

乔慧兰, 马铭泽, 武爱园, 等. 基于代谢组揭示雪兔和妙香 7 号草莓果实香气物质的差异[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 744-755.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.013

# 基于代谢组揭示雪兔和妙香 7 号草莓果实香气物质的差异

乔慧兰<sup>1</sup>, 马铭泽<sup>1</sup>, 武爱园<sup>1</sup>, 豆志琦<sup>1</sup>, 祝秀梅<sup>2</sup>, 马宗桓<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 安宁 730070; 2. 甘肃省农产品质量安全检验检测中心, 甘肃 城关 730020)

**摘要:** 为明确白色草莓雪兔和红色草莓妙香 7 号果实香气物质的差异, 对 2 个品种成熟期果实的基本品质和香气物质进行测定。测定了单果重、花青素含量、可溶性固形物含量以及总酚含量等基本品质, 并采用气相色谱-质谱(GC-MS)法, 检测 2 个品种草莓果实中挥发性代谢物质。结果表明, 妙香 7 号的果形指数为 1.41, 圆锥形, 雪兔为 1.15, 短圆锥形; 妙香 7 号总酚含量为 4.10 mg/g, 花青素含量为 1.21 mg/g, 均显著高于雪兔。在 2 个草莓品种中共检测出 15 类 471 种代谢物, 其中 117 种上调表达, 24 种下调表达, 差异代谢物有 96 种, 占总代谢物的 20.38%。差异代谢物数量较多的为醇类、醛类、酸类、萜类、烃类、酮类、杂环化合物以及酯类物质等 8 类物质, 主要富集在萜类物质的生物合成途径中, 雪兔草莓果实中主要的挥发性物质为酯类, 妙香 7 号果实中为萜类物质。雪兔草莓中有 20 种特征性香气物质, 香气类型为草木香型; 妙香 7 号草莓中有 22 种特征性香气物质, 香气类型为果香型。

**关键词:** 草莓; 果实; 差异代谢物; 香气物质; 品质

中图分类号: S668.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)04-0744-12

## Aroma compounds differences in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7 revealed at metabolome level

QIAO Huilan<sup>1</sup>, MA Mingze<sup>1</sup>, WU Aiyuan<sup>1</sup>, DOU Zhiqi<sup>1</sup>, ZHU Xiumei<sup>2</sup>, MA Zonghuan<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Anning 730070, China; 2. Gansu Provincial Agricultural Products Quality and Safety Inspection and Testing Center, Chengguan 730020, China)

**Abstract:** To clarify the differences in aroma compounds between white strawberry Snow Rabbit and red strawberry Miaoxiang No.7, the basic fruit quality and aroma compounds of the two varieties at the maturity stage were determined in this study. Basic qualities including single fruit weight, anthocyanin content, soluble solids content, and total phenolic content were measured. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to detect volatile compounds in the fruits of the two strawberry varieties. The results showed that the fruit shape index of Miaoxiang No.7 was 1.41, the fruit was long conical in shape, while the fruit shape index of Snow Rabbit was 1.15, and the fruit was short conical in shape.

The total phenolic content and anthocyanin content of Miaoxiang No.7 were 4.10 mg/g and 1.21 mg/g, respectively, both were significantly higher than those of Snow Rabbit. A total of 471 metabolites in 15 categories were detected in the two strawberry cultivars, of which 117 were up-regulated, 24 were down-regulated, and 96 were differentially expressed metabolites, accounting for 20.38% of the

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 甘肃农业大学本科生创新训练计划项目(S202210733043、202212030); 高等学校创新基金项目(2021B-142); 甘肃农业大学伏羲青年英才项目(GAUfx-04Y05)

作者简介: 乔慧兰(1999-), 女, 甘肃渭源人, 硕士研究生, 主要从事果树逆境生理与生长调控研究。(E-mail) 3151618114@qq.com

通讯作者: 马宗桓, (E-mail) mazohu@163.com

total metabolites. The eight differential metabolites with high quantities were alcohols, aldehydes, acids, terpenoids, hydrocarbons, ketones, heterocyclic compounds, and esters. These compounds were mainly enriched in the biosynthetic pathway of terpenoids. The main volatile compounds in Snow Rabbit strawberry fruit were esters, while those in Miaoxiang No.7 fruit were terpenoids. There were 20 characteristic aroma compounds in Snow Rabbit strawberry, with a herbaceous aroma type, and there were 22 characteristic aroma compounds in Miaoxiang No.7 strawberry, with a fruity aroma type.

**Key words:** strawberry; fruit; differential metabolites; aroma substances; quality

草莓 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 属于蔷薇科 (Rosaceae) 草莓属 (*Fragaria*)<sup>[1]</sup>, 是多年生草本浆果类果树, 其果实通常呈现出鲜艳的红色, 然而, 除了常见的红色果实之外, 也有一部分草莓的果实为白色。草莓具有极高的经济价值和营养价值, 在市场上备受欢迎, 有“水果皇后”之称。近年来随着农业技术的不断进步以及市场需求的持续增长, 中国草莓产业快速发展, 种植面积不断扩大, 种植技术日益成熟, 草莓的产量也在稳步提升。如今, 中国已成为世界第一草莓生产和消费大国<sup>[2]</sup>。改善草莓果实品质是当前草莓产业发展的任务<sup>[3]</sup>, 在草莓的众多品质中, 香气堪称一项至关重要的品质, 它不但是评价草莓品质的关键指标, 同时也是草莓在育种、鲜食以及加工等方面的重要考量因素<sup>[4]</sup>。香气由植物细胞中的挥发性有机物 (VOCs) 产生, 占鲜重的 0.001%~0.010%, 包括酯类、萜类、醚类、烷烃、苯等物质<sup>[5]</sup>。这些挥发性化合物共同作用, 混合形成了草莓果实独特的香气。草莓果实的香气呈现出多种不同的类型, 主要的香气类型有水果香味、青草香味、柑橘香味、焦糖香味、黄油味以及花香味。草莓的香气类型与其香气活性值 (实际浓度/香气阈值) 有关, 某种挥发性化合物的香气活性值大于 1 代表其特征性香气物质能够对其香气类型作出贡献。草莓的焦糖香由呋喃类化合物的味道构成, 呋喃类化合物是新鲜草莓特有的挥发性化合物。尽管草莓中的呋喃酮含量极少, 然而其香气阈值较低, 对草莓的香气起着重要的作用<sup>[6-7]</sup>。花香与柑橘香主要由萜类化合物造就, 其中芳樟醇和橙花醇便是形成这两种香气的重要成分, 其气味阈值也相对较低<sup>[8-9]</sup>。此外, 挥发性苯丙烷类化合物 (如丁香酚、异丁香酚) 也是构成草莓花香气味的物质基础<sup>[10-11]</sup>。

依据前人的研究结果可知, 在草莓中含量最为丰富的挥发性化合物当属使草莓呈现出果香的酯类化合物, 占总挥发性化合物总量的 25%~90%。冯佳等<sup>[12]</sup>对冀香、冀九以及红颜 3 个草莓品种在不同发

育时期的果实进行了挥发性物质的代谢组检测分析, 结果表明, 萜类物质和酯类物质是草莓果实香气形成的关键所在。并且, 伴随果实成熟度的逐步提升, 挥发性物质的种类持续不断地增多。在果实生长的不同阶段, 起到主导作用的挥发性物质种类存在显著差异。当果实处于未成熟时期, 挥发性物质以醇类和醛类为主; 随着果实逐渐接近成熟状态, 挥发性物质的种类开始发生变化, 此时以酯类物质为主。酯类物质为果实带来了浓郁的芳香, 使果实散发出诱人的气息。此外, 不同的品种之间, 化合物的种类以及含量也存在着极大的差异<sup>[13]</sup>。有的品种可能富含特定的醇类或醛类化合物, 而另一些品种则可能在酯类化合物的含量上更为突出。这种差异不仅影响着果实的气味特征, 也在一定程度上决定了不同品种果实的独特风味和品质。Wang 等<sup>[14]</sup>通过转录组与代谢组对黄毛草莓 (*F. nilgerrensis*) 的香气合成机制进行分析, 得出酯类和内酯类物质是黄毛草莓浓郁桃香味的物质基础。

草莓香气物质合成途径多样, 主要有脂肪酸、氨基酸、萜烯及碳水化合物途径。当然, 在实际情况中, 影响草莓香气类型的因素还有很多, 比如遗传因素、发育因素、栽培条件以及采后条件等都会影响草莓的香气物质合成<sup>[15]</sup>。庞夫花等<sup>[16]</sup>研究发现, 常规土壤栽培处理红颜果实的内酯、萜烯醇、脂肪酯相对含量低于高架基质栽培处理红颜果实, 常规土壤栽培处理天使 8 号草莓果实的内酯、萜烯醇、脂肪酯相对含量高于高架基质栽培处理。才可欣<sup>[17]</sup>的研究结果表明, 随着冻藏时间的延长, 哈尼和九九草莓总挥发性有机化合物含量呈波动下降趋势, 而蒙特瑞草莓总挥发性有机化合物含量呈波动趋势但保持在一定水平内。我们在研究过程中发现, 白色草莓品种雪兔和红色草莓品种妙香 7 号果实展现出截然不同的风味和香气, 但其香气成分的具体差异尚不清楚。深入研究这 2 种草莓的挥发性化合物含量以及与之相关的代谢途径, 具有重大的意义。通过对

挥发性化合物含量的精确测定,我们可以了解到不同化合物在 2 种草莓中的分布情况,进而找出可能导致香气差异的关键成分。同时,对代谢途径的探索能够帮助我们揭示香气物质的合成机制,从根本上找到白草莓和红草莓香气差异的潜在原因。这不仅有助于丰富我们对草莓香气形成的科学认识,还为草莓品种的改良和培育提供了重要的理论依据,为消费者带来更加丰富多样的草莓风味体验。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与处理

供试材料为雪兔和妙香 7 号草莓果实。草莓定植于日光温室中,起垄栽培,株距 15 cm,行距 20 cm。果实完全成熟时在日光温室不同区域采摘 150 个果实,随机分为 3 组,每个组规定为 1 个重复。取样时保证果实大小适中、果形正常、无损伤。采摘后,把果实装入自封袋中,带回后在实验室测定单果重等基础指标后放入 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱保存。

### 1.2 品质指标的测定

1.2.1 果形、果实含水量及可溶性固形物含量的测定 利用游标卡尺测量草莓果实的纵径、横径,精确到 0.01 cm,并计算果形指数(果实纵径与横径之比)<sup>[18-19]</sup>。每个重复随机选取 3 个果实进行各项指标的测定。

果实含水量采用称重法测定,先称果实鲜重,切薄片后于 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干至恒重后称取干重,计算果实水分含量。用数显糖度计测定可溶性固形物含量<sup>[20]</sup>。

1.2.2 总酚含量的测定 总酚含量参照房玉林等<sup>[21]</sup>的方法测定,称取 0.5 g 草莓果肉,先将其捣碎,放入 10 mL 的离心管中,紧接着向离心管中加入 8 mL 酸化甲醇溶液。在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温条件下,采用数控超声波(功率设置为 100%)处理辅助提取上清液,持续时间为 30 min。提取完成后,将离心管放入超低温离心机中,以 10 000 r/min 的速度进行离心处理,持续 5 min。最后,将收集到的上清液在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下贮藏,以备后续试验使用。该操作流程有助于保护样品的稳定性,确保研究结果的准确性与可信度。标准曲线绘制:精确称取没食子酸标准品 0.020 0 g,用蒸馏水溶解并定容至 100 mL 容量瓶中,得到 0.2 mg/mL 的标准液。准确移取标准液 0 mL、0.3 mL、0.6 mL、0.9 mL、1.2 mL、1.5 mL、1.8 mL 于玻璃管中,加 1.0 mL 福林酚试剂涡旋混

合 1 min,再加 3.0 mL 10%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液振荡,加蒸馏水至 10.0 mL, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴反应 1.5 h,以不加标准液的溶液为空白对照,在 765 nm 波长下测定 OD 值,以没食子酸质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标,建立标准曲线回归分析并计算样品总酚含量<sup>[22-23]</sup>,试验重复 3 次。

$$\text{总酚含量}(\text{mg/g}) = (x \times V \times n) / m_s$$

式中, $x = (y + 0.0025) / 0.0159$  (mg/L);  $V = 0.001\text{ L}$ ;  $n = 100$  (稀释倍数);  $m_s$  为样品质量。

1.2.3 花青素含量及类黄酮含量的测定 花青素含量及类黄酮含量参考张驰等<sup>[24]</sup>的方法测定,准确称取 1 g 草莓果肉,在液氮中研磨成粉末后转至 10 mL 离心管中,加入 5 mL 1% HCl-甲醇溶液,在黑暗条件下冰浴浸提 1 h,其间振荡 3~4 次,10 000 r/min 离心,收集上清液,转至 20 mL 刻度试管中,残渣中再加 5 mL 1% HCl-甲醇溶液,浸提 2 h 后离心,合并 2 次上清液并定容至 20 mL。以 1% HCl-甲醇溶液作为空白参比样本,进行调零操作,测定波长 325 nm、600 nm 和 530 nm 下的吸光度,重复 3 次。以 325 nm 处的吸光度表示类黄酮相对含量,即  $OD_{325}$ ,以 530 nm 和 600 nm 吸光度之差表示花青素相对含量( $U$ ), $U = (OD_{530} - OD_{600})$ 。

### 1.3 气相色谱-质谱分析

1.3.1 样品提取流程 从 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中取出样品,加液氮研磨,称取 500 mg 样品于顶空瓶中,加 2 mL 饱和 NaCl 溶液和 10  $\mu\text{L}$  (50  $\mu\text{g/mL}$ ) 3-己酮溶液,用全自动顶空固相微萃取技术(HS-SPME)萃取样本供气相色谱-质谱(GC-MS)分析。

1.3.2 分析条件 HS-SPME 萃取条件:在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行恒温振荡,持续 5 min。随后,将 120  $\mu\text{m}$  的二乙烯基苯/宽范围碳/聚二甲基硅氧烷(DVB/CWR/PDMS)萃取头插入样品顶空瓶。然后进行顶空萃取,时长为 15 min。结束之后在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解析 5 min,进行 GC-MS 分离鉴定。采样前,萃取头在 Fiber Conditioning Station 中于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 老化 5 min。

色谱条件:DB-5MS 毛细管柱(30.00 m $\times$  0.25 mm $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ , 美国加利福尼亚州安捷伦科技公司产品),载气为高纯氦气。在试验过程中,恒流流速为 1.2 mL/min,进样口温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不分流进样,溶剂延迟 3.5 min。进行程序升温操作时,首先在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下保持 3.5 min,然后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再以 $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至

180 ℃。最后,以 25 ℃/min 的速率升温至 280 ℃,并在此温度下保持 5.0 min。

质谱条件:采用电子轰击离子源(EI),将离子源温度设定为 230 ℃,确保离子能够在适宜的温度环境下产生。同时,四级杆温度保持在 150 ℃,为离子的筛选与传输提供稳定的条件。质谱接口温度为 280 ℃,以实现高效的离子传输。电子能量设置为 70 eV。在扫描方式上,采用选择性离子检测模式(SIM),可以更加准确地确定物质的成分与含量。

#### 1.4 计算各香气组分的含量

根据已有的研究报道中各挥发性物质的气味描述及阈值(化合物气味阈值为在水中的阈值浓度)<sup>[25]</sup>,分析并处理草莓果实香气物质特征,对雪兔和妙香7号草莓果实的挥发性物质进行香型分类。

香味各组分含量以及香气值( $U_0$ )的计算参考万鹏等<sup>[26]</sup>的方法进行。

#### 1.5 数据处理及分析

从 GC-MS 气质联用仪导出数据,使用 HMDB、Lipidmaps(v2.3)及 METLIN 数据库进行定性分析,使用 Progenesis QI v2.3 软件进行峰识别等操作,使用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)鉴定差异代谢物,以 KEGG 数据库为基础,开展代谢通路富集分析<sup>[27]</sup>,使用 Excel 2010 编辑数据,使用 DPS 7.05 软件检验数

据的显著性( $\alpha=0.05$ ),使用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 草莓果实剖面及果实品质比较分析

观察 2 个品种草莓的外观及剖面图(图 1),发现雪兔(图 1A)果皮为粉白色,种子为红色,妙香 7 号(图 1B)果皮为红色,种子为红色。从内部来看,雪兔髓部饱满充实,无髓心空洞,整体同果肉一样呈现白色;妙香 7 号髓部空洞、不饱满,有所缺失,且髓部多呈现红色,果肉颜色越靠近果皮颜色越深。从果实形状来看,雪兔为短圆锥形,妙香 7 号为圆锥形。由图 2 可知,2 个草莓品种的可溶性固形物含量和含水量都没有显著差异,而单果重、总酚含量、类黄酮含量、花青素含量和果形指数均有显著差异。雪兔的总酚含量为 2.18 mg/g,而妙香 7 号的总酚含量高达 4.10 mg/g。2 个草莓品种之间的花青素含量呈现出显著差异,妙香 7 号的花青素含量为 1.21 mg/g,远远高于雪兔的花青素含量。这主要是因为 2 个品种在颜色方面存在着显著的不同,妙香 7 号为红色品种,雪兔则是白色品种。雪兔和妙香 7 号的果形指数也相差较大,其中妙香 7 号为 1.41,雪兔为 1.15,反映了两者的果形不同。此外,妙香 7 号单果重较高,为 23.35 g,雪兔仅为 10.07 g。

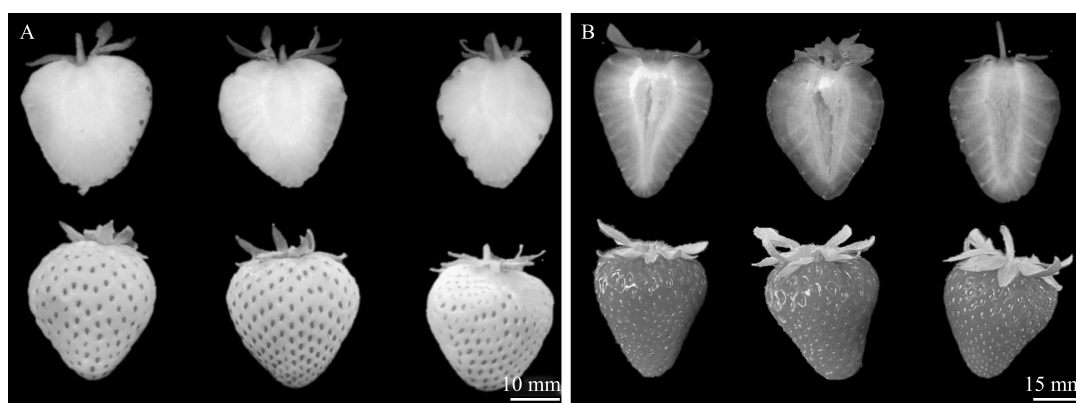


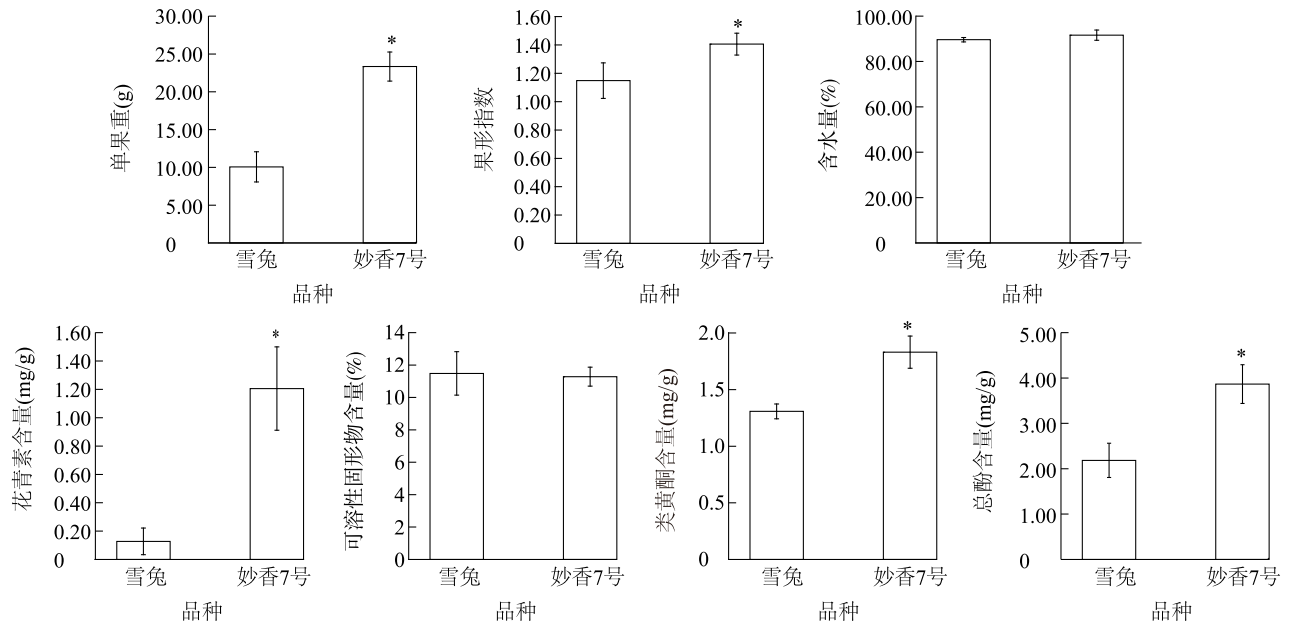
图 1 雪兔(A)和妙香7号(B)草莓果实剖面

Fig.1 Strawberry fruit sections of Snow Rabbit (A) and Miaoxiang No.7 (B)

### 2.2 代谢组分总体分析

雪兔和妙香7号草莓果实样品经 GC-MS 分析,共鉴定出 15 类 471 种代谢物(表 1),包括胺、醇、芳烃、酚、含氮化合物、含硫化合物、卤代烃、醛、酸、萜、烃、酮、杂环化合物、酯以及其他代谢物。萜类化合物的种类

最多,有 84 种,其次是酯类化合物和杂环化合物,分别有 80 种和 79 种;卤代烃类物质的种类最少。其中表达上调的代谢物有 10 类 117 种,萜类代谢物的数目最多,有 34 种,其次是醇类和酯类代谢物,均有 17 种;表达下调的代谢物有 11 类 24 种,酯类物质最多,有 11 种。



\* 表示雪兔与妙香7号相比差异显著( $P < 0.05$ )。

图2 雪兔和妙香7号草莓果实品质

Fig.2 Strawberry fruit quality of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7

表1 2个品种的草莓果实中的代谢物数量

Table 1 Number of metabolites in strawberry fruits of two varieties

代谢物种类	代谢物数量(种)	上调表达的代谢物数量(种)	下调表达的代谢物数量(种)	差异显著的代谢物数量(种)
胺	8	0	1	1
醇	61	17	2	19
芳烃	12	1	0	1
酚	6	0	0	0
含氮化合物	5	2	0	2
含硫化合物	3	0	1	1
卤代烃	1	0	0	0
其他	3	0	2	2
醛	31	6	1	7
酸	14	8	1	9
萜	84	34	1	35
烃	44	7	1	8
酮	40	11	1	12
杂环化合物	79	14	2	16
酯	80	17	11	28
总计	471	117	24	141

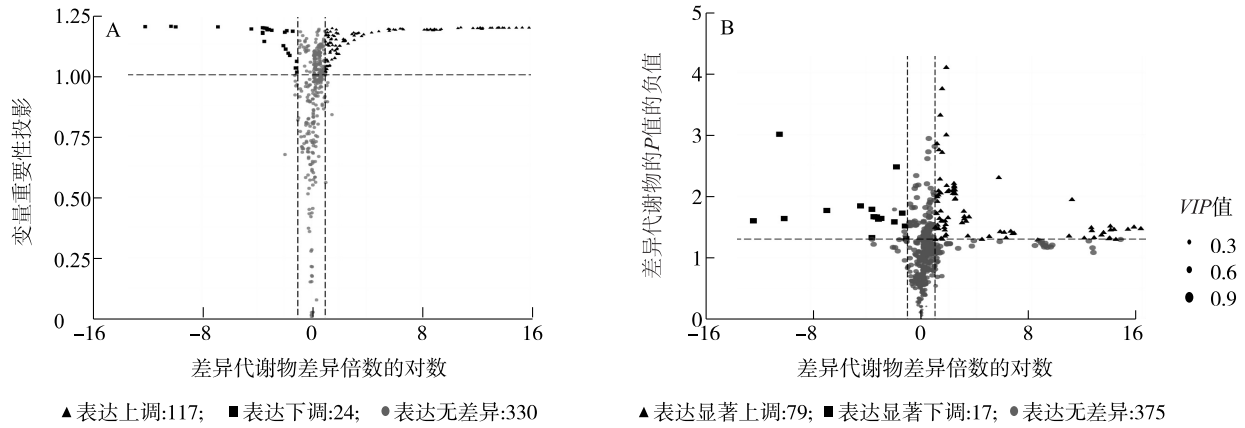
### 2.3 雪兔和妙香7号差异代谢物鉴定及火山图分析

图3A为雪兔和妙香7号草莓中未经筛选的全部

差异代谢物。根据变量重要性投影(VIP)值 $>1$ ,  $t$ 检验的 $P$ 值 $<0.05$ 且差异倍数( $FC$ ) $\geq 2.0$ 或 $FC \leq 0.5$ ,从2个草莓品种中筛选到总体的显著差异代谢物96种。从2个品种的草莓果实中共检测到471种代谢物,其中117种为上调的差异代谢物,占总代谢物的24.84%;其中有79种显著上调(图3B)。下调的差异代谢物有24种,占代谢物总量的5.10%,其中17种为显著下调。2个草莓品种在代谢物总量、上调代谢物和下调代谢物的种类上存在差异。

### 2.4 差异代谢物热图分析

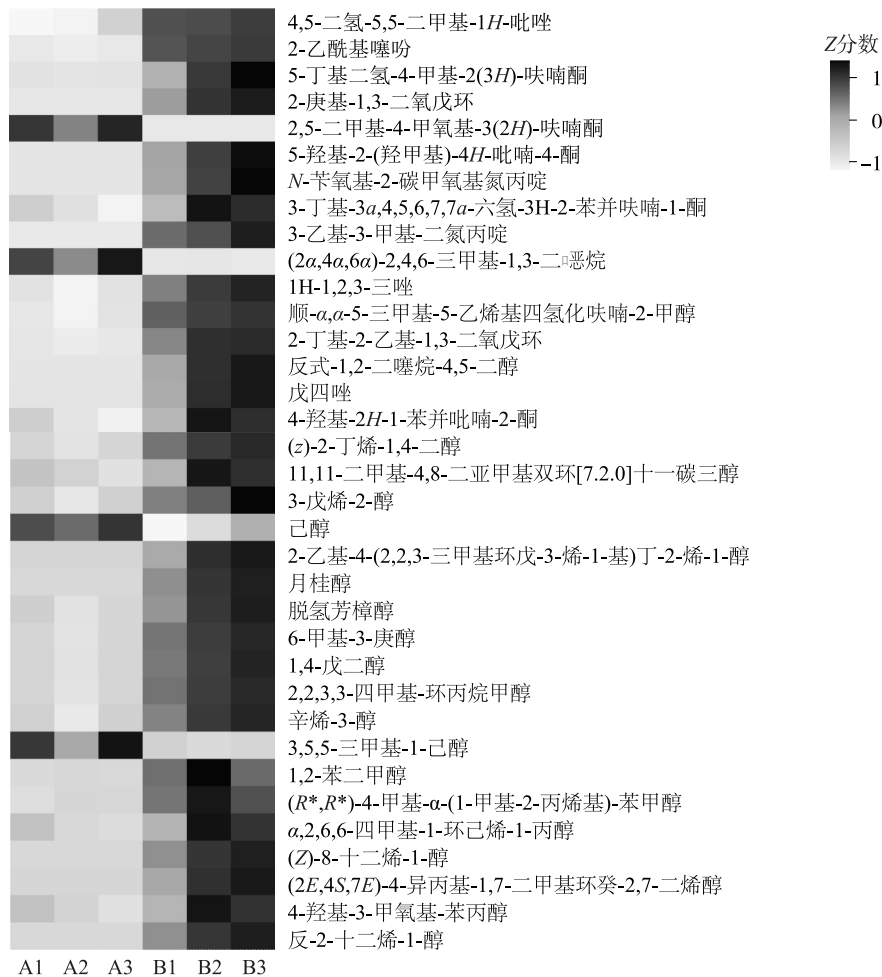
为了直观地呈现样本关联及代谢物表达差异,筛选上调代谢物质、下调代谢物质数量较多的8类物质(醇类、醛类、酸类、萜类、烃类、酮类、杂环化合物以及酯类物质),进行归一化处理并绘制聚类热图。结果如图4、图5、图6、图7所示。雪兔草莓果实的代谢物大多为酯类物质,丁酸乙酯、 $\beta$ -苯乙酸乙酯、乙酸1-乙基丙酯、1-辛基三氟乙酸酯、丙酸2,2-二甲基戊酯、异戊酸异戊酯、3-甲基丁酸戊酯、乙酸异戊酯、1-(二甲氨基)丙-2-基乙酸酯、戊酸4-甲基甲酯、水杨酸甲酯等物质的含量均高于妙香7号草莓果实。此外,雪兔草莓果实中还有己醇、 $E$ -2-辛烯醛、3-庚酮等物质的含量也较高。与雪兔相比,妙香7号草莓果实中2-甲基-2-庚醛、4,5-二氢-5,5-二甲



VIP:变量重要性投影;FC:差异倍数;P值:显著性。图3A为VIP+FC筛选条件下差异代谢物的火山图,纵坐标表示VIP值;图3B为VIP+FC+P值筛选条件下差异代谢物的火山图,纵坐标表示差异代谢物的显著性水平的负值,圆点的大小代表VIP值大小。纵坐标值越大,表明差异越显著,筛选得到的差异代谢物越可靠。

图3 差异代谢物的火山图

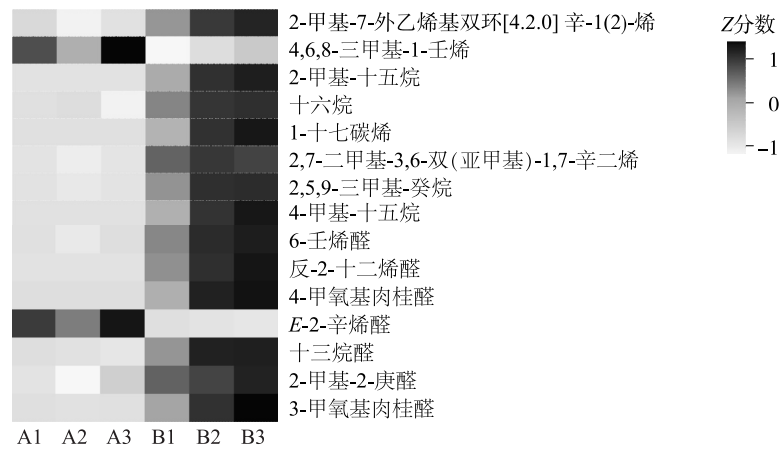
Fig.3 Volcano diagram of differential metabolites



A1、A2、A3为雪兔草莓果实的3个重复;B1、B2、B3为妙香7号草莓果实的3个重复。

图4 雪兔和妙香7号草莓果实杂环化合物与醇类物质的差异代谢物热图

Fig.4 Heat map of differential metabolites of heterocyclic compounds and alcohols in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7



A1、A2、A3 为雪兔草莓果实的 3 个重复;B1、B2、B3 为妙香 7 号草莓果实的 3 个重复。

图 5 雪兔和妙香 7 号草莓果实烃类物质与醛类物质的差异代谢物热图

Fig.5 Heat map of differential metabolites of hydrocarbon substances and aldehydes compounds in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7



A1、A2、A3 为雪兔草莓果实的 3 个重复;B1、B2、B3 为妙香 7 号草莓果实的 3 个重复。

图 6 雪兔和妙香 7 号草莓果实酮类物质与酸类物质的差异代谢物热图

Fig.6 Heat map of differential metabolites of ketones and acids in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7

基-1*H*-吡唑和 2-乙酰基噻吩等上调表达。

## 2.5 差异代谢物 KEGG 富集分析

KEGG 数据库可推测生物系统中基因、蛋白质及代谢物的功能及其相互作用。基于该数据库对差异代谢物进行代谢通路富集分析,有助于理解差异样品代谢途径变化机制。如图 8 所示,在雪兔与妙香 7 号的比较组中,差异代谢物主要富集在半萜和三萜的生物合成、生物碱的生物合成,以及萜类骨架的生物合成代谢中,部分物质还参与了丁酸盐的代谢合成,另

外还有少量参与了单萜的生物合成。这表明 2 个品种之间萜类物质的差异是造成草莓果实香气物质差异的主要原因。

## 2.6 代谢途径分析

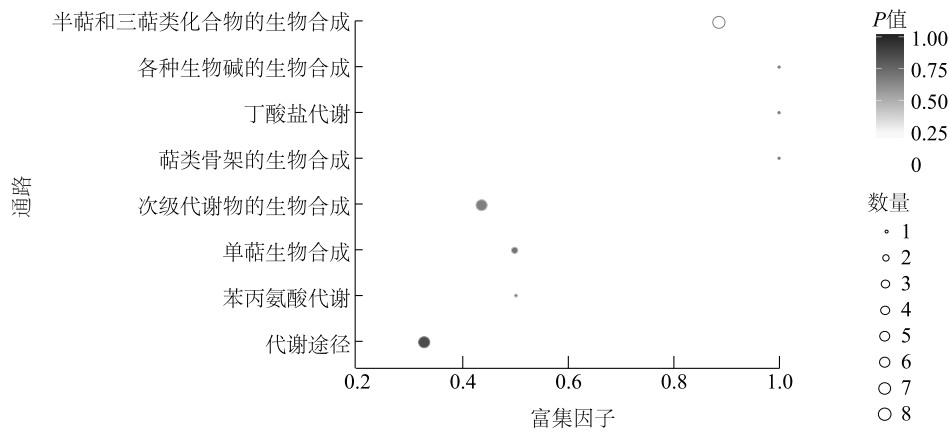
基于 KEGG 代谢通路分析结果,分析并绘制了 2 个草莓品种中萜类骨架生物合成代谢途径解析图(图 9),对雪兔和妙香 7 号草莓果实代谢物表达量进行比对分析可发现,香叶醇、(+)-(*R*)-柠檬烯、(-)-反式异萜啶醇在妙香 7 号果实中下调表达, $\alpha$ -



A1、A2、A3 为雪兔草莓果实的 3 个重复;B1、B2、B3 为妙香 7 号草莓果实的 3 个重复。

图 7 雪兔和妙香 7 号草莓果实酯类物质与萜类物质的差异代谢物热图

Fig.7 Heat map of differential metabolites of esters and terpenoids in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7



$P$  表示超几何检验  $P$  值,  $P$  值越接近 0, 表示富集越显著; 数量代表富集到相应通路上的差异显著代谢物的个数。

图 8 雪兔和妙香 7 号草莓果实差异代谢物 KEGG 富集分析

Fig.8 KEGG enrichment map of differential metabolites in strawberry fruits of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7

松油醇上调表达。

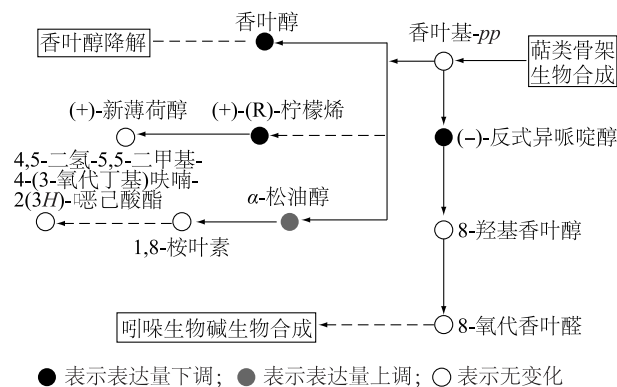


图 9 萜类骨架生物合成代谢途径解析

Fig.9 Analysis of terpenoid backbone biosynthesis and metabolism pathways

## 2.7 2 个草莓品种的香型分析

由表 2 可知,雪兔草莓果实中共检测出了 20 种特征香气物质,醛类物质最多,有 8 种;其次是酯类物质,有 5 种;萜类物质有 4 种,而醇类物质最少,仅有 3 种。妙香 7 号草莓有 22 种特征性香气物质,醛类物质和萜类物质种类最多,均有 6 种,其次为酯类物质 (5 种),酸类物质和醇类物质 2 种,酮类物质最少,只有 1 种。己醛、 $E$ -2-辛烯醛、苯甲醛、 $E$ -2-己烯醛、丁酸乙酯、(+)-柠檬烯是 2 个品种草莓果实共同的特征性香气成分。结合图 10,2 个草莓品种的香气类型都为果香、花香、甜香、草木香以及脂肪香。在雪兔中,草木香占比最大,其次为果香和花香,甜香和脂肪香占比较小,因此雪兔草莓果实的香型为草木香型;在

妙香 7 号中,果香最为突出,其次是草木香、甜香和脂肪香,花香占比最小,因此妙香 7 号草莓果实的香型为果香型。

由以上结论可知,2 个品种草莓果实的特征性香气的差异主要是由萜类物质和酯类物质造成的,在雪兔草莓果实中,仅含有 (+)-表-双环倍半水芹烯、 $\alpha$ -石竹烯和 (+)-柠檬烯这 3 种萜类物质,而妙香 7 号的果实中含有 6 种萜类香气成分,其中  $\alpha$ -法呢烯、萜品油烯、乙酸芳樟酯等的香气值都较高,对妙香 7 号的果实香气有较大的贡献。

## 3 讨论

随着人们消费水平的提升,草莓生产从数量型向质量型转变,需种植更多优质新品种满足市场需求<sup>[28]</sup>。本研究结果显示,妙香 7 号草莓果实的表型及内在品质整体高于雪兔。妙香 7 号果型较大,平均单果重 23.35 g,果色鲜红,含水量较高,果形指数为 1.41;雪兔草莓果实的平均单果重为 10.07 g,果实为白色,含水量适中,果形指数为 1.15。果形指数可体现商品草莓等级,美国红星草莓特级和优级果果形指数要求不低于 0.93<sup>[29]</sup>。果形指数同时也是衡量果实形状的一个重要指标,它反映了果实的长短、宽窄等形态特征。雪兔和妙香 7 号在果形指数上的差异,充分体现了两者在果形方面的不同。这种差异可能会影响到消费者的购买选择,因为不同的果形可能会给人带来不同的视觉感受和口感体验。综合分析结果显示,2 个品种的草莓果实品质都较高,雪兔草莓果实的品质稍逊于妙香 7 号。

表2 雪兔和妙香7号的特征性香气成分及香气值

Table 2 Characteristic aroma components and aroma values of Snow Rabbit and Miaoxiang No.7

类别	特征香气物质	相对含量( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )		阈值 ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	香气值( $U_0$ )		香味描述
		雪兔	妙香7号		雪兔	妙香7号	
醛类	顺式-柠檬醛	1.35		1 000.00	1.35		柠檬香、水果香
	己醛	1.19	1.42	4.50	264.44	315.60	绿色蔬菜香、草香、树叶香、葡萄酒香
	(Z)-3-己烯醛	0.08		0.25	320.00		青草香、苹果香
	香茅醛	0.48		6.00	80.00		玫瑰香、柑橘香、柠檬香
	E-2-辛烯醛	0.24	0.09	3.00	80.00	30.00	新鲜的黄瓜香、药草的清香、香蕉叶样的脂肪气息
	苯甲醛	0.58	0.45	350.00	1.66	1.29	芳香、焦糖香
	苯乙醛	0.05		4.00	12.50		花香、玫瑰香
	(E)-2-己烯醛	3.81	4.70	17.00	224.12	276.50	青草香、草木香
	反-2-十二烯醛		0.72	0.04		18 000.00	柑橘香、橘子香
	(E)-2-壬烯醛		4.57	0.15		30 466.70	脂肪香、青菜香、黄瓜香、柑橘香
	酯类	丁酸乙酯	0.63	0.196	1.00	630.00	196.00
乙酸异戊酯		1.90		0.03	6 333.00		热带水果味
庚酸乙酯		0.07		2.00	35.00		酒香、果香
水杨酸甲酯		0.31		40.00	77.50		浓烈青涩的草药香
苯乙酸乙酯		0.23		0.07	3 285.71		玫瑰味、花香
2-甲基丁基己酸酯			0.067	17.00		3.94	醚香
乙酸己酯			0.138	2.00		69.00	果香、青菜香、苹果香、蕉香、甜香
反式-2-己烯基乙酸酯			0.197	100.00		1.97	甜香、青菜香、鲜香、苹果香、蕉香、蜡香
己酸己酯			0.062	10.00		6.20	药草香、鲜香、蔬菜香、果香
醇类		脱氢芳樟醇	4.47	10.20	110.00	40.64	92.70
	3-辛醇	0.02		1.00	20.00		壤香、蘑菇独特香味与淡霉香,覆有蜡香,且含清新木香、微辛香及隐约薄荷香韵
	1-辛醇	0.12		0.04	3 000.00		柠檬香
	壬醇		4.95	50.00		99.00	鲜香、脂肪气息、草木香、玫瑰香、橘子香、脂膏香
萜类	(+)- $\beta$ -双环倍半水芹烯	0.94		40.00	23.50		黑胡椒和薄荷似香气
	$\alpha$ -石竹烯	0.59		64.00	9.22		甜香、木香、丁香花香
	(+)-柠檬烯	0.10	5.96	10.00	10.00	596.00	柠檬香味、柑橘味
	$\alpha$ -松油醇	0.40	1.08	330.00	1.21	3.27	丁香花香、草木香
	$\alpha$ -法呢烯		0.21	0.16		1 321.50	柑橘香、药草香、薰衣草香、佛手柑香、药香、橙花油香、青菜香
	萜品油烯		0.21	0.20		1 050.00	柑橘香、松木香
	乙酸芳樟酯		2.28	1.00		2 280.00	甜香、青菜香、柑橘香、佛手柑香、薰衣草香、木质香
	$\gamma$ -松油烯		0.03	1.40		21.40	油香、烟味
	酮类	2-庚酮		0.50	140.00		3.58
酸类		己酸		11.20	3 000.00		3.70
	(E)-2-己酸		5.87	1 000.00		5.87	果香、甜香、药草香

王爱华等<sup>[30]</sup>比较黄毛草莓和凤梨草莓种间杂种 PF(有蜜桃香)与 NF(无蜜桃香)完熟期果实香气成分代谢谱,从检测到的 383 种代谢物里,成功筛选出 67 种具有显著差异的代谢物,其中 58 种上调,9 种下调,内酯类物质上调幅度较大。本研究筛选

到 141 种差异代谢物,妙香 7 号中萜类物质的上调幅度较大,而雪兔中上调幅度较大的多为酯类物质。冯佳等<sup>[12]</sup>选取 3 个品种的成熟草莓果实进行感官评价,研究表明,萜类物质和酯类物质的种类最多。在本研究中,雪兔果实中的差异代谢物主要为

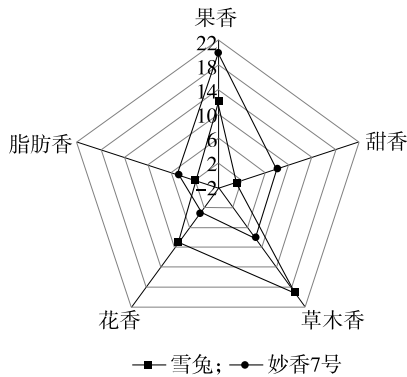


图 10 2 个草莓果实的香气类型分析

Fig.10 Analysis of aroma types of two strawberry fruits

酯类物质,妙香7号中则主要为萜类物质。

前人的研究表明,草莓的香气是由多种因素共同决定的,果实香气物质的影响因素包括品种、果实成熟度以及贮藏环境等<sup>[31]</sup>。赵倩等<sup>[32]</sup>对野生黄毛草莓与3个栽培品种进行主成分聚类分析,发现黄毛草莓与其他3个品种分为2类,且类间距较远,这说明2类呈香物质存在较大区别。不同品种的草莓果实,其香气物质的种类和含量有所不同,进而对草莓果实的香味产生一定影响。本研究结果表明,2个草莓品种的挥发性物质的种类不同,因此这2个草莓品种的香气类型也不同。

## 4 结论

妙香7号果实的单果重、总酚含量和花青素含量均显著高于雪兔,雪兔和妙香7号草莓果实中共检测到96种显著差异代谢物,妙香7号中,对萜类骨架生物合成代谢途径的影响最为显著,萜类差异代谢物质无论是数量还是含量都呈现出显著的上升趋势,雪兔中则以酯类差异代谢物质为主。对2个草莓品种的香气类型进行分析,发现雪兔草莓果实的香气类型为草木香型,妙香7号草莓果实的香气类型为果香型。

### 参考文献:

[1] 刘玲. 四倍体野生草莓的诱导与四倍体黄毛草莓的低温胁迫效应[D]. 南京:南京农业大学,2016.  
 [2] 严聪文,苏代发,代庆忠,等. 草莓病害的生物防治研究进展[J]. 生物技术通报,2022,38(12):73-87.  
 [3] 郑珍珍,陈雪雪,沈元月,等. 转录因子 FabHLH148 参与草莓果实的颜色发育[J]. 果树学报,2022,39(8):1358-1367.  
 [4] 张运涛,王桂霞,董静,等. 草莓5个品种的果实香味成分分

析[J]. 园艺学报,2008,35(3):433-437.

[5] 叶楚,谢炳春,李涛,等. 园艺作物香气成分及合成调控机理的研究进展[J]. 广东农业科学,2023,50(11):98-112.  
 [6] DU X F, PLOTTO A, BALDWIN E, et al. Evaluation of volatiles from two subtropical strawberry cultivars using GC-olfactometry, GC-MS odor activity values, and sensory analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(23):12569-12577.  
 [7] ZHANG Y Y, YIN X R, XIAO Y W, et al. An ethylene response factor-myb transcription complex regulates furaneol biosynthesis by activating *QUINONE OXIDOREDUCTASE* expression in strawberry[J]. Plant Physiology,2018,178(1):189-201.  
 [8] AUBERT C, BRUAUT M, CHALOT G, et al. Impact of maturity stage at harvest on the main physicochemical characteristics, the levels of vitamin C, polyphenols and volatiles and the sensory quality of Gariguette strawberry[J]. European Food Research and Technology,2021,247(1):37-49.  
 [9] DU X F, SONG M, ROUSEFF R. Identification of new strawberry sulfur volatiles and changes during maturation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(4):1293-1300.  
 [10] SCHUURINK R C, HARING M A, CLARK D G. Regulation of volatile benzenoid biosynthesis in *Petunia* flowers[J]. Trends in Plant Science,2006,11(1):20-25.  
 [11] ULRICH D, KOMES D, OLBRIGHT K, et al. Diversity of aroma patterns in wild and cultivated *Fragaria* accessions[J]. Genetic Resources and Crop Evolution,2007,54(6):1185-1196.  
 [12] 冯佳,李莉,范婧芳,等. 基于代谢组检测的草莓果实香气物质的比较分析[J]. 江西农业学报,2023,35(6):115-123.  
 [13] 倪溢楠. 草莓果实品质评价及香气资源挖掘[D]. 扬州:扬州大学,2021.  
 [14] WANG A H, MA H Y, ZHANG B H, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses provide insights into the formation of the peach-like aroma of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht. fruits[J]. Genes,2022,13(7):1285.  
 [15] 刘金莹,孔令喜,王威浩,等. 草莓果实香气物质生物合成研究进展[J]. 园艺学报,2023,50(9):1959-1970.  
 [16] 庞夫花,王庆莲,袁华招,等. 不同栽培模式对草莓果实挥发性香气物质的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(2):359-366.  
 [17] 才可欣. 不同品种草莓冻藏过程中挥发性有机物变化的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.  
 [18] 周金梅,关法春,王超,等. 林芝地区西藏草莓的果实质量评价[J]. 北方园艺,2019(9):56-59.  
 [19] 陈厚锡. 钙对红阳猕猴桃苗木生长及果实品质的影响[D]. 贵阳:贵州师范大学,2022.  
 [20] 唐静,周园园,袁利荣. 不同基质配方对立体栽培草莓生长、品质和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):185-187.  
 [21] 房玉林,孙伟,万力,等. 调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(13):2730-2738.  
 [22] 王兴瑞,陈响响,韩玉泽,等. 青海亚麻籽总酚含量测定及其抗氧化活性研究[J]. 中国油脂,2020,45(8):121-124,137.  
 [23] 张雨. 双螺杆挤压操作参数对红景天膨化及抗氧化特性的

- 影响研究[D]. 延吉:延边大学,2021.
- [24] 张 驰,李 平,曾宝珍,等. 光照强度对酿酒葡萄‘马瑟兰’果实品质的影响[J]. 林业科技通讯,2021(9):27-33.
- [25] 马宗桓,贺雅娟,李 蔚,等. 施氮量对‘马瑟兰’葡萄果实挥发物质组分与含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(5):201-211.
- [26] 万 鹏,梁国平,马丽娟,等. 19个苹果品种果实香气成分的GC-MS分析[J]. 食品工业科技,2019,40(14):227-232.
- [27] 许海峰,陈 新,张士刚,等. 基于代谢组学分析‘秋香’核桃贮藏期间脂肪酸的变化[J]. 园艺学报,2021,48(11):2161-2170.
- [28] 宋娇娇,任寅印,李银枝,等. 草莓品种果实品质特性比较[J]. 浙江农业科学,2022,63(5):1053-1056.
- [29] 刘 丽,尹克林,刘 禹. 重庆地区不同草莓品种果实品质分析[J]. 中国南方果树,2012,41(4):102-104.
- [30] 王爱华,马红叶,李荣飞,等. 凤梨草莓与黄毛草莓种间杂种果实香气成分的代谢谱分析[J]. 中国农业科学,2021,54(5):1043-1054.
- [31] 程帅旗,王丽娟,高轶楠. 草莓果实香气物质研究进展[J]. 山东农业科学,2023,55(1):157-164.
- [32] 赵 倩,杨 京,周丽免,等. 云南野生黄毛草莓的营养价值评价和香气成分分析[J]. 现代食品科技,2020,36(9):277-283.

(责任编辑:陈海霞)