基于冷鲜肉脂肪氧化的糖化酶型时间-温度指示器的研究

钱 静，郑光临，冯 钦
(江南大学机械工程学院，江苏 无锡 214122)

摘 要：对3种不同加酶量的糖化酶型时间-温度指示器(TTI)体系的动力学性能进行研究，得到3种TTI体系的活化能数据；同时对冷鲜肉的脂肪氧化动力学性能进行研究，测得其活化能及货架寿命。根据TTI活化能与食品活化能及终点相匹配的原则，在恒温、变温条件下对冷鲜肉和TTI进行货架期与指示时间的匹配性实验。结果表明：加酶量为50μL的糖化酶型TTI可以准确预测冷鲜肉的货架寿命。

关键词：时间-温度指示器；糖化酶；活化能；冷鲜肉；脂肪氧化

Glucoamylase Time-Temperature Indicators based on Fat Oxidation of Chilled Pork

QIAN Jing，ZHENG Guang-lin，FENG Qin
(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract：The dynamic properties and activation energies of three glucoamylase types of TTIs (time-temperature indicators) were investigated. The fat oxidation in chilled pork was investigated to acquire its activation energy and shelf life. According to the activation energy and end-point matching principle between TTI and foods, matching experiments were set up under both constant and variable temperatures. One (50 μL enzyme dosage) of the glucoamylase TTIs was selected to predict the shelf life of chilled pork accurately based on experiments and following calculation.

Key words：time-temperature indicator (TTI)；glucoamylase；activation energy；chilled pork；fat oxidation
中图分类号：TS251.1 文献标志码：B 文章编号：1002-6630(2013)18-0343-06
doi:10.7506/spkx1002-6630-201318070

温度对食品的品质及储存周期有极大的影响，时间-温度指示剂/器(time temperature indicator/integrator，TTI)作为包装的一部分，易于识别和观察到与时间、温度相关的不可逆变化，这种变化通常表现为机械变形或者颜色的变化。TTI是监控产品时间温度积累的有效手段，用于指示产品质量信息，提示产品剩余货架期[1-3]。

在国外，时间-温度指示器已经广泛应用于食品和药品等温度敏感性产品的储藏。目前国内对TTI的研究还处于起步阶段，没有实现TTI的商业化，科研机构对TTI有少量研究，且大多集中在酶型。吴秋明[4]研制出一种脲酶型TTI，随着pH值的升高，该TTI能够呈现出从初始黄色到终点红色的变色过程。蔡华伟[5]、Sun Yan[6]等研究了一种基于淀粉酶反应的时间-温度指示器。其基本工艺为将淀粉与碘液混合变色后烘干粉碎，然后与淀粉酶混合压制成片。由于这种指示卡缺乏激活装置，制好即开始反应，需要在冷藏条件下贮存。宁鹏[7]开发了碱性脂肪酶型时间-温度指示卡，利用的是碱性脂肪酶与底物三乙酸甘油酯的水解反应。

在4℃条件下，蔡华伟[5]、Sun Yan[6]研究的淀粉酶型TTI可指示的食品货架期在2～10个月范围内，属于长期监测；而宁鹏[7]研究的碱性脂肪酶型TTI在4℃条件下的监测时间则只有60h，吴秋明[4]研究的脲酶型TTI在5℃条件下的监测时间约为80h，指示时间均比较短。针对于此，本研究研制的时间-温度指示器应用于0～4℃条件下，贮藏时间在5d左右的产品，如冷鲜肉。根据时间-温度指示器与产品的匹配原则，首先对TTI和冷鲜肉的动力学特性进行研究，测定其活化能并进行匹配；然后在恒温、变温条件下，对冷鲜肉和TTI进行实验，以验证TTI反应终点与食品货架寿命终点的匹配性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

精选猪扒(里脊)冷鲜肉 华润万家有限公司。
糖化酶(100000U/mL) 江苏锐阳生物科技有限公

收稿日期：2013-03-30
基金项目：教育部第44批回国留学人员科研启动基金项目
作者简介：钱静(1968—)，女，副教授，博士，研究方向为运输包装。E-mail：qj639@jiangnan.edu.cn

司；麦芽糊精　罗盖特精细化工有限公司；三氯乙酸、乙二胺四乙酸(EDTA)、2-硫代巴比妥酸、氯仿、碘、碘化钾、十二水合磷酸氢二钠、二水合磷酸二氢钠(均为分析纯)　国药集团化学试剂有限公司。

1.2　仪器与设备

YC-300L型科研、医疗保存箱　中科美菱低温科技有限责任公司；JYC-21ES10型电磁炉　九阳股份有限公司；UV-2802型紫外-可见分光光度计　尤尼柯(上海)仪器有限公司；SPX-150B-Z型生化培养箱　上海博迅实业有限公司；PQX型多段可编程人工气候箱　宁波东南仪器有限公司；HY-4型调速多用振荡器　江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司。

1.3　方法

1.3.1　糖化酶型时间-温度指示器动力学研究

为满足不同产品的指示要求，对3种不同加酶量的时间-温度指示器的动力学性能进行研究，使该糖化酶型时间-温度指示器成为一个系列[8]，可满足不同运输温度、时间的要求。3种TTI的编号及加酶量分别为1#TTI加酶量30μL、2#TTI加酶量50μL、3#TTI加酶量75μL。

取9支试管，各加入10mL、40g/L的麦芽糊精，3mL、1g/L的碘液，及不同加酶量的糖化酶，每3支作为1组，分别放置于不同温度的恒温培养箱中反应，每隔一段时间测1次吸光度，绘制吸光度随时间变化的曲线。

通过测定所研制糖化酶时间-温度指示器在不同温度条件下的吸光度-时间曲线，并对曲线进行拟合，可以得到时间-温度指示器在不同温度条件下的反应速率，然后根据Arrhenius方程[16]，求得TTI反应体系的活化能，从而确定时间-温度指示器的适用范围。

1.3.2　冷鲜肉氧化动力学参数的确定

指征冷鲜肉新鲜程度的指标有多种，常见的有：菌落总数、挥发性盐基氮(TVBN)、pH值、2-硫代巴比妥酸(TBA)等[9-10]。这些指标互相印证，均可从某个侧面反映冷鲜肉的新鲜程度[11-12]。本实验采用TBA值法(2-硫代巴比妥酸实验法)来评价肉类的脂肪氧化程度。反应原理是：不饱和脂肪酸经氧化分解会产生丙二醛等衍生物，与TBA发生显色反应，通过测定反应产物在532nm和600nm波长处的吸光度，可以计算出相应的TBA值[13]。随着脂肪氧化程度的加剧，氧化产物增多，TBA值也会相应地增大，因此可以通过测定反应产物的吸光度来定量脂肪的氧化程度。

测定方法：准确称取绞碎肉样10g，置于100mL锥形瓶中，加入50mL、7.5g/100mL的三氯乙酸溶液(0.1g/100mL EDTA)，振荡器振摇30min，双层滤纸过滤含肉样的乳白色混合液(为保证过滤干净，需重复过滤)；用5mL移液管移取滤液5mL于25mL带塞试管中，加入0.02mol/L的TBA溶液5mL，加塞后摇匀；置于沸水中煮40min，取出后静置冷却至室温；取上清溶液于25mL试管中，加5mL氯仿后摇匀，静置会出现分层；吸取上清溶液于比色皿中，分别在波长532nm和600nm处测吸光度，并根据式(1)[14-15]计算TBA值：

$$\text{TBA值/(mg/kg)}=(A_{532nm}-A_{600nm})/155\times0.1\times72.6\times100 \quad (1)$$

式中：A_{532nm}和A_{600nm}分别代表上清溶液在波长532nm和600nm处的吸光度。

为测定冷鲜肉在不同温度条件下的脂肪氧化速率，将分装好的10g装冷鲜肉小样分别置于不同温度的恒温箱中，每隔一定时间分别对其进行TBA值的测定。

1.3.3　糖化酶型时间-温度指示器与食品的匹配原则

适用性是评价TTI能否指示食品质量时要考虑的重要问题。一种TTI不可能适用于所有的产品，必须有针对性地为不同的食品选择相应的指示器。符合匹配原则方可将TTI应用到相应产品上。TTI预测食品货架寿命的匹配原则如下：TTI反应的终点与食品货架寿命的终点相吻合；TTI与食品的活化能差值小于25kJ/mol。

2　结果与分析

2.1　糖化酶型时间-温度指示器动力学研究

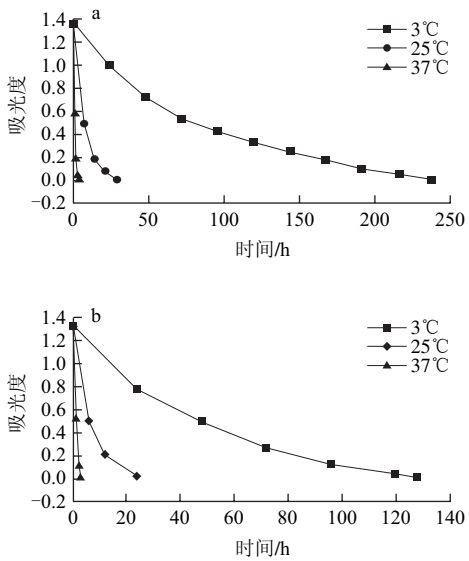
2.1.1　各TTI体系在不同温度条件下反应速率的确定

在本实验中，通过测定时间-温度指示器在变色反应过程中的吸光度，可以绘制出3种TTI在指示时间内吸光度随时间变化的曲线，如图1所示。

利用数据处理软件对吸光度-时间曲线进行指数函数拟合：

$$X=a\times\exp(-kt)+b \quad (2)$$

式中：X是TTI体系的吸光度；a、k及b分别是拟合函数参数。由此得到糖化酶型时间-温度指示器在不同温度条件下的反应速率k，如表1所示。



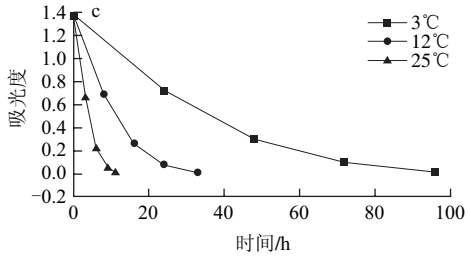


图 1　不同温度条件下1#TTI(a)、2#TTI(b)和3#TTI(c)的吸光度与时间的关系

Fig.1　Relationships between the absorbance of TTIs and reaction time at different temperatures

表 1　各拟合曲线参数及相应ln*k*值

Table 1　The parameters of fitted curves and corresponding ln*k* value

组别	温度*T*/K	*a*	*b*	*k*	R^2	1/*T*	ln*k*
1#TTI	276(3℃)	1.38600	−0.04975	0.012	0.99662	0.00362	−4.423
	298(25℃)	1.34646	−0.00367	0.144	0.99959	0.00336	−1.938
	310(37℃)	1.42412	−0.06897	0.822	0.99890	0.00323	−0.196
2#TTI	277(3℃)	1.43066	−0.11779	0.019	0.99889	0.00362	−3.9792
	298(25℃)	1.35024	−0.00325	0.167	0.99948	0.00336	−1.7898
	310(37℃)	1.42937	−0.12634	0.843	0.99856	0.00323	−0.1708
3#TTI	276(3℃)	1.51356	−0.14747	0.025	0.99921	0.00362	−3.6969
	285(12℃)	1.47432	−0.11943	0.082	0.99784	0.00351	−2.4990
	298(25℃)	1.50224	−0.14526	0.226	0.99777	0.00336	−1.4885

从表1可以看出，不同温度条件下的拟合曲线方程的相关系数R^2都在0.99以上，说明3种TTI在不同温度条件下的吸光度与时间的指数相关性显著。

2.1.2　各TTI体系活化能的确定

酶催化反应中温度对反应速率的影响遵循Arrhenius公式[16]：

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (3)$$

式中：k为反应的速率常数；k_0为指前因子，对于指定反应是一个常数；R为摩尔气体常数，在法定计量单位中R=8.314J/(mol·K)；T为热力学温度/K；E_a为活化能。

以ln$k$对1/T作图，若两者线性关系显著，说明不同温度条件下的速率常数k符合Arrhenius方程，则可利用Arrhenius方程求出活化能E_a和指前因子k_0。

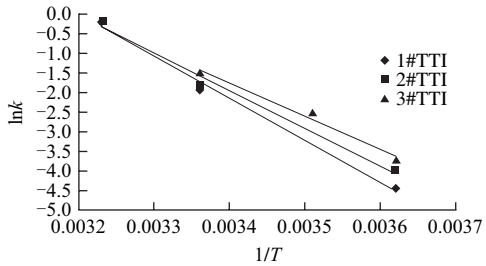


图 2　各TTI的ln*k*对1/*T*关系曲线

Fig.2　The curves between ln*k* and 1/*T* for TTIs

根据表1中不同温度条件下所对应的ln$k$值，可以作出ln$k$与1/T的关系曲线，如图2所示。

利用数据处理软件，可以得到各TTI的拟合直线，利用Arrhenius方程可以求得各自的活化能E_a和指前因子k_0，如表2所示。

表 2　各TTI的动力学参数

Table 2　The kinetic parameters of TTIs

项	1#TTI	2#TTI	3#TTI
拟合直线	$\ln k=34.08-10655.49\frac{1}{T}$	$\ln k=30.327-9496.576\frac{1}{T}$	$\ln k=34.08-10655.49\frac{1}{T}$
R^2	0.99604	0.99536	0.99056
k_0/h^{-1}	6.32×10^{14}	1.48×10^{13}	4.27×10^{11}
E_a/(kJ/mol)	88.59	78.95	69.76

理论研究表明，当TTI的活化能与产品的活化能相差在25kJ/mol之内时，该TTI便可应用于该产品。1#TTI、2#TTI、3#TTI可以指示的产品活化能范围分别为63～113kJ/mol、53～103kJ/mol、44～94kJ/mol。根据Labuza[17]在1982年提到的引起食品质量下降的主要反应的活化能，可以判断出1#TTI可以应用于因脂肪氧化、微生物增长而造成食品质量损失的产品，如油脂、肉类、糕点、鱼类等；2#TTI、3#TTI均可以应用于因脂肪氧化而造成质量损失的食品，如油脂、肉类等产品。

2.2　冷鲜肉氧化动力学参数的确定

冷鲜肉是低温流通中主要因脂肪氧化而发生腐败的典型。此外，冷鲜肉在0～4℃条件下通常可以保存3～7d，与所研制TTI的指示时间相近。因此，本实验拟选用冷鲜肉进行研究，并选用与之在指示时间及活化能方面均匹配的时间-温度指示器对其新鲜程度进行监测。

一般来说，当冷鲜肉的TBA值超过0.5mg/kg时，肉就会有氧化异味[18-19]。故以TBA值达到0.5mg/kg所经历的时间作为冷鲜肉的货架寿命。

在本实验中，通过测定冷鲜肉在因脂肪氧化而变质过程中的TBA值点，可以绘制出冷鲜肉在货架期内TBA值随时间变化的曲线，利用数据处理软件对TBA值-时间曲线进行拟合，如图3所示。据此得到冷鲜肉在不同温度条件下的脂肪氧化速率。

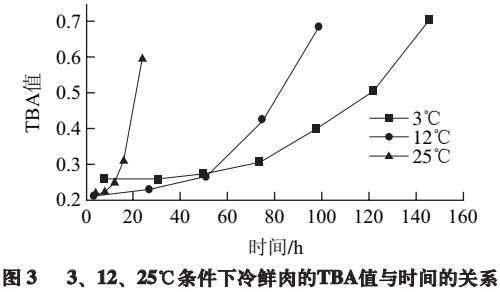


图 3　3、12、25℃条件下冷鲜肉的TBA值与时间的关系

Fig.3　Relationship between TBA in chilled pork and reaction time at 3, 12 ℃ and 25 ℃

由图3可以看出，在各温度条件下TBA值与时间呈显著的指数关系，且随着温度的升高，TBA值达到终点值0.5mg/kg所需的时间依次变短：3℃条件下122h、12℃条件下85h、25℃条件下22h。说明随着温度的升高，冷鲜肉的脂肪氧化速率加快。

由图3可以得到不同温度条件下冷鲜肉的脂肪氧化速率及拟合曲线的相关系数，从而可以得到冷鲜肉的ln$k$与温度对应关系，如表3所示。

表 3 冷鲜肉的ln$k$与温度对应值

Table 3 The ln$k$ value of chilled pork under different temperatures

T/K	1/T	ln$k$
276(3℃)	0.00362	−3.8167
285(12℃)	0.00351	−3.4029
298(25℃)	0.00336	−1.8031

根据表3中不同温度条件下所对应的ln$k$值，可以作出ln$k$与1/T的关系曲线。该模型的复相关系数R为−0.9694，故该模型可以达到显著水平。即冷鲜肉的ln$k$与1/T之间遵循线性关系。因此可利用Arrhenius方程求出其活化能E_a和指前因子k_0。

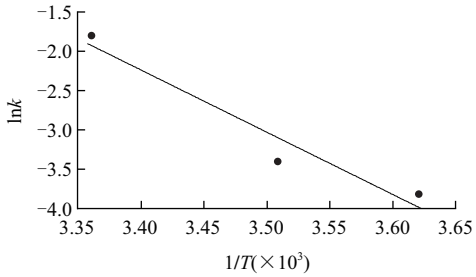


图 4 冷鲜肉的ln$k$对1/T关系曲线

Fig.4 The curve between ln$k$ and 1/T for chilled pork

由拟合直线$\ln k=24.63-7904.6\frac{1}{T}$，可求得冷鲜肉的指前因子及活化能：

$$k_0(\text{冷鲜肉})=4.97\times10^{10}\text{h}^{-1} \quad (4)$$

$$E_a(\text{冷鲜肉})=65.72\text{kJ/mol} \quad (5)$$

2.3 糖化酶型时间-温度指示器监测冷鲜肉的贮藏质量

2.3.1 活化能匹配

对于冷鲜肉，测得其因脂肪氧化而变质的活化能为65.72kJ/mol，则TTI的活化能只要在40.72～90.72kJ/mol之间，就能够满足活化能的匹配要求。

从表2可以看出，1#TTI、2#TTI、3#TTI的活化能均在该范围之内，故而均能满足活化能的匹配要求。

2.3.2 恒温条件下的反应终点匹配

通过前面的实验，已经得到3种TTI在3、25℃恒温条件下各自的指示时间，以及冷鲜肉在3、25℃恒温条件下的货架期，如表4所示。

表 4 不同温度条件下各TTI的指示时间及冷鲜肉的货架期

Table 4 Indicating time of TTIs and shelf life of chilled pork under different temperatures

恒温温度/℃	冷鲜肉货架期/h	指示时间/h		
		1#TTI	2#TTI	3#TTI
3	122	238	128	96
25	22	29	24	11

从表4可以看出，不论是在3℃还是25℃条件下，2#TTI的指示时间与冷鲜肉的货架期均是最接近的，预测误差分别为4.92%、9.09%(对食品质量评估的误差在15%以下，时间-温度指示器就可以应用于该食品中)。因此，可以认为2#TTI的反应终点与冷鲜肉的货架寿命终点在恒温条件下是相吻合的。

2.3.3 变温条件下的反应终点匹配

由于产品在流通的整个过程中很少会一直保持恒温的条件，因此有必要在变温条件下对2#TTI与冷鲜肉的匹配情况进行研究。

将制作好的2#TTI体系和独立自封袋包装的冷鲜肉样品共同置于生化培养箱中，进行变温实验，如图5所示，先在3℃条件下经历12h，再在23℃条件下经历3h，再在37℃条件下经历1h，然后在12℃条件下培养5h，最后在3℃条件下培养[20]。每隔一段时间，测定TTI体系的吸光度和冷鲜肉TBA值的变化情况。

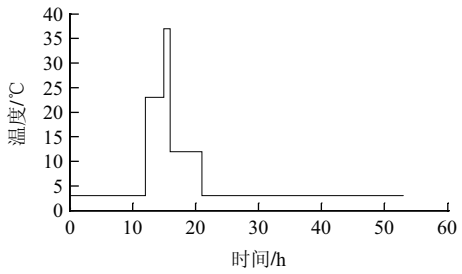


图 5 变温实验中冷鲜肉经历的时间-温度历程

Fig.5 The time-temperature course of chilled pork under variable temperatures

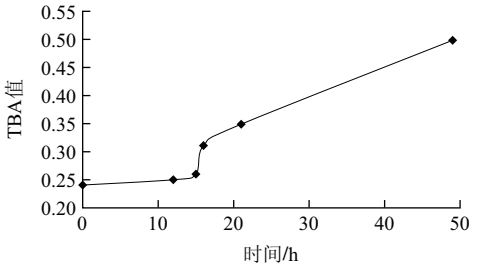


图 6 变温条件下冷鲜肉的TBA值随时间的变化

Fig.6 The change in TBA value of chilled pork over time under variable temperatures

由图6可以看出，在整个变温实验中，TBA值逐渐变大，说明随着时间的延长，冷鲜肉的脂肪氧化速率加大，

冷鲜肉的TBA值由初始的0.24mg/kg逐渐变大，最终达到0.5mg/kg的时间为49h左右；从图中还可以看到，3℃条件下冷鲜肉的TBA值变化比较缓慢，37℃条件下TBA值变化最快，12、23℃条件下TBA值变化次之，说明各温度条件下的变化速率不同，温度越高脂肪氧化速率越大。

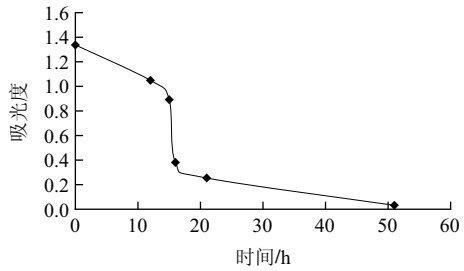


图7 变温条件下2#TTI的吸光度随时间的变化

Fig.7 The change in absorbance of 2# TTI over time under variable temperatures

与之对应的2#TTI体系吸光度变化情况如图7所示。可以看到，2#TTI体系在52h左右时，吸光度接近于0，说明此时TTI体系的颜色已变为无色，反应达到终点。2#TTI体系在3℃条件下吸光度降低比较缓慢，37℃条件下吸光度曲线很陡峭，说明其变化很快，12、23℃条件下次之，这与冷鲜肉脂肪氧化速率受温度的影响情况是一致的。

TTI体系在变温实验中的响应函数$F(X)$用有效温度$T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{TTI}}$表示，分析食品在变温实验的货架期时，其质量函数$Q(A)$模型采用有效温度$T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{food}}$表示[20]，则

$$F(X)_t = k_0^{\mathrm{TTI}}\exp(-E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{TTI}}/\mathrm{R}T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{TTI}})t \tag{6}$$

式中：$F(X)_t$为TTI的响应函数；k_0^{TTI}为TTI的指前因子；$E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{TTI}}$为TTI的活化能/(J/mol)；$T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{TTI}}$为TTI经历的有效温度/K。

$$Q(A)_t = k_0^{\mathrm{food}}\exp(-E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{food}}/\mathrm{R}T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{food}}) \tag{7}$$

式中：$Q(A)_t$为食品的质量函数；k_0^{food}为食品的指前因子；$E_{\mathrm{a}}^{\mathrm{food}}$为食品的活化能/(J/mol)；$T_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{food}}$为食品经历的有效温度/K。

对于图5所示的变温历程，2#TTI在达到指示终点时：

$$F(X)_t = \int_0^t k\mathrm{d}t = \int_0^{12} k_3\mathrm{d}t + \int_{12}^{15} k_{23}\mathrm{d}t + \int_{15}^{16} k_{37}\mathrm{d}t + \int_{16}^{21} k_{12}\mathrm{d}t + \int_{21}^{51} k_3\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中：k_3、k_{12}、k_{23}、k_{37}分别为3、12、23、37℃条件下2#TTI的吸光度变化速率，积分上下限为图5所示变温历程中各段所对应的起止时间。

根据公式(3)及2#TTI的指前因子、活化能值，可以得到2#TTI的反应速率表达式

$$k_{2\#\mathrm{TTI}} = 1.48\times10^{13}\mathrm{e}^{(-78.95\times10^3/RT)t} \tag{9}$$

由此，可以得到2#TTI在各温度条件下的反应速率，如表5所示。

表5 2#TTI在不同温度条件下的反应速率

Table 5 The reaction rates of 2# TTI under different temperatures

温度/℃	3	12	23	37
反应速率k/h^{-1}	0.017	0.050	0.173	0.736

将表5中的反应速率带入式(8)可以得到达到指示终点时的$F(X)_t$=2.236。将该值及2#TTI的指前因子$k_0^{2\#\mathrm{TTI}}$=1.48×1013h^{-1}、活化能$E_{\mathrm{a}}^{2\#\mathrm{TTI}}$=78.95kJ/mol、指示时间$t$=52h带入到公式(6)中，可以得到该变温历程中2#TTI的等效温度$T_{\mathrm{eff}}^{2\#\mathrm{TTI}}$=284K。

对于图5所示的变温历程，冷鲜肉在达到货架终点时：

$$Q(A)_t = \int_0^t k\mathrm{d}t = \int_0^{12} k_3\mathrm{d}t + \int_{12}^{15} k_{23}\mathrm{d}t + \int_{15}^{16} k_{37}\mathrm{d}t + \int_{16}^{21} k_{12}\mathrm{d}t + \int_{21}^{51} k_3\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中：k_3、k_{12}、k_{23}、k_{37}分别为3、12、23、37℃条件下冷鲜肉的脂肪氧化速率。

根据公式(3)～(5)，冷鲜肉的脂肪氧化速率函数可以表示为：

$$k_{\text{冷鲜肉}} = 4.97\times10^{10}\mathrm{e}^{(-65.72\times10^3/RT)t} \tag{11}$$

由此，可以得到各温度条件下的反应速率，如表6所示。

表6 冷鲜肉在不同温度条件下的脂肪氧化速率

Table 6 The fat oxidation rates of chilled pork under different temperatures

温度/℃	3	12	23	37
脂肪氧化速率k/h^{-1}	0.018	0.045	0.125	0.419

将表6中的反应速率带入(10)式可以得到冷鲜肉达到货架终点时的$Q(A)_t$=1.739。将该值及冷鲜肉的指前因子$k_0^{\text{冷鲜肉}}$=4.97×10^{10}h^{-1}、活化能$E_{\mathrm{a}}^{\text{冷鲜肉}}$=65.72kJ/mol、货架寿命$t$=49h带入到公式(7)中，可以得到该变温历程中冷鲜肉的等效温度$T_{\mathrm{eff}}^{\text{冷鲜肉}}$=285K。

由上述计算可知，在图5所示的变温历程下，2#TTI监测冷鲜肉的T_{eff}误差为1℃，货架寿命预测误差为8.16%＜15%，在误差要求的范围之内。因此，在变温情况下，2#TTI的反应终点与冷鲜肉的货架寿命终点亦是相吻合的。

综上所述，2#TTI的活化能与冷鲜肉的活化能差值小于25kJ/mol，其对冷鲜肉质量评估的误差在恒温与变温条件下均低于15%，因此2#TTI可以用来监测冷鲜肉在流通过程中的质量状况。实际应用中，若TTI的颜色显示为深紫色，则说明食品一直处于低温的环境下，新鲜度良好；若TTI的颜色呈浅粉色，则表明食品已经处于变质的边缘，营养流失比较严重。

3 结 论

本实验确定了加酶量分别为30、50、75μL的3种糖化酶型时间-温度指示器的活化能分别为88.59、78.95、

69.76kJ/mol。根据TTI活化能必须与食品活化能相匹配的原则，得到了它们各自可以指示的食品类型：加酶量为30μL的TTI可以应用于因脂肪氧化、微生物增长而造成食品质量损失的产品；加酶量为50、75μL的TTI可以应用于因脂肪氧化而造成质量损失的食品。冷鲜肉是低温流通中主要因脂肪氧化而发生腐败的典型。研究工作通过测定冷鲜肉TBA值随时间的变化曲线，对冷鲜肉的变质机理及其动力学性能进行了研究，得到不同温度条件下脂肪氧化的速率，计算出冷鲜肉的活化能，并根据TBA值达到0.5mg/kg时即认定变质来计算冷鲜肉的货架寿命。在恒温、变温条件下，对冷鲜肉和TTI进行实验，验证TTI反应终点与食品货架寿命终点的匹配性，结果表明：加酶量为50μL的糖化酶型时间-温度指示器可以较准确地用于预测冷鲜肉的货架寿命。

参考文献：

[1] WANIHSUKSOMBAT C, HONGTRAKUL V, SUPPAKUL P. Development and characterization of a prototype of a lactic-acid-based time-temperature indicator for monitoring food product quality[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 427-434.

[2] SHIMONI E, ANDERSON E M, LABUZA T P. Reliability of time temperature indicators under temperature abuse[J]. Food Engineering and Physical Properties, 2001, 66(9): 1337-1340.

[3] 田秋实, 谢晶. 时间温度指示剂的发展现状[J]. 渔业现代化, 2009, 36(6): 50-52.

[4] 吴秋明. 应用脲酶开发货架寿命指示体系的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[5] 蔡华伟. 淀粉酶时间温度指示卡的研制与开发[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.

[6] SUN Yan, CAI Huawei, ZHENG Limin, et al. Development and characterization of a new amylase type time-temperature indicator[J]. Food Control, 2008, 19: 315-319.

[7] 宁鹏. 碱性脂肪酶型时间-温度指示卡的研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.

[8] 郑光临, 钱静. 糖化酶型时间-温度指示器反应体系的制备[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 82-85..

[9] 耿爱琴, 郑国锋, 钱和. 浅述肉类新鲜度的检测方法[J]. 肉类工业, 2006(12): 37-39.

[10] 黄蓉, 刘敦华. 猪肉新鲜度评价指标、存在问题及应对措施[J]. 肉类工业, 2010(6): 43-46.

[11] 李苗云, 张秋会, 高晓平, 等. 冷却猪肉贮藏过程中腐败品质指标的关系研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(7): 168-171.

[12] 黎园园. 解冻猪肉腐败机理及解冻措施优化研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2010.

[13] 王正勇. 肉制品中的脂肪氧化[J]. 肉类研究, 1999, 13(1): 16-19.

[14] 王爱枝. 食品中脂肪的酸败及检测[J]. 肉类研究, 1998, 12(8): 34-38.

[15] 李娜. 冷却猪肉脂肪光氧化机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.

[16] TAOUKIS P S, LABUZA T P. Applicability of time temperature indicators as shelf-life monitors of food products[J]. Food Science, 1989, 54: 783-788.

[17] LABUZA T P. Shelf-life dating of foods[M]. Westport, CT: Food and Nutrition Press, 1982.

[18] 霍晓娜, 李兴民, 刘毅, 等. 猪腿肉脂肪酸组成及脂肪氧化的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(1): 101-104.

[19] 孙群. 肉制品脂类氧化: 硫代巴比妥酸试验测定醛类物质[J]. 食品科学, 2002, 23(8): 331-334.

[20] TAOUKIS P S, LABUZA T P. Reliability of time-temperature indicators as food quality monitors under non-isothermal conditions[J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4): 789-792.

欢迎订阅《酿酒》杂志

邮发代号：14-62

《酿酒》杂志是我国酿酒行业专业性期刊。出版时间早，发行量大，反映讯息快，在国内酿酒界有很高声誉。深受企业、科研、大中专院校、广大管理干部和科技人员欢迎。

《酿酒》杂志1974年创刊，原名《黑龙江发酵》，为季刊，1982年改名为《酿酒》，1985年改为双月刊。国内外公开发行的专业技术性刊物。

《酿酒》杂志是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊，《中国期刊网》、《中国学术期刊光盘版》全文收录期刊。为美国化学文摘摘选为来源期刊，为全国统计源期刊。国内外公开发行。

● 国内刊号CN23-1256，国际刊号ISSN1002-8110，国外代号BM6776。

● 本刊为双月刊，可在当地邮局订阅，也可直接汇款至编辑部，我部常年订阅。

● 双月刊，大16开本，120.00元/年(如需挂号请另加邮费18.00元/年)

地　址：哈尔滨市道里区端街43号

电　话：0451-84677504　　传　真：0451-84677504　　邮　编：150010　　Emal：zhtnj@163.com