

# 叶黄素在面包加工与贮藏中的稳定性

谢晓叶<sup>1,2</sup>, 李大婧<sup>1,2,\*</sup>, 宋江峰<sup>2</sup>, 刘春泉<sup>2</sup>

(1.东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 将叶黄素水溶性微囊粉添加至面包, 研究叶黄素在面包制作以及贮藏过程中的稳定性。结果表明, 和面、发酵和焙烤过程能引起全反式叶黄素含量的显著减少以及13-顺式、13'-顺式、9-顺式和9'-顺式叶黄素的生成, 但焙烤对叶黄素含量的影响最大。和面和发酵过程中总叶黄素保留率下降了3.24%和5.40%; 焙烤导致面包芯和面包皮中总叶黄素保留率分别下降了6.32%和41.12%。面包20 °C避光贮藏7 d, 面包芯和面包皮中总叶黄素保留率分别下降了13.64%和8.72%, 色泽值基本无变化。面包贮藏稳定性良好, 可以满足面包产品货架期需求。

**关键词:** 叶黄素; 稳定性; 面包; 加工; 贮藏

## Stability of Lutein in Bread during Processing and Storage

XIE Xiao-ye<sup>1,2</sup>, LI Da-jing<sup>1,2,\*</sup>, SONG Jiang-feng<sup>2</sup>, LIU Chun-quan<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Lutein is a yellow pigment with a variety of nutritional functions. The stability of lutein from bread flour fortified with water-soluble lutein microcapsule was studied during processing steps and subsequent storage. Results showed that dough making, fermentation and baking caused a significant reduction in all-*trans* lutein and the formation of 13-*cis*, 13'-*cis*, 9-*cis*, and 9'-*cis*-lutein, but baking had the greatest influence on the content of lutein. Dough making and fermentation caused a decrease in the retention rate of total lutein by 3.24% and 5.40%, respectively, and baking led to a reduction in the retention rate of total lutein in bread core and bread crust by 6.32% and 41.12%, respectively. After being stored at 20 °C in the dark for seven days, the retention rates of total lutein in bread core and bread crust decreased by 13.64% and 8.72%, respectively, but color value changed little. The storage stability of bread was good, which could meet the requirement for the shelf life of bread.

**Key words:** lutein; stability; bread; processing; storage

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 20-0271-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201420053

叶黄素, 又名“植物黄体素”, 是一种含紫罗酮环的二羟基类胡萝卜素<sup>[1]</sup>, 具有着色、抗氧化、抗癌、抗诱变、延缓动脉硬化等功能<sup>[2-5]</sup>。科学研究证实每人每日摄入6 mg叶黄素可有效预防和辅助治疗老年性黄斑变性病和白内障等眼部疾病的发生<sup>[6-7]</sup>, 但人体所需的叶黄素不能直接由自身合成, 必须通过母乳和补充剂等膳食补充<sup>[8]</sup>。据统计, 在重视度较高的美国和欧洲叶黄素每日摄入量约为1.7 mg和2.2 mg<sup>[1]</sup>, 我国叶黄素的每日摄入量更低, 远远不能满足人体的正常需求。因此, 有必要在一些食品基质中强化叶黄素含量。

目前, 叶黄素的应用研究主要集中于奶酪<sup>[9]</sup>、酸奶<sup>[10]</sup>、

冰淇淋等油脂基质中, 在淀粉基质中的应用相当有限。Hidalgo等<sup>[11]</sup>选取了两种富含类胡萝卜素的Monlis和ID331小麦面粉经215 °C条件下焙烤25 min制成面包, 计算比较了不同加工过程对( $\alpha+\beta$ )-胡萝卜素、 $\beta$ -隐黄质、叶黄素、玉米黄质、总类胡萝卜素含量的变化, 结果表明Monlis和ID331小麦面粉制作的面包中, 面包皮和面包芯的总类胡萝卜素含量下降了约21%和47%, 而Monlis面包皮和面包芯的总叶黄素含量分别下降了约38%和8%, ID331面包皮和面包芯的总叶黄素含量分别下降了约44.8%和6.0%。Abdel-Aal等<sup>[12]</sup>将游离叶黄素(纯度85%)添加到小麦面粉中制成饼干, 研究了贮藏期叶黄素的含

收稿日期: 2014-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31101385)

作者简介: 谢晓叶(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品营养化学。E-mail: xiexiaoye2014@163.com

\*通信作者: 李大婧(1976—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为食品营养化学。E-mail: lidajing@163.com

量变化,发现添加叶黄素的饼干比未强化叶黄素的饼干有更高的降解率。由于叶黄素的亲脂特性使其在淀粉基质中分散均一性较差,采用微胶囊化技术包埋叶黄素可增加其水溶性,并且保护叶黄素免遭破坏<sup>[13]</sup>。因此本研究将叶黄素水溶性微囊粉添加到面包中,考察叶黄素水溶性微囊粉在面包加工及贮藏过程中的稳定性,以期为叶黄素膳食补充剂开发提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

质量分数5%的叶黄素水溶性微囊粉 大连医诺生物有限公司;高活性干酵母粉 安琪酵母有限公司;食用盐 江苏井神盐化股份有限公司;面包粉 潍坊风筝面粉有限责任公司;全反式叶黄素标准品 美国Sigma公司;乙腈、二氯甲烷(色谱纯) 国药集团化学试剂有限公司;甲醇(色谱纯) 美国天地公司;丙酮、石油醚、无水硫酸钠均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

LGJ-12冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司;RE-52A真空旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂;SHZ-D循环水式真空泵 上海东玺制冷仪器设备有限公司;全自动面包机 ACA北美电器;WSC-S型色差仪 上海精密科学仪器有限公司;FA2104电子分析天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司;HPLC1200高效液相色谱仪(主要包括在线真空脱气机、四元梯度洗脱泵、柱温箱、二极管阵列检测器、色谱柱YMC-C<sub>30</sub>(4.6 mm×250 mm, 5 μm)) 美国安捷伦科技有限公司。

### 1.3 方 法

#### 1.3.1 面包制作过程

考虑到鸡蛋、油脂等成分可能因脂质氧化等反应对叶黄素产生影响,采用简化的面包配方,并根据预实验确定其配方为:面粉300 g、水180 g、盐3 g、酵母4 g,向其中均匀添加0.150 g质量分数为5%的叶黄素水溶性微囊粉。

面包机执行程序依次为和面成型60 min, 38 °C醒发150 min, 180 °C焙烤60 min。考察和面成型后的面团(刚成团)、发酵后的面团(焙烤前)以及焙烤后的面包芯和面包皮中叶黄素含量的变化。取样部位分别为:面包皮从面包的6个面中心取5 cm×5 cm的正方形后合并,面包芯取面包中心部位。平行取样3次。

#### 1.3.2 贮藏期实验

将制作好的面包用灭菌的塑料袋普通包装后20 °C避光贮藏1周,每天取样。平行取样3次。

#### 1.3.3 叶黄素含量分析

##### 1.3.3.1 叶黄素的提取

按实验设计1.3.1、1.3.2节条件取样,避光冷冻干燥36 h,粉碎过40目筛后-20 °C冷藏待提取。结合王闯<sup>[14]</sup>、Hidalgo<sup>[11]</sup>、Abdel-Aal<sup>[12,15]</sup>等方法,稍作修改。准确称量2.00 g面包冻干粉于250 mL磨口三角瓶中,加20 mL蒸馏水和30 mL石油醚-丙酮溶液(1:1, V/V),加塞后1 500 r/min磁力搅拌10 min,加30 mL石油醚-丙酮溶液(1:1, V/V)转移至分液漏斗,收集有机相,重复萃取3次至水层无色。合并有机相,30 °C条件下真空旋干,用5 mL丙酮复溶后过0.45 μm滤膜,用于色谱分析。为避免样品的光氧化降解,所有操作均在昏暗的灯光下进行。

##### 1.3.3.2 叶黄素顺反异构体C<sub>30</sub>-高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)分析<sup>[16]</sup>

标准曲线的制备 准确称取1 mg全反式叶黄素标准品,用丙酮溶解并定容至50 mL,混匀,制成质量浓度为20 μg/mL的标准液。再分别取0.1、0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 mL标准液置于10 mL容量瓶中,用丙酮定容并混匀,制成质量浓度为0.2、1、3、5、7、9、11、13 μg/mL的系列标准液。

色谱条件:色谱柱YMC Carotenoid C<sub>30</sub>(4.6 mm×250 mm, 5 μm);柱温25 °C;检测波长450 nm;DAD光谱收集范围:250~600 nm。流动相为甲醇-水(98:2, V/V),70 min内等度洗脱;流速1.0 mL/min;进样量20 μL。

##### 1.3.4 色泽测定

按1.3.2节取样后,用色差仪分别测定面包皮和面包芯的L\*、a\*、b\*值。对每种样品取3次样,取平均值。CIE-L\*a\*b\*表色系中的L\*为明度,反映色泽的亮度;a\*为Hunter标度中的a轴值,正数代表红色,负数代表绿色;b\*为Hunter标度中的b轴值,正数代表黄色,负数代表蓝色。

##### 1.3.5 保留率的计算

全反式叶黄素保留率为各工序面包制品中全反式叶黄素的含量与添加到面包中全反式叶黄素初始含量的比值。

总叶黄素保留率为各工序面包制品中总叶黄素的含量与添加到面包中全反式叶黄素初始含量的比值。总叶黄素含量为全反式叶黄素与检测到的各顺式异构体含量的总和。

## 1.4 数据处理

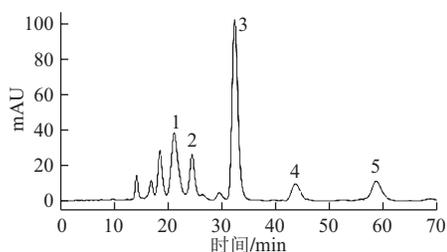
实验数据结果均采用软件Origin 7.5和SPSS进行方差分析和标准差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶黄素顺反异构体的定性定量分析

C<sub>30</sub>-HPLC可以很好地分离叶黄素的顺反异构体,

采用高效液相色谱-正离子模式的大气压化学电离-质谱 (HPLC-advanced configuration and power interface-mass spectrometer, HPLC-APCI-MS) 分析和DAD能准确地对叶黄素顺、反异构体进行定性分析<sup>[16]</sup>。面包皮中叶黄素的C<sub>30</sub>-HPLC色谱图如图1所示, 其中1、2、3、4、5号峰分别为13-顺式、13'-顺式、全反式、9-顺式和9'-顺式叶黄素。



1、2、3、4、5号峰分别为13-顺式、13'-顺式、全反式、9-顺式和9'-顺式叶黄素。

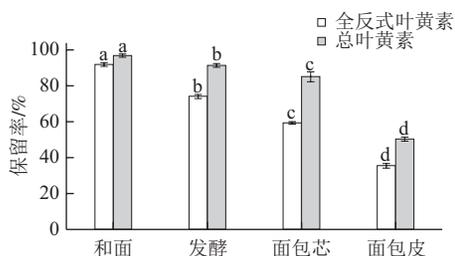
图1 面包皮中叶黄素的C<sub>30</sub>-HPLC色谱图

Fig.1 C<sub>30</sub>-HPLC chromatogram of lutein in bread crust

由于自然界中叶黄素的顺式异构体含量低, 分离困难, 至今没有标准品, 所以根据全反式叶黄素标准曲线进行定量分析。按照1.3.3.2节叶黄素顺反异构体C<sub>30</sub>-HPLC分析方法, 以进样量 (ng) 为横坐标、以相应的吸收峰面积为纵坐标, 得标准曲线回归方程为 $y=9.4207x-10.128$  ( $R^2=0.9997$ )。结果表明全反式叶黄素含量在4~260 ng范围内峰面积和进样量呈良好的线性关系。

## 2.2 面包制作过程中的稳定性

### 2.2.1 总叶黄素和全反式叶黄素的变化



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图2 加工过程对面包中叶黄素保留率的影响

Fig.2 Effects of bread processing steps on the retention rate of lutein

叶黄素强化面包制作过程对总叶黄素和全反式叶黄素保留率的影响如图2所示。和面、发酵、焙烤后的面包芯和面包皮中总叶黄素保留率分别为96.76%、91.36%、85.04%、50.24%, 全反式叶黄素保留率分别为91.88%、74.08%、59.40%、35.52%。说明每个加工工序对叶黄素的稳定性影响显著。和面和发酵过程中, 总叶黄素含量只下降了3.24%和5.40%, 全反式叶黄素下降了8.12%和17.80%, 说明和面和发酵过程对叶黄素的降解影响较小。发酵过程中有可能是酵母消耗氧气限制了脂肪氧

合酶活性, 从而减弱了叶黄素降解<sup>[17]</sup>。焙烤后的面包成品中面包皮和面包芯分别与发酵后的面团相比总叶黄素含量下降了41.12%和6.32%, 全反式叶黄素含量下降了38.56%和14.68%。说明焙烤过程对面包皮中叶黄素的降解影响较大。焙烤后总叶黄素含量的变化与Hidalgo等<sup>[11]</sup>的研究结果相类似。面包皮和面包芯降解程度差异很大, 主要与其温度耐受程度有关。在焙烤结束前面包皮温度一直维持在低于水的沸点<sup>[11]</sup>, 而面包皮接触面包机一直维持在180 °C。

### 2.2.2 顺式异构体的生成及含量变化

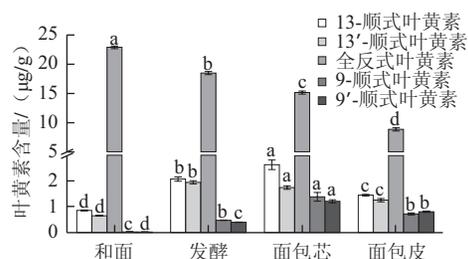


图3 加工过程对面包中叶黄素顺反异构体含量的影响

Fig.3 Effects of bread processing steps on the trans-cis-isomerization of lutein content

如图3所示, 在面包制作过程中, 随着全反式叶黄素含量的逐渐下降, 叶黄素顺式异构体含量在各制作工序中的变化也不相同。和面过程中, 先生成了少量的13-顺式和13'-顺式叶黄素。发酵过程中, 13-顺式和13'-顺式叶黄素含量分别由0.85、0.64 µg/g增加至2.07、1.94 µg/g, 同时也新生成了少量的9-顺式和9'-顺式叶黄素。发酵过程叶黄素各顺式异构体的显著增加 ( $P<0.05$ ), 可能是由于在50 °C左右较低温度条件下反应体系中反-顺叶黄素异构化大于顺式叶黄素降解反应, 以异构化反应为主<sup>[18]</sup>, 适当升高温度后, 反-顺叶黄素异构化反应的幅度加快<sup>[19]</sup>, 造成各顺式异构体的快速累积。焙烤后的面包成品, 面包芯和面包皮中13-顺式、13'-顺式、9-顺式、9'-顺式叶黄素含量分别2.63、1.74、1.37、0.71 µg/g和1.45、1.25、0.71、0.80 µg/g。面包皮中各顺反叶黄素异构体含量均显著低于面包芯中的各顺反叶黄素异构体含量 ( $P<0.05$ ), 这是因为焙烤过程中面包表面比面包内部受热温度高, 便于引起叶黄素反-顺异构化以及各顺反叶黄素异构体的热降解<sup>[20-21]</sup>。整个加工过程中, 13-顺式、13'-顺式叶黄素增加量始终高于9-顺式、9'-顺式叶黄素的增加量, 与Chen等<sup>[22]</sup>研究结果相吻合, 因为13-顺式、13'-顺式叶黄素中顺式双键附近的空间位阻小于9-顺式、9'-顺式叶黄素, 导致反式叶黄素形成13-顺式、13'-顺式叶黄素异构化反应所需要的活化能小于9-顺式、9'-顺式叶黄素, 使前者更易形成。

## 2.3 面包贮藏过程中叶黄素的变化

## 2.3.1 面包贮藏过程中叶黄素顺反异构体的变化

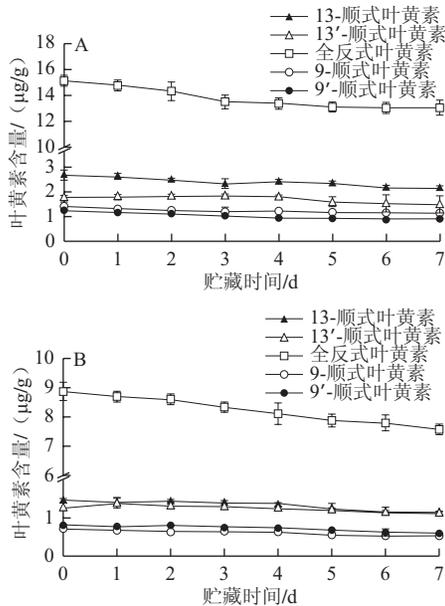


图4 面包芯(A)和面包皮(B)中叶黄素顺反异构体含量在贮藏过程中的变化

Fig.4 Evolution of trans-cis-isomerization of lutein content in bread core and bread crust during storage

如图4所示,整个贮藏过程中面包芯和面包皮中全反式叶黄素含量远远高于各顺式异构体的含量,4种顺式异构体含量大小顺序依次为:13-顺式>13'-顺式>9-顺式>9'-顺式叶黄素。全反式叶黄素含量均逐渐减少,13-顺式、13'-顺式、9-顺式、9'-顺式叶黄素含量变化不明显。全反式叶黄素保留率在前4d变化较大,第4天后基本稳定在52.68%~54.36%之间,而面包皮中全反式叶黄素一直呈下降趋势。刚制备的面包芯中13-顺式、13'-顺式、9-顺式、9'-顺式叶黄素含量依次为2.63、1.74、1.38、1.20 µg/g,贮藏第7天后依次为2.12、1.45、1.12、0.87 µg/g,各顺式异构体含量都略有降低。面包皮中13-顺式、13'-顺式、9-顺式、9'-顺式叶黄素含量依次为1.45、1.25、0.71、0.80 µg/g,贮藏7d后面包皮中依次为1.13、1.1、0.51、0.59 µg/g,变化趋势与面包芯基本相同,与肖亚东等<sup>[23]</sup>的研究一致。Lin等<sup>[24]</sup>指出番茄汁贮藏过程中叶黄素等类胡萝卜素的氧化降解与温度、光照和空气关系密切。分析原因可能是空气氧化了面包中的叶黄素,导致叶黄素含量的降低。焙烤后的面包芯中全反式叶黄素和总叶黄素的保留率分别为60.72%和86.40%,贮藏7d后为52.68%和72.76%,分别下降了8.04%和13.64%。焙烤后的面包皮中全反式叶黄素和总叶黄素的保留率为34.80%和49.52%,贮藏7d后为30.28%和41.52%,分别下降了5.24%和8.72%。Pott等<sup>[25]</sup>黑暗状态下干燥芒果片并未发现9-顺式-β-胡萝卜素的存在,升高

温度后13-顺式-β-胡萝卜素的相对含量增加,认为类胡萝卜素的物理状态也是引起异构化作用的主要因素。

## 2.3.2 面包贮藏过程中面包芯和面包皮色泽变化

表1 面包贮藏过程中色泽的变化  
Table 1 Color changes in bread during storage

贮藏时间/d	面包芯			面包皮		
	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
0	73.92±0.20 <sup>ab</sup>	9.27±0.25 <sup>a</sup>	38.84±0.60 <sup>ab</sup>	71.63±0.06 <sup>c</sup>	13.41±0.02 <sup>a</sup>	36.54±0.11 <sup>a</sup>
1	74.87±0.56 <sup>a</sup>	9.60±0.02 <sup>a</sup>	38.13±0.09 <sup>b</sup>	71.04±0.04 <sup>d</sup>	13.54±0.08 <sup>a</sup>	36.16±0.01 <sup>a</sup>
4	73.81±0.40 <sup>b</sup>	9.68±0.11 <sup>a</sup>	38.96±0.08 <sup>ab</sup>	71.36±0.01 <sup>d</sup>	13.57±0.20 <sup>a</sup>	36.09±0.15 <sup>a</sup>
7	74.90±0.21 <sup>a</sup>	9.44±0.12 <sup>a</sup>	39.45±0.09 <sup>a</sup>	71.08±0.75 <sup>d</sup>	13.02±0.49 <sup>a</sup>	35.69±0.66 <sup>a</sup>

注:同列肩标不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

色泽是评价食品外观质量的重要指标。贮藏过程中类胡萝卜素含量的降解会导致食品色泽的变化,这也将影响食品的货架期。从表1可知,贮藏过程中,面包皮的*L*\*值在71.04~71.63之间,面包芯的*L*\*值在73.92~74.90之间,表明面包皮的亮度值低于面包芯。面包焙烤会引起焦糖化和美拉德反应<sup>[26]</sup>,有可能是面包皮中焦糖化和美拉德反应程度高于面包芯中,因而面包皮褐变程度高于面包芯中。面包皮*a*\*值在13.02~13.57之间,面包芯*a*\*值在9.27~9.68之间,面包皮比面包芯红值大。Hidalgo等<sup>[26]</sup>研究了热处理对不同品种小麦面粉制成的饼干的色泽影响,结果均表明面粉的热损伤与*L*\*值呈负相关,与*a*\*值呈正相关。因此面包皮的*L*\*值比面包芯中的小,*a*\*值比面包中的大。面包芯*b*\*值在38.13~39.45之间,面包皮的*b*\*值在35.69~36.54之间,面包芯比面包皮黄值高。文献<sup>[27]</sup>表明,小麦中*b*\*值和叶黄素含量呈正相关,*L*\*值和*a*\*值几乎与叶黄素、(α+β)-胡萝卜素含量没有关系。分析原因是面包芯中叶黄素含量比面包皮中叶黄素含量高。贮藏1、4、7d后的面包中面包皮的*L*\*、*a*\*、*b*\*值分别与刚制备出的面包皮的*L*\*、*a*\*、*b*\*值相比,均无差异性( $P > 0.05$ ),与面包芯中一致。在整个贮藏过程中,面包色泽基本无变化。

## 3 结论

叶黄素强化面包整个加工和贮藏过程都伴随着叶黄素异构体的生成和含量变化。和面过程中生成了少量的13-顺式和13'-顺式叶黄素,发酵过程还生成了少量的9-顺式和9'-顺式叶黄素,焙烤过程面包皮和面包芯中13-顺式、13'-顺式、9-顺式、9'-顺式叶黄素含量显著增加,贮藏过程中叶黄素顺式异构体含量变化不明显。和面、发酵过程对叶黄素降解影响很小,焙烤过程对面包皮中叶黄素降解影响很大,但对面包芯中影响较小。贮藏过程对叶黄素影响不大,色泽值基本无变化。尽管强化面包中叶黄素明显减少,但是每份面包经7d贮藏后面包皮和面包皮中仍然保留有72.76%和41.52%的总叶黄素能满足每日的摄取和消耗。

## 参考文献:

- [1] ALVES-RODRIGUES A, SHAO A. The science behind lutein[J]. *Toxicology Letters*, 2004, 150(1): 57-83.
- [2] WANG M, TSAO R, ZHANG S, et al. Antioxidant activity, mutagenicity/anti-mutagenicity, and clastogenicity/anti-clastogenicity of lutein from marigold flowers[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44(9): 1522-1529.
- [3] STAHL W, SIES H. Antioxidant activity of carotenoids[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2003, 24(6): 345-351.
- [4] 李大婧, 刘春泉, 白云峰, 等. 叶黄素, 玉米黄质研究进展[J]. *核农学报*, 2006, 20(1): 64-67.
- [5] WANG L, LI B, PAN M X, et al. Specific carotenoid intake is inversely associated with the risk of breast cancer among Chinese women[J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, 111(9): 1686-1695.
- [6] RICHER S, STILES W, STATKUTE L, et al. Double-masked, placebo-controlled, randomized trial of lutein and antioxidant supplementation in the intervention of atrophic age-related macular degeneration: the Veterans LAST study (Lutein Antioxidant Supplementation Trial)[J]. *Optometry-Journal of the American Optometric Association*, 2004, 75(4): 216-229.
- [7] CURCIO C A, JOHNSON M, HUANG J, et al. Aging, age-related macular degeneration, and the response-to-retention of apolipoprotein B-containing lipoproteins[J]. *Progress in Retinal and Eye Research*, 2009, 28(6): 393-422.
- [8] GIOVANNUCCI E, ASCHERIO A, RIMM E B, et al. Intake of carotenoids and retino in relation to risk of prostate cancer[J]. *Journal of the National Cancer Institute*, 1995, 87(23): 1767-1776.
- [9] TOKUŞOĞLU Ö. The physicochemical, microbiological, organoleptic properties and antioxidant activities of functional cream cheeses fortified with lutein[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2013, 66(4): 527-534.
- [10] ARYANA K J, BARNES H T, EMMICK T K, et al. Lutein is stable in strawberry yogurt and does not affect its characteristics[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(Suppl 6): 467-472.
- [11] HIDALGO A, BRANDOLINI A, POMPEI C. Carotenoids evolution during pasta, bread and water biscuit preparation from wheat flours[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(3): 746-751.
- [12] ABDEL-AAL E M, YOUNG J C, AKHTAR H, et al. Stability of lutein in wholegrain bakery products naturally high in lutein or fortified with free lutein[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(18): 10109-10117.
- [13] 李大婧, 王闯, 徐爱琴, 等. 叶黄素的制备及制剂化研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(5): 231-233.
- [14] 王闯, 宋江峰, 李大婧, 等. 叶黄素微胶囊化研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 43-47.
- [15] ABDEL-AAL E M, RABALSKI I. Effect of baking on free and bound phenolic acids in wholegrain bakery products[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 312-318.
- [16] 李大婧, 王闯, 徐爱琴, 等. 高效液相色谱法测定叶黄素顺, 反异构体[J]. *食品科学*, 2012, 33(22): 186-190.
- [17] LEENHARDT F, LYAN B, ROCK E, et al. Wheat lipoxigenase activity induces greater loss of carotenoids than vitamin E during breadmaking[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(5): 1710-1715.
- [18] AMAN R, BIEHL J, CARLE R, et al. Application of HPLC coupled with DAD, APcI-MS and NMR to the analysis of lutein and zeaxanthin stereoisomers in thermally processed vegetables[J]. *Food Chemistry*, 2005, 92(4): 753-763.
- [19] 庞慧丽, 李大婧, 刘春泉. 叶黄素在有机溶剂中的稳定性[J]. *食品科学*, 2013, 34(23): 15-19.
- [20] 庞慧丽, 李大婧, 刘春泉. 在高温油脂中叶黄素的热降解动力学[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(18): 147-151.
- [21] HIDALGO A, BRANDOLINI A. Tocols stability during bread, water biscuit and pasta processing from wheat flours[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 52(2): 254-259.
- [22] CHEN H E, PENG H Y, CHEN B H. Stability of carotenoids and vitamin A during storage of carrot juice[J]. *Food Chemistry*, 1996, 57(4): 497-503.
- [23] 肖亚冬, 李大婧, 刘春泉. 冻干甜玉米粒贮藏过程中玉米黄质稳定性分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(6): 229-233.
- [24] LIN C H, CHEN B H. Stability of carotenoids in tomato juice during storage[J]. *Food Chemistry*, 2005, 90(4): 837-846.
- [25] POTT I, MARX M, NEIDHART S, et al. Quantitative determination of beta-carotene stereoisomers in fresh, dried, and solar-dried mangoes (*Mangifera indica* L.).[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(16): 4527-4531.
- [26] HIDALGO A, BRANDOLINI A. Heat damage of water biscuits from einkorn, durum and bread wheat flours[J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(2): 471-478.
- [27] HUMPHRIES J M, GRAHAM R D, MARES D J. Application of reflectance colour measurement to the estimation of carotene and lutein content in wheat and triticale[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(2): 151-159.