

## 2个凤梨草莓与黄毛草莓杂交后代的果实品质分析

李荣飞, 王爱华, 杨仕品, 马红叶, 乔荣\*, 钟霏霖\*

(贵州省农业科学院园艺研究所, 贵阳 550006)

**摘要:**【目的】分析2个凤梨草莓与黄毛草莓杂交后代的果实品质差异,初步探索二者果面色泽差异原因。【方法】以2个凤梨草莓与黄毛草莓杂交后代为试材,测定果实色泽、单果质量、可溶性固形物等,利用气相色谱-质谱联用技术对果实中糖酸代谢产物进行鉴定和比较。【结果】单果质量、 $L^*$ 、 $b^*$ 和 $H$ 为1号显著高于16号,可溶性固形物(16号是1号的1.15倍)、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 与之相反。鉴定出33种糖,木糖含量最高,占总糖含量的62.68%、50.71%,其次是肌醇、葡萄糖;53种有机酸,柠檬酸含量最高,其次是苹果酸;27种氨基酸,氧化脯氨酸、丙氨酸、天门冬酰胺、天门冬氨酸等含量较高。16号的糖含量高于1号,16号木糖是1号的1.22倍,葡萄糖2.09倍,果糖1.77倍,半乳糖1.44倍;有机酸和氨基酸与之相反,1号柠檬酸为16号的1.23倍、苹果酸1.20倍、硬脂酸2.28倍,天门冬酰胺1.85倍、天门冬氨酸1.53倍。可溶性固形物、木糖、葡萄糖、果糖、乳酸、水杨酸、酒石酸、丙氨酸、脯氨酸、瓜氨酸等与 $a^*$ 、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈正相关,与 $L^*$ 、 $b^*$ 、 $H$ 呈负相关;苹果酸、柠檬酸、丙酮酸、丝氨酸、天门冬氨酸、谷氨酸等与之相反。【结论】16号果实高糖低酸,果面色泽鲜艳,呈胭脂红;1号果实大,果面亮有光泽,呈粉白色,氨基酸含量高。

**关键词:**凤梨草莓;黄毛草莓;杂交种;果实品质;糖代谢;有机酸;氨基酸

中图分类号:S668.4

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2020)12-1885-13

### Analysis of fruit quality of two interspecific hybrid progenies between *Fragaria ananassa* Duch. and *Fragaria nilgerrensis* Schlecht.

LI Rongfei, WANG Aihua, YANG Shipin, MA Hongye, QIAO Rong\*, ZHONG Peilin\*

(Institute of Horticulture, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guizhou 550006, Guiyang, China)

**Abstract:** 【Objective】 In order to utilize two interspecific hybrid strawberry progenies, contents and compositions of sugars, acids and amino acids, and the correlations between sugar, acid and fruit color were analyzed. 【Methods】 The progenies of two interspecific hybrids of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht. were used as the materials to determine the fruit color, single fruit weight, total soluble solids and other fruit quality traits. Meanwhile, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to identify and compare the sugar, acid and amino acid metabolites in the fruit. 【Results】 (1) Fruit weight of No. 1 was significantly higher than that of No.16, but the content of total soluble solids in No. 16 was 1.15 times that of No.1. The color brightness ( $L^*$ ), yellow index ( $b^*$ ) and hue angle ( $H$ ) of the peel of No. 1 were significantly higher than that of No. 16, and the  $E^*ab$ ,  $CCI$ ,  $a^*/b^*$  were significantly lower in No. 1, indicating that No. 1 fruit surface was more shiny, and that No. 16 fruit surface was more reddish. (2) Among the two strawberry strains, 33 sugars were identified, of which xylose was the highest, accounting for 62.68% and 50.71% of the total sugar content, in No.1 and No.16, respectively, followed by inositol (2.78%, 5.78%) and glucose (0.41%, 0.85%), and the contents of fructose (0.006 1%, 0.010 8%), sucrose (0.013 0%, 0.097%) and galactose (0.075 5%, 0.108 4%) were all low. Fifty three organic acids

收稿日期:2020-07-06

接受日期:2020-08-31

基金项目:贵州省农业公关项目(黔科合支撑[2018]2282号);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y018号);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y020号);贵州省园艺研究所青年基金(黔园青年基金[2018]001号);贵州省农业科学院青年基金(黔农科院青年基金[2018]37号)

作者简介:李荣飞,女,研究实习员,研究方向为果树生理生态与育种。Tel:18275163947, E-mail: lirongfei55@126.com

\*通信作者 Author for correspondence. E-mail:2956513292@qq.com, E-mail:1540854508@qq.com

were identified and citric acid was the highest, which was 57.42% and 46.61% in No. 1 and No. 16, respectively, followed by malic acid (7.65%, 6.35%), succinic acid (0.33%, 0.26%), ascorbate (0.30%, 0.40%), quinic acid (0.11%, 0.10%), lactic acid, salicylic acid, tartaric acid, etc. Twenty-seven amino acids were identified. From high to low, they were oxyproline (5.36%, 4.47%), alanine (1.19%, 2.26%), asparagine (1.15%, 0.62%), aspartic acid (0.26%, 0.17%), serine (0.26%, 0.17%), tryptophan (0.13%, 0.10%), and amino acids in micro amount including isoleucine, cycloleucine, methionine, cysteine, glutamic acid amino acid, phenylalanine, etc. The results showed that carbohydrate metabolites in No. 16 fruit was higher than that in No. 1, among which xylose, glucose, fructose, galactose and sucrose were 1.22, 2.09, 1.77, 1.44 and 1.34 times that of No. 16, respectively. The total relative contents of organic acids and amino acids in the fruit were higher in No. 1 than in No. 16. citric acid, malic acid, palmitic acid, stearic acid, oxyproline, asparagine and aspartic acid in No.1 was 1.23, 1.46, 2.28, 1.20, 1.85 and 1.53 times at of No.16, respectively, but alanine in No.16 was 1.90 times that of No. 1. The difference in the metabolites in the mature fruits of the two strains was mainly due to the difference in sugars, indicating that sugar may be one of the important reasons that affect the different flavors of the two. (3) Through correlation analysis, it was found that organic acids such as malic acid, citric acid and pyruvic acid, and amino acids such as serine, aspartic acid, methionine, glutamic acid and phenylalanine were positively correlated with maltitol and fructose 6-phosphate, and negatively with such sugars as xylose, glucose and fructose. Organic acids such as lactic acid, salicylic acid, and tartaric acid, and amino acids such as alanine, cycloleucine, and citrulline were inversely related to maltitol and fructose 6-phosphate, but positively correlated to sugar metabolites such as xylose, glucose, and fructose. The soluble solids were extremely significantly positively correlated with  $E^*ab$ ,  $CCI$ ,  $a^*/b^*$ , but negatively correlated with  $b^*$ ,  $H$ , and  $L^*$ . Metabolites such as xylose, glucose, fructose, lactic acid, salicylic acid, tartaric acid, alanine, proline, and citrulline were positively correlated with  $a^*$ ,  $E^*ab$ ,  $CCI$ , and  $a^*/b^*$  with most of the correlations being extremely significant levels, but negatively correlated with  $L^*$ ,  $b^*$ , and  $H$ . However, malic acid, citric acid, pyruvic acid, valine, serine, aspartic acid, methionine, glutamic acid and other metabolites were positively correlated with  $L^*$ ,  $b^*$ ,  $H$ , and negatively with  $a^*$ ,  $E^*ab$ ,  $CCI$ ,  $a^*/b^*$ .【Conclusion】It shows that the relations between sugars, organic acids, amino acids and fruit color were close and complex, and the intrinsic quality of the fruit affects the appearance quality to some certain extent. In summary, the fruit of No. 16 is high in sugars and low in acids, and its fruit surface is bright in color and is carmine. The fruit of No. 1 is large, bright, pinkish, and high in amino acids.

**Key words:** *Fragaria ananassa*; *F. nilgerrensis* Schlecht.; Interspecific hybrids; Fruit quality; Sugar metabolism; Organic acid; Amino acid

草莓属于蔷薇科 (Rosaceae) 草莓属 (*Fragaria*) 多年生草本植物,果实芳香多汁,酸甜适口,且富含糖类、维生素、氨基酸等多种营养成分,素有“水果皇后”的美称<sup>[1]</sup>。但当前生产上草莓栽培品种的遗传背景狭窄,类型较单一,造成对病虫害和逆境抗性减弱的现象,草莓育种者期望利用野生草莓的抗旱、抗病性强、香味浓等特点,通过其和栽培草莓进行种间杂交,以培育出具有色泽丰富、香味浓、抗病性强等性状的新品种。如Noguchi等<sup>[2]</sup>通过栽培品种‘丰香’(8x)和野生黄毛草莓(2x)杂交,通过加倍处理后

获得了具有浓郁桃香味的十倍体品种‘久留米IH1号’。2006年,Noguchi<sup>[3]</sup>利用‘久留米IH1号’为母本,‘卡伦浆果’与野生草莓杂交再加倍处理得到K58N7-21(10x)为父本,父本与母本杂交后繁育出‘桃薰’(10x)。韩国Rho等<sup>[4]</sup>用二倍体森林草莓、黄毛草莓和八倍体栽培草莓品种‘章姬’(*F. ananassa* Duch. ‘Akihime’, 8x)进行了种间和种内杂交以及反交等研究,得到了二倍体、四倍体、五倍体种间杂种。本课题组也利用栽培品种‘红颜’(*F. ananassa* Duch. ‘Benihoppe’, 8x)和黄毛草莓(*F. nilgerrensis*

Schlecht., 2x)进行杂交,经过筛选后获得一些优良的材料,其中1号和16号具有共同亲本,生长势强,果形均为短圆锥形或圆锥形,但是1号具有较浓的蜜桃香味,果面呈粉白色,16号无蜜桃香味,果面呈胭脂红。

代谢产物是基因表达的终产物,能够直观地反映遗传背景和环境因素对生物体共同作用的结果<sup>[5]</sup>,通过测定果实中代谢产物,是评价果实品质的有效途径<sup>[6]</sup>。现已有研究者对柑橘<sup>[7]</sup>、梨<sup>[8]</sup>、猕猴桃<sup>[9]</sup>等果树进行果实糖、有机酸、氨基酸等代谢产物测定,分析比较不同品种间的品质特征,以及探索品质差异原因。果实中糖和有机酸的含量、种类、及糖酸比例是决定其甜度及风味品质的关键因素<sup>[10]</sup>;氨基酸是果实品质的组成成分之一,并参与果实其他品质特征成分和风味物质的合成<sup>[11]</sup>。因而在果实品质测定时,除了测定单果质量、色泽等外观品质,还需测定糖、有机酸、氨基酸含量等内在品质综合评价。

关于草莓品质的研究较多,例如糖酸种类<sup>[12]</sup>,成熟过程糖酸的变化<sup>[13]</sup>,糖、酸代谢的研究<sup>[14-15]</sup>,果实色泽的研究<sup>[16]</sup>,香气成分的研究<sup>[17-18]</sup>等,但研究对象多是常规栽培品种,对于野生黄毛草莓杂交后代的研究较少。且有机酸和糖根据物种、品种以及环境和园艺条件而有所不同<sup>[19]</sup>。本研究材料为黄毛和栽培品种的杂交后代,田间表现优良,果实色泽美观,口感更佳。因此,笔者旨在对1号和16号2个草莓品系通过GC-MS进行糖、有机酸、氨基酸等代谢物测定分析,以及测定果实色泽、单果质量、可溶性固形物等果实品质,比较两者糖酸代谢产物的差异,评价2个草莓品系的果实品质,并进行糖酸与色泽间相关性分析,以期初步探索二者果面色泽差异原因,为2个杂交后代的利用和草莓种间杂交育种提供基础理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

本课题组利用栽培品种‘红颜’(*F. ananassa* Duch. ‘Benihoppe’, 8x)和黄毛草莓(*F. nilgerrensis* Schlecht., 2x)进行种间杂交,获得五倍体,经加倍后再与‘小白’(红颜芽变品种, 8x)杂交,经过筛选后发现具有同样亲本的1号和16号,田间表现优良,果形均为短圆锥形或圆锥形,但是1号具有较浓的蜜桃香味,果实呈粉白色,16号无蜜桃香味,果实呈胭脂

红。2个杂交后代均种植于贵州省园艺研究所草莓资源圃,4月取完熟果实,测定果实色泽、单果质量、可溶性固形物等品质,并测定糖、有机酸、氨基酸代谢产物。

### 1.2 测定内容及方法

1.2.1 草莓单果质量、可溶性固形物含量测定 用电子天平测定单果质量,果实纵横径用游标卡尺测定,并计算果形指数(果形指数=果实纵径/果实横径),可溶性固形物含量采用折光仪法测定,硬度采用硬度计测定。

1.2.2 草莓果实色泽测定 果实颜色描述采用当前最通用的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 色度空间方法,即在每个果实赤道部的不同方位,用日本电色NIPPON DENSHOKU NF555分光色差仪测定果实 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $E^*ab$ 值,并计算 $H=\arctan b^*/a^*$ , $C^*=[(a^*)^2+(b^*)^2]^{0.5}$ , $CCI=1\ 000\times a^*/(L^*\times b^*)$ , $a^*/b^*$ 。

1.2.3 代谢物测定 样品收集:采集1号和16号的成熟果实作为代谢物分析的试验材料,6次重复。

代谢物提取:在真空浓缩器中干燥提取物;向干燥后的代谢物加入60  $\mu\text{L}$  甲氧胺盐试剂(甲氧胺盐酸盐,溶于吡啶20  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),轻轻混匀后,放入烘箱中80  $^{\circ}\text{C}$  孵育30 min;向每个样品中加入80  $\mu\text{L}$  BST-FA(含有1% TMCS, v/v),将混合物70  $^{\circ}\text{C}$  孵育1.5 h;实验样本随机顺序上机检测。

GC-MS检测:利用配有Agilent DB-5MS毛细管柱(30 m $\times$ 250  $\mu\text{m}\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ , J&W Scientific, Folsom, CA, USA)的Agilent 7890气相色谱-飞行时间质谱联用仪进行检测。

代谢物的鉴定:使用ChromaTOF软件(V 4.3x, LECO)对质谱数据进行峰提取、基线校正、解卷积、峰积分、峰对齐等分析。使用LECO-Fiehn Rtx5数据库,根据质谱匹配度、保留时间指数匹配等对代谢物进行定性鉴定。

### 1.3 数据处理

采用色谱峰面积归一化法计算各代谢物成分的相对含量。Excel 2003整理数据并绘制图表,并结合JMP 13软件进行主成分分析,SPSS.13.0软件分析显著性及相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 单果质量、可溶性固形物比较分析

根据表1可知,1号平均单果质量为14.36 g,16



表 1 2个草莓品系果实品质的差异

Table 1 Differences in fruit quality of two strawberry strains

品系 Strains	单果质量 Fruit mass/g	果实纵径 Longitudinal diameter/mm	果实横径 Fruit diameter/mm	果形指数 Fruit shape index	果实硬度 Fruit firmness/(kg·cm <sup>-2</sup> )	w(可溶性固形物) Total soluble solids/%
1号 No. 1	14.36±0.84 a	35.95±0.95 a	31.70±0.71 a	1.13±0.03 b	0.70±0.03 a	8.52±0.20 b
16号 No. 16	12.56±0.34 b	36.37±1.64 a	30.18±1.40 a	1.21±0.04 a	0.68±0.05 a	9.79±0.25 a

注:同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at  $p < 0.05$ . The same below.

号为 12.56 g, 1号单果质量显著大于 16号, 但 1号可溶性固形物显著低于 16号, 16号是 1号的 1.15倍。二者果形指数呈显著差异, 其中 1号纵横比更接近 1, 说明 1号果实形状更接近短圆锥形, 16号为圆锥形。

## 2.2 果实色泽比较分析

$L^*$ 值表示色泽亮度, 值越大表示所测样品的表面越亮。 $a^*$ 是红绿色指标,  $a^*$ 值正值为红色, 负值为绿色, 绝对值越大表示红色或绿色程度越深。 $b^*$ 是黄蓝色指标,  $b^*$ 值正值为黄色, 负值为蓝色, 绝对值越大, 黄色或蓝色越深。 $C^*$ 为色泽饱和度, 是指色彩的纯度,  $C^*$ 值越高, 表明果皮颜色种类较少, 色彩鲜明,  $C^*$ 值越低, 表明果皮颜色种类较多, 色彩较黯

淡。 $H$ 值为色调角, 其变化范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 依次为紫红、红、橙红、橙、黄、黄绿、绿和蓝绿,  $H=0^\circ$ 时为紫红,  $H=90^\circ$ 时为黄色,  $H=180^\circ$ 时为绿色。 $H > 100^\circ$ 时,  $H$ 值越大, 果实绿色越深;  $H < 50^\circ$ 时,  $H$ 值越小, 红色越深。 $E^*ab$ 表示差异;  $a^*/b^*$ 值表示果实外观颜色, 正值、负值和 0 分别表示果面为橙(红)色、黄色和绿色;  $CCI$ 正值代表红黄程度, 负值代表蓝绿程度。通过对 2个草莓品系果实色泽的比较发现, 果皮色泽亮度  $L^*$ 、黄蓝色指标  $b^*$ 和色调角  $H$ 均是 1号显著高于 16号,  $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 为 16号显著高于 1号,  $a^*$ 、 $C^*$ 指标 2个杂交后代无显著差异。说明 1号果面更亮, 有光泽, 黄色更深, 而 16号果面红色更深, 与观察结果一致(图 1, 图 2, 表 2)。



图 1 1号(左)和 16号(右)植株

Fig. 1 Plants of No. 1 (left) and No. 16 (right)



图 2 1号(左)和 16号(右)果实

Fig. 2 Fruits of No. 1 (left) and No. 16 (right)

表 2 2 个草莓品系果实色泽的比较

Table 2 Compare in color values between strawberry hybrid strains

品系 Strains	L*	a*	b*	E*ab	C*	H	CCI	a*/b*
1 号 No. 1	44.24±1.55 a	28.54±1.42 a	18.95±0.74 a	5.85±0.55 b	34.28±1.06 a	33.59±1.50 a	34.28±1.16 b	1.51±0.07 b
16 号 No. 16	38.86±1.71 b	30.62±1.59 a	14.79±1.00 b	10.55±0.56 a	34.01±2.27 a	25.89±0.93 b	53.74±2.37 a	2.07±0.13 a

2.3 果实中代谢产物差异分析

2.3.1 糖代谢产物差异分析 2 个凤梨草莓和黄毛草莓种间杂交后代果实中鉴定出 33 种糖,其中 1 号糖代谢产物相对含量为 11.71%,16 号为 17.61%(表

3)。1 号和 16 号草莓果实糖含量最高的是木糖(7.34%、8.93%),分别占总糖含量的 62.68%、50.71%,含量较高的依次有:肌醇(2.78%、5.78%)、葡萄糖(0.41%、0.85%)、甘露糖(0.28%、0.63%)、D-

表 3 2 个草莓品系果实中糖代谢产物的相对含量

Table 3 Relative contents of sugar metabolites in fruits between two strawberry hybrid strains

化合物 Compound	分子式 Formula	保留时间 Retention time/min	1 号相对含量 Relative content/%	16 号相对含量 Relative content/%	倍数 (log <sub>2</sub> R/G)* Multiple	p 值 p-value	ROC	VIP
2-脱氧赤藓糖醇 2-Deoxyerythritol	NA	10.86	0.001 4	0.054 0	-4.410	0.033	0.903	2.056
赤藓糖 Erythrose	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	12.71	0.001 0	0.001 2	0.455	0.655	0.514	2.852
L-苏糖 L-Threose	NA	12.83	0.000 6	0.004 2	-1.995	0.028	0.833	1.141
苏糖醇 Threitol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	13.53	0.004 6	0.003 9	0.916	0.086	0.750	0.633
赖糖 Lyxose	NA	15.24	0.011 8	0.021 1	-0.108	0.409	0.611	0.130
木糖 Xylose	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	15.33	0.594 8	0.751 0	0.404	0.227	0.694	0.246
阿洛糖 Allose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	15.37	0.006 4	0.016 4	-0.661	0.001	1.000	0.528
木糖 Xylose	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	15.43	6.532 9	8.087 1	0.420	0.330	0.722	0.277
木糖 Xylose	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	15.50	0.208 8	0.094 2	1.822	0.001	0.972	1.276
核糖 Ribose	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	15.67	0.157 5	0.194 7	0.426	0.115	0.806	0.334
左旋葡聚糖 Levoglucosan	[C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ] <sub>n</sub>	16.14	0.024 8	0.051 2	-0.342	0.212	0.750	0.230
核糖醇 Ribitol	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub>	16.20	0.008 1	0.006 1	0.932	0.621	0.528	0.692
15-脱水葡萄糖醇 15-Anhydroglucitol	NA	17.52	0.011 4	0.022 9	-0.327	0.056	0.833	0.306
塔格糖 Tagatose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	17.54	0.006 2	0.014 3	-0.711	0.856	0.556	0.309
果糖 Fructose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	17.75	0.006 1	0.010 8	-0.103	0.487	0.583	0.128
甘露糖 Mannose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	18.20	0.277 0	0.628 5	-0.488	0.191	0.722	0.645
半乳糖 Galactose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	18.22	0.075 5	0.108 4	0.147	0.827	0.556	0.173
D-塔洛糖 D-Talose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	18.29	0.182 6	0.372 4	-0.358	0.677	0.667	0.108
葡萄糖 Glucose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	18.35	0.407 4	0.851 1	-0.662	0.276	0.972	1.723
七庚糖 Sedoheptulose	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>7</sub>	18.45	0.035 6	0.084 9	-0.587	0.036	0.861	0.475
肌醇 Inositol	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	19.95	2.777 7	5.782 1	-0.411	0.158	0.750	0.328
d-葡萄糖庚糖 D-Glucoheptose	NA	20.35	0.019 4	0.018 3	0.764	0.235	0.694	0.422
果糖-6-磷酸 Fructose-6-phosphate	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O <sub>9</sub> P	21.82	0.021 2	0.007 1	2.272	0.003	0.972	1.696
葡萄糖-6-磷酸 Glucose-6-phosphate	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O <sub>9</sub> P	21.93	0.035 0	0.013 3	2.101	0.004	0.944	1.574
葡萄糖-6-磷酸 Glucose-6-phosphate	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O <sub>9</sub> P	22.09	0.007 9	0.003 0	2.077	0.005	0.917	1.516
蔗糖 Sucrose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	24.47	0.013 0	0.009 7	1.142	0.034	0.861	0.790
乳糖 Lactose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	24.94	0.012 0	0.029 4	-0.614	0.252	0.833	1.640
乳果糖 Lactulose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	24.95	0.002 7	0.006 7	-0.708	0.169	0.750	3.775
海藻糖 Trehalose	C <sub>11</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>3</sub>	25.27	0.050 2	0.092 3	-0.239	0.418	0.556	0.317
麦芽糖 Maltose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	25.32	0.038 1	0.064 5	-0.089	0.587	0.639	0.312
龙胆二糖 Gentiobiose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	25.81	0.008 0	0.091 6	-2.839	0.003	0.944	2.753
麦芽糖醇 Maltitol	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>11</sub>	26.08	0.131 2	0.062 4	1.660	0.041	0.889	1.210
异麦芽糖 Isomaltose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	26.49	0.005 1	0.002 5	2.001	0.194	0.736	1.237
肌醇半乳糖苷 Galactinol	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>11</sub>	26.66	0.012 7	0.032 2	-0.629	0.044	0.833	0.473
6-磷酸海藻糖 Trehalose-6-phosphate	C <sub>12</sub> H <sub>23</sub> O <sub>14</sub> P	28.36	0.002 2	0.006 0	-0.758	0.270	0.667	0.759
棉籽糖 Raffinose	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>16</sub>	30.29	0.020 1	0.006 9	2.140	0.047	0.833	1.160
总和 Sum			11.710 9	17.606 2				

塔洛糖(0.18%、0.37%)、核糖(0.16%、0.19%)。虽2个杂交材料果实中所含糖(0.006 1%、0.010 8%)、蔗糖(0.013 0%、0.097%)、半乳糖(0.075 5%、0.108 4%)的含量较少,但也是草莓果实重要的糖分。此外,2个材料比较发现,除苏糖醇、核糖醇、d-葡萄糖、蔗糖(1.34倍)、麦芽糖醇、异麦芽糖、棉籽糖等9个糖代谢产物相对含量为1号高于16号,其他糖代谢产物相对含量均是16号高于1号,其中16号中木糖是1号的1.22倍,葡萄糖2.09倍,果糖1.77倍,半乳糖1.44倍,说明16号中糖代谢产物含量高。

**2.3.2 有机酸代谢产物差异分析** 2个品系成熟果实中鉴定出53种有机酸,其中1号有机酸相对含量为71.56%,16号有机酸相对含量为60.98%(表4)。草莓果实有机酸中含量高于0.1%的依次有:柠檬酸(57.42%、46.61%)、苹果酸(7.65%、6.35%)、2-酮基-L-古洛糖酸(2.32%、4.34%)、棕榈酸(1.30%、0.89%)、硬脂酸(0.98%、0.43%)、琥珀酸(0.33%、0.26%)、抗坏血酸(0.30%、0.40%)、甲苯磺酸(0.20%、0.17%)、脱氢抗坏血酸(0.12%、0.24%)、4-氨基丁酸(0.11%、0.11%)、奎宁酸(0.11%、0.10%)。说明2个杂交材料果实中有机酸主要是柠檬酸,其次是苹果酸,以及少量的棕榈酸、琥珀酸、抗坏血酸、奎宁酸。此外,还含有乳酸、富马酸、水杨酸、酒石酸、莽草酸等微量有机酸。通过2个材料比较发现,其中柠檬酸(1号为16号1.23倍)、苹果酸(1.20倍)、棕榈酸(1.46倍)、硬脂酸(2.28倍)、琥珀酸(1.27倍)、奎宁酸等18个有机酸代谢产物相对含量为1号高于16号,其他为16号高于1号。说明1号中有机酸含量总体高于16号,但16号中微量有机酸相对含量高。

**2.3.3 氨基酸代谢产物差异分析** 2个杂交后代果实中鉴定出27种氨基酸,其中11个氨基酸代谢产物为1号高于16号,其余16个为16号高于1号材料(表5)。草莓果实中氨基酸含量高于0.1%的依次有:氧化脯氨酸(5.36%、4.47%)、丙氨酸(1.19%、2.26%)、天门冬酰胺(1.15%、0.62%)、天门冬氨酸(0.26%、0.17%)、丝氨酸(0.26%、0.17%)、色氨酸(0.13%、0.10%)、马来酰胺酸(0.10%、0.14%)、缬氨酸(0.11%、0.05%)、甘氨酸(0.10%、0.11%)、脯氨酸(0.01%、0.12%)。此外,2个材料中还含有少量异亮氨酸、环亮氨酸、蛋氨酸、半胱氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸、瓜氨酸、酪氨酸、精氨酸等氨基酸。1号果实中

总氨基酸代谢产物相对含量为9.14%,16号为8.79%,说明1号中氨基酸含量稍高于16号。

**2.3.4 差异代谢产物主成分分析** 采用PLS-DA模型第一主成分的变量投影重要度(Variable Importance in the Projection, VIP)值,并结合T-test的 $p$ 值来寻找差异性表达代谢物,设置阈值为VIP > 1,差异倍数FC > 1.5 或 FC < 0.667 且  $p < 0.05$ ,筛选出8种糖差异代谢物分别为:果糖-6-磷酸、6-磷酸葡萄糖、龙胆二糖、麦芽糖醇、2-脱氧赤藓糖醇、L-蔗糖、木糖、棉籽糖,6种有机酸差异代谢物分别为:丙酮酸、水杨酸、 $\alpha$ -酮戊二酸、4-羟基肉桂酸、来酸、硬脂酸,7种氨基酸差异代谢物为:丝氨酸、异亮氨酸、天门冬氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、天门冬酰胺。对差异代谢产物进行PCA分析发现,1号和16号的糖差异代谢产物分布存在显著差异,而有机酸和氨基酸代谢产物无显著差异(图3,图4)。说明1号和16号果实中主要是糖代谢产物之间存在显著差异,因此糖分可能是影响二者风味不同的原因之一。

## 2.4 相关性分析

**2.4.1 果实代谢产物间相关性分析** 由表6可知,有机酸、氨基酸与糖之间呈显著、极显著正相关或负相关。其中苹果酸、柠檬酸、棕榈酸、硬脂酸、丙酮酸、 $\alpha$ -酮戊二酸等有机酸,缬氨酸、丝氨酸、天门冬氨酸、蛋氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸等氨基酸,与麦芽糖醇、果糖-6-磷酸呈正相关,与木糖、葡萄糖、果糖等糖代谢产物呈负相关。而乳酸、水杨酸、酒石酸等有机酸,丙氨酸、脯氨酸、马来酰胺酸、环亮氨酸、瓜氨酸等氨基酸,与麦芽糖醇、果糖-6-磷酸呈负相关,与木糖、葡萄糖、果糖等糖代谢产物呈正相关。说明糖酸间关系密切复杂。

**2.4.2 果实内在品质与色泽间相关性分析** 根据代谢产物相对含量 > 0.1%、重要代谢产物与色泽指标间进行相关性分析,并从中筛选出相关性达显著或极显著的代谢产物有38种,包括10种糖,17种有机酸,11种氨基酸(表7)。可溶性固形物与 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈极显著正相关,与 $b^*$ 、 $H$ 呈极显著负相关,与 $L^*$ 呈显著负相关。木糖、葡萄糖、果糖等糖代谢产物与 $a^*$ 、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈正相关关系,且多数达极显著水平,而与 $L^*$ 、 $b^*$ 、 $H$ 呈负相关。但麦芽糖醇、果糖-6-磷酸、蔗糖恰好相反,与 $L^*$ 、 $b^*$ 、 $H$ 呈正相关,与 $a^*$ 、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈负相关。有机酸代谢产物与色泽指标间相关性分为两类,其中包括苹



表4 2个草莓品系果实中有机酸代谢产物的相对含量  
Table 4 Relative contents of organic acid metabolites in fruits between two strawberry hybrid strains

化合物 Compound	分子式 Formula	保留时间 Retention time/min	1号相对含量 Relative content/%	16号相对含量 Relative content/%	倍数 (log <sub>2</sub> R/G)* Multiple	p值 p-value	ROC	VIP
丙酮酸 Pyruvic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	7.41	0.008 6	0.004 5	1.585	0.006	0.944	1.252
乳酸 Lactic acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	7.55	0.024 3	0.042 3	-0.070	0.731	0.528	0.047
2-酮丁酸 2-Ketobutyric acid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	7.66	0.063 0	0.106 6	-0.066	0.306	0.639	0.050
乙醇酸 Glycollic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	7.79	0.033 4	0.061 3	-0.169	0.038	0.861	0.133
3-羟基丙酸 3-Hydroxypropionic acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	8.78	0.001 4	0.002 2	-0.053	0.885	0.542	0.065
3-羟基丁酸 3-Hydroxybutyric acid	NA	9.00	0.009 4	0.020 8	-0.416	0.924	0.500	0.633
丙二酸 Malonic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	9.53	0.004 5	0.008 3	-0.137	0.951	0.667	0.055
苯甲酸 Benzoic acid	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	10.33	0.004 4	0.006 6	0.148	0.202	0.611	0.098
2-己酸 2-Ketocaproic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	10.41	0.007 8	0.017 3	-0.403	0.301	0.639	0.345
马来酸 Maleic acid	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	11.04	0.003 4	0.003 4	0.690	0.002	1.000	0.514
琥珀酸 Succinic acid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	11.19	0.330 3	0.260 1	1.035	0.000	1.000	0.761
D-甘油酸 D-Glyceric acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	11.36	0.066 4	0.106 2	0.031	0.721	0.556	0.020
衣康酸 Itaconic acid	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	11.57	0.014 9	0.018 8	0.341	0.083	0.778	0.244
富马酸 Fumaric acid	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	11.69	0.020 8	0.021 8	0.624	0.005	0.944	0.448
壬酸 Pelargonic acid	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	11.85	0.002 2	0.002 8	0.280	0.158	0.750	0.211
柠康酸 Citraconic acid	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	12.02	0.000 7	0.001 0	0.189	0.611	0.583	0.161
戊二酸 Glutaric acid	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	12.30	0.000 4	0.000 6	0.172	0.912	0.500	0.204
6-羟基己酸 Hexanoic acid	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	12.62	0.009 0	0.015 5	-0.075	0.287	0.722	0.070
3-氨基异丁酸 3-Aminoisobutyric acid	C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	13.11	0.016 0	0.027 5	-0.067	0.140	0.833	0.068
氨基丙二酸 Aminomalonic acid	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>4</sub>	13.23	0.007 4	0.010 4	0.245	0.278	0.694	0.391
柠苹果酸 Citramalic acid	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>5</sub>	13.32	0.018 7	0.042 7	-0.471	0.028	0.917	0.359
苹果酸 Malic acid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	13.45	0.021 0	0.029 3	0.203	0.317	0.639	0.166
苹果酸 Malic acid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	13.49	7.633 8	6.321 2	0.958	0.007	0.972	0.725
己二酸 Adipic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	13.72	0.009 3	0.013 2	0.158	0.824	0.722	0.189
水杨酸 Salicylic acid	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	13.77	0.000 4	0.002 1	-1.830	0.014	0.889	1.259
4-氨基丁酸 4-Aminobutyric acid	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	14.00	0.112 4	0.108 7	0.674	0.031	0.889	0.554
3-羟基苯甲酸 3-Hydroxybenzoic acid	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	14.47	0.001 4	0.002 8	-0.370	0.198	0.694	0.380
2-羟基-3-异丙基丁二酸 2-Hydroxy-3-isopropylbutanedioic acid	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	14.52	0.085 8	0.238 0	-0.726	0.032	0.861	0.474
α-酮戊二酸 Alpha-ketoglutaric acid	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	14.54	0.003 6	0.002 1	1.401	0.019	0.861	1.304
甲苯磺酸 Toluenesulfonic acid	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> S	15.19	0.198 9	0.171 7	0.905	0.042	0.861	0.757
酒石酸 Tartaric acid	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	15.23	0.009 6	0.019 2	-0.301	0.021	0.889	0.249
醋酸 Acetol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	16.00	0.028 1	0.043 3	0.102	0.751	0.556	0.223
乌头酸 Aconitic acid	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	16.52	0.025 5	0.024 5	0.719	0.004	0.944	0.535
莽草酸 Shikimic acid	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	17.17	0.004 2	0.007 0	-0.020	0.723	0.458	0.270
柠檬酸 Citric acid	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	17.24	0.025 2	0.062 8	-0.634	0.107	0.750	0.443
柠檬酸 Citric acid	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	17.29	57.399 4	46.551 1	0.953	0.003	1.000	0.724
脱氢抗坏血酸 Dehydroascorbic acid	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	17.58	0.117 7	0.239 9	-0.328	0.088	0.750	0.239
奎宁酸 Quinic acid	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	17.65	0.114 9	0.104 1	0.890	0.012	0.889	0.639
2-酮基-L-古洛糖酸 2-Keto-L-gulonic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>7</sub>	18.01	2.323 3	4.335 6	-0.171	0.601	0.639	0.368
半乳糖醛酸 Galacturonic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>7</sub>	18.48	0.032 0	0.027 8	0.790	0.090	0.778	0.590
抗坏血酸 Ascorbate	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	18.51	0.297 4	0.397 5	0.239	0.258	0.722	0.159
4-羟基肉桂酸 4-Hydroxycinnamic acid	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	18.63	0.005 8	0.003 0	1.639	0.005	0.944	1.350
没食子酸 Gallic acid	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	18.68	0.005 9	0.005 6	0.739	0.249	0.722	0.486
硫辛酸 Alpha lipoic acid	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	18.77	0.057 0	0.078 3	0.182	0.757	0.472	0.087
半乳糖酸 Galactonic acid	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>7</sub>	19.02	0.002 4	0.003 9	-0.061	0.637	0.556	0.121
泛酸 Pantothenic acid	C <sub>9</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>5</sub>	19.16	0.006 4	0.007 8	0.413	0.012	0.944	0.304
葡萄糖醛酸 Glucuronic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>7</sub>	19.20	0.009 1	0.012 3	0.276	0.404	0.667	0.171
黏酸 Mucic acid	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>8</sub>	19.48	0.006 7	0.005 3	1.074	0.053	0.806	1.149
棕榈酸 Palmitic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	19.60	1.297 7	0.888 9	1.264	0.023	0.889	0.817
葡庚酸 Glucoheptonic acid	NA	20.30	0.011 5	0.013 0	0.494	0.307	0.694	0.268
油酸 Oleic acid	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	21.16	0.035 9	0.011 1	2.575	0.056	0.833	1.290
来酸 Elaidic acid	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	21.32	0.021 5	0.012 5	1.484	0.033	0.875	1.280
硬脂酸 Stearic acid	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	21.39	0.982 4	0.433 2	1.892	0.000	1.000	1.394
花生酸 Arachidic acid	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	23.06	0.003 2	0.006 9	-0.423	0.786	0.417	2.313
乳糖酸 Lactobionic acid	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>12</sub>	25.39	0.027 2	0.016 4	1.444	0.041	0.833	0.862
总和 Sum			71.563 4	60.981 2				

表5 2个草莓品系果实中氨基酸代谢产物的相对含量

Table 5 Relative contents of amino acid metabolites in fruits between two strawberry hybrid strains

化合物 Compound	分子式 Formula	保留时间 Retention time/min	1号相对含量 Relative content/%	16号相对含量 Relative content/%	倍数 (log <sub>2</sub> R/G)* Multiple	p值 p-value	ROC	VIP
丙氨酸 Alanine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	8.18	1.185 1	2.255 1	-0.226	0.980	0.583	0.146
N-甲基-DL-丙氨酸 N-Methyl-dl-alanine	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	9.17	0.004 2	0.013 1	-0.965	0.076	0.778	0.596
缬氨酸 Valine	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	9.79	0.108 8	0.053 3	1.669	0.002	1.000	1.310
丝氨酸 Serine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	10.40	0.030 6	0.032 1	0.635	0.012	0.917	0.481
邻甲基苏氨酸 O-methylthreonine	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub>	10.88	0.015 3	0.021 1	0.230	0.049	0.833	0.158
异亮氨酸 Isoleucine	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	10.88	0.045 4	0.022 4	1.609	0.005	0.944	1.190
脯氨酸 Proline	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	10.97	0.007 4	0.121 3	-3.508	0.195	0.722	1.397
甘氨酸 Glycine	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	11.07	0.097 7	0.106 5	0.622	0.048	0.778	0.617
丝氨酸 Serine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	11.78	0.233 3	0.135 8	1.446	0.001	1.000	1.130
3-羟基正缬氨酸 3-Hydroxynorvaline	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub>	11.82	0.004 8	0.009 3	-0.198	0.396	0.500	3.160
环亮氨酸 Cycloleucine	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	11.89	0.005 0	0.068 8	-3.048	0.000	1.000	2.170
3-氰基丙氨酸 3-Cyanoalanine	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	11.96	0.093 8	0.083 8	0.835	0.052	0.833	0.743
天门冬氨酸 Aspartic acid	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>	12.67	0.011 6	0.015 4	0.253	0.380	0.583	0.435
β-丙氨酸 Beta-alanine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	12.71	0.013 2	0.027 1	-0.288	0.359	0.639	0.212
L-高丝氨酸 L-homoserine	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>	12.96	0.001 4	0.004 1	-0.829	0.219	0.639	0.636
马来酰胺酸 Maleamic acid	C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> NO <sub>3</sub>	13.55	0.100 6	0.138 1	0.257	0.020	0.889	0.189
天门冬酰胺 Asparagine	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.70	0.499 5	0.303 0	1.379	0.025	0.889	1.277
天门冬氨酸 Aspartic acid	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>	13.86	0.247 2	0.155 4	1.258	0.011	0.917	1.047
蛋氨酸 Methionine	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub> S	13.88	0.019 1	0.011 4	1.409	0.124	0.792	1.012
氧化脯氨酸 Oxoproline	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	13.93	5.357 8	4.471 9	0.924	0.022	0.917	0.697
谷氨酰胺 Glutamine	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.11	0.081 7	0.130 8	0.022	0.817	0.611	0.017
半胱氨酸 L-cysteine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub> S	14.39	0.004 1	0.003 4	0.998	0.053	0.889	0.935
谷氨酸 Glutamic acid	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> O <sub>4</sub> N	15.06	0.037 0	0.021 5	1.399	0.010	1.000	1.181
苯丙氨酸 Phenylalanine	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	15.17	0.054 1	0.027 3	1.592	0.005	0.944	1.238
天门冬酰胺 Asparagine	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.65	0.645 5	0.312 4	1.742	0.021	0.889	1.693
瓜氨酸 Citrulline	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	16.55	0.050 8	0.078 4	0.072	0.447	0.639	0.065
邻磷酸丝氨酸 O-Phosphoserine	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>6</sub> P	17.32	0.001 3	0.001 3	0.761	0.568	0.514	0.501
酪氨酸 Tyrosine	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>	18.56	0.040 8	0.048 5	0.427	0.191	0.694	0.522
NN-二甲基精氨酸 NN-dimethylarginine	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	20.03	0.015 6	0.020 1	0.411	0.754	0.583	0.101
色氨酸 Tryptophan	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	21.11	0.126 4	0.100 5	1.066	0.008	0.944	0.797
总和 Sum			9.139 3	8.793 2				

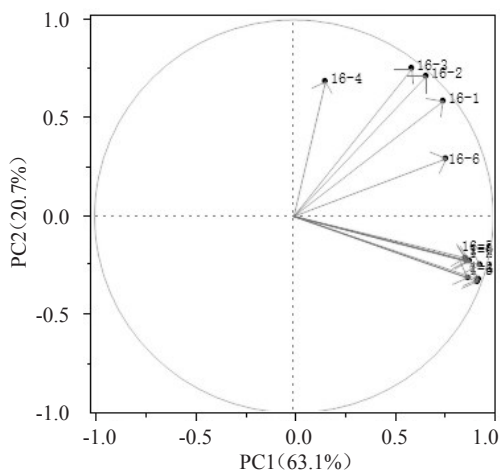


图3 2个草莓品系糖代谢差异产物的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of the glucose metabolism products between two strawberry hybrid strains

果酸、柠檬酸、棕榈酸、硬脂酸、丙酮酸、 $\alpha$ -酮戊二酸等与麦芽糖醇、果糖-6-磷酸、蔗糖规律一致；而乳酸、水杨酸、酒石酸等其余有机酸与多数糖代谢产物规律一致。缬氨酸、丝氨酸、天门冬氨酸、蛋氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸等氨基酸代谢产物也与麦芽糖醇、果糖-6-磷酸、蔗糖规律一致；而丙氨酸、脯氨酸、马来酰胺酸、环亮氨酸、瓜氨酸与多数糖代谢产物规律一致。说明糖、有机酸、氨基酸与果实色泽指标间关系密切且复杂，内在品质影响了果实外观色泽。

### 3 讨论

遗传背景狭窄是栽培草莓品种改良的重要制



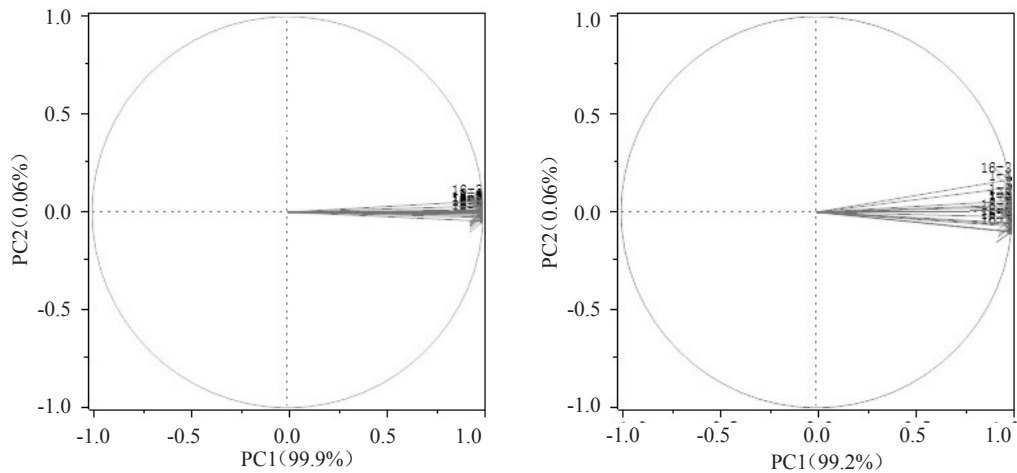


图 4 2 个草莓品系有机酸 (左)、氨基酸 (右) 差异代谢产物的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of differential metabolites of organic acids (left) and amino acids (right) of two strawberry strains

表 6 糖酸代谢产物间相关性分析

Table 6 Correlation analysis between sugar and organic acid metabolites

	木糖 Xylose	甘露糖 Mannose	D-塔洛糖 D-talose	葡萄糖 Glucose	麦芽糖醇 Maltitol	核糖 Ribose	果糖 Fructose	肌醇 Inositol	肌醇半乳糖苷 Galactinol	果糖 6-磷酸 Fructose-6-phosphate	蔗糖 Sucrose
2-酮丁酸 2-Ketobutyric acid	0.465	0.905**	0.809**	0.940**	-0.784**	0.395	0.935**	0.847**	0.764**	-0.645*	-0.438
D-甘油酸 D-glyceric acid	0.499	0.915**	0.841**	0.903**	-0.816**	0.454	0.945**	0.802**	0.723**	-0.656*	-0.390
苹果酸 Malic acid	-0.720**	-0.720**	-0.670*	-0.700*	0.670*	-0.639*	-0.764**	-0.692*	-0.865**	0.612*	0.514
2-羟基-3-异丙基丁二酸 2-Hydroxy-3-isopropylbutanedioic acid	0.729**	0.858**	0.740**	0.818**	-0.769**	0.676*	0.908**	0.803**	0.838**	-0.711**	-0.483
柠檬酸 Citric acid	-0.657*	-0.784**	-0.677*	-0.770**	0.657*	-0.548	-0.912**	-0.652*	-0.724**	0.555	0.375
脱氢抗坏血酸 Dehydroascorbic acid	0.609*	0.850**	0.899**	0.829**	-0.749**	0.353	0.789**	0.686*	0.735**	-0.662*	-0.453
2-酮基-L-古洛糖酸 2-Keto-L-gulonic acid	0.742**	0.862**	0.854**	0.789**	-0.741**	0.527	0.899**	0.740**	0.769**	-0.678*	-0.572
棕榈酸 Palmitic acid	-0.297	-0.589*	-0.530	-0.583*	0.695*	-0.478	-0.404	-0.691*	-0.686*	0.717**	0.383
硬脂酸 Stearic acid	-0.259	-0.664*	-0.593*	-0.677*	0.710**	-0.553	-0.526	-0.627*	-0.649*	0.795**	0.305
乳酸 Lactic acid	0.558	0.767**	0.612*	0.785**	-0.685*	0.472	0.911**	0.669*	0.700*	-0.524	-0.437
水杨酸 Salicylic acid	0.548	0.763**	0.593*	0.698*	-0.689*	0.545	0.807**	0.710**	0.618*	-0.635*	-0.376
酒石酸 Tartaric acid	0.447	0.917**	0.793**	0.976**	-0.824**	0.568	0.918**	0.911**	0.807**	-0.790**	-0.544
丙酮酸 Pyruvic acid	-0.460	-0.769**	-0.781**	-0.753**	0.663*	-0.326	-0.770**	-0.769**	-0.702*	0.436	0.424
乙醇酸 Glycollic acid	0.579*	0.925**	0.842**	0.949**	-0.853**	0.524	0.944**	0.822**	0.855**	-0.722**	-0.460
α-酮戊二酸 Alpha-ketoglutaric acid	-0.484	-0.745**	-0.760**	-0.742**	0.704*	-0.182	-0.744**	-0.723**	-0.726**	0.422	0.515
半乳糖酸 Galactonic acid	0.511	0.698*	0.739**	0.690*	-0.435	0.325	0.716**	0.760**	0.608*	-0.440	-0.489
柠檬酸 Citramalic acid	0.731**	0.850**	0.764**	0.835**	-0.815**	0.658*	0.898**	0.725**	0.904**	-0.657*	-0.377
丙氨酸 Alanine	0.461	0.574	0.448	0.638*	-0.402	0.537	0.721**	0.631*	0.602*	-0.470	-0.561
缬氨酸 Valine	-0.607*	-0.657*	-0.731**	-0.619*	0.529	-0.727**	-0.592*	-0.596*	-0.630*	0.525	0.257
脯氨酸 Proline	0.606*	0.959**	0.858**	0.904**	-0.830**	0.636*	0.925**	0.953**	0.761**	-0.838**	-0.576*
丝氨酸 Serine	-0.520	-0.617*	-0.702*	-0.573	0.491	-0.678*	-0.469	-0.553	-0.595*	0.694*	0.185
马来酰胺酸 Maleamic acid	0.339	0.837**	0.785**	0.842**	-0.678*	0.315	0.868**	0.709**	0.539	-0.553	-0.289
天门冬氨酸 Aspartic acid	-0.515	-0.846**	-0.901**	-0.765**	0.788**	-0.299	-0.697*	-0.820**	-0.728**	0.679*	0.461
环亮氨酸 Cycloleucine	0.759**	0.883**	0.822**	0.840**	-0.789**	0.706*	0.913**	0.787**	0.888**	-0.745**	-0.465
蛋氨酸 Methionine	-0.511	-0.634*	-0.579*	-0.646*	0.674*	-0.421	-0.612*	-0.639*	-0.744**	0.379	0.284
谷氨酸 Glutamic acid	-0.736**	-0.835**	-0.734**	-0.732**	0.712**	-0.596*	-0.866**	-0.819**	-0.666*	0.693*	0.622*
苯丙氨酸 Phenylalanine	-0.547	-0.611*	-0.706*	-0.644*	0.453	-0.433	-0.623*	-0.524	-0.630*	0.316	0.303
瓜氨酸 Citrulline	0.447	0.877**	0.830**	0.859**	-0.778**	0.365	0.905**	0.760**	0.682*	-0.570	-0.438

注: \*显著相关 ( $p < 0.05$ ), \*\*极显著相关 ( $p < 0.01$ )。下同。

Note: \* Significantly correlation ( $p < 0.05$ ), \*\* Very significantly correlation ( $p < 0.01$ ). The same below.

表7 果实内在品质与色泽间相关性分析

Table 7 Correlation analysis between fruit intrinsic quality traits and color values

	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>E</i> * <i>ab</i>	<i>C</i> *	<i>H</i>	<i>CCI</i>	<i>a</i> */ <i>b</i> *
可溶性固形物 TSS	-0.754*	0.598	-0.832**	0.902**	-0.092	-0.876**	0.905**	0.855**
木糖 Xylose	-0.715**	0.273	-0.694*	0.705*	0.019	-0.722**	0.711**	0.724**
甘露糖 Mannose	-0.834**	0.745**	-0.881**	0.933**	-0.03	-0.896**	0.936**	0.889**
D-塔洛糖 D-talose	-0.840**	0.649*	-0.934**	0.911**	-0.236	-0.863**	0.917**	0.852**
葡萄糖 Glucose	-0.789**	0.864**	-0.777**	0.878**	0.163	-0.862**	0.890**	0.884**
麦芽糖醇 Maltitol	0.818**	-0.680*	0.765**	-0.874**	-0.047	0.816**	-0.849**	-0.816**
核糖 Ribose	-0.797**	0.335	-0.693*	0.709**	0.180	-0.765**	0.707*	0.738**
果糖 Fructose	-0.759**	0.791**	-0.739**	0.835**	0.200	-0.814**	0.852**	0.837**
肌醇 Inositol	-0.757**	0.607*	-0.845**	0.874**	-0.127	-0.854**	0.892**	0.836**
肌醇半乳糖苷 Galactinol	-0.924**	0.650*	-0.772**	0.886**	0.189	-0.886**	0.896**	0.942**
果糖-6-磷酸 Fructose-6-phosphate	0.740**	-0.661*	0.778**	-0.885**	-0.011	0.823**	-0.842**	-0.809**
蔗糖 Sucrose	0.297	-0.487	0.399	-0.515	-0.051	0.443	-0.488	-0.459
2-酮丁酸 2-Ketobutyric acid	-0.719**	0.764**	-0.690*	0.793**	0.138	-0.771**	0.825**	0.809**
D-甘油酸 D-glyceric acid	-0.744**	0.766**	-0.694*	0.792**	0.180	-0.756**	0.814**	0.789**
苹果酸 Malic acid	0.805**	-0.550	0.688*	-0.794**	-0.160	0.780**	-0.807**	-0.839**
2-羟基-3-异丙基丁二酸 2-Hydroxy-3-isopropylbutanedioic acid	-0.797**	0.609*	-0.726**	0.838**	0.196	-0.836**	0.861**	0.868**
柠檬酸 Citric acid	0.677*	-0.642*	0.567	-0.696*	-0.334	0.680*	-0.728**	-0.739**
脱氢抗坏血酸 Dehydroascorbic acid	-0.762**	0.759**	-0.800**	0.828**	-0.031	-0.789**	0.828**	0.800**
2-酮基-L-古洛糖酸 2-Keto-L-gulonic acid	-0.777**	0.639*	-0.743**	0.825**	0.078	-0.762**	0.839**	0.815**
棕榈酸 Palmitic acid	0.681*	-0.427	0.670*	-0.731**	0.127	0.724**	-0.706*	-0.709**
硬脂酸 Stearic acid	0.689*	-0.703*	0.667*	-0.750**	-0.042	0.738**	-0.700*	-0.719**
乳酸 Lactic acid	-0.631*	0.687*	-0.492	0.655*	0.432	-0.648*	0.681*	0.704*
水杨酸 Salicylic acid	-0.565	0.521	-0.572	0.662*	0.122	-0.674*	0.675*	0.666*
酒石酸 Tartaric acid	-0.822**	0.826**	-0.755**	0.886**	0.253	-0.876**	0.895**	0.901**
丙酮酸 Pyruvic acid	0.681*	-0.563	0.703*	-0.702*	0.145	0.691*	-0.736**	-0.712**
乙醇酸 Glycollic acid	-0.839**	0.836**	-0.753**	0.876**	0.247	-0.857**	0.890**	0.895**
$\alpha$ -酮戊二酸 Alpha-ketoglutaric acid	0.659*	-0.578*	0.638*	-0.684*	0.064	0.646*	-0.715**	-0.692*
半乳糖酸 Galactonic acid	-0.590*	0.348	-0.685*	0.659*	-0.264	-0.627*	0.722**	0.673*
柠草酸 Citramalic acid	-0.866**	0.727**	-0.729**	0.850**	0.300	-0.855**	0.864**	0.894**
丙氨酸 Alanine	-0.554	0.491	-0.449	0.577*	0.327	-0.582*	0.604*	0.645*
缬氨酸 Valine	0.829**	-0.509	0.833**	-0.767**	-0.013	0.823**	-0.765**	-0.775**
脯氨酸 Proline	-0.798**	0.653*	-0.850**	0.909**	-0.011	-0.898**	0.921**	0.887**
丝氨酸 Serine	0.760**	-0.430	0.808**	-0.768**	0.145	0.760**	-0.758**	-0.740**
马来酰胺酸 Maleamic acid	-0.591*	0.734**	-0.603*	0.662*	0.117	-0.627*	0.687*	0.645*
天门冬氨酸 Aspartic acid	0.724**	-0.527	0.847**	-0.826**	0.405	0.767**	-0.839**	-0.769**
环亮氨酸 Cycloleucine	-0.874**	0.675*	-0.793**	0.895**	0.161	-0.872**	0.909**	0.917**
蛋氨酸 Methionine	0.705*	-0.494	0.629*	-0.660*	-0.107	0.727**	-0.681*	-0.711**
谷氨酸 Glutamic acid	0.685*	-0.451	0.713**	-0.778**	-0.056	0.764**	-0.800**	-0.765**
苯丙氨酸 Phenylalanine	0.717**	-0.597*	0.707*	-0.656*	-0.047	0.706*	-0.671*	-0.695*
瓜氨酸 Citrulline	-0.690*	0.717**	-0.653*	0.731**	0.099	-0.686*	0.761**	0.725**

约因素,育种者一直尝试通过野生草莓与八倍体凤梨草莓的种间杂交来拓宽现有草莓的遗传基础。本课题组利用八倍体栽培品种‘红颜’和二倍体黄毛草莓进行种间杂交,获得五倍体经秋水仙素加倍后得到十倍体与八倍体‘小白’杂交,经过评价、筛选后获得2个稳定遗传优系——1号和16号。对2个杂交后代进行倍性鉴定,初步判断16号为八倍体,1号为

六倍体,但植株田间表现均接近八倍体亲本,二者倍性需进一步验证。通过2个优系果实品质比较发现,16号果实高糖低酸,果面色泽鲜艳,呈胭脂红;1号果实大,果面亮有光泽,呈粉白色,有机酸、氨基酸含量高。且2个品系果实中代谢产物之间主要是糖代谢产物存在显著差异,说明糖分可能是影响二者风味不同的原因之一。

果实甜度是评价草莓鲜食和加工品质的重要属性之一。果实甜度通常用可溶性固形物表示,实际上果实甜度主要取决于可溶性糖含量和组成<sup>[20]</sup>。本研究的2个草莓品系可溶性固形物为8.52%、9.79%,均高于李桂香等<sup>[21]</sup>研究报道的野生黄毛草莓(7.86%)。成熟草莓果实中可溶性糖主要是葡萄糖、果糖,二者约占65%以上,而蔗糖相对较少<sup>[22-23]</sup>。荣宁宁<sup>[16]</sup>研究发现,草莓果实中主要可溶性糖为蔗糖和果糖,其次还有葡萄糖、半乳糖,如‘章姬’果实中蔗糖百分比为45.6%,果糖百分比为22.5%,葡萄糖17.8%,半乳糖13.5%。‘枳乙女’在促成栽培中,蔗糖含量超过65%<sup>[24]</sup>。本文中2个品系果实中糖分主要是木糖,分别占总糖含量的62.68%、50.71%,其次是肌醇和葡萄糖,而果糖、蔗糖相对含量较少,与前人研究有所差异。由于各个品种间可溶性糖含量及组成比例不同,导致各品种间的风味差异<sup>[25]</sup>。说明1号和16号的口感异于其他草莓栽培品种,这可能是由于本试验材料为野生黄毛草莓的杂交后代。因黄毛草莓与栽培种亲缘关系较远<sup>[26]</sup>,其后代及本身与栽培品种糖分组成可能不一致。关于黄毛草莓中可溶性糖组成如何待进一步研究。

有机酸的组分和含量是果实品质的重要组成因素,其与糖的组分及含量的比例决定了果实的风味差异<sup>[27]</sup>。草莓属于柠檬酸型果实,除柠檬酸为主要有机酸以外,还有较多的苹果酸和少量的奎尼酸,以及乙酸、草酸、琥珀酸、莽草酸、异柠檬酸、富马酸和顺乌头酸等微量有机酸<sup>[12,28]</sup>,有些草莓品种还含有少量的酒石酸<sup>[29]</sup>。本研究中,草莓果实中有机酸主要是柠檬酸,分别占总有机酸的80.24%、76.44%,其次是苹果酸,及少量的棕榈酸、琥珀酸、抗坏血酸、奎宁酸。此外,还含有乳酸、富马酸、水杨酸、酒石酸、莽草酸等微量有机酸。与前人研究大致相同,但是有机酸含量更高,种类更丰富,2个品系均共检测到53种有机酸,其中1号中总的有机酸相对含量高于16号。

氨基酸是果实鲜味的组成成分,是影响和评价果实品质的重要指标,并参与果实其他品质特征成分和风味物质的合成<sup>[30]</sup>。研究发现一些游离氨基酸可能会影响水果的味道,谷氨酸负责“鲜味”或“美味”<sup>[31]</sup>,丙氨酸或赖氨酸与甜度高度相关<sup>[11]</sup>,苯丙氨酸或酪氨酸具有苦味<sup>[11]</sup>。草莓果汁中氨基酸种类丰富,主要是天门冬酰胺(占70%以上)、丙氨酸、谷氨

酸和天门冬氨酸,还有少量的丝氨酸、苏氨酸、谷氨酰胺、苯丙氨酸等<sup>[32]</sup>。张娟娟<sup>[30]</sup>的研究中,草莓果实中丝氨酸含量最高,精氨酸含量次之,谷氨酸、组氨酸、天冬氨酸、脯氨酸含量较高,为主要氨基酸;而缬氨酸、酪氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和苯丙氨酸等含量均较少。本研究中,2个草莓品系中氨基酸含量最高的是氧化脯氨酸,还有较多的丙氨酸、天门冬酰胺、天门冬氨酸、丝氨酸、色氨酸,及少量的缬氨酸、甘氨酸、脯氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸等,共有27种氨基酸。本研究中氨基酸含量与前人研究有所差异,但是所含种类之间大致相同,不仅包含人体必需的氨基酸,还含有负责“鲜味”的谷氨酸,与甜度高度相关的丙氨酸,以及其他氨基酸。说明2个杂交后代果实中所含氨基酸种类丰富。

糖是果实品质和风味物质的主要成分,也是色素、氨基酸、有机酸等其他营养成分合成的基础原料,即糖酸之间相关性密切。有研究表明,苹果酸与蔗糖、山梨糖、总糖和可溶性固形物呈显著正相关<sup>[33]</sup>。Etienne等<sup>[34]</sup>研究了桃群体的63个基因型,结果表明蔗糖和苹果酸、柠檬酸均呈负相关。本研究糖酸相关性中有机酸、氨基酸与糖之间呈显著、极显著正相关或负相关,其中苹果酸、柠檬酸、丙酮酸、天门冬氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸与木糖、葡萄糖、果糖呈极显著或显著负相关,而乳酸、水杨酸、酒石酸、丙氨酸与葡萄糖、果糖等糖代谢产物呈显著或极显著正相关,但蔗糖与各酸之间相关性多数未达显著水平。因此,有关果实内的糖酸相互关系有待深入研究。

果实色泽不仅影响果实的外观,而且着色程度与风味品质密切相关。决定草莓红色表现的花色素苷由花色素和糖组成,而花色素又是在糖代谢的基础上由丙酮酸和乙酸缩合而形成的<sup>[23]</sup>。说明糖酸和色泽间关系密切,但近十多年,在研究者对果实肉色与糖酸含量的关系进行探讨的报道结果中差异较大。李荣飞等<sup>[35]</sup>研究发现,‘龙安柚’果肉色泽各指标与转化糖、蔗糖、总糖、糖酸呈显著相关,与可滴定酸多为负相关。荣宁宁<sup>[16]</sup>在草莓上研究,3个草莓品种在白熟以前只有少量花色素积累,随着果实的生长发育,花色素含量迅速增加,到全红期达到高峰,果实总糖含量也随之上升。但吴本宏等<sup>[32]</sup>通过桃果肉颜色对果实糖与酸含量的影响及相关性研究发现,黄肉桃与白肉桃之间的糖酸含量无显著差异。



本研究发现,可溶性固形物与 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈极显著正相关,与 $b^*$ 、 $H$ 呈极显著负相关,与 $L^*$ 呈显著负相关。木糖、葡萄糖、果糖、乳酸、水杨酸、酒石酸、丙氨酸、脯氨酸、瓜氨酸等代谢产物与 $a^*$ 、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈正相关关系,且多数达极显著水平,而与 $L^*$ 、 $b^*$ 、 $H$ 呈负相关。但苹果酸、柠檬酸、丙酮酸、缬氨酸、丝氨酸、天门冬氨酸、蛋氨酸、谷氨酸等代谢产物,与 $L^*$ 、 $b^*$ 、 $H$ 呈正相关,与 $a^*$ 、 $E^*ab$ 、 $CCI$ 、 $a^*/b^*$ 呈负相关。说明糖、有机酸、氨基酸与果实色泽指标间关系密切且复杂,内在品质影响了果实外观色泽。

### 参考文献 References:

- [1] 雷家军,代汉萍,谭昌华,邓明琴,赵密珍,钱亚明. 中国草莓属(*Fragaria*)植物的分类研究[J]. 园艺学报,2006,33(1):1-5.  
LEI Jiajun, DAI Hanping, TAN Changhua, DENG Mingqin, ZHAO Mizhen, QIAN Yaming. Studies on the taxonomy of the strawberry (*Fragaria*) species distributed in China[J]. Acta Horticulturae Sinica,2006,33(1):1-5.
- [2] NOGUCHI Y, MOCHIZUKI T, SONE K. Interspecific hybrids originated from crossing Asian wild strawberries (*F. nilgerrensis* and *F. iinumae*) to *F. × ananassa*[J]. HortScience, 1997, 32(3): 438-439.
- [3] NOGUCHI Y. 'Tokun': A new decaploid interspecific hybrid strawberry having the aroma of the wild strawberry[J]. Journal of Japan association on odor environment, 2011, 42(2): 122-128.
- [4] RHO I R, HWANG Y J, LEE H I, LIM K B, LEE C H. Interspecific hybridization of diploids and octoploids in strawberry[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134(2): 46-52.
- [5] 顾渝娟,吴振先. 代谢组学在植物研究中的应用[J]. 广东农业科学,2012,39(4):105-107.  
GU Yujuan, WU Zhenxian. Application of metabolomics in plant research[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(4):105-107.
- [6] 宋江峰,刘春泉,李大婧,顾振新. 代谢组学在果蔬采后品质研究中的应用[J]. 江苏农业科学,2015,43(6):253-255.  
SONG Jiangfeng, LIU Chunquan, LI Dajing, GU Zhenxin. Application of metabolomics in the study of postharvest quality of fruits and vegetables[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(6):253-255.
- [7] LIN Q, WANG C Y, DONG W C, JIANG Q, WANG D L, LI S J, CHEN M, LIU C R, SUN C D, CHEN K S. Transcriptome and metabolome analyses of sugar and organic acid metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit during fruit maturation[J]. Gene, 2015, 554(1), 64-74.
- [8] 李浩男,王宏,贾晓东,吕照清,蔡斌华,乔玉山. '黄花'及其芽变'绿黄花'梨成熟期果皮代谢物鉴定与比较分析[J]. 果树学报,2015,32(6):1118-1127.  
LI Haonan, WANG Hong, JIA Xiaodong, LÜ Zhaoqing, CAI Binhua, QIAO Yushan. Identification and comparison of differential metabolites from the skin of mature fruit in 'Huanghua' pear and its bud mutant 'Lühuanghua' pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai.)[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(6): 1118-1127.
- [9] 张慧琴,谢鸣,张琛,杨鲁琼,章镇,肖金平,周利秋. 猕猴桃果实发育过程中淀粉积累差异及其糖代谢特性[J]. 中国农业科学,2014,47(17):3453-3464.  
ZHANG Huiqin, XIE Ming, ZHANG Chen, YANG Luqiong, ZHANG Zhen, XIAO Jinping, ZHOU Liqiu. Difference in starch accumulation and characterization of sugar metabolism during fruit development of Kiwi fruit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(17): 3453-3464.
- [10] 姚改芳,张绍铃,曹玉芬,刘军,吴俊,袁江,张虎平,肖长城. 不同栽培种梨果实中可溶性糖组分及含量特征[J]. 中国农业科学,2010,43(20):4229-4237.  
YAO Gaifang, ZHANG Shaoling, CAO Yufen, LIU Jun, WU Jun, YUAN Jiang, ZHANG Huping, XIAO Changcheng. Characteristics of components and contents of soluble sugars in pear fruits from different species[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(20): 4229-4237.
- [11] KEUTGEN A J, PAWELZIK E. Contribution of amino acids to strawberry fruit quality and their relevance as stress indicators under NaCl salinity[J]. Food Chemistry, 2008, 111(3): 642-647.
- [12] KALLIO H, HAKALA M. Sugars and acids of strawberry varieties[J]. European Food Research and Technology, 2000, 212(1): 81-85.
- [13] 刘士华,吕国胜. 草莓果实成熟过程中糖、酸含量的动态变化[J]. 安徽林业科技,2011,37(5):24-27.  
LIU Shihua, LÜ Guosheng. Study on dynamic changes of carbohydrates and organic acids in the strawberry fruit during its development[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2011, 37(5): 24-27.
- [14] 柴叶茂,贾海锋,李春丽,秦岭,沈元月. 草莓果实发育过程中糖代谢相关基因的表达分析[J]. 园艺学报,2011,38(4):637-643.  
CHAI Yemao, JIA Haifeng, LI Chunli, QIN Ling, SHEN Yuan-yue. Transcriptional analysis of sugar metabolism-related genes during strawberry fruit development[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(4): 637-643.
- [15] ZHANG J J, WANG X, YU O, TANG J J, GU X G, WAN X C, FANG C B. Metabolic profiling of strawberry (*Fragaria × Ananassa* Duch.) during fruit development and maturation[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(3): 1103-1118.
- [16] 荣宁宁. 不同栽培措施对不同品种草莓色泽及内在品质的影响研究[D]. 杭州:浙江师范大学,2015.  
RONG Ningning. Effects of different cultivation measures on the color and inner quality of different varieties of strawberry [D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2015.
- [17] DONG J, ZHANG Y T, TANG X W, JIN W M, HAN Z H. Dif-

- ferences in volatile ester composition between *Fragaria* × *Ananassa* and *F. vesca* and implications for strawberry aroma patterns [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 150: 47-53.
- [18] KÅRLUND A, MOOR U, MCDUGALL G, LEHTONEN M, KARJALAINEN R O, HANHINEVA K. Metabolic profiling discriminates between strawberry (*Fragaria* × *Ananassa* Duch.) cultivars grown in Finland or Estonia[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 647-653.
- [19] ALBERTINI M V, CARCOUET E, PAILLY O, GAMBOTTI C, LURO F O, BERTI L. Changes in organic acids and sugars during early stages of development of acidic and acidless Citrus fruit[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2006, 54 (21): 8335-8339.
- [20] 张玲. 草莓蔗糖代谢与转运相关基因对果实糖分积累的影响机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.  
ZHANG Ling. Strawberry sucrose metabolism and transport related genes on fruit sugar accumulation mechanism[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [21] 李桂香, 吕建召, 肖湘滇, 沈发春. 云南野生黄毛草莓鲜果的营养成分分析[J]. 大理大学学报, 2017, 2(6): 64-67.  
LI Guixiang, LÜ Jianzhao, XIAO Xiangdian, SHEN Fachun. Analysis of nutritional compositions of Yunnan Wild *Fragaria nilgerrensis* Schlecht fresh fruit[J]. *Journal of Dali University*, 2017, 2(6): 64-67.
- [22] 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1-2, 149-151.  
ZHANG Shanglong, CHEN Kunsong. Molecular physiology of fruit quality formation and regulation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 1-2, 149-151.
- [23] WANG S Y, CAMP M J. Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry[J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 85(3): 183-199.
- [24] 陈俊伟, 谢鸣, 蒋桂华, 秦巧平, 徐红霞, 程建徽, 吴江. 不同时期采收的草莓果实糖含量差异的代谢机理[J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1147-1150.  
CEHN Junwei, XIE Ming, JIANG Guihua, QIN Qiaoping, XU Hongxia, CHENG Jianhui, WU Jiang. Difference in sugar content of fruit harvested in different month strawberry (*Fragaria* × *Ananassa* Duch. 'Tochiotome') and its relation to sucrose metabolism[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(5): 1147-1150.
- [25] 彭小芮. 草莓果实发育过程糖积累差异及光质对糖代谢途径的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.  
PENG Xiaorui. Differences in sugar accumulation during strawberry fruit development and the effect of light quality on sugar metabolism pathways [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [26] 马鸿翔, 陈佩度. 黄毛草莓与凤梨草莓种间杂种的获得及其细胞遗传学分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1966-1970.  
MA Hongxiang, CHEN Peidu. Production and cytogenetics of interspecific hybrids from the cross of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht and *F. ananassa* Duch.[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1966-1970.
- [27] MIKULIC- PETKOVSEK M, SCHMITZER V, SLATNAR A, STAMPAR F, VEBERIC R. Composition of sugars, organic acids, and total phenolics in 25 wild or cultivated berry species[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(10/12): 1064-1070.
- [28] 陈发兴, 刘星辉, 陈立松. 果实有机酸代谢研究进展[J]. 果树学报, 2005, 22(5): 526-531.  
CHEN Faxing, LIU Xinghui, CHEN Lisong. Advances in research organic acid metabolism in fruits[J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(5): 526-531.
- [29] STURM K, KORON D, STAMPAR F. The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage[J]. *Food Chemistry*, 2003, 83(3): 417-422.
- [30] 张娟娟. '丰香'草莓果实发育过程中主要品质特征成分的代谢谱分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.  
ZHANG Juanjuan. Metabolic profiling of the main quality characteristic components of 'Fengxiang' strawberry fruit during development[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009.
- [31] LINDEMANN B. Receptors and transduction in taste[J]. *Nature*, 2001, 413: 219-225.
- [32] 邓明琴, 雷家军. 中国果树志(草莓卷)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 1-3.  
DENG Mingqin, LEI Jiajun. Chinese fruit tree (*Strawberry* Roll.) [M]. Beijing: China Forestry Press, 2005: 1- 3.
- [33] 吴本宏, 李绍华, Quilot Bénédicte, Génard Michel, Kervella Jocelyne. 桃果皮毛、果肉颜色对果实糖与酸含量的影响及相关性研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1540-1544.  
WU Benhong, LI Shaohua, Quilot Bénédicte, Génard Michel, Kervella Jocelyne. Influence of hairless of fruit epidermis and flesh color on contents of sugars and acids and their relationship in peach[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1540-1544.
- [34] ETIENNE C, ROTHAN C, MOING A, PLOMION C, BODÉNÈS C, SVANELLA-DUMAS L, COSSON P, PRONIER V, MONET R, DIRLEWANGER E. Candidate genes and QTLs for sugar and organic acid content in peach [*Prunus persica* (L.) Batsch.][J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2002, 105 (1): 145-159.
- [35] 李荣飞, 王明明, 杨艺, 常耀栋, 张抗萍, 梁国鲁, 陆智明, 胡涛, 易佑文, 苏理荣, 郭启高. 不同施肥处理对龙安柚果实产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(10): 60-68.  
LI Rongfei, WANG Mingming, YANG Yi, CHANG Yaodong, ZHANG Kangping, LIANG Guolu, LU Zhiming, HU Tao, YI Youwen, SU Lirong, GUO Qigao. Effects of different fertilization treatments on fruit yield and quality of *Citrus grandis* var. *Longanyou*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36 (10): 60-68.