

# 钛对逆境胁迫下植物生理生化特性影响的研究

李珍, 闫道良, 郑炳松

(浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 钛 (Ti) 是对植物生长有刺激和促进作用的有益元素之一, 能够在一定程度上提高植物的抗逆性。文章综述了植物在逆境胁迫下, 外源 Ti 对其抗氧化系统、光合特性、激素效应以及养分吸收的影响, 以为农林业中通过施加钛制剂提高植物抗逆性, 减轻非生物胁迫对植物的不利影响提供参考。

**关键词:** 植物; 钛; 非生物胁迫; 生理生化; 抗逆性

**中图分类号:** Q945.78      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776 (2021) 02-0073-06

## Researches on Effect of Titanium Compound on Physiological and Biochemical Properties of Plants under Stress

LI Zhen, YAN Dao-liang, ZHENG Bing-song

(State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** Reviews were made on effect of application of exogenous Titanium compound on photosynthetic properties, antioxidant system, hormone and nutrient absorption of plants under stress. Further studies should be aimed at plant resistance by titanium compound.

**Key words:** plants; Titanium; abiotic stress; physiological and biochemical; resistance

植物在生长过程中会面临各种逆境胁迫, 会在适应不良环境的过程中通过一系列生理反应来抵抗逆境, 即植物的抗逆性<sup>[1]</sup>。如果对不良环境的负荷超过植物自身的修复能力, 损伤将不可逆。所以, 植物除了需要自身的反馈调节能力, 更需要通过人为调控技术以提高其抗逆性。植物体内除了含有 16 种必需元素外, 还含有一些有益元素。目前, 许多试验结果一致证明, 钛 (Ti) 是对植物生长有刺激和促进作用的有益元素之一, 对植物的生长代谢过程起着重要的作用<sup>[2]</sup>, 受到国内外学者的日益关注<sup>[3-5]</sup>。含 Ti 试剂众多, 其中二氧化钛纳米颗粒 (TiO<sub>2</sub> NPs) 被认为是一种植物刺激剂, 它激活了植物对各种非生物胁迫因子的不同防御机制<sup>[6]</sup>。植物器官本身含有 Ti, 但是含量极低, 能够从土壤中吸收利用的可溶性钛微乎其微<sup>[7]</sup>, 因此, 外源 Ti 的施加显得更为必要。本文对外施 Ti 对植物在逆境胁迫环境下产生的生理效应进行了综述, 旨在为 Ti 在林业上的研究与应用提供资料与依据。

## 1 钛对植物逆境胁迫下光合特性的影响

光合作用中的光反应主要在 4 种蛋白质复合物上进行: 光系统 2 (PSII)、细胞色素 b6f 复合体 (Cytb6f)、光系统 1 (PSI)、三磷酸腺苷合成酶 (ATP synthase)。两个光电系统在光下发生电荷分离, 然后促进电子传

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1000604)

作者简介: 李珍, 硕士研究生, 从事林业资源开发利用研究; E-mail: lizhen@stu.zafu.edu.cn。通信作者: 郑炳松, 博士, 教授, 从事经济林及植物生理生化研究; E-mail: bszheng@zafu.edu.cn。

输,当两个光系统结合时,它们会捕获  $\text{H}_2\text{O}$  中的电子形成质子并释放氧气,然后通过电子载体将其转移至  $\text{NADP}^+$ ,这使  $\text{NADP}^+$  还原为  $\text{NADPH}$ 。同时,在类囊体膜上形成 pH 梯度,用于 ATP 合成。Hong F S 等发现,  $\text{TiO}_2$  NPs 处理可以提高叶绿体的 Hill 反应(指叶绿体借助光能使电子受体还原并放出氧的反应)活性,认为  $\text{TiO}_2$  NPs 可能进入叶绿体,并且其受到光催化后的氧化还原反应促进了电子传输和氧的释放<sup>[8]</sup>。

Ze Y G 等以鼠耳芥(俗名拟南芥) *Arabidopsis thaliana* 为材料,研究了  $\text{TiO}_2$  NPs 处理对拟南芥叶绿体光吸收和转运的影响机制。结果表明,  $\text{TiO}_2$  NPs 能诱导拟南芥类囊体膜捕光色素蛋白复合体基因(*LHCIIb*)的表达,表明  $\text{TiO}_2$  NPs 的处理能够提高拟南芥叶绿体对光能的吸收<sup>[9]</sup>。同时,光谱分析表明,拟南芥的叶绿体在 440 和 480 nm、650 和 680 nm 附近的荧光激发强度显著增加,  $F_{480}/F_{440}$  比值降低,  $F_{650}/F_{680}$  比值上升,表明  $\text{TiO}_2$  NPs 通过增加捕光复合物以促进叶绿体中叶绿素 b 和类胡萝卜素向叶绿素 a 的能量运输,并促进了光能从 PSI 向 PSII 的分配,此外,还加速了光能向电能的转化和电子的传递,进而促进了水的光解,光合作用活性增加<sup>[10]</sup>。由以上研究结果说明,  $\text{TiO}_2$  NPs 具有光催化特性,可以促进叶绿体吸收光能并激发电子传输中的电子,将光能转化为化学能,从而丰富二氧化碳的吸收<sup>[8,11-13]</sup>,使其在光催化性能方面非常有效<sup>[14]</sup>,更能防止叶绿体的衰退,延长其光合作用的持续时间<sup>[8]</sup>。

有学者将稻 *Oryza sativa* 进行单独镉(Cd)胁迫处理和  $\text{TiO}_2$  NPs 与 Cd 共同施加处理,对比发现共同处理植株的净光合速率和叶绿素含量均显著增加,由此说明  $\text{TiO}_2$  NPs 可以减轻 Cd 对稻的毒性<sup>[15]</sup>。同样的,叶片施加  $\text{TiO}_2$  NPs 对豇豆 *Vigna unguiculata* Cd 毒害的影响研究发现,叶面施用  $\text{TiO}_2$  显著提高了 Cd 胁迫后植株的叶绿素 b 和总叶绿素含量<sup>[16]</sup>。在大豆 *Glycine max* 上的  $\text{TiO}_2$  NPs 应用也能够通过增加植物的光合速率和生长参数来限制 Cd 的毒性<sup>[17]</sup>。另有研究  $\text{TiO}_2$  NPs 对叶片在轻度热应激下光合作用的影响,结果表明,施用适当浓度的  $\text{TiO}_2$  NPs 后,番茄 *Lycopersicon esculentum* 叶片的净光合速率和蒸腾速率均有所提高<sup>[18]</sup>。光合作用的增强可能导致光合产物的高效同化、运输和分配,从而促进叶片的生长和碳水化合物的生物合成<sup>[19]</sup>。相比之下,  $\text{TiO}_2$  NPs 在低光强( $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )胁迫下改善了长序榆 *Ulmus elongata* 幼苗的净光合作用,但在较高的光强( $1600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )胁迫下是相反的<sup>[20]</sup>。因此,  $\text{TiO}_2$  NPs 对植物光合作用的影响是复杂的,实际环境条件以及应用浓度等可能在一定程度上影响其效应。

## 2 钛对逆境胁迫下植物抗氧化系统的影响

氧气在参与新陈代谢的过程中会被活化成为超氧阴离子自由基、羟基自由基、过氧化氢、脂质过氧化物和单线态氧,即通常所说的活性氧<sup>[21]</sup>。活性氧会以极强的氧化性对细胞质膜进行过氧化,造成膜系统损伤、代谢功能不可修复的丧失和细胞死亡。在植物正常生长情况下,体内有负责清除活性氧产生的抗氧化系统,使活性氧的产生和清除处于动态平衡状态,然而植物在受到胁迫时,平衡被打破,造成活性氧大量积累。已有研究发现  $\text{TiO}_2$  NPs 通过促进酶促和非酶促抗氧化剂防御系统来提高植物的水分胁迫耐受性,从而减轻了干旱胁迫的不利影响<sup>[22]</sup>。

### 2.1 酶类抗氧化防御系统

植物自身对活性氧的清除系统之一是酶类抗氧化系统,包括超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)等。有研究证明, Ti 可以提高以上部分酶活性<sup>[23]</sup>,因为  $\text{TiO}_2$  NPs 参与了细胞质和叶绿体中超氧阴离子自由基的产生<sup>[24-25]</sup>。  $\text{TiO}_2$  NPs 能降低超氧阴离子自由基和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)的含量,提高 SOD、CAT 和 POD 的活性,以保持菠菜 *Spinacia oleracea* 细胞膜结构的稳定性<sup>[12]</sup>。研究还发现,洋葱 *Allium cepa* 幼苗的淀粉酶(Amylase)和蛋白酶(Protease)活性在  $10 \sim 40 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的  $\text{TiO}_2$  NPs 浓度下呈现上升趋势,但在  $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的  $\text{TiO}_2$  NPs 浓度下表现出下降趋势, SOD 活性受  $\text{TiO}_2$  NPs 浓度的依赖性较高, CAT 和 POD 活性在  $10 \sim 30 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的处理浓度时增强,但在 40 和  $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  处理浓度时活性降低<sup>[26]</sup>。另外,有学者使用不同浓度的  $\text{TiO}_2$  NPs 对甜叶菊 *Stevia rebaudiana* 进行处理,发现膜脂过氧化产物 MDA 在  $200 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  处理下含量最低<sup>[27]</sup>。值得

注意的是, 施用 Ti 使关键的碳固定酶 (核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶, Rubisco) 活性增强<sup>[28-29]</sup>。

研究表明, Ti 具有改善蚕豆 *Vicia faba* 受到土壤盐分胁迫的效果, 施加 0.01% 的 TiO<sub>2</sub> NPs 显著提高了盐害植株的酶促抗氧化剂活性, 而抗氧化酶活性的提高有助于 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量的降低<sup>[30]</sup>。另一研究以香青兰 *Dracocephalum moldavica* 为材料, 在中、重度盐分胁迫下施用 TiO<sub>2</sub> NPs, 结果表明, 在两种条件下都表现出积极的效果, 即施用 TiO<sub>2</sub> NPs 降低了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量, 并触发酶防御系统的激活, 提高了抗氧化酶活性, 从而改善了植物的氧化损伤, 最终提高植物在胁迫条件下的能力<sup>[31]</sup>。另外, 当大豆受到遮荫处理的同时, 喷施 Ti 可提高其抗氧化酶的活性, 特别是加氧酶活化酶活性, 提高了光合速率<sup>[32]</sup>。

## 2.2 非酶类抗氧化防御系统

植物自身对活性氧的另一清除系统是非酶类抗氧化系统, 主要指抗坏血酸 (Ascorbic acid, ASA) 与类胡萝卜素 (Carotenoids, Car) 以及一些含巯基的低分子化合物等, 次生代谢物质如类黄酮、酚类、生物碱等, 均通过多条途径直接或间接地猝灭活性氧<sup>[33]</sup>。

研究表明, 经 TiO<sub>2</sub> NPs 处理的蒜 *Allium sativum* 叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素和槲皮素的浓度增加<sup>[10]</sup>。TiO<sub>2</sub> NPs 也被证明能激活重要的亲脂性抗氧化剂 (维生素 E) 的生物合成<sup>[24]</sup>。有研究发现, 施加 0.01% 的 TiO<sub>2</sub> NPs 显著提高了盐害植株可溶性糖、氨基酸的含量, 通过渗透保护, 提高了植物生长<sup>[30]</sup>。此外, TiO<sub>2</sub> NPs 的正效应具有浓度依赖性, 施用 0.01% TiO<sub>2</sub> NPs 的效果最好, 而施用 0.02% TiO<sub>2</sub> NPs 在对照和盐渍土壤条件下均表现为中等效应, 施用 0.03% 的 TiO<sub>2</sub> NPs 几乎无效。由此证实了低浓度的 TiO<sub>2</sub> NPs 对土壤盐渍化的促进作用及其改良潜力<sup>[30]</sup>。据报道, 施用 TiO<sub>2</sub> NPs 可以通过改善番茄的酚类物质和抗氧化能力等来缓解盐胁迫<sup>[34]</sup>。另有学者研究了 TiO<sub>2</sub> 和 Cd 复合施加对水培玉蜀黍 (俗名玉米) *Zea Mays* 的影响, 结果表明, TiO<sub>2</sub> NPs 能上调抗氧化剂的合成, 具体来说, 其通过激活丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢以及甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢合成的主要代谢途径来维持植物的生理状态, 以对抗 Cd 诱导的胁迫<sup>[35]</sup>。因此, 叶面喷施 TiO<sub>2</sub> NPs 被认为是保护玉米幼苗免受 Cd 胁迫的有效途径。当然, Ti 除了能够改善对植物有害的重金属元素 Cd 诱导的毒性反应, 也具有对砷 (As) 诱导的毒性反应的改善潜力。研究推断, TiO<sub>2</sub> NPs 通过增加抗氧化剂有效地减轻了 As 的不利影响, 这在绿豆 *V. radiata* 中证明了其在减轻 As 中毒方面的潜力<sup>[36]</sup>。

## 3 钛对逆境胁迫下植物激素效应的影响

研究发现, TiO<sub>2</sub> NPs 在黑暗条件下可以刺激细胞分裂、增加细胞大小和刺激愈伤组织诱导, 它们可能具有类似于植物激素 (细胞分裂素和赤霉素) 的效果<sup>[27,37]</sup>。因此认为 Ti 可以补偿生长素和赤霉素等某些激素缺乏对生长的抑制作用。

在烟草 *Nicotiana tabacum* 愈伤组织的溶液培养实验中, 在缺少生长素的营养液中加入 Ti, 发现愈伤组织的生长比生长素存在时表现更好。同样的, 用 Ti 代替细胞分裂素时, 愈伤组织生长受到的抑制作用得到大部分补偿, 示踪原子方法的试验还证明, Ti 促进生长素向幼叶及根的运输<sup>[38]</sup>。万春侯认为由于生长素与分裂素对根芽、维管组织及胚状体分化都有诱导作用, 能够活化细胞内的脱氧核糖核酸, 使之解除抑制并进行基因表达, 最终通过调节代谢而对生长发育造成影响<sup>[38]</sup>。在重金属 Cd 的胁迫下, 不同浓度的 TiO<sub>2</sub> NPs 处理对稻中植物激素水平的影响不同。与对照相比, 10 mg·L<sup>-1</sup> TiO<sub>2</sub> NPs 处理的植株中脱落酸 (abscisic acid, ABA) 的含量显著增加 35.8%, 赤霉素 (Gibberellins, GA) 的含量显著降低, 当 Cd 含量为 20 mg·L<sup>-1</sup> 且 TiO<sub>2</sub> NPs 为 100 mg·L<sup>-1</sup> 和 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 时, IAA 的含量显著降低了 62.1% 和 53.4%。由此说明, TiO<sub>2</sub> NPs 的存在可能通过影响激素水平从而减轻 Cd 对稻幼苗的毒性<sup>[15]</sup>。

## 4 钛对逆境胁迫下植物养分吸收的影响

根是植物重要的营养器官吸收器官, 发达的根系有利于植物对水分及养分的吸收。而 Ti 能使根系发育良好,

良好的根系能吸取更多的养分,无疑对植物的生长发育有利<sup>[4]</sup>。研究表明,Ti 可以有效地促进植物对养分的吸收、转运,并促进养分的有效利用<sup>[39]</sup>。施用复合钛剂后,稻、果树对 N、P、K 等营养元素的吸取量增加,叶片中的 Ca、B、Mg、Fe、Mn、Zn 等含量均有所提高<sup>[40]</sup>,从而提高了体内的营养水平和肥料利用率<sup>[4]</sup>,为植株的生长提供了更好的基础。TiO<sub>2</sub>能改善植物 N 代谢,因为 TiO<sub>2</sub> NPs 可以促进大气中的 N 在紫外线或阳光照射下转化为硝酸盐<sup>[41]</sup>,TiO<sub>2</sub> NPs 还可以通过提高硝酸还原酶的活性来增强 N 的同化<sup>[28]</sup>。研究发现,对甜叶菊叶面和土壤施 Ti 均能使其糖苷含量显著提高<sup>[42]</sup>。

植物在 Cd 胁迫下会影响对其他营养元素的摄取<sup>[43-44]</sup>,然而研究发现,溶解在 1/2 Kimura 营养液中的 TiO<sub>2</sub> NPs 可以吸附 Cd 或可以让 Cd 进入 NPs 的晶格中,也可能是 TiO<sub>2</sub> NPs 吸附在根表面,然后阻止稻幼苗从溶液中吸收 Cd<sup>[45]</sup>。TiO<sub>2</sub> NPs 吸收的一部分 Cd 可能保留在溶液中并无法为植物所利用,一部分 Cd 会与 TiO<sub>2</sub> NPs 一起进入植物,并且 NPs 可通过木质部<sup>[46]</sup>从根部运输到叶片<sup>[47-48]</sup>。但是叶片中的 Cd 和 Ti 含量均降低说明其生物转化也可能有助于减轻 Cd 对稻幼苗的毒性<sup>[15]</sup>。研究者认为在光照下,TiO<sub>2</sub> NPs 表面会发生持续的氧化还原反应,在此过程中,Ti 的化合价在 Ti<sup>3+</sup>和 Ti<sup>4+</sup>之间连续变化,产生的电子被传递到放氧复合体中心的 Mn,使 Mn 的氧化发生变化。同时,TiO<sub>2</sub> NPs 可能直接作用于析氧复合物,通过增加类囊体膜的渗透率,使 Ca<sup>2+</sup>和 Cl<sup>-</sup>更容易进入析氧复合物中心<sup>[8]</sup>。同理,螯合钛预处理可减轻渗透胁迫对普通小麦 *Triticum aestivum* 幼苗的伤害,增强普通小麦对渗透胁迫的抵抗力<sup>[49]</sup>。Jabzadeh 等研究认为,在干旱胁迫下,TiO<sub>2</sub> NPs 改善了普通小麦的生长<sup>[50]</sup>。

## 5 结论与展望

Ti 是对植物生长有益的元素之一,所以植物在受到逆境胁迫时,可以根据植物种类、生长阶段和施用方式选择 Ti 的制剂种类和使用浓度,便可通过激活植物体的抗氧化系统、调节激素水平,进而提高光合速率并对养分进行合理有效的吸收,达到提高植物抗逆性的目的。

对于未来有关 Ti 在植物抗逆性方面的研究可在以下方面予以加强:

(1) 加强 Ti 对植物受到逆境影响的细胞形态结构与超微结构的研究。目前,已知 TiO<sub>2</sub> NPs 被植物吸收并分配到叶片中,从而影响根长和植物生物量<sup>[24-25]</sup>。研究者推测 NPs 会产生局部氧化压力和细胞壁孔的增大,这导致根中含水量和膨胀量的增加,从而促进根的伸长<sup>[51]</sup>。然而研究发现 TiO<sub>2</sub> NPs 对欧洲油菜 *Brassica napus* 植株有促进生长的作用,但是没有观察到明显的叶绿体超微结构变化<sup>[5]</sup>。因此,在逆境胁迫下,施用一定浓度的 Ti,对植物各种膜结构的稳定性效应需要作进一步研究。

(2) 加强不同植物对 Ti 的吸收动力学特性研究。已知稻对 Ti 的吸收是被动过程,而甜叶菊对 Ti 的吸收是一个需要能量的主动吸收过程<sup>[42]</sup>。马晓玥等研究发现,多环芳烃(PAHs)会促进植物根部对 TiO<sub>2</sub> NPs 的吸收与累积,使其增加了 82.3%,但 TiO<sub>2</sub> NPs 的添加使得大豆根部萘含量降低<sup>[52]</sup>。因此,不同植物的吸收过程和方式具有差异性,有待进一步探索。

(3) 加强不同 Ti 制剂种类对植物的抗逆性的比较研究。已知 TiO<sub>2</sub> NPs 能够促进植物中的氮同化、PSII 的光还原活性和清除植物中的活性氧<sup>[53]</sup>;抗坏血酸 Ti 在樱桃番茄 *L. esculentum* var. *cerasiforme* 上进行叶面喷施具有显著的提高产量和改善品质的作用,并且能促进樱桃番茄植株生理活性的增强、果实中可溶性固形物和维生素 C 含量的增加等<sup>[54]</sup>;另外,植物对氨基酸钛微肥的吸收利用率较高,通过大量田间试验实践资料论证了氨基酸型钛肥在农林业生产中应用的增产提质肥效<sup>[55]</sup>。但是部分 Ti 制剂种类对植物受到胁迫时的响应机制尚未进行研究,因此需更全面地了解不同 Ti 制剂的施用对逆境下植物生长的影响。

(4) 加强 Ti 对于提高植物抗逆性的分子机理研究。目前,相关研究主要聚焦于 Ti 缓解植物受到温度、盐碱、水分和重金属等非生物胁迫的生理响应,但是植物的抗逆性得以提高的原因是复杂多样的,需要更深层次的分析 and 解释。

(5) 加强 Ti 对木本植物的抗逆性研究。目前,对于 Ti 制剂的开发利用大多集中于草本植物,从有利于林业发展的实际应用价值来看,有望尽可能多的选择最适试剂及浓度施加于木本植物体并进行抗逆性研究。

## 参考文献:

- [1] 何凌仙子, 贾志清, 刘涛, 等. 植物适应逆境胁迫研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31 (2): 13–18.
- [2] 鲍碧娟. 植物生长的有益元素——钛 (Ti) [J]. 磷肥与复肥, 2001, 16 (5): 67.
- [3] RADKOWSKI A, RADKOWSKA I, LEMEK T. Effects of Foliar Application of Titanium on Seed Yield in Timothy (*Phleum pratense* L.)[J]. Ecol Chem Engin, 2015, 22 (4): 691–701.
- [4] 谢庭生, 魏晓, 王芳, 等. 农作物施用复合钛剂的正效应[J]. 湖南农业科学, 2018 (1): 51–54, 59.
- [5] LI J, NAEEM M S, WANG X P, et al. Nano-TiO<sub>2</sub> Is Not Phytotoxic As Revealed by the Oilseed Rape Growth and Photosynthetic Apparatus Ultra-Structural Response[J]. PLoS ONE, 2015, 10 (12): e0143885.
- [6] ZHENG L, SU M Y, WU X, et al. Antioxidant Stress is Promoted by Nano-anatase in Spinach Chloroplasts Under UV-B Radiation[J]. Biol Trace Elem Res, 2008, 121 (1): 69–79.
- [7] 杜娟, 许自成, 李志刚, 等. 植物钛素营养研究进展[J]. 江西农业学报, 2010, 22 (1): 42–44.
- [8] HONG F S, ZHOU J, LIU C, et al. Effect of nano-TiO<sub>2</sub> on Photochemical Reaction of Chloroplasts of Spinach[J]. Biol Trace Elem Res, 2005, 105 (1–3): 269–279.
- [9] ZE Y G, LIU C, WANG L, et al. The Regulation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Expression of Light-harvesting Complex II and Photosynthesis of Chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*[J]. Biol Trace Elem Res, 2011, 143 (2): 1131–1141.
- [10] BHARTI A S, SHARMA S, SHUKLA N, et al. Steady State and Time Resolved Laser-induced Fluorescence of Garlic Plants Treated with Titanium Dioxide Nanoparticles[J]. Spectrosc Lett, 2018, 51 (1): 45–54.
- [11] YANG F, LIU C, GAO F Q, et al. The Improvement of Spinach Growth by Nano-anatase TiO<sub>2</sub> Treatment is Related to Nitrogen Photoreduction[J]. Biol Trace Elem Res, 2007 (119): 77–88.
- [12] HONG F S, YANG F, LIU C, et al. Influences of Nano-TiO<sub>2</sub> on the Chloroplast Ageing of Spinach under Light[J]. Biol Trace Elem Res, 2005b (104): 249–260.
- [13] MARIYA K, MOHAMED H L. Nanoparticles and Plants: from Toxicity to Activation of Growth, Handbook of Nanotoxicology, Nanomedicine and Stem Cell Use in Toxicology[J]. Wiley, 2014: 121–130.
- [14] GAO F Q, HONG F S, LIU C, et al. Mechanism of Nano Anatase TiO<sub>2</sub> on Promoting Photosynthetic Carbon Reaction of Spinach[J]. Biol Trace Elem Res, 2006, 111: 239–245.
- [15] JI Y, ZHOU Y, MA C X, et al. Jointed toxicity of TiO<sub>2</sub> NPs and Cd to Rice Seedlings: NPs Alleviated Cd Toxicity and Cd Promoted NPs Uptake[J]. Plant Physiol Biochem, 2017, 110: 82–93.
- [16] OGUNKUNLE C O, ODULAJA D A, AKANDE F O, et al. Cadmium Toxicity in Cowpea Plant: Effect of Foliar Intervention of Nano-TiO<sub>2</sub> on Tissue Cd Bioaccumulation, Stress Enzymes and Potential Dietary Health Risk[J]. J Biotechnol, 2020, 310: 54–61.
- [17] SINGH J W, LEE B K. Influence of Nano-TiO<sub>2</sub> Particles on the Bioaccumulation of Cd in Soybean Plants (*Glycine max*): A Possible Mechanism for the Removal of Cd from the Contaminated Soil[J]. J Environ Manag, 2016, 170: 88–96.
- [18] QI M F, LIU Y F, LI T L. Nano-TiO<sub>2</sub> Improve the Photosynthesis of Tomato Leaves under Mild Heat Stress[J]. Biol Trace Elem Res, 2013, 156 (1–3): 323–328.
- [19] AHMAD B, SHABBIR A, JALEEL H, et al. Efficacy of Titanium Dioxide Nanoparticles in Modulating Photosynthesis, Peltate Glandular Trichomes and Essential Oil Production and Quality in *Mentha piperita* L[J]. Cur Plant Biol, 2018, 13: 6–15.
- [20] GAO J G, XU G D, QIAN H H, et al. Effects of Nano-TiO<sub>2</sub> on Photosynthetic Characteristics of *Ulmus elongata* Seedlings[J]. Environ Pollut, 2013, 176: 63–70.
- [21] 李合生. 现代植物生理学: 第3版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 356.
- [22] KARAMIAN R, GHASEMLOU F, AMIRI H. Physiological Evaluation of Drought Stress Tolerance and Recovery in *Verbascum Sinuatum* Plants Treated with Methyl Jasmonate, Salicylic Acid and Titanium Dioxide Nanoparticles[J]. Plant Biosyst, 2020, 154 (3): 277–287.
- [23] CHOI H G, MOON B Y, BEKHZOD K, et al. Effects of Foliar Fertilization Containing Titanium Dioxide on Growth, Yield and Quality of Strawberries during Cultivation[J]. Hort Environ Biotechnol, 2015, 56 (5): 575–581.
- [24] RENATA S, KAROLINA K, IRENEUSZ Ś, et al. Titanium Dioxide Nanoparticles (100-1 000 mg/l) can Affect Vitamin E Response in *Arabidopsis thaliana*[J]. Environ Pollut, 2016, 213: 957–965.
- [25] SONG U, SHIN M, LEE G, et al. Functional Analysis of TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Toxicity in Three Plant Species[J]. Biol Trace Elem Res, 2013, 155 (1): 93–103.
- [26] SHANKAR L, SHILPA R. Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on Hydrolytic and Antioxidant Enzymes during Seed Germination in Onion[J]. Int J Curr Microbiol App Sci, 2014, 3 (7): 749–760.
- [27] REZAIZAD M, HASHEMI-MOGHADDAM H, ABBASPOUR H, et al. Photocatalytic Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Morphological and Photochemical Properties of Stevia Plant (*Stevia rebaudiana* Bertoni)[J]. Sugar Tech, 2019, 21 (6): 1024–1030.

- [28] YANG F, HONG F S, YOU W J, et al. Influence of Nano-anatase TiO<sub>2</sub> on the Nitrogen Metabolism of Growing Spinach[J]. Biol Trace Elem Res, 2006 ( 110 ) : 179 – 190.
- [29] ZHENG L, SU M Y, LIU C, et al. Effects of Nanoanatase TiO<sub>2</sub> on Photosynthesis of Spinach Chloroplasts under Different Light Illumination[J]. Biol Trace Elem Res, 2007 ( 119 ) : 68 – 76.
- [30] ABDEL LATEF A A H, SRIVASTAVA A K, EL-SADEK M S A, et al. Titanium Dioxide Nanoparticles Improve Growth and Enhance Tolerance of Broad Bean Plants under Saline Soil Conditions[J]. Land Degrad Devel, 2018, 29 ( 4 ) : 1065 – 1073.
- [31] Gohari G, Mohammadi A, Akbari A, et al. Titanium Dioxide Nanoparticles (TiO<sub>2</sub> NPs) Promote Growth and Ameliorate Salinity Stress Effects on Essential Oil Profile and Biochemical Attributes of *Dracocephalum moldavica*[J]. Sci Rep, 2020, 10 ( 1 ) : 912 – 926
- [32] HUSSAIN S, IQBAL N, BRESTIC M, et al. Changes in Morphology, Chlorophyll Fluorescence Performance and Rubisco Activity of Soybean in Response to Foliar Application of Ionic Titanium under Normal Light and Shade Environment[J]. Sci Total Environ, 2019, 658 ( MAR 25 ) : 626 – 637.
- [33] 张俊霞, 刘晓鹏, 向极轩. 植物抗氧化系统对逆境胁迫的动态响应[J]. 湖北民族学院学报 ( 自然科学版 ), 2015, 33 ( 4 ) : 435 – 439.
- [34] KHAN N. Nano-titanium Dioxide (Nano-TiO<sub>2</sub>) Mitigates NaCl Stress by Enhancing Antioxidative Enzymes and Accumulation of Compatible Solutes in Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. J Plant Ences, 2016 ( 11 ) : 1 – 11.
- [35] LIAN J P, ZHAO L F, WU J N, et al. Foliar Spray of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Prevails over Root Application in Reducing Cd Accumulation and Mitigating Cd-induced Phytotoxicity in Maize (*Zea mays* L.)[J]. Chemosphere, 2020, 239: 124794.
- [36] KATIYAR P, YADU B, KORRAM J, et al. Titanium Nanoparticles Attenuates Arsenic Toxicity by up-regulating Expressions of Defensive Genes in *Vigna radiata* L[J]. J Environ Sci. 2020, 92: 18 – 27.
- [37] MANDEH M, OMIDI M, RAHAIE M. In Vitro Influences of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Barley (*Hordeum vulgare* L.) Tissue Culture[J]. Biol Trace Elem Res, 2012, 150 ( 1 – 3 ) : 376 – 380.
- [38] 万春侯. 钛与植物生长[J]. 农资科技, 2001 ( 6 ) : 18 – 20.
- [39] EZZAT G, SHREEN A, ASHRAF F, et al. Copper Sulfate Nanoparticles Enhance Growth Parameters, Flavonoid Content and Antimicrobial Activity of *Ocimum Basilicum* Linnaeus[J]. J Am Sci, 2017, 13: 108 – 114.
- [40] MARSCHNER P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, Third Edition[M]. Elsevier. 2011.
- [41] YUAN S J, CHEN J J, LIN Z Q, et al. Nitrate Formation from Atmospheric Nitrogen and Oxygen Photocatalysed by Nano-sized Titanium Dioxide[J]. Nature Communicat, 2013, 4 ( 1 ) : 293 – 296.
- [42] 张咪咪. 甜叶菊糖苷含量和积累量与钛吸收的相关性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [43] LAETITIA P B., LEONHARDT N, VAVASSEUR A, et al. Heavy Metal Toxicity: Cadmium Permeates Through Calcium Channels and Disturbs the Plant Water Status[J]. Plant J, 2002, 32 ( 4 ) : 539 – 548.
- [44] ZHANG M, LIU X C, YUAN L Y, et al. Transcriptional Profiling in Cd-treated Rice Seedling Roots Using Suppressive Subtractive Hybridization[J]. Plant Physiol Biochem, 2012, 50: 79 – 86.
- [45] LI X G, GUI X, RUI Y K, et al. Bt-transgenic Cotton is More Sensitive to CeO<sub>2</sub> Nanoparticles than its Parental Non-transgenic Cotton[J]. J Hazard Mater, 2014 ( 274 ) : 173 – 180.
- [46] WANG Z Y, XIE X Y, ZHAO J, et al. Xylem-and Phloem-based Transport of CuO Nanoparticles in Maize (*Zea mays* L.)[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46: 4434 – 4441.
- [47] LIN S J, REPPERT J, HU Q, et al. Uptake, Translocation, and Transmission of Carbon Nanomaterials in Rice Plants[J]. Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2009, 5 ( 10 ) : 1128 – 1132.
- [48] SHI J Y, PENG C, YANG Y Q, et al. Phytotoxicity and Accumulation of Copper Oxide Nanoparticles to the Cu-tolerant Plant *Elsholtzia splendens*[J]. Nanotoxicology, 2014, 8 ( 2 ) : 179 – 188.
- [49] 张元湖, 樊继莲, 曾英松, 等. 螯合钛提高冬小麦抗旱性的研究[J]. 山东农业大学学报, 1995 ( 1 ) : 111 – 114.
- [50] JABERZADEH A, MOAVENI P, MOGHADAM 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]. Notul Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca, 2013, 41 ( 1 ) : 201 – 207.
- [51] LARUE C, LAURETTE J, HERLINBOIME N, et al. Accumulation, Translocation and Impact of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles in Wheat (*Triticum aestivum* spp.): Influence of Diameter and Crystal Phase[J]. Sci Total Environ, 2012, 431: 197 – 208.
- [52] 马晓玥, 袁彬彬, 方国东, 等. 二氧化钛纳米颗粒对大豆根部吸收砒的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020 ( 9 ) : 1 – 11.
- [53] RALIYA R, NAIR R, CHAVALMANE S, et al. Mechanistic Evaluation of Translocation and Physiological Impact of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles on the Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Plant[J]. Metallomics: Integ Biomet Sci, 2015, 7 ( 12 ) : 1584 – 1594
- [54] 朱京涛, 曹霞. 抗坏血酸钛对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2009 ( 6 ) : 74 – 76.
- [55] 邵建华, 陈绍荣, 孙玲丽. 氨基酸型钛肥在农作物生产中的应用研究[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34 ( 4 ) : 34 – 35, 38.