

微生物型时间-温度指示器 (TTI) 研究进展

衣然¹, 马浩洋¹, 金露达¹, 刘启嘉¹, 王洪江¹, 李娟¹, 张东杰^{1,2}

(1.黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319; 2.国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: **目的** 介绍微生物型时间-温度指示器 (Time Temperature Indicator, TTI) 在食品智能包装中的研究进展, 为 TTI 在食品品质监测上的应用提供一定的参考和理论依据。**方法** 概述微生物型 TTI 在食品智能包装中的研究进展, 微生物 TTI 的组成, 包括 TTI 微生物、培养基和 pH 指示剂; 总结微生物 TTI 基于总色差 (ΔE) 和可滴定酸度 (TA) 的响应机制, 以及微生物 TTI 模型的建立, 并分析其应用和发展趋势。**结论** 大量的文献证明微生物 TTI 是可用于监测食品贮藏运输过程中温度历史的有效工具, 有广阔的发展前景。

关键词: 微生物 TTI; 时间-温度指示器; 品质监测; 响应机制

中图分类号: TS206.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)01-0223-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.025

Research Progress of Microbial Time-Temperature Indicator (TTI)

YI Ran¹, MA Hao-yang¹, JIN Lu-da¹, LIU Qi-jia¹, WANG Hong-jiang¹,
LI Juan¹, ZHANG Dong-jie^{1,2}

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the research progress of microbial time-temperature indicator (TTI) in food intelligent packaging, to provide some reference and theoretical basis for the application of TTI in food quality monitoring. The research progress of microbe TTI in intelligent food packaging, the composition of the TTI, including TTI microorganism, culture medium and pH indicator were overviewed. The response mechanism of TTI based on total color difference (ΔE) and titratable acidity (TA) was summarized. The TTI model of microorganism was established, and its application and development trend were analyzed. It is proved by large number of literature that microbial TTI is an effective tool for monitoring the temperature history during food storage and transportation. It has vast potential for future development.

KEY WORDS: microbial TTI; time-temperature indicator; quality monitoring; response mechanism

近年来, 随着科技的迅猛发展和人们生活水平的不断提高, 网络消费逐渐普遍, 远距离的食品运输也带来了很多新的问题, 消费者对更方便、新鲜

和健康的生鲜类食品的需求显著增加, 这对食品品质提出了新的更高的需求, 促使智能包装的研究不断发展进步^[1]。

收稿日期: 2022-07-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFE0206300); 黑龙江八一农垦大学博士科研启动项目 (XDB-2017-14); 大学生创新创业训练项目 (S202210223041)

作者简介: 衣然 (1997—), 女, 硕士生, 主攻智能包装和农产品加工及贮藏保鲜。

通信作者: 王洪江 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品包装及贮藏保鲜技术; 张东杰 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。

货架寿命是食品出厂后,经过流通各环节,所能保持质量完好的时间,也是包装的主要质量指标。生鲜产品的主要问题之一是潜在的微生物腐败,同时,运输和储藏过程中的环境条件变化等也会对其新鲜度产生影响^[2]。传统的食用有效期标注方法是通过假定产品在规定的温度范围内的整个寿命来确定的,并不能向消费者展现产品在运输途中,由于内部或外部环境的变化会对货架寿命产生的影响^[3],因此,实时地监测生鲜产品的新鲜度变得十分重要。

许多国家已经有相应的规定,要求食品包装上有对应的可以表明其货架寿命终点的标志。同时采用食用有效日期和指示性标志 2 种方式来告知消费者食品新鲜度是否在可食用的范围内,可以更方便地评估生鲜产品的品质劣变,并确保其在贮藏、运输和零售过程中的安全性。智能包装作为一种指示性标志,可以与消费者进行通信,实时地反馈产品质量,并通过感知包装内部或外部的环境向消费者提供品质信息和预警,来实现上述目的^[4]。

智能包装主要包括指示器^[5]、传感器^[6]、数据载体等多个种类,其中指示器类智能包装的研究和应用最为广泛^[7]。时间-温度指示器(TTI)可以对货架期中食品的参数进行监测,通过记录时间温度变化过程指示食品剩余货架信息^[8]。

目前,用于监测包装水果^[9-10]、肉^[11-14]、鲜牛奶^[15]和酸奶^[16-17]等新鲜度的 TTI 越来越多,其中微生物型 TTI 是非常有前景的智能包装。文中将对微生物型 TTI 进行综述,阐述其基本概念、组成及反应原理,分析前人研究的 TTI 机理,为微生物型 TTI 在生鲜食品品质监测中的研究和应用提供参考。

1 基本概念

1.1 智能包装

Azeredo 等^[18]认为智能食品包装通常旨在监控食品或其周围环境的状态,以及它们之间的相互作用,通过指示器、传感器等向消费者传递信号来提供有关食品质量安全的消息。

智能包装通常被分为指示器、数据载体和传感器三大类^[19]。智能包装的种类繁多,其中用于食品的指示器类智能包装主要有时间-温度指示器、新鲜度指示器及气体指示器^[6]。大部分食品的腐败都与温度有关,因此温度被认为是影响食品质量和保质期的关键因素之一。TTI 能通过监测和记录食品的温度累积效应来指示食品质量变化和剩余货架期信息,是非常有前景的智能包装,近年来的研究也显示出了 TTI 在食品实时质量监控方面的潜力。

1.2 时间-温度指示器

时间-温度指示器(TTI)是附着在食品包装或标

签上用来监测和记录产品的时间-温度历史来反馈食品质量和安全性的简单设备^[20]。

TTI 通常通过时间和温度产生不可逆的颜色变化,向消费者和制造商展示食品的品质信息,避免在运输和储存过程中因为过高的温度和过长的时间导致食品提前达到适销限度^[21]。具有性价比高、变化不可逆、使用简单等特点。根据不同反应机理,TTI 可分为生物型^[22]、物理化学型^[23]、酶型^[24]、扩散型^[25-26]、聚合物型、固相反应和光敏体系。

1.3 微生物型时间-温度指示器

微生物型 TTI 的工作机理是通过微生物的生长代谢影响 TTI 培养基中的酸碱度,随后培养基的 pH 值会发生变化,导致酸碱指示剂颜色发生相应变化^[8]。根据 Gao 等^[27]的研究,微生物 TTI 被定义为一种不可逆的指示剂,它依赖于 TTI 微生物的生长和代谢活性对 TTI 底物介质的酸化,并在 pH 指示剂中诱导一种渐进和定量的颜色变化。微生物型 TTI 与其他 TTI 相比具有很多优势^[20],其反应与食品微生物腐败直接相关,因为它反映了微生物在 TTI 中的生长和代谢。

2 微生物 TTI 的组成、响应机制

2.1 微生物 TTI 的组成

微生物 TTI 主要由 TTI 微生物、底物培养基和 pH 指示剂组成。表 1 列出了文献中不同的微生物 TTI 所用微生物及其培养基和 pH 指示剂,并列出了相应的颜色变化和对应的 pH 值或可滴定酸度(TA)的变化范围。

2.1.1 TTI 微生物

TTI 微生物是 TTI 中的核心部分,影响着 TTI 底物培养基和 pH 指示剂的选择,因此使用合适的 TTI 微生物对微生物 TTI 非常重要。

微生物腐败是迄今为止最常见的腐败原因,通常表现为可见生长(如菌泥、真菌菌丝)、质构变化(聚合物降解、凝固)或微生物代谢活动^[34]。大多数食品的品质劣变都是由特定腐败菌(Specific Spoilage Organism, SSO)的生长代谢活动引起的。当易腐食品达到感官排斥时,SSO 达到一定的种群水平,称为“腐败水平”^[35],因此,食品的 SSOs 可以作为 TTI 微生物。

微生物 TTI 的微生物应是产酸且不产气、无毒无害的,最好是可食用的,所以在微生物 TTI 的实际开发和应用中,通常用乳酸菌(LAB)菌株作为 TTI 微生物。主要是因为 LAB 对温度变化的敏感性和生长速度与许多易腐食品中的 SSO 接近;并且 LAB 菌株几乎都是益生菌,比较安全、卫生,对人体黏膜表面的健康微生物也是有益的,通常被认为是安全的(Generally Recognized as Safe, GRAS)^[20]。

根据微生物能够降低生长底物 pH 值,并准确地

反映食品品质劣变和剩余货架期的特点, 筛选出可用的特异性乳酸菌菌株。表 1 中列出的几种微生物 TTI 所使用的微生物, 说明微生物 TTI 可使用的微生物有 *Weissella koreensis*、*Weissella cibaria* CIFP 009、清酒乳杆菌等。

2.1.2 培养基

培养基作为微生物 TTI 的生长基质为微生物提

供了生长和代谢活动所需的营养物质。其组成成分由所用微生物决定, 一般含有碳源、氨基酸和氮源、无机盐、生长因子、水等, 同时考虑到培养基应具有成本低、制备简单的特性。表 2 列出了几种 TTI 微生物所用的培养基, 其中常用于食品中乳酸菌培养的 Man Rogasa Sharpe (MRS) 肉汤是微生物 TTI 较多的选择。

表 1 微生物 TTI 的组成
Tab.1 Composition of microbial TTI

微生物	培养基	pH 指示剂	颜色变化	pH 值或可滴定酸度	参考文献
<i>Weissella koreensis</i>	培养基 1	溴麝香草酚蓝钠盐、甲基红钠盐		7.5~5.7	Lim 等 ^[28]
<i>Weissella cibaria</i> CIFP 009	培养基 2	酚酞		5.7~6.68	Kim 等 ^[12]
<i>Weissella cibaria</i> CIFP 009	培养基 3	溴甲酚紫、甲基红钠盐		0%~0.67%	Kim 等 ^[11] Park 等 ^[14]
清酒乳杆菌	培养基 4	氯酚红		6.5~5.2	Hariklia 等 ^[29]
<i>Weissella cibaria</i> CIFP 009	培养基 5			7~3.5	Choi 等 ^[30]
<i>Weissella cibaria</i> CIFP 009	培养基 6	溴甲酚紫、甲基红钠盐		0.1%~0.7%	Jung 等 ^[31]
<i>Weissella cibaria</i> CIFP 009	培养基 7	溴甲酚紫、溴甲酚绿、甲基橙		6.6~3.8	Rahman 等 ^[32]
清酒乳杆菌	培养基 8	溴甲酚绿、氯酚红		7.5~4.5	Hsiao 等 ^[33]

注: 培养基成分见表 2。

表 2 微生物 TTI 培养基成分
Tab.2 Medium components of microbial TTI

培养基	培养基成分
培养基 1	25%MRS 肉汤、0.3%牛肉膏、2%葡萄糖、2%木糖、1.25%甘油、8.5% pH 指示液
培养基 2	MRS 肉汤
培养基 3	葡萄糖 30.0 g, 胰蛋白胨 5.0 g, 酵母提取物 7.5 g, KH ₂ PO ₄ 1.0 g, Tween 80 0.5 g, MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.2 g, MnSO ₄ ·H ₂ O 0.05 g, 醋酸钠 5.0 g, 柠檬酸钠 5.0 g, 低熔点琼脂糖 10.0 g, 蒸馏水 1 000 mL
培养基 4	营养肉汤、生理盐水(质量浓度为 0.1 g/mL 的蛋白胨和 0.85 g/mL 的 NaCl)、胰蛋白胨大豆肉汤(Merck)和 MRS 肉汤, 再添加葡萄糖和酵母膏
培养基 5	MRS 肉汤, 15%甘油
培养基 6	葡萄糖、酵母提取物、胰蛋白胨、磷酸二氢钾、Tween 80、芒果(II)硫酸盐-水合物、七水硫酸镁、柠檬酸钠、乙酸钠、低熔点琼脂糖
培养基 7	改良培养基(MIC; 2%葡萄糖、1%蛋白胨、0.25%磷酸二钠、1%酵母膏、1%葡萄糖、1%氯化钠、0.01%硫酸镁、0.005%硫酸锰、0.3%柠檬酸钠)、肉汤培养基
培养基 8	2 g/mL 葡萄糖和 0.5 g/mL 酵母膏, MRS 琼脂

2.1.3 pH 指示剂

TTI 微生物在培养基中生长和代谢, 通过 pH 指示剂显示出与食品货架期一致的不可逆的颜色变化, 因此, 选择合适的 pH 指示剂有利于 TTI 的有效显色^[36]。

Augustin 等^[37]列出了 pH 指示剂的选择标准: 微生物的抑制作用, 对微生物生长有抑制作用的 pH 指示剂可能会对颜色变化产生影响, 应选择对微生物生长无抑制或抑制作用小的 pH 指示剂作为 TTI 的指示剂; 颜色变化反应机理解释的简单性; 颜色变化程度, 选择的 pH 指示剂或 pH 混合指示剂应能显示出肉眼可查的颜色变化。

Kim 等^[36]将 pH 指示剂的选择方法概括为: 确定微生物 TTI 中微生物生长和乳酸代谢引起的 pH 变化范围, 同时, 选择具有相似 pH 变化范围的潜在 pH 指标或混合 pH 指标; 符合 pH 指示剂选择的标准; 选择满足上述标准的最佳 pH 指示剂或混合 pH 指示剂。

表 1 列出了基于各微生物 TTI 相应的 pH 指示剂和其显示的品质劣变过程中的颜色变化, 表 3 列出了 TTI 中常用的 pH 指示剂及其指示的 pH 值范围和颜色变化。

2.1.4 微生物 TTI 的结构

在微生物型 TTI 智能包装的研究中很少提及 TTI 在智能包装中如何进行安置的问题。目前已经投入商用的 CRYOLOG 公司的 (eO)^{®[37]} 和 TRACEO^{®[38]} 被制成指示标签, 用于食品的品质监测, 如图 1 所示, 使用时被贴在食品包装外表面, 根据食品包装的温度变化情况来响应自身的颜色变化, 进而对食品品质进行监测。

Sav-On 水产品公司从 Avery Dennison 购买的 TT Sensor[™] 标签也已投入商用, 用于新鲜鱼类的包装, 它们由指示器标签和激活器标签组成, 贴于托盘封装表面, 如图 2 所示, 激活后, 将根据温度暴露情况以预定的速率从黄色变为粉红色。

表 3 pH 指示剂及其变化范围
Tab.3 pH indicator and its range of variation

pH 指示剂	pH 值变化范围	颜色变化范围
酚酞	8.0~10.0	无色—红色
甲基橙	3.0~4.4	红色—橙色
溴酚蓝	3.0~4.6	黄色—蓝色
刚果红	3.0~5.2	蓝紫色—红色
溴甲酚绿	3.8~5.4	黄色—蓝色
甲基红	4.4~6.2	红色—黄色
氯酚红	5.0~6.6	黄色—红色
溴甲酚紫	5.2~6.8	黄色—紫色
溴百里酚蓝	6.0~7.6	黄色—蓝色

孟晶晶等^[20]在微生物型 TTI 应用于酸奶质量管理的研究中, 将 TTI 制成指示卡的形式置于食品包装外部, 通过与食品相似的时间—温度积累历史进行食品品质的监测, 其 TTI 结构及实验样品见图 3。

2.2 微生物 TTI 的响应机制

2.2.1 微生物 TTI 的响应过程

微生物 TTI 的响应机制是通过活化后的 TTI 微生物温度依赖性生长, 导致 pH 下降引起指示剂发生不可逆的颜色变化的过程。

微生物 TTI 的响应过程可以总结为温度感知过程、微生物响应过程、食品质量指示过程等 3 个步骤^[20]。

1) 温度感知过程。活化后, TTI 内部的微生物变得活跃, 具有温度依赖性生长的特点。当环境温度合适时, 微生物开始生长, 即 TTI 开始感知温度。

2) 微生物响应过程。微生物 TTI 的微生物生长和乳酸代谢的速度随环境温度的变化而变化, 环境温度越高, 速率越快。



图 1 CRYOLOG 公司的 TTI 标签
Fig.1 TTI label of CRYOLOG company



图 2 用于新鲜鱼类包装的 TT Sensor™ 标签
Fig.2 TT Sensor™ label for fresh fish packaging

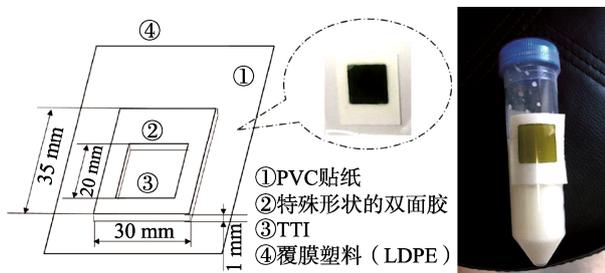


图 3 孟晶晶所做 TTI 的结构及实验样品
Fig.3 TTI structure and experimental sample made by MENG Jing-jing

3) 食品质量指示过程。TTI 内部的微生物生长和乳酸代谢导致 pH 下降, 引起颜色的变化作为信号传递。TTI 可以准确地指示、反映食品在整个过程中的温度暴露情况。比较货架期前后颜色变化, 可以判断食品是否安全, 基于 TTI 颜色变化, 可以动态、定性地反映时间-温度历史和食品质量。

2.2.2 微生物 TTI 的响应类型

微生物 TTI 的工作原理本质上是基于微生物的变化引起颜色的可视变化, 广泛用于实时反映食品的质量, 如颜色或酸度的反应, 因此微生物 TTI 有不同类型的响应指标, 在一些研究中会测定微生物 TTI 不同的响应指标, 最终根据 TTI 预测机制的信息和食品货架期信息选出最适合的响应指标, 作为 TTI 的响应机制。微生物 TTI 的关键动力学响应指标有: 总颜色差值〔 ΔE 和 $F(X)$ 〕、可滴定酸度 (TA)、pH 值、微生物生长情况等。这里主要对常用的总颜色差值〔 ΔE 和 $F(X)$ 〕和可滴定酸度 (TA) 进行说明。

2.2.2.1 基于 TTI 总色差 (ΔE) 的响应。

ΔE 作为一种易于测量的与反应发展有关的 TTI 响应指标, 已被广泛使用, 其有效性已在许多研究中得到证实^[39]。

Vaikousi 等^[35]开发了一种基于清酒乳杆菌的微生物 TTI 用于监测 (Modified Atmosphere Packed, MAP) 碎牛肉, 以等温贮藏过程中颜色变化动力学的 ΔE 作为响应参数, 得到估算活化能 (E_a), 在动态贮藏条件下, 微生物 TTI 在监测 (MAP) 碎牛肉腐败变质过程中, 微生物 TTI 反应显示出了从红色到黄色的渐进性和不可逆转的颜色变化。

Lim 等^[28]利用乳酸菌开发了微生物 TTI, 利用 Minolta CM-2500d 色度计在 2° 观测角下用 D65 照明测量 TTI 系统的 ΔE 值, ΔE 值的计算见式 (1)。

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]} \quad (1)$$

式中: ΔL^* 为 $t=0$ 时测量单位时间亮度 (白黑) 变化的颜色差值; Δa^* 为红绿度差值; Δb^* 为黄蓝度差值。所有实验均重复 3 次, 以平均值和标准差报告。

随着 pH 值的降低, 指示剂的颜色也由绿色变为黄色, 由黄色变为红色。在反应初期, pH 为 7.5 时仍保持绿色, pH 为 7.0 时变为黄色, 在 pH 小于等于 5.7 时变为红色。用肉眼确认红色的时间 (ΔE 为 25 时) 被认为是微生物 TTI 的终点。

根据 Taoukis 和 Labuza^[21]所描述的 TTI 颜色反应动力学, 将 pH 指示剂的总颜色变化值 $F(X)$ 计算见式 (2)。

$$F(X) = \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $X = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}$, $C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$, C_{\min} 和 C_{\max} 分别为 TTI 响应初始和终点时 C 的值。

2.2.2.2 基于可滴定酸 (TA) 的响应。

酸度是另一个广泛应用的 TTI 反应的响应参数。与使用颜色变化不同, 对于基于酸度的 TTI, 在进行 TTI 修饰时考虑了酸度变化或 pH 变化。Kim 等^[36]基于乳酸菌 (LAB) 制备的微生物 TTI 通过产生乳酸诱导颜色变化实现了对牛肉品质的实时监测。测定了不同显色阶段的可滴定酸 (TA), 并将其纳入 TTI 模型。以 TA 为响应, 根据 Arrhenius 方程计算 k 和 E_a 。

$$\ln y = k \cdot t + \ln y_0 \quad (3)$$

式中: y 和 y_0 分别为实时 TA 及其初始水平。

此外, Park 等^[14]也选择 TA 作为 TTI 响应的响应指标, 采用类似公式的建模方法。

2.3 微生物 TTI 的模型

导致食品品质劣变的影响因素有很多, 包括化学、微生物、生化和物理反应等。数学建模是预测食品因这些反应而发生品质劣变的有效方法^[40]。食品质量变化通常遵循零级^[33, 41]或一级^[11]反应。动力学模型通常可以通过测量一个或多个指标参数, 如颜色、

酸度、微生物数量等^[42]来评估食品的货架寿命。

微生物 TTI 的响应变化可以用时间 (t) 和反应速率常数 (k) 的函数建模^[43]。确认 k 后, 可利用 Arrhenius 方程计算活化能 (E_a)。基于食品动力学模型和 TTI 反应模型, 可以实时地反映食品贮藏运输过程中的温度累计历史, 并通过指标参数转化为食品品质劣变的预测因子。TTI 主要运用的一些典型模型和公式总结见表 4。

2.3.1 色差的测定

总色差 (ΔE) 是反映 TTI 颜色变化的一个有效的可测参数^[39, 48]。利用色度计, 可以得到 L^* (黑色到白色)、 a^* (绿色到红色) 和 b^* (蓝色到黄色) 的值, 利用式 (1) 计算 ΔE 。

2.3.2 Arrhenius 反应速率常数 k 的测定

采用 n 阶动力学方程估算 TTI 反应速率常数的温度依赖性, 由零级 [式 (4)] 和一级 [式 (5)] 反应描述。

$$y = k \cdot t + y_0 \tag{4}$$

$$\ln y = \ln y_0 + k \cdot t \tag{5}$$

式中: y 为食品某一质量指标在时间 t 时的值;

y_0 为初始值; k 为反应速率常数; t 为反应时间, 采用 Arrhenius 方程两侧的自然对数计算 TTI 活化能。

2.3.3 活化能的测定

若食品的反应速率常数为 k , TTI 的反应速率常数为 k' , 确定后通过 Arrhenius 方程计算活化能 E_a , 该方程已被广泛用于模拟食品中各种反应对 k 的温度效应和 TTI 反应对 k' 的温度效应^[49]。Arrhenius 方程可以表示为:

$$\ln k = \ln A + \left(\frac{-E_a}{R} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \tag{6}$$

式中: A 为 Arrhenius 指前因子 ($1/h$); E_a 为活化能, kJ/mol; R 为理想气体常数 [$8.314 \times 10^{-3} \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$]; T 为绝对温度, K。根据式 (7) 绘制以 $1/T$ 为 x 轴, $\ln k$ 为 y 轴的线性曲线, 并利用该曲线得到 E_a 。

E_a 和 A 是反应的特征常数, 与温度无关, 可以通过实验确定。对于同一反应, 在一定温度下, k 的值是确定的。结合不同温度下的 Arrhenius 方程, 得到 E_a 可以写成:

$$E_a = R \frac{d \ln k(T)}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \tag{7}$$

表 4 TTI 模型及公式
Tab.4 Model and formula of TTI model

模型	选择的模型	公式	参考文献
ΔE	—	$\Delta E = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2}$	Vaikousi 等 ^[35]
k 的确定	Gompertz 生长模型	$b^*(t) = \{ \Delta b^* \cdot \exp[-B \cdot \exp(-s \cdot k_T \cdot t)] \} + b_0^*$	Zabala 等 ^[44]
	logistic 方程	$norm(a+b) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_1 - t}{k_2}\right)}$	Vaikousi 等 ^[35]
	零级反应	$y = k \cdot t + y_0$	Tsironi 等 ^[45]
	一级反应	$\ln y = \ln y_0 + k \cdot t$	
E_a 的确定	Gaussian 方程	$F(X_D) = \left(\frac{\ln 1}{1 - X} \right)^{1/2} = kt$	Suppakul 等 ^[46]
	Arrhenius 方程	$\ln k = \ln A + \left(\frac{-E_a}{R} \right) \left(\frac{1}{T} \right)$	
		$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT} \right)$	
		$E_a = R \frac{d \ln k(T)}{d \left(\frac{1}{T} \right)}$	Martins 等 ^[47]
		$\frac{k}{k_{ref}} = \exp\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$	
		$\ln\left(\frac{k}{k_{ref}} \right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)$	
E_a 的匹配	—	$ E_{a,food} - E_{a,TTI} \leq 25 \text{ kJ/mol}$	Choi 等 ^[30]

为了更好地估计表观 A 和表观 E_a , 可以利用重新参数化的 Arrhenius 方程^[40]来评估温度对 k 的影响, 其中引入了 2 个因子 (T_{ref} 和 k_{ref})。重新参数化的 Arrhenius 方程见式 (8)。

$$\frac{k}{k_{ref}} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (8)$$

式中: T_{ref} 为参考温度; k_{ref} 为参考温度 T_{ref} 下的反应速率常数。

由于 TTI 的反应和涉及食品劣化的反应都遵循一定温度范围内的 Arrhenius, 重新参数化的方程可以纳入 $F(P)$ 和 $F(R)$:

$$F(P) = kt = k_{ref} \exp \left[-\frac{E_{afood}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] t \quad (9)$$

$$F(R) = k't = k'_{ref} \exp \left[-\frac{E_{aTTI}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] t \quad (10)$$

式中: k_{ref} 和 k'_{ref} 分别为 P 和 R 在参考温度 T_{ref} 下的速率常数; E_{afood} 和 E_{aTTI} 分别为食品质量变化的 E_a 和 TTI 响应变化的 E_a 。

2.3.4 E_a 的偶合

在得到食品和 TTI 的 E_a 后, 需要两者进行偶合, 来确定 TTI 和食品的匹配度。通常认为可以应用于食品的微生物 TTI 应符合式 (11)。

$$|E_{afood} - E_{aTTI}| \leq 25 \text{ kJ/mol} \quad (11)$$

对于微生物 TTI 的建立, 选择合适的指标参数也是非常重要的, TTI 在食品质量监测中的应用见图 4。

3 微生物 TTI 的应用和发展趋势

3.1 微生物 TTI 的应用

微生物 TTI 作为新兴的智能技术, 是一种可以附

着在食品或食品包装上的具有高性价比、变化不可逆转、使用方便等特点的食品质量监测工具。

微生物 TTI 通常可以用作多种产品的质量评价, 主要用于猪肉、牛肉、鸡肉等肉制品, 酸奶等乳制品以及冷链食品, 在运输过程中其能准确监测食品所经历的时间-温度历史。微生物 TTI 的应用情况总结见表 5。

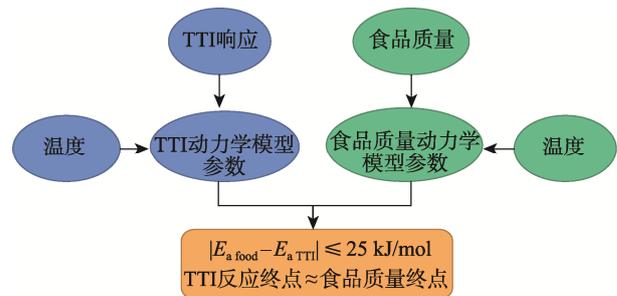


图 4 TTI 在食品质量监测中的应用示意图
Fig.4 Schematic diagram of TTI application in food quality monitoring

3.2 微生物 TTI 的优点和局限性

微生物 TTI 作为时间温度指标, 具有安全、成本低、便于使用等优势^[50]。与其他可用的非微生物 TTI 相比, 微生物 TTI 的显著优势在于它以“不可逆的颜色变化”为响应, 反映了 TTI 微生物生长和代谢活性的过程, 可以模拟许多食品 (尤其是高蛋白和冷链食品) 的实际品质劣变过程^[37]。

在 TTI 的众多优点背后有一些局限性也是不可忽视的, 例如, 这样基于颜色变化的食品品质指标对色盲的消费者来说是没有意义的; 颜色变化需要显色的指示剂, 通常是化学试剂, 这就可能会引起安全问题, 而天然的颜色指示剂不够稳定, 因此稳定、安全的颜色指示剂还需要进一步开发^[51]。

表 5 微生物 TTI 的应用
Tab.5 Application of microbial TTI

监测产品	品质指标	响应类型	TTI 的 E_a	食品的 E_a	参考文献
牛肉	LAB	ΔE	112.77	106.90	Vaikousi 等 ^[35]
牛肉	LAB	TA	106.22	116.65	Kim 等 ^[12]
	AMB		106.22	110.35	
猪肉	AMB	TA	106.22	104.90	Kim 等 ^[11]
	LAB		106.20	101.60	
鸡肉	CB	TA	106.20	106.40	Park 等 ^[14]
	VBN		116.80	117.70	
鱼	VBN	ΔE	116.80	117.70	Hsiao 等 ^[33]
牛奶	LAB	TA	106.00	107.00	Jung 等 ^[31]

注: LAB 为乳酸菌, AMB 为好氧中温菌, CB 为大肠菌群, VBN 为挥发性碱基, ΔE 为总色差, TA 为可滴定酸度。

基于酸度响应的优势在于其酸度与食品污染程度的高度相关性,因此可以更准确地指示食品的品质变化。由于微生物生长的波动性,基于酸度的响应需要大量的样本和精确的模型来支持^[52],也是有待研发解决的问题。

3.3 微生物 TTI 的发展趋势

在当下的时代背景下,食品安全受到越来越高度的重视,这对食品的贮藏和运输也提出了更高的要求,同时,由于固定货架期造成的食品浪费及安全问题也亟待改善^[18, 53],向消费者传达准确的食物质量信息变得尤为重要。TTI 的研究应运而生,相比国外较成熟的体系,国内在 TTI 上的研究开始得较晚。近年国内的许多学者开始投入 TTI 的研发,但由于其应用性、特异性等原因的限制,真正可以用于食品质量检测,并投入到商业化生产的 TTI 仍然很少^[4, 54]。

TTI 在食品质量检测领域也面临许多挑战,限制了其满足食品工业要求的能力。综合一些学者的观点认为理想的 TTI 应具有体积小、成本低、可读性强、稳定性强、对温度变化敏感、颜色反应不可逆、无毒性材料、易于食品包装、适应高速包装过程、易活化^[55-56]等优点。

目前可用于商业的微生物 TTI,可以随着温度的上升自动激活,因此,必须在冷藏或冷冻温度下保存,存储环境苛刻,并且浪费电能;微生物 TTI 中的游离细胞容易失去活性^[51-52],因此提出了微生物微胶囊化,微胶囊化是将活细胞与周围不利环境分开屏蔽的过程^[57]。据报道,将微生物微胶囊化可对其在提供对高氧水平、酸性环境、冷冻和冷藏^[58]等恶劣环境提供保护,是解决微生物 TTI 非常有前景的方法。除此之外,微胶囊化试剂是无毒的,形成的基质对微生物体是温和的,在冷藏或冷冻条件下具有较高的稳定性^[59]。

还有通过 RFID^[60]或条形码技术集成的微生物 TTI。RFID 和条形码作为先进的自动识别技术,被认为是适合融入 TTI 的^[61-62],其可以提供指示食品质量信息的颜色变化,在实际应用中可以直接被人眼识别。将信息通信技术与 TTI 技术相结合,为食品工业提供了一个独特的发展机遇,具有十分重要的意义^[63]。

对于未来 TTI 的发展趋势,应注重降低成本和不可避免的损耗、减少浪费,以及成分的简化和模型的优化。

4 结语

文中对国内外学者研究的微生物 TTI 进行了综述并总结了其结构组成、响应类型和机制以及相关模型。通过对食品和微生物 TTI 各种指标的测定和匹配可以确定适合不同食品的反应指标,主要有颜色变化 (ΔE) 和可滴定酸度 (TA)。最终通过食品反应活化能和微生物 TTI 反应活化能的匹配来保证微生物 TTI

的有效应用。近年我国对智能包装的重视程度不断提高,许多学者对微生物型 TTI 进行了研究,一些学者提出将 TTI 微生物微胶囊化以扩展微生物 TTI 的使用范围,有的学者还提出将 RFID 或条形码技术融入微生物 TTI,进一步发挥 TTI 的温度和货架寿命监测能力。最后对微生物 TTI 的发展趋势进行了展望,作为监测食品品质劣变的智能包装,微生物 TTI 的制作应在品质指标和模型的优化上作出更多的考虑,提高消费者对微生物 TTI 的接受度,使微生物 TTI 更有效地应用于生鲜食品品质监测,保证食品在贮藏和运输过程中的安全性,减少食物浪费,发挥更重要的意义。

参考文献:

- [1] 赵冬菁, 仲晨, 朱丽, 等. 智能包装的发展现状、发展趋势及应用前景[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 72-81.
ZHAO Dong-jing, ZHONG Chen, ZHU Li, et al. Development Status, Tendency and Application Prospect of Intelligent Packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 72-81.
- [2] 蒋海云, 曾慧, 张诗浩, 等. 食品新鲜度指示器的研究与发展趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 3027-3033.
JIANG Hai-yun, ZENG Hui, ZHANG Shi-hao, et al. Research and Development Trend of Food Freshness Indicator[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(12): 3027-3033.
- [3] 宿跃, 石伟伟, 马骏, 等. 食品智能包装的研究热点、应用现状及展望[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 133-139.
SU Yue, SHI Wei-wei, MA Jun, et al. Research Hotspot, Application Status and Prospect of Food Intelligent Packaging[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 133-139.
- [4] 朱勇, 胡长鹰, 王志伟. 智能包装技术在食品保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2007, 28(6): 356-359.
ZHU Yong, HU Chang-ying, WANG Zhi-wei. Application of Intelligent Packaging Technology in Food Preservation[J]. Food Science, 2007, 28(6): 356-359.
- [5] 林华敏, 李彦韦, 赵海东, 等. 智能指示型标签——食品物流包装中的质量管控“神器”[J]. 今日印刷, 2019(11): 28-32.
LIN Hua-min, LI Yan-wei, ZHAO Hai-dong, et al. Intelligent Label—Quality Control “Artifact” in Food Logistics Packaging[J]. Print Today, 2019(11): 28-32.
- [6] 邵平, 刘黎明, 吴唯娜, 等. 传感器在果蔬智能包装中的应用[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 349-355.
SHAO Ping, LIU Li-ming, WU Wei-na, et al. Research and Application of Sensors in Intelligent Packaging of

- Fruits and Vegetables[J]. *Food Science*, 2021, 42(11): 349-355.
- [7] 周子涵, 李豪, 袁留波. 时间温度指示剂类智能包装研究现状及展望[J]. *轻纺工业与技术*, 2020, 49(8): 38-39.
ZHOU Zi-han, LI Hao, YUAN Liu-bo. Research Status and Prospect of Time Indicator Intelligent Packaging[J]. *Light and Textile Industry and Technology*, 2020, 49(8): 38-39.
- [8] 谢勇, 张诗浩, 曾慧, 等. 时间温度指示器的研究与应用[J]. *包装学报*, 2018, 10(6): 23-32.
XIE Yong, ZHANG Shi-hao, ZENG Hui, et al. Research and Application of Time-Temperature Indicators[J]. *Packaging Journal*, 2018, 10(6): 23-32.
- [9] 廖恺芯, 夏宇轩, 王军. 果蔬可视化新鲜度检测智能包装研究进展[J]. *湖南包装*, 2021, 36(2): 35-37.
LIAO Kai-xin, XIA Yu-xuan, WANG Jun. Research Progress of Intelligent Packaging for Visual Freshness Detection of Fruits and Vegetables[J]. *Hunan Packaging*, 2021, 36(2): 35-37.
- [10] 王桂莲, 未新玲, 杨洪洋, 等. 一种草莓新鲜度指示标签的研究与设计[J]. *科技创新导报*, 2014, 11(33): 185-186.
WANG Gui-lian, WEI Xin-ling, YANG Hong-yang, et al. Research on a Kind of Label Indicating Strawberry Freshness[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2014, 11(33): 185-186.
- [11] KIM E, CHOI D Y, KIM H C, et al. Calibrations between the Variables of Microbial TTI Response and Ground Pork Qualities[J]. *Meat Science*, 2013, 95(2): 362-367.
- [12] KIM Y, JUNG S, PARK H, et al. Application of a Prototype of Microbial Time Temperature Indicator (TTI) to the Prediction of Ground Beef Qualities during Storage[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2012, 32(4): 448-457.
- [13] MATARAGAS M, BIKOULI V C, KORRE M, et al. Development of a Microbial Time Temperature Indicator for Monitoring the Shelf Life of Meat[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 52: 89-99.
- [14] PARK H R, KIM Y A, JUNG S W, et al. Response of Microbial Time Temperature Indicator to Quality Indices of Chicken Breast Meat during Storage[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22(4): 1145-1152.
- [15] 邱灵敏, 张嘉帅, 钱静, 等. 微生物型鲜牛奶时间温度指示器[J]. *包装工程*, 2020, 41(9): 67-73.
QIU Ling-min, ZHANG Jia-shuai, QIAN Jing, et al. Microbial Time-Temperature Indicator Applied in Fresh Milk[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(9): 67-73.
- [16] 孟晶晶. 微生物型时间温度指示器在酸奶质量管理中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 17-49.
MENG Jing-jing. Application of Microbial Time and Temperature Indicator in Yogurt Quality Management[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 17-49.
- [17] 王琳, 孟晶晶, 李园锦, 等. 固定化糖化酶型时间-温度指示器在酸奶质量检测上的应用[J]. *包装学报*, 2018, 10(1): 46-53.
WANG Lin, MENG Jing-jing, LI Yuan-jin, et al. Application of Immobilized Glucoamylase Time-Temperature Indicators on Yogurt Quality Monitoring[J]. *Packaging Journal*, 2018, 10(1): 46-53.
- [18] AZEREDO H M C, CORREA D S. Smart Choices: Mechanisms of Intelligent Food Packaging[J]. *Current Research in Food Science*, 2021, 4: 932-936.
- [19] GHAANI M, COZZOLINO C A, CASTELLI G, et al. An Overview of the Intelligent Packaging Technologies in the Food Sector[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 51: 1-11.
- [20] ZHANG X, SUN G, XIAO X, et al. Application of Microbial TTIs as Smart Label for Food Quality: Response Mechanism, Application and Research Trends[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 51: 12-23.
- [21] TAOUKIS P S, TSIRONI T N. Reference Module in Food Science[M]. Greece: Elsevier. 2018: 1-13.
- [22] 杨俊伦, 黄珏, 郭永洪. 生物供电时间温度指示器在酸奶中的实验研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(17): 112-117.
YANG Jun-lun, HUANG Jue, GUO Yong-hong. Experimental Study on Bio-Powered Time-Temperature Integrator in Yogurt[J]. *Packaging Engineering*, 2021(17): 112-117.
- [23] 张李璇. 基于金纳米时间温度指示器的食品品质监测[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
ZHANG Li-xuan. Food Quality Monitoring Based on Gold Nanometer Time and Temperature Indicator[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [24] 唐园园, 钱静. 固态酶型时间温度指示器性能研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(1): 97-102.
TANG Yuan-yuan, QIAN Jing. Characteristics of Time-Temperature Indicator with Solid-State Enzyme[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(1): 97-102.
- [25] 康峻菡, 胥义. 基于扩散型 TTI 与鲜银耳品质关联模型的建立及验证[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(32): 130-139.
KANG Jun-han, XU Yi. The Correlation Model between Diffused Time-Temperature Indicator and Quality of Fresh Tremella: Establishment and Verification[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(32):

- 130-139.
- [26] 杨加敏, 胥义. 扩散型时间-温度指示器在预测奇异果品品质中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(9): 176-182.
- YANG Jia-min, XU Yi. Application of a New Diffuse Type Time-Temperature Indicator in Characterizing the Quality of Kiwifruits during Storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(9): 176-182.
- [27] GAO Ting-ting, TIAN You, ZHU Zhi-wei, et al. Modelling, Responses and Applications of Time-Temperature Indicators (TTIs) in Monitoring Fresh Food Quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 311-322.
- [28] LIM S H, CHOE W Y, SON B H, et al. Development of a Microbial Time-Temperature Integrator System Using Lactic Acid Bacteria[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(2): 483-487.
- [29] HARIKLIA V, 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.
- [30] CHOI D Y, JUNG S W, KIM T J, et al. A Prototype of Time Temperature Integrator (TTI) with Microbeads-Entrapped Microorganisms Maintained at a Constant Concentration[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 118-123.
- [31] JUNG K M, RI P H, JU L S. Guideline for Proper Usage of Time Temperature Integrator (TTI) Avoiding Underestimation of Food Deterioration in Terms of Temperature Dependency: A Case with a Microbial TTI and Milk[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(3): 713-719.
- [32] RAHMAN A T M M, JUNG S W, CHOI D Y, et al. Investigation of the Temperature Dependence of Encapsulated Microbial Cells Based TTI by Applying a Variety of Color Parameters[J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(5): 1-9.
- [33] HSIAO H I, CHANG J N. Developing a Microbial Time-temperature Indicator to Monitor Total Volatile Basic Nitrogen Change in Chilled Vacuum-packed Grouper Fillets[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41: 1-9.
- [34] KOUTSOUMANIS K, TSALOUMI S, ASPRIDOU Z, et al. Application of Quantitative Microbiological Risk Assessment (QMRA) to Food Spoilage: Principles and Methodology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 189-197.
- [35] VAIKOUSI H, BILIADERIS C G, KOUTSOUMANIS K P. Applicability of a Microbial Time Temperature Indicator (TTI) for Monitoring Spoilage of Modified Atmosphere Packed Minced Meat[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 133(3): 272-278.
- [36] KIM M J, JUNG S W, PARK H R, et al. Selection of an Optimum PH-Indicator for Developing Lactic Acid Bacteria-Based Time-Temperature Integrators (TTI)[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 471-478.
- [37] ELLOUZE M, AUGUSTIN J C. Applicability of Biological Time Temperature Integrators as Quality and Safety Indicators for Meat Products[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 138(1): 119-129.
- [38] ELLOUZE M, PICHAUD M, BONAITI C, et al. Modelling pH Evolution and Lactic Acid Production in the Growth Medium of a Lactic Acid Bacterium: Application to Set a Biological TTI[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 128(1): 101-107.
- [39] PEREIRA V A, DE ARRUDA I N Q, STEFANI R. Active Chitosan/PVA Films with Anthocyanins from Brassica Oleraceae (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for Application in Intelligent Food Packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 180-188.
- [40] VAN BOEKEL M A. Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 144-158.
- [41] KREYENSCHMIDT J, CHRISTIANSEN H, HÜBNER A, et al. A Novel Photochromic Time-temperature Indicator to Support Cold Chain Management [J]. Institute of Food Science & Technology, 2010, 45(2): 208-215.
- [42] WANG Xiao-jun, LI Dong. A Dynamic Product Quality Evaluation Based Pricing Model for Perishable Food Supply Chains[J]. Omega, 2012, 40(6): 906-917.
- [43] 佟懿, 谢晶. 时间-温度指示器响应动力学模型的研究[J]. 安徽农业科学, 2008(22): 9341-9343.
- TONG Yi, XIE Jing. Study on the Response Kinetics Model of Time-Temperature Indicator[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008(22): 9341-9343.
- [44] ZABALA S, CASTÁN J, MARTÍNEZ C. Development of a Time-temperature Indicator (TTI) Label by Rotary Printing Technologies[J]. Food Control, 2015, 50: 57-64.
- [45] TSIRONI T, RONNOW P, GIANNOGLOU M, et al. Developing Suitable Smart TTI Labels to Match Specific Monitoring Requirements: The Case of Vibrio SPP Growth during Transportation of Oysters[J]. Food Control, 2017, 73: 51-56.
- [46] SUPPAKUL P, KIM D Y, YANG J H, et al. Practical Design of a Diffusion-Type Time-Temperature Indicator with Intrinsic Low Temperature Dependency[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 22-31.
- [47] MARTINS S I, JONGEN W M, VAN BOEKEL M A. A

- Review of Maillard Reaction in Food and Implications to Kinetic Modelling[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2000, 11(9/10): 364-373.
- [48] MENG J, QIAN J, TANG Y. A Solid-state Time-temperature Indicator Used in Chilled Fresh Pork Monitoring [J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(5): 353-360.
- [49] MAHDI J S, MOHAMMAD G, DANIAL D, et al. Arrhenius Equation Modeling for the Shelf Life Prediction of Tomato Paste Containing a Natural Preservative[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(15): 5216-5222.
- [50] PENNANEN K, FOCAS C, KUMPUSALO-SANNA V, et al. European Consumers' Perceptions of Time-Temperature Indicators in Food Packaging[J]. *Packaging Technology and Science*, 2016, 29(12): 611.
- [51] SOLTANI FIROUZ M, MOHI-ALDEN K, OMID M. A Critical Review on Intelligent and Active Packaging in the Food Industry: Research and Development[J]. *Food Research International (Ottawa, Ont)*, 2021, 141: 110113.
- [52] KALPANA S, PRIYADARSHINI S, LEENA M M, et al. Intelligent Packaging: Trends and Applications in Food Systems[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 93: 145-157.
- [53] 王少东. 时间温度指示器在易腐败食品包装中的应用现状[J]. *中国包装工业*, 2014(14): 7-8.
WANG Shao-dong. Current Research Application of Time and Temperature Indicators in Perishable Food Packaging[J]. *China Packaging Industry*, 2014(14): 7-8.
- [54] 周云令, 魏娜, 郝晓秀, 等. 智能包装技术在食品供应链中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(7): 336-344.
ZHOU Yun-ling, WEI Na, HAO Xiao-xiu, et al. Progress in Application of Intelligent Packaging Technologies in Food Supply Chain[J]. *Food Science*, 2021, 42(7): 336-344.
- [55] CHENG H, XU H, JULIAN MCCLEMENTS D, et al. Recent Advances in Intelligent Food Packaging Materials: Principles, Preparation and Applications[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 1317-1338.
- [56] SHAO Ping, LIU Li-ming, YU Jia-hao, et al. An Overview of Intelligent Freshness Indicator Packaging for Food Quality and Safety Monitoring[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 285-296.
- [57] 项郑昊, 周化岚, 张建国. 海藻酸钠微胶囊制备及其在微生物包埋中的应用[J]. *工业微生物*, 2021, 51(1): 43-49.
XIANG Zheng-hao, ZHOU Hua-lan, ZHANG Jian-guo. Preparation of Alginate Microcapsules and Its Application in Industrial Microbiology[J]. *Industrial Microbiology*, 2021, 51(1): 43-49.
- [58] ARAÚJO E M, RADDATZ G C, MORAES F É M, et al. Effect of Resistant Starch and Chitosan on Survival of *Lactobacillus Acidophilus* Microencapsulated with Sodium Alginate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 511-517.
- [59] KIM S J, CHO S Y, KIM S H, et al. Effect of Microencapsulation on Viability and other Characteristics in *Lactobacillus Acidophilus* ATCC 43121[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2007, 41(3): 493-500.
- [60] 赵冬菁. 智能包装新技术: RFID 标签[J]. *今日印刷*, 2019(4): 18-21.
ZHAO Dong-jing. New Intelligent Packaging Technology: RFID Tag[J]. *Print Today*, 2019(4): 18-21.
- [61] 高琳, 易凯, 蔡锋, 等. 可视化智能包装在减少食物浪费中的应用[J]. *包装工程*, 2020, 41(7): 125-133.
GAO Lin, YI Kai, CAI Feng, et al. Application of Visible Intelligent Packaging in Reducing Food Waste[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(7): 125-133.
- [62] 钱艳峰, 王娅, 张明玥, 等. 用于监测食品新鲜度的时间-温度指示器研究现状[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 10-20.
QIAN Yan-feng, WANG Ya, ZHANG Ming-yue, et al. Research Status of Time-Temperature Indicator for Monitoring Food Freshness[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 10-20.
- [63] KENNING G G. Development of a Nanoparticle Time-Temperature Sensor for Passive and Active RFID[C]// *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID)*, Orlando, 2014: 134-140.