

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, 吕家珑

引用本文:

王晓晶, 杨毅哲, 曹阳, 张东明, 代允超, 吕家珑. 微塑料与镉及其复合对小麦种子发芽的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 263–273.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0473>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响

连加攀, 沈玫玫, 刘维涛

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 737–745 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0948>

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>

不同化学生态型紫苏的镉耐性及镉富集能力研究

韩博伦, 肖清铁, 谢惠玲, 游武, 郑新宇, 林瑞余

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2106–2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0161>

聚乙烯微塑料对花生幼苗镉吸收及生理特征的影响

宗海英, 刘君, 郭晓红, 李萌, 黄小丽, 王芳丽, 宋宁宁

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1400–1407 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1446>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王晓晶, 杨毅哲, 曹阳, 等. 微塑料与镉及其复合对小麦种子发芽的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 263–273.

WANG X J, YANG Y Z, CAO Y, et al. Effect of microplastics, cadmium, and their combination on wheat seed germination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 263–273.



开放科学 OSID

微塑料与镉及其复合对小麦种子发芽的影响

王晓晶¹, 杨毅哲², 曹阳¹, 张东明¹, 代允超¹, 吕家珑^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省耕地质量与农业环境保护工作站, 西安 710000)

摘要: 为了解微塑料与镉单一及其复合污染对水培小麦发芽和幼苗生长的影响, 选取农业土壤中普遍存在的两种微塑料[聚苯乙烯(mPS)和聚氯乙烯(mPVC), 0、100、500 mg·L⁻¹和1 000 mg·L⁻¹、重金属镉(Cd, 0、2、10 mg·L⁻¹和50 mg·L⁻¹)和小麦种子为试验对象进行种子发芽试验。结果表明: 单一微塑料污染下, mPS和mPVC对小麦种子发芽率的影响总体表现为低浓度促进、中高浓度抑制, 其中mPVC对小麦种子的发芽指数、发芽势、平均发芽速度均有促进作用, mPS对小麦的生物量有促进作用; 单一镉胁迫对小麦种子发芽率的影响基本表现为低浓度(2 mg·L⁻¹)促进发芽, 中高浓度(10 mg·L⁻¹和50 mg·L⁻¹)抑制发芽, 对小麦芽与根的影响基本表现为低促高抑的规律。微塑料和镉复合污染试验中, 与对照组相比, 低浓度镉(2 mg·L⁻¹)–微塑料复合污染抑制小麦种子发芽, 其余复合污染几乎对小麦种子的发芽无影响; 而低浓度的mPVC与镉复合对小麦种子发芽指数、活力指数、平均发芽速度、根芽的生长和含水率等起协同作用。研究表明, 与单一污染处理相比, 微塑料–镉复合污染对小麦种子发芽势、活力指数、芽长和生物量的影响基本表现为拮抗作用, 即两者复合在一定程度上降低了单一污染物的毒性。

关键词: 小麦; 微塑料; 镉; 复合污染; 种子发芽; 幼苗生长

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0263-11 doi:10.11654/jaes.2022-0473

Effect of microplastics, cadmium, and their combination on wheat seed germination

WANG Xiaojing¹, YANG Yizhe², CAO Yang¹, ZHANG Dongming¹, DAI Yunchao¹, LÜ Jialong^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 2. Cultivated Land Quality and Agricultural Environment Protection Workstation of Shaanxi Province, Xi'an 710000, China)

Abstract: To understand the effects of microplastics, cadmium, and their combination on germination and growth of hydroponic wheat, two common microplastics [polystyrene(mPS) and polyvinyl chloride(mPVC)] (0, 100, 500 mg·L⁻¹, and 1 000 mg·L⁻¹), heavy metal cadmium (Cd) (0, 2, 10 mg·L⁻¹, and 50 mg·L⁻¹), and wheat seeds in agricultural soil were selected for seed germination testing. The results showed that overall, mPS and mPVC promoted wheat seed germination at low concentrations, but inhibited wheat seed germination at medium and high concentrations. mPVC promoted the germination index, germination potential, and average germination rate of wheat seeds, whereas, mPS promoted wheat biomass. Cd promoted wheat seed germination at a low concentration (2 mg·L⁻¹), but inhibited wheat seed germination at medium and high concentrations (10 mg·L⁻¹ and 50 mg·L⁻¹). The effect on wheat buds and roots followed the rule of low

收稿日期: 2022-05-10 录用日期: 2022-09-14

作者简介: 王晓晶(1999—), 女, 浙江台州人, 硕士研究生, 从事土壤环境化学研究。E-mail: 2493441377@qq.com

*通信作者: 吕家珑 E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007303); 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-YL(XN)19); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(A314021402-2021012)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42007303); The Project of Shaanxi Agricultural Science and Technology Innovation Drive(NYKJ-2021-YL(XN)19); The Open Fund of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau(A314021402-2021012)

promotion and high inhibition. When the combined effect of microplastics and cadmium was tested, compared with the control group, low concentration of Cd ($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)—microplastic inhibited wheat seed germination, but had almost no effect on wheat seed germination. Low concentration of mPVC combined with Cd had synergistic effects on wheat seed germination index, vigor index, average germination rate, root bud growth, and water content. In summary, the combined microplastic-cadmium pollution had antagonistic effects on wheat seed germination potential, vigor index, bud length, and biomass, thereby indicating that the combination of the two pollutants had a reduced toxicity compared to that of either pollutant.

Keywords: wheat; microplastics; cadmium; compound pollution; seed germination; seedling growth

随着塑料制品的大规模生产和广泛应用,越来越多的塑料进入自然环境^[1]。塑料碎片在紫外线和氧气的作用下,以及风浪的物理作用下变得脆碎,逐渐降解为微米级和纳米级的颗粒,这些粒径小于5 mm的固体颗粒被称为微塑料^[1]。许多研究证实了全球范围内在海洋^[2]、沉积物^[3]、淡水^[4]、地下水^[5]和土壤^[6]环境中都存在微塑料,这些微塑料的主要成分包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)^[7]等。微塑料污染已经成为水生生态系统的威胁,也极有可能成为陆地生态系统的新威胁。

微塑料本身及其负载的毒性会对环境中的植物产生影响^[8]。有研究发现,低密度聚乙烯和聚丙烯均不利于小麦生长,但微塑料和镉的复合效应在一定程度上降低了微塑料的毒性^[9]。微塑料对植物的毒性机制之一是微塑料黏附在植物根系上造成根表孔堵塞,从而影响根系对养分的吸附^[10]。纳米塑料的吸收和积累可能会影响植物的生理生化代谢。例如,高浓度($2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)聚氯乙烯抑制大豆根系活力,但随着其添加量的增加,大豆超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性反而升高^[11]。同时,聚乙烯和可降解塑料地膜能促进树莓植株的生长和产量的增加^[12]。这些发现表明微塑料的毒性可能与其种类、粒径和浓度有关。

除微塑料外,我国的土壤也受到了重金属的严重污染,其中镉为首要污染物,据统计,我国镉污染土壤面积高达20万 km^2 ^[13]。研究表明,土壤中镉的浓度远超标准值,全国大约有1300万 hm^2 的耕地被镉污染^[14]。水中重金属主要来自工业排放、金属开采、化肥和农药的不当使用以及大气沉降^[15]。土壤重金属积累可能破坏酶的活性,影响土壤基本理化性质和微生物种类等,最终影响植物的生长^[16]。此外,在土壤中越积越多的重金属会转化为具有强毒性的甲基化合物,并沿着食物链进行流动,最终威胁人类健康^[17]。

许多研究表明微塑料对重金属具有吸附作用。

例如, Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Ag^+ 可以吸附在聚氯乙烯微塑料表面^[18]。研究发现,微塑料对镉的吸附与微塑料表面的官能团、溶液pH值和离子强度密切相关^[19]。微塑料可能对吸附在其上的污染物起到“载体”作用,从而将重金属污染物运入植物体内。Abbasi等^[20]的研究证明聚对苯二甲酸乙二醇酯颗粒可以作为载体将重金属运输到根际区域。当与微塑料共存时,植物中其他污染物的毒性效应也可能增强^[21]。镉-微塑料组合(聚苯乙烯、聚对苯二甲酸类塑料)对水稻种子萌发的抑制作用大于单一微塑料或重金属镉^[22]。然而,一些研究发现微塑料能够降低或不影响重金属镉的毒性效应,例如:李贞霞等^[23]证实聚氯乙烯微塑料能够缓解镉对黄瓜根系活力的影响;顾馨悦等^[24]在研究老化聚氯乙烯与镉对小麦联合毒性的实验中发现,原始和老化的聚氯乙烯微塑料不影响镉对小麦叶的毒性。

近年来,有关重金属对小麦种子发芽影响的研究已被大量报道,但在微塑料与重金属复合暴露的条件下,对小麦种子萌发影响的研究较少。基于我国目前的国情与土壤污染现状,微塑料与镉极可能会发生交互作用,从而影响作物生长。因此本研究以小麦(*Triticum aestivum* L.)为研究对象,选取农业土壤中普遍存在的两种微塑料[聚苯乙烯(mPS)、聚氯乙烯(mPVC)]与重金属镉(Cd)为试材,探究微塑料和镉污染对小麦种子发芽和幼苗生长的影响,并进一步了解农业土壤中微塑料与镉污染对小麦的影响,以防范重金属镉与微塑料的复合作用对人体及生态环境造成损害,为有序推进农用土壤污染风险管控与修复提供理论依据和科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验小麦种子为垦星5号,购买于陕西某种子商店。过氧化氢(H_2O_2 , 30%)与氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)均为分析纯。从广东恒发塑化厂购买粒径为100 μm 的微塑料聚苯乙烯(mPS)与聚氯乙烯(mPVC)。

1.2 试验设计

悬浮液制备:在超纯水中分别加入一定量的mPS、mPVC,定容于容量瓶,20℃左右的水浴中超声30 min(600 W,40 kHz),使微塑料均匀悬浮分散于超纯水,制成悬溶液备用。在试验前需再次进行超声波振荡10 min,确保mPS、mPVC均匀分散于超纯水中。

将试验小麦种子在2% H₂O₂溶液中浸泡30 min,超纯水冲洗多次以去除种子表面残留的H₂O₂,并浸泡在超纯水中4 h后沥干待用。将15粒小麦种子摆放于垫有两张定性滤纸的培养皿(直径为9 cm)中。本试验镉暴露浓度参考祝社民^[25]的研究,微塑料浓度设置参考吴佳妮等^[26]的研究。

单一污染试验:在上述培养皿中分别加入5 mL浓度为100、500 mg·L⁻¹与1 000 mg·L⁻¹的微塑料(mPS与mPVC)悬浮液;2、10 mg·L⁻¹与50 mg·L⁻¹的镉溶液。所有处理设置3次重复。将浸泡好的种子均匀摆放在于滤纸上,每皿15粒。

复合污染试验:两种微塑料浓度为100 mg·L⁻¹和500 mg·L⁻¹,镉浓度为2 mg·L⁻¹和10 mg·L⁻¹。试验设置8个处理:100 mg·L⁻¹ mPS+2 mg·L⁻¹ Cd、100 mg·L⁻¹ mPVC+2 mg·L⁻¹ Cd、500 mg·L⁻¹ mPS+2 mg·L⁻¹ Cd、500 mg·L⁻¹ mPVC+2 mg·L⁻¹ Cd、100 mg·L⁻¹ mPS+10 mg·L⁻¹ Cd、100 mg·L⁻¹ mPVC+10 mg·L⁻¹ Cd、500 mg·L⁻¹ mPS+10 mg·L⁻¹ Cd、500 mg·L⁻¹ mPVC+10 mg·L⁻¹ Cd。在上述培养皿中分别加入5 mL微塑料和镉的复合溶液,每个处理重复3次。

对照(CK)组:用等量的超纯水在相同条件下进行培养,3次重复。

在25℃,湿度70%的条件下,将处理好的培养皿置于恒温恒湿培养箱(HWM-358)无光照环境中,培养7 d。于每天20:00记录小麦种子的萌芽情况,每隔24 h开启培养皿并补充适量的超纯水以补充蒸发的水分,维持培养液的浓度不变。

微塑料吸附动力学试验:分别称取0.1 g mPS和mPVC于250 mL的锥形瓶中,再分别加入200 mL浓度为2 mg·L⁻¹和10 mg·L⁻¹的镉溶液,即试验设置的4个处理为mPS+2 mg·L⁻¹ Cd、mPVC+2 mg·L⁻¹ Cd、mPS+10 mg·L⁻¹ Cd、mPVC+10 mg·L⁻¹ Cd。25℃条件下于恒温振荡器中振荡,平衡一定时间后测定过滤液中镉浓度,所有处理均设置3次重复。

1.3 测定指标及方法

以幼芽达到种子长度一半,根长与种子等长作为发芽标准。记录小麦种子每天的发芽数,7 d后计算

发芽率、平均根长与芽长,并将小麦幼苗置于103℃烘箱中烘干24 h至质量恒定,用天平称量记录。种子根长与芽长用1/10 cm尺子人工测量。相关指标的计算公式如下:

$$\text{发芽率} = 7 \text{ d内小麦种子发芽数} / \text{小麦种子总数} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势} = 3 \text{ d内小麦种子发芽数} / \text{小麦种子总数} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum G_i / D_i \quad (3)$$

$$\text{平均发芽速度}(d) = \sum (G_i \times D_i) / \sum G_i \quad (4)$$

式中: G_i 为与 D_i 对应的当日种子数; D_i 为发芽天数,d。

$$\text{活力指数} = \text{发芽指数} \times \text{胚芽长度} \quad (5)$$

$$\text{含水率} = (\text{鲜质量} - \text{干质量}) / \text{鲜质量} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{吸附量}(q_e) = V \times (C_0 - C_e) / m \quad (7)$$

式中: q_e 为镉的吸附量,mg·g⁻¹; C_0 为镉的初始浓度,mg·L⁻¹; C_e 为镉的平衡浓度,mg·L⁻¹; V 为溶液体积,L; m 为微塑料的用量,g。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2016、SPSS 23.0对数据进行统计分析,数据的差异显著性通过SPSS 23.0软件运用单因素ANOVA检验。试验结果以平均值±标准偏差(Mean±SD)表示,运用Duncan法对各处理间的差异性进行多重比较。使用Origin 2021软件对统计结果制图,使用PS CS5.1对小麦发芽图片进行处理。

参考王泽正等^[22]的方法,通过计算生长净变化量判断微塑料与镉对小麦种子的交互作用。

2 结果与分析

2.1 单一暴露对小麦种子发芽及生长的影响

2.1.1 单一微塑料或镉污染对种子发芽率的影响

不同微塑料处理对小麦种子发芽率的影响如图1所示。总体上看,经微塑料处理后的小麦种子发芽率达93.33%~100%,表明大多数小麦种子在微塑料暴露下仍能萌发。mPS处理对小麦种子发芽率的影响基本表现为抑制作用(图1a),当mPS浓度为中高浓度(500 mg·L⁻¹与1 000 mg·L⁻¹)时,第7天小麦种子的发芽率较对照组分别降低了4.5%与2.3%。而mPVC对小麦种子发芽率的影响总体表现为低促中抑高恢复的规律(图1b)。当微塑料浓度为100 mg·L⁻¹时,小麦种子的发芽率较对照组增加了2.3%;当微塑料浓度为500 mg·L⁻¹时,小麦种子的发芽率较对照组降低了2.3%;而当mPVC浓度达到1 000 mg·L⁻¹时,发芽率与对照组相同。

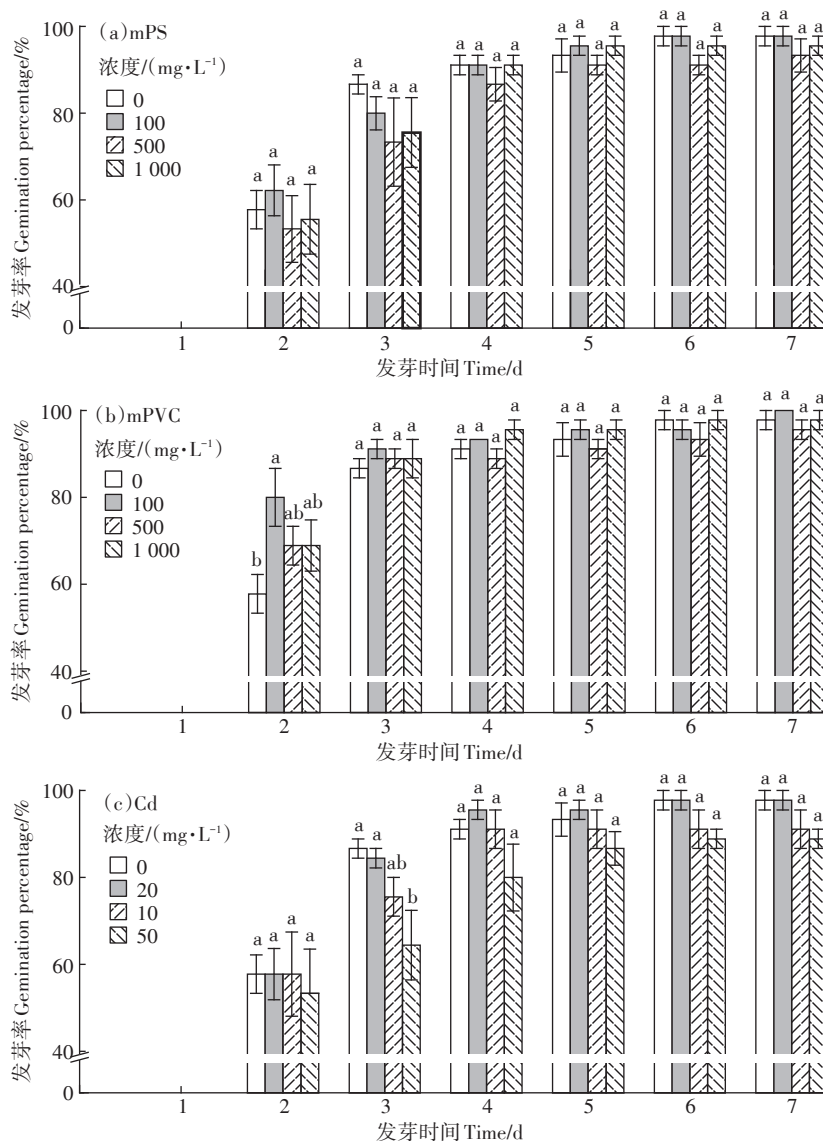
在重金属镉胁迫下,小麦种子的发芽率与镉浓度呈负相关关系(图1c)。重金属镉处理对小麦种子发芽率的影响基本表现为低促高抑的规律,镉浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时促进了小麦种子的发芽,当镉浓度升高时($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则抑制了小麦种子的发芽。

2.1.2 单一微塑料或镉污染对种子生长特征的影响

以发芽势、活力指数与平均发芽速度等作为指标,表征单一微塑料或重金属镉对小麦生长特征的影响,具体情况如表1所示。结果显示,不同浓度的mPS均抑制小麦种子的发芽势、平均发芽速度和活力指数。在mPS浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对小麦种子平均发芽速度、发芽势与发芽指数的抑制作用达到最大。

在mPS的胁迫下,小麦种子的发芽指数总体表现为低促中高抑的规律,与对照组相比,mPS对小麦种子发芽指数无显著影响,但中浓度($500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)mPS与低浓度($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)mPVC相比差异显著($P<0.05$),且mPS与mPVC相比,mPS对发芽指数的抑制作用更显著。

不同浓度的mPVC对小麦种子发芽指数、发芽势、平均发芽速度均表现为促进作用。总体而言,在低浓度($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,mPVC对发芽指数、发芽势与平均发芽速度等指标的促进程度达到最大,但与对照组相比差异不显著($P>0.05$)。在不同浓度的mPVC胁迫下,小麦种子活力指数总体表现为低促中高抑的规律,其中 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的mPVC对小麦种子活力指数



不同小写字母表示同一天不同处理间的差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicated significant differences between different treatments on the same day ($P<0.05$). The same below

图1 单一微塑料及重金属镉暴露下小麦种子发芽率随时间的变化

Figure 1 Germination rate of wheat seeds under a single microplastic pollution

表1 单一微塑料及重金属镉对小麦种子生长特征的影响

Table 1 Effects of single MPs(mPS, mPVC) and Cd on the growth characteristics of wheat seeds

处理 Treatment	浓度 Concentration/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	发芽指数 Germination index	发芽势 Germination viability/%	活力指数 Vigor index	平均发芽速度 Mean germination speed/d
CK	0	19.42±0.56abc	86.67±6.67a	142.56±14.14abc	4.72±0.05ab
mPS	100	19.49±0.64abc	80.00±6.67ab	109.25±19.56bcd	4.72±0.08ab
	500	17.93±2.34bc	73.33±17.64ab	124.14±18.49abcd	4.77±0.13ab
	1 000	18.66±1.89abc	75.56±13.88ab	99.86±32.11cd	4.76±0.12ab
mPVC	100	21.45±1.18a	91.11±3.85a	157.67±20.30a	4.61±0.06b
	500	20.06±1.06abc	88.89±3.85a	114.42±12.24abcd	4.64±0.04ab
	1 000	20.60±1.33ab	88.89±7.70a	126.40±19.99abc	4.66±0.08ab
Cd	2	19.55±1.31abc	84.44±3.85a	136.97±30.36abc	4.73±0.04ab
	10	18.49±2.35abc	75.56±7.70ab	148.38±24.19ab	4.72±0.09ab
	50	16.95±2.86c	64.44±13.88b	82.08±24.76d	4.79±0.15a

注:同列数据后的不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

的抑制作用达到最大,但与对照组差异不显著($P>0.05$);高浓度($1\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)mPS与低浓度($100\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)mPVC相比差异显著($P<0.05$)。

重金属镉处理总体上抑制小麦种子的平均发芽速度(表1),且镉浓度为 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对小麦种子的平均发芽速度抑制程度最大。相较于对照组,重金属镉处理总体上抑制小麦种子的发芽势,镉浓度为 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,显著抑制了小麦种子的发芽势($P<0.05$)。镉污染对小麦种子的发芽指数与活力指数总体表现为低促高抑的规律(表1)。镉浓度为 $2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,促进了小麦种子的发芽指数;当镉浓度增加至 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,抑制了小麦种子的发芽指数,但促进了小麦种子的活力指数;镉浓度为 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对小麦种子的发芽指数与活力指数均表现出抑制作用。与对照组相

比,镉浓度在 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对小麦种子发芽势与活力指数抑制作用显著($P<0.05$)。

2.1.3 单一微塑料或镉污染对幼苗生长的影响

小麦幼苗的生长情况如图2所示。幼苗的根长与含水率均呈现随mPS浓度增大而先升高后下降的趋势(图3a和图3d)。在mPS暴露下,小麦含水率与对照组相比无显著变化;小麦根长与对照组相比变化也不显著,但中浓度($500\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)能促进小麦根长,而高浓度($1\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)抑制小麦根长,两个浓度间达到显著性差异($P<0.05$)。在mPVC暴露时,小麦含水率与对照组相比差异不显著,小麦根的生长基本表现为低促高抑的规律。当浓度为 $500\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,mPS能增加幼苗的含水量,而mPVC则减少了幼苗的含水量,且两种微塑料达到显著性差异($P<0.05$)。

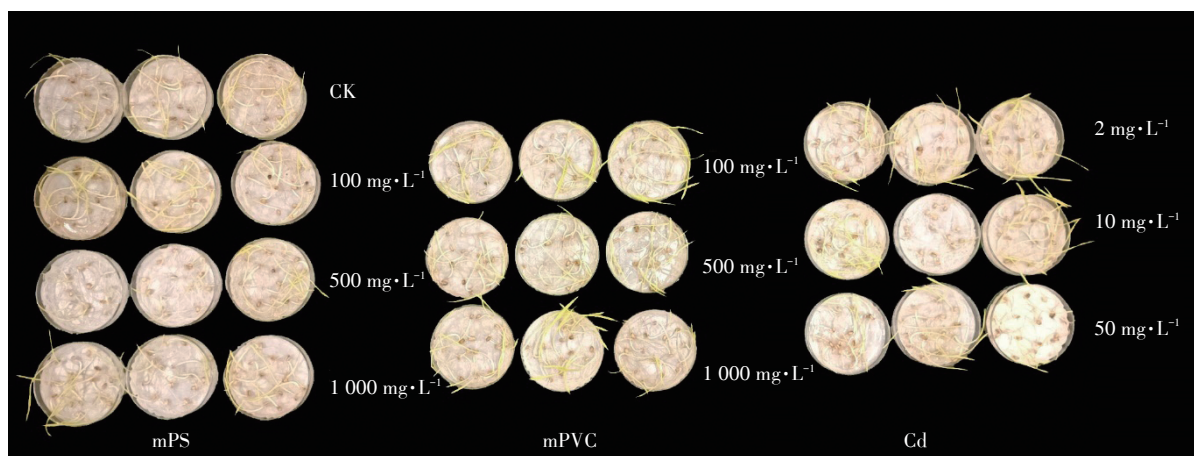


图2 单一微塑料与镉胁迫下小麦幼苗生长情况

Figure 2 Effects of single MPs(mPS, mPVC) and Cd on seedling growth of wheat

由图3b可知,mPS抑制小麦芽的生长,且在高浓度($1\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时抑制作用最强,与对照组相比差异显著($P<0.05$)。与mPS对小麦芽生长的影响相反,相较于对照组,mPS对小麦生物量有促进作用,但促进作用不显著($P>0.05$)。在mPVC胁迫下,小麦芽的生长总体表现为低促高抑的规律。mPVC浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对小麦芽的生长表现为促进作用,且与低浓度($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)mPS相比差异显著($P<0.05$)。mPVC对小麦生物量的影响总体表现为低抑高促的规律(图3c)。

与对照组相比,单施镉对含水率与生物量没有显著影响($P>0.05$)。镉处理对小麦芽与根的影响基本表现为低促高抑的规律(图3a与图3b),各处理间差异显著($P<0.05$)。具体表现为镉浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,促进了小麦根生长但抑制了小麦芽生长;而在镉浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,均促进了小麦根与芽的生长;当

镉浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对小麦根与芽的抑制作用显著($P<0.05$)。

2.2 微塑料-镉复合污染对小麦种子发芽及生长的影响

2.2.1 微塑料-镉复合污染对种子发芽率的影响

微塑料与镉的复合处理下,小麦种子的发芽率如图4所示。 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉溶液与微塑料的复合处理下小麦种子发芽率如图4a所示,发芽率为 $91.11\%\sim 97.78\%$ 。总体而言,低浓度镉溶液($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与微塑料的复合作用中,除与 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ mPVC复合污染下,小麦的发芽率与对照组相同外,其余处理抑制了小麦种子的发芽。在镉浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,mPS浓度与发芽率的抑制作用呈正相关关系,而mPVC浓度与发芽率的抑制作用呈负相关关系。

$10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉溶液与微塑料的复合处理下小麦种子发芽率如图4b所示,总体发芽率为 $93.33\%\sim$

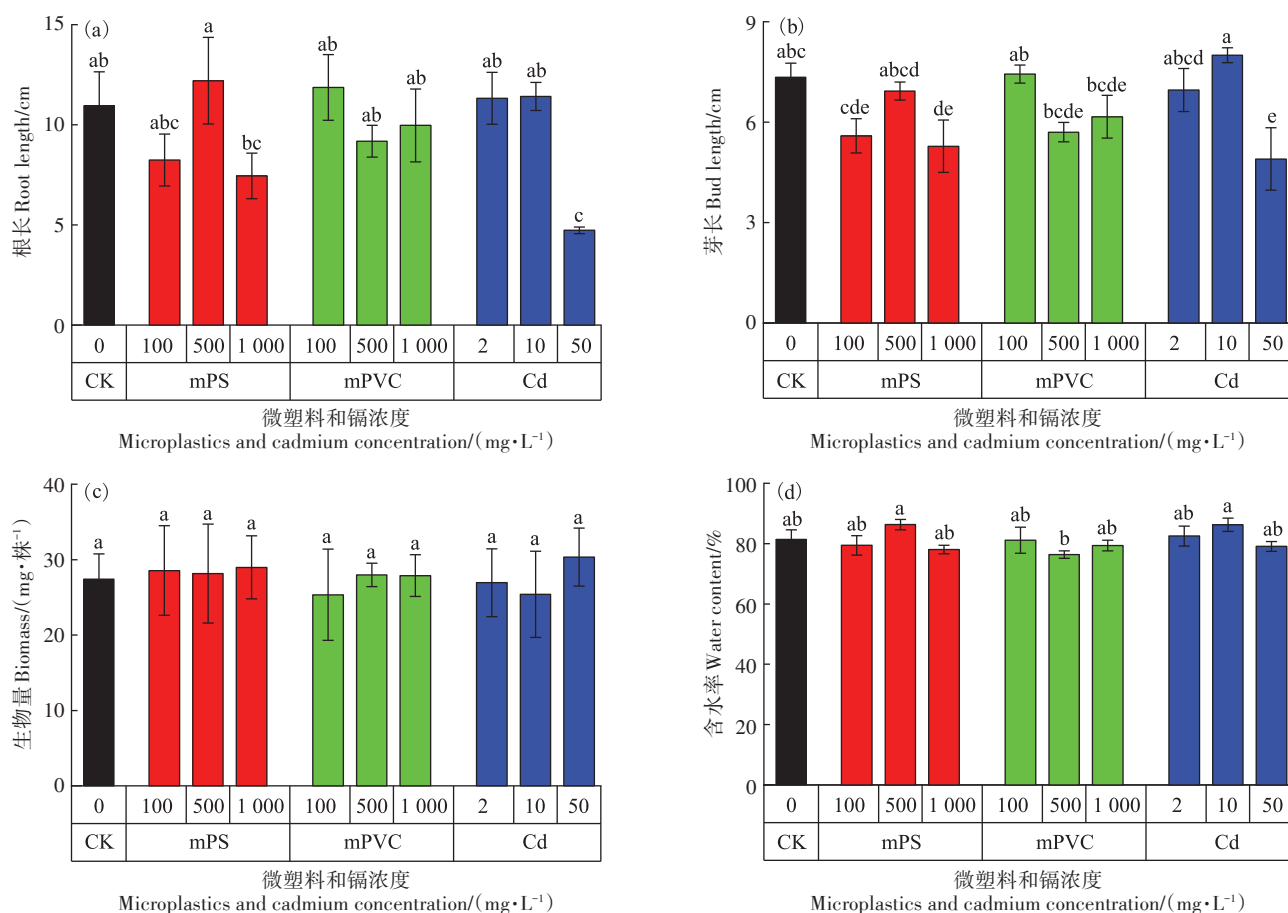


图3 单一微塑料与镉对小麦根长、芽长、生物量与含水率的影响

Figure 3 Effects of single MPs(mPS, mPVC) and Cd on root length, bud length, biomass, and water content of wheat

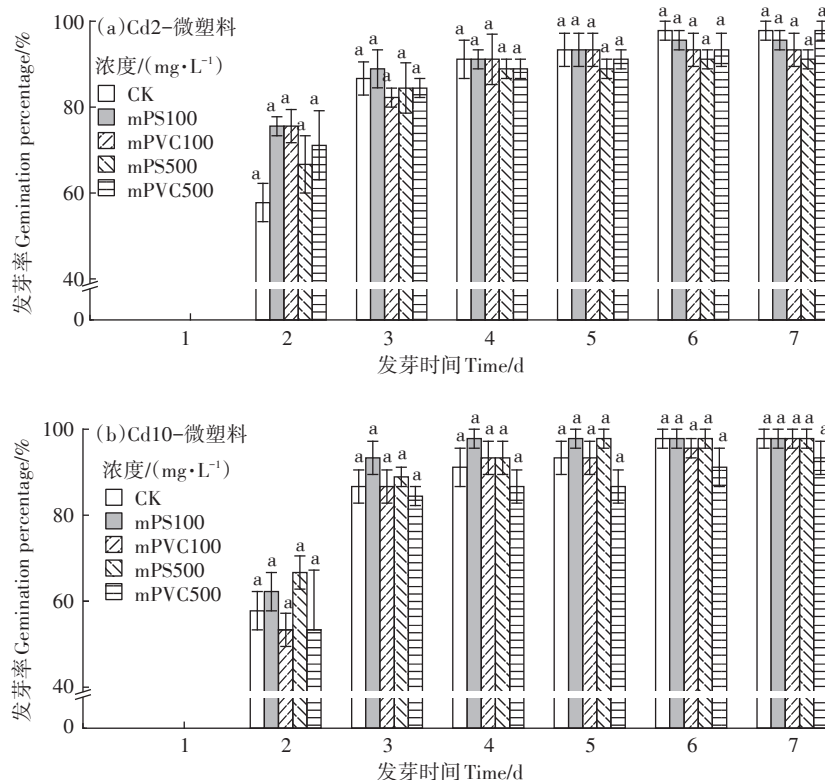


图4 微塑料-镉复合效应下小麦种子发芽率随时间的变化

Figure 4 Combined effects of MPs-Cd on seed germination rate of wheat

97.78%。总体而言,中浓度镉溶液($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与微塑料的复合作用中,除与 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ mPVC的复合污染抑制了小麦种子的发芽外,其余处理几乎不影响小麦种子的发芽。

2.2.2 微塑料-镉复合污染对种子生长特征的影响

由表2可知,微塑料-镉的复合污染总体上促进了小麦种子的发芽指数与平均发芽速度。相比而言,微塑料-镉的复合污染总体上抑制了小麦种子的发芽势与活力指数,仅 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液与 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的mPS溶液、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液与mPS溶液($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的复合污染对活力指数起促进作用。mPVC溶液($500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与镉($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的复合作用和mPS溶液($500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与镉($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的复合作用对活力指数存在显著差异($P < 0.05$)。

相比于单一污染物处理,mPS与镉的复合污染对小麦种子生长特征的影响总体表现为拮抗作用,如对活力指数、发芽指数、发芽势和平均发芽速度均表现为拮抗作用,这表明两种污染物的复合污染缓解了单一污染物对小麦种子生长特征的毒害作用。mPVC与镉的共同胁迫对小麦种子生长特征的影响基本表

现为协同作用,即两种污染物(mPVC-镉复合)的污染加剧了单一污染物对小麦种子生长特征的毒害作用。

2.2.3 微塑料-镉复合污染对幼苗生长的影响

小麦幼苗的生长情况如图5所示。由表3可知,微塑料-镉复合效应对小麦根长、生物量与含水量的影响基本表现为促进作用,但小麦根长、生物量与含水量与对照组相比没有显著差异($P > 0.05$)。相比而言,不同微塑料-镉复合处理对小麦芽长有一定影响。具体表现为低浓度($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的镉溶液与微塑料的复合污染对小麦芽的生长基本表现为抑制作用,仅在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液与 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的mPS的复合污染下表现为促进作用;中浓度($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的镉溶液与微塑料的复合污染对小麦芽的生长基本表现为促进作用,仅在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液与 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的mPVC的复合污染下表现为抑制作用。值得注意的是,与对照组相比, $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液与 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的mPVC的复合处理对小麦芽长的抑制作用显著($P < 0.05$)。

相比于单一污染物处理,低浓度的mPVC($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与镉溶液的复合处理对根、芽的生长与含水率的影响表现为协同作用,这与表2中低浓度mPVC

表2 微塑料-镉复合污染对小麦种子生长特征的交互作用
Table 2 Combined effects of MPs and Cd on growth characteristics of wheat seeds

镉浓度 Concentration of Cd/ (mg·L ⁻¹)	微塑料浓度 Concentration of MPs/ (mg·L ⁻¹)	发芽指数 Germination index	发芽势 Germination viability/%	活力指数 Vigor index	平均发芽速度 Mean germination speed/d	交互作用类型 Type of interaction			
						发芽指数 Germination index	发芽势 Germination viability	活力指数 Vigor index	平均发芽速度 Mean germination speed
	CK	19.42±0.56a	86.67±6.67a	142.56±14.14abc	4.72±0.05a				
2	mPS 100	20.76±1.06a	88.89±7.70a	129.85±11.98abc	4.61±0.02a	拮抗	拮抗	拮抗	拮抗
	mPVC 100	20.16±0.92a	82.22±3.85a	105.46±10.29c	4.63±0.06a	协同	协同	协同	协同
	mPS 500	19.45±1.61a	84.44±10.18a	151.00±10.17ab	4.64±0.08a	拮抗	拮抗	拮抗	拮抗
	mPVC 500	20.05±0.70a	84.44±3.85a	139.78±20.51abc	4.65±0.11a	协同	协同	拮抗	协同
10	mPS 100	20.47±1.32a	93.33±6.67a	170.63±15.19a	4.68±0.03a	拮抗	拮抗	拮抗	拮抗
	mPVC 100	19.12±1.16a	86.67±6.67a	132.53±19.60abc	4.74±0.07a	协同	拮抗	协同	协同
	mPS 500	20.42±1.06a	88.89±3.85a	156.22±31.72a	4.67±0.02a	拮抗	拮抗	拮抗	拮抗
	mPVC 500	18.35±2.41a	84.44±3.85a	111.76±38.52bc	4.73±0.16a	协同	拮抗	协同	协同

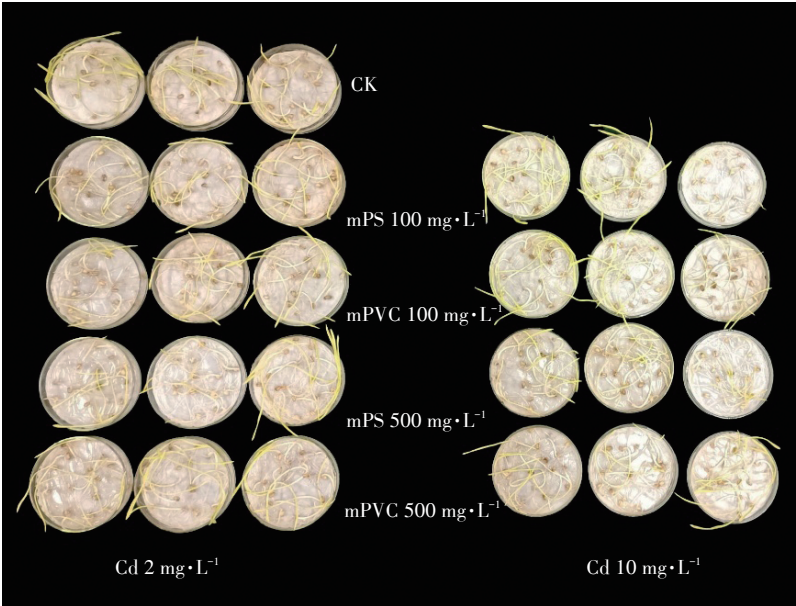


图5 微塑料与镉复合效应下小麦幼苗生长情况
Figure 5 Combined effects of MPs-Cd on seedling growth of wheat

表3 微塑料-镉复合污染对小麦幼苗生长的交互作用
Table 3 Combined effects of MPs and Cd on interaction of wheat seedling growth

镉浓度 Concentration of Cd/(mg·L ⁻¹)	微塑料浓度 Concentration of MPs/(mg·L ⁻¹)	根长 Root length/cm	芽长 Bud length/cm	生物量 Biomass/ (mg·株 ⁻¹)	含水率 Water content/%	交互作用类型 Type of interaction			
						根长 Root length	芽长 Bud length	生物量 Biomass	含水率 Water content
	CK	10.95±2.92ab	7.34±0.72ab	27.41±5.82a	81.42±5.49ab				
2	mPS 100	8.78±0.56b	6.25±0.37bc	30.13±10.42a	78.69±4.39b	拮抗	拮抗	拮抗	协同
	mPVC 100	8.29±0.51b	5.23±0.36c	30.99±10.41a	77.57±4.48b	协同	协同	拮抗	协同
	mPS 500	14.43±2.81a	7.77±0.24ab	28.33±6.73a	87.41±3.03a	拮抗	拮抗	拮抗	拮抗
	mPVC 500	11.13±3.09ab	6.98±1.07abc	26.06±6.46a	83.76±2.04ab	拮抗	拮抗	协同	拮抗
10	mPS 100	11.71±1.66ab	8.33±0.38a	25.86±6.71a	87.00±1.59a	拮抗	拮抗	协同	拮抗
	mPVC 100	11.54±2.91ab	6.96±1.13abc	27.76±10.75a	82.23±4.46ab	协同	协同	拮抗	协同
	mPS 500	11.01±3.08ab	7.62±1.22ab	25.84±2.91a	85.76±1.26a	协同	拮抗	协同	协同
	mPVC 500	8.24±0.65b	6.08±1.77bc	29.21±8.12a	81.57±3.04ab	协同	协同	拮抗	拮抗

微塑料与镉对小麦种子生长特性的协同作用相似。而低浓度的mPS($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与镉溶液的复合污染对根与芽的生长为拮抗作用。

3 讨论

本研究观察到,mPS对小麦种子发芽率、生物量、含水量与平均发芽速度没有明显影响。这与研究认为聚苯乙烯微球($0.07\sim 20\text{ }\mu\text{m}$)对菜心种子发芽与幼苗生长存在显著的毒性作用不一致^[27]。这一现象在一项研究中也发现,聚乙烯微塑料($100\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)对绿豆幼苗的生长与水分吸收表现出显著抑制作用^[28]。这种差异可能与所研究的微塑料的粒径、浓度与植物种类有关。例如,200 nm PS微塑料能从根进入莴苣并向茎叶运输,而 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的则不能^[29]。HDPE微塑料($3\text{ }\mu\text{m}$)既不能到达血管系统,也不能转移到枝条^[30]。拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)与小麦的共聚焦图像显示,植物对40 nm与 $1\text{ }\mu\text{m}$ PS球没有活性吸收^[31]。在本研究中,mPS的粒径约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,不能被小麦吸收,这可能解释了其对小麦幼苗的生态效应不显著的原因。此外,虽然粒径太大的微塑料不能被植物吸收,但会影响植物的生物量、组织的元素成分、根系性状以及土壤微生物活性等,从而影响养分的可利用性^[32],进而可能对植物造成伤害。植物对不同尺寸微塑料的吸附量有所差别,因此可以推断不同尺寸的微塑料对植物的影响机制差异较大,这还有待进一步研究。

在本研究中,重金属胁迫不仅影响小麦种子生长特征,而且影响小麦幼苗的生长,但是不同浓度的镉溶液对小麦种子有不同程度的影响。根据张珂等^[33]的研究,低浓度($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)镉对郑麦1354种子的生长特征有促进作用,高浓度镉会影响郑麦1354的发芽指数与活力指数,且均随着镉胁迫质量浓度的增加表现出先升高后降低的趋势。刘建新等^[34]的研究指出,镉处理对裸燕麦种子的活力指数、胚根长与幼苗干质量的抑制作用随镉浓度增加而增强。以上结论与本研究结果基本吻合。

作为土壤生态系统的重要组成部分,植物的生长必然会受到土壤环境的影响。微塑料对重金属有吸附作用,因此在研究微塑料与重金属的联合作用时,在相同的试验条件下测定了mPS和mPVC对镉的吸附量。结果表明:在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉溶液中,mPS对镉离子的吸附量为 $0.402\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,mPVC对镉离子的吸附量为 $0.471\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉溶液中,mPS对镉

离子的吸附量为 $0.781\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,mPVC对镉离子的吸附量为 $0.813\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;mPVC对镉的吸附量略高于mPS。在本研究中,mPS与镉的复合效应对小麦种子生长特征的影响基本表现为拮抗作用,可能是因为:一方面微塑料吸附了溶液中的游离镉,降低了溶液中镉的浓度;另一方面微塑料在小麦表面积累,与溶液中的镉竞争吸附点位,降低了镉离子对小麦的危害^[21,31]。但微塑料与重金属联合作用于生物体时,微塑料可通过吸附作用富集重金属、增加摄入浓度、破坏组织结构、降低自我调控能力等加重重金属对植物的毒害作用^[35],如低浓度mPVC($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与低浓度镉($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的共同胁迫对小麦种子生长特征的影响表现为协同作用。此外,目前本试验仅采用水培方式,未对微塑料对土壤理化性质的影响及其在土壤中对小麦的影响进行试验。因此,土壤环境中的微塑料与其他污染物的复合毒性对小麦的影响尚不明确,还有待于进一步探讨。

4 结论

(1)在特定的浓度条件下($100\sim 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),单一微塑料处理对小麦种子发芽率的影响总体表现为低促高抑的规律,对活力指数、根长、芽长与含水率的影响多为抑制作用。

(2)镉污染对小麦种子的发芽指数、发芽势、活力指数与平均发芽速度的影响多为抑制作用;镉污染对小麦种子发芽率、根长与芽长的影响总体表现出低促高抑的规律。

(3)与对照组相比,除低浓度($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)镉与微塑料的复合污染外,其余微塑料与镉溶液的复合对小麦种子发芽率几乎无影响,微塑料-镉的复合污染总体上促进了小麦种子的发芽指数、平均发芽速度和幼苗生长,相比而言,微塑料-镉的复合污染总体上抑制了小麦种子的发芽势与活力指数。

(4)与单一微塑料或镉作用相比,聚苯乙烯(mPS)与镉的复合效应对小麦种子生长特征的影响基本表现为拮抗作用,而聚氯乙烯(mPVC)与镉的共同胁迫对发芽指数和平均发芽速度的影响表现为协同作用;低浓度的mPVC溶液与镉溶液的复合污染对根长、芽长、含水率表现为协同作用,低浓度的mPS溶液与镉溶液的复合污染对根与芽的生长表现为拮抗作用。

参考文献:

[1] FRANCISCO B, CARMEN G B, ANTONIO L S, et al. Textile microfi-

- bers reaching aquatic environments: A new estimation approach[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114889.
- [2] ORY N C, LEHMANN A, JAVIDPOUR J, et al. Factors influencing the spatial and temporal distribution of microplastics at the sea surface: A year-long monitoring case study from the urban Kiel Fjord, southwest Baltic Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139493.
- [3] ZHANG L, ZHANG S, GUO J, et al. Dynamic distribution of microplastics in mangrove sediments in Beibu Gulf, south China: Implications of tidal current velocity and tidal range[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399(4): 122849.
- [4] FORREST S A, HOLMAN L, MURPHY M, et al. Citizen science sampling programs as a technique for monitoring microplastic pollution: Results, lessons learned and recommendations for working with volunteers for monitoring plastic pollution in freshwater ecosystems[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2019, 191: 172.
- [5] PANNO S V, KELLY W R, SCOTT J, et al. Microplastic contamination in Karst groundwater systems[J]. *Groundwater*, 2019, 57(2): 189-196.
- [6] 桑文静, 王晓霞, 王夏妹, 等. 土壤中微塑料的来源、赋存特征及迁移行为[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1361-1367. SANG W J, WANG X X, WANG X M, et al. The source, occurrence characteristics and migration behavior of microplastics in soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(11): 1361-1367.
- [7] 张国珍, 任豪, 周添红, 等. 淡水环境中微塑料的分布及生物毒性研究进展[J]. 给水排水, 2022, 58(1): 162-171. ZHANG G Z, REN H, ZHOU T H, et al. Research progress on the distribution and biotoxicity of microplastics in freshwater environment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(1): 162-171.
- [8] 韦丽超. 微塑料对植物的毒性效应研究进展[J]. 辽宁化工, 2022, 51(1): 82-85. WEI L C. Research progress on toxic effects of microplastics on plants[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2022, 51(1): 83-85.
- [9] 冯天朕, 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 Cd interaction on wheat seed germination[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1892-1900.
- [10] GAO M L, LIU Y, SONG Z G. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort)[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124482.
- [11] 安菁, 刘欢语, 郑艳, 等. 土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(1): 41-46, 113. AN J, LIU H Y, ZHENG Y, et al. Effects of soil microplastics residue on soybean seedlings growth and the physiological and biochemical characteristics[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, 39(1): 41-46, 113.
- [12] ZHANG H, MILES C, GHIMIRE S, et al. Polyethylene and biodegradable plastic mulches improve growth, yield, and weed management in florican red raspberry[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 250: 371-379.
- [13] 冯亚娟, 黄议漫, 余海英, 等. 籽粒镉低积累小麦材料的筛选及稳定性分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 842-850. FENG Y J, HUANG Y M, YU H Y, et al. Screening of wheat materials with low cadmium accumulation in grain and characteristics of cadmium accumulation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(7): 842-850.
- [14] 孟龙, 黄涂海, 陈睿, 等. 镉污染农田土壤安全利用策略及其思考[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(3): 263-271. MENG L, HUANG T H, CHEN J, et al. Safe utilization of farmland soil with cadmium pollution: Strategies and deliberations[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2019, 45(3): 263-271.
- [15] KHAN M I, ZAHOR M, KHAN A, et al. Bioaccumulation of heavy metals and their genotoxic effect on freshwater mussel[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 102(1): 52-58.
- [16] 黄艳玲, 罗开萍. 土壤重金属污染及生物修复技术研究[J]. 现代农业科技, 2022(3): 173-175. HUANG Y L, LUO K P. Study on soil heavy metal pollution and bioremediation technology[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2022(3): 173-175.
- [17] 李建凤. 土壤重金属污染现状及检测技术分析[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(2): 193-195. LI J F. Analysis on the status quo of soil heavy metal pollution and detection technology[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2022, 48(2): 193-195.
- [18] KEDZIERSKI M, D'ALMEIDA M, MAGUERESSE A, et al. Threat of plastic ageing in marine environment. Adsorption/desorption of micro-pollutants[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 684-694.
- [19] GUO X, HU G, FAN X, et al. Sorption properties of cadmium on microplastics: The common practice experiment and a two-dimensional correlation spectroscopic study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190: 110118.
- [20] ABBASI S, MOORE F, KESHAVARZI B, et al. PET-microplastics as a vector for heavy metals in a simulated plant rhizosphere zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140984.
- [21] DONG Y, GAO M, SONG Z, et al. Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 259: 113892.
- [22] 王泽正, 杨亮, 李婕, 等. 微塑料与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.
- [23] 李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料与镉污染的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 263-271. LI Z X, LI Q F, LI R J, et al. Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 263-271.
- [24] 顾馨悦, 徐修媛, 咸泽禹, 等. 老化聚氯乙烯微塑料与镉对小麦的联合毒性[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2633-2369. GU X Y, XU X Y, XIAN Z Y, et al. Joint toxicity of aged polyvinyl chloride microplastics and cadmium to the wheat plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(9): 2633-2369.
- [25] 祝社民. 镉胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(12): 51-52, 64. ZHU S M. Effects of cadmium stress on seed germination characteristics of wheat[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 65(12): 51-52, 64.
- [26] 吴佳妮, 杨天志, 连加攀, 等. 聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)对大豆

- (*Glycine max*)种子发芽与幼苗生长的影响[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.
- [27] 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.
- [28] 刘莹莹, 张旗, 崔文智, 等. 聚乙烯微塑料对绿豆发芽的毒性研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(5):123-125. LIU Y Y, ZHANG Q, CUI W Z, et al. Toxicity of polyethylene microplastics to seed germination of mung bean [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(5):123-125.
- [29] LI L Z, ZHOU Q, YIN N, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant [J]. *Chinese Journal*, 2019, 64(9):928-934.
- [30] URBINA M A, CORREA F, ABURTO F, et al. Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741:140216.
- [31] TAYLOR S E, PEARCE C I, SANGUINET K A, et al. Polystyrene nano- and microplastic accumulation at *Arabidopsis* and wheat root cap cells, but no evidence for uptake into roots [J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7:1942-1953.
- [32] MACHADO A, LAU C W, KLOAS W, et al. Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(10):6044-6052.
- [33] 张珂, 高楠, 张凌基, 等. 镉对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 轻工学报, 2022, 37(1):118-126. ZHANG K, GAO N, ZHANG L J, et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different wheat varieties [J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(1):118-126.
- [34] 刘建新, 欧晓彬, 王金成. 裸燕麦对重金属镉(Cd)胁迫的生理生态响应及Cd累积特性[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5):621-629. LIU J X, OU X B, WANG J C. Physiological-ecological responses of naked oat to cadmium (Cd) stress and Cd accumulation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(5):621-629.
- [35] 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 microplastics with toxic pollutants [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(5):168-185.

(责任编辑:朱晓昱)