

白萝卜饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中生物活性和挥发性成分分析

刘盼盼¹, 任广跃^{1,2*}, 赵路洁¹, 段续^{1,2}, 李琳琳¹, 王兆凯¹

¹河南科技大学食品与生物工程学院 河南洛阳 471023

²粮食储藏安全河南省协同创新中心 郑州 450001

摘要 为探究饱和蒸汽处理对白萝卜干燥过程中生物活性成分和挥发性成分的影响,以传统牡丹燕菜加工工序为研究依据,选择不同饱和蒸汽处理时间,研究白萝卜饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中生物活性和挥发性成分的变化规律。结果表明,干燥过程中,白萝卜生物活性成分均呈总体下降趋势。饱和蒸汽-热泵组合干燥较单一热泵干燥更有利于生物活性成分的保留,其中,饱和蒸汽处理 6 min 的效果最为明显,干燥 180 min 时,维生素 C(VC)、总酚和总糖含量较单一热泵干燥分别提高了 22.98%、66.82%、54.01%。采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用鉴定新鲜白萝卜中的挥发性成分有 26 种,其中,异硫氰酸酯类是其主要挥发性成分,共 12 种,占总组分 71.99%。经饱和蒸汽-热泵组合干燥,白萝卜中异硫氰酸酯类、硫醚类、醇类含量减少,醛类、酮类含量增加。饱和蒸汽处理后增加了正己醛、庚醛、正辛醛、棕榈酸乙酯、香叶基丙酮等具有花香、果香、茶香的风味物质,改善了白萝卜的风味。研究结果为提升工业化生产牡丹燕菜的风味品质提供参考。

关键词 白萝卜; 饱和蒸汽-热泵组合干燥; 挥发性成分; 顶空固相微萃取-气质谱联用

文章编号 1009-7848(2022)10-0325-15 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.10.035

白萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 别称菜菔、芦菔、土人参,十字花科属 2 年生植物,原产中国,有千年的种植历史,富含蛋白质、维生素、膳食纤维等营养物质,具有较高的营养价值、药膳价值和食用价值^[1]。牡丹燕菜又称洛阳燕菜,是白萝卜的一种特殊制作方法,作为河南洛阳当地的一道特色传统名菜,九蒸九晒是其制作的关键^[2],因其形如牡丹,味如燕窝,得名“牡丹燕菜”。

蒸、晒是极具中国特色的烹饪方式,与煎、炸、烤、熏等方法相比,更绿色、健康,不仅可以很好地保留食品中的 VC、总酚、总糖、总黄酮等生物活性成分,还可以改善食品中特殊的风味^[3]。Mehmood 等^[4]研究发现与油炸、微波相比,蒸制能更好地保留蔬菜中酚类化合物、类胡萝卜素和抗坏血酸的含量。Roslan 等^[5]发现过热蒸汽干燥茶叶,可以显著提高总酚含量的保留率,提高其抗氧化性能。

徐永霞等^[6]研究发现,随着蒸制时间的延长,鱼肉中产生令人愉快气味的醛类物质如庚醛、辛醛、壬醛等含量逐渐升高,表明蒸制可以改善鲈鱼肉的风味。钟明慧等^[7]研究蒸制 16 min 的鲟鱼肉具有较好的滋味和较高的整体可接受度。然而,牡丹燕菜传统制作工序中自然晾晒时间长,导致白萝卜中营养成分大量散失。为解决牡丹燕菜加工耗时长,成本高,品质低等问题,选择热泵干燥代替自然晾晒与饱和蒸汽结合。热泵干燥是一种公认的高效节能环保干燥技术,被广泛应用于山药^[8]、辣椒^[9]、丝瓜^[10]、油茶籽^[11]等农产品干燥领域。

风味是评价牡丹燕菜品质的重要指标,在很大程度上影响消费者的选择。牡丹燕菜的独特之处在于经过九蒸九晒的工序,将主料白萝卜原有的辛辣味去除,使其有类似燕窝的口感。顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 联用法因选择性强、无损、操作时间短等优点而被广泛应用于食品风味研究中^[12]。目前,国内外利用 HS-SPME-GC-MS 技术分析和鉴别白萝卜挥发性成分的研究较少。刘宗敏等^[13]采用 HS-SPME-GC-MS 分析不同乳酸菌发酵萝卜干的挥发性成分。汪冬冬等^[14]发现干态腌渍萝卜更有利于特征风味成分的产生,

收稿日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671907);国家重点研发计划项目(2017YFD0400901);“智汇郑州·1125 聚才计划”项目(郑政[2017]40 号);河南省高校重点科研项目(20A550006);河南省科技攻关项目(182102110043)

作者简介: 刘盼盼(1997—),女,硕士生

通信作者: 任广跃 E-mail: guangyueyao@163.com

如2-正戊基呋喃、庚醛、苯乙醇等。刘忠义等^[15]研究发现白萝卜中异硫氰酸酯类物质是白萝卜辛辣味的主要来源,且随着烹饪温度的升高而不断降低。近年来,关于白萝卜干燥过程中挥发性成分变化鲜少研究报道,饱和蒸汽处理对白萝卜干燥过程中挥发性成分的影响研究也未见报道。

为探究饱和蒸汽处理对白萝卜干燥过程中生物活性成分和挥发性成分的影响,以传统牡丹燕菜加工工序为研究依据,将饱和蒸汽与热泵干燥进行组合,分析该干燥过程中生物活性成分和挥发性成分的变化规律,揭示饱和蒸汽对生物活性成分和挥发性成分的影响,以期为牡丹燕菜工业化生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白萝卜,购于洛阳市当地超市,挑选大小一致、无破损、无腐败、无褐变的白萝卜;*D*-抗坏血酸钠(分析纯级),江西省德兴市百勤异VC钠有限公司;乙醇、碳酸钠、碳酸氢钠(分析纯级),天津德恩化学试剂有限公司;萘酚、碘酸钾(分析纯级),天津市科密欧化学试剂有限公司;浓硫酸(分析纯级),洛阳昊华化学试剂有限公司;葡萄糖、抗坏血酸(分析纯级),江苏强盛功能化学股份有限公司;福林酚、2,6-二氯酚靛酚(分析纯级),上海蓝季科技发展有限公司;没食子酸(分析纯级),天津市风船化学试剂科技有限公司;草酸(分析纯级),上海润捷化学试剂有限公司;碘化钾(分析纯级),西陇科学股份有限公司。

1.2 仪器与设备

TSQ9000 气相色谱-三重四极杆串联质谱仪,美国 Thermo Fisher Scientific 仪器公司;固相微萃取(Solid phase microextraction, SPME)装置、萃取头为 2 cm-50/30 μm DVB/CAR/PDMS Stable-Flex、色谱柱 DB-5MS(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)弹性石英毛细管柱,美国 Supelco 公司;20 mL 顶空萃取瓶;HH-S4 电热恒温水浴锅,北京科伟永兴仪器有限公司;GHRH-20 型热泵干燥机,广东省农业机械研究所。

1.3 试验方法

1.3.1 饱和蒸汽-热泵组合干燥试验设计 白萝

卜,采用 GB 5009.3-2016(直接干燥法)^[16]测定其初始含水率为 95.4%(以湿基计)。洗净后切条(5 mm \times 5 mm \times 50 mm),平铺于热泵干燥箱多孔物料盘内,物料之间无堆积,备用。

饱和蒸汽-热泵组合干燥试验:固定热泵温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 、风速 1.5 m/s,当物料含水率降至(92 \pm 0.02)%、(89 \pm 0.02)% (以湿基计)时进行 2 次饱和蒸汽处理,每次处理 4, 6, 8, 10 min,并与单一热泵干燥对比。饱和蒸汽处理在蒸锅中进行,从蒸锅出气孔冒蒸汽开始计时,打开锅盖时停止计时。干燥过程中每 30 min 取 1 次样。

1.3.2 生物活性成分的测定

1.3.2.1 VC 的测定 VC 的提取与检测方法采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[17]。

1.3.2.2 总酚的测定 总酚的提取与检测采用 Folin-Ciocalteu 法^[18]。

1.3.2.3 总糖的测定 总糖的提取与检测采用蒽酮-硫酸法^[19]。

1.3.3 挥发性成分的测定 样品处理:将样品切碎,称取 3 g 放入 20 mL 顶空萃取瓶内加盖密封,将顶空瓶置恒温水浴锅中 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下平衡 40 min,然后,将老化完全的 2 cm-50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空萃取瓶内,伸出纤维于空气中,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下萃取 40 min,最后拔出萃取头立即插入 GC-MS 进样口(温度 250 $^{\circ}\text{C}$)中解析 5 min 进样分析^[20]。每个样品独立测定 3 次。

色谱条件:色谱柱 DB-5MS 弹性石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm);采用程序升温,柱温:初始温度 35 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 45 $^{\circ}\text{C}$,再以 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$,之后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 190 $^{\circ}\text{C}$,最后以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min;载气(He)流速为 1 mL/min;溶剂延迟时间 1 min;进样口采用不分流模式。

质谱条件:电子轰击离子源(EI);电子能量 70 eV;离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$;接口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;全扫描模式,扫描范围 45~450 amu。

定性和定量分析:通过 GC-MS 得到的挥发性成分,总离子流图,经计算机把各个峰与标准谱库中对比检索,选取匹配度大于 80(最大值为 100)的物质进行定性分析,并参考相关文献资料,结合保留时间、CAS 确定挥发性成分的化学组成。按峰

面积归一化法进行定量分析,确定各分离化合物的相对含量^[21]。

1.4 数据处理与分析

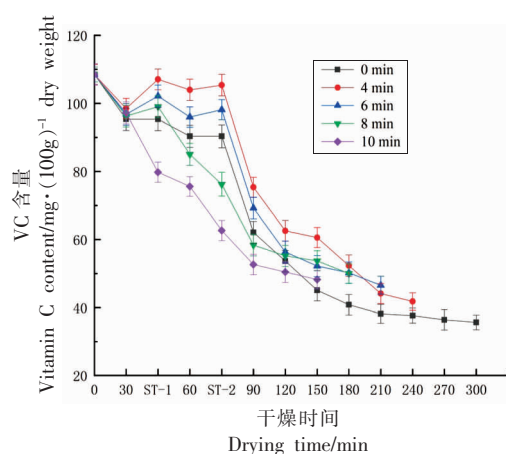
采用 Excel 2016 对原始数据进行初步整理,采用 Origin 2018 统计软件绘图,采用 SPSS 19.0 软件进行显著性分析和标准差计算。

2 结果与分析

2.1 白萝卜饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中生物活性成分分析

2.1.1 VC 含量变化 不同饱和蒸汽处理时间与热泵组合干燥过程中白萝卜 VC 含量的变化曲线如图 1 所示,可以看出 VC 含量呈下降趋势。干燥初期 0~30 min 内,白萝卜含水量较高且表面温度上升较快,表面的 VC 受热发生氧化分解,导致含量下降;第 1 次饱和蒸汽处理后,处理 4,6,8 min 组的 VC 含量较无饱和蒸汽组分别提高 12.30%, 7.15%, 7.00%, 而饱和蒸汽处理 10 min 后 VC 含量降低了 16.29%,可能是适当的饱和蒸汽处理可使细胞破裂,提高细胞渗透性,将细胞溶质释放到细胞外空间,进而提高 VC 含量,这与张莉会等^[22]的研究结果一致,然而,长时间的饱和蒸汽处理,使白萝卜暴露于高热环境中,VC 发生氧化分解,进而降低其含量,此外,饱和蒸汽冷凝液中也会带走部分 VC,这与 Liu 等^[23]的研究结论一致;第 2 次饱和蒸汽处理之后,VC 含量变化呈现的规律与第 1 次饱和蒸汽处理结果相似。干燥 90 min 后各组 VC 含量均出现大幅度降低,这与 90 min 后白萝卜干燥速率增加,部分 VC 随着水分的干燥而流失掉有关。干燥到终点,饱和蒸汽-热泵组合干燥较单一热泵干燥 VC 含量提高了 14.64%~40.20%,说明饱和蒸汽处理有利于白萝卜干燥过程中 VC 的保留。

2.1.2 总酚含量变化 不同饱和蒸汽处理时间与热泵组合干燥过程中白萝卜总酚含量的变化如图 2 所示。白萝卜干燥过程中总酚含量不断下降。在第 1 次饱和蒸汽处理后,白萝卜总酚含量均不同程度地降低,说明饱和蒸汽湿热处理促进酶促反应进行,导致总酚下降。干燥 60 min 时饱和蒸汽-热泵组合干燥较单一热泵干燥总酚含量高,且饱和蒸汽处理时间越长总酚含量越高。其原因:1)饱



注:ST-1,第 1 次饱和蒸汽处理;ST-2,第 2 次饱和蒸汽处理;下同。

图 1 不同饱和蒸汽处理时间的白萝卜 VC 含量变化曲线

Fig.1 Changes curve of VC content in white radish at different saturated steam treatment time

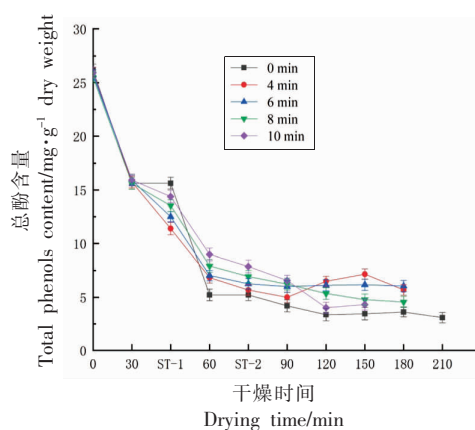


图 2 不同饱和蒸汽处理时间的白萝卜总酚含量变化曲线

Fig.2 Change curve of total phenols content in white radish under different saturated steam treatment time

和蒸汽处理钝化了多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,抑制了酶促反应的进行,减少了酚类物质的氧化分解;2) 饱和蒸汽处理改善了细胞组织的通透性,导致酚类生物活性物质释放,进而提高了总酚的含量,这与严启梅^[24]的研究结果一致。干燥 120 min 时,饱和蒸汽处理 4 min 组总酚含量出现升高,这与该干燥条件下干燥速率低、水分流失慢以及氧化酶活性低有关,这与杨森等^[25]的研究结论一致。饱和蒸汽处理 10 min 组总酚含量降低,可能是该处理提高了白萝卜干燥速率,导致部分总酚随大量水分的脱除而流失。第 2 次饱和蒸汽处理后总酚含量变化规律与第 1 次饱和蒸汽处理结

果相似。

2.1.3 总糖含量变化 不同饱和蒸汽处理时间与热泵组合干燥过程中白萝卜总糖含量变化如图3所示。白萝卜干燥过程中总糖含量呈下降趋势。在第1次饱和蒸汽处理后,总糖含量较单一热泵干燥降低0.34%~12.90%,且饱和蒸汽处理时间越长,总糖含量下降越严重,说明过长时间的饱和蒸汽处理使总糖分解,原因可能是长时间处理使得物料内部糖分迁移到物料表面,在高温、高热环境中发生美拉德反应,使总糖损失;此外,饱和蒸汽处理时间越长,总糖含量下降速度越快。第2次饱和蒸汽处理后,8,10 min组总糖含量均低于单一热泵干燥,原因可能是饱和蒸汽处理提高了干燥速率,导致部分总糖随水分的脱除而流失。干燥180 min时,饱和蒸汽处理4,6 min组总糖含量较单一热泵干燥的总糖含量高,说明适当的饱和蒸汽处理有利于白萝卜总糖的保留,这与Saldivar等^[26]用饱和蒸汽处理大豆,对可溶性糖的保留效果一致。

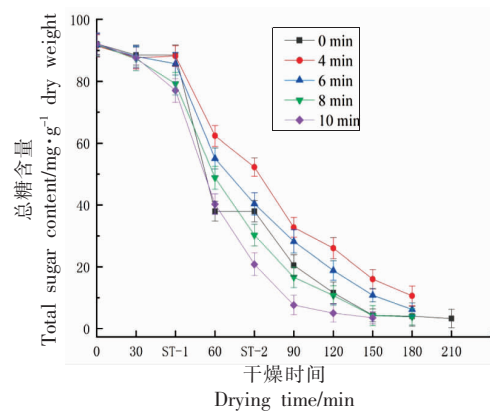
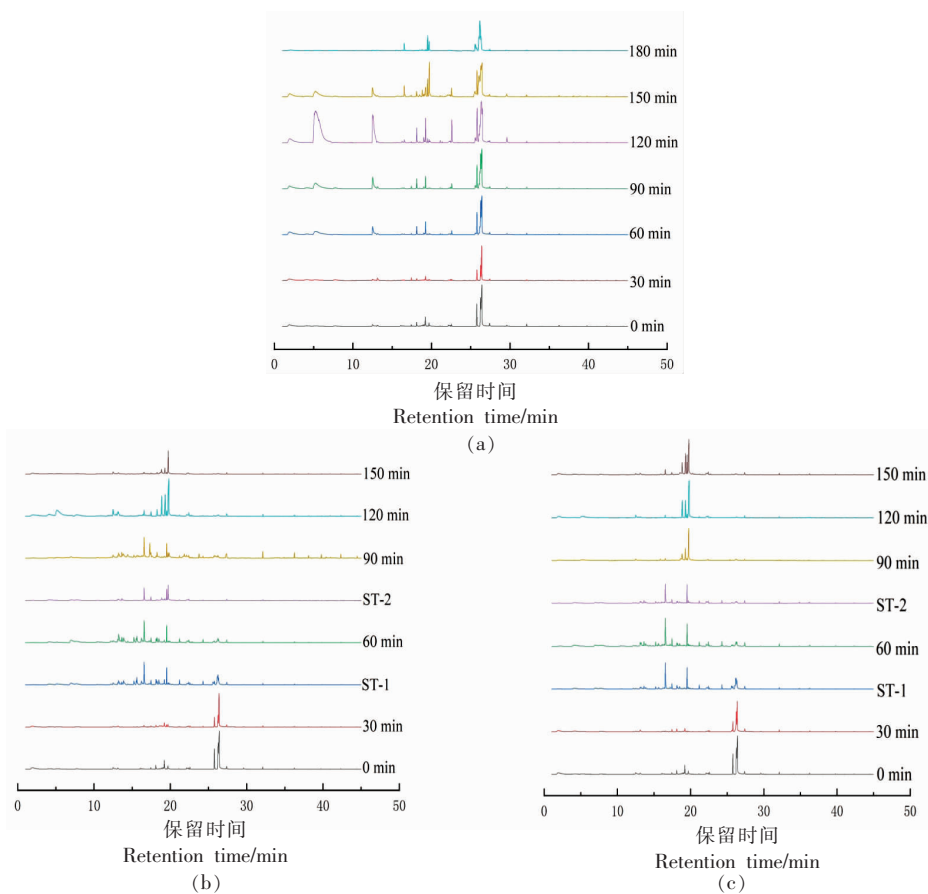


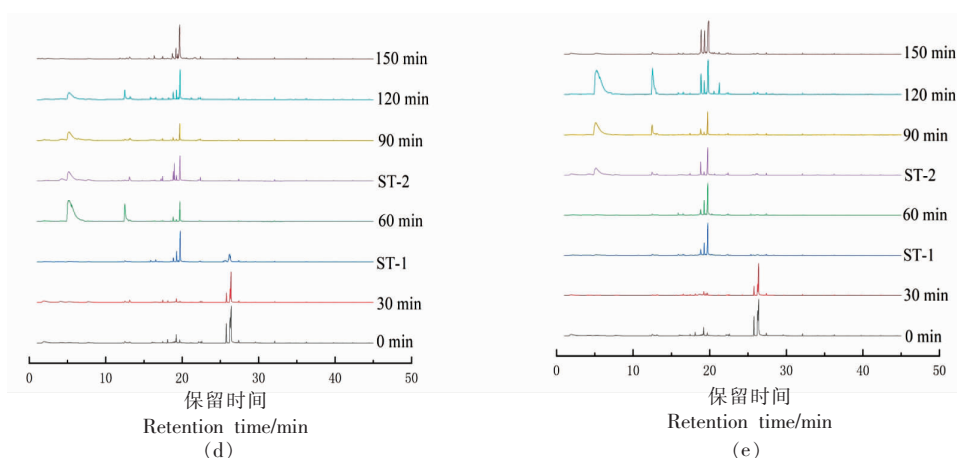
图3 不同饱和蒸汽处理时间下白萝卜总糖含量变化曲线

Fig.3 Change curve of total sugar content in white radish under different saturated steam treatment time

2.2 白萝卜饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中挥发性成分分析

对不同饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中白萝卜进行GC-MS测定分析,其挥发性成分的GC-MS总离子流图见图4。





注:a~e. 依次饱和蒸汽处理 0,4,6,8,10 min。

图 4 不同干燥方式白萝卜总离子流图

Fig.4 Total ion current chromatograms of volatile components from white radish for different drying methods

图 4a 为无饱和蒸汽处理热泵干燥过程中白萝卜的总离子流图。干燥过程中白萝卜离子强度较大的物质出峰时间相似,而离子强度(峰高)有所差异,说明白萝卜干燥过程中有共同的挥发性物质,其含量有所不同;同一干燥时间,不同保留时间有不同离子强度的峰,说明白萝卜该条件下不同挥发性成分含量不同。干燥到 120 min 时,不同保留时间出现较多的峰,说明有较多的挥发性风味物质。综合图 4b~4e 可知,饱和蒸汽处理后,白萝卜原有出峰时间的离子强度被减弱甚至被清除,在其它保留时间出现大小不一的较多峰,说明饱和蒸汽处理对白萝卜初始风味物质有清除作用,且促进其它风味物质的产生。不同饱和蒸汽处理时间对白萝卜风味物质的种类和含量的影响有差异。随着干燥的进行,白萝卜部分风味物质逐渐积累,部分物质逐渐被转化和清除。

选择饱和蒸汽处理时间 6 min,进行有或无饱和蒸汽-热泵组合干燥处理,各挥发性成分定性分析结果见表 1、表 2。

表 1 列出白萝卜热泵干燥过程中挥发性成分种类和含量。从新鲜白萝卜中检测到的挥发性成分:醇类 3 种、醛类 2 类、烷烃类 3 种、烯烃类 1 种、酯类 3 种、硫醚类 2 种、异硫氰酸酯类 12 种。其中,种类较多的是异硫氰酸酯类物质,因白萝卜属十字花科类蔬菜,其中含量丰富的芥子油苷被黑芥子酶水解成异硫氰酸酯类物质^[27];而 4-甲硫基-3-丁烯异硫氰酸酯含量最为丰富,为 42.77%,

是白萝卜的主要挥发性物质,呈辛辣气味^[28]。随着白萝卜干燥的进行,异硫氰酸酯类作为白萝卜的特征风味物质含量在减少,醛酮类等物质种类和含量有所增加,当干燥 180 min 时 4-甲硫基-3-丁烯异硫氰酸酯含量降低 44.20%,4-甲硫基-1-丁基异硫氰酸酯含量降低 9.14%,醛类物质种类增加 5 种,含量也有所增加,说明白萝卜干制过程中可将原有的辛辣味物质——异硫氰酸酯类化合物含量降低,并产生一些醛酮类物质,提高白萝卜的风味,这与黄珊^[29]研究萝卜干加工过程中挥发性风味变化规律一致。

表 2 列出白萝卜饱和蒸汽处理 6 min 与热泵组合干燥过程中挥发性成分种类和相对含量分析结果。第 1 次饱和蒸汽处理 6 min 后检测到的白萝卜挥发性成分中醇类 5 种、醛类 15 种、烷烃类 5 种、烯烃类 2 种、酯类 2 种、硫醚类 2 种、异硫氰酸酯类 11 种、酮类 3 种、其它物质 2 种。

与新鲜白萝卜和干燥 30 min 白萝卜中检测到的挥发性成分相比,饱和蒸汽处理后增加种类最多是醛类物质:十一醛、2-十一烯醛、正己醛、庚醛、正辛醛、反-2-顺-6-壬二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、反-2-辛烯醛、反式-2,4-癸二烯醛、2-癸烯醛、1-甲基-3-环己烯-1-甲醛、4-乙基苯甲醛。醛类挥发性物质是由不饱和脂肪酸氧化和氨基酸 Strecker 反应生成^[30],多数具有令人愉快的气味,如水果香、茶香或花香。十一醛具有清新的玫瑰花香甜橙果香,用于制造香精和化妆品^[31],相对含量

表1 白萝卜热泵干燥过程中挥发性成分含量

名称	CAS 码	保留时间/ min										
		0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min				
醇类												
甲硫醇	74-93-1	7.56	11.39	9.01	6.69	4.66	2.65	5.36				
叔十六硫醇	25360-09-2	0.05	0.59	0.06	0.16	0.13	0.10	-				
2-甲基-1-十六醇	2490-48-4	0.18	0.51	0.29	0.18	0.17	0.10	-				
2-巯基乙醇	60-24-2	-	10.66	8.57	7.32	5.01	4.13	2.15				
乙酸-7-辛硫醇	32438-29-2	-	-	-	-	0.18	-	0.07				
3-癸炔-2-醇	69668-93-5	-	-	-	-	-	-	0.41				
2-癸烯-1-醇	22104-80-9	-	-	-	-	-	-	0.42				
醛类												
2-十一烯醛	2463-77-6	0.23	0.06	-	-	-	-	-				
癸醛	112-31-2	0.33	0.49	0.25	0.12	0.33	1.04	2.63				
壬醛	124-19-6	-	-	0.27	0.48	0.44	1.09	2.47				
正己醛	66-25-1	-	-	-	-	-	-	0.33				
庚醛	111-71-7	-	-	-	-	-	0.25	0.21				
正辛醛	124-13-0	-	-	-	-	-	0.11	0.22				
(Z)-2-壬醛	60784-31-8	-	-	-	-	-	-	0.35				
反-2-顺-6-壬二烯醛	557-48-2	-	-	-	-	-	-	0.17				
烷烃类												
2,6,10-三甲基十四烷	14905-56-7	0.14	1.71	0.58	0.23	0.28	0.25	0.19				
2,6,10-三甲基十五烷	3892-00-0	-	0.44	-	0.08	-	-	-				
2,6,10-三甲基十六烷	55000-52-7	-	1.02	-	0.16	-	-	-				
3-甲硫基甲烷	5418-86-0	0.94	-	-	-	-	-	-				
2-甲基-2-戊基-1,3-二氧戊环	4352-95-8	0.33	1.15	0.30	0.21	0.11	0.49	-				
正十六烷	544-76-3	-	0.18	-	-	0.05	-	0.07				
正十七烷	629-78-7	-	0.38	0.11	-	0.09	0.10	0.15				
正二十烷	112-95-8	-	0.87	-	-	-	-	-				
1-环丙基戊烷	2511-91-3	-	-	0.11	0.11	0.08	0.18	-				

(续表 1)

名称	CAS 码	保留时间/ min		相对含量/%									
		0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min					
烯烃类													
顺-2-壬烯	6434-77-1	0.06	-	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-
酯类													
抗坏血酸二棕榈酸酯	28474-90-0	0.09	0.17	0.26	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-
棕榈酸乙酯	628-97-7	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14
乙酸-2-壬酯	14936-66-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.45	-	-
正己酸乙酯	123-66-0	1.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
硫醚类													
二甲基二硫醚	624-92-0	5.02	3.34	14.72	17.82	17.26	12.73	7.55					
二甲基三硫醚	3658-80-8	3.54	3.31	6.95	8.76	12.14	5.62	4.17					
二甲基四硫醚	5756-24-1	-	-	0.21	0.18	0.18	-	-					
异硫氰酸酯类													
异硫氰酸异戊酯	628-03-5	0.38	0.10	0.07	0.16	0.16	0.09	0.12					
异硫氰酸戊酯	629-12-9	0.69	0.55	0.51	0.39	0.30	0.31	0.32					
4-甲基异硫氰酸戊酯	17608-07-0	1.96	1.43	2.52	4.20	3.78	2.83	2.67					
异硫氰酸己酯	4404-45-9	2.71	2.88	3.57	2.68	2.32	1.30	1.35					
1-异硫代氰酸庚酯	4426-83-9	0.65	0.21	0.28	0.22	0.20	0.17	0.14					
3-(1-甲基)丙基异硫氰酸酯	505-79-3	1.99	0.88	1.22	1.29	2.39	1.86	0.44					
4-甲基-3-丁烯异硫氰酸酯	51598-96-0	42.77	39.84	31.22	29.49	24.18	23.98	23.51					
异硫氰酸仲丁酯	4426-79-3	1.68	1.65	1.20	0.86	0.30	0.23	0.20					
3-甲基异硫氰酸己酯	206761-72-0	0.12	0.08	0.11	0.09	0.09	0.08	0.07					
2-苯基乙基异硫代氰酸酯	2257-9-2	0.16	0.36	0.44	0.37	0.16	0.18	0.48					
4-甲基-1-丁基异硫氰酸酯	4430-36-8	18.05	9.64	16.44	15.84	12.78	12.11	16.40					
5-(甲基磺酰基)戊基异硫氰酸酯	4430-42-6	0.82	0.18	0.49	0.58	0.62	0.88	0.89					
酮类													
3,5-辛二烯酮	38284-27-4	-	-	-	-	-	-	1.35					
其他													
17-十八炔酸	34450-18-5	-	-	-	-	-	0.07	0.05					
2-甲基丁酸	116-53-0	-	-	-	-	-	-	-					0.39
5-甲基基戊醇	59121-25-4	-	-	-	-	-	1.78	0.63					

注: -, 未检出或相对含量低于表达值。

表2 白萝卜饱和蒸汽(6 min)-热泵组合干燥过程中的挥发性成分

名称	CAS 码	保留时间/ min						相对含量/%						
		30 min	ST-1	60 min	ST-2	90 min	120 min	150 min						
醇类														
甲硫醇	74-93-1	10.94	5.32	4.73	2.47	2.07	0.89	1.01						
叔十六硫醇	25360-09-2	0.63	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-甲基-1-十六醇	2490-48-4	0.57	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-巯基乙醇	60-24-2	10.31	4.13	0.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
十一醇	112-42-5	-	1.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
醛类														
十一醛	112-44-7	-	0.49	0.39	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-十一烯醛	2463-77-6	-	1.56	2.88	2.18	0.69	0.32	0.53						
癸醛	112-31-2	0.43	8.16	7.90	9.52	9.17	9.73	10.99						
壬醛	124-19-6	1.17	13.47	13.10	13.69	10.20	9.27	8.42						
正己醛	66-25-1	-	3.10	3.73	3.96	1.51	1.63	1.96						
庚醛	111-71-7	-	0.92	0.69	0.72	0.51	0.62	0.67						
正辛醛	124-13-0	-	2.29	2.91	2.82	1.34	1.12	1.2						
反-2-顺-6-壬二烯醛	557-48-2	-	0.16	0.08	0.13	0.07	-	-						
(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-3-5	0.16	1.85	3.20	2.33	-	-	-						
(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	-	0.36	1.34	0.89	-	-	-						
反-2-辛烯醛	2548-87-0	-	1.65	2.56	1.82	-	-	-						
反式-2,4-癸二烯醛	2363-88-4	-	0.08	0.08	0.13	-	-	-						
2-癸烯醛	2497-25-8	-	1.57	1.52	1.53	0.24	-	-						
1-甲基-3-环己烯-1-甲醛	931-96-4	-	0.22	0.71	-	-	-	-						
4-乙基苯甲醛	4748-78-1	-	1.13	1.58	1.66	0.5	0.41	0.30						
烷烃类														
2,6,10-三甲基十四烷	14905-56-7	0.22	0.21	0.07	0.06	-	-	-						
2,6,10-三甲基十五烷	3892-00-0	0.35	-	-	-	-	-	-						
2,6,10-三甲基十六烷	55000-52-7	0.80	0.15	-	-	-	-	-						
2-甲基-2-戊基-1,3-二氧戊环	4352-95-8	1.01	0.11	-	-	-	-	-						
正十六烷	544-76-3	0.13	-	-	-	-	-	-						
正十七烷	629-78-7	0.35	0.02	-	-	-	-	-						
正二十烷	112-95-8	0.97	0.05	-	0.07	0.17	-	-						
烯烃类														
壬烯	124-11-8	-	1.21	3.93	2.10	1.10	0.27	0.26						
3-乙基-1,4-己二烯	2080-89-9	-	0.78	-	-	-	-	-						
顺-2-壬烯	6434-77-1	-	-	-	-	0.25	0.25	-						
1,2-二甲基-1-环庚烯	20053-89-8	-	-	-	0.25	0.24	0.06	-						

(续表2)

名称	CAS 码	保留时间/ min					相对含量/%						
		30 min	ST-1	60 min	ST-2	90 min	120 min	150 min					
酯类													
棕榈酸乙酯	628-97-7	-	0.45	0.49	0.77	0.61	0.42	0.31					
13,16-十八碳烯酸甲酯	56846-98-1	-	0.07	-	-	-	-	-					
(E)-9-十四碳烯-1-醇乙酸酯	23192-82-7	-	-	-	0.05	0.18	0.19	0.19					
2-十六碳烯酸甲酯	2825-81-2	-	-	-	-	-	-	0.05					
硫醚类													
二甲基二硫醚	624-92-0	3.26	1.92	1.83	1.52	1.31	1.29	1.35					
二甲基三硫醚	3658-80-8	3.95	2.53	2.01	1.21	2.07	2.56	1.45					
异硫氰酸酯类													
异硫氰酸异戊酯	628-03-5	0.24	-	-	-	-	-	-					
异硫氰酸戊酯	629-12-9	0.66	0.49	0.42	0.31	0.28	0.26	0.25					
4-甲基异硫氰酸戊酯	17608-07-0	1.56	0.32	0.15	0.06	-	-	-					
异硫氰酸己酯	4404-45-9	3.02	1.61	0.61	-	-	-	-					
1-异硫代氰酸庚酯	4426-83-9	0.17	0.05	0.02	-	-	-	-					
3-(甲硫基)丙基异硫氰酸酯	505-79-3	0.96	0.57	0.42	0.30	0.25	0.13	0.15					
4-甲硫基-3-丁烯异硫氰酸酯	51598-96-0	39.76	20.21	15.61	13.21	12.13	12.28	10.60					
异硫氰酸仲丁酯	4426-79-3	1.70	1.11	0.89	0.80	0.51	0.46	0.43					
3-甲基异硫氰酸己酯	206761-72-0	0.49	0.39	0.33	0.21	0.16	0.17	0.16					
2-苯基乙基异硫代氰酸酯	2257-9-2	0.35	0.10	0.11	0.08	0.08	0.07	0.05					
4-甲硫基-1-丁基异硫氰酸酯	4430-36-8	8.69	4.19	2.87	2.18	0.30	0.66	0.29					
5-(甲基磺酰基)戊基异硫氰酸酯	4430-42-6	0.53	0.27	0.19	0.10	0.12	0.11	0.12					
酮类													
3,5-辛二烯酮	38284-27-4	-	3.15	3.47	2.34	1.02	1.09	0.33					
2-(2-丁炔基)环己酮	54166-48-2	-	0.48	-	-	-	-	-					
香叶基丙酮	3796-70-1	-	0.55	0.25	0.13	0.10	0.07	0.20					
其他													
2-正戊基呋喃	3777-69-3	-	5.54	6.33	4.23	3.09	2.09	0.97					
2-己基-1-环丙烷乙酸	35936-15-3	-	-	-	0.62	0.53	0.21	0.09					
17-十八炔酸	34450-18-5	-	0.10	0.09	0.20	0.21	0.17	0.14					
4-甲硫基丁腈	59121-24-3	-	-	-	-	-	0.25	0.28					
5-甲硫基戊腈	59121-25-4	-	-	-	-	1.64	9.67	11.26					
6-甲硫基己腈	72931-29-4	-	-	-	-	-	0.59	0.36					
正庚腈	629-08-3	-	-	-	-	-	0.53	-					
5-甲基己腈	19424-34-1	-	-	-	-	-	0.28	-					

注: -; 未检出或相对含量低于表达值。

为 0.49%; 2-十一烯醛具有青香和柑橘香, 在牛奶和炒花生中大量发现, 相对含量为 1.56%; 正己醛具有青草的清香风味和苹果香气, 常被用作水果的调味剂, 可以防止水果的腐败变质, 相对含量为 3.10%; 庚醛具有水果香味和玫瑰花香^[32], 大量存在于苦橙、柠檬、风信子中, 有吸湿防潮功效, 相对含量为 0.92%; 正辛醛有类似玫瑰和橙皮的香气, 可用于配制香精, 相对含量为 2.29%; 反-2-顺-6-壬二烯醛和 (*E,E*)-2,4-壬二烯醛是成熟黄瓜的特征香气物质, 呈芳香味^[33], 相对含量分别是 0.16%, 0.36%; 反-2-辛烯醛呈脂肪和肉类香味, 用于制作香精, 相对含量为 1.65%; 反式-2,4-癸二烯醛呈现刺激性桔子和橙子的清甜香气并带有鸡肉香气, 是亚油酸甲酯氧化物^[34], 常被用作配制鸡肉香精和加工土豆片等辛香型食品, 其相对含量为 0.08%; 2-癸烯醛存在于胡荽油中, 有橙子香味, 其相对含量为 1.57%; 4-乙基苯甲醛呈芳香气味, 常被用于制作焙烤制品和调味香料, 其相对含量为 1.13%。与干燥 30 min 白萝卜的挥发性成分相比, 共同醛类物质的相对含量大有提高: 癸醛增加 94.73%, 呈蜡香花香和果香, 产生令人愉快的感觉; 壬醛增加 91.13%, 是茶叶的特征风味物质, 具有清甜的柑橘香气和玫瑰花香; (*E,E*)-2,4-庚二烯醛增加 91.35%, 带有青草香气和油炸香韵, 用于配制调味品^[35]。

饱和蒸汽处理后白萝卜特征风味物质异硫氰酸酯类相对含量降低, 其中, 异硫氰酸异戊酯被降解, 4-甲硫基-3-丁烯异硫氰酸酯相对含量降低 51.84%, 4-甲硫基-1-丁基异硫氰酸酯相对含量降了 49.17%。除异硫氰酸酯, 饱和蒸汽处理后产生棕榈酸乙酯, 该物质是白酒的主要风味物质, 具有奶油芳香和酒韵^[36]。

醇类挥发性物质是不饱和脂肪酸生物降解的产物^[37], 因相对含量低、阈值高, 故对白萝卜风味贡献不大。甲硫醇会产生不愉快的气味, 叔十六硫醇呈强烈的蒜气味, 在饱和蒸汽处理后分别降低 51.37% 和 92.06%。

硫醚类挥发性物质二甲基二硫醚、二甲基三硫醚具有令人不愉快的特殊臭气味和辛辣味, 天然存在于葱属类植物中^[38], 是白萝卜辛辣味的来源之一, 在饱和蒸汽处理后相对含量分别降低

41.10%, 35.95%, 说明饱和蒸汽处理降解白萝卜中大量的不良风味物质, 原因可能是高热处理新产生的醛类物质遮盖了白萝卜的辛辣味。

酮类挥发性物质由不饱和脂肪酸热氧化降解和氨基酸降解生成^[39], 在饱和蒸汽处理后产生 3 种带有令人愉悦香味的酮类物质: 3,5-辛二烯酮呈奶香味, 2-(2-丁炔基)环己酮呈果香, 香叶基丙酮呈木兰花香。2-正戊基呋喃是美拉德反应产物, 在饱和蒸汽处理后产生, 其具有豆香、果香和肉香^[40-41]。

第 2 次饱和蒸汽处理后醛类物质相对含量提高, 而异硫氰酸酯类、硫醚类物质再次被降解。综合得出, 饱和蒸汽处理可消除白萝卜的特殊气味, 产生令人愉快的气味, 使白萝卜风味得到改善, 这与高海燕等^[42]的研究结果相似。

由表 1、2 可知, 从白萝卜中检出的 8 类挥发性成分中, 异硫氰酸酯类、醛类、硫醚类、醇类含量较高, 对这 4 类主要挥发性物质含量进行分析。由图 5 可知, 异硫氰酸酯类物质干燥过程中整体呈下降的趋势, 饱和蒸汽-热泵组合干燥对其降解远远大于热泵干燥, 第 1 次饱和蒸汽处理后, 异硫氰酸酯类物质总含量降低 47.88%, 原因可能是饱和蒸汽热处理导致异硫氰酸酯类物质结构破坏, 从而降低了含量。刘大群等^[43]研究发现风脱水会造成萝卜中一些异硫氰酸酯类物质降解。醛类物质含量在热泵干燥过程中呈上升趋势, 在饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中呈先上升后下降的趋势, 第 1 次饱和蒸汽处理后, 醛类物质总含量增加 95.24%, 原因可能是饱和蒸汽热浸处理促进不饱和脂肪酸的氧化和酯类的降解, 增加了醛类物质种类和含量, 这与李想^[44]研究热处理对白萝卜醛类挥发性物质的影响结果一致。干燥 90 min 时, 醛类物质下降, 可能与水分大量脱除有关, 或者醛类物质间发生反应生成其它物质所致; 干燥 150 min 时, 饱和蒸汽-热泵组合干燥醛类物质含量高于热泵干燥醛类物质含量 86.66%, 说明饱和蒸汽-热泵组合干燥更有利于醛类物质生成。硫醚类物质在热泵干燥过程中呈先上升后下降的趋势, 干燥 120 min 时总含量达到最大值 29.58%, 随后下降, 原因可能是芥子苷在芥子苷酶的作用下分解成硫化物, 导致硫醚类物质升高, 随着干燥的进

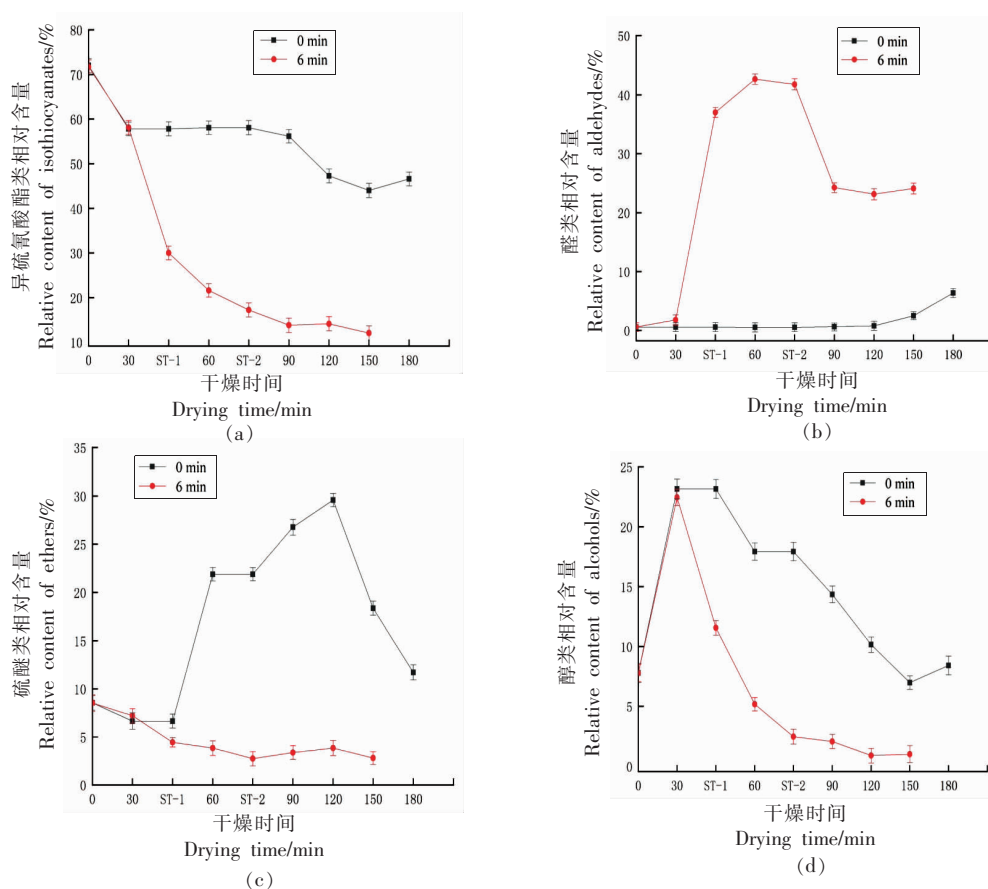


图 5 白萝卜 4 类主要挥发性成分的变化规律

Fig.5 Changes of four main volatile flavor compounds in white radish

行,芥子苷酶活性降低导致硫醚类含量下降。饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中白萝卜硫醚类物质持续降低,其原因:一是饱和蒸汽处理使芥子苷酶失活,二是硫醚类物质在高温环境中被分解。唐小闲等^[45]研究得出汽蒸后莲藕的醚类物质种类和含量均下降。醇类物质种类和含量在干燥过程中均呈下降趋势。醇类物质大多数是热敏性物质,在干燥过程中处于高温、高热环境中,一些低沸点醇类易挥发和氧化,饱和蒸汽处理后,醇类物质含量大幅度降低,原因可能是醇类物质与脂肪酸氧化生成醛酮类物质,导致其含量降低。

综合分析表 1、表 2 和图 5,白萝卜干燥过程中有些挥发性成分变化是没有规律可寻的,如 5-甲硫基戊腈、顺-2-壬烯等,这与挥发性风味物质的形成有关,大多数挥发性成分是由脂肪酸氧化、氨基酸 strecker 降解、美拉德反应生成,易受温度影响,同时各类物质间还会相互的转化^[46]。

3 结论

研究了白萝卜不同饱和蒸汽处理时间与热泵组合干燥过程中生物活性和挥发性成分含量变化规律,即:

1) 白萝卜干燥过程中生物活性成分随干燥的进行不断降低。总酚和总糖经饱和蒸汽处理后降解,VC 在饱和蒸汽处理 4,6,8 min 后升高。饱和蒸汽处理 6 min 组干燥 180 min 时,VC、总酚和总糖含量较单一热泵干燥分别提高 22.98%,66.82%,54.01%,表明饱和蒸汽-热泵组合干燥较单一热泵干燥更有利于白萝卜中生物活性成分的保留。

2) 采用顶空固相微萃取与气相色谱-质谱联用法,分析白萝卜饱和蒸汽-热泵组合干燥过程中挥发性成分种类和含量的变化。在新鲜白萝卜中共鉴定出 26 中挥发性风味物质,其中异硫氰酸酯类相对含量较高,占总组分的 71.99%,是白萝卜辛辣味的主要来源。热泵干燥 180 min 异硫氰酸

酯类物质降低了 25.4%。饱和蒸汽处理 6 min 后, 从白萝卜中共鉴定出 47 种挥发性风味物质, 其中醛类物质含量和种类最高, 共 15 种占总组分的 42.67%。与单一热泵干燥相比, 白萝卜经饱和蒸汽-热泵组合干燥, 其中的异硫氰酸酯类、硫醚类、醇类含量减少, 醛类和酮类含量增加。干燥产生的癸醛、壬醛、正己醛、庚醛、正辛醛、棕榈酸乙酯、香叶基丙酮等具有花香、果香、茶香的风味物质使白萝卜原有辛辣味被掩盖, 改善了白萝卜的风味, 提高了其食用品质。

参 考 文 献

- [1] MOLAHOSEINI H. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, sunflower, and turnip cultivated in a soil under wastewater irrigation [J]. *International Journal of Engineering Research*, 2014, 3(4): 289-293.
- [2] 马献军. 牡丹燕菜的食疗作用[J]. *家庭中医药*, 2014, 21(9): 66-67.
MA X J. The therapeutic effect of peony swallow herb [J]. *Family & Traditional Chinese Medicine*, 2014, 21(9): 66-67.
- [3] ZHAO C, LIU Y Y, LAI S S, et al. Effects of domestic cooking process on the chemical and biological properties of dietary phytochemicals[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 55-66.
- [4] MEHMOOD A, ZEB A. Effects of different cooking techniques on bioactive contents of leafy vegetables [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 22: 100246.
- [5] ROSLAN A S, ISMAIL A, ANDO Y, et al. Effect of drying methods and parameters on the antioxidant properties of tea (*Camellia sinensis*) leaves[J]. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2020, 2(1): 42-46.
- [6] 徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等. 基于 GC-IMS 和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化[J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 270-275.
XU Y X, BAI X T, FENG Y, et al. Changes of flavor compounds in sea bass during steaming process based on GC-IMS and chemometrics[J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 270-275.
- [7] 钟明慧, 徐新星, 刘康, 等. 不同蒸制时间下鲟鱼背部肉的滋味特征差异分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 55-60.
ZHONG M H, XU X X, LIU K, et al. Analysis on the taste characteristics of sturgeon under different steaming time[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 55-60.
- [8] 李丽, 孙健, 盛金凤, 等. 山药热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(10): 212-217.
LI L, SUN J, SHENG J F, et al. Heat pump drying characteristics and mathematical modeling of Chinese yam[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(10): 212-217.
- [9] 姬长英, 蒋思杰, 张波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 296-302.
JI C Y, JIANG S J, ZHANG B, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 296-302.
- [10] 许泽文, 刘军, 林丽霞, 等. 有棱丝瓜热泵干燥特性及干制品多酚的体外抗氧化活性比较[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 184-193.
XU Z W, LIU J, LIN L X, et al. Heat pump drying characteristics of *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb. and *in vitro* antioxidant activity of polyphenols of its dried products[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 184-193.
- [11] 吴雪辉, 龙婷, 王泽富, 等. 油茶籽热泵干燥特性及模型的研究[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(1): 111-117.
WU X H, LONG T, WANG Z F, et al. Drying characteristics and models for heat pump drying of *Camellia Oleifera* seed [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(1): 111-117.
- [12] WANG H, DUAN X, DUAN L, et al. Mutual transformation of the water binding state and moisture diffusion characteristics of Chinese yams during microwave freeze drying [J]. *Drying Technology*, 2021, 39(1): 66-76.
- [13] 刘宗敏, 谭兴和, 周红丽, 等. 不同乳酸菌发酵萝卜干挥发性成分分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(24): 144-149.
LIU Z M, TAN X H, ZHOU H L, et al. Analysis of volatile components in dried radish fermented by different *Lactobacillus* species [J]. *Food Science*,

- 2017, 38(24): 144-149.
- [14] 汪冬冬, 唐焱, 陈功, 等. 不同发酵方式盐渍萝卜挥发性成分动态分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 146-154.
- WANG D D, TANG Y, CHEN G, et al. Dynamic analysis of volatile components of salted radish during different fermentation processes[J]. Food Science, 2020, 41(6): 146-154.
- [15] 刘忠义, 李平, 李河, 等. 不同微波烹饪方式对白萝卜品质和风味的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 184-189, 78.
- LIU Z Y, LI P, LI H, et al. Effect of different microwave cooking methods on the quality and flavor of white radish[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(2): 184-189, 78.
- [16] 敖继红, 唐文洁, 李思臻. 食品安全中国国家标准 GB5009.3-2016《食品中水分的测定》与蒙古 MNS6477:2014《肉与肉制品水分测定方法》比对分析报告[J]. 中国标准化, 2019(1): 112-117.
- AO J H, TANG W J, LI S Z. Comparison and Analysis Report of the Chinese National Standard, GB 5009.3-2016, Determination of Moisture in Food Safety Standard Food (First Method Continuous Drying Method) and Mongolian National Standard, MNS6477: 2014, Method for Determination of Moisture in Meat and Meat Products[J]. China Standardization, 2019(1): 112-117.
- [17] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295-302.
- DUAN X, LIU W C, REN G Y, et al. Drying characteristics and quality of button mushrooms during microwave freeze drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 295-302.
- [18] QI L, LV S, PENG Y, et al. Characterization of phenolics and antioxidant abilities of red navel orange "Cara Cara" harvested from five regions of China[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1107-1116.
- [19] 吕朝燕, 高智席, 马秀情, 等. 不同热风干燥温度对方竹笋品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 23-29.
- LV C Y, GAO Z X, MA X Q, et al. Effect of different hot air drying temperatures on quality of *Chimonobambusa quadrangularis* shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 23-29.
- [20] DOMÍNGUEZ R, PURRIÑOS L, PÉREZ -SANTAESCOLÁSTICA C, et al. Characterization of volatile compounds of dry-cured meat products using HS -SPME -GC/MS technique [J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(6): 1263-1284.
- [21] 马士成, 王梦琪, 刘春梅, 等. 六堡茶挥发性成分中关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 191-197.
- MA S C, WANG M Q, LIU C M, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of Liupao tea[J]. Food Science, 2020, 41(20): 191-197.
- [22] 张莉会, 乔宇, 汪超, 等. 超高压结合超声预处理对真空冷冻干燥草莓片品质和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 157-167.
- ZHANG L H, QIAO Y, WANG C, et al. Effect of ultra high pressure combined with ultrasonic pretreatment on the quality and antioxidant activity of vacuum freeze-dried strawberry slices[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 157-167.
- [23] LIU J B, XUE J, XU Q, et al. Drying kinetics and quality attributes of white radish in low pressure superheated steam[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(7): 65-78.
- [24] 严启梅. 杏鲍菇真空微波联合气流膨化干燥研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- YAN Q M. Study of combined vacuum microwave and air puffing drying *Pleurotus eryngii*[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.
- [25] 杨森, 冯靖雯, 刘友平, 等. 热风干燥温度对竹叶花椒干燥特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 203-209.
- YANG S, FENG J W, LIU Y P, et al. The effect of hot air drying temperature on the drying characteristics and quality of *Zanthoxylum armatum* DC[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(12): 203-209.
- [26] SALDIVAR X, WANG Y J, CHEN P, et al. Effects of blanching and storage conditions on soluble sugar contents in vegetable soybean[J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1368-1372.
- [27] 袁华伟, 尹礼国, 徐洲, 等. 5种蔬菜中风味物质成分分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 192-196.

- YUAN H W, YIN L G, XU Z, et al. Analysis of flavor components in five vegetables[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 192-196.
- [28] 刘辰, 王萍, 徐文玲, 等. 萝卜挥发性风味物质变化规律研究[J]. 山东农业科学, 2020, 52(2): 43-49.
- LIU C, WANG P, XU W L, et al. Variation rules of volatile flavor substances in radish[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(2): 43-49.
- [29] 黄珊. 贵州特色萝卜干的品质影响因素及控制[D]. 贵州: 贵州大学, 2018.
- HUANG S. Research on the influence factors of Guizhou dried radish quality and its control [D]. Guizhou: Guizhou University, 2018.
- [30] SONG S Q, ZHANG X M, HAYAT K, et al. Formation of the beef flavour precursors and their correlation with chemical parameters during the controlled thermal oxidation of tallow[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 203-209.
- [31] WEN X, CHEN A, XU Y, et al. Comparative evaluation of volatile profiles of Asian hard clams (*Meretrix meretrix*) with different shell colors by electronic nose and GC-MS[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2020, 30(1): 1-15.
- [32] ZHOU Q, XIAO J, YAO Y Z, et al. Characterization of the aroma-active compounds in commercial fragrant rapeseed oils via monolithic material sorptive extraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(41): 11454-11463.
- [33] 徐坤范. 不同季节黄瓜果实芳香物质含量变化及氮对风味品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- XU K F. Changes of aromatic compounds content and effect of nitrogen on flavor quality of cucumber fruits at different season[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006.
- [34] 李晓朋, 曾欢, 林柳, 等. 不同煎炸用油制备河豚鱼汤挥发性风味成分的差异性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 251-259.
- LI X P, ZENG H, LIN L, et al. Volatile compounds of puffer fish soup prepared with different frying oils [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(7): 251-259.
- [35] 任洪涛, 夏凯国, 周恒苍, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析美藤果油中的挥发性成分[J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 135-138.
- REN H T, XIA K G, ZHOU H C, et al. Analysis of volatile compounds in sacha inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.) by HS-SPME-GC-MS[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(2): 135-138.
- [36] 车再全, 夏延斌, 雷辰, 等. 萝卜腌制前的预处理方式对风味及质构的影响研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(1): 197-205.
- CHE Z Q, XIA Y B, LEI C, et al. Effects of pretreatment on flavor substance and crispness of pickled radish[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(1): 197-205.
- [37] ZHANG Q, WAN C, WANG C Z, et al. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process[J]. Food Chemistry, 2018, 243(15): 151-161.
- [38] 田震, 徐亚元, 李大婧, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析不同干燥方式对香葱挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 232-244.
- TIAN Z, XU Y Y, LI D J, et al. Analysis of volatile components in dried chives by SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 232-244.
- [39] 郭迅, 曾名湧, 董士远. 牡蛎蒸煮过程中的品质变化[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 24-31.
- GUO X, ZENG M Y, DONG S Y. Quality changes of oysters during steaming[J]. Food Science, 2021, 42(5): 24-31.
- [40] 张彩霞, 奚印慈, 柳泽琢也, 等. 原味沙拉酱的营养评价与关键风味成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 253-258.
- ZHANG C X, XI Y C, LIU Z Z Y, et al. Nutritional evaluation and analysis of volatile flavor components of plain mayonnaise [J]. Food Science, 2020, 41(2): 253-258.
- [41] 符成刚, 刘文玉, 陈友志, 等. 加热温度对新疆马脂理化性质、脂肪酸及挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 54-60.
- FU C G, LIU W Y, CHEN Y Z, et al. Effects of different heating temperatures on physicochemical properties, fatty acids and volatile flavor compounds of horse fat in Xinjiang[J]. Food Science, 2021, 42(16): 54-60.
- [42] 高海燕, 曾洁, 朱继英. 袋装莴笋护绿与保脆的研究[J]. 保鲜与加工, 2004(4): 26-27.
- GAO H Y, ZENG J, ZHU J Y. Study on being kept green and brittle of packed-lettuce[J]. Storage and Process, 2004(4): 26-27.

- [43] 刘大群, 华颖. 基于电子鼻与 SPME-GC-MS 法分析不同脱水方式下萧山萝卜干中的挥发性风味物质[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 279-284.
- LIU D Q, HUA Y. Detection of volatile flavor compounds in different dehydrated Xiaoshan pickled radish by SPME-GC-MS and E-nose methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(2): 279-284.
- [44] 李想. 阿魏酸预处理增强萝卜硬度及其机制的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- LI X. Study on the effect and mechanism of ferulic acid pre-treatment on the hardness of radish[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [45] 唐小闲, 董明琴, 罗杨合, 等. 莲藕片汽蒸加工工艺及其挥发性风味物质变化研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 61-69.
- TANG X X, DONG M Q, LUO Y H, et al. Steam processing technology of lotus root slices and the changes of its volatile flavoring substances[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 61-69.
- [46] SONG S, ZHANG X, XIAO Z, et al. Contribution of oxidized tallow to aroma characteristics of beeflike process flavour assessed by gas chromatography-mass spectrometry and partial least squares regression[J]. Journal of Chromatography A, 2012, 12(54): 115-124.

Analysis of Bioactive and Volatile Components of White Radish during Saturated Steam-Heat Pump Drying

Liu Panpan¹, Ren Guangyue^{1,2*}, Zhao Lujie¹, Duan Xu^{1,2}, Li Linlin¹, Wang Zhaokai¹

¹College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan

²Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou 450001)

Abstract To investigate the effects of saturated steam treatment on the changes of bioactive components and volatile components of white radish during drying. Based on the traditional processing process of Peony Swallow, different saturated steam treatment times were selected to study the variation of bioactive components and volatile components in the saturated steam-heat pump combined drying process of white radish. The results showed that the bioactive components of white radish showed a general decreasing trend during drying. Compared with single heat pump drying, saturated steam-heat pump combined drying was more conducive to the retention of bioactive components, and the results of saturated steam treatment for 6 min were the most obvious. After drying for 180 min, the contents of Vitamin C (VC), total phenol and total sugar increased by 22.98%, 66.82% and 54.01%, respectively, compared with that of single heat pump drying. Using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry identified in fresh green radish there are 26 kinds of volatile components, and isothiocyanates were the main volatile components, accounting for a total of 12 components of 71.99%. After the combination of saturated steam-heat pump drying, the relative contents of isothiocyanates, sulfides and alcohols in the radish decreased, while the relative contents of aldehydes and ketones increased. After saturated steam treatment, n-hexanal, heptyl aldehyde, n-octanal, ethyl palmitate, geranifolyl acetone and other flavor substances with floral, fruit and tea fragrance were added to improve the flavor of white radish. The research results can provide a theoretical basis for the industrial production of Peony Swallow.

Keywords white radish; saturated steam-heat pump combination drying; volatile flavour substances; HS-SPME-GC-MS