

时间温度指示器等量线匹配适应性评估方法^{*}

马常阳¹ 傅泽田² 姚萌萌¹ 张小栓¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种基于等量线匹配的时间温度指示器(TTI)评估方法。首先,从理论方面论证了等量线方法的可行性,然后以不同温度条件下的4种TTI响应值与玫瑰香葡萄硬度变化进行了验证与评估。研究结果表明,Vitsab M25-2型TTI最适于监测玫瑰香葡萄的品质变化,此结果与经过变温方案检验的反应动力学方法的评估结果一致。同时发现,TTI和玫瑰香葡萄等量线之间的差异与其反应活化能之间的差别呈正相关关系,进一步验证了等量线方法的可靠性。

关键词: 时间温度指示器 品质等量线 反应活化能 动力学方程

中图分类号: TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0183-06

引言

作为一种简便智能的温度感知装置,时间温度指示器(Time temperature indicator, TTI)通过监测物流过程中不断变化的环境温度,产生相应的内部反应使其自身颜色发生变化。这样,TTI可以在产品货架期终点时显示出明显的视觉差异,间接地反映产品的品质变化过程,监测该产品的货架期。目前,TTI正在逐步被应用于农产品与食品物流过程的品质监测^[1-3]。

由于TTI变化过程和产品品质变化过程是两个独立的随温度变化而变化的过程,因此,为了能让TTI准确地监测产品货架期,不仅需要分别建立两者的反应动力学模型,还需要逐步验证两者的耦合程度:第一,活化能相匹配,即TTI本身与被感知产品对温度的敏感性相同或相近,在一定的可接受误差范围之内;第二是货架期相匹配,即TTI响应值要与产品质量变化具有同步效应,TTI动力学模型可以模拟质量变化整个过程,且激活后TTI的监测时间需要与被监测产品的剩余货架期趋于一致^[4-7]。

在这个过程中,首先需要构建TTI和产品的反应动力学模型,并在此基础上进行耦合。动力学方程一般进行经过多次数学拟合,不仅计算复杂,精确度也会有所下降。

本文提出基于等量线匹配方法,对TTI适应性进行评估,以期直观、快速地评价TTI和待测产品的

相关程度。

1 方法构建

1.1 等量线方法

为待测农产品选择合适的TTI,需要保证TTI在恒温 and 变温条件下的监测时间与农产品的货架期接近。在时间-温度二维图中把不同恒温条件下的农产品货架期终点连成线,则在这条线上的所有点都有着与货架期终点等量的品质状态,因此这条线记为所监测农产品的货架期终点品质等量线(简称农产品等量线);同理也可以绘制TTI的响应值终点状态的等量线(简称TTI等量线)。当农产品等量线与TTI等量线接近时(如图1),则可以保证在不同的恒温条件下农产品的货架期与TTI的监测时间十分接近,即在恒温条件下,TTI可以很好地监测产品货架期。而变温过程可以看作多个不同温度的恒温过程组合在一起,如果变温过程中的每个恒温阶段所测农产品和TTI的反应进度相同,那么农产品在

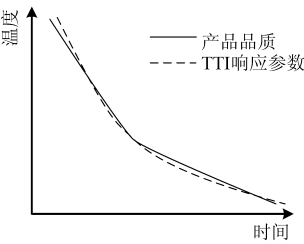


图1 农产品货架期和TTI响应值终点等量线图示

Fig. 1 Contour diagrams of agricultural produce and TTI

收稿日期: 2013-09-03 修回日期: 2013-09-21

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31371538)和新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0491)

作者简介: 马常阳,博士生,主要从事食品物流信息技术与追溯系统研究, E-mail: macaya1024@sina.com

通讯作者: 张小栓,教授,博士生导师,主要从事农(渔)业系统工程与信息化技术研究, E-mail: zhxshuan@cau.edu.cn

变温过程到达货架期终点时,TTI 的响应值也会变化到最终状态,这样就可以简化 TTI 的匹配方法。本文使用动力学模型对变温过程的匹配效果进行检验。

1.2 理论证明

据前人关于农产品和 TTI 的研究发现,农产品的品质参数变化很好地遵循反应级数不同的动力学方程^[8]

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ^n \tag{1}$$

TTI 的响应函数 $f(E)$ 遵循^[9]

$$f(E) = kt \tag{2}$$

式中 Q ——产品的品质参数
 $f(E)$ ——TTI 的响应函数
 t ——时间变量 k ——反应速率函数
 n ——反应动力学级数

设 $Q(A)$ 为通过对动力学方程积分而得到的产品的品质函数, Q_0 和 Q_t 分别为产品初始和 t 时的品质状态。当反应级数不同时, $Q(A)$ 对应着不同的函数表达式。当产品品质参数遵循 0 级动力学方程时, $Q(A) = Q_t - Q_0$;当其遵循 1 级动力学方程时, $Q(A) = \ln Q_t - \ln Q_0$;当其遵循 2 级及其以上级数的动力学方程时, $Q(A) = \frac{Q_t^{1-n} - Q_0^{1-n}}{1-n}$ 。而对于不同的 TTI, $f(E)$ 有着各自的具体形式。

在动力学模型中,反应速率均使用人们最常见的 Arrhenius 方程来描述^[10],即

$$\begin{cases} Q(A) = kt = \left[k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \right] t \\ f(E) = k't = \left[k'_0 \exp \left(-\frac{E'_a}{RT} \right) \right] t \end{cases} \tag{3}$$

式中 k_0 ——指前因子
 E_a ——动力学反应活化能
 R ——通用气体常数,取 8.314 J/(mol·K)
 T ——反应绝对温度,K
 E'_a 、 k' 、 k'_0 ——TTI 响应值变化的相关参数

当农产品品质和 TTI 响应值变化的反应活化能 E_a 和 E'_a 相等时,就可以保证变温过程中速率函数的变化相同,进而保证农产品品质函数和 TTI 响应函数在相同状态下的反应进度相同。

在动力学模型已知的前提下,图 1 中两条等量线还可以借助农产品和 TTI 的动力学模型进行构建^[11]。图中两个产品等量线的接近,说明在所研究的任何恒定温度 T 下,TTI 从初始状态到达终点状态所需要的时间 t 与农产品的货架期是十分接近的,因此式(3)可以进行以下推导,得出关于时间 t

与温度 T 的相关关系

$$t = \frac{Q(A)}{k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right)} \approx \frac{f(E)}{k'_0 \exp \left(-\frac{E'_a}{RT} \right)} \tag{4}$$

进而可以推导出

$$k = k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \approx \frac{Q(A)}{f(E)} k'_0 \exp \left(-\frac{E'_a}{RT} \right) \tag{5}$$

经过对数变化,可以推导出

$$\ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \approx \ln \left(\frac{Q(A)}{f(E)} k'_0 \right) - \frac{E'_a}{RT} \tag{6}$$

农产品和 TTI 的初始状态和终点状态都是固定的,因此在给定农产品和 TTI 的情况下, $Q(A)$ 和 $f(E)$ 是两个恒定的常数。因此在式(6)中,对于分布相近的样本点,它们相对于温度变量 T 的斜率项和截距项也都是很相近的,农产品和 TTI 动力学模型中的反应活化能和指前因子相近,即

$$\begin{cases} \frac{E_a}{R} \approx \frac{E'_a}{R} \\ \ln k_0 \approx \ln \left(k'_0 \frac{Q(A)}{f(E)} \right) \end{cases} \tag{7}$$

由此看出,只要保证农产品货架期等量线与 TTI 等量线相吻合,就能保证这两个研究对象反应活化能相近,即反应速率随着温度变化的一致性。需要注意的是,式(6)是式(7)的必要但不充分条件,当所监测的产品等量线与 TTI 等量线并不接近时,式(6)并不能推导出式(7),但这种情况可以通过比较等量线差异的方式排除掉,并不妨碍等量线方法对 TTI 匹配性的评估。综上可知,使用等量线法可以直观、综合地评估 TTI 对农产品品质的预测效果。

2 验证试验设计

2.1 材料处理

目前文献显示 TTI 已经被大量适用于奶制品、水产品、畜牧产品、冷冻蔬菜等领域,并且已经成功地验证了其适应性^[12]。为了验证等量线匹配方法,本文选择前人研究较少的玫瑰香(Muscata Hamburg)鲜食葡萄品种进行研究。

硬度是葡萄品质评价的一个重要指标,它决定了葡萄的货架期^[13-16]。通过进一步试验发现葡萄果实硬度与感官相关度最高,因此本文选择葡萄硬度作为品质参数构建货架期预测模型。

同时本研究选用了酶型和化学型两类 4 种 TTI 标签,分别是 I-Point 公司生产的 Vitsab C25-4 和 Vitsab M25-2 时间温度指示器,BASF 公司生产的 OnVu 时间温度指示器(紫外光定量激活 2 s 和 4 s 进行使用,记为 OnVu(2 s) 和 OnVu(4 s)),把玫瑰

香葡萄和 4 种标签置于相对湿度为 85% ~ 90% , 温度在 0、5、10、20、25、30℃ 的条件下, 定期对葡萄硬度和 TTI 颜色进行测定。

为了检验 TTI 和鲜食葡萄对于温度波动的敏感特性, 提高 TTI 对实际变温物流过程的监测精度, 本文设计了 2 个变温过程, 分别模拟了采后低温波动贮藏和高温运输销售 2 个过程, 低温过程为 (0℃, 4 d) — (5℃, 2 d) — (10℃, 2 d) — (5℃, 2 d) — (0℃, 2 d) …… 循环波动, 高温过程为 (20℃, 2 d) — (30℃, 1 d) — (25℃, 1 d), 直到玫瑰香葡萄的硬度指标下降到不满意为止。

2.2 测定方法

本文采用 CT3 型质构仪检测葡萄硬度, 测定出的第一个硬度峰值作为硬度^[16]; 同时使用 Minolta CR200 型色差计对 TTI 标签进行 L 、 a 、 b 值的测定。根据前人对于两类 TTI 颜色特征的研究^[17-19], 本文分别使用以初始状态为基准的总色差 (ΔE) 和经过标准化和高斯拟合的色度 ($F(X_c)$) 构建响应函数, 对 OnVu™ 系列和 Vitsab 系列的 TTI 颜色特征变化情况进行测度, 具体公式为

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$
 (8)

$$\begin{cases} X_c = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \\ F(X_c) = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1 - X_c}\right)} \end{cases}$$
 (9)

其中
式中 a 、 b ——红绿色度和黄蓝色度
 ΔL 、 Δa 、 Δb ——以初始颜色状态为基准的亮度差、红绿色度差和黄蓝色度差
 C ——色度
 X_c ——标准化后的色度
 $F(X_c)$ ——经过高斯拟合的色度

3 结果分析与讨论

3.1 基于等量线的 TTI 匹配性评估

经过对不同温度条件下玫瑰香葡萄硬度以及 OnVu™ 系列和 Vitsab 系列 TTI 标签响应值的监测, 葡萄硬度和 4 种 TTI 响应值在不同温度下的变化情况如图 2 ~ 4 所示。

根据图中玫瑰香葡萄硬度变化和 TTI 响应值的变化, 可以测得鲜食葡萄在不同温度下的剩余货架期和 TTI 到达响应值终点所需的时间 (图 5)。玫瑰香葡萄和 4 种 TTI 的等量线可以通过图中的样本点进行曲线拟合得到。

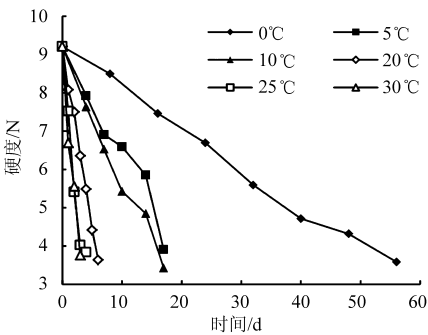


图 2 不同贮藏温度下玫瑰香葡萄硬度变化情况
Fig. 2 Firmness changes of Muscat Hamburg grape at different temperatures

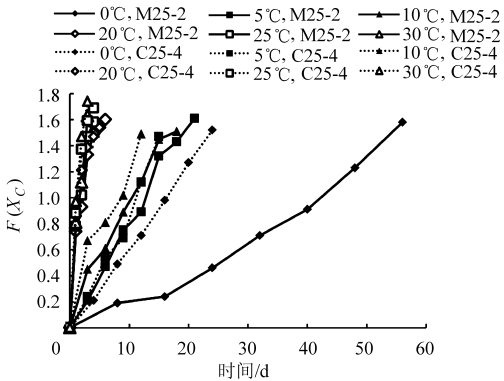


图 3 Vitsab 系列 TTI 的响应值 $F(X_c)$ 变化情况
Fig. 3 Response value change $F(X_c)$ of the Vitsab TTIs

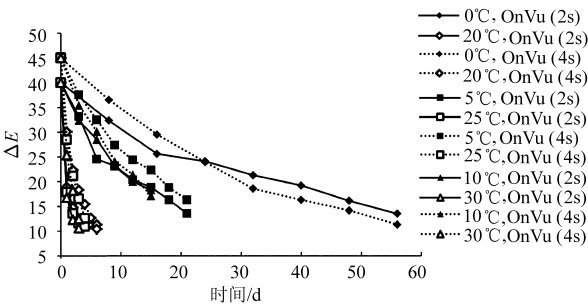


图 4 OnVu 系列 TTI 的响应值 ΔE 变化情况
Fig. 4 Response value change ΔE of the OnVu TTIs

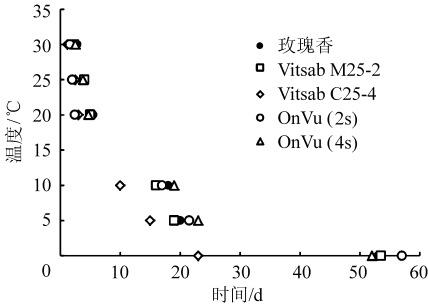


图 5 玫瑰香葡萄货架期和 TTI 反应终点所需时间
Fig. 5 Shelf life of the Muscat Hamburg and end point times of the TTIs

为了比较图 5 中 TTI 等量线与玫瑰香葡萄的差异程度, 本文使用了用于拟合等量线的样本点进行差异对比, 具体公式为

$$\Delta t_{ij} = \frac{t_{ij} - t_i}{t_i} \tag{10}$$
$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^{n'} |\Delta t_{ij}|}{n'} \times 100\% \tag{11}$$

式中 D_i ——平均相对偏差
 t_{ij} ——特定 TTI(j) 在 i 温度下的响应值终点所需的时间
 t_i ——玫瑰香葡萄在 i 温度下的货架期
 n' ——所取的温度样本点数,此处为 6 个恒温监测点
 Δt_{ij} ——特定 TTI(j) 相对于对应温度(i) 下货架期的相对偏差

对不同温度下的相对偏差绝对值化并取平均值(式(11)),可以得到相对于玫瑰香葡萄货架期结果的平均相对偏差,即为 TTI 等量线与玫瑰香葡萄等量线在所研究温度范围内的平均差异。

由计算结果得出:Vitsab M25-2、Vitsab C25-4、OnVu(2 s) 和 OnVu(4 s) 的平均相对偏差分别为 7.33%、44.36%、28.30% 和 8.78%,按从小到大排序,依次为:Vitsab M25-2、OnVu(4 s)、OnVu(2 s) 和 Vitsab C25-4。Vitsab M25-2 型和 OnVu(4 s) 型 TTI 与玫瑰香葡萄硬度品质的平均相对偏差在 10% 以下;Vitsab M25-2 的平均相对偏差最小,其等量线最接近于玫瑰香葡萄的硬度品质等量线。由此可以判断出 Vitsab M25-2 的监测时间和反应活化能均与所测的玫瑰香葡萄最接近,因此该 TTI 是最适合于监测其品质变化的 TTI。

为了检验等量线方法的准确性,本文使用基于活化能和货架期的 TTI 匹配性评估方法进行验证。

3.2 基于反应活化能和货架期的 TTI 匹配性评估

为了构建玫瑰香葡萄品质变化动力学模型,首先对玫瑰香葡萄硬度变化进行 0 级和 1 级动力学拟合判定,其决定系数如表 1 所示。

表 1 硬度变化动力学拟合方程决定系数 R^2

Tab.1 Coefficient of determination for the zero and first order linear regression respectively

温度/℃	0 级	1 级	温度/℃	0 级	1 级
0	0.98	0.99	20	0.99	0.98
5	0.97	0.90	25	0.86	0.95
10	0.97	0.96	30	0.96	0.99

由于 1 级动力学方程的拟合决定系数 R^2 均高于 0.9,因此本文使用 1 级动力学方程对玫瑰香葡萄进一步进行品质动力学方程拟合(图 6),得到斜率和截距即为反应活化能(E_a)和指前因子(k_0)。

同理,本文使用 Arrhenius 模型,计算出了所研

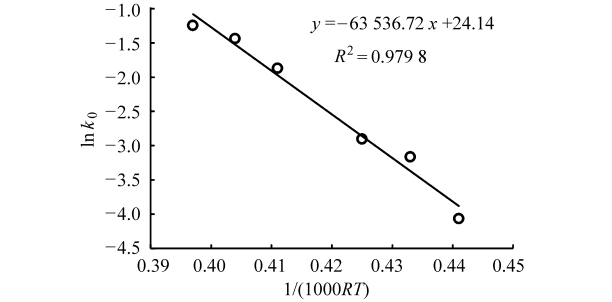


图 6 玫瑰香葡萄硬度变化的 Arrhenius 图
Fig.6 Arrhenius plots for change of grape firmness

究的 4 种 TTI 的反应动力学参数,并与玫瑰香葡萄的参数一起列在表 2 中。

由表 2 可以看出,4 种 TTI 响应值变化与玫瑰香葡萄硬度变化的反应活化能的差异从小到大依次为:OnVu(4 s)、Vitsab M25-2、Vitsab C25-4 和 OnVu(2 s)。OnVu(4 s) 的反应活化能更接近玫瑰香葡萄硬度变化的反应活化能。

表 2 鲜食葡萄和各 TTI 的动力学模型参数

Tab.2 Coefficients of zero and first order linear regression respectively

	产 品	E_a	k_0	R^2
	玫瑰香	63 536.72	24.14	0.98
酶型 TTI	Vitsab M25-2	69 398.79	27.20	0.95
	Vitsab C25-4	56 574.90	22.13	0.98
化学型 TTI	OnVu (2 s)	73 936.30	28.94	0.96
	OnVu (4 s)	69 144.71	26.82	0.98

由玫瑰香葡萄和 TTI 的动力学模型,不难得出二者对应的等量线(图 7),由此可以直观比较恒温条件下 TTI 有效监测时间与玫瑰香葡萄货架期的差异。

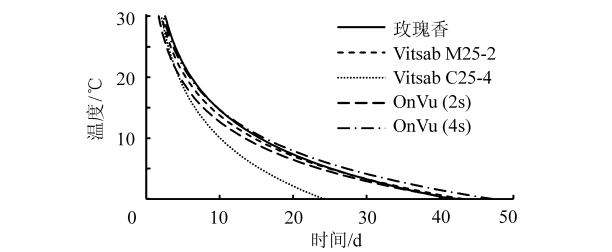


图 7 玫瑰香葡萄和 TTI 的等量线
Fig.7 Contour lines of the grape and TTIs based on the kinetic functions

从图 7 中可以看出,4 种 TTI 与玫瑰香葡萄的等量线有着不同的差异,其中 Vitsab M25-2、OnVu(2 s) 和 OnVu(4 s) 与玫瑰香葡萄对应等量线的重合部分明显较 Vitsab C25-4 多,因此 Vitsab C25-4 最不适用于监测玫瑰香葡萄的硬度品质,可以将其舍弃。

为了量化 4 种 TTI 的监测时间与农产品的剩余货架期的差异,把 0~30℃(273.15~303.15 K)内

每隔 0.1℃ (实际物流过程中温度设定和检测装置的精确度)取作样本点,对恒温条件下农产品剩余货架期和 TTI 有效监测时间进行对比分析,求得平均相对偏差结果。

由计算结果可得出:Vitsab M25-2、OnVu(2 s)和 OnVu(4 s)与玫瑰香葡萄的平均相对偏差分别为 8.89%、18.40% 和 5.77%,其中,OnVu(4 s)和 Vitsab M25-2 的偏差范围在 10% 以内;OnVu(4 s)的偏差最小,最适于玫瑰香葡萄的品质监测。各个 TTI 的平均相对偏差按从小到大排序,依次为:OnVu(4 s)、Vitsab M25-2、OnVu(2 s),与各 TTI 和鲜食葡萄反应活化能差异的排列顺序完全相同。由此可以判定出,TTI 等量线与玫瑰香葡萄等量线的差异程度与两者之间活化能差别有着强烈的正相关关系,因此 TTI 和鲜食葡萄等量线的接近程度可以综合、直观地反映两者反应活化能和监测时间这两方面的差异。

通过反应活化能和恒温条件下货架期的比较,可以初步得出 OnVu(4 s)TTI 对玫瑰香葡萄的货架期有着很好的指示效果。

3.3 两种方法结果的比较分析

通过分析可知,使用等量线方法评估的最优 TTI 与使用反应活化能和货架期评估的初步结果不一致,并且,基于反应动力学方程绘制的玫瑰香葡萄和 4 种 TTI 的等量线图(图 7)与图 5 中通过实际检测的样本点有着明显的差异。其原因在于表 2 中的反应活化能和图 7 中的等量线图均是使用鲜食葡萄和 TTI 的动力学方程估算得到的,由于在动力学方程的构建过程中需要进行多重拟合,多重拟合会导致整体拟合优度的下降,因此造成了动力学分析结果与实测数据的差异。等量线法使用实测数据进行对比,不仅简化了模型的构建过程,而且更精确、直观地反映了所测农产品和 TTI 的相应参数。

在使用反应活化能和货架期进行 TTI 匹配性评估时,还需要考察 TTI 和鲜食葡萄对于温度波动的敏感一致性。本文对比分析了 OnVu(4 s)和 Vitsab

M25-2 两种 TTI 对变温过程中的检测结果,结果显示:低温波动中,鲜食葡萄货架期为 15.6 d,M25-2 和 OnVu(4 s)终点时间分别为 15.33 d 和 17.04 d;高温波动中,葡萄货架期为 3.8 d,而这两种 TTI 的反应终点时间分别为 3.56 d 和 4.31 d。尽管 OnVu(4 s)的动力学方程反应活化能稍近于玫瑰香葡萄,但 Vitsab M25-2 对于高温波动和低温波动过程下的葡萄货架期有着更好的预测效果,更能接近鲜食葡萄实际供应过程,因此适合作为鲜食葡萄货架期的时间温度指示器。

对于等量线方法,由于不论在实际的农产品供应过程中,还是实验室模拟恒温过程中,温度均是存在波动的,因此在恒温试验中实测的产品货架期与 TTI 到达响应终点的时间差距原本就是对于二者温度敏感性的一致性检验,因此使用实测数据进行 TTI 评价的结果与使用温度变化敏感一致性检验方案评价的结果是等效的。

这也进一步表明 TTI 和鲜食葡萄等量线的接近程度可以综合地从反应活化能和农产品监测时间两方面进行比较,这不仅保证了等量线方法与动力学方法评估效果的一致性,且过程更直观、简便。

4 结论

(1) 在所研究的温度范围内,有 3 种 TTI 的等量线与玫瑰香葡萄等量线十分接近,且它们与玫瑰香葡萄等量线之间的差别与两者反应活化能之间的差别有着强烈的正相关关系。这保证了等量线方法与基于活化能和货架期方法评估效果的一致性。

(2) 通过对农产品等量线和 TTI 等量线的对比分析,发现 Vitsab M25-2 型 TTI 对于玫瑰香葡萄硬度的监测较为准确,其结果与经过变温检验的动力学方法一致,因此 Vitsab M25-2 型 TTI 可以有效用于玫瑰香葡萄的货架期预测。

综上所述,等量线方法可以对待测产品、TTI 的反应活化能和货架期终点进行综合对比,是一种准确、直观的 TTI 匹配性评估方法。

参 考 文 献

- 1 Giannakourou M C, Taoukis P S. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions [J]. Food Chemistry, 2003, 83(1): 33-41.
- 2 Bobelyn E, Hertog M L A T M, Nicolaï B M. Applicability of an enzymatic time temperature integrator as a quality indicator for mushrooms in the distribution chain [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 42(1): 104-114.
- 3 傅泽田,姚萌萌,马常阳,等.基于化学型时间温度指示器的鲜食葡萄品质监测研究[J].中国农业大学学报,2013,18(6): 186-191.
- 4 Fu Zetian, Yao Mengmeng, Ma Changyang, et al. Applicability of a chemical time temperature indicator as a quality indicator for table grape [J]. Journal of China Agricultural University, 2013,18(6):186-191. (in Chinese)
- 4 Taoukis P S, Koutsoumanis K, Nychas G J E. Use of time-temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 53(1): 21-31.

- 5 Smolander M, Alakomi H L, Ritvanen T. Monitoring of the quality of modified atmosphere packaged broiler chicken cuts stored in different temperature conditions. A. Time-temperature indicators as quality – indicating tools [J]. Food Control, 2004, 15(3): 217 – 229.
- 6 Vaikousi H, Biliaderis C G, Koutsoumanis K P, et al. Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(10): 3242 – 3250.
- 7 Lu Lixin, Zheng Weizhou, Lv Zhiye, et al. Development and application of time-temperature indicators used on food during the cold chain logistics [J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(Supp. 1): 80 – 90.
- 8 Labuza T P, Shapero M. prediction of nutrient losses [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1978, 2(2): 91 – 99.
- 9 Taoukis P S, Labuza T P. Applicability of time-temperature indicators as shelf life monitors of food products [J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4): 783 – 788.
- 10 Labuza T P. Temperature/enthalpy/entropy compensation in food reaction [J]. Food Technology, 1980, 34(2): 67.
- 11 Kwolek W F, Bookwalter G N. Predicting storage stability from time · temperature data [J]. Food Technology, 1971, 25(10): 51 – 63.
- 12 Vaikousi H, Biliaderis C G, Koutsoumanis K P. Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(10): 3242 – 3250.
- 13 李琛, 刘颖, 翁桢, 等. 贮运环境对葡萄品质的影响 [J]. 现代食品科技, 2013, 29(2): 230 – 235.
Li Chen, Liu Ying, Weng Zhen, et al. The influence of storage and transport environment on grape quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(2): 230 – 235. (in Chinese)
- 14 王昕, 李建桥, 任露泉, 等. 番茄果实采收后的硬度测定及其变化规律 [J]. 农业机械学报, 2006, 36(6): 65 – 67, 64.
Wang Xin, Li Jianqiao, Ren Luquan, et al. Mensuration and changes on firmness of tomato fruits during the post-harvest storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 36(6): 65 – 67, 64. (in Chinese)
- 15 邓云, 吴颖, 李云飞. 葡萄在贮藏和货架期间品质的预测模型 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 93 – 97.
Deng Yun, Wu Ying, Li Yunfei. Mathematical model of mass and firmness loss of grapes during storage and shelf life periods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 93 – 97. (in Chinese)
- 16 李志文, 张平, 张昆明, 等. 1 – MCP 结合冰温贮藏对葡萄果实质地的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 176 – 181.
Li Zhiwen, Zhang Ping, Zhang Kunming, et al. Effect of 1-methylcyclopropene combined with controlled freezing-point storage on texture of grape fruit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 176 – 181. (in Chinese)
- 17 Taoukis P S, Koutsoumanis K. Nychas G J E. Use of time-temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 53(1): 21 – 31.
- 18 Tsironi T, Stamatiou A, Giannoglou M, et al. Predictive modelling and selection of time temperature integrators for monitoring the shelf life of modified atmosphere packed gilthead seabream fillets [J]. LWT—Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1156 – 1163.
- 19 Han J Y, Kim M J, Shim S D, et al. Application of fuzzy reasoning to prediction of beef sirloin quality using time temperature integrators (TTIs) [J]. Food Control, 2012, 24(1 – 2): 148 – 153.

Selection Method of the Time Temperature Indicator Based on the Contour Lines

Ma Changyang¹ Fu Zetian² Yao Mengmeng¹ Zhang Xiaoshuan¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the situation that the kinetic model which is necessary for the traditional time temperature indicator (TTI) selection method is complex and inaccurate for the multiple regressions, a convenient and intuitive method based on the contour lines was proposed. The method is demonstrated in theory, and analyzed with the traditional method through an experiment about Muscat Hamburg grape and four kinds of TTI. The result shows that the TTI of Vitsab M25 – 2 could be considered as the best candidate to monitor firmness losses of Muscat Hamburg, and this is similar to the result from the traditional kinetic model. Meanwhile, the differences of the contour lines between the grape and TTIs are positive correlated with the differences between the activation energy of them, which confirms the reliability of the TTI selection method based on contour lines.

Key words: Time temperature indicator Contour lines Activation energy Kinetic model