

袁辛锐, 杨其长, 王芳, 等. 紫胡萝卜复合发酵饮料的研制及其挥发性风味物质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 201-209. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040238

YUAN Xinrui, YANG Qichang, WANG Fang, et al. Development and Volatile Flavor Substances Analysis of Purple Carrot Compound Fermented Beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 201-209. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040238

· 工艺技术 ·

紫胡萝卜复合发酵饮料的研制及其挥发性风味物质分析

袁辛锐¹, 杨其长¹, 王芳¹, 林致通^{1,2,*}

(1. 中国农业科学院都市农业研究所, 四川成都 610065;

2. 四川天味食品集团股份有限公司, 四川成都 610200)

摘要: 以羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜为主要原料, 安琪乳酸菌为发酵菌种, 制备紫胡萝卜复合发酵饮料。采用单因素和正交试验优化糖添加量、乳酸菌接种量、发酵温度和发酵时间。结果表明, 发酵饮料的最佳工艺参数为: 糖添加量 7%、乳酸菌接种量 5%、发酵温度 41 °C、发酵时间 38 h。该条件下得到的发酵饮料酸甜可口、色泽鲜红, 总糖含量 0.21 g/L, 总酸含量 0.38 g/L, 膳食纤维含量 0.41 g/L, 活菌数 7.42×10^7 CFU/g, 感官评分 93.3 分; 共检测出 71 种挥发性风味物质, 以酮类和醛类为主, 其次依次是醇类、酸类、酯类及其他化合物; 其中香叶基丙酮、乙酸、反式-2-癸烯醛含量最高, 分别为 15.60%、13.14% 和 6.40%, 是发酵饮料风味的主要来源。本研究为蔬菜饮料的开发提供新思路, 也为实现农副产品的进一步开发提供参考。

关键词: 发酵饮料, 风味物质, 工艺优化, 羽衣甘蓝, 冰菜, 紫胡萝卜

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)02-0201-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040238

本文网刊:



Development and Volatile Flavor Substances Analysis of Purple Carrot Compound Fermented Beverage

YUAN Xinrui¹, YANG Qichang¹, WANG Fang¹, LIN Zhitong^{1,2,*}

(1. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Chengdu 610065, China;

2. SiChuan TianWei Food Group Co., Ltd, Chengdu 610200, China)

Abstract: Using kale, *Mesembryanthemum crystallinum* and purple carrot as the main raw materials, and angel *Lactobacillus* as fermentation strains, the purple carrot compound fermented beverage was prepared. Orthogonal experiment was used to optimize the sugar addition, inoculum amount, fermentation temperature and fermentation time. Results showed that the optimal sugar addition of the fermented vegetable beverage was 7%, the lactic acid bacteria inoculation amount was 5%, the fermentation temperature was 41 °C, the fermentation time was 38 h. The final compound fermented beverage with moderate sour and sweetness taste, and bright red color was obtained. And the total sugar was 0.21 g/L, the total acid was 0.38 g/L, the dietary fiber content was 0.41 g/L, the number of *Lactobacillus* was 7.42×10^7 CFU/g, the sensory score was 93.3. A total of 71 volatile flavor substances were detected, mainly ketones and aldehydes, followed by alcohols, acids, esters and other compounds. Among them, the highest concentrations of geranylacetone, acetic acid and (2E)-2-decenal were 15.60%, 13.14% and 6.40%, respectively, which were the main sources of fermented beverage flavor. This study provides new ideas for the development of vegetable beverages and provides a reference for the further development of agricultural and sideline products.

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目 (ASTIP2023-34-IUA-01)。

作者简介: 袁辛锐 (1995-), 女, 硕士, 研究实习生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1206940421@qq.com。

* 通信作者: 林致通 (1995-), 男, 硕士, 研究实习生, 研究方向: 植物基功能性食品研究, E-mail: 929159415@qq.com。

Key words: fermented beverage; flavor substance; process optimization; kale; *Mesembryanthemum crystallinum*; purple carrot

羽衣甘蓝是十字花科芸薹属甘蓝种的一个变种^[1],一种高营养、低热量、高膳食纤维的蔬菜,被称为“超级食物”^[2]。其富含多种维生素和矿物质,尤其Ca、Fe、P含量突出^[3],含有异硫氰酸酯、多酚、类胡萝卜素等生物活性成分,有助于抗氧化^[4]、抗炎^[5]、抗癌^[6]。冰菜(*Mesembryanthemum crystallinum*)别名冰叶日中花、冰草,属番杏科(Aizoaceae)^[7],叶面底部和茎上附着大量包含盐类的细胞^[8],自身带微咸味,口感清脆,富含矿物质和维生素,黄酮类化合物含量也较高^[9-10],具有保护肝脏、抗痘、抗病毒的功效^[11]。紫胡萝卜由于富含花青素而呈现紫色,花青素是迄今为止发现的抗氧化性较强的天然活性物质之一,属于多酚类化合物,具有显著的抗氧化、抗菌、抗炎功效、改善视力^[12]等功效。

目前对羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜的研究多集中在种植技术和品种鉴定上,除鲜食外,其食用价值未被充分开发利用^[13]。近年来发酵果蔬饮品受到消费者的喜爱^[14],因为蔬菜水果经发酵后,不仅营养吸收效率得到显著提高^[13],同时,果蔬饮料含大量益生菌,能够调节肠道菌群^[15],维持肠道健康^[16-17]。对于发酵饮料的研究也逐渐深入,比如王紫琳等^[18]、王鑫等^[19]分别优化了雪莲果、清涧红枣发酵饮料的发酵参数,但对于蔬菜发酵饮料,尤其是以羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜的复合饮料发酵工艺鲜有研究。因此,亟需对此开展深加工技术,提升产品附加值。

本研究以羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜为主要原料,以安琪乳酸菌为发酵剂,制备紫胡萝卜复合发酵饮料,以总糖、总酸、乳酸菌活菌数及感官评分为指标,利用单因素实验和正交试验,研究了紫胡萝卜复合发酵饮料的最佳工艺参数,并探讨了发酵饮料的挥发性风味物质,旨在酿造一款口感佳、营养丰富的发酵饮料,为蔬菜发酵饮料的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冰菜、羽衣甘蓝、紫胡萝卜、白砂糖 购自超市;乳酸菌 安琪酵母股份有限公司;盐酸、氢氧化钠、酒石酸钾钠、硫酸铜、氯化钠、葡萄糖 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;MRS培养基 北京索莱宝科技有限公司。

MJ-BL1206A 破壁机、SN2105T 电磁炉 美的集团有限公司;HWS-250 恒温培养箱 绍兴苏珀仪器有限公司;XHF-D-XZ 高速分散器 宁波新芝生物科技股份有限公司;TD50002A 电子天平 宁波市鄞州华丰仪器厂;SW-CJ-2FD 超净工作台 上海尚道仪器制造有限公司;QP2010Ultra 气相色谱-质谱仪(Gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)

日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 紫胡萝卜复合发酵饮料的制备

1.2.1.1 工艺流程 原料→清洗→漂烫→打浆→过滤→调配→均质→煮沸杀菌→冷却→接种→发酵→成品

1.2.1.2 操作要点 漂烫:将清洗干净的羽衣甘蓝进行漂烫,漂烫温度 100℃,时间 1 min,料液比 1:30(g:mL)。

打浆:将处理好的羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜分别以料液比 1:2 的比例与纯净水混合后打浆。

过滤:将蔬菜浆过 100 目纱布得到滤液。

调配:将羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜三种蔬菜汁以质量比 5:5:1 混合,加入蔬菜汁总质量 7% 的糖并混合均匀。

均质:常温下用 4000 r/min 均质 1 min。

杀菌:将混合液加热,直至煮沸。

接种:待混合液冷却到 40℃,按 7% 的比例加入发酵剂,并搅拌均匀。

发酵:在 40℃ 恒温条件下发酵 36 h 后结束发酵。

1.2.2 单因素实验 根据前期实验结果选取糖添加量、乳酸菌接种量、发酵温度和发酵时间来进行单因素实验。

1.2.2.1 糖添加量 设定糖添加量分别为 4%、5%、6%、7%、8%,接种量为 7%,发酵温度为 40℃,发酵时间为 36 h 进行发酵,研究不同糖添加量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响。

1.2.2.2 乳酸菌接种量 设定乳酸菌接种量分别为 4%、5%、6%、7%、8%,糖添加量为 7%,发酵温度为 40℃,发酵时间为 36 h 进行发酵,研究不同乳酸菌接种量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响。

1.2.2.3 发酵温度 设定发酵温度分别为 38、39、40、41、42℃,糖添加量为 7%,接种量为 7%,发酵时间为 36 h 进行发酵,研究不同发酵温度对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响。

1.2.2.4 发酵时间 设定发酵时间分别为 30、32、34、36、38 h,糖添加量为 7%,乳酸菌接种量为 7%,发酵温度为 40℃ 进行发酵,研究不同发酵时间对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响。

1.2.3 正交试验 在单因素实验的基础上,选择对实验结果影响较大的糖添加量(A)、乳酸菌接种量(B)、发酵温度(C)、发酵时间(D)4个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交优化试验。因素水平见表1。

表 1 正交试验因素水平设计
Table 1 Factors and levels for orthogonal experiments

水平	因素			
	A糖添加量(%)	B乳酸菌接种量(‰)	C发酵温度(℃)	D发酵时间(h)
1	6	5	39	34
2	7	6	40	36
3	8	7	41	38

1.2.4 理化指标的测定 总糖的测定:按照 GB 5009.7-2016 采用滴定法,还原糖以葡萄糖计。总酸的测定:按照 GB/T 12293-90 采用滴定法,总酸以乳酸计。膳食纤维的测定:按照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》方法测定。乳酸菌数:MRS 培养基平板计数法。

1.2.5 挥发性风味物质的测定 参照杨定宽等^[20]的方法进行测定。

1.2.5.1 样品的前处理 将 3 mL 样品加入顶空瓶中,于 60 ℃ 条件下萃取 55 min。

1.2.5.2 GC 条件 色谱柱:SH-Rtx-Wax 强极性毛细管柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm); 45 ℃ 保持 3 min,以 3 ℃/min 升温至 180 ℃,保持 3 min,接着以 12 ℃ 升温至 220 ℃,保持 3 min;载气(He)流速 1.67 mL/min,压力 19.0 kPa;分流比 10:1。

1.2.5.3 MS 条件 质谱条件:电子轰击离子源;电子能量 70 eV;离子源温度 200 ℃;溶剂延迟:3 min;增益系数:1.16;质量扫描范围 m/z 35~500。

1.2.6 感官评价 参照葛永辉等^[21]的方法制定发酵

表 2 紫胡萝卜复合发酵饮料感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standards of purple carrot compound fermented beverage

指标	评分标准	分数(分)
色泽(20分)	鲜亮的红色,有光泽	15~20
	红色,较有光泽	8~14
	暗红色,无光泽	0~7
澄清度(20分)	无沉淀,清亮透明,质地均匀	15~20
	有少许沉淀,略浑浊,质地较均匀	8~14
	浑浊,有沉淀,质地不均匀	0~7
香气(30分)	具有浓厚香甜水果香气,无青菜味	21~30
	淡淡香甜果味,无青菜味	11~20
	无果香气味,显著青菜味	0~10
滋味(30分)	口感柔和,滋味丰富,风味协调	21~30
	口感较柔和,酸甜适中,口感较佳	11~20
	口感刺激、粗糙,过酸或过甜,口感较差	0~10

表 3 糖添加量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响

Table 3 Effects of sugar addition on the quality of purple carrot compound fermented beverage

糖添加量(%)	总糖(g·L ⁻¹)	总酸(g·L ⁻¹)	活菌数(10 ⁷ CFU·g ⁻¹)	膳食纤维(%)	感官评分(分)
4	6.387±0.143 ^c	0.296±0.015 ^d	3.347±0.181 ^d	0.377±0.005 ^a	64.113±2.384 ^c
5	8.093±0.146 ^d	0.330±0.010 ^c	6.673±0.301 ^c	0.383±0.006 ^a	67.703±3.457 ^d
6	14.973±0.417 ^c	0.356±0.005 ^{ab}	8.237±0.106 ^b	0.377±0.015 ^a	72.733±4.234 ^c
7	21.433±0.071 ^b	0.356±0.011 ^{ab}	8.637±0.073 ^a	0.390±0.010 ^a	92.013±6.046 ^a
8	23.177±0.212 ^a	0.358±0.010 ^a	8.233±0.087 ^b	0.387±0.015 ^a	85.963±6.518 ^b

注:表中数字右上标字母不同,表明同列有显著性差异(P<0.05),表4~表6同。

饮料的感官评分标准,产品在 4 ℃ 下贮藏 24 h,请 10 位专业人员根据产品的色泽、澄清度、香气、滋味进行评分,满分 100 分,评分标准见表 2。

1.3 数据处理

所有试验重复 3 次,结果均采用平均值±标准偏差的表示方法。数据统计使用 Excel 2010 软件进行,采用 SPSS 25.0 软件进行数据显著性分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 糖添加量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响 糖是乳酸菌生长代谢可利用的底物,乳酸菌可通过转化酶将糖水解为葡萄糖和果糖,从而利用这种碳源^[22]。如表 3 所示,随着糖添加量的增加,总糖含量逐渐上升,膳食纤维含量无明显差异,总酸含量先升高后趋于稳定,活菌数和感官评分先升高后降低。发酵过程中饮料中的乳酸不断积累使总酸含量大量增加^[23]。糖添加量为 4%~5% 时,添加量较低,不足以微生物生长增殖提供充足的能量,导致部分微生物的死亡^[24-25],从而影响了活菌数及其产酸能力,因此总酸含量、活菌数和感官评分均较低。糖添加量为 5%~7% 时,乳酸菌大量增殖,活菌数和总酸含量上升,活菌数在 7% 时达到最大值;糖添加量为 7%~8% 时,添加量过多,饮料的渗透压增大,抑制了乳酸菌的生长和代谢,从而影响乳酸的继续产生^[26]。糖添加量对饮料的感官评分影响重大,添加量过低会导致在发酵时间内无法形成特殊的发酵风味,导致蔬菜本身的味道过重;添加量过高则会因为甜度过高,掩盖了发酵饮料的特殊风味;在添加量为 7% 时,饮料的糖酸比适宜,感官评分最高。因此,紫胡萝卜复合发酵饮料的适宜糖添加量为 7%。

2.1.2 接种量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响

如表 4 所示,随着接种量的增加,总酸、活菌数逐渐升高,总糖持续减少,感官评分先升高后降低,膳食纤维含量无明显变化,说明膳食纤维并非由微生物发酵获得。当接种量为 4‰ 时,由于乳酸菌含量较低,产酸量较低,饮料风味物质积累少,糖消耗量低、总糖含量较高导致整体感官偏甜且有异味,因此感官评分也较低。当接种量为 5‰~6‰ 时,饮料中的总酸逐渐上升,总糖含量逐渐降低,说明在一定的接种量下,

表 4 乳酸菌接种量对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响

Table 4 Effect of lactic acid bacteria inoculation amount on the quality of purple carrot compound fermented beverage

乳酸菌接种量(%)	总糖(g·L ⁻¹)	总酸(g·L)	活菌数(10 ⁷ CFU·g ⁻¹)	膳食纤维(%)	感官评分(分)
4	28.307±0.117 ^a	0.263±0.005 ^d	1.527±0.012 ^e	0.380±0.020 ^a	73.743±0.487 ^d
5	26.503±0.146 ^b	0.323±0.015 ^c	1.977±0.031 ^d	0.383±0.015 ^a	79.003±0.294 ^c
6	23.277±0.083 ^c	0.343±0.012 ^b	3.530±0.249 ^c	0.380±0.010 ^a	86.223±0.316 ^b
7	21.387±0.067 ^d	0.360±0.010 ^a	8.280±0.076 ^b	0.380±0.026 ^a	91.960±0.318 ^a
8	20.403±0.183 ^e	0.361±0.015 ^a	13.843±0.305 ^a	0.381±0.017 ^a	86.770±0.389 ^b

总酸含量与接种量呈正相关,总糖含量与接种量呈负相关。当接种量在 7‰~8‰时,饮料的总酸上升趋势不明显,活菌数持续增加,但感官评分稍有降低,在接种量 7‰时达到最高。这是由于乳酸菌是发酵饮料中的优势菌种,适宜的接种量使发酵液充分发酵^[27],同时乳酸菌能够通过降低 pH 和提高 CO₂ 水平来减少杂菌的干扰^[28],保证了饮料的良好口感;但当接种量过大时,营养物质消耗过快,同时产生醇类、醛类等刺激性气味,从而影响饮料的口感^[29]。当接种量为 7‰时,酸度适中,总糖较低,活菌数较高,感官评分最高。因此,紫胡萝卜复合发酵饮料的适接种量为 7‰。

2.1.3 发酵温度对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响 如表 5 所示,随着发酵温度的增加,饮料中的膳食纤维含量变化不明显,总酸含量和活菌数呈现增加趋势,总糖含量大幅度降低,感官评分先增加后减少。发酵温度过高或过低都会影响菌种的生长代谢。当发酵温度为 38~39℃ 时,低于微生物的适宜发酵温度时,微生物细胞内酶活下降,影响产酸能力和发酵速度,不利于乳酸菌的生长,导致总酸含量、活菌数及感官评价较低^[30-31];当温度为 41~42℃ 时,高温会抑制菌体生长代谢甚至导致菌种死亡,使杂菌污染的概率升高。此外,高温胁迫使乳酸菌发酵能力被抑制^[32],风味物质的积累减少,同时高温会导致发酵液损失更多的芳香挥发性物质^[33],导致感官评分较差。因此发酵饮料最适发酵温度为 41℃,在此温度

下乳酸菌活菌数较高,感官评分最高。

2.1.4 发酵时间对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响 从表 6 可看出,总糖随着发酵时间的延长逐渐减少,总酸逐渐增加,活菌数先增加后趋于稳定,膳食纤维含量无明显变化,感官评分先增大后略微降低。有研究表明,在适宜接种量下,随着发酵时间的增加,乳酸菌活菌数增加趋势先缓慢后快速,最后趋于稳定^[34]。如表 6 所示,在 30~32 h 区间活菌数增加较慢,32~36 h 区间增速上升,而 36~38 h 活菌数增加速度缓慢,在 38 h 时活菌数最高。其原因可能是 32 h 前为调整期,乳酸菌为适应环境,主要活动为增殖,产酸少,风味不佳,感官评分低;32~36 h 区间为对数期,菌体生长迅速,代谢加强,总酸含量逐步升高;36~38 h 区间为成熟期,菌体总数稳定,一定时间内烯烃物质(不良风味来源)减少,有机酸、氨基酸和各种芳香族化合物生成^[35],使得总酸和风味物质积累较多,但发酵时间过长不良风味物质积累,产酸过多,导致感官评分下降。在当发酵时间为 36 h 时,感官评分最高,饮料风味协调,活菌数也较高。因此,饮料的最佳发酵时间为 36 h。

2.2 正交试验

通过单因素实验,选择糖添加量(A)、乳酸菌接种量(B)、发酵温度(C)、发酵时间(D)作为考察因素,以感官评分作为评价指标,进行 4 因素 3 水平的正交试验,试验结果及方差分析见表 7 和表 8。

表 5 发酵温度对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响

Table 5 Effects of fermentation temperature on the quality of purple carrot compound fermented beverage

发酵温度(℃)	总糖(g·L ⁻¹)	总酸(g·L)	活菌数(10 ⁷ CFU·g ⁻¹)	膳食纤维(%)	感官评分(分)
38	32.303±0.144 ^a	0.267±0.012 ^d	1.290±0.157 ^e	0.377±0.006 ^a	81.797±1.340 ^e
39	27.527±0.137 ^b	0.277±0.015 ^d	3.250±0.095 ^d	0.377±0.012 ^a	84.673±0.116 ^d
40	23.467±0.132 ^c	0.323±0.060 ^c	8.077±0.212 ^b	0.377±0.006 ^a	90.660±0.411 ^b
41	21.497±0.151 ^d	0.370±0.010 ^b	8.777±0.090 ^a	0.377±0.015 ^a	92.537±0.656 ^a
42	18.270±0.062 ^e	0.437±0.006 ^a	7.360±0.080 ^c	0.380±0.020 ^a	86.177±0.452 ^c

表 6 发酵时间对紫胡萝卜复合发酵饮料品质的影响

Table 6 Effects of fermentation time on the quality of purple carrot compound fermented beverage

发酵时间(h)	总糖(g·L ⁻¹)	总酸(g·L)	活菌数(10 ⁷ CFU·g ⁻¹)	膳食纤维(%)	感官评分
30	24.460±0.151 ^a	0.307±0.012 ^c	3.557±0.065 ^d	0.353±0.025 ^a	73.817±0.528 ^e
32	24.383±0.215 ^a	0.317±0.015 ^c	4.740±0.080 ^c	0.367±0.015 ^a	80.640±0.422 ^d
34	22.173±0.092 ^b	0.377±0.006 ^b	7.673±0.222 ^b	0.357±0.015 ^a	88.7203±0.370 ^c
36	21.420±0.055 ^c	0.397±0.015 ^{ab}	8.970±0.142 ^a	0.360±0.017 ^a	93.597±0.450 ^a
38	21.303±0.021 ^c	0.417±0.006 ^a	9.020±0.335 ^a	0.353±0.025 ^a	90.073±0.296 ^a

表 7 紫胡萝卜复合发酵饮料发酵工艺优化正交试验结果与分析

Table 7 Results and analysis of orthogonal experiments for fermentation technology optimization of purple carrot compound fermented beverage					
实验号	A	B	C	D	感官评分(分)
1	1	3	2	3	73.84
2	2	3	3	1	87.11
3	2	2	1	3	78.32
4	1	2	3	2	82.31
5	3	2	2	1	74.56
6	3	1	3	3	90.21
7	1	1	1	1	64.86
8	3	3	1	2	73.34
9	2	1	2	2	82.12
K ₁	221.01	237.19	216.52	226.53	
K ₂	247.55	235.19	230.52	237.77	
K ₃	238.11	234.29	259.63	242.37	
k ₁	73.67	79.06	72.17	75.51	
k ₂	82.52	78.40	76.84	79.26	
k ₃	73.37	78.10	86.54	80.79	
R	9.15	0.96	14.37	5.28	

表 8 正交试验结果方差分析

Table 8 Variance analysis of orthogonal experiment results					
因素	偏差平方和	自由度	均方	F	显著性
A	259.889	2	129.945	381.411	**
B	0.984	2	0.492	1.444	
C	669.799	2	334.899	982.990	**
D	109.592	2	54.796	160.837	*
误差	3.066	9	0.341		

注: **表示极显著($P<0.01$); *表示显著($P<0.05$)。

表 9 紫胡萝卜复合发酵饮料中挥发性风味物质的种类和含量

Table 9 Content and kinds of volatile compounds of purple carrot compound fermented beverage		
分类	化合物名称	相对含量(峰面积%)
醇类	里哪醇	3.75
	1-壬醇	2.51
	2-十三醇	1.47
	植物醇	1.39
	1-辛醇	1.14
	1-十六醇	0.97
	1-十四醇	0.96
	1-癸醇	0.57
	反式-橙花叔醇	0.40
	2-壬醇	0.37
	正十五醇	0.37
	1-庚醇	0.35
	1-戊醇	0.31
	柏木醇	0.29
	反式法尼醇	0.28
	1-己醇	0.24
	2-庚醇	0.23
	(E)-2-辛烯-1-醇	0.20
	苯甲醇	0.14
	1-十一烷醇	0.13
	橙花醇	0.13
	苯乙醇	0.07

由表 7 极差分析结果可知, 4 种因素对紫胡萝卜复合发酵饮料的感官评分影响的强弱顺序依次为: 发酵温度>糖添加量>发酵时间>乳酸菌接种量。由表 8 方差分析结果可知, 糖添加量和发酵温度对紫胡萝卜复合发酵饮料的感官评分的影响极显著($P<0.01$), 发酵时间也对其影响显著($P<0.05$), 但乳酸菌接种量对其的影响不显著($P>0.05$)。

实验结果表明紫胡萝卜复合发酵饮料的最优发酵条件为 $A_2B_1C_3D_3$, 即糖添加量 7%, 乳酸菌接种量 5‰, 发酵温度 41 ℃、发酵时间 38 h, 但正交试验中未发现有此组合, 对该组合进行验证, 验证所得总糖含量 0.21 g/L, 总酸含量 0.38 g/L, 膳食纤维含量 0.41 g/L, 活菌数 7.42×10^7 CFU/g, 感官评分最高为 93.3 分。

2.3 挥发性风味物质的组成及含量分析

由表 9 可知, 紫胡萝卜复合发酵饮料中, 检测到 71 种挥发性风味物质。包括 22 种醇类、16 种酮类、15 种醛类、8 种酯类、3 种酸类, 以及其他化合物 7 种。含量最高的是酮类化合物, 为 32.24%, 其次是醛类化合物, 为 31.61%, 然后是醇类化合物、酸类化合物、其他化合物及酯类化合物, 其分别为 16.27%、14.09%、3.36%、2.43%。

酮类化合物主要有香叶基丙酮、(Z)-五癸-6-烯-2-酮、 β -紫罗兰酮等, 香叶基丙酮是 71 种挥发性物质中含量最高的。酮类通常是不饱和脂肪酸氧化而成^[36], 其中香叶基丙酮具有甜木兰花香^[37], β -紫罗兰酮具有紫罗兰花香^[38]。

续表 9

分类	化合物名称	相对含量(峰面积%)
酯类	δ-十二内酯	0.61
	1,4-二丁基苯-1,4-二甲酸酯	0.49
	2-乙基-十六烷基己酸酯	0.44
	3,7,11,15-四甲基十六烷基乙酸酯	0.35
	邻苯二甲酸二异丁酯	0.19
	异硫氰酸烯丙酯	0.17
	十六烷酸甲酯	0.13
	富马酸乙基2-甲基烯丙基酯	0.05
酸类	乙酸	13.14
	癸酸	0.72
	壬酸	0.23
	(E)-2-癸烯醛	6.40
醛类	(E)-2-辛烯醛	5.66
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4.26
	反-2-十一烯醛	3.11
	壬醛	2.63
	(E)-2-庚醛	2.02
	(Z)-7-十六碳烯醛	1.69
	(E)-2-非烯醛	1.14
	癸醛	1.07
	橙花醛	0.95
	正辛醛	0.93
	苯甲醛	0.77
	(E,E)-3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳三烯醛	0.40
	(E)-2-戊烯醛	0.32
	十二烷醛	0.26
	香叶基丙酮	15.60
	(Z)-五癸-6-烯-2-酮	3.53
	1-环十二烷基酮	2.41
酮类	β-紫罗兰酮	2.18
	2-十三烷酮	1.77
	2-十五烷酮	1.33
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.24
	(E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	1.04
	β-大马酮	0.98
	环十五烷酮	0.89
	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	0.66
	2-壬酮	0.32
	(R)-5,6,7,7a-四氢-4,4,7a-三甲基-2(4H)-苯并呋喃酮	0.10
	1-辛烯-3-酮	0.10
	(Z)-四氢-6-(2-戊烯基)-2H-吡喃-2-酮	0.05
其他	四氢-6-壬基-2H-吡喃-2-酮	0.04
	α-法尼烯	1.41
	甲氧基苯基-肟	0.89
	苜蓿	0.17
	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	0.40
	2,4-二叔丁基苯酚	0.37
	新植二烯	0.07
	反式-2-(2-戊烯基)呋喃	0.05

醛类化合物主要有反式-2-癸烯醛、反式-2-辛烯醛、壬醛、苯甲醛等,醛类物质通常阈值较低,较低浓度时对气味也能起到积极促进作用^[39],通常由多酚氧化或醇类转化而来^[40]。反式-2-癸烯醛、反式-2-辛烯

醛都具有脂香和清香^[41],壬醛具有柑橘、玫瑰清香^[42],苯甲醛具有果味和杏仁味^[43]。
醇类化合物有里哪醇、壬醇、辛醇、柏木醇等。醇类在发酵过程中有糖代谢合成和芳香族氨基酸降

解合成两条途径^[44]。里哪醇不仅是呈香物质,也是健康活性成分,具有清香和果香,壬醇具有强烈的玫瑰和橙子香气,辛醇具有油脂和柑橘香味,柏木醇具有温和的柏木芳香^[45],会使发酵饮料风味更加复合浓郁。

酯类化合物主要有 δ -十二内酯、邻苯二甲酸二异丁酯、异硫氰酸烯丙酯等,酯类物质通常呈现多种水果香味,发酵过程可以促进酯类的形成^[46]。 δ -十二内酯具有桃子果香^[47],邻苯二甲酸二异丁酯具有芳香气味^[48],异硫氰酸烯丙酯是含芥子苷类十字花科蔬菜及其加工产品中的独特风味物质,具有一定的辛辣味和芳香味^[36]。

酸类化合物包括乙酸、癸酸和壬酸。酸类主要在发酵过程中形成^[49]。乙酸含量 13.14%,在检测出的挥发性物质中含量排第二位。有机酸不仅能产生酸味,还能提供其他香气物质的前体,共同构成了发酵饮料的酸甜口感。

其他化合物包括苜蓿、新植二烯、2-甲氧基-4-乙氧基苯酚、2,4-二叔丁基苯酚、反式-2-(2-戊烯基)呋喃和甲氧基苯基-呋喃。腈类化合物是十字花科蔬菜特有的风味物质,带有苦杏仁味^[50],这与何洪巨等^[51]的研究结果一致。这些物质虽然含量不高,但它们共同构成了发酵饮料的丰富香气。

3 结论

紫胡萝卜复合发酵饮料的最佳发酵参数为:糖添加量 7%、乳酸菌接种量 5%、发酵温度 41 °C、发酵时间为 38 h。该条件下得到的发酵饮料酸甜适中、色泽艳丽,总糖含量 0.21 g/L,总酸含量 0.38 g/L,膳食纤维含量 0.41 g/L,活菌数 7.42×10^7 CFU/g,感官评分 93.3 分;共检测出 71 种挥发性风味物质,主要的挥发性风味物质是酮类、醛类、醇类和酸类化合物,其中,香叶基丙酮、乙酸、(E)-2-癸烯醛含量位居前三。羽衣甘蓝、冰菜和紫胡萝卜本身就具有丰富的营养价值和开发价值,本研究所得复合发酵饮料不仅气味芳香,而且酸甜适口。因此,为今后蔬菜发酵饮料的开发提供新思路,同时也增加了蔬菜加工产业的经济效益。但本研究未对发酵饮料的花青素、多酚等活性物质含量以及抗氧化性展开深入探究,后续可深入研究。

参考文献

[1] WANG Y S, TONG Y, LI Y F, et al. High frequency plant regeneration from microspore-derived embryos of ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130(1): 296–302.

[2] DUNJA Š, BRANIMIR U, SALOPEK-SONDI B. Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) as a superfood: Review of the scientific evidence behind the statement [J]. *CRC Critical Reviews in Food Technology*, 2019, 59(15): 2411–2422.

[3] HE Q, ZHANG Z, ZHANG L. Anthocyanin accumulation, antioxidant ability and stability, and a transcriptional analysis of anthocyanin biosynthesis in purple heading chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 64(1): 132–

145.

[4] LEE S, OH M M. Electric stimulation promotes growth, mineral uptake, and antioxidant accumulation in kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) [J]. *Bioelectrochemistry*, 2020, 138: 107727.

[5] FERIOLI F, GIAMBANELI E, D'ANTUONO L F, et al. Comparison of leafy kale populations from Italy, Portugal, and Turkey for their bioactive compound content: Phenolics, glucosinolates, carotenoids, and chlorophylls [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2013, 93(14): 3478–3489.

[6] WANG Q, BAO Y. Nanodelivery of natural isothiocyanates as a cancer therapeutic [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2021, 167: 125–140.

[7] 张洪磊, 刘孟霞. 冰菜特征特性及控盐高产栽培技术 [J]. *陕西农业科学*, 2015(3): 122–124. [ZHANG H L, LIU M X. Characteristics and cultivation techniques of salt control and high yield of *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2015(3): 122–124.]

[8] 孙美玲, 冯晓光, 侯雪飞, 等. 水晶冰菜总黄酮大孔树脂纯化工艺及体外降糖活性研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(5): 936–944. [SUN M L, FENG X G, HOU X F, et al. Purification technology and *in vitro* hypoglycemic activity of total flavonoids macroporous resins from *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(5): 936–944.]

[9] 孙美玲, 冯晓光, 常希光, 等. 水晶冰菜总黄酮分级萃取及其抗氧化活性 [J]. *北京农学院学报*, 2021, 36(4): 116–120. [SUN M L, FENG X G, CHANG X G. Study on extraction and antioxidant activity of total flavonoids from *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2021, 36(4): 116–120.]

[10] KIM J Y, KIM M H, KIM M H, et al. Growth and phytochemicals of ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) as affected by various combined ratios of red and blue LEDs in a closed-type plant production system [J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2020: 100267.

[11] JAIN S, VAIDYA A. Comprehensive review on pharmacological effects and mechanism of actions of taxifolin: A bioactive flavonoid [J]. *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*, 2023, 7: 100240.

[12] YANG W, GUO Y, LIU M, et al. Structure and function of blueberry anthocyanins: A review of recent advances [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 88: 104864.

[13] 焦云鹏. 水晶冰菜的营养分析及评价 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(9): 181–185. [JIAO Y P. Analysis and evaluation of nutritional components in *Mesembryanthemum crystallinum* L [J]. *Food Research And Development*, 2019, 40(9): 181–185.]

[14] 张倩茹, 尹蓉, 王贤萍, 等. 乳酸菌发酵树莓饮料的工艺优化 [J]. *食品科技*, 2021, 46(5): 99–103. [ZHANG Q R, YIN R, WANG X P, et al. Optimization of fermented raspberry beverage by lactic acid bacteria [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(5): 99–103.]

[15] BORN P A, GRANGETTE C, MERCENIER A, et al. Identification of *Lactobacillus plantarum* genes that are induced in the gastrointestinal tract of mice [J]. *Journal of Bacteriology*, 2004, 186(17): 5721–5729.

[16] WANG Y, YU M, SHI Y W, et al. Effects of a fermented beverage of changbai mountain fruit and vegetables on the composition of gut microbiota in mice [J]. *Plant Foods Human Nutrition*, 2019, 74(4): 468–473.

[17] SEN S, MULLAN M M, PARKER T J, et al. Effect of *Lacto-*

- bacillus plantarum* 299v on colonic fermentation and symptoms of irritable bowel syndrome[J]. Digestive Diseases & Sciences, 2002, 47(11): 2615–2620.
- [18] 王紫琳, 方冉, 赵存朝, 等. 雪莲果植物乳杆菌发酵饮料的研制[J]. 中国酿造, 2022, 41(12): 216–222. [WANG Z L, FANG R, ZHAO C Z, et al. Development of yacon beverage fermented with *Lactobacillus plantarum*[J]. China Brewing, 2022, 41(12): 216–222.]
- [19] 王鑫, 马芙俊, 李雅丽, 等. 清涧红枣乳酸菌发酵饮料工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 95–100. [WANG X, MA F J, LI Y L, et al. Process optimization of qingjian jujube beverage fermented by *Lactobacillus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 95–100.]
- [20] 杨定宽, 季香青, 曾承, 等. 泡蔸头中挥发性风味物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 4978–4983. [YANG D K, JI X Q, ZENG C, et al. Analysis of volatile flavor substances in *Allium chinensis*[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(12): 4978–4983.]
- [21] 葛永辉, 汪玲, 姜天丽, 等. 黑莓玫瑰复合饮料的制备及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 121–128. [GE Y H, WANG L, JIANG T L, et al. Preparation and antioxidant activity of blackberry-rose compound beverage[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 121–128.]
- [22] PAREDES J L, ESCUDERO-GILETE M L, VICARIO I M. A new functional kefir fermented beverage obtained from fruit and vegetable juice: Development and characterization[J]. LWT, 2021: 154.
- [23] 欧阳佳, 兰雪花, 李清明, 等. 复合乳酸菌发酵淮山工艺优化研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 119–123. [OUYANG J, LAN X H, LI Q M, et al. Study on the optimization of compound lactobacillus fermentation in yam[J]. Food Research And Development, 2020, 41(20): 119–123.]
- [24] BEGUM T, ISLAM M Z, SIDDIKI M, et al. Preparation of fermented beverage from whey-based watermelon (*Citrullus lanatus*) juice[J]. Asian Journal of Dairy and Food Research, 2020, 38: 301–306.
- [25] TTHA B, VCKA B, NVM C, et al. Production of a fermented beverage from pineapple (*Ananas comosus*) byproduct crumbs[J]. Materialstoday: Proceedings, 2022(60): 2034–2042.
- [26] 李慧, 韩卓, 叶玲, 等. 石榴芦荟柠檬复合发酵饮料的研制[J]. 农产品加工, 2022(4): 5–9. [LI H, HAN Z, YE L, et al. Preparation of pomegranate aloe lemon compound fermented beverage[J]. Farm Products Processing, 2022(4): 5–9.]
- [27] 骆嘉原, 常晨, 孙瑶, 等. 香菇可溶性膳食纤维饮品的研制[J]. 中国酿造, 2017, 36(3): 182–187. [LUO J Y, CHANG C, SUN Y, et al. Development of *Lentinus edodes* soluble dietary beverage[J]. China Brewing, 2017, 36(3): 182–187.]
- [28] 王丹, 江春阳, 邓乔晟, 等. 地参发酵酒的工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 235–243. [WANG D, JIANG C Y, DENG Q S, et al. Process optimization and quality analysis of *Lycopus lucidus* fermented wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 235–243.]
- [29] YU Y S, XIAO G S, XU Y J, et al. Effects of dimethyl dicarbonate (DMDC) on the fermentation of litchi juice by *Lactobacillus casei* as an alternative of heat treatment[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(5): M947–M954.
- [30] 杨春敏, 王燕云, 黄建初. 九月黄乳酸菌发酵饮料工艺优化研究[J]. 现代食品, 2021(8): 94–99. [YANG C M, WANG Y Y, HUANG J C. Study on optimization of fermented beverage process of jiuyuehuang lactobacillus[J]. Modern Food, 2021(8): 94–99.]
- [31] 贾凌云, 胡志和, 薛璐, 等. 不同温度发酵无乳糖酸奶与普通酸奶差异性比较[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 79–90. [JIA L Y, HU Z H, XUE L, et al. Comparison of lactose-free and plain yoghurt fermented at different temperatures[J]. Food Science, 2019, 40(23): 79–90.]
- [32] 彭昕, 李桂林, 艾赛提·阿合旦, 等. 模糊数学感官评定结合响应面法优化红枣白兰地发酵工艺[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 185–191. [PENG X, LI G L, ASAT A, et al. Optimization of fermentation process of jujube brandy by fuzzy mathematics sensory evaluation combined with response surface methodology[J]. China Brewing, 2022, 41(4): 185–191.]
- [33] MASSERA A, M, MARIELA, SARI S, et al. Effect of low temperature fermentation on the yeast-derived volatile aroma composition and sensory profile in Merlot wines[J]. LWT, 2021, 142(1): 111069.
- [34] 于素素, 杨佳杰, 马向阳, 等. 含发酵乳杆菌 HY01 牦牛酸奶工艺优化及主体风味成分动态解析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 105–113. [YU S S, YANG J J, MA X Y, et al. Process optimization for the development of fermented yak milk containing *Lactobacillus fermentum* HY01 and dynamic analysis of main flavor components[J]. Food Science, 2021, 42(2): 105–113.]
- [35] GUAN Q, XIONG T, XIE M. Influence of probiotic fermented fruit and vegetables on human health and the related industrial development trend[J]. Engineering, 2021, 7(2): 212–218.
- [36] MICHELA P, MONICA A, ANTONELLA C, et al. Exploitation of autochthonous Tuscan sourdough yeasts as potential starters[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 302: 59–68.
- [37] 倪伟, 陈开波, 徐志强, 等. 使用 GC/MS 和 GC-O 鉴定皖南烟叶主要呈香组分[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(6): 137–143. [NI W, CHEN K B, XU Z Q, et al. Identification of main aroma compounds in tobacco leaves from southern anhui using GC/MS and GC-O[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(6): 137–143.]
- [38] 王娟, 张晓宇, 肖巧梅, 等. 不同等级普洱熟茶挥发性物质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 319–328. [WANG J, ZHANG X Y, XIAO Q M, et al. Analysis of volatile substances of different grades of Pu'erh Ripe Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 319–328.]
- [39] 赵畅雯, 潘晓倩, 成晓瑜, 等. 产香酵母发酵面团挥发性风味物质分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(1): 147–154. [ZHAN C W, PAN X Q, CHENG X Y, Analysis of volatile flavor compounds in dough fermented by aroma-producing yeast[J]. China Brewing, 2023, 42(1): 147–154.]
- [40] YIN H, LEE S W, KIM J W, et al. Impact-resistant capacity and failure behavior of unbonded bi-directional PSC panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 72: 40–55.
- [41] BAI S, YOU L Q, JI C, et al. Formation of volatile flavor compounds, maillard reaction products and potentially hazard substance in China stir-frying beef sao zi[J]. Food Research International, 2022, 159: 111545–111545.
- [42] LIU H, XU Y, WU J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons[J]. Food Research International, 2021, 150: 110784–110784.
- [43] MA J, MA Y H, ZHANG H Z, et al. The quality change of fig wine fermented by RV171 yeast during the six-month aging process[J]. LWT, 2022, 166.
- [44] CLEMENTE-JIMENEZ J M, MINGORANCE-CAZORLA

- L, MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ S, et al. Influence of sequential yeast mixtures on wine fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2005, 98(3): 301–308.
- [45] 崔香香, 白飞荣, 于学健, 等. 谢瓦散囊菌 CICC41584 产香特性及在浓香型白酒大曲生产中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 60–67. [CUI X X, BAI F R, YU X J, et al. Aroma characteristics of *Eurotium chevalieri* CICC 41584 and its application in aroma Baijiu Daqu production[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(21): 60–67.]
- [46] LIU X, XU S, WANG M, et al. Effect of mixed fermentation with *Pichia fermentans*, *Hanseniaspora uvarum*, and *Wickerhamomyces anomala* on the quality of fig (*Ficus carica* L.) wines[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(2): e15169.
- [47] 彭雨露, 吴淑蒙, 徐学明, 等. 新型稀奶油-大豆分离蛋白香基的风味形成研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9): 171–178. [PENG Y L, WU S M, XU X M, et al. Study on flavor formation of novel cream-soy protein isolate mixed flavor[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 171–178.]
- [48] 马菁华. 刺槐精油制备与资源化利用基础研究[D]. 河南: 河南农业大学, 2019. [MA J H. Study on the preparation and resource utilization of *Robinia pseudoacacia* essential oil[D]. HeNan: Henan Agricultural University, 2019.]
- [49] LI S Q, BI P F, GAO Z Y, et al. Effect of sequential fermentation with four non-*Saccharomyces* and *Saccharomyces cerevisiae* on nutritional characteristics and flavor profiles of kiwi wines[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022; 104480.
- [50] 何洪巨, 陈杭, Schnitzler W H. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(2): 192–197. [HE H J, CHEN H, SCHNITZLER W H. Glucosinolate composition and contents in brassica vegetables, *scientia agricultura sinica*[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2002, 35(2): 192–197.]
- [51] 何洪巨, 唐晓伟, 宋曙辉, 等. 用吹扫捕集法测定十字花科蔬菜中挥发性物质[J]. *中国蔬菜*, 2005(z1): 39–42. [HE H J, TANG X W, SONG S H, et al. Analysis of volatile components of brassicas with purge and trap technique coupled with GC/MS[J]. *China Vegetables*, 2005(z1): 39–42.]