

聚丙烯微塑料添加对大豆和花生生长及生理生态特征的影响

江俊涛, 陈宏伟, 阎薪竹, 邓娇娇, 魏占波, 周旺明, 周莉, 于大炮, 王庆伟

引用本文:

江俊涛, 陈宏伟, 阎薪竹, 邓娇娇, 魏占波, 周旺明, 周莉, 于大炮, 王庆伟. 聚丙烯微塑料添加对大豆和花生生长及生理生态特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 761-768.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

水土环境中微塑料对磷的吸附行为

李旺, 祖波, 冉典容, 黄银权, 李嘉雯

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1758-1764 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0284>

微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响

连加攀, 沈玖玖, 刘维涛

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

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

农业环境科学学报. 2023, 42(2): 263-273 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0473>

重金属存在下微塑料对环丙沙星的吸附特征及机制研究

刘迪, 童非, 高岩, 卢信, 樊广萍, 张娅香, 张振华

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1017-1025 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1350>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

江俊涛, 陈宏伟, 阎薪竹, 等. 聚丙烯微塑料添加对大豆和花生生长及生理生态特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 761–768.

JIANG J T, CHEN H W, YAN X Z, et al. Effects of polypropylene microplastics on the growth and ecophysiological characteristics of soybean (*Glycine max*) and peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 761–768.

聚丙烯微塑料添加对大豆和花生生长及生理生态特征的影响

江俊涛^{1,2}, 陈宏伟¹, 阎薪竹³, 邓娇娇², 魏占波^{2,4}, 周旺明², 周莉², 于大炮², 王庆伟^{2*}

(1. 沈阳大学生命科学与工程学院, 沈阳 110044; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; 3. 东北大学秦皇岛分校, 河北 秦皇岛 066001; 4. 中国科学院绿色肥料工程实验室, 沈阳 110016)

摘要:农田微塑料污染对作物生长存在显著影响,但不同功能类型作物的生理生态、产量及品质对土壤微塑料的响应尚不清楚。鉴于此,本研究选取我国农业生产的两大主要作物大豆(地上结实)和花生(地下结实)为试验材料,并设置对照组(无添加)和实验组(添加0.40%的聚丙烯微塑料)进行大田原位试验。结果表明:微塑料添加与作物结实类型二者的交互作用对作物的生长与生理生态特征存在显著影响,主要体现在作物的整株形态结构、生物量积累与分配及籽粒品质。微塑料添加显著降低两种作物的总生物量、地上生物量、相对生长速率和百粒重,大豆降幅分别为13.61%、14.07%、13.23%和7.84%,花生降幅分别为17.10%、18.64%、16.12%和11.98%。此外,微塑料添加显著降低花生的地下生物量、可溶性糖含量和大豆的叶绿素含量,降幅分别为15.77%、25.51%和5.74%,与之相反,微塑料添加增加大豆的叶面积比值和可溶性糖含量,增幅分别为28.07%和25.82%。由此可见,聚丙烯微塑料添加对两种作物的生长和产量均有抑制作用,对花生的影响尤为明显。

关键词:聚丙烯微塑料;结实类型;功能性状;生物量积累;生理响应;籽粒品质

中图分类号:X505;X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)04-0761-08 doi:10.11654/jaes.2022-1035

Effects of polypropylene microplastics on the growth and ecophysiological characteristics of soybean (*Glycine max*) and peanut (*Arachis hypogaea* L.)

JIANG Juntao^{1,2}, CHEN Hongwei¹, YAN Xinzhu³, DENG Jiaojiao², WEI Zhanbo^{2,4}, ZHOU Wangming², ZHOU Li², YU Dapao², WANG Qingwei^{2*}
(1. College of Life Science and Bioengineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066001, China; 4. Engineering Laboratory for Green Fertilizer, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Although microplastic pollution of farmland has significant effects on crop growth, data regarding the responses of the physiological and ecological characteristics, yield, and quality of different functional types of crops to soil microplastics are limited. Therefore, we selected two major crop species, *Glycine max* (aboveground-bearing) and *Arachis hypogaea* L. (belowground-bearing), as the plant materials and carried out an *in situ* addition experiment of polypropylene microplastics (0%, 0.4% addition). Our results demonstrated that the interaction between microplastics and crop type had a significant impact on the growth and physiological and ecological characteristics of the crops, especially on the morphological structure of the whole plant, biomass accumulation and distribution,

收稿日期:2022-10-17 录用日期:2022-12-08

作者简介:江俊涛(1996—),女,河北邯郸人,硕士研究生。E-mail:jjt156136@163.com

*通信作者:王庆伟 E-mail:wangqingwei@iae.ac.cn

基金项目:农业农村部种植业管理司项目(Y9HX01L)

Project supported: Project of Planting Management Department of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China(Y9HX01L)

and grain quality. The addition of polypropylene microplastics significantly reduced the total biomass, aboveground biomass, relative growth rate, and 100-grain weight of both crops, with soybean decreasing by 13.61%, 14.07%, 13.23%, and 7.84% respectively, and peanut decreasing by 17.10%, 18.64%, 16.12%, and 11.98%, respectively. Moreover, the addition of polypropylene microplastics clearly reduced the belowground biomass and the soluble sugar content of peanut, and the chlorophyll content of soybean by 15.77%, 25.51%, and 5.74%, respectively. On the contrary, the addition of polypropylene microplastics increased the leaf area ratio and soluble sugar content of soybean by 28.07% and 25.82%, respectively. It can be seen that the addition of polypropylene microplastics had major adverse effects on the growth and yield of both crops, but especially on peanut. This study provides key data supporting the impact of soil microplastic pollution on crop yield and quality, and also provides a theoretical basis for future breeding of superior varieties.

Keywords: polypropylene microplastic; bearing type; functional trait; biomass accumulation; physiological response; grain quality

作为一种新型环境污染物,微塑料(microplastics)在土壤环境中的分布及其生物学效应是当前生态、农业和环境科学研究的热点问题之一^[1]。微塑料通常指粒径小于5 mm的塑料颗粒^[2]、碎片、纤维及薄膜等^[3],农田土壤微塑料主要来源于农田地膜覆盖^[4]、污泥填埋^[5]、堆肥^[6]、灌溉^[6]、大气沉积^[7]及汽车轮胎的磨损^[8]等。以往微塑料的相关研究主要集中在海洋^[9]、河流^[10]、湖泊^[11]及河口^[12]等水域生态系统,近年来有关陆地生态系统微塑料污染问题的研究也日益增多。塑料制品和农田薄膜的大量使用,导致微塑料碎片或颗粒在土壤环境中大量累积,每年进入土壤的微塑料量甚至比海洋环境高出4~23倍^[13],严重威胁陆地生态系统健康和粮食安全,受到全球的高度关注。在2016年的第二届联合国环境大会中,微塑料污染问题被列入全球环境与生态研究领域第二大科学问题^[14]。

近些年农田土壤中的微塑料污染问题引起各国学者的广泛关注^[15]。目前,农田土壤微塑料的类型主要包括聚丙烯(polypropylene, PP)、聚乙烯(polyethylene, PE)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)和聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等,其中,聚丙烯微塑料(PP-MPs)在农田中占比较高^[16]。Hu等^[17]发现PP-MPs在我国30个农田中总体占比可高达65.96%,微塑料不易降解,进入土壤后可长期存在并不断积累,达到一定浓度则会改变土壤理化性质,影响土壤微生物多样性及作物对水肥的利用效率,从而直接或间接调控作物生长发育^[18-19]。研究结果表明,PP-MPs添加能够抑制地下结实作物胡萝卜根生物量积累^[20],然而,其对地上结实作物番茄等根长及根生物量影响较小^[21-22]。此外,土壤微塑料的存在能够显著改变作物体内可溶性蛋白和可溶性糖等营养成分的含量^[23]。以上研究结果表明,土壤微塑料污染能够显著改变作物的生长、产量和品质,其影响程度可能与作物结实类型直接相关,但目前微塑料对于不同结实类型作物响应特征的比较研究尚未开展。

鉴于此,本研究以地上结实作物大豆(*Glycine max*)和地下结实作物花生(*Arachis hypogaea* L.)为研究材料,选用农田土壤中占比较高的PP-MPs,采用大田原位实验,探究大豆和花生的形态、生长、生理生化及籽粒品质对PP-MPs添加的响应特征,为准确评估PP-MPs污染对不同功能类型的作物生长、产量和品质影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

实验样地位于中国科学院沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站,地处沈阳南郊的苏家屯区十里河镇(41°32' N, 122°23' E),平均海拔41 m。属于温带半湿润大陆性季风气候,雨热同期,四季分明。年均气温为7~8℃,年平均降水量650~700 mm,年总辐射量为504~567 kJ·cm⁻²,土壤的类型为潮棕壤^[24]。

1.2 供试植物材料

供试作物大豆(冬豆88)和花生(白沙308)的种子均采购于辽宁富友种业有限公司。

1.3 供试微塑料材料

PP-MPs采购于泰利化纤制品有限公司,微塑料纤维的长度为3.00±0.03 mm,直径约30 μm。

1.4 试验设计

田间试验采用双因素设计,因素1为作物种类,即大豆和花生;因素2为微塑料添加处理,共设2个水平,即不施加PP-MPs的对照组(标记为CK)和施加0.40%(微塑料的质量与土壤质量的比值)PP-MPs的试验组,微塑料添加的浓度参考Lozano^[25],共4个处理,每个处理4个重复,采用随机区组设计,共16个小区,每个小区的面积为1 m×1 m。微塑料添加前将所有小区内0~20 cm的表层土取出,随机选取8个小样方添加PP-MPs,PP-MPs与表层土混匀后(8个对照组仅将取出的表层土混匀),重新回填至各小区。

试验于2021年6月初至10月初进行,每个小区

内设置9穴,作物的种植方式为穴播,每穴播种5粒种子,出苗后每穴定植一株。定期管理维护,包括田间除草,追施肥料(纯硫酸钾型复合型肥料,N-P₂O₅-K₂O为12-18-15等。

1.5 测定方法

生理生化指标:2021年8月27日天气晴朗,于9:00—11:00及13:00—15:00,使用便携式荧光仪(型号MINI-PAM-II,Heinz-Walz公司,德国)测定光系统II的最大光能转换效率(F_v/F_m)和光系统II的实际光能转换效率[Y(II)];使用Dualect植物氮平衡指数测量仪(型号FORCE-A,Orsay,法国)测定叶片的叶绿素含量(Chl)和类黄酮含量(Flav)。

植株形态指标:使用刚卷尺和游标卡尺测量大豆和花生的株高和地径;用CanoScan图像扫描仪对叶片进行扫描,使用Fiji软件计算叶面积;将扫描后的叶片放入烘箱烘干至质量恒定;植株的叶面积比值(SLA)按以下公式计算:

$$SLA = \text{叶片面积}(\text{cm}^2) / \text{叶片干质量}(\text{g})$$

生长指标:作物成熟后,将其根、茎、叶、果实各部分分离,清洗干净后置于烘箱烘干至质量恒定,计算大豆和花生的地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比及相对生长速率,采用下列公式计算根冠比和相对生长速率(RGR):

$$\text{根冠比} = \text{地下生物量}(\text{g}) / \text{地上生物量}(\text{g})$$

$$RGR = (M_2 - M_1) / (\ln M_2 - \ln M_1)$$

式中:M₁代表初始样品总生物量;M₂代表成熟期样品总生物量。

籽粒品质:随机称取烘干后的大豆和花生种子100粒,计算百粒重;采用蒽酮比色法测定籽粒中的淀粉及可溶性糖含量^[26];采样凯氏定氮法测定籽粒中的粗蛋白含量^[27]。

1.6 数据处理

使用广义线性模型(GLM: Generalized Linear Models)分析PP-MPs添加、作物类型(大豆和花生)及其交互作用对植株形态、生长、生理生化指标及籽粒品质的影响,选用独立样本T检验进一步分析微塑料添加对大豆和花生的影响,并使用主成分分析(PCA)分析微塑料添加下作物性状的响应格局。统计分析使用SPSS完成,使用OriginPro(2021)绘图。

2 结果与分析

2.1 作物形态对PP-MPs添加的响应

PP-MPs添加与作物类型的交互作用对作物的株高和叶面积比值均存在显著影响($\chi^2=4.80, P=0.03$; $\chi^2=4.47, P=0.03$ 。表1)。PP-MPs添加显著降低花生植株的株高,降幅为2.64%,对大豆的株高无显著影

表1 聚丙烯微塑料添加对大豆和花生主要功能性状和生长的影响

Table 1 Response of functional traits of soybean and peanut to the polypropylene microplastics addition

分类 Category	指标 Index	微塑料 Microplastic(M)		物种 Specy(S)		交互作用 M×S	
		χ^2	P	χ^2	P	χ^2	P
植株形态 Plant morphology	株高 Plant height	0.42	0.52	6 463.91	<0.01	4.80	0.03
	地径 Basal diameter	0.02	0.90	906.86	<0.01	3.33	0.07
	叶面积比值 Specific leaf area	5.04	0.03	0.02	0.90	4.47	0.03
生长与生物量积累 Growth and biomass accumulation	地上生物量 Aboveground biomass	12.43	<0.01	696.70	<0.01	3.12	0.08
	地下生物量 Belowground biomass	14.57	<0.01	1 513.19	<0.01	14.54	<0.01
	根冠比 Root-shoot ratio	0.47	0.49	717.74	<0.01	0.30	0.58
	总生物量 Total biomass	17.34	<0.01	276.31	<0.01	0.72	0.40
	相对生长速率 Relative growth rate	34.22	<0.01	303.42	<0.01	0.56	0.46
生理生化 Physiology and biochemistry	F_v/F_m	1.82	0.18	0.03	0.87	1.16	0.28
	Y(II)	2.42	0.12	2.15	0.14	1.86	0.17
	叶绿素 Chlorophyll	1.23	0.27	601.47	<0.01	9.03	<0.01
	类黄酮 Flavonoid	0.86	0.35	15.00	<0.01	2.82	0.09
品质 Quality	百粒重 100-grain weight	33.37	<0.01	470.38	<0.01	5.50	0.02
	可溶性糖 Soluble sugar	1.73	0.19	269.02	<0.01	41.83	<0.01
	淀粉 Starch	3.82	0.05	9.36	<0.01	1.20	0.27
	粗蛋白 Crude protein	2.87	0.09	630.03	<0.01	1.56	0.21

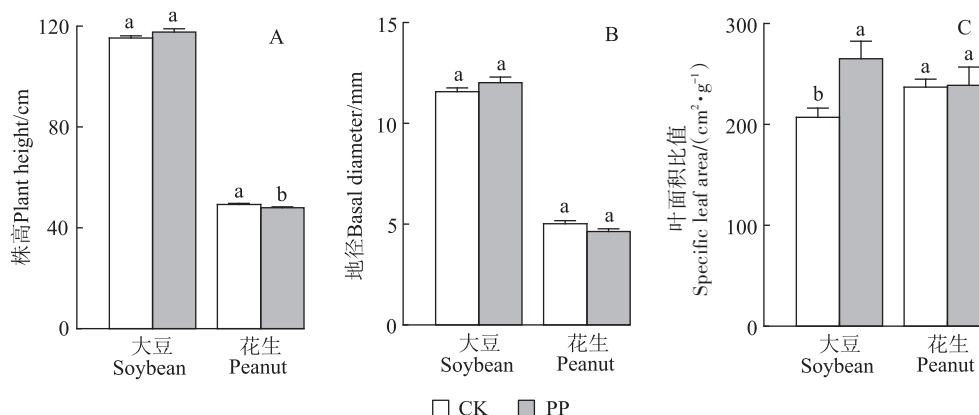
注: χ^2 ,比较理论频数和实际频数的吻合程度或拟合优度。
Note: χ^2 ,compare the degree of coincidence or goodness of fit between the theoretical frequency and the actual frequency.

响(图1A);PP-MPs添加对大豆和花生的地径均无显著影响;PP-MPs添加显著增加了大豆的叶面积比值,增幅为28.07%,但对花生的叶面积比值无显著影响(图1C)。

2.2 作物生长和生物量积累对PP-MPs的响应

PP-MPs添加对作物的生物量积累和生长速率均存在显著影响(表1),与对照相比,PP-MPs添加显著

降低大豆的地上生物量、总生物量和相对生长速率,降幅分别为14.07%、13.61%和13.23%;同样,PP-MPs添加显著降低花生的地上生物量、总生物量和相对生长速率,降幅分别为18.64%、17.10%和16.12%(图2A、图2C、图2E)。此外,PP-MPs添加与作物类型的交互作用对作物的地下生物量存在显著影响($\chi^2 = 14.54, P < 0.01$),PP-MPs添加显著降低了花生地下生



不同字母表示同一作物在不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different letters indicate significant difference between treatments within one crop species ($P < 0.05$). The same below.

图1 大豆和花生植株形态对PP-MPs添加的响应

Figure 1 Morphological response of soybean and peanut to the polypropylene microplastic addition

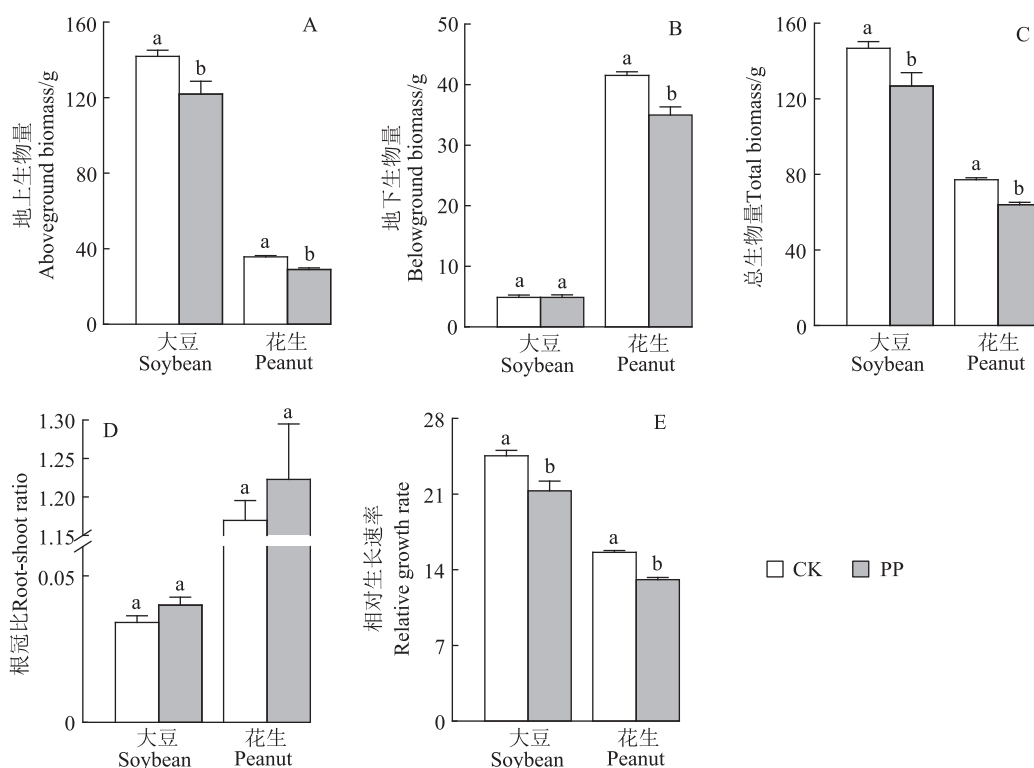


图2 大豆和花生植株生长与生物量分配对PP-MPs添加的响应

Figure 2 Response of growth and biomass allocation of soybean and peanut to the polypropylene microplastic addition

物量积累,降幅为15.77%,但对大豆的地下生物量无显著影响(图2B)。PP-MPs添加对大豆和花生的根冠比无显著影响(图2D)。

2.3 作物叶片生理生化特征对聚丙烯微塑料添加的响应

PP-MPs添加与作物类型的交互作用对作物的叶绿素含量存在显著影响($\chi^2=9.03, P<0.01$, 表1)。PP-MPs添加显著降低大豆的叶绿素含量,降幅为5.74%,但对花生的叶绿素含量无显著影响(图3-C)。此外,PP-MPs添加对大豆和花生叶片的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 及类黄酮含量均无显著影响(图3A、图3B、图3D)。

2.4 作物籽粒品质对PP-MPs添加的响应

PP-MPs添加显著降低了大豆与花生籽粒的百粒重,降幅分别为7.84%和11.98%(图4A)。此外,PP-MPs添加与作物类型的交互作用对作物籽粒的百粒重和可溶性糖含量存在显著交互作用($\chi^2=5.50, P=0.02$; $\chi^2=41.83, P<0.01$, 表1), PP-MPs添加

显著提高了大豆籽粒可溶性糖含量,增幅为25.82%;与之相反,PP-MPs添加降低了花生籽粒可溶性糖含量,降幅为25.51%(图4B)。PP-MPs添加对大豆和花生的淀粉和粗蛋白含量无显著影响(图4C、图4D)。

2.5 作物功能性状对PP-MPs添加响应的分异特征

主成分分析结果表明,第一主成分的贡献率为73.40%,第二主成分的贡献率为10.60%,前两个主成分的累计贡献率为84.00%,表明仅第一主成分和第二主成分即可以较好地解释各个指标的变化。地上生物量、株高、地径、粗蛋白、地下生物量、总生物量、相对生长速率及根冠比与第一序轴显著相关,说明以上因子是反映作物功能性状对PP-MPs添加响应的重要指标(图5)。大豆和花生两种作物对应的点分别投影在PCA二维平面的两侧,表明整体上花生和花生功能性状对PP-MPs添加的响应存在显著差异。

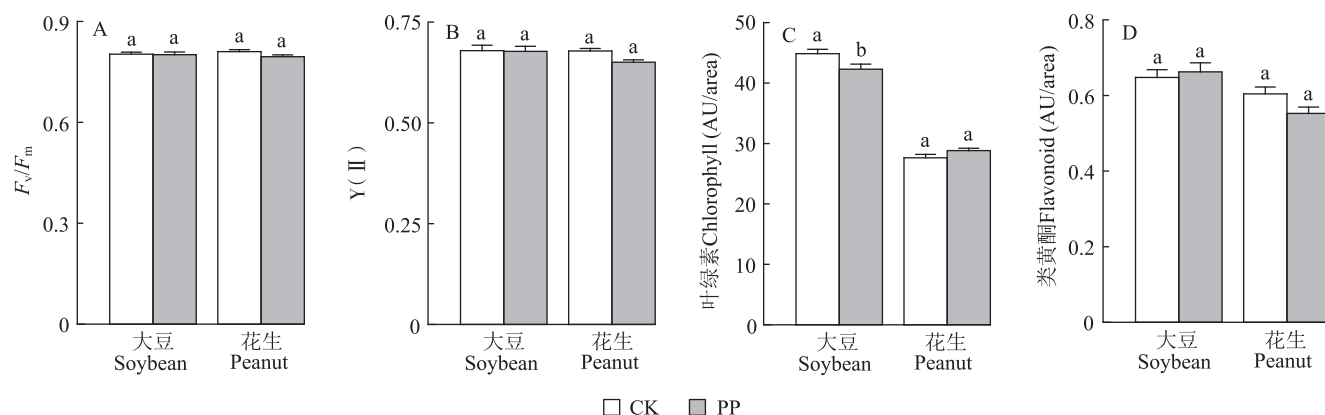


图3 大豆和花生生理生化性状对PP-MPs添加的响应

Figure 3 Response of physiological and biochemical traits of soybean and peanut to the polypropylene microplastic addition

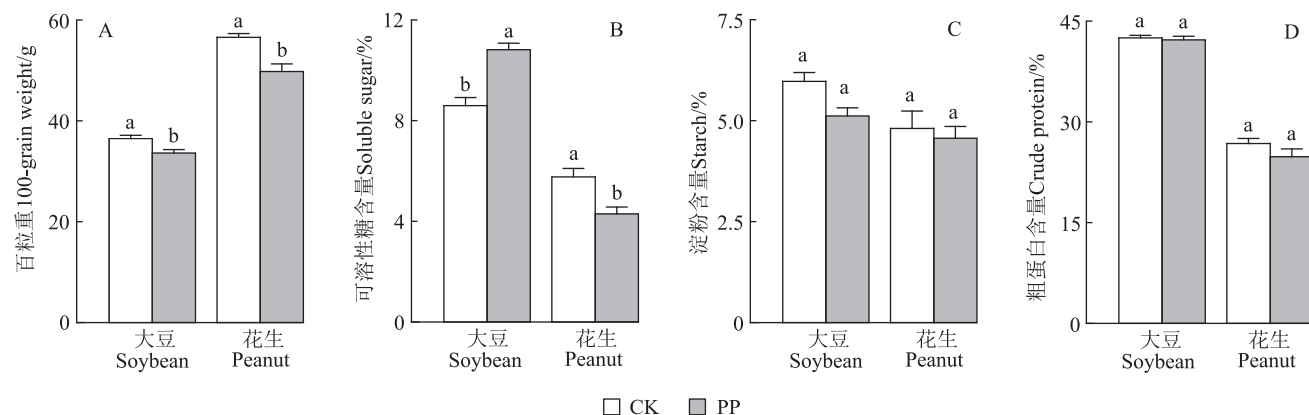
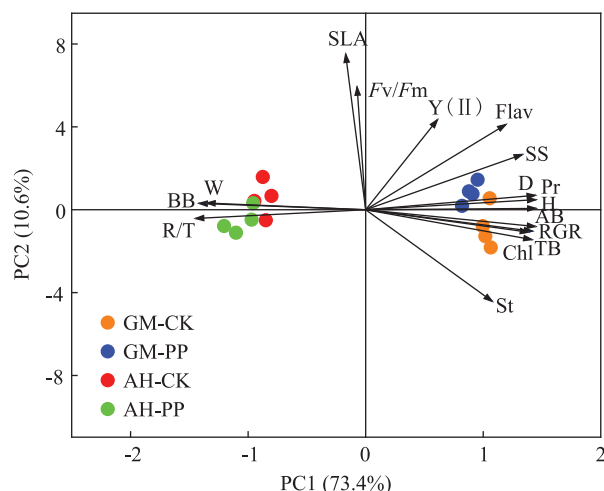


图4 大豆和花生籽粒品质对PP-MPs添加的响应

Figure 4 Response of grain quality of soybean and peanut to the polypropylene microplastic addition



H, 株高; D, 地径; SLA, 叶面积比值; AB, 地上生物量; BB, 地下生物量; R/T, 根冠比; TB, 总生物量; RGR, 相对生长速率; Chl, 叶绿素; Flav, 类黄酮; W, 百粒重; SS, 可溶性糖; St, 淀粉; Pr, 粗蛋白。GM, 大豆; AH, 花生。

H, plant height; D, basal diameter; SLA, specific leaf area; AB, aboveground biomass; BB, belowground biomass; R/T, root-shoot ratio; TB, total biomass; RGR, relative growth rate; Chl, chlorophyll; Flav, flavonoid; W, 100-grain weight; SS, soluble sugar; St, starch; Pr, crude protein. GM, *Glycine max*; AH, *Arachis hypogaea*.

图5 作物功能性状对PP-MPs添加响应的主成分分析

Figure 5 PCA among responses of crop functional traits to the polypropylene microplastic addition

3 讨论

3.1 PP-MPs添加对大豆和花生生长和植株形态特征的影响

PP-MPs添加显著影响作物生长、生物量积累以及植株形态的表达(表1、图5)。本研究所使用的两种作物在相对生长速率和总生物量积累方面表现一致,均显著降低(图2C、图2E),该结果证实了农田土壤微塑料污染能够对作物生长产生一定的负面影响^[28]。其中主要的作用机理可能是由于土壤中的PP-MPs包裹在作物地下部分的表面,阻塞作物的细胞壁孔洞,阻碍作物对水分和营养物质的吸收及转运^[29],从而抑制大豆和花生的生长速度及生物量积累。值得注意的是,PP-MPs的添加显著降低花生的地下生物量,但对大豆的地下生物量无显著影响,这一差异的产生可能与作物的结实类型有关,PP-MPs仅聚集在大豆根部,但可以聚集在花生的根和果实处,而花生的果实在前期(果针、荚果)同样具有从土壤中吸收水分和营养物质的功能^[30],因此与大豆相比,PP-MPs添加对花生生殖生长阶段的地下部分可能产生更加严重的阻塞作用,从而导致PP-MPs添加对花生地下生物量积累的抑制作用更加明显。这一

结果表明与地上结实的作物相比,地下结实的作物更易受到土壤微塑料的影响。由于目前对土壤微塑料对作物重要性状及生长影响的了解相对较少,相关机理需要更多的延续性研究及试验证据。

在植株形态方面,微塑料污染的影响在作物类型间呈现出明显的分异特征。与对照相比,PP-MPs添加下,花生的株高显著降低2.64%,而大豆叶面积比值显著增加28.07%(图1A、图1C),这说明不同结实类型作物的植株形态对微塑料污染的响应不同。大豆可能通过增大叶面积来增加植株的光截获能力,在叶片生物量有限的条件下,利用较少的干物质投资来捕获更多的光以保证叶片的光合收益达到最大^[31],进而抵御微塑料的负面影响。

3.2 PP-MPs添加对大豆和花生生理生化的影响

叶绿素作为参与光合作用最重要的色素之一,其含量一定程度上反映作物的光合能力^[32]。Lian等^[33]发现莴苣的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素在微塑料胁迫下显著降低,邱陈陈等^[34]发现随着微塑料质量浓度的增加,大蒜叶片发生浓缩,从而增大单位面积的叶绿素含量(仍低于对照组)。本研究发现PP-MPs的添加显著降低大豆叶片的叶绿素含量(图3C),与上述研究结果一致,这可能是由于微塑料胁迫导致地上结实大豆的叶片叶面积比值显著增大,叶片变的大而薄,从而使叶片单位面积的叶绿素含量降低。然而PP-MPs添加对花生叶片的叶绿素含量无显著影响,这可能是由于地下结实的花生在受到微塑料胁迫后可能通过自身调节维持叶绿素含量的稳定,具体机理仍需进一步探究。此外,叶绿素荧光能够直接或间接反映外界胁迫对植物生理状况的影响^[35]。本研究中PP-MPs添加对大豆和花生叶片的 F_v/F_m 和 $Y(II)$ 无显著影响,与叶子琪等^[36]对生菜叶片的叶绿素荧光的研究结果一致,这可能是由于本实验所选用的微塑料类型、尺寸及浓度对大豆和花生的毒性较低。

3.3 PP-MPs添加对大豆和花生产量与籽粒品质的影响

PP-MPs添加下,大豆和花生的百粒重分别降低7.84%和11.98%,大豆和花生籽粒的饱满程度受到影响(图4A)。大豆和花生在形态和生理生化方面的响应差异,表明大豆和花生百粒重的降低对微塑料添加的响应机制不同。大豆百粒重的降低可能是由于其叶绿素含量降低抑制了光合碳同化效率^[33],在营养阶段和生殖阶段减少了干物质向大豆籽粒的运输和分配^[37]。对于花生而言,花生荚果的生长发育是花生籽粒中营养物质积累的关键,而花生荚果生长所需的营

养物质虽由根和荚果共同提供,但有些营养物质只能依靠荚果自行吸收^[38],PP-MPs聚集在花生的地下部分,阻碍花生荚果对营养物质的吸收,进而抑制荚果的生长,最终导致花生籽粒的百粒重降低。

除产量外,微塑料污染能够改变作物籽粒品质,主要影响籽粒的可溶性糖含量。PP-MPs的添加显著促进了大豆籽粒可溶性糖含量的积累(25.82%),但花生的可溶性糖含量显著降低25.51%(图4B)。可溶性糖作为植物叶片主要的光合产物,反映了塑料添加对作物光合碳的合成及运输影响^[39]。对于地上结实的大豆,在微塑料添加下,虽然其产量(百粒重)受到抑制,但显著增加的叶面积比值能够提高光截获能力及光合碳同化效率^[31],从而促进相对丰富的可溶性糖等光合产物在籽粒积累。而花生方面,如上所述,其地下结实的特点更容易受到根际土壤微塑料富集的影响,微塑料的阻塞作用影响花生对水分和营养物质的吸收及运输,营养物质的匮乏可能影响花生地上的光合产物向地下根系及籽粒运移与分配,其中内在的过程与机理,需要通过荧光标记等方法进一步进行验证和探究。

4 结论

(1)聚丙烯微塑料(PP-MPs)添加对大豆和花生的生长和生物量积累均表现出抑制作用。

(2)PP-MPs添加下大豆叶片的叶绿素含量显著降低5.74%,但对花生的叶绿素含量无显著影响,同样大豆和花生的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 及类黄酮含量也无明显变化。

(3)PP-MPs添加对大豆和花生籽粒的百粒重影响一致,但对大豆和花生籽粒的可溶性糖含量影响截然相反。

参考文献:

- [1] 骆永明,施华宏,涂晨,等.环境中微塑料研究进展与展望[J].科学通报,2021,66(13):1547-1562. LUO Y M, SHI H H, TU C, et al. Research progresses and prospects of microplastics in the environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(13):1547-1562.
- [2] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304:838.
- [3] 徐湘博,孙明星,张林秀,等.土壤微塑料污染研究进展与展望[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):1-9. XU X B, SUN M X, ZHANG L X, et al. Research progress and prospect of soil microplastic pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1):1-9.
- [4] 朱永官,朱冬,许通,等.(微)塑料污染对土壤生态系统的影响:进展与思考[J].农业环境科学学报,2019,8(1):1-6. ZHU Y G, ZHU D, XU T, et al. Impacts of (micro)plastics on soil ecosystem: Progress and perspective[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 8(1):1-6.
- [5] MOHAJERANI A, KARABATAK B. Microplastics and pollutants in biosolids have contaminated agricultural soils: An analytical study and a proposal to cease the use of biosolids in farmlands and utilise them in sustainable bricks[J]. *Waste Management*, 2020, 107:252-265.
- [6] 李鹏飞,侯德义,王刘炜,等.农田中的(微)塑料污染:来源、迁移、环境生态效应及防治措施[J].土壤学报,2021,58(6):314-330. LI P F, HOU D Y, WANG L W, et al. (Micro)plastics pollution in agricultural soils: Sources, transportation, ecological effects and preventive strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6):314-330.
- [7] 骆永明,周倩,章海波,等.重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J].中国科学院院刊,2018,33(10):1021-1030. LUO Y M, ZHOU Q, ZHANG H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food Chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10):1021-1030.
- [8] 陈瑶,刘金,张颖昕,等.环境中的黑色微塑料:轮胎磨损颗粒的来源、迁移扩散及环境风险[J].应用生态学报,2022,33(8):2260-2270. CHEN Y, LIU J, ZHANG Y X, et al. Black microplastics in the environment: Origin, transport and risk of tire wear particles[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8):2260-2270.
- [9] LUSHER A L, BURKE A, O'CONNOR I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 88(1/2):325-333.
- [10] HURLEY R R, WOODWARD J C, ROTHWELL J J. Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4):251-257.
- [11] WANG W F, YUAN W K, CHEN Y L, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633:539-545.
- [12] LI H X, MA L S, LIN L, et al. Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River Estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236:619-625.
- [13] HE D F, LOU Y M, LU S B, et al. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 109:163-172.
- [14] 蒲生彦,张颖,吕雪.微塑料在土壤-地下水中的环境行为及其生态毒性研究进展[J].生态毒理学报,2020,15(1):44-55. PU S Y, ZHANG Y, LÜ X, et al. Review on the environmental behavior and ecotoxicity of microplastics in soil-groundwater[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(1):44-55.
- [15] 廉宇航,刘维涛,史瑞滢,等.聚乙烯和聚乳酸微塑料对大豆生长和生理生化及代谢的影响[J].中国环境科学,2022,42(6):2894-2903. LIAN Y H, LIU W T, SHI R Y, et al. Impact of polyethylene and polylactic acid microplastics on growth, physio-biochemistry and metabolism in soybean (*Glycine max*)[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6):2894-2903.
- [16] 薄录吉,李冰,张凯,等.农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J].环境科学,2022:1-11. BO L J, LI B, ZHANG K, et al. Distribution and characteristics of microplastics in farmland soil: Sources and behavior[J]. *Environmental Science*, 2022:1-11.

- tion, sources and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil[J]. *Environmental Science*, 2022: 1–11.
- [17] HU J N, HE D, ZHANG X T, et al. National-scale distribution of micro(meso)plastics in farmland soils across China: Implications for environmental impacts[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 424(Pt A): 127283.
- [18] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(12): 6453–6454.
- [19] 卢灵慧, 王娟, 郑阳, 等. 微塑料对农作物生长影响的研究进展[J]. 河南化工, 2021, 38(6): 8–11. LU L H, WANG J, ZHENG Y, et al. Research progress of the effect of microplastics on crop growth[J]. *Henan Chemical Industry*, 2021, 38(6): 8–11.
- [20] LOZANO Y M, LEHNERT T, LINCK L T, et al. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 616645.
- [21] SHI R Y, LIU W, YU L, et al. Phytotoxicity of polystyrene, polyethylene and polypropylene microplastics on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115441.
- [22] HERNÁNDEZ-ARENAS R, BELTRÁN-SANAHUJA A, NAVARRO-QUIRANT P, et al. The effect of sewage sludge containing microplastics on growth and fruit development of tomato plants[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 268(Pt B): 115779.
- [23] 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.
- [24] 董姝含, 吕慧捷, 周锋, 等. 玉米土壤有机氮组分的生长季动态变化及其对当季和长期秸秆还田的响应[J]. 生态学报, 2022, 41(1): 73–80. DONG S H, LÜ H J, ZHOU F, et al. Variation of soil organic nitrogen fractions in maize field during growing season and its response to current year and long-term straw returning[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1): 73–80.
- [25] LOZANO Y M, AGUILAR-TRIGUEROS C A, ONANDIA G, et al. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(5): 988–996.
- [26] 马玥, 苏宝玲, 韩艳刚, 等. 岳桦幼苗光合特性和非结构性碳水化合物积累对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 513–520. MA Y, SU B L, HAN Y G, et al. Response of photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate accumulation of *Betula ermanii* seedlings to drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 513–520.
- [27] 罗小芬. 浅谈凯氏定氮法测定蛋白质准确度的操作技巧及关键点[J]. 现代食品, 2017(19): 99–100. LUO X F. Talking about the operation skills and key points of determining protein accuracy by kjeldahl method[J]. *Modern Food*, 2017(19): 99–100.
- [28] LI B, 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.
- [29] KALČÍKOVÁ G, ŽGAJNAR GOTVAJN A, KLADNIK A, et al. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *lemna minor*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 1108–1115.
- [30] 孙勇. 花生(*Arachis hypogaea*)果针响应外界刺激蛋白质组学研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011. SUN Y. Proteomic analysis of fruit-needle from *Arachis hypogaea* response different stimulations[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [31] 李群, 赵成章, 王继伟, 等. 湿地芦苇比叶面积和水分利用效率的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4956–4962. LI Q, ZHAO C Z, WANG J W, et al. Relationship analysis between specific leaf area and water use efficiency of *Hragmites australis* in the Zhangye wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4956–4962.
- [32] 赵如皓, 丁俊男, 于少鹏, 等. NaCl胁迫对野生大豆幼苗生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(14): 23–29. ZHAO R H, DING J N, YU S P, et al. Effects of NaCl stress on physiological and chlorophyll fluorescence properties of wild soybean seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(14): 23–29.
- [33] LIAN J P, LIU W T, MENG L Z, et al. Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116978.
- [34] 邱陈陈, 李国新, 李青松, 等. 聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4387–4393. QIU C C, LI G X, LI Q S, et al. Effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on the physiology of *Allium sativum* L.[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4387–4393.
- [35] KALAJI H M, JAJOO A, OUKARROUM A, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. *Acta Physiol Plant*, 2016, 38(4): 1–11.
- [36] 叶子琪, 蒋小峰, 汤其阳, 等. 聚乙烯微塑料对蚕豆幼苗的毒性效应[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(3): 385–392. YE Z Q, JIANG X F, TANG Q Y, et al. Toxic effects of polyethylene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, 57(3): 385–392.
- [37] 原程, 张玉先, 王孟雪, 等. 中耕时间和深度对大豆光合特性及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(15): 2911–2926. YUAN C, ZHANG Y X, WANG M X, et al. Effects of intertillage time and depth on photosynthetic characteristics and yield formation of soybean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(15): 2911–2926.
- [38] 于天一, 郑亚萍, 邱少芬, 等. 酸化土壤施钙对不同花生品种(系)钙吸收、利用及产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 80–85. YU T Y, ZHENG Y P, QIU S F, et al. Effects of calcium (Ca) application in acidified soil on Ca absorption, utilization and yield of different peanut varieties (lines)[J]. *Crops*, 2021(4): 80–85.
- [39] 陈艳妮, 徐鸿儒, 赵云燕, 等. 芝麻蒴果发育过程中蒴果皮的光合作用及籽粒充实的变化研究[J]. 植物生理学报, 2022, 58(4): 723–732. CHEN Y N, XU H R, ZHAO Y Y, et al. Study on the changes in photosynthetic capacity of capsule walls and grainfilling in *Sesamum indicum* during capsule development[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(4): 723–732.

(责任编辑:叶飞)