

不同种类醋炮制对青皮主要成分及抗氧化活性的影响

李新悦¹, 张磊¹, 杨纯国³, 许丽丽⁴, 汪冰², 张紫茹¹, 崔伟亮^{1,2*}, 李慧芬^{1*}

1. 山东中医药大学药学院, 山东 济南 250355

2. 山东省食品药品检验研究院中药室, 山东 济南 250101

3. 山东一方制药有限公司, 山东 临沂 276067

4. 山东省创新发展研究院, 山东 济南 250101

摘要:目的 探讨不同种类醋作为炮制辅料, 对青皮 *Citri Reticulatae Pericarpium Viride* 主要成分及其抗氧化活性的影响, 为其优化醋炙工艺和制定中药炮制辅料醋的质量标准提供依据。方法 采用 HPLC 结合化学模式识别技术, 研究 20 批醋作为炮制辅料对青皮主要成分的影响, 采用 DPPH 和 ABTS 法测定不同类别醋作为炮制辅料对青皮抗氧化活性的影响。以主成分的贡献率对主成分得分进行加权平均计算综合评分, 以正交偏最小二乘-判别分析 (orthogonal partial least squares-discrimination analysis, OPLS-DA) 筛选出区分不同炮制品的差异性标志物。结果 醋炙青皮 HPLC 指纹图谱中标定了 15 个共有峰, 指认了芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素 6 种黄酮类成分; 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 结果表明, 采用陈醋炮制的青皮综合得分最高, 然后依次为白醋、米醋、香醋; 橙皮素、橙皮苷可以作为区分不同炮制品的差异性标志物。体外抗氧化实验显示, 采用白醋炮制的青皮清除 DPPH 能力最强, 生品清除 ABTS 能力最佳。白醋炮制品的综合抗氧化能力 (antioxidant potency composite, APC) 最高, 其次为香醋、米醋、陈醋。结论 醋的种类选择性影响青皮黄酮类成分的溶出与转化, 并调控其抗氧化活性。其中陈醋更利于黄酮类成分保留, 白醋可显著增强其抗氧化能力, 在实际应用中需结合具体药用目的进行选择。

关键词: 醋; 青皮; HPLC 含量测定; 化学模式识别; 抗氧化活性; 芸香柚皮苷; 橙皮苷; 香蜂草苷; 橙皮素; 甜橙黄酮; 川陈皮素

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)10-3730-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.10.006

Effects of different vinegar processing methods on major constituents and antioxidant activity of *Citri Reticulatae Pericarpium Viride*

LI Xinyue¹, ZHANG Lei¹, YANG Chunguo³, XU Lili⁴, WANG Bing², ZHANG Ziru¹, CUI Weiliang^{1,2}, LI Huifen¹

1. School of pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China

2. Traditional Chinese Medicine Department, Shandong Institute for Food and Drug Control, Jinan 250101, China

3. Shandong Yifang Pharmaceutical Co., Ltd., Linyi 276067, China

4. Shandong Innovation and Development Research Institute, Jinan 250101, China

Abstract: Objective To investigate the effects of different types of vinegar as processing excipients on the main components and antioxidant activity of Qingpi (*Citri Reticulatae Pericarpium Viride*, CRPV), aiming to provide a basis for optimizing the vinegar stir-frying processing technology and establishing quality standards for vinegar used as a processing excipient in traditional Chinese medicine. **Methods** The influence of 20 batches of vinegar as processing excipients on the main components of CRPV was studied using HPLC combined with chemical pattern recognition. The antioxidant activity of CRPV processed with different vinegars was

收稿日期: 2025-12-16

基金项目: 国家重点研发计划项目—中医药现代化专项 (2023YFC3504102); 国家药品监管科学体系建设重点项目 (RS2024Z006); 山东省中医药科技项目 (MR20241736); 药品监管科学全国重点实验室课题 (2025SKLDRS0338); 2025 年全国老药工传承工作室建设项目 (国中医药人教函 (2025) 181 号); 2024 山东中医药大学药苑育研 (YYCXJJ-202416)

作者简介: 李新悦 (2002—), 女, 山东省聊城人, 硕士研究生, 研究方向为中药新药开发与炮制原理研究。E-mail: linyu196196@163.com

*通信作者: 李慧芬 (1979—), 女, 山东省邹城人, 教授, 研究方向为中药新药开发与炮制原理研究。E-mail: lhfen007@126.com

崔伟亮 (1980—), 男, 山东省烟台人, 副主任中药师, 博士, 从事中药质量控制研究。E-mail: xinyao2002@126.com

determined by DPPH and ABTS assays. A comprehensive score was calculated by weighting averaging of principal component scores based on their contribution rates. Orthogonal partial least squares-discrimination analysis (OPLS-DA) was employed to identify differential markers for distinguishing different vinegar-processed products. **Results** A total of 15 common peaks were calibrated in the HPLC of vinegar-processed CRPV, and six flavonoids, including narirutin, hesperidin, didymin, hesperetin, sinensetin, and nobiletin, were identified. Principal component analysis (PCA) indicated that CRPV processed with mature vinegar achieved the highest comprehensive score, followed by those processed with white vinegar, rice vinegar, and balsamic vinegar, respectively. Hesperetin and hesperidin can serve as differential markers to distinguish the different vinegar-processed CRPV products. *In vitro* antioxidant assays showed that CRPV processed with white vinegar exhibited the strongest DPPH radical scavenging ability, while raw CRPV possessed the optimal ABTS radical scavenging capacity. The antioxidant potency composite (APC) index was highest for the white vinegar-processed product ranked the highest, followed by those processed with aromatic vinegar, rice vinegar, and aged vinegar. **Conclusions** The type of vinegar exert selective effects on the dissolution and transformation of flavonoid components in CRPV and modulate its antioxidant activity. Mature vinegar is more conducive to the retention of flavonoid components, while white vinegar can significantly enhance its antioxidant capacity. In practical applications, the selection should be tailored according to specific therapeutic objectives.

Key words: vinegar; *Citri Reticulatae Pericarpium Viride*; HPLC content determination; chemical pattern recognition; antioxidant activity; narirutin; hesperidin; didymin; hesperetin; sinensetin; nobiletin

醋是中药炮制中常用的液体辅料，味酸、性温，归肝、胃经，具有引药入肝^[1-2]、活血行气^[3]、涩肠止泻^[4-5]等功效，已有两千余年的药用历史。《中国药典》2025年版四部通则 0213 规定“醋炙时，除另有规定，一般用米醋”^[6]，但传统医药著作中记载的“米醋”以仓米、粳米、糯米、大米等谷物为原料酿造，与现代所定义的“米醋”存在一定差异^[7-9]。有学者研究发现，不同种类醋的酸碱度、总酸、总黄酮、总酚等理化性质各不相同，对所炮制药材质量的影响也可能存在差异^[10-12]。探究不同种类醋对中药成分及活性的影响，对制订中药炮制辅料醋的质量标准，规范醋炙炮制工艺具有重要的意义。2025年6月中国中药协会发布的《中药炮制辅料第1部分：通则》(T/CATCM 035.1—2025) 团体标准，为进一步规范辅料质量提供了新依据，本研究期望为该标准的实践与完善提供实验参考。

青皮为芸香科柑橘属植物橘 *Citrus reticulata* Blanco 及其栽培变种的干燥幼果或未成熟果实的果皮^[13]。《中国药典》2025年版收载了青皮和醋青皮 2 种饮片。青皮生品性烈，辛散作用强，疏肝兼有发汗功效，醋炙后增强了引药入肝、疏肝消滞之功^[14-15]。现代研究证明，氧化应激反应与肝郁气滞证的发生发展关系密切，抑制氧化应激反应可作为治疗该证的重要途径^[16]。青皮中富含黄酮类成分，其中芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮及川陈皮素 6 种成分为其主要黄酮类成分，具有良好的抗氧化活性^[17-19]，并具有缓解氧化损伤、保护肝细胞、调节胃肠运动等功能^[20-24]。因此，

以该类成分为指标，结合抗氧化活性评价，有助于系统分析不同种类醋对青皮成分和药效的影响，从成分与效应关联的角度揭示醋炙青皮的科学内涵。

为系统考察不同种类醋对炮制效果的影响，本研究以山西、江苏镇江等传统酿造醋主要产区为基础，结合发酵类型（如固态发酵、液态发酵）与市场普遍性，于济南地区采购了米醋、陈醋、香醋和白醋 4 种常用醋。采用 HPLC 系统分析不同醋炙青皮中上述 6 种黄酮类成分的含量变化^[25-26]，并结合化学模式识别技术分析差异性质量标志物。在此基础上，进一步测定各炮制品的抗氧化活性，探究不同种类醋作为炮制辅料对青皮主要成分及活性的影响，以期醋炙工艺的优化、辅料醋的合理选用及相关质量标准的制订提供科学依据。

1 仪器与试药

1.1 仪器

Waters 2998 型高效液相色谱仪，美国 Waters 公司；Spectra Max M2 型多功能酶标仪，美谷分子仪器（上海）有限公司；KQ-250DE 型超声波清洗器，功率 250 W，昆山市超声仪器有限公司；KDM-2 000 mL 型调温电热套，山东鄄城华鲁电热仪器有限公司；Alpha 1-4 Ldplus 型冷冻干燥机，德国 CHRIST 有限公司；ME204/02 型万分之一天平、XS 105 型十万分之一天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；101 型电热鼓风干燥箱，北京市永光明医疗仪器有限公司。

1.2 试药

青皮饮片，批号 YP06-2205202，购自山东一方

制药有限公司,经山东中医药大学中药鉴定教研室李峰教授鉴定,为芸香科柑橘属植物橘 *C. reticulata* Blanco 及其栽培变种的干燥幼果的切制加工品。所

有醋样品均来源于酿造工艺成熟、具有地域代表性的品牌,以涵盖不同产地、原料与工艺特征的醋产品,醋的样品基本信息见表1。

表1 不同类型醋样品信息

Table 1 Information of different types of vinegar samples

编号	批号	名称	发酵类型	生产厂家	总酸/ (g·L ⁻¹)	pH值	不挥发酸/ (g·L ⁻¹)	总酚/ (mg·g ⁻¹)	总黄酮/ (mg·g ⁻¹)	固体总 量/%
m1	20220509	清香米醋	液态发酵	千禾味业食品股份有限公司	41.4	3.38	10.4	0.343	0.172	4.14
m2	20220516	清香米醋	液态发酵	海天醋业(广东)有限公司	41.0	3.04	9.9	0.319	0.057	2.57
m3	20220520	香米醋	液态发酵	好太太食品有限公司	41.1	3.15	14.0	0.340	0.275	4.98
m4	20220607	味达美柔香米醋	液态发酵	济南宜和食品有限公司	41.5	3.15	17.7	0.379	0.194	7.47
m5	20220503	紫林米醋	液态发酵	山西紫林醋业股份有限公司	44.6	3.23	21.1	0.756	0.775	5.07
c6	20220116	山西陈醋	固态发酵	山西辰洪百味食品有限公司	44.3	2.98	12.0	0.903	0.628	4.52
c7	20220115	紫林山西陈醋	固态发酵	山西紫林醋业股份有限公司	38.0	3.48	15.6	2.870	1.530	13.00
c8	20220616	东湖4°精酿	固态发酵	山西老陈醋集团有限公司	48.2	3.08	13.2	0.894	0.613	4.29
c9	20220414	厨邦陈醋	固态发酵	广东美味鲜调味食品有限公司	46.7	3.19	16.8	1.830	1.230	8.49
c10	20220425	千禾陈醋	固态发酵	千禾味业食品股份有限公司	45.5	3.30	21.2	1.140	0.727	6.35
x11	20220714	镇江香醋	固态发酵	镇江金山寺食品有限公司	53.3	3.10	23.3	1.460	1.060	11.70
x12	20220625	镇江香醋	固态发酵	镇江金山寺食品有限公司	58.4	3.14	21.7	2.250	1.310	13.40
x13	20220628	凉拌香醋	固态发酵	莱阳鲁花醋业食品有限公司	46.0	3.47	12.6	1.190	0.644	9.69
x14	20220519	巧媳妇香醋	液态发酵	山东巧媳妇食品集团有限公司	43.1	3.12	11.6	0.410	0.303	4.12
x15	20230116	香醋王	液态发酵	好太太食品有限公司	38.1	3.29	18.5	0.133	0.294	6.63
b16	20220418	白醋	液态发酵	山东玉兔食品股份有限公司	41.3	2.76	2.9	0	0.024	0.32
b17	20211201	精制白醋	液态发酵	鹤山市东古调味食品有限公司	40.1	2.80	4.1	0	0.017	0.80
b18	20220526Z3	白醋	液态发酵	山东巧媳妇食品集团有限公司	40.8	3.14	3.8	0	0.057	0.89
b19	20220506	白醋	液态发酵	山西紫林醋业股份有限公司	37.8	3.04	4.4	0	0.030	0.72
b20	20220111	白醋	液态发酵	山西老陈醋集团有限公司	42.5	2.96	3.6	0	0.042	0.60

对照品川陈皮素,批号 PS000224,质量分数≥98.0%,购于成都普思生物科技股份有限公司;对照品芸香柚皮苷(批号 CHB201208)、香蜂草苷(批号 CHB210115)、甜橙黄酮(批号 CHB201222)、橙皮素(批号 CHB201221)、橙皮苷(批号 CHB201220),质量分数≥98.0%,均购于成都克洛玛生物科技有限公司;磷酸,批号 C14951212,购于上海麦克林生化科技有限公司;乙腈(批号 20240429078)、甲醇(批号 20240921206)均购于山东禹王和天下新材料有限公司。

2 方法与结果

2.1 醋炙青皮的制备

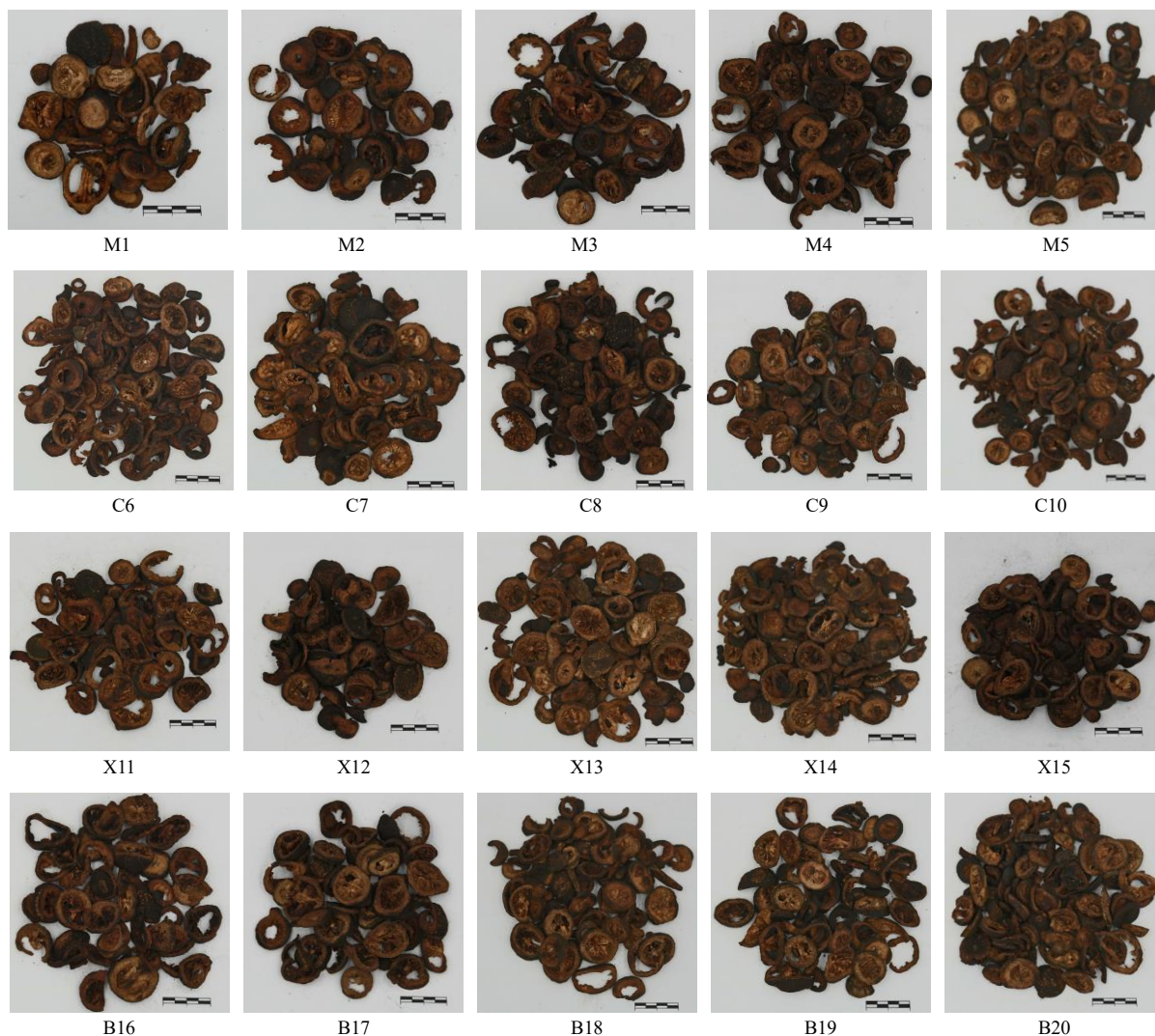
取青皮饮片,按照《中国药典》2025年版一部醋青皮炮制方法,具体炮制操作如下:取净青皮饮片100g,加入15g醋,闷润1h,置于预热的炒药锅中,翻炒至饮片表面加深,略有醋香气时,取出,晾凉,即得。分别用20批次不同类型醋炮制青皮,

共制得20批醋炙青皮饮片,米醋炙青皮饮片编号为M1~M5;陈醋炙青皮饮片编号为C6~C10;香醋炙青皮饮片编号为X11~X15;白醋炙青皮饮片编号为B16~B20。醋炙青皮样品的性状图见图1。

2.2 溶液的制备

2.2.1 混合对照品溶液的制备 分别称取芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素适量,精密称定,加甲醇溶解,配制成各对照品储备液,分别取各对照品储备液适量,加甲醇制成质量浓度分别为0.10、0.30、0.10、0.05、0.05、0.05 mg/mL的混合对照品溶液。

2.2.2 供试品溶液的制备 取醋炙青皮样品粉末(过五号筛)约0.2g,精密称定,置于具塞锥形瓶中,精密加入甲醇25mL,密塞,称定质量,超声(功率250W、频率40kHz)30min,放冷,加甲醇,补足减失的质量,摇匀,过0.45μm微孔滤膜,取续滤液,即得供试品溶液。



M1—M5-米醋炙青皮; C6—C10-陈醋炙青皮; X11—X15-香醋炙青皮; B16—B20-白醋炙青皮; 下同。

M1—M5-vinegar-processed CRPV roasted with rice vinegar; C6—C10-vinegar-processed CRPV roasted with aged vinegar; X11—X15-vinegar-processed CRPV roasted with balsamic vinegar; B16—B20-vinegar-processed CRPV roasted with white vinegar; same as below.

图 1 20 批醋炙青皮饮片外观

Fig. 1 Appearance of 20 batches of vinegar-processed *Citri Reticulatae Pericarpium Viride* (CRPV)

2.3 色谱条件

色谱柱为 Kromasil 100-5 C₁₈ 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相为乙腈-0.1%磷酸水溶液, 梯度洗脱: 0~8 min, 10%~14%乙腈; 8~17 min, 14%~16%乙腈; 17~38 min, 16%~18%乙腈; 38~50 min, 18%~30%乙腈; 50~72 min, 30%~38%乙腈; 72~88 min, 38%~50%乙腈; 88~88.1 min, 50%~10%乙腈; 体积流量为 1 mL/min; 检测波长为 283 nm; 柱温为 35 °C; 进样体积为 10 μL。

2.4 HPLC 指纹图谱的测定

2.4.1 精密度试验 称取 M1 样品粉末 (过五号筛), 按照 “2.2.2” 项下方法制备供试品溶液, 按照 “2.3” 项下色谱条件连续进样 6 次。依据《中国药

典》2025 年版中青皮药材含量测定项下明确规定橙皮苷为指标成分, 故以 8 号峰 (橙皮苷) 为参照峰, 计算各共有峰的相对保留时间和相对峰面积的 RSD 分别为 0.40%~1.42%和 0.67%~1.14%, 结果表明该仪器精密度良好。

2.4.2 重复性试验 称取 M1 样品粉末 (过五号筛), 按照 “2.2.2” 项下方法制备 6 份供试品溶液, 按照 “2.3” 项下色谱条件连续进样, 以 8 号峰 (橙皮苷) 为参照峰, 计算各共有峰的相对保留时间和相对峰面积的 RSD 分别为 0.05%~0.69%和 0.84%~1.47%, 表明该方法重复性良好。

2.4.3 稳定性试验 称取 M1 样品粉末 (过五号筛), 按照 “2.2.2” 项下方法制备供试品溶液, 按照

“2.3”项下色谱条件，分别在制备后0、2、4、8、12、24 h 进样测定，以8号峰（橙皮苷）为参照峰，计算各共有峰的相对保留时间和相对峰面积的RSD分别为0.06%~0.29%和0.58%~1.23%，结果表明供试品溶液在24 h内相对稳定。

2.4.4 HPLC 指纹图谱的建立 将测定结果导入《中药色谱指纹图谱相似度评价系统（2012版）》以M1号样品色谱图为参照图谱，采用平均数法及多

点校正后进行标记（mark）峰匹配，并生成20批醋青皮指纹图谱及共有模式图谱（R），结果见图2。以醋炙青皮饮片色谱图中共有峰为参考，共标定15个共有峰，并与6个对照品的色谱图（图3）及保留时间比对，指认了6个共有峰，其中，6号峰为芸香柚皮苷、8号峰为橙皮苷、10号峰为香蜂草苷、13号峰为橙皮素、14号峰为甜橙黄酮、15号峰为川陈皮素；另外，分析发现1号峰为溶剂峰。

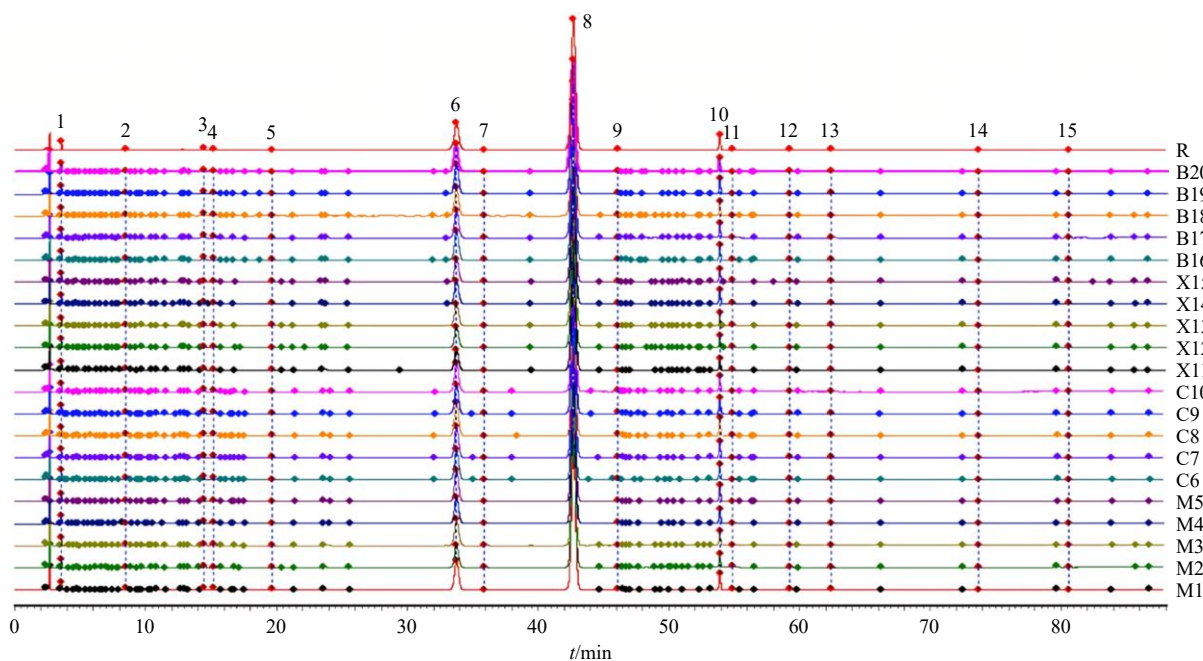
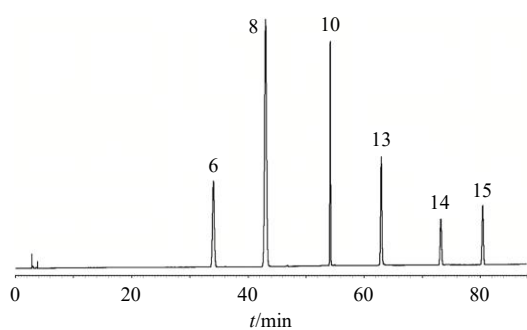


图2 20批醋炙青皮饮片 HPLC 图谱

Fig. 2 HPLC fingerprints of 20 batches of vinegar-processed CRPV



6-芸香柚皮苷；8-橙皮苷；10-香蜂草苷；13-橙皮素；14-甜橙黄酮；15-川陈皮素。

6-naringin；8-hesperidin；10-didymin；13-hesperetin；14-sinensetin；15-nobiletin。

图3 混合对照品的 HPLC 图

Fig. 3 HPLC fingerprint of mixed reference substances

2.5 样品含量测定

2.5.1 线性关系考察 取“2.2.1”项下混合对照品溶液，以甲醇稀释成不同质量浓度的系列混合对照品溶液，按照“2.3”项下色谱条件进行测定。以对

照品质量浓度为横坐标（X），对照品峰面积为纵坐标（Y）进行线性回归分析，得到线性回归方程及相关系数分别为芸香柚皮苷 $Y=16\ 199.0 X+8\ 749.2$, $R^2=0.999\ 6$, 线性范围 $0.781\ 3\sim 100.000\ \mu\text{g/mL}$ ；橙皮苷 $Y=16\ 109.0 X+1\ 424.4$, $R^2=0.999\ 6$, 线性范围 $2.343\ 8\sim 300.000\ \mu\text{g/mL}$ ；甜橙黄酮 $Y=13\ 599.0 X+3\ 020.6$, $R^2=0.999\ 7$, 线性范围 $0.390\ 6\sim 50.000\ \mu\text{g/mL}$ ；川陈皮素 $Y=16\ 495.0 X+5\ 500.1$, $R^2=0.999\ 7$, 线性范围 $0.390\ 6\sim 50.000\ \mu\text{g/mL}$ ；橙皮素 $Y=26\ 889.0 X+2\ 896.5$, $R^2=0.999\ 8$, 线性范围 $0.390\ 6\sim 50.000\ \mu\text{g/mL}$ ；香蜂草苷 $Y=15\ 457.0 X+9\ 906.2$, $R^2=0.999\ 7$, 线性范围 $0.781\ 3\sim 100.000\ \mu\text{g/mL}$ ；结果显示，各成分在相应质量浓度范围内线性关系良好。

2.5.2 精密度试验 称取 M1 样品粉末（过五号筛），按照“2.2.2”项下方法制备供试品溶液，按照“2.3”项下色谱条件连续进样6次，记录峰面积。

芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素峰面积的 RSD 分别为 0.70%、0.39%、0.55%、0.78%、1.21%、0.81%，结果表明该仪器精密度良好。

2.5.3 重复性试验 称取 M1 样品粉末（过五号筛），按照“2.2.2”项下方法制备供试品溶液，平行 6 份，按照“2.3”项下色谱条件进样测定。6 种成分芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素质量分数的 RSD 分别为 0.98%、1.10%、0.76%、0.57%、0.69%、0.66%，结果表明该实验重复性良好。

2.5.4 稳定性试验 称取 M1 样品粉末（过五号筛），按照“2.2.2”项下方法制备供试品溶液，按照“2.3”项下色谱条件，分别于制备后 0、2、4、8、16、24 h 进样测定，计算峰面积。6 种成分芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素峰面积的 RSD 分别为 0.25%、0.26%、0.48%、0.95%、1.50%、0.54%，结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.5.5 加样回收率试验 称取已知成分含量的 M1 样品粉末（过五号筛）0.1 g，置于锥形瓶中，平行 6 份，分别加入约与样品中成分含量等量的对照品，按照“2.2.2”项下方法制备供试品溶液，按照“2.3”项下色谱条件进样测定，计算各成分的平均加样回收率。结果 6 种成分芸香柚皮苷、橙皮苷、香蜂草苷、橙皮素、甜橙黄酮、川陈皮素的平均加样回收率分别为 96.39%、98.68%、97.23%、95.94%、96.91%、97.33%，RSD 分别为 0.47%、0.68%、0.57%、1.19%、1.67%、1.34%，结果表明该方法加样回收率良好。

2.5.6 含量测定 分别取 20 批醋炙青皮饮片粉末（过五号筛）0.2 g，精密称定，按照“2.2.2”项下方法制备供试品溶液，按照“2.3”项下色谱条件进样测定，计算 6 种成分的含量，结果见表 2。结果表明，不同种类醋对青皮中 6 种黄酮类成分的含量具有显著影响。陈醋炙青皮中芸香柚皮苷、橙皮苷及香蜂草苷的含量普遍高于其他组别。香醋炙青皮中上述 3 种成分的含量总体较低，但该组中甜橙黄酮与川陈皮素的含量相对较高。米醋和白醋炙青皮的各项成分含量多处于中间水平，且组内波动较小。

2.6 化学模式识别

2.6.1 层次聚类分析 (hierarchical cluster analysis, HCA) 将 20 批醋炙青皮饮片共有峰峰面积为原始

表 2 20 批醋炙青皮饮片中 6 种成分的含量测定结果

Table 2 Determination results of contents of six components in 20 batches of vinegar-processed CRPV

样品	质量分数/%					
	芸香柚皮苷	橙皮苷	香蜂草苷	橙皮素	甜橙黄酮	川陈皮素
M1	3.69	17.00	0.76	0.02	0.03	0.06
M2	2.83	15.96	0.66	0.04	0.08	0.11
M3	3.36	15.95	0.72	0.02	0.04	0.07
M4	3.37	16.68	0.67	0.02	0.03	0.06
M5	3.99	17.91	0.79	0.02	0.02	0.05
C6	3.92	18.12	0.76	0.06	0.01	0.05
C7	3.92	18.41	0.79	0.04	0.01	0.05
C8	4.35	19.41	0.86	0.04	0.01	0.04
C9	3.71	17.49	0.75	0.04	0.01	0.04
C10	3.79	18.92	0.77	0.04	0.03	0.07
X11	2.61	15.26	0.57	0.03	0.10	0.13
X12	2.56	15.19	0.56	0.03	0.09	0.12
X13	2.70	15.51	0.59	0.03	0.09	0.12
X14	2.88	16.25	0.64	0.05	0.08	0.12
X15	2.87	16.14	0.61	0.03	0.10	0.13
B16	3.61	16.99	0.71	0.04	0.03	0.06
B17	3.43	17.03	0.68	0.04	0.04	0.07
B18	3.51	17.19	0.69	0.04	0.03	0.07
B19	3.77	16.69	0.73	0.03	0.02	0.05
B20	3.54	16.65	0.69	0.06	0.02	0.05

数据，输入 <https://hiplot.com.cn> 网站中分析，按列标准化，采用 Ward.D2 聚类方法，进行 HCA，结果如图 4 所示。20 批样品总体上被聚为 4 个主要簇群，其划分与醋的 4 种类型（米醋、陈醋、香醋、白醋）具有较高的吻合度，这表明醋的种类是主导青皮炮制品化学特征差异的关键因素。但是，HCA 结果中也可观察到，个别样品未严格按醋的品种归类，存在交叉现象：米醋样品 M2 与香醋组 (X11~X15) 聚为一类；陈醋样品 C10 则与白醋组 (B16~B20) 聚为一类。这一现象提示，除了醋的宏观品类外，其具体的理化性质与化学成分组成对炮制结果具有显著影响。结合表 1 的醋样品的数据进行分析，可能的原因如下：样品 M2 所用米醋的总酸、不挥发酸、总酚、总黄酮及固体总量在其同组 5 批米醋中均为最低，从而导致聚类时发生偏离。同样，样品 C10 所用陈醋的不挥发酸含量在同组陈醋中最高，此性质可能使其炮制出的青皮在部分成分溶出或转化特征上趋近于白醋组样品。

上述结果说明，市售醋虽按传统品类划分，但受原料来源、发酵工艺及批次差异的影响，其内在

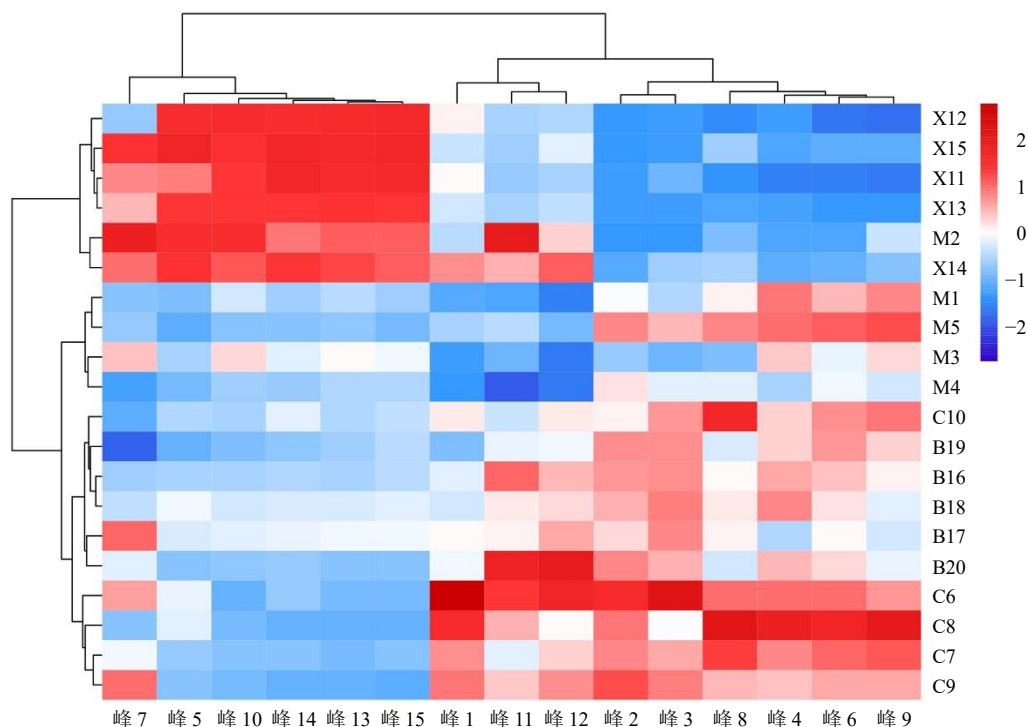


图4 20批醋炙青皮饮片15个共有峰面积的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of peak areas of 15 common peaks from 20 batches of vinegar-processed CRPV

质量（如总酸、特征性成分含量等）存在一定波动，并直接干扰炮制终产品的化学成分。此外，尽管实验过程中力求炮制条件一致，但手工炒制过程中可能存在的非控制变量微扰（如每次翻炒的均匀度、饮片与锅体接触的微观时间差异等）也可能对最终成分的转化与溶出产生细微影响，这或许也是造成个别样品聚类偏离的因素之一。采用更自动化和参数精确可控的现代炮制设备，将有助于在后续研究中减少此类变异。因此，在制定与优化中药炮制用辅料醋的质量标准时，除明确规定醋的种类外，还应对不同批次醋的关键理化指标（如总酸、不挥发酸、总酚等）设定合理的限度范围，以保障炮制工艺的稳定性 and 饮片质量的均一性。

2.6.2 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 将 20 批醋炙青皮样品共有峰峰面积导入 SPSS 26.0 软件进行 PCA。Kaiser-Meyer-Olkin 检验 (KMO 检验) 是用于评估数据是否适合进行 PCA 或因子分析的重要指标, Sig 值是 Bartlett 球形度检验的显著性水平 (P 值), KMO 值 > 0.6 , Sig 值 < 0.05 , 表明表明变量间存在显著相关性, 数据适合进行 PCA。并以主成分特征值 > 1 为标准, 提取 2 个满足 Kaiser 准则的主成分; 2 种主成分的特征值和方差贡献结果见表 3。

表3 醋炙青皮饮片 PCA 结果

Table 3 PCA results of vinegar-processed CRPV

主成分	特征值	贡献率/%	KMO值	Sig值
1	9.998	66.652	0.716	0.000
2	2.798	18.656		

采用 PCA 对数据进行标准化处理, 根据主成分得分系数构建主成分表达式, 以各主成分方差贡献率为权重, 对主成分得分进行加权求和, 即 $Y = Y_1 \times 66.652\% + Y_2 \times 18.656\%$, 计算综合得分 (Y)。综合得分越高, 样品主要成分含量越高。不同类型醋炮制青皮饮片综合得分结果见表 4, 结果显示陈醋炙青皮饮片组综合得分普遍较高。使用 SIMCA 14.1 分析软件生成 PCA 得分图, 醋炙青皮饮片 PCA 散点图 ($R^2 = 0.667$, $Q^2 = 0.809$) 见图 5, 由得分矩阵可见, 20 批醋炙青皮饮片大致被分为 4 类。

2.6.3 正交偏最小二乘-判别分析 (orthogonal partial least squares-discrimination analysis, OPLS-DA) 为了筛选不同类型醋对青皮质量产生影响贡献较大的成分, 采用 SIMCA 14.1 软件建立有监督模式的 OPLS-DA。OPLS-DA 得到不同种类醋炙青皮饮片散点得分图 ($R^2 = 0.639$, $Q^2 = 0.516$), 见图 6。以置换检验 ($n = 200$) 对建立的 OPLS-DA 模型进行验证, 结果如图 7 所示, 左端随机排列的 $R^2 = 0.222$ 、

表 4 20 批醋炙青皮饮片主成分综合得分和排序结果

Table 4 Comprehensive scores and ranking results of principal components for 20 batches of vinegar-processed CRPV

样品	综合得分			排序	样品	综合得分			排序	样品	综合得分			排序
	主成分1	主成分2	总得分			主成分1	主成分2	总得分			主成分1	主成分2	总得分	
M1	1.21	-2.73	0.30	11	C8	4.12	0.54	2.84	2	X15	-4.73	0.33	-3.09	18
M2	-3.89	1.83	-2.25	16	C9	2.69	1.22	2.02	3	B16	1.75	0.37	1.24	8
M3	-0.73	-2.29	-0.92	14	C10	2.12	-0.42	1.34	7	B17	0.18	0.84	0.28	12
M4	0.50	-3.30	-0.28	13	X11	-4.86	-0.12	-3.26	19	B18	1.07	0.06	0.72	10
M5	2.81	-1.55	1.59	6	X12	-4.90	-0.46	-3.35	20	B19	2.08	-1.42	1.12	9
C6	3.61	3.48	3.06	1	X13	-4.51	-0.23	-3.05	17	B20	1.94	1.64	1.60	5
C7	2.93	0.26	2.00	4	X14	-3.39	1.95	-1.89	15					

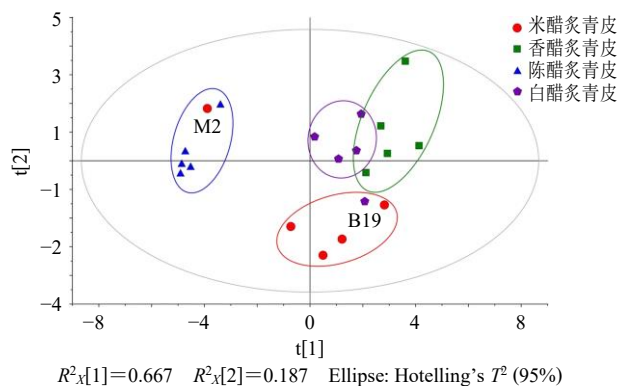


图 5 20 批醋炙青皮饮片 PCA 得分图

Fig. 5 PCA score plot of 20 batches of vinegar-processed CRPV

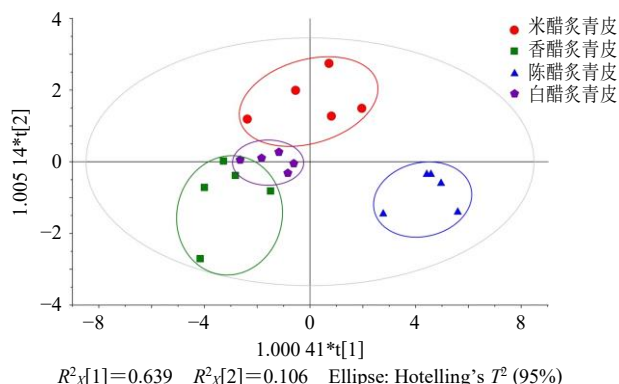


图 6 20 批醋炙青皮饮片 OPLS-DA 散点得分图

Fig. 6 OPLS-DA score scatter plot of 20 batches of vinegar-processed CRPV

$Q^2 = -0.514$, Q^2 的回归线与纵轴相交于 0.5 以下, 表明建立的 OPLS-DA 模型拟合度好, 没有过拟合。变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) 值见图 8, 筛选 VIP > 1 的共有峰, VIP 值越高, 对区分不同种类醋炙青皮饮片贡献率越高。从统计结果可知, 13 (橙皮素)、8、(橙皮苷)、9、3、5 号峰的 VIP 值 > 1, 故认为这 5 个色谱峰所代表的成分, 可以作为区分不同种类醋炙青皮饮片的标志

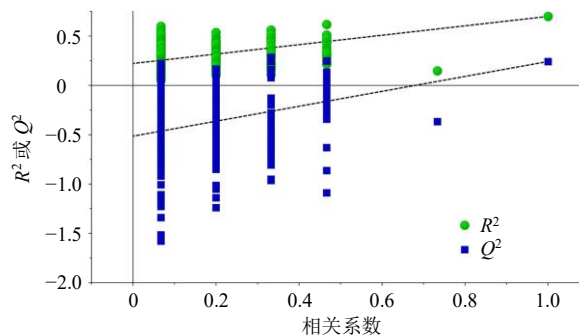


图 7 20 批醋炙青皮饮片 OPLS-DA 置换检验结果

Fig. 7 Permutation test results of OPLS-DA model for 20 batches of vinegar-processed CRPV

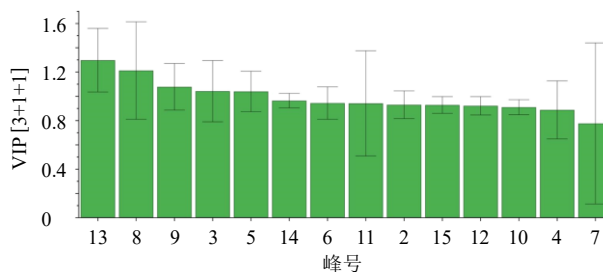


图 8 20 批醋炙青皮饮片 VIP 图

Fig. 8 VIP plot of 20 batches of vinegar-processed CRPV

物。其中, 橙皮素是橙皮苷的苷元, 其含量变化可能反映了醋炙过程中苷类成分的水解转化程度; 橙皮苷作为青皮的主要黄酮苷, 其含量受醋的酸性环境影响显著, 二者共同构成了表征醋炙工艺差异的核心化学指标。其他 VIP > 1 的未知峰 (9、3、5 号峰) 的进一步指认与功能解析, 将是后续研究的重要内容。

2.7 体外抗氧化活性研究

2.7.1 生青皮及醋炙青皮对 DPPH 自由基的清除作用^[27] 取生青皮及醋炙青皮 50 g, 加 10 倍量水, 煎煮 3 次, 每次 30 min, 合并滤液, 滤过, 减压浓缩, 冷冻干燥。取冻干粉适量, 加蒸馏水溶解, 超声 (250 W、40 kHz) 30 min, 配制成 2 mg/mL 的溶

液备用。取不同质量浓度样品溶液各 2 mL，分别加入 2 mL DPPH 溶液，充分振荡，室温下避光反应 30 min，于 517 nm 处测定吸光度，记作 A_1 。样品对照溶液用无水乙醇替代 DPPH 溶液，其余操作同上，记作 A_2 。维生素 C 作为阳性对照，记作 A_3 ，DPPH 自由基清除能力的计算公式如下。每种样品均重复测定 3 次，并计算半数抑制浓度 (median inhibition concentration, IC_{50})，结果见表 5 (在实验所设质量浓度范围内，维生素 C 对 DPPH、ABTS 自由基清除率始终 >50%，无法拟合计算得到 IC_{50} ，表明维生素 C 在所考察质量浓度区间内具有极强的体外抗氧化清除活性)。

$$\text{待测样品 DPPH 清除率} = 1 - (A_1 - A_2)/A_0$$

$$\text{阳性对照 DPPH 清除率} = (A_0 - A_3)/A_0$$

A_0 为空白对照 (以纯水替代样品溶液) 吸光度

表 5 生青皮及不同醋炙青皮饮片的抗氧化能力 ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

Table 5 Antioxidant capacity of raw CRPV and different vinegar-processed CRPV ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

样品	自由基清除能力 $IC_{50}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$		APC 指数/%
	DPPH	ABTS ⁺	
S1	110.6 ± 1.9	53.7 ± 0.6	95.72 ^b
M4	105.5 ± 2.0	70.9 ± 1.3	91.97 ^{c**}
C6	97.9 ± 2.1	76.6 ± 1.1	90.96 ^{c**}
X11	97.1 ± 2.2	77.1 ± 1.0	94.49 ^b
B16	96.7 ± 4.1	60.5 ± 0.6	98.00 ^{a**}

与 S1 比较: ** $P < 0.01$; 同列数据后不同上标小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

** $P < 0.01$ vs S1; different lowercase superscript letters within the same column indicate significant differences among groups ($P < 0.05$).

2.7.2 生青皮及醋炙青皮对 ABTS 自由基 (ABTS⁺) 清除率的测定^[28] 取 7.0 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.5 mmol/L 的 $K_2S_2O_8$ 溶液各 0.2 mL，混和均匀，在室温黑暗中放置 12~16 h，制备 ABTS⁺ 储备液。用水稀释储备液，使其在 734 nm 处测定的吸光度为 0.70 ± 0.02 ，即得 ABTS⁺ 反应液。将 100 μL 样品溶液与 100 μL ABTS⁺ 反应液在 96 孔板中混合，室温避光反应 30 min，在 734 nm 处测定吸光度，记作 A_1 。其他操作同“2.7.1”项下。ABTS⁺ 自由基清除能力的计算公式如下。每种样品均重复测定 3 次，并计算 IC_{50} 值，结果见表 5。

$$\text{待测样品 ABTS}^+ \text{清除率} = 1 - (A_1 - A_2)/A_0$$

$$\text{阳性对照 ABTS}^+ \text{清除率} = (A_0 - A_3)/A_0$$

A_2 为样品对照溶液吸光度， A_0 为空白对照 (以纯水替代样品

溶液) 吸光度， A_3 为阳性对照吸光度

2.7.3 抗氧化综合评价 由于不同的体外抗氧化方法代表不同的抗氧化机制，单一的指标难以完全反映样品的抗氧化能力，故本研究采用综合抗氧化能力 (antioxidant potency composite, APC)^[29] 来评价样品的抗氧化能力，结果见表 5。

$$APC = \sum(t_x/t_{max})/N$$

t_x 为方法测定值， t_{max} 为该方法测定的最大值， N 为使用的方法总数

基于 DPPH 与 ABTS⁺ 2 种不同机制抗氧化模型的 APC 指数评价显示，样品抗氧化能力依次为 $B16 > S1 > X11 > M4 > C6$ 。抗氧化综合评价结果显示，除 X11 外，其余醋炙样品与生青皮 (S1) 相比均存在显著差异 ($P < 0.01$)。经过多重比较明确了任意 2 组之间的具体差异情况，白醋炙品 (B16) 的 APC 指数显著高于其他所有组。生品 (S1) 与香醋炙品 (X11) 的 APC 指数无显著差异，但二者均显著高于米醋炙品 (M4) 与陈醋炙品 (C6)，而后两组之间亦无显著差异。综上，醋炙处理对青皮的抗氧化活性具有调节作用，其中白醋炙青皮 (B16) 展现出最佳的综合抗氧化性能，而陈醋炙处理 (C6) 则相对降低其抗氧化能力。结果表明醋的种类可能通过影响炮制过程中活性成分的变化，进而调控青皮的体外抗氧化活性。

3 讨论

中药炮制应用辅料的历史非常久远，古人在长期的临床实践中发现，炮制辅料对中药疗效影响显著并提出了“辅料作用论”的基本理论。本研究发现，醋的种类对青皮中黄酮类成分的影响具有选择性。陈醋炙青皮的芸香柚皮苷、橙皮苷及香蜂草苷的含量较高，表明陈醋炙炮制工艺更有利于此类黄酮苷的溶出或稳定保留；而香醋炙青皮则呈现出甜橙黄酮与川陈皮素等多甲氧基黄酮相对较高的趋势，提示其可能促进了成分间的转化或特定成分的溶出，米醋与白醋炮制品的成分含量多处于中间水平。同时通过化学模式识别成功筛选出橙皮素与橙皮苷等成分作为区分不同醋炙青皮饮片的关键质量标志物。但现有的研究发现，青皮醋炙后橙皮苷含量的变化不规律^[30-32]，综合本研究结果并结合文献报道，这种不规律性可能源于炮制工艺参数 (如温度、时间) 的细微差异，以及不同研究中所用醋本身理化性质的不同，这反映出当前仅以单一成分评价醋青皮质量的局限性。多成分、整体性评价已

是中药质量控制的趋势,因此,建立基于多指标成分协同评价的质量控制体系,更能科学、全面地反映炮制品的整体质量。

有研究发现,醋中所含的多酚类成分、黄酮类化合物以及美拉德反应产物含量的高低,是影响其抗氧化能力的重要因素^[33-34]。陈醋、香醋以固态发酵为主,而米醋、白醋多为液态发酵。陈醋因发酵周期长、微生物群落更丰富,易积累更多多酚类、黄酮类物质及美拉德反应产物^[35],白醋为液态发酵,成分组成相对简单^[36-37]。结合醋样品理化分析与抗氧化评价结果发现,白醋本身的总酚、总黄酮及固体总量在所有醋的样品组中最低,表明其自身的直接抗氧化贡献几乎可忽略不计。然而,白醋炮制青皮却表现出最强的综合抗氧化活性。结果提示,白醋炮制的高抗氧化活性并非源于其自身的抗氧化物质,而主要是辅料起到了促进青皮强抗氧化成分的充分溶出或转化的作用。陈醋与香醋中虽富含多酚、黄酮及美拉德反应产物等抗氧化成分,但其复杂的化学组成可能在炮制过程中与青皮成分发生相互作用(如竞争性溶出、络合等),或在体外抗氧化测定中产生基质干扰,导致其炮制品的APC指数并不如白醋的高。结果表明,醋炙青皮的抗氧化活性差异主要是由不同类型醋改变青皮内在成分所致,而非醋自身抗氧化能力的简单叠加。本研究结果提示,在醋炙青皮炮制中,若以提升与传统功效相关的黄酮类成分整体含量为目标,陈醋是更优选择;若以增强抗氧化活性为导向,则白醋显示出独特优势。

既往研究多集中于单一品种醋炮制对青皮中个别成分(如挥发油、橙皮苷)的影响^[15,30],或侧重于不同醋的理化性质比较^[12]。本研究系统比较了米醋、陈醋、香醋及白醋4大类20批常用醋对青皮中6种特征黄酮成分的整体影响规律,并运用化学模式识别技术,筛选出橙皮素与橙皮苷作为区分不同炮制品的关键差异性标志物,实现了更为全面的化学表征。在分析成分变化的基础上,同步开展了体外抗氧化活性评价,通过分析市售醋批次间理化性质的波动及其对炮制品化学特征的潜在影响,从实验层面表明了炮制辅料标准化与质量控制的重要性。本研究存在样品批次较少,评价指标局限于HPLC测定结果以及活性评价仅采用体外抗氧化模型等不足。未来的研究将进一步扩大样本量,覆盖更多产地与工艺的醋类样品,并通过溶剂萃取定

位活性物质基础,建立谱效关系模型以识别关键活性贡献成分。并且采用分子对接和更全面的抗氧化评价体系,如铁离子还原抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)、氧自由基吸收能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC),结合体外消化模拟及体内药效学实验,考察不同醋炙品中活性成分的生物利用度及抗氧化功效,从而深入揭示“辅料-药物-功效”三元联动的分子机制与科学内涵,从而为中药炮制辅料的精准选用和质量标准的科学制订提供更为坚实的依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 陈嘉谟. 本草蒙筌 [M]. 张印生, 韩学杰, 赵慧玲, 主校. 北京: 中医古籍出版社, 2009: 270.
- [2] 李梃. 医学入门 [M]. 金嫣莉, 等, 校注. 北京: 中国中医药出版社, 1995: 126.
- [3] 陈藏器著; 尚志钧 辑释. 《本草拾遗》辑释 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2002: 459.
- [4] 李中梓. 本草通玄 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2015: 60.
- [5] 张介宾. 景岳全书 [M]. 上海: 上海古籍出版社, 2017: 388.
- [6] 中国药典 [S]. 四部, 2025: 34.
- [7] 李时珍. 本草纲目: 金陵版点校本 [M]. 陈贵廷, 等, 点校. 北京: 中医古籍出版社, 1994: 1807.
- [8] 李先端, 顾雪竹, 毛淑杰. 醋的历史沿革及其保健功能 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(18): 295-297.
- [9] 卢之颐. 本草乘雅半偈 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2016: 47-48.
- [10] 刘英杰, 毛淑杰, 陈金春, 等. 不同品种醋炮制元胡对延胡索乙素提取率和固形物的影响 [J]. 浙江中医药大学学报, 2011, 35(2): 246-248.
- [11] 范玛莉. 不同食醋对醋制中药的化学成分影响研究 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [12] 刘济源, 曹星雨, 赵艺文, 等. 不同种类市售食醋特征指标的测定及差异性分析 [J]. 中国调味品, 2015, 40(11): 1-6.
- [13] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 212.
- [14] 张倩, 薛蓉, 徐瑞杰, 等. 中药“醋制入肝”炮制理论的研究进展与探讨 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(18): 4854-4862.
- [15] 龚千锋, 李慧. 青皮不同炮制品对其挥发油影响初探 [J]. 江西中医学院学报, 1991, 3(1): 52.
- [16] 赵赞. 基于氧化应激的柴胡疏肝散合阿魏酸抗抑郁症肝郁气滞证模型大鼠作用研究 [D]. 郑州: 河南中医药大学, 2023.

- [17] Shen N, Wang T F, Gan Q, *et al.* Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. *Food Chem*, 2022, 383: 132531.
- [18] Ali Y A, Ahmed O M, Soliman H A, *et al.* Rutin and hesperidin alleviate paclitaxel-induced nephrocardiotoxicity in wistar rats via suppressing the oxidative stress and enhancing the antioxidant defense mechanisms [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2023, 2023: 5068304.
- [19] 肖哲. 川陈皮素与阿魏酸通过抗炎与氧化应激及调控胃饥饿素发挥类似枳壳当归的抗抑郁促动力作用 [D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [20] 付祎珑, 林益游, 刘福才, 等. 基于网络药理学和动物实验探讨橙皮素对非酒精性脂肪性肝病的保护作用 [J]. *中成药*, 2025, 47(9): 3116-3123.
- [21] Zhang G Q, Sun X H, Wen Y J, *et al.* Hesperidin alleviates cholestasis via activation of the farnesoid X receptor *in vitro* and *in vivo* [J]. *Eur J Pharmacol*, 2020, 885: 173498.
- [22] Fan C W, Ling-Hu A, Sun D L, *et al.* Nobiletin ameliorates hepatic lipid deposition, oxidative stress, and inflammation by mechanisms that involve the Nrf2/NF- κ B axis in nonalcoholic fatty liver disease [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(50): 20105-20117.
- [23] 林木海. 吸收成分橙皮苷发挥类似枳壳厚朴抗抑郁及促胃肠动力作用及分子机制研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [24] 张明智, 隋海娟, 张玲玲, 等. 橙皮苷对功能性消化不良大鼠胃肠运动及 Ghrelin 表达的影响 [J]. *中药药理与临床*, 2014, 30(2): 30-34.
- [25] Wang Y, Cui W L, Pang G W, *et al.* Analyses of physical and chemical compositions of different medicinal specifications of CRPV by use of multiple instrumental techniques combined with multivariate statistical analysis [J]. *Molecules*, 2022, 27(10): 3285.
- [26] 孙梓玮, 崔伟亮, 王杨, 等. 基于 HPLC 指纹图谱及化学计量学筛选个青皮、四花青皮质量标志物 [J]. *中药材*, 2022, 45(3): 647-651.
- [27] 徐菁, 刘会琴, 刘晓燕. 贵长猕猴桃皮 HPLC 指纹图谱及抗氧化谱效关系研究 [J]. *食品科技*, 2021, 46(3): 288-296.
- [28] Li Y, Liu S T, Zhao C, *et al.* The chemical composition and antibacterial and antioxidant activities of five *Citrus* essential oils [J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 7044.
- [29] Seeram N P, Aviram M, Zhang Y J, *et al.* Comparison of antioxidant potency of commonly consumed polyphenol-rich beverages in the United States [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(4): 1415-1422.
- [30] 郑青山. 青皮不同炮制品中黄酮类成分的试验比较 [J]. *海峡药学*, 2011, 23(1): 58-59.
- [31] 顾田, 李妍, 王建科, 等. 青皮生品及贵州特色炮制品质量标准研究 [J]. *世界最新医学信息文摘*, 2019, 19(99): 350-351.
- [32] 王杨. 多技术融合的青皮醋炙增效缓性炮制原理研究 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2022.
- [33] 夏婷, 姚佳慧, 郑宇, 等. 传统食醋的抗氧化成分及功能研究进展 [J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 285-290.
- [34] Bai H, Wang S, Wang Z M, *et al.* Investigation of bioactive compounds and their correlation with the antioxidant capacity in different functional vinegars [J]. *Food Res Int*, 2024, 184: 114262.
- [35] 沈广玥. 食醋风味及其与发酵工艺的相关性分析 [D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [36] 李爱平, 李震宇, 邢婕, 等. 核磁共振代谢组学技术检测食醋化学成分 [J]. *食品科学*, 2013, 34(12): 247-253.
- [37] 李婷婷, 周丽, 任兴权, 等. 食醋中有机酸组成及其检测技术研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(24): 86-95.

[责任编辑 郑礼胜]