

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240202001

# 用于食品智能包装的时间温度指示器的开发与性能测试研究进展

段敏\*, 刘朴真, 李强, 黄蓉, 刘鹏, 戴岳

(中国标准化研究院农业食品标准化研究所, 北京 100191)

**摘要:** 时间温度指示器(time-temperature indicator, TTI)作为实时监测食品温度历史的有效工具, 在确保食品质量安全、减少食品浪费方面具有广阔的前景。当前已形成了物理型、化学型、生物型和复合型等多种类型的 TTI 用于食品智能包装, 产品应用于海鲜、肉制品、乳制品和果蔬等不同类型食品。本文研究总结了近年来国内外 TTI 的开发及商业化应用情况, 重点对纳米型、微生物型、酶型、美拉德型 4 种 TTI 的工作原理和研究进展进行了综述, 同时梳理分析了 TTI 与食品的匹配性原则、变温环境下产品适用性、可靠性测试方法以及欧盟、美国和韩国等国外法规对 TTI 的食品安全要求, 最后提出了未来 TTI 发展面临的一些挑战, 以期行业的进一步发展提供参考依据。

**关键词:** 时间温度指示器; 变温环境; 适用性; 可靠性; 安全性

## Research progress on development and performance testing of time-temperature indicators for food intelligent packaging

DUAN Min\*, LIU Pu-Zhen, LI Qiang, HUANG Rong, LIU Peng, DAI Yue

(Agricultural Food Standardization Research Institute, China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** Time-temperature indicator (TTI), as an effective tool for real-time monitoring of food temperature history, has broad prospects in ensuring food quality and safety and reducing food waste. Currently, various types of TTI have been developed for intelligent food packaging, including physical, chemical, biological, and composite types. The products are applied to different types of food such as seafood, meat products, dairy products, and fruits and vegetables. This paper summarized the development and commercial application of TTI at home and abroad, reviewed the working principle and research progress of nano TTI, microbial TTI, enzyme TTI, and Maillard TTI, analyzed the compatibility principles between TTI and food, product applicability and reliability testing methods under variable temperature environments, and foreign regulations such as the European Union, the United States, and South Korea on food safety requirements for TTI, finally, proposed the challenges faced by future TTI development, in order to provide reference for the further development of the industry.

**KEY WORDS:** time-temperature indicators; variable temperature environment; applicability; reliability; safety

**基金项目:** 中央基本科研业务经费项目(562022Y-9419)、国家市场监督管理总局科技计划项目(2022MK185)、国家市场监督管理总局政府采购项目(HT-SPXG-2023003)

**Fund:** Supported by the Central Basic Research Business Funding Project (562022Y-9419), the Science and Technology Plan Project of State Administration for Market Regulation (2022MK185), and the Government Procurement Project of State Administration for Market Regulation (HT-SPXG-2023003)

\*通信作者: 段敏, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品相关产品风险控制与标准化。E-mail: duanmin@cnis.ac.cn

\*Corresponding author: DUAN Min, Master, Associate Professor, Agricultural Food Standardization Research Institute, China National Institute of Standardization, No.4, Zhichun Road, Haidian District, Beijing 100191, China. E-mail: duanmin@cnis.ac.cn

## 0 引 言

食品产业链中的温度监测对于确保食品质量安全以及减少食物浪费具有至关重要的意义, 尤其是对于需要冷链储运及销售的食物, 温度对其影响尤为关键<sup>[1-3]</sup>。GB 31605—2020《食品安全国家标准 食品冷链物流卫生规范》规定需冷冻的食品在运输过程中温度不应高于 $-18^{\circ}\text{C}$ ; 需冷藏的食品在运输过程中温度应为  $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ , 并且要求运输过程中的温度应实时连续监控, 记录时间间隔不宜超过 10 min。在实际冷链物流中, 由于环境因素和管理因素影响, 偶尔会发生温度波动、脱冷和断冷的现象, 对食品质量安全极为不利<sup>[4-5]</sup>。因此, 对冷链系统和储存食品的时间和温度条件进行连续控制具有重要意义。智能包装作为一种指示性标志, 能够对环境因素进行“识别-判断-响应”, 向消费者直观传递产品状态信息, 在农产品、食品、药品等领域取得了应用<sup>[6-10]</sup>。

时间温度指示器(time-temperature indicator, TTI)作为智能包装的一种, 得到了国内外学者广泛研究与应用。国外自 20 世纪 60 年代起开展了 TTI 研究, 目前已有商业化应用产品应用于海鲜、肉制品、乳制品和果蔬等产品的监测<sup>[11]</sup>。随着当前遏制和减少食物浪费的推进, TTI 的高潜力再次受到国外研究机构和学者的关注<sup>[12-13]</sup>, 据德国 Thünen 市场分析研究所<sup>[13]</sup>的最新研究表明, TTI 可减少 15%的食物浪费, 并得到了消费者的积极认可。国内研究起步较晚, 主要集中在 TTI 理论和实验室设计开发阶段, 但受产品安全性、适用性、可靠性以及生产成本和市场需求等多重因素影响, 国内还没有进行广泛的商用化生产<sup>[14-18]</sup>。本文主要对近年来国外和国内在 TTI 的开发与性能测试研究进行现状综述, 分析了国外相关法规标准, 并提出了未来 TTI 发展面临的挑战,

有利于推动 TTI 的研究和技术的不断进步, 将为食品领域提供更精准、更可靠的监测产品。

## 1 TTI 的开发

TTI 根据工作原理, 可分为物理型、化学型、生物型和复合型, 具体产品类型细分和对应已商业化产品<sup>[19-22]</sup>见表 1。从近些年科研文章来看, 纳米型、微生物型、酶型和美拉德型是国内外学者的研究重点和热点, 表 2 中列举了部分典型研究案例。

### 1.1 纳米型 TTI

纳米型 TTI 是化学型 TTI 的一个新分支, 具有高灵敏度、高精度和高稳定性的特点。尤其是局域表面等离子共振现象(localized surface plasmon resonance, LSPR)和良好的光学性能, 使其在近些年得到了快速发展<sup>[23,35]</sup>。

目前, 纳米型 TTI 开发较成熟的方案以使用金、银等贵金属纳米材料合成为主。LANZA 等<sup>[36]</sup>制备了直径在 40~160 nm 之间银纳米粒子, 并在不同的温度( $4^{\circ}\text{C}$ 和  $22^{\circ}\text{C}$ )和时间(0~5 h)下对悬浮液(水中的银纳米粒子)进行表征, 确认纳米颗粒因不同的热吸收量而表现出不同的性质。SAENJAIBAN 等<sup>[25]</sup>利用添加银纳米粒子提高聚二乙炔颜色变化的敏感性, 开发了聚二乙炔/银纳米颗粒嵌入羧甲基纤维素薄膜的 TTI。GAO 等<sup>[23]</sup>开发了一种基于金-银核壳纳米棒的时间-温度指示剂(Au@AgNRs TTI), 并通过光谱变化、微观形态和颜色变化表征研究了不同温度下(4、15、25、 $35^{\circ}\text{C}$ ) TTI 的动力学特性和温度依赖性, 表明了纳米型 TTI 的高灵敏度和良好的适用性。上述研究表明纳米型 TTI 可通过添加或改变纳米颗粒的成分、大小、局部微环境等, 使其具有更灵活、更敏感的颜色变化。

表 1 TTI 的分类及以商业化产品  
Table 1 Classification and commercialization of TTI

大类	细类	已商业化产品(举例)	开发原理	产品对应国家	当前研究重点
物理型	扩散型	MonitorMark™ TTI	染色脂肪酸脂融化、在多孔卡纸上扩散引起颜色变化	美国	否
	力学型	—			否
	电子型	—			否
化学型	聚合型	Fresh-Check® TTI	特定单体的固相聚合反应引起颜色变化	美国	否
	光化学型	OnVu™ TTI	温敏墨水被 UV 紫外线光源激活引起颜色变化	德国	否
	氧化还原型	—			否
	纳米型	—			是
生物型	微生物型	(eO)® TTI	微生物代谢引起颜色变化	法国	是
	酶型	Check Point® TTI	底物经过脂肪酶反应导致 pH 值降低引起颜色变化	瑞典	是
	美拉德反应型	—			是
复合型	—				否

注: —为尚未找到对应类型的商业化产品。

表 2 近 5 年 TTI 的典型研究  
Table 2 Typical research of TTI in the past 5 years

序号	种类	具体材料	Ea (TTI)/ (kJ/mol)	Ea(食品)/ (kJ/mol)	颜色变化	是否进行 变温测试	文献
1	纳米型	金-银核壳纳米棒 Au@AgNRs	70.36	65.67(牛奶的可滴定 酸度)	红色→橙色或黄色→绿色	是	[23]
2	纳米型	明胶-金纳米颗粒	77.89~84.58	92.61(玛芬蛋糕的油脂 氧化)	淡黄色→深紫色	是	[24]
3	纳米型	聚二乙炔/银纳米颗粒嵌 入羧甲基纤维素薄膜 微生物	58.70	—	紫蓝色→紫色→红紫色	—	[25]
	微生物型	<i>Janthinobacterium</i> sp.(紫 曲霉素)	65.1~110.3	—	淡黄色→深紫色	是	[26]
3	微生物型	嗜热脂肪芽孢杆菌 (PTCC 1713)和萎缩芽孢 杆菌(PTCC 1670)孢子的 生物油墨	—	—	嗜热脂肪虫生物油墨: 紫色→黄色; 萎缩芽孢 杆菌的生物油墨: 绿色 →黄色	—	[27]
4	微生物型	乳酸菌 <i>Carnobacter</i> <i>maltaromaticum</i> 菌株 (4 种不同菌株)	—	—	紫色→黄色	—	[28]
5	酶型	固定化磷脂酶 A1/聚乙 烯醇微球	58.15	58.15(猪肉的挥发性盐 基总氮); 57.02(猪肉的 2-硫代巴比妥酸)	深蓝色→蓝绿色→浅黄 色	是	[19]
6	酶型	脂肪酶、三乙酸甘油酯, 固定在聚乙烯亚胺/戊二 醛/聚丙烯无纺布	26.28~47.98	37.60(牛肉的挥发性盐 基氮)	绿色→橙色或橙红色	—	[29]
7	酶型	漆酶电纺壳聚糖/聚(乙 烯醇)纤维上, 氧化愈创木酚	40.9±2.8	—	透明→深紫棕色	是	[30]
8	酶型	脂肪酶@Cu <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 杂化 纳米花	46.86~65.63	—	紫色→黄色→绿色	—	[31]
9	酶型	具有显色基底带的固定 化糖化酶	29.14~79.14	75.54(酸奶的酸度)	紫色→无色	是	[32]
10	美拉德反应型	木糖-赖氨酸基	72.11	86.55(鲭鱼的挥发性盐 基氮)	无色→浅黄色→黄色→ 浅棕色→深棕色	是	[33]
11	美拉德反应型	木糖-赖氨酸基	83.51	70.45(大黄鱼的挥发性 盐基氮)	无色→浅黄色→黄色→ 浅棕色→深棕色	是	[34]

注: —为文献中未提及。

## 1.2 微生物型 TTI

微生物型 TTI 与其他非微生物型 TTI 比较, 最突出的优点在于 TTI 微生物生长和代谢活性的过程带来的“不可逆的颜色变化”响应, 可用于模拟冷链食品品质劣变的过程<sup>[37]</sup>。

大多微生物型 TTI 由微生物、底物培养基和 pH 指示剂组成, 其工作机制是通过微生物的生长代谢影响底物培养基的 pH, 导致 pH 指示剂的颜色发生相应变化<sup>[38-39]</sup>。但也有研究表明, 并非所有的微生物型 TTI 的颜色变化都是由于代谢产物的酸碱度变化引起的, 也有由微生物产生的有色次级代谢产物引起的。例如 MATARAGAS 等<sup>[26]</sup>利用 *Janthinobacterium* sp. 微生物产生的紫曲霉素(紫色)开

发了一款新型微生物时间-温度指示器。

在开发过程中, 微生物的种类是开发 TTI 的关键要素。目前用于制备微生物型 TTI 的微生物种类大多为乳酸菌<sup>[38-39]</sup>。主要原因有两点, 一是乳酸菌对温度变化的敏感性和生长速度与食物的特定腐败微生物接近; 二是乳酸菌是公认的安全、卫生的菌株。邱灵敏等<sup>[39]</sup>、孟晶晶<sup>[40]</sup>、张小栓等<sup>[41]</sup>均开展了乳酸菌型 TTI 的制备, 用于监测鲜牛奶、酸牛奶和葡萄的品质变化。也有研究学者使用其他菌种开展研究, 如 LIU 等<sup>[28]</sup>在脑心浸液肉汤(brain heart infusion, BHI)培养基、pH 指示剂和补充葡萄糖的混合物上接种麦芽香肉杆菌(4 种不同的菌株), 利用其产生的酸引发不可逆的颜色变化制备了 TTI, 并指出 TTI 的响应可通过控制接种量调整整个系统, 从而定制更灵活的产品满足

不同被监测食品。LEYLA 等<sup>[27]</sup>制备了基于嗜热脂肪芽孢杆菌(PTCC 1713)和萎缩芽孢杆菌(PTCC 1670)的孢子生物油墨, 激光打印机在柔性基板上制作了一种比色温度指示器, 此外该研究证明了在印刷过程中, 随着温度升高, 细菌孢子仍完好无损地转移到了基板上并保持活力。

此外, 由于微生物型 TTI 一般会随着温度的升高自动激活, 因此必须在冷藏或冷冻温度下保存, 并且微生物中的游离细胞容易失去活性, 基于上述考虑, 有学者研究了微生物微胶囊化 TTI 和基于无线射频识别技术或条形码技术集成的微生物型 TTI<sup>[38]</sup>。

### 1.3 酶型 TTI

酶型 TTI 因具有性能稳定、易于控制等优点被大量学者研究, 主要研究的酶种类涵盖了脂肪酶、漆酶、糖化酶和脲酶等<sup>[42]</sup>。随着酶固定化研究的深入, 使用不同载体开发固定化酶型 TTI 成为了一个新的研究方向。尽管用于固定化的支撑材料种类较多, 例如壳聚糖、石墨烯氧化物或聚氨酯等, 但是新型固定化技术和固定化基质的开发仍然受到广泛关注, 其中研究较多的为静电纺丝技术和蛋白质-无机杂化纳米花等<sup>[31,43]</sup>。

在静电纺丝方面, 因静电纺丝薄膜具有孔隙率和比表面积大的特点, 将它与 TTI 集成应用可提高产品的稳定性和灵敏性。使用静电纺丝技术固定酶的方式, 主要包括了表面吸附、共价交联、共混静电纺丝和同轴静电纺丝<sup>[43-44]</sup>。其中同轴静电纺丝作为前沿技术, 在固定化酶上得到了良好应用, 实现了既稳定固定酶, 又保持酶的高活性的目标。JI 等<sup>[44]</sup>基于中空纳米纤维结构的同轴静电纺丝方法固定糜蛋白酶, 研究结果证明了中空纳米纤维包埋酶的可行性和优势。CHOI 等<sup>[45]</sup>利用芳香族热塑性聚氨酯的特性, 开发了一种使用自修复纳米纤维制造的创新型 TTI, 采用静电纺丝制备的薄膜冷藏时是不透明的, 但在室温下通过自愈诱导的纤维间融合, 指示器逐渐透明, 从而出现警告信号。

在蛋白质-无机杂化纳米花方面, LIN 等<sup>[31]</sup>利用脂肪酶与铜离子的相互作用制备了脂肪酶@Cu<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 杂化纳米花并在 TTI 中实现了应用, 结果显示纳米花表面积与体积比大, 有力增加了酶与底物之间的传质, 纳米花使脂肪酶的活性提高了 1.37 倍, 并显著提高了脂肪酶的储存稳定性, 有效解决了脂肪酶在溶液状态下不稳定的问题。

目前还没有基于静电纺丝的商业化 TTI 材料可用于食品包装, 但是 FORGHANI 等<sup>[43]</sup>、孙亚鹏等<sup>[46]</sup>均认为通过静电纺丝技术对于探索和开发新的智能包装材料是非常有意义的。

### 1.4 美拉德型 TTI

美拉德反应是一种在还原糖(如葡萄糖、半乳糖等)、氨基酸、蛋白质存在下发生的非酶促褐变反应。美拉德型 TTI 正是利用其颜色随温度、时间变化关系开发的 TTI。随着温

度的升高, 美拉德反应的速率也会相应地增加。李冰等<sup>[47]</sup>将赖氨酸和木糖混合后溶于磷酸缓冲溶液中, 混合体系经过美拉德反应可以在迅速升温的过程中产生明显的颜色变化, 最初无色的溶液会随着时间的增加最后变为深褐色。

此外, 美拉德型 TTI 可通过调整反应物的浓度以及还原糖和氨基酸的特定组合来控制设计灵活的反应时间和温度, 基于美拉德反应开发的 TTI 适用于不同温度下储存的食物。胡泽茜等<sup>[48]</sup>通过正交试验调节木糖、甘氨酸、磷酸氢二钾(K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)浓度配比, 改变 TTI 使用寿命和适用范围, 以匹配不同货架期的食品。YE 等<sup>[33-34]</sup>利用美拉德反应特性制备了 TTI, 用于监测冷藏不同种类鱼的新鲜度。LEE 等<sup>[49]</sup>分别在烹饪过程中、水果和蔬菜在冷藏或室温储存条件下使用 TTI 进行食品质量监测。此外, TSUJHASHI 等<sup>[50]</sup>利用美拉德型 TTI 成功地对应了冷冻食品(虾和鸡肉)的质量恶化情况, 实现了基于美拉德反应的 TTI 在冷链物流环境中的应用。

## 2 TTI 的性能测评

从上述研究可看出, 当前已形成了多种不同类型的 TTI 用于监测食品品质并预测剩余货架期, 涵盖了肉类、鱼类、乳制品等不同类型的食品。但是 TTI 仍面临着产品的适用性、可靠性、安全性以及准确性等多方面问题, 商业化发展受到了较大阻力<sup>[22]</sup>。因此研究人员在设计开发一款新的 TTI 时, 有必要深入思考和研究 TTI 各项性能以及实际应用时的环境因素等, 推动实现产品的商业化应用。

### 2.1 TTI 与食品的匹配性原则

TTI 的适用性是判断其能否准确监测和指示食品质量的重要指标<sup>[32]</sup>。早在 1997 年, 美国材料与试验协会发布了 ASTM F 1416-96 《时间-温度指示器的选择标准指南》, 该标准是有关 TTI 的第一个标准, 明确提出易腐食品的生产加工商有责任确定产品在适当温度下的保质期, 并需要咨询 TTI 的生产商以选择与产品质量最匹配的可用指示器。

大多数研究者在开发 TTI 并与食品进行匹配时, 主要遵守两大原则: 一是要求 TTI 和食品之间的活化能相匹配, 差值不超过 25 kJ/mol; 二是 TTI 反应终点与食品的保质期终点相匹配, 误差不超过 15%<sup>[32]</sup>。从表 2 的研究可看出, 食品品质发生变化时的活化能与开发的 TTI 之间均小于 25 kJ/mol。从表 2 可看出, 通常进行 TTI 的适用性测试时, 反映食品品质变化的指标主要选取了肉类和鱼类的挥发性盐基氮、牛奶和酸奶的可滴定酸度等, 其活化能基本处于 50±20 kJ/mol, 易于匹配 TTI 的活化能。

### 2.2 变温环境下 TTI 的适用性和可靠性

温度波动对食品的质量安全影响较大。但在实际的冷链和流通环节中, 温度的变化是不可避免的。ALBRECHT

等<sup>[51]</sup>提出在变温条件下开展 TTI 的适用性和可靠性是至关重要的。他们在实验室成功开发了测试模型并集成到在线软件工具中,在德国多家家禽连锁店测试了 OnVu™ TTI 作为保质期指标的适用性和可靠性,结果 TTI 准确地反映了在实际条件下发生的温度波动,并支持肉类供应链中的动态保质期预测。目前,国内研究学者在开展 TTI 适用性和可靠性的测试时,大多会进行恒温和变温两种温度环境下的测试。例如,在测试时,模拟放置冰箱和室温的温度变化,在 5°C 和 25°C 下各放置 2 h 进行循环<sup>[30]</sup>;或先在 4°C 放置 24 h, 13°C 放置 12 h, 18、25、15°C 分别放置 10 h 后,保持 4°C 直至保质期终点<sup>[23]</sup>等。

英国标准 BS 7908:1999《包装—时间温度指示器—性能规范和参考试验》明确了温度指示器和时间-温度指示器的性能要求,以及用于确认交付指示器性能质量或者用作第三方试验方式的参考试验程序,其中附录 D 给出了 TTI 在非等温条件下的可靠性,这也是目前唯一以标准形式发布的非等温条件下的可靠性测试方法。其试验原理为 TTI 经受交替的温度循环,在不同温度范围内进行 4 次不同的测定,用 TTI 在每个温度范围内达到终点所用的时间,来验证 TTI 是否能够对不同温度积分,同时仍遵循阿伦尼乌斯特性。标准也给出了不同类型产品的测试温度范围,如表 3。

表 3 不同类型产品的测试温度范围(°C)

Table 3 Test temperature range for different types of products (°C)

冷冻产品	冷藏产品	室温产品
-25~-15	-1~5	5~15
-15~-10	5~10	15~25
-10~-5	10~15	25~40
-25~-5	-1~25	0~45

### 2.3 TTI 的安全性

虽然 TTI 从根本上可改善食品冷链管理,但由于担心产品的安全性以及立法问题等,在国外的商业化应用也没有得到特别好的实施<sup>[51]</sup>。目前我国还没有关于 TTI 等智能包装的法规和标准。项目组查询分析了欧盟、美国 and 韩国等国外关于 TTI 的法规要求,希望为国内研究者在开发和商业化推广 TTI 提供一些参考依据。

欧盟委员会 2009 年发布了 NO.450/2009《关于预期接触食品的活性和智能材料及制品》,该法规主要规定了活性与智能材料物品的定义,可用作活性和智能材料的种类,贴附标识图案、合规内容声明等。

美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration, FDA)将食品接触材料按照间接食品添加剂的方式进行管理。所使用物质未列入清单中或不满足法规中物质要求,则需要进行食品接触通告申请。同时 FDA 在一些食品加工领域中推荐使用 TTI 控制产品贮存期,例如,

2022 年 FDA 发布了行业指南文件 FDA-2011-D-0287《鱼类和渔业产品危害和控制指南》,指出了使用 TTI 监控海产品中肉毒杆菌的生长和毒素的产生。

韩国食品药品安全处 2021 年修订了第 2021-76 号公告《食品器具、容器和包装的标准和规范》,新增了活性和智能包装的制造标准,要求应按照相应的标准和规格制造使用,以确保其不会迁移到食品中;当使用食品或食品添加剂制造活性和智能包装时,食品或食品添加可能会在符合相关标准的范围内迁移到被包装食品中,但这些物质不应影响被包装食品的特性。

### 3 结论

TTI 作为记录食品在运输和储存过程中的时间和温度的累计变化,有很大潜力和市场作为保障食品质量安全以及动态预测食品保质期、减少食品浪费的有效工具,但在未来发展上也面临着以下挑战。

(1)开发高适用性、高可靠性的 TTI。食品品质变化是一个复杂的过程,现有开发设计,多是通过匹配 TTI 与某个响应指标变化的结果,未来要考虑多质量指标的整合,并且建立标准化规范化的性能测评方法。

(2)开发高稳定性 TTI。酶型和微生物型 TTI 是目前研究和较为突出的类型,其活化能的调节也更为灵活和简单,虽然目前也开展了固化酶和固化微生物的研究,但如何保障高稳定性和高活性将是下一个研究需要突破的重点。

(3)注重选用材料的安全性。从国外的应用实践和法规要求,可看出智能包装虽然在保障食品安全上发挥了优势,但其自身对食品安全的影响要求是不会松懈的。在开发 TTI 时,要充分考虑和测试当其与食品包装相连时,所有材料及其中物质是否可能会迁移到食品中引发食品安全问题。

(4)降低产品的成本。当前已实现商业化 TTI 的成本相对较高,低附加值食品生产者不会也不愿使用 TTI,因此如何降低和控制 TTI 的生产成本,是国内外研究学者的技术难题,也是加快 TTI 商业化应用的基础和前提。

### 参考文献

- [1] GAO TT, TIAN Y, ZHU ZW, *et al.* Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 99: 311-322.
- [2] SUPPAKUL P, KIM YD, YANG HJ, *et al.* Practical design of a diffusion-type time-temperature indicator with intrinsic low temperature dependency [J]. J Food Eng, 2018, 223: 22-31.
- [3] CENCHA LG, GARCIA GF, BUDINI N, *et al.* Time-temperature indicator based on the variation of the optical response of photonic crystals upon polymer infiltration [J]. Sens Actuators A, 2022, 341: 113571.
- [4] 刘冬青, 陈朴, 臧鹏, 等. 时间-温度指示器在食品保质期预测中的应用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 1-10.
- LIU DQ, CHEN P, ZANG P, *et al.* Application of time-temperature

- indicator in food shelf life prediction [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(22): 1–10.
- [5] 刘晓锦, 李婷, 东为富. 食品智能包装的研究进展[J]. *塑料包装*, 2021, 31(4): 1–6, 53.
- LIU XJ, LI T, DONG WF. Research progress of intelligent packaging for food [J]. *Plast Packag*, 2021, 31(4): 1–6, 53.
- [6] CASANOVA CF, SOUZA MAD, FISCHER B, *et al.* Development of enzymatic-colorimetric time-temperature integrator for smart packaging [J]. *Biointerface Res Appl Chem*, 2021, 11(2): 9335–9345.
- [7] CHEN B, ZHANG M, CHEN H, *et al.* Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables: A review [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2023, 198: 112261.
- [8] 王瑶瑶, 徐文, 黄昀, 等. 疫苗温度控制标签在疫苗冷链储运中的应用[J]. *生物产业技术*, 2018, (4): 90–93.
- WANG YY, XU W, HUANG J, *et al.* Application of vaccine vial monitor in the storage and transportation of vaccine cold chain [J]. *Biotechnol Bus*, 2018, (4): 90–93.
- [9] 都若曦, 沈滢滢, 张毅兰. 用于冷链运输中温度监测的时间温度指示剂的研究进展[J]. *中国医药工业杂志*, 2020, 51(4): 434–441.
- DU RX, SHEN TT, ZHANG YL. A review of time-temperature indicators for temperature monitoring in cold chain transportation [J]. *Chin J Pharm*, 2020, 51(4): 434–441.
- [10] 王伯阳, 李杰, 高锦, 等. 浅谈时间-温度指示器在温敏型军队药品质量控制工作中的应用[J]. *药学实践杂志*, 2020, 38(3): 282–285, 288.
- WANG BY, LI J, GAO J, *et al.* Application of TTI in quality control of the military thermos-sensitive drugs [J]. *J Pharm Pract*, 2020, 38(3): 282–285, 288.
- [11] JANJARASSKUL T, SUPPAKUL P. Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(5): 808–831.
- [12] BRENNAN L, LANGLEY S, VERGHESE K, *et al.* The role of packaging in fighting food waste: A systematised review of consumer perceptions of packaging [J]. *J Cleaner Prod*, 2021, 281: 125276.
- [13] LEHN F, GOOSSENS Y, SCHMIDT T. Economic and environmental assessment of food waste reduction measures—trialing a time-temperature indicator on salmon in hellofresh meal boxes [J]. *J Cleaner Prod*, 2023, 392: 136183.
- [14] LIU Y, LI L, YU ZM, *et al.* Principle, development and application of time-temperature indicators for packaging [J]. *Packag Technol Sci*, 2023, 36: 833–853.
- [15] DU HY, SUN XL, CHONG XN, *et al.* A review on smart active packaging systems for food preservation: Applications and future trends [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 141: 104200.
- [16] 刘晓锦, 李婷, 东为富. 食品智能包装的研究进展[J]. *塑料包装*, 2021, 31(4): 1–6, 53.
- LIU XJ, LI T, DONG WF. Research progress of intelligent packaging for food [J]. *Plast Packag*, 2021, 31(4): 1–6, 53.
- [17] 张李璇, 余海龙, 许高垒, 等. 胶态金纳米型时间-温度指示器性能研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(19): 134–139.
- ZHANG LX, YU HL, XU GL, *et al.* Colloidal time-temperature indicators based on gold nanoparticles [J]. *Packag Eng*, 2020, 41(19): 134–139.
- [18] 孙若楠, 张敏, 夏斯璇, 等. 胶态酶型时间温度指示器的制备研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(9): 115–121.
- SUN RN, ZHANG M, XIA SX, *et al.* Preparation of colloidal enzyme type time and temperature indicator [J]. *Packag Eng*, 2022, 43(9): 115–121.
- [19] YUE C, WANG JY, WU DR, *et al.* Immobilization of phospholipase A1 on polyvinyl alcohol microspheres to develop a time-temperature indicator for freshness monitoring of pork [J]. *J Food Eng*, 2023, 357: 111640.
- [20] 唐园园. 固态酶型时间温度指示器的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- TANG YY. Research on the solid-type time-temperature indicators [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [21] 王静伊, 岳崇泽, 王之强, 等. 时间-温度指示器在食品智能包装中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 328–334.
- WANG JY, YUE CZ, WANG ZQ, *et al.* Research progress of time-temperature indicator in intelligent food packaging [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(4): 328–334.
- [22] 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 YF, WANG Y, ZHANG MY, *et al.* Research status of time-temperature indicator for monitoring food freshness [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(7): 10–20.
- [23] GAO TT, SUN DW, TIAN Y, *et al.* Gold-silver core-shell nanorods based time-temperature indicator for quality monitoring of pasteurized milk in the cold chain [J]. *J Food Eng*, 2021, 306: 110624.
- [24] 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 LX. Food quality monitoring based on gold nano time-temperature indicator [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [25] SAENJAIBAN A, SINGTISAN T, SUPPAKUL P, *et al.* Novel color change film as a time-temperature indicator using polydiacetylene/silver nanoparticles embedded in carboxymethyl cellulose [J]. *Polymers*, 2020, 12: 2306.
- [26] MATARAGAS M, BIKOULI VC, KORRE M, *et al.* Development of a microbial time temperature indicator for monitoring the shelf life of meat [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2019, 52: 89–99.
- [27] LEYLA G, MOHSEN R. Fabrication of a time-temperature indicator by inkjet printing of a spore-based bio-ink [Z]. 2020.
- [28] LIU CY, CHEAH E, KANG SG, *et al.* Development of a microbial time-temperature indicator for real-time monitoring the quality of Australian vacuum-packed lamb [J]. *Int J Food Microbiol*, 2024, 412: 110559.
- [29] JINGYI W, CHONGZE Y, GUIYING W. Beef quality monitoring using immobilization lipase on modified polypropylene non-woven fabric based on time-temperature indicator [J]. *J Food Eng*, 2023, 357: 111586.
- [30] JHAO RJ, SHYI NL, SHIH BL, *et al.* Immobilizing laccase on electrospun chitosan fiber to prepare time-temperature indicator for food quality monitoring [J]. *Innovat Food Sci Emerg Technol*, 2020, 63:

- 102370.
- [31] LIN W, FENG L, SUFANG W, *et al.* Time-temperature indicators based on Lipase@Cu<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> hybrid nano flowers [Z]. 2022.
- [32] 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 L, MENG JJ, LI YJ, *et al.* Application of immobilized glucoamylase time-temperature indicators on yogurt quality monitoring [J]. Packag J, 2018, 10(1): 46–53.
- [33] YE BB, CHEN J, YE HW, *et al.* Development of a time-temperature indicator based on Maillard reaction for visually monitoring the freshness of mackerel [J]. Food Chem, 2022, 373: 131448.
- [34] YE BB, LIU CK, LI H, *et al.* The design and application of xylose-lysine based time-temperature indicators for visually monitoring the shelf-life of chilled large yellow croaker [J]. J Food Eng, 2023, 355: 111583.
- [35] ZHANG C, YIN AX, JIANG RB, *et al.* Time-temperature indicator for perishable products based on kinetically programmable Ag overgrowth on Au nanorods [J]. ACS Nano, 2013, 7(5): 4561–4568.
- [36] LANZA GA, PEREZ-TABORDA JA, AVILA A. Time temperature indicators (TTIs) based on silver nanoparticles for monitoring of perishables products [C]. 6th National Conference on Engineering Physics and the 1st International Conference, 2019.
- [37] 李昱珩, 马常阳. 基于化学反应和微生物生长的时间-温度指示器跨模型匹配方法[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 58–64.  
LI YH, MA CY. Multi-model matching method for time-temperature indicators based on chemical reaction and microbial growth [J]. Food Sci, 2022, 43(19): 58–64.
- [38] 衣然, 马浩洋, 金露达, 等. 微生物型时间-温度指示器(TTI)研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 223–233.  
YI R, MA HY, JIN LD, *et al.* Research progress of microbial time-temperature indicator (TTI) [J]. Packag Eng, 2023, 44(1): 223–233.
- [39] 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 LM, ZHANG JS, QIAN J, *et al.* Microbial time-temperature indicator applied in fresh milk [J]. Packag Eng, 2020, 41(9): 67–73.
- [40] 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.  
MENG JJ. Application of microbial time and temperature indicators in yogurt quality management [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [41] 张小栓, 孙格格, 肖新清, 等. 一种用于鲜食葡萄品质感知的微生物型时间温度指示器: 中国, CN104964968B [P]. 2018-04-13.  
ZHANG XS, SUN GG, XIAO XQ, *et al.* A microbial time-temperature indicator for quality perception of fresh grapes: China, CN104964968B [P]. 2018-04-13.
- [42] 徐凤娟, 葛蕾, 李振兴, 等. 固态酶型时间温度指示器的研发[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3507–3512.  
XU FJ, GE L, LI ZX, *et al.* Development of a novel time-temperature indicator based on tyrosinase [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(9): 3507–3512.
- [43] FORGHANI S, ALMASI H, MORADI M. Electrospun nanofibers as food freshness and time-temperature indicators: A new approach in food intelligent packaging [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2021, 73: 102804.
- [44] JI XY, SU ZHG, LIU CHX, *et al.* Regulation of enzyme activity and stability through positional interaction with polyurethane nanofibers [J]. Biochem Eng J, 2017, 121: 147–155.
- [45] CHOI S, EOM Y, KIM SM, *et al.* A self-healing nanofiber-based self-responsive time-temperature indicator for securing a cold-supply chain [J]. Adv Mater, 2020, 32(11): 1907064.
- [46] 孙亚鹏, 刘霄莹, 李慧雪, 等. 静电纺丝纳米纤维在食品智能包装中的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 93–102.  
SUN YP, LIU XY, LI HX, *et al.* Research progress of electrospun nanofibers in food intelligent packaging [J]. Packag Eng, 2023, 44(13): 93–102.
- [47] 李冰, 胡怡, 李玉婷, 等. 指示消费端食源性 AGEs 含量的美拉德反应型时间-温度指示器的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 303–310.  
LI B, HU Y, LI YT, *et al.* A study on the Maillard reaction time temperature indicator for indicating the content of foodborne AGEs in consumers [J]. Food Technol, 2017, 42(3): 303–310.
- [48] 胡泽茜, 李洋, 崔琢玉, 等. 冷链物流环境下时间温度指示器的制备与应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 246–257.  
HU ZQ, LI Y, CUI ZY, *et al.* Preparation and application of time temperature indicators in cold chain logistics environment [J]. J Agric Eng, 2023, 39(22): 246–257.
- [49] LEE JY, HARADA R, KAWAMURA S, *et al.* Development of a novel time-temperature integrator/indicator (TTI) based on the maillard reaction for visual thermal monitoring of the cooking process [J]. Food Bioprocess Technol, 2018, 11(1): 185–193.
- [50] TSUJHASHI M, TANAKA S, KOAYAMA K, *et al.* Application of time-temperature indicator/integrator based on the Maillard reaction to frozen food distribution [J]. Food Bioprocess Technol, 2022, 15: 1343–1358.
- [51] ALBRECHT A, IBALD R, RAAB V, *et al.* Implementation of time temperature indicators to improve temperature monitoring and support dynamic shelf life in meat supply chains [J]. J Packag Technol Res, 2020, 4: 23–32.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

## 作者简介



段敏, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品相关产品风险控制与标准化。  
E-mail: duanmin@cnis.ac.cn