

新鲜度指示型智能包装的研究进展

李洋, 冯刚, 王磊明, 张茜

(东北林业大学工程技术学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 食品新鲜度指示型智能包装是利用食品在贮藏过程中释放的某些特征气体与特定试剂产生的特征颜色反应、温度激活生物学反应及酶作用等引起指示剂发生明显的变化, 从而帮助消费者直观、准确以及科学的判断食品品质与新鲜程度。因此, 食品新鲜度指示剂在实际生活中具有重要的应用价值。本文在归纳和分析国内外新鲜度指示型智能包装的基础上, 分别从食品新鲜度指示剂应用类型与新鲜度指示剂基材两个方面阐述了新鲜度指示剂的指示原理与研究现状以及指示剂基材的制作工艺与材料选择, 对现有研究成果进行总结, 指出了研究中依然存在的问题并对未来的研究方向进行展望以及提出合理性研究建议, 旨在为今后更深入的食品新鲜度指示剂技术研究提供借鉴和参考。

关键词: 食品包装; 新鲜度; 指示剂; 智能

文章编号: 1673-9078(2018)04-287-293

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.042

Review: Freshness Indicator Intelligent Packaging

LI Yang, FENG Gang, WANG Lei-ming, ZHANG Xi

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Food freshness indicator intelligent packaging is developed based on characteristic color reactions, temperature-activated biological reactions and enzyme activations caused by characteristic gas and specific reagents released during the storage process of food products, and thus can be used to help consumers intuitively, accurately and scientifically judging the quality and freshness of foods. Food freshness indicators had important application values in real life. In this paper, based on the induction and analysis of the domestic and foreign freshness indicator intelligent packaging, the instruction principle research status and indications of the freshness indicator were explained from two aspects: the food freshness indicator application type and the freshness indicator substrate. The production process and material selection of the agent substrate, summarized the existing research results, pointed out the problems that still existed in the research and the direction of future research prospects and put forward reasonable research suggestions, aiming to study food freshness indicator technology more deeply and provide the reference.

Key words: food packaging; freshness; indicator; intelligent

随着人们对高质量生活水平的不断追求, 食品安全问题逐渐成为社会关注的焦点, 而食品的新鲜程度是影响食品品质、食用安全的重要因素之一。食品新鲜度不仅决定着商品的价格, 也是影响消费者购买意愿与食用者健康的重要指标。当前, 消费者对食品新鲜程度的判断仅限于透过外包装物观察以及核对食品包装上的保质日期, 然而这样的观察结果会受到包装效果较大影响, 忽视了食品在贮藏以及运输过程中由于环境的不良改变导致的食品变质。这种方法准确性低且不具有科学性, 与食品的真实状况存在较大差距^[1]。传统的食品包装形式不再适用于当今更加注重安

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (25720170805); 黑龙江省科学基金项目 (QC2017080)

作者简介: 李洋 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 智能包装技术与冷链技术研究

全的市场需求和日益复杂的物品流通环境。因此, 开发出准确显示食品新鲜度的指示剂, 并能够将其应用于实际生活中具有重要的现实意义。智能包装定义为包装系统能够执行智能功能 (如检测, 感知, 记录, 追踪, 交互和应用逻辑判断), 以实现延长保质期, 增强安全, 提高质量, 提供信息, 并提出安全警告问题的目的^[2]。新鲜度指示型智能包装的检测原理, 是利用食品在贮藏过程中产生的某些特征气体与特定试剂产生特征颜色反应、温度激活生物学反应及酶作用等引起包装内指示剂明显变化 (如颜色变化), 具有无需破坏食品包装即可检测食品品质与感知食品新鲜度的功能, 帮助消费者只需对比指示剂与比色卡的颜色便可了解包装内食品的新鲜程度, 达到主动提供食品质量信息的目的^[3]。目前, 国内外大量学者与食品安全公司正致力于此项研究, 在英国、美国等一些国家, 已经有将食品新鲜度指示剂应用于商业化产品的案

例,并得到了消费者积极的反馈^[4]。本文综述了食品新鲜度指示剂的应用分类,将其分为微生物敏感型指示剂、二氧化碳敏感型指示剂、挥发性含氮化合物敏感型指示剂、硫化氢敏感型指示剂和乙烯敏感型指示剂等种类,分别阐述工作原理与应用范围,提出了存在的问题,并对食品新鲜度指示剂的研究进展进行总结与展望,旨在为促进我国食品新鲜度指示剂技术发展提供参考。

1 新鲜度指示型智能包装指示剂类型

1.1 微生物敏感型指示剂

食品从原料到消费者使用会经历一系列复杂的生产过程,由于食品是营养物质的综合载体,因此生产的各个环节都可能收到微生物的污染^[5]。食品中的营养物质也就会成为微生物的食物来源,使食品发生腐败,如果消费者卫生安全意识薄弱,还会引发食源性疾病。因此,通过对食品中微生物的检测,可以有效判断新鲜程度,保证食品安全^[6]。

微生物能够利用食物中的蛋白质、糖类和脂肪等物质,在酶的作用下生成葡萄糖与脂肪酸等,其中一部分通过异化作用生成复杂代谢产物包括醇类、醛类、酸类、酯类和酮类等细菌挥发性有机化合物(bacterial volatile metabolites, BVMs)^[7]。因此微生物敏感性指示剂可以依据微生物及其代谢产物的特性进行研制,如可以利用具有化学还原性质的代谢产物葡萄糖,可以被还原的变色物质制作智能包装指示剂,随着变色物质颜色加深或变化范围增加,表明食物中微生物的数量越多,食品的安全性越差,消费者便可以直观了解到食品内微生物数量从而判断食品状况。2006年,加拿大 Toxin Alert 公司利用 DNA 聚合酶反应原理检测大肠杆菌的技术,研制出一种应用于牛奶的新鲜度指示型智能包装。当牛奶中微生物数量超标,指示剂的颜色将会由白色变为红色,提醒消费者注意食品安全。该公司已将这一成果商业化,并在此基础上研究了更多致病菌的检测产品^[8]。用酶作为微生物检测物质时,往往会受到外界环境较大影响易造成误判。闫文杰等^[9]利用大肠杆菌在生长繁殖过程中代谢产生还原性物质,以美蓝为指示剂,借助还原物质使美蓝逐渐还原褪色,通过指示剂颜色变化来达到检测食品品质与新鲜度的目的,主动为消费者提供食品安全信息。存在于糕点中的霉菌和酵母菌生长繁殖能力强,经常会引起食品霉变并产生有毒代谢物,以 5-溴-4-氯-3 吡啶基-磷酸盐作为显色剂,通过发生的特异性显色反应可以准确的判定霉菌和酵母菌数量,以此来判

断糕点品质^[10]。

食物的腐败大部分是由微生物生长繁殖造成的后果,生长过程中可能产生有害代谢物,危害人体健康。微生物敏感型指示剂应用生物学反应原理,指示剂变化明显且迅速,是一种高效精准的判别食品新鲜度的指示剂。

1.2 二氧化碳敏感型指示剂

果蔬在采摘过后仍会进行呼吸作用,产生二氧化碳气体,尤其是一些呼吸跃变类型的果蔬在进入衰老的阶段,其呼吸速率迅速升高,会释放大量的二氧化碳^[11]。二氧化碳也是微生物代谢过程中的主要产物,在某些食物中二氧化碳的出现意味着食品的品质发生了变化。因此,检测食品包装内二氧化碳量可以作新鲜度指示型智能包装判别食品新鲜度指标之一。二氧化碳气体为酸性气体,对其进行检测的简易方法是检测 pH 值的变化,通过 pH 指示剂颜色的改变,进而判断食品品质。

对 pH 值变化敏感的染色液有溴百里酚蓝、二甲苯酚蓝、溴甲酚绿、溴甲酚紫、苯酚红、甲基红等,检测的食品种类不同,所选择的染色液种类与计量也有所不同^[12]。Dowan K 等^[13]使用浓度为 3%的溴甲酚紫溶液作为指示剂的染色液,应用过程中指示剂的颜色如图 1 所示,由黄色变为蓝色最终为紫色,表明鸡肉品质变化过程,直至最终腐败无法食用,图 1 为指示剂颜色随时间变化的关系图。有时为了指示剂颜色变化明显会采用多种混合染色液。Rukchon C 等^[14]在对无皮鸡胸肉新鲜度指示剂研究过程中,使包装内包含两组 pH 敏感染料,其中一组是溴百里酚蓝和甲基红的混合物,另一组是溴百里酚蓝,溴甲酚绿和酚红的混合物。实验结果表明溴百里酚蓝和甲基红的混合溶液能够准确的反映鸡肉的新鲜程度。人工合成的 pH 染色液具有颜色明显、反应迅速的特点,然而其制作工艺存在安全性以及染色液迁移等问题易对食品造成污染^[15]。在自然界中,植物花朵与果实中的色素在酸碱性不同的溶液中颜色有不同的变化。花色素跟酸反应,生成稳定的红色盐类物质,在碱存在的条件下部分花色素变为醌型结构,颜色变为蓝色,而有些色素在碱性条件下显示为黄绿色^[16]。图 2 为花色素的主要结构在不同 pH 条件下存在的形式。因此,天然色素也可作为新鲜度指示型智能包装的染色剂。Prietto L^[17]和 Luchese^[18]尝试使用红甘蓝和蓝莓提取的花青素溶液作为二氧化碳敏感型指示剂的染色液,实验结果表明天然色素染色液在检测二氧化碳过程中可以产生明显的颜色变化,适宜做二氧化碳敏感型指示剂染色液。

这种天然色素具有安全无污染、价格便宜等特点,将会是未来二氧化碳敏感性指示剂的主要染色剂^[19]。

二氧化碳敏感型指示剂可应用于果蔬、肉制品包装中二氧化碳含量检测。但由于指示剂的颜色变化会受到包装环境中湿度、温度以及空气中二氧化碳的影响,因此在实际应用中对包装技术具有较高的要求^[20]。

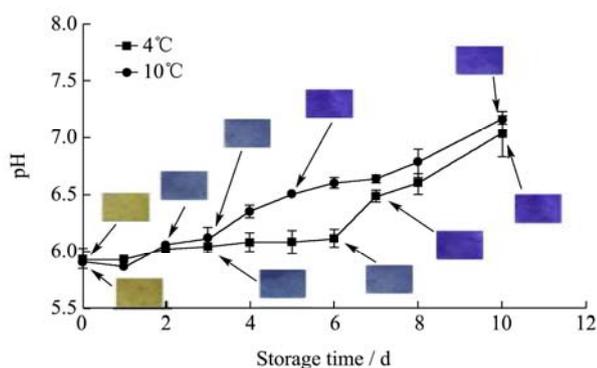


图1 鸡胸肉表面酸碱度的变化及其与 pH 指示剂颜色变化与储存时间的关系

Fig.1 Changes of acidity and alkalinity in the chicken breast surface and its relationship with the color changes of the pH indicator and storage time

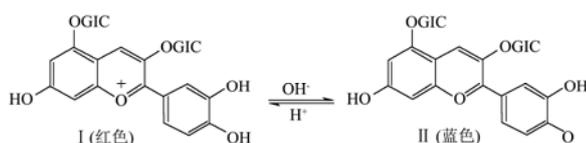
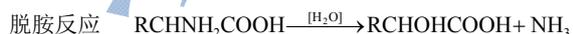


图2 花色素的主要结构在不同 pH 条件下存在的形式

Fig.2 The main structure of the anthocyanidin is present in different pH conditions

1.3 挥发性含氮化合物敏感型指示剂

挥发性含氮化合物是动物性食品在酶和细菌共同作用下,食品中的蛋白质逐渐分解,并依次向低分子化合物降解,其产物包含多类有毒物(有毒的胺)以及难闻异味,分解过程为:蛋白质→多肽和氨基酸→氨、胺类、甲基吲哚等^[21]。其中氨基酸分解的过程包括^[22]:



此类含氮化合物具有较强挥发性,是海产品腐败臭味的主要来源,其含量越高,表明氨基酸被破坏的越多,食品腐败的程度也越严重。因此,挥发性含氮化合物是评估动物性食品新鲜度的核心指标之一,该类食品新鲜度指示型智能包装的研发也正是利用了挥发性含氮化合物的化学性质^[23]。

挥发性含氮化合物呈现为碱性,对 pH 值影响较

大,常采用 pH 指示剂检测食品中的挥发性含氮化合物^[24]。挥发性含氮化合物敏感型指示剂通常应用于水产品的包装中,Chun H-N^[25]以溴甲酚绿溶液作为指示剂的显色剂,用于检测鲭鱼腐败过程中挥发性含氮化合物,通过调整指示剂配方最终达到判断鲭鱼新鲜度的要求。孙媛媛^[26]以浓度为 0.5% 的溴甲酚紫溶液作为染色液制作新鲜度指示剂,当指示剂的颜色由黄色变为绿色最终为蓝色,也同样表示了猪肉品质衰败的过程。在此基础上,Liu B^[27]以花青素溶液作为指示剂的染色液,并在指示剂中添加柠檬烯,可以实现同时判别食品新鲜度与抗菌的功能。

挥发性含氮化合物敏感型指示剂与二氧化碳敏感型指示剂原理相似,都是以 pH 剂作为指示剂的染色液,但在使用过程中挥发性含氮化合物敏感型指示剂的 pH 值逐渐增加,因此要求在 pH 数值较高的环境中,指示剂能够有明显的颜色变化。同样,受到外界的影响挥发性含氮化合物敏感型指示剂也对包装环境有较高的要求。

1.4 硫化氢敏感型指示剂

肉制品在腐败分解的过程中,肉中含有巯基(-SH)的氨基酸在被腐败菌、肠杆菌以及荧光假单胞菌产生的脱巯基酶作用下发生分解,释放硫化氢气体^[28]。H₂S 是肉类腐败臭味的主要来源,在真空环境包装的鱼肉制品中,H₂S 还可以作为某种乳酸菌生长情况的判断标准,因此测定硫化氢的存在与否可以判断肉制品的新鲜程度。

硫化氢气体具有较强的还原性,硫化氢能还原溶液中的铜离子(Cu²⁺)、亚硒酸(H₂SeO₃)、四价钋离子(Po⁴⁺)等,如:Po⁴⁺+2H₂S→PoS↓+S↓+4H⁺。该类新鲜度指示型智能包装的应用原理往往基于这一性质,随着肉制品腐败程度加剧,硫化氢气体浓度增加,这些变化会在指示剂上明显的体现出来,提醒消费者注意食品安全问题。Smolander M 等人^[29]利用肌红蛋白研发了一种硫化氢敏感指示剂,其原理是利用肉品在储藏过程中产生的硫化氢会与血红蛋白反应生成绿颜色的硫化肌红蛋白,通过这种不可逆转的颜色变化,消费者可以轻松判断肉品的新鲜度。研究者将金属银、铜层或硝酸铅印刷、涂覆到肉制品包装材料上,当肉品腐败释放硫化氢时,会与金属材料发生明显的颜色反应,从而帮助消费者判断肉品的新鲜度^[30]。

该类新鲜度指示型智能包装在应用过程中产生的颜色变化往往是不可逆转的,这个性质在指示剂检测包装内的硫化氢时会更具信服力,消费者可以放心通过指示剂判断肉品的新鲜度。然而硫化氢具有较强还

原性,包装内的气体环境也会对指示剂的效果产生一定影响,如果将其与肉品的气调包装技术结合,会得到更加明显的效果。

1.5 乙烯敏感型指示剂

乙烯是一种植物内源激素,可以促进果实成熟,是由蛋氨酸在供氧充足的条件下转化而成的,广泛存在于植物的各种组织和器官中。果蔬在成熟的过程中会释放乙烯,乙烯的释放速率是研究果蔬采后生理的重要指标之一,因此,乙烯可以作为判断果蔬新鲜度的指示气体^[31]。Lang 等^[32]研究表明成熟期果实的脆性和衰老与乙烯气体的排放密切相关。苹果的乙烯排放量可以通过开发的新鲜度指示剂来检测,该指标变化基于乙烯的还原效应,导致所选金属离子颜色改变。颜色变化机制为:先制取稳定的过氧钼酸盐: $[\text{Mo}_8\text{O}_{26}]^{4-} + 4\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow [\text{Mo}_8\text{O}_{24}(\text{O}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{4-} + 2\text{H}_2\text{O}$;乙烯会导致过氧钼酸盐分解 $2\text{C}_2\text{H}_4 + [\text{Mo}_8\text{O}_{24}(\text{O}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{4-} \rightarrow 2\text{C}_2\text{H}_4\text{O} + [\text{Mo}_8\text{O}_{26}(\text{H}_2\text{O})_2]^{4-}$;并使 Mo(VI) 向 Mo(V) 部分还原,产生蓝色物质, $\text{C}_2\text{H}_4 + [\text{Mo}_8\text{O}_{26}(\text{O}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{4-} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{O} + [\text{Mo}_8\text{O}_{25}(\text{H}_2\text{O})_2]^{4-}$,最终所使用的钼(Mo)发色团在乙烯的影响下由白色/淡黄色至蓝色变化,这也代表着果蔬不断成熟衰败的过程,消费者由此可以直接判断苹果的品质。早在2004年,新西兰的市场上就已经出现了这种新鲜度指示型智能包装,随着果蔬不断成熟衰败,指示剂的颜色会由红色逐渐变为黄色,这一技术被《时代》杂志评为2004年最伟大的发明之一,并逐步商业化。

乙烯是一种具有还原性的气体,但受到环境的影响不能选用高锰酸钾或溴水等高氧化性材料作为指示剂的染色液,因此,对于染色液的选择具有严格要求。虽然乙烯可以判断果蔬的成熟度,但部分果蔬成熟过程中释放的乙烯量少,不易被检测到^[33]。在应用过程中需要选择呼吸跃变性果实为目标,才会得到理想的监测效果,准确判断果蔬新鲜度。

1.6 其他类型的新鲜度指示剂

食品在存储过程中,能够释放具有挥发性的气体或产生能与某种染色液发生明显变化的物质,都存在研制食品新鲜度指示型智能包装的可能。Niponsak^[34]通过加入天然聚合物(壳聚糖,柠檬酸,羧甲基纤维素和牛皮纸纤维)开发了比色淀粉基膜(CSBF),使用释放的水果香气的试验证实CSBF在混合的硫化物和乙醇的香气存在下导致可见的颜色变化。CSBF总色差的变化与混合硫和乙醇含量有关,从而使CSBF可用于监测榴莲的实时成熟度。Du L^[35]以姜黄素作为

新鲜度指示剂的染色液,检测食品包装内的 NH_3 ,实验结果表明指示剂颜色的变化能够反映虾的品质变化。王桂莲等^[36]以红萝卜色素溶液作为草莓新鲜度指示剂的染色液,指示剂与草莓直接接触,感知草莓表面pH值的变化。随着pH降低,草莓的品质逐渐下降,达到判断草莓新鲜度的目的。

2 新鲜度指示型智能包装指示剂基材

2.1 凝胶型指示剂

凝胶型是指示剂中常见的类型,因其对pH值、温度等刺激较为敏感,已经广泛应用与生物与医药领域^[37]。凝胶型指示剂主要是由粘合剂、增塑剂与染色液加工制作而成。制作工艺如下^[38]:

染色液→加入增塑剂→加热→加入粘合剂→加热搅拌至粘合剂完全溶解→超声脱泡→流延成膜→鼓风干燥→凝胶型指示剂

凝胶型指示剂的性质会受到粘合剂和增塑剂种类的影响。常见的粘合剂为甲基纤维素、淀粉和羧甲基纤维素等。智玲玲^[39]以玉米淀粉为粘合剂制作指示剂,并研究了搅拌速度、流延方法和超声功率等工艺参数对指示剂力学特性、透气性等性质的影响,结果表明玉米淀粉膜的透气性良好但拉伸强度较弱,并发现搅拌速度、流延方法和加热温度等工艺参数都会对指示剂效果产生影响。胡云峰^[40]研究了甘油、聚乙二醇-400和三乙醇胺三种增塑剂对指示剂的影响,研究表明增塑剂会对指示剂颜色变化产生一定影响,经过对比得出以甘油作为指示剂对指示效果的影响最小。

凝胶型指示剂是染色液优良的载体,具有良好地透气性与拉伸性。但由于受到制作工艺与制作材料的限制,指示剂的熔化温度低于 200°C ,因此不适宜与食品共同加热。并且在相对湿度较高的环境中易发生溶解,这也限制了凝胶型指示剂的发展。

2.2 纳米纤维型指示剂

纳米纤维型指示剂的制备利用的是静电纺丝技术,静电纺丝技术是一种在外加电场的作用下将高分子溶液沉积于接收装置上而形成纤维的一种纺丝技术^[41]。静电纺丝技术可以简单、方便、有效而经济的获得纳米纤维,而且是目前唯一一种可制备连续纳米纤维的方法。该技术因其优越的性能已经应用于过滤材料^[42]、电子传感器^[43]及生物组织工程^[44]等多个领域。

目前,静电纺丝技术应用于食品指示剂领域并不常见。Van 等^[45]在聚酰胺聚合物溶液中加入溴甲酚紫pH指示剂染料,利用静电纺丝技术开发纳米纤维pH

传感器,实验结果表明利用这种方法研制的 pH 指示剂是可行的,且能够稳定、准确的判断 pH 的变化。朱英瑞^[46]利用静电纺丝技术制备的纳米纤维膜作为载体制备氧气指示纳米纤维膜,极大的提升了指示剂反应速度,相较以往研究其响应时间从 30 min 缩短至 3 min,最大程度提高了氧气指示剂的效率。

静电纺指示剂具有纤维直径小、孔隙率高和透气性好等优点,相比于传统流延方法制备的指示剂具有更快的响应速度,能够更加高效快速的反映食品品质^[47]。但由于静电纺丝技术对设备有较高要求,操作技术不宜掌控,且相比于传统技术,成本有所增加无法大规模推广,这些问题共同制约着静电纺丝技术在食品指示剂领域的发展。

3 问题与展望

新鲜度指示型智能包装功能逐步完善,已经基本达到人们的要求,研究成果也已经从实验室走向了商业化应用。通过新鲜度指示型智能包装,消费者对于包装的认识从作为容器和提供方便升级为了解食品品质信息的信息传递工具,引导消费者对食品品质和货架期的关注,为保护消费者饮食健康及监督食品生产商和食品销售商的责任意识起到了积极的作用。就目前新鲜度指示型智能包装的应用来看,该成果已经能够及时准确的传达食品的新鲜度和品质信息。然而由于染色液的变色原理和基材的材料的原因,在实际应用过程中还存在一些问题:①目前大多数指示剂的原理都是依据包装内酸碱度的变化和某些特殊气体的颜色反应,然而这些化学反应受到环境影响较大,湿度、温度以及包装的密封性都会对指示剂的准确性产生影响。②一些指示剂的颜色变化反应是可逆的,即可以通过改变包装环境内气体环境达到改变指示剂颜色的目的,这给不良商家提供了可乘之机。③缺乏对于新鲜度指示型智能包装的毒理性评估,指示剂的染色液与基材材料大多数由人工合成,其安全性往往存在问题。

就目前存在的问题与市场需求,新鲜度指示型智能包装在以下方面还有很大的发展空间:①研发多种新型材料应用于新鲜度指示型智能包装,例如具有良好性质的纳米材料,能够显著提升指示剂的响应速度与灵敏性。②开发并使用天然色素作为新鲜度指示型智能包装的显色物质,一些天然色素具有安全无毒、颜色变化范围广、成本低且易获得的优点,是指示剂显色物质良好的选择。③由于具有易受到外界环境干扰影响指示剂准确性的特点,新鲜度指示型智能包装对食品包装环境有较高的要求。因此,可以尝试将气

调包装技术与活性包装技术有机结合,利用多种技术的优点,弥补新鲜度指示型智能包装存在的问题,更有效率的提供食品新鲜度信息。④随着电子技术与感应器技术的快速发展,相关电子零件的成本降低,把电子科学的技术应用到新鲜度指示型智能包装中,其所承载的食品信息量将大大增加且反应灵敏迅速,能够帮助消费者以数字化的形式获得食品的新鲜度品质信息,为消费者提供良好地消费体验。通过研究学者们的共同努力,各类技术的蓬勃发展与相互促进,智能包装也必将迎来更广阔的发展空间,我国的包装技术也会将会得到进一步发展。

参考文献

- [1] 闫文杰,李兴民,郑淼,等.食品新鲜度指示卡的研究进展[J].食品科技,2011,36(7):260-262
YAN Wen-jie, LI Xing-min, ZHENG Miao, et al. Food freshness indicator card research progress [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(7): 260-262
- [2] Yam K L, Takhistov P T, Miltz J. Intelligent packaging: Concepts and applications [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(1): 1-10
- [3] 刘怀伟,孔保华,武晗.鲜度指示剂在食品包装中的应用[J].黑龙江畜牧兽医,2006,7:103-104
LIU Huai-wei, KONG Bao-hua, WU Han. Application of freshness indicator in food packaging [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2006, 7: 103-104
- [4] 孔凡真.检验食品新鲜度的新型标签[J].保鲜与加工,2005, 5:22
KONG Fan-zhen. New labeling for freshness of food [J]. Preservation and Processing, 2005, 5: 22
- [5] 张新武,杜小波,徐素玲,等.食品中微生物危害的分析和控制[J].食品安全质量检测学报,2014,5(10):3295-3299
ZHANG Xin-wu, DU Xiao-bo, XU Su-ling, et al. Analysis and control of microbial hazards in food [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2014, 5(10): 3295-3299
- [6] 孙媛媛.食品新鲜度指示型智能包装的研究与应用[J].包装学报,2012,4(3):16-20
SUN Yuan-yuan. Study and application of intelligent packaging for food freshness indication [J]. Chinese Journal of Packaging, 2012, 4 (3): 16-20
- [7] 陈娟,史辉,王琼,等.细菌挥发性代谢产物的类型、检测技术及应用[J].微生物学杂志,2015,35(1):89-94
CHEN Juan, SHI Hui, WANG Qiong, et al. Types, detection techniques and applications of bacterial volatile metabolites

- [J]. Microbiology, 2015, 35(1): 89-94
- [8] OTLES S, YALCIN B. Intelligent food packaging [J]. Log Forum, 2008, 4(4): 1-8
- [9] 闫文杰,李兴民,安媛,等.一种微生物型时间-温度指示卡的制作方法:中国,2010101985623[P]2010-12-01
YAN Wen-jie, LI Xing-min, AN Yuan, et al. Preparation of microbial time-temperature indicating card: China, 2010101985623 [P] 2010-12-01
- [10] Rodrigo, Antonio F, August N. Development of a selective culture medium for bifidobacteria, Raffinose-Propionate Lithium Mupirocin (RP-MUP) and assessment of its usage with Petrifilm™ aerobic count plates [J]. Food Microbiol., 2014, 39(4): 96-102
- [11] 齐秀东,魏建梅,赵美微,等.‘京白梨’果实后熟软化与糖、淀粉代谢及其基因表达的关系[J]. 中国农业科学,2015, 48(13):2591-2599
QI Xiu-dong, WEI Jian-mei, ZHAO Mei-wei, et al. Relationship between ripening and softening of sugar and starch metabolism and gene expression in 'Jingbai pear' fruit [J]. Chines Journal of Agricultural Sciences, 2015, 48(13): 2591-2599
- [12] 胡云峰,陈君然,贺业鑫,等.食品包装内二氧化碳含量指示剂研究[J].包装工程,2014,11:6-12
HU Yun-feng, CHEN Jun-ran, HE Ye-xin, et al. Study on the indicator of carbon dioxide content in food packaging [J]. Packaging Engineering, 2014, 11: 6-12
- [13] Kim D, Lee S, Lee K, et al. Development of a pH indicator composed of high moisture-absorbing materials for real-time monitoring of chicken breast freshness [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 37-42
- [14] Rukchon C, Nopwinyuwong A, Trevanich S, et al. Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast [J]. Talanta, 2014, 130: 547-554
- [15] WEI Y-C, CHENG C-H, HO Y-C, et al. Active gellan gum/purple sweet potato composite films capable of monitoring pH variations [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 491-502
- [16] 刘玲,肖怡琳,王彤文,等.用植物色素制取代用酸碱指示剂[J].云南师范大学学报,2000,20(5):62-66
LIU Ling, XIAO Yi-lin, WANG Tong-wen, et al. Replacing acid-base indicator with plant pigment [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2000, 20(5): 62-66
- [17] Prietto L, Mirapalhete T C, Pinto V Z, et al. pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from black bean seed coat and red cabbage [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 80: 492-500
- [18] Luchese C L S, Natalia, Spada Jordana Corralo, et al. Effect of blueberry agro-industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104: 11-18
- [19] Choi I, Lee J Y, Lacroix M, et al. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato [J]. Food Chemistry, 2017, 218: 122-128
- [20] 胡云峰,陈君然,贺业鑫,等.食品用 CO₂ 敏感型指示卡研究[J].中国粮油学报,2015,30(4):125-129,135
HU Yun-feng, CHEN Jun-ran, HE Ye-xin, et al. Study on CO₂-sensitive indicator card for food [J]. Editorial for China Cereals and Oils, 2015, 30(4): 125-129, 135
- [21] 张敬平,钮伟民,叶扣贵.肉类分解产物及检测现状[J].中国卫生检验杂志,2006,16(11):1405-1408
ZHANG Jing-ping, NIU Wei-min, YE Kou-guan. Calclic decomposition products and detection status [J]. Chinese Journal of Health Laboratory, 2006, 16(11): 1405-1408
- [22] Qiao L, Tang X Y, Dong J. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1179-1185
- [23] 杨又雄.浅析食品腐败的化学变化[J].湖北预防医学杂志, 2001,12:115-116
YANG You-xiong. Analysis of chemical changes in food spoilage [J]. Hubei Journal of Preventive Medicine, 2001, 12: 115-116
- [24] XIONG L, HU Y, LIU C, et al. Detection of total volatile basic nitrogen (tvb-n) in pork using fourier transform near-infrared (ft-nir) spectroscopy and cluster analysis for quality assurance [J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(6): 2251-2255
- [25] CHUN H-N, KIM B, SHIN H-S. Evaluation of a freshness indicator for quality of fish products during storage [J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(5): 1719-1725
- [26] 孙媛媛,张蕾.猪肉新鲜度指示卡的研究[J].包装工程,2013, 34(5):29-33
SUN Yuan-yuan, ZHANG Lei. Study on pork freshness indicator card [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5): 29-33
- [27] LIU B, XU H, ZHAO H, et al. Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial

- activity for food packaging applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 842-849
- [28] 庄玉亭,赵月兰.肉品新鲜度检测方法[J].河北科技大学学报,1999,20(2):63-66
ZHUANG Yu-ting, ZHAO Yue-lan. Meat freshness detection method [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 1999, 20(2): 63-66
- [29] Smolander M, Hurme E, Latva-Kala K, et al. Myoglobin-based indicators for the evaluation of freshness of unmarinated broiler cuts [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2002, 3(3): 279-288
- [30] Smolander M. Package for Enclosing Food: US, 7785894B2 [P] 2010-8-31
- [31] 李杨昕,王贵禧,梁丽松.‘大久保’桃常温贮藏过程中香气成分变化及其与乙烯释放的关系[J].园艺学报,2011, 38(1): 35-42
LI Yang-xin, WANG Gui-xi, LIANG Li-song. Changes of aroma components and their relationships with ethylene release at normal temperature storage of 'Okubo' peach [J]. *Horticulture*, 2011, 38(1): 35-42
- [32] Lang C, Hubert T. A Colour ripeness indicator for apples [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3244-3249
- [33] Cristescu S M, Mandon J, Arslanov D, et al. Current methods for detecting ethylene in plants [J]. *Annals of Botany*, 2013, 111(3): 347-360
- [34] Niponsak A, Laohakunjit N, Kerchoechuen O, et al. Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness [J]. *Food Research International*, 2016, 89: 365-372
- [35] MA Q, DU L, WANG L. Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH₃ indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017, 244: 759-766
- [36] 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,2014,33:185-186
WANG Gui-lian, WEI Xin-ling, YANG Hong-yang, et al. Study and design of a freshness indicator for strawberry [J]. *Science and Technology Innovation Guide*, 2014, 33: 185-186
- [37] Banerjee S, Bhattacharya S. Food gels: gelling process and new applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(4): 334-346
- [38] 王海标.气调包装冷却猪肉新鲜度指示卡的研究与制作[D].河南:河南农业大学,2015
WANG Hai-biao. Research and production of fresh-keeping indicator card for modified pork freshness [D]. Henan: Henan Agricultural University, 2015
- [39] 智玲玲,张钦发,冯卉,等.食品新鲜度指示卡基材玉米淀粉膜的成膜工艺研究[J].包装学报,2012,4(1):48-52
ZHI Ling-ling, ZHANG Qin-fa, FENG Hui, et al. Study on film forming process of corn starch film for food freshness indicator card [J]. *Chinese Journal of Packaging*, 2012, 4(1): 48-52
- [40] 胡云峰,陈君然,贺业鑫,等.食品包装用凝胶型二氧化碳指示标签研究[J].包装学报,2014,6(2):27-33
HU Yun-feng, CHEN Jun-ran, HE Ye-xin, et al. Study on gel-type carbon dioxide indicator label for food packaging [J]. *Chinese Journal of Packaging*, 2014, 6(2): 27-33
- [41] SUN Z. Electrospinning -an easy way to produce nanomaterials [J]. *Express Polymer Letters*, 2009, 3(3): 137-137
- [42] Choi J, Yang B J, Bae G N, et al. Herbal extract incorporated nanofiber fabricated by an electrospinning technique and its application to antimicrobial air filtration [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(45): 25313-25320
- [43] NIE G D, LI S K, LU X F, et al. Progress on applications of inorganic nanofibers synthesized by electrospinning technique [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities-Chinese*, 2013, 34(1): 15-29
- [44] 赵晓燕,赵晓画,王铭,等.静电纺复合膜的制备及其应用[J].高分子通报,2013,12:44-51
ZHAO Xiao-yan, ZHAO Xiao-hua, WANG Ming, et al. Preparation and application of electroslide composite film [J]. *Acta Agricultura Sinica*, 2013, 12: 44-51
- [45] Van Der Schueren L, Mollet T, Ceylan O, et al. The development of polyamide 6.6 nanofibres with a pH-sensitive function by electrospinning [J]. *European Polymer Journal*, 2010, 46(12): 2229-2239
- [46] 朱英瑞.静电纺技术在食品智能包装中的探索研究[D].海口:海南大学,2016
ZHU Ying-rui. Study on the research of electrostatic spinning technology in food intelligent packaging [D]. Haikou: Hainan University, 2016
- [47] 李沉纹,谢红,李卓恒,等.静电纺丝技术及其作为药物载体的应用研究进展[J].中国医院药学杂志,2013, 33(17):1428-1431
LI Chen-wen, XIE Hong, LI Zhuo-heng, et al. Electro-electrospinning and its application as a drug carrier [J]. *Chinese Journal of Hospital Pharmacy*, 2013, 33(17): 1428-1431