

# 目次

|                                                                 |                                                           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响 .....                                      | 朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)                                  |
| 不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析 .....                                 | 秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)                                        |
| 不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异 .....                                        | 陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧玮, 胡建林 (635)                 |
| 2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析 .....                           | 郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)                         |
| 基于大气成分观测网的山西省近地面O <sub>3</sub> 体积分数分布特征 .....                   | 李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)                    |
| 伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 .....                                        | 王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)                |
| 运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种 .....                                   | 阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)                  |
| 郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析 .....                           | 赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晚, 张瑞芹 (689)                          |
| 郑州市PM <sub>2.5</sub> 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成 .....                  | 李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晚, 张瑞芹 (700)                          |
| 中国三大城市群PM <sub>2.5</sub> 浓度非线性变化分析 .....                        | 吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)                                  |
| 基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析 .....                             | 吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)                           |
| 碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化 .....                                       | 郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)                                    |
| 考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析 .....                            | 马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)                           |
| 我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析 .....                                     | 韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)                                       |
| 不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响 .....                               | 谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)                           |
| 深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应 .....                          | 韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)                                  |
| 河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析 .....                                  | 王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)                           |
| 北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析 .....                                        | 郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)                      |
| 店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析 .....                                   | 郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)                                        |
| 张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析 .....                                  | 金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)                        |
| 黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布 .....                                      | 闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)                              |
| 制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法 .....                                 | 彭安萍, 高虎, 张新波 (844)                                        |
| 水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响 .....                                      | 汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)                    |
| 富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除 .....                                         | 刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)                               |
| 壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd <sup>2+</sup> 的吸附机制 .....                  | 姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)                   |
| 硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制 .....                                         | 邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)                                |
| 磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性 .....                                   | 韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)                    |
| 广东省高分辨率温室气体排放清单及特征 .....                                        | 卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)  |
| 辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO <sub>2</sub> 交换及其环境调控 .....                  | 刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)                          |
| 生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N <sub>2</sub> O和CH <sub>4</sub> 排放的影响 ..... | 胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)                    |
| 生物炭改良盐碱地研究与应用进展 .....                                           | 魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)                       |
| 免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析 .....                                   | 徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)           |
| 黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例 .....                        | 李月, 罗红芬 (961)                                             |
| 不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响 .....                                     | 李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)                    |
| Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制 .....                                   | 张超, 翟付杰, 单保庆 (983)                                        |
| 秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素 .....                               | 闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)                              |
| 我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险 .....                                 | 杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)              |
| 广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估 .....                                        | 邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015) |
| 基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析 .....                                    | 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)                                       |
| 基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析 .....           | 罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)        |
| 基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估 .....                                 | 袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)                           |
| 基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析 .....                       | 沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)               |
| PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制 .....                                   | 王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)                                   |
| 氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性 .....                                          | 李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)                |
| 昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析 .....                                   | 张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)                |
| 钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果 .....                                       | 王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)                             |
| 氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复 .....                                  | 袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)                       |
| 关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响 .....                                   | 周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)                 |
| 外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响 .....                                  | 张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)            |
| 稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应 .....                                     | 张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)      |
| 根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用 .....                                    | 郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)             |
| 高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应 .....                         | 胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)           |
| 微塑料的人体富集及毒性机制研究进展 .....                                         | 包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)                             |
| 机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展 .....                                 | 白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)                    |
| 微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展 .....                                   | 侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)                    |
| 水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展 .....                                      | 郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)                                      |
| 基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素 .....                                | 郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)                                      |

# 稀土元素铈对锌胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应

张静静<sup>1</sup>, 徐正阳<sup>1</sup>, 焦秋娟<sup>1</sup>, 范丽娜<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1</sup>, 赵颖<sup>1</sup>, 宋佳<sup>1</sup>, 化党领<sup>1</sup>, 李鸽子<sup>2</sup>, 柳海涛<sup>1\*</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046; 2. 河南农业大学国家小麦工程研究中心, 郑州 450046)

**摘要:** 为探究稀土元素铈(Ce)对锌(Zn)胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应,通过水培试验,以百农307为试验材料,研究外源Ce对500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下小麦幼苗生长、Zn积累和生理特性的影响。结果表明,500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫显著抑制了小麦幼苗叶绿素含量(叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素)、光合作用和生物量的积累,使得幼苗根系变短变粗、侧根减少,同时降低了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性和可溶性蛋白含量,增加了丙二醛(MDA)的积累。外源Ce降低了根系对Zn的吸收和转运,缓解了Zn胁迫对小麦幼苗的毒害效应,具体表现为叶绿素含量和光合作用参数的升高;提高了抗氧化酶活性和可溶性蛋白含量并降低MDA质量摩尔浓度;降低脂质过氧化对细胞膜的损伤,最终表现为小麦幼苗根系和茎叶干物质量的增加。外源Ce可通过提高Zn胁迫下小麦幼苗的光合特征、抗氧化酶活性和渗透调节物质的方式,降低细胞膜脂质的过氧化程度,缓解Zn胁迫对小麦幼苗生长的毒害作用。

**关键词:** 铈(Ce); 锌(Zn)胁迫; 小麦幼苗; 生理特性; 缓解效应

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1141-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202304090

## Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings

ZHANG Jing-jing<sup>1</sup>, XU Zheng-yang<sup>1</sup>, JIAO Qiu-juan<sup>1</sup>, FAN Li-na<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>, SONG Jia<sup>1</sup>, HUA Dang-ling<sup>1</sup>, LI Ge-zi<sup>2</sup>, LIU Hai-tao<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. National Engineering Research Center for Wheat, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** This research aimed to clarify the mitigative effect of exogenously applied rare earth element cerium (Ce) on the growth, zinc (Zn) accumulation, and physiological characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under Zn stress. The wheat variety studied was Bainong307 (BN307), and Zn stress was achieved by growing seedlings in a hydroponic culture experiment with 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Zn}^{2+}$  added to the culture solution. It was found that Zn stress at 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  significantly inhibited the chlorophyll content, photosynthesis, and biomass accumulation of wheat seedlings. Seedling roots became shorter and thicker, and the lateral roots decreased under Zn stress. The Zn stress also increased MDA accumulation and the degree of cell membrane lipid peroxidation and reduced soluble protein contents and the activities of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX). On the contrary, exogenous Ce decreased the adsorption and transport of Zn by the root system and alleviated the damage of Zn stress to wheat seedlings. Specifically, the increase in chlorophyll content (chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll) and photosynthetic parameters, the enhancement of antioxidant enzymes activities and soluble protein levels, and the reduction in MDA content and the damage of lipid peroxidation to the cell membrane were all driven by exogenous Ce, which ultimately led to the increase in dry matter biomass of the root system and shoot. In summary, these results provide basic data for the application of exogenous Ce to alleviate Zn toxicity to plants.

**Key words:** cerium (Ce); zinc (Zn) stress; wheat seedlings; physiological characteristics; mitigative effect

由于工业废水、废气排放及人类不合理活动,我国土壤重金属污染问题日益突出,已成为限制农产品产量提高和品质安全的重要因素之一。土壤中过量的重金属易迁移到其他生态系统,如地下水或植物体内,并通过食物链进入人体,对人类健康造成巨大风险<sup>[1]</sup>。重金属Zn可参与植物体内多种生理和生物化学反应过程<sup>[2]</sup>。Zn缺乏会影响植物正常的代谢过程,导致植株生长缓慢和叶片失绿;外源补充Zn会通过提高植株光合性能和增强叶绿素合成的方式来促进植株的生长发育<sup>[3]</sup>。然而,植物体内过量的Zn会抑制植物生长,减少生物量积累,降低光合作用,扰乱叶绿素合成,最终阻滞植物正常的生长发育<sup>[4]</sup>。陈建等<sup>[5]</sup>研究发现,高浓度锌胁迫下,菠菜根部细胞膜会遭到破坏,使其通透性增加,进而吸收更多的有毒有害物质。

小麦(*Triticum aestivum* L.)是重要的口粮作物,是人类蛋白质和能量摄入的主要来源之一<sup>[6]</sup>。有研究表明,外源施锌可缓解重金属<sup>[7]</sup>和盐碱<sup>[8]</sup>等胁迫对小麦植株细胞膜的氧化损伤,但过量的Zn对小麦造成氧化损伤<sup>[9]</sup>。Wei等<sup>[4]</sup>研究表明,小麦根和茎叶中过量的Zn导致细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)积累,诱发膜脂过氧化,降低光合色素含量并影响光合作用。

稀土元素(rare earth elements, REEs)是指化学元

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-16

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2021YFD1700904); 河南省农业农村厅重点项目(30801910); 河南省留学人员科研择优资助项目(30602340); 河南农业大学大学生创新训练计划项目(2022DC158)

作者简介: 张静静(1988~),女,博士,讲师,主要研究方向为重金属污染修复与生态毒理, E-mail: zhangjj1121@126.com

\* 通信作者, E-mail: liuhaitaoky@henau.edu.cn



素周期表中 15 种镧系元素和与其性质相近的钪(Sc)和钇(Y)的总称. 铈(cerium, Ce)作为地壳中丰度最高的稀土元素,近年来被广泛应用于农业生产中<sup>[10]</sup>. 有研究表明,稀土元素铈不仅可促进种子萌发<sup>[11]</sup>,提高根系活力<sup>[12]</sup>,还可用作微肥来促进农作物的生长,改善作物品质<sup>[13]</sup>. 此外,稀土元素铈还可通过影响光合作用、抗氧化物质含量等来缓解环境胁迫对植物的毒害效应<sup>[14]</sup>. 如李庆<sup>[15]</sup>研究发现,外源 Ce 能够有效缓解镉对玉米幼苗的毒害作用,增强抗氧化酶活性,降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)和细胞质膜透性. Zhou 等<sup>[16]</sup>研究发现,外源 Ce 能够提高水稻对盐分胁迫的耐受性并提高水稻产量. 然而,目前关于稀土元素如何增强植物抵御环境胁迫的研究已取得一定进展,但对于稀土元素 Ce 缓解小麦 Zn 胁迫的生理生化机制研究鲜见报道. 鉴于此,本试验通过水培法研究 Zn 胁迫下稀土元素 Ce 对小麦幼苗生长特征、光合特性、抗氧化酶活性和锌积累特征的影响,加深对 Ce 缓解小麦幼苗锌毒性机制的认识,以期稀土元素 Ce 应用于降低植物 Zn 毒害提供理论基础和技术参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 幼苗培养与处理

供试小麦品种为百农 307, Zn 和 Ce 源分别为  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 本试验在人工气候室内进行. 首先用  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液(5%)对小麦种子消毒 15 min, 用去离子水反复冲洗干净, 遮光催芽 1 d 后转入温室培养, 待种子出芽 1 cm 左右转入植物光照培养箱. 一叶一心后, 将长势相同的幼苗移栽至含有 2 L 培养液的塑料盆中继续培养. 为使小麦幼苗更好地适应水培环境, 移栽后分别用 1/8、1/4、1/2 和完全浓度的 Hoagland 营养液进行培养. 试验期间每 3 d 更换一次培养液, 待幼苗两叶一心时对其进行处理.

本文设置两个 Zn 水平( $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )和两个 Ce 水平( $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的水培试验, 共 4 个处理: $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Zn} + 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ce}$  (对照组, 只添加营养液)、 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Zn} + 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ce}$ 、 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Zn} + 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ce}$ 、 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Zn} + 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ce}$ , 分别记作 CK、Zn、Ce 和 Zn + Ce, 每个处理 3 次重复. 复合处理的 Zn 溶液与 Ce 溶液同时加入营养液. 人工气候室内环境参数设置为: 相对湿度 60%~65%, 昼夜时间 16 h / 8 h, 昼夜温度  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  /  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 光照强度为  $400 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ . 在处理后的第 14 d 取样, 并分离幼苗植株的茎叶和根部. 取样前, 利用便携式光合仪(LI-6400, 美国)测定光合参数. 将根系放入  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$  溶液( $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )中浸泡

15 min, 用去离子水清洗 3~5 次, 地上部用去离子水清洗干净后装入信封中, 放入烘箱杀青( $105^\circ\text{C}$ , 30 min), 之后改为  $70^\circ\text{C}$  至恒重, 用于测定植株生物量, 并取适量样品粉碎, 用于分析锌浓度; 另一部分鲜样用液氮处理并储存在  $-80^\circ\text{C}$  冰箱中, 用于生物化学指标的分析.

### 1.2 生理生化指标测定

采样前, 利用便携式光合仪(LI-6400, 美国)对小麦植株顶部的第一片完全展开叶进行叶片气体参数的测量: 每个处理选 3 株, 叶室内光照强度控制在  $1000 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、温度控制在  $25^\circ\text{C}$ , 测定指标包括净光合速率(net photosynthetic rate,  $P_n$ )、蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )、胞间  $\text{CO}_2$  摩尔分数(intercellular  $\text{CO}_2$  concentration,  $C_i$ )和气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ ). 采用 95% 乙醇提取法测定叶绿素含量<sup>[17]</sup>; 根据考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白(soluble protein)含量<sup>[18]</sup>; 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定使用硫代巴比妥酸比色法<sup>[19,20]</sup>; 利用氮蓝四唑(NBT)还原法测定超氧化物歧化酶活性(superoxide dismutase, SOD)<sup>[20]</sup>; 参照 Aebi 的方法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性<sup>[21]</sup>; 参照 Nakano 等<sup>[22]</sup>的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性.

### 1.3 Zn 含量的测定

植株样用硝酸:高氯酸 = 3:1 (体积比)进行消解, 用火焰原子吸收光谱仪(PinAAcle 900T, 美国)测定 Zn 含量. 为保证试验数据的可靠性, 植株 Zn 含量测定过程中插入国家标准植物样品 GBW07604 (GSV-1)进行质量控制, 加标回收率均在 88%~114% 之间.

### 1.4 数据分析

$$\text{耐受指数} = \frac{\text{各处理组植株干重}}{\text{对照组相应干重}} \times 100\%$$

$$\text{根冠比} = \text{地下部干重} / \text{地上部干重}$$

$$\text{转运系数} = \text{茎叶 Zn 积累量} / \text{根系 Zn 积累量} \times 100\%$$

所有数据使用 Microsoft Office Excel 2016 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析. 采用最小显著极差法(least significant difference, LSD,  $P < 0.05$ )进行方差分析(analysis of variance, ANOVA), 并采用 Origin Pro 2018 作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 Ce 对 Zn 胁迫下小麦幼苗生物量积累和耐受性的影响

由表 1 可知, 与 CK 相比, Zn 胁迫下小麦幼苗根系和茎叶的长度、干重均有不同程度的降低(根系和

茎叶的长度分别降低 29.29% 和 13.12%, 干重分别降低 9.09% 和 44.74%), 且除根系干重外, 其余均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 表明 Zn 胁迫导致小麦幼苗根长变短、地上部植株矮小、植株生长受到明显抑制。同时, 与对照 CK 相比, Zn 胁迫下小麦植株根冠比显著增加, 表明 Zn 对小麦幼苗地上部的抑制作用大于根部。耐受指数反映植株在逆境胁迫环境中生长的抑制程度<sup>[23,24]</sup>。由表 1 可知, Zn 胁迫下幼苗茎叶的耐受指数比根系更低, 表明茎叶对 Zn 胁迫的变化更敏感。

表 1 外源 Ce 对 Zn 胁迫下小麦幼苗生物量和耐受指数的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of exogenous cerium on the biomass and tolerance index of winter wheat seedlings under zinc stress

| 处理      | 根长<br>/cm   | 茎叶长<br>/cm   | 根系干重<br>/g·plant <sup>-1</sup> | 茎叶干重<br>/g·plant <sup>-1</sup> | 根冠比         | 根系耐受指数<br>/%   | 茎叶耐受指数<br>/%  |
|---------|-------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|----------------|---------------|
| CK      | 42.00±2.29a | 37.33±0.92ab | 0.11±0.01b                     | 0.38±0.03a                     | 0.29±0.01c  | 100.00±7.80b   | 100.00±5.80ab |
| Ce      | 44.17±5.80a | 38.67±1.82a  | 0.16±0.03a                     | 0.44±0.05a                     | 0.36±0.07bc | 144.77±26.27a  | 133.61±27.93a |
| Zn      | 29.70±1.54c | 32.43±0.83c  | 0.10±0.01b                     | 0.21±0.01b                     | 0.49±0.03a  | 83.76±22.32b   | 72.88±14.03b  |
| Zn + Ce | 35.83±0.76b | 35.67±1.61b  | 0.15±0.01a                     | 0.37±0.06a                     | 0.40±0.04b  | 113.96±13.99ab | 89.43±15.88b  |

1) 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

2.2 外源 Ce 对 Zn 胁迫下小麦幼苗根系形态的影响

Zn 胁迫显著抑制了小麦幼苗根系的生长发育, 小麦幼苗的根长、根表面积、根体积和总根尖数显著降低(表 2), 与对照 CK 相比分别降低了 13.25%、8.37%、27.68% 和 15.39% ( $P < 0.05$ )。但 Zn 胁迫下根平均直径比对照 CK 显著提升了 16.22% ( $P < 0.05$ )。这些结果表明过量 Zn 抑制小麦幼苗根系生长, 根长变短、侧根减少、根系变粗。

与对照 CK 相比, 外源 Ce 的单一处理可在一定程度上促进小麦幼苗根系的发育, 但小麦幼苗的总

由表 1 可知, 外源 Ce 的添加可在一定程度上促进小麦幼苗根系和茎叶的生长, 但除根系干重显著增加外, 其余均未达到显著水平。相对于单一 Zn 胁迫, 同时添加 Zn 和 Ce 促进了小麦幼苗根系和茎叶的长度和生物量的积累。由耐受指数可知, 与对照 CK 相比, Zn 和 Ce 同时添加时对小麦根系和茎叶的抑制率分别为 -13.96% 和 10.57%, 介于单一的 Zn 处理 (16.24% 和 27.12%) 和单一的 Ce 处理 (-44.77% 和 -33.61%) 之间, 表明外源 Ce 可在一定程度上缓解过量 Zn 对小麦幼苗生长的抑制作用。

根长、根表面积、根体积、根平均直径和总根尖数均未达到显著水平(表 2)。Zn 和 Ce 同时添加时, 与单一 Zn 胁迫相比, 小麦幼苗的根长、根表面积、根体积和总根尖数均显著升高(表 2), 但仍低于单一的 Ce 处理; Zn 和 Ce 同时添加时小麦幼苗的根长和总根尖数分别比对照 CK 降低 6.61% 和 9.99%, 而根表面积和根体积差异不显著。这些结果表明外源 Ce 可以通过扩大根表面积、增加根体积来促进根系对水分和养分的吸收, 从而增强幼苗抗 Zn 胁迫的能力, 在一定程度上缓解 Zn 胁迫对小麦根系的伤害。

表 2 外源 Ce 对 Zn 胁迫下小麦根系形态的影响

Table 2 Effect of exogenous cerium on the root morphological indexes of wheat seedlings under zinc stress

| 处理      | 根长/cm         | 根表面积/cm <sup>2</sup> | 根平均直径/mm    | 根体积/cm <sup>3</sup> | 总根尖数              |
|---------|---------------|----------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| CK      | 978.65±20.20a | 117.10±3.43a         | 0.37±0.01bc | 1.12±0.02a          | 1 804.67±33.08a   |
| Ce      | 987.68±33.61a | 117.84±1.65a         | 0.40±0.03ab | 1.27±0.14a          | 1 867.67±151.16a  |
| Zn      | 849.01±24.36c | 107.30±5.73b         | 0.43±0.03a  | 0.81±0.10b          | 1 527.00±124.83b  |
| Zn + Ce | 913.98±26.01b | 117.27±1.35a         | 0.35±0.01c  | 1.14±0.13a          | 1 624.33±157.89ab |

2.3 外源 Ce 对 Zn 胁迫下小麦幼苗光合性能和光合色素含量的影响

由表 3 可知, 与 CK 相比, Zn 胁迫下小麦幼苗的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  均显著降低, 分别降低了 20.46%、16.25%、15.43% 和 42.69% ( $P < 0.05$ ), 表明小麦幼苗叶片的光合作用受 Zn 毒害影响明显。外源 Ce 的单一处理可在一定程度上促进小麦幼苗的光合作用(与对照 CK 相比), 除  $T_r$  外, 小麦幼苗叶片的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均显著增强。与单一 Zn 胁迫相比, 外源 Zn 和 Ce 同时添加时小麦幼苗叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  参数均显著提高 ( $P < 0.05$ ); Zn 和 Ce 同时添加时小麦幼苗叶片

的净光合速率( $P_n$ )略低于对照 CK 处理, 而  $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  参数均略高于对照 CK 组, 但均未达到显著水平。表明外源 Ce 处理可有效缓解 Zn 胁迫对小麦幼苗叶片光合作用的抑制。

叶片光合色素含量的高低能够直观反映植物光合作用的强弱<sup>[25]</sup>。由表 3 知, Zn 胁迫下小麦幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)和 SPAD 值较对照 CK 均显著下降, 分别降低了 14.69%、74.60%、47.09% 和 38.17% ( $P < 0.05$ )。而外源 Ce 的单一添加后, 小麦幼苗叶片的叶绿素含量变化不显著, 除叶绿素 a 略微升高外, 其余叶绿素 b、叶绿素(a+b)和

表3 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗光合性能和叶绿素的影响

Table 3 Effect of exogenous cerium on the photosynthetic performance and chlorophyll content of winter wheat seedlings under zinc stress

| 处理      | 净光合速率<br>(以CO <sub>2</sub> 计)<br>/μmol·(m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> | 气孔导度<br>(以H <sub>2</sub> O计)<br>/mol·(m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> | 胞间二氧化碳摩尔<br>分数(以CO <sub>2</sub> 计)<br>/μmol·mol <sup>-1</sup> | 蒸腾速率<br>(以H <sub>2</sub> O计)<br>/mmol·(m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> | 叶绿素a<br>/mg·g <sup>-1</sup> | 叶绿素b<br>/mg·g <sup>-1</sup> | 叶绿素(a+b)<br>/mg·g <sup>-1</sup> | SPAD        |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------|
| CK      | 25.30±2.01b                                                              | 0.39±0.04bc                                                            | 319.18±7.50b                                                  | 6.84±0.34a                                                              | 0.906±0.034a                | 1.261±0.122a                | 2.167±0.089a                    | 36.77±1.46a |
| Ce      | 29.93±0.89a                                                              | 0.61±0.06a                                                             | 370.76±13.84a                                                 | 6.39±0.48a                                                              | 0.907±0.011a                | 1.224±0.035a                | 2.130±0.025a                    | 36.33±1.62a |
| Zn      | 20.12±0.65c                                                              | 0.33±0.03c                                                             | 269.93±9.87c                                                  | 3.92±0.78b                                                              | 0.773±0.031b                | 0.320±0.055c                | 1.146±0.131c                    | 22.73±0.83c |
| Zn + Ce | 24.28±0.81b                                                              | 0.45±0.04b                                                             | 326.21±2.03b                                                  | 7.12±0.77a                                                              | 0.954±0.012a                | 0.928±0.054b                | 1.882±0.043b                    | 30.90±1.87b |

SPAD值均随外源Ce的单一添加而下降,分别降低2.96%、1.69%和1.18%,均未达到显著水平( $P > 0.05$ )。外源Zn和Ce同时添加时幼苗叶片的光合色素含量较Zn单一胁迫均显著升高[叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)含量和SPAD值分别增加了23.38%、189.79%、64.16%和35.92%],但除叶绿素a外,其余叶绿素b、总叶绿素含量和SPAD值仍显著低于对照CK组( $P < 0.05$ ,表3)。表明外源Ce能够通过提高小麦幼苗叶片光合色素含量的方式来缓解Zn胁迫对幼苗叶片的损伤,进而缓解Zn胁迫对小麦幼苗叶片光合作用的抑制。

#### 2.4 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗丙二醛和可溶性蛋白含量的影响

丙二醛(MDA)含量常用来判断植物细胞膜系统损伤的程度<sup>[23,26]</sup>。Zn胁迫下小麦幼苗地上部和地下部MDA质量摩尔浓度均显著升高,分别比对照CK增加了53.64%和67.53%( $P < 0.05$ ,图1),

表明Zn可对幼苗根系和茎叶的细胞膜造成严重的氧化损伤,且对根系的损伤更严重。外源Zn和Ce同时添加时,小麦幼苗根系和茎叶的MDA较Zn单一胁迫组均显著降低,但仍显著高于对照处理,表明外源Ce可有效缓解Zn胁迫对小麦幼苗细胞膜的损伤,但Zn毒害对小麦幼苗细胞膜的损害不可清除。

可溶性蛋白作为渗透调节物质之一,可参与植物体内多种稳态平衡<sup>[23,25]</sup>。与CK相比,Zn胁迫下小麦幼苗地上部和地下部可溶性蛋白含量均显著降低,分别下降了29.17%和17.68%( $P < 0.05$ ,图1)。外源Zn和Ce同时添加时,小麦幼苗茎叶的可溶性蛋白含量较Zn单一胁迫组显著升高,但仍显著低于对照处理,而幼苗根系的可溶性蛋白含量较Zn单一胁迫组差异不显著。表明稀土元素Ce主要通过促进小麦幼苗茎叶渗透调节物质积累的方式,来缓解Zn对小麦幼苗的毒害损伤。

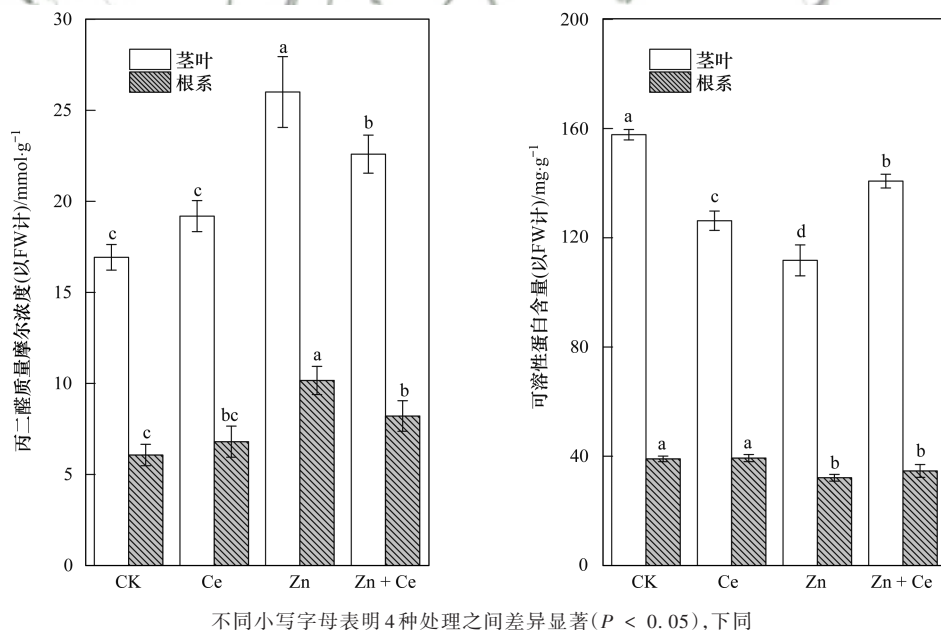


图1 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗丙二醛和可溶性蛋白含量的影响

Fig. 1 Effect of exogenous cerium on the content of MDA and soluble protein of winter wheat seedlings under zinc stress

#### 2.5 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响

重金属胁迫可诱导植物细胞氧化应激并产生

ROS,过量ROS破坏了细胞内氧化还原稳态,导致ROS在植物体内积累,最终造成细胞膜氧化损伤。SOD、APX和CAT等抗氧化酶系统是植物常用的抗



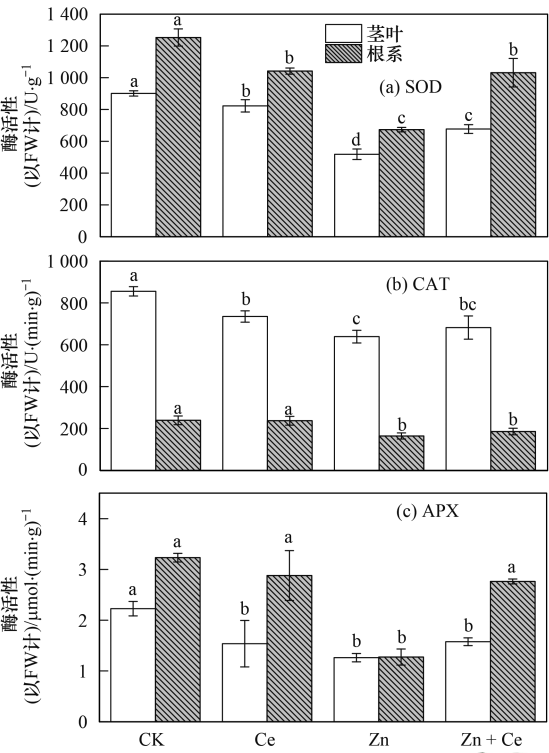


图2 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响  
Fig. 2 Effect of exogenous cerium on the antioxidant enzyme activities (SOD, CAT, and APX) of winter wheat seedlings under zinc stress

氧化机制之一,它们相互协调共同清除ROS. Zn胁迫下小麦幼苗地上部和地下部的SOD、CAT和APX活性较对照CK均显著降低( $P < 0.05$ ,图2),且抗氧化酶活性损失率表现为根系>茎叶,根系抗氧化酶活性的损失率由大到小排序为:APX(60.58%)>SOD

(46.26%)>CAT(31.33%),而茎叶抗氧化酶活性的损失率由大到小排序为APX(43.36%)>SOD(42.48%)>CAT(25.31%).这些结果表明500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫可显著降低小麦幼苗清除ROS的能力,且对根系的损害程度强于茎叶.外源Zn和Ce同时添加时,小麦幼苗地上部和地下部的SOD、APX和CAT活性较Zn单一胁迫均有不同程度的增加,其中根系和茎叶的SOD以及根系的APX均达到显著水平,但仍显著低于对照CK组.该结果表明外源Ce可通过提高小麦幼苗抗氧化酶活性的方式来清除ROS,从而缓解Zn胁迫对小麦幼苗的氧化损伤.

2.6 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗Zn含量和转运系数的影响

由表4可知,不同处理条件下,小麦幼苗不同组织中Zn含量均表现为根系>茎叶. CK处理中小麦幼苗根系和茎叶 $\omega(\text{Zn})$ (以DW计)分别为130.19  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和72.34  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,表明小麦幼苗正常生长过程中会吸收培养液中的微量Zn.由表4知,Zn单一胁迫组中小麦幼苗根系的Zn含量是茎叶的3.56倍,根系的Zn积累量是茎叶的1.61倍,表明小麦幼苗吸收的Zn大部分积累到根系中.外源Zn和Ce同时添加时,小麦幼苗根系和茎叶的Zn含量较Zn单一胁迫组分别降低了19.50%和31.01%,根系和茎叶的Zn积累量较Zn单一胁迫分别降低了11.82%和17.18%,转运系数降低了4.84%(表4),表明稀土元素Ce不仅能抑制幼苗对Zn的吸收,也能抑制Zn在幼苗体内的转运.

表4 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗Zn含量、积累量和转运系数的影响

| 处理      | 根系                                                              |                                                 | 茎叶                                                              |                                                 | 转运系数      |
|---------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|
|         | $\omega(\text{Zn})$ (以干重计)<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Zn 积累量<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ | $\omega(\text{Zn})$ (以干重计)<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Zn 积累量<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ |           |
| CK      | 130.19±4.44                                                     | 14.15±1.31                                      | 72.34±5.00                                                      | 27.22±2.75                                      |           |
| Ce      | 122.04±4.43                                                     | 19.31±4.08                                      | 65.77±1.62                                                      | 33.21±7.77                                      |           |
| Zn      | 5 352.35±121.37                                                 | 667.90±136.43                                   | 1 502.43±73.85                                                  | 415.33±96.28                                    | 0.62±0.02 |
| Zn + Ce | 4 308.54±142.93                                                 | 588.98±86.27                                    | 1 036.58±97.49                                                  | 343.99±37.09                                    | 0.59±0.06 |

3 讨论

3.1 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗生长的影响

Zn是人类和植物体必需的微量元素<sup>[27]</sup>,植物体对Zn胁迫的响应通常表现为“低促高抑”.本试验中500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下小麦幼苗根长、株高均显著降低,根系和茎叶的干物质量不同程度降低,幼苗的生长受到明显的抑制,这与陈玉真等<sup>[28]</sup>和Ahmad等<sup>[29]</sup>研究的结果相一致;同时,本研究中锌胁迫下小麦幼苗根冠比显著增加,这可能是由于小麦幼苗茎叶对Zn胁迫更敏感,受到了更严重的毒害作用.有

研究表明,外源施加适宜浓度的Ce能够有效缓解逆境胁迫,促进作物的生长<sup>[13,16]</sup>.王蕊<sup>[30]</sup>研究发现,外源根施一定浓度的Ce能够有效缓解铜胁迫对豌豆幼苗的影响,有利于豌豆幼苗根和芽的生长.在本试验中,与单一Zn胁迫相比,外源施加Zn + Ce时小麦幼苗的株高、根长和生物量均显著增加,地上、地下部的耐受指数均有不同程度的提高.锌胁迫达到一定浓度可抑制幼苗根系的生长,减缓水分和矿质元素的输送,进而影响植株地上部的生长<sup>[31,32]</sup>.本研究中500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下小麦幼苗的根长、根表面积、根体积和总根尖数均显著降低,幼苗根系的生长发

育受到显著抑制,呈现出根长变短、侧根减少和根系变粗的趋势.根系作为直接接触重金属的器官,在重金属胁迫下呈现变短变粗的趋势,这主要是由于根内蛋白质可整合固定重金属离子,且当重金属浓度达到某一阈值时会加速根系细胞的木质化,导致根系变短变粗<sup>[33-35]</sup>.本研究中,Zn和Ce同时添加时,与单一Zn胁迫相比,小麦幼苗的根长、根表面积、根体积和总根尖数均显著升高.这与他人的研究结果一致,如有研究表明适宜浓度的Ce可以促进玉米、绿豆<sup>[36]</sup>和椰子树<sup>[37]</sup>根系的生长.

### 3.2 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗生理生化参数的影响

叶绿素含量是制约植物光合作用的重要因素之一,在光能利用方面也起着至关重要的作用<sup>[38]</sup>.Li等<sup>[39]</sup>研究发现,高浓度Zn胁迫可导致小麦植株叶绿素a和叶绿素b含量降低,同时光合速率也受到显著抑制.本试验中,500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下小麦幼苗表现出明显的毒害现象,如植株矮小发黄、根长变短和侧根变少等.本研究中Zn胁迫下小麦幼苗叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和SPAD值均显著下降,这主要是由于高浓度的锌不仅可导致叶绿体结构紊乱<sup>[40]</sup>,还可抑制叶绿素合成、加剧叶绿素降解<sup>[41]</sup>.本试验中Zn胁迫下小麦幼苗的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 和 $T$ 均显著降低(表3),这与Li等<sup>[39]</sup>和陈小米等<sup>[42]</sup>研究的结果相一致.其原因可能是:①高浓度的Zn导致植物体内代谢紊乱,如元素吸收、运输以及渗透调节等方面失衡;②大量的Zn除与植物体内核酸、蛋白质等结合外,还导致某些酶活性降低或丧失,生理功能紊乱<sup>[23,43]</sup>.而本试验中,外源施加Zn+Ce时小麦幼苗叶片的光合色素(叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素)含量较Zn单一胁迫显著增加,表明外源Ce可增强小麦幼苗叶片捕捉和利用光能的能力,这与前人的研究结果一致<sup>[15,44]</sup>.有研究表明,稀土元素Ce可促进植株叶片对光能的吸收、传递和转化,加快叶绿体中光电子的传递速率和光化学效率,延缓叶绿体的衰老,从而提高光合作用效率<sup>[45,46]</sup>.还有研究表明,稀土元素Ce可保护光合系统中电子传递体免受伤害,提高传递效率<sup>[47]</sup>.

通常情况下,植株对Zn胁迫的响应表现为经典的“低促高抑”现象,Zn胁迫超过一定浓度时,植物抗氧化酶活性会受到抑制,且呈现浓度依赖性<sup>[48,49]</sup>.有研究发现,菠菜、小白菜、茭白<sup>[50]</sup>的SOD活性和水稻<sup>[51]</sup>的CAT活性均随着重金属胁迫程度的增加呈现先上升后下降的趋势.其原因可能是:①高浓度的Zn存在时,加剧了与抗氧化酶的金属结合位点的竞争,改变其空间结构,使酶失活;②ROS的产生超过其清

除能力,导致酶活性降低<sup>[52]</sup>.本研究中,500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下小麦幼苗茎叶和根系的SOD、CAT和APX活性均显著下降( $P < 0.05$ ),而外源施加Zn+Ce时小麦幼苗茎叶和根系的抗氧化酶活性较Zn单一胁迫时有不同程度的增加,这与他人的结果一致<sup>[30]</sup>.

本研究中,Zn胁迫导致小麦幼苗根系和茎叶中MDA质量摩尔浓度大幅提高(图1),这与Guo等<sup>[53]</sup>和孔佑莎<sup>[54]</sup>研究的结果相一致,表明Zn胁迫下产生了过量的ROS,造成严重的氧化损伤.与Zn单一胁迫相比,外源施加Zn+Ce后小麦幼苗茎叶和根系的MDA质量摩尔浓度降低(图1),而相关抗氧化酶活性升高(图2),该结果表明适当浓度的稀土元素Ce可提高小麦幼苗抗氧化酶活性从而缓解Zn胁迫的氧化损伤,增强植物抗逆性.

重金属胁迫条件下,植物细胞内通过积累可溶性蛋白和可溶性糖等化学物质来降低胞内渗透势,从而保证水分的正常供应,维持细胞正常的结构和生理功能<sup>[55,56]</sup>.本研究中,Zn胁迫下小麦幼苗地上部和地下部可溶性蛋白含量均显著降低,这可能是 $\text{Zn}^{2+}$ 直接破坏了可溶性蛋白分子结构或抑制可溶性蛋白合成,从而使其含量降低.外源施加Zn+Ce时小麦幼苗茎叶和根系的可溶性蛋白含量较单一Zn处理有不同程度的升高,表明外源Ce能有效促进Zn胁迫下小麦幼苗渗透调节物质的积累,维持植株体内的代谢平衡.

### 3.3 外源Ce对Zn胁迫下小麦幼苗Zn积累特性的影响

根系作为植物吸收水分和养分的主要器官,也更容易受到外界胁迫.通常情况下,植物吸收积累重金属主要通过两种方式:①植物根部积累大量重金属,减少向地上部的转运;②植株主动吸收重金属,并转运至地上部<sup>[57]</sup>.本研究中,500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn胁迫下,小麦幼苗根系的Zn含量是茎叶的3.56倍,而根系中Zn的积累量是茎叶的1.61倍,表明小麦幼苗吸收的Zn大部分积累在根系中,只有少部分被转运到茎叶中,这与已有研究的结果相一致<sup>[30]</sup>.而外源Ce添加后,小麦幼苗根系和茎叶的Zn含量和积累量都在降低,转运系数也降低,这可能是由于:一方面,小麦根表面上的一些吸附位点被Ce占据,相应地Zn的吸附位点减少<sup>[58,59]</sup>;另一方面,外源Ce调控了与Zn吸收转运相关基因的表达,从而减少了Zn的吸收和转运<sup>[23,60]</sup>.

## 4 结论

(1)外源施加Ce可以提高Zn胁迫下小麦幼苗的生物量,有效缓解Zn胁迫对小麦幼苗的生长抑制;显



著提高小麦幼苗叶片的叶绿素含量和根系生长参数,促进小麦的生长;

(2)外源Ce可降低小麦幼苗对Zn的吸收和转运,并调控幼苗的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,减少MDA的积累,缓解Zn导致的氧化损伤,减轻Zn对小麦的毒害作用。

#### 参考文献:

- [1] Zhang J J, Wang Y, Liu J S, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the sources and spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Gongzhuling, Northeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 634-644.
- [2] Rehman A, Farooq M, Ozturk L, *et al.* Zinc nutrition in wheat-based cropping systems [J]. *Plant and Soil*, 2018, **422** (1-2): 283-315.
- [3] Xing W Q, Cao E Z, Scheckel K G, *et al.* Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31): 31396-31406.
- [4] Wei C, Jiao Q J, Agathokleous E, *et al.* Hormetic effects of zinc on growth and antioxidant defense system of wheat plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150992.
- [5] 陈建, 夏星辉, 张真瑞, 等. 增温和锌复合作用对菠菜富集多环芳烃的影响 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(12): 4531-4539.
- Chen J, Xia X H, Zhang Z R, *et al.* The effects of elevated temperature and zinc combination on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in spinach [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(12): 4531-4539.
- [6] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(15): 72-82.
- Sun S, Yang X G, Li K N, *et al.* Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(15): 72-82.
- [7] Zhou Z, Zhang B, Liu H T, *et al.* Zinc effects on cadmium toxicity in two wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) differing in grain cadmium accumulation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109562.
- [8] Iqbal M N, Rasheed R, Ashraf M Y, *et al.* Exogenously applied zinc and copper mitigate salinity effect in maize (*Zea mays* L.) by improving key physiological and biochemical attributes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(24): 23883-23896.
- [9] Duan X H, Li X N, Ding F, *et al.* Interaction of nitric oxide and reactive oxygen species and associated regulation of root growth in wheat seedlings under zinc stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 95-102.
- [10] Migaszewski Z M, Gałuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, **45**(5): 429-471.
- [11] Sobarzo-Bernal O, Gómez-Merino F C, Alcántar-González G, *et al.* Biostimulant effects of cerium on seed germination and initial growth of tomato seedlings [J]. *Agronomy*, 2021, **11**(8), doi: 10.3390/agronomy11081525.
- [12] 柴瑞娟, 王玉良, 吴琼. 氧化铈对玉米种子和茶叶中内生细菌的影响及机理 [J]. *稀土*, 2012, **33**(6): 9-13.
- Chai R J, Wang Y L, Wu Q. Effect of  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  on endophytic bacteria isolated from *Zea mays* and *Camellia sinensis* and its mechanism [J]. *Chinese Rare Earths*, 2012, **33**(6): 9-13.
- [13] Vilela L A F, Null N, Ramos S J, *et al.* Cerium (Ce) and Lanthanum (La) promoted plant growth and mycorrhizal colonization of maize in tropical soil [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2018, **12**(5): 704-710.
- [14] Tao Y, Shen L, Feng C, *et al.* Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **298**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118540.
- [15] 李庆. 镉胁迫下铈对玉米生理特性影响研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2013.
- Li Q. Research on effect of cerium on the physiological characteristics of corn under cadmium stress [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [16] Zhou H, Wu H H, Zhang F, *et al.* Molecular basis of cerium oxide nanoparticle enhancement of rice salt tolerance and yield [J]. *Environmental Science: Nano*, 2021, **8**(11): 3294-3311.
- [17] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. (第3版). 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [18] Law M Y, Charles S A, Halliwell B. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. The effect of hydrogen peroxide and of Paraquat [J]. *Biochemical Journal*, 1983, **210** (3): 899-903.
- [19] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiology*, 1977, **59**(2): 309-314.
- [20] Chance B, Maehly A C. Assay of catalases and peroxidase [J]. *Methods in Enzymology*, 1955, **2**: 764-775.
- [21] Aebi H. Catalase *in vitro* [J]. *Methods in Enzymology*, 1984, **105**: 121-126.
- [22] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by Ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, **22**(5): 867-880.
- [23] 王龙, 樊婕, 魏畅, 等. 外源抗坏血酸对铜胁迫下菊苣幼苗生长的缓解效应 [J]. *草业学报*, 2021, **30**(4): 150-159.
- Wang L, Fan J, Wei C, *et al.* Mitigative effect of exogenous ascorbic acid on the growth of copper-stressed chicory (*Cichorium intybus*) seedlings [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(4): 150-159.
- [24] 李贺勤, 王维华, 江绪文. 抗坏血酸对铜胁迫下广藿香幼苗生长、铜积累和抗氧化酶活性的影响 [J]. *环境化学*, 2016, **35** (7): 1431-1437.
- Li H Q, Wang W H, Jiang X W. Effects of exogenous ascorbic acid on seedling growth, copper accumulation and antioxidant enzyme activities of *Pogostemon cablin* under copper stress [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(7): 1431-1437.
- [25] 王泳超, 张颖蕾, 闫东良, 等. 干旱胁迫下 $\gamma$ -氨基丁酸保护玉米幼苗光合系统的生理响应 [J]. *草业学报*, 2020, **29**(6): 191-203.
- Wang Y C, Zhang Y L, Yan D L, *et al.* Physiological role of  $\gamma$ -aminobutyric acid in protecting the photosynthetic system of maize seedlings under drought stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29**(6): 191-203.
- [26] Miller G, Shulaev V, Mittler R. Reactive oxygen signaling and abiotic stress [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, **133** (3): 481-489.
- [27] Kumssa D B, Joy E J M, Ander E L, *et al.* Dietary calcium and



- zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10974.
- [28] 陈玉真, 张娟, 黄玉芬, 等. 福建省 16 种蔬菜对锌毒害敏感性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2185-2191.
- Chen Y Z, Zhang J, Huang Y F, *et al.* The sensibility to zinc toxicity of 16 vegetables commonly cultivated in Fujian province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2185-2191.
- [29] Ahmad I, Rawoof A, Priyanka, *et al.* Diversity and expression analysis of ZIP transporters and associated metabolites under zinc and iron stress in *Capsicum* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, **196**: 415-430.
- [30] 王蕊. 镧、铈对铜胁迫下豌豆种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.
- Wang R. Effect of lanthanum, cerium on peas seeds germination and seedling growth under copper stress[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [31] Apel K, Hirt H. REACTIVE OXYGEN SPECIES: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, **55**: 373-399.
- [32] Aydin S S, Gökçe E, Büyükc İ, *et al.* Characterization of stress induced by copper and zinc on cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings by means of molecular and population parameters [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2012, **746**(1): 49-55.
- [33] 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等. 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(19): 6065-6073.
- Wang S F, Shi X, Sun H J, *et al.* Metal uptake and root morphological changes for two varieties of *Salix integra* under cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6065-6073.
- [34] Jones D L, Darrah P R, Kochian L V. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake[J]. *Plant and Soil*, 1996, **180**(1): 57-66.
- [35] 陈涵, 庄玉婷, 冯嘉仪, 等. 铅镉复合污染对台湾相思生长和元素吸收的影响[J]. *西南林业大学学报*, 2022, **42**(1): 76-82.
- Chen H, Zhuang Y T, Feng J Y, *et al.* Effects of combined pollution of Pb and Cd on the growth and element uptake of *Acacia confusa* [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2022, **42**(1): 76-82.
- [36] Diatloff E, Smith F W, Asher C J. Rare earth elements and plant growth: I. Effects of lanthanum and cerium on root elongation of corn and mungbean [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, **18**(10): 1963-1976.
- [37] Wahid P A, Valiathan M S, Kamalam N V, *et al.* Effect of rare earth elements on growth and nutrition of coconut palm and root competition for these elements between the palm and *Calotropis gigantea* [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, **23**(3): 329-338.
- [38] Patel M, Parida A K. Salinity alleviates the arsenic toxicity in the facultative halophyte *Salvadora persica* L. by the modulations of physiological, biochemical, and ROS scavenging attributes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123368.
- [39] Li X N, Yang Y L, Jia L Y, *et al.* Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **89**: 150-157.
- [40] Jin X F, Yang X E, Islam E, *et al.* Ultrastructural changes, zinc hyperaccumulation and its relation with antioxidants in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, **46**(11): 997-1006.
- [41] Ouni Y, Mateos-Naranjo E, Abdelly C, *et al.* Interactive effect of salinity and zinc stress on growth and photosynthetic responses of the perennial grass, *Polypogon monspeliensis* [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 171-179.
- [42] 陈小米, 胡国涛, 杨兴, 等. 速生树种竹柳对复合污染土壤中镉和锌的吸收、积累与生理响应特性[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3968-3976.
- Chen X M, Hu G T, Yang X, *et al.* Heavy metal accumulation and physiological response of bamboo-willow plants to soil co-contaminated with Cd and Zn [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3968-3976.
- [43] Li H, Chang J J, Chen H J, *et al.* Exogenous melatonin confers salt stress tolerance to watermelon by improving photosynthesis and redox homeostasis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 295.
- [44] Liu X Q, Ze Y G, Liu C, *et al.* Effects of  $Ce^{3+}$  on improvement of spectral characteristics and function of chloroplasts damaged by linolenic acid in spinach [J]. *Journal of Rare Earths*, 2009, **27**(2): 288-293.
- [45] Yang F, Ma Z N, Liu C, *et al.* Effects of  $Ce^{3+}$  on chloroplast senescence of spinach under light [J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, **23**(4): 480-485.
- [46] Liu X Q, Su M Y, Liu C, *et al.* Effects of  $CeCl_3$  on energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II [J]. *Journal of Rare Earths*, 2007, **25**(5): 624-630.
- [47] Liu X Q, Huang H, Liu C, *et al.* Alleviation effects of  $Ce^{3+}$  on inhibition of photochemical activity caused by linolenic acid in spinach chloroplast [J]. *Journal of Rare Earths*, 2008, **26**(6): 875-879.
- [48] 罗晟, 赵泽文, 任新宇, 等. 屎肠球菌胞外多糖对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(9): 1888-1899.
- Luo S, Zhao Z W, Ren X Y, *et al.* Effect of exopolysaccharide from *Enterococcus faecium* on rice seed germination and seedling growth under cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(9): 1888-1899.
- [49] 张珂, 厉萌萌, 刘德权, 等. 镉胁迫对小麦、玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2019, **38**(5): 90-94.
- Zhang K, Li M M, Liu D Q, *et al.* Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of wheat and maize [J]. *Seed*, 2019, **38**(5): 90-94.
- [50] 崔宏莉, 解静芳, 杨彪, 等. 污灌与镉胁迫对菠菜几种抗氧化酶活性的影响[J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(2): 274-279.
- Cui H L, Xie J F, Yang B, *et al.* Effects of sewage irrigation and cadmium stresses on the activities of several antioxidant enzymes of spinach [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(2): 274-279.
- [51] Shah K, Kumar R G, Verma S, *et al.* Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings [J]. *Plant Science*, 2001, **161**(6): 1135-1144.
- [52] 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16**(6): 133-149.
- Xiong M X, Wu D, Xu X N, *et al.* Advances in toxic effects of soil heavy metal cadmium on higher plants [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(6): 133-149.
- [53] Guo J J, Qin S Y, Rengel Z, *et al.* Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone

- concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **172**: 380-387.
- [54] 孔佑莎. 锌胁迫对大叶女贞叶片性状及富集特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- Kong Y S. Effects of zinc stress on leaf traits and enrichment characteristics of *Ligustrum lucidum* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.
- [55] 张纪涛, 徐猛, 韩坤, 等. 盐胁迫对番茄幼苗的营养及生理效应[J]. 西北农业学报, 2011, **20**(2): 128-133.
- Zhang J T, Xu M, Han K, *et al.* Effect of salt stress on plant nutrition and physiology of tomato seedlings [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, **20**(2): 128-133.
- [56] 李洋, 于丽杰, 金晓霞. 植物重金属胁迫耐受机制[J]. 中国生物工程杂志, 2015, **35**(9): 94-104.
- Li Y, Yu L J, Jin X X. Mechanism of heavy metal tolerance stress of plants [J]. *China Biotechnology*, 2015, **35**(9): 94-104.
- [57] 黎森, 王敦球, 于焕云. 铅-砷交互作用影响小白菜生长及铅砷积累的效应研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(1): 170-180.
- Li S, Wang D Q, Yu H Y. Effect of Pb and As interaction on the growth and As and Pb accumulation of *Brassica campestris* L. [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(1): 170-180.
- [58] Zare A A, Khoshgoftarmanesh A H, Malakouti M J, *et al.* Root uptake and shoot accumulation of cadmium by lettuce at various Cd: Zn ratios in nutrient solution [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **148**: 441-446.
- [59] Khaliq M A, James B, Chen Y H, *et al.* Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice [J]. *Chemosphere*, 2019, **215**: 916-924.
- [60] Pandhair V, Sekhon B S. Reactive oxygen species and antioxidants in plants: an overview [J]. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 2006, **15**(2): 71-78.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2023年9月20日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2022年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2022年度总被引频次14 897,影响因子3.759,多项引证指标位居环境科学技术类科技期刊前列.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown .....                                                                | ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> ( 617 )          |
| Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations .....                                                                    | QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang ( 626 )                          |
| Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing .....                                                                                                        | CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> ( 635 )                     |
| Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021 .....                             | ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> ( 645 )        |
| Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network .....                                      | LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> ( 655 )             |
| Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City .....                                                                         | WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> ( 668 )              |
| Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng .....                                                                                       | YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> ( 678 )           |
| Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou .....                                           | LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> ( 689 )            |
| Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....                                                                 | LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> ( 700 )                |
| Nonlinear Variations in PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China .....                                                                        | WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> ( 709 )         |
| Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model .....                                  | WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> ( 721 )                   |
| Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy .....                                                    | ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> ( 732 )         |
| Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences .....                        | MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> ( 744 )                 |
| Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China .....                                                                    | WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang ( 755 )                    |
| Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek .....                                                     | TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> ( 768 )               |
| Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall .....                                                    | WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 780 )         |
| Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources .....                       | WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> ( 792 )                    |
| Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area .....                                                                                   | GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> ( 802 )            |
| Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin .....                                                                             | ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong ( 813 )                         |
| Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area .....                                                                    | JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River .....                                             | MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> ( 837 )          |
| Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater .....                                                     | PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo ( 844 )                             |
| Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics .....                                                                                        | TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> ( 854 ) |
| Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate .....                                                                                                  | LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> ( 862 )                 |
| Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> in Aqueous Solution .....                                                                  | JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> ( 873 )         |
| Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon .....                                                                                              | ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> ( 885 )                       |
| Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water .....                                                                     | HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> ( 898 )            |
| High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China .....                                                                                | LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> ( 909 )            |
| Ecosystem CO <sub>2</sub> Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary .....                                                           | LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> ( 920 )             |
| Effects of Biochar Application Two Years Later on N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China .....                     | HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> ( 929 )             |
| Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil .....                                                                                              | WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> ( 940 )                   |
| Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis .....                                                                                                            | XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> ( 952 )               |
| Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example .....                      | LI Yue, LUO Hong-fen ( 961 )                                           |
| Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil .....                                                                                           | LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> ( 974 )                   |
| Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism .....                                                                     | ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing ( 983 )                         |
| Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains .....                                        | YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> ( 992 )            |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China .....                                             | YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> ( 1004 )   |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou .....                                                                         | ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> ( 1015 )         |
| Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources .....                                                                                         | PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong ( 1026 )                      |
| Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation ..... | LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 1038 )            |
| Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization .....                                                             | YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> ( 1049 )                 |
| Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models .....                                                        | SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> ( 1058 )           |
| Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd .....                                                                                       | WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> ( 1069 )            |
| Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium .....                                                                                   | LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> ( 1080 )                  |
| Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City .....                                                                   | ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> ( 1090 )         |
| Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland .....                                                                                         | WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> ( 1098 )      |
| Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide .....                                                                      | YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> ( 1107 )                  |
| Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice .....                                                 | ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> ( 1118 )                 |
| Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress .....                                                                | ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> ( 1128 )         |
| Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings .....                                                    | ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> ( 1141 )  |
| Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat .....                                                                 | GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> ( 1150 )     |
| Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community .....                               | HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> ( 1161 )         |
| Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review .....                                                                                                        | BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> ( 1173 )      |
| Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics .....                                                           | BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> ( 1185 )                |
| Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils .....                                                                        | HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> ( 1196 )             |
| Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water .....                                                                                      | ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang ( 1210 )               |
| Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory .....                                     | GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li ( 1222 )                         |