

# 溶液 pH 对番茄红素稳定性及其降解动力学研究

赵文红, 严婷婷, 尹文婷, 谢岩黎

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 番茄红素易受溶剂环境的影响造成损失。为揭示溶液环境对番茄红素稳定性的影响规律, 本文基于紫外可见吸收光谱的变化研究了二甲基亚砜、四氢呋喃、丙酮等不同溶剂种类、比例及酸碱度对番茄红素紫外可见吸收光谱及其吸收强度的影响, 并进行降解动力学研究。结果显示: 番茄红素在四氢呋喃和二甲基亚砜溶剂中的特征吸收波长与其在丙酮溶剂相比红移, 吸收峰 3 的波长由 505 nm 分别红移至 511 nm 和 523 nm; 番茄红素在有机溶剂水溶液体系中均呈 H 型聚集, 光谱表现为吸收波长蓝移; 番茄红素在有机溶剂中的降解均符合一级反应动力学, 其在丙酮水溶液中的半衰期为 25.48 h; 番茄红素在弱酸和弱碱性条件下更稳定。结果表明: 弱酸性或弱碱性的丙酮和四氢呋喃水溶液可作为番茄红素的良好溶剂, 本研究为番茄类食品的储藏、加工及开发应用奠定理论基础。

**关键词:** 番茄红素; 酸碱度; 紫外可见吸收光谱; 降解动力学; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2020)01-178-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.1.025

## Effect of pH on the Lycopene Stability and Its Degradation Kinetics

ZHAO Wen-hong, YAN Ting-ting, YIN Wen-ting, XIE Yan-li

(School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Lycopene is susceptible to degradation affected by light, oxygen, heat, solvents and its environment. In order to investigate the effect of solution environment on lycopene stability, the UV-vis spectroscopy character of lycopene with different solvents and its degradation kinetics were analyzed in this work. The solvents were including dimethyl sulfoxide (DMSO), tetrahydrofuran (THF) and acetone. The results showed that the characteristic wavelength of lycopene in different solvents appeared the redshift distribution from acetone of 505 nm to DMSO of 511 nm and THF of 523 nm in UV-vis spectroscopy. Lycopene represented as H-type aggregation and observed the blue shift of the maximum of UV absorption peak in water-organic solvent. The experimental results of degradation kinetics showed that the degradation of lycopene in different solvents conformed to first-order reaction law, and it was stable in acetone solvent with a half-life of 25.48 h. The lycopene were stable in acidic and alkane media, but limitedly resistant to strong acid and alkali solution and strong solvent. These results indicated that lycopene was suitable for keeping stability under weak acid and alkane media of acetone and THF aqueous solutions. This study provided a theoretical basis for processing, packaging, and storage of tomato products.

**Key words:** lycopene; pH; UV-visible spectroscopy; degradation kinetics; stability

番茄红素具有异戊二烯类化合物结构, 其特征链式结构中含有 13 个不饱和双键 (图 1), 是一种具有功能性的天然类胡萝卜素。基于其多双键结构, 番茄红素具有强抗氧化活性, 能够淬灭活性氧<sup>[1,2]</sup>、消除人体自由基<sup>[3]</sup>、增强机体免疫<sup>[4]</sup>等作用。此外, 流行病学调查显示膳食摄入番茄红素及其制品可有效降低血浆 LDL-胆固醇酯<sup>[5]</sup>、延缓动脉粥样硬化<sup>[5]</sup>、保护心血管<sup>[3,6]</sup>并预防多种癌症<sup>[7,8]</sup>的发生。目前, 番茄红素以食品添加剂、医药原料等形式应用于食品和保健食品领域, 是一种很有发展前途的新型功能性天然色素。

收稿日期: 2019-08-18

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2016YFD0400200); 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室开放基金 (KL-2018-18)

作者简介: 赵文红 (1982-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品化学与营养

通讯作者: 谢岩黎 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全

但经提取纯化的番茄红素易受到环境因素影响造成分解及损失。已有研究表明氧气<sup>[9,10]</sup>、光照<sup>[11]</sup>、温度等都可能引起番茄红素的氧化降解。许庆陵等人<sup>[12]</sup>发现番茄红素对光、高温、强酸及 Fe<sup>3+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 不稳定; 蔡基智<sup>[13]</sup>等人也研究发现高温和强酸性条件会破坏番茄红素。但这些研究主要针对番茄红素稳定性影响因素, 对番茄红素良好试剂的选择、试剂水溶液对聚集态和光谱特征的影响及溶液酸碱度对番茄红素稳定性的影响规律尚未见阐明。因此, 为揭示溶液环境对番茄红素稳定性的影响规律, 本文基于紫外可见吸收光谱的变化研究了二甲基亚砜、四氢呋喃、丙酮等不同溶剂种类、比例及酸碱度对番茄红素紫外可见吸收光谱及其吸收强度的影响, 揭示溶剂类型和溶液酸碱度对番茄红素的稳定性的影响。通过研究以期对番茄红素稳定环境的研究提供理论依据, 促进番茄红素在医药、

食品、化妆品等领域的应用。

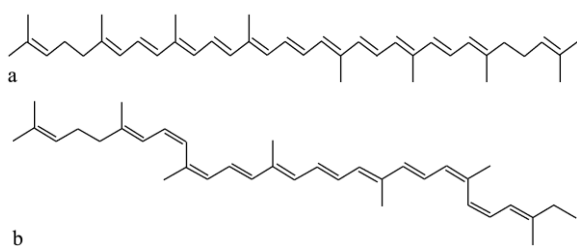


图1 全反式番茄红素(a)和四顺番茄红素(b)结构

Fig.1 The structure of all-trans lycopene (a) and tetra-cis lycopene (b)

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

98%番茄红素晶体,上海源叶生物科技有限公司;其他氢氧化钠、丙酮、四氢呋喃和二甲基亚砷等试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

UV-1800BPC 紫外可见分光计,上海美谱达仪器有限公司);MX-R-Pro 涡旋振荡器,上海辅泽商贸有限公司;FA2004A 电子分析天平,上海精天电子仪器有限公司;PHS-3E 型 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 番茄红素在不同溶剂中的紫外可见光谱分析

采用电子分析天平精确称取 1.25 mg 番茄红素晶体,分别溶于丙酮、四氢呋喃和二甲基亚砷 3 种溶剂中;用 10 mL 的棕色容量瓶定容,配制成浓度为 125  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的母液;稀释母液至 2.5  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,采用紫外分光光度计检测不同番茄红素溶剂在 300~600 nm 的紫外可见吸收。

#### 1.3.2 番茄红素在不同稀释浓度溶液中的紫外可见光谱分析

分别吸取 1.3.1 项下已配制好的番茄红素-丙酮溶液、番茄红素-四氢呋喃溶液和番茄红素-二甲基亚砷溶液分别按照  $V_{\text{溶剂}}:V_{\text{水}}$  为 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6、1:7、1:8 和 1:9 比例稀释后,采用紫外分光光度计检测不同稀释浓度番茄红素溶剂在 300~600 nm 的紫外可见吸收。

#### 1.3.3 番茄红素在不同 pH 丙酮溶剂中的紫外可见光谱分析

对 1.3.1 项下已配制好的番茄红素-丙酮溶液

( $V_{\text{溶剂}}:V_{\text{水}}=1:7$ ) 分别采用 HCl 和 NaOH 滴定使其 pH 值分别控制在 3、5、7、9、11 和 13,采用紫外分光光度计检测不同 pH 番茄红素丙酮溶剂在 300~600 nm 的紫外可见吸收。

#### 1.3.4 不同溶剂中番茄红素的降解反应动力学研究

对 1.3.2 项下的番茄红素溶液,采用紫外分光光度计每隔 0.5 h 在 300~600 nm 范围内进行扫描,观察不同番茄红素溶剂特征吸收的变化。经不同级别的反应动力学方程(零级降解动力学:  $C=kt+b$ ;一级降解动力学:  $\ln(C/C_0)=kt+b$ ;二级降解动力学:  $1/C=kt+b$ )拟合,并根据公式计算其降解反应动力学参数速率常数  $K$  ( $\text{h}^{-1}$ ) 和半衰期  $t_{1/2}$  (h)。

$$t_{1/2} = -\ln(0.5)/k$$

式中:  $k$  为反应动力学速率常数。

#### 1.3.5 数据分析

数据以  $\bar{X} \pm \text{SD}$  表示,利用 origin 8.0 和 Microsoft excel 2016 进行绘图分析,并采用 SPSS 18.0 软件的组间比较进行统计学分析,  $p < 0.05$  表示具有显著差异。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 番茄红素在不同溶剂中的紫外可见光谱分析

番茄红素晶体在丙酮(Acetone)、四氢呋喃(THF)和二甲基亚砷(DMSO) 3 种溶剂中的紫外可见光谱图如图 1 所示,番茄红素在这几种溶剂中的 3 个吸收峰的位置见表 1。

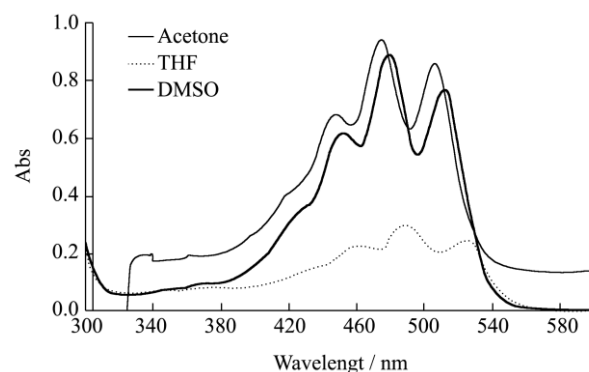


图1 番茄红素晶体在不同溶剂中的紫外可见光谱图

Fig.1 The UV-visible spectrum of lycopene crystals in different solvents

由图 1 可知:番茄红素在丙酮、四氢呋喃和二甲基亚砷溶液中表现出不同的紫外可见吸收性质,其吸收峰位置和强度均存在差异。这可能是由于番茄红素与不同溶剂分子间相互作用的结果。番茄红素分子中

的共轭  $\pi$  电子从基态跃迁到第二激发态引起其外可见吸收带的产生, 因而其所处的介质环境对吸收带产生位置以及吸收强度有较大影响<sup>[14]</sup>。本实验中三种溶液的折光率顺序为: 二甲基亚砷>四氢呋喃>丙酮(表 1)与中等极性的溶剂-丙酮相比, 番茄红素在较高折光率

的四氢呋喃和二甲基亚砷溶剂中的特征吸收带波长明显红移<sup>[15]</sup>, 吸收峰 3 的波长由 505 nm 红移至 511 nm 和 523 nm。这可能是由于高折光率的溶剂对番茄红素激发态的稳定作用比基态强的结果<sup>[5]</sup>, 故番茄红素在不同溶液中的特征吸收位置与溶液折光率顺序一致。

表 1 番茄红素在不同溶剂中的吸收峰位置

Table 1 Absorption peak positions of lycopene in different solvents

溶剂类型	溶剂折光率/n	吸收峰 1/nm	吸收峰 2/nm	吸收峰 3/nm
丙酮	1.3588	448	474	505
四氢呋喃	1.4137	451	479	511
二甲基亚砷	1.4770	461	488	523

表 2 番茄红素在不同溶剂中的吸收强度

Table 2 The absorption strength of lycopene in different solvents

溶液类型	吸收峰 1	吸收峰 2	吸收峰 3
番茄红素-丙酮溶液	0.854±0.052 <sup>a</sup>	0.938±0.047 <sup>a</sup>	0.682±0.043 <sup>a</sup>
番茄红素-四氢呋喃溶液	0.768±0.072 <sup>a</sup>	0.890±0.056 <sup>a</sup>	0.619±0.057 <sup>a</sup>
番茄红素-二甲基亚砷溶液	0.251±0.049 <sup>b</sup>	0.302±0.061 <sup>b</sup>	0.229±0.052 <sup>b</sup>

注: 上标字母表示不同溶液组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

此外, 在不同极性溶液中的溶剂化还会限制分子的自由转动, 因而番茄红素在极性较大的二甲基亚砷溶液中的分子振动受到限制, 引起其精细的结构消失<sup>[16]</sup>, 在光谱图中表现为宽带(图 1~3)。且由表 2 可知: 相同浓度(2.5  $\mu\text{g/mL}$ )的番茄红素溶液(丙酮、四氢呋喃和二甲基亚砷)在相近吸收位置时的吸光强度不同。番茄红素在二甲基亚砷溶液中的 3 处吸收位置的吸收强度均显著低于其丙酮和四氢呋喃溶液。结果表明: 在二甲基亚砷溶液中, 番茄红素分子振动受到影响最大, 其不易作为番茄红素的良好溶剂。

## 2.2 番茄红素在不同比例溶剂中的紫外可见

### 光谱分析

番茄红素不同比例的丙酮水溶液(a)、四氢呋喃水溶液(b)和二甲基亚砷水溶液(c)紫外可见光谱见图 2。由图可知: 不同比例的丙酮水溶液、四氢呋喃水溶液和二甲基亚砷水溶液的吸收光谱均发生明显变化。

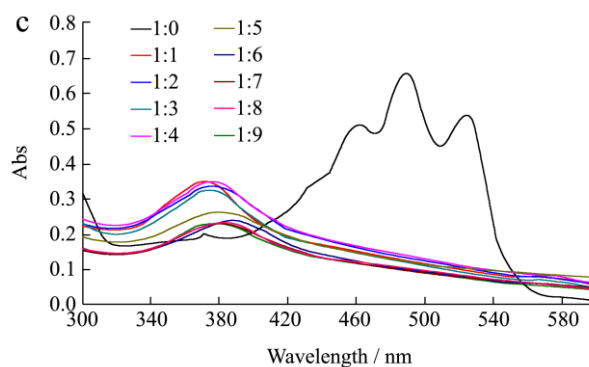
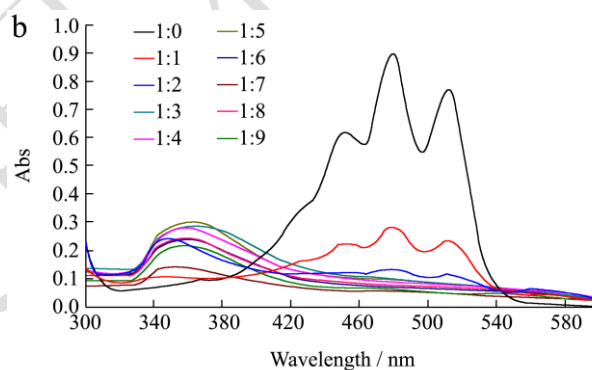
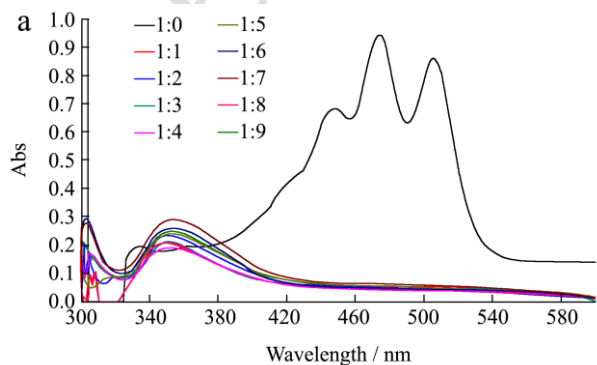


图 2 番茄红素不同比例的丙酮水溶液(a)、四氢呋喃水溶液(b)和二甲基亚砷水溶液(c)紫外可见光谱图

Fig.2 The UV-visible spectrum of aqueous solution of lycopene in different proportions of acetone (a), aqueous tetrahydrofuran (b) and aqueous solution of dimethyl sulfoxide (c)

首先, 随着水量的增加, 番茄红素溶液的吸收波长提前, 这可能是由于番茄红素在不同溶液中分散时其聚集构型引起的吸收峰位置偏移<sup>[17]</sup>。番茄红素的溶

解通常表现为：番茄红素呈 H 型聚集时，其紫外-可见吸收光谱表现为发色团吸收峰位置蓝移；而呈 J 型聚集时，其紫外-可见吸收光谱表现为发色团吸收峰位置红移。由结果可知，在不同比例的丙酮水溶液、四氢呋喃水溶液和二甲基亚砜水溶液均出现明显蓝移。因此，溶液中水的存在会引起番茄红素聚集成为 H 型，即层状堆叠。

此外，随着有机溶剂中水量的增加，番茄红素溶液的吸收强度也受到影响。这可能是由于溶液中番茄红素呈 H 型聚集，其分散性质受到影响，因而表现为特征吸收位置的吸收强度下降。与丙酮和二甲基亚砜相比，高浓度 ( $V_{THF}:V_w=1:0, 1:1, 1:2$ ) 四氢呋喃水溶液中，番茄红素的特征吸收峰位置不变，仅吸收强度逐渐下降；随着加水量的增加，番茄红素的紫外可见光谱图出现了蓝移。这说明番茄红素在四氢呋喃水体系中逐渐形成 H 型聚集。

### 2.3 番茄红素在不同溶剂中降解稳定性研究

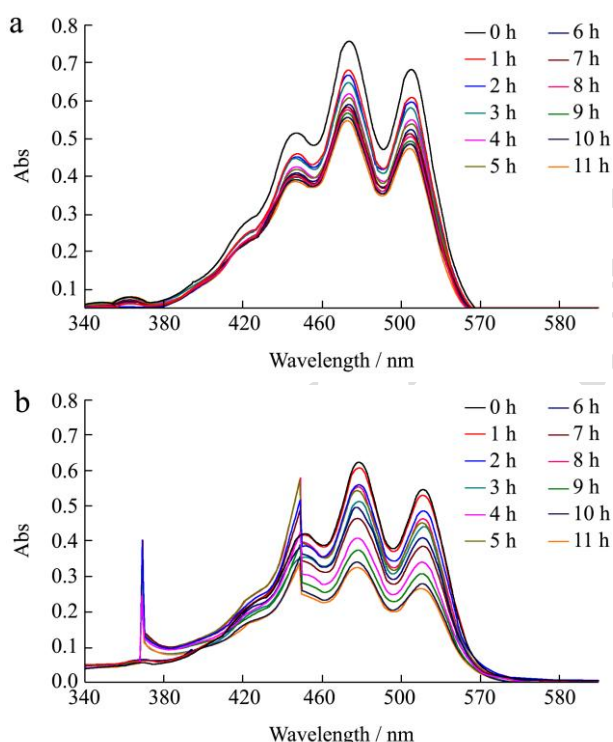


图3 不同时间的番茄红素-丙酮溶液 (a) 和番茄红素-四氢呋喃溶液 (b) 紫外可见吸收光谱

Fig.3 The UV-visible absorption spectra of lycopene-acetone solution (a) and lycopene-tetrahydrofuran solution (b) at different times

番茄红素在丙酮溶液和四氢呋喃溶液的紫外吸收随着时间的变化见图 3。由图可见：番茄红素-丙酮溶液和番茄红素-四氢呋喃溶液的吸收强度均随时间呈现下降趋势，结果说明随着时间的延长，番茄红素在不

同溶液中均存在降解损失。其中番茄红素在丙酮溶液中的开始阶段番茄红素降解较快，随着时间的延长降解逐渐放缓 (图 3a)；番茄红素在四氢呋喃溶液中的降解表现平稳。此外，在番茄红素-四氢呋喃溶液降解 4 h 时，449 nm 处的吸光强度忽然升高。这可能是因为番茄红素在有机溶剂中可优先转化成 13-cis 异构体<sup>[18]</sup>，溶剂效应导致番茄红素中的反式结构部分转变为顺式结构。

为了进一步研究番茄红素的降解稳定性，对番茄红素-丙酮和番茄红素-四氢呋喃溶液体系的降解进行不同的动力学反应级数线性拟合，结果见表 3。动力学反应方程的相关系数越大，表明拟合度越高。从表 1 中可以看出，番茄红素在两种溶剂中的三种动力学反应拟合方程中，一级降解动力学方程的  $R^2$  分别为 0.974 和 0.966，较其他曲线拟合效果好，因此番茄红素在两种溶剂中的降解符合一级反应动力学，其在两种溶剂中的降解动力学拟合曲线见图 4。丙酮溶剂中降解反应动力学方程为  $\ln C_t = -0.027t - 0.004$ ，其降解反应速率常数  $k$  为  $0.027 \mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ ；四氢呋喃溶剂中的降解反应动力学方程为： $\ln C_t = -0.066t + 0.056$ ，相关系数为 0.966，其降解速率常数  $k$  为  $0.066 \mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ 。

表3 番茄红素在丙酮和四氢呋喃溶剂里的降解动力学拟合  
Table 3 The degradation kinetics of lycopene in acetone and tetrahydrofuran.

溶剂类型	反应级数	回归方程	相关系数 $R^2$
丙酮	0	$C_t = -0.016t + 0.634$	0.912
	1	$\ln C_t = -0.027t - 0.004$	0.974
	2	$1/C_t = 0.053t + 1.560$	0.962
四氢呋喃	0	$C_t = -0.055t + 1.187$	0.953
	1	$\ln C_t = -0.066t + 0.056$	0.966
	2	$1/C_t = 0.0801t + 0.7498$	0.884

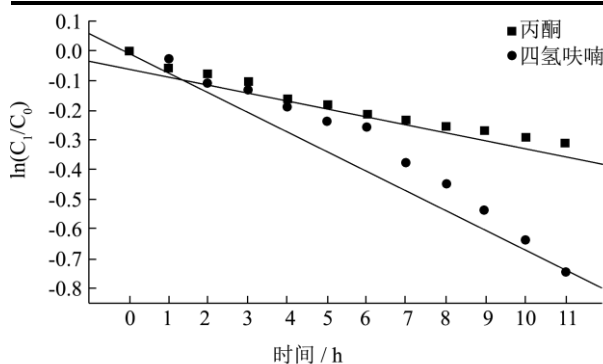


图4 番茄红素在丙酮、四氢呋喃溶液里降解动力学曲线

Fig.4 The degradation kinetics curve of lycopene in acetone and tetrahydrofuran

番茄红素在丙酮溶液和四氢呋喃溶液中的降解反应动力学参数见表 4。其降解速率常数  $k$  分别为

0.027  $\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ 和 0.066  $\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ , 在丙酮溶液中的降解速率常数小于在四氢呋喃溶液。由公式  $t_{1/2}=\ln(0.5)/k$  可知: 降解速率常数  $k$  越小, 半衰期越长。番茄红素在丙酮溶液的半衰期远大于在四氢呋喃溶液中的降解时间 ( $t_{\text{丙酮}}=25.48>t_{\text{四氢呋喃}}=10.49$ )。结果表明: 与四氢呋喃溶液 10.49 h 的半衰期相比, 番茄红素在丙酮溶剂中更为稳定, 半衰期可达 25.48 h。

表 4 番茄红素在丙酮、四氢呋喃溶液里降解的一级动力学参数

**Table 4 First order kinetic parameters of lycopene degradation in acetone and tetrahydrofuran solutions**

溶剂类型	方程式	速率常数 $(\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h}))$	半衰期/ $(t_{1/2}/\text{h})$
丙酮	$\ln C_t = -0.027t - 0.004$	0.027	25.48
四氢呋喃	$\ln C_t = -0.066t + 0.056$	0.066	10.49

## 2.4 溶液酸碱度对番茄红素紫外可见吸收光谱及其吸收强度的影响

### 谱及其吸收强度的影响

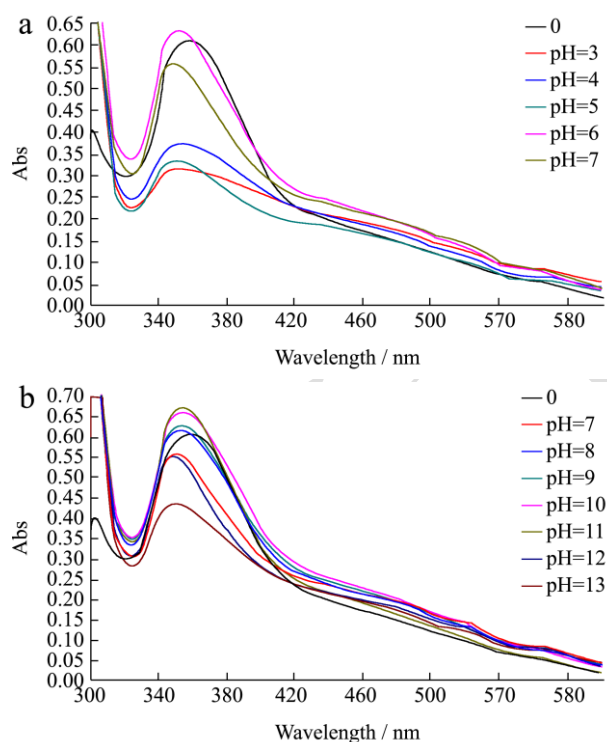


图 5 茄红素-丙酮溶液 ( $V_{\text{丙酮}}:V_{\text{水}}=1:7$ ) 在酸性 (a) 和碱性 (b) 介质下紫外可见吸收光谱图

**Fig.5 The UV-visible absorption spectrum of lycopene-acetone solution ( $V_{\text{acetone}}:V_{\text{water}}=1:7$ ) in acidic (a) and basic (b) media**

番茄红素-丙酮溶液 ( $V_{\text{丙酮}}:V_{\text{水}}=1:7$ ) 在酸性 (a) 和碱性 (b) 介质下紫外可见吸收光谱见图5。其在酸性和碱性环境中表现出不同的紫外可见吸收特性。

不同酸碱度番茄红素-丙酮溶液中番茄红素含量的变化见图6。由图6酸性介质对番茄红素-丙酮溶液中番

茄红素测定的影响结果可知: 在最大吸收波长处,  $\text{pH}=3$  时溶液吸光度为0.313,  $\text{pH}=13$ 时溶液吸光度为0.436, 而 $\text{pH}=7$ 时溶液吸光度为0.557; 表明在强酸和强碱条件下番茄红素的吸光强度均有下降, 与中性环境吸光度存在差异 ( $p<0.05$ ); 在弱酸和碱性条件下吸收强度较强。结果表明: 番茄红素的耐酸性较差, 在弱酸和弱碱性条件下稳定。这与魏俊<sup>[19]</sup>等的研究相符。Boon等人<sup>[20]</sup>调节番茄红素微乳 $\text{pH}$ 研究发现, 番茄红素在酸性条件下降解快速。强酸性和强碱性环境对番茄红素稳定性的影响机制不同。强酸性环境下, Cl成为番茄红素的取代基发生了重原子效应, 从而降低番茄红素在体系中的含量<sup>[21]</sup>; 强碱性环境下, 番茄红素发生了阴离子聚合效应而出现沉淀<sup>[22]</sup>。但也有研究表明, 在酸存在下, 番茄红素被质子化, 然后发生异构化和其他降解反应<sup>[23,24]</sup>。

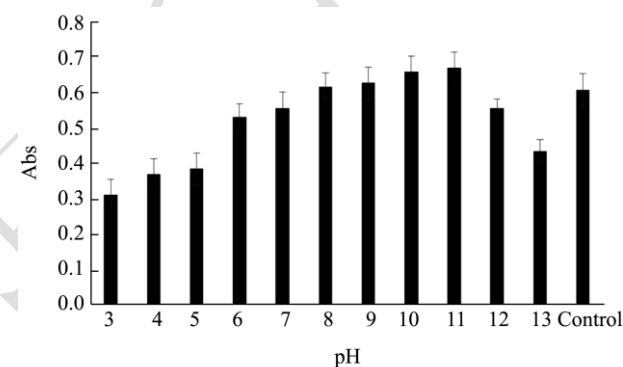


图 6 不同酸碱度番茄红素-丙酮溶液中番茄红素含量的变化  
**Fig.6 The changes in lycopene content in lycopene-acetone solution with different pH**

## 3 结论

3.1 番茄红素作为功能性天然色素, 具有卓越的抗氧化活性和抗癌作用, 目前已经作为食品添加剂应用于食品和保健食品。本论文基于紫外可见吸收光谱的变化研究溶液及其酸碱度对番茄红素稳定性的影响。主要结论包括: (1) 番茄红素的吸收带波长红移位置与有机溶液折光率顺序一致。番茄红素在高折光率溶剂中的吸收产生红移, 其吸收峰 3 的波长由丙酮中的 505 nm 分别红移至 511 nm (四氢呋喃) 和 523 nm (二甲基亚砜) (见表 2); (2) 溶液中水的存在会引起番茄红素呈 H 型聚集, 表现为吸收波长蓝移。其中, 番茄红素在丙酮水溶液为 1:7 ( $V_{\text{丙酮}}:V_{\text{水}}$ ) 时具良好吸收; (3) 番茄红素在有机溶剂水溶液中的降解均符合一级反应动力学 (表 3)。其中, 在丙酮水溶剂 ( $V_{\text{丙酮}}:V_{\text{水}}=1:7$ ) 中的降解速率常数为 0.027  $\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ , 其半衰期为 25.48 h (表 4); (4) 番茄红素不耐强酸和强碱, 在弱酸或弱碱条件下较稳定 (图 6)。结果表明: 番茄

红素可适用于弱酸性或弱碱性的丙酮和四氢呋喃水溶液。

3.2 通过研究不同溶液的种类、比例及其酸碱度对番茄红素紫外可见吸收光谱及稳定性的影响,为拓展番茄红素在医药、食品、化妆品等方面的应用奠定基础,以期促进番茄类食品的储藏、加工及开发。

### 参考文献

- [1] Ilahy R, Hdider C, Lenucci M S, et al. Phytochemical composition and antioxidant activity of high-lycopene tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars grown in Southern Italy [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 127(3): 255-261
- [2] Krinsky N I, Mayne S T, Sies H. Carotenoids in health and disease [J]. Crc Press, 2004, 105-126
- [3] Abete I, Perez-Cornago A, Navas-Carretero S, et al. A regular lycopene enriched tomato sauce consumption influences antioxidant status of healthy young-subjects: A crossover study [J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(1): 28-35
- [4] Watzl B, Bub A, Briviba K G. Supplementation of a low-carotenoid diet with tomato or carrot juice modulates immune functions in healthy men [J]. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 2003, 47(6): 255-261
- [5] Rissanen T H, Voutilainen S, Nyyssonen K, et al. Low plasma lycopene concentration is associated with increased intima-media thickness of the carotid artery wall [J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2000, 20(12): 2677-2681
- [6] Klipsteingrobusch K, Launer L J, Geleijnse J M, et al. Serum carotenoids and atherosclerosis: The rotterdam study [J]. *Atherosclerosis*, 2000, 148(1): 49-56
- [7] Ford N A, Erdman J W. Are lycopene metabolites metabolically active? [J]. *Acta Biochimica Polonica*, 2012, 59(1): 1-4
- [8] Giovannucci E, Rimm E B, Liu Y, et al. A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk [J]. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2002, 94(5): 391-398
- [9] Ax K, Mayer-Miebach E, Link B, et al. Stability of lycopene in oil-in-water emulsions [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2010, 3(4): 199-201
- [10] Shi J, Wu Y, Bryan M, et al. Oxidation and isomerization of lycopene under thermal treatment and light irradiation in food processing [J]. *Journal of Food Science and Nutrition*, 2002, 7(2): 179-183
- [11] Landers G M, Olson J A. Absence of isomerization of retinyl palmitate, retinol, and retinal in chlorinated and nonchlorinated solvents under gold light [J]. *Journal Association of Official Analytical Chemists*, 1986, 69(1): 50-55
- [12] 许庆陵,陆海霞,吴丽容,等.番茄红素提取工艺及其性质比较[J].*现代食品科技*,2009,25(1):86-90  
XU Qing-ling, LU Hai-xia, WU Li-rong, et al. Extraction of lycopene and comparison of its properties [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2009, 25(1): 86-90
- [13] 蔡基智,周芳梅.超声法辅助提取番茄渣中番茄红素的工艺研究[J].*现代食品科技*,2010,26(7):724-727  
CAI Ji-zhi, ZHOU Fang-mei. Ultrasonic-assisted extraction of lycopene from tomato residue [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2010, 26(7): 724-727
- [14] 王罗新,吕军,杜宗良,等.番茄红素与 $\beta$ -环糊精包结物的紫外-可见吸收光谱研究[J].*光谱学与光谱分析*,2004,2:183-186  
WANG Luo-xin, LYU Jun, DU Zong-liang, et al. UV-visible absorption spectroscopy study of lycopene and  $\beta$ -cyclodextrin inclusions [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 2: 183-186
- [15] Britton G L-J S, Pfander H. Carotenoids (Vol.1B) [M]. Basel: Birkhauser Verlag. 1995: 13-26
- [16] 杨晓占,李萍,戴松晖,等.番茄红素可见吸收光谱和荧光光谱的测量与分析[J].*光谱学与光谱分析*,2005,11: 88-91  
YANG Xiao-zhan, LI Ping, DAI Song-hui, et al. Measurement and analysis of visible absorption and fluorescence spectra of lycopene [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 11: 88-91
- [17] 王罗新.番茄红素的物理化学性质及其与多糖类大分子的相互作用[D].成都:四川大学,2004  
WANG Luo-xin. Physicochemical properties of lycopene and its interaction with polysaccharide macromolecules [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004
- [18] 朱倩,高瑞萍,雷琳,等.番茄红素热异构化机制及其影响因素研究进展[J].*食品科学*,2018,39(15):310-315  
ZHU Qian, GAO Rui-ping, LEI Lin, et al. Research progress on thermal isomerization mechanism of lycopene and its influencing factors [J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 310-315
- [19] 魏俊,陈义伦,李毓,等.三种天然果蔬色素稳定性研究[J].*中国食物与营养*,2016,22(10):39-42  
WEI Jun, CHEN Yi-lun, LI Yu, et al. Study on the stability of three natural fruit and vegetable pigments [J]. *Chinese Food and Nutrition*, 2016, 22(10): 39-42

现代食品科技