

不同市售蓝莓酒的营养成分分析

曾稳稳¹, 李霄², 丁昱文¹, 吴颜欣¹, 余强^{2*}

(1. 贵州茅台(集团)生态农业产业发展有限公司, 贵州丹寨 557500) (2. 南昌大学食品学院, 江西南昌 330047)

摘要: 为探究市售蓝莓酒中的基本营养成分, 该研究分离提取了 10 款市售蓝莓酒的多糖组分, 测定了其含量和单糖组成, 并进一步使用高效液相色谱分析了有机酸、维生素的含量以及使用化学法测定了总酚、总黄酮、总花色苷等营养成分含量。结果表明, 大部分市售蓝莓酒的多糖具有多个组分, 其中甘露糖、阿拉伯糖及半乳糖为蓝莓酒中多糖的主要单糖, 与蓝莓多糖的组成相似。10 款市售蓝莓酒中含有奎宁酸 (271.73~10 693.36 $\mu\text{g/mL}$)、乳酸 (67.65~1 766.40 $\mu\text{g/mL}$) 及苹果酸 (151.53~6 006.40 $\mu\text{g/mL}$) 等含量较高的有机酸, 以及在蓝莓酒中检出维生素 B₁、维生素 B₂ 和维生素 B₆ 等高含量的维生素, 含量分别在 0.08~2.89、0~4.35、0~4.95 mg/100 mL 范围内。此外, 10 款蓝莓酒中总酚、总黄酮、总花色苷含量分别在 0.18~1.65、0.29~3.48、3.47~117.27 mg/L 范围内。通过比较多种成分及其含量, 发现 4 号蓝莓酒不仅含有更多种类和更好含量的维生素, 而且其酚类物质的含量也显著高于其他蓝莓酒, 因此品质最佳。该研究初步揭示了蓝莓酒的营养成分, 为其更深层次的生物活性探究奠定基础。

关键词: 蓝莓酒; 营养成分; 多糖; 有机酸; 维生素

文章编号: 1673-9078(2025)11-37-46

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1159

Analysis of Nutritional Constituents of Different Commercially

Available Blueberry Wines

ZENG Wenwen¹, LI Xiao², DING Yuwen¹, WU Yanxin¹, YU Qiang^{2*}

(1. Guizhou Moutai (Group) Ecological Agriculture Industry Development Co. Ltd., Danzhai 557500, China)

(2. College of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: To explore the basic nutrients in commercially available blueberry wine, polysaccharide components from 10 commercially available blueberry wines were isolated and extracted, and their content and monosaccharide composition were determined. Meanwhile, the organic acid and vitamin contents were analyzed through high performance liquid chromatography. The contents of nutrients, such as total phenols, total flavonoids, and total anthocyanins, were determined through chemical methods. The findings indicated that the polysaccharides in the most commercially available blueberry wines had multiple components, with mannose, arabinose, and galactose being the main monosaccharides, similar to the composition of blueberry polysaccharides. All commercial blueberry wine samples had high levels of organic acids, such as quinic acid (271.73~10 693.36 $\mu\text{g/mL}$), lactate acid (67.65~1 766.40 $\mu\text{g/mL}$), and malic acid (151.53~6 006.40 $\mu\text{g/mL}$). In addition, the blueberry wines had high vitamin B₁, B₂, and B₆ contents (0.08~2.89, 0~4.35, and 0~4.95 mg/100 mL, respectively). Additionally, the total phenol, flavonoid, and anthocyanin contents of the 10 blueberry wines were 0.18~1.65, 0.29~3.48, and 3.47~117.27 mg/L, respectively. Comparing various ingredients

引文格式:

曾稳稳, 李霄, 丁昱文, 等. 不同市售蓝莓酒的营养成分分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 37-46.

ZENG Wenwen, LI Xiao, DING Yuwen, et al. Analysis of nutritional constituents of different commercially available blueberry wines [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 37-46.

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2024-10-06; 接受日期: 2024-10-10

基金项目: 江西省重点研发计划项目 (20232BBF60026)

作者简介: 曾稳稳 (1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 果酒酿造, E-mail: ndjiabm@126.com

通讯作者: 余强 (1986-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品功能组分的活性及机制、功能食品研究与开发, E-mail: yuqiang8612@163.com

and their contents suggested that No.4 blueberry wine contained a greater variety and higher amount of vitamins and had a significantly higher content of phenolic substances than the other blueberry wines, indicating the best quality. Overall, the nutritional composition of blueberry wine was preliminarily revealed, laying a foundation for further investigation of its biological activity.

Key words: blueberry wine; nutrient composition; polysaccharides; organic acid; vitamin

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 属于杜鹃花科, 是一种浆果植物。近年来我国蓝莓产业发展迅猛, 截止 2021 年, 我国蓝莓栽培面积为 6.90 万 hm^2 , 占全球总面积 29.31%^[1]。蓝莓果实营养成分丰富, 有研究表明蓝莓鲜果中的蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素等含量均高于其他水果^[2], 因此蓝莓果实被誉为“浆果之王”。但新鲜蓝莓容易腐烂, 收获期短, 不宜储藏, 因此多种蓝莓副产品应运而生, 如蓝莓酒、蓝莓果干、蓝莓饮品等。由于蓝莓果实中的碳水化合物含量高, 且营养成分丰富, 糖与有机酸的比例适中, 因此蓝莓适合加工成果酒, 为蓝莓的储藏与加工提供了一种保存其营养价值和提升其价值的方法。

目前, 对于多糖组分的研究多集中在原料本身, 如对蓝莓^[3]、葡萄^[4]、苹果^[5]等果实中提取的多糖进行研究, 此外部分研究发现多糖对果酒浑浊的影响较大, 大分子的多糖可能是引起果酒浑浊的原因^[6], 但是对经发酵后的果酒中多糖结构及活性的相关研究较少。多糖是果酒基质的一类复杂大分子, 类如在葡萄酒中提取多糖的研究^[7], 蓝莓酒中的多糖可能主要来源于蓝莓果实及酵母的胞内多糖, 工艺的差异、果实的生长、环境差异等都会影响果酒的多糖谱, 同时基于多糖的广泛生物活性, 探究酿造后蓝莓酒中的多糖组分具有一定的创新性和必要性。果酒中有机酸主要包括草酸、酒石酸、甲酸、苹果酸、醋酸、柠檬酸、富马酸、琥珀酸和乳酸等, 它们主要来源于果实本身以及酿造过程中由酵母及微生物代谢所产生的有机酸, 除抗坏血酸具有抗氧化的作用外, 有机酸所提供的酸性环境也能够抑制发酵中某些腐败菌, 如酒石酸在果酒发酵早期可以抑制一些腐败菌的生长^[8]。维生素在果实中广泛存在, 也是酿造过程中酿酒微生物所必需的化合物, 缺乏维生素会影响微生物的生长。研究发现蓝莓酒中含有大量的水溶性维生素, 其中 B 族维生素尤其丰富, 通常在蓝莓酒中可检出 B_1 、 B_2 、 B_6 等 B 族维生素^[9]。酚类物质主要包括酚酸、黄酮、花色苷等物质, 蓝莓中含有大量酚类物质, 其中花色苷类物质最丰富。同时酚类物质具有抗氧化等生物活性, Yang 等^[10]比较了葡萄酒与蓝莓酒的营养成分与抗氧化能力, 发现蓝莓酒具有更加优良的抗氧化活性, 说明蓝莓酒

中的酚类物质可能比其他果酒更加丰富。

综上所述, 本研究首次提取蓝莓酒中的多糖, 初步探究蓝莓酒中多糖的组成, 并进一步运用高效液相色谱测定有机酸和维生素含量, 利用化学法测定蓝莓酒中的总酚、总黄酮、总花色苷含量, 从多个方面共同探究市售蓝莓酒的基本营养物质组成, 为蓝莓酒的进一步研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓酒样品为 10 款市场在售蓝莓酒。试剂: 硫酸、氢氧化钠、苯酚、亚硝酸钠、硝酸铝、正丁醇 (均为分析纯), 西陇科学股份有限公司; 三氯甲烷 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 福林酚、DNS 试剂 (均为分析纯), 北京索莱宝科技有限公司; 草酸、酒石酸、奎宁酸、甲酸、苹果酸、莽草酸、乳酸、冰乙酸、柠檬酸、琥珀酸、芦丁、维生素 B_1 、维生素 B_2 、维生素 B_3 、维生素 B_6 、维生素 B_{12} 、烟酰胺、维生素 C (均为色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司; 甲酸、磷酸 (均为色谱纯), 上海安谱科技有限公司; 甲酸铵 (色谱纯), 上海麦克林生化科技股份有限公司; 乙腈、甲醇 (均为色谱纯), Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

TU-1810DAPC 紫外分光光度计, 北京普析仪器公司; Agilent 1290 高效液相色谱仪, 美国安捷伦科技公司; Dionex ICS 6000 离子色谱仪, 美国赛默飞世尔公司; Waters e2695 高效凝胶渗透色谱, 美国 Waters 公司; EXL800 全自动酶标仪, 美国 Biotek Instruments 有限公司; TGL 216G 高速台式离心机, 上海安亭科学仪器厂; RV10 digital 旋转蒸发仪, 上海沛升仪器设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 蓝莓酒中糖类成分测定

使用苯酚-硫酸法测定蓝莓酒中的总糖含量。以葡萄糖为标准品, 在 490 nm 波长处测定吸光度。蓝莓酒样品经过稀释处理后进行检测。

使用 DNS 法测定蓝莓酒中的还原糖含量。以葡萄糖为标准品，在 540 nm 的波长处测定吸光度。蓝莓酒样品经过稀释处理后进行检测。

1.3.2 蓝莓酒中多糖的提取和结构表征

1.3.2.1 多糖的提取

参考本团队建立的多糖提取方法^[11]，使用水提醇沉法提取蓝莓酒中的多糖。首先取 400 mL 蓝莓酒，45 ℃下旋转蒸发至 50 mL 左右，使用容量瓶定容至 100 mL，得到 4 倍浓缩蓝莓酒。随后加入 4 倍体积无水乙醇，4 ℃冰箱中放置 12 h。4 800 r/min 离心 10 min 后倒出上清，取出下层多糖部分，加入 φ =80% 乙醇震荡，4 800 r/min 离心 5 min 倒出上清，重复三次，随后加水复溶，加入 1/4 体积 Sevage 试剂（三氯甲烷：正丁醇=4:1），震荡并离心，吸取上层多糖，重复三次，除去多糖中蛋白质，随后将脱蛋白质的多糖溶液 60 ℃下旋转蒸发除去液体中残余的 Sevage 试剂，然后装入截留量 3 500 Da 的透析袋，蒸馏水透析 48 h，超纯水透析 24 h 后，将透析液冷冻干燥，得到蓝莓酒多糖。

1.3.2.2 多糖的分子量测定

参考赵佳莹等^[12]的方法使用高效凝胶渗透色谱（HPGPC）测定蓝莓酒中多糖分子量。称取 1 mg 各样品，使用 1 mL 流动相（0.1 mol/L NaNO₃）溶解，配制成 1 mg/mL 的样品溶液，过 0.22 μm 的水系滤膜后上样待测。

色谱系统为 Waters e2695 高效液相色谱，色谱柱为 Ultrahydrogel™ Linear Column（7.8 mm×300 mm），检测器为紫外分光光度检测器（UV）及示差折光检测器（RID），检测波长为 280 nm，进样量为 20 μL，流动相为 0.1 mol/L NaNO₃，流速为 0.6 mL/min，单个样品采集时间为 30 min，柱温为 35 ℃。使用分子量为 180 u 的葡萄糖及 10 000、40 000、70 000、500 000 u 的葡聚糖标准品绘制标准曲线。

1.3.2.3 蓝莓酒中多糖的单糖组成测定

使用高效阴离子交换色谱结合脉冲安培检测蓝莓酒中多糖的单糖组成。参考本团队建立^[13]的方法，在具塞试管中精确称取 5 mg 多糖，在试管中加入 0.5 mL 12 mol/L H₂SO₄，磁力搅拌 30 min，随后加入 2.5 mL 超纯水，105 ℃油浴条件下，磁力搅拌 3 h，使多糖水解，结束后冷却至常温，定容至 50 mL 容量瓶中，稀释至合适倍数，过 0.22 μm 的水系滤膜后上样待测。

色谱系统为 Dionex ICS-6000 离子交换色谱，色谱柱为 CarboPac™ PA20（3 mm×150 mm），检测器为脉冲安培检测器，进样量为 10 μL，流动相为 A：250 mmol/L NaOH，B：H₂O，C：1 mol/L NaOAc，三

元梯度洗脱，流量为 0.5 mL/min，单个样品采集时间为 60 min，柱温为 30 ℃，检测器温度为 35 ℃，使用岩藻糖（Fucose）、鼠李糖（Rhamnose）、阿拉伯糖（Arabinose）、半乳糖（Galactose）、葡萄糖（Glucose）、木糖（Xylose）、甘露糖（Mannose）、果糖（Fructose）、半乳糖醛酸（Galacturonic Acid）和葡萄糖醛酸（Glucuronic Acid）作为标准品。

1.3.3 蓝莓酒中有机酸分析

使用超高效液相色谱（UHPLC）测定蓝莓酒中的有机酸。将蓝莓酒 12 000 r/min 离心 10 min，并稀释至合适倍数，过 0.22 μm 的有机系滤膜后上样待测。

色谱系统为 Agilent 1290 UHPLC 高效液相色谱仪，色谱柱为 Athena C18-WP（4.6 mm×250 mm，5 μm），检测器为紫外分光光度检测器（UV），检测波长为 210 nm，进样量为 20 μL，流动相为 0.12% 磷酸水-2% 甲醇溶液，等度洗脱，流量为 0.8 mL/min，单个样品采集时间为 20 min，柱温为 35 ℃，检测器温度为 35 ℃。标准品浓度及其标准曲线如表 1。

表 1 有机酸标准曲线

Table 1 Standard curve of organic acids			
名称	标曲范围/(mg/mL)	标准曲线	R ²
草酸	0.009~0.09	y=25 452x-42.044	0.998 9
酒石酸	0.1~1	y=931.51x-3.957 2	1
奎宁酸	0.3~3	y=2 113.9x+9.676	0.999 9
甲酸	0.04~0.4	y=1 813.2x-12.792	0.999 1
苹果酸	0.099~0.99	y=1 130.9x-8.568	0.999 7
莽草酸	0.011~0.11	y=72 974x-39.623	0.999 7
乳酸	0.065~0.65	y=1 080.3x-4.917 2	0.999 8
冰乙酸	0.05~0.5	y=850.83x-3.999 7	0.999 8
柠檬酸	0.01~0.1	y=15 028x-12.278	0.999 8
琥珀酸	0.052~0.52	y=808.72x-3.512 8	0.999 7

1.3.4 蓝莓酒中维生素分析

使用超高效液相色谱（UHPLC）测定蓝莓酒中的维生素。将蓝莓酒离心后（12 000 r/min，10 min）过 0.22 μm 的有机系滤膜后上样待测。

色谱系统为 Agilent 1290 UHPLC 高效液相色谱仪，色谱柱为 Titank Hilic（4.6 mm×150 mm，3 μm），检测器为紫外分光光度检测器（UV），检测波长为 254 nm，进样量为 2 μL，流动相为 A：90% 乙腈水-10 mmol/L 甲酸-甲酸铵（pH 值 3.6），B：50% 乙腈水-10 mmol/L 甲酸-甲酸铵（pH 值 3.6），梯度洗脱见表 2，柱温为 20 ℃。标准品浓度及其标准曲线如表 3。

表 2 液相色谱测定维生素含量的洗脱梯度			
Table 2 Elution gradients for the determination of vitamin content by liquid chromatography			
时间/min	流动相	比例/%	流量/(mL/min)
0	A	100	1
5	A	85	1
8	A	85	1
16	A	50	1
21	A	100	1
23.5	A	100	1

表 3 维生素标品的标准曲线			
Table 3 Vitamin standard curve			
名称	标曲范围/(μg/mL)	标准曲线	R ²
维生素 B ₁	3~30	y=5.815 1x+0.616 4	0.999 3
维生素 B ₂	3~30	y=5.515 4x+3.385 4	0.998 3
维生素 B ₃	3~30	y=6.799 1x-1.294 8	0.999 7
维生素 B ₆	3~30	y=1.028 1x-0.369 3	0.999 2
维生素 B ₁₂	5~50	y=0.556 2x+0.447 7	0.998 4
烟酰胺	3~30	y=6.132 6x+1.344 7	0.998 7
维生素 C	3~30	y=7.3x-84.4	0.999 4

1.3.5 蓝莓酒总酚含量测定

使用福林酚法测定蓝莓酒中总酚含量。加入 1 mL 稀释后的待测蓝莓酒与 1 mL 福林酚试剂，混匀后静置 5 min，随后加入 4 mL 7.5 wt.% Na₂CO₃，避光反应 20 min。在紫外分光光度计 765 nm 处测定光度值。以没食子酸为标准品绘制标准曲线，蓝莓酒总酚含量以没食子酸当量表示。

1.3.6 蓝莓酒总黄酮含量测定

利用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠法测定蓝莓酒中总黄酮含量。加入 2 mL 稀释后的待测蓝莓酒、5 mL φ=50% 乙醇和 1 mL 5 wt.% NaNO₂，避光反应 6 min，随后加入 1 mL 10 wt.% Al(NO₃)₃，避光反应 6 min，后加入 2 mL 4 wt.% NaOH，摇匀，反应 15 min。在紫外分光光度计 500 nm 处测定光度值。以芦丁为标准品绘制标准曲线，蓝莓酒总黄酮含量以芦丁当量表示。

1.3.7 蓝莓酒花色苷含量测定

使用 pH 示差法测定蓝莓酒中的花色苷含量。取 1 mL 蓝莓酒样品，分别加入 9 mL pH 值为 1.0 和 4.5 的缓冲溶液。40 ℃水浴 20 min，待体系稳定后，在紫外分光光度计 520 nm 及 700 nm 处测定光度值。花色

苷含量由公式（1）计算。

$$\chi=\frac{A\times V_F\times M_W\times 1000}{\varepsilon}$$

(1)

式中：

χ——花色苷含量，mg/L；
A——（A_{520 nm}~A_{700 nm}）_{pH 1.0}-（A_{520 nm}~A_{700 nm}）_{pH 4.5}；
V_F——样品稀释倍数；
M_W——矢车菊素-3-葡萄糖苷分子量（449.2 mg/mol）；
ε——矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数 26 900。

1.4 数据处理

实验重复三次，所得数据以平均值 ± 标准方差表示。使用 Origin 2022 绘制相关图表。使用 SPSS 13.0 执行单因素方差分析，P<0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 蓝莓酒中多糖成分分析

由表 4 可知，10 款蓝莓酒中总糖含量范围为 7.92~172.31 mg/mL，还原糖含量范围为 2.82~140.36 mg/mL，各样品间的差距可能是由于蓝莓原料及市售酒生产工艺的不同。各样品中的总糖含量高于还原糖含量，说明蓝莓酒中含有一定量的多糖。市售蓝莓酒发酵时大多都额外添加糖类物质如蔗糖，以确保在发酵过程中酵母有足够的碳水化合物，产生酒精与二氧化碳，因此蓝莓中的多糖可能会被有所保留，保留了蓝莓酒中的多糖生物活性。

表 4 10款蓝莓酒中总糖与还原糖含量（mg/mL）		
Table 4 Content of total sugar and reducing sugar in ten blueberry wines (mg/mL)		
样品序号	总糖含量	还原糖含量
1	26.94 ± 0.61 ^a	13.92 ± 0.51 ^b
2	55.74 ± 4.24 ^{ab}	34.37 ± 0.79 ^c
3	172.31 ± 16.71 ^d	140.36 ± 1.68 ^h
4	7.92 ± 2.47 ^a	4.17 ± 0.10 ^a
5	7.92 ± 1.92 ^a	2.82 ± 0.12 ^a
6	118.66 ± 19.58 ^c	75.02 ± 2.14 ^d
7	135.25 ± 10.43 ^{cd}	80.13 ± 2.69 ^c
8	128.56 ± 3.74 ^c	86.36 ± 1.39 ^f
9	152.38 ± 30.62 ^{cd}	136.58 ± 1.33 ^h
10	152.94 ± 14.57 ^{cd}	106.58 ± 2.67 ^g

注：不同字母表示样品间具有显著性差异（P<0.05）。

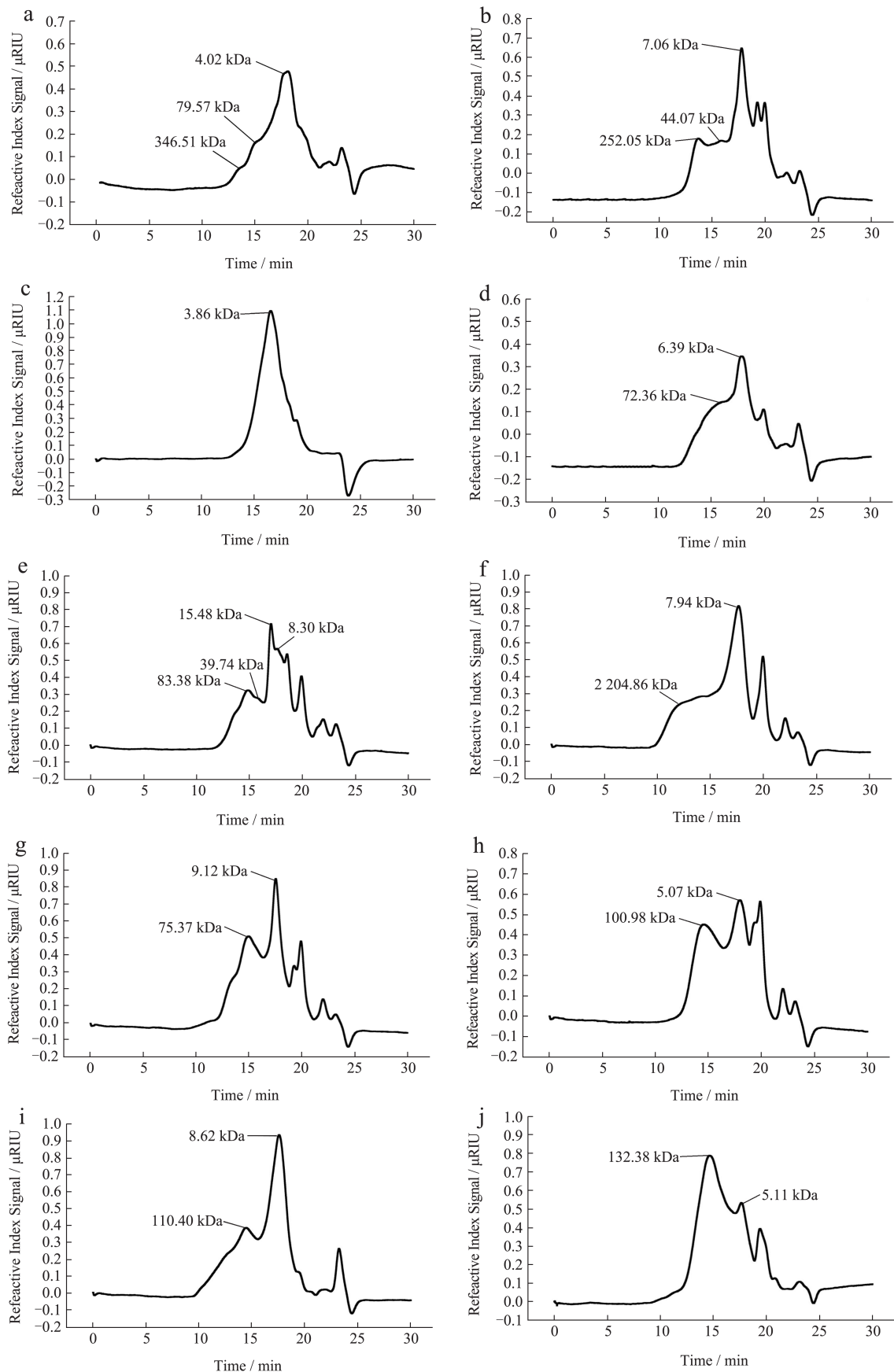


图 1 10 款蓝莓酒中多糖分子量分布图

Fig.1 Molecular weight distribution of polysaccharides in ten blueberry wines

注：a~j 分别为 1~10 号蓝莓酒。

表 5 10款蓝莓酒多糖的单糖种类以及含量（%）

Table 5 Types and contents of polysaccharide monosaccharides in ten blueberry wines (%)									
序号	岩藻糖	鼠李糖	阿拉伯糖	半乳糖	葡萄糖	木糖	甘露糖	半乳糖醛酸	葡萄糖醛酸
1	ND	13.45	33.14	19.68	9.41	ND	13.36	10.97	ND
2	0.91	26.04	9.45	12.02	12.12	ND	37.43	2.02	ND
3	ND	7.49	13.17	16.04	16.25	ND	30.15	11.78	ND
4	ND	10.63	23.50	19.68	19.44	ND	26.74	ND	ND
5	8.96	12.27	17.73	14.61	29.96	ND	16.46	ND	ND
6	2.32	1.01	11.32	57.64	6.13	ND	19.63	1.96	ND
7	0.59	16.01	17.23	17.72	16.57	ND	18.42	12.19	1.28
8	ND	1.87	10.71	11.33	27.13	ND	48.01	0.96	ND
9	ND	19.03	22.56	18.70	12.94	ND	22.63	4.15	ND
10	ND	2.46	8.30	18.50	16.00	ND	52.48	2.27	ND

注：ND 为未检出。含量是指同一样品中不同单糖的相对摩尔百分比。

由图 1 发现，10 款市售蓝莓酒多糖的分子量范围为 3 860~3 465 100 u, 3 号蓝莓酒多糖有一个组分, 4、6、7、8、9、10 号蓝莓酒多糖有两个组分, 1、2 号蓝莓酒多糖有三个组分, 5 号蓝莓酒多糖有四个组分。结果表明 10 种市售蓝莓酒提取出的粗多糖大都含有 2 个及以上的峰, 推测其多糖可能是由多个组分组成, 这与秦雨齐等^[14]所报道的蓝莓中多糖存在四个组分的结果相似。在蓝莓酒中提取的多糖中, 分子量小的组分占主要部分, 据 Chen 等^[15]报道笋渣多糖中分子量较少的组分表现出了更好的生物活性, 低分子量的多糖生物活性更好, 推测蓝莓酒中的多糖可能具有一定的生物活性。由表 5 单糖组成的结果可以看出, 在中性糖中, 蓝莓酒中的多糖主要由甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖及鼠李糖所组成, 仅有少部分多糖中检测出了岩藻糖。同时各样品甘露糖的含量占比均较高, 8 号蓝莓酒多糖中的甘露糖最多, 摩尔百分比为 48.01%, 这主要源于 β -葡聚糖酶对酵母细胞壁分解释放以共价键形式与细胞壁葡聚糖相连接的甘露糖蛋白^[16]。在酸性糖中, 4 号与 5 号未检出半乳糖醛酸, 其余样品都检测出了半乳糖醛酸, 其中 7 号蓝莓酒多糖中的半乳糖醛酸最多, 摩尔百分比为 12.19%, 仅有 7 号检测出了葡萄糖醛酸, 说明蓝莓酒多糖中的酸性糖主要是半乳糖醛酸。与报道中蓝莓多糖的单糖组成相似^[17]。相关研究^[18]表明糖醛酸含量较高的多糖, 具有更好的抗氧化活性, 因此蓝莓酒多糖的生物活性可进一步的探索。

2.2 蓝莓酒有机酸测定

有机酸是提供蓝莓酒风味的重要物质之一, 对蓝莓酒发酵后的色泽稳定性有影响。同时有机酸可以作为酸化剂或稳定剂添加^[19], 在维持食品的质量和营养价值方面起着主要作用。通过高效液相色谱共检测 10 种有机酸, 色谱图见图 2, 10 款市售蓝莓酒中普遍存在且含量较高的有机酸为奎宁酸、苹果酸、乳酸及柠

檬酸。如表 6 所示, 奎宁酸在蓝莓酒有机酸中占大部分, 奎宁酸含量的范围为 271.73~10 693.36 $\mu\text{g/mL}$ 。奎宁酸在蓝莓酒整体风味中主要提供酸味, 是在蓝莓酒发酵中的莽草酸途径的次级代谢产物。在 Zhang 等^[20]的研究中, 蓝莓汁中的奎宁酸在经发酵后会有明显的降低, 降低的程度由不同酵母品类所决定。苹果酸含量的范围为 151.53~6 006.40 $\mu\text{g/mL}$ 。苹果酸味道酸涩, 略带苦味和涩味, 经苹果酸酶转化为丙酮酸随后进入三羧酸循环, 也可以经过苹果酸乳酸途径产生乳酸^[20], 乳酸的含量在 67.65~1 766.40 $\mu\text{g/mL}$ 范围内。乳酸酸味较少且相对稳定, 能够增加蓝莓酒的风味, 主要是经苹果酸-乳酸发酵及酒石酸转化而升高^[21], 同时也会因为菌体酒精发酵被分解^[22]。柠檬酸含量的范围为 64.60~246.20 $\mu\text{g/mL}$ 。柠檬酸是果酒风味的重要组成部分, 具有温和清爽的酸味, 使果酒具有宜人的酸度与风味, 来源于蓝莓果实自身, 是三羧酸循环的重要中间体, 因此柠檬酸是由于好氧微生物通过三羧酸循环而产生, 随后在苹果酸-乳酸循环中生成口感柔和的挥发性酸^[23], Nagai 等^[24]研究发现柠檬酸可以改善酮症防止糖尿病。

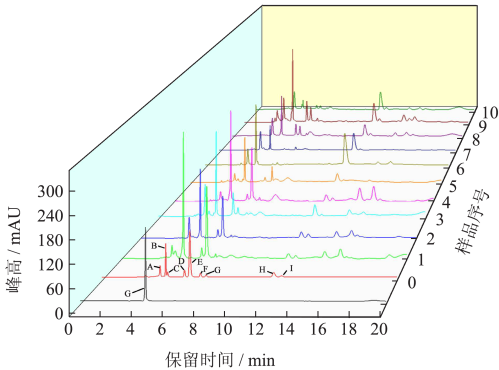


图 2 10 款蓝莓酒有机酸色谱图

Fig.2 Organic acid chromatogram of ten blueberry wines

注：A：草酸，B：奎宁酸，C：甲酸，D：苹果酸，E：莽草酸，F：乳酸，G：冰乙酸，H：柠檬酸，I：琥珀酸，G：酒石酸。

表 6 10款蓝莓酒各有机酸含量 (μg/mL)

Table 6 Content of organic acids in ten blueberry wines (μg/mL)

样品序号	草酸	酒石酸	奎宁酸	甲酸	苹果酸
1	54.87 ± 2.97 ^f	ND ^a	10 693.36 ± 165.04 ^g	ND ^a	886.87 ± 60.07 ^{bc}
2	16.77 ± 0.56 ^c	ND ^a	5 548.84 ± 123.58 ^c	108.25 ± 2.27 ^b	791.93 ± 56.16 ^{abc}
3	25.65 ± 2.13 ^c	217.73 ± 26.60 ^c	6 262.97 ± 586.47 ^f	ND ^a	1 840.02 ± 200.88 ^d
4	8.75 ± 0.22 ^b	ND ^a	5 387.83 ± 361.75 ^c	ND ^a	6 006.40 ± 708.29 ^e
5	21.59 ± 3.43 ^{cd}	ND ^a	4 042.19 ± 228.57 ^c	ND ^a	790.68 ± 118.30 ^{abc}
6	171.62 ± 2.36 ^g	ND ^a	271.73 ± 13.02 ^a	ND ^a	151.53 ± 9.91 ^a
7	19.11 ± 0.36 ^c	141.53 ± 27.94 ^b	1 921.48 ± 48.23 ^b	ND ^a	184.82 ± 56.37 ^a
8	ND ^a	ND ^a	3 766.48 ± 86.46 ^c	ND ^a	1 133.63 ± 74.68 ^c
9	27.88 ± 2.08 ^e	696.33 ± 10.37 ^d	6 954.08 ± 107.88 ^f	ND ^a	1 869.91 ± 76.33 ^d
10	ND ^a	384.40 ± 48.78 ^e	612.75 ± 18.93 ^a	ND ^a	354.82 ± 3.02 ^{ab}

样品序号	莽草酸	乳酸	冰乙酸	柠檬酸	琥珀酸
1	93.54 ± 1.08 ^g	291.96 ± 14.91 ^{cd}	ND ^a	64.60 ± 1.52 ^a	610.29 ± 29.43 ^{dc}
2	59.48 ± 1.51 ^c	244.37 ± 6.29 ^{bc}	ND ^a	75.78 ± 2.12 ^a	829.95 ± 22.19 ^{gh}
3	16.59 ± 2.32 ^c	140.53 ± 56.98 ^{ab}	495.69 ± 88.31 ^b	144.23 ± 17.05 ^{bc}	302.88 ± 58.15 ^c
4	70.92 ± 1.35 ^f	595.17 ± 72.37 ^e	ND ^a	432.19 ± 22.56 ^f	697.39 ± 9.15 ^{ef}
5	5.87 ± 0.14 ^{ab}	1 766.40 ± 25.23 ^g	ND ^a	132.52 ± 23.57 ^b	183.68 ± 17.14 ^b
6	6.82 ± 0.26 ^{ab}	67.65 ± 6.49 ^a	ND ^a	492.49 ± 3.77 ^g	ND ^a
7	3.91 ± 0.32 ^a	254.15 ± 15.08 ^c	ND ^a	246.20 ± 8.81 ^d	281.31 ± 26.56 ^{bc}
8	17.56 ± 0.67 ^c	800.87 ± 45.34 ^f	ND ^a	180.05 ± 7.78 ^c	801.62 ± 95.32 ^{fg}
9	24.62 ± 1.96 ^d	385.35 ± 34.71 ^d	ND ^a	312.80 ± 10.01 ^e	928.95 ± 35.59 ^h
10	7.99 ± 0.43 ^b	117.40 ± 37.01 ^a	745.48 ± 16.81 ^c	285.07 ± 5.10 ^e	580.77 ± 8.82 ^d

注: ND 为未检出, 不同字母样品间具有显著性差异 ($P<0.05$)。下同。

表 7 10款蓝莓酒各维生素含量 (mg/100 mL)

Table 7 Vitamin content of ten blueberry wines (mg/100 mL)

样品序号	维生素 B ₁	维生素 B ₂	维生素 B ₃	维生素 B ₆	维生素 C	烟酰胺
1	2.89 ± 0.16 ^f	3.44 ± 0.12 ^f	ND ^a	4.03 ± 0.17 ^f	ND ^a	0.63 ± 0.01 ^c
2	1.32 ± 0.05 ^d	4.35 ± 0.08 ^g	ND ^a	4.95 ± 0.07 ^h	ND ^a	0.94 ± 0.01 ^d
3	1.01 ± 0.13 ^c	0.67 ± 0.06 ^c	ND ^a	1.99 ± 0.01 ^c	ND ^a	0.24 ± 0.01 ^b
4	1.31 ± 0.01 ^d	4.17 ± 0.01 ^h	0.79 ± 0.01 ^b	5.53 ± 0.01 ⁱ	1.87 ± 0.22 ^c	ND ^a
5	0.22 ± 0.01 ^a	0.14 ± 0.01 ^a	ND ^a	4.32 ± 0.01 ^g	ND ^a	0.53 ± 0.01 ^c
6	0.08 ± 0.01 ^a	0.31 ± 0.01 ^b	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a
7	0.25 ± 0.01 ^a	ND ^a	ND ^a	1.57 ± 0.01 ^b	ND ^a	ND ^a
8	0.58 ± 0.01 ^b	1.70 ± 0.04 ^e	ND ^a	3.82 ± 0.02 ^e	1.65 ± 0.01 ^b	ND ^a
9	2.25 ± 0.01 ^c	1.07 ± 0.02 ^d	ND ^a	2.92 ± 0.04 ^d	1.83 ± 0.01 ^{bc}	1.25 ± 0.08 ^c
10	0.50 ± 0.01 ^b	ND ^a	ND ^a	4.02 ± 0.01 ^f	ND ^a	0.46 ± 0.20 ^c

由上述可知,蓝莓酒中含量较高的有机酸为奎宁酸,除6号及10号蓝莓酒,其余蓝莓酒的奎宁酸含量均达到了1 000 $\mu\text{g/mL}$ 以上,这可能主要归因于两点。首先,在原料方面,不同蓝莓酒厂家可能运用不同品种的蓝莓进行发酵,其中包括以奎宁酸为主的奎宁酸优势型矮丛蓝莓品种以及以柠檬酸为主的柠檬酸优势型高丛或半高丛蓝莓品种^[25],奎宁酸优势型蓝莓品种本身就含有一定量奎宁酸,从而导致蓝莓酒中奎宁酸含量也较多。2号及6号蓝莓酒的柠檬酸含量高于奎宁酸含量,因此其发酵蓝莓酒时使用的可能是高丛或半高丛蓝莓品种,其余蓝莓酒奎宁酸含量均高于柠檬酸含量,因此其发酵蓝莓酒使用的可能是矮丛蓝莓品种;其次,在发酵过程方面,对比蓝莓果实中的有机酸,蓝莓果实中多以柠檬酸、奎宁酸、苹果酸为主^[26],而在蓝莓酒中可以发现柠檬酸、苹果酸的含量相较于蓝莓果实有所降低,这可能是由于蓝莓果实经酵母发酵后,柠檬酸等有机酸被利用,经过代谢循环,转变为奎宁酸等有机酸,从而促进奎宁酸含量升高。蓝莓酒中乳酸及琥珀酸等有机酸含量增多,柠檬酸及苹果酸等有机酸含量减少,因此可以推测蓝莓果实经发酵后,可以丰富有机酸种类与含量,同时乳酸等有机酸具备的风味使蓝莓酒风味更加丰富。Zhang等^[20]在发酵后的蓝莓酒中也检出了乳酸、柠檬酸、草酸、苹果酸、莽草酸及奎宁酸,同时发现奎宁酸在其中占比最高,其含量在1 264.5~5 537.3 mg/kg 范围内。结果表明蓝莓酒富含多种有机酸,使其在风味及营养价值方面具有更优势。

2.3 蓝莓酒中维生素测定

维生素是人体所需的一类有机化合物,水溶性维生素常在体内作为辅酶,参与催化^[27],特定的维生素对特定的疾病也有预防治疗效果,如维生素 B_1 可以预防脚气病,维生素 B_6 可以治疗贫血,虽然需求量很少但是对人体正常生理功能至关重要。本研究使用高效液相色谱共检测了6种B族维生素和维生素C,色谱图见图3,含量见表7,结果发现大部分蓝莓酒中检测到维生素 B_1 、 B_2 、 B_6 、烟酰胺,少部分蓝莓酒中检出维生素 B_3 、维生素C,未检出维生素 B_{12} 。维生素 B_1 含量的范围为0.08~2.89 $\text{mg}/100\text{ mL}$,其中1号蓝莓酒中含量最多,6号蓝莓酒含量最少;维生素 B_2 含量的范围为0~4.35 $\text{mg}/100\text{ mL}$,其中2号蓝莓酒含量最多,7号与10号未检出;维生素 B_3 仅4号蓝莓酒可检出,其余蓝莓酒都无法检出;维生素 B_6 含量的范围为0~4.95 $\text{mg}/100\text{ mL}$,其中4号蓝莓酒含量最多,6号蓝莓酒未检出;烟酰胺含量的范围为0~1.25 $\text{mg}/100\text{ mL}$,

其中9号蓝莓酒最多,4号、6号、7号及8号蓝莓酒未检出。由上述可知,在10款市售蓝莓酒中,4号蓝莓酒具有最丰富的水溶性维生素种类,仅烟酰胺未检出,其余均有检出,并且维生素 B_6 显著高于其余蓝莓酒,可能具有更丰富的营养价值和更高的生物活性;同时6号蓝莓酒仅检出了两种水溶性维生素,同时其含量显著低于大部分蓝莓酒。蓝莓酒中的维生素大部分来源于蓝莓果实,部分维生素也可能来源于发酵时酵母细胞自溶^[28],但在蓝莓酒发酵过程中也有部分维生素被酵母细胞所利用。方雨洁^[9]在探究蓝莓酒酿造工艺及其品质时测定了蓝莓酒中维生素含量,发现维生素 B_2 的含量范围在0.07~2.7 $\text{mg}/100\text{ g}$,同时检出了维生素 B_1 和 B_6 等主要水溶性维生素。维生素是一种易分解的物质,在酿酒过程中可能会有大量损失,因此维生素在蓝莓酒中的保藏还有待优化,且蓝莓酒中维生素的生物活性还有待更深入的发掘。

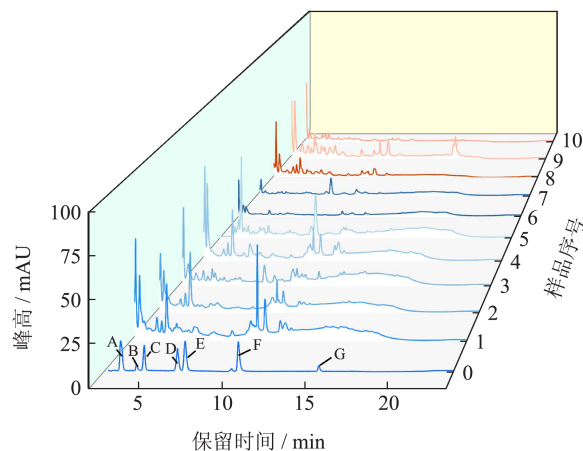


图3 10款蓝莓酒维生素色谱图

Fig.3 Vitamin chromatograms of ten blueberry wines

注:A:烟酰胺,B:维生素 B_6 ,C:维生素 B_2 ,D:维生素 C ,E:维生素 B_3 ,F:维生素 B_1 ,G:维生素 B_{12} 。

2.4 蓝莓酒总酚、总黄酮、花色苷测定

酚类物质是一类具有生物活性的物质,是蓝莓中主要的次生代谢产物,在体内具有抗氧化、抑制氧化应激酶活性及清除自由基等活性作用^[29]。10款蓝莓酒中的总酚含量为0.18~1.65 mg/mL ,各款蓝莓酒之间存在显著性差异,含量最高的为4号蓝莓酒,最低的为6号蓝莓酒。

黄酮是一类天然存在植物中的化合物,是蓝莓中的重要化合物,黄酮类物质有多种活性功能,如抗氧化、降血脂、抑菌等^[29]。但黄酮类物质也会影响蓝莓酒的口感,有些黄酮类物质可能会产生苦味、涩味等不良风味。表8中,10款蓝莓酒的总黄酮含量为0.29~3.48 mg/mL ,各款蓝莓酒之间存在显著性差

异，含量最高的为4号蓝莓酒，最低的为6号蓝莓酒。

表 8 10款蓝莓酒总酚、总黄酮、花色苷含量
Table 8 Contents of total phenols, flavonoids and anthocyanins in ten blueberry wines

样品 序号	总酚含量 /(mg/mL)	总黄酮含量 /(mg/mL)	花色苷含量 /(mg/L)
1	1.44 ± 0.08 ^f	2.14 ± 0.04 ^e	39.13 ± 3.02 ^e
2	1.41 ± 0.02 ^f	1.53 ± 0.12 ^d	29.88 ± 0.80 ^d
3	1.13 ± 0.02 ^e	1.38 ± 0.04 ^d	81.29 ± 1.53 ^g
4	1.65 ± 0.06 ^g	3.48 ± 0.16 ^f	20.62 ± 1.51 ^e
5	0.93 ± 0.05 ^d	1.62 ± 0.04 ^d	117.27 ± 3.03 ^h
6	0.18 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.03 ^a	3.47 ± 0.35 ^a
7	0.34 ± 0.01 ^b	0.49 ± 0.03 ^{ab}	58.62 ± 0.41 ^f
8	0.56 ± 0.01 ^c	0.68 ± 0.03 ^{bc}	6.55 ± 0.26 ^{ab}
9	1.12 ± 0.04 ^e	1.37 ± 0.22 ^d	19.56 ± 0.66 ^c
10	0.41 ± 0.01 ^b	0.50 ± 0.02 ^{ab}	10.95 ± 0.27 ^b

花色苷主要以游离态、聚合态、结合态三种形式在蓝莓酒中呈现，花色苷也是蓝莓酒调控色泽的主要物质，在不同条件下表现出不同的色泽。花色苷类物质具有抗氧化活性、抗炎作用以及降低糖尿病与肥胖症患病几率等作用^[30]。10款蓝莓酒中的花色苷含量在3.47~117.27 mg/L 范围内，各款蓝莓酒中存在显著性差异，含量最高的为5号蓝莓酒，最低的为6号蓝莓酒。

对比10款市售蓝莓酒中的总酚、总黄酮、花色苷含量可以发现4号蓝莓酒的总酚与总黄酮含量均显著高于其他蓝莓酒，而6号蓝莓酒的总酚、总黄酮及花色苷含量均显著低于其他蓝莓酒，这可能是由于不同品牌的蓝莓酒使用了不同的生产工艺，以及在发酵时添加的蓝莓含量也有所不同，从而导致了各蓝莓酒之间酚类物质含量的差异，由此可知4号蓝莓酒可能具有更优质的品质以及更高的营养价值。龚文玲等^[31]、薄慧杰等^[32]对百香果酒、白葡萄酒、水蜜桃酒、杨梅酒和火龙果酒等市售果酒进行总酚和总黄酮的测定，其5种果酒总酚含量在190.49~992.49 mg/L 范围内，总黄酮含量在42.67~196.01 mg/L 范围内。常甜甜^[33]在对不同产区的市售干红葡萄酒进行总酚、总黄酮及花色苷进行测定，发现不同产区的干红葡萄酒总酚含量范围为3 158.46~1 264.67 mg/L，总黄酮范围为37.46~94.04 mg/L，花色苷含量范围为127.09~354.40 mg/L。对比上述不同类型的果酒可以发现10款市售蓝莓酒的总酚含量及总黄酮含量均高于除干红葡萄酒外的5种果酒，说明相较于其他果实发酵的果酒，蓝莓果酒可能具有更高的营养价值；比较干红葡萄酒可以发现10款蓝莓酒总酚含量及花色苷含量普遍低于干红葡萄酒，蓝莓含

有丰富的花色苷，但是发酵后却低于干红葡萄酒，主要原因可能是花色苷不稳定在发酵过程中发生降解。徐雯^[34]在探究蓝莓酒发酵过程中花色苷变化时发现蓝莓酒的花色苷含量随发酵时间先增大后大幅度下降，同时也说明目前商业的蓝莓酒发酵工艺可能存在缺陷，导致花色苷在发酵过程中大量损失。10款蓝莓酒总黄酮含量普遍高于干红葡萄酒，说明蓝莓酒中黄酮类物质可能较干红葡萄酒更加丰富，具有更好的生物活性。林岚^[35]研究发现不同品种蓝莓发酵的蓝莓酒中总酚含量在706.64~1 396.52 mg/mL 范围内，花色苷含量在101.78~270.85 mg/L 范围内，总酚含量与市售蓝莓酒相似，而花色苷普遍高于市售蓝莓酒，可能是由于市售蓝莓酒中花色随时间逐渐降解。刘国华等^[36]探究蓝莓酒抗氧化研究中也测定出相似的总黄酮含量(1.019~1.255 mg/mL)。

3 结论

本研究通过提取10款市售蓝莓酒多糖并检测其分子量与单糖组成，进一步测定了有机酸、维生素、总酚、总黄酮及总花色苷含量。在10款市售蓝莓酒中提取的粗多糖经过测定发现大部分蓝莓酒中多糖具有两个以上的组分，且阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖占比较大，与蓝莓多糖的组成相似；10款市售蓝莓酒中有包括奎宁酸、苹果酸等6种占比较高的有机酸，且在发酵过程中有机酸会发生转化，产生更丰富的有机酸种类以及含量的变化；10款蓝莓酒中含有维生素B₁、维生素B₂及维生素B₆含量较高的维生素；10款蓝莓酒总酚、总黄酮、总花色苷含量分别为0.183~1.646、0.289~3.480、3.470~117.274 mg/L。综合水溶性维生素以及总酚、总黄酮、花色苷含量可以发现4号蓝莓酒具有更丰富的维生素种类与含量，且酚类物质含量也显著高于其他蓝莓酒，其品质最佳；而6号蓝莓酒具有最少的维生素种类以及最低的酚类物质，其品质最差。综上所述，本研究通过测定多种物质初步探究了蓝莓酒的营养成分，为其今后的生物活性研究奠定了基础。

参考文献

[1] 徐艺格,王兴东,刘有春,等.蓝莓产业现状及技术发展趋势分析与展望[J].北方园艺,2024,8:130-136.
[2] 胡雅馨,李京,惠伯棣.蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究[J].食品科学,2006,10:600-603.
[3] 孙希云.蓝莓多糖的分离纯化、结构鉴定及免疫活性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
[4] 程明冬.葡萄多糖的分离纯化和功能特性的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2007.
[5] 苏钰琦.苹果多糖的分离纯化与抗氧化活性深入研究[D].咸阳:

- 西北农林科技大学,2008.
- [6] 郑佳.果酒中蛋白质、多糖、多酚的相互作用及其澄清初步研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [7] JONES-MOORE H R, JELLEY R E, MARANGON M, et al. The polysaccharides of winemaking: From grape to wine [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 731-740.
- [8] CHIDI B S, BAUER F F, ROSSOUW D. Organic acid metabolism and the impact of fermentation practices on wine acidity: A Review [J]. South African Journal of Enology and Viticulture, 2018, 39(2): 1-15.
- [9] 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,2023.
- [10] YANG W, GUNER S, ROCK C, et al. Prospecting antioxidant capacities and health-enhancing phytonutrient contents of southern highbush blueberry wine compared to grape wines and fruit liquors [J]. Sustainable Agriculture Research, 2012, 1(1): p26.
- [11] 张晓新,范春娟,王君巧,等.吴茱萸多糖的提取纯化与结构解析[J].南昌大学学报(理科版),2024,48(3):261-270.
- [12] 赵佳莹,辛玥,宋萧萧,等.鹰嘴豆多糖分离纯化与结构表征[J].食品科学,2023,44(8):40-45.
- [13] 万宇俊,殷军艺,聂少平,等.微波提取对胡萝卜中的多糖基本结构特征及固体形貌的影响[J].食品科学,2017,38(7):1-5.
- [14] 秦雨齐.蓝莓多糖的制备和体外活性研究[D].合肥:合肥学院,2024.
- [15] CHEN G, CHEN X, YANG B, et al. New insight into bamboo shoot (*Chimonobambusa quadrangularis*) polysaccharides: Impact of extraction processes on its prebiotic activity [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 367-377.
- [16] 黄佳.猕猴桃酒发酵及陈酿过程中多酚及多糖的变化规律[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [17] TRANDEL-HAYSE M, JOHANNINGSMEIER S, OH H, et al. Blueberry cell wall polysaccharide composition of three distinct fruit firmness phenotypes [J]. ACS Food Science & Technology, 2023, 3(11): 1920-1930.
- [18] GAO J, LIN L, SUN B, et al. Comparison study on polysaccharide fractions from *Laminaria japonica*: Structural characterization and bile acid binding capacity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(44): 9790-9798.
- [19] JURADO-SÃ B. Gas chromatographic determination of 29 organic acids in foodstuffs after continuous solid-phase extraction [J]. Talanta, 2011, 84(3): 924-930.
- [20] ZHANG J, FANG L, HUANG X, et al. Evolution of polyphenolic, anthocyanin, and organic acid components during coinoculation fermentation (simultaneous inoculation of LAB and yeast) and sequential fermentation of blueberry wine [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 4878-4891.
- [21] XIANG J, ZHU W, HAN J, et al. Analysis of organic acids in Chinese raisin tree (*Hovenia dulcis*) peduncle and their changes in liquid fermentation process [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(4): 1119-1127.
- [22] 王龙瑞,周连玉,孙文娟,等.果酒有机酸变化及复合降酸技术的研究进展[J].酿酒科技,2024,1:90-94,101.
- [23] 曾竟蓝,马胤鹏,秦丹,等.果酒中有机酸的作用及检测方法研究[J].中国酿造,2018,37(6):183-187.
- [24] NAGAI R, NAGAI M, SHIMASAKI S, et al. Citric acid inhibits development of cataracts, proteinuria and ketosis in streptozotocin (type 1) diabetic rats [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2010, 393(1): 118-122.
- [25] 邹雪梅,卜庆状,张馨予,等.蓝莓果实品质分析与评价研究进展[J].辽宁农业科学,2023,5:66-71.
- [26] 徐玉涛,李珂珂,王贺新,等.高效液相色谱法对蓝莓果实中8个有机酸含量的测定[J].食品科学,2015,36(18):127-131.
- [27] HUANG J, WANG Y, REN Y, et al. Effect of inoculation method on the quality and nutritional characteristics of low-alcohol kiwi wine [J]. LWT, 2022, 156: 113049.
- [28] KRASNODAR, AGEYEVA N M, SHIRSHOVA A A, et al. Vitamin content of apple juices and ciders made from them [J]. Problems of Nutrition, 2023, 92(2): 116-123.
- [29] CHEYNIER V. Phenolic compounds: from plants to foods [J]. Phytochemistry Reviews, 2012, 11(2-3): 153-177.
- [30] 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.
- [31] 龚文玲,传均强,徐洪磊,等.商业酿酒酵母发酵百香果果酒的品质及抗氧化性分析[J].中国酿造,2023,42(3):135-139.
- [32] 薄慧杰,张爱华,潘勇,等.果酒中二氧化硫、非酚类和酚类物质抗氧化能力的研究[J].食品工程,2019,2:20-26.
- [33] 常甜甜.干红葡萄酒中酚类物质和抗氧化性的研究[D].烟台:烟台大学,2021.
- [34] 徐雯.蓝莓酒发酵过程中关键成分的特性研究[D].常州:常州大学,2022.
- [35] 林岚.贵州麻江地区不同品种蓝莓酒发酵过程中真菌菌群动态及抗氧化性的研究[D].扬州:扬州大学,2024.
- [36] 刘国华,谢小林,王代波,等.不同品种蓝莓红酒抗氧化研究[J].酿酒科技,2021,8:28-30,34.