

食品智能包装的研究热点、应用现状及展望

宿跃¹, 石伟伟¹, 马骏², 阎瑞香^{1,*}

(1. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300222; 2. 天津市农作物研究所, 天津 300112)

摘要: 分别利用中国知网(CNKI)和 Science Direct(SD)搜索平台进行文献计量分析, 采用国家知识产权局专利检索与分析平台检索分析专利授权情况, 采用微软 Bing 搜索国际版搜索引擎搜集智能包装技术与产品, 并进行归纳及整理, 以追踪相关科学研究热点, 分析相关产品的应用现状和发展方向。发现近二十年来, 关于包装专用新型功能材料研究文献量最大, 而知识产权方面, 信息型智能包装授权明显高于其他类型, 生产中应用也较多, 是未来包装技术发展方向。

关键词: 食品; 智能包装; 文献计量; 专利授权; 热点追踪

Research Hotspot, Application Status and Prospect of Food Intelligent Packaging

SU Yue¹, SHI Wei-wei¹, MA Jun², YAN Rui-xiang^{1,*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Crops Research Institute, Tianjin 300112, China)

Abstract: This study aims to collect food intelligent packaging information from literature, patents, and product application using mainstream network and information search platform, and track the relevant scientific research hotspots and analyze current application status along with development trends. CNKI and Science Direct (SD) search platforms were used to carry out bibliometric analysis. Patent license was retrieved and analyzed by the National Intellectual Property Office Patent Retrieval and Analysis Platform, while intelligent package technology and products were collected by Microsoft Bing Search International search engine. During the last 20 years, the research of novel functional materials designated for packaging has the maximum quantity of publications. In the aspect of intelligent property, information-based intelligent packaging patents are obviously more than other types of patents, which indicates this area would be the development trend in the future.

Key words: food products; intelligent packaging; bibliometrics; patent grant; hot spot tracking

中图分类号: TB484; TS206.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2021.02.021

根据 Actipak 项目(全称“对活性与智能化包装的安全性、有效性、经济环境影响和消费者接受程度的评估”)的定义, 智能包装是一种能够自动检测、传感、记录和溯源食品在流通环节内外环境变化, 并

通过复印、印刷或粘贴于包装上的标签以视觉上可感知的物理变化来告知和警告消费者食品安全信息的新技术^[1]。它对包装食品进行感知和监测, 以提供有关食品质量、安全和产品在运输和储存过程中的历史

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFD0401304) 天津市科技支撑重点项目(18YFZCNC01150)

作者简介: 宿跃(1998—)男, 汉族, 在读本科生, 研究方向: 包装工程。

*通讯作者: 阎瑞香, 博士, 教授, 研究方向: 农产品物流保鲜包装。

信息,在满足保护产品、方便储运、促进销售等基本功能的同时增加了检测、传感、记录、跟踪和通信等功能。按照工作原理,智能包装可分为功能材料型、功能结构型以及信息型等三大类型^[2-9]。目前关于智能包装材料的文献较多,但是针对智能包装的研究发展热点进行全面研究分析和应用情况的报道较少。宗利永等^[10]运用知识图谱对智能包装的专利数据进行了挖掘,但需要进一步基于专利数据以外的研究和应用角度来识别智能包装领域的技术热点和科技前沿。本文通过关键词/主题词共现的方式,通过目前主流科研科技数据库进行文献搜索与专利授权情况分析相结合的方式,同时采用微软 Bing 国际版搜索引擎检索搜集了食品智能包装。通过对近二十年来的研究热点进行追踪分析,并对应用现状、存在问题及发展趋势进行了归纳总结,绘制了关于智能包装近二十年的文献检索及知识产权情况的柱状图,以期能为智能包装的研究热点、应用现状和发展趋势提供基础和依据。

1 信息采集方法

在文献计量分析方面,在中国知网(CNKI)和 Science Direct(SD)两大平台,分别以“化学传感器”/“Chemosensor”或“生物传感器”/“Biosensor”或“印刷电子”/“Printed electronics”或“光学信号”/“Optical signal”或“气体指示剂”/“Gas indicator”或“新鲜度指示剂”/“Freshness indicator”或“时间温度指示剂”/“Time temperature indicator”或“热变色油墨”/“Thermochromic ink”或“RFID”或“条形码 二维码”/“Bar code and QR code”或“磁墨水”/“Magnetic ink”或“语音识别”/“Automatic Speech Recognition”或“生物识别”/“Biological recognition”或“自动加热”/“Self-heating”或“自动制冷”/“Automatic refrigeration”或“自动报警”/“Automatic alarm”为主题/关键词对相关文献进行检索,在知识产权方面,通过国家知识产权局专利检索与分析平台,对相同关键词/主题词进行专利申请、授权情况的检索分析;在智能包装产品方面,采用微软 Bing 搜索国际版搜索引擎搜集了相关智能包装产品。信息采集时间跨度为 2000—2020 年,通过对采集到的信息进行文献计量分析和专利信息检索分析,对智能包装相关技术领域的文献和专利数据进行研究热度的可视化分析,并归纳总结和分析其应用现状及研究生产转化过程中遇到的问题。

2 不同类型智能包装研究分析

通过 CNKI 和 Science Direct 搜索平台,一共检索

到相关文献 236 224 篇,通过国家知识产权局专利检索与分析检索平台,搜索相关授权专利 216 433 个;通过微软 Bing 搜索国际版搜索引擎,发现不同类型的智能包装都有相应产品转化、应用,但比率存在一定差异。

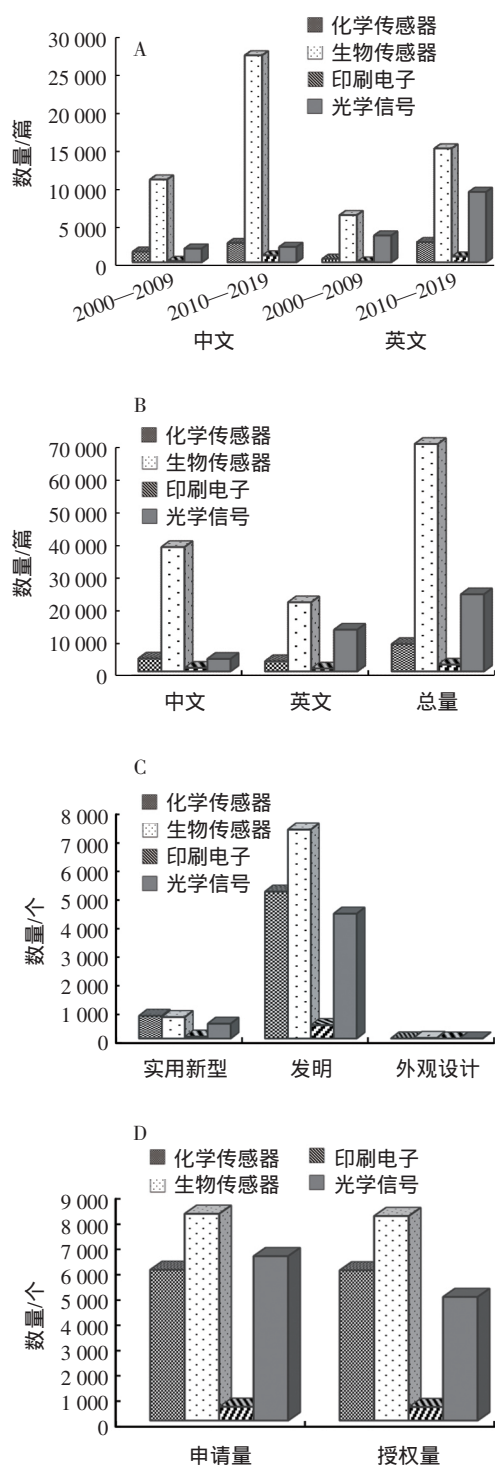
2.1 功能材料型智能包装

功能材料型智能包装是指通过应用新型智能包装材料,改善和增加包装的功能,使包装达到特定的目的^[11-13],如可以检测温度、湿度、光照强度、气体种类、目标微生物、物理冲击大小等,将其用于制作食品、药品和化妆品等包装,以达到检测新鲜度、追踪、溯源、防伪、实时监测以及增加产品与消费者的互动等目的的包装。常见的有传感器和指示剂两大类。

2.1.1 传感器

目前研究主要集中于化学传感器、生物传感器、印刷电子、光学信号等方面,关于这 4 种传感器的文献检索结果差异较大,见图 1。其中,生物传感器一直保持着较高的热度,近二十年发表的中文文献数量为 38 069 篇,英文文献数量为 21 152 篇,中英文文献历史发表总数为 69 666 篇,约占相关研究文献总数的 67%;光学信号次之,近二十年发表的中文文献数量为 3 815 篇,英文文献数量为 12 762 篇,中英文文献历史发表总数为 23 600 篇;印刷电子和化学传感器相关研究较少,二者文献总数之和占相关研究文献总数的 10%。4 种类型的传感器 2010—2019 年发表的中英文文献数目较 2000—2009 年都有增长。知识产权方面专利授权总数为 19 422,其中生物传感器约占 42%,仍遥遥领先,而研究较少的印刷电子仅占 3%。

关于生物传感器的研究,主要集中在对鱼类、肉类、医药、果蔬的实时监测及军事医学等方面。生物传感器的敏感元件包含了用于检测化学分析物的生物成分^[14]。如徐李舟^[15]将纳米技术与光学检测传感技术相结合,开发了一种新型的生物传感器。通过建立有限元分析模拟磁场特性,并建立免疫磁珠捕获细菌进行磁分离的数学模型,结果表明此传感器可同时进行分离和定量检测大肠杆菌 O157:H7、单增李斯特菌、鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌等 4 种主要的食源性致病菌。Frebort 等^[16]采用分光光度法测定作为鱼肉分解标志的腐烂性胺(腐胺和组胺),以构建流式酶反应器进行胺分析,优化后制成的生物传感器平均寿命为 20 d,腐胺在 0.9~70 nmol 范围内,测定限为 0.5 nmol。Yano 等^[17]开发了一种以酪氨酸酶为基础,采用酪氨酸酶固定柱和氧电极组成的生物传感器。经过测定分别存放在 10、5、0 °C 条件下的真空包装牛



注:A、B为文献,C、D为知识产权,下同。

图1 各种传感器文献检索及知识产权情况

Fig.1 Information on various sensor documents and intellectual property rights ators

肉的生物胺、活性计数和嫩度随时间的变化,证实了该生物传感器可用于评估牛肉的品质。Durmus等^[18]利用黄嘌呤分子可作为肉类腐败的指示剂,通过制备纳米复合薄膜开发了一种灵敏的生物纳米复合黄嘌呤生物传感器,测定不同天数鱼类样品的黄嘌呤含

量。相对于耗时长、过程繁琐、成本高的传统检测方法,生物传感器具有方便快捷、特异性强、灵敏度高、响应快、可用于复杂体系等特点,除了应用在产品包装种,还广泛应用于医学领域、环境监测、食品分析、发酵工业等^[19-21],具有极大的发展潜力。

2.1.2 指示剂

关于指示剂的研究主要集中于气体指示剂、新鲜度指示剂、时间-温度指示剂(TTIS)及热变色油墨等方面,信息采集情况见图2。其中,气体指示剂为目前研究的热点,发表的中英文文献历史发表总数为4809篇,约占相关研究文献总数53%,较TTIS高24%,热变色油墨相关研究最少,发表的中英文文献历史发表总数仅35篇。4种类型的指示剂2010—2019年发表的中英文文献数目较2000—2009年呈迅速增长的趋势。热变色油墨技术相关研究文献最少,但专利授权量却是最多的数量为35个,而气体指示剂技术专利授权量的总数仅为5个。

气体指示剂研究主要集中在对果蔬成熟度、肉类、鱼类及冷冻食品的质量实时检测等方面。Choi等^[22]开发一种基于酪蛋白酸钠(NaCas)和果胶反应的二氧化碳指示剂,将其用于泡菜的包装中,经测定泡菜的pH、可滴定酸、乳酸菌和CO₂含量的变化与指示剂的可见参数变化之间有很强的相关性,因此可用于检测泡菜储藏过程中的质量参数与成熟度参数。Niponsak等^[23]以淀粉为原料,通过添加天然聚合物壳聚糖、柠檬酸、羧甲基纤维素和牛皮纤维,制备了新型挥发性复合指示膜比色淀粉基膜(CSBFs)。CSBFs在硫化物和乙醇混合的香气的存在下会发生可见的颜色变化,且总色差与硫化物和乙醇的混合浓度有关。将CSBFs置于榴莲包装中,通过颜色转变,表明鲜切榴莲的成熟阶段。因此,比色淀粉基膜可作为气体指示剂实时监测榴莲的成熟度。Chun等^[24]以pH敏感原料溴甲酚绿的聚合物溶液作为显色剂,研制了一种用于检测鲭鱼腐败过程中挥发性含氮化合物含量的气体指示剂,判断鲭鱼的新鲜度。Nopwinyuwong等^[25]研制了一种具有开发智能包装潜力的比色混合pH染料指示剂,由溴麝香草酚蓝和甲基红混合溶液组成,对甜点腐败代谢物二氧化碳作出过可见的颜色变化,能够实时监测甜点的状况。

气体指示剂不需要用仪器进行分析,可以用视觉上的变化直接提供产品质量信息,是一种成本效益高、准确、快速、可靠且不对产品造成伤害的智能包装技术,是智能包装中最具实际应用前景的类型。由于食品的质量信息和腐败情况,可以通过检测食品变质

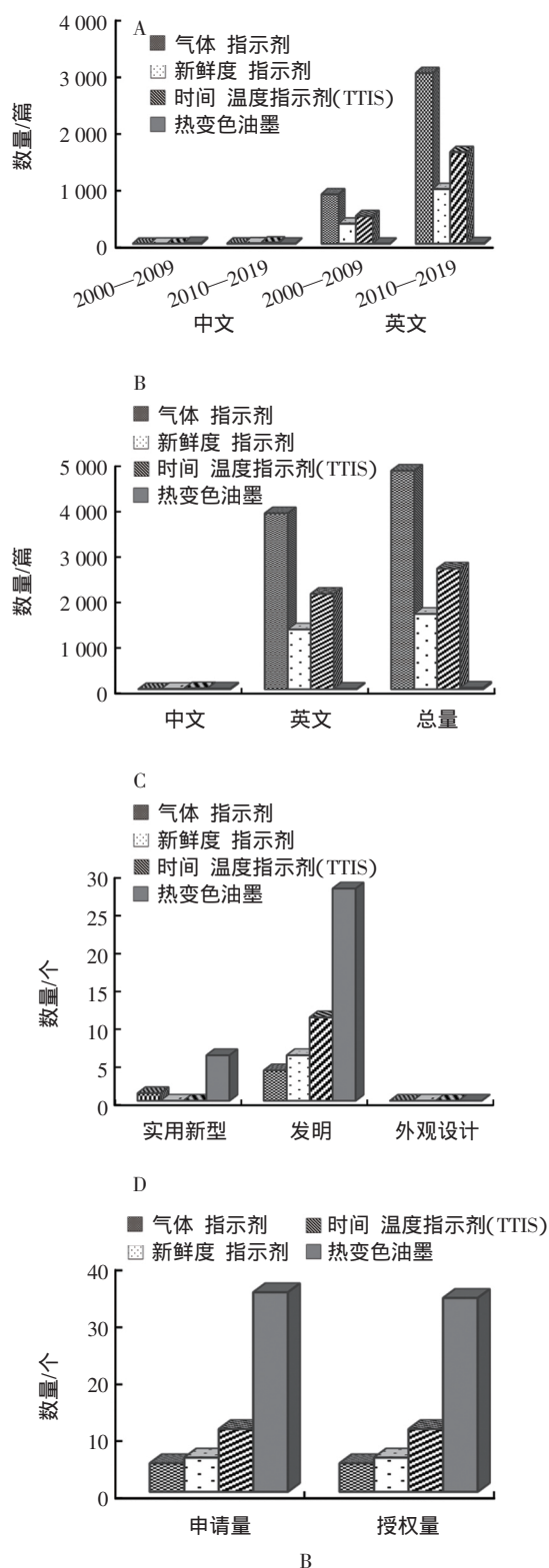


图 2 各种指示剂文献检索及知识产权情况

Fig.2 Literature retrieval and intellectual property rights of various indicators

之处,目前并未得到广泛的应用。

目前时间温度指示剂的应用较为广泛,国外在 20 世纪 60 年代就开始将其应用在产品中,到 20 世纪 70 年代,美国政府要求在某些特殊的产品上必须应用时间温度智能标签(TTI)。目前,Vitsab 公司、3M 公司和 Lifelines Technology 公司、Cryolog 公司等相继研究并开发了 TTI,并已商业化应用^[27]。

2.2 信息型智能包装材料

信息型智能包装是以通讯技术、信息技术等为基础,可以提供产品在运输、销售过程中信息的新颖技术^[28],能够实现商品生产、运输、销售信息以及产品溯源等重要通讯交流功能的包装,主要有射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)、条形码和二维码、磁墨水、语音识别、生物识别等。近二十年发表的研究 RFID 的中文文献数量为 44 212 篇,英文文献数量为 1 918 篇,中英文文献历史发表总数为 76 485 篇,是研究的热点。条形码、二维码次之,其中英文文献历史发表总数为 31 481 篇,约占相关研究文献总数的 29%,比 RFID 研究文献占比低 11%。磁墨水相关研究最少,近二十年发表的中文文献数量为 2 篇,英文文献数量为 19 篇,中英文文献历史发表总数为 190 篇。上述 5 种类型的信息型智能包装 2010—2019 年发表的中英文文献数目较 2000—2009 年都有增长,其中英文文献数目增长较少,中文文献关于 RFID 相关研究增长最多。专利授权总量以 RFID 最多,达 76 578,约占总数的 43%;条形码和二维码次之,约占 39%;磁墨水相关专利最少数量仅为 28 个(图 3)。

RFID 集成了光电传感器、温湿度传感器、微控制器、存储芯片、低功耗电子、通信天线等产品功能,研究主要集中在食品生鲜、温度敏感产品等监控追踪及防伪等方面。如 Abad 等^[29]将传感器记录的数据与跟踪数据一起存储在内存中,通过对一条洲际(世界范围内的跨洲际采购、运输、消费)鲜鱼物流链进行投入试验,研制出一种可实时追踪监测冷链运输中食品质量状态的 RFID 智能标签,具有内存大、可重复使用等特点。为了克服传统 RFID 标签存在读取范围小,且需要外部提供电能读取的问题,Chen 等^[30]开发了一种集成了可穿戴混合纳米发电机的自供电智能有源 RFID 标签,利用一种基于摩擦电-电磁混合机制的可穿戴纳米发电机,将生物机械能转化为电能,可持续地为 RFID 标签供电。这种主动 RFID 标签能够自动工作,工作距离可达 33 m,且其工作方向范围全方位覆盖。赵燕妮^[31]研究了一种将 RFID 技术嵌入新型智能包装盒的方法,实现了对 RFID 标签的保护,

过程中产生的特征气体(如 CO₂ 和 H₂S)的浓度来确定^[26],气体指示剂型智能包装相对于其他指示剂成本更低,但由于其技术要求较高、存在安全隐患等不足

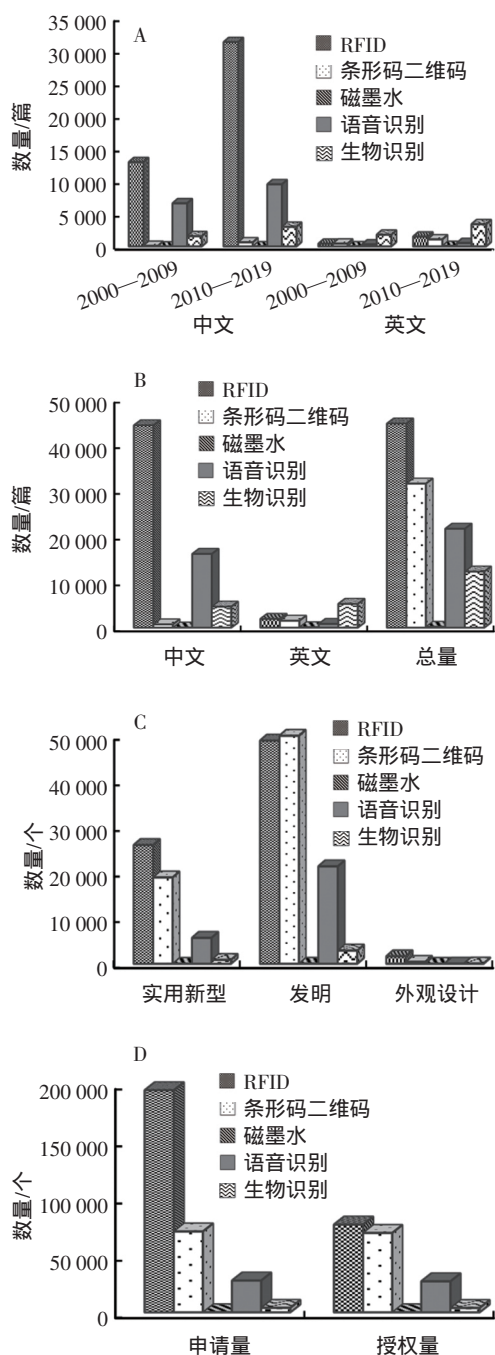


图 3 各种无线射频识别文献检索及知识产权情况

Fig.3 Literature retrieval and intellectual property rights of various radio frequency identifiers

且降低了 RFID 标签与包装制品的捆绑成本。实现包装制品一线防伪和二线防伪的综合应用,在提高包装产品的防伪性能的同时,保证数字化监管的有效实施。此外,RFID 技术还可以与其他技术相结合得到功能更完善、作用更强大的智能包装。如 RFID 技术可以与传感器技术相结合,得到一种 RFID 生物传感器标签,既可以用来记录食品运输过程中的环境变化,又可以监控食品品质的变化^[32]。RFID 技术还可以与

纳米技术相结合,由纳米材料制成的辅助传感器可用于监测周围环境,记录产品包装有关温度、湿度、氧气等方面的信息,然后发送到包装上的 RFID 芯片上,既可以实时对包装进行追踪,又可以获得食品的质量和状态信息^[33]。

RFID 标签具有可重复利用、读取速度快、储存容量大、安全性高、功能稳定等优势,且数据实时更新,无需人工干预,此外 RFID 技术还有一个重要作用,就是能够防止他人随意篡改或删除产品记录^[34]。RFID 标签具有的许多特点能满足目前飞速发展的物流运输、快递配送等行业,如电商包装中 RFID 标签的应用,使商品包装在仓储物流、产品追踪方面有着巨大优势,在赋予包装一定智能性的同时,又在提高供应链效率、监管库存和减少人力等方面取得了显著效果,为电商包装的减量化提供了新的思路^[35]。

2.3 功能结构型智能包装

功能结构型智能包装多运用物理学原理,指通过增加或改进部分包装结构,而使包装具有智能型特点和自动化性能^[36-38]。关于功能结构型的研究主要集中于自动加热、自动制冷、自动报警等方面。自动加热技术近二十年发表的中文文献数量为 1 394 篇,英文文献数量为 3 368 篇,中英文文献历史发表总数为 6 277 篇,约占相关研究文献总数的 47%(见图 4);自动报警技术相关文献总数占比较高 3%,英文文献历史发表总数为 6 666 篇;自动制冷方面较少,近二十年发表的中文文献数量为 178 篇,英文文献数量为 38 篇,中英文文献历史发表总数为 284 篇。4 种类型的功能结构型智能包装 2010—2019 年发表的中英文文献数目较 2000—2009 年都有增长,不同的是中文文献关于自动报警技术方面最多,而英文文献关于自动加热技术方面研究文献较多。功能结构型智能包装相关专利授权总数为 20 188 个,其中自动报警技术占总数的 78%,自动加热和自动制冷分别占 21%和 1%。

自动加热技术的研究主要集中在饮料、食品等快速加热,为消费者提供简单快捷的产品加热方法。如吴秀玲等^[39]研发了一款矿物发热剂自动加热式水瓶,其利用铝溶于氢氧化钙溶液及氧化钙的水合反应具有放热的特点,将氧化钙和铝粉以一定比例、粒度混合制作发热剂,然后加入适量的发热抑制剂和催化剂保持反应平稳、持续供热。该包装能为内部液体快速加热,且可持续加热 13~20 min。自动加热包装具有可快速加热、不受电源限制、不需要明火、安全、卫生、无腐蚀性和携带方便等特点,不仅能满足人们日益增长的对方便饮料包装的需求,而且还具有附加值的功

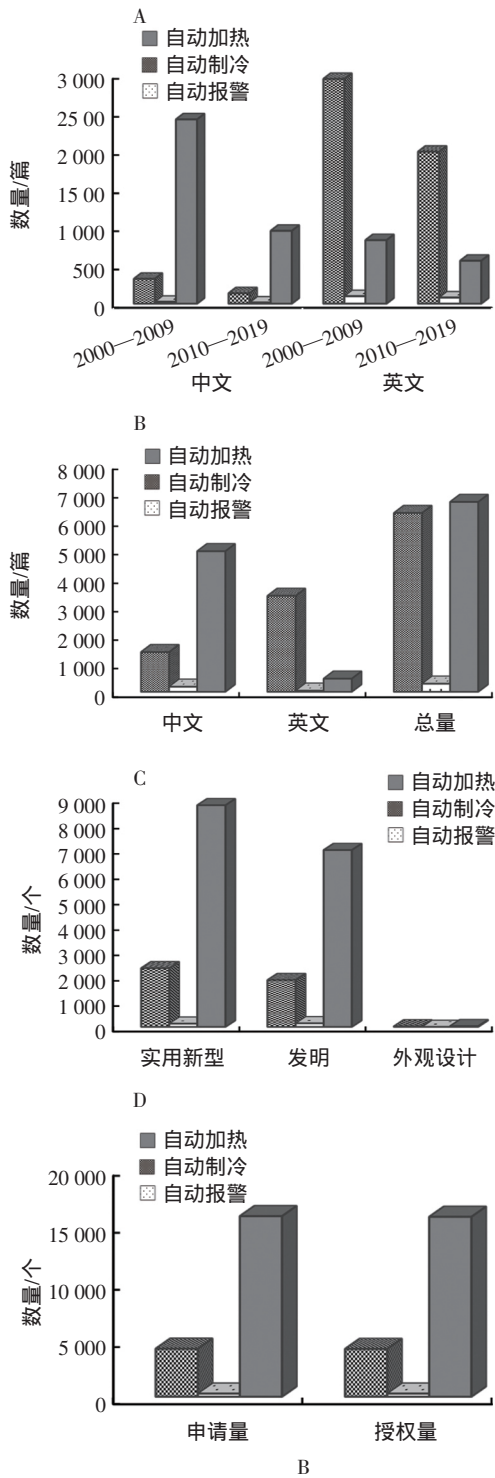


图4 各种结构型智能包装文献检索及知识产权情况
Fig.4 Literature retrieval and intellectual property rights of various structured intelligent packaging

能是一种全新的产品。若能将其由研究转换为生产,必将创造出一片新的市场^[40]。

自动报警包装的报警系统靠压力作用实现报警。当包装袋内食品胀袋产生的压力大于设计的标准压力时,报警系统就会自动报警,用以提醒食品质量已不

适宜食用,提醒商家和消费者,避免消费冲突,同时保证消费者的健康^[41]。刘俊澧^[42]设计了一款便携式智能感温奶粉包装,外观类似于吸管可以直接用于奶粉搅拌,但加入了TPE(又名热塑性弹性体,是一种兼有塑料和橡胶特性,在常温下显示橡胶的高弹性,高温下又能塑化成型的高分子材料(不需要硫化))感温材料可以根据水温产生颜色变化,以提醒使用者水温是否达到幼儿的最佳饮用温度。芝加哥的一家食品科技初创公司Ovie推出了一款智能标签Smart Tag,将标签贴附在食品包装或保鲜盒上,它可以通过食品腐败时间数据库找到产品对应的保鲜日期,以帮助用户了解食物的新鲜程度,从而提醒用户食品是否过期。可以看出,自动报警包装可以为用户直接提供特殊帮助,关系人类健康和生命,具有更加人性化、智能化的特点,发展潜力较大。

3 智能包装产品及应用

为了对应用现状进行分析,采用微软Bing搜索国际版搜索引擎分别以“Information intelligent packaging products and applications”或“Functional material intelligent packaging products and applications”或“Functional structure intelligent packaging products and applications”搜集相关智能包装产品及生产公司,检索结果分别为152 000 000、13 900 000和6 290 000。经过分析比较发现信息型智能包装产品最多,尤其是RFID和条形码、二维码已经广泛应用到物流运输、产品销售和防伪等方面。利乐包装公司将在印度推广“二维码式”智能包装技术,利用动态二维码搭建桥梁,将纸箱生产商、加工商和终端使用者等各个环节相互连接起来^[43]。

4 小结与展望

通过对近二十年来发表文献、授权专利的量化分析,发现对不同智能包装的关注热点有明显不同。其中,功能材料型智能包装的研究文献最多,数量达112 851篇,明显是包装领域的研究热点;信息型智能包装研究的文献次之,功能结构型的研究文献最少(13 227篇),研究热度最低。功能材料型和信息型分别约占总数的48%和47%,通过国家知识产权局专利检索与分析检索平台,搜索相关授权专利216 433个,其中信息型约占总数的82%,而功能材料型仅占9%。通过微软Bing搜索国际版搜索引擎搜集相关智能包装产品及应用,得知信息型智能包装产品是应用最多的。智能包装在快速发展的过程中面临

着诸如信息安全、专业知识不足、标准体系不完善等问题,在由研究向生产转换的过程中也面临诸如成本、实用价值、稳定性、生产难度以及安全性等诸多挑战。

智能包装是集成各种创新技术应用为载体,逐渐走向高端化、智能化,发展智能包装将成为包装产业的主流趋势^[44],纳米材料与包装的创新融合、活性和智能包装的一体化、智能包装与电子信息技术相融合等将成为智能包装的研究方向^[45-46]。伴随着科研内容的深入以及相关技术的日益完善,食品智能包装有助于保障食品质量安全、提高商品性,将拥有更加广阔的市场和发展前景。

参考文献:

- [1] 黄少云. 新鲜度指示型智能包装的研究进展与展望[J]. 今日印刷,2019(9):71-74.DOI:10.3969/j.issn.1002-6533.2019.09.029.
- [2] 李慧玲,徐长妍,蒋少华. 功能包装材料的发展现状与趋势[J]. 中国材料进展,2019,38(12):1135-1144,1134.DOI:10.7502/j.issn.16743962.201905022.
- [3] 王瑛伦,黄爱宾. 浅析智能包装及其在国内的发展[J]. 包装世界,2017(1):20-21.DOI:10.13337/j.cnki.packaging.world.2017.01.008.
- [4] 李才昌. 智能包装存在的问题和对策[J]. 绿色包装,2018(4):47-50.DOI:10.19362/j.cnki.cn10-1400/tb.2018.04.001.
- [5] 赵冬菁. 智能包装新技术:RFID 标签[J]. 今日印刷,2019(4):18-21.DOI:10.3969/j.issn.1002-6533.2019.04.012.
- [6] 孙聚杰. 食品智能包装[J]. 上海包装,2012(12):31-36.
- [7] 樊美娟. 智能包装的概念及分类[J]. 印刷质量与标准化,2012(2):10-14.DOI:10.3969/j.issn.1008-5602.2012.02.007.
- [8] 许文才,李东立. 智能包装技术的发展与应用[J]. 印刷工业,2009,4(4):11-14.
- [9] 李杨,陈曲. 智能包装技术在我国的发展及应用现状[J]. 印刷质量与标准化,2011(12):14-16.DOI:10.3969/j.issn.1008-5602.2011.12.013.
- [10] 宗利永,邓林菲,崔庆斌. 基于知识图谱的智能包装专利数据挖掘[J]. 上海包装,2019(8):30-37.DOI:10.19446/j.cnki.1005-9423.2019.04.008.
- [11] 夏征. 智能包装技术[J]. 包装世界,2011(2):4-6.DOI:10.3969/j.issn.1003-9929.2011.02.001.
- [12] 田晓宇,高清华. 智能包装的研究及应用现状[J]. 科技展望,2016,26(27):111.DOI:10.3969/j.issn.1672-8289.2016.27.096.
- [13] 张梦. 浅谈智能包装与 RFID 技术[J]. 广东印刷,2011(5):47-49.DOI:10.3969/j.issn.1005-7463.2011.05.020.
- [14] 王志伟. 智能包装技术及应用[J]. 包装学报,2018,10(1):27-33.DOI:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.01.005.
- [15] 徐李舟. 基于量子点的荧光生物与化学传感器及其食品安全快速检测应用[D]. 杭州 浙江大学,2016 :114-153.
- [16] FREBORT I, SKOUPA L, PEC P. Amine oxidase-based flow biosensor for the assessment of fish freshness[J]. Food Control, 2000,11(1):13-18.DOI:10.1016/S0956-7135(99)00032-8.
- [17] YANO Y, KATAHO N, WATANABE M, et al. Changes in the concentration of biogenic amines and application of tyramine sensor during storage of beef[J]. Food Chemistry,1995,54(2):155-159.DOI:10.1016/0308-8146(94)00161-W.
- [18] DURMUS Z, DERWISEVIC M, DERWISEVIC E, et al. Electrochemical biosensor based on REGO/Fe₃O₄ bionano-composite interface for xanthine detection in fish sample[J]. Food Control, 2015, 57:402-410. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.05.001.
- [19] 陈玲. 生物传感器的研究进展综述[J]. 传感器与微系统,2006,25(9):4-7.DOI:10.3969/j.issn.1000-9787.2006.09.002.
- [20] 武宝利,张国梅,高春光,等. 生物传感器的应用研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2004,24(7):65-69.DOI:10.3969/j.issn.1671-8135.2004.07.013.
- [21] 吴礼光,刘茉娥,朱长乐. 生物传感器研究进展[J]. 化学进展,1995(4):287-310.
- [22] CHOI I, HAN J. Development of a novel on-off type carbon dioxide indicator based on interactions between sodium caseinate and pectin[J]. Food Hydrocolloids,2018,80:15-23. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.01.028.
- [23] NIPONSAK A, LAOHAKUNJIT N, KERDCHOECHUEN O, et al. Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness[J]. Food Research International,2016,89:365-372.DOI:10.1016/j.foodres.2016.08.038.
- [24] 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. DOI:10.1007/s10068-014-0235-9.
- [25] NOPWINYUWONG A, TREVANICH S, SUPPAKUL P. Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage[J]. Talanta,2010,81(3):1126-1132.DOI:10.1016/j.talanta.2010.02.008.
- [26] 李洪军,王俊鹏,贺稚非,等. 智能包装在动物源性食品质量与安全监控中应用的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2019,45(21):272-279.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021194.
- [27] 谢勇,刘林,王凯丽,等. 包装用智能标签的应用及研究进展[J]. 包装工程,2017,38(19):121-127.
- [28] 王莉,张浩. 信息型智能包装技术应用分析[J]. 数字印刷,2018(4):51-53.

(下转第 150 页)

- scjyjg.2017.01.009.
- [54] 李靖, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2018.04.032.
- [55] 谢如鹤, 唐海洋, 陶文博, 等. 基于空载温度场模拟与试验的冷藏车冷板布置方式优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 290-298. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.24.038.
- [56] 王安冉. 基于 CFD 的冷藏车内流场及温度场的数值研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [57] SAIF A, ELHEDHLI S. Cold supply chain design with environmental considerations: A simulation-optimization approach[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(1): 274-287. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.10.056.
- [58] 李锦, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏车降温数学模型建立与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 175-182. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.030.
- [59] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 55-62. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.007.
- [60] 李君, 栗栋, 王海林, 等. 真空绝热板覆盖率对冷藏厢体内温度场特性的影响[J]. 食品与机械, 2016(7): 99-102.
- [61] 杨天润. 基于相变材料的冷库储能系统设计与优化[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [62] 江燕涛. 动态冰浆蓄冷湿冷技术在果蔬冷藏中的应用前景分析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(10): 5-9, 36.
- [63] 孙静, 陈全, 王萍, 等. 乙二醇蓄冷库性能及其在黄冠梨保鲜上的应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 276-282.

收稿日期 2020-05-21

(上接第 139 页)

- [29] ABAD E, PALACIO F, NIUM M, et al. RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(4): 394-399. DOI: 10.1016/j.jfo-odeng. 2009.02.004.
- [30] CHEN Y L, LIU D, WANG S, et al. Self-powered smart active RFID tag integrated with wearable hybrid nanogenerator[J]. Nano Energy, 2019, 64. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.103911.
- [31] 赵燕妮. 基于 RFID 技术的食品、药品智能包装应用研究[J]. 物联网技术, 2019, 9(1): 86-87, 90. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2019.01.025.
- [32] 刘东红, 吕飞, 叶兴乾. 食品智能包装体系的研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 286-290. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.08.054.
- [33] MADHUSUDAN P, CHELLUKURI N, SHIVAKUMAR N, Smart packaging of food for the 21st century-A review with futuristic trends, their feasibility and economics[J]. Materials Today, 2018, 5(10): 21018-21022. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.494.
- [34] KUMAR S, BUDIN E M. Prevention and management of product recalls in the processed food industry: A case study based on an exporter's perspective[J]. Technovation, 2005, 26(5): 739-750. DOI: 10.1016/j.technovation.2005.05.006.
- [35] 何青萍. 基于智能包装技术的电子商务减量化包装设计模式研究[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 43-47. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.007.
- [36] 胡兴军, 林燕. 智能包装的分类应用及前景[J]. 塑料包装, 2010, 20(2): 33-36.
- [37] 廖雨瑶, 陈丹青, 李伟, 等. 智能包装研究及应用进展[J]. 绿色包装, 2016(2): 39-46.
- [38] 陈广学, 陈琳轶, 俞朝晖. 智能包装技术的探索与应用[J]. 今日印刷, 2018(5): 25-27. DOI: 10.16004/j.cnki.pt.2018.05.004.
- [39] 吴秀玲, 姜文涛. 矿物发热剂自动加热式水瓶的研究设计[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(12): 121, 123. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6490.2017.12.105.
- [40] 杨艳华. 新型自热饮料罐[J]. 中国包装工业, 2004(2): 46-47.
- [41] 蒋海鹏. 食品智能包装体系的研究进展分析[J]. 科技创业家, 2014(7): 214.
- [42] 刘俊澧. 多种感官体验下的智能化包装设计研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016: 49-52.
- [43] 王磊. RFID 技术在机场中的应用[N]. 中国民航报, 2017-05-29(006).
- [44] 陈克复, 陈广学. 智能包装——发展现状、关键技术及应用前景[J]. 包装学报, 2019, 11(1): 1-17. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7100.2019.01.001.
- [45] 李田田, 李洋, 王磊明. 智能包装指示器在食品工业中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 190-199. DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2019.15.032.
- [46] 李洋, 冯刚, 王磊明, 等. 新鲜度指示型智能包装的研究进展[J]. 现代食品科技, 2018, 34(4): 287-293. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.042.

收稿日期 2020-06-11