

黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应

李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 赵亚非, 耿佳慧, 孙涌栋, 周俊国, 王广印

引用本文:

李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 973–981.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1241>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁营养状况对黄瓜幼苗吸收转运镉和锌的影响

万亚男, 张燕, 余垚, 陈京生, 袁思莉, 李花粉

农业环境科学学报. 2015(3): 409–414 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.001>

镉在黄瓜幼苗中的化学形态及亚细胞分布

闫雷, 朱园辰, 陈辰, 张思佳, 丁宫尧, 喇乐鹏, 曲娟娟

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1864–1871 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0395>

微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展

刘沙沙, 付建平, 郭楚玲, 党志

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 957–969 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1016>

土壤微塑料污染及生态效应研究进展

任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1045–1058 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1409>

微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响

连加攀, 沈玫玫, 刘维涛

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 973–981.

LI Zhen-xia, LI Qing-fei, LI Rui-jing, et al. Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 973–981.



开放科学 OSID

黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应

李贞霞^{1,2}, 李庆飞^{1,2}, 李瑞静¹, 赵亚非¹, 耿佳慧¹, 孙涌栋^{1,2}, 周俊国^{1,2}, 王广印^{1,2}

(1. 河南科技学院园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省园艺植物资源利用与种质创新工程研究中心, 河南 新乡 453003)

摘要:为研究农田土壤中微塑料和镉污染对黄瓜(*Cucumis sativus* L.)幼苗的生理效应,以两种不同粒径的聚氯乙烯微塑料A(粒径: $<18\ \mu\text{m}$)和B(粒径: $18\sim150\ \mu\text{m}$)及 $20\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的镉为试材,探讨微塑料与镉污染对黄瓜幼苗根系和叶片生理特性的影响。结果表明,微塑料A和B能够缓解镉污染对黄瓜根系活力的影响;微塑料A显著降低了黄瓜幼苗总根长,但对根直径无显著影响。微塑料A、B和镉的复合污染对黄瓜叶片SOD和 H_2O_2 的影响无叠加效应,反而呈现中和效应;微塑料B可以改善镉污染对黄瓜叶片MDA的影响。微塑料粒径不同,其对黄瓜叶片光合色素和光合荧光参数的影响也不同;微塑料A可以显著改善镉污染对黄瓜叶片类胡萝卜素的影 响;微塑料B处理的黄瓜叶片对光能的吸收和耗散能力都高于微塑料A处理;微塑料B与镉的复合污染降低了黄瓜叶片对光能的耗散能力,但增高了其 对光能的捕获能力。灰色关联度分析表明微塑料A和B对生理指标的影响与镉不同,镉与生理指标 H_2O_2 的关联度大;但微塑料A和B与光合作用相关的生理指标关联度大。本研究为农田土壤微塑料与镉污染的生态风险评价提供依据。

关键词:微塑料;镉;黄瓜;生理指标

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-0973-09 doi:10.11654/jaes.2019-1241

Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium

LI Zhen-xia^{1,2}, LI Qing-fei^{1,2}, LI Rui-jing¹, ZHAO Ya-fei¹, GENG Jia-hui¹, SUN Yong-dong^{1,2}, ZHOU Jun-guo^{1,2}, WANG Guang-yin^{1,2}

(1. College of Horticulture and Landscape, Henan Institute of Science and Technology, Xinxian 453003, China; 2. Henan Province Engineering Research Center of Horticultural Plant Resource Utilization and Germplasm Enhancement, Xinxian 453003, China)

Abstract: To investigate the physiological effects of microplastic and cadmium pollution in the soil, the physiological characteristics of the roots and leaves of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings were examined after treatment with two different sizes of polyvinyl chloride particles (A, particle size: $<18\ \mu\text{m}$ and B, particle size: $18\sim150\ \mu\text{m}$) and a dose of cadmium ($20\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). The results showed that microplastics A and B alleviated the effect of cadmium on root activity. Microplastic A significantly reduced the total root length, but had no significant effect on the root diameter of the cucumber seedlings. Pollution by the combination of microplastics A and B and cadmium had no superposition effect on the superoxide diamutase (SOD) activity and H_2O_2 content of the leaves. Instead, it showed a neutralization effect. Microplastic B mitigated the effect of cadmium on malondialdehyde (MDA) content. The different microplastic particle sizes had different effects on the photosynthetic pigments and fluorescence parameters. Microplastic A significantly reduced the effect of cadmium on the carotenoids of cucumber leaves. The light absorption and dissipation capacity of cucumber leaves treated with microplastic B was higher than that of leaves treated with microplastic A. Pollution by the combination of microplastic B and cadmium reduced the light dissipation ability

收稿日期: 2019-11-11 录用日期: 2020-01-03

作者简介: 李贞霞(1973—), 女, 河南南阳人, 副教授, 主要从事蔬菜栽培生理生态研究。E-mail: lizhenxia196@163.com

基金项目: 河南省高等学校重点项目(20B210003); 河南省科技厅基础与前沿项目(142300410140)

Project supported: Key Projects of Henan Province Universities (20B210003); Basic and Frontier Project of Henan Science and Technology Department (142300410140)

of cucumber leaves but improved their light capture ability. A gray correlation analysis showed that the effects of microplastics A and B on the physiological indices differed from that of cadmium. The cadmium treatment had a greater correlation with H_2O_2 content, whereas the treatments with microplastics A and B had greater correlations with photosynthetic indices. This study provides insights useful in the ecological risk assessment of microplastic and cadmium pollution in farmland.

Keywords: microplastic; cadmium; cucumber; physiological indices

目前微塑料作为一种新型环境污染成为环境科学研究的热点之一^[1-2]。关于海洋和潮滩环境中的微塑料污染已有大量研究^[3-5]。近期研究表明,陆地土壤中也存在较为严重的微塑料污染^[6-7]。据估计在欧洲和北美,每年从废水处理厂转移到农业土壤的微塑料超过了目前海水中微塑料的总量^[8]。我国是塑料垃圾排放大国,排放量在全球居首位,仅沿海地区每年排放塑料垃圾高达132万~353万^[9];同时我国农膜的普遍使用导致大量的农膜碎片滞留在土壤中,经过多年的老化分解,这些农膜碎片可能会转化成微塑料^[10]。Liu等^[11]对上海郊区20个菜田土壤中微塑料进行了研究,发现表层土壤比深层土壤含有更高浓度的微塑料。农田土壤中存在的微塑料颗粒大小不同对高等植物生长发育的影响也不同。廖苑辰等^[12]研究发现粒径5 μm 的聚苯乙烯微球较100 nm的聚苯乙烯微球对小麦的生长表现出更大的毒性效应。Jiang等^[13]研究发现粒径5 μm 的聚苯乙烯微球导致蚕豆幼根SOD和POD等抗氧化酶含量显著增高。Qi等^[14]研究发现微塑料(1~50 μm)对小麦生长的负面影响大于大塑料(最大长度6.98 mm,最大宽度6.10 mm)。

农田土壤中除了有微塑料污染外,还存在重金属污染。以河南省新乡市农田土壤镉污染为例,陈碧华等^[15]对新乡市郊的设施农田土壤中镉含量调查发现,其含量随设施种植年限的增加而增大,种植年限10年时,土壤镉含量达到5.73 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而王铁军等^[16]调查新乡市郊环宇电池厂周围生菜根际土壤,发现镉含量高达24.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;说明镉是农田土壤中普遍存在的无机污染物。现有的一些研究表明,农田土壤中的微塑料还可以作为土壤其他有机或无机污染物的载体^[8,17-18],如Brennecke等^[19]观察到,老化的聚氯乙烯(PVC)吸附 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 的水平更高。Gao等^[20]研究发现直径4 mm的PVC和聚丙烯(PP)对铅、锰的吸附能力与海水中金属浓度密切相关。

聚氯乙烯为非结晶热塑性高聚物,应用极为广泛,其产量仅次于聚乙烯位居第二^[21]。PVC农膜以其良好的保温性、流滴性等特点,适用于我国东北、西北、华北等寒冷地区,用于节能日光温室、塑料大中

棚、小棚春提前、秋延后蔬菜栽培^[22]。PVC农膜在农田土壤中长期残留,会老化分解成粒径较小的微塑料。农田土壤中存在微塑料和镉,二者都会影响植物的生长和发育,但目前二者共同存在时对高等植物生理特性影响的研究还尚未有相关报道,因此,本研究以黄瓜(*Cucumis sativus* L.)为对象,以两种不同粒径的聚氯乙烯微塑料及20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的镉为试材,研究微塑料和镉污染对黄瓜生理特性的影响,以期为进一步了解土壤中微塑料和镉污染对植物的生态风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

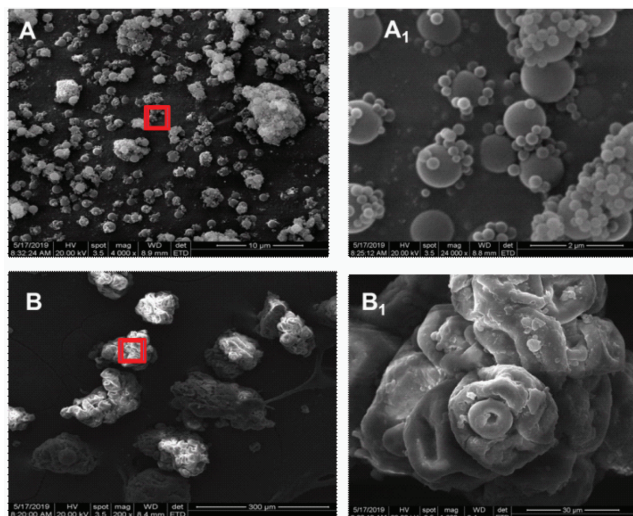
1.1 试验材料

供试黄瓜品种为津优1号,购自河南省新乡市牧野种子经销部。微塑料为高密度聚氯乙烯粉,购自广东艺源塑料原料有限公司,分别过18 μm (代号A)和150 μm (代号B)筛孔,具体形貌见图1。A的粒径范围在100 nm~18 μm ,微小的颗粒有单个分散状态,但大多聚合在一起;B的粒径范围在8~150 μm ,主要以大颗粒形态聚合在一起,其表面凹凸不平,向内形成很多孔隙。供试土壤采自河南科技学院试验田,土壤pH值为8.1,采用玻璃电极法(1:2.5土水比)测定。土壤全氮含量156 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,采用扩散法测定。有机质18.38 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,采用油浴法测定。速效磷15.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,采用碳酸氢钠比色法测定。速效钾119.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,采用醋酸铵提取火焰光度法测定。以上测定方法均参考鲍士旦^[23]《土壤农化分析》方法。

1.2 试验方法

试验设置6个处理,分别为不添加微塑料和外源镉的处理(CK);添加外源镉20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd20);添加1%(微塑料质量与土壤质量之比)微塑料A(A);添加1%微塑料A和20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源镉(A+Cd20);添加1%微塑料B(B);添加1%微塑料B和20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源镉(B+Cd20)。土壤中镉是以硫酸镉的形态添加,称取200 g土壤和相应含量的镉,充分混合后待用。

黄瓜种子浸种后播种于育苗基质中,置于日光温室中培养2周后,用自来水清洗根系并移栽至处理土



A₁和B₁分别是A和B所选定区域的放大
A₁ and B₁ show the enlargement of the selected region of A and B, respectively

图1 微塑料A和B的扫描电镜(SEM)图片

Figure 1 Scanning electron microscope images of microplastic A and B

壤中,处理土壤用硬质黑色塑料培养杯盛装,杯子的高度为9 cm,口径为8 cm,每杯种植1株黄瓜幼苗,每个处理种植5株,继续培养3周后进行各项生理指标的测定。

1.3 测定项目

根系活力采用三苯基四唑氯铵(TTC)法测定^[24]。总根长和根平均直径采用根系扫描仪(EPSON perfection 4990 PHOTO)对根系进行扫描,再经根系分析软件(Win RHIZO Pro 2007 d 13 March 2007)分析,获得总根长和根系平均直径。丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定^[21]。叶绿素含量采用分光光度计比色法测定^[25]。超氧化物歧化酶(SOD)活性参照 Giannopolitis 等^[26]的方法测定。 H_2O_2 采用 $TiCl_4$ 法测定^[27]。叶绿素荧光参数用 HandyPEA 便携式植物效率分析仪(Hansatech,英国)测定,激发光强度为 $3000 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,暗适应时间 30 min;荧光参数由 Handy PEA 软件直接从测定结果中导出,选择每株幼苗的第二片真叶测定,每个处理重复测定5个叶片。

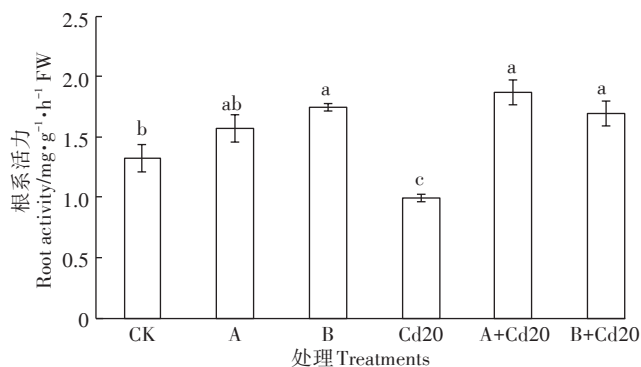
1.4 数据分析

所有处理为完全随机设计,数据均采用 Microsoft Excel 2010 软件进行整理、作图,采用 SPSS 19.0 进行方差分析、灰色关联度分析,采用 Duncan 氏新复极差法进行多重比较($P < 0.05$),图中数据为平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果与讨论

2.1 微塑料和镉污染对黄瓜根系活力的影响

由图2可知,随着微塑料粒径的增大,黄瓜根系活力增大;微塑料A处理根系活力较CK有升高,但差异不显著;微塑料B处理根系活力较CK有显著升高。镉处理显著降低了根系活力。但A+Cd20和B+Cd20根系活力较Cd20显著升高,也较CK显著升高。该结果显示微塑料可以提高根系活力,且能够缓解镉污染对黄瓜根系的伤害。分析微塑料缓解镉污染对根系活力的影响,可能与微塑料对镉的吸附固定有关,据 Li 等^[28]研究表明环境中的微塑料对镉具有显著的吸附能力,说明微塑料可能是通过对镉的吸附固定,减小了镉的生物有效性,从而缓解镉污染对黄瓜根系活力的影响。



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments($P < 0.05$). The same below

图2 微塑料和镉污染对黄瓜根系活力的影响

Figure 2 Effect of microplastics and cadmium on root activity of cucumber

2.2 微塑料和镉污染对黄瓜总根长和根直径的影响

由图3a可知,Cd20和微塑料B对黄瓜根系总根长无显著影响,但微塑料A显著降低了黄瓜总根长。A+Cd20和B+Cd20与A、B和Cd20都无显著差异,显示微塑料粒径不同,对黄瓜根系总根长的影响不同。据李连祯等^[29]研究发现粒径 $0.2 \mu m$ 的聚苯乙烯微球能被生菜根系吸收转运到地上部,而 $1 \mu m$ 微球不能被根系吸收转运到地上部;Jiang 等^[13]研究发现 $100 nm$ 聚苯乙烯微球可在蚕豆幼根中积累,且具有基因毒性;而本研究中微塑料A的粒径范围涵盖了上述研究的微塑料粒径范围。推测微塑料A中的部分颗粒可能会被吸收转运进黄瓜植株体内,而微塑料B不能被黄瓜根系吸收。微塑料A对根系形态的影响可能与黄瓜

根系对其吸收积累和转运有关,如果微塑料A中的颗粒被黄瓜根系吸收,不能迅速转运到地上部,就会在根中积累,堵塞根系输导组织,影响根系发育。

由图3b可知,Cd20显著增粗了黄瓜幼苗根直径。微塑料A和B对根直径无显著影响。A+Cd20和B+Cd20与A、B和Cd20差异都不显著,但B+Cd20与CK差异显著,而A+Cd20与CK差异不显著,显示微塑料与镉的复合污染对根直径的影响因微塑料粒径不同而有差异。

2.3 微塑料和镉污染对黄瓜叶片MDA含量的影响

MDA是膜脂过氧化的产物,是细胞膜稳定性的标志物^[26]。由图4可知,Cd20处理显著提高了黄瓜叶片MDA含量。微塑料A和B的MDA含量较CK无显著影响。A+Cd20较A、Cd20、CK差异都不显著;B+Cd20与Cd20差异显著,但和B及CK差异不显著。说明微塑料A和B没有显著影响黄瓜叶片MDA含量的变化;但微塑料B可以改善镉污染对黄瓜叶片MDA的影响。推测与微塑料B的形貌结构有关,据图1可知,微塑料B的粒径较大,结构扭曲,其孔隙度和不规则程度要大于微塑料A,这种结构可能对外源镉的吸附固定能力强于微塑料A,从而可以显著改善镉污染对黄瓜叶片MDA的影响。

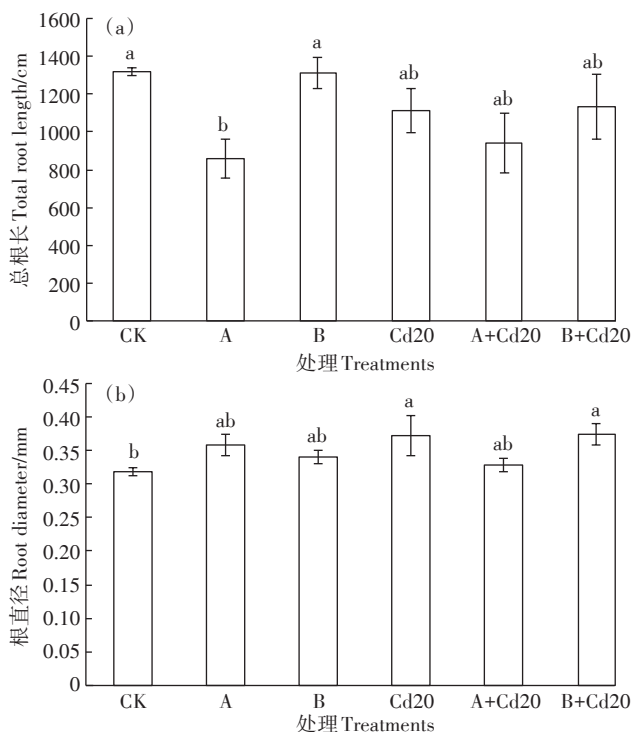


图3 微塑料和镉污染对黄瓜总根长和根直径的影响

Figure 3 Effect of microplastics and cadmium on total root length and root diameter of cucumber

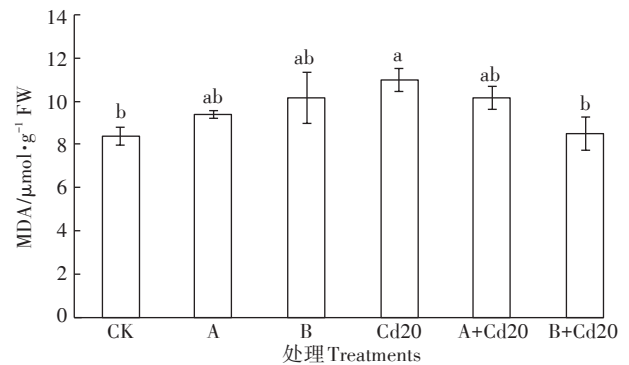


图4 微塑料和镉污染对黄瓜叶片MDA含量的影响

Figure 4 Effect of microplastics and cadmium on MDA content of cucumber leaves

2.4 微塑料和镉污染对黄瓜叶片SOD和H₂O₂的影响

由图5a可知,微塑料A、B和Cd20都使SOD活性显著增强,但A+Cd20和B+Cd20与微塑料A、B和Cd20的SOD活性无显著差异。说明微塑料和镉都可以显著提高黄瓜叶片的SOD活性,二者的复合污染对SOD活性无叠加效应,相反存在中和效应。这可能与微塑料在土壤中的形貌变化有关,据Horton等^[30]研究表明进入土壤环境的微塑料在紫外照射及与土壤其他组分的相互作用下存在结构形貌改变,可以与土壤有机质等结合,形成更大的聚合态,增大对镉的吸附或固定能力,导致土壤镉生物有效性降低,从而出现中和效应。

由图5b可知,Cd20显著升高了黄瓜叶片H₂O₂的含量,微塑料A和B没有显著改变H₂O₂含量。A+Cd20和B+Cd20的叶片H₂O₂含量较A和B都有轻微升高,A+Cd20较Cd20有轻微降低,但差异都不显著。微塑料和镉的复合污染对H₂O₂的影响也呈中和效应。

2.5 微塑料和镉污染对光合色素含量的影响

由图6a和图6b可知,微塑料A、B和Cd20处理对叶绿素a和叶绿素b含量都无显著影响。A+Cd20和B+Cd20处理的叶绿素a和叶绿素b含量较A、B和Cd20差异都不显著,但A+Cd20和B+Cd20之间差异显著。提示微塑料粒径不同,其与镉复合污染对黄瓜叶片叶绿素a和叶绿素b的影响不同。

类胡萝卜素即是光合作用的辅助色素,也是逆境条件下植物抗氧化系统的重要成员,不仅可以起着光吸收和光保护的作用,也可以在防御光破坏中发挥重要作用^[31]。由图6c可知,微塑料A和B处理都可以显著降低黄瓜叶片类胡萝卜素含量;这与廖苑辰等^[12]研究微塑料(粒径100 nm和5 μm)对小麦叶片类胡萝卜

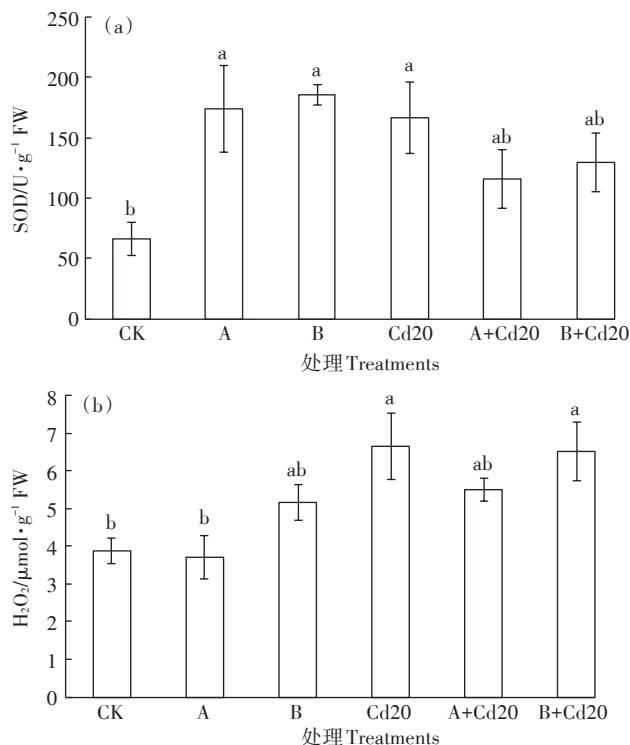
图5 微塑料和镉污染对黄瓜叶片SOD和H₂O₂的影响

Figure 5 Effect of microplastics and cadmium on SOD and H₂O₂ of cucumber leaves

素的影响具有一致性;这个结果显示微塑料会破坏叶片类胡萝卜素的合成。Cd20也可以显著降低叶片的类胡萝卜素合成。A+Cd20和B+Cd20的类胡萝卜素含量较微塑料A和B差异不显著,但A+Cd20较Cd20差异显著。提示微塑料A可以显著改善镉污染对黄瓜叶片类胡萝卜素的影响。

2.6 微塑料和镉污染对叶绿素荧光参数的影响

2.6.1 对基础荧光参数的影响

F_0 是光系统Ⅱ(PSⅡ)反应中心处于完全开放时的荧光产量。由图7a可知,微塑料A和Cd20显著降低了 F_0 ,但A+Cd20的 F_0 较A和Cd20无显著差异。微塑料B的 F_0 较CK无显著差异;B+Cd20较Cd20无显著差异,但较B有显著差异。而且A+Cd20和B+Cd20之间差异显著。说明 F_0 受微塑料粒径的影响,微塑料与镉复合污染的 F_0 因微塑料粒径不同而有差异。

F_m 是PSⅡ反应中心处于完全关闭时的荧光产量。由图7b可知,微塑料A、B和Cd20对 F_m 无显著影响。A+Cd20较A和Cd20差异都不显著;但B+Cd20较B和Cd20差异显著。显示微塑料B和镉的复合污染可以改善微塑料B和镉对黄瓜叶片 F_m 的影响。

F_v/F_m 是PSⅡ最大光化学量子产量,反映PSⅡ反

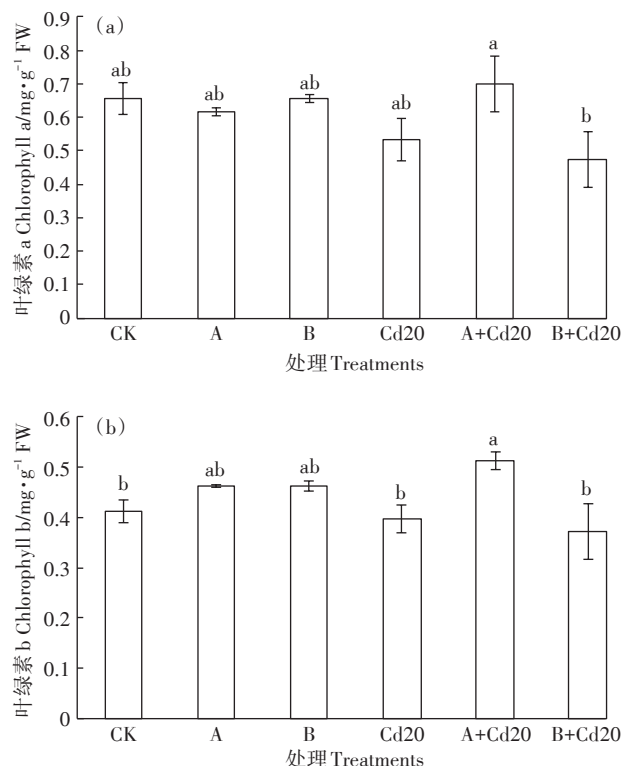


图6 微塑料和镉污染对黄瓜叶片光合色素含量的影响

Figure 6 Effect of microplastics and cadmium on photosynthetic pigment contents of cucumber leaves

应中心内禀光能转换效率。有研究表明叶绿素荧光参数 F_v/F_m 在非胁迫条件下变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下 F_v/F_m 降低^[32-33]。由图7c可知,微塑料A、B和Cd20对 F_v/F_m 无显著影响。A+Cd20较A和Cd20无显著差异。但B+Cd20较B有显著差异。显示B和镉的复合污染可以改善B对黄瓜叶片 F_v/F_m 的影响,这与 F_m 的趋势是一致的。

PI_{abc} 是PSⅡ以吸收光能为基础的性能指数。由图7d可知,微塑料A和B的 PI_{abc} 较CK无显著影响,A+Cd20和B+Cd20与A、B和Cd20差异都不显著。但微塑料A和B差异显著,提示微塑料粒径不同对黄瓜

叶片的 PI_{abc} 影响不同。

综上所述,微塑料 A 和 B 都会显著影响黄瓜叶片叶绿素荧光参数 F_0 和 PI_{abc} 的变化,微塑料 B 和镉的复合污染可以改善微塑料 B 对叶片 F_m 和 F/F_m 的影响。

2.6.2 对能量流动参数的影响

ABS/RC 是 PS II 单位反应中心吸收的光能, DIo/RC 是 PS II 单位反应中心耗散的光能。由图 8a 和 8b 可知,微塑料 A、B 和 Cd20 对 ABS/RC 和 DIo/RC 无显著影响。但微塑料 A 和 B 之间差异显著, B 处理的 ABS/RC 和 DIo/RC 显著高于 A 处理。提示 B 处理对光能的吸收和耗散能力都高于 A 处理。但 B+Cd20 的 DIo/RC 显著低于 B, 提示 B 与镉的复合污染降低了黄瓜叶片对光能的耗散能力。

TRo/RC 是 PS II 单位反应中心捕获的光能。由图 8c 可知,微塑料 A、B 和 Cd20 处理 TRo/RC 较 CK 都无显著差异。A+Cd20 和 B+Cd20 较微塑料 A、B 和 Cd20 也无显著差异。但 A+Cd20 和 B+Cd20 之间差异显著。提示 B 与镉的复合污染对光能的捕获大于 A 与镉的复合污染。

ETo/RC 是 PS II 单位反应中心用于电子传递的光能。由图 8d 可知,各处理 ETo/RC 之间无显著差异。

REo/RC 是 PS II 单位反应中心传递到 PSI 的光能。由图 8e 可知, Cd20 显著降低了 REo/RC , 微塑料 A 和 B 与镉的复合污染对 REo/RC 无显著影响。

综上所述,微塑料 B 对黄瓜叶片光能的吸收和耗散能力的影响都高于微塑料 A; 微塑料 B 与镉的复合污染降低了黄瓜叶片对光能的耗散能力, 但增高了其光能的捕获能力。

2.7 微塑料和镉处理对黄瓜生理指标的灰色关联度分析

由表 1 可知,与镉处理关联系数最大的生理指标是 H_2O_2 。说明镉胁迫首先使活性氧增加,叶片中产生大量 H_2O_2 积累,进一步引起其他生理指标的变化。与微塑料 A 关联系数最大的生理指标是 PI_{abs} , 其次为叶绿素 b 和 F_m 等。说明微塑料 A 首先引起以吸收光能为基础的性能指数 PI_{abs} 的改变,进而引起叶绿素 b 含量的改变,进一步引起其他生理指标的变化。与微塑料 B 关联系数最大的 5 个指标是 ETo/RC 、根系活力、 TRo/RC 、 ABS/RC 和 REo/RC , 这 5 个指标中有 4 个都与叶片能量流动有关。说明微塑料 B 最先引起叶片能量流动分配参数和根系活力的变化,进而引起其他生理指标的变化。

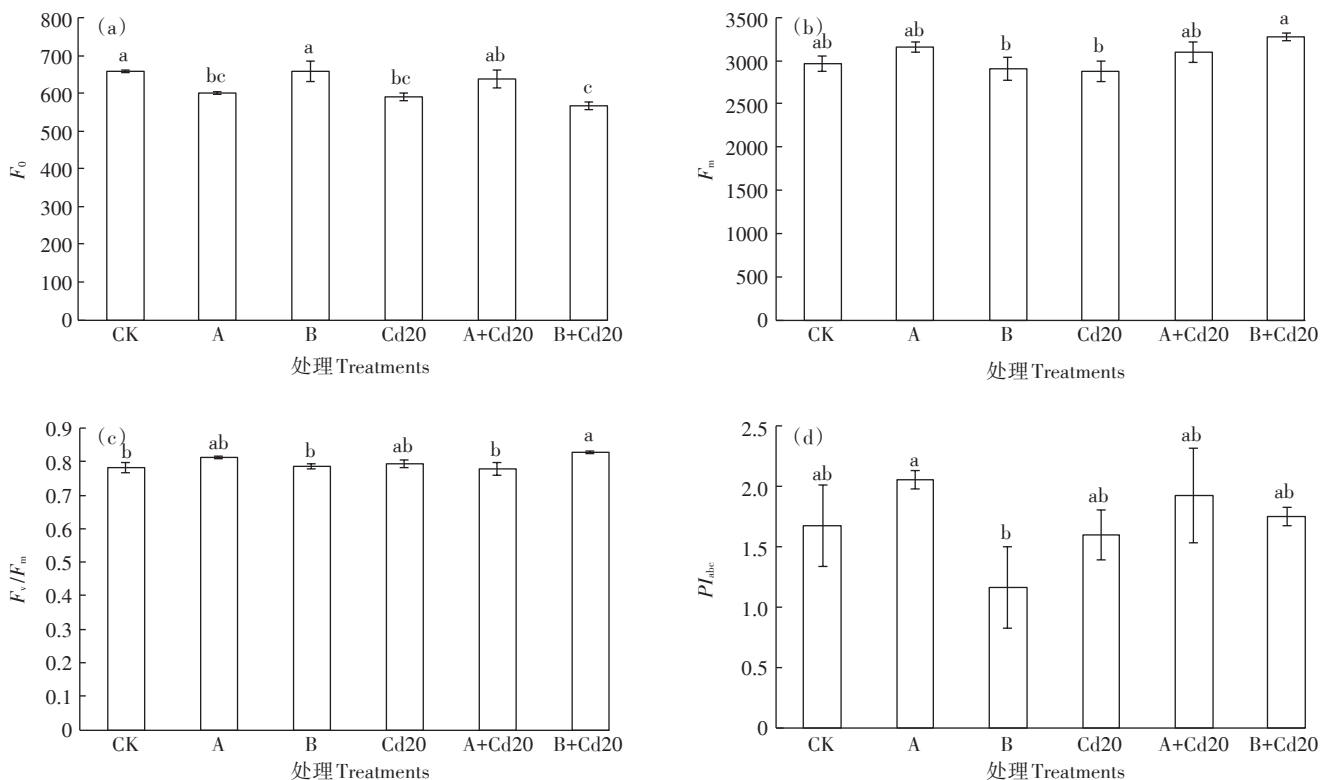


图7 微塑料和镉污染对叶绿素基础荧光参数的影响

Figure 7 Effect of microplastics and cadmium on chlorophyll basal fluorescence parameters

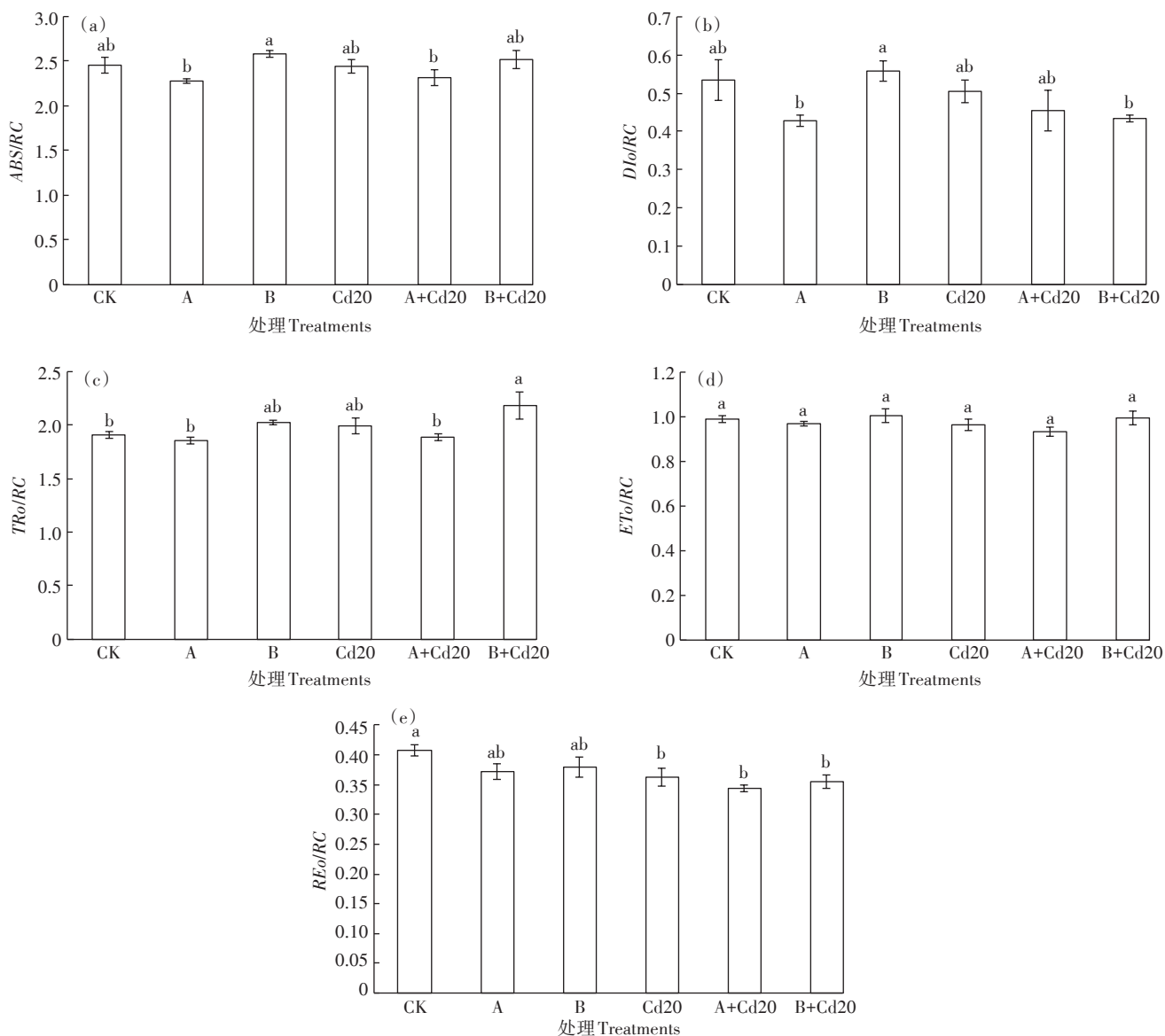


图8 微塑料和镉污染对能量流动参数的影响

Figure 8 Effect of microplastics and cadmium on energy flow parameters

微塑料引起黄瓜生理指标变化的顺序与镉不同,微塑料 A 和 B 虽然对生理指标的影响顺序有差异,但与二者关联系数较大的指标都和黄瓜光合性能有关,说明微塑料处理首先会影响黄瓜叶片的光合作用。据廖苑辰等^[12]的研究认为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 剂量(与本研究 1% 的微塑料添加量相同)的微塑料对小麦叶片光合系统产生了损害,阻碍蛋白质的合成;这与本研究的灰色关联度分析结果具有一致性。在本研究中,微塑料与光合作用相关的生理指标关联度大,说明微塑料会影响植物的光合系统,其影响机制可能与微塑料的粒径等有关。

综合分析微塑料和镉及其复合污染对黄瓜叶片

生理指标的影响发现,在镉污染的情况下,微塑料对土壤镉生物有效性的影响具有部分减轻作用。但微塑料对镉的吸附固定能力及不同剂量和粒径的微塑料对镉生物有效性的影响等还需进一步的试验证实。

3 结论

(1)微塑料 A 和 B 能够缓解镉污染对黄瓜根系活力的影响;微塑料 A 显著降低了黄瓜幼苗总根长,但对根直径无显著影响。微塑料 A、B 和镉的复合污染对黄瓜叶片 SOD 和 H_2O_2 的影响无叠加效应,反而呈现中和效应;微塑料 B 可以改善镉污染对黄瓜叶片 MDA 的影响。

表1 镉和微塑料处理对黄瓜生理指标的灰色关联度分析

Table 1 Grey correlation degree analysis of physiological index with cadmium and microplastic of cucumber

排序 Sort	镉 cadmium		微塑料 A Microplastic A		微塑料 B Microplastic B	
	生理指标 Physiological index	关联系数 Correlation value	生理指标 Physiological index	关联系数 Correlation value	生理指标 Physiological index	关联系数 Correlation value
1	H ₂ O ₂	0.800 3	PI _{abs}	0.767 9	ETo/RC	0.745 7
2	根直径	0.707 4	叶绿素 b	0.713	根系活力	0.721 1
3	F _m	0.675 5	F _m	0.710 6	TRo/RC	0.717 8
4	TRo/RC	0.664 2	F _v /F _m	0.683 9	ABS/RC	0.705 6
5	MDA	0.662 5	SOD	0.639 5	REo/RC	0.661 8
6	根系活力	0.651 2	类胡萝卜素	0.638 4	总根长	0.649 5
7	F _v /F _m	0.633	根系活力	0.637 2	叶绿素 b	0.644 6
8	PI _{abs}	0.620 3	REo/RC	0.635 1	F _v /F _m	0.640 6
9	ABS/RC	0.607	叶绿素 a	0.622 5	F ₀	0.639
10	SOD	0.561 1	根直径	0.618 5	PI _{abs}	0.637 2
11	DIo/RC	0.554 7	MDA	0.613 9	MDA	0.634 7
12	ETo/RC	0.550 1	F ₀	0.605 5	SOD	0.628 6
13	叶绿素 b	0.550 1	H ₂ O ₂	0.573 8	叶绿素 a	0.621 9
14	总根长	0.538 6	TRo/RC	0.57	H ₂ O ₂	0.621 4
15	F ₀	0.535 5	ETo/RC	0.559 2	F _m	0.617 1
16	叶绿素 a	0.533 1	总根长	0.535 2	DIo/RC	0.612 3
17	类胡萝卜素	0.511 8	ABS/RC	0.525 1	类胡萝卜素	0.601 8
18	REo/RC	0.468 4	DIo/RC	0.515 3	根直径	0.600 8

(2)微塑料粒径不同,其对黄瓜叶片光合色素和光合荧光参数的影响也不同;微塑料A可以显著改善镉污染对黄瓜叶片类胡萝卜素的影响;微塑料B对光能的吸收和耗散能力都高于微塑料A;微塑料B与镉的复合污染降低了黄瓜叶片对光能的耗散能力,但提高了其对光能的捕获能力。

(3)灰色关联度分析表明微塑料A和B对生理指标的影响与镉不同,镉与生理指标H₂O₂的关联度大;微塑料A和B与光合作用相关的生理指标关联度大。

参考文献:

- [1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672):838.
- [2] Peng G, Xu P, Zhu B, et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234:448-456.
- [3] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223):768-771.
- [4] Rocha-Santos T, Duarte A C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 65(3):47-53.
- [5] Machado A A D, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4):1405-1416.
- [6] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(6):3591-3598.
- [7] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50:5774-5780.
- [8] Alimi O S, Budarz J F, Hernandez L M, et al. Microplastics and nano-plastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(4):1704-1724.
- [9] 周倩,章海波,周阳,等.滨海河口潮滩中微塑料的表面风化和成分变化[J]. *科学通报*, 2018, 63(2):214-223.
ZHOU Qian, ZHANG Hai-bo, ZHOU Yang, et al. Surface weathering and changes in components of microplastics from estuarine beaches[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(2):214-223.
- [10] Ng E L, Huerta L E, Eldridge S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627:1377-1388.
- [11] Liu M T, Lu S B, Song Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242:855-862.
- [12] 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.
LIAO Yuan-chen, Nazygul·Jahitbek1, LI Mei, et al. Effects of micro-

- plastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4661–4667.
- [13] Jiang X, Chen H, Liao Y, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 831–838.
- [14] Qi Y, Yang X, Pelaez A M, et al. Macro-and micro-plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1048–1056.
- [15] 陈碧华, 杨和连, 周俊国, 等. 大棚菜田种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 213–218.
CHEN Bi-hua, YANG He-lian, ZHOU Jun-guo, et al. Effect of cultivating years of vegetable field on soil heavy metal content and enzyme activity in plastic shed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 213–218.
- [16] 王铁军, 苏楠楠, 雷 鹏, 等. 重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5133–5141.
WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, et al. Community structure of the heavy metal immobilized bacteria in the lettuce (*Lactuca sativa* L.) rhizosphere soil polluted by heavy metals and its effects on reducing heavy metal accumulation in lettuce[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5133–5141.
- [17] Lee H, Shim W J, Kwon J H. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470–471: 1545–1552.
- [18] Teuten E L, Rowland S J, Galloway T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(22): 7759–7764.
- [19] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment[J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 2016, 178: 189–195.
- [20] Gao F, Li J, Sun C, et al. Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 144: 61–67.
- [21] 李永磊, 邱瑞玲. 中国聚氯乙烯生产技术与市场分析[J]. 聚氯乙烯, 2011, 39(6): 1–4.
LI Yong-lei, QIU Rui-ling. Polyvinyl chloride (PVC) production technology and market analysis in China[J]. *Polyvinyl Chloride*, 2011, 39(6): 1–4.
- [22] 王耀林. 棚(室)覆盖薄膜的性能、选择与应用[J]. 中国蔬菜, 2010(17): 43–44.
WANG Yao-lin. Performance, selection and application of greenhouse mulch film[J]. *Chinese Vegetables*, 2010(17): 43–44.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] Zhang X, Huang G, Bian X, et al. Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere[J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59(2): 80–88.
- [25] Zhang Y, Du N, Wang L, et al. Physical and chemical indices of cucumber seedling leaves under dibutyl phthalate stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5): 3477–3488.
- [26] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutase in higher plants [J]. *Plant Physiology*, 1977, 59: 309–314.
- [27] Feng M L, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel anti-algal allelochemical from *Phragmites communis*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71: 6545–6553.
- [28] Li X W, Mei Q Q, Chen L B, et al. Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process[J]. *Water Research*, 2019, 157: 228–237.
- [29] 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 Lian-zhen, ZHOU Qian, YIN Na, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(9): 928–934.
- [30] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127–141.
- [31] Siefertmann D, Yamamoto H Y. Properties of NADPH and oxygen-dependent zeaxanthine epoxidation in isolated chloroplasts: A transmembrane model for the violaxanthin cycle[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1975, 171(1): 70–77.
- [32] 郝召君, 周春华, 刘 定, 等. 高温胁迫对芍药光合作用、叶绿素荧光特性及超微结构的影响[J]. 分子植物育种, 2017, 15(6): 2359–2367.
HAO Zhao-jun, ZHOU Chun-hua, LIU Ding, et al. Effects of high temperature stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ultrastructure of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.)[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(6): 2359–2367.
- [33] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444–448.
ZHANG Shou-ren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444–448.