

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱渣对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

外源褪黑素对锑胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响

储玉檀, 李颜, 黄益宗*, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 为了探讨外源添加褪黑素(MT)对锑(Sb)胁迫下水稻幼苗影响,以华润2号水稻幼苗为研究对象进行水培实验,采用荧光探针定位技术对水稻幼苗根尖的活性氧(ROS)进行荧光定位,并对水稻幼苗根部根系活力、丙二醛(MDA)含量、ROS(H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$)含量、抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX)活性和抗氧化剂(GSH、GSSG、AsA、DHA)含量进行分析.结果表明,外源添加MT能缓解Sb胁迫对水稻幼苗生长的不利影响,提高水稻幼苗的生物量;与单独Sb处理相比,添加 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的MT使水稻根系活力和总根长分别提高44.1%和34.7%,MDA、 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量分别降低37.0%、32.7%和40.5%.此外,MT处理不仅使POD和CAT活性分别提高54.1%和21.8%,还能调节AsA-GSH循环.由此可见,外源添加 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT可以促进水稻幼苗生长,提高水稻幼苗抗氧化能力,缓解Sb胁迫对水稻的脂质过氧化损害,从而提高水稻幼苗在Sb胁迫下的抗逆性.

关键词: 锑胁迫; 水稻; 褪黑素(MT); 抗氧化系统; AsA-GSH循环

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2356-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202205297

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress

CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong*, BAO Qiong-li, SUN Hong-yu, HUANG Yong-chun

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To investigate the effect of exogenous application of melatonin (MT) on rice seedlings under antimony (Sb) stress, hydroponic experiments were carried out with rice seedlings (Huanun No. 2). The fluorescent probe localization technology was used to locate the reactive oxygen species (ROS) in the root tips of rice seedlings, and the root viability, malondialdehyde (MDA) content, ROS (H_2O_2 and $O_2^{\cdot-}$) content, antioxidant enzyme (SOD, POD, CAT, and APX) activities, and antioxidant (GSH, GSSG, AsA, and DHA) contents in the roots of rice seedlings were analyzed. The results showed that exogenous addition of MT could alleviate the adverse effects of Sb stress on the growth and increase the biomass of rice seedlings. Compared with the Sb treatment, the application of $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT increased rice root viability and total root length by 44.1% and 34.7% and reduced the content of MDA, H_2O_2 , and $O_2^{\cdot-}$ by 37.0%, 32.7%, and 40.5%, respectively. Further, the MT treatment increased the activities of POD and CAT by 54.1% and 21.8%, respectively, and also regulated the AsA-GSH cycle. This research indicated that exogenous application of $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT can promote the growth and antioxidant ability of rice seedlings and alleviate the damage of lipid peroxidation by Sb stress, thus improving the resistance of rice seedlings under Sb stress.

Key words: antimony stress; rice; melatonin (MT); antioxidant system; AsA-GSH cycle

锑(Sb)是一种全球性污染物,是一种具有潜在毒性和致癌性的金属元素,被欧盟和美国列为优先污染物^[1].由于采矿、燃煤和阻燃剂、催化剂和玻璃脱色剂等含Sb产品的广泛使用^[2],导致土壤和水中Sb污染日益严重,对动植物造成伤害,而且Sb还可以通过食物链进入人体,导致癌症、心血管疾病、肝脏疾病和呼吸系统疾病发生^[3].Sb的环境污染和生态毒性问题引起人们的关注.在环境中,Sb主要以三价[Sb(Ⅲ)]和五价[Sb(Ⅴ)]的形式存在,而土壤中Sb的价态主要是Sb(Ⅴ)^[4].过量的Sb对植物的毒害作用主要表现为影响植物的生长发育、产生氧化胁迫和影响必需营养元素的吸收^[5].因此,亟需采取安全有效的策略以减轻Sb污染对农作物生长的毒害.

目前,其他重金属或类金属对植物的毒害作用已经得到了广泛的研究,但是对Sb在植物中的毒性

研究较少.不同价态的Sb在植物体内吸收转运机制不同,植物对Sb(Ⅲ)的吸收途径可能是水通道蛋白,与砷(As)相似,但Sb(Ⅴ)则最有可能是通过质外体途径进入植物体内^[3].有研究表明Sb会降低植物光合色素含量和光合作用效率,影响植物光合作用^[6,7].而且过量的Sb会诱导植物产生活性氧(ROS),引起植物体内氧化胁迫的产生^[8].因此,应当采取措施提高植物在Sb胁迫下的耐受性.植物激素不仅可以调节植物生长发育,还能提高植物抗性以适应重金属胁迫.尽管已明确几种植物激素可以缓解Sb胁迫下植物的不利影响,但该领域仍然需要深入的研究.

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-07-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1808702, 2017YFD0801500)

作者简介: 储玉檀(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属生态毒理和修复, E-mail: chuyutan@126.com

* 通信作者, E-mail: yizonghuang@126.com

褪黑素(MT)是一种吲哚类化合物,具有抗氧化性,可以通过改善氧化还原稳态、渗透平衡以及初级和次级代谢来促进植物对重金属胁迫的耐受性^[9].近年来,褪黑素在高等植物中的功能被发现,主要是作为逆境反应的调节因子^[10].适量添加MT可以缓解重金属对植物的胁迫,在抗氧化系统中,ROS和MT存在很强的联系^[11],例如MT可以有效缓解As^[12]、Cd^[13]和Ni^[14]等重金属胁迫对水稻种子萌发和幼苗的不利影响,还可以缓解Cd对油菜的过氧化胁迫^[15].然而,关于MT对Sb胁迫下水稻幼苗的作用效果还鲜见报道.

因此,本文通过研究MT对水稻幼苗的生长状况、根系活力和抗氧化防御系统的潜在影响,有助于理解MT对水稻Sb毒害的缓解机制,以期有效防治水稻Sb污染提供更多选择.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试水稻品种为华润2号,购于湖南亚华种子有限公司.

三水铋酸钠,分子式为 $\text{NaSbO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,分析纯;MT,分子式为 $\text{C}_{10}\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_2$,优级纯,购于阿达玛斯试剂有限公司.

1.2 实验设计

选取饱满的水稻种子,用5%过氧化氢(H_2O_2)溶液浸泡消毒15min后再用去离子水冲洗干净.将消毒洗净的种子均匀播撒于育苗盘,放入28℃恒温培养箱催芽培养.挑选露白一致的种子移栽到黑色育苗盒(10.5 cm × 15.5 cm × 17.0 cm,长×宽×高)中,在人工气候室中生长.待水稻幼苗根长约1cm时进行处理.在预实验中,设置0、50、100、200、300和500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 共6个不同浓度的Sb浓度处理,筛选出与空白处理相比对水稻幼苗的生物量产生显著影响的300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为后续Sb处理浓度,参考课题组的前期实验^[16],MT的浓度设置为100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,本实验设计4个处理:不添加Sb和MT(CK)、100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MT(MT)、300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(Sb)和100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MT + 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(MT + Sb).每个处理3次重复,培养期间每3 d换一次营养液.

1.3 测量指标

1.3.1 水稻幼苗生物量的测定

将处理7d后的水稻幼苗取出,将幼苗分为地上部分和地下部分,用蒸馏水洗净擦干,用刻度尺测量并记录株高和根长,用分析天平称取鲜重,在80℃烘箱中烘干至恒重,称取干重.

1.3.2 水稻幼苗根系生长指标测定

将处理后的水稻幼苗取出洗净,使用根系扫描仪(Epson Expression 10000XL,日本)扫描水稻根系,用WinRHIZO根系分析软件(Regent Instruments Inc,加拿大)分析根参数(根表面积、根体积、根尖数和根分叉数),每个处理测量6棵.

1.3.3 根系活力的测定

根系活力是通过三苯基四氮唑(TTC)还原法测定^[17],将0.5 g水稻幼苗根部切成小块,加入5 mL 0.4% TTC和5 mL磷酸盐缓冲液(pH 7.0),37℃孵育3 h,然后样品在乙酸乙酯中萃取15 min,用分光光度测定其在485 nm处的特征吸收峰.

1.3.4 ROS含量的测定及显微观察

H_2O_2 与硫酸钛反应生成的过氧化物-钛复合物黄色沉淀被浓硫酸溶解,并用分光光度计测定其在415 nm处的特征吸收峰,超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)利用羟胺氧化法生成粉红色偶氮染料,并用分光光度计测定其在540 nm处的特征吸收峰^[18].

分别采用特异性荧光探针 H_2DCFDA ^[19](2',7'-二氯二氢荧光素二乙酸酯,MedChemExpress,美国)和DHE^[18](超氧化物阴离子荧光探针,碧云天生物技术有限公司,中国)对约1 cm的根尖进行染色,标记水稻根尖细胞中 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的分布情况,并用倒置荧光显微镜(DYF-880,点应,中国)观察拍照.

1.3.5 MDA含量测定及细胞活力显微观察

MDA在高温和酸性条件下与硫代巴比妥酸(TBA)反应生成红褐色产物,并用分光光度计测定其在535 nm处的特征吸收峰^[20].

采用荧光染料FAD(二醋酸荧光素,阿拉丁试剂有限公司,中国)和PI(碘化丙啶,阿拉丁试剂有限公司,中国)对约1 cm的根尖进行染色检测细胞活力^[21],并用倒置荧光显微镜观察拍照.

1.3.6 酶活性的测定

采用酶活性试剂盒(苏州格瑞斯生物技术有限公司,中国)对超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性进行测定.

1.3.7 抗坏血酸和谷胱甘肽的测定

采用抗坏血酸(AsA)和还原性坏血酸(DHA)试剂盒(苏州格瑞斯生物技术有限公司,中国),谷胱甘肽(GSH)和还原性谷胱甘肽(GSSG)检测试剂盒(北京索莱宝科技有限公司,中国)对AsA、DHA、GSH和GSSG含量进行测定.

1.4 数据处理

采用SPSS 21.0和OriginPro 9.0进行数据分析和绘图.方差分析和多重比较采用单因素(ANOVA)

和 Duncan 检验. 表中数据均用平均值 ± 标准差的形式表示.

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Sb 对水稻幼苗生长的影响

过量 Sb 胁迫对水稻幼苗根系生长影响显著. 表 1 为研究不同浓度 Sb 对水稻幼苗生长状况的影响, 结果表明, 不同浓度 Sb 处理对水稻幼苗生长状况有

显著差异, 随着 Sb 浓度的增加, Sb 处理对水稻幼苗茎长、根长、干重和鲜重的抑制作用也明显增强. 与 CK 相比, 500 μmol·L⁻¹ Sb 胁迫处理浓度过高严重抑制水稻的生长, 而 300 μmol·L⁻¹ Sb 胁迫下水稻幼苗茎长和根长分别减少了 47.0% 和 44.9%, 而水稻幼苗茎鲜重、根鲜重、茎干重和根干重这 4 个指标的降幅均超过 35%, 因此选择该浓度作为下一阶段实验 Sb 胁迫浓度.

表 1 不同浓度 Sb 对水稻幼苗芽长、根长、鲜重和干重的影响¹⁾

Table 1 Effect of different concentrations of Sb on shoot length, root length, fresh weight, and dry weight of rice seedlings						
Sb 浓度 /μmol·L ⁻¹	茎长 /cm	根长 /cm	茎鲜重 /mg·株 ⁻¹	根鲜重 /mg·株 ⁻¹	茎干重 /mg·株 ⁻¹	根干重 /mg·株 ⁻¹
0	5.79 ± 0.41a	15.38 ± 1.14a	19.51 ± 1.24a	18.32 ± 1.23a	3.74 ± 0.24a	2.11 ± 0.14ab
50	5.21 ± 0.37b	12.29 ± 1.41b	21.65 ± 1.55a	16.68 ± 0.25ab	3.91 ± 0.53a	2.22 ± 0.06a
100	4.61 ± 0.40c	11.80 ± 1.3bc	15.54 ± 0.54b	14.43 ± 1.24c	3.31 ± 0.17ab	1.85 ± 0.27b
200	3.56 ± 0.33d	11.06 ± 0.82c	13.24 ± 1.54bc	15.31 ± 1.12bc	2.73 ± 0.02bc	1.81 ± 0.31b
300	3.07 ± 0.35e	8.48 ± 0.35d	11.60 ± 1.01c	11.51 ± 1.14d	2.40 ± 0.30c	1.37 ± 0.10c
500	1.74 ± 0.18f	1.41 ± 0.26e	4.79 ± 0.32d	3.22 ± 0.15e	1.61 ± 0.05c	0.31 ± 0.05d

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

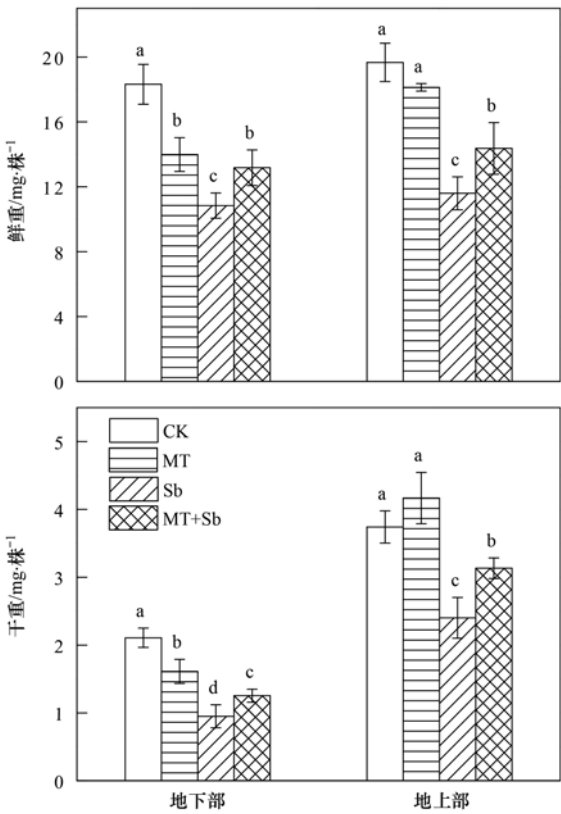
2.2 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗生物量的影响

图 1 为 MT 处理对 Sb 胁迫下水稻生物量状况的影响. 从中可知, 与 CK 相比, MT 处理降低水稻幼苗地下部的生物量, 对地上部的生物量无显著影响,

而 Sb 处理的幼苗在鲜重和干重方面均表现出生长抑制现象. MT 处理显著提高了水稻幼苗 Sb 胁迫下的生物量. 在 Sb 胁迫下, 添加 MT 使水稻地下部和地上部的鲜重分别增加了 21.6% 和 23.9%, 使水稻地下部和地上部的干重分别增加了 32.1% 和 30.6%.

2.3 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系生长状况的影响

水稻可以通过改变根的生长模式和形态来响应 Sb 胁迫, Sb 处理对水稻幼苗的生长有明显抑制作用. CK 和 MT 处理中水稻根系生长健康, 主根和侧根发育正常, 而 Sb 胁迫下的水稻幼苗根伸长则受到显著影响, 而且抑制了侧根的发育, 而外源添加 MT 却促进了水稻主根和侧根的生长 (图 2). 通过测定 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系生长参数的影响 (表 2), 结果表明, 与 CK 相比, MT 处理对水稻幼苗的部分根系生长参数影响不大, 但 Sb 胁迫下水稻幼苗总根长、根表面积、根体积、根尖数、



不同小写字母表明 4 种处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗鲜重和干重的影响

Fig. 1 Effect of MT on fresh and dry weights of rice seedlings under Sb stress

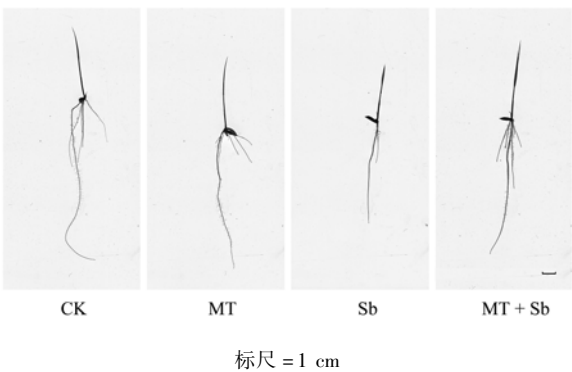


图 2 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系生长的影响

Fig. 2 Effect of MT on root growth of rice seedlings under Sb stress

根枝数和根分叉数分别减少了 62.2%、56.3%、19.1%、78.2%、57.8% 和 16.5%, 而外源添加 MT 较 Sb 胁迫处理使水稻总根长、根表面积、根体

积、根尖数、根枝数和根分叉数分别显著增加了 34.7%、44.0%、29.3%、34.7%、42.4% 和 23.0%。

表 2 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系生长参数的影响

Table 2 Effect of MT on root growth parameters of rice seedlings under Sb stress						
处理	总根长 /cm·株 ⁻¹	根表面积 /cm ² ·株 ⁻¹	根体积 /mm ³ ·株 ⁻¹	根尖数 /个·株 ⁻¹	根枝数 /个·株 ⁻¹	根分叉数 /个·株 ⁻¹
CK	61.82 ± 3.32a	6.15 ± 0.33a	19.44 ± 1.89ab	554.21 ± 38.19a	223.88 ± 17.45a	31.81 ± 5.23a
MT	50.42 ± 3.56b	5.71 ± 0.36a	18.50 ± 1.73bc	337.75 ± 7.85b	189.15 ± 24.13b	24.69 ± 3.09b
Sb	23.40 ± 2.12d	2.69 ± 0.08c	15.73 ± 2.42c	121.00 ± 9.71d	94.50 ± 9.33d	26.56 ± 1.85c
MT + Sb	35.81 ± 3.93c	4.80 ± 0.34b	22.25 ± 1.26a	185.17 ± 10.66c	164.00 ± 18.51c	34.50 ± 4.44ab

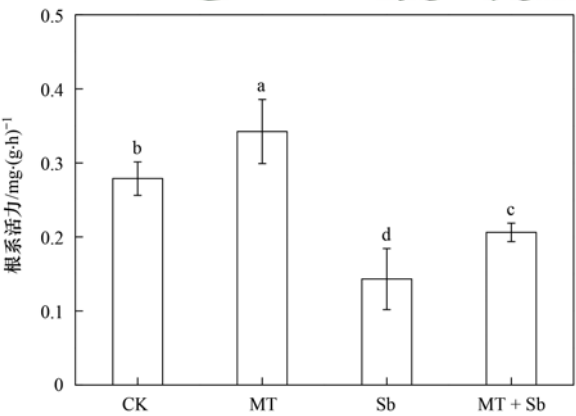
2.4 MT 对水稻根系活力的影响

添加 MT 对 Sb 胁迫下水稻根系活力的影响如图 3 所示. 从中可知, 外源添加 MT 能显著提高水稻根系活力, Sb 胁迫显著降低水稻幼苗根系活力. Sb 胁迫后, 水稻根系活力比 CK 降低了 48.7%, 而外源添加 MT 使 Sb 胁迫下的水稻幼苗根系活力提高 44.1%。

2.5 MT 对水稻幼苗根系细胞氧化损伤的影响

为了明确 MT 对 Sb 胁迫下水稻根细胞氧化损

伤的缓解作用, 测定了 O₂^{·-} 含量、H₂O₂ 含量、MDA 含量和细胞活力. 用特异性荧光探针 H₂DCFDA 和 DEH 对水稻根细胞中的 O₂^{·-} 和 H₂O₂ 进行定位, 结果表明, CK 和 MT 处理的水稻根细胞荧光强度较弱, 而 Sb 胁迫下的水稻根细胞表现出强烈的红色荧光和绿色荧光, MT 的处理明显降低了 Sb 胁迫下根细胞的荧光强度(图 4). 水稻根细胞中 H₂O₂ 和 O₂^{·-} 的含量测定结果同荧光定位结果一致(图 5). 与 CK 相比, MT 处理显著提高了水稻幼苗 H₂O₂ 含量, 但对 O₂^{·-}



不同小写字母表明 4 种处理之间的显著差异 ($P < 0.05$)

图 3 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系活力的影响

Fig. 3 Effect of MT on root vigor of rice seedlings under Sb stress

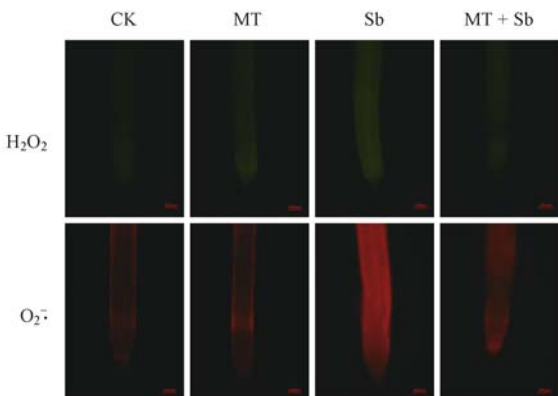
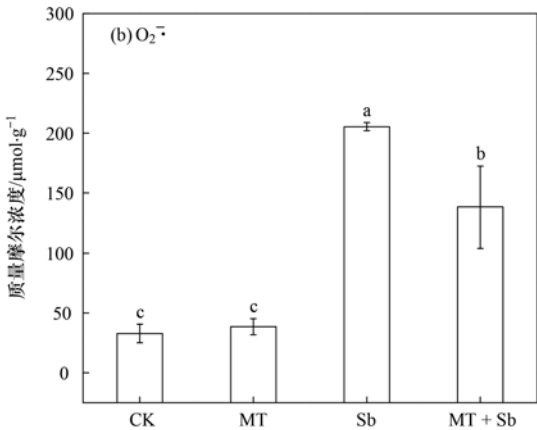
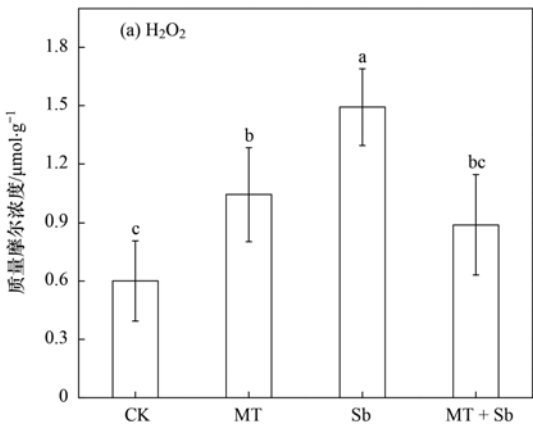


图 4 不同 MT 和 Sb 处理下水稻幼苗根细胞中 ROS 的荧光染色

Fig. 4 Fluorescence staining of ROS in root cells of rice seedlings under different MT and Sb treatments



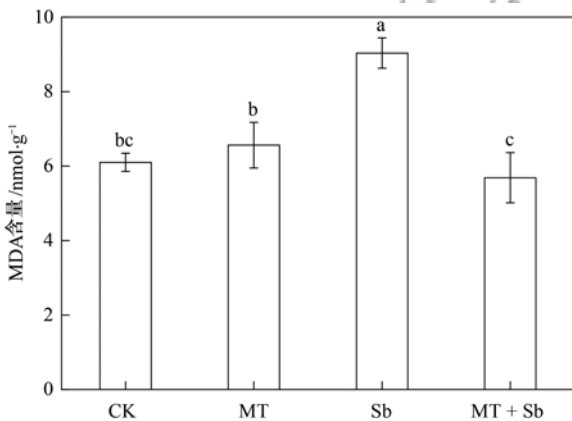
不同小写字母表明 4 种处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根细胞中 ROS 含量的影响

Fig. 5 Effect of MT on ROS content in root cells of rice seedlings under Sb stress

含量无显著影响. Sb 处理的水稻根细胞中 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量分别是 CK 处理的 2.5 倍和 6.3 倍,但是与 Sb 处理相比,MT + Sb 处理的根细胞中的 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量分别降低了 40.5% 和 32.7% (图 5).

MDA 含量是评价细胞膜脂过氧化的常用指标,可指示水稻根细胞中膜脂过氧化损伤程度. 与 CK 相比,MT 处理对水稻根系 MDA 含量无显著影响,而在 Sb 胁迫下,水稻根系中 MDA 含量是 CK 处理的 1.5 倍,MT 处理使水稻根系中 MDA 含量降低了 37.0% (图 6). 此外,从 FDA-PI 双染的结果观察到 CK 和 MT 处理的水稻根系表现出清晰的绿色荧光,表明水稻根细胞活力强盛; Sb 处理显著增强了水稻根中红色荧光的强度,表明有部分死细胞的产生,细胞活力下降;和 Sb 处理相比,MT + Sb 处理降低了根细胞中的红色荧光强度,提高了水稻根细胞的活力(图 7). 结果表明,MT 有助于缓解 Sb 诱导产生的水稻根系细胞氧化损伤,提高细胞活力,缓解 Sb 毒害.



不同小写字母表明 4 种处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根细胞中 MDA 含量的影响

Fig. 6 Effect of MT on MDA content in root cells of rice seedlings under Sb stress

2.6 MT 对水稻幼苗根系抗氧化防御系统的影响

图 8 为 MT 对水稻 Sb 胁迫下根系 SOD 活性、CAT 活性、POD 含量和 APX 活性的影响. 与 CK 处理相比,MT 处理可显著提高水稻幼苗根系 CAT 和 APX 活性,而对 POD 和 SOD 活性无显著影响,单独 Sb 处理的根中 SOD、POD 和 APX 活性显著降低,分别降低了 76.5%、62.6% 和 42.8%,而 CAT 活性显著提高了 61.0%. 外源添加 MT,可以提高 Sb 胁迫下水稻根细胞中抗氧化酶的活性. 与 Sb 处理相比,MT + Sb 处理使水稻根中 POD 和 CAT 活性提高了 54.1% 和 21.8%,而 MT + Sb 处理对 SOD 和 APX 活性影响不显著. 以上数据表明,MT 可以一定程度上缓解 Sb 胁迫下的水稻幼苗氧化损伤,这与水稻幼苗

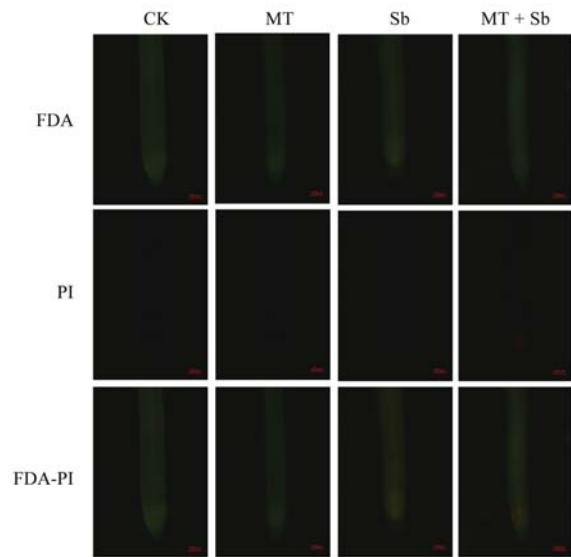


图 7 不同 MT 和 Sb 处理下水稻幼苗根细胞中的 FDA-PI 双染荧光

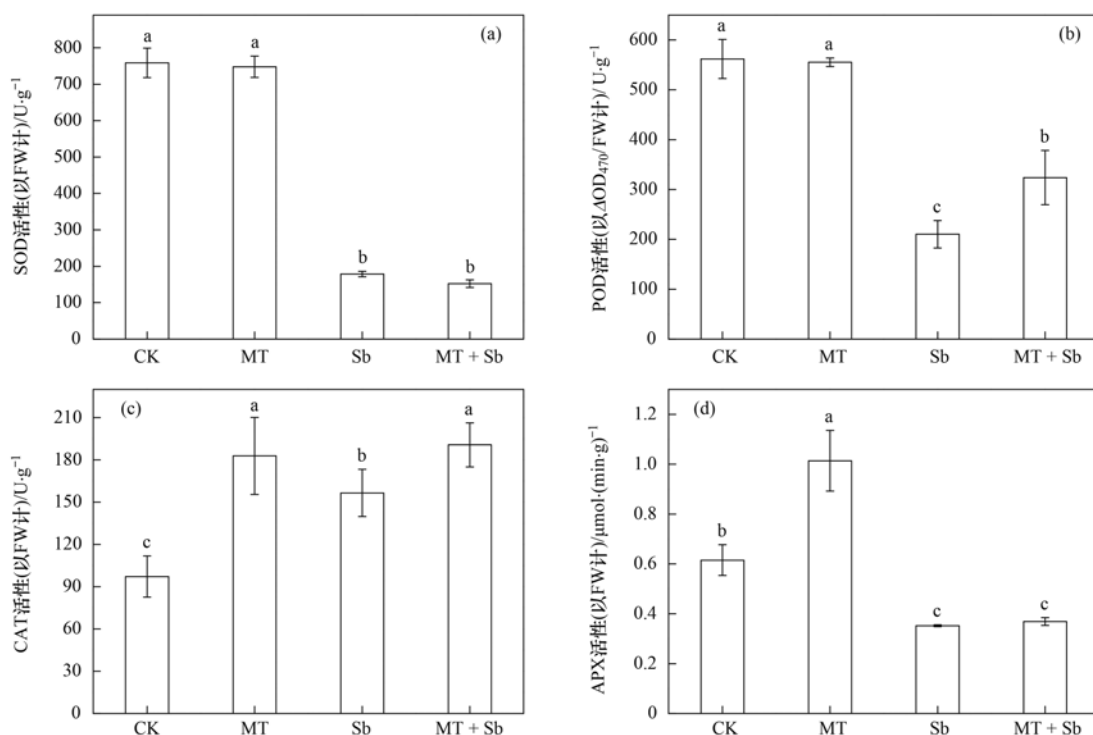
Fig. 7 Fluorescence of FDA-PI double staining in root cells of rice seedlings under different MT and Sb treatments

体内抗氧化系统活性密切相关.

图 9 为 MT 对 Sb 胁迫下水稻幼苗根系 GSH 含量、GSSG 含量、AsA 含量和 DHA 含量以及 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 的影响. GSH 和 AsA 是植物细胞中最重要的抗氧化剂,其氧化还原状态对氧化稳态更为关键. 与 CK 处理相比,MT 处理使水稻幼苗根系中 GSH 含量和 GSH/GSSG 均显著增加,对 GSSG 含量无显著影响,单独 Sb 处理的水稻幼苗根系中 GSH 含量和 GSH 氧化还原比 GSH/GSSG 均显著增加,分别比 CK 处理增加了 3.11 倍和 5.03 倍,而 GSSG 含量降低了 30.6%. 与 Sb 处理相比,MT + Sb 处理的水稻幼苗根系中 GSH 含量和 GSH/GSSG 分别降低了 15.3% 和 29.2%,而对水稻根系 GSSG 含量无显著影响. 与 CK 处理相比,MT 处理使水稻幼苗根系中 AsA 含量和 DHA 含量均显著增加,对 AsA/DHA 无显著影响,单独 Sb 处理的根中 AsA 含量和 DHA 含量均显著提高,分别提高了 28.8% 和 76.0%,而 AsA/DHA 相对于 CK 处理降低了 39.4%. 与 Sb 处理相比,MT + Sb 处理的根中 AsA 含量降低了 38.2%,而对 DHA 和 AsA/DHA 无显著影响.

3 讨论

近年来,MT 在植物非生物胁迫方面的应用越来越多引起人们的关注. 作为一种调节因子,MT 不仅可以调节植物的生长发育,还可以缓解温度、干旱、盐碱和重金属等环境胁迫. 有研究表明 MT 可以促进茄子体内可溶性蛋白的含量和渗透调节物质



不同小写字母表明 4 种处理之间的差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 8 MT 对 Sb 胁迫下水稻根系 SOD、CAT、POD 和 APX 活性的影响

Fig. 8 Effect of MT on SOD, CAT, POD, and APX activity of rice roots under Sb stress

的积累,有助于植物适应低温胁迫环境^[22]。干旱胁迫下,外源添加 MT 通过提高总抗氧化能力减轻小麦植株的氧化伤害^[23]。外源添加 MT 可以维持细胞膜的性质和完整性,降低电解质渗透率,有助于甜瓜和甜菜适应盐胁迫^[17,24]。关于 MT 对重金属胁迫的影响方面,有研究发现外源 MT 通过上调花色苷生物合成基因的表达和关键酶的活性来提高茶树在 As 胁迫下花色苷含量,从而提高了的茶树对 As 胁迫的耐受性^[25]; MT 还可以通过氨基酸代谢和谷胱甘肽代谢提高蘑菇的抗氧化性,改善 Cd 诱导的氧化应激^[26];另外,MT 可以通过触发非酶和酶的抗氧化系统改善氧化还原动态平衡,提高小麦根对镉的解毒能力^[27]; MT 通过增加光合作用和改善根系参数缓解 Ni 诱导的生长缓慢^[28]。然而关于 MT 如何缓解水稻幼苗 Sb 胁迫的研究还很少。

Sb 的过量积累对植物有害,不仅会抑制植物的生长,还会对植物的抗氧化系统和光系统中的电子传递和光合产物流动方向造成影响,阻碍植物对铁、锰和镁等矿质元素的吸收,抑制植株的生长^[29~31]。有研究发现,硅可以改善芦苇根系木质化,促进植物生长和通过光合作用缓解 Sb 的毒性^[32],而外源添加植物激素可以减轻植物 Sb 毒害,例如外源水杨酸 (SA) 能有效缓解 Sb 胁迫的抑制效应,促进水稻植株生长^[33],叶面喷施 2,4-表油菜素内酯 (EBL) 能提高拟南芥体内酶类和非酶类抗氧化剂的功能,进而

增加拟南芥对 Sb 胁迫的耐受性^[34]。本研究中, Sb 胁迫下水稻幼苗的鲜重和干重均降低,水稻生长发育受到明显抑制,这与已有的研究结果相一致^[35]。植物可以通过改变根的生长模式和形态来响应重金属胁迫^[32],水稻幼苗总根长、根表面积、根体积、根尖数、根枝数和根分叉数等根系参数可以直接反映植物根系生长状况。在研究 MT 处理对水稻幼苗 Sb 胁迫的影响时,发现 MT 对水稻幼苗根系生长的影响明显, Sb 胁迫对水稻幼苗根系生长参数有负面影响,而 MT 处理可以显著提高水稻的各个根系参数 (表 2)。根系活力可以反映植物根的氧化、还原和合成能力,间接衡量根的代谢功能^[36]。本研究中受到 Sb 胁迫的水稻幼苗根系活力显著降低, MT 可以显著提高水稻幼苗的根系活力 (图 3),对水稻根系的生长功能产生了积极影响。

在正常情况下,水稻细胞内过量的 ROS 可以被抗氧化防御机制去除^[37],但是高浓度 Sb 胁迫下, ROS 产生与清除之间的平衡被干扰,水稻幼苗细胞的 ROS 剧增,破坏细胞结构。已经证实 Sb 胁迫会对其他植物造成氧化损伤,例如 Sb 的过度积累,诱导小麦植株膜脂过氧化^[38]。MDA 是评价植物膜脂过氧化的重要指标。本研究中, Sb 胁迫导致水稻根细胞内 ROS 和 MDA 大量积累 (图 5 和图 6),说明 Sb 毒害会导致水稻氧化胁迫,伤害植物的细胞膜,而 MT 处理显著降低 ROS 和 MDA 的含量,并提高水稻

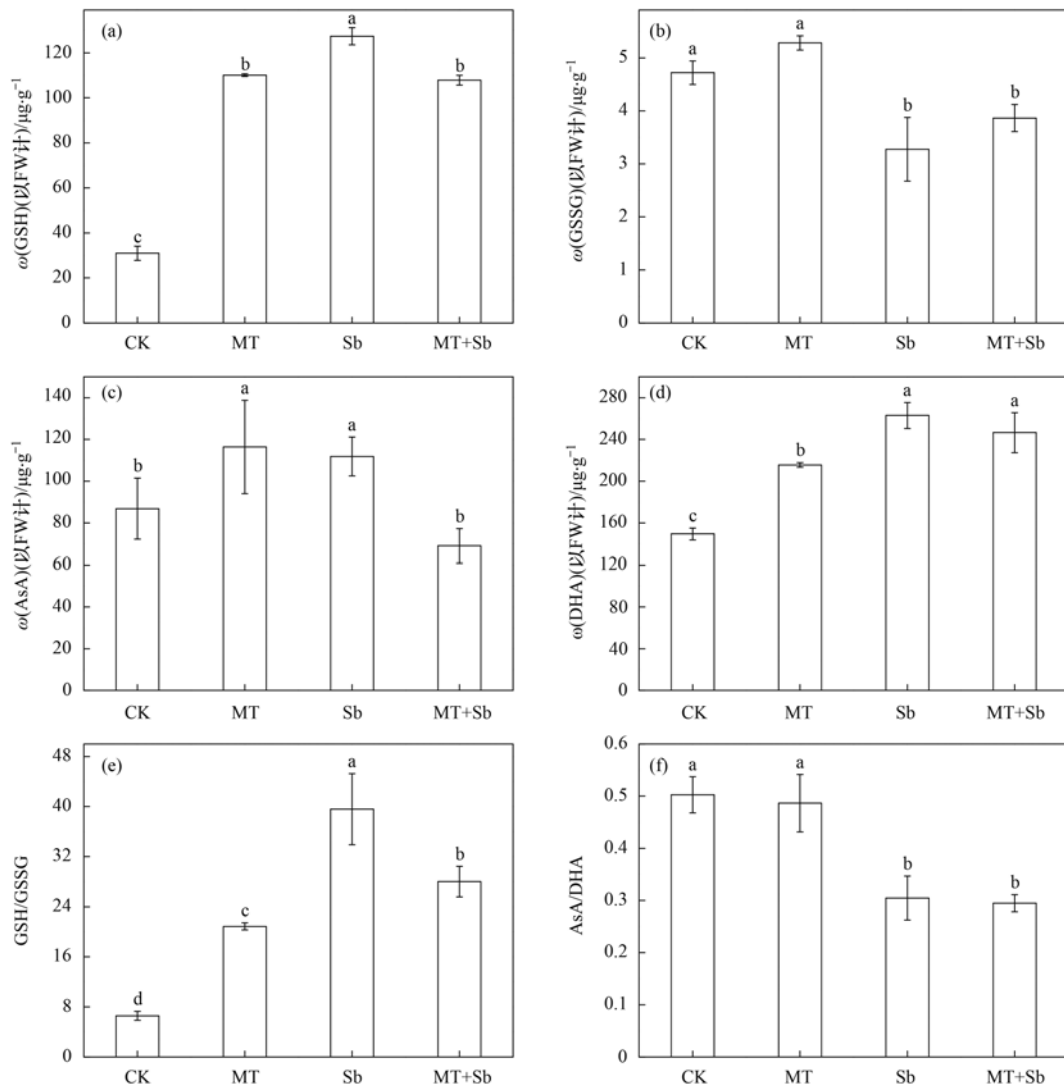


图9 MT对Sb胁迫下水稻幼苗根系GSH、GSSG、AsA和DHA含量和AsA/DHA和GSH/GSSG的影响

Fig. 9 Effect of MT on GSH, GSSG, AsA, and DHA content, and AsA/DHA and GSH/GSSG values in rice seedling roots under Sb stress

根系在Sb毒害下的细胞活力。植物通过SOD、CAT、POD和APX等抗氧化酶的协同作用来清除体内积累的ROS^[39]。有研究发现镉处理下水稻幼苗根系中SOD、CAT和APX活性都显著提高,POD活性降低^[40],而本研究中Sb处理下,水稻幼苗根系中CAT的活性显著提高,但POD、SOD和APX活性显著降低,MT+Sb处理可以提高CAT和POD的活性,对SOD和APX活性无显著影响。这些结果表明MT可以特异性上调Sb胁迫下水稻幼苗根系抗氧化酶CAT和POD的活性,说明MT起到抗氧化剂作用,不仅可以刺激抗氧化系统降低水稻在Sb胁迫下ROS水平,还可以提高Sb胁迫下抗氧化酶的活性和抗氧化潜力。MT参与酶促反应,与水稻幼苗体内抗氧化系统密切相关,然而,水稻在不同重金属胁迫抗氧化酶活性变化有差异的原因还有待进一步研究。

AsA-GSH循环参与了胁迫条件下产生的ROS

的清除和控制,是植物清除ROS的重要组成部分,可以平衡ROS的合成和清除并防止细胞损伤^[41]。抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)作为最主要的非酶抗氧化剂可以提高植物的氧化能力,降低非生物胁迫诱导的氧化胁迫^[42],GSH可以通过与金属或者类金属螯合作用,使细胞内维持较低的重金属水平,以清除ROS和缓解氧化应激。AsA和GSH与细胞氧化还原平衡有关,而AsA/DHA和GSH/GSSG可能作为调节抗氧化机制的信号,已有多项研究发现植物体内AsA-GSH循环效率可以在应激条件下得到提高^[43]。本研究中,Sb胁迫导致水稻幼苗根中AsA和DHA的含量增加,而AsA/DHA下降;而Sb胁迫时水稻根细胞中GSH含量和GSH/GSSG明显增加,GSSG含量减少,这说明水稻可以通过提高AsA和GSH水平维持良好的氧化还原状态,缓解Sb诱导的损伤。Sb对水稻根系中AsA和GSH水平的影响一定程度上与Sb对番茄植株的毒性反应一

致^[36], GSH 是一种低分子硫醇, 是植物抗氧化防御系统中最关键的代谢产物^[44], GSH 在内的硫醇基团与 Sb 形成络合物的解毒作用可能是抗氧化剂成分不平衡的原因之一. 与单独 Sb 处理相比, MT + Sb 处理降低了水稻幼苗根细胞中 AsA 和 GSH 的含量, 这说明外源添加 MT 可能通过刺激 Sb 胁迫下植物螯合素 (PCs) 的生成并将其隔离在液泡中, 改变细胞氧化还原平衡^[45], 从而增加了 PCs 生物合成主要底物 GSH 含量的消耗, 而以 GSH 为电子供体的脱氢抗坏血酸还原酶 (DHAR) 促进 DHA 还原为 AsA^[43]. 另外, AsA-GSH 循环中的酶 (如 APX 和 DHAR 等) 也容易因受到氧化损伤改变活性, 从而破坏氧化防御, 这与植物种类和发育阶段有关, 不同的防御机制可能由不同 Sb 浓度决定^[42], 然而这一过程的具体机制还需进一步研究.

4 结论

(1) 外源添加 MT 可以提高 Sb 胁迫下水稻幼苗的生物量, 有效缓解 Sb 胁迫对水稻幼苗产生的生长抑制; 显著提高水稻幼苗根系活力和根系生长参数, 促进水稻的生长.

(2) 外源添加 MT 显著提高 Sb 胁迫下水稻幼苗根系细胞中 POD 和 CAT 的活性, 抑制 ROS 和 MDA 的产生, 减轻 Sb 诱导的氧化损伤; 通过调节 AsA-GSH 循环提高水稻抗氧化潜力, 缓解 Sb 对水稻的毒害作用.

参考文献:

- [1] Long X J, Wang X, Guo X J, *et al.* A review of removal technology for antimony in aqueous solution [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **90**: 189-204.
- [2] He M C, Wang X Q, Wu F C, *et al.* Antimony pollution in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 41-50.
- [3] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, *et al.* The uptake and detoxification of antimony by plants: a review [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, **96**: 28-34.
- [4] Filella M, Williams P A, Belzile N. Antimony in the environment: knowns and unknowns [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **6**(2): 95-105.
- [5] 冯人伟, 韦朝阳, 涂书新. 植物对砷的吸收和代谢及其毒性的研究进展 [J]. *植物学报*, 2012, **47**(3): 302-308.
Feng RW, Wei C Y, Tu S X. Research advances in uptake, metabolism and toxicity of antimony in plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, **47**(3): 302-308.
- [6] Abbasi S, Lamb D T, Choppala G, *et al.* Antimony speciation, phytochelatin stimulation and toxicity in plants [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **305**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119305.
- [7] 耿丽莎, 杨再福, 许志楠, 等. 砷胁迫对桑树生理指标及富集转运特征的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(8): 1667-1674.
Geng L S, Yang Z F, Xu Z N, *et al.* Effects of antimony stress on physiological indexes and enrichment and transport characteristics of mulberry [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(8): 1667-1674.
- [8] Espinosa-Vellarino F L, Garrido I, Ortega A, *et al.* Effects of antimony on reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS) and antioxidant mechanisms in tomato plants [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**, doi: 10.3389/fpls.2020.00674.
- [9] Hoque M N, Tahjib-Ul-Arif M, Hannan A, *et al.* Melatonin modulates plant tolerance to heavy metal stress: morphological responses to molecular mechanisms [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, **22** (21), doi: 10.3390/ijms222111445.
- [10] Zhan H S, Nie X J, Zhang T, *et al.* Melatonin: a small molecule but important for salt stress tolerance in plants [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, **20**(3), doi: 10.3390/ijms20030709.
- [11] Khan A, Numan M, Khan A L, *et al.* Melatonin: awakening the defense mechanisms during plant oxidative stress [J]. *Plants*, 2020, **9**(4), doi: 10.3390/plants9040407.
- [12] 黄益宗, 蒋航, 王农, 等. 外源褪黑素对砷胁迫下水稻幼苗生长的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(6): 1738-1743.
Huang Y Z, Jiang H, Wang N, *et al.* Effects of exogenous melatonin on the growth of rice seedlings under As stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(6): 1738-1743.
- [13] Bao Q L, Bao W K, Li Y, *et al.* Silicon combined with foliar melatonin for reducing the absorption and translocation of Cd and As by *Oryza sativa* L. in two contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112343.
- [14] 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 等. 褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1675-1682.
Liu S X, Huang Y Z, Luo Z J, *et al.* Alleviation effects of exogenous melatonin on Ni toxicity in rice seedlings [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1675-1682.
- [15] 张盛楠, 黄亦玫, 陈世宝, 等. 不同外源物质对镉砷复合污染胁迫下油菜生理指标和镉砷积累的影响 [J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(7): 2214-2222.
Zhang S N, Huang Y W, Chen S B, *et al.* Effects of spraying different exogenous substances on physiological indices and cadmium and arsenic accumulation in rape under combined pollution of cadmium and arsenic [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(7): 2214-2222.
- [16] 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.
- [17] Castañares J L, Bouzo C A. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) under salt stress [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2019, **5**(2): 79-87.
- [18] Sun C L, Lv T, Huang L, *et al.* Melatonin ameliorates aluminum toxicity through enhancing aluminum exclusion and reestablishing redox homeostasis in roots of wheat [J]. *Journal of Pineal Research*, 2020, **68**(4), doi: 10.1111/jpi.12642.
- [19] Chen Z P, Gu Q, Yu X L, *et al.* Hydrogen peroxide acts downstream of melatonin to induce lateral root formation [J]. *Annals of Botany*, 2018, **121**(6): 1127-1136.

- [20] Zhen S, Shuai H, Xu C, *et al.* Foliar application of Zn reduces Cd accumulation in grains of late rice by regulating the antioxidant system, enhancing Cd chelation onto cell wall of leaves, and inhibiting Cd translocation in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145302.
- [21] Riaz M, Kamran M, Fang Y Z, *et al.* Boron supply alleviates cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by enhancing cadmium adsorption on cell wall and triggering antioxidant defense system in roots[J]. *Chemosphere*, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128938.
- [22] 吴雪霞, 朱宗文, 张爱冬, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下茄子幼苗生长及其光合作用和抗氧化系统的影响[J]. *西北植物学报*, 2017, **37**(12): 2427-2434.
Wu X X, Zhu Z W, Zhang A D, *et al.* Effects of exogenous melatonin on the growth, photosynthesis and antioxidant system in eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings under low temperature stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(12): 2427-2434.
- [23] Cui G B, Zhao X X, Liu S D, *et al.* Beneficial effects of melatonin in overcoming drought stress in wheat seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, **118**: 138-149.
- [24] Liu L, Wang Z Y, Gai Z J, *et al.* Exogenous application of melatonin improves salt tolerance of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seedlings[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2022, **44**(6), doi: 10.1007/s11738-022-03389-4.
- [25] Li X, Ahammed G J, Zhang X N, *et al.* Melatonin-mediated regulation of anthocyanin biosynthesis and antioxidant defense confer tolerance to arsenic stress in *Camellia sinensis* L [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123922.
- [26] Ni J, Wang Q J, Shah F A, *et al.* Exogenous melatonin confers cadmium tolerance by counterbalancing the hydrogen peroxide homeostasis in wheat seedlings[J]. *Molecules*, 2018, **23**(4), doi: 10.3390/molecules23040799.
- [27] Gao Y, Wang Y, Qian J, *et al.* Melatonin enhances the cadmium tolerance of mushrooms through antioxidant-related metabolites and enzymes[J]. *Food Chemistry*, 2020, **330**, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127263.
- [28] Altaf M A, Shahid R, Ren M X, *et al.* Melatonin mitigates nickel toxicity by improving nutrient uptake fluxes, root architecture system, photosynthesis, and antioxidant potential in tomato seedling[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, **21**(3): 1842-1855.
- [29] Zhu Y M, Li Z F, Shen J, *et al.* Toxicity of different forms of antimony to rice plants: photosynthetic electron transfer, gas exchange, photosynthetic efficiency, and carbon assimilation combined with metabolome analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **437**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129433.
- [30] He S X, Chen J Y, Hu C Y, *et al.* Uptake, speciation and detoxification of antimonate and antimonite in As-hyperaccumulator *Pteris Cretica* L [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119653.
- [31] Zhou X J, Sun C Y, Zhu P F, *et al.* Effects of antimony stress on photosynthesis and growth of *Acorus calamus* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.00579.
- [32] Shetty R, Vidya C S N, Weidinger M, *et al.* Silicon alleviates antimony phytotoxicity in giant reed (*Arundo donax* L.) [J]. *Planta*, 2021, **254**(5), doi: 10.1007/s00425-021-03756-4.
- [33] Luo W T, He L, Li F, *et al.* Exogenous salicylic acid alleviates the antimony (Sb) toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, **40**(3): 1327-1340.
- [34] Wu C C, Li F, Xu H, *et al.* The potential role of brassinosteroids (BRs) in alleviating antimony (Sb) stress in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, **141**: 51-59.
- [35] 向猛, 黄益宗, 蔡立群, 等. 外源钙对两种价态锑胁迫下水稻幼苗吸收积累锑和钙的影响[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(3): 153-160.
Xiang M, Huang YZ, Cai LQ, *et al.* Effect of calcium on uptake and accumulation of antimony and calcium by rice seedling in solution culture [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(3): 153-160.
- [36] 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 等. 外源褪黑素处理对镉胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(6): 1034-1041.
Liu S X, Huang Y Z, Luo Z J, *et al.* Effects of exogenous melatonin on germination of rice seeds under Cd stresses [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(6): 1034-1041.
- [37] Huang H L, Ullah F, Zhou D X, *et al.* Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fpls.2019.00800.
- [38] Ma C L, He M C, Zhong Q Y, *et al.* Uptake, translocation and phytotoxicity of antimonite in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **669**: 421-430.
- [39] Zeng L, Cai J S, Li J J, *et al.* Exogenous application of a low concentration of melatonin enhances salt tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, **17**(2): 328-335.
- [40] Li Y, Zhang S N, Bao Q L, *et al.* Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity through regulating the antioxidant response and enhancing the chelation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **304**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119178.
- [41] Meng X, Luo S L, Dawuda M M, *et al.* Exogenous silicon enhances the systemic defense of cucumber leaves and roots against CA-induced autotoxicity stress by regulating the ascorbate-glutathione cycle and photosystem II [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **227**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112879.
- [42] Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, Anee T I, *et al.* Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress [J]. *Antioxidants*, 2019, **8**(9), doi: 10.3390/antiox8090384.
- [43] Bashri G, Prasad S M. Exogenous IAA differentially affects growth, oxidative stress and antioxidants system in Cd stressed *Trigonella foenum-graecum* L. seedlings: toxicity alleviation by up-regulation of ascorbate-glutathione cycle [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **132**: 329-338.
- [44] Koh Y S, Wong S K, Ismail N H, *et al.* Mitigation of environmental stress-impacts in plants: role of sole and combinatory exogenous application of glutathione [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, **12**, doi: 10.3389/fpls.2021.791205.
- [45] Riyazuddin R, Nisha N, Ejaz B, *et al.* A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants [J]. *Biomolecules*, 2022, **12**(1), doi: 10.3390/biom12010043.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)