

不同干燥条件下趁鲜切制云当归质量和“微生物-成分”相关性评价

李春玉,王梦琦,谷云霞,孔银春,赖雅迪,马晓霞*,刘小莉*

云南中医药大学 云南省教育厅云南特色饮片炮制研究重点实验室,昆明 650500

摘要:基于熵值-综合评分法研究趁鲜切制云当归在4种干燥条件(晒干和40、50、60℃热风干燥)下的药效成分变化,并对其微生物群落组成和药效成分之间的变化规律进行相关性分析。利用电子鼻量化云当归气味并进行主成分分析;测定其挥发油、阿魏酸、藁本内酯、多糖、总酚、总黄酮6个药效成分的含量;通过DPPH法和ABTS法评价其自由基清除能力;采用16S和ITS微生物高通量测序揭示其趁鲜切制干燥过程中微生物群落组成变化,对“微生物-成分”进行相关性分析。结果显示,晒干样品综合评分最优,其次为40℃热风干燥,其性状(翘片率、气味),药效成分(挥发油、阿魏酸、藁本内酯、多糖、总酚、总黄酮)及抗氧化活性(DPPH、ABTS自由基清除能力)保留最佳。此外,16S、ITS微生物测序表明,干燥条件显著影响微生物群落组成,真菌群落变化占主导地位,其中曲霉菌属、沙雷菌属、*Apiotrichum*、*Naganishia*等与成分含量变化密切相关。综上,在规模化生产中建议采用40℃热风干燥以平衡干燥效率与云当归药材质量,本研究也为优化云当归干燥工艺及其干燥过程中“微生物-成分”相互作用机制研究提供理论依据。

关键词:云当归;趁鲜切制;干燥;微生物群落;药效成分;相关性分析

中图分类号:R285.5

文献标志码:A

文章编号:1001-6880(2026)8-1722-13

DOI:10.16333/j.1001-6880.2026.8.011

CSTR:32307.14.1001-6880.2026.8.011

Quality of fresh-cut *Angelicae Sinensis Radix* from Yunnan under different drying conditions and “microorganism-component” correlation evaluation

LI Chun-yu, WANG Meng-qi, GU Yun-xia, KONG Yin-chun, LAI Ya-di, MA Xiao-xia*, LIU Xiao-li*

Yunnan University of Chinese Medicine, Key Laboratory of Yunnan Provincial Department of Education for Processing Research on Characteristic Prepared Drug in Pieces, Kunming 650500, China

Abstract: Based on the entropy-comprehensive scoring method, the changes of pharmacodynamic components of fresh-cut *Angelicae Sinensis Radix* from Yunnan (YASR) under four drying conditions (sun drying, 40, 50, 60 °C hot air drying) were studied, and the correlation between microbial community composition and pharmacodynamic components was analyzed. The electronic nose was used to quantify the odor of YASR and principal component analysis was performed. The contents of volatile oil, ferulic acid, ligustilide, polysaccharide, total phenols and total flavonoids were determined. The free radical scavenging ability was evaluated by the DPPH method and the ABTS method. The 16S and ITS microbial high-throughput sequencing was used to reveal the changes in microbial community composition during the fresh-cut drying process, and the correlation analysis of “microorganism-component” was carried out. The results showed that the comprehensive score of sun-dried samples was the best, followed by hot air drying at 40 °C. Their traits (warping rate, odor), pharmacodynamic components (volatile oil, ferulic acid, ligustilide, polysaccharide, total phenols, total flavonoids) and antioxidant activity (DPPH, ABTS free radical scavenging activity) were the best. 16S and ITS microbial sequencing showed that drying conditions significantly affected the composition of microbial community, and the change of fungal community was dominant. Among them, *Aspergillus*, *Serratia*, *Apiotrichum* and *Naganishia* were closely related to the change of component content. In summary, it is recommended to use 40 °C hot air drying in large-scale production to balance the drying efficiency and the quality of YASR. This study also pro-

收稿日期:2025-06-18 接受日期:2025-10-20

基金项目:云南省教育厅科学研究基金(2025Y0596);云南省“万人计划”青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-011);国家中医药管理局全国老药工传承工作室建设项目(赵荣华全国老药工传承工作室);2022年医疗服务与保障能力提升补助资金(Z155080000004)

*通信作者 Tel:86-018087835221; E-mail:kxmzuni@aliyun.com, 13708763980@163.com

vides a theoretical basis for optimizing the drying process of YASR and the mechanism of “microorganism-component” interaction during the drying process.

Key words: Angelicae Sinensis Radix from Yunnan; fresh-cut; drying; microbial community; pharmacodynamic components; correlation analysis

当归药材为伞形科植物当归 *Angelica Sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根,具有补血活血、调经止痛、润肠通便的功效^[1]。始载于《神农本草经》,是我国药食同源的主要中药材之一^[2]。历代医家对当归品质评价具有共识,即甘肃产当归(习称“岷归”)品质最优。自 1910 年以来逐渐被引至云南西北部的大理、丽江和维西等地,形成特色品质,被誉为“云当归”,被列入“十大云药”之一。近年来,云当归种植规模和产量有逐年增加的势头,然而其产地加工方法粗放,缺乏规范性,甚至存在将鲜品运至甘肃加工的现象,民间有“云当归,一流的品质,二流的加工”之说。

调研发现,云当归产地曾采用鲜材直接切片后干燥的加工方式,这一做法与“产地加工与炮制一体化”中的趁鲜切制工艺类似。趁鲜切制干燥不仅可简化流程,降低成本,还可减少因多次处理导致的质量波动。已有研究探讨了熏干、微波干燥、远红外干燥等多种不同方法对当归药材性状、微观结构、活性成分等的影响,表明不同加工方法和干燥温度所得的干燥品外观性状和指标性成分含量有差异性^[3,4]。Zang 等^[5]发现超声-真空远红外干燥明显优于晒干及热风干燥,Li 等^[6]则认为平衡脱水干燥的当归外观较好、油室较大、活性成分含量更高。然而,当归趁鲜切制后不同干燥条件云当归品质形成的系统性研究较为缺乏。

药材品质变化不仅受非生物因素的影响,微生物群落组成也对药用植物成分的合成与积累造成影响^[7,8]。药材加工环节,微生物活动同样可以改变中药活性成分的组成及含量,如发汗江丹参和干燥白芷^[9,10]。对于趁鲜切制加工的云当归,干燥条件对其药效成分的影响以及这些药效成分变化是否与微生物群落构成和代谢活动有关,目前尚不清楚。

本研究基于熵值-综合评分法,系统评价趁鲜切制后 4 种干燥条件(晒干、40、50、60 ℃热风干燥)对云当归性状、微观结构、药效成分、抗氧化能力及微生物群落组成的影响,明确“微生物-药效成分”间的关联,为云当归产地加工方法提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 药材

云当归于 2024 年 11 月采自云南鹤庆马厂(100.05 °E,26.47 °N,海拔 3 060 m),药材编号为 2024MC001,经云南中医药大学刘小莉教授鉴定为伞形科植物当归 *Angelica Sinensis* (Oliv.) Diels 的根。

1.2 试剂

对照品阿魏酸、藁本内酯(批号:24231228002、24240410001,质量分数≥98%,北京索莱宝科技有限公司);乙腈(批号:JB125430,色谱纯,德国默克股份两合公司);ABTS、过硫酸钾、DPPH、抗坏血酸(批号:kvxi0ax、tx6yrjh、k1wa8ka、t8tab36,纯度≥98.5%,上海毕合生物化学技术有限公司);AK-SU078M-多糖测定试剂盒(批号:1012406182,北京盒子生工科技有限公司);LCSSH-0117W-总酚试剂盒、LCSSH-0118W-总黄酮试剂盒(批号:G18241230,苏州格锐思生物科技有限公司)。

1.3 仪器

DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);SH10A 型卤素水分测定仪(上海菁海仪器有限公司);PEN 3 型电子鼻(德国 Airsense 公司);Phenom Pro 6 型扫描电子显微镜(复纳科学仪器上海有限公司);Agilent 1260 高效液相色谱仪(德国 Agilent Technologies 公司);台式冷冻离心机(德国 Eppendorf 公司);FlexA-200 型全波长酶标分析仪(杭州奥盛仪器有限公司)。

1.4 药材干燥处理

根据云当归民间产地加工方法:新鲜云当归抢水洗后,沥干水分,采用晒干及热风干燥(40、50、60 ℃)干燥至半干(含水率为 50%±5%),斜切成 3 mm 薄片,再分别以对应干燥条件干燥至含水量≤15%,打粉,过三号筛,密封保存,备用。

传统方法加工^[1,11]:新鲜云当归 40 ℃热风干燥后,以沾湿水的 8 层纱布为底层,平铺当归药材 1 层,再覆盖同样的湿纱布,每隔 3.5 h 喷淋 1 次水,喷淋水量为药材质量的 1/8,待药材软化无干硬心时(喷淋 7 次),斜切成 2 mm 薄片,40 ℃干燥至含水量≤15%,打粉,过三号筛,密封保存,备用。

1.5 性状及扫描电镜评价

1.5.1 翘片率统计

翘片为边缘翘起、不平整的饮片。取云当归饮片 500 g, 筛选出翘片并称取其质量, 计算翘片率(翘片率 = 翘片质量/饮片质量)。

1.5.2 电子鼻测定

称取云当归粉末 1 g, 置于顶空进样瓶中, 放置 60 min 后测试, 每个样品重复 3 次实验。采用直接顶空吸气法进行测定。测定条件: 采样间隔时间为每组 1 s; 传感器自清洗时间为 100 s; 传感器归零时间为 5 s; 样品准备时间为 5 s; 进样流量为 300 mL/min; 检测时间 120 s。

1.5.3 扫描电镜表征观测

将云当归样品粉末, 粘贴在样品台上, 喷金 60 s, 利用 SEM 扫描电镜对微观结构进行观察, 放大倍数为 13 000 倍, 加速电压 15 kV。

1.6 药效成分含量测定

1.6.1 挥发油含量测定

取云当归粉末 50 g 置烧瓶中, 加水 500 mL 振荡混合后, 浸泡过夜。自冷凝管上端加水使充满挥发油测定器的刻度部分, 再加入液体石蜡 1 mL, 连接挥发油测定装置, 电热套加热保持微沸约 8 h, 至挥发油量不再增加, 停止加热, 冷却后读取挥发油量, 并计算供试品中挥发油的含量[挥发油含量 = 挥发油体积(mL)/云当归粉末质量(g) × 100%]。

1.6.2 多糖含量测定

1.6.2.1 样品提取

称取 50 mg 云当归粉末, 加入 1 mL 提取液 100 °C 提取 2 h, 取上清液 200 μL 加入 800 μL 无水乙醇静置过夜, 留沉淀加入 1 mL 提取液即得。

1.6.2.2 硫酸-苯酚法测定

取 100 μL 样品提取液, 先加入 50 μL 苯酚, 再加入 150 μL 浓硫酸, 混匀后在 95 °C 处理 20 min。取 200 μL 反应液在 490 nm 处测定其吸光度值, 以蒸馏水为空白对照, 葡萄糖为阳性对照。

1.6.3 阿魏酸、藁本内酯含量测定

1.6.3.1 色谱条件

采用 Agilent ZORBAX SB-C₁₈ (4.6 mm × 250 mm, 5 μm) 色谱柱, 流动相为 1% 冰乙酸水溶液(A)-乙腈(B), 梯度洗脱(0 ~ 18 min, 19% B; 18 ~ 30 min, 19% B → 48% B; 30 ~ 55 min, 48% B; 55 ~ 60 min, 48% B → 100% B), 检测波长 280 nm, 流速 0.8 mL/min, 柱温 30 °C, 进样量 10 μL。

1.6.3.2 对照品溶液的制备

分别精密称取阿魏酸 2.47 mg、藁本内酯 9.14 mg, 加甲醇定容至 5 mL 容量瓶中。移取阿魏酸、藁本内酯储备液各 2 mL, 用甲醇定容在 10 mL 容量瓶中, 制成混合对照品溶液。

1.6.3.3 供试品溶液的制备

精密称定云当归粉末约 0.5 g, 置具塞锥形瓶中, 用移液管加入 20 mL 的 70% 甲醇, 密塞, 称定重量, 超声 40 min, 补足失重, 摇匀过滤即得。

1.6.3.4 方法学考察

精密度: 取云当归样品制备供试品溶液连续进样 6 次, 测定峰面积并计算其相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。稳定性: 取云当归供试品溶液于室温放置 0、2、4、8、12、24 h 时进样, 测定峰面积并计算其 RSD。重复性: 取云当归样品 6 份制备供试品溶液, 测定峰面积并计算其 RSD。加样回收率: 取云当归样品 6 份, 每份 0.5 g, 加入各成分含量已知的对照品适量, 计算加样回收率和 RSD。线性关系: 吸取混合对照品稀释 2、4、8、16、32、64、128 倍, 以浓度为横坐标, 峰面积为纵坐标, 绘制标准曲线, 计算回归方程。

1.6.4 总酚、总黄酮含量测定

1.6.4.1 样品提取

取 30 mg 云当归粉末加 1.5 mL 60% 乙醇, 60 °C 震荡提取 2 h, 25 °C、12 000 r/min 离心 10 min, 取上清液即得。

1.6.4.2 总酚含量测定

取上清液采用福林酚法在 760 nm 处测定其吸光度值, 以蒸馏水为空白对照, 没食子酸为阳性对照。

1.6.4.3 总黄酮含量测定

取上清液采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH 显色法在 510 nm 处测定其吸光度值, 以蒸馏水为空白对照, 芦丁为阳性对照。

1.7 抗氧化活性评价

1.7.1 样品处理及溶液配制

1.7.1.1 样品处理

取 30 mg 云当归粉末加 1.5 mL 60% 乙醇, 60 °C 震荡提取 2 h, 25 °C、12 000 r/min 离心 10 min, 取上清液即得。

1.7.1.2 ABTS 稀释液配制

7.0 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L K₂S₂O₈ 溶液以 1:0.5 比例混合, 室温避光 12 h, 按 1:4 稀释即得 ABTS 稀释液。

1.7.2 DPPH 和 ABTS 自由基清除率检测

1.7.2.1 DPPH 自由基清除率检测

取 100 μ L 样品提取液,将其加入 100 μ L 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液(避光保存,现配现用)中,25 $^{\circ}$ C 避光 30 min,随后在 517 nm 处测定吸光度(A),以蒸馏水为空白对照,抗坏血酸溶液为阳性对照。按公式(1)计算自由基清除率(I)。

1.7.2.2 ABTS 自由基清除率检测

取 50 μ L 样品提取液,将其加入 150 μ L ABTS 稀释液中,室温避光 8 min,随后在 734 nm 处测定吸光度(A),空白对照为蒸馏水,阳性对照为抗坏血酸溶液。按公式(1)计算自由基清除率(I)。

$$I = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_0 :空白对照组吸光度; A_1 :实验组吸光度。

1.8 熵值法及综合评分

使用 SPSSPRO 在线分析软件进行熵值法赋权重值,并将权重系数代入公式计算综合评分^[12]:综合评分 = ($Y_1/Y_{1max} \times W_1 + Y_2/Y_{2max} \times W_2 + Y_3/Y_{3max} \times W_3 + \dots$) $\times 100$,其中 Y 为指标值, Y_{max} 为指标最大值, W 为权重值。

1.9 微生物高通量测序

1.9.1 云当归样品选择

用于微生物高通量测序的样品分别取自于晒干、40、50、60 $^{\circ}$ C 热风干燥 4 个干燥条件干燥中期(含水量为 50%)、干燥后期(含水量为 15%)和干燥前期(新鲜)的云当归,具体取样时间及样品编号命名见表 1。

表 1 微生物检测样本选择及分组信息

Table 1 Selection and grouping information for microbial detection samples

组别 Group	取样时间 Sampling time	样品编号 Sample number
晒干 Sun-drying	含水量 50%	Z. S
	含水量 15%	H. S
40 $^{\circ}$ C	含水量 50%	Z. 40
	含水量 15%	H. 40
50 $^{\circ}$ C	含水量 50%	Z. 50
	含水量 15%	H. 50
60 $^{\circ}$ C	含水量 50%	Z. 60
	含水量 15%	H. 60
新鲜 Fresh	新鲜云当归	Q

1.9.2 DNA 提取及高通量测序分析

各组样品基因组 DNA 提取。真菌扩增区域为 ITS1-1F,引物为 ITS1-1F-F: 5'-CTTGGTCATT-

TAGAGGAAGTAA-3' 和 ITS1-1F-R: 5'-GCTGCGT-TCTTCATCGATGC-3';细菌是对 16S rDNA 的 V3-V4 区进行扩增,引物为 341F:5'-CCTAYGGGRBGCAS-CAG-3' 和 806R: 5'-GGACTACNNGGCTATCTAAT-3'。利用 Metware Cloud 平台,对样品中微生物群落组成特征、 α 多样性和 β 多样性进行分析。

2 结果

2.1 干燥条件对云当归性状及微观结构的影响

2.1.1 干燥条件对云当归翘片率的影响

与传统加工方法相比(见表 2),云当归趁鲜切制时翘片率均较高,且翘片率与干燥温度呈正相关,即干燥温度越高翘片率越高,这可能是由于鲜切的片型缩水性能大,且成片时间早、受热面积大,水分流失速率过高。如若想要保证饮片翘片率低、外形美观可选择低温趁鲜切制,如晒干和 40 $^{\circ}$ C 干燥。

表 2 不同干燥条件云当归翘片率($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 2 Warpage rate of different drying conditions of YASR($\bar{x} \pm s, n = 3$)

加工方法 Processing method	翘片率 Warpage rate (%)
晒干 Sun-drying	40.43 $\pm$ 1.76 ***
40 $^{\circ}$ C	45.85 $\pm$ 2.87 ***
50 $^{\circ}$ C	52.96 $\pm$ 1.90 ***
60 $^{\circ}$ C	61.65 $\pm$ 0.27 ***
传统 Traditional-drying	22.35 $\pm$ 2.34

注:与传统组相比,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$,*** $P < 0.001$,下同。
Note:Compared with the Traditional-drying group,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$,*** $P < 0.001$,the same below.

2.1.2 干燥条件对云当归气味的影响

由图 1A 可知,当归气味响应值在 W5S、W1W、W2W 传感器较高,主要为含硫有机、无机化合物和氮氧化合物,且不同加工方法所得的云当归在 W1W、W5S 传感器上,响应值:晒干 $>$ 传统 $>$ 40 $^{\circ}$ C = 50 $^{\circ}$ C $>$ 60 $^{\circ}$ C,由此可见,干燥温度越高,导致当归气味响应值降低。主成分分析(principal component analysis,PCA)结果(见图 1B)显示,5 种不同加工方法云当归样品在气味分布上分离良好,无重叠区域,其中,40 $^{\circ}$ C 干燥组组内离散度较大,50 $^{\circ}$ C 干燥组和传统加工组距离较接近,综上,不同干燥条件显著影响了云当归的挥发性气味物质组成。

2.1.3 干燥条件对云当归切片及微观结构的影响

物料的微观结构决定了宏观特性,晒干的云当归表面结构紧凑,呈蜂窝状结构,表面凸起较多;热风干燥后的云当归微观结构致密,细胞形态变形,出

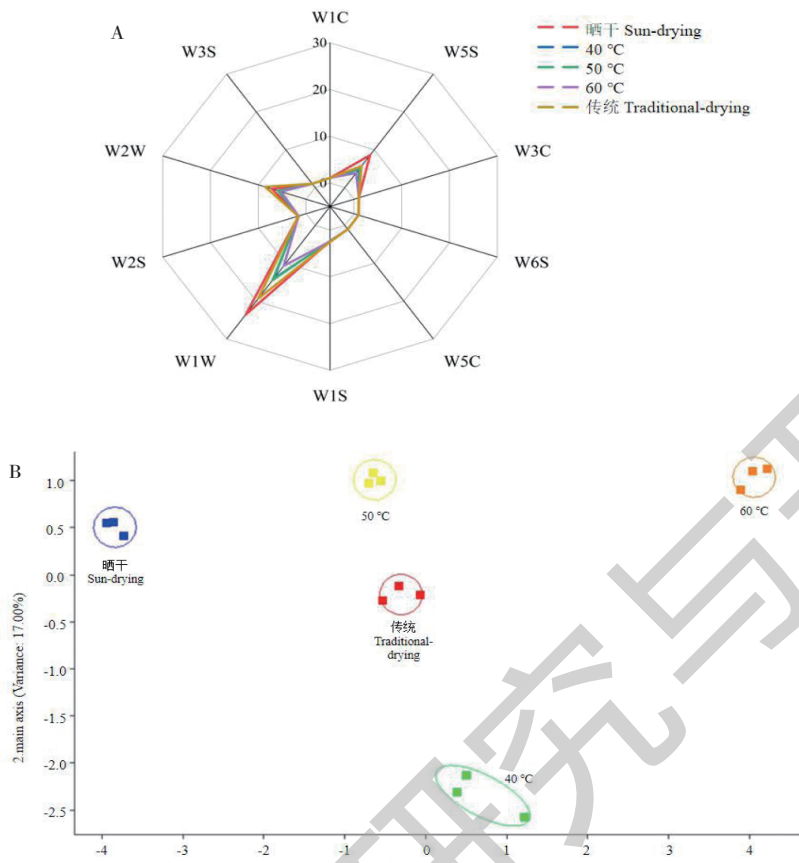


图 1 不同干燥条件云当归电子鼻雷达图 (A) 和 PCA 图 (B)

Fig. 1 Radar image (A) and PCA plot (B) of the electronic nose of *Angelicae Sinensis Radix* from Yunnan (YASR) under different drying conditions

现不同程度破碎和坍塌。40 °C 干燥后云当归表皮相对光滑但组织结构完整性较差,推测可能与低温下干燥耗时长有关;60 °C 干燥,高温造成云当归表面硬化,表皮细胞塌陷较严重,孔隙率低;而 50 °C 干

燥条件,干燥时长及干燥温度均介于 40 °C 和 60 °C 之间,其表皮细胞坍塌程度也处于居中状态。传统加工方法所得的云当归表皮与 50 °C 类似,观察到较严重的破碎和坍塌(见图 2)。晒干和热风干燥均为

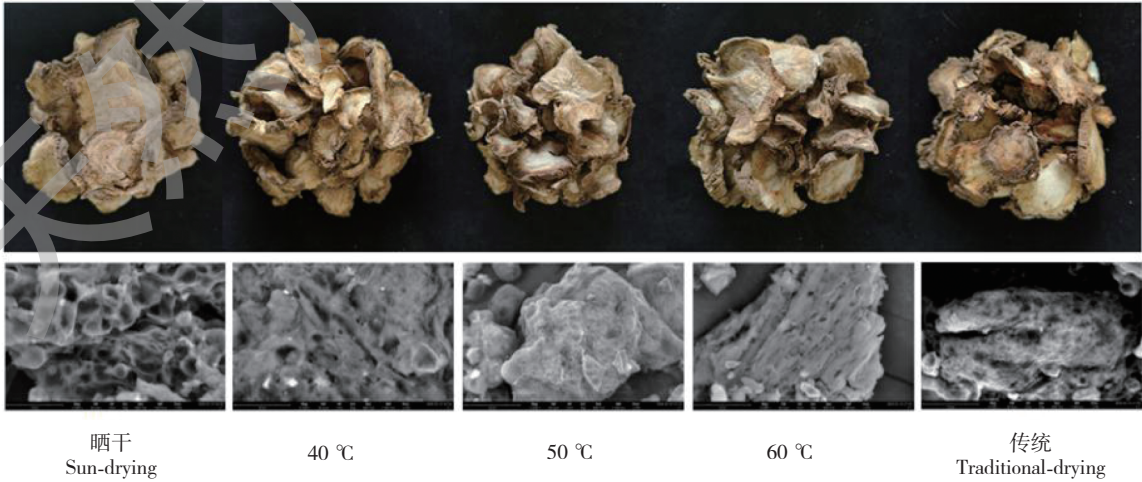


图 2 不同干燥条件云当归切片及微观结构图 (13 000 ×)

Fig. 2 Slices and microstructure (13 000 ×) of YASR under different drying conditions

由外到内的干燥过程,物料内部结构致密,若干燥时间过长,则不利于内部水分往外溢出,最终导致因应力集中而出现坚硬、破裂的现象,这与 Yao^[13] 和 Li 等^[14] 的结论类似。

2.2 干燥条件对云当归药效成分含量的影响

2.2.1 方法学考察

精密性:阿魏酸、藁本内酯的峰面积 RSD 分别为 1.4%、0.095%,表明本方法精密性良好。

稳定性:阿魏酸、藁本内酯的峰面积 RSD 分别为 0.20%、0.092%,表明供试品溶液在 24 h 内稳定。

重复性:阿魏酸、藁本内酯的峰面积 RSD 分别为 1.0%、1.5%,表明本方法重复性良好。加样回

收率:阿魏酸的平均回收率为 102.4%,RSD 为 0.77%;藁本内酯的平均回收率为 103.0%,RSD 为 3.8%;表明回收率符合含量测定的要求。

线性关系:阿魏酸线性回归方程为 $Y = 20\,555X + 5.2479$, $R^2 = 0.9994$,结果表明阿魏酸在 0.003 1 ~ 0.4 mg 之间有良好的线性关系;藁本内酯线性回归方程为 $Y = 28\,333X - 72.886$, $R^2 = 0.9996$,结果表明藁本内酯在 0.005 8 ~ 0.748 mg 之间有良好的线性关系。

2.2.2 标准曲线及色谱图

HPLC 法线性关系考察标准曲线见图 3,多糖、总酚、总黄酮标准曲线见图 4,HPLC 法阿魏酸和藁本内酯色谱图见图 5。

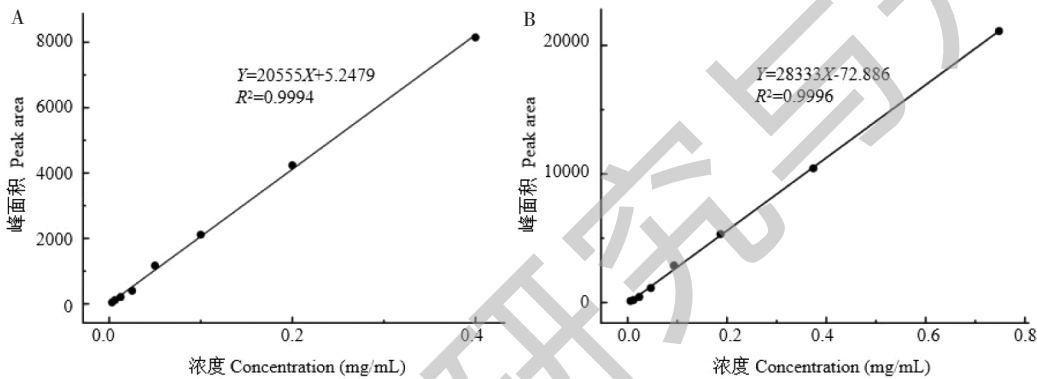


图 3 云当归阿魏酸(A)和藁本内酯(B)的线性关系标准曲线

Fig. 3 Standard curve for linear relationship of ferulic acid (A) and ligustilide (B) in YASR

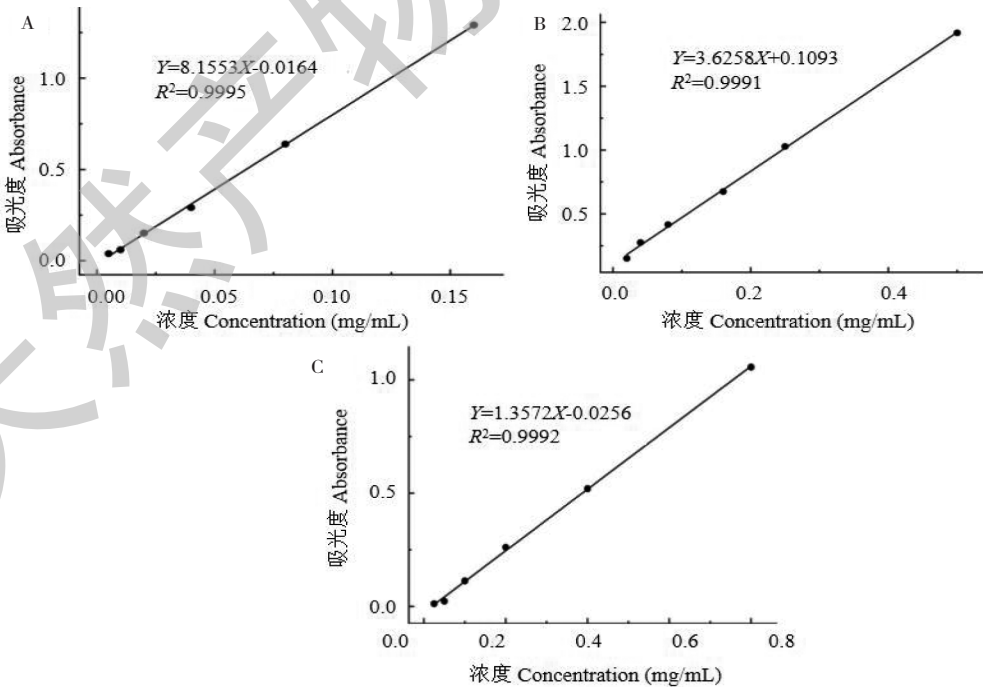


图 4 云当归多糖(A)、总酚(B)、总黄酮(C)含量测定标准曲线

Fig. 4 Standard curve for determination of polysaccharide (A), total phenols (B) and total flavonoids (C) in YASR

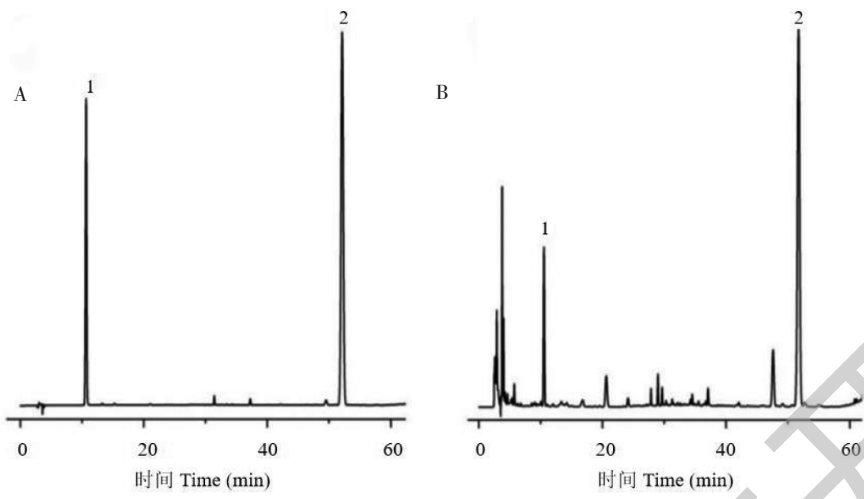


图5 混合对照品(A)及云当归样品(B)HPLC图

Fig. 5 HPLC chromatogram of mixed reference substance (A) and YASR (B)

注:1-阿魏酸,2-藁本内酯。Note:1-Ferulic acid,2-Ligustilide.

2.2.3 药效成分含量测定

云当归作为芳香性药材,其所含挥发油(特别是藁本内酯)在促进血红蛋白生成能力和除体内自由基(即抗氧化)方面作用显著^[15];当归中有机酸类和多糖等非挥发性成分对其补血活血和抗氧化功效具有重要贡献^[16,17]。除《中华人民共和国药典》2020年版标准收载挥发油和阿魏酸外,多糖、总酚、总黄酮作为当归基本的药效成分,其含量的变化对物料品质的整体品质评价亦具有重要影响。表3结果显示,不同干燥条件云当归中阿魏酸和挥发油含量均高于《中华人民共和国药典》2020年版标准(挥发油 $\geq 0.4\%$,阿魏酸 $\geq 0.050\%$),两者含量均随温度升高而降低,其中晒干组含量最高,且趁鲜切制组

两者含量均高于传统加工,晒干组和40℃干燥组阿魏酸含量显著高于传统组($P < 0.001$)。总酚和总黄酮含量随着温度升高而先下降再升高,但仍以晒干组含量最高,40℃组其次,晒干组总酚含量显著高于传统组($P < 0.001$);趁鲜切制各组总黄酮含量均高于传统组($P < 0.01$)。多糖和藁本内酯含量则随着温度升高呈现先升再降趋势,但与传统组相比趁鲜切制各组均有显著性差异($P < 0.01$),峰值均出现在50℃时含量达到最高(分别为95.44 mg/g和0.960%)。值得注意的是,综合各药效指标(除藁本内酯含量)趁鲜切制加工均高于传统加工,此结论与当归的研究^[18]一致,后期可考虑将藁本内酯纳入云当归趁鲜加工的药效指标。

表3 不同趁鲜干燥条件和传统加工云当归药效成分含量($\bar{x} \pm s, n = 3$)

加工方法 Processing method	挥发油含量 Volatile oil content (%)	阿魏酸 Ferulic acid (%)	藁本内酯 Ligustilide (%)	多糖 Polysaccharide (mg/g)	总酚 Total phenols (mg/g)	总黄酮 Total flavonoids (mg/g)
晒干 Sun-drying	2.00 ± 0.09	0.248 ± 0.002 ***	0.658 ± 0.002 ***	62.55 ± 2.15 ***	5.79 ± 0.37 **	11.29 ± 0.34 ***
40℃	1.80 ± 0.16	0.243 ± 0.000 ***	0.943 ± 0.017 **	56.87 ± 1.33 **	4.64 ± 0.27	8.72 ± 0.34 ***
50℃	1.60 ± 0.09	0.187 ± 0.001	0.960 ± 0.001 ***	95.44 ± 5.57 ***	3.37 ± 0.25	7.56 ± 0.16 **
60℃	1.60 ± 0.00	0.188 ± 0.008	0.849 ± 0.014 ***	87.54 ± 2.82 ***	4.17 ± 0.70	7.81 ± 0.24 ***
传统 Traditional-drying	1.80 ± 0.28	0.185 ± 0.004	0.898 ± 0.003	47.15 ± 1.11	4.32 ± 0.16	6.47 ± 0.08

2.3 干燥条件对云当归 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力的影响

干燥条件对云当归抗氧化活性的影响研究表明,DPPH 法和 ABTS 法测定的自由基清除能力趋势

与总酚和总黄酮含量变化类似,均与干燥温度相关(见表3、表4),说明总酚和总黄酮作为生物活性化合物,其含量与抗氧化活性直接相关,这与Fu等^[19]的观点基本一致。具体而言,随温度升高,云当归

DPPH 和 ABTS 自由基清除能力均减弱。然而,与传统组相比趁鲜切制各组 ABTS 自由基清除能力均显著升高($P<0.001$),而 DPPH 自由基清除能力趁鲜切制组却低于传统组,这与总酚和总黄酮含量变化趋势不一致,因此在后续综合评分和相关性分析中均采用 ABTS 自由基清除能力数据。

表 4 不同趁鲜干燥条件和传统加工云当归抗氧化活性($\bar{x}\pm s,n=3$)

加工方法 Processing method	DPPH 自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate (%)	ABTS 自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate (%)
晒干 Sun-drying	36.78 ± 1.36 * *	97.95 ± 0.08 * * *
40 ℃	40.87 ± 0.79	94.41 ± 0.59 * * *
50 ℃	38.83 ± 2.26 *	85.04 ± 1.30 * * *
60 ℃	31.42 ± 0.54 * * *	84.66 ± 0.99 * * *
传统 Traditional-drying	42.04 ± 1.53	69.14 ± 1.07

2.4 云当归趁鲜切制不同干燥条件综合评分

上述结果表明,不同干燥条件对云当归各指标的影响不同,进而本研究采用熵值法对各指标进行客观权重分配,克服主观赋权法的局限性,提高评价结果的兼容度。根据熵权法得到各指标所占的权重值(见表 5)显示,阿魏酸、挥发油、多糖等权重较高,表明这些指标对干燥方法评价中有重要影响。基于

各指标权重计算得到的综合评分(见表 6)显示不同干燥条件综合评分由高到低依次为:趁鲜切制晒干 > 40 ℃ > 50 ℃ > 60 ℃ > 传统。

2.5 干燥条件对云当归微生物群落的影响

2.5.1 α 多样性

由表 7 可知,和新鲜样品(Q)相比,不同干燥条件的样品中细菌丰富度指数 Chao 1、ACE 和多样性

表 5 不同干燥条件云当归熵值法权重系数

指标值 Targeted value	信息熵值 Information entropy value	信息效用值 Information utility value	权重 Weight (%)
挥发油 Volatile oil	0.646	0.354	19.391
阿魏酸 Ferulic acid	0.533	0.467	25.560
藁本内酯 Ligustilide	0.852	0.148	8.098
多糖 Polysaccharide	0.753	0.247	13.520
总酚 Total phenols	0.799	0.201	10.988
总黄酮 Total flavonoids	0.752	0.248	13.592
ABTS 抗氧化 ABTS antioxidant	0.838	0.162	8.852

表 6 不同趁鲜干燥条件和传统加工云当归综合评分

加工方法 Processing method	挥发油 Volatile oil (%)	阿魏酸 Ferulic acid (%)	藁本内酯 Ligustilide (%)	多糖 Polysaccharide (mg/g)	总酚 Total phenols (mg/g)	总黄酮 Total flavonoids (mg/g)	ABTS 抗氧化 ABTS antioxidant	综合评分 Comprehensive score
晒干 Sun-drying	2.00	0.248	0.658	62.55	5.79	11.29	97.95	92.79
40 ℃	1.80	0.243	0.943	56.87	4.64	8.72	94.41	86.34
50 ℃	1.60	0.187	0.960	95.44	3.37	7.56	85.04	79.59
60 ℃	1.60	0.188	0.849	87.54	4.17	7.81	84.66	79.42
传统 Traditional-drying	1.80	0.185	0.898	47.15	4.32	6.47	69.14	73.01

指数 Shannon、Simpson 均增加,且随含水量降低而上升,物种丰度明显增加;60 ℃干燥至含水量 50% 的样品(Z. 60)的丰富度指数 Chao 1 和 ACE 最低,说明该高温条件显著降低了样品中的细菌种类数量;相比之下,40 ℃组样品(Z. 40、H. 40)和 50 ℃组样品(Z. 50、H. 50)的丰富度指数波动范围较小,说明温度较低时样本中细菌物种总数相对稳定。此

表 7 不同干燥条件云当归微生物群落多样性指数分析($\bar{x} \pm s, n = 3$)

样品 Sample	细菌 Bacteria				真菌 Fungus			
	Chao 1	ACE	Shannon	Simpson	Chao 1	ACE	Shannon	Simpson
Q	21.778 ± 1.848	22.797 ± 1.765	0.618 ± 0.024	0.388 ± 0.031	161.744 ± 16.288	167.620 ± 14.131	3.263 ± 0.237	0.918 ± 0.023
Z. S	23.917 ± 1.712	24.429 ± 1.472	0.586 ± 0.036	0.345 ± 0.035	180.263 ± 15.944	182.697 ± 15.641	2.824 ± 0.213	0.860 ± 0.029
Z. 40	24.167 ± 8.721	23.652 ± 6.648	0.563 ± 0.094	0.340 ± 0.073	163.333 ± 10.773	163.713 ± 10.997	3.129 ± 0.522	0.858 ± 0.076
Z. 50	27.167 ± 9.259	27.293 ± 9.141	0.783 ± 0.281	0.394 ± 0.054	186.431 ± 33.410	188.371 ± 32.077	3.336 ± 0.105	0.898 ± 0.021
Z. 60	19.867 ± 4.970	20.413 ± 5.424	0.618 ± 0.049	0.379 ± 0.020	209.702 ± 2.625	213.512 ± 5.783	3.655 ± 0.434	0.922 ± 0.045
H. S	31.361 ± 10.035	32.248 ± 9.891	1.165 ± 0.403	0.538 ± 0.096	151.678 ± 32.627	152.108 ± 32.895	2.934 ± 0.268	0.843 ± 0.049
H. 40	25.500 ± 3.082	26.192 ± 3.758	1.376 ± 0.679	0.611 ± 0.223	199.043 ± 18.016	196.596 ± 17.095	3.302 ± 0.561	0.899 ± 0.053
H. 50	25.833 ± 4.836	26.343 ± 4.938	0.888 ± 0.202	0.472 ± 0.051	146.424 ± 25.572	145.459 ± 23.887	3.502 ± 0.316	0.915 ± 0.032
H. 60	30.889 ± 0.685	29.856 ± 3.008	0.829 ± 0.279	0.430 ± 0.061	126.975 ± 77.763	134.836 ± 69.639	2.133 ± 1.481	0.676 ± 0.211

2.5.2 β 多样性

细菌主坐标分析 (PCoA) 结果显示 PCoA1、PCoA2 的贡献率分别为 30.80、23.46%, 累计贡献率为 54.26%, 可以表征大部分的变量特征, 各组样品较分散, 说明各组样品的细菌组成结构差异较大 (见图 6A)。真菌的 PCoA 结果显示 PCoA1、PCoA2 的贡献率分别为 16.30、7.67%, 累计贡献率为 23.97%, 说明真菌群落结构复杂, 2 个 PCo 难以在很大程度上对其进行解释 (见图 6B)。

2.5.3 微生物群落 (属水平) 组成特征

干燥过程中细菌水平如图 7A 所示。门水平

外, 晒干 (H. S)、50 ℃ (H. 50)、60 ℃ (H. 60) 的真菌丰富度指数和多样性指数均低于新鲜样品 (Q), 说明干燥加工过程中大部分真菌丧失活性, 但 H. 40 样品的真菌指数却高于新鲜样品, 这可能归因于 40 ℃热风干燥过程是在封闭的环境中进行, 且该温度为某些微生物提供了适宜的增殖温度。

上, 优势菌属主要由 unidentified-Cyanobacteria、欧文氏菌属 (*Erwinia*)、假单细胞菌属 (*Pseudomonas*)、沙雷菌属 (*Serratia*)、柠檬酸细菌属 (*Citrobacter*) 等组成。在云当归干燥处理期间, 在 H. 40 样品中有少量的欧文氏菌属和假单细胞菌属细菌。真菌水平如图 7B 所示。属水平上, 主要由 *Ilyonectria*、*Linne-mannia*、*Solicoccozyma*、*Tausonia*、*Operculomyces*、曲霉菌属 (*Aspergillus*) 等组成。干燥前云当归样品中优势真菌 *Ilyonectria* 相对丰度很低, 经过干燥处理之后丰度迅速增加, 在 H. 40 中相对丰度高达 80%, 表明 *Ilyonectria* 在云当归加工过程发生显著动态变化。

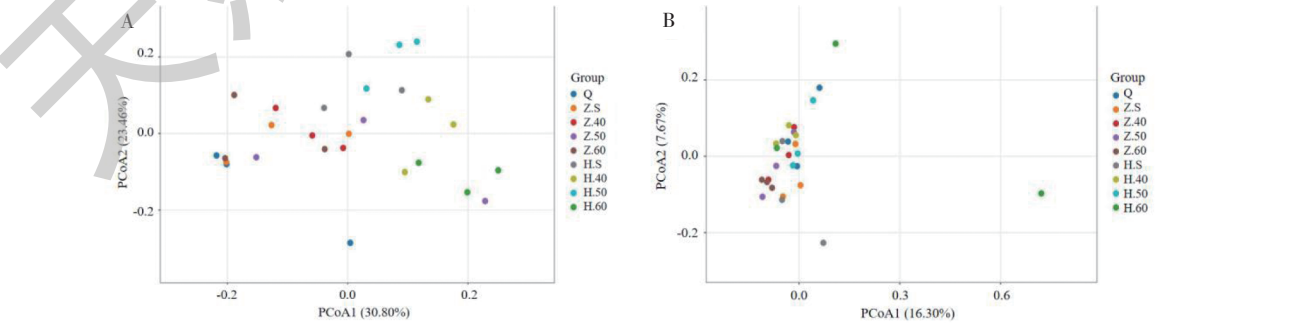


图 6 不同干燥条件云当归的细菌 (A) 和真菌 (B) β 多样性分析

Fig. 6 Analysis of bacteria (A) and Fungi (B) β diversity of YASR under different drying conditions

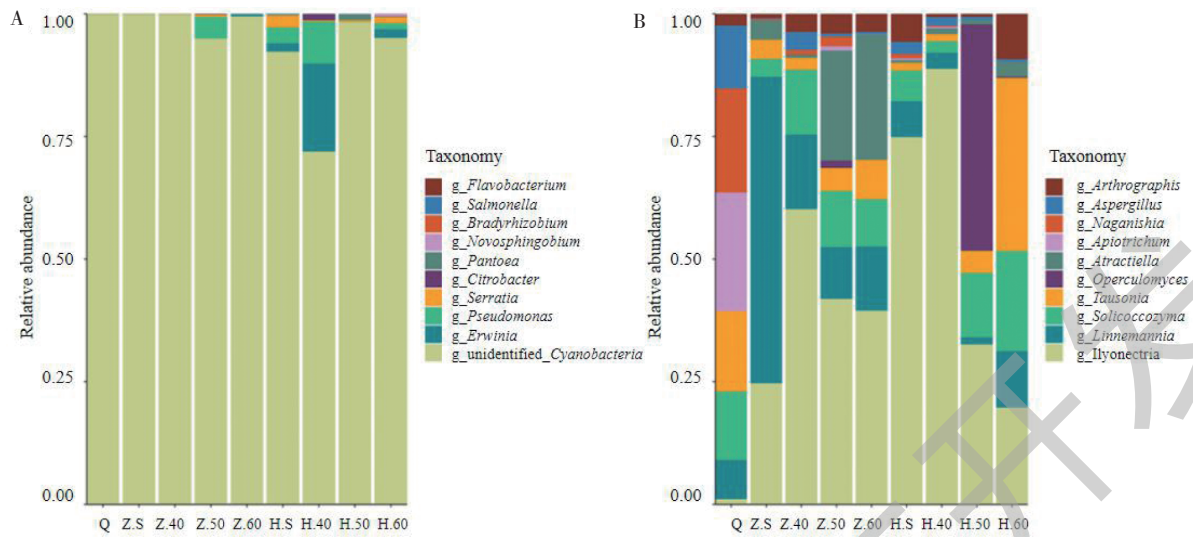


图 7 不同干燥条件云当归属水平的细菌 (A) 和真菌 (B) 群落组成分析

Fig. 7 Analysis of bacteria (A) and Fungi (B) community composition at the genus level of YASR under different drying conditions

2.6 微生物菌群(属水平)与趁鲜切制云当归饮片药效成分的相关性分析

2.6.1 电子鼻传感器与微生物菌群(属水平)的相关性分析

当 $0.5 \leq |r| < 0.6$ 且 $P < 0.05$ 时,判定为显著相关性,当 $|r| \geq 0.6$ 且 $P < 0.01$ 时,则为强相关性。图 8 显示,假单胞菌属、欧文氏菌属、Unidentified-Cyanobacteria、Bradyrhizobium、Salmonella 五个优势细菌与电子鼻传感器 W3S、W1C、W5S、W1W 存在不同程度的相关性,其中 W3S 传感器与假单胞菌属呈强正相关,与欧文氏菌属呈明显正相关,与 Unidentified-Cyanobacteria 呈强负相关。而优势真菌中仅有 Arthrographis 与 W5C 呈明显正相关,其余优势真菌与电子鼻传感器之间相关性较弱。综上表明,

云当归干燥过程中,真菌群落几乎与气味无关联,而细菌相对丰度与当归气味形成关联显著,尤其与传感器 W3S、W1C、W5S、W1W 的相应值密切相关,该结果与前期研究中云当归高响应气味传感器的鉴定结论基本符合。

2.6.2 药效成分指标与微生物菌群(属水平)的相关性分析

药效成分与细菌的相关性分析(见图 9A)发现,优势细菌中沙雷菌属(*Serratia*)与当归中藁本内酯含量呈强负相关,*Salmonella* 与总黄酮含量呈明显正相关,而其余优势细菌属与当归药效成分含量间的相关性较弱。与真菌(见图 9B)的相关性分析表明,挥发油和阿魏酸各与三个菌群呈明显正相关性,挥发油与曲霉菌属(*Aspergillus*)呈强正相关、与

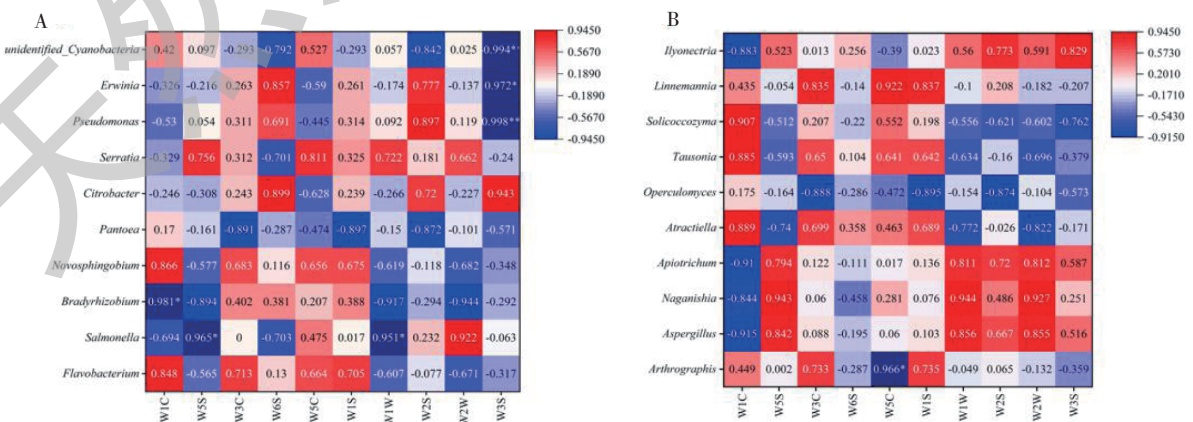


图 8 云当归气味值与细菌 (A) 和真菌 (B) 群落(属水平)的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between bacteria (A) and Fungi (B) community (genus level) and odor value of YASR

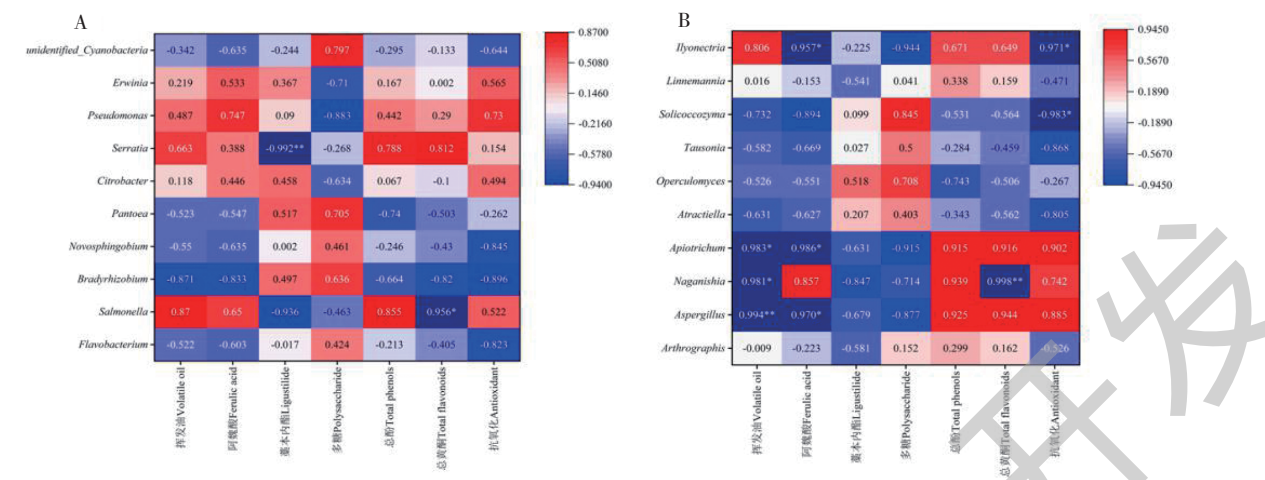


图9 云当归药效成分与细菌(A)和真菌(B)群落(属水平)的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between effective components and bacteria (A) and Fungi (B) community (genus level) of YASR

Apiotrichum、*Naganishia* 呈明显正相关,阿魏酸与曲霉属、*Ilyonectria*、*Apiotrichum* 呈明显正相关性。总黄酮与优势真菌 *Naganishia* 呈强正相关,抗氧化能力与 *Ilyonectria* 呈明显正相关,而与 *Solicoecozya* 呈明显负相关。综上所述,微生物群落相对丰度变化与当归各药效成分含量存在多维度关联,其中曲霉菌属、*Apiotrichum*、*Naganishia*、*Ilyonectria* 及沙雷菌属与其关键成分含量表现出最强的相关性。

3 讨论与结论

干燥是中药材和饮片加工关键环节之一,趁鲜切制可降低加工成本和减少药效成分损失,近年来备受关注。本研究系统评价了干燥条件对云当归趁鲜切制饮片性状、药效成分含量、抗氧化活性方面的影响。

结果表明,不同干燥温度导致挥发油、阿魏酸、挥发油、多糖、总酚、总黄酮含量、抗氧化能力发生多维变化。挥发油、阿魏酸的含量随干燥温度升高而降低,原因在于两者均为热敏性成分,高温易导致挥发油逸散及阿魏酸降解^[20,21]。云当归气味响应值与干燥温度呈负相关,进一步印证了挥发性成分在不同干燥条件下的显著差异,该方法可为当归品质的快速无损评价提供支持。

相比之下,萜本内酯与多糖含量则呈现温度依赖性,二者均在 50 ℃ 时达峰值,适度升温可能促进萜本内酯的酶促反应,但其热稳定性有一定限度,过高温度的会使其挥发损失^[22];多糖高温下易产生美拉德反应从而降解,低温延长干燥时间同样引起多糖降解^[23]。干燥温度对总酚、总黄酮、抗氧化能力的影响一致,与温度呈负相关,归因于酚类与黄酮

类物质的化学性质不稳定,长时间高温暴露加剧其降解^[3],进而影响抗氧化活性。新鲜云当归在干燥过程中经历了失水、温度变化、紫外线等非生物胁迫的诱导,可激发防御反应,诱导基因表达,进而调控次生代谢产物积累,导致了云当归在不同干燥条件下的药效成分积累呈现一定规律性,但具体机制尚需要进一步研究。

综合比较,自然晒干(环境温度为 20 ℃ 左右)与趁鲜切制 40 ℃ 热风干燥从细胞结构以及药效成分均处于优势,而以自然晒干最优。晒干避免了高温快速干燥导致挥发性成分破坏,且受到复杂环境如昼夜温差以及紫外线等影响,有助于抑制药材表面微生物滋生,降低霉变风险^[24]。40 ℃ 下的趁鲜切制和传统加工,虽然热风干燥条件相同,但传统加工表皮细胞的破碎和坍塌程度接近 50 ℃,而且其他药效指标也不如 40 ℃,这可能是传统加工经过了两道干燥过程加重了细胞的机械损伤,闷润过程长造成了成分的流失,提示重复干燥与长时间水浸润可能加剧细胞机械损伤与成分流失。2025 年云南省将云当纳入《云南省趁鲜切制药材品种目录(第二批)》,本研究结果从药效成分和抗氧化活性综合评分角度支持了这一举措:当归趁鲜切制饮片质量总体优于传统加工,表明云当归趁鲜切制具备一定可行性,为后续云当归趁鲜加工工艺和标准研究提供了依据。

尽管药用植物内生菌与药材品质形成的关系已在多种药材中得到证实,但现有研究多集中于内生真菌与次生代谢产物的相关性研究,对中药材加工环节微生物群落变化研究报道较为缺乏。本研究首

次探讨了云当归干燥过程中微生物群落结构和药效成分的相关性,发现干燥过程中微生物群落随药材含水量和温度而变化,真菌群落变化占主导地位,细菌群落稳定。相关性分析表明云当归的气味响应值和药效成分与微生物群落呈现多维关联。假单胞菌属、欧文氏菌属、unidentified-*Cyanobacteria*、*Bradyrhizobium*、*Salmonella*、沙雷菌属等优势细菌和 *Arthrographis*、曲霉菌属、*Apiotrichum*、*Naganishia*、*Ilyonectria*、*Solicoccozyma* 等优势真菌与云当归药效成分指标相关。以上结果提示:干燥温度通过影响云当归微生物群落结构尤其是真菌群落的演替,间接调控药效成分的转化和积累,进而驱动云当归药材品质变化。

基于本研究结果,趁鲜切制后 40 ℃ 热风干燥法、趁鲜切制后自然晒干、传统加工方式适用场景各异。根据黄璐琦院士所提出道地药材的“三优”(优形、优质、优效)理念,建议:①作为投料或饮片,推荐选用趁鲜切制自然晒干法(4 个有效成分含量最高,综合评分排名第一,且饮片翘片率低)或 40 ℃ 热风干燥(饮片药效成分含量高于传统加工饮片,能缩短干燥用时及堆置时间,但饮片出现翘片、不平整、凹陷等现象)。②药食同源产品或出口等高外观要求市场,建议采用传统加工方法。该工艺所得饮片该法外观平整美观,翘片率低,且挥发油和阿魏酸含量符合《中华人民共和国药典》2020 年版标准,但工序复杂,人力成本高。

数据可用性声明: 本篇论文的关联数据可在 ScienceDB 数据库 (<https://doi.org/10.57760/sciencedb.45385>) 中访问获取。

参考文献

- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Vol I (中华人民共和国药典: 第一部) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 139.
- National Health Commission of the People's Republic of China. Announcement No. 8 of 2019 on the addition of six substances, including *Angelica sinensis*, to the list of traditional materials that are both food and Chinese Medicinal Materials [EB/OL]. (2020-01-06) [2025-06-18]. https://zwfw.nhc.gov.cn/kzx/tzgg/qt_235/202001/t20200106_1452.html.
- Li X, Li CY, Qiang ZZ, et al. Determination of index components in *Angelica Sinensis* Radix by different drying methods [J]. Mod Chin Med (中国现代中药), 2019, 21: 1110-1113.
- Zhu SQ, Guo S, Qian DW, et al. Modern drying processing method for *Angelicae Sinensis* Radix based on multi-bioactive constituents [J]. China J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2017, 42: 264-273.
- Zang ZP, Huang XP, Ma GJ, et al. Evaluation of drying characteristics and physicochemical properties of *Angelicae Sinensis* Radix under different drying methods based on combination entropy weight and variable coefficient method [J]. Chin Tradit Herb Drugs (中草药), 2022, 53: 7403-7413.
- Li SN, Wang YQ, Ma LL, et al. Appearance characters, micro morphology, active component content and antioxidant enzyme activity of Chinese *Angelica* under different drying methods [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2020, 32: 1396-1404.
- Yang J, Miao M. Analysis of the Influence of different drying methods on the active ingredients of fresh medicine [J]. Chin Med Nat Prod, 2022, 2: e1-e4.
- Xie Z, Chu Y, Zhang W, et al. *Bacillus pumilus* alleviates drought stress and increases metabolite accumulation in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch [J]. Environ Exp Bot, 2018, 158: 99-106.
- Wang XY, Zhang SL, Wang Y, et al. Correlation between dominant microbial communities and major medicinal compositions in *Salvia miltiorrhiza* from Zhongjiang processed by “sweating” based on high-throughput sequencing [J]. Chin Tradit Herb Drugs (中草药), 2024, 55: 420-433.
- Chen XY, Zhu XL, Gan QX, et al. Correlation analysis between microbial community changes and medicinal quality formation during processing of *Angelicae Dahuricae* Radix [J]. Chin J Exp Tradit Med Form (中国实验方剂学杂志), 2025, 31: 198-207.
- Nie RJ, Wang YZ, Sun ZY, et al. Preliminary study on standardization of production and processing of *Angelicae Sinensis* Radix pieces [J]. China J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2017, 42: 4503-4509.
- Deng Q, Luo HB, Zhong LY, et al. Optimization of processing technology and quality control of *Rhodiola crenulata* Radix et Rhizoma processing with vinegar based on orthogonal experiment and AHP-comprehensive scoring method [J]. J Chin Med Mater (中药材), 2024, 47: 1672-1677.
- Yao LY, Fan LP, Duan ZH. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices [J]. Food Chem, 2020, 305: 125477.
- Li WQ, Wan FX, Luo Y, et al. Far infrared drying characteristics and kinetics of *Angelicae Sinensis* Radix slices [J].

- Chin Tradit Herb Drugs(中草药),2019,50:4320-4328.
- 15 Wang KP, Wu J, Xu JY, et al. Correction of anemia in chronic kidney disease with *Angelica sinensis* polysaccharide via restoring EPO production and improving iron availability[J]. Front in Pharmacol, 2018, 9: 803.
 - 16 Du KH, Wang L, Wang ZL, et al. *Angelica Sinensis* polysaccharide antagonizes 5-fluorouracil-induced spleen injury and dysfunction by suppressing oxidative stress and apoptosis [J]. Biomed Pharmacother, 2023, 162: 114602.
 - 17 Zou YF, Li CY, Fu YP, et al. The comparison of preliminary structure and intestinal anti-inflammatory and anti-oxidative activities of polysaccharides from different root parts of *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels [J]. J Ethnopharmacol, 2022, 295: 115446.
 - 18 Tang LY, Wang ZJ, Song BS, et al. Study on feasibility of cutting process of fresh *Angelica Sinensis* Radix [J]. China J Chin Mater Med(中国中药杂志), 2010, 35: 3147-3150.
 - 19 Fu ZF, Han LF, Zhang P, et al. *Cistanche* polysaccharides enhance echinacoside absorption *in vivo* and affect the gut microbiota [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 149: 732-740.
 - 20 Chen Y. Study on drying characteristics and quality changes of aromatic Chinese herbal pieces during processing [D]. Nanchang: Jiangxi University of Chinese Medicine(江西中医药大学), 2023.
 - 21 Xu TC, Yang GR, Chen C, et al. Optimization of the processing technology for slices from fresh *Angelica sinensis* Diels by orthogonal design [J]. J Yunnan Univ Chin Med(云南中医药大学学报), 2024, 47: 47-53.
 - 22 Hou XY, Gao F, Du LD, et al. Research progress on the stability of ligustilide [J]. Chin Pharm J(中国药学杂志), 2024, 59: 2299-2305.
 - 23 Ma HY, Xing L, Miao YL. Effects of drying temperature on the dissolving-out properties of polysaccharides in *Dendrobium officinale* [J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2019, 35: 109-115.
 - 24 Wang YD, Zhang R, Chen QL, et al. Effect of drying methods on antioxidant activity and bacteriostatic ability of *Gentianae Macrophyllae* Radix [J]. Lishizhen Med Mater Med Res(时珍国医国药), 2021, 32: 865-867.

(上接第 1660 页)

- 9 Zhang C, Liao YP, Li TJ, et al. Apigenin promotes apoptosis of 4T1 cells through PI3K/AKT/Nrf2 pathway and improves tumor immune microenvironment *in vivo* [J]. Toxicol Res (Camb), 2024, 13: tfae011.
- 10 Cicek M, Unsal V, Emre A, et al. Investigation of the effects of apigenin, a possible therapeutic agent, on cytotoxic and SWH pathway in colorectal cancer (HT29) cells [J]. Adv Pharm Bull, 2023, 13: 188-195.
- 11 Yang HY, Peng C, Sun HJ, et al. Nanotechnology-targeted modulation of mitophagy in cancer therapy: progress and challenges [J]. Acta Biomater, 2025, 204: 129-155.
- 12 Yamashita SI, Arai R, Hada H, et al. The mitophagy receptors BNIP3 and NIX mediate tight attachment and expansion of the isolation membrane to mitochondria [J]. J Cell Biol, 2025, 224: e202408166.
- 13 Sowter HM, Ratcliffe PJ, Watson P, et al. HIF-1-dependent regulation of hypoxic induction of the cell death factors BNIP3 and NIX in human tumors [J]. Cancer Res, 2001, 61: 6669-6673.
- 14 Bellot G, Garcia-Medina R, Gounon P, et al. Hypoxia-induced autophagy is mediated through hypoxia-inducible factor induction of BNIP3 and BNIP3L via their BH3 domains [J]. Mol Cell Biol, 2009, 29: 2570-2581.
- 15 Xu HY, Ding YH, Dong H, et al. The effects of atractylodes polysaccharides and n-butanol fraction on mitochondrial autophagy in rats with spleen deficiency [J]. Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发), 2023, 35: 1372-1379.
- 16 O'Sullivan TE, ohnson LR, Kang HH, et al. BNIP3- and BNIP3L-mediated mitophagy promotes the generation of natural killer cell memory [J]. Immunity, 2015, 43: 331-342.
- 17 Gottlieb E, Tomlinson IP. Mitochondrial tumour suppressors: a genetic and biochemical update [J]. Nat Rev Cancer, 2005, 5: 857-866.
- 18 Settembre C, Zoncu R, Medina DL, et al. A lysosome-to-nucleus signalling mechanism senses and regulates the lysosome via mTOR and TFEB [J]. EMBO J, 2012, 31: 1095-1108.
- 19 Zhao Y, Yang J, Liao WJ, et al. Cytosolic FoxO1 is essential for the induction of autophagy and tumour suppressor activity [J]. Nat Cell Biol, 2010, 12: 665-675.