

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响

郭冰林¹, 丰晨晨¹, 陈悦¹, 林迪^{1*}, 李岚涛²

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450046; 2. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 揭示小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 微塑料胁迫响应特征, 为微塑料污染生理生态机制阐释以及微塑料污染土壤生物修复提供理论基础与实验参考。通过室内水培实验, 研究不同粒径 (100 nm 和 1 000 nm) 聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 胁迫对小白菜生长发育、光合生理、抗氧化酶活性、营养品质、解剖结构和冠层群体温度的影响效应。结果表明, PS-MPs (100 nm 和 1 000 nm) 胁迫均显著抑制小白菜生长发育和光合生理过程, 其叶片数、株高、叶面积和生物量等表型指标以及叶绿素 a (Chl-a)、叶绿素 b (Chl-b)、叶绿素 a + b (Chl-a + b)、类胡萝卜素 (Car) 和光合特性等均随 PS-MPs 胁迫增加而显著降低。同时, PS-MPs 胁迫显著增强了小白菜氧化应激反应能力。随 PS-MPs 胁迫增强, 叶片过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性以及丙二醛 (MDA) 含量均呈先升高后降低的变化趋势。PS-MPs 胁迫降低了小白菜叶片厚度、海绵组织厚度和栅栏组织厚度。此外, PS-MPs 胁迫显著提升了小白菜叶片植株冠层群体温度。综上, PS-MPs 胁迫对小白菜生长发育及理化特性均具有明显的抑制作用和毒性损伤。

关键词: 微塑料 (MPs); 小白菜; 生长发育; 生理特征; 冠层温度

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5080-12 DOI: 10.13227/j.hjlx.202209260

Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (*Brassica chinensis* L.)

GUO Bing-lin¹, FENG Chen-chen¹, CHEN Yue¹, LIN Di^{1*}, LI Lan-tao²

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The aim of this study was to clarify the response characteristics of Chinese cabbage pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under two particle size (100 nm and 1 000 nm) polystyrene microplastic (PS-MPs) stress conditions. This study can provide a theoretical basis and experimental reference for the interpretation of the physiological and ecological mechanism of microplastic pollution and the bioremediation of microplastic-contaminated soil. Hydroponic experiments were carried out to study the effects of two particle sizes (100 nm and 1 000 nm) of PS-MPs on growth, photosynthetic physiology, antioxidant enzyme activities, nutritional quality, anatomical structure, and canopy temperature in Chinese cabbage pakchoi. The results showed that PS-MPs stress significantly inhibited the growth and development of Chinese cabbage pakchoi. When PS-MPs stress was increased, the phenotypic indicators were significantly reduced. Meanwhile, PS-MPs stress significantly enhanced the oxidative stress response of Chinese cabbage pakchoi, such as the activities of catalase (CAT), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), and ascorbate peroxidase (APX) and the content of malondialdehyde (MDA) in leaves. Such a change tended to decrease the thickness of fenestrated and leaf and spongy tissues. Moreover, PS-MPs stress significantly increased the canopy population temperature of the Chinese cabbage pakchoi leaves. Microplastic stress had obvious inhibitory effects and toxic damage on the growth, development, and physical and chemical properties of Chinese cabbage pakchoi.

Key words: microplastics (MPs); Chinese cabbage pakchoi; growth and development; physiological traits; canopy temperature

近年来,随着塑料及其制品在工农业生产以及人们日常生活中得以广泛应用,进入生态环境中的塑料废弃物在物理、化学及生物降解等多种因素作用下形成大量的微塑料^[1]。微塑料 (microplastics, MPs) 指尺寸小于 5 mm 的塑料纤维、颗粒和碎片等,具有粒径小、质量轻、强疏水性、耐腐蚀和难降解等特点^[2]。MPs 易于在海洋、河流和湖泊中随水循环及空气中大气环流长距离迁移,在土壤生态环境系统中广泛并长期存在。有研究表明,MPs 进入土壤后不仅可直接改变土壤物理结构,还因其携带的传统污染物可显著影响土壤生物化学性质^[3]。此外,土壤中的 MPs 被植物吸收后,不但影响植物正

常生长发育,而且随植物进入营养链作为食物被人体摄入,对人体健康和生态环境构成较大危害风险^[4]。因此,系统探究 MPs 胁迫对植物生长发育及理化特性影响效应,对保护生态环境及人类身体健康具有重大意义^[5]。

目前,MPs 被认定为“一类新型环境污染物”并

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41907323); 河南省科技攻关项目 (222102320078); 河南农业大学青年英才基金项目 (3050072630500427)

作者简介: 郭冰林 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型污染物的生态毒性效应, E-mail: 954384176@qq.com

* 通信作者, E-mail: lindidi2018@henau.edu.cn

逐渐引起了越来越多专家学者的关注和重视^[6]. 从来源上看,土壤中 MPs 来源途径主要有 3 种:① 土壤中的塑料薄膜在光照及微生物作用下降解残留的塑料颗粒;② 污水处理过程中较大的塑料颗粒沉降在污泥中,部分较小的 MPs,特别是微米或纳米塑料因体积小无法被过滤,最后随净化水灌溉到农田里,而污泥又被作为肥料和有机肥一起施于田中;③ MPs 随地表水流浸入土地、大气中的 MPs 随雨水沉降以及填埋场塑料垃圾的渗流等^[7]. 有研究发现,MPs 经土壤进入植物体后会引发一系列生态毒理学效应,如细胞毒性、氧化应激响应和行为异常等,严重时甚至造成植物死亡^[8]. 另有研究认为,MPs 对植物叶片叶绿素含量、生物量、可溶性蛋白质和光合作用等理化参数具有显著抑制效应^[9,10]. 张晨等^[11]研究认为,MPs 对不同植物的株高有显著影响,如黑藻在受到不同浓度聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)胁迫后株高显著低于对照株,而黄瓜在 PS-MPs 胁迫后株高明显低于对照^[12].

目前,自然生态环境中 MPs 存在的种类、浓度和粒径大小等各不相同,对植物生长发育影响效应尚无一致定论. 小白菜(*Brassica chinensis* L.)作为鲜食绿叶蔬菜,鲜嫩口感好且热量低,备受消费者青睐,在全国各地均有广泛种植. 如何减少小白菜等蔬菜产品中 MPs 污染效应,控制 MPs 向食物链迁移,保障农产品质量安全成为了一个重要科学问题,也是一个亟待解决的技术难题. 不同于其他植物,有关小白菜等蔬菜中 MPs 胁迫的研究则相对较少,其响应 MPs 胁迫生理生态机制仍不明确;此外,不同 MPs 胁迫下小白菜生长发育、营养品质和光温响应特性仍待深入研究明确. 因此,深入开展 MPs 对植物生长发育及理化特性影响效应研究,对保护生态环境及人类身体健康具有重大意义. 基于此,本文以小白菜为研究对象,以聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)为供试材料,利用室内水培实验,系统分析了两种粒径(100 nm 和 1 000 nm) PS-MPs 对小白菜生长发育、光合生理、抗氧化酶活性、营养品质、叶片解剖结构和冠层温度变化规律与应激响应特征,以期揭示小白菜 MPs 毒理学研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料与方法

供试小白菜(*Brassica chinensis* L.)为市场上常见和广泛种植的代表性品种“五月慢”,购自上海申耕农业发展有限公司. 该品种全生育期 150 d 左右,适应性强,品质好,株型高大,株高 30 cm,开展度 30 cm,单株重 500 g 左右,亩产高达 4 000 kg,在中国全

国范围均可种植.

水培实验于河南农业大学水培实验室进行. 选取籽粒饱满和大小均一的小白菜种子,先用 15% H_2O_2 浸泡 15 min,再用蒸馏水完全洗净后放入 30℃ 左右的温水中浸泡 20 min,而后均匀放入装有少量水的专用育苗盘内,置于 25℃ 恒温培养箱暗培养 120 h 后转入人工气候室. 待小白菜长至两叶一心时,选取长势一致幼苗移植到 1/8 霍格兰(Hoagland's)营养液,黑色塑料盒中进行培养. 塑料盒上盖有带均匀小圆孔的黑色泡沫塑料板,将小白菜幼苗用海绵固定于小圆孔内. 每间隔 3 d,随小白菜幼苗长势增大,逐步将营养液浓度调整为 1/4、1/2 和全量霍格兰浓度. 水培实验均在人工气候室进行,昼夜时间 16 h/8 h,昼夜温度均保持为 20℃,相对湿度为 55%~65%.

待小白菜第 3 片心叶完全展开时,浇灌添加 2 种粒径(100 nm、1 000 nm)和不同浓度(0、0.01、0.1、1、10、20 $mg \cdot L^{-1}$) PS-MPs 的霍格兰营养液,使 PS-MPs 胁迫为低(0.01 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.1 $mg \cdot L^{-1}$)、中(1 $mg \cdot L^{-1}$)和高(10 $mg \cdot L^{-1}$ 和 20 $mg \cdot L^{-1}$)这 3 个等级. 每 3 d 更换一次营养液,同时控制营养液的 pH 值在 6.0 左右(图 1). 每个处理分别设 5 个重复.

1.2 数据采集与分析

1.2.1 表型生长指标测定

分别于小白菜四叶期、六叶期和八叶期,使用直尺(精确到 0.1 cm)测量小白菜株高;利用数码相机拍照法无损测试叶面积^[13]. 将小白菜地上部和根称重后,置于 105℃ 烘箱中杀青 30 min,然后降温至 70℃ 烘干至恒重,称其干重.

1.2.2 叶片光合指标测定

分别于小白菜上述生育期,采用 LI-6400 光合测定系统对其第一片完全展开叶中部进行净光合速率(Photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)和蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)等光合指标测定. 光强设为 1 200 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$,使用 CO_2 缓冲气瓶保证气流稳定.

1.2.3 叶片叶绿素含量测定

分别于小白菜上述生育期,各处理选取同第 3 片完全展开叶(自上而下),采用丙酮浸提、分光光度法测试叶片叶绿素含量(Chl-a、Chl-b 和 Car)^[14].

1.2.4 抗氧化酶活性测定

于上述各生育期采集小白菜完全展开叶叶片. 分别采用碘量法测试过氧化氢酶(catalase, CAT)活

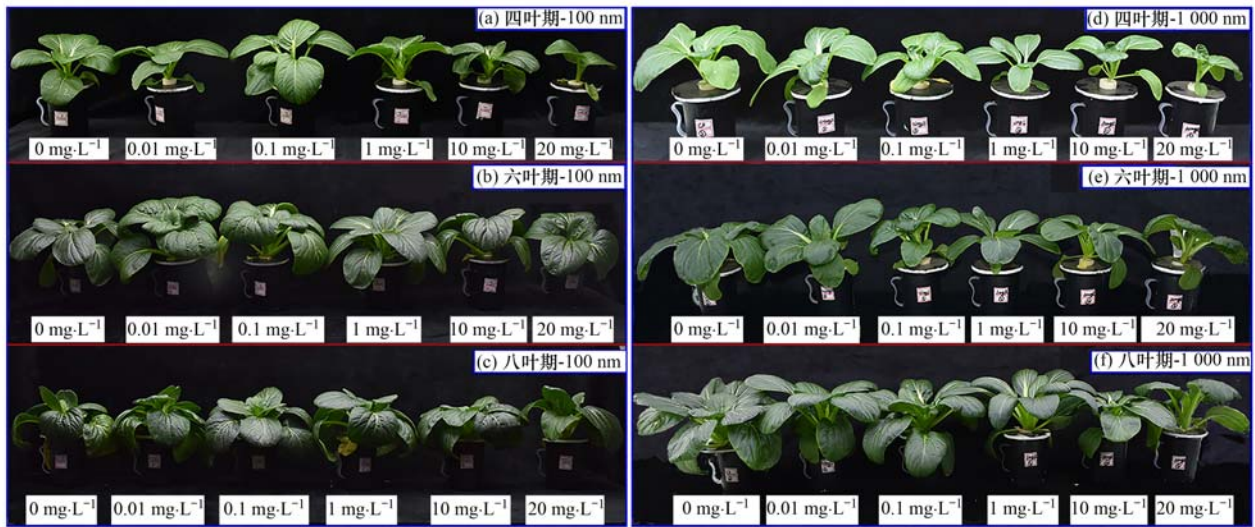


图1 不同 PS-MPs 胁迫下小白菜生长发育情况

Fig. 1 Growth and development of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

性、氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性、愈创木酚法测定过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性和硫代巴比妥酸法测丙二醛 (malonic dialdehyde, MDA) 活性^[15]。

1.2.5 叶片解剖结构测定

于各生育期选取小白菜第一片完全展开叶,在距离主叶脉 0.5 cm 左右处剪取 1 cm×3 cm 大小叶片,固定包埋后制成叶片横切片,甲苯胺蓝染色,在 OLYMPUS BH2 型植物显微成像分析系统选取 5 个视野清晰的位置拍摄,拍摄倍数为 200 倍。利用 Image-Pro Plus 6.0 专业图像分析软件测量叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度等叶片解剖指标,分析探究 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片解剖结构影响效应。

1.2.6 植物热成像指标测定

为深入研究 PS-MPs 胁迫对小白菜植株光温生长发育影响特性,在光合速率测试基础上,采用 Fluke TiX650 型红外热成像仪测试其不同 PS-MPs 胁迫处理下植株冠层温度。该仪器空间分辨率为 0.8 mrad。拍摄时红外相机固定在小白菜植株上方约 1.0 m 高度,45°观察角俯视拍摄。每个重复拍摄 4 张照片,采用 SmartView 专业软件对小白菜冠层温度进行计算分析。

1.3 数据分析

基础数据输入和分析采用 Excel 2007 软件进行;方差分析采用 SPSS 25.0 进行;利用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

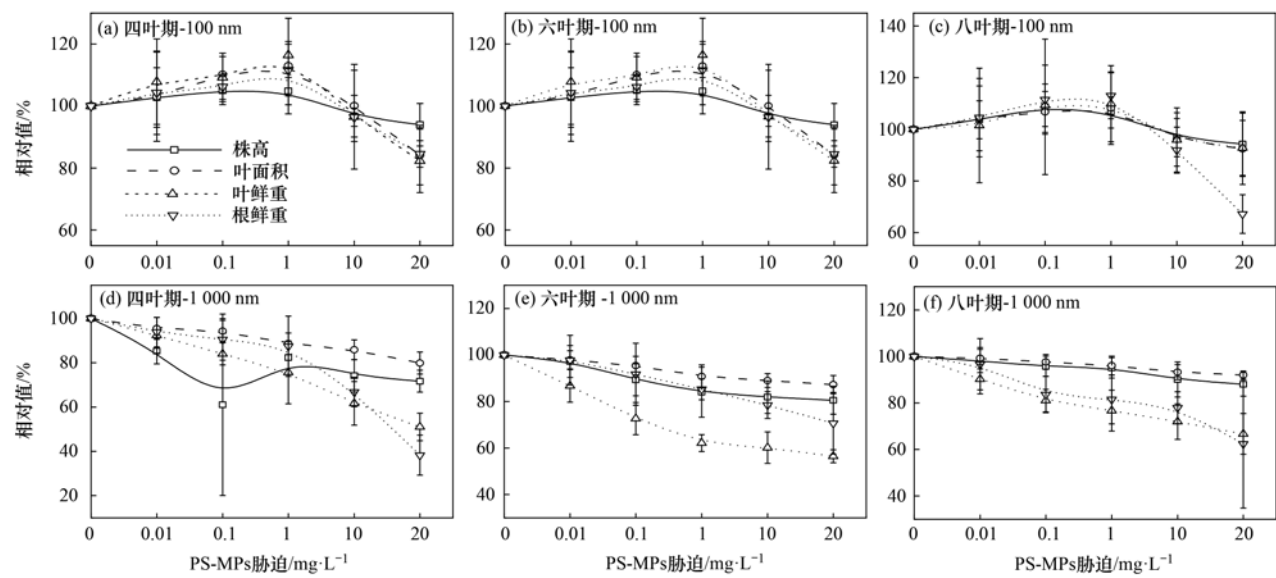
2.1 PS-MPs 胁迫对小白菜表型生长指标的影响

不同 PS-MPs 胁迫对小白菜不同生育期株高、

叶面积、叶鲜重和根鲜重等表型指标胁迫效应如图 2 所示。结果表明,100 nm PS-MPs 对小白菜各生育期胁迫效应表现为中、低胁迫(0~1 mg·L⁻¹)时株高、叶面积、叶鲜重和根鲜重逐步增强;10~20 mg·L⁻¹ PS-MPs 胁迫下株高、叶面积、叶鲜重和根鲜重均显著低于对照处理。当 100 nm PS-MPs 胁迫为 1 mg·L⁻¹ 时,小白菜各生育期株高、叶面积、叶鲜重和根鲜重均达到最大值。对于 1000 nm PS-MPs 而言,随胁迫增加,小白菜株高、叶面积、叶鲜重和根鲜重均呈降低趋势,且随生育期推进,其抑制效应有所缓解。以四叶期和八叶期为例,20 mg·L⁻¹ PS-MPs 处理小白菜株高、叶面积、叶鲜重和根鲜重分别降低 28%、20%、49%、62% 和 12%、8%、33% 和 38%。与 100 nm PS-MPs 相比,1000 nm PS-MPs 表现出更强的生长抑制作用,且 1000 nm PS-MPs 胁迫越高,危害越严重。

2.2 PS-MPs 胁迫对小白菜叶绿素含量的影响

不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶绿素含量的影响不同(表 1)。随 PS-MPs 胁迫增加,100 nm PS-MPs 对小白菜叶片叶绿素含量具有较低的抑制作用,以四叶期为例,Chl-a、Chl-b、Chl-a+b 和 Car 含量均呈先升高后降低趋势变化,至 1 mg·L⁻¹ 时达最大值,分别为对照的 28%、52%、33% 和 62%。且胁迫达 20 mg·L⁻¹ 时,PS-MPs 对小白菜的 Chl-a+b 含量抑制最大。六叶期和八叶期时,PS-MPs 对小白菜的叶绿素含量无明显影响。1000 nm PS-MPs 胁迫下,以四叶期为例,小白菜叶片 Chl-a、Chl-b、Chl-a+b 和 Car 含量同样呈先升高后降低趋势变化,且在 1 mg·L⁻¹ 时分别达到最大值,与对照相比,各上升了 14%、19%、15% 和 44%。当胁迫达 20 mg·L⁻¹ 时,PS-MPs 对小白菜的叶绿素含量抑制最大无明显影响。



相对值表示各处理相对于 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的变化

图 2 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜表型生长指标的影响

Fig. 2 Growth characteristics of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

表 1 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片叶绿素含量的影响¹⁾

Table 1 Chlorophyll content of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

时期	PS-MPs 胁迫	100 nm				1 000 nm			
		Chl-a 含量	Chl-b 含量	Car 含量	Chl-a + b 含量	Chl-a 含量	Chl-b 含量	Car 含量	Chl-a + b 含量
四叶期	0	1.85b	0.55b	0.26a	2.40b	1.46a	0.58ab	0.22c	2.04ab
	0.01	2.14ab	0.72ab	0.35a	2.86ab	1.57a	0.62ab	0.30ab	2.19a
	0.1	2.16ab	0.74ab	0.41a	2.90ab	1.65a	0.66ab	0.32a	2.31a
	1.0	2.36a	0.83a	0.42a	3.20a	1.66a	0.69a	0.32a	2.35a
	10	1.99ab	0.67ab	0.37a	2.66ab	1.40ab	0.58ab	0.26bc	1.99ab
	20	1.85b	0.66ab	0.34a	2.51b	1.12b	0.52b	0.21c	1.64b
六叶期	0	1.93a	0.81a	0.38a	2.74a	1.33a	0.49b	0.26a	1.83b
	0.01	1.94a	0.85a	0.25c	2.79a	1.46a	0.56b	0.29a	2.02ab
	0.1	1.94a	0.86a	0.22c	2.80a	1.59a	0.65a	0.30a	2.24a
	1.0	1.93a	0.87a	0.27bc	2.80a	1.53a	0.66a	0.31a	2.19a
	10	1.90a	0.86a	0.30abc	2.76a	1.45a	0.56b	0.28a	2.01ab
	20	1.88a	0.73a	0.36ab	2.61a	1.36a	0.50b	0.25a	1.86b
八叶期	0	1.66a	0.64a	0.31ab	2.30a	1.60a	0.61ab	0.26a	2.21ab
	0.01	1.68a	0.69a	0.29ab	2.37a	1.74a	0.64ab	0.27a	2.38ab
	0.1	1.67a	0.71a	0.33a	2.38a	1.81a	0.72a	0.32a	2.53ab
	1.0	1.70a	0.72a	0.26b	2.41a	1.82a	0.73a	0.31a	2.55a
	10	1.63a	0.66a	0.30ab	2.29a	1.57a	0.61ab	0.26a	2.18ab
	20	1.57a	0.58a	0.31ab	2.15a	1.55a	0.56b	0.26a	2.11b

1) PS-MPs 单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其余为 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 同一时期同列数据后不同小写字母表示处理之间差异达到显著水平($P < 0.05$),下同

2.3 PS-MPs 胁迫对小白菜光合特性的影响

随 PS-MPs 胁迫增加,不同 PS-MPs 胁迫对小白菜各生育期叶片 P_n 、 C_i 、 G_s 和 T_r 指标均呈先升高后下降趋势变化,至 PS-MPs 为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到峰值(表 2). 与对照(0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,不同 PS-MPs 胁迫在中、低程度(0 ~ 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时明显促进植物光合速率的增加,并在 0.1 ~ 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围达光合作用最大值. 当 PS-MPs 胁迫为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,100 nm 下 P_n 、 C_i 、 G_s 和 T_r 明显降低. 以四叶期为例,上述光合指标分别下降 19%、7%、37% 和 40%. 相对

应 1 000 nm PS-MPs 胁迫的小白菜叶片光合作用各指标分别下降 16%、2%、22% 和 12%.

2.4 PS-MPs 胁迫对小白菜抗氧化酶活性的影响

图 3 为不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的影响效应. 结果表明,小白菜叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均随胁迫增大呈先升高后下降趋势,而 MDA 含量则随 PS-MPs 胁迫增大而逐渐升高. 与对照相比,不同 PS-MPs 胁迫在中、低程度(0 ~ 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时明显促进植物酶抗活性的增加,且在 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 SOD 和 POD

表 2 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片光合特性的影响

Table 2 Photosynthetic characteristics of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

时期	PS-MPs 胁迫 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	100 nm					1 000 nm			
		P_n	C_i	T_r	G_s		P_n	C_i	T_r	G_s
		$/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$/\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	$/\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$		$/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$/\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	$/\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$
四叶期	0	16.73b	364.50a	2.61b	0.64abc		9.33b	239.49ab	7.64bc	0.49a
	0.01	18.05b	379.50a	2.83ab	0.69ab		9.52b	266.44ab	8.99bc	0.50a
	0.1	21.43a	394.00a	2.95a	0.74a		12.27a	304.11a	10.17ab	0.50a
	1.0	13.70c	355.50a	2.30c	0.59bc		12.41a	276.11ab	11.81a	0.50a
	10	12.78c	351.25a	1.80d	0.55c		12.08a	250.28ab	7.67bc	0.43b
	20	13.53c	340.75a	1.55d	0.40d		8.19b	233.70b	6.70c	0.39b
六叶期	0	16.25ab	309.00ab	1.93bc	0.64abc		32.20ab	365.00c	8.74ab	0.35bc
	0.01	18.18a	320.00ab	2.15c	0.69ab		34.37a	458.00ab	9.10ab	0.51ab
	0.1	19.45a	347.25a	2.45c	0.74a		34.67a	467.33a	9.90ab	0.54a
	1.0	14.08b	284.75ab	1.83b	0.59bc		32.10ab	427.67abc	10.26a	0.48ab
	10	9.23c	278.25b	1.53ab	0.55c		27.90ab	392.33bc	7.86bc	0.32c
	20	9.35c	287.25ab	1.48a	0.40d		23.03b	360.33c	6.57c	0.32c
八叶期	0	14.75bc	355.75ab	2.48ab	0.64abc		22.95ab	301.25bc	4.23b	0.33b
	0.01	15.90ab	386.75b	2.60a	0.69ab		23.88ab	375.00a	5.53a	0.41a
	0.1	17.65a	394.25b	2.68a	0.74a		23.42ab	368.25a	5.90a	0.43a
	1.0	14.70bc	347.00ab	2.23bc	0.59bc		27.70a	333.50ab	5.87a	0.46a
	10	13.63bc	324.25a	2.05cd	0.55c		20.20bc	277.00bc	3.92b	0.35b
	20	13.06c	323.00a	1.85d	0.40d		17.34c	243.50c	3.41b	0.32b

活性最强,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 CAT 活性最大.当 PS-MPs 胁迫为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,100 nm PS-MPs 胁迫 POD 和 CAT 活性明显降低,MDA 含量则随胁迫增加而逐渐升高,与对照相比,不同 PS-MPs 胁迫对小白菜 MDA 含量平均值增幅分别为 32% 和 41% (以八叶期为

例). 综上,不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片酶抗活性的影响表现为中、低程度(0 ~ 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)增强小白菜叶片酶抗活性;高程度(10 ~ 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)1 000 nm PS-MPs 对小白菜叶片酶抗系统无明显效应,而 100 nm PS-MPs 使其酶抗系统显著变化,表明

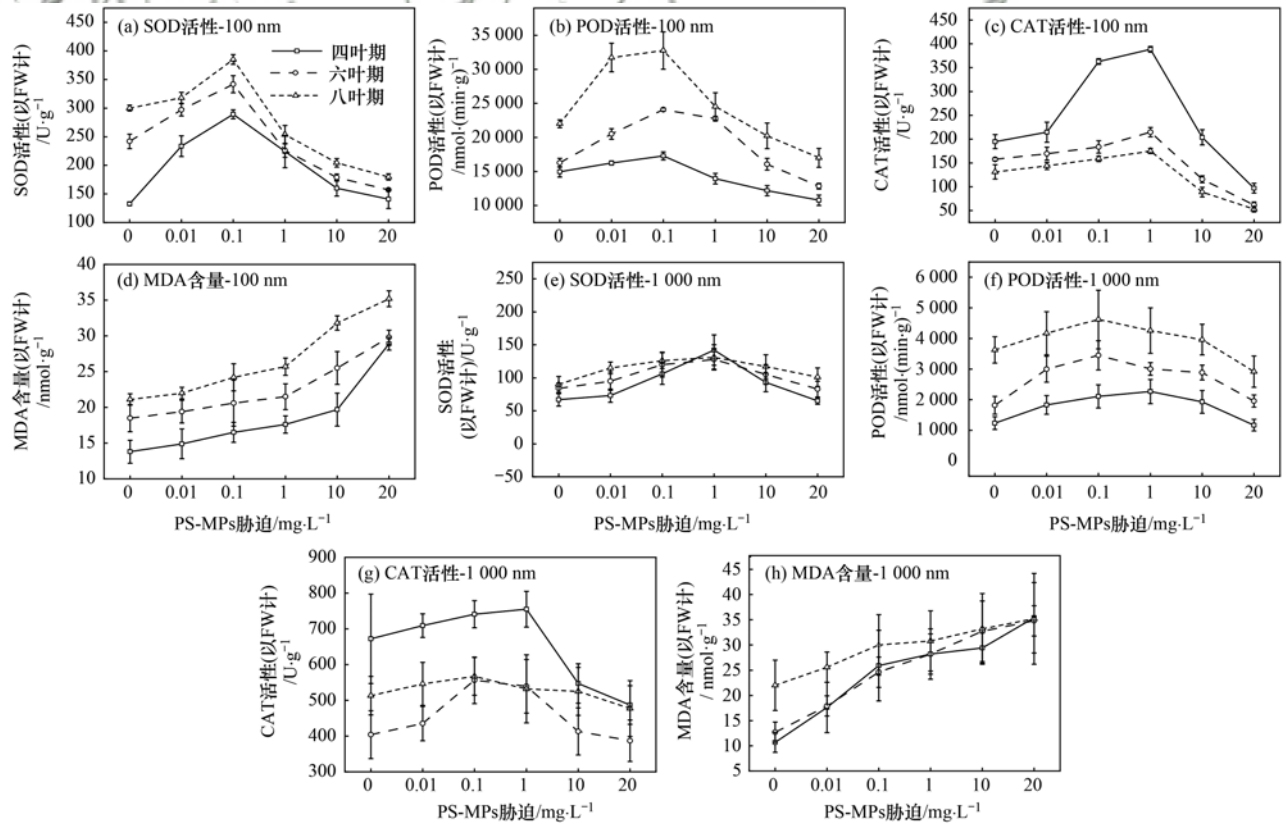


图 3 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Activities of antioxidant enzymes of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

植物酶抗系统受到激活,对小白菜叶片存在明显的毒害效应.

2.5 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片解剖结构的影响

PS-MPs 胁迫显著影响小白菜叶片解剖结构特征(表 3). 随 PS-MPs 胁迫增加,小白菜各生育期叶片厚度、海绵组织厚度和栅栏组织厚度均呈先升高后下降趋势. 与对照相比,不同 PS-MPs 胁迫在中、低程度时(0.1 ~ 1 mg·L⁻¹)促进小白菜叶片、海绵组织、栅栏组织增加,其平均厚度分别为 309.4 μm、130.3 μm、126.2 μm(100 nm)和 242.3 μm、

111.0 μm、120.1 μm(1 000 nm),并在 0.1 ~ 1 mg·L⁻¹处达解剖结构最大值. 当不同 PS-MPs 胁迫为 10 ~ 20 mg·L⁻¹时,小白菜解剖结构较对照显著下降,小白菜叶片、海绵组织、栅栏组织平均厚度分别为 261.7 μm、107.6 μm 和 102.9 μm(100 nm),223.0 μm、100.1 μm 和 113 μm(1 000 nm),且随着生育期的推进,不同 PS-MPs 胁迫的小白菜叶片解剖结构抑制有所缓和. 此外,小白菜栅海比(P/S)、叶肉组织紧密度(P/L)和叶肉组织疏松度(S/L)数值随 PS-MPs 胁迫变化不显著.

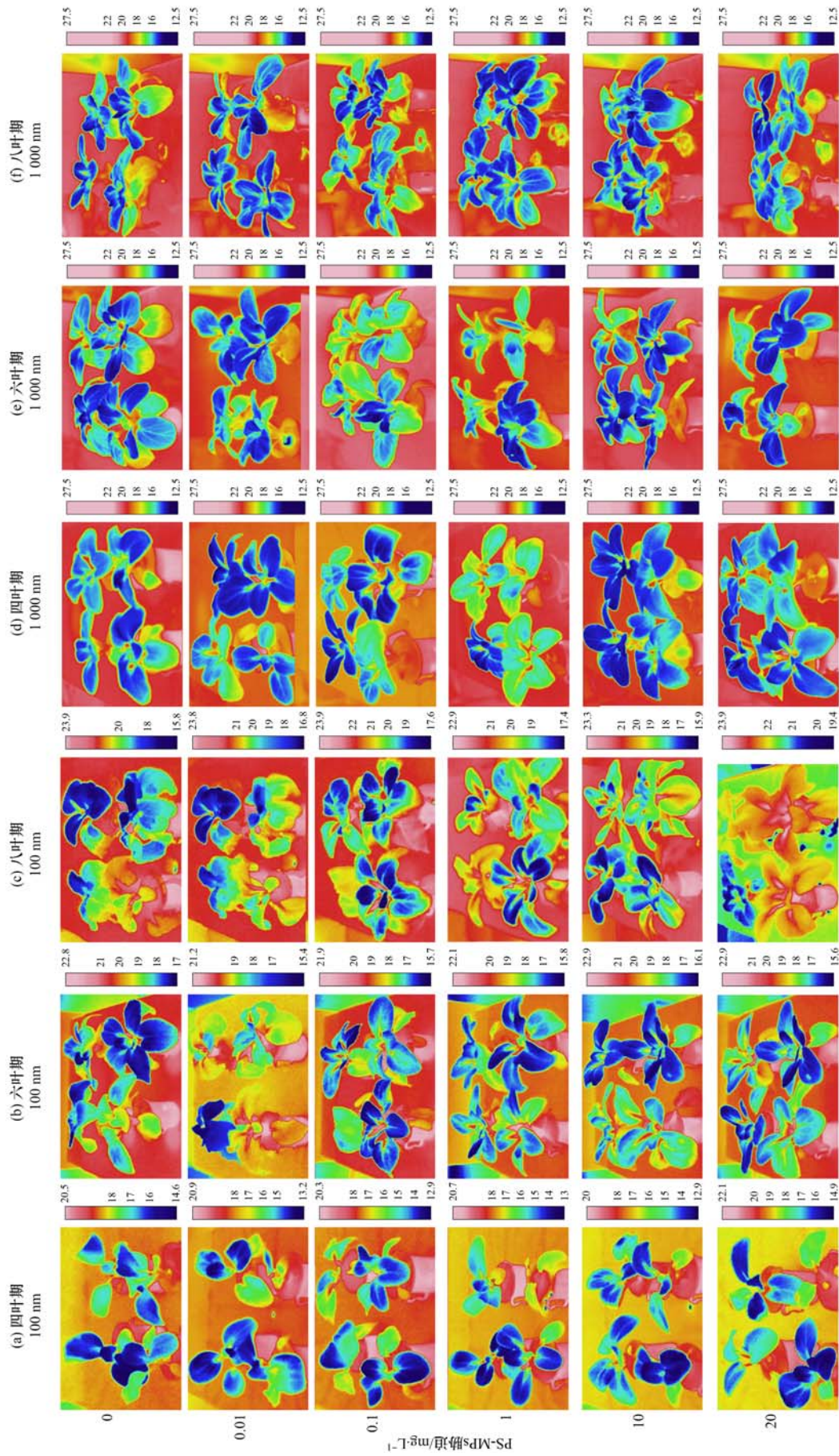
表 3 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片解剖特征的影响

Table 3 Leaf quantitative anatomical characteristics of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions								
粒径 /nm	时期	PS-MPs 胁迫 /mg·L ⁻¹	叶片厚度 (L)/μm	栅栏组织厚度 (P)/μm	海绵组织厚度 (S)/μm	栅海比 (P/S)	叶肉组织紧密度 (P/L)	叶肉组织疏松度 (S/L)
100	四叶期	0	265.72bc	103.08bc	100.02b	1.05a	0.39a	0.38a
		0.01	277.54abc	111.33ab	108.78ab	1.04a	0.40a	0.39a
		0.1	284.12ab	117.00ab	112.07ab	1.06a	0.41a	0.40a
		1.0	295.16a	125.88a	118.95a	1.07a	0.43a	0.40a
		10	256.59cd	104.05bc	98.96b	1.05a	0.41a	0.39a
		20	237.98d	90.63c	76.13c	1.24a	0.39a	0.32b
	六叶期	0	306.12bc	125.18a	130.18b	0.97ab	0.41a	0.43ab
		0.01	319.36ab	128.72a	135.24ab	0.96b	0.40a	0.42ab
		0.1	330.55a	133.22a	135.74ab	0.99ab	0.40a	0.41ab
		1.0	334.23a	129.28a	141.39a	0.92b	0.39a	0.42ab
		10	294.07c	122.22a	127.43b	0.96b	0.41a	0.43a
		20	211.20d	91.40b	81.98c	1.13a	0.43a	0.39b
	八叶期	0	267.33b	107.90c	114.81b	1.29a	0.49a	0.38a
		0.01	289.42b	126.77bc	118.98b	0.96b	0.40b	0.43a
		0.1	316.96a	154.41a	121.46b	1.07b	0.44ab	0.41a
		1.0	337.56a	145.99ab	143.16a	1.02b	0.43ab	0.42a
		10	279.21b	118.91c	116.88b	1.03b	0.43ab	0.42a
		20	272.68b	118.20c	116.22b	1.04b	0.43ab	0.43a
	四叶期	0	198.82b	90.17c	120.13b	0.76a	0.45a	0.61a
		0.01	223.86b	104.01bc	135.79b	0.77b	0.47b	0.61a
		0.1	231.55a	108.28a	130.08b	0.83b	0.47ab	0.56a
		1.0	221.99a	102.59ab	127.15a	0.81b	0.47ab	0.58a
		10	214.26b	100.08c	122.13b	0.83b	0.47ab	0.57a
		20	207.47b	93.89c	113.32b	0.83b	0.45ab	0.55a
	六叶期	0	242.82ab	110.66a	102.72a	1.09a	0.46a	0.43a
		0.01	247.13a	111.48a	104.26a	1.09a	0.45a	0.42a
		0.1	241.68ab	110.80a	106.96a	1.06a	0.46a	0.44a
		1.0	224.15bc	94.31b	105.05a	0.90a	0.42a	0.47a
		10	222.82bc	87.14b	99.49a	0.90a	0.39a	0.45a
		20	210.98c	88.75b	102.72a	0.87a	0.41a	0.55a
1 000	八叶期	0	258.91a	117.459a	117.23a	1.02a	0.45a	0.46a
		0.01	263.80a	118.84a	122.54a	0.97a	0.45a	0.47a
		0.1	266.53 a	120.20a	121.19a	1.00a	0.45a	0.46a
		1.0	260.27 a	128.21a	127.73a	1.00a	0.50a	0.50a
		10	243.89 a	118.32a	125.93a	0.95a	0.50a	0.52a
		20	238.33 a	112.65a	117.35a	0.93a	0.47a	0.51a

2.6 PS-MPs 胁迫对小白菜叶片冠层温度特征的影响

不同 PS-MPs 胁迫对小白菜冠层温度影响结果如表 4 和图 4 所示. 随 PS-MPs 胁迫增加,小白菜各生育期冠层最高温、最低温和平均温均呈先下

降后升高趋势变化. 与其 100 nm PS-MPs 胁迫相比,1 000 nm 随胁迫变化不显著. 且随着生育期推进,100 nm PS-MPs 胁迫的小白菜冠层温度不断升高,而1 000 nm 小白菜冠层温度各生长期基本保



暖色(红色和黄色)表示温度高,冷色(蓝色)调表示温度低;数值单位为℃

图 4 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜冠层温度影响效应

Fig. 4 Photographs of canopy temperature features of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions

持不变. 此外, 与对照相比, 100 nm PS-MPs 在中、低胁迫 ($0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时小白菜冠层温度不断下降, 其平均降幅分别为 2.0%、6.0% 和 4.2%, 并在 $0.1 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处达冠层最小值. 当胁迫为 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 100 nm PS-MPs 胁迫的小白菜冠层温度较对照显著上升, 上述指标分别平均上升 1.9%、3.3% 和 2.7%. 而 1 000 nm 随胁迫温度变化不显著.

表 4 不同 PS-MPs 胁迫对小白菜冠层温度特征影响

Table 4 Canopy temperature characteristics of Chinese cabbage pakchoi under different PS-MPs stress conditions										
粒径/nm	PS-MPs 胁迫 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	四叶期/ $^{\circ}\text{C}$			六叶期/ $^{\circ}\text{C}$			八叶期/ $^{\circ}\text{C}$		
		最高温	最低温	平均温	最高温	最低温	平均温	最高温	最低温	平均温
100	0	20.00a	15.00a	16.77ab	21.17ab	16.27ab	18.13ab	23.53ab	18.03a	20.80a
	0.01	19.77a	13.20b	15.40b	21.13ab	15.80ab	17.90ab	23.37ab	17.93a	20.60a
	0.1	19.47a	12.73b	15.30b	20.53ab	15.70b	17.53b	23.33ab	17.63a	20.50a
	1.0	19.40a	13.23b	15.40b	20.13b	15.43b	17.40b	22.93b	17.20a	20.03a
	10	20.47a	15.30a	17.17a	21.40a	16.50a	18.30a	23.67a	18.53a	21.17a
	20	20.90a	15.77a	17.67a	21.60a	16.90ab	18.73ab	24.00ab	19.00a	21.50a
1 000	0	19.53a	14.70c	17.07b	19.90a	14.50ab	17.18b	18.83a	13.97a	16.23b
	0.01	19.50a	14.60c	17.05b	20.00a	14.47ab	17.23ab	18.93a	14.13a	16.20b
	0.1	20.20a	15.87a	18.05a	20.07a	15.10a	17.58a	18.87a	14.03a	16.45ab
	1.0	20.17a	15.57ab	17.90a	19.93a	14.63ab	17.28ab	19.07a	14.00a	16.53ab
	10	20.33a	15.97a	18.15a	19.93a	13.93b	16.93b	18.53a	14.13a	16.33ab
	20	20.33a	15.00bc	17.67ab	19.93a	14.53ab	17.23ab	19.00a	14.60a	16.80a

3 讨论

MPs 作为新型污染物, 对生态环境存在较大风险. 有研究表明, MPs 对植物生长发育、应激响应、品质、光合效应和叶片结构等理化指标均有显著影响^[6,9]. 另有研究认为, 不同 MPs 胁迫对植物影响效应不同^[11]. 廖苑辰等^[4]研究认为, 粒径为 5 μm MPs 对植物生长影响较大, 而 100 nm MPs 对植物生长的影响效应则较小. 张彦等^[3]研究指出, 1 000 μm MPs 对小麦种子的发芽率、发芽抑制率和生长特征等指标数值影响均大于 150 μm 粒径的 MPs. 不同 MPs 胁迫对很多植物生长的影响表现为低促高抑, 即低浓度 MPs 一般不会影响植物的生长发育, 甚至还会起到促进种子萌发和幼苗生长的作用^[6], 而在高浓度 MPs 的胁迫下, 则会降低种子发芽率, 甚至对幼苗正常生长产生抑制作用^[16]. 如低中浓度 MPs 对玉米无显著影响, 高浓度 MPs 会降低玉米生物量^[5]. 本实验结果显示, 100 nm PS-MPs 在低中胁迫时对小白菜幼苗的生长发育起促进作用, 高胁迫时对小白菜幼苗的生长发育起抑制作用, 1 000 nm PS-MPs 随着胁迫增加对小白菜幼苗的生长发育一直起抑制作用.

从机制上讲, 暴露于土壤环境中的 MPs 首先与植物根系接触, 小粒径 MPs 可通过细胞间隙穿过皮层进入中柱, 向地上部运输, 影响植物生长及生理特征; 而大粒径 MPs (微米级以上) 则不能直接进入植物体内^[8]. 但随 MPs 胁迫提升, 相互吸附发生团聚, 产生浓度聚集效应, 吸附于根系表面^[17]. 此外, 一些小粒径 MPs 被植物根系吸收后, 在高胁迫条件下容

易堵塞细胞壁孔洞^[10], 共同阻碍根系对养分、水分的吸收和转运, 降低蒸腾作用, 叶片温度上升, 导致热胁迫, 阻碍植物生长^[18]. 同时, MPs 对 N、P 和 K 等离子吸附会导致植物离子体失衡, 阻碍植物叶绿素的合成, 继而降低植物光合速率^[19~21]. 有研究指出, 聚乙烯会降低莴苣植株的光合速率、气孔导度、瞬时蒸腾速率、荧光参数、叶片叶绿素含量和 Rubisco 活性等参数, 这也是植株叶绿素合成减少及光合速率下降的主要原因^[22~24]. 本实验结果表明, 随 PS-MPs 胁迫增加, 小白菜叶片光合参数均先上升后下降, 且生育后期胁迫效应大于前期, 即: 八叶期 > 六叶期 > 四叶期. 此外, 100 nm PS-MPs 处理在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时各生长期净光合速率达到最大值, 1 000 nm PS-MPs 处理在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时各生长期净光合速率达到最大值. 100 nm PS-MPs 比 1 000 nm 在更低胁迫水平 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进更大, 这可能是因为不同粒径基础下的浓度效应不同所导致^[25]. 此现象与 Zhang 等^[26]研究的结果高度相似. 有研究发现, 较大尺寸的 MPs 通过阻断光传输和影响光合作用而产生不利影响, 而较小尺寸的 MPs 则通过吸附在藻类表面而破坏细胞壁. 这也是导致不同粒径对植物光合产生影响的原因之一^[27].

有研究表明, 植物应对外源因子胁迫具有完善的自我调节功能, 而抗氧化防御体系是植物调节细胞代谢平衡的重要屏障^[28]. 当植物受到环境胁迫 (病虫害、干旱、低温、强光和污染物等) 时, 细胞内产生大量的 ROS, 如超氧阴离子 (O_2^-)、过氧化氢 (H_2O_2)、羟基 (OH^-) 和臭氧 (O_3) 等, 破坏植物体内

的细胞膜、蛋白质和 DNA,造成细胞伤害^[29-32]. ROS 对细胞膜的破坏主要是通过对膜脂的过氧化过程来完成,不仅导致细胞膜结构和功能的破坏,而且其终产物 MDA 可与蛋白质结合致其失去活性,造成二次伤害;少量的 ROS 作为信号分子引导植物对外界胁迫(如重金属)产生应激响应,植物体内的抗氧化酶被诱导活性加快, SOD 将 O_2^- 歧化为 H_2O_2 , 过氧化物酶(POD、CAT 和 APX 等)将 H_2O_2 还原为 O_2 和 H_2O ^[33,34]. 此外,为避免 SOD 消除 O_2^- 过程中产生的中间产物对植物体造成氧化损伤, APX-DHAR-MDHAR(APX 抗坏血酸过氧化物酶、DHAR 脱氢抗坏血酸还原酶、MDHAR 单脱氢抗坏血酸还原酶)循环发挥重要作用. 即它作为抗氧化系统中的重要组成部分,可以通过调节中间产物水平来维持植物体内适当的氧化还原状态^[35]. 有研究指出, POD、SOD 存在于细胞质和叶绿体中,在维持蛋白质的稳定和生物膜的结构完整性方面也发挥着重要作用,并能有效防止膜脂过氧化^[36,37]. 有研究发现,在 MPs 胁迫作用下,微藻体内的 SOD 活性及含量明显增加,表明微藻细胞内部产生了应激反应^[38,39]. 另外,有研究表明 MPs 对膜脂过氧化物 MDA 含量造成一定程度的影响^[16]. 本研究结果表明,1 000 nm PS-MPs 对小白菜的生长影响较小不显著;低胁迫下 100 nm PS-MPs 诱导了小白菜体内 SOD、POD 和 CAT 活性的上升,高胁迫 100 nm PS-MPs 小白菜抗氧化酶活性受到抑制;小白菜体内 MDA 含量随着 PS-MPs 胁迫的增加而升高. 与张晨等^[11]研究的 PS-MPs 处理下,黑藻体内 SOD、CAT 和 POD 活性均随胁迫的增加呈先上升后下降趋势的研究结果近似. 这可能是因为在胁迫低时受 PS-MPs 胁迫小白菜的应激反应诱导了抗氧化酶活性的增加,而随着 PS-MPs 胁迫的增加,小白菜机体又对过强的抗氧化酶活性产生了应激抑制作用. 而小白菜体内 MDA 含量随着 PS-MPs 胁迫的增强而升高,说明了 MPs 胁迫下对小白菜机体的危害性也随着胁迫的增加而加大. 此外,较小的尺寸并不一定意味着更大的毒性,除八叶期外,100 nm PS-MPs 处理在 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,抗氧化酶活性最强,而 1000 nm PS-MPs 处理在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,抗氧化酶活性最大,且随着胁迫增加抗氧化酶活性下降,1 000 nm PS-MPs 对小白菜比 100 nm 微塑料表现出不同粒径基础上浓度差异副作用,改观了人们以往关于微塑料植物毒性的理解,并挑战了传统上认为较小的微塑料毒性更大的看法. 该研究结果与 Wu 等^[40]相似.

叶片不仅是植物与外界进行物质交互的重要场所,更是植物进行光合作用、蒸腾作用、呼吸作用

的主要器官. 有研究表明^[41-44], 外部环境胁迫会改变植物叶片形态特征和解剖结构. 如随盐分胁迫增加,叶片数量、叶面积和相对含水量均显著降低,叶片厚度和叶肉细胞间隙逐渐增大,细胞排列放松,主脉维管束面积缩小. 植物叶片形态特征和解剖结构(栅栏组织、海绵组织和气孔)等直接影响到叶片的光合、蒸腾和呼吸作用等功能^[45]. 邱毅敏等^[46]研究表明,叶片栅栏组织厚度和组织结构疏松度是影响耐热性的主要叶片解剖结构性状,而叶片厚度、海绵组织厚度、栅海比、上下表皮细胞厚度和组织结构疏松度与植株耐热性的关系不大. 柱状的栅栏组织细胞具有光线通道的作用,将光线传播到叶肉深层;球状的海绵组织排列不规则,可增加内部光散射,从而提高光吸收率;叶脉系统是叶片运输水分的主要通道,叶表皮上的气孔控制叶片与外界的水气交换;栅栏组织和海绵组织等结构特征对叶片水分传导能力也会产生重要影响^[47]. 有研究表明,当植物受干旱胁迫时,随着干旱程度的加重叶片厚度呈现逐渐减小的显著趋势;上表皮厚度随胁迫加重逐渐减小;栅栏组织和海绵组织的厚度均随胁迫加重而减小;受到干旱胁迫后叶片的栅栏组织同海绵组织的比值均大于对照组;干旱胁迫下,绢毛委陵菜叶绿素含量随着干旱胁迫的加重持续下降^[48]. 叶绿素的下降说明光合作用的减弱,这与栅栏组织变薄叶片捕光能力减弱相呼应^[49];栅栏组织同海绵组织的比值均大于对照组,这与前人研究的叶片栅栏组织与海绵组织比越大,抗旱能力越强的理论一致^[50];也与栅栏组织厚度与平均日耗水量呈正相关关系,而栅栏海绵组织厚度与平均日耗水量呈负相关关系^[51]的理论相吻合. 本实验结果表明,高胁迫 PS-MPs 情况下,同一生长时期的小白菜叶片厚度、海绵组织厚度与对照相比明显下降,栅栏组织厚度显著增加,这说明高胁迫 PS-MPs 时,叶片会表现出一定的抗性,会消耗海绵组织内的水分,并通过栅栏组织细胞进行光合作用,以此抵御 PS-MPs 的胁迫.

4 结论

(1) 100 nm PS-MPs 胁迫下,低胁迫($0\sim1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可提高小白菜株高、叶面积、根鲜重和叶鲜重等表型生长指标,高胁迫($10\sim20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则显著抑制小白菜生长;而 1 000 nm PS-MPs 胁迫下,小白菜生长发育指标则随浓度升高而不断下降.

(2) 低胁迫($0\sim1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 100 nm PS-MPs 主要通过提高根系对营养和水分的吸收,进而对小白菜的生长起到促进作用. 而高胁迫($10\sim20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

100 nm PS-MPs 通过堵塞根系,减少了根系对水分和营养的吸收,导致植物体内离子失衡,活性氧暴发,进而对小白菜生长起到抑制作用。

(3)不同 PS-MPs 胁迫可显著改变小白菜叶片中 MDA 含量,而 CAT、SOD 和 APX 活性在 PS-MPs 作用下显著变化,表明小白菜叶片的抗氧化系统受到了 PS-MPs 的干扰。

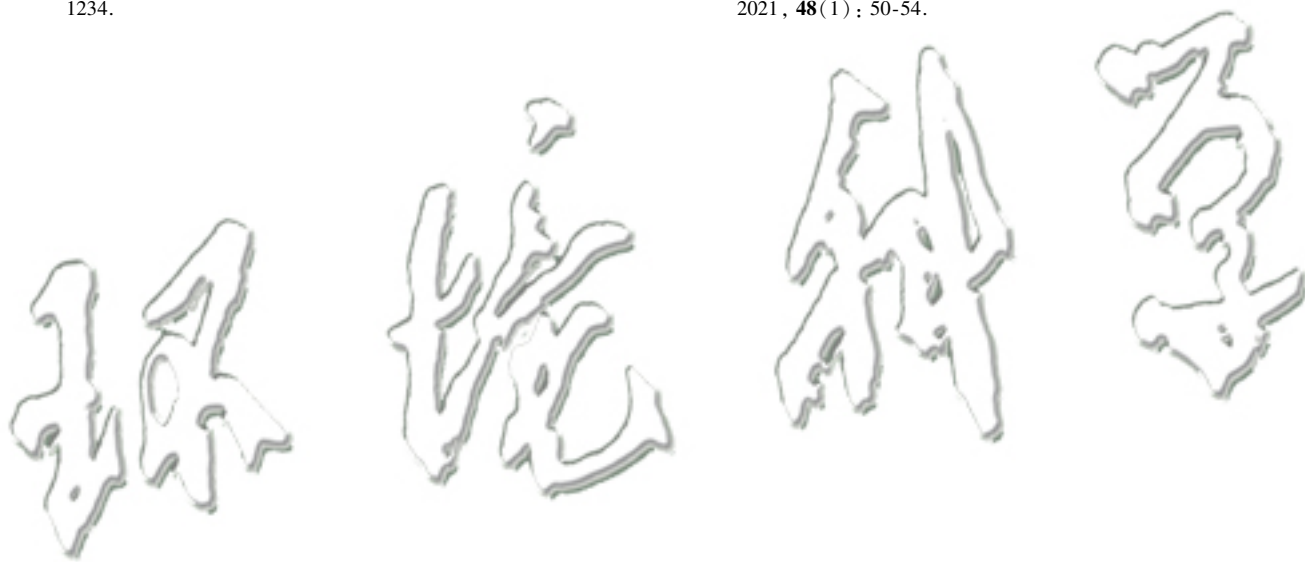
(4)PS-MPs 导致小白菜叶片解剖结构和冠层温度发生显著差异,高胁迫 ($10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下效应更为显著; 100 nm PS-MPs 能够引起小白菜叶片厚度下调和冠层温度升高。

参考文献:

- [1] 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**(2): 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**(2): 314-330.
- [2] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838-838.
- [3] 张彦, 窦明, 邹磊, 等. 不同微塑料赋存环境对小麦萌发与幼苗生长影响研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3867-3877.
Zhang Y, Dou M, Zou L, *et al.* Effects of different microplastics occurrence environment on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3867-3877.
- [4] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加甫甫别克, 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 Y C, Jahitbek N, Li M, *et al.* Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4661-4667.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 2021, **58**(2): 281-298.
Yang J, Li L Z, Zhou Q, *et al.* Microplastics contamination of soil environment: sources, processes and risks [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(2): 281-298.
- [8] 李连祯, 周倩, 尹娜, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. 科学通报, 2019, **64**(9): 928-934.
Li L Z, Zhou Q, Yin N, *et al.* Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(9): 928-934.
- [9] 纪红, 陈修文, 赵宏利, 等. 微塑料对高等植物生长发育影响研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(18): 7415-7424.
Ji H, Chen X W, Zhao H L, *et al.* Research advances of the influence of microplastics on the growth and development of higher plants [J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(18): 7415-7424.
- [10] 冯雪莹, 孙玉焕, 张书武, 等. 微塑料对土壤-植物系统的生态效应[J]. 土壤学报, 2021, **58**(2): 299-313.
Feng X Y, Sun Y H, Zhang S W, *et al.* Ecological effects of microplastics on soil-plant systems [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(2): 299-313.
- [11] 张晨, 简敏菲, 陈宇蒙, 等. 聚苯乙烯微塑料对黑藻生长及生理生化特征的影响[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 317-325.
Zhang C, Jian M F, Chen Y M, *et al.* Effects of polystyrene microplastics (PS-MPs) on the growth, physiology, and biochemical characteristics of *Hydrilla verticillata* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(1): 317-325.
- [12] 李瑞静. 微塑料对黄瓜幼苗生理生化特性的影响机制研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022.
Li R J. Effects of microplastics on physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings [D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2022.
- [13] Jullien A, Mathieu A, Allirand J M, *et al.* Characterization of the interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus*) using the GreenLab model [J]. Annals of Botany, 2011, **107**(5): 765-779.
- [14] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents [J]. Biochemical Society Transactions, 1983, **11**(5): 591-592.
- [15] 郝再彬. 植物生理实验技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002.
- [16] 安菁, 刘欢语, 郑艳, 等. 土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, **39**(1): 41-46, 113.
An J, Liu H Y, Zheng Y, *et al.* Effects of soil microplastics residue on soybean seedlings growth and the physiological and biochemical characteristics [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, **39**(1): 41-46, 113.
- [17] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, *et al.* Macro- and microplastics 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.
- [18] 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**, doi: 10.3389/fpls.2021.616645.
- [19] Colzi I, Renna L, Bianchi E, *et al.* Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127238.
- [20] 仲子文, 赵海军, 刘苹, 等. 可降解地膜残留碎片对小油菜生长和土壤性状的影响[J]. 江西农业学报, 2015, **27**(12): 107-109.
- [21] Zhong Z W, Zhao H J, Liu P, *et al.* Effects of residual fragments of degradable mulch on small rape growth and soil properties [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, **27**(12): 107-109.
- [21] Zheng X W, Liu X L, Zhang L L, *et al.* Toxicity mechanism of

- Nylon microplastics on *Microcystis aeruginosa* through three pathways: photosynthesis, oxidative stress and energy metabolism [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **426**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.128094.
- [22] Lee T Y, Kim L, Kim D, *et al.* Microplastics from shoe sole fragments cause oxidative stress in a plant (*Vigna radiata*) and impair soil environment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **429**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128306.
- [23] Gao M L, Liu Y, Song Z G, *et al.* Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-*n*-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort) [J]. Chemosphere, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124482.
- [24] Lang X P, Ni J, He Z. Effects of polystyrene microplastic on the growth and volatile halocarbons release of microalgae *Phaeodactylum tricornutum* [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113197.
- [25] Zhao W G, Su Z, Geng T, *et al.* Effects of ionic strength and particle size on transport of microplastic and humic acid in porous media [J]. Chemosphere, 2022, **309**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136593.
- [26] Zhang B H, Tang X X, Liu Q, *et al.* Different effecting mechanisms of two sized polystyrene microplastics on microalgal oxidative stress and photosynthetic responses [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, **244**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114072.
- [27] Liu G, Jiang R F, You J, *et al.* Microplastic impacts on microalgae growth: effects of size and humic acid [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(3): 1782-1789.
- [28] 施征, 史胜青, 姚洪军, 等. 植物线粒体中活性氧的产生及其抗氧化系统[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(1): 150-154.
- Shi Z, Shi S Q, Yao H J, *et al.* Production of ROS and its antioxidant system in plant mitochondria [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, **31**(1): 150-154.
- [29] 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 等. 罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 [J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 3074-3083.
- Zhang L Y, Liu J C, Leng Y, *et al.* Effects of roxithromycin on reproduction, growth, and anti-oxidation system of *Daphnia magna* [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 3074-3083.
- [30] 林冬, 朱诚, 孙宗修. 镉敏感水稻突变体在镉胁迫下活性氧代谢的变化 [J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 561-566.
- Lin D, Zhu C, Sun Z X. Alterations of oxidative metabolism respond to cadmium stress in cd-sensitive mutant rice seedlings [J]. Environmental Science, 2006, **27**(3): 561-566.
- [31] 张玉秀, 黄智博, 张红梅, 等. 商陆和烟草对锰胁迫的抗氧化响应研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3676-3683.
- Zhang Y X, Huang Z B, Zhang H M, *et al.* Antioxidative response of *Phytolacca americana* and *Nicotiana tabacum* to manganese stresses [J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3676-3683.
- [32] 王爱云, 钟国锋, 徐刚标, 等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1717-1725.
- Wang A Y, Zhong G F, Xu G B, *et al.* Effects of Cr(VI) stress on physiological characteristics of Brassica juncea and its Cr uptake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1717-1725.
- [33] 周希琴, 莫灿坤. 植物重金属胁迫及其抗氧化系统 [J]. 新疆教育学院学报, 2003, **19**(2): 103-108.
- Zhou X Q, Mo C K. The plant heavy metal coercion and its antioxidation system [J]. Journal of Xinjiang Education Institute, 2003, **19**(2): 103-108.
- [34] 周慧敏, 李品, 高峰, 等. 臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4359-4365.
- Zhou H M, Li P, Gao F, *et al.* Interactive effects of ozone and drought on antioxidant enzyme activities of poplar leaves [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4359-4365.
- [35] 王胜利, 宋正国, 王成伟, 等. 聚苯乙烯与邻苯二甲酸二丁酯共存对紫叶生菜的毒性效应 [J]. 应用生态学报, 2021, **32**(9): 3335-3340.
- Wang S L, Song Z G, Wang C W, *et al.* Toxic effects of polystyrene and dibutyl phthalate on purple lettuce [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(9): 3335-3340.
- [36] 张星雨, 叶志彪, 张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展 [J]. 植物生理学报, 2021, **57**(7): 1437-1450.
- Zhang X Y, Ye Z B, Zhang Y Y. Advances in physiological and molecular mechanism of plant response to cadmium stress [J]. Plant Physiology Journal, 2021, **57**(7): 1437-1450.
- [37] Lian Y H, Liu W T, Shi R Y, *et al.* Effects of polyethylene and polylactic acid microplastics on plant growth and bacterial community in the soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **435**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129057.
- [38] 凌晨, 陈思语, 李建宏. 微塑料对微藻的毒性作用研究进展 [J]. 生物学教学, 2020, **45**(7): 7-9.
- [39] Menicagli V, Castiglione M R, Balestri E, *et al.* Early evidence of the impacts of microplastic and nanoplastic pollution on the growth and physiology of the seagrass *Cymodocea nodosa* [J]. Science of the Total Environment, 2022, **838**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156514.
- [40] Wu D, Wang T, Wang J, *et al.* Size-dependent toxic effects of polystyrene microplastic exposure on *Microcystis aeruginosa* growth and microcystin production [J]. Science of the Total Environment, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143265.
- [41] 祖庆学, 刘晓云, 饶成, 等. 镉胁迫下硅对烤烟生长及生理特性的影响 [J]. 河南农业科学, 2019, **48**(1): 38-43.
- Zu Q X, Liu X Y, Rao C, *et al.* Effects of silicon on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco under cadmium stress [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, **48**(1): 38-43.
- [42] Song Z H, Ni X B, Yao J, *et al.* Progress in studying heteromorphic leaves in *Populus euphratica*: leaf morphology, anatomical structure, development regulation and their ecological adaptation to arid environments [J]. Plant Signaling & Behavior, 2021, **16**(4), doi: 10.1080/15592324.2020.1870842.
- [43] Sobczak A, Sujkowska-Rybikowska M, Gajc-Wolska J, *et al.* Photosynthetic efficiency and anatomical structure of pepper leaf (*Capsicum annuum* L.) transplants grown under high-pressure sodium (HPS) and light-emitting diode (LED) supplementary lighting systems [J]. Plants, 2021, **10**(10), doi: 10.3390/plants10101975.
- [44] Hu Y, Yang L, Gao C, *et al.* A comparative study on the leaf anatomical structure of *Camellia oleifera* in a low-hot valley area in Guizhou Province, China [J]. PLoS One, 2022, **17**(1), doi: 10.1371/journal.pone.0262509.
- [45] Tian M, Yu G R, He N P, *et al.* Leaf morphological and anatomical traits from tropical to temperate coniferous forests: mechanisms and influencing factors [J]. Scientific Reports, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep19703.
- [46] 邱毅敏, 王伟, 胡杏, 等. 杜鹃叶片解剖结构与植株耐热性

- 的关系[J]. 林业与环境科学, 2021, **37**(4): 69-81.
- Qiu Y M, Wang W, Hu X, *et al.* Relationship between leaf anatomical structure and heat resistance of *Rhododendron simsii* [J]. Forestry and Environmental Science, 2021, **37**(4): 69-81.
- [47] 张小燕, Wee K S A, Kajita T, 等. 种源地对两种红树叶片结构和功能的影响: 对温度的适应性遗传[J]. 植物生态学报, 2021, **45**(11): 1241-1250.
- Zhang X Y, Wee K S A, Kajita T, *et al.* Effects of provenance on leaf structure and function of two mangrove species: the genetic adaptation to temperature[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, **45**(11): 1241-1250.
- [48] 吴建慧, 郭瑶, 赵倩竹, 等. 干旱胁迫对绢毛委陵菜叶片解剖结构和生理指标的影响[J]. 草业科学, 2012, **29**(8): 1229-1234.
- Wu J H, Guo Y, Zhao Q Z, *et al.* Effects of drought stress on anatomical structures and physiological indexes of *Potentilla sericea* leaves[J]. Pratacultural Science, 2012, **29**(8): 1229-1234.
- [49] 吴晓颖, 高华军, 王晓琳, 等. 光照强度对雪茄烟叶片组织结构及内源激素含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, **42**(2): 37-42.
- Wu X Y, Gao H J, Wang X L, *et al.* Effects of light intensity on growth and development and endogenous hormone content of cigar leaves[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, **42**(2): 37-42.
- [50] 庞杰, 张凤兰, 郝丽珍, 等. 沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对于旱胁迫的响应[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(4): 575-581.
- Pang J, Zhang F L, Hao L Z, *et al.* Effect of drought stress on anatomical structure and photosynthesis of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. leaves in seedling [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(4): 575-581.
- [51] 陈瑞, 刘振华, 李贵, 等. 石漠化区朴树叶片结构与蒸腾量的相关性探讨[J]. 湖南林业科技, 2021, **48**(1): 50-54.
- Chen R, Liu Z H, Li G, *et al.* Study on the correlation between leaf structure and transpiration of *Celtis sinensis* Pers. in rocky desertification area[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2021, **48**(1): 50-54.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)