

基于包装功能的时间-温度指示器与食品新鲜度指示器研究进展

于江, 王嘉懿, 谢利, 周星, 边文慧

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048)

摘要: **目的** 从包装功能实现的角度分析研究时间-温度指示器和食品新鲜度指示器的原理、类型与发展趋势, 指出开发设计时间-温度指示器和食品新鲜度指示器应完成的包装功能, 为有效实现包装交流功能提供研究思路和技术支持。**方法** 列出现有食品包装功能在物理环境、周围环境和人类环境下的实现矩阵, 通过研究时间-温度指示器和食品新鲜度指示器的实现原理和所满足的包装交流功能, 探讨这2种技术提高矩阵中分值较低元素的可行性。**结果** 时间-温度指示器监测食品所经历的时间、温度的完整历程, 有助于提高实现矩阵中 ComA 元素的分值; 食品新鲜度指示器提供生理变化或微生物生长引起的食品质量变化的定性或半定量信息, 有助于提高实现矩阵中 ComH 元素的分值。**结论** 时间-温度指示器和食品新鲜度指示器能够有效提升食品包装的交流功能, 保证消费者安全, 减少资源浪费, 具有广阔的发展前景。

关键词: 包装功能; 包装环境; 包装交流功能; 时间-温度指示器; 食品新鲜度指示器

中图分类号: TB485.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)19-0049-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.19.005

Research Progress of Time-Temperature Indicator and Food Freshness Indicator Based on Packaging Functions

YU Jiang, WANG Jia-yi, XIE Li, ZHOU Xing, BIAN Wen-hui

(Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the principle, type and development trend of time-temperature indicator and food freshness indicator from the perspective of realizing packaging functions and point out the packaging functions that should be completed in the development and design of time-temperature indicator and food freshness indicator, so as to provide research idea and technical support for the effective realization of packaging communication functions. The realization matrix of the current food packaging functions in the physical environment, ambient environment and human environment was listed. The feasibility of time-temperature indicator and food freshness indicator to improve the elements with lower scores in the matrix was discussed by studying the realization principle and packaging functions of these two technologies. Time-temperature indicator was conducive to improving the score of ComA element in the realization matrix by monitoring the complete record of time and temperature of food. Food freshness indicator provided qualitative or semi-quantitative information about changes in food quality caused by physiological changes or microbial growth, which

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 中国博士后科学基金 (2019M663785)

作者简介: 于江 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为包装工艺、智能包装。

通信作者: 周星 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为印刷包装功能材料及其资源化。

helped to improve the scores of ComH element in the realization matrix. Time-temperature indicator and food freshness indicator can effectively improve the communication functions of food packaging and reduce waste of resources. Therefore, these two technologies both have broad development prospects.

KEY WORDS: packaging functions; packaging environments; packaging communication functions; time-temperature indicator; food freshness indicator

在全球性资源匮乏的背景下,人类亟需一类能够有效减少食品浪费并同时保证食品安全的包装。从包装功能的角度,此类包装既具有避免营养卫生符合要求的食品不被丢弃的功能,又能够保证消费者甄别出不安全食品,要求包装与消费者之间的交流功能顺畅,包装可以如实提供内装食品的相关信息。时间-温度指示器(Time Temperature Indicators, TTI)和食品新鲜度指示器(Food Freshness Indicators, FFI)让消费者通过颜色等易感知信息掌握包装内食品的有效信息,让食品充分被消费者利用,带来经济效益与社会效益的最大化。文中在分析包装功能及其实现环境的基础上研究 TTI 与 FFI 能满足的包装功能需求与技术原理,指出其发展趋势和研发方向。

1 包装功能及其实现环境

进行产品包装设计时充分考虑包装功能及其实现环境是非常有意义的。包装有 4 项基本功能:装容(Containment)、保护(Protection)、方便(Convenience)和交流(Communication)。包装基本功能实现的环境被分解成 3 个方面:物理环境(Physical Environment)、周围环境(Ambient Environment)和人类环境(Human Environment)^[1]。物理环境泛指包装流通过程中所承受的温度、压力、振动、跌落等;周围环境主要是包装所处外界环境中的 O₂、水蒸气、游离挥发性有机物等因素;人类环境则指包装与人之间的相互作用,如包装对人造成的伤害、人对包装信息的理解与领悟等。包装功能与环境的矩阵见图 1,包装的 4 项基本功能与它们的 3 种实现环境共形成 12 个交点,每个交叉点就是 3 行 4 列矩阵的 1 个元素。针对某个具体的包装,如果各元素分值越高,则功能的完成情况越好。包装功能环境矩阵中的元素都有各自的含义。以保护功能为例,保护功能在物理环境中保护内装产品不受外界机械冲击等不利影响;在周围环境中保护内装产品不受空气中 O₂、水蒸气、游离挥发性有机物的影响;在人类环境中保护使用者不受到包装本身的伤害^[2-3]。包装保护功能在环境下的实现分别对应矩阵元素 ProP、ProA 和 ProH。

包装功能环境矩阵的 12 个元素中,与交流功能相关的元素 ComA 和 ComH 是较难实现的。元素 ComA 指的是包装交流功能在周围环境中的实现情况,产品在流通过程中所经历的周围环境的参数,如

温度、湿度、O₂ 浓度等信息无法反映给消费者进行交流,消费者对产品所经历的环境参数不了解,也就无法知晓流通过程对产品造成的影响^[4]。仅从食品包装上的失效日期来确定食品的品质状况是不足以实现交流功能的。

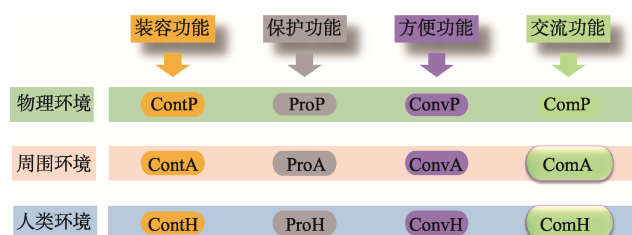


图 1 包装功能环境矩阵

Fig.1 Packaging functions and environments matrix

事实上,依据化学反应动力学和腐败微生物生长的特性可知,决定食品品质变化的最主要因素是食品的储存温度而非储存时间^[5],而通常的食品包装只能提供给消费者食品的失效日期。这样会导致很多储存温度较低,但储存时间较长的食品在质量仍旧完好的情况下被丢弃。当然,由于食品流通环境的未知性,也会导致长期处于恶劣环境下的食品在包装所示失效期之内品质已经恶变。后面这种情况有可能导致消费者食用不安全的食品,尤其值得重视^[6]。

在产品包装中附加 TTI,可以实现包装在周围环境下的交流功能。TTI 综合反映产品所经历的流通环境的时间和温度,通过变色的形式提供给消费者产品的外界环境变化情况^[7]。这类产品已经商业化了,包括瑞典的 Vitsab,美国的 Avery Dennison,法国的 Cryolog 等。其中,TEMPTIME 旗下的 Fresh-Checks 标签已经在法国的超市 Monoprix 应用超过 25 年,使用这种标签的产品达 400 种以上^[1]。

元素 ComH 指交流功能在人类环境中的实现情况,根据各类法规和行业管理要求,食品包装上有大量的交流信息,如品名、生产厂家、使用方法、食品的失效时间等。即便如此,消费者对食品信息的掌握还是不够的,食品的新鲜程度往往无法让消费者直接掌握。FFI 可以在不破坏食品包装、不影响食品质量的前提下,提供生理变化或微生物生长引起的食品质量变化的定性或半定量信息。FFI 可以帮助消费者直观科学地判断食品质量^[8]。FFI 非常适用于肉制品、海鲜、乳制品、水果和蔬菜等易腐食品的新鲜度无损

检测^[9],因此,FFI可以增加包装在人类环境下的交流功能。

需要指出的是,TTI和FFI虽然都有助于提供食品品质的相关信息,但它们各自提供交流功能的环境是不同的。TTI反映的是食品经历的时间温度累积,是对流通环境信息的交流,而FFI反映的是具体食品的新鲜程度,并直接将食品新鲜程度反馈给消费者。一种TTI可以应用于多种储存条件相近的食品,但多数FFI针对的是一种具体的食品,因为每种食品标志性释放物产量对应的食品失效程度是不同的。两者的共同之处在于,将TTI和FFI应用于食品包装都能有效提升包装的交流功能。

2 TTI的原理与发展趋势

2.1 TTI的原理及其功能

食品从生产出来到消费者手中的过程中会发生物理变化、化学变化、生理生化变化或微生物滋生,这些均对食品质量产生了负面影响,导致消费者的感官排斥,甚至影响健康。无论是各类变化的程度还是微生物的滋生速度都受时间、温度的双重影响。TTI可以监测食品所经历的时间温度的完整历程。含有TTI的食品包装由于能够直观地反映出食品的流通经历,因而对包装功能环境矩阵ComA元素的分值有很大提升。

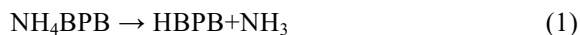
根据TTI工作原理的不同,可将TTI分为电子型、物理型、化学型、微生物型和酶型。国内外研究者围绕TTI展开了较多的研究,其中Zweig等^[10]、Debord等^[11]利用温度传感器件和计算设备制备了电子型TTI,这2种电子型TTI皆可通过数字化信号准确地传达食品的流通环境信息。关于物理型TTI的科学研究大多关注扩散原理,Jafry等^[12]利用流体的扩散速率与温度相关的原理开发了一种扩散型TTI。Osborn等^[13-14]则针对扩散通道的几何参数对扩散速率的影响进行了研究。利用特殊物质具有的化学特性可开发出较多的化学型TTI,Mills等^[15]利用溴酚蓝pH值变化显色的原理开发了一种化学型TTI。Galagan等^[16]利用蒽醌衍生物在氧化还原反应下变色的特点开发了一种新型TTI。Saenjaiban等^[17]利用聚二乙炔(PDA)受热变色的特性制备了一种化学型TTI。微生物型TTI相较于其他TTI更能贴切地反映食品由于微生物生长而导致的腐败变质,此类TTI研究成果较多。Mataragas等^[18]开发了深蓝紫色杆菌TTI。邱灵敏等^[19]开发了瑞士乳杆菌、酸碱指示剂基质组成的微生物TTI。瑞典Vitsab A.B.公司开发出一种基于酶直接催化底物原理的酶型TTI^[20]。

TTI实现的基本原理是通过各种技术手段来记录食品所经历的时间温度的完整历程。最直观的记录方式是电子型TTI^[10]。电子型TTI以电子数据记

录器为核心,在食品流通过程中,跟踪和记录温度,读取数据记录器的信息进行相关的计算,即可判定食品在不利温度下的暴露情况,进而判断食品的剩余货架寿命^[11]。

物理型TTI通过材料的扩散、溶解等物理变化进行的程度来计量时间温度累积效应,用以监控食品品质^[21]。扩散型TTI以流体在特定结构中的扩散速率指示时间与温度累积效应。Jafry等^[12]选用油酸、辛酸与癸酸类小分子物质为扩散流体。因为扩散流体在不同温度下扩散的速度是不同的,所以只需观察扩散流体在设定好的硝酸纤维素条上的扩散位置就可以得到对应的剩余货架寿命。改变扩散通道的长度、宽度或几何形状,或在扩散通道中设置水溶性障碍物都可以影响扩散速率。通过改变流体扩散速率,就可以实现与食品腐败速率的匹配^[13-14]。

化学型TTI利用化学反应进程体现温度时间累积效应^[16-17]。Mills等^[15]利用式(1)所示的化学反应呈现温度和时间的积累情况。 NH_4BPB 为蓝色,随着时间的推移 NH_4BPB 逐渐转化成HBPB和 NH_3 ,原先的蓝色也就逐渐变成了黄色。如果反应所经历的温度高,则反应速度加快,TTI变黄的速度也会加快。此外,通过调节在 NH_4BPB 中加入磷酸三丁酯的量可以来控制 NH_4BPB 的分解速度,匹配不同类型产品的指示。



微生物TTI系统内含有细菌,细菌生长和代谢与食品中的细菌生长直接相关,因此,可以利用微生物TTI中的细菌生长情况来反映食品中细菌的生长情况。冷冻食品的不利变化主要是由微生物生长及其代谢引起的。温度是影响所有这些变化的最关键的环境参数^[22]。冷冻食品的温度过高是影响食品质量和安全的常见问题,因为这有利于腐败微生物和食源性病原体的生长。当同一批次的单个食品在运输和储存期间暴露在高于预期温度的环境中时,这方面的问题将变得更加严峻^[23]。迄今为止,用于监测冷冻食品质量的微生物TTI多基于所选微生物生长期间TTI培养基的酸化或水解而引起的指示剂颜色变化。

深蓝紫色杆菌是一种嗜冷细菌,其最适温度和pH值分别为25℃和7.0^[24]。它是一种能够产生显色次级代谢物(紫罗兰素)的细菌,其菌落由此呈现紫色^[25]。根据Aranda等^[26]的研究可知,影响紫罗兰素产生的因素有微生物浓度、温度、 O_2 浓度、pH值和培养基。

Mataragas等^[18]利用深蓝紫色杆菌的这一特性制成用于监测冷冻食品质量的微生物TTI。微生物TTI中的深蓝紫色杆菌与食品经历同样的温度与时间,伴随着时间的延长,深蓝紫色杆菌与食品中的特定的腐败标志微生物一样开始生长与代谢。从感官角度,二者不同之处在于深蓝紫色杆菌的生长和代谢会产生

肉眼可见的紫色,而食品中的腐败微生物生长不易被消费者觉察。改变TTI中的培养基pH值、深蓝紫色杆菌初始浓度等参数,将TTI出现紫色和食品不能被接受的程度对应起来,就可以通过TTI指示食品的品质。通过调整微生物TTI的输入参数以匹配产品腐败动力学,使其广泛适用于食品中,从而改善冷链管理并减少食品浪费。这种基于深蓝紫色杆菌的TTI可以潜在地用于不同的食品包装中,甚至可用于有被微生物污染倾向的食物中。

邱灵敏等^[19]将瑞士乳杆菌微胶囊与酸碱指示剂固体基质混合制成用于检测鲜牛奶新鲜度的微生物TTI。该微生物TTI中的瑞士乳杆菌是牛乳制品中的优势菌群,能较好地代表鲜牛奶中微生物的生长和繁殖。在流通、储存过程中,时间的延长或温度的变化都会促进瑞士乳杆菌的生长代谢,代谢产生的中间产物具有酸性,进而引起TTI基质的酸化,使得TTI基质的pH值降低,导致基质中酸碱指示剂的颜色发生变化,这种颜色变化可直接通过肉眼辨别。TTI最初的深绿色到最终的黄色这一颜色变化历程与鲜牛奶货架寿命具有精准的联系,可实现鲜牛奶货架期的可视化。

酶型TTI有2种工作原理:一种是酶直接催化底物,产生肉眼可见的颜色变化,来达到指示效果^[27-28];另一种是基于酶促反应原理,利用酶水解产物改变体系的pH值,以pH指示剂的颜色变化实现监测食品质量变化的目的。改变酶的类型、起始pH值等就可以改变酶型TTI体系和活化能,以适应不同的食品^[20,29]。

2.2 TTI存在的问题与发展趋势

TTI可以直接监控食品的流通环境,实现食品流通环境的可视化,从而减少食物浪费和腐败,提高食品的安全性,但目前在食品领域中带有TTI的智能包装应用十分有限。由于工业模式、自身的生产困难、成本高、安全性、指示性能和消费者接受度等原因,TTI应用很难从实验室转移到商业应用中^[30]。

TTI反映了食品包装的流通条件,但TTI的毒理评价并不是完全可靠的,因为其涉及化学品的种类太过复杂,可能含有合成材料,会导致迁移和其他安全性的问题。消费者是否接受TTI取决于TTI本身的准确性及其材料的安全性。虽然一些TTI已经通过了安全评估,但由于消费者没有相关概念,担心相关产品的安全性,所以TTI的接受度仍然很低^[31]。

在TTI中融入电子印刷技术是TTI的发展方向之一。借助当今强大的信息技术,消费者可以直接通过手机等媒体设备读取流通环境的信息,并实时监控食品的温度时间积累^[32]。这种形式TTI的适用范围非常广,工作稳定,记录数据较为精确。

3 FFI的原理与发展趋势

3.1 FFI的原理及其功能

FFI可以提供生理生化变化或微生物生长引起的食品质量变化的定性或半定量信息,FFI的原理与TTI不同,FFI的基本原理是选择某种食品的特征挥发物,然后运用一定的技术将特征挥发物的浓度转化为肉眼可见的颜色,消费者根据颜色直接了解食品的新鲜程度。含有FFI的食品包装由于能够直观地反映出食品的新鲜程度,因而对包装功能环境矩阵ComH元素的分值有很大提升。

食品中的特征挥发物引起的FFI颜色变化可以直接反映食品的新鲜度。根据测量的形式,FFI可分为显色指示器和数据载体指示器。显色指示器通常通过颜色变化直接显示食品的新鲜度。其中的显色剂是新鲜度指示器的关键成分,直接关系到指示器的应用范围和灵敏度。数据载体指示器可以存储食品质量、微生物活性或其他与新鲜度相关的特征信息。信息可以通过阅读器传递给消费者^[9]。

不同食品标志其新鲜程度的挥发性物质是不同的,常见的挥发性物质有CO₂、TVB-N、硫化物、乙烯以及醛类物质。CO₂是微生物新陈代谢的主要产物。由于外部环境发生改变,食物通常会发生变质或发酵,食品质量就会劣变。微生物的生长和采摘后的水果、蔬菜的呼吸,都会产生CO₂,因此,有些食品的新鲜度与CO₂的浓度有关。CO₂作为一种酸性气体可以导致pH值的变化,并可用于识别肉制品、水果和蔬菜、甜点和其他食品的新鲜度。食品包装中CO₂浓度作为检测指标时,受储存时间和条件、食品类型、微生物呼吸特性、包装材料、包装顶部空间等因素的影响。

动物性食品中的蛋白质在细菌和酶的作用下,逐渐分解为多肽和氨基酸,再降解为甲基吡啶、氨、胺等低分子化合物。这些含氮的低分子化合物挥发性很强,是动物食品腐败气味的主要来源^[33],因此,将氨、二甲胺、三甲胺等挥发性氮化合物的含量作为检测肉类和海鲜腐败的主要指标^[34]。TVB-N浓度的增加会使食品包装内环境的pH值升高。通过pH值指示色的变化,可以显示鲜肉和海鲜的新鲜度。禽肉、一些水果和蔬菜在腐烂过程中会产生大量的硫化物,硫化物的生成量可以作为新鲜度的指标^[35]。

水果和蔬菜在成熟过程中释放出各种挥发性物质,可以用来表征其成熟度和新鲜度。苹果成熟过程中释放的挥发性醛类物质可以用来检测其成熟度。榴莲在成熟过程中会产生大量的挥发性硫化物。

此外,乙烯释放量可以直接反映果蔬的成熟度。可以通过检测猕猴桃等水果和蔬菜成熟过程中的乙烯释放量,来指示成熟度和新鲜度^[36]。这类FFI也称生物传感器(Biosensors)^[37-39]。生物传感器的灵感

源自自然界的生物特性。比如,当水果成熟时会释放出乙烯气体,但人类不会直接感知乙烯而知道水果的成熟状态,但动物能够很准确地感知乙烯,从而在适当成熟度时食用水果。生物传感器就是利用自然界的生物特性,利用变色原理感知乙烯气体的浓度,通过标签的颜色告知消费者水果的最佳食用时间。图 2 是梨的成熟度感知 FFI,可以通过测定梨成熟后产生的芳香类挥发性有机物的量来判断梨的成熟度,并指示消费者在梨的最佳成熟度时食用。



图 2 梨的新鲜度指示器

Fig.2 FFI for pears

随着食品腐败或变质的发生,食品包装中指示食品新鲜度的特征物质释放量不断增加。不同浓度特征物质与显色剂反应会导致特定的颜色变化,因此,可以根据颜色的变化实时监测食品的新鲜度^[40]。FFI 中常用的化学显色剂包括酚红、溴酚红、溴酚蓝、溴甲酚紫等。考虑到化学试剂迁移引起的潜在安全问题,非接触指示剂通常用于避免化学试剂与食品直接接触。天然色素因其安全和环保的优点而受到越来越多的关注^[41]。

姜黄素就是一种优秀的天然色素。姜黄素属于天然多酚化合物,它不仅具有强大的抗菌、抗氧化活性、抗炎活性、低毒性、低成本和生物相容性,还在食品包装中表现出优良的功能特性和 pH 决定变色特性,能够达到延长食品保质期并指示其质量的作用。在食品包装的应用中,姜黄素可用于增强复合膜的物理强度、抗氧化性能和抗菌活性。当将 pH 值调整为碱性条件时,姜黄素分子两端具有的 2 个酚羟基与羟基离子反应形成酚盐阴离子,并发生共轭效应,引起姜黄素颜色变化为红色。由于姜黄素的结构在不同 pH 条件下会发生变化,可将其固定在薄膜基质中,显示包装内食品的新鲜程度,从而通过 FFI 实现食品包装在人类环境下精确的交流功能。

其他的天然色素(花青素、叶绿素、类胡萝卜素等)同样有随着 pH 值变化而发生颜色变化的性质。其中,花青素(ACNs)因来源广泛、色域丰富而被广泛用作天然指示剂,已被用于监测鱼、虾、奶的新鲜度。

3.2 FFI 存在的问题与发展趋势

FFI 可以直接反映食品的新鲜程度,不仅减少食物浪费和腐败,而且可以指导消费者掌握食品最佳的食用时间段。与 TTI 相似,FFI 在商业化方面也没有得到充分发展。除了与 TTI 同样面临工业化、成本、食品安全、消费者信任等问题外,还面临因流通环境变化导致的新鲜度表达的准确性,以及对不同食品的适用性等问题。

目前,食品智能包装技术一直在不断发展,与传统的包装方法相比,FFI 可以助力食品包装实现与消费者深入的交流。FFI 中显色剂会直接影响鲜度指标与食物的匹配程度,合适的显色剂可以更清晰准确地判断食物的新鲜水平和新鲜程度。与单一显色剂相比,混合显色剂可以扩大颜色变化的范围^[42],是 FFI 的发展趋势之一。

附在包装内部的非接触式指示器只对挥发性物质有反应,而食品表面的腐败物质(如非气态的酶解产物和微生物分解产物)就不能通过指示剂检测。相较而言,接触式指示器不仅可以扩大指示器的应用范围,而且可以提高检测结果的准确性。开发天然的显色剂并选择安全无毒的底物,可以提高接触式指示器的安全性^[43]。

4 结语

文中在分析包装功能环境矩阵的基础上,研究 TTI 和 FFI 的原理与功能,得出结论如下。

1) 对于食品包装,包装功能环境矩阵中的 12 个元素中 ComA 和 ComH 的实现较为困难,目前食品包装交流功能尚不能完全反应出食品的流通环境状况和品质变化,易导致资源的浪费,并且有不利于消费者健康,存在的潜在危险。

2) TTI 综合监测食品流通过程中所经历的时间、温度,有助于提高实现矩阵中 ComA 元素的分值。TTI 提供的食品流通过程信息,可以避免丢弃品质尚可的食品或变质食品被食用。FFI 提供生理变化或微生物生长引起的食品质量变化的定性或半定量信息,有助于提高实现矩阵中 ComH 元素的分值。搭载 FFI 的食品包装与消费者交流的信息量明显高于普通包装与消费者交流的信息量。

3) TTI 和 FFI 虽然面临工业化、成本、食品安全、消费者信任、表达精确性等问题,但毫无疑问,TTI 和 FFI 技术能够使食品包装的交流功能得到质的提升,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] YAM K L. The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009:

- 869-871.
- [2] FERNANDO I, FEI J, STANLEY R, et al. Evaluating Packaging Performance for Bananas under Simulated Vibration[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 23: 1-9.
- [3] WEN Yan-yi, LIU Jia, JIANG Lei, et al. Development of Intelligent/Active Food Packaging Film Based on TEMPO-Oxidized Bacterial Cellulose Containing Thymol and Anthocyanin-Rich Purple Potato Extract for Shelf Life Extension of Shrimp[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 1-9.
- [4] WADUD A M, AZIZUL H M, MD M, et al. A Review on Active Packaging for Quality and Safety of Foods: Current Trends, Applications, Prospects and Challenges[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 1-12.
- [5] HOFFMANN T G, RONZONI A F, SILVA D L D, et al. Impact of Household Refrigeration Parameters on Post-harvest Quality of Fresh Food Produce[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 306: 1-11.
- [6] GAO Ting-ting, TIAN You, ZHU Zhi-wei, et al. Modeling, Responses and Applications of Time-Temperature Indicators (TTIs) in Monitoring Fresh Food Quality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 311-322.
- [7] VANSHIKA A, SUMIT G, VARIYAR P S. A Simple Time Temperature Indicator for Real Time Microbial Assessment in Minimally Processed Fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 311: 1-8.
- [8] 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.
- [9] CHEN R S, CHEN C C, YEH K C, et al. Using RFID Technology in Food Produce Traceability[J]. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 2008, 5(11): 1551-1560.
- [10] ZWEIG S E. Electronic Time-Temperature Indicator: US, 6950028. [P]. 2005-09-27.
- [11] DEBORD W K, HATCHETT J, JENSEN T P. Perishable Product Electronic Label Including Time and Temperature Measurement: US, 7532106[P]. 2009-05-12.
- [12] JAFRY A T, LIM H, SUNG W K, et al. Flexible Time-Temperature Indicator: A Versatile Platform for Laminated Paper-Based Analytical Devices[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2017, 21(3): 1-13.
- [13] OSBORN J L, LUTZ B, FU E, et al. Microfluidics without Pumps: Reinventing the T-Sensor and H-Filter in Paper Networks[J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(20): 2659-2665.
- [14] GIOKAS D L, TSOOGAS G Z, VLESSIDIS A G. Programming Fluid Transport in Paper-Based Microfluidic Devices Using Razor-Crafted Open Channels[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(13): 6202-6207.
- [15] MILLS A, HAWTHORNE D, GRAHAM A, et al. Novel Time-Temperature and 'Consume-within' Indicator Based on Gas-Diffusion[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2016, 52(97): 13987-13990.
- [16] GALAGAN Y, SU W F. Fadable Ink for Time-Temperature Control of Food Freshness: Novel New Time-Temperature Indicator[J]. *Food Research International*, 2008, 41(6): 653-657.
- [17] 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(10): 2306.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] LIU Y, ZHANG Y, LI X, et al. Self-Repairing Metal-Organic Hybrid Complexes for Reinforcing Immobilized Chloroperoxidase Reusability[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2017, 53(22): 3216-3219.
- [21] 张岩, 韩珊. 食品包装用时间-温度指示剂原理与现状分析[J]. *塑料包装*, 2018(2): 59-62.
- ZHANG Yan, HAN Shan. The Principle and Current Situation Analysis of Time-Temperature Indicator for Food Packaging[J]. *Plastics Packaging*, 2018(2): 59-62.
- [22] SUBRAMANIAM P. The stability and shelf life of food[M]. Array Duxford: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016: 171-198.
- [23] 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.
- [24] GILLIS M, LOGAN N. *Bergey's Manual of Systematic*

- of Archaea and Bacteria[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2015: 35-36.
- [25] PANTANELLA F, BERLUTTI F, PASSARIELLO C, et al. Violacein and Biofilm Production in *Janthinobacterium Lividum*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2007, 102(4): 992-999.
- [26] ARANDA S, MONTES-BORREGO M, LANDA B B. Purple-Pigmented Violacein-Producing *Duganella* SPP. Inhabit the Rhizosphere of Wild and Cultivated Olives in Southern Spain[J]. *Microbial Ecology*, 2011, 62(2): 446-459.
- [27] HUANG Y, RAN X, LIN Y, et al. Self-Assembly of an Organic-Inorganic Hybrid Nanoflower as an Efficient Biomimetic Catalyst for Self-Activated Tandem Reactions[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2015, 51(21): 4386-4389.
- [28] 丁润生. 新型有机——无机杂化纳米酶的制备与应用的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 6-8.
DING Run-sheng. Study on Preparation and Application of New Organic-Inorganic Hybrid Nanoenzyme[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 6-8.
- [29] 胡晓波, 王麟, 李小娟. 淀粉酶纳米花型时间-温度指示剂的研究[J/OL]. *食品科学*: 1-10[2022-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220310.1019.014.html>
HU Xiao-bo, WANG Lin, LI Xiao-juan. Performance of Time-temperature Indicator with Amylase Nanoflowers[J/OL]. *Food Science*: 1-10[2022-08-03].
- [30] JEEVAHAN J J, CHANDRASEKARAN M, VENKATESAN S, et al. Scaling up Difficulties and Commercial Aspects of Edible Films for Food Packaging: A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 100: 210-222.
- [31] ALDRED C K, WANSINK B. Making it Part of the Package: Edible Packaging is more Acceptable to Young Consumers when it is Integrated with Food[J]. *Journal of Food Products Marketing*, 2017, 23(6): 723-732.
- [32] SCHAEFER D, CHEUNG W M. Smart Packaging: Opportunities and Challenges[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 72: 1022-1027.
- [33] TIMM M, JØRGENSEN B M. Simultaneous Determination of Ammonia, Dimethylamine, Trimethylamine and Trimethylamine- n -Oxide in Fish Extracts by Cationic Electrophoresis with Indirect UV-Detection[J]. *Food Chemistry*, 2002, 76(4): 509-518.
- [34] AHMED I, LIN Hong, ZOU Long, et al. An Overview of Smart Packaging Technologies for Monitoring Safety and Quality of Meat and Meat Products[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(7): 449-471.
- [35] EGAN A F, SHAY B J, ROGERS P J. Factors Affecting the Production of Hydrogen Sulphide by *Lactobacillus Sake* L13 Growing on Vacuum-Packaged Beef[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1989, 67(3): 255-262.
- [36] HU Xiao guang, LI Xiao-liang, PARK S H, et al. Non-destructive Monitoring of Kiwi Ripening Process Using Colorimetric Ethylene Sensor[J]. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2016, 37(5): 759-762.
- [37] 邵平, 刘黎明, 吴唯娜, 等. 传感器在果蔬智能包装中的研究与应用[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.
- [38] ABDUS S, KASIVISWANATHAN M, LIN Wei. Biosensors and Biopolymer-Based Nanocomposites for Smart Food Packaging: Challenges and Opportunities[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 30: 1-12.
- [39] FAIQA F F, LING Tan-ling. Phenylalanine-Responsive Fluorescent Biosensor Based on Graphene Oxide- Chitosan Nanocomposites Catalytic Film for Non- Destructive Fish Freshness Grading[J]. *Food Control*, 2021, 125: 1-11.
- [40] ARVANITOYANNIS I S, STRATAKOS A C. Application of Modified Atmosphere Packaging and Active/Smart Technologies to Red Meat and Poultry: A Review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(5): 1423-1446.
- [41] DAINELLI D, GONTARD N, SPYROPOULOS D, et al. Active and Intelligent Food Packaging: Legal Aspects and Safety Concerns[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 64(4): 868-879.
- [42] WALLACH D F H. Methods and Devices for Detecting Microbial Spoilage in Food Products:US, 6495368[P]. 2002-12-17.
- [43] LEE K, BAEK S, KIM D, et al. A Freshness Indicator for Monitoring Chicken Breast Spoilage Using a Tyvek Sheet and RGB Color Analysis[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 19: 40-46.