

不同微塑料含量暴露下间作对大豆根系和养分吸收的影响

明春艳, 何澍然, 陈林康, 李鑫伟, 叶媛媛, 宋世杰, 龙光强, 赵平

引用本文:

明春艳, 何澍然, 陈林康, 等. 不同微塑料含量暴露下间作对大豆根系和养分吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(8): 2110-2119.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2024-0695>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响

王雅梅, 许彦骁, 王亚露, 李静, 张海芳, 杨殿林, 赵建宁, 轩清霞

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2587-2595 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0348>

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 347-354 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0916>

砷污染土壤不同比例客土对大豆生长和吸收砷的影响

武慧斌, 曾希柏, 汤月丰, 白玲玉, 苏世鸣, 王亚男, 陈鸽

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2021-2028 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0311>

微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响

刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 谢瑞丽, 周颖, 王玲, 汪承润

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2623-2633 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0523>

氟磺胺草醚及其降解菌对大豆生长及生物固氮的影响

周聪, 陈未, 高岩, 施曼, 李江叶, 刘丽珠, 陈金林

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2660-2668 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0264>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

明春艳, 何澍然, 陈林康, 等. 不同微塑料含量暴露下间作对大豆根系和养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2110-2119.

MING C Y, HE S R, CHEN L K, et al. Effects of intercropping on soybean roots and nutrient uptake under different microplastic concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(8): 2110-2119.



开放科学 OSID

不同微塑料含量暴露下间作对大豆根系和养分吸收的影响

明春艳, 何澍然, 陈林康, 李鑫伟, 叶媛媛, 宋世杰, 龙光强, 赵平*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要:为探究不同微塑料含量暴露下间作对大豆根系形态特征和养分吸收的影响,以及间作缓解微塑料毒害效应的机理机制,本研究通过盆栽实验,设置0%、0.1%、1%、10% 4个微塑料含量和大豆单作、玉米大豆间作2种植模式,于播种30 d和60 d后对大豆的各生长指标、根系特性、养分累积吸收量和土壤理化性质进行测定分析。结果表明:与不添加微塑料相比,微塑料暴露显著增加了大豆总根长,但降低了根系平均直径和根系活力,减少了大豆氮、磷、钾累积吸收量和总生物量。与相同微塑料含量下的大豆单作相比,间作显著提高了大豆总根长23.2%、总根表面积39.8%和根系活力49.2%,同时,增加了大豆氮、磷、钾累积吸收量35.6%、29.5%、32.0%。相关性分析表明,总根长、根系活力、硝态氮、速效磷和速效钾含量是影响大豆生长和养分吸收的主要因素。研究表明,间作可以通过改善大豆根系性状和土壤养分有效性来缓解微塑料对大豆生长发育和养分吸收的抑制作用。间作调控微塑料对作物生长发育的抑制表现出“时间效应”,即间作的缓解作用随作物生育期的延长而增强。

关键词:间作;微塑料含量;根系形态;生长发育;养分吸收量

中图分类号:X53;X173;S565.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2025)08-2110-10 doi:10.11654/jaes.2024-0695

Effects of intercropping on soybean roots and nutrient uptake under different microplastic concentrations

MING Chunyan, HE Shuran, CHEN Linkang, LI Xinwei, YE Yuanyuan, SONG Shijie, LONG Guangqiang, ZHAO Ping*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to explore the effects of intercropping on root morphological characteristics and nutrient uptake of soybean under different concentrations of microplastics, and the mechanism of intercropping to alleviate the toxic effects of microplastics, in this study, four concentrations of microplastics (0%, 0.1%, 1%, 10%) and two planting patterns (soybean monoculture and maize-soybean intercropping) were set up by pot experiment. After 30 days and 60 days of sowing, the growth indexes, root characteristics, nutrient accumulation and absorption and soil physical and chemical properties of soybean were measured and analyzed. Compared with no microplastics, microplastics exposure significantly increased the total root length of soybean, but decreased the average root diameter and root activity, and reduced the cumulative uptake of nitrogen, phosphorus and potassium and total biomass of soybean. Compared with soybean monocropping at the same microplastic concentration, intercropping significantly increased the total root length 23.2%, total root surface area 39.8% and root activity 49.2% of soybean, and increased the cumulative uptake of nitrogen 35.6%, phosphorus 29.5% and potassium 32.0% of soybean. Redundancy and correlation analysis showed that total root length, root activity, nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium were the main factors affecting soybean growth and nutrient uptake. Intercropping can alleviate the inhibitory effect of microplastics on soybean growth and nutrient uptake by improving soybean root traits and soil nutrient availability. Moreover, the inhibition of crop growth and development by intercropping regulation of microplastics showed a “time effect”, that is, the mitigation effect of intercropping increased with the extension of crop growth period.

Keywords: intercropping; microplastic concentration; root morphology; growth and development; nutrient uptake

收稿日期:2024-08-19 录用日期:2025-01-23

作者简介:明春艳(1998—),女,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为多样化种植与土壤库容、养分转化。E-mail:201277183@qq.com

*通信作者:赵平 E-mail:2586439210@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1901503)

Project supported: National Key Research and Development Program(2022YFD1901503)

微塑料作为一种新兴污染物已引起了人们的广泛关注^[1-2]。大量的塑料废弃物通过焚烧、填埋、农膜覆盖、污泥还田、废水灌溉和大气沉降等方式进入农田土壤,这些大块的塑料废弃物在物理、化学和生物作用下逐渐降解为微塑料留存在土壤中^[3-4]。据报道,在一些高污染区域,微塑料占了土壤质量的7%^[5]。在欧洲农田土壤中,每千克土壤中含1 000~4 000个微塑料颗粒^[6]。在我国山东省寿光市的农田土壤中,平均每千克土壤中含1 444个微塑料颗粒^[7]。微塑料在土壤中大量积累会对土壤的物理(如容重、持水能力、孔隙度)和化学(如pH、养分有效性、养分循环)性质产生影响。例如,微塑料和土壤颗粒相互吸附,增强了土壤中磷的吸附固定,降低了磷的有效性^[8]。此外,由于微塑料是一种有机聚合物,可能对硝态氮和铵态氮具有一定的吸附性,从而降低了土壤硝态氮和铵态氮含量^[9-12]。最近的一项Meta分析表明,微塑料暴露使土壤速效磷含量降低了17.0%,速效钾含量降低了6.7%^[13]。

土壤中的微塑料也会对植株的生长发育和养分吸收产生诸多不利影响^[14],如延迟种子萌发、抑制植株生长、降低生物量、改变根系性状以及降低根系活力等^[15-17]。微塑料抑制植株生长的原因可能有两点:首先,微塑料本身携带的有毒物质可能会对根系产生毒害,从而抑制植株的生长^[18]。先前的研究指出,土壤中的微塑料老化或降解后会释放大量有害物质,包括增塑剂和双酚A,这些有毒物质进入根系后,会损坏根细胞从而限制植株的营养生长和养分吸收^[19-20]。此外,微塑料所带的负电荷基团的亲水性会与质膜上磷脂双层的疏水基团强烈结合,导致细胞收缩和木质化,进而抑制根生长^[21]。同时,微塑料暴露会通过机械损伤破坏植株细胞质膜,导致根系活力下降,减少植株对大量元素(氮、磷、钾)的吸收^[7]。微塑料通过吸附在种皮和根系上,堵塞毛孔以抑制植株的生长和养分吸收^[22],还可通过吸收进入植物根系,阻碍水分和养分的吸收,产生生理和遗传毒性,直接影响植物生长和对磷素的吸收^[23-24]。因此,微塑料会直接或间接地从多个方面对植株生长发育和养分吸收产生抑制作用^[14,25-26]。所以,寻求缓解微塑料对植株的毒害效应的方式,对于实现农业可持续发展具有重要意义。

间作是指在同一区域上同时种植两种或多种作物,是典型的多样化种植模式,因其可以通过利用物种间的互补性提高产量、防止病害和增加养分有效性等优势,被称为“新绿色革命”^[27-28]。大量的研究表明,间作可以通过改善根系性状以及根系活力来增加作物

对养分的吸收,以促进作物的生长发育^[29-30]。比如,Qiu等^[31]的研究表明,与棉花单作相比,棉花和花生间作后促进了棉花对氮、磷和钾的吸收,从而增加了棉花的生物量和产量。当豆科和禾本科间作后,豆科通过分泌有机酸活化土壤中的难溶性磷,以增加植株对磷的吸收利用^[32]。大豆是一种富含蛋白质和油脂的重要作物,其不仅是植物衍生蛋白质的重要来源,还是植物油生产的重要原材料,其油产量占全球的一半以上^[33]。同时,大豆可以通过生物固氮来增加速效氮含量以促进氮素吸收^[34]。然而,在不同含量微塑料暴露下,间作的诸多优势是否得以维持,以及间作优势是否受微塑料含量调控知之甚少。因此,本研究选取大豆||玉米间作系统,并以单作大豆为对照,同时设置4个微塑料含量,探究间作和微塑料对大豆生长发育和养分吸收的影响,从而为多样化种植缓解微塑料对植株生长发育和养分吸收的毒害效应提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究使用聚乙烯微塑料,粒径约150 μm ,购自东莞市安特塑胶原料有限公司。实验前,用去离子水冲洗微塑料以去除表面杂质,然后风干备用。玉米(贵卓玉899)和大豆(甜脆毛豆)种子分别由贵州卓豪农业科技股份有限公司和硕果农业有限公司提供。播种前,使用1%的NaClO溶液对大小均匀、无破损、籽粒饱满的种子进行消毒(浸泡15 min)处理。

供试土壤取自云南农业大学后山试验田,前茬作物为玉米。收集表层(0~20 cm)土壤,去除植株和动物残体、石块和碎屑后过1 cm网筛并风干备用。土壤类型为山地红壤,表层土壤有机质(SOM)含量为12.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮(AHN)含量为44.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷(AP)含量为5.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾(AK)含量为56.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH值为6.39。

1.2 实验设计

基于当前土壤中微塑料含量水平以及前人的报道,本研究设置了0%、0.1%、1%和10%四个微塑料含量,分别模拟无、轻度、中度和重度污染土壤环境^[35-37]。同时,各含量下设置了大豆单作和大豆玉米间作两种种植模式,每个处理6次重复,共计48盆。

试验用盆规格为长×宽×高=40 cm×20 cm×20 cm。为保证作物正常生长,每盆施入有机肥和营养土,施入量均为0.65 kg,将有机肥、营养土与8.7 kg土壤混合均匀,即每盆装10 kg土壤。播种前,将微塑料与土

壤均匀混合并装盆,然后在室温下平衡一个月。单作每盆12株大豆,间作每盆大豆和玉米各6株。作物生长期间大棚内温度为24~35℃,日照时长为12~14h,空气湿度为60%~75%。每周浇水2~3次,以保持田间持水量的60%,并且每周随机重新排列盆的位置,以确保生长条件一致。在播种后30d和60d进行破坏性取样,采集植株和土壤样品以分析大豆的生长特性和土壤理化性质。

1.3 植株分析

各处理选取6株长势均匀的大豆测定其株高(SH)、茎粗(SD)和叶绿素含量(SPAD值)。播种30d和60d后,采用直尺测量地面到所有叶片自然展开时的最高处,以确定株高;使用游标卡尺测量叶痕处的茎粗。自播种30d后,每隔5d用SPAD-502型叶绿素计(Minolta,日本)测定大豆第二片顶端叶片SPAD值。采用烘干称质量法测定大豆生物量(BM):将采集的植株样品分为地上部和地下部,并用去离子水洗净,于105℃杀青30min,75℃烘干称质量。将植株研磨过筛后,分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度法测定植株全氮、全磷和全钾含量,并计算大豆氮、磷和钾的累积吸收量(养分累积吸收量=地上部养分含量×地上部生物量+地下部养分含量×地下部生物量)。

播种60d后分析大豆的根系形态特征和根系活力(RA)。采用数字化扫描仪(Epson Expression 1600 pro, Model EU-35,日本)扫描大豆根系,并使用WinRHIZO软件(Rengent Instruments Inc,加拿大)分析总根长(RL)、总根表面积(RS)和根系平均直径(RD)。根系活力用氯化三苯基四氯唑(TTC)法测定^[38]。将0.5g根尖置于培养皿中,并加入0.4% TTC溶液和磷酸缓冲溶液各5mL,将根系完全浸泡在溶液内。随后将培养皿置于37℃的恒温培养箱中避光培养1h,培养结束后加入1mol·L⁻¹ H₂SO₄溶液2mL以终止反应。取出根系并吸干水分后置于研钵中,加入乙酸乙酯4mL和少量石英砂后研磨提取三苯甲胺,于485nm波长下读取吸光度。根据标准曲线可计算出TTC的还原量,基于TTC还原量即可求出根系的还原强度,即根系TTC还原强度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)=TTC还原量(μg)/[根质量(g)×时间(h)]。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤pH值采用电位法测定(土水比为1:2.5, m:V);土壤有机碳(SOC)采用外加热重铬酸钾容量法测定;土壤速效磷(AP)采用NaHCO₃浸提-比色法测定;土壤速效钾(AK)采用NH₄OAc浸提-火焰光度

法测定;土壤硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)用1mol·L⁻¹ KCl溶液浸提后,采用连续流动分析仪(AA3全自动连续流动分析仪,SEAL Analytical,德国)测定。

1.5 统计分析

采用Excel 2016和Origin 2021软件进行数据分析和作图。采用SPSS 27.0软件中的单因素方差分析(One-way ANOVA)、双因素方差分析(Two-way ANOVA)、独立样本t检验和皮尔逊(Pearson)相关分析对单作和间作以及不同微塑料含量影响的大豆农艺性状(生物量、株高、茎粗)、根系特性(总根长、总根表面积、平均直径、根系活力)、养分吸收(氮、磷、钾)和土壤理化性质进行差异性显著分析和相关分析。采用CANOCO 5.0进行冗余分析(RDA),并统计影响因子的解释度。

2 结果与分析

2.1 微塑料和间作对大豆农艺性状和叶绿素含量的影响

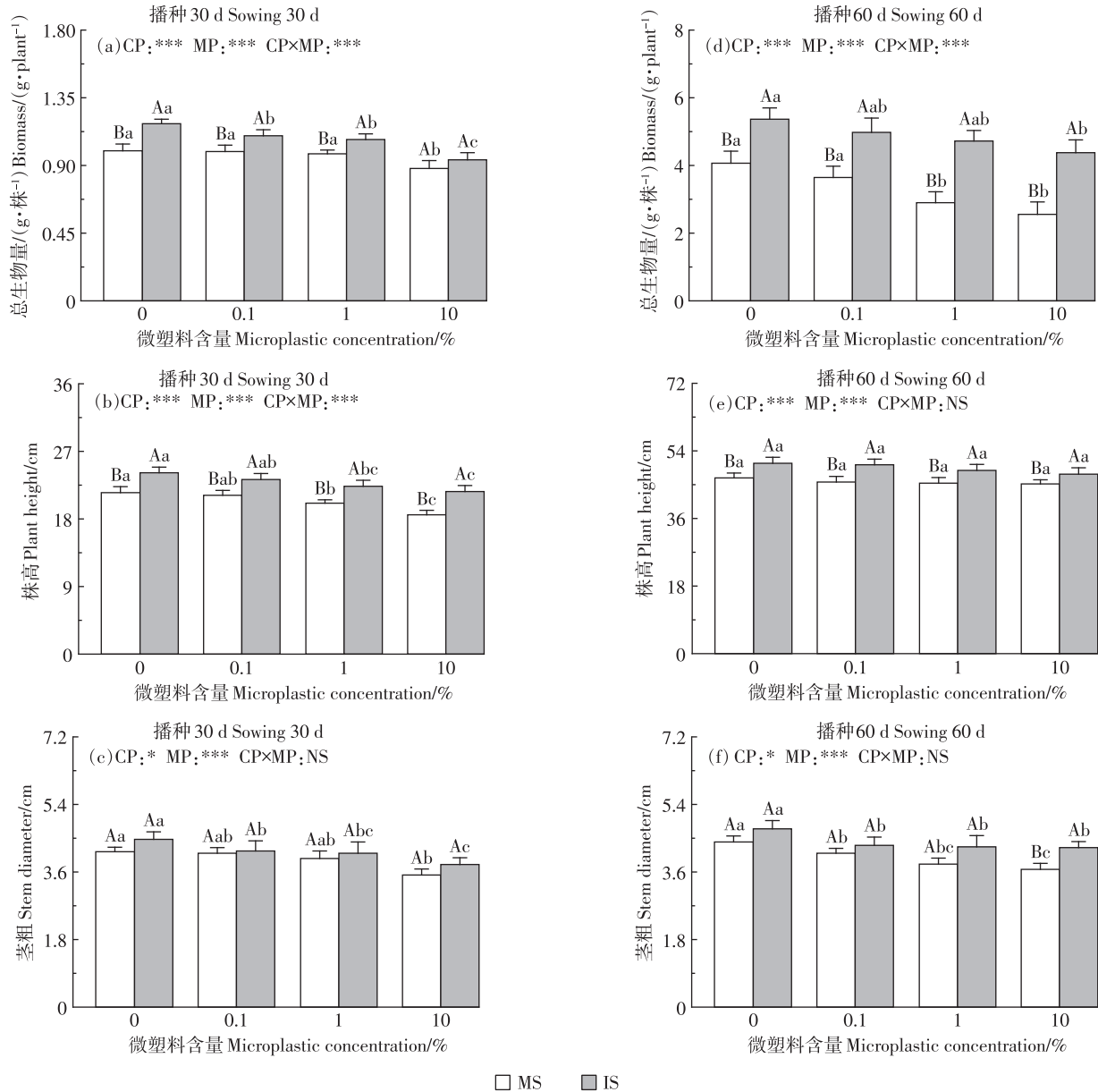
播种30d和60d后,与不添加微塑料相比,微塑料暴露显著降低了大豆总生物量、株高和茎粗,分别平均降低了13.6%、5.2%和9.8%(图1)。在相同微塑料含量暴露下,间作大豆的总生物量和株高显著高于单作,平均提高了31.8%和8.2%,但是对大豆茎粗没有影响。间作对大豆总生物量的影响随着大豆生育期的延长和微塑料含量的增加而增强,即播种60d后间作提高大豆总生物量的幅度大于30d。另外,大豆总生物量和株高受种植模式和微塑料含量及其交互作用的显著影响。播种后30~60d期间,在所有微塑料含量(0%、0.1%、1%、10%)暴露下,间作大豆叶片的叶绿素含量(SPAD值)始终高于单作(图2)。

2.2 微塑料和间作对土壤理化性质的影响

播种30d和60d时,在相同种植模式下,与不添加微塑料相比,微塑料暴露(0.1%、1%、10%)显著增加了SOC含量,但是显著降低了土壤NO₃-N、NH₄⁺-N和AP含量(表1)。相同微塑料含量暴露下,间作的SOC、pH、NO₃-N、NH₄⁺-N、AP和AK含量显著高于单作,分别平均提高了15.1%、0.17个pH单位、24.9%、30.4%、23.2%和22.6%。此外,pH、NO₃-N、AP和AK受种植模式、微塑料含量及其交互作用的显著影响,SOC和NH₄⁺-N受种植模式和微塑料的显著影响(表2)。

2.3 微塑料和间作对大豆根系形态和根系活力的影响

与不添加微塑料相比,微塑料暴露(0.1%、1%、



不同大写字母表示相同微塑料含量下两种种植模式下差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同种植模式下不同微塑料含量间差异显著 ($P < 0.05$)。CP: 种植模式; MP: 微塑料含量; CP×MP: 种植模式与微塑料含量之间的交互作用。***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: 无显著差异。下同。Different uppercase letters indicate that there is a significant difference between the two cropping patterns under the same microplastic concentration ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that there are significant differences among different microplastic concentrations under the same cropping pattern ($P < 0.05$). CP: cropping pattern; MP: microplastic concentration; CP×MP: interaction between cropping pattern and microplastic concentration. ***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: no significant. The same below.

图1 不同微塑料含量下单作(MS)和间作(IS)大豆的总生物量、株高和茎粗

Figure 1 Total biomass, plant height and stem diameter of monocropping (MS) and intercropping (IS) soybean under different microplastic concentrations

10%)显著增加了大豆总根长,且总根长随微塑料含量的增加而增加,但平均直径和根系活力则随着微塑料含量的增加而降低,总根表面积则呈现出先上升后下降的趋势(图3)。与单作相比,间作显著增加了大豆总根长和总根表面积,平均增加了23.2%和39.8%。在10%微塑料含量下,相比于单作,间作显

著提高了大豆根系的平均直径。在0.1%、1%和10%微塑料处理下,间作大豆的根系活力均显著高于单作,分别增加了26.4%、65.7%和55.7%。总根长和根系活力受种植模式、微塑料含量及其交互作用的显著影响,总根表面积和平均直径受种植模式和微塑料含量的显著影响。

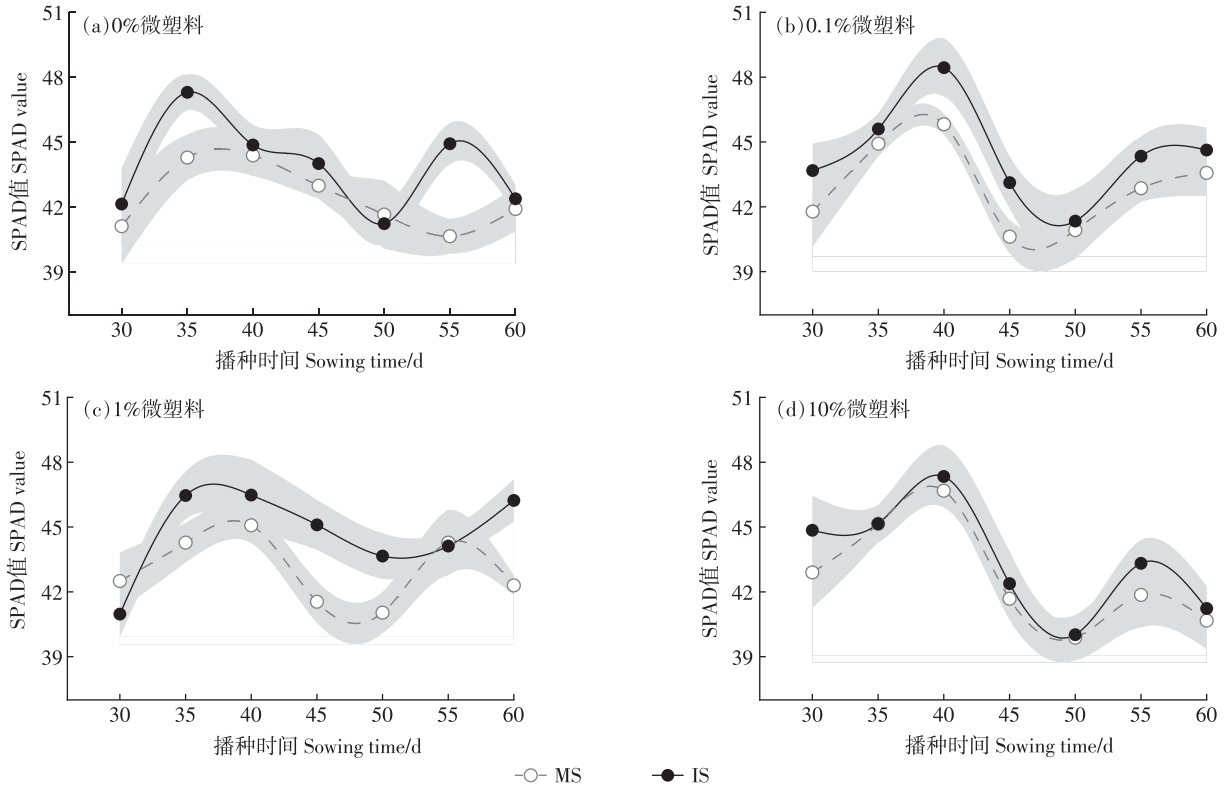


图2 不同微塑料含量下单作(MS)和间作(IS)大豆叶片叶绿素含量(SPAD值)

Figure 2 Chlorophyll content (SPAD value) of soybean leaves in monoculture (MS) and intercropping (IS) under different microplastic concentrations

表1 不同微塑料含量下大豆单作(MS)和间作(IS)土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soybean monocropping (MS) and intercropping (IS) soils under different microplastic concentrations

时间 Time/d	项目 Item	0%		0.1%		1%		10%	
		MS	IS	MS	IS	MS	IS	MS	IS
30	SOC/(g·kg ⁻¹)	16.00±0.46Bb	18.35±0.75Ac	16.24±0.51Bab	18.95±0.59Abc	16.79±0.69Bab	19.90±0.74Aab	17.07±0.41Ba	21.07±0.69Aa
	pH	6.60±0.02Ba	6.71±0.03Ad	6.64±0.04Ba	6.88±0.02Aa	6.64±0.03Ba	6.81±0.02Ab	6.61±0.02Ba	6.77±0.02Ac
	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	10.90±0.44Aa	11.23±0.43Aa	6.99±0.30Bb	8.87±0.42Ab	5.80±0.28Bc	8.34±0.46Ab	4.85±0.40Bd	7.23±0.40Ac
	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	17.27±0.51Ba	19.29±0.57Aa	13.90±0.51Bb	16.87±0.51Ab	11.92±0.53Bc	14.91±0.42Ac	10.29±0.50Bd	14.70±0.60Ac
	AP/(mg·kg ⁻¹)	18.90±0.70Ba	21.52±0.67Aa	16.69±0.74Bb	19.06±0.69Ab	15.21±0.92Bb	17.98±0.62Abc	13.17±0.92Bc	16.99±0.74Ac
	AK/(mg·kg ⁻¹)	215.33±8.08Ba	244.00±9.54Aa	202.00±9.85Ba	234.00±12.17Aa	202.40±10.83Ba	230.21±9.50Aa	191.27±9.01Ba	226.67±11.06Aa
60	SOC/(g·kg ⁻¹)	13.02±0.43Bb	14.40±0.42Ab	14.23±0.31Ba	15.36±0.49Aab	14.82±0.57Ba	16.24±0.56Aab	15.02±0.47Ba	17.93±0.47Aa
	pH	7.01±0.10Aa	7.08±0.05Aa	6.74±0.05Ba	7.01±0.05Aa	6.81±0.02Ba	7.03±0.05Aa	6.84±0.02Ba	7.00±0.02Aa
	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	7.41±0.23Ba	8.10±0.19Aa	4.75±0.14Bb	5.07±0.13Ab	4.45±0.15Bb	5.03±0.20Ab	3.87±0.16Bc	4.88±0.36Ab
	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	8.60±0.52Ba	10.97±0.60Aa	8.11±0.53Bab	10.64±0.77Aab	7.34±0.49Bb	9.88±0.64Aab	6.33±0.41Bc	9.39±0.61Ab
	AP/(mg·kg ⁻¹)	16.30±0.88Aa	17.66±0.56Aab	15.01±0.62Ba	18.33±0.84Aa	13.19±0.73Bb	17.02±0.54Ab	11.07±0.71Bc	15.00±0.60Ac
	AK/(mg·kg ⁻¹)	212.91±10.86Ba	139.17±8.25Aa	212.06±9.05Ba	236.18±11.70Aa	156.50±11.65Bb	219.33±15.88Aa	140.29±15.35Bb	218.51±19.24Aa

注:不同大写字母表示相同微塑料含量下两种种植模式间差异显著(P<0.05),不同小写字母表示相同种植模式下不同微塑料含量间差异显著(P<0.05)。

Note: Different uppercase letters indicate that there is a significant difference between the two cropping patterns under the same microplastic concentration (P<0.05), and different lowercase letters indicate that there are significant differences among different microplastic concentrations under the same cropping pattern (P<0.05).

2.4 微塑料和间作对大豆养分吸收量的影响

播种30 d和60 d时,相同种植模式下,大豆氮、磷和钾累积吸收量随着微塑料含量的增加而降低,分别

平均下降了19.4%、24.3%和10.2%(图4)。相同微塑料含量下,间作大豆的氮、磷和钾累积吸收量显著高于单作,分别平均增加了35.6%、29.5%和32.0%。间

表2 种植模式和微塑料含量对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of cropping patterns and microplastic concentration on soil physicochemical properties

处理 Treatment	播种 30 d Sowing 30 d						播种 60 d Sowing 60 d						
	SOC	pH	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	AP	AK	SOC	pH	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	AP	AK	
CP	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
MP	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***
CP×MP	NS	**	**	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	**	**

注:***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: 无显著差异。

Note: ***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: no significant.

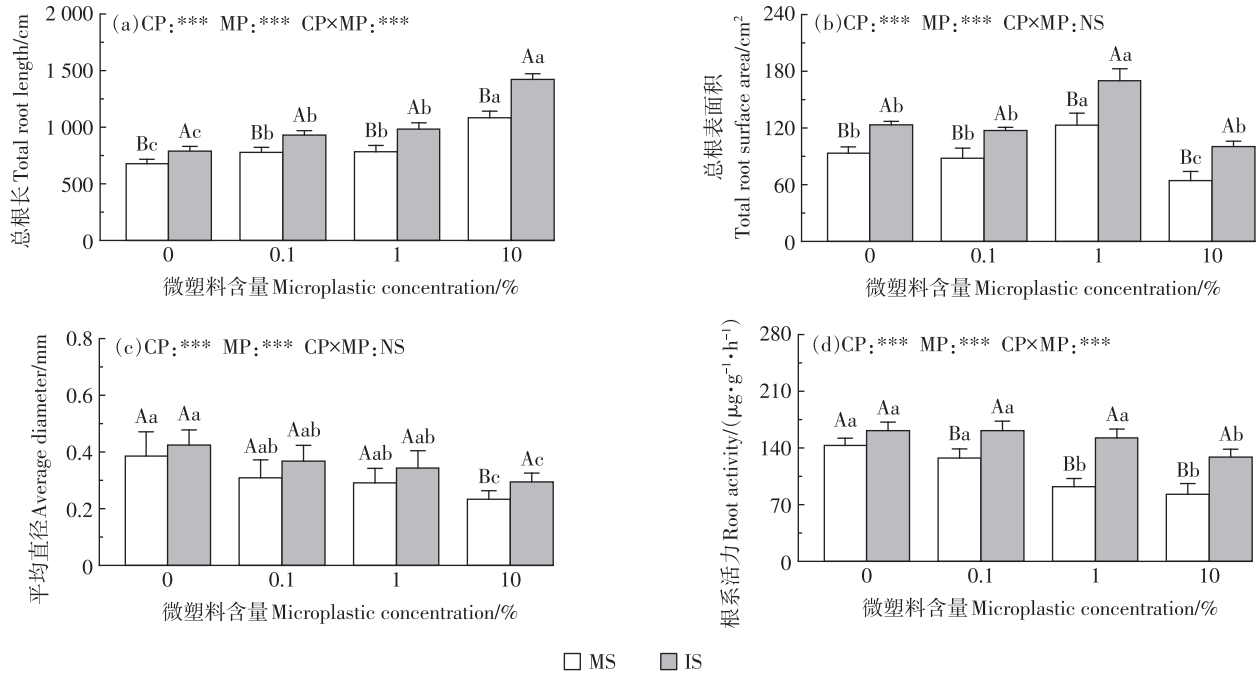


图3 不同微塑料含量下单作(MS)和间作(IS)大豆的根系特征

Figure 3 Root characteristics of monocropping (MS) and intercropping (IS) soybean under different microplastic concentrations

作对大豆养分累积吸收量的影响随着大豆生育期的延长和微塑料含量的增加而增强,即播种 60 d 时间作提高大豆养分吸收量的幅度大于 30 d 时。播种 30 d 后,大豆磷和钾累积吸收量受种植模式、微塑料含量及其交互作用的影响显著;播种 60 d 后,大豆氮、磷和钾累积吸收量仅受种植模式和微塑料含量的影响显著。

2.5 大豆生长发育和养分吸收的调控因子

冗余分析(RDA)结果表明,第一轴和第二轴分别解释了环境因子变异的 97.87% 和 1.25% (图 5a)。SH (90.2%)、AK (4.6%)、RL (1.3%)、AP (2.1%)、NH₄⁺-N (0.4%) 和 RA (0.2%) 是影响大豆 BM 和养分(N、P、K)累积吸收量的主要因子(图 5b)。皮尔逊相关分析表明,大豆 BM 和 N、P、K 吸收量与 SH、AK、AP、NH₄⁺-N、RA 呈显著正相关($P < 0.01$, 图 5c)。

3 讨论

3.1 微塑料对大豆根系和养分吸收的影响

根系形态特征是反映植株在受到逆境胁迫时的生长状态和生物学特性的重要指标^[39-40]。本研究发现,与不添加微塑料相比,微塑料暴露(0.1%、1%、10%)显著增加了大豆总根长,但是降低了总根表面积、平均直径和根系活力(图 3)。这表明,作物可以通过改变根系构型来应对外界胁迫^[41-42]。大豆总根长增加可能是由于微塑料暴露改善了土壤孔隙率、通气性和持水能力,这对细根的生长尤为有益^[43]。微塑料诱导植物体内活性氧和过氧化物的过量产生,且其自身所携带的有毒物质(增塑剂、双酚 A、重金属等)损害根细胞结构,这可能是导致根系平均直径和根系活力下降的原因^[19-20]。本研究发现,与不

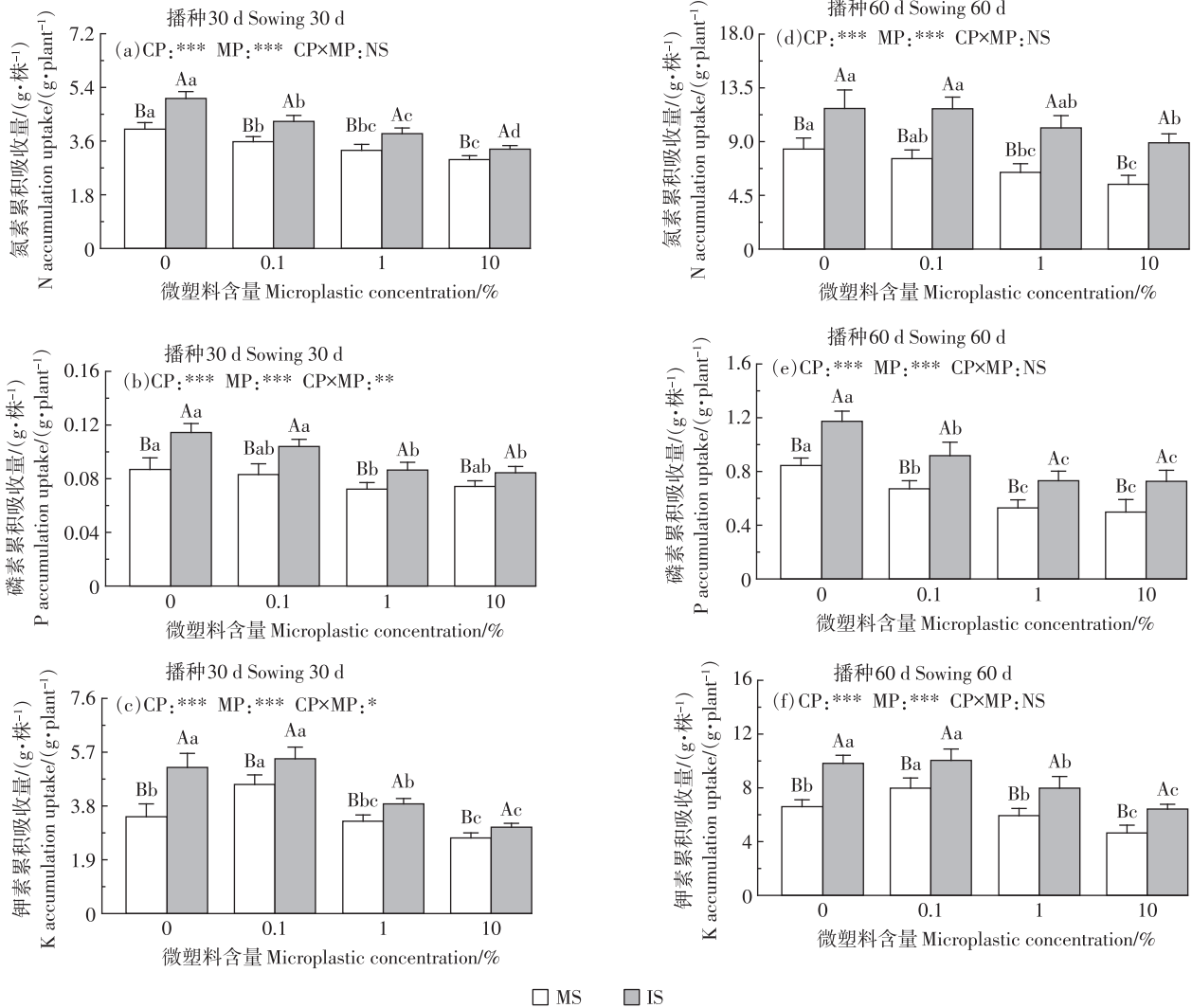


图4 不同微塑料含量下单作(MS)和间作(IS)大豆的氮、磷和钾累积吸收量

Figure 4 Accumulation uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in soybean under monocropping (MS) and intercropping (IS) at different microplastic concentrations

添加微塑料相比,微塑料暴露显著降低了大豆总生物量(13.6%)、株高(5.2%)、茎粗(9.8%)以及氮(19.4%)、磷(24.3%)、钾(10.2%)累积吸收量(图1和图4)。这可能是由于微塑料在土壤中积累对土壤的理化性质产生负面影响,从而限制了大豆的生长和养分积累吸收量^[8-13]。本研究结果显示,微塑料暴露显著降低了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、AP和AK含量(表1),并且大豆养分吸收量和生物量与土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、AP显著正相关(图5),这进一步证实了以上观点。

3.2 间作缓解了微塑料暴露对大豆根系和养分吸收的影响

与单作相比,间作后大豆总根长、总根表面积和根系活力分别平均增加了23.2%、39.8%和49.2%,并

且大豆总生物量和氮、磷、钾吸收量均高于单作。先前的研究也指出,相比于单作,间作显著提高了作物的根长和根表面积^[33,44]。同时,间作可以通过增强根系分泌物与微生物组之间的联系,提高根系活力,从而促进作物的生长和养分吸收^[30]。这说明在微塑料暴露的情况下,间作可以通过改善植株根系性状,促进养分吸收来缓解微塑料对植株生长发育的抑制作用。其可能的原因有两个:一是由于间作使物种间产生互补效应(种间生态位的分配或促进),大豆和玉米根系分泌物相互作用,且两种作物根系间通过质流和扩散引起了水分和养分吸收竞争,从而促进了根系生长^[44]。同时,种间互补效应为作物的生长提供一个重要的生物缓冲区,以在面临环境胁迫时(如微塑料暴露)维持生态系统的功能^[45-47]。二是间作可以通过改

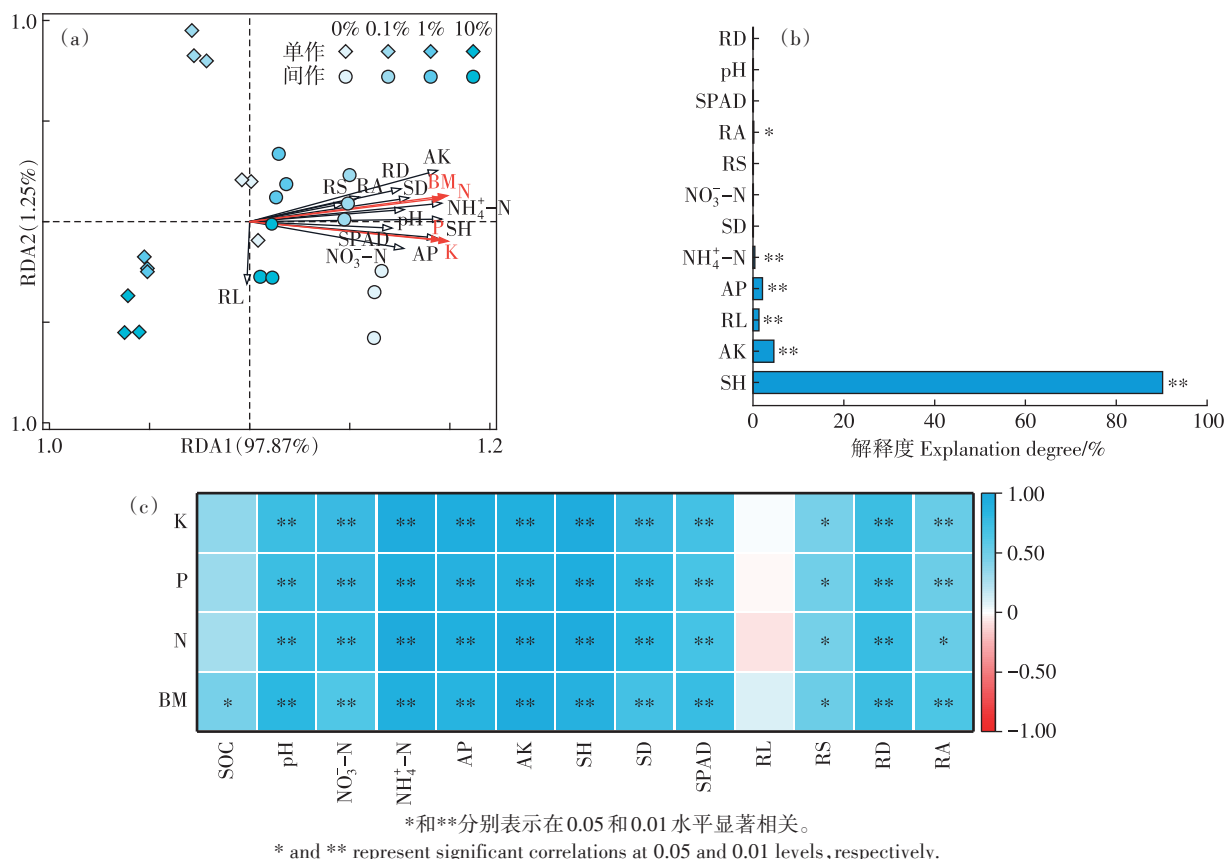


图5 大豆生物量和养分吸收的调控因子

Figure 5 Regulating factors of soybean biomass and nutrient uptake

善土壤理化性质和活化养分来促进作物的根系生长和养分吸收^[31-32]。Ablimit等^[48]的研究表明,玉米间作豆科绿肥显著提高了土壤pH值、NH₄⁺-N和AK含量。本实验结果同样证实了间作对土壤理化性质的促进作用,间作显著提高了土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AP和AK含量(表1)。进一步分析发现,NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AP和AK与大豆养分吸收量和总生物量呈显著正相关。因此,间作系统中速效养分含量的增加,为大豆生长和养分吸收提供了保障。但是,本研究选用长方形的盆,实行1:1替代种植的方式(即1行玉米替代1行大豆)来模拟田间间作种植模式的真实情境,并增加了种植密度,这可能在一定程度上放大了间作优势,今后可延长作物生育期,增加盆的体积,并调整种植密度,进一步探究间作缓解微塑料毒害效应的机理机制。

3.3 微塑料对间作系统大豆根系和养分吸收的调控作用

大豆根系特征和养分累积吸收量受到种植模式、微塑料含量及其交互作用的显著影响(图3和图4)。在相同微塑料含量暴露下,相比于单作,间作显著增加了大豆总根长、总根表面积、根系活力和氮、磷、钾累积

吸收量,但间作对根系特征和养分累积吸收量的影响受到微塑料含量的显著调控。与单作相比,间作对大豆总根长、总根表面积和根系活力的增加幅度随着微塑料含量的增加而增大。值得一提的是,在播种30 d后,间作对大豆总生物量和氮、磷、钾累积吸收量的影响随着微塑料含量的增加而降低。但在播种60 d后,间作对大豆总生物量和氮、磷、钾累积吸收量的影响则随着微塑料含量的增加而显著提高,且增加幅度分别是播种30 d后的4.5、2.9、1.8倍和1.4倍。前人的研究揭示了物种间相互作用的强度会随着环境的变化而变化,例如,当受到环境胁迫增强时(如微塑料含量增加),种间相互作用可以从有利环境中的高竞争转向低竞争,甚至是在受到胁迫时表现出相互促进^[49]。而这种互补效应会随着时间的推移而增强,在受到胁迫时,种间促进和抗性较强的物种可以通过增加群落多样性来应对胁迫,并随着时间的推移其效果增强^[47,50-51]。而播种30 d后,间作效应随着微塑料含量的增加而降低,可能是由于此时的大豆还处于苗期,物种间的互补效应较弱。而随着大豆的生长,种间互补效应增强,进而提高了大豆对抗微塑料胁迫的能力。这表明间作

缓解微塑料对作物生长发育的抑制表现出“时间效应”。即间作缓解微塑料抑制的能力随着作物的生育期延长而逐渐增强。

4 结论

(1)微塑料暴露显著抑制了大豆根系生长发育和养分吸收,进而降低其生物量积累。

(2)间作能通过改善土壤性质、调控作物根系构型从而缓解微塑料对作物生长发育的抑制。并且,间作缓解微塑料对作物生长发育的抑制表现出“时间效应”,即间作的缓解作用随作物的生长而增强。

(3)间作效应受微塑料含量的调控,不同微塑料含量下,间作对大豆根系和养分吸收的影响不同。

参考文献:

- COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(12): 2588–2597.
- ZANG H D, ZHOU J, MARSHALL M R, et al. Microplastics in the agroecosystem: are they an emerging threat to the plant–soil system?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107926.
- QI R M, JONES D L, LI Z, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134722.
- LIN Z Y, JIN T, ZOU T, et al. Current progress on plastic/microplastic degradation: fact influences and mechanism[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 304: 119159.
- FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5774–5780.
- ZUBRIS K A V, RICHARDS B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(2): 201–211.
- YU Y F, LI J, SONG Y, et al. Stimulation versus inhibition: the effect of microplastics on pakchoi growth[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 177: 104505.
- ZHOU J, XU H B, XIANG Y Z, et al. Effects of microplastics pollution on plant and soil phosphorus: a meta-analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132705.
- SU P J, GAO C Y, ZHANG X J, et al. Microplastics stimulated nitrous oxide emissions primarily through denitrification: a meta-analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130500.
- IQBAL S, XU J C, ALLEN S D, et al. Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil–plant system: implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127578.
- SUN X, TAO R D, XU D Q, et al. Role of polyamide microplastic in altering microbial consortium and carbon and nitrogen cycles in a simulated agricultural soil microcosm[J]. *Chemosphere*, 2023, 312: 137155.
- GAO M L, LIU Y, SONG Z G. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort)[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124482.
- GAO H H, LIU Q, YAN C R, et al. Macro-and/or microplastics as an emerging threat effect crop growth and soil health[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 186: 106549.
- 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.
- KALČÍKOVÁ G, ANDREJA Ž G, KLADNIK A, et al. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 1108–1115.
- BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19): 11496–11506.
- LI R J, TU C, LI L Z, et al. Visual tracking of label-free microplastics in wheat seedlings and their effects on crop growth and physiology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 456: 131675.
- RILLIG M C, LEHMANN A, ABEL DE SOUZA MACHADO A, et al. Microplastic effects on plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(3): 1066–1070.
- ZHANG Z Q, CUI Q L, CHEN L, et al. A critical review of microplastics in the soil–plant system: distribution, uptake, phytotoxicity and prevention[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt D): 127750.
- LIU Y Y, XU F J, DING L P, et al. Microplastics reduce nitrogen uptake in peanut plants by damaging root cells and impairing soil nitrogen cycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 443: 130384.
- XU Z M, ZHANG Y X, LIN L P, et al. Toxic effects of microplastics in plants depend more by their surface functional groups than just accumulation contents[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155097.
- 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.
- JIANG X F, CHEN H, LIAO Y C, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 831–838.
- LI L Z, LUO Y M, PEIJNENBURG W J G M, et al. Confocal measurement of microplastics uptake by plants[J]. *MethodsX*, 2020, 7: 100750.
- 刘鲤萍, 卢文振, 刘鑫雨, 等. 地膜微塑料对玉米生长与养分吸收的影响[J]. *智慧农业导刊*, 2024, 4(8): 52–55. LIU L P, LU W Z, LIU X Y, et al. Effects of plastic film microplastics on maize growth and nutrient uptake[J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2024, 4(8): 52–

- 55.
- [26] 依代倩, 农传江, 王成尘, 等. 土壤微塑料对农作物的危害作用机制与防治措施[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 510–522. NONG D Q, NONG C J, WANG C C, et al. Adverse effects and underlying mechanisms of soil microplastics on crops and its preventive strategies [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(1): 510–522.
- [27] BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 107–117.
- [28] MARTIN-GUAY M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767–772.
- [29] LIU T T, WANG X Y, SHEN L, et al. Apricot can improve root system characteristics and yield by intercropping with alfalfa in semi-arid areas[J]. *Plant and Soil*, 2025, 506(1): 91–108.
- [30] JIANG P, WANG Y Z, ZHANG Y P, et al. Intercropping enhances maize growth and nutrient uptake by driving the link between rhizosphere metabolites and microbiomes[J]. *New Phytologist*, 2024, 243(4): 1506–1521.
- [31] QIU Y R, LI X, TANG Y R, et al. Directly linking plant N, P and K nutrition to biomass production in cotton-based intercropping systems [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 126960.
- [32] AN R, YU R P, XING Y, et al. Enhanced phosphorus-fertilizer-use efficiency and sustainable phosphorus management with intercropping [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(5): 57.
- [33] AINSWORTH E A, YENDREK C R, SKONECZKA J A, et al. Accelerating yield potential in soybean: potential targets for biotechnological improvement[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(1): 38–52.
- [34] NYGREN P, LEBLANC H A. Dinitrogen fixation by legume shade trees and direct transfer of fixed N to associated cacao in a tropical agroforestry system[J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(2): 134–147.
- [35] SUN H R, SHI Y L, ZHAO P, et al. Effects of polyethylene and biodegradable microplastics on photosynthesis, antioxidant defense systems, and arsenic accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown in arsenic-contaminated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161557.
- [36] BÜKS F, KAUPENJOHANN M. Global concentrations of microplastics in soils: a review[J]. *Soil*, 2020, 6(2): 649–662.
- [37] QI Y L, BERIOT N, GORT G, et al. Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115097.
- [38] 朱秀云, 梁梦, 马玉. 根系活力的测定(TTC法)实验综述报告[J]. 广东化工, 2020, 47(6): 211–212. ZHU X Y, LIANG M, MA Y. A review report on the experiments for the determination of root activity by TTC method[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(6): 211–212.
- [39] 贾国燊. 不同粒径微塑料对小白菜植株养分吸收及土壤理化性质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. JIA G Y. Effects of microplastics with different particle sizes on nutrient absorption of Chinese cabbage plants and soil physical and chemical properties[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [40] 李瑞杰, 涂晨, 杨杰, 等. 不同温湿度条件下微塑料对小麦幼苗生长和生理的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 608–616. LI R J, TU C, YANG J, et al. Effects of microplastics on growth and physiology of wheat under different temperature and humidity conditions[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(5): 608–616.
- [41] 陈广龙, 王文静, 王俊. 微塑料对陆生植物生长发育和根际环境影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 625–633. CHEN G L, WANG W J, WANG J. Research progress on the effects of microplastics on the growth and development of terrestrial plants and rhizosphere environment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(5): 625–633.
- [42] GUO C C, BAO X Y, SUN H C, et al. Optimizing root system architecture to improve cotton drought tolerance and minimize yield loss during mild drought stress[J]. *Field Crops Research*, 2024, 308: 109305.
- [43] XU H K, CHEN C, PANG Z, et al. Effects of microplastics concentration on plant root traits and biomass: experiment and meta-analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 285: 117038.
- [44] YANG H, XU H S, ZHANG W P, et al. Overyielding is accounted for partly by plasticity and dissimilarity of crop root traits in maize / legume intercropping systems[J]. *Functional Ecology*, 2022, 36(9): 2163–2175.
- [45] PENG Y F, LI X X, LI C J. Temporal and spatial profiling of root growth revealed novel response of maize roots under various nitrogen supplies in the field[J]. *PLoS One*, 2012, 7(5): e37726.
- [46] HISANO M, SEARLE E B, CHEN H Y H. Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2018, 93(1): 439–456.
- [47] HONG P B, SCHMID B, DE LAENDER F, et al. Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(2): 555–569.
- [48] ABLIMIT R, LI W K, ZHANG J D, et al. Altering microbial community for improving soil properties and agricultural sustainability during a 10-year maize-green manure intercropping in northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115859.
- [49] OLSEN S L, TÖPPER J P, SKARPAAS O, et al. From facilitation to competition: temperature-driven shift in dominant plant interactions affects population dynamics in seminatural grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(5): 1915–1926.
- [50] HUANG Y Y, CHEN Y X, CASTRO-IZAGUIRRE N, et al. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment[J]. *Science*, 2018, 362(6410): 80–83.
- [51] VAN MOORSEL S J, HAHL T, WAGG C, et al. Community evolution increases plant productivity at low diversity[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(1): 128–137.

(责任编辑: 宋潇)