

牛丽影, 沈凌雁, 刘春菊, 等. 鲜食糯玉米己醛和己醇的生成与 *LOX* 活性及其基因表达的相关性[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1138-1143.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.024

鲜食糯玉米己醛和己醇的生成与 *LOX* 活性及其基因表达的相关性

牛丽影¹, 沈凌雁^{1,2}, 刘春菊¹, 李大婧¹, 刘春泉¹, 肖丽霞²

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2. 扬州大学食品科学与工程学院, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为探讨生鲜糯玉米汁主要挥发性成分己醛与己醇的生成与脂氧合酶(*LOX*)的关系, 对4个籽粒发育期的鲜食糯玉米京甜紫花糯2号和苏玉糯11号生鲜玉米汁中己醛与己醇含量、脂氧合酶活性以及 *ZmLOX1*、*ZmLOX2*、*ZmLOX3*、*ZmLOX10* 基因的相对表达量进行了测定和比较。结果显示己醛与己醇含量显著正相关 ($P < 0.05$), 4种 *LOX* 基因的表达量之间显著正相关 ($P < 0.05$), 但 *LOX* 活性与其他指标之间未表现出显著的相关关系。主成分分析(PCA)结果显示所有指标聚为3类: 4种 *LOX* 基因表达量、己醛与己醇含量、*LOX* 活性, 三者之间未表现出显著的相关性关系。

关键词: 鲜食糯玉米; 己醛; 脂氧合酶(*LOX*); 基因表达量

中图分类号: S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)05-1138-06

Correlation of formation of hexanal and hexanol, *LOX* activity and gene expression in fresh waxy corn

NIU Li-ying¹, SHEN Ling-yan^{1,2}, LIU Chun-ju¹, LI Da-jing¹, LIU Chun-quan¹, XIAO Li-Xia²

(1. Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

Abstract: To explore the role of lipoxygenase(*LOX*) in the formation of hexanal and hexanol, the main volatile components in two fresh waxy corn cultivars, Jingtianzihuannuo-2 and Suyunuo-11, at 4 developmental stages were collected. The content of hexanal and hexanol, the activity of *LOX*, and the relative gene expression of *ZmLOX1*, *ZmLOX2*, *ZmLOX3*, *ZmLOX10* were determined. Correlation analysis were performed and the results showed that hexanal content and hexanol content were significantly positive correlated ($P < 0.05$), and there were significantly positive relationships among the expression of four *LOX* genes ($P < 0.05$), however, *LOX* activity didn't show significant correlation with other parameters. Principal component analysis (PCA) plots showed that all the parameters were clustered into three groups: the expression of four *LOX* genes, hexanal and hexanol contents, and *LOX* activity. No significant relationships were found among the three groups.

Key words: fresh waxy corn; hexanal; lipoxygenase(*LOX*); gene expression

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(17)2013]

作者简介: 牛丽影(1977-), 女, 河北安国人, 博士, 副研究员, 研究方向为果蔬加工与综合利用。(Tel) 025-84391570; (E-mail) liying.niu@hotmail.com

通讯作者: 肖丽霞, (E-mail) lxxiao@yzu.edu.cn

糯玉米为起源中国的玉米类型, 作为鲜食玉米广受消费者喜爱^[1-4]。鲜食糯玉米蒸煮后散发的玉米香与类似青叶、青草的清香是其重要特征之一。在鲜食糯玉米挥发性成分与香气变化研究中发现, 来自脂氧合酶(*LOX*)途径的己醛和己醇为生鲜玉米

汁挥发性成分的主要成分,并可能与糯玉米的青香有关^[5-7]。LOX 途径为 LOX 启动的具异戊二烯结构的多元不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated fatty acid, PUFA) 的氧化过程,植物中多以亚油酸和亚麻酸为底物,在 LOX 作用下生成 9-氢过氧化物 (9-HPOT) 和 13-氢过氧化物 (13-HPOT),然后由氢过氧化物裂解酶 (HPL) 作用生成的 C₆醛和 C₉醛,并在乙醇脱氢酶 (ADH) 的作用下生成相应的醇^[8]。其中 C₆的醛、醇、酮以及衍生的酯类被称为青叶挥发性成分 (Green leaf volatile, GLV)^[9]。GLV 在植物生理研究中被作为抗逆反应的标志性成分^[10],在番茄^[11]、黄瓜^[12]或柑橘^[13]中为新鲜香气的表征成分,在豆类^[14]、速冻玉米^[15]、水稻^[16]等谷物中则与油脂氧化味等不良风味相关。

从基因水平研究 LOX 途径及风味调控是近年来的趋势。LOX 是一个大基因家族,每种植物中都会有多个 LOX 同工酶,在番茄^[17]、苹果^[18]等植物中只有某特定的 LOX 同工酶调控 GLV 的生成。目前已知玉米中有 13 种 LOX, *ZmLOX1* 基因存在于成熟籽粒中,具有 9-LOX 和 13-LOX 的非传统型双位点特异性^[19]; *ZmLOX2* 基因在玉米生长发育过程中表达, *ZmLOX3* 存在于玉米植株的根部以及发育的胚中^[20]; *ZmLOX10* 位于叶绿体中,主要调节 GLV 的生成^[21]。在对鲜食糯玉米 LOX 酶特性研究中发现,鲜食糯玉米中至少存在 2 种 LOX 同工酶^[22],并且生鲜糯玉米汁的 GLV 则主要为己醛与己醇^[6]。为了在基因表达水平上探讨鲜食糯玉米中 GLV 生成和香气变化机制,本研究对 2 个品种 4 个发育期的鲜食糯玉米中己醛和己醇含量、LOX 酶活性以及 *ZmLOX1*、*ZmLOX2*、*ZmLOX3*、*ZmLOX10* 的相对基因表达量之间的相关性进行分析,为鲜食糯玉米香气的调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

糯玉米京甜紫花糯 2 号 (JT)、苏玉糯 11 号 (SY) 均采自江苏省农业科学院六合动物科学基地试验田。2 种糯玉米于授粉后 14 d、19 d、25 d、31 d 进行采收,分别对应于籽粒建成熟期、乳熟前期、乳熟后期和蜡熟期,记为 JT1~4 和 SY1~4。采收当日手工去除苞叶,分离完整玉米籽粒,液氮速冻后真空包装,置于 -80 °C 冰箱待用。

1.2 主要仪器和试剂

Agilent 7890A/5975C 气相色谱质谱联用仪,美国 Agilent 公司产品;CAR/PDMS/DVB 固相微萃取萃取头,美国 supelco 公司产品;HP-INNOWAX 毛细管色谱柱,美国 Agilent 公司产品;荧光定量 PCR 仪,美国 Roche 公司产品。Trizol 试剂盒,美国 Gibco 公司产品。

1.3 试验方法

1.3.1 己醛、己醇含量的测定 冷冻玉米粒 10 g 加入 40 ml 4 °C 预冷的蒸馏水,迅速研磨,用 5 ml 水转移至均质仪进行均质后定容到 50 ml,取 5 ml 于 15 ml 顶空瓶中并加入搅拌子及 1.6 g NaCl,密封后 40 °C 水浴平衡 15 min,插入萃取头 (CAR/PDMS/DVB),使之与液面保持 1.5 cm 的距离,加入搅拌子置于磁力搅拌器上,搅拌速度 200 r/min,在 40 °C 下萃取 15 min。色谱条件:色谱柱为 HP-INNOWAX (30 m×0.32 mm×0.25 μm) 分析柱;升温程序为:起初温度 40 °C 保持 2 min,然后 5 °C/min 升温至 220 °C,进样口温度 250 °C,解析 2 min,采用不分流进样;载气:He。质谱条件:离子源温度 230 °C,传输线温度为 150 °C,电离化方式为 EI,电子能量 70 eV,质量扫描范围 m/z 30~450,扫描速率为 5.27 scan/s,溶剂延迟 1 min。定量方法采用外标法,首先用色谱纯甲醇配置 1 mg/ml 的贮备液,再稀释为 0.2~200.0 mg/L 的测定液,建立待测组分标准品的峰面积与对应质量浓度的标准曲线。

1.3.2 LOX 活性的测定 同牛丽影等的方法^[19]。

1.3.3 实时荧光定量 PCR 测定 LOX 基因表达量 使用 Trizol 试剂盒提取样品总 RNA,用随机引物将 RNA 反转录成 cDN。反转录反应条件为 25 °C 10 min,42 °C 30 min,85 °C 5 min。根据基因序列设计特异性引物,通过实时荧光定量 PCR 方法,采用 SYBR GREEN 染料法,以 *GAPDH* 为内参基因,测定 LOX 基因表达量,以乳熟期甜玉米晶甜 3 号为对照。引物序列见表 1。PCR 反应条件为:94 °C 30 s;94 °C 10 s,60 °C 12 s,72 °C 30 s,循环 45 次,72 °C 单点检测信号。采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法对结果进行相对定量分析。

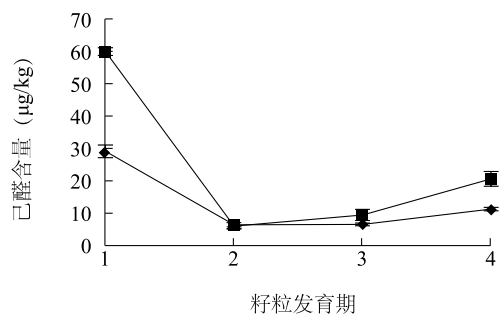
1.4 数据分析

采用 JMP (JMP 10.0, SAS Institute Inc.) 进行单因素方差分析 (ANOVA) 和主成分分析 (PCA)。各指标重复测定 3 次,结果以平均值±标准差表示。采用单因素方差分析 (ANOVA) Tukey HSD 进行差异显著性分析。

表 1 引物序列

Table 1 Sequence of primers

基因	引物名称	引物序列(5'→3')	片段大小 (bp)
ZMLOX1	2536LOX-1F	GACTGGGAGGTGGAGAAGCA	70
	2536LOX-1R	AGAACTCGGAGGCGTGGT	
ZMLOX2	2536LOX-2F	GAAGCCGACGCAGACAGAC	128
	2536LOX-2R	CCTTGATGGTGTAGCCGTAGAA	
ZMLOX3	2536LOX-3F	CGGCGTTCAAGAGGTTTCAG	139
	2536LOX-3R	TGGTCAGAGGTGTTGGGATAGA	
ZMLOX10	2536LOX-10F	TCGACTGCAACTCCTGGGTG	80
	2536LOX-10R	CGGCAGGTATGACTTGAGGG	
GAPDH	GAPDH-F	CCATCACTGCCACACAGAAAAC	
	GAPDH-R	AGGAACACGAAGGACATACCAG	



1: 籽粒建成期; 2: 乳熟前期; 3: 乳熟后期; 4: 蜡熟期。

图 1 籽粒发育期京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号玉米的己醇和己醛含量变化

Fig.1 Hexanal and hexanol content in two waxy corn cultivars Jingtianzihuannuo-2 and Suyunuo-11 during grain development

2.2 两种鲜食糯玉米脂氧合酶(LOX)活性比较

LOX 活性测定结果(图 2)显示,两种糯玉米京甜紫花糯 2 号(JT)和苏玉糯 11 号(SY)LOX 活性均随籽粒发育期延长呈现直线上升趋势($R^2 = 0.9806$ 、 $R^2 = 0.9978$),在 4 个发育期两种玉米的 LOX 活性并未表现出显著差异($P > 0.05$)。

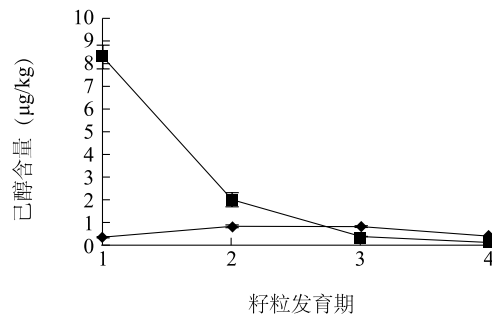
2.3 两种鲜食糯玉米 ZmLOX1、ZmLOX2、ZmLOX3、ZmLOX10 基因表达量差异

京甜紫花糯 2 号的 4 种 LOX 基因表达量在发育过程中变化趋势一致,均为籽粒建成期 \leq 乳熟后期 \leq 乳熟前期 $<$ 蜡熟期(图 3)。苏玉糯 11 号的变化趋势与京甜紫花糯 2 号不同,京甜紫花糯 2 号的 4 种 LOX 基因表达量均为蜡熟期最高,而苏玉糯 11 号中 ZmLOX3 在乳熟后期表达量最高。另外,苏玉糯 11 号 ZmLOX1、ZmLOX2、ZmLOX10 的表达量在 4 个时期均等于甚至低于京甜紫花糯 2 号籽粒建成期

2 结果与分析

2.1 不同采收期两种鲜食糯玉米中己醛和己醇含量比较

4 个采收期两种鲜食糯玉米京甜紫花糯 2 号(JT)和苏玉糯 11 号(SY)中己醛含量为 6.00~59.90 $\mu\text{g}/\text{kg}$,己醇含量为 0.11~8.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。两种糯玉米的己醛均在籽粒建成期含量最高,在乳熟期含量最低,到蜡熟期略有回升,但蜡熟期苏玉糯 11 号的己醛含量与乳熟前期和乳熟后期京甜紫花糯 2 号差异未达显著水平(图 1)。JT 的己醇含量随籽粒发育期的延长而呈降低趋势,而 SY 的己醇含量变化不显著。



—◆— 京甜紫花糯2号; —■— 苏玉糯11号

1: 籽粒建成期; 2: 乳熟前期; 3: 乳熟后期; 4: 蜡熟期。

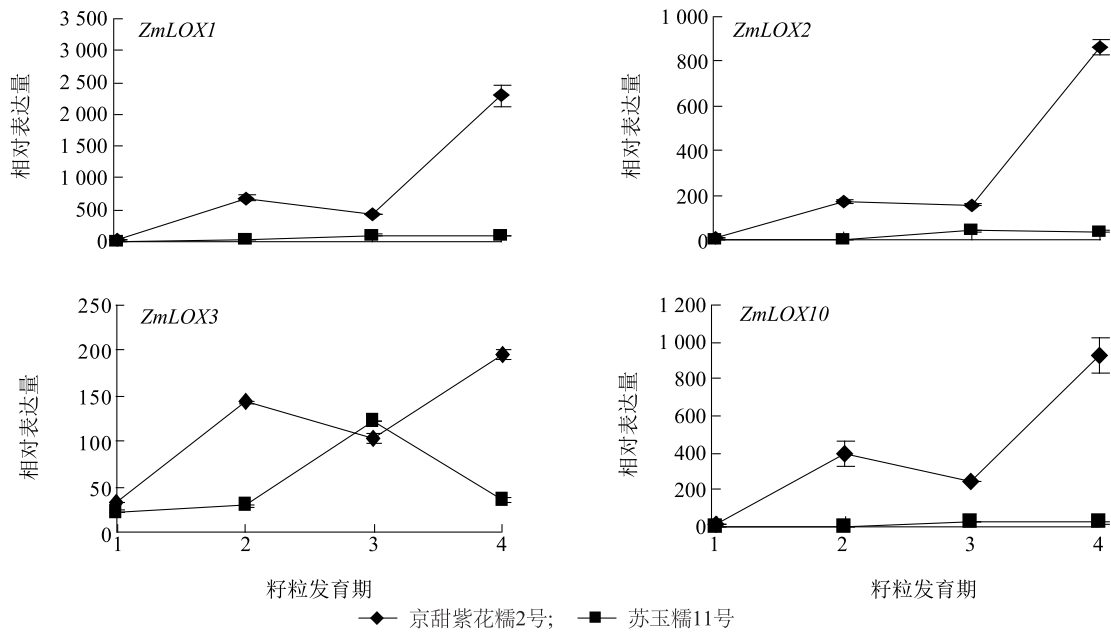
图 2 4 个发育期京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号玉米的 LOX 活性比较

Fig.2 Comparison of LOX activity of corn cultivars Jingtianzihuannuo-2 and Suyunuo-11 at four developing stages

的最低值。2 种玉米差异较大的为乳熟前期和蜡熟期,乳熟前期京甜紫花糯 2 号的 ZmLOX2 和 Zm-

LOX3 基因表达量分别为苏玉糯 11 号的 117.25 和 4.92 倍,蜡熟期京甜紫花糯 2 号的 *ZmLOX3* 基因表达量为苏玉糯 11 号的 5.54 倍。另外,与 GLV 相关的 *ZmLOX10* 基因表达量京甜紫花糯 2 号大于苏玉

糯 11 号,对应 4 个发育期京甜紫花糯 2 号的基因表达量分别为苏玉糯 11 号的 2.56、92.96、10.52 和 45.15 倍。



1:籽粒建成期;2:乳熟前期;3:乳熟后期;4:蜡熟期。

图3 京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号玉米 LOX 基因相对表达量比较

Fig.3 Comparison of relative expression of *ZmLOX1*, *ZmLOX2*, *ZmLOX3*, *ZmLOX10* genes in corn cultivars Jingtianzihuannuo-2 and Suyunuo-11

2.4 玉米己醇和己醛含量与 LOX 活性、LOX 基因表达量的相关性分析

己醛和己醇是生鲜玉米汁中最主要的挥发性成分^[6]。通过调节 pH 以及加热等方法抑制 LOX 的活性可以减少二者的生成^[23],说明 LOX 途径是二者生成的主要途径。相关性分析结果(表 2)显示,己

醛含量与己醇含量之间以及 4 种 LOX 基因表达量之间呈显著正相关关系。己醇含量与己醛含量呈显著正相关,说明生成的己醛越多,才能生成更多的己醇,但是二者的量与 LOX 活性、LOX 基因表达量的相关性不显著。

表 2 生鲜糯玉米中己醛和己醇含量、LOX 活性、LOX 基因表达量之间的相关性

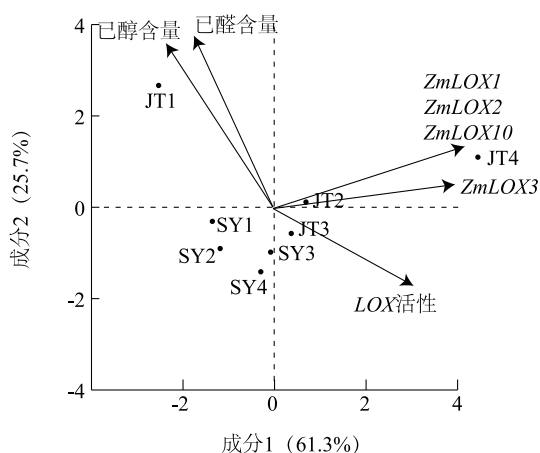
Table 2 Correlation of content of hexanal and hexanol, LOX activity and relative expression of LOX gene in fresh waxy corn

项目	己醛含量	己醇含量	LOX 活性	<i>ZmLOX1</i> 表达量	<i>ZmLOX2</i> 表达量	<i>ZmLOX3</i> 表达量
己醇含量	0.824 *					
LOX 活性	-0.400	-0.599				
<i>ZmLOX1</i> 表达量	-0.090	-0.257	0.509			
<i>ZmLOX2</i> 表达量	-0.067	-0.269	0.548	0.995 **		
<i>ZmLOX3</i> 表达量	-0.347	-0.290	0.403	0.831 *	0.801 *	
<i>ZmLOX10</i> 表达量	-0.133	-0.252	0.445	0.988 **	0.970 *	0.862 **

*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

主成分分析(PCA)结果(图 4)表明,主成分 1 与主成分 2 可解释总方差的 87.0%。从图 4 中可以

看出己醛与己醇含量、4 种 *ZmLOX* 基因分别在第 1 象限和第 2 象限聚集。而样品与指标在空间上的接近则表明此样品在此指标上具有突出的特征,例如籽粒建成期的京甜紫花糯 2 号己醛与己醇含量最高,蜡熟期的京甜紫花糯 2 号 *ZmLOX* 基因表达量最高。



JT1~4 分别为籽粒建成期、乳熟前期、乳熟后期和蜡熟期的京甜紫花糯 2 号,SY1~4 分别为籽粒建成期、乳熟前期、乳熟后期和蜡熟期的苏玉糯 11 号。

图 4 京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号玉米 7 个指标的 PCA 分析图

Fig.4 Principal component analysis plots basing on seven parameters from corn cultivars Jingtiansihuannuo-2 and Suyunuo-11

3 讨论

不同植物的 *LOX* 代谢机制存在差别。本研究 中京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号 2 种糯玉米之间也存在显著差异,例如在乳熟后期京甜紫花糯 2 号 *ZmLOX1*、*ZmLOX2*、*ZmLOX10* 基因表达量均高于苏玉糯 11 号,在籽粒建成期和蜡熟期京甜紫花糯 2 号的己醛和己醇含量也高于苏玉糯 11 号。京甜紫花糯 2 号和苏玉糯 11 号糯玉米在发育过程中 GLV 的生成量和 *LOX* 活性存在显著变化,但是与 *LOX* 基因表达量随生长期的变化并不一致,未表现为显著的相关性关系。猕猴桃中随果实发育阶段的延长,6 种 *LOX* 基因表达量不同,*AdLOX1* 和 *AdLOX5* 在成熟期间上调,而 *AdLOX2*、*AdLOX3*、*AdLOX4* 和 *AdLOX6* 则下调^[24]。番茄中 *TomLOXC* 基因只有在成熟时才被检测到,被认为是 C₆ 醛醇生成的功能基因^[16]。

ZmLOX10 在玉米植株受到伤害时表达量迅速增加,促进 GLV 的产生^[10]。但在本研究中,在糯玉米籽粒建成期己醛与己醇含量最高,但籽粒发育后期 *ZmLOX10* 表达量最高,二者的变化并不一致。陈巧等^[12]研究发现黄瓜 GLV 含量与 *LOX* 基因表达间也未呈现显著相关性,而且黄瓜中 *CsLOX2* 基因表达高峰的出现先于 *LOX* 活性高峰。但是,Zhang 等^[25]发现桃成熟过程中 GLV 含量与 *PpLOX-2*、*PpLOX-3*、*PpHPL-1* 和 *PpADH1-3* 等基因表达水平存在一致的变化趋势。Boukobza 等发现添加外源亚油酸/亚麻酸可以增加番茄 GLV 的生成,但是添加 *LOX* 或者乙醇脱氢酶(*ADH*)都不能影响 GLV 的生成^[26]。在氢过氧化物裂解酶(*HPL*)过度表达的番茄中,挥发性短链醛醇的量几乎没有改变^[27]。这些结果说明在番茄中 GLV 含量并不取决于 *LOX* 途径中酶的基因表达量以及酶的活性。鲜食玉米中 *LOX* 活性与 C₆ 醛醇含量之间的相关性不显著,而与亚油酸含量显著相关^[28]。谷物(如水稻、玉米)种子中 *LOX* 基因表达量与病原菌入侵引发的抗逆机制^[10]以及发芽时的生理变化^[29]有关。*LOX* 虽然是催化脂肪氧化的酶,但是在谷物中有水的情况下会加速反应^[30]。鲜食糯玉米作为发育中的谷物种子,水分含量与果蔬接近,在蒸煮、制汁等条件下 *LOX* 作用的微环境和生化机制,及其对产品新鲜风味的影响仍待进一步研究。

参考文献:

- [1] 胡俏强,陆海燕,李 炯,等. 糯玉米杂交种纯度 InDel 分子标记鉴定与田间鉴定的相关性分析[J]. 江苏农业学报,2016,32(5):999-1004.
- [2] 刘夫国,牛丽影,李大婧,等. 鲜食玉米加工利用研究进展[J]. 食品科学,2012,33(23):375-379.
- [3] 张振良,薛 林,黄小兰,等. 10 个糯玉米自交系育种潜力分析[J]. 南方农业学报,2017,48(9):1560-1567.
- [4] 张振良,郝德荣,陈国清,等. SSR 标记在糯玉米品种鉴定上的应用[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):104-106.
- [5] 牛丽影,李丽娟,李大婧,等. 乳熟期甜玉米、糯玉米鲜榨汁品质特征比较[J]. 江西农业学报,2013,25(1):102-105.
- [6] 牛丽影,刘夫国,李大婧,等. 热处理对乳熟期玉米汁挥发性风味成分的影响[J]. 核农学报,2014,28(3):446-452.
- [7] 吴建平,牛丽影,李大婧,等. 鲜食糯玉米挥发性成分与感官属性相关性分析[J]. 食品科学,2016,37(16):94-99.
- [8] BAYSAL T, DEMIRDÖVEN A. Lipoxygenase in fruits and vegetables: A review [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 40(4):491-496.

- [9] HASSAN M N, ZAINAL Z, ISMAIL I. Green leaf volatiles: biosynthesis, biological functions and their applications in biotechnology[J]. Plant Biotechnology Journal, 2015, 13(6): 727-739.
- [10] SCALA A, ALLMANN S, MIRABELLA R, et al. Green leaf volatiles: a plant's multifunctional weapon against herbivores and pathogens [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(9): 17781-17811.
- [11] BAI J, BALDWIN E A, IMAHORI Y, et al. Chilling and heating may regulate C₆ volatile aroma production by different mechanisms in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(2): 111-120.
- [12] 陈巧,陈书霞,王聪颖,等. 黄瓜脂氧合酶基因 *CsLOX2* 的克隆及表达分析 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2285-2297.
- [13] TIETEL Z, PLOTTO A, FALLIK E, et al. Taste and aroma of fresh and stored mandarins [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(1): 14-23.
- [14] YANG A, SMYTH H, CHALIHA M, et al. Sensory quality of soymilk and tofu from soybeans lacking lipoxygenases [J]. Food Science and Nutrition, 2016, 4(2): 207-215.
- [15] THEERAKULKAIT C, BARRETT D M, MCDANIEL M R. Sweet corn germ enzymes affect odor formation [J]. Journal of Food Science, 1995, 60(5): 1034-1040.
- [16] SUZUKI Y, ISE K, LI C, et al. Volatile components in stored rice [*Oryza sativa* (L.)] of varieties with and without lipoxygenase-3 in seeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(3): 1119-1124.
- [17] CHEN G, HACKETT R, WALKER D, et al. Identification of a specific isoform of tomato lipoxygenase (*TomloxC*) involved in the generation of fatty acid-derived flavor compounds [J]. Plant Physiology, 2004, 136(1): 2641-2651.
- [18] VOGT J, SCHILLER D, ULRICH D, et al. Identification of lipoxygenase (LOX) genes putatively involved in fruit flavour formation in apple (*Malus × domestica*) [J]. Tree Genet Genomes, 2013, 9(6): 1493-1511.
- [19] KIM E S, CHOI E, KIM Y, et al. Dual positional specificity and expression of non-traditional lipoxygenase induced by wounding and methyl jasmonate in maize seedlings [J]. Plant Molecular Biology, 2003, 52(6): 1203-1213.
- [20] BORREGO E J, KOLOMIETS M V. Synthesis and functions of jasmonates in maize [J]. Plants, 2016, 5(4): 41.
- [21] CHRISTENSEN S A, NEMCHENKO A, BORREGO E, et al. The maize lipoxygenase, *ZmLOX10*, mediates green leaf volatile, jasmonate and herbivore-induced plant volatile production for defense against insect attack [J]. The Plant Journal, 2013, 74(1): 59-73.
- [22] NIU L, LI D, LIU C, et al. Comparison of lipoxygenase activity characteristics in aqueous extracts from milk-stage sweet corn and waxy corn [J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(3): 867-873.
- [23] 牛丽影,李大婧,刘春泉,等. 一种非热预处理制作甜玉米汁的方法;20150577706.9 [P]. 2015-11-11.
- [24] ZHANG B, YIN X, LI X, et al. Lipoxygenase gene expression in ripening kiwifruit in relation to ethylene and aroma production [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(7): 2875-2881.
- [25] ZHANG B, SHEN J, WEI W, et al. Expression of genes associated with aroma formation derived from the fatty acid pathway during peach fruit ripening [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(10): 6157-6165.
- [26] BOUKOBZA F, DUNPHY P J, TAYLOR A J. Measurement of lipid oxidation-derived volatiles in fresh tomatoes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 23(2): 117-131.
- [27] MATSUI K, FUKUTOMI S, WILKINSON J, et al. Effect of overexpression of fatty acid 9-hydroperoxide lyase in tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5418-5424.
- [28] 牛丽影,马玉玲,吴建平,等. 鲜食玉米中脂氧合酶活力、脂肪酸与挥发性成分的相关性研究 [J]. 现代食品科技, 2016(5): 59-64, 58.
- [29] HUANG J, CAI M, LONG Q, et al. OsLOX2, a rice type I lipoxygenase, confers opposite effects on seed germination and longevity [J]. Transgenic Research, 2014, 23(4): 643-655.
- [30] BARNES P, GALLIARD T. Rancidity in cereal products [J]. Lipid Technology, 1991, 3: 23-28.

(责任编辑:张震林)