

# 纳米包装技术在食品工业中的可持续发展研究

林罕彦

郑州轻工业大学国际教育学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年1月26日; 录用日期: 2024年3月15日; 发布日期: 2024年3月22日

## 摘要

在过去的数十年中, 纳米技术作为一项潜力巨大的技术, 这一技术不仅在制造业和医疗业等多个领域展现出巨大的潜在价值, 而且也对食品工业产生了深远的影响。本文综述了 nano-TiO<sub>2</sub>、nano-ZnO、AgNPs 在食品工业中的抗菌性、对食品保质期的影响和纳米黏土对改善包装材料的力学性能的能力, 列举了 nano-Au、nano-Pt 纳米传感器用于纳米包装进行食品分析的应用, 以及对食品安全性和保质期的保障, 同时讨论了该项技术 CuNPs、CuONPs、纳米黏土等的迁移问题对人体健康潜在的影响。

## 关键词

纳米, 保质期, 包装, 抗菌性, 力学性能

# Research on Sustainable Development of Nano-Packaging Technology in the Food Industry

Hanyan Lin

International Education College, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou Henan

Received: Jan. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2024

## Abstract

Nanotechnology has emerged as a technology with great potential over the past decades, and this technology has not only demonstrated great potential value in a number of fields such as manufacturing and healthcare, but has also had a profound impact on the food industry. This paper reviews the antimicrobial properties of nano-TiO<sub>2</sub>, nano-ZnO, and AgNPs in the food industry, the effect on the shelf life of food and the ability of nano-clay to improve the mechanical properties of packaging materials, lists the application of nano-Au and nano-Pt nano-sensors used in nano-packaging for food

analysis, as well as the guarantee of the safety and shelf life of food, and at the same time, discusses the potential impact of the migration of CuNPs, CuONPs, nano-clay, etc. of this technology on human health.

## Keywords

Nano, Shelf Life, Packaging, Antimicrobial Properties, Mechanical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

纳米包装技术作为一门前沿技术，核心聚焦于分子与原子层面的材料探究，通过利用纳米材料的独特性能，为食品工业提供了创新的解决方案，本文旨在探讨纳米包装技术在食品工业中的纳米包装的抗菌剂和拥有监测食品内部化学、生物化学甚至产品周围环境的能力的智能包装。同时，将分析纳米包装纳米材料迁移对人体的潜在危害。通过深入了解纳米包装技术的发展动向，我们可以更好地把握其在食品工业中的潜在贡献，推动该领域的可持续发展。

## 2. 纳米包装技术概述

纳米包装技术是基于纳米材料的应用，旨在提高食品包装的性能以减少食品腐败污染。纳米材料是指尺寸在 1 到 100 纳米之间的物质[1]，许多工程纳米材料作为功能添加剂被引入食品包装中，包括银 NPs (AgNPs)、纳米粘土、纳米氧化锌(nano-ZnO)、纳米二氧化钛(nano-TiO<sub>2</sub>)、氮化钛 NPs (nano-TiN)等，它们具有独特的物理、化学和生物学特性[2]。这些特性使得纳米材料能够用于改进食品包装的性能，例如提高气体阻隔性、水分保持能力和抗菌性能等。

在纳米材料的广泛应用中，粒径小于 100 nm 的 TiO<sub>2</sub> 成为一种常见选择，被广泛用作食品包装和储存容器中的食品添加剂和抗菌剂；对于食品包装和储存容器，纳米银颗粒也展现了其卓越的抗菌性能，被用作抗菌剂，并广泛应用于砧板、冰箱以及保健品领域；锌和氧化锌不仅在食品中扮演营养添加剂的角色，还在食品包装中发挥抗菌剂的作用[3]，SiO<sub>2</sub> 和碳以纳米颗粒的形式存在，其颗粒大小达到几百纳米，被应用于食品添加剂和食品包装领域。此外，铂(Pt)和金(Au)纳米线在生物传感器方面发挥独特作用，有望改善食品分析的效果。

## 3. 纳米包装技术在食品工业中的应用

纳米材料的不同特性使它们适用于多种食品工业应用。例如，纳米银颗粒因其出色的抗菌性能而成为理想的食品包装材料，可有效延长食品的保质期；SiO<sub>2</sub> 和碳的纳米颗粒在食品添加剂和包装中的应用，则有望提高食品的质量和安全性。而铂和金纳米线作为生物传感器的应用，有助于食品分析领域的技术进步。这些不同类别的纳米材料展现了在食品工业中的多元化应用潜力，为提高食品质量、延长保质期以及提升食品分析技术提供了新的可能性。

### 3.1. 纳米包装中的抗菌剂

在现代工业生产中，包装领域大量采用一种技术，即把金属、金属氧化物无机纳米抗菌剂等无机抗

菌成分融入聚烯烃材料中，或者在其表面进行涂层处理的一种纳米技术。

### 3.1.1. AgNPs 抗菌剂

金属银(Ag)具有强烈的杀菌性，无机抗菌剂中各金属离子杀菌活性按下列顺序递减： $Ag > Hg > Cu > Cd > Cr > Ni > Pd > Co > Zn > Fe$  [4]，可见 AgNPs 抗菌剂始终是相当有研究价值的无机抗菌剂，纳米银是由 20~15000 个银原子组成的银原子簇，与常规的银离子相，AgNPs 能够引发细菌细胞内外产生自由基，例如活性氧、活性氮等，这会导致细菌细胞膜脂质过氧化，干扰其跨膜呼吸并造成细菌内容物的泄露，最终引发细菌裂解[5]。

汪敏等人[6]通过对聚乙烯薄膜添加不同纳米银量(0、2%、3%、4%、5%、6%、7%)的聚乙烯薄膜对白菜上所携带微生物的抗菌效果，以及对白菜贮藏保鲜过程中失质量率、新鲜度、袋内  $CO_2$ 、 $O_2$  含量等指标的影响进行了研究。结果表明，抗菌试验中，4%纳米银含量的薄膜对白菜上菌群的抗菌率达 91.2%。

也有部分学者通过物理静电吸附作用在 AgNPs 上修饰了多功能抗菌(MFP)，构建了一个高效的双重抗菌载药体系，相比单纯的 AgNPs，复合材料对细菌的 MIC 值(最小抑菌浓度 Minimum Inhibitory Concentration, MIC)由 32  $\mu\text{g/mL}$  降低到 2  $\mu\text{g/mL}$  [7]。

### 3.1.2. Nano-TiO<sub>2</sub> 抗菌剂

nano-TiO<sub>2</sub> 光催化对病毒、真菌、细菌、癌细胞等的抗菌作用的研究一直都是重点[8]，大量研究得以证明，纳米粒子的确具备对各类微生物如细菌、真菌、霉菌等的显著抗菌活性，以半导体 nano-TiO<sub>2</sub> 为例，其内部由低能价带和高能导带组成的能带结构，两者间由一条禁带分隔开。当光线照射到其表面，并提供超过带隙能的光照时，便能够激发其价带中的电子跃迁至导带，产生一对带正负电荷的自由电子和电子空穴。在这个过程中，价带上的电子空穴会将水和氢氧根离子(OH<sup>-</sup>)氧化成羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )，而导带上的电子则会与氧气反应，生成超氧自由基( $-\text{O}_2^-$ )和过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) [9]，这些活性氧基团(Reactive Oxygen Species, ROS)具有极强的氧化效果，在分解有机物方面扮演了至关重要的角色[10]。在紫外光照射下，能够激发产生光生电子和光电空穴。这些电子和空穴直接与细胞壁和细胞膜产生反应，氧化这些结构成分，致使细胞丧失活性[11]。

nano-TiO<sub>2</sub> 对革兰氏阳性菌(G<sup>+</sup>)、革兰氏阴性菌(G<sup>-</sup>)往往显示出不同的抑菌能力，原因主要和细菌细胞壁中肽聚糖的含量和致密程度、外膜的组成成分等有差别引起的[12] [13]，革兰氏阳性菌的细胞壁较为厚重，构造也相对简单，且富含肽聚糖；而革兰氏阴性菌的细胞壁则相对薄弱，结构也较为复杂，肽聚糖含量相对较低。革兰氏阴性菌的细胞壁外还有一层特别的薄膜，该薄膜由脂质、脂蛋白和脂多糖构成，能够有效阻止多数物质的渗透。研究者 Xing 等人[12]研发的 nano-TiO<sub>2</sub>/PE 复合薄膜对金黄色葡萄球菌(G<sup>+</sup>)的抗菌效果相比于大肠杆菌(G<sup>-</sup>)更为显著。在紫外光照射下，该复合膜对金黄色葡萄球菌(G<sup>+</sup>)和大肠杆菌(G<sup>-</sup>)的抗菌率分别达到了 95.2%和 89.3%。

## 3.2. 智能包装

纳米粒子(如 nano-Au、nano-Pt)具备监测食品内部化学、生物化学成分甚至产品周围环境的能力，这使得它们在提升智能功能的食品包装的巨大潜力。因此，可以使用特定的特定气体纳米传感器进行食品腐败进行精准的监测[14] [15]。

在智能包装领域，使用的定制纳米传感器用于食品分析，其主要目的是检测毒素、各类化学物质和潜在的食品病原体，此外还可以对食品风味或颜色等进行检测[16]。食品包装可以整合湿度、气体形成或温度变化敏感的纳米传感器，例如，当由于食品变质而形成气体的情况下，包装的提示器会转换颜色，

以此告知消费者已经不适合食用的产品。这是因为纳米传感器可以对食品中化学标记物，以及病原体和毒素做出响应[17] [18]，从而精确地判定食品的保鲜期限。尽管生物成分可能是目标分析物，决定性差异在于识别本质上是生物的元素[19]。生物传感器是生物传感器与纳米技术相结合的产物。表 1 列出了生物纳米传感器在食品包装领域的多样化应用。

**Table 1.** Different applications of bionnanometer sensors in food packaging field  
**表 1.** 生物纳米传感器在食品包装领域的不同应用

生物纳米传感器的应用	纳米传感器	检测物质	参考
有毒物质的检测	三层 10 nm nano-SiO <sub>2</sub>	真菌毒素	[20]
	nano-Au 颗粒	短链毒素 (PbTx-1, PbTx-2, PbTx-3, PbTx-9)	[21]
微生物检验	nano-Au 颗粒	黄曲霉毒素 B <sub>1</sub>	[22]
	单壁碳纳米管	沙门氏菌	[23]

## 4. 纳米包装材料的性能及评价

纳米包装材料的独特性能是其备受关注的主要原因。纳米材料的小尺寸效应使其具有高比表面积、优异的力学、热学、电学和磁学性能。这些特性使得纳米包装材料在提高包装产品的防护性能、保鲜性能以及环保性能等方面具有显著优势。此外，纳米材料还具有优异的生物活性，可应用于生物活性包装材料，为食品等产品提供额外的安全保障。

### 4.1. 纳米包装材料的力学性能

首先，纳米包装材料的独特性能是其备受关注的主要原因。纳米材料具有较大的比表面积、优异的力学性能、良好的阻隔性、热稳定性以及生物相容性等特性。这些特性使得纳米包装材料在包装领域具有显著的优势[24]。

例如，纳米黏土拥有改善基底材料的力学性能和气体的阻隔性能，同时它也具有较大的比表面积、良好的阳离子交换率和良好的溶胀性。作为市场上首个应用于食品包装的纳米复合材料，它由纳米黏土制备而成[25]。研究人员 Peres 等人[26]将 1%质量分数的 MMT 材料融入到热塑性淀粉(TPS)包装材料中，这一改性手段显著提高了包装材料的整体机械强度和水蒸气阻隔能力。相较于未处理的对照组薄膜，TPS/1% MMT 薄膜的拉伸强度由 2.5 MPa 提高到 3.8 MPa 和断裂伸长率由 38%提高到 60%，得到了显著提升。水蒸气阻隔性增强可以归因于 MMT 在聚合物基质中均匀分散，提高了水蒸气透过时路径的曲折性。

纳米材料还可以改善包装材料的力学性能，提高包装品的抗冲击性和耐磨性[27]。张彦奇等人[28]通过熔融共混法成功制备了 LLDPE (线型低密度聚乙烯)与 SiO<sub>2</sub> 的复合材料，当纳米粉体含量为达到 2.9%时，该材料的拉伸和冲击强度得到显著提升。戴欣团队[29]深入研究了纳米 CaCO<sub>3</sub> 对 PE 材料(即聚乙烯)的增强增韧的研究，并制备了力学性能优秀的复合材料。张雪茜等人[30]发现，纳米 ZnO 和可大幅提升 LDPE 的强度性能。在层状纳米粒子领域，刘金月等人[31]采用熔融挤出法制出了  $\beta$  成核聚丙烯/蒙脱土纳米复合材料。实验结果显示，添加  $\beta$  成核剂 0.1%时，复合材料的弯曲强度可达到 35.06 MPa，与此同时，缺口冲击强度相较于不添加  $\beta$  成核剂时提高了约 3 倍，而弯曲强度的下降仅为了 28.39%。

纳米包装材料在包装领域的应用已经取得了显著的成果[32]。然而，纳米包装材料在实际应用过程中仍然面临一些挑战，如生产成本较高、产业化程度较低、环境友好性有待提高等。因此，进一步研究纳米包装材料的性能优化及其评价方法，对于推动纳米包装材料的广泛应用具有重要意义。

## 4.2. 纳米包装材料的食品安全忧虑

纳米颗粒食品产业中具备显著优点，然而，大众对它们的毒性及环境效应仍抱有很大疑虑。当下，纳米材料对人体健康的长期影响方面尚无充足研究数据支撑，而其在食品包装领域的应用也迫切需要健全相应的安全评估机制[33]；二是纳米材料在生产过程中易于生成粉尘，纳米颗粒可经由吸入、摄取或皮肤接触途径进入人体[34]，已有研究表明，ZnO 纳米粒子具有遗传毒性。一些报告指出，吸入极高剂量(10 mg/m<sup>3</sup>)的纳米 TiO<sub>2</sub> 与肺部肿瘤的发病率存在显著的相关性[35]。

## 4.3. 纳米包装对人体健康潜在的影响

纳米包装技术可能对食物产生潜在而难以估量的影响，食品作为一般人摄入的一种维持生命运动的物质，由农村田地、食品加工厂、食品经销商等经过复杂的流程来到消费者手中。

抛开复杂的生产、运输的流程，纳米填料的尺寸、形状、初始浓度同样影响其迁移水平。学者 Jiang 等人[36]采用质量分数为 1% 的铜纳米粒子(CuNPs)掺入聚丙烯基质(PP-H)，以制备食品接触材料 PP-H/CuNPs。即使最严苛的迁移条件下，3% 的醋酸食品模拟液和 70℃ 温度进行迁移实验。结果表明，CuNPs 的最大迁移量可达 4.5 mg/kg，并可对肝细胞 L-02 造成损害，这一发现为研究 CuNPs 在食品接触材料中的应用提供了关键数据。

迁移条件的变化如温度、光照等也会影响迁移水平。升温、紫外线等常规使用条件都能促进纳米物质的迁移水平。Deng 等人[37]研究了在不同温度下，AgNPs 从 LDPE/AgNPs 复合膜向食品模拟物中的迁移情况，并观察到随着温度上升，迁移水平明显增加(如图 1~3 所示)。同样，Lajarrige 等人[38]在生物降解聚酯 PBSA/PHBV 中引入了有机改性的蒙脱土黏土 C-30B (质量分数为 5%)，制成了 PBSA/PHBV/C-30B 纳米复合材料，通过紫外线、湿度和温度等条件对材料进行加速老化处理。结果发现，紫外线的照射和纳米黏土的加入降低了纳米复合食品接触材料的潜在风险。

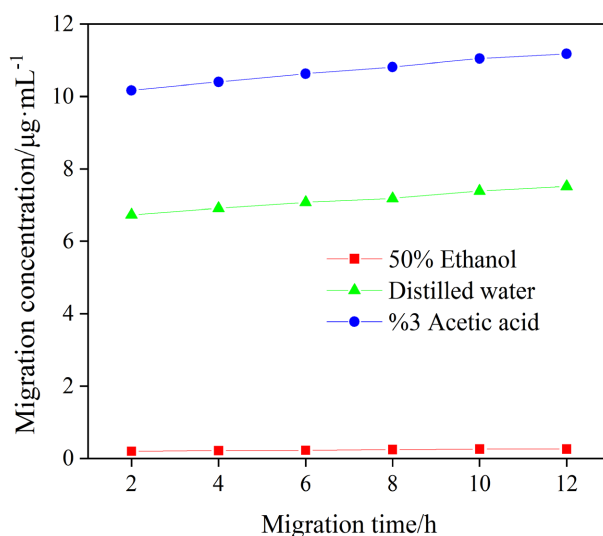
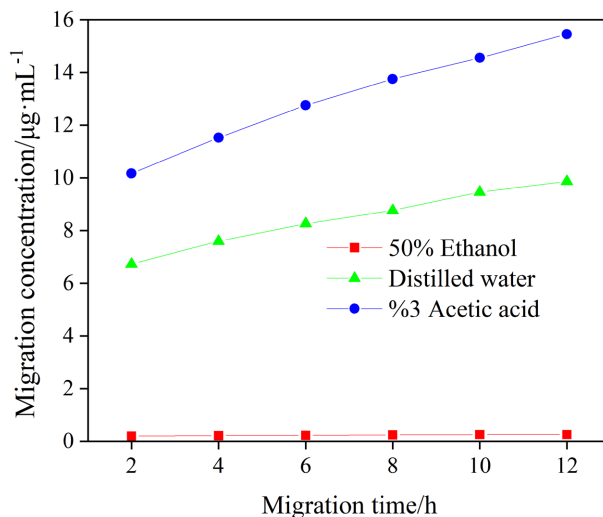


Figure 1. Migration of AgNPs at 25°C [38]

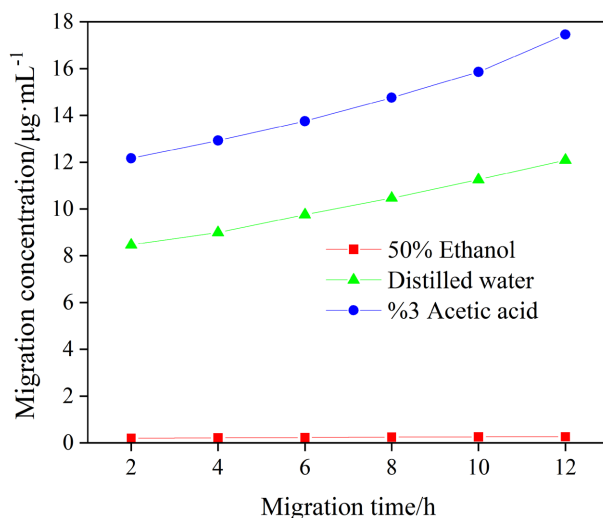
图 1. AgNPs 在 25°C 的条件下迁移[38]





**Figure 2.** Migration of AgNPs at 40°C [38]

**图 2.** AgNPs 在 40°C 的条件下迁移 [38]



**Figure 3.** Migration of AgNPs at 70°C [38]

**图 3.** AgNPs 在 70°C 的条件下迁移 [38]

纳米成分也可以从包装中泄漏至食品，或储存包装、纳米传感器在垃圾填埋场可能释放到环境、空气、水和土壤中[39] [40] [41]，纳米颗粒从包装材料迁移食品主要可以划分为三个子阶段[42]：

- 1) 受浓度梯度驱动，分子迁徙至聚合物内，以抵达食品之中；
- 2) 在食品包装接触部位，分子与聚合物分离，进而被食品吸收；
- 3) 受浓度差异驱动，分子透过食品进行扩散。

然而，关于纳米颗粒潜在释放机制的探讨，当前尚显不足。鉴于纳米颗粒的理化特性对胃肠道吸收产生的许多影响，如形态、组成、表面性质等，与食品包装中纳米颗粒迁移相关的消费者风险问题或许比其他问题更为复杂[43]。

同时，某些纳米材料在食品生产线中包装与食品接触的过程中，其特性可能与细胞、组织及器官相结合，从而引发毒理学效应，这些效应与吸入、摄入及皮肤吸收毒性尚不明确的潜在风险相关。因此，亟需研发可靠的分析工具，对纳米食品的安全风险进行评估[44]。

## 5. 纳米包装技术的结论和展望

食品包装的纳米技术可以明显改善包装材料的性能, 并提供检测食品内部化学、生物化学甚至产品周围环境的能力, 配备对湿度、气体形成或温度变化敏感的纳米传感器, 以致于可以充分改善具备智能功能的食品包装, 提高食品的质量和安全性。

但具体的 nano-TiO<sub>2</sub>、nano-ZnO、AgNPs 迁移与其对环境的影响仍需进一步的研究和开发, 以更好地了解纳米技术在食品包装材料中的作用。借助纳米技术, 减少二氧化碳、氧气和水蒸汽渗透, 使之在包装过程中更加健康、美味及营养; 此外, 采用适宜的纳米材质有助于提升包装物的拉伸强度、抗冲击性及耐磨性, 从而延长食品的保质期及安全性。在食品包装领域, 这一趋势预测在未来十年内将居于前沿地位[45]。

## 参考文献

- [1] 陈晨晨, 余澜, 周宋奕, 裘蕾蕾, 郑茹悦, 陈瑾. 纳米材料与水体其他污染物的复合暴露毒性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(4): 174-187.
- [2] Hirvikorpi, T., Vähä-Nissi, M., Mustonen, T., *et al.* (2010) Atomic Layer Deposited Aluminum Oxide Barrier Coatings for Packaging Materials. *Thin Solid Films*, **518**, 2654-2658. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.025>
- [3] Alfadul, S.M. and Elneshwy A.A. (2010) Use of Nanotechnology in Food Processing, Packaging and Safety—Review. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition Development*, **10**, 2719-2739. <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i6.58068>
- [4] 刘姝瑞, 谭艳君, 张明宇, 霍倩. 抗菌材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2022, 39(1): 90-98.
- [5] Ramalingam, B.P., Thanusu, D.A.S. and Sujoy, K. (2016) Antibacterial Effects of Biosynthesized Silver Nanoparticles on Surface Ultrastructure and Nanomechanical Properties of Gram-Negative Bacteria Viz. *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*. *ACS Applied Materials Interfaces*, **8**, 4963-4976. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00161>
- [6] 汪敏, 赵富富, 侯喜林, 冯敏, 王合叶, 蒋希芝. 纳米银抗菌膜对白菜的保鲜效果[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 204-206.
- [7] 李文茜. 抗菌多肽修饰银纳米粒的抗菌活性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [8] Feng, Q.L., Wu, J., Chen, G.Q., *et al.* (2000) A Mechanistic Study of the Antibacterial Effect of Silver Ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biomedical Materials Research*, **52**, 662-668. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(20001215\)52:4<662::AID-JBM10>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-4636(20001215)52:4<662::AID-JBM10>3.0.CO;2-3)
- [9] 扈莹莹, 李其轩, 刘昊天, 孔保华, 陈倩. 纳米二氧化钛光催化技术抑菌机制及其在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 232-238.
- [10] Fagan, R., McCormack, D.E., Dionysiou, D.D., *et al.* (2016) A Review of Solar and Visible Light Active TiO<sub>2</sub> Photocatalysis for Treating Bacteria, Cyanotoxins and Contaminants of Emerging Concern. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **42**, 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.052>
- [11] 陈韶娟, 马建伟. 纳米二氧化钛复合抗菌剂的抗菌性及抗菌原理[C]//第五届功能性纺织品及纳米技术研讨会论文集. 2005: 293-301. <https://d.wanfangdata.com.cn/conference/ChZDb25mZXJlbnNlTmV3UzIwMjQwMTA5Egc2MDUyODM5GghpeDda3AxNQ%3D%3D>
- [12] Xing, Y.G., Li, X.H., Zhang, L., *et al.* (2012) Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Antibacterial and Physical Properties of Polyethylene-Based Film. *Progress in Organic Coatings*, **73**, 219-224. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.11.005>
- [13] Lin, D.R., Huang, Y.C., Liu, Y.Q., *et al.* (2018) Physico-Mechanical and Structural Characteristics of Starch/Polyvinyl Alcohol/Nano-Titania Photocatalytic Antimicrobial Composite Films. *LWT*, **96**, 704-712. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.001>
- [14] Kuswandi, B. (2017) Environmental Friendly Food Nano-Packaging. *Environmental Chemistry Letters*, **15**, 205-221. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0613-7>
- [15] Madhusudan, P., Chellukuri, N. and Shivakumar, N. (2018) Smart Packaging of Food for the 21<sup>st</sup> Century—A Review with Futuristic Trends, Their Feasibility and Economics. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 21018-21022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.494>

- [16] Li, Z.X. and Sheng, C.X. (2014) Nanosensors for Food Safety. *Journal of Nanoscience Nanotechnology*, **14**, 905-912. <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.8743>
- [17] Sharma, C., *et al.* (2017) Nanotechnology: An Untapped Resource for Food Packaging. *Frontiers in Microbiology*, **8**, Article 1735. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01735>
- [18] Pramanik, P.K.D., Solanki, A., Debnath, A., *et al.* (2020) Advancing Modern Healthcare with Nanotechnology, Nanobiosensors, and Internet of Nano Things: Taxonomies, Applications, Architecture, and Challenges. *IEEE Access*, **8**, 65230-65266. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984269>
- [19] Eggins, B.R. (2002) *Chemical Sensors and Biosensors*. Wiley, Hoboken.
- [20] Mak, A.C., Osterfeld, S.J., Yu, H., *et al.* (2010) Sensitive Giant Magnetoresistive-Based Immunoassay for Multiplex Mycotoxin Detection. *Biosensors Bioelectronics*, **25**, 1635-1639. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.11.028>
- [21] Zhou, Y.P., Li, F.-G., Zhang, Y.-S., *et al.* (2009) Colloidal Gold Probe-Based Immunochromatographic Assay for the Rapid Detection of Brevetoxins in Fishery Product Samples. *Biosensors Bioelectronics*, **24**, 2744-2747. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.01.034>
- [22] Sharma, A., Matharu, Z., Sumana, G., *et al.* (2010) Antibody Immobilized Cysteamine Functionalized-Gold Nanoparticles for Aflatoxin Detection. *Thin Solid Films*, **519**, 1213-1218. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.08.071>
- [23] Hasan, M.R., Pulingam, T., Appaturi, J.N., *et al.* (2018) Carbon Nanotube-Based Aptasensor for Sensitive Electrochemical Detection of Whole-Cell Salmonella. *Analytical Biochemistry*, **554**, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2018.06.001>
- [24] Kuswandi, B. and Moradi, M. (2019) Improvement of Food Packaging Based on Functional Nanomaterial. In: Siddiquee, S., Melvin, G.J.H. and Rahman, M.M., Eds., *Nanotechnology: Applications in Energy, Drug and Food*, Springer, Berlin, 309-344. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99602-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99602-8_16)
- [25] Adeyeye, S.A.O. and Ashaolu, T.J. (2021) Applications of Nano-Materials in Food Packaging: A Review. *Journal of Food Process Engineering*, **44**, e13708. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13708>
- [26] Peres, L.G.S., Malafatti, J.O.D., Bernardi, B., *et al.* (2023) Biodegradable Starch Sachets Reinforced with Montmorillonite for Packing ZnO Nanoparticles: Solubility and Zn<sup>2+</sup> Ions Release. *Journal of Polymers the Environment*, **31**, 2388-2398. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2273765/v1>
- [27] 任新乐, 赵书乾, 王建泽, 宋兆萍. 纳米纤维素在食品包装中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2020, 34(2): 13-18.
- [28] 张彦奇, 华幼卿. LLDPE/纳米 SiO<sub>2</sub> 复合材料的力学性能和光学性能研究[J]. 高分子学报, 2003, 13(5): 683-687.
- [29] 戴欣, 尚庆坤, 李诗春. 改性纳米 CaCO<sub>3</sub>/PE-g-MAH/HDPE 复合塑料拉伸性能研究[J]. 分子科学学报, 2007, 23(5): 340-343.
- [30] 张雪茜, 刘敏江, 李国立. 纳米氧化锌改性聚乙烯的研究[J]. 塑料, 2004, 33(1): 9-11+15.
- [31] 刘金月, 祝宝东. 聚丙烯/蒙脱土纳米复合材料的制备与力学性能预测[J]. 化学工程师, 2024, 38(2): 97-100.
- [32] Chaudhary, P., Fatima, F. and Kumar, A. (2020) Relevance of Nanomaterials in Food Packaging and Its Advanced Future Prospects. *Journal of Inorganic Organometallic Polymers Materials*, **30**, 5180-5192. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01674-8>
- [33] Alfei, S., Marengo, B. and Zuccari, G. (2020) Nanotechnology Application in Food Packaging: A Plethora of Opportunities versus Pending Risks Assessment and Public Concerns. *Food Research International*, **137**, Article ID: 109664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109664>
- [34] Maisanaba, S., Pichardo, S., Puerto, M., *et al.* (2015) Toxicological Evaluation of Clay Minerals and Derived Nanocomposites: A Review. *Environmental Research*, **138**, 233-254. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.024>
- [35] Sharma, C., Dhiman, R., Rokana, N., *et al.* (2017) Nanotechnology: An Untapped Resource for Food Packaging. *Frontiers in Microbiology*, **8**, Article 1735. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01735>
- [36] Jiang, Z.-W., Yu, W.-W., Li, Y., *et al.* (2019) Migration of Copper from Nanocopper/Polypropylene Composite Films and Its Functional Property. *Food Packaging Shelf Life*, **22**, Article ID: 100416. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100416>
- [37] Deng, J., Ding, Q.M., Li, W., *et al.* (2020) Preparation of Nano-Silver-Containing Polyethylene Composite Film and Ag Ion Migration into Food-Simulants. *Journal of Nanoscience*, **20**, 1613-1621. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17346>
- [38] Lajarrige, A., Gontard, N., Gaucel, S., *et al.* (2020) Evaluation of the Food Contact Suitability of Aged Bio-Nanocomposite Materials Dedicated to Food Packaging Applications. *Applied Sciences*, **10**, Article 877. <https://doi.org/10.3390/app10030877>
- [39] Han, W., Yu, Y.J., Li, N.T. and Wang, L.B. (2011) Application and Safety Assessment for Nano-Composite Materials in Food Packaging. *Chinese Science Bulletin*, **56**, 1216-1225. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4326-6>
- [40] He, X.J. and Hwang, H.-M. (2016) Nanotechnology in Food Science: Functionality, Applicability, and Safety Assessment.



- 
- Journal of Food Drug Analysis*, **24**, 671-681. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.06.001>
- [41] Xia, Y.N., Rubino, M. and Auras, R. (2014) Release of Nanoclay and Surfactant from Polymer-Clay Nanocomposites into a Food Simulant. *Environmental Science Technology*, **48**, 13617-13624. <https://doi.org/10.1021/es502622c>
- [42] Wyrwa, J. and Barska, A. (2017) Innovations in the Food Packaging Market: Active Packaging. *European Food Research Technology*, **243**, 1681-1692. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2878-2>
- [43] McClements, D.J. and Xiao, H. (2017) Is Nano Safe in Foods? Establishing the Factors Impacting the Gastrointestinal Fate and Toxicity of Organic and Inorganic Food-Grade Nanoparticles. *NPJ Science of Food*, **1**, Article No. 6. <https://doi.org/10.1038/s41538-017-0005-1>
- [44] Bouwmeester, H., van der Zande, M. and Jepson, M.A. (2018) A Effects of Food-Borne Nanomaterials on Gastrointestinal Tissues and Microbiota. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine*, **10**, e1481. <https://doi.org/10.1002/wnan.1481>
- [45] Primožič, M., Knez, Ž. and Leitgeb, M. (2021) (Bio)nanotechnology in Food Science—Food Packaging. *Nanomaterials*, **11**, Article 292. <https://doi.org/10.3390/nano11020292>