石菖蒲与苍术挥发油在 β-环糊精包合和 Pickering 乳液技术处理下光照稳定性考察及 GC-MS 分析

林笑霄，陈忠莹，邹俊波，史亚军，张小飞，郭东艳，翟秉涛，栾　飞*

陕西省中药基础与新药研究重点实验室，陕西中医药大学药学院，陕西 咸阳　712046

摘　要：目的　考察 β-环糊精包合和 Pickering 乳液技术处理的石菖蒲和苍术挥发油（volatile oils from *Acori Tatarinowii Rhizoma* and *Atractylodis Rhizoma*，VAA），在强光照射条件下的稳定性，以提升挥发油的稳定性及品质，为其他含挥发油中药固体制剂稳定性的提升提供参考依据。**方法**　对 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组、Pickering 乳组进行强光照射 1、3、5 d 稳定性考察，收集并测定挥发油保有率与过氧化物含量。采用 GC-MS 法测定各组挥发油成分，用 OmicShare、Rmisc、Reshape2、Ggplot2 包等分析数据，筛选差异成分，分析挥发性成分含量和组成，明确不同处理方式提升挥发油稳定性的效果。**结果**　在强光照射下，β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组，保有率无显著性差异（$P>0.05$），但相比于 VAA 组有更低的氧化程度（$P<0.001$）。GC-MS 分析结果表明，相比于 VAA 组，Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组能够延缓强光照射环境下大部分差异成分与主要成分的含量变化，在强光照射 1、3、5 d 后，Pickering 乳组阻止了 10、9、10 种差异成分的新生成，β-环糊精包合 VAA 组阻止了 4、9、9 种差异成分的新生成；Pickering 乳组降低了 2、2、3 种新生成差异成分的相对含量，而 β-环糊精包合 VAA 组分别降低了 5、0、2 种；另外，Pickering 乳组有效保存了 6、2、2 种消失成分，β-环糊精包合 VAA 有效保存了 5、1、8 种消失成分。综上，Pickering 乳与 β-环糊精包合技术均能使 VAA 的稳定性显著提高。**结论**　β-环糊精包合 VAA 与 Pickering 乳能够显著提升 VAA 的稳定性及品质，Pickering 乳更具优势。

关键词：Pickering 乳；β-环糊精；包合；石菖蒲；苍术；挥发油；GC-MS；稳定性

中图分类号：R283.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2025)02 - 0441 - 17

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.02.008

Light stability examination and GC-MS analysis of volatile oils of *Acori Tatarinowii Rhizoma* and *Atractylodis Rhizoma* under treatment of β-cyclodextrin inclusion and Pickering emulsion technology

LIN Xiaoxiao, CHEN Zhongying, ZOU Junbo, SHI Yajun, ZHANG Xiaofei, GUO Dongyan, ZHAI Bingtao, LUAN Fei

Key Laboratory of Basic and New Drug Research of Traditional Chinese Medicine of Shaanxi Province, School of Pharmacy, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China

Abstract: Objective　To investigate the stability of volatile oils from Shichangpu (*Acori Tatarinowii Rhizoma*) and Cangzhu (*Atractylodis Rhizoma*) (VAA) treated with β-cyclodextrin inclusion and Pickering emulsion technology under strong light exposure conditions, aiming to enhance the stability and quality of volatile oils, and to provide a reference for improving the stability of other solid preparations containing volatile oils in traditional Chinese medicine. **Methods**　The stability of VAA group, β-cyclodextrin inclusion VAA group, and Pickering emulsion group was assessed under strong light exposure for 1, 3, and 5 days. The retention rate and peroxide content of volatile oils were collected and measured. The components of each group's volatile oils were determined using GC-MS. Data were analyzed using packages such as OmicShare, Rmisc, Reshape2, and Ggplot2 to screen for differential components, analyze the content and composition of volatile components, and clarify the effects of different treatment methods on enhancing the

收稿日期：2024-08-30

基金项目：国家自然科学基金面上项目（82274105）；陕西省中医药管理局中医药科研项目（SZY-KJCYC-2025-JC-043）；中药制药共性关键技术研究科技创新团队（2024-CXTD-03）；陕西中医药大学学科创新团队项目（2019-YL11）；陕西省中医药管理局中药制药工程重点学科（2017001）

作者简介：林笑霄（2002—），硕士研究生，从事中药新剂型与新技术研究。E-mail: 2713651861@qq.com

***通信作者：**栾　飞（1989—），博士，讲师，从事中药新剂型与新技术研究。E-mail: luanfeiren@163.com

stability of volatile oils. **Results** Under strong light exposure, there was no significant difference in retention rates between the β-cyclodextrin inclusion VAA group and the Pickering emulsion group ($P > 0.05$), but both exhibited lower oxidation levels compared to the VAA group ($P < 0.001$). GC-MS analysis indicated that, compared to the VAA group, both the Pickering emulsion group and the β-cyclodextrin inclusion VAA group were able to delay changes in the content of most differential and main components under strong light exposure. After 1, 3, and 5 days of strong light exposure, the Pickering emulsion group prevented the formation of 10, 9, and 10 new differential components, while the β-cyclodextrin inclusion VAA group prevented the formation of 4, 9, and 9 new differential components. The Pickering emulsion group reduced the relative content of 2, 2, and 3 newly formed differential components, whereas the β-cyclodextrin inclusion VAA group reduced 5, 0, and 2. Additionally, the Pickering emulsion group effectively preserved 6, 2, and 2 disappearing components, while the β-cyclodextrin inclusion VAA group preserved 5, 1, and 8 disappearing components. In summary, both Pickering emulsion and β-cyclodextrin inclusion technology significantly enhance the stability of VAA. **Conclusion** Both β-cyclodextrin inclusion VAA and Pickering emulsion can significantly improve the stability and quality of VAA, with Pickering emulsion demonstrating greater advantages.

Key words: Pickering emulsion; β-cyclodextrin; encapsulation; *Acori Tatarinowii Rhizoma*; *Atractylodis Rhizoma*; essential oil; GC-MS; stability

石菖蒲（*Acori Tatarinowii Rhizoma*，ATR）是一种重要的药用芳香植物，具有经济和药用特性[1]。主要由多种化学成分组成，包括挥发油、黄酮类、醌类、生物碱、氨基酸和糖类等[2]。石菖蒲具有镇静、抗抑郁、抗痴呆、保护心脏、抗氧化、镇咳、支气管扩张、抗菌和抗疲劳等多种药理作用[3]。此外，由于其芳香性和高药用特性，该植物还用于食品工业和芳香疗法[1]。挥发油是苍术（*Atractylodis Rhizoma*，AR）的关键活性成分[4]。其中，苍术酮、苍术素、β-桉叶醇和茅术醇是其主要活性成分[5]。苍术挥发油展现了广泛的药理活性，在消化系统、神经系统、抗炎、抗菌、抗氧化和抗肿瘤等方面发挥着重要作用[6]。但是，挥发油对光照比较敏感，长时间置于光照环境中可能使其化学结构发生变化，导致其降解或失活，进而降低药效[7]，这制约了含挥发油中药固体制剂的良性发展。

作为一种新型乳化技术，以固体粒子为稳定剂制备的 Pickering 乳，在医药和材料科学等领域已经引起一波新的关注[8-10]。Pickering 乳以其独特的优点，如高度稳定性、低毒性以及生物相容性等，使得该技术在中药挥发油稳定性的提升方面展现出强大的应用潜力[11]。青黛（*Indigo Naturalis*，IN）作为一味可直接入药的固体颗粒，却无法制备为 Pickering 乳。因此本课题组引入了加热熔融法对青黛进行改性，成功制备了稳定的 Pickering 乳。环糊精是一种重要的载体分子，可用于封装小分子有机物，如精油，以增加其稳定性和应用潜力[12]。通过环糊精的包合，减缓精油的挥发，从而延长产品的使用寿命[13]。因此本课题组同样采用 β-环糊精包合石菖蒲与苍术挥发油。

GC-MS 分析是一种常用的化学分析方法，其结合气相色谱和质谱技术，用于鉴定未知物质、确定化合物的结构、分析混合物中的成分和定量等[14]。GC-MS 分析可应用于许多领域，如化学、食品安全、环境监测、药物分析等[15-17]。基于此，本研究以石菖蒲与苍术挥发油（volatile oils from ATR and AR，VAA）、Pickering 乳和 β-环糊精包合 VAA 为研究对象，比较（4 500±500）lx 强光照射条件下各自稳定性及成分变化，以期提升 VAA 的稳定性及品质，并为含挥发油中药固体制剂稳定性的提升提供参考依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

WD-A 型药物稳定性检查仪，天津药典标准仪器厂；JY-3002 型十万分之一分析天平，上海浦春仪器有限公司；IKA T18 digital 型数显型高速分散机，上海土森视觉科技有限公司；DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱，上海恒科学仪器有限公司；DZTW 型电子调温电热套，北京市永光明医疗仪器有限公司；Agilent 7890B/5977B 型气相色谱-质谱联用仪，美国 Agilent 公司；TESCAN VEGA3 型扫描电子显微镜（SEM）、蔡司场发射扫描电子显微镜，上海泰思肯贸易有限公司；DM3000 型生物显微镜，徕卡显微系统贸易有限公司；TENSOR-27 型傅里叶变换红外光谱仪，德国布鲁克公司；ANTIRIS III 型傅里叶变换近红外光谱仪，美国赛默飞公司；Zetasizer Nano ZS90 型纳米粒度仪和 ζ 电位分析仪，英国 Malvern 公司；S3500 型激光粒度分析仪，大昌华嘉商业有限公司；K100C-KRUSS 型全自动表面张力及接触角测定仪，德国 KRUSS 公司；SP-1920 型紫外分光

光度仪，上海光谱仪器有限公司；F-P4000 型高能行星式球磨仪，陕西斯科曼生物科技有限公司。

1.2 材料

聚乙二醇（polyethyleneglycol，PEG）2000（批号 20210306）、PEG 4000（批号 20220710）、PEG 6000（批号 20221121）、碘化钾（批号 20220422），均购自天津市科密欧化学试剂有限公司；硫代硫酸钠（批号 20180806）、无水碳酸钠（批号 20210506）、可溶性淀粉（批号 20180808）、无水乙醇（批号 20220902）、氯化钠（批号 20210302）、氯仿（批号 20210203），均购自天津市天力化学试剂有限公司；PEG 8000（批号 A16GS157920）、PEG 10000（批号 A14GS145205）、PEG 20000（批号 O13HS197779），均购自上海源叶生物科技有限公司；正己烷（批号 2112091）、正二十二烷（批号 G171809，质量分数 99.6%）均购自格雷斯化学有限公司；石菖蒲与苍术混合提取挥发油（VAA，批号 S-230204），购自陕西摩美得气血和制药有限公司；β-环糊精（批号 2206160007），购自西安德立生物化工有限公司；水为蒸馏水；其余试剂均为分析纯。

2 方法与结果

2.1 β-环糊精包合 VAA 和改性青黛及 Pickering 乳的制备

2.1.1 β-环糊精包合 VAA 精密称取 72.00 g β-环糊精投入球磨仪中，加入 30 颗玛瑙研磨球，再加 2.6 倍量（187 mL）的纯化水研磨 10 min，制成 β-环糊精混悬液，当混悬液形成时，缓慢滴加 VAA 乙醇等比例稀释溶液 12 mL，将其缓缓加入球磨仪中，与 β-环糊精混悬液混合研磨 33 min，真空抽滤，使用无水乙醇进行洗涤 3 次，每次约 45 mL，于 55 ℃下干燥 12～14 h；研碎，过 40 目筛网，即得 β-环糊精包合物。

2.1.2 改性青黛 参考 Chen 等[18]的研究方法，分别称取 5.00 g PEG 4000 和 1.00 g 青黛细粉，将 PEG 4000 置于 100 mL 蒸发皿中，转移至电热套，设置温度为 228 ℃，电热套预热 5 min，将 PEG 4000 加热融化后，加入青黛，玻璃棒快速搅拌熔融 5 min，取出蒸发皿，室温干燥 1 h，研碎，即得改性青黛，备用。

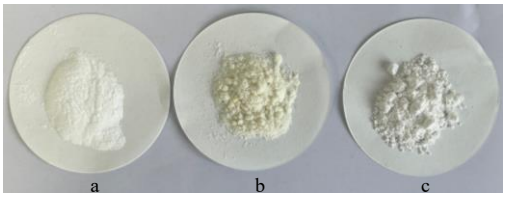
2.1.3 Pickering 乳 称取改性青黛 0.50 g，分别于 50 mL 离心管中加入 13 mL VAA 和 7 mL 水，于高速剪切机中 10 000 r/min 剪切 2 min，即得改性青黛 Pickering 乳。

2.2 β-环糊精包合 VAA、改性青黛及 Pickering 乳的表征

2.2.1 β-环糊精包合物的表征 将 β-环糊精、β-环糊精与 VAA 物理混合物（6.3∶1）、β-环糊精包合物分别置于干净滤纸上，比较其差异。将适量的 β-环糊精、物理混合物和 β-环糊精包合物分别溶于水中，并与油溶性染料苏丹 III 混合。然后将混合物铺在玻片上，盖上盖，在光学显微镜下观察（×100），检查其形态。分别取 0.10 g β-环糊精、包合物、物理混合物与 1 μL VAA，加入甲醇 1 mL，摇匀后取上清液。采用硅胶 G 板，以石油醚-醋酸乙酯（9∶1）为展开系统，喷以 5%香兰素硫酸溶液，105 ℃加热，直到斑点变得清晰可见。

经比较发现，β-环糊精与其包合物呈白色粉末状，物理混合物呈浅黄色粉末状，如图 1 所示。在光学显微镜下观察到 β-环糊精为不含挥发油的圆柱形晶体，而 β-环糊精包合物为含挥发油的颗粒状晶体，物理混合物兼具两者形态，并含挥发油，如图 2 所示。薄层色谱图显示，β-环糊精包合物及物理混合物斑点与 VAA 一致，β-环糊精无相应斑点，结果见图 3。提示 VAA 被 β-环糊精较好地包裹，且 VAA 被 β-环糊精包入后主要成分无差异。

2.2.2 改性青黛的表征 使用导电黏性胶，将 10 mg 左右青黛、PEG 4000、改性青黛粒子粘附在 SEM 支架上，将其进行金属蒸镀处理后，置于 SEM 的真空室中观察各微观粒子形态并进行元素谱图分析。取



a-β-环糊精；b-VAA 和 β-环糊精物理混合物；c-β-环糊精包合物；图 2 同。

a-β-cyclodextrin; b-VAA and β-cyclodextrin physical mixture; c-β-cyclodextrin inclusion complex; same as figure 2.

图 1 β-环糊精包合物的外观形状

Fig. 1 Appearance shape of β-cyclodextrin inclusion complex

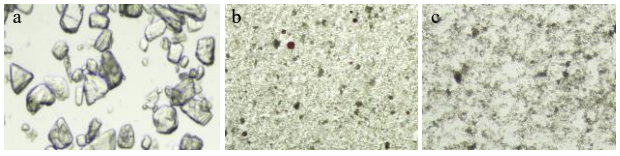
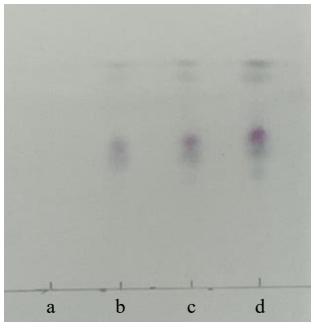


图 2 β-环糊精包合物的显微鉴别（×100）

Fig. 2 Microscopic identification of β-cyclodextrin inclusion complex (× 100)



a-β-环糊精；b-β-环糊精包合物；c-VAA；d-VAA 和 β-环糊精物理混合物。

a-β-cyclodextrin; b-β-cyclodextrin inclusion complex; c-VAA; d-VAA and β-cyclodextrin physical mixture.

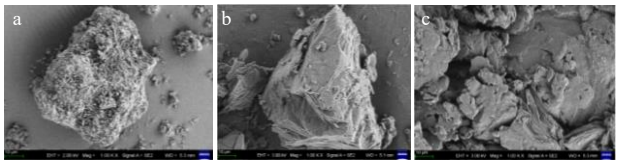
图 3　β-环糊精包合物的 TLC 分析

Fig. 3　TLC analysis of β-cyclodextrin inclusion complex

3 批各 0.2 g 的青黛与改性青黛细粉，采用红外压片机压片，测试溶液为水溶液，采用 K100C-KRUSS 型全自动表面张力及接触角测定仪测定青黛接触角。取适量的溴化钾粉末，置于电热鼓风干燥箱中，100 ℃烘干 4 h，然后按溴化钾与青黛、改性青黛、PEG 4000、青黛与 PEG 4000 物理混合物粉末 200∶1，研匀，压片成型，测定各样品粒子的红外谱图。

青黛粒子微观形貌总体呈现出疏松多孔的聚合状，结果见图 4-a，青黛粒子中主要含 O、Ca、C 元素，见图 5-a；PEG 4000 粒子微观形貌总体呈现出紧实的团块状，结果见图 4-b，PEG 4000 粒子中主要含 C、O、Pt 元素，见图 5-b；改性青黛粒子微观形貌与 PEG 4000 粒子微观形貌类似，呈现出棱状，结果见图 4-c，改性青黛粒子中主要含有 C、O、Ca 元素，结果见图 5-c。接触角测定结果显示，青黛接触角为（80.15±0.45）°、改性青黛接触角为（64.32±2.38）°。红外谱图分析可知改性青黛、青黛和 PEG 4000 物理混合物的吸收峰与 PEG 4000 的吸收峰波动幅度基本一致，改性青黛在波数 1 500、860 cm^{-1} 等附近处保留了青黛特征峰，如图 6 所示。提示改性青黛被 PEG 4000 较好地包裹，且改性青黛接触角降低，润湿性增加，其亲水性更好。

2.2.3　Pickering 乳的表征　取少量 Pickering 乳，滴于滤纸上展开，然后用水稀释，观察稀释情况。将 Pickering 乳包被在玻片上，用油溶性染料苏丹 III 和水溶性染料亚甲基蓝染色，然后在显微镜下观察样品（×100）。采用 S3500 型激光粒度分析仪测量



a-青黛粒子；b-PEG 4000 粒子；c-改性青黛粒子；图 5 同。

a-IN particles; b-the microscopic morphology of PEG 4000 particles; c-micro-morphology of modified IN particles; same as figure 5.

图 4　改性青黛的微观形貌

Fig. 4　Microscopic morphology of modified IN

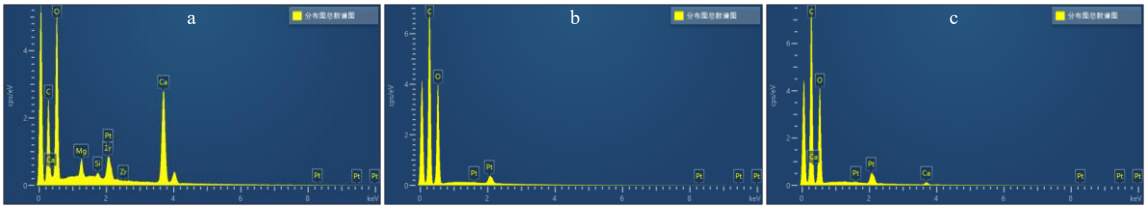


图 5　改性青黛的元素分布谱图

Fig. 5　Element distribution spectrum of modified *Indigo Naturalis*

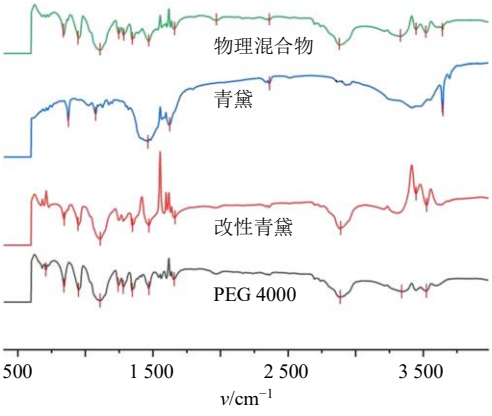


图 6　各样品粒子红外测定谱图

Fig. 6　Infrared spectra of each sample particle

Pickering 乳液的粒径。采用 Zetasizer Nano ZS90 型纳米粒度仪和 ζ 电位分析仪测定了 Pickering 乳液的 ζ 电位。取适量的 VAA、青黛混悬液（称取 0.5 g 青黛细粉，加入 20 mL 蒸馏水，常温磁力搅拌至混悬状态，即得）和 Pickering 乳样品，分别放入旋转样品杯中进行光谱采集。采集使用积分球，采集延迟为 0 s，分辨率为 8 cm^{-1}，增益为×2。使用空气作为背景减法的参考。每个样品采集 3 次，得到平均近红外光谱（near infrared spectroscopy，NIRS）。

观察 Pickering 乳，滤纸法结果如图 7-a 所示，稀释法结果如图 7-b 所示。显微观察结果显示，Pickering 乳内相被苏丹 III 溶液染成红色，如图 7-c

所示；Pickering 乳外相被亚甲基蓝溶液染成蓝色，如图 7-d 所示。测得 Pickering 乳液的平均粒径为（23.42±0.20）μm，表明其为正常乳液，如图 8-a 所示。测得 Pickering 乳液的 ζ 电位为（31.80±0.85）mV，表明其具有中等稳定性，如图 8-b 所示。通过观察 NIRS 发现，在 Pickering 乳中，VAA 在波数为 6 000 cm^{-1} 附近的特征吸收峰被减弱，Pickering 乳吸收峰表现出与青黛混悬液相似的波动，且 Pickering 乳中没有明显的新吸收峰产生，结果如图 9 所示，表明在 Pickering 乳中并没有形成新的化学键。提示采用优化工艺制备的 Pickering 乳，为水包油（O/W）型 Pickering 乳。

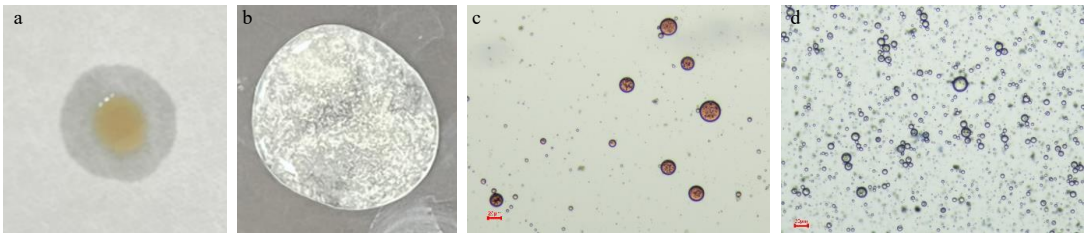


图 7　Pickering 乳稀释后外观（滤纸法，a；稀释法，b）和显微镜观察结果（苏丹 III 染色，c；亚甲基蓝染色，d）

Fig. 7　Diluted appearance (filter paper method, a; dilution method, b) and microscopic observation results (methylene blue staining, c; Sudan III staining, d) of Pickering emulsion

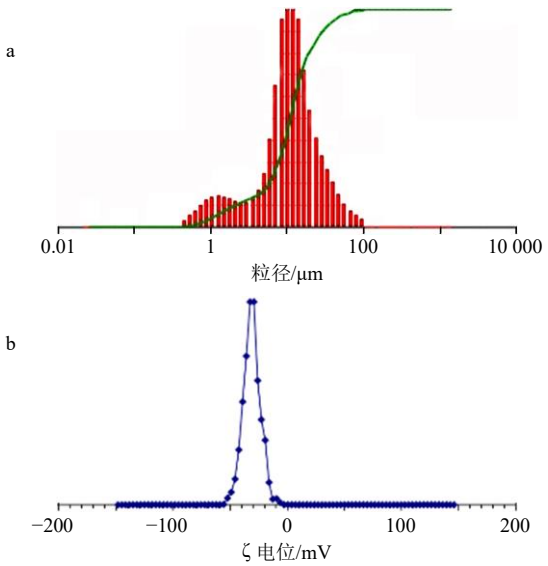


图 8　Pickering 乳的粒径分布（a）和 ζ 电位（b）

Fig. 8　Particle size distribution (a) and ζ potential (b) of Pickering emulsion

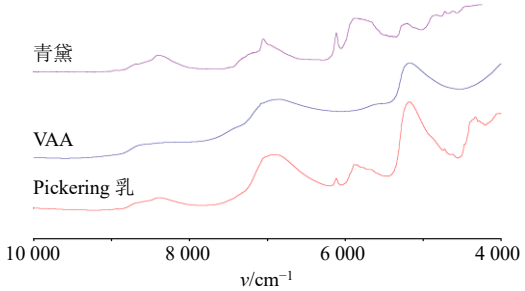


图 9　Pickering 乳的 NIRS

Fig. 9　NIRS of Pickering emulsion

2.3　强光照射环境下 VAA 的收集及其保有率与过氧化物含量的测定

2.3.1　强光照射环境下 VAA 的收集及其保有率的测定　将 VAA、β-环糊精包合 VAA、Pickering 乳分别置于 40×25 开口扁形称量瓶中，于（4 500±500）lx 稳定箱中放置 1、3、5 d。取出后记录 VAA 组中 VAA 体积；将 β-环糊精包合 VAA 组和 Pickering 乳组使用水蒸气蒸馏法提取其中 VAA，蒸馏 5 h，分离油相，记录体积，计算挥发油保有率。

$$挥发油保有率 = V_t/V_0$$

V_t 为强光照射处理过程中各组在 t 时的 VAA 体积（mL），V_0 为各组中 VAA 的初始体积（mL）

实验平行 3 组，结果见表 1。在（4 500±500）lx 强光照射 1、3 d 环境下，β-环糊精包合 VAA 组和 Pickering 乳组与 VAA 组相比，挥发油保有率均显著提高（$P<0.01$），Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组相比，挥发油保有率无统计学差异（$P>0.05$）。在（4 500±500）lx 强光光照 5 d 环境下，β-环糊精包合 VAA 组与 VAA 组相比，挥发油保有率显著提高（$P<0.05$），Pickering 乳组与 VAA 组相比保有率无统计学差异（$P>0.05$），这是由于随着时间的推移，乳液可能会发生其他化学和物理变化，如氧化或聚集，导致不稳定，此时乳剂分散，油相和水相发生分离，挥发油散失。提示 β-环糊精包合 VAA 和 Pickering 乳能在一定程度上延缓（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 的损失，其中 β-环糊精包合 VAA 表现良好，Pickering 乳次之。

2.3.2　强光照射环境下 VAA 中过氧化物含量的测定　精密吸取 500 μL “2.1”项下样品，取 10.00 mL 三氯甲烷-冰乙酸混合液（4∶6）至锥形瓶中，加入 1.00 mL 饱和碘化钾溶液，密塞，振摇 0.5 min，暗

表 1　不同强光照射下各组中石菖蒲与苍术混合提取挥发油的保有率（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 1　Retention rates of volatile oils extracted from the mixture of ATR and AR under different light intensities ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	挥发油保有率/%		
	1 d	3 d	5 d
VAA	92.51±1.24	91.28±1.78	90.77±1.54
Pickering 乳	95.90±0.89**	95.38±1.54**	92.31±1.54
β-环糊精包合物	96.55±1.72**	95.40±1.00**	93.68±1.00*

与 VAA 组比较：*P<0.05　**P<0.01。

*P < 0.05　**P < 0.01 *vs* VAA group.

处放置 3 min，取出，加入 30.00 mL 水，加入 1.00 mL 1%淀粉指示剂，用 0.01 mmol/L 硫代硫酸钠标准溶液滴定至溶液蓝色消失为终点，记录消耗硫代硫酸钠标准溶液体积并计算过氧化物含量。结果见表 2。在（4 500±500）lx 强光照射 1、3、5 d 环境下，β-环糊精包合 VAA 组和 Pickering 乳组与 VAA 组相比，VAA 中过氧化物含量均极显著降低（P<0.001），Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组中过氧化物含量没有统计学差异（P>0.05）。提示 β-环糊精包合 VAA 和 Pickering 乳组能在一定程度上降低（4 500±500）lx 强光照射条件下 VAA 中过氧化物含量。

表 2　不同强光照射下各组中过氧化物含量（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 2　Content of peroxides in each group under different light intensities ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	过氧化物/(μmol·kg^{-1})		
	1 d	3 d	5 d
VAA	7.6±0.3	10.7±0.6	13.5±0.8
Pickering 乳	2.1±0.1***	2.4±0.1***	2.7±0.1***
β-环糊精包合物	2.0±0.1***	2.3±0.1***	2.6±0.2***

与 VAA 组比较：***P<0.001。

***P < 0.001 *vs* VAA group.

2.4　GC-MS 法测定强光照射环境下 VAA 中的成分

2.4.1　内标溶液的制备　精密称取 50.50 mg 二十二烷标准品，将其放置于 5 mL 量瓶中，滴加正己烷至刻度线，摇匀即得质量浓度为 10 mg/mL 的二十二烷内标溶液。

2.4.2　供试品溶液的制备　精密移取“2.1”项下各组挥发油样品 100 μL，置 10 mL 量瓶中，加入 100 μL 二十二烷内标溶液，加正己烷至刻度，加入适量无水硫酸钠除去水分，摇匀，过 0.22 μm 有机滤膜，得不同组别挥发油供试品溶液。

2.4.3　GC-MS 分析条件　供试品溶液采用液体进样法制备，分别考察不同 GC 条件、MS 条件等对样品色谱信息的影响，以色谱信息丰度为评价指标，优选可得到最多成分信息的色谱条件为最佳条件：采用 HP-5 MS 石英毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气（纯度 99.999%），体积流量为 1 mL/min，进样量为 1 μL，分流比为 10∶1，气化室温度为 230 ℃，色谱柱采用程序升温法，初始温度为 50 ℃，以 15 ℃/min 速率升温至 140 ℃后，再以 0.4 ℃/min 速率升温至 144 ℃，保持 5 min 后，以 10 ℃/min 速率升温至 250 ℃，保持 2 min 后，以 4 ℃/min 速率升温至 280 ℃，保持 2 min。电离方式为 EI，电子能量为 70 eV，离子源温度为 230 ℃，四极杆温度为 150 ℃，扫描范围为 m/z 35～500，溶剂延迟 3 min。

2.4.4　β-环糊精包合和 Pickering 乳液技术处理后强光照射环境下 VAA 中成分测定　VAA 总离子流图如图 10 所示。GC-MS 数据采集完成后，使用安捷伦数据库分析软件 Data Analysis，调用 NIST14.0 数据库并结合正构烷烃对各组成分进行汇总，结果见表 3。

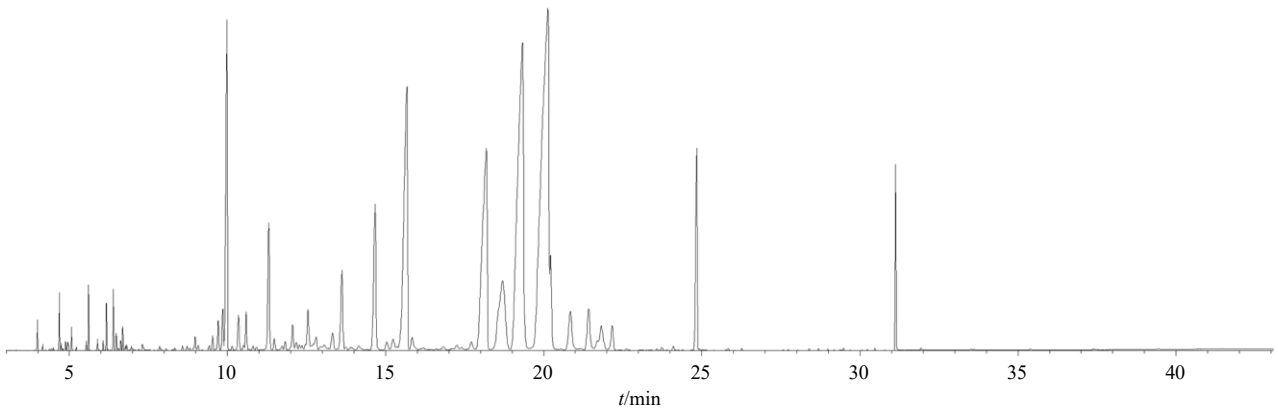


图 10　VAA 总离子流图

Fig. 10　Plot of total ionic flow of VAA

表 3 β-环糊精包合和 Pickering 乳液技术处理后强光照射环境下 VAA 中成分信息

Table 3 Component information of VAA after treatment with β-cyclodextrin inclusion and Pickering emulsion technology under strong light irradiation

序号	CAS	相对含量/(mg·mL^{-1})									
		1O	1P	1β	3O	3P	3β	5O	5P	5β	YO
1	007785-26-4	0.15±0.13	−	−	−	−	−	−	−	−	0.36±0.62
2	000099-83-2	1.02±0.05	0.10±0.17	−	−	0.05±0.08	−	−	−	0.08±0.14	2.27±0.18
3	000099-87-6	0.52±0.46	−	−	−	−	−	−	−	−	1.04±0.08
4	013877-91-3	0.67±0.03	−	−	0.04±0.07	−	−	−	−	0.04±0.08	0.58±0.51
5	000078-70-6	2.97±0.23	1.97±0.80	1.03±0.21	2.32±0.06	1.21±0.33	0.84±0.30	2.09±0.03	1.37±0.29	1.59±0.65	2.95±0.17
6	029803-82-5	0.51±0.03	0.36±0.12	0.28±0.02	0.40±0.00	0.27±0.06	0.25±0.07	0.12±0.21	0.08±0.14	0.28±0.25	0.46±0.04
7	000464-48-2	1.50±1.31	1.39±1.33	1.55±1.35	2.16±0.02	0.89±0.81	1.59±1.46	0.67±1.17	1.62±0.31	1.86±1.64	2.33±0.14
8	010385-78-1	1.70±1.47	−	0.67±1.16	0.72±1.24	−	−	−	−	−	−
9	000562-74-3	0.92±0.06	0.70±0.19	0.64±0.03	0.49±0.42	0.55±0.08	0.60±0.12	0.68±0.01	0.62±0.11	0.80±0.15	0.88±0.07
10	000140-67-0	1.75±0.30	1.68±0.40	1.03±0.90	1.71±0.02	1.35±0.13	0.55±0.96	1.63±0.03	1.56±0.24	1.96±0.44	2.09±0.16
11	016721-38-3	0.36±0.32	−	−	−	−	−	−	−	−	−
12	000106-22-9	0.50±0.02	0.41±0.07	0.51±0.01	0.40±0.00	0.36±0.02	0.57±0.07	0.41±0.01	0.25±0.22	0.66±0.09	0.30±0.26
13	000106-25-2	0.20±0.35	0.22±0.39	0.53±0.46	0.34±0.30	0.33±0.29	−	0.35±0.31	0.18±0.32	−	0.35±0.31
14	004057-31-2	0.15±0.26	0.31±0.27	−	0.08±0.15	0.27±0.24	0.10±0.17	0.10±0.18	−	0.12±0.21	0.25±0.22
15	138752-24-6	0.31±0.02	0.24±0.05	−	0.24±0.01	0.07±0.12	−	0.22±0.00	0.07±0.12	0.10±0.18	0.31±0.02
16	020307-84-0	0.38±0.02	0.29±0.06	0.18±0.15	0.30±0.01	0.28±0.30	0.09±0.15	0.30±0.01	0.34±0.38	0.31±0.07	0.48±0.07
17	005989-08-2	0.49±0.04	0.38±0.07	0.21±0.18	0.39±0.01	0.21±0.18	0.11±0.18	0.37±0.01	0.12±0.21	0.38±0.07	0.46±0.04
18	001137-12-8	1.17±0.09	0.98±0.17	0.89±0.13	0.96±0.02	0.55±0.48	0.88±0.12	0.92±0.02	0.30±0.52	1.06±0.20	1.13±0.09
19	068269-87-4	2.55±0.18	2.18±0.36	2.08±0.27	2.14±0.02	2.15±0.53	2.05±0.27	2.08±0.05	2.75±0.73	2.43±0.40	2.51±0.20
20	000093-15-2	41.26±3.04	38.43±5.32	29.90±2.55	35.18±2.22	33.29±1.76	29.42±3.96	36.42±2.15	38.72±5.44	27.93±1.48	34.91±2.72
21	002387-78-2	0.40±0.03	0.34±0.05	0.33±0.04	0.33±0.01	0.29±0.02	0.33±0.04	0.31±0.01	0.33±0.06	0.38±0.06	0.38±0.04
22	071596-72-0	3.70±0.27	3.24±0.49	3.19±0.30	3.12±0.04	2.82±0.16	3.23±0.38	3.06±0.06	3.16±0.44	3.54±0.44	3.54±0.28
23	000087-44-5	4.12±0.29	3.60±0.48	3.92±0.32	3.45±0.04	3.16±0.16	4.01±0.48	3.41±0.07	3.56±0.52	4.18±0.44	3.87±0.34
24	029873-99-2	0.16±0.28	0.15±0.26	−	0.15±0.25	0.13±0.22	0.40±0.35	−	0.13±0.23	0.36±0.31	0.12±0.21
25	006380-24-1	14.00±1.05	12.83±1.62	10.69±0.33	12.45±0.13	11.92±0.21	11.59±1.73	12.87±0.25	13.53±1.65	10.92±0.64	13.01±1.01
26	006753-98-6	1.18±0.08	1.04±0.12	1.21±0.08	1.00±0.02	0.93±0.05	1.27±0.16	0.99±0.02	1.07±0.17	1.25±0.11	1.10±0.11
27	150320-52-8	0.64±0.04	0.17±0.30	0.93±1.61	0.17±0.29	−	−	1.03±1.36	0.17±0.29	0.40±0.35	0.38±0.33
28	729602-94-2	1.00±0.07	0.56±0.48	0.93±0.05	0.86±0.01	0.70±0.67	0.99±0.13	0.58±0.51	1.33±0.45	1.14±0.32	0.93±0.09
29	000451-55-8	3.08±0.22	−	1.81±1.57	1.76±1.53	−	2.96±0.43	−	−	−	−
30	023515-88-0	0.69±0.60	0.29±0.50	0.37±0.64	−	−	−	−	−	−	−
31	023986-74-5	0.64±0.04	0.56±0.07	0.60±0.03	0.70±0.28	0.64±0.56	0.67±0.09	0.69±0.59	0.51±0.50	1.02±0.30	1.10±0.11
32	997221-34-6	0.18±0.31	0.87±1.51	0.82±1.43	−	−	−	−	−	0.87±1.50	0.73±1.27
33	010208-80-7	2.98±0.21	2.72±0.34	1.82±1.58	2.62±0.07	2.54±0.14	2.22±0.73	1.79±1.55	2.83±0.40	2.64±0.18	2.81±0.25
34	000483-76-1	1.96±0.13	1.80±0.21	6.59±3.68	4.70±5.14	4.67±5.26	9.62±1.56	7.95±5.32	5.57±6.62	9.00±0.49	1.86±0.16
35	039029-41-9	1.92±1.67	2.61±0.33	1.82±1.58	2.54±0.02	2.44±0.13	3.03±0.47	1.78±1.54	2.78±0.34	2.81±0.19	2.64±0.22
36	024406-05-1	0.99±0.07	0.66±0.59	−	0.58±0.50	0.86±0.03	−	0.91±0.03	1.01±0.18	−	0.64±0.55
37	000639-99-6	23.78±1.72	23.34±2.96	24.38±1.10	21.46±0.27	21.76±0.11	26.73±4.24	22.35±0.46	24.41±2.95	24.48±1.15	22.05±1.62
38	015423-57-1	0.79±0.46	0.99±0.54	0.82±0.51	1.25±0.01	1.16±0.06	1.53±0.23	0.98±0.52	1.32±0.21	1.40±0.10	1.31±0.10
39	112421-19-9	2.50±0.19	1.42±1.23	1.61±1.40	1.45±1.26	0.66±1.14	2.71±0.41	1.38±1.20	1.43±1.24	1.59±1.38	1.60±1.39
40	005353-15-1	66.58±5.21	62.21±8.00	30.20±1.01	60.68±0.68	56.14±3.73	32.99±5.66	62.89±1.04	64.53±6.96	30.23±1.64	62.27±4.28
41	000489-86-1	0.72±0.05	0.20±0.35	−	0.43±0.37	0.40±0.35	−	0.67±0.02	0.53±0.49	0.20±0.35	0.66±0.06
42	019912-67-5	1.31±0.08	1.27±0.15	1.27±0.05	1.17±0.02	1.19±0.04	1.59±0.30	1.23±0.01	1.53±0.48	1.45±0.21	1.31±0.10
43	002883-98-9	43.58±37.80	23.45±40.61	21.83±18.91	41.70±36.12	35.88±31.51	22.19±19.25	65.01±1.32	63.33±6.18	34.27±1.54	40.99±35.51

表 3（续）

序号	CAS	相对含量/(mg·mL^{-1})									
		1O	1P	1β	3O	3P	3β	5O	5P	5β	YO
44	001209-71-8	31.51±2.31	29.91±3.79	30.71±1.27	28.78±0.34	27.98±0.17	33.89±5.37	30.06±0.65	31.96±4.06	30.95±1.80	29.28±2.17
45	023811-08-7	82.26±71.32	−	123.14±5.30	−	37.72±65.34	134.02±21.89	39.29±68.05	−	122.03±5.40	−
46	000473-15-4	192.21±14.33	181.84±23.38	177.69±7.96	172.42±2.34	166.17±3.72	195.03±31.18	177.97±3.39	186.40±21.26	172.30±6.95	173.52±11.71
47	997220-90-4	9.30±0.67	8.55±1.09	5.66±4.90	5.87±4.43	7.86±0.22	9.17±1.48	8.69±0.18	9.05±1.10	8.20±0.44	8.57±0.65
48	005956-05-8	5.60±4.86	−	2.30±3.99	5.26±4.55	2.57±4.45	7.69±1.14	5.53±4.79	3.29±5.69	2.41±4.17	−
49	030021-74-0	4.31±0.32	3.99±0.50	3.57±0.17	2.58±2.23	2.36±2.05	4.13±0.58	2.63±2.28	−	−	0.16±0.27
50	997153-98-9	21.53±1.99	0.85±0.16	0.43±0.37	1.10±0.06	7.00±9.61	10.06±8.28	1.61±0.10	2.52±0.23	0.86±0.07	20.78±1.50
51	000464-45-9	0.95±1.65	1.50±1.37	1.35±1.17	1.47±1.28	1.77±0.16	1.94±0.33	2.15±0.04	2.00±0.32	2.37±0.29	0.83±1.43
52	000624-15-7	0.44±0.38	0.34±0.29	−	0.17±0.29	−	0.88±0.12	−	−	0.59±0.51	0.17±0.30
53	092618-89-8	0.18±0.31	0.12±0.22	−	0.10±0.18	−	−	0.21±0.18	−	−	0.10±0.17
54	005273-86-9	24.51±42.46	38.49±33.38	11.51±19.94	20.65±35.76	20.20±34.98	16.42±28.44	−	−	−	23.06±39.94
55	004630-07-3	46.38±80.34	37.85±61.57	−	116.06±1.61	38.48±64.85	0.63±1.09	40.53±70.20	126.65±14.57	−	80.12±67.86
56	021653-33-8	3.14±5.44	8.22±1.04	4.66±4.04	2.60±4.50	5.01±4.34	−	2.66±4.61	5.39±4.68	4.48±3.89	8.06±0.60
57	007785-70-8	0.07±0.11	−	−	−	−	−	−	−	−	−
58	000527-84-4	0.26±0.45	−	−	−	−	−	−	−	−	−
59	000076-22-2	0.89±1.55	−	0.73±1.26	−	0.52±0.90	−	0.67±1.16	−	1.36±2.35	−
60	005655-61-8	0.16±0.28	−	0.21±0.18	0.10±0.17	−	−	−	0.51±0.08	0.24±0.21	−
61	020085-19-2	0.34±0.59	0.67±0.59	0.72±0.62	0.93±0.01	−	−	0.96±0.02	0.31±0.54	0.73±0.63	0.96±0.09
62	006813-21-4	0.19±0.33	−	−	0.68±1.17	−	−	−	−	−	−
63	000088-84-6	0.81±1.40	0.67±1.15	1.99±0.06	−	−	0.70±1.21	0.72±1.24	1.57±1.39	0.64±1.10	−
64	003242-08-8	−	0.16±0.28	0.19±0.32	0.24±0.21	0.26±0.23	0.18±0.31	0.25±0.21	0.33±0.30	0.20±0.35	0.17±0.30
65	018252-44-3	−	0.20±0.35	0.38±0.33	−	−	0.43±0.38	0.17±0.29	−	−	−
66	090457-37-7	−	0.34±0.59	−	−	−	−	−	−	−	−
67	094535-52-1	−	1.87±1.65	0.96±1.66	−	0.85±1.48	−	0.90±1.55	0.81±1.41	0.92±1.60	1.84±1.60
68	000515-17-3	−	0.19±0.34	−	−	−	−	−	−	0.22±0.38	−
69	000104-20-1	−	5.48±0.70	3.43±2.98	1.73±3.00	3.66±3.21	1.73±3.00	−	−	1.91±3.31	1.83±3.16
70	000507-70-0	−	0.63±1.10	−	−	−	−	−	−	−	1.70±1.49
71	013744-15-5	−	0.17±0.29	−	0.18±0.31	−	0.19±0.33	0.17±0.29	−	−	0.19±0.33
72	094482-89-0	−	0.88±1.52	−	0.87±1.51	1.61±1.39	−	0.87±1.50	1.89±1.66	1.91±1.66	1.05±1.82
73	000514-51-2	−	0.16±0.29	−	−	−	−	−	−	−	−
74	000464-49-3	−	0.51±0.89	−	−	−	0.56±0.96	0.66±1.14	−	−	−
75	046030-07-3	−	0.16±0.27	0.20±0.35	0.16±0.28	−	0.25±0.43	−	0.17±0.29	−	−
76	000106-26-3	−	−	0.34±0.06	−	−	0.33±0.04	0.06±0.10	−	0.37±0.07	−
77	000106-24-1	−	−	0.25±0.43	−	0.18±0.30	−	0.18±0.31	0.40±0.35	0.35±0.61	−
78	005392-40-5	−	−	0.11±0.20	−	−	0.29±0.26	−	−	0.34±0.30	−
79	017334-55-3	−	−	0.23±0.20	−	−	0.11±0.19	−	−	0.40±0.07	0.32±0.28
80	000475-20-7	−	−	1.03±0.16	−	−	0.20±0.34	−	−	−	−
81	000495-61-4	−	−	1.87±3.24	−	−	−	−	2.03±3.52	−	−
82	081944-09-4	−	−	0.27±0.46	−	−	−	−	−	−	−
83	000141-27-5	−	−	0.31±0.27	−	−	0.17±0.30	−	−	0.16±0.28	−
84	065372-78-3	−	−	0.93±1.61	2.04±1.77	1.82±1.59	3.21±0.41	2.00±1.73	1.01±1.75	3.66±0.55	3.54±0.28
85	000495-60-3	−	−	0.38±0.33	0.17±0.29	−	0.19±0.33	−	−	−	−
86	000483-75-0	−	−	0.89±1.54	−	0.29±0.50	−	−	−	−	−
87	016982-00-6	−	−	0.78±1.35	−	−	2.73±0.41	−	−	2.63±0.19	−

表 3（续）

序号	CAS	相对含量/(mg·mL^{-1})									
		1O	1P	1β	3O	3P	3β	5O	5P	5β	YO
88	020085-85-2	−	−	1.57±1.37	−	−	1.11±1.93	−	−	−	−
89	022567-17-5	−	−	2.67±4.62	−	−	−	−	−	−	−
90	006902-91-6	−	−	0.36±0.32	−	−	−	−	−	−	−
91	081944-08-3	−	−	0.47±0.81	−	−	−	−	−	−	−
92	007785-53-7	−	−	0.47±0.82	−	−	0.92±0.81	−	−	−	−
93	029837-12-5	−	−	0.84±1.45	−	−	−	−	−	−	−
94	000489-39-4	−	−	0.29±0.50	−	−	−	−	−	−	−
95	054274-73-6	−	−	−	0.17±0.29	0.15±0.26	−	−	−	−	−
96	000464-17-5	−	−	−	0.13±0.22	−	−	0.13±0.22	−	−	−
97	000523-47-7	−	−	−	0.57±0.98	0.62±1.07	−	1.18±1.03	0.76±1.31	−	−
98	020126-76-5	−	−	−	0.24±0.42	−	−	−	−	−	−
99	058893-88-2	−	−	−	0.29±0.51	−	−	−	−	0.31±0.54	−
100	000489-40-7	−	−	−	0.72±1.25	1.28±1.13	−	0.76±1.31	0.71±1.24	−	−
101	157477-72-0	−	−	−	−	0.17±0.29	−	−	−	−	−
102	997220-41-0	−	−	−	−	0.28±0.49	−	0.28±0.49	−	−	−
103	997220-91-2	−	−	−	−	−	0.83±1.44	−	−	−	−
104	004677-90-1	−	−	−	−	−	0.34±0.59	−	−	−	−
105	003466-15-7	−	−	−	−	−	0.72±0.68	−	−	−	−
106	000473-08-5	−	−	−	−	−	0.12±0.21	−	−	−	−
107	005989-27-5	−	−	−	−	−	−	0.27±0.23	−	−	−
108	000619-62-5	−	−	−	−	−	−	0.24±0.21	0.22±0.19	−	0.18±0.31
109	997220-96-6	−	−	−	−	−	−	0.90±1.56	−	−	−
110	031983-22-9	−	−	−	−	−	−	0.92±1.60	−	−	−
111	001117-61-9	−	−	−	−	−	−	−	0.16±0.28	−	0.14±0.24
112	041702-63-0	−	−	−	−	−	−	−	0.41±0.70	0.42±0.73	−
113	086000-71-7	−	−	−	−	−	−	−	0.25±0.43	−	−
114	002792-39-4	−	−	−	−	−	−	−	−	0.08±0.14	−
115	000079-92-5	−	−	−	−	−	−	−	−	−	0.14±0.12
116	000080-56-8	−	−	−	−	−	−	−	−	−	0.78±0.68
117	013466-78-9	−	−	−	−	−	−	−	−	−	0.28±0.49
118	000099-85-4	−	−	−	−	−	−	−	−	−	0.13±0.11
119	005794-04-7	−	−	−	−	−	−	−	−	−	0.09±0.15

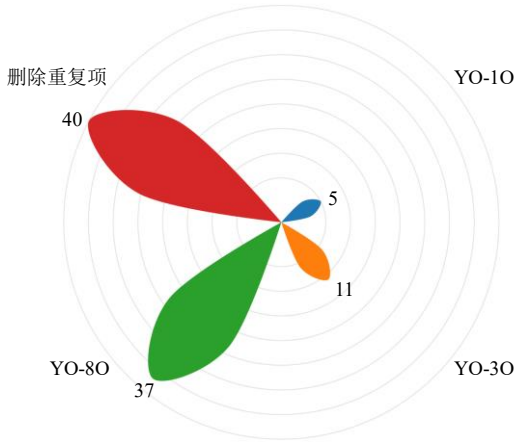
1O、1P、1β、3O、3P、3β、5O、5P、5β-强光照射 1、3、5 d 后 VAA 组、Pickering 乳组、β-环糊精包合物组；YO-未经处理的 VAA 组；“−”未检出；表 4、5 和图 12、14～16 同。

1O, 1P, 1β, 3O, 3P, 3β, 5O, 5P, 5β-mixed VAA group, Pickering emulsion group, and β-cyclodextrin inclusion compound group after strong light irradiation for 1, 3, 5 days; YO-untreated VAA group; “–” not detected; same as tables 4, 5 and figures 12, 14—16.

2.5 强光照射环境下 VAA 量变差异成分分析

2.5.1 强光照射环境下 VAA 差异成分的选取 采用 *t* 检验，筛选强光照射环境下 VAA 量变差异成分，采用 pheatmap 包[19]绘制 VAA 量变差异成分特征图谱，采用 ggbiplot[20]包绘制 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组中 VAA 量变差异成分的主成分分析（principal component analysis，PCA）图。采用 *t* 检验，筛选此环境下的差异成分，由图 11 可知，未经处理的 VAA 与强光照射 1 d 相比，有 5 个差异成分（$P<0.05$）；未经处理的 VAA 与强光照射 3 d 相比，有 11 个差异成分（$P<0.05$）；未经处理的 VAA 与强光照射 5 d 相比，有 37 个差异成分（$P<0.05$），删除重复成分后共有 40 个差异成分。

采用 pheatmap 包[18]绘制 40 个差异成分特征图谱，如图 12 所示，不同强光照射环境下各组聚类结果可知，可将 9 个组别分为 3 类：①强光照射 1 d



YO-1O、YO-3O、YO-8O 表示未经处理的 VAA 与强光照射 VAA 1, 3, 5 d 后比较的差异成分。

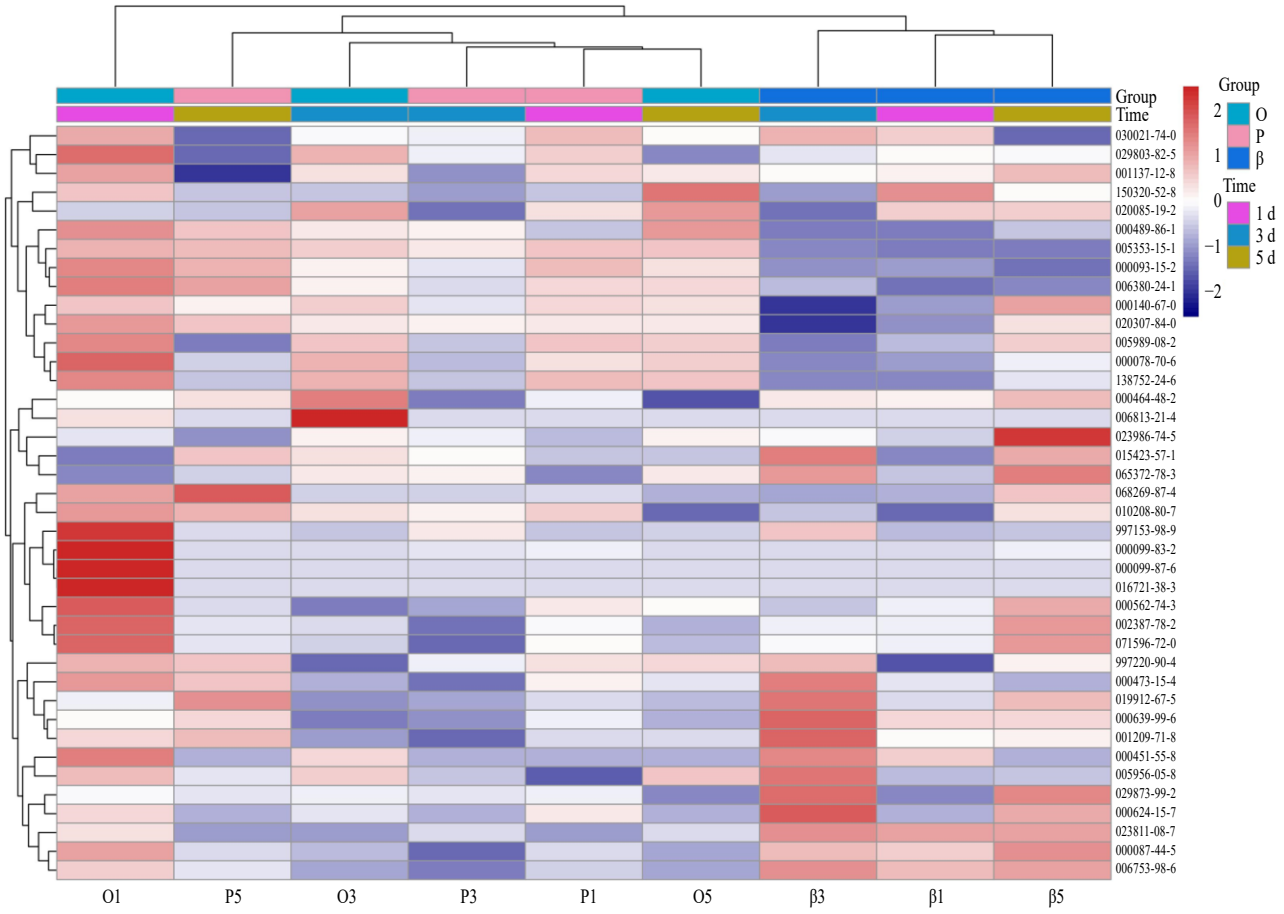
YO-1O, YO-3O, YO-8O represent the difference components between untreated VAA and VAA irradiated by strong light for 1, 3, 5 d.

图 11　光照环境下各时间段柱状图

Fig. 11　Histogram of each time period under light environment

VAA 组；②强光照射 5 d Pickering 乳组、强光照射 3 d VAA 组、强光照射 3 d Pickering 乳组、光照射 1 d Pickering 乳组、强光照射 5 d VAA 组；③强光照射 3 d β-环糊精包合 VAA 组、强光照射 1 d β-环糊精包合 VAA 组、强光照射 5 d β-环糊精包合 VAA 组。

从挥发性成分聚类结果可知，特征成分可分为 5 类：①α-葎草烯（α-caryophyllene，CAS 号 006753-98-6）、反式石竹烯［(−)-beta-caryophyllene，CAS 号 000087-44-5］、β-桉叶醇（β-eudesmol，CAS 号 000473-15-4）等；②香附子烯（cyperene，CAS 号 002387-78-2）、4-萜烯醇（terpinen-4-ol，CAS 号 000562-74-3）、水芹烯（*p*-mentha-1,5-diene，CAS 号 000099-83-2）等；③大根香叶烯 B（germacrene B，CAS 号 015423-57-1）、左旋樟脑［(−)-camphor，CAS 号 000464-48-2］、selina-3,7(11)-diene（CAS 号 006813-21-4）等；④芳樟醇（linalool，CAS 号 000078-70-6）、长叶蒎烯［(+)-α-longipinene，CAS 号 005989-



O-VAA 组；P-Pickering 乳组；β-β-环糊精包合物组；图 13 同。

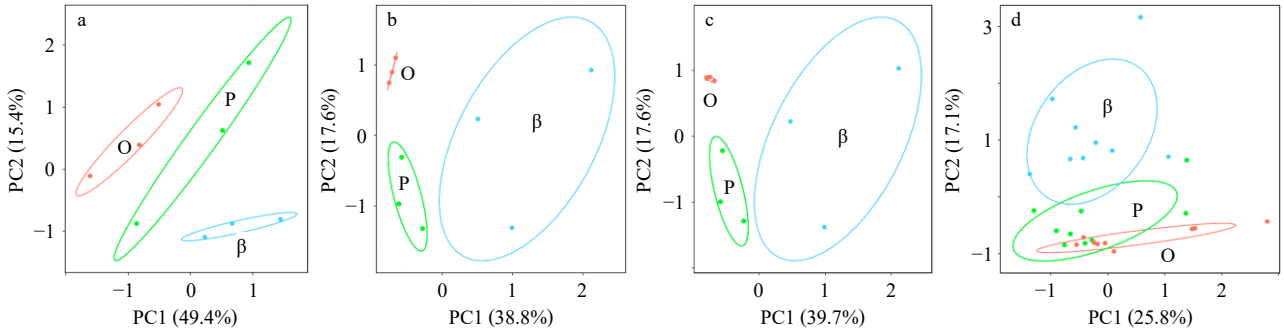
O-VAA group; P-Pickering emulsion group; β-β-cyclodextrin inclusion compound group; same as figure 13.

图 12　40 个差异成分热图

Fig. 12　Selection of differential components in light environment

08-2]、草茴香脑（4-allylanisole，CAS 号 000140-67-0）等；⑤γ-muurolene（CAS 号 030021-74-0）、顺式-4-(异丙基)-1-甲基环己-2-烯-1-醇［*cis*-4-(isopropyl)-1-methylcyclohex-2-en-1-ol，CAS 号 029803-82-5］、(+)-长叶环烯[(+)-longicyclene，CAS 号 001137-12-8]。

采用 ggbiplot[19]包绘制 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组 40 个差异成分 PCA 图。由图 13 可知，在（4 500±500）lx 强光照射 1、3、5 d 环境下，各组能够明显分离，提示 β-环糊精包合 VAA 组、Pickering 乳组与 VAA 组差异明显。VAA 组与 Pickering 乳组，随着强光照射时间的延长逐渐聚集。β-环糊精包合 VAA 组，随着强光照射时间的延长逐渐离散。提示，随着强光照射时间的延长，差异成分在各组间的差异愈加明显。



a～c-强光照射 1、3、5 d 各组别差异成分 PCA 图；d-强光照射环境下各组别差异成分 PCA 总图。

a—c-PCA plots of the different components of each group in 1, 3, 5 d of light; d-total PCA plots of the different components of each group in the light environment.

图 13　强光照射环境下差异成分 PCA 图

Fig. 13　PCA plot of differential components under strong light environment

2.5.2　强光照射环境下 VAA 量变差异成分分析如表 4 所示，随着强光照射处理时间的延长，VAA 组中部分差异成分相对含量呈上升趋势，如 020085-19-2、023986-74-5、065372-78-3、150320-52-8。但这些成分在 Pickering 乳组中的趋势都更为稳定，表明 Pickering 乳可以减缓上述 4 种挥发性成分在强光照射处理过程中相对含量上升的趋势；VAA 中 005353-15-1、029873-99-2、997220-90-4 的相对含量随强光照射处理时间延长逐渐减少，这种减少趋势在 Pickering 乳组中得到减缓，差异成分 000078-70-6、000087-44-5、000093-15-2、000464-48-2、000473-15-4、000562-74-3、000639-99-6、001209-71-8、002387-78-2、006380-24-1、006753-98-6、010208-80-7、020307-84-0、029803-82-5、068269-87-4、071596-72-0 减少的趋势在 Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组中都得到了减缓。这其中 000639-99-6、006753-98-6、023811-08-7、000087-44-5、000624-15-7、002387-78-2、029873-99-2 和 071596-72-0 共 8 种差异成分在 β-环糊精包合 VAA 组中的相对含量整体高于 VAA 组。

综上所述，VAA 中挥发性成分相对含量随强光照射处理时间延长表现出升高和降低的趋势，而 Pickering 乳和 β-环糊精包合对 VAA 的保护效果显著，能有效减缓大部分挥发性成分随强光照射时间延长而升高和减少的趋势。

2.6　强光照射环境下 VAA 质变差异成分分析

2.6.1　强光照射环境下 VAA 质变差异成分的选取　采用 OmicShare 在线平台绘制 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组强光照射环境下 Upset 韦恩图，左侧水平柱子表示各集合拥有的成分数量，图形下方矩阵中的单个点表示统计某个集合特有的成分，点和点之间的连线表示统计相连集合的交集，上方竖直柱子表示统计的特有或交集的成分数量。

由图 14-a 可知，强光照射 1 d 后，与未处理的 VAA 相比，VAA 组新生成了 12 个成分、Pickering 乳组新生成了 8 个成分、β-环糊精包合 VAA 组新生成了 27 个成分，VAA 组消失了 15 个成分、Pickering 乳组消失了 12 个成分、β-环糊精包合 VAA 组消失了 22 个成分。未经强光照射处理的 VAA 组、VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组仍有 39 个共有成分；VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组仅有 2 个共有成分；提示 Pickering 乳组能够在一定程度上延缓因强光照射环境变化而导致 VAA 组成成分的改变。

由图 14-b 可知，强光照射 3 d 后，与未处理的 VAA 相比，VAA 组新生成了 13 个成分、Pickering 乳组新生成了 10 个成分、β-环糊精包合 VAA 组新生成了 19 个成分，VAA 组消失了 14 个成分、Pickering

表 4 强光照射环境下各组别差异成分含量信息

Table 4 Information of the content of different components in each group under strong light irradiation conditions

CAS	相对含量/(mg·mL^{-1})								
	1O	1P	1β	3O	3P	3β	5O	5P	5β
000099-83-2	1.02±0.05	0.10±0.17	−	−	0.05±0.08	−	−	−	0.08±0.14
000099-87-6	0.52±0.46	−	−	−	−	−	−	−	−
000078-70-6	2.97±0.23	1.97±0.80	1.03±0.21	2.32±0.06	1.21±0.33	0.84±0.30	2.09±0.03	1.37±0.29	1.59±0.65
029803-82-5	0.51±0.03	0.36±0.12	0.28±0.02	0.40±0.00	0.27±0.06	0.25±0.07	0.12±0.21	0.08±0.14	0.28±0.25
000464-48-2	1.50±1.31	1.39±1.33	1.55±1.35	2.16±0.02	0.89±0.81	1.59±1.46	0.67±1.17	1.62±0.31	1.86±1.64
000562-74-3	0.92±0.06	0.70±0.19	0.64±0.03	0.49±0.42	0.55±0.08	0.60±0.12	0.68±0.01	0.62±0.11	0.80±0.15
000140-67-0	1.75±0.30	1.68±0.40	1.03±0.90	1.71±0.02	1.35±0.13	0.55±0.96	1.63±0.03	1.56±0.24	1.96±0.44
016721-38-3	0.36±0.32	−	−	−	−	−	−	−	−
138752-24-6	0.31±0.02	0.24±0.05	−	0.24±0.01	0.07±0.12	−	0.22±0.00	0.07±0.12	0.10±0.18
020307-84-0	0.38±0.02	0.29±0.06	0.18±0.15	0.30±0.01	0.29±0.30	0.09±0.15	0.30±0.01	0.34±0.38	0.31±0.07
005989-08-2	0.49±0.04	0.38±0.07	0.21±0.18	0.39±0.01	0.21±0.18	0.11±0.18	0.37±0.01	0.12±0.21	0.36±0.07
001137-12-8	1.17±0.09	0.98±0.17	0.89±0.13	0.96±0.02	0.55±0.48	0.88±0.12	0.92±0.02	0.30±0.52	1.06±0.20
068269-87-4	2.55±0.18	2.18±0.36	2.08±0.27	2.14±0.02	2.15±0.53	2.05±0.27	2.08±0.05	2.75±0.73	2.43±0.40
000093-15-2	41.26±3.04	38.43±5.32	29.90±2.55	35.18±2.22	33.29±1.76	29.42±3.96	36.42±2.15	38.72±5.44	27.93±1.48
002387-78-2	0.40±0.03	0.34±0.05	0.33±0.04	0.33±0.01	0.29±0.02	0.33±0.04	0.31±0.01	0.33±0.06	0.38±0.06
071596-72-0	3.70±0.27	3.24±0.49	3.19±0.30	3.12±0.04	2.82±0.16	3.23±0.38	3.06±0.06	3.16±0.44	3.54±0.44
000087-44-5	4.12±0.29	3.60±0.48	3.92±0.32	3.45±0.04	3.16±0.16	4.01±0.48	3.41±0.07	3.56±0.52	4.18±0.44
029873-99-2	0.16±0.28	0.15±0.26	−	0.15±0.25	0.13±0.22	0.40±0.35	−	0.13±0.23	0.36±0.31
006380-24-1	14.00±1.05	12.83±1.62	10.69±0.33	12.45±0.13	11.92±0.21	11.59±1.73	12.87±0.25	13.53±1.65	10.92±0.64
006753-98-6	1.18±0.08	1.04±0.12	1.21±0.08	1.00±0.02	0.93±0.05	1.27±0.16	0.99±0.02	1.07±0.17	1.25±0.11
150320-52-8	0.64±0.04	0.17±0.30	0.93±1.61	0.17±0.29	−	−	1.03±1.36	0.17±0.29	0.40±0.35
000451-55-8	3.08±0.22	−	1.81±1.57	1.76±1.53	−	2.96±0.43	−	−	−
023986-74-5	0.64±0.04	0.56±0.07	0.60±0.03	0.70±0.28	0.64±0.56	0.67±0.09	0.69±0.59	0.51±0.50	1.02±0.30
010208-80-7	2.98±0.21	2.72±0.34	1.82±1.58	2.62±0.07	2.53±0.14	2.22±0.73	1.80±1.55	2.83±0.40	2.64±0.18
000639-99-6	23.78±1.72	23.34±2.96	24.38±1.10	21.46±0.27	21.76±0.11	26.73±4.24	22.35±0.46	24.41±2.95	24.48±1.15
015423-57-1	0.79±0.46	0.99±0.54	0.82±0.51	1.25±0.01	1.16±0.06	1.53±0.23	0.98±0.52	1.32±0.21	1.40±0.10
005353-15-1	66.58±5.21	62.21±8.00	30.20±1.01	60.68±0.68	56.14±3.73	32.99±5.66	62.89±1.04	64.53±6.96	30.23±1.64
000489-86-1	0.72±0.05	0.20±0.35	−	0.43±0.37	0.40±0.35	−	0.67±0.02	0.53±0.49	0.20±0.35
019912-67-5	1.31±0.08	1.27±0.15	1.27±0.05	1.17±0.02	1.19±0.04	1.59±0.30	1.23±0.01	1.53±0.48	1.45±0.21
001209-71-8	31.51±2.31	29.91±3.79	30.71±1.27	28.78±0.34	27.98±0.17	33.89±5.37	30.06±0.65	31.96±4.06	30.95±1.80
023811-08-7	82.26±3.41	−	123.14±5.30	−	37.72±65.34	134.02±21.89	39.29±68.05	−	122.03±5.40
000473-15-4	192.21±14.33	181.84±23.38	177.69±7.96	172.42±2.34	166.17±3.72	195.03±31.18	177.97±3.39	186.40±21.26	172.30±6.95
997220-90-4	9.30±0.67	8.55±1.09	5.66±4.90	5.87±4.43	7.86±0.22	9.17±1.48	8.69±0.18	9.05±1.10	8.20±0.44
005956-05-8	5.60±4.86	−	2.30±3.99	5.26±4.55	2.57±4.45	7.69±1.14	5.53±4.79	3.29±5.69	2.41±4.17
030021-74-0	4.31±0.32	3.99±0.50	3.57±0.17	2.58±2.23	2.36±2.05	4.13±0.58	2.63±2.28	−	−
997153-98-9	21.53±1.99	0.85±0.16	0.43±0.37	1.10±0.06	7.00±9.61	10.06±8.28	1.61±0.10	2.52±0.23	0.86±0.07
000624-15-7	0.44±0.38	0.34±0.29	−	0.17±0.29	−	0.88±0.12	−	−	0.59±0.51
020085-19-2	0.34±0.59	0.68±0.59	0.72±0.62	0.93±0.01	−	−	0.96±0.02	0.31±0.54	0.73±0.63
006813-21-4	0.19±0.33	−	−	0.68±1.17	−	−	−	−	−
065372-78-3	−	−	0.93±1.61	2.04±1.77	1.82±1.59	3.21±0.41	2.00±1.73	1.01±1.75	3.67±0.55

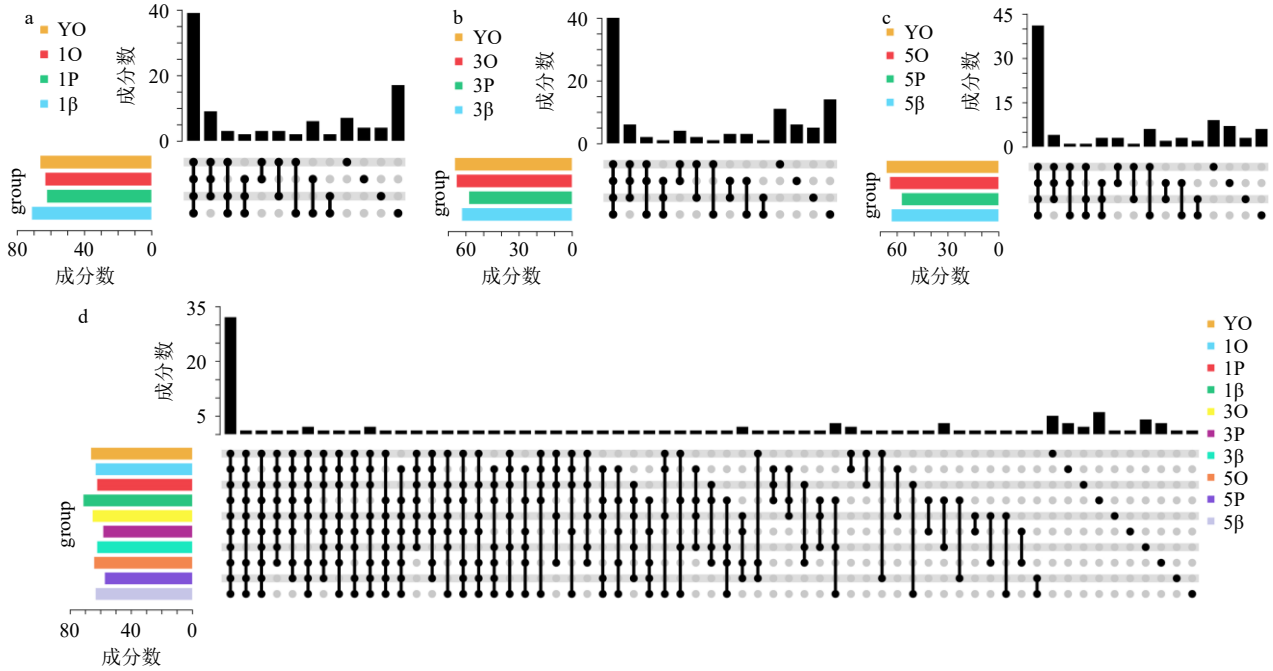
乳组消失了 18 个成分、β-环糊精包合 VAA 组消失了 23 个成分。未经强光照射处理的 VAA 组、VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组仍有 40 个共有成分；VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组，仅有 1 个共有成分；提示 Pickering 乳组能够在一定程度上延缓因强光照射环境变化而

导致 VAA 新生成成分增加的趋势，但 Pickering 乳组消失成分较 VAA 组多，分析原因可能是随着强光照射时间的延长，其延缓作用逐渐减弱，加之对强光照射 1 d 后所延缓的消失成分进一步处理，进而导致其增加，分析随着强光照射时间的延长，其消失成分会逐渐增多。

由图 14-c 可知，强光照射 5 d 后，与未处理的 VAA 相比，VAA 组新生成了 15 个成分、Pickering 乳组新生成了 10 个成分、β-环糊精包合 VAA 组新生成了 14 个成分，VAA 组消失了 17 个成分、Pickering 乳组消失了 19 个成分、β-环糊精包合 VAA 组消失了 17 个成分。未经强光照射处理的 VAA 组、VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组仍有 41 个共有成分，VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组仅有 3 个共有成分。

由图 14-d 可知，未处理的 VAA 与各组强光照射 1、3、5 d 环境下，仍有 32 个共有成分；各组强光照射 1、3、5 d 条件下，无共有成分，VAA 中特有 5 个成分。光照 1 d，混合油组特有 3 个成分、Pickering 乳组中特有 2 个成分、β-环糊精包合 VAA 组中特有 6 个成分；强光照射 3 d，VAA 组特有 1 个成分、Pickering 乳组中特有 1 个成分、β-环糊精包合 VAA 组中特有 4 个成分。强光照射 5 d，VAA 组特有 3 个成分、Pickering 乳组中特有 1 个成分、β-环糊精包合 VAA 组中特有 1 个成分。

总之，强光照射 1 d 后，Pickering 乳组能够有效延缓因强光照射环境变化而导致 VAA 组成成分的改变；强光照射 3、5 d 后，Pickering 乳能够一定程度上减缓新生成成分的增加，但减缓成分的消失效果次之。



a～c-强光照射 1、3、5 d 各组 Upset 图；d-强光照射环境下各组 Upset 总图。

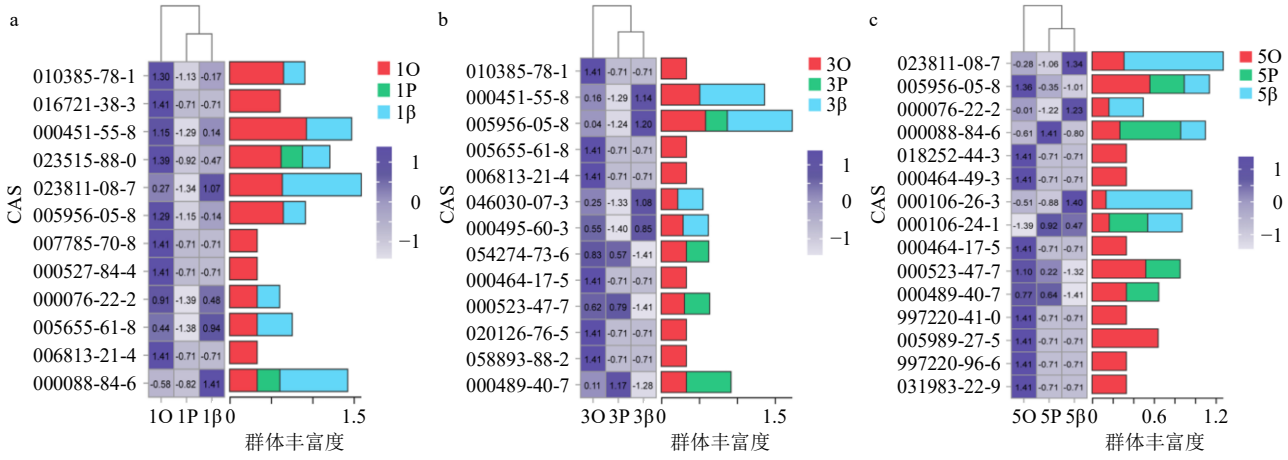
a—c-Upset plots of each group for 1, 3 5 d of light; d-total Upset plots of each group in light environments.

图 14 强光照射环境下各组别 Upset 韦恩图

Fig. 14 Upset Wayne plots for each group under strong light environment

2.6.2 强光照射环境下 VAA 新生成质变差异成分分析 采用 OmicShare 在线平台绘制 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组强光照射环境下新生成成分热图堆叠图，热图横向为样本及分组，纵向为成分，热图中每个方格颜色表示成分在样本中的丰度；堆叠图横坐标表示成分分组丰度，纵向为成分，柱子颜色表示不同分组，柱子高度表示成分在各组中丰度大小。

由图 15-a 可知，在强光照射 1 d 后，在 VAA 组中共新生成 12 个差异成分，分别是 010385-78-1、016721-38-3、000451-55-8、023515-88-0、023811-08-7、005956-05-8、007785-70-8、000527-84-4、000076-22-2、005655-61-8、006813-21-4 和 000088-84-6。经过整理，Pickering 乳组阻止了 010385-78-1、016721-38-3、000451-55-8、023811-08-7、005956-05-8、007785-70-8、000527-84-4、000076-22-2、005655-



a～c-1、3、5 d VAA 新生成成分各组热图堆叠图。

a—c-stacked thermograms of each group of newly generated compounds from 1, 3, 5 d of VAA.

图 15　强光照射环境下各组别新生成成分热图堆叠图

Fig. 15　Stacked thermograms of newly generated compounds in each group under strong light environment

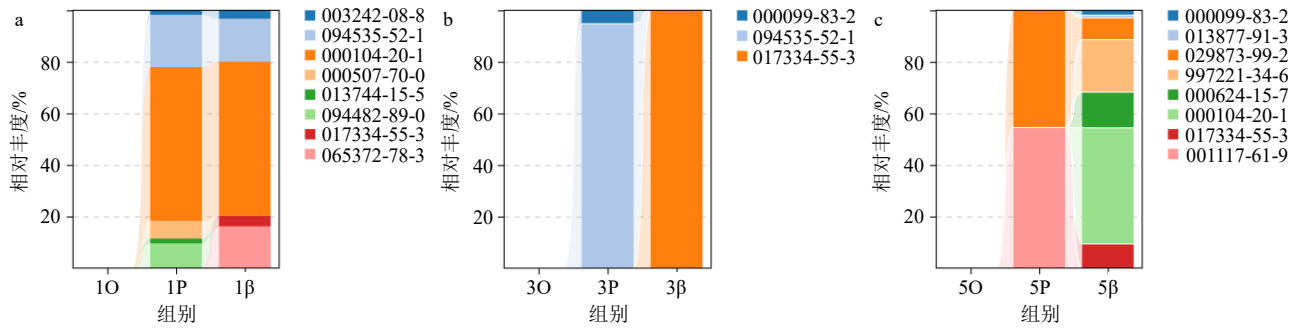
61-8 和 006813-21-4 共 10 种差异成分的新生成，降低了 023515-88-0、000088-84-6 共 2 种新生成差异成分的相对含量；β-环糊精包合 VAA 组阻止了 016721-38-3、007785-70-8、000527-84-4、006813-21-4 共 4 种差异成分的新生成，降低了 010385-78-1、000451-55-8、023515-88-0、005956-05-8 和 000076-22-2 共 5 种新生成差异成分的相对含量。

由图 15-b 可知，在强光照射 3 d 后，在 VAA 组中共新生成 13 个差异成分，分别是 010385-78-1、000451-55-8、005956-05-8、005655-61-8、006813-21-4、046030-07-3、000495-60-3、054274-73-6、000464-17-5、000523-47-7、020126-76-5、058893-88-2 和 000489-40-7。经过整理，Pickering 乳组阻止了 010385-78-1、000451-55-8、005655-61-8、006813-21-4、046030-07-3、000495-60-3、000464-17-5、020126-76-5 和 058893-88-2 共 9 种差异成分的新生成，降低了 005956-05-8、054274-73-6 共 2 种新生成差异成分的相对含量；β-环糊精包合组阻止了 010385-78-1、005655-61-8、006813-21-4、054274-73-6、000464-17-5、000523-47-7、020126-76-5、058893-88-2 和 000489-40-7 共 9 种差异成分的新生成。其中，054274-73-6、000523-47-7、000489-40-7 在 VAA 组与 Pickering 乳组相对含量较高，而在 β-环糊精包合 VAA 组中不存在。

由图 15-c 可知，在强光照射 5 d 后，在 VAA 组中共新生成 15 个差异成分，分别是 023811-08-7、005956-05-8、000076-22-2、000088-84-6、018252-44-3、000464-49-3、000106-26-3、000106-24-1、000464-17-5、000523-47-7、000489-40-7、997220-41-0、005989-27-5、997220-96-6 和 031983-22-9。经过整理，Pickering 乳组阻止了 023811-08-7、000076-22-2、018252-44-3、000464-49-3、000106-26-3、000464-17-5、997220-41-0、005989-27-5、997220-96-6 和 031983-22-9 共 10 种差异成分的新生成，降低了 005956-05-8、000523-47-7、000489-40-7 共 3 种新生成差异成分的相对含量；β-环糊精包合 VAA 组阻止了 018252-44-3、000464-49-3、000464-17-5、000523-47-7、000489-40-7、997220-41-0、005989-27-5、997220-96-6 和 031983-22-9 共 9 种差异成分的新生成，降低了 005956-05-8、000088-84-6 共 2 种新生成差异成分的相对含量。

总体而言，在强光照射处理 1、3、5 d 后，Pickering 乳液和 β-环糊精包合都能够在一定程度上杜绝（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 中部分新生成差异组分的生成、延缓因强光照射环境变化而导致 VAA 新生成成分相对含量变化的趋势，其中 Pickering 乳液优势明显，β-环糊精包合次之。

2.6.3　强光照射环境下 VAA 消失质变差异成分分析　采用 OmicShare 在线平台绘制 VAA 组、β-环糊精包合 VAA 组与 Pickering 乳组强光照射环境下消失成分堆叠连线图。横向为样本及分组，纵向表示成分及丰度，柱子颜色表示不同成分，柱子高度表示成分在各组的丰度大小。由图 16-a 可知，在强光照射 1 d 后，消失成分 003242-08-8、094535-52-1、000104-20-1 在 Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组中都能够得到有效保存。消失成分 000507-70-0、



a～c-强光照射 1、3、5 d VAA 消失成分堆叠连线图。

a—c-stacked line graph of compounds disappearing from VAA in 1, 3, 5 d of light.

图 16　强光照射环境下各组别消失成分堆叠连线图

Fig. 16　Stacked line diagrams of vanishing compounds in each group under strong light environment

013744-15-5、094482-89-0 在 Pickering 乳组能够得到有效保存。消失成分 017334-55-3、065372-78-3 在 β-环糊精包合 VAA 组能够得到有效保存。

由图 16-b 可知，在强光照射 3 d 后，消失成分 000099-83-2、094535-52-1 在 Pickering 乳组能够得到有效保存。消失成分 017334-55-3 在 β-环糊精包合 VAA 组能够得到有效保存。

由图 16-c 可知，在强光照射 5 d 后，消失成分 029873-99-2 在 Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组都能够得到有效保存。消失成分 001117-61-9 在 Pickering 乳组能够得到有效保存。消失成分 000099-83-2、013877-91-3、029873-99-2、997221-34-6、000624-15-7、000104-20-1、017334-55-3 在 β-环糊精包合 VAA 组能够得到有效保存。

综上所述，可分析得到在强光照射处理 1、3、5 d 后，Pickering 乳液和 β-环糊精包合都能够在一定程度上阻止（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 中部分成分的消失。且强光照射处理 1、3 d 后，Pickering 乳液对消失成分的保存比 β-环糊精包合 VAA 更具优势，但强光照射处理 5 d 后，β-环糊精包合 VAA 的保留效果更佳。

2.6.4　强光照射环境下 VAA 主要成分成分分析　石菖蒲主要成分有 α-细辛醚（CAS 号 002883-98-9）、β-细辛醚（CAS 号 005273-86-9）、γ-细辛醚（CAS 号 005353-15-1）、甲基丁香酚（CAS 号 000093-15-2）、芳樟醇（CAS 号 000078-70-6）、顺式甲基异丁香油酚（CAS 号 006380-24-1）、δ-荜橙茄烯（CAS 号 000483-76-1）、石竹烯（CAS 号 000087-44-5）、α-葎草烯（CAS 号 006753-98-6）等，苍术主要成分有 β-桉叶醇（CAS 号 000473-15-4）、茅苍术醇（CAS 号 023811-08-7）等。由表 5 可知，与 VAA 组相比，主要成分 000078-70-6、000087-44-5、006380-24-1、006753-98-6、005353-15-1、000473-15-4 在 Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组中的下降趋势都得到

表 5　强光照射环境下各组别主要成分含量信息

Table 5　Content information of main components in each group under strong light exposure

CAS	相对含量/(mg·mL^{-1})								
	1O	1P	1β	3O	3P	3β	5O	5P	5β
000078-70-6	2.97±0.23	1.97±0.80	1.03±0.21	2.32±0.06	1.21±0.33	0.84±0.30	2.09±0.03	1.37±0.29	1.59±0.65
000093-15-2	41.26±3.04	38.43±5.32	29.90±2.55	35.18±2.22	33.29±1.76	29.42±3.96	36.42±2.15	38.72±5.44	27.93±1.48
000087-44-5	4.12±0.29	3.60±0.48	3.92±0.32	3.45±0.04	3.16±0.16	4.01±0.48	3.41±0.07	3.56±0.52	4.18±0.44
006380-24-1	14.00±1.05	12.83±1.62	10.69±0.33	12.45±0.13	11.92±0.21	11.59±1.73	12.87±0.25	13.53±1.65	10.92±0.64
006753-98-6	1.18±0.08	1.04±0.12	1.21±0.08	1.00±0.02	0.93±0.05	1.27±0.16	0.99±0.02	1.07±0.17	1.25±0.11
000483-76-1	1.96±0.13	1.80±0.21	6.59±3.68	1.72±0.02	1.71±0.13	9.62±1.56	1.79±0.04	1.92±0.31	9.00±0.49
005353-15-1	66.58±5.21	62.21±8.00	30.20±1.01	60.68±0.68	56.14±3.73	32.99±5.66	62.89±1.04	64.53±6.96	30.23±1.64
002883-98-9	68.10±5.12	61.94±7.48	33.34±1.04	62.35±079	56.08±6.50	38.61±9.28	65.01±1.32	63.33±6.18	34.27±1.54
023811-08-7	82.26±71.32	0.00±0.00	123.14±5.30	0.00±0.00	37.72±65.34	134.02±21.89	39.29±68.05	0.00±0.00	122.03±5.40
000473-15-4	192.21±14.33	181.84±23.38	177.69±7.69	172.42±2.34	166.17±3.72	195.03±31.18	177.97±3.39	186.40±21.26	172.30±6.95
005273-86-9	74.07±1.21	57.76±1.71	22.37±19.40	61.50±0.97	60.28±1.17	49.03±1.45	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00

了减缓，Pickering 乳组总体表现良好，β-环糊精包合 VAA 组次之。主要成分 000093-15-2 在 Pickering 乳组中的下降趋势得到了减缓。主要成分 023811-08-7 在 β-环糊精包合 VAA 组中的下降趋势得到了减缓。主要成分 000483-76-1 在 Pickering 乳组与 β-环糊精包合 VAA 组中的上升趋势得到了减缓，β-环糊精包合 VAA 组表现良好，Pickering 乳组次之。结果分析表明，Pickering 乳液和 β-环糊精包合 VAA 都能够在一定程度上延缓（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 中部分主要组分相对含量的波动，其中 Pickering 乳液稳定，β-环糊精包合 VAA 次之。

2.7 统计学分析

本研究采用 SPSS 软件对实验数据进行分析，结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用两独立样本的等方差 t 检验，设定显著性水平为 P 值小于 0.05，以筛选差异组分。统计结果以 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

3 讨论

中药挥发油药理活性显著[21]，但由于其较易发生氧化与挥发反应，使得其制剂的稳定性较差[22]。研究表明，光、氧、热和水分等是引起挥发油氧化变质的主要因素，光照会导致挥发油中某些成分的分解、氧化或降解，使其香气、活性或功效发生变化。较强的光照可以加速挥发油分子的蒸发速率，使其更快地散发出来，使其寿命变短。从而对挥发油的成分、挥发速率和稳定性产生影响[23-24]。

（4 500±500）lx 的强光照射条件下，VAA 随着光照时间的延长，过氧化物含量逐渐升高。强光照射 1、3、5 d 后，与 VAA 相比，β-环糊精包合 VAA 与 Pickering 乳处理的 VAA，其过氧化物含量显著降低（$P<0.01$），β-环糊精包合 VAA 与 Pickering 乳无显著性差异（$P>0.05$）。强光照射 1、3 d 后，与 VAA 相比，β-环糊精包合 VAA 与 Pickering 乳处理的 VAA，其保有率显著提高（$P<0.01$）。强光照射 5 d 后，与 VAA 相比，β-环糊精包合处理的 VAA，其保有率提高（$P<0.05$）。

GC-MS 分析结果表明，Pickering 乳与 β-环糊精包合能够在一定程度上延缓（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 组中大部分差异成分升高或降低的趋势。Pickering 乳与 β-环糊精包合能够在一定程度上杜绝（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 中部分差异成分的新生成、延缓因强光照射环境变化而导致 VAA 中新生成成分相对含量变化的趋势，其中 Pickering 乳优势明显，β-环糊精次之。Pickering 乳与 β-环糊精包合能够在一定程度上阻止（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 组中部分成分的消失，其中 β-环糊精包合优势明显，Pickering 乳次之。Pickering 乳与 β-环糊精包合能够在一定程度上延缓（4 500±500）lx 强光照射环境下 VAA 中部分主要成分的损失，其中 Pickering 乳稳定，β-环糊精次之。

本研究对比分析了 VAA、Pickering 乳与 β-环糊精包合物，在（4 500±500）lx 强光照射环境下挥发油保有率、过氧化物含量、差异成分、量变成分、质变成分、主要成分的变化趋势，阐述了 Pickering 乳与 β-环糊精包合稳定 VAA 各自的优势。总之，通过强光照射下稳定性考察以及成分分析，进一步说明了 Pickering 乳与 β-环糊精包合技术能够提升 VAA 的稳定性，为其品质的提升提供了一定的参考价值，并为含挥发油中药固体制剂的质量提升提供参考。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Tamang R, Munda S, Darnei R L, *et al*. Genetic diversity evaluation of core collection gene bank using simple sequence repeat marker of *Acorus calamus* L.: An important aromatic species [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 204: 117292.

[2] Qamar M, Ahmad N, Ismail T, *et al*. Medicinal uses, phytochemistry, and pharmacological properties of *Acorus calamus* [A] // *Aquatic Medicinal Plants* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2023: 89-106.

[3] Rajput S B, Tonge M B, Karuppayil S M. An overview on traditional uses and pharmacological profile of *Acorus calamus* Linn. (Sweet flag) and other *Acorus* species [J]. *Phytomedicine*, 2014, 21(3): 268-276.

[4] Wu J X, Hu J P, Yu H W, *et al*. Full-length transcriptome analysis of two chemotype and functional characterization of genes related to sesquiterpene biosynthesis in *Atractylodes lancea* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 225: 1543-1554.

[5] Zhang Z X, Ding R P, Zhang Y Y, *et al*. The phenotypic variation mechanisms of *Atractylodes lancea* post-cultivation revealed by conjoint analysis of rhizomic transcriptome and metabolome [J]. *Plant Physiol Biochem,* 2023, 203: 108025.

[6] Koonrungsesomboon N, Na-Bangchang K, Karbwang J. Therapeutic potential and pharmacological activities of *Atractylodes lancea* (Thunb.) DC. [J]. *Asian Pac J Trop Med,* 2014, 7(6): 421-428.

[7] Pacheco F, Avelar R P, Alvarenga I C A, *et al*. Essential oil

of monkey-pepper (*Piper aduncum* L.) cultivated under different light environments [J]. *Ind Crops Prod,* 2016, 85: 251-257.

[8] Xu W, Ning Y L, Wang M Y, *et al*. Construction of astaxanthin loaded Pickering emulsions gel stabilized by xanthan gum/lysozyme nanoparticles with konjac glucomannan from structure, protection and gastrointestinal digestion perspective [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 252: 126421.

[9] Li H Y, Zhang X L, Wang Q Q, *et al*. Pickering emulsion enhanced interfacial catalysis under Taylor flow in a microchannel reactor [J]. *Chem Eng J,* 2023, 466: 143258.

[10] Hazt B, Pereira Parchen G, Fernanda Martins do Amaral L, *et al*. Unconventional and conventional Pickering emulsions: Perspectives and challenges in skin applications [J]. *Int J Pharm,* 2023, 636: 122817.

[11] Zhao Q L, Fan L P, Li J W, *et al*. Pickering emulsions stabilized by biopolymer-based nanoparticles or hybrid particles for the development of food packaging films: A review [J]. *Food Hydrocoll*, 2024, 146: 109185.

[12] Zhang D, Cao G Y, Bu N T, *et al.* Multi-functional konjac glucomannan/chitosan bilayer films reinforced with oregano essential oil loaded β-cyclodextrin and anthocyanins for cheese preservation [J]. *Int J Biol Macromol,* 2023, 244: 125365.

[13] da Silva W F, dos Santos Niculau E, de Oliveira D A B, *et al*. Preparation, physicochemical characterization and computational studies of *Plectranthus ornatus* codd essential oil/β-cyclodextrin inclusion complex [J]. *J Mol Struct*, 2023, 1285: 135476.

[14] Wang F C Y, Qian K N, Green L A. GCxMS of diesel: A two-dimensional separation approach [J]. *Anal Chem*, 2005, 77(9): 2777-2785.

[15] Kharbach M, Marmouzi I, El Jemli M, *et al*. Recent advances in untargeted and targeted approaches applied in herbal-extracts and essential-oils fingerprinting - A review [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2020, 177: 112849.

[16] Honour J W. Gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Methods Mol Biol*, 2006, 324: 53-74.

[17] Thamer F H, Thamer N. Gas chromatography - Mass spectrometry (GC-MS) profiling reveals newly described bioactive compounds in *Citrullus colocynthis* (L.) seeds oil extracts [J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16861.

[18] Chen Z Y, Shi Y J, Zhang X F, *et al*. The investigation of thermal stability and GC-MS analysis of *Acorus tatarinowii* and *Atractylodes lancea* volatile oils treated by β cyclodextrin inclusion and Pickering emulsion technologies [J]. *Heliyon*, 2024, 10(5): e25909.

[19] Kolde, R. (2019) [OL]. pheatmap: Pretty Heatmaps. R package version 1.0.12. Retrieved from https://CRAN.R-project.org/package=pheatmap.

[20] Vu V Q. (2011) [OL]. ggbiplot: A ggplot2 based biplot. R package version 0.55, http://github.com/vqv/ggbiplot. 2011.

[21] Zhao J H, Quinto M, Zakia F, *et al*. Microextraction of essential oils: A review [J]. *J Chromatogr A*, 2023, 1708: 464357.

[22] da Silva B D, do Rosário D K A, Weitz D A, *et al*. Essential oil nanoemulsions: Properties, development, and application in meat and meat products [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 121: 1-13.

[23] Wang J D, Zhao F Y, Huang J L, *et al*. Application of essential oils as slow-release antimicrobial agents in food preservation: Preparation strategies, release mechanisms and application cases [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr,* 2024, 64(18): 6272-6297.

[24] Turek C, Stintzing F C. Stability of essential oils: A review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2013, 12(1): 40-53.

[责任编辑 郑礼胜]