

# 乳糖对鱿鱼中氧化三甲胺热分解反应动力学的影响

陈帅, 朱军莉, 潘伟春

(浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江杭州 310018)

**摘要:** 为探究鱿鱼高温氧化三甲胺(TMAO)热分解的内源刺激因子, 从热分解动力学角度研究还原糖对TMAO热分解生成甲醛、二甲胺(DMA)和三甲胺(TMA)的影响。高温条件下鱿鱼中TMAO降解生成甲醛、DMA和TMA, 而还原糖也表现表现下降。通过体外筛选, 发现7种还原糖的添加能显著促进鱿鱼上清和TMAO-Fe(II)体系中甲醛的产生, 其中半乳糖的刺激作用最强, 且对鱿鱼上清和TMAO-Fe(II)体系中TMAO热分解产生FA、DMA和TMA也表现相似的促进作用。比较研究了TMAO-Fe(II)和TMAO-Fe(II)-Gal的热分解动力学, 发现FA、DMA、TMA和TMAO含量变化符合零级反应动力学, TMAO热分解分为两个阶段, 第一阶段表观活化能高于第二阶段, 半乳糖的添加能明显降低活化能。因此, 为了控制鱿鱼TMAO分解生成甲醛, 在鱿鱼制品加工过程中应降低半乳糖等还原糖的添加。

**关键词:** 鱿鱼; 氧化三甲胺; 半乳糖; 甲醛; 动力学

文章编号: 1673-9078(2017)3-116-121

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.019

## Effects of Galactose on the Reaction Kinetics of Thermal Degradation of TMAO in Squid

CHEN Shuai, ZHU Jun-li, PAN Wei-chun

(College of Food science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The aim of this study was to assess the endogenous stimulating factors of thermal decomposition of trimethylamine-N-oxide (TMAO). The influence of reducing sugar on the thermal conversion of TMAO to formaldehyde (FA), dimethylamine (DMA), and trimethylamine (TMA) in squid was studied using thermal decomposition kinetics. At high temperatures, the TMAO in squid was decomposed into FA, DMA, and TMA, and the content of the reducing sugar was reduced. *In vitro* screening demonstrated that the additions of seven types of reducing sugars could significantly promote FA production in the supernatant of squid and the TMAO-Fe(II) system. Among them, galactose exhibited the strongest stimulation effect, and a similar promoting effect was observed in the supernatant of squid and the TMAO-Fe(II) system on the decomposition of TMAO into FA, DMA, and TMA. Reaction kinetics of the thermal decomposition of TMAO in TMAO-Fe(II) and TMAO-Fe(II)-Gal were studied comparatively. The changes in the contents of FA, DMA, TMA, and TMAO followed the zero order kinetics. The thermal decomposition of TMAO was divided into two stages, in which the apparent activation energies of stage 2 were lower than those of stage 1. The addition of galactose reduced the activation energies significantly. Therefore, the addition of galactose and other reducing sugars should be limited during the processing of squid products to control the decomposition of TMAO to FA.

**Key words:** squid; trimethylamine-N-oxide; galactose; formaldehyde; reaction kinetics

鱿鱼丝、烤鱿鱼头和烤鱿鱼片等鱿鱼制品营养丰富、口味独特, 深受大众欢迎。然而, 鱿鱼制品中高含量内源性甲醛(Formaldehyde)给产品品质和食用安全带来了负面的影响<sup>[1]</sup>。因此, 探究鱿鱼制品中内源性甲醛的产生机理是调控鱿鱼制品甲醛含量和货架

收稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271954); 省自然科学基金项目(LY15C200001)

作者简介: 陈帅(1987-), 女, 硕士研究生, 讲师, 主要从事水产品品质与安全控制研究

通讯作者: 朱军莉, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工品质与安全

期品质的基础。研究已表明, 水产品内源性甲醛的前体物质是氧化三甲胺(Trimethylamine-n-oxide, TMAO)。TMAO广泛存在于海洋生物中, 具有保持鱼体内氮的平衡及调节体内渗透压的作用<sup>[2]</sup>, 以肌肉中含量最高。鱿鱼制品在加工过程中受到蒸煮、烘烤等高温加热工艺, TMAO热分解产生甲醛、二甲胺(Dimethylamine, DMA)和三甲胺(Trimethylamine, TMA)<sup>[2,3]</sup>。Lin等发现5种鱿鱼在200℃加热1h, 90%的TMAO热分解生成DMA和TMA<sup>[4]</sup>, 而鳕鱼在高温过程中TMAO仅分解生成TMA, 而DMA和FA无增加<sup>[5]</sup>。Spinelli等报道鱼体组织中的Fe<sup>2+</sup>、Sn<sup>2+</sup>、

SO<sub>2</sub>和半胱氨酸的代谢产物能显著促进TMAO的非酶分解<sup>[6]</sup>。李丰等<sup>[7]</sup>在研究乳糖与TMAO的作用时,发现随着乳糖用量增加和温度升高,DMA、TMA和半乳糖的生成量增多。李薇霞等<sup>[8]</sup>在研究奶糖中甲醛的产生来源,发现甲醛产生与美拉德反应中的Strecher降解有关。因此,推测鱿鱼中刺激TMAO分解生成DMA和甲醛的关键物质可能与还原糖等有关。

热反应动力学主要用于研究各种因素如反应浓度、温度和光照等对化学反应速率影响,进而确定反应物热分解反应动力学模型,求算动力学参数<sup>[9]</sup>。唐万军等<sup>[10]</sup>研究二水草酸亚铁热分解反应动力学,建立FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>热分解反应遵循相界面反应模型。辛学倩等<sup>[11]</sup>对鱿鱼丝贮藏过程中各指标变化动力学研究发现,TMAO、DMA和甲醛变化遵循零级或一级反应模型。

鉴于此,本研究分析了鱿鱼中TMAO热分解产生甲醛、DMA和TMA与还原糖的内在关联;通过还原糖体外刺激试验,确定了促进鱿鱼上清、TMAO-Fe(II)和TMAO体系甲醛生成的重要还原糖;进一步从动力学角度探究半乳糖对鱿鱼和TMAO-Fe(II)中TMAO分解影响,为初步阐明海产品中TMAO热分解机制提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

鱿鱼,浙江兴业集团有限公司;TMAO、TMA和DMA纯度98%,美国SIGMA公司;葡萄糖、半乳糖和乳糖,分析纯,成都科龙化工试剂厂;HNO<sub>3</sub>,色谱纯,上海阿拉丁试剂;三氯乙酸,纯度99.5%,上海阿拉丁试剂;甲醇和乙腈,99.9%,美国TEDIA公司;甲醛标准溶液100 mg/L,国家环保总局。

### 1.2 主要试验仪器

ICS-1500离子色谱仪,美国戴安公司;HPLC1100高效液相色谱配有Agilent ODS2-C18柱及紫外检测器,美国Agilent公司;SIGMA3-30K冷冻高速离心机,SIGMA公司;AB-135-S电子天平,梅特勒-托利多公司;PHS-3C pH计,上海精密科学仪器有限公司;Milli-Q Century超纯水系统,美国密理博。

### 1.3 鱿鱼上清制备

冷冻鱿鱼室温解冻后,将鱼肉切小块捣碎,取一定量碎鱿鱼,以1:2(m:V)与Tris-乙酸缓冲液(pH 7.0)混合,匀浆,离心(3000 g, 12 min),取上清液,沉淀以1:1缓冲液混合,匀浆,重复2次,上清(即提

取的鱿鱼上清)混合,4℃冷藏备用。

### 1.4 样品处理

取鱿鱼肉在100℃沸水浴中处理30 min,冷却,加入1 mL、7.5% TCA,离心,取上清,测定TMAO、TMA、DMA、FA和还原糖含量。配置20 mM TMAO和20 mM TMAO-20 mM Fe(II)的体外反应体系,7种还原糖对鱿鱼上清、TMAO和TMAO-M Fe(II)体系FA生成的影响,具体处理方法是:分别取7中还原糖与鱿鱼上清、TMAO和TMAO-Fe(II)进行等体积混合,还原糖作用浓度分别为20 mM和200 mM,以超纯水为空白对照,于100℃反应30 min,同上处理后,测定甲醛含量。

### 1.5 TMAO-Fe(II)和TMAO-Fe(II)-Gal体系

#### 热反应动力学

各取TMAO-Fe(II)和TMAO-Fe(II)-Gal反应体系2 mL,分别于100℃、80℃、60℃和37℃下反应0、1、2、3、4、5、10、15、30、45和60 min,取TCA终止反应后,测定甲醛、DMA、TMA和TMAO含量。

### 1.6 样品处理 TMAO、TMA、DMA和甲醛的

#### 检测方法

采用离子色谱法测定样品氧化三甲胺、三甲胺和二甲胺的含量<sup>[12,13]</sup>,参考李薇霞等<sup>[8]</sup>高效液相色谱法测定甲醛含量。

### 1.7 还原糖的测定

取高温处理后的鱿鱼上清液,稀释至适合倍数后取0.5 mL与0.5 mL DNS溶液混匀后,沸水浴5 min,冷却,在520 nm的波长下测定吸光值<sup>[14]</sup>。

### 1.8 还原力的测定

还原力的测定参考<sup>[4]</sup>。

### 1.9 数据处理

试验重复3次,结果以均值±标准偏差(Mean±SD)表达。采用Origin 8.0进行作图,SPSS软件单因素方差分析(Analysis of variance, ANOVA)用来比较各组间的差异, $p < 0.05$ 表示差异性显著。

## 2 结果与讨论

## 2.1 高温处理对鱿鱼肌肉 TMAO 降解和还原

### 糖含量的影响

鱿鱼肌肉经 100 °C 加热处理 30 min 后, 甲醛、DMA、TMA、TMAO 及还原糖含量变化如表 1 所示。TMAO 含量表现显著下降 ( $p<0.05$ ), 减少 13.9%, 相应的甲醛、DMA 和 TMA 含量显著上升 ( $p<0.05$ ), 其中 DMA 和 TMA 增加率远远高于甲醛。研究已表明, 在高温加热过程中阿根廷和北太鱿鱼胴体中大量的 TMA、DMA 和甲醛积累<sup>[15,16]</sup>, 相似的, 在 200 °C 加热 1 h 五种鱿鱼中 90% TMAO 热转化成 DMA 和 TMA。并且加热处理还原糖下降 20%。因此, 高温 TMAO 非酶分解是鱿鱼制品在加工和贮藏过程中内源性甲醛的重要形成途径<sup>[7]</sup>, 推测鱿鱼高温 TMAO 热分解反应可能与还原糖参与有关。

表 1 鱿鱼肌肉在 100 °C 处理后 TMAO、TMA、DMA、甲醛和还原糖含量

指标	含量/(mg/L)	
	0 min	30 min
TMAO	12406.54±2.09 <sup>a</sup>	10685.61±10.89 <sup>b</sup>
TMA	1.89±0.01 <sup>a</sup>	374.07±0.01 <sup>b</sup>
DMA	91.04±10.38 <sup>a</sup>	535.92±17.89 <sup>b</sup>
甲醛	9.65±1.98 <sup>a</sup>	40.96±2.93 <sup>b</sup>
还原糖	320.32±1.21 <sup>a</sup>	255.34±8.23 <sup>b</sup>

表 2 还原糖对鱿鱼上清、TMAO 和 TMAO-Fe(II) 体系在 100 °C 中甲醛含量的影响

添加剂	鱿鱼上清		TMAO		TMAO-Fe(II)		还原力
	20 mM	200 mM	20 mM	200 mM	20 mM	200 mM	20 mM
对照	7.08±0.51 <sup>a</sup>	7.08±0.51 <sup>a</sup>	0.75±0.01 <sup>a</sup>	0.75±0.01 <sup>a</sup>	21.38±0.21 <sup>a</sup>	21.38±0.21 <sup>a</sup>	0.087±0.001 <sup>a</sup>
Glc	12.51±0.82 <sup>d</sup>	15.40±0.03 <sup>d</sup>	1.89±0.03 <sup>c</sup>	1.95±0.02 <sup>c</sup>	40.41±1.34 <sup>c</sup>	150.01±4.89 <sup>c</sup>	0.104±0.001 <sup>a</sup>
Lac	11.66±0.33 <sup>d</sup>	15.44±0.04 <sup>d</sup>	1.01±0.01 <sup>d</sup>	1.15±0.01 <sup>d</sup>	32.07±2.89 <sup>b</sup>	80.14±5.98 <sup>b</sup>	0.110±0.010 <sup>a</sup>
Gal	17.80±0.42 <sup>g</sup>	117.30±2.13 <sup>e</sup>	1.30±0.02 <sup>e</sup>	5.82±0.02 <sup>e</sup>	55.23±2.01 <sup>d</sup>	199.13±10.93 <sup>de</sup>	0.120±0.009 <sup>a</sup>
Lev	14.74±0.17 <sup>e</sup>	45.04±0.12 <sup>f</sup>	2.33±0.02 <sup>f</sup>	7.48±0.02 <sup>f</sup>	176.06±2.83 <sup>e</sup>	238.58±1.93 <sup>f</sup>	0.167±0.023 <sup>a</sup>
Man	11.07±0.23 <sup>d</sup>	30.11±2.11 <sup>c</sup>	0.91±0.01 <sup>ad</sup>	2.22±0.09 <sup>g</sup>	101.26±1.56 <sup>f</sup>	212.12±3.03 <sup>e</sup>	0.111±0.026 <sup>a</sup>
Sac	8.64±0.04 <sup>c</sup>	8.25±0.72 <sup>a</sup>	0.81±0.04 <sup>a</sup>	0.67±0.10 <sup>a</sup>	31.42±0.14 <sup>b</sup>	209.19±0.98 <sup>e</sup>	0.096±0.001 <sup>a</sup>
Xyl	13.54±0.32 <sup>f</sup>	20.36±0.01 <sup>g</sup>	1.64±0.09 <sup>g</sup>	4.05±0.07 <sup>f</sup>	42.51±1.98 <sup>b</sup>	188.36±3.09 <sup>d</sup>	0.110±0.012 <sup>a</sup>

注: 各组因素同一列中数据右上角字母不同表示显著差异 ( $p<0.05$ ); 对照代表蒸馏水; Glc 代表葡萄糖; Lac 代表乳糖; Gal 代表半乳糖; Lev 代表果糖; Man 代表甘露糖; Sac 代表蔗糖; Xyl 代表木糖。

## 2.3 半乳糖对鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II) 体系

### TMAO 热分解的影响

注: 同一行中数据右上角字母不同表示显著差异 ( $p<0.05$ )。

## 2.2 还原糖对鱿鱼上清、TMAO 和 TMAO-Fe

### (II) 水溶液中甲醛形成的影响

七种还原糖对鱿鱼上清、TMAO 及 TMAO-Fe(II) 模拟体系高温甲醛生成的影响如表 2 所示。结果表明, 经过 100 °C 处理 30 min 后, 鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II) 模拟体系甲醛生成明显, 而 TMAO 水溶液稳定。还原糖的添加都能显著促进鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II) 体系中 FA 的产生 ( $p<0.05$ ), 其中 TMAO-Fe(II) 体系更明显。在鱿鱼上清中以半乳糖促进作用最强, 其次为果糖、甘露糖和木糖, TMAO-Fe(II) 体系中果糖刺激作用最明显, 甘露糖、蔗糖和半乳糖次之。并且, 高浓度还原糖促进甲醛生成的效果明显高于低浓度。还原糖还原力大小并无显著性差异 ( $p>0.05$ )。

结果表明, 半乳糖等还原糖能显著促进鱿鱼内源性甲醛生成, 而还原糖的还原力与刺激甲醛生成作用无直接内在关联。

研究已表明, 北太 and 阿根廷蒸煮鱿鱼肉还原糖低于 32.0  $\mu\text{mol/g}$ <sup>[4]</sup>。尽管鱿鱼胴体中还原糖含量较低, 然而在鱿鱼加工中添加乳糖等还原糖以改善鱿鱼制品的风味和感官特性, 添加量可高达 8.5%, 并且在贮藏过程中乳糖与鱿鱼游离氨基酸、蛋白质等发生美拉德反应, 同时乳糖自身会发生分解, 其中半乳糖是乳糖发生美拉德反应的终产物之一, 转化率可达 20%<sup>[8]</sup>。

研究进一步分析半乳糖对鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II) 体系中 TMAO 热分解的影响, 如图 1 所示。结果发现, 半乳糖对鱿鱼上清中 TMAO 热降解的促进作用随添加浓度的升高而显著增大 ( $p<0.05$ ), 200 mM



时 FA、DMA、TMA 和 TMAO 含量分别达至 117.30 mg/L、354.10 mg/L、28.34 mg/L 和 4298.07 mg/L, 表现浓度依赖性。乳糖对 TMAO-Fe(II)中 TMAO 分解产生 FA、DMA 和 TMA 作用表现相似的趋势, 其中低浓度时促进作用快于鱿鱼上清, 而当半乳糖浓度在 60 mM 时含量达到平衡状态。因此, 半乳糖对鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II)均表现促进 TMAO 分解作用。

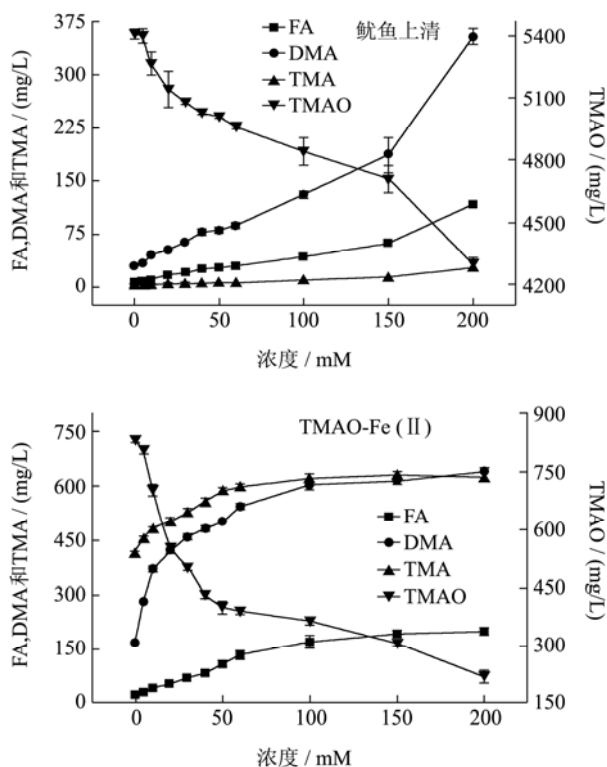


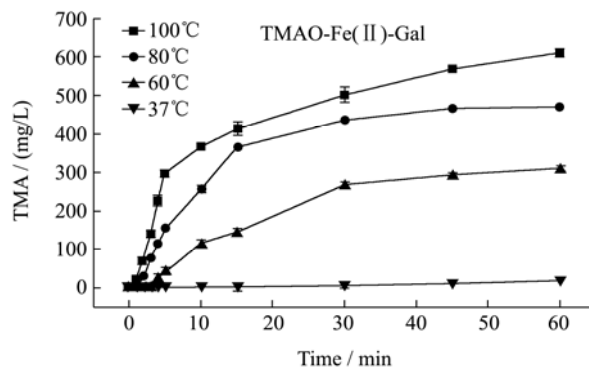
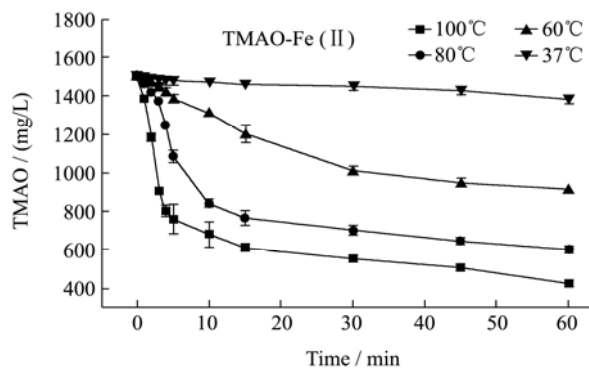
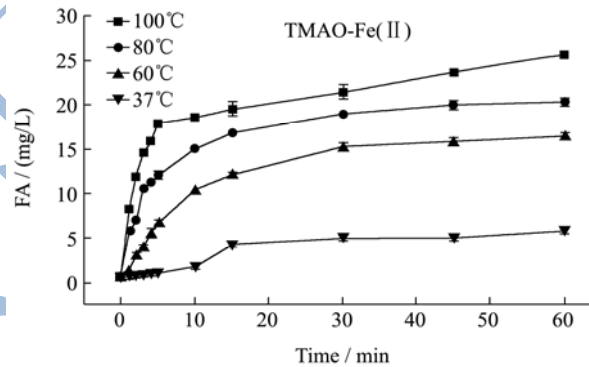
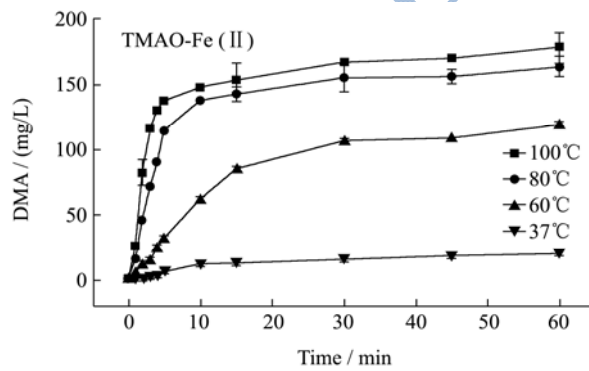
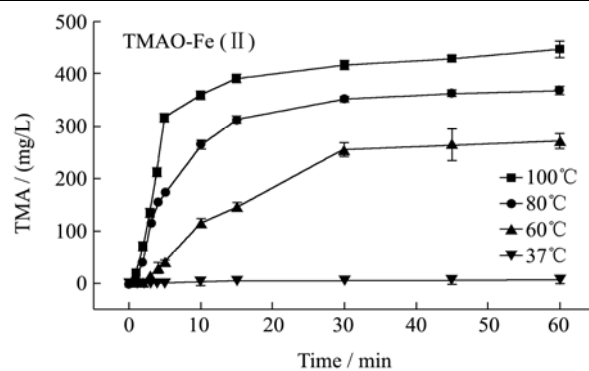
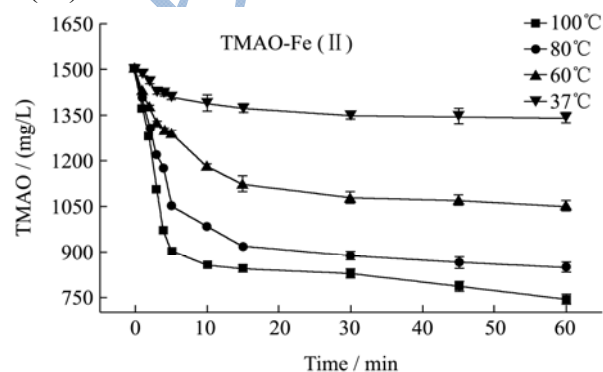
图1 半乳糖对鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II)体系在 100 °C中 TMAO、DMA、TMA 和甲醛含量的影响

Fig.1 Effects of galactose on the levels of FA, DMA, TMA, and TMAO in the supernatant of squid and TMAO-Fe(II) at 100 °C

## 2.4 TMAO-Fe(II)和 TMAO-Fe(II)-Gal 体外

模拟体系热反应动力学研究

### 2.4.1 温度和时间对 TMAO-Fe(II)和 TMAO-Fe(II)-Gal 体系的影响



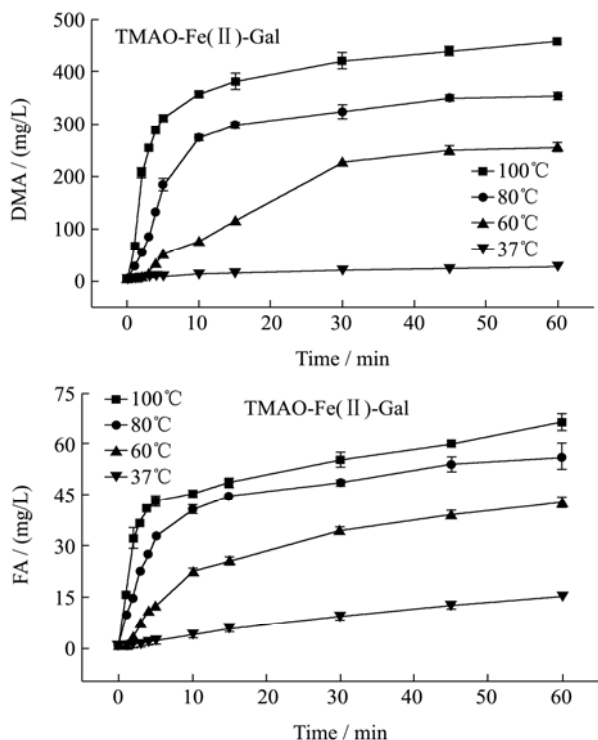


图2 反应温度和时间对 TMAO-Fe(II) 和 TMAO-Fe(II)-Gal 体系在 100 °C 中甲醛、DMA、TMA 及 TMAO 含量的影响

Fig.2 Effects of processing temperature and time on the contents of FA, DMA, TMA, and TMAO in TMAO-Fe(II) and TMAO-Fe(II)-Gal

图2显示在不同加热时间和温度下 TMAO-Fe(II) 和 TMAO-Fe(II)-Gal 两个体系 TMAO 热分解的反应特性。结果表明,随加热时间延长, TMAO 逐渐热解为甲醛、DMA 和 TMA, 加入半乳糖可以明显促进 TMAO 热解。在 100 °C 加热 30 min, TMAO-Fe(II) 溶液中 TMAO 下降到 828.27 mg/L, 而 TMAO-Fe(II)-Gal 体系中 TMAO 含量仅为 552.09 mg/L, 可能是由于半乳糖添加促进溶液中美拉德反应, 加速 TMAO 分解。两个体系中甲醛、DMA、TMA 和 TMAO 含量变化表现相似趋势, 其中前 5 min 内显著增加( $p < 0.05$ ), 生成量均高于 50%, 之后上升缓慢。可能是在加热初期  $Fe^{2+}$  起主要作用, 而在 5 min 后被氧化为  $Fe^{3+}$  失去对 TMAO 还原能力。可见, TMAO 的分解分为两个阶段, 前 5 min 作为第一阶段, 5~60 min 为第二阶段。

2.4.2 TMAO-Fe(II)、TMAO-Fe(II)-Gal 体系甲醛、DMA、TMA 及 TMAO 的 Arrhenius 曲线及表观活化能

如图3所示, TMAO-Fe(II)和 TMAO-Fe(II)-Gal 体系各指标的 Arrhenius 直线, 其相关系数达到 91.03% 以上。根据 Arrhenius 公式  $\ln k = -E_a/(RT) + \ln A$ , 进而计算出各指标的活化能  $E_a$ , 如表 3 所示。结果表明, TMAO-Fe(II) 体系中加入半乳糖能够降低 TMAO 热

解的表观活化能, 在第一阶段中加入半乳糖, 甲醛、DMA 和 TMA 的活化能分别由 68.77 kJ/mol、53.42 kJ/mol 和 99.02 kJ/mol 降低至 37.66 kJ/mol、41.88 kJ/mol 和 83.83 kJ/mol, TMAO 的活化能 48.14 kJ/mol 降低至 25.87 kJ/mol。

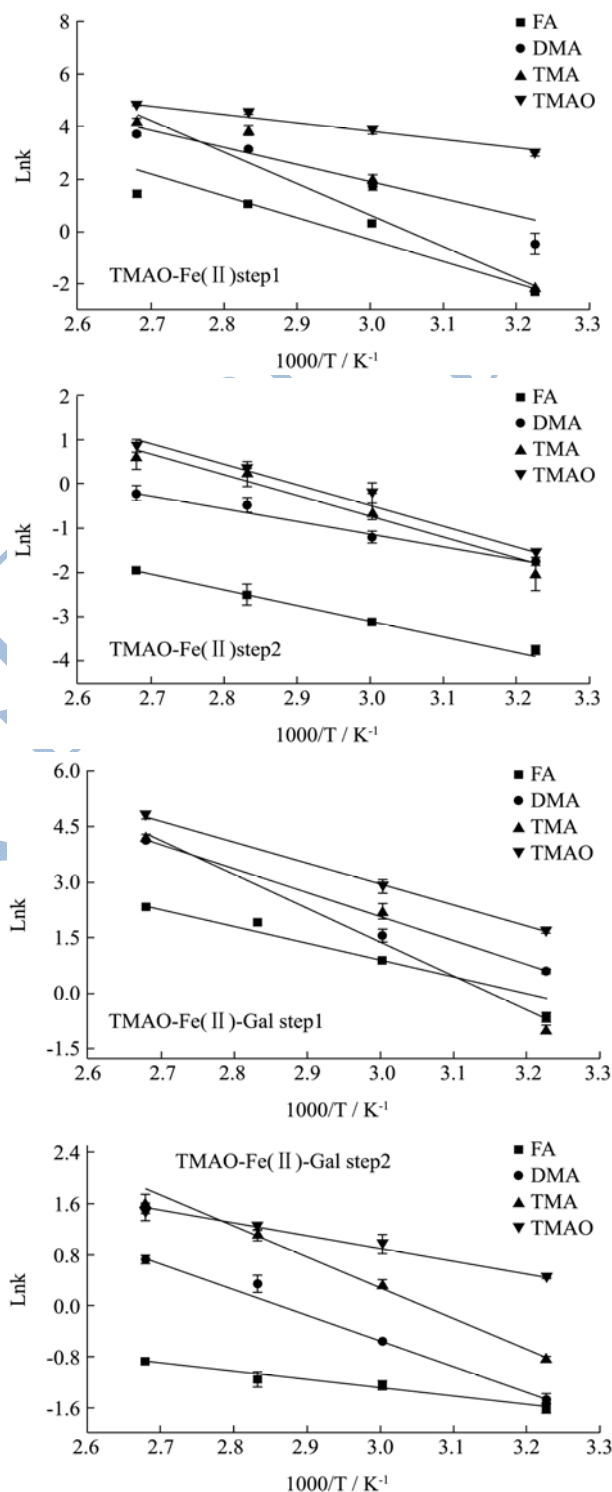


图3 TMAO-Fe(II) 和 TMAO-Fe(II)-Gal 体系甲醛、DMA、TMA 和 TMAO 的 Arrhenius 曲线

Fig.3 Arrhenius plots for FA, DMA, TMA, and TMAO in the TMAO-Fe(II) and TMAO-Fe(II)-Gal aqueous solutions

表3 TMAO-Fe(II)和TMAO-Fe(II)-Gal体系甲醛、DMA、TMA和TMAO的活化能

**Table 3 Activation energies of the decomposition of TMAO to FA, DMA, and TMA in TMAO-Fe(II) and TMAO-Fe(II)-Gal aqueous solutions**

物质 名称	TMAO-Fe(II)		TMAO-Fe(II)-Gal	
	Step1	Step2	Step1	Step2
甲醛	68.77±12.30	29.72±0.52	37.66±6.00	10.81±0.77
DMA	53.42±12.20	23.79±3.21	41.88±4.83	22.20±1.58
TMA	99.02±11.07	43.19±4.46	83.83±11.14	32.43±3.62
TMAO	48.14±0.99	36.90±1.35	25.87±2.90	17.93±1.81

研究表明, Arrhenius 活化能多与温度有关, 即活化能越低, 热分解反应对温度的敏感性也越低<sup>[17]</sup>。第二阶段各指标的表观活化能普遍比第一阶段低, TMAO 热解对温度的敏感性逐渐降低, 半乳糖也能明显促进 TMAO 分解各指标的反应速率, 降低表观活化能。因此, 在鱿鱼加工过程中, 应控制加热工艺, 如蒸煮、烘烤温度和时间, 应减少半乳糖等还原糖的添加, 从而降低 TMAO 热分解。

### 3 结论

本研究表明还原糖能显著促进鱿鱼高温内源性甲醛的生成, 其中半乳糖加速鱿鱼上清和 TMAO-Fe(II) 中 TMAO 分解生成 TMA、DMA 和甲醛, 提示还原糖参与鱿鱼中 TMAO 的热分解。比较研究了 TMAO-Fe(II) 和 TMAO-Fe(II)-Gal 热分解反应动力学, 发现 TMAO 热解分为两个阶段, 第一阶段反应速率更快, 半乳糖的添加促进 TMAO-Fe(II) 热分解反应, 增大反应速率, 降低表观活化能减少。因此, 在鱿鱼制品加工过程中, 应避免加工温度过高、高温时间过长及减少乳糖等还原糖的添加, 从而降低 TMAO 热分解及减少甲醛的积累。

### 参考文献

[1] 俞其林, 励建荣. 食品甲醛的来源与控制[J]. 现代食品科技, 2007, 23(10): 76-78  
YU Qi-lin, LI Jian-rong. Origin and control of formaldehyde in food [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(10): 76-78

[2] Zhu J L, Li J R, Jia J. Effects of thermal process and various chemical substances on formaldehyde and dimethylamine formation in squid *Dosidicus gigas* [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(12): 2436-2442

[3] Fu X, Xue C, Miao B C, et al. Effect of processing steps on the physicochemical properties of dried-seasoned squid [J].

Food Chemistry, 2007, 103(2): 287-294

- [4] Lin J K, Hurng D C. Thermal conversion of trimethylamine-N-oxide to trimethylamine and dimethylamine in squids [J]. Food and Chemical Toxicology, 1985, 23(6): 579-583
- [5] Bechmann I E. Comparison of the formaldehyde content found in boiled and raw mince of frozen saithe using different analytical methods [J]. LWT-Food Science and Technology, 1998, 31(5): 449-453
- [6] Spinelli J, Koury B. Nonenzymic formation of dimethylamine in dried fishery products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1979, 27(5): 1104-1108
- [7] 李丰, 刘红英, 薛长湖, 等. 乳糖与氧化三甲胺的反应研究[J]. 食品工业科技, 2010, 7: 98-100  
LI Feng, LIU Hong-ying, XUE Chang-hu, et al. Study on the reaction of lactose and trimethylamine N-oxide [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 7: 98-100
- [8] 李薇霞. 奶糖中内源性甲醛生成机理研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012  
LI Wei-xia. Study of formation mechanism of endogenous formaldehyde in toffee [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012
- [9] 吴少雄, 郭祀远, 李琳, 等. 苹果汁中糖和氨基酸的美拉德反应动力学模拟研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(3): 204-209  
WU Shao-Xiong, GUO Si-yuan, LI Lin, et al. Kinetics modelling on malliard reaction of sugars with amino acids in apple juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(3): 204-209
- [10] 唐万军, 陈栋华. 二水草酸亚铁热分解反应动力学[J]. 物理化学学报, 2007, 23(4): 605-608  
TANG Wan-Jun, CHEN Dong-Hua. Thermal decomposition kinetics of ferrous oxalate dehydrate [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2007, 23(4): 605-608
- [11] 辛学倩, 薛勇, 薛长湖, 等. 鱿鱼丝贮藏过程中甲醛含量变化动力学研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(9): 12-15  
XIN Xue-qian, XUE Yong, XUE Chang-hu, et al. Research on kinetics of formaldehyde in drie-seasoned squid during storage [J]. Food Research and Development, 2011, 32(9): 12-15
- [12] CHEN Shuai, ZHU Jun-li, LI Jian-rong. Simultaneous determination of dimethylamine, trimethylamine and trimethylamine-n-oxide in aquatic products by non-suppressed ion chromatography [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(4): 163-171
- [13] Li F, Liu H, Xue C, et al. Simultaneous determination of

dimethylamine, trimethylamine and trimethylamine-n-oxide in aquatic products extracts by ion chromatography with non-suppressed conductivity detection [J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216: 5924-5926

[14] HU Ruo-fei, LIN Lu. Reducing sugar content in hemicellulose hydrolysate by DNS method: A revisit [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2008, 2(2): 156-161

现代食品科技