

多属性决策在中药研发及生产中的应用

杨志城¹, 杨羽君^{2,3}, 何 毅^{2,3}, 戚 进¹, 鄂秀辉^{2,3*}

(1. 中国药科大学中药学院, 江苏 南京 211198; 2. 天士力控股集团有限公司, 天士力研究院现代中药开发中心, 天津 300410; 3. 天士力医药集团股份有限公司 创新中药关键技术国家重点实验室, 天津 300410)

摘要: 多属性决策是现代决策科学的一个重要组成部分, 目前已广泛应用于工程设计、经济、管理和军事等诸多领域。中药具有“多成分、多靶点”的特点, 在流通中还有品相等其他质量控制因素, 目前已有一些分析手段与其相适应, 但均有不足。多属性决策与中药上述特点不谋而合, 但它在中药研究体系中的应用相对较少。本文从主观赋权法、客观赋权法、主客观集成赋权法 3 个方面对目前已有相关文章进行综述, 以期多属性决策在中药研发及生产中的应用提供依据。

关键词: 中药; 研发; 生产; 多属性决策

中图分类号: R28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1528(2021)04-0988-06

doi: 10. 3969/j. issn. 1001-1528. 2021. 04. 029

多属性决策 (MADM) 也称有限方案多目标决策, 是指在同时考虑多个属性的情况下, 选择最优备选方案或进行方案排序的决策问题, 是现代决策科学的一个重要组成部分, 它克服了由于单一指标或指标选取不全面等原因导致的决策偏差, 可丰富决策结果包含的信息量, 使其可信度更高。目前, 在中药研究中有采用 1 个或 2 个化学指标来代表整体, 也有采用指纹图谱代表整体, 但不能完全代表中药这个复杂有机体, 尤其是其配伍规律, 而中药在流通中还受品相等因素影响, 更是化学指标所无法衡量的, 故现有手段显然无法在中药研究中做到客观有效的评价。将多属性决策与中药研究有机结合, 可将影响因素根据重要程度赋予相应权重、综合评分, 能综合全面地研究中药, 从而为其工艺探索和质量评价等提供更好的思路。

1 常用赋权方法及其应用

多属性决策过程主要分为 3 个步骤, 即合理的指标的选取、充足的属性决策方案及数据的标准化、各指标的权重分配。对指标进行赋权是多属性决策中的重要一环, 有学者认为它至关重要^[1], 主要体现指标属性包括决策者对该指标的重视程度、该指标对目标的影响程度、该指标在组间的变异程度。赋权的方法多种多样, 不仅有各自特点, 也有不同的适用范围。

1.1 主观赋权法 主观赋权法是根据对各属性的主观偏好程度由专家根据经验进行赋权的一种方法, 各指标权重的大小取决于各专家自身的知识结构、个人喜好。该方法能较好地反映决策者的主观意愿, 可根据很多无法数值化处

理的信息进行赋权, 同时进行集思广益, 具有很强的实效性, 简单实用, 便于推广。但由于它欠缺科学性、稳定性, 与实际数据的联系不紧密, 故一般只用于数据收集困难或者信息不能准确量化的评价中。

1.1.1 德尔菲法 德尔菲法是一种简单、便捷、有效的主观权重确定方法, 其最大优点是简便直观, 无需建立繁琐的数学模型, 而且在缺乏足够统计数据和没有类似历史事件可借鉴的情况下, 也能对研究对象未知或未来状态作出有效预测。该方法本质上是一种反馈匿名函询法, 其流程是在对所要预测的问题征得专家的意见后进行整理、归纳、统计, 再匿名反馈给各专家再次征求意见, 再集中, 再反馈, 直至得到一致的意见, 进而确定各指标的权重系数^[2]。

石亚飞等^[3]邀请四十余位熟悉中药注射剂研发的药学及医学专家, 采用德尔菲法对中药注射剂研发阶段安全性评价中的一些指标进行打分, 最终建立一级指标 11 项、二级指标 60 项, 并采用百分权重法确认指标权重, 可为中药注射剂安全性评价提供理论依据, 并能根据权重系数选择性地改善其研发、生产、运输等环节。任守利^[4]采用德尔菲法构建中药天麻商品规格评价体系, 最终确立一级指标 2 个、二级指标 8 个、三级指标 11 个, 并分别确立了权重值, 同时建议建立以德尔菲法为中心的中药评价体系。靳玉瑶^[5]采用德尔菲法构建复方中成药欧盟注册评价指标体系, 最终确认一级指标 2 个、二级指标 3 个、三级指标 18 个, 以及各指标的权重, 并提出运用 Delphi 专家咨询法与模糊综合评价法相结合构建的评价指标体系, 权威程度较

收稿日期: 2020-05-19

基金项目: 重大新药创制科技重大专项——中医药优势领域的创新中药关键技术开发研究 (2017ZX09301005)

作者简介: 杨志城 (1996—), 男, 硕士生, 研究方向为工业药学。Tel: 15657995175, E-mail: m15657995175@163.com

* 通信作者: 鄂秀辉 (1973—), 男, 副高级工程师, 从事中药新药开发与质量控制研究。Tel: (022) 86343784, E-mail: exh@

tasly.com

高, 指标体系科学合理性较强, 可为中药企业复方中成药欧盟简化注册提供参考。楚笑辉^[6]、鲍倩等^[7]应用德尔菲法, 分别构建黄连、陈皮药材商品规格评价体系。

1.1.2 层次分析法 美国运筹学家 Sasty 于 20 世纪 70 年代初提出层次分析法 (AHP)^[8], 是一种定量与特性相结合、系统化、层次化的分析法, 它不仅适用于存在不确定性和主观信息的情况, 还允许以合乎逻辑的方式运用经验、洞察力和直觉。该方法最大的优点是提出了层次本身, 使得决策者能认真考虑和衡量指标的相对重要性, 并可深入分析实际问题, 将有关因素自上而下分层 (目标-准则/指标-方案/对象), 上层受下层影响, 而层内各因素基本上相对独立, 然后对每一层次内的因素进行两两对比, 并采用一定算法确定本层次内的元素权重系数, 并最终确定所有指标的权重系数^[9-13]。

王民敬等^[14]基于层次分析法对灵芝质量安全进行综合评价, 发现 5 种质量安全指标单项风险指数依次为 Cd>Hg>多糖>As>Pb, 安全风险指数为安全级, 这与内梅罗法所得结果一致。任爱农等^[15]应用层次分析法确认中药复方提取工艺中多个指标的权重, 并以此为基础优选最佳工艺, 可保证其科学性和准确性。孙宇靖等^[16]采用 AHP 法优化当归烟熏工艺, 可为该药材产业化和标准化生产提供理论依据。祝宇^[17]采用 AHP 结合正交试验法优化肉苁蓉醇沉工艺, 可为复方肉苁蓉合剂工业化生产提供参考。

1.1.3 优序图法 优序图法由美国运筹学家穆蒂于 20 世纪 80 年代提出并应用, 它采用矩阵图示的方法分析各因素对最终结果影响的重要程度, 为最终决策的确定提供依据^[18]。该方法通过两两比较来计算单个指标的总得分, 最后计算各指标的权重系数^[19]。但目前文献调研发现, 优序图法在中药研究中的应用较少, 仅何穗智等^[20]以其评价络气虚滞 (过劳) 型动脉粥样硬化模型, 胡星等^[21]以其建立水质评价权重。由此建议, 研究者可将优序图法与其他方法进行对比, 来探究它是否也可用于中药质量评价的建立。

1.1.4 其他方法 除了上述常用方法外, 还有自拟权重法、二项系数法^[22]、环比评分法^[23]等。其中, 自拟权重法是研究者根据自身知识经验对指标进行权重赋予, 应用较广, 但由于没有系统的赋值过程, 故在此不做详细介绍; 二项系数法、环比评分法在中药研究领域中的应用较少, 故也不再阐述。

1.2 客观赋权法 客观赋权法是利用数理统计将各指标经过分析处理后得出权数的一类方法, 其指标权重不具备可继承性, 在不同阶段中若评价指标值发生变化, 则各指标权重系数也将会改变, 由于它赖于较完善的数学理论, 尤其是最优化理论方面的知识, 故计算过程较复杂^[24]。该方法根据样本指标本身特点来进行赋权, 具有较好的规范性, 但它容易受到样本数据影响, 不同样本在同一方法下会得出不同权数, 故其所得结果难以得到公认, 更适用于宏观分级。

1.2.1 熵权法 熵本身是热力学概念, 最初由申农引入信

息论, 目前已经在工程技术、社会信息领域中广泛应用, 它适用于样本指标之间有相互关系且复杂的情况, 需要有一定的样本单位才可使用。该方法确定权重的依据为指标值的信息熵大小, 其数值越小, 该指标的变异程度越大, 提供的信息量越多, 在综合评价中起到的作用越大, 权重也就越大^[25], 故它只适用于相对评价而不适用于绝对评价, 同时数据标准化处理亦是熵权法中不可或缺的一个步骤。

曹苗苗等^[26]采用熵权法结合响应面法优化银怡片水体浸膏喷雾干燥工艺, 发现最优工艺稳定可行。朱紫烨等^[27]在甘草皂苷提取工艺中, 采用熵权法确认指标, 并结合 bp 神经网络系统分析数据, 准确有效。江华娟等^[28]采用熵权法结合 bp 神经网络成功优化四物汤提取工艺, 发现其稳定可行。李四海等^[29]、田彦芳等^[30]均采用熵权法优选中药提取工艺, 证明结果稳定可行。

1.2.2 主成分分析 主成分分析是一种使用最广泛的数据压缩算法, 它将原来众多具有一定相关性的指标重新组合成一组新的互相无关的综合指标, 用于代替原来的指标, 经典做法是用成分 (F_1) 方差来表达, $\text{Var} (F_1)$ 越大, 表示其包含的信息越多, 再根据 F_1 中各指标对应的系数计算最终权重值^[31-32], 适用于指标数目较多, 计算量过大的情况, 可在较好地在保持结果准确性的情况下大大减少工作量, 故得到广泛应用。

汪露露等^[33]基于指纹图谱与主成分分析相结合的方法优化复方虎杖方提取工艺, 全面考察药材提取情况, 同时简化数据处理, 所建立方法可靠实用。张黄琴等^[34]采用 UPLC-TQ-MS 联用技术测定百合中 8 种活性成分含量, 通过主成分的 F 综合评分, 对不同批样品的品质进行排序, 发现安徽霍山产者较优, 该方法准确高效便捷, 可为百合质量控制提供依据。蔡晓洋等^[35-38]采用主成分分析法建立不同产地中药种质资源评价函数, 可用于同种药材不同基源的分类评级。

1.2.3 CRITIC 法 CRITIC 法是 Diakoulaki 最先提出的一种处理多指标的客观定权法, 它通过指标内的变异性和指标间的冲突性来综合确定各指标的客观权重^[39], 虽然与熵权法一样是根据指标变异大小来确认权重, 但其特有之处在于可体现指标之间的冲突性。当标准差一定时, 指标间冲突性越小, 权重也越小, 反之则越大。

陈翔等^[40]基于 CRITIC 法、正交试验优化三叶青干燥工艺, 权重系数客观真实, 工艺稳定可重复。孙强等^[41]采用 CRITIC 法优化甘草黄酮纳米海绵提取工艺。黄潇等^[42]采用 CRITIC 法结合响应面试验优化栀子炭微波炮制工艺, 发现微波炮制工艺节能高效、可操作性强, 可作为丰富传统炮制工艺的方法。陈达等^[43]采用 CRITIC 法结合响应面试验优化韭菜籽盐炙工艺, 发现该方法稳定可靠。

1.2.4 其他方法 除了上述常用方法外, 还有艾玛法、多元统计法等^[44], 前期文献调研时发现它们在中药领域中的应用较少, 故不予介绍。

1.3 主客观集成赋权法 学术界普遍认为,主观赋权法和客观赋权法互有长短,前者能体现决策者主观意愿,但具有一定主观随意性,即使实际上属性的相对重要程度一般不会违反人的常识;后者虽然通过标准的计算步骤得出评价指标的权重系数,但在计算过程中决策者无法干预结果,故有时会出现难以解释的结果。因此,需要通过一定的手段将这 2 种方法综合考虑。

目前已有的集成方法主要是多属性决策方法集成,即对于给定的有限个选择指标,决策者根据事先确定的指标若干个属性值,再按照某种决策准则进行多指标排序。王应明^[45]提出一种确定多指标加权系数的离差平方和最大化方法。陈华友^[46]在此基础上提出多属性决策中基于离差平方和的最优组合赋权方法,并对文献 [47-48] 中的实例进行计算,结果一致。王中兴等^[49]提出基于离差最小和使综合评价价值尽可能大的集成各指标的最终权重,其计算结果与文献 [46-47] 排序一致。其他集成方法还有加法集成法^[50]、乘法集成法^[51]、目标规划法^[52]、灰色理论与数学模糊集成法^[53]、粗糙-模糊集集成模型的决策法^[54]等,虽然目前应用最广泛的是多属性决策方法集成,但在中药研究方面主要应用的是乘法集成法。

通过文献调研发现,目前在中药领域研究中最常见的主客观集成赋权法为 AHP 法、CRITIC 法的联合。张琳等^[55]将 AHP-CRITIC 法(乘法集成)与响应面试验相结合优化陈皮炮制工艺,可为该药材规范化炮制提供依据。刘小妹等^[56]采用 AHP-CRITIC 法优化参膝口服液提取工艺,所得最优工艺合理稳定,重复性好,可用于工业化生产。杨铭等^[57]采用 AHP-CRITIC 法建立复方自身清颗粒提取工艺中的多重指标权重,可使综合评价结果更加合理客观。

2 相关文献统计分析

通过查阅 CNKI、万方、维普等数据库,以“中药”“多指标综合评价”“权”等为关键词,检索近 10 年(2009-2019)来中药研究相关评价指标和方法的文献。结果,符合条件的文献大约有 220 篇,研究方向主要分为提取工艺(57.33%)、炮制工艺(18.53%)、质量评价(9.05%)、制剂工艺(15.09%)。

2.1 决策方法分析 研究者在拟定权重时,选取的指标属性可分为效益型、成本型,其中前者是指属性值越大越好的指标,后者是指属性值越小越好的指标^[58]。最后,采用得分公式计算出最终综合得分,用以评判不同方法的优劣。

文献统计显示,决策方法主要分为主观赋权法、客观赋权法、主客观集成赋权法、无、不明。本文通过对相关文献中采用的决策方法进行统计分析,可为后续研究者提供参考,减少因方法选择不当而进行无效实验。

研究者大多采用主观赋权法进行赋权,占有文献的 75.93%,见图 1,其中自行拟定权重的最多,达 83.24%,其次是层次分析法、德尔菲法,见图 2,表明在中药多属性决策中更侧重决策者主观意见。另外,主观赋权法在提取工艺研究中的应用最多,达 62.21%,其次是炮制工艺、

制剂工艺、质量评价,见图 3。

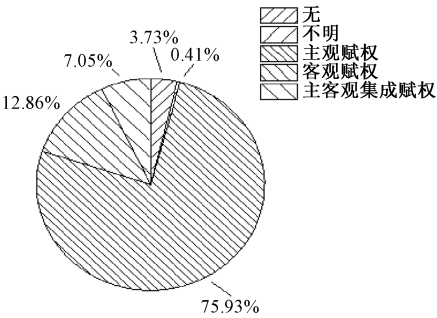


图 1 赋权方法分布

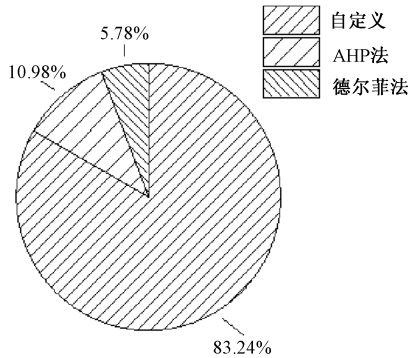


图 2 主观赋权法类别分布

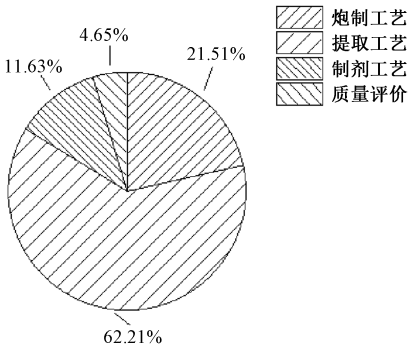


图 3 主观赋权法应用分布

部分研究者在主观赋权时采用的是 AHP 法,它是一种多指标优化中药复方提取工艺中主、客观相结合的确立权重法,可结合定性与定量分析,较为可靠。虽然该方法相对于自拟权重法说服力明显更强,但其计算过程复杂,这也是限制其广泛使用的原因之一。

在主观赋权法中,有 83.24% 研究者采用自行拟定的方法。决策者结合中药本身特性或制剂中某些因素重要程度来自行拟定相应的权重,虽然应用起来相对容易,但对研究者要求较高,需要对研究对象有深入的理解,并且在拟定权重时保持绝对公正。图 4 显示,提取工艺研究中采用自拟权重的频率最高,为了避免相关文献本身基数较大导致的误差,故对关于提取工艺的文献进行了分析,结果见图 5,可知仍然为主观赋权(自拟)频率最高。

文献统计显示,尚无研究者采用自行拟定权重的方法

进行质量评价研究，可能与其主观随意性过强，无法达到质量评价所需的客观性有关。再进一步分析质量评价文献，结果见图 6，可知有 38.1% 的文献采用主观赋权法，其中 12.5% 采用层次分析法，87.5% 采用是德尔菲法，提示在采用主观赋权法对进行质量评价研究时德尔菲法是更优选择。

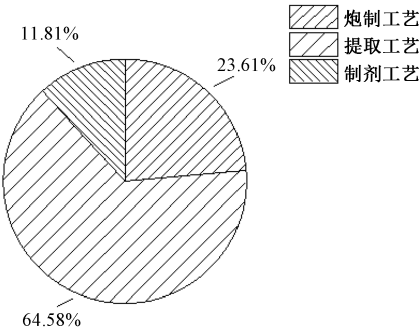


图 4 自拟权重应用分布

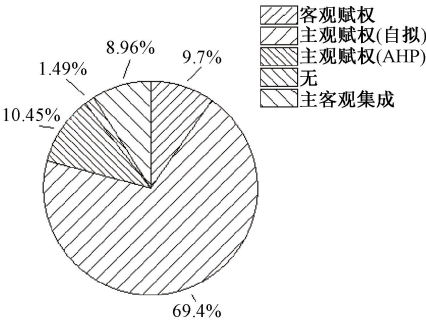


图 5 提取工艺赋权方法分布

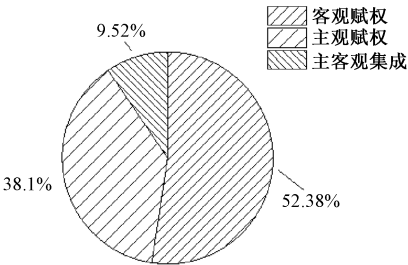


图 6 质量评价赋权方法分布

客观赋权法的应用比例仅次于主观赋权法，占全部文献的 12.86%，实现方法多于主观赋权法，其中熵权法、主成分法赋权最多，其次为变异系数法、均值法等，见图 7，并在提取工艺中的应用最广泛，占 39.39%，其次为质量评价、制剂工艺、炮制工艺，见图 8。另外，在中药质量评价研究中客观赋权法的使用率最高，占全部文献的 52.38%，其中以主成分赋权法最多，达 63.64%，表明质量评价时客观赋权法中的主成分法为主要赋权方法，可能与该方法适用于数目较多、计算量大的指标相关。

主客观集合赋权法结合了研究者主观意见与客观实验数据进行赋权，兼顾 2 种赋权方法的优点，但目前中药研究的应用较少，仅占全部文献的 7.05%，主要用于提取

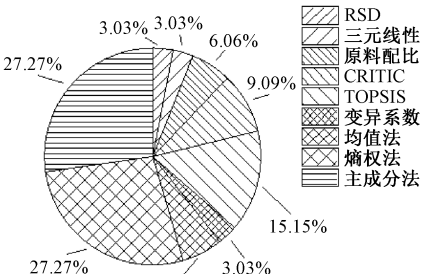


图 7 客观赋权法类别分布

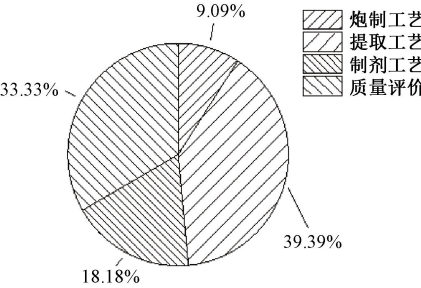


图 8 客观赋权法应用分布

工艺，其次是炮制工艺、质量评价等。推测可能与以下几个因素有关：（1）赋权的步骤相对于主观赋权法复杂；（2）对主观赋权和客观赋权权重集成方法的研究较少，目前均采用乘法集成法，尚未涉及其他集成法；（3）目前对主观赋权、客观赋权、主客观集成赋权结果对比的研究较少。

2.2 数据标准化处理 在筛选和确认指标权重后，研究者需要结合数据来计算综合得分。但不同数据结果的单位、大小均不一致，直接采用原始数据会使综合评分不真实，故先进行数据标准化操作。该方法是将数据按比例缩放，使之落入一个小的特定区间，在某些指标处理中常会用到，去除数据单位限制后将其转化为无量纲的纯数值，便于不同单位或量级的指标能够进行比较和加权^[59]。

图 9 显示，最常用的标准化方法为最大值归一化法，占 53.88%，其次为线性函数归一化法，占 19.83%，还有 Z-core 法、全概率法等，表明数据标准化是多属性决策中所必备的步骤。除去不明文献（10.78%），有 13.36%（包括采用李克特法）未进行数据标准化操作。

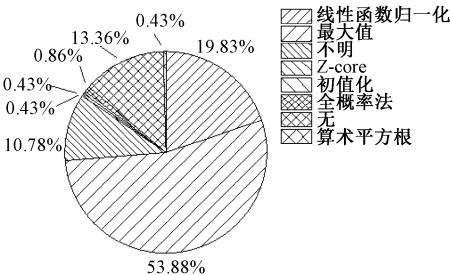


图 9 数据标准化方法分布

2.3 综合得分集成 在确认各指标权重并对数据进行无量

纲化操作后，需要将二者结合起来以获得最后的综合评分，在多属性决策研究中除了确定权重外，建立综合得分方法也是不可或缺的一部分。图 10 显示，最常用的综合得分方法是权重加和法，占全部文献的 78.35%，计算公式为得分 $D_i(w) = \sum_{j=1}^m Z_{ij}W_j (i=1, 2, 3\cdots)$ 。另外，其他方法还有直接加和法（无赋权）、几何法等。

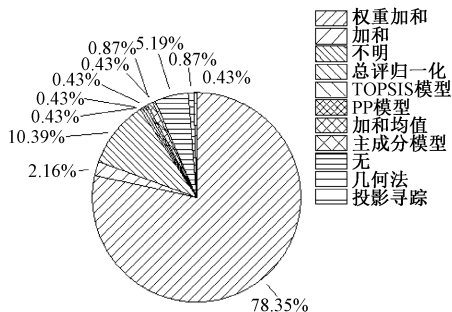


图 10 综合得分计算方法类别分布

3 结语

单一指标评价事物时往往不尽合理，故需要结合事物本身的特点对相关信息进行收集汇总，得到综合指标，从而能从整体上反应事物是否达到了预期要求^[60]。主观赋权法虽然操作简单，但决策者自身人为因素干扰太强；客观赋权法虽然在赋权过程中排除了人为因素，但它过于依赖样本数据，当后者发生变化时权重也随之不同，而在实验中无限增大样本量以使其接近稳定值也显然难以实现，同时所得结果也可能存在与决策者主观赋权结果相反的情况，表明单独应用任何一种上述方法都会存在一定程度上的信息缺失。因此，减少信息缺失的方法是将两者有机结合起来，既能体现决策者主观意愿，又不脱离实际数据，使最终赋权结果更有说服力。

目前，在中药多属性决策研究中主观赋权法应用较多，而结合其与客观赋权法各自优缺点后形成的集成赋权法优势相当明显，但相关报道较少，并且也鲜有比较组合赋权中不同赋权方法的研究，需要进一步挖掘。在中药研究方面，罕有对集成方法的探索极少，故研究人员应对其作进一步考察。

参考文献:

[1] 王晓男. 综合评价中若干理论方法的适用性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

[2] 张 璞. 权系数设计技术之探讨[J]. 延安大学学报 (自然科学版), 1995, 14(1): 68-71.

[3] 石亚飞, 闫 荟, 王苏会, 等. 德尔菲法构建中药注射剂研发阶段安全性评价指标体系[J]. 中国医院药学杂志, 2013, 33(24): 2074-2075; 2090.

[4] 任守利. 中药天麻商品规格等级相关性及其划分合理性的研究[D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2010.

[5] 靳玉瑶. 复方中成药欧盟简化注册评价体系研究[D]. 太原: 山西中医药大学, 2019.

[6] 楚笑辉, 王伽伯, 孔维军, 等. 基于 Delphi 法的黄连药材商品规格感官评价的重现性研究[J]. 世界科学技术 (中医药现代化), 2011, 13(2): 321-327.

[7] 鲍 倩, 夏 荃, 潘超美, 等. 基于 Delphi 法对广陈皮商品规格等级划分[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(22): 48-54.

[8] Saaty T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation [M]. New York: Mc Graw Hill, 1980.

[9] 高光贵. 多指标综合评价中指标权重确定及分值转换方法研究[J]. 经济师, 2003(3): 265-266.

[10] Yin Y J, Li L. Transnational education programs in Chinese universities based on AHP [C] //Xi' an: International Textile Science & Technology Forum, 2009.

[11] 吕跃进, 张 维, 曾雪兰. 指数标度与 1-9 标度互不相容及其比较研究[J]. 工程数学学报, 2003, 20(8): 77-81.

[12] 谭 阳, 吕跃进, 覃菊莹. AHP 中两类标度转换的保序性条件[J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2002, 27(3): 217-219.

[13] 韩 利, 梅 强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.

[14] 王民敬, 裴海生, 孙君社, 等. 基于改进层次分析法的灵芝品质安全综合评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 302-308.

[15] 任爱农, 卢爱玲, 田耀洲, 等. 层次分析法用于中药复方提取工艺的多指标权重研究[J]. 中国中药杂志, 2008, 14(4): 372-374.

[16] 孙宇靖, 王耀鹏, 马智勇, 等. 当归烟熏工艺的正交设计结合加权综合评分法优选[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(2): 354-356.

[17] 祝 宇, 余世荣, 张晓燕, 等. AHP 法结合正交试验优化复方肉苁蓉合剂醇沉工艺[J]. 中国药师, 2019, 22(7): 1257-1260.

[18] 丰朴春, 陈大勇, 杨蕾馨. 优序图法在投标项目选择中的应用研究[J]. 价值工程, 2011, 30(28): 62-63.

[19] 辛德财, 王鹏文, 王国琴, 等. 优序图法在鲜食糯玉米食味品质评价中的应用[J]. 天津农学院学报, 2010, 17(4): 17-20.

[20] 何穗智, 吴伟康, 卓潜潜, 等. 对络气虚滞 (过劳) 型动脉粥样硬化模型的综合评价[J]. 临床医学工程, 2010, 17(8): 1-3.

[21] 胡 星, 孔 舒, 赵晓旭, 等. 加权优序法和 BP 神经网络在水质评价中的应用比较[J]. 治淮, 2016(12): 77-79.

[22] 程明熙. 处理多目标决策问题的二项系数加权法和法[J]. 系统工程理论与实践, 1983(4): 23-26.

[23] 王 慧. 基于多智能体进化算法的 COA 方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

[24] 闫书丽. 多属性决策与集成方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.

[25] 李元年. 基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

[26] 曹苗苗, 徐桂红, 许明君, 等. 响应面法结合熵权法优化

银怡片水提浸膏喷雾干燥工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 73-76.

[27] 朱紫烨, 田彦芳, 张 迁, 等. BP 神经网络结合熵权法优化甘草皂苷提取工艺[J]. 中成药, 2017, 39(9): 1830-1834.

[28] 江华娟, 何 瑶, 陈 意, 等. BP 神经网络结合熵权法多指标优化四物汤水提工艺[J]. 中草药, 2019, 50(18): 4313-4319.

[29] 李四海, 高建德, 陈建国, 等. 熵权法优选湖北海棠叶中总黄酮提取工艺[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(23): 56-58.

[30] 田彦芳, 万海同, 朱紫烨, 等. 基于熵权法的多目标筛选甘草黄酮类成分纯化工艺[J]. 中草药, 2016, 47(7): 1118-1125.

[31] 张文霖. 主成分分析在满意度权重确定中的应用[J]. 市场研究, 2006(6): 18-22.

[32] 颜惠琴, 牛万红, 韩惠丽. 基于主成分分析构建指标权重的客观赋权法[J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2017, 31(6): 519-523.

[33] 汪露露, 何丹丹, 王 满, 等. 基于指纹图谱与主成分分析相结合的复方虎杖方提取工艺研究[J]. 中草药, 2017, 48(2): 278-282.

[34] 张黄琴, 严 辉, 钱大玮, 等. 不同产地百合药材中 8 种活性成分的分析与评价[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(2): 311-318.

[35] 蔡晓洋, 张思获, 曾 俊, 等. 基于主成分分析和聚类分析的栀子种质资源评价[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(14): 30-37.

[36] 李建鹏, 洪 伟, 林 晗, 等. 主成分分析和投影寻踪法在雷公藤优树选择中的应用[J]. 西南林学院学报, 2009, 29(3): 26-30.

[37] 郭慧清, 李娅琦, 王梓轩, 等. 不同商品规格羌活药材的 HPLC 指纹图谱分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(7): 184-188.

[38] 张 婷, 康显杰, 杨 莹, 等. 不同产地乌药质量的评价[J]. 中成药, 2017, 39(10): 2113-2118.

[39] 张彦奇, 赵延龙, 基于组合赋权-TOPSIS 装配式建筑施工阶段进度风险评价[J]. 价值工程, 2019, 38(31): 50-53.

[40] 陈 翔, 郭海波, 陈才军, 等. 基于 CRITIC 法计算权重系数的正交设计法优化三叶青干燥工艺的研究[J]. 时珍国医国药, 2018, 29(9): 2174-2176.

[41] 孙 强, 李小芳, 罗开沛, 等. 基于 CRITIC 权重赋值的 Box-Behnken 响应面法优化甘草黄酮纳米海绵制备工艺[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(24): 4855-4861.

[42] 黄 潇, 刘 婧, 付小梅, 等. 基于 CRITIC 法计算权重系数的 Box-Behnken 响应面法优化栀子炭微波炮制工艺研究[J]. 中草药, 2017, 48(6): 1133-1138.

[43] 陈 达, 郑凯旋, 李文兵, 等. 基于 CRITIC 法计算权重系数的 Box-Behnken 效应面法优化韭菜子盐炙工艺[J]. 中药材, 2018, 41(4): 859-862.

[44] 马 辉. 综合评价系统中的客观赋权方法[J]. 合作经济与科技, 2009(17): 50-51.

[45] 王应明. 离差平方和的多指标决策方法及其应用[J]. 中国软科学, 2000(3): 110-113.

[46] 陈华友. 多属性决策中的一种最优组合赋权方法研究[J]. 运筹与管理, 2003, 12(2): 6-10.

[47] 樊治平, 赵 莹. 多属性决策中权重确定的主客观赋权法[J]. 决策与决策支持系统, 1997, 7(4): 87-91.

[48] 樊治平, 张 全, 马 建. 多属性决策中权重确定的一种集成方法[J]. 管理科学学报, 1998, 1(3): 52-55.

[49] 王中兴, 李桥兴. 依据主、客观权重集成最终权重的一种方法[J]. 应用数学与计算数学学报, 2006, 20(1): 87-92.

[50] 孙小静, 周中林. 基于加法集成赋权的低碳城市发展评价研究——以荆州市为例[J]. 经济视角, 2016(5): 30-38.

[51] 张董敏, 齐振宏, 罗丽娜, 等. 湖北省生态文明水平现状、趋势推演及空间分异研究——基于乘法集成赋权法[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 649-656.

[52] 张大林, 朱 昌. 多目标规划原理及其应用[J]. 科技视界, 2019(9): 127-130.

[53] 徐维祥, 张全寿. 一种基于灰色理论和模糊数学的综合集成算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001(4): 114-119.

[54] 何亚群, 胡寿松. 一种基于粗糙-模糊集集成模型的决策分析方法[J]. 控制与决策, 2004, 19(3): 315-318.

[55] 张 琳, 周 欣, 闫 丹, 等. 基于 CRITIC-AHP 权重分析法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选陈皮饮片炮制工艺[J]. 中草药, 2018, 49(16): 3829-3834.

[56] 刘小妹, 程中琴, 施崇精, 等. 基于 AHP-CRITIC 法的正交设计优选参膝口服液液提取工艺[J]. 中草药, 2018, 49(11): 2577-2583.

[57] 杨 铭, 周 昕, 谢瑞芳, 等. 用层次分析法结合 CRITIC 法研究复方自身清颗粒提取工艺的多指标权重[J]. 药学服务与研究, 2009, 9(1): 36-39.

[58] 王国强, 李 鹏, 周书杰, 等. 水利工程施工方案选择的改进灰色关联分析法[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 46-48; 73.

[59] 牛 岩. 作物产量指标综合评价的数据标准化处理[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(19): 16-19.

[60] 李 博. 多指标综合评价方法应用中存在的问题与对策[J]. 沈阳工程学院学报 (社会科学版), 2010, 6(2): 200-202; 236.