

纳米塑料与盐胁迫对菠菜种子和幼苗的毒性效应

郭琳琳, 刘盼, 王晶晶, 谌柄旭

引用本文:

郭琳琳, 刘盼, 王晶晶, 谌柄旭. 纳米塑料与盐胁迫对菠菜种子和幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1257–1266.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微塑料与镉及其复合对小麦种子发芽的影响

王晓晶, 杨毅哲, 曹阳, 张东明, 代允超, 吕家琰

农业环境科学学报. 2023, 42(2): 263–273 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0473>

微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响

王泽正, 杨亮, 李婕, 付东东, 胡维薇, 范正权, 彭丽成

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 44–53 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0560>

聚苯乙烯微球对菜心种子及幼苗的毒性效应

黄献培, 向垒, 郭静婕, 潘一峰, 陈逸平, 李彦文, 莫测辉

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 926–933 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1473>

耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

刘鹏, 毕江涛, 罗成科, 惠治兵, 李文兵, 肖国举, 王静

农业环境科学学报. 2022, 41(2): 246–256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0590>

铈对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1916–1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭琳琳, 刘盼, 王晶晶, 等. 纳米塑料与盐胁迫对菠菜种子和幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1257-1266.

GUO L L, LIU P, WANG J J, et al. Toxicity of the combination of nanoplastics and salt stress on seeds and seedlings of *Spinacia oleracea* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1257-1266.

纳米塑料与盐胁迫对菠菜种子和幼苗的毒性效应

郭琳琳¹, 刘盼¹, 王晶晶², 谌柄旭³

(1. 沧州师范学院生命科学系, 河北 沧州 061001; 2. 大连大学生命健康学院, 辽宁 大连 116622; 3. 沧州环创环保技术服务有限公司, 河北 沧州 061001)

摘要:为探究纳米塑料与盐胁迫对蔬菜作物的影响,选取菠菜(*Spinacia oleracea* L.)作为受试植物,研究粒径为100 nm的聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs, 200、400、800、1 600 mg·L⁻¹)和NaCl(50、100、150、200 mmol·L⁻¹)单一以及二者复合对种子萌发和幼苗生长特性的影响。结果表明:与空白对照组相比,单一PSNPs胁迫(>200 mg·L⁻¹)显著降低菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,单一PSNPs胁迫(>400 mg·L⁻¹)还显著抑制菠菜幼苗超氧化物歧化酶(SOD)的活性,显著提高可溶性蛋白的含量,而对过氧化物酶(POD)的活性以及叶绿素含量的影响表现为“低促高抑”的作用规律。与NaCl单独胁迫相比,低浓度(200 mg·L⁻¹)和高浓度(800 mg·L⁻¹)的PSNPs与NaCl复合污染均进一步降低了菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,加剧了对种子萌发的抑制作用。相比于NaCl单独胁迫,PSNPs-NaCl复合污染对菠菜幼苗的影响主要表现为不同浓度的PSNPs与NaCl复合会进一步显著降低POD的活性,而提高可溶性蛋白的含量,低浓度(200 mg·L⁻¹)PSNPs与NaCl复合显著抑制SOD的活性,而高浓度(800 mg·L⁻¹)PSNPs与NaCl复合显著提高SOD的活性。研究表明,PSNPs对菠菜的种子和幼苗存在明显的毒性效应,并会加剧盐胁迫对菠菜的影响,毒性作用主要涉及种子的萌发、幼苗的可溶性蛋白、叶绿素以及抗氧化系统。

关键词:纳米塑料;盐胁迫;菠菜;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)06-1257-10 doi:10.11654/jaes.2022-1090

Toxicity of the combination of nanoplastics and salt stress on seeds and seedlings of *Spinacia oleracea* L.

GUO Linlin¹, LIU Pan¹, WANG Jingjing², CHEN Bingxu³

(1. Department of Life Science, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China; 2. College of Life and Health, Dalian University, Dalian 116622, China; 3. Cangzhou Huanchuang Environmental Protection Technology Service Co., LTD., Cangzhou 061001, China)

Abstract: This study aimed to understand the impact of nanoplastics and salt stress on vegetable crops. Specifically, we investigated the effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) (200, 400, 800 mg·L⁻¹, and 1 600 mg·L⁻¹) with a particle size of 100 nm and also the combinatorial effect of PSNPs and NaCl (50, 100, 150 mmol·L⁻¹, and 200 mmol·L⁻¹) on the seed germination and seedling growth of spinach (*Spinacia oleracea* L.). We noticed that, in comparison to the control, single PSNPs treatments (>200 mg·L⁻¹) significantly reduced the germination rate, vigor, and index of spinach seeds. Further, superoxide dismutase (SOD) activity was decreased, and the soluble protein content was significantly increased under cultivation with PSNPs (>400 mg·L⁻¹). Moreover, low concentrations of PSNPs promoted peroxidase (POD) activity and increased chlorophyll content, while high PSNPs concentrations also induced an inhibitory effect on POD and chlorophyll. Compared with NaCl alone, treatments with low (200 mg·L⁻¹) or high (800 mg·L⁻¹) concentrations of PSNPs and NaCl (PSNPs+NaCl) reduced germination rate, vigor, and index of spinach seeds, and aggravated the inhibitory effects of NaCl. The combined

收稿日期:2022-11-01 录用日期:2022-12-16

作者简介:郭琳琳(1988—),女,河北沧州人,硕士,讲师,从事污染生态学与生态毒理学研究。E-mail:glinlin11@126.com

基金项目:河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2021401);沧州市重点研发计划指导项目(213109014)

Project supported: The Key Project of Science and Technology Research of the Higher Education Institutions of Hebei Province, China(ZD2021401); The Guidance Project of Key Research and Development Plan of Cangzhou, China(213109014)

effects of PSNPs+NaCl pollution on seedlings were as follows: PSNPs+NaCl contamination significantly decreased POD activity and increased soluble protein content. However, 200 mg·L⁻¹ PSNPs+NaCl led to a decline in SOD activity, while 800 mg·L⁻¹ PSNPs+NaCl enhanced it. These results indicate that PSNPs have significant toxic effects on seed germination and seedling growth of spinach and aggravate the impact of salt stress on spinach. Importantly, the toxic effects affect not only seed germination but also soluble protein content, chlorophyll content, and the antioxidant system.

Keywords: nanoplastics; salt stress; spinach; seed germination; seedling growth

塑料在我们的日常生活中被广泛使用,大约99%的塑料制品在使用后被排放到陆地环境中^[1]。塑料在外界条件的作用下,可降解为粒径<5 mm的颗粒或碎片,即微塑料(MPs)^[2]。近年来,MPs因其分布广、粒径小、迁移快、难降解以及可能带来的生态风险等因素,已成为全球广泛关注的环境问题。在已有的研究中,大量有关MPs污染的报道多集中在水生生态系统,而对土壤生态系统却缺乏研究^[3]。土壤生态系统作为人类粮食生产的主要载体,也是MPs的主要分布场所。环境中的MPs通过废水灌溉、大气沉积、塑料地膜降解、聚合物的施用等途径进入土壤,并对植物的生长发育产生危害,其影响直接关系到农产品的安全,进而威胁人类健康^[4]。

一个微塑料颗粒可以破碎成10¹⁴个量级以上的直径≤100 nm的纳米塑料(NPs)颗粒^[5]。Sun等^[6]的研究发现不同表面电荷的NPs可以显著降低拟南芥植物的高度和质量,且带正电的NPs不容易穿透植物组织,对植物生长有更显著的影响。NPs通过增加生菜活性氧的含量,进一步破坏叶绿体结构,抑制光合活性,从而降低叶绿素和类胡萝卜素的含量^[7]。也有研究发现,NPs会对植物的氧化应激产生影响,例如50 mg·L⁻¹和100 mg·L⁻¹的粒径20 nm的NPs会提高过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性,而当浓度为10 mg·L⁻¹时,则不存在这种影响^[5]。NPs因粒径小而更容易附着到生物体表面,引起更为复杂的毒理效应,但是NPs对植物影响的研究还非常少,需进一步开展更为有效的研究。

另外,土壤除受到塑料污染外,还受到盐渍化的威胁。河北东部滨海地区处在水陆交接地带,土壤盐渍化程度较为严重^[8]。微量的盐分对植物的生长代谢有一定的促进作用,而滨海地区盐渍土壤中盐分较高,养分贫瘠,因此会抑制农作物和植物的生命代谢过程^[9]。环境中绝对意义的单一污染极少,更多的是多种污染物共同存在^[10]。土壤MPs和土壤盐渍化作为两类重要的污染来源,其单一作用和联合胁迫对农作物的影响还未见报道。

菠菜作为河北地区主要的蔬菜作物被广泛种植,有关盐胁迫对菠菜的影响已有较多研究,而单一MPs尤其是较小的NPs胁迫,以及其与盐胁迫复合作用对菠菜种子萌发和幼苗生长的研究还未见报道。因此,本文以菠菜作为供试植物,以NaCl和聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)为研究对象,研究单一PSNPs或NaCl以及两者复合污染对菠菜种子萌发和幼苗生长的影响,为探究共污染对农作物的毒理学效应以及评估NPs对土壤生态系统的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试种子

供试小叶菠菜种子购于当地某农贸市场。

1.1.2 供试微塑料

单分散聚苯乙烯微球购于无锡瑞格生物技术有限公司,粒径为(100±10) nm。

1.2 试验设计

1.2.1 种子萌发实验

选取颗粒饱满、大小均匀、状态良好的种子剥掉外壳,浸泡于1% H₂O₂溶液消毒30 min,再用蒸馏水冲洗多次,吸干表面水分后晾干备用。将10粒菠菜种子放入铺有纱布的直径为9 cm的培养皿中。结合我国西南部地区可耕种土壤每千克土的MPs含量为7.1×10³~4.3×10⁴个^[11],参考Giorgetti等^[12]和黄献培等^[13]的研究,以及前期的预试验结果对PSNPs的浓度进行设置。NaCl浓度的设置主要参考Uçgun等^[14]的研究,以及前期的预试验结果。

单一胁迫试验:在上述培养皿中分别加入2 mL浓度为200、400、800、1 600 mg·L⁻¹的PSNPs悬浮液;或分别加入2 mL浓度为50、100、150、200 mmol·L⁻¹的NaCl溶液。

PSNPs-NaCl复合污染组:在上述培养皿中加入2 mL PSNPs(200 mg·L⁻¹和800 mg·L⁻¹)及NaCl(50 mmol·L⁻¹和150 mmol·L⁻¹)的复合溶液。

对照组:加入2 mL蒸馏水进行培养。

以上所有处理组均设置3次重复。

将处理好的培养皿置于人工气候培养箱(RY-QH-250F,上海姚氏仪器设备厂)内培养(25℃恒温、光照14 h),培养过程中及时观察种子萌发情况并补充适量的蒸馏水。

1.2.2 幼苗生长实验

将已洗净消毒后的菠菜种子置于铺有纱布的培养皿(直径为9 cm)中,每个培养皿中加入2 mL蒸馏水以及2 mL Hoagland 营养液,待种子萌发后置于人工气候培养箱内培养(25℃恒温、光照14 h)。待菠菜幼苗第二片真叶展开之前,将幼苗移栽到装有1/4 Hoagland 营养液的三角瓶中,放入人工气候培养箱中继续培养,光暗周期为12 h:12 h,温度23℃,湿度60%^[15],每3 d更换一次培养液。在菠菜第三片真叶展开后,选取长势较好且一致的幼苗分别移栽到装有不同处理液的三角瓶中(处理组浓度设置同1.2.1,且每个处理组均设置3次重复)继续培养,每日更换培养液,继续培养14 d后进行各项生理指标的测定。

1.3 测定方法

1.3.1 种子生长指标测定

每日观察并记录种子的发芽数,在第7天统计并计算各生长指标,具体计算公式如下^[16]:

发芽率=(7 d内供试种子发芽数/供试种子总数)×100%

发芽势=(3 d内供试种子发芽数/供试种子总数)×100%

发芽指数= $\sum Gt/Dt$ (Gt 为 t 天内的发芽数; Dt 为对应的发芽天数)

活力指数=发芽指数×胚芽长度

1.3.2 幼苗生理指标测定

称取新鲜健康的菠菜幼苗,低温研磨,经离心后,分别采用氮蓝四唑法测定SOD活性,采用愈创木酚法测定POD活性,采用考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白的含量^[17],采用有机溶剂浸提法提取叶绿素并用可见分光光度计(TU-1810SPC,北京普析)测定叶绿素含量^[18]。

1.4 数据处理

使用GraphPad Prism 8软件制图,使用SPSS 23.0软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析法(ANOVA)对不同处理组和对照组的数据进行分析比较。

2 结果与分析

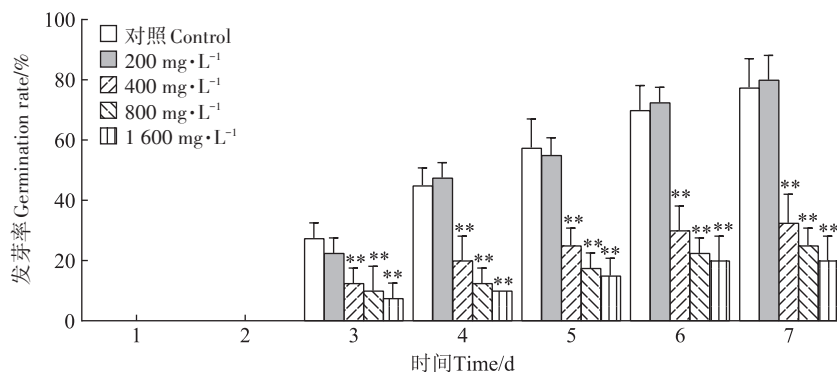
2.1 PSNPs与NaCl胁迫对菠菜种子萌发的影响

2.1.1 PSNPs或NaCl单独胁迫对菠菜种子萌发的影响

(1)对菠菜种子发芽率的影响

发芽率是衡量种子活力的重要指标,在不同的胁迫条件下,菠菜种子均从第3天起开始发芽。在PSNPs单独胁迫下(图1),第3~7天不同的暴露时间内,相比于对照组,200 mg·L⁻¹低浓度PSNPs对种子的发芽率没有显著影响,而400、800、1 600 mg·L⁻¹中高浓度PSNPs胁迫均会极显著降低菠菜种子的发芽率。在NaCl单独胁迫下(图2),从第3天至第7天,50 mmol·L⁻¹低浓度NaCl胁迫对菠菜种子发芽率无显著影响,150、200 mmol·L⁻¹高浓度NaCl胁迫极显著降低了菠菜种子的发芽率,而100 mmol·L⁻¹中浓度NaCl胁迫在第3天至第5天对菠菜种子发芽率无显著影响,在第6天和第7天显著降低了种子的发芽率。

(2)对菠菜种子生长特征的影响



*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。下同。
* represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$. The same below.

图1 聚苯乙烯纳米塑料胁迫下菠菜种子的发芽率

Figure 1 Effects of PSNPs on seeds germination rate of spinach

由表1可知,相比于对照组,除200 mg·L⁻¹低浓度PSNPs对种子的各项生长指标无显著影响外,400、800、1 600 mg·L⁻¹中高浓度PSNPs胁迫对菠菜种子的发芽势、发芽指数和活力指数均表现为抑制作用($P<0.05$)。而NaCl单独胁迫基本表现出和PSNPs相同的效应,即低浓度50 mmol·L⁻¹NaCl对菠菜种子的发芽势、发芽指数和活力指数无显著影响,而100、150、200 mmol·L⁻¹中高浓度胁迫对种子的3项生长指标基本表现为抑制作用($P<0.05$)。

2.1.2 PSNPs和NaCl复合污染对菠菜种子萌发的影响
(1)对菠菜种子发芽率的影响

由图3可知,相比于空白对照组,低浓度PSNPs与低浓度NaCl(PSNPs 200–NaCl 50)复合污染对菠菜种子的发芽率无显著影响,而其余3个复合污染组(PSNPs 800–NaCl 50、PSNPs 200–NaCl 150、PSNPs 800–NaCl 150)均会显著降低菠菜种子的发芽率($P<0.05$)。与NaCl单独胁迫相比,低浓度(200 mg·L⁻¹)PSNPs与NaCl复合污染对种子的发芽率无显著影响,而高浓度(800 mg·L⁻¹)PSNPs与NaCl复合会在不同暴露时间内显著降低菠菜种子的发芽率($P<0.05$),进一步抑制种子的发芽。

(2)对菠菜种子生长特征的影响

由表2可知,相比于空白对照组,除低浓度PSNPs与低浓度NaCl(PSNPs 200–NaCl 50)复合污染对菠菜种子各项生长特征无显著影响外,其余3个复合污染组(PSNPs 800–NaCl 50、PSNPs 200–NaCl 150、PSNPs 800–NaCl 150)均会显著降低菠菜种子的发芽势、发芽指数和活力指数($P<0.05$)。与NaCl单独胁迫相比,低浓度(200 mg·L⁻¹)PSNPs与NaCl复合作用下,仅PSNPs 200–NaCl 150处理组的种子活力指数显著低于150 mmol·L⁻¹ NaCl处理组,其余复合污染条件

表1 单一聚苯乙烯微塑料或氯化钠胁迫对菠菜种子生长特征的影响

Table 1 Effects of PSNPs or NaCl on growth of spinach seeds

处理组 Treatment	浓度 Concentration	发芽势 Germination vigor/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
对照 Control	0	27.50±5.00a	5.47±0.54a	13.68±1.58a
PSNPs	200 mg·L ⁻¹	22.50±5.00ab	5.39±0.32a	14.28±0.92a
	400 mg·L ⁻¹	12.50±5.00bcd	2.38±0.69c	6.13±1.76c
	800 mg·L ⁻¹	10.00±8.16cd	1.73±0.55cd	4.19±1.50cd
	1 600 mg·L ⁻¹	7.50±5.00d	1.42±0.49d	3.47±1.26d
NaCl	50 mmol·L ⁻¹	30.00±8.16a	5.49±0.71a	14.42±1.86a
	100 mmol·L ⁻¹	20.00±8.16abc	4.30±0.58b	10.22±1.44b
	150 mmol·L ⁻¹	10.00±8.16cd	2.31±0.32c	5.10±0.53cd
	200 mmol·L ⁻¹	7.50±5.00d	1.75±0.47cd	3.40±0.98d

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

表2 聚苯乙烯纳米塑料与氯化钠复合污染对菠菜种子生长特征的影响

Table 2 Combined effects of PSNPs and NaCl on growth characteristics of spinach seeds

处理组 Treatment	发芽势 Germination vigor/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
对照 Control	27.50±5.00a	5.47±0.54a	13.68±1.58a
PSNPs 200	22.50±5.00ab	5.39±0.32a	14.28±0.92a
PSNPs 800	10.00±8.16c	1.73±0.55c	4.44±1.33c
NaCl 50	30.00±8.16a	5.49±0.71a	14.42±1.86a
NaCl 150	10.00±8.16c	2.31±0.32c	10.22±1.44b
PSNPs 200–NaCl 50	22.50±5.00ab	5.73±0.32a	14.75±0.87a
PSNPs 800–NaCl 50	15.00±10.00bc	4.13±0.50b	9.74±1.08b
PSNPs 200–NaCl 150	12.50±5.00bc	2.26±0.52c	4.90±1.15c
PSNPs 800–NaCl 150	7.50±5.00c	1.63±0.58c	3.23±1.22c

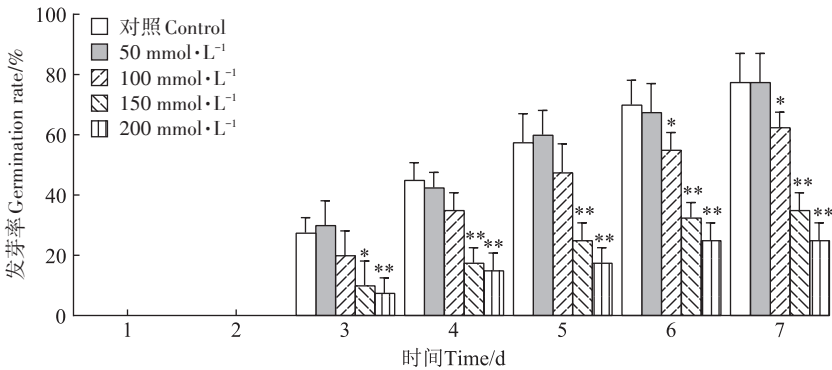
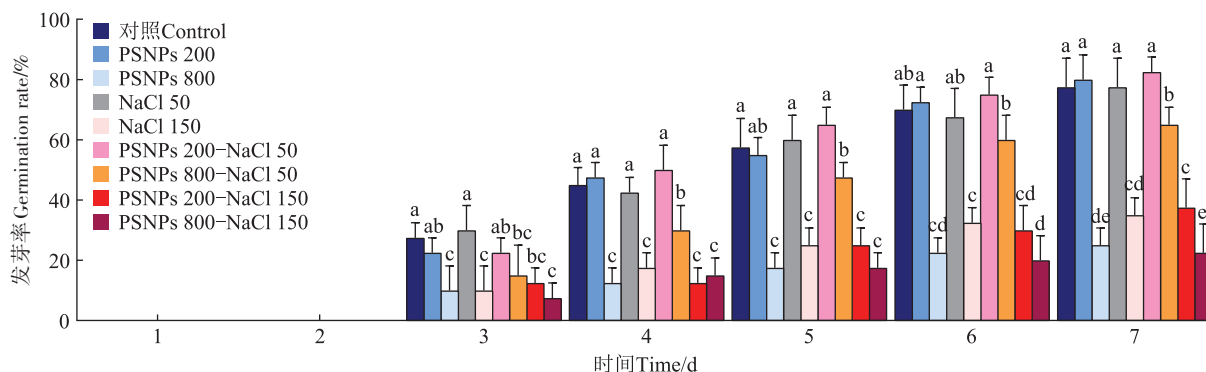


图2 氯化钠胁迫下菠菜种子的发芽率

Figure 2 Effects of NaCl on seeds germination rate of spinach



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图3 聚苯乙烯纳米塑料与氯化钠复合污染条件下菠菜种子的发芽率

Figure 3 Combined effects of PSNPs and NaCl on seeds germination rate of spinach

下无显著差异;而高浓度($800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) PSNPs 与 NaCl 复合会降低菠菜种子的发芽势、发芽指数和活力指数,进一步抑制种子的萌发。

2.2 PSNPs 与 NaCl 胁迫对菠菜幼苗生长的影响

2.2.1 PSNPs 或 NaCl 单独胁迫对菠菜幼苗生长的影响

(1) 对菠菜幼苗 SOD 和 POD 活性的影响

由图4可知,相比于空白对照组, 200 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 低中浓度 PSNPs 胁迫对菠菜幼苗 SOD 活性无显著影响 ($P>0.05$), 而 800 、 $1600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高浓度 PSNPs 胁迫显著降低菠菜幼苗 SOD 的活性 ($P<0.05$); 400 、 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PSNPs 胁迫显著提高菠菜幼苗中 POD 的活性, 而 $1600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 最高浓度胁迫下, POD 活性受到显著抑制 ($P<0.05$)。相比于空白对照组, 50 、 100 、 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 单独胁迫均会显著提高菠菜幼苗的 SOD、POD 活性 ($P<0.05$), 而最高浓度 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

NaCl 单独胁迫对 SOD、POD 活性无显著影响。

(2) 对菠菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

由图5可知, PSNPs 单独胁迫对菠菜幼苗体内可溶性蛋白的影响均表现为一定的促进作用, 但仅在 800 、 $1600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高浓度 PSNPs 胁迫条件下可溶性蛋白的含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。相比于空白对照组, 不同浓度的 NaCl 单独胁迫均会显著降低可溶性蛋白的含量 ($P<0.05$)。

(3) 对菠菜幼苗叶绿素含量的影响

由图6可知, 相比于空白对照组, PSNPs 或 NaCl 单独胁迫对菠菜幼苗叶绿素的含量影响规律基本相同, 即低浓度 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PSNPs 或 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 能够显著提高叶绿素的含量 ($P<0.05$), 而随着 PSNPs 或 NaCl 胁迫浓度的升高, 菠菜幼苗的叶绿素含量逐渐下降, 且叶绿素含量在 400 、 800 、 $1600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

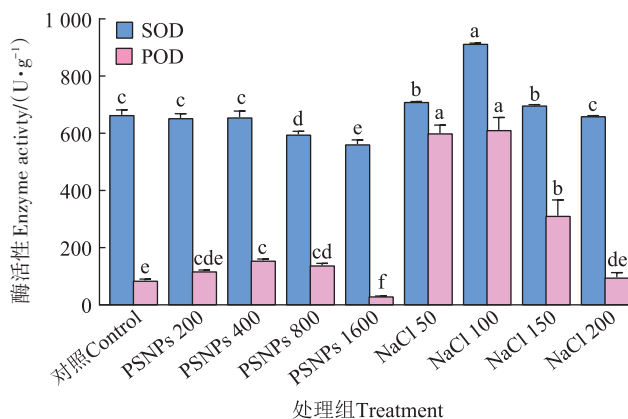


图4 聚苯乙烯纳米塑料或氯化钠单独胁迫对菠菜幼苗酶活性的影响

Figure 4 Effects of PSNPs or NaCl on enzyme activity of spinach seedlings

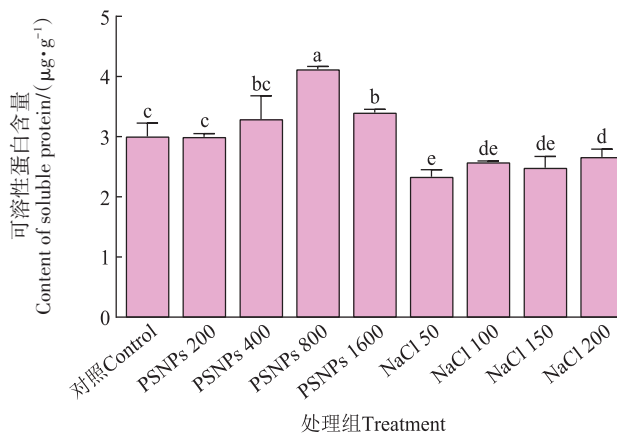


图5 聚苯乙烯纳米塑料或氯化钠单独胁迫对菠菜幼苗可溶性蛋白的影响

Figure 5 Effects of PSNPs or NaCl on soluble protein of spinach seedlings

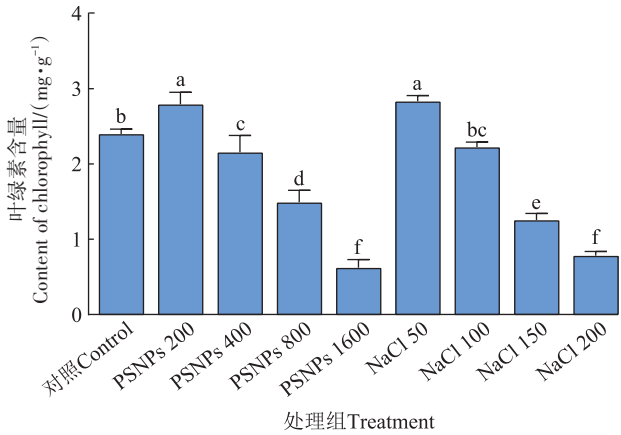


图6 聚苯乙烯纳米塑料或氯化钠单独胁迫对菠菜幼苗叶绿素含量的影响

Figure 6 Effects of PSNPs or NaCl on chlorophyll content of spinach seedlings

PSNPs 浓度组和 150、200 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度组显著低于对照组($P<0.05$)。

2.2.2 PSNPs 和 NaCl 复合污染对菠菜幼苗生长的影响

由表 3 可知,相比于空白对照组,低浓度 200 mg·L⁻¹ PSNPs 与不同浓度 NaCl 复合会显著降低菠菜幼苗体内的 SOD 活性($P<0.05$),对叶绿素含量无显著影响,而高浓度 800 mg·L⁻¹ PSNPs 与不同浓度 NaCl 复合会显著提高 SOD 活性,显著降低叶绿素的含量($P<0.05$)。而不同浓度 PSNPs 与不同浓度 NaCl 复合均会提高 POD 的活性,以及显著提高可溶性蛋白的含量($P<0.05$)。

NaCl 单独胁迫可提高 POD 的活性,而 4 个 PSNPs-NaCl 复合污染处理组的 POD 活性均显著低于同浓度 NaCl 单一胁迫($P<0.05$),表明 PSNPs 可减弱 NaCl 单独胁迫对 POD 活性的促进作用;另外,不同复

合污染处理组的可溶性蛋白含量显著高于 NaCl 单独胁迫组($P<0.05$),表明 PSNPs 能够缓解 NaCl 单独胁迫对可溶性蛋白的抑制作用。

与 NaCl 单独胁迫相比,低浓度 (200 mg·L⁻¹) PSNPs 与 NaCl 复合显著降低 SOD 的活性($P<0.05$),而高浓度 (800 mg·L⁻¹) PSNPs 与 NaCl 复合显著提高 SOD 活性($P<0.05$);不同浓度 PSNPs 与低浓度 50 mmol·L⁻¹ NaCl 复合,叶绿素的含量显著降低($P<0.05$),PSNPs 能够减弱低浓度 NaCl 对幼苗叶绿素含量的增加作用,而不同浓度 PSNPs 与高浓度 150 mmol·L⁻¹ NaCl 复合显著提高叶绿素的含量($P<0.05$),PSNPs 能够减弱高浓度 NaCl 对菠菜幼苗叶绿素的抑制作用。由此可知,PSNPs 与 NaCl 对菠菜幼苗的影响基本表现为拮抗作用。

3 讨论

3.1 PSNPs 与 NaCl 胁迫对菠菜种子萌发的影响

本研究表明,400、800、1 600 mg·L⁻¹ 中高浓度 PSNPs 胁迫显著降低菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,抑制菠菜种子的萌发,而 200 mg·L⁻¹ 低浓度胁迫对种子的萌发无显著影响。已有研究发现,不同浓度 PSNPs 均抑制大豆种子的发芽势、发芽指数、活力指数和平均发芽速度^[19];Guo 等^[20]的研究发现,粒径为 80 nm 的 PSNPs 会显著降低凤仙花 (*Impatiens balsamina*) 种子的发芽率和发芽势,对种子的萌发起到抑制作用。这些结果均与本文的研究结果一致。Bosker 等^[21]采用 50 nm 和 500 nm 的绿色荧光 NPs 和 MPs 暴露水芹种子,发现 8 h 后发芽率均降低,进一步采用荧光显微镜观测后发现,大部分 NPs 和 MPs 会聚集在种皮的孔隙中,少部分 MPs 会进入到种

表 3 聚苯乙烯纳米塑料与氯化钠复合污染对菠菜幼苗生长的影响

Table 3 Combined effects of PSNPs and NaCl on growth of spinach seedlings

处理组 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD/(U·g ⁻¹)	过氧化物酶 POD/(U·g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein/(μg·g ⁻¹)	叶绿素 Chlorophyll/(mg·g ⁻¹)
对照 Control	664.36±18.03d	85.00±5.18g	3.01±0.22d	2.40±0.06bc
PSNPs 200	653.98±14.61d	117.60±4.18fg	3.00±0.05d	2.79±0.16a
PSNPs 800	595.85±11.04e	138.50±7.10ef	4.12±0.05c	1.49±0.16d
NaCl 50	710.04±1.08c	600.00±28.93a	2.33±0.12e	2.84±0.07a
NaCl 150	697.58±3.07c	312.00±54.67c	2.49±0.19e	1.26±0.09e
PSNPs 200-NaCl 50	494.12±1.05f	120.00±18.33fg	4.43±0.16ab	2.49±0.14b
PSNPs 800-NaCl 50	772.31±1.98a	480.00±37.99b	4.63±0.13a	1.09±0.05e
PSNPs 200-NaCl 150	457.54±0.63g	168.00±15.72e	4.35±0.19bc	2.22±0.17c
PSNPs 800-NaCl 150	730.80±2.27b	252.00±18.52d	4.65±0.13a	1.54±0.16d

子的胚乳中,抑制种子对水分和营养物质的吸收作用;对蚕豆的扫描电镜结果显示,100 nm的PSNPs会进入到根尖内,使根尖营养物质吸收受阻^[22]。这些可能是MPs抑制植物种子萌发的主要原因。

本研究中,NaCl单独胁迫与PSNPs单独胁迫对菠菜种子的萌发影响类似,即100、150、200 mmol·L⁻¹中高浓度组显著降低菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数,抑制种子的萌发,而50 mmol·L⁻¹低浓度组对种子的萌发无显著影响。已有的研究发现,NaCl胁迫会显著降低菠菜种子的发芽率和发芽速度^[14],降低野榆钱菠菜种子的萌发率和萌发指数^[15],上述研究结果与本研究的结论一致。而较高浓度的NaCl抑制种子萌发的主要原因可能是其导致菠菜种子渗透调节紊乱、吸水率下降、胞内离子失衡等^[23]。

PSNPs与NaCl复合污染的研究表明,高浓度800 mg·L⁻¹ PSNPs与NaCl复合会进一步降低菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,即加剧NaCl对种子萌发的抑制作用,而低浓度200 mg·L⁻¹ PSNPs与NaCl复合相比于NaCl单独胁迫并未引起各指标的显著变化。已有的研究表明,MPs可以通过吸附作用富集金属离子,当二者联合作用于生物体时,MPs会通过增加摄入浓度、加剧组织损伤等方式增强金属离子对生物体的毒性效应^[24]。例如,已有的研究发现,聚乙烯微塑料会加剧Cd对小麦种子发芽的抑制作用^[25],加剧Cd对玉米的毒性^[26];粒径为20 nm的PSNPs通过增加莱茵衣藻细胞质膜的渗透性,使其体内的Ag⁺含量增加,从而增加PSNPs与Ag⁺的联合毒性^[27]。已有的研究发现,盐度能够影响MPs对有机污染物的吸附效应,但具体机制尚不明确^[28],而有关MPs与盐胁迫复合污染对植物的影响尚无报道。

3.2 PSNPs与NaCl胁迫对菠菜幼苗生长的影响

SOD和POD是组成植物抗氧化系统的主要酶,二者相互协同维持植物体内的自由基稳态。本研究中,PSNPs单独胁迫下,菠菜幼苗的SOD活性在200、400 mg·L⁻¹中低浓度下无显著变化,而在800、1 600 mg·L⁻¹高浓度组显著降低,POD活性随着PSNPs浓度的增加,先逐渐升高后在最高浓度1 600 mg·L⁻¹下显著低于对照组。廖苑辰等^[29]采用100 nm的聚苯乙烯荧光微球暴露小麦幼苗的研究发现,叶片内SOD活性显著低于对照组,而POD的活性先显著升高后降低,这与本研究的结果基本一致。抗氧化酶活性的升高是植物在抵抗外界环境胁迫时产生的调节反应,而活性的降低表明胁迫超出机体自身的承受范围。已

有研究发现,低浓度的MPs会加强植物体内活性氧簇的相关酶的编码基因,从而提高不同抗氧化酶的活性,而高浓度的MPs会提高植物体内的丙二醛含量,破坏机体的抗氧化酶防御系统,从而导致酶活性的降低^[30],这可能是本研究中SOD和POD两种酶活性变化的主要机制之一。另外,在本研究中,NaCl单独胁迫会诱导菠菜幼苗的SOD和POD活性。已有的研究发现,NaCl胁迫会诱导红叶石楠幼叶SOD活性升高,而抑制POD的活性^[31],单独NaCl胁迫小麦幼苗6 d, SOD活性升高而POD活性降低^[32],上述结果与本研究一致,表明菠菜幼苗主要通过提高SOD和POD的活性调节盐胁迫作用后机体的生理变化。

可溶性蛋白含量也是植物参与外界胁迫的重要指标之一,其参与机体的渗透调节。本研究中,PSNPs单独胁迫能够增加菠菜幼苗体内可溶性蛋白的含量,且在800、1 600 mg·L⁻¹高浓度处理组含量显著升高。已有研究发现,5 μm聚苯乙烯荧光微球胁迫会提高小麦叶片可溶性蛋白的含量^[26],这与本研究结果一致。而高浓度PSNPs单独胁迫引起可溶性蛋白含量的显著升高,这可能与对应浓度下SOD活性降低引起机体的抗氧化防御机制有关。另外,在本研究中,NaCl单独胁迫会降低菠菜幼苗的可溶性蛋白含量。已有研究表明,低浓度NaCl胁迫可促进植物可溶性蛋白的合成以适应盐环境,但随着NaCl浓度的增加,胁迫达到一定程度时,可溶性蛋白的合成受到严重抑制^[33]。周峰等^[34]的研究发现,5~20 mmol·L⁻¹低浓度NaCl可促进菠菜幼苗可溶性蛋白的合成,当NaCl浓度大于30 mmol·L⁻¹时,菠菜幼苗的可溶性蛋白含量开始明显下降;另外,盐胁迫也会降低黄瓜、紫松果菊、千屈菜幼苗内的可溶性蛋白含量^[33,35-36],这与本研究的结果一致。

外源物质可以通过改变植物体内叶绿素的含量进一步影响光合作用。本研究中,200 mg·L⁻¹低浓度PSNPs单独胁迫引起叶绿素含量升高,而随着PSNPs浓度的升高,叶绿素含量显著降低。廖苑辰等^[29]的研究发现,低浓度的聚苯乙烯荧光微球能够提高小麦幼苗叶绿素含量,随着聚苯乙烯暴露浓度的升高,叶绿素含量逐渐降低;张晨等^[37]采用聚苯乙烯微塑料暴露沉水植物黑藻,低浓度50 mg·L⁻¹ MPs会引起黑藻体内叶绿素含量增加,随着暴露浓度增加叶绿素含量逐渐降低并显著低于对照组;Liu等^[38]采用聚乙烯微塑料暴露小麦幼苗,其体内叶绿素的含量也表现为先升高后降低的规律,这些结果与本研究一致。已有的研

究发现,低浓度碳纳米管能够提升水稻叶绿素含量的原因主要与该浓度微塑料能够促进叶片的生长有关^[39],这也是本研究中低浓度PSNPs提高叶绿素含量的可能原因之一。而高浓度的PSNPs降低叶绿素含量的主要机制可能是高浓度暴露会提高植物体内的ROS含量,破坏叶绿体结构,从而降低叶绿素的含量^[7]。另外,也有研究发现,50 nm和500 nm的聚苯乙烯荧光颗粒暴露于维管植物紫萍后,并未引起紫萍体内叶绿素含量的显著变化^[40];Lian等^[7]采用粒径为93.6 nm的PSNPs暴露生菜幼苗,幼苗叶绿素含量降低。以上结果与本研究并不一致,这可能与不同植物种类,以及所采用的PSNPs的粒径、形状和自身所含添加剂的差异有关^[41]。另外,在本研究中,低浓度NaCl单独胁迫提升菠菜幼苗的叶绿素含量,中高浓度NaCl显著降低叶绿素的含量,这与前人的研究结果一致^[42-44]。

PSNPs与NaCl复合污染的研究表明,PSNPs与NaCl对菠菜幼苗POD、可溶性蛋白、叶绿素的影响基本表现为拮抗作用。已有的研究发现,聚苯乙烯微塑料会减弱Pb对水稻幼苗根系POD的抑制作用^[45],能够缓解Cu和Cd对小麦幼苗叶绿素的抑制作用^[46],聚苯乙烯微塑料与上述金属离子之间表现为拮抗作用,这些与本文的研究结果相一致。另外,本研究中低浓度PSNPs会抑制NaCl对SOD的诱导作用,二者表现为拮抗效应,而高浓度PSNPs会进一步加强NaCl的诱导,二者表现为协同效应。已有的研究发现,低浓度的MPs会缓解As对水稻幼苗叶片中SOD的抑制作用,MPs与As发挥拮抗效应,而高浓度MPs会加剧As对SOD的抑制,二者发挥协同效应^[47],这与本研究的结果一致。原因是由于MPs对金属离子具有吸附作用,低浓度的PSNPs可能携带Na⁺浮于培养液上,或占据幼苗根系Na⁺的吸附位点,从而降低了菠菜幼苗对NaCl的利用度,而高浓度的PSNPs可以携带更多的Na⁺进入植物体内发挥协同作用^[48]。不同浓度的PSNPs与不同浓度的NaCl复合对幼苗不同指标的影响存在一定差异,因此推测PSNPs对盐胁迫条件下植物的影响机理较为复杂,还有待进一步研究。

4 结论

(1)单独的PSNPs胁迫对菠菜种子的影响为降低其发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,抑制种子的萌发;单独的PSNPs胁迫对菠菜幼苗的影响为抑制SOD的活性,提高可溶性蛋白的含量,低、中浓度提高

POD的活性,最高浓度抑制POD活性,最低浓度提高叶绿素的含量,中、高浓度抑制叶绿素的合成。

(2)单独的NaCl胁迫抑制菠菜种子的萌发,诱导菠菜幼苗SOD和POD活性升高,降低可溶性蛋白的含量,对叶绿素的影响表现为“低促高抑”的作用规律。

(3)PSNPs会加剧NaCl对菠菜种子萌发的抑制作用,二者表现为协同作用;而二者复合对菠菜幼苗的影响表现为拮抗作用。

参考文献:

- [1] VAN SEBILLE E, WILCOX C, LEBRETON L, et al. A global inventory of small floating plastic debris[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10:124006.
- [2] NEL H A, DALU T, WASSERMAN R J. Sinks and sources: assessing microplastic abundance in river sediment and deposit feeders in an Austral temperate urban river system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:950-956.
- [3] SOUZA MACHADO A A, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4):1405-1416.
- [4] WU X, LU J, DU M, et al. Particulate plastics-plant interaction in soil and its implications: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 20:148337.
- [5] ZHOU C, LU C, MAI L, et al. Response of rice (*Oryza sativa* L.) roots to nanoplastic treatment at seedling stage[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401:123412.
- [6] SUN X, YUAN X, JIA Y, et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(9):755-760.
- [7] LIAN J, LIU W, MENG L, et al. Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. *Environment Pollution*, 2021, 280:116978.
- [8] 于淑会, 周向莉, 卿冀川, 等. 河北滨海盐碱土地生态安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5):778-786. YU S H, ZHOU X L, QING J C, et al. Evaluation of land ecological security of coastal saline land in Hebei[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(5):778-786.
- [9] 祝瑜, 褚琳琳, 朱文东, 等. 滨海盐渍土壤物化性质与水动力学性质变异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6):379-386. ZHU Y, CHU L L, ZHU W D, et al. Variation of soil physicochemical properties and hydrodynamic properties of coastal saline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):379-386.
- [10] POSTHUMA L, BAERSELMAN R, VAN VEEN R P, et al. Single and joint toxic effects of copper and zinc on reproduction of *Enchytraeus crypticus* in relation to sorption of metals in soils[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 1997, 38(2):108-121.
- [11] ZHANG G S, LIU Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:12-20.

- [12] GIORGETTI L, SPANÒ C, MUCCIFORA S, et al. Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 149: 170–177.
- [13] 黄献培, 向垒, 郭静婕, 等. 聚苯乙烯微球对菜心种子及幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 926–933. HUANG X P, XIANG L, GUO J J, et al. Toxicity of polystyrene microplastics on seeds and seedlings of *Brassica campestris* L[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 926–933.
- [14] UÇGUN K, FERREIRA J F S, LIU X, et al. Germination and growth of spinach under potassium deficiency and irrigation with high-salinity water[J]. *Plants(Basel)*, 2020, 9(12): 1739.
- [15] 王伟华, 姜黎. 四种钠盐胁迫对野榆钱菠菜种子萌发特性和幼苗生长的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(6): 23–29. WANG W H, JIANG L. Effects of sodium stress on seed germination and seedling growth of *Atriplex aucherii*[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 23–29.
- [16] 王泽正, 杨亮, 李婕, 等. 微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 44–53. WANG Z Z, YANG L, LI J, et al. Single and combined effects of microplastics and cadmium on the germination characteristics of rice seeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 44–53.
- [17] 宗海英, 刘君, 郭晓红, 等. 聚乙烯微塑料对花生幼苗镉吸收及生理特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1400–1407. ZONG H Y, LIU J, GUO X H, et al. Effects of polyethylene microplastics on cadmium absorption and physiological characteristics of peanut seedling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1400–1407.
- [18] 张秀君, 孙钱钱, 乔双, 等. 菠菜叶绿素提取方法的比较研究[J]. 作物杂志, 2011(3): 57–60. ZHANG X J, SUN Q Q, QIAO S, et al. A comparative study of chlorophyll extraction methods[J]. *Crops*, 2011(3): 57–60.
- [19] 吴佳妮, 杨天志, 连加攀, 等. 聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)对大豆(*Glycine max*)种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4581–4589. WU J N, YANG T Z, LIAN J P, et al. Effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of soybean (*Glycine max*) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(12): 4581–4589.
- [20] GUO M, ZHAO F, TIAN L, et al. Effects of polystyrene microplastics on the seed germination of herbaceous ornamental plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151100.
- [21] BOSKER T, BOUWMAN L J, BRUN N R, et al. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*[J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 774–781.
- [22] JIANG X, CHEN H, LIAO Y, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 831–838.
- [23] 郑伶俐, 丁丁, 丁冯洁, 等. NaCl胁迫对2种补血草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(10): 44–52. ZHENG L J, DING D, DING F J, et al. Effect of NaCl stress on seed germination and seedling growth of two species of *limonium*[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(10): 44–52.
- [24] 张哥, 邹亚丹, 徐擎擎, 等. 微塑料与水中污染物的联合作用研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 59–69. ZHANG J, ZOU Y D, XU Q Q, et al. Proceedings of joint effect of microplastics and pollutants in water[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(2): 59–69.
- [25] 冯天联, 陈苏, 陈影, 等. 微塑料与Cd交互作用对小麦种子发芽的生态毒性研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1892–1900. FENG T Z, CHEN S, CHEN Y, et al. Study on ecological toxicity of microplastics and cadmium interaction on wheat seed germination[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1892–1900.
- [26] WANG F, ZHANG X, ZHANG S, et al. Effects of co-contamination of microplastics and Cd on plant growth and Cd accumulation[J]. *Toxics*, 2020, 8(2): 36.
- [27] HUANG B, WEI Z B, YANG L Y, et al. Combined toxicity of silver nanoparticles with hematite or plastic nanoparticles toward two freshwater algae[J]. *Environment Science & Technology*, 2019, 53(7): 3871–3879.
- [28] 徐笠, 李海霞, 韩丽花, 等. 微塑料对典型污染物吸附解吸的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 961–969. XU L, LI H X, HAN L H, et al. Research progress on the adsorption and desorption of typical pollutants on microplastics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 961–969.
- [29] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4661–4667. LIAO Y C, NAZYGUL J, LI M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4661–4667.
- [30] YIN L, WEN X, HUANG D, et al. Interactions between microplastics/nanoplastics and vascular plants[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 117999.
- [31] 林义成, 傅庆林, 郭彬, 等. 盐胁迫对红叶石楠花青素含量及抗氧化系统的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(6): 970–977. LIN Y C, FU Q L, GUO B, et al. Effects of salt stress on anthocyanin content and activities of antioxidant enzymes in leaves of *Photinia fraseri*[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(6): 970–977.
- [32] 吕丽荣. 茶多酚对盐处理下小麦幼苗叶片光合特性及抗氧化反应的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018. LÜ L R. Effects of tea polyphenols on photosynthetic characteristics and antioxidant responses in wheat seedling leaves under salt stress[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018.
- [33] 华智锐. 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 119–126. HUA Z R. Effects of exogenous glycine betaine on *Lythrum salicaria* seed germination and seedling growth under salt stress[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2022, 50(9): 119–126.
- [34] 周峰, 华春. 低浓度NaCl对菠菜生长的效应[J]. 西北农业学报, 2008(6): 127–129, 143. ZHOU F, HUA C. Effect of low NaCl con-

- centration on growth of spinach[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008(6): 127-129, 143.
- [35] 尹娟, 朱庆松, 赵晶晶, 等. 超声波对盐胁迫下紫松果菊种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(8): 117-127. YIN J, ZHU Q S, ZHAO J J, et al. Effects of ultrasound on seed germination and seedling physiological characteristics of *Echinacea purpurea* under salt stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(8): 117-127.
- [36] 王芳, 周娟, 黄兴华, 等. 外源MeJA对盐胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化酶基因表达的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(2): 75-81. WANG F, ZHOU J, HUANG X H, et al. Effects of exogenous MeJA on growth and antioxidant enzyme gene expression of maize seedlings under salt stress[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(2): 75-81.
- [37] 张晨, 简敏菲, 陈宇蒙, 等. 聚苯乙烯微塑料对黑藻生长及生理生化特征的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 317-325. ZHANG C, JIAN M F, CHEN Y M, et al. Effects of polystyrene microplastics (PS-MPs) on the growth, physiology, and biochemical characteristics of *Hydrilla verticillata*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 317-325.
- [38] LIU S, WANG J, ZHU J, et al. The joint toxicity of polyethylene microplastic and phenanthrene to wheat seedlings[J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 130967.
- [39] ZHANG H, YUE M X, ZHENG X K, et al. Physiological effects of single- and multi-walled carbon nanotubes on rice seedlings[J]. *IEEE Transactions on Nanobio-science*, 2017, 16(7): 563-570.
- [40] DOVIDAT L C, BRINKMANN B W, VIJVER M G, et al. Plastic particles adsorb to the roots of freshwater vascular plant *Spirodela polyrrhiza* but do not impair growth[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2020, 5(1): 37-45.
- [41] GONG W, ZHANG W, JIANG M, et al. Species-dependent response of food crops to polystyrene nanoplastics and microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148750.
- [42] 王颖, 郭世荣, 束胜, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下菠菜叶绿素合成前体含量的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(10): 2026-2034. WANG Y, GUO S R, SHU S, et al. Effects of exogenous spermidine on chlorophyll precursors content of spinach plants under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(10): 2026-2034.
- [43] 刘美岑, 张子健, 张东, 等. NaCl胁迫对甜瓜幼苗保护酶活性及光合性能的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1-12[2022-10-25]. <https://kns-cnki-net.webvpn.caztc.edu.cn/kcms/detail/46.1068.S.20220926.1415.002.html>. LIU M Q, ZHANG Z J, ZHANG D, et al. Effects of NaCl stress on protective enzyme activity and photosynthetic performance of muskmelon seedlings[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-12 [2022-10-25]. <https://kns-cnki-net.webvpn.caztc.edu.cn/kcms/detail/46.1068.S.20220926.1415.002.html>.
- [44] 闻小霞, 王冬, 周爱凤, 等. 盐胁迫对不同菠菜品种发芽率及生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(3): 27-30. WEN X X, WANG D, ZHOU A F, et al. Effects of salt stress on germination rate and physiological characters of different spinach varieties[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(3): 27-30.
- [45] 刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 等. 微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2623-2633. LIU L, HONG T T, HU Q N, et al. Effects of the combination of microplastics and lead pollution on growth and oxidative responses of rice seedlings' roots[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2623-2633.
- [46] ZONG X, ZHANG J, ZHU J, et al. Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 217: 112217.
- [47] DONG Y, GAO M, SONG Z, et al. Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings[J]. *Environment Pollution*, 2020, 259: 113892.
- [48] 赵美静, 夏斌, 朱琳, 等. 微塑料与有毒污染物相互作用及联合毒性作用研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 168-185. ZHAO M J, XIA B, ZHU L, et al. Research progress on interaction and joint toxicity of micro-plastics with toxic pollutants[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(5): 168-185.

(责任编辑:李丹)