

# 蓝莓酒香气成分及其影响因素研究进展

郭志君<sup>1,2</sup>, 杨红丽<sup>1</sup>, 闵卓<sup>1</sup>, 房玉林<sup>2,3,\*</sup>

(1. 茅台学院, 贵州 仁怀 564500; 2. 西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 陕西省葡萄与葡萄酒工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 蓝莓酒因营养成分丰富、风味独特, 深受消费者欢迎且市场潜力大。香气是衡量蓝莓酒感官品质的重要指标之一, 但目前蓝莓酒存在香气成分研究不充分、香气特征不明确、香气调控手段有限等问题, 制约着我国蓝莓酒产品的品质提升。本文对蓝莓酒香气物质组成进行阐述, 分析各类香气物质的占比及来源; 并从香气活度值评价角度分析蓝莓酒的关键呈香物质和特征香气; 最后深入讨论品种、酵母菌及工艺条件对蓝莓酒香气的影响, 旨在为蓝莓酒香气品质研究、加工技术提升提供一定参考。

**关键词:** 蓝莓酒; 挥发性成分; 影响因素

## Research Progress in Aroma Compounds of Blueberry Wine and Their Influential Factors

GUO Zhijun<sup>1,2</sup>, YANG Hongli<sup>1</sup>, MIN Zhuo<sup>1</sup>, FANG Yulin<sup>2,3,\*</sup>

(1. Moutai Institute, Renhuai 564500, China; 2. College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Grape and Wine Engineering Research Center of Shaanxi Province, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Blueberry wine is popular with consumers and has great market potential due to its rich nutrients and unique flavor. Aroma is an important indicator to measure the sensory quality of blueberry wine. However, there are some problems restricting the quality improvement of blueberry wine, such as insufficient studies on aroma components, unclear aroma characteristics and limited ways of aroma quality management. This article summarizes the composition, proportion and sources of volatile aroma components of blueberry wine, analyzes its key aroma substances and characteristic aroma based on odor activity value (OAV), and discusses the influence of cultivars, yeast, and process conditions on blueberry wine aroma. The purpose of this article is to offer a theoretical foundation for research on the aroma quality of blueberry wine aroma and for improving its processing technology.

**Keywords:** blueberry wine; volatile compounds; influential factors

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230105-027

中图分类号: S663.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 06-0337-07

引文格式:

郭志君, 杨红丽, 闵卓, 等. 蓝莓酒香气成分及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 337-343. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230105-027. <http://www.spkx.net.cn>

GUO Zhijun, YANG Hongli, MIN Zhuo, et al. Research progress in aroma compounds of blueberry wine and their influential factors[J]. Food Science, 2024, 45(6): 337-343. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230105-027. <http://www.spkx.net.cn>

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 是杜鹃花科 (Ericaceae) 越橘属多年生灌木小浆果类果树<sup>[1]</sup>, 其果实富含维生素、有机酸、多酚等多种营养成分, 已成为世界粮食及农业组织推荐的“五大健康水果”之一, 2020年全球产量达到85.09万 t<sup>[2]</sup>,

但由于其不易贮藏, 约50%被制成加工产品。因具有花色苷、多酚含量丰富和糖酸比合适等特点, 使蓝莓果实适合加工成蓝莓酒, 蓝莓酒较高的抗氧化作用<sup>[3]</sup>和独特的风味使其越来越受到消费者的喜爱<sup>[4]</sup>, 具有成为优质果酒的潜力。

收稿日期: 2023-01-05

基金项目: 遵义市科技局茅台学院联合项目 (遵市科合HZ字[2021]311号); 国家自然科学基金地区科学基金项目 (32160688);

茅台学院高层次人才科研启动项目 (myg[2022]25)

第一作者简介: 郭志君 (1985—) (ORCID: 0000-0002-5232-351X), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为葡萄酒工艺、质量控制及副产物系统利用。E-mail: guozhijun@mtxy.edu.cn

\*通信作者简介: 房玉林 (1973—) (ORCID: 0000-0001-7437-4249), 男, 教授, 博士, 研究方向为葡萄生理与抗性。

E-mail: fangyulin@nwsuaf.edu.cn

香气是评价果酒风味最重要的指标之一<sup>[5]</sup>, 蓝莓果实香气研究早在1983年已有报道<sup>[6]</sup>, 但蓝莓酒香气研究相对较晚。1999年为调查一起违法添加兴奋剂(甲基苯丙胺)案件Hida等<sup>[7-8]</sup>测定了蓝莓利口酒的挥发性成分; 国内研究人员于2010年首次采用顶空固相微萃取和气相色谱-质谱联用技术(headspace solid phase microextraction-gas chromatograph-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)测定了3种酵母对蓝莓发酵酒香气成分的影响<sup>[9]</sup>, 之后相继开展了品种、工艺条件等因素对蓝莓酒香气影响的研究<sup>[5,10-11]</sup>。以上研究对指导蓝莓酒生产、品质评价、市场推广具有重要意义。本文综述蓝莓酒香气成分, 包括其占比及来源; 分析总结蓝莓酒的关键呈香物质及香气特征; 深入探讨影响蓝莓酒香气的因素, 旨在为蓝莓酒香气品质研究以及香气精准调控加工技术提升提供一定参考。

## 1 蓝莓酒香气物质的组成

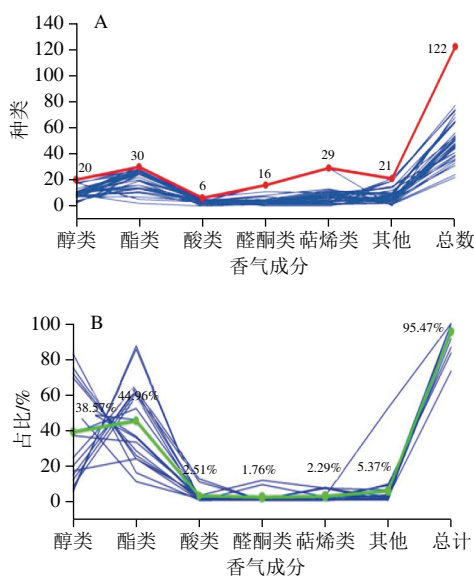
蓝莓经过酒精发酵成为蓝莓酒的过程中, 香气成分种类和含量都有所增加<sup>[12]</sup>, 发酵过程中糖、氨基酸、糖苷前体物质、多酚类等的代谢、水解、酶促氧化及偶联反应形成了醇、酯、酸、萜烯、醛、酮等化合物, 构成了果酒香气的物质基础。目前检测鉴定出的蓝莓酒香气成分超过120种<sup>[13]</sup>, 一般分为醇类、酯类、酸类、醛酮类、萜烯类和其他成分6大类。

图1统计了文献中报道的蓝莓酒香气种类及相对含量占比, 可见醇类和酯类的种类和含量所有香气成分中占比较高, 此外, 萜烯类的种类也十分丰富, 是蓝莓酒的主要香气成分<sup>[4-5,14]</sup>。醇类物质主要由酵母在发酵过程中通过酮酸合成途径和氨基酸降解途径产生<sup>[15]</sup>, 高浓度醇类物质会产生白兰地等烈酒风味, 低浓度下则表现出水果、青草等香气。目前蓝莓酒中检测到的醇类物质超过30种<sup>[13]</sup>, 单一酒样中最多检测出20种, 含量占比平均达到38.57%, 其中异戊醇、异丁醇、苯乙醇和3-甲基-1-丁醇存在于多数蓝莓酒中<sup>[9,16-17]</sup>, 赋予蓝莓酒花香和酒香。酯类物质主要由酵母代谢和陈酿过程中酸和醇酯化产生, 对果酒的香气特征具有重要作用。蓝莓酒中已检测到40种以上酯类物质<sup>[13]</sup>, 单一酒样中最多检测出30种, 含量占比平均达到44.96%, 其中乙酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、正己酸乙酯、苯甲酸乙酯<sup>[4]</sup>等在大部分蓝莓酒中含量较高, 赋予蓝莓酒果香和花香。萜烯类物质主要来源于果实, 经过水解或酵母代谢转变为具有挥发性的游离态, 虽然含量常低于醇类和酯类, 但因其阈值较低, 对蓝莓酒香气特征有重要影响, 蓝莓酒中已检测到29种萜烯类物质<sup>[18]</sup>, 其中芳樟醇、香茅醇、香叶醇、 $\alpha$ -松油醇、橙花叔醇、*D*-柠檬烯、 $\beta$ -大马士酮等普遍存在于蓝莓酒中<sup>[17]</sup>, 赋予蓝莓酒薰衣草、玫瑰和甜香气味<sup>[19]</sup>。

另外, 酸类、醛酮类和挥发酚等物质也普遍存在于蓝莓酒中, 但总含量占比通常不超过10%。果酒中影响香

气的酸类主要是脂肪酸, 短链脂肪酸类主要来源于果实本身, 适量时为果酒带来清爽感, 也有利于陈酿过程酯类香气形成<sup>[20]</sup>, 中长链脂肪酸则主要由酵母代谢产生<sup>[21]</sup>, 较高浓度时表现出腐败、酸臭等异味, 较低浓度时表现出具有修饰作用的奶油、奶酪气味。蓝莓酒中检测到含量相对较高的酸类物质有己酸、辛酸、癸酸以及9-癸烯酸等<sup>[17]</sup>。醛酮类由不饱和脂肪酸在脂氧合酶催化作用下产生<sup>[22]</sup>, 对果酒香气可起到协调作用, 但也会使果酒表现出老化等不良风味, 蓝莓酒中除苯乙醛<sup>[23]</sup>、癸醛<sup>[17]</sup>和壬醛<sup>[24]</sup>, 其他醛酮类物质较少。此外, 蓝莓酒中还检测到丁子香酚<sup>[25]</sup>、乙偶姻<sup>[17]</sup>等其他香气成分, 赋予蓝莓酒丁香花、奶油香气。

综上, 蓝莓酒香气成分中醇类和酯类的占比和种类较多, 萜烯物质种类丰富, 酸类、醛酮和挥发酚等较少, 其共同为蓝莓酒丰富的香气表现奠定物质基础。现有蓝莓酒香气研究较多采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)法, 检测到的香气成分相对有限, 可进一步采用全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry, GC $\times$ GC-TOFMS)等方法丰富微量成分的检测研究。另外, 受限于我国蓝莓酒产业化起步较晚, 市场主流蓝莓酒产品的香气研究缺乏, 还应补充和完善典型品种及商品蓝莓酒香气成分研究。



图中所用数据来自文献全部酒样的可统计数据, 每条蓝色折线代表1个酒样; A.香气成分种类统计结果: 红色折线为种类最大值; B.香气含量占比统计结果: 绿色折线为含量平均值。

图1 文献中蓝莓酒香气物质种类及含量占比统计图<sup>[4,9-10,12-14,25-32]</sup>

Fig. 1 Statistical plots of the types and contents of aroma substances in blueberry wine based on literature data<sup>[4,9-10,12-14,25-32]</sup>

## 2 蓝莓酒关键呈香物质

果酒中检测到的众多挥发性化合物中,并非每一种都对香气呈现有作用,其中少部分起主要贡献作用的物质被称为关键香气组分,这类物质通常有较高的风味稀释(flavor dilution, FD)因子<sup>[33]</sup>或香气活度值(odour activity value, OAV)。一般认为化合物浓度高于其阈值,即 $OA \geq 1$ 的化合物单独对酒的香气有贡献, $0.1 \leq OA < 1$ 的化合物对香气有重要修饰作用<sup>[34]</sup>。

表1总结了文献中蓝莓酒挥发性成分 $OA > 0.1$ 的物质,可初步确定为蓝莓酒的关键呈香物质,其中 $OA \geq 1$ 的物质有42种,包括醇类4种、酯类18种、酸类3种、醛酮类2种、萜烯类12种、挥发酚类等其他物质3种。 $\beta$ -大马士酮(4 600)、苯乙醛(4 050.00)、辛酸乙酯(893.56)、苯乙醇(380.87)、癸酸乙酯(328.65)、乙酸异戊酯(303.00)和D-柠檬烯(202.80)的OA均大于100,呈香作用较为突出,使蓝莓酒表现出玫瑰和紫罗兰的花香、小浆果类的果香、似白兰地的酒香、柠檬和薄荷类的植物香,这些香气类型共同组成了蓝莓酒的主要香气特征。

表1 蓝莓酒关键呈香物质

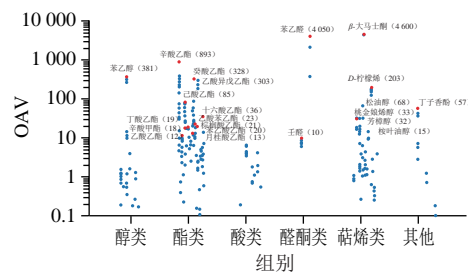
Table 1 Key aroma compounds in blueberry wine

| 蓝莓酒类型                                | 关键香气成分                                                                                                                                                                                                                | 参考文献 |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 野生蓝莓<br>( <i>V. uliginosum</i> ) 干型  | 异丁醇、异戊醇、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、丁酸乙酯、二甲基丁酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、庚酸乙酯、辛酸乙酯、2-羟基-4-甲基戊酸乙酯、癸酸乙酯、9-癸烯酸乙酯、己酸、辛酸、癸酸、9-癸烯酸、 $\beta$ -大马士酮、癸醛、乙偶姻                                                                                                  | [17] |
| 兔眼蓝莓<br>( <i>V. ashei</i> ) 干型       | 异丁醇*、异戊醇*、苯乙醇、松油醇、乙酸*、癸酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯、棕榈酸乙酯                                                                                                                                                                     | [12] |
| 南高丛蓝莓<br>( <i>V. corymbosum</i> ) 干型 | 桉叶油醇、芳樟醇、 $\alpha$ -松油醇、桃金娘烯醇、香茅醇、 $\beta$ -香茅醇、苯乙醇、丁酸乙酯、乙酸异戊酯、苯甲酸甲酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、丁子香酚                                                                                                                                   | [25] |
| 品种不明半干型                              | 异戊醇、正庚醇、正壬醇*、苯乙醇、芳樟醇、乙酸乙酯、己酸乙酯、壬醛、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、十六酸乙酯、苯甲酸、D-柠檬烯、月桂烯*                                                                                                                                                | [24] |
| 兔眼蓝莓<br>( <i>V. ashei</i> ) 半干型      | 香叶醇、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、丁二酸二乙酯*、苯乙酸乙酯、己酸乙酯、辛酸甲酯、9-癸烯酸乙酯、乙酸己酯、癸酸乙酯、苯乙醇、 $\alpha$ -松油醇、芳樟醇、香茅醇、4-萜烯醇、紫罗兰醇、壬酸乙酯、辛酸乙酯、月桂酸乙酯、乙酸苯乙酯、 $\beta$ -大马士酮、3-萜烯、苯乙醛、4-乙炔基愈创木酚*、肉豆蔻酸乙酯*、正癸酸、辛酸、己酸、苯乙酸*、异戊醇、正己醇、苯甲醇*、4-乙基苯酚、D-柠檬烯*、1,3,8-对薄荷三烯 | [23] |

注: \*.  $0.1 \leq OA < 1$ 的挥发性物质;其余为 $OA \geq 1$ 的挥发性物质。

部分已报道的各类蓝莓酒关键呈香物质( $OA > 0.1$ )的分布情况如图2所示,其中酯类和萜烯类是蓝莓酒中占比最多且感知强度最突出的呈香物质,这与蓝莓酒酯类物质含量丰富、萜烯类物质阈值较低有重要关系。除了7种OA大于100的关键呈香物质外,松油醇(67.56)、丁子香酚(57.20)、桃金娘烯醇(32.7)、芳樟醇(32.3)、乙酸苯乙酯(23.39)、 $\beta$ -香茅醇(4.50)、正庚醇(4.0)、紫罗兰醇(3.92)和异戊醇(1.58)等赋予蓝莓酒花香;己酸乙酯(84.73)、丁酸乙酯(19.30)、

辛酸甲酯(18.40)、乙酸乙酯(11.95)等赋予蓝莓酒果香;桉叶油醇(14.50)、1,3,8-对薄荷三烯(4.00)、3-萜烯(2.92)、4-萜烯醇(1.64)和香芹醇(1.1)等使蓝莓酒呈现出清新的植物香气;十六酸乙酯(35.63)、棕榈酸乙酯(20.73)、苯乙酸乙酯(20.36)、月桂酸乙酯(13.32)、癸醛(10.04)和乙偶姻等呈现类似于蜡、油脂、蜂蜜和奶油的修饰性气味;适当的己酸(4.17)、辛酸(1.12)和癸酸(1.81)可增加蓝莓酒香气的复杂度,而不至于引起酸败味。另外, $0.1 \leq OA < 1$ 的香气物质主要有乙酸、丁二酸二乙酯、苯乙酸、4-乙炔基愈创木酚等,这类物质在浓度超过阈值时常表现出酸败、化学溶剂、动物皮革、马厩等负面气味,但在较低浓度时可起到修饰、提升香气复杂性的作用<sup>[35-36]</sup>。



图中所用数据来自文献中全部酒样统计结果,相同物质仅标识最高值,括号内为该物质的最高OA。

图2 蓝莓酒关键呈香物质OA散点图<sup>[12,23-25]</sup>

Fig. 2 OAV scatter plot of key aromatic substances in blueberry wine<sup>[12,23-25]</sup>

综上,蓝莓酒的关键呈香物质超过40种,呈现花香、果香、植物香和酒香等特征香气。目前尚缺乏关于蓝莓酒香气特征的整体描述,将以上关键呈香物质相对应的主要香气和已发表文献<sup>[12,17,23-25,35]</sup>对蓝莓酒香气的感官描述进行汇总、分类、分级,参考王震<sup>[37]</sup>和张海伟<sup>[38]</sup>等方法,初步绘制了蓝莓酒香气轮,如图3所示。香气类别定为一二级术语,香气描述词为二级术语,一级类别中相应的关键呈香物质在最外层显示。图3描述的蓝莓酒香气轮中果香、花香的种类相对较多,辅以植物香、酒香和少量的化学香气,形成了比较复杂的香气轮廓。但在葡萄酒中表现突出的香料及烘焙香在蓝莓酒中涉及的呈香物质较少,可能与被测蓝莓酒样多数未经橡木桶陈酿或橡木制品处理有关。需要指出的是,由于已有研究选用的蓝莓酒样品量和典型性有限,且均采用感官分析或HS-SPME-GC-MS结合OA的方法,缺少将感官和仪器分析相关联的气相色谱-嗅闻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)结合香气萃取物稀释分析(aroma extract dilution analysis, AEDA)的方法,以及缺少香气重组和缺失实验的有效验证,上述香气轮尚不能全面展现蓝莓酒香气特征,还需要进一步完善和丰富。

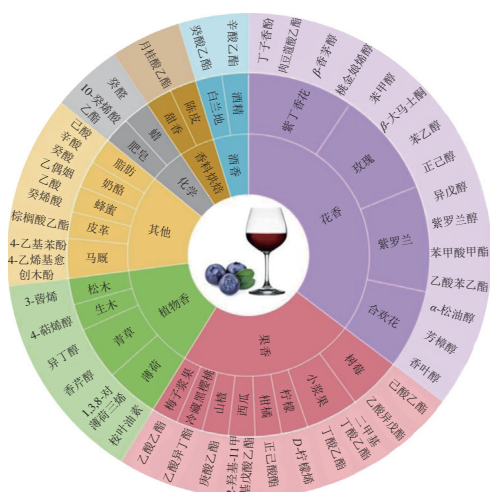


图3 蓝莓酒香气轮图

Fig. 3 Aroma wheel of blueberry wine

### 3 蓝莓酒香气的影响因素

根据TSCPTJGJ003-2022《四川省优质蓝莓酒生产技术规范》，蓝莓酒生产流程包括原料采购、食品添加剂选择、前处理、发酵、贮存陈酿、后处理等，每个环节都对蓝莓酒香气有不同程度的影响，以下从品种、酵母和工艺条件3个方面进行阐述分析。

#### 3.1 品种

果酒中的一类香气主要来源于果实本身，不同品种蓝莓香气化合物的组成和含量均有一定差异<sup>[39]</sup>，特别是广泛存在于蓝莓果实中的萜类物质<sup>[28]</sup>，品种间差异明显。南高丛蓝莓‘密斯蒂’（Misty）的萜烯类物质的种类和含量均高于‘奥尼尔’（O’Neal），相应的‘密斯蒂’蓝莓酒的萜烯类香气更为丰富<sup>[25]</sup>，但‘奥尼尔’的苯甲酸乙酯、苯乙醇、3-羟基苯乙醇含量较高，使得‘奥尼尔’酿制蓝莓酒具有更明显的玫瑰花香气特征<sup>[10]</sup>。兔眼蓝莓‘杰兔’（Premier）所酿蓝莓酒的香气成分检出种类（71种）和含量（2 485.45 μg/L）均较高<sup>[40]</sup>，橙花叔醇、二乙基正己醇、丁二酸二乙醇是其特征香气成分，赋予其苹果香、酒香和玫瑰香；而‘灿烂’（Britewell）蓝莓酿制蓝莓酒相对香气成分较少<sup>[40]</sup>，特征物质有9-癸烯酸乙酯、香茅醇和萜烯，表现出明显的植物香和薄荷香，但因辛酸含量较高口感过酸<sup>[14,41]</sup>，相对不适合酿造优质蓝莓酒。高丛蓝莓品种‘安娜’（Anna）、‘薄雾’（Misty）、‘蓝丰’（Bluecrop）和‘夏普兰’（Sharpblue）所酿蓝莓酒有别于兔眼蓝莓的特征物质是乙酸乙酯和桉油醇<sup>[14]</sup>。以上不同品种蓝莓酒香气的研究，为后续建立蓝莓酒品种辨别模型奠定了基础。同时，品种也是蓝莓酒风格化发展的基础，在考虑出汁率、固酸比、抗氧化性等指标<sup>[42]</sup>的基础上，评估其香气指标，对筛选酿酒适用性高的蓝莓品种具有重要意义。

#### 3.2 酵母菌

酵母菌是影响果酒香气物质的关键因素之一<sup>[43]</sup>，不同菌种对蓝莓酒风味特征有显著影响。如酿酒酵母1203<sup>[9]</sup>、AS2.316<sup>[16]</sup>所酿造蓝莓酒中3-甲基-1-丁醇含量较高；酿酒酵母Lalvin K1和DV10所酿造蓝莓酒酯类成分相对较高，使酒偏向酯香型；酿酒酵母Angel ADT发酵后乙偶姻含量较高，所酿蓝莓酒偏向醇香型<sup>[44]</sup>。对于香气不够丰富的蓝莓品种，通过酵母菌选择可实现蓝莓酒香气提升，例如酿酒酵母QD-1可增加人工种植品种所酿蓝莓酒香气种类<sup>[45]</sup>，非酿酒酵母*P. fermentans* JT-1-3可增加蓝莓酒中酸类、萜烯和酮类的种类，同时降低高级醇含量，平衡酯类香气<sup>[12]</sup>。酵母菌对蓝莓酒香气的影响和对整体品质的影响并不总是一致，如酿酒酵母F33酿造的蓝莓酒中酯类和醇类含量更高，尤其以异戊醇、苯乙醇、香茅醇和乙酸乙酯含量较高，使蓝莓酒偏向花香和清香，优于酿酒酵母Fermirouge，但经颜色、香气、口感综合评价，后者优势更明显<sup>[46]</sup>。因此可通过混菌发酵的方式提升香气及综合品质，例如异常威克汉姆酵母K-8与酿酒酵母ZM-5顺序接种发酵，使蓝莓酒有较为浓郁的果香和花香、酸甜平衡、风味物质更加丰富<sup>[47]</sup>。

#### 3.3 工艺条件

蓝莓酒生产中涉及预处理方式、浸渍方式、辅料添加、澄清方式、发酵温度、陈酿方法等具体的工艺条件，探索蓝莓酒最佳工艺条件一直是研究热点。

蓝莓果实不耐贮存且成熟期一致性较差，常预先冷冻再进行酿造。长白山野生蓝莓经冷冻浓缩和冷压榨后，香气物质含量明显提高，拥有更加丰富的香气层次<sup>[48]</sup>。反复冻融则可能降低蓝莓酒香气质量，但冻融次数增加可使（E）-2-己烯醛含量降低，从而减弱青草气味<sup>[49]</sup>，因此多次冻融处理也许可用于改善生青味较重的蓝莓酒。

浸渍方式对蓝莓酒香气物质成分及含量也有一定影响。热浸渍可增加蓝莓酒香气物质种类，但低温预浸渍发酵的蓝莓酒挥发性物质、醇类和酯类以及特征性香气物质的相对含量更高，风味品质更佳<sup>[4]</sup>。二氧化碳浸渍（15 d）法可提升蓝莓酒中酯类和萜烯类物质含量，使蓝莓酒呈现出清新优雅的风格特点<sup>[11]</sup>。

发酵前后或过程中添加适合的辅料也是增加果酒香气的方法。氮源对酵母代谢具有重要影响，同时也是果酒中某些芳香物质的前体，无机氮源被证实可使酒样中丁酸乙酯含量升高，配合合适的酵母（Red Fruit），对蓝莓酒的增香效果优于有机氮<sup>[17]</sup>。蓝莓中含量较高的萜类物质在果实中多以糖苷结合态的形式存在，β-D-葡萄糖苷酶制剂对蓝莓酒增香具有一定潜力，研究表明

AR2000葡萄糖苷酶制剂酶解处理可增加蓝莓酒中部分萜烯类物质以及丁子香酚含量,且增香效果明显<sup>[25]</sup>。常用于提升葡萄酒口感圆润度的酵母甘露聚糖也可提升蓝莓酒香气,促进乙酸乙酯、月桂酸乙酯、香茅醇、 $\alpha$ -松油醇、苯乙酸、 $\beta$ -大马士酮等物质的产生,使蓝莓酒的花香、果香和甜香味更加浓郁<sup>[27]</sup>。壳聚糖可用于改良蓝莓酒中挥发性酚类物质引起的不良风味<sup>[27]</sup>。澄清稳定处理可去除蓝莓酒中的不稳定因素,同时引起蓝莓酒香气物质种类明显减少,经过自然澄清、硅藻土过滤、下胶处理、冷冻处理、再次硅藻土过滤后,香气物质由38种减少至25种<sup>[50]</sup>。因此蓝莓酒生产过程中,合理地“加”辅料、适当地“减”澄清稳定处理步骤,是提高蓝莓酒香气和整体品质的重要手段。

温度是发酵过程最关键的工艺参数之一,通常观点认为低温发酵更适合蓝莓酒,有利于酯类物质富集,增加蓝莓酒花香、果香及香气复杂度<sup>[51]</sup>,可能与低温条件下酰基转移酶活力更强,有利于酯类物质积累有关<sup>[52]</sup>。但有研究表明蓝莓酒在25℃条件下醇类物质总量高于18℃,尤其苯乙醇含量明显升高,且辛酸含量降低<sup>[14]</sup>,因此,相对较高的温发酵度可能更适合品种香气特征不明显、口感偏酸的蓝莓原料。温度对果酒贮存期间的香气变化也有影响<sup>[53]</sup>,温度较低时酯化、氧化反应缓慢,温度过高则引起过度氧化<sup>[54]</sup>,18~22℃的贮存温度可能更适合蓝莓酒醇类果香的形成<sup>[13]</sup>。

虽然绝大多数水果酒都不耐贮存,但研究表明,适当陈酿可提升蓝莓酒香气质量。陈酿期间,蓝莓酒香气成分总含量呈升高趋势,其中酯类物质含量在3a陈酿期内呈先升高后稳定、醇类物质含量先降低后升高、萜烯类物质含量显著减少、醛酮类和芳香族类物质含量均有所增加、酸类物质含量基本保持稳定的特点<sup>[29]</sup>。为达到加快陈酿速度、短时间内提高香气质量的目的,蓝莓酒人工催陈研究相继展开,超声-微波复合催陈可增加蓝莓酒香气物质的总含量<sup>[55]</sup>;高功率脉冲微波处理能够促进酯化反应,加速蓝莓酒中乙酸乙酯、辛酸乙酯等酯类的生成<sup>[24]</sup>;磁场催陈可增加蓝莓酒中醇、醛、酮类和烷烃类含量,减少酸类含量,有利于蓝莓酒香气整体提升,但磁场催陈时间不可超过8周,否则可能引起蓝莓酒过度老化<sup>[51]</sup>。另外,果香型蓝莓酒需要尽量长时间地保持新鲜度,减少贮存过程产生氧化气味,葡萄糖氧化酶可作为生物去氧剂应用于蓝莓酒风味改良,保持蓝莓酒香气新鲜度,具有延长保存期的作用<sup>[30]</sup>。

近年来工艺条件对蓝莓酒香气化合物及感官特征的影响研究汇总如表2所示。

表2 不同工艺条件对蓝莓酒香气的影响  
Table 2 Effects of different process conditions on the aroma of blueberry wine

| 工艺条件 | 参数                                       | 香气成分变化                                    | 香气特征变化     | 参考文献 |
|------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------|
| 浸渍方式 | 带皮渣发酵→10℃预浸渍72 h                         | 醇类含量↓<br>苯乙醇、酯类种类、癸酸乙酯、乙酸乙酯、辛酸↑           | 香气浓郁度↑     | [4]  |
|      | 传统→二氧化碳浸渍                                | 苯乙醇↓<br>酯类和萜烯类含量↑                         | 香气清新优雅↑    | [11] |
|      | 有机氮→无机氮                                  | 丁酸乙酯↑、芸香酮出现                               | 果香↑        | [17] |
| 辅料   | 空白→AR2000葡萄糖苷酶25 mg/L、30℃、酶解4 h          | 葵酸乙酯、琥珀酸二乙酯↓<br>2-苄醇、 $\alpha$ -松油醇、丁子香酚↑ | 整体增香↑      | [25] |
|      | 空白→0.2 g/L壳聚糖                            | 4-乙基愈创木酚、4-乙基苯酚↓<br>己酸乙酯、辛酸↑              | 不良风味减↓     | [27] |
|      | 空白→0.2 g/L酵母甘露聚糖                         | 异戊醇↓<br>醇类、苯乙酸、萜烯类↑                       | 花香、果香和甜香味↑ | [27] |
| 发酵温度 | 18℃→25℃                                  | 辛酸↓<br>总含量、乙酸乙酯、异戊醇、苯乙醇↑                  | 果香↑        | [14] |
|      | 微波30 s (320 W)+温度50℃超声15 min (32 kHz) 2次 | 香气成分含量总体↑                                 | 复杂度↑       | [55] |
|      | 高功率脉冲微波50~150 Hz, 45~90 d                | 酯类↑                                       | 浓郁度↑       | [24] |
|      | 磁场催陈(磁感应强度为0.2 T), 24 h不间断, 处理4~8周       | 醇、醛、酮类、烷烃↑<br>酸↓                          | 整体感官评分↑    | [56] |
|      | 75 U/mL葡萄糖氧化酶+267 U/mL过氧化氢酶溶液贮藏6个月       | 苯乙醇、己酸乙酯、萜烯类↑                             | 保持相对新鲜     | [30] |

以上研究为提升蓝莓酒香气品质提供了品种选择、菌种选择和工艺条件方面的参考和指导,为未来明确主流酿酒蓝莓品种和蓝莓酒专用酵母菌种奠定了基础。目前尚缺乏原料控制层面的影响研究,还需进一步开展产地、栽培管理措施、采摘期成熟度等因素对蓝莓酒香气影响的研究,为蓝莓酒香气精准调控和酿酒蓝莓品种选择提供技术参考。

4 结 语

随着人们对饮食健康问题的日益重视,低酒精度、营养美味、风格多样化已成为果酒发展的新方向,蓝莓酒正是可以满足消费者新需求的优质果酒之一。蓝莓酒香气物质成分和特征及其影响因素的研究对蓝莓种植、生产加工和市场营销都具有重要意义。目前蓝莓酒香气研究已取得一定进展,但依然存在检测手段和分析方法不全面、样品不典型、调控措施有限等问题。在未来的研究中,应进一步采用GC×GC-TOFMS、GC-O等更高灵敏度和准确度的检测工具和多元统计分析方法,开展典型品种和商品蓝莓酒的香气研究,深入蓝莓酒香气精准调控方法和机理探索,为我国蓝莓酒产业高质量发展、蓝莓种植业升级转型、果酒市场繁荣提供参考和指导。

## 参考文献:

- [1] 王丹, 张静, 贾晓曼, 等. 蓝莓采后主要病原菌的分离鉴定及肉桂精油抑菌效果[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 167-172. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181029-338.
- [2] DUAN Y M, TARAFDAR A, CHAURASIA D, et al. Blueberry fruit valorization and valuable constituents: a review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 381: 109890. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109890.
- [3] YANG W J, GUO Y X, LIU M, et al. Structure and function of blueberry anthocyanins: a review of recent advances[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 88: 104864. DOI:10.1016/j.jff.2021.104864.
- [4] 国田, 夏晓雨, 张娜, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同发酵方式蓝莓酒的香气物质成分及特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(10): 150-159. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.10.018.
- [5] LIU F T, LI S J, GAO J H, et al. Changes of terpenoids and other volatiles during alcoholic fermentation of blueberry wines made from two southern highbush cultivars[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 233-240. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.100.
- [6] HIRVI T, HONKANEN E. The aroma of blueberries[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1983, 34(9): 992-996. DOI:10.1002/jsfa.2740340916.
- [7] HIDA Y, KUDO K, IKEDA N. Identification of an alcoholic beverage in which methamphetamine was dissolved[J]. Legal Medicine, 1999, 1(1): 44-47. DOI:10.1016/S1344-6223(99)80010-8.
- [8] HIDA Y, KUDO K, NISHIDA N, et al. Identification of reddish alcoholic beverages by GC/MS using aroma components as indicators[J]. Legal Medicine, 2001, 3(4): 237-240. DOI:10.1016/S1344-6223(01)00038-4.
- [9] 盖禹含, 辛秀兰, 杨国伟, 等. 不同酵母发酵的蓝莓酒香气成分GC-MS分析[J]. 食品科学, 2010, 31(4): 171-174.
- [10] YUAN F, CHENG K, GAO J H, et al. Characterization of cultivar differences of blueberry wines using GC-QTOF-MS and metabolic profiling methods[J]. Molecules, 2018, 23(9): 2376. DOI:10.3390/molecules23092376.
- [11] 董莹璐, 吴皓玥, 刘雪平, 等. 二氧化碳浸渍法对于蓝莓酒香气成分影响研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(9): 135-140. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2015.09.031.
- [12] ZHONG W, LIU S Q, YANG H, et al. Effect of selected yeast on physicochemical and oenological properties of blueberry wine fermented with citrate-degrading *Pichia fermentans*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111261. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111261.
- [13] 郭营营, 韩焱, 张彦聪, 等. 基于HS-SPME-GC-MS和PCA分析陈酿条件对蓝莓酒品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 271-277. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026730.
- [14] 张杰. 蓝莓酒挥发性成分分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016: 26-36.
- [15] JIANG X H, LU Y Y, LIU S Q. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109929. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109929.
- [16] 严红光, 张文华, 丁之恩. 不同酵母菌发酵对蓝莓果酒香气物质影响研究[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 94-97. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2013.05.049.
- [17] 魏铭, 赵莱昱, 杨航宇, 等. 不同酵母和氮源对笃斯越橘果酒香气的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 257-262. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810039.
- [18] PICO J, NOZADI K, GERBRANDT E M, et al. Determination of bound volatiles in blueberries, raspberries, and grapes with an optimized protocol and a validated SPME-GC/MS method[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134304. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134304.
- [19] 张杰, 赵洋溢, 林静, 等. 蓝莓果酒主发酵工艺参数优化及其品质分析[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 690-705. DOI:10.13836/j.jjau.2022069.
- [20] 田怀香, 熊娟娟, 于海燕, 等. 果酒中香气化合物的生物转化与调控机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 36-47. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220412-131.
- [21] WANG X C, CAPONE D L, ROLAND A, et al. Impact of accentuated cut edges, yeast strain, and malolactic fermentation on chemical and sensory profiles of Sauvignon blanc wine[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134051. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134051.
- [22] OUYANG X Y, YUAN G S, REN J, et al. Aromatic compounds and organoleptic features of fermented wolfberry wine: effects of maceration time[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(10): 2234-2248. DOI:10.1080/10942912.2016.1233435.
- [23] 刘乾坤. 浸渍酶及多糖对蓝莓酒缩合单宁特性和感官品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 72.
- [24] 刘思远. 高功率脉冲微波催陈对蓝莓酒色泽及风味的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 48.
- [25] 刘方恬, 李孙君, 成柯, 等. 酶促增香对2个品种蓝莓酒理化性质及香气物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 108-114. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.018936.
- [26] 严红光, 张文华, 丁之恩. 兔眼蓝莓果汁果酒香气成分GC-MS分析[J]. 酿酒科技, 2013(7): 101-104. DOI:10.13746/j.njki.2013.07.024.
- [27] 刘乾坤, 徐晓云, 李二虎. 壳聚糖和酵母甘露聚糖对蓝莓酒单宁特性及品质的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(6): 44-50. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.06.008.
- [28] PICO J, GERBRANDT E M, CASTELLARIN S D. Optimization and validation of a SPME-GC/MS method for the determination of volatile compounds, including enantiomeric analysis, in northern highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.)[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130812. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130812.
- [29] 李小惠, 陈燕, 韦广鑫, 等. 蓝莓果酒陈酿期间香气成分变化研究[J]. 酿酒科技, 2016(9): 65-70. DOI:10.13746/j.njki.2016180.
- [30] 兰蓉, 李双石, 辛秀兰. 葡萄糖氧化酶对蓝莓酒贮藏过程中香气成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(7): 110-114. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2015.07.030.
- [31] 曹雪丹, 李二虎, 方修贵, 等. 蓝莓酒主发酵前后挥发性成分变化的GC-MS分析[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(3): 179-184. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201503032.
- [32] 尤宏梅, 李凤琴, 俞志刚. 忠芝蓝莓酒香气成分的气相色谱-质谱分析[J]. 化学试剂, 2014(11): 1009-1013. DOI:10.13822/j.cnki.hxsj.2014.11.011.
- [33] CHENG Y, LI G, WU H, et al. Identification of light-induced key off-flavors in ponkan mandarin juice using MDGC-MS/O and GC-MS/PFPD[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(47): 14259-14269. DOI:10.1021/acs.jafc.1c05465.
- [34] 郭志君, 杨磊, 骆红霞, 等. 苹果酸-乳酸发酵对刺梨酒香气的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 197-204; 233. DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90035.
- [35] LIU Y R, QIAN X, XING J T, et al. Accurate determination of 12 lactones and 11 volatile phenols in nongrape wines through headspace-solid-phase microextraction (HS-SPME) combined with high-resolution gas chromatography-orbitrap mass spectrometry (GC-Orbitrap-MS)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(6): 1971-1983. DOI:10.1021/acs.jafc.1c06981.
- [36] ÖZDEMİR G B, ÖZDEMİR N, ERTEKİN-FİLİZ B, et al. Volatile aroma compounds and bioactive compounds of hawthorn vinegar

- produced from hawthorn fruit (*Crataegus tanacetifolia* (lam.) pers.)[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(3): e13676. DOI:10.1111/jfbc.13676.
- [37] 王震, 叶宏, 朱婷婷, 等. 清香型白酒风味成分的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 232-244. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210316-217.
- [38] 张海伟, 江飞鸿, 杨欧, 等. 中国酿造酱油风味轮构建及感官定量描述分析[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 258-265. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220623-261.
- [39] FORNEY C F, JORDAN M A, PENNELL K M, et al. Controlled atmosphere storage impacts fruit quality and flavor chemistry of five cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 194: 112073. DOI:10.1016/j.postharvbio.2022.112073.
- [40] 刘国华, 姚依林, 黄明泉, 等. 不同蓝莓品种发酵酒香气物质的检测分析研究[J]. 酿酒科技, 2022(8): 118-124; 130. DOI:10.13746/j.njkj.2022069.
- [41] 方雨洁. 贵州麻江地区蓝莓酒酿造工艺优化及品质分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2022: 70.
- [42] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 不同品种蓝莓品质特性及聚类分析[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 140-144. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201506026.
- [43] CARPENA M, FRAGA-CORRAL M, OTERO P, et al. Secondary aroma: influence of wine microorganisms in their aroma profile[J]. Foods, 2020, 10(1): 51. DOI:10.3390/foods10010051.
- [44] 严红光, 张建炀, 霍羽佳, 等. 基于GC-IMS技术分析不同酵母菌发酵蓝莓酒风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 235-241. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020060183.
- [45] 郭成宇, 安百慧. 不同品种蓝莓和菌种酿制蓝莓酒的香气成分分析[J]. 中国酿造, 2017, 36(4): 174-179. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2017.04.036.
- [46] 李影, 韩立杰, 刘子菱, 等. 不同种类酵母对蓝莓果酒品质的影响[J]. 食品科技, 2014, 39(4): 73-77. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.04.017.
- [47] 赵剑雷. 发酵蓝莓酒中不同酵母菌间相互作用机制初步研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022: 75.
- [48] 王天龙, 李晓红, 陈长武. 野生蓝莓冰酒发酵工艺及其香气成分的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(13): 3427-3433.
- [49] 林富斌. 基于组学分析方法研究冻融对蓝莓冻果特性和风味影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2021: 41.
- [50] 李亚辉, 周剑忠, 马艳弘, 等. 蓝莓酒澄清稳定处理中组分及抗氧化活性变化[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(6): 72-79. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2019.06.010.
- [51] 袁晓红, 姚卫蓉, 陈国烽. 低温预发酵对蓝莓果酒风味物质的影响[J]. 酿酒科技, 2018(12): 97-101. DOI:10.13746/j.njkj.2018121.
- [52] CHEN Y F, LI F, GUO J, et al. Enhanced ethyl caproate production of Chinese liquor yeast by overexpressing EHT1 with deleted FAA1[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2014, 41(3): 563-572. DOI:10.1007/s10295-013-1390-3.
- [53] PATI S, CRUPI P, SAVASTANO M L, et al. Evolution of phenolic and volatile compounds during bottle storage of a white wine without added sulfite[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 775-784. DOI:10.1002/jsfa.10084.
- [54] DE ESTEBAN M L G, UBEDA C, HEREDIA F J, et al. Impact of closure type and storage temperature on chemical and sensory composition of Malbec wines (Mendoza, Argentina) during aging in bottle[J]. Food Research International, 2019, 125: 108553. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108553.
- [55] 王芳. 蓝莓果酒酿造工艺及对其品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 11.
- [56] GUO D X, LI J F, YUE G X, et al. Effects of magnetization with neodymium magnets treatment on blueberry wine ageing[J]. Food Bioscience, 2022, 51(2): 102332. DOI:10.1016/j.fbio.2022.102332.