

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, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大尺度环流背景分析 .....郑庆锋, 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, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气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, 李晓, 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, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 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, 顾杨阳, 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, 黄志烟, 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, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析 .....徐芝萍, 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, 王楠楠 (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, 张晓琦, 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, 孙淇, 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, 辜峰峰, 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嘧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)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

# 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<sup>1</sup>, 魏畅<sup>1</sup>, 柳海涛<sup>1\*</sup>, 张静静<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1</sup>, 赵颖<sup>1</sup>, 张雪海<sup>2</sup>, 李鸽子<sup>3</sup>, 姜瑛<sup>1\*</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046; 2. 河南农业大学农学院, 省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 郑州 450046; 3. 河南农业大学国家小麦工程技术研究中心, 郑州 450046)

**摘要:** 为探究不同浓度锌(Zn)对镉(Cd)胁迫条件下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响,通过水培试验,以玉米品种郑单 958 为试验材料,研究 Cd 胁迫条件下(50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),外源施加不同浓度 Zn(0、10、25、50、100、200 和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )对玉米幼苗生长、根系构型及其分级特征、Cd 含量及根系 Cd 吸收能力、光合系统的影响,并通过主成分分析和隶属函数法进行综合评价。结果表明,50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 胁迫对玉米幼苗具有明显的毒害作用,使叶绿素含量和光合参数显著降低,主根长、株高、生物量、根分枝数和根尖数,包括 I ~ III 级径级区间的根长、根表面积及 I ~ II 级径级区间的根体积显著下降,阻碍了玉米幼苗的正常生长发育。施用 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 与不施 Zn 相比,降低了玉米幼苗对 Cd 的吸收,显著降低了 Cd 含量和 Cd 吸收效率,缓解了对玉米幼苗的毒害作用,使地上地下部鲜重、地上部干重、地上地下部耐受指数和根分枝数均显著升高;显著增强了玉米幼苗的光合作用,促使幼苗光合速率和总叶绿素含量显著升高;I 级径级区间的 RL、I ~ II 级径级区间的 SA 和 RV 在 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 时达到最大,III 级径级区间的 RL、SA 和 RV 在 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 时达到最大,均显著高于不施 Zn 处理;玉米幼苗生长耐受性综合评价表明,100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 缓解 Cd 毒害作用效果较好。综合分析可知,施加适宜浓度的 Zn 可以降低玉米幼苗植株内 Cd 含量、根系 Cd 吸收能力及 Cd 吸收效率,提高玉米幼苗生物量的积累,减轻 Cd 毒害对根系构型的影响,减少对光合系统的影响,提高玉米幼苗对 Cd 的耐受性。

**关键词:** 玉米; 镉(Cd); 锌(Zn); 生理参数; 根系构型分级

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1128-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202303013

## Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress

ZHANG Hui-hong<sup>1</sup>, WEI Chang<sup>1</sup>, LIU Hai-tao<sup>1\*</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>, ZHANG Xue-hai<sup>2</sup>, LI Ge-zi<sup>3</sup>, JIANG Ying<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 3. National Engineering Research Center for Wheat, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** To explore the effects of different concentrations of zinc (Zn) on the growth and root architecture classification of maize seedlings under cadmium (Cd) stress, a hydroponic experiment was conducted to study the effects of different concentrations of Zn (0, 10, 25, 50, 100, 200, and 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) on the growth, root architecture and classification characteristics, Cd content, root Cd uptake capacity, and photosynthetic system of maize seedlings under Cd stress (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) by using Zhengdan 958 as the experimental material. Principal component analysis and the membership function method were used for comprehensive evaluation. The results showed that the 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd stress had a significant toxic effect on maize seedlings, which significantly reduced chlorophyll content and photosynthetic parameters. The main root length, plant height, biomass, root forks, and root tips, including the root length and root surface area of the grade I - III diameter range and the root volume of the grade I - II diameter range, decreased significantly, which hindered the normal growth and development of maize seedlings. Compared with that under no Zn application, 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn application reduced the uptake of Cd by maize seedlings, significantly reduced the Cd content in shoots and roots and the Cd uptake efficiency. The toxic effect on maize seedlings was alleviated, and the fresh weight, dry weight, tolerance index, and root forks of shoots and roots were significantly increased. The photosynthesis of maize seedlings was significantly enhanced, and the photosynthetic rate and the total chlorophyll content was significantly increased. The RL, SA, and RV in the I - II diameter range reached the maximum at 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn, and the RL, SA, and RV in the III diameter range reached the maximum at 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn, which were significantly higher than those without Zn treatment. The comprehensive evaluation of the growth tolerance of maize seedlings showed that 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn had better effects on alleviating Cd toxicity. Comprehensive analysis showed that the application of appropriate concentration of Zn could reduce the Cd content in maize seedlings, the Cd uptake capacity, and Cd uptake efficiency of roots; increase the biomass accumulation of maize seedlings; reduce the effect of Cd toxicity on root architecture; reduce the effect on the light and system; and improve the tolerance of maize seedlings to Cd.

**Key words:** maize; cadmium(Cd); zinc(Zn); physiological parameters; root architecture classification

近年来,随着城市工业化进程的加快,农田土壤 中重金属积累不断增多,土壤污染日益严重,我国耕

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-05-10

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: 张辉红(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属生态毒理和修复, E-mail: 13783949406@163.com

\* 通信作者, E-mail: liuhaitaoky@henau.edu.cn; JY27486@163.com

地土壤的重金属点位超标率达到 19.4%, 在这些重金属污染中镉(cadmium, Cd)的超标最为严重<sup>[1]</sup>. 土壤中的 Cd 会对作物产生一系列毒害作用, 影响作物的品质和产量, 进而通过食物链对人类健康造成危害<sup>[2]</sup>. 有研究表明, Cd 胁迫条件下, 水稻(*Oryza sativa*)<sup>[3]</sup>、玉米(*Zea mays*)<sup>[4]</sup>、小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[5]</sup>、小白菜(*Brassica campestris*)<sup>[6]</sup>、黄瓜(*Cucumis sativus*)<sup>[7]</sup>和番茄(*Solanum lycopersicum*)<sup>[8]</sup>等作物表现出叶片黄化, 生长速度缓慢, 植株矮小, 根分枝数减少, 叶片干重降低, 生物量下降等现象.

玉米在我国广泛种植, 是重要的粮食、经济、饲料作物和工业原料, 能够对多种逆境胁迫产生抗性, 被广泛用于土壤重金属污染研究<sup>[9]</sup>. 玉米受到 Cd 毒害时, 幼苗株高和地上部生物量降低, 根系变短, 叶绿素含量下降, 籽粒的产量和品质也受到了负面影响<sup>[10]</sup>. 陈建军等<sup>[11]</sup>研究表明 50 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下, 玉米的生物量和产量均会降低. 根系是植物的重要器官, 能够最先感知土壤中的逆境胁迫, 通常表现为生物量和根系构型的变化, 根系构型变化会直接影响根系的生理功能, 从而影响对水分和营养元素的吸收<sup>[12,13]</sup>. 本实验室前期研究发现 Cd 胁迫条件下玉米幼苗根系的根长、根表面积、根体积、根尖数和根分枝数显著减少, 直径处于 0~1.5 mm 的根系受到较大影响; 叶片中 Cd 大量积累, 影响了叶片光合色素的合成和光合作用, 造成玉米幼苗生物量降低, 叶片发黄, 抗性下降<sup>[14]</sup>. 当玉米、水稻体内 Cd 浓度达到一定水平时, 会对其光合作用和呼吸作用产生抑制, 使其产量和品质降低, 萌发期和苗期对 Cd 胁迫更为敏感<sup>[15,16]</sup>.

不同的外源物质可缓解 Cd 胁迫对植物的毒害作用. 余志强等<sup>[17]</sup>研究发现, 应用外源亚精胺(spermidine, Spd)可提高 Cd 胁迫下黑麦草(*Lolium perenne*)根系可溶性蛋白、抗坏血酸和谷胱甘肽含量及过氧化物酶活性, 降低丙二醛和过氧化氢含量, 以缓解 Cd 对其根系活力的负面效应. 外源喷施 6-苄基腺嘌呤(6-benzylaminopurine, 6-BA)、水杨酸(salicylic acid, SA)和 24-表油菜素甾醇(24-epibrassinosteroid, 24-EBR)这 3 种植物激素可显著提高三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)生物量与光合作用能力, 增强抗氧化能力, 提高植株对 Cd 的耐受性<sup>[18]</sup>. 刘杨等<sup>[19]</sup>通过比较不同浓度硒(selenium, Se)对 Cd 污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响, 发现施入适量外源 Se 使小白菜生物量提高、Cd 积累下降, 降低了 Cd 的毒性. 本实验室前期研究发现, 添加外源硅(silicon, Si)可降低玉米幼苗根系对 Cd 的吸收和转运, 缓解 Cd 胁迫对根系构型的影响, 提高玉米幼苗抗

Cd 能力<sup>[20]</sup>.

锌(zinc, Zn)是植物生长的必需营养元素, 缺乏 Zn 会导致植株生长缓慢、叶片黄化, 适宜的 Zn 可增强植物的光合作用<sup>[21]</sup>, 提高植物抗氧化酶活性, 从而增强对逆境的耐受性<sup>[22~24]</sup>. Zn 和 Cd 位于同一副族, 具有相似的化学性质, 两者在根系吸收过程中存在一定的拮抗作用<sup>[25]</sup>. McKenna 等<sup>[26]</sup>研究表明, Zn 能抑制莴苣(*Lactuca sativa*)和菠菜(*Spinacia oleracea*)根系对 Cd 的吸收并阻碍 Cd 向地上部运输. 付宝荣等<sup>[27]</sup>研究发现在 Cd 胁迫条件下, 根施 Zn 能够提高小麦的光合作用和过氧化物酶活性, 降低脯氨酸含量, 增强小麦对 Cd 胁迫的抗性. Zn 缓解 Cd 胁迫的作用由多种因素所决定, 适宜浓度的 Zn 能降低 Cd 的转运速率, 影响细胞中 Cd 的分布, 增强植物的光合作用, 提高生物量的积累<sup>[28,29]</sup>.

目前, 关于不同矿质元素缓解 Cd 胁迫方面的研究已有大量报道, 但对施加 Zn 缓解 Cd 对玉米幼苗的毒害及其根系构型的影响却少有报道. 因此, 本研究采用水培试验, 通过探究不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫条件下玉米幼苗的生长、根系构型及分级特征、光合作用及根系 Cd 的积累和吸收的影响, 综合评价不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫条件下玉米幼苗的耐受性, 丰富外源施加矿质元素缓解玉米 Cd 毒害机制的研究, 以期期为玉米 Cd 污染防治及安全生产提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

玉米供试品种为郑单 958, 种子购买于河南秋乐种业科技股份有限公司; 营养液为 Hoagland 营养液, 配方为: 大量元素 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、KNO<sub>3</sub>、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 和 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 分别为 4、6、2 和 1 mmol·L<sup>-1</sup>, 微量元素 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 EDTA-Fe 分别为 46.1、9.1、0.76、0.32、0.08 和 100 μmol·L<sup>-1</sup>. Zn 源选用 ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, Cd 源选用 CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O.

### 1.2 试验设计

本试验于 2021 年 8 月在河南农业大学资源与环境学院光照培养室内进行, 采用水培的方式. 培养室设置温度为 25℃, 昼夜条件为 16 h/8 h, 相对湿度为 60%±5%. 选择饱满均一的玉米种子在 5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液中消毒 15 min, 用去离子水洗净种子表面的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液后在黑暗环境下发芽 3 d, 然后转移到培养室内. 待玉米幼苗培养至一叶一心时, 挑选形态长势一致的幼苗在盛有 1/4 Hoagland 营养液的黑色塑料盆(体积: 2 L)中进行培养, 每 2 d 更换一次营养液. 待玉米幼苗长至两叶一心时, 更换全营养液并进行处理, 即根

施 Cd 和不同浓度 Zn, 本试验共设置 8 个处理, 分别为: ①CK (不加 Cd, 不加 Zn); ②Cd (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd); ③CdZn<sub>10</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn); ④CdZn<sub>25</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn); ⑤ CdZn<sub>50</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn); ⑥ CdZn<sub>100</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn); ⑦ CdZn<sub>200</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn); ⑧ CdZn<sub>400</sub> (50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd + 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn). 每个处理设置 3 个重复, 即种植 3 盆, 每盆种植 9 棵玉米, 施加处理 5 d 后收获玉米幼苗植株.

### 1.3 指标测定方法

#### 1.3.1 玉米幼苗采收及其生物量的测定

用清洁的不锈钢剪刀将玉米幼苗的地上部和地下部分离, 然后用去离子水将地上部和地下部植株的表面冲洗干净并擦干表面水分. 测量幼苗的根长和株高, 用万分位天平 (FA2104, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司) 称量幼苗地上和地下部鲜重. 将玉米幼苗的地下部在 20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  EDTA- $\text{Na}_2$  溶液中浸泡 15 min, 去除附着在根系的离子, 地下部用去离子水洗 3~5 次后装入信封保存. 将样品放置于 105 $^{\circ}\text{C}$  烘箱杀青 30 min, 70 $^{\circ}\text{C}$  烘至恒重, 称量幼苗地上、地下部干重.

$$\text{耐受指数} = \frac{\text{各处理组植株的干重}}{\text{对照组植株的干重}} \times 100\%$$

$$\text{根冠比} = \frac{\text{各处理组地下部干重}}{\text{各处理组地上部干重}}$$

#### 1.3.2 根系构型及分级特征的测定

各处理取 3 株完整根系, 分别放入盛有去离子水的根盘中 (长  $\times$  宽: 20 cm  $\times$  40 cm), 然后将根盘置于根系扫描仪 (V700 PHOTO, Epson, 日本) 上, 用遮光盘覆盖根盘, 再对根系进行全景扫描. 利用图像分析软件 (WinRHIZO™ 2003b, 加拿大) 分析根长 (total root length, RL)、根表面积 (root surface area, SA)、根体积 (root volume, RV)、根平均直径 (root average diameter, RD)、根尖数 (root tips, RT) 和分枝数 (root forks, RF) 以及根系构型分级参数. 以 RD=0.5 mm 为度量对 RL、SA 和 RV 进行等级划分, 分为 4 个等级: I 级 (RD 0~0.5 mm)、II 级 (RD 0.5~1.0 mm)、III 级 (RD 1.0~1.5 mm) 和 IV 级 (RD > 1.5 mm)<sup>[30]</sup>.

#### 1.3.3 玉米幼苗 Cd 含量的测定

称取 0.2 g 干样于 50 mL 三角瓶中, 按照 3:1 体积比向各三角瓶中加入 10 mL  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  溶液, 静置 12 h 后加热消解至酸全部蒸发, 再于 25 mL 容量瓶用去离子水定容, 过滤后利用原子吸收光谱仪 (PinAAcle 990T THGA/FL HSN, 美国) 测定 Cd 浓度.

地上或地下部 Cd 含量 ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) =

$$\frac{\text{地上或地下部 Cd 含量} \times 25}{\text{所取干重}}$$

地上或地下部 Cd 积累量 ( $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) =

地上或地下部 Cd 含量  $\times$  地上或地下部干重  
整株 Cd 积累量 ( $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) =

地上部 Cd 积累量 + 地下部 Cd 积累量

$$\text{根系 Cd 吸收能力} (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{\text{整株 Cd 积累量}}{\text{地下部干重} \times 1000}$$

$$\text{Cd 吸收效率} (\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}) = \frac{\text{整株 Cd 积累量}}{\text{根表面积}}$$

#### 1.3.4 叶片光合参数和叶绿素含量的测定

于采样前 1 d, 各处理选取 3 株健康玉米幼苗, 采用便携式光合测定仪 (Li-6400, LICOR Inc., 美国) 测定每株第一片完全展开叶片的光合速率 (photosynthetic rate,  $P_n$ )、气孔导度 (stomatal conductance,  $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 (intercellular  $\text{CO}_2$  concentration,  $C_i$ ) 和蒸腾速率 (transpiration rate,  $T_r$ ).

采样当天, 各处理随机选取新鲜玉米叶的第一片完全展开叶片 (包括用于光合参数测定的叶片) 切成小块, 并取 0.3 g 样品浸泡在 25 mL 95% 乙醇中置于黑暗环境下, 待叶片完全褪色后用紫外分光光度计 (L5, 上海仪电分析仪器有限公司) 在 470 nm、649 nm 和 665 nm 处分别测定计算叶绿素 a (chlorophyll a, Chla)、叶绿素 b (chlorophyll b, Chlb)、类胡萝卜素 (carotenoid) 和总叶绿素 (total chlorophyll, TChl) 的含量<sup>[31]</sup>.

#### 1.3.5 耐受性综合评价

应用隶属函数法对不同处理耐受性进行综合评价.

隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (1)$$

反隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = \frac{1 - (X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2)$$

式中,  $X_i$  为指标的测定值;  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为所有处理的某一指标的最小值和最大值;  $R(X_i)$  表示指标  $X_i$  的隶属函数值. 把每个处理计算的  $R(X_i)$  求和计算均值, 均值越大说明该处理下玉米幼苗的耐受性越强. 若所测指标与耐受性呈正相关用公式 (1), 呈负相关用公式 (2).

#### 1.4 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2021, SPSS 25.0 和 Metabo Analyst 5.0 软件进行分析, 运用 LSD 方法 ( $P < 0.05$ ) 进行单因素方差分析 (ANOVA), 分析处理间差

异的显著性,使用 Origin 2021 和 Adobe Illustrator 2019 作图.

### 2 结果与分析

#### 2.1 Cd胁迫下外源 Zn对玉米幼苗生长的影响

Cd胁迫条件下玉米幼苗的生长发育受到了明显抑制,根长、侧根数和株高都有明显降低,施加不同浓度 Zn缓解了Cd对玉米幼苗的毒害作用(图1). 施加 Cd以后,相比于CK处理,玉米幼苗的株高、主根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重和地下部干重分别显著降低了33.65%[图2(a)],39.38%[图2(a)],67.47%[图2(b)],49.22%[图2(b)],47.62%

[图2(c)]和33.33%[图2(c)]( $P < 0.05$ );与单纯的Cd胁迫相比,施加  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Zn}$ (CdZn<sub>100</sub>)使玉米幼苗株高、主根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重、地下部干重、地上部耐受指数和地下部耐受指数分别显著提高了17.98%、26.80%、114.74%、60.00%、54.55%、50.00%、57.96%和47.43%(图2);施加  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Zn}$ (CdZn<sub>200</sub>)使地上部鲜重和地下部鲜重分别显著提高了76.84%和50.77%.

#### 2.2 Cd胁迫下外源 Zn对玉米幼苗根系构型分级的影响

施 Cd使得玉米幼苗根系的RL、SA、RV、RT和RF分别显著降低了74.89%[图3(a)],63.00%[图3

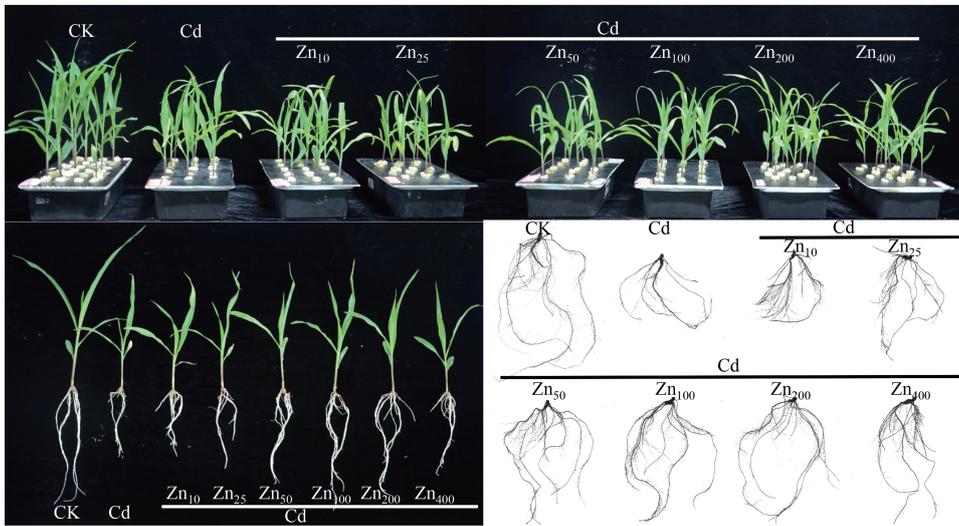
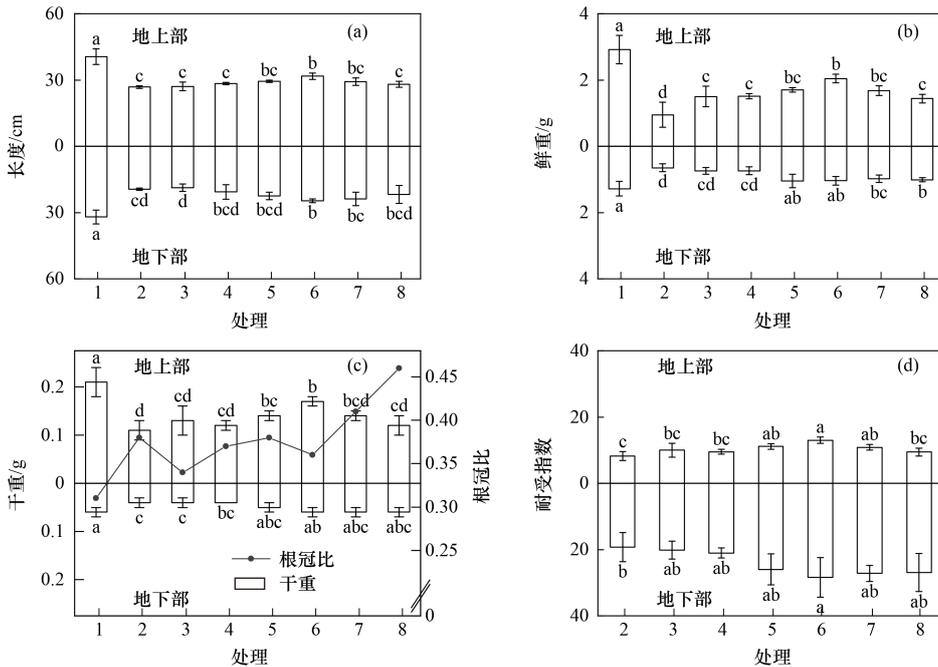


图1 Cd胁迫下不同浓度 Zn 处理对玉米幼苗生长表型的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of Zn on the growth phenotype of maize seedlings under Cd stress



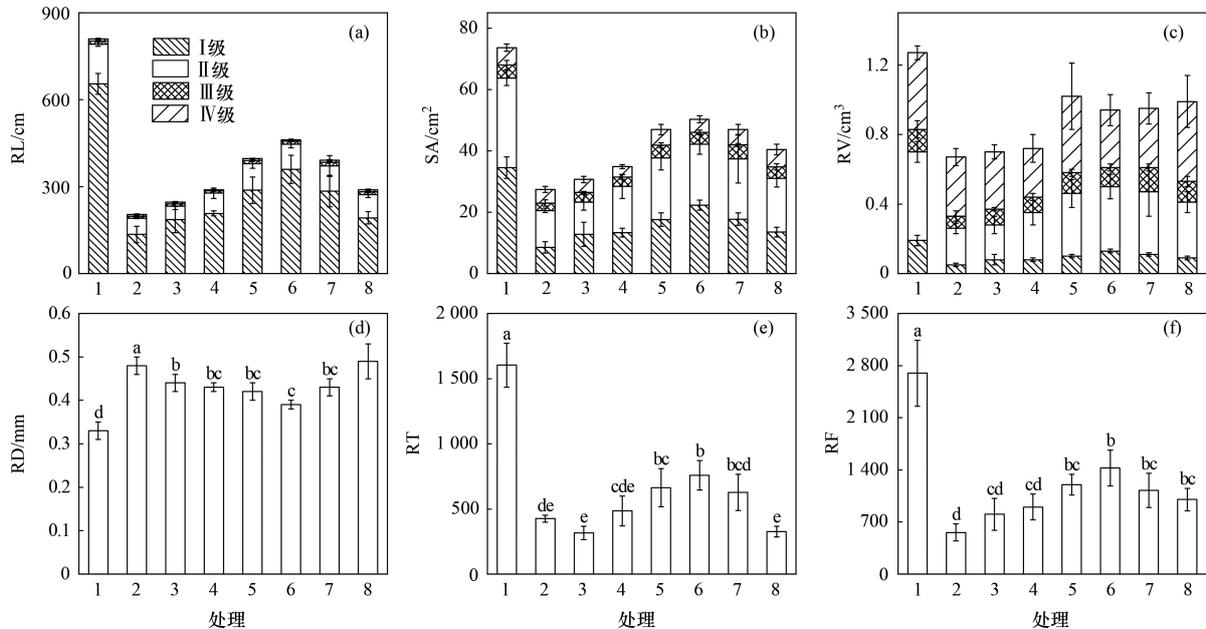
1. CK, 2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>;不同小写字母表示各处理间有显著差异( $P < 0.05$ )

图2 Cd胁迫下不同浓度 Zn 处理对玉米幼苗生长及耐受指数的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of Zn on growth and tolerance index of maize seedlings under Cd stress

(b)]、45.59% [图 3(c)]、73.46% [图 3(e)] 和 79.24% [图 3(f)]. 与 Cd 处理相比, CdZn<sub>100</sub> 处理的 RL、SA、RV、RT 和 RF 分别显著增加了 127.26%、83.79%、48.65%、78.23% 和 154.34%, RD 显著下降了 18.75% [图 3(d)]; CdZn<sub>200</sub> 处理的 RL、SA、RV 和 RF 分别显著提高了 92.22%、68.88%、48.65% 和 100.83%, RD 显著降低了 10.42%; I 级径级区间的

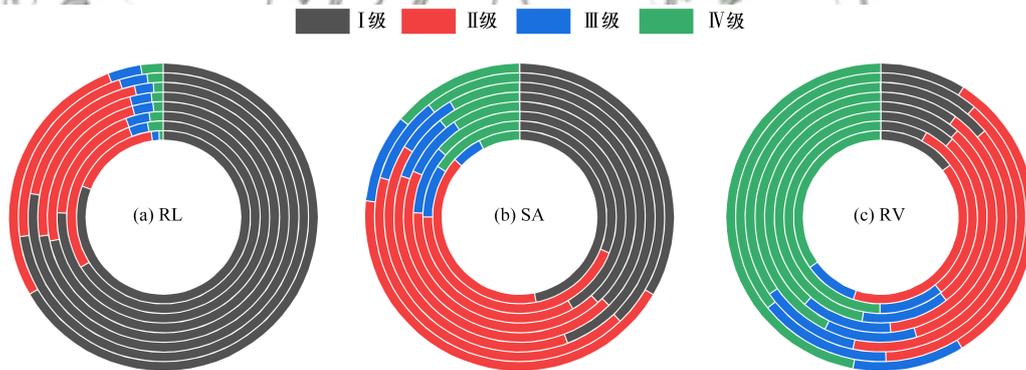
RL、I ~ II 级径级区间的 SA 和 RV 在 CdZn<sub>100</sub> 处理下达到最大, III 级径级区间的 RL、SA 和 RV 在 CdZn<sub>200</sub> 处理下达到最大, 均显著高于 Cd 处理 [图 3(a) ~ 3(c)]. 施加 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 下 I 级径级区间的 RL、SA 占比相比于 Cd 处理分别显著增加了 17.39% 和 9.93% [图 4(a)], 42.48% 和 21.72% [图 4(b)].



1. CK, 2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>; 不同小写字母表示各处理间有显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 3 Cd胁迫下不同浓度 Zn 处理对玉米幼苗根系结构和构型分级的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of Zn on root structure and architecture classification of maize seedlings under Cd stress



从内圈往外依次表示 CK、Cd、CdZn<sub>10</sub>、CdZn<sub>25</sub>、CdZn<sub>50</sub>、CdZn<sub>100</sub>、CdZn<sub>200</sub> 和 CdZn<sub>400</sub> 处理

图 4 Cd胁迫下不同浓度 Zn 处理对玉米幼苗根长、根表面积以及根体积在不同径级区间所占比例的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of Zn on root length, root surface area, and root volume of maize seedlings under Cd stress

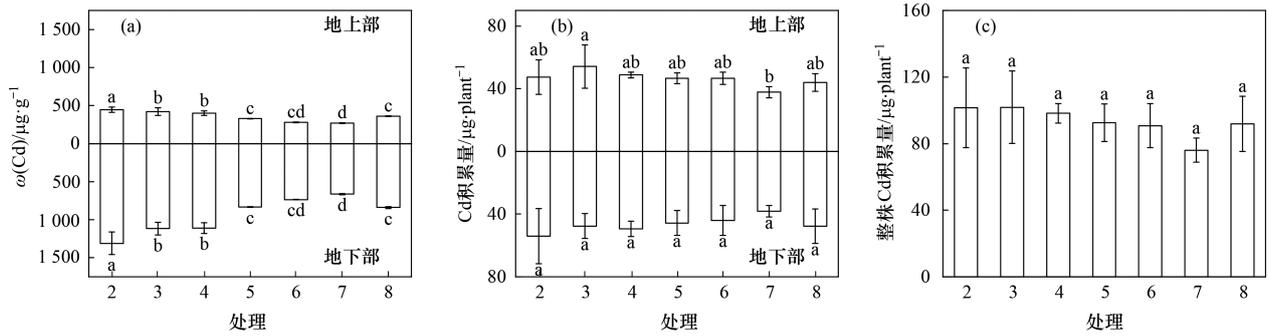
### 2.3 外源 Zn 对玉米幼苗 Cd 吸收的影响

Cd 胁迫下随着施加 Zn 浓度梯度的增加, 玉米地上和地下部 Cd 含量表现出先降低再增加的趋势, 各浓度梯度处理相比于 Cd 处理均显著降低, 在 CdZn<sub>200</sub> 处理降至最低, 分别降低了 39.24% 和 49.25% [图 5(a)]; 玉米幼苗地上部 Cd 积累量随着 Zn 浓度梯度的增加表现出先降低再增加, 在 CdZn<sub>200</sub> 处理降至最低, 相比于 CdZn<sub>10</sub> 处理显著降低了 30.19% [图 5(b)]; 施加不同浓度 Zn 处理后, 整株 Cd 积累量均表现出降低

趋势, 与 Cd 处理相比, 各处理间未达到显著水平 [图 5(c)]. 根系 Cd 吸收能力和 Cd 吸收效率在 Zn 浓度 > 10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时显著降低, 与 Cd 处理相比降低了 32.02% ~ 47.07% [图 6(a)] 和 37.31% ~ 54.87% [图 6(b)], 均在 CdZn<sub>200</sub> 处理达到最低值.

### 2.4 Cd 胁迫下外源 Zn 对玉米幼苗光合系统的影响

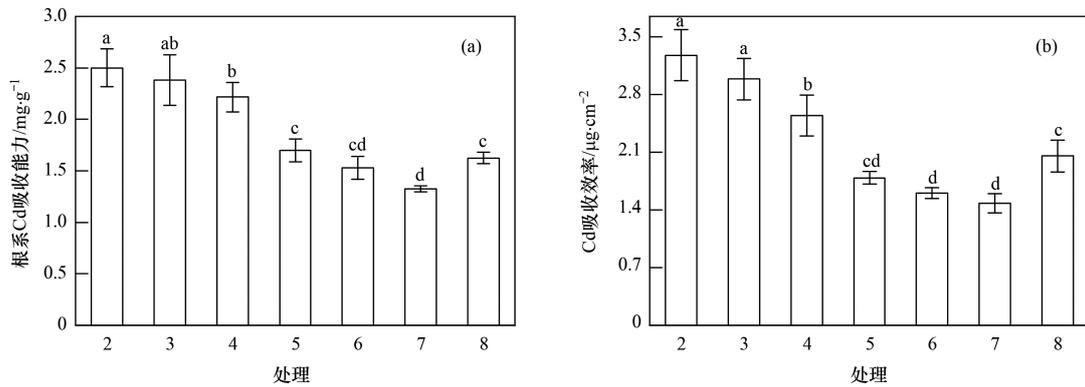
Cd 胁迫导致玉米幼苗的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  显著降低, 分别比 CK 降低了 54.06% [图 7(a)]、56.71% [图



2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>; 不同小写字母表示各处理间有显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 5 Cd胁迫下不同浓度Zn处理对玉米幼苗Cd含量和Cd积累量的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of Zn on Cd content and Cd accumulation in maize seedlings under Cd stress



2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>; 不同小写字母表示各处理间有显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 6 Cd胁迫下不同浓度Zn处理对玉米幼苗根系Cd吸收能力和Cd吸收效率的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of Zn on Cd uptake capacity and Cd uptake efficiency of maize seedling roots under Cd stress

7(b)]、66.97% [图 7(c)] 和 55.18% [图 7(d)]. 施加不同浓度 Zn 以后, 与 Cd 处理相比玉米幼苗的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$  均显著升高, 分别升高 13.23% ~ 69.75%、18.31% ~ 80.06%、34.66% ~ 181.90% 和 16.70% ~ 73.04%, 均在 CdZn<sub>100</sub> 处理达到最大值.

与 CK 处理相比, Cd 胁迫下 Chla、Chlb、类胡萝卜素和 TChl 含量分别显著降低了 57.27% [图 8(a)]、55.54% [图 8(b)]、65.07% [图 8(c)] 和 56.69% [图 8(d)]. 施加 25 ~ 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 时, Chla 和 TChl 含量与不施 Zn 处理相比分别显著提高了 16.54% ~ 70.00% 和 18.67% ~ 72.50%; 与 Cd 处理相比, Chlb 和 TChl 在施加 Zn 浓度为 50 ~ 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时分别显著提高了 27.17% ~ 77.25% 和 31.23% ~ 64.92%; Chla、Chlb、类胡萝卜素和 TChl 含量均在 CdZn<sub>200</sub> 处理达到最高(图 8).

## 2.5 外源 Zn 对 Cd 胁迫下玉米幼苗各指标间相关性的影响

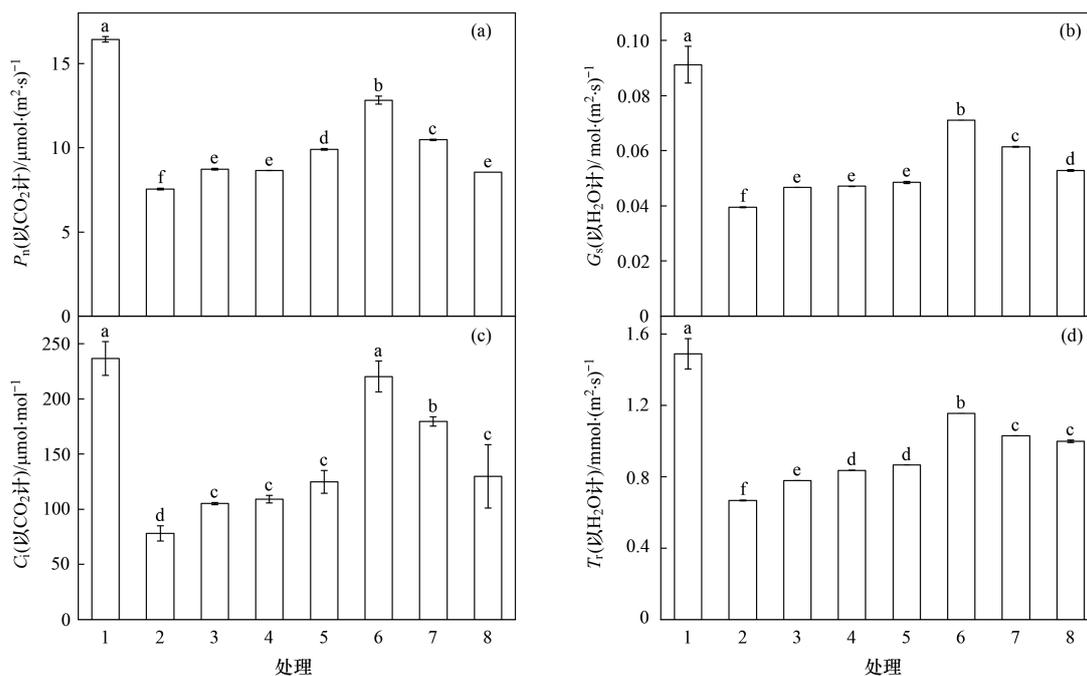
通过主成分分析(PCA)的方法分析 Cd 胁迫下不同浓度 Zn 对玉米幼苗各指标的影响(图 9). 结果显示, PC1 和 PC2 在玉米幼苗各指标的整体变异中分别占了 89.8% 和 7.5%, CdZn<sub>25</sub>、CdZn<sub>50</sub>、CdZn<sub>100</sub>、CdZn<sub>200</sub> 和 CdZn<sub>400</sub> 处理与 Cd 处理显著分离, CdZn<sub>50</sub>、CdZn<sub>100</sub>、

CdZn<sub>200</sub> 处理与 CdZn<sub>10</sub> 处理显著分离, CdZn<sub>25</sub> 和 CdZn<sub>400</sub> 与 CdZn<sub>100</sub> 和 CdZn<sub>200</sub> 处理显著分离[图 9(a)]; PC1 和 PC2 共同显著影响了 RT、RL I 级、RL 和  $P_n$  [图 9(b)]; 随机森林图[图 9(c)]分析结果表明: 对于光合参数指标, 平均精度下降(mean decrease accuracy)值由大到小依次为  $G_s$  和  $C_i$ ; 对于地上部指标, 地上部 Cd 含量的 mean decrease accuracy 值大于地上部 Cd 积累量的 mean decrease accuracy 值; 对于根系指标来说, 不同处理依次对 Cd 吸收效率、RT、根冠比、SA、RF、根系 Cd 吸收能力、RL 和 RV 有较大影响; 对于根系构型指标来说, I 级径级区间的 RL 位于 I 级径级区间的 SA 之前.

相关性分析结果表明, 施加不同浓度 Zn 后, 玉米幼苗的光合参数指标  $P_n$ 、 $C_i$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、类胡萝卜素、Chla、Chlb 和 TChl 与根系 Cd 吸收能力、Cd 吸收效率和地上、地下部 Cd 浓度呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); I 级径级区间的 RL、SA 和 RV、II 级径级区间的 SA、RF、RL 和 RT 与根系 Cd 吸收能力、Cd 吸收效率和地上地下部 Cd 浓度呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 见图 10.

## 2.6 综合评价 Cd 胁迫下外源 Zn 对玉米幼苗的影响

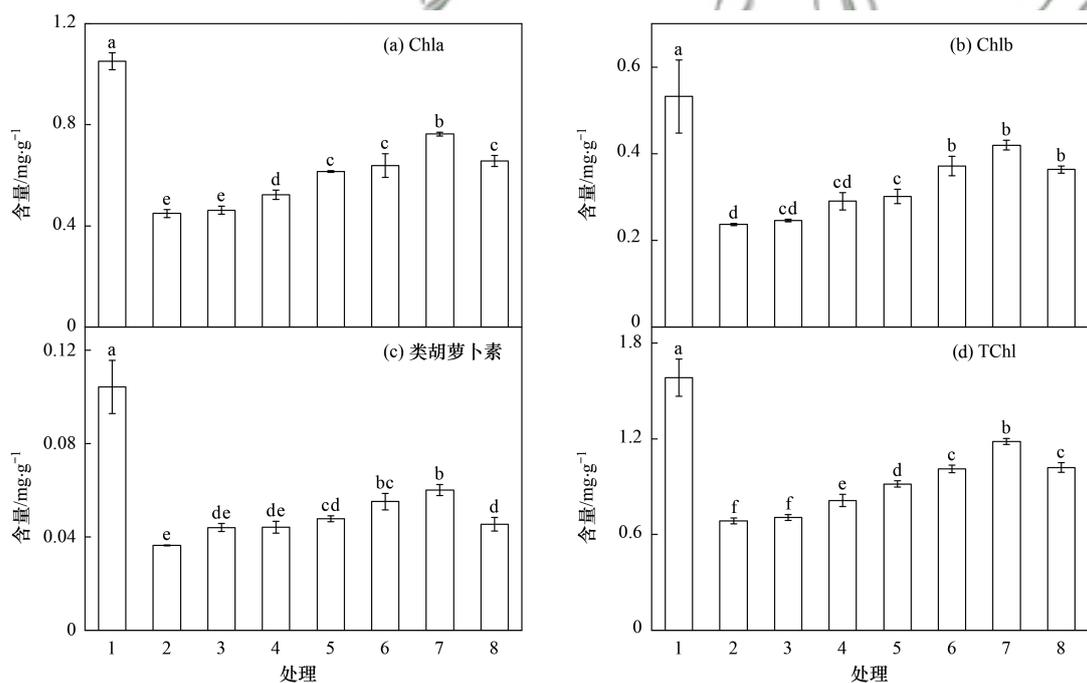
如表 1 所示, 通过隶属函数值的方法对 Cd 胁迫下不同浓度 Zn 对玉米幼苗的影响进行综合性评价,



1. CK, 2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>; 不同小写字母表示各处理间有显著差异 ( $P < 0.05$ )

图7 Cd胁迫下不同浓度Zn处理对玉米幼苗光合参数的影响

Fig. 7 Effects of different concentrations of Zn on photosynthetic parameters of maize seedlings under Cd stress



1. CK, 2. Cd, 3. CdZn<sub>10</sub>, 4. CdZn<sub>25</sub>, 5. CdZn<sub>50</sub>, 6. CdZn<sub>100</sub>, 7. CdZn<sub>200</sub>, 8. CdZn<sub>400</sub>; 不同小写字母表示各处理间有显著差异 ( $P < 0.05$ )

图8 Cd胁迫下不同浓度Zn处理对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 8 Effects of different concentrations of Zn on chlorophyll content of maize seedlings under Cd stress

结果表明,玉米幼苗在Cd胁迫下不同处理的耐受性强弱依次为: CdZn<sub>100</sub> > CdZn<sub>200</sub> > CdZn<sub>50</sub> > CdZn<sub>400</sub> > CdZn<sub>25</sub> > CdZn<sub>10</sub> > Cd.

### 3 讨论

#### 3.1 外源施加Zn对Cd胁迫下玉米幼苗生长的影响

Cd胁迫下植物体内会产生大量活性氧,对植物

细胞膜造成氧化损伤,影响其对养分和矿质元素的吸收,从而导致植物生长发育缓慢<sup>[32]</sup>. 本研究结果表明, Cd胁迫条件下,玉米幼苗的主根长、株高、生物量均显著降低,幼苗的生长受到了明显的抑制,同时玉米幼苗根冠比显著提高,可能是由于玉米幼苗的地上部对Cd更为敏感,受到了更为严重的毒害作用. 有研究表明,外源施加适宜浓度的Zn能够有效

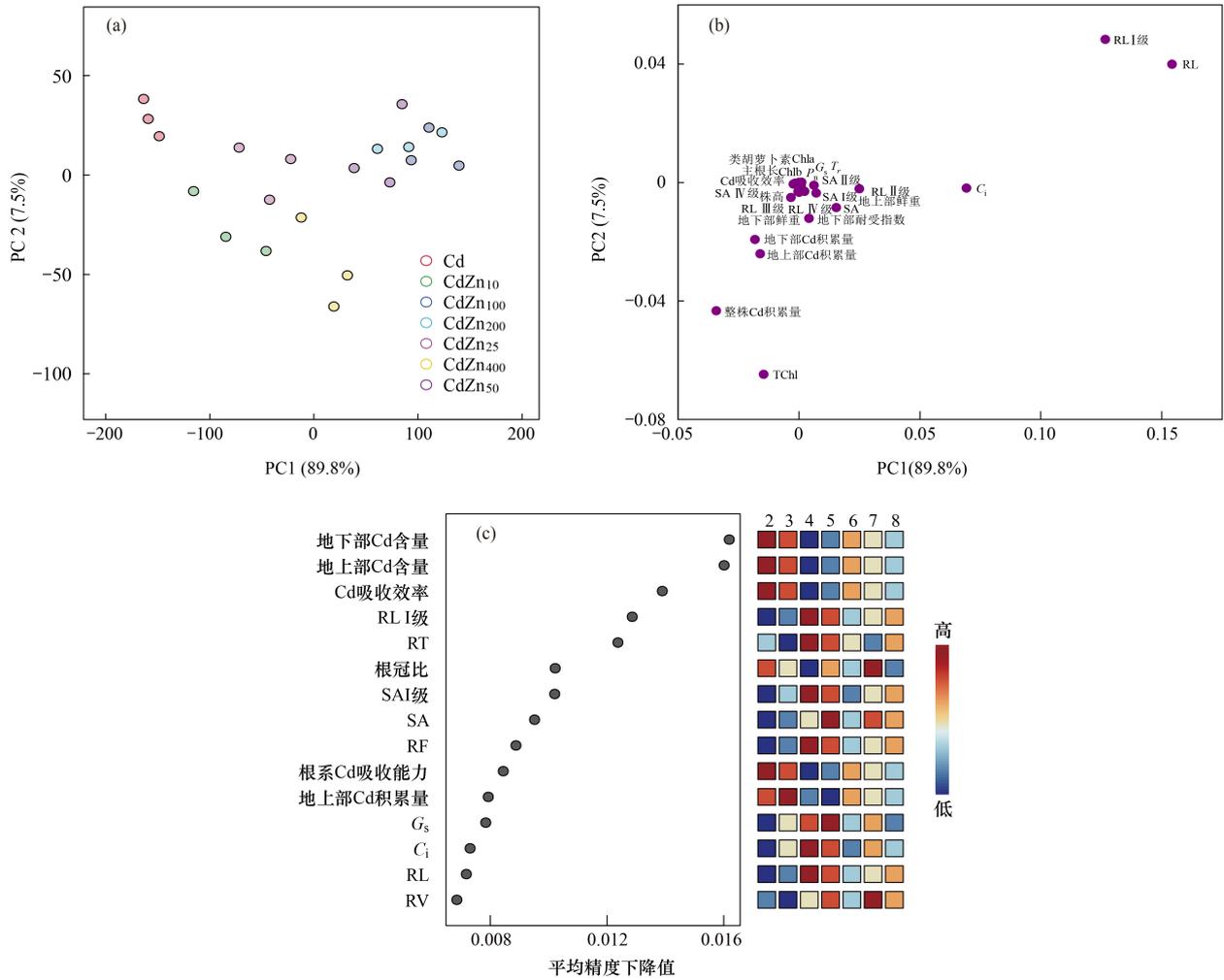


图9 Cd胁迫下不同浓度Zn处理诱导玉米幼苗各指标变化的主成分分析和随机森林分析

Fig. 9 Principal component analysis and random forest analysis of maize seedlings induced by different concentrations of Zn under Cd stress

表1 Cd胁迫下不同浓度Zn处理对玉米幼苗生长耐受性综合评价  
Table 1 Comprehensive evaluation of growth tolerance of maize seedlings treated with different concentrations of Zn under Cd stress

处理	Cd浓度 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn浓度 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	耐受性 平均值	排序
Cd	50	0	0.150 785	7
CdZn <sub>10</sub>	50	10	0.263 591	6
CdZn <sub>25</sub>	50	25	0.351 285	5
CdZn <sub>50</sub>	50	50	0.550 222	3
CdZn <sub>100</sub>	50	100	0.790 377	1
CdZn <sub>200</sub>	50	200	0.689 507	2
CdZn <sub>400</sub>	50	400	0.487 916	4

缓解逆境胁迫,提高作物的生物量<sup>[33]</sup>.韩潇潇等<sup>[34]</sup>研究发现,外源喷施Zn能够提高Zn向水稻籽粒中的转运,且抑制籽粒中Cd的积累.Zn是二价离子,与Cd有更大的相似性,可在根系附近竞争根表面的结合位点来影响植物对Cd的吸收<sup>[35]</sup>.在本试验中,外源施加 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn以后,玉米幼苗的生物量升高,株高、主根长、RT和RF均显著增加,

地上和地下部的耐受指数显著提高,地上和地下部Cd含量及根系Cd吸收能力和Cd吸收效率显著降低.有研究表明,较低浓度的Zn可有效缓解Cd诱导的植物生长下降和氧化胁迫<sup>[36,37]</sup>,而较高浓度的Zn水平增加了Cd浓度并引起植物的氧化胁迫<sup>[38]</sup>.本试验发现, $0\sim 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn处理下,玉米幼苗植株生物量增加、Cd含量及根系Cd吸收能力和吸收效率逐渐降低,在 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn处理下又显著升高,结合玉米耐受性隶属函数评价, $100、200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn可作为缓解 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫的适宜浓度. Chaoui等<sup>[39]</sup>对大豆(*Glycine max*)的研究发现,Cd和Zn之间表现为协同作用,施加Zn可以促进大豆对Cd的吸收和转运.本试验中玉米地上和地下部Cd含量在不同浓度Zn水平下显著降低,推测可能是由于Zn对玉米Cd转运能力抑制作用较强,从而达到减少Cd在地上部的累积作用,但是目前关于Zn与Cd之间的效应及作用机制仍存在争议<sup>[40-43]</sup>.

光合作用是植物积累生物量的重要途径,Cd胁迫

胁迫条件下,光合作用受到抑制,光合色素合成缓慢,生长发育受到阻碍,导致植株矮小,生物量积累减少<sup>[14]</sup>. 本试验发现,Cd胁迫导致玉米幼苗叶片的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 和 $T_r$ 显著降低,在水稻<sup>[44]</sup>和小麦<sup>[45]</sup>中也观察到类似现象. 可能是由于Cd胁迫导致玉米幼苗叶片气孔的密度和大小显著降低,并导致气孔开放数减少,根系对 $K^+$ 吸收减少及对 $Na^+$ 吸收增多,使保卫细胞开合受到阻碍,从而导致叶片 $G_s$ 下降,抑制玉米幼苗的 $P_n$ 、 $C_i$ 和 $T_r$ <sup>[46-49]</sup>. 施Zn后,光合作用得到明显改善,CdZn<sub>100</sub>处理下玉米叶片气体交换参数 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 和 $T_r$ 达到最大值. 类似现象在其它作物上也有发现,例如,Cd胁迫下外源施加Zn提高了小麦<sup>[50-52]</sup>和水稻<sup>[53]</sup>的气体交换特性和叶绿素含量. Sarwar等<sup>[54]</sup>研究表明,Cd胁迫下外源喷施赖氨酸锌可显著缓解Cd对小麦光合系统的抑制,光合色素含量和气体交换参数会随着Zn浓度的提高而增加.

叶绿体是植物进行光合作用的重要场所,而光合色素是植物吸收传递光能进行光合作用的主要介质,其含量对植物光能的吸收、转化和利用至关重要<sup>[55]</sup>. 有研究表明,随着Cd胁迫浓度的提高,玉米幼苗的细胞膜系统、叶绿体和线粒体等都会受到损伤<sup>[4]</sup>. 在本试验中,Cd胁迫条件下玉米叶片的Chla、Chlb、类胡萝卜素和TChl含量与CK处理相比显著降低,魏畅<sup>[56]</sup>在小麦中也发现了类似现象. 随着外源施加Zn浓度的升高,玉米叶片的Chla、Chlb、类胡萝卜素和TChl含量逐渐提高,在CdZn<sub>200</sub>处理下达到最高,显著高于Cd处理,在CdZn<sub>400</sub>处理下又降低. 10~200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn水平梯度下叶绿素含量升高可能是和叶片的光合损伤减少有关,因为Zn的施用显著降低了玉米体内Cd含量,缓解了Cd对玉米光合器官的损伤,相关性结果也表明玉米叶片的光合参数和叶绿素含量与玉米体内Cd含量、根系Cd吸收能力和吸收

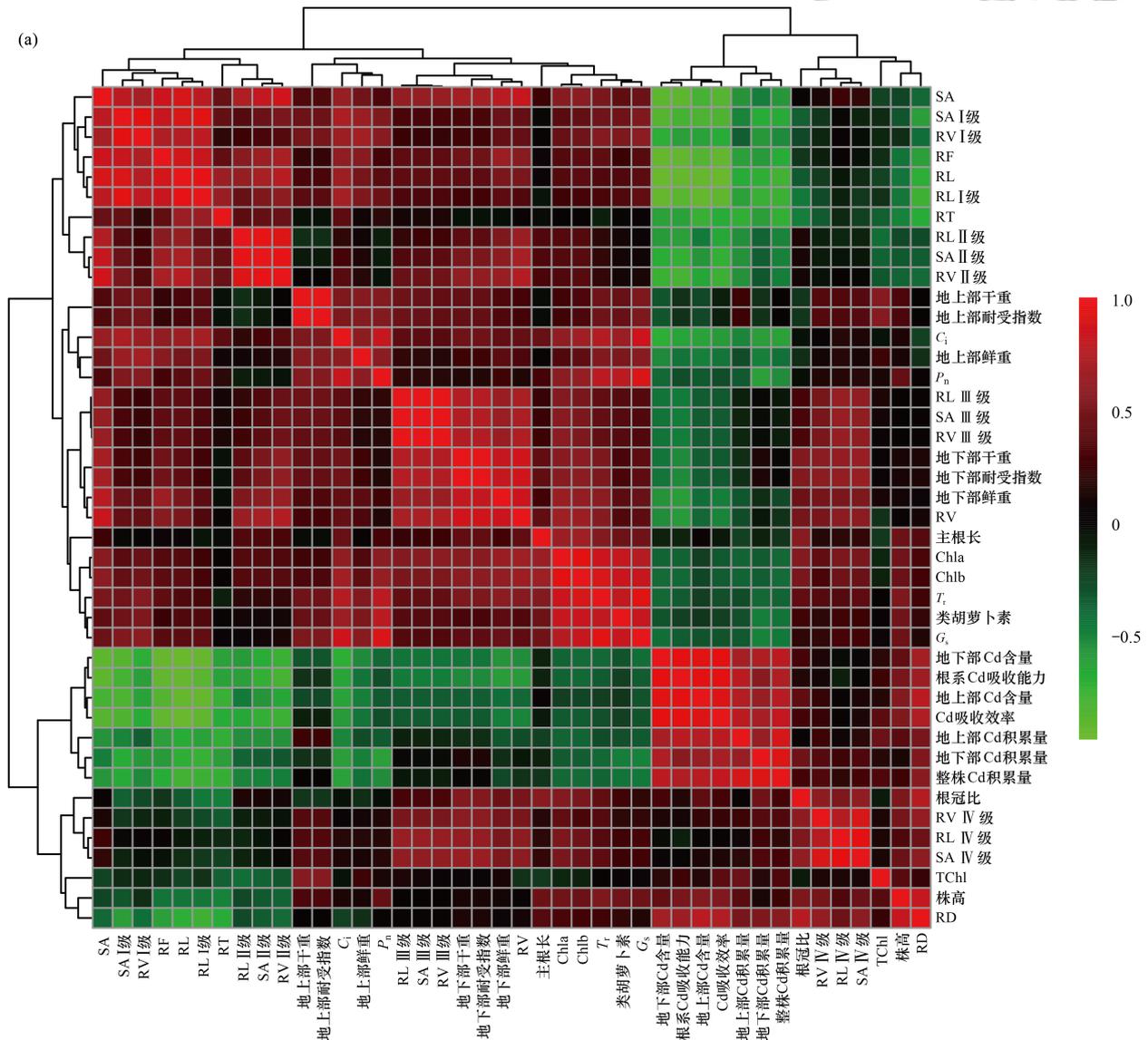
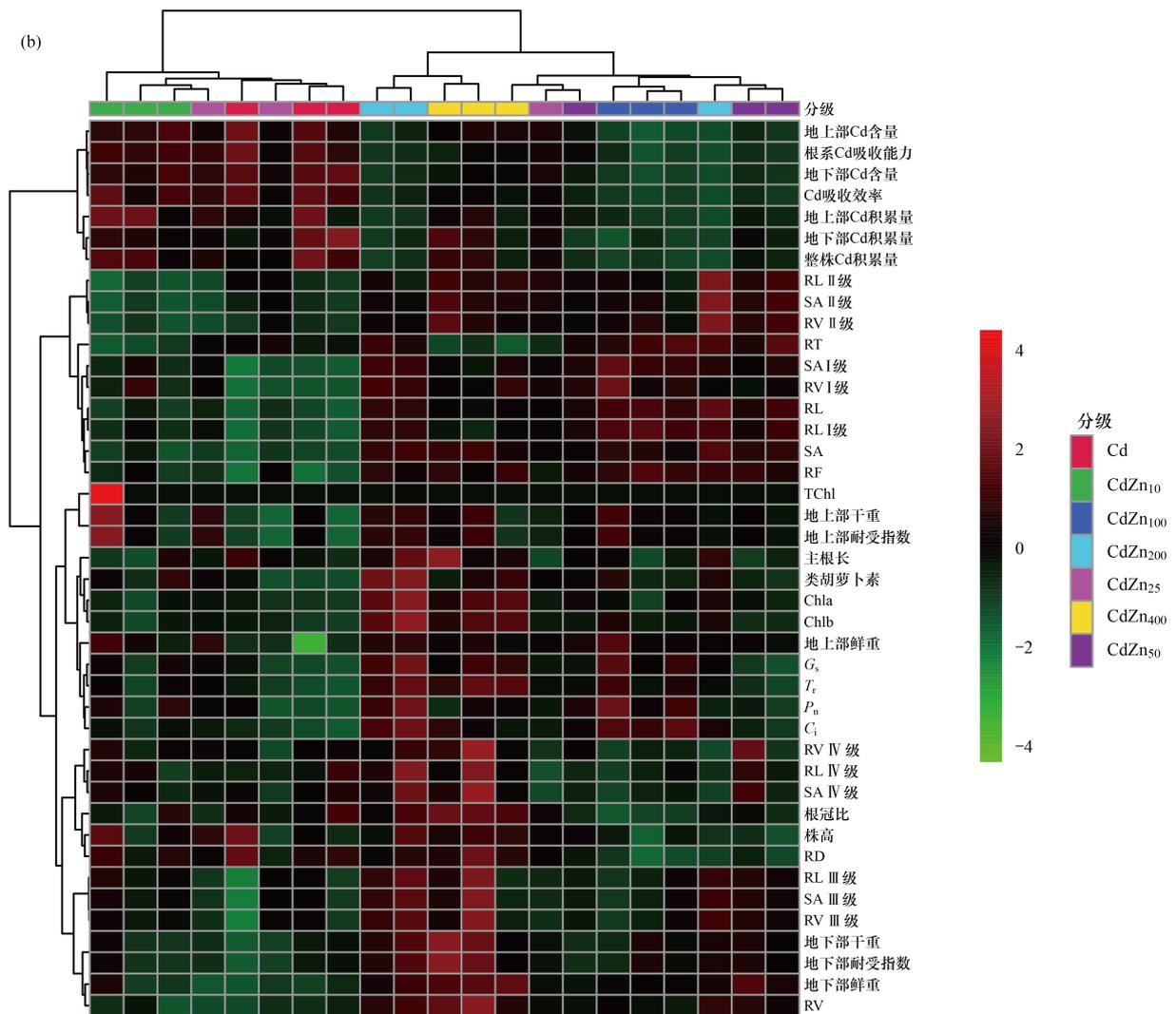


图10 Cd胁迫下不同浓度Zn处理诱导玉米幼苗各指标变化的相关性分析和热图

Fig. 10 Correlation analysis and heat map of each index change in maize seedlings induced by different concentrations of Zn under Cd stress

续图10



效率呈极显著负相关( $P < 0.01$ ); CdZn<sub>400</sub>处理下叶绿素含量降低,可能是由于高浓度的Zn和Cd导致玉米重金属毒性,影响玉米的正常生长。

### 3.2 外源施加Zn对Cd胁迫下玉米幼苗根系构型分级的影响

根系是植株最先感受和响应胁迫的器官,然后通过信号传递给其它器官,通过各种响应途径来适应逆境。植株根系构型及其分级特征可用于反映其对养分的吸收程度<sup>[57]</sup>。Cd胁迫能够直接抑制幼苗根系的生长,进而影响植株的生长发育,最终影响植株的生物量和品质<sup>[58]</sup>。李海燕等<sup>[59]</sup>研究发现,当Cd浓度超过 $3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时玉米幼苗根系的生长会受到抑制,且随着Cd浓度的升高抑制作用逐渐加强。本研究发现,Cd胁迫下(Cd),玉米幼苗RL、SA、RV、RT、RF、I~III级径级区间的RL、SA和I~II级径级区间的RV均显著降低,表现出明显的毒害症状,在小麦<sup>[29]</sup>和水稻<sup>[60]</sup>上也发现了类似的毒害症状。Cd进入到根细胞内,会破坏细胞结

构,导致细胞分裂和根系生长受阻,从而导致根系生长缓慢<sup>[61]</sup>。何俊瑜等<sup>[60]</sup>研究发现,随着外源Cd浓度升高,对水稻I~III级径级区间的RL、SA和RV的抑制作用逐渐加强。本研究发现根施Zn显著增加了玉米幼苗的RL、SA和RV; CdZn<sub>100</sub>处理较好地缓解了Cd胁迫对玉米幼苗根系的毒害作用, CdZn<sub>200</sub>处理更好地促进了平均直径 $> 0.5 \text{ mm}$ 部分根系的生长发育。从生理生化机制方面推测,可能是由于外源添加Zn对Cd胁迫诱导的氧化应激有缓解作用,以促进根系及其构型的生长发育。有研究表明,根系中较高的Cd积累量会诱导其产生过量的活性氧,破坏抗氧化系统,降低根系活力,影响呼吸代谢过程,从而抑制地上部的生长和根系形态构型的发育<sup>[62,63]</sup>。Zn可作为生物膜的稳定剂和保护剂<sup>[64]</sup>,主要是通过降低根系Cd的吸收能力和地上部的氧化胁迫,改变膜的通透性,从而缓解Cd毒害对地上部及根系发育的抑制作用<sup>[53]</sup>。

## 4 结论

(1) 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 胁迫对玉米幼苗生长发育具有显著抑制作用, 使玉米幼苗株高显著降低 33.65%, TChl 含量显著降低 56.69%, RT 显著减少 45.59%, 导致玉米幼苗植株矮小、叶片失绿、根系构型异常。

(2) 外源施加不同浓度 Zn 能够不同程度降低玉米幼苗对 Cd 的吸收能力和吸收效率, 减少植株内的 Cd 含量, 缓解 Cd 胁迫造成的毒害作用。其中, 外源施加 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 使根系 Cd 吸收能力及 Cd 吸收效率显著降低, 显著提高了 Cd 胁迫下玉米幼苗的生物量、株高、主根长、RV、SA、RT 和 RF, 有效缓解了对光合系统的抑制, 并促进了各根系分级下构型参数。

(3) 对玉米的耐受性综合评价发现, CdZn<sub>100</sub> 处理和 CdZn<sub>200</sub> 处理能较好缓解 Cd 胁迫对玉米幼苗生长发育的抑制作用, 有效提高玉米幼苗对 Cd 胁迫的耐受性。

### 参考文献:

[1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 环境教育, 2014, (6): 8-10.

[2] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1606-1619.

Ren C, Ren Y Z, Wang H, et al. Cadmium accumulation characteristics of different wheat varieties under cadmium stress[J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1606-1619.

[3] 李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 147-152.

Li C Z, Sun Y L, Liu H M, et al. The difference of seedling growth and photosynthetic performance of different rice varieties under cadmium stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(2): 147-152.

[4] 陈晶, 庞思琪, 赵秀兰. 外源生长素对镉胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(8): 1191-1198.

Chen J, Pang S Q, Zhao X L. Effects of exogenous auxins on growth and antioxidation system in maize seedlings under cadmium stress[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(8): 1191-1198.

[5] Ur Rahman S, Xuebin Q, Riaz L, et al. The interactive effect of pH variation and cadmium stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth, physiological and biochemical parameters[J]. PLoS One, 2021, 16(7), doi: 10.1371/journal.pone.0253798.

[6] 蒋欣梅, 薛冬冬, 于锡宏, 等. 玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 1000-1006.

Jiang X M, Xue D D, Yu X H, et al. Effects of corn-stalk biochar on the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(4): 1000-1006.

[7] 于敏敏, 樊文华, 刘奋武, 等. 硅和硒对镉胁迫下黄瓜幼苗光合作用和抗氧化酶系统的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(1): 116-124.

Yu M M, Fan W H, Liu F W, et al. Effects of silicon and

selenium on photosynthesis and antioxidant enzyme system of cucumber seedlings under cadmium stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(1): 116-124.

- [8] 高夕彤, 李硕, 贾娟, 等. 不同番茄品种对镉胁迫的耐抗性差异研究[J]. 华北农学报, 2018, 33(2): 169-176.
- Gao X T, Li S, Jia J, et al. Study on resistance of different tomato varieties to cadmium stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(2): 169-176.
- [9] 王玉萍, 常宏, 李成, 等. Ca<sup>2+</sup>对镉胁迫下玉米幼苗生长、光合特征和 PS II 功能的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(5): 40-48.
- Wang Y P, Chang H, Li C, et al. Effects of exogenous Ca<sup>2+</sup> on growth, photosynthetic characteristics and photosystem II function of maize seedlings under cadmium stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(5): 40-48.
- [10] 刘建新. 镉胁迫下玉米幼苗生理生态的变化[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 265-268.
- Liu J X. Physiological and ecological responses of maize seedlings to cadmium stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 265-268.
- [11] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米 (*Zea mays*) 对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671-1676.
- Chen J J, Yu W, Zu Y Q, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea Mays* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(10): 1671-1676.
- [12] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Root morphology and cadmium uptake kinetics of the cadmium-sensitive rice mutant [J]. Biologia Plantarum, 2007, 51(4): 791-794.
- [13] 严小龙, 廖红, 戈振扬, 等. 植物根构型特性与磷吸收效率[J]. 植物学通报, 2000, 17(6): 511-519.
- Yan X L, Liao H, Ge Z Y, et al. Root architectural characteristics and phosphorus acquisition efficiency in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 17(6): 511-519.
- [14] 魏畅, 焦秋娟, 柳海涛, 等. 镉暴露条件下玉米生长及根系构型分级特征研究[J]. 草业学报, 2022, 31(3): 101-113.
- Wei C, Jiao Q J, Liu H T, et al. Physiological effects of different Cd concentrations on maize root architecture and classification [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(3): 101-113.
- [15] Liu H J, Zhang C X, Wang J M, et al. Influence and interaction of iron and cadmium on photosynthesis and antioxidative enzymes in two rice cultivars [J]. Chemosphere, 2017, 171: 240-247.
- [16] 樊金娟, 刘宇, 曹樱迪, 等. 玉米对镉胁迫的响应及其耐镉机制研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 633-640.
- Fan J J, Liu Y, Cao Y D, et al. Responses of maize to cadmium stress and mechanisms of cadmium tolerance [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(5): 633-640.
- [17] 余志强, 胡嘉源, 李尚珂, 等. 外源亚精胺调控黑麦草根系响应镉胁迫及其转录组学分析[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5746-5756.
- Yu Z Q, Hu J Y, Li S K, et al. Exogenous spermidine regulates rye grass root system response to Cd stress and its transcriptome analysis [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5746-5756.
- [18] 杨青, 谢俊婷, 张志盼, 等. 外源植物激素喷施对三叶鬼针草修复镉污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5757-5768.
- Yang Q, Xie J T, Zhang Z P, et al. Effects of exogenous plant hormones spraying on the phytoremediation by *Bidens pilosa* L. in cadmium contaminated soil [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5757-5768.

- [19] 刘杨, 齐明星, 王敏, 等. 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2024-2030.  
Liu Y, Qi M X, Wang M, *et al.* Effects of different exogenous selenium species application on growth and cadmium uptake of Pak Choi in cadmium contaminated soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2024-2030.
- [20] 姜琰, 魏畅, 焦秋娟, 等. 外源硅对镉胁迫下玉米生理参数及根系构型分级的影响[J]. 草业学报, 2022, **31**(9): 139-154.  
Jiang Y, Wei C, Jiao Q J, *et al.* Effects of exogenous silicon application on physiological parameters, root architecture and diameter distribution of maize under cadmium stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, **31**(9): 139-154.
- [21] 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.
- [22] Hassan M U, Aamer M, Chattha M U, *et al.* The critical role of zinc in plants facing the drought stress[J]. Agriculture, 2020, **10**(9), doi: 10.3390/agriculture10090396.
- [23] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, *et al.* A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [24] 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.
- [25] Qaswar M, Hussain S, Rengel Z. Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar[J]. Science of the Total Environment, 2017, **605-606**: 454-460.
- [26] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach[J]. Environmental Pollution, 1993, **79**(2): 113-120.
- [27] 付宝荣, 李法云, 臧树良, 等. 锌营养条件下镉污染对小麦生理特性的影响[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2000, **27**(4): 366-370.  
Fu B R, Li F Y, Zang S L, *et al.* Effect of Cd on physiological characteristics of wheat under the condition of Zn nutrition[J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 2000, **27**(4): 366-370.
- [28] Zhou J, Zhang C, Du B Y, *et al.* Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars[J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115045.
- [29] 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.
- [30] Shi G R, Xia S L, Ye J, *et al.* PEG-simulated drought stress decreases cadmium accumulation in castor bean by altering root morphology[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, **111**: 127-134.
- [31] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2015.  
Wang X K, Huang J L. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment (3rd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [32] 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.
- [33] Wu S W, Shi K L, Hu C X, *et al.* Non-invasive microelectrode cadmium flux measurements reveal the decrease of cadmium uptake by zinc supply in Pakchoi root (*Brassica chinensis* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **168**: 363-368.
- [34] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1809-1817.  
Han X X, Ren X H, Wang P P, *et al.* Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1809-1817.
- [35] 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.
- [36] Taspinar M S, Agar G, Alpsoy L, *et al.* The protective role of zinc and calcium in *Vicia faba* seedlings subjected to cadmium stress [J]. Toxicology and Industrial Health, 2011, **27**(1): 73-80.
- [37] Saifullah, Sarwar N, Bibi S, *et al.* Effectiveness of zinc application to minimize cadmium toxicity and accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(4): 1663-1672.
- [38] Cherif J, Mediouni C, Ben Ammar W, *et al.* Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(5): 837-844.
- [39] Chaoui A, Ghorbal M H, El Ferjani E. Effects of cadmium-zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Plant Science, 1997, **126**(1): 21-28.
- [40] He P P, Lv X Z, Wang G Y. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables [J]. Environment International, 2004, **30**(2): 167-172.
- [41] Liu H J, Zhang J L, Christie P, *et al.* Influence of external zinc and phosphorus supply on Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings with root surface iron plaque[J]. Plant and Soil, 2007, **300**(1-2): 105-115.
- [42] Kummerová M, Zezulka Š, Králová K, *et al.* Effect of zinc and cadmium on physiological and production characteristics in *Matricaria recutita* [J]. Biologia Plantarum, 2010, **54**(2): 308-314.
- [43] Qiu R L, Thangavel P, Hu P J, *et al.* Interaction of cadmium and zinc on accumulation and sub-cellular distribution in leaves of hyperaccumulator *Potentilla griffithii* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1425-1430.
- [44] Huang H L, Li M, Rizwan M, *et al.* Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123393.
- [45] Shi Z Y, Yang S Q, Han D, *et al.* Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(8): 7638-7646.
- [46] 陈良华, 赖娟, 胡相伟, 等. 接种丛枝菌根真菌对受镉胁迫美

- 洲黑杨雌、雄株光合生理的影响[J]. 植物生态学报, 2017, **41**(4): 480-488.
- Chen L H, Lai J, Hu X W, *et al.* Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic physiology in females and males of *Populus deltoides* exposed to cadmium pollution[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, **41**(4): 480-488.
- [47] Tang L, Ying R R, Jiang D, *et al.* Impaired leaf CO<sub>2</sub> diffusion mediates Cd-induced inhibition of photosynthesis in the Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, **73**: 70-76.
- [48] Zhu R K, Macfie S M, Ding Z F. Cadmium-induced plant stress investigated by scanning electrochemical microscopy[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, **56**(421): 2831-2838.
- [49] 王旭明, 赵夏夏, 黄露莎, 等. 盐胁迫下 4 个不同耐盐基因型水稻 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 积累效应[J]. 热带作物学报, 2018, **39**(11): 2140-2146.
- Wang X M, Zhao X X, Huang L S, *et al.* The Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> accumulative effect of four different salt tolerance genotypes in rice under salt stress[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, **39**(11): 2140-2146.
- [50] Sharma R K, Agrawal M, Agrawal S B. Responses of *Beta vulgaris* exposed to cadmium and zinc through soil drenching[J]. Journal of Environmental Biology, 2014, **35**(4): 727-732.
- [51] Abbas M S, Akmal M, Ullah S, *et al.* Effectiveness of zinc and gypsum application against cadmium toxicity and accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, **48**(14): 1659-1668.
- [52] Rizwan M, Ali S, Hussain A, *et al.* Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment [J]. Chemosphere, 2017, **187**: 35-42.
- [53] Hassan M J, Zhang G P, Wu F B, *et al.* Zinc alleviates growth inhibition and oxidative stress caused by cadmium in rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, **168**(2): 255-261.
- [54] Sarwar N, Ishaq W, Farid G, *et al.* Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **122**: 528-536.
- [55] 孔维萍, 程鸿, 岳宏忠. 镉胁迫对甜瓜幼苗叶片叶绿体超微结构及光合色素质量分数的影响[J]. 西北农业学报, 2020, **29**(6): 935-941.
- Kong W P, Cheng H, Yue H Z. Effects of cadmium stress on leaf chloroplast ultrastructure and chlorophyll mass fraction of three melon varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, **29**(6): 935-941.
- [56] 魏畅. 硅锌互作缓解冬小麦镉毒害效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
- Wei C. Effect of silicon-zinc interaction on alleviating cadmium toxicity in winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.
- [57] 曲梦雪, 宋杰, 孙菁, 等. 镉胁迫对不同耐镉型玉米品种苗期根系生长的影响[J]. 作物学报, 2022, **48**(11): 2945-2952.
- Qu M X, Song J, Sun J, *et al.* Effects of cadmium stress on root growth of maize (*Zea mays* L.) varieties with different cadmium-tolerant at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, **48**(11): 2945-2952.
- [58] Guo T R, Zhang G P, Zhou M X, *et al.* Influence of aluminum and cadmium stresses on mineral nutrition and root exudates in two barley cultivars[J]. Pedosphere, 2007, **17**(4): 505-512.
- [59] 李海燕, 郭永成, 李刘洋, 等. 外源一氧化氮对镉胁迫下玉米幼苗根生长及氧化伤害的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(8): 1599-1605.
- Li H Y, Guo Y C, Li L Y, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide on root growth and oxidative damage in maize seedlings under cadmium stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, **32**(8): 1599-1605.
- [60] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(5): 1863-1868.
- He J Y, Wang Y Y, Ren Y F, *et al.* Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(5): 1863-1868.
- [61] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J]. 生态学报, 1998, **18**(3): 320-325.
- Qin T C, Wu Y S, Wang H X, *et al.* Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis* [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, **18**(3): 320-325.
- [62] Javed M T, Akram M S, Tanwir K, *et al.* Cadmium spiked soil modulates root organic acids exudation and ionic contents of two differentially Cd tolerant maize (*Zea mays* L.) cultivars [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **141**: 216-225.
- [63] Srivastava R K, Rajpoot R, Pandey P, *et al.* Cadmium alters mitochondrial membrane potential, inhibits electron transport chain activity and induces callose deposition in rice seedlings[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2018, **37**(1): 335-344.
- [64] Aravind P, Prasad M N V. Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a freshwater macrophyte [J]. Plant Science, 2004, **166**(5): 1321-1327.

## 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 )