

• 药剂与工艺 •

基于仿生技术对薏苡仁麸炒过程中色泽气味变化研究

陈 鹏¹, 肖晓燕¹, 梅 茜¹, 李 林¹, 毛春芹¹, 刘明贵², 陆兔林^{1*}, 徐葱茏^{2*}

1. 南京中医药大学药学院, 江苏 南京 210023

2. 江西景德中药股份有限公司, 江西 乐平 333302

摘 要: 目的 对薏苡仁麸炒过程中的色泽与气味进行客观量化并对色泽与气味的变化特征进行研究。方法 采用 CM-5 型分光测色计(电子眼)及 Heracles NEO 超快速气相电子鼻技术, 并通过判别分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)、判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)、风味热图等方法对获取数据进行处理分析。结果 随着炮制程度的加深, 薏苡仁外观色泽整体上呈现变暗(L^* 值不断降低)、变红(a^* 值不断增加)、变黄(b^* 值不断增加)的变化趋势, 基于粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 所构建的判别函数实现了生薏苡仁及不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的区分。薏苡仁固有及在麸炒过程中共检测出 34 种挥发性气味物质, 随着炮制程度的加深, 挥发性气味物质的丰富度不断提高。热图分析结果表明 1-丁烯、2-丁烯、丙烯醛、乙硫醇、2-丁醇、乙偶姻、1,4-二氧六环、丙二醇、1-甲基-1*H*-吡咯、甲基环己烯、丁酸乙酯、丁基二甲硫醚、糠醇、辛内酯 14 种成分在薏苡仁麸炒过程中变化最为明显。PCA 与 DFA 均可实现生薏苡仁及不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的区分。结论 通过电子眼、电子鼻仿生技术对薏苡仁麸炒过程中色泽与气味变化进行研究, 为基于性状进行中药炮制研究提供了新的方法与思路。

关键词: 麸炒薏苡仁; 电子眼; 超快速气相电子鼻; 色泽; 气味; 炮制; 判别分析; 主成分分析; 判别因子分析; 丁烯; 丙烯醛; 乙硫醇; 乙偶姻

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2022)14-4285-13

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.14.008

Study on color and odor change of *Coicis Semen* bran stir-fry based on bionic technology

CHEN Peng¹, XIAO Xiao-yan¹, MEI Xi¹, LI Lin¹, MAO Chun-qin¹, LIU Ming-gui², LU Tu-lin¹, XU Cong-long²

1. College of Pharmacy, Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

2. Jiangxi Jingde Chinese Medicine Co., Ltd., Leping 333302, China

Abstract: Objective To quantify objectively the color and odor of *Yiyiren* (*Coicis Semen*) bran during frying and to study the characteristics of color and odor change. **Methods** CM-5 spectrophotometer (electronic eye) and Heracles NEO ultra-fast gas electronic nose were used, and the data were processed and analyzed by discriminant analysis, principal component analysis (PCA), discriminant factor analysis (DFA) and flavor heat map. **Results** With the degree of processing, *Coicis Semen* appearance overall color appears dim (L^* values decrease), red (a^* value increasing), yellow (b^* value increasing) trends, and the discriminant function was constructed based on powder chromaticity values L^* , a^* , b^* to distinguish the raw *Coicis Semen* and different processing degrees of bran fried *Coicis Semen* slices. A total of 34 volatile odors were detected in *Coicis Semen* and in the process of bran frying. With the deepening of processing degree, the abundance of volatile odors increased continuously. The results of heat map analysis showed that the changes of 14 components such as 1-butene, 2-butene, acrolein, ethanethiol, 2-butanol, acetoin, 1,4-dioxane, propylene glycol, 1-methyl-1*H*-pyrrole, 1-methylcyclohexene, ethyl butyrate, butyl methyl sulfide, 2-furanmethanol, 4-octanolide were most

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1707000); 江西省“双千计划”项目(S2019CXTD2300)

作者简介: 陈 鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 专业方向为中药学。E-mail: chenpenggzy@163.com

*通信作者: 陆兔林, 男, 教授, 博士生导师。Tel: 13951636763 E-mail: ltl2021@njucm.edu.cn

徐葱茏, 男, 医师, 从事中药饮片的生产与开发研究。E-mail: 490272406@qq.com

obvious in *Coicis Semen* bran frying. Principal component analysis (PCA) and discriminant factor analysis (DFA) could be used to distinguish raw *Coicis Semen* from processed *Coicis Semen* in different processing degrees. **Conclusion** In this experiment, electronic eye and electronic nose bionic technology were used to study the color and odor changes in *Coicis Semen* bran frying process, which provided a new method and idea for TCM processing research based on characters.

Key words: *Coicis Semen* fried with bran; electronic eye; ultra-fast gas phase electronic nose; colour and lustre; smell; processing; discriminant analysis; principal component analysis; discriminant factor analysis; butene; acrolein; ethanethiol; acetoin

薏苡仁为禾本科薏苡属植物薏米 *Coix lacrima-jobi* L. var. *mayuen* (Roman.) Stapf 的干燥成熟种仁^[1], 始载于《神农本草经》, 被列为上品, 薏苡仁性凉, 味甘、淡, 归脾、胃、肺经, 具有利水渗湿、健脾止泻等功能, 可用于水肿、脚气、小便不利等病症^[2-6]。薏苡仁常见炮制方法有清炒^[7]、糯米炒^[8]、土炒^[9]、姜汁炙^[10]、盐制^[11]等。目前《中国药典》2020 年版所收载薏苡仁炮制品种包括薏苡仁与麸炒薏苡仁。薏苡仁经麸炒处理, 其性味归经从微寒变为性微温; 归脾、胃、肺经变为归脾、肺、肝、肾经; 祛除了寒凉之性, 其功效由利水渗湿转为利水祛湿^[12]。除性味归经及功效上的改变, 麸炒薏苡仁饮片在炮制过程中色泽与气味也发生了明显的改变, 但目前并无相关研究及文献报道。

色泽与气味作为中药饮片性状特征的主要指标, 是反映中药饮片质量的重要信号, 传统的色泽与气味判别多以人工为主, 易受多种外界因素(如视觉、嗅觉、生理、心理等因素)的影响而存在主观性过大的缺点^[13-15]。随着科学技术的不断发展, 仿生技术作为一种新型的质量评价手段已逐步应用于中药领域的研究, 其中电子鼻与电子眼是最常用的 2 种手段^[16-17]。

电子眼是一种识别、分析样品视觉信息的检测仪器, 以国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)色度空间系统为基础, 可在条件相同的光源下引入明暗度(L^*)、红绿色(a^*)、黄蓝色(b^*) 3 个指标对物体颜色进行客观量化, 在中药材的采收^[18]、基原鉴别^[19]、质量评价^[20]、真伪判断^[21]方面均有应用。电子鼻, 又称人工嗅觉系统, 超快速气相电子鼻, 作为一种新型的气味分析仪器, 可实现定性或定量分析不同的气体样本, 亦可将测得的气味成分定性, 甚至浓度量化建模, 具有检测灵敏和分析时间极短等优势, 已广泛用于食品风味检测, 品质品级分析以及中药气味物质基础研究^[22-24]。

本实验通过采用 CM-5 型分光测色仪(电子眼)及 Heracles NEO 超快速气相电子鼻技术, 对薏苡仁

麸炒过程中色泽与气味信息进行客观量化并分析其变化规律, 初步建立生薏苡仁及不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片质量评价模型, 为今后麸炒薏苡仁饮片内在成分与外在性状的关联性研究提供参考依据, 以期实现麸炒薏苡仁炮制终点的确定并为今后大生产、大流通中的在线检测控制提供参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

CM-5 型分光测色计, 日本柯尼卡美能达有限公司, KONICA MINOLTA 型; Heracles NEO 型超快速气相电子鼻, 法国 Alpha MOS 公司, 配备 PAL RSI 型全自动顶空进样仪; HL-250 型高速多功能粉碎机, 上海塞耐机械有限公司; FA1104N 型电子天平, 上海菁海仪器有限公司; DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; C21-SN216 型多功能电磁炉, 广东美的生活电器制造有限公司; TM750 型红外测温仪, 深圳市泰克曼电子有限公司。

1.2 试剂与药材

正构烷烃 $nC_6 \sim nC_{16}$ 混合对照品, 美国 RESTEK 公司, 批号 A10142930; 麦麸, 江西省南城县建洪中药饮片厂, 批号 201216; 15 批薏苡仁收集于安徽、贵州、云南、福建等 7 个产地, 经南京中医药大学药学院陈建伟教授鉴定为禾本科薏苡属植物薏米 *C. lacrima-jobi* L. var. *mayuen* (Roman.) Stapf 的干燥成熟种仁, 分别编号 S1~S15, 具体见表 1。

表 1 薏苡仁样品信息

Table 1 Information of *Coicis Semen* samples

编号	批号	产地	编号	批号	产地
S1	21040101	安徽	S9	201812	福建
S2	21040201	安徽	S10	20170406	云南
S3	20070403	黑龙江	S11	20190101	云南
S4	20090301	黑龙江	S12	200906	广东
S5	202101	贵州	S13	200807	广东
S6	202005	贵州	S14	1911104	江苏
S7	201911	福建	S15	1011021	江苏
S8	202007	福建			

2 方法

2.1 不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的制备

参照《中国药典》2020 年版一部薏苡仁项下收载麸炒薏苡仁炮制方法^[1]，以单国顺^[25]研究确定的麸炒薏苡仁炮制工艺作为参考，选用所收集的 15 批薏苡仁分别制备不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片各 15 批次，供实验研究用。不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片制备工艺具体参数：炮制不及（S16~S30）：

炮制温度 210~220 ℃，炮制时间 30 s，投麸量 100:20；炮制适中（S31~S45）：炮制温度 210~220 ℃，炮制时间 60 s，投麸量 100:20；炮制太过（S46~S60）：炮制温度 210~220 ℃，炮制时间 90 s，投麸量 100:20。结果见图 1。

2.2 基于电子眼的色泽分析

2.2.1 样品制备 将薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片（炮制不及、炮制适中、炮制太过）分别

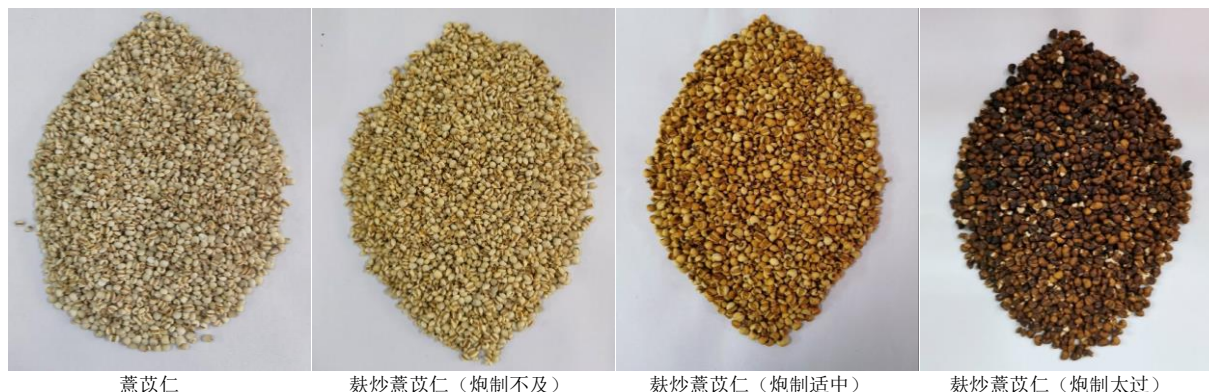


图 1 薏苡仁与不同炮制程度（炮制不及、炮制适中、炮制太过）麸炒薏苡仁饮片

Fig. 1 *Coicis Semen* and different processing degrees (processing less, processing moderate, processing too much) of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

粉碎，过三号筛，备用。

2.2.2 测量条件 测定光源 D65，测定试场 10°，视角测量口径为 $\varnothing$ 3 mm，测量波长范围 360~740 nm，测量波长间隔 10 nm，照明光源脉冲氙灯，SCE 模式（不包含镜面反射光），30 mm，对仪器进行零校正（放置透明片、黑筒）与用户校正（放置透明片、白板）。

2.2.3 样品检测 取样品粉末适量（4.0 g），均匀平铺在测试皿内，测定，记录色度值（ L^* 、 a^* 、 b^* ，其中 L^* 值越大表示颜色越亮浅、 a^* 值越大表示颜色越偏红、 b^* 值越大表示颜色越偏黄^[26]）。

2.2.4 精密度试验 取样品粉末（编号 S1）适量（4.0 g），按“2.2.3”项下方法连续测定 6 次，记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值。结果，上述色度值的 RSD 为 0.87%~1.13%，表明方法精密度良好。

2.2.5 重复性试验 取样品粉末（编号 S1）适量（4.0 g），按“2.2.3”项下方法连续测定 6 次，记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值。结果，上述色度值的 RSD 为 0.64%~1.09%，表明该方法重复性良好。

2.2.6 稳定性试验 取样品粉末（编号 S1）适量（4.0 g），按“2.2.3”项下方法，分别在室温下放置 0、2、4、6、8、10、12、24 h 时进行测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

结果，上述色度值的 RSD 为 1.17%~2.31%，表明样品在室温下放置 24 h 内稳定性良好。

2.2.7 数据采集与处理 色泽采集软件为 Spectra Magic NX，采用 CIE $L^*a^*b^*$ 色空间系统，采用 SPSS 26.0 统计学软件与 Origin 函数绘图软件进行数据分析。

2.2.8 样品色度值测定结果 参照“2.2.4”项下方法，采用电子眼对薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片粉末色度值进行测定，每份样品重复测量 3 次并记录平均值，结果见表 2。

2.2.9 秩和检验与秩相关性分析 将所收集的生薏苡仁与麸炒薏苡仁饮片分为 4 大类：I 类为薏苡仁，II 类为麸炒薏苡仁（炮制不及），III 类为麸炒薏苡仁（炮制适中），IV 类为麸炒薏苡仁（炮制太过）。通过表 3 Kruskal-Wallis H 秩和检验结果可知， L^* 、 a^* 、 b^* 的 P 值均小于 0.01，均拒绝原假设，证明样品粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 的分布不同，即样品色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 均可按照样品类别明显分为 4 类。再将样品粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 作为变量分别与分组类别进行秩相关性检验。根据 Spearman 检验结果可知，样品粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 与分组类别之间存在显著相关性（ $P < 0.01$ ），结果见表 4。

表2 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片粉末色度值 ($n=60$)Table 2 Color value of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces ($n=60$)

样品	L^*	a^*	b^*	样品	L^*	a^*	b^*	样品	L^*	a^*	b^*	样品	L^*	a^*	b^*	样品	L^*	a^*	b^*
S1	82.93	0.93	11.39	S13	83.95	0.72	10.68	S25	80.59	2.01	15.14	S37	77.07	2.91	14.82	S49	59.98	5.65	17.06
S2	83.09	0.86	11.42	S14	84.03	0.72	10.55	S26	80.82	2.07	15.00	S38	77.06	2.92	14.81	S50	60.06	6.13	17.69
S3	82.92	0.82	11.01	S15	82.87	0.86	10.90	S27	80.64	2.08	15.25	S39	76.84	2.97	14.97	S51	60.57	5.59	17.06
S4	82.88	0.81	10.99	S16	81.02	1.91	15.43	S28	80.85	1.97	15.32	S40	76.87	2.93	14.95	S52	60.70	5.57	17.00
S5	82.63	1.16	11.83	S17	81.14	2.15	15.21	S29	80.68	1.99	15.17	S41	77.01	2.97	14.93	S53	59.60	6.27	17.84
S6	84.81	1.06	12.09	S18	80.91	2.09	15.02	S30	80.37	2.03	14.97	S42	78.18	2.64	13.72	S54	59.23	6.36	17.90
S7	84.80	1.05	12.10	S19	80.88	2.14	15.12	S31	77.46	2.94	14.93	S43	78.48	2.69	13.41	S55	60.53	6.40	18.30
S8	82.30	1.15	11.70	S20	80.88	2.13	15.01	S32	75.53	2.90	14.18	S44	79.22	2.91	14.27	S56	60.23	6.42	18.08
S9	82.98	0.78	10.99	S21	80.62	2.03	15.13	S33	75.53	2.89	14.16	S45	77.33	2.95	14.77	S57	60.38	6.48	18.14
S10	83.49	0.94	10.94	S22	80.83	2.11	15.00	S34	75.79	2.75	14.10	S46	60.57	5.62	17.11	S58	59.76	5.62	17.00
S11	82.58	1.23	12.34	S23	80.69	1.96	15.10	S35	75.78	2.74	14.12	S47	60.31	5.66	17.08	S59	59.33	5.70	17.01
S12	82.19	1.12	11.62	S24	80.90	2.15	14.99	S36	77.05	2.93	14.82	S48	60.74	6.44	18.38	S60	59.48	6.32	17.84

表3 Kruskal-Wallis H 秩和检验Table 3 Kruskal-Wallis H test

组别	原假设	显著性
L^*	在样品类别中, L^* 的分布相同	$P<0.01$
a^*	在样品类别中, a^* 的分布相同	$P<0.01$
b^*	在样品类别中, b^* 的分布相同	$P<0.01$

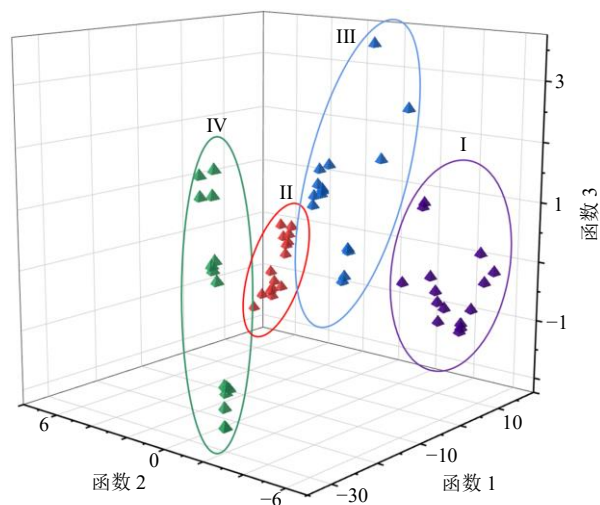
表4 秩相关性检验

Table 4 Rank correlation test

方法	显著性		
	L^*	a^*	b^*
Spearman	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$

2.2.10 判别分析 根据“2.2.9”项所得结果,选用“2.2.9”项分类情况作为分组变量,选择薏苡仁与不同炮制麸炒薏苡仁饮片粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 作为自变量,将收集到的 60 组相关数据作为训练样本,通过统计学分析建立区分薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的判别函数并对数据进行交叉验证。

本研究共建立了区分生薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片典则判别函数与专属性判别函数。典则判别函数包含 3 个判别函数式:函数 1 (类别 = $1.048 L^* - 3.712 a^* + 0.857 b^* - 80.388$), 函数 2 (类别 = $-0.161 L^* - 4.134 a^* + 3.355 b^* - 24.698$), 函数 3 (类别 = $0.892 L^* + 5.234 a^* - 0.920 b^* - 69.218$)。基于上述 3 个判别函数式通过 Origin 函数绘图软件构建薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片典则判别三维散点图,由图 2 可知所构建典则判别函数可实现薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的区分。



I-生薏苡仁 II-麸炒薏苡仁 (炮制不及) III-麸炒薏苡仁 (炮制适中) IV-麸炒薏苡仁 (炮制太过), 图 3、6~8、10 同

I-raw *Coicis Semen* II-*Coicis Semen* fried bran (processing less) III-*Coicis Semen* fried bran (processing moderate) IV-*Coicis Semen* fried bran (processing too much), same as figs. 3, 6~8, 10

图2 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片典则判别三维散点图

Fig. 2 Three-dimensional scatter diagram of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

专属性判别函数包含 4 个判别函数式: 薏苡仁 = $155.819 L^* - 73.394 a^* + 86.783 b^* - 6\,944.386$; 麸炒薏苡仁 (炮制不及) = $150.996 L^* - 94.469 a^* + 111.879 b^* - 6\,849.713$; 麸炒薏苡仁 (炮制适中) = $145.233 L^* - 38.011 a^* + 87.340 b^* - 6\,170.924$; 麸炒薏苡仁 (炮制太过) = $115.879 L^* + 53.093 a^* + 66.178 b^* - 4\,224.359$, 通过上述函数式可实现对薏苡仁及

不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的定性鉴别。同时,对所收集数据进行交叉验证的判别率达 100.00%,结果见表 5。

表 5 薏苡仁与不同炮制麸炒薏苡仁交叉验证

Table 5 Cross-validation of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

项目	类别	预测值				总计
		I	II	III	IV	
原始	计数	15	0	0	0	15
		0	15	0	0	15
		0	0	15	0	15
		0	0	0	15	15
	判别率/%	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
		0.00	0.00	100.00	0.00	100.00
		0.00	0.00	0.00	100.00	100.00
交叉验证	计数	15	0	0	0	15
		0	15	0	0	15
		0	0	15	0	15
		0	0	0	15	15
	判别率/%	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
		0.00	0.00	100.00	0.00	100.00
		0.00	0.00	0.00	100.00	100.00

I-生薏苡仁 II-麸炒薏苡仁(炮制不及) III-麸炒薏苡仁(炮制适中) IV-麸炒薏苡仁(炮制太过)

I-raw *Coicis Semen* II-*Coicis Semen* fried bran (processing less)

III-*Coicis Semen* fried bran (processing moderate) IV-*Coicis Semen*

fried bran (processing too much)

2.2.11 色泽变化规律分析 根据“2.2.10”项结果可知,薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片在色泽上存在明显差异,基于所收集数据构建薏苡仁麸炒过程中色度值变化趋势图,结果见图 3。薏苡仁在麸炒过程中,随着炮制程度的加深,其明暗值 L^* 呈下降趋势,红绿值 a^* 呈上升趋势,黄蓝值 b^* 从薏苡仁到炮制不及过程中呈上升趋势,从炮制不及到炮制适中呈下降趋势,从炮制适中到炮制太过又呈现上升趋势,整体上呈现上升趋势。综上,随着炮制程度的加深,薏苡仁外观色泽整体呈变暗、变红、变黄的趋势。

2.2.12 色度值参考范围 将所测得薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片粉末色度值通过 SPSS 26.0 统计学软件处理并计算其色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 的

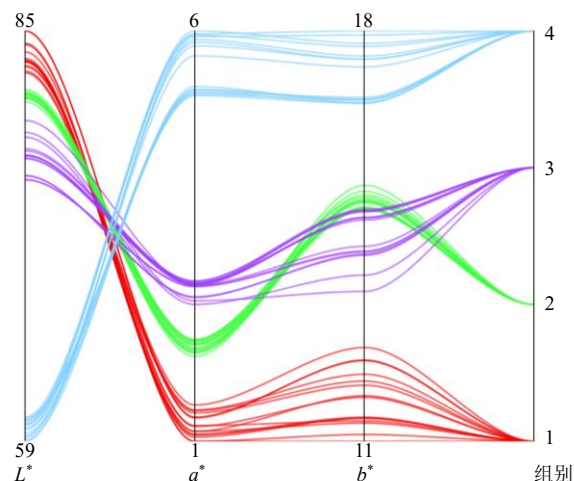


图 3 麸炒薏苡仁饮片炮制过程色度值变化趋势图

Fig. 3 Change trend chart of color value in processing process of *Coicis Semen* fried with bran

95.00%置信区间,结果见表 6。

2.3 基于电子鼻的气味分析

2.3.1 样品制备 同“2.2.1”项下。

2.3.2 测量条件 本实验样品进样方式为顶空进样,为得到较好的分析结果,固定粉末进样量 2.0 g,采用单因素实验对影响样品色谱峰较大的进样体积、孵化时间与孵化温度等关键因素进行考察,确定最佳实验条件。

表 6 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片色度值的参考范围

Table 6 Reference range of color value of *Coicis Semen* and different processing degree *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

样品	95%置信区间		
	L^*	a^*	b^*
生薏苡仁	82.86~83.60	0.87~1.02	11.12~11.62
麸炒薏苡仁(炮制不及)	80.70~80.88	2.02~2.09	15.06~15.19
麸炒薏苡仁(炮制适中)	76.52~77.50	2.82~2.92	14.24~14.69
麸炒薏苡仁(炮制太过)	59.87~60.33	5.84~6.19	17.32~17.81

固定孵化温度 60 ℃,孵化时间 40 min,考察进样体积 3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 mL,结果发现当进样体积为 4.0 mL 时,各色谱峰峰强度达到饱和,且峰形稳定,故选择其为最佳进样体积。

固定进样体积 4.0 mL,孵化时间 40 min,考察孵化温度 45、50、55、60、65、70 ℃,结果发现当孵化温度为 60 ℃时,各色谱峰峰高趋于饱和,峰形稳定,且温度过高不利于反映样品真实气味表达,故选择其为最佳孵化温度。

固定进样体积 4.0 mL, 孵化温度 60 °C, 考察孵化时间 20、25、30、35、40、45 min, 结果发现当孵化时间为 40 min 时, 各色谱峰峰强度达到饱和, 且峰形稳定, 故选择其为最佳孵化时间。

Heracles NEO 型超快速气相电子鼻检测生薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片挥发性气味物质具体检测参数: 样品瓶体积 20.0 mL, 样品量 2.0 g, 进样量 4.0 mL, 孵化温度 60 °C, 孵化时间 40 min, 进样速率 125 μ L/s, 进样持续时间 21 s, 进样口温度 200 °C, 捕集阱初始温度 45 °C, 捕集阱分流速率 10.0 mL/min, 捕集持续时间 26 s, 捕集阱最终温度 230 °C, 柱温初始温度 48 °C, 程序升温方式: 0.5 °C/s 至 60 °C, 3 °C/s 至 230 °C, 采集时间 130 s, 氢火焰离子化检测器 (FID) 增益 12。

2.3.3 样品检测 精密称取生薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁 (炮制不及、炮制适中、炮制太过) 样品粉末 2.0 g, 置于 20.0 mL 顶空进样瓶中, 室温静置 30 min, 采用 Heracles NEO 型超快速气相电子鼻进行检测。

2.3.4 精密度试验 取样品粉末 (SP1) 适量 (2.0 g) 并精密称定, 按“2.3.3”项下方法连续测定 6 次, 记录各色谱峰峰面积。结果, 上述各色谱峰峰面积的 RSD 为 0.77%~1.67%, 表明该方法精密度良好。

2.3.5 重复性试验 取样品粉末 (SP1) 适量 (2.0 g) 并精密称定, 共称定 6 份样品, 按“2.3.3”项下方法分别测定, 记录各色谱峰峰面积。结果, 上述各色谱峰峰面积的 RSD 为 0.98%~1.83%, 表明该方法重复性良好。

2.3.6 稳定性试验 取样品粉末 (SP1) 适量 (2.0 g) 并精密称定, 共称定 8 份样品, 按“2.3.3”项下方法, 分别在室温下放置 0、2、4、6、8、10、12、24 h 时进行测定并记录各色谱峰峰面积。结果, 上述色谱峰峰面积的 RSD 为 1.13%~2.91%, 表明样品在室温下放置 24 h 内稳定性良好。

2.3.7 数据采集与处理 采用 SPSS 26.0 对数据进行收集处理, 使用 Heracles NEO 电子鼻自带作图软件对采集的数据进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 及判别因子分析 (discriminant factor analysis, DFA), 应用 Excel 2019 与 Origin 2021 绘图软件进行作图。

2.3.8 麸炒薏苡仁饮片炮制过程中挥发性成分的鉴定 参照“2.3.3”项下方法, 采用 Heracles NEO 型超快速气相电子鼻对薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏

苡仁饮片样品进行检测, 每份样品重复测定 3 次。扣除空白组参考后, 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片样品在 Heracles NEO 型超快速气相电子鼻 2 根不同极性色谱柱 MXT-5 (低极性) 及 MXT-1701 (中极性) 所得色谱峰详见图 4、5。取各样品色谱峰峰面积均值, 结合保留时间计算其在色谱柱上线性保留指数 (retention index, RI) 值, 通过电子鼻自带数据库 AroChemBase Nist 标准数据库及文献报道等方法对样品中的挥发性成分进行定性分析, 结果详见表 7。

2.3.9 不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片 PCA 与 DFA PCA 作为一种非监督学习的降维方法, 通过正交变换将一组可能存在相关性的变量数据转换为一组线性不相关的变量, 提取色谱图中几个能较大反映样品气味信息的特征值进行线性分类并得到可视化的二维散点图^[27]。收集生薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片在 Heracles NEO 型超快速气相电子鼻中传感器数据并采用 PCA 方法对上述数据进行降维处理, 结果如图 6 所示: PCA 识别指数为 72, 主成分 1 的贡献率为 74.67%, 主成分 2 的贡献率为 21.68%, 累积贡献率 96.35%, 能较好地反应所测样品原始数据中绝大部分气味信息。不同样品点之间的距离反应不同样品间存在特异性差异的程度, 生薏苡仁位于第 3 象限, 麸炒薏苡仁 (炮制不及) 与麸炒薏苡仁 (炮制适中) 均位于第 2 象限, 麸炒薏苡仁 (炮制太过) 位于第 4 象限, 证明麸炒薏苡仁饮片炮制过程中从生品至麸炒薏苡仁 (炮制不及) 阶段与麸炒薏苡仁 (炮制适中) 至麸炒薏苡仁 (炮制太过) 阶段, 气味发生了显著性的变化, 麸炒薏苡仁 (炮制不及) 至麸炒薏苡仁 (炮制适中) 阶段, 样品间气味信息较为相似, 气味变化趋于稳定。

DFA 是在 PCA 法的基础上扩大组间差异, 缩小组内差异^[28], 为验证 PCA 所得结果, 对不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片进行 DFA, 结果发现判别因子 1 的贡献率为 94.98%, 判别因子 2 的贡献率为 3.95%, 累积贡献率 98.93%。在 DFA 模型图中可以看出, 生薏苡仁及不同炮制程度的麸炒薏苡仁分布区域在 DF1 与 DF2 上的分布均具有明显差别。整体来说, DFA 判别模型结果与 PCA 判别模型结果相吻合, 生薏苡仁及不同炮制程度的麸炒薏苡仁分布区域均集中且区分明显, 可被清晰的聚为 4 类, 说明以气味指纹图谱可对生薏苡仁及不同炮制程度的麸炒薏苡仁进行有效鉴别区分。进一步证明生薏

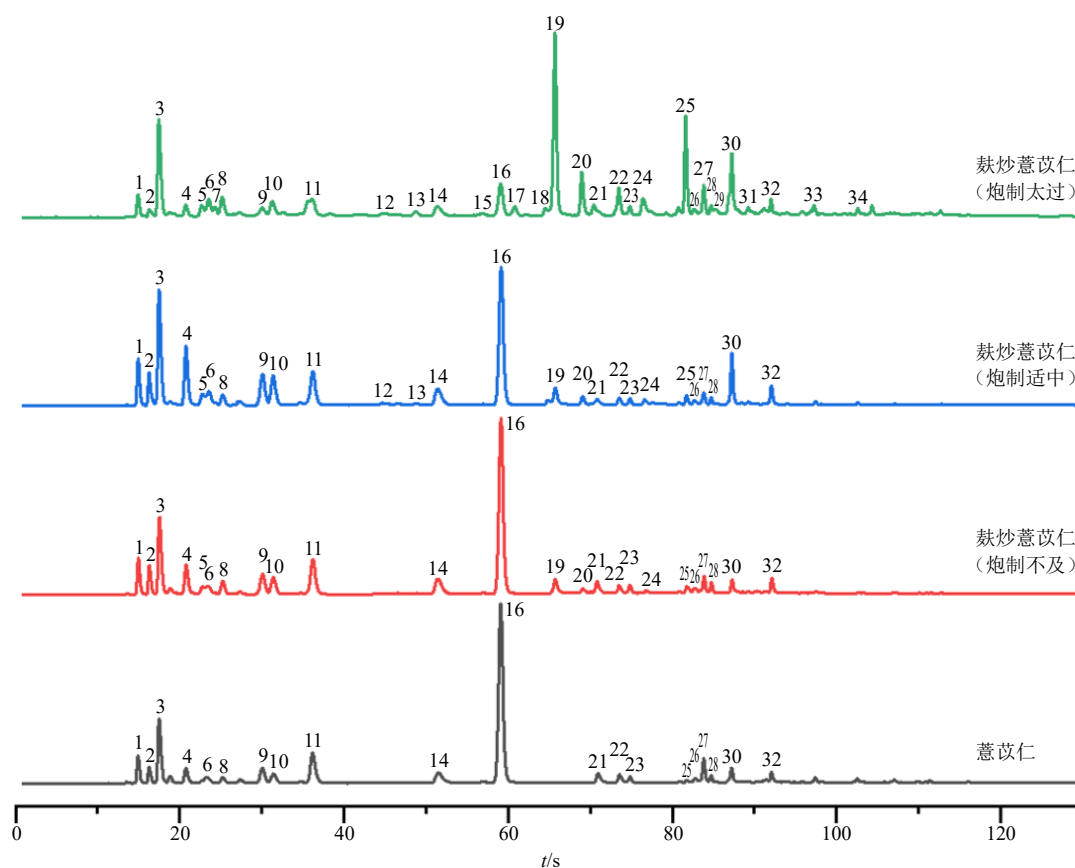


图 4 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片在 MXT-5 色谱柱的色谱图

Fig. 4 Chromatograms of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces on MXT-5 column

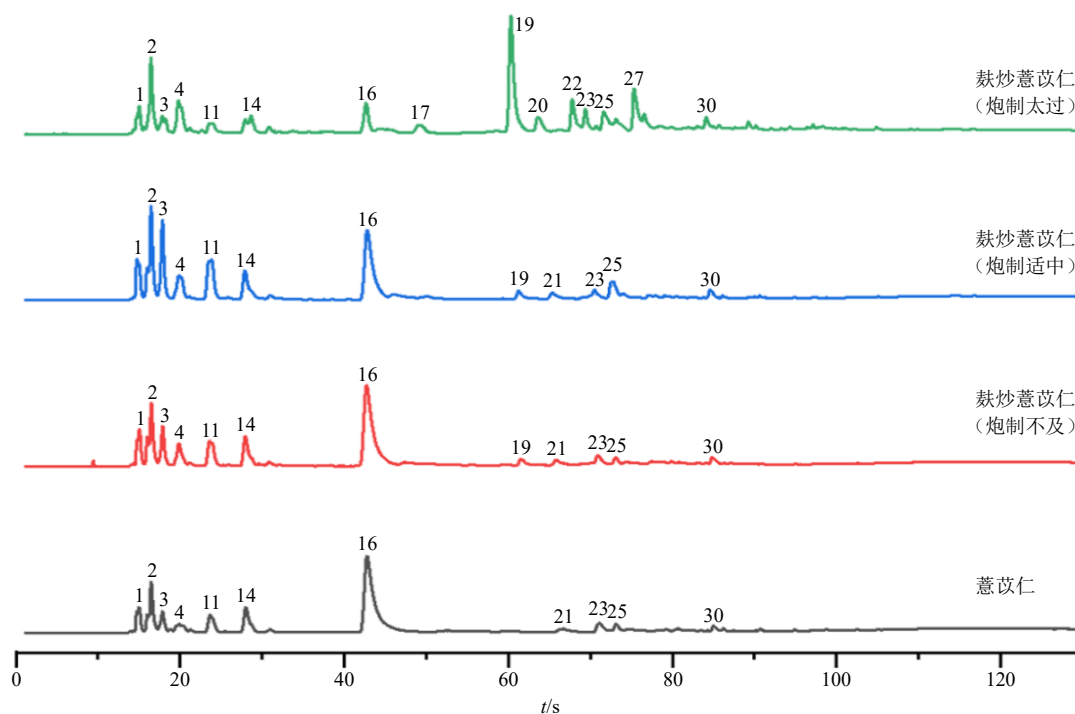


图 5 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片在 MXT-1701 色谱柱的色谱图

Fig. 5 Chromatogram of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces on MXT-1701 column

表 7 AroChemBase 数据库分析薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁中的可能挥发性气味物质信息

Table 7 AroChemBase database analysis of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces volatile flavor substances information

峰号	分子式	可能化合物名称	MXT-5 保留指数	MXT-1701 保留指数	感官描述信息
1	C ₃ H ₈	丙烷	300	300	燃料、无味
2	C ₃ H ₄	丙炔	339	330	甜
3	C ₃ H ₆	环丙烷	356	340	淡味、无味
4	C ₄ H ₈	1-丁烯	386	389	芳族
5	C ₄ H ₈	2-丁烯	411	412	芳族
6	C ₂ H ₇ N	二甲胺	426	427	含氮、鱼腥、辛辣
7	C ₃ H ₄ O	丙烯醛	450	466	杏仁、樱桃、刺激性
8	C ₅ H ₁₂	2-甲基丁烷	464	477	汽油、愉悦
9	C ₂ H ₆ S	乙硫醇	516	500	水果、大蒜、韭菜、洋葱、橡皮、强烈
10	CH ₃ I	碘甲烷	530	515	辛辣
11	C ₄ H ₁₀ O	2-丁醇	598	607	愉悦、强烈、甜、酒
12	C ₅ H ₅ NO ₂	硝基乙烷	637	618	水果、淡味、愉悦、强烈
13	C ₅ H ₁₀ O	甲基丁酮	658	640	丙酮、樟脑
14	C ₆ H ₁₂	环己烷	664	654	氯仿
15	C ₃ H ₉ O ₃ P	亚磷酸三甲酯	689	691	辛辣
16	C ₄ H ₈ O ₂	乙偶姻	712	682	甜、木头味
17	C ₄ H ₈ O ₂	1,4-二氧六环	714	690	模糊、愉悦
18	C ₃ H ₈ O ₂	丙二醇	732	716	酒精、焦糖、无味
19	C ₅ H ₇ N	1-甲基-1 <i>H</i> -吡咯	743	718	烟、木头味
20	C ₇ H ₁₂	甲基环己烯	766	771	橘子、石灰
21	C ₅ H ₁₀ O	环戊醇	773	787	薄荷、愉悦、甜
22	C ₈ H ₁₄	丁酸乙酯	800	784	焦糖、甜
23	C ₆ H ₁₄ O	2-庚酮	801	784	花椰菜、萜烯、葡萄酒
24	C ₆ H ₁₂ O ₂	丁基二甲硫醚	813	796	苦味
25	C ₅ H ₆ O ₂	糠醇	860	833	焦糖、咖啡、面包
26	C ₄ H ₈ OS	甲二磺醛	879	856	烘焙马铃薯、土豆（熟）
27	C ₈ H ₁₆ O	2,5-二乙基四氢呋喃	897	884	草药
28	C ₈ H ₁₂ O	2-乙基呋喃	898	887	淡味、弱
29	C ₃ H ₅ NO	丙烯酰胺	912	936	无味
30	C ₆ H ₁₀ O ₄	草酸二乙酯	940	948	芳族
31	C ₆ H ₇ N	苯胺	978	954	胺、芳族、愉悦、辛辣、甜
32	C ₇ H ₁₀ N ₂	甲基吡嗪	1005	983	面包、玉米、土的、花生、坚果、烤
33	C ₉ H ₂₀ O	3-羟基壬烷	1205	1069	草药、油腻
34	C ₈ H ₁₄ O ₂	辛内酯	1261	1216	焦糖、草药、辛辣、烤

苡仁及不同炮制程度的麸炒薏苡仁挥发性气味物质的种类与含量存在差异,结果如图 7 所示。

2.3.10 麸炒薏苡仁炮制过程挥发性气味物质的组成情况及数量变化 美拉德反应作为近年来食品与中药研究领域的热点,在形成食物风味特征(例如

颜色、香气和味道)中起重要作用^[29],醛类和酮类等羰基化合物与食品中的氨基化合物(游离氨基酸、肽类等)发生美拉德反应,产生包括醛、酮、醇、呋喃、吡啶、及含氮或硫的杂环化合物在内的一系列香味化合物^[30]。麸炒薏苡仁饮片在炮制过程中挥

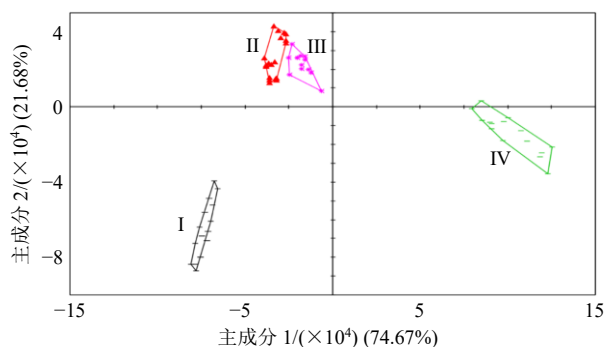


图 6 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片 PCA 图
Fig. 6 PCA diagram of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

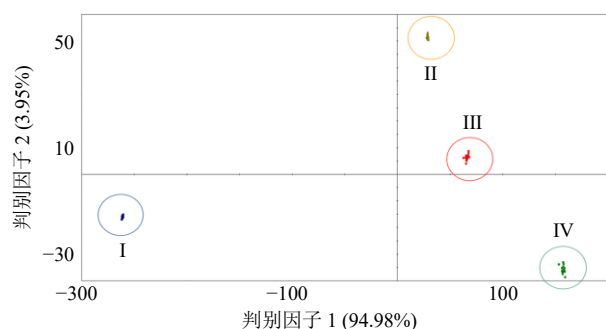


图 7 薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片 DFA 图
Fig. 7 DFA analysis chart of *Coicis Semen* and different processing degrees of *Coicis Semen* bran fried decoction pieces

发性气味物质的变化可能与美拉德反应有关。通过“2.3.8”项对挥发性成分的定性分析，薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁样品中共鉴定出 34 种成分。根据化学结构的差异，上述 34 种成分共分成 8 类，包括烃类（11 种）、胺类（3 种）、醛类（2 种）、醇类（5 种）、酮类（3 种）、酯类（4 种）、醚类（2

种）及其他类（4 种）。

薏苡仁共检测出挥发性气味物质 21 种，包括烃类（8 种）、胺类（1 种）、醛类（1 种）、醇类（4 种）、酮类（2 种）、酯类（2 种）及其他（3 种）；至炮制不及阶段，相较于生品，该阶段挥发性气味物质在总体数量上有所增加，共检测出 22 种成分，其中胺类（1 种）、醛类（1 种）、醇类（4 种）、酮类（2 种）、酯类（2 种）成分在种类数量上无变化，烃类化合物 3-羟基壬烷消失并新增化合物 2-丁烯，其他类新增化合物 1-甲基-1*H*-吡咯；至炮制适中阶段，相较于炮制不及阶段挥发性气味物质在总体数量上进一步增加，共检测出 25 种成分，其中胺类（1 种）、醛类（1 种）、醇类（4 种）、酮类（2 种）、酯类（2 种）及其他类（4 种）成分在种类数量上无变化，烃类新增化合物硝基乙烷与甲基环己烯，醚类化合物丁基二甲硫醚作为新类别化合物第 1 次出现；至炮制太过阶段，相较于炮制适中阶段挥发性气味物质在总体数量上显著增加，共检测出 31 种成分，除其他类（4 种）成分在种类数量上无变化外，烃类化合物 2-甲基丁烷与硝基乙烷消失并新增化合物 3-羟基壬烷，胺类新增化合物丙烯酰胺与苯胺，醛类新增化合物丙烯醛，醇类新增化合物丙二醇，酮类新增化合物甲基丁酮，酯类新增化合物辛内酯，醚类新增化合物 1,4-二氧六环。具体见图 8、9。

2.3.11 麸炒薏苡仁炮制过程挥发性气味物质的含量变化 为进一步研究薏苡仁麸炒过程中挥发性气味物质的变化情况，将薏苡仁饮片麸炒过程中检测出的 34 种挥发性气味物质以最大峰面积为 100% 进行归一化处理后进行热图分析，以实现直观表达薏苡仁麸炒过程中挥发性气味物质含量上的差异。颜

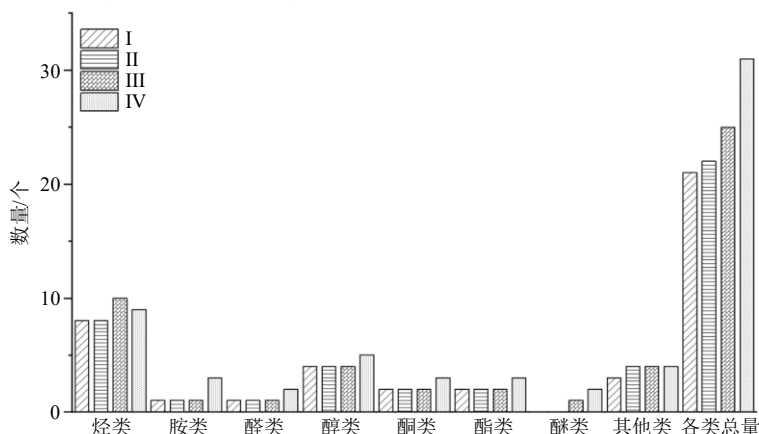


图 8 不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片挥发性气味物质的种类数量

Fig. 8 Types and quantities of volatile flavor substances in *Coicis Semen* decoction pieces fried with bran at different processing levels

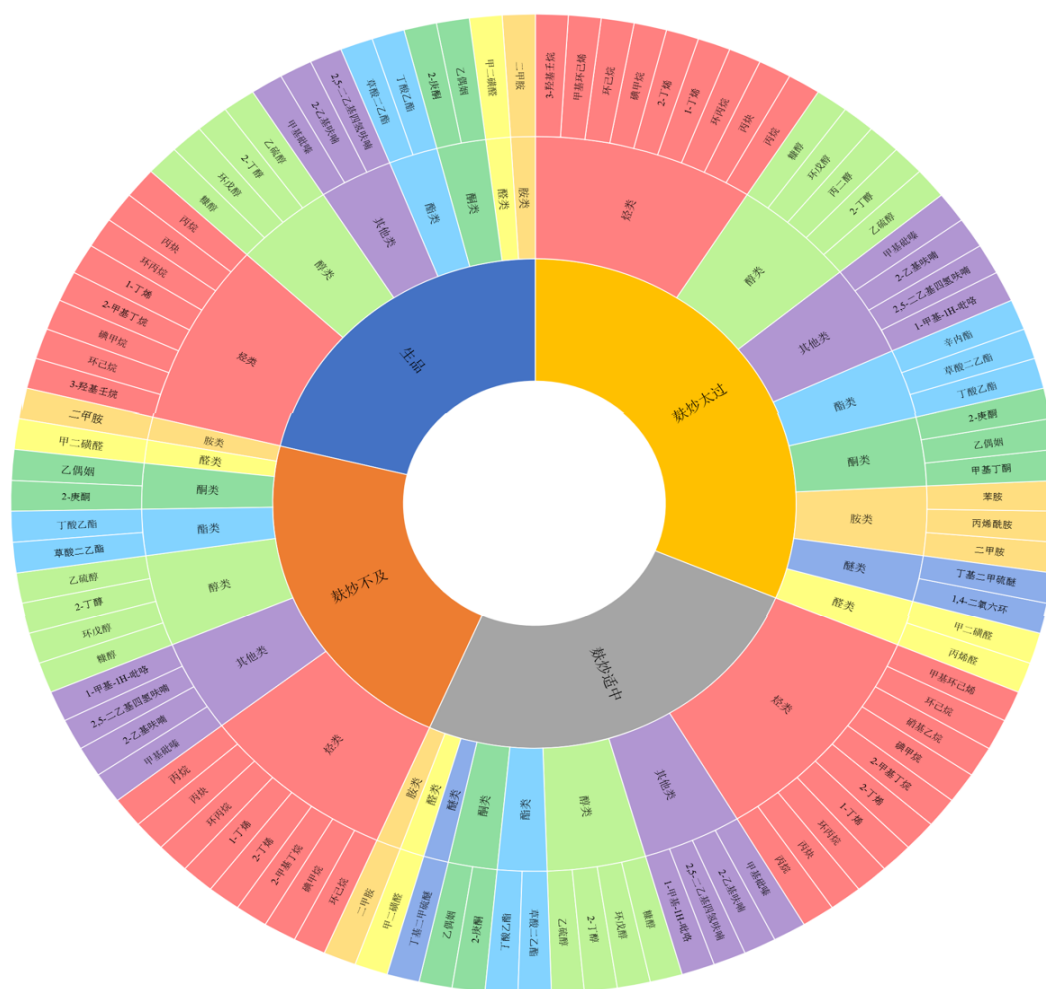


图9 不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片挥发性气味物质旭日图

Fig. 9 Sunrise of volatile flavor substances in *Coicis Semen* decoction slices fried with bran at different processing levels

色越偏向紫黑色表明成分含量越高,越偏向黄白色表明成分含量越低。结果如图10所示。在薏苡仁麸炒过程中,包括1-丁烯、2-丁烯、丙烯醛、乙硫醇、2-丁醇、乙偶姻、1,4-二氧六环、丙二醇、1-甲基-1*H*-吡咯、甲基环己烯、丁酸乙酯、丁基二甲硫醚、糠醇、辛内酯在内的14种成分含量变化比较明显。

结合表8中挥发性气味物质的感官信息,2-丁醇与乙偶姻作为薏苡仁阶段含量最高的2种气味物质,为薏苡仁生品贡献了强烈的、甜的、类似于木头的气味,随着炮制程度的加深,2-丁醇与乙偶姻的含量持续减少。1-丁烯、2-丁烯与乙硫醇从未炮制阶段到炮制适中阶段含量不断增加,到末期炮制太过阶段含量减少,这3种气味物质在薏苡仁麸炒过程中为其贡献强烈的类似于芳族的香气;丙烯醛、1,4-二氧六环、丙二醇、1-甲基-1*H*-吡咯、甲基环己烯、丁基二甲硫醚、糠醇在整个炮制过程中含量均持续增加,这几种气味物质在薏苡仁麸炒过程中贡

献焦味、烟味与苦味,结合薏苡仁麸炒实际情况,至炮制适中阶段,麸炒薏苡仁饮片散发出一种焦香气味^[31],在炮制过程中随着炮制程度的加深,这种焦香气味越来越浓烈,焦香气味的出现及增强可能与上述成分的含量变化有关,其中2-乙烯与丁基二甲硫醚作为麸炒薏苡仁炮制不及阶段出现的2个新成分,可以作为麸炒薏苡仁炮制不及阶段气味差异标志物(指品种特有的,可作为定性依据的特征性气味成分);丙烯醛与甲基环己烯作为麸炒薏苡仁炮制适中阶段出现的2个新成分,可以作为麸炒薏苡仁炮制适中阶段气味差异标志物。

丁酸乙酯、辛内酯在末期炮制太过阶段含量才出现明显增加,这2类气味物质为炮制太过阶段的麸炒薏苡仁提供了强烈的类似于烘烤的、焦糖气味,结合在整个炮制过程中含量均持续增加的丙烯醛、1,4-二氧六环、丙二醇等挥发性气味物质贡献的焦味、烟味与苦味,使得薏苡仁在炮制太过阶段呈现

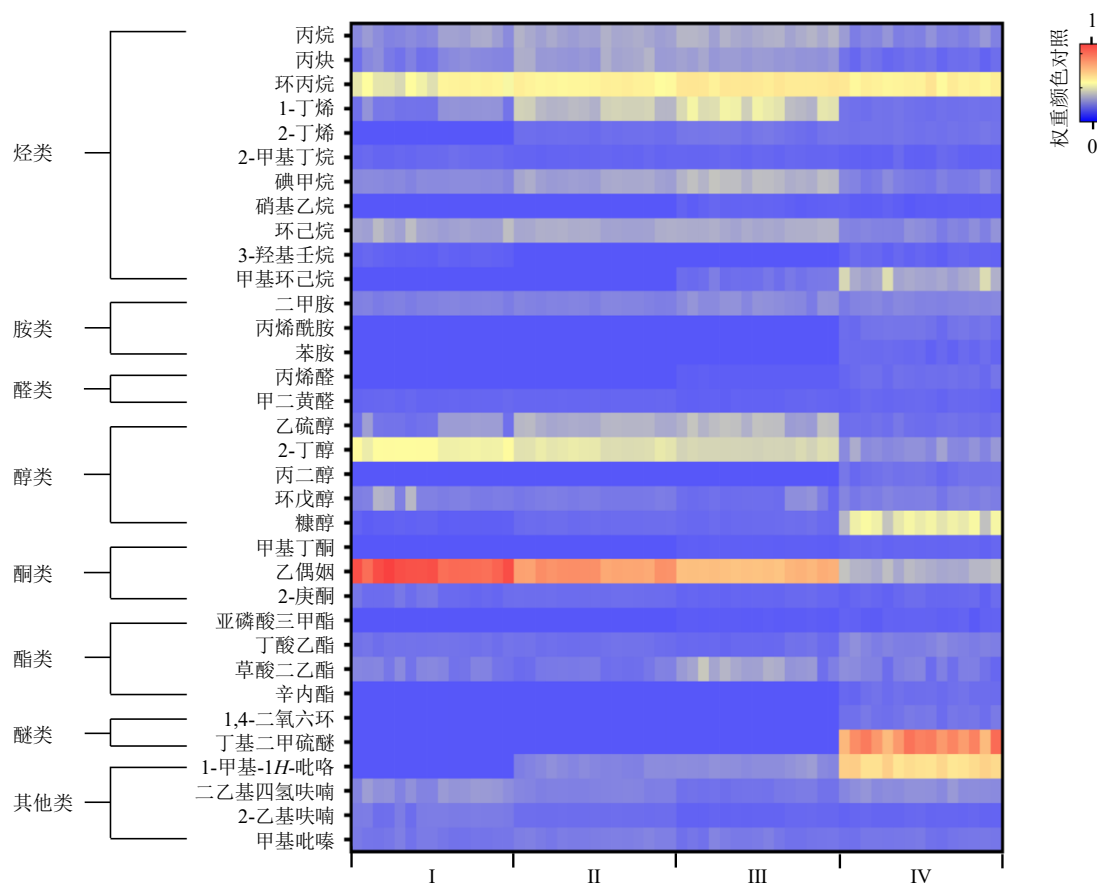


图 10 不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片挥发性气味物质含量变化热图

Fig. 10 Heat map of content changes of volatile flavor substances in *Coicis Semen* decoction pieces fried with bran at different processing levels

出浓烈的焦糊气味，其中辛内酯为麸炒薏苡仁炮制太过阶段新出现的成分，1-甲基-1*H*-吡咯含量增长约为炮制适中阶段 10 倍，此外，美拉德反应形成的吡咯等化合物会产生一些令人不悦的味道^[32]，故上述 2 种成分可作为麸炒薏苡仁炮制太过阶段气味差异标志物。其他挥发性气味物质的含量变化情况相较于上述 14 种挥发性气味物质不明显。

3 讨论

性状鉴别作为一种简单直观的方法在中药材真伪优劣评判、中药饮片质量控制等方面具有广泛应用，但传统的性状判别以人作为评判主体，易受主观因素的影响，具有一定的局限性。目前仿生技术已逐步应用于中药领域，相较于传统经验式性状判别，采用仿生技术进行的性状鉴别具有操作简单、迅速、客观、准确等优点。色泽与气味作为性状鉴别中的主要特征指标，对其进行鉴别的电子眼与电子鼻仿生技术已成功应用于药材基源鉴别^[33]、外观性状与内在成分相关性研究^[34-35]、硫熏鉴别^[36-37]、

种源区分^[38]等中药研究。

薏苡仁在麸炒过程中色泽与气味均发生了明显改变，本课题组采用电子眼与超快速气相电子鼻 2 种仿生技术对麸炒过程中色泽与气味进行客观量化，通过对比分析薏苡仁不同炮制阶段色泽气味变化情况，探究薏苡仁麸炒过程中色泽与气味的变化规律。

电子眼结果表明，麸炒过程中薏苡仁的色度值 L^* 不断降低， a^* 与 b^* 整体上均不断增加，其在外观色泽上的表现为整体上呈现变暗、变红、变黄的变化趋势，可能与美拉德反应的褐变作用有关^[39]。电子鼻结果表明，薏苡仁麸炒过程中气味成分发生了“量”与“质”的变化。2-丁醇与乙偶姻作为生薏苡仁阶段含量最高的 2 种气味物质，为生薏苡仁中的标志性成分，随着炮制程度的加深，上述成分的含量不断降低。随着麸炒至适中阶段，1-丁烯、2-丁烯、乙硫醇、丙烯醛等成分含量持续升高，共同为麸炒薏苡仁饮片贡献“焦香”气味，2-乙烯与丁基

二甲硫醚可作为麸炒薏苡仁炮制不及阶段气味差异标志物；丙烯醛与甲基环己烯可作为麸炒薏苡仁炮制适中阶段气味差异标志物。至炮制太过阶段，乙硫醇等“香”味成分含量降低，丙烯醛等“焦”味成分与丁酸乙酯、辛内酯“苦”味成分共同构成炮制太过麸炒薏苡仁饮片的“焦糊”气味，辛内酯与 1-甲基-1*H*-吡咯可作为麸炒薏苡仁炮制太过阶段气味差异标志物。通过 PCA 与 DFA 均可实现生薏苡仁与不同炮制程度麸炒薏苡仁饮片的区分。

本实验将传统性状中的色泽与气味通过电子眼、电子鼻仿生技术进行数字量化，运用到麸炒薏苡仁炮制过程的研究中，克服了传统经验判别主观性过大的缺点，使本研究更加准确、客观，为中药炮制研究提供了新的方法与思路。由于麸炒薏苡仁炒制时间较短，色泽变化较快，同时麸炒薏苡仁炮制不及与炮制适中阶段气味成分更多为“量变”，本研究对于上述 2 种炮制程度的区分及炮制终点的判定仍有不足，本课题组将在后续的研究中，对麸炒薏苡仁饮片炮制过程中内在成分的改变与外在性状的改变进行关联性分析，并确定生薏苡仁及不同炮制程度麸炒薏苡仁相关质量标志物，以期进一步探究麸炒薏苡仁炮制过程中的整体变化情况，实现麸炒薏苡仁炮制过程的控制。

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. 2020: 393.
- [2] 隋利强, 曹冬英, 黄婷婷, 等. SPME-GC-MS 法分析薏苡仁砂烫前后挥发性成分变化 [J]. 中国民族民间医药, 2021, 30(10): 26-32.
- [3] 明·倪朱谟撰. 郑金生, 甄雪燕, 杨梅香校点. 本草汇言 [M]. 北京: 中医古籍出版社, 2005: 532.
- [4] 明·刘文泰等选. 《本草品汇精要》校注研究本 [M]. 北京: 华夏出版社, 2004: 113.
- [5] 刘明心. 药性粗评 [M]. 南京: 凤凰出版社, 2016: 131.
- [6] 明·李中立撰. 张卫, 张瑞贤校注. 本草原始 [M]. 北京: 学苑出版社, 2011: 416.
- [7] 《中华大典》编委会. 中华大典 医药卫生典 [M]. 成都: 巴蜀书社, 2009: 611-625.
- [8] 南朝宋·雷敫撰著. 清·张骥补辑. 施仲安校注. 雷公炮炙论 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1985: 11.
- [9] 宋·张世南撰. 李心传撰. 张茂鹏点校. 崔文印点校. 游宦纪闻 [M]. 北京: 中华书局, 1981: 42.
- [10] 清·张璐著. 顾漫, 杨亦周校注. 本经逢原 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2011: 130.
- [11] 明·佚名宫廷画师编绘. 补遗雷公炮制便览 [M]. 上海:

上海辞书出版社, 2012: 237.

- [12] 周宇, 吴孟华, 罗思敏, 等. 薏苡仁炮制历史沿革考证 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(11): 2694-2701.
- [13] 李雪莲. 白术麸炒过程中颜色与物质基础变化相关性研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2015.
- [14] 刘倩倩, 王升菊, 任超翔, 等. 中药辨色论质理论与方法的传承创新 [J]. 中草药, 2021, 52(10): 3121-3132.
- [15] 毕胜, 谢若男, 金传山, 等. 基于仿生技术的制川乌炮制过程变化研究 [J]. 中草药, 2020, 51(23): 5956-5962.
- [16] 费程浩, 戴辉, 苏杭, 等. 电子鼻技术的研究进展及其在中药行业中的应用 [J]. 世界中医药, 2019, 14(2): 257-262.
- [17] 段金芳, 肖洋, 刘影, 等. 一测多评法与电子眼和电子舌技术相结合优化山茱萸蒸制时间 [J]. 中草药, 2017, 48(6): 1108-1116.
- [18] 付小梅, 杨超, 吴志瑰, 等. 不同采收期栀子中 8 个有效成分含量动态变化与颜色的相关性研究 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(13): 3191-3202.
- [19] 祁晓娟, 李欣, 卓冰雨, 等. 基于颜色数字化的大黄药材基原判别 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(4): 902-906.
- [20] 芦海生, 李婷, 姜丹, 等. 基于 DNA 条形码、UPLC 及色度学方法鉴定与评价橘红 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(20): 4419-4425.
- [21] 刘瑞新, 郝小佳, 张慧杰, 等. 基于电子眼技术的中药川贝母真伪及规格的快速辨识研究 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(14): 3441-3451.
- [22] Fei C H, Ren C C, Wang Y L, *et al.* Identification of the raw and processed *Crataegi Fructus* based on the electronic nose coupled with chemometric methods [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1849.
- [23] Song J X, Chen Q Q, Bi J F, *et al.* GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods [J]. *Food Chem*, 2020, 331: 127201.
- [24] Li Y, Fei C H, Mao C Q, *et al.* Physicochemical parameters combined flash GC E-nose and artificial neural network for quality and volatile characterization of vinegar with different brewing techniques [J]. *Food Chem*, 2022, 374: 131658.
- [25] 单国顺. 薏苡仁炮制工艺及质量标准规范化研究 [D]. 沈阳: 辽宁中医药大学, 2010.
- [26] 林华坚, 张梓豪, 孟江, 等. 干姜及其炮制品色差值与活性成分含量的相关性研究 [J]. 中国药房, 2020, 31(10): 1197-1202.
- [27] 刘晓梅, 张存艳, 刘红梅, 等. 基于电子鼻和 HS-GC-MS 研究地龙腥味物质基础和炮制矫味原理 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(12): 154-161.

- [28] 武文奇, 毛怡宁, 李虹, 等. Heracles II 超快速气相电子鼻对金银花粉末质量的鉴别研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5129-5133.
- [29] Zhao J, Wang T Z, Xie J C, *et al.* Meat flavor generation from different composition patterns of initial Maillard stage intermediates formed in heated cysteine-xylose-Glycine reaction systems [J]. *Food Chem*, 2019, 274: 79-88.
- [30] 孙方达, 刘骞, 孔保华. 美拉德反应及其在肉类香味物质生产中的应用 [J]. 包装与食品机械, 2013, 31(4): 45-49.
- [31] 王小莉, 于生, 单晨啸, 等. 顶空 GC-MS 测定薏苡仁不同炮制品中焦香味醛类物质的含量 [J]. 海峡药学, 2021, 33(6): 69-71.
- [32] Shang Y F, Cao H, Wei C K, *et al.* Bio-utilization of peony seed meal for flavoring production via Maillard reaction: Effects of sugar types on sensory and flavor of products [J]. *J Food Process Preserv*, 2020, 44: 314-341.
- [33] 罗霄, 韦志强, 俞佳, 等. Heracles II 气相电子鼻技术快速鉴别萆澄茄与洋澄茄 [J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2018, 37(1): 34-37.
- [34] 谢巧, 廖莉, 栗圣榕, 等. 基于色度原理分析安息香颜色与化学成分的相关性 [J]. 中成药, 2020, 42(9): 2372-2376.
- [35] 梁志毅, 黄贵发, 崔婷, 等. 狗脊微波炮制过程中指标成分与粉末颜色关联性分析 [J]. 中成药, 2020, 42(6): 1548-1552.
- [36] 卢一, 解达帅, 吴纯洁. 基于 Heracles II 超快速气相电子鼻的硫熏麦冬快速鉴别研究 [J]. 中药材, 2017, 40(5): 1070-1073.
- [37] 殷珍珍, 梁玉芝, 王梦, 等. 基于超快速气相电子鼻对不同硫熏程度天麻的快速鉴别 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 28(13): 167-172.
- [38] 王鑫源, 董诚明, 李曼, 等. 基于 Heracles II 超快速气相电子鼻的牛膝种子快速鉴别研究 [J]. 种子, 2021, 40(4): 135-138.
- [39] Geng J T, Takahashi K, Kaido T, *et al.* Relationship among pH, generation of free amino acids, and Maillard browning of dried Japanese common squid *todarodes pacificus* meat [J]. *Food Chem*, 2019, 283: 324-330.

[责任编辑 郑礼胜]