

# 采后小白菜叶绿体色素含量变化及其 叶绿素降解动力学研究

乔勇进<sup>1\*</sup>, 张辉<sup>1</sup>, 唐坚<sup>2</sup>, 张娜娜<sup>2</sup>, 马丽<sup>1</sup>

(1. 上海市农业科学院农产品保鲜加工研究中心, 上海 201403;

2. 上海师范大学植物种质资源开发中心, 上海 200234)

**摘要:** **目的** 探究采后小白菜贮藏过程中叶绿体色素的代谢变化及其叶绿素降解的动力学模型。**方法** 以采后“上海青”小白菜为试材, 分别将其贮藏于室温(20 ℃)、低温(2 ℃)及冰温(-0.5 ℃)条件下, 研究其总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b、 $\beta$ -胡萝卜素及叶黄素的代谢变化, 并对其叶绿素的降解进行动力学模型拟合。**结果** 采后小白菜贮藏过程中总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b、 $\beta$ -胡萝卜素和叶黄素均发生不同程度的降解, 低温和冰温贮藏均可减缓其降解, 其中冰温贮藏减缓效果最佳。叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值、 $\beta$ -胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值以及室温贮藏条件下叶黄素含量与总叶绿素含量的比值均呈现不同程度的上升趋势, 而低温和冰温贮藏环境中的叶黄素含量与总叶绿素含量的比值总体则呈现下降趋势, 但贮藏 6 d 后下降不显著。此外, 叶绿素的降解反应符合零级动力学反应模型, 拟合调整决定系数( $Adj.R^2$ )均大于 0.93, 降解活化能为 95.53 kJ/mol, 降解动力学模型为  $k=6.51 \times 10^{15} \cdot \exp(9.553 \times 10^4/RT)$ 。**结论** 采后小白菜贮藏过程中叶绿体色素的代谢变化受贮藏温度影响较大, 其叶绿素降解反应符合零级动力学反应模型。

**关键词:** 叶绿体色素; 小白菜; 动力学模型; Arrhenius 方程

## Research on chloroplast pigment metabolism and chlorophyll degradation dynamics of post-harvest pakchoi(*Brassica chinensis* L.)

QIAO Yong-Jin<sup>1\*</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, TANG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Na-Na<sup>2</sup>, MA Li<sup>1</sup>

(1. Agro-product storage and Processing Institute, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201403, China;  
2. Plant Idioplasm Resources Development Center, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the chloroplast pigment metabolism and chlorophyll degradation kinetic model of post-harvest pakchoi in the process of storage. **Methods** The post-harvest pakchoi(Shanghai qing)was selected as materials. They were stored at room temperature (20 ℃), low temperature (2 ℃) and ice temperature (-0.5 ℃), and the metabolic changes of their total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b,  $\beta$ -carotene and xanthophyll were studied. The kinetic model of chlorophyll degradation was studied. **Results** The total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b,  $\beta$ -carotene and xanthophyll of post-harvest pakchoi were all degraded at certain degrees in the process of storage, and the low temperature and ice temperature

基金项目: 植物种质资源开发中心基金项目

**Fund:** Supported by the Funds of Plant Idioplasm Resources Development Center

\*通讯作者: 乔勇进, 研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: yjqiao2002@126.com

\*Corresponding author: QIAO Yong-Jin, Ph.D, Professor, Agro-product storage and Processing Institute, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201403, China. E-mail: yjqiao2002@126.com

could slow down their degeneration. The effect of ice temperature storage on the degradation was best. The ratios of chlorophyll a content to chlorophyll b content,  $\beta$ -carotene content to total chlorophyll content and the ratio of xanthophyll content to total chlorophyll content at room temperature had an upward tendency at certain levels, while the ratio of xanthophyll content to total chlorophyll content at low temperature and ice temperature had a downward trend during the storage, and the downward trend was not significant after 6 d. In addition, the chlorophyll degradation reaction was accorded with the characteristics of zero order kinetic model, and fitting adjusted coefficient of determination ( $Adj.R^2$ ) were all above 0.93, the degradation activation energy was 95.53 kJ/mol, the degradation kinetic model was  $k=6.51 \times 10^{15} \cdot \exp(9.553 \times 10^4/RT)$ . **Conclusion** The chloroplast pigment metabolism of post-harvest pakchoi in the process of storage was largely influenced by the storage temperature, and its chlorophyll degradation reaction was accorded with zero order kinetic model.

**KEY WORDS:** chloroplast pigment; pakchoi; kinetic model; Arrhenius equation

小白菜(*Brassica chinensis* L.)又名不结球白菜,属于十字花科(*Cruciferae*)、芸薹属(*Brassica*),其富含维生素、矿物质及类胡萝卜素等营养功能成分,深受人们青睐。但采后的小白菜容易褪绿黄化,失去原有色泽,造成其感官品质严重下降。绿叶菜采后黄化现象已成为贮运中急需解决的关键难题,也成为广大学者研究的焦点。费斐等<sup>[1]</sup>研究了冷藏温度和薄膜半封闭包装对小白菜贮藏过程中黄化的影响,其结果表明较低冷藏温度(0~2 °C)和薄膜半封闭包装相结合可有效控制小白菜黄化率。朱军伟等<sup>[2]</sup>研究表明 0 °C 贮藏可有效减缓菠菜贮藏过程中叶绿素的损失。焦莉等<sup>[3]</sup>通过研究发现赤霉素可以减少生菜贮藏期间的叶绿素损失,维持其外观品质。目前,大多针对绿叶菜采后贮藏中护绿技术的研究均聚焦在叶绿素的代谢变化上,而对影响绿叶菜黄化的另一因素—类胡萝卜素的代谢变化的研究性报道较少。近年来,反应动力学理论已逐渐运用于食品加工及贮藏过程中营养功能成分降解的研究中。Bosch 等<sup>[4]</sup>研究了一种婴幼儿水果食品 beikost 的抗坏血酸降解动力学特征,结果表明其符合阿仑尼乌斯一级动力学反应模型,降解活化能为(20.11±0.33) kcal·mol<sup>-1</sup>。Gonçalves 等<sup>[5]</sup>研究了花椰菜冷冻贮藏过程中色泽变化的动力学特征,并通过动力学模型对其贮藏于-18 °C 恒温条件下的货架期进行了预测。而关于小白菜采后贮藏中叶绿素降解动力学模型的研究未见报道。本实验以采后“上海青”小白菜为试验材料,通过分析其在贮藏过程中总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b、 $\beta$ -胡萝卜素和叶黄素的含量变化以及其叶绿素降解的动力学参数,探究采后小白菜贮藏过程中叶绿体色素的代谢变化

规律及其叶绿素降解动力学模型,以期为采后小白菜护绿技术的提升及贮藏品质的提高提供理论参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试小白菜品种为“上海青”,采摘于上海市农业科学院蔬菜种植基地,采收后立刻运回实验室,于 4 °C 冷库中预冷 12 h。选取无病虫害、无机械损伤及成熟度一致的小白菜作为试验材料。

### 1.2 仪器与设备

LHS-80HC 恒温恒湿培养箱(上海捷呈实验仪器有限公司); N-1 $\alpha$  手持折光仪(日本 ATAGO 公司); Ultrospec 3300 pro 紫外分光光度计(美国安玛西亚公司); D37520 Osterode 高速冷冻离心机(德国 Biofuge 公司); KK29E-18T1 型冰箱(德国 SIEMENS 公司); BP301S 型电子天平(德国赛多利斯公司)。

### 1.3 试验方法

将经预冷、挑选后的小白菜,去除死叶、黄叶,并将其随机分为 3 组,每组处理设 4 个平行样品,每个样品质量为 200 g 左右。将样品置于聚乙烯(PE)托盘上,并用聚丙烯(OPP)保鲜袋进行包装。根据前期实验结果,分别将包装后的样品置于室温(20 °C)、低温(2 °C)及冰温(-0.5 °C)条件下进行贮藏(相对湿度为 85%~90%)。每隔 3 d 取样进行相关指标的测定。

### 1.4 指标的测定

总叶绿素含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量参

照曹健康方法进行测定<sup>[6]</sup>； $\beta$ -胡萝卜素含量参照刘晓燕方法进行测定<sup>[7]</sup>；叶黄素含量参照夏祎稚方法进行测定<sup>[8]</sup>。

### 1.5 数据统计及处理

采用 Excel 2010 进行数据统计，所有数据为 4 次重复实验的平均值和标准误差。采用 SPSS 19.0 对数据进行新复极差法多重差异显著分析和  $t$  检验。采用 Origin 8.0 绘制相关数据图形及对叶绿素降解动力学模型进行拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 总叶绿素及叶绿素 a、b、a/b 的含量变化

小白菜叶绿素含量包括总叶绿素含量、叶绿素 a

含量及叶绿素 b 含量。采后小白菜在贮藏过程中叶绿素合成作用停止，呼吸代谢仍较为旺盛，随着贮藏时间延长，叶绿素逐渐被分解而使绿色消退，从而导致黄化，故叶绿素含量是评价小白菜色泽品质的重要标志。由图 1a、1b、1c 可知，各贮藏温度下总叶绿素含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量随着贮藏时间延长，均呈现逐渐下降的趋势，其中室温贮藏条件下 3 种色素均下降剧烈，在贮藏第 6 d 几乎检测不到；而低温和冰温贮藏条件下，3 种色素下降较为缓慢。此外，低温和冰温贮藏条件下的总叶绿素含量和叶绿素 a 含量在贮藏 6 d 后呈现显著性差异( $P < 0.05$ )，叶绿素 b 含量在贮藏 9 d 后呈现显著性差异( $P < 0.05$ )。由此可见，小白菜在采后其叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 均发生降解，降低温度可减缓其降解，且

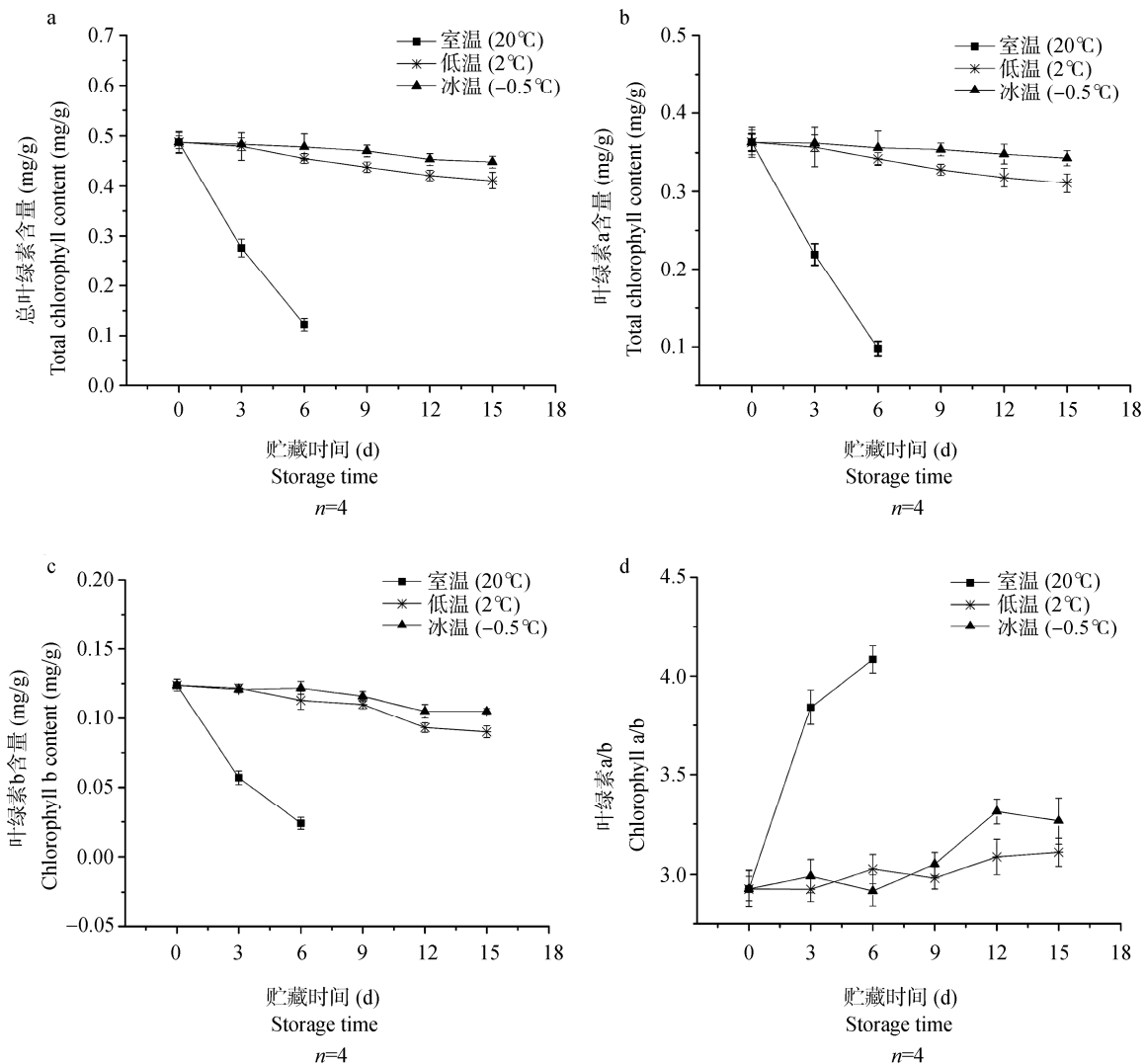


图 1 小白菜贮藏过程中叶绿素的代谢变化

Fig. 1 Chlorophyll metabolism of post-harvest pakchoi in the process of storage

冰温贮藏环境中降解最为缓慢。图 1d 表明小白菜室温贮藏过程中叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的比值呈急剧上升趋势, 其值在贮藏第 6 d 达到峰值(4.08)。低温贮藏条件下二者比值无显著性( $P>0.05$ )变化; 而在冰温贮藏 6 d 后二者比值显著增加( $P<0.05$ ), 并在贮藏第 12 d 达到峰值(3.31)。这表明在贮藏后期冰温贮藏环境对小白菜叶绿素 a 降解的减缓效果比叶绿素 b 降解的减缓效果更为明显。

### 2.2 $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素的含量变化

图 2a 表明, 室温和低温贮藏过程中小白菜的  $\beta$ -胡萝卜素含量均呈下降的趋势, 其中室温贮藏下降明显( $P<0.05$ )。而冰温贮藏前 6 d 的小白菜, 其  $\beta$ -胡萝卜素含量略微下降, 后期又呈现缓慢上升趋势, 且其含量在贮藏 12 d 后显著高于室温和低温贮藏组

( $P<0.05$ )。图 2b 表明, 采后小白菜在贮藏过程中其叶黄素含量显著降低, 其中低温贮藏组和冰温贮藏组的叶黄素含量在整个贮藏过程中无显著性差异, 但二者均显著高于室温贮藏组。图 2c、2d 表明, 室温贮藏小白菜的  $\beta$ -胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值及叶黄素含量与总叶绿素含量的比值均呈显著上升趋势( $P<0.05$ )。低温贮藏和冰温贮藏过程中采后小白菜的  $\beta$ -胡萝卜素含量与叶绿素含量的比值无显著性变化, 而叶黄素含量与总叶绿素含量的比值在贮藏前 6 d 均显著下降( $P<0.05$ ), 而后均无显著变化。整个贮藏过程中冰温贮藏组的  $\beta$ -胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值及叶黄素含量与总叶绿素含量的比值均高于低温贮藏组, 但二者之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

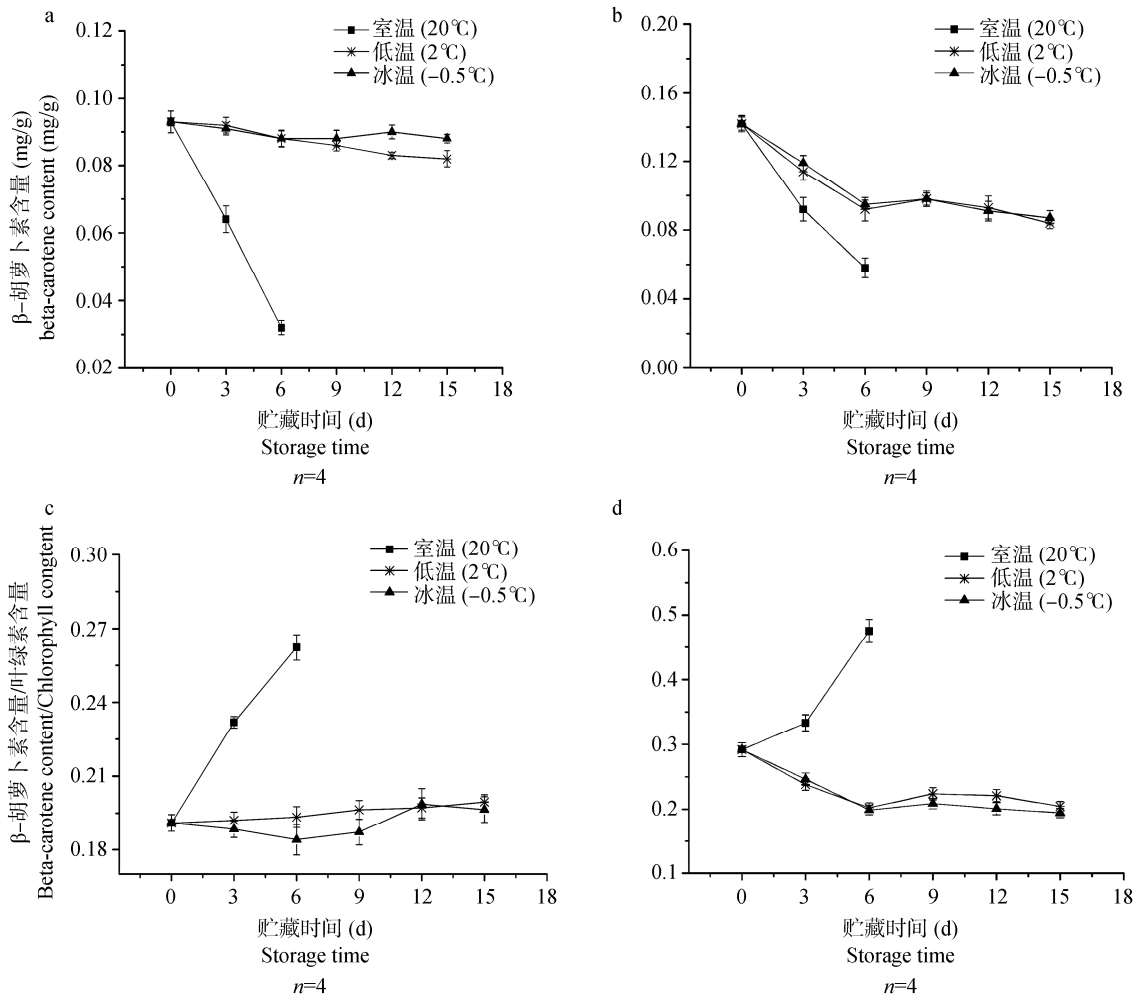


图 2 小白菜贮藏过程中  $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素的代谢变化

Fig. 2  $\beta$ -carotene and xanthophyll metabolism of post-harvest pakchoi in the process of storage

## 2.3 叶绿素降解的动力学

### 2.3.1 动力学模型拟合

采后小白菜贮藏过程中的叶绿素降解速度可用式 1 表示<sup>[9-10]</sup>, 对式 1 进行零级动力学模型变形, 可得式 2, 模型拟合结果见表 1。

$$\frac{dA_t}{dt} = -kA_t^n \quad (1)$$

$$\int_{A_0}^{A_t} dA_t = \int_0^t k dt \Rightarrow A_t = A_0 - kt \quad (2)$$

式中:  $t$ —小白菜贮藏时间, d;  $A_t$ —小白菜贮藏第  $t$  天的叶绿素含量;  $k$ —小白菜叶绿素降解速率常数,  $d^{-1}$ ;  $n$ —动力学反应模型的级数。

由表 1 可知, 各拟合调整决定系数( $Adj. R^2$ )均大于 0.93, 说明拟合度较高, 拟合结果可解释 93% 以上的实验数据变异性。此外, 各模型显著性均达到显著性水平( $P < 0.05$ )。故小白菜采后贮藏过程中叶绿素的降解反应符合零级动力学反应模型。由表 1 还可看出, 低温贮藏和冰温贮藏可有效减缓叶绿素的降解, 其降解速率常数比室温贮藏分别减少了 10.28、18.89 倍。

### 2.3.2 Arrhenius 方程拟合

Arrhenius 方程(式 3)可用于描绘降解反应速率常数随贮藏温度的变化关系<sup>[11-12]</sup>。

$$k = A \cdot \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

式中:  $k$ —降解速率常数,  $d^{-1}$ ;  $A$ —指前因子;  $E_a$ —降解反应活化能,  $J \cdot mol^{-1}$ ;  $R$ —气体常数,  $8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $T$ —绝对温度, K。

对小白菜叶绿素降解反应的绝对温度倒数  $T^{-1}$  和速率常数的对数值  $\ln k$  分别进行线性拟合(图 3), 可得到 Arrhenius 方程参数(表 2)<sup>[13]</sup>。

由表 2 可知, 调整决定系数( $Adj. R^2$ )为 0.9892, 这表明 Arrhenius 方程具有很高的拟和精度。图 3 中拟合直线斜率可反映叶绿素降解活化能  $E_a$  的大小。由图 3 可知, 活化能  $E_a$  一定时, 温度降低, 降解反应速

度减缓。通常认为  $E_a$  大小为  $40 \sim 400 kJ \cdot mol^{-1}$ ,  $E_a$  越小, 反应越易进行。当  $E_a < 42 kJ \cdot mol^{-1}$ , 反应速率非常大;  $E_a > 400 kJ \cdot mol^{-1}$ , 反应速率非常小<sup>[14]</sup>。小白菜在采后贮藏过程中叶绿素降解反应活化能为  $95.53 kJ \cdot mol^{-1}$ , 故其易发生降解。

## 3 讨论

### 3.1 叶绿体色素的含量变化

小白菜叶绿体色素主要包含叶绿素和类胡萝卜素两大类, 其在小白菜采后贮藏过程的代谢变化对小白菜色泽影响较大。张京芳等<sup>[15]</sup>研究表明, 脱水芥菜和蕨菜在贮藏过程中  $\beta$ -胡萝卜素含量降低, 且常温贮藏较冷藏时  $\beta$ -胡萝卜素更易损失。这与本研究结果较为一致。关于小白菜采后贮藏过程中营养成分代谢变化的研究较为广泛<sup>[1,16]</sup>, 而对于其叶绿体色素的代谢变化未见有研究性报道。本研究发现小白菜采后室温贮藏过程中叶绿体色素均呈现急剧下降趋势, 而  $\beta$ -胡萝卜素含量和总叶绿素含量的比值及叶黄素含量和总叶绿素含量的比值则呈现剧烈上升趋势, 从而导致了小白菜采后室温贮藏中黄化较为迅速。小白菜采后低温和冰温贮藏过程中叶绿体色素的降解缓慢, 且贮藏过程中  $\beta$ -胡萝卜素含量和总叶绿素含量的比值无显著性变化, 此外叶黄素含量和总叶绿素含量的比值呈现下降趋势。这表明采后小白菜贮藏过程中色泽变黄可能是由于叶绿素(总叶绿素、叶绿素 a 及叶绿素 b)的降解, 叶黄素和胡萝卜素的显现所造成。而低温和冰温贮藏均可有效维持小白菜叶绿体色素原有比例, 从而保持其原有色泽, 且其中冰温贮藏保持效果最好。本研究可为小白菜采后贮藏护绿技术的完善与提升提供一定参考依据。然而叶绿体色素的代谢变化规律是复杂的, 受多方面因素影响, 应综合各方面的实验事实和资料, 进行全面分析, 才可对其变化规律有较为正确深刻的理解。

表 1 采后小白菜叶绿素的降解动力学参数

Table 1 Degradation kinetic parameters of chlorophyll in post-harvest pakchoi

贮藏温度( $^{\circ}C$ )	速率常数 $k$ ( $d^{-1}$ )	模型拟合决定系数( $Adj. R^2$ )	模型显著性( $Prob > F$ )
20	0.0608	0.99025	0.04449 *
2	0.00539	0.98487	< 0.001**
-0.5	0.00291	0.93859	< 0.001**

注: \*表示模型显著; \*\*表示模型极显著。

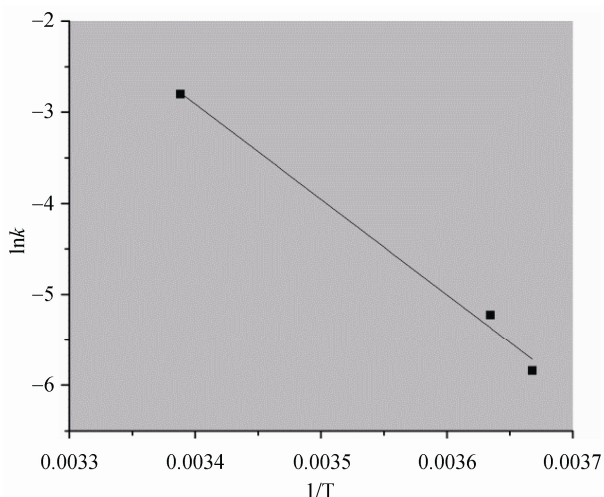


图 3 采后小白菜贮藏过程中叶绿素降解的 Arrhenius 拟合图

Fig. 3 Arrhenius fitting plot of chlorophyll in post-harvest pakchoi

表 2 采后小白菜贮藏过程中叶绿素降解的 Arrhenius 方程拟合参数

Table 2 Arrhenius fitting parameters of chlorophyll in post-harvest pakchoi

$E_a$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	Arrhenius 方程	调整决定系数
95.53	$k=6.51 \times 10^{15} \cdot \exp(9.553 \times 10^4/RT)$	0.9892

### 3.2 叶绿素降解的动力学模型

小白菜采后叶绿素降解的动力学研究可为探究其降解机制及预测小白菜采后贮藏期提供理论依据。谢晶等<sup>[17]</sup>通过对贮藏于 5、10、15、20 °C 条件下的上海青蔬菜的叶绿素含量变化分别进行零级和一级动力学拟合,发现零级动力学模型具有更好的拟合效果,这与本研究结果一致。刁恩杰等<sup>[18]</sup>研究发现未经热烫和经热烫处理后冻干菠菜叶绿素降解的活化能分别为 39.99 kJ/mol 和 41.44 kJ/mol。这与本研究有一定差异,可能是由于原料种类及前处理方式的差异性所造成。虽然关于叶绿素降解的动力学研究已在绿叶菜贮藏及加工的过程中有所报道<sup>[19]</sup>,而对于小白菜采后贮藏中叶绿素的降解动力学研究尚未发现<sup>[20]</sup>。本研究发现采后小白菜贮藏过程中叶绿素降解符合零级动力学模型,降解速率常数随贮藏温度的降低而减小,降解活化能为 95.53 kJ/mol,降解动力学模型为  $k=6.51 \times 10^{15} \cdot \exp(9.553 \times 10^4/RT)$ 。此外,室温贮藏下小白菜叶绿素降解的速率常数分别是低

温贮藏和冰温贮藏的 11.28 倍和 20.89 倍。这表明小白菜采后进行冰温贮藏可有效延缓其叶绿素降解,维持其原有色泽。

## 4 结 论

小白菜采后贮藏过程中总叶绿素含量、叶绿素 a、叶绿素 b、β-胡萝卜素和叶黄素均发生不同程度的降解,降低温度可减缓其降解。叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值、β-胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值以及室温贮藏条件下叶黄素含量与总叶绿素含量的比值均呈现不同程度的上升趋势,而低温和冰温贮藏环境中的叶黄素含量与总叶绿素含量的比值则呈现下降趋势。故,采后小白菜在不发生冻害及冷害的前提下,需要将其在尽可能低的温度环境中贮藏。此外,采后小白菜贮藏过程中叶绿素的降解反应符合零级动力学反应模型,降解活化能为 95.53 kJ/mol,降解动力学模型为  $k=6.51 \times 10^{15} \cdot \exp(9.553 \times 10^4/RT)$ 。这可为小白菜采后贮藏过程中护绿技术及贮藏品质的提升提供参考依据。

## 参考文献

- [1] 费斐, 侯建设, 田莹, 等. 冷藏温度和薄膜半封闭包装对小白菜贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(5): 157-159. Fei F, Hou JS, Tian Y, et al. Effect of cold storage temperature and film semi-sealed packaging on storage qualities of Chinese cabbage [J]. Food Res Dev, 2010, 31(5): 157-159.
- [2] 朱军伟, 谢晶, 林永艳, 等. 贮藏温度对薄膜包装菠菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 226-228. Zhu JW, Xie J, Lin YY, et al. Effect of storage temperature on quality of film packaged spinach [J]. Food Mach, 2011, 27(6): 226-228.
- [3] 焦莉, 王大平. 赤霉素对生菜保鲜的品质影响研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(1): 336-337. Jiao L, Wang DP. Effects of gibberellin on the quality of lettuce in storage [J]. J Anhui Agr Sci, 2013, 41(1): 336-337.
- [4] Bosch V, Cilla A, García-Llatas G, et al. Kinetics of ascorbic acid degradation in fruit-based infant foods during storage[J]. J Food Eng, 2013, 116(2): 298-303.
- [5] Gonçalves EM, Abreu M, Brandã TR, et al. Degradation kinetics of colour, vitamin c and drip loss in frozen Broccoli (*Brassica Oleracea* L. Ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions[J]. Int J Refrig, 2011, 34(8): 2136-2144.
- [6] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M].

- 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- Cao JK, Jiang WB, Zhao YM. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [7] 刘晓燕, 陈章鑫, 姜黎. 新鲜蔬菜中 $\beta$ -胡萝卜素提取和测定的研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2009, 28(2): 46-50.
- Liu XY, Chen ZX, Jiang L. Study on extraction and determination of  $\beta$ -carotene in fresh vegetables[J]. J Mianyang Norm Univ, 2009, 28(2): 46-50.
- [8] 夏祎稚, 邵卫樑. 叶黄素热稳定性及热降解动力学研究[J]. 安徽医药, 2012, 16(7): 890-893.
- Xia YZ, Shao WL. Thermal stability and degradation kinetics of lutein[J]. Anhui Med Pharm J, 2012, 16(7): 890-893.
- [9] Olivera DF, Salvadori VO. Kinetic modeling of quality changes of chilled ready to serve lasagna[J]. J Food Eng, 2012, 110(3): 487-492.
- [10] Nisha P, Singhal RS, Pandit AB. A study on degradation kinetics of niacin in potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. J Food Compos Anal, 2009, 22(6): 620-624.
- [11] Hidalgo A, Brandolini A, Pompei C. Kinetics of tocopherols degradation during the storage of einkorn (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) and bread wheat (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) flours[J]. Food Chem, 2009, 116(4): 821-827.
- [12] Derossi A, De PT, Fiore AG. Vitamin C kinetic degradation of strawberry juice stored under non-isothermal conditions[J]. LWT-Food Sci Technol, 2010, 43(4): 590-595.
- [13] Jirasatid S, Nopharatana M, Kitsubun P, et al. Degradation kinetics of Monacolin K in red yeast rice powder using mutiresponse modeling approach[J]. J Food Eng, 2013, 116(2): 436-443.
- [14] 王梦泽, 薛少平, 王佳, 等. 草莓浑浊汁维生素 C 降解动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 353-357.
- Wang MZ, Xue SP, Wang J, et al. Thermal degradation dynamic model of vitamin C in cloudy strawberry juice during storage[J]. Trans CSAE, 2010, 26(3): 353-357.
- [15] 张京芳, 陈锦屏, 饶国华. 干燥条件对绿色叶菜质量的影响[J]. 食品工业科技, 2002, 23(6): 23-24, 27.
- Zhang JF, Chen JP, Rao GH. Effect of drying condition on quality of green vegetables[J]. Sci Technol Food Ind, 2002, 23(6): 23-24, 27.
- [16] 侯建设, 席均芳, 余挺, 等. 温度、机械伤和采收期对小白菜的采后生理的影响[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(10): 42-46.
- Hou JS, Xi YF, Yu T, et al. Effects of storage temperature, mechanical wound and harvest period on postharvest physiology of Chinese cabbage[J]. Food Fermentation Ind, 2002, 28(10): 42-46.
- [17] 谢晶, 张利平, 苏辉, 等. 上海青蔬菜的品质变化动力学模型及货架期预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 271-278.
- Xie J, Zhang LP, Su H, et al. Quality kinetic model and shelf life prediction of green vegetable (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. Trans Chin Soc Agr Eng, 2013, 29(15): 271-278.
- [18] 刁恩杰, 李向阳, 丁晓雯. 脱水菠菜贮藏过程中颜色变化动力学[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 350.
- Diao EJ, Li XY, Ding XW. Kinetics of colour changes of dehydrated spinach during storage[J]. Trans Chin Soc Agr Eng, 2010, 26(8): 350.
- [19] 王冬梅, 马越, 王丹, 等. 真空干燥过程中甘蓝叶绿素降解动力学的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 69-72.
- Wang DM, Ma Y, Wang D, et al. Kinetic modeling of chlorophyll degradation in cabbages during vacuum drying[J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(17): 69-72.
- [20] 黄持都, 陈计恋, 胡小松, 等. 光对采后果蔬叶绿素降解动力学研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 233-238.
- Huang CD, Chen JL, Hu XS, et al. Kinetics for photo-degradation of chlorophyll in postharvest fruit and vegetable[J]. Trans Chin Soc Agr Eng, 2008, 24(10): 233-238.

(责任编辑: 赵静)

## 作者简介



乔勇进, 研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: yjqiao2002@126.com