



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响

尹勇, 刘灵

引用本文:

尹勇, 刘灵. 三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 736–743.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0259>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改性蒙脱石修复镉污染对水稻根际土壤酶活性的影响

陈泽雄, 朱凰榕, 周志军, 赵秋香

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 528–533 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0269>

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 544–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究

徐奕, 赵丹, 徐应明, 孙约兵

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 38–46 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0208>

硅铁施用对水稻生长及磷吸收的影响

刘煜椿, 李仁英, 谢晓金, 李霖, 徐向华, 张婧, 吴思佳, 简静, 李玉聪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 511–517 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0145>

海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤DOM粒径分布与光谱特性

吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 吴治澎, 解钰, 符佩娇

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 654–665 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尹勇, 刘灵. 三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 736–743.

YIN Yong, LIU Ling. Effects of three nanomaterials on the growth and rhizospheric soil fertility of rice seedlings[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 736–743.



开放科学 OSID

三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响

尹勇^{1,2}, 刘灵^{1,2*}

(1. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541006)

摘要:为探讨纳米材料在土壤环境中的生态效应,采用盆栽试验将三种外源纳米材料(nSiO_2 、 nTiO_2 、 nZnO)分别添加到水稻土中,研究三种浓度的纳米材料对盆栽水稻幼苗生长及土壤肥力的影响。结果表明:0.5 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nZnO 处理后水稻幼苗鲜质量、干质量和株高增加,但1、2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nZnO 处理后水稻鲜质量、干质量和株高降低;2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 处理后水稻干质量和株高显著降低。0.5、2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 处理后的水稻N含量显著降低,三种浓度 nZnO 处理后的水稻P含量显著增加,而K含量显著降低。1、2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nTiO_2 处理对水稻生长、主要营养元素(N、P、K)含量以及土壤有效氮、有效磷、有效钾含量的影响均不显著。经三种浓度 nSiO_2 和 nTiO_2 处理后的土壤pH和有机质含量均降低,1、2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 处理后土壤有效氮和有效磷含量显著增加,三种浓度的 nZnO 处理后土壤有效磷和有效钾含量降低。经三种纳米材料处理后土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性分别被显著抑制和显著促进,不同浓度的 nZnO 处理土壤蔗糖酶和脲酶活性均被显著抑制。总体而言,三种纳米材料中 nZnO 对植物的生长、养分吸收和土壤酶活性的影响最大。

关键词:纳米材料;水稻;植物生长;土壤养分;土壤酶

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)05-0736-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0259

Effects of three nanomaterials on the growth and rhizospheric soil fertility of rice seedlings

YIN Yong^{1,2}, LIU Ling^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Conservation of Education Ministry, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China; 2. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China)

Abstract: In order to explore the ecological effects of nanomaterials in the soil environment, three exogenous nanomaterials (nSiO_2 , nTiO_2 and nZnO) were separately added to the paddy soil of potted rice seedlings. The effects of the three nanomaterials, with different concentrations, on the growth and rhizospheric soil fertility of the rice seedlings were then analyzed. The results showed that the fresh weight, dry weight and plant height of rice seedlings treated with 0.5 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nZnO increased, but both 1 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nZnO treatment had the opposite effect. The dry weight and plant height of rice seedlings treated with 2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 decreased significantly. The nitrogen content of rice seedlings treated with 0.5 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 was significantly decreased. P content in rice seedlings treated with three concentrations of nZnO increased and K content decreased significantly. The effects of 1 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nTiO_2 treatment on plant growth, main nutrient (N, P, K) content, soil available nitrogen, available phosphorus, and available potassium were not significant. Soil pH and organic matter content decreased after treatment with nSiO_2 and nTiO_2 at three concentrations, soil available nitrogen and available phosphorus content increased significantly after treatment with 1 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 . Soil available phosphorus and available potassium content decreased after treatment with nZnO at three concentrations. The activity of soil acid phosphatase was significantly inhibited and that of catalase was significantly promoted after treatment with all three kinds of nanomaterials, and the activities of soil invertase and urease were significantly inhibited under three different concentrations of nZnO . Among the three nanomaterials tested with rice seedlings, nZnO treatment had the strongest influence on growth, nutrient uptake and rhizospheric soil enzyme activity.

Keywords: nanomaterials; rice; plant growth; soil nutrients; soil enzymes

收稿日期: 2019-03-19 录用日期: 2019-05-16

作者简介: 尹勇(1992—), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生, 从事植物生理及土壤微生物研究。E-mail: 502881597@qq.com

*通信作者: 刘灵 E-mail: liuling@mailbox.gxnu.edu.cn

由于纳米材料具备独特的物理及化学特性,纳米产品在社会生产生活中应用越来越广泛。其中应用最广泛、使用最多的三种纳米材料是 nSiO_2 (纳米二氧化硅)、 nTiO_2 (纳米二氧化钛)和 nZnO (纳米氧化锌)。据报道,2012年我国通过气相法生产的 nSiO_2 约为5.23万t,其主要用于电子、橡胶、涂料、环保等领域^[1]。Keller等^[2]通过调查研究得出2010年全球 nTiO_2 和 nZnO 的产量分别为83 500~88 000 t和31 500~34 000 t,这两种纳米材料均可用于防晒霜、抗菌涂料和食品包装等产品中^[3-4]。

随着纳米材料的广泛应用,纳米产品的普及给人们生活带来益处的同时,也对生态系统产生潜在的危害。近几年,国内外大量文献报道了纳米材料的环境生态效应,但多集中于水环境^[5-8]。而农业上的喷洒、灌溉会将水体中的纳米材料带入土壤,另外纳米农药和纳米肥料的施用也会使纳米材料进入土壤。由于纳米材料在土壤中迁移能力较弱,其在土壤中的含量远高于水体^[9]。据估计,2010年全球约有86 500 t的纳米材料通过各种途径被释放到土壤中,其中约有10 600 t nSiO_2 、38 200 t nTiO_2 和8 700 t nZnO ^[2]。Gottschalk等^[9]通过模型预测土壤中 nTiO_2 和 nZnO 含量年增长速率分别为0.3~1.3、0.03~0.09 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;有调查显示, nTiO_2 和 nZnO 在活性污泥中的含量分别达到57.0~64.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和433~802 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[10]。

土壤中的纳米材料可进入生物细胞,通过释放金属离子、产生活性氧、吸附其他污染物等直接或间接作用对植物和微生物产生影响,进而影响土壤中营养元素向植物中转移,从而影响植物的生长^[11-12]。孟萍^[13]通过透射电镜观察和X射线能谱仪分析发现,添加到土壤中的 nTiO_2 会进入西兰花幼苗根部细胞,并

影响其根系分泌物的种类和数量;刘雪琴^[14]也发现添加到土壤中的 nZnO 会进入玉米根和叶片细胞中,诱导植株细胞内的活性氧自由基(ROS)含量的增加;Dimkpa等^[15]发现 nCuO 和 nZnO 在沙土中会分别溶解出Cu和Zn,并对植物产生氧化损伤,抑制植物生长;李琳慧^[16]研究发现, nTiO_2 对土壤中氨化细菌、硝化细菌、自生固氮菌具有抑制作用,同时也降低了土壤脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶、脱氢酶的活性。但也有研究表明 nTiO_2 可以降低水稻根对Cd的吸收,减少Cd在水稻叶的积累,减轻Cd对植物的毒性^[17]。

目前关于纳米材料对土壤环境的生态效应的研究相对缺乏,因此,本研究取水稻田间土采用盆栽实验,通过向土壤中添加三种常用纳米材料,探讨土壤环境中纳米材料对水稻生长、植物养分及土壤肥力的影响,以期对纳米材料在土壤环境中的生态效应评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

三种纳米材料(nSiO_2 、 nTiO_2 、 nZnO)均购自皓锡纳米科技(上海)有限公司。其透射电镜(TEM)图见图1(由皓锡纳米科技有限公司提供),具体性质如表1所示。

供试水稻品种为桂育8号,发芽率>90%,购自广西农业科学院;供试土壤采自广西桂林会仙镇水稻田(东经110°11'59",北纬25°05'11"),去除表层土壤,采集5~20 cm深度的土壤,在室内风干,去除小石块、植物组织和杂物,过2 mm筛备用。供试土壤基本理化性质:pH 5.74,有机质4.86%,全氮3.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷1.91 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾16.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

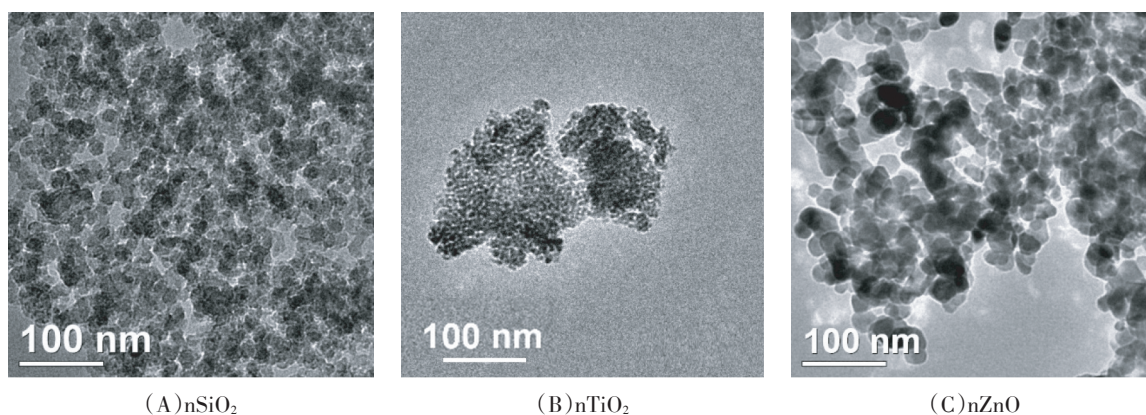


图1 三种纳米材料的TEM图

Figure 1 The TEM images of three nanomaterials

表1 三种纳米材料基本信息

Table 1 Basic information on the three nanomaterials

名称 Name	粒径 Size/nm	纯度 Purity/%	Zeta电位 Zeta potential/mV	水力直径 Hydrodynamic size/nm
nSiO ₂	20	99.9	-24.8±1.6	396
nTiO ₂	5	99.9	-7.4±1.0	712
nZnO	20	99.9	-13.3±0.4	220

1.2 试验方法

分别称取0.5、1 g和2 g纳米材料加入400 mL无菌水中,采用超声波细胞破碎仪在400 W的条件下超声分散20 min,然后将400 mL的纳米分散液加入到1 kg过2 mm筛的水稻土中,边加边混匀,即得到0.5、1、2 mg·g⁻¹三种(低、中、高)浓度纳米材料的土壤。

选取颗粒饱满大小相近的水稻种子,先用自来水冲洗干净,再用10%的H₂O₂浸泡10 min,然后用无菌水冲洗4~5次,用无菌水浸种12 h,将含有不同浓度(0、0.5、1、2 mg·g⁻¹)三种纳米材料的土壤装入培养盒中(培养盒长×宽×高=18 cm×13 cm×6 cm),将浸泡好的种子种植在其中,每盒12穴,每穴3粒种子,每个处理3个重复,共30盒。于25℃模拟自然光照(光照14 h,黑暗10 h)培养30 d,每3 d补加一次Hoagland营养液,每次补加100 mL,培养期间每日浇水100 mL,保持培养箱湿度为65%~75%。

将培养30 d的水稻幼苗用去离子水清洗3~5次,用吸水纸吸干,将根部剪去后用直尺测量其株高,并立即测量鲜质量,105℃杀青30 min,75℃烘干24 h至恒质量,取出测定干质量。烘干的叶子磨碎过0.21 mm筛,采用鲁如坤^[18]的方法测定水稻叶子N、P、K含量。

将培养水稻后的土壤混匀后取一部分风干,取出残留的水稻根系,过筛后采用鲁如坤^[18]的方法测定土壤pH、有机质、有效氮、有效磷和有效钾含量;采用关松荫^[19]的方法测定土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶及酸性磷酸酶活性。

1.3 数据分析

用Excel 2003处理数据,采用SPSS 20.0中的ANOVA进行单因素方差分析,并用Duncan多重比较法进行差异显著性分析,用Origin 8.0绘图。

2 结果与分析

2.1 纳米材料对水稻幼苗生长的影响

三种纳米材料对水稻幼苗的各项生长指标的影响各不相同(图2)。与不添加纳米材料的对照相比,

土壤中添加三种浓度的nSiO₂和nTiO₂都对水稻幼苗鲜质量影响不显著;而添加0.5 mg·g⁻¹ nZnO处理显著增加了幼苗鲜质量,增幅24.94%,但添加1 mg·g⁻¹和2 mg·g⁻¹的nZnO时,水稻鲜质量分别降低8.97%(*P*>0.05)和5.86%(*P*>0.05)。与对照相比,三种浓度的nTiO₂处理对幼苗的干质量影响不显著;但是nSiO₂和nZnO处理都表现出低浓度增加幼苗干质量和高浓度降低幼苗干质量的现象。土壤中添加2 mg·g⁻¹ nSiO₂

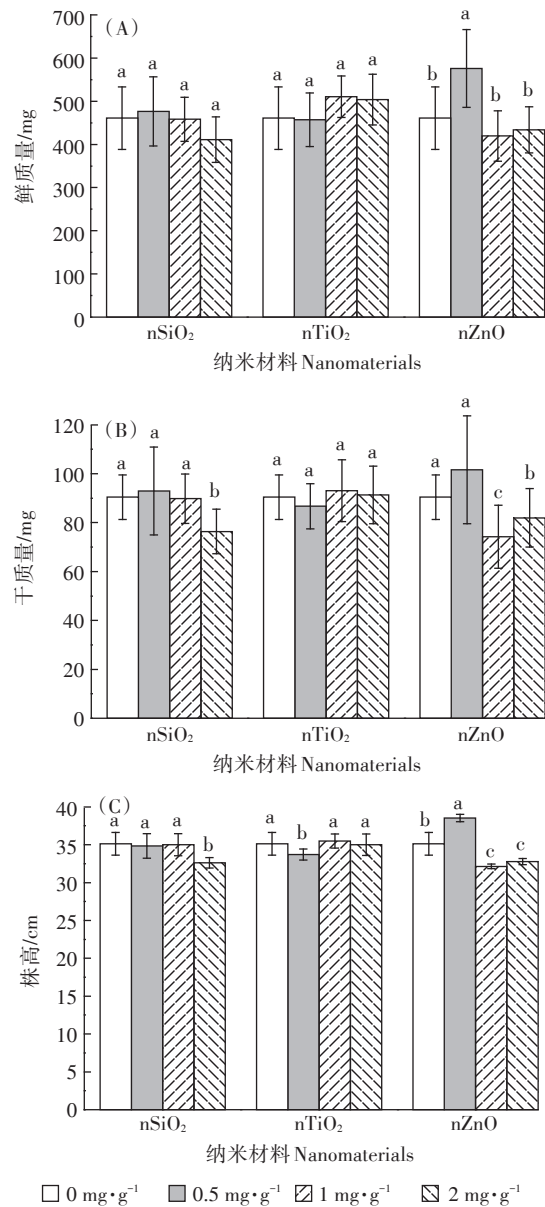


图2 三种纳米材料对水稻幼苗生长的影响
Figure 2 Effect of three nanomaterials on growth of rice seedlings

或 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nTiO_2 均显著降低水稻幼苗的株高,分别降低 7.12% 和 4.01%;添加低浓度的 nZnO 显著增加幼苗的株高,增长 9.71%,而添加中、高浓度的 nZnO 显著降低幼苗的株高,分别降低了 8.51% 和 6.67%。

2.2 纳米材料对水稻幼苗营养元素含量的影响

如图 3 所示,三种纳米材料中 nZnO 处理对水稻幼苗 N、P、K 三种营养元素含量的影响最大。与无纳米材料的对照组相比,添加各种浓度的 nTiO_2 都对水稻幼苗 N 含量无显著影响;添加低、高浓度的 nSiO_2 均显著降低幼苗 N 含量,与对照相比分别降低 10.16% 和 18.83%,而 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 nSiO_2 处理幼苗 N 含量增加不显著; nZnO 处理对水稻幼苗 N 含量影响与 nSiO_2 相似,与对照相比,低、高浓度处理幼苗 N 含量分别降低 10.50% 和 15.32%,中浓度的 nZnO 处理水稻幼苗 N 含量增加 7.96%。与对照相比,三种浓度的 nSiO_2 、 nTiO_2 和 nZnO 处理均增加水稻幼苗 P 含量($2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 处理除外)。 nSiO_2 处理水稻幼苗 P 含量随着土壤中添加的 nSiO_2 增加而逐渐降低,但是各浓度处理间差异并不显著; nTiO_2 处理与 nSiO_2 处理正好相反,水稻幼苗 P 含量随着土壤中添加的 nTiO_2 增加而逐渐增加;水稻幼苗 P 含量受 nZnO 影响最显著,与对照相比,土壤中添加三种浓度的 nZnO 均显著增加幼苗 P 含量,分别增加 12.75%、20.59% 和 17.50%。与不添加纳米材料的处理相比,土壤中添加 nSiO_2 和 nTiO_2 对水稻幼苗 K 含量无显著影响;但水稻幼苗 K 含量受 nZnO 影响显著,三种浓度处理幼苗 K 含量分别降低 15.38%、13.08% 和 17.08%。

2.3 纳米材料对水稻土壤理化性质的影响

三种纳米材料的添加对土壤 pH 的影响具有差异(表 2)。随着土壤中添加的 nSiO_2 浓度增加,土壤 pH 逐渐降低,当土壤中添加 $1, 2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ nSiO_2 时,土壤 pH 显著低于对照组;随着土壤中添加的 nTiO_2 浓度增加,土壤 pH 呈上升趋势,但各处理的 pH 都显著小于对照组;添加高浓度的 nZnO 显著增加土壤 pH,但低、中浓度 nZnO 处理对土壤 pH 的影响并不显著。土壤中添加 nSiO_2 降低了土壤有机质含量,且随着添加浓度的增高而逐渐降低,降幅为 1.17%~4.48%;添加三种浓度的 nTiO_2 处理后土壤有机质含量均小于对照处理,尤其是低、中浓度的处理差异显著,分别降低 6.43%、6.43%;添加 $0.5, 1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 nZnO 降低土壤有机质含量,但当添加的 nZnO 浓度增加到 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,土壤有机质含量高于对照处理,但三种浓度 nZnO 处理的有机质含量与对照处理的差异均不显著。

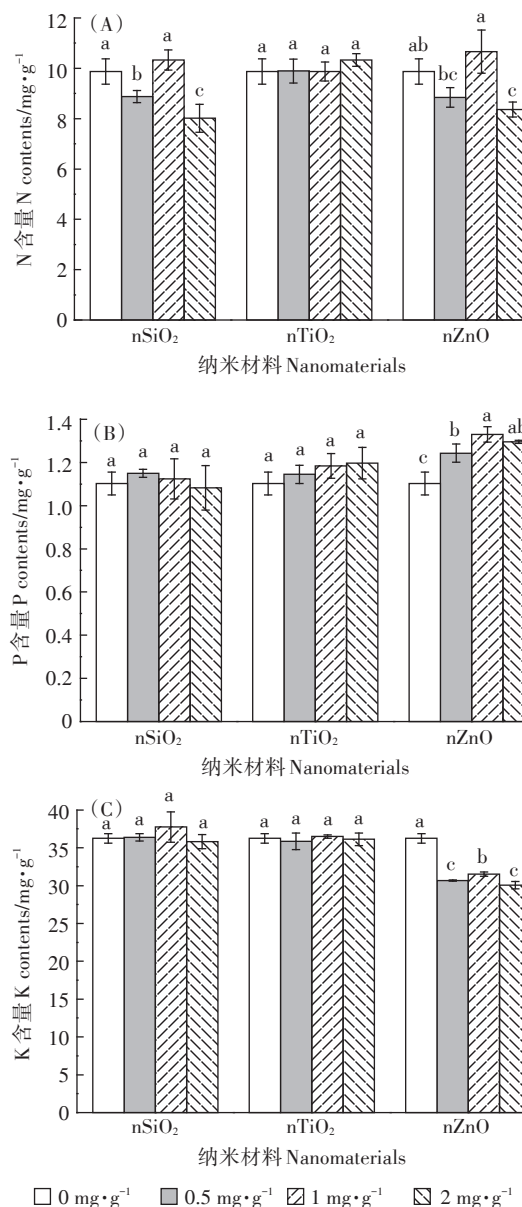


图3 三种纳米材料对水稻幼苗营养元素含量的影响

Figure 3 Effect of three nanomaterials on the nutrient content in rice seedlings

与对照相比,添加中、高浓度的 nSiO_2 处理均显著增加土壤有效氮的含量,分别增加了 5.43%、4.65%,但低浓度的 nSiO_2 对土壤有效氮的含量影响不显著;三种浓度的 nTiO_2 和 nZnO 处理对土壤有效氮含量的影响并不显著。随着土壤中 nSiO_2 的添加量增加,土壤有效磷的含量总体为增加的趋势,增幅为 4.88%~7.90%,当添加浓度增加到 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,土壤有效磷的含量显著高于对照处理;土壤有效磷的含量随着土壤中 nTiO_2 的添加量增加呈现逐渐降低的趋势,但各处理与对照之间的差异不显著; nZnO 的添加

表2 纳米材料对水稻土壤理化性质的影响

Table 2 Effect of nanomaterials on the physical and chemical properties of rice soil

纳米材料 Nanomaterials	浓度 Concentrations/(mg·g ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter/%	有效氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	有效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)
nSiO ₂	0	6.09±0.01a	5.13±0.03a	258±7b	86.1±0.8b	170±12a
	0.5	6.02±0.02ab	5.07±0.09a	256±4b	91.0±1.8ab	174±5a
	1	5.94±0.07bc	4.99±0.09ab	272±7a	90.3±3.5ab	168±2a
	2	5.87±0.05c	4.90±0.05b	270±4a	92.9±5.0a	177±3a
nTiO ₂	0	6.09±0.01a	5.13±0.03a	258±7ab	86.1±0.8ab	170±12a
	0.5	5.81±0.04c	4.80±0.10b	273±7a	90.0±1.7a	175±17a
	1	6.00±0.02b	4.80±0.14b	251±7b	88.1±0.5ab	168±6a
	2	6.02±0.03b	5.04±0.03a	258±8ab	85.3±3.9b	180±10a
nZnO	0	6.09±0.01b	5.13±0.03ab	258±7a	86.1±0.8a	170±12a
	0.5	6.09±0.02b	5.05±0.03b	250±8a	83.0±2.0b	147±18a
	1	6.13±0.03b	4.94±0.10b	259±7a	80.6±0.7c	165±10a
	2	6.29±0.03a	5.28±0.16a	250±4a	79.7±0.2c	149±9a

注:同种材料不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters for the same nanomaterial indicate significant differences among different concentration treatments ($P<0.05$).

对土壤中有效磷含量的影响正好与 nSiO₂ 处理相反,随着 nZnO 的浓度增加土壤中有效磷的含量呈现显著降低的趋势,分别降低了 3.60%、6.39% 和 7.43%。三种浓度的三种纳米材料对土壤中有效钾含量影响均不显著。

2.4 纳米材料对水稻土壤酶活性的影响

如图 4A 所示,与不添加任何纳米材料的对照组相比,三种纳米材料的添加均显著提升土壤过氧化氢酶活性。土壤过氧化氢酶活性随 nSiO₂ 浓度增加逐渐增大,nZnO 处理也表现出显著增大的趋势,但 nTiO₂ 处理间差异不显著。随着 nSiO₂ 浓度增加,土壤蔗糖酶活性也逐渐增强,由低浓度的抑制效应逐渐转变为促进效应;土壤蔗糖酶活性随 nTiO₂ 处理浓度变化的趋势与 nSiO₂ 处理相反,但与对照相比,添加三种浓度 nTiO₂ 均不同程度地增加土壤蔗糖酶活性,分别增加 15.54%、14.21% 和 7.75%;与对照相比,nZnO 处理对蔗糖酶都表现出抑制效应,抑制率为 10.59%、14.20% 和 11.75%。土壤脲酶活性受 nSiO₂ 和 nTiO₂ 处理影响较小,各浓度处理与对照之间的差异不显著;nZnO 的添加对土壤脲酶活性产生显著的抑制效应,并随添加浓度的增加抑制效应逐渐增大,抑制率分别为 17.60%、19.24% 和 24.52%。与对照处理相比,三种纳米材料均显著降低了土壤酸性磷酸酶的活性,随着 nSiO₂ 浓度增加,土壤酸性磷酸酶的活性也逐渐增加,但 nTiO₂ 各浓度处理间土壤酸性磷酸酶的活性差异并不显著;添加 1 mg·g⁻¹ 的 nZnO 对土壤酸性磷酸酶的活性抑制率最高为 17.49%。

3 讨论

3.1 纳米材料对植物生长的影响

纳米材料对植物的影响不仅与添加的纳米材料的浓度有关,也与纳米材料的种类有关。王丽华^[20]的研究表明,施加低浓度的 nZnO 对大豆植株地上部或根系干质量无明显影响,但当施剂量达到 3 000 mg·kg⁻¹ nZnO 时显著降低植株干质量;另外,随 nAg(纳米银)施加浓度的增加,所有大豆处理的地上部分、根系干质量和总干质量均下降。梁太波等^[21]研究发现,施用纳米碳均不同程度地增加了植株根系生物量。Siddiqui 等^[22]研究发现,用 8 g·L⁻¹ 的 nSiO₂ 处理番茄种子,可以提高种子发芽率、平均发芽时间、发芽指数、活力指数以及幼苗鲜质量和干质量。本研究发现低浓度的 nZnO 处理使水稻鲜质量和干质量增加,而高浓度的 nZnO 使水稻鲜质量和干质量降低,与王丽华^[20]的结果相似;低、中浓度的 nSiO₂ 处理提高鲜质量和干质量与 Siddiqui 等^[22]的结果相似。

裴福云等^[23]研究发现,相比对照处理,喷施相同含硅量的纳米硅藻土、纳米二氧化硅后,苋菜干物质质量分别提高 43.4% 和 14.9%,吸收的氮磷钾总量分别提高了 36% 和 20%。Li 等^[24]、李贵莲等^[25]和 Wang 等^[26]用含有 nTiO₂ 和 nZnO 的材料处理植株,发现其可显著增加植株根系和地上部对 N、P、K 元素的吸收。本研究发现 nSiO₂ 和 nTiO₂ 对水稻幼苗 P 和 K 含量的影响不显著,但 nZnO 显著增加植株的 P 含量而降低了 K 含量。陈丁等^[27]通过 nZnO 和 nSiO₂ 对海水中磷酸根

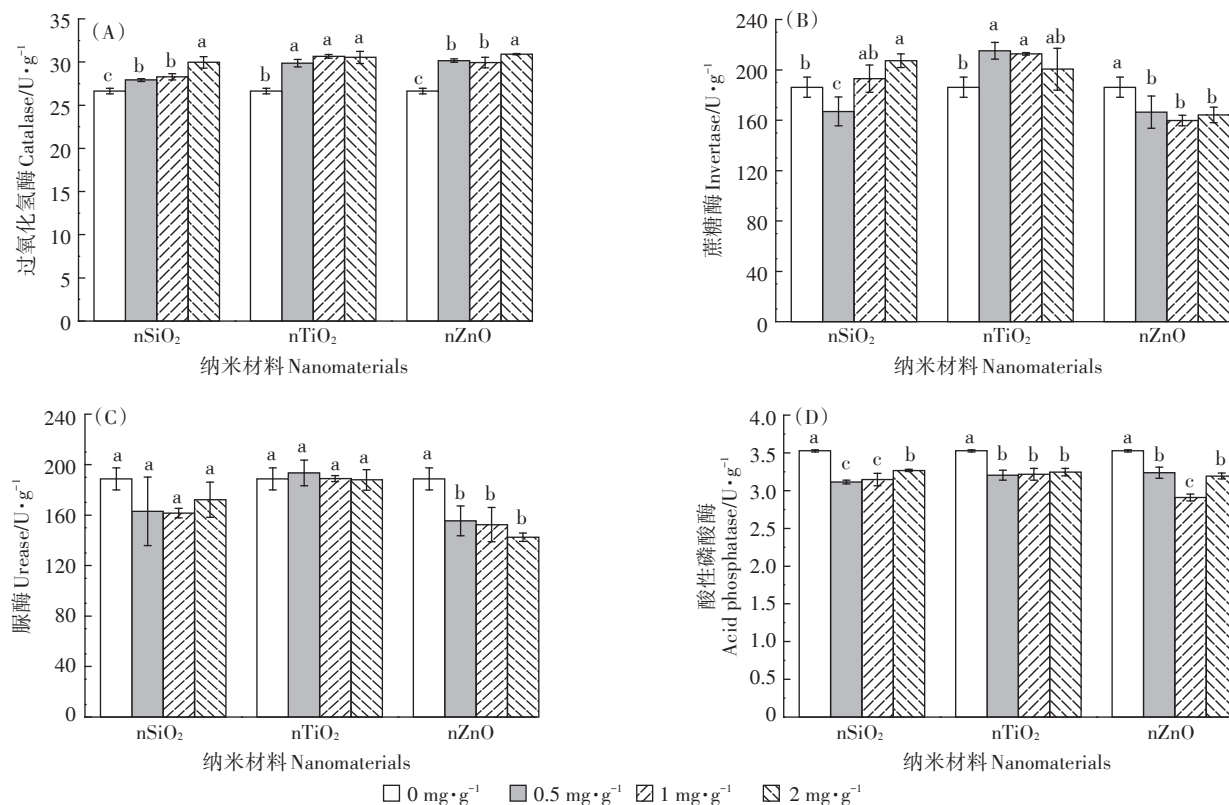


图4 三种纳米材料对水稻土壤酶活性的影响

Figure 4 Effect of three nanomaterials on enzyme activity in rice soil

的吸附实验发现, nZnO 可以吸附海水中的磷酸根, 但 nSiO₂ 对海水中磷酸根的吸附率为 0。nTiO₂ 的电荷零点在 pH 6.4 左右 (与水 pH 接近), 最容易发生自聚, 吸附其他离子的能力差^[28]。Dimkpa 等^[29] 于沙培条件下研究了纳米氧化锌以及相应的微颗粒氧化锌的施用, 运用 bulk XAS 技术发现, 无论是施加纳米氧化锌和还是微颗粒氧化锌, 其锌的形态都为磷酸锌团聚体; 植物体可能通过增加体内的 P 含量, 并与锌结合为磷酸锌团聚体, 来降低纳米氧化锌对植物的毒害。植物可通过非选择性阳离子通道吸收 K⁺, 而 nZnO 可溶解出 Zn²⁺, 竞争性抑制植物对 K⁺ 的吸收^[30], 从而影响水稻对 K 的吸收, 导致 K 含量降低。但与 nZnO 相比, nTiO₂ 和 nSiO₂ 较难在土壤中释放出相应的离子^[31-32], 因此对植物体 K 元素的吸收影响不显著。

3.2 纳米材料对土壤养分转化的影响

本研究发现添加三种纳米化合物均降低土壤有机质含量, 同时增加土壤过氧化氢酶活性。有研究表明, 纳米材料可产生具有很强化学活性的氧自由基和氢氧自由基, 这些自由基能与大多数有机物反应, 使有机物分解成二氧化碳和水^[16], 同时也会对土壤中微

生物产生氧化胁迫, 刺激土壤微生物生成过氧化氢酶, 从而降低纳米材料对土壤微生物的氧化损伤^[33]。王佳奇^[34]研究发现纳米碳可以增加土壤中碱解氮、速效磷、速效钾养分的含量。李爽^[35]的研究结果表明, 在分蘖期喷施纳米硅制剂可以使土壤有效氮、速效磷和速效钾的含量显著提高。本研究发现 nSiO₂ 对水稻土壤有效氮、有效磷、有效钾的含量有增加作用, 与李爽^[35]的研究结果相似; 但 nTiO₂ 对土壤有效氮、有效磷、有效钾含量的影响并不显著; nZnO 的添加降低了土壤有效氮、有效磷、有效钾的含量, 这可能是因为 nZnO 抑制了土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶等土壤酶活性, 从而影响了土壤中养分的释放。

土壤酶活性不仅能表征土壤养分转化、运移能力和评价土壤肥力, 也可作为评价纳米材料土壤污染的生物学指标。纳米材料可以通过向土壤释放金属离子改变土壤酶或其底物的空间结构, 金属离子还会损伤生物体细胞进而影响土壤酶活性^[36]。本研究发现 nSiO₂ 增强了土壤过氧化氢酶活性, 抑制土壤酸性磷酸酶和脲酶活性。柴汉魁^[31]认为 nSiO₂ 通过影响相关微生物活性进而对土壤酶活性产生影响。有研究报道, nTiO₂ 可以提高土壤脲酶活性, 抑制土壤磷酸酶活

性^[37],同时,也能促进土壤抗氧化酶活性^[38]。本研究也发现nTiO₂显著增强了土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性,显著抑制了土壤酸性磷酸酶活性,nZnO抑制了土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶等土壤酶活性。Chai等^[39]的研究也有类似的发现,nZnO抑制了土壤葡萄糖苷酶、脱氨酶、磷酸酶和超氧化物酶的活性。有研究认为nZnO表现毒性作用的主要原因是锌离子释放^[40],而nTiO₂和nSiO₂较难在土壤中释放相应的离子^[31-32],同时根据三种纳米材料的水力直径可知,nZnO的水力直径最小,nTiO₂的水力直径最大,因而,nZnO表现出的毒性作用强于nSiO₂,而nTiO₂的毒性最弱。

4 结论

(1)三种纳米材料中nZnO处理对水稻幼苗生长的影响最大,低浓度的nZnO处理对水稻生长有促进作用,中、高浓度的nZnO处理对水稻生长有显著抑制作用。低、中浓度nSiO₂和中、高浓度nTiO₂处理对水稻生长表现出轻微的促进作用。

(2)nZnO处理对水稻N、P、K元素吸收的影响较大,nSiO₂处理对水稻N元素的吸收影响较大,nTiO₂处理对水稻N、P、K元素的吸收影响均不显著。

(3)中、高浓度的nSiO₂处理对土壤理化性质的影响比低浓度明显,nTiO₂处理对土壤有效氮、有效磷和有效钾的影响均不显著,nZnO处理对土壤有机质、有效氮和有效钾的影响不显著。

(4)土壤酶对纳米材料比较敏感,尤其是过氧化氢酶和酸性磷酸酶的响应更为明显;三种纳米材料中nZnO对土壤酶影响最大,但其受纳米材料浓度变化的影响较小。

参考文献:

[1] 郭铁琼,朱春雨,孙树明. 2012年中国气相法白炭黑市场分析与发展趋势[J]. 无机盐工业, 2014, 46(4):4-6.
GUO Yi-qiong, ZHU Chun-yu, SUN Shu-ming. 2012 market analysis and development trend of fumed silica in China[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2014, 46(4):4-6.

[2] Keller A A, Lazareva A. Predicted releases of engineered nanomaterials: From global to regional to local[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, 1(1):65-70.

[3] Piccinno F, Gottschalk F, Seeger S, et al. Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, 14(9):1109.

[4] 王盼雪,王雪杰,田露,等. 纳米金属氧化物在食品领域的应用及安全性进展[J]. 食品科技, 2019, 44(2):295-300.
WANG Pan-xue, WANG Xue-jie, TIAN Lu, et al. Application and safety of nano metal oxides in food industry[J]. *Food Science and Tech-*

nology, 2019, 44(2):295-300.

[5] 汪苹,孙志强,王宇涛,等. 纳米ZnO对微藻的毒性效应和生物富集的研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12):13-19.
WANG Ping, SUN Zhi-qiang, WANG Yu-tao, et al. Toxicity and bio-accumulation of zinc oxide nanoparticles by microalgae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12):13-19.

[6] Kaya H, Aydın F, Gürkan M, et al. A comparative toxicity study between small and large size zinc oxide nanoparticles in tilapia (*Oreochromis niloticus*): Organ pathologies, osmoregulatory responses and immunological parameters[J]. *Chemosphere*, 2016, 144:571-582.

[7] 文双喜,王毅力. 水培实验中不同粒径纳米TiO₂对芦苇种子发芽和植株生长和生理的影响[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(2):71-80.
WEN Shuang-xi, WANG Yi-li. Effect of nano titanium dioxide with different particle size on the seed germination and plant growth and physiology of *Phragmites australis* in hydroponic experiments[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(2):71-80.

[8] Iswarya V, Bhuvaneshwari M, Alex S A, et al. Combined toxicity of two crystalline phases (anatase and rutile) of titania nanoparticles towards freshwater microalgae: *Chlorella* sp[J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, 161:154-169.

[9] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, et al. Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different regions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24):9216-9222.

[10] 杨晓南. 水中纳米TiO₂特性及对SBR活性污泥系统稳定性的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
YANG Xiao-nan. Characteristics of TiO₂ nanoparticle in water and effects on the stability of SBR activated sludge system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[11] 曹际玲,冯有智,林先贵. 人工纳米材料对植物-微生物影响的研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):1-11.
CAO Ji-ling, FENG You-zhi, LIN Xian-gui. Review of researches on influences of engineered nanomaterials on plant microorganisms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):1-11.

[12] 孙耀琴,申聪聪,葛源. 典型纳米材料的土壤微生物效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(5):2-13.
SUN Yao-qin, SHEN Cong-cong, GE Yuan. Review on microbiological effects of typical nanomaterials in soil ecosystem[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(5):2-13.

[13] 孟萍. 土壤环境中西兰花对金属纳米颗粒敏感性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
MENG Ping. Broccoli susceptibility to metal nanoparticles in soil environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[14] 刘雪琴. 纳米ZnO/AM真菌对玉米的生物效应及作用机理研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
LIU Xue-qin. Biological effects of nano-ZnO and *Arbuscular mycorrhizal* fungi on maize and its mechanism[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.

[15] Dimkpa C O, Mclean J E, Latta D E, et al. CuO and ZnO nanoparticles: Phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, 14(9):1-15.

[16] 李琳慧. 纳米TiO₂对土壤氮转化相关微生物和酶的影响[D]. 长

- 春:吉林大学, 2015.
- LI Lin-hui. Effect of nano-TiO₂ on microorganisms and enzyme activity for nitrogen transform in soil[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [17] Ji Y, Zhou Y, Ma C X, et al. Jointed toxicity of TiO₂ NPs and Cd to rice seedlings NPs alleviated Cd toxicity and Cd promoted NPs uptake [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 110:82-93.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:263-270.
- LU Ru-kun. Methods for chemical analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 263-270.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [20] 王丽华. 纳米氧化锌和纳米银对丛枝菌根的毒性效应[D]. 洛阳:河南科技大学, 2014.
- WANG Li-hua. Toxic effects of nano-ZnO and nano silver on *Arbuscular mycorrhizae*[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.
- [21] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6):1429-1435.
- LIANG Tai-bo, YIN Qi-sheng, ZHANG Yan-ling, et al. Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6):1429-1435.
- [22] Siddiqui M H, Alwhaibi M H. Role of nano SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.)[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2014, 21(1):13-17.
- [23] 裴福云, 董超文, 陈文哲, 等. 纳米硅肥的制备及对苋菜生长的影响[J]. 园艺与种苗, 2015(6):12-17.
- PEI Fu-yun, DONG Chao-wen, CHEN Wen-zhe, et al. Preparation and the effect of nano-silicon fertilizer on the growth of amaranth[J]. *Horticulture & Seed*, 2015 (6):12-17.
- [24] Li G L, Chen R Y, Liu H C, et al. Effects of nano-devices on growth, quality and activities of enzymes in nitrogen metabolism of hydroponic lettuce[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 609/610:1453-1458.
- [25] 李贵莲, 陈日远, 刘厚诚, 等. 纳米胶片处理对生菜生长及元素吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11):237-238, 243.
- LI Gui-lian, CHEN Ri-yuan, LIU Hou-cheng, et al. Effect of nano-film treatment on lettuce growth and element absorption[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(11):237-238, 243.
- [26] Wang Y J, Chen R Y, Liu H C, et al. Effects of nano-devices on growth and major elements absorption of hydroponic lettuce[M]//Wang Y P, Zhou S Q. Advances in energy, environment and materials science. Balkema: CRC Press, 2016.
- [27] 陈丁, 郑爱榕, 马春宇. 纳米氧化锌和二氧化硅对海水中磷酸根的吸附[J]. 科技创新与应用, 2017(27):174-175.
- CHEN Ding, ZHENG Ai-rong, MA Chun-yu. Adsorption of phosphate in seawater by nZnO and nSiO₂[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(27):174-175.
- [28] Liu X Y, Chen G X, Keller A A, et al. Effects of dominant material properties on the stability and transport of TiO₂ nanoparticles and carbon nanotubes in aquatic environments: From synthesis to fate[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, 15(1):169-189.
- [29] Dimkpa C O, Latta D E, Mclean J E, et al. Fate of CuO and ZnO nano- and microparticles in the plant environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(9):4734-4742.
- [30] 邓桂芳. 环境因素对玉米根系钾离子跨膜转移的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2008.
- DENG Gui-fang. Effects of environmental factors on transmembrane transfer of potassium ions in maize roots[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [31] 柴汉魁. 四种金属氧化物纳米颗粒对农业土壤微生物的毒性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
- CHAI Han-kui. The toxic effect study of four metal oxide nanoparticles on agricultural soil microorganism[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [32] Du W, Sun Y, Ji R, et al. TiO₂ and ZnO nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13(4):822-828.
- [33] 刘丹丹. 两种土壤中氧化物纳米材料对微生物群落结构和功能的影响[D]. 长春:东北师范大学, 2017.
- LIU Dan-dan. Effects of oxide nanoparticles on microbial community structure and function in two different soil types[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2017.
- [34] 王佳奇. 纳米碳对玉米生长及养分吸收的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.
- WANG Jia-qi. Effects of nano-carbon on growth and nutrient absorption of maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [35] 李爽. 硅制剂对土壤养分有效性和水稻养分吸收及产量的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- LI Shuang. Effects of silica sol on soil nutrient availability and nutrient absorption and production of rice[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [36] 石清清, 邓代莉, 颜椿, 等. 纳米金属氧化物对土壤酶活性的影响研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(2):47-56.
- SHI Qing-qing, DENG Dai-li, YAN Chun, et al. Review on effects of engineered nano-metal oxide particles on soil enzyme activities[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(2):47-56.
- [37] Xu C, Peng C, Sun L J, et al. Distinctive effects of TiO₂ and CuO nanoparticles on soil microbes and their community structures in flooded paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 86:24-33.
- [38] Dinesh R, Anandaraj M, Srinivasan V, et al. Engineered nanoparticles in the soil and their potential implications to microbial activity[J]. *Geoderma*, 2012, 173/174:19-27.
- [39] Chai H K, Yao J, Sun J J, et al. The effect of metal oxide nanoparticles on functional bacteria and metabolic profiles in agricultural soil [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 94(4):490-495.
- [40] Josko I, Oleszczuk P, Futa B. The effect of inorganic nanoparticles (ZnO, Cr₂O₃, CuO and Ni) and their bulk counterparts on enzyme activities in different soils[J]. *Geoderma*, 2014, 232/234:528-537.