

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
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	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

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

张盛楠, 黄益宗*, 李颜, 保琼莉, 黄永春

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 为了探讨外源添加植物激素对Cd胁迫下水稻幼苗的抗氧化系统及Cd吸收积累情况的影响,减少Cd在植物体内的运输和积累,从而缓解Cd对水稻的胁迫.以中嘉早17水稻幼苗为研究对象,进行水培试验,设置0、5和25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 这3个Cd浓度处理,3种外源植物激素处理:不添加植物激素、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素(MT)、0.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-表油菜素内酯(EBL)和0.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 茉莉酸(JA),共12个处理,每个处理重复3次.测定水稻幼苗体内Cd的含量,同时也对水稻幼苗地上部及根部丙二醛(MDA)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量进行分析.结果表明,在5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,外源添加MT、EBL和JA使地上部MDA含量显著降低了11%~24%,但是根系与地上部情况恰好相反,添加3种外源物质均导致根系中MDA含量增加,其中MT和EBL现象明显,在5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,与CK相比,分别提高了45.5%和20.0%;在25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,分别提高了46.2%和19.8%.外源添加植物激素可显著增加水稻幼苗地上部和地下部POD、CAT的活性,降低GSH以及Cd的含量,在5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,添加MT、EBL和JA导致水稻地上部Cd含量分别降低39.4%、40.1%和51.6%,根部分别降低38.9%、40.2%和7.0%;25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,地上部Cd含量分别降低18.9%、14.5%和35.6%,根部分别降低85.3%、81.1%和56.5%.由此可见,通过外源添加低浓度植物激素MT、EBL和JA,可缓解Cd对水稻的胁迫,降低Cd对水稻的毒害作用.

关键词: 水稻; 镉(Cd); 褪黑素; 2,4-表油菜素内酯; 茉莉酸; 抗氧化系统

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2040-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007290

Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress

ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong*, LI Yan, BAO Qiong-li, HUANG Yong-chun

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

Abstract: In order to explore the effects of the exogenous addition of plant hormones on the antioxidant system and Cd absorption and accumulation of rice seedlings under Cd stress, the transportation and accumulation of Cd was reduced in plants to alleviate the stress of Cd on the rice. With the rice seedlings of Zhongjiazao 17 as the research object, a hydroponic experiment was carried out with three Cd concentration treatments (0, 5, and 25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), and four exogenous plant hormone treatments: no plant hormones, 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin (MT), 0.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-epibrassinolide (EBL), and 0.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ jasmonic acid (JA), for a total of 12 treatments, each treatment repeated three times. The contents of Cd in the rice seedlings were analyzed, as well as the content of MDA, POD, CAT, and reduced GSH in the shoots and roots of the rice seedlings. The results indicated that under the stress of 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and 25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd, the addition of MT, EBL, and JA significantly reduced the MDA content of the shoots by 11%~24%, and the roots and shoots were healthy. On the contrary, the addition of the three exogenous substances all caused an increase in the MDA content in the root system, but the effects of MT and EBL were obvious. Under the 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd stress, compared with CK, the MDA contents increased by 45.5% and 20.0% respectively; under 25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd stress, they increased by 46.2% and 19.8%. The exogenous addition of plant hormones can significantly increase the activity of POD and CAT in the shoots and underground parts of the rice seedlings and reduce the contents of GSH and Cd. Under the 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd stress, the Cd content in the shoots of rice plants decreased by 39.4%, 40.1%, and 51.6%, the roots were reduced by 38.9%, 40.2%, and 7.0%. Under the 25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd stress, the aboveground Cd content was reduced by 18.9%, 14.5%, and 35.6%, and the roots were reduced by 85.3%, 81.1%, and 56.5%. By exogenously adding low-concentration plant hormones MT, EBL, and JA, the stress of Cd on the rice can be alleviated, and the toxic effect of Cd on rice can be reduced.

Key words: rice; Cd; melatonin; 2,4-epibrassinolide; jasmonic acid; antioxidant system

水稻是中国主要的粮食作物,根据文献[1],到2020年,我国水稻面积将稳定在30万 km^2 (约4.5亿亩).土壤是人类赖以生存和发展的基石,是保障粮食安全生产的重要物质基础.据文献[2]显示,我国耕地土壤总样点污染超标率为19.4%,其中Cd污染较严重为7.0%,耕地土壤质量状况令人担忧.镉

(Cd)是植物非必需元素,具有较强的水溶性,Cd作为对人体危害性最强的重金属元素之一,被水稻等

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801500)

作者简介: 张盛楠(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属修复,E-mail: 296927851@qq.com

* 通信作者,E-mail: yizonghuang@126.com

作物吸收富集,通过食物链进入人体,从而对人体健康造成威胁^[3].那么,如何保障粮食作物安全生产,降低水稻对重金属的积累,是当前土壤及环境领域的研究热点和难点^[4].

植物激素是指植物细胞接受特定环境信号诱导产生的一些微量而能调节(促进或抑制)自身生理过程的简单的小分子有机化合物^[5].褪黑素(melatonin, MT)、油菜素甾醇(brassinosteroids, BRs)和茉莉酸(jasmonic acid, JA)作为植物体内产生的激素,它们的生理效应非常复杂、多样,对植物的生长发育有重要的调控作用.植物中的褪黑素最早于 20 世纪 90 年代被发现,随后被确认在高等植物和植物产品中普遍存在^[6].褪黑素是一种两亲性的低分子量吲哚胺,在植物细胞中具有广泛的生物学功能,尤其是在应对各种压力时,可以用作生长调节剂,生物刺激剂,抗衰老剂和抗氧化剂^[7],可通过调控植物抗氧化系统的酶活性和物质水平来降低非生物胁迫对植物造成的氧化损伤,进而提高植物的抗逆性等^[8].王丙烁等^[9]的研究发现,外源添加褪黑素($10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)能显著降低水稻幼苗地上部和地下部 Cd 的含量.油菜素甾醇是一类多羟基的类固醇植物激素.2,4-表油菜素内酯作为 BR 的高活性合成类似物,对植物具有抗逆作用^[10],有助于缓解非生物胁迫,在高温、低温、盐、光照和干旱等方面的胁迫下均表现出促进植物生长的作用,同时其具有刺激酶促和非酶促抗氧化剂生产系统的作用,该系统能够清除 ROS 自由基并控制渗透调节,促进抗氧化剂防御系统,光合作用和激素稳态以及增加渗透液和大量营养素的积累^[11,12].因此,EBL 可能是“辅助植物修复”的潜在候选者.茉莉酸是存在于高等植物体内的一种植物激素,它的环状前体和衍生物构成一类生物活性的脂蛋白,在植物生长和发育过程中发挥不同的作用^[13,14],并且调节植物的生长和对胁迫的反应.除了在生理上的作用外,外源施用 JA 可以提高植物对非生物胁迫的耐受性^[15,16].有研究表明,大豆等植物受到胁迫条件下,JA 由于其信号传导分子的作用而增强了植物对环境胁迫的耐受性^[17].

本研究通过在水稻幼苗期外源添加植物激素褪黑素(MT)、2,4-表油菜素内酯(EBL)和茉莉酸(JA),比较 MT、EBL 和 JA 对缓解水稻 Cd 毒害的效果,通过筛选出能有效缓解 Cd 对水稻造成胁迫的物质,以期降低作物对 Cd 的吸收积累提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为中嘉早 17(国审稻 2009008),

选育单位为中国水稻研究所和浙江省嘉兴市农业科学研究院.该品种属籼型常规水稻.在长江中下游作双季早稻种植,全生育期平均 109.0 d.株型适中,分蘖力中等,茎秆粗壮,叶片宽挺,熟期转色好,每亩有效穗数 20.6 万穗,穗长 18.0 cm,株高 88.4 cm,每穗总粒数 122.5 粒,结实率 82.5%,千粒重 26.3 g.

供试褪黑素(MT)购自阿达玛斯试剂有限公司;2,4-表油菜素内酯(EBL)购自上海源叶生物科技有限公司;茉莉酸(JA)购自梯希爱化成工业发展有限公司.这 3 种物质均为分析纯.

1.2 试验设计与处理

设置 0、5 和 $25\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 这 3 个 Cd 处理浓度,3 种外源植物激素处理:不添加植物激素、 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素(MT)、 $0.2\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-表油菜素内酯(EBL)和 $0.2\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 茉莉酸(JA),共 12 个处理,每个处理重复 3 次.外源物质浓度参考已有研究使用浓度并进行预试验确定.选用颗粒饱满的中嘉早 17 水稻种子,并用 5% 的过氧化氢(H_2O_2)溶液消毒 30 min 后,用超纯水冲洗 3~5 遍,将消毒洗净后的水稻种子均匀播撒于育苗盘上,用超纯水刚好没过种子,放入 28°C 的恒温电热培育箱中进行催芽培养.两周后,将长势均匀的幼苗转移至 8 L 水培箱中,用 1/10 的霍格兰营养液再次进行培养.待水稻幼苗三叶一心时,对其进行胁迫处理,将水稻幼苗转移至 500 mL 的水培罐中,罐中溶液为不同试验处理的混合溶液,每日变换一次水培罐的摆放位置.处理液每 5 d 更换一次,处理 15 d 后收取水稻样品.

1.3 植物样品的采集与测定方法

1.3.1 叶绿素含量的定量测量

取 0.10~0.20 g 新鲜的水稻叶片,并加入 25 mL 96% 的乙醇来浸提叶片中的叶绿素,在黑暗的条件下浸泡过夜,中间摇动 3~4 次,至叶片组织全都变白时,说明叶绿素已经提取完全,过滤,测定 96% 的乙醇提取液在 665、649 和 470 nm 波长下的吸光度,然后根据相应的比吸收系数即可求出叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的浓度.

1.3.2 丙二醛(MDA)、抗氧化酶活性及还原型谷胱甘肽(GSH)含量的测定

采用酶试剂盒法测定水稻幼苗地上部和根部 MDA 含量、CAT、POD 活性及 GSH 含量.将收集到的新鲜水稻样品,先用超纯水反复冲洗根系表面,再将地上部和根系分开,用苏州格锐思生物科技有限公司提供的试剂盒和紫外分光光度计(上海菁华,759 MC)来测定地上部和根系中丙二醛、还原性谷胱甘肽的含量以及过氧化物酶和过氧化氢酶活性.

1.3.3 Cd 含量的测定

将水稻根部放在 5% 的 CaCl_2 溶液中浸泡 30 min,再用超纯水反复冲洗根系表面.然后将水稻的根和茎分别放入牛皮纸信封中,在 80°C 下烘干至恒重,称取 0.2500 g 烘干后的样品放入干燥洁净的消煮管中,加入 7 mL GR 硝酸,在 110°C 消煮炉消煮 2.5 h 后冷却至室温,加入 1 mL H_2O_2 再煮 1.5 h 后,赶酸至近干,将消煮好的样品用超纯水定容至 25 mL,过滤后用石墨炉 (AnalytikJena, ZEE nit700) 测定水稻样品中 Cd 含量.测定过程中用标准物质 [GBW(E)100350] 进行质量控制.

1.4 数据处理

用 SPSS 22 对数据进行差异显著性分析,Microsoft Excel 2010 对数据统计处理和作图.对同一 Cd 浓度不同外源物质处理的数据采用单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较,试验数据用

平均值 $\pm$ 标准误差表示.

2 结果与分析

2.1 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗叶绿素含量的影响

由表 1 可以看出,在没有 Cd 胁迫处理下,MT 可显著降低水稻叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量,分别下降了 8.4%、12.8% 和 9.5%,类胡萝卜素下降不明显,而 EBL 分别提高了叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量的 15.7%、15.3%、15.6% 和 15.4%. 在 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,外源添加 JA 使得水稻叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量显著提高,与 CK 相比,分别提高了 28.5%、29.5%、28.7% 和 36.8%;而在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,MT、EBL 和 JA 对叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素没有明显影响.

表 1 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗叶绿素含量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different exogenous substances on the chlorophyll content of rice seedlings under Cd stress

Cd 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	项目	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素	类胡萝卜素
0	CK	$2.58 \pm 0.05\text{b}$	$0.92 \pm 0.03\text{b}$	$3.51 \pm 0.08\text{b}$	$0.48 \pm 0.01\text{b}$
	MT	$2.37 \pm 0.06\text{c}$	$0.80 \pm 0.02\text{c}$	$3.17 \pm 0.08\text{c}$	$0.45 \pm 0.01\text{bc}$
	EBL	$2.99 \pm 0.06\text{a}$	$1.06 \pm 0.03\text{a}$	$4.05 \pm 0.10\text{a}$	$0.56 \pm 0.01\text{a}$
	JA	$2.48 \pm 0.01\text{bc}$	$0.84 \pm 0.01\text{bc}$	$3.32 \pm 0.03\text{bc}$	$0.43 \pm 0.02\text{c}$
5	CK	$2.00 \pm 0.08\text{b}$	$0.71 \pm 0.03\text{b}$	$2.72 \pm 0.10\text{b}$	$0.34 \pm 0.01\text{bc}$
	MT	$2.09 \pm 0.16\text{b}$	$0.73 \pm 0.06\text{b}$	$2.82 \pm 0.21\text{b}$	$0.40 \pm 0.03\text{b}$
	EBL	$1.84 \pm 0.07\text{b}$	$0.65 \pm 0.02\text{b}$	$2.49 \pm 0.09\text{b}$	$0.33 \pm 0.02\text{c}$
	JA	$2.57 \pm 0.07\text{a}$	$0.93 \pm 0.02\text{a}$	$3.50 \pm 0.09\text{a}$	$0.47 \pm 0.02\text{a}$
25	CK	$2.26 \pm 0.10\text{a}$	$0.81 \pm 0.04\text{a}$	$3.07 \pm 0.14\text{a}$	$0.39 \pm 0.02\text{a}$
	MT	$2.25 \pm 0.24\text{a}$	$0.80 \pm 0.09\text{a}$	$3.05 \pm 0.32\text{a}$	$0.39 \pm 0.04\text{a}$
	EBL	$2.07 \pm 0.09\text{a}$	$0.75 \pm 0.04\text{a}$	$2.82 \pm 0.13\text{a}$	$0.37 \pm 0.01\text{a}$
	JA	$1.96 \pm 0.06\text{a}$	$0.73 \pm 0.02\text{a}$	$2.69 \pm 0.09\text{a}$	$0.33 \pm 0.01\text{a}$

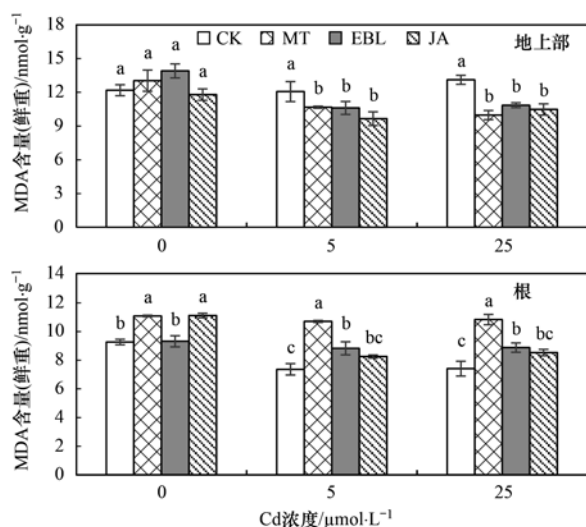
1) 数值后不同小写字母表示同一 Cd 浓度处理,添加不同外源植物激素之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗抗氧化系统的影响

图 1 为不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 MDA 含量的影响.在未经 Cd 胁迫处理下,添加 3 种外源物质对地上部无显著影响,但是 MT 和 JA 的使用却显著增加了水稻根系 MDA 含量,分别提高了 19.5% 和 19.9%.而在 Cd 胁迫下,添加 MT、EBL 和 JA 均可显著降低地上部 MDA 含量,其中在 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,与 CK 相比,分别降低了 11.5%、12.0% 和 20.0%;在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,分别降低了 23.9%、17.2% 和 20.1%.而根系与地上部情况恰好相反,添加 3 种外源物质均导致根系中 MDA 含量增加,其中 MT 和 EBL 现象明显,其中在 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,与 CK 相比,分别提高了 45.5% 和 20.0%;在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,分别提高了 46.2% 和 19.8%.

图 2 为不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 POD 活性的影响.对地上部而言,添加 3 种外源物质使 0、5 和 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下的 POD 含量与 CK 相比均显著升高,其中在没有 Cd 胁迫处理下,POD 含量分别增加了 50.9%、75.4% 和 49.2%;在 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,分别增加了 52.1%、59.8% 和 49.2%;在 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,分别增加了 37.7%、42.2% 和 93.9%.而在根系中,在没有 Cd 胁迫处理下,MT 和 EBL 显著降低了根中 POD 的含量,分别降低了 36.1% 和 17.1%.在 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,MT 和 JA 显著增加了根系中 POD 的含量,MT 分别增加了 14.8% 和 20.1%,JA 增加了 16.3% 和 43.5%,而 EBL 则使 POD 量下降,分别下降了 13.1% 和 34.5%.

图 3 为不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 CAT 活性的影响.在未经 Cd 胁迫处理下,添加 MT



不同小写字母表示同一 Cd 浓度处理,添加不同外源植物激素之间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图 1 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of different exogenous substances on the MDA content of rice seedlings under Cd stress

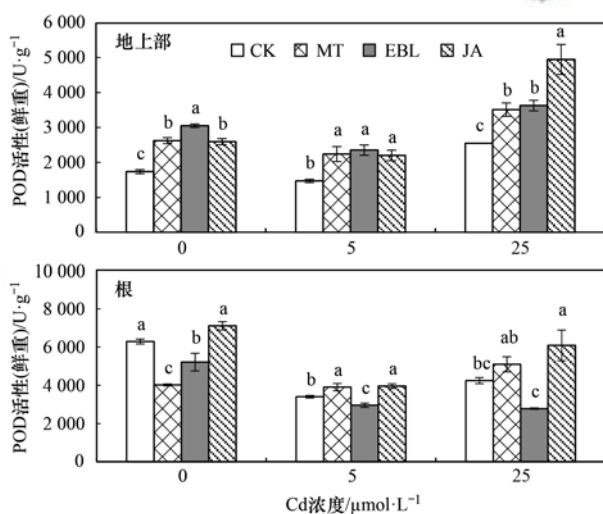


图 2 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 POD 活性的影响

Fig. 2 Effects of different exogenous substances on POD activity of rice seedlings under Cd stress

和 EBL 显著降低了地上部 CAT 的含量,与 CK 相比,分别下降了 7.0% 和 14.7%,而对根部无显著影响.在 Cd 胁迫下,添加 3 种外源物质均显著提高了水稻地上部与根部 CAT 的含量,在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,添加 MT、EBL 和 JA 后,水稻地上部 CAT 含量与 CK 相比分别提高了 26.0%、36.7% 和 22.4%,根部提高了 138.5%、70.2% 和 102.4%;在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,添加 MT、EBL 和 JA 后,水稻地上部 CAT 含量与 CK 相比分别提高了 30.1%、18.7% 和 41.0%,根部提高了 66.0%、32.9% 和 42.6%.

图 4 为不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 GSH 含量的影响.在未经 Cd 胁迫处理下,与 CK

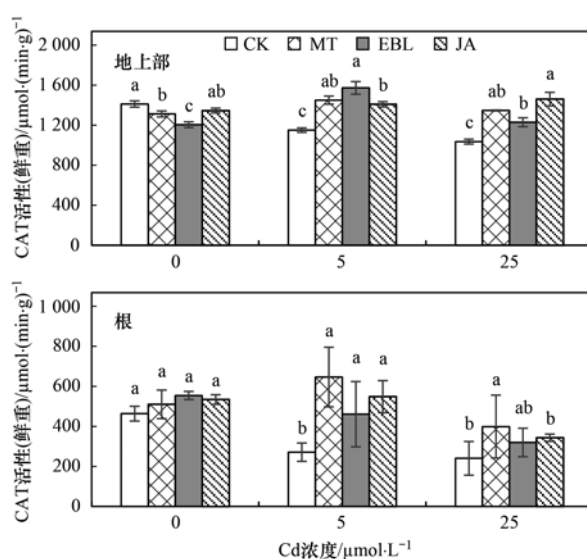


图 3 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effects of different exogenous substances on CAT activity of rice seedlings under Cd stress

相比,MT 显著提高了地上部 GSH 含量的 10.7%,而 EBL 和 JA 则显著降低了 12.7% 和 23.5%,在根部中,添加 MT 和 EBL 使 GSH 分别提高了 24.2% 和 22.0%;在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,MT 和 JA 分别降低了地上部 GSH 含量的 9.9% 和 7.6%,而 MT、EBL 和 JA 均显著降低了水稻根部 GSH 的含量,分别降低了 77.4%、48.8% 和 28.4%;在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,3 种外源物质均显著降低了地上部与根部 GSH 的含量.对地上部而言,与 CK 相比,添加 MT、EBL 和 JA 的处理分别降低了 28.2%、48.0% 和 15.2%,而在水稻根部中,GSH 分别降低了 26.5%、65.2% 和 21.1%.

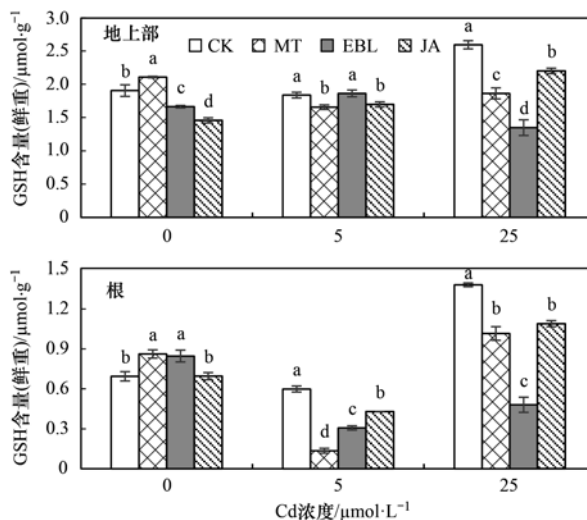


图 4 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗 GSH 含量的影响

Fig. 4 Effects of different exogenous substances on GSH content of rice seedlings under Cd stress

2.3 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻吸收积累 Cd 的影响

图 5 为不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗吸收积累 Cd 的影响. 通过对水稻体内 Cd 的测定, 不难发现, 在 Cd 胁迫下, 添加了 3 种外源物质后, 水稻体内的 Cd 积累量与 CK 相比具有显著地差异. 对地上部而言, 在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 添加 MT、EBL 和 JA 后分别降低了 39.4%、40.1% 和 51.6%; 在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 分别下降了 18.9%、14.5% 和 35.6%. 另外, 在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 添加了 MT 和 JA 后, 水稻根部中的 Cd 含量呈明显下降趋势, 与 CK 相比降低了 38.9% 和 40.2%, EBL 没有明显影响; 在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 添加了 MT、EBL 和 JA 后, 水稻根部积累 Cd 的含量显著下降了 85.3%、81.1% 和 56.5%.

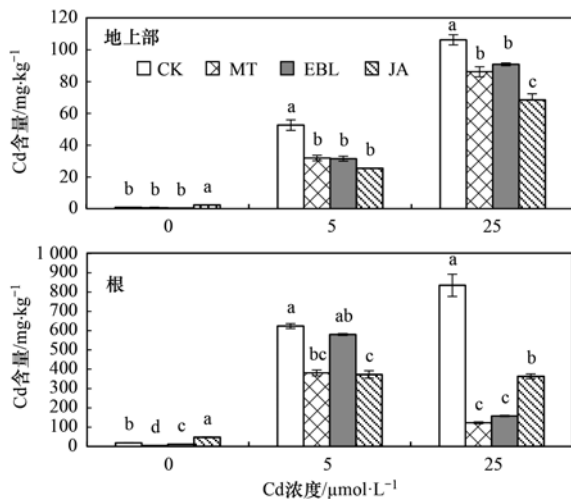


图 5 不同外源物质对 Cd 胁迫下水稻幼苗吸收积累 Cd 的影响

Fig. 5 Effects of different exogenous substances on the Cd absorption and accumulation of rice seedlings under Cd stress

3 讨论

重金属对土壤的污染日益增加, 已成为对环境可持续性和全球粮食安全的最大威胁之一, 这使其成为影响稻米质量安全的重要限制性因素^[4]. 据统计, 每年因土壤重金属污染造成的粮食减产超过 1000 万 t, 中国每年有 1200 万 t 粮食受到污染, 损失每年可达 200 亿元人民币^[18]. 植物体内重金属含量的增加对植物的生理和生化过程产生各种不利影响^[19]. Cd 通过抑制植物细胞正常分裂, 降低叶片的活力, 引起细胞膜脂质过氧化和抑制抗氧化酶的活性, 进而抑制植物的正常生长. MDA 是环境胁迫下植物氧化反应的产物, 其积累反映了氧自由基对细胞膜的损伤程度^[20]. 在本试验中, 与单独 Cd 处理相比, 外源添加 MT、EBL 和 JA 降低了水稻地上部 MDA 含量, 说明添加 MT、EBL 和 JA 使水稻保持了

细胞膜较高的完整性, 可缓解 Cd 对水稻造成的氧化损伤. 叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素, 含量的高低能够反映光合作用水平的强弱. 但是叶绿素不太稳定, 即使低浓度的 Cd 也会抑制植物光合作用^[21]. 在本研究中, Cd 处理降低了水稻叶片叶绿素含量, 但在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, JA 促进了水稻叶片的光合作用, 提高了叶片的叶绿素含量.

植物在应对非生物胁迫时有两类抗氧化防御系统, 一类是酶促防御系统, 包括过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等; 另一类是非酶促防御系统, 包括一些胡萝卜素、维生素 E 以及谷胱甘肽等^[22]. 酶促防御系统中的 SOD 和 CAT 等几种酶可分别使 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 等转变为活性较低的物质, 降低或消除了它们对膜脂的攻击能力, 使膜脂不致发生过氧化作用而得到保护. MT 作为抵御内部和环境氧化胁迫的第一道防线, 具有可以调节植物的生长、发育和防御各种环境胁迫的作用^[23]. 外源施用或内源性诱导褪黑激素可以增强植物对非生物胁迫的抗性^[24]. EBL 不仅可以缓解低温、高温、盐和碱等非生物胁迫对植物造成的伤害, 也可以缓解重金属对植物的影响^[25,26]. Zhong 等^[27]的研究发现, 将高羊茅暴露于 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 会引起氧化应激, 叶面喷施 EBR 可以减少高羊茅中 ROS 的积累, 并提高基于酶和非酶物质的抗氧化防御系统, 从而恢复叶绿素和类胡萝卜素的生物合成, 提高枝条和根的生物量, 并随后提高高羊茅对 Pb 的耐受性. JA 通过介导营养循环、储存和分配等生理活动, 在营养信号传导和压力管理中发挥了重要作用^[28], 同时还可调节植物在胁迫条件下的抗氧化防御系统的活性. Ahmad 等^[29]的研究表明外源添加 JA 通过减少 Cd 的吸收以及 H_2O_2 和 MDA 含量, 使蚕豆的生长和色素系统有所恢复. 此外, JA 的应用提高了酶促抗氧化剂的活性, 这两者都为植物提供了进一步的保护. 本研究发现, 在 Cd 胁迫下, 水稻体内的 CAT 和 POD 活性与无 Cd 胁迫相比有一定程度降低, 而外源添加 MT、EBL 和 JA 后, 显著提高了水稻体内 CAT、和 POD 的活性, 这表明外源 MT、EBL 和 JA 可通过诱导抗氧化酶活性的提高来增强水稻的抗氧化能力, 以清除 Cd 胁迫下产生的 ROS, 从而缓解 Cd 毒害作用. 在植物抗氧化胁迫过程中, GSH 也被认为是抗氧化系统的一个组成部分, 可以通过调节膜蛋白巯基和二硫键化合物的比例, 维持 ROS 生成和清除之间的平衡, 对植物细胞膜成分起保护作用. 在本试验中, 在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 水稻地上部以及根部中的 GSH 含量与无 Cd 胁迫相比显著增加, 而外源添加植物激素后, 与

相同浓度 Cd 胁迫相比, GSH 含量呈明显的下降趋势, 外源 MT、EBL 和 JA 并没有增加 GSH 的含量, 这有可能是因为 GSH 含有巯基(—SH), 可与 Cd 螯合后将 Cd 拦截在根系表皮细胞的液泡中, 限制其向植物其他部位的转移^[30], 并减少 Cd 对植物其他部位尤其是地上部分的毒害作用, 外源植物激素的添加可能是加速了 GSH 与 Cd 的螯合, 但并未能逆转 GSH 含量的消耗. 这也可能是本试验中降低水稻体内 Cd 积累量的一个因素, 这需要进一步地研究来证明.

Wang 等^[7]的研究发现, 叶面喷施褪黑素显著提高了烟草对 Cd 的耐受性, 其表现为促进植物生长, 从而显著降低了烟草叶片中 Cd 的含量. 而褪黑素浸种也可促进豌豆幼苗的生长, 降低其对 Cd 的吸收与积累^[31]. BR 是一类甾醇类植物激素, 能够激发植物的内在潜能, 在植物生长发育中有着不可替代的作用, 影响植物的细胞分裂和发育, 改善植物代谢, 使作物的耐逆性增强, 从而促进作物的生长和产量的提高^[32]. Khripach 等^[33]的研究证实 EBL 的应用有助于减少萝卜 (*Raphanus sativus*)、大麦 (*Hordeum vulgare*)、番茄 (*Solanum lycopersicon*) 和甜菜 (*Beta vulgaris*) 的金属吸收并调节重金属毒性. Bajguz^[34]的研究也发现, 在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围外源施用 EBL 会显著阻塞藻类细胞对重金属的吸收. 前人在研究 JA 时发现, 与未处理的植物相比, JA 的外源施用分别降低了庭荠、番茄和蚕豆对 Ni^[35]、Pb^[36] 和 Cd^[29] 的吸收和积累, 对重金属胁迫下的生长参数具有明显的正效应. 在本试验中, 水稻对 Cd 的吸收随着浓度的增加而增加, MT、EBL 和 JA 则有效地降低了水稻体内 Cd 的含量, 这可能是 3 种植物激素限制了 Cd 的根冠运输, 从而显著降低了水稻对 Cd 的吸收积累. 可见 3 种植物激素在水稻对重金属胁迫的防御反应中起着至关重要的作用.

4 结论

目前的结果表明, Cd 处理 15 d 导致水稻幼苗体内 Cd 含量增加, 且 Cd 浓度越高, 水稻的吸收积累量越大, 特别是在根部, 导致水稻生长受到抑制并且产生氧化应激, 外源添加 MT、EBL、JA 减轻了 Cd 胁迫产生的生长抑制, 增加了水稻根部和地上部 POD 和 CAT 的活性, 减轻了膜脂过氧化, 降低了水稻吸收积累 Cd 的含量.

参考文献:

- [1] 农业部. 2016. 全国种植业结构调整规划 (2016-2020) [EB/OL]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201604/t20160428_5110638.htm, 2016-04-11.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [3] Van Kerkhove E, Pennemans V, Swennen Q. Cadmium and transport of ions and substances across cell membranes and epithelia [J]. *BioMetals*, 2010, **23**(5): 823-855.
- [4] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 153-159.
- [5] Xu J M, Meng J, Liu X M, *et al.* Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 153-159.
- [6] 豆峻岭, 赵胜杰, 路绪强, 等. 不同倍性西瓜植株生长过程中内源激素的变化 [J]. *中国瓜菜*, 2016, **29**(3): 7-10, 18.
- [7] Dou J L, Zhao S J, Lu X Q, *et al.* Changes of endogenous hormones in different ploidy watermelon during plant development [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2016, **29**(3): 7-10, 18.
- [8] Dubbels R, Reiter R J, Klenke E, *et al.* Melatonin in edible plants identified by radioimmunoassay and by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Pineal Research*, 1995, **18**(1): 28-31.
- [9] Wang M, Duan S H, Zhou Z C, *et al.* Foliar spraying of melatonin confers Cadmium tolerance in *Nicotiana tabacum* L. [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **170**: 68-76.
- [10] Liu N, Jin Z Y, Wang S S, *et al.* Sodic alkaline stress mitigation with exogenous melatonin involves reactive oxygen metabolism and ion homeostasis in tomato [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, **181**: 18-25.
- [11] 王丙烁, 黄益宗, 李娟, 等. 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 746-755.
- [12] Wang B S, Huang Y Z, Li J, *et al.* Effects of different amendments on seed germination and Cadmium uptake and accumulation in rice seedlings under Cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 746-755.
- [13] Tanveer M, Shahzad B, Sharma A, *et al.* 24-Epibrassinolide application in plants: An implication for improving drought stress tolerance in plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, **135**: 295-303.
- [14] Jan S, Alyemeni M N, Wijaya L, *et al.* Interactive effect of 24-epibrassinolide and silicon alleviates Cadmium stress via the modulation of antioxidant defense and glyoxalase systems and macronutrient content in *Pisum sativum* L. seedlings [J]. *BMC Plant Biology*, 2018, **18**(1), doi: 10.1186/s12870-018-1359-5.
- [15] Kohli S K, Handa N, Bali S, *et al.* Modulation of antioxidative defense expression and osmolyte content by co-application of 24-epibrassinolide and salicylic acid in Pb exposed Indian mustard plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **147**: 382-393.
- [16] Wasternack C, Hause B. Jasmonates: biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth and development. An update to the 2007 review in *Annals of Botany* [J]. *Annals of Botany*, 2013, **111**(6): 1021-1058.
- [17] Wasternack C. Action of jasmonates in plant stress responses and development — applied aspects [J]. *Biotechnology Advances*, 2014, **32**(1): 31-39.
- [18] Alam M M, Nahar K, Hasanuzzaman M, *et al.* Exogenous jasmonic acid modulates the physiology, antioxidant defense and

- glyoxalase systems in imparting drought stress tolerance in different *Brassica* species [J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2014, **8**(3): 279-293.
- [16] Chen J, Yan Z Z, Li X Z. Effect of methyl jasmonate on cadmium uptake and antioxidative capacity in *Kandelia obovata* seedlings under Cadmium stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **104**: 349-356.
- [17] Kamal A H M, Komatsu S. Jasmonic acid induced protein response to biophoton emissions and flooding stress in soybean [J]. *Journal of Proteomics*, 2016, **133**: 33-47.
- [18] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 409-417.
- [19] Shahzad B, Tanveer M, Hassan W, *et al.* Lithium toxicity in plants: reasons, mechanisms and remediation possibilities-a review [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, **107**: 104-115.
- [20] Han D, Xiong S L, Tu S X, *et al.* Interactive effects of selenium and arsenic on growth, antioxidant system, arsenic and selenium species of *Nicotiana tabacum* L. [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, **117**: 12-19.
- [21] Akhtar T, Zia-ur-Rehman M, Naeem A, *et al.* Photosynthesis and growth response of maize (*Zea mays* L.) hybrids exposed to Cadmium stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(6): 5521-5529.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao J F. *Experimental guidance for plant physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [23] Zhang N, Zhao B, Zhang H J, *et al.* Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Journal of Pineal Research*, 2013, **54**(1): 15-23.
- [24] Ke Q B, Ye J, Wang B M, *et al.* Melatonin mitigates salt stress in wheat seedlings by modulating polyamine metabolism [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.00914.
- [25] Zhang Y P, He J, Yang S J, *et al.* Exogenous 24-epibrassinolide ameliorates high temperature-induced inhibition of growth and photosynthesis in *Cucumis melo* [J]. *Biologia Plantarum*, 2014, **58**(2): 311-318.
- [26] Sharma A, Kumar V, Thukral A K, *et al.* Epibrassinolide-imidacloprid interaction enhances non-enzymatic antioxidants in *Brassica juncea* L. [J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 2016, **21**(1): 70-75.
- [27] Zhong W X, Xie C C, Hu D, *et al.* Effect of 24-epibrassinolide on reactive oxygen species and antioxidative defense systems in tall fescue plants under lead stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109831.
- [28] Armengaud P, Breitling R, Amtmann A. The potassium-dependent transcriptome of arabidopsis reveals a prominent role of jasmonic acid in nutrient signaling [J]. *Plant Physiology*, 2004, **136**(1): 2556-2576.
- [29] Ahmad P, Alyemeni M N, Wijaya L, *et al.* Jasmonic acid alleviates negative impacts of cadmium stress by modifying osmolytes and antioxidants in faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, **63**(13): 1889-1899.
- [30] 范旭杪, 秦丽, 王吉秀, 等. 植物谷胱甘肽代谢与镉耐性研究进展[J]. *西部林业科学*, 2019, **48**(4): 50-56.
Fan X M, Qin L, Wang J X, *et al.* A review of glutathione metabolism and cadmium tolerance in plants [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, **48**(4): 50-56.
- [31] 唐懿, 任伟, 刘副刚, 等. 褪黑素浸种对豌豆幼苗生长及镉积累的影响[J]. *土壤*, 2018, **50**(1): 109-114.
Tang Y, Ren W, Liu F G, *et al.* Effects of melatonin soaking on growth and cadmium accumulation of pea seedlings [J]. *Soils*, 2018, **50**(1): 109-114.
- [32] 吴杨, 高慧纯, 张必弦, 等. 24-表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(5): 811-821.
Wu Y, Gao H C, Zhang B X, *et al.* Effects of 24-brassinolide on the fertility, physiological characteristics and cell ultra-structure of soybean under saline-alkali stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(5): 811-821.
- [33] Khrpach V A, Voronica L V, Malevannaya N N. *et al.* Preparation for the diminishing of heavy metals accumulation of agricultural plants [J]. *RU Patent Applied*, 1996, **95**: 850.
- [34] Bajguz A. Blockade of heavy metals accumulation in *Chlorella vulgaris* cells by 24-epibrassinolide [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2000, **38**(10): 797-801.
- [35] Kakavand S N, Karimi N, Ghasempour H R. Salicylic acid and jasmonic acid restrains nickel toxicity by ameliorating antioxidant defense system in shoots of metallicolous and non-metallicolous *Alyssum inflatum* Náyr. Populations [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, **135**: 450-459.
- [36] Bali S, Jamwal V L, Kaur P, *et al.* Role of P-type ATPase metal transporters and plant immunity induced by jasmonic acid against lead (Pb) toxicity in tomato [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **174**: 283-294.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)