

## 综述

## 纳米材料在食品添加剂和食品配料生产中的应用进展

关桦楠<sup>1,2</sup>, 迟振东<sup>1</sup>, 孙艺铭<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076;

2. 江苏科技大学粮食学院, 江苏 镇江 212100)

**摘要:** 随着纳米技术的发展, 纳米材料被广泛应用于多个领域, 纳米材料独有的特性使其在食品加工领域有着重要地位。近年来, 纳米材料作为一种新兴材料被用作食品添加剂或食品配料, 其不仅能提升食品品质、强化营养属性、改善食品工艺, 还能够赋予食品新的功能特性或作为某些成分的替代物。纳米材料为食品领域带来了新的发展方向, 但部分纳米材料对人体的影响仍需进一步探究。为了拓宽纳米材料在食品领域中的应用, 本文围绕有机和无机两种类型的纳米材料在食品添加剂和食品配料方面的进展进行了介绍, 并对食品中纳米材料的优势和不足进行了总结, 旨在探索其未来在开发新型食品添加剂和食品配料中的应用。

**关键词:** 纳米材料; 食品添加剂; 食品配料; 研究进展

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2024)05-0627-08

DOI: 10.13590/j.cjfh.2024.05.018

### Research progress on the application of nanomaterials in the production of food additives and food ingredients

GUAN Huanan<sup>1,2</sup>, CHI Zhendong<sup>1</sup>, SUN Yiming<sup>1</sup>

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Heilongjiang Harbin 150076, China;

2. School of Gain, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212100, China)

**Abstract:** With the development of nanotechnology, nanomaterials are widely used in many fields, and their unique properties make an important position in the food processing field. In recent years, nanomaterials have been used as food additives or food ingredients as an emerging material, which can not only enhance food quality, strengthen nutritional properties and improve food processes, but also give new functional properties to food or act as a substitute for certain ingredients. The food field has brought new directions for nanomaterials, but the effects of some nanomaterials on human body still need to be explored. In order to broaden the application of nanomaterials in the food field, this paper introduces the progress of both organic and inorganic types of nanomaterials in food additives and food ingredients, and summarizes the advantages and shortcomings of nanomaterials in food, with the aim of exploring their future applications and developing new food additives and food ingredients.

**Key words:** Nanomaterials; food additives; food ingredients; research progress

纳米材料是指在三维空间中至少一个维度处于纳米尺寸(1~100 nm)范围内的材料。根据形状特征, 纳米材料分为零维(纳米粒子、纳米簇、量子点和富勒烯)、一维(纳米线、纳米棒或纳米管)、二维(纳米薄膜)和三维结构(纳米复合材料和树枝状聚合物)<sup>[1]</sup>。一些纳米材料是自然形成的(如酪蛋白

纳米粒子), 一些是从自然界中获得的(如纳米纤维素或纳米甲壳素), 还有一些是使用加工操作制造的(如活性成分的纳米乳液)。纳米粒子根据原材料可分为两大类: 有机纳米颗粒和无机纳米颗粒。有机纳米颗粒通常由蛋白质(例如玉米醇溶蛋白纳米颗粒和酪蛋白胶束)、碳水化合物(例如纳米甲壳素和纳米纤维素纳米凝胶)、磷脂或脂质(例如脂质体)组成。无机纳米粒子通常由金属或金属盐组成, 例如金、银、铜、二氧化钛、氧化锌和氧化铁等<sup>[2-3]</sup>。纳米材料具有粒径小、比表面积大、质量轻、化学性质稳定、颗粒大小均匀、表面易于修饰以及生物相容性良好等特点, 为医疗保健、能源、建筑、农业食品加工等其他领域的进步带来了新的机

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2022C046); 黑龙江省博士后科研启动项目(LBH-Q19027); 黑龙江省领军人才支持计划(2020376); 中央财政支持地方高校发展专项(YSL036)

作者简介: 关桦楠 男 教授 研究方向为食品加工及安全检测分析 E-mail: guanhuanan3@163.com

遇<sup>[4]</sup>。纳米材料在研究过程中的历史和标准、分类、合成方法以及接触路径、风险和规定见图1。

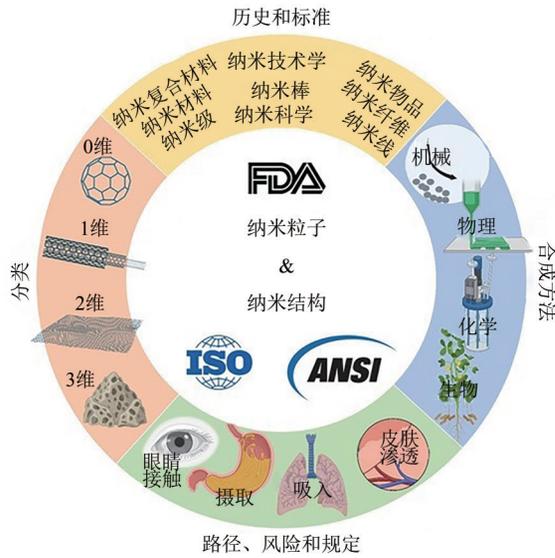


图1 纳米材料分类及各领域进展<sup>[3]</sup>  
Figure 1 Classification nanomaterials and progress in various fields<sup>[3]</sup>

纳米材料的尺寸使其适用于食品行业中,涵盖了从食品加工到食品包装等诸多环节<sup>[5]</sup>。纳米材料具有一定的吸收、结合和提高食品结构的能力,作为食品添加剂会影响食品的口感、风味、颜色、质地、保质期和营养价值,还可以作为具有抗菌能力的长效食品包装材料、追踪健康危害的纳米传感器、检查食品质量的生物纳米传感器以及食品成分或添加剂的封装或涂层<sup>[6-8]</sup>。食品工业中最常用的纳米材料是纳米颗粒,其功能属性取决于组成、大小、形状和电荷<sup>[9]</sup>。

近年来,许多纳米材料已被研究开发并广泛应用于食品领域中,包括直接加入到食品中的纳米食品添加剂可以提高食品成分在体内的溶解度,同时增强了其生物利用度和在目标部位的受控释放<sup>[10-11]</sup>,或是加入到包装材料中以扩展其功能<sup>[12]</sup>。本文总结了近年来纳米材料用作食品添加剂或者配料的相关研究,综述了纳米材料作为食品添加剂和食品配料生产中的应用进展及新用途,以期纳米材料用作食品添加剂或者配料提供参考资料。

## 1 有机纳米材料在食品添加剂和食品配料生产方面的应用

### 1.1 纳米纤维素

纳米纤维素是从可再生资源中获得的一种绿色无毒的天然纳米材料,具有重量轻、机械强度高和生物相容性良好等优点。纳米纤维素在食品中应用广泛,主要涉及食品添加剂、稳定剂、涂层材料、

封装材料、食品包装和功能性食品等领域(图2)。纳米纤维素具有3种不同类型:纤维素纳米晶体(Cellulose nanocrystals, CNC)、网状纤维素纳米纤维(Cellulose nanofibers, CNF)和细菌纳米纤维素(Bacterial nanocelluloses, BNC),其粒径均小于100 nm<sup>[13]</sup>。在食品中,纳米纤维素是一种非水溶性膳食纤维,人体难以消化吸收,具有良好的吸湿性和流变特性,可以用作乳化稳定剂、脂肪替代剂或品质改良剂等食品添加剂,也可作为功能性食品成分参与调节血糖、血脂以及改善炎症,促进人体肠道蠕动和改善肠道菌群平衡<sup>[14]</sup>。

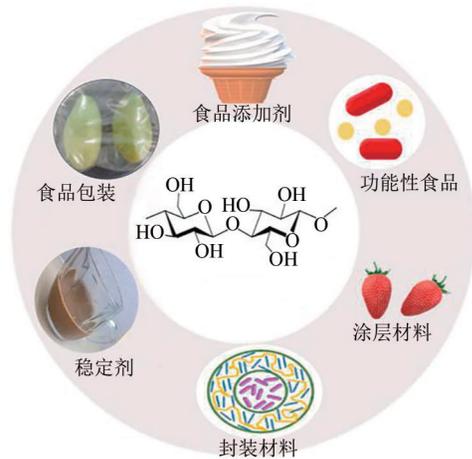


图2 纳米纤维素在食品中的应用领域<sup>[13]</sup>  
Figure 2 Applications of nanocellulose in food<sup>[13]</sup>

近年来,纳米纤维素常被用作增稠剂与脂肪替代剂<sup>[15]</sup>。研究表明,CNC和BNC通过与蛋白的非共价相互作用进而显著提高奶油、酸奶和冰淇淋的稳定性<sup>[16-18]</sup>。研究表明将BNC和CNF添加到蛋黄酱和肉丸中,不仅能够降低脂肪的添加量进而调整营养状况,还能改善食品的品质<sup>[19-20]</sup>。QI等<sup>[21]</sup>研究了经纳米纤维素稳定的预乳化豆油制备的香肠,发现其水分和脂肪结合能力显著提高,降低了蒸煮损失,提高了乳化稳定性,经感官评价其硬度、弹性和咀嚼性均显著提高。其中,香肠中使用经纳米纤维素预乳化的大豆油,可减少动物脂肪的使用,还可改善由纯液态油引起的脂肪分布不均匀和产品结构不紧凑等问题。纳米纤维素还会影响食物的消化和营养素的吸收。NAGANO等<sup>[22]</sup>发现食用含有CNF的食品可提高运动表现、降低肥胖指数并改善肠道微生物群。DU等<sup>[23]</sup>发现CNC能将长链脂肪酸转化为短链脂肪酸,促进短链脂肪酸的吸收,从而改善肠道健康。此外,其他研究表明CNC可以防止胆固醇和胆汁酸的再吸收,具有去除黄曲霉毒素和真菌毒素等有害毒素的能力<sup>[24-25]</sup>。LIU等<sup>[26]</sup>的研究表明CNF和CNC在含量较高的情况下会显著降

低葡萄糖扩散和蛋白质消化过程中氨基氮的扩散速率。纳米纤维素用作食品添加剂不仅可以提高食品品质,还对提高肠道健康和控制体质量具有显著的作用,但会阻碍部分营养素的吸收,营养缺失人群需控制纳米纤维的摄入。

### 1.2 纳米淀粉

纳米淀粉是一种新兴的微纳米级膳食纤维,淀粉基纳米颗粒通常小于 300 nm,具有不溶于水、赋形性能强、颜色浅和口感舒适等优势,同时还具有改善人体肠道功能、调节血糖血脂和预防结肠癌等生理功能。纳米淀粉作为食品膳食纤维的功能成分,在食品中可适量添加,制成具有特色功能的风味食品<sup>[27]</sup>。展望未来食品领域的发展趋势,纳米淀粉作为一种环保、健康、绿色且可食用的产品,可应用到保健食品、肉制品和食品添加剂等领域,推动食品行业的技术发展和进步。与此同时,纳米淀粉具有比表面积大、表面羟基丰富和具有典型流变学特性等优点,可将其作为乳化稳定剂、脂肪替代剂、增稠剂或流变改性剂,用于改善食品性质和功能<sup>[28]</sup>。

纳米淀粉基皮克林乳液具有独特的质构和流变特性,将其作为食品添加剂的研究已屡见不鲜<sup>[29]</sup>。LÓPEZ-PEDROUSO 等<sup>[30]</sup>研究发现纳米淀粉基皮克林乳液的油水界面具有由微淀粉颗粒排列组成的高强度物理屏障,可阻隔氧气侵入,且某些颗粒还具有吸附和清除自由基的功效,能极大增强油脂的抗氧化性。YANO 等<sup>[31]</sup>通过纳米淀粉基皮克林乳液制备的无麸质大米面包口感良好,这可能是由于纳米淀粉基皮克林乳液对发酵过程中的气泡具有稳定作用,进而有助于面团的溶胀。CHIVERO 等<sup>[32]</sup>以大豆可溶性多糖作为乳化剂稳定纳米淀粉基皮克林乳液,所得的高稳定性乳液可将其用于制备蛋黄酱模拟产品。通过与蛋白质和多糖等食品级成分进行复合,可将纳米淀粉基皮克林乳液开发成具有多功能的食品辅料。纳米淀粉对于食品品质的改善主要体现在纳米淀粉基皮克林乳液上,对于其他形式的纳米淀粉的研究较少,其潜在功能的开发利用仍有待加强。

### 1.3 纳米蛋白

纳米蛋白粒子制备简单且来源广泛,同时可赋予产品稳定的结构状态,使其在食品加工领域得到广泛的应用<sup>[33]</sup>。近年来纳米蛋白常作为各种替代物加入食品中,纳米蛋白纤维具有强大的机械性能,可模仿真实肉的纳米纤维结构,从而制备出高品质的植物仿生肉<sup>[34]</sup>。因其低过敏性和容易形成网络结构等特点,乳清蛋白纳米纤维(Whey protein nanofibers, WPN)也可被用作面筋蛋白替代物。研

究表明,向无面筋面团添加 WPN 后流变特性与含面筋面团接近<sup>[35]</sup>。同时纳米蛋白还是一种应用广泛的载体材料。研究表明,WPN 能吸附纳米铁,形成具有高生物利用度的铁复合体<sup>[36]</sup>,这种模板效应也被成功应用于大豆蛋白纤维<sup>[37]</sup>。除作为纳米粒子模板外,纳米蛋白也是小分子活性物质的优秀载体。例如,姜黄素可通过氢键和疏水相互作用吸附在 WPN 上,显著提高其水溶性和抗氧化活性,并可掺入食品和饮料的配方中,从而改善其健康属性<sup>[38]</sup>;茶多酚可吸附于溶菌酶纤维,形成壳核型纳米纤维结构<sup>[39]</sup>。与其他传统的多酚递载系统相比,蛋白纤维载体的负载量更高,且可以将其以活性形式递送到目标位点。例如,蛋白纤维-多酚组装形成的凝胶可保护多酚经过胃部运输到肠道,能有效调节肠道微生物,起到治疗肠道疾病的作用<sup>[40]</sup>。与此类似,蛋白纤维-黄酮类化合物组成的凝胶也被开发为缓解肥胖症的功能材料<sup>[41]</sup>。淀粉样纤维化也能增强抗菌蛋白的抗菌活性。HU 等<sup>[39]</sup>通过将多酚与淀粉样蛋白纤维自组装制备了可逆水凝胶(图 3),并用 LIVE/DEAD-BcLight 活力测定法测定纤维化后的溶菌酶,结果显示其抗菌能力显著提升。研究人员对寡聚体和蠕虫状纤维的纳米溶菌酶纤维化结构进行了对比研究<sup>[42-43]</sup>。此类研究表明,淀粉样纳米蛋白纤维具有超强的抗菌效果,而低聚物和蠕虫状纳米蛋白纤维并未明显提升溶菌酶的抗菌活性。纳米蛋白本身具有较高的营养价值,与其他纳米材料复合后会产生蛋白冠从而为赋予纳米材料新功能,蛋白冠对人体带来的影响值得深入研究发掘。

### 1.4 其他有机纳米材料

纳米果胶是一种天然存在的多糖,是水果和蔬菜来源中有效的膳食成分,大量存在于植物细胞壁中<sup>[44]</sup>。果胶的化学和结构特征使其能够与食品各种分子相互作用,具有出色的稳定、乳化、封装和增稠能力。在食品行业,纳米果胶作为一种高价值的功能性食品成分,可用作糊化剂、稳定剂、乳化剂和增稠剂,以提高食品的质量和质地<sup>[45]</sup>。纳米果胶及其衍生物在果酱、果冻和果泥等食物中可作为增稠剂和凝胶剂。郑文迪<sup>[46]</sup>通过亚临界水法制备的纳米姜黄素颗粒的还原能力和 DPPH 自由基清除能力较强,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有较强的抑制作用。

有机纳米材料来源广泛、制备简单,相较人工合成的纳米材料更为安全健康、经济环保且多用于食品配料。由于其天然无毒的特点,有机纳米材料可添加的食品范围更广泛、添加含量更高且适合的

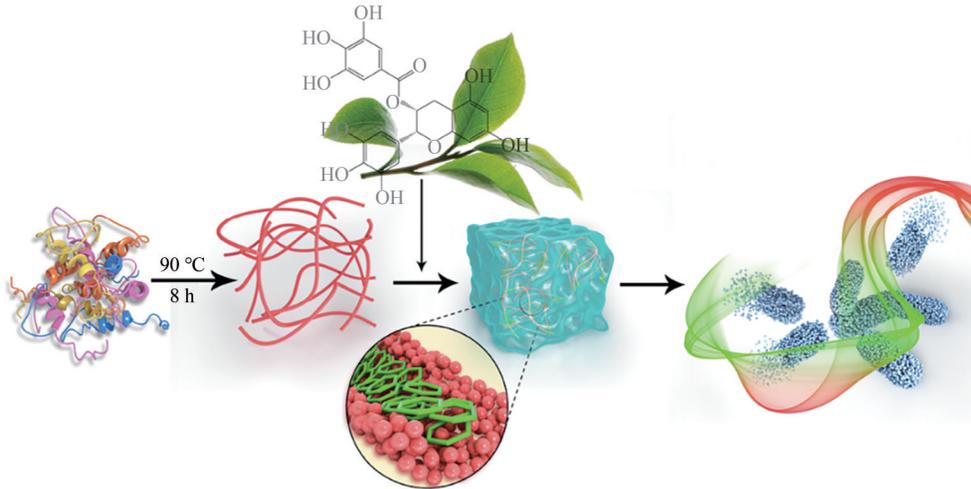


图3 多酚结合的淀粉样蛋白纤维自组装成具有抗菌活性的可逆水凝胶示意图<sup>[39]</sup>

Figure 3 Schematic of polyphenol-binding amyloid fibrils self-assembly into reversible hydrogels with antibacterial activity<sup>[39]</sup>

人群更多。常见的有机纳米材料如淀粉、蛋白质等均可为食品提供较高的营养价值,此外,纳米级别的有机食品配料不仅加强了人体对营养成分的吸收和利用,还可以与其他成分结合产生新功效或替代其他的食品成分从而减轻对食品品质的影响和对人体健康的潜在威胁。开发和利用有机纳米材料的新功能和新用途应成为接下来研究的首要选择。

## 2 无机纳米材料在食品添加剂和食品配料生产方面的应用

### 2.1 纳米氧化铁

在食品行业,氧化铁纳米粒子( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  NPs)和四氧化三铁纳米粒子( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs)常作为食品着色剂和营养强化剂<sup>[47-48]</sup>。在一些营养补充剂的胶囊、鱼和甲壳类食品以及一些酱料中常会添加  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  NPs<sup>[49]</sup>。DUEIK 等<sup>[50]</sup>将  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 添加到茶叶中以此来改善铁元素缺乏的问题,致使每杯红茶 Fe 含量为 4 mg。与传统的添加方式不同,研究人员利用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 良好的分散性使其与乙二胺四乙酸(EDTA)先形成  $\text{Fe}^{3+}$ -EDTA 复合物,避免与多酚进行接触,防止铁元素与多酚形成络合物影响茶叶品质。其次通过检测色度和感官分析选择合适的添加量。此外,相比于其他纳米材料复杂的合成路线, $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 的合成方法更加简洁且制备方法多样,能有效控制粒径和形状,使其作为食品添加剂有着良好的优势。ELABD 等<sup>[51]</sup>发现给罗非鱼补充  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  NPs 后使其体内的丙氨酸氨基转移酶和天冬氨酸氨基转移酶水平上升,平均红细胞血红蛋白量和浓度均有提升,总蛋白质、葡萄糖和皮质醇等生化指标显著改善。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  NPs 还显著增加了血浆中钠离子和钾离子的浓度及超氧化物歧化酶、过氧化

氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性。纳米氧化铁加入食品中不仅可以充分补充铁元素,还对改善生物体的生化指标有着重要作用,但其在食品中的应用领域较为狭隘,应更多研究其在不同类型食品中所能带来的新功能。

### 2.2 纳米氧化锌

纳米氧化锌( $\text{ZnO}$  NPs)具有稳定性良好、抗菌活性强和价格低等特点<sup>[52]</sup>,常作为食品中的锌补充剂和营养强化剂<sup>[53]</sup>。近年来  $\text{ZnO}$  NPs 常被作为抗菌剂和营养补充剂。研究表明,采用湿法合成的  $\text{ZnO}$  NPs 作为食品抗菌剂对伤寒沙门菌、肺炎克雷伯菌和福氏志贺氏菌等革兰氏阴性菌和阳性菌都有较强的抗菌能力<sup>[54-55]</sup>。HAKIMIAN 等<sup>[56]</sup>研究在蛋黄酱配方中添加 1 g/kg 的  $\text{ZnO}$  NPs 作为食品抗菌剂,结果表明添加  $\text{ZnO}$  NPs 可以抑制微生物生长、延缓脂质氧化降解,且不会影响样品稳定性和感官特性。其中,在饲料中添加一定量的  $\text{Zn}$  NPs 或  $\text{ZnO}$  NPs 对雏鸡和鹌鹑的体质量增加、饲料摄入量和饲料转化率均有显著提高,对丙氨酸氨基转移酶、天冬氨酸氨基转移酶、乳酸脱氢酶活性、超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、丙二醛、免疫球蛋白 G 和免疫球蛋白 M 均有积极影响<sup>[57-58]</sup>。ABDEL-WARETH 等<sup>[59]</sup>发现给雄兔摄入一定  $\text{ZnO}$  NPs 后极大提高了粗蛋白和醚提取物的消化系数,同时降低了丙氨酸氨基转移酶和天冬氨酸氨基转移酶水平。 $\text{ZnO}$  NPs 作为食品添加剂具有优异的抗菌功能,对生物体内蛋白消化也有积极影响,但对于生物体内部分酶的影响仍有争论需要通过后续研究解决,且将  $\text{ZnO}$  NPs 添加到食品中的应用相较其他领域进展缓慢,应加强对此领域的研究。

### 2.3 纳米二氧化硅

纳米二氧化硅( $\text{SiO}_2$  NPs)比表面积大,同时具

有稀疏多孔的结构,使其自身具有良好的吸附能力,多作为抗结剂用于粉状食品中。杨丽梅等<sup>[60]</sup>在 SiO<sub>2</sub> NPs、亚铁氰化钾和柠檬酸铁铵用作食盐抗结剂的对比实验中发现由于 SiO<sub>2</sub> NPs 具有无毒和高阻结性的特点,优于所用亚铁氰化钾和柠檬酸铁铵,但因 SiO<sub>2</sub> NPs 不溶于水,作为食盐抗结剂的使用也将受到一定的限制。研究表明 SiO<sub>2</sub> NPs 还有助于增强固体饮料的护胃功效<sup>[61]</sup>。王杰等<sup>[62]</sup>发现在气相 SiO<sub>2</sub> NPs、磷酸三钙和微晶纤维素 3 种类型的食品抗结剂中,气相 SiO<sub>2</sub> NPs 在相对较低的添加量(0.5%~1.0%)下,可达到更优的抗结效果,同时还具有更好的粉体助流动性能。OGAWA 等<sup>[63]</sup>发现在每日摄入范围内,口服粒径为 10 nm 的 SiO<sub>2</sub> NPs 也会加剧结肠炎模型中的肠道炎症,而口服粒径为 30 nm 的 SiO<sub>2</sub> NPs 则不会增强同一模型中的肠道炎症,表明 SiO<sub>2</sub> NPs 的毒性在很大程度上取决于其粒径的大小。已经有充足的研究表明 SiO<sub>2</sub> NPs 作为食品抗结剂的优异能力,但其对于胃肠道可能造成的危害也不容忽视,在未来 SiO<sub>2</sub> NPs 的研究上应继续深入了解其潜在威胁。

#### 2.4 纳米二氧化钛

纳米二氧化钛(TiO<sub>2</sub> NPs)是一种用于改变食品和饮料视觉特性的纳米材料<sup>[64]</sup>,常添加于口香糖、糖果和含糖产品中。TiO<sub>2</sub> NPs 的尺寸接近光的波长,具有非常高的光折射率,导致其折射光能力较强,因此常被用作食品中的增白剂或增亮剂,以增强产品视觉吸引力,并被批准在中国、美国和欧盟(法国除外)应用<sup>[65]</sup>。研究表明,食品添加剂 TiO<sub>2</sub> NPs 会造成肠道屏障紊乱,会破坏胃肠道的正常功能如影响初级营养素(脂类、蛋白质或碳水化合物)酶的消化<sup>[66]</sup>。BING 等<sup>[67]</sup>研究了 4 种不同蛋白质与 TiO<sub>2</sub> NPs 结合形成 4 种不同蛋白冠(图 4),用于判断 TiO<sub>2</sub> NPs 与不同食品成分的相互作用以及预测 TiO<sub>2</sub> NPs 在人体胃肠内的行为。GARVAS 等<sup>[68]</sup>发现 TiO<sub>2</sub> 纳米管结合牛血清蛋白可以稳定 TiO<sub>2</sub> 纳米管的分散,清除光生成自由基,防止紫外线辐照纳米管的光毒性作用。BARANOWSKA-WÓJCIK 等<sup>[69]</sup>研究了 4 种 TiO<sub>2</sub> NPs 对人类消化道中 17 株乳酸菌株生长的影响。研究表明,在 150 和 300 mg/L 的浓度下应用 TiO<sub>2</sub> NPs,多数分析菌株的生长速率有所下降,在 TiO<sub>2</sub> NPs 的最高剂量(600 mg/L)下,细菌与实验中使用的不同 TiO<sub>2</sub> NPs 类型的反应各不相同。TiO<sub>2</sub> NPs 除了作为着色剂,还可作为抑菌剂,因此应加强 TiO<sub>2</sub> NPs 对于食品品质改善的探究,同时应继续加强 TiO<sub>2</sub> NPs 在蛋白冠方面的研究,使形成的蛋白冠可以探究 TiO<sub>2</sub> NPs 与食品结合及在人体内反应的

机理,为 TiO<sub>2</sub> NPs 蛋白冠方向增添更多参考资料。

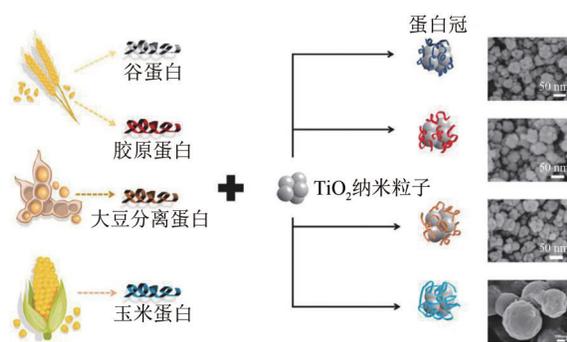


图 4 四种不同蛋白在 TiO<sub>2</sub> NPs 表面生成蛋白冠<sup>[67]</sup>

Figure 4 Four different proteins formed protein corona on the surface of TiO<sub>2</sub> NPs<sup>[67]</sup>

#### 2.5 其他无机纳米材料

硒纳米粒子(Se NPs)比有机和无机形式的硒吸收程度更高、毒性更低,由于其较高的氧化活性和氧化还原平衡性常被用作食品抗菌剂<sup>[70]</sup>。XU 等<sup>[71]</sup>通过对多糖乳液稳定的 Se NPs 进行碱中和处理,显著增强了抗氧化能力和生物活性,并可在低温下稳定 240 d。SHEIHA 等<sup>[72]</sup>发现在饮食中添加 Se NPs 能够降低热应激对生长中兔子的负面影响。热应激期间,在兔子饮食加入 25~50 mg/kg 的合成膳食纳米硒能提高其生长性能、肝脏和肾功能及抗氧化状态,同时调节炎症细胞因子反应,减轻热应激对生长中的兔子造成的有害影响。碳酸钙是人体补充钙的主要来源,纳米碳酸钙作为营养强化剂有效提高了食品中的钙含量,预防人体因缺钙产生的病症。RAY 等<sup>[73]</sup>发现蛋壳粉中含有大量的碳酸钙,对比添加了 3%、6% 和 9% 蛋壳粉的巧克力蛋糕,结果表明就蛋糕的钙含量、质地和感官特性而言,6% 的蛋壳粉补充(即将钙含量增加到 816.8 mg/100 g)是最佳选择。ERFANIAN 等<sup>[74]</sup>调查了纳米钙粒子作为牛奶中的营养强化剂补充钙后,通过体内研究,证实应用纳米钙粒子可以改善骨骼中的钙含量和磷含量。

无机纳米材料在食品行业用途广泛,由于无机纳米金属材料大多含有人体需要的微量元素且本身具有优异的抗菌功能,多用作防腐抗菌或营养强化类的食品添加剂。但由于无机纳米材料会影响生物体内部分酶的活性并可能在生物体内产生氧化和炎症反应等潜在威胁。因此,无机纳米材料在食品中的添加含量需要控制在合理范围。无机纳米材料虽然已长期应用于食品中,但对于无机纳米材料与食品成分的结合及在人体内生物环境的相互作用机制仍需继续探究,同时还应注重研究无机纳米材料的潜在毒性机制,通过改性和复合等方式

缓解并降低其对生物的负面影响,提高无机纳米材料在食品中的安全性与营养价值。

### 3 展望

不同的纳米材料被广泛应用于食品工业,为食品增添各种属性,改善食品的口感、风味、颜色、质地、保质期和营养价值。有机纳米材料因其天然、安全和无毒等特点多用作食品配料以改善食品结构、营养组成或作为某些成分的替代物。无机纳米材料则因其出色的抗菌和防腐能力、独特的元素构成多被用作微量元素的补充剂和延长食品保质期的食品添加剂,部分无机纳米材料还具有改善食品形貌和增加食品吸引力的能力。本文综述了近年来有机和无机纳米材料用作食品添加剂或配料的研究,总结了纳米级食品添加剂和配料的新功能和新技术,以期纳米材料用作食品添加剂或者配料提供参考资料。

食品中的纳米材料的应用仍有许多问题尚待解决。无机纳米材料虽不会被肠道吸收,但会在肠道内积聚从而影响肠道内微生物群的代谢,造成氧化应激与炎症反应;部分无机纳米材料还可能对胃肠道细胞产生毒性,影响蛋白质的消化和吸收。有机纳米材料对人体的负面影响鲜有报道,但其制备相对复杂且功能性较为单一,用其做食品配料还会大幅增加食品的成本。因此,还需要更多的研究来解决纳米材料作为食品添加剂和配料的不足。此外,有机纳米材料具有复杂的成分,应多注重其本身营养价值的开发利用,研究更多有机纳米材料的新功能用途,同时还应优化有机纳米材料的提取和制备工艺,降低生产成本。对于无机纳米材料则应更多注重其对人体健康的影响,对不同组合和种类的食品级无机纳米材料用作食品添加剂的应用进行更深入的研究,以便更全面地了解纳米材料与食品成分的相互作用;同时采取控制粒径、表面改性或复合其他物质形成纳米复合材料等方法来减弱和消除其对人体的负面影响。

### 参考文献

- [1] SHAHEEN I, KHALIL A, SHAHEEN R, et al. A review on nanomaterials: Types, synthesis, characterization techniques, properties and applications [J]. *Innovation in Science and Technology*, 2023, 2(1): 56-62.
- [2] PANDEY P, DAHIYA M. A brief review on inorganic nanoparticles [J]. *J Crit Rev*, 2016, 3(3): 18-26.
- [3] BARHOUM A, GARCÍA-BETANCOURT M L, JEEVANANDAM J, et al. Review on natural, incidental, bioinspired, and engineered nanomaterials: History, definitions, classifications, synthesis, properties, market, toxicities, risks, and regulations [J]. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 2022, 12(2): 177.
- [4] ÖSTERBERG M, ALEXANDER HENN K, FAROOQ M, et al. Biobased Nanomaterials—The role of interfacial interactions for advanced materials[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(5): 2200-2241.
- [5] SINGH D P, PACKIRISAMY G. Applications of nanotechnology to combat the problems associated with modern food[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(2): 479-487.
- [6] COX S, SANDALL A, SMITH L, et al. Food additive emulsifiers: A review of their role in foods, legislation and classifications, presence in food supply, dietary exposure, and safety assessment[J]. *Nutrition Reviews*, 2021, 79(6): 726-741.
- [7] JAGTIANI E. Advancements in nanotechnology for food science and industry[J]. *Food Frontiers*, 2022, 3(1): 56-82.
- [8] PRIYANKA P, KUMAR D, YADAV A, et al. Nanobiotechnology and its application in agriculture and food production [M]. *Nanotechnology in the Life Sciences*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 105-134.
- [9] GANASAN E, MOHD YUSOFF H, AZMI A A, et al. Food additives for the synthesis of metal nanoparticles: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(1): 525-538.
- [10] BABU P J, TINGIRIKARI J M R. A review on polymeric nanomaterials intervention in food industry[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(1): 137-164.
- [11] ZHOU H L, DAI T T, LIU J N, et al. Chitin nanocrystals reduce lipid digestion and  $\beta$ -carotene bioaccessibility: An *in-vitro* INFOGEST gastrointestinal study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106494.
- [12] SAHANI S, SHARMA Y C. Advancements in applications of nanotechnology in global food industry [J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128318.
- [13] PERUMAL A B, NAMBIAR R B, MOSES J A, et al. Nanocellulose: Recent trends and applications in the food industry[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107484.
- [14] MARCHETTI L, ANDRES S C, CERRUTI P, et al. Effect of bacterial nanocellulose addition on the rheological properties of gluten-free muffin batters [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105315.
- [15] SAALLAH S, MISSON M, SIDDIQUEE S, et al. Nanocellulose and nanocellulose-based composites for food applications. *Composite Materials: Applications in Engineering, Biomedicine and Food Science* [J]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 369-385.
- [16] ASGHARI M, KARIMI ZARCHI A A, ALI TAHERI R. Preparation and characterization nanocrystalline cellulose as a food additive to produce healthy biscuit cream [J]. *Starch - Stärke*, 2021, 73(3-4): 2000033.
- [17] 张雯, 王建军, 房茹茹, 等. 细菌纤维素酸乳制备工艺及稳定性[J]. *陕西科技大学学报*, 2020, 38(2): 46-52.
- [17] ZHANG W, WANG J J, FANG R R, et al. Preparation process and stability of Bacterial Cellulose yogurt [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2020, 38(2): 46-52.
- [18] CONTRERAS-RAMÍREZ J I, PATEL A R, GALLEGOS-

- INFANTE J A, et al. Organogel-based emulsified systems, food applications, microstructural and rheological features-A Review [J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, 12(2): 1601-1627.
- [19] HEGGSET E B, AAEN R, VESLUM T, et al. Cellulose nanofibrils as rheology modifier in mayonnaise - A pilot scale demonstration[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106084.
- [20] MARCHETTI L, MUZZIO B, CERRUTTI P, et al. Impact of bacterial nanocellulose on the rheological and textural characteristics of low-lipid meat emulsions [M]. *Nanotechnology Applications in Food*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 345-361.
- [21] QI W, WU J, SHU Y, et al. Microstructure and physiochemical properties of meat sausages based on nanocellulose-stabilized emulsions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 567-575.
- [22] NAGANO T, YANO H. Dietary cellulose nanofiber modulates obesity and gut microbiota in high-fat-fed mice [J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2020, 22: 100214.
- [23] DU L H, LOVEDAY S M, SINGH H, et al. Gastrointestinal digestion of Pickering emulsions stabilised by hydrophobically modified cellulose nanocrystals: Release of short-chain fatty acids[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126650.
- [24] TARGUMA S, NJOBEH P B, NDUNGU P G. Current applications of magnetic nanomaterials for extraction of mycotoxins, pesticides, and pharmaceuticals in food commodities[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2021, 26(14): 4284.
- [25] LIN Y J, QIN Z, PATON C M, et al. Influence of cellulose nanocrystals (CNC) on permeation through intestinal monolayer and mucus model *in vitro* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 263: 117984.
- [26] LIU L L, KONG F B. *In vitro* investigation of the influence of nano-cellulose on starch and milk digestion and mineral adsorption [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 1278-1285.
- [27] WANG Y, ZHANG H, ZENG Y, et al. Development and characterization of potato starch/lactucin/nano-TiO<sub>2</sub> food packaging for sustained prevention of mealworms [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100837.
- [28] ALI HASSAN N, DARWESH O M, SMUDA S S, et al. Recent trends in the preparation of nano-starch particles[J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5497.
- [29] GUIDA C, AGUIAR A C, CUNHA R L. Green techniques for starch modification to stabilize Pickering emulsions: A current review and future perspectives [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 38: 52-61.
- [30] LÓPEZ-PEDROUSO M, LORENZO J M, MOREIRA R, et al. Potential applications of Pickering emulsions and high internal-phase emulsions (HIPEs) stabilized by starch particles [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 46: 100866.
- [31] YANO H, FUKUI A, KAJIWARA K, et al. Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 79: 632-639.
- [32] CHIVERO P, GOHTANI S, YOSHII H, et al. Assessment of soy soluble polysaccharide, gum Arabic and OSA-Starch as emulsifiers for mayonnaise-like emulsions [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 69: 59-66.
- [33] BISWAS S, SENGUPTA S. Current use of nanoprotein and application in the development of food products for functional and nutritional benefits[J]. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2021: e1737.
- [34] HE J, ZHAO Y G, JIN X, et al. Material perspective on the structural design of artificial meat [J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(8): 2100017.
- [35] SHAN S Y, CHEN D, FEDERICI E, et al. The effects of whey protein fibrils on the linear and non-linear rheological properties of a gluten-free dough[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 909877.
- [36] SHEN Y, POSAVEC L, BOLISSETTY S, et al. Amyloid fibril systems reduce, stabilize and deliver bioavailable nanosized iron [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 642-647.
- [37] XIANG N, WU S, WEI Z, et al. Characterization of iron reducibility of soy protein amyloid fibrils and their applications in iron fortification[J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129420.
- [38] MOHAMMADIAN M, SALAMI M, MOMEN S, et al. Enhancing the aqueous solubility of curcumin at acidic condition through the complexation with whey protein nanofibrils [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 902-914.
- [39] HU B, SHEN Y, ADAMCIK J, et al. Polyphenol-binding amyloid fibrils self-assemble into reversible hydrogels with antibacterial activity[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3385-3396.
- [40] HU B, YU S J, SHI C, et al. Amyloid-polyphenol hybrid nanofilaments mitigate colitis and regulate gut microbial dysbiosis [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2760-2776.
- [41] HU B, LI M, HE X Q, et al. Flavonoid-amyloid fibril hybrid hydrogels for obesity control *via* the construction of gut microbiota [J]. *Biomaterials Science*, 2022, 10(13): 3597-3611.
- [42] WEI Z X, WU S H, XIA J J, et al. Enhanced antibacterial activity of hen egg-white lysozyme against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* due to protein fibrillation [J]. *Biomacromolecules*, 2021, 22(2): 890-897.
- [43] KUMMER N, WU T T, DE FRANCE K J, et al. Self-assembly pathways and antimicrobial properties of lysozyme in different aggregation states [J]. *Biomacromolecules*, 2021, 22(10): 4327-4336.
- [44] MOSLEMI M. Reviewing the recent advances in application of pectin for technical and health promotion purposes: From laboratory to market[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 254: 117324.
- [45] TAN H, NIE S. Deciphering diet-gut microbiota-host interplay: Investigations of pectin[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 171-181.
- [46] 郑文迪. 亚临界水法制备姜黄素纳米颗粒及其质量评价[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- ZHENG W D. Preparation of curcumin nanoparticles by subcritical water method and its quality evaluation [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [47] VOSS L, HSIAO I L, EBISCH M, et al. The presence of iron oxide nanoparticles in the food pigment E172[J]. *Food Chemistry*, 2020, 327: 127000.

- [48] ZANELLA D, BOSSI E, GORNATI R, et al. Iron oxide nanoparticles can cross plasma membranes[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11413.
- [49] EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). Scientific Opinion on the re-evaluation of iron oxides and hydroxides (E 172) as food additives [J]. *EFSA Journal*, 2015, 13(12): 4317.
- [50] DUEIK V, CHEN B K, DIOSADY L L. Iron-polyphenol interaction reduces iron bioavailability in fortified tea: Competing complexation to ensure iron bioavailability [J]. *Journal of Food Quality*, 2017, 2017: 1-7.
- [51] ELABD H, YOUSSUF H, MAHBOUB H H, et al. Growth, hemato-biochemical, immune-antioxidant response, and gene expression in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) received nano iron oxide-incorporated diets [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 128: 574-581.
- [52] EMAMIFAR A, MOHAMADIZADEH M. Influence of sonication and antimicrobial packaging-based nano-ZnO on the quality of fresh strawberry juice during cold storage [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(6): 3280-3290.
- [53] YOUN S M, CHOI S J. Food additive zinc oxide nanoparticles: Dissolution, interaction, fate, cytotoxicity, and oral toxicity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(11): 6074.
- [54] GUDKOV S V, BURMISTROV D E, SEROV D A, et al. A mini review of antibacterial properties of ZnO nanoparticles [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 641481.
- [55] VENKATASUBBU G D, BASKAR R, ANUSUYA T, et al. Toxicity mechanism of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles against food pathogens [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2016, 148: 600-606.
- [56] HAKIMIAN F, EMAMIFAR A, KARAMI M. Evaluation of microbial and physicochemical properties of mayonnaise containing zinc oxide nanoparticles [J]. *LWT*, 2022, 163: 113517.
- [57] HUSSAN F, KRISHNA D, PREETAM V C, et al. Dietary supplementation of nano zinc oxide on performance, carcass, serum and meat quality parameters of commercial broilers [J]. *Biological Trace Element Research*, 2022, 200(1): 348-353.
- [58] REDA F M, EL-SAADONY M T, EL-RAYES T K, et al. Use of biological nano zinc as a feed additive in quail nutrition: Biosynthesis, antimicrobial activity and its effect on growth, feed utilisation, blood metabolites and intestinal microbiota [J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2021, 20(1): 324-335.
- [59] ABDEL-WARETH A A A, AMER S A, MOBASHAR M, et al. Use of zinc oxide nanoparticles in the growing rabbit diets to mitigate hot environmental conditions for sustainable production and improved meat quality [J]. *BMC Veterinary Research*, 2022, 18(1): 1-10.
- [60] 杨丽梅, 何劲, 荀春, 等. 二氧化硅作为抗结剂在食盐中的应用研究 [J]. *中国井矿盐*, 2021, 52(2): 34-36.
- YANG L M, HE J, XUN C, et al. Application research of silica as anti-caking agent in salt [J]. *China Well and Rock Salt*, 2021, 52(2): 34-36.
- [61] 袁尔东, 刘靓赞, 黄敏, 等. 纳米二氧化硅抗结剂对护胃固体饮料稳定性及功效的影响 [J]. *现代食品科技*, 2021, 37(6): 167-174.
- YUAN E D, LIU L Y, HUANG M, et al. Effect of nano-silica on the stability and efficacy of a stomach-protecting solid drink [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2021, 37(6): 167-174.
- [62] 王杰, 张勇, 朱宁杰. 固体类食品中安全且优异的抗结剂—气相二氧化硅 [J]. *食品安全导刊*, 2022, 344(15): 125-129.
- WANG J, ZHANG Y, ZHU N J. Fumed silica, a safe and excellent anti-caking agent in solid food [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022, 344(15): 125-129.
- [63] OGAWA T, OKUMURA R, NAGANO K, et al. Oral intake of silica nanoparticles exacerbates intestinal inflammation [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2021, 534: 540-546.
- [64] MUSIAL J, KRAKOWIAK R, MLYNARCZYK D T, et al. Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products—What do we know about their safety? [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(6): 1110.
- [65] SETYAWATI M I, ZHAO Z T, NG K W. Transformation of nanomaterials and its implications in gut nanotoxicology [J]. *Small*, 2020, 16(36): 2001246.
- [66] BARANOWSKA-WÓJCIK E, SZWAJGIER D, WINIARSKA-MIECZAN A. A review of research on the impact of E171/TiO<sub>2</sub> NPs on the digestive tract [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2022, 72: 126988.
- [67] BING J, XIAO X, MCCLEMENTS D J, et al. Protein corona formation around inorganic nanoparticles: Food plant proteins-TiO<sub>2</sub> nanoparticle interactions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 115: 106594.
- [68] GARVAS M, TESTEN A, UMEK P, et al. Protein Corona prevents TiO<sub>2</sub> phototoxicity [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129577.
- [69] BARANOWSKA-WÓJCIK E, GUSTAW K, SZWAJGIER D, et al. Four types of TiO<sub>2</sub> reduced the growth of selected lactic acid bacteria strains [J]. *Foods*, 2021, 10(5): 939.
- [70] BHATTACHARJEE A, BASU A, BHATTACHARYA S. Selenium nanoparticles are less toxic than inorganic and organic selenium to mice *in vivo* [J]. *The Nucleus*, 2019, 62(3): 259-268.
- [71] XU X D, PAN Y X, LIU X Y, et al. Constructing selenium nanoparticles with enhanced storage stability and antioxidant activities via conformational transition of curdlan [J]. *Foods*, 2023, 12(3): 563.
- [72] SHEIHA A M, ABDELNOUR S A, ABD EL-HACK M E, et al. Effects of dietary biological or chemical-synthesized nano-selenium supplementation on growing rabbits exposed to thermal stress [J]. *Animals*, 2020, 10(3): 430.
- [73] RAY S, BARMAN A, ROY P K, et al. Chicken eggshell powder as dietary calcium source in chocolate cakes [J]. *The Pharma Innovation Journal*, 2017, 6: 1-4.
- [74] ERFANIAN A, RASTI B, MANAP Y. Comparing the calcium bioavailability from two types of nano-sized enriched milk using *in-vivo* assay [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 606-613.