

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

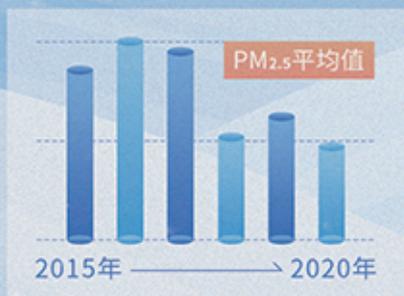
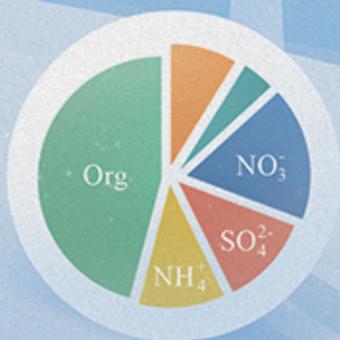
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期

Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊雨媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响

邱陈陈¹, 李国新^{1*}, 李青松¹, 颜昌宙²

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 厦门市水资源利用与保护重点实验室, 厦门 361024; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

摘要: 自然环境中的微/纳米塑料污染日趋严重, 但纳米塑料对农作物生长的潜在影响尚不清楚. 通过营养液培养方式, 探讨了粒径为 80 nm 的聚苯乙烯纳米塑料 (polystyrene nanoplastics, PS-NPs) 对金乡大蒜 (*Allium sativum* L.) 叶绿素含量、抗氧化性能和营养品质的影响. 结果显示, 添加 PS-NPs 处理的大蒜, 其叶片叶绿素含量均显著低于对照组, 叶绿素的合成受到抑制. 大蒜叶片 SOD、APX 活性和脯氨酸含量随着 PS-NPs 质量浓度的增加呈先升高后降低的趋势. 10 d 处理时大蒜叶片 POD 活性随 PS-NPs 质量浓度的增加而上升, 但在 20 d 处理时, 各处理组 POD 活性均受到抑制. 大蒜叶片 MDA 质量摩尔浓度随 PS-NPs 质量浓度的增加而增加, 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下, 10 d 和 20 d 处理时其含量相对对照分别增加 43.24% 和 89.70%. 同时, 经 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 胁迫处理 10 d 后, 大蒜叶片可溶性蛋白质、可溶性糖和维生素 C 含量均高于对照组, 但 20 d 后, 维生素 C 含量较对照则降低了 26.53%. 以上结果表明 PS-NPs 能对大蒜产生较为显著的氧化胁迫效应, 且较高质量浓度的 PS-NPs 胁迫会对大蒜叶片的营养品质产生一定的影响.

关键词: 金乡大蒜; 纳米塑料; 生长生理; 抗氧化酶; 营养品质

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4387-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202110021

Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of *Allium sativum* L.

QIU Chen-chen¹, LI Guo-xin^{1*}, LI Qing-song¹, YAN Chang-zhou²

(1. Key Laboratory of Water Resources Utilization and Protection of Xiamen, School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: The pollution of micro/nanoplastics in the natural environment is becoming increasingly serious, but the potential effects of nanoplastics on crops remain unclear. In the present study, the effects of polystyrene nanoplastics (PS-NPs) with a particle size of 80 nm on the chlorophyll content, antioxidant enzyme activity, and nutritional quality of *Allium sativum* L. were explored via hydroponic culture. The results showed that the chlorophyll contents in leaves of *A. sativum* treated with PS-NPs were significantly lower than those in the control, indicating that the synthesis of chlorophyll was inhibited. The superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) activities, and proline contents in leaves of *A. sativum* initially increased but then decreased with the increase in $\rho(\text{PS-NPs})$. The activity of guaiacol peroxidase (POD) increased with the increase in $\rho(\text{PS-NPs})$ for 10 days of treatment; however, it was inhibited for 20 days of treatment. The malondialdehyde (MDA) content increased with the rise in $\rho(\text{PS-NPs})$. When $\rho(\text{PS-NPs})$ increased to $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the MDA content in leaves of *A. sativum* increased by 43.24% and 89.70% for 10 and 20-day treatments, respectively, compared with those in the control. Meanwhile, the contents of soluble protein, soluble sugar, and vitamin C were higher than those in the control for 10-day treatments; however, the vitamin C content decreased by 26.53% after 20 days of treatment. These results indicated that PS-NPs had a significant oxidative stress on *A. sativum*, and a high concentration of PS-NPs stress would have deleterious effects on the nutritional quality of *A. sativum*.

Key words: *Allium sativum* L.; nanoplastics; physiology; antioxidant enzymes; nutritional quality

据统计,全球每年塑料生产量已超过 3.2 亿 t, 多达 74% 的塑料垃圾最终被排放到环境中^[1]. 在物理、化学和微生物等作用下,塑料垃圾会被分解成无数微小的塑料碎片或颗粒^[2]. 同时,个人护理品中的塑料微珠以及人造纺织品聚合纤维等微塑料,也会直接进入环境. 早在 2004 年,英国学者 Thompson 等^[3]在研究海洋塑料垃圾污染时提出“微塑料”这一概念. 一般认为,当塑料碎片或颗粒的尺寸小于 5 mm 时,即被定义为微塑料^[4]. 理论上,环境中的微塑料仍然会进一步分解,最终可形成尺寸小于 100 nm 的纳米塑料^[5]. Besseling 等^[6]通过研究证实,在条件充分时,一个微塑料颗粒可以破碎成 10^{14} 个以上的纳米塑料. 纳米塑料体积小,比表面积大,使其很容易吸附携带其它污染物^[7]. 相较于微塑料,纳米塑料也更容易被生物体吞食或被动摄

入^[8],然后通过食物链在高营养层生物体内富集^[9, 10],其毒性实验也表明纳米塑料对生物体和人类健康存在潜在危害^[11].

近年来,陆地生态系统中纳米塑料污染受到广泛重视,尤其是农业生态系统中的纳米塑料对农作物生长的潜在危害^[12-16]. 连加攀等^[17]的研究指出,粒径为 50 nm 的乙烯-乙酸乙烯酯共聚物、线性低密度聚乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯纳米塑料能够对小麦 (*Triticum aestivum* L.) 种子的发芽和生长产生抑

收稿日期: 2021-10-05; 修订日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878582); 福建省自然科学基金项目(2016J01695); 厦门理工学院科研攀登计划项目(XPDKT19029); 厦门理工学院研究生科技创新计划基金项目(4030221017)

作者简介: 邱陈陈(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为微/纳米塑料污染的植物毒性, E-mail: qiucc2020@qq.com

* 通信作者, E-mail: ligx@xmut.edu.cn

制作用. Jiang 等^[18]的研究发现 100 nm 的聚苯乙烯微球能够干扰蚕豆 (*Vicia faba* L.) 生长过程中营养物质的运输, 并对作物产生遗传毒性. Giorgetti 等^[19]的研究结果也表明: 50 nm 的聚苯乙烯微球能诱导洋葱 (*Allium cepa* L.) 细胞毒性 (降低有丝分裂指数)、基因毒性 (细胞遗传异常和微核的诱导) 和氧化损伤. 整体而言, 关于纳米塑料对高等植物的影响研究仍然偏少, 纳米塑料对作物生长和品质的影响尚不清晰.

大蒜是著名的食药两用植物, 其蒜头和蒜叶均可作蔬菜食用. 聚苯乙烯是使用最为广泛的塑料材料, 常用于塑料杯、塑料薄膜等包装盒和建筑保温等产业, 已成为土壤、湖泊和海洋的主要污染物^[20]. 因此, 本研究选用广泛种植的金乡大蒜 (*Allium sativum* L.) 作为供试材料, 以粒径为 80 nm 的聚苯乙烯纳米颗粒 (polystyrene nanoplastics, PS-NPs) 作为胁迫物质, 探讨不同质量浓度的 PS-NPs 对大蒜叶片叶绿素含量、抗氧化性能和营养品质的影响, 以期为后续评估纳米塑料对农作物的影响提供参考依据.

1 材料与与方法

1.1 塑料微球

本研究采用由 Nile blue 荧光染料标记的红色荧光 PS-NPs, 购自大鹅 (天津) 科技有限公司. PS-NPs 呈球形, 平均粒径为 80 nm, 变异系数 < 5%, 在水相中分散和保存, 原液中 ρ (PS-NPs) 为 10 000 mg·L⁻¹.

1.2 供试大蒜和培养实验

挑选饱满且大小一致的金乡大蒜蒜瓣, 先用 2% H₂O₂ 溶液浸泡约 30 min, 进行表面灭菌, 随后用超纯水多次漂洗去除残留 H₂O₂. 用吸水纸擦拭干净后, 放置于直径 12 cm 的玻璃培养皿中. 每盘处理放置 12 粒蒜瓣, 加入 20% Hoagland 营养液 160 mL, 随后整盘置于光照培养箱 (SPX-250B-G, 上海博迅) 中培养 6 d, 待其茎盘长出短根及顶部冒出细芽后进行胁迫实验. 在胁迫实验中, 取适量 PS-NPs 原液, 用 20% Hoagland 营养液稀释, 使培养液中 ρ (PS-NPs) 分别为 1、10、50 和 100 mg·L⁻¹, 取 160 mL 培养液继续培养. 设置培养箱温度为 22℃ ± 1℃, 光照时间为 13 h, 光照强度约 9 900 lx. 培养过程中每日早晚各添加适量纯水补充蒸发量, 每 3 d 更换一次培养液. 在 PS-NPs 处理第 10 d 和第 20 d 采集植物叶片后测定.

Hoagland 营养液^[21] 成分为: 5.00 mmol·L⁻¹ Ca(NO₃)₂·4H₂O、5.04 mmol·L⁻¹ KNO₃、1.99

mmol·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O、1.03 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄、8.99 μmol·L⁻¹ Fe₂(C₄H₄O₆)₃、9.70 μmol·L⁻¹ H₃BO₃、2.02 μmol·L⁻¹ MnCl₂·4H₂O、0.31 μmol·L⁻¹ ZnSO₄、0.20 μmol·L⁻¹ CuSO₄·5H₂O 和 0.09 μmol·L⁻¹ H₂MoO₄·4H₂O. 取 PS-NPs 原液时, 先超声 (120 W) 振动 5 min 以保证取样均匀. 同时培养液中每天早晚补水后适当搅拌, 以保证培养液中纳米塑料质量浓度均匀.

叶片采集和后处理: 先使用去离子水清洗大蒜叶片表面, 用吸水纸擦拭干净, 然后使用手术剪刀分别剪取大蒜叶片中段. 取样完成后迅速完成部分指标测定, 其余样本先液氮速冻, 然后迅速置于超低温冷冻储存箱 (DW-HL100, 中科美菱) 中保存待测.

1.3 指标测定方法

叶绿素采用丙酮乙醇浸提法测定^[22], 超氧化物歧化酶 (SOD) 采用黄嘌呤氧化酶法测定^[23], 过氧化物酶 (POD) 采用愈创木酚显色法测定^[24], 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 采用紫外分光光度法测定^[25], 脯氨酸采用酸性茚三酮显色法测定^[26], 丙二醛 (MDA) 采用硫代巴比妥酸显色法测定^[26], 可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝法测定^[25], 可溶性糖采用蒽酮比色法测定^[25], 维生素 C 采用比色法测定^[25]. 以上所有指标均采用试剂盒检测. 所有试剂盒均购自南京建成生物工程研究所, 详细实验步骤严格按照说明书进行.

1.4 数据处理

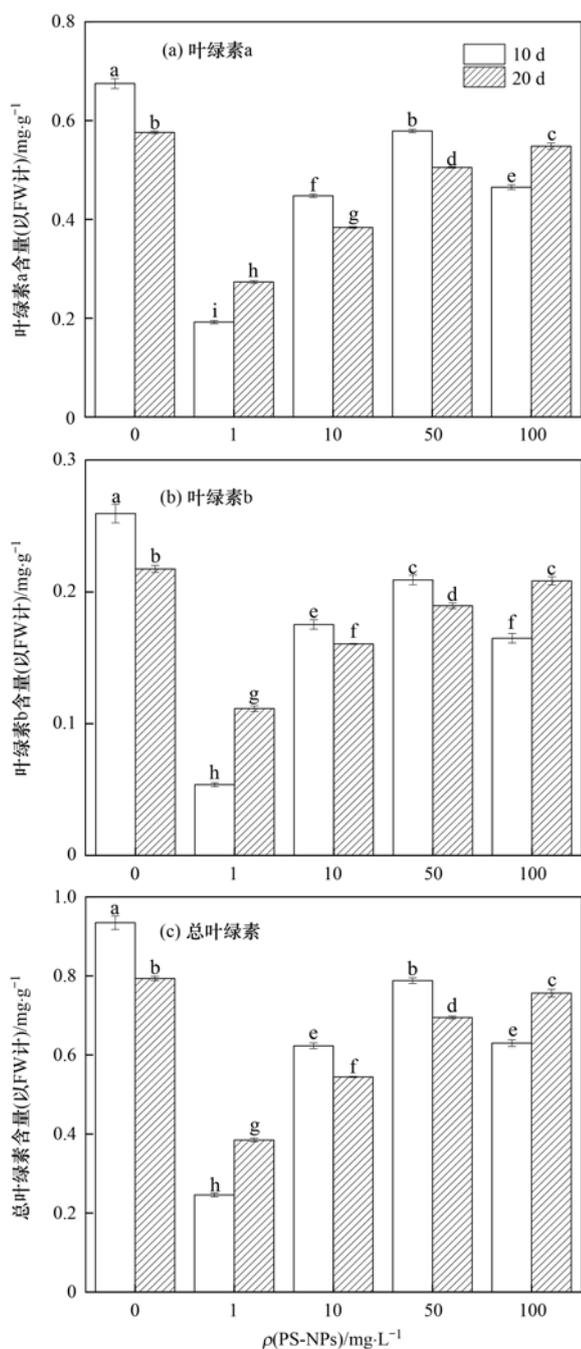
本实验数据均使用 SPSS 26.0 进行单因素 ANOVA 检验分析, 以 Duncan 检验进行事后多重比较 ($P < 0.05$). 实验数据均以平均值 ± 标准偏差 (Mean ± SD) 表示, 图形均采用 Origin 2018 软件绘制.

2 结果与讨论

2.1 PS-NPs 对叶绿素含量的影响

光合作用是植物必需的重要生理过程, 能为植物生长和生物量的增加提供重要帮助, 叶绿素含量的多少又能直接影响光合作用的强弱^[27]. PS-NPs 对大蒜叶片叶绿素含量的影响如图 1 所示. 可见, 添加 PS-NPs 处理后, 叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量都显著低于对照组 ($P < 0.05$), 且都在 ρ (PS-NPs) 为 1 mg·L⁻¹ 处理时出现最低值. Lian 等^[28]的研究结果表明, 在 100 nm 的 PS-NPs 胁迫下, 生菜 (*Lactuca sativa* L.) 叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量皆低于对照, 与本研究结果一致. 叶绿素的合成是一个由多酶参与的复杂过程^[29], PS-NPs 胁迫可能会降低合成关键酶活性, 从而使得叶片

叶绿素含量下降. 本实验中添加 PS-NPs 处理后, 叶绿素含量均随 PS-NPs 质量浓度的增加而上升, 这可能是因为非生物逆境胁迫促使叶片浓缩, 从而导致单位面积的叶绿素含量增加^[30], 还有可能是在逆境胁迫下, 叶绿素与叶绿体蛋白间的结合逐渐松弛, 叶绿素更容易被提取, 最终导致叶绿素含量增加^[31].



不同小写字母表示不同处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 样本数量 $n = 3$, 下同

图1 PS-NPs对金乡大蒜叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of PS-NPs on chlorophyll content in leaves of *A. sativum*

2.2 PS-NPs对大蒜叶片的氧化损伤

SOD作为抗氧化防御的第一道防线,对机体氧化和抗氧化的平衡至关重要^[32]. PS-NPs对大蒜叶

片SOD活性的影响如图2(a)所示. 经PS-NPs胁迫处理10 d和20 d后, SOD活性随PS-NPs质量浓度的增加均呈先升高后降低的趋势, 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD活性相比对照分别上升了17.98%和7.33%, 且差异显著 ($P < 0.05$). 当 $\rho(\text{PS-NPs})$ 增大至 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 第10 d和20 d处理下, SOD活性相比对照分别降低了13.42%和20.87%, 这表明高质量浓度的PS-NPs处理会显著抑制大蒜叶片的SOD活性.

PS-NPs对大蒜叶片POD活性的影响如图2(b)所示. 10 d处理时, POD活性随PS-NPs质量浓度的增加而上升, 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, POD活性相比对照上升了138.55%, 差异显著 ($P < 0.05$). 20 d处理时, POD活性随PS-NPs质量浓度的增加而下降, 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, POD活性相比对照分别降低了46.22%和51.69%. 这表明在短期(10 d) PS-NPs胁迫处理下, 大蒜可通过提高POD活性来抵御外界环境胁迫, 但随着胁迫时间的延长, POD活性会受到抑制.

APX是叶绿体中清除 H_2O_2 的关键酶, 也是抗坏血酸代谢的重要抗氧化酶^[33]. PS-NPs对大蒜叶片APX活性的影响如图2(c)所示. 可见, 经PS-NPs胁迫10 d后, 各质量浓度处理下APX活性相比对照分别升高了74.33%、897.17%、179.93%和7.57%, 表明PS-NPs处理10 d可不同程度地促进大蒜叶片APX活性升高. 20 d后, APX活性仅在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下低于对照, 分别降低了29.11%和58.44%, 未达到差异显著水平 ($P > 0.05$). 这表明在本实验PS-NPs质量浓度范围内, PS-NPs胁迫处理20 d内不会显著抑制APX活性.

脯氨酸是一种可溶性渗透剂, 能作为渗透调节介质、自由基清除剂和高分子结构稳定剂来帮助植物抵御外界环境胁迫^[34]. PS-NPs对大蒜叶片脯氨酸含量的影响如图2(d)所示. 可见, 脯氨酸含量随PS-NPs质量浓度的增加呈先增加后减少的趋势. 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 10 d处理下, 叶片脯氨酸含量达到峰值, 最高脯氨酸含量相比对照增加了308.27%. 而当 $\rho(\text{PS-NPs})$ 增加至 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 在20 d处理下, 叶片脯氨酸含量相比对照则减少12.77%.

MDA常常反映机体内脂质过氧化程度, 也可间接地反映出细胞的氧化损伤程度^[26]. 如图2(e)所示, 经PS-NPs胁迫处理后, 大蒜叶片MDA质量摩尔浓度随着PS-NPs质量浓度的增加而增加, 在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、胁迫处理20 d时, MDA质量

摩尔浓度达到最高,相比对照增加了 89.70%。且在同一质量浓度的 PS-NPs 处理时,胁迫时间越长,MDA 质量摩尔浓度也越高。这表明随着 PS-NPs 质

量浓度增大和胁迫时间延长,大蒜叶片的脂质过氧化程度和细胞损伤程度在逐渐加重。

SOD 可清除机体内过量产生的超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$),使之发生歧化反应,生成 H_2O_2 和 O_2 ^[35]。随后,POD 和 APX 活性也将被激活,催化分解 H_2O_2 生成 H_2O 和 O_2 ^[36]。Zhou 等^[37]的研究表明,在粒径 20 nm 的 PS-NPs 作用下,水稻根系 SOD 活性随着 PS-NPs 质量浓度的增加而上升,与本实验中 $\rho(\text{PS-NPs}) \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 10 d 时的结果较一致。同时,本实验结果显示,经 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 胁迫处理后,大蒜叶片的 SOD 活性被显著抑制,这可能是由于产生的过量自由基已超过酶作用阈值^[37],且生成的过量 H_2O_2 也会抑制 SOD 活性^[38]。此外,在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,10 d 后大蒜叶片的 POD 和 APX 活性均高于对照,这可能是由于氧化胁迫增强,植物体通过提高这两种酶活性使自身免受伤害^[25];但 20 d 后两者活性都受到抑制,这可能是由于 H_2O_2 的积累速度大于植物保护系统清除的速度,造成 H_2O_2 过度积累,从而导致酶活性出现抑制现象^[39]。NPs 具有显著诱导 APX 酶基因表达的能力^[40],如在粒径为 100 nm 的 PS-NPs 胁迫下,黄瓜(*Cucumis sativus* L.)叶片 APX 酶基因相对表达水平提高了 600% 以上^[25]。本实验中,在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,10 d 胁迫下 APX 活性达到最大,推测可能是此时 PS-NPs 诱导的 APX 酶基因表达量显著增加,从而使得 APX 活性显著上升。本实验中脯氨酸含量总体呈现先增大后减小的趋势,这表明在一定 PS-NPs 质量浓度胁迫时,大蒜体内的脯氨酸能作为有效的抗氧化剂清除自由基,调节大蒜体内的氧化平衡状态。从 MDA 质量摩尔浓度变化来看,由于抗氧化酶活性在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、胁迫处理 20 d 时都被抑制,导致机体内脂质过氧化程度显著上升,即 MDA 质量摩尔浓度显著增加($P < 0.05$),这也间接反映出高质量浓度 PS-NPs 的存在可对大蒜造成氧化损伤^[41]。

2.3 PS-NPs 对大蒜叶片营养品质的影响

蛋白质、糖类和维生素等是植物体内重要的营养素,其含量的多少也可直接或间接反映出植物营养品质的高低^[42]。PS-NPs 胁迫下大蒜叶片可溶性蛋白质含量如图 3(a)所示,经 PS-NPs 处理 10 d 后,当 $\rho(\text{PS-NPs}) \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时大蒜叶片可溶性蛋白质含量略低于对照,但当 $\rho(\text{PS-NPs})$ 增加至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白质含量较对照增加 9.45%。在 PS-NPs 胁迫处理 20 d 后,大蒜叶片可溶性蛋白质含量均高于对照,但增加均不显著($P > 0.05$)。

PS-NPs 对大蒜叶片可溶性糖含量的影响如图 3

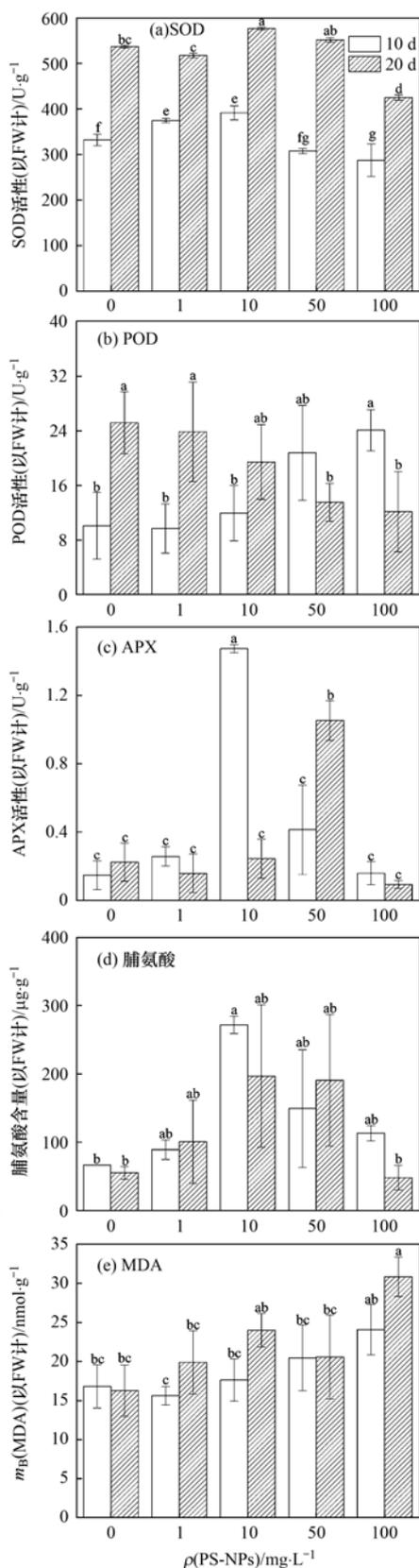


图 2 PS-NPs 对金乡大蒜叶片抗氧化系统的影响

Fig. 2 Effects of PS-NPs on antioxidant system in leaves of *A. sativum*

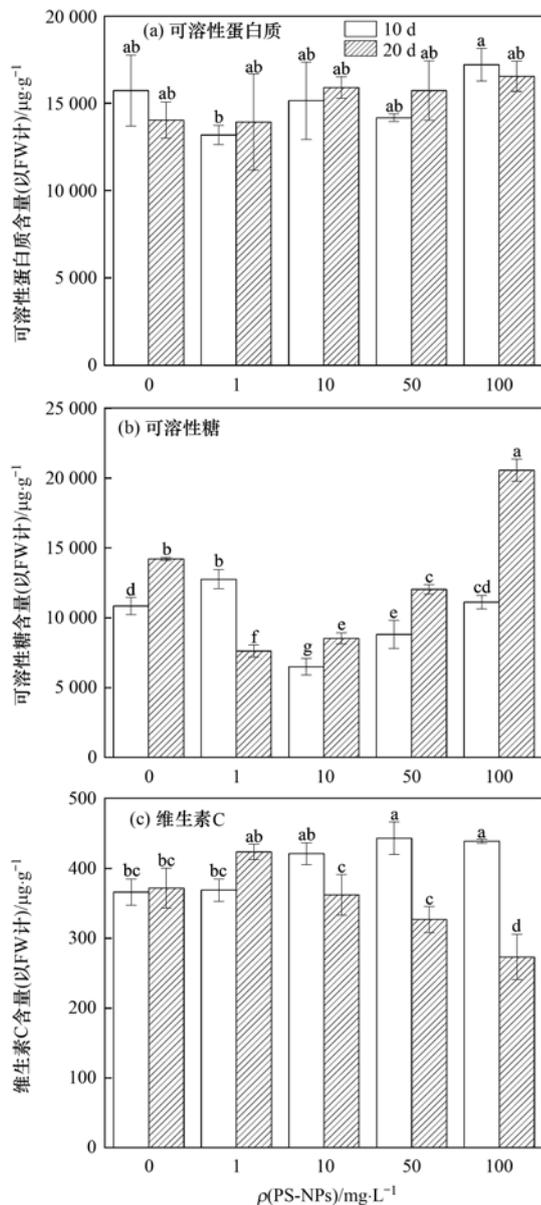


图3 PS-NPs对金乡大蒜叶片营养品质的影响

Fig. 3 Effects of PS-NPs on nutritional quality for leaves of *A. sativum*

(b)所示.可溶性糖含量在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均显著低于对照,PS-NPs的存在降低了大蒜叶片可溶性糖含量,表现出抑制作用;但在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,处理10 d和20 d后,可溶性糖含量相比对照分别升高了2.50%和44.65%,表现出促进作用.

PS-NPs对大蒜叶片维生素C含量的影响如图3(c)所示.10 d处理时,PS-NPs胁迫使得维生素C含量显著增加.但20 d处理时,维生素C含量呈先上升后下降的趋势,并在 $\rho(\text{PS-NPs}) \geq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时开始低于对照.当 $\rho(\text{PS-NPs})$ 增加至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,维生素C含量较对照降低26.53%,达到差异显著水平($P < 0.05$).

可溶性蛋白质和可溶性糖在调节植物体内生理代谢过程中发挥着重要作用,也是衡量蔬菜品质的重要指标^[43].王成伟等^[44]的研究表明,生菜(*L. sativa*)叶片中可溶性蛋白质、可溶性糖含量和PS-NPs质量浓度呈负相关.Lian等^[28]的研究也表明,在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生菜(*L. sativa*)叶片的可溶性蛋白质和可溶性糖含量均显著低于对照,其矿物质含量也全面下降.本研究中,经 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫10 d后,叶片可溶性蛋白质含量低于对照,但差异不显著($P > 0.05$),而此时可溶性糖含量要显著高于对照,这可能是由于可溶性糖含量的增加缓解了PS-NPs的胁迫,进而可溶性蛋白质含量并未发生显著变化^[45].维生素C具有清除体内自由基、预防癌症的作用,还有增强人体免疫功能、预防和治疗缺铁性贫血等多种功能,同时,维生素C作为植物抗氧化系统中的非酶性物质,对于抵御外界的非生物胁迫具有重要作用^[46].本研究中,10 d处理时维生素C含量显著增加,表明此时维生素C参与了缓解PS-NPs带来的胁迫效应.在 $\rho(\text{PS-NPs})$ 为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,20 d胁迫使得维生素C含量显著下降,可能是高氧化胁迫环境造成维生素C合成量下降,也可能是清除体内过量的自由基需要消耗大量的维生素C,消耗量大于合成量所致^[47].

3 结论

(1) 在粒径为80 nm的PS-NPs胁迫下,大蒜叶片的光合色素(叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素)含量均显著低于对照,表明80 nm的PS-NPs能显著影响金乡大蒜叶片叶绿素的合成过程.

(2) 80 nm的PS-NPs能对大蒜叶片造成氧化胁迫,植物则可以通过提高SOD、POD、APX酶活性和脯氨酸含量来缓解一定程度的氧化胁迫环境.

(3) 80 nm的PS-NPs对大蒜叶片可溶性蛋白质含量的影响不显著,对可溶性糖、维生素C含量的影响和PS-NPs质量浓度、胁迫时间有关,纳米塑料对大蒜叶片营养品质的影响还需进一步研究.

参考文献:

- [1] Alimi O S, Budarz J F, Hernandez L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1704-1724.
- [2] 任欣伟,唐景春,于宸,等.土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1045-1058. Ren X W, Tang J C, Yu C, et al. Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [3] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672), doi:

- 10.1126/science.1094559.
- [4] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas [J]. Science, 2014, **345**(6193): 144-145.
- [5] 杨婧婧, 徐笠, 陆安祥, 等. 环境中微(纳米)塑料的来源及毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2018, **37**(3): 383-396.
Yang J J, Xu L, Lu A X, et al. Research progress on the sources and toxicology of micro (nano) plastics in environment [J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(3): 383-396.
- [6] Besseling E, Redondo-Hasselerharm P, Foekema E M, et al. Quantifying ecological risks of aquatic micro- and nanoplastic [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, **49**(1): 32-80.
- [7] Shen M C, Zhang Y X, Zhu Y, et al. Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: a review [J]. Environmental Pollution, 2019, **252**: 511-521.
- [8] Booth A M, Hansen B H, Frenzel M, et al. Uptake and toxicity of methylmethacrylate-based nanoplastic particles in aquatic organisms[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, **35**(7): 1641-1649.
- [9] Lehner R, Weder C, Petri-Fink A, et al. Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(4): 1748-1765.
- [10] Wang L W, Wu W M, Bolan N S, et al. Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: current status and future perspectives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123415.
- [11] Bouwmeester H, Hollman P C H, Peters R J B. Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: experiences from nanotoxicology [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(15): 8932-8947.
- [12] Yang X Y, He Q, Guo F C, et al. Nanoplastics disturb nitrogen removal in constructed wetlands: responses of microbes and macrophytes[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(21): 14007-14016.
- [13] Lian J P, Wu J N, Xiong H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121620.
- [14] 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, Nazygul J, 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.
- [15] 李瑞杰, 李连祯, 张云超, 等. 禾本科作物小麦能吸收和积累聚苯乙烯塑料微粒[J]. 科学通报, 2020, **65**(20): 2120-2127.
Li R J, Li L Z, Zhang Y C, et al. Uptake and accumulation of microplastics in a cereal plant wheat [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(20): 2120-2127.
- [16] Chae Y, An Y J. Nanoplastic ingestion induces behavioral disorders in terrestrial snails: trophic transfer effects via vascular plants[J]. Environmental Science: Nano, 2020, **7**(3): 975-983.
- [17] 连加攀, 沈玫玫, 刘维涛. 微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 737-745.
Lian J P, Shen M M, Liu W T. Effects of microplastics on wheat seed germination and seedling growth [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 737-745.
- [18] 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.
- [19] Giorgetti L, Spanò C, Muccifora S, et al. Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, **149**: 170-177.
- [20] Ya H B, Jiang B, Xing Y, et al. Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment [J]. Science of the Total Environment, 2021, **798**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149338.
- [21] 汤绍虎, 罗充. 植物生理学实验教程[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2012. 280-281.
- [22] Li Z X, Li Q F, Li R J, et al. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(24): 30306-30314.
- [23] 徐东, 赵建, 黄汉昌, 等. 改良的黄嘌呤氧化酶法测定动植物组织中 SOD 比活力 [J]. 食品科学, 2011, **32**(6): 237-241.
Xu D, Zhao J, Huang H C, et al. Determination of SOD specific activity in animal and plant tissues by improved xanthine oxidase method [J]. Food Science, 2011, **32**(6): 237-241.
- [24] 郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦光合作用、膜脂过氧化和抗氧化系统的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1643-1651.
Zheng Y F, Hu C D, Wu R J, et al. Effects of ozone stress upon winter wheat photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant systems [J]. Environmental Science, 2010, **31**(7): 1643-1651.
- [25] Li Z X, Li R J, Li Q F, et al. Physiological response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) leaves to polystyrene nanoplastics pollution [J]. Chemosphere, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127041.
- [26] 徐亚军, 赵龙飞, 邢鸿福, 等. 内生细菌对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸和丙二醛的影响 [J]. 生态学报, 2020, **40**(11): 3726-3737.
Xu Y J, Zhao L F, Xing H F, et al. Effects of endophytic bacteria on proline and malondialdehyde of wheat seedlings under salt stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(11): 3726-3737.
- [27] 刘国峰, 何俊, 杨轶中, 等. 藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2887-2894.
Liu G F, He J, Yang Y Z, et al. Ecological effects of algae blooms cluster: the impact on chlorophyll and photosynthesis of the water hyacinth [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2887-2894.
- [28] Lian J P, Liu W T, Meng L Z, et al. Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Environmental Pollution, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116978.
- [29] Zhang S W, Heyes D J, Feng L L, et al. Structural basis for enzymatic photocatalysis in chlorophyll biosynthesis [J]. Nature, 2019, **574**(7780): 722-725.
- [30] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应 [J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5406-5416.
Li F L, Bao W K, Wu N. Morphological and physiological responses of current *sophora davidii* seedlings to drought stress

- [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5406-5416.
- [31] Romero-Aranda R, Soria T, Cuartero J. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions[J]. *Plant Science*, 2001, **160**(2): 265-272.
- [32] 平令文, 李现旭, 张翠, 等. DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4825-4833.
Ping L W, Li X X, Zhang C, *et al.* Oxidative stress and DNA damage induced by DEP exposure in earthworms [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4825-4833.
- [33] Foyer C H, Shigeoka S. Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis [J]. *Plant Physiology*, 2011, **155**(1): 93-100.
- [34] 蒋雪梅, 戚文华, 肖娟, 等. 盐胁迫下外源脯氨酸对银杏雌雄幼苗生理生化特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2013, **49**(6): 579-585.
Jiang X M, Qi W H, Xiao J, *et al.* Effects of exogenous proline on physiological and biochemical features of salt-stressed female and male *Ginkgo biloba* L. seedlings [J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, **49**(6): 579-585.
- [35] 时萌, 王芙蓉, 王棚涛. 植物响应重金属镉胁迫的耐性机理研究进展[J]. *生命科学*, 2016, **28**(4): 504-512.
Shi M, Wang F R, Wang P T. Research advances in the tolerance mechanism of plant response to heavy metal cadmium stress[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2016, **28**(4): 504-512.
- [36] 张盛楠, 黄益宗, 李颜, 等. Cd 胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及 Cd 吸收积累的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2040-2046.
Zhang S N, Huang Y Z, Li Y, *et al.* Effects of different exogenous plant hormones on the antioxidant system and Cd absorption and accumulation of rice seedlings under Cd stress [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2040-2046.
- [37] Zhou C Q, Lu C H, Mai L, *et al.* Response of rice (*Oryza sativa* L.) roots to nanoplastic treatment at seedling stage[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123412.
- [38] Zheng W, Zou H F, Lv S W, *et al.* The effect of nano-TiO₂ photocatalysis on the antioxidant activities of Cu, Zn-SOD at physiological pH[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2017, **174**, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2017.08.004.
- [39] Sharma P, Jha A B, Dubey R S, *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions[J]. *Journal of Botany*, 2012, **2012**, doi: 10.1155/2012/217037.
- [40] Guan Q J, Wang Z J, Wang X H, *et al.* A peroxisomal APX from *Puccinellia tenuiflora* improves the abiotic stress tolerance of transgenic *Arabidopsis thaliana* through decreasing of H₂O₂ accumulation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, **175**: 183-191.
- [41] 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 Z X, Li Q F, Li R J, *et al.* Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 973-981.
- [42] Wang Z Y, Yue L, Dhankher O P, *et al.* Nano-enabled improvements of growth and nutritional quality in food plants driven by rhizosphere processes[J]. *Environment International*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105831.
- [43] Li Z X, Li Q F, Li R J, *et al.* The distribution and impact of polystyrene nanoplastics on cucumber plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(13): 16042-16053.
- [44] 王成伟, 刘禹, 宋正国, 等. 微塑料对 DBP 胁迫下生菜光合作用及品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(3): 508-516.
Wang C W, Liu Y, Song Z G, *et al.* Effects of microplastics and DBP on photosynthesis and nutritional quality of lettuce [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(3): 508-516.
- [45] Yu H W, Zhang X L, Hu J W, *et al.* Ecotoxicity of polystyrene microplastics to submerged carnivorous *Utricularia vulgaris* plants in freshwater ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114830.
- [46] Mitchell T S, Agnew L, Meyer R, *et al.* Traffic influences nutritional quality of roadside plants for monarch caterpillars[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138045.
- [47] Foyer C H, Noctor G. Ascorbate and glutathione: the heart of the redox hub[J]. *Plant Physiology*, 2011, **155**(1): 2-18.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Comcob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)