

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响

廖苑辰¹, 娜孜依古丽·加合甫别克¹, 李梅^{1,2*}, 王晓琳^{1,2}, 蒋丽娟^{1,2}

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 南京大学环境学院, 环境科学与工程国家级实验教学示范中心, 南京 210023)

摘要: 土壤环境中微塑料污染及毒理学效应逐渐引起关注, 但微塑料对植物的毒性及其机制研究仍十分匮乏。为探究微塑料对陆生高等植物小麦 (*Triticum aestivum*) 的毒性作用, 选用 100 nm 和 5 μm 聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 进行土培处理, 结合水培生长试验, 研究了 PS-MPs 对小麦生长及叶片光合色素、可溶性蛋白含量和抗氧化酶活性等的影响。结果表明, 水培试验中, 高浓度 (200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) PS-MPs 显著抑制小麦根、茎的伸长, 5 μm PS-MPs 较 100 nm PS-MPs 表现出更大的毒性效应, 小麦根和茎的长度抑制率分别为 67.15% 和 56.45%。土培条件下, 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PS-MPs 对小麦生长影响最为显著。在试验含量范围内 (0 ~ 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 随 PS-MPs 含量的增加, 小麦叶片光合色素和可溶性蛋白含量先升后降, 提示 PS-MPs 对小麦叶片光合系统产生了损害, 抑制其蛋白的合成; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性下降, 过氧化氢酶 (CAT) 活性先降后升, 表明 PS-MPs 对小麦毒性的可能机制涉及氧化应激。本研究结果将为土壤环境中微塑料的生态风险评价提供依据。

关键词: 微塑料; 陆生植物; 小麦; 生长; 光合色素; 酶活性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4661-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201903113

Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (*Triticum aestivum*)

LIAO Yuan-chen¹, Nazygul·Jahitbek¹, LI Mei^{1,2*}, WANG Xiao-lin^{1,2}, JIANG Li-juan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Experimental Teaching Demonstration Centre for Environmental Science and Engineering, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The toxicological effects of microplastics in the soil environment have gradually attracted widespread attention, while less is known about the influence of microplastics on plants. The growth of wheat, photosynthetic pigment content, soluble protein content, and the antioxidant enzyme activities of leaves were investigated to explore the toxic effects of microplastics on wheat (*Triticum aestivum*). In this study, 100 nm and 5 μm polystyrene microplastics (PS-MPs) were used for soil culture treatment combined with hydroponic growth. The results showed that in hydroponic experiment, high concentrations (200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of PS-MPs significantly inhibited the elongation of wheat roots and stems, and 5 μm PS-MPs showed a greater toxicity effect than 100 nm PS-MPs. Roots and stem length inhibition rates were 67.15% and 56.45%, respectively. In the soil culture tests, 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PS-MPs had the most significant effect on wheat growth. Within the test content range (0-100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), with an increase in PS-MPs exposure, the content of photosynthetic pigment and soluble protein in wheat leaves increased first and then decreased. This indicated that PS-MPs damaged the photosynthetic pathway of wheat leaves and inhibited protein synthesis. SOD activity decreased, and CAT decreased first and then increased, indicating that the possible mechanism of toxicity to wheat involves oxidative stress. The results provide a basis for the ecological risk assessment of microplastics in the soil environment.

Key words: microplastics; terrestrial plant; wheat (*Triticum aestivum*); growth; photosynthetic pigments; enzyme activity

自 2004 年 Thompson 等^[1]在海洋水体和沉积物中发现塑料碎片以来, 微塑料作为一种新型持久性环境污染物逐渐成为国内外的研究热点之一^[2]。通常将粒径 < 5 mm 的塑料碎片或颗粒定义为微塑料^[1, 3], 目前在全球范围内的大气^[4, 5]、水体^[6, 7]、沉积物^[8, 9]、土壤^[10, 11]和生物体^[12, 13]等环境介质中均有其不同程度的检出。受塑料自身结构和性质影响, 微塑料在自然环境中难以降解, 并且由于具有高疏水性和较高的比表面积, 其表面易吸附周围环境污染物和病原体, 甚至可能通过食物链传递、富集, 对生态系统构成威胁, 产生的环境污染与毒害问题不容小觑^[3, 14]。已有研究表明, 微塑料进入

生物体内会引起一系列生态毒理学效应, 包括细胞毒性、遗传毒性、神经毒性、生殖毒性、氧化应激及损伤和行为异常等, 甚至造成生物死亡^[15]。

相较于水生生态系统, 现阶段有关土壤生态系统中微塑料的研究较少^[16, 17]。土壤作为人类赖以生存的环境及物质交换基础, 与人类接触尤为密切。然而, 一些污水、污泥的土地利用和塑料薄膜

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41773115); 江苏省科技支撑项目 (BE2016736); 南京大学“十三五”实验教学改革研究课题项目 (SY201911)

作者简介: 廖苑辰 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: fjctlyc@163.com

* 通信作者, E-mail: meili@nju.edu.cn

覆盖物的大量使用,加剧了土壤塑料废弃物污染,造成土壤微塑料积累^[18],久而久之对土壤理化性质及物质循环产生潜在的不利影响^[10].迄今,关于土壤中微塑料含量及其分布的报道还很有限^[19]. Zhang 等^[11]对我国西南地区土壤团聚体的调查显示,微塑料平均丰度为 $18\ 760\ \text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$. Scheurer 等^[20]的研究也发现,瑞士洪泛平原中有最高含量达 $55.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的微塑料检出.因此,土壤环境中微塑料污染及其生态毒理效应逐渐引起相关学者的关注^[21].

目前,微塑料对土壤生物毒性效应的研究才刚刚起步.有研究表明,土壤动物蚯蚓能摄食微塑料^[22],高浓度微塑料造成蚯蚓明显肠道损伤^[23],抑制其生长并增加死亡率^[24].此外,微塑料的暴露还能改变弹尾虫和线蚓的肠道微生物多样性及群落结构^[25, 26].然而,微塑料对植物影响的研究鲜见报道^[2].植物是生态系统的生产者,也是生物蓄积的起点,长期存留在土壤中的微塑料很有可能形成纳米塑料^[18, 27],被迁移并积聚在植物中,再通过食物链被摄入体内,最终导致人体暴露,对生态环境和人类健康构成风险^[28].因此,开展土壤中微塑料对植物的毒性效应研究已刻不容缓.

本研究选取陆生高等植物小麦 (*Triticum aestivum*) 为试验作物,采用水培和土培方式,分析纳米级 (100 nm) 和微米级 (5 μm) 聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 对其生长,光合色素和可溶性蛋白含量、抗氧化酶和淀粉酶活性等生理生化指标的影响,以期评估微塑料对植物的毒性效应及其作用机制提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 购自北京市某市场,籽粒饱满,状态健康.

聚苯乙烯荧光微球 (fluorescent polystyrene microspheres, PS-MPs) 购自天津市某色谱技术开发中心,粒径分别为 100 nm 和 5 μm . 100 mg 聚苯乙烯微球分装在 10 mL 去离子水-乙醇 (1:1, 体积比) 乳浊液中,固含量 1% (质量浓度),于 4℃ 冰箱贮存.

1.2 试验方法

1.2.1 微塑料表征

将聚苯乙烯荧光微球原液 [$100\ \text{mg}\cdot(10\ \text{mL})^{-1}$] 稀释一定倍数,稀释前后均超声处理 10 min (120 W) 以进行分散,用透射电子显微镜 (TEM, Jeol 2100F, 日本 Jeol 公司) 表征微塑料的形貌,激光粒

度仪动态光散射 (DLS, Zetasizer Nano-S, 英国 Malvern 公司) 验证其粒径分布.

1.2.2 植物培养

选取均一饱满的小麦种子,蒸馏水浸泡 30 min,弃去浮于水面的种子.剩余种子经 1% H_2O_2 浸泡消毒 30 min 后,用蒸馏水冲洗 3 次.将消毒后的种子置于蒸馏水中浸泡 12 h,滤纸吸干表面水分后用于试验.

(1) 水培 水培试验在培养皿中进行.将表面消毒的 15 粒种子均匀放入铺有消毒滤纸的培养皿中,分别向培养皿加入预先配制的不同粒径 (100 nm 和 5 μm)、不同浓度 (0、10、20、50、100 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 PS-MPs 溶液 10 mL.然后置于 25℃、80% 湿度、明暗 12 h/12 h、光照度 3 000 lx 的恒温恒湿培养箱中培养 6 d,每天适当补充蒸馏水.每个处理设置 3 个平行.

(2) 土培 土培试验在花盆中进行,供试土壤采自南京市未受污染的紫金山深处.将土样风干后过 20 目筛,加入 2 种粒径、不同浓度的 PS-MPs 溶液 80 mL,分别配制 PS-MPs 含量为 0、1、10、50 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤,分装入盆,每盆 300 g.选取浸泡发芽的小麦种子播种于土中,每盆 15 粒,置室温自然光照下培养 10 d.每个处理重复 3 次.

1.2.3 各毒性指标的测定

(1) 形态学指标的测定 分别于试验周期第 6 d 和 10 d,用厘米尺测量小麦水培、土培条件下的根长、茎长和株高.

(2) 光合色素含量的测定 于试验第 10 d,称取 200 mg 土培条件下的小麦叶片,经液氮粉碎后,加入 25 mL 80% 丙酮,离心 ($4\ 800\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min) 后取上清液,用酶标仪测定 663 nm (叶绿素 a)、645 nm (叶绿素 b) 和 470 nm (类胡萝卜素) 波长下的吸光度值.用公式计算光合色素含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$):

$$\text{Chla} = 12.21 \times A_{663} - 2.81 \times A_{645}$$

$$\text{Chlb} = 20.13 \times A_{645} - 5.03 \times A_{663}$$

$$\text{Car} = (1\ 000 \times A_{470} - 3.27 \times \text{Chla} - 104 \times \text{Chlb}) / 229$$

式中,Chla、Chlb 和 Car 分别表示叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的浓度. A_{663} 、 A_{645} 和 A_{470} 分别为相应波长下的吸光度值.

(3) 酶活性及可溶性蛋白含量的测定 取剩余液氮粉碎后的土培小麦叶片,按重量 (g): 体积 (mL) = 1:9 的比例加入 9 倍体积的生理盐水制作 10% 组织匀浆,离心 ($3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min) 后取上清液,用于淀粉酶 (AMS) 活力检测.另取液氮粉碎后的新鲜

土培小麦叶片, 用 PBS($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 为 7~7.4) 制备 10% 或 1% 组织匀浆, 离心($3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min)后取上清液, 用于检测小麦叶片过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活力和可溶性蛋白含量. 试验用试剂盒及方法均来自南京建成生物工程研究所.

1.3 数据统计与分析

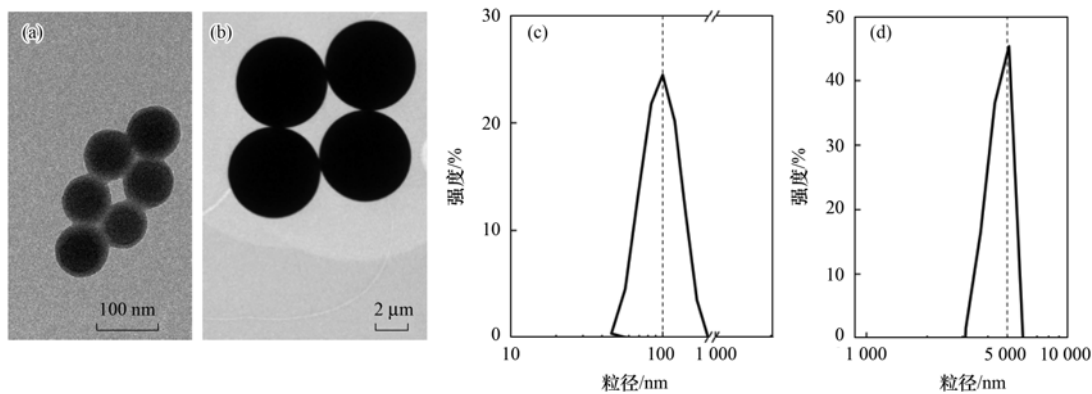
利用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据分析, 试验数据以平均值 $\pm$ 标准偏差(SD)表示, 并用方差分析(ANOVA)进行统计处理, $P<0.05$ 时, 表

示处理组与对照组存在显著差异. 采用 Origin 2017 绘图.

2 结果与讨论

2.1 PS-MPs 表征

通过 TEM 和 DLS 对 PS-MPs 进行相关表征, 结果如图 1 所示. 本试验所用 100 nm 和 5 μm PS-MPs 在水溶液中呈球状, 平均粒径分别为 99.94 nm 和 5.04 μm , 微塑料溶液体系分布较为均匀, 分散效果良好.



(a) 100 nm PS-MPs TEM 图; (b) 5 μm PS-MPs TEM 图; (c) 100 nm PS-MPs DLS 图; (d) 5 μm PS-MPs DLS 图

图 1 聚苯乙烯塑料微球形貌及粒径强度分布
Fig. 1 TEM images and DLS results of PS-MPs

2.2 PS-MPs 对小麦生长的影响

2.2.1 水培法

水培环境中, 不同处理浓度下 2 种粒径 PS-MPs 对小麦根长和茎长的影响如表 1 所示. 100 nm PS-MPs 对小麦生长的作用表现为中、低浓度($0\sim50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)暴露时根长逐渐伸长, 茎长先降低后升高; $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS-MPs 暴露下根和茎长度均显著低于对照组($P<0.05$), 分别降低了 9.25% 和 13.71%. 当 PS-MPs 处理浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 小麦根长和茎长均达到最大值.

对于 5 μm PS-MPs 而言, 随处理浓度的增加, 与对照组相比, 小麦根长和茎长均呈降低趋势. $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS-MPs 处理组中, 根长和茎长分别降低 67.15% 和 56.45%, 此时小麦根、茎的伸长受到

显著抑制($P<0.05$). 与 100 nm PS-MPs 相比, 5 μm PS-MPs 表现出更强的生长抑制作用, 与 Jiang 等^[17]的研究结果相一致.

2.2.2 土培法

由表 2 可知, 土培条件下, 100 nm PS-MPs 对小麦的根长和株高有微弱的抑制作用. 随暴露含量增大, 呈根长先降后升、株高先升后降的趋势, 且在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到根长最小值和株高最大值, 分别为对照的 91.50% 和 105.75%.

5 μm PS-MPs 处理下, 小麦的根长和株高均呈先降后升的趋势, 且在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时分别达到最低值, 与对照相比, 各降低了 15.91% 和 5.94%. 当暴露含量达 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, PS-MPs 对小麦的生长无明显影响($P>0.05$).

表 1 水培条件下聚苯乙烯塑料微球暴露对小麦形态指标的影响¹⁾
Table 1 Effects of PS-MPs on the morphology index of wheat (treated with water)

PS-MPs 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	100 nm		5 μm	
	根长/cm	茎长/cm	根长/cm	茎长/cm
0	4.11 $\pm$ 0.79b	3.72 $\pm$ 0.84a	4.11 $\pm$ 0.79a	3.72 $\pm$ 0.84a
10	4.14 $\pm$ 0.47b	3.10 $\pm$ 0.38b	4.10 $\pm$ 0.83a	3.47 $\pm$ 0.54a
20	4.13 $\pm$ 0.74b	3.32 $\pm$ 0.60b	4.05 $\pm$ 0.63a	3.75 $\pm$ 0.65a
50	4.67 $\pm$ 0.81a	3.73 $\pm$ 0.62a	3.79 $\pm$ 0.67a	3.47 $\pm$ 0.64a
100	4.51 $\pm$ 0.87a	3.56 $\pm$ 0.70ab	2.68 $\pm$ 0.69b	3.21 $\pm$ 0.79b
200	3.73 $\pm$ 0.81c	3.21 $\pm$ 0.68b	1.35 $\pm$ 0.50c	1.62 $\pm$ 0.63c

1) 同列数字后不同字母表示不同处理组之间存在显著差异($P<0.05$), 下同

表 2 土培条件下聚苯乙烯塑料微球暴露对小麦形态指标的影响

Table 2 Effects of PS-MPs on the morphology index of wheat (treated with soil)

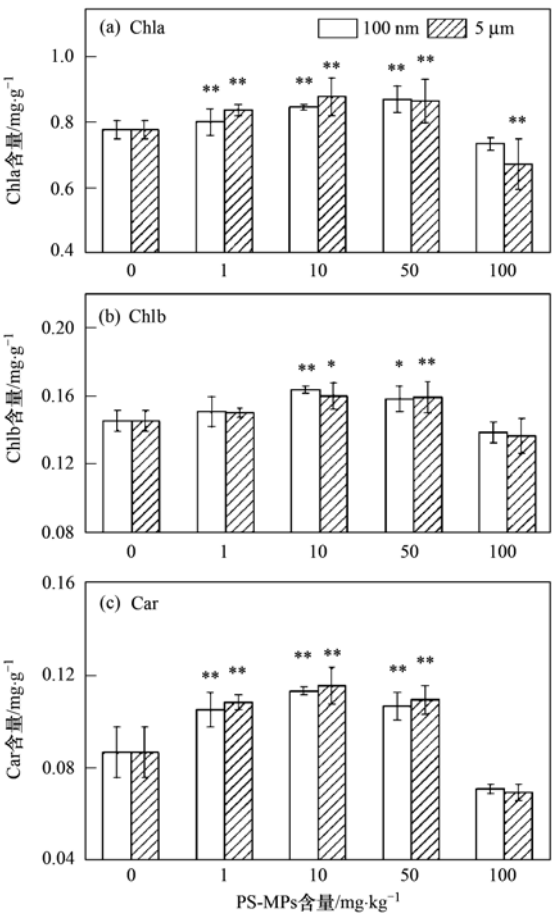
PS-MPs 含量 /mg·kg ⁻¹	100 nm		5 μm	
	根长/cm	株高/cm	根长/cm	株高/cm
0	13.89 ± 1.58a	20.87 ± 4.29b	13.89 ± 1.58a	20.87 ± 4.29a
1	13.12 ± 1.80ab	20.89 ± 2.53b	13.42 ± 1.90ab	21.90 ± 3.14a
10	12.71 ± 2.44b	22.07 ± 2.42a	11.68 ± 2.02c	19.63 ± 3.49b
50	12.77 ± 2.44b	21.12 ± 3.08ab	12.70 ± 1.16b	20.17 ± 4.35a
100	13.08 ± 3.06ab	17.93 ± 1.63c	13.81 ± 1.82a	20.35 ± 1.65a

土培试验结果表明, 纳米级(100 nm)和微米级(5 μm)尺寸对小麦生长的影响略有不同, 高含量(100 mg·kg⁻¹)暴露下, 100 nm PS-MPs 对株高的影响更甚, 但总体表现为 10 mg·kg⁻¹ PS-MPs 暴露显著抑制根的伸长。

总体而言, PS-MPs 暴露对小麦生长具有一定抑制作用, 这与 Qi 等^[2]的研究结果一致. Qi 等发现聚乙烯和可生物降解地膜的塑料残留物对小麦的生长造成了不良影响. 类似地, 徐荣乐等^[29]研究了塑料地膜对小麦种子萌发的影响, 结果显示, 塑料地膜高添加量(15 000 mg·kg⁻¹)明显抑制小麦芽和根的伸长, 阻碍根系对土壤水分和养分的吸收, 导致植物的新陈代谢需求得不到满足. 在本试验中, 两种培养方式下, 水培环境中 PS-MPs 对小麦的生长抑制作用强于土培, 与陈忠林等^[30]的研究结果相似. 这可能是由于水培条件下, 悬浮液中的 PS-MPs 与小麦根系接触更为充分, 且较土壤介质而言, 微塑料在水环境中易于移动并附着于根表面或进入植物体内, 干扰根系对水分的吸收^[31, 32]. 植物细胞壁孔洞约 5 ~ 50 nm, 因此尺寸较大的塑料颗粒透过细胞壁孔洞被植物吸收的可能性极小^[18]. Kalčíková 等^[33]的研究发现, 30 ~ 600 μm 聚乙烯微珠可以通过机械阻断显著影响浮萍的根系生长. 推测水培条件下高浓度 PS-MPs 可能通过吸附在小麦种子表皮或根系细胞壁孔洞, 扰乱了种子或根系对水分、营养的正常吸收或运输, 从而导致小麦生长受抑^[17]. 目前有关微塑料与植物相互作用的机制并不清楚, 对此需进一步深入开展相关研究工作.

2.3 土培试验 PS-MPs 对小麦光合色素的影响

光合色素含量的多少能反映植物光合能力的强弱^[34]. 不同粒径、不同含量 PS-MPs 处理对土培小麦叶片光合色素含量的影响结果如图 2 所示. 培养 10 d 后, 小麦叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均随处理浓度的增大呈现先升高后下降的趋势, 且类胡萝卜素变化程度最大. 与对照组相比, 2 种粒径 PS-MPs 在中、低含量(0 ~ 50 mg·kg⁻¹)时明显促进植物光合色素含量的增加($P < 0.05$), 并在 10 mg·kg⁻¹处达光合色素含量最大



与 CK 相比有显著差异, * 表示 $P < 0.05$,
* * 表示 $P < 0.01$, 下同

图 2 2 种粒径 PS-MPs 处理后土培小麦叶片光合色素含量变化

Fig. 2 Changes of the photosynthetic pigment content of the leaves of wheat with differently sized PS-MPs treatments

值, 且粒径间的差异性不显著. 当浓度为 100 mg·kg⁻¹时, 100 nm PS-MPs 处理的小麦叶片光合色素含量较对照无显著差异($P > 0.05$), 5 μm PS-MPs 处理下叶绿素 a 和类胡萝卜素含量明显降低($P < 0.01$), 分别下降 13.55% 和 19.90%. 即, 2 种粒径 PS-MPs 对小麦叶片光合色素含量的影响表现为中、低含量(0 ~ 50 mg·kg⁻¹)增强小麦叶片光合作用; 高含量(100 mg·kg⁻¹)100 nm PS-MPs 对小麦叶片光合作用无明显效应, 而 5 μm PS-MPs 使其光合色素合成受阻, 表明植物光合系统受到损伤^[35], 对小麦叶片存在较为明显的毒害效应.

Zhang 等^[36]研究了单壁碳纳米管(SWCNTs)和多壁碳纳米管(MWCNTs)对水稻幼苗生长发育的影响,结果显示低浓度($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)暴露能促进水稻幼苗叶绿素含量的增加,与本试验结果一致。

2.4 土培试验 PS-MPs 对小麦抗氧化系统的影响

图3所示为2种粒径PS-MPs对土培小麦叶片POD、SOD和CAT活性的测定结果。结果显示,100 nm PS-MPs试验组中,叶片POD活性呈低促高抑现象,在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到最大值,较对照组升高了73.69%,与100 nm PS-MPs处理下的株高趋势一致(表2)。对于5 μm PS-MPs处理组而言,中、低含量($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时叶片POD活性先降低后升高,在

$50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到最大值,较对照组升高16.94%,当含量达 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著降低POD活性($P < 0.01$)。表明中、低含量($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的100 nm PS-MPs显著提高小麦叶片POD活力,高含量($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)暴露时无明显影响;5 μm PS-MPs对小麦叶片POD活性的影响总体表现为抑制作用。

在本试验含量范围内,暴露于2种粒径PS-MPs的小麦叶片,其SOD和CAT含量变化趋势相一致[图3(b)和3(c)]。体现为SOD活性显著降低($P < 0.01$);CAT活性呈先降后升的趋势,低含量($0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著抑制($P < 0.05$),中、高含量($50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理组的CAT含量与对照组差异不显著($P > 0.05$)。

POD、SOD和CAT是植物抗氧化系统中的主要酶,其活性水平能反映植物受外界逆境影响的程度。SOD能催化超氧阴离子转化为 H_2O_2 和 O_2 的反应,是生物体内清除自由基的首要物质,CAT和POD是清除 H_2O_2 的酶,三者通过协同作用维持植物体内的自由基含量保持稳态水平,防止由于自由基引起的植物生理生化上的改变^[37]。本研究结果显示,2种粒径处理的小麦叶片SOD活性始终低于对照组,CAT活性呈先降低后升高的趋势。酶活性的短暂升高是使机体免受外界胁迫毒害的调节反应,而活性下降则表示超出自身调节能力的阈值,酶受到损伤,表明PS-MPs对小麦毒性的可能机制涉及氧化应激。

可溶性蛋白是植物体内主要渗透调节物质,其含量变化可以指示外界胁迫对生物生长发育的影响^[38]。由图4可以看出,叶片可溶性蛋白含量随PS-MPs含量的增加,呈低含量($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)上升、中含量($10 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)下降、高含量(100

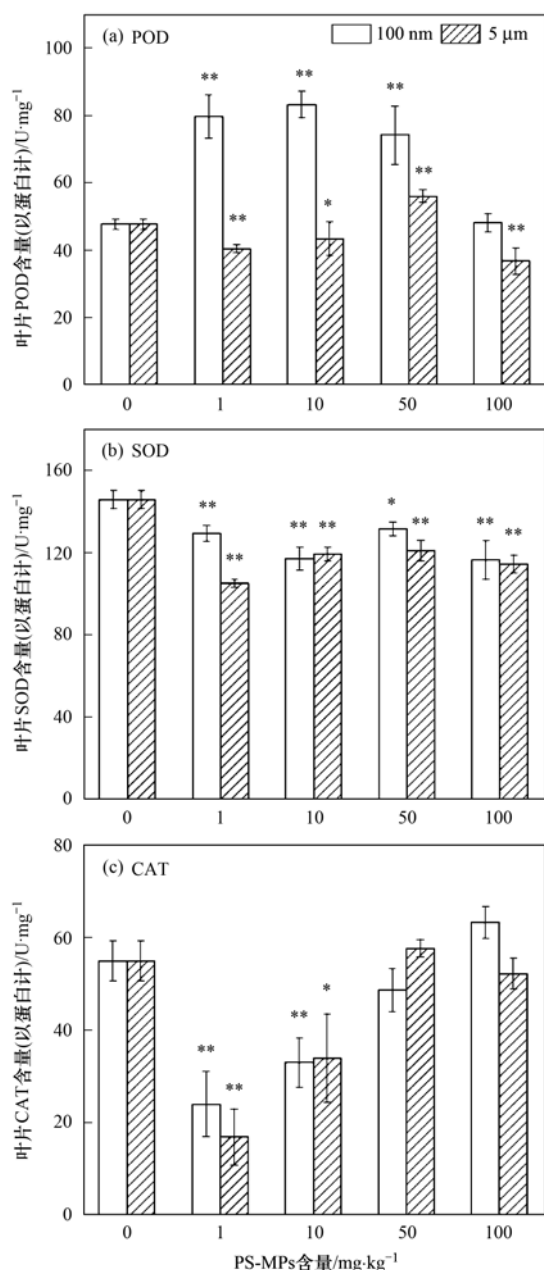


图3 PS-MPs对土培小麦叶片POD、SOD和CAT活性的影响

Fig. 3 Changes in the POD, SOD, and CAT activity in the leaves of wheat treated with PS-MPs

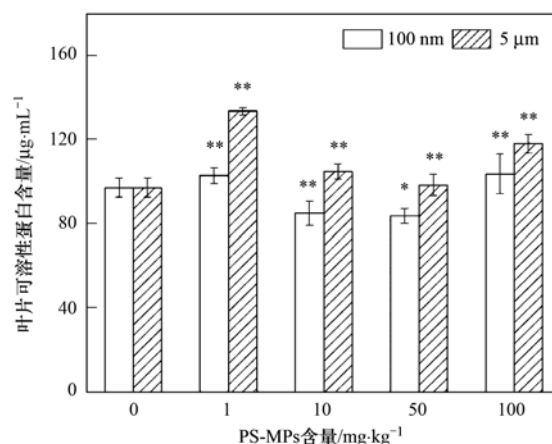


图4 2种粒径PS-MPs处理后土培小麦叶片可溶性蛋白含量变化

Fig. 4 Changes in the SP content of the leaves of wheat treated with differently sized PS-MPs

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)上升趋势. 当处理含量为 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 100 nm PS-MPs 暴露使小麦叶片可溶性蛋白含量显著降低 ($P < 0.05$), 分别为对照的 87.50% 和 86.18% .

由图 3 可知, $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PS-MPs 暴露引起小麦叶片抗氧化酶活性发现显著改变, 此时可溶性蛋白含量的升高可能是机体抵御氧化胁迫的结果. 当 PS-MPs 含量高于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 与对照相比, 光合色素含量随处理浓度的增大而显著降低 (图 2), 表明 PS-MPs 对小麦叶片光合系统产生了损害, 影响植物正常代谢活动, 从而导致可溶性蛋白生成受抑.

2.5 土培试验 PS-MPs 对小麦淀粉酶活力的影响

AMS 是分解淀粉提供能量的酶. 2 种粒径 PS-MPs 对土培小麦叶片 AMS 活力的影响如图 5 所示. 小麦叶片 AMS 活力随 100 nm PS-MPs 含量的升高呈先升后降的趋势, 在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值. 与对照相比, 中、低含量 ($0\sim50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) PS-MPs 均显著提高了 AMS 活性 ($P < 0.01$), 高含量 ($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 处理组与对照无明显差异. 经 $5\text{ }\mu\text{m}$ PS-MPs 处理后的小麦叶片, 其 AMS 活力受到抑制, 在试验浓度范围内小麦叶片 AMS 活力均显著降低 ($P < 0.05$). 说明 100 nm PS-MPs 促进小麦淀粉分解, $5\text{ }\mu\text{m}$ PS-MPs 抑制分解代谢.

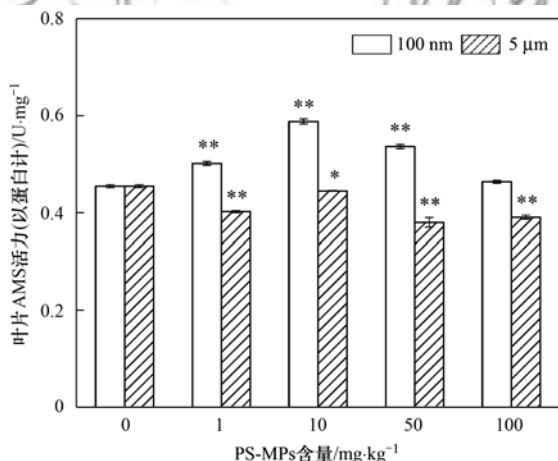


图 5 2 种粒径 PS-MPs 处理后土培小麦叶片淀粉酶活力变化

Fig. 5 Changes in the AMS activity in the leaves of wheat treated with differently sized PS-MPs

有研究评估了陆生植物生理和生化参数之间的定量关系, 并指出多壁碳纳米管纳米材料对植物生化参数的影响较生理指标更敏感^[39], 因此生化参数可能是植物对纳米塑料响应的良好指标^[18]. 本研究发现, 土培试验中, 随着 PS-MPs 含量的增大, 100 nm PS-MPs 处理下的小麦叶片光合色素含量 (图 2) 和叶片 AMS 含量 (图 5), 与 $5\text{ }\mu\text{m}$ PS-MPs 处理下的小麦叶片光合色素含量 (图 2) 和可溶性蛋白含量 (图 4) 变化趋势具有一致性, 均先升高后降

低, 且在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处达到最大值, 提示选取植物对微塑料的响应指标还需考虑不同暴露含量及粒径的影响.

本试验结果表明, 纳米级和微米级 PS-MPs 暴露对小麦生长及其生理生化特性产生了一定影响, 但不同粒径、不同浓度或含量 PS-MPs 诱导植物产生不同效应的内在机制有待进一步研究, 研究结果为深入了解微塑料对土壤-植物生态系统的影响提供了基础数据和科学依据.

3 结论

(1) 水培试验中, 2 种粒径 PS-MPs 在高浓度 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下显著抑制小麦根和茎的伸长, 其中, $5\text{ }\mu\text{m}$ PS-MPs 较 100 nm PS-MPs 表现出更强的生长抑制作用.

(2) 土培条件下, $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PS-MPs 对小麦生长影响最为显著. 小麦叶片光合色素、可溶性蛋白含量随 PS-MPs 暴露含量的增加先升后降, 表明 PS-MPs 对小麦叶片光合系统产生了损害, 阻碍蛋白质的合成.

(3) 本试验含量范围 ($0\sim100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 内, 随 PS-MPs 暴露含量增加, 小麦叶片抗氧化酶活性呈 SOD 活性下降、CAT 先降后升的趋势, 说明 PS-MPs 对小麦毒性的可能机制涉及氧化应激.

参考文献:

- [1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672): 838-838.
- [2] 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.
- [3] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 483-492.
- [4] 周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异 [J]. *科学通报*, 2017, **62**(33): 3902-3909. Zhou Q, Tian C G, Luo Y M. Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, **62**(33): 3902-3909.
- [5] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, *et al.* Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(32): 24928-24935.
- [6] Free C M, Jensen O P, Mason S A, *et al.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **85**(1): 156-163.
- [7] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, *et al.* Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1369-1374.
- [8] Claessens M, De Meester S, Van Landuyt L, *et al.* Occurrence

- and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(10): 2199-2204.
- [9] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1620-1627.
- [10] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [11] 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.
- [12] Li J N, Qu X Y, Su L, *et al.* Microplastics in mussels along the coastal waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 177-184.
- [13] Jabeen K, Su L, Li J N, *et al.* Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 141-149.
- [14] Waring R H, Harris R M, Mitchell S C. Plastic contamination of the food chain: A threat to human health? [J]. *Maturitas*, 2018, **115**: 64-68.
- [15] De Sá L C, Oliveira M, Ribeiro F, *et al.* Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1029-1039.
- [16] De Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, *et al.* Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [17] 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.
- [18] Ng E L, Lwanga E H, Eldridge S M, *et al.* An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1377-1388.
- [19] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(10): 25-34.
- Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, *et al.* Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(10): 25-34.
- [20] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(6): 3591-3598.
- [21] Chae Y, An Y J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 387-395.
- [22] Rillig M C, Bonkowski M. Microplastic and soil protists: A call for research [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 1128-1131.
- [23] Rodriguez-Seijo A, Lourenço J, Rocha-Santos T A P, *et al.* Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 495-503.
- [24] Cao D D, Wang X, Luo X X, *et al.* Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, **61**: 012148.
- [25] Zhu B K, Fang Y M, Zhu D, *et al.* Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus*[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 408-415.
- [26] Zhu D, Chen Q L, An X L, *et al.* Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 302-310.
- [27] Lambert S, Wagner M. Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene[J]. *Chemosphere*, 2016, **145**: 265-268.
- [28] Rico C M, Majumdar S, Duarte-Gardea M, *et al.* Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, **59**(8): 3485-3498.
- [29] 徐荣乐, 海热提. 塑料地膜对小麦种子萌发及幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(11): 2702-2707.
- Xu R L, Hai R T. Effects of plastic film on seed germination and the activities of antioxidant enzyme of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(11): 2702-2707.
- [30] 陈忠林, 关伟, 胡刚, 等. 水培与土培离子液体 [C₂ mim] [Val] 对小麦的影响[J]. *实验室研究与探索*, 2013, **32**(3): 5-9.
- Chen Z L, Guan W, Hu G, *et al.* Effects of ILs [C₂ mim] [Val] on wheat under two culture conditions[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2013, **32**(3): 5-9.
- [31] 袁刚强, 龚继来, 曾光明. 单壁碳纳米管材料对水稻幼苗的毒性效应[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 4143-4149.
- Yuan G Q, Gong J L, Zeng G M. Phytotoxicity of single-walled carbon nanotubes to rice seedling (*oryza sativa* L.) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **35**(12): 4143-4149.
- [32] 李连斌, 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.
- [33] Kalčíková G, Gotvajn A Z, Kladnik A, *et al.* Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor* [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 1108-1115.
- [34] 张传玲, 江红生, 李长江, 等. 纳米银与镉的复合毒性对拟南芥根系形态及叶片生理指标的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(5): 1951-1960.
- Zhang C L, Jiang H S, Li C J, *et al.* Effects of AgNPs and cadmium on root morphology and leaves physiological indexes of *Arabidopsis thaliana* [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(5): 1951-1960.
- [35] Jiang H S, Yin L Y, Ren N N, *et al.* Silver nanoparticles induced reactive oxygen species via photosynthetic energy transport imbalance in an aquatic plant [J]. *Nanotoxicology*, 2017, **11**(2): 157-167.
- [36] Zhang H, Yue M X, Zheng X K, *et al.* Physiological effects of single- and multi-walled carbon nanotubes on rice seedlings[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2017, **16**(7): 563-570.
- [37] Weckx J E J, Clijsters H M M. Oxidative damage and defense mechanisms in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* as a result of root assimilation of toxic amounts of copper [J]. *Physiologia Plantarum*, 1996, **96**(3): 506-512.
- [38] Sairam R K, Kumutha D, Ezhilmathi K, *et al.* Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants [J]. *Biologia Plantarum*, 2008, **52**(3): 401-412.
- [39] Zhao Q, Ma C X, White J C, *et al.* Quantitative evaluation of multi-wall carbon nanotube uptake by terrestrial plants [J]. *Carbon*, 2017, **114**: 661-670.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)