纳米氧化铜对小麦根系生理生化行为的影响①

金盛杨[1,2]， 王玉军[1]， 汪 鹏[1,2]， 翁南燕[1,2]， 周东美[1*]

（1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所)，南京 210008；
2 中国科学院研究生院，北京 100049）

摘 要： 为阐明纳米金属材料暴露对植物生长的影响及其作用机制，采用模拟土壤的琼脂培养方法研究了纳米氧化铜（CuO NPs） 对小麦（*Triticum aestivum* L.）根伸长及相关生理生化行为的影响。结果表明：小麦根伸长与 CuO NPs 暴露浓度之间存在指数相关关系，在低浓度 CuO NPs（10 mg/L）暴露下得到一定程度促进，而在高浓度（100 mg/L）下受到强烈抑制。小麦根内超氧化物歧化酶（SOD）活性随 CuO NPs 暴露浓度的变化趋势与小麦根伸长具有一致性。另外，在 1 ~ 100 mg/L 范围内，随着 CuO NPs 暴露浓度的升高，小麦根内丙二醛（MDA）含量不断增加，但植物蛋白含量急剧降低。以上结果说明 CuO NPs 对根伸长抑制主要是由于纳米材料暴露造成植物细胞膜氧化损伤，小麦能通过提高根系活力对 CuO NPs 暴露作出适应性应激响应以减少纳米材料毒性的伤害。

关键词： 纳米氧化铜；小麦；根伸长；生理生化行为；

中图分类号： X503.231

随着纳米技术迅猛发展，纳米材料应用日益广泛，其生态安全性问题正引起世界范围的普遍关注。纳米金属材料是当前应用最为广泛的一类纳米材料[1-2]，在其研发、生产、运输、消费和处置过程都有可能会进入水体和土壤，因此学界围绕其对土壤生态系统尤其是陆生植物影响进行了探索性的研究。Lin 等[3]研究结果表明，纳米氧化锌（ZnO NPs）暴露处理抑制了黑麦草幼苗根尖生长并使其生物量减少，根部表皮细胞发生空泡化和凋亡现象。同时，他们还观察到 ZnO NPs 在黑麦草根部存在吸附并被吸收至内皮和中柱。其他纳米金属对陆生植物也存在类似的毒性效应：Lee 等[4]发现纳米铜（Cu NPs）抑制了绿豆和小麦幼苗的生长；Speranza 等[5]发现纳米钯（Pd NPs）不仅改变了猕猴桃花粉的形貌结构，而且极强地抑制了花粉管的形成和伸长。

在研究纳米金属材料的植物毒性时，研究者[3-7]往往采用纳米颗粒制成水相悬液后进行植物培养实验。水培体系下，纳米材料容易发生沉降及空间分布不均的问题使得其难以较好地模拟和反映真实土壤状况下的纳米植物毒性效应[6, 8]。因此，有必要寻找一种既能控制纳米毒性试验体系探究其机理，又能良好地模拟实际土壤的培养介质进行相关研究。

琼脂成分单一便于试验体系控制，另外其颗粒结构和固液相分配与土壤相似，因此可以在一定程度上模拟实际土壤。本文以典型纳米金属材料纳米氧化铜（CuO NPs）为研究对象，通过琼脂培养研究其对小麦根伸长、超氧化物歧化酶活性（SOD）、细胞膜脂过氧化及根系活力等生理生化行为的影响，以揭示纳米材料暴露下植物毒性产生过程及生理响应。本研究以期为评价纳米材料生物安全性影响提供基础数据和理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料与仪器

供试植物：小麦（*Triticum aestivum* L.）为 OECD[9] 毒性测试标准推荐的试验生物之一，所用种子购自南京农业大学神州种业公司，品种为南农 9918。

纳米材料及主要试剂: 纳米氧化铜（CuO NPs）购自南京埃普瑞纳米材料有限公司，样品纯度＞99.8%；测试小麦根系生理代谢指标（植物蛋白，超氧化物歧化酶，丙二醛）相关试剂盒和标准品购自南京建成生物工程研究所；$CaCl_2·2H_2O$、 $MgSO_4·2H_2O$、NaCl、KCl、NaOH、NaClO、Na_2HPO_4、KH_2PO_4、冰醋酸和红四氮唑（TTC）均为分析纯，乙醇和 H_2SO_4 为

①基金项目：国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (No. 2007CB936604) 资助。

* 通讯作者 (dmzhou@issas.ac.cn)

作者简介：金盛杨 (1981—)，男，浙江海宁人，博士研究生，主要从事纳米安全性评价研究。E-mail: syjin@issas.ac.cn

优级纯；MES（2-[N-吗啡啉]乙磺酸）为进口产品（Amresco），分析纯；琼脂粉（BR 级）；实验用水为去离子水，玻璃培养皿（底面直径 9.5 cm，高 1.5 cm）。

实验仪器：H-7650 型透射电子显微镜（TEM，日立公司，日本），FEI Quanta 200 扫描电子显微镜（SEM，FEI 公司，荷兰），JW-004 型 BET 氮气吸附仪（北京精微高博公司），MLR-351H 型人工恒温气候培养箱（三洋公司，日本），KQ-300VDE 型超声波仪（昆山超声仪器有限公司），752 紫外可见分光光度计（上海菁华科技仪器有限公司）。

1.2 纳米氧化铜形貌分析

称取一定量的 CuO NPs，加入乙醇中配制成含 100 mg/L（以 Cu 计，全文同）的 CuO NPs 有机悬液，然后对悬液进行超声（45 Hz，300 W，30 min）处理后用 TEM 表征 CuO NPs 形貌。

1.3 植物营养液配制

将一定浓度的 $CaCl_2$、$MgSO_4$、NaCl 和 KCl 母液加入去离子水配成含 0.20 mmol/L Ca^{2+}、0.05 mmol/L Mg^{2+}、2.5 mmol/L Na^+ 和 0.08 mmol/L K^+ 的简易营养液，并通过 2 mmol/L MES 缓冲液和适量稀 NaOH 溶液调节营养液 pH 为 6.0。

1.4 含纳米氧化铜的琼脂培养基制备

另外，称取一定量 CuO NPs 和琼脂粉混合均匀后加入到 1.3 配制的营养液中，超声处理（45 Hz，300 W，30 min）后倒入玻璃培养皿内制成固体琼脂培养基（$W_{琼脂}:W_{营养液}=0.01$），琼脂中 CuO NPs 形貌和分布用 SEM 进行表征。

1.5 纳米氧化铜暴露对小麦根伸长影响

CuO NPs 对小麦根伸长影响试验参考了 OECD[9] 和 USEPA[10]的方法。按照 1.4 中的方法制备含 0 ~ 100 mg/L CuO NPs 的琼脂培养基待用。取饱满、颗粒大小均一的小麦种子进行消毒处理（0.3% NaClO 溶液浸泡 10 min，然后用去离子水冲洗 30 min）。将消毒后的种子放在去离子水润湿的滤纸上于恒温培养箱内黑暗发芽，培养箱中温度保持在（25 ± 1）℃，湿度为（80 ± 5）%。24 h 后选用 9 株发芽至有 3 条根且根长约为 0.5 cm 的幼苗分别移栽至琼脂培养基中开始根伸长影响试验，注意保护幼根不受损伤。所有处理均为 3 次重复，并在培养箱中采用完全随机放置的方式，保持黑暗，在（20 ± 1）℃下培养。48 h 暴露后结束试验，测定每株小麦幼苗的最长根长。

1.6 小麦根在纳米氧化铜暴露下相关生理生化指标变化

本试验主要考察 CuO NPs 对小麦根的植物蛋白、超氧化物歧化酶（SOD）活性、膜脂过氧化水平（以丙二醛，即 MDA 含量表征）和根系活力的影响。参照 1.5 中琼脂培养小麦过程进行试验，CuO NPs 暴露浓度分别为 0、1、10 和 100 mg/L，暴露时间为 48 h。SOD、丙二醛和植物蛋白含量测定前对小麦根进行同样的前处理。将小麦幼苗从琼脂培养基中取出后在生理盐水中将其根部漂洗干净，用吸水纸吸去根表残留的水渍后用小刀切下根部，在电子天平上准确称取小麦根重量，按重量体积比加入 9 倍的生理盐水制成 10% 的匀浆，4 000 r/min，离心 10 min，取上清即 10% 的植物匀浆待测。

SOD 活性测定：将植物匀浆用生理盐水稀释 1.5 倍，分别在测定管和对照管中加入双蒸水、待测样本和相关试剂，用旋涡混匀器充分混匀，置 37℃ 恒温水浴 40 min 后加入显色剂。再次对样品混匀后，室温放置 10 min，于波长 550 nm 处，1 cm 光径比色杯，蒸馏水调零，比色，最后经过换算吸光度获得 SOD 活性值（以每毫克植物蛋白所含活性单位计）。

MDA 含量测定：在标准管、空白管、测定管和对照管中分别加入植物匀浆、无水乙醇、标准品和相关试剂，混匀后再加入冰醋酸和另两种标准试剂，并用涡旋混匀器混匀。所有试管口用保鲜薄膜扎紧，用针头刺一小孔，沸水浴 40 min，取出后流水冷却，然后以 3 500 r/min 离心 10 min，取上清液，测各管吸光度值（532 nm，1 cm 光径，蒸馏水调零），最后将吸光度值换算成 MDA 含量（以每毫克植物蛋白中的含量计）。

植物蛋白含量测定: 分别在空白管、标准品管和测定管按标准测试方法分别加入植物匀浆、双蒸水、蛋白标准和考马应用液，然后混匀并静置 10 min，于 595 nm 波长，1 cm 光径，蒸馏水调零，测定各管光密度值，最后经过换算获得蛋白含量（以每克小麦根鲜重（FW）中含量计）。

根系活力测定参照李合生[11]的方法：称取根尖样品（约 0.2 g），放入试管中，加入 6 ml 配制在 0.06 mol/L Na_2HPO_4-KH_2PO_4 和 0.5 ml/L 吐温 20 中的 6 ml/L 红四氮唑（TTC）溶液，使根充分浸没在溶液内，在 30℃ 下暗保温 20 h，此后立即加入 2 ml 的 1 mol/L H_2SO_4 以停止反应（与此同时做一空白试验，先加根样品，再加 H_2SO_4 并放置 30 min 使根系灭活，30℃下暗保温后不加 H_2SO_4，其溶液浓度、操作步骤同上）。停止反应 10 min 后把根取出，用滤纸吸干水分并放入试管中，加 95% 乙醇 6 ml，在 80℃下水浴 15 min 以提取出三苯甲臜（TPF）。把红色提取液移入容量瓶中，最后用

95% 乙醇定容到 10 ml，用分光光度计在波长 520 nm 下比色，以空白试验作参比测出吸光度，利用标准曲线即可得到根系活力值（以每小时每克小麦根鲜重所得到的 TPF 含量计）。

1.7　数据处理和统计

通过相对净根伸长来定义 CuO NPs 暴露对小麦根伸长的影响。相对净根伸长（relative net elongation，RNE）定义为:

$$RNE(\%) = 100 \times (RL_{cu} - RL_0)/RL_{ck} - RL_0)$$

式中，RL_0 代表小麦移栽时的初始根长，RL_{cu} 和 RL_{ck} 分别代表 CuO NPs 暴露处理和空白对照处理 48 h 后的根长。当 RNE 大于 100% 时则表明 CuO NPs 对小麦根伸长起促进作用，反之则表明起抑制作用。

本文数据结果均采用统计软件 SPSS 11.5 for Windows 进行分析计算。

2　结果与分析

2.1　纳米氧化铜形貌分析

纳米氧化铜（CuO NPs）在有机相（乙醇)中的透射电镜图像和在琼脂培养基中的扫描电镜图像分别如图 1 所示。由图 1 左可见，CuO NPs 呈近圆球状，其粒径范围为 25 ~ 80 nm，平均粒径为 55 nm，比表面积为 23.9 m^2/g。图 1 右表明，CuO NPs 在琼脂中呈均匀分布状态。由此证明，琼脂是一种解决纳米颗粒分散和沉降问题的良好介质。另外，琼脂培养基具有一定的颗粒组成、固液相分配比例，与土壤具有相似性。因此，琼脂培养是一种模拟实际土壤进行纳米毒理研究的理想方法。

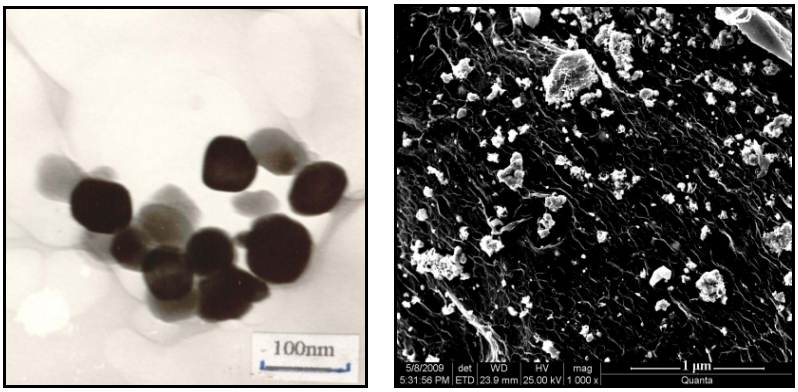


图 1　CuO NPs 在乙醇中的透射电镜图（左）和在琼脂中的扫描电镜图（右）

Fig. 1　TEM image of CuO NPs in ethanol (left) and SEM image of CuO NPs in agar (right)

2.2　纳米氧化铜对小麦根伸长的影响

为了深入考察 CuO NPs 植物毒性与纳米材料浓度间的相关关系，本文引入被广泛应用于研究生物毒性-毒物剂量关系的 Weibull 分布方程[12]进行非线性回归拟合分析:

$$RNE\ (\%) = 100 / \exp[(\alpha\{T\})^{\beta}]$$

式中，$\{T\}$ 表示毒性物质浓度，α 和 β 分别为方程系数，α 与毒性强度有关，β 与方程拟合曲线变化有关。小麦 RNE 与琼脂中 CuO NPs 浓度的经验回归方程见图 2，CuO_{NPs} 表示琼脂中 CuO NPs 浓度，指数方程的决定系数 $R^2 = 0.99$。结果表明，小麦 RNE 与 CuO NPs 投放量之间存在指数相关关系。

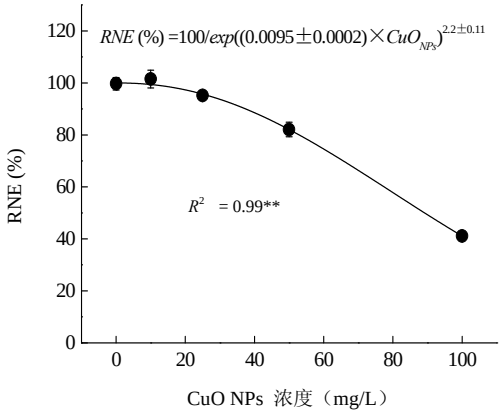


图 2　CuO NPs 浓度对小麦根伸长影响

Fig. 2　RNE as function of the concentration of CuO NPs

琼脂培养下，不同浓度 CuO NPs 暴露对小麦根伸长影响显著不同。如图 2 所示，低浓度（10 mg/L）CuO NPs 暴露促进了小麦根生长，其相对净根伸长（RNE）为 101.5%。当 CuO NPs 浓度继续增大时，小麦根生长开始被抑制，纳米材料浓度越高，根伸长被抑制程度越强。当 CuO NPs 暴露浓度达到 100 mg/L 时，小麦 RNE 仅为 41.1%。

2.3 纳米氧化铜对小麦根内超氧化物歧化酶活性和细胞膜脂过氧化影响

超氧化物歧化酶（SOD）是一种源于生命体的活性物质，具有特殊的生理活性，是生物体内重要的抗氧化酶，能消除体内的自由基。SOD 在植物体内的水平高低可表征其抗不良胁迫能力。由图 3 可知，在 1 mg/L CuO NPs 暴露浓度下 SOD 活性比对照组增强了 51.3%，说明低浓度 CuO NPs 可以增强小麦根内 SOD 活性。在高剂量（100 mg/L）暴露下，根内 SOD 活性则开始出现急剧下降，仅为对照组的 49.9%。与 2.2 结果比较可知，SOD 活性的变化趋势与小麦根伸长具有一致性，即在低浓度 CuO NPs 暴露下被促进而在高浓度暴露下被抑制。

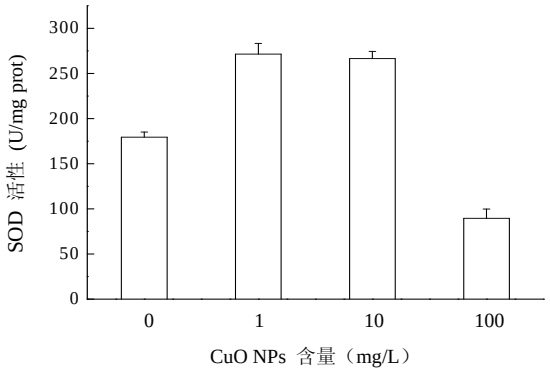


图 3 CuO NPs 暴露对小麦根内 SOD 活性影响

Fig. 3 Effect of CuO NPs exposure on SOD activity of wheat root

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害时，往往发生膜脂过氧化作用。丙二醛（MDA）是膜脂过氧化作用的最终分解产物，其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度，MDA 的积累可能对膜和细胞造成一定的伤害。图 4 说明，随着 CuO NPs 暴露浓度增加，小麦根细胞内 MDA 含量也逐渐升高，说明 CuO NPs 对小麦根具有毒性胁迫作用。当 CuO NPs 暴露浓度控制在 10 mg/L 以内时，MDA 积累量相比对照组增加不显著；当暴露浓度升高到 100 mg/L 时，MDA 积累量急剧增加，可达到对照组的 6.8 倍。

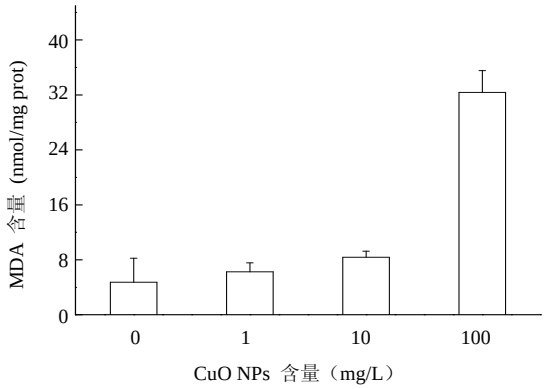


图 4 CuO NPs 暴露对小麦根内 MDA 含量影响

Fig. 4 Effect of CuO NPs exposure on MDA content of wheat root

2.4 纳米氧化铜对小麦根植物蛋白含量和根系活力影响

蛋白是植物体最重要的组成成分，植物只有维持一定的蛋白含量才能正常进行各项新陈代谢活动。图 5 表明，随着 CuO NPs 暴露浓度升高，小麦根的植物蛋白含量不断降低。当 CuO NPs 暴露浓度为 1 mg/L 时，植物蛋白含量为对照组的 66.3%；当暴露浓度增加到 100 mg/L 时，植物蛋白含量仅为对照组的 10.8%。

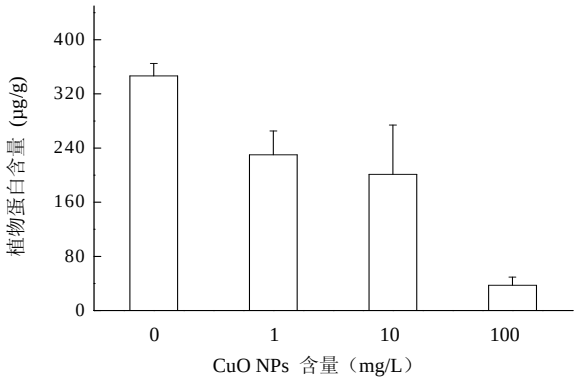


图 5 CuO NPs 暴露对小麦根蛋白含量影响

Fig. 5 Effect of CuO NPs exposure on plant protein of wheat root

根系活力泛指根系的吸收、合成、氧化和还原能力等，反映了根系代谢强度的大小。活力越高，则根系组织的代谢活动就越旺盛。从图 6 来看，小麦根系活力随着 CuO NPs 暴露浓度的升高而升高。在 0 ~ 50 mg/L CuO NPs 浓度范围内，根系活力变化较小，50 mg/L CuO NPs 暴露下的根系活力约为对照组的 1.5 倍。当暴露浓度继续增加时，根系活力开始大幅提高，100 mg/L CuO NPs 暴露下的小麦根系活力可达到对照组的 2.8 倍。

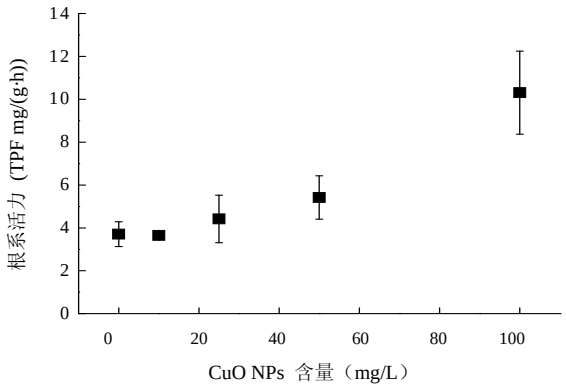


图 6　CuO NPs 暴露对小麦根系活力的影响

Fig. 6　Effect of CuO NPs exposure on root vitality of wheat root

3　讨论

3.1　纳米氧化铜暴露下植物根伸长与超氧化物歧化酶活性

由 2.2 结果可知，低浓度（1 ~ 10 mg/L）的纳米氧化铜（CuO NPs）暴露可在一定程度上促进小麦根伸长，说明纳米金属材料与其他有毒物质一样对植物生长具有低浓度刺激效应[13-14]。当暴露浓度继续升高时，CuO NPs 开始表现出显著的植物毒性效应，小麦根伸长随着其浓度增加呈指数减少趋势。CuO NPs 暴露下小麦根生长变化与其生理生化行为密不可分，其中超氧化物歧化酶（SOD）活性变化与根伸长具有一致性，即在低浓度（1 ~ 10 mg/L）CuO NPs 存在下被促进而在高浓度暴露下被抑制（图 3），说明 CuO NPs 可能通过影响植物细胞的抗氧化能力而产生毒性效应。Nel 等[15]认为纳米材料暴露能刺激生物细胞表面电子供体与氧分子反应，从而生成超氧自由基（O_2^-），随后超氧自由基可以在细胞体内发生歧化反应或 Fenton 反应而产生活性氧（reactive oxygen species，ROS），ROS 的产生能够导致生物细胞 DNA 复制出错，膜系统受损和氧化应激等反应。结合图 2 和图 3 表明，在低浓度（1 ~ 10 mg/L）CuO NPs 暴露下，小麦可通过增强 SOD 活性以清除纳米材料诱导产生的 ROS，从而保证甚至促进植物的生长。当 CuO NPs 暴露浓度超过一定范围（如 100 mg/L）时，植物体内 SOD 活性大幅降低，因此难以清除大量积累的 ROS 而使细胞受损导致植物根生长受到抑制。

3.2　纳米氧化铜暴露下植物细胞膜脂过氧化与蛋白含量变化

本研究结果证实了纳米材料暴露会导致生物膜系统受损。从 2.4 和 2.5 结果可知，在 1 ~ 100 mg/L 范围内 CuO NPs 暴露增加了小麦根内丙二醛（MDA）含量，同时降低了植物蛋白含量。MDA 是膜脂过氧化的最终分解产物，从膜上产生的位置释放出后，与蛋白质、核酸起反应修饰其特征，能够使纤维素分子间的桥键松驰，从而抑制蛋白质的合成。因此，由 Nel 等[15]理论可知 CuO NPs 暴露产生的 ROS 首先导致了小麦根细胞膜脂过氧化，从而通过抑制植物蛋白的合成造成其含量下降。结合 2.2 结果表明，低浓度 CuO NPs （1 ~ 10 mg/L）下植物细胞在 CuO NPs 暴露下发生的一定水平膜脂过氧化和蛋白含量降低并不影响植物根生长，因此表明植物对 CuO NPs 毒性胁迫具有一定的耐受能力。

3.3　纳米氧化铜暴露下植物的适应性应激响应

植物对纳米材料暴露的应激响应体现在根系活力变化上，随着 CuO NPs 暴露浓度升高，小麦根系活力不断增强（图 6）。这说明植物试图通过加快自身新陈代谢，加速有毒物质在植物体内外的转运来抵御 CuO NPs 暴露带来的毒性伤害，这是一种生物适应性的体现。1 ~ 50 mg/L CuO NPs 暴露下小麦根系活力提高幅度相对较小，说明此时植物尚未感受到明显的纳米毒性胁迫。当 CuO NPs 暴露浓度增加至 100 mg/L，小麦根系活力急剧增加，表明纳米材料对植物产生了强烈的毒性效应，该浓度下的纳米毒性同时也反映在根伸长和 SOD 活性抑制、细胞膜脂过氧化水平升高和植物蛋白含量降低等方面（图 2 ~ 图 5）。

综上所述，CuO NPs 对根伸长抑制主要是由于纳米材料暴露造成了植物细胞膜过氧化损伤。同时，植物能对相对低浓度纳米材料暴露作出适应性应激响应而减轻毒性伤害甚至促进生长，但在高浓度下这种适应性机制将会被过多的 ROS 积累所破坏。本研究发现 CuO NPs 暴露浓度从 10 mg/L 至 100 mg/L 的变化显著增强了纳米材料的毒性效应，说明小麦对 CuO NPs 暴露的最高耐受浓度应处在这一区间内，应进一步研究以确定 CuO NPs 对于植物的环境容纳量。

参考文献:

[1] Griffitt RJ, Luo J, Gao J, Bonzongo JC, Barber DS. Effects of particle composition and species on toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(9): 1 972−1 978

[2] Nowack B, Bucheli TD. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. Environmental Pollution, 2007, 150(1): 5−22

[3] Lin DH, Xing BS. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. Environmental Science and Technology, 2008, 42(15): 5 580−5 585

[4] Lee WM, An YJ, Yoon H, Kweon HS. Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): Plant agar test for water-insoluble nanoparticles. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(9): 1 915−1 921

[5] Speranza A, Leopold K, Maier M, Taddei AR, Scoccianti V. Pd-nanoparticles cause increased toxicity to kiwifruit pollen compared to soluble Pd (Ⅱ). Environmental Pollution, 2010, 158(3): 873−882

[6] Lin DH, Xing BS. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. Environmental Pollution, 2007, 150(2): 243−250

[7] Seeger EM, Baun A, Kästner M, Trapp S. Insignificant acute toxicity of TiO_2 nanoparticles to willow tree. Journal of Soils and Sediments, 2009, 9(1): 46−53

[8] Doshi R, Braida W, Christodoulatos C, Wazne M, O'Connor G. Nano-aluminum: Transport through sand columns and environmental effects on plants and soil communities. Environmental Research, 2008, 106(3): 296−303

[9] OECD. OECD Guideline for the Testing of Chemicals # 208 Terrestrial Plants, Growth Test (Draft). Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2003: 1−19

[10] USEPA. OPPTS Series 850-Ecological Effects Test Guidelines 850.4200: Seed Germination/root Elongation Toxicity Test. US: Environmental Protection Agency, Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substance, 1996: 1−6

[11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出社, 2000: 119−120

[12] Taylor GJ, Stadt KJ, Dale MRT. Modelling the phytotoxicity of aluminum, cadmium, copper, manganese, nickel and zinc using the Weibull frequency distribution. Canadian Journal of Botany, 1991, 69(2): 359−367

[13] Stebbing AR. Hormesis-the stimulation of growth by low levels of inhibitors. Science of The Total Environment, 1982, 22(3): 213−234

[14] 黄健, 唐学玺, 宫相忠, 李永祺. 低浓度毒物对海洋微藻生长刺激效应的初步研究. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1 516−1 518

[15] Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel. Science, 2006, 311(5 761): 622−627

Effects of CuO Nanoparticles on Physiological and Biochemical Behaviors of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Root

JIN Sheng-yang[1,2], WANG Yu-jun[1], WANG Peng[1,2], WENG Nan-yan[1,2], ZHOU Dong-mei[1]

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture* (*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences*), *Nanjing* 210008, *China*; 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: To explore the effects of metal nanoparticles on plant growth, agar culture simulating soil was used to characterize the root elongation and relative physiological and biochemical behavior of wheat (*Triticum aestivum* L.) under stress of copper oxide nanoparticles (CuO NPs). The results showed that the inhibition of root elongation in agar was exponentially correlated with the concentration of CuO NPs, which was increased slightly at a lower concentration (10 mg/L) of CuO NPs but decreased greatly at a higher concentration (100 mg/L). It should be noted that the variation of superoxide dismutase (SOD) activity shared the same trend as the inhibition of root elongation under CuO NPs exposure. Furthermore, with increasing of CuO NPs from 1 to 100 mg/L, the content of malonaldehyde (MDA) continuously increased while the protein content sharply decreased in roots. These results demonstrated that the inhibition of root elongation could be mainly attributed to the peroxide injury of plant cell membrane under CuO NPs exposure. Interestingly, wheat root may exhibit the adaptive response through enhancing the root vitality to alleviate the phytotoxicity induced by CuO NPs.

Key words: CuO nanoparticles, Wheat, Root elongation, Physiological and biochemical behavior