical foundation for the development of this field. The path of knowledge diffusion shows that the research focus has shifted from theoretical research to applied research, especially the application of multi-attribute decision making, and it has begun to be widely integrated with other decision-making theories, management theories and computer algorithms recently. Active research subareas mainly revolves around information integration, intuitionistic fuzzy inference, bilateral matching, Choquet integral and intuitionistic normal fuzzy number. This study is beneficial for researchers to dig out the knowledge structure of this field, grasp the development process of this field and identify the latest research trends effectively.

**Keywords:** intuitionistic fuzzy sets; co-citation analysis; main path analysis; knowledge structure; knowledge diffusion; active subareas

## 0 引言

直觉模糊集最早由 Atanassov<sup>[1]</sup> 提出, 是目前最具有影响力的模糊理论之一. 基于 Zadeh<sup>[2]</sup> 提出的模糊集, 直觉模糊集在此基础上增加了新的参数, 即非

隶属度, 有利于更好地测度不确定信息和应对更加复杂的现实情景, 因此得到国内外学者的广泛关注和认可. 目前, 该理论已被广泛应用于目标识别、风险投资、物流中心选址、合作博弈以及图像处理等多个领

收稿日期: 2020-11-19; 录用日期: 2021-01-19.

基金项目: 教育部人文社科项目(19YJC630208); 江苏省青蓝工程项目(2019).

责任编辑: 徐泽水.

†通讯作者. E-mail: lidengfeng@uestc.edu.cn.

域.

随着研究成果的不断增多,目前已有学者基于文献综述、文献计量方法对现有研究进行总结.例如,万树平<sup>[3]</sup>从直觉模糊集、区间直觉模糊集、直觉三角模糊数和直觉梯形模糊数4个方面展开分析,指出信息残缺环境下的直觉模糊决策方法仍有待发展.基于SCIE和SSCI数据,Yu等<sup>[4]</sup>采用文献计量方法对该领域的重要作者和期刊进行了统计.He等<sup>[5]</sup>通过筛选该领域内被引量最高的100篇出版物,分析了其年度分布和区域特征.Alfaro-García等<sup>[6]</sup>关注出版期刊的区域分布,指出亚洲地区,尤其是中国,呈现日益增长的研究活力.

现有文献大多是从研究的增长态势和分布特征对直觉模糊领域进行概括总结,鲜有研究从知识流动的角度梳理该领域研究的发展过程,并且鲜有文献聚焦于中国学者对该领域的贡献,即通过中文文献探测直觉模糊领域的研究进展.鉴于此,本文旨在通过主路径分析方法,挖掘该领域的知识扩散轨迹和活跃研究子领域,以期帮助研究人员理清该领域的发展现状,把握该领域的研究动向和未来趋势.此外,借助知识图谱工具,对该领域的研究概况和知识结构进行可视化分析.

本文的优势体现在:1)基于网络爬虫技术,首次对中国知网中的《科学引文索引》(SCI)、《工程索引》(EI)、《中国科学引文数据库》(CSCD)和《中国社会科学引文索引》(CSSCI)多个数据库中的文献进行共被引分析,以对该领域的知识结构进行系统介绍.2)重点聚焦于知识流动的动态演化分析,而非静态的指标统计.基于主路径方法,探测直觉模糊领域的知识演进过程,并且使用多路径方法,挖掘该领域内活跃的研究子领域.基于定量研究方法,有利于研究人员全面把握直觉模糊领域的发展概况,明确该领域内的知识结构,识别领域内的关键文献,理清研究发展演进过程以及掌握热点研究主题,以期为未来研究提供新思路.

## 1 数据来源与研究方法

为了保证数据的有效性和全面性,选取中国知网(CNKI)中的SCI、EI、CSCD和CSSCI数据库作为数据来源,以“直觉模糊”为关键词对相关文献进行检索.数据采集时间为2020年8月27日,得到相关记录1247条.通过对数据清洗处理,去除1篇不相关文献,最终获得1246篇记录.此外,通过网络爬虫获取每篇原始文献的参考文献和引证文献,分别获得10905篇(21393次参考)和7081篇(13390次引证).

基于主路径分析方法,借助可视化工具,对直觉模糊领域的相关研究进行系统分析.首先,采用成长曲线分析方法对该领域的发展阶段进行量化分析;其次,借助桑基图对期刊层面的知识流动进行可视化;再次,基于知识图谱工具CiteSpace<sup>[7]</sup>,通过文献共被引聚类分析,研究该领域的知识结构;最后,通过主路径分析方法,对该领域的知识演化路径以及研究子领域进行深入分析.所用到的主要研究方法包括:

1)成长曲线分析.成长曲线分析可用于评估某个领域或某个学科的发展阶段.该方法假定特定领域的科研产出如同生态系统中的生命体,其发展受到资源约束<sup>[8]</sup>,因此假设文献数量符合S型曲线增长.起初,文献增长速度较为缓慢,领域处于发展期;之后,该领域受到关注,进入高速成长期;最后,进入成熟期,文献的增速不断减缓.

2)共被引分析.文献共被引是指2篇文献同时被1篇或多篇文献所引证<sup>[9]</sup>.由文献间的共被引关系形成的共被引聚类,能够有效揭示各个研究领域潜在的知识结构<sup>[7]</sup>.其中被引文献视为引证文献的知识基础,通过分析共被引结构的变化,可以观测到目标领域的知识结构变化和动向.作为一种有效的分析工具,该方法已广泛应用于情感分析、供应链金融等领域.

3)主路径分析.主路径分析方法最早由文献[10]提出,以探测DNA领域的知识演化路径,其后经过文献[11]发展,从局部最优路径选择拓展到全局发展路径分析.主路径方法重点关注文献之间的知识流动,通过精简复杂的引文网络,发掘出该领域内最具有代表性的发展路径.目前,该方法已广泛应用于物联网、数据包络分析以及区块链等领域.

## 2 直觉模糊领域研究概况

### 2.1 年度分布

文献数量和引文数量是衡量一个领域研究进展的重要指标,对评价该领域发展阶段、预测未来发展趋势具有重要意义.本文通过成长曲线分析,对文献的累计产量和被引量进行统计,以判断该领域的发展现状以及未来趋势.考虑到2003~2005年间发文量较少,而2020年的论文尚未全部出版,本文以2006~2019年间的发文量以及所有文献在当年的被引次数为分析对象,使用成长曲线进行拟合,结果如图1所示,图中上方柱状图分别代表年度被引次数(蓝色)以及下载次数(绿色).

由图1发文量曲线可知,转折点在2014年,预计发文量最大增长至1363篇达到饱和状态.年发文量



糊集在决策方法上的应用.

### 3 知识结构分析

基于共被引分析,借助CiteSpace知识图谱工具,研究直觉模糊领域的知识结构.基于原始文献及其对应的参考文献信息,首先制备了CiteSpace可识别的数据格式.在CiteSpace操作页面,设置时间切片为1年,选取每年前50篇高被引文献并采用寻径

(Pathfinder)算法对网络进行裁剪,以确保可视化结果的可解释性.考虑到有些聚类成员较少不具有代表性,本文仅保留前10大聚类.删除频次较低的文献后,得到的聚类可视化效果如图3所示.图中,节点大小与文献的总被引次数呈正相关,灰色年轮表示该文献的被引量曾在短期内急速上升,紫色外圈表示其在网络中具有较高的中介中心性.

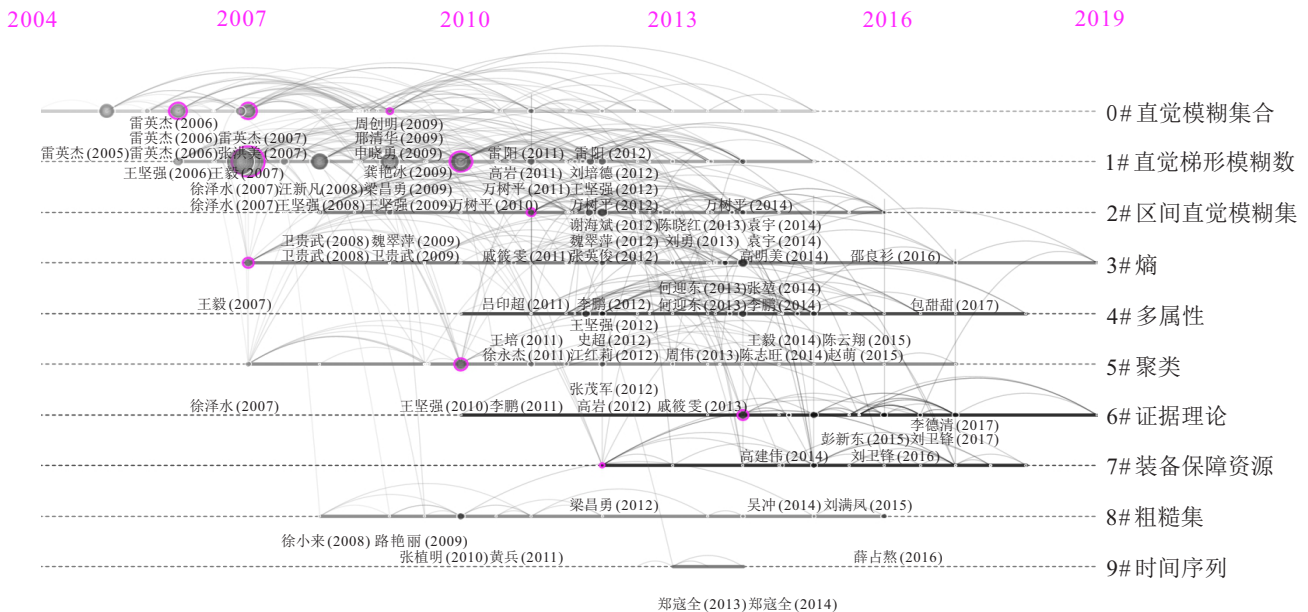


图3 文献共被引聚类

选取对数似然算法(LLR)对聚类进行命名.聚类效果一般由2个指标确定,一是衡量网络模块化的评价指标(Modularity),值大于0.3表示聚类结构显著;二是衡量网络同质性的指标(Silhouette),值大于0.5表示聚类结果合理,大于0.7表示结果令人信服.本文的聚类效果Modularity值为0.64, Silhouette值为0.90,表明聚类效果是显著的、可信的.

前3大聚类#0直觉模糊集合(雷英杰等<sup>[15-16]</sup>), #1直觉梯形模糊数(徐泽水等<sup>[17]</sup>、王毅等<sup>[18]</sup>、王坚强等<sup>[19]</sup>)和#2区间直觉模糊集(戚筱雯等<sup>[20]</sup>、万树平等<sup>[21]</sup>)为直觉模糊领域的主要研究对象.其中,区间直觉模糊集用区间值替代直觉模糊集中的精确数值,作为一种经典的推广形式,提升了传统直觉模糊测度不确定信息的能力.由时间线可知,这3类研究出现的年份较早,且被引次数较高,为该领域的发展奠定了坚实的理论基础.但近年来此类研究数量有减缓趋势,表明该领域的基础研究已较为成熟.随着研究的深入,研究主题也开始发生了变化.聚类#4多属性表明直觉模糊理论在多属性决策领域中得到了广泛应用,并且随着此类研究数量的增多,与熵相关的研

究也逐渐突显,以在决策过程中提供更加客观的权重分配方案.聚类#5聚类、聚类#6证据理论、聚类#7装备保障资源和聚类#8粗糙集表明学者们开始将直觉模糊理论与其他理论相结合.

### 4 知识流动分析

为了直观地反映直觉模糊领域的知识演化过程与研究子领域,基于原始文献构成的引文网络,通过主路径方法,抽取该领域的Global standard路径,探索中文直觉模糊领域的研究基础、发展现状以及未来趋势.

#### 4.1 知识演化路径

图4为直觉模糊研究的知识扩散轨迹,箭头指向施引文献,代表了知识流动的方向.由图4可知,徐泽水<sup>[22]</sup>的研究为该理论后续的发展发挥了重要作用.该文献定义了区间直觉模糊数的精确函数和得分函数,并提出2种集结算子,推广区间直觉模糊集在决策领域的应用.王坚强等<sup>[23]</sup>研究直觉梯形模糊数距离函数,并提出一种基于直觉梯形模糊数的决策方法.万树平等<sup>[24]</sup>运用数形结合的思想,通过重心定义期望值和预期函数,并通过算数平均算子和混

合集结算子探索直觉梯形模糊数在群体决策中的应用. 针对动态决策, 刘勇等<sup>[25]</sup> 讨论单个决策者在不同决策阶段的决策信息集结过程, 运用灰色关联分析, 计算出每个方案相对理想方案的关联系数和拉格朗日函数, 进而确定属性权重未知情况下满足偏差最小的属性权重方案. 早期研究主要以区间直觉模糊数和直觉梯形模糊数为研究对象, 相比于传统模糊集, 前两者更有效地刻画了客观世界的模糊性.



图4 直觉模糊研究主路径

陈志旺等<sup>[26]</sup> 和高明美等<sup>[27]</sup> 对徐泽水<sup>[22]</sup> 提出的得分函数展开进一步研究. 陈志旺等<sup>[26]</sup> 将犹豫度考虑在内, 提出包含犹豫度系数的新得分函数和精确函数. 高明美等<sup>[27]</sup> 系统性总结已有的改进得分函数, 并分析其优缺点和适用范围, 此外, 提出一种新的得分函数, 更充分地考虑了弃权信息. 尹胜等<sup>[28]</sup> 基于前两者对于模糊熵的研究, 进一步考虑犹豫度对直觉模糊熵的影响, 并在此基础上提出一种新的混合几何算子以确定多属性决策中的权重分配.

在属性值为三角模糊数的情况下, 江登英等<sup>[29]</sup> 提出一种确信度算子. 这一算子基于先前文献中的

信息熵理论进行权重分配, 无需主观偏好即可给出一个相对客观的权重分配方案. 任红岗等<sup>[30]</sup> 引入集对分析理论, 并将该理论中的同、异、反概念与直觉模糊集中的隶属度、非隶属度、犹豫度概念相结合, 提出一种新的区间直觉模糊决策模型.

在直觉模糊领域, 学者们前期注重基础概念和指标改进, 而近期研究更注重与其他理论的结合, 以推出更加完整和多元的决策方法. 研究主题的转变时间点恰恰与成长曲线分析中建议的阶段划分相吻合. 主路径结果表明, 多属性决策一直是直觉模糊理论的重点研究领域. 随着研究的深入, 学者们借助模糊熵法, 解决主观因素导致的信息集结失衡问题. 基于直觉模糊熵法的研究成为研究焦点, 其有利于提升决策的科学性和准确性. 此外, 通过分析主路径上的文献来源发现, 早期《控制与决策》<sup>[22-25, 27]</sup> 是直觉模糊研究的主要发文期刊, 近年来, 《控制理论与应用》<sup>[26, 30]</sup> 和《系统工程与电子技术》<sup>[28-29]</sup> 也开始成为直觉模糊知识传播的重要期刊.

#### 4.2 研究子领域分析

通过增加主路径数量可以展现更多的细节, 图5为直觉模糊领域的多路径. 其中, 新增的文献用青色和蓝色标注, 红色节点代表图4中主路径上的文献. 从多路径扩散情况可见, 直觉模糊领域的研究主题较为广泛, 前3篇文献(徐泽水<sup>[22]</sup>、王坚强等<sup>[23]</sup>、万树平等<sup>[24]</sup>)的知识扩散体现了这种多元化趋势.

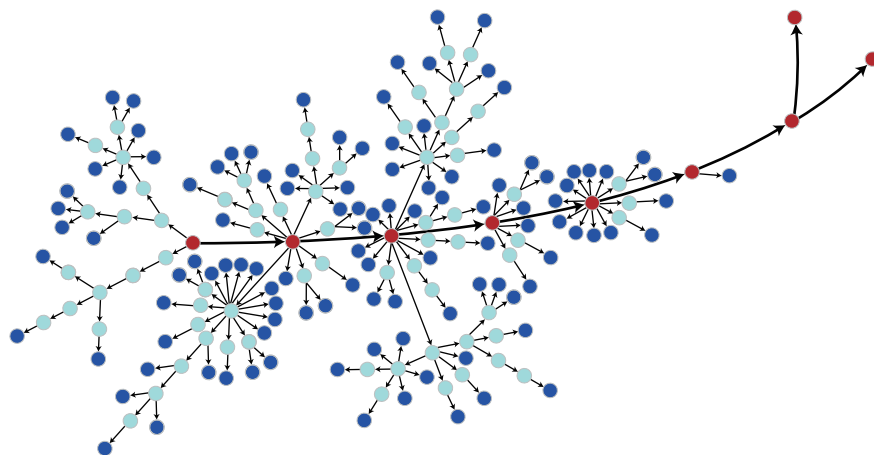


图5 直觉模糊研究多路径

分析基于徐泽水<sup>[22]</sup> 的研究, 主要衍生出3条分支. 学者们分别围绕信息集成、理论拓展和实际应用方面展开研究. 在信息集成方面, 王坚强等<sup>[31]</sup> 提出直觉语义数, 刘培德等<sup>[32]</sup> 提出直觉不确定数, 两者都提出基于语义变量的集结算子. 一方面, 研究重点集中在优化集结算子上. 例如, 陈岩等<sup>[33]</sup> 和曾守帧等<sup>[34]</sup>

分别引入 Choquet 积分和 Zhenyuan 积分, 对语义信息集结算子进行改进. 另一方面, 学者们致力于将其应用于多属性决策中<sup>[35-36]</sup>. 在徐泽水<sup>[22]</sup> 的第1条扩散路径上, 语义信息的测度以及信息集结算子逐渐成为研究热点, 在后期的扩散路径上被广泛应用于决策中. 在徐泽水<sup>[22]</sup> 的第2条扩散路径上, 前景理论、后悔

理论和证据理论相继被引入直觉模糊研究中,从而考虑决策主体的心理特征<sup>[37]</sup>.高建伟等<sup>[38]</sup>基于前景理论,通过构建参考点而非依赖传统的效用函数确定决策者的主观偏好,进而提出基于这一约束的优化模型以获取方案的前景值.余高锋等<sup>[39]</sup>考虑了基于前景理论的客观权重与专家主观权重的一致性问题,从而更全面地考虑决策主体的主观偏好问题.基于后悔理论,朱轮等<sup>[40]</sup>考虑了决策者的有限理性,提出方案感知价值的确定不仅应考虑所选方案收益,还需与其他方案收益进行对比.常政等<sup>[41]</sup>发展了基于证据理论的决策模型,根据信度分配函数确定事物的可能状态.这些研究不仅考虑客观环境下的权重缺失,还注意到决策主体有限理性和主观偏好.此外,还有一些学者重点研究直觉模糊理论的实际应用,尤其是基于直觉模糊熵的多属性决策(王翠翠等<sup>[42]</sup>、张堃等<sup>[43]</sup>),在一定程度上减少了不确定信息,特别是主观权重对于决策结果客观性的影响,并且降低了对于决策参数的依赖程度,有助于不完全信息下的决策分析.此外,基于TOPSIS的多属性决策方法也逐渐成为研究热点.例如,为了避免传统TOPSIS存在的逆排序问题,陈伟等<sup>[44]</sup>将基于垂面距离的TOPSIS与直觉模糊相结合.基于上述分析,徐泽水<sup>[22]</sup>的知识扩散主要有以下2个特点:一是属性值从区间数转向语义变量,二是决策环境从权重信息已知转向权重信息未知,这种残缺信息环境下的决策过程更加贴近现实应用.因此可以预见,直觉模糊及其拓展形式将与决策方法进一步结合以增强对不确定环境下的信息评估和处理能力.

王坚强等<sup>[23]</sup>的知识扩散相对多元化,具有一些在其他知识扩散中较少出现的主题,例如直觉模糊推理以及双边匹配问题.一些学者对直觉模糊推理展开研究,特别是对该系统鲁棒性进行了深入分析(于祥雨等<sup>[45]</sup>、井美等<sup>[46]</sup>).研究表明,推理系统的鲁棒性取决于所选用的直觉模糊连接词.过往的研究往往考虑的是单向决策,即决策者对备选方案进行评价.然而在现实生活中,存在着大量的双向匹配问题,例如员工招聘等.这一分支中,乐琦<sup>[47]</sup>考虑了直觉模糊环境下的双边匹配问题,通过构建分值矩阵和匹配矩阵并采取倒差最大化求解问题,提高决策双方对于最终结果的满意度.张裕稳等<sup>[48]</sup>和张笛等<sup>[49]</sup>分别引入灰色关联分析和TODIM理论,提出了改进的直觉模糊双边匹配方法.

基于万树平等<sup>[24]</sup>的研究,路径上出现了2条明显的分支,有如下2个特征:一是基于Choquet积分的

研究显著增多,二是直觉正态模糊数开始受到学者们的广泛关注.在万树平等<sup>[24]</sup>的第1条分支中,研究多集中在Choquet积分上.例如,李喜华<sup>[50]</sup>和赵树平等<sup>[51]</sup>在直觉梯形模糊数和Choquet积分的基础上,分别整合了前景理论和多准则妥协优化解(VIKOR)方法.陈振颂等<sup>[52]</sup>结合了Choquet积分与直觉梯形模糊数,周晓辉等<sup>[53]</sup>进而将其与区间直觉梯形模糊数进行结合.在万树平等<sup>[24]</sup>的第2条分支中,直觉正态模糊数成为研究热点.与直觉三角模糊数和直觉梯形模糊数相比,直觉正态模糊数为测度连续性模糊信息提供了更多方案,同时这种连续集合可以保证决策的客观性和民主性.例如,王坚强等<sup>[54]</sup>定义了直觉正态模糊数,并提出相应的运算法则和距离公式.时恩早等<sup>[55]</sup>提出另一种运算法则.刘政敏等<sup>[56]</sup>利用直觉正态模糊数的优良性质,在此基础上提出一种基于直觉正态模糊数的群体决策方法.

与徐泽水<sup>[22]</sup>知识扩散不同的是,在王坚强等<sup>[23]</sup>和万树平等<sup>[24]</sup>的知识扩散路径上,除后悔理论等经济学理论被吸收到直觉模糊研究中以外,人工蜂群算法<sup>[57]</sup>、最小路集算法<sup>[58]</sup>和萤火虫算法<sup>[59]</sup>等计算机算法也根据实际应用需要被引入这一领域中.例如,刘勇等<sup>[25]</sup>的知识扩散主要围绕动态决策.高明美等<sup>[60]</sup>提出基于时间熵分配权重,从而强调对特定时间段信息的重视.通过集成不同时间段属性值的相似度,梅晓玲<sup>[61]</sup>对时序数据进行赋权.陈伟等<sup>[62]</sup>和张浩为等<sup>[63]</sup>分别将动态决策与VIKOR、TOPSIS方法进行结合.因此在未来的研究中,应关注直觉模糊在动态决策中的应用,尤其是时序数据的赋权问题.

## 5 结论

基于1246篇文献,本文运用主路径分析方法,结合知识图谱工具,对直觉模糊领域的文献特征、期刊知识流向、知识结构、知识扩散路径以及研究子领域展开了深入分析,以揭示该领域在过去十几年内的研究进展.主要结论如下:

1) 成长曲线表明该领域的发展已进入成熟期,但相关研究的影响力还将持续,2007年和2014年是直觉模糊研究的重要转折点.作者产量分析发现,雷英杰和李登峰自进入该领域以来,长期致力于该领域研究.基于级联扩展的期刊间知识流动表明,直觉模糊研究广泛吸收国外先进的研究成果,知识流向虽以数学和决策期刊为主,但总体上较为多元化.主路径上文献的期刊来源表明,《控制与决策》《控制理论与应用》与《系统工程与电子技术》在知识扩散过程中起到了关键的枢纽作用.

2) 基于文献共被引聚类分析,发现该领域的研究主题主要包括直觉模糊集合、直觉梯形模糊数、区间直觉模糊集、直觉模糊熵、多属性、聚类、证据理论和粗糙集。主路径上的文章分别出现在聚类#1 直觉梯形模糊数、聚类#2 区间直觉模糊集和聚类#4 多属性中,紫色外圈代表其在整个网络中承担知识传播者的角色,印证了主路径结果的有效性。

3) 知识扩散路径表明,随着直觉模糊研究的推进,研究内容已由基础理论研究转向应用研究。早期的研究关注属性值,随后得分函数和模糊熵等被学者们持续改进,而近年来的研究则以应用为主。学者们开始根据特定应用情景,提出相应的决策方法。

4) 多路径结果表明,该领域的研究呈现多元化趋势,研究主题涵盖多个子领域。徐泽水<sup>[22]</sup>的知识扩散主要围绕信息集成、理论拓展、实际应用3大方面;王坚强等<sup>[23]</sup>的知识扩散包含直觉模糊推理以及双边匹配问题;万树平等<sup>[24]</sup>的知识扩散集中在 Choquet 积分以及直觉正态模糊数上。

本文通过主路径方法对直觉模糊领域的知识扩散进行总结,但仅仅分析了同构网络下的知识扩散,未考虑作者、期刊等因素对于知识扩散的影响。在未来的工作中,可扩展至异构网络下的知识扩散研究。此外,本文的目的主要是关注中文社区中直觉模糊领域的知识扩散和知识结构,因此主要考虑了中文出版物,较少分析国内学者在外文期刊上发表的成果。

#### 参考文献(References)

- [1] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [2] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [3] 万树平. 直觉模糊多属性决策方法综述[J]. *控制与决策*, 2010, 25(11): 1601-1606.  
(Wan S P. Survey on intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making approach[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(11): 1601-1606.)
- [4] Yu D, Liao H. Visualization and quantitative research on intuitionistic fuzzy studies[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2016, 30(6): 3653-3663.
- [5] He X, Wu Y. Global research trends of intuitionistic fuzzy set: A bibliometric analysis[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2019, 28(4): 621-631.
- [6] Alfaro-García V G, Merigó J M, Calderón G G A, et al. A citation analysis of fuzzy research by universities and countries[J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2020, 38(5): 1-13.
- [7] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [8] Meyer P S, Yung J W, Ausubel J H. A primer on logistic growth and substitution: The mathematics of the loglet lab software[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 1999, 61(3): 247-271.
- [9] Small H. Cocitation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents[J]. *Journal of the American Society for Information Science*, 1973, 24(4): 265-269.
- [10] Hummon N P, Dereian P. Connectivity in a citation network: The development of DNA theory[J]. *Social Networks*, 1989, 11(1): 39-63.
- [11] Liu J S, Lu L Y Y. An integrated approach for main path analysis: Development of the hirsch index as an example[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2012, 63(3): 528-542.
- [12] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-208.  
(Xu Z S. Intuitionistic fuzzy information aggregation: Theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-208.)
- [13] 张文修, 吴伟志, 梁吉业. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-236.  
(Zhang W X, Wu W Z, Liang J Y. Rough sets theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-236.)
- [14] 李登峰. 直觉模糊集决策与对策分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 21-34.  
(Li D F. Intuitionistic fuzzy set decision and game analysis methodologies[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 21-34.)
- [15] 雷英杰, 王宝树, 苗启广. 直觉模糊关系及其合成运算[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(2): 113-118.  
(Lei Y J, Wang B S, Miao Q G. On the intuitionistic fuzzy relations with compositional operations[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2005, 25(2): 113-118.)
- [16] 雷英杰, 王宝树, 路艳丽. 基于直觉模糊逻辑的近似推理方法[J]. *控制与决策*, 2006, 21(3): 305-310.  
(Lei Y J, Wang B S, Lu Y L. Approximate reasoning method based on intuitionistic fuzzy logic[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(3): 305-310.)
- [17] 徐泽水, 陈剑. 一种基于区间直觉判断矩阵的群决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(4): 126-133.  
(Xu Z S, Chen J. An approach to group decision making based on interval-valued intuitionistic judgment matrices[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2007, 27(4): 126-133.)
- [18] 王毅, 雷英杰. 一种直觉模糊熵的构造方法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(12): 1390-1394.  
(Wang Y, Lei Y J. A technique for constructing intuitionistic fuzzy entropy[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(12): 1390-1394.)
- [19] 王坚强, 李寒波. 基于直觉语言集结算子的多准则决

- 策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1571-1574.  
(Wang J Q, Li H B. Multi-criteria decision-making method based on aggregation operators for intuitionistic linguistic fuzzy numbers[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1571-1574.)
- [20] 戚筱雯, 梁昌勇, 张恩桥, 等. 基于熵最大化的区间直觉模糊多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1940-1948.  
(Qi X W, Liang C Y, Zhang E Q, et al. Approach to interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attributes group decision making based on maximum entropy[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2011, 31(10): 1940-1948.)
- [21] 万树平, 李登峰. 具有不同类型信息的风险投资商与投资企业多指标双边匹配决策方法[J]. 中国管理科学, 2014, 22(2): 40-47.  
(Wan S P, Li D F. Decision making method for multi-attribute two-sided matching problem between venture capitalists and investment enterprises with different kinds of information[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(2): 40-47.)
- [22] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 215-219.  
(Xu Z S. Methods for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and their application to decision making[J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 215-219.)
- [23] 王坚强, 张忠. 基于直觉梯形模糊数的信息不完全确定的多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 226-230.  
(Wang J Q, Zhang Z. Multi-criteria decision-making method with incomplete certain information based on intuitionistic fuzzy number[J]. Control and Decision, 2009, 24(2): 226-230.)
- [24] 万树平, 董九英. 多属性群决策的直觉梯形模糊数法[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 773-776.  
(Wan S P, Dong J Y. Method of intuitionsitic trapezoidal fuzzy number for multi-attribute group decision[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 773-776.)
- [25] 刘勇, Jeffery F, 刘思峰, 等. 基于区间直觉模糊的动态多属性灰色关联决策方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1303-1308.  
(Liu Y, Jeffery F, Liu S F, et al. Dynamic multiple attribute grey incidence decision making method based on interval valued intuitionistic fuzzy number[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1303-1308.)
- [26] 陈志旺, 陈林, 杨七, 等. 用区间直觉模糊集方法对属性权重未知的群求解其多属性决策[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1025-1033.  
(Chen Z W, Chen L, Yang Q, et al. Interval-valued intuitionistic fuzzy set method for group multi-attribute decision-making with unknown attribute weights[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(8): 1025-1033.)
- [27] 高明美, 孙涛, 朱建军. 基于改进熵和新得分函数的区间直觉模糊多属性决策[J]. 控制与决策, 2016, 31(10): 1757-1764.  
(Gao M M, Sun T, Zhu J J. Interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attribute decision-making method based on revised fuzzy entropy and new scoring function[J]. Control and Decision, 2016, 31(10): 1757-1764.)
- [28] 尹胜, 杨桢, 陈思翼. 基于改进模糊熵的区间直觉模糊多属性决策[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1079-1084.  
(Yin S, Yang Z, Chen S Y. Interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making based on the improved fuzzy entropy[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(5): 1079-1084.)
- [29] 江登英, 张徐军. 基于TFNCD算子的三角模糊数多属性群决策[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2065-2071.  
(Jiang D Y, Zhang X J. Multi-attribute group decision-making method with triangular fuzzy numbers based on the TFNCD operator[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(9): 2065-2071.)
- [30] 任红岗, 谭卓英. 区间直觉模糊熵-集对分析-理想解耦合的多属性决策模型[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 176-186.  
(Ren H G, Tan Z Y. Multi-attribute decision making model coupled with interval valued intuitionistic fuzzy entropy-set pair analysis-technique for order preference by similarity to an ideal solution[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(1): 176-186.)
- [31] 王坚强, 李寒波. 基于直觉语言集结算子的多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1571-1574.  
(Wang J Q, Li H B. Multi-criteria decision-making method based on aggregation operators for intuitionistic linguistic fuzzy numbers[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1571-1574.)
- [32] 刘培德, 张新. 直觉不确定语言集成算子及在群决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(12): 2704-2711.  
(Liu P D, Zhang X. Intuitionistic uncertain linguistic aggregation operators and their application to group decision making[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(12): 2704-2711.)
- [33] 陈岩, 李庭. 基于Choquet积分的直觉不确定语言信息集结算子及其应用[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 842-852.  
(Chen Y, Li T. Intuitionistic uncertain linguistic information aggregation operators based on choquet integral and their application[J]. Control and Decision, 2016, 31(5): 842-852.)
- [34] 曾守桢, 穆志民. 基于Zhenyuan积分的直觉模糊多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 542-548.  
(Zeng S Z, Mu Z M. Method based on zhenyuan integral for intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 542-548.)
- [35] 刘政敏, 刘培德, 金芳. 基于直觉语言数集成算子的多属性群决策方法研究[J]. 管理评论, 2014, 26(11): 39-47.  
(Liu Z M, Liu P D, Jin F. Research on the multiple

- attribute group decision-making method based on some intuitionistic linguistic aggregation operators[J]. *Management Review*, 2014, 26(11): 39-47.)
- [36] 王中兴, 陈晶, 兰继斌. 基于直觉不确定语言新集成算子的多属性决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7): 1871-1878.  
(Wang Z X, Chen J, Lan J B. Multi-attribute decision making method based on intuitionistic uncertain linguistic new aggregation operator[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1871-1878.)
- [37] 余高锋, 李登峰, 刘文奇. 考虑决策者心理行为特征的激励型变权决策方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1304-1312.  
(Yu G F, Li D F, Liu W Q. Method for incentive type variable weight decision making considering decision maker's psychological behavioral character[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(5): 1304-1312.)
- [38] 高建伟, 刘慧晖, 谷云东. 基于前景理论的区间直觉模糊多准则决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3175-3181.  
(Gao J W, Liu H H, Gu Y D. Interval-valued intuitionistic fuzzy multi-criteria decision-making method based on prospect theory[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3175-3181.)
- [39] 余高锋, 费巍, 叶银芳. 基于前景理论的农村电子商务发展水平多维偏好决策方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2182-2188.  
(Yu G F, Fei W, Ye Y F. Development level of rural E-commerce multi-dimensional preference decision making method based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(9): 2182-2188.)
- [40] 朱轮, 马庆功. 直觉模糊信息环境下考虑后悔规避的决策方法[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(14): 123-129.  
(Zhu L, Ma Q G. Decision-making method with regret theory under intuitionistic fuzzy information environment[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(14): 123-129.)
- [41] 常政, 项华春, 陈云翔, 等. 基于证据理论的直觉模糊群决策方法[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(8): 125-130.  
(Chang Z, Xiang H C, Chen Y X, et al. Intuitionistic fuzzy group decision-making method based on evidence theory[J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(8): 125-130.)
- [42] 王翠翠, 姚登宝, 毛军军, 等. 基于熵和相关系数的直觉模糊多属性决策方法[J]. *计算机应用*, 2012, 32(11): 3002-3004.  
(Wang C C, Yao D B, Mao J J, et al. Intuitionistic fuzzy multiple attributes decision making method based on entropy and correlation coefficient[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(11): 3002-3004.)
- [43] 张堃, 王雪, 张才坤, 等. 基于IFE动态直觉模糊法的空战目标威胁评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(4): 697-701.  
(Zhang K, Wang X, Zhang C K, et al. Evaluating and sequencing of air target threat based on IFE and dynamic intuitionistic fuzzy sets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(4): 697-701.)
- [44] 陈伟, 李金秋, 杨早立. 一种基于“垂面”距离和IFE的直觉模糊多属性决策方法[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(9): 7-12.  
(Chen W, Li J Q, Yang Z L. A multi-attribute decision-making method in intuitionistic fuzzy set based on vertical projection distance and IFE[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(9): 7-12.)
- [45] 于祥雨, 李得超. 直觉模糊推理系统的鲁棒性[J]. *模糊系统与数学*, 2014, 28(2): 111-119.  
(Yu X Y, Li D C. Robustness of atanassov's intuitionistic fuzzy reasoning system[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2014, 28(2): 111-119.)
- [46] 井美, 惠小静, 王蓉. 基于相似度的直觉模糊推理反向三I算法的鲁棒性[J]. *电子学报*, 2020, 48(2): 265-271.  
(Jing M, Hui X J, Wang R. Robustness of intuitionistic fuzzy inference reverse triple I methods based on similarity[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(2): 265-271.)
- [47] 乐琦. 直觉模糊环境下考虑匹配意愿的双边匹配决策[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(6): 161-168.  
(Yue Q. Two-sided matching decision considering matching aspiration under the intuitionistic fuzzy circumstance[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(6): 161-168.)
- [48] 张裕稳, 吴洁, 李鹏, 等. 基于灰色关联的不确定信息双边匹配决策模型与应用[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(16): 253-259.  
(Zhang Y W, Wu J, Li P, et al. Decision model and application of two-sided matching of uncertain information based on grey correlation[J]. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(16): 253-259.)
- [49] 张笛, 孙涛, 耿成轩, 等. 基于TODIM的直觉模糊双边公平满意匹配方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(6): 1338-1344.  
(Zhang D, Sun T, Geng C X, et al. Method for intuitionistic fuzzy two-sided fair and satisfied matching based on TODIM[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(6): 1338-1344.)
- [50] 李喜华. 基于累积前景理论和Choquet积分的直觉梯形模糊多属性决策[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(8): 2422-2425.  
(Li X H. Intuitionistic trapezoidal fuzzy multi-attribute decision making method based on cumulative prospect theory and choquet integral[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(8): 2422-2425.)
- [51] 赵树平, 梁昌勇, 罗大伟. 基于VIKOR和诱导广义直觉梯形模糊Choquet积分算子的多属性群决策方法[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(6): 132-142.  
(Zhao S P, Liang C Y, Luo D W. Multi-attribute group decision making based on extend VIKOR and induced

- generalized intuitionistic trapezoidal fuzzy choquet integral[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(6): 132-142.)
- [52] 陈振颂, 李延来. 基于ITFN信息关联输入的改进群体MULTIMOORA决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3138-3156.  
(Chen Z S, Li Y L. An improved MULTIMOORA approach for group decision making based upon interdependent inputs of intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(12): 3138-3156.)
- [53] 周晓辉, 姚俭. 基于Choquet积分的区间直觉梯形模糊多属性群决策[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(2): 245-256.  
(Zhou X H, Yao J. Approach for multiple attribute group decision-making with interval valued intuitionistic trapezoidal fuzzy number based on choquet integral[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(2): 245-256.)
- [54] 王坚强, 李康健. 基于直觉正态模糊集结算子的多准则决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(6): 1501-1508.  
(Wang J Q, Li K J. Multi-criteria decision-making method based on intuitionistic normal fuzzy aggregation operators[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(6): 1501-1508.)
- [55] 时恩早, 范颖. 基于直觉正态模糊信息集成的多属性决策[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1612-1617.  
(Shi E Z, Fan Y. Intuitionist normal fuzzy information aggregation operators and their applications to multi-attribute decision making[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(10): 1612-1617.)
- [56] 刘政敏, 刘培德. 直觉正态模糊优先集结算子及其在群决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 494-504.  
(Liu Z M, Liu P D. Intuitionistic normal fuzzy prioritized aggregation operators and their application to group decision making[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(2): 494-504.)
- [57] 王文全, 黄胜, 王超, 等. 舰船通道布置方案的直觉模糊多属性群决策方法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 894-899.  
(Wang W Q, Huang S, Wang C, et al. Intuitionistic fuzzy multiple attribute group decision-making for ship passage arrangement[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(6): 894-899.)
- [58] 郭艺, 吕飞鹏, 王刚. 基于直觉梯形模糊数的数字保护可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 65-70.  
(Guo Y, Lyu F P, Wang G. Reliability analysis of digital relay based on intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 65-70.)
- [59] 巩奕成, 任仲宇, 丁飞, 等. 基于直觉梯形模糊数的灰关联投影寻踪动态聚类多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1333-1339.  
(Gong Y C, Ren Z Y, Ding F, et al. Grey relation-projection pursuit dynamic cluster method for multiattribute decision making assessment with trapezoidal intuitionistic fuzzy numbers[J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1333-1339.)
- [60] 高明美, 孙涛, 赵天燕, 等. 基于区间直觉模糊熵和时间熵的动态多属性模糊决策[J]. 模糊系统与数学, 2016, 30(4): 31-41.  
(Gao M M, Sun T, Zhao T Y, et al. Approach to dynamic multiple attribute fuzzy decision making based on the interval-valued intuitionistic fuzzy entropy and time entropy[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2016, 30(4): 31-41.)
- [61] 梅晓玲. 基于相似度的动态直觉模糊多属性决策方法[J]. 统计与决策, 2016, 32(15): 22-24.  
(Mei X L. Dynamic intuitionistic fuzzy multiple attribute decision-making method based on similarity[J]. Statistics & Decisions, 2016, 32(15): 22-24.)
- [62] 陈伟, 杨早立, 周文, 等. 基于时间度的动态直觉模糊多属性妥协决策[J]. 运筹与管理, 2016, 25(2): 83-89.  
(Chen W, Yang Z L, Zhou W, et al. Dynamic intuitionistic fuzzy compromise decision making method based on time degrees[J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(2): 83-89.)
- [63] 张浩为, 谢军伟, 葛佳昂, 等. 改进TOPSIS的多时刻融合直觉模糊威胁评估[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 811-815.  
(Zhang H W, Xie J W, Ge J A, et al. Intuitionistic fuzzy set threat assessment based on improved TOPSIS and multiple times fusion[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 811-815.)

### 作者简介

余德建(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事信息计量学、模糊理论与运筹优化等研究, E-mail: yudejian62@126.com;

潘天行(1997—), 男, 硕士生, 从事信息计量学、社会网络分析的研究, E-mail: pantianxing97@163.com;

李登峰(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事经济管理决策与对策、模糊理论与运筹优化等研究, E-mail: lidengfeng@uestc.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)