

· 经济管理青年学者论坛 ·

层次分析法研究的知识流动和主题 演变分析



□余德建¹ 徐泽水² 颜兆萍¹

[1. 南京审计大学 南京 211815; 2. 四川大学 成都 610064]

[摘要] **【目的/意义】** 从20世纪70年代至今, 层次分析法经过不断改进和发展, 已经成为解决多目标决策问题的有效方法并广泛应用于经济管理和工程技术等多个领域。由于该方法的飞速发展, 文献数量大量累积, 有必要采用文献计量的方法对层次分析法研究的发展进行梳理和剖析。

【设计/方法】 运用主路径和知识图谱, 对发表于国内重要期刊上的593篇文献所呈现的关键研究内容、重要主题等进行分析。**【结论/发现】** 1980~2020年该领域经历了萌芽期、生长期和发展期三个发展阶段。判断矩阵一致性、标度和权重问题是层次分析法的重点研究内容。针对三个研究阶段, 主要研究主题包括“判断矩阵一致性”“权重”“排序”“模糊层次分析法”和“区间层次分析法”等主题, 其中“模糊层次分析法”和“区间层次分析法”主题正处于蓬勃发展的状态。研究结果对于厘清层次分析法的知识发展脉络和研究主题的动态演变, 推动层次分析法的进一步发展具有重要意义。

[关键词] 层次分析法; 主路径分析; 知识图谱; 判断矩阵一致性; 标度; 权重

[中图分类号] C934

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2021)-1054

Analysis of Knowledge Flow and Thematic Evolution in Analytic Hierarchy Process

YU De-jian¹ XU Ze-shui² YAN Zhao-ping¹

(1. Nanjing Audit University Nanjing 211815 China;

2. Sichuan University Chengdu 610064 China)

Abstract [Purpose/Significance] Since the 1970s, the analytic hierarchy process (AHP) has been continuously improved and developed and has become an effective method to solve multi-objective decision-making problems. It has been widely used in many fields such as economic management and engineering technology. Due to the rapid development of this method and the accumulation of a large number of literature, it is necessary to use bibliometric methods to sort out and analyze the development of AHP. [Design/Methodology] Based on this background, this article uses main path and knowledge graph to analyze the main research content and important topics presented in 593 literatures published in domestic core journals. [Conclusions/Findings] The field has experienced three stages of development from 1980 to 2020: the embryonic period, the growth period and the development period. The consistency, scale and weight of the judgment matrix are the main research contents of the AHP field. For the three research stages, the main research topics include the consistency of judgment matrix, weight, fuzzy AHP and

[收稿日期] 2021-05-20

[基金项目] 国家自然科学基金(71771155, 72071135); 教育部人文社科项目(19YJC630208)。

[作者简介] 余德建(1984-)男, 南京审计大学商学院副教授、硕士生导师; 颜兆萍(1999-)女, 南京审计大学商学院硕士研究生。

[通信作者] 徐泽水(1968-)男, 四川大学商学院教授、博士生导师. E-mail: xuzeshui@263.net.

interval AHPs, among which the subjects of fuzzy AHP and interval AHP are in vigorous development. The research results are of great significance for clarifying the knowledge development process of AHP and the dynamic evolution of research topics and promoting the further development of AHP.

Key words analytic hierarchy process; main path analysis; knowledge graph; judgment matrix consistency; scale; weight

引言

层次分析法是一种定性和定量相结合的分析方法,于20世纪70年代初由美国运筹学家Saaty提出^[1]。迄今为止,国内外学者对层次分析法进行了广泛的研究,该方法的知识体系不断丰富并且应用于多个领域。面对大量的研究成果,有必要系统地梳理和回顾层次分析法的发展,以全面了解该领域。目前已有一些学者运用文献综述法和文献计量分析对层次分析法的发展历程进行总结。例如,Ishizaka等总结了层次分析法的应用领域,并重点审查了层次分析法研究的重要领域^[2];Vargas阐述了层次分析法的计算步骤、重点研究主题和应用^[3]。冯长根等基于安全领域层次分析法的2794篇文献,对文献年发文量和机构发文量进行描述性统计,利用CiteSpace软件构建作者-机构网络和高频词共现网络来获取该领域的研究主体和研究热点^[4]。马萍以CSSCI数据库中于2013~2017年发表的层次分析法文献为数据集,采用文献计量法统计该领域的年发文量及关键词频数,分析层次分析法的现状及发展趋势^[5]。

从总体上来看,一方面,现有关于层次分析法的部分文献综述是基于主观经验对该领域进行归纳总结,缺少样本数据的支撑及定量分析研究;另一方面,鲜有文献从知识流动的角度探索层次分析法领域的发展历程。基于此背景,本文结合两种定量方法研究层次分析法领域,即主路径分析和知识图谱分析,旨在揭示该领域知识发展脉络及趋势。其中,利用主路径方法提取数据集中的关键文献,揭示层次分析法领域的重要发展路线;知识图谱分析则挖掘该领域各阶段的研究主题及主题演化趋势。

本文的优势体现在以下几个方面:(1)现有的文献综述大多仅依赖静态的描述性统计。不同于传统的定量分析方法,本文从动态的角度揭示层次分析法研究的知识流动和主题演化。(2)本文首次将主路径方法运用到层次分析法领域,以中国知网为数据源,从大量文献中提取重要的知识流,对重要文献进行内容分析。基于以上分析,本文更系统、全面地剖析层次分析法领域的发展脉络,研究热点及主题演化趋势,有助于研究人员把握该领域的发展概况和发展方向,为未来研究提供新的思路。

一、数据来源与研究方法

(一) 数据来源和发展阶段划分

1. 数据来源

本文的数据来源于中国知网(CNKI),检索主题为“层次分析法”,为了保证样本数据的质量,在数据的选取上,限制期刊来源为国家自然科学基金委确定的管理科学重要学术期刊和FMS管理科学高质量期刊推荐列表中FMS等级为T1的期刊,合并后共筛选出39种期刊,以2020年为终止点,检索时间为2021年4月,去除非论文类条目,共检索出593篇学术文献,通过对数据的手动检查,增加三篇相关文献,最终获得593篇文。

2. 发展阶段划分

为了更准确地把握层次分析法领域的发展规律及趋势,本节基于该领域总文献的年发文量来反映该领域的发展状况并进行阶段的划分。如图1所示,绘制总文献发文量及重要期刊的文献发文量变化曲线。条形图表示重要期刊的文献发文量,折线图表示总文献发文量,每个阶段使用不同图案进行标记。对总文献发表量进行分段拟合,得到三条拟合直线,其斜率表示文献变化量。结合文献增长曲线和拟合直线,将1980~2020年划分为三个阶段:

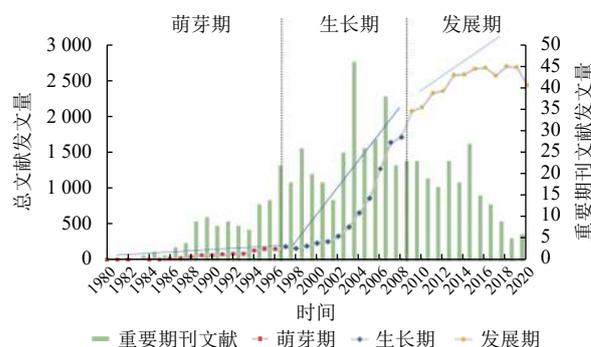


图1 层次分析法领域的总文献发文量和重要期刊的文献发文量

(1) 萌芽期: 1980~1996年, 该阶段发文量较少且文献增长趋势缓慢, 年发文量介于0~160篇, 平均每年发表文献58篇, 处于层次分析法领域发展的萌芽期。

(2) 生长期: 1997~2008年, 该阶段年发文量增长较快, 拟合直线斜率最大, 相对于上一个时期有显著的变化, 最高年发文量高达1700余篇, 但该阶段发展趋势还不稳定仍然处于不断上升阶段, 此阶段为层次分析法的生长期。

(3) 发展期: 2009~2020年, 该阶段文献发表量相对平稳且数量较多, 平均每年发表文献2480篇, 该阶段可视为层次分析法的发展期。

(二) 研究方法

本文首先基于主路径方法描绘出该领域的知识演化路径, 并深入分析该领域的重要文献。其次, 借助知识图谱工具SciMAT作辅助分析, 通过关键词聚类, 揭示主题的知识结构及其动态发展。本文的具体研究步骤如图2所示, 所使用的研究方法

如下:

1. 基于引文关系的主路径分析

Hummon和Doreian首次利用主路径方法探索DNA领域的知识演化^[6]。引文网络代表了研究者之间的知识流动^[7], 其中节点代表科学文献, 论文之间的链接代表引文信息, 知识方向从被引文献流向施引文献。许多节点和链接组成了一个非加权网络。为了从复杂的引文网络中提取关键的信息, Hummon和Doreian提出了“主要路径”来简化庞大的引文网络。随后, Liu和Batagelj等人在此基础上基于多方面视角提出了优化主路径的遍历方法和赋权算法^[8-9]。主路径方法的核心思想是提取出一条或多条由关键文献组成的发展路径, 以研究该领域的知识流动和发展趋势。

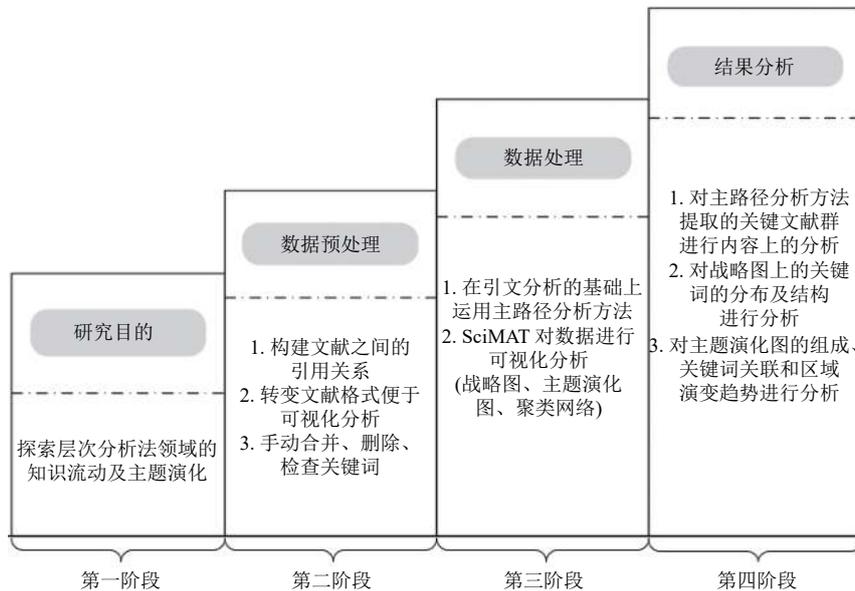


图2 研究步骤

2. 基于关键词的可视化分析

在已有的研究中, 许多学者利用知识图谱工具探索某一领域的发展历程及研究热点。本文以软件SciMAT为分析工具, 在可视化模块中, 选取战略图和主题演化图来分析和跟踪研究领域的发展和演化。战略图是一种能够直观判断研究热点与趋势的方法^[10], 根据Cobo等人的研究, 用X和Y轴将平面分为四个象限, 中心度和密度是衡量战略图中主题的重要指标^[11]。如图3(a)所示, 右上象限中的主题发展良好, 并且与其他主题紧密相关, 被称为“主流主题”。密度高但低中心度的主题位于左上象限。这意味着它们的内部关系得到发展, 但与研究领域中其他主题的交互作用较弱, 称为“孤立主题”。左下象限中的主题为“边缘主题”, 这些主

题处于出现或衰落状态。最后, 右下象限中的主题与其他主题紧密相连, 但是其中心性相对较低, 称为“基本主题”。其中, 第一象限和第四象限的主题是领域发展的主要主题, 值得重点关注。

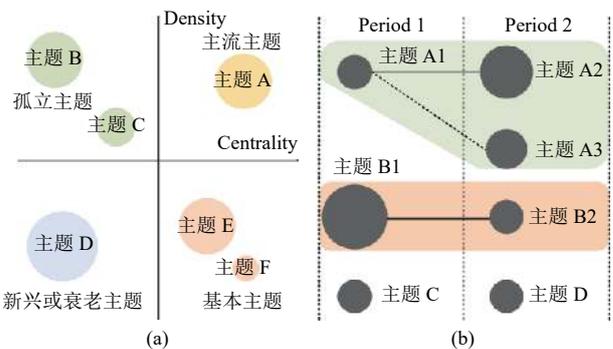


图3 战略图和主题演化图

主题演化图用于纵向分析。如图3(b)所示,将整个时间段划分为两个时期,不同的主题区域用不同的颜色标记。由图可知,主题A1、主题A2和主题A3属于同一区域,主题B1和主题B2组成一个区域。主题C可以看作是一个孤立的主题,主题D是新兴主题。实线表示两个主题具有相同的名称,或者一个主题的名称是另一个主题的一部分。虚线表示主题共享相同的元素^[12]。

二、关键文献群间知识扩散

本节利用主路径方法,聚焦于局部引文网络,来确定层次分析法领域的关键文献和重要观点,以追溯该领域的知识扩散轨迹和主要发展方向。基于此算法,计算出593篇文献之间的引用经标准化处理后的遍历权重分布如表1所示。593篇文献之间共存在202次引用关系,其中遍历系数值在0.0036以上的引用关系占比33.1683%。为了提取该领域的核心文献,本文以0.0036为阈值选取67对引用进一步分析,结果如图4所示。图中每个节点由文献的第一作者和发表时间标注,箭头粗细与权值大小成正比。由图4可知,层次分析法研究的关键文献有23篇,大致可以分为三个部分。以下对这三部分内容作简要分析。

表 1 引用关系遍历权重分布表

遍历权值	频数	占比 (%)	累计频数	累计占比 (%)
(0.0109, 0.0272]	11	5.4456	11	5.4456
(0.0073, 0.0109]	17	8.4158	28	13.8614
(0.0054, 0.0073]	16	7.9208	44	21.7822
(0.0036, 0.0054]	23	11.3861	67	33.1683
(0.0018, 0.0036]	49	24.2574	116	57.4257
(0, 0.0018]	86	42.5743	202	100



图 4 层次分析法领域的关键文献群

第一部分的文献集中于处理判断矩阵一致性的问题,研究者们提出了修正判断矩阵一致性的多种方法。路径首端的文献是梁樑^[13]和马云东^[14],这两篇文献结合最优传递矩阵改进传统的层次分析法,该方法的优势是不需要进行一致性检验。以上

两篇文献仅仅对判断矩阵进行局部修正,金菊良基于全局的视角提出了用加速遗传算法修正判断矩阵一致性和计算排序权值^[15]。王学军基于G1法分析了造成判断矩阵不一致的原因并且通过建立指标间的序关系解决了该问题^[16]。李春好基于BG-AHP层次分析原理提出多属性变权决策方法,该方法能够反映决策者的真实偏好、弱化决策者主观判断带来的误差,最终获得决策者接受的结论^[17]。在以上的研究中,研究者们通过调整某些要素以满足判断矩阵的一致性,但调整之后原有的判别信息被篡改,故结论的可靠性降低。王洪波在此背景下,提出基于流形学习的非一致性判断矩阵排序方法^[18]。

第二部分的文献集中于引入一系列新方法来解决判断矩阵一致性和群决策的问题。魏翠萍和朱建军通过调整判断矩阵中的元素来改进判断矩阵一致性。前者基于已有的一致性检验标准对判断矩阵的一对元素进行修改来提高判断矩阵的一致性,后者通过测量判断矩阵各元素与其达到最佳一致性时的取值距离来调整矩阵的元素^[19-20]。田志友结合可能满意度指标和一致性比率标准来控制判断矩阵的改进方向和调整力度^[21]。判断矩阵的相容性检验及修正是群组决策排序的关键步骤。孙婧将可能满意度引入残缺矩阵相容性的改进和排序新算法^[22]。焦波定义可能度和满意度指标,构建最优可能度矩阵和最优满意度矩阵,并且以这两个矩阵为上下界获得更优的可能满意度矩阵来解决群决策问题^[23]。

第三部分的关键文献群分为左右两个分支,左分支的文献集中于层次分析法的标度研究,右分支的文献侧重于讨论层次分析法的权重和加速遗传算法。刘豹对层次分析法的基本原理,基本步骤和计算方法进行了详细阐述^[24-25]。何莹对比了不同标度下的排序结果,强调了群判断标度系统对层次分析法结果的可靠性有重要影响^[26]。骆正清基于徐泽水^[27]、汪浩^[28]等提出的多种标度方法及已有的标度比较研究^[29-30],建立多种性能评价标准,对比分析其中几种常见的标度方法,并且针对不同的排序问题提出了参考标度^[31]。杨卫华和高媛媛将层次分析法分别应用于城市经济发展水平和中国水资源利用效率评价中^[32-33]。马东辉从递结算子的选择方面研究层次分析法中的逆序问题,并证明了加权乘法法的保序效果最佳^[34]。在此基础上,马东辉又提出了限定性层次分析法并将其应用到防灾减灾工程领域^[35]。王莲芬将评判排序分为两步,层次单排序和层次总排序,研究和讨论了不同类型评判矩阵的排序权数的多种计算方法^[36]。金菊良和李传威分别提

出用加速遗传算法和基于实数编码的加速遗传算法来计算排序权值^[37-38]。

从关键集群文献的分析结果来看,对层次分析法的研究侧重于判断矩阵一致性、标度系统、排序权重、加速遗传算法和群决策等多个方面。以这些关键文献群为基础,可以很快了解层次分析法研究的基本情况。本文基于局部的视角追踪层次分析法领域的重要发展轨迹,借助知识图谱工具辅助分析,基于全局的视角探测研究主题及主题演化,随着研究的进一步深入,更多有关层次分析法的研究细节被揭示。

三、研究主题及主题演化

(一) 各时间段的研究主题

在本节中,运用战略图和主题演化图来分析层次分析法领域中的重要主题和主题演变。由于层次分析法领域发展迅速,故基于文献增长量将整个时间段(1984~2020年)划分为萌芽期(1984~1996年)、生长期(1997~2008年)、发展期(2009~2020年)三个连续时间段。需要指出的是,在生成图谱之前,需要预先去除“层次分析法”“AHP”等通用的关键词以免影响分析结果;手动合并具有相同含义的词,例如“权重”和“权重值”。最终,分析结果得出1318个关键词和63个关键词组。此外,图中球体的大小与文章数量成正比,以关键词名称标注。

1. 萌芽期: 1984~1996年

萌芽期的战略图如图5所示,共有九个研究主题。结合主题分布可知,层次分析法领域的研究集中于四个主题:“排序”“一致性调整”“权重”和“标度”。在Saaty提出层次分析法理论之后,研究人员针对层次分析法存在的问题和难点提出了许多对策。主题“排序”与“保序性”相关联,主要是解决层次分析法中元素间存在的逆序和保序问题。除此之外,在此期间许多研究者还介绍了层次单排序的方法和层次总排序的方法。主题“一致性调整”的主要研究内容是修正及检验判断矩阵的一致性,该主题与“最优判断矩阵”相关联。主题“标度”的主要研究内容是研究者们基于原有Saaty的1~9标度法提出了多种新的标度法并考察其优劣。主题“权重”有最高中心度,基于多个因素评价目标时,层次分析法作为确定指标权重系数的有效方法,较大程度地提升了比较过程中的科学性。主题“模糊层次分析法”和“模糊综合评价”

密度高但中心度低,这两个主题自身发展较好但与其他主题交互较弱。

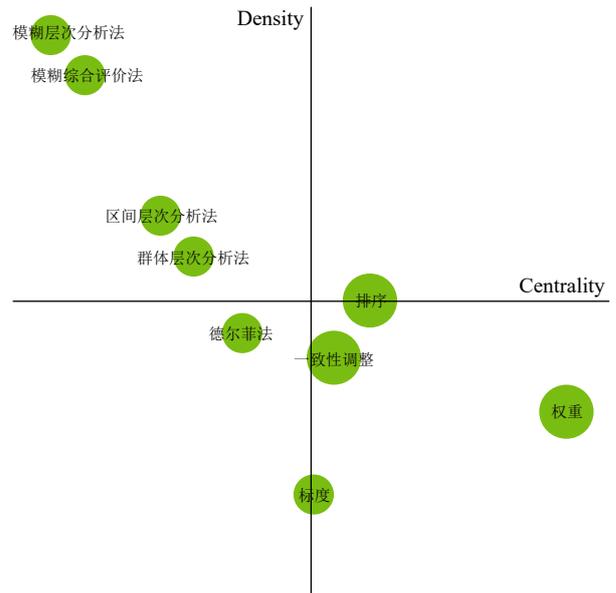


图 5 1984~1996年国内重要期刊中层次分析法研究关键词战略图

2. 生长期: 1997~2008年

层次分析法领域生长期的主题与萌芽期的研究主题基本一致,但在萌芽期的基础上有所发展和进步,如图6所示。根据主题分布可得关键主题是“粗糙集”“排序”“模糊层次分析法”“权重”“区间层次分析法”“综合评价”“群决策”“一致性调整”和“模糊综合评价”。主题“一致性调整”与“主题聚类分析”和“遗传算法”相关联。该阶段“一致性调整”的研究重点是基于矩阵元素的局部修正,而萌芽期的该主题的研究重点则是采用聚类分析、加速遗传算法、前瞻算法等进行全局修正。层次分析法的“权重”和“排序”研究也更加丰富,如对区间数判断矩阵、模糊层次分析法和组合赋权等方法的研究。主题“模糊层次分析法”是对原始层次分析法的改进及延伸,前一时期该主题集中于对权重和排序的方法研究,这一时期集中于应用研究。主题“区间层次分析法”也作为层次分析法的改进,采用区间标度处理不确定的判断,该阶段的研究包含区间数判断矩阵的一致性研究和权重计算。

生长期新增研究主题“粗糙集”“综合评价”和“群决策”。主题“综合评价”的文献数目最多,层次分析法不断发展完善并且被应用于许多领域的综合评价中,主题“模糊综合评价”可以看作是该主题的子集。主题“粗糙集”通常与层次分析法相结合,粗糙集理论基于客观的角度来确定各

第一阶段和第二阶段, 研究者们致力于研究模糊层次分析法的判断矩阵一致性、权重等问题, 主题“模糊层次分析法”和“模糊综合评价法”在改进了传统层次分析法的缺陷基础上致力于自身的理论研究。在最后一个时期, 许多学者将模糊层次分析法广泛运用到多个领域的评估中。

主题区域“排序-权重”是由主流主题和基本主题构成的, 主题“排序”和“权重”相互关联并且最终都发展成为主流主题, 该主题区域的研究呈现一种蓬勃发展的趋势。在第一阶段和第二阶段, 研究者们提出层出不穷的权重计算方法。在最后一个阶段, 出现了新的主题“熵权法”, 研究者们常常利用主客观相结合的方法来确定权重。

涵盖多个主题的主题区域“一致性调整”从两个基本主题开始, 最终发展为两个主流主题。纵观整个时期, 主题“一致性调整”一直是值得研究且热门的主题。在第二阶段, 出现了主题“群决策”和“平衡计分卡”, 主题“群决策”是在评价分析中融合多位专家的意见; 主题“平衡计分卡”与层次分析法相结合构建绩效考核的评价体系。

“区间层次分析法”占据较大的区域。从主题结构及其组成角度来看, 主题区域从一个孤立主题开始, 一些主题出现在第二阶段和第三阶段, 部分主题发展成为基本主题和主流主题。此外, 文献数量于第二阶段和第三阶段间迅速增长。该领域研究的重心是区间层次分析法, 前期集中于区间层次法的权重求解, 区间判断矩阵一致性研究。在第三阶段, 出现主题“物流”与“供应链”, 这说明区间层次分析法较多的应用于物流选址, 物流企业绩效评价, 物流效率评价等。

主题区域“综合评价-评价模型”包含三个主题。主题“综合评价”和“评价模型”出现于第二阶段, 该区域的研究集中于设计多项评价指标, 构建综合评价系统。

四、结论与展望

本文从1980~2020年的593篇高质量文献出发, 利用主路径分析和知识图谱相结合的方法对层次分析法的发展态势进行总结和梳理。首先, 基于局部视角利用高质量文献引文关系构建引文网络, 深入地剖析了该领域关键文献群的研究内容, 来探索该领域关键文献间的知识扩散。其次, 基于全局视角分析, 将整个时间段分割为三个连续的时间片, 利用聚类分析提取每一阶段的研究主题并揭示

主题的动态演化。根据两种方法的分析结果, 本文总结以下几点主要的结论:

1. 从关键文献集群来看, 该领域的关键文献集中于判断矩阵一致性、标度和权重等方面的研究。从文献数量来看, 判断矩阵一致性的研究占比较多, 学者们致力于寻找判断矩阵不一致的原因, 检验和修正判断矩阵一致性。从文献内容来看, 关键文献集群大多数文章类型属于理论改进及创新, 其在层次分析法的发展历程中有着重要的理论意义。

2. 从研究主题来看, 层次分析法研究主要集中于“判断矩阵一致性”“排序”“权重”“模糊层次分析法”“区间层次分析法”和“综合评价”研究。其中, “判断矩阵一致性”“排序”“模糊层次分析法”和“区间层次分析法”存在于三个阶段, 是贯穿整个发展时期的重要主题。

3. 从主题动态演化趋势来看, “模糊层次分析法-模糊综合评价法”和“区间层次分析法”主题区域的研究整体上处于显著上升的趋势。

4. 对比两种分析方法的研究结果, 发现层次分析法领域的引文路径下的演进与主题演化趋势基本一致, 但是, 基于知识图谱分析挖掘出更多的研究热点, 例如“模糊层次分析法”和“区间层次分析法”。

本文首次结合主路径分析和知识图谱方法研究层次分析法领域的知识流动, 主题演化及趋势。一方面, 为该领域的学者们提供了一些有价值的信息, 这些图谱及结论有助于学者们回顾层次分析法的重要发展历程并拓展新的研究方向; 另一方面, 为探索某一领域的知识扩散和发展方向提供了新的研究视角。然而, 本文也存在一些不足之处: 一是数据的选取, 仅以中国知网为数据集, 这可能会导致遗漏部分研究成果; 二是在生成战略图之前, 需预先设定关键词的阈值, 本文仅筛选了部分重要关键词作为参考。在未来的研究中, 可以优化数据集或者拓展其他研究方法, 对层次分析法领域作进一步的研究。

参考文献

- [1] SAATY T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48(1): 9-26.
- [2] ISHIZAKA A, LABIB A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 14336-14345.
- [3] VARGAS L G. An overview of the analytic hierarchy

process and its applications[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48(1): 2-8.

[4] 冯长根, 李杰, 李生才. 层次分析法在中国安全科学研究中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(6): 2126-2130.

[5] 马萍. 基于文献计量层次分析法的研究综述[J]. *经济研究导刊*, 2018(32): 6-8.

[6] HUMMON N P, DEREIAN P. Connectivity in a citation network: the development of DNA theory[J]. *Social Networks*, 1989, 11(1): 39-63.

[7] YU D, PAN T. Tracing knowledge diffusion of TOPSIS: a historical perspective from citation network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 168: 114238.

[8] LIU J S, LU L 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.

[9] Batagelj V. Efficient algorithms for citation network analysis[EB/OL]. (2003-09-14) [2020-09-11]. <https://arXiv.org/abs/cs/0309023>.

[10] 颜端武, 苏琼, 任婷, 等. 基于引文主路径和时序主题的科学发现知识演进分析[J]. *情报理论与实践*, 2020, 43(6): 102-108+122.

[11] COBO M J, CHICLANA F, COLLOP A, et al. A bibliometric analysis of the intelligent transportation systems research based on science mapping[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 15(2): 901-908.

[12] MURGADO-ARMENTEROS E M, GUTIÉRREZ-SALCEDO M, TORRES-RUIZ F J, et al. Analysing the conceptual evolution of qualitative marketing research through science mapping analysis[J]. *Scientometrics*, 2014, 102(1): 519-557.

[13] 梁樑, 盛昭翰, 徐南荣. 一种改进的层次分析法[J]. *系统工程*, 1989(3): 5-7+2.

[14] 马云东, 胡明东. 改进的AHP法及其在多目标决策中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 1997(6): 41-45+ 58.

[15] 金菊良, 魏一鸣, 潘金锋. 修正AHP中判断矩阵一致性的加速遗传算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2004(1): 63-69.

[16] 王学军, 郭亚军. 基于G1法的判断矩阵的一致性分析[J]. *中国管理科学*, 2006(3): 65-70.

[17] 李春好, 杜元伟, 孙永河, 等. 多属性隐式变权决策分析方法[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(5): 163-172.

[18] 王洪波, 罗贺, 杨善林. 基于流形学习的非一致性判断矩阵排序方法[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 147-155.

[19] 魏翠萍, 章志敏. 一种改进判断矩阵一致性的算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2000(8): 62-66.

[20] 朱建军, 刘士新, 王梦光. 一种新的改进不一致判断矩阵的方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2003(11): 95-98+110.

[21] 田志友, 王浣尘, 吴瑞明. 可能满意度与判断矩阵的一致性检验及改进[J]. *系统工程理论与实践*, 2004(12): 94-99.

[22] 孙靖, 许维胜, 吴启迪. 群组决策中残缺判断矩阵的相容性修正及排序新算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006(10): 88-94.

[23] 焦波, 黄赅东, 黄飞, 等. 一种基于最优可能满意度的群AHP判断矩阵集结方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(8): 1242-1246.

[24] 刘豹, 许树柏, 赵焕臣, 等. 层次分析法—规划决策的工具[J]. *系统工程*, 1984(2): 23-30.

[25] 刘豹. 群判断与层次分析法[J]. *系统工程学报*, 1991(1): 70-75.

[26] 何堃. 层次分析法的标度研究[J]. *系统工程理论与实践*, 1997(6): 59-62+104.

[27] 徐泽水. 层次分析新标度法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998(10): 75-78.

[28] 汪浩, 马达. 层次分析标度评价与新标度方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1993(5): 24-26.

[29] 徐泽水. 关于层次分析中几种标度的模拟评估[J]. *系统工程理论与实践*, 2000(7): 58-62.

[30] 侯岳衡, 沈德家. 指数标度及其与几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 1995(10): 43-46.

[31] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 2004(9): 51-60.

[32] 杨卫华, 李小立, 孟海燕. 冀中南地区城市低碳经济发展评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S3): 24-27.

[33] 高媛媛, 许新宜, 王红瑞, 等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 776-784.

[34] 马东辉, 郭小东, 周锡元. 层次结构综合评判中各种递结算子保序性研究[J]. *控制与决策*, 2007(8): 873-877.

[35] 马东辉, 郭小东, 苏经宇, 等. 层次分析法逆序问题及其在土地利用适宜性评价中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2007(6): 124-135+165.

[36] 王莲芬. 层次分析法中排序权数的计算方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1987(2): 31-37.

[37] 金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 计算层次分析法中排序权值的加速遗传算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002(11): 39-43.

[38] 李传威. 加速遗传算法的层次分析法的探讨[J]. *中国软科学*, 2005(12): 140-144.

编辑 邓婧