

苦杏仁贮藏过程中走油变质机制分析

程云霞¹, 于金倩², 王凯¹, 郭兰萍³, 王晓^{2*}

(1. 山东中医药大学药学院, 济南 250355;

2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省分析测试中心, 济南 250014;

3. 中国中医科学院中药资源中心道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700)

[摘要] 目的:研究苦杏仁走油过程中含水量、细胞膜相对透性及脂肪油酸败度的变化规律,探讨苦杏仁的走油变质机制。方法:对不同贮藏条件下的苦杏仁样品进行感官评价并分类;含水量变化以水分及水分活度表示,分别采用甲苯法和水分活度测定仪测定;细胞膜相对透性以丙二醛(MDA)含量和相对电导率为评价指标,分别采用硫代巴比妥酸比色法、电导仪测定;脂肪油酸败度的变化以脂肪油含量、酸值和过氧化值表示,脂肪油含量采用索氏提取法测定,酸值、过氧化值分别按2020年版《中华人民共和国药典》(四部)通则0713,2303所载方法进行测定。整理上述实验数据,应用化学计量学方法(聚类分析、主成分分析)建立不同走油程度苦杏仁样品的分类、判别模型,以验证分类结果的准确性。结果:根据感官评价结果,苦杏仁样品被分为未走油、轻微走油、走油三类。与未走油样品相比,走油样品的表面及子叶颜色加深、表面显油性、质发软并产生酸败味,水分、水分活度、相对电导率和MDA含量均显著升高($P<0.01$);脂肪油含量显著降低($P<0.01$),酸值与过氧化值显著升高($P<0.01$)。聚类分析与主成分分析结果表明,走油样品与未走油、轻微走油样品可以得到较好的区分。结论:高温、高湿贮藏条件可加快苦杏仁走油变质,在这一变质过程中同时伴随着药材内部含水量升高、细胞膜通透性增加并有脂肪油酸败发生。建议苦杏仁药材应贮藏于低温、干燥的环境中,且贮藏时间不宜过长。

[关键词] 苦杏仁;走油变质;含水量;细胞膜相对透性;酸败度;水分活度;脂肪油

[中图分类号] R22;R931;R28;S339.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2021)16-0124-07

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20211146

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20210309.1805.002.html>

[网络出版日期] 2021-03-10 14:20

Analysis of Rancidity Mechanism of Armeniacae Semen Amarum During Storage

CHENG Yun-xia¹, YU Jin-qian², WANG Kai¹, GUO Lan-ping³, WANG Xiao^{2*}

(1. School of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China;

2. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Shandong Analysis and Test Center, Jinan 250014, China;

3. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for
Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

[Abstract] **Objective:** To explore the mechanism of rancidity during storage by researching the changes of water content, relative permeability of cell membrane and rancidity levels of Armeniacae Semen Amarum in deterioration process. **Method:** Armeniacae Semen Amarum samples under different storage conditions were evaluated and classified by sensory assessors, and samples with different levels of rancidity were obtained. Water content was measured by toluene method, and water activity was obtained by water activity meter. Malondialdehyde (MDA) and relative conductivity were measured using thiobarbituric acid colorimetry and

[收稿日期] 20201221(015)

[基金项目] 国家中药材产业技术体系项目(CARS-21)

[第一作者] 程云霞,在读硕士,从事中药质量控制研究,E-mail:chengyunxia1234@163.com

[通信作者] * 王晓,博士,研究员,从事中药质量控制研究,E-mail:wangx@sdas.org

conductivity meter, respectively. The content of fatty oil was obtained by Soxhlet extraction. The acid value and peroxide value were measured in accordance with the general rules 0713 and 2303 of the 2020 edition of *Chinese Pharmacopoeia* (part IV), respectively. Based on the above experimental data, chemometric methods (cluster analysis, principal component analysis) were selected to establish classification and discriminant models of *Armeniaca Semen Amarum* with different rancidity levels, in order to verify the accuracy of the classification results. **Result:** According to the results of sensory evaluation, *Armeniaca Semen Amarum* samples were divided into three classes, including no rancidity, slight rancidity and rancidity. Compared with the no rancid samples, the color of surface and cotyledon were deepened in rancid samples, and the oil was appeared on surface with rancid taste. The values of water content, water activity, MDA content and relative conductivity were all significantly increased in deterioration process ($P<0.01$). The content of fatty oil was significantly decreased with the occurrence of rancidness ($P<0.01$), while the acid value and peroxide value increased significantly ($P<0.01$). The results of cluster analysis and principal component analysis showed that the rancid samples could be distinguished from the no rancid and slightly rancid samples. **Conclusion:** The storage conditions under high temperature and high humidity can accelerate the rancidness of *Armeniaca Semen Amarum*, which is accompanied by the increase of internal water content, the increase of cell membrane permeability and the occurrence of fatty acid rancidity. It is suggested that *Armeniaca Semen Amarum* should be stored in low temperature, dry environment, as well as short storage time.

[Keywords] *Armeniaca Semen Amarum*; rancidness; water content; relative permeability of cell membrane; rancidity levels; water activity; fatty oil

优良、稳定的中药品质是确保中医临床疗效和保障公共卫生安全的基础。贮藏是否得当与药材品质密切相关,若贮藏不当极易发生气味散失、走油、变色、风化、潮解、发霉、变味等变质现象,进而影响药材品质,降低临床疗效^[1]。走油是中药材、中药饮片贮藏过程中普遍存在的一种变质现象,又称“泛油”,是指中药所含的脂肪油、糖类、黏液质、蛋白质、挥发油等因受热、受潮发生变质,出现药材颜色加深、质地发软、表面油光、发黏、油酸败味等现象,严重影响药材品质^[2]。

苦杏仁为蔷薇科植物山杏、西伯利亚杏、东北杏或杏的干燥成熟种子^[3],始载于《神农本草经》,具有止咳平喘、润肠通便的功效。现代药理研究表明,苦杏仁有预防动脉粥样硬化、抗高脂血症、抗癌、抗菌和抗氧化等作用^[4]。苦杏仁中含丰富脂肪油(占总量的40%~56%)^[5],在贮藏中极易发生走油变质,严重影响苦杏仁品质及临床用药安全性。目前对苦杏仁贮藏养护研究多集中于外界因素对药材质量影响和走油前后指标成分含量变化方面^[6-10],关于走油变质的发生、发展机制研究相对较少。

含水量是影响中药质量的关键因素之一,考察贮藏期内含水量的变化是评价苦杏仁贮藏养护效果的重要指标之一^[11],2020年版《中华人民共和国

药典》(简称《中国药典》)检查项新增苦杏仁药材含水量规定(不得超过7%)。活性成分含量测定也是评价中药质量的重要方式之一^[12-13]。脂肪油作为苦杏仁中主要的活性成分,常用作走油质量评价指标;在贮藏过程中,脂肪油易发生酸败现象,酸败度也常用来反映药材变质程度^[7]。此外,有研究发现,枸杞子走油与其细胞膜透性增大有关^[14],而关于苦杏仁走油过程中膜透性变化规律尚无研究报道,故本研究选取丙二醛(MDA)含量和相对电导率(G)作为反映细胞结构和功能变化的指标,探讨苦杏仁走油发生与膜透性变化相关性^[15-16]。综上分析,本研究基于恒温恒湿加速试验,模拟不同温度、湿度条件下苦杏仁不同走油程度样品的制备。采用传统感官评价,将全部苦杏仁样品分为未走油、轻微走油、走油三类。选取水分,水分活度, G ,脂肪油含量,酸值,过氧化值及MDA含量作为表征苦杏仁内在变质的指标,通过研究走油过程中含水量、细胞膜相对透性及脂肪油酸败度的变化规律,建立不同走油程度苦杏仁样品的分类、判别模型,以探讨苦杏仁走油变质的机制,为预防、调控苦杏仁走油提供科学依据。

1 材料

WD-2A型药物稳定性试验箱(天津市精拓仪器科技有限公司),AL104-IC型电子分析天平(瑞士

Mettler-Toledo公司), FW-100型高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司), WSC-4型水分活度测定仪(无锡市华科仪器仪表有限公司), DDS-307型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司), UV-2550型紫外分光光度计(日本岛津公司), TGL-16型离心机(湘仪离心机仪器有限公司), Milli-Q型超纯水系统(德国默克密理博有限公司)。

可溶性淀粉(国药集团化学试剂有限公司,批号F20091117a), 硫代巴比妥酸(上海源叶生物科技有限公司,批号M18M11H13275), 水为超纯水, 所有试剂均为分析纯。苦杏仁于2019年7月初, 即杏仁果实成熟后于山东省蒙阴县采收, 除去果肉, 杏核置于室外(温度>23℃)自然风干1周后, 除去核壳, 将获得的杏仁种子贮存在4℃冰箱中用于后续实验; 采用甲苯法测定苦杏仁初始含水量2.97%, 水分活度0.52; 苦杏仁样品经山东中医药大学李佳教授鉴定为蔷薇科植物山杏 *Prunus armeniaca* var. *ansu* 的干燥成熟种子。

2 方法

2.1 不同走油程度样品的制备 将苦杏仁样品分别置于3组不同温度、不同相对湿度(RH)条件下进行加速试验, 每隔4~6 d取样分析, 以获得不同走油程度的苦杏仁样品。测试样品编号见表1。

表1 苦杏仁的样品信息

Table 1 Sample information of *Armeniaca Semen Amarum*

加速条件		加速时间/d	样品代号
T/°C	RH/%		
25	30	3, 7, 11, 16, 20	S1~S5
50	50	3, 7, 11, 16, 20	S6~S10
65	60	3, 7, 11, 16, 20	S11~S15

2.2 苦杏仁样品感官评价^[7,11] 5个参数被选用来描述苦杏仁的总体走油程度, 包括硬度、子叶颜色、表面颜色、气味及是否显油性, 见表2。实验中选取10名具有专业鉴定知识的人员组成感官评价小组(5名男性和5名女性), 所有的评估者均接受一段时间的培训, 使具备鉴定不同走油程度苦杏仁的能力。基于表2所示的感官评价信息, 评估者对实验中制备的全部样品进行感官评价。

2.3 含水量的测定 按2020年版《中国药典》(四部)通则0832“甲苯法”测定。水分活度采用水分活度测定仪测定。水分活度测定仪使用前先开机预热30 min, 用空调维持室内温度在24~28℃, 待仪器稳定后将破碎的苦杏仁样品置于塑料器皿中, 样品

表2 苦杏仁样品的感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard of *Armeniaca Semen Amarum*

样品	硬度	子叶颜色	表面颜色	气味	油性表面
未走油	硬	乳白色	黄棕色	气微	无
轻微走油	稍软	部分微黄色	深黄棕色、黄褐色	微异味	轻微
走油	软	黄棕色	深褐色	强烈酸败味	油性

量需超过塑料器皿体积的60%。测量时, 塑料器皿的盖不得盖上, 设置测量时间15 min, 测量结束时, 记录样品的水分活度及温度。

2.4 G和MDA含量测定

2.4.1 G的测定 取5粒苦杏仁, 准确称重(*W*), 自来水、超纯水各冲洗3遍, 滤纸吸干表面水分, 装入50 mL量管中, 加超纯水30 mL, 振荡, 使种子浸没于水中, 室温封口放置24 h后测定浸提液电导率, 记为*D*₁; 接下来将装有浸提液的量管置沸水中水浴30 min, 取出后冷却至室温, 再次测定浸提液电导率, 记为*D*₂^[17]。样品平行设置3组, 取平均值。计算公式为 $G = (D_2 - D_1) / W$, 单位为 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.4.2 MDA含量测定 精密称取苦杏仁样品0.5 g于研钵中, 加10%三氯乙酸溶液10 mL研磨成匀浆, 转至离心管中, 4 500 r·min⁻¹离心10 min(离心半径25 cm, 下同), 得上清液, 体积记为*V*₁。取上清液2 mL于10 mL试管中, 加10%三氯乙酸2 mL和0.67%硫代巴比妥酸溶液4 mL, 密塞, 混匀后于100℃沸水浴15 min, 取出后迅速冷却, 转移至离心管中以4 000 r·min⁻¹离心5 min, 得上清液, 体积记为*V*₂。取上清液分别于450, 532, 600 nm处测定吸光度*A*, 根据公式 $\text{MDA 浓度} = 6.45 \times (A_{532 \text{ nm}} - A_{600 \text{ nm}}) - 0.56 \times A_{450 \text{ nm}}$ 计算MDA浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 根据公式 $\text{MDA 含量} = (\text{MDA 浓度} \times V_2 \times V_1) / (2 \times \text{植物组织鲜重})$ 计算MDA含量($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)。平行3次, 取平均值。

2.5 脂肪油含量、酸值、过氧化值的测定 取样品35 g, 粉碎, 过20目筛, 装入纸筒, 置索氏提取装置中, 加石油醚190 mL, 水浴加热回流3 h, 放冷, 3号垂熔玻璃漏斗过滤, 滤液置水浴上减压回收溶剂至尽, 即得油脂, 称重, 根据公式 $[(\text{脂肪油质量} / \text{样品质量}) \times 100\%]$ 计算脂肪油质量分数; 平行3次, 取平均值, 脂肪油于4℃冰箱中储藏, 备用。酸值、过氧化值测定分别参照2020年版《中国药典》(四部)通则0713, 2303方法。

2.6 数据处理 采用SPSS 26.0和Origin 2019b进行数据处理。多组间的比较采用单因素方差分析,

两组间比较采用最小显著性差异法(LSD), $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

3 结果

3.1 苦杏仁样品分类 感官评价小组基于表2信息对制备的苦杏仁样品进行鉴定, 结果发现样品S1~S6未走油, 样品S7~S9轻微走油, 样品S10~S15走油。部分样品的性状见图1。



A. 未走油样品; B. 轻微走油样品; C. 走油样品(图3同)

图1 不同走油程度的苦杏仁样品

Fig. 1 Samples of *Armeniaca Semen Amarum* with different rancidity levels

3.2 苦杏仁含水量、细胞膜相对透性及油脂酸败度变化分析

3.2.1 水分、水分活度 水分与水分活度是考察中药贮藏养护效果的重要指标, 高于或接近临界值均会导致药材走油、发霉、变色等变质现象的发生, 降低中药品质与药用价值^[11, 18]。苦杏仁样品的水分是指其内部的自由水和束缚水占原始质量的百分比^[19], 水分变化见图2。结果发现未走油与轻微走油苦杏仁中水分差异不显著, 而走油苦杏仁中水分与前两者则差异明显($P < 0.01$, $P < 0.05$), 提示水分是影响苦杏仁走油的一个重要因素。水分活度用于衡量水分与种子内物料的结合程度, 也被称为束缚水量^[19], 苦杏仁的水分活度变化情况见图2。结果发现走油样品的水分活度与未走油样品差异极显

著($P < 0.01$), 但与轻微走油样品差异不具有统计学意义。

3.2.2 G及MDA含量 作为植物生理生化试验的重要指标, G与MDA含量常用来反映植物细胞膜透性的变化规律。植物受到逆境胁迫或者机械损伤时, 细胞膜被破坏, 导致胞液外渗, 溶液的离子浓度增大, G升高^[20]。MDA是膜脂过氧化的产物, 其含量高低常用于评估膜脂氧化还原反应的程度, MDA含量越高, 膜脂过氧化程度越高, 膜被破坏的越严重^[21]。苦杏仁的G及MDA含量变化情况见图2。结果发现与未走油样品比较, 轻微走油苦杏仁的G明显升高($P < 0.01$), MDA含量则无显著差异; 与轻微走油样品比较, 走油苦杏仁的G显著升高($P < 0.01$), MDA含量显著增加($P < 0.01$), 提示走油后苦杏仁细胞结构和功能受到一定破坏, 细胞膜脂过氧化, 通透性增加。

3.2.3 脂肪油含量、酸值、过氧化值 苦杏仁中富含脂肪油, 高温、高湿条件贮藏时, 常发出难闻的油酸味^[22]。苦杏仁的脂肪油含量、酸值、过氧化值测定情况见图2。结果发现与未走油样品比较, 轻微走油样品的脂肪油含量、酸值、过氧化值差异无统计学意义; 与轻微走油样品比较, 走油苦杏仁中脂肪油含量减少($P < 0.01$), 酸值及过氧化值则差异无统计学意义, 提示苦杏仁走油过程伴随着脂肪油氧化酸败发生。

3.3 内在变质指标的相关性分析

3.3.1 与性状指标的相关性分析 传统性状鉴定结果表明, 苦杏仁走油后, 表面及子叶颜色加深, 出现质软、油性并伴有酸败味等现象。理化分析结果发现, 随着走油程度加重, 样品脂肪油含量逐渐降低, 水分、水分活度、酸值、过氧化值均升高, 表明脂肪油的氧化在加剧。因此, 苦杏仁走油过程中发生的颜色、气味变化与脂肪油氧化酸败有关。

3.3.2 变质指标间相关性分析 将水分, 水分活度, G, MDA含量, 脂肪油含量, 酸值及过氧化值进行两两相关性分析, 见表3。结果发现样品脂肪油含量与G, MDA含量存在负相关性, 水分、水分活度均与酸值及过氧化值呈正相关。提示苦杏仁贮藏在高温、高湿的环境下, 细胞结构和功能被破坏, 膜透性增大, 脂肪油外溢并发生氧化酸败, 致使酸值、过氧化值升高。

3.4 聚类分析(HCA)^[23-27] 采用组间平均连接法, 以欧氏距离的平方为量度, 选取样品水分, 水分活度, G, MDA含量, 脂肪油含量, 酸值及过氧化值为

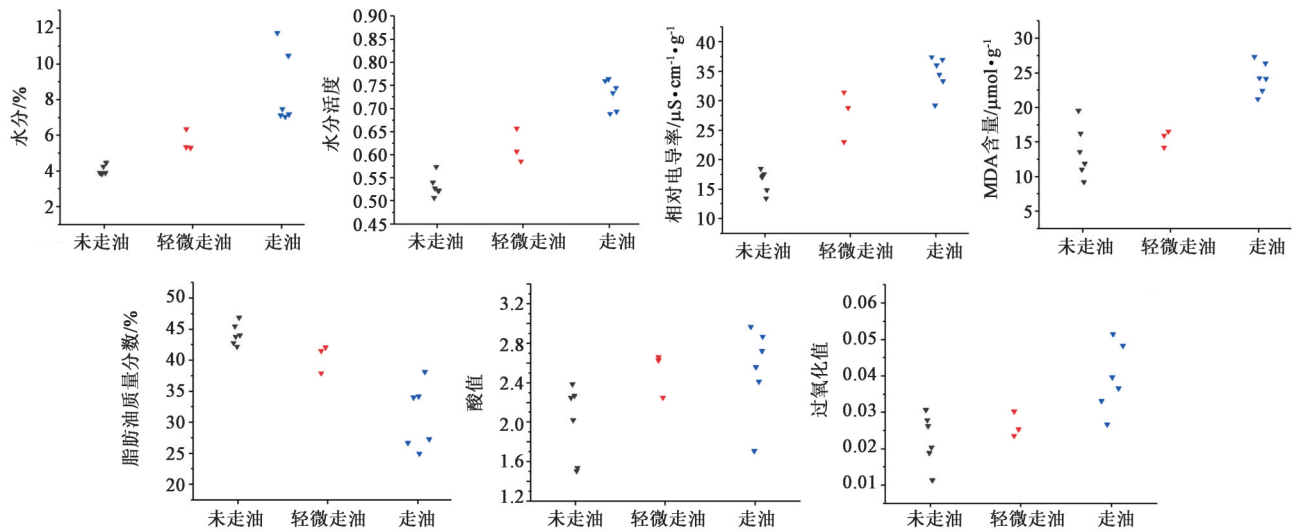


图2 不同走油程度苦杏仁中各项变质指标的测定

Fig. 2 Determination of various deterioration indexes of Armeniaca Semen Amarum with different rancidity levels

表3 苦杏仁内在变质指标间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis among intrinsic deterioration index of Armeniaca Semen Amarum

指标	水分	水分活度	MDA含量	G	脂肪油含量	酸值	过氧化值
水分	1.000						
水分活度	0.878 ¹⁾	1.000					
MDA含量	0.835 ¹⁾	0.760 ¹⁾	1.000				
G	0.865 ¹⁾	0.874 ¹⁾	0.948 ¹⁾	1.000			
脂肪油含量	-0.927 ¹⁾	-0.859 ¹⁾	-0.900 ¹⁾	-0.911 ¹⁾	1.000		
酸值	0.616 ²⁾	0.514 ²⁾	0.766 ¹⁾	0.702 ¹⁾	-0.067 ¹⁾	1.000	
过氧化值	0.882 ¹⁾	0.757 ¹⁾	0.838 ¹⁾	0.816 ¹⁾	-0.796 ¹⁾	0.669 ¹⁾	1.000

注:¹⁾P<0.01;²⁾P<0.05。

变量,对苦杏仁样本进行分类,结果发现走油程度相近的被分为一类,见图3。当欧氏距离为15时,苦杏仁样品可分为三类,分别为未走油样品、轻微走油样品和走油样品。走油组样品包括S10~S15,与感官小组评价结果一致,可与其他两组明显区分。值得注意的是,S5样品在HCA结果中归属于轻微走油组,这与感官小组评价结果存在出入,出现这种情况可能是由于轻微走油是样品从未走油到走油的中间过渡阶段,感官评价结果存在一定的模糊性。

3.5 主成分分析(PCA)^[28-29] 与HCA一致,选取表征未走油、轻微走油、走油苦杏仁的7个变质指标作为变量,将已标准化的数据进行PCA处理,构建不同走油程度苦杏仁样品的判别模型,见图4。前3个主成分的累计方差百分比高达94.9%,能表征原始数据的绝大部分有效信息。由图4可知,走油样品与未走油样品能够得到较好的区分,彼此间并无交叉重叠现象,表明走油样品与未走油样品的水分,

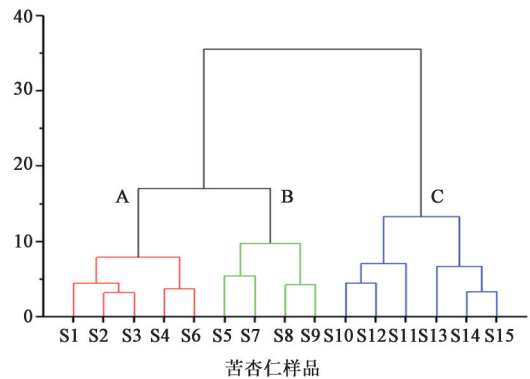


图3 苦杏仁样品的HCA

Fig. 3 HCA of Armeniaca Semen Amarum samples

水分活度,G,MDA含量,脂肪油含量,酸值,过氧化值有显著差异,这与上述测定结果一致。而轻微走油样品与未走油样品间存在交叉,无法准确分类。

4 讨论

苦杏仁富含脂肪油,湿热条件下贮藏容易使得脂肪油外溢,发生走油变质^[30]。有文献报道,苦杏仁走油后种皮颜色、子叶颜色加深,油败酸味变

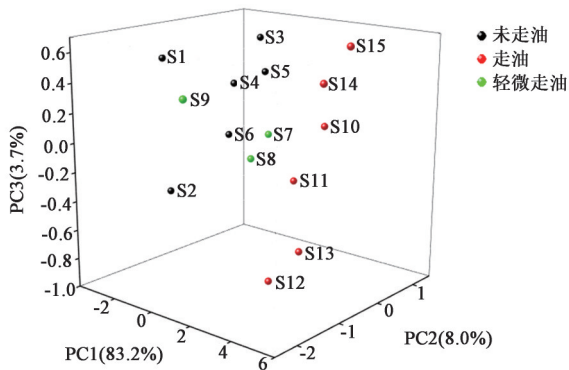


图4 苦杏仁样品的PCA得分

Fig. 4 PCA scores of *Armeniaca Semen Amarum* samples

重^[7]。采用气相色谱-离子迁移谱法(GC-IMS)检测到走油后的苦杏仁中肉豆蔻酸、棕榈酸、油酸、亚油酸及2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)等有色组分相对质量分数总和增大^[31]。醛类和酮类物质是脂肪氧化的终产物,与脂肪氧化酸败的气味密切相关。苦杏仁走油后醛类物质含量减少,如具有特殊苦杏仁气味的苯甲醛;酮类物质含量增加,如2-溴苯丙酮^[32],提示苦杏仁脂肪油在发生酸败,酸值、过氧化值增大。有研究表明药材走油发生是脂肪油外溢,在氧气、酶、微生物、光线等作用下发生一系列氧化、分解反应的结果^[33]。但此结论对于细胞内脂肪油是如何溢出、氧化分解反应所需的氧气来源于何处并没有深入探讨。

本文通过对苦杏仁走油过程中含水量、细胞膜相对透性及脂肪油酸败度的变化规律进行研究,探讨了苦杏仁发生走油变质的可能机制。实验结果显示,苦杏仁在25℃,RH 30%条件下贮藏20 d未出现走油现象,而在温度65℃,RH 60%条件下贮藏第3天即出现走油,表明高温、高湿贮藏条件可加速苦杏仁走油变质。苦杏仁走油后,脂肪油含量减少,酸值、过氧化值明显升高,表明走油过程中脂肪油发生酸败;MDA含量及G也有明显增大,这与高温、高湿贮藏条件破坏了细胞膜的结构和功能,使其膜脂过氧化,透性增大有关。实验中也发现走油后苦杏仁中水分、水分活度增加,故建议苦杏仁药材干燥后于4~20℃冷藏,环境湿度控制在30%以下,贮藏时间越短越好。另外,HCA和PCA结果发现,走油样品与未走油样品能得到准确区分,这在一定程度上表明内在变质指标可用于阐明苦杏仁走油前后的质量差异,本文构建的走油模型具有一定的代表性。

综上所述,苦杏仁走油的发生是外在条件(温度、湿度及贮藏时间等)致使内在因素改变(药材自

身的性状、理化和生理性质变化)的结果。结合本文研究结果,推测苦杏仁走油变质的机制为在高温、高湿环境中贮藏,细胞膜被破坏,细胞壁通透性增加,细胞内脂肪油外流,水中携带的活性氧催化脂肪油发生一系列氧化酸败,出现了颜色加深、质变软、刺鼻酸味等走油现象。但加速试验贮藏时间有限,此推测结论还需后续长期贮藏试验来进一步验证。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

[参考文献]

- [1] 李倩,何芳,艾倩倩,等. 模拟加速实验研究大黄贮藏过程中颜色变化与药效成分的相关性[J]. 中国实验方剂学杂志,2019,25(23):139-144.
- [2] 曹光昭,陈慧荣,刘玢清,等. 不同走油程度苦杏仁“电子鼻”气味与止咳药效的相关性分析[J]. 中成药,2020,42(5):1249-1254.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:210.
- [4] GENG H L, YU X C, LU A L, et al. Extraction, chemical composition, and antifungal activity of essential oil of bitter almond[J]. Int J Mol Sci, 2016, 17(9):1421.
- [5] FENG J, JI W, JOE M R, et al. Effect of roasting temperatures on the properties of bitter apricot (*Armeniaca sibirica* L.) kernel oil[J]. J Oleo Sci, 2018, 67(7):813-822.
- [6] 阎敏,廖建萍. 贮存条件对苦杏仁质量的影响[J]. 中药新药与临床药理,2009,20(1):72-74.
- [7] 拱健婷,赵丽莹,徐东,等. 苦杏仁走油过程中外观性状、活性成分和酸败度的变化规律及其相关性分析[J]. 中国中药杂志,2020,45(13):3155-3160.
- [8] 张丽娟. 苦杏仁小包装饮片贮藏养护研究[D]. 成都:成都中医药大学,2013.
- [9] 罗琼. 苦杏仁泛油后主要有效成分的改变[J]. 中医学报,2002,30(3):32-33.
- [10] 阎敏,李新中. 苦杏仁“泛油”后的质量变化[J]. 中药材,2008,32(8):1251-1252.
- [11] 兰志琼,张丽娟,刘晓芬,等. 不同贮藏条件对苦杏仁小包装饮片性状和含水量的影响[J]. 中药与临床,2014,5(5):20-22.
- [12] 王慧,常坤,高鹏,等. 川麦冬药材的等级评价标准分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2020,26(9):194-201.
- [13] 蔡广知,赵凌,王莎莎,等. 甘草药材等级标准分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2019,25(10):148-153.
- [14] 卢俊宇,陈鸿平,胡媛,等. 枸杞子贮藏过程中水分等生理活性变化与“走油”的相关性[J]. 中国实验方剂

- 学杂志,2016,22(13):63-67.
- [15] 周冰谦,卢恒,刘峰,等. 不同温度胁迫对金银花细胞膜透性、活性氧代谢及其有效物质积累的影响[J]. 中国中药杂志,2019,44(18):3935-3941.
- [16] 许佳林. 高温胁迫对山杏幼苗丙二醛和脯氨酸指标变化的影响[J]. 天津农业科学,2013,19(4):98-100.
- [17] 张婷婷,赵宾,杨丽明,等. 基于高光谱成像技术结合SPA和GA算法测定甜玉米种子电导率[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(8):2608-2613.
- [18] 刘珈羽,陈鸿平,胡媛,等. 枸杞子“走油”发生与水分含量及水分活度相关性研究[J]. 时珍国医国药,2017,28(6):1293-1296.
- [19] 朱海兰,朱周静,李科友. 微波加热法测定苦杏仁水分含量的研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):117-120.
- [20] 付元真. 金银花低温烘干过程中活性成分变化及机制[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
- [21] 赵惠新,覃建兵,祝长青,等. 铅胁迫对甜瓜种子胚芽酶系统及MDA含量的影响[J]. 种子,2008,27(12):82-84.
- [22] 赵丽莹. 基于电子鼻技术苦杏仁“走油”预警模型的建立[D]. 北京:北京中医药大学,2017.
- [23] ZAKARIA S R, SAIM N, OSMAN R, et al. Combination of sensory, chromatographic, and chemometrics analysis of volatile organic compounds for the discrimination of authentic and unauthentic harumanis mangoes [J]. *Molecules*, 2018, 23 (9) : 2365.
- [24] GERHARDT N, SCHWOLOW S, ROHN S, et al. Quality assessment of olive oils based on temperature-ramped HS-GC-IMS and sensory evaluation; Comparison of different processing approaches by LDA, kNN, and SVM [J]. *Food Chem*, 2019, 278: 720-728.
- [25] QI D D, MIAO A Q, CAO J X, et al. Study on the effects of rapid aging technology on the aroma quality of white tea using GC-MS combined with chemometrics: In comparison with natural aged and fresh white tea [J]. *Food Chem*, 2018, 265: 189-199.
- [26] TIAN L L, ZENG Y Y, ZHENG X Q, et al. Detection of peanut oil adulteration mixed with rapeseed oil using gas chromatography and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Anal Method*, 2019 12 (10):2282-2292.
- [27] XU M W, JIN Z, LAN Y, et al. HS-SPME-GC-MS/olfactometry combined with chemometrics to assess the impact of germination on flavor attributes of chickpea, lentil, and yellow pea flours [J]. *Food Chem*, 2019, 280: 83-95.
- [28] WANG X R, YANG S P, HE J N, et al. A green triple-locked strategy based on volatile-compound imaging, chemometrics, and markers to discriminate winter honey and sapium honey using headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Res Int*, 2019, 119: 960-967.
- [29] 陈楚英,刘善军,付永琦,等. 基于PCA分析“南丰”和“新余”蜜橘的耐贮性差异 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(12):2474-2480.
- [30] 赵梓辰,杨丽,李雪莲,等. 中药材走油现象探析 [J]. *亚太传统医药*, 2014, 10(23):32-34.
- [31] 拱健婷,赵丽莹, RUDOLF B, 等. “辨状论质”看中药材苦杏仁走油 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(23): 4375-4381.
- [32] 陈慧荣. 基于颜色气味数字化及信息融合的苦杏仁走油监测系统的研究 [D]. 北京:北京中医药大学, 2019.
- [33] 李倩,兰志琼,刘晓芬,等. 中药材贮藏过程中质量变化机理的研究进展 [C]//中国商品学会. 中国商品学会第五届全国中药商品学术大会论文集:2017年卷. 哈尔滨:中国商品学会, 2017:9.

[责任编辑 刘德文]