殷俊,段门俊,梁超,等.不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗光合、生物量和根系特性的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(6):1443-1451.
YIN J,DUAN M J,LIANG C,et al.Effects of polyethylene microplastics with different particle sizes on photosynthesis,biomass and root characteristics of maize seedlings[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(6):1443-1451.

不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗光合、生物量和根系特性的影响

殷　俊[1,2],段门俊[3],梁　超[4],聂江文[1*]

(1.长江大学 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心,湖北 荆州 434025;2.长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010;3.广东农垦热带农业研究院有限公司,广东 广州 511300;4.先正达(中国)投资有限公司,上海 200131)

摘要:【目的】随着塑料污染日益严重,微塑料已成为全球环境中的一个重要问题。了解微塑料对植物生长的影响,有助于评估塑料污染对农业生态系统的潜在威胁,尤其是其对作物生长和农业生产的长期影响。本研究旨在探讨不同粒径聚乙烯(PE)微塑料对玉米幼苗生长的影响。【方法】通过土壤盆栽试验,设置无添加(CK)、小粒径(13 μm,M1)和大粒径(150 μm,M2)PE微塑料(质量浓度均为5%)。分别测定玉米的株高、叶面积、叶绿素含量(SPAD)、生物量积累和根系性状等指标,计算植物健康指数(PHI),以全面评估微塑料对作物生长的影响。【结果】小粒径微塑料处理下玉米幼苗的SPAD值显著降低了11.52%(P<0.05)。尽管M1和M2未显著改变株高和叶面积,但两者均有助于生物量积累,具体表现为玉米幼苗各器官生物量呈现M1>M2>CK的趋势(P>0.05)。在根系性状方面,M1对根系总长度、体积和表面积的增强作用尤为明显,分别增加148.87%、175.78%和104.29%(P<0.05)。与CK相比,M1使玉米幼苗PHI显著提高了50.43%(P<0.05),表明小粒径微塑料对玉米幼苗的生长和健康具有积极影响。主成分分析(PCA)结果显示,M1和M2样本均与CK显著分离,表明这2种微塑料处理显著影响了玉米幼苗的生长。此外,株高、叶面积、各器官生物量、根系总长度、根体积和根表面积是不同粒径微塑料影响玉米幼苗生长的重要驱动因素。【结论】不同粒径的聚乙烯微塑料对玉米幼苗生长具有显著影响,其中小粒径的影响强于大粒径。未来,应考虑微塑料长期暴露对土壤健康和植物生长的累积效应,以便更好地评估微塑料污染对农业生态系统的全面影响。

关键词:聚乙烯;微塑料;微塑料粒径;植物健康指数;根系
中图分类号:S154.31　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)06-1443-09
CSTR:32399.14.aauj.2025124

Effects of polyethylene microplastics with different particle sizes on photosynthesis, biomass and root characteristics of maize seedlings

YIN Jun[1,2], DUAN Menjun[3], LIANG Chao[4], NIE Jiangwen[1*]

收稿日期:2025-02-11　　**修回日期:**2025-04-20
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(32401972)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32401972)
作者简介:殷俊,硕士生,orcid.org/0009-0009-9589-5938,yinjun3@cjwsjy.com.cn;*通信作者:聂江文,讲师,博士,主要从事农作制与农田生态研究,orcid.org/0000-0003-0881-0115,13437203646@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1. Engineering Research Center of Ecology and Agriculture Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; 2.Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Guangdong Agribusiness Tropical Agriculture Institute, Guangzhou 511300, China; 4.Syngenta (China) Investment Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: [**Objective**] With increasing plastic pollution, microplastics have become an important issue in the global environment. Understanding the effects of microplastics on plant growth can help to assess the potential threat of plastic pollution to agro-ecosystems, especially its long-term effects on crop growth and agricultural production. This study was conducted to investigate the effects of polyethylene (PE) microplastics of different particle sizes on the growth of maize (variety: Zhengdan 958) seedlings. [**Method**] Through soil pot experiment, the control group (CK), small particle size (13 μm, M1) and large particle size (150 μm, M2) PE microplastic treatment group were set up, and the microplastic mass concentration was 5%. The plant height, leaf area, chlorophyll content (SPAD), biomass accumulation, root traits and plant health index (PHI) of maize were measured to comprehensively evaluate the effects of microplastics on crop growth. [**Result**] The results showed that the SPAD values of maize seedlings were significantly reduced by 11.52% (P<0.05) under the treatment of small-sized microplastic (P<0.05). Although M1 and M2 did not significantly change plant height and leaf area, they both contributed to biomass accumulation, which showed that the biomass of organs in maize seedlings showed a trend of M1>M2>CK (P>0.05). The enhancing effect of M1 on the total root length, root volume, and root surface area was particularly significant, with increases of 148.87%, 175.78%, and 104.29% respectively (P<0.05). M1 significantly increased the PHI of maize seedlings by 50.43% (P<0.05) compared with CK, indicating that small-sized microplastics have a positive effect on the growth and health of maize seedlings. The results of principal component analysis (PCA) showed that both M1 and M2 samples were significantly separated from CK, indicating that the two microplastic treatments significantly affected the growth of maize seedlings. In addition, the plant height, leaf area, biomass of each organ, total root length, root volume and root surface area were the important driving factors affecting the growth of maize seedlings with different particle sizes of microplastics. [**Conclusion**] In summary, the results of this study showed that polyethylene microplastics with different particle sizes had significant effects on the growth of maize seedlings, and the effect of small particle size was stronger than that of large particle size. In the future, the cumulative effects of long-term exposure to microplastics on soil health and plant growth should be considered in order to better assess the full impact of microplastic pollution on agroecosystems.

Keywords: polyethylene; microplastics; microplastic particle size; plant health index; root system

【研究意义】近年来，微塑料（<5 mm粒径）污染已成为全球环境问题的重要组成部分，其对生态系统和生物的潜在影响引起了广泛关注[1-2]。随着塑料消费量的增加，微塑料以其细小的粒径和广泛的分布，逐渐渗透到土壤、水体和空气中，对农业生产构成了不容忽视的威胁[3-4]。作物生长是农业可持续发展的基础，而土壤中微塑料的存在可能直接或间接影响作物的生长、发育和产量[5]。因此，深入研究农田微塑料对作物生长的影响，不仅有助于揭示微塑料污染对农业生态的危害，也为相关治理措施的制定提供科学依据。【前人研究进展】研究[6]表明，微塑料的粒径大小对植物的光合作用、生物量和根系生长等方面具有显著影响。例如，较大的微塑料颗粒可能通过物理阻碍作用影响根系的伸展，从而降低植物吸收水分和养分的能力，进而影响光合作用效率和生物量的积累[7-9]。而较小粒径的微塑料更容易被植物根系吸收，可能引发植物在代谢过程中的毒性反应，并可能导致植物对水分和养分竞争能力的下降，从而抑制其生长[10]。此外，小粒径微塑料的表面特性和化学性质也可能改变土壤的物理化学性质，进一步影响植物的生长环境[11-12]。研究发现，微塑料的存在能够导致植物光合效率降低[13-14]，生物量积累受到抑制，尤其是在根系生长方面表现得尤为明显[15]。

【本研究切入点】目前多数的研究结果并不完全一致。此外，多数研究仅从作物地上光合、生物量积

累、地下根系发育等单一角度分析微塑料粒径的影响,缺乏系统综合分析。近年来,植物健康指数(PHI)包括叶片颜色、面积、光合作用效率、生物量积累、根系生长特性等,被广泛运用于监测植物生长状态对生态环境的响应过程,从而为判断植物的生长健康提供科学依据[16-17]。【拟解决的关键问题】聚乙烯(PE)被广泛应用于农膜等产品,因而是土壤中常见的微塑料类型[18]。玉米是全球主要的粮食作物之一,广泛种植于不同气候和土壤条件下。因此,本研究通过室内盆栽实验,旨在探讨不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗地上光合、干物质积累和地下根系生长的影响,同时采用植物健康指数综合评估玉米植株对微塑料的响应,为理解微塑料在农业生态系统中的作用提供新的视角,促进农业的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试土壤采自湖北省荆州市太湖镇农田,深度为0~20 cm,种植制度为水稻-棉花。其基本理化性质如下:pH 6.3,有机质 22.3 g/kg,全氮 1.26 g/kg,全磷 0.51 g/kg,全钾 9.51 g/kg,速效磷 20.8 mg/kg,速效钾 95.5 mg/kg。样品自然风干后去除杂质,过 2 mm 筛,用于室内土壤盆栽模拟试验。供试植物为玉米“郑单958”,微塑料为颗粒状聚乙烯,购自东莞市前景新材料有限公司。

1.2　试验设计

本研究设置3组处理:对照,无微塑料添加(CK)、小粒径聚乙烯添加(M1,13 μm)和大粒径聚乙烯添加(M2,150 μm),每组重复4次,聚乙烯微塑料质量浓度均为5%。每个花盆(高15 cm,上口径8.9 cm,下口径5.7 cm)装入0.4 kg处理后的风干土壤,混合所需的微塑料后植入4颗玉米种子。幼苗长出两片真叶后间苗,每盆留一株,每2 d补水,保持土壤湿度在最大持水量的60%。试验在人工气候培养箱(上海佳语仪器有限公司JYC-412)中进行,光强 4 000 lx,相对湿度55%,光照周期 12 h/12 h,温度设定为昼温(24±0.5) ℃、夜温(15±0.5) ℃。盆栽试验于2023年7月13日开始,生长25 d后破坏性取样。

1.3　测定指标与方法

玉米幼苗生长25 d后,测定其叶片SPAD值、株高和叶面积,随后分析根系形态特征及生物量等指标。使用日本东京的SPAD-502PLUS仪器测量SPAD值,株高、叶长和叶宽通过直尺(精确至0.1 cm)测得。

根据玉米的形态和其他指标计算叶面积(LA)和植物健康指数(PHI)。叶面积计算公式为:

$$LA = Ll \times Lw \times b \tag{1}$$

式(1)中:LA为叶面积,cm^2;Ll为玉米叶片长度,cm;Lw为玉米叶片宽度,cm;b为系数,玉米半展叶为0.5,全展叶为0.75。

根系形态分析:清洗干净的根系通过根系扫描仪扫描,生成PNG格式图像,并使用ScanWizard EZ软件分析,得到根系长度、体积、平均直径和表面积等数据。

干物质积累测定:生长25 d后,将玉米样品分为根系(根系扫描后测定)、茎秆和叶片,在105 ℃下杀青0.5 h后烘干至恒重后称量生物量。

所有计量指标均进行标准化处理,即通过公式(2)转化为0~1,以计算植物健康指数(PHI):

$$SL = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{2}$$

式(2)中:SL为标准化后的数据,无量纲;x为某指标原始测量值,x_{max}和x_{min}分别指该指标原始测量值的最大值和最小值。

植物健康指数评分通过基于转换后指标计算的面积法[16]评估:

$$PHI = 0.5 \times \sum_1^n SL_i^{\,2} \times \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \tag{3}$$

式(3)中:PHI为植物健康指数评分,SL_i为第i个指标标准化后的数据,n为用于计算PHI的指标数量。

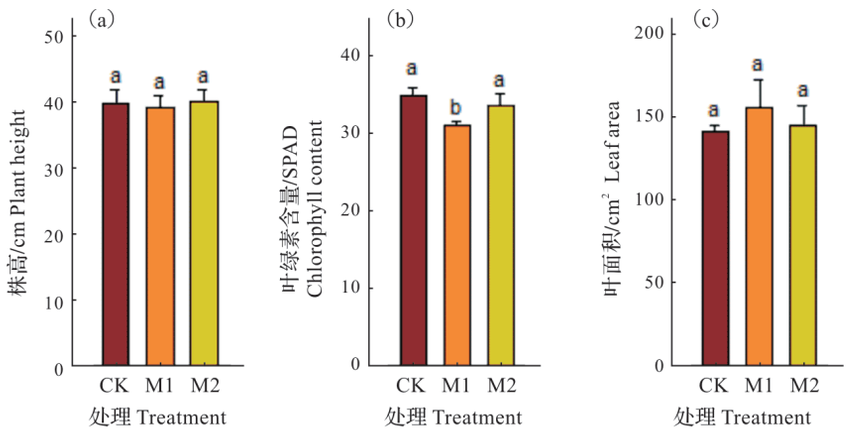
1.4　数据处理与分析

试验数据均使用Excel 2021进行数据预处理,并通过SPSS Statistics 26.0进行单因素方差分析(ANOVA)和Duncan's法显著性检验(P<0.05),采用Origin 2024绘制图。

2 结果与分析

2.1 不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗株高、SPAD、叶面积和生物量积累的影响

如图 1 所示，经过 25 d 的盆栽试验，玉米幼苗株高、SPAD 值和叶面积分别达 39.30~40.10 cm、30.93~34.95 和 141.59~155.23 cm^2。其中，与 CK 相比，小粒径 PE 添加（M1）导致 SPAD 值显著降低 11.52%（$P<0.05$），而小粒径和大粒径 PE 添加均对玉米幼苗株高与叶面积无显著影响。



CK：无微塑料添加；M1：小粒径微塑料添加；M2：大粒径微塑料添加。不同小写字母表示处理间在 $P=0.05$ 水平上差异显著。
CK: No microplastics added; M1: Small particle size microplastics added; M2: Large particle size microplastics added. Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at $P=0.05$ level.

图 1 不同粒径微塑料对玉米幼苗株高（a）、叶绿素含量（b）和叶面积（c）的影响

Fig.1 Effects of microplastics of different particle sizes on maize seedling height (a), chlorophyll content (b) and leaf area (c)

如图 2 所示，经过 25 d 的盆栽试验，玉米幼苗的地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比分别为 0.34~0.44 g/plant、0.12~0.21 g/plant、0.47~0.63 g/plant 和 0.36~0.47。与 CK 相比，2 种粒径 PE 微塑料对，各生物量指标均有一定增加，但差异不显著（$P>0.05$）。

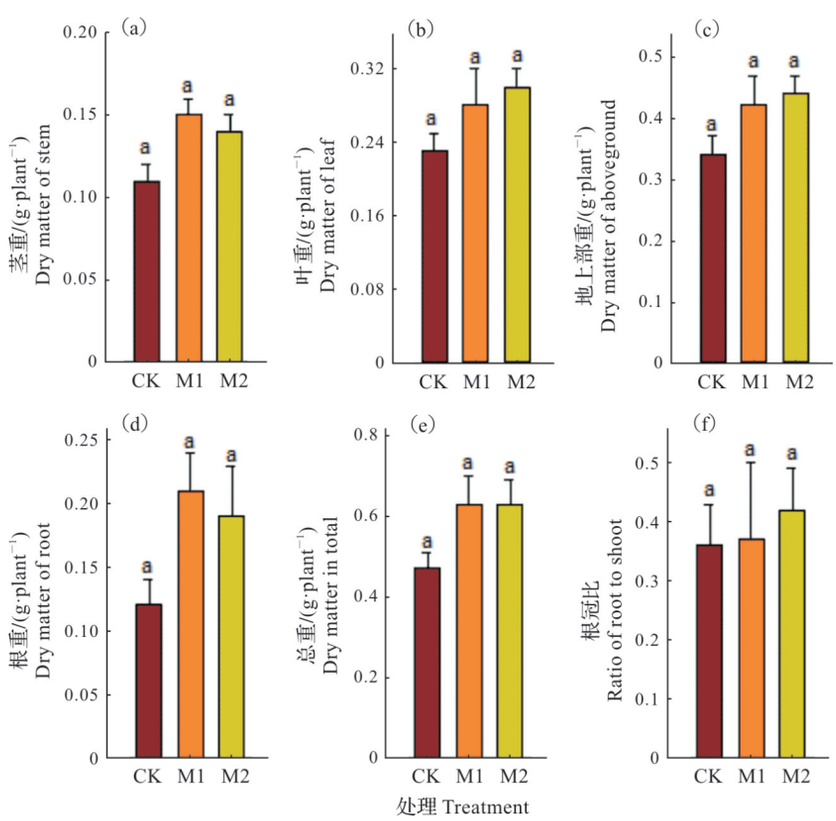


图 2 不同粒径微塑料对玉米幼苗干物质积累的影响

Fig.2 Effects of microplastics with different particle sizes on dry matter accumulation in maize seedlings

2.2　不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗根系性状的影响

如图 3 所示,玉米幼苗总根长、根体积和根表面积均呈 CK<M2<M1 的趋势。与 CK 相比,M1 处理下总根长、根体积和根表面积分别显著增加了 148.87%、175.78% 和 104.29%;同时,M2 处理下根表面积也显著高于 CK(P<0.05)(图 3d)。然而,各处理间玉米根系平均直径无显著差异(图 3c)。

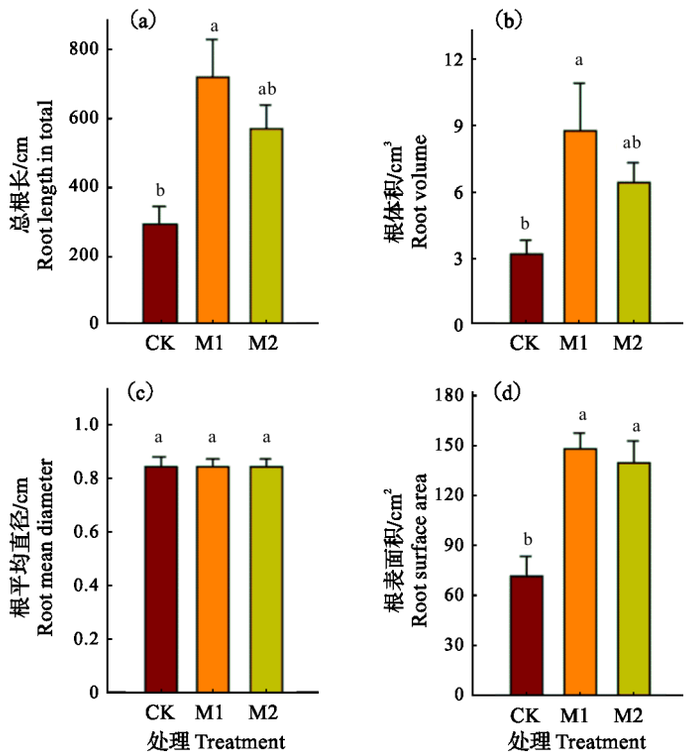


图 3　不同粒径微塑料对玉米幼苗根系特征的影响

Fig.3　Effects of microplastics with different particle sizes on root characteristics of maize seedlings

2.3　不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗植物健康指数的影响

综合玉米幼苗所有地上部和地下部生长指标(图 4),玉米幼苗健康生长指数(PHI)呈 CK<M2<M1 的趋势。与 CK 相比,M1 显著增加 PHI 达 50.43%。

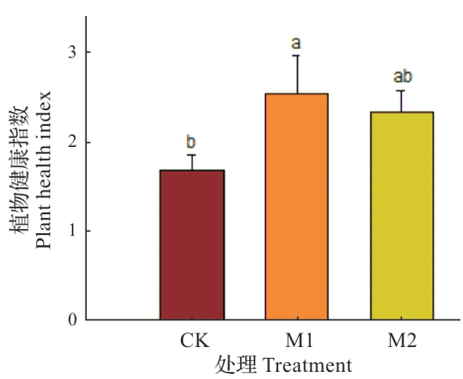


图 4　不同粒径微塑料对玉米幼苗健康指数的影响

Fig.4　Effects of microplastics with different particle sizes on health index of maize seedlings

2.4　玉米幼苗生长各指标间的相互关系

通过主成分分析描述玉米幼苗生长指标对微塑料变化的响应(图 5)。PC1 和 PC2 分别解释了各指标 87.41% 和 6.94% 的变异性。M1 和 M2 处理的玉米幼苗与 CK 显著分离,且 M1 与 CK 的距离更远,表明 M1 对玉米幼苗的影响更为显著。进一步分析,M1 和 M2 处理由株高、叶面积、各器官生物量、根系总长度、根体积和根表面积驱动,而 CK 主要由根平均直径和 SPAD 驱动。

Pearson 相关性分析(图 6)显示,PHI 与绝大部分指标(根平均直径和 SPAD 除外)间均呈显著正相关关系(P<0.05)。此外,多数玉米幼苗生长指标间均呈显著正相关。然而,SPAD 与玉米幼苗根冠比呈显著负相关,而根平均直径与其他玉米幼苗生长指标均无显著相关关系。

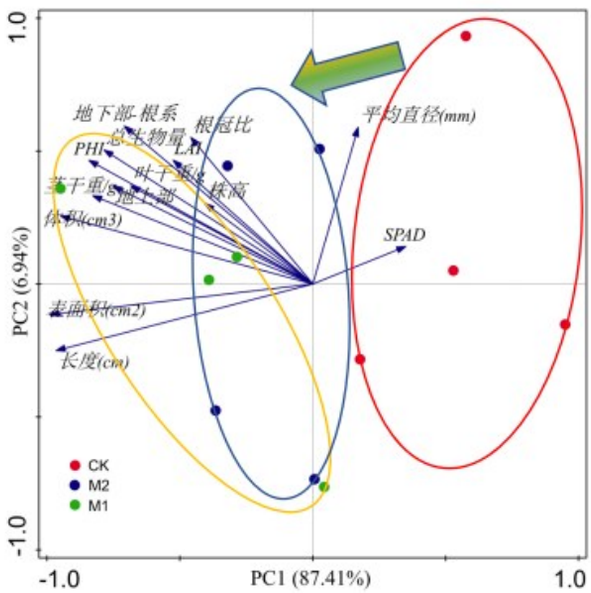
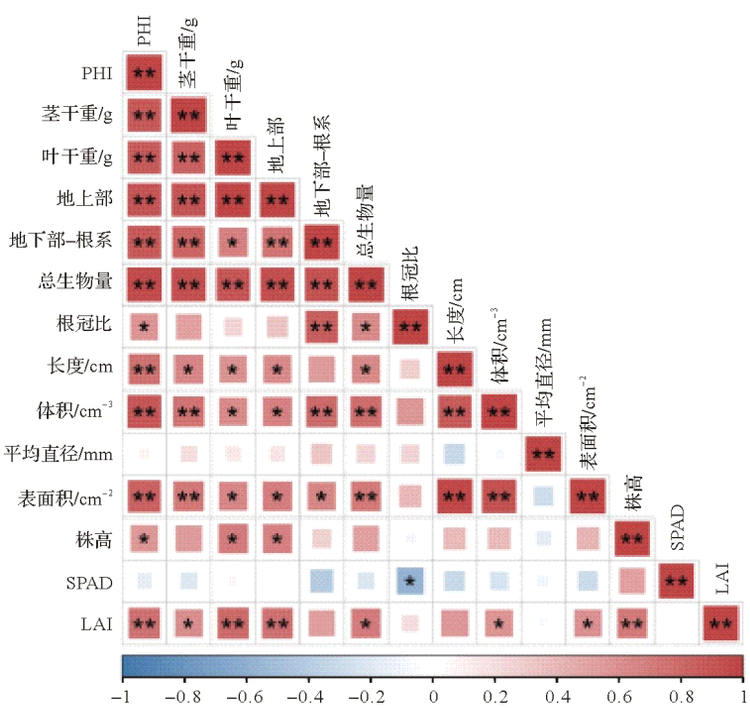


图 5 玉米幼苗各生长指标的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of each growth index of maize seedlings



*和**分别表示差异显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)。

* and ** indicate statistically significant(P<0.05)and highly statistically significant(P<0.01)differences, respectively.

图 6 玉米幼苗各生长指标间的相关关系

Fig.6 Correlation among growth indexes of maize seedlings

3 讨 论

3.1 不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗地上部生长的影响

前人研究发现,微塑料对植物的影响可能是多方面的,尤其是在小粒径微塑料的情况下,它们更容

易被植物吸收,导致生理功能的变化[19-20],如降低光合相关的叶绿素含量[21]。同样,笔者的研究发现小粒径PE微塑料显著降低了叶片的SPAD值,即小粒径PE微塑料可能通过影响植物的光合作用能力,进而对其生长产生潜在的负面影响[13]。此外,这也可能归因于微塑料胁迫作用导致细胞中活性氧的积累,破坏了叶绿素结构,进而影响光合作用[22]。然而,本试验结果显示2种粒径的PE微塑料对玉米幼苗的株高和叶面积没有显著影响。其原因可能是微塑料通过改变土壤特性,如增强土壤持水能力或改善土壤结构(如提高土壤的通气性和排水性,减少土壤的紧实度),从而提升玉米幼苗的生长环境,抵消光合降低带来的负面影响[23-24]。

另一方面,笔者观察到不同粒径的聚乙烯微塑料对玉米幼苗生物量积累的影响,尽管2种粒径处理下玉米幼苗各器官的干物质积累普遍有高于对照组(CK)的趋势,但未能达到显著性差异。这一结果表明,微塑料的存在可能对玉米生长产生一定的促进作用。其原因在于,较小粒径的微塑料可能会通过增加土壤的持水能力或改善土壤结构,从而提升玉米幼苗的生长环境,如提高土壤的通气性和排水性,减少土壤的紧实度,进而有助于根系的发育和水分、养分的吸收,进而促进生物量的积累[23-24]。但由于试验周期的限制,促进效果在较短时间内未能充分体现出来。同样,有研究[5,25]证实,尽管微塑料的添加未表现出显著的生物量差异,但长期的微塑料污染仍可能对植物健康及生态系统造成潜在风险。总之,本室内盆栽试验显示,短期内不同粒径PE微塑料对玉米生物量的影响较小。

3.2　不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗根系性状的影响

本研究发现,2种粒径的微塑料均能显著增加玉米幼苗的根系总长、根体积和根表面积,这与前人的研究结果相类似,这一现象可能与微塑料在土壤中改善了根系生长的微环境有关[26-27]。例如,有学者发现微塑料能够提高土壤通气性和水分保持能力,为根系的伸展提供了有利条件[23]。值得注意的是,小粒径微塑料对根系的影响更为显著。这可能是由于小粒径微塑料具有更大的比表面积,能够更好地与植物根系相互作用,促进根系的生长和扩展[28]。此外,小粒径微塑料可能释放出有机物质或养分,进一步刺激根系的发展[12]。相对而言,有研究还发现随着粒径的增大,PE微塑料对植物根系的机械性伤害加剧,进而引发植物的氧化应激反应,抑制了根系的生长以及植株的整体发育[29-30]。总之,相比于地上部生物量,玉米幼苗根系对于不同微塑料粒径添加更为敏感。

3.3　不同粒径聚乙烯微塑料对玉米幼苗植物健康指数的影响

本研究发现,不同粒径的聚乙烯微塑料对玉米幼苗的植物健康指数产生了显著影响,尤其是小粒径微塑料的处理组,其植物健康指数明显高于对照组。这一结果表明,小粒径微塑料可能在一定程度上促进了玉米幼苗的生长。通过主成分分析(PCA),本研究进一步揭示了小粒径微塑料对植物健康指数的正向影响主要与生物量和根系性状有关,特别是根系根长和根表面积的增加密切相关。这表明,小粒径微塑料可能通过改善土壤的物理特性或促进营养元素的有效利用[23],从而增强根系的生长能力和吸收功能,提高玉米的整体生长状态[31]。例如,有研究表明,土壤中大量微塑料的存在会改变土壤的容重和保水能力。这是因为塑料的密度通常低于土壤中的天然矿物质密度,且微塑料的存在会减少灌溉水和降水的渗透,进而对土壤结构产生不利影响,甚至可能导致土壤缺氧[32-33]。另一方面,由于根系是植物吸收水分和养分的主要部位,根系的生长和扩展能够直接提升植物的营养获取能力,进而支持地上部分的生长。

尽管短期内小粒径微塑料似乎对玉米幼苗产生了积极影响,但其长期影响尚需进一步研究,特别是微塑料对植物生理特性及其生态影响的机制。此外,未来的研究应关注微塑料对植物生长的长期效应及其在不同环境条件下的表现,特别是田间试验,以更全面地评估微塑料对农业生态系统的影响。

4　结　论

本研究表明,微塑料在短期内对玉米幼苗的生长有一定的影响,且不同粒径PE微塑料对玉米的生长表现出差异。小粒径PE微塑料显著降低了叶片的SPAD值,但未对玉米幼苗的株高、叶面积和各器官的生物量产生显著影响。然而,小粒径微塑料在根系性状(如根系总长、根体积和根表面积)上表现出显著的促进作用,这可能与其较大的比表面积以及对根系生长环境的改善密切相关。此外,小粒径PE微塑料还显著改善了玉米幼苗的健康指数。这表明微塑料在某些条件下可能对植物的根系生长和整体健

康产生积极影响，但其对地上部分的影响则较为有限。尽管本研究揭示了微塑料粒径对玉米幼苗短期生长的影响，但长远效应仍需进一步探讨，特别是微塑料在不同土壤类型、气候条件以及其他环境因素下的综合影响。未来的研究可以扩展至多样化的土壤环境，探索微塑料与其他农业污染物（如农药、化肥等）的相互作用，评估其在不同生态系统中的长期效应。因此，在农业实践中，为了减少微塑料对土壤和植物生长的潜在负面影响，应加强微塑料污染的监测与管理。

致谢：湖北省教育厅科研计划青年项目（Q20231310）、长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金项目（KF202309）和长江大学创新创业训练计划（Yz2023198）同时对本研究给予了资助，谨致谢意！

参考文献 References：

[1] 郝爱红，赵保卫，张建，等.土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展[J].环境化学，2021，40(4)：1100-1111.
HAO A H，ZHAO B W，ZHANG J，et al.Research progress on pollution status and ecological risk of microplastics in soil[J].Environmental chemistry，2021(4)：1100-1111.

[2] KOZLOV M.Landmark study links microplastics to serious health problems[J].Nature，2024，6：1.

[3] 雷晓婷，雷金银，周丽娜，等.微塑料对农田土壤质量的影响研究现状与分析[J].宁夏农林科技，2020，61(2)：26-28.
LEI X T，LEI J Y，ZHOU L N，et al.Status and analysis of study on effects of microplastics on farmland soil quality[J].Ningxia journal of agriculture and forestry science and technology，2020，61(2)：26-28.

[4] 季梦如，马旖旎，季荣.微塑料圈：环境微塑料对微生物的载体作用[J].环境保护，2020，48(23)：19-27.
JI M R，MA Y N，JI R.Plastisphere：the vector effects of microplastics on microbial communities[J].Environmental protection，2020，48(23)：19-27.

[5] 吕一涵，周杰，杨亚东，等.微塑料对农田生态系统的影响：研究现状与展望[J].中国生态农业学报（中英文），2022，30(1)：1-14.
LYU Y H，ZHOU J，YANG Y D，et al.Microplastics in agroecosystem：research status and future challenges[J].Chinese journal of eco-agriculture，2022，30(1)：1-14.

[6] 陈欣，郭薇，李济之，等.土壤微塑料影响植物生长的因素与机制研究进展[J].农业环境科学学报，2024，43(3)：488-495.
CHEN X，GUO W，LI J Z，et al.Research progress on the influencing factors and mechanisms of soil microplastics on plant growth[J].Journal of agro-environment science，2024，43(3)：488-495.

[7] 王志超，倪嘉轩，张博文，等.聚氯乙烯微塑料对土壤水分特征曲线的影响及模拟研究[J].农业环境科学学报，2022，41(5)：983-989.
WANG Z C，NI J X，ZHANG B W，et al.Simulation study to determine the influence of polyvinyl chloride microplastics on the soil water characteristic curve[J].Journal of agro-environment science，2022，41(5)：983-989.

[8] JIANG X J，LIU W J，WANG E H，et al.Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water flow behavior in the Minqin Oasis，northwestern China[J].Soil and tillage research，2017，166：100-107.

[9] ZHANG K，SHI H H，PENG J P，et al.Microplastic pollution in China's inland water systems：a review of findings，methods，characteristics，effects，and management[J].Science of the total environment，2018，630：1641-1653.

[10] 李连祯，周倩，尹娜，等.食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J].科学通报，2019，64(9)：928-934.
LI L Z，ZHOU Q，YIN N，et al.Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant[J].China science bulletin，2019，64(9)：928-934.

[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] PEHLIVAN N，GEDIK K.Particle size-dependent biomolecular footprints of interactive microplastics in maize[J].Environmental pollution，2021，277：116772.

[13] 王成伟，刘禹，宋正国，等.微塑料对DBP胁迫下生菜光合作用及品质的影响[J].农业环境科学学报，2021，40(3)：508-516.
WANG C W，LIU Y，SONG Z G，et al.Effects of microplastics and DBP on photosynthesis and nutritional quality of lettuce[J].Journal of agro-environment science，2021，40(3)：508-516.

[14] 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,2021,755:142516.

[15] LOZANO Y M,RILLIG M C.Effects of microplastic fibers and drought on plant communities[J].Environmental science & technology,2020,54(10):6166-6173.

[16] NAYAB G,ZHOU J,JIA R,et al.Climate warming masks the negative effect of microplastics on plant-soil health in a silt loam soil[J].Geoderma,2022,425:116083.

[17] ZHAO T Y,NIE J W,YAN X,et al.Identifying the critical LED light condition for optimum yield and flavonoid of pea sprouts[J].Scientia horticulturae,2024,327:112801.

[18] 李泽霖,徐子航,徐露卉,等.聚乙烯高效降解复合菌系的构建及其降解特性研究[J].江西农业大学学报,2024,46(2):481-489.
LI Z L,XU Z H,XU L H,et al.Construction and degradation characteristics of high-efficiency polyethylene degrading composite microbial community[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(2):481-489.

[19] LIU G,ZHU Z,YANG Y,et al.Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater[J].Environmental pollution,2019,246:26-33.

[20] 刘鑫蓓,董旭晟,解志红,等.土壤中微塑料的生态效应与生物降解[J].土壤学报,2022,59(2):349-363.
LIU X B,DONG X S,XIE Z H,et al.Ecological effects and biodegradation of microplastics in soils[J].Acta pedologica Sinica,2022,59(2):349-363.

[21] LIAO C S,YEN J H,WANG Y S.Growth inhibition in Chinese cabbage(*Brassica rapa* var. chinensis)growth exposed to di-n-butyl phthalate[J].Journal of hazardous materials,2009,163(2/3):625-631.

[22] MOINUDDIN M,GULZAR S,HAMEED A,et al.Differences in photosynthetic syndromes of four halophytic marsh grasses in Pakistan[J].Photosynthesis research,2016,131:51-64.

[23] DE SOUZA MACHADO A A,LAU C W,TILL J,et al.Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J].Environmental science & technology,2018,52(17):9656-9665.

[24] RILLIG M C,LEHMANN A,DE SOUZA MACHADO A A,et al.Microplastic effects on plants[J].New phytologist,2019,223(3):1066-1070.

[25] 阳祝庆,杨敏,黄道友,等.聚苯乙烯微塑料对连续种植小白菜生长及品质的影响[J].环境科学,2024,45(11):6645-6653.
YANG Z Q,YANG M,HUANG D Y,et al.Effects of polystyrene microplastics on the growth and quality of *Brassica campestris* L. in a three-season consecutive cultivation[J].Environmental science,2024,45(11):6645-6653.

[26] 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.

[27] YANG W W,CHENG P,ADAMS C A,et al.Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles[J].Soil biology and biochemistry,2021,155:108179.

[28] 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.

[29] 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.

[30] CHEN H P,WANG Y H,SUN X,et al.Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function[J].Chemosphere,2020,243:125271.

[31] 周薇,石磊,许明祥.微塑料对土壤持水性能的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):258-263.
ZHOU W,SHI L,XU M X.Influence of microplastics on soil water retention[J].Journal of soil and water conservation,2021,35(6):258-263.

[32] LIU E K,HE W Q,YAN C R.'White revolution' to 'white pollution' - agricultural plastic film mulch in China[J].Environmental research letters,2014,9:091001.

[33] DE SOUZA MACHADO A A,LAU C W,TILL J,et al.Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J].Environmental science & technology,2018,52(17):9656-9665.

(责任编辑:刘玉香)