

林 英,司春灿,黄莉萍,等. 纳米技术在作物病害防治中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):11-15.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.003

纳米技术在作物病害防治中的应用研究进展

林 英,司春灿,黄莉萍,高 洁
(景德镇学院生物与化学工程系,江西景德镇 333000)

摘要:纳米技术用于作物的病害防治对农业的可持续发展具有重要意义,综述纳米技术在作物病害防治中的具体应用,采用纳米农药用于作物病害的防治、利用纳米传感器对作物病原体进行检测、利用纳米肥料提高作物的抗病能力等,旨在为纳米技术在作物病害防治中提供参考。

关键词:纳米技术;病害防治;可持续发展;作物;应用;抗病能力;研究进展

中图分类号:S435 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)11-0011-05

纳米技术是指采用原子或分子制造物质的科学技术,主要研究结构尺寸在纳米尺度范围(0.1~100 nm)内材料的性质和应用。由于纳米材料具有许多传统材料不具备的奇异特性,如小尺寸效应、量子效应、高反应活性、大的比表面积等,自 1959 年纳米技术被提出后,很快得到了迅速发展^[1-2]。目前已经被广泛用于医药、化工、能源、电子、食品、环保、农业等各个领域,给人们的生活带来了极其深远的影响。

农作物病害是主要的农业灾害之一,病害的暴发对国民经济、特别是农业生产常造成重大损失。据报道,就全球范围而言,每年由病原真菌或病原细菌引发的植物病害导致作物减产 14.1%,直接经济损失达 220 亿美元/年^[3]。因此,对作物病害的防治一直是农业研究的重点和热点。

本研究就纳米技术在作物病害防治中的应用,包括采用纳米农药用于作物病害的防治、利用纳米传感器对作物病原体进行检测、通过施用纳米肥料提高作物的抗病能力等方面的研究进展进行综述,旨在为纳米技术在作物病害防治中的应用提供参考。

1 纳米农药用于作物病害的防治

纳米农药指的是将农药原药或者载体粒子纳米化后,形成具有纳米效应、降低用量、提高药效、环境友好等特性的新

型农药制剂^[4-5]。目前常见的纳米农药有以下几种类型。

1.1 纳米包埋型农药

纳米包埋型农药是指将农药与纳米材料通过溶解、包裹作用于粒子内部,或者通过吸附、附着作用于粒子表面^[6]。目前常见的用于包埋农药的纳米材料有聚合物基纳米材料、固体脂质纳米材料、无机多孔纳米材料、纳米黏土材料等。这些纳米材料经过加工组装后又形成了不同形状的纳米包埋型农药,如纳米胶囊、纳米球、胶束、纳米凝胶、脂质体、无机多孔纳米粒等^[5-6]。与传统农药相比,纳米包埋型农药能起到可控缓释,延长药物的持续性,增强药剂有效成分的溶解性,抑制药物因受光、紫外线、雨水、温度、微生物等因素的影响而过早降解的作用^[6-7]。如 Kaushik 等将相对分子质量分别为 600、1 000、1 500、2 000 的聚乙二醇和 5-羟基间苯二甲酸二甲酯共聚制得的 4 种嵌段共聚物纳米胶束用于包埋福美双,发现没有采用纳米包埋技术的福美双在水中释放后第 7 天就检测到了最高浓度,而采用纳米包埋技术的福美双在水中释放后分别于第 15、21、28、35 天时才检测到最高浓度^[8]。除了具备上述纳米包埋型农药共有的优点外,不同的纳米材料由于自身特殊的性质,在防治作物病害的应用方面也具有各自的优点。目前常见的合成纳米包埋型农药的材料性质、合成类型及在防治作物病害上的优点如表 1 所示。

表 1 常见的合成纳米包埋型农药的材料性质、合成类型及在防治作物病害上的优点

材料性质	合成类型	在防治作物病害上的优点
聚合物基纳米材料	纳米胶囊、纳米球、胶束、纳米凝胶	基于天然聚合物如多糖、海藻酸钠、几丁质等加工成的纳米农药具有无毒、易降解、生物相容性好等优点,得到了广泛的关注和应用 ^[9] ;此外,纳米水凝胶和土壤结合后还能增加土壤的持水能力、渗透性、土壤通气量,有利于植物的生长 ^[10]
固体脂质纳米材料	脂质体	容易通过植物的角质层 ^[1]
无机多孔纳米材料	无机多孔纳米粒	无毒、生物相容性好、机械性能稳定、孔径可调节 ^[11]

1.2 纳米材料用作农药

最近的研究结果表明,镁、锌、铜、二氧化钛、氧化锌、氧化镁、氧化铜、石墨烯等金属或无机材料被制成纳米级微粒之后本身就具有抑制病原真菌或病原细菌的功效,它们不仅在室内离体试验条件下能抑制病原菌的生长,而且在活体试验条件下也对作物病害表现出了很好的抑制效果^[12-14],但目前还不清楚其抑菌机理。常见的金属或无机纳米材料对病原菌的抑制种类及抑制机理如表 2 所示。

收稿日期:2016-11-22

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(编号:GJJ151277、GJJ151279)。

作者简介:林 英(1985—),女,江西萍乡人,博士,讲师,主要从事农业微生物资源的研究与开发及作物病害的防治等。E-mail:jslinying@163.com。

表 2 常见的金属或无机纳米材料对病原菌的抑制种类及抑制机理

纳米材料	抑制病原菌的种类	可能的抑菌机理
纳米银	立枯丝核菌(<i>Rhizoctonia solani</i>) ^[17] 、炭疽菌(<i>Colletotrichum spp.</i>) ^[18] 、根腐病菌(<i>Bipolaris sorokiniana</i>)、稻瘟病菌(<i>Magnaporthe grisea</i>) ^[19] 、叶枯病菌(<i>Xanthomonas perforans</i>) ^[20]	释放出银离子,银离子与细胞膜结合后破坏细胞膜的完整性,随后渗透到细胞质中的银离子导致关键酶失活和细胞死亡 ^[20]
纳米二氧化钛	甜瓜细菌性叶斑病菌(<i>Pseudomonas syringae</i> P.v. <i>lachrymans</i>)、霜霉病菌(<i>Pseudoperonospora cubensis</i>) ^[21] 、叶枯病菌 ^[13]	经光催化反应生成的活性羟基和超氧离子能穿透细胞壁,使细胞膜中的脂质发生过氧化反应,破坏细胞结构,导致细胞死亡 ^[22]
纳米氧化锌	灰葡萄孢菌(<i>Botrytis cinerea</i>)、青霉菌(<i>Penicillium expansum</i>) ^[23] 、交链格孢菌(<i>Alternaria alternata</i>)、匍枝根霉(<i>Rhizopus stolonife</i>)、尖孢镰刀菌(<i>Fusarium oxysporum</i>) ^[24]	沉积在细胞表面的氧化锌能产生活性氧(主要是单态氧、羟基自由基),或纳米颗粒本身的机械损伤造成细胞的结构和功能发生混乱 ^[25]
纳米石墨烯	禾谷镰刀菌、尖孢镰刀菌、丁香假单胞菌、小麦黑颖病黄单胞菌(<i>X. campestris</i> p.v. <i>undulosa</i>) ^[26]	通过缠绕包裹病原菌位点性损伤细胞膜,引起细胞膜电势降低和孢子电解质泄露,从而造成病原菌裂解死亡 ^[26]

除了单一利用某种金属或无机材料制成纳米级微粒用于作物病害的防治外,目前也研发了将不同的金属或无机材料组合成一种纳米制剂后用于病害的防治。研究发现,硅虽然对植物病原菌没有直接的抑制作用,但它能激活植物的生理活性,促进植物的生长,提高植物对病害的抵抗能力^[15]。而银离子能对植物病原菌具有直接的抑制作用,基于硅和银各自的特点,Park 等将硅和银组合在一起加工成了具有加强效应的抑菌纳米微粒,这种新型的硅-银纳米微粒不仅在离体试验条件下能抑制植物多种病原菌的生长,还在温室和大田试验中对南瓜白粉病表现出了很好的防治效果^[16]。

1.3 将原农药纳米化

农药原药绝大多数不溶于水,又难以直接粉碎使用,因此在农药的生产过程中往往要添加一些农药助剂,如溶剂、渗透剂、展着剂等。而这些农药助剂对人畜造成的毒性可能比农药有效成分本身更大^[27]。

采用纳米加工技术使农药原药纳米化,如将液体农药制成微乳剂或将固体农药直接制成纳米微粒制剂,可以增加农药的比表面积,改善农药在水中的分散性和稳定性,减少有机溶剂和助剂的用量,降低农药的表面张力,促进靶标的吸收,提高农药的利用率^[28]。戊唑醇是一种高效、广谱的杀菌剂,在全球范围内使用广泛,但由于其水溶性低,传统的戊唑醇乳油的生产要添加二氯甲烷和丙酮,并且该农药对地下水的污染指数为 2.3,对地下水源淋溶存在危险。Díaz - Blancas 等通过添加丙酮、甘油、吐温 80、Agnique BL1754 将戊唑醇原药加工成纳米乳剂后发现,该乳剂的表面张力比纯水低 50% 左右,大大提高了戊唑醇的利用率,降低了其对环境的污染^[27]。

2 纳米技术用于作物病害的检测

农作物的大部分病害在染病初期虽然较易防治,但一般不易被人察觉,病害一旦暴发,就给防治带来很大的困难。因此,在作物发病初期对病害进行及时、正确的检测,对防止病害的暴发尤为重要。纳米技术用于植物病害的检测,主要包括以下 2 个方面:一是利用纳米材料直接对植物病原体进行检测,二是作为快速诊断工具检测植物因病害产生的特征化合物,为作物病害的诊断提供参考。

2.1 纳米材料直接用于病原体的检测

基因芯片是准确检测各种病原体的重要工具,而纳米基因芯片可以使分子在其上的结合速度比传统方法提高 1 000

倍,能灵敏地检测出细菌和病毒单个核苷酸的变化。Ruiz - Garcia 等利用纳米基因芯片对感染番茄植株的病原细菌和病毒进行了准确、快速的检测^[29]。金纳米颗粒由于具有较高的电导率和电催化活性,目前已被制成各种传感器,广泛应用于病原菌的检测中。Singh 等利用纳米金侧流免疫层析传感器灵敏地检测出了小麦黑穗病病原菌(*Tilletia indicai*)^[30]。纳米荧光探针由于其超高的灵敏度和即便是在超痕量组分的检测下都能发出足够强的荧光等特点,目前已被用于病原菌的检测中。Yao 等将二抗羊抗兔连接到包裹了联吡啶钉的二氧化硅颗粒上制成的二氧化硅荧光纳米探针,用于检测茄科植物的细菌性叶斑病病原菌,与直接用异硫氰酸荧光作荧光探针相比,二氧化硅荧光纳米探针检测到的荧光信号更明显^[31]。

2.2 纳米材料作为快速诊断工具检测作物因病害产生的特征化合物

植物在病害、虫害、干旱或其他胁迫条件下会产生一些与损伤相关的植物激素和信号分子,如茉莉酸、茉莉酸甲酯、水杨酸等,从而激活植物体内防御基因的表达,提高抗胁迫的能力。通过对这些信号分子的检测,可以对植物的健康状况作出诊断,但普通的电化学传感器难以对这些信号分子进行检测。Wang 等采用循环伏安法,用普通的金电极没有从感染了核盘菌的油菜种子中检测到明显的氧化峰,几乎检测不到水杨酸的存在,而采用同样的方法利用铜纳米颗粒修饰的金电极则检测到了明显且稳定的氧化峰,且测得的水杨酸的浓度与采用高效液相色谱-紫外检测法测得的值非常接近^[32]。

除此之外,植物在感染某种病原菌的情况下会产生一些特殊的挥发性物质,通过检测这些挥发性物质可以推测植物是否感染了某种病原菌。4 - 乙基愈创木酚是疫病病原菌(*Phytophthora cactorum*)产生的标志性挥发物,通过检测该物质可以推测疫病病菌的存在情况。Fang 等利用基于二氧化钛或二氧化锡修饰的丝网印刷碳电极成功地从感染了疫病病原菌的植物中检测到了 4 - 乙基愈创木酚^[33]。

3 施用纳米肥料,提高作物的抗病能力

作物的病害有生理性病害(缺素症)和非生理性病害。生理性病害一般是由于缺少某些营养元素造成的,非生理性病害是由于受到病原菌的侵染造成的,作物一旦发生生理性病害就容易发生非生理性病害。一般来说,具有最佳营养状

态的植物具有最大的抗病力。因此,给予农作物全面、合理的营养,提高作物对病害的抵抗力,也是作物病害防治的一个重要方面^[34]。

纳米肥料是指纳米材料技术构建、医药微胶囊技术和化工微乳化技术改性而形成的肥料,由于纳米肥料具有普通肥料不具备的优点,目前已引起了广泛的关注并投入了商品化生产。从植物营养的角度来看,目前生产的纳米肥料可大体分为大量元素纳米肥料、微量元素纳米肥料、纳米材料增强剂肥料、植物促生长纳米材料 4 类^[35-36]。

3.1 大量元素纳米肥料

大量元素纳米肥料是指含有氮、磷、钾、镁、钙、硫等大量元素中的 1 种或几种元素的纳米肥料。传统的大量元素肥料在施用过程中,有 40% ~ 70% 的氮肥、80% ~ 90% 的磷肥、50% ~ 90% 的钾肥流失到环境中^[37-38],由于作物在生长过程中对大量元素的大量需求,预测到 2050 年作物对大量元素的需求将达到 263 Mt^[39]。因此,对大量元素纳米肥料的开发是纳米肥料中优先考虑的对象。目前已开发的大量元素纳米肥料主要有氮纳米肥料、磷纳米肥料、钙纳米肥料、镁纳米肥料等。这些大量元素纳米肥料的开发既减少了普通氮肥、磷肥、钾肥的使用量,又减少了面源污染的发生。

3.2 微量元素纳米肥料

微量元素锰、铜、锌等在作物抵御病害方面有非常重要的作用,这主要是因为与植物防御反应相关的酶,如苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶必须要在这些微量元素存在的情况下才能被激活^[40]。然而,全球 50% 的土壤存在微量元素含量过低的问题,尤其是中性和碱性土壤,因此为了保证作物正常地生长,必须要依靠人工施肥来补充微量元素,而施用普通的肥料能被作物利用的微量元素小于 5%^[41-42]。目前已开发的微量元素纳米肥料主要有铁纳米肥料、锰纳米肥料、铜纳米肥料、锌纳米肥料、钼纳米肥料等^[42-43]。微量元素纳米肥料的开发可提高作物对微量元素的利用率,增加作物的产量,减少病害的发生。

3.3 纳米材料加强型肥料

纳米材料加强型肥料是指将一些材料加工成纳米级别后用于装载或包膜肥料,这些材料本身虽然不能给植物提供营养,但经过纳米材料装载或包膜后的肥料吸附性能增强,挥发量减少,能迎合土壤与作物的需肥规律可控释放,作物对其利用率也大幅提高。目前报道的装载或包膜各种肥料的纳米材料有高岭土、沸石、高分子树脂等。值得一提的是,沸石被加工成纳米级后由于具有比表面积大、阳离子交换量高且对大量元素(如 K^+ 、 NH_4^+ 等)具有很高的选择性等特点,常被用于氮肥、钾肥等各种肥料的载体,经纳米沸石装载的肥料在室内盆栽试验和大田试验中都表现出了很好的促生作用,有效地减少了肥料的流失^[36]。

3.4 促生型纳米材料

研究发现,有的纳米材料本身既不是植物大量元素和微量元素的来源,也不作为肥料的载体,但施用这些纳米材料后却能促进作物的生长,如纳米二氧化钛、纳米硅、碳纳米管等。钛并不是植物生长所必需的元素,土壤中也不须要添加额外的钛。但已经有多个研究报道纳米钛具有明显的促生长作用,Yang 等将 2.5 g/L 纳米二氧化钛溶液处理菠菜的种子,待

发芽后再用 2.5 g/L 二氧化钛溶液喷施叶片后发现与用非纳米二氧化钛相比,处理组菠菜中的生物量明显增加,且菠菜叶片中总氮、叶绿素、蛋白质的含量分别增加 23%、34%、13%^[44]。Jaberzadeh 等分别用 0.01%、0.02%、0.03% 纳米二氧化钛喷施小麦叶片后发现,与对照组相比,小麦的生物量和产量都明显增加^[45]。

硅也不是植物生长过程中的必需元素,但它能通过影响植物中其他元素如碳、氮、磷的代谢,促进作物种子的萌发和作物的生长。Suriyaprabha 等将 1% 纳米硅悬浮液添加到含玉米的霍格兰水培液中,与对照组相比,处理组的玉米种子中各种大量元素和微量元素含量发生了明显的变化,但总的来看,处理组中玉米种子的萌发率提高了 95.5%,玉米干质量增加了 6.5%^[46]。

研究表明,碳纳米管也能促进各种作物种子的萌发和生长。Lahiani 等以大麦、大豆、玉米种子作为试验对象,将多壁碳纳米管添加到 MS 培养基中或者作为种子包衣处理上述不同作物种子,发现处理组种子的发芽率明显高于对照组^[47]。Tiwari 等也发现,碳纳米管在低浓度下能促进小麦种子的生长^[48]。

4 结语与展望

利用转基因技术培育出具有抗病害能力的农作物新品种是农作物病害防治的一个重要趋势,而在转基因技术研究中,基因载体扮演着重要的角色,它们不仅明显影响外源基因的转化效率,而且还会影响外源基因的表达特性。传统地利用农杆菌作为转基因载体存在宿主限制,外源重排率高,容易形成逃逸体、嵌合体等缺点^[49]。而最近的研究结果表明,基于以纳米转基因载体的新型转化法与传统方法相比具有以下优点:纳米材料具有特殊的磁学、光学、热学性能和较多的表面活性基团,便于修饰,可以实现基因靶向递送或控制释放;纳米材料具有较高的电势和比表面积,加大了基因载量,提高了基因进入受体细胞的概率;纳米材料粒径很小,容易透过组织进入细胞,增加了基因的递送效率;纳米材料通常具有良好的生物相容性,因而对细胞的生长和代谢有较小的影响^[49-50]。因此,以纳米材料介导外源基因的新型转化法为植物基因转导提供了一个新的工具,目前该方法在植物转基因中备受关注,已有不少关于利用纳米基因载体成功用于植物转基因的报道^[51-53],但利用纳米基因载体培育具有抗病害能力的转基因作物还未见报道,这是一个值得未来探讨和研究的方向。

此外,纳米材料因其小尺寸、表面效应等特殊性质容易被植物吸收,并能通过食物链富集和传递,能透过人体解剖学屏障,因此,纳米材料可能存在潜在的安全性问题^[54]。但目前国际上对纳米材料的安全性评价尚没有统一的标准^[55]。因此,一方面,应尽量选择无毒生物相容性高、可生物降解的纳米材料;另一方面,应尽快弄清纳米材料与植物的相互作用关系及其向食物中的迁移途径,建立定量的方法和模型,不断完善安全性评价工作和使用规范。

总之,由于纳米材料特殊的性能,利用纳米技术对作物病害进行预防和治理,有利于病害的早发现、早控制,能减少化学农药和化学肥料的使用,能弥补化学农药防治或生物防治存在的不足,提高作物病害的防治效率。这对减少农业开支、

实现作物增产以及农业生产的可持续发展、生态环境的保护等具有重要的意义。

参考文献:

- [1] de Luque A P, Rubiales D. Nanotechnology for parasitic plant control [J]. Pest Management Science, 2009, 65 (5): 540 – 545.
- [2] Roduner E. Size matters; why nanomaterials are different [J]. Chemical Society Reviews, 2006, 35 (7): 583 – 592.
- [3] Sharma R, Dewanjee S, Kole C. Utilization of nanoparticles for plant protection [M]//Plant nanotechnology. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 305 – 327.
- [4] Ghormade V, Deshpande M V, Paknikar K M. Perspectives for nano – biotechnology enabled protection and nutrition of plants [J]. Biotechnology Advances, 2011, 29 (6): 792 – 803.
- [5] Kah M, Hofmann T. Nanopesticide research; current trends and future priorities [J]. Environment International, 2014, 63: 224 – 235.
- [6] Nuruzzaman M, Rahman M M, Liu Y, et al. Nanoencapsulation, nano – guard for pesticides: a new window for safe application [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64 (7): 1447 – 1483.
- [7] Panpatte D G, Jhala Y K, Shelat H N, et al. Nanoparticles; the next generation technology for sustainable agriculture [M]//Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity. New Delhi: Springer India, 2016: 289 – 300.
- [8] Kaushik P, Shakil N A, Kumar J, et al. Development of controlled release formulations of thiram employing amphiphilic polymers and their bioefficacy evaluation in seed quality enhancement studies [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2013, 48 (8): 677 – 685.
- [9] Roy A, Singh S K, Bajpai J, et al. Controlled pesticide release from biodegradable polymers [J]. Central European Journal of Chemistry, 2014, 12 (4): 453 – 469.
- [10] Campos E V R, de Oliveira J L, Fraceto L F, et al. Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35 (1): 47 – 66.
- [11] Liu J, Liu F, Gao K, et al. Recent developments in the chemical synthesis of inorganic porous capsules [J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19 (34): 6073 – 6084.
- [12] Chen J, Sun L, Cheng Y, et al. Graphene oxide – silver nanocomposite; novel agricultural antifungal agent against *Fusarium graminearum* for crop disease prevention [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (36): 24057 – 24070.
- [13] Paret M L, Vallad G E, Averett D R, et al. Photocatalysis; effect of light – activated nanoscale formulations of TiO₂ on *Xanthomonas perforans* and control of bacterial spot of tomato [J]. Phytopathology, 2013, 103 (3): 228 – 236.
- [14] Giannousi K, Avramidis I, Dendrinos – Samara C. Synthesis, characterization and evaluation of copper based nanoparticles as agrochemicals against *Phytophthora infestans* [J]. RSC Advances, 2013, 3 (44): 21743 – 21752.
- [15] Gosse S, Labrie D, Chylek P. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice [J]. Plant Physiology, 2001, 127 (4): 1773 – 1780.
- [16] Park H J, Kim S H, Kim H J, et al. A new composition of nanosized silica – silver for control of various plant diseases [J]. The Plant Pathology Journal, 2006, 22 (3): 295 – 302.
- [17] Elgorban A M, El – Samawaty A E R M, Yassin M A, et al. Antifungal silver nanoparticles; synthesis, characterization and biological evaluation [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2016, 30 (1): 56 – 62.
- [18] Lamsal K, Kim S W, Jung J H, et al. Application of silver nanoparticles for the control of *Colletotrichum* species *in vitro* and pepper anthracnose disease in field [J]. Mycobiology, 2011, 39 (3): 194 – 199.
- [19] Jo Y K, Kim B H, Jung G. Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi [J]. Plant Disease, 2009, 93 (10): 1037 – 1043.
- [20] Ochoy I, Paret M L, Ochoy M A, et al. Nanotechnology in plant disease management; DNA – directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans* [J]. ACS Nano, 2013, 7 (10): 8972 – 8980.
- [21] Cui H, Zhang P, Gu W, et al. Application of anatase TiO₂ sol derived from peroxotitanic acid in crop diseases control and growth regulation [C]//2009 NSTI Nanotechnology Conference and Expo. Florida: CRC Press, 2009: 286 – 289.
- [22] Maness P C, Smolinski S, Blake D M, et al. Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65 (9): 4094 – 4098.
- [23] He L L, Liu Y, Mustapha A, et al. Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum* [J]. Microbiological Research, 2011, 166 (3): 207 – 215.
- [24] Wani A H, Shah M A. A unique and profound effect of MgO and ZnO nanoparticles on some plant pathogenic fungi [J]. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2012, 2 (3): 40 – 44.
- [25] Raghupathi K R, Koodali R T, Manna A C. Size – dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles [J]. Langmuir, 2011, 27 (7): 4020 – 4028.
- [26] Chen J, Peng H, Wang X, et al. Graphene oxide exhibits broad – spectrum antimicrobial activity against bacterial phytopathogens and fungal conidia by intertwining and membrane perturbation [J]. Nanoscale, 2014, 6 (3): 1879 – 1889.
- [27] Díaz – Blancas V, Medina D I, Padilla – Ortega E, et al. Nanoemulsion formulations of fungicide tebuconazole for agricultural applications [J]. Molecules, 2016, 21 (10): 1271 – 1282.
- [28] Kah M, Beulke S, Tiede K, et al. Nanopesticides; state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 43 (16): 1823 – 1867.
- [29] Ruiz – Garcia A B, Olmos A, Arahal D R, et al. Biochip electrónico para la detección y caracterización simultánea de los principales virus bacterias patógenos de la patata [C]//XII Congreso de la Sociedad Española de Fitopatología. 2004: 12.
- [30] Singh S, Singh M, Agrawal V V, et al. An attempt to develop surface plasmon resonance based immunosensor for Karnal bunt (*Tilletia indica*) diagnosis based on the experience of nano – gold based lateral flow immuno – dipstick test [J]. Thin Solid Films, 2010, 519 (3): 1156 – 1159.
- [31] Yao K S, Li S J, Tzeng K C, et al. Fluorescence silica nanoprobe as

- a biomarker for rapid detection of plant pathogens [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 79/80/81/82: 513–516.
- [32] Wang Z, Wei F, Liu S Y, et al. Electrocatalytic oxidation of phyto-hormone salicylic acid at copper nanoparticles – modified gold electrode and its detection in oilseed rape infected with fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. *Talanta*, 2010, 80(3): 1277–1281.
- [33] Fang Y, Umasankar Y, Ramasamy R P. Electrochemical detection of P – ethylguaiaicol, a fungi infected fruit volatile using metal oxide nanoparticles [J]. *Analyst*, 2014, 139(15): 3804–3810.
- [34] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable Agriculture; a review [M]//Sustainable agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 443–460.
- [35] Ditta A, Arshad M. Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition [J]. *Nanotechnology Reviews*, 2015, 5(2): 209–229.
- [36] Liu R, Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 131–139.
- [37] Ombódi A, Saigusa M. Broadcast application versus band application of polyolefin – coated fertilizer on green peppers grown on andisol [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(10): 1485–1493.
- [38] Solanki P, Bhargava A, Chhipa H, et al. Nano – fertilizers and their smart delivery system [M]//Nanotechnologies in food and agriculture. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 81–101.
- [39] Lexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision [R]. Rome: FAO, ESA Working Paper, 2012.
- [40] Servin A, Elmer W, Mukherjee A, et al. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(2): 1–21.
- [41] Rashid A, Ryan J. Micronutrient constraints to crop production in the near east [J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 122(4): 1–84.
- [42] Monreal C M, de Rosa M, Mallubhotla S C, et al. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer – micronutrients [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(3): 423–437.
- [43] 罗伟君, 唐琳, 周佳丽, 等. 纳米锌肥对番茄果实锌含量与品质的强化 [J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 184–188.
- [44] Yang F, Liu C, Gao F, et al. The improvement of spinach growth by nano – anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photoreduction [J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 119(1): 77–88.
- [45] Jaberzadeh A, Moaveni P, Moghadam H R T, et al. Influence of bulk and nanoparticles titanium foliar application on some agronomic traits, seed gluten and starch contents of wheat subjected to water deficit stress [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj – Napoca*, 2013, 41(1): 201–207.
- [46] Suriyaprabha R, Karunakaran G, Yuvakkumar R, et al. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L.) seeds under hydroponic conditions [J]. *Current Nanoscience*, 2012, 8(6): 902–908.
- [47] Lahiani M H, Dervishi E, Chen J, et al. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(16): 7965–7973.
- [48] Tiwari D K, Dasgupta – Schubert N, Cendejas L M V, et al. Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture [J]. *Applied Nanoscience*, 2014, 4(5): 577–591.
- [49] 孔倩倩, 李志辉, 王琼, 等. 纳米基因载体在植物遗传转化中的应用 [J]. *生物技术通报*, 2010(6): 6–12.
- [50] 夏兵, 董琛, 陆叶, 等. 纳米材料在植物细胞生物学研究中的应用 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(6): 121–126.
- [51] Jafarirad S, Naderi R, Alizadeh H, et al. Silver – nanoparticle as a vector in gene delivery by incubation [J]. *International Research Journal of Applied Life Sciences*, 2013, 2(3): 21–33.
- [52] Torney F, Trewyn B G, Lin V S Y, et al. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(5): 295–300.
- [53] Chang F P, Kuang L Y, Huang C A, et al. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2013, 1(39): 5279–5287.
- [54] Dasgupta N, Ranjan S, Mundekkad D, et al. Nanotechnology in agro – food: from field to plate [J]. *Food Research International*, 2015, 69: 381–400.
- [55] Pandey S, Giri K, Kumar R, et al. Nanopesticides: opportunities in crop protection and associated environmental risks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences India*, 2016, 86: 1–22.