

DOI: 10.5846/stxb201805091024

路国华, 赵树兰, 多立安. 纳米铁联合氧化石墨烯对垃圾堆肥基质高羊茅生理生态的影响. 生态学报, 2019, 39(7): - .

Lu G H, Zhao S L, Duo L A. Effects of nano-iron combined with graphene oxide on the ecophysiology of *Festuca arundinacea* grown in municipal solid waste compost. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

纳米铁联合氧化石墨烯对垃圾堆肥基质高羊茅生理生态的影响

路国华, 赵树兰, 多立安*

天津市动植物抗性重点实验室, 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387

摘要:通过室内盆栽试验,在生活垃圾堆肥中按质量比添加 1% 氧化石墨烯(GO)和不同比例的纳米铁(nZVI, 1%、3%、5%),研究了 GO 和 nZVI 对高羊茅生长和生理特性的影响。结果表明:单独添加 GO 及共同添加 GO 和 nZVI 促进了高羊茅种子萌发,发芽率和发芽指数均在 GO+5% nZVI 处理达到最大。除 1% nZVI 处理外,其他添加剂处理显著提高了高羊茅地上生物量和叶绿素含量,在 GO+5% nZVI 处理达到最大,较对照分别提高 25% 和 31%。添加 3%、5% nZVI 显著提高了超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,且随 nZVI 添加比例的增加而升高。与对照相比,单独添加 nZVI 以及联合 GO 处理过氧化氢酶(CAT)与丙二醛(MDA)含量显著降低,随 nZVI 添加比例的增加而减少,分别在 GO+5% nZVI 和 GO+3% nZVI 处理中达到最低,较对照分别降低 52% 和 48%。高羊茅地上部重金属含量随 nZVI 添加比例的增加而降低,在共同添加 GO 和 nZVI 的处理中效果显著,均显著低于对照。可见,nZVI 和 GO 两种材料对堆肥重金属具有固定作用,减少了植物对重金属的吸收,促进了草坪植物的生长。

关键词:高羊茅;生活垃圾堆肥;纳米零价铁;氧化石墨烯;重金属钝化

Effects of nano-iron combined with graphene oxide on the ecophysiology of *Festuca arundinacea* grown in municipal solid waste compost

LU Guohua, ZHAO Shulan, DUO Li'an*

Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Through indoor pot experiments, the effects of graphene oxide (GO) and nanoscale zero-valent iron (nZVI) on the growth and physiological characteristics of *Festuca arundinacea* were investigated by adding 1% GO and different ratios of nZVI (1, 3, and 5%) to municipal solid waste (MSW) compost. The results showed that adding GO alone and GO and nZVI together promoted the germination of *F. arundinacea* seeds, and the germination rate and germination index were highest with the GO+5% nZVI treatment. Except for 1% nZVI, all other treatments with amendments significantly increased the shoot biomass and chlorophyll content of *F. arundinacea*, both attaining their highest values with the GO+5% nZVI treatments, which were 25% and 31% higher, respectively, than the control. The activity of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in *F. arundinacea* increased with the 3 and 5% nZVI treatments, as well as with increasing nZVI-addition ratios. Compared to the control, GO and nZVI treatments significantly decreased the activity of catalase (CAT) and the content of malondialdehyde (MDA), which reached their lowest values with GO+5% nZVI and GO+3% nZVI treatments, decreasing by 52 and 48%, respectively. Heavy metal concentrations in plant shoots decreased with increasing nZVI-addition ratios, and the effect was significant with GO+nZVI treatments. The results indicate that both nZVI and GO

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31870484)和(31470548)

收稿日期:2018-05-09; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duolian_tjnu@163.com

can immobilize heavy metals in MSW compost, decrease heavy metal absorption in plants, and promote the growth of turfgrass.

Key Words: *Festuca arundinacea*; municipal solid waste compost; nanoscale zero-valent iron; graphene oxide; heavy metal passivation

随着我国人口数量和人民生活水平的提高,城市生活垃圾的产生量与日俱增。截止到 2015 年底,生活垃圾产生量已从 1980 年的每天 0.5 kg/人增加到 2015 年的 1.2 kg/人,较过去 30 年增长了一倍,如何处理快速增长的生活垃圾已成为亟待解决的环境问题之一^[1]。生活垃圾堆肥化利用是实现垃圾减量化和资源化的有效方式。垃圾堆肥含有大量的有机质和植物生长所需的营养物质,可以提高土壤肥力,改善土壤理化性质,促进植物生长,提高作物产量^[2]。然而,由于我国未实行垃圾分类,垃圾堆肥中重金属含量较高,长期施用会导致土壤重金属含量升高,并通过植物吸收进入食物链,危害人类健康,从而限制了垃圾堆肥的应用^[3]。

另一方面,随着我国城市的快速发展,人们对园林绿化和生态环境的要求不断提高,草坪作为园林绿化的一部分发挥着极其重要的作用。目前,城市草坪建植的多种方式之中,规模化生产地毯式草皮被普遍采用。但地毯式草皮生产一般选择农田的优质耕层土壤作为基质,几次生产过后,优质耕层土壤随草皮被带走,因而这种草皮生产方式存在着消耗土壤资源、破坏农田生态环境及草皮杂草难控制等弊端^[4]。近年来,国内外利用工农业废弃物为土壤替代基质进行无土草皮生产展开了一系列的研究,以探讨不同土壤替代基质对草皮性状的影响^[5-7]。赵树兰等^[8]以生活垃圾堆肥代替土壤作为草皮培养基质,与园土基质草皮的相关生长参数进行了比较研究,表明以生活垃圾堆肥为基质的无土草皮性能符合草皮培植技术性能要求。虽然生活垃圾堆肥可作为基质用于草皮生产,但基质中的重金属问题未得到根本解决,仍存在污染地下水、影响植物生长的风险。因此,若能解决草坪堆肥基质中重金属问题,堆肥基质草坪建植体系的应用方式将会更加安全有效。

钝化法是一种从生物可利用态向稳定态重金属转移的技术方法,被广泛应用于重金属污染土壤的修复^[9-10]。零价纳米铁(nZVI)具有粒径小、比表面积大兼具吸附性与还原性强等特点,其在水中具有较强去除重金属能力,被认为是处理污染土壤与地下水的有效选择^[11-13]。氧化石墨烯(GO)具有相对较大的比表面积,其表面存在丰富的含氧官能团,可以快速高效去除水中重金属离子,由于其独特的物理化学特性,是一种极好的吸附剂^[14]。两种材料对重金属的吸附能力较强,具有钝化修复堆肥重金属的潜力。但是,向堆肥基质中添加外源物质同样可能会影响植物的正常生长,而其对草坪植物生长的影响尚未见文献报道。

因此,本研究选择生活垃圾堆肥作为高羊茅培养基质,通过室内盆栽试验,研究草坪基质中添加 GO 和不同比例 nZVI 对高羊茅生长和生理特性的影响,为 nZVI 联合 GO 安全有效地应用于堆肥基质重金属的钝化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

生活垃圾堆肥来自天津市小淀垃圾堆肥处理厂。试验前对堆肥进行预处理,去除其中的塑料薄膜、砖瓦、石块和玻璃等杂物,风干后,过 2 mm 筛。堆肥理化性质为:pH 7.62,有机质含量 221.25 g/kg,全氮 13.48 g/kg,有效磷 0.078 g/kg,C/N 为 8.37,饱和含水量 0.76 mL/g;重金属(Cd、Cr、Cu、Pb、Zn)含量分别是 1.97、67.00、239、172、496 mg/kg。高羊茅(*Festuca arundinacea*)种子购买于天津曹庄花卉市场。

供试多层氧化石墨烯(GO)购自苏州碳丰石墨烯科技有限公司,厚度为 3.4—8 nm,片层直径为 10—50 μm ,层数为 5—10 层,比表面积为 100—300 m^2/g 。纳米铁购自于清河县科工冶金材料有限公司,粒径为 50 nm。

1.2 试验设计

取堆肥 100 g,按一定比例加入钝化材料混匀后,分别放入直径 6.3 cm、高 6.8 cm 的塑料盆中,作为高羊茅

培养基质。试验处理如下:①添加 1% nZVI(N1);②添加 3% nZVI(N3);③添加 5% nZVI(N5);④添加 1% GO(G);⑤添加 1% GO+1% nZVI(GN1);⑥添加 1% GO+3% nZVI(GN3);⑦添加 1% GO+5% nZVI(GN5),以不添加钝化剂的纯堆肥为对照(CK),每个处理 4 次重复。将 300 粒大小均一、籽粒饱满的高羊茅种子均匀播撒于基质上。培养期间定期浇水,使含水量保持在最大田间持水量的 60%。植物培养期间的环境温度为 13~25℃,相对湿度为 15%~31%,光照为透入室内的自然光。

1.3 指标测定

1.3.1 种子萌发相关指标测定

种子从第 4 天开始萌发,每天记录萌发的种子数。萌发 10 d 时,测定发芽率、发芽势和发芽指数。发芽率 $Gr(\%) = (\text{发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100$;发芽势 $(\%) = (\text{萌发起 4 d 内发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100$;发芽指数 $GI = \sum (G_t / D_t)$,式中 G_t 为在 t 日的发芽种子数, D_t 为相应的发芽天数。

1.3.2 地上生物量测定

在播种第 50 d 时收获植物地上部分,在 108℃ 下杀青 20 min,80℃ 条件下烘干至恒重后称量。

1.3.3 叶绿素含量的测定

称取新鲜叶片 0.5 g,剪成 1—2 mm 碎片,浸泡于 20 mL 丙酮:乙醇(1:1,v/v)溶液中 24 h,浸泡液为待测液。取上述浸泡液 1 mL,加丙酮 4 mL 稀释后转入比色杯中,以丙酮为对照,用紫外可见分光光度计分别测定 663、645 nm 处的 OD 值,计算叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量。

1.3.4 保护酶活性与丙二醛含量的测定

保护酶活性的测定:取新鲜草样 0.5 g,加入预冷的研钵中,加入 pH 7.8 的磷酸缓冲液 5 mL,少量石英砂,在冰浴下研磨成浆;再加入 5 mL 磷酸缓冲液研磨,定容到 15 mL 的离心管中。在 4℃,8000 r/min 下离心 30 min,上清液用于保护酶活性的测定。POD 活性的测定采用愈创木酚法^[15],CAT 活性测定采用紫外分光光度法^[16],POD 和 CAT 的活性单位(U)定义为:每克鲜质量每分钟分别使 OD_{470} 和 OD_{240} 增加 0.1 的酶量为一个酶活性单位。SOD 活性测定采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化还原法^[17],以每克鲜质量抑制 NBT 光化还原 50% 为一个酶活性单位。

丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸氧化法。取叶片 0.5 g,剪碎,加入 2 mL 10% 三氯乙酸(TCA)和少量石英砂研磨,再加入 8 mL TCA 充分研磨,匀浆以 4000×g 离心 10 min。取 2 mL 上清液,加入 2 mL 0.6%TBA 液,混匀,在试管上加盖塞,置于沸水浴中煮沸 15 min,迅速冷却后离心,对照以 4 mL 去离子水代替提取液。取上清液,用紫外分光光度计(SHIMADZU UV-1700)测定 532 和 450 nm 处的 OD 值。计算 MDA 浓度,折算成每克鲜重质量组织 MDA 含量。

1.3.5 重金属含量的测定

准确称取高羊茅地上部干重 0.1 g,加入硝酸和双氧水(5:1),在 120—140℃ 下消解,过滤后用 1% HNO_3 溶液定容至 25 mL,用原子吸收光谱仪测定植物体内重金属(Cu、Cd、Pb、Zn、Cr)含量。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件对所得数据进行单因素方差分析,并采用 Turkey 法,在 $P=0.05$ 水平进行数据差异显著性检验,采用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 钝化剂对高羊茅种子萌发的影响

播种 4 d 后,高羊茅种子开始萌发,10 d 时达到萌发稳定。如表 1 所示,单独添加 nZVI 对高羊茅种子萌发无显著影响。添加 GO 后,发芽率、发芽势和发芽指数均显著提高,且随着 nZVI 添加比例的增加而增加。发芽率与发芽指数均在 GO+5% nZVI 处理中达到最高,较对照分别提高了 109% 和 108%。发芽势在 1% GO 处理中达到最大,较对照提高了 92%。

表 1 钝化剂对高羊茅种子萌发的影响

Table 1 Effect of passivators on seed germination of *Festuca arundinacea*

处理 Treatments	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
CK	38.00±1.15c	13.42±4.70b	13.28±0.91b
N1	36.50±1.81c	9.83±1.74b	12.55±0.79b
N3	37.42±2.05c	11.83±1.43b	13.25±1.03b
N5	39.50±0.95c	13.67±1.26b	13.75±0.40b
G	73.83±1.29b	25.83±1.04a	26.43±0.43a
GN1	72.08±1.38b	22.58±2.20a	25.30±0.80a
GN3	74.58±1.30b	23.75±1.09a	25.83±0.58a
GN5	79.25±2.19a	24.75±3.52a	27.57±1.11a

CK:对照,control;N1:1%纳米铁,1% nanoscale iron;N3:3%纳米铁,3% nanoscale iron;N5:5%纳米铁,5% nanoscale iron;G:1%氧化石墨烯,1% graphene oxide;GN1:1%氧化石墨烯+1%纳米铁,1% graphene oxide+1% nanoscale iron;GN3:1%氧化石墨烯+3%纳米铁,1% graphene oxide+3% nanoscale iron;GN5:1%氧化石墨烯和 5%纳米铁,1% graphene oxide+5% nanoscale iron;不同字母表示差异显著 ($P<0.05$, $n=4$)

2.2 钝化剂对高羊茅地上干重及叶绿素含量的影响

添加钝化剂对高羊茅地上干重和叶绿素含量的影响如表 2 所示。除 1% nZVI 对高羊茅地上干重无显著影响外,单独添加 3%、5% nZVI 及联合 GO 处理均显著促进了地上生物量的积累,在 GO+5% nZVI 处理下达到最大,较对照增加 25%。

各钝化剂处理叶绿素 a 与总叶绿素含量均显著高于对照,且随 nZVI 添加比例的升高呈现增加的趋势,总叶绿素含量在 GO+5% nZVI 处理达到最大,比对照提高了 31%。与叶绿素 a 和总叶绿素含量不同的是,钝化剂的添加显著降低了叶绿素 b 含量。

表 2 钝化剂处理对高羊茅地上干重及叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of passivators on shoot dry weight and chlorophyll contents of *Festuca arundinacea*

处理 Treatments	地上干重 Shoot dry weight/g	叶绿素含量 Chlorophyll contents/(mg/g)		
		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll
CK	2.75±0.08c	2.15±0.18g	1.47±0.02a	3.62±0.02d
N1	2.98±0.07bc	3.37±0.19c	1.05±0.03c	4.43±0.02b
N3	3.12±0.14b	3.44±0.04b	0.95±0.01d	4.40±0.05b
N5	3.21±0.10ab	3.62±0.24a	1.06±0.01c	4.68±0.03a
G	3.27±0.17ab	2.63±0.04e	1.19±0.03b	3.82±0.05c
GN1	2.95±0.02bc	2.48±0.04f	1.16±0.02b	3.64±0.03d
GN3	3.13±0.08ab	2.85±0.03d	0.94±0.02d	3.79±0.03c
GN5	3.45±0.16a	3.61±0.05ab	1.15±0.02b	4.76±0.07a

2.3 钝化剂对高羊茅保护酶活性和丙二醛含量的影响

钝化剂对高羊茅保护酶活性和丙二醛含量的影响如图 1 所示。单独添加 nZVI 处理 POD 活性随添加比例的增加而升高,3%和 5% nZVI 处理分别显著高出对照 42%和 55%;共同添加 GO 和 3%、5% nZVI 处理,POD 活性显著高于对照;相同比例 nZVI 处理,有 GO 处理要低于无 GO 处理,但差异不显著。单独添加 3%、5% nZVI 以及 GO+5% nZVI 处理,SOD 活性显著升高,在 5% nZVI 处理组达到最大,较对照提高 14%;共同添加 GO 和 1%、3% nZVI 处理,SOD 活性分别低于单独添加 1%、3% nZVI 处理,差异显著。添加钝化剂处理 CAT 活性显著降低,并随 nZVI 添加比例的增加而下降,GO+5% nZVI 处理最低,较对照降低了 59%。单独添加 GO 的处理,CAT 活性较对照降低了 52%;共同添加 GO 和 nZVI 较单独添加 nZVI 处理,CAT 活性显著降低,在 GO+5% nZVI 处理降低最多,达到了 42%。

与对照相比,添加钝化剂处理 MDA 含量显著降低,GO+3% nZVI 处理为最低,降低了 48%;单独添加 GO 处理比对照减少 29%;共同添加 GO 和 3%、5% nZVI 处理较单独添加 3%、5% nZVI 处理,MDA 含量显著降低。

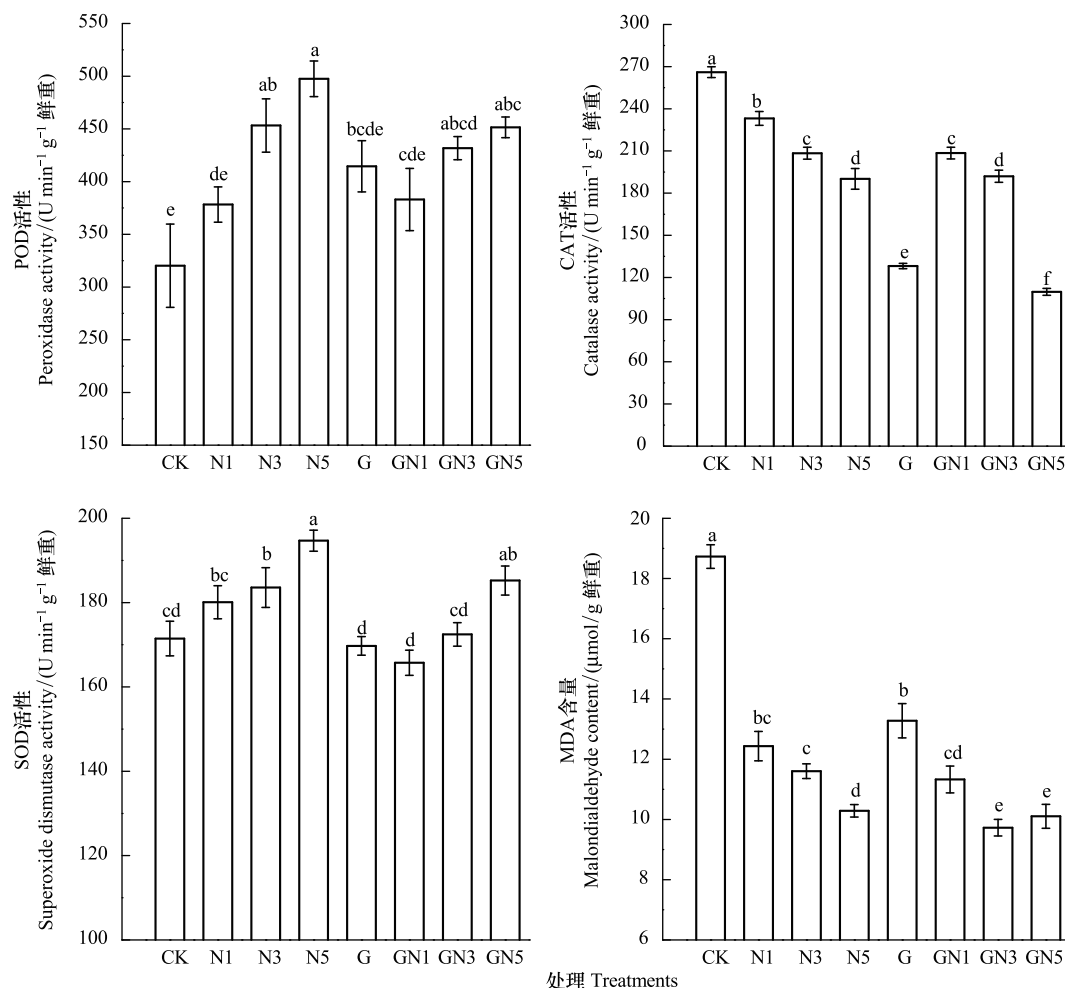


图1 钝化剂对高羊茅保护酶活性和 MDA 含量的影响

Fig.1 Effects of passivators on protective enzyme activity and MDA content of *Festuca arundinacea*

CK;对照,control;N1;1%纳米铁,1% nanoscale iron;N3;3%纳米铁,3% nanoscale iron;N5;5%纳米铁,5% nanoscale iron;G;1%氧化石墨烯,1% graphene oxide;GN1;1%氧化石墨烯+1%纳米铁,1% graphene oxide+1% nanoscale iron;GN3;1%氧化石墨烯+3%纳米铁,1% graphene oxide+3% nanoscale iron;GN5;1%氧化石墨烯和 5%纳米铁,1% graphene oxide+5% nanoscale iron;图柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, $n = 4$)

2.4 钝化剂对高羊茅地上部重金属含量的影响

如表 3 所示,除单独添加 1% nZVI 处理外,钝化剂均显著降低了高羊茅地上部 Cu 和 Pb 含量,且添加 GO 后降低的更多。对于 Cd、Zn 而言,共同添加 GO 和 nZVI 处理,其含量均显著低于对照;单独添加 nZVI 处理和对照差异不显著。除单独添加 1%和 3% nZVI 处理外,其他钝化剂处理,Cr 含量均显著低于对照。与单独添加 nZVI 相比,共同添加 GO 与 nZVI,显著降低 Cu、Cd、Pb、Cr 含量。

3 讨论与结论

种子萌发是植物生长的初始阶段,它可以对外界生长环境做出敏感反应,因此种子萌发试验被广泛用于评价堆肥质量研究中^[18]。本研究发现,堆肥中添加 GO 能显著促进高羊茅种子的萌发。Khodakovskaya 等^[19]研究发现,碳纳米材料处理能显著促进番茄种子萌发,认为碳纳米材料能够穿透厚的种皮,促进种子对水分的

吸收,从而促进番茄种子的萌发和幼苗的生长。吴金海等^[20]研究发现,5 mg/L GO 处理能显著提高油菜种子的发芽势。这些研究表明,一定浓度的氧化石墨烯,会对种子萌发起促进作用,与本文研究结果一致。

表 3 钝化剂处理对高羊茅地上部重金属含量的影响

Table 3 Effect of passivators on heavy metal concentrations in shoots of *Festuca arundinacea*/(mg/kg)

处理 Treatments	Cu	Cd	Pb	Zn	Cr
CK	31.25±0.55a	0.43±0.06a	79.00±0.67a	136.30±9.54a	32.75±0.86a
N1	30.95±0.33a	0.44±0.05a	77.20±0.83a	133.15±10.10ab	30.55±1.26a
N3	29.50±0.25b	0.43±0.02a	68.65±0.39b	124.45±4.72abc	28.90±0.84a
N5	26.35±0.26d	0.41±0.02ab	64.95±0.64c	116.35±6.93abc	23.50±0.79b
G	28.50±0.44c	0.42±0.01a	45.45±0.77d	124.65±6.56bcd	23.75±0.59b
GN1	25.60±0.18d	0.37±0.01b	64.35±1.26e	111.55±2.94cd	21.65±0.90b
GN3	25.50±0.06d	0.29±0.02c	54.45±0.91f	109.40±5.11cd	17.40±0.44c
GN5	24.25±0.13e	0.27±0.01c	51.40±0.63g	102.40±2.99d	13.55±0.66d

叶绿素是与植物光合作用最密切相关的一种色素,其含量的高低可以衡量植物光合能力的强弱。试验结果表明,单独添加 nZVI 与共同添加 GO 和 3%、5% nZVI 能显著增加高羊茅叶绿素含量,促进其光合作用,这与对植物地上生长影响相一致。王静等^[21]研究发现,增加供铁可显著提高油松幼苗的光合能力;龙文靖等^[22]研究发现,玉米苗期叶绿素含量随供铁浓度增加而增加。由于 nZVI 具有强的还原性,它会被氧化释放出二价和三价的铁离子^[13],从而提高了堆肥中可供植物吸收的铁元素含量,进而导致光合作用增强。而由 nZVI 氧化产生的铁离子是否会引起毒性效应,还有待于进一步研究;但也有报道,10%的 nZVI 经过老化后,并未对土壤及其微生物产生不良影响^[23]。另外,纳米材料本身也能通过抑制氧化胁迫来提高逆境条件下植物的光合能力^[24]。本研究发现,3%、5% nZVI 处理及联合 GO,生物量显著增加。有研究显示,碳纳米材料能促进根的伸长和植物生物量的积累^[25],这与本研究的结果一致。植物体内的重金属含量也表明,添加 GO 和 nZVI 能降低植物对堆肥重金属的吸收,说明 GO 和 nZVI 能对堆肥重金属起到吸附钝化作用,从而减轻了重金属对植物的胁迫,促进了生物量的积累。

正常生长条件下,植物细胞产生的活性氧与本身的抗氧化防御系统处于动态平衡状态。植物在胁迫环境下,体内活性氧增加,过量的活性氧会导致生物大分子的氧化,植物抗氧化防御系统通过提高抗氧化酶活性来减小活性氧的伤害。通过 MDA 含量来反映脂质过氧化水平,保护酶活性可以用来判断植物受胁迫程度,SOD 可以催化超氧自由基生成 H_2O_2 ,而 H_2O_2 可以被 POD 和 CAT 所清除^[26]。本研究结果表明,添加 3%、5% nZVI 的处理,POD 和 SOD 的活性升高,MDA 含量均下降,说明 nZVI 处理提高了抗氧化酶活性,清除活性氧的能力增强,从而减轻了膜质过氧化。Li 和 Huang^[27]的研究发现,纳米羟基磷灰石(nHAP)能诱导 Cd 胁迫下小白菜抗氧化酶活性,抑制了植物对 Cd 的吸收,降低 MDA 含量,说明 nHAP 降低了污染土壤中 Cd 的生物有效性,增强了植物的抗 Cd 能力。本研究中,钝化剂处理 CAT 活性降低,可能是在清除 H_2O_2 过程中导致的酶失活或酶合成受阻^[28]。因此,在 3%、5% nZVI 处理中,高羊茅 POD 和 SOD 活性升高,MDA 含量下降,可能是因为 GO 和 nZVI 钝化了堆肥中重金属,减少了植物对重金属的吸收,减轻了植物所受胁迫的伤害。

综上所述,堆肥基质中施入 GO 和 nZVI,促进了高羊茅种子的萌发,且随 nZVI 添加比例的增加而提高。3%、5% nZVI 单独添加以及和 GO 的共同添加,均提高了高羊茅叶绿素含量和地上生物量。3%、5%的 nZVI 提高了高羊茅 SOD 和 POD 活性,降低了 MDA 含量,减少了植物对堆肥重金属的吸收。因此,nZVI 和 GO 两种材料能够固定堆肥中的重金属,减少植物对重金属的吸收,对植物生长具有一定的促进作用。

参考文献 (References):

- [1] 王蕾, 刘思成, 荀世忠, 王滨松, 马玉昆, 赵伟. 城市生活垃圾处理方式的对比研究. 环境科学与管理, 2017, 42(7): 29-31.
- [2] Wright A L, Provin T L, Hons F M, Zuberer D A, White R H. Compost impacts on dissolved organic carbon and available nitrogen and phosphorus

- in turfgrass soil. *Waste Management*, 2008, 28(6): 1057-1063.
- [3] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 2009, 35(1): 142-156.
- [4] 崔建宇, 慕康国, 胡林, 张福锁, 徐淑红. 北京地区草皮卷生产对土壤质量影响的研究. *草业科学*, 2003, 20(6): 68-72.
- [5] 宋丽芬, 陈军霞, 杜滨舵, 史向群. 利用工农业废弃物生产无土草皮卷基质的配方研究. *江苏农业科学*, 2015, 43(7): 166-169.
- [6] 付玲, 王彩云, 尹少华. 蘑菇渣基质生产狗牙根无土草皮配方施肥优化研究. *草业学报*, 2013, 22(3): 241-249.
- [7] Tesfamariam E H, Annandale J G, Steyn J M, Stirzaker R J. Exporting large volumes of municipal sewage sludge through turfgrass sod production. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(3): 1320-1328.
- [8] 赵树兰, 多立安. 生活垃圾堆肥与园土基质草皮建植体系的生长参数比较. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 962-967.
- [9] Mallampati S R, Mitoma Y, Okuda T, Sakita S, Kakeda M. Total immobilization of soil heavy metals with nano-Fe/Ca/CaO dispersion mixtures. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, 11(2): 119-125.
- [10] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, Shen Y J, Hou Y Q, Cheng H S, Song L Q. Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 279-286.
- [11] Li S L, Wang W, Liang F P, Zhang W X. Heavy metal removal using nanoscale zero-valent iron (nZVI): Theory and application. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 322: 163-171.
- [12] Mueller N C, Braun J, Bruns J, Černík M, Rissing P, Rickerby D, Nowack B. Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(2): 550-558.
- [13] 高园园, 周启星. 纳米零价铁在污染土壤修复中的应用与展望. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 418-425.
- [14] Peng W J, Li H Q, Liu Y Y, Song S X. A review on heavy metal ions adsorption from water by graphene oxide and its composites. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 230: 496-504.
- [15] Omran R G. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings. *Plant Physiology*, 1980, 65(2): 407-408.
- [16] Singh B K, Sharma S R, Singh B. Antioxidant enzymes in cabbage: Variability and inheritance of superoxide dismutase, peroxidase and catalase. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(1): 9-13.
- [17] Wang Y F, Pan F B, Wang G S, Zhang G D, Wang Y L, Chen X S, Mao Z Q. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. *Scientia Horticulturae*, 2014, 175: 9-15.
- [18] Luo Y, Liang J, Zeng G M, Chen M, Mo D, Li G X, Zhang D F. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, 2018, 71: 109-114.
- [19] Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, Xu Y, Li Z R, Watanabe F, Biris A S. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*, 2009, 3(10): 3221-3227.
- [20] 吴金海, 焦靖芝, 谢伶俐, 袁程飞, 陈帆, 许本波. 氧化石墨烯处理对甘蓝型油菜生长发育的影响. *基因组学与应用生物学*, 2015, 34(12): 2738-2742.
- [21] 王静, 丛日晨, 王中华, 杨建民, 孟庆瑞, 李彦慧, 赵黎芳. 不同供铁水平对油松幼苗光合特性的影响. *河北农业大学学报*, 2010, 33(3): 57-61.
- [22] 龙文靖, 万年鑫, 朱从桦, 郭萍, 查丽, 谢梦琳, 孔凡磊, 袁继超. 不同供 Fe^{3+} 水平对玉米苗期生长的影响. *玉米科学*, 2015, 23(4): 78-83, 91-91.
- [23] Fajardo C, Gil-Díaz M, Costa G, Alonso J, Guerrero A M, Nande M, Lobo M C, Martín M. Residual impact of aged nZVI on heavy metal-polluted soils. *Science of the Total Environment*, 2015, 535: 79-84.
- [24] Khan M N, Mobin M, Abbas Z K, Almutairi K A, Siddiqui Z H. Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 110: 194-209.
- [25] 赵振杰, 梁太波, 陈千思, 胡利伟, 张艳玲, 尹启生. 碳纳米材料对植物生长发育的调节作用. *作物杂志*, 2017, (2): 7-13.
- [26] Lin H Y, Sun T, Zhou Y, Zhang X M. Anti-oxidative feedback and biomarkers in the intertidal seagrass *Zostera japonica* induced by exposure to copper, lead and cadmium. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1): 325-333.
- [27] Li Z W, Huang J A. Effects of nanoparticle hydroxyapatite on growth and antioxidant system in pakchoi (*Brassica chinensis* L.) from cadmium-contaminated soil. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 2014: 470962.
- [28] Hertwig B, Streb P, Feierabend J. Light dependence of catalase synthesis and degradation in leaves and the influence of interfering stress conditions. *Plant Physiology*, 1992, 100(3): 1547-1553.