文章编号：1001-8689(2020)08-0745-06

纳米银抗菌应用的研究进展

胡烈海[1] 朱新根[1] 余双[1] 江从元[2] 许恒毅[1,*]
(1 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室，南昌 330047；2 湖南安信恒毅生物科技有限公司，长沙 410000)

摘要：纳米银因其对致病菌具有广谱、高效和不易产生耐药性等抗菌特点而被广泛使用。本文对纳米银抗菌机理的研究进展及其在医疗、环境、纺织和食品等领域的抗菌应用进行了综述，并对存在的问题和发展趋势进行了阐述和展望。

关键词：纳米银；抗菌机理；应用；研究进展；展望
中图分类号：R9 **文献标志码**：A

Research progress in antibacterial application of nano-silver in antibacteria

Hu Lie-hai[1], Zhu Xin-gen[1], Yu Shuang[1], Jiang Cong-yuan[2] and Xu Heng-yi[1]
(1 State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047;
2 Hunan Anxin Hengyi Biotechnology Co. Ltd, Changsha 410000)

Abstract Nano-silver is widely used because of its antibacterial characteristics such as broad spectrum, high efficiency, and difficulty to develop drug resistance to pathogenic bacteria. This paper reviewed the research progress of antibacterial mechanism of nano-silver and its application in the fields of healthcare, environment, textile and food industry, and the existing problems and future applications of nano-silver were discussed and prospected.

Key words Nano-silver; Antibacterial mechanism; Application; Research progress; Prospect

在人类历史上，银被广泛使用了数千年，在古代银器常被用来盛装食物和保存葡萄酒，银丝用来包扎伤口，现代医学之父希波克拉底用银来治疗溃疡，在抗生素诞生之前银化合物一直是人们抵抗伤口感染的主要武器[1-2]。20世纪以来，抗生素的滥用使致病菌的耐药性日益严重，使用纳米银(nano-silver)抗菌被认为是替代抗生素实现对致病菌控制的有效方案[3]。纳米银是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度(粒径＜100nm)的金属银单质[4]，原子排列为介于固体和分子之间的“介态”，其比表面积极大[5]，通过不同的制备方法可以获得立方体、球形、棒状、锥形、丝状等不同形态的纳米银粒子[6]。纳米银具有较高的热稳定性、较强的表面活性和催化性能，是一种对致病菌具有持久抗菌活性的纳米材料，广泛应用于医疗、环境、纺织和食品等领域[7]。纳米银还可以掺入到其它材料中，形成性能良好的载纳米银抗菌复合材料[8]。本文对纳米银的抗菌机理和纳米银抗菌应用研究情况进行了综述，旨在为纳米银抗菌产品的开发和应用提供参考。

1 纳米银抗菌机理

纳米银作为一种新型的抗菌材料，因其广谱、高效和不易产生耐药性等特点被广泛应用，成为当今纳米材料研究的热点之一，但纳米银抗菌机理尚不明确。目前被研究者们普遍接受的抗菌机理主要

收稿日期：2019-07-12
基金项目：江西省科技厅青年科学家培养对象项目(No. 20142BCB23004)
作者简介：胡烈海，男，生于1999年，主要研究方向为纳米银抑菌剂研发与应用，E-mail: ncuspyhuliehai@163.com
*通讯作者，E-mail: kidyxu@163.com

有以下几个方面(图1)：

(1)破坏细胞壁、细胞膜：纳米银颗粒可以与细菌的细胞壁以及细胞膜结合。当带正电荷的纳米银颗粒遇到表面带负电荷的细菌时，会产生静电力，从而促进两者间的相互吸引和相互作用，使纳米银吸附在细胞膜上[9]。吸附在细胞膜上的纳米银颗粒会攻击细胞膜的磷脂双分子层，使细胞膜遭到严重破坏，同时改变细胞膜的通透性，导致细胞内容物泄漏，引起细菌死亡[10-12]。纳米银能与细胞壁肽聚糖中的-COOH、-NH-官能团发生反应，在细胞壁上形成小坑，破坏细胞壁的完整性，导致细胞壁正常功能丧失[13]。

(2)影响菌体内环境：在液体环境中，纳米银受质子(H^+)作用会释放出Ag^+，或受O_2作用被氧化成Ag_2O再释放出Ag^+[14]，发挥抗菌作用，反应机理如下：$4Ag+O_2+2H_2O \rightarrow 4Ag^++4OH^-$。纳米银及其释放的$Ag^+$进入菌体后会与蛋白质、多肽以及多糖的-COOH、-NH-发生反应，改变菌体内环境的pH值，破坏细菌正常的生存体系，起到杀死细菌的效果[15]。此外，有报道称Ag^+可与菌体内的营养元素如磷酸盐、甘露醇、谷氨酸盐等络合，致使菌体内的营养元素丢失，从而发挥抗菌作用[16]。

(3)损伤细菌DNA：DNA分子只有在松弛解旋状态下才能有效地进行复制，而纳米银和Ag^+进入菌体后会与含大量供电子原子的细胞核、拟核和线粒体DNA分子相互作用，使其发生明显的皱缩，抑制DNA的复制从而阻止细菌繁殖[17]。根据相关文献报道，纳米银对DNA的损伤一方面可能是由于Ag^+与DNA结构中含磷、含硫化合物的相互作用对细胞造成损伤[18]；另一方面可能是纳米银与DNA碱基中的磷络合形成交叉连接，置换嘧啶或嘌呤中相邻氮原子之间的氢键，破坏磷酸二酯键，形成嘧啶二聚体，使双螺旋结构消失，造成DNA分子双链断裂[19]。

(4)产生活性氧自由基：吸附在菌体表面微量的Ag^+能激活水或空气中的氧，产生羟自由基及活性氧离子，进一步氧化菌体外膜从而抑制或杀死细菌，这一点可以从纳米银对好氧型细菌抗菌活性大于对厌氧型细菌抗菌活性得到验证[3,20]；纳米银与其释放的Ag^+还可使呼吸链脱氢酶失活，诱导O_2获得电子生成O^{2-}，诱导水产生-OH及其他活性氧，过量的活性氧自由基会阻断呼吸链电子传递，从而抑制细胞的呼吸和生长，造成ATP产量下降，破坏其生命活动导致细菌最终死亡[10,21]。

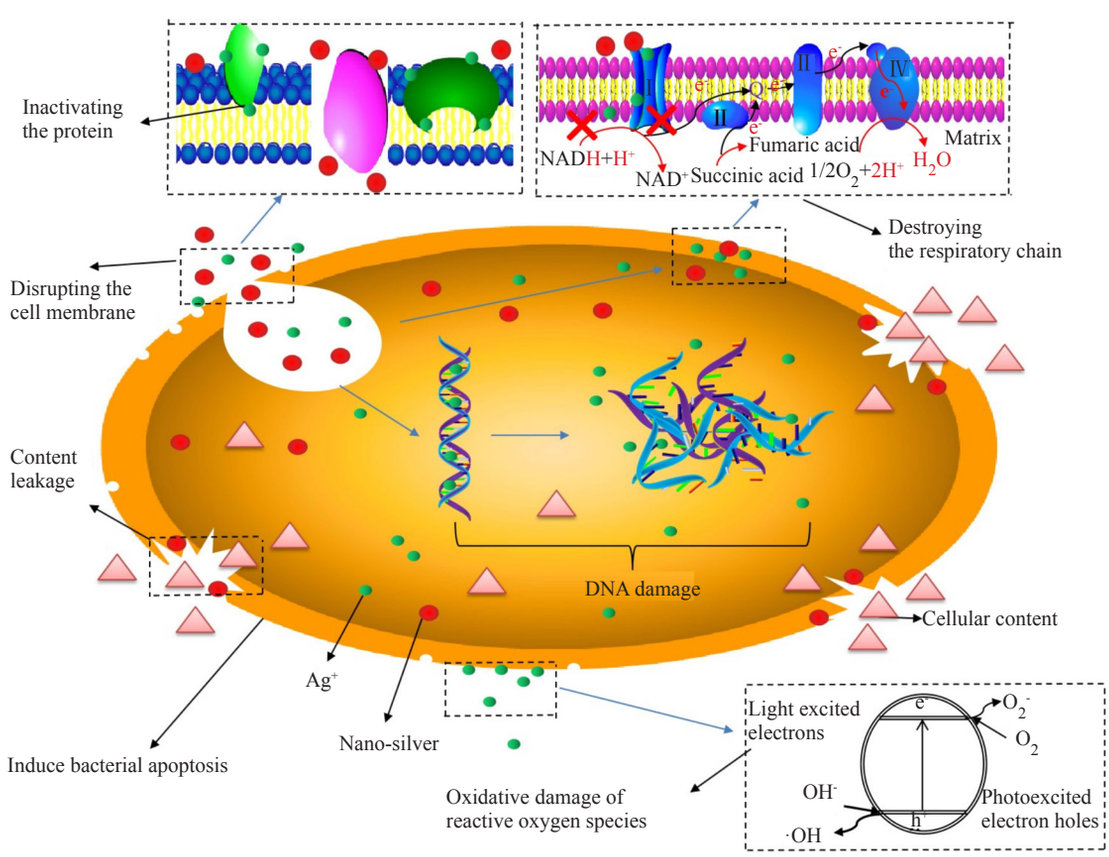


图1　纳米银的抗菌机理

Fig. 1　The antibacterial mechanism of nano-silver

(5)诱导细菌凋亡：纳米银可以通过干扰细胞色素C(cytochrome C, CytC)[22]、增加细胞周期蛋白P53的表达[23]、改变细胞周期[24]等方式诱导细胞凋亡。于晓旭等[25]根据细菌发生凋亡时，膜上的磷脂酰丝氨酸会发生外翻暴露这一原理，采用Annexin V-PI双染色检测纳米银是否能引起细菌凋亡，结果表明纳米银可以剂量依赖地诱导细菌凋亡。

2 纳米银抗菌应用的研究进展

2.1 医疗卫生领域

将纳米银与各种口腔材料以物理掺杂或化学合成等方式结合，利用纳米银的抗菌性降低细菌的附着率，抑制细菌的生长，是一种预防龋病、治疗假体感染和进行根管消毒的好方法[26]。龋病俗称蛀牙，是一种由细菌感染引发的口腔性疾病。Beatriz等[27]探究了含纳米银防龋剂的抗菌活性，与其他防龋剂相比，纳米银防龋剂能以较低的浓度抑制100%的微生物生长，同时纳米银防龋剂的抗菌性能可以促进患龋病的乳牙釉质再矿化。此外，Nozari等[28]测定了氟化钠、纳米羟基磷灰石血清以及纳米氟化银对前牙牙釉质的再矿化能力，结果显示相比于氟化钠和纳米羟基磷灰石血清，纳米氟化银对牙釉质有更好的再矿化效果。聚甲基丙烯酸甲酯(poly methyl methacrylate, PMMA)是制作假牙的材料，口腔中植入假牙后会阻碍舌头和唾液的清洁作用，促进生物膜的形成，有利于细菌尤其是白念珠菌的生长繁殖。Kurt等[29]将纳米银分别以0、0.25%、0.5%和1%的体积比添加到PMMA中，根据菌落形成单位评估它们对白念珠菌的抗菌活性，结果发现随着纳米银含量的增加，对白念珠菌的抗菌作用逐渐增强。Samiei等[30]以1%的体积比添加纳米银，对根管填充物三氧化矿物凝聚体(mineral trioxide aggregate, MTA)进行了改性，评价其对口腔细菌和真菌的抑制作用，结果显示含纳米银的MTA对粪肠球菌、白念珠菌和铜绿假单胞菌都有较好的抗菌效果。然而，目前国内市场上的纳米银牙科材料主要是纳米银牙膏、纳米银硅胶牙刷、纳米银儿童磨牙棒等，针对纳米银对口腔疾病的治疗主要停留在临床试验阶段，还有待进一步研究与开发。

细菌感染是伤口愈合的主要障碍之一，保持伤口不受细菌感染对皮肤创伤的快速修复至关重要。纳米银由于其极高的银溶出率和抗菌活性，可以降低炎症反应，减少创面感染，加速肉芽组织的形成，促进伤口愈合。Oryan等[31]探讨了壳聚糖包覆的纳米银颗粒(Ch/AgNPs)外敷对大鼠烧伤创面愈合的影响，结果发现伤口处白细胞介素-1β水平和中性粒细胞数显著降低，转化生长因子-β1和碱性成纤维细胞生长因子水平增加，该敷料促进了大鼠创面愈合、再上皮化和胶原沉积。Verma等[32]研制了丝胶和壳聚糖包覆纳米银粒子的水凝胶，并探讨了其对伤口治疗的效果，发现该水凝胶具有较高的杀菌活性和促伤口愈合特性。Maneesh等[33]采用冻融法制备了负载纳米银颗粒的聚乙烯醇纳米复合储油型水凝胶敷料，发现该纳米银复合敷料对Wistar大鼠的创面收缩、炎症治疗、新生血管生成和肉芽组织形成均有促进作用。近几年，纳米银伤口治疗在国内外市场上发展迅速，国内普慧旭晟药业科技有限公司生产的愈邦抗菌医用敷料能有效地减少烧烫伤创面和供皮区创面的感染；美国FKC公司研发的爱可欣银愈生物凝胶敷料适用于各种体表创面的治疗，如烧烫伤、痔疮、溃疡、手术及外伤创口的皮肤感染等。

纳米银还可用于治疗妇科疾病。纳米银抗菌卫生巾能减少细菌的滋生，而且无刺激性，能给处于非常时期的女性带来更安全健康的生活体验[34]。纳米银抗菌水凝胶可以有效地治疗细菌性阴道炎，在阴道和宫颈上形成一层保护膜，杀死阴道内的病原微生物[35]。陶萍等[36]分析了雌三乳膏联合纳米银抗菌水凝胶治疗老年阴道炎的临床效果，结果显示该联合水凝胶阴道给药安全，治疗效果较好，降低了阴道炎的复发率，减少了不良反应，值得在妇科临床推广。市场上推出的由仁和集团研发的纳米银依兰抗菌凝胶和纳米银妇用抗菌洗液可对女性的私处进行清洁、滋润呵护，促进私部健康；深圳源兴医药公司研发的阿希米纳米银妇用抗菌凝胶可用于治疗细菌性阴道炎、念珠菌性阴道炎、霉菌性阴道炎以及轻中度宫颈炎。

纳米银除了在牙科材料、伤口修复和妇科疾病治疗中有广泛的应用之外，还被应用于导管、支架、硅橡胶等医疗器械。Thomas等[37]测试了涂有纳米银颗粒的新型导管的抗菌活性，发现该导管几乎能完全抑制大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌和白念珠菌的生长。管婕等[38]研发了一种含5%纳米银颗粒的复合支架，采用显微电子计算机断层技术观察支架植入区域骨组织生长情况，并用平板涂布法检测该复合支架对金黄色葡萄球菌的抗菌活性，发现与传统的支架相比，该复合支架具有良好的生物相容性，且周围骨组织培养的金黄色葡萄球菌菌落

数大大减少，有利于骨缺损的愈合，可作为一种良好的骨缺损植入物和抗菌材料。杨玲玲等[39]采用共混法制备了含0.2%~1.0%纳米银抗菌剂/硅橡胶复合材料，并通过抑菌环法对该材料的抗菌性进行了检测，结果显示该复合材料对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌均有较好的抑菌效果。除此之外，纳米银还可用于医疗器械的消毒，以降低医院的感染率[40]。

2.2　环境领域

纳米银在改善水和空气污染等方面也发挥着重要作用。在日常生活中，水被致病菌污染后极易传播疾病，危害人体健康。朱子沛等[41]制备了负载纳米银磺化聚醚砜超滤膜用于水处理，并通过细胞吸附法进行了抗菌测试，结果表明与未改善的聚醚砜膜相比，纳米银的负载大大提高了超滤膜的抗菌性能，对金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌和假单胞菌的抑菌率由原来的19.7%、29.3%和14.0%分别增加到87.7%、96.7%和98.3%，且抗菌效果至少可以持续60d。室内空气中含有大量的致病微生物，特别是在医院病房、门诊等处，容易受到带菌者和病人污染。Feng等[42]报道了一种多功能空气净化器，该净化器采用原子沉积技术将纳米ZnO沉积到聚四氟乙烯纤维上，通过化学镀银的方式将纳米银沉积到ZnO纳米棒的表面，报道称该空气净化器的抗菌率可达100%，且甲醛的降解率达到了60%，该技术成功为室内空气净化器的研制提供了一条新的途径。在国内，昆山方氏集团研发并生产的多功能纳米银滤芯能扑杀水中600余种有害菌及病毒，并高效剔除水中余氯、亚硝酸胺等多种化学污染物，实现深层“净化”、“活化”功能；而北欧的Nathome品牌纳米银空气净化器不仅能杀灭细菌，还能抑制新的细菌丛产生，防止二次污染。

2.3　纺织业

纳米银材料由于其独特的抗菌性能，可生产具有自洁抗菌活性的纺织品。Hossam等[43]采用无溶剂吸附技术将纳米银直接沉积到棉花中，生产抗菌织物，通过对该织物的抑菌实验发现，与传统的织物相比，该纳米银织物有较好的抗菌效果。Balakumaran等[44]评价了一种表面包覆纳米银颗粒的棉织品，经平行划线法测试其抗菌性能发现该棉织品对所测病原菌均具有广谱抗菌活性，更重要的是，在经过15次洗涤后该织物仍具有优良的抗菌持久性和显著的抗菌活性。Ballottin等[45]采用生物方法合成了一种含有纳米银颗粒的棉纤维，该棉纤维能有效地抑制微生物的生长，且经过重复的清洗之后，仍能保持较强的抗菌活性。

2.4　食品包装及保鲜

纳米银的抗菌性能还可以应用在食品包装及保鲜领域。Li等[46]在37℃和70%相对湿度下，将聚乙烯和高度分散的Ag/TiO_2粉末混合，制备抗菌纳米银包装膜(ANP)，通过扫描电子显微镜和平板计数法对ANP的抗黄曲霉能力进行评价，用质构分析仪和快速粘度分析仪评价ANP包装水稻的贮藏效果，结果表明与传统的PE包装相比，ANP具有更好的防霉效果，且对其理化性质有较好的改善作用，是一种良好的大米贮藏包装材料。Soumya等[47]以魔芋葡甘聚糖-壳聚糖为原料，加入木薯淀粉和纳米银颗粒，制备了魔芋葡甘聚糖-壳聚糖包装膜，与传统的食品包装膜相比，纳米银的加入提高了该膜的热稳定性、抗拉强度及抗菌活性。此外，也可以将纳米银掺入保鲜膜中，提高果蔬储藏保鲜质量，减少因病害和霉变所造成的损失[48]。近些年国内外市场针对纳米银食品包装保鲜方面的产品开发已取得很大的进展，例如韩国小白熊、新贝、佰美等品牌的母乳保鲜袋利用纳米银的抑菌性帮助母乳持续保鲜，锁住母乳健康；国内西派珂品牌的纳米银抗菌塑料保鲜盒以及德国玻玻乐品牌的纳米银抗菌保鲜罐能有效杀灭细菌，抑制细菌繁殖，延缓食品腐败，使食品保鲜更持久。

2.5　其它领域

纳米银还可以应用于合成革、抗菌涂料、洗涤剂及抗菌玻璃等，王瑶等[49]将纳米银加到合成革上制备抗菌合成革，采用抑菌圈法和抑菌率法对其抗菌性能进行评价，结果表明该合成革对真菌和细菌都有较好的抗菌效果，而且经过多次模拟汗洗之后，仍然保持较强的抗菌能力。Gao等[50]制备了一种TiO_2纳米银涂料，发现当纳米银浓度达到93μmol/L时，该涂层对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌的抑菌率分别达到95.6%和94.8%。李元敬等[51]采用微乳液法制备了一种含纳米银的新型抗菌洗涤剂，测定了其对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌的抗菌效果，并用织物澡巾测定其抗菌持久性，发现该洗涤剂相比传统洗涤剂抗菌活性更强，抗菌时间更持久。杜文修等[52]以石英玻璃基片为载体以氧化石墨烯和银溶胶为模板制备了镀银玻璃，并测试了其对大肠埃希菌的抑菌性能，结果显示该镀银玻璃具有较好的抗菌性能。中国台湾聚纺公司生产的含纳米银抗菌涂料抗

菌能力强，抗菌范围广，抗菌效果持久且安全性好，不会对环境造成污染；韩国的洗汰普纳米银清洁剂杀菌能力超强，可去除农药残留，易清洁不伤手，适用于清洗各类水果蔬菜、餐具、幼儿用品等。

3 展望

纳米技术作为21世纪的前沿技术，其应用已逐渐延伸到各个领域，而纳米银作为应用最为广泛的纳米材料之一，其作为抗菌材料的研究已成为当今热点。然而，纳米银作为抗菌材料在应用中还存在较多问题，如纳米银的制备工艺较复杂且成本较高，其应用范围和形式也较为局限。随着纳米银的大规模商业化和工业化生产，人们通过呼吸、皮肤接触以及其他途径暴露纳米银的概率也大大增加，其潜在的生物毒性也值得进一步关注[53]。未来的研究应进一步明确纳米银的毒性及机制，探究纳米银抗菌机理及与环境的交互作用，以期能为纳米银的规范使用提供参考。另外，简化纳米银制备工艺、降低成本和提高安全性仍是亟需解决的问题。相信随着纳米技术的不断发展，纳米银在抗菌领域必将拥有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Mathur P, Jha S, Ramteke S, *et al*. Pharmaceutical aspects of silver nanoparticles[J]. *Artif Cell Nanomed B*, 2017: 1-12.

[2] Kora A J, Rastogi L. Enhancement of antibacterial activity of capped silver nanoparticles in combination with antibiotics, on model Gram-negative and Gram-positive bacteria[J]. *Bioinorg Chem Appl*, 2013(8): 871097.

[3] 曲锋, 许恒毅, 熊勇华, 等. 纳米银杀菌机理的研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 420-424.

[4] 张冰洁, 刘倩, 周群芳, 等. 纳米银的神经毒理学效应[J]. 化学进展, 2018, 30(9): 1392-1402.

[5] 商配, 杨靖. 纳米银的制备及其抗菌性的研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2017, (1): 24-28.

[6] Khodashenas B, Ghorbani H R. Synthesis of silver nanoparticles with different shapes[J]. *Arab J Chem*, 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.014.

[7] Sadeghnejad A, Aroujalian A, Raisi A, *et al*. Antibacterial nano silver coating on the surface of polyethylene films using corona discharge[J]. *Surf Coat Tech*, 2014, 245(4): 1-8.

[8] Fernando S, Gunasekara T, Holton J. Antimicrobial nanoparticles: Applications and mechanisms of action[J]. *Sri Lankan J Infect Dis*, 2018, 8(1): 2-11.

[9] Franci G, Falanga A, Galdiero S, *et al*. Silver nanoparticles as potential antibacterial agents[J]. *Molecules*, 2015, 20(5): 8856-8874.

[10] Khalandi B, Asadi N, Milani M, *et al*. A review on potential role of silver nanoparticles and possible mechanisms of their actions on bacteria[J]. *Drug Research* (Stuttg), 2017, 11(2): 70-76.

[11] Reidy B, Haase A, Luch A, *et al*. Mechanisms of silver nanoparticle release, transformation and toxicity: A critical review of current knowledge and recommendations for future studies and applications[J]. *Materials*, 2013, 6(6): 2295-2350.

[12] Yang L, Aguilar Z P, Qu F, *et al*. Enhanced antimicrobial activity of silver nanoparticles-*Lonicera* Japonica Thunb combo[J]. *IET Nanobiotechnol*, 2016, 10(1): 28-32.

[13] 曹雪玲, 陆书来, 张东杰, 等. 纳米银作为抗菌剂的抗菌性能研究[J]. 吉林化工学院学报, 2017, 34(11): 30-34.

[14] Prabhu S, Poulose E K. Silver nanoparticles: mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects[J]. *Int Nan Lett*, 2012, 2(1): 32.

[15] 秦社宣, 童细焱, 孙林煌, 等. 新型纳米银体外广谱抗菌作用及机制[J]. 中国微生态学杂志, 2018, 30(9): 1024-1028.

[16] Matsumura Y, Yoshikata K, Kunisaki S I, *et al*. Mode of bactericidal action of silver zeolite and its comparison with that of silver nitrate[J]. *Appl Environ Microb*, 2003, 69(7): 4278-4281.

[17] Qing Y, Cheng L, Li R, *et al*. Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedicimplants by advanced modification technologies[J]. *Int J Nanomed*, 2018, 13: 3311-3327.

[18] Silver S N R. Silver nanoparticles-the real "silver bullet" in clinical medicine? [J]. *Medchemcomm*, 2010, 1(2): 125-131.

[19] Sharma V K, Yngard R A, Lin Y. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities[J]. *Adv Colloid Interface*, 2009, 145(1-2): 83-96.

[20] Xu H, Qu F, Xu H, *et al*. Role of reactive oxygen species in the antibacterial mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli* O157: H7[J]. *Biometals*, 2012, 25(1): 45-53.

[21] Quinteros M A, Cano A V, Dalmasso P R, *et al*. Oxidative stress generation of silver nanoparticles in three bacterial genera and its relationship with the antimicrobial activity[J]. *Toxicol In Vitro*, 2016, 36: 216-223.

[22] Hsin Y H, Chen C F, Huang S, *et al*. The apoptotic effect of nanosilver is mediated by a ROS-and JNK-dependent mechanism involving the mitochondrial pathway in NIH3T3 cells[J]. *Toxicol Lett*, 2008, 179(3): 130-139.

[23] Ahamed M, Karns M, Goodson M, *et al*. DNA damage response to different surface chemistry of silver nanoparticles in mammalian cells[J]. *Toxicol Appl Pharm*, 2008, 233(4): 404-410.

[24] 周国凤, 汤京龙, 奚廷斐, 等. 纳米银诱导细胞凋亡的研究与进展[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(42):

8314-8318.

[25] 于晓旭, 鲍会静, 徐晨, 等. 纳米银抗菌作用机制: 剂量依赖性促进细菌凋亡[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(38): 6173-6178.

[26] Bapat R A, Chaubal T V, Joshi C P, *et al*. An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry[J]. *Mat Sci Eng C-Mater*, 2018, 91: 881-898.

[27] Scarpelli B B, Punhagui M F, Hoeppner M G, *et al*. *In vitro* evaluation of the remineralizing potential and antimicrobial activity of a cariostatic agent with silver nanoparticles[J]. *Brazilian Dental Journal*, 2017, 28(6): 738-743.

[28] Nozari A, Ajami S, Rafiei A, *et al*. Impact of nano hydroxyapatite, nano silver fluoride and sodium fluoride varnish on primary teeth enamel remineralization: An *in vitro* study[J]. *J Clin Diagn Res*, 2017, 11(9): ZC97-ZC100.

[29] Kurt A, Erkosegenc G, Uzun M, *et al*. The antifungal activity and cytotoxicity of silver containing denture base material[J]. *Niger J Clin Pract*, 2017, 20(3): 290-295.

[30] Mohammad S, Mohammad A, Mehrdad L, *et al*. Antimicrobial efficacy of mineral trioxide aggregate with and without silver nanoparticles[J]. *Iran Endodont J*, 2013, 8(4): 166-170.

[31] Oryan A, Alemzadeh E, Tashkhourian J, *et al*. Topical delivery of chitosan-capped silver nanoparticles speeds up healing in burn wounds: A preclinical study[J]. *Carbohyd Polym*, 2018, 200: 82-92.

[32] Verma J, Kanoujia J, Parashar P, *et al*. Wound healing applications of sericin/chitosan-capped silver nanoparticles incorporated hydrogel[J]. *Drug Deliv Transl Res*, 2017, 7(1): 77-88.

[33] Jaiswal M, Koul V, Dinda A K. *In vitro* and *in vivo* investigational studies of a nanocomposite-hydrogel-based dressing with a silver-coated chitosan wafer for full-thickness skin wounds[J]. *J Appl Polym Sci*, 2016, 133(21): 43472.

[34] 张濛, 孟光, 张广伟, 等. 纳米银抗菌卫生巾抗菌效果及安全性研究[J]. 现代预防医学, 2015, 42(3): 560-562.

[35] 伍华珍. 纳米银抗菌水凝胶对细菌性阴道炎患者临床症状的改善作用[J]. 中国农村卫生, 2018, (18): 28.

[36] 陶萍, 曲志翠. 雌三醇乳膏联合纳米银抗菌水凝胶治疗老年性阴道炎的临床治疗[J]. 中西医结合心血管病杂志, 2018, 6(32): 73.

[37] Thomas R, Mathew S, Nayana A R, *et al*. "Microbially and phytofabricated AgNPs with different mode of bactericidal action were identified to have comparable potential for surface fabrication of central venous catheters to combat *Staphylococcus aureus*, biofilm"[J]. *J Photoch Photobio B*, 2017, 171: 96-103.

[38] 管捷, 程坚, 谢幼专, 等. 含纳米银颗粒的β-磷酸三钙复合支架的抗菌性和促成骨性的研究[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2018, 15(2): 9-13.

[39] 杨玲玲, 高长青, 丁雪佳, 等. 纳米银抗菌剂对加成型硅橡胶性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2017, (6): 5-8.

[40] Chaloupka K, Malam Y, Seifalian A M. Nanosilver as a new generation of nanoproduct in biomedical applications[J]. *Trends Biotechnol*, 2010, 28(11): 580-588.

[41] 朱子沛, 钟炼军, 何其, 等. 负载纳米银磺化聚醚砜超滤膜的制备及其抗菌性[J]. 精细化工, 2017, 34(6): 637-644.

[42] Feng S, Li D, Low Z, *et al*. ALD-seeded hydrothermally-grown Ag/ZnO nanorod PTFE membrane as efficient indoor air filter[J]. *J Membrane Sci*, 2017, 531: 86-93.

[43] Emam H E, Saleh N H, Nagy K S, *et al*. Instantly AgNPs deposition through facile solventless technique for poly-functional cotton fabrics[J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 84: 308-318.

[44] M.D. Balakumaran, Ramachandran R, Jagadeeswari S, *et al*. *In vitro* biological properties and characterization of nanosilver coated cotton fabrics-An application for antimicrobial textile finishing[J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2016, 107: 48-55.

[45] Ballottin D, Fulaz S, Cabrini F, *et al*. Antimicrobial textiles: biogenic silver nanoparticles against candida and xanthomonas[J]. *Mat Sci Eng C-Mater*, 2017, 75: 582-589.

[46] Li L, Zhao C, Zhang Y, *et al*. Effect of stable antimicrobial nano-silver packaging on inhibiting mildew and in storage of rice[J]. *Food Chem*, 2017, 215: 477-482.

[47] Nair S B, Jyothi A N, Moothandasserry S. S. Chitosan-konjac glucomannan-cassava starch-nanosilver composite films with moisture resistant and antimicrobial properties for food-packaging applications[J]. *Starch/Stärke*, 2017, 69(1-2): 1-12.

[48] 孙传范. 高新技术在食品加工中的应用[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(8): 203-207.

[49] 王瑶, 陈昱, 张金伟, 等. 纳米银复合抗菌剂在合成革上的应用研究[J]. 皮革科学与工程, 2017, 27(2): 11-15.

[50] Gao J, Zhao C, Zhou J, *et al*. Plasma sprayed rutile titania-nanosilver antibacterial coatings[J]. *Appl Surf Sci*, 2015, 355: 593-601.

[51] 李元敬, 张春艳, 卢万峰, 等. 新型纳米银/多酸复合抗菌洗涤剂的合成及抗菌性能研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 155-159.

[52] 杜文修, 杨娟, 程晓农, 等. 纳米银的制备及其在抗菌玻璃中的应用[J]. 成都工业学院学报, 2016, 19(4): 83-86.

[53] 孙倩, 李明春, 马守栋. 纳米银抗菌活性及生物安全性研究进展[J]. 中国药事, 2013, 27(8): 842-846.