

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用

刘仕翔^{1,2}, 黄益宗^{1*}, 罗泽娇², 黄永春¹, 蒋航¹

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 中国地质大学(武汉) 环境学院, 武汉 430074)

摘要: 研究添加外源褪黑素对水稻幼芽 Ni 胁迫的缓解作用. 结果表明, 较低浓度 Ni ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫对水稻幼芽根系生长影响不大, 而较高浓度 Ni ($100 \sim 1\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫显著地抑制水稻根系的生长. 与 CK 处理相比, $100 \sim 1\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫导致水稻总根长降低 63.3% ~ 98.0%, 根表面积降低 56.9% ~ 96.3%. 褪黑素的添加能明显地促进 Ni 胁迫下水稻幼芽的生长, 尤其是对幼芽的根系生长促进作用更明显. 当 Ni 胁迫浓度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 两个水稻品种总根长相较于无 Ni 胁迫的对照组降低了 58.4% ~ 83.8%, 在添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理后, 水稻总根长相较于无 Ni 胁迫的对照组仅降低了 8.7% ~ 29.1%. 添加外源褪黑素导致 Ni 胁迫下水稻幼芽的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率和相对电导率显著降低, CAT 活性和可溶性蛋白含量显著提高. 与 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理相比, 添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能显著地降低两种水稻品种 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率 43.2% ~ 50.2%、相对电导率 25.7% ~ 31.6%, 提高 CAT 活性 21.9% ~ 33.7%、可溶性蛋白含量 82.6% ~ 84.6%. 褪黑素可以有效地缓解 Ni 胁迫对水稻幼芽的毒害作用.

关键词: 水稻; 镍; 褪黑素; 抗氧化系统; 毒害

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2017)04-1675-08 **DOI:** 10.13227/j.hj.kx.201609139

Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings

LIU Shi-xiang^{1,2}, HUANG Yi-zong^{1*}, LUO Ze-jiao², HUANG Yong-chun¹, JIANG Hang¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The alleviation effect of exogenous melatonin (MT) on Ni toxicity in rice seedlings was investigated. The results showed that low concentration of Ni stress ($10, 50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) had little effect on the growth of root of rice seedlings, while higher concentration of Ni stress ($100\text{--}1\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) significantly inhibited the growth of rice root. Compared with the control treatment, the addition of 100 and $1\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni would decrease the total length and surface area of root by 63.3%–98.0% and 56.9%–96.3%, respectively. The results showed that addition of exogenous melatonin had a positive effect on the growth of rice seedlings under Ni stress. This kind of positive effect was even more obvious in the root of rice seedlings. The total length of rice root decreased by 58.4%–83.8% at Ni concentration of $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, whereas it decreased by only 8.7%–29.1% when $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni and $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT were added, compared with the control treatment. The addition of exogenous melatonin had significant alleviation effects on oxidative stress in rice seedlings caused by Ni. Compared with the $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni treatment, addition of $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ exogenous MT could significantly decrease the production rate of $\text{O}_2^{\cdot-}$ by 43.2%–50.2% and the relative electrolytic leakage by 25.7%–31.6%, whereas increase the activities of CAT by 21.9%–33.7% and the soluble protein content by 82.6%–84.6%. The results suggested that application of exogenous melatonin could effectively alleviate the toxic effects of Ni on rice seedlings.

Key words: rice; Ni; melatonin (MT); antioxidant system; toxicity

随着工农业生产的迅速发展, 污染物在环境中的不断累积, 导致土壤环境污染日益严重^[1~3], 尤其是土壤重金属污染因其高富集、难降解、毒性强等特点而越来越被人们所关注. 众所周知有些重金属是植物所必需营养元素, 而多数为植物非必需元素, 所有的重金属元素当浓度超过某一阈值, 都会对植物产生毒害作用. 重金属胁迫将导致植物体代谢功能紊乱, 生长发育受影响, 严重时甚至导致植物死亡. 镍(Ni)是一种重金属元素, 它是植物必需的微量元素, 但当环境中 Ni 含量超过一定浓度就会对植物体产生毒害作用^[4]. 据 2014 年环保部和国土资源部联合发布的全国土壤污染状况调查公报显示,

无机污染物指标中, Ni 超标率为 4.8%, 仅次于 Cd 的 7.0%, 是我国耕地主要污染物之一^[5]. Ni 胁迫对植物的毒害作用已有较多报道, Ni 毒害表现为抑制种子萌发、影响幼苗根和茎叶生长、导致植物体内活性氧代谢失衡、降低作物产量^[6, 7], 因此如何防治 Ni 胁迫对植物的毒害具有十分重要的现实意义.

褪黑素(melatonin, MT)又名褪黑激素, 是一种

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-11-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02)

作者简介: 刘仕翔(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: liushixiang@2014.cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yizonghuang@126.com

结构简单的小分子量分子,分子式为 $C_{13}N_2H_{16}O_2$, 相对分子质量 232.17, 熔点为 $116 \sim 118^\circ\text{C}$ 。褪黑素广泛存在于动植物体内,具有亲水和亲脂双重性质,能自由进出细胞。早期褪黑素的研究主要集中在哺乳动物,有研究发现 MT 与生物的个体发育、生殖、中枢神经等调节有关^[8]。随着检测技术的进步,人们已经在许多植物中发现褪黑素。有研究表明褪黑素对植物逆境胁迫有着显著的缓解作用^[9],这些研究主要集中在植物抵御干旱^[10]、低温^[11]、高盐^[12]、UV 辐射^[13]、化学胁迫^[14]等方面。褪黑素不仅可以作为一种自由基清除剂,还可以通过提高抗氧化系统酶活性来抑制活性氧产生,提高植物抵御各种环境胁迫。包宇等^[15]研究发现褪黑素添加可有效缓解番茄幼苗低温胁迫,与对照组相比,番茄叶片的 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶活性均有一定程度的提高,膜脂过氧化程度降低。有研究报道在重金属胁迫下,植物体内褪黑素含量有明显的升高,这暗示内源褪黑素产生是植物应对逆境的一种生理反应^[16]。笔者最近的研究表明添加褪黑素可缓解 Cd 胁迫下水稻的种子萌发,促进水稻幼苗生长^[17],但是褪黑素在植物 Ni 胁迫的影响情况还未见报道。本实验以水稻为材料,研究褪黑素对 Ni 胁迫下水稻幼芽生长的影响,以期为农业生产中作物 Ni 毒害防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

水稻品种为早稻潭两优 83 和晚稻 T2 优 369 (以下以 X83 和 X369 表示)。选取饱满的水稻种子,在实验前均用 3% NaClO 浸泡消毒 10 min,去离子水反复冲洗 4~5 遍。

1.2 实验设计

Ni 胁迫浓度的筛选:将消毒洗净后的水稻种子置于培养皿中浸种 1 d,挑选整齐露白的种子置于铺有一层滤纸的 9 cm 培养皿中,每盘 20 粒,摆好种子后向培养皿中加入 8 mL Ni 处理液(7 个处理浓度分别为 0、10、50、100、200、500、1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),每个处理重复 3 次,Ni 以 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 形式加入。将培养皿放置在 28°C 生化培养箱中暗培养,记录每个培养皿重量,并用称重法补充蒸发的水分。处理 4~5 d 后取样。

MT 缓解水稻 Ni 胁迫浓度筛选:将消毒洗净后的水稻种子置于培养皿中浸种 1 d,挑选整齐露白的种子置于铺有一层滤纸的 9 cm 培养皿中,每盘 20

粒,摆好种子后向培养皿中加入 8 mL 处理液。处理液设置 7 个 MT 浓度(CK1、CK2、1、5、10、50、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),Ni 处理浓度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每个处理重复 3 次。其中,CK1 表示正常生长的水稻幼芽,无 Ni 胁迫处理,未添加褪黑素;CK2 表示水稻幼芽仅受 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理,而未添加褪黑素。将培养皿放置在 28°C 生化培养箱中暗培养,记录每个培养皿重量,并用称重法补充蒸发的水分。处理 4~5 d 后取样。

MT 缓解水稻 Ni 胁迫实验:将消毒洗净后的水稻种子置于培养皿中浸种 1 d,挑选整齐露白的种子置于育苗盆中,摆好种子后向育苗盆中加入等量处理液,使得处理液刚好接触种子。设置 4 个处理:CK、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni、10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni + 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT。每个处理重复 3 次。将育苗盆放置在 28°C 生化培养箱中暗培养,记录每个育苗盆重量,并用称重法补充蒸发的水分。处理 4~5 d 后取样。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标测定

培养 4~5 d 后测定水稻幼芽的根长、芽长、根鲜重和芽鲜重,其中芽鲜重、根鲜重按每 10 粒计算。

1.3.2 生理指标测定

超氧阴离子产生速率、可溶性蛋白含量、CAT 活性和相对电导率的测定均参考文献[18]中的方法。主要测定步骤如下所述。

取 0.5 g 幼芽,用 10 mL 提取液($\text{pH}=7.0$ 的 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸钾缓冲液,其中包含 1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA,1% PVP-30)进行冰浴研磨,随后提取液在 $16\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 4°C 下离心 15 min。取上清液进行后续测定。

可溶性蛋白含量选用考马斯亮蓝法测定:吸取 0.1 mL 样品提取液,加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂,摇匀静置 10 min 后测定 595 nm 处吸光值,通过标准曲线,换算成样品中可溶性蛋白含量。CAT 活性测定使用分光光度法,以每分钟减少 0.1 为 1 个 H_2O_2 活性单位(U),在求得每克鲜样中 CAT 活性后,换算成 CAT 比活力。 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率使用羟胺氧化法。电导率用电导仪进行测定,将 0.5 g 洗净、拭干的样品置于烧杯中,加入 20 mL 去离子水后静置 4 h,用手持电导仪(梅特勒 SG3)测定电导值 R_1 ,置于沸水中煮 15 min,冷却至室温后测外渗液电导值 R_2 ,相对电导率 $= R_1/R_2 \times 100\%$ 。

采用根系扫描仪 (Epson Expression 10000XL) 对水稻根系进行扫描,并用 WinRhizo 根系分析软件进行根形态指标分析.

1.4 数据处理

本实验数据采用 Origin 9.0 和 SPSS 19 统计软件进行分析及差异显著性检验. 对不同处理数据进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示.

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Ni 对水稻幼芽的胁迫作用

表 1 为不同浓度 Ni 对水稻幼芽生长的影响,从表中可以看出高浓度 Ni 对水稻幼芽有明显的胁迫作用 ($P < 0.05$),而低浓度 Ni 对水稻幼芽无明显毒害作用. 根系扫描结果显示,与对照组相比,当 Ni 胁迫浓度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,总根长、根表面积等指标降幅均超过 50%. 以 X83 为例,与对照处理相比, $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 对水稻根系生长未表现出显著差异 ($P > 0.05$). 与对照处理相比, 100 、 200 、 500 和 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫对水稻 X83 根系生长有显著负面影响 ($P < 0.05$),其对水稻总根长分别降低了 63.3%、78.4%、95.8% 和 98.0%,对根表面积分别降低了 56.9%、71.3%、94.7% 和 96.3%. 不同浓度 Ni 对 X369 根系生长的影响与 X83 相似,均在 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 时开始出

现明显胁迫症状,因此选用该浓度作为下阶段实验 Ni 胁迫浓度.

2.2 不同浓度 MT 对水稻幼芽 Ni 胁迫的缓解作用

表 2 为不同 MT 添加对水稻幼芽 Ni 胁迫的影响. 从中可以看出当添加褪黑素浓度为 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对 X83 和 X369 的缓解效果最为明显 ($P < 0.05$),而较低浓度褪黑素 ($1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和较高浓度褪黑素 ($50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 对 Ni 胁迫的缓解作用相对较低或无明显缓解作用. 以 X369 为例,与对照处理 (CK1) 相比,在 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫时,水稻幼芽总根长和根表面积分别降低了 58.4% 和 55.0%,当添加 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素浓度时,相较于无 Ni 胁迫的对照处理,水稻幼芽总根长仅降低了 33.2% 和 8.7%,根表面积分别下降了 23.3% 和 9.7%; 1 、 50 和 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素添加时,对 Ni 胁迫的缓解作用相对较低或无明显缓解作用,并没有表现出显著差异. 不同浓度褪黑素对 Ni 胁迫下 X83 根系生长的影响与 X369 接近,均在 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有明显的缓解作用,其中 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 对两个水稻品种影响均最为显著. 与无 Ni 胁迫的处理相比,在添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理后,水稻总根长仅降低了 8.7% ~ 29.1%,显著低于仅有 Ni 胁迫的 58.4% ~ 83.8%. 因此选择该浓度作为下一阶段 MT 添加浓度.

表 1 不同浓度 Ni 胁迫对水稻幼芽根系形态相关参数的影响¹⁾

Table 1 Effects of Ni stress on rice root parameters						
品种	Ni 处理 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	总根长 / $\text{cm}\cdot\text{plant}^{-1}$	根表面积 / $\text{cm}^2\cdot\text{plant}^{-1}$	根体积 / $\text{cm}^3\cdot\text{plant}^{-1}$	根尖数	根分叉数
X369	0 (CK)	13.71 $\pm$ 2.53a	1.54 $\pm$ 0.39a	0.014 $\pm$ 0.004a	60.00 $\pm$ 29.55a	89.67 $\pm$ 27.06a
	10	12.30 $\pm$ 3.02a	1.19 $\pm$ 0.31ab	0.009 $\pm$ 0.003b	49.33 $\pm$ 10.02a	62.00 $\pm$ 31.48a
	50	15.58 $\pm$ 5.21a	1.15 $\pm$ 0.10b	0.007 $\pm$ 0.002bc	63.67 $\pm$ 26.58a	65.67 $\pm$ 24.03a
	100	4.60 $\pm$ 0.61b	0.48 $\pm$ 0.11c	0.004 $\pm$ 0.001cd	17.67 $\pm$ 7.57b	10.00 $\pm$ 2.65b
	200	3.08 $\pm$ 1.07b	0.28 $\pm$ 0.07c	0.002 $\pm$ 0.000d	12.00 $\pm$ 4.00b	5.33 $\pm$ 2.31b
	500	0.64 $\pm$ 0.41b	0.11 $\pm$ 0.08c	0.002 $\pm$ 0.001d	3.67 $\pm$ 2.08b	2.00 $\pm$ 2.65b
	1000	1.27 $\pm$ 0.74b	0.13 $\pm$ 0.08c	0.001 $\pm$ 0.001d	7.00 $\pm$ 3.61b	12.33 $\pm$ 15.37b
X83	0 (CK)	20.12 $\pm$ 4.37a	1.66 $\pm$ 0.37a	0.011 $\pm$ 0.003a	114.67 $\pm$ 44.41a	108.00 $\pm$ 26.89a
	10	26.98 $\pm$ 5.02a	1.79 $\pm$ 0.34a	0.010 $\pm$ 0.002a	136.67 $\pm$ 38.48a	125.00 $\pm$ 40.11a
	50	19.97 $\pm$ 8.54a	1.56 $\pm$ 0.41a	0.010 $\pm$ 0.001a	115.00 $\pm$ 68.23a	105.33 $\pm$ 71.91a
	100	7.39 $\pm$ 2.16b	0.72 $\pm$ 0.19b	0.005 $\pm$ 0.002b	25.00 $\pm$ 8.72b	20.33 $\pm$ 8.08b
	200	4.35 $\pm$ 0.79b	0.48 $\pm$ 0.07bc	0.004 $\pm$ 0.000b	15.67 $\pm$ 3.06b	18.33 $\pm$ 12.70b
	500	0.85 $\pm$ 0.22b	0.09 $\pm$ 0.02c	0.001 $\pm$ 0.000c	10.67 $\pm$ 3.51b	1.33 $\pm$ 0.58b
	1000	0.40 $\pm$ 0.13b	0.06 $\pm$ 0.03c	0.001 $\pm$ 0.000c	2.33 $\pm$ 0.58b	0.33 $\pm$ 0.58b

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

2.3 褪黑素添加对 Ni 胁迫下水稻幼芽生长的影响

图 1 表示 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素添加对 Ni 胁迫下水稻幼芽地上部和根部生长的影响,从中可以看出

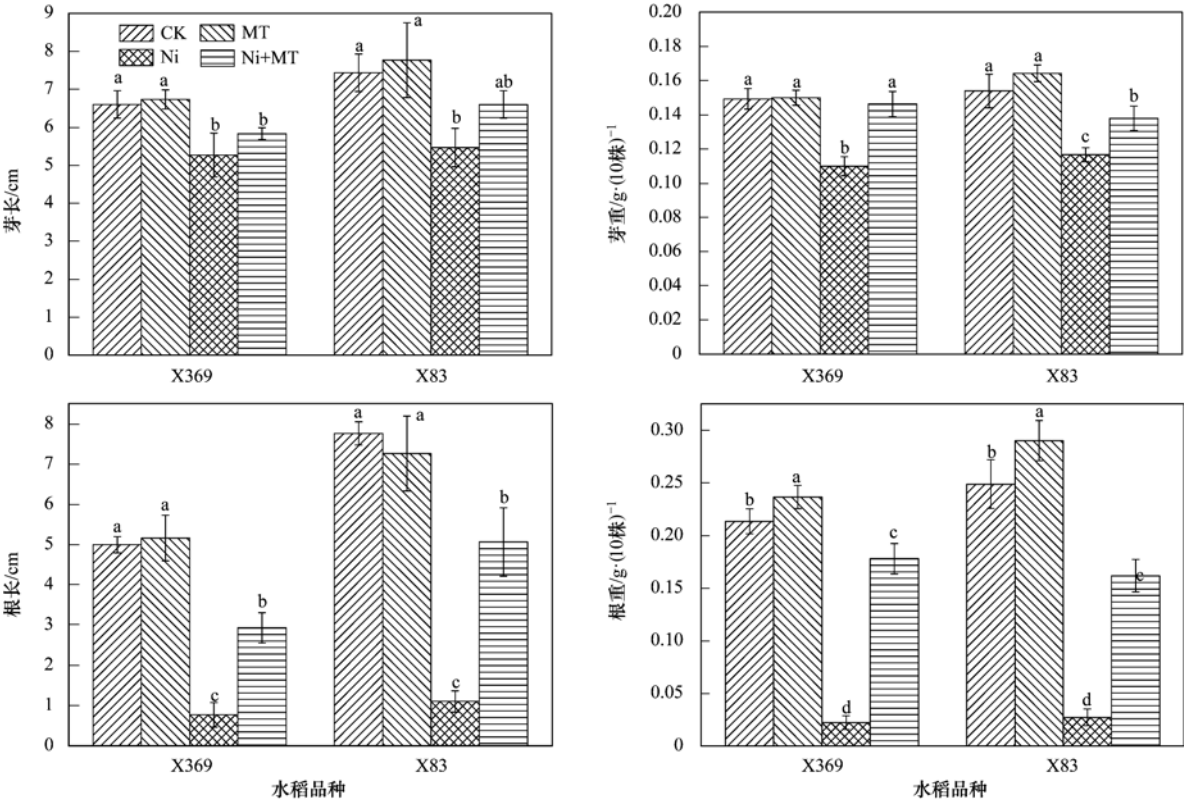
Ni 胁迫可明显抑制水稻根芽的生长. 在无 Ni 胁迫的情况下添加褪黑素对水稻芽生长无明显影响,对根长影响也不显著,但明显提高了根鲜重. 当水稻

表 2 褪黑素对 Ni 胁迫下 (100 μmol·L⁻¹) 水稻幼芽根系形态相关参数的影响¹⁾

Table 2 Effects of exogenous melatonin on rice root parameters under Ni stress

品种	MT 处理 /μmol·L ⁻¹	总根长 /cm·plant ⁻¹	根表面积 /cm ² ·plant ⁻¹	根体积 /cm ³ ·plant ⁻¹	根尖数	根分叉数
X369	CK1	13.77 ± 1.63a	1.24 ± 0.29a	0.009 ± 0.003a	153.33 ± 29.74a	102.00 ± 24.02a
	CK2	5.73 ± 2.30c	0.56 ± 0.23b	0.004 ± 0.002b	25.33 ± 7.57d	23.67 ± 14.22c
	1	9.45 ± 3.03bc	0.92 ± 0.17ab	0.007 ± 0.001ab	60.00 ± 7.94bcd	42.00 ± 38.16abc
	5	9.20 ± 3.48bc	0.95 ± 0.24ab	0.007 ± 0.001ab	51.33 ± 42.16cd	62.00 ± 38.00abc
	10	12.57 ± 0.48ab	1.12 ± 0.05a	0.007 ± 0.000ab	97.00 ± 12.77b	95.33 ± 10.21ab
	50	8.90 ± 0.92bc	0.99 ± 0.20ab	0.007 ± 0.002ab	68.67 ± 5.03bc	86.33 ± 52.54ab
	100	7.27 ± 2.24c	0.87 ± 0.30ab	0.007 ± 0.004ab	61.33 ± 7.57bcd	37.33 ± 20.13bc
X83	CK1	26.51 ± 0.95a	1.91 ± 0.22a	0.011 ± 0.003a	154.67 ± 41.2a	186.00 ± 22.91a
	CK2	4.28 ± 0.78d	0.40 ± 0.07c	0.003 ± 0.001c	21.00 ± 4.00c	13.33 ± 7.64d
	1	6.36 ± 1.18cd	0.55 ± 0.15c	0.004 ± 0.002bc	32.00 ± 4.00c	22.33 ± 10.41d
	5	20.66 ± 0.98b	1.45 ± 0.17b	0.007 ± 0.001b	131.33 ± 46.49ab	150.67 ± 18.04b
	10	18.8 ± 1.08b	1.48 ± 0.26b	0.010 ± 0.003a	104.33 ± 16.17b	111.33 ± 19.01c
	50	4.46 ± 1.43d	0.55 ± 0.16c	0.005 ± 0.001bc	21.33 ± 11.68c	26.00 ± 9.85d
	100	7.21 ± 2.81c	0.66 ± 0.12c	0.005 ± 0.00bc	34.67 ± 10.02c	44.67 ± 26.95d

1) CK1 表示正常生长的水稻幼芽,无 Ni 胁迫处理,未添加褪黑素;CK2 表示水稻幼芽仅受 100 μmol·L⁻¹ Ni 胁迫处理,而未添加褪黑素



CK;0 μmol·L⁻¹ Ni +0 μmol·L⁻¹ MT;MT;0 μmol·L⁻¹ Ni +10 μmol·L⁻¹ MT;Ni;100 μmol·L⁻¹ Ni +0 μmol·L⁻¹ MT;
Ni + MT;100 μmol·L⁻¹ Ni +10 μmol·L⁻¹ MT; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05),下同

图 1 外源褪黑素对 Ni 胁迫下水稻根长、芽长、根重和芽重的影响

Fig. 1 Effects of exogenous melatonin on fresh weight and length of rice seedlings

受到 Ni 胁迫时,添加外源褪黑素对水稻幼芽生长抑制有明显的缓解作用,其中水稻幼芽根系生长的影响较地上部生长的影响更为明显. 以 X369 为例,在仅添加褪黑素时,水稻芽长、根长和芽重与对照处理(CK)相比均无显著性差异 (P > 0.05),根重与对

照处理相比呈显著差异 (P < 0.05),提高 10.8%. 在仅有 100 μmol·L⁻¹ Ni 胁迫时,相较于对照处理,水稻芽长和根长分别下降 20.2% 和 84.7%,芽重和根重分别下降 26.3% 和 89.6%,但是当添加 10 μmol·L⁻¹ 外源褪黑素后,Ni 对水稻芽和根生长的抑

制作用有明显的降低($P < 0.05$),与对照处理相比,添加褪黑素后水稻芽长和根长分别仅下降了 11.6% 和 41.3%,芽重和根重分别下降 2.0% 和 16.6%.

2.4 褪黑素添加对水稻幼芽氧化胁迫及蛋白含量的影响

图 2 表示褪黑素添加对水稻幼芽相对电导率的影响,从中看出褪黑素添加可显著降低 Ni 胁迫下水稻幼芽的电导率($P < 0.05$).以 X369 为例,与对照处理相比,在无 Ni 胁迫的情况下,仅添加褪黑素对水稻幼芽相对电导率无明显影响,而 Ni 胁迫处理明显提高水稻幼芽的相对电导率,达到 26.7%;添加褪黑素能明显降低 Ni 胁迫导致的水稻幼芽电导率的增加.同样,X83 品种也看出相同的趋势.与 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理相比,添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能显著地降低两种水稻品种相对电导率 25.7% ~ 31.6%.

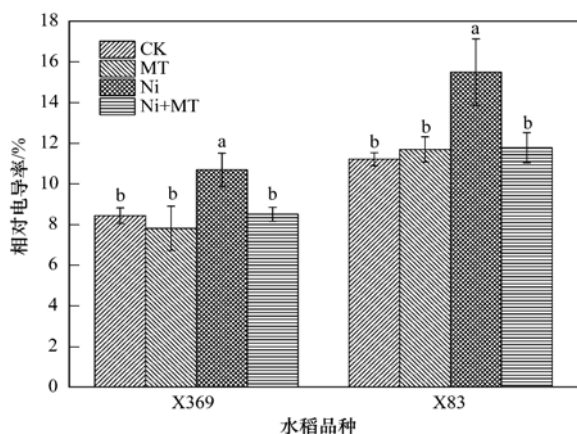


图 2 褪黑素对 Ni 胁迫下水稻幼芽相对电导率的影响

Fig. 2 Effects of melatonin on relative electrolytic leakage in rice seedlings under Ni stress

褪黑素添加对水稻幼芽 CAT 活性的影响如图 3 所示,褪黑素添加能明显提高 Ni 胁迫下水稻幼芽的 CAT 活性($P < 0.05$).以 X369 为例,与对照处理相比,除了单独添加褪黑素处理对水稻幼芽 CAT 活性无明显影响外, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 和 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni + $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理分别导致水稻幼芽 CAT 活性提高 25.2% 和 52.5%.水稻品种 X83 也表现出相似的规律.与 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理相比,添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能显著地提高两种水稻品种 CAT 活性 21.9% ~ 33.7%.

添加外源褪黑素对水稻幼芽 O_2^- 产生速率的影响如图 4 所示,褪黑素的添加能明显降低 Ni 胁迫下水稻幼芽 O_2^- 产生速率($P < 0.05$).以 X369 为例,

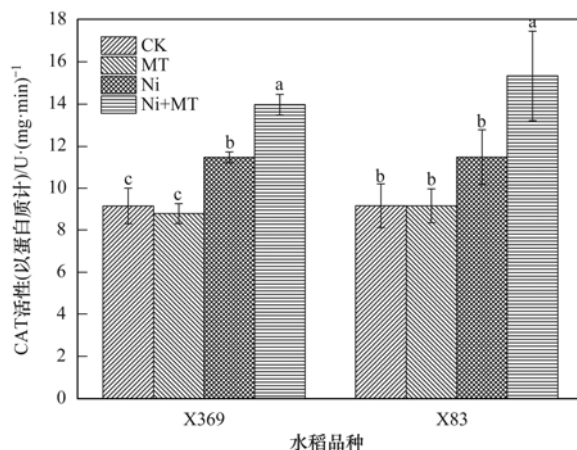


图 3 褪黑素对 Ni 胁迫下水稻幼芽 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effects of melatonin on CAT activity in rice seedlings under Ni stress

在无 Ni 胁迫时,褪黑素添加对 O_2^- 产生速率无明显影响.单独 Ni 胁迫时,水稻体内 O_2^- 产生速率比对照组提高 130.8%,而 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni + $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理仅比对照组提高 53.7%.X83 品种也看出相同的趋势.与 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理相比,添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能显著地降低两种水稻品种 O_2^- 产生速率 43.2% ~ 50.2%.

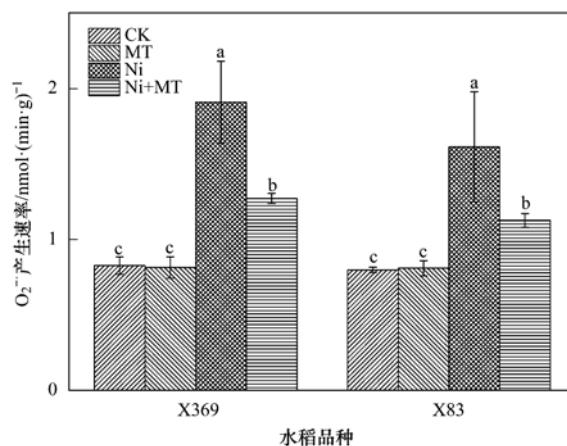


图 4 褪黑素对 Ni 胁迫下水稻幼芽 O_2^- 产生速率的影响

Fig. 4 Effects of melatonin on O_2^- production rate in rice seedlings under Ni stress

图 5 表示添加外源褪黑素对水稻幼芽可溶性蛋白含量的影响.褪黑素的添加能明显提高 Ni 胁迫下水稻幼芽的可溶性蛋白含量.以 X369 为例,单独 Ni 胁迫时水稻体内可溶性蛋白含量比对照组降低 46.9% ($P < 0.05$),与单独 Ni 胁迫处理相比, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni + $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理显著提高水稻幼芽体内的可溶性蛋白含量.与 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ni 胁迫处理相比,添加 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能显著提高两种水稻品种可溶性蛋白含量 82.6% ~ 84.6%.

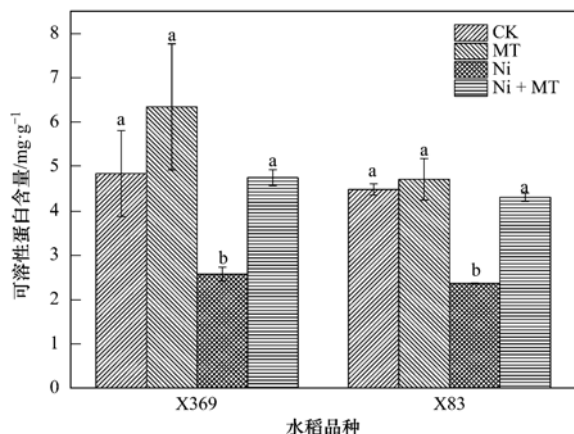


图5 褪黑素对Ni胁迫下水稻可溶性蛋白含量的影响

Fig. 5 Effects of melatonin on soluble protein content in rice seedlings under Ni stress

3 讨论

自1958年Lerner等^[19]首次从牛的松果体分离出褪黑素后,在很长一段时间内,人们认为褪黑素是仅存在于动物的一类神经激素^[8],直至近年,其对植物体逆境胁迫方面的作用才逐渐受到重视.本实验研究表明褪黑素添加对水稻Ni胁迫有一定的缓解作用,特别是在缓解Ni胁迫导致的水稻根系生长抑制上效果显著.

本研究结果显示水稻根系生长在低浓度Ni胁迫下有一定的促进作用,但是当Ni浓度提高时,水稻根系生长表现出明显的抑制作用,这一抑制作用在地上部表现得并没有根部明显,这与前人的研究结果相似,即Ni对植物体的胁迫作用在其达到较高浓度时才会表现出来,同时这种胁迫作用首先表现在根部,其次才是地上部^[20].褪黑素添加能明显促进水稻幼芽根系生物量的积累,这可能是由于褪黑素能促进水稻根系的新陈代谢过程,加快水稻根系发育,而褪黑素对水稻地上部的影响没有那么明显,这与笔者最近的研究结果相类似^[17].

褪黑素对植物体的作用具有较强的浓度依赖性,对于同一品种植物体,不同浓度褪黑素对植物体所受胁迫作用可能是缓解,也可能是加剧相关胁迫作用. Posmyk等^[21]研究了不同浓度褪黑素前处理对红叶卷心菜Cu胁迫下种子萌发的影响,发现经过 $1\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理后,对无Cu胁迫和有Cu胁迫处理种子的萌发均有促进作用,而 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理却不利于种子的萌发. Tiriyaki等^[22]研究艾菊叶法色草种子经过褪黑素前期处理后,发芽率和发芽时间都有明显变化,当褪黑素浓度较高时,褪黑素的影响偏负面.本实验

在研究不同MT浓度处理对水稻Ni胁迫的缓解情况时,发现 $5\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素对Ni胁迫下水稻幼芽根系生长的影响最为明显,水稻总根长、总表面积、总体积和分叉数等均比对照处理明显提高,根长、芽长、根重和芽重也比对照处理显著提高,而低浓度和高浓度褪黑素的缓解作用相对较低或无明显缓解作用. Weeda等^[23]利用转录组分析发现拟南芥经过褪黑素处理16h后,低浓度褪黑素处理时,有81个基因的转录水平发生明显变化,其中30个上调,51个下调;高浓度褪黑素处理时,1308个基因发生明显变化,其中566个上调,742个下调,同时并不是所有被低浓度影响的基因都会被高浓度影响,这也侧面说明了不同浓度褪黑素在植物中的作用不尽相同.由此可见,在使用褪黑素进行植物逆境胁迫缓解研究时,提前筛选合适的处理浓度有着重要的作用.

植物体需要微量Ni维持正常的生命活动,但过量Ni胁迫将会导致植物体内活性氧大量产生和积累,膜脂过氧化加剧,质膜透性显著增大^[24].在本实验未添加褪黑素的处理中,添加高浓度Ni($100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫明显提升水稻幼芽中 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率,水稻体内CAT活性一定程度的提高并未能阻止活性氧在其体内的积累.活性氧积累加剧了水稻体内膜脂过氧化,使得细胞内可溶性物质外渗,最终表现为水稻幼芽体内相对电导率增加.同时,高浓度Ni胁迫也明显降低了水稻幼芽中可溶性蛋白含量,这可能是由于高浓度Ni胁迫直接或间接影响了植物体内蛋白质的合成以及蛋白酶的活性.本研究实验结果表明,高浓度Ni胁迫下, $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素的添加显著地提高了水稻幼芽CAT活性,降低了 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率,从而有效地缓解了水稻幼芽的膜脂过氧化,并表现为水稻幼芽体内相对电导率的下降.同时,适宜浓度褪黑素添加显著提高Ni胁迫下水稻幼芽的可溶性蛋白含量,这与Hasan等^[25]在研究褪黑素缓解西红柿Cd胁迫所得的结果相吻合,该研究发现褪黑素处理的西红柿体内不仅谷胱甘肽含量明显增加,植物螯合肽等含量也较之对照组有明显升高.

4 结论

(1)高浓度Ni胁迫对水稻幼芽生长有明显的抑制作用,适宜浓度外源褪黑素的添加对Ni胁迫下水稻幼芽生长有明显的促进作用,但是外源褪黑素浓度过高时则未表现出明显的促进作用.

(2) 添加外源褪黑素显著提高 Ni 胁迫下水稻幼芽抗氧化酶 CAT 的活性,降低 O_2^- 产生速率,进而降低了 Ni 胁迫下水稻幼芽的相对电导率,说明添加外源褪黑素能有效缓解 Ni 胁迫导致的水稻幼芽膜脂过氧化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang river basin [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 260-265.
- [3] 张连科,李海鹏,黄学敏,等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.
Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [4] 黄锦孙,韦东普,郭雪雁,等. 田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1369-1375.
Huang J S, Wei D P, Guo X Y, *et al.* Toxicity and accumulation of copper and nickel in wheat plants cropped on alkaline and acidic field soils[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1369-1375.
- [5] 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.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National survey of soil pollution[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [6] 胡欣欣. 土壤钴、镍向植物的转移及毒害效应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
Hu X X. Study on the transfer characteristics of cobalt and nickel from soils to plants and their toxicity to plants[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [7] 马贵. 镍胁迫对玉米萌发和早期生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(32): 18029-18030, 18034.
Ma G. Effect of nickel stress on germination and seedling growth of maize[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(32): 18029-18030, 18034.
- [8] Tan D X, Hardeland R, Manchester L C, *et al.* The changing biological roles of melatonin during evolution: from an antioxidant to signals of darkness, sexual selection and fitness[J]. Biological Reviews, 2010, **85**(3): 607-623.
- [9] Zhang N, Sun Q Q, Zhang H J, *et al.* Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, **66**(3): 647-656.
- [10] 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.
- [11] Turk H, Erdal S. Melatonin alleviates cold-induced oxidative damage in maize seedlings by up-regulating mineral elements and enhancing antioxidant activity[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, **178**(3): 433-439.
- [12] 王丽英. 褪黑素预处理对黄瓜幼苗耐盐性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
Wang L Y. Effects of melatonin pretreatment on salt tolerances of cucumber seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [13] 王英利,王英娟,郝建国,等. 褪黑素对绿豆在增强 UV-B 辐射下的防护作用[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2629-2633.
Wang Y L, Wang Y J, Hao J G *et al.* Defend effects of melatonin on mung bean under UV-B irradiation [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, **38**(10): 2629-2633.
- [14] 孙莎莎,巩彪,温丹,等. 对羟基苯甲酸胁迫下褪黑素对黄瓜胚根生理生化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 897-903.
Sun S S, Gong B, Wen D, *et al.* Effect of exogenous melatonin on physiological and biochemical characteristics of cucumber radicles under *p*-hydroxybenzoic acid [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(3): 897-903.
- [15] 包宇,罗庆熙,黄娟,等. 外源褪黑素对低温胁迫下番茄幼苗生理指标的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, **38**(10): 57-61.
Bao Y, Luo Q X, Huang J, *et al.* Effect of exogenous melatonin on physiological indexes of tomato seedling under low temperature stress [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2013, **38**(10): 57-61.
- [16] Tal O, Haim A, Harel O, *et al.* Melatonin as an antioxidant and its semi-lunar rhythm in green macroalga *Ulva* sp.[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(6): 1903-1910.
- [17] 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.
- [18] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] Lerner A B, Case J D, Takahashi Y. Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, **80**(10): 2587.
- [20] 康立娟,谢忠雷. 镍对玉米和水稻污染效应及累积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2315-2318.
Kang L J, Xie Z L. Pollution effects and accumulation rules of nickel in corn and rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(6): 2315-2318.
- [21] Posmyk M M, Kuran H, Marciniak K, *et al.* Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations[J]. Journal of Pineal Research, 2008, **45**(1): 24-31.
- [22] Tiryaki I, Keles H. Reversal of the inhibitory effect of light and high temperature on germination of *Phacelia tanacetifolia* seeds by melatonin[J]. Journal of Pineal Research, 2012, **52**(3): 332-

- 339.
- [23] Weeda S, Zhang N, Zhao X L, *et al.* Arabidopsis transcriptome analysis reveals key roles of melatonin in plant defense systems [J]. PLoS One, 2014, **9**(3): e93462.
- [24] 胡泽友, 邓小波, 彭喜旭, 等. 外源钙对镍胁迫下水稻幼苗抗氧化酶活性及膜脂过氧化的影响 [J]. 中国水稻科学, 2007, **21**(4): 367-371.
- Hu Z Y, Deng X B, Peng X X, *et al.* Effects of external calcium on activities of antioxidant enzymes and membrane lipid peroxidation in rice seedlings under nickel stress [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, **21**(4): 367-371.
- [25] Hasan M K, Ahammed G J, Yin L L, *et al.* Melatonin mitigates cadmium phytotoxicity through modulation of phytochelatin biosynthesis, vacuolar sequestration, and antioxidant potential in *Solanum lycopersicum* L [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, **6**: 601.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Fouling Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)