

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响

周颖^{1,2}, 蒋文婷^{1,2}, 刘训悦³, 朱高荻^{1,2*}, 唐荣贵^{1,2}, 章海波², 蔡延江^{1,2}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2. 浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 杭州 311300; 3. 浙江农林大学现代农学院, 杭州 311300)

摘要: 土壤中微塑料污染及其毒理学效应逐渐引起关注, 但微塑料对农作物生长和生理的影响机制研究仍相对匮乏. 为探讨微塑料对农作物生长和生理化的影响, 选用不同质量分数(0%、0.2%、5%和10%)的低密度聚乙烯(LDPE MPs)进行盆栽试验, 研究了其对柳叶空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk)种子发芽率、光合色素含量、生物量、抗氧化酶活性、可溶性蛋白和可溶性糖含量等的影响效应. 结果表明, LDPE MPs显著抑制了($P < 0.05$)空心菜种子活力, 且质量分数越高抑制效果越显著. 然而, 5% LDPE MPs显著促进空心菜地上生物量; 0.2% LDPE MPs显著促进空心菜叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性, 而10% LDPE MPs则显著提高了过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性; 丙二醛(MDA)含量随LDPE MPs质量分数的增加呈梯度式下降, 较对照处理降低了15.53%~27.39%. LDPE MPs显著提高了空心菜叶片可溶性糖含量. 综上可知, LDPE MPs可抑制空心菜种子活力, 但会促进其生物量累积; 空心菜可通过调节抗氧化酶活性和可溶性蛋白含量来缓解LDPE MPs造成的氧化胁迫. 研究结果可为评估微塑料对蔬菜生产的影响提供参考依据.

关键词: 微塑料; 空心菜; 种子发芽; 生长; 抗氧化酶

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4170-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202207205

Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of *Ipomoea aquatica* Forsk

ZHOU Ying^{1,2}, JIANG Wen-ting^{1,2}, LIU Xun-yue³, ZHU Gao-di^{1,2*}, TANG Rong-gui^{1,2}, ZHANG Hai-bo², CAI Yan-jiang^{1,2}

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 3. College of Advanced Agricultural Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: Microplastic pollution in soil and its toxicological effects have attracted increasing attention from researchers, but the mechanisms of microplastics affecting crop growth and physiology remain unclear. A pot experiment was conducted to evaluate the impacts of various mass concentrations (0%, 0.2%, 5%, and 10%) of low-density polyethylene microplastics (LDPE MPs) on the germination rate, photosynthetic pigment content, biomass, antioxidant enzyme activity, soluble protein, and soluble sugar content of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk). The results showed that LDPE MPs significantly inhibited ($P < 0.05$) the seed vigor of water spinach, and the inhibitory effect increased with increasing concentration of LDPE MPs. However, the 5% LDPE MPs significantly promoted the aboveground biomass of water spinach. The 0.2% and 10% LDPE MPs significantly improved the superoxide dismutase (SOD) activity and catalase (CAT) and peroxidase (POD) activities, respectively. Further, malondialdehyde (MDA) content decreased with increasing concentration of LDPE MPs, and the reductions reached 15.53%-27.39% in comparison to that in the control. The LDPE MPs also significantly increased the soluble sugar content of water spinach leaves. In summary, LDPE MPs could inhibit the seed vigor and promote biomass accumulation in water spinach. Water spinach could relieve the oxidative stress caused by LDPE MPs by regulating antioxidant enzyme activity and soluble protein content. Therefore, this study may provide basic information for assessing the influences of microplastics on vegetables.

Key words: microplastics; water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk); seed germination; growth; antioxidant enzymes

微塑料(microplastics, MPs)通常是指直径小于5 mm的塑料颗粒^[1], 因其难降解和易迁移等特点, 被认为是一种全球性新型污染物, 普遍存在于大气、水和土壤等环境介质中^[2]. 微塑料粒径小且降解周期长, 极易被生物体吸收并随之在食物链中转移和富集, 从而危及生态环境安全及人类健康^[3]. 鉴于此, 联合国环境规划署(UNEP)已于2014年将微塑料污染列为全球十大环境问题之一^[4]. 当前关于微塑料的研究大多集中于海岸^[5]、海洋^[6]、河口^[7]和湖泊^[8]等水生生态系统. 相比于水生生态系统, 陆地生态系统尤其是农业生态系统中微塑料污染的研究仍相对较少. 事实上, 农业生产过程中因大量使用塑料薄膜、地膜和含有微塑料成分的农用化学品, 会通过污水灌溉、大气沉降等途径而导致农田土壤

中微塑料的累积量远高于海洋生态系统^[9]. 较高质量分数的MPs累积于农田土壤中, 会威胁农业生产活动. 例如, MPs可被生菜(*Lactuca sativa*)和小麦(*Triticum aestivum* L.)等农作物吸收和富集, 并从根部迁移到地上部, 分布于可直接被食用的茎叶之中^[10,11], 最终对人类生命健康构成威胁.

MPs进入农业土壤后可引起土壤结构和理化性质的变化, 进而扰动土壤养分原有的循环过程, 最终

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-09-09

基金项目: 浙江农林大学科研发展基金项目(2034020090, 2018FR005, 2018FR006); 国家自然科学基金项目(42050410315)

作者简介: 周颖(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微塑料污染对环境的风险评价, E-mail: zhouying980312@163.com

* 通信作者, E-mail: zhugaodi@zafu.edu.cn

影响植物种子萌发和后续生长^[12]. 种子萌发是植物生命周期的关键阶段之一, 发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等均是决定种子发芽能力的重要指标, 能够直接反映种子的生长趋势^[13]. 有研究表明, MPs 胁迫能够延缓种子发芽和抑制植物生长^[14,15]. 如叶子琪等^[16]发现 500 mg·kg⁻¹ 的聚乙烯微塑料 (polyethylene microplastics, PE MPs) 可显著降低蚕豆的总生物量, 抑制光合作用, 这与 Pignattelli 等^[17]的研究结果类似. 然而, 有研究则发现 MPs 能够增加植物叶片中叶绿素含量, 促进植物的生长发育^[18~20]. 此外, 新近研究指出, MPs 还可诱导植物产生过多活性氧 (ROS), 导致细胞器的致命受损^[21]. 通常, 植物体内会产生一系列的抗氧化酶, 如超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 以清除 ROS 带来的毒性^[22,23]. 然而, 在不同质量分数 MPs 胁迫下, 植物体内的抗氧化酶活性均呈现出不同的变化趋势^[24,25]. 丙二醛 (MDA) 是氧化应激引起的脂质过氧化的副产物, 是细胞膜损伤程度的生物学指标^[26], 其含量的变化可以表征植物在 MPs 胁迫下的过氧化和脂质损伤程度. Dong 等^[27]发现 MPs 可通过损坏水稻抗氧化酶结构, 诱导水稻组织脂质过氧化, 提高其 MDA 含量. Abduro 等^[28]则指出 MPs 可降低植物叶片的 MDA 含量. MPs 还可通过影响植物体内可溶性蛋白和可溶性糖等渗透调节物质的含量来缓解外界胁迫^[29,30]. 如 Dong 等^[31]研究发现浓度为 1 g·L⁻¹ 的聚丙烯微塑料可导致生菜可溶性蛋白和可溶性糖含量显著下降, 但 Li 等^[32]指出浓度为 10 g·L⁻¹ 的聚丙烯微塑料可显著提高黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 果实中可溶性蛋白含量.

综上所述, 当前 MPs 对农作物生长和生理的影响尚有争议, 可能与 MPs 的质量分数、种类和植物对象等相关, 仍有待进一步研究. 低密度聚乙烯 (low-density polyethylene, LDPE) 是农用塑料薄膜的主要组成成分, 因农用塑料薄膜的大量使用, 其已成为土壤微塑料污染物的主要类型之一^[33,34]. 空心菜是一种广泛种植的食用蔬菜, 为促进空心菜种植过程中的保温高产, 覆膜栽培技术成为空心菜种植过程中的常用措施之一. 然而, 有关低密度聚乙烯微塑料 (low-density polyethylene microplastics, LDPE MPs) 对于空心菜生长生理的效应, 目前尚不清楚且未见报道. 因此, 本研究选用柳叶空心菜 (*Ipomoea aquatica* Forsk) 为供试材料, 以粒径 < 200 μm 的 LDPE MPs 颗粒作为胁迫物质, 探讨不同质量分数的 LDPE MPs 对空心菜生长和生理的影响, 以期为后续评估 MPs 对蔬菜生产的影响提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

空心菜种子购于长沙市银田蔬菜种子实业有限公司. LDPE MPs 颗粒购于上海冠步机电科技有限公司, 粒径 < 200 μm, 其形貌如图 1 所示.

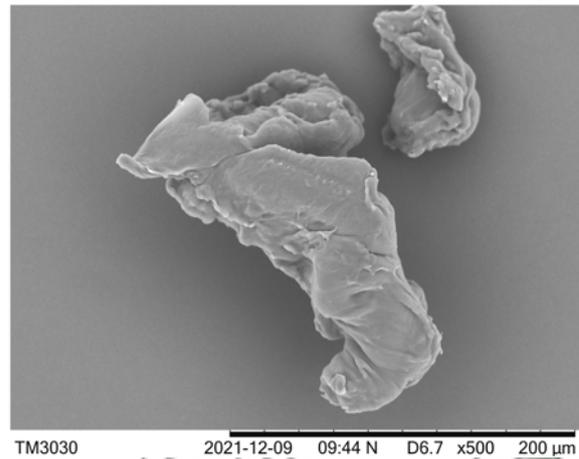


图 1 扫描电镜下 LDPE MPs 颗粒的形貌

Fig. 1 Scanning electron micrograph of LDPE MPs particle surface characteristics

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验

土壤采自浙江农林大学东湖校区官塘附近的蔬菜地土壤 (30°15' N, 119°43' E), 其基本理化性质如下: pH 5.47, ω (有机质) 17.53 g·kg⁻¹, ω (全氮) 0.33 g·kg⁻¹, ω (有效磷) 30.39 mg·kg⁻¹, ω (速效钾) 65.33 mg·kg⁻¹. 试验前用不锈钢铲在 0~20 cm 土壤深度范围内采集供试土壤, 过 1 cm 筛, 以去除植物的根、茎、有机碎屑和石子等杂物. 盆栽试验盆子直径 15 cm, 高 13 cm, 盆底垫纱网以防土漏出, 每盆装风干土 2 kg. 本试验在学校温室大棚内进行, 将 LDPE MPs 颗粒与过筛土壤多次搅拌充分混合均匀, 用自来水浇灌, 采用称重法使土壤水分含量达到田间最大持水量 (WHC) 的 40%. 稳定 15 d 后, 以溶液的形式一次性施入尿素、磷酸二氢钠和硫酸钾作为基肥, 控制土壤中氮磷钾的质量浓度比例为 1:1:1.

本试验设置不添加 LDPE MPs 的对照组 (CK), 添加 0.2% (质量分数, 下同) LDPE MPs (PE1), 添加 5% LDPE MPs (PE2) 和添加 10% LDPE MPs (PE3) 这 4 个处理, 添加质量分数参考了目前已有报道的微塑料含量以及以往报道试验中的含量^[35,36]. 已有研究表明, 土壤中的 MPs 质量分数范围为 0.03%~6.75%^[37], 考虑到农用薄膜的使用量大、回收率低的情况, 且微塑料会在土壤中不断积累^[38], 本试验将最高质量分数设置为 10%. 每个处

理均以溶液的形式施加等量肥料. 每个处理设置 4 个重复, 盆栽随机摆放于温室内.

空心菜种子放置在 30 ~ 40℃ 之间的温水中, 浸泡 24 h 进行催芽处理, 播种至放有营养土的穴盘中育苗, 待幼苗长出两片真叶后, 挑选长势相似的幼苗移栽至盆内, 每盆定植 3 株. 用称重法将含水量调至 60% WHC. 定植后及时用喷壶灌溉补充水分, 保证土壤水分充足. 除虫、除草等管理与当地田间管理方式保持一致. 空心菜生长 45 d 后收割第一茬, 75 d 后收割第二茬, 共收割两茬.

1.2.2 发芽试验

发芽试验在穴盘内进行, 试验设计、微塑料和土壤处理、施肥量及方法与盆栽试验相同, 催芽后在每个穴内播种 1 粒空心菜种子, 每盘播种 20 粒, 共 4 盘.

播种后 7 d 内, 每天于固定时间记录空心菜种子的发芽个数, 并用刻度尺测量第 7 d 的幼苗长度. 按式(1)~(4)分别计算种子的发芽势(germination energy, GE)、发芽指数(germination index, GI)、活力指数(vigor index, VI)和发芽率(germination rate, GR)^[15].

$$GE = (a/n) \times 100\% \quad (1)$$

$$GI = \sum Gt/Dt \quad (2)$$

$$VI = GI \times S \quad (3)$$

$$GR = (b/n) \times 100\% \quad (4)$$

式中, a 为 3 d 内发芽种子数; b 为 7 d 内发芽种子数; n 为供试种子总数; Dt 为发芽日数; Gt 为与 Dt 相对应的每日发芽种子数; S 为一定时期内的幼苗长度($\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$).

1.3 植株样品采集与测定

空心菜植株收获前, 先用剪刀采集约 3 g 叶片置于自封袋内, 经液氮粉碎后于 -80℃ 冰箱保存, 用于后续指标的测定. 第一茬收获时, 采集基部两节以上的地上部分, 第二茬收获时采集整颗植株. 植株用自来水连续冲洗干净, 再以去离子水冲洗, 用滤纸擦干后置于信封内备用. 主要指标测定方法如下.

1.3.1 叶绿素含量的测定

采用分光光度法, 用丙酮-乙醇混合溶液($V_{\text{丙酮}}: V_{\text{乙醇}} = 1:1$)提取植物叶片中的叶绿素, 用紫外可见分光光度计(岛津 UV-2600)分别测量在 470、645 和 663 nm 波长下的吸光度值. 按式(5)~(8)分别计算叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量^[39].

$$\text{叶绿素 a: Chla} (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (12.21 \times A_{663} - 2.81 \times A_{645}) \times V_T \times N / (1000 \times W) \quad (5)$$

$$\text{叶绿素 b: Chlb} (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (30.311 \times A_{645} - 5.03 \times A_{663}) \times V_T \times N / (1000 \times W) \quad (6)$$

$$\text{总叶绿素} (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (7.18 \times A_{663} + 27.5 \times A_{645}) \times V_T \times N / (1000 \times W) \quad (7)$$

$$\text{类胡萝卜素} (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (1000 \times A_{470} - 3.27 \times \text{Chla} - 104 \times \text{Chlb}) \times V_T \times N / (1000 \times W \times 229) \quad (8)$$

式中, V_T 为提取液体积; W 为样品鲜重; N 为稀释倍数.

1.3.2 生物量的测定

植株鲜样在 105℃ 烘箱内杀青 30 min, 后 60℃ 烘至恒重, 测定植株干重.

1.3.3 叶片 SOD、POD 和 CAT 活性、MDA、可溶性蛋白和可溶性糖含量的测定

取经液氮粉碎后的新鲜空心菜叶片, 用 PBS 缓冲液($0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH 7.4)按重量(g): 体积(mL) = 1:6 的比例制备组织匀浆, 离心($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min), 取上清液待测, 所有步骤均在冰浴上进行. 按南京建成生物工程研究所的试剂盒说明测定并计算空心菜叶片超氧化物歧化酶(SOD, 黄嘌呤氧化酶法)、过氧化氢酶(CAT, 紫外吸收法)、过氧化物酶(POD, 愈创木酚法)活力、丙二醛(MDA, 硫代巴比妥酸法)和可溶性蛋白含量(考马斯亮蓝法).

取经液氮粉碎后的新鲜空心菜叶片, 用超纯水按重量(g): 体积(mL) = 1:10 的比例制备组织匀浆, 沸水浴 10 min, 冷却后离心($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min), 取上清液待测. 按南京建成生物工程研究所的试剂盒说明测定并计算空心菜叶片可溶性糖含量(蒽酮比色法).

1.4 数据处理与分析

所有数据均用 Microsoft Excel 2016 进行处理与计算, 采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析, 图表中数据均以平均值 \pm 标准偏差表示. 所有数据均通过方差齐性检验, 符合正态分布, 运用单因素方差分析法(ANOVA)进行差异显著性分析. 采用 Origin 2018 软件作图.

2 结果与分析

2.1 种子发芽率及生长特性、光合色素含量和生物量

LDPE MPs 各处理对种子发芽率无显著影响($P > 0.05$), 但对于发芽势、发芽指数和活力指数等指标而言, 随 LDPE MPs 质量分数的增加, 抑制程度越高(表 1). PE3 处理中空心菜的发芽势、发芽指数和活力指数均显著低于 CK 处理($P < 0.05$), 分别降低了 42.31%、28.68% 和 21.47%. 与之不同, PE1 和 PE2 处理对发芽势和活力指数均表现出微弱的

抑制作用,但差异不显著($P > 0.05$).

就第一茬而言,添加 LDPE MPs 的各处理对叶绿素 a [图 2(a)]、叶绿素 b [图 2(b)]、总叶绿素 [图 2(c)] 和类胡萝卜素 [图 2(d)] 的含量均无显著影响($P > 0.05$). 但在第二茬中 PE2 和 PE3 处理则显著抑制了叶绿素 b 和类胡萝卜素含量($P < 0.05$),且都在 PE3 处理中出现最低值. 相反,PE1 处理则对各光合色素含量表现为微弱的促进作用,

但差异不显著($P > 0.05$).

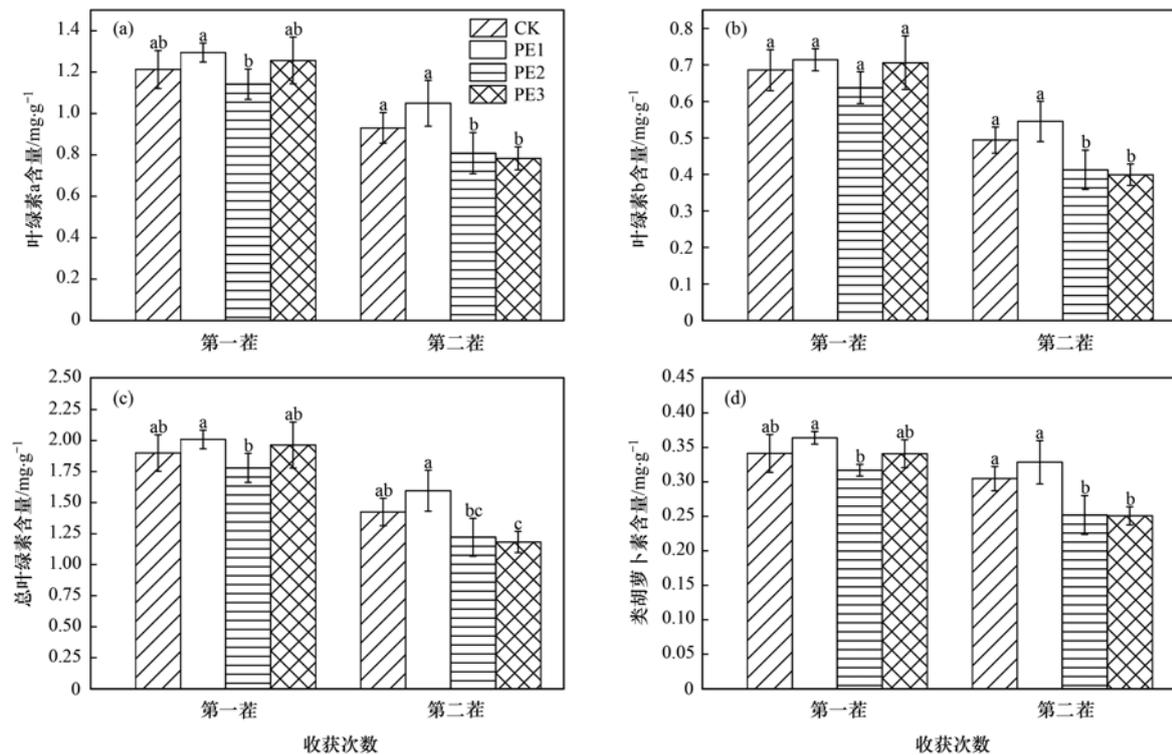
从总体上来看,LDPE MPs 各处理对空心菜地上生物量和地下生物量均呈现先升后降的趋势,且 PE2 处理的第一茬、第二茬地上和地下生物量达到最大值,总地上生物量较 CK 处理增加了 39.41% (表 2),显著促进了空心菜的生长($P < 0.05$). PE3 处理时,LDPE MPs 对空心菜的生长无显著影响($P > 0.05$).

表 1 空心菜种子活力¹⁾

Table 1 Seed vigor of water spinach

处理	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数
CK	88.89 ± 9.62a	72.22 ± 0.05a	4.64 ± 0.31a	22.01 ± 2.82a
PE1	91.67 ± 8.33a	66.67 ± 0.00a	3.62 ± 0.17b	19.76 ± 2.08ab
PE2	91.67 ± 8.33a	66.67 ± 0.00a	3.46 ± 0.13b	19.94 ± 1.51ab
PE3	75.00 ± 8.33a	41.67 ± 0.08b	3.31 ± 0.31b	17.28 ± 0.91b

1) 数值为平均值 ± 标准偏差 ($n = 4$), 同列不同小写字母表示不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同



不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 2 空心菜叶片光合色素含量

Fig. 2 Photosynthetic pigment content in leaves of water spinach

表 2 空心菜生物量

Table 2 Water spinach biomass

处理	地上生物量/g			地下生物量/g
	第一茬	第二茬	总计	
CK	1.00 ± 0.14c	1.08 ± 0.24b	2.14 ± 0.30b	0.63 ± 0.06b
PE1	1.25 ± 0.15b	1.13 ± 0.22ab	2.38 ± 0.32b	0.67 ± 0.12ab
PE2	1.51 ± 0.21a	1.42 ± 0.34a	2.98 ± 0.29a	0.79 ± 0.09a
PE3	1.22 ± 0.23b	1.26 ± 0.26ab	2.51 ± 0.32b	0.71 ± 0.11ab

2.2 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量

随着 LDPE MPs 质量分数的升高, SOD 活性先

升后降, 在 PE1 处理中达到最大值, 较 CK 处理显著提高了 8.68% [$P < 0.05$, 图 3(a)]. LDPE MPs 添加

对 POD 活性无显著影响,但 PE3 处理的 POD 活性略高于其余处理 [$P > 0.05$, 图 3(b)]. PE2 和 PE3 处理显著提高第一茬空心菜叶片 CAT 活性 [$P < 0.05$, 图 3(c)], 第二茬 CAT 活性在 PE3 中达到最大值. 第一茬中, LDPE MPs 的添加显著降低了 MDA 含量 ($P < 0.05$), 且随着质量分数的增加, MDA 含量呈现阶梯式下降, PE1、PE2 和 PE3 处理较 CK 处理分别降低了 15.53%、26.81% 和 27.39% [图 3(d)]. 但在第二茬中, PE2 处理显著增加了叶片的 MDA 含量 ($P < 0.05$), 增加幅度为 33.58%.

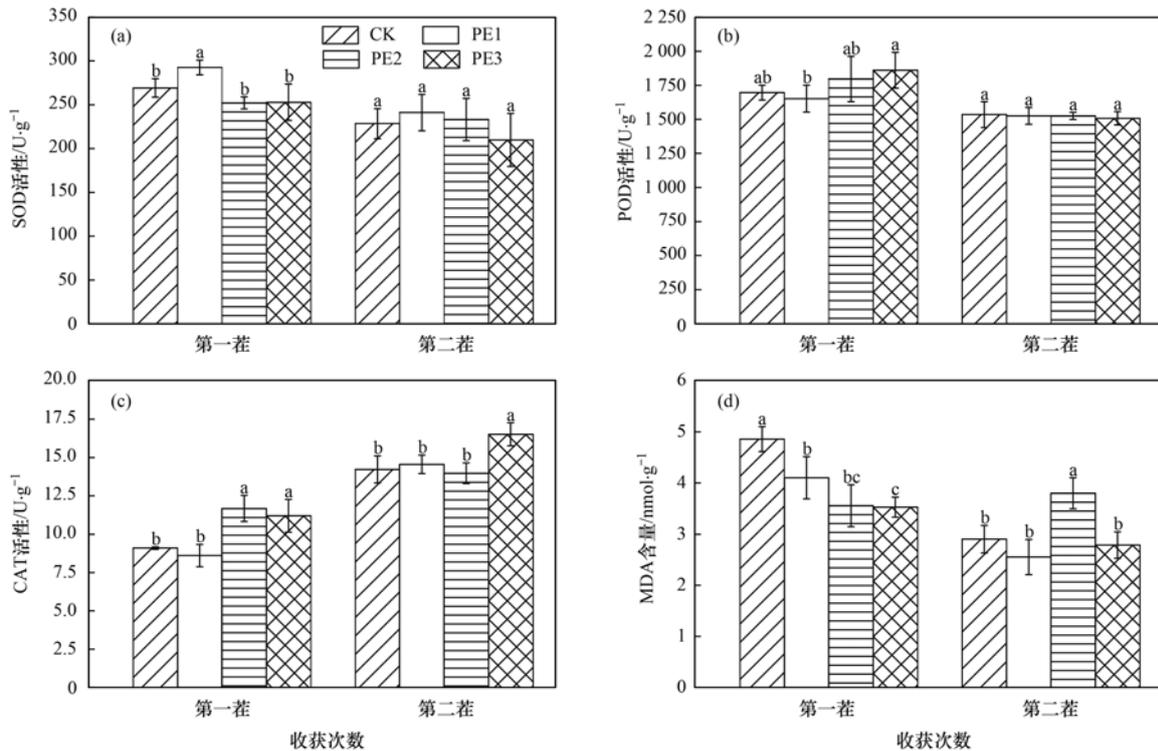


图 3 空心菜叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量

Fig. 3 Antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in leaves of water spinach

2.3 可溶性蛋白和可溶性糖含量

特别地, PE2 处理显著降低空心菜叶片第一茬可溶性蛋白含量, 较 CK 降低了 29.63%, PE3 处理可溶性蛋白含量较 CK 显著提高了 27.80% [$P < 0.05$, 图 4(a)], 但在第二茬中各处理间无显著差异

($P > 0.05$). 同时, LDPE MPs 在两茬收获中均显著提高了可溶性糖含量 ($P < 0.05$), 但不同质量分数处理间无显著差异 [$P > 0.05$, 图 4(b)]. 此外, 第二茬的可溶性蛋白和可溶性糖含量均显著高于第一茬 ($P < 0.05$).

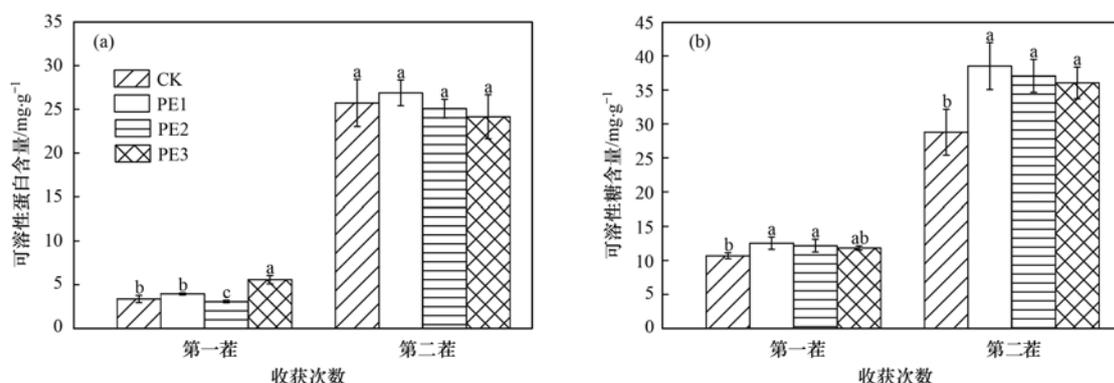


图 4 空心菜叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量

Fig. 4 Soluble protein and soluble sugar content in leaves of water spinach

3 讨论

3.1 LDPE 对空心菜生长的影响

本研究发现, LDPE MPs 显著抑制空心菜种子

的活力, 这与 Pignattelli 等^[17]的研究结果一致. 种子发芽阶段对水分的需求量极大, 而 MPs 可以吸附在种子、胚根和胚毛的表面, 堵塞种子囊中空隙^[14], 这导致种子无法及时吸收水分供给自身发育, 进而

抑制种子萌发. 本研究还发现, LDPE MPs 对空心菜种子发芽的抑制效果会随着质量分数的升高而增强, 这可能是由于 MPs 颗粒中化合物浸出导致, 随着 MPs 质量分数的升高, MPs 释放出更多的有毒物质^[40], 从而降低种子活力. 然而, 本研究却并未发现 LDPE MPs 对种子的发芽率产生显著影响, 这可能是由于随着 MPs 暴露时间增加, 种子自身已吸收的充足水分抵消了 MPs 对于种子萌发的负效应^[41].

此外, PE2 和 PE3 显著降低空心菜叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量. 这可能是因为 MPs 被空心菜吸收后在体内积累, 阻隔了部分叶绿素的合成途径, 与叶绿素合成有关的蛋白酶活性受到抑制, 进而使叶绿素含量下降^[42]. 此外, MPs 的氧化胁迫使 ROS 在植物细胞中积累, 破坏叶绿体结构^[43], 进而使叶绿素合成受阻, 最终导致光合色素含量的下降.

特别地, PE2 可显著增加空心菜地上和地下生物量, 而其他处理则无显著影响, 这与文献^[19]的研究结果类似, 造成这一现象的原因可能是 MPs 的添加降低了土壤容重^[44,45]. 本研究结果发现, PE2 的土壤容重较 CK 显著降低 $[(1.09 \pm 0.03) \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $(1.21 \pm 0.04) \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $P < 0.05$]. 土壤容重的降低可以减小植物根系的渗透阻力, 改善土壤通气性, 从而促进根系生长, 增加根系总长度、直径、体积和质量等^[46,47]. 以上差异还可能通过改变土壤团聚体直接或间接影响土壤结构, 进而促进植株生长^[48]. 然而, PE2 和 PE3 在第二茬中对空心菜叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量表现出显著的抑制作用, 这与生物量的结果相反. 由此可以推测, 土壤容重降低对植物生长的促进作用缓解了因光合色素含量的降低而带来的负面效应. 此外, 本研究还发现, PE3 的生物量显著低于 PE2, 生物量有下降趋势, 这与本研究中 LDPE MPs 对空心菜光合色素含量影响结果一致, 由此本研究推测 MPs 可通过影响植株光合作用, 进而对植株生长构成威胁.

3.2 LDPE 对空心菜生理特性的影响

本研究发现, 随着 LDPE MPs 质量分数的升高, 空心菜体内的 SOD 活性呈先升后降的规律, SOD 活性的短暂升高是机体为免受外界胁迫和毒害而做出的调节反应, 而之后活性下降是由于产生的过量自由基已超过酶作用阈值^[49]. 这与大豆在受到聚氯乙烯微塑料胁迫时激发体内抗氧化系统, 从而减少氧化损伤的研究结果一致^[50]. SOD 可以催化超氧阴离子生成 H_2O_2 和 O_2 , 是机体抗氧化防御的第一道防线^[51]. CAT 和 POD 均是普遍存在的氧化还原酶, 可

催化分解过量 H_2O_2 以防止脂质过氧化^[51], 因此 CAT 和 POD 在活力变化上较 SOD 有滞后性. 在本研究中, MPs 的添加虽没有使 POD 活性出现显著差异, 但可看到 PE3 处理下 CAT 活性出现了显著提高. CAT 和 POD 活性的上升可能是空心菜为防止 ROS 增加的一种保护策略, 也是空心菜在 LDPE MPs 暴露下避免氧化应激的一种适应性反应. 类似的, Zhou 等^[49]发现在 $50 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $100 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下, 聚苯乙烯微塑料显著提高了水稻 CAT 和 POD 活性.

第一茬中, LDPE MPs 胁迫使空心菜叶片的 MDA 含量显著降低, 结合上述微塑料胁迫下空心菜叶片抗氧化酶活性变化可推测, 空心菜对 MPs 胁迫所作出的氧化应激反应减轻了其细胞膜脂质的过氧化程度. 另有研究表明, 在聚苯乙烯微塑料暴露下, 水生植物密刺苦草 (*Vallisneria denseserrulata*) 的 SOD 和 POD 等抗氧化酶活性显著提高, 而 MDA 含量显著降低^[28], 与本研究表现出相同的结果. 但是, 第二茬中, PE2 处理的 MDA 含量显著高于其余处理, 这表明 LDPE MPs 对空心菜产生了氧化胁迫. Yang 等^[52]发现在高浓度的 PE MPs 胁迫下, 绿藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) MDA 含量显著上升, 与本研究的结果相似.

另外, PE3 显著提高空心菜叶片可溶性蛋白含量, 说明空心菜可主动增加和积累可溶性蛋白用于提高细胞的持水能力, 以缓解 LDPE MPs 的外界胁迫, 进一步保护自身重要物质和生物膜^[53]. 同时, LDPE MPs 可提高空心菜叶片可溶性糖含量, 这与本研究中空心菜地上生物量的显著增加结果一致, 表明 LDPE MPs 可通过提升可溶性糖这一重要的供能及缓冲物质含量, 缓解 LDPE MPs 带来的氧化胁迫, 进而促进空心菜地上生物量的累积^[54]. 本研究还发现, 经 LDPE MPs 胁迫后, 第二茬空心菜叶片可溶性蛋白含量无显著差异, 而可溶性糖含量显著高于对照组, Dong 等^[55]的研究也呈现类似的结果, 这可能是由于可溶性糖含量的增加缓解了 LDPE MPs 的胁迫作用, 进而使可溶性蛋白质含量并未发生显著变化^[18]. 本研究中空心菜第二茬叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量均显著高于第一茬, 这与张亚楠等^[56]研究的结果一致, 表明空心菜对连作条件做出抗逆反应.

4 结论

(1) 本试验在 0% ~ 10% 质量分数范围内, LDPE MPs 对空心菜种子活力具有显著的抑制作用, 且抑制效果随着 LDPE MPs 质量分数的升高而增强.

LDPE MPs 可能通过抑制空心菜种子活力进而影响种子的发芽,因而种子发芽势同活力指数的变化趋势具有相似性。

(2)5% 质量分数的 LDPE MPs 可以降低土壤容重,促进根系生长,从而显著提高空心菜的生物量。

(3)随着 LDPE MPs 质量分数(0%~10%)的增加,空心菜叶片抗氧化酶活性呈 SOD 活性先升后降,POD、CAT 活性升高的趋势,且可溶性蛋白和可溶性糖含量均有提升,而 MDA 含量显著降低,表明空心菜对 LDPE MPs 胁迫做出了氧化应激反应,减轻了其细胞膜脂质的过氧化程度。

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), doi: 10.1126/science.1094559.
- [2] 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.
- [3] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [4] Qi R M, Jones D L, Li Z, *et al.* Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134722.
- [5] Kwon O Y, Kang J H, Hong S H, *et al.* Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **155**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110729.
- [6] Li J X, Gao F L, Zhang D, *et al.* Zonal distribution characteristics of microplastics in the southern Indian ocean and the influence of ocean current [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, **10**(2), doi: 10.3390/jmse10020290.
- [7] Ta A T, Babel S. Microplastics pollution with heavy metals in the aquaculture zone of the Chao Phraya River Estuary, Thailand [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **161**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111747.
- [8] Zhang Q J, Liu T, Liu L, *et al.* Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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球 [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.
- [12] 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.
- [13] Guo M, Zhao F R, Tian L W, *et al.* Effects of polystyrene microplastics on the seed germination of herbaceous ornamental plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **809**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151100.
- [14] Bosker T, Bouwman L J, Brun N R, *et al.* Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum* [J]. *Chemosphere*, 2019, **226**: 774-781.
- [15] 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.
- [16] 叶子琪,蒋小峰,汤其阳,等. 聚乙烯微塑料对蚕豆幼苗的毒性效应 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, **57**(3): 385-392.
Ye Z Q, Jiang X F, Tang Q Y, *et al.* Toxic effects of polyethylene microplastics on higher plant *Vicia faba* [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, **57**(3): 385-392.
- [17] Pignattelli S, Broccoli A, Renzi M. Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **727**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138609.
- [18] 邱陈陈,李国新,李青松,等. 聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4387-4393.
Qiu C C, Li G X, Li Q S, *et al.* Effects of polystyrene nanoplastics (PS-NPs) on the physiology of *Allium sativum* L. [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4387-4393.
- [19] Hernández-Arenas R, Beltrán-Sanahuja A, Navarro-Quirant P, *et al.* The effect of sewage sludge containing microplastics on growth and fruit development of tomato plants [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115779.
- [20] Zhang Q G, Zhao M S, Meng F S, *et al.* Effect of polystyrene microplastics on rice seed germination and antioxidant enzyme activity [J]. *Toxics*, 2021, **9**(8), doi: 10.3390/toxics9080179.
- [21] Gao M L, Liu Y, Song Z G. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-*n*-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort) [J]. *Chemosphere*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124482.
- [22] Li J, Zheng X Q, Liu K C, *et al.* Effect of tetracycline on the growth and nutrient removal capacity of *Chlamydomonas reinhardtii* in simulated effluent from wastewater treatment plants [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.080.
- [23] Cao D J, Shi X D, Li H, *et al.* Effects of lead on tolerance, bioaccumulation, and antioxidative defense system of green algae, *Cladophora* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 231-237.

- [24] 黄献培, 向垒, 郭静婕, 等. 聚苯乙烯微球对菜心种子及幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 926-933.
Huang X P, Xiang L, Guo J J, *et al.* Toxicity of polystyrene microplastics on seeds and seedlings of *Brassica campestris* L. [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 926-933.
- [25] Yu H W, Qi W X, Cao X F, *et al.* Microplastic residues in wetland ecosystems: do they truly threaten the plant-microbe-soil system? [J]. Environment International, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106708.
- [26] 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.
- [27] Dong Y M, Gao M L, Song Z G, *et al.* Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings [J]. Environmental Pollution, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113892.
- [28] Abduro Ogo H, Tang N, Li X W, *et al.* Combined toxicity of microplastic and lead on submerged macrophytes [J]. Chemosphere, 2022, **295**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133956.
- [29] Sudhakar M P, Kumar B R, Mathimani T, *et al.* A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **228**: 1320-1333.
- [30] Wang Y P, Zhang Z J, Wang X C, *et al.* Exogenous dopamine improves apple fruit quality via increasing flavonoids and soluble sugar contents[J]. Scientia Horticulturae, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.scienta.2021.109903.
- [31] Dong Y M, Song Z G, Liu Y, *et al.* Polystyrene particles combined with di-butyl phthalate cause significant decrease in photosynthesis and red lettuce quality [J]. Environmental Pollution, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116871.
- [32] 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.
- [33] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al.* Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [J]. Environmental Pollution, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [34] 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 土壤微塑料污染现状、来源、环境命运及生态效应[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 353-365.
Yang G R, Chen L R, Lin D M. Status, sources, environmental fate and ecological consequences of microplastic pollution in soil [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 353-365.
- [35] Ng E L, Lin S Y, Dungan A M, *et al.* Microplastic pollution alters forest soil microbiome[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **409**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124606.
- [36] 许学慧, 胡海娜, 陈颖. 聚乙烯微塑料对大豆生长的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021, (6): 262-268.
Xu X H, Hu H N, Chen Y. Study on the effect of polyethylene microplastics on soybean growth[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (6): 262-268.
- [37] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(11): 5774-5780.
- [38] 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.
- [39] 张宇阳, 于涛, 马文宝, 等. 不同郁闭度对野外回归的梓叶槭幼树形态和生理特征的影响[J]. 生物多样性, 2020, **28**(3): 323-332.
Zhang Y Y, Yu T, Ma W B, *et al.* Physiological and morphological effects of different canopy densities on reintroduced *Acer catalpifolium* [J]. Biodiversity Science, 2020, **28**(3): 323-332.
- [40] Pflugmacher S, Tallinen S, Kim Y J, *et al.* Ageing affects microplastic toxicity over time: effects of aged polycarbonate on germination, growth, and oxidative stress of *Lepidium sativum* [J]. Science of the Total Environment, 2021, **790**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148166.
- [41] 吴佳妮, 杨天志, 连加攀, 等. 聚苯乙烯纳米塑料 (PSNPs) 对大豆 (*Glycine max*) 种子发芽和幼苗生长的影响 [J]. 环境科学学报, 2020, **40**(12): 4581-4589.
Wu J N, Yang T Z, Lian J P, *et al.* Effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of soybean (*Glycine max*) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(12): 4581-4589.
- [42] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo [J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, **59**: 89-113.
- [43] Moinuddin M, Gulzar S, Hameed A, *et al.* Differences in photosynthetic syndromes of four halophytic marsh grasses in Pakistan [J]. Photosynthesis Research, 2017, **131**(1): 51-64.
- [44] de Souza Machado A A, Lau C W, Till J, *et al.* Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(17): 9656-9665.
- [45] de Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(10): 6044-6052.
- [46] 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.
- [47] van Weert S, Redondo-Hasselerharm P E, Diepens N J, *et al.* Effects of nanoplastics and microplastics on the growth of sediment-rooted macrophytes [J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**: 1040-1047.
- [48] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in Southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 12-20.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Gao K, Li B, Chen R Z, *et al.* A feasibility study of using silkworm larvae as a novel *in vivo* model to evaluate the biotoxicity

- of ionic liquids [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111759.
- [52] Yang W F, Gao X X, Wu Y X, *et al.* The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110484.
- [53] Zhu Z L, Wang S C, Zhao F F, *et al.* Joint toxicity of microplastics with triclosan to marine microalgae *Skeletonema costatum* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 509-517.
- [54] 李月灵, 金则新, 罗光宇, 等. 干旱胁迫下接种丛枝菌根真菌对七子花非结构性碳水化合物积累及 C、N、P 化学计量特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(4): 963-971.
Li Y L, Jin Z X, Luo G Y, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on non-structural carbohydrate contents and C: N: P stoichiometry of *Heptacodium miconioides* under drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(4): 963-971.
- [55] Dong J W, Li L Q, Liu Q Q, *et al.* Interactive effects of polymethyl methacrylate (PMMA) microplastics and salinity variation on a marine diatom *Phaeodactylum tricorutum* [J]. *Chemosphere*, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133240.
- [56] 张亚楠, 王兴祥, 李孝刚, 等. 连作对棉花抗枯萎病生理生化特性的影响 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(14): 4456-4464.
Zhang Y N, Wang X X, Li X G, *et al.* Effects of continuous cropping on physiological and biochemical resistance of cotton to *Fusarium* wilt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(14): 4456-4464.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)