

# 基于多指标综合加权法的独蒜兰假鳞茎加工方法研究

罗海翠<sup>1,2</sup>, 胡中会<sup>1</sup>, 黄伟<sup>1\*</sup>, 张石宝<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院昆明植物研究所 资源植物与生物技术重点实验室, 云南 昆明 650201

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 目的 通过研究杀青方式和时间、干燥方式对药用植物独蒜兰 *Pleione bulbocodioides* 假鳞茎外观、显微结构和化学成分含量的影响, 探索其最佳初加工工艺。方法 采用烘箱直接烘干(oven direct drying, OD)、煮制 10、20、30 min 后烘干(boiling for 10, 20, 30 min and then drying, B10D、B20D、B30D)、隔水蒸制 10、20、30 min 后烘干(steaming for 10, 20, 30 min and then drying, S10D、S20D、S30D) 和冷冻干燥(freeze drying, FD) 共 8 种方式处理独蒜兰假鳞茎, 测定其 2-O-葡萄糖基白及苷(dactylorhin A)、白及苷和山药素 III 的含量。通过构建 HPLC 指纹图谱, 并进行相似度分析(similarity analysis, SA)、层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA) 和主成分分析(principal component analysis, PCA) 评价加工方法对假鳞茎质量的影响。通过外观特征、组织结构及粉末显微结构观察, 评估加工方法对假鳞茎结构的影响。以 dactylorhin A、白及苷、山药素 III、醇溶性浸出物、水溶性浸出物、折干率、水分、灰分和酸不溶性灰分含量为指标, 利用熵权法、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP) 和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 综合评价不同加工方法对假鳞茎品质的影响。**结果** 8 种加工方法所得样品的 HPLC 指纹图谱相似度为 0.681~0.994。其中, FD 样品的相似度最低, 且 HCA 和 PCA 均将其单独归为一类, 其余 7 种加工方法的样品则聚为另一类。通过 HPLC 指纹图谱 24 个共有峰鉴定出 3 个共有峰, 分别为 dactylorhin A(峰 7)、白及苷(峰 9) 和山药素 III(峰 15)。TOPSIS 综合评价结果发现, S10D 处理样品的贴近度以及 dactylorhin A、白及苷和山药素 III 总含量最高。**结论** 隔水蒸制 10 min 后烘干是独蒜兰假鳞茎初加工的最优方法, 该方法有利于活性成分保留, 且工艺简便。为独蒜兰假鳞茎的规范化加工以及山慈姑药材质量标准的完善提供了重要依据。

**关键词:** 独蒜兰; 假鳞茎; 产地加工; 质量评价; 指纹图谱; 熵权法-AHP-TOPSIS; 2-O-葡萄糖基白及苷; 白及苷; 山药素 III; 层次聚类分析; 主成分分析

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)01-0073-13

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.01.009

## Study on processing methods of *Pleione bulbocodioides* pseudobulbs based on multi-index comprehensive weighting approach

LUO Haicui<sup>1,2</sup>, HU Zhonghui<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Shibao<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Economic Plants and Biotechnology, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract: Objective** To explore the optimal processing method for Dusuanlan (*Pleione bulbocodioides*) pseudobulbs, this study investigated the effects of scalding method and duration, and drying technique on their morphologies, microstructures, and chemical composition contents. **Methods** Pseudobulbs of *P. bulbocodioides* were processed using eight methods: oven direct drying (OD), boiling for 10, 20, 30 min and then drying (B10D, B20D, B30D), steaming for 10, 20, 30 min and then drying (S10D, S20D, S30D), and freeze drying (FD). The contents of 2-O-glucosylbulleyanolide (dactylorhin A), militarine, and batatasin III were quantified by HPLC. By constructing HPLC fingerprints and performing similarity analysis (SA), hierarchical cluster analysis (HCA), and principal

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1306703); 云南省重点研发计划项目(202403AC100032); 云南省重点研发计划项目(202403AC100028); 云南省兴滇英才支持计划项目(YNWR-CYJS-2020-023)

作者简介: 罗海翠(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药质量控制及植物生理生态研究。E-mail: luohaicui@mail.kib.ac.cn

\*通信作者: 张石宝(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事兰科植物生物学及植物生理生态学研究。E-mail: sbzhang@mail.kib.ac.cn

黄伟(1986—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 从事植物生理生态研究。E-mail: huangwei@mail.kib.ac.cn

component analysis (PCA), the impact of processing methods on the quality of pseudobulbs was evaluated. Structural changes were assessed through examination of macroscopic features, tissue organization, and powdered microscopic characteristics. Using dactylorhin A content, militarine content, batatasin III content, alcohol-soluble extractives, water-soluble extractives, drying rate, moisture content, total ash content, and acid-insoluble ash content as indicators, the effects of eight processing methods on the quality of pseudobulbs were comprehensively evaluated by entropy weight method, analytic hierarchy process (AHP), and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). **Results** The values for HPLC fingerprint similarity of the samples obtained from eight methods ranged from 0.681 to 0.994. The freeze-dried (FD) samples exhibited the lowest similarity and were segregated as a distinct cluster in both hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA), while the samples from other seven methods formed a separate cluster. Three common peaks were identified among the 24 common peaks in the HPLC fingerprints: dactylorhin A (peak 7), militarine (peak 9), and batatasin III (peak 15). According to TOPSIS-based comprehensive evaluation, samples steamed for 10 min followed by oven drying (S10D) showed both the highest relative closeness coefficient and the greatest total content of dactylorhin A, militarine, and batatasin III. **Conclusion** Based on comprehensive multi-index evaluation, steaming for 10 min followed by oven drying (S10D) was identified as an optimal primary processing method for *P. bulbocodioides* pseudobulbs. This method enhanced the retention of active compounds while being technically straightforward. The study establishes a critical foundation for standardizing processing of *P. bulbocodioides* pseudobulbs and refining quality standards of Shancigu (*Cremastrae Pseudobulbus Pleiones Pseudobulbus*) in pharmacopeial monographs.

**Key words:** *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe; pseudobulb; origin processing; quality evaluation; fingerprint; entropy weight method-AHP-TOPSIS; dactylorhin A; militarine; batatasin III; hierarchical cluster analysis; principal component analysis

独蒜兰 *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe 为兰科 (Orchidaceae) 独蒜兰属的多年生半附生草本植物。《中国药典》2025 年版将杜鹃兰 *Cremastra appendiculate* (D. Don) Makino、独蒜兰和云南独蒜兰 *P. yunnanensis* Rolfe 的干燥假鳞茎作为山慈姑的基原植物，其中独蒜兰和云南独蒜兰习称为“冰球子”。独蒜兰具有清热解毒、化痰散结等功效，用于治疗痈肿疔毒、瘰疬痰核、蛇虫咬伤、癰瘕痞块等症<sup>[1]</sup>。目前，独蒜兰被用作麝香丸、紫金锭、周氏回生丸、庆余辟瘟丹、癃闭舒胶囊等 20 余个中成药的主要原料，其主要化学成分为菲类、联苄类、丁二酸苄酯苷类、黄酮类等化合物<sup>[2-5]</sup>。现代药理研究发现，独蒜兰的次生代谢物具有抗肿瘤、抗痴呆、抗炎、神经毒性等生物活性<sup>[2-3]</sup>，在乳腺癌<sup>[6]</sup>、肝癌<sup>[7]</sup>和肺癌<sup>[8-9]</sup>等恶性肿瘤的治疗中具有一定的应用价值。独蒜兰因其在抗癌方面表现出良好疗效<sup>[2]</sup>，近年来市场需求持续增加，其人工种植规模也不断扩大。据研究团队调查统计，2025 年药用独蒜兰的种植面积约为 2.8 km<sup>2</sup>，年产鲜假鳞茎 550~600 t。然而，随着栽培规模的扩大，加工方法的不统一导致的药材质量差异，已成为影响其临床疗效稳定性的重要因素。产地初加工是保障中药材质量与安全性的关键环节。《中药材生产质量管理规范》(2022 年第 22 号) 强调，产地加工需“规范中药材生产，保证中药材质量”，并要求企业制定科学的技术规程，对采收后的药用部位进行适宜加工<sup>[10]</sup>。因此，建立

统一的标准化加工方法，既是确保中药材安全有效的内在需求，也是响应国家政策导向的重要举措。目前，尚未发现有关独蒜兰产地加工方法的研究报道。对独蒜兰本草考证发现，其采收时间多为夏秋二季，加工方法古时多为晒干，现今为分大小，置沸水中蒸煮至透心，然后干燥<sup>[1,11]</sup>。前期调研发现，企业和农户为了方便运输、缩短干燥时间、保持外观形状和色泽，常会对新鲜独蒜兰假鳞茎进行初加工。其中，蒸制和煮制是较为常见的杀青方式。然而，对于蒸制和煮制方式及其时间的选择，当前企业和农户多依赖经验判断，缺乏科学的数据支撑和评价。

在质量控制方面，《中国药典》2020 年版仅对山慈姑的原植物、性状和横切面做了描述<sup>[12]</sup>。《中国药典》2025 年版完善了其质量标准体系，新增浸出物、水分和总灰分理化检查项目、以及粉末显微鉴别特征、薄层色谱鉴别方法，仍未对其化学成分含量进行明确规定<sup>[1]</sup>。研究表明，独蒜兰的化学成分以菲类、联苄类、丁二酸苄酯苷类为主<sup>[3-4]</sup>，包括山药素 III、白及苷、2-O-葡萄糖基白及苷 (dactylorhin A) 等<sup>[3,13]</sup>，其中，丁二酸苄酯苷类的 dactylorhin A 和白及苷被作为独蒜兰药材质量检测的指标性成分<sup>[13-14]</sup>。因此，建立以特征成分为指标的质量评价方法至关重要。为此，本研究系统探讨了烘箱直接烘干 (oven direct drying, OD)，煮制 10、20、30 min 后烘干 (boiling for 10, 20, 30 min and then drying,

B10D、B20D、B30D), 隔水蒸制 10、20、30 min 后烘干 (steaming for 10, 20, 30 min and then drying, S10D、S20D、S30D) 以及冷冻干燥 (freeze drying, FD) 共 8 种加工方法, 对独蒜兰假鳞茎外观、显微结构和化学成分含量的影响, 并运用化学计量学方法结合层次聚类分析 (hierarchical cluster analysis, HCA)、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 等方法来系统性评价不同加工方法对独蒜兰质量的影响。然后, 通过加权评分法对不同加工方法进行综合评价, 旨在建立规范化的独蒜兰假鳞茎初加工技术, 并为药材质量控制标准的完善提供科学依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器

FD-550 型冷冻干燥机, Tokyo Rikakikai Co., Ltd., Japan; DHG-9240A 型鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; Agilent 1100 型高压液相色谱仪, 美国 Agilent Technologies 公司; Hei-VAP 型旋转蒸发仪, 德国 Heidolph 公司; Sigma300 型扫描电子显微镜, 德国蔡司公司; ZF-20D 型暗箱式紫外分析仪, 上海宝山顾村电光仪器厂; GF254 硅胶板, 青岛康业鑫药用硅胶有限公司; SX-10-12D 型箱式电阻炉, 天津泰斯特仪器有限公司; JP-020 型超声波清洗机, 深圳洁盟技术股份有限公司; ME204/02 型电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; S4-M71 型磨粉机, 九阳股份有限公司。

### 1.2 试剂

独蒜兰对照药材, 批号 YCWP25040308, 四川省维克奇生物科技有限公司; 对照品白及昔 (批号 CFN90409)、山药素 III (批号 CFN92689), 质量分数均 $\geqslant$ 98.0%, 武汉中标科技有限公司; 对照品 dactylorhin A, 批号 C17179307, 质量分数 $\geqslant$ 98.0%, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 甲醇、醋酸乙酯、丙三醇、乙醇, 分析纯, 天津市大茂化学试剂合伙企业; 正丁醇, 分析纯, 利安隆博华(天津)医药化学有限公司; 三氯甲烷, 分析纯, 重庆川东化工(集团)有限公司; 冰醋酸, 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司; 硫酸, 分析纯, 四川西陇科学有限公司; 水合氯醛, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 苯酚, 分析纯, 广东光华科技股份有限公司。

### 1.3 药材

3 年生的独蒜兰假鳞茎, 于 2024 年 11 月采自

昭通芸生农业科技开发有限公司 (东经 103°43', 北纬 27°28', 海拔 2181 m) 种植基地, 经中国科学院昆明植物研究所张石宝研究员鉴定, 为兰科独蒜兰属多年生半附生草本植物独蒜兰 *P. bulbocodioides* (Franch.) Rolfe 的新鲜假鳞茎。

## 2 方法与结果

### 2.1 加工方法

精选大小均匀、表皮完整、质地紧实且无破损病斑的新鲜独蒜兰假鳞茎, 除去杂质和非药用部位, 洗净泥沙后擦干水分, 备用。

8 种假鳞茎加工方法分别为 (1) OD: 取大小相近的新鲜假鳞茎 500 g, 置于烘箱 (功率 2450 W, 控温均匀度 $\pm$ 3%, 恒温波动度 $\pm$ 1 °C) 中, 在 70 °C 下烘干至恒定质量, 此温度设定参考了与本研究植物高度相似 (同科且富含黏液质) 的天麻的最佳干燥温度, 该温度能有效平衡干燥效率与成分保护<sup>[15]</sup>。(2) 沸水煮+烘干: 沸水煮设 10 min (B10D)、20 min (B20D)、30 min (B30D) 3 种处理时间, 其他处理流程相同。即取新鲜假鳞茎 500 g, 将其放入沸水中, 水淹没, 分别煮制 10、20、30 min 后取出, 冷却, 晾晒 4 d, 70 °C 下烘干至恒定质量。(3) 隔水蒸制+烘干: 设隔水蒸 10 min (S10D)、20 min (S20D)、30 min (S30D) 3 种处理时间, 其他处理流程相同。即取新鲜假鳞茎 500 g, 水煮沸圆气后, 置于笼屉上, 分别蒸制 10、20、30 min 后取出, 冷却, 晾晒 4 d, 70 °C 下烘干至恒定质量。(4) FD: 取新鲜假鳞茎 500 g, 放入-80 °C 超低温冰箱中冷冻 24 h, 再放入冷冻干燥机 (冷阱温度为-45 °C, 真空度 6.67 Pa) 中干燥。每组设置 3 个重复, 所有样品干燥时平铺厚度均为 (3.01 $\pm$ 0.08) cm。

### 2.2 外观、粉末性状观察及物理常数测定

**2.2.1 外观性状观察** 参照《中国药典》2025 年版中冰球子的性状描述, 通过肉眼观察经不同加工方法处理后的独蒜兰假鳞茎形状、表面颜色、质地、断面等特征。煮制和蒸制处理所产生的独蒜兰假鳞茎外观性状与 OD、FD 不同 (图 1)。不同时间的煮制 (B10D、B20D、B30D) 和蒸制 (S10D、S20D、S30D) 处理样品的外观表现相似, 表面均呈浅紫红色、浅棕色、瓶颈部呈墨绿色, 不规则纵皱纹多, 缩皱程度大, 质地坚硬, 难折断, 断面浅黄色, 角质半透明, 符合《中国药典》2025 年版对“冰球子”的性状描述。蒸制与煮制样品在外观上无显著性差异, 表明杀青方式对外观性状影响有限。相比之下,



图 1 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎外观性状

Fig. 1 Appearance characteristics of *P. bulbocodioides* pseudobulbs processed by different methods

OD 的假鳞茎表面颜色相对较深, 可能原因是美拉德反应或酶促褐变导致色素增加。FD 处理的假鳞茎能更好地保持其原有色泽, 表面浅紫粉色、浅绿色或青白色, 颈部呈浅绿色, 无明显皱缩, 质地轻, 断面浅黄绿色, 内部呈海绵状多孔结构, 与《中国药典》2025 年版规定的性状有较大差异。

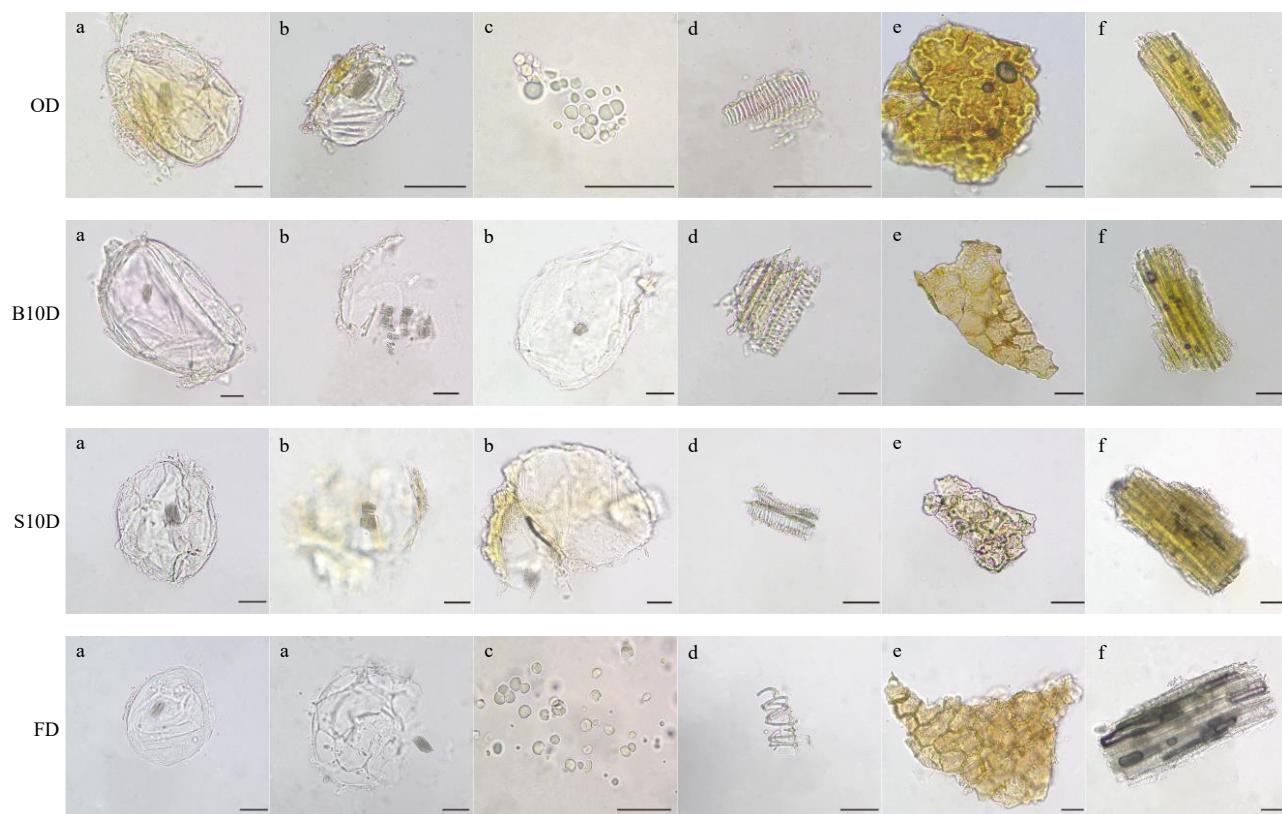
**2.2.2 粉末观察** 参照《中国药典》2025 年版进行显微鉴别试验, 具体方法如下: 将不同处理方法干燥后的独蒜兰假鳞茎粉碎, 过 60 目筛。取少许粉末

放于载玻片上, 加水合氯醛溶液 3 滴, 用酒精灯加热透化 3 次, 加稀甘油溶液 1~2 滴, 封片, 观察细胞形态特征。每种加工方式至少制备 5 张有效的显微制片, 且每张制片至少观察 5 个不重叠的视野。

对 8 种不同加工方法制得的假鳞茎粉末进行显微特征比较分析(图 2、3)发现, 所有加工方法的样品均符合《中国药典》2025 年版中对冰球子粉末的显微特征要求: 表皮细胞类方形或多角形, 垂周壁微波状弯曲且略呈连珠状增厚, 草酸钙针晶多存在于类圆形的黏液细胞中, 针晶长 20~60 μm, 导管为梯纹、网纹、螺纹、具缘纹孔导管(图 3)。但是, 不同处理方法的草酸钙针晶完整性、淀粉粒分



图 2 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎粉末特征

Fig. 2 Powder characteristics of *P. bulbocodioides* pseudobulbs processed by different methods

a-黏液细胞和草酸钙针晶; b-碎裂的草酸钙针晶; c-淀粉粒; d-导管; e-表皮细胞; f-木纤维。

a-mucilage cells and calcium oxalate needle crystals; b-fractured calcium oxalate crystals; c-starch granules; d-vessels; e-epidermal cells; f-wood fibers.

图 3 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎粉末显微结构特征 (比例尺均为 50 μm)

Fig. 3 Microstructural characteristics of *P. bulbocodioides* pseudobulbs powders processed by different methods (scales are all 50 μm)

布及粉末色泽等存在显著差异。其中, FD 样品粉末颜色最浅, 为青白色, 草酸钙针晶完整, 存在大量淀粉粒; OD 样品粉末颜色最深, 为深黄褐色, 草酸钙针晶出现轻微断裂, 可见少量淀粉粒; 蒸制和煮制处理的样品(不同蒸制、煮制时间对粉末结构无显著影响, 以 B10D 和 S10D 为例说明)粉末呈浅灰棕色, 草酸钙针晶断裂明显, 未观察到淀粉粒(图 3), 可能是蒸煮过程导致淀粉粒溶解或糊化。相比于其他 7 种处理方法, FD 能更完整地保留独蒜兰假鳞茎的粉末形态。

**2.2.3 显微结构观察** 取干燥后的独蒜兰假鳞茎样品, 瓣断后形成自然横断面, 作为观察样本。将样本固定在样品托上, 喷金后, 用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行扫描, 在

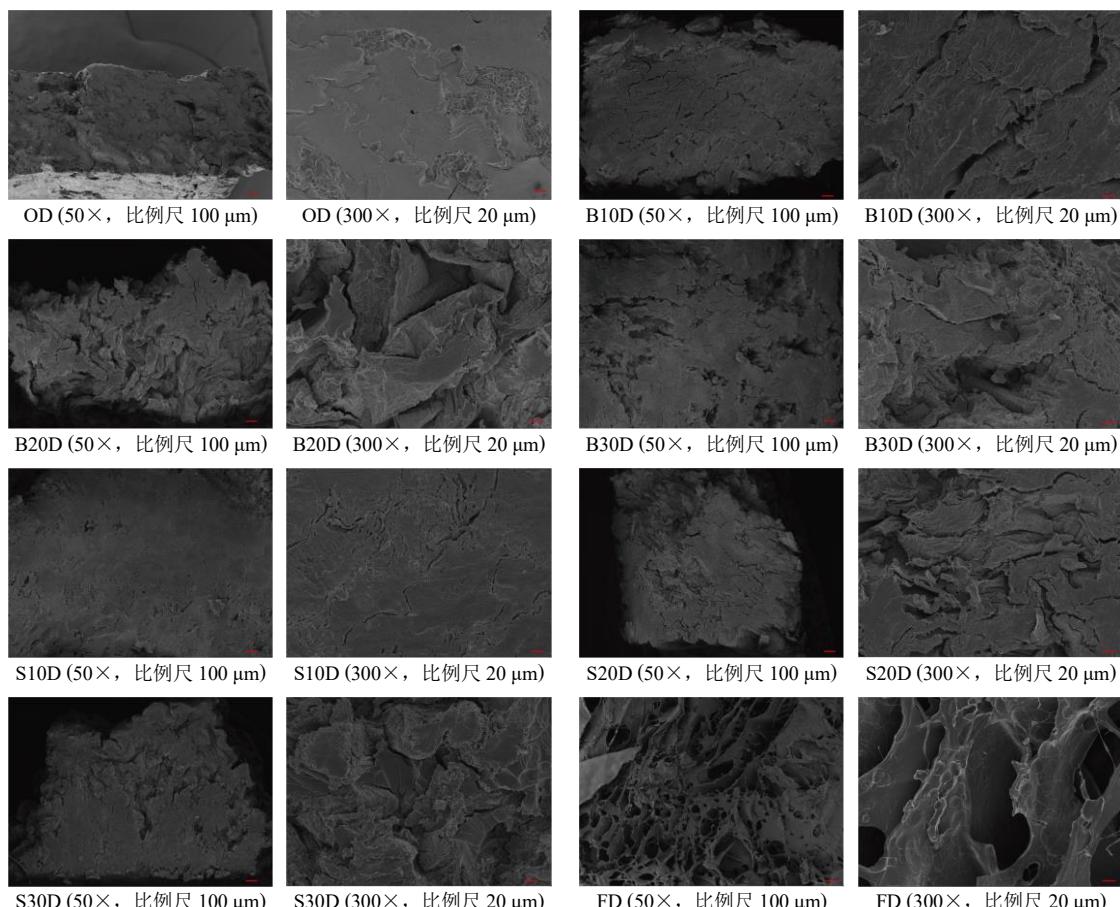


图 4 不同加工方法处理后独蒜兰假鳞茎的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of *P. bulbocodioides* pseudobulbs processed by different methods

文献方法<sup>[17-18]</sup>, 将完全干燥的假鳞茎切片, 按料液比 1:50 浸泡于 25 ℃恒温蒸馏水中, 每隔 20 min 将样品取出, 沥干 60 s 后, 用纸轻擦去表面水分, 精确称定质量后放入水中继续复水, 重复操作至样品吸水呈饱和状态。按照公式计算复水比。

50、300 倍放大下, 观察样品表面组织的微观结构。结果显示, 8 种加工方法处理的独蒜兰假鳞茎组织结构差异显著(图 4)。与其他 7 种加工方法相比, FD 处理的假鳞茎孔径面积大, 未发生变形、塌陷和断裂现象, 而 OD 处理的假鳞茎组织结构更致密, 这可能是由于在干燥过程中, 伴随着水分由内而外蒸发, 组织中的孔隙消失, 发生收缩、变形、塌陷和断裂等现象, 导致组织结构间的结合更紧密, 而 FD 是将假鳞茎内部的水分子直接由固态升华为气态, 组织结构更好地保持了原状<sup>[16]</sup>。蒸制和煮制处理后再烘干, 进一步加剧了假鳞茎组织结构的收缩、变形、塌陷和断裂, 这种破坏随着蒸煮时间的增加而加剧。

**2.2.4 复水比、体积收缩率和折干率的测定** 参照

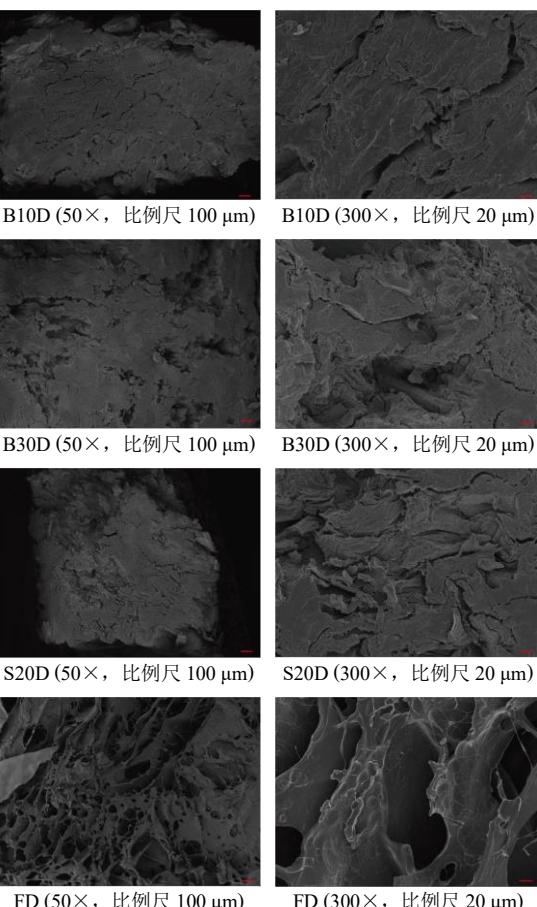


图 4 不同加工方法处理后独蒜兰假鳞茎的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of *P. bulbocodioides* pseudobulbs processed by different methods

复水比=(样品浸润  $t$  时间的质量-样品干质量)/样品干质量

干燥前、后的独蒜兰假鳞茎均呈近圆锥形, 分别测定其直径和高度后, 按以下公式计算体积收缩率<sup>[19]</sup>。

体积收缩率=(干燥前假鳞茎体积-干燥后假鳞茎体积)/干燥前假鳞茎体积

每个处理各选取10个新鲜假鳞茎,分别测定其鲜质量后,经过不同方法处理达到恒定质量,测定,获得干质量。根据假鳞茎的鲜质量和干质量,计算其折干率。

折干率=干质量/鲜质量

不同加工方法处理的独蒜兰假鳞茎折干率、复水比和体积收缩率显著不同(表1和图5)。其中,OD处理假鳞茎的折干率最高,为( $17.89 \pm 0.36$ )%,而FD处理的折干率最低,为( $15.73 \pm 0.26$ )%。蒸制时间、煮制时间对假鳞茎折干率无显著影响( $P > 0.05$ )。相较于其他加工方法,FD处理过程中水分直接从固态升华到气态,从而形成多孔结构,体积收缩率最小(表1),复水性快(图5)。经过烘箱干燥的样品,其组织结构发生了严重收缩,体积收缩率大(与FD处理比较, $P < 0.05$ ),复水时水分不

表1 不同加工方法对独蒜兰假鳞茎折干率和体积收缩率的影响( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

Table 1 Effects of different processing methods on drying rate and volumetric shrinkage rate of *P. bulbocodioides pseudobulbs* ( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

加工方法	折干率/%	体积收缩率/%	加工方法	折干率/%	体积收缩率/%
OD	$17.89 \pm 0.36^a$	$77.52 \pm 2.08^a$	S10D	$17.12 \pm 0.18^b$	$78.55 \pm 1.55^a$
B10D	$16.82 \pm 0.29^b$	$76.53 \pm 3.76^a$	S20D	$16.76 \pm 0.27^b$	$79.63 \pm 2.60^a$
B20D	$16.53 \pm 0.19^b$	$82.29 \pm 2.31^a$	S30D	$16.91 \pm 0.27^b$	$77.53 \pm 1.30^a$
B30D	$16.64 \pm 0.26^b$	$81.37 \pm 1.89^a$	FD	$15.73 \pm 0.26^c$	$37.89 \pm 1.72^b$

同一列标注不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ );表2、3同。

Different letters within the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ), while the same letter indicates no significant differences ( $P > 0.05$ ); Same as tables 2, 3.

表2 不同加工方法对独蒜兰假鳞茎水分、浸出物和灰分含量的影响( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

Table 2 Effects of different processing methods on contents of moisture, extractive, and ash contents in *P. bulbocodioides pseudobulbs* ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

加工方法	水分/%	醇溶浸出物/%	水溶浸出物/%	总灰分/%	酸不溶性灰分/%
OD	$9.10 \pm 0.12^{bc}$	$19.32 \pm 0.08^a$	$67.13 \pm 1.70^{ab}$	$3.78 \pm 0.08^a$	$0.08 \pm 0.01^a$
B10D	$9.86 \pm 0.08^{ab}$	$15.14 \pm 0.10^d$	$58.46 \pm 1.79^d$	$3.23 \pm 0.03^d$	$0.05 \pm 0.01^{bc}$
B20D	$9.38 \pm 0.08^{abc}$	$14.56 \pm 0.19^e$	$67.81 \pm 1.16^{ab}$	$3.38 \pm 0.03^c$	$0.06 \pm 0.01^b$
B30D	$9.91 \pm 0.66^{ab}$	$15.58 \pm 0.07^c$	$68.69 \pm 0.82^a$	$3.70 \pm 0.03^{ab}$	$0.08 \pm 0.01^a$
S10D	$9.54 \pm 0.21^{abc}$	$16.22 \pm 0.04^b$	$63.66 \pm 1.93^b$	$3.61 \pm 0.03^b$	$0.05 \pm 0.00^{bcd}$
S20D	$8.70 \pm 0.51^c$	$14.72 \pm 0.20^e$	$63.19 \pm 0.79^b$	$3.42 \pm 0.06^c$	$0.03 \pm 0.00^d$
S30D	$10.35 \pm 0.34^a$	$14.09 \pm 0.18^f$	$62.92 \pm 1.89^{bc}$	$3.40 \pm 0.04^c$	$0.03 \pm 0.00^d$
FD	$9.95 \pm 0.18^{ab}$	$14.94 \pm 0.04^{de}$	$69.21 \pm 1.32^a$	$3.16 \pm 0.03^d$	$0.04 \pm 0.00^{cd}$

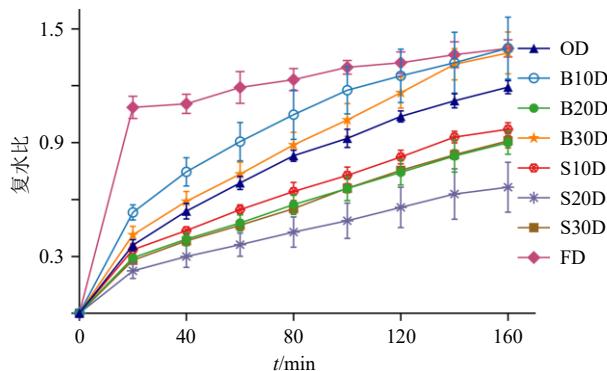


图5 不同加工方法对独蒜兰假鳞茎复水比的影响  
( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

Fig. 5 Effects of different processing methods on rehydration ratio of *P. bulbocodioides pseudobulbs*  
( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

易进入,复水效果较慢。此外,FD处理的假鳞茎在复水后发生明显褐变,不利于后续的药材储藏。

**2.2.5 水分、灰分和浸出物的测定** 参照《中国药典》2025年版(四部)相关通则,对不同加工方法处理的独蒜兰假鳞茎进行水分、总灰分、酸不溶性灰分、醇溶性浸出物和水溶性浸出物进行测定。其中,水分测定依据通则0832,因独蒜兰不含或少含挥发性成分,故采用烘干法;总灰分和酸不溶性灰分依据通则2302测定;水溶性和醇溶性浸出物采用热浸法(通则2302)测定。醇溶性浸出物含量测定具体参照《中国药典》2025年版山慈姑项规定的方法<sup>[1]</sup>,采用稀乙醇作为提取溶剂。结果见表2。

不同加工方法处理的独蒜兰假鳞茎中水分含量、醇溶性浸出物、水溶性浸出物、总灰分、酸不溶性灰分含量存在显著差异(表2)。8种加工方法的水分含量为8.70%~10.35%。经过蒸制和煮制处理的样品,其水分含量随处理时间增加呈现出先下降后上升的变化趋势。OD处理的样品醇溶性浸出

浸出物和灰分含量的影响( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

Table 2 Effects of different processing methods on contents of moisture, extractive, and ash contents in *P. bulbocodioides pseudobulbs* ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

物含量显著高于其他 7 种加工方法 ( $P<0.05$ , 表 2)。煮制时间延长, 使醇溶性浸出物呈现先降后升的趋势, 而蒸制时间延长, 则导致其含量持续下降。FD 处理的水溶性浸出物含量最高, 而 B10D 处理的水溶性浸出物最低, 呈现随煮制时间增加而上升, 随蒸制时间延长而减少的趋势(表 2)。OD 处理的总灰分含量和酸不溶性灰分含量最高, 而 FD 处理的总灰分含量最低, S30D 处理的酸不溶性灰分含量最低(表 2)。8 种加工方法处理假鳞茎的水分含量(<15%)、总灰分含量(<5%)和醇溶性浸出物含量(>9%), 均符合《中国药典》2025 年版山慈姑项规定的标准。

### 2.3 指标性化学成分含量测定

根据 Shi 等<sup>[20]</sup>的方法, 采用 HPLC 法测定山药素 III、dactylorhin A 和白及苷的含量。

**2.3.1 色谱条件** Agilent 1100 型高压液相色谱仪; 色谱柱为 Agilent Zorbax SB-C<sub>18</sub> 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相为甲醇-水, 梯度洗脱条件: 0~30.0 min, 40%~100%甲醇; 30.0~35.0 min, 100%~40%甲醇; 检测波长为 230.4 nm; 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 25 °C。

**2.3.2 对照品溶液的制备** 分别精密称取山药素 III、dactylorhin A 和白及苷对照品适量, 加甲醇溶解, 稀释定容于 10 mL 量瓶中, 分别制成质量浓度分别为山药素 III 317.9 μg/mL、dactylorhin A 339.9 μg/mL、白及苷 450.7 μg/mL 的单一对照品储备液。

**2.3.3 供试品溶液的制备** 取独蒜兰假鳞茎粉末, 过 50 目筛, 称取 0.30 g, 精密称定, 置于 250 mL 圆底烧瓶中, 精密加入甲醇 60 mL, 80 °C 水浴回流提取 2 h, 冷却滤过, 转移到 100 mL 量瓶中, 定容, 摆匀, 即得供试品溶液。

**2.3.4 精密度试验** 称取 OD 样品粉末 0.30 g, 依照“2.3.3”项下方法制备供试品溶液, 并按照“2.3.1”项下色谱条件进行检测, 连续测定 6 次, 分别计算 dactylorhin A、白及苷与山药素 III 峰面积的 RSD, 结果依次为 1.71%、0.61%、0.63%, 结果表明, 该仪器精密度良好。

**2.3.5 稳定性试验** 称取 OD 样品粉末 0.30 g, 按照“2.3.3”项下方法制备供试品溶液, 于溶液制备后的 0、2、4、6、8、12、18、24 h, 分别精密吸取 10 μL, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样分析, 计算 dactylorhin A、白及苷和山药素 III 峰面积的 RSD 值, 结果分别为 2.41%、1.31%、1.39%, 结果表明,

供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

**2.3.6 重复性试验** 取 OD 样品 6 份, 每份 0.30 g, 按照“2.3.3”项下方法制备 6 份供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进行检测, 计算 dactylorhin A、白及苷、山药素 III 质量分数的 RSD 值, 结果分别为 2.63%、1.24%、0.64%, 结果表明, 该方法的重复性良好。

**2.3.7 加样回收率试验** 取已测定 3 种化学成分含量的 OD 样品 9 份, 每份称定 0.15 g, 精密称定, 并按照 80%、100%、120% 的加标水平分为低、中、高 3 个质量浓度组。按照“2.3.3”项下方法制备供试品溶液, 并采用“2.3.1”项下色谱条件进行 HPLC 分析, 测定各目标成分含量。结果表明, dactylorhin A、白及苷和山药素 III 在低、中、高 3 个加标质量浓度下的平均加样回收率分别为 90.77%、107.75%、90.35%, RSD 分别为 2.48%、0.72%、1.12%, 结果表明该方法的准确性高。

**2.3.8 样品含量测定** 取不同加工方法的样品, 按照“2.3.3”项下方法平行制备供试品溶液 3 份, 并按照“2.3.1”项下色谱条件进样检测, 测定各目标成分含量, 结果见表 3。独蒜兰假鳞茎中的 dactylorhin A、白及苷和山药素 III 含量在不同加工处理间存在显著性差异。与 OD 处理相比, 独蒜兰假鳞茎经蒸制和煮制处理后, 其白及苷和 dactylorhin A 含量增加, 特别是白及苷含量的增加幅度为 54.75%~114.75% (表 3), 其中 S10D 上升幅度最大。相反, 与 OD 处理相比, 蒸制和煮制处理后的山药素 III 含量下降 6.52%~58.70%, 其中 S10D 的下降幅度最小, 而 B20D 的下降幅度最大。

表 3 不同加工方法对独蒜兰假鳞茎中 dactylorhin A、白及苷和山药素 III 含量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

加工 方法	质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )			
	dactylorhin A	白及苷	山药素 III	总量
OD	0.88±0.04 <sup>c</sup>	4.00±0.11 <sup>d</sup>	0.46±0.01 <sup>a</sup>	5.34±0.15 <sup>d</sup>
B10D	1.00±0.04 <sup>bc</sup>	6.19±0.15 <sup>c</sup>	0.25±0.01 <sup>c</sup>	7.44±0.20 <sup>c</sup>
B20D	1.50±0.09 <sup>a</sup>	8.29±0.22 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>d</sup>	9.98±0.31 <sup>a</sup>
B30D	0.95±0.02 <sup>c</sup>	8.54±0.06 <sup>a</sup>	0.26±0.01 <sup>c</sup>	9.75±0.08 <sup>a</sup>
S10D	1.14±0.02 <sup>b</sup>	8.59±0.06 <sup>a</sup>	0.43±0.01 <sup>a</sup>	10.16±0.07 <sup>a</sup>
S20D	1.48±0.06 <sup>a</sup>	7.17±0.19 <sup>b</sup>	0.31±0.01 <sup>b</sup>	8.97±0.26 <sup>b</sup>
S30D	1.03±0.07 <sup>bc</sup>	6.98±0.24 <sup>b</sup>	0.33±0.00 <sup>b</sup>	8.35±0.30 <sup>b</sup>
FD	0.27±0.02 <sup>d</sup>	1.98±0.23 <sup>e</sup>	0.45±0.01 <sup>a</sup>	2.71±0.23 <sup>e</sup>

FD 处理样品的 dactylochin A 和白及苷含量显著低于其他 7 个处理, 但山药素 III 含量却相对较高。进一步分析各成分含量随处理时间的变化趋势发现, 经蒸制和煮制处理的样品, 其 dactylochin A 含量随处理时间增加先上升后下降, 且在处理 10 min 时达到最高值; 白及苷含量随煮制时间增加而上升, 随蒸制时间的延长而减少; 山药素 III 含量则随处理时间增加先下降后上升。综合分析来看, S10D 处理样品中的 3 种指标性成分总含量最高, 达  $(10.16 \pm 0.07)$  mg/g, 但与 B20D 和 B30D 处理样品相比, 三者之间并无显著差异 ( $P > 0.05$ )。FD 处理的样品总含量最低, 仅为  $(2.71 \pm 0.23)$  mg/g。

#### 2.4 指纹图谱建立

**2.4.1 供试品溶液的制备** 参照 Zhang 等<sup>[21]</sup>的方法制备供试品溶液, 将独蒜兰假鳞茎粉末过 80 目筛, 称取 3.0 g, 精密称定, 加入甲醇 90 mL, 于 80 °C 下用索氏提取器提取 3 h, 滤过, 滤渣用 15 mL 甲醇洗涤 2 次, 合并滤液, 浓缩得粗品, 将其溶于 50 mL 甲醇中, 充分摇匀, 用无菌 0.45 μm 过滤器滤过, 即得供试品溶液。

**2.4.2 精密度试验** 取 OD 处理的独蒜兰假鳞茎药材粉末, 按照“2.4.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 连续进样 6 次, 以 9 号色谱峰(白及苷)为参照峰(s), 测得各共有峰相对保留时间的 RSD 值均小于 0.05%, 相对峰面积的 RSD 值均小于 2.98%, 结果表明该仪器精密度良好。

**2.4.3 稳定性试验** 取 OD 处理独蒜兰假鳞茎药材

粉末, 按照“2.4.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 分别于制备后 0、2、4、6、12、18、24 h 进样测定, 以 9 号色谱峰(白及苷)为参照峰(s), 测得各共有峰相对保留时间的 RSD 值均小于 0.08%, 相对峰面积的 RSD 值均小于 4.32%。结果表明, 供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

**2.4.4 重复性试验** 取 OD 处理独蒜兰假鳞茎药材粉末, 按照“2.4.1”项下方法平行制备 6 份供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 连续进样 6 次, 以 9 号色谱峰(白及苷)为参照峰(s), 测得各共有峰相对保留时间的 RSD 值均小于 0.05%, 相对峰面积的 RSD 值均小于 1.33%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.4.5 HPLC 指纹图谱建立及相似度评价** 采用与指标性成分含量测定相同的色谱条件, 获得色谱指纹图谱。然后将 8 种加工方法的样品数据全谱分别导入国家药典委员会《中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)》软件中, 采用中位数法, 时间窗口设定为 0.1 min, 选以 OD 处理为参照图谱, 进行特征峰匹配, 获得指纹图谱叠加图和对照指纹图谱。通过对样品色谱峰与对照品保留时间的一致性, 对目标化合物进行指认。

通过分析 8 种不同加工方法样品的指纹图谱叠加图(图 6), 共匹配到 24 个共有峰, 根据色谱峰的出峰时间进行比较, 共指认出 3 个主要的特征峰: 峰 7 为 dactylochin A、峰 9 为白及苷、峰 15 为山药素 III。因峰 9(白及苷)具有较大的峰面积、良好

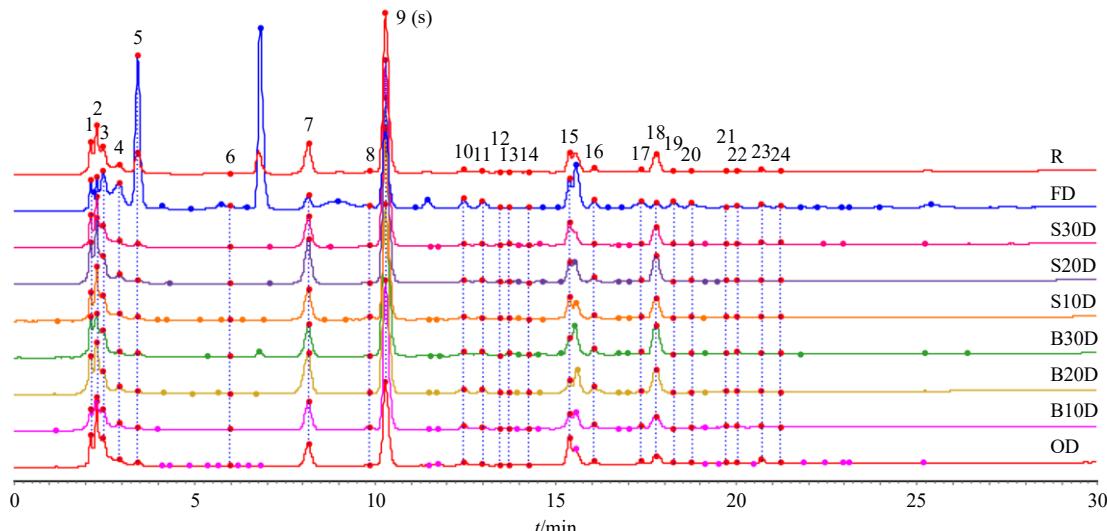


图 6 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎 HPLC 叠加指纹图谱

Fig. 6 Overlaid HPLC fingerprints of *P. bulbocodioides* pseudobulbs processed by different methods

的分离度和稳定性，因此，确定峰9为本研究的参照峰，用于计算其他峰相对于峰9的相对峰面积。由表4所示，除白及苷外，其余共有峰的相对峰面积的RSD为20.69%~231.43%，差异显著。这一现象表明，不同加工方法显著影响独蒜兰假鳞茎的化

学成分含量。以建立的HPLC对照指纹图谱为参照图谱，计算出8种加工方法独蒜兰假鳞茎样品的相似度。结果（表5）显示，8种加工方法的相似度在0.681~0.994，其中，FD处理样品的相似度为0.681，其余加工方法样品的相似度均高于0.949。这表明

表4 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎 HPLC 指纹图谱共有峰相对峰面积

Table 4 Relative peak areas of common peaks in HPLC fingerprints of *P. bulbocodioides pseudobulbs* processed by different methods

加工方法	相对峰面积											
	峰1	峰2	峰3	峰4	峰5	峰6	峰7	峰8	峰9	峰10	峰11	峰12
OD	0.2549	0.5453	0.3822	0.1363	0.1108	0.0188	0.3080	0.0219	1.0000	0.0399	0.0244	0.0060
B10D	0.1081	0.1961	0.1478	0.0659	0.0285	0.0027	0.2177	0.0219	1.0000	0.0260	0.0212	0.0046
B20D	0.1517	0.1904	0.1128	0.0531	0.0289	0.0039	0.2531	0.0081	1.0000	0.0316	0.0229	0.0041
B30D	0.1062	0.1784	0.1273	0.0382	0.0290	0.0021	0.1654	0.0080	1.0000	0.0285	0.0243	0.0041
S10D	0.1005	0.2116	0.1548	0.0545	0.0359	0.0041	0.1894	0.0297	1.0000	0.0199	0.0142	0.0047
S20D	0.1453	0.2480	0.1558	0.0738	0.0285	0.0026	0.2726	0.0071	1.0000	0.0195	0.0165	0.0056
S30D	0.1072	0.1937	0.1359	0.0510	0.0244	0.0019	0.1947	0.0100	1.0000	0.0190	0.0200	0.0062
FD	0.1806	0.2251	0.5029	0.5990	1.5000	0.0768	0.2504	0.1053	1.0000	0.1809	0.1226	0.0287
RSD/%	36.72	49.04	67.40	142.02	231.43	183.74	20.69	124.39	0.00	120.70	109.07	105.12
加工方法	相对峰面积											
	峰13	峰14	峰15	峰16	峰17	峰18	峰19	峰20	峰21	峰22	峰23	峰24
OD	0.0079	0.0118	0.2823	0.0384	0.0429	0.1531	0.0217	0.0254	0.0187	0.0265	0.0579	0.0257
B10D	0.0063	0.0035	0.0924	0.0249	0.0122	0.1074	0.0034	0.0072	0.0120	0.0129	0.0170	0.0045
B20D	0.0054	0.0033	0.0548	0.0342	0.0108	0.1451	0.0024	0.0046	0.0115	0.0081	0.0074	0.0016
B30D	0.0091	0.0039	0.0532	0.0311	0.0138	0.1668	0.0038	0.0069	0.0128	0.0144	0.0134	0.0049
S10D	0.0055	0.0032	0.1038	0.0204	0.0133	0.1403	0.0045	0.0056	0.0122	0.0123	0.0128	0.0087
S20D	0.0064	0.0036	0.0790	0.0237	0.0094	0.1738	0.0039	0.0059	0.0099	0.0105	0.0137	0.0068
S30D	0.0091	0.0034	0.1752	0.0158	0.0091	0.1220	0.0036	0.0069	0.0104	0.0123	0.0192	0.0108
FD	0.0768	0.0605	0.2926	0.1131	0.1435	0.0813	0.1372	0.1350	0.0323	0.0663	0.0650	0.0403
RSD/%	156.23	171.01	68.98	83.13	145.76	22.85	207.21	182.61	50.20	94.86	86.57	102.98

表5 不同加工方法的独蒜兰假鳞茎 HPLC 指纹图谱相似度结果

Table 5 Similarity results of HPLC fingerprints of *P. bulbocodioides pseudobulbs* processed by different methods

编号	相似度									
	OD	B10D	B20D	B30D	S10D	S20D	S30D	FD	对照图谱	
OD	1.000	0.930	0.921	0.912	0.934	0.944	0.933	0.667	0.949	
B10D		1.000	0.997	0.996	0.999	0.995	0.996	0.602	0.994	
B20D			1.000	0.995	0.995	0.997	0.991	0.588	0.990	
B30D				1.000	0.997	0.992	0.992	0.585	0.989	
S10D					1.000	0.995	0.997	0.604	0.994	
S20D						1.000	0.991	0.599	0.992	
S30D							1.000	0.597	0.991	
FD								1.000	0.681	
对照图谱									1.000	

FD与其余7种加工方法在化学成分组成上存在着显著差异，HPLC指纹图谱技术可有效区分FD与其他加工工艺的样品。

## 2.5 化学计量学分析

以8种加工方法样品的24个共有峰的相对峰面积为变量，采用组间联接法，以平方欧氏距离作为相似度度量指标，进行层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)。当平方欧氏距离为25时，8种加工方法可聚为2类，OD、B10D、B20D、B30D、S10D、S20D和S30D聚为一类，FD单独聚为另一类(图7-A)。结果表明，FD所得样品的化学成分含量与其他7种加工方法存在明显差异。

对24个共有峰的相对峰面积数据进行主成分分析(principal component analysis, PCA)发现，FD

和 OD 处理样品与其他 6 种加工方法样品明显分离，其中，FD 处理样品的分离程度尤为显著（图 7-B）。该结果与 HCA 所得结果一致，进一步证实 FD

加工方法在化学成分组成上与其他处理方式存在显著差异。

## 2.6 多指标评价方法

采用层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）-熵权法-逼近理想解排序法（technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS）组合赋权法对 dactylorhin A、白及苷、山药素 III、醇溶性浸出物、水溶性浸出物、折干率、水分含量、灰分含量和酸不溶性灰分含量共 9 个指标进行综合分析与评价。

**2.6.1 AHP 法主观权重系数 ( $W_j^s$ )** 构建 AHP 判断矩阵时，权重分配主要依据各指标与独蒜兰内在质量关联的直接性与特异性。dactylorhin A、白及苷、山药素 III 作为特征性药效成分，被赋予最高权重。醇溶性浸出物能综合反映有效组分整体水平，重要性次之；水溶性浸出物权重略低。折干率、水分和灰分等通用检查项目主要用于表征基础质量，故赋予相同的最低权重。据此，按 dactylorhin A=白及苷=山药素 III>醇溶性浸出物>水溶性浸出物>折干率=水分含量=灰分含量=酸不溶性灰分含量的顺序构建了判断矩阵（表 6）。在一致性检验中，一致性比率（consistency ratio, CR）=0.052 3<0.1，说明 AHP 法所得的独蒜兰药材质量评价指标权重系数无逻辑混乱，合理有效。进而，计算得到各指标的权重<sup>[22]</sup>（表 7）。

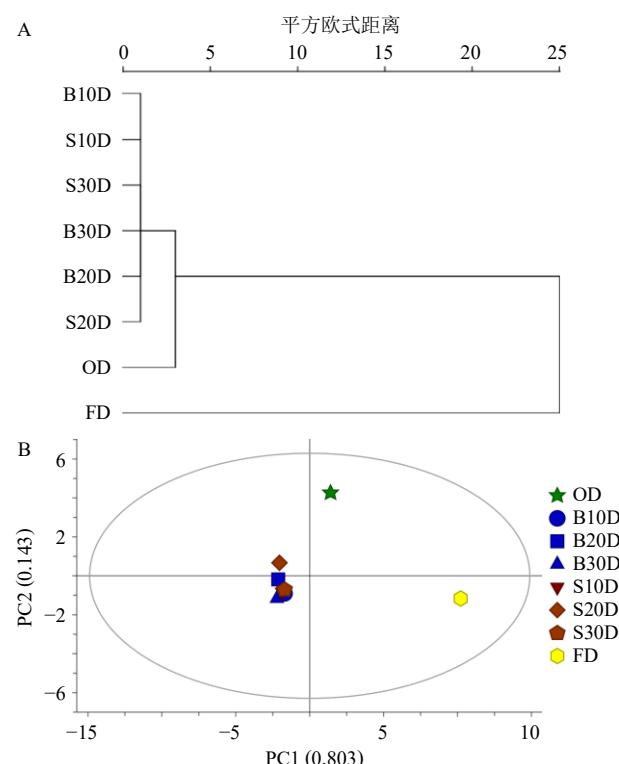


图 7 不同加工方法处理的独蒜兰假鳞茎 HCA 图 (A) 和 PCA 图 (B)

Fig. 7 HCA dendrogram (A) and PCA plot (B) of *P. bulbocodioides pseudobulbs* processed by different methods

表 6 独蒜兰假鳞茎指标成对比较优先判断矩阵

Table 6 Pairwise comparison priority judgment matrix of indicators for *P. bulbocodioides pseudobulbs*

指标	优先判断矩阵								
	dactylorhin A	白及苷	山药素 III	醇溶性浸出物	水溶性浸出物	折干率	水分	灰分	酸不溶性灰分
dactylorhin A	1	1	1	5	7	9	9	9	9
白及苷	1	1	1	5	7	9	9	9	9
山药素 III	1	1	1	5	7	9	9	9	9
醇溶性浸出物	1/5	1/5	1/5	1	3	7	7	7	7
水溶性浸出物	1/7	1/7	1/7	1/3	1	5	5	5	5
折干率	1/9	1/9	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1
水分	1/9	1/9	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1
灰分	1/9	1/9	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1
酸不溶性灰分	1/9	1/9	1/9	1/7	1/5	1	1	1	1

表 7 独蒜兰假鳞茎指标的综合权重系数

Table 7 Comprehensive weight coefficients of indicators for *P. bulbocodioides pseudobulbs*

指标	$W_j^s$	$W_j^o$	$W_j$	指标	$W_j^s$	$W_j^o$	$W_j$	指标	$W_j^s$	$W_j^o$	$W_j$
dactylorhin A	0.252 1	0.074 1	0.177 8	醇溶性浸出物	0.100 4	0.202 6	0.193 6	水分	0.020 7	0.114 1	0.022 5
白及苷	0.252 1	0.081 2	0.195 0	水溶性浸出物	0.060 5	0.084 1	0.048 5	灰分	0.020 7	0.118 9	0.023 4
山药素 III	0.252 1	0.124 8	0.299 7	折干率	0.020 7	0.082 0	0.016 2	酸不溶性灰分	0.020 7	0.118 1	0.023 3

**2.6.2 熵权法客观权重系数 ( $W_j^o$ )** 熵权法<sup>[22-23]</sup>结合熵值提供的信息值来确定权重，是一种客观赋权方法。某个指标的熵越小，说明携带的信息越多，权重越大。通过构建初始化决策矩阵，将数据标准化，计算其信息熵，通过信息熵计算权重（表7）。

**2.6.3 综合权重系数 ( $W_j$ )** 将主观权重系数 ( $W_j^s$ ) 和客观权重系数 ( $W_j^o$ ) 综合考虑，按照下列公式计算  $W_j$ ，结果见表7。

$$W_j = W_j^o W_j^s / \sum_{j=1}^n W_j^o W_j^s$$

**2.6.4 基于组合赋权的 TOPSIS 综合评价** 基于综合权重，构建加权决策矩阵并针对不同指标特性进行标准化处理。对于 dactylorhin A、白及苷、山药素 III、醇溶性浸出物、水溶性浸出物和折干率等效益型指标（越大越优），使用公式  $Y_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j)$  进行标准化；水分含量、总灰分含量和酸不溶性灰分含量等成本型指标（越小越优），则采用公式  $Y_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j)$  进行标准化，以消除不同指标量纲的影响<sup>[24-25]</sup>。随后，计算各评价对象到正理想解 ( $D^+$ ) 和负理想解 ( $D^-$ ) 的欧氏距离，并根据下列公式计算各加工方法的相对贴近度 ( $C_i$ )。最后，根据  $C_i$  值来排名，值大的方法为优（表8）。基于 TOPSIS 模型的综合评价结果显示，不同加工方法的  $C_i$  存在明显差异，其排序为 S10D、OD、S20D、FD、S30D、B30D、B20D、B10D。其中，S10D 处理（蒸制 10 min 后烘干）的  $C_i$  最高（表8），表明其是 8 种独蒜兰假鳞茎加工方法中最优的初加工工艺。

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$$

表 8 独蒜兰假鳞茎经不同方法初加工后的  $C_i$

Table 8  $C_i$  values of *P. bulbocodioides pseudobulbs* after primary processing by different methods

加工方法	$C_i$	排名	加工方法	$C_i$	排名
OD	0.693 1	2	S10D	0.730 0	1
B10D	0.368 0	8	S20D	0.524 8	3
B20D	0.429 7	7	S30D	0.490 2	5
B30D	0.459 8	6	FD	0.494 1	4

## 2.7 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2019 整理，使用 SPSS 25.0 进行分析。通过单因素方差分析（One-way ANOVA）确定不同加工方法间各参数的显著性差异。

## 3 讨论

目前，独蒜兰虽已基本实现规模化栽培，但产

地初加工技术缺失成为制约其药材质量提升与产业链升级的关键瓶颈。本研究首次比较了干燥方式与蒸煮时间对独蒜兰假鳞茎加工后质量的影响，旨在优选独蒜兰假鳞茎最佳的初加工技术。为全面评价加工后假鳞茎的质量，本研究综合选取了指标性化学成分含量、醇溶性浸出物、水溶性浸出物、折干率、总灰分和酸不溶性灰分含量等多项指标，并采用熵权法-AHP-TOPSIS 模型对不同加工方法进行综合评价，确定蒸制 10 min 后烘干为独蒜兰假鳞茎的最佳加工方法。

### 3.1 基于微观结构及化学成分变化的构-效关系分析

不同加工方法显著影响独蒜兰假鳞茎的微观结构。在烘箱直接烘干处理的假鳞茎中可以观察到完整淀粉粒，而经蒸煮处理的样品未观察到淀粉粒，这可能是由于高温导致淀粉粒溶解或糊化。该现象与苦参<sup>[26]</sup>和天麻<sup>[27]</sup>的研究结果相符。此外，与冷冻干燥相比，采用烘箱干燥的 7 种加工方法均导致草酸钙针晶发生断裂，且蒸煮处理会进一步加剧这种断裂情况。该现象与尹素娟等<sup>[28]</sup>在黄精中的研究结果一致，表明高温处理会对植物组织中的晶体结构产生显著影响。草酸钙针晶与细胞结构破坏的协同作用可能促进蒸煮或提取时内容物的释放，提高有效成分的溶出效率。这些微观结构的变化不仅影响药材的外观性状，还与其有效成分的溶出和药效发挥密切相关。

### 3.2 主要有效成分的测定与分析

高温杀青能够灭活酶系统，降低化学成分降解，是药材加工的重要手段。例如，天麻块茎经蒸煮杀青后，高温能够钝化或破坏鲜天麻中的  $\beta$ -糖苷键酶等关键酶，避免天麻素及巴利森苷类等有效成分被分解，从而实现“杀酶保苷”，提高有效成分含量<sup>[29-31]</sup>。dactylorhin A 和白及苷属于丁二酸苄酯苷类，具有抗凋亡、促智、延缓衰老的作用<sup>[32]</sup>。本研究中，不同加工方法对独蒜兰假鳞茎的 dactylorhin A、白及苷和山药素 III 含量有显著影响。与烘箱直接烘干处理相比，经蒸制和煮制处理后，假鳞茎中的白及苷和 dactylorhin A 含量均呈上升趋势，推测蒸制和煮制会使独蒜兰假鳞茎中酶的活性降低或失活，起到“杀酶保苷”的作用。相反，经冷冻干燥处理样品的 dactylorhin A 和白及苷含量显著低于其它处理，可能是由于冷冻干燥的独蒜兰假鳞茎，其酶仍具有一定的活性，导致部分物质发生酶解反应，增加 dactylorhin A 和白及苷成分损失。与本研

究的结果相似，小白及块茎在 50 °C 和 90 °C 条件下热风干燥后，其白及苷含量高于冷冻干燥<sup>[33]</sup>。

### 3.3 指纹图谱和化学计量学分析

本研究通过相似度评价、HCA、PCA 等方法，分析了不同加工方法对独蒜兰指纹图谱的影响。结果表明，指纹图谱能有效区分冷冻干燥与烘箱干燥的样品。在共有峰分析中，峰 5 的相对峰面积表现出极高的 RSD (231.43%)，且在冷冻干燥样品中色谱法峰面积显著高于其他加工方法。尽管该峰所对应的化学成分结构尚未明确，但其在特定干燥条件下的显著富集现象提示其具有重要的潜在价值。若该成分后续被鉴定为某种高附加值的活性化合物，则可在生产工艺中优先采用冷冻干燥技术，以最大限度地保留该特定成分。这表明在实际生产中，应根据临床适应证选取合适的加工工艺。

### 3.4 冷冻干燥技术的适用性评判与工艺优化路径

冷冻干燥技术已经在人参<sup>[34]</sup>、三七<sup>[35]</sup>和铁皮石斛<sup>[36]</sup>等药材加工中被证实，能够更好地保留外观形态和化学成分。本研究显示，冷冻干燥处理能减小皱缩，更好地保持独蒜兰假鳞茎的外观形态和色泽，但复水后会发生明显的褐变。该现象与未漂烫马铃薯的相关报道一致<sup>[37]</sup>。同时，在冷冻干燥过程中，虽然低温可抑制酶的活性，当转至到正常条件下，其酶活可能会恢复<sup>[38]</sup>，导致有效成分分解。因此，冷冻干燥不适宜独蒜兰假鳞茎加工后的长期保存。未来可探索“漂烫-冷冻干燥”联用方法，综合利用冷冻干燥在保持外观而热处理在解决褐变上的优势，优化独蒜兰假鳞茎的低温加工工艺。然而，冷冻干燥高昂的设备与运行成本制约了其规模化应用。为破解这一成本瓶颈，未来研究可将冷冻干燥与其他干燥技术耦合，开发联合干燥工艺。

综上，本研究系统评价了不同加工方法对独蒜兰假鳞茎品质的影响，首次建立了基于多指标综合评价的加工工艺优化体系，确定蒸制 10 min 后烘干为独蒜兰假鳞茎最佳初加工工艺，该方法不仅能够提高活性成分含量（如 dactylorhin A 和白及苷），且操作简便、成本较低，具有推广应用价值。本研究采用 HPLC 同步测定独蒜兰假鳞茎中 dactylorhin A、白及苷与山药素 III 的含量，并进行了系统的方法学验证。基于此，构建了熵权法-AHP-TOPSIS 模型，实现了对不同加工方法下独蒜兰假鳞茎药材质量的整体性与多维度评价。所建立的方法与模型为独蒜兰药材的质量控制与加工工艺优化提供了可靠

的技术支撑与科学依据。

但是，本研究还存在着一定的局限性：(1) 活性成分考察范围有限，未能全面反映药材整体质量；(2) 未开展样品储存稳定性研究，缺乏时效性数据支持；(3) 烘箱干燥温度参数未经系统优化，制约了优化工艺体系的构建。后续将进一步开展以下研究：(1) 结合多酚氧化酶、β-糖苷键酶等酶活性测定，系统解析独蒜兰蒸制和煮制处理“杀酶保苷”的具体机制；(2) 通过 LC-MS 非靶向代谢组学筛选蒸制和煮制过程中的差异代谢物，探索活性成分的转化路径；(3) 整合 SEM 多孔结构与浸出物测定结果，构建“微观结构-理化性质-药效”的关联性分析；(4) 基于 LC-MS/MS 技术扩大化合物鉴定范围，丰富和完善独蒜兰指纹图谱的化学信息；(5) 开发基于电子鼻、电子舌和色差仪等智能感官分析技术的快速质控方法；(6) 建立“产地初加工-饮片炮制”一体化质量控制体系，实现独蒜兰全产业链的标准化生产。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 35-36.
- [2] 刘星星, 刘宏栋, 潘玲玲, 等. 独蒜兰化学成分及生物活性研究进展 [J]. 江西中医药大学学报, 2019, 31(2): 106-111.
- [3] 周泽琴, 李汉芬, 胡江苗. 独蒜兰中 1 个新的苄酯苷类化合物及抗炎活性 [J]. 中草药, 2025, 56(1): 16-25.
- [4] Wu X Q, Li W, Chen J X, et al. Chemical constituents and biological activity profiles on *Pleione* (Orchidaceae) [J]. Molecules, 2019, 24(17): 3195.
- [5] 周晓蓉. 三种药用植物化学成分研究 [D]. 昆明: 昆明医科大学, 2020: 7.
- [6] Deng W Q, Han S W, Shao S Y, et al. Elucidation of the fine structure and anti-breast tumor activity of a glucomannan from the pseudobulbs of *Pleione bulbocodioides* [J]. Carbohydr Polym, 2025, 351: 123062.
- [7] Cao Y X, Hao Z Z, Liu M M, et al. Establishment of a new approach for quality evaluation of *Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones* (Shancigu) based on multicomponent analysis and anti-liver cancer pharmacological effects [J]. Front Pharmacol, 2025, 16: 1544982.
- [8] Cao Y X, Hao Z Z, Liu M M, et al. *Cremastrae pseudobulbus pleiones pseudobulbus* (CPPP) against non-small-cell lung cancer: Elucidating effective ingredients and mechanism of action [J]. Pharmaceuticals, 2024,

- 17(11): 1515.
- [9] 刘新桥. 中药山慈姑的化学成分及其抗肿瘤活性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [10] 国家药品监督管理局, 中华人民共和国农业农村部, 国家林业和草原局, 等. 国家药监局 农业农村部 国家林草局 国家中医药局关于发布《中药材生产质量管理规范》的公告 (2022年第22号) [EB/OL]. (2022-03-17) [2025-11-11]. <https://www.nmpa.gov.cn/>.
- [11] 王晓宇, 罗冰, 吴萍, 等. 基于商品规格等级的山慈姑本草考证及近现代文献研究 [J]. 世界中医药, 2022, 17(16): 2336-2344.
- [12] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 34.
- [13] 陈家仪, 侯惠婵, 谢美晓, 等. 冰球子质量标准提升研究 [J]. 中国药业, 2025, 34(12): 65-71.
- [14] 崔保松, 宋杰, 李帅, 等. RP-HPLC 同时测定山慈姑药材中 dactylorhin A 和 militarine 的含量 [J]. 中国中药杂志, 2013, 38(24): 4347-4350.
- [15] 朱仕豪, 阳楠, 欧梓轩, 等. 天麻主要活性成分分离和鉴定及产地初加工方法对其含量的影响 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 45(2): 194-198.
- [16] Li L H, Zhang M, Lu C F, et al. Appearance, microstructure, and bioactive components of *Bletilla striata* Tuber as affected by different drying methods [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2024, 17(11): 3746-3756.
- [17] 张燕青, 崔清亮, 魏庆霞, 等. 不同干燥方式对黄芪感官品质及功能成分的影响 [J]. 农产品加工, 2021(23): 30-34.
- [18] 王雨晨. 丹参采后干燥特性及品质变化研究 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2022.
- [19] 张猛. 不同干燥方式及水解对天麻主要成分的影响及抗氧化活性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023: 22.
- [20] Shi Y C, Zhang W, Zhang S B. Biomass and active compounds accumulation of the medicinal orchid *Pleione bulbocodioides* in response to light intensity and irrigation frequency [J]. *Chem Biodivers*, 2022, 19(5): e202200056.
- [21] Zhang W, Zhang L F, Deng Y, et al. Chemical constituents of species in the genus *Pleione* (Orchidaceae) and the implications from molecular phylogeny [J]. *Chem Biodivers*, 2021, 18(1): e2000870.
- [22] 张秀如, 杨金平, 焦春梅, 等. 基于正交试验设计-组合赋权 TOPSIS 法的菟丝子酒炙工艺优化 [J]. 山东中医药大学学报, 2024, 48(5): 596-602.
- [23] 申柯, 姚晓煜, 李建国, 等. 多组分定量结合 AHP-熵权法对不同产地梅花鹿茸饮片质量综合评价 [J]. 中草药, 2024, 55(21): 7474-7482.
- [24] 冯晓莉, 李成义, 魏舒畅, 等. 基于主观赋值结合熵权 TOPSIS 法综合评价不同产地黄花菜质量 [J]. 中国现代应用药学, 2022, 39(22): 2927-2934.
- [25] 李海燕, 王慧然, 那丽莎, 等. 基于主成分分析、正交偏最小二乘判别分析及加权逼近理想解排序-灰色关联度融合模型评价不同产地珠子参质量 [J]. 中草药, 2024, 55(9): 3116-3126.
- [26] 江恬妮. 苦参炮制前后化学成分变化及其对湿热型溃疡性结肠炎小鼠作用对比 [D]. 沈阳: 辽宁中医药大学, 2023.
- [27] 管金杰. 硫磺熏蒸对天麻食用品质影响及机理研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [28] 尹素娟, 骆航, 孙兴力. 九蒸九制对黄精品质的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 302-307.
- [29] 张霞, 高慧, 王瑞鑫, 等. 天麻现代炮制研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(4): 130-134.
- [30] 杨成翠, 包刘媛, 李春燕, 等. 不同加工工艺对昭通天麻主要成分含量的影响 [J]. 湖南农业科学, 2023(12): 51-56.
- [31] 杨飞, 王信, 马传江, 等. 天麻加工炮制、成分分析与体内代谢研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(11): 2207-2215.
- [32] 韩少伟, 王超, 崔保松, 等. 独蒜兰中丁二酸苄酯苷类化学成分的研究 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(5): 908-914.
- [33] Wu T Y, Lay H L. Effect of growth stages, culture media, and processing methods on the component variations of *Bletilla formosana* and comparison of its component contents to commercial *Rhizoma Bletillae* crude drugs [J]. *J Food Drug Anal*, 2013, 21(4): 404-413.
- [34] 孟灵旭. 人参冻干工艺优化及不同干燥方式的比较研究 [D]. 长春: 长春中医药大学, 2023.
- [35] 刘胜男, 王承潇, 杨野, 等. 三七真空冷冻干燥工艺优化及对活性成分影响的研究 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2020, 46(4): 517-525.
- [36] 董婧婧, 宋亚, 范蓓, 等. 不同加工方式对石斛品质的影响研究进展 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 318-326.
- [37] Zvitov-Ya'ari R, Nussinovitch A. Browning prevention in rehydrated freeze-dried non-blanchered potato slices by electrical treatment [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2014, 56(1): 194-199.
- [38] 邱勋荣, 李玉姗, 万琴, 等. 真空冷冻干燥对中药材质量的影响与调控技术研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(4): 1377-1388.