

真空脉动干燥温度对黄花菜理化性质与微观结构的影响

杨双喜¹, 马慧¹, 张海红^{1*}, 马雪梅¹, 张海波²

(¹宁夏大学食品与葡萄酒学院 银川 750021

²宁夏盐池县自然资源局林木检疫站 宁夏盐池 751500)

摘要 鲜黄花菜含水率较高,导致采后品质快速下降。探讨适合黄花菜的加工方法对延长黄花菜的货架期非常重要。为探究不同真空脉动干燥(PVD)工艺条件对黄花菜营养成分、色泽、风味、复水率及微观结构的影响,以便提高干制黄花菜品质,选用PVD设备干制黄花菜,研究真空保持时间(10 min)和常压保持时间(5 min)条件下不同干燥温度(65,70,75,80,85℃)对黄花菜品质的影响。采用主成分分析法和偏最小二乘法对黄花菜干燥工艺、风味组成以及特征滋味进行判别分析。结果表明,自然干燥(CK)黄花菜中游离氨基酸含量最多,为0.858 mg/g,ΔE值最大,为16.47,进一步表明样品整体质量较差。PVD干燥后黄花菜色泽鲜亮,复水性能较好,蛋白质和黄酮含量显著增加。当PVD 80℃时,原色保留率最大(ΔE=7.28),游离氨基酸含量最高(0.818 mg/g)。当PVD 75℃时,样品中蛋白质(7.331 g/L)和Ga(1 072.445 μg/kg)含量最高。当PVD 70℃时,黄菜样品中β-折叠和α-螺旋含量占比最多,为35%。当PVD 65℃时,黄酮含量(1.653 mg/g)和复水率最高(3.04%),并且可较好地保留无机硫化物、氮氧化物及萜类物质。此外,通过偏最小二乘判别分析得出天门冬氨酸、组氨酸、丝氨酸、谷氨酸和丙氨酸为黄花菜特征滋味物质。结论:不同PVD干燥温度导致黄花菜的理化性质和营养成分不同,研究结果可为满足不同质量属性要求和消费者接受度提供适合的工艺参数。

关键词 黄花菜;真空脉动干燥;营养成分;游离氨基酸;风味

文章编号 1009-7848(2024)06-0264-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.023

黄花菜是百合科萱草属多年生草本宿根植物,又名金针菇,其气味清淡,含有丰富的营养成分,如蛋白质、矿物质、膳食纤维、黄酮、VC、多糖、酚类、萜醌类等,具有抗抑郁、抗氧化、抗炎、抗癌等药用功效^[1],属于药食两用食品,并与香菇、木耳、冬笋并称为四大珍品,其营养综合指标仅次于香菇^[2]。新鲜黄花菜含水率高,不耐贮藏且极易腐烂,并且开花后便会失去商业价值^[3]。为延长其货架期,便于运输以及提高经济价值,通常需对黄花菜干燥加工。

真空脉动干燥技术(Vacuum pulsating drying technology, PVD)具有改善产品褐变和风味流失的特点^[4]。此外,PVD技术利用真空系统可以抑制氧化、褐变反应等发生,该过程中凭借真空和常压的交替使干燥室内一段时间处于特定压力,使产品表面接触的空气层达到饱和状态,并利用压力交

替破坏空气层,从而使物料表面的水分蒸发^[5]。目前,该技术主要应用于枸杞、蓝莓、大蒜、柑橘以及油菜蜂花粉等果蔬。Xie等^[6]利用FIR-PVD研究枸杞干燥动力学、色泽、复水等,结果表明枸杞最佳干燥温度为65℃,并且干燥温度越高枸杞复水率越低。Liu等^[7]研究发现PVD 65℃时相比热风干燥时间缩短32.14%,并且PVD干燥易导致细胞呈不规则状态。Feng等^[8]研究了不同干燥工艺对大蒜干燥色泽、热稳定性和风味物质的影响,结果表明PVD 60℃大蒜色泽和贮藏稳定性最佳。目前未有PVD干燥温度对黄花菜营养成分、色泽、游离氨基酸含量、风味、复水率及微观结构影响的研究报告。

有文献表明PVD干燥过程中常压保持时间变化范围较小,真空保持时间取值过大对干燥动力学性质影响并不显著^[10]。前期试验已确定PVD干燥的真空保持时间和常压保持时间分别为10 min与5 min。为此,本文主要研究不同干燥温度对色泽、游离氨基酸含量、风味、复水率及微观结构的影响,并通过数学模型拟合筛选黄花菜中关键滋味物质,为PVD干燥技术的应用提供参考。

收稿日期:2023-06-06

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目
(2019BFF02004)

第一作者:杨双喜,男,硕士生

通信作者:张海红 E-mail: 13995277851@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

“马莲花”黄花菜采自宁夏盐池县,挑选九成熟,长 10~12 cm,单体质量 9~12 g,直径 0.7~10 mm,无病虫害、机械损伤以及未开化的花蕾,测得初始鲜黄花菜湿基含水率为 86%。

1.2 主要试验设备与仪器

真空脉动干燥设备(ZGF-120型),山东登月红景天有限公司;高速冷冻离心机(TGL-16M),上海卢湘仪离心机仪器有限公司;电子天平(SQP),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;紫外-可见分光光度计(752N),上海悦丰仪器仪表有限公司;数显恒温水浴锅(HH-1),金坛市江南仪器厂;水分测定仪(DHS-16A),宁波市勤州华丰电子仪器厂;电子鼻(PEN3),德国 Airsence 公司;氨基酸分析仪器(LA8080),日本日立公司。

1.3 干燥方法

利用 70 °C 热蒸汽、时间 10 min 对鲜黄花菜进行杀青处理,结束后将黄花菜均匀放在托盘上并沥干表面水分,而后准确称取(500±2)g 样品分别置于 PVD 设备和阳光充足的水泥地面进行干燥。其中,PVD 设备的真空罐初始压力-16.4 kPa,脉动比为 10:5,干燥温度为 65,70,75,80 °C 和 85 °C。从干燥开始时每隔相同时间测定黄花菜的湿

基水分含量,直到湿基水分含量达到(15±2)%时停止干燥,每组试验重复 3 次。将干制后的黄花菜用铝箔袋包装置于(4±1)°C 冰箱贮存。

1.4 指标测定

1.4.1 营养成分的测定

1.4.1.1 蛋白质含量的测定 依据考马斯亮蓝染料液与蛋白质-NH₃⁺结合,溶液变蓝色原理测定。具体操作按照试剂盒说明书进行。

1.4.1.2 黄酮的测定 依据类黄酮与铝离子在 502 nm 处的碱性溶液中可形成红色络合物原理测定。具体操作按照试剂盒说明书进行。

1.4.2 色差值的测定 参考 Chen 等^[9]的试验方法,采用便携式色差仪对黄花菜干燥前后取黄花菜中间部位测定,并用 L^* 、 a^* 、 b^* 值分别表示明亮或者黑暗、红色或绿色、黄色或蓝色,ΔE 表示总颜色变化。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta a^{*2}} \quad (1)$$

1.4.3 游离氨基酸含量的测定 参照 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》进行测定。

1.4.4 风味评价 参照马琦等^[10]试验方法。利用 PEN3 电子鼻评价干燥温度对样品风味的影响。PEN3 电子鼻配备 10 种金属氧化物半导体检测装置,且每种检测装置对应的敏感物质种类不同。

表 1 PEN3 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of PEN3 electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	响应特征
1	W1C	对芳香成分、苯类敏感
2	W5S	灵敏度高、对氮氧化物敏感
3	W3C	对氨水、芳香类敏感
4	W6S	对氢化物敏感
5	W5C	对周围环境中短链烷烃和芳香族化合物敏感
6	W1S	对烷烃类敏感
7	W1W	对无机硫化物和萜类敏感对无机硫化物和萜类敏感
8	W2S	范围较广,对醇类、醛酮类化合物敏感
9	W2W	对芳香和有机硫化物敏感
10	W3S	对长链烷烃类化合物敏感

1.4.5 复水率的测定 参照王静等^[11]试验方法。准确称取 1.000 g 干黄花菜加入 10 mL 蒸馏水,常温放置 12 h,用滤纸吸干表面水分,在放置于电子

天平称量复水后黄花菜的质量。

1.4.6 傅里叶红外光谱分析 参照 Mutukuri 等^[12]试验方法。红外光谱图采用 Peakfit 4.12 和 EZ

OMNIC 软件进行处理。

1.4.7 热稳定性分析 参照 Feng 等^[13]试验方法。利用热重分析仪(TG)测定不同干燥工艺下黄花菜样本的热稳定性。

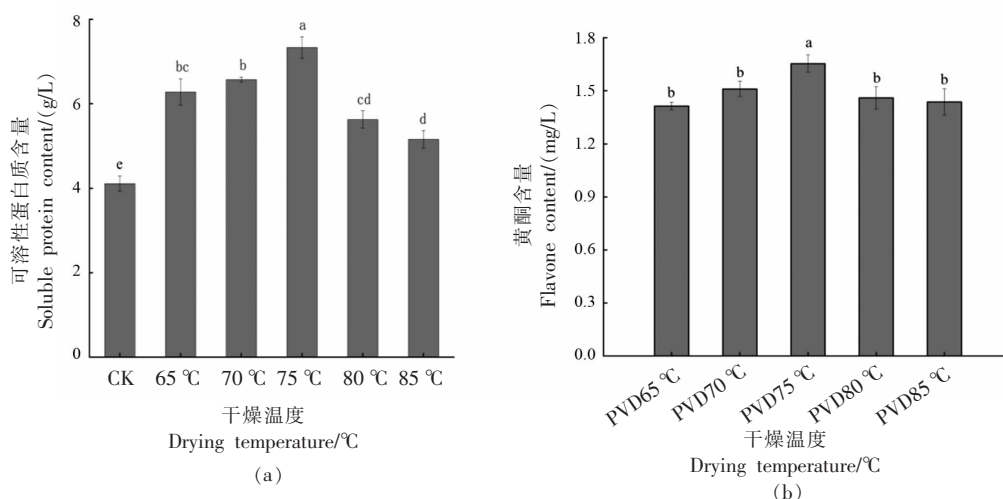
1.5 数据处理

3次试验结果采用平均值±标准差表示。采用 Spass 软件进行方差和相关性分析, $P<0.05$,利用 office 2016 和 Origin 2021b 软件作图。

2 结果与分析

2.1 PVD 干燥温度对黄花菜营养含量的影响

不同干燥工艺下黄花菜营养成分含量变化见图 1。由图 1 可知,与 CK 组相比 PVD 干燥后蛋白质含量存在显著性差异($P<0.05$),但随着 PVD 干燥温度的升高蛋白质含量逐渐降低,且研究结果



注:abcd 为显著标记,相同的标记字母表示没有显著差异,不同的字母标记表示显著差异。

图 1 PVD 干燥温度对黄花菜营养成分含量的影响

Fig.1 Effect of PVD drying temperature on nutrient content of daylily

2.2 PVD 干燥温度对黄花菜色泽的影响

色差仪可以更加准确且客观的判定干制产品的色泽。由表 2 可知,不同温度对黄花菜表面色泽的影响存在显著性差异($P<0.05$)。自然干燥的黄花菜样品 L^* 最高(69.69),说明自然干燥脱水过程可使黄花菜表面变亮,而 PVD 干燥过程中 L^* 相比自然干燥色泽偏黄,可能是由于真空环境改善了非酶褐变或美拉德反应发生的程度^[16],且干燥温度为 80 °C 其 L^* 与杀青后黄花菜色泽最接近。 a 值越低表示干制后黄花菜产品越绿。在干燥温度为

与方小明等^[14]报告文献相似。蛋白质损失原因可能是温度升高导致蛋白质疏水力展开或变性,从而导致其一级、二级、三级和四级部分结构被破坏,部分碳水化合物与其发生美拉德反应最终导致含量降低^[15]。在许多研究中表明,黄花菜的药用作用与其生物活性含量有关,其中黄酮类物质是其药用作用的主要成分。PVD 干燥后黄酮类物质含量呈现先增到后降低的趋势,推测原因可能是起初温度较低及真空与常压反复环境下分解黄酮的氧化酶活性较弱或者大部分黄酮类与碳水化合物结合,导致黄酮类破坏较少,但随着干燥温度的升高分解黄酮的氧化酶活性逐渐增强,使得黄酮含量逐渐降低,表明高温条件下不利于黄酮含量的保存。

80 °C 时, a 值最小且最接近杀青后黄花菜的色泽,表明在该干燥温度条件下可以较好的保持黄花菜中的酚类、叶绿素及叶绿酸等物质。 b 值越大,表明干制后黄花菜的色泽越黄,当干燥温度为 75 °C 时, b 值最大(35.96),表明该温度条件下黄花菜发生的褐变较少。此外,黄花菜干燥过程中类胡萝卜素色素的分解也会影响干制过程中颜色的变化。因此,PVD 干制后样品的 b 值相对较高,可能是 PVD 干燥抑制了色素的降解。

ΔE 值表示样品的整体颜色变化。而对于干制

样品, ΔE 值越小, 干制质量越好。当 $\Delta E > 3$ 时可用肉眼判别颜色差异^[17]。由表 2 可知, ΔE 值随着 PVD 干燥温度的升高而先减小后增加的变化, 当干燥温度为 80 °C 时 ΔE 值最小 (7.28), 表明此温度下干制样品发生的褐变程度最低, 最接近杀青后黄花菜颜色。这可能是因为干燥温度为 80 °C

时, 干燥时间相对较短, 黄花菜中所含酶活性被有效抑制, 从而削弱了酶促氧化作用, 因此可获得较好的黄花菜产品和外观。当温度高于 80 °C 时, 样品内与叶绿素相关的酶短时间内发生降解, 黄花菜外观产生焦黑现象, 对其整体色泽产生严重影响, 并产生不良风味。

表 2 PVD 干燥温度对黄花菜表面色泽的影响

Table 2 Effects of different drying processes on the surface color of daylily

干燥方法	干制后黄花菜表面颜色			
	L^*	a	b	ΔE
杀青后	58.30 ± 0.52^c	-2.08 ± 0.03^c	31.25 ± 0.03^{bc}	-
CK	69.69 ± 1.33^a	9.39 ± 2.27^a	28.98 ± 1.37^c	16.47 ± 1.24^a
PVD 65 °C	60.83 ± 0.80^b	9.56 ± 2.66^a	32.83 ± 1.59^{ab}	12.15 ± 2.33^b
PVD 70 °C	59.54 ± 0.90^{bc}	6.85 ± 2.42^{ab}	34.84 ± 2.04^a	9.95 ± 1.92^{bcd}
PVD 75 °C	58.80 ± 0.86^c	4.62 ± 1.46^b	35.96 ± 1.99^a	8.48 ± 0.13^{cd}
PVD 80 °C	58.60 ± 1.66^{bc}	3.46 ± 0.40^b	35.49 ± 2.17^a	7.28 ± 1.08^d
PVD 85 °C	59.25 ± 1.78^{bc}	8.48 ± 1.43^a	34.75 ± 1.88^a	11.29 ± 2.14^{bc}

注: 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 PVD 干燥温度对黄花菜风味的影响

电子鼻是一种多感官系统, 主要利用气味传感器模拟动物嗅觉系统, 进行识别和描述不同加工方式对产品气味的影响^[18]。图 2a 所示为电子鼻 PCA 分析结果, 由图 2a 可知, 主成分 1 和主成分 2 贡献率分别为 95.1% 和 4.8%, 总贡献率达到 99.9% > 85%, 能够反映样品的主体信息。图 2a 中 6 种样品未出现重叠现象, 说明 PCA 可以有效区分不同黄花菜样品的香气图谱, 并且香气图谱中相似样品在各自区域中相互靠近。其中, PVD 75 °C、PVD 70 °C 和 PVD 80 °C 接近, 自然干燥和 PVD 85 °C 接近, 表明每组挥发性物质成分相似。但 PVD 65 °C 干制黄花菜样品远离前两组, 说明 PVD 65 °C 香气化合物显著不同。

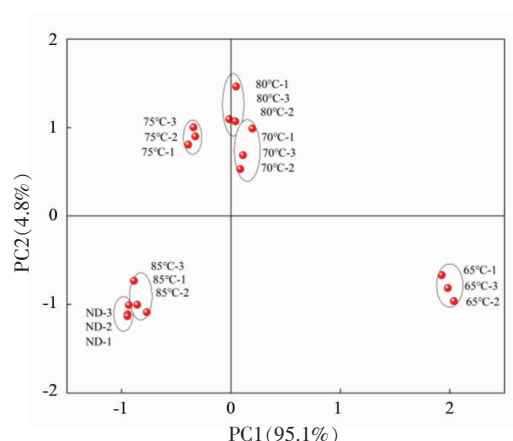
电子鼻 Loading 图如图 2b 所示, 由图 2b 可知, W1W (对无机硫化物和萜类敏感) 和 W5S (灵敏度高、对氮氧化合物敏感) 与主成分 1 有明显正相关, 而 W1W (对无机硫化物和萜类敏感) 与主成分 2 有明显正相关, 表明 ND 组和不同 PVD 干燥温度下的黄花菜样品挥发性物质差异主要表现在无机硫化物和萜类敏感化合物上。

电子鼻雷达图可以直观表征不同处理对气味

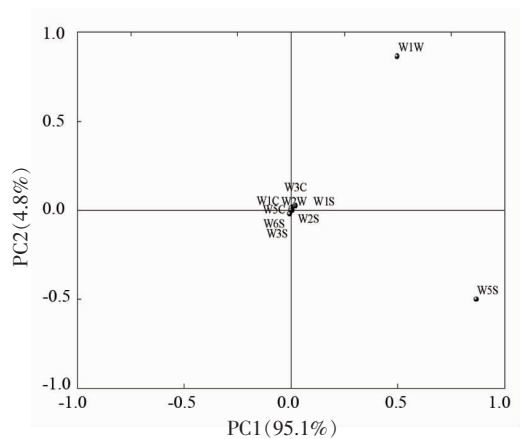
的差异性^[19]。图 2c 所示, 为自然干燥和 PVD 干燥处理后黄花菜电子鼻响应值雷达图。由图 2c 可知, ND 和不同 PVD 干燥温度下的黄花菜样品之间的轮廓较为相似, 但响应强度存在一定差异, 其中 PVD 65 °C W5S 和 W1W 显著高于其它干燥方式, 表明 PVD 65 °C 可以很好的保留样品中这几类风味物质。

2.4 PVD 干燥温度对黄花菜复水性能的影响

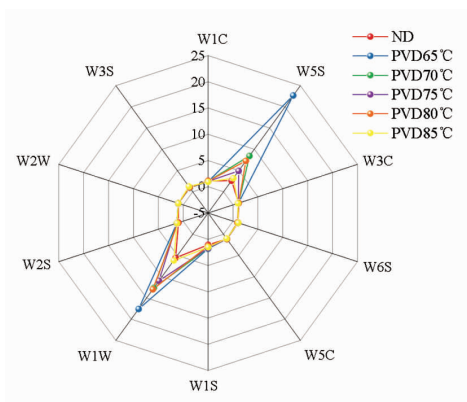
复水比是评价干制品最常用的特性参数, 代表干制品吸收水分恢复原来新鲜状态的过程, 复水比越高, 则干燥方式对干制品组织结构影响较小, 干制品品质较好^[20]。由图 3 可知, 干燥温度对黄花菜复水率存在显著性影响 ($P < 0.05$)。其中, PVD65 °C 复水率最大 (3.04%), 而 PVD85 °C 复水率最小 (2.66%)。可见随着干燥温度的升高, 干制品复水率呈现下降趋势, 可能是由于高温导致样品细胞结构萎缩和变形程度较大, 使其恢复原有状态的能力较差。同时高温会破坏细胞壁渗透以及诱导部分蛋白质变性, 降低其吸水能力或水合能力。此外, Deng^[21]和 Vega^[22]等研究结果表明 60 °C 时红辣椒真空脉动干燥复水率最大为 4.48%, 其次为 70, 80 和 90 °C, 与本文研究结果相似。



(a) PCA 分析



(b) Loading 图



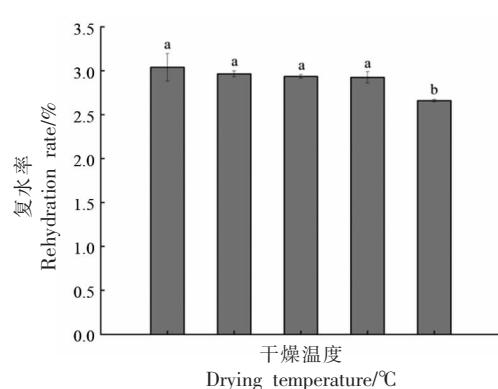
(c) 雷达图

图2 PVD干燥温度下黄花菜电子鼻分析

Fig.2 Electronic nose analysis of daylily under different drying temperature

2.5 PVD干燥温度对黄花菜游离氨基酸含量的影响

果蔬干制过程中时常伴随着美拉德反应以及多酚类物质的缩合反应，而反应过程中都需要游



注:ab为显著标记,相同的标记字母表示没有显著差异,不同的字母标记表示显著差异。

图3 PVD干燥温度对黄花菜复水率的影响

Fig.3 Effects of different drying temperature on the rehydration rate of daylily

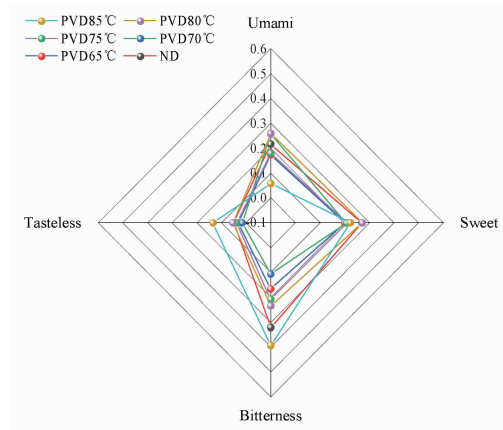


图4 PVD干燥温度对黄花菜呈味物质的雷达图

Fig.4 Radar diagram of flavoring substances in daylily under different drying temperature

离氨基酸的参与,因此,可以根据游离氨基酸含量的变化作为判别干制黄花菜的营养品质的指标,也是解析黄花菜干制过程中发生非酶褐变的重要指标。表3所示,样品经不同PVD温度干燥后总游离氨基酸含量均低于ND组,但在PVD温度干燥过程中游离氨基酸含量呈现先增加后降低的趋势,其中80℃时总游离氨基酸含量显著高于其它组($P < 0.05$),为0.818 mg/g。这可能是由于起初温度较低促进样品中蛋白质水解产生更多游离氨基酸,但随着干燥温度的升高部分游离氨基酸开始降解^[23],如丝氨酸、苏氨酸、丙氨酸、缬氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、精氨酸等作为风味前体物质与糖

发生美拉德反应、焦糖化反应,并产生一些其它风味物质,导致总游离氨基酸含量降低,可见 PVD 80 °C 可有效保留样品中游离氨基酸含量。

游离氨基酸也是一种重要的呈味物质,根据其呈味规律可以分为甜味、鲜味、苦味及无味等 4 种,可共同增强食品风味。由表 2 可知,干制样品中主要包括味觉活性氨基酸为鲜味氨基酸(0.058~0.259 干重 mg/g)、甜味(0.201~0.272 干重 mg/g)和苦味氨基酸(0.106~0.393 干重 mg/g)。由图 4 可知,PVD 80 °C 鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量相对较高,其中天门冬氨酸和谷氨酸作为黄花菜鲜味的主要来源,在干燥过程中含量增加可能

是由于加热过程发生美拉德反应和蛋白质分解,导致产生的氨基酸含量高于消耗的氨基酸^[24]。此外,谷氨酸及其衍生物具有抗癌活性、细胞增殖、改善蛋白质代谢及增强免疫系统作用^[25]。丝氨酸、甘氨酸和丙氨酸作为样品甜味的主要物质,其中甘氨酸可促进谷胱甘肽的合成,对细胞具有生成和激活作用^[26],同时对多种细胞如脑、心、肝和肾等具有保护功能^[27]。苦味氨基酸中异亮氨酸具有稳定血糖、合成血红蛋白及调节能量水平等功能^[28],酪氨酸可作为苯丙氨酸产生的重要前体并转化为与学习能力和应激控制相关的蛋白质^[29]。

表 3 PVD 干燥温度对黄花菜样品中游离氨基酸含量的影响

Table 3 Effects of different drying temperature on free amino acid content in daylily samples

呈味	游离氨基酸	不同干燥工艺下黄花菜样品中游离氨基酸含量/干重(mg/g)					
		CK	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C
鲜味	天门冬氨酸	0.138 ± 0.006 ^b	0.084 ± 0.003 ^d	0.180 ± 0.004 ^a	0.104 ± 0.001 ^c	0.172 ± 0.002 ^a	0.051 ± 0.002 ^c
	谷氨酸	0.079 ± 0.001 ^b	0.089 ± 0.004 ^a	0.079 ± 0.002 ^b	0.076 ± 0.001 ^b	0.087 ± 0.003 ^a	0.007 ± 0.003 ^c
	合计	0.217 ± 0.007 ^b	0.173 ± 0.007 ^c	0.258 ± 0.002 ^a	0.180 ± 0.001 ^c	0.259 ± 0.005 ^a	0.058 ± 0.004 ^d
甜味	苏氨酸	0.052 ± 0.002 ^b	0.055 ± 0.001 ^b	0.068 ± 0.003 ^a	0.058 ± 0.002 ^{sub}	0.067 ± 0.004 ^a	0.023 ± 0.008 ^c
	丝氨酸	0.122 ± 0.003 ^a	0.071 ± 0.000 ^{bc}	0.080 ± 0.002 ^{bc}	0.060 ± 0.002 ^{cd}	0.104 ± 0.000 ^{ab}	0.028 ± 0.032 ^d
	甘氨酸	0.010 ± 0.000 ^c	0.009 ± 0.001 ^c	0.004 ± 0.000 ^d	0.009 ± 0.001 ^c	0.012 ± 0.000 ^b	0.023 ± 0.001 ^a
	脯氨酸	0.074 ± 0.003 ^a	0.039 ± 0.001 ^c	0.037 ± 0.002 ^c	0.048 ± 0.002 ^b	0.049 ± 0.002 ^b	0.072 ± 0.006 ^a
	丙氨酸	0.013 ± 0.000 ^f	0.028 ± 0.001 ^d	0.017 ± 0.001 ^e	0.033 ± 0.001 ^c	0.040 ± 0.001 ^b	0.077 ± 0.003 ^a
	合计	0.270 ± 0.001 ^a	0.201 ± 0.000 ^c	0.207 ± 0.005 ^{bc}	0.208 ± 0.001 ^{bc}	0.272 ± 0.005 ^a	0.223 ± 0.016 ^b
	缬氨酸	0.025 ± 0.001 ^b	0.016 ± 0.000 ^d	0.007 ± 0.000 ^e	0.018 ± 0.001 ^d	0.022 ± 0.002 ^c	0.058 ± 0.002 ^a
苦味	异亮氨酸	0.018 ± 0.001 ^c	0.015 ± 0.000 ^e	0.008 ± 0.000 ^d	0.016 ± 0.001 ^c	0.022 ± 0.000 ^b	0.053 ± 0.003 ^a
	亮氨酸	0.022 ± 0.000 ^d	0.022 ± 0.000 ^d	0.009 ± 0.000 ^e	0.030 ± 0.001 ^c	0.037 ± 0.002 ^b	0.077 ± 0.003 ^a
	蛋氨酸	0.005 ± 0.000 ^c	0.004 ± 0.000 ^e	0.003 ± 0.000 ^d	0.007 ± 0.000 ^b	0.007 ± 0.000 ^b	0.026 ± 0.002 ^a
	组氨酸	0.063 ± 0.003 ^b	0.031 ± 0.001 ^e	0.021 ± 0.001 ^e	0.032 ± 0.002 ^d	0.045 ± 0.001 ^c	0.079 ± 0.004 ^a
	精氨酸	0.021 ± 0.001 ^c	0.017 ± 0.000 ^e	0.006 ± 0.000 ^d	0.018 ± 0.000 ^c	0.024 ± 0.001 ^b	0.071 ± 0.005 ^a
	苯丙氨酸	0.169 ± 0.000 ^a	0.061 ± 0.005 ^d	0.052 ± 0.003 ^e	0.086 ± 0.001 ^b	0.078 ± 0.002 ^c	0.030 ± 0.004 ^f
	合计	0.321 ± 0.001 ^b	0.166 ± 0.004 ^c	0.106 ± 0.001 ^f	0.208 ± 0.000 ^d	0.234 ± 0.004 ^c	0.393 ± 0.017 ^a
无味	酪氨酸	0.029 ± 0.002 ^b	0.014 ± 0.001 ^e	0.011 ± 0.000 ^f	0.020 ± 0.000 ^d	0.026 ± 0.001 ^c	0.062 ± 0.002 ^a
	赖氨酸	0.021 ± 0.001 ^c	0.017 ± 0.000 ^e	0.007 ± 0.000 ^d	0.018 ± 0.001 ^c	0.027 ± 0.001 ^b	0.072 ± 0.001 ^a
	合计	0.050 ± 0.002 ^b	0.031 ± 0.001 ^d	0.016 ± 0.000 ^e	0.038 ± 0.001 ^c	0.053 ± 0.001 ^b	0.134 ± 0.003 ^a
	总量	0.858 ± 0.012 ^a	0.571 ± 0.003 ^d	0.587 ± 0.002 ^d	0.634 ± 0.002 ^c	0.818 ± 0.006 ^b	0.808 ± 0.008 ^b

注:同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.6 特征滋味物质的筛选

通过 PLS-DA 模型可知, $R^2_x = 0.999$, $R^2_y = 0.987$, $Q^2 = 0.958$, 其中 R^2_x 和 R^2_y 代表在 x 轴和 y 轴方向的解释率。当 $R^2_x - R^2_y < 0.3$ 时,表明该模型

能够反映样品的绝大部分信息。同时,采用 200 次置换检验(图 5)可知, $R^2 = 0.417$, $Q^2 = -0.502$, 且 Q^2 与 y 轴的截距小于零,进一步证明该模型未拟合过度,能够进一步筛选标志性滋味物质。因此,采

用 PLS-DA 模型中变量重要性投影值 (variable importance in project, VIP) 对每个变量的样品分类贡献度进行量化(图 6), 当 $VIP > 1$ 时表明该滋

味物质被称为标志性滋味物质, 并且 VIP 值越大, 代表其贡献率越多。由图 6 可知, 天门冬氨酸、组氨酸、丝氨酸、谷氨酸和丙氨酸的特征滋味物质。

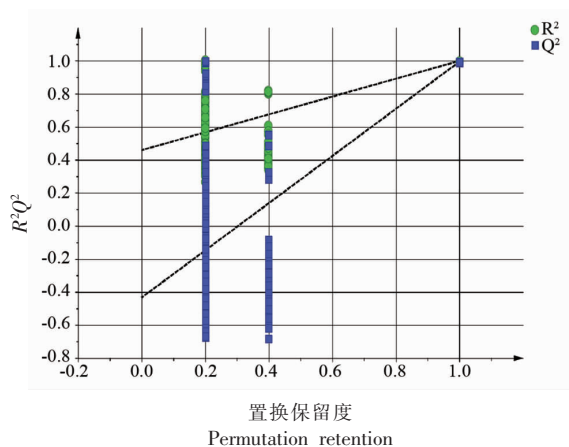


图 5 PLS-DA 模型置换检验

Fig.5 Replacement test of PLS-DA model

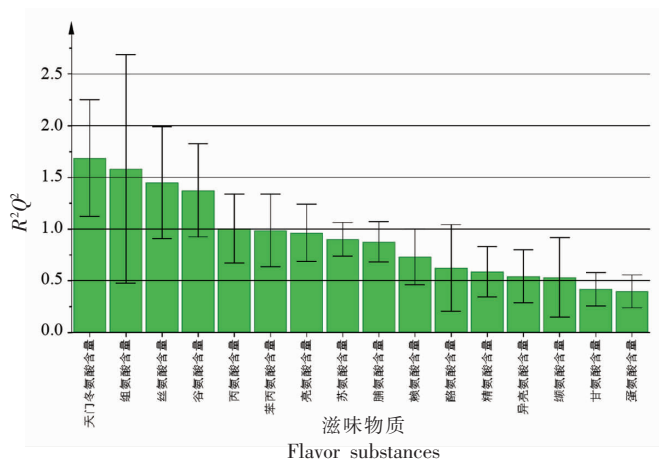


图 6 PVD 干燥温度下黄花菜样品滋味化合物 VIP 排序图

Fig.6 Ordering of flavor compounds VIP of daylily samples at PVD drying temperature

2.7 PVD 干燥温度对黄花菜微观结构的影响

2.7.1 PVD 干燥温度对黄花菜蛋白质二级结构的影响 图 7 为 CK 组和不同 PVD 温度下黄花菜样品的 FT-IR 光谱图($4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$)。图 7a 显示了不同 PVD 干燥温度下样品对不同特定波数范围的吸收, 从而有利于鉴定其相关的官能团。由图 7a 可知, 每个波带大致可以分为 4 种吸光度区域, I $3\ 900\sim 3\ 000\text{ cm}^{-1}$ (主要包括 O-H 拉伸、氢键和水); II $3\ 000\sim 2\ 300\text{ cm}^{-1}$ (主要包括 C-H 拉伸和脂肪), III $2\ 300\sim 1\ 700\text{ cm}^{-1}$ (主要包括 N-H 拉伸和叔胺盐) 和 IV $1\ 700\sim 500\text{ cm}^{-1}$ (主要包括酰胺 I、II、III 和碳水化合物), 表明不同干燥温度和干燥方式对黄花菜官能团存在显著性影响。CK 组和 PVD 干燥的波峰强度存在较大差异, 但黄花菜样品在不同 PVD 温度干燥下的峰值更具有可比性。PVD 干燥的黄花菜样品显示在 $3\ 900\sim 3\ 000\text{ cm}^{-1}$ 存在强而宽的峰被 O-H 拉伸振动, 其中 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸幅度最小, 但相比自然干燥振动幅度较大, 并且干燥过程中也导致羟基键的吸光度降低, 原因是因为干燥过程中水分的损失。 $3\ 000\sim 2\ 300\text{ cm}^{-1}$ C-H 时 C-H 拉伸强度呈现先降低后增加的变化趋势, 可能与 $2\ 995\sim 2\ 886\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 886\sim 2\ 783\text{ cm}^{-1}$ 波峰处脂肪酸的化学基团 $-\text{CH}_3$ 与 $-\text{CH}_2$ 甲基含量

变化有关^[30], 并且 CK 组和 PVD 干燥曲线变化幅度基本一致, 当波峰为 $2\ 300\text{ cm}^{-1}$ 左右时, PVD $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的碳氢键吸光度最大。这些结果表明, PVD 干燥相比自然干燥表现出更多的非晶态结构, 进一步说明高温易对晶体内水分的扩散起到破坏作用, 从而导致干制后样品结构受到影响^[31]。然而, 在 $2\ 300\sim 1\ 700\text{ cm}^{-1}$ 时自然干燥和 PVD 对保留黄花菜中微量元素及营养物质起到一定的作用, 过程中也对叔胺盐的峰值强度显著降低, 其中 PVD $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对叔胺盐相对吸光度值影响最小。在 $1\ 700\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 时自然干燥和 PVD 的峰值强度整体呈现先降低后增加的趋势, 并在每个波带中都存在多个峰, 推测可能会形成或者破坏样品中的芳香物质^[32]。因此, 以上这些反应易导致黄花菜中多糖物质发生降解、氧化、非酶褐变和酶促反应发生。

光谱中也包含了黄花菜主要成分相连的特征带, 主要包括酰胺 I 带 ($1\ 700\sim 1\ 600\text{ cm}^{-1}$) 和酰胺 II 带 ($1\ 600\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$), 其中酰胺 I 带为理论研究相对成熟, 被用来指定蛋白质二级结构^[33]。因此将酰胺 I 带的光谱去卷积、求二阶导数及曲线拟合等方法, 计算出各处理组中蛋白质二级结构相对含量, 如图 7b、图 8 所示。由图 7a 可知, 不同干燥条件(干燥方式和温度)对黄花菜的蛋白质特征

峰个数、位置以及峰面积存在显著性影响,主要是由于氢键是维持蛋白质二级结构最主要的作用力。当其二级结构发生改变,其氢键强度也随之改变。图 7a 中酰胺 I 带对碳基的几何振动和氢键结构变化非常敏感。因此,当黄花菜中蛋白质二级结构改变时,其在 FT-IR 上的形状和强度也会发生改变。

参照 Rocha^[34]研究对黄花菜蛋白质二级结构中 β_1 β_2 β -折叠 β -转角(t)、 α -螺旋、和无规卷曲(r)在酰胺 I 带中相对含量进行计算,其中 β_1 和 β_2 结构特征分别为分子反向平行,且分子间氢键强相互作用;分子间为非平面结构且作用力为弱氢键。由图 7b 可知,CK 和 PVD 干燥对黄花菜中蛋白质相对含量存在显著性影响。在 CK 组中 β -折叠含量和 α -螺旋相对最高,为 34%和 31%,无规卷曲的含量最低,为 0%。但在 PVD 干燥中随

着干燥温度的升高, β -折叠和 α -螺旋含量呈现先升高后降低趋势,且 β -折叠下降趋势较快,但温度为 70 °C 时两者含量最高,且都为 35%。结果表明 α -螺旋逐渐向 β_1 和 β -转角转换,并伴随着氢键的破坏, β -折叠逐渐向无规卷曲转换。Deng 等^[35]研究表明鱿鱼经热风干燥后 α -螺旋降低。Vanga 等^[36]也发现微波干燥过程黄花中无规卷曲含量随温度升高而增加。综合以上分析原因,可能是高温破坏了黄花菜蛋白质内部的刚性结构,促使其构像从有序变无序更加灵活,也加速了疏水基团的暴露。此外,加热处理也可能破坏干制黄花菜内部氢键,使蛋白质之间的相互作用力减弱,从而导致分子自由能随机分布^[37]。因此,推测加热处理可能会导致黄花菜蛋白质内部结构含量持续相互转换。

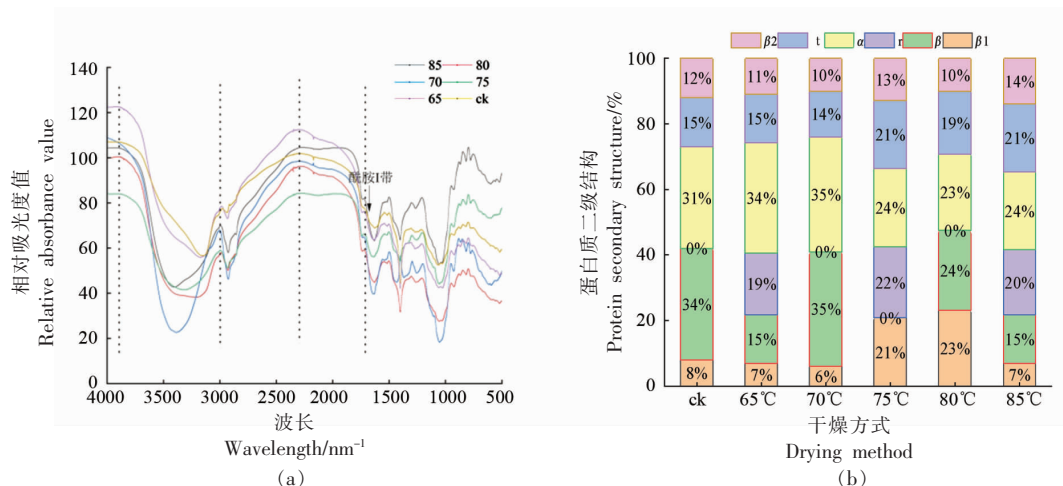
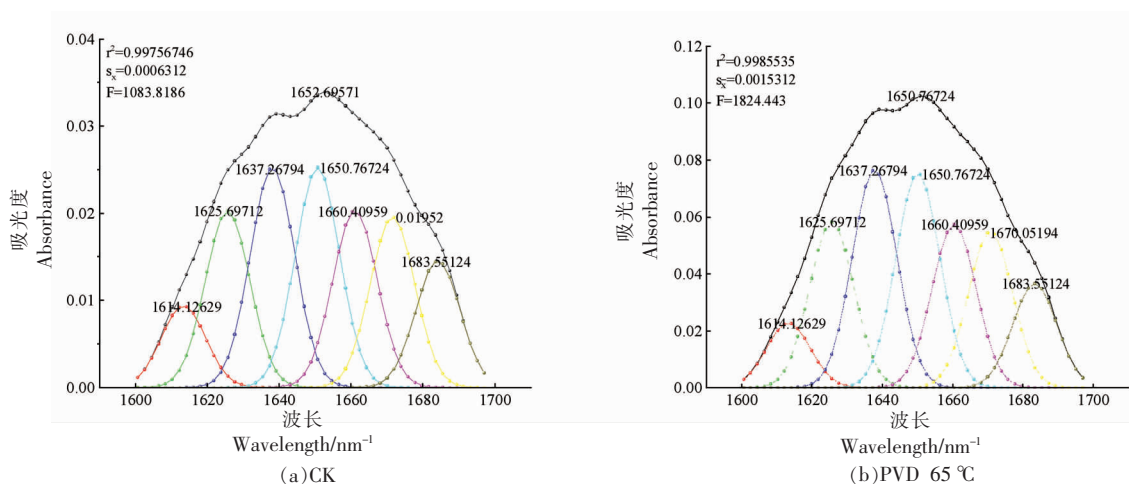


图 7 干燥工艺下黄花菜蛋白 FT-IR 光谱 (a) 和二级结构百分比 (b)

Fig.7 FT-IR spectra (a) and percentage of secondary structure (b) of daylily protein at different drying processes



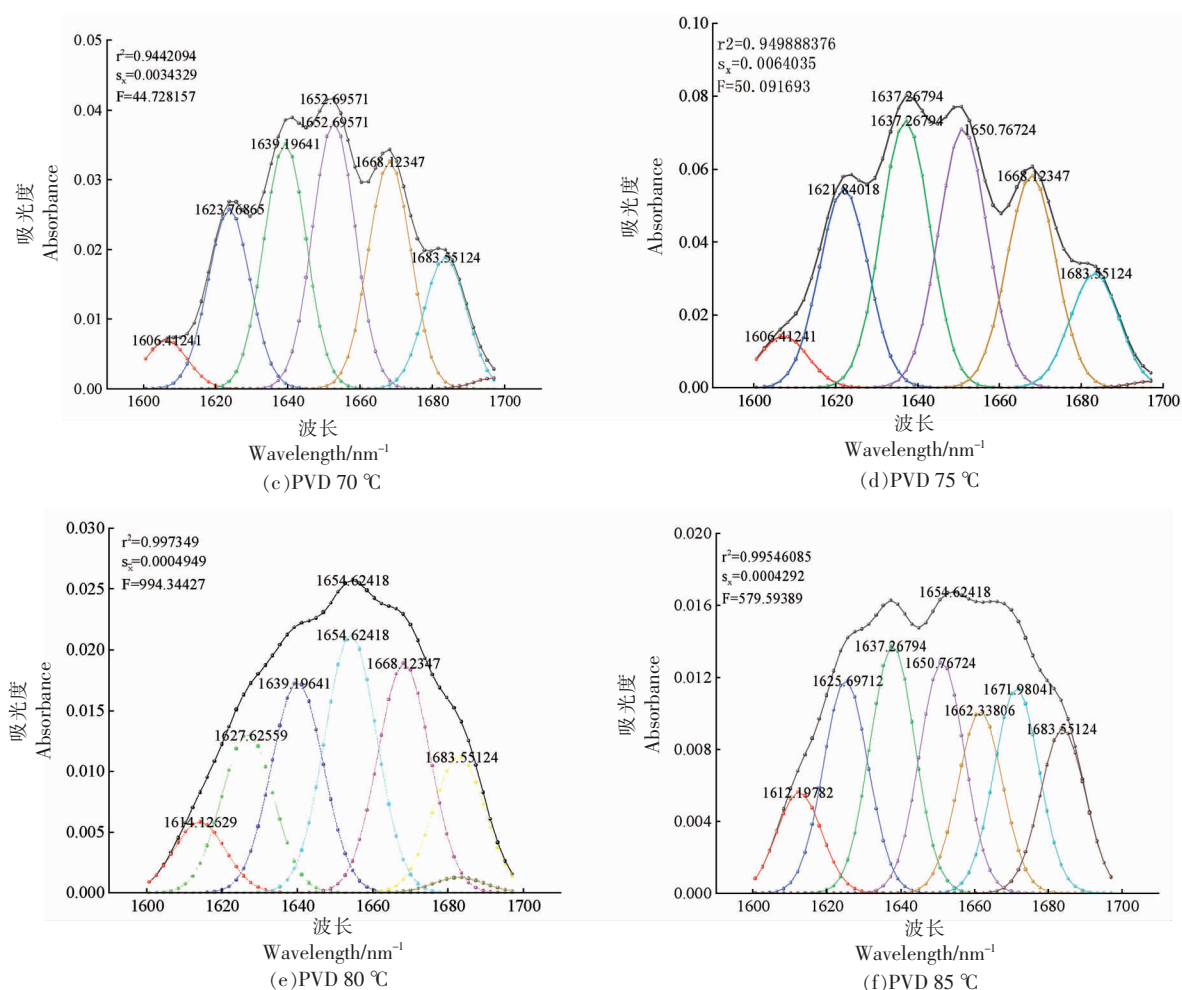


图 8 干燥工艺对黄花菜去卷积图谱的影响

Fig.8 Effect of drying processes on daylily deconvolution map

2.7.2 PVD 干燥温度对黄花菜热稳定性的影响

图 9 所示为不同 PVD 干燥温度下黄花菜样品的热稳定性。由图 9 可知,黄花菜干燥样品中碳水化合物、挥发性物质及结合水等化学成分,随着加热温度的升高,干制样品的质量逐渐降低。起初,在 26~153 °C 范围内所有样品初始质量发生损失,推测原因可能是加热造成样品中水分和挥发性物质的损失,并且降解过程中温度变化可能与样品中不同组分与水结合模式有关,而导致水的结合特性发生改变,使释放水所需的能量发生改变^[38]。当温度高于 153 °C 时,所有样品发生分解的过程为 3 个阶段。第一阶段质量损失相对较大,主要与样品的分解和脱水有关;第二阶段可能与样品中有机物质的分解和降解有关;第三阶段主要形成非转

化的残基^[39]。样品加热结束时,剩余样品占对应干燥样品总质量的百分比分别为 28.055 (ND), 28.91% (PVD 65 °C), 28.77% (PVD 70 °C), 28.88% (PVD 75 °C), 28.88% (PVD 80 °C) 和 30.02% (PVD 85 °C), 可以看出经 PVD 干燥后样品的热稳定明显增加,表明样品中的蛋白质具有较好的热力学稳定性,有利于干燥过程中保持稳定。同时,PVD 处理过程中峰值温度越高,蛋白质热力学更稳定,变性温度较高的蛋白质对变性的影响也相对较小。此外,样品稳定性与其结构密切相关,结构越密集则样品越稳定,表明 PVD 处理后的样品具有更密集的结构。因此,使用 PVD 技术干燥样品的同时即保持了样品稳定性,也提高其质量特性。

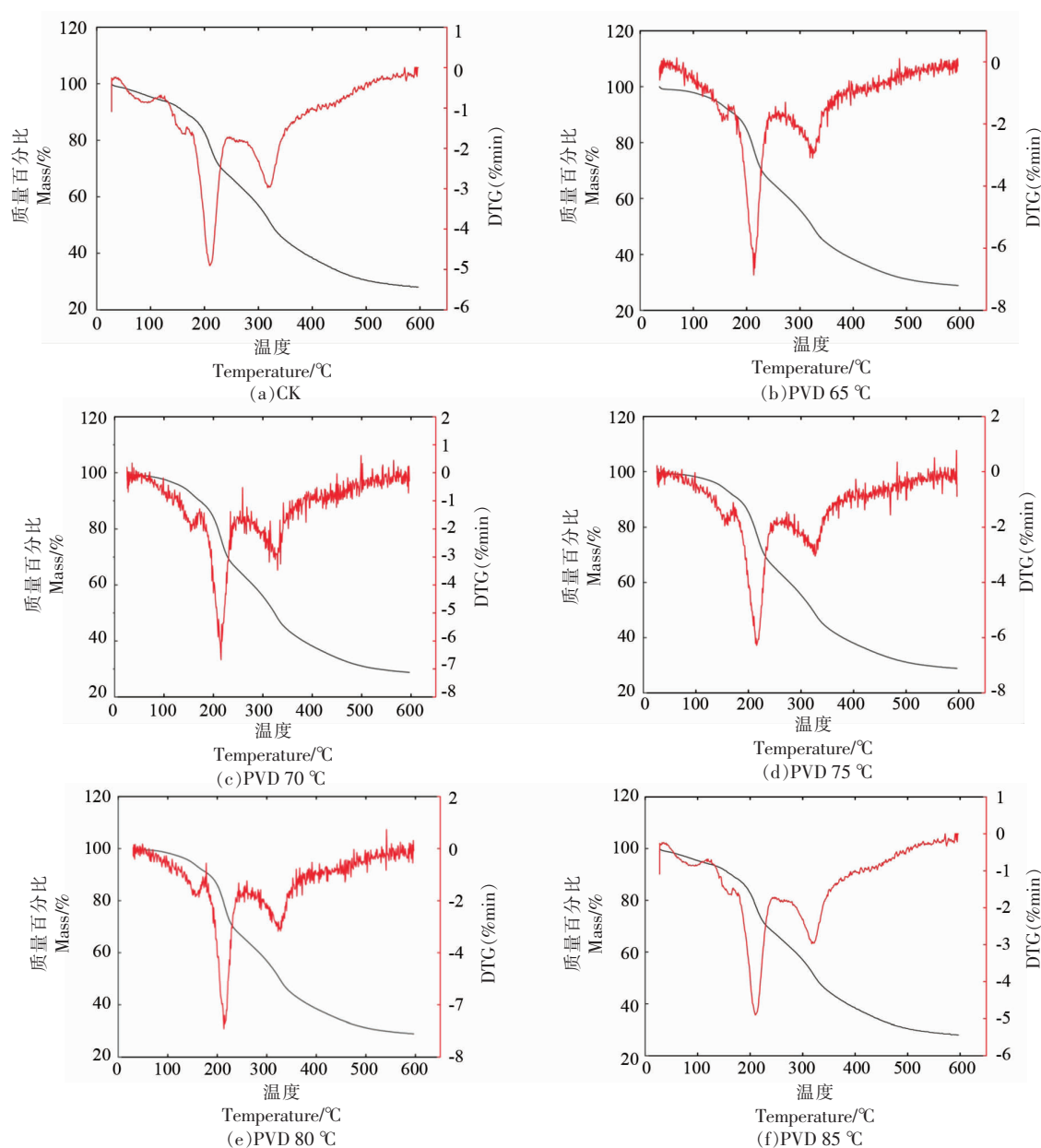


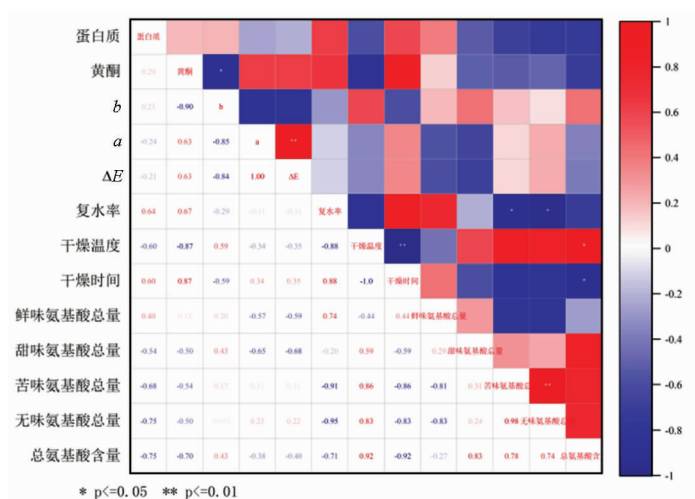
图9 PVD干燥温度对黄花菜干燥热稳定性的影响

Fig.9 Effect of PVD drying temperature on the thermal stability of daylily

2.8 相关性分析

图10为干燥温度、干燥时间、蛋白质、黄酮、 ΔE 、复水率、鲜味氨基酸总量、甜味氨基酸总量、苦味氨基酸总量、无味氨基酸总量等含量相关性分析矩阵。由图10皮尔森相关系数(r)可知,鲜黄花菜在干燥后色泽变化与营养成分含量有关,其中黄酮含量和 b 值呈现负相关($r=-0.896, P<0.05$),推测原因可能是高温导致分解黄酮的氧化酶失活或者大部分黄酮类物质与碳水化合物结

合,从而避免黄酮类物质被破坏^[40]。游离氨基酸总量与干燥温度呈现正相关,与干燥时间呈现负相关,研究结果与许利平等^[41]文献报告一致,表明游离氨基酸总量主要受干燥时间和干燥温度影响。而干制后样品的复水率与苦味氨基酸总量、无味氨基酸总量分别呈现负相关($r=-0.913, r=-0.951, P<0.05$),并结合复水率、苦味氨基酸总量和无味氨基酸总量变化趋势可知,复水性能的降低,对苦味与无味氨基酸总量的增加产生正面影响。



注:图中数字表示相关系数, $P < 0.01$, $P < 0.05$ 。

图 10 干燥温度、干燥时间、蛋白质、黄酮、复水率、鲜味氨基酸总量、甜味氨基酸总量、苦味氨基酸总量、无味氨基酸总量及总氨基酸总量等相关性分析矩阵

Fig.10 Correlation analysis matrix of drying temperature, drying time, protein, flavone, rehydration rate, total umami amino acid, sweet amino acid, bitter amino acid, tasteless amino acid and total amino acid

3 结论

本文研究了真空脉动干燥温度对黄花菜干燥过程中干燥特性、营养成分、复水率及风味组成的影响,结果表明:PVD 75 °C时,干制样品中蛋白质为 7.331 g/L;PVD 65 °C时,黄酮含量和复水率最高,分别为 1.653 mg/g 和 3.04;PVD 80 °C时花菜物理性质较好,颜色鲜亮,且游离氨基酸总量最高,为 0.818 mg/g。同时不同干燥温度下的黄花菜具有不同的风味特征,其中 PVD 65 °C时可以较好的保留无机硫化物、氮氧化物及萜类物质。此外,FT-IR 图谱能够可视化和区分不同干燥工艺条件下蛋白质分子组成之间的差异,其中 PVD 70 °C的黄花菜样品中 β -折叠和 α -螺旋含量最高,同时也进一步表明 FT-IR 是一种快速、高效、无创的技术可以区分和计算不同干燥工艺对样品蛋白质结构和含量的影响。这些结果表明,可以为满足不同质量属性要求和消费者接受度的黄花菜提供合适的工艺参数起到积极的指导作用。而在后期研究中需进一步从缩短干燥时间,优化干燥活化能等角度优选最佳干燥模型以及节能减排等多维度加大研究 PVD 干燥技术模型,进一步提高 PVD 干燥技术的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张运晖, 赵瑛, 欧巧明. 黄花菜采后加工及药用机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(20): 6-8. ZHANG Y H, ZHAO Y, OU Q M. Research progress on postharvest processing and medicinal mechanism of daylily [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(20): 6-8.
- [2] 韩志平, 张春业, 张海霞, 等. 黄花菜和 3 种食用菌营养价值的研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 63-65. HAN Z P, ZHANG C Y, ZHANG H X, et al. Research on the nutritional value of daylily and three edible fungi[J]. Journal of Shanxi Datong University(Natural Science Edition), 2013, 29(5): 63-65.
- [3] 张欣, 李坤, 马明, 等. CO₂ 浓度对黄花菜 MA 贮藏效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 35(5): 183-186. ZHANG X, LI K, MA M, et al. Effect of CO₂ concentration on MA storage effect of daylily [J]. Food and Fermentation Industry, 2010, 35(5): 183-186.
- [4] XIE Y, GAO Z, LIU Y, et al. Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices[J]. LWT- Food Science and Technology, 2017, 80: 237-249.

- [5] WANG J, LAW C, NEMA K P, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 224: 129–138.
- [6] XIE L, MUJUMDAR A S, FANG X M, et al. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes [J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2017, 102: 320–331.
- [7] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2021, 142(8): 258–266.
- [8] FENG Y B, XU B G, ELGASIM A, et al. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. *Food Chemistry*, 2020, 343(5): 221–233.
- [9] CHEN Y, LV Z, LIU Z, et al. Effect of different drying temperatures on the rehydration of the fruiting bodies of Yu Muer (*Auricularia cornea*) and screening of browning inhibitors[J]. *Food Science and Nutrition*, 2020, 11(8): 6037–6046.
- [10] 马琦, 伯继芳, 冯莉, 等. GC-MS结合电子鼻分析干燥方式对杏鲍菇挥发性风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 276–282.
- MA Q, BO J F, FENG L, et al. Analysis of the effects of drying methods on the volatile flavor components of *Pleurotus eryngii* by GC-MS combined with electronic nose [J]. *Food Science*, 2019, 40(14): 276–282.
- [11] 王静, 胡秋辉, 辛志宏. 真空微波与热风联合干燥蒜片的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(8): 280–283, 286.
- WANG J, HU Q H, XIN Z H. Study on the process of vacuum microwave and hot air drying garlic slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(8): 280–283, 286.
- [12] MUTUKURI T T, WILSON N E, TAYLOR L S, et al. Effects of drying method and excipient on the structure and physical stability of protein solids: Freeze drying vs. spray freeze drying[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020, 594(11): 2256–2266.
- [13] FENG Y B, XU B G, MA H, et al. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. *Food Chemistry*, 2020, 343(8): 221–233.
- [14] 方小明, 张晓琳, 王军, 等. 荷花粉真空脉动干燥特性和干燥品质[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 287–295.
- FANG X M, ZHANG X L, WANG J, et al. Vacuum pulsation drying characteristics and drying quality of lotus pollen[J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 287–295.
- [15] RAFIQ S, SINGH B, GAT Y. Effect of different drying techniques on chemical composition, color and antioxidant properties of kinnow (*Citrus reticulata*) peel[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(5): 2458–2466.
- [16] CERNISEV S. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(1): 114–118.
- [17] PENG J, TANG J, LUAN D, et al. Microwave pasteurization of pre-packaged carrots[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 202: 56–64.
- [18] GHOSH P K, CHATTERJEE S, BHATTACHARJEE P, et al. Removal of rancid-acid odor of expeller-pressed virgin coconut oil by gamma irradiation: Evaluation by sensory and electronic nose technology [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2016, 9(10): 1–11.
- [19] 樊月, 刘伟, 徐芬, 等. 不同种类山东煎饼特征风味成分差异分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 173–179.
- FAN Y, LIU W, XU F, et al. Difference analysis of characteristic flavor components of different types of Shandong pancakes[J]. *Food Science*, 2020, 41(12): 173–179.
- [20] HONG W X, BAI J W, XIE L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2015, 94: 581–591.
- [21] DENG L Z, YANG X H, WANG D, et al. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and mi-

- crostructure[J]. *Drying Technology: An International Journal*, 2018, 36(8): 893–907.
- [22] VEGA-GALVEZ A, SCALA K D, RODRIGUEZ K, et al. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum* L. var. Hungarian)[J]. *Food Chemistry*, 2009, 117(4): 647–653.
- [23] 孙承锋, 周楠, 朱亮, 等. 卤猪肉加工过程中游离脂肪酸、游离氨基酸及核苷酸变化分析[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(6): 200–206.
- SUN C F, ZHOU N, ZHU L, et al. Analysis of changes in free fatty acids, free amino acids and nucleotides during processing of braised pork [J]. *Modern Food Technology*, 2016, 32(6): 200–206.
- [24] 王振宇, 刘欢, 马佃珍, 等. 热处理下的猪肉蛋白质特性[J]. *食品科学*, 2008, 29(5): 73–77.
- WANG Z Y, LIU H, MA L Z, et al. Characteristics of pork protein under heat treatment[J]. *Food Science*, 2008, 29(5): 73–77.
- [25] DUTTA S, RAY S, NAGARAJAN K. Glutamic acid as anticancer agent: An overview[J]. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 2013, 21(4): 337–343.
- [26] GUNDERSEN R Y, VAAGENES P, BREIVIK T, et al. Glycine—an important neurotransmitter and cytoprotective agent[J]. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 2005, 49(8): 1108–1116.
- [27] ILARIA L, GENNARO R, FRANCESCO C, et al. Oxidative stress, aging, and diseases[J]. *Clinical Interventions in Aging*, 2018, 13: 757–772.
- [28] MOORTHI P P, GUNASEKARAN S, RAMKUMMAAR G R. Vibrational spectroscopic studies of isoleucine by quantum chemical calculations[J]. *Spectrochim Acta—Part A Mol Biomol Spectrosc*, 2014, 124: 365–374.
- [29] FERNSTROM J D, FERNSTROM M H. Tyrosine, phenylalanine, and catecholamine synthesis and function in the brain[J]. *J Nutr*, 2007, 137: 1539S–1547S.
- [30] LONG C, TIAN Y, SUN B, et al. Measurement and characterization of external oil in the fried waxy maize starch granules using ATR-FTIR and XRD[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 131–138.
- [31] WARREN J F, GIDLEY J M, FLANAGAN M B. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study[J]. *Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2016, 139: 35–42.
- [32] KHETO A, DHUA S, NEMA P K, et al. Influence of drying temperature on quality attributes of bell pepper (*Capsicum annum* L.): Drying kinetics and modeling, rehydration, color, and antioxidant analysis[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(11): 115–123.
- [33] DEFLORES L P, GANIM Z, NICODEMUS R A, et al. Amide I'-II' 2D IR spectroscopy provides enhanced protein secondary structural sensitivity [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(8): 85–91.
- [34] ROCHA L. Toward a better understanding of structural divergences in proteins using different secondary structure assignment methods [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2014, 1063(1): 242–250.
- [35] DENG Y, LUO Y, WANG Y, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets[J]. *Food Chem*, 2015, 171: 168–176.
- [36] VANGA S K, SINGH A, KALKAN F, et al. Effect of thermal and high electric fields on secondary structure of peanut protein[J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 19(5/6/7/8): 1259–1271.
- [37] LIAO X Y, WANG S S, LI Y Q, et al. Effects of 'nine steaming nine sun-drying' on proximate composition, protein structure and volatile compounds of black soybeans[J]. *Food Research International*, 2022, 155(8): 1012–1022.
- [38] DIAS C O, DSODA J, PINTO S S, et al. Development and physico-chemical characterization of microencapsulated bifidobacteria in passion fruit juice: A functional non-dairy product for probiotic delivery [J]. *Food Bioscience*, 2018, 24: 26–36.
- [39] ROPELEWSKA E. Thermal properties of fresh and dried cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) fruits determined by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(4): 223–235.
- [40] 石晓晨, 王蕾, 王尧尧, 等. 干燥方式对山楂总黄酮总有机酸含量的影响[J]. *山东科学*, 2018, 31(5): 14–19.
- SHI X C, WANG L, WANG Y Y, et al. Effects of

- drying methods on the content of total organic acids of total flavonoids in hawthorn[J]. Shandong Science, 2018, 31(5): 14–19.
- [41] 许利平, 黄贵元, 刘崇盛, 等. 高温热风干燥对枣中游离氨基酸含量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 206–212.
- XU L P, HUANG G Y, LIU C S, et al. Effects of high temperature and hot air drying on the content of free amino acids in jujube[J]. Food and Fermentation Industry: 2022, 48(22): 206–212.

The Effect of Vacuum Pulsation Drying Temperature on the Physicochemical Properties and Microstructure of Daylily

Yang Shuangxi¹, Ma Hui¹, Zhang Haihong^{1*}, Ma Xuemei¹, Zhang Haibo²

¹College of Food and Wine Science, Ningxia University, Yinchuan 750021

²Yanchi County Natural Resources Bureau Forest Quarantine Station, Yanchi 751500, Ningxia)

Abstract Because the water content of fresh daylily is high, the quality of fresh daylily decreases rapidly after harvest. It is very important to explore the suitable processing methods for extending the shelf life of daylily. The effects of different vacuum pulsating preventive technology (PVD) conditions on nutritional composition, color, flavor, rehydration rate and microstructure of daylily were investigated, so as to improve the quality of dried daylily. The effects of different drying temperatures (65, 70, 75, 80 °C and 85 °C) on the quality of daylilies were studied under the conditions of vacuum holding time (10 min) and atmospheric holding time (5 min) using PVD equipment. Furthermore, principal component analysis and partial least squares method were used to discriminate the drying process, flavor composition and characteristic taste of daylily. The results showed that the content of free amino acids in naturally dried (CK) daylily was the highest, at 0.858 mg/g. The ΔE value was the highest, at 16.47, further indicating that the overall quality of the sample was poor. After PVD drying, daylily has a bright and vibrant color, good rehydration performance, and significantly increased protein and flavonoid content. When PVD was 80 °C, the primary color retention rate was the highest ($\Delta E=7.28$), and the free amino acid content was the highest (0.818 mg/g). When PVD was 75 °C, the protein (7.331 g/L) and Ga (1 072.445 $\mu\text{g}/\text{kg}$) content in the sample was the highest. When PVD was 70 °C, the proportion of β -fold and α -helix content in the daylily sample was the highest, at 35%. When PVD was 65 °C, the flavonoid content (1.653 mg/g) and rehydration rate are the highest (3.04%), and inorganic sulfides, nitrogen oxides, and terpenoids can be well retained. In addition, partial least squares discriminant analysis revealed that aspartic acid, histidine, serine, glutamic acid, and alanine are characteristic taste substances of daylily. Conclusion: Different PVD drying temperatures lead to differences in the physicochemical properties and nutritional components of daylily. The research results can provide suitable process parameters to meet different quality attribute requirements and consumer acceptance.

Keywords daylily; vacuum pulse drying; nutrient content; free amino acids; flavor