

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.10096

查燕, 汤婕, 阮松林. 模拟大气细颗粒物中镉沉降对小白菜的毒性效应研究[J]. 植物科学学报, 2022, 40(1): 96~104

Zha Y, Tang J, Ruan SL. Toxic effects of cadmium deposition on pakchoi (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitamura) seedlings exposed to simulated atmospheric fine particulate matter [J]. *Plant Science Journal*, 2022, 40(1): 96~104

模拟大气细颗粒物中镉沉降对小白菜的毒性效应研究

查 燕¹, 汤 婕², 阮松林^{1*}

(1. 杭州市农业科学研究院农作物(生态)研究所, 杭州 310024; 2. 安徽农业大学环境与资源学院, 合肥 210036)

摘要: 为探究大气细颗粒物中镉(Cadmium, Cd)沉降对小白菜(*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitamura)的毒性效应, 本研究模拟不同浓度梯度大气细颗粒物中镉沉降(0、150、300 和 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 分别代表对照、轻度、重度和严重污染, 检测幼苗受胁迫后的生长状况、叶绿素相对含量(SPAD)、抗氧化酶活性、丙二醛(MDA)及体内 Cd 含量。结果显示: 在处理第 7 d 时, 3 种污染处理均提高了小白菜茎叶长、根长和鲜重, 但到第 19 d, 严重污染处理显著降低了茎叶长、根长和鲜重, 较对照分别下降了 8.05%、13.82% 和 9.80%; 整个试验期间, 重度和严重污染均显著降低 SPAD, 在第 19 d 时, 严重污染处理组 SPAD 较对照降低了 17.54%; 3 种污染浓度均显著提高了 MDA 含量和过氧化物酶(POD)活性; 小白菜地上部分 Cd 积累量随污染浓度的增加而递增。研究结果表明, 大气细颗粒物中镉沉降显著影响小白菜生长、叶绿素相对含量、抗氧化酶系统及 Cd 的累积。

关键词: 大气细颗粒物; 镉; 小白菜; 生理特征; 重金属积累

中图分类号: QX513; X171.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)01-0096-09

Toxic effects of cadmium deposition on pakchoi (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitamura) seedlings exposed to simulated atmospheric fine particulate matter

Zha Yan¹, Tang Jie², Ruan Song-Lin^{1*}

(1. Institute of Crop (Ecology), Hangzhou Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310024, China;

2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230016, China)

Abstract: This study investigated the toxic effects of different concentrations and gradients of cadmium (Cd) (0, 150, 300, and 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in fine particulate matter following deposition on pakchoi (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitamura). After treatment, the growth status, relative chlorophyll content (SPAD), antioxidant enzyme activity, malondialdehyde (MDA) content, and heavy metal enrichment in pakchoi seedlings were measured. Results showed that mild, heavy, and severe concentrations of Cd deposition in atmospheric fine particulate matter initially promoted stem, root, and leaf length, and fresh weight of pakchoi on day 7. On day 19, compared with the control, the severe pollution conditions significantly reduced stem and leaf length, root length, and fresh weight of pakchoi by 8.05%, 13.82%, and 9.80%, respectively. During the whole experimental period, severe pollution significantly reduced the

收稿日期: 2021-07-01, 修回日期: 2021-08-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809001); 浙江省自然科学基金(LQ20C03007); 杭州市农业科学研究院科技创新基金(2021HNCT-06)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (51809001), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ20C03007), and Science and Technology Innovation Fund of Hangzhou Academy of Agricultural Sciences (2021HNCT-06)。

作者简介: 查燕(1989-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为污染生态学(E-mail: ecosciyanzha@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: njqj1989@163.com)。

SPAD of pakchoi. On day 19, compared with the control, the SPAD of pakchoi under severe pollution conditions decreased significantly by 17.54%. Mild, heavy, and severe concentrations of Cd in fine particulate matter significantly increased MDA content and peroxidase (POD) activity. Furthermore, Cd accumulation in the aboveground parts of pakchoi increased with the increase in Cd concentration, and Cd accumulation was the highest under severe pollution conditions. These results indicated that Cd deposition in fine particulate matter significantly affects growth, SPAD, antioxidant enzymes, and Cd accumulation in pakchoi.

Key words: Atmospheric fine particulate matter; Cadmium; Pakchoi; Physiological characteristic; Heavy metal accumulation

近年来, 随着城市化进程和精准化农业的快速发展, 环境污染导致的农产品安全问题引起了人们的广泛关注。特别是向大气排放的大量颗粒物, 造成了严重的大气污染^[1], 其中细颗粒物和超细颗粒物是我国面临的重要环境问题, 其携带的大量重金属元素、有毒有机物、细菌、病毒等会对动植物及人体健康造成危害^[2]。研究发现, 重金属作为PM_{2.5}中主要的无机成分, 其在环境中的蓄积性强、毒性大, 易通过呼吸作用进入人体, 给人类健康带来深远影响^[3-6]。据统计, 大约75%~90%的重金属吸附在可吸入颗粒物中, 且颗粒越小含量越高^[7]。镉(Cd)作为植物生长发育的非必需元素, 具有毒性大、分布广、迁移能力及金属活力强等特征^[8, 9], 被称为“五毒之首”^[10]。研究表明, 人体中的镉90%来源于日常饮食, 长期食用镉超标的食品会导致人体镉累积并产生慢性毒性^[11]。因此, 大气细颗粒物中重金属对环境及人类健康的影响需要引起重视。

植物叶片作为接触、截留和吸附大气颗粒物的重要环境界面, 对区域大气颗粒物具有消减作用^[12, 13], 而附着在叶表面的颗粒物会进一步通过气孔或角质层等途径被植物吸收并转移到其他部分。叶片作为叶菜类蔬菜的可食部分, 不仅对环境胁迫较为敏感, 也是有效吸收重金属的重要器官^[14]。研究表明, 叶片可吸附灰尘中的重金属, 且其富集量与大气中颗粒物污染浓度呈正比^[15]。王京文等^[16]发现大气沉降对蔬菜地上部分中镉、铅和汞等重金属积累有直接作用。潘如圭^[17]研究发现冶炼厂周围植物主要通过叶面吸收积累重金属, 只有少量被转移到其它部位。章明奎等^[18]通过大气沉降暴露实验发现, 露天生长的大白菜(*Brassica pekinensis* (L.) Kitamura)地上部分镉含

量比覆膜条件下高1.5倍。龙思斯等^[19]通过盆栽水稻(*Oryza sativa* L.)实验显示, 叶面污染源对水稻Cd积累的贡献远远大于其它因素。通过模拟大气颗粒物暴露实验发现, 结球甘蓝(*B. oleracea* var. *capitata*)和菠菜(*Spinacia oleracea* L.)叶片能够吸收大量Cd、Sb、Zn和Pb等重金属^[4]。此外, 由于细颗粒物粒径较小, 能够直接通过气孔进入植物体内^[20], 还可能造成大量有害重金属富集, 导致植物生长发育受阻、代谢失调、组织坏死或遗传变异等问题^[21, 22]。

然而, 目前有关大气细颗粒物中镉沉降对叶菜产生的毒性效应研究尚不清楚且未见报道。小白菜(*B. rapa* var. *chinensis* (L.) Kitamura)是绿叶菜的主要种类之一, 因其耐热、耐湿, 生长快速, 在我国种植面积广且需求大, 一年四季均有供应。为了阐明大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗生长、生理和重金属累积的影响, 本研究采用气溶胶发生器模拟大气细颗粒物沉降, 通过搭建密闭微型温室开展盆栽试验, 模拟不同浓度含镉细颗粒物沉降, 研究大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗生长的影响, 探究小白菜叶片对重金属的累积特征及相关生理响应, 旨在为大气细颗粒物污染背景下的农作物安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

供试材料为小白菜(‘德高508’青梗菜), 由杭州市农科院提供。播种前将小白菜种子用3% KMnO₄消毒10 min, 自来水冲洗数次后再以蒸馏水反复冲洗, 然后将种子用超纯水浸泡6 h, 再用湿润育苗纸包裹, 平铺在育苗盘中。待幼苗长出2片真叶时, 移栽至花盆中。温室培养条件如下: 温

度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，光照强度为 $1600 \sim 2100 \text{ lux}$ ，湿度为 $(50 \pm 10)\%$ 。试验采用盆栽方法，供试土壤取自杭州市清凉峰镇蔬菜基地，土壤 Cd 含量为 0.06 mg/kg ，符合我国土壤环境质量镉标准值 ($\text{Cd} \leq 0.20 \text{ mg/kg}$)。土壤经风干、磨碎、剔除其中粗杂质，过 20 目筛后备用。在花盆底部托盘中添加适当纯水，以保持土壤湿度，提供小白菜生长所需要的水分。试验于 2020 年 10 月在安徽农业大学试验大棚内进行。

为区分不同胁迫浓度对小白菜幼苗生长的影响，按照中国环保部的标准，将大气环境细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度 24 h 的平均值分别设置为 150、300 和 $500 \mu\text{g/m}^3$ ，分别代表细颗粒物达到轻度、重度和严重污染 3 个水平。气溶胶制备及粒径：本试验采用 9302 型气溶胶发生器(上海汇分)，该仪器能够产生粒径范围为 $0.01 \sim 2 \mu\text{m}$ 的多分散高浓度气溶胶。将镉 ICP 标准液 (Sigma-Aldrich) 配制成浓度为 30 mg/L 的溶液，通过将气溶胶发生器压缩空气入口连接至氮气钢瓶，以 5 mL/min 的速度产生分散系气溶胶。气溶胶发生器分别工作 144、288 和 480 s 即可满足 3 个微型温室空气浓度达到轻度、重度和严重污染水平。气溶胶发生器每隔 2 h 喷 1 次， 1 d 内共计 5 次重复，以保证微型温室内达到各自设置的污染水平。采用单因素随机区组试验设计，每个花盆种植 4 株小白菜，每个处理 6 个重复。在试验开展期间用塑料薄膜隔离土壤，以避免土壤受大气细颗粒物沉降影响。分别于第 7、13 和 19 d 进行取样，并记录空白对照组小白菜生长指标等信息。

1.2 样品采集及前处理

分别在播种后第 7、13 和 19 d 剪下叶片，用 20 mmol/L 的 EDTA 溶液小心清洗叶片，超纯水冲洗 3 遍，再用滤纸擦干叶片表面水分。部分样品放在研钵内迅速用液氮处理，然后放置于提前标记好的自封袋内，用于生理指标测定；一部分立即用于叶绿素测定；剩余部分样品保存在 4°C 冰箱用于重金属含量测定。

1.3 指标测定方法

生长指标测定：分别在播种后第 7 d 和第 19 d 收集样品，每个处理每个重复取 3 株幼苗。用钢卷尺(精度 1 mm)和游标卡尺(精度 0.01 mm)测量茎叶长、根长。用 0.01 g 精度的天平称量鲜重。

丙二醛 (MDA)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 测定：采用生物试剂盒(北京索莱宝生物科技有限公司)进行测定，根据操作说明，称取 0.1 g 新鲜叶片放入离心管中，放数粒玻璃珠，加入 1 mL 提取液，在高通量组织研磨仪中进行匀浆研磨。取出玻璃珠后，匀浆液在 8000 g ， 4°C 条件下离心 10 min 。用移液枪取上清液作为样本溶液，置冰上，紫外分光光度计测定特定波长的吸光度，计算上述指标，整个试验在 4°C 下进行。

叶绿素相对含量 (SPAD)：采用叶绿素仪 (SPAD-502 Plus) 进行测定，用仪器前端夹住叶片，将植株各个叶片的叶尖、叶中、叶基进行 3 次测定，取平均值作为最后结果。

Cd^{2+} 含量测定：因生长初期小白菜幼苗较小，采用地上部分整体测定。先用 20 mmol/L EDTA 清洗小白菜地上部分，超纯水冲洗 3 遍后，再用滤纸擦干叶片表面水分。待自然晾干后，将样品放入烘箱， 105°C 杀青 30 min ， 80°C 烘干至恒重，采用原子吸收石墨炉法(德国耶拿，ZEEnit 700P) 测定 Cd^{2+} 含量。

1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件进行统计分析，对参数进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)，采用新复极差法 (Duncan) 进行差异显著性检验， $P < 0.05$ 时差异显著，计量采用均值 \pm 标准差表示。采用 Origin 9.0 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗生长的影响

结合表 1 和图 1 可知，茎叶长、根长和鲜重对不同胁迫浓度的反应各异。在处理 7 d 时，各胁迫浓度对茎叶长、根长和鲜重均表现出不同程度的促进作用。其中，茎叶长随胁迫浓度的增加而增加，严重和重度污染下茎叶长分别较对照显著增加了 9.03% 和 12.21% 。根部生长受影响较小，根长仅在轻度污染下较对照显著增加了 18.00% 。不同污染胁迫对小白菜鲜重均无显著影响。在 19 d 时，不同胁迫处理对茎叶长、根长和鲜重均起抑制作用。其中重度和严重污染下小白菜根长与对照相比显著降低了 6.50% 和 13.82% ，严重污染下鲜重达到最小值，与对照相比显著下降了 9.80% 。

表1 大气细颗粒物中Cd沉降下小白菜幼苗生长指标变化

Table 1 Growth index of pakchoi seedlings under different Cd deposition in atmospheric fine particulate matter

处理 Treatment	生长参数 Growth index					
	茎叶长/cm Stem length		根长/cm Root length		鲜重/g Fresh weight	
	7 d	19 d	7 d	19 d	7 d	19 d
空白对照	13.10 ± 0.80b	17.40 ± 0.30a	10.00 ± 0.70b	12.30 ± 1.20a	2.70 ± 0.40a	5.10 ± 0.20a
轻度污染	13.60 ± 0.50b	15.90 ± 0.10b	11.80 ± 0.60a	12.20 ± 1.00a	3.10 ± 0.20a	4.70 ± 0.10ab
重度污染	14.40 ± 0.90a	16.20 ± 0.30b	11.10 ± 0.90b	11.50 ± 0.40b	2.90 ± 0.40a	4.90 ± 0.20ab
严重污染	14.70 ± 0.70a	16.00 ± 0.50b	10.30 ± 0.60b	10.60 ± 0.70b	2.80 ± 0.20a	4.60 ± 0.20c

注: 同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level in same column.



图1 大气细颗粒物中镉沉降下小白菜表型变化

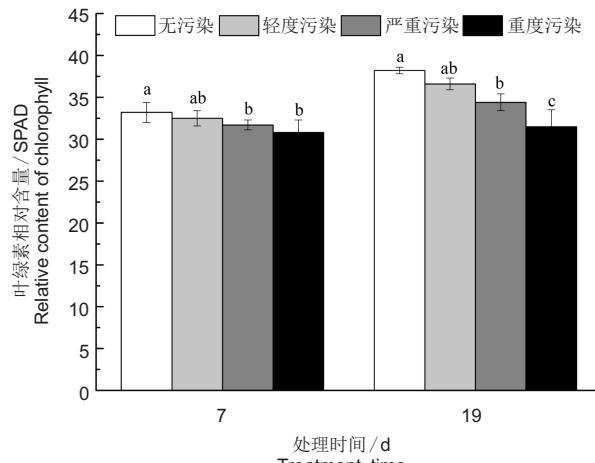
Fig. 1 Variation in phenotypes of pakchoi seedlings under different Cd deposition in atmospheric fine particulate matter

2.2 大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗叶绿素相对含量的影响

本研究发现, 在处理 7 d 时, 小白菜叶绿素相

对含量在 3 种浓度胁迫下较对照分别降低了 2.11%、4.52% 和 7.23%, 其中严重污染与重度污染对叶绿素相对含量影响显著。在 19 d 时, 随着

污染浓度的升高, 叶绿素相对含量明显下降, 3 种污染处理较对照分别降低了 4.19%、9.95% 和 17.54%, 严重和重度污染下叶绿素相对含量与对照的差异达到显著水平(图 2)。



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。
Different lowercase letters in same growth period indicate significant differences at 0.05 level. Same below.

图 2 大气细颗粒物中镉沉降下
小白菜的叶绿素相对含量变化

Fig. 2 Variation in relative chlorophyll content in pakchoi seedlings under Cd deposition in atmospheric fine particulate matter

2.3 大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗抗氧化酶活性的影响

3 种胁迫处理均提高了小白菜叶片 CAT(图 3: A) 和 POD 活性(图 3: B)。在 7 d 时, 严重和重度污染下 CAT 活性分别较对照显著升高 16.39% 和 21.31%, 轻度污染与对照无显著差异。叶片 POD 活性随胁迫浓度增加呈上升趋势, 轻度和重度污染与对照无显著差异, 但重度污染下 POD 活性显著高出对照的 25.50%。在 13 d 时, 各胁迫处理均显著提高小白菜叶片 CAT 和 POD 活性, 重度污染组 CAT 和 POD 活性较 CK 显著升高 28.86% 和 48.31%。在 19 d 时, 轻度和重度污染组 CAT 活性分别较对照高 18.83% 和 7.14%, 仅轻度处理与对照达到显著差异水平。叶片 POD 活性随处理浓度的增加呈显著上升趋势, 重度污染组的活性最高, 比对照高 34.80%; 轻度和重度污染组分别比对照高 15.04% 和 23.73%。

2.4 大气细颗粒物中镉沉降对小白菜幼苗丙二醛含量的影响

小白菜叶片 MDA 含量随细颗粒物中镉浓度的

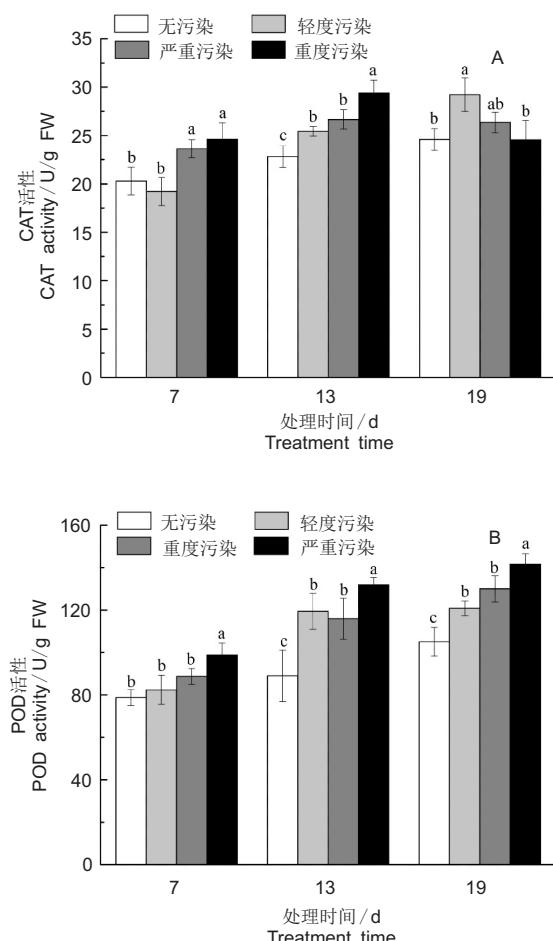


图 3 大气细颗粒物中镉沉降下
小白菜叶片抗氧化酶活性变化

Fig. 3 Variation in antioxidant enzyme activity in pakchoi under Cd deposition in atmospheric fine particulate matter

增加而升高(图 4)。7 d 时, 轻度和重度污染组 MDA 含量与对照无显著差异, 但严重污染组显著升高, 高于对照 37.99%。在 13 和 19 d 时, MDA 含量随处理浓度的增加而显著升高。在 13 d 时, 3 个污染处理组的 MDA 含量分别较对照高 9.65%、17.11% 和 23.90%; 而在 19 d 时, 分别较对照高 12.10%、23.23% 和 38.85%。

2.5 大气细颗粒物中镉沉降下小白菜地上部分对 Cd 的积累

由于小白菜在生长初期植株较小, 本研究以叶片和茎部作为小白菜地上部分(图 5)。检测发现, 在 7 d 时, 重度和严重污染组小白菜地上部分 Cd 含量均显著高于对照, 分别为对照组的 4.39 和 10.67 倍。轻度污染组 Cd 含量虽高于对照, 但未达到显著水平。在 13 d 时, 3 个污染处理组地上部

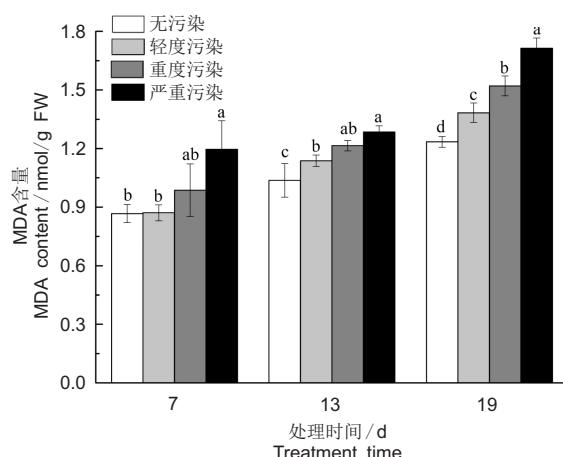


图4 大气细颗粒物中镉沉降下
小白菜叶片MDA含量变化

Fig. 4 Variation in MDA content in pakchoi leaves under Cd deposition in atmospheric fine particulate matter

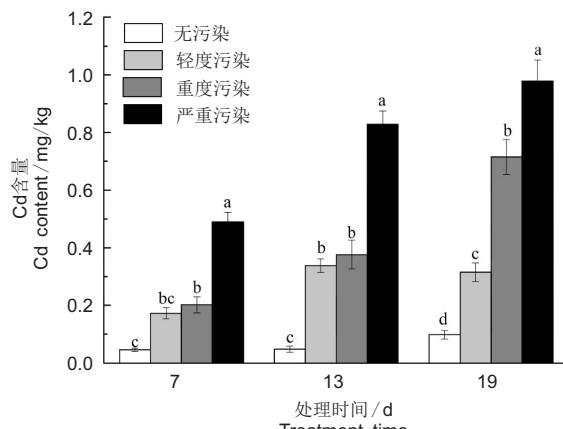


图5 大气细颗粒物中镉沉降下不同时期
小白菜地上部分Cd含量变化

Fig. 5 Variation in Cd content in aboveground
parts of pakchoi under Cd deposition in
atmospheric fine particulate matter

分Cd含量均显著高于对照，分别为对照的7.04、7.83和17.25倍，但轻度和重度污染组间Cd含量无显著差异。在19 d时，不同胁迫处理组Cd含量均显著高于对照，分别为对照的6.43、14.59和19.98倍，且各处理组间的差异均达到显著水平。

3 讨论

研究表明，大气沉降已成为我国部分地区农产品重金属污染的主要来源之一^[23]。镉是植物生长的非必需元素，作为毒性最大的重金属之一，对农作物的毒性效应主要表现为使植株矮小、失绿、产量下降、抑制其生长和光合作用等^[24]，其中生长

参数是评价植物对环境污染响应的重要指标之一。在生长初期，不同浓度胁迫处理对小白菜茎叶长、根长和鲜重均有促进作用，这可能是幼苗期小白菜生长时间较短，受大气细颗粒物中镉胁迫作用不明显。本研究发现随着污染暴露时间的延长，不同浓度胁迫处理对小白菜茎叶长、根长和鲜重均有不同程度的抑制作用，且随着处理浓度的增加其抑制作用越明显，导致植株生长缓慢。张盼盼等^[25]报道长时间镉胁迫能够抑制糜子(*Panicum miliaceum* L.)幼苗地上部和根系生长，与本研究结果一致。刘楚藩等^[26]发现大气低污染和高污染Pb单独胁迫对苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)的生长表现为促进作用。此外，含低剂量Cd、Pb的细颗粒物对玉米(*Zea mays* L.)和黄瓜(*Cucumis sativus* L.)的平均株高起抑制作用，而对西红柿(*Lycopersicon esculentum* Miller)、小麦(*Triticum aestivum* L.)和黄瓜的平均鲜重起刺激作用^[27]。由此可见，细颗粒物沉降对不同农作物生长的抑制作用与叶片对重金属的富集作用有关^[28-30]。小白菜作为一种叶菜类蔬菜，具有相对较大的表面积及较多的气孔，随着胁迫时间的延长，其叶片能够累积更多的Cd，受大气沉降中重金属的影响越明显。

叶绿素是植物进行光合作用的必需色素，通常植物叶绿素含量越高，表明其生长情况越好。本研究中，随处理时间的延长，严重和重度污染对小白菜幼苗的伤害作用最为明显，其叶绿素的积累受到明显抑制。这可能是污染物浓度过高时影响了植株叶绿素酶活性，阻碍了叶绿素的合成，最终导致植株光合速率下降^[28]。孔维萍等^[31]发现高浓度镉胁迫能够降低甜瓜(*C. melo* L.)叶片光合色素质量分数，损坏叶绿体结构，进而影响叶片的光合作用。张大为等^[32]研究发现，较高浓度的镉胁迫(30、50 mg/kg)会显著抑制油菜幼苗生长，降低叶绿素含量，与本研究结果一致。有研究发现在细颗粒物暴露下，小白菜叶片上下表皮及海绵组织中均有铅的分布，不利于进行光合作用^[33]。本研究表明重度污染对小白菜茎叶长、根长、鲜重和叶绿素相对含量均有抑制作用。值得注意的是，植物对细颗粒物中重金属的吸附机制与其叶面积大小、形态、植株早期生长快慢和以及气孔大小有关^[34, 35]，因此，不同植物对细颗粒物中重金属胁迫的响应也有差异。

酶促保护是植物调节氧化胁迫的一种重要机制^[36]。本研究中大气污染条件下,小白菜 CAT 活性整体表现出先升后降的趋势,与前人研究结果相似^[37, 38]。说明小白菜在幼苗期能通过调节机体 CAT 活性以应对胁迫造成的 ROS 的增加,增强机体对大气细颗粒物中 Cd 的耐受性。随胁迫时间的延长,大气细颗粒物中镉浓度超过一定范围后,植株 CAT 活性反而受到抑制,导致其清除 ROS 的能力受限,使得植物细胞的功能膜及酶系统受到严重损伤。在小白菜生长后期,叶片 POD 活性随处理浓度的增加呈上升趋势,与张大为等^[32]在油菜幼苗中的研究结果相一致。此外, CAT 和 POD 也可能发生光失活,与 H_2O_2 和 O_2^- 反应形成复合物,从而抑制二者的活性。本文发现,小白菜在幼苗期可通过提高自身抗氧化酶活来抵御环境胁迫,各生长指标表现为增长趋势;但机体内积累过多的 ROS 并未得到有效清除,导致叶绿体结构受到损伤。MDA 是植物细胞膜质过氧化产物,是反应细胞膜受损程度的重要指标^[39]。本研究发现 MDA 含量随 Cd 处理浓度的增加显著升高,说明高浓度镉沉降加剧了小白菜细胞的膜质过氧化反应,导致细胞膜结构受到严重损伤,从而积累更多的 MDA。前人研究表明,夏季和冬季极端天气的协同颗粒物污染能够导致 MDA 含量积累上升^[40];小报春 (*Primula forbesii* Franch) 幼苗叶片 MDA 含量随 Cd 胁迫浓度增加而持续升高^[41];此外,长时间镉胁迫能够提高糜子幼苗 MDA 含量和氧自由基水平^[25],均与本试验结果类似。

本文发现,低浓度细颗粒物中镉沉降对小白菜茎叶长和根长起促进作用,而高浓度细颗粒物中镉沉降起抑制作用,其原因可能是低浓度细颗粒物中镉胁迫提高细胞内酶活以促进植物生长。前人报道认为 Cd 对部分植物生长具有剂量效应,低浓度 Cd 可提高或加速某些生理生化反应,从而促进根的生长^[42, 43],与本研究结果类似。尽管在第 7 d 和第 19 d 轻度污染处理对叶绿素相对含量没有明显影响,但小白菜叶片 MDA 含量有所上升,说明细胞膜受到了一定的损伤且抗氧化系统已经响应,导致在轻度污染处理 19 d 后小白菜生长减缓。

4 结论

随胁迫时间的延长,大气严重污染对小白菜茎

叶长、根长和鲜重具有明显的抑制作用。整个试验期间,重度和严重污染均显著降低了 SPAD 值。不同浓度大气细颗粒物中镉沉降显著提高了 MDA 含量和 POD 活性。在细颗粒物中镉浓度较低时,机体 POD 和 CAT 活性增强。细颗粒物中镉强度较高时,CAT 活性略有下降。

参考文献:

- [1] 侯艳军. 淮东地区降尘-土壤-植物重金属迁移过程及生态效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [2] Harguineguy CA, Cofré MN, Fernández-Cirelli A, Pignata ML. The macrophytes *Potamogeton pusillus* L. and *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. as potential bioindicators of a river contaminated by heavy metals[J]. *Microchem J*, 2016(124): 228-234.
- [3] Tabatabaei T, Karbassi AR, Moatar F, Monavari SM. Geospatial patterns and background levels of heavy metal in deposited particulate matter in Bushehr, Iran[J]. *Arab J Geosci*, 2015, 8: 2081-2093.
- [4] Xiong TT, Leveque T, Austruy A, Monavari SM. Foliar uptake and metal (loid) bioaccessibility in vegetables exposed to particulate matter[J]. *Environ Geochem Health*, 2014, 36: 897-909.
- [5] 柯盛, 张际标, 孙省利, 谢群. 珠江口沉积物重金属源解析及富集与生物毒性的关系[J]. 广东海洋大学报, 2017, 37(4): 69-77.
- [6] Ke S, Zhang JB, Sun SL, Xie Q. The source characteristics and the relationship between enrichment and biological and toxicity on heavy metals in surface sediment of Pearl river estuary[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(4): 69-77.
- [7] Wang BQ, Liu JF, Liu BW, Niu HH, Chen RH, et al. Personal exposure to $PM_{2.5}$ associated with heavy metals in four travel modes of Tianjin during the summer season[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24(7): 6667-6678.
- [8] Kong S, Lu B, Ji Y, Zhao X, Bai Z, et al. Risk assessment of heavy metals in road and soil dusts within $PM_{2.5}$, PM_{10} and PM_{100} fractions in Dongying city, Shandong Province, China[J]. *J Environ Monitor*, 2012, 14(3): 791-803.
- [9] Rizwan M, Ali S, Adrees M, Rizvi H, Zia-Ur-Rehman M, et al. Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23: 17859-17879.
- [10] Baycu G, Gevrek-Kürüm N, Moustaka J, Csatári I, Rognes SE, Moustakas M. Cadmium-zinc accumulation and photosystem II responses of *Nothaea caerulescens* to Cd and Zn exposure[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24: 2840-2850.

- [10] Rehman MZU, Rizwan M, Ali S, Naeem A, Yousaf B, et al. A field study investigating the potential use of phosphorus combined with organic amendments on cadmium accumulation by wheat and subsequent rice [J]. *Arab J Geosci*, 2018, 11: 1–10.
- [11] Nordberg GF. Cadmium and health in the 21st century—historical remarks and trends for the future [J]. *Biometals*, 2004, 17(5): 485–489.
- [12] 邵锋. 园林树木对PM_{2.5}等大气颗粒物浓度和成分的影响及滞尘效应研究——以浙江农林大学为例 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [13] 陈玉艳. 北京市典型区域主要树种调节空气质量生态功能效应 [D]. 北京: 北京农学院, 2019.
- [14] Schreck E, Dapke V, Sarret G, Sobanska S, Nowak D, et al. Foliar or root exposures to smelter particles: Consequences for lead compartmentalization and speciation in plant leaves [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 476–477: 667–676.
- [15] Witherspoon JP, Taylor FG Jr. Retention of a fallout simulant containing ¹⁴³Cs by pine and oak tree [J]. *Health Phys*, 1969, 17(6): 825–829.
- [16] 王京文, 谢国雄, 章明奎. 大气沉降对萝卜地上和地下部分铅镉汞砷积累的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 184–190.
Wang JW, Xie GX, Zhang MK. Effects of atmospheric deposition on accumulation of lead, cadmium, mercury and arsenic in aboveground and underground parts of radish [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(1): 184–190.
- [17] 潘如圭. 作物对大气源重金属的吸收和转移 [J]. 农业环境科学学报, 1984(6): 10–12.
Pan RG. Absorption and transfer of heavy metals from atmospheric sources by crops [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1984(6): 10–12.
- [18] 章明奎, 刘兆云, 周翠. 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(2): 221–229.
Zhang MK, Liu ZY, Zhou C. The effect of atmospheric deposition on heavy metal accumulation in vegetable crop near lead-zinc mine [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2010, 36(2): 221–229.
- [19] 龙思斯, 宋正国, 雷鸣, 喻理, 王艺康, 等. 不同外源镉对水稻生长和富集镉的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 419–424.
Long SS, Song ZG, Lei M, Yu L, Wang YK, et al. Growth and Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils amended with Cd from different pollution sources [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 419–424.
- [20] Fernández Espinosa AJ, Oliva SR. The composition and relationships between trace element levels in inhalable atmospheric particles (PM₁₀) and in leaves of *Nerium oleander* L. and *Lantana camara* L. [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(10): 1665–1672.
- [21] Hirano T, Kiyota M, Aiga I. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants [J]. *Environ Pollut*, 1995, 89(3): 255–261.
- [22] McIlveen WD, Cole H. Influence of zinc on development of the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and its mediation of phosphorus uptake by *glycine max* 'Amsoy 71' [J]. *Agr & Environ*, 1979, 4(4): 245–256.
- [23] 翟振, 张艳玲, 杨欣, 王爱国, 戴华鑫. 大气沉降对烟叶重金属含量的影响及溯源分析 [J]. 烟草科技, 2019, 52(6): 9–15.
Zhai Z, Zhang YL, Yang X, Wang AG, Dai HX. Effect of atmospheric deposition on heavy metal contents in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves and traceability analysis [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2019, 52(6): 9–15.
- [24] 谭长强, 何琴飞, 秦玉燕, 申文辉, 刘秀, 曹艳云. 施氮对镉胁迫下杂交相思树生长及镉吸收分配的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1326–1334.
Tang CQ, He QF, Qin YY, Shen WH, Liu X, Cao YY. Effect of nitrogen application on seedling growth and cadmium uptake and distribution in *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis* under cadmium stress [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1326–1334.
- [25] 张盼盼, 袁琴琴, 王小林, 郭亚宁, 薛灵聪, 等. 镉胁迫对糜子幼苗生长及抗性生理的影响 [J]. 分子植物育种, 2022: 1–10.
Zhang PP, Yuan QQ, Wang XL, Zhang YN, Xue LC, et al. Effect of cadmium stress on plant growth and resistance physiology in millet seedlings [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022: 1–10.
- [26] 刘楚藩, 肖荣波, 黄飞, 戴伟杰, 高中原, 等. 土壤与大气双重胁迫下苋菜幼苗对铅的累积与生理响应 [J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9174–9183.
Liu CF, Xiao RB, Huang F, Dai WJ, Gao ZY, et al. Accumulation and physiological response of *Amaranthus tricolor* L. seedlings to lead under soil and atmospheric stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9174–9183.
- [27] 杨帆, 王樱芝, 杨和行, 张瑛, 杨婧, 刘敏. 含铅、镉重金属细颗粒物对几种陆生植物的暴露危害 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12(6): 179–187.
Yang F, Wang YZ, Yang HX, Zhang Y, Yang J, Liu M. Hazard assessment of several terrestrial plants exposed to fine particulate matters containing heavy metals lead and cadmium [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(6): 179–187.

- [28] 吕冬梅, 朱广龙, 王玥, 施雨, 卢发光, 等. 苗期重金属胁迫下蓖麻生长、生理和重金属积累效应[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 728-737.
Lü DM, Zhu GL, Wang Y, Shi Y, Lu FG, et al. Growth, physiological, and heavy metal accumulation traits at seedling stage under heavy metal stress in castor (*Ricinus communis* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47 (4): 728-737.
- [29] 宋清梅, 蔡信德, 吴颖欣, 吴嘉慧, 陈显斌, 吴文成. 香根草对污染土壤水溶态重金属组分胁迫响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2715-2722.
Song QM, Cai XD, Wu YX, Wu JH, Chen XB, Wu WC. Response of *Vetiveria zizanioides* to the stress of water-soluble components of heavy metals in contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (12): 2715-2722.
- [30] 姚俊修, 乔艳辉, 杨庆山, 仲伟国, 李庆华, 等. 重金属镉胁迫对黑杨派无性系光合生理及生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 40-46.
Yao JX, Qiao YH, Yang QS, Zhong WG, Li QH, et al. Effects of cadmium stress on the growth and photosynthesis of *Aigeiros* clones [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 40-46.
- [31] 孔维萍, 程鸿, 岳宏忠. 镉胁迫对甜瓜幼苗叶片叶绿体超微结构及光合色素质量分数的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(6): 935-941.
Kong WP, Chen H, Yue HZ. Effects of cadmium stress on leaf chloroplast ultrastructure and chlorophyll mass fraction of three melon varieties [J]. *Acta Agriculture Boreali Occidentalis Sinica*, 2020, 29(6): 935-941.
- [32] 张大为, 杜云燕, 吴金锋, 周定港, 刘丽莉, 等. 镉胁迫对甘蓝型油菜幼苗生长及基因表达的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 613-622.
Zhang DW, Du YY, Wu JF, Zhou DG, Liu LL, et al. Effect of cadmium stress on plant growth and gene expression in *Brassica napus* seedlings [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(4): 613-622.
- [33] 范佳明. 大气颗粒物中铅的污染特征及其在植物叶片中的迁移累积[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [34] 李春烨, 丁国华, 刘保东. 重金属影响植物细胞超微结构和功能的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 114-118.
Li CY, Ding GH, Liu BD. Research progress of heavy metal affecting plant cell ultrastructure and function [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (18): 114-118.
- [35] 杨亚丽, 李友丽, 陈青云, 郭文忠. 土壤铅、镉、铬对蔬菜发育影响及迁移规律的研究进展[J]. 华北农学报, 2015, 30(S1): 511-517.
Yang YL, Li YL, Chen QY, Guo WZ. The research progress of lead, cadmium and chromium in soil on the growth and migration of vegetables [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(S1): 511-517.
- [36] Mittler R, Vanderauwera S, Gollery A, Breusegem FV. Relative oxygen gene network of plants [J]. *Trends Plant Sci*, 2004, 9(10): 490-498.
- [37] 铁得祥, 胡红玲, 陈洪, 喻秀燕, 张健, 等. 槟榔幼树生长及抗性生理对镉胁迫的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 104-114.
Tie DX, Hu HL, Chen H, Yu XY, Zhang J, et al. Responses of growth and resistant physiology of *Phoebe zhennan* saplings to cadmium stress [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47 (12): 104-114.
- [38] 冯建鹏, 史庆华, 王秀峰, 洪艳艳. 镉对黄瓜幼苗光合作用、抗氧化酶和氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 970-974.
Feng JP, Shi QH, Wang XF, Hong YY. Effects of cadmium on photosynthesis, antioxidant enzyme and nitrogen metabolism of cucumber seedlings [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 970-974.
- [39] Zhou CF, Huang MY, Luo JW, Hou XL, PF XQ. Lead tolerance mechanism in *Conyza canadensis*: subcellular distribution, ultrastructure, antioxidative defense system, and phytochelatins [J]. *J Plant Res*, 2016, 129: 251-262.
- [40] 陆婷. 不同污染水平下三种道路绿化树种颗粒物滞留能力及其生理响应[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [41] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 赵健, 向元芬, 潘远智. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 454-462.
Jia Y, Liu CL, Lan XY, Zhao J, Xiang YF, Pan YZ. Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings [J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2020, 40(3): 454-462.
- [42] 汤文光, 肖小平, 张海林, 黄桂林, 唐海明, 等. 轮耕对双季稻田耕层土壤养分库容及Cd含量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(1): 105-114.
Tang WG, Xiao XP, Zhang HL, Huang GL, Tang HM, et al. Effects of rotational tillage on nutrient storage capacity and Cd content in tilth soil of double-cropping rice region [J]. *Acta Agron Sin*, 2018, 44(1): 105-114.
- [43] Mahmood T, Islam KR. Response of rice seedlings to copper toxicity and acidity [J]. *J Plant Nutr*, 2005, 29 (5): 943-957.

(责任编辑: 李惠英)