

# 微塑料对萝卜种子萌发和幼苗生长的影响

陈 毅, 谭梦琪, 周 雨, 王以超, 张家亮

(经济林木种质改良与资源综合利用湖北省重点实验室·大别山特色资源开发  
湖北省协同创新中心·黄冈师范学院 湖北黄冈 438000)

**摘 要:** 为了探究聚乙烯(polyethylene, PE)微塑料对蔬菜潜在的危害, 以未添加 PE 微塑料的土壤为对照(CK), 研究不同粒径(0.013 mm 粉状和 3.50 mm 颗粒状)和不同浓度(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%, w)微塑料对萝卜种子萌发的影响; 以未添加 PE 微塑料土壤为对照(CK), 研究 1.5% PE 粉土壤、1.5% PE 颗粒土壤对萝卜幼苗生长的影响。结果表明, 与 CK 相比, PE 粉和 PE 颗粒处理均能显著延迟萝卜种子萌发, 其中, 0.5% PE 粉处理延迟作用最显著(0.70 d), 但两者对种子萌发率均无显著影响。与 CK 相比, PE 粉和 PE 颗粒处理均能显著延缓幼苗第 2 片真叶出现, 并减少幼苗真叶数; 且两者均能显著降低幼苗最大叶片长度, 但 PE 粉处理能显著促进萝卜幼苗根的伸长; PE 粉和 PE 颗粒处理也均能显著降低幼苗叶片生物量(0.08、0.10 g)、总生物量(0.07、0.10 g)和幼苗的冠根比。综上, 与 CK 相比, PE 粉和 PE 颗粒均能显著推迟萝卜种子萌发和抑制幼苗生长, 其中叶片生长抑制最为突出(真叶出现推迟, 数量和生物量降低), PE 微塑料对幼苗生长的影响呈现时间依赖性累积效应和器官特异性抑制效应。

**关键词:** 萝卜; 微塑料; 种子萌发; 幼苗生长; 聚乙烯

中图分类号: S631.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)11-186-07

## Effects of microplastics polyethylene on seed germination and seedling growth of cultivated radish (*Raphanus sativus*)

CHEN Yi, TAN Mengqi, ZHOU Yu, WANG Yichao, ZHANG Jialiang

(Hubei Key Laboratory of Economic Forest Germplasm Improvement and Resources Comprehensive Utilization/Hubei Collaborative Innovation Center for the Characteristic Resources Exploitation of Dabie Mountains/Huanggang Normal University, Huanggang 438000, Hubei, China)

**Abstract:** To investigate the potential hazards of polyethylene (PE) microplastics on vegetables, the effects of polyethylene microplastics with different particle sizes (0.013 mm powder and 3.50 mm particle) and concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, w) on radish seed germination were investigated, using soil without PE microplastics as the control (CK). Separately, the impacts of soil containing 1.5% PE powder and soil containing 1.5% PE particle on radish seedling growth were studied. The results revealed that compared with CK, both PE powder and PE particle significantly delayed radish germination, with 0.5% PE powder showing the most significant delaying effect, though neither treatment significantly affected germination rates. Compared with CK, both PE forms significantly delayed the second true leaf emergence time and reduced true leaves number of seedlings. Additionally, both treatments significantly decreased the maximum leaf length of seedlings, while PE powder treatment significantly promoted root elongation of radish seedlings. Furthermore, both PE powder and PE particle treatments significantly reduced the leaf biomass (0.08, 0.10 g), total biomass (0.07, 0.10 g), and shoot-root ratio of seedlings. In summary, this study demonstrates that both PE powder and particle significantly delay radish seed germination and inhibit seedling growth, with the suppression of leaf development (the emergence of true leaves was delayed, while their numbers, and biomass were reduced) being the most prominent manifestation of growth inhibition. PE exhibits time-dependent cumulative effects and organ-specific inhibition on seedling growth.

**Key words:** *Raphanus sativus*; Microplastics; Seed germination; Seedling growing; Polyethylene

收稿日期: 2025-01-04; 修回日期: 2025-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32171600)

作者简介: 陈 毅, 男, 在读本科生, 主要从事环境生态学研究。E-mail: 3201152699@qq.com

通信作者: 张家亮, 男, 讲师, 主要从事入侵生态学和污染生态学研究。E-mail: jjialiangzh@163.com

随着塑料制品的大量使用,微塑料( $\Phi < 5\text{ mm}$ )污染已成为全球性的环境问题<sup>[1-3]</sup>。微塑料广泛存在于各类生态系统中,并对生物体产生多方面的不良影响。目前关于微塑料生态毒性的研究主要集中在水生生物,而对陆生植物影响的研究还处于起步阶段<sup>[4]</sup>。阐明微塑料对农作物的毒性生态效应,将有助于评估微塑料污染对农田生态系统及农业生产安全的潜在风险。已有研究表明,微塑料能影响植物的种子萌发<sup>[5-7]</sup>、幼苗生长<sup>[8-12]</sup>。但不同植物对不同类型塑料污染的响应存在差异<sup>[10,13-15]</sup>。不同浓度的微塑料(含纳米塑料, $\Phi < 100\text{ nm}$ )对种子萌发具有显著影响。郭琳琳等<sup>[16]</sup>研究表明,聚苯乙烯纳米塑料(nano-polystyrene, NPs)对番茄种子萌发的影响呈现低促、中抑、高恢复的浓度依赖性特征。微塑料对陆生植物,特别是作物或食用蔬菜的影响有待进一步研究。本研究聚焦典型蔬菜作物萝卜(*Raphanus sativus* L.),系统评估聚乙烯(polyethylene, PE)微塑料对其种子萌发和幼苗生长的影响,探究PE微塑料粒径和浓度对萝卜的效应,为农业微塑料污染的风险评估提供理论依据。通过研究不同粒径和浓度梯度的PE微塑料对萝卜种子萌发率、幼苗生长参数(株高、根长、生物量累积等)的影响,解析微塑料的浓度、大小与对萝卜生长影响的关系,明确微塑料污染对萝卜栽培的生态风险,为防控微塑料污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 供试土壤处理 2022年3月,试验土壤采自黄冈师范学院南侧明珠山村红旗六组的菜园表层土(0~20 cm),土壤为黄棕壤,除去可见的砂石及动植物残体、塑料碎片后自然风干,将土壤过5 mm筛备用。

1.1.2 供试种子 供试萝卜种子是由大别山生物资源库提供的黄州萝卜,种子籽粒饱满、健康状态良好。

1.1.3 微塑料的选取 试验采用2种粒径的PE微塑料,一种是直径约3.50 mm的低密度塑胶原料(购于东莞市鸿程塑胶原料有限公司),以下简称PE颗粒;一种是直径约0.013 mm的PE粉(购于东莞市华创塑料原料商行),以下简称PE粉。

### 1.2 试验设计

采用单因素完全随机试验,在黄冈师范学院生物与农业资源学院实验室进行。试验在自然条件下进行,试验期间,平均低温16.1℃,平均高温23.4℃,湿度50%~80%,日均光周期为5.9 h。

1.2.1 种子萌发试验 将种子播种在有18个格子的塑料盒中(21.0 cm×12.8 cm×3.4 cm,格子大小3.3 cm×3.7 cm×2.9 cm),每格播种2粒,每盒播种36粒。将PE粉、PE颗粒和土壤分别按照质量比配成5种不同浓度(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%(w))混合基质<sup>[11]</sup>,以不添加PE微塑料的土壤为对照(CK),共11个处理,每处理3次重复。共计播种33×36=1188粒种子。播种后每天喷洒适量的水,保持基质湿润,同时记录幼苗出土时间。种子于2022年4月29日播种,2022年4月30日开始出苗,5月6日后,连续1周不再有幼苗出土后,试验结束。

1.2.2 幼苗生长试验 将种子播种在圆形塑料碗中(高7.5 cm,下底直径8 cm,碗口直径11.9 cm),试验基质分为3个处理:1.5% PE粉土壤、1.5% PE颗粒土壤和未添加PE微塑料的土壤(CK),基于前人研究<sup>[11]</sup>,1.5% PE浓度代表农田环境中中等偏高的污染水平,故本试验选取该浓度以评估不同粒径PE微塑料对萝卜幼苗生长的影响。每处理15个重复,每碗播种4粒种子,保留每碗中最初的2株幼苗进行试验观察和测量,共计45碗90株幼苗。播种后每天喷洒适量的水,使试验基质保持湿润,2022年5月4日播种,2022年5月6日开始出苗,5月31日收割材料。

### 1.3 指标测定

1.3.1 萝卜种子萌发率的测定 在萝卜种子萌发试验中,以天(d)为单位记录种子的萌发时间(本试验以出苗作为萌发指标,文中“萌发时间”和“萌发率”实际指“出苗时间”和“出苗率”),出苗的第1天时间记录为1,第2天时间记录为2,依次类推,记录各处理种子出苗时间,当连续1周没有新苗出土时,试验结束。NA表示没有出苗不带有萌发时间信息,不纳入种子萌发时间的生存分析。萌发率%=(萌发种子粒数/供试种子粒数)×100。用生存分析(survival analysis)中的Kaplan-Meier方法分析各处理间萌发时间的差异;采用方差分析(ANOVA)各处理间萌发率的差异。

1.3.2 萝卜幼苗生长指标及生物量的测定 在萝卜幼苗生长试验中,以天(d)为单位记录幼苗第1和第2真叶出现的时间,记录方法同种子萌发,基于塑料污染对植物生长的时间依赖性响应<sup>[7]</sup>,在试验中还记录了5月13日和5月25日2个时间点的幼苗真叶数量。在试验结束时,测量幼苗最大叶片的叶片长度并采摘全部叶片装入信封;洗净根部测量根长后,将根单独装入另一信封。将叶片和根分

别放入 80 ℃烘箱中烘 72 h 后,称质量,获取两部分生物量数据<sup>[17]</sup>。用生存分析(survival analysis)中的 Kaplan-Meier 方法分析各处理间第 1 片真叶和第 2 片真叶出现时间的差异,用单因素方差分析(One Way ANOVA)分析各处理最大叶片长度、根长度、叶片生物量、根生物量和总生物量(叶片干质量+根干质量)以及冠根比(叶片生物量/根生物量)的差异。在 5 月 31 日收割材料时对 3 组幼苗进行拍照。

1.4 数据分析

所有数据分析均在 R 系统中完成(R4.4.3 core,R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria)。

2 结果与分析

2.1 PE 微塑料对萝卜种子萌发的影响

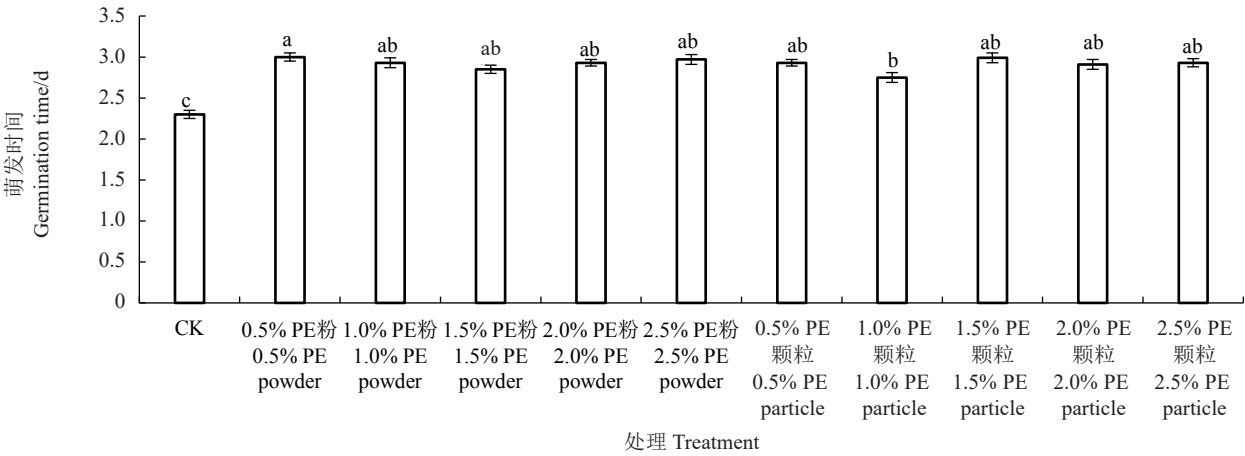
由图 1 可以看出,与 CK 相比,PE 处理均显著

延迟了萝卜种子萌发,1.0% PE 颗粒与 0.5%PE 粉处理萝卜种子萌发时间差异显著,与 CK 相比,抑制作用最弱的为 1.0% PE 颗粒处理(2.75 d),较 CK 显著延迟 0.45 d 萌发;抑制作用最强的为 0.5% PE 粉处理(3.0 d),较 CK 显著延迟了 0.70 d;其他 PE 处理间差异不显著。

由图 2 可以看出,各处理萝卜种子萌发率均在 90%以上,各处理间差异不显著,PE 微塑料对萝卜种子最终萌发率没有显著影响。

2.2 1.5%PE 微塑料对萝卜幼苗生长的影响

2.2.1 1.5%PE 微塑料对萝卜幼苗真叶出现时间的影响 由图 3 可知,与 CK 相比,PE 处理对萝卜幼苗第 1 片真叶的出现时间均无显著影响,但对第 2 片真叶的出现时间有显著影响。与 CK(8.25 d)相比,PE 粉处理(8.76 d)和 PE 颗粒处理(8.96 d)萝卜



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图 1 PE 微塑料对萝卜种子萌发时间的影响

Fig. 1 Effects of PE microplastics on the germination time of radish seeds

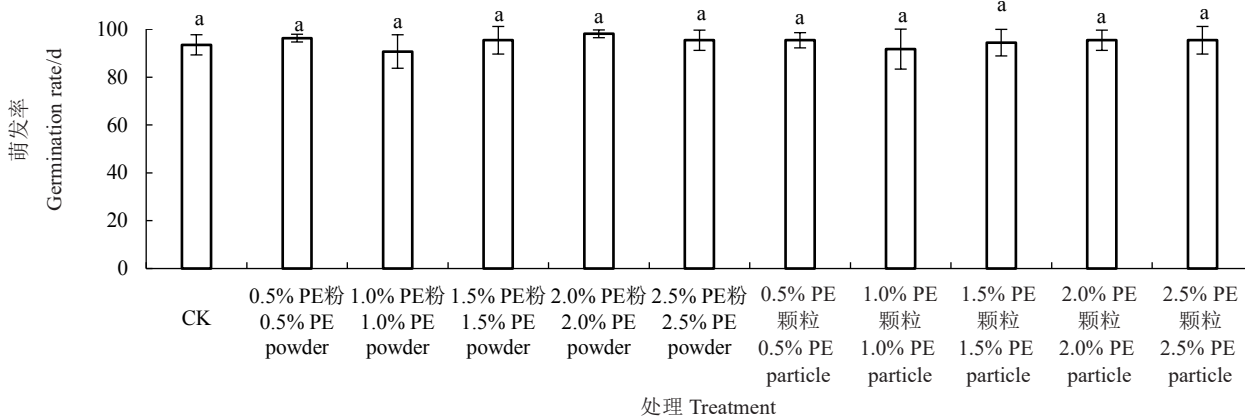


图 2 PE 微塑料对萝卜种子萌发率的影响

Fig. 2 Effects of PE microplastics on the germination rate of radish seeds

幼苗第2片真叶出现的时间均延迟0.5 d以上,而PE粉处理与PE颗粒处理间无显著差异。

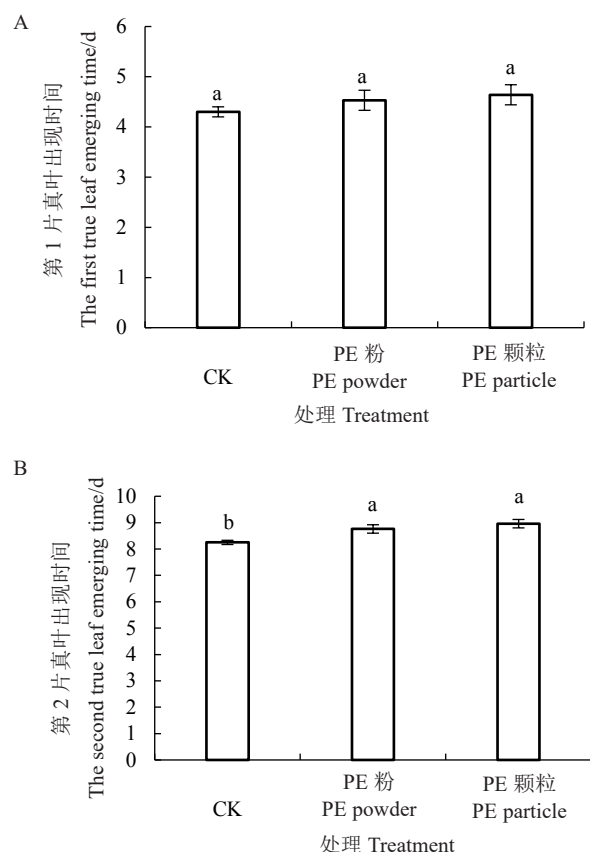


图3 PE微塑料对萝卜真叶出现时间的影响

Fig. 3 Effects of PE microplastics on the appearance time of radish true leaves

在5月13日和5月25日分别对幼苗的真叶数进行了调查,结果如下。

由图4可知,PE处理可减少萝卜幼苗的真叶数。5月13日PE颗粒处理的真叶数最少(1.32片),PE粉处理次之(1.47片),CK真叶数最多(1.77片),PE粉处理真叶数与CK无显著差异,但PE颗粒处理显著低于CK。5月25日的结果表明,PE处理进一步减少了真叶数。PE粉处理(3.03片)和PE颗粒处理(3.21片)的真叶数均显著低于CK(4.33片),但两处理间无显著差异。

**2.2.2 1.5%PE微塑料对萝卜幼苗生长指标的影响** 由图5可知,与CK相比,PE处理对萝卜幼苗生长均具有抑制作用,PE颗粒处理和PE粉处理植株叶片均小于CK。

由图6可知,PE处理可显著降低萝卜幼苗的最大叶长,与CK(17.26 cm)相比,PE粉处理(12.93 cm)和PE颗粒处理(12.58 cm)的最大叶长较CK分别显著降低了25.08%和27.11%。PE处理

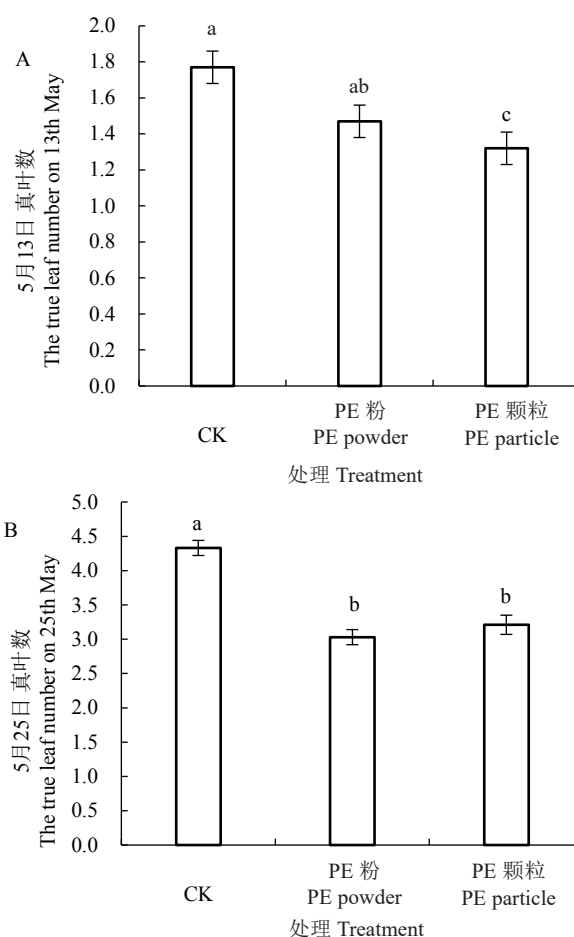


图4 PE微塑料对萝卜真叶数的影响

Fig. 4 Effects of PE microplastics on radish true leaf number

可增加萝卜幼苗的根长,与CK(23.46 cm)相比,PE粉处理的根长(30.67 cm)显著增加了30.73%,PE颗粒处理根长与CK和PE粉处理间均无显著差异。

可通过测定萝卜幼苗叶片、根的生物量分析植物生物量配置<sup>[18]</sup>。由图7可知,PE处理可抑制萝卜地上生物量积累并改变幼苗生物量配置。由图7-A可知,与CK相比,PE处理显著降低了幼苗叶片的生物量,CK、PE粉和PE颗粒处理叶片生物量分别是0.24、0.16、0.14 g;由图7-B可知,3个处理根生物量差异不显著;由图7-C可知,CK幼苗总生物量最高(0.27 g),显著高于PE粉处理(0.20 g)和PE颗粒处理(0.17 g),PE处理导致幼苗总生物量显著减少,但PE颗粒和PE粉处理间无显著差异。由图7-D可知,PE处理显著影响萝卜幼苗的冠根比,与CK(9.39)相比,PE处理幼苗冠根比显著降低,但PE粉(4.81)与PE颗粒(5.29)处理间无显著差异。结合PE微塑料对萝卜幼苗根、叶片和总生物量的影响,表明PE微塑料主要通过抑制叶片生长来影



图5 PE微塑料对萝卜幼苗大小的影响

Fig. 5 Effects of PE microplastics on the radish seedling size

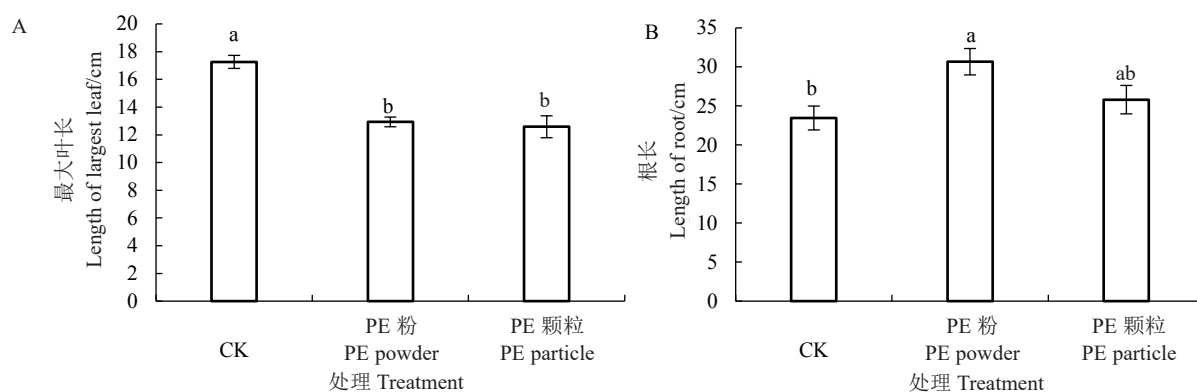


图6 PE微塑料对萝卜的最大叶片长度及根长的影响

Fig. 6 Effects of PE microplastics on lengths of largest leaf and root of radish

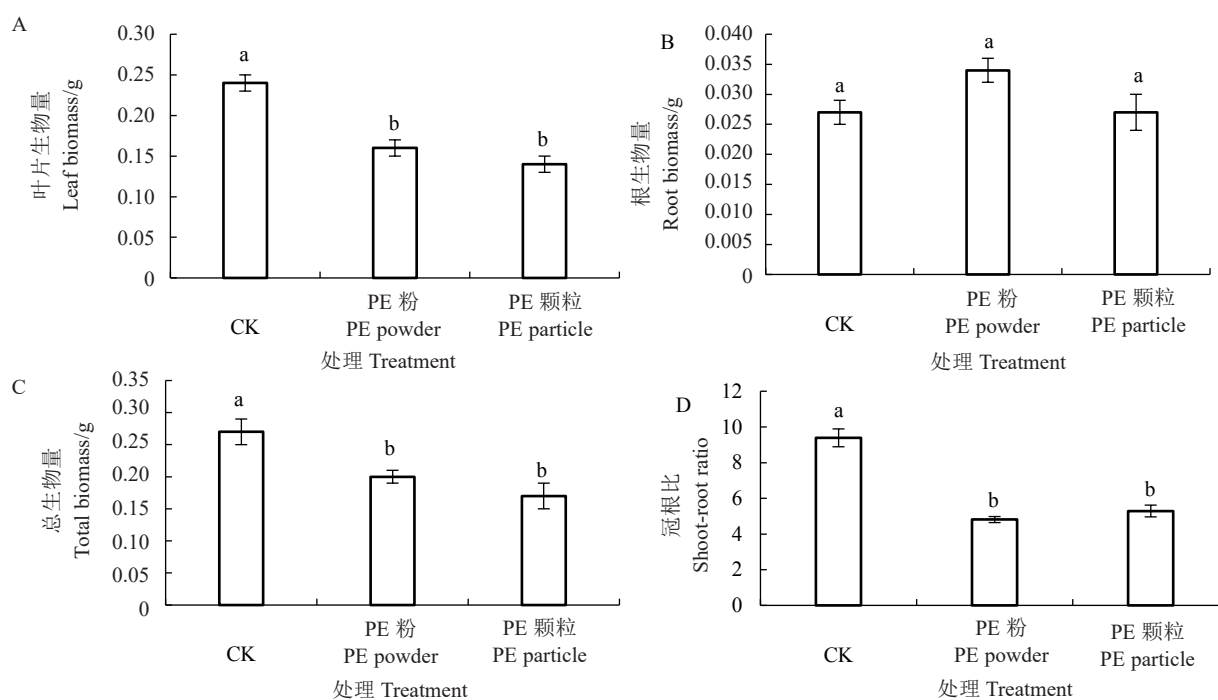


图7 PE微塑料对萝卜幼苗生物量及其配置的影响

Fig. 7 Effects of PE microplastics on the biomass and its allocation of radish seedling

响萝卜幼苗生长。

### 3 讨论与结论

微塑料对植物的影响是复杂多样的。一方面可以单独与其他生态因子互作改变土壤理化性质,也可通过改变土壤微生物群落间接影响植物;另一方面纳米级塑料可直接穿透植物组织,引发细胞毒性效应而对植物产生毒害作用<sup>[13-14,16]</sup>。微塑料对植物的生态效应具有高度异质性;其影响方向(促进、抑制或无显著作用)取决于微塑料的化学组成、物理形态(如形状与粒径)、宿主植物的生理特性以及暴露持续时间<sup>[15]</sup>。本研究表明,与CK相比,PE处理可延缓萝卜种子萌发进程并抑制幼苗生长,尤其是叶片生长受抑制最明显。其中,PE粉处理种子萌发的时间较长,表明PE微塑料粒径越小,对萝卜种子萌发抑制作用越强。值得注意的是,PE粉处理可显著促进幼苗根的伸长,说明PE微塑料的物理形态(粒径)可诱导植物在根与叶之间的生长权衡响应,揭示了其对萝卜生长发育的形态依赖性调控机制。

与CK相比,PE处理对种子萌发率无显著影响,但显著延迟了种子萌发时间。这与Bosker等<sup>[6]</sup>的研究结果相似,即不同浓度的聚苯乙烯(polystyrene, PS)微塑料和纳米塑料通过物理堵塞种皮萌发孔延迟了独行菜(*Lepidium sativum*)种子萌发时间。郭琳琳等<sup>[16]</sup>研究表明,NPs对番茄种子萌发呈现低促、中抑、高恢复的浓度依赖性的影响,其影响机制可能是物理阻塞效应或种子氧化应激与修复的博弈。其他研究也表明,微塑料或纳米塑料对种子萌发率的影响存在差异,部分研究未检测到显著效应<sup>[19-23]</sup>,而另一些研究观测到显著的抑制作用<sup>[5,24-26]</sup>。而且,微塑料对种子萌发的影响具有浓度和颗粒大小特异性<sup>[15,26-28]</sup>。本研究也表明PE微塑料粒径大小和浓度均影响萝卜的萌发时间,但0.5%PE粉处理比1.0%PE颗粒处理更显著地延迟了萝卜种子萌发,这反映了种子萌发延迟为PE浓度-粒径的综合效应,而非单一因素效应。

PE微塑料对萝卜幼苗生长影响具有时间依赖性累积效应。萝卜幼苗生长的试验结果表明,PE处理对萝卜幼苗生长的影响呈现时间累积特征,与CK相比,PE处理不仅延缓了真叶出现的时间,而且减少了真叶的数量。随着暴露时间延长,PE处理对萝卜幼苗生长的抑制作用逐渐增强,表现为真叶出现时间延迟和真叶数显著减少,这表明PE具有明显的时间依赖累积毒性效应。值得注意的是,不同微塑料类型及植物物种的毒性响应模式存在显

著差异。例如,聚氯乙烯(PVC)微塑料对大豆幼苗的抑制效应随暴露时间逐渐消失:7d时叶面积、株高和根鲜质量显著降低,但21d时上述指标已恢复至正常水平,表明其毒性作用具有短暂性<sup>[7]</sup>。相比之下,本研究中PE处理对萝卜幼苗的抑制作用随暴露时间增加持续增强,呈典型的时间依赖性累积效应。试验初期,PE对萝卜幼苗生长未产生显著影响,但随着暴露时间延长,PE微塑料的负面效应逐渐显现:PE处理对第1片真叶出现时间无显著影响,而PE粉和PE颗粒处理均显著延迟第2片真叶的出现时间;对真叶数量的抑制趋势与之一致。本研究证实微塑料对植物的毒性效应具有显著的时间依赖性累积特征,这为植物生态毒理学研究提供了重要科学依据。鉴于微塑料生态效应的累积性,采样时间点的选择为影响试验数据可比性的关键因素。因此,微塑料生态效应研究需建立时间序列采样体系,其污染治理策略必须将累积性生态风险纳入长期评估框架。

同时,PE微塑料对萝卜幼苗生长影响具有器官特异性特征。本研究表明,PE对萝卜幼苗的形态和生物量配置均有显著影响。与CK相比,PE处理显著降低了萝卜幼苗最大叶片长度,但PE粉处理显著增加了根的长度。同时,PE微塑料对萝卜幼苗生物量积累具有显著的器官特异性效应,PE微塑料处理显著抑制了地上生物量累积,但对地下生物量没有抑制,甚至略微促进根的生物量累积。值得注意的是,PE处理对总生物量仍表现出显著抑制作用。这个结果表明,PE微塑料对萝卜幼苗叶片和根生长影响不同,其中对叶片抑制作用显著。所以,PE对萝卜幼苗生长抑制作用主要表现在对叶片生长的抑制方面。叶片为光合作用的核心器官,其生长受抑制(最大叶长减小、地上生物量减少)可能直接削弱植物碳固定能力,进而影响产量形成,尽管根长增加可能短期增强水分吸收,但总生物量显著下降表明整体代谢失衡,这对蔬菜生产构成现实风险。

本研究仅聚焦于PE微塑料对萝卜种子萌发和幼苗生长的宏观表型特征(包括萌发时间、萌发率、叶片数量、最大叶长、根长及生物量)影响,未测定种子和幼苗的微观生理生化机制(如抗氧化酶活性、活性氧水平等),难以全面地了解微塑料对植物生长的影响机制。究其本质,宏观表型特征的变化是微观生理活动的外在表征:微塑料或纳米塑料可以对植物生理生化反应(光合作用、酶活性、水分和矿物质吸收等)产生影响,例如微塑料可影响植物根系活力<sup>[7]</sup>、叶绿素a/b的比值<sup>[15]</sup>、叶绿素和胡萝卜

素含量<sup>[27]</sup>,甚至还可影响植物的微量元素或必需营养成分含量<sup>[23,27]</sup>等。这些影响进而反映在宏观表型特征上,表现为各种生长指标(株高、茎粗、根长、根毛量、生物量配置、开花成熟时间等)受到影响,即微塑料通过干扰植物生理生化过程,导致宏观表型特征改变。未来研究中应整合表型和微观机制,全面解析微塑料生态效应机制。

综上所述,PE 微塑料对萝卜的生长发育呈现显著的阶段特异性与形态依赖性效应:萌发阶段仅显著延迟萌发时间而对最终萌发率无显著影响;幼苗阶段,两种形态的 PE 微塑料随暴露时间延长均显著抑制地上部生长(延迟真叶出现、减少真叶数量和生物量),尽管对根的生物量影响不显著,但 PE 粉末却显著促进根的伸长。这一结果揭示了 PE 微塑料对萝卜的影响呈显著的时间累积性和植物器官特异性。

### 参考文献

- [1] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 46 (12): 6453-6454.
- [2] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3 (7): e1700782.
- [3] KANE I A, CLARE M A. Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: A review and future directions[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 80.
- [4] MACHADO A A D, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [5] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(19): 11496-11506.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] VERLA A W, ENYOH C E, OBINNA I B, et al. Effect of macro- and micro-plastics in soil on growth of Juvenile Lime tree (*Citrus aurantium*) [J]. *AIMS Environmental Science*, 2020, 7 (6): 526-541.
- [9] QI Y L, YANG X M, PELAEZ A M, et al. Macro- and micro-plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1048-1056.
- [10] 张彦, 寅明, 邹磊, 等. 不同微塑料赋存环境对小麦萌发与幼苗生长影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3867-3877.
- [11] MENG F R, YANG X M, RIKSEN M, et al. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth to soil contaminated with microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(2): 142516.
- [12] 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.
- [13] RILLIG M C, LEHMANN A. Microplastic in terrestrial ecosystems: research shifts from ecotoxicology to ecosystem effects and Earth system feedbacks[J]. *Science*, 2020, 368 (6498): 1430-1431.
- [14] RILLIG M C, LEHMANN A, MACHADO A A D, et al. Microplastic effects on plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 223 (3): 1066-1070.
- [15] DE SILVA Y S K, RAJAGOPALAN U M, KADONO H. Microplastics on the growth of plants and seed germination in aquatic and terrestrial ecosystems[J]. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2021, 7(3): 1-22.
- [16] 郭琳琳, 郭琛, 王品苏, 等. 纳米塑料与铜复合对番茄种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(2): 80-87.
- [17] LIU R T, BI R C, ZHAO H L. Biomass partitioning and water content relationships at the branch and whole-plant levels and as a function of plant size in *elaegnus mollis* populations in Shanxi, North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (2): 139-143.
- [18] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50.
- [19] ZHANG Q G, ZHAO M S, MENG F S, et al. Effect of polystyrene microplastics on rice seed germination and antioxidant enzyme activity[J]. *Toxics*, 2021, 9(8): 179.
- [20] GIORGETTI L, SPAN 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.
- [21] LIAN J P, WU J N, XIONG H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121620.
- [22] GHARAH N, ZMANI- AHMADMAHMOODI R. Effect of plastic pollution in soil properties and growth of grass species in semiarid regions: A laboratory experiment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 59118-59126.
- [23] LI B T, HUANG S, WANG H M, et al. Effects of plastic particles on germination and growth of soybean (*Glycine max*): a pot experiment under field condition[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116418.
- [24] DE SILVA Y S K, RAJAGOPALAN U M, KADONO H, et al. Effects of microplastics on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth[J]. *Chemosphere*, 2022, 303 (1): 135162.
- [25] LI T, CAO X F, ZHAO R, et al. Stress response to nanoplastics with different charges in *Brassica napus* L. during seed germination and seedling growth stages[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2023, 17(4): 43.
- [26] GUO M, ZHAO F R, TIAN L W, et al. Effects of polystyrene microplastics on the seed germination of herbaceous ornamental plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 809: 151100.
- [27] 连加攀, 沈玫玫, 刘维涛. 微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 737-745.
- [28] PFLUGMACHER S, TALLINEN S, KIM Y J, et al. Ageing affects microplastic toxicity over time: Effects of aged polycarbonate on germination, growth, and oxidative stress of *Lepidium sativum*[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148166.