DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251113002
引用格式: 宋雪, 贺光云, 岳宁, 等. 四川省不同产地晚熟荔枝品质差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 170–178.
SONG X, HE GY, YUE N, *et al*. Analysis of quality differences of late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from different origins in Sichuan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 170–178. (in Chinese with English abstract).

四川省不同产地晚熟荔枝品质差异分析

宋　雪, 贺光云, 岳　宁*, 王凤怡, 王　娟, 熊　梅, 蔡芝鸿, 肖　迪, 夏斯琪
(四川省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 成都　610066)

摘　要: 目的　探讨四川省不同产地晚熟荔枝果实品质差异, 挖掘独特品质指标。**方法**　以泸州市合江县、乐山市市中区、宜宾市叙州区 3 个产地的晚熟荔枝主栽品种大红袍为研究对象, 分析单果重、可食率和可溶性固形物含量差异, 并采用气相色谱-四极杆-飞行时间质谱技术, 采集荔枝果实样品的挥发性香气组分, 并结合无监督主成分分析, 分析不同产地荔枝间香气差异。**结果**　四川产晚熟荔枝平均单果量符合国家鲜荔枝标准, 平均单果可食率约为(72.00±0.86)%, 可溶性固形物含量为(17.39±0.18)%。3 个产地中, 乐山荔枝的单果重、可食率和可溶性固形物含量均较泸州和宜宾荔枝产地高。香气分析共检出 79 种挥发性成分, 以木香为主, 辅以花香与果香, 乐山香气种类最丰富, 宜宾数量最少但含量较高。基于荔枝果实的香气组分主成分分析结果显示, 泸州和宜宾荔枝可明显区分, 乐山荔枝分别与泸州荔枝和宜宾荔枝有相似。香气活性值分析进一步揭示, 3 地的荔枝共有 20 种关键香气物质, 其中泸州以果香、柠檬香和花香为主, 乐山突出柠檬果香、草本与木质香, 宜宾则具独特玫瑰与松木香型, 壬酸乙酯为其特有组分。**结论**　四川省内不同产地晚熟荔枝在基础品质与香气特征上均存在明显差异, 可为川内荔枝品种优化与特色产品开发提供数据支撑。

关键词: 晚熟荔枝; 挥发性香气; 产地差异; 气相色谱-四极杆-飞行时间质谱法

Analysis of quality differences of late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from different origins in Sichuan Province

SONG Xue, HE Guang-Yun, YUE Ning*, WANG Feng-Yi, WANG Juan, XIONG Mei, CAI Zhi-Hong, XIAO Di, XIA Si-Qi
(*Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products*, *Sichuan Academy of Agricultural Sciences*, *Chengdu* 610066, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the differences in fruit quality of late-ripening *Litchi chinensis* Sonn. from different producing areas in Sichuan Province and identify their unique quality indicators. **Methods**　The main cultivar of *Litchi chinensis* Sonn. (Dahongpao) from 3 production areas (Hejiang County in Luzhou, Shizhong District in Leshan and Xuzhou District in Yibin) was used as the research object. The differences of single fruit

收稿日期: 2025-11-13
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0606800); 四川省水果质量安全风险评估项目(2025)
第一作者: 宋雪(2004—), 女, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: cexd166@163.com
***通信作者:** 岳宁(1995—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: ynueing@163.com

weight, edible rate and soluble solid content were analyzed. Volatile aroma components of *Litchi chinensis* Sonn. fruit samples were collected using gas chromatography-quadrupole-time-of-flight mass spectromety and combined this with unsupervised principal component analysis to examine the aromatic differences among *Litchi chinensis* Sonn. from different production areas. **Results**　The average fruit weight of late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. produced in Sichuan met national standards for fresh *Litchi chinensis* Sonn., with an average edible flesh ratio of approximately (72.00±0.86)% and the soluble solids content of (17.39±0.18)%. Among the 3 origins, Leshan *Litchi chinensis* Sonn. had higher fruit weight, edible rate and soluble solid content than those from Luzhou and Yibin. Aroma analysis detected 79 kinds of volatile compounds, dominated by woody notes, supplemented by floral and fruity aromas. Leshan had the richest variety of aroma types, while Yibin had the fewest types but higher content levels. Principal component analysis based on aroma components showed that Luzhou and Yibin *Litchi chinensis* Sonn. could be clearly distinguished, whereas Leshan *Litchi chinensis* Sonn. showed similarities to both. Odor activity value analysis further revealed 20 kinds of key aroma compounds common to all 3 areas. Luzhou *Litchi chinensis* Sonn. were characterized mainly by fruity, lemon and floral notes; Leshan *Litchi chinensis* Sonn. were prominent in citrus, herbal and woody notes; Yibin *Litchi chinensis* Sonn. possessed unique rose and pinewood notes, with ethyl nonanoate as its characteristic component. **Conclusion**　Distinct differences in both basic quality and aroma characteristics are found among late-ripening *Litchi chinensis* Sonn. from different producing areas within Sichuan Province, which can provide a data basis for cultivar optimization and characteristic product development of local *Litchi chinensis* Sonn..

KEY WORDS: late-maturing *Litchi chinensis* Sonn.; volatile aroma compounds; geographical differences; gas chromatography-quadrupole-time-of-flight mass spectrometry

0　引　言

中国是荔枝主要生产国和出口国, 在世界荔枝出口市场中占有巨大份额, 并逐年提升。2025 年我国鲜荔枝前 3 季度进出口总额约达 7.5 亿元人民币, 约为 2024 年前 3 季度的 2 倍[1]。国内荔枝主要种植在南方地区, 包括广东、广西、福建和四川等。其中, 由于四川空气湿度大、光照多但弱, 荔枝开花和果实成熟期较广东等地区推迟, 形成了具有地方特色的四川晚熟荔枝[2–3]。四川产晚熟荔枝主要集中种植在泸州市合江县、乐山市市中区和宜宾市叙州区, 主要品种包括大红袍和带绿等。四川产晚熟荔枝的独特优势在于“晚熟”和“特色风味”。

目前, 对荔枝的品质研究多集中于广东、福建等传统产区的特早、早、中熟品种[4–5], 涉及果实理化特性、营养成分、储藏保鲜及风味物质等方面[6–9], 然而, 针对四川产晚熟荔枝的系统性评价研究仍较为缺乏, 尤其是对其在独特生态条件下形成的理化特性与香气组分的深入解析较少, 这制约了该产区荔枝品种的市场竞争力, 及进一步优化与高附加值产品的开发。

因此, 为系统阐明四川产晚熟荔枝的品质特征, 本研究以四川省泸州、乐山和宜宾地区三大产区的共 30 批次大红袍为研究对象, 参考荔枝相关地理标志产品等国家标准中设定的指标, 测定其单果重、可食率、可溶性固形物含量等基础品质指标, 并采用现代分析技术鉴定其香气组分, 结合主成分分析法和单因素方差分析等方法, 揭示川内不同产区荔枝的品质差异及其特征标志物。本研究旨在充实四川产晚熟荔枝品质评价方面的数据基础, 为今后品种选育、产地标识保护及特色荔枝产品开发提供科学依据, 同时也为促进四川荔枝产业可持续发展和市场竞争力的提升奠定基础。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

本研究所采集荔枝样品的品种均属于大红袍, 四川省泸州市合江县、乐山市中区、宜宾市叙州区 3 个产地各采集 10 批次样品, 其中, 泸州 6 批次基地样品和 4 批次市场样品、乐山 5 批次基地样品和 5 批次市场样品、宜宾 8 批次基地样品和 2 批次市场样品。样品采集于 2025 年 7 月中旬, 均为可上市成熟样品。

邻二氯苯、正构烷烃(C_7~C_{40})(纯度>98%, 天津阿尔塔科技有限公司); 丙酮、正己烷(色谱纯, 德国 Meker 公司)。

1.2　仪器与设备

8890-7250 气相色谱-四极杆-飞行时间质谱仪[安捷伦科技(中国)有限公司]; JY-2002 电子天平(精度 0.2 g, 海舜

宇恒平科学仪器公司); HX-PB1058 破壁料理机(宁波奥克斯厨房电器有限公司); LC-DR-53B 数显折射仪(上海力辰邦西仪器科技有限公司); 三合一萃取头(二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷, divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane, DVB/CAR/PDMS, 广州智达实验室科技有限公司); DB-5MS 色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm, 美国安捷伦公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 基础理化指标的测定

将果皮、果核与果肉分离, 果肉用破壁料理机打碎混匀, 单果、果皮、果核质量用电子天平测定; 可溶性固形物用数显折射仪测定。

1.3.2 挥发性物质的提取与检测

准确称取 0.5 g 新鲜荔枝样品匀浆于 20 mL 固相微萃取顶空瓶中, 加入 10 μg/mL 内标邻二氯苯 10 μL 后[10−11], 迅速拧紧螺帽待测。

色谱条件: 将加有荔枝样品和内标的固相微萃取顶空瓶在 40 ℃下平衡 15 min 后, 用固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)三相萃取针于 50 ℃提取 10 min, 随后立即在 250 ℃下将萃取头插入进样口 5 min。注射器和传输线温度为 110 ℃; 色谱柱为 DB-5MS 柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm); 升温程序为 50 ℃保持 2 min, 先以 15 ℃/min 升至 95 ℃, 保持 2 min, 然后以 5 ℃/min 升至 130 ℃, 保持 1 min, 再以 8 ℃/min 升至 260 ℃, 保持 3 min。气化室温度为 32 ℃; 火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)温度为 260 ℃; 载气为氦气; 载气压力为 37.8 kPa; 碰撞器为氮气, 不分流进样。

质谱条件: 离子源温度: 250 ℃。离子源: 电子轰击源(electron ionization, EI), 离子模式: 正离子, 碰撞能: 70 eV, 质谱采集范围: m/z 100~1000。

1.4 定性与相对定量分析

定性分析: 通过 NIST 标准质谱库对质谱图中的各色谱峰进行检索比对, 并结合保留指数(retention index, RIs)进行定性分析, 确定化合物种类。

相对定量分析: 邻二氯苯作为内标对挥发性成分进行相对定量, 相对定量计算见公式(1)[12]:

$$\mathrm{RC}=\frac{A_{\mathrm{x}}}{A_{\text{邻二氯苯}}}\times n_{\text{邻二氯苯}} \tag{1}$$

式中: RC 为目标物的相对含量(relative content), μg/mL; A_{x} 和 $A_{\text{邻二氯苯}}$分别为目标物的峰面积和邻二氯苯的峰面积, $n_{\text{邻二氯苯}}$为邻二氯苯的浓度。

香气活性值(odor activity value, OAV)计算见公式(2)[13]:

$$\mathrm{OAVs}=\frac{C}{T} \tag{2}$$

式中: OAVs 为目标物的香气活性值; C 为目标化合物的相对含量; T 为目标化合物的香气阈值。

1.5 数据处理

解卷积等峰处理利用 MassHunter 未知物解析软件。采用 NIST 数据库 21.0 检索、线性保留指数(line retention index, LRI)和气味特性共同定性挥发性香气成分香气化合物。LRIs 通过正构烷烃(C_7~C_{40})确定; LRIs 的误差范围为 35, 数据库最小匹配: 80%。无监督主成分分析法等分析采用 Metaboanalyst 5.0 和 Simca-p 14.1 进行。采用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)分析各组之间的显著性, 采用主成分分析法进行荔枝样品品质的综合评价。每个样品 6 个生物学平行。

2 结果与分析

2.1 四川省内不同产地晚熟荔枝基础品质指标差异分析

研究共采集了四川省 30 批次晚熟荔样品, 其中, 四川省泸州市、乐山市、宜宾市 3 个产地各 10 批次样品。研究测定了荔枝样品的单果重、可食率、可溶性固形物含量 3 个基础品质指标。如图 1 所示, 整体上, 四川省 30 批次荔枝平均单果重为(24.30±0.50) g, 满足 GH/T 1185—2020《鲜荔枝》标准中规定的单果重要求(≥23.8 g)。四川产晚熟荔枝单果重仅略低于 DB4403/T 179—2021《地理标志产品 南山荔枝》和 DB4452/T 5—2021《地理标志产品 惠来荔枝》中分别规定的妃子笑(≥25.0 g)和优等糯米糍(≥26.3 g)单果重, 基本高于现有地理标志产品标准中规定的多品种、多产地荔枝单果重(≥16.0~23.8 g)。然而, 四川产晚熟荔枝的平均单果可食率仅约为(72.00±0.86)%, 虽然略高于 DB4401/T 255—2024《桂味荔枝》中可食率的要求, 但整体上低于现有地理标志产品标准中的可食率要求(≥75%~80%), 如略低于 GH/T 1185—2020 标准中规定的可食率要求(≥75%)。考虑到样本差异, 本研究所采荔枝样品中, 30%的样品可食率高于 75.0%。整体结果表明, 四川产晚熟荔枝大红袍品种的果核和果皮占比高于其他产地品种荔枝。这可能与荔枝品种差异有关, 大红袍属大果核品种, 其可食率高于同为大果核品种的怀枝(约 70.0%), 低于小果核品种的糯米糍(约 80.0%)。可溶性固形物含量有类似结果, 四川产晚熟荔枝大红袍品种的可溶性固形物含量为(17.39±0.18)%, 虽略高于 DB35/T 1901—2020《地理标志产品 岭山荔枝》(≥17.0%)和 DB4452/T 5—2021 (≥16.5%)中要求含量, 但整体上低于现有地理标志产品标准中规定的多品种、多产地荔枝可溶性固形物含量(≥17.5%~19.5%)。考虑到样本差异, 本研究所采荔枝样品中, 同样存在 30%样品的可溶性固形物含量高于 17.5%。与其他产地其他品种荔枝可溶性固形物含量的差异, 除了与生长环境和品种有关外[14−17], 还可能与荔枝结果母枝质量有

关。张航等[18]研究发现荔枝果实的单果重和可食率与母枝的粗度成显著正相关、可溶性固形物含量与母枝的与叶片数显著正相关。

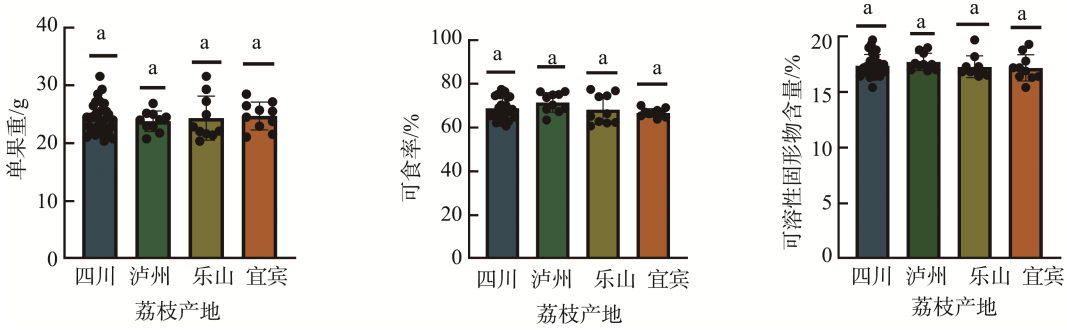
如图 1 所示, 川内 3 个产地相同品种荔枝果实基础品质存在明显差异, 结果显示, 乐山荔枝的单果重、可食率和可溶性固形物含量均为 3 产地中最高。3 个产地间相同品种荔枝可食率的差异可能与气候环境有关[19–21], 姜泳如等[22]研究发现, 气象因子可影响荔枝果树的成花率, 严婷婷等[23]发现提高荔枝花穗的雌花率, 可有效降低荔枝果皮厚度、提高荔枝可食率。

2.2　四川省内不同产地晚熟荔枝挥发性香气组分差异分析

如表 1 所示, 整体上, 四川省晚熟荔枝果实样品中共检出 79 个挥发性香气化合物, 香型主要以木香为主, 花香和果香为辅, 兼具少量的清新香气。其中, 萜烯类物质数量最多, 为 50 个(单萜类 12 种, 倍半萜烯类 38 种), 占总挥发性化香气化合物数量的 63.3%。这与文献[24–26]的研究结果一致, 萜烯类物质约占早熟荔枝香气化合物总数量 60.0%。芳樟醇、β-蒎烯、柠檬烯、香芹醇等 18 个组分在 30 个样品中均有检出, 检出率为 100%。泸州、乐山和宜宾 3 个产地中, 乐山晚熟荔枝检出的香气组分数量最高为 77 个, 其次为泸州荔枝 74 个, 宜宾荔枝检出的香气组分数量最低, 为 50 个。与四川省整体情况类似, 3 个产地的荔枝果实挥发性香气组分均以萜烯类为主。泸州、乐山和宜宾荔枝检出率 100%的香气组分分别为 19 个、20 个和 24 个。其中, γ-萜品烯、酯烯、橙花醇和 β-石竹烯仅在宜宾荔枝中检出率为 100%。结果表明, 四川省晚熟荔枝的香气成分以萜烯类物质为主导(约占 63.3%), 整体呈现木香为主、花香与果香为辅的香气特征。3 个主要产地中, 乐山检出的香气种类最多(77 种), 宜宾最少(50 种), 但宜宾有 24 种组分检出率达 100%, 且拥有部分独有高检出成分。所有产地均以萜烯类为主要香气组分, 整体结果与已有早熟荔枝研究一致。

如表 2 和图 2 所示, 乐山荔枝果实样品独有的挥发性成分为 β-蒎烯氧化物, 具有浓郁、清新, 带点松木和柑橘的混合香气。宜宾荔枝果实样品独有的挥发性成分为壬酸乙酯, 具有果香及玫瑰样香气, 任路等[27]发现壬酸乙酯可增加白酒独有的蜜香。泸州荔枝果实样品无独有香气组分。然而, 与宜宾荔枝相比, 泸州和乐山共同特有的挥发性香气组分有 22 个, 主要为萜烯类物质, 香型主要为木质香、柠檬果香和花香。与泸州荔枝相比, 乐山和宜宾共同特有的挥发性香气组分有 2 个, 香型主要为果香、花香、木香和清新香气。与乐山相比, 宜宾和泸州无共同特有挥发性香气组分。

如图 3(a)所示, 整体上, 醇类物质的相对含量为四川晚熟荔枝香气组分最高, 约占四川省荔枝整体香气组分含量的 35.5%, 其次为单萜烯类组分, 占比约 26.8%。与现有研究报道结果类似[28–30]。倍半萜烯类物质虽然数量最高, 但其相对含量仅占四川省荔枝整体香气组分含量 13.6%。醇类、萜烯类、酯类和醛类物质总占四川省荔枝整体香气组分含量 93.2%, 这与文献[24,31–32]等结果一致。结果表明, 醇类、萜烯类、酯类和醛类组分是四川晚熟荔枝种质



注: 相同字母表示差异不显著(P>0.05)。

图 1　四川晚熟荔枝基础品质情况

Fig.1　Basic quality situation of late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. in Sichuan

表 1　3 个地区晚熟荔枝挥发性物质种类

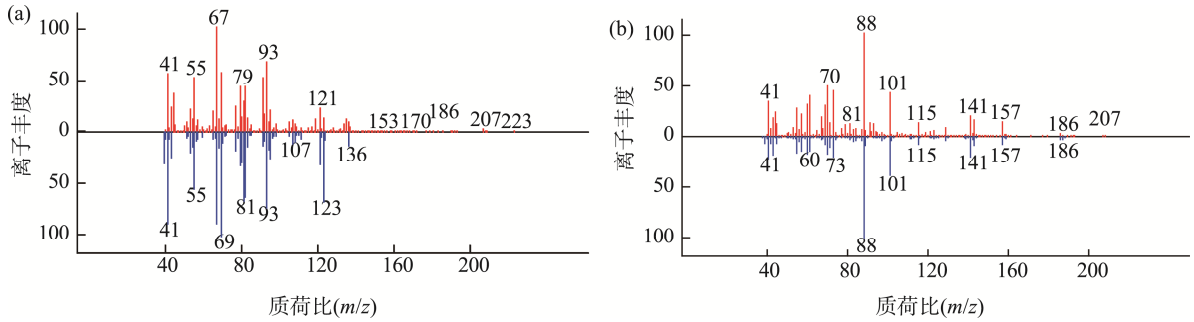
Table 1　Types of volatile compounds in late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from 3 regions

地区	单萜烯类	倍半萜烯类	酯类	醛类	醇类	酮类	其他	总计
四川	12	38	4	4	14	1	6	79
泸州	11	38	3	3	13	1	5	74
乐山	12	38	3	4	14	1	5	77
宜宾	11	15	4	3	12	1	4	50

表 2 3 个地区晚熟荔枝的特有挥发性物质

Table 2 Characteristic volatile compounds in late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from 3 regions

地区	中文名称	CAS	香气描述
乐山	*β*-蒎烯氧化物	6931-54-0	浓郁、清新，带点松木和柑橘的混合香气
宜宾	壬酸乙酯	123-29-5	带果香及玫瑰样香气的酒香
乐山&宜宾	2-亚乙基-6-甲基-3,5-庚二烯醛	99172-18-6	有果香、青草以及烤肉等香气
	橙花醚	1786-08-9	有强烈的花香香气以及橙花油似的香气
泸州&乐山(部分)	*δ*-榄香烯	20307-84-0	有木质、辛辣、松脂的气味
	α-荜澄茄油烯	17699-14-8	带有类似胡椒的微辣芳香，并且伴有一些木质以及樟脑般的气息
	α-依兰烯	14912-44-8	清新花香，柑橘类香气
	(±)-*β*-可巴烯	18252-44-3	呈现出木质、青香与植物气息，带有类似薰衣草的底
	(-)-*β*-立方苯	13744-15-5	薄荷般的清凉感和清新的香气
	γ-榄香烯	29873-99-2	有强烈的柑橘香味
	(-)-愈创木酚-6,9-二烯	36577-33-0	木质香韵
	3,5-杜松二烯	267665-20-3	有木质气味，展现出百里香以及草本的气息
	桧烯	119660-67-2	具有芳香和木质的气味
	(-)-10 表带烯	41929-05-9	有辛辣、木质以及柑橘混合的香气
	(*Z*)-*β*-姜黄烯醇	698365-10-5	浓郁的木质香调，带有似姜味的辛香感，混合着柑橘香以及淡淡的花香
	α-姜黄烯	644-30-4	具有清新的柠檬香气
	γ-杜松烯	39029-41-9	有强烈、新鲜的青柑橘样气息，微带木香
	δ-杜松烯	483-76-1	具有花香、木质香以及隐约的柑橘气息，并带有甜香
	α-杜松烯	24406-05-1	有干燥的木质香气，并略带樟脑气息
	α-二去氢菖蒲烯	21391-99-1	干燥、温暖的木质香气



注: (a)为 *β*-蒎烯氧化物组分子离子图; (b)为壬酸乙酯组分子离子图。

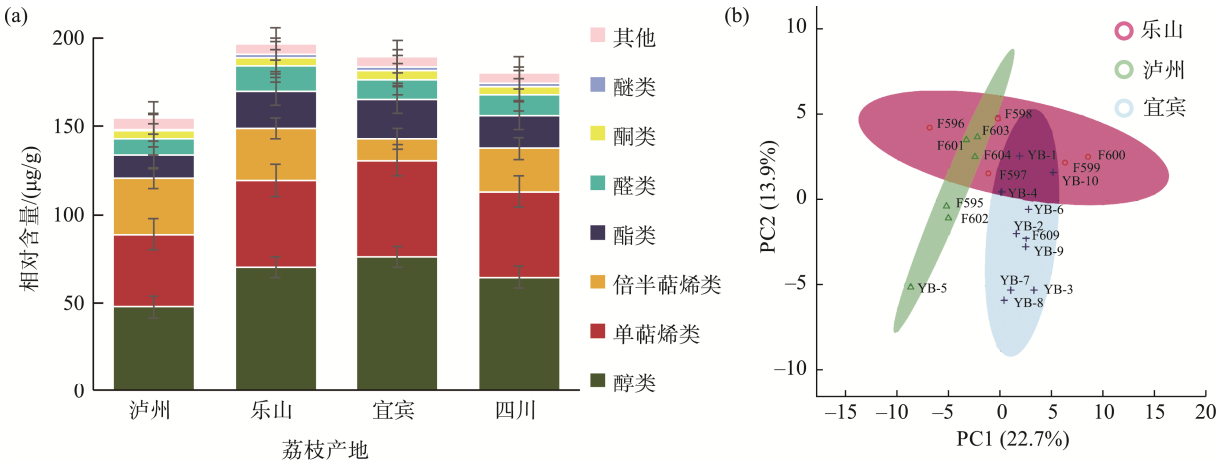
图 2 四川产晚熟荔枝果肉中的特有挥发性化合物分子离子图

Fig.2 Molecular ion diagram of characteristic volatile compounds in the pulp of Sichuan late-maturing *Litchi chinensis* Sonn.

的主要挥发性组分。3 个产地荔枝的香气组分情况与四川省整体情况类似，均为醇类含量最高，单萜烯类物质次之。宜宾荔枝的倍半萜烯类物质的含量占比低于其他两个产地。3 个产地中挥发性香气组分含量最高的是乐山荔枝(196.32±13.56) μg/g，宜宾荔枝虽香气组分数量最低，但其香气组分的含量(189.36±11.36) μg/g 却高于泸州荔枝(154.60±10.83) μg/g。

为准确分析泸州、乐山和宜宾荔枝基于香气组分的差异情况，将 3 个产地的基地样品进行主成分分析。结果如图 3(b)所示，基于香气组分，泸州和宜宾荔枝可明显区分，乐山荔枝分别与泸州荔枝和宜宾荔枝有相似，这与前面提到的乐山分别与泸州和宜宾存在共同特有香气组分、泸州和宜宾无共同特有挥发性香气组分结果一致。

为明确四川省不同产区晚熟荔枝果实香型特征，计算香气组分在 3 个产地荔枝果实中的 OAVs。结果如表 3 所示，3 个产地共有且 OAV>1 的挥发性香气组分共 20 种，包括萜烯类 9 种，醇类 6 种，醛类 2 种，芳香类 2 种，酮类 1 种。其中，OAV 较高的挥发性风味物质有柠檬醛、*β*-罗勒烯、蘑菇醇、芳樟醇、柠檬烯-10-醇、橙花醇、顺式-柠檬醛、薰衣草醇、(-)-异喇叭烯、邻-异丙基苯、乙苯、



注: (a)为挥发性组分相对含量; (b)为 PCA 结果。

图 3　四川产晚熟荔枝果肉中的挥发性化合物组成

Fig.3　Composition of volatile compounds in late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from Sichuan

表 3　四川产晚熟荔枝中部分挥发性风味物质的 OAVs

Table 3　OAVs of volatile flavor compounds in late-maturing *Litchi chinensis* Sonn. from Sichuan

中文名称	CAS 号	泸州		乐山		宜宾		香气阈值/(mg/m³)	香气描述
		含量/(mg/g)	OAVs	含量/(mg/g)	OAVs	含量/(mg/g)	OAVs		
乙苯	100-41-4	6.2	236.7	5.3	205.2	5.4	208.0	0.026	坚果般的气味
苄基异丁基酮	5349-62-2	4.8	13.7	4.6	13.1	4.8	13.8	0.35	焦糖气息、甜的水果、坚果及肉类香味
3-乙基甲苯	620-14-4	0.1	1.1	0.1	0.7	0.0	0.0	0.088	温和的芳香气息
蘑菇醇	3391-86-4	1.4	1393.5	1.9	1904.5	1.9	1885.4	0.001	具有蘑菇、薰衣草、玫瑰和干草香
β-蒎烯	127-91-3	14.7	81.4	17.7	98.5	19.5	108.1	0.18	松树香味
2-茴烯	554-61-0	0.3	17.7	0.5	27.4	0.7	40.2	0.018	有松香和柠檬的香气
邻-异丙基苯	527-84-4	0.7	186.3	1.2	310.9	0.9	231.2	0.004	浓烈的芳香气味
(*E*)-罗勒烯	3779-61-1	1.3	70.1	2.3	122.1	3.1	166.0	0.0187	有清新的柑橘香气，具备木质香调
β-罗勒烯	13877-91-3	2.5	2507.5	3.9	3926.8	5.7	5680.1	0.001	温暖的药香、柑橘的、热带的、青香、萜烯香、木香
γ-松油烯	99-85-4	0.2	0.0	0.4	0.0	0.5	0.0	55	柑橘和柠檬香气
对伞花烃	1195-32-0	19.8	29.8	20.0	30.1	21.2	31.8	0.665	清新、芳香、略带辛辣，并且有时带有湿抹布的气味，微弱的柑橘和胡萝卜样香气，柑橘气息清新淡雅
2-亚乙基-6-甲基-3,5-庚二烯醛	99172-18-6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	1	有果香、青草以及烤肉等香气
芳樟醇	78-70-6	1.5	623.9	3.0	1231.1	3.1	1296.3	0.0024	有铃兰、玫瑰和木香的香气
萜品油烯	21195-59-5	0.4	52.2	0.7	85.2	0.3	35.6	0.0086	松木香气，微带甜的柑橘风味
别罗勒烯	7216-56-0	0.0	0.2	0.1	0.4	0.1	0.7	0.21	有草香、花香并伴有橙花油气息
橙花醚	1786-08-9	0.0	0.0	0.0	2.5	0.1	3.7	0.018	有强烈的花香香气以及橙花油似的香气
α-松油醇	98-55-5	0.1	0.2	0.9	1.0	0.1	0.1	0.86	具有清香似海桐花气息和紫丁香、铃兰的鲜幽香气

表 3(续)

中文名称	CAS 号	泸州		乐山		宜宾		香气阈值/(mg/m³)	香气描述
		含量/(mg/g)	OAVs	含量/(mg/g)	OAVs	含量/(mg/g)	OAVs		
柠檬烯-10-醇	3269-90-7	17.0	448.6	23.5	618.7	21.5	564.8	0.038	具有柠檬香味
异香叶醇	5944-20-7	1.8	100.6	3.1	174.6	2.2	120.6	0.018	具玫瑰味香气
顺式-柠檬醛	106-26-3	2.2	244.6	4.5	513.8	3.4	387.8	0.0088	有强烈的柠檬香气
香叶醇	106-24-1	2.1	3.5	6.1	10.2	0.0	0.0	0.6	盛开的玫瑰气味
橙花醇	106-25-2	16.4	334.7	20.2	412.9	35.5	724.1	0.049	有令人愉快的玫瑰和橙花的香气, 香气较平和, 微带柠檬样的果香
熏衣草醇	498-16-8	0.0	81.4	0.3	515.1	0.3	469.8	0.00054	草本花香气味
柠檬醛	5392-40-5	6.6	44183.8	9.8	65039.0	7.7	51280.4	0.00015	香淡淡柠檬清香、略甜
壬酸乙酯	123-29-5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	21.7	0.01	带果香及玫瑰样香气的酒香
乙酸橙花酯	141-12-8	0.2	0.3	1.3	1.4	1.1	1.3	0.88	橙花和玫瑰香气及蜂蜜和覆盆子甜香味
β-石竹烯	87-44-5	3.1	0.3	5.4	0.5	1.0	0.1	11	有辛香、木香、柑橘香、樟脑香, 温和的丁香香气
桧烯	14029-18-6	1.0	57.4	0.9	50.6	0.0	0.0	0.018	具有芳香和木质的气味
(*E*)-*β*-金合欢烯	28973-97-9	0.6	123.5	0.4	89.8	0.1	21.5	0.005	以新鲜的草本气息为基底, 伴随淡淡的花香底蕴, 带有微弱的果香
长叶蒎烯	5989-08-2	0.3	18.2	0.3	15.5	0.1	4.2	0.018	有特殊的松木香气
(-)-异喇叭烯	95910-36-4	4.7	427.1	4.0	368.2	3.2	289.1	0.011	有甜感的木质-琥珀香, 干果香

异香叶醇。其中柠檬醛具有柠檬清香, 罗勒烯具有柑橘香、木香, 蘑菇醇具有蘑菇香、薰衣草香, 芳樟醇具有铃兰香、玫瑰香, 柠檬烯-10-醇具有柠檬香味, 橙花醇具有玫瑰香、橙花香, 顺式-柠檬醛具有柠檬香气, 薰衣草醇具有草本花香, 邻-异丙基苯具有芳香气味, 乙苯具有坚果香, 异香叶醇具有玫瑰香气。泸州荔枝中 OAV>1 的挥发性风味物质有 23 种, 其中 OAV>100 的物质有 12 种, 包括柠檬醛、*β*-罗勒烯、蘑菇醇、芳樟醇、柠檬烯-10-醇、橙花醇、顺式-柠檬醛、(-)-异喇叭烯、邻-异丙基苯、乙苯、(*E*)-*β*-金合欢烯、异香叶醇, 这些物质对泸州荔枝果香、柠檬香、花香香型风味的形成具有重要作用。乐山荔枝中 OAV>1 的挥发性风味物质有 24 种, 相比泸州荔枝, 乐山荔枝的薰衣草醇和(*E*)-罗勒烯的 OAV>100, 其中薰衣草醇具有草本花香, (*E*)-罗勒烯有清新的柑橘香气, 具备木质香调, 这两个物质可能对乐山荔枝整体果香、草本、木质香型风味有显著贡献。宜宾荔枝中 OAV>1 的挥发性风味物质有 23 种, 区别于泸州和乐山荔枝, 宜宾荔枝果实中橙花醇、*β*-蒎烯的 OAV 较高(>100), 橙花醇呈玫瑰花香和橙花香, *β*-蒎烯呈现松木香气。除此之外, 宜宾荔枝果实中的 2-茚烯 OAV 约为其他两地的 2 倍, 呈现松木香气。壬酸乙酯仅在宜宾荔枝中检出, 呈现玫瑰花香, 这些物质有助于宜宾荔枝果实形成其独特的玫瑰花香、松木香型的关键挥发性香气组分。

3 结 论

本研究对四川省泸州、乐山与宜宾 3 个产地晚熟荔枝的基础品质指标及挥发性香气成分进行了系统地分析。四川产晚熟荔枝平均单果量符合国家鲜荔枝标准, 但可食率整体偏低, 可能与“大红袍”品种果核较大有关; 可溶性固形物含量略高于部分地方标准, 但仍低于多数地理标志产品要求。3 个产地中, 乐山荔枝的单果重、可食率和可溶性固形物含量均较泸州和宜宾荔枝产地高。香气分析共检出 79 种挥发性成分, 以木香为主, 辅以花香与果香, 乐山香气种类最丰富, 宜宾数量最少但含量较高。基于荔枝果实的香气组分主成分分析结果显示, 泸州和宜宾荔枝可明显区分, 乐山荔枝分别与泸州荔枝和宜宾荔枝有相似。香气活性值分析进一步揭示, 3 地共有 20 种关键香气物质, 其中泸州以果香、柠檬香和花香为主, 乐山突出柠檬果香、草本与木质香, 宜宾则具独特玫瑰与松木香型, 壬酸乙酯为其特有组分。综上, 乐山荔枝综合品质优, 香气种类丰富, 加工适应性最广。泸州荔枝香气以果香、花香为主, 适于果汁或果肉加工。宜宾荔枝香气独特, 适宜开发特色风味产品。综上, 四川不同产地晚熟荔枝在基础品质与香气特征上均存在明显差异, 可为地方品种优化与特色产品开

发提供科学依据。未来可进一步研究不同产地四川产晚熟荔枝特征香型的形成机制。

参考文献

[1] 中华人民共和国海关总署. 海关统计数据在线查询平台-鲜荔枝进出口数据[EB/OL]. (2025-11-02) [2025-11-10]. http://stats.customs.gov.cn/
General Administration of Customs. Customs statistics online query platform-fresh lychee import and export data [EB/OL]. (2025-11-02) [2025-11-10]. http://stats.customs.gov.cn/

[2] 四川省农业农村厅. 合江县: 一颗荔枝改变一座城[EB/OL]. (2023-07-21) [2025-11-10]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2023/7/21/6fa5aa9ab7c6470785336773ef1f0d29.shtml
Sichuan Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs. Hejiang County: One lychee transforms a city [DB/OL]. (2023-07-21) [2025-11-10]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2023/7/21/6fa5aa9ab7c6470785336773ef1f0d29.shtml

[3] HU G, FENG J, XIANG X, *et al*. Two divergent haplotypes from a highly heterozygous lychee genome suggest independent domestication events for early and late-maturing cultivars [J]. Nature Genetics, 2022, 54(1): 73–83.

[4] 李颖, 陈春旭, 张玲, 等. ‘桂味’荔枝单体速冻工艺研究及品质评价[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(8): 11–18.
LI Y, CHEN CX, ZHANG L, *et al*. Study on the Individual quick freezing tcchnology and quality evaluation of ‘Guiwei’ litchi [J]. Storage and Process, 2025, 25(8): 11–18.

[5] 周如, 赵琦, 叶剑芝, 等. 基于主成分分析、层次分析-理想解法的荔枝品质评价对比[J]. 农产品质量与安全, 2024(6): 50–56.
ZHOU R, ZHAO Q, YE JZ, *et al*. A comparative evaluation of lychee quality assessment based on principal component analysis and AHP-TOPSIS method [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2024(6): 50–56.

[6] LIU Z, WANG Y, XU H, *et al*. Integrative analyses of metabolome and transcriptome reveal the regulatory network underlying flavor differences in lychee pulp from different varieties [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 229: 11059.

[7] FAN S, WANG D, XIE H, *et al*. Sugar transport, metabolism and signaling in fruit development of *Litchi chinensis* Sonn: A review [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(20): 11231.

[8] JIANG Y, QI Y, CHEN X, *et al*. Combined metabolome and transcriptome analyses unveil the molecular mechanisms of fruit acidity variation in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(3): 1871.

[9] 刘展眉, 邹启文, 张汉辉, 等. 荔枝果实不同部位提取物的总黄酮含量及其稳定性、抗氧化、美白活性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(11): 274–283.
LIU ZM, ZOU QW, ZHANG HH, *et al*. Analysis of total flavonoids content, stability, antioxidant and whitening activities of extracts from different parts of litchi fruit [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(11): 274–283.

[10] MU Z, TING L, FAN Y, *et al*. Characterization of key aroma-active compounds in Hanyuan *Zanthoxylum bungeanum* by GC-O-MS and switchable GC×GC-O-MS [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132659.

[11] WANG J, YANG F, GUO JY, *et al*. Characterization of key aroma-active compounds in *Zanthoxylum schinifolium* by sensory evaluation and multiple instrumental analyses [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106848.

[12] ZHU J, CHEN F, WANG L, *et al*. Characterization of the key aroma volatile compounds in cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) using gas chromatography-olfactometry (GC-O) and odor activity value (OAV) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(24): 4990–4999.

[13] GUI X, TIAN L, LIU Y, *et al*. Key aroma compounds and aroma characteristics in Nongxiangxing Baijiu characterized by GC-IMS, GC×GC-MS, and an electronic nose [J]. ACS Food Science & Technology, 2025, 5(10): 3792–3811.

[14] MENZEL CM, SIMPSON DR. Effect of temperature on growth and flowering of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) cultivars [J]. Journal of Horticultural Science, 1988, 63(2): 349–360.

[15] LAL N, PANDEY SK, NATH V. Effect of weather on panicle development, flower morphogenesis and fruit set in litchi *cv*. Shahi [J]. Plant Physiology Reports, 2025, 30(1): 53–57.

[16] YAHIA EM. Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

[17] 李英, 李家良, 彭丽英, 等. 茂名荔枝种植的精细化气候适宜性区划研究[J]. 广东气象, 2025, 47(3): 82–86.
LI Y, LI JL, PENG LY, *et al*. Research on the detailed climate suitability zoning for lychee cultivation in Maoming [J]. Guangdong Meteorology, 2025, 47(3): 82–86.

[18] 张航, 何紫迪, 孔子尚, 等. ‘仙进奉’荔枝结果母枝质量与坐果和果实品质关系的研究[J]. 广东农业科学, 2023, 50(9): 127–134.
ZHANG H, HE ZD, KONG ZS, *et al*. Study on the relationship between the quality of fruit-bearing shoot, fruit setting and fruit quality in ‘Xianjinfeng’ litchi [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(9): 127–134.

[19] 郑锦锦, 刘帅, 陈岩, 等. 岭南地区荔枝主栽品种品质评价分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(4): 128–136.
ZHENG JJ, LIU S, CHEN Y, *et al*. Quality evaluation and analysis of main cultivated litchi in Lingnan region [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(4): 128–136.

[20] 刘吉元. 我国荔枝果实品质性状及其遗传改良[J]. 广西热作科技, 1996(1): 8–11.
LIU JY. Quality traits of lychee fruit in china and their genetic improvement [J]. Journal of Agricultural Research and Application, 1996(1): 8–11.

[21] HWANG YW, HSU YH, CHEN YM. Impact of flowering temperature on litchi yield under climate change: A case study in Taiwan [J]. Climate Services, 2024, 34: 100483.

[22] 姜泳如, 张劲梅, 项倩, 等. 气象因子对荔枝成花率的影响及预测模型探讨[J]. 中国热带农业, 2025(4): 63–72, 55.
JIANG YR, ZHANG JM, XIANG Q, *et al*. Effects of meteorological factors on litchi flowering rate and development of a predictive model [J]. China Tropical Agriculture, 2025(4): 63–72, 55.

[23] 严婷婷, 李二莉, 王满青, 等. 生长素抑制剂对荔枝开花坐果的调控效应[J]. 果树学报, 2025, 42(1): 162–169.
YAN TT, LI ERL, WANG MQ, *et al*. Regulatory effect of auxin inhibitors on flowering and fruit setting in litchi [J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(1): 162–169.

[24] 蒋依辉, 向旭, 钟云, 等. 6 个特早熟与早熟荔枝种质果实挥发性化合物的鉴定及香气特征分析[J]. 果树学报, 2023, 40(9): 1915–1931.
JIANG NH, XIANG X, ZHONG Y, *et al*. Identification of volatile compounds and analysis of aroma characteristics in litchi fruits of 6 special-early maturing and early maturing germplasms [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(9): 1915–1931.

[25] LIU Z, ZHAO M, LI J. Aroma volatiles in litchi fruit: A mini-review [J]. Horticulturae, 2022, 8(12): 1166.

[26] WU Y, PAN Q, QU W, *et al*. Comparison of volatile profiles of nine litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) cultivars from southern China [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(20): 9676–9681.

[27] 任璐, 张亚芳, 张永利. 不同储存容器对风香型基酒储存前期风味形成的探究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(5): 124–130.
REN L, ZHANG YF, ZHANG YL. Flavor formation of Feng-flavor base Baijiu in different storage contains [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(5): 124–130.

[28] ONG PKC, ACREE TE. Gas chromatography/olfactory analysis of lychee (*Litchi chinesis* Sonn.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(6): 2282–2286.

[29] 文英杰, 姜永华, 刘海伦, 等. 荔枝新品种‘离娘香’与 3 个常规品种果实香气物质差异比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 331–340.
WEN YJ, JIANG YH, LIU HL, *et al*. Comparison of aroma compounds in a new lychee cultivar ‘Liniangxiang’ and three common cultivars [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 331–340.

[30] 董晨, 李金枝, 王弋, 等. 六个荔枝品种的挥发性香气成分比较分析[J]. 南方农业, 2024, 18(5): 8–12.
DONG C, LI JZ, WANG G, *et al*. Comparative analysis of volatile aroma components in six lychee varieties [J]. South China Agriculture, 2024, 18(5): 8–12.

[31] 李金枝, 李伟才, 王弋, 等. “井岗红糯”荔枝果肉香气成分 GC-MS 分析[J]. 中国南方果树, 2023, 52(2): 54–57, 65.
LI JZ, LI WC, WANG G, *et al*. GC-MS analysis of aroma components in Jinggang Hongnuo litchi pulp [J]. South China Fruits, 2023, 52(2): 54–57, 65.

[32] 范妍, 黄旭明, 莫伟钦, 等. SPME/GC-MS 法分析不同荔枝品种果实中的香气成分[J]. 热带农业科学, 2017, 37(6): 72–78.
FAN Y, HUANG XM, MO WQ, *et al*. Analysis of aromatic compounds of three litchi cultivars by SPME/GC-MS [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(6): 72–78.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)