

基于中药纳米相态自组装的挥发油稳定化机制与调控策略

王琦瑀^{1,2}, 雷茹婷^{1,2}, 裴朝阳³, 刘英^{1,2}, 万娜¹, 张凰^{1,2}, 胡恢权^{1,2}, 陈世彬^{3*}, 伍振峰^{1,2,4*}

1. 江西中医药大学 现代中药制剂教育部重点实验室, 江西 南昌 330004

2. 经典名方现代中药创制全国重点实验室, 江西 南昌 330004

3. 华润三九医药股份有限公司, 广东 深圳 518110

4. 江西省中药绿色制造技术创新中心, 江西 南昌 330029

摘要: 中药药效成分自组装已被研究证实存在于汤剂中, 保证了传统汤剂药效成分的有效性, 提高了生物利用度, 且有增效减毒的作用。挥发油作为一类重要的药效成分, 被广泛应用于中药解表、化湿、开窍、理气等方剂。尽管挥发油具有易挥发的特点, 但在汤剂煎煮过程中并未完全挥发而继续发挥药效, 这一现象暗示挥发油在复杂汤剂体系中可能通过与其他成分的自组装形成了“油-活性分子”配合体, 实现了挥发油分子的稳定化。基于中药分子自组装理论, “配伍组合体”的稳定状态可能与挥发油结构、多种成分相互作用以及溶液状态有关。基于中药自组装领域的研究现状与挑战, 聚焦于汤剂共煎体系中所存在的“油-活性分子”配合体, 旨在阐明其自组装的活性成分、作用力与调控策略, 并系统探讨自组装技术应用于中药挥发油稳定化的潜力与进展。

关键词: 挥发油; 稳定性; 汤剂; 自组装; 纳米相态; “油-活性分子”配合体

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)04-1559-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.04.031

Stabilization mechanism and regulation strategy of volatile oil based on nanophase self-assembly of traditional Chinese medicine

WANG Qiyu^{1,2}, LEI Ruting^{1,2}, PEI Zhaoyang³, LIU Ying^{1,2}, WAN Na¹, ZHANG Huang^{1,2}, HU Huiquan^{1,2}, CHEN Shibin³, WU Zhenfeng^{1,2,4}

1. Key Laboratory of Modern Preparation of TCM, Ministry of Education, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

2. National Key Laboratory of Classical Formula for Modern Traditional Chinese Medicine Creation, Nanchang 330004, China

3. China Resources SanJiu Medical & Pharmaceutical Co., Ltd., Shenzhen 518110, China

4. Jiangxi Technology Innovation Center of Green Manufacturing of Chinese Medicine, Nanchang 330029, China

Abstract: The self-assembly of active components of traditional Chinese medicine has been confirmed to exist in decoctions, which ensures the effectiveness of active components of traditional decoctions, improves bioavailability, and has the effect of enhancing efficacy and reducing toxicity. As an important pharmacodynamic component, essential oil is widely used in traditional Chinese medicine prescriptions such as relieving exterior syndrome, resolving dampness, inducing resuscitation and regulating *qi*. Although essential oil has the characteristics of easy volatilization, it does not completely volatilize during the decoction process and continues to exert its efficacy. This phenomenon suggests that essential oil may form an “oil-active molecule” complex through self-assembly with other components in a complex decoction system to achieve the stabilization of essential oil molecules. Based on the theory of molecular self-assembly of traditional Chinese medicine, it is speculated that the stable state of “compatible combination” may be related to the structure of essential oil, the interaction of multiple components and the solution state. Based on the research status and challenges in the field of self-assembly of traditional Chinese medicine, this paper focuses on the “oil-active molecule” complexes existing in the decoction co-decoction system, aiming to clarify the active components, forces and regulatory strategies of self-assembly, and systematically explore the potential and

收稿日期: 2025-09-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(82474091); 国家自然科学基金(82560781); 国家级高层次人才支持计划

作者简介: 王琦瑀, 硕士研究生, 研究方向为中药制剂与评价技术。E-mail: 13977059790@163.com

*通信作者: 陈世彬, 高级工程师, 从事古代经典名方复方制剂开发及本草考证研究。E-mail: chensb@999.com.cn

伍振峰, 教授, 博士生导师, 主要从事中药新剂型与新技术/中药制剂装备研究。E-mail: zfwu527@163.com

progress of self-assembly technology applied to the stabilization of essential oil of traditional Chinese medicine.

Key words: volatile oil; stability; decoction; self-assembly; nano-phase state; “oil-active molecule” complex

挥发油作为芳香中药的关键物质基础是经典名方临床疗效的重要支撑^[1-2]。中药汤剂是经典名方最主要的临床剂型和核心应用形式，“汤液”状态不仅是挥发油的载体，更是挥发油与多糖、皂苷、黄酮等成分实现“君、臣、佐、使”协同的天然环境，脱离汤剂环境的挥发油研究难以还原其在经典名方中的相互作用机制。但挥发油自身挥发性强、稳定性差等问题限制了其存储和药效传递^[3-6]。目前，挥发油稳定化方法包括β-环糊精包合、Pickering乳、多孔淀粉吸附等，能够在有效提升挥发油固态体系中的稳定性，但存在显著性的应用局限^[7]。β-环糊精包合因环糊精的空腔大小与数量相对固定，在需要高剂量挥发油的制剂中，难以满足载药量需求，且包合物在高温高湿环境下稳定性差，易致挥发油泄漏^[8]。Pickering乳化技术依靠的固体颗粒需要精准匹配油相与水相，否则易分层，长期储存有颗粒沉降。多孔淀粉吸附孔径较小、吸附缺乏选择性，以单一的多孔淀粉为壁材时制备的微胶囊不稳定。这些不足表明，仍需探索更具优势的挥发油稳定化新策略。

自组装是分子在非共价键的弱相互作用下，自发地形成有序结构的过程，此过程因其微观结构与性能可被精准调控，在中药领域的研究范畴日益广泛^[9]。从纳米药物载体的构建到中药活性成分的分离与富集，自组装技术均展现出了巨大的应用潜力^[10]。如典型的两亲分子由1个极性亲水基

团（通常称为头部）和1个非极性疏水基团（称为尾部）组成，这一特性的分子自组装形成的纳米胶束，能够将难溶性中药成分包裹其中，显著提高其溶解度和稳定性，从而提升药物的生物利用度^[11-12]。通过精确设计这些分子的两亲性，可以实现对自组装过程的调控；基于核酸的自组装结构还可实现对中药活性成分的靶向输送，增强治疗效果。这些研究充分验证了自组装技术在中药领域的可行性，但将其引入挥发油稳定化领域是仍需挖掘的方向。与其他挥发油稳定化方法相比，这一自发过程具有生物相容性好、结构调控灵活的特点^[13]，尤其是其依托中药体系内多糖、皂苷、黄酮等软物质的特性，通过非共价作用驱动自组装，不仅能包载挥发油减少挥发损失，还可模拟汤剂中多成分“君、臣、佐、使”的协同环境，为挥发油与其他中药成分相互作用提供环境基础。图1展示了依托氢键、范德华力、疏水作用等非共价键弱相互作用，通过包合技术、脂质体包封、Pickering乳制备及挥发油自组装等方式，构建自组装体系并实现挥发油稳定化。但中药体系内挥发油自组装的规律、稳定化机制以及在医药、食品等领域的应用拓展仍需系统探究。因此，本文将借助自组装过程的作用力以及体系环境解析自组装基本原理，阐述挥发油稳定化现状，并重点综述自组装在挥发油稳定化体系中的应用，以明确其理论意义与实际价值。

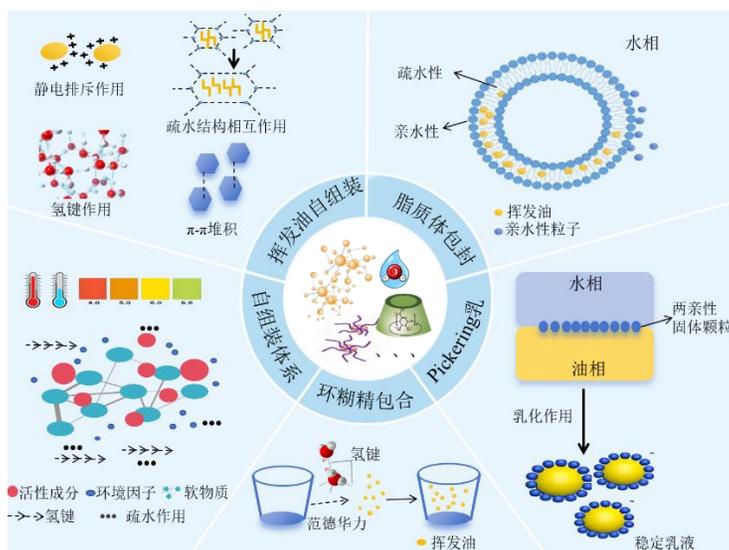


图1 自组装体系及挥发油稳定化原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-assembly system and stabilization principle of volatile oil

1 中药自组装的现状与问题

1.1 中药自组装的研究现状

中药自组装是指中药化学成分中所含的特殊结构通过多种作用方式形成具有特定结构的聚集体。这一过程行为可分为2种：一是分子无其他外界成分干扰的自发行为，二是通过引入其他成分与原有结构修饰而产生的组装行为^[14]。已有研究表明，中药自组装不仅能保留有效成分，还实现了药效协同与增效减毒的作用^[15]，为中药配伍机制与制剂优化提供了新的分子层面解释。

当前自组装研究内容主要围绕核心活性成分的组装机制与典型配伍体系的应用价值展开。三萜类、黄酮类等中药特征成分是自组装的关键驱动物质：三萜类成分如甘草中的甘草酸、甘草次酸具备疏水性空间结构，易与药物分子间相互作用形成药物复合体系，可以自发聚集并形成胶束或凝胶，同时能通过氢键、疏水相互作用等弱作用力，对木犀草苷、槲皮素等水溶性差的黄酮类成分发挥增溶促稳作用^[16]。成分间组装协同的特性是中药自组装实现药效优化的核心基础。

甘草在中药方剂中有“调和诸药”的作用，其所含成分如甘草酸、甘草次酸能与多种化学成分发生自组装已得到验证。姜黄-甘草配伍中，甘草酸是两亲性物质，能形成纳米粒负载水溶性差的姜黄素，显著提升其生物利用率与抗炎活性^[17]。孟雨婷等^[18]进一步针对这一经典配伍研究发现，采用微沉淀法优化甘草煎煮过程的组装条件，所得自组装纳米粒与传统水煎煮形成的纳米粒比较发现其稳定性增强，成分转移率及抗炎活性显著提升，为制剂工艺优化提供了依据^[19]。在经典名方甘草附子汤的甘草-附子减毒配伍体系中，疏水相互作用成为二者成分自组装的主要驱动力之一。在共煎体系中，甘草酸三萜结构的疏水性部分与附子中乌头碱的疏水基团基于疏水效应相互靠近，以减少与水分子的接触面积^[20]。当甘草酸与乌头碱共存会在水相环境里会逐渐调整位置，让疏水结构域相互缠绕，促使初步的自组装结构形成^[21]，从而改变了原本生物碱在溶液中的游离状态，限制其生物活性及毒性作用，既体现了甘草在此汤剂中调和减毒的作用，又为中药“减毒”机制提供了直接的分子证据。这些研究结果表明非挥发性成分可自组装以稳定的形式存在于汤液体系中并提升生物利用率；但对于中药中同样具有药效的挥发性成分如挥发油是否参与自组装、组装路径与机制如

何，均处于研究阶段，探明这一过程可为挥发油稳定化策略开发提供理论参考。

1.2 汤剂共煎体系中挥发油的组装局限

中药药效物质研究对于阐明中药的药效机制及作用靶点具有重要意义。在经典名方还原一碗汤的药效研究过程中，中药配伍能发挥增效减毒、攻补兼施等作用。经典名方白虎汤君药石膏是典型的难溶性药物，与方中其余药物共煎相较于先煎的清热效果更佳，通过对白虎汤相态拆分发现石膏药效成分与皂苷类成分发生作用^[22]，提示汤剂中多元成分的相互作用可调控活性物质的存在状态。而汤剂中挥发性成分在高温、长时间煎煮过程中仍能发挥药效作用，其药效保留也可能在汤剂中与其他药效成分通过改变空间结构、非共价键等作用参与自组装体系，稳定存在于汤剂，但尚未形成机制与验证的实验结论。

在此研究基础上，以主要有效成分为桂皮醛和桂枝油的桂枝汤为例，此方由桂枝、芍药、甘草、大枣、生姜5味药组成^[23]，基于成分结构提示煎煮过程中桂皮醛与大枣蛋白质自组装可能性。首先是自发的疏水基团相互作用的过程，这一过程基于分子间的熵驱动即系统的熵增加，当一个作用力大到足够克服熵时，系统可能会自发组装。桂皮醛分子中的苯环以及与之相连的不饱和烃基部分表现出较强的疏水性；蛋白质是由氨基酸组成的生物大分子，结构复杂多样，有一些氨基酸的侧链具有疏水性^[24]，这些氨基酸残基在蛋白质折叠过程中，会倾向于聚集在蛋白质分子内部，形成疏水区域。桂皮醛的疏水区域与蛋白质的疏水区域形成疏水相互作用，两者紧密结合，为进一步的自组装奠定基础。于分子结构而言，蛋白质分子中的氨基酸残基能提供氢键供体或受体，挥发油分子与之通过氢键相互作用；不同的蛋白质结晶自组装的形态及条件也不同^[25]，特定的氨基酸序列可以组装成具有特定空间结构的分子，当桂皮醛与大枣蛋白质之间的相互作用达到一定程度时，可能会自组装形成胶束或囊泡结构，蛋白质作为疏水部分将挥发油包裹在内部，形成一种具有两亲性的壳核结构，从而延缓挥发油的释放。

含有挥发油类药材的经典名方煎煮过程中挥发油自组装体系形成示意图如图2所示。当前汤剂共煎体系中挥发油的自组装研究停留在现象推测阶段，在稳定策略和非汤剂体系研究方面支撑结果



图2 经典名方煎煮过程中挥发油自组装体系形成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of volatile oil self-assembly system formation during decoction process of classic famous prescriptions

不足：稳定化策略缺乏分子适配性^[16]，在芳香油研究中未充分利用分子特性，仅依赖疏水作用包裹；非汤剂体系研究薄弱，部分研究探索离子液体-挥发油组装体系用于其他剂型开发，现有挥发油自组装研究局限于汤剂共煎环境。基于成分结构与药效现象提出的自组装假说缺乏对组装过程、作用机制以及结构特征等验证，且多成分体系干扰状态下，如何解析成分之间的自组装结构、用科学的方法拆分不同相态并对有效物质成分进行筛选是待解决的问题。

2 汤剂自组装的发生机制

2.1 自组装体系的组成部分

2.1.1 软物质 软物质泛指处于软凝聚态的一类物质体系，主要包括离子液体、蛋白质、多糖等生物大分子。这类物质在微弱外力或温度变化等外界刺激下可表现出显著的物理性质改变如形变、相变等，其行为主要受熵驱动、非共价键相互作用如氢键、疏水作用等以及外场调控支配^[26]。在自组装体系中，鉴于软物质组成单元的生物学特性以及由弱相互作用驱动组装的特点，该体系可自发形成有序结构，核心功能在于提供结构支撑、实现稳定化以及作为控释载体。蛋白质作为纳米生物材料的组装基元显示出良好的低毒性和稳定性、生物相容性、生物降解性等优势^[27-29]，是构建超分子聚合物的理想单元。其依据氨基酸残基间的多样相互作用进行折叠与进一步组装，在折叠过程中疏水性残基倾向于富集于蛋白质分子内部形成疏水核心，而亲水性残基则分布于表面以维持溶解性。与简单小分子或

传统金属配体不同，蛋白质具有广泛的异质表面，其与金属离子的相互作用往往呈现非特异性和动态性。Salgado 等^[30]指出金属-配体配位键相较于传统蛋白质-蛋白质相互作用中的弱非共价键，能够在不依赖精确设计的蛋白质界面的情况下，高效驱动蛋白质组装体的形成。因此，在复杂多组分体系如同时含有蛋白质类及金属离子的汤剂中^[31]，难溶性物质以及挥发油能与多种成分相互作用发生自组装。

多糖类成分可以作为表面活性剂具有更好的生物相容性，这克服了传统表面活性剂无法生物降解的主要缺陷。研究表明，多糖分子链能在水-空气界面发生动态吸附-解吸附行为，同时通过分子间氢键形成界面聚集体，显著增强界面稳定性^[32]。近年来，多糖自组装纳米粒已成为药物递送系统的研究热点。邓翔等^[33]构建了波棱甲素-波棱多糖自组装纳米粒，利用大鼠在体单向肠灌流模型模拟人体内药物在肠道中的吸收过程，得出其能提高波棱甲素溶出度和溶解速率的结论。毛倩倩^[34]开发的香菇多糖-熊果酸自组装纳米药物表现出优异的稳定性和高载药量，在体外和体内均能诱导肿瘤免疫原性死亡并激活系统性抗肿瘤免疫应答。Li 等^[35]结合蛋白质和多糖形成聚合物的优缺点，使用成分组合设计含有阴离子蛋白涂层百里香油液滴的乳液，外层修饰阳离子多糖，该体系不仅制备过程简便，且较单层乳液具有更高的稳定性，并展现出比纯百里香油更强的抗菌活性。这些研究结果证实，多糖类、蛋白质类和金属离子类等软物质可在水性介质中与

难溶性药物及挥发油自发形成稳定的自组装体^[36]。

2.1.2 活性成分 自组装的发生成分具有独特性和多样性,许多中药活性成分自身具备自组装能力。汤液中化学成分大多以分子、离子或其他状态存在于多相混悬体系中。生物大分子自组装方面,黄芪多糖、枸杞多糖等多糖类物质以及蛋白质是中药领域自组装的关键参与者^[37],其分子结构中存在大量的羟基有助于氢键形成,由此促进该类化合物进行自组装。这些成分在体系中可依靠分子间的氢键、范德华力等相互作用自组装形成水凝胶等结构^[38-39],进而发挥其药效。一方面,作为一类软物质,多糖自组装结构能够负载中药活性成分,实现精准输送;另一方面,多糖自组装体自身具有生物活性,与所负载的中药活性成分协同作用进一步增强治疗效果。生物小分子自组装方面,以皂苷类成分为例,人参皂苷、柴胡皂苷等具有典型的两亲结构,一端亲水性糖基与另一端疏水性甾体或三萜类母核在溶液中能够自发聚集形成纳米级自组装体^[40]。这些自组装体如同微型胶囊能有效包裹其他难溶性中药活性成分,显著提高其溶解度和稳定性^[41],促进药物在体内的吸收与利用,提升中药药效。

2.2 中药自组装体系形成的作用机制

在传统汤剂中,多味药配伍往往发挥着大于饮片本身成分的作用即增效减毒^[42],炮制方法、配伍加减及煎煮方法等因素对饮片活性成分含量和药理作用影响较大。基于相态变化角度,饮片化学成分在相互作用时也可能发生分子间自组装。黄芩-黄连的共煎煮是药效成分间相互作用的过程,存在着药效成分通过 $\pi-\pi$ 堆积、静电引力和疏水作用等弱键诱导下自发形成中药超分子^[43]。李超团队^[44]开发了一种由小檗碱和甘草酸自组装而成的无载体水凝胶,推测甘草酸通过氢键自组装成纳米纤维,小檗碱通过 $\pi-\pi$ 堆积自组装,甘草酸通过静电作用吸引小檗碱形成水凝胶。在具有苯环结构的分子中,由于 π 电子共轭的扩展,芳香环间 $\pi-\pi$ 堆积效应明显,对分子空间排列有显著影响。现有研究成果表明天然小分子仅通过静电相互作用、氢键、疏水相互作用、 $\pi-\pi$ 堆积和范德华力等非共价相互作用即可构筑超分子组装体系。汤剂自组装体系中作用力效果见图3。

尽管二元组分超分子组装机制已得到广泛探索,但针对中药复方多组分系统的自发组装行为及其形成机制的研究仍显不足。由于中药饮片所含化

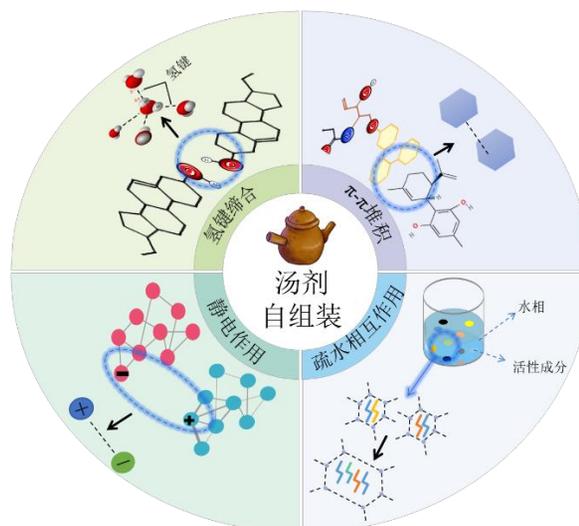


图3 汤剂自组装作用力

Fig. 3 Self-assembly forces of decoction

学成分具有高度复杂性,其多组分间相互作用远比药对二元体系更为复杂。此类研究不仅需要解析分子间作用力对组装过程的调控机制,还需系统考察外源因素的影响,包括但不限于煎煮工艺参数如温度梯度、时间、pH变化,溶剂动力学效应以及热力学驱动条件。这些因素通过改变分子构象自由度和相互作用势能显著影响多组分协同组装的动力学路径与最终超分子结构的稳定性。

2.3 基于环境驱动的中药汤剂自组装体系

在中药汤剂体系中,溶液环境的相关因素如化学成分、热效应以及酸碱度(pH值)等是自组装过程得以形成的必要条件。由于中药成分复杂多样,化学成分存在游离态、结合态、络合态等多种化学结构形态,因此,汤液常包含了真溶液、胶体溶液、混悬液等多种相态分散体系。而相态变化与中药发挥临床疗效密切相关,不同的相态会对中药复方的药性或药效产生影响,同时为不同成分提供了自组装的环境,使其发挥作用^[45]。研究表明汤剂中有效成分以及难溶性成分大多数分布于纳米相态中,故纳米混悬液中大部分药效成分能够共存^[46]。煎煮过程中的热力学参数对成分自组装行为具有关键调控作用:高温阶段形成的动态热环境能显著增强疏水性成分如挥发油的溶出效率和分子扩散速率^[47],而后续的冷却过程则通过熵驱动机制促进分子间疏水相互作用和氢键网络的形成,从而诱导有序自组装^[48]。共煎体系中pH值的动态变化同样重要,研究显示汤剂通常维持弱酸性环境(pH 5~6.5),该范围接近多种生物大分子的等电点^[49],有利于通

过静电作用形成稳定的组装体。此外，煎煮过程中金属离子的释放可与带负电的功能基团发生配位键合，形成“金属-有机框架”样结构，进一步稳定自组装结构^[50]。这种由温度、pH和离子强度共同调控的动态平衡，使得汤剂成为一个独特的“生物分子反应器”，为自组装体系提供适宜环境，能够自发形成从纳米胶束到微米级乳液的多尺度自组装结构。

中药共煎体系为多组分自组装提供了理想的反应平台。在该体系中，药效成分作为组装核心通过与载体软物质的分子识别和环境因子的协同作用，在非共价相互作用力的驱动下自发形成结构有序的超分子组装体。这一复杂的介质环境为挥发油自组装创造了相应条件。

3 自组装体系在挥发油的应用前景

3.1 挥发油自组装体系的构建与功能化

在中药汤剂的挥发油稳定化体系构建中，主要涉及3个调控维度：环境参数优化（包括温度控制、避光处理、湿度调节）、汤剂内源性载体系统（皂苷、生物碱形成的微环境）构建和汤剂剂型特性适配。通过这些调控可针对性改善汤剂中挥发油高温共煎易挥发、水相体系易团聚以及与自组装体系非活性成分互作失活的问题，提升其在汤剂中的生物利用度，最终保障汤剂“多成分协同”的治疗价值。

前期研究表明，结合汤剂共煎工艺优化挥发油提取方法和引入功能组分可显著提升自组装纳米粒的制备效率，提高挥发油稳定性^[45-46]。基于汤液环境，离子液体作为含挥发油汤剂中典型的软物质，具有低熔点（<100℃）、可设计性和环境友好性等特点^[51]，可提高挥发油的提取效率、溶解度、生物利用率。采用低温共煎工艺替代传统煎煮方式，将离子液体加入汤剂其高溶解特性既能促进挥发油溶出，又能通过疏水作用与挥发油自发组装形

成核壳结构。在离子液体-水-Pickering乳液中，粒子会在界面形成单层，且不同表面性质的粒子在分散相和连续相有相偏好。这与汤剂中挥发油分子行为高度契合，提示在离子液体与挥发油自组装体系中，挥发油分子可类比为活性粒子，其在离子液体中的分布和自组装可能受自身性质（如疏水性、亲水性）和离子液体性质的影响。这一特性支撑着内源性载体驱动自组装对挥发油水相稳定性的调控：挥发油与离子液体形成Pickering乳液时，离子液体通过阴、阳离子分别作用于油滴表面与水相，结合汤剂中两亲性成分形成复合界面膜，可以抑制油滴团聚并结合挥发油分子，从而提高挥发油在水相的分散稳定性^[52]。

利用自组装过程可将挥发油包裹在离子液体形成的特定结构中，用于挥发油的分离、提纯和储存；在药物递送领域可将挥发油与离子液体自组装形成具有特定功能的载体，实现挥发油类药物的靶向输送和控制释放。从载体系统设计与功能化角度分析，单萜类、倍半萜类、芳香族挥发油的特性决定着载体选择与组装过程的差异，如单萜类挥发油可通过甘草酸的胶束包和策略实现稳定包埋。甘草酸作为两亲性分子可自发形成胶束，实现初步的疏水作用驱动的包合；在煎煮过程中，挥发油分子的羟基与甘草酸的极性基团形成氢键，增强分子间结合力，稳定包埋于甘草酸胶束。黄芪多糖含羟基等极性基团与Ca²⁺通过配位键结合组装成固体颗粒，疏水性极强的倍半萜类挥发油与水相形成乳液时，黄芪多糖-Ca²⁺颗粒通过疏水作用吸附在油-水界面，阻碍油滴聚结从而稳定乳液结构。不同挥发油自组装体系的自组装策略如表1所示，差异化构建的逻辑既解决不同类型挥发油的稳定性问题，又通过分子特性设计载体系统与组装策略，为挥发油自组装的药效兼顾提供可实施的方案。

表1 挥发油的差异化自组装策略

Table 1 Differentiated self-assembly strategy of volatile oils

挥发油成分	分子特性	代表成分	自组装策略	载体/软物质	作用力	应用	文献
单萜类	相对分子质量小、高挥发性、含羟基	薄荷油、紫苏叶挥发油	甘草酸胶束包合、离子液体-酶协同诱导	甘草酸、[BMIM]Br	疏水作用、氢键、离子-偶极作用	医药制剂、食品保鲜	16,53
倍半萜类	相对分子质量大、易氧化、极强疏水性、含双键	莪术油、姜黄挥发油	黄芪多糖-Ca ²⁺ Pickering乳液、离子液体双相体系调控	黄芪多糖、Ca ²⁺ 、[BMIM]PF6	π-π堆积、氢键、离子-偶极作用、疏水作用	药物递送、制剂开发	37,54
芳香族	易氧化，强疏水性，含苯环、醛基	桂皮醛	大枣蛋白-槲皮素囊泡	大枣蛋白、槲皮素	π-π堆积、静电作用	靶向抗菌、食品保鲜	23

3.2 中药剂型中挥发油的稳定性保障

在中药制剂领域确保成分的稳定性和有效性至关重要^[55]。挥发油稳定化技术目前已广泛用于固体制剂和液体制剂中，自组装技术作为一种新兴的稳定化方法，在制剂成分递送及防止成分反应发生方面展现出独特的优势。

挥发油作为易挥发性成分，在储存和使用过程中易受外界因素如温度、湿度、光照等的影响，发生性质改变或含量减少从而影响药物疗效。在现有剂型中确保挥发油稳定性多采用“包封”策略，尽管在保护挥发性成分、降低抗氧化程度等方面表现了一定的改善作用，但共通的核心原理均为引入外加辅料实现稳定，对挥发油有效成分释放影响明显，降低药效^[56]。挥发油自组装体系无需添加外来辅料，依托中药自身内源性成分自发组装在保障挥发油稳定的同时提高生物利用度^[57]。固体制剂中，挥发油作为湿度敏感的药物成分制备后在潮湿环境中容易发生水解，导致药物含量降低和活性丧失^[58]。而通过自组装技术将药物包裹在脂质体中再制备成固体制剂，其中脂质体的双层膜结构可以阻挡水分的进入，从而保护药物成分不被水解^[59]。液体制剂中，自组装载体能够稳定地保持药物的化学结构和物理性质，抑制水相中的相分离与团聚，减少药物的降解和含量损失。

自组装技术为中药制剂解决挥发性成分稳定性提供了新的策略和方法。通过合理设计和调控自组装过程充分发挥药效，为患者带来更好的治疗效果。未来随着对自组装机制的深入研究和技术的不断发展，挥发油稳定性研究在制剂领域有望取得更多的突破和应用。

4 中药含挥发油共煎体系自组装的调控策略

4.1 含挥发油汤剂的自组装体系成分解析分离及结构表征

汤剂中的多相混杂体使得自组装体系作用复杂，而自组装作为汤剂功效和功能的体现，明确自组装中药效成分互作关系、物理状态和药理作用才能对自组装结构状态解析，进而实现自组装到设计组装以满足符合用药需求的愿景。在真溶液、纳米和沉淀相态中，成分分布、含量差异显著，中药汤剂中不同相态药理作用各有侧重^[60]。而含挥发油汤剂与普通中药汤剂相比较还存在油相、油-水界面复合层等独特相态。在自组装过程中，无非是大量成分分子自发聚集形成有序的整体，复合成具有特定

功能的物理结构，存在于汤剂体系中被人体吸收转运产生生物效应。因此，对含挥发油汤剂药效成分解析时，不仅需从化学成分检测、自组装体物理结构探究、形成机制原理解析 3 方面入手，还需根据油相的疏水性及界面活性设计特定的分离与表征方案。

中药汤剂中分子聚集体的高效分离是进行结构表征及自组装机制分析的前提。首先需要明确含油汤剂自组装体系所参与挥发油成分、活性成分以及软物质，并基于油相的物理性质与界面行为选用分离方法，避免分离过程中油相破裂、界面成分流失的问题^[61]。由于挥发油自组装体系有挥发性成分、活性成分及软物质等潜在底物，自组装体系可能存在于油-水界面复合层。利用相态分离技术如超滤法、超速离心-透析法、超速离心沉降分离及鉴定化学成分，系统性解析相态。缓冲密度梯度超速离心法基于分离物质的密度差异，通过缓冲保护与密度梯度分离 2 步协同，实现了外泌体与蛋白质聚集体、微囊泡的密度差异分离^[62]。而含油汤剂的油相、界面相与水相亦存在密度差，缓冲液保护机制可减少离心力对分离过程中结构的破坏，由此推测缓冲密度梯度超速离心对含油汤剂相态分离具有理论可行性。采用傅里叶变换红外光谱可在不破坏自组装结构的前提下检测分子振动吸收峰，分析汤剂中各种成分的官能团，从而推断油相空间构型^[63]。透射电子显微镜和扫描电子显微镜测量纳米颗粒的平均尺寸以及粒径的分布情况，深入研究样品的晶体结构，观察固体表面的形貌。通过实验观察和理论计算相结合研究汤剂中成分之间的相互作用。例如，利用核磁共振技术研究小分子与大分子之间的相互作用，通过分析核磁共振谱图中化学位移的变化，推断出成分之间是否存在氢键、疏水相互作用等，进而探究挥发油自组装挥发油与其他活性成分、软物质等自发形成组装体的规律，建立共煎体系热力学-分子动力学动态关联分析模拟体系。通过分子对接技术建立自组装体系中活性成分、软物质等与挥发油分子结合的分子模型，结合荧光发射、动态光散射和动力学模拟验证汤剂中挥发油自组装体在不同条件下的运动和相互作用，从而揭示挥发油自组装的过程和机制。挥发油自组装体系解析分离及结构表征示意图如图 4 所示。

4.2 非汤剂依赖型重构挥发油自组装环境

构建非汤剂依赖型自组装体系需要系统解析



图4 含挥发油经典汤剂自组装体系的研究技术路线

Fig. 4 Research technical route for self-assembly systems of classic decoctions containing volatile oils

汤剂环境的关键要素，其中汤剂多相态是有效方药药效物质发生反应的重要相态环境，亦是汤剂中药效物质充分自组装发挥作用的重要基础。在仿汤剂体系的构建中借鉴其多组分协同原理，重构油相、水相、界面相3相微环境。汤剂中环境热能使如黄连素-黄芩苷分子重排形成紧密自组装系统，导致三维空间构象改变，影响自组装体的稳定性和存在状态^[64]。因此需要采用特定的控温程序装置模拟汤剂共煎体系中的动态热环境，在高温阶段促进挥发油溶出，低温阶段诱导疏水组装。利用加入缓冲溶液等方法精确控制 pH 范围，使两亲性多糖如黄芪多糖处于近等电点状态，形成带电位垒稳定的纳米乳液；溶剂中金属离子的类型和强度会影响蛋白质、多肽等的自组装^[65]。改变离子环境可添加适量浓度的离子、调节离子强度等以模拟汤剂中离子作为自组装软物质载体的特征。

除模拟汤剂环境外，依照药辅合一理念选用有挥发油自组装辅助和生物活性的物质，如多糖、蛋白质等，以辅助挥发油自组装，同时发挥其自身生物活性。如壳聚糖纳米粒既作为百里香酚的载体在自组装体系中充当软物质，其质子化氨基又发挥协同抗菌作用^[66]。黄芪多糖与佛手柑挥发油共组装形成的 Pickering 乳液，多糖既稳定界面，其免疫调节活性又加速伤口愈合。这些生物来源的分子以及某些特殊的小分子，由于其固有的生物相容性和低毒性被广泛探索用于构建各种纳米结构和材料。由此，在重构挥发油自组装体系时，除引入目标挥发

油之外，可以根据成分性质与组成解析，选择加入适量的蛋白质、多糖或金属离子等，在明确其用量后进行调整使其在非汤剂依赖性自组装体系中发挥多重作用，以提高挥发油自组装体系的组装率。

5 结语与展望

中药自组装是基于分子间的多种弱相互作用^[67]，使中药成分中的两亲性分子或其他自组装单元自发形成有序纳米结构的过程。这种自组装过程在中药复杂体系中广泛存在，不仅可以增加难溶性药物的溶解度、提高其生物利用度、增强靶向性，还能达到缓释、协同增效的效果，是中药发挥药效的微观基础之一。挥发油作为众多中药的关键有效成分，在中药的药理作用中发挥着不可或缺的作用。其广泛存在于多种中药材中，具有多方面的药理作用，如止咳平喘、抗菌消炎、抗氧化及抗癌作用等^[68-70]。为了提高挥发油的稳定性以及生物利用率，从中药纳米相态自组装角度出发，通过解析自组装机制，设计特定药效与结构的挥发油自组装体系，依托现有自组装相关结构与化学作用机制可实现挥发油稳定性的优化。在作用机制层面，以分子络合、超分子配位理论为核心，利用挥发性成分如薄荷脑、丁香酚中活性官能团与中药活性成分、药用辅料构建自组装体系，将挥发性成分包裹于自组装体结构内部，防止其在制剂中析出。在制剂设计环节，遵循质量源于设计理念，以药效需求构建配伍体系，利用2种及以上挥发性成分协同作为核心药效成分，再筛选可与之络合的载体材料形

成自组装配体, 实现稳定且具备多种药效的制剂设计目标。同时, 结合药辅合一理念, 让挥发油在体系中兼具双重角色, 不仅作为活性成分发挥自身药效, 其两亲性分子结构还可辅助调节自组装体系的粒径、表面电荷等, 稳定包载与递送其他水溶性中药成分, 如疏水相互作用驱动挥发油包封于纳米胶束疏水内核, 而静电作用和氢键网络则协同增强组装体稳定性。这种基于中药多组分协同自组装的“纳米稳定化”策略为开发符合质量源于设计理念的现代中药制剂提供了新范式, 其核心优势在于:

(1) 保持天然组分完整性, 可实现释放行为精准调控; (2) 可根据挥发油理化性质设计调整自组装载体, 适配其特性以稳定; (3) 与脂溶性成分复合构建自组装体系, 促进挥发油的跨膜运输, 提高生物利用度。尽管中药自组装为挥发油稳定化提供了创新路径, 但仍存在多方面局限。(1) 汤剂体系复杂性阻碍机制精确解析: 含油汤剂中除挥发油与自组装成分外, 还含有多种非组装核心成分, 这些成分可通过竞争分子间结合位点、破坏弱相互作用干扰自组装过程; (2) 药材批次差异导致自组装重复困难: 中药自组装体系中软物质、活性成分含量如多糖、皂苷纯度依赖药材品质, 而药材的产地、采收期、炮制工艺差异会显著改变其理化性质, 药材与自组装体的关联性导致不同批次自组装稳定性难以控制。

未来研究应聚焦于建立“组分-结构-功能”计算模型, 解析挥发油组分结构与分子间作用力, 依据经典名方配伍逻辑解析重构, 再通过纯物质模型的设想, 用单一或双载体与挥发油形成纯净体系, 以排除非活性成分干扰, 系统地阐释挥发油及其活性成分动态组装规律和自组装体结构, 以关联体系药效和功能。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Dosoky N S, Setzer W N. Chemical composition and biological activities of essential oils of *Curcuma* species [J]. *Nutrients*, 2018, 10(9): 1196.

[2] Wei Q, Zhang Y H. Composition and antioxidative and antibacterial activities of the essential oil from *Farfugium japonicum* [J]. *Molecules*, 2023, 28(6): 2774.

[3] Lin X Y, Huang X M, Pi W M, et al. Self-assembly variation of glycyrrhetic acid epimers: Assembly mechanism and antibacterial efficacy between 18 α -GA and 18 β -GA [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2024, 242:

114120.

- [4] Cai D S, Yang Y Q, Lu J H, et al. Injectable carrier-free hydrogel dressing with anti-multidrug-resistant *Staphylococcus aureus* and anti-inflammatory capabilities for accelerated wound healing [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(38): 43035-43049.
- [5] 刘月, 顾永哲, 罗云, 等. 银翘散煮散与饮片煎煮过程挥发性成分蒸发规律比较研究 [J]. *中草药*, 2022, 53(10): 2991-2999.
- [6] 林晓钰, 田学浩, 黄雪梅, 等. 基于中药超分子化学探究大黄-黄连配伍平和“苦-寒”之性物质基础 [J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(22): 6066-6075.
- [7] Ren G L, Ke G, Huang R, et al. Study of the volatilization rules of volatile oil and the sustained-release effect of volatile oil solidified by porous starch [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 8153.
- [8] 张雨萌, 徐芳, 姚雨含, 等. 小茴香挥发油 β -环糊精包合物的制备、表征及稳定性研究 [J]. *食品与机械*, 2024, 40(3): 203-209.
- [9] Mao Q Q, Min J, Zeng R, et al. Self-assembled traditional Chinese nanomedicine modulating tumor immunosuppressive microenvironment for colorectal cancer immunotherapy [J]. *Theranostics*, 2022, 12(14): 6088-6105.
- [10] Xing C Y, Sheng Y Y, Wu Y, et al. Carrier-free small molecule-assembled nanoparticles for treatment of sepsis [J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2024, 7(20): 24049-24060.
- [11] Chen Q Z, Jiang Y W, Yuan L L, et al. Preparation, characterization, and antioxidant properties of self-assembled nanomicelles of curcumin-loaded amphiphilic modified chitosan [J]. *Molecules*, 2024, 29(11): 2693.
- [12] Palacios-Hernandez T, Luo H Y, Garcia E A, et al. Nanoparticles from amphiphilic heterografted macromolecular brushes with short backbones [J]. *Macromolecules*, 2018, 51(8): 2831-2837.
- [13] 赵梦倩, 张雅丹, 王迎香, 等. 自组装多肽水凝胶对百里香精油的控释作用、抑菌和抗氧化效果的延长作用 [J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 8-14.
- [14] 沈成英, 胡菲, 朱君君, 等. 中药自组装纳米粒的形成及应用研究进展 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(19): 4875-4880.
- [15] 吴淑洋, 杨晓琴, 成威键, 等. 葛根芩连汤成分间自组装纳米粒改善伊立替康所致肠毒性作用研究 [J]. *中草药*, 2024, 55(12): 3987-3997.
- [16] 刘帆. 甘草酸自组装体系对中药单体成分的增溶促稳作用及其配伍机制研究 [D]. 天津: 天津中医药大学, 2020.
- [17] 宋基正. 甘草次酸修饰和pH敏感的姜黄素混合胶束构

- 建与抗肝癌细胞研究 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2020.
- [18] 孟雨婷, 薛玉叶, 刘燕, 等. 甘草新型自组装纳米粒的形成及抗炎作用评价 [J]. 中草药, 2024, 55(9): 2912-2922.
- [19] Zhong C P, Luo S J, Xiong R Y, *et al.* A new green self-assembly strategy for preparing curcumin-loaded starch nanoparticles based on natural deep eutectic solvent: Development, characterization and stability [J]. *Food Hydrocoll*, 2024, 151: 109878.
- [20] 梁尚云. OSA 淀粉基纳米载体的构建及其对姜黄素包埋的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [21] 赵晓然. 基于甘草酸自组装体系的甘草“能缓能和”配伍作用研究 [D]. 天津: 天津中医药大学, 2023.
- [22] 吕邵娃, 武印奇, 李英鹏, 等. 白虎汤相态拆分及不同相态中主要成分的含量测定 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(11): 154-160.
- [23] 杨春. 从桂枝汤对汗液分泌的双向调节作用论治杂症体会 [J]. 中医研究, 2011, 24(6): 59-61.
- [24] 夏芳, 冯宙, 姜舟婷. 分子动力学模拟研究氨基酸亲疏水性对蛋白质结构的影响 [J]. 中国计量大学学报, 2024, 35(3): 415-421.
- [25] Zhang T D, Chen L L, Lin W J, *et al.* Searching for conditions of protein self-assembly by protein crystallization screening method [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2021, 105(7): 2759-2773.
- [26] 韩旭, 薛斌, 曹毅, 等. 自组装生物分子软物质材料及其物理特性 [J]. 物理学报, 2024, 73(17): 277-290.
- [27] Jain A, Singh S K, Arya S K, *et al.* Protein nanoparticles: Promising platforms for drug delivery applications [J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2018, 4(12): 3939-3961.
- [28] Eweje F, Ibrahim V, Shajii A, *et al.* Self-assembling protein nanoparticles for cytosolic delivery of nucleic acids and proteins [J]. *Nat Biotechnol*, 2025, doi: 10.1038/s41587-025-02664-2.
- [29] Liu B, Liu B X, Wang R, *et al.* α -Lactalbumin self-assembled nanoparticles with various morphologies, stiffnesses, and sizes as Pickering stabilizers for oil-in-water emulsions and delivery of curcumin [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(8): 2485-2492.
- [30] Salgado E N, Radford R J, Tezcan F A. Metal-directed protein self-assembly [J]. *Acc Chem Res*, 2010, 43(5): 661-672.
- [31] Stevens C A, Kaur K, Klok H A. Self-assembly of protein-polymer conjugates for drug delivery [J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2021, 174: 447-460.
- [32] 喻绍勇. 基于食品蛋白和天然多糖的生物大分子自组装 [D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [33] 邓翔, 朱煜文, 郑冀邢, 等. 波棱甲素-波棱多糖自组装纳米粒的制备及其肠吸收机制研究 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(2): 404-411.
- [34] 毛倩倩. 香菇多糖/熊果酸自组装纳米药物用于大肠癌免疫治疗的研究 [D]. 福州: 福建中医药大学, 2022.
- [35] Li S Q, Sun J L, Yan J, *et al.* Development of antibacterial nanoemulsions incorporating thyme oil: Layer-by-layer self-assembly of whey protein isolate and chitosan hydrochloride [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 128016.
- [36] Terashima T. Controlled self-assembly of amphiphilic random copolymers into folded micelles and nanostructure materials [J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(6): 529-538.
- [37] Yang B, Wu X C, Zeng J Q, *et al.* A multi-component nano-co-delivery system utilizing *Astragalus* polysaccharides as carriers for improving biopharmaceutical properties of *Astragalus* flavonoids [J]. *Int J Nanomedicine*, 2023, 18: 6705-6724.
- [38] Gelain F, Luo Z L, Zhang S G. Self-assembling peptide EAK16 and RADA16 nanofiber scaffold hydrogel [J]. *Chem Rev*, 2020, 120(24): 13434-13460.
- [39] Yu Z Q, Xu Q, Dong C B, *et al.* Self-assembling peptide nanofibrous hydrogel as a versatile drug delivery platform [J]. *Curr Pharm Des*, 2015, 21(29): 4342-4354.
- [40] 鲁妍妍, 赵梦柯, 赵璇, 等. 自组装在解析中药药效物质基础中的应用 [J]. 中草药, 2025, 56(21): 8033-8042.
- [41] Wang J, Li B T, Song X X, *et al.* One-step preparation of photoresponsive microcapsules based on the interfacial self-assembly of an azopyridine coordination polymer [J]. *Chem Eng J*, 2023, 463: 142403.
- [42] 于川, 樊巧玲. 方剂配伍增效减毒之原理探究 [J]. 中医药导报, 2007, 13(7): 89-91.
- [43] 魏吉昌, 林晓钰, 张景怡, 等. 基于相态变化探讨煎煮方式对黄芩-黄连超分子物质基础及配伍“和合”机制的影响 [J]. 中草药, 2024, 55(24): 8366-8378.
- [44] Lei C Y, Wen J J, Sun Y H, *et al.* Self-assembled herbal hydrogel for rectal administration therapy in ulcerative colitis [J]. *Chem Eng J*, 2025, 503: 158477.
- [45] 叶亮, 熊志伟, 孙娥, 等. 中药液体制剂的剂型设计关键技术: 组分的溶解性质与增溶技术应用 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(12): 3166-3174.
- [46] 张双. 人参-五味子药对汤液相态的拆分、表征及活性研究 [D]. 长春: 长春中医药大学, 2023.
- [47] Sethi V, Cohen-Gerassi D, Meir S, *et al.* Modulating hierarchical self-assembly in thermoresponsive intrinsically disordered proteins through high-temperature incubation time [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 21688.
- [48] Miyazaki R, Nargis M, Bin Ihsan A, *et al.* Effects of glycon and temperature on self-assembly behaviors of α -

- galactosyl ceramide in water [J]. *Langmuir*, 2021, 37(26): 7936-7944.
- [49] Feng J L, Qi J R, Yin S W, *et al.* Fabrication and characterization of stable soy β -conglycinin-dextran core-shell nanogels prepared via a self-assembly approach at the isoelectric point [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(26): 6075-6083.
- [50] Wang W J, Yu S, Huang S, *et al.* Bioapplications of DNA nanotechnology at the solid-liquid interface [J]. *Chem Soc Rev*, 2019, 48(18): 4892-4920.
- [51] 杨怡琴, 吴意, 吴一峰, 等. 基于离子液体的中药挥发油制剂技术应用与问题分析 [J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(5): 1194-1202.
- [52] Frost D S, Nofen E M, Dai L L. Particle self-assembly at ionic liquid-based interfaces [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2014, 206: 92-105.
- [53] 滕晓焕, 杜淑霞, 柯剑丽, 等. 离子液体-酶辅助水提紫苏叶挥发油工艺优化及成分分析 [J]. *广东轻工职业技术大学学报*, 2024, 23(5): 19-25.
- [54] 卢彩会, 牟德华. 离子液体[BMIM]PF₆ 酶法辅助提取姜黄挥发油工艺优化及成分分析 [J]. *食品科学*, 2017, 38(10): 264-271.
- [55] 侯志远, 张海龙, 丁劲松. 改善维生素 D₃ 复方制剂稳定性与含量均匀度的技术与挑战 [J]. *中国医药工业杂志*, 2021, 52(10): 1269-1277.
- [56] 陈忠莹, 张定堃, 张小飞, 等. 2020 年版《中国药典》一部含挥发油类中药固体制剂的分类及其挥发油质量控制分析 [J]. *中成药*, 2023, 45(7): 2275-2280.
- [57] 叶丽萍. 普朗尼克改性玉米蛋白-姜黄素给药系统的制备及其性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [58] 杨东晟, 缪艳燕, 刘耀, 等. 中药传统固体制剂溶出度的现状分析 [J]. *微量元素与健康研究*, 2017, 34(2): 40-42.
- [59] 阴婷婷. 叶酸纳米脂质体的制备及性质研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [60] 张则宽, 王琪, 郭小萌, 等. 基于相态变化探究煎煮方法与纯化工艺对经典名方吴茱萸汤药性传递的影响 [J]. *中草药*, 2025, 56(2): 430-440.
- [61] 刘真, 李传宪. 油相组成及相态变化对含蜡油包水乳状液稳定性的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(4): 1428-1437.
- [62] Li K, Wong D K, Hong K Y, *et al.* Cushioned-density gradient ultracentrifugation (C-DGUC): A refined and high performance method for the isolation, characterization, and use of exosomes [J]. *Methods Mol Biol*, 2018, 1740: 69-83.
- [63] Kong J L, Yu S N. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures [J]. *Acta Biochim Biophys Sin*, 2007, 39(8): 549-559.
- [64] Huang X M, Liu X J, Lin X Y, *et al.* Thermodynamics driving phytochemical self-assembly morphological change and efficacy enhancement originated from single and co-decoction of traditional Chinese medicine [J]. *J Nanobiotechnology*, 2022, 20(1): 527.
- [65] Bhavya P V, Soundarajan K, Malecki J G, *et al.* Sugar-based phase-selective supramolecular self-assembly system for dye removal and selective detection of Cu²⁺ ions [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(43): 39310-39324.
- [66] Trifković K T, Milašinović N Z, Djordjević V B, *et al.* Chitosan microbeads for encapsulation of thyme (*Thymus serpyllum* L.) polyphenols [J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 111: 901-907.
- [67] 吴奥丽, 郑利强, 孙继超. 弱相互作用调控表面活性剂自组装 (V): 在纳米材料制备方面的应用 [J]. *日用化学工业*, 2019, 49(5): 286-292.
- [68] Wang B, Yan S X, Gao W, *et al.* Antibacterial activity, optical, and functional properties of corn starch-based films impregnated with bamboo leaf volatile oil [J]. *Food Chem*, 2021, 357: 129743.
- [69] Yu L P, Cheng W, Tian M F, *et al.* Antioxidant activity and volatile oil analysis of ethanol extract of *Phoebe zhennan* S. lee et F. N. Wei leaves [J]. *Forests*, 2024, 15(2): 236.
- [70] Ashour H M. Antibacterial, antifungal, and anticancer activities of volatile oils and extracts from stems, leaves, and flowers of *Eucalyptus sideroxylon* and *Eucalyptus torquata* [J]. *Cancer Biol Ther*, 2008, 7(3): 399-403.

[责任编辑 潘明佳]