

蓝莓果实不同发育时期挥发性风味物质变化及差异性分析

乔晨^{1,2}, 赵慧宇², 林佳琦³, 刘成³, 刘有春³, 齐沛沛², 孙晓丽^{1,4*}, 王新全^{2*}

(1. 浙江农林大学食品与健康学院, 浙江杭州 311300) (2. 浙江省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 浙江杭州 310021) (3. 辽宁省果树科学研究所, 辽宁营口 115009) (4. 丽水学院生态学院, 浙江丽水 323000)

摘要: 为探究青果期、转色期和成熟期蓝莓果实风味变化, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-四极杆飞行时间质谱结合气味活性值, 分析了4个蓝莓品种(LBS、ZB、FX和SXL)的挥发性物质组成和含量的变化规律。结果表明, 共鉴定出191种化合物(含40种关键香气物质), 其中萜烯类物质是果实中最主要的香气成分, 其数量(53)和含量($42\,455.36\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高。在3个发育时期中, 转色期是蓝莓果实风味变化的重要阶段, 在青果期、转色期和成熟期中分别检出149种($34\,723.06\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、128种($31\,417.00\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、114种化合物($32\,547.89\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 从化合物含量来看, 醛类和醇类物质逐渐上升, 酮类和酯类物质逐渐下降, 而萜烯类物质在品种间变化规律不同。上述品种在3个发育时期的共性关键差异标志物为己醛和芳樟醇。风味轮廓分析表明, LBS、FX和SXL发育过程中始终以花香为主, 而ZB在青果期以浓郁的花香为主, 随着果实发育成熟, 最终形成一种花香和草本香等混合的独特香气。该研究为蓝莓果实发育过程中风味形成及变化提供理论依据。

关键词: 蓝莓; 发育时期; 挥发性风味物质; 气相色谱-四极杆飞行时间质谱; 气味活性值

文章编号: 1673-9078(2026)4-276-286

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0090

Changes and Differential Analysis of Volatile Flavor Compounds in Blueberry Fruits at Different Developmental Stages

QIAO Chen^{1,2}, ZHAO Huiyu², LIN Jiaqi³, LIU Cheng³, LIU Youchun³, QI Peipei², SUN Xiaoli^{1,4*}, WANG Xinquan^{2*}

(1. College of Food and Health, Zhejiang Agriculture and Forest University, Hangzhou 311300, China)

(2. Institute of Agricultural Product Quality and Nutrition, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

(3. Liaoning Institute of Pomology, Yingkou 115009, China) (4. College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China)

Abstract: To investigate flavor changes in blueberry fruits during the green fruit stage, mid-ripening stage, and mature stage, headspace-solid-phase microextraction-gas chromatography-quadrupole flight time mass spectrometry in combination with odor activity value was used to analyze variations in the composition and content of volatile compounds of four blueberry varieties (LBS, ZB, FX, and SXL). The results showed 191 compounds, including 40 key aroma compounds, with terpenes being the predominant

引文格式:

乔晨, 赵慧宇, 林佳琦, 等. 蓝莓果实不同发育时期挥发性风味物质变化及差异性分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 276-286.

QIAO Chen, ZHAO Huiyu, LIN Jiaqi, et al. Changes and differential analysis of volatile flavor compounds in blueberry fruits at different developmental stages [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 276-286.

收稿日期: 2025-01-19; 修回日期: 2025-04-07; 接受日期: 2025-04-09

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-29-jg-4)

作者简介: 乔晨(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: qiaochen072024@163.com; 共同第一作者: 赵慧宇(1986-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品质量与安全, E-mail: zhaohuiyu64@163.com

通讯作者: 孙晓丽(1988-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: sxl2015@lsu.edu.cn; 共同通讯作者: 王新全(1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品质量与安全, E-mail: wangxinquan212@163.com

aroma components in blueberry fruits and exhibiting the highest number (53) and concentrations ($42\,455.36\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Among the three developmental stages, the mid-ripening stage was identified as a critical phase for flavor transformation in blueberry fruits. Specifically, 149 ($34\,723.06\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 128 ($31\,417.00\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and 114 compounds ($32\,547.89\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) were detected in the green fruit, mid-ripening, and mature stages, respectively. In terms of compound concentrations, aldehydes and alcohols gradually increased, whereas ketones and esters gradually decreased. However, the concentration of terpenes varied differently across cultivars. The common key differential marker compounds in the varieties at the three developmental stages were hexanal and linalool. Flavor profile analysis indicated that LBS, FX, and SXL predominantly exhibited a floral aroma throughout development, whereas ZB displayed a strong floral aroma during the green fruit stage that evolved into a unique mixed aroma characterized by floral and herbal aromas as the fruits matured. This study provides a theoretical foundation for understanding the formation and variation of flavor during the development of blueberry fruits.

Key words: blueberry; developmental stage; volatile flavor compounds; gas chromatography-quadrupole flight time mass spectrometry; odor activity value

蓝莓被誉为“超级水果”，联合国粮农组织已将其列为五大健康食品之一^[1,2]。作为人们日常饮食中最受欢迎的软质水果之一^[3]，蓝莓独特的香气风味已成为影响消费者接受度的主要因素。蓝莓果实生长发育过程中会产生多种挥发性有机化合物，包括醛类、醇类、酯类、酸类、酮类和萜烯类等^[4]。这些挥发性有机化合物的共同作用与果实香气直接相关，决定了果实的基本香气特征^[5]。

蓝莓果实的成熟过程，不仅伴随着生理和生化结构的显著变化，导致果实颜色、硬度和滋味的改变，更重要的是这些变化会影响挥发性风味化合物的含量和组成^[6,7]。蓝莓挥发性风味化合物含量和组成受到多种因素的影响，包括品种、生长发育程度、栽培条件、采后处理和加工技术^[8-10]。其中，品种和生长发育程度是影响果实香气产生和积累的关键因素。先前的研究发现，在水果发育过程中，未成熟果实中主要香气成分为醇类和醛类化合物；而在成熟果实中香气成分以萜烯类、C6类化合物为主，并且大多数挥发性化合物主要在成熟阶段产生^[11-14]。这些结果表明在果实生长发育过程中其香气积累具有一定的变化规律。

然而，由于挥发性风味化合物在果实中的含量普遍较低，在不同品种或同一品种的不同生长发育时期中香气成分的含量和组成均具有较大的差异，蓝莓果实生长发育过程中的风味研究长久以来一直被忽视。目前，有关蓝莓果实发育的研究大多集中于单一品种间的风味比较、抗氧化活性成分（花青素、黄酮等）以及理化性质（糖、酸、维生素C）等方面^[4,15,16]，对挥发性香气化合物在不同品种的不同果实发育时期中关键香气成分的变化规律鲜有报道。因此，深入蓝莓果实发育香气挥发物的相关研究显得尤为迫切和必要。

本研究对4个蓝莓品种在3个发育时期（青果期、

转色期和成熟期）的挥发性风味化合物进行分析比较，通过计算气味活性值（Odor Activity Value, OAV）筛选出关键香气组分，并探究各类型化合物在果实发育过程中的积累变化规律，为后续蓝莓品质提升、品种改良以及加工原料的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

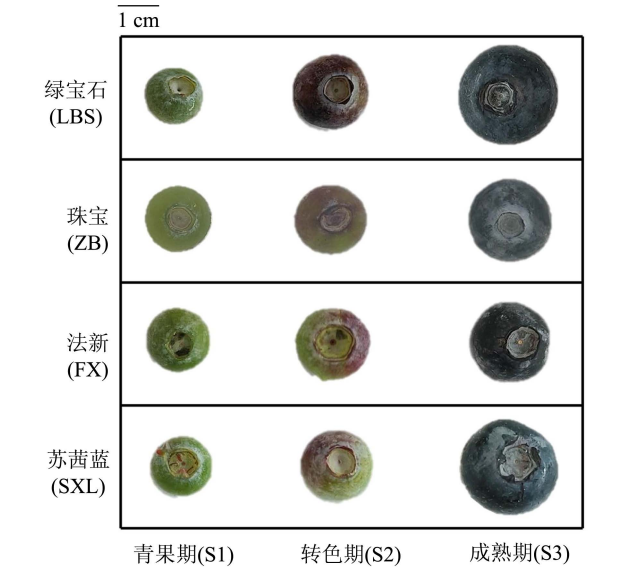


图 1 不同品种和发育时期的蓝莓果实表型图

Fig.1 Phenotypic of blueberry fruits of different varieties and developmental stages

本研究选取了4个具有代表性的南高丛蓝莓品种，分别在3个不同发育时期进行样品采集。这些样品于2023年3月至6月期间，在中国辽宁省果树研究所进行收获。所涉及的4个蓝莓品种分别为：“绿宝石”（LBS）、“珠宝”（ZB）、“法新”（FX）和“苏茜蓝”

(SXL), 具体样品表型信息如图 1 所示。所有品种均在统一的栽培条件下生长。所选样品大小均匀、成熟度一致且无机械损伤或微生物感染。每个品种各选择 3 株生长正常、长势相似的结果树作为生物学重复。根据蓝莓果实的颜色和质地, 新鲜果实可分为 3 个发育时期, 青果期 (S1, 深绿色且质地坚硬)、转色期 (S2, 绿色或粉绿色, 质地偏软) 和成熟期 (S3, 蓝色且质地柔软), 在上述发育时期采样时, 每株树随机摘取 50.0 g 果实样品。果实采集后立即使用液氮进行冷冻处理, 随后存放于 -80 °C 的冰箱中以保持其新鲜全果状态, 风味分析前将样品取出匀浆, 并进行样品前处理。

氯化钠 (分析纯), 中国广东光华科技股份有限公司; 正构烷烃混合标准品 (C5-C32, 色谱纯)、2-甲基-3-庚酮 (99%), 美国 Sigma-Aldrich 公司; 蒸馏水, 中国杭州娃哈哈集团有限公司。

1.2 仪器与设备

20 mL 螺旋小瓶、MPS-2 多功能自动进样器, 德国 Gerstel 公司; 50/30 μm 二乙烯苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷 (DVB/CAR/PDMS) SPME 萃取头, 美国 Supelco 公司; 7890B-7250 气相色谱-四极杆飞行时间质谱 (Gas Chromatography-Quadrupole Flight Time Mass Spectrometry, GC-QTOF-MS)、DB-5MS 弹性石英毛细管色谱柱 (60 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm), 美国 Agilent 公司。

1.3 顶空固相微萃取分析方法

本研究中挥发性化合物的萃取方法参考了 Zhang 等^[17]的方法, 并进行了适当的修改。首先, 将均质化的蓝莓样品 (2.0 g) 加入到 20 mL 的顶空样品瓶中, 接着加入 2 mL 的饱和氯化钠溶液和 200 μL 的 2-甲基-3-庚酮内标溶液 (质量浓度为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。随后, 用聚四氟乙烯 (PTFE) 硅胶隔膜密封顶空瓶。使用 Gerstel 自动进样器, 将顶空瓶放入自动振荡器中, 以 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的搅拌速度在 50 °C 下平衡 15 min。平衡后, 将 SPME 纤维头在 50 °C 下置于顶空萃取 30 min。最后, 将纤维头导入气相进样口进行热解吸 3 min。

1.4 GC-QTOF-MS 分析方法

GC-QTOF-MS 条件参考了文献^[17,18]。使用 Agilent 7890B-7250 GC-QTOF-MS 气相色谱-质谱仪对挥发性物质进行分离和鉴定。在 DB-5 MSUI 毛细管柱 (60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm) 上进行色谱分析, 载气为氦气 (纯度 $\geq$ 99.999%), 流量为 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;

溶剂延迟 3 min。升温程序: 在 40 °C 下保持 2 min, 以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升至 280 °C 并保持 10 min; 不分流模式进样, 运行 60 min。质谱仪分析在 EI 电离模式下进行, 电子轰击能量为 70 eV, 离子源温度为 230 °C。质谱法采用全扫描模式, 扫描质量范围 33~500 u。发射电流 5 μA , 四极杆温度为 250 °C。

1.5 定性与定量分析

使用 Agilent MassHunter 未知分析软件将原始数据转换为 SureMass 格式, 然后进行解卷积, 通过比较 MS 库 (NIST 2017) 鉴定挥发性化合物, 将匹配因子超过 75 的物质保留。在相同的色谱条件下, 使用 1 μL 正构烷烃 (C5-C32) 的混合标准品进样并计算保留指数 (Retention Index, RI), 将计算出的 RI 与谱库 RI 比较, 选择 RI 偏差小于 30 的化合物。

采用内标半定量法进行定量分析, 以 2-甲基-3-庚酮作为内标, 测定各挥发性化合物的相对含量。计算公式如下:

$$C_i = \frac{R \times V \times C}{M} \times 1000 \quad (1)$$

式中:

C_i ——目标化合物质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;

R ——目标化合物峰面积与内标峰面积比值;

V ——内标体积, 200 μL ;

C ——内标质量浓度, 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;

M ——蓝莓样本的添加量, 2.0 g。

此外, OAV 值是化合物含量与水中香气阈值的比值, 是评估单个香气化合物对整体香气特征贡献的重要指标。一般只有 OAV >1 的挥发性物质在整体香气呈现中具有贡献作用, 被确定为关键香气成分。OAV 值的计算公式如下:

$$O = \frac{C_i}{T_i} \quad (2)$$

式中:

O ——气味活度值 (OAV);

C_i ——目标化合物质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;

T_i ——目标化合物在水中的香气阈值 (OT), $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.6 统计分析

所有样本均设 3 个重复。使用 Excel 2019 进行数据处理和统计分析。使用 Origin 2024 软件绘制条形图、柱状图和雷达图。使用 MetaboAnalyst 6.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>) 绘制聚类热图和偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares-Discrimination Analysis, PLS-DA)。

2 结果与讨论

2.1 蓝莓果实不同发育时期挥发性化合物比较分析

根据 HS-SPME-GC-QTOF-MS 分析结果，蓝莓果实的挥发性成分如图 2 所示。同前期文献报道检出的 38^[12]、76^[4] 个物质相比，本研究中共鉴定出 191 种挥发性风味物质，主要由脂肪酸衍生物、支链氨基酸衍生物和萜烯类化合物等组成，包括萜烯类 53 种、烃类 42 种、醇类 23 种、醛类 18 种、酮类 17 种、酯类 16 种、杂环 14 种、酚类 4 种以及其他物质 4 种。萜烯类在香气挥发物总数中占主导地位（数量占比为 28.27%），其次是烃类（22.00%）、醇类（12.04%）。从化合物含量来看，萜烯类和醛类物质总含量最高，发育过程中其总含量占比范围分别为 26.07%~52.36%、20.66%~49.69%，这表明萜烯类和醛类物质是蓝莓果实生长发育全过程中最主要的风味成分。其次是烃类物质（10 252.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），主要以阈值较高、香气贡献较小的烷烃类为主。然而烷烃类物质是形成杂环物质的重要前体物质，对蓝莓果实风味的形成也有一定的作用^[19]。

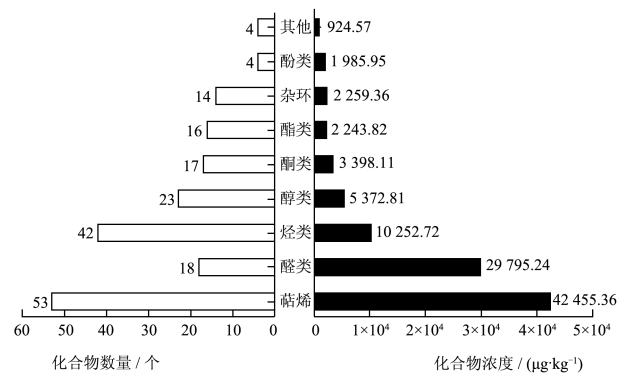


图 2 蓝莓果实中挥发性化合物的数量和含量

Fig.2 The number and concentration of volatile compounds in blueberry fruits

韦恩图可以直观地呈现蓝莓果实不同发育时期及不同品种间的共有及特有挥发性物质。图 3a 显示，3 个发育时期的果实分别检出 149 种、128 种、114 种化合物，总含量分别为 34 723.06、31 417.00 和 32 547.89 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中共有物质 82 种，特有物质分别有 38 种、14 种、21 种，其相对含量分别占各自时期总含量的 4.65%、1.96%、5.25%。而根据不同品种分析发现（图 3b），LBS、ZB、FX 和 SXL 中分别检出 123 种、113 种、124 种和 96 种化合物，总含量分别

为 22 395.73、32 549.59、27 224.73 和 16 517.90 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中共有物质 54 种，特有物质分别有 19 种、21 种、20 种、10 种，其相对含量分别占各自品种总含量的 1.13%、18.44%、4.53%、1.16%。这些特有化合物可能对蓝莓果实不同时期和品种的特征香气起到修饰作用。而 ZB 中的特有物质占比最大，这可能会导致其风味与其他品种具有较大差异。

在 4 个蓝莓品种的所有发育时期中共同存在的化合物有 23 种：8 种萜烯、3 种醛类、1 种醇类、1 种酮类、1 种酚类、8 种烃类和 1 种杂环。这 23 种化合物在蓝莓果实发育过程中含量丰富且相对稳定，相对含量占比为总含量的 33.32%~68.42%，说明蓝莓果实不同品种及不同时期间的主要成分相同，只是这些各自具有独特气息的风味成分以不同比例组合在一起，形成了独特的香气^[20]。尤其是 2-己烯醛（11 290.01 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、己醛（9 504.53 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、 α -松油醇（8 413.69 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和香叶醇（5 865.66 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）这四种共有物质，它们在蓝莓果实发育全过程均保持最高水平，这与之前的研究结果相似。Shi 等^[4]研究发现，己醛在所有成熟阶段均保持较高水平；张小玲等^[21]亦发现不同成熟度蓝莓中都含有的挥发物为己醛、2-己烯醛、2-己烯醇、 α -松油醇。

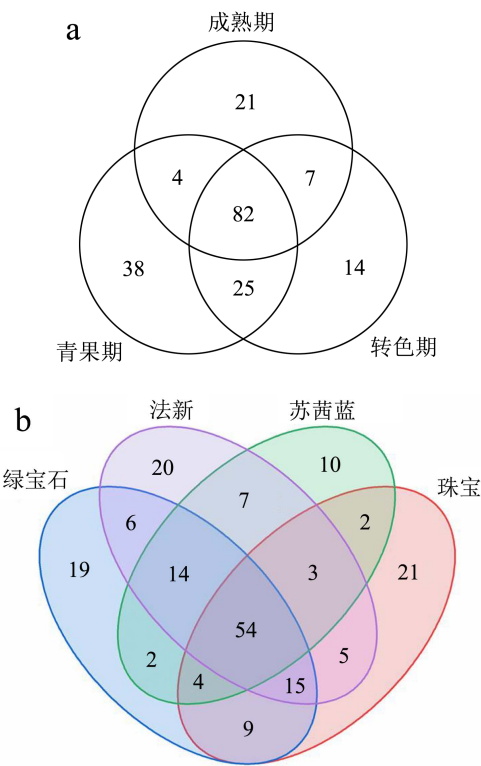


图 3 蓝莓果实中挥发性化合物韦恩图

Fig.3 Venn diagram of volatile compounds in blueberry fruits

2.2 蓝莓果实不同发育时期挥发性化合物数量及含量变化分析

如图 4a 所示，4 个蓝莓品种的化合物总数均在青果期中最高，并随着蓝莓果实的不断发育而逐渐减少。张小玲等^[21]在未熟、成熟、过熟蓝莓中分别检测出 15 种、11 种和 13 种挥发物成分，这与本研究结果相似。LBS 在青果期、转色期和成熟期中分别检测出 91 种、77 种和 74 种；ZB 中分别检测出 94 种、82 种和 76 种；FX 中分别检测出 89 种、86 种和 70 种；SXL 中分别检测出 73 种、69 种和 56 种。此外，通过对同一发育时期不同蓝莓品种之间的化合物总数量综合分析，ZB 在青果期（94）和成熟期（76）的化合物总数量均为最高，而在转色期中 FX 的化合物总数量最高（86）。

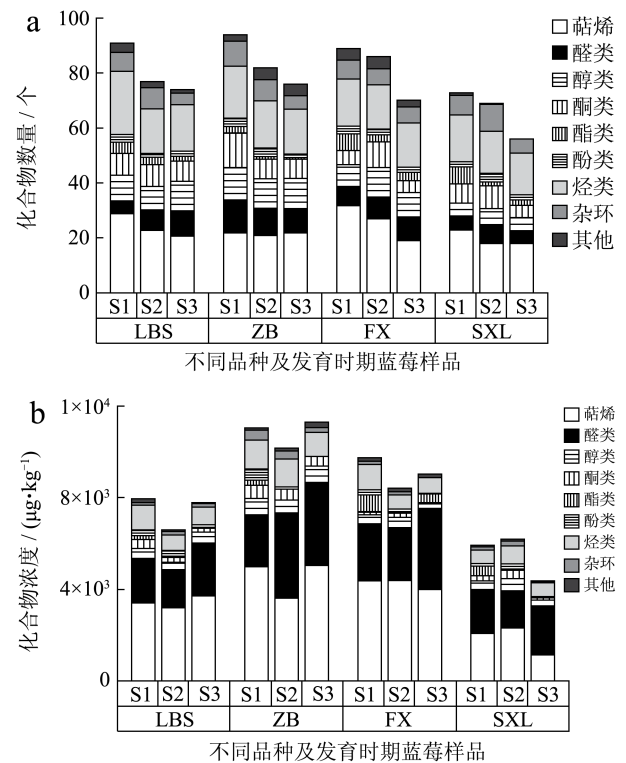


图 4 4 个蓝莓品种不同发育时期果实中挥发性化合物的数量和含量

Fig.4 The number and concentration of volatile compounds in four blueberry varieties fruits at different developmental stages

从化合物总含量来看，4 个蓝莓品种在果实发育过程中化合物总含量呈现不同的积累模式（图 4b）。其中 LBS、ZB、FX 呈现出“V”型趋势，化合物总含量分别从青果期的 $7\,972.69$ 、 $11\,052.10$ 和 $9\,767.29\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 变化为成熟期的 $7\,808.92$ 、 $11\,305.79$ 和 $9\,035.29\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；而在 SXL 中则呈现“八”型趋势，化合物总含量在转色期达到最大值（ $6\,189.03\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。综上所述，蓝莓

化合物总含量在转色期有显著的变化，这表明转色期是产生蓝莓果实风味变化的重要阶段。此外，ZB 在所有发育时期的化合物总含量均最高，这表明 ZB 在果实发育全过程中挥发性风味组成最为丰富。

2.3 蓝莓果实不同发育时期中关键香气组分分析

挥发性物质对蓝莓果实风味的贡献程度，不仅与挥发性物质的含量有关，还与其阈值有关。根据化合物的含量及香气阈值计算出 OAV，并将 $\text{OAV} > 1$ 的成分视为对整体香气有重要贡献的关键香气成分。本研究共鉴定出 40 种关键香气组分，包括 14 种萜烯类、11 种醛类、3 种醇类、6 种酮类、2 种酯类、3 种杂环类以及 1 种烃类物质，其对应的 OAV 和香气描述如表 1。

2.3.1 萜烯类化合物

萜烯类物质是蓝莓中最主要的物质，赋予蓝莓独特的怡人花香^[22]。在蓝莓果实发育的 3 个时期中，关键萜烯类香气物质的总含量均在较高水平，分别为 $10\,273.20$ 、 $9\,586.57$ 和 $10\,346.56\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。关键萜烯类物质总含量受品种影响较大，在 LBS 和 FX 中整体呈上升趋势，分别在成熟期（ $3\,072.05\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和转色期（ $3\,285.32\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）达到最高值；ZB 在青果期含量最高（ $3\,611.98\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）；SXL 相较其他品种，3 个时期的关键萜烯类物质总含量均为最低，在转色期最高为 $1\,641.64\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。萜烯类物质是通过 C5 单位异戊烯焦磷酸（Isopentenyl Pyrophosphate, IPP）缩合而成，进而被分别催化形成单萜（C10）、倍半萜（C15）、多萜（nC5）等萜烯类物质^[23]。其中，IPP 主要是通过甲基赤磷酸糖醇和甲羟戊酸途径合成，直接介导合成的基因是萜烯合酶（Terpene Synthase, TPS）基因^[20]。萜烯类物质的高含量研究结果表明，TPS 在蓝莓果实的发育全过程都有较高水平的表达。

香叶醇、月桂烯、对伞花烃和萜品油烯是 4 个蓝莓品种在不同果实发育时期共有的萜烯类香气物质，共同构成“草本、玫瑰、柑橘”香气。 β -石竹烯（ $1\,134.30\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、柠檬烯（ $476.03\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、 β -紫罗兰酮（ $305.61\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、 β -环柠檬醛（ $299.41\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 1,8-桉叶素（ $222.16\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）在青果期相对含量最高，主要呈现“果香、草本、木香”等香气。在转色期，香叶基丙酮（“绿色、果香、木香、玫瑰香”）、柠檬醛（“柠檬、果香”）和环氧胡柚烯（“草本”）开始大量生成，并分别在成熟期达到峰值 309.09 、 210.65 和 $103.34\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。最后，经过一系列的转化合成，成

熟期果实的萜烯类特征香气基本形成,如芳樟醇、香叶醇和(E)- β -罗勒烯在成熟期相对含量较高。芳樟醇($11\,778.11\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)是相对含量最高的萜烯类化合物,其OAV $>1\,000$,对蓝莓果实香气的贡献显著,仅在ZB转色期未检出。这一发现与先前Du等^[12]对南高丛蓝莓的研究结果相一致,芳樟醇是蓝莓中主要的芳香活性挥发性物质,有助于“甜香、花香和果香”的香气释放。此外,芳樟醇在4℃和30℃下可降解为香叶醇^[17],这表明蓝莓果实中的香叶醇可能源自芳樟醇的转化。

2.3.2 醛类化合物

醛类物质是“绿色”、“青草”以及“果香”等香气的重要贡献者^[24],其相对含量在所有品种中均随果实发育程度的增加整体呈上升趋势。当蓝莓果实逐渐成熟后,醛类和酯类的含量急剧上升^[4]。在果实发育过程中,醛类物质主要来源于脂氧合酶途径降解脂质物质,而醛类化合物在成熟期果实中广泛存在,这一现象可以归因于成熟新鲜水果果实中的高脂质含量为醛类物质的生成提供了有利条件^[18]。关键醛类物质相对含量在LBS、ZB、FX和SXL中分别占成熟期蓝莓果实中总含量的27.27%、29.19%、27.50%和49.69%,可以看出醛类物质是SXL成熟期主要的香气构成成分。

蓝莓果实中的共有关键醛类香气物质包括通过Strecker降解途径衍生而来的2-己烯醛^[25]以及由不饱和脂肪酸氧化形成的己醛和庚醛^[26],这三种物质共同赋予蓝莓果实的“绿色、果香”香气。其中己醛OAV >100 ,对蓝莓果实的“绿色、叶香、果香、木香”香气有显著贡献。反-2-辛烯醛在青果期含量最高($72.77\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);辛醛($106.53\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和戊醛($77.00\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)在转色期含量最高;而反式-2-壬烯醛($98.21\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)在成熟期含量最高,这些物质构成了不同发育时期中蓝莓果实的特征醛类香气。苯乙醛(“绿色、三叶草、可可”)仅在LBS和SXL的转色期中检出,这些可以作为蓝莓果实未成熟时期的标志物质。此外,癸醛(“蜡香、柑橘、花香”)和反式-2-庚烯醛(“绿色、蔬菜、脂香”)是ZB青果期的特有物质,而反式-2-己烯醛(“绿色、香蕉、脂香、干酪”)是ZB的特有物质,这些特有物质可能会造成该品种的香气特异性。

2.3.3 醇类化合物

醇类化合物作为不饱和脂肪酸氧化过程的副产物,具有蘑菇、清香、花香、蜡香、脂香等感官风味^[27]。在蓝莓果实发育过程中,关键醇类物质相对含量在所有品种中整体呈现与醛类物质一致的上升趋势,这可能是由于醛类化合物在醇脱氢酶作用下不断转化为醇

类化合物^[28]。其中,己醇($17.37\sim 67.50\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)作为共有的关键醇类物质,为蓝莓果实提供了“果香、甜香和绿色”香气,其相对含量随着果实不断发育成熟呈现上升趋势。具有“脂香、玫瑰香和柑橘香”的壬醇,其相对含量也呈现上升趋势,并在成熟期达到最高值($156.86\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。而2-十一烷醇(“新鲜、蜡香”)仅在LBS($51.40\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和ZB($36.77\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的成熟期中存在,是蓝莓果实成熟期的特有关键物质。

2.3.4 酮类化合物

酮类物质同样是脂肪的氧化产物之一,在所有蓝莓品种中其相对含量随着果实发育程度的提高而下降。在LBS和ZB中,青果期关键酮类物质含量最高,分别为 $191.14\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $490.87\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;而在FX和SXL中,转色期关键酮类物质含量最高,分别为 $123.04\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $329.81\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大马士酮($762.29\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2-十一烷酮($675.19\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2-壬酮($592.61\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和6-甲基-5-庚烯-2-酮($212.47\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)是蓝莓果实中相对含量最高的关键酮类物质,共同构成“果香”和“木香”风味。部分酮类物质因阈值较低已被证实对蓝莓果实的风味有显著的贡献作用^[29],如大马士酮的OAV $>1\,000$,赋予了独特的“苹果、玫瑰、蜂蜜、烟草”风味。此外,1-辛烯-3-酮和5-壬酮是ZB青果期的特有物质。其中1-辛烯-3-酮OAV为1078.69,是造成“草药、蘑菇、泥土、发霉”特殊香气的主要因素^[12]。

2.3.5 酯类、杂环类和烃类化合物

酯类物质主要在青果期积累,随着蓝莓果实的成熟而逐渐消解,这与Shi等^[4]研究结果相反。这是由于酯类化合物是野生低丛蓝莓的主要风味物质^[31],而本研究选取的是南方高丛蓝莓,这表明挥发性成分在不同果实品种间具有不同的组成。乙酸异戊酯(OAV >10)和乙酸叶醇酯(OAV >10)是蓝莓果实中的关键酯类物质,具有“果香”香气,可作为青果期蓝莓果实的标志物质。

杂环类化合物是主要包括呋喃、吡嗪等,通常具有烤香、爆米花香、土豆香、可可等香气^[32]。其中,(2S-顺)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃和2-戊基呋喃随着果实发育程度的提高呈下降趋势,它们分别具有“玫瑰香、天竺葵”和“果香、绿色、土豆香”,以及丰富的金属味。而2-异丁氧基-3-甲氧基吡嗪仅存在于ZB的青果期(OAV=1233.60),对“青豆香、绿色、松香”香气贡献最显著。

此外,苯乙烯作为唯一的键烃类香气成分,是蓝莓果实中“脂香”风味的重要来源,仅在SXL的青果期未检测到,其相对含量随着果实的发育成熟而不断下降。

表 1 蓝莓果实不同发育时期中OAV>1的关键香气物质

Table 1 Key aromatic compounds with OAV > 1 during different developmental stages of blueberry fruits										OAV									
序号	化合物名称	CAS 号	香气描述 ^a	阈值 ^[30] b/(μg/kg)	绿宝					珠宝					法新				
					石-S1	石-S2	绿宝	绿宝	石-S3	珠宝	珠宝	珠宝	珠宝	石-S3	法新	法新	法新	法新	苏茜
A1	月桂烯	123-35-3	胡椒、脂香、塑料	1.2	106.81	80.58	283.41	283.41	195.33	324.15	605.01	112.93	206.85	293.25	54.28	59.13	63.27	苏茜	蓝-S3
A2	对伞花烃	99-87-6	新鲜、柑橘、木香	11.4	7.99	7.07	6.21	41.12	41.12	16.48	16.56	12.94	12.79	16.66	3.20	3.97	1.28	苏茜	蓝-S2
A3	柠檬烯	138-86-3	柑橘、草本、樟脑	200.0	<1	1.16	—	—	—	—	—	<1	<1	—	<1	—	—	—	—
A4	1,8-桉叶素	470-82-6	桉树、草本、樟脑、药香	1.1	49.07	42.38	25.53	19.74	19.74	29.47	20.47	133.15	59.43	53.58	—	—	—	—	—
A5	(E)-β-罗勒烯	3779-61-1	甜香、草本	34.0	1.44	1.60	5.54	—	—	5.98	9.16	1.78	—	5.87	1.01	1.23	1.06	—	—
A6	萜品油烯	586-62-9	新鲜、木香、甜香、松香、柑橘	200.0	<1	<1	<1	<1	1.00	1.21	1.17	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
A7	芳樟醇	78-70-6	玫瑰、百合、柑橘香、甜香	1.0	994.74	1484.56	1304.91	1562.24	—	—	—	21.33	1060.73	1383.62	1461.77	877.19	1051.15	575.86	—
A8	β-环柠檬醛	432-25-7	草本、玫瑰、烟草、果香	5.0	25.89	—	—	—	—	—	—	16.71	—	—	17.28	13.18	3.52	—	—
A9	香叶醇	106-24-1	花香、果香、玫瑰、蜡质、柑橘	1.1	275.83	105.82	649.59	579.79	805.08	805.08	1215.49	285.77	650.63	568.16	51.68	84.10	60.50	—	—
A10	柠檬醛	5392-40-5	柠檬、甜香	40.0	—	—	1.37	—	1.88	2.94	—	—	—	<1	—	—	—	—	—
A11	β-石竹烯	87-44-5	丁香、木香、香料	64.0	4.83	1.34	1.18	4.74	4.74	1.47	1.30	7.10	4.60	<1	1.05	—	—	—	—
A12	香叶基丙酮	3796-70-1	绿色、果香、蜡香、玫瑰、木香	60.0	—	<1	2.00	<1	<1	<1	<1	—	1.07	—	—	2.27	2.39	—	—
A13	β-紫罗兰酮	14901-07-6	花香、木香、果香、浆果香	8.4	6.60	4.39	1.47	14.13	9.06	3.01	8.43	5.33	1.66	7.23	5.40	1.69	—	—	—
A14	环氧胡柚烯	19888-33-6	草本	10.0	—	—	4.28	1.28	1.97	—	—	1.30	<1	5.40	—	1.21	<1	—	—
B1	戊醛	110-62-3	发酵、面包香、果香、浆果香	12.0	<1	<1	—	1.23	1.70	—	—	1.60	2.26	<1	1.16	1.65	—	—	—
B2	己醛	66-25-1	绿色、叶香、果香、木香	5.0	86.21	187.50	150.57	76.83	210.83	263.45	126.97	165.95	203.78	82.34	178.42	168.06	—	—	—
B3	2-己烯醛	505-57-7	杏仁香、果香、绿色、苹果、李子、蔬菜	30.0	46.93	19.43	43.69	<1	1.82	1.25	58.19	41.20	47.56	50.29	22.02	43.62	—	—	—
B4	反式-2-己烯醛	6728-26-3	绿色、香蕉、脂香、干酪	110.0	—	—	—	7.01	18.49	16.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B5	庚醛	111-71-7	新鲜、脂香、绿色、草本	2.8	2.32	1.23	3.40	5.08	5.57	6.25	2.49	3.50	3.18	2.37	4.06	3.14	—	—	—
B6	反式-2-庚烯醛	18829-55-5	绿色、蔬菜、脂香	51.0	—	—	—	1.26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B7	辛醛	124-13-0	蜡香、柑橘、绿色、草本、脂香	0.8	—	20.56	19.30	66.98	33.66	44.50	—	43.25	7.74	—	35.69	8.58	—	—	—
B8	苯乙醛	122-78-1	绿色、花香、风信子、三叶草、蜂蜜、可可	6.3	—	<1	—	—	—	—	—	—	—	—	1.56	—	—	—	—
B9	反-2-辛烯醛	2548-87-0	甜香、绿色、柑橘、黄瓜、脂香	3.0	—	—	7.58	24.26	16.17	16.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B10	癸醛	112-31-2	蜡香、柑橘、花香	9.0	—	—	—	19.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B11	反式-2-壬烯醛	18829-56-6	脂香、绿色、黄瓜、柑橘	0.2	—	—	93.58	97.66	108.26	216.02	—	76.40	97.82	—	—	109.50	—	—	—

续表1

序号	化合物名称	CAS 号	香气描述 ^a	阈值 ^[30] b/(μg/kg)	OAV											
					绿宝 石-S1	绿宝 石-S2	绿宝 石-S3	珠宝 -S1	珠宝 -S2	珠宝 -S3	法新 -S1	法新 -S2	法新 -S3	苏茜 蓝-S1	苏茜 蓝-S2	苏茜 蓝-S3
醇 类	C1 己醇	111-27-3	果香、甜香、绿色	5.6	3.10	6.49	8.36	5.67	4.05	9.03	4.25	7.29	7.63	12.05	8.88	8.97
	C2 壬醇	143-08-8	新鲜、脂香、花香、玫瑰	45.5	—	—	2.13	<1	<1	1.32	—	<1	—	—	—	—
	C3 2-十一烷醇	1653-30-1	新鲜、蜡香	8.6	—	—	5.98	—	—	4.28	—	—	—	—	—	—
酮 类	D1 1-辛烯-3-酮	4312-99-6	草木、蘑菇、泥土、发霉	0.036	—	—	—	1 078.69	—	—	—	—	—	—	—	—
	D2 6-甲基-5-庚-2-酮	110-93-0	柑橘、绿色、发霉、柠檬、苹果	68.0	—	—	—	1.00	<1	—	<1	<1	—	<1	<1	<1
	D3 5-壬酮	502-56-7	—	8.2	—	—	—	7.86	—	—	—	—	—	—	—	—
酯 类	D4 2-壬酮	821-55-6	新鲜、绿色、泥土、草木	41.0	2.24	1.95	—	1.50	4.59	3.11	—	—	—	—	1.07	—
	D5 2-十一烷酮	112-12-9	蜡香、果香、奶油、脂香、鸛尾花	5.5	10.67	5.86	8.26	30.88	23.47	20.10	5.07	7.30	3.83	3.81	3.50	—
	D6 大马士酮	23726-93-4	苹果、玫瑰、蜂蜜、烟草、甜香	0.056	722.49	1 288.73	160.19	1 575.26	1 138.69	460.46	—	1 056.99	—	2 178.48	4 095.31	935.65
杂 环	E1 乙酸异戊酯	123-92-2	甜香、果香、香蕉	2.0	—	—	—	—	—	—	26.31	11.09	8.31	5.10	—	—
	E2 乙酸叶醇酯	3681-71-8	绿色、果香、香蕉、苹果	31.0	2.35	—	—	—	—	—	10.80	—	—	5.80	1.04	—
	F1 2-戊基呋喃	3777-69-3	果香、绿色、土豆香、金属味	5.8	—	1.07	—	—	—	—	—	3.44	—	—	2.57	1.29
炔 类	(2S-顺)-四氢化-4-甲基-2-基-2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	3033-23-6	玫瑰、天竺葵、金属味	0.5	55.20	—	—	30.82	22.13	9.47	—	—	—	—	—	—
	F3 2-异丁氧基-3-甲氧基吡喃	24683-00-9	青豆、绿色、甜香、松香	0.0062	—	—	—	1233.60	—	—	—	—	—	—	—	—
	G1 苯乙烯	100-42-5	甜香、脂香、花香	3.6	22.09	18.19	15.38	104.82	82.22	83.98	105.90	23.71	18.68	-	15.64	19.75

注: a 香气描述参考 TGSC 线上网站 (<http://www.thegoodscentscompany.com/>); b 香气阈值数据来自水中的香气阈值; - 表示未检出或未查询到。

2.4 蓝莓果实不同发育时期中风味差异性分析

2.4.1 聚类热图分析

进一步结合聚类热图对蓝莓果实的 40 种关键香气组分进行分析，如图 5 所示（编号同表 1），12 个蓝莓样本可以聚为四类。其中，青果期的 FX 与 LBS 为第一类，成熟期和转色期的 LBS、FX 以及不同时期的 SXL 为第二类，转色期和成熟期的 ZB 聚为第三类，而青果期的 ZB 单独为第四类。说明 SXL 各时期挥发性物质组成及含量最相近，而 ZB 各时期挥发性物质组成及含量与其他样本差异较大，具有独特的香气。

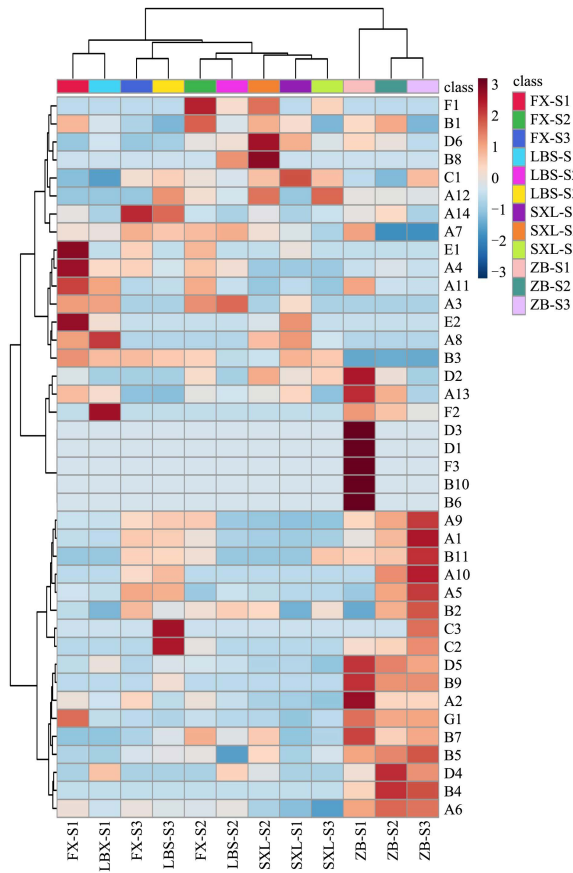


图 5 蓝莓果实中关键香气物质 Heatmap 分析

Fig.5 Heatmap analysis of key aromatic components in blueberry fruits

2.4.2 偏最小二乘法判别分析

在本实验中，建立了关键香气成分与 4 个蓝莓品种的 3 个发育时期样品之间相关性的模型，使用变量投影重要性（Variables Importance in Projection, VIP）确定 PLS-DA 模型中的关键差异标志物质（图 6）。VIP 值越高，组间香气成分的差异越大。根据 VIP>1 的条件分别考察了每个品种在 3 个发育时期的关键差异标志物的数量，分别为 7 种（LBS）、5 种（ZB）、8 种（FX）和 5 种（SXL），具体化合物包括芳樟醇、

香叶醇、月桂烯、柠檬烯、 β -石竹烯、(E)- β -罗勒烯、香叶基丙酮、己醛、反式-2-己烯醛、2-己烯醛、苯乙烯和乙酸叶醇酯。其中，己醛和芳樟醇在所有品种不同发育时期的 VIP 值均大于 1，它们是蓝莓果实发育过程中的共性关键差异性物质。

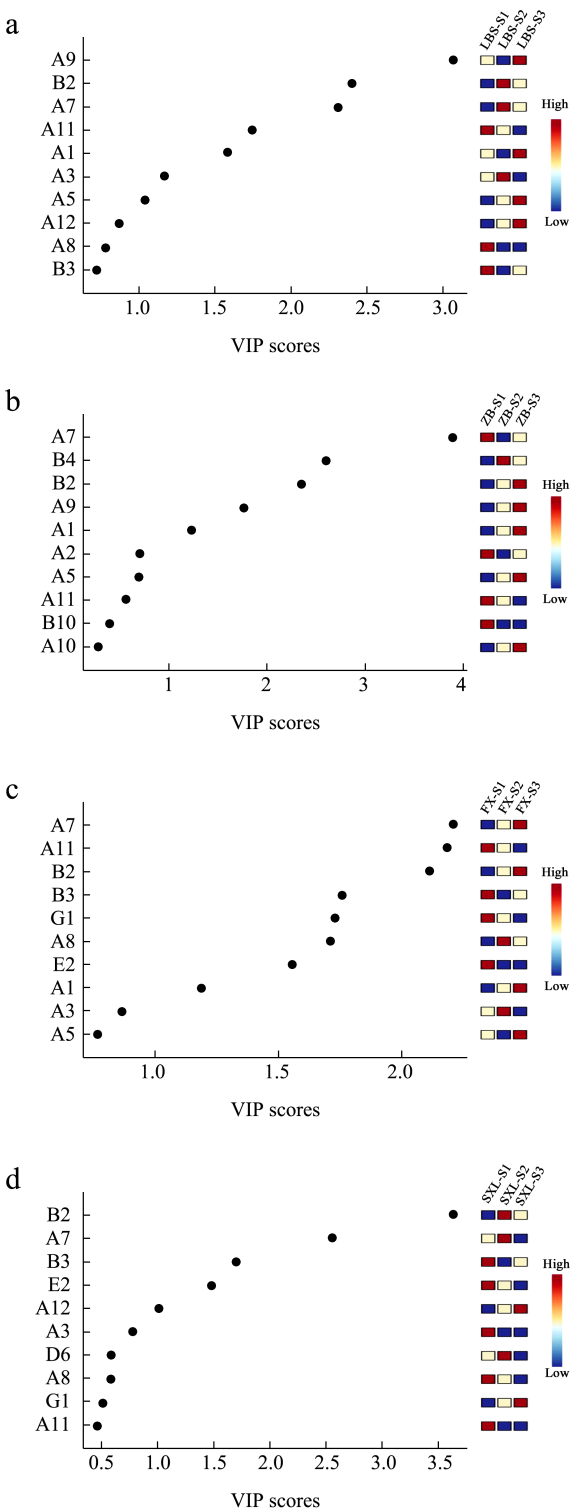


图 6 蓝莓果实中关键香气物质 PLS-DA 分析

Fig.6 PLS-DA analysis of key aromatic compounds in blueberry fruits

选取 VIP>1 关键差异性风味物质，根据相关化合物香气描述，将其分为花香、果香、草本香、脂香、绿色香。通过计算各类型关键差异性风味物质的累积 OAV 值，绘制蓝莓果实不同发育期间香气轮廓雷达图（图 7）以便直观反映果实发育过程中香气的典型性变化。

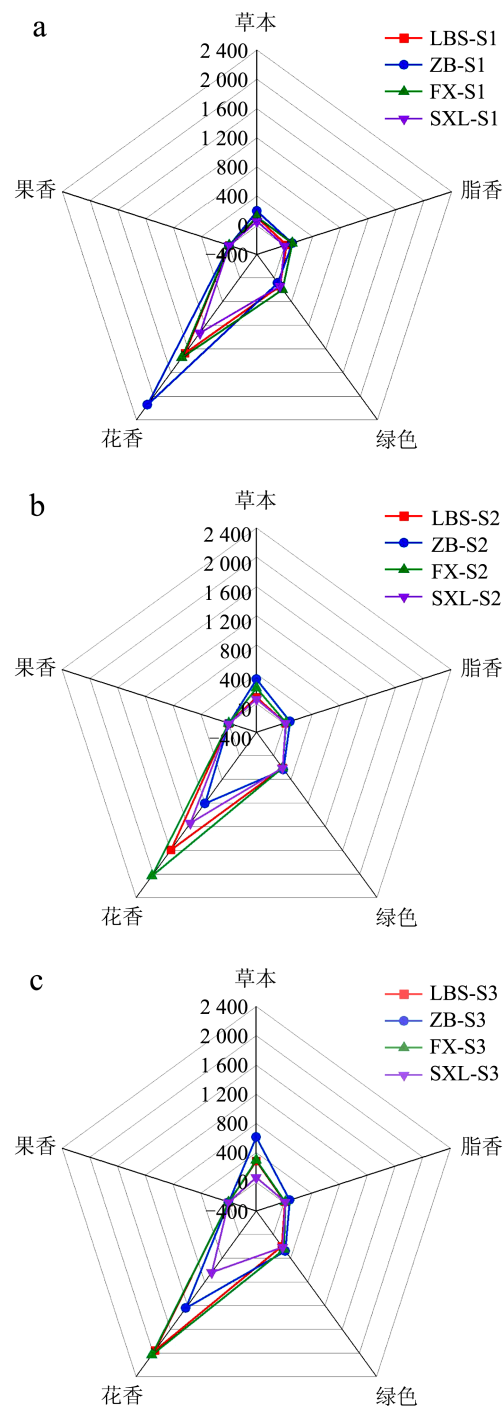


图 7 蓝莓果实不同发育时期香气雷达图
Fig.7 Radar chart of blueberry fruits aroma at different developmental stages

由图 7 可知，果香、脂香和绿色香在蓝莓果实发育过程中均无明显变化，而花香和草本香在不同品种间呈现不同的变化规律。花香是蓝莓果实的主要香气，LBS、FX 和 SXL 发育过程中始终以花香为主，其中青果期的 LBS 和 FX 主要以花香为主，随着果实成熟，以芳樟醇主导的花香香气逐渐增强，形成成熟的玫瑰花香；SXL 的香气整体较弱，且随着果实成熟，花香香气有少量下降；而 ZB 与其他品种具有显著不同，在青果期以浓郁的花香为主，随着果实的成熟，花香香气骤减。此外，在 ZB 果实发育的各个时期，草本香的 OAV 值均显著高于其他品种，并随着果实发育成熟而逐渐增加，最终形成了一种花香和草本香等混合的独特香气，这与之前的聚类分析结果一致。

3 结论

本研究探究了不同发育时期对蓝莓果实挥发性风味物质组成和含量的影响。结果表明，萜烯类是最主要的香气成分，在果实发育过程中呈现较高的含量占比（26.07%~52.36%）。转色期是产生蓝莓果实风味变化的重要阶段，通过科学调控此阶段的施肥与栽培管理措施可有效提升果实风味品质。随着果实成熟，醛类和醇类物质含量逐渐增加，而酮类和酯类物质含量逐渐减少，不同品种间萜烯类含量变化各异。进一步采用 OAV 并结合 PLS-DA 分析鉴定出 12 种关键差异标志物，其中己醛和芳樟醇作为共性关键成分，可作为区分不同发育时期的特征指标。风味轮廓分析显示，蓝莓果实以花香为主要香气特征，而其发育过程中的香气形成因品种而异。本研究揭示了蓝莓果实发育过程中香气成分的动态变化规律，为果实品质改良、品种选育及加工利用提供了重要理论依据。

参考文献

[1] KALT W, CASSIDY A, HOWARD L R, et al. Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins [J]. Advances in Nutrition, 2020, 11(2): 224-236.

[2] SATER H, FERRAO L F V, OLMSTEAD J, et al. Exploring environmental and storage factors affecting sensory, physical and chemical attributes of six southern highbush blueberry cultivars [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289: 110468.

[3] FERRAO L F V, SATER H, LYRENE P, et al. Terpene volatiles mediates the chemical basis of blueberry aroma and consumer acceptability [J]. Food Research International, 2022, 158: 111468.

[4] SHI J, XIAO Y, JIA C, et al. Physiological and biochemical changes during fruit maturation and ripening in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135299.

[5] FARCUH M, COPEL B, LE-NAVENEC G, et al. Sensory,

- physicochemical and volatile compound analysis of short and long shelf-life melon (*Cucumis melo* L.) genotypes at harvest and after postharvest storage [J]. Food Chemistry: X, 2020, 8: 100107.
- [6] VALLONE S, SIVERTSEN H, ANTHON G E, et al. An integrated approach for flavour quality evaluation in muskmelon (*Cucumis melo* L. reticulatus group) during ripening [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1): 171-183.
- [7] CEDILLO-JIMENEZ C A, FERREGRINO-PEREZ A A, GUEVARA-GONZÁLEZ R G, et al. MicroRNA regulation during the tomato fruit development and ripening: a review [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 270: 109435.
- [8] LOUW E D, THERON K I. Volatile dynamics during maturation, ripening and cold storage of three Japanese plum cultivars (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 70: 13-24.
- [9] 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,2024,6:337-343.
- [10] 程国亭,常培培,王新宇,等.果色和成熟度对樱桃番茄 (*Solanum lycopersicum* var.*cerasiforme*) 果实挥发物分布的影响 (英文) [J].食品科学,2021,12:173-183.
- [11] ARAGÜEZ I, CRUZ-RUS E, BOTELLA M Á, et al. Proteomic analysis of strawberry achenes reveals active synthesis and recycling of l-ascorbic acid [J]. Journal of Proteomics, 2013, 83: 160-179.
- [12] DU X, ROUSEFF R. Aroma active volatiles in four southern highbush blueberry cultivars determined by gas chromatography-olfactometry (GC-O) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(20): 4537-4543.
- [13] EL HADI M, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research [J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200-8229.
- [14] 李春秀,李勋兰,梁国鲁,等.不同成熟阶段柠檬果皮挥发物和酚类成分分析[J].食品科学,2022,4:215-224.
- [15] LIN Y, HUANG G, ZHANG Q, et al. Ripening affects the physicochemical properties, phytochemicals and antioxidant capacities of two blueberry cultivars [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162: 111097.
- [16] DAS P R, DARWISH A G, ISMAIL A, et al. Diversity in blueberry genotypes and developmental stages enables discrepancy in the bioactive compounds, metabolites, and cytotoxicity [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131632.
- [17] ZHANG S, ZHAO H, TANG Z, et al. Flavor characteristics of key aroma compounds in bayberry juice, fruit, and thinning fruit using HS-SPME coupled with GC/Q-TOF-MS [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106032.
- [18] MA D, LIN T, ZHAO H, et al. Development and comprehensive SBSE-GC/Q-TOF-MS analysis optimization, comparison, and evaluation of different mulberry varieties volatile flavor [J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138578.
- [19] 林婉玲,曾姣,郑秋纯,等.不同卤料处理方式对卤味鹅肝挥发性风味物质的影响[J].现代食品科技,2024,40(6): 243-251.
- [20] 李丽,蒋景龙,胡佳乐,等.HS-SPME-GC-MS与ROAV相结合的4种柑橘果皮精油关键香气物质分析[J].现代食品科技,2024, 40(5): 221-230.
- [21] 张小玲,刘丹,何俊,等.不同成熟度蓝莓挥发物测量研究[J].现代园艺,2023,14:1-2,5.
- [22] POTT D M, OSORIO S, VALLARINO J G. From central to specialized metabolism: an overview of some secondary compounds derived from the primary metabolism for their role in conferring nutritional and organoleptic characteristics to fruit [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 835.
- [23] 程焕.杨梅风味特征组分鉴定及变化规律的研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [24] 张伯雅,郑璞帆,李晓雪,等.基于电子舌结合GC-IMS分析不同品种梨果实的风味成分差异[J].保鲜与加工,2024,24(10):109-118.
- [25] CASTEJÓN-MUSULÉN O, MANUEL ARAGÓN-CAPONE A, ONTAÑÓN I, et al. Accurate quantitative determination of the total amounts of strecker aldehydes contained in wine. Assessment of their presence in table wines [J]. Food Research International, 2022, 162: 112125.
- [26] CHEN X, GU C, ZHU K, et al. Insight into the effects of different ripeness levels on the quality and flavor chemistry of noni fruit (*Morinda citrifolia* L.) [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137408.
- [27] JIN Y, CUI H, YUAN X, et al. Identification of the main aroma compounds in Chinese local chicken high-quality meat [J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129930.
- [28] MA D, ZHAO H, LIU Z, et al. Recent advances on mulberry volatile flavor: a review [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105665.
- [29] 刘建华,朱荣荣,曾倩华,等.基于SPME-GC-MS和电子鼻分析臭氧-流态冰处理对大黄鱼风味的影响[J].食品科学技术学报, 2023(1):154-162.
- [30] VAN GEMERT, L. J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Utrecht, The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
- [31] FARNETI B, KHOMENKO I, GRISENTI M, et al. Exploring blueberry aroma complexity by chromatographic and direct-injection spectrometric techniques [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 617.
- [32] 喻余梅,何金华,孙祥祥,等.基于感官导向的风味分析和多元统计学方法表征传统烤鸡风味[J/OL].食品科学技术学报,1-12[2025-01-19].