

孟令秦, 沈哲源, 王 宁, 等. 微塑料和锂离子交互作用对小麦生长特性与抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1081-1091.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.001

微塑料和锂离子交互作用对小麦生长特性与抗氧化系统的影响

孟令秦, 沈哲源, 王 宁, 田明珠, 马彩滢, 张 亮, 范 尧, 王寿景, 周 学
(南京师范大学泰州学院化学与生物工程学院, 江苏 泰州 225300)

摘要: 本研究以小麦(*Triticum aestivum* L.)(济麦 22)为供试作物, 探究聚乙烯微塑料(PE)(20 g/kg)和聚己二酸-对苯二甲酸丁酯微塑料(PBAT)(20 g/kg)与锂(Li)(60 mg/kg)单一处理及复合处理对小麦生长和抗氧化系统的影响。结果表明, 2%PE 处理增加了小麦生物量, 2%PBAT 处理显著抑制根茎发育, 两者都降低植物叶绿素总含量, 增加类胡萝卜素含量; Li^+ 处理促进叶片生长, 显著提高过氧化氢酶(CAT)活性, 但抑制叶绿素合成和根系生长, 并抑制根部超氧化物歧化酶(SOD)活性。复合处理中, 2%PE+ Li^+ 与 2%PBAT+ Li^+ 都加剧了叶片生长抑制和增加过氧化物酶(POD)和 CAT 的活性。其中 PBAT+ Li^+ 导致植株鲜重、干重和叶绿素含量降低最明显。另外, 复合处理显著抑制小麦对 Li^+ 的吸收转运, 2%PBAT 的抑制作用强于 2%PE。土壤理化性质分析结果显示, 2%PE 可缓解 Li^+ 对有效磷的抑制, 而 2%PBAT 与 Li^+ 协同使有效钾含量增加, 复合处理均显著促进土壤蔗糖酶和脲酶活性提高。相关性分析结果表明抗氧化系统与生长指标呈正相关, 表明植物通过调控抗氧化防御响应污染胁迫。总体而言, 可降解的 PBAT 较 PE 具有更高的生态风险, Li^+ 进一步加剧了 PBAT 的生态毒性, 这可能是由于 PBAT 与 Li^+ 之间的相互作用与 PE 存在差异, 从而诱导植物-土壤系统产生不同的响应机制。

关键词: 微塑料; 锂; 小麦; 复合作用; 生态毒性效应; 土壤理化性质

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026) 06-1081-11

Impact of the interaction between microplastics and lithium ions on the growth traits and antioxidant system of *Triticum aestivum* L.

MENG Lingqin, SHEN Zheyuan, WANG Ning, TIAN Mingzhu, MA Caiying, ZHANG Liang, FAN Yao, WANG Shoujing, ZHOU Xue

(School of Chemistry and Biological Engineering, Nanjing Normal University Taizhou College, Taizhou 225300, China)

Abstract: This study used *Triticum aestivum* L. (Jimai 22) as the test plant to investigate the effects of single and combined exposure to polyethylene microplastics (PE) (20 g/kg) and polybutylene adipate-terephthalate microplastics (PBAT) (20 g/kg) with lithium (Li) (60 mg/kg) on the growth and antioxidant system of wheat. The results showed that

收稿日期: 2025-05-30

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK202111128); 2025 年江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象和泰州市“凤城英才计划”第六期“311 高层次人才培养专项”

作者简介: 孟令秦(2004-), 男, 山东淄博人, 本科, 研究方向为微塑料的生态效应。(E-mail) 16220251@nnut.edu.cn

通讯作者: 张 亮, (E-mail) liangzai0061@126.com

2% PE increased biomass, while 2% PBAT significantly inhibited root and stem development, both treatments decreased the total chlorophyll content of the plant and increased carotenoid content. Li^+ promoted the growth of the leaves, significantly increased catalase (CAT) activity, but inhibited chlorophyll synthesis and root growth, as well as inhibited superoxide dismutase (SOD) activity in the roots.

In the combined treatments, both 2% PE+Li⁺ and 2% PBAT+Li⁺ exacerbated the growth inhibition of the leaves and increased the activities of peroxidase (POD) and CAT. Among them, the PBAT+Li⁺ group caused the most significant decrease in fresh and dry weight and chlorophyll content of the plants. In addition, combined treatments significantly inhibited the absorption and transport of Li⁺ in wheat (2% PBAT>2% PE). Soil physicochemical analysis showed that 2% PE could alleviate the inhibition of Li⁺ on available phosphorus, while 2% PBAT and Li⁺ synergistically increased the available potassium content. Combined treatments significantly promoted soil invertase and urease activities. Correlation analysis revealed a positive association between the antioxidant system and growth indicators, indicating that plants respond to pollution stress by regulating antioxidant defense. Overall, degradable PBAT has higher ecological risks than PE, and Li⁺ further exacerbates the ecological toxicity of PBAT, which may be due to the differences in the interaction between PBAT and Li⁺ compared to PE, inducing different response mechanisms in the plant-soil system.

Key words: microplastics; lithium; wheat; compound action; ecotoxicological effects; soil physical and chemical properties

微塑料(Microplastics, MPs)是粒径小于 5 mm 的新型污染物,其生态毒性研究领域涵盖海洋生物、植物、动物及人体等。海洋生物摄入微塑料可引发消化道损伤、代谢异常及神经毒性^[1]。植物暴露于微塑料环境中,其生理生化代谢机制会发生明显改变,其中聚苯乙烯(Polystyrene, PS)微塑料被发现可抑制水稻(*Oryza sativa* L.)籽粒三羧酸循环相关蛋白质的基因表达^[2]。微塑料常与环境中的重金属、抗生素等污染物形成复合污染体系。在电子产业快速发展背景下,锂(Li)作为新兴污染物,在中国长江中下游流域的累积尤为显著^[3]。

当前研究多聚焦微塑料或重金属对植物的单一胁迫,而两者复合污染效应尚不明确。相较于 Cd、Pb 等重金属,锂离子因影响离子通道及细胞膜电位,可特异性干扰细胞信号传导^[4]。微塑料可能通过吸附 Li⁺ 改变其生物有效性,或通过物理损伤加剧毒性。研究表明,微塑料如聚乙烯(PE)微塑料、聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料、聚丙烯(PP)对小麦(*Triticum aestivum* L.)幼苗生长和叶绿素含量的增加有抑制作用^[5],在重金属复合污染下植物抗氧化酶[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)]活性呈现异质响应^[6-8]。Xu 等^[7]研究发现,低含量的锂对小麦的生长无显著影响,甚至在一定程度上还可能促进生长,但高含量的锂则会对小麦的生长产生显著的抑制作用,使叶片长度、根长和全株鲜重均降低。锂的存在可能会影响土壤中氮、磷、钾等营养元素的有效性和含量^[9],微塑料会改变土壤的物理结构,影响其化学性质,并干扰土壤生物学特性,进而对土壤生态功能和植物生长产生广泛影响^[10]。目前关于

微塑料和锂离子交互作用对作物生长发育和土壤的影响研究仍存在空白,亟待深入探究。

随着锂离子电池和塑料制品的广泛使用,农田微塑料与锂的复合污染问题逐渐显现,但其环境效应及对主粮作物的生态风险尚不明晰。本研究拟以小麦为研究对象,通过构建微塑料-锂复合污染体系,分析其对小麦生长、小麦抗氧化系统及土壤酶活性的影响,以阐明其交互作用对小麦的生态毒性机制。本研究旨在揭示农田微塑料与锂的协同/拮抗效应,填补复合污染研究空白,为生态风险评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

聚乙烯(PE)微塑料、聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料均购于东莞市中联塑化科技有限公司,粒径均为 106 μm。济麦 22 小麦品种是通过综合多品种优势培育而成的,种植广泛,在不同地区的土壤和气候条件下均能较好地生长,具有抗寒、分蘖能力强、成穗率高和抗病虫害等优点^[11],所以本研究供试小麦品种选择半冬性多穗型中晚熟品种济麦 22(购自山东省农业科学院作物研究所)。取样地点为泰州某农田,取表层(0~20 cm)土,土壤类型为潮土,土壤基本理化性质:pH=8.56,有效氮含量为 26.50 mg/kg,有效磷含量为 11.4 mg/kg,有效钾含量为 59.06 mg/kg。

1.2 试验设计

使用 2%PE 和 2%PBAT 微塑料含量模拟农用地膜残留带来的较高污染水平^[12],研究表明,60 mg/kg 的锂离子含量处理下,小麦的根长、株高、

鲜重等生长指标均受到抑制,对小麦生长会产生毒性效应^[7],所以本研究选择 60 mg/kg 的锂离子含量进行试验。盆栽试验共设置 6 个处理组,分别为不添加污染物的对照组(CK)、单一 PE 污染组(PE 含量为 20 g/kg)(2% PE 组)、单一 PBAT 污染组(PBAT 含量为 20 g/kg)(2% PBAT 组)、单一 Li⁺污染组(Li⁺含量为 60 mg/kg)(Li⁺组)、PE 和 Li⁺复合污染组(PE 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg)(2% PE+Li⁺组)、PBAT 和 Li⁺复合污染组(PBAT 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg)(2% PBAT+Li⁺组),每个处理组设置 5 个重复。

选择饱满一致的小麦种子,用 1.5% 次氯酸钠(NaClO)溶液消毒 20 min,经灭菌水冲洗数次后浸种 12 h,再转移到铺有湿润滤纸的培养皿中,于恒温培养箱中 25 ℃ 催芽 24 h,将露白一致的种子转移至事先处理好的土壤盆中。小麦生长期每天接受自然光照 8~9 h,并且每周随机调换盆栽位置以减少试验系统误差。室内温度保持在 20~25 ℃;整个生长期不施肥;每 3 d 通过称重法补充去离子水,以保持 60%~70% 的最大持水量。

1.3 测定项目与测定方法

采用浸提法提取叶片中光合色素,用分光光度计测定光合色素含量^[13]。参考孔祥生等^[14]的方法测定丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性,参考李合生^[15]的方法测定过氧化物酶(POD)

活性和过氧化氢酶(CAT)活性,以上指标均基于鲜重测定。采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量^[16]。土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性的测定参考林先贵^[17]的方法。锂元素含量的测定采用密闭罐湿法消解(硝酸-高氯酸体系),并采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定^[18]。

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 Excel2021、OriginPro2021 进行基本计算和绘图。采用 SPSS19.0 中的 Duncan's 法进行平均值的多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同微塑料与 Li⁺对小麦生长情况的影响

由表 1 可知,与对照组相比,2%PE 组及 2%PE+Li⁺组显著抑制小麦根部长度的,而 2%PE 组显著增加小麦鲜重和干重,2%PE+Li⁺组显著增加小麦鲜重;2%PBAT 组及 2%PBAT+Li⁺组均呈显著抑制小麦叶片和根部长度的,干重。另外,与 2%PE+Li⁺组相比,2%PBAT+Li⁺组小麦叶片长度、根部长度和干重均显著降低,与 2%PE 组相比,2%PBAT 组小麦根部长度和干重均显著降低,这说明 PBAT 可能比 PE 对小麦的毒性更强。与此同时,2%PBAT+Li⁺组比 2%PBAT 组对叶片和根部长度的抑制更明显,而 2%PE+Li⁺组小麦的叶片长度、根部长度的鲜重和干重与 2%PE 组相比并无显著差异。

表 1 微塑料与锂胁迫对小麦生长情况的影响

Table 1 Effects of microplastics and lithium stress on wheat growth

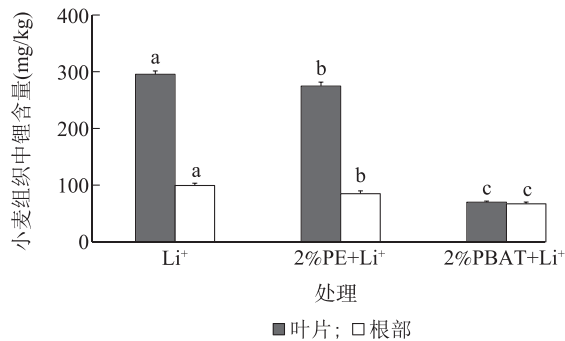
处理组	叶片长度(cm)	根部长度的(cm)	鲜重(g)	干重(g)
CK	12.22±0.45b	40.07±5.64a	0.152±0.024c	0.094±0.012c
2%PE	11.67±0.77bc	20.92±1.83b	0.244±0.037ab	0.147±0.038a
2%PBAT	9.69±0.75c	17.72±4.25c	0.143±0.041bc	0.073±0.022d
Li ⁺	13.52±0.41a	19.45±4.34bc	0.218±0.034b	0.122±0.015ab
2%PE+Li ⁺	11.87±0.95bc	19.52±5.26bc	0.267±0.058a	0.116±0.026bc
2%PBAT+Li ⁺	7.02±0.46d	11.88±2.61d	0.141±0.042c	0.063±0.021d

CK:不添加污染物,对照组;2%PE 组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE 含量为 20 g/kg;2%PBAT 组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料污染组,PBAT 含量为 20 g/kg;Li⁺组:单一锂离子(Li⁺)污染组,Li⁺含量为 60 mg/kg;2%PE+Li⁺组:PE 和 Li⁺复合污染组,PE 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg;2%PBAT+Li⁺组:PBAT 和 Li⁺复合污染组,PBAT 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同微塑料与 Li⁺对小麦植株锂含量的影响

2%PE 组与 2%PBAT 组对小麦锂吸收及转运的影响存在显著差异。由图 1 可知,相较于单一 Li⁺

处理,2%PE+Li⁺组和 2%PBAT+Li⁺组分别使叶片 Li⁺含量降低 7.0% 和 76.3%,根部 Li⁺含量下降 14.6% 和 32.5%,其中 PBAT 对小麦吸收及转运 Li⁺的抑制作用显著强于 PE。



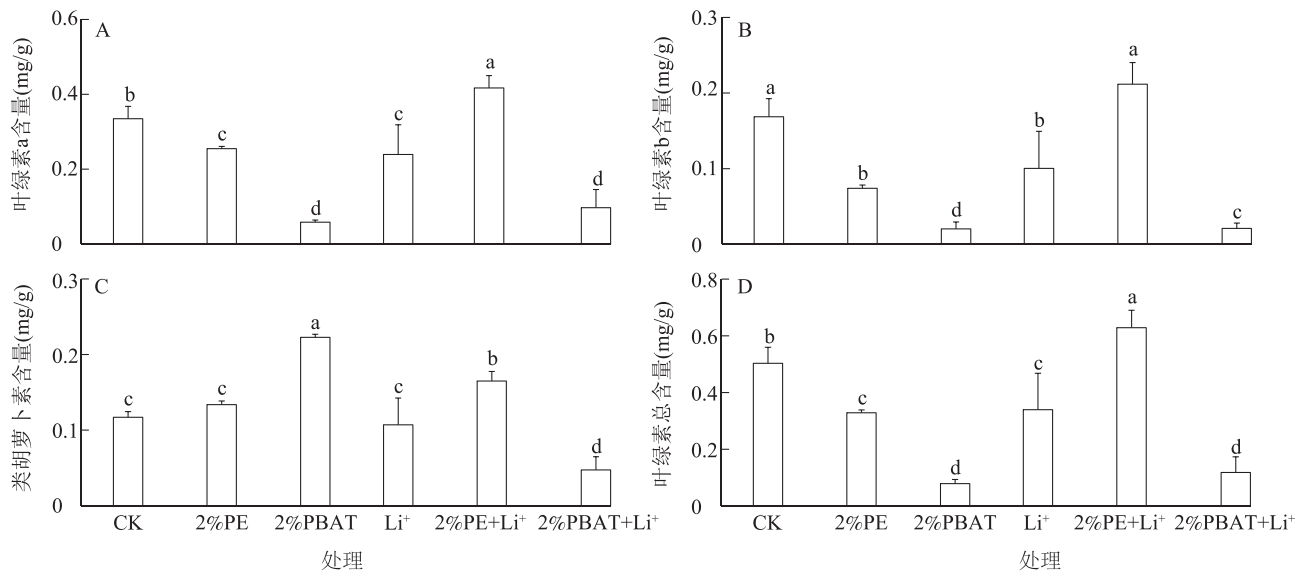
PE:聚乙烯;PBAT:聚己二酸-对苯二甲酸丁二脂;Li⁺组:单一Li⁺污染组,Li⁺含量为60 mg/kg;2%PE+Li⁺组:PE和Li⁺复合污染组,PE和Li⁺含量分别为20 mg/kg和60 mg/kg;2%PBAT+Li⁺组:PBAT和Li⁺复合污染组,PBAT和Li⁺含量分别为20 mg/kg和60 mg/kg。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图1 微塑料和锂胁迫下小麦植株中的锂离子(Li⁺)含量

Fig.1 Li⁺ content in wheat plants under microplastics and lithium stress

2.3 不同微塑料与Li⁺对小麦叶片中光合色素含量的影响

光合色素在植物的光合作用和能量传递过程中发挥着重要作用。由图2可知,与CK相比,2%PE组、2%PBAT组、Li⁺组显著降低了小麦叶片中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量,尤其是2%PBAT组,其含量接近于0 mg/g(图2A、图2B和图2D)。复合处理下,相较于2%PBAT组,2%PBAT+Li⁺组小麦叶片中叶绿素a含量和叶绿素总含量略有回升,差异不显著($P > 0.05$);而与2%PE组相比,2%PE+Li⁺组小麦叶片中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量显著升高。在类胡萝卜素方面(图2C),单一处理组,2%PBAT组小麦叶片中类胡萝卜素含量显著高于对照组,2%PE组和Li⁺组小麦叶片中类胡萝卜素含量与对照组差异不显著。复合处理下,相较于2%PE组,2%PE+Li⁺组小麦叶片中类胡萝卜素含量显著升高;而2%PBAT+Li⁺组小麦叶片中类胡萝卜素含量显著低于对照组,也显著低于2%PBAT组。



CK:不添加污染物,对照组;2%PE组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE含量为20 g/kg;2%PBAT组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二脂(PBAT)微塑料污染组,PBAT含量为20 g/kg;Li⁺组:单一Li⁺污染组,Li⁺含量为60 mg/kg;2%PE+Li⁺组:PE和Li⁺复合污染组,PE和Li⁺含量分别为20 mg/kg和60 mg/kg;2%PBAT+Li⁺组:PBAT和Li⁺复合污染组,PBAT和Li⁺含量分别为20 mg/kg和60 mg/kg。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图2 微塑料和锂(Li)胁迫下小麦植株中光合色素含量

Fig.2 Photosynthetic pigment content in wheat plants under microplastics and lithium stress

2.4 不同微塑料与Li⁺对小麦抗氧化酶活性的影响

微塑料与Li⁺胁迫显著改变了小麦抗氧化酶活性,且叶片与根部的抗氧化酶活性存在明显差异。

由表2可知,对于叶片抗氧化酶活性,与CK相比,2%PE组显著提高POD(提高42.0%)、CAT活性,但未显著改变SOD活性;2%PBAT组显著提高CAT

活性但抑制 *SOD* 活性(降低 41.3%),且对 *POD* 活性无显著影响;单一 Li^+ 处理显著提高 *CAT*、*POD* 活性,且显著提升 *SOD* 活性(较 CK 提高 9.1%);复合处理下,2%PE+ Li^+ 组和 2%PBAT+ Li^+ 组显著提高了 *CAT* 和 *POD* 活性,其中 2%PE+ Li^+ 组的 *CAT* 活性达到最大值[733.3 U/(g·min),FW],较 CK 提高 314.3%,但 2%PBAT+ Li^+ 组 *SOD* 活性均有所下降。

表 2 微塑料与锂(Li)胁迫对小麦组织抗氧化酶活性的影响

Table 2 Effects of microplastics and lithium stress on antioxidant enzyme activities in wheat tissues

处理组	叶片			根部		
	<i>SOD</i> 活性 (U/g)	<i>POD</i> 活性 [U/(g·min)]	<i>CAT</i> 活性 [U/(g·min)]	<i>SOD</i> 活性 (U/g)	<i>POD</i> 活性 [U/(g·min)]	<i>CAT</i> 活性 [U/(g·min)]
CK	882.3±18.1bc	13.8±1.0d	177.0±34.4e	817.2±59.9c	25.7±1.1d	400.0±45.6e
2%PE	901.0±29.2b	19.6±2.2c	237.5±22.5d	1 022.7±35.5a	27.4±2.7cd	481.2±30.3d
2%PBAT	518.1±40.1c	15.0±1.4d	250.0±35.3d	901.2±22.3b	24.9±2.3d	427.4±48.5e
Li^+	962.8±64.3a	26.5±0.8b	397.9±30.8c	433.7±48.0de	33.8±3.4b	568.7±57.2c
2%PE+ Li^+	952.3±23.7a	27.2±0.9ab	733.3±56.7a	398.2±60.4e	42.1±3.7a	858.3±48.2a
2%PBAT+ Li^+	422.8±60.2d	29.6±3.1a	662.5±22.5b	511.4±49.4d	28.9±2.9c	629.1±57.0b

SOD:超氧化物歧化酶;*POD*:过氧化物酶;*CAT*:过氧化氢酶;CK:不添加污染物,对照组;2%PE 组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE 含量为 20 g/kg;2%PBAT 组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料污染组,PBAT 含量为 20 g/kg; Li^+ 组:单一 Li^+ 污染组, Li^+ 含量为 60 mg/kg;2%PE+ Li^+ 组:PE 和 Li^+ 复合污染组,PE 和 Li^+ 含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg;2%PBAT+ Li^+ 组:PBAT 和 Li^+ 复合污染组,PBAT 和 Li^+ 含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

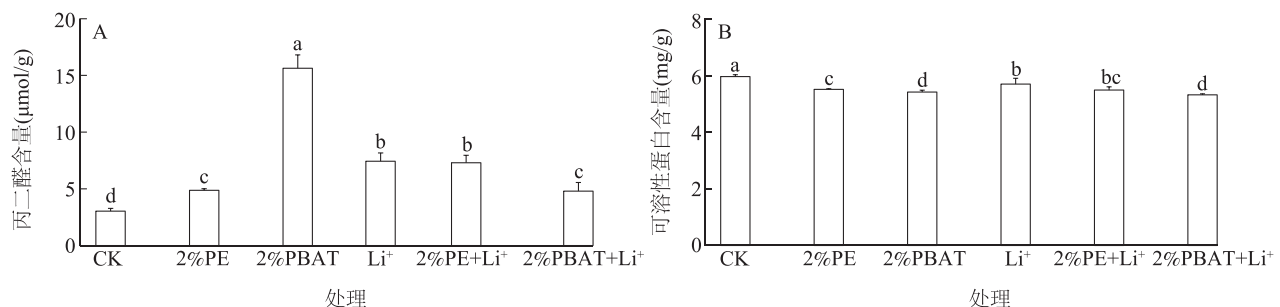
2.5 不同微塑料与 Li^+ 对小麦叶片中丙二醛(MDA)、可溶性蛋白(SP)含量的影响

图 3A 显示了不同处理对小麦 MDA 含量的影响。与 CK 相比,所有处理组均显著增加小麦叶片 MDA 含量。其中 2%PBAT 组增加得最显著, Li^+ 组的小麦叶片 MDA 含量与 2%PE 组相近,均显著低于 2%PBAT 组;相较于 2%PE 组,2%PE+ Li^+ 复合处理使 MDA 含量显著升高;2%PBAT+ Li^+ 组与 2%

在根部抗氧化酶活性方面,相较于 CK 组,在 2%PE 处理下 *SOD* 活性显著提高 25.1%,*CAT* 活性显著提高 20.3%;2%PBAT 处理提高了 *SOD* 活性,而对 *POD*、*CAT* 活性无显著影响。而单一 Li^+ 处理及联合处理(2%PE+ Li^+ 和 2%PBAT+ Li^+) 都显著抑制了 *SOD* 活性,并显著提高了 *POD*、*CAT* 的活性,其中 2%PE+ Li^+ 组 *CAT* 活性较 CK 提高 114.6%。

PBAT 比较,MDA 含量显著降低。

图 3B 显示了不同处理对小麦可溶性蛋白含量的影响。与 CK 组相比,2%PE 和 2%PBAT 处理组的可溶性蛋白含量均显著降低;而 Li^+ 处理组的可溶性蛋白含量显著高于 2%PE 和 2%PBAT 处理组。复合处理中,2%PE+ Li^+ 组与 Li^+ 组可溶性蛋白含量差异不显著,均低于 CK,2%PBAT+ Li^+ 组可溶性蛋白含量显著低于 2%PBAT 组。



CK:不添加污染物,对照组;2%PE 组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE 含量为 20 g/kg;2%PBAT 组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料污染组,PBAT 含量为 20 g/kg; Li^+ 组:单一 Li^+ 污染组, Li^+ 含量为 60 mg/kg;2%PE+ Li^+ 组:PE 和 Li^+ 复合污染组,PE 和 Li^+ 含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg;2%PBAT+ Li^+ 组:PBAT 和 Li^+ 复合污染组,PBAT 和 Li^+ 含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 3 微塑料和锂胁迫下小麦植株丙二醛、可溶性蛋白含量

Fig.3 Malondialdehyde and soluble protein contents of wheat plants under microplastics and lithium stress

2.6 不同微塑料与 Li⁺对土壤理化性质的影响

不同微塑料与 Li⁺对土壤理化性质影响有显著差异。如表 3 所示,2%PE 组显著提高了土壤 pH,而 2%PBAT 组和 Li⁺组土壤 pH 分别降至 7.61 和 7.60,显著低于对照组;复合处理中,2%PE+Li⁺组和 2%PBAT+Li⁺组土壤 pH 分别降至 7.36 和 7.46,显

著低于对照组。2%PE+Li⁺组有效钾含量显著低于对照组,2%PBAT+Li⁺组有效钾含量显著高于对照组;CK 有效磷含量最高,其他处理组均显著低于 CK。2%PBAT+Li⁺组有效磷含量最低,为 8.48 mg/kg。2%PBAT 组有效氮含量最高,显著高于 CK,Li⁺组土壤有效氮含量最低,显著低于 CK。

表 3 微塑料和锂(Li)胁迫对土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of microplastics and lithium stress on soil physical and chemical properties

处理组	pH	有效氮含量 (mg/kg)	有效钾含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
CK	7.81±0.02b	26.49±1.48b	59.05±1.97b	11.35±0.19a
2%PE	7.93±0.12a	30.41±2.21ab	61.06±0.70ab	10.47±0.88bc
2%PBAT	7.61±0.01c	31.37±1.67a	60.01±0.28ab	10.58±0.13bc
Li ⁺	7.60±0.05c	24.07±3.01c	60.45±0.23ab	9.05±0.32c
2%PE+Li ⁺	7.36±0.30e	26.01±3.69bc	56.89±0.48c	10.65±0.13b
2%PBAT+Li ⁺	7.46±0.07d	26.52±2.63bc	63.04±1.05a	8.48±0.20d

CK:不添加污染物,对照组;2%PE 组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE 含量为 20 g/kg;2%PBAT 组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料污染组,PBAT 含量为 20 g/kg;Li⁺组:单一 Li⁺污染组,Li⁺含量为 60 mg/kg;2%PE+Li⁺组:PE 和 Li⁺复合污染组,PE 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg;2%PBAT+Li⁺组:PBAT 和 Li⁺复合污染组,PBAT 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2%PBAT 组土壤脲酶活性较 CK 组显著提高 70%;2%PE 组和 Li⁺组土壤脲酶活性与对照差异不显著;复合处理均显著提高了土壤脲酶活性,其中 2%PBAT+Li⁺组升高最明显,较 CK 组提升 133% (图 4A)。所有处理组的土壤蔗糖酶活性均较 CK 显著升高,两个单一处理组之间差异不显著,2%PE+Li⁺组升高最显著,2%PBAT+Li⁺组显著低于 2%PE+Li⁺组(图 4B)。所有处理组的碱性磷酸酶活性均显著高于 CK,2%PE 组碱性磷酸酶活性最低,2%PBAT 组最高;2%PBAT+Li⁺组虽显著高于 Li⁺组,但仍显著低于 2%PBAT 组(图 4C)。其中,所有加入 Li⁺的处理组相比单一微塑料处理组都显著提高了土壤脲酶活性,2%PE+Li⁺处理组的土壤蔗糖酶活性较 2%PE 组显著提高。

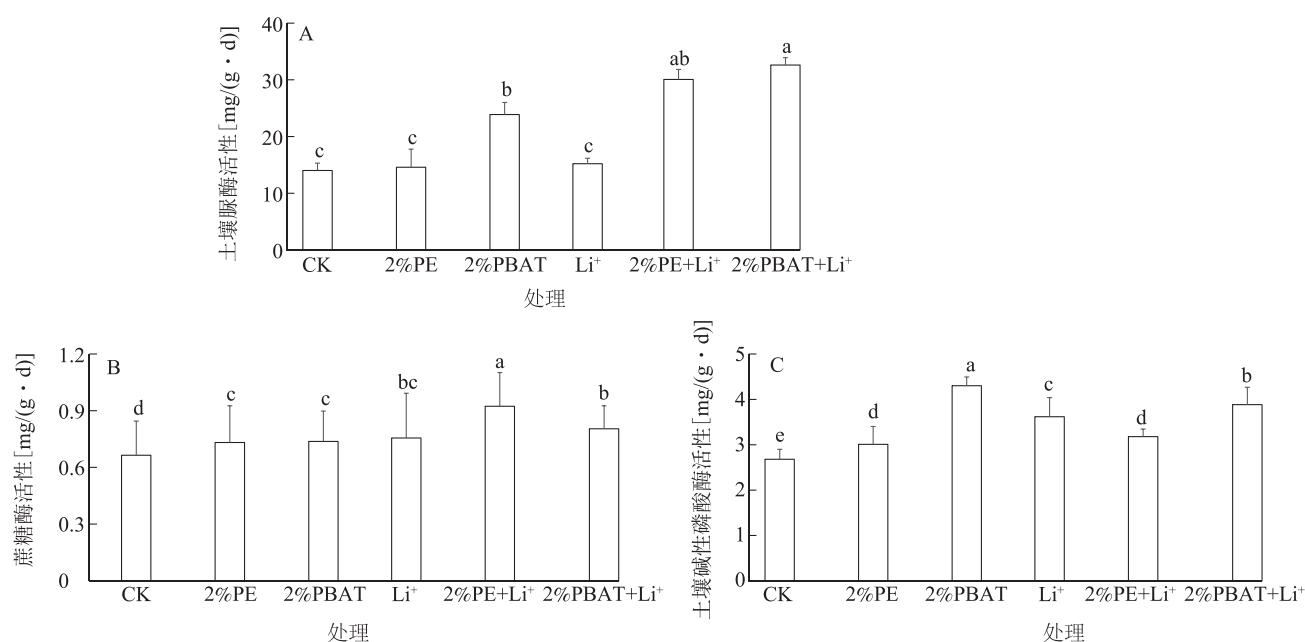
2.7 小麦生理指标与土壤理化性质指标相关性分析

由表 4 可知,叶片长度(LL)与叶片 SOD 活性之间表现出显著的正相关关系,相关系数高达 0.939。根部长度(RL)与土壤速效磷含量(SP)呈显著正相关,相关系数为 0.906。叶片 CAT 活性与土壤蔗糖酶活性(S-SC)呈显著正相关,根部 CAT 活性与根部 POD 活性无显著相关性。此外,土壤碱性磷酸酶(ALP)活性与小麦叶绿素含量(Chl)呈负相关,相关系数为-0.810;土壤脲酶(S-UE)活性与土壤 pH 值

之间也存在显著的负相关关系,相关系数为-0.849。主成分分析结果(图 5)显示,根部 POD、根部 CAT、叶片 CAT、叶片 POD、S-SC、FW 等变量聚集在右上方区域,根部 SOD、pH、AN 等变量分布在左下方区域。生长指标的分布位置与抗氧化酶活性相关变量有所关联,说明小麦的生长状况受到抗氧化系统的影响。pH 的分布位置相对独立,与其他一些变量如根部 SOD 等存在一定关联。

3 讨论

本研究结果表明,微塑料与锂离子(Li⁺)对小麦生长的复合效应差异显著,具体影响取决于二者所采用的处理组合。2%PE 单独处理虽抑制小麦茎叶生长,却显著提高鲜重和干重,可能通过促进生物量积累缓解胁迫效应,这与前人发现 PE 含量依赖性抑制效应存在关联^[19]。Li⁺处理可促进叶片生长而抑制根系发育,可能与其转运分配机制及组织耐受性差异有关^[20]。复合处理中,2%PE+Li⁺处理的小麦根部长度比对照组显著降低,而 2%PBAT+Li⁺处理对整体生长的协同抑制作用尤为显著,表明 PBAT 的降解产物与 Li⁺具有毒性叠加效应。值得注意的是,2%PBAT 在大部分处理中均表现出显著的抑制效应,其降解特性可能带来长期生态风险;



CK:不添加污染物,对照组; 2%PE 组:单一聚乙烯(PE)微塑料污染组,PE 含量为 20 g/kg; 2%PBAT 组:单一聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)微塑料污染组,PBAT 含量为 20 g/kg; Li⁺组:单一 Li⁺污染组,Li⁺含量为 60 mg/kg; 2%PE+Li⁺组:PE 和 Li⁺复合污染组,PE 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg; 2%PBAT+Li⁺组:PBAT 和 Li⁺复合污染组,PBAT 和 Li⁺含量分别为 20 mg/kg 和 60 mg/kg。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 4 微塑料和锂胁迫对土壤酶活性的影响

Fig.4 Effect of microplastics and lithium stress on soil enzyme activities

2%PE 单独处理虽可能通过物理屏障短暂改善生物量,但与 Li⁺联用时产生拮抗效应,这与微塑料-重金属复合污染研究的互作规律存在相似的作用机制^[9]。

微塑料与 Li⁺的复合作用显著抑制了小麦植株对 Li⁺的吸收与转运,其中 2%PBAT 的抑制作用显著强于 2%PE。这可能是因为 PBAT 降解过程中释放的活性物质对植物木质部运输具有干扰作用^[21],而 PE 主要通过改变土壤物理性质降低 Li⁺的生物有效性^[22],从而抑制植株对 Li⁺的吸收与转运。在叶绿素含量方面,单一处理组均显著降低叶绿素含量,而 2%PE+Li⁺复合处理显著提升叶绿素 a 含量和叶绿素总含量,可能因为 PE 缓冲了 Li⁺的毒性,或激活了植物的抗逆机制,这与冯智望等^[23]研究发现的 PE 微塑料与镉离子复合污染条件下,生菜叶片叶绿素含量的变化趋势有一定相似性。

对于抗氧化酶活性, Li⁺通过诱导活性氧(ROS)生成激活部分抗氧化酶, Li⁺处理可诱导小麦叶片 CAT 活性显著增加,但抑制根部 SOD 活性,表明 Li⁺通过活性氧积累引发氧化应激。2%PE 与 2%PBAT

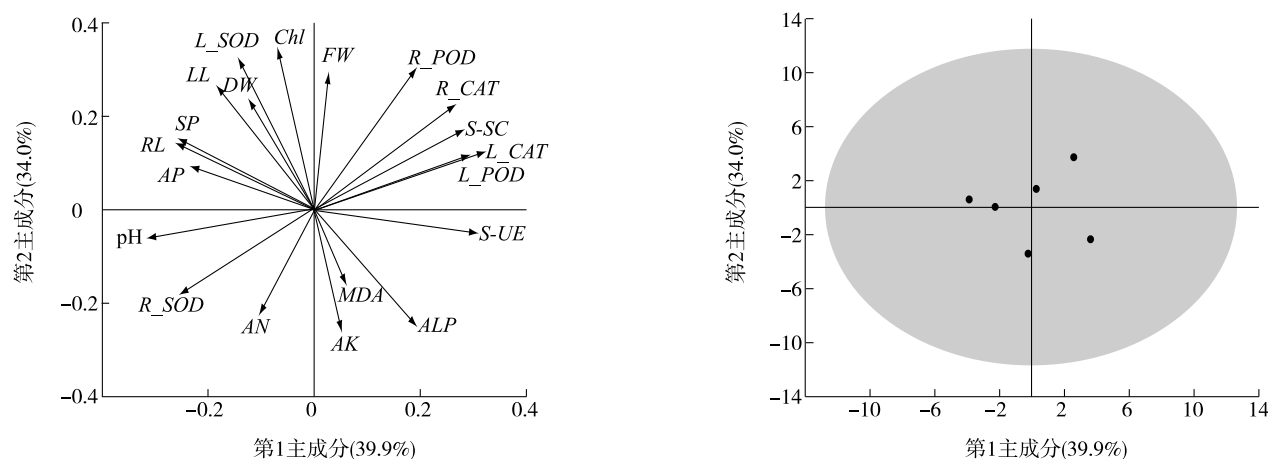
对小麦抗氧化系统的影响呈现差异:2%PE 胁迫主要激活叶片 POD 与根部 CAT 活性,而 2%PBAT 对叶片 SOD 活性有一定抑制作用。Li⁺的添加协同 2%PBAT 使 POD、CAT 活性升高,并协同 2%PE 进一步激活 CAT 活性,表明 Li⁺可能通过调节酶基因表达或稳定性增强植物抗逆性^[24]。此外,小麦叶片与根部对胁迫的响应差异提示,根系可能通过优先分配资源至 CAT 途径应对氧化损伤,而叶片依赖 SOD-POD 协同防御机制^[25]。在 2%PBAT 单独处理下,小麦叶片 MDA 含量最高,氧化损伤最显著,同时可溶性蛋白含量最低,对其合成的抑制作用较大,但与 Li⁺联用时通过交互作用部分缓解毒性,而 2%PE 与 Li⁺的联合效应相对有限。根据邹继颖^[26]的研究结果,推测 PBAT 可能通过吸附 Li⁺或形成络合物减轻其毒性。

在土壤理化性质方面,不同微塑料与锂对土壤理化性质影响显著且具有差异性。2%PE 处理提高土壤 pH,而 2%PBAT 处理和 Li⁺处理分别可能因酸性中间产物或离子交换而降低 pH^[27-28]。结合陈熹等^[28-29]的研究结果分析, Li⁺与微塑料的交互作用进

表4 微塑料与锂处理下土壤理化性质与小麦生理指标之间的相关性分析
Table 4 Correlation analysis between soil physicochemical properties and wheat physiological indices under microplastics and lithium treatment

变量	LL	RL	FW	DW	Chl	L _{SOD}	L _{POD}	L _{CAT}	R _{SOD}	R _{POD}	R _{CAT}	MDA	pH	SP	S-SC	S-UE	ALP	AN	AK	AP
LL	1.000																			
RL	0.556	1.000																		
FW	0.596	-0.031	1.000																	
DW	0.754	0.186	0.861 [*]	1.000																
Chl	0.678	0.637	0.651	0.545	1.000															
L _{SOD}	0.939 [*]	0.534	0.767	0.852 [*]	0.836	1.000														
L _{POD}	-0.217	-0.625	0.353	0.024	0.046	-0.037	1.000													
L _{CAT}	-0.347	-0.506	0.292	-0.182	0.171	-0.140	0.880 [*]	1.000												
R _{SOD}	-0.029	0.264	-0.235	0.133	-0.293	-0.113	-0.822 [*]	-0.820 [*]	1.000											
R _{POD}	0.323	-0.147	0.739	0.341	0.636	0.487	0.679	0.762	-0.782	1.000										
R _{CAT}	-0.035	-0.347	0.590	0.120	0.444	0.185	0.797	0.931 [*]	-0.783	-0.783	1.000									
MDA	-0.145	-0.399	-0.186	-0.305	-0.482	-0.376	-0.238	-0.105	0.137	-0.097	-0.106	1.000								
pH	0.338	0.474	-0.048	0.443	-0.027	0.279	-0.685	-0.878 [*]	0.829 [*]	-0.666	-0.789	-0.274	1.000							
SP	0.710	0.906 [*]	-0.020	0.269	0.553	0.623	-0.485	-0.546	0.112	-0.130	-0.404	-0.417	0.489	1.000						
S-SC	-0.150	-0.467	0.539	0.043	0.302	0.044	0.737	0.916 [*]	-0.687	0.868 [*]	0.972 [*]	0.093	-0.821 [*]	-0.566	1.000					
S-UE	-0.725	-0.580	-0.115	-0.576	-0.197	-0.591	0.579	0.837 [*]	-0.507	0.386	0.667	0.216	-0.849 [*]	-0.749	0.757	1.000				
ALP	-0.562	-0.770	-0.430	-0.585	-0.810	-0.736	0.201	0.196	-0.133	-0.153	-0.009	0.775	-0.473	-0.679	0.156	0.492	1.000			
AN	-0.321	-0.150	-0.190	-0.055	-0.475	-0.389	-0.597	-0.475	0.842 [*]	-0.579	-0.472	0.502	0.422	-0.378	-0.278	-0.046	0.261	1.000		
AK	-0.596	-0.529	-0.496	-0.300	-0.792	-0.614	0.204	-0.085	0.178	-0.571	-0.372	-0.131	0.202	-0.372	-0.354	0.045	0.406	0.145	1.000	
AP	0.433	0.760	0.141	0.247	0.512	0.408	-0.779	-0.505	0.536	-0.120	-0.269	0.067	0.424	0.497	-0.246	-0.385	-0.534	0.391	-0.706	1.000

LL: 叶片长度; RL: 根部长度; FW: 鲜重; DW: 干重; Chl: 叶绿素总含量; L_{SOD}: 叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性; L_{POD}: 叶片过氧化物酶(POD)活性; L_{CAT}: 叶片过氧化氢酶(CAT)活性; R_{SOD}: 根部SOD活性; R_{POD}: 根部POD活性; R_{CAT}: 根部CAT活性; MDA: 丙二醛含量; pH: 土壤pH; SP: 可溶性蛋白含量; S-SC: 土壤蔗糖酶活性; S-UE: 土壤脲酶活性; ALP: 碱性磷酸酶活性; AN: 有效氮含量; AK: 有效钾含量; AP: 有效磷含量。* 代表相应理化性质指标间显著相关(P<0.05)。



LL: 叶片长度; RL: 根部长度; FW: 鲜重; DW: 干重; Chl: 叶绿素总含量; L_SOD: 叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; L_POD: 叶片过氧化物酶 (POD) 活性; L_CAT: 叶片过氧化氢酶 (CAT) 活性; R_SOD: 根部 SOD 活性; R_POD: 根部 POD 活性; R_CAT: 根部 CAT 活性; MDA: 丙二醛含量; pH: 土壤 pH; SP: 可溶性蛋白含量; S-SC: 土壤蔗糖酶活性; S-UE: 土壤脲酶活性; ALP: 碱性磷酸酶活性; AN: 有效氮含量; AK: 有效钾含量; AP: 有效磷含量。

图5 微塑料与锂离子 (Li^+) 处理下土壤理化性质与小麦生理指标之间的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis between soil physicochemical properties and wheat physiological indices under microplastics and lithium treatment

一步扰乱土壤固定态铵的释放,影响小麦氮素利用效率。PE 主要通过物理或化学作用缓解部分 Li^+ 效应,而 PBAT 因降解特性在复合胁迫中多表现为协同抑制或毒性增强。在土壤酶活性方面,微塑料对土壤酶活性均有促进作用,与 Li^+ 联用时对土壤脲酶和土壤蔗糖酶活性的协同促进作用更显著;2% PBAT 处理相对 2%PE 处理对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性的促进作用更显著。2%PBAT 和 Li^+ 的协同效应可能源于 PBAT 降解产物螯合 Li^+ ,降低其生物毒性,同时为微生物提供额外碳源,增强其耐污能力^[30-31]。其中,所有加入 Li^+ 的处理组相比单一微塑料处理组都显著提高了脲酶、蔗糖酶活性,并降低了碱性磷酸酶活性,这可能是双重胁迫触发微生物代谢补偿效应,刺激蔗糖酶加速碳源分解以应对能量需求^[32],显著提升铵态氮含量,抑制硝化作用,导致脲酶活性比微塑料单独处理有所提升^[9],同时通过磷限制诱导碱性磷酸酶的分泌,使碱性磷酸酶活性下降^[33]。

从相关性矩阵热图可以看出,在微塑料与 Li^+ 复合胁迫下,土壤理化性质与小麦生理指标间存在显著相关关系,反映了土壤-植物系统的协同响应机制,小麦鲜重 (FW) 与干重 (DW) 呈显著正相关 ($r=0.861$),表明生物量积累过程中水分吸收与干物质

合成的一致性未被胁迫打破,这与低浓度微塑料处理下小麦生物量指标同步升高的研究结论^[19,34]相符;叶片 SOD 活性 (L_{SOD}) 与叶片长度 (LL) 呈显著正相关 ($r=0.939$),叶片 CAT 活性 (L_{CAT}) 与根部 CAT 活性 (R_{CAT}) 呈显著正相关 ($r=0.931$),这反映了抗氧化系统在根与叶组织间的分区响应与功能协同,与微塑料胁迫下小麦抗氧化酶活性同步变化的特征^[19,35]一致;根部 CAT 活性 (R_{CAT}) 与蔗糖酶活性 (S-SC) 呈显著正相关 ($r=0.972$),体现根系生理与土壤碳循环的紧密耦合^[19,36];叶片 SOD 活性 (L_{SOD}) 与叶片长度 (LL, $r=0.939$)、干重 (DW, $r=0.852$) 呈显著正相关,与叶绿素总含量呈正相关, SOD 作为核心抗氧化酶,能减少对细胞结构和代谢过程的活性氧损伤^[34],既为叶片伸长 (LL 增加) 和干物质积累 (DW 提升) 提供了稳定的生理环境^[37],又能保护光合色素免受氧化破坏,保障光合系统功能正常^[38];叶片 POD 活性 (L_{POD}) 与叶片 CAT 活性 (L_{CAT}) 呈显著正相关 ($r=0.880$), L_{POD} 与 L_{CAT} 作为叶片中核心的过氧化氢清除酶,在复合胁迫诱导活性氧大量积累时同步激活、协同作用,共同减少 H_2O_2 对叶片细胞的氧化损伤,这与微塑料与重金属复合污染下小麦叶片 POD 和 CAT 活性显著升高且交互效应显著的研究结论一致^[39]。

4 结 论

(1) 2%PE 处理会抑制小麦根系发育,但因此激活了抗氧化防御系统,维持了部分光合色素的稳定性并促进生物量积累。2%PBAT 处理及其与 Li^+ 复合处理全面抑制小麦生长,导致叶绿素含量趋近于 0,显著提升 MDA 含量。PE 处理与 PBAT 处理均显著改变小麦对 Li^+ 的吸收转运;2%PBAT 处理使叶片和根部 Li^+ 含量分别降低最显著。

(2) 2%PBAT 处理显著提高土壤脲酶和碱性磷酸酶活性;2%PBAT 与 Li^+ 复合处理导致土壤 pH 降低和有效磷耗竭。2%PE 处理维持较高土壤 pH 和有效氮水平。

(3) 抗氧化系统指标(如叶片 SOD 活性)与生长指标(如 LL、FW 等)呈正相关。叶片 CAT 活性(L_CAT)与根部 CAT 活性(R_CAT)呈显著正相关。在微塑料与 Li^+ 复合胁迫下,小麦通过整合抗氧化酶系统与土壤碳代谢的跨组织协同防御机制保护光合功能和生物量积累。 Li^+ 的添加加剧了 PBAT 对小麦生长的抑制效应,但制约了 PE 的抑制效应。PBAT 处理较 PE 处理对小麦生长表现出更强的抑制效应。

参考文献:

- [1] KANG H M, BYEON E, JEONG H, et al. Different effects of nano- and microplastics on oxidative status and gut microbiota in the marine medaka *Oryzias melastigma* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405: 124207.
- [2] WU X, HOU H J, LIU Y, et al. Microplastics affect rice (*Oryza sativa* L.) quality by interfering metabolite accumulation and energy expenditure pathways; a field study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126834.
- [3] 于 扬,王登红,王 伟,等. 不同地质环境中锂的分布特征及生态、环境与生物健康效应[J]. *中国地质*, 2025, 52(2): 727-744.
- [4] BING S S, XIAN W P, CHEN S F, et al. Bio-inspired construction of ion conductive pathway in covalent organic framework membranes for efficient lithium extraction [J]. *Matter*, 2021, 4(6): 2027-2038.
- [5] 杨 帆,张彦军,张蓓蓓. 微塑料对小麦幼苗生长、叶绿素含量及光系统 II 的影响[J]. *陕西农业科学*, 2025, 71(3): 37-44.
- [6] 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.
- [7] XU Z N, PENG S, PEI L Y, et al. Integrated analysis of pollution characteristic and ecotoxicological effect reveals the fate of lithium

- in soil-plant systems; a challenge to global sustainability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(35): 15755-15765.
- [8] 吴嘉煜,米 楠. 重金属对植物抗氧化酶影响研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(6): 1177-1181, 1304.
- [9] XU Z N, ZHANG Z Q, PENG S, et al. Influences of lithium on soil properties and enzyme activities [J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137458.
- [10] 肖建勇,刘月仙. 微塑料与镉对白菜生长及生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(11): 2887-2898.
- [11] 翟建强,荀金标,席修省. 济麦 22 号的特征特性及高产栽培要点 [J]. *农业工程技术*, 2020, 40(8): 56.
- [12] 刘晓红,刘柳青青,栗 敏,等. 不同粒径的聚乙烯微塑料对玉米和黄瓜种子发芽和幼苗生长的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1263-1271.
- [13] 徐 伟,季索菲. 提取方法对叶绿素含量的影响 [J]. *廊坊师范学院学报(自然科学版)*, 2022, 22(4): 56-59.
- [14] 孔祥生,易现峰. 植物生理学实验技术 [M]. 北京:中国农业出版社, 2008: 257-260.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [16] ZHANG C, LIU F, KONG W W, et al. Application of visible and near-infrared hyperspectral imaging to determine soluble protein content in oilseed rape leaves [J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 16576-16588.
- [17] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法 [M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- [18] 韩 晓,方 迪. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定岩矿中锂的含量 [J]. *中国无机分析化学*, 2021, 11(2): 36-39.
- [19] 丰晨晨. 聚乙烯和聚丙烯微塑料对小麦生长及土壤特性影响研究 [D]. 郑州:河南农业大学, 2024.
- [20] MACEDO F G, DOS SANTOS VARGAS E, MOREIRA A É B, et al. Understanding the effects of lithium exposure on *Castor bean* (*Ricinus communis*) plants, a potential bioindicator of lithium-contaminated areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(39): 51991-52000.
- [21] 胡榆杰,伍 钧,杨 刚,等. 不同微塑料对水稻土性质、镉有效性及其形态的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(8): 1721-1728.
- [22] 何 睿. 聚乙烯(PE)微塑料对土壤重金属 Cd 形态及生物有效性的影响研究 [D]. 雅安:四川农业大学, 2022.
- [23] 冯智望,刘 棋,吴汉洲,等. 微塑料对土壤性质、镉有效性及生菜中镉积累量的影响 [J]. *环境科学*, 2025, 46(5): 3171-3178.
- [24] 张乐欢,邹昌玉,朱天翔,等. 茉莉酸在植物抗逆性中的研究进展 [J]. *生物工程学报*, 2024, 40(1): 15-34.
- [25] 郭祖国,王孟鑫,崔 林,等. 植物防御酶在应对害虫胁迫中的潜在机制研究进展 [J]. *中国应用生态学杂志*, 2018, 29(12): 4248-4258.
- [26] 邹继颖. 微塑料对典型有机污染物和重金属离子的吸附及机

- 理研究[D]. 长春:东北师范大学,2021.
- [27] PANG W L, LI B, WU Y F, et al. Upgraded recycling of biodegradable PBAT plastic: efficient hydrolysis and electrocatalytic conversion[J]. Chemical Engineering Journal,2024,486:150342.
- [28] 陈 熹,马 琮,陶宗娅,等. 微塑料对小麦农艺性状及氮素利用效率的影响[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2020,43(5):664-670.
- [29] 石梦玄,李昊欣,周鹏宇,等. 不同温度条件下微塑料浓度和粒径对农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报,2025,62(3):651-665.
- [30] 裴雯玉,江雨韩,李 娜,等. 可降解 PLA/PBAT 塑料的微生物菌群结构研究[J]. 安徽农业科学,2024,52(4):57-61,70.
- [31] 马映超,刘 峻,章若红,等. 微生物响应 PBAT-PLA 生物降解膜袋工业需氧堆肥降解机制[J]. 农业工程学报,2021,37(24):224-231.
- [32] 刘沙沙,秦建桥,吴贤格. 微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响[J]. 环境科学,2024,45(1):496-507.
- [33] 王秋颖. 碱性磷酸酶特性及其应用的研究进展[J]. 中国畜牧兽医,2011,38(1):157-161.
- [34] 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.
- [35] ZHANG K, WANG M G, LI Y, et al. Wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings performance mainly affected by soil nitrate nitrogen under the stress of polyvinyl chloride microplastics[J]. Scientific Reports,2024,14:4962.
- [36] NEUBERT K J, BRÜGGEMANN N. Soil texture modifies the impact of microplastics on winter wheat growth[J]. Journal of Soils and Sediments,2025,25(4):1340-1357.
- [37] HAN Z W, OSMAN R, LIU Y, et al. Analyzing the impacts of cadmium alone and in co-existence with polypropylene microplastics on wheat growth[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:1240472.
- [38] KUMARI S, MAHAJAN M, NASEEM K, et al. Dopamine regulates nitric oxide biosynthesis, optimizes carbon utilization, and maintains potassium retention to support wheat productivity under salt stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2025,230:110931.
- [39] 陈 悦,程海宽,陈富鹏,等. 基于 PLS 模型的镉与微塑料复合污染对冬小麦植株生理和土壤理化性质影响[J]. 环境科学,2025,46(3):1815-1830.

(责任编辑:陈海霞)