不同碳源对蓝莓果渣醋活性成分、风味及体外生物活性的影响

李溪娥,徐融融,穆　先,姚　纱,陈　莉*,卢红梅,黄永光,罗　游

(贵州大学 酿酒与食品工程学院 贵州省发酵工程与生物制药重点实验室,贵州 贵阳 550025)

摘　要:为探究不同碳源对蓝莓果渣醋品质的影响,该研究以蓝莓果渣为原料,以蔗糖、果葡糖浆、甜酒酿为碳源,采用固态发酵酿造蓝莓果渣醋,采用常规方法分析其活性成分、感官品质,采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用(HS-SPME-GC-MS)测定挥发性风味成分,分析其体外抗氧化活性及体外降血糖能力,并对总酸、活性成分及体外生物活性进行相关性分析。结果表明,果葡糖浆为碳源酿造蓝莓果渣醋品质最佳,感官评分为80分,总酸、总花青素、总黄酮、总多酚、多糖含量分别为3.87 g/100 mL、34.87 mg/100 mL、0.74 mg芦丁当量(RE)/mL、1.91 mg没食子酸当量(GAE)/mL、3.27 mg/mL;检出挥发性风味物质共59种;DPPH自由基、ABTS自由基、羟基自由基清除率最高分别为91.19%、82.50%、90.29%;α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的抑制率最高分别为84.10%和89.25%。相关性分析表明,羟基自由基清除率与总花青素、总多酚、多糖显著正相关($P<0.05$),与总黄酮极显著正相关($P<0.01$),α-淀粉酶抑制率与总花青素、总黄酮、总多酚、多糖呈显著正相关($P<0.05$)。

关键词:蓝莓果渣醋;碳源;挥发性风味成分;抗氧化活性;降血糖活性;感官评价

中图分类号:TS275.4　　**文章编号**:0254-5071(2026)02-0059-08　　doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.02.009

引文格式:李溪娥,徐融融,穆先,等. 不同碳源对蓝莓果渣醋活性成分、风味及体外生物活性的影响[J]. 中国酿造,2026,45(2):59-66.

Effect of different carbon sources on active components, flavor and *in vitro* bioactivity of blueberry pomace vinegar

LI Xi'e, XU Rongrong, MU Xian, YAO Sha, CHEN Li*, LU Hongmei, HUANG Yongguang, LUO You

(Guizhou Provincial Key Laboratory of Fermentation Engineering and Biopharmacy, School of Brewing and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To investigate the effect of different carbon sources on quality of blueberry pomace vinegar, using blueberry pomace as raw material, with sucrose, fructose-glucose syrup, and sweet rice wine as carbon sources, the blueberry pomace vinegar was brewed by solid-state fermentation. The active ingredients and sensory quality were analyzed by conventional methods. The volatile flavor components were determined by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The *in vitro* antioxidant activity and *in vitro* hypoglycemic ability were analyzed, and the correlation analysis of total acid, active ingredients and *in vitro* bioactivity was conducted. The results showed that blueberry pomace vinegar brewed with fructose-glucose syrup as the carbon source had the optimal quality, with a sensory score of 80 points. The contents of total acid, total anthocyanins, total flavonoids, total polyphenols, and polysaccharides were 3.87 g/100 ml, 34.87 mg/100 ml, 0.74 mg rutin equivalent (RE)/ml, 1.91 mg gallic acid equivalent (GAE)/ml, and 3.27 mg/ml, respectively. A total of 59 volatile flavor substances were detected. The scavenging rates of DPPH radicals, ABTS radicals and hydroxyl radicals were the highest, reaching 91.19%、82.50%、90.29%, respectively. The inhibition rates of α-glucosidase and α-amylase were the highest, reaching 84.10% and 89.25%, respectively. Correlation analysis indicated that the scavenging rates of hydroxyl radicals was significantly positively correlated with total anthocyanins, total polyphenols, and polysaccharides ($P<0.05$), and extremely significantly positively correlated with total flavonoids ($P<0.01$), and the inhibition rate of α-amylase was significantly positively correlated with total anthocyanins, total flavonoids, total polyphenols, and polysaccharides ($P<0.05$).

Key words: blueberry pomace vinegar; carbon source; volatile flavor component; antioxidant activity; hypoglycemic activity; sensory evaluation

蓝莓,又名甸果、越橘,被誉为“浆果之王[1]。蓝莓鲜果富含多糖类、黄酮、多酚、花青素等多种生物活性成分[2],具有抗氧化、抗癌、抗炎活性及促进视红素再生等功能[3]。由于蓝莓鲜果贮藏性较差,为降低采后损失,对其加工利用主要集中于蓝莓汁的生产[4]。在此过程中,会产生大量副产物——蓝莓果渣,其主要成分为果皮、细小种子及部分未充分压榨的残余果肉。据统计,贵州地区年产果渣4 900～7 350 t,大部分果渣直接填埋造成了资源浪费[5]。少部分果渣作为农作肥料或是动物饲料[6]。研究表明,蓝莓果渣仍保留多糖、多酚等功能成分[6],其利用多集中于饲料、肥料

收稿日期:2025-05-19　　**修回日期**:2025-08-25

基金项目:贵州省科技创新人才团队建设项目(黔科合人才CXTD〔2025〕054号)

作者简介:李溪娥(2000-),女,硕士研究生,研究方向为食品生物技术。

***通讯作者**:陈　莉(1975-),女,副教授,硕士,研究方向为食品生物技术。

等低附加值领域[6]。

果醋以水果、蔬菜或果品加工下脚料为原料，经微生物酒精发酵与醋酸发酵后酿制而成的酸性产品，具备抗氧化、抗疲劳、降糖降脂等多种功效，兼具营养与风味[7]。吴震等[8]的研究表明，经固态发酵桑葚果渣醋的风味物质含量与多样性均优于液态发酵。因此，固态发酵可促进果渣醋中风味物质，可赋予果渣醋更丰富的风味层次。目前，果醋发酵研究仅聚焦单一碳源对产酸或风味的影响[9-11]。不同碳源在产酸效率、风味物质组成与含量等方面存在差异，优化碳源选择可精准调控果渣醋的发酵进程与品质特性，但目前鲜见该方面的研究报道。

本研究以蓝莓果渣为原料，分别以蔗糖(SC)、果葡糖浆(GC)及甜酒酿(MC)为碳源，采用固态发酵工艺制备蓝莓果渣醋，比较不同碳源发酵的蓝莓果渣醋在总酸、活性成分、感官品质、挥发性风味成分及体外生物活性方面的差异，并对总酸、活性成分与体外抗氧化能力及体外降血糖能力进行相关性分析。以期探究碳源对蓝莓果渣醋品质的影响，为蓝莓副产物资源化利用提供新思路，增加蓝莓产品的附加值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓果渣(鲜果渣含水量85%左右)：贵州麻江某蓝莓工厂；果葡糖浆：湖北中超食品科技有限公司；糯米、蔗糖：贵阳市花溪区某沃尔玛超市；甜酒曲、RW葡萄酒酵母：安琪酵母有限公司；巴氏醋酸杆菌(*Acetobacter pasteurianus*)(沪酿1.01醋酸菌)：本实验室保藏。

3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid，DNS)、三氯乙酸、酒石酸钾钠、磷酸二氢钾：上海国药化学试剂公司；葡萄糖、水杨酸、邻苯三酚、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠：天津市科密欧化学试剂公司；苯酚、铁氰化钾、硫酸亚铁、乙酸钠、硫酸镁、氯化钾：成都金山化学试剂有限公司；氢氧化钠、浓盐酸：重庆川东化工公司；无水硫酸钠：天津市永大化学试剂公司；无水乙醇：天津市富宇精细化工公司；酵母浸出粉：上海博微生物科技公司；Tris-HCl：北京索莱宝科技公司；三氯化铁：天津市大茂化学试剂厂。所用试剂均为分析纯或生化试剂。

1.2 仪器与设备

220V-AC1000W电炉：天津市泰斯特仪器有限公司；FA2004N电子分析天平：上海菁海仪器有限公司；HH-b恒温水浴锅：常州奥华仪器有限公司；LS-B50L立式压力蒸汽灭菌锅：上海博迅实业有限公司医疗设备厂；DHG-9140B恒温鼓风干燥箱：上海琅玕试验设备有限公司；SPX-250生化培养箱：上海恒丰仪器仪表有限公司；XH-B旋涡混匀器：姜堰市康健医疗器具有限公司；722s可见分光光度计：上海欣茂仪器有限公司；SW-CJ-1F超净工作台：上海雷韵试验仪器制造有限公司；57318 75 μm Carbon WR/PDMS纤维萃取头、57330-U SPME手动进样手柄：美国Supelco公司；ZD-2A自动电位滴定仪：上海大普仪器有限公司；pHS-3C数显酸度仪：上海仪电科学仪器股份有限公司；8890-7000D气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS)、HP-5MS Ultra Inert毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)：美国安捷伦公司；LD-3D离心机：上海上登实验设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 不同碳源蓝莓果渣醋的制备工艺流程及操作要点

蓝莓果渣→调节糖度→酒精发酵→固态醋酸发酵→淋醋→离心→灭菌→成品

甜酒酿的制备：糯米蒸煮达到“熟而不烂”的状态、取冷开水冲凉迅速冷却至室温。将糯米干质量的0.4%甜酒曲拌入冷却的米饭内，混合均匀。密封于35 ℃恒温培养箱中发酵72 h即得甜酒酿。

蓝莓果渣醋的制备：于蓝莓果渣中分别加入蔗糖、果葡糖浆或甜酒酿(添加量均为蓝莓果渣的14%)，调整蓝莓果渣总含糖量为21%，加入酵母菌(使用蔗糖或果葡糖浆时，因其对整体质量影响小，酵母菌的添加量为蓝莓果渣质量的0.5%；使用甜酒酿为碳源时，因甜酒酿还原糖含量低且添加体积高，酵母菌的添加量为蓝莓果渣与甜酒酿的质量总和的0.5%)，30 ℃恒温密封进行酒精发酵，发酵周期为5 d。将酒精发酵结束后的蓝莓果渣水分调整至75%，添加14%醋酸菌后于32 ℃恒温培养，每24 h翻拌一次，发酵时长为11 d，完成醋酸发酵。待发酵完成后，取100 g醋醅，加120 mL无菌水浸泡12 h，过滤得一次浸提液；另取100 g醋醅，用一次浸提液浸泡12 h，过滤得二次浸提液；再取100 g醋醅，用二次浸提液浸泡12 h，过滤得醋液经离心(3 000 r/min、10 min)、灭菌(60 ℃、30 min)后即得蓝莓果渣醋成品。将蔗糖、果葡糖浆、甜酒酿为碳源酿造蓝莓果渣醋的样品分别编号为SC、GC、MC。

1.3.2 理化指标测定

总酸测定：采用GB/T 12456—2021《食醋卫生标准》中的酸碱滴定法。

1.3.3 活性成分测定

总花青素含量的测定：参照文献[11]的方法。

总黄酮含量的测定：参照GB/T 19777—2013《地理标准性产品 山西老陈醋》的方法，以芦丁质量浓度(x)为横坐标，波长510 nm处的吸光度值(y)为纵坐标绘制标准曲线，获得芦丁标准曲线回归方程为y=0.334 9x-0.002 1，R^2=0.999 7。按照标准曲线回归方程计算样品中总黄酮含量，结果以芦丁当量(rutin equivalent，RE)计(mg RE/100 g)。

总多酚含量的测定：参照文献[12]的方法，以没食子酸质量浓度(x)为横坐标，波长765 nm处的吸光度值(y)为

纵坐标绘制标准曲线，获得没食子酸标准曲线回归方程y=0.013 6x-0.007，R^2=0.999 4。按照标准曲线回归方程计算样品中总多酚含量，结果以没食子酸当量（gallic acid equivalent，GAE）计（mg GAE/100 g）。

多糖含量的测定：采用苯酚-硫酸法[13]。

1.3.4 挥发性风味物质分析

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术测定蓝莓果渣醋的样品挥发性风味成分[14]。

HS-SPME条件：样品于45 ℃顶空萃取10 min后，采用Carbon WR/PDMS纤维萃取30 min，期间每10 s搅动2 s以提升萃取效率，250 ℃气相进样口解吸5 min。

GC条件：HP-5MS UItra Inert毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气（He），柱前压7.0 psi，载气流量1.0 mL/min，溶剂延迟时间1 min，分流比5∶1，程序升温条件为初始温度42 ℃保持2 min，梯度升温至210 ℃和310 ℃，总运行68 min。

MS条件：电子电离（electronic ionization，EI）源，离子源温度230 ℃、电子能量70 eV、发射电流34.6 μA，倍增器电压2 205 V；接口温度250 ℃，质量扫描范围30～500 amu。

定性定量分析：检测结果与美国国家标准技术研究所（national institute of standards and technology，NIST）20数据库比对进行定性，采用峰面积归一化法定量分析。

1.3.5 抗氧化活性测定

1,1二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH）自由基清除率的测定：参照文献[15]的方法并稍作修改。配制0.2 mmol/L DPPH-乙醇溶液，将蓝莓果渣醋原液分别加蒸馏水稀释制备不同体积分数（0.2%、0.4%、06%、0.8%、1.0%）样液，取1 mL样液与2 mL DPPH-乙醇溶液室温避光反应30 min后于波长517 nm处测定吸光度值记为A_1，以1 mL样液与2 mL乙醇同条件下测定的吸光度值记为A_2，以1 mL乙醇与2 mL DPPH-乙醇溶液同条件下测定的吸光度值记为A_0。以维生素C（vitamin C，VC）溶液为阳性对照，DPPH自由基清除率计算公式如下：

$$\text{DPPH自由基清除率}=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100\%$$

2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（2,2'-azino-bis（3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid），ABTS）自由基清除率的测定：参照文献[16]的方法并稍作修改。将蓝莓果渣醋原液分别加蒸馏水稀释制备不同体积分数（0.2%、0.4%、06%、0.8%、1.0%）样液，取1 mL样液添加8 mL ABTS工作液，室温避光反应10 min，测定吸光度值记为A_1；取0.5 mL样品加4 mL甲醇，同条件测定吸光度值记为A_2；取0.5 mL甲醇加4 mL ABTS工作液，同条件测定吸光度值记为A_0。以VC溶液为阳性对照，ABTS自由基清除率计算公式如下：

$$\text{ABTS自由基清除率}=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100\%$$

羟基自由基清除率的测定：参照文献[17]的方法稍作修改。将蓝莓果渣醋原液分别加蒸馏水稀释制备不同体积分数（2%、4%、6%、8%、10%）样液，取1 mL样液依次加入9 mmol/L硫酸亚铁溶液、9 mmol/L水杨酸-乙醇溶液、8.8 mmol/L过氧化氢溶液各1 mL，振荡均匀后于37 ℃水浴反应30 min，在波长510 nm处测定吸光度值记为A_1；同体积下分别以蒸馏水代替过氧化氢、样品，同条件测定吸光度值，分别记为A_2、A_0。以VC溶液为阳性对照，羟基自由基清除率计算公式如下：

$$\text{羟基自由基清除率}=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100\%$$

1.3.6 降血糖能力测定

将蓝莓果渣醋原液分别加蒸馏水稀释制备不同体积分数（0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4%）的蓝莓果渣醋样液，根据文献[18]的方法测定样液的葡萄糖苷酶抑制能力；根据文献[19]的方法测定不同体积分数（1%、2%、3%、4%、5%）蓝莓果渣醋样液的淀粉酶抑制能力。

1.3.7 感官评价

参考GB/T 18187—2000《酿造食醋》制定蓝莓果渣醋感官评价标准。选取经过感官培训的10名专业人士分别从色泽、香气、滋味、体态4个方面对蓝莓果渣醋进行感官评价，满分100分，蓝莓果渣醋感官评价标准见表1。

表1 蓝莓果渣醋感官评分标准

Table 1 Sensory scoring standards of blueberry pomace vinegar

项目	评价标准	评分/分
色泽（20分）	具深邃且饱满的的紫红色，光泽度较高	21～25
	较为淡雅的浅红色，光泽度良好	10～20
	浅红色，无光泽	0～9
香气（30分）	具有独特的蓝莓果香，且香气浓郁且协调	21～25
	具有蓝莓果香，且香气淡雅较协调	10～20
	无蓝莓果香，且不协调	0～9
滋味（35分）	入口微甜，酸味柔和，具层次感，无异味	21～25
	酸味较为柔和，口味较单薄，无异味	10～20
	酸味刺激，口味单薄，有异味	0～9
体态（15分）	醋液清澈，澄清度高，无杂质	21～25
	较为澄清，少许悬浮物	10～20
	浑浊，明显悬浮物	0～9

1.3.8 数据处理

采用Excel 2010、SPSS 19.0等软件对试验数据进行分析，Origin2018作图。

2 结果与分析

2.1 蓝莓果渣醋的总酸及活性成分检测结果

蓝莓果渣醋的总酸及活性成分测定结果见表2。由表2

可知，样品SC、GC和MC的总酸含量分别为4.07 g/100 mL、3.87 g/100 mL、3.59 g/100 mL；总花青素含量分别为33.45 mg/100 mL、34.87 mg/100 mL、26.78 mg/100 mL；总黄酮含量分别为0.78 mg RE/mL、0.74 mg RE/mL、0.44 mg RE/mL；总多酚含量分别为2.38 mg GAE/mL、1.91 mg GAE/mL、1.42 mg GAE/mL；多糖含量分别为4.02 mg/mL、3.27 mg/mL、1.59 mg/mL。结果表明，不同碳源发酵的蓝莓果渣醋活性成分有所降低，可能是由于发酵过程中微生物的代谢消耗、酶促降解及成分互作[20]。样品SC、GC活性成分含量较高，且优于样品MC，说明添加甜酒酿可加速发酵过程中微生物代谢及酶促反应进行，导致部分活性成分消耗增加[21]。

表2 蓝莓果渣醋总酸及活性成分测定结果

Table 2 Determination results of total acid and active components in blueberry pomace vinegar

理化指标	SC	GC	MC
总酸/(g·100 mL^{-1})	4.07±0.24	3.87±0.22	3.59±0.26
总花青素/(mg·100 mL^{-1})	33.45±1.78	34.87±1.72	26.78±0.96
总黄酮/(mg RE·mL^{-1})	0.78±0.02	0.74±0.01	0.44±0.01
总多酚/(mg GAE·mL^{-1})	2.38±0.51	1.91±0.26	1.42±0.12
多糖/(mg·mL^{-1})	4.02±0.02	3.27±0.15	1.59±0.06

2.2 蓝莓果渣醋的感官评价结果

不同碳源制备蓝莓果渣醋的感官评分雷达图见图1。

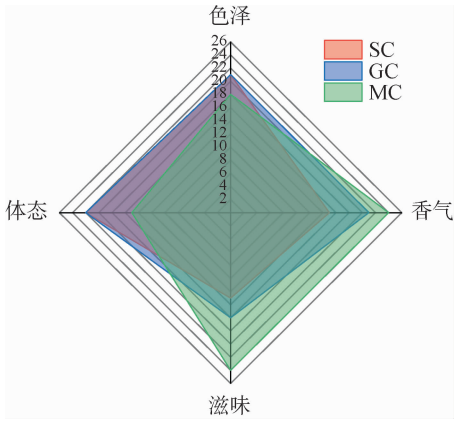


图1 不同碳源制备蓝莓果渣醋的感官评分雷达图

Fig. 1 Sensory score radar chart of blueberry pomace vinegar prepared from different carbon sources

由图1可知，样品SC、GC、MC的感官评分分别为71分、80分、81分，其中样品MC的香气及滋味优势最为突出，其香气融合蓝莓天然果香与甜酒酿特有发酵醇香，层次丰富且辨识度高，滋味酸感柔和协调、酸甜配比均衡无强烈刺激性，感官接受度显著高于其他样品。同时呈淡紫红色且醋液澄清度良好；样品GC与SC则保持浓郁纯正的紫红色泽且醋液澄清透明、质地均一，体态稳定性表现出色，香气与滋味方面，样品GC的蓝莓天然果香馥郁纯粹，滋味酸感清爽且与果香融合度高；样品SC酸感强烈，风味轮廓复杂，伴随奶酪/肥皂味、酸臭/脂肪味等杂味，酸感凸显且酸甜协调性不足，故样品GC的香气与滋味综合表现优于样品SC。综上，样品MC香气复合性及滋味柔和性突出；而样品GC感官呈天然果香、酸感清爽度及整体稳定性较优。

2.3 蓝莓果渣醋中的挥发性风味物质分析

蓝莓果渣醋中挥发性风味成分相对含量GC-MS检测结果见表3。

表3 蓝莓果渣醋中挥发性风味成分含量GC-MS检测结果

Table 3 Results of volatile flavor components contents in blueberry pomace vinegar analyzed by GC-MS

种类	序号	化合物	相对含量/%		
			SC	GC	MC
醇类	1	乙醇	3.18	7.87	8.89
	2	异戊醇	2.63	4.82	4.90
	3	2-甲基丁醇	1.91	2.82	2.81
	4	芳樟醇	0.20	0.18	0.14
	5	β-苯乙醇	17.61	19.67	22.81
	6	-松油醇	1.74	1.14	0.58
	7	松油醇	0.10	-	-
	8	2,3-丁二醇	0.58	0.08	0.24
	9	2-乙基己醇	-	0.04	0.05
		小计	27.95	36.62	40.42
酯类	1	乙酸乙酯	20.15	21.97	22.51
	2	乙酸甲酯	0.01	-	-
	3	乙酸丙酯	0.03	0.06	0.14
	4	丙酸乙酯	-	0.23	0.07
	5	异丁酸乙酯	0.06	0.32	0.09
	6	醋酸异丁酯	0.74	0.78	0.79
	7	丁酸乙酯	-	0.05	0.07
	8	乙酸异戊酯	5.09	5.46	4.42
	9	乳酸乙酯	-	-	0.17
	10	2-甲基丁基乙酸酯	1.92	1.74	1.53
	11	2-甲基丁酸乙酯	-	0.14	0.05
	12	异戊酸乙酯	-	0.28	0.12
	13	1-甲基庚基乙酸酯	0.12	0.10	0.01
	14	苯甲酸乙酯	0.06	0.15	0.49
	15	水杨酸甲酯	0.22	0.09	0.07
	16	辛酸乙酯	0.46	0.69	1.53
	17	苯乙酸乙酯	0.27	1.01	0.14
	18	丁二酸二乙酯	-	0.41	0.77
	19	乙酸苯乙酯	10.63	10.35	10.51
	20	癸-9-烯酸乙酯	0.24	-	-
	21	癸酸乙酯	0.61	0.15	0.17
	22	棕榈酸乙酯	0.40	0.12	0.08
	23	月桂酸乙酯	0.29	0.04	0.02
	24	十四酸乙酯	0.03	0.02	0.04
	25	顺-9-十六碳烯酸乙酯	0.05	-	-
	26	正己酸乙酯	-	-	1.25

续表

种类	序号	化合物	相对含量/%		
			SC	GC	MC
	27	2-乙基己醇乙酸酯	-	-	0.04
	28	己醇醋酸酯	-	-	0.02
	29	壬酸乙酯	-	-	0.02
		小计	41.38	44.16	45.12
	1	2-甲基丁酸	0.09	0.18	0.08
	2	醋酸	19.58	12.85	9.80
	3	异戊酸	0.29	0.47	0.01
酸类	4	辛酸	3.23	0.47	0.53
	5	正癸酸	1.58	0.10	0.20
	6	异丁酸	-	-	0.17
	7	己酸	0.03	-	-
		小计	24.80	14.07	10.79
	1	2-壬酮	0.03	0.04	0.03
	2	苯乙醛	0.06	0.12	0.11
	3	苯乙酮	0.03	0.04	0.02
	4	3-羟基-2-丁酮	0.23	0.05	0.07
	5	糠醛	0.38	0.14	0.08
	6	苯甲醛	3.62	1.23	0.75
醛酮类	7	仲辛酮	0.27	0.29	0.24
	8	甲基庚烯酮	0.02	-	-
	9	2-辛烯醛	0.06	-	-
	10	反-2-辛烯醛	-	0.03	0.03
	11	壬醛	0.08	0.09	0.09
	12	3,4-二甲基苯甲醛	-	1.82	0.95
	13	β-突厥酮	0.12	0.01	0.02
		小计	4.90	3.86	2.39
	1	1,1-二乙氧基乙烷	-	0.27	0.28
	2	正十三烷	0.02	0.03	0.04
	3	十四烷	0.05	0.05	0.04
烷烃类	4	十五烷	0.02	0.04	0.03
	5	十六烷	0.09	0.13	0.09
	6	十七烷	0.08	0.14	0.09
	7	2,6,10-三甲基十六烷	0.06	0.12	0.26
	8	十八烷	0.03	0.05	0.14
		小计	0.35	0.83	0.97
烯类	1	苯乙烯	0.05	0.02	0.03
	2	反-菖蒲烯	0.06	-	0.03
		小计	0.11	0.02	0.06
	1	焦化二甲苯	0.04	0.02	0.03
苯酚类	2	戊基苯	0.22	0.23	0.19
	3	丁香酚	-	-	0.03
		小计	0.26	0.25	0.25
	1	(*E*)-呋喃类芳樟醇氧化物	0.10	0.07	-
其他	2	苯乙腈	0.02	0.08	0.03
	3	*N*,*N*-二丁基甲酰胺	0.14	0.03	-
		小计	0.26	0.18	0.03

其中“-”表示未检出或低于检出限。

由表3可知，样品SC、GC和MC中共检出74种挥发性风味物质，其中样品SC、GC、MC分别共检出58种、59种、65种；共有挥发性风味物质48种。其中β-苯乙醇、醋酸、异丁醇、乙酸异戊酯等物质的相对含量在样品SC、GC、MC中较高，其原因在于发酵过程中酵母、醋酸菌等微生物可将蓝莓果渣中多糖、芳香族氨基酸、酚类等底物代谢转化为这些物质(如β-苯乙醇源于芳香族氨基酸代谢，酯类源于醇与酸的酯化反应，醋酸由乙醇氧化生成等)[8]。

从挥发性风味物质类别占比来看，样品SC、GC和MC中醇类相对含量分别为27.95%、36.62%、40.42%，酯类物质相对含量分别为41.38%、44.16%、45.12%，酸类物质相对含量分别为24.80%、14.07%、10.79%，说明醇类、酯类以及酸类物质是蓝莓果渣醋中主要的挥发性风味物质，共同构成了其风味轮廓的核心。

不同样品中挥发性风味物质的差异由碳源类型、微生物代谢路径及底物转化特性共同决定。样品SC以蔗糖为碳源，其单糖结构驱动微生物合成癸-9-烯酸乙酯、顺-9-十六碳烯酸乙酯、己酸、甲基庚烯酮、2-辛烯醛5种独有物质，与蔗糖发酵的脂肪酸、烯醛代谢路径相关[12]；样品GC以葡萄糖为单一碳源，没有独有物质产生；样品MC以甜酒酿为复合碳源，促使乳酸乙酯、正己酸乙酯、壬酸乙酯、2-乙基己醇乙酸酯、己醇醋酸酯、异丁酸6种独有物质生成，其糯米多糖、氨基酸及微生物代谢物为微生物提供丰富底物，与多糖分解、酯化反应、氨基酸代谢等路径相关[13]。综上，碳源的“天然性/人工性”“单一性/复合性”直接调控微生物代谢方向，使不同样品挥发性风味物质呈现显著差异，其中MC的复合碳源为微生物代谢提供更丰富底物与环境，因此独有物质种类最多。

为了进一步探究不同样品中主要挥发性风味物质的差异，选取相对含量＞1%的挥发性风味物质进行分析，结果见表4。由表4可知，β-苯乙醇在样品MC、GC及SC中相对含量较高，分别为22.81%、19.67%、17.61%，具有玫瑰花香；乙醇在样品MC、GC中相对含量较高(8.89%、7.87%)，在风味体系中赋予一定的醇香特征，其相对含量变化主要反映不同碳源条件下挥发性风味物质组成的差异。在酯类物质中，乙酸乙酯在样品MC、GC及SC中相对含量较高(20.15%～22.51%)；乙酸异戊酯及乙酸苯乙酯相对含量较高，赋予水果香。在酸类物质中，样品SC中醋酸的相对含量较高(19.58%)，可增强酸刺激感；辛酸(3.23%)、正癸酸(1.58%)分别具有奶酪/肥皂味、酸臭/脂肪味，进一步强化SC的酸感与风味复杂性，然而，3,4-二甲基苯甲醛未在此样品中检出。这些物质的含量差异与香气特征，共同塑造了不同样品的风味轮廓[21]。综上，样品GC具有稳定的花香与醇香基调，协调性与平衡性良好。

表4 蓝莓果渣醋中相对含量＞1%的挥发性风味成分

Table 4 Volatile flavor components with relative contents greater than 1% in blueberry pomace vinegar

种类	化合物	相对含量/%			香气特征[22]
		SC	GC	MC	
醇类	乙醇	3.18	7.87	8.89	醇香
	异戊醇	2.63	4.82	4.90	香蕉、苹果香
	2-甲基丁醇	1.91	2.82	2.81	苹果；水果香
	芳樟醇	0.20	0.18	0.14	铃兰香
	β-苯乙醇	17.61	19.67	22.81	玫瑰花香
	α-松油醇	1.74	1.14	0.58	薄荷香
	小计	27.27	36.5	40.13	
酯类	乙酸乙酯	20.15	21.97	22.51	菠萝香、水果香
	乙酸异戊酯	5.09	5.46	4.42	香蕉香、水果糖香
	2-甲基丁基乙酸酯	1.92	1.74	1.53	苹果；水果香
	苯乙酸乙酯	0.27	1.01	0.14	发酵香、花香、蜂蜜香
	乙酸苯乙酯	10.63	10.35	10.51	水果、甜花香
	正己酸乙酯	-	-	1.25	
	小计	38.06	40.53	40.36	
酸类	醋酸	19.58	12.85	9.80	刺激性酸味
	辛酸	3.23	0.47	0.53	奶酪；肥皂味
	正癸酸	1.58	0.10	0.20	酸臭；脂肪味
	小计	24.39	13.42	10.53	
醛酮类	仲辛酮	0.27	0.29	0.24	
	3,4-二甲基苯甲醛	-	1.82	0.95	
	小计	0.27	2.11	1.19	

注：“-”表示未检出；香气特征参考http://www.the good scents company.com/。

蓝莓果渣醋中主要挥发性风味物质（相对含量＞1%）的主成分分析得分图见图2。由图2可知，PC1方差贡献率为57.6%、PC2方差贡献率为35.3%，2个主成分的累计方差贡献率达92.9%，其中PC1主要与2-甲基丁基乙酸酯、乙酸苯乙酯等呈正相关，与仲辛酮等呈负相关，PC2主要与异戊醇、乙醇等呈正相关，与正癸酸等呈负相关；从象限分布看，发酵样品SC、GC与MC在主成分空间中呈现明显区分，其中GC与MC因均为淀粉水解型碳源，其挥发性风味物质组成更为接近；综上，主成分分析可区分不同样品，不同样品间挥发性风味物质组成及整体风味有明显区别。

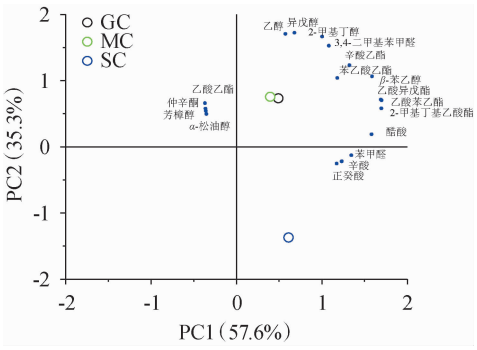


图2 蓝莓果渣醋中主要挥发性风味成分的主成分分析得分图

Fig. 2 Score plot of principal component analysis for major volatile flavor compounds in blueberry pomace vinegar

2.4 蓝莓果渣醋的体外生物活性评价

2.4.1 体外抗氧化能力分析

蓝莓果渣醋对DPPH、ABTS及羟基自由基清除能力的测定结果见图3。

由图3A可知，随着蓝莓果渣醋体积分数在0.2%～1.0%范围内增加，样品SC、GC和MC对DPPH自由基清除能力均增加，但样品SC、GC对DPPH自由基清除率均高于MC；当体积分数为1.0%时，样品SC、GC和MC的DPPH自由基清除率均最高，分别为92.06%、91.19%、69.59%。结果表明，样品SC、GC具有较强的DPPH自由基清除能力，这与石庆叠[13]的研究结果相似。

由图3B可知，随着蓝莓果渣醋体积分数在0.2%～1.0%范围内增加，样品SC、GC和MC对ABTS自由基清除能力均增加；当体积分数为1.0%时，样品SC、GC和MC的ABTS自由基清除率均最高，分别为98.73%、82.50%、98.16%。结果表明，样品SC、GC和MC具有较强的ABTS自由基清除能力。

由图3C可知，随着蓝莓果渣醋体积分数在2%～10%范围内增加，样品SC、GC和MC对羟基自由基的清除能力均增加；当体积分数为10%时，样品SC、GC和MC的羟基自由基的清除率均最高，分别为90.88%、90.29%、86.61%。结果表明，样品SC、GC和MC具有较强的羟基自由基清除能力，这与谢思芸等[23]的研究结果相似。

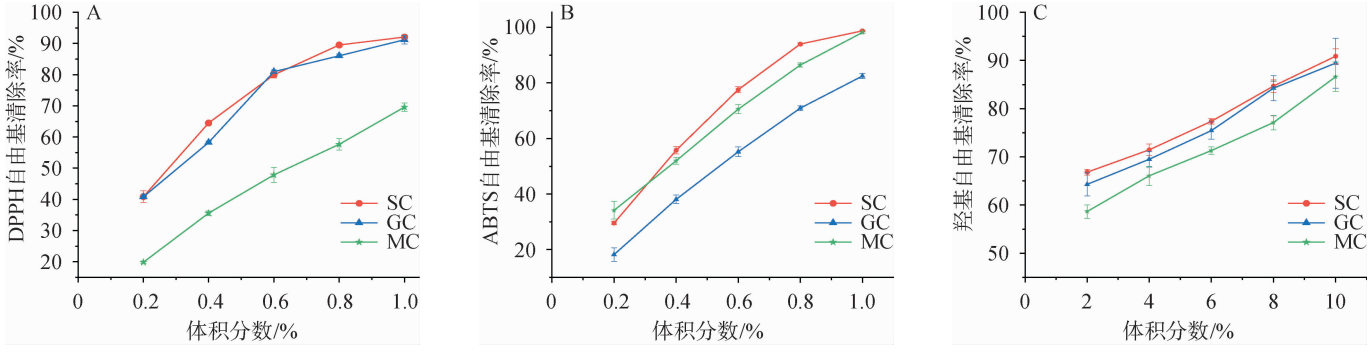


图3 蓝莓果渣醋对DPPH（A）、ABTS（B）及羟基（C）自由基清除能力的测定结果

Fig. 3 Determination results of the scavenging abilities of blueberry pomace vinegar on DPPH (A), ABTS (B) and hydroxyl (C) free radicals

2.4.2 体外降血糖能力分析

抑制α-葡萄糖苷酶活性可通过削弱其将碳水化合物(如淀粉、双糖)分解为可吸收葡萄糖的能力,减少并延缓葡萄糖在小肠的吸收,进而避免餐后血糖骤升、降低血糖波动,最终实现血糖水平的改善[24-26]。抑制α-淀粉酶的活性可延缓体内淀粉的降解和吸收,进而控制血糖[27-28]。蓝莓果渣醋对α-葡萄糖苷酶及α-淀粉酶抑制率测定结果见图4。

由图4A可知,随着蓝莓果渣醋体积分数在0.6%～1.4%范围内增加,样品SC、GC和MC对α-葡萄糖苷酶的抑制能力均增加;当体积分数为1.4%时,样品SC、GC和MC的α-葡萄糖苷酶抑制率均最高,分别为83.96%、84.10%、74.96%。结果表明,样品GC具有较强的α-葡萄糖苷酶的抑制能力。

由图4B可知,随着蓝莓果渣醋体积分数在1%～5%范围内增加,样品SC、GC和MC对α-淀粉酶抑制能力均增加;当体积分数为5%时,样品SC、GC和MC的α-淀粉酶抑制率均最高,分别为86.22%、89.25%和77.99%。结果表明,样品GC具有较强的α-淀粉酶抑制能力。

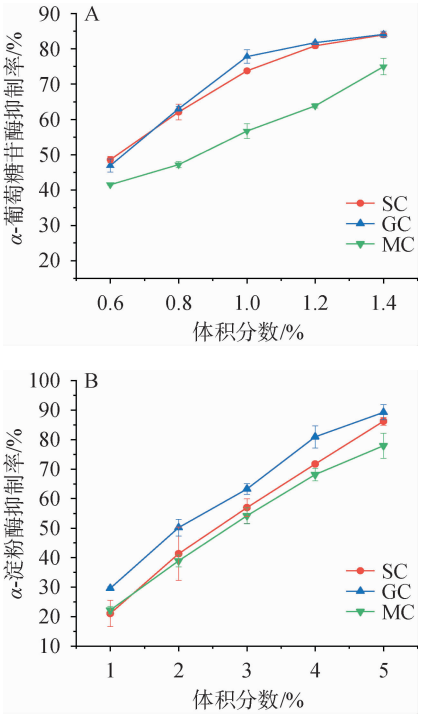


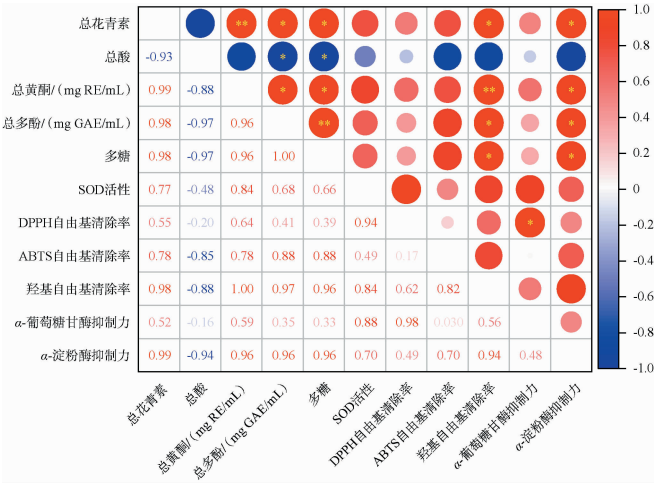
图4　蓝莓果渣醋对α–葡萄糖苷酶(A)、α–淀粉酶(B)活性抑制能力

Fig. 4 Inhibitory abilities of blueberry pomace vinegar against α–glucosidase (A) and α–amylase (B)

2.4.3 相关性分析

本实验采用Pearson双尾检验,对抗氧化能力、降血糖能力及各项理化指标之间的相关性进行分析,结果见图5。红色代表正相关、蓝色代表负相关,颜色越深、圆圈越大表示相关性越强[29]。

由图5可知,蓝莓果渣醋的活性成分含量与抗氧化能力及降血糖能力呈正相关,总酸含量与抗氧化能力及降血糖能力呈负相关。其中,羟基自由基清除率与总花青素、总多酚、多糖显著正相关($P<0.05$),与总黄酮极显著正相关($P<0.01$),与蔡成林[30]研究结论相似,说明总黄酮含量对羟基自由基的影响较显著。DPPH和ABTS自由基清除率与活性成分中的总花青素、总黄酮、总多酚、多糖相关性较弱。α-葡萄糖苷酶抑制率与活性成分中的总花青素、总黄酮、总多酚、多糖相关性较弱。α-淀粉酶抑制率与总花青素、总黄酮、总多酚、多糖呈显著正相关($P<0.05$)。



"*"、"**"分别表示相关性显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。

图5　总酸、活性成分与抗氧化能力及降血糖能力的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of total acid, active ingredients with antioxidant abilities and hypoglycemic abilities

3 结论

本研究以蓝莓果渣为原料,比较蔗糖、果葡糖浆、甜酒酿为碳源对蓝莓果渣醋活性成分、感官品质、挥发性风味成分及体外生物活性的影响。结果表明,果葡糖浆为碳源酿造蓝莓果渣醋(GC)品质最佳,感官评分为80分,总酸、总花青素、总黄酮、总多酚、多糖含量分别为3.87 g/100 mL、34.87 mg/100 mL、0.74 mg RE/mL、1.91 mg GAE/mL、3.27 mg/mL;检出挥发性风味物质59种;DPPH自由基、ABTS自由基、羟基自由基清除率最高分别为91.19%、82.50%、90.29%;α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的抑制率最高分别为84.10%和89.25%。相关性分析结果表明,羟基自由基清除率与总花青素、总多酚、多糖显著正相关($P<0.05$),与总黄酮极显著正相关($P<0.01$),α-淀粉酶抑制率与总花青素、总黄酮、总多酚、多糖呈显著正相关($P<0.05$)。本研究为蓝莓果渣高值化利用提供有效路径,为功能型发酵果蔬制品的品质调控提供技术支撑。

参考文献:

[1] BATTINO M, GIAMPIERI F, CIANCIOSI D, et al. The roles of strawberry and honey phytochemicals on human health: A possible clue on the

molecular mechanisms involved in the prevention of oxidative stress and inflammation[J]. **Phytomedicine**, 2020, 86: 153170.

[2] FERNANDES I, MARQUES F, FREITAS D V, et al. Antioxidant and antiproliferative properties of methylated metabolites of anthocyanins[J]. **Food Chem**, 2013, 141(3): 2923-2933.

[3] 张致豪,王蓓,师丰丰,等.贵州蓝莓蜜营养成分分析[J].食品研究与开发,2022,43(1):152-159.

[4] JOHNSON M H, GONZALEZ DE MEJIA E. Comparison of chemical composition and antioxidant capacity of commercially available blueberry and blackberry wines in Illinois[J]. **J Food Sci**, 2012, 77(1): C141-C148.

[5] 栾浩. 蓝莓果渣花色苷酶法酰基化修饰及其活性研究[D]. 无锡:江南大学,2022.

[6] MUSTAFA B, YIXIAO S, RESAT A, et al. Release and degradation of anthocyanins and phenolics from blueberry pomace during thermal acid hydrolysis and dry heating[J]. **J Agr Food Chem**, 2013, 61(27): 6643-6649.

[7] 张雅欣,李旋,胡佳星,等. 水果及其制品滋味特征及调控方法研究进展[J]. 食品科学,2024,45(14):299-311.

[8] 吴震,吴煜樟,陈莉,等. 桑葚果渣固态发酵醋有机酸及风味特征分析[J]. 食品与发酵工业,2021,47(10):103-108.

[9] 刘敏楠,丛懿洁. 复合果醋的研究进展[J]. 食品工程,2021(2):5-7.

[10] 赵松. 枣渣果醋发酵工艺研究及营养成分分析[D]. 保定:河北农业大学,2013.

[11] 谭亮,李玉林,杲秀珍,等. 改进pH示差法检测不同植物源性食品中花青素的方法[J]. 食品与发酵工业,2022,48(21):276-285.

[12] 袁治浩,卢红梅,李荣源,等. 陈酿方式对赤水晒醋醋醅的影响研究[J]. 中国酿造,2022,41(11):78-83.

[13] 石庆叠. 刺梨醋酿造及功能性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022.

[14] 吴震. 铁皮石斛醋的酿造及功能研究[D]. 贵阳:贵州大学,2021.

[15] 全志刚,王维浩,赵姝婷,等. 小米麸皮水溶性膳食纤维-Cr(Ⅲ)配合物的合成、表征及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学,2021,42(21):46-55.

[16] 魏建敏. 刺梨酵素的制备及功能性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022.

[17] 杨洋. 双菌种发酵山楂酵素及其功能性研究[D]. 天津:天津农学院,2020.

[18] 汪磊. 刺梨多糖的分离纯化、降血糖作用及其对肠道微生态的影响[D]. 广州:华南理工大学,2019.

[19] 管立军,李家磊,王崑仑,等. 乳酸菌发酵对刺五加叶活性成分、体外抗氧化作用与降血糖相关酶的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(7):155-162.

[20] 李瑞雪,于江傲,冉军舰,等. 发酵果蔬汁功能特性及生物转化研究进展[J]. 中国酿造,2023,42(2):22-26.

[21] 禹晓婷. 黑糯米酒工艺优化及发酵过程代谢组学研究[D]. 贵阳:贵州大学,2019.

[22] 邱晓曼,陈程鹏,洪厚胜. 果醋风味改良研究进展[J]. 中国酿造,2020,39(1):12-16.

[23] 谢思芸,钟瑞敏,肖仔君,等. 杨梅果醋体外抗氧化活性的研究[J]. 食品与机械,2012,28(6):125-128.

[24] 李媛. 蓝莓渣中总黄酮的提取纯化及抗氧化性的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.

[25] 吴雪,李毅诺,董永惠,等. 沙棘原花青素的抗氧化和α-葡萄糖苷酶抑制活性[J]. 食品科学,2025,46(6):63-72.

[26] 董玉婷,蔡宏浩,李志朋,等. 乳杆菌发酵提高坛紫菜的抗氧化和抑制糖脂代谢关键酶活性[J]. 食品科学,2022,43(10):162-171.

[27] 杨仙鹤. 余甘子活性成分及其抑制α-葡萄糖苷酶活性作用研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2025.

[28] CHEN R, ZHAO J, SUI Z, et al. Comparative analysis of granular starch hydrolysis and multi-structural changes by diverse α-amylases sources: Insights from waxy rice starch[J]. **Food Chem**, 2024, 444: 138622.

[29] 李晓萌,李佳惠,王雨行,等. 响应面优化莲藕多酚提取工艺及其生物活性研究[J]. 食品科技,2022,47(1):203-211.

[30] 蔡成林,黄庭海,张青峰. 红莓和黑莓叶黄酮类化合物抗氧化活性的比较研究[J]. 生物化工,2020,6(6):33-35.