

 方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



**2019**

Vol.40 No.1  
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM<sub>2.5</sub>成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM<sub>2.5</sub>时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O<sub>3</sub>的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM<sub>2.5</sub>传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM<sub>2.5</sub>中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO<sub>2</sub>交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca<sup>2+</sup>复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS<sub>2</sub>/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N<sub>2</sub>O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

# Cd、Zn 交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响

郭俊梅<sup>1</sup>, 杨俊兴<sup>1\*</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 陈同斌<sup>1</sup>, 李厚恩<sup>2</sup>, 徐铁兵<sup>3</sup>, 周小勇<sup>4</sup>, 叶勇<sup>4</sup>, 于豹<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 环境修复中心, 北京 100101; 2. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京市环境岩土工程技术研究中心, 北京 100038; 3. 河北省环境科学研究院, 石家庄 050051; 4. 北京瑞美德环境修复有限公司, 北京 100015)

**摘要:** 采取水培试验, 研究了不同 Cd、Zn 浓度单一胁迫及其交互作用对三七景天生长、根系形态及 Cd、Zn 吸收和积累的影响。结果表明, 三七景天对 Cd、Zn 单一胁迫均有较强的耐受性, 其根、茎、叶各组织中 Cd、Zn 含量均随胁迫的增加而增加, 且对 Cd 有较强的富集能力, 地上部 Cd 含量可达 133.0 mg·kg<sup>-1</sup>。Cd、Zn 共同胁迫对三七景天生长的影响大于单一胁迫, 而根系对其胁迫更为敏感, 在 Cd、Zn 共同胁迫下其根系长度、表面积、体积和根尖数均显著降低, 且对其根尖数的影响最为显著。Zn 对三七景天地上部 Cd 吸收具有“低促高抑”效应, 低浓度 Zn (10 mg·L<sup>-1</sup>) 对三七景天地上部 Cd 吸收有协同作用, 促进 Cd 由根部向地上部转运。而添加 Cd 则对三七景天 Zn 吸收具有拮抗作用。Zn/Cd 浓度比值对三七景天 Cd 吸收有显著影响, Zn/Cd 比值较低时促进三七景天地上部 Cd 的积累, 而高 Zn/Cd 比则抑制其 Cd 的积累。因此, 三七景天具有较强的 Cd 富集能力, 可应用于修复 Cd 污染土壤, 而调节生长介质中 Cd、Zn 比例可促进三七景天对 Cd 的吸收效率。

**关键词:** 三七景天; Cd; Zn; 交互作用; 根系形态; 吸收

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0470-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201805055

## Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in *Sedum aizoon*

GUO Jun-mei<sup>1</sup>, YANG Jun-xing<sup>1\*</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, CHEN Tong-bin<sup>1</sup>, LI Hou-en<sup>2</sup>, XU Tie-bing<sup>3</sup>, ZHOU Xiao-yong<sup>4</sup>, YE Yong<sup>4</sup>, YU Bao<sup>1</sup>

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Environmental Geotechnology, BGI Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 4. Beijing Remediation Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing 100015, China)

**Abstract:** A hydroponic experiment was conducted to study the interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of Cd and Zn in *Sedum aizoon*. The results show that *S. aizoon* exhibits a high tolerance to single stress of Cd and Zn and the concentrations of Cd and Zn in the leaf, stem, and root of *S. aizoon* increase as the stress levels increase. A strong phytoextraction capacity in *S. aizoon* was also observed for the Cd concentration in the aboveground part reaching 133.0 mg·kg<sup>-1</sup>. The combined stress of Cd and Zn has a greater effect on the growth of *S. aizoon* than single stress to which the root is more sensitive. The root length, surface area, root volume, and tips significantly decrease under combined stress of Cd and Zn; the effect on the tips is most significant. The low-level Zn application (10 mg·L<sup>-1</sup>) has a synergistic effect on the Cd accumulation in the shoot of *S. aizoon* because of the promotion of Cd translocation from root to shoot. However, the addition of Cd leads to a notable antagonism of the Zn absorption of *S. aizoon*. The concentration ratio of Zn and Cd also has a significant effect on the Cd uptake of *S. aizoon*. A high ratio promotes the Cd accumulation in the shoot, while the latter is inhibited by a low Zn/Cd ratio. Therefore, *S. aizoon* possesses a strong potential of Cd phytoextraction and can be applied for phytoremediation of Cd-contaminated soil, while the adjustment of the ratio of Cd and Zn in the growth medium will help to enhance the phytoremediation efficiency of *S. aizoon*.

**Key words:** *Sedum aizoon*; Cd; Zn; interaction; root morphology; uptake

Cd 是自然界中毒性最强的重金属污染物之一, Cd 胁迫会抑制植物生长, 减少其叶绿素含量, 使细胞内活性氧水平上升, 影响营养元素的吸收, 以及其他形态学和生理生化方面的影响<sup>[1, 2]</sup>。同时 Cd 具有较高的迁移性和积累性, 可通过食物链在生物体内富集, 对人类健康造成威胁<sup>[3]</sup>。Zn 与 Cd 同为 II B 族元素, 是植物生长必须的微量营养元素, 是植物体内多种关键酶的重要组分, 参与植物叶绿素

合成、光合作用和蛋白质代谢等多种代谢过程, 同时 Zn 对维持细胞结构完整性和膜透性有重要作用<sup>[4-7]</sup>, 但其在高浓度下也会对植物产生毒性<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 国家自然科学基金项目(41771509, 41771510, 41201312, 41271478)

作者简介: 郭俊梅(1990~), 男, 博士, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: gjm19900321@163.com

\* 通信作者, E-mail: yangjx@igsnr.ac.cn

目前,国内外对植物单一重金属胁迫的研究已较为完善,但自然界中重金属污染物往往不是单独存在的,如 Cd、Zn 具有相同的核外电子构型和离子半径,因而其具有相近的地球化学和环境特性,自然界中 Zn 矿中一般含有 0.1%~5% 的 Cd,采矿和冶金等工业活动往往会造成周边土壤的重金属污染, Cd、Zn 污染往往相伴生<sup>[9,10]</sup>. Cd、Zn 之间存在复杂的交互作用,其 Cd、Zn 相互作用对植物生长、植物体内 Cd、Zn 的吸收转运及其生理生化方面具有影响. Zn 与 Cd 间的相互作用既可能是协同效应,也可能是拮抗效应,目前的研究发现, Cd、Zn 交互作用对不同植物表现出截然不同的影响,对浮萍(*Lemna minor*)、蚕豆(*Vicia faba* L.) 和大麦(*Hordeum vulgare* L.) 等表现出拮抗作用<sup>[11~13]</sup>,而对小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、番茄(*Solanum lycopersicum*) 和油菜(*Brassica napus*) 等表现出协同作用<sup>[14~16]</sup>,其可能取决于植物品种、环境条件、Zn 和 Cd 浓度及比值等<sup>[17]</sup>.

根系是植物和环境介质离子交换的主要界面,其对环境中重金属的胁迫最为敏感,研究表明植物在 Cd 胁迫下通过根系形态的改变以适应不利的生长环境,根系对 Cd 的吸收可能受根系形态的影响大于根生物量<sup>[18,19]</sup>,目前国内外的研究多为 Cd、Zn 单因素对植物根系形态的影响,而 Cd、Zn 交互作用对植物根系形态的影响尚少见报道, Li 等<sup>[20]</sup>的研究发现 Cd、Zn 交互作用对不同富集型东南景天根系形态和 Cd、Zn 吸收转运有不同的响应.

三七景天(*Sedum aizoon*) 为景天科景天属多年生植物,其适应性强、不择土壤,在全国各地均有广泛分布. 有研究表明其对 Cd 具有较强的耐性和富集能力<sup>[21]</sup>,具有应用于 Cd 污染土壤修复的潜力,但目前对 Cd、Zn 单一胁迫及其交互作用下三七景天根系形态和 Cd、Zn 吸收转运的研究尚不明了,明晰不同重金属胁迫之间的相互作用及其对植物吸收转运和根系形态的影响有助于更好地探索植物修复的潜力<sup>[22]</sup>. 因此,本研究采用水培试验来分析不同 Cd、Zn 单一胁迫及其交互作用对三七景天生长、根系形态及 Cd、Zn 吸收和积累的影响,以期对三七景天应用于 Cd、Zn 污染土壤修复提供技术支持和理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

供试植物为景天科景天属多年生植物——三七景天,其幼苗取自河南省济源市土壤重金属修复基地,由中国科学院地理科学与资源研究所提供.

三七景天幼苗首先在人工无污染培养基质中预培养 15 d,然后选取长势一致的健壮幼苗用于水培试验. 本试验在中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心温室内进行.

### 1.2 试验设计

将长势一致的幼苗转移至装有 600 mL 50% 霍格兰营养液的 1 L 塑料盆中,营养液中各成分如下: 2.5 mmol·L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、2.5 mmol·L<sup>-1</sup> KCl、0.005 mmol·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、0.5 mmol·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>、25 μmol·L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、2.25 μmol·L<sup>-1</sup> MnSO<sub>4</sub>、1.9 μmol·L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub>、0.15 μmol·L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>、0.05 mmol·L<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> 和 5 μmol·L<sup>-1</sup> EDTA-FeNa. 本试验共设 8 个处理: CK, 2 mg·L<sup>-1</sup> Cd, 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd, 10 mg·L<sup>-1</sup> Zn, 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn, 2 mg·L<sup>-1</sup> Cd + 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn, 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd + 10 mg·L<sup>-1</sup> Zn 和 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd + 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn, 可组合为 4 个试验: ① Cd 单一胁迫试验, 设 0、2 和 5 mg·L<sup>-1</sup> 这 3 个浓度梯度; ② Zn 单一胁迫试验, 设 0、10 和 20 mg·L<sup>-1</sup> 这 3 个浓度梯度; ③ 在 Cd 添加浓度为 0、2 和 5 mg·L<sup>-1</sup> 下添加 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn; ④ 在 Cd 添加浓度为 5 mg·L<sup>-1</sup> 下添加 0、10 和 20 mg·L<sup>-1</sup> 这 3 个浓度梯度的 Zn. 每个试验处理设 4 个重复,每盆培养 4 株三七景天幼苗. 以优级纯 CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 和 ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 为试验中 Cd 和 Zn 的污染源,用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 调节营养液的 pH 至 6.0±0.1. 温室培养条件为昼夜温度 25/15℃,光周期 16 h,光照强度为 300 mE·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>,空气相对湿度为 60%. 试验持续 16 d,每 3 d 更换一次营养液,同时对营养液连续均匀通气.

### 1.3 样品测试

培养试验结束后将三七景天样品分为根、茎、叶 3 部分单独收获,茎、叶部分先用自来水冲洗 3 遍,根部先在 10 mmol·L<sup>-1</sup> 乙二胺四乙酸溶液(EDTA)中浸泡 5 min 以去除根表面附着的重金属离子,最后,各部分均用超纯水清洗 3 遍.

首先取清洗后各处理三七景天完整根系,用根系扫描仪(Epson Perfection V700)进行扫描,然后用 WinRHIZO 根系形态分析系统进行分析,获取总根长(root length, RL)、根表面积(root surfact area, RSA)、根系平均直径(average root diameter, ARD)、根体积(root volume, RV)和根尖数(tips)等根系形态参数.

然后将三七景天叶、茎、根各组织放入到烘箱中,先于 105℃ 杀青 30 min,后在 70℃ 下将植物样品烘干,用电子天平称取干物质重量.

将烘干后的根、茎、叶样品分别磨碎,称取0.2 g到50 mL三角瓶中,加入8 mL浓硝酸和高氯酸(5:1,体积比)混合液于电热板上消解,消解温度开始设定为65℃,然后升高至160℃直至样品溶液澄清.消解液定容至50 mL容量瓶中,用电感耦合等离子质谱仪测定Cd、Zn含量(ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, USA).使用标准物质GBW07603(GSV-2)来监控样品中Cd、Zn的回收率(90%±10%).

#### 1.4 统计分析

使用Excel软件进行数据相关计算,试验结果采用SPSS Statistics 19统计分析软件进行方差分析,不同处理间采用最小显著差数法(LSD法)进行差异显著性检验( $P < 0.05$ ),采用Origin Pro 2016软件进行作图.

利用耐性指数(tolerance index, TI)表征不同Cd、Zn胁迫下三七景天的生长响应,其计算公式如下所示:

$$TI = \frac{B_m}{B_{control}}$$

式中, $m$ 代表Cd、Zn不同重金属, $B_m$ (g)与 $B_{control}$ (g)分别表示Cd、Zn胁迫下与对照条件下三七景天生物量.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同Cd、Zn浓度胁迫对三七景天生长的影响

Cd、Zn单一胁迫及其交互作用对三七景天各组织生物量的影响如表1所示,从中可知,三七景天叶生物量在0.29~0.39 g·plant<sup>-1</sup>之间,Cd、Zn

单一胁迫及其交互作用对三七景天叶生物量均没有显著影响.与对照处理相比,Cd、Zn单一胁迫均增加了三七景天茎生物量,均在低浓度胁迫下茎生物量达到最大,尤其在2 mg·L<sup>-1</sup> Cd胁迫下增加了61.1%,达到显著水平( $P < 0.05$ ).Cd、Zn交互作用较单一胁迫均抑制了三七景天茎的生长,且随着Cd、Zn浓度的增加而抑制作用更加明显,在Cd浓度为2 mg·L<sup>-1</sup>和5 mg·L<sup>-1</sup>时添加20 mg·L<sup>-1</sup> Zn其茎生物量均较单一胁迫显著下降了48.7%和51.2% ( $P < 0.05$ ).不同Cd、Zn添加量对三七景天地上部生物量的影响均未达显著水平,由表可知,Cd、Zn单独胁迫下,三七景天地上部生物量均略有增加,唯有Zn浓度为20 mg·L<sup>-1</sup>时略有降低,而Cd、Zn同时添加的情况下三七景天地上部生物量较Cd、Zn单一胁迫均有所降低.Cd单一胁迫抑制了三七景天根系生长,在Cd浓度为2 mg·L<sup>-1</sup>和5 mg·L<sup>-1</sup>时分别降低了47.9%和44.5%,且添加20 mg·L<sup>-1</sup> Zn进一步降低了其根系生物量,较对照显著降低了82.6%和82.8% ( $P < 0.05$ ).Zn单一胁迫在10 mg·L<sup>-1</sup>浓度下三七景天根系生物量略有增加,而在高浓度(20 mg·L<sup>-1</sup>)条件下较对照降低了38.5%,添加5 mg·L<sup>-1</sup> Cd进一步抑制了根系生长.不同Cd、Zn添加量下三七景天耐性指数在0.65~1.17之间,在Cd、Zn添加量分别为5 mg·L<sup>-1</sup>和20 mg·L<sup>-1</sup>时耐性指数最低.

双因素方差分析结果表明,Cd胁迫对三七景天地上部各组织生长均没有显著影响,而Zn却显著影响三七景天地上部的生长,主要影响茎生物量,Cd、Zn均显著抑制了植物根系的生长( $P < 0.05$ ).

表1 Cd、Zn单一胁迫及其交互作用对三七景天生物量的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of different Cd and Zn additions to the nutrient solution on the biomass of different tissues of *S. aizoon*

Cd 添加量 /mg·L <sup>-1</sup>	Zn 添加量 /mg·L <sup>-1</sup>	三七景天生物量/g·plant <sup>-1</sup>			TI
		叶	茎	根	
0	0	0.38 ± 0.16a	0.36 ± 0.18bcd	0.018 ± 0.007ab	
2	0	0.20 ± 0.10a	0.58 ± 0.03a	0.009 ± 0.003bc	1.04
5	0	0.32 ± 0.27a	0.50 ± 0.06ab	0.010 ± 0.007bc	1.09
0	10	0.39 ± 0.08a	0.49 ± 0.12abc	0.020 ± 0.007a	1.17
0	20	0.29 ± 0.03a	0.37 ± 0.10bcd	0.011 ± 0.003bc	0.89
2	20	0.23 ± 0.02a	0.30 ± 0.03cd	0.003 ± 0.001c	0.70
5	10	0.39 ± 0.09a	0.43 ± 0.08abcd	0.010 ± 0.001bc	1.09
5	20	0.24 ± 0.13a	0.24 ± 0.11d	0.003 ± 0.001c	0.65
ANOVA					
	Cd	1.13	0.98	9.36**	
	Zn	1.00	8.41**	6.93**	
	Cd × Zn	0.31	2.78	0.04	

1) 数据为平均值±标准差,同一列不同字母代表差异显著( $P < 0.05$ );双因素方差分析中,\*表示 $P < 0.05$ ,\*\*表示 $P < 0.01$

### 2.2 不同Cd、Zn浓度胁迫对三七景天根系形态的影响

Cd、Zn单一胁迫及其交互作用对三七景天根

系形态的影响如表2所示,从中可知,不同Cd浓度单一胁迫均显著降低了三七景天根长、根表面积、根体积和根尖数( $P < 0.05$ ),且均随Cd胁迫

的增加而降低作用更显著, 在  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 时降低了  $47.2\% \sim 60.9\%$ , 在  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 时降低了  $65.1\% \sim 80.0\%$ , 而根平均直径则不受 Cd 胁迫的影响. Cd 胁迫下添加 Zn 较 Cd 单一胁迫进一步降低了三七景天根长、根表面积、根体积和根尖数, 且均在  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd +  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 情况下最低 ( $P < 0.05$ ). Zn 单一胁迫对三七景天根长、根表面积和根尖数的影响同 Cd 单一胁迫一致, 均有显著降低作用 ( $P < 0.05$ ), 而对根平均直径和根体积则是在  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 时较对照分别提高了  $24.2\%$  ( $P < 0.05$ ) 和  $13.0\%$ , 在  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 添

加时根体积显著降低了  $65.2\%$  ( $P < 0.05$ ). 在  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 胁迫下添加不同浓度 Zn, 随着 Zn 添加量的增加三七景天根长、根表面积、根体积和根尖数均显著降低, 且降低幅度高于 Zn 单一胁迫, 而根平均直径则在低 Zn 添加量时较 Zn 单一胁迫显著提高了  $30.3\%$ , 而高 Zn 添加量则没有显著影响.

双因素方差分析结果表明, 三七景天根长根表面积、根体积和根尖数受 Cd、Zn 胁迫的显著影响, 根平均直径受 Zn 添加量的调控, 根长与根尖数同时受 Cd、Zn 交互作用的显著影响 ( $P < 0.05$ ).

表 2 Cd、Zn 单一胁迫及其相互作用对三七景天根系形态的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effect of different Cd and Zn additions to the nutrient solution on the root morphology of *S. aizoon*

Cd 添加量 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn 添加量 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	根长 / $\text{cm}$	根表面积 / $\text{cm}^2$	平均直径 / $\text{mm}$	根体积 / $\text{cm}^3$	根尖数
0	0	$265.0 \pm 64.9\text{a}$	$27.7 \pm 9.6\text{a}$	$0.33 \pm 0.05\text{cd}$	$0.23 \pm 0.10\text{a}$	$1252.6 \pm 244.8\text{a}$
2	0	$139.9 \pm 24.2\text{bc}$	$12.4 \pm 2.6\text{b}$	$0.28 \pm 0.02\text{d}$	$0.09 \pm 0.02\text{b}$	$562.8 \pm 129.0\text{c}$
5	0	$92.4 \pm 60.1\text{cd}$	$9.6 \pm 6.3\text{bc}$	$0.33 \pm 0.03\text{cd}$	$0.08 \pm 0.05\text{b}$	$251.2 \pm 151.1\text{d}$
0	10	$178.1 \pm 53.4\text{b}$	$23.1 \pm 10.7\text{a}$	$0.41 \pm 0.13\text{ab}$	$0.26 \pm 0.19\text{a}$	$809.7 \pm 285.7\text{b}$
0	20	$90.2 \pm 38.7\text{cd}$	$9.7 \pm 4.5\text{bc}$	$0.34 \pm 0.03\text{bcd}$	$0.08 \pm 0.04\text{b}$	$246.8 \pm 92.2\text{d}$
2	20	$18.7 \pm 12.1\text{e}$	$2.1 \pm 1.3\text{c}$	$0.38 \pm 0.07\text{abc}$	$0.02 \pm 0.01\text{b}$	$79.8 \pm 50.0\text{d}$
5	10	$52.3 \pm 14.0\text{cd}$	$7.0 \pm 1.5\text{bc}$	$0.43 \pm 0.03\text{a}$	$0.07 \pm 0.01\text{b}$	$222.7 \pm 44.8\text{d}$
5	20	$25.1 \pm 9.6\text{e}$	$2.6 \pm 1.1\text{c}$	$0.33 \pm 0.01\text{cd}$	$0.02 \pm 0.01\text{b}$	$119.0 \pm 35.8\text{d}$
ANOVA						
	Cd	41.82***	26.51***	0.03	12.91***	60.74***
	Zn	38.14***	17.99***	10.60***	7.70**	51.51***
	Cd × Zn	3.26*	1.96	1.75	1.28	14.61***

1) 数据为平均值 ± 标准差, 同一列不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ ); 双因素方差分析中, \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$

### 2.3 不同 Cd、Zn 浓度胁迫对三七景天 Cd、Zn 吸收转运的影响

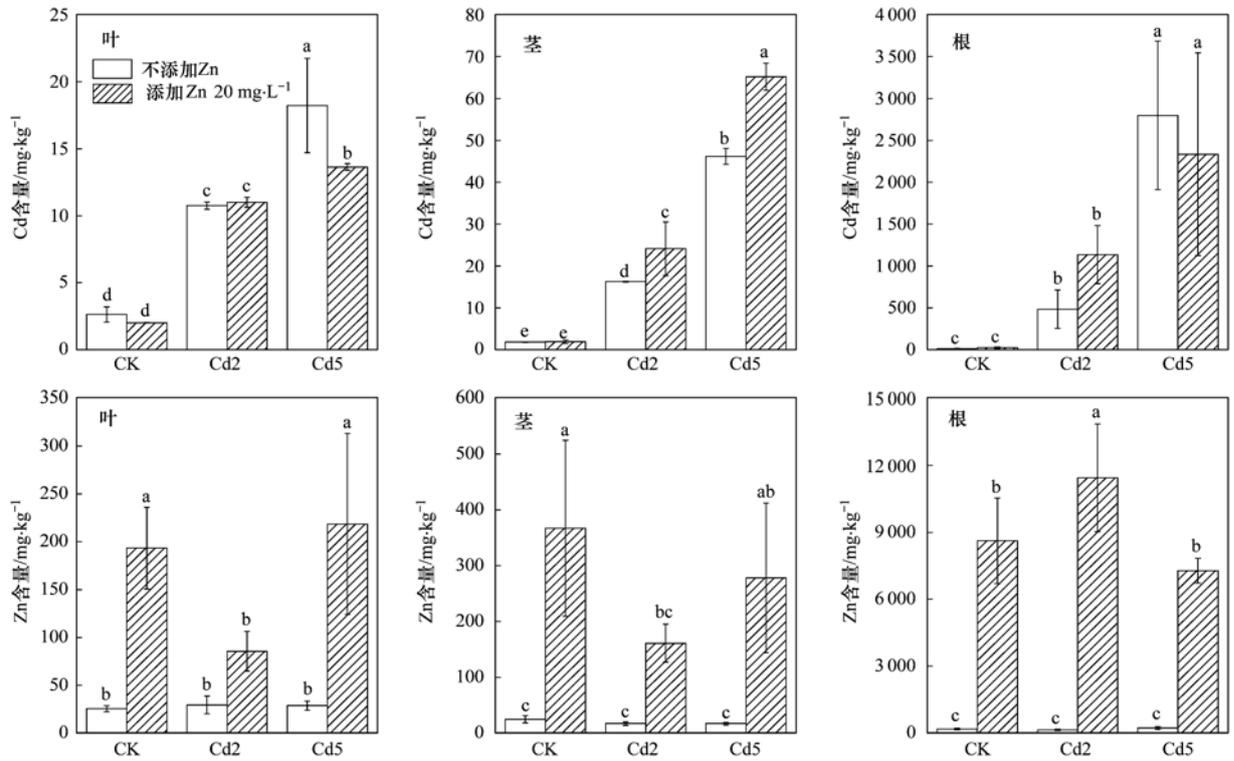
Zn 对不同 Cd 浓度胁迫下三七景天 Cd、Zn 吸收的影响如图 1 所示, 从中可知, 三七景天各组织中 Cd 浓度均随 Cd 胁迫的增加而显著提高, Cd 在各组织中含量顺序为根 > 茎 > 叶. Cd 浓度为  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时添加  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 对三七景天叶、茎、根中 Cd 含量均有所提高, 其中茎中 Cd 含量显著提高  $48.7\%$  ( $P < 0.05$ ), 而高浓度 Cd 胁迫下 ( $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 添加 Zn 使三七景天叶中 Cd 含量显著降低了  $25.1\%$ , 茎中 Cd 含量显著增加了  $41.1\%$  ( $P < 0.05$ ), 对根中 Cd 浓度均没有显著影响. 在 Zn 浓度为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  条件下添加  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 均显著降低了三七景天叶和茎中 Zn 含量, 却显著提高了根中 Zn 含量 ( $P < 0.05$ ); 而在  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 添加量条件下对三七景天各组织中 Zn 吸收均没有显著影响.

在 Cd 胁迫浓度为  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  条件下添加不同浓度 Zn 对三七景天各组织 Cd、Zn 含量的影响如图 2 所示, 从中可知, Cd 胁迫一定的条件下, 随着 Zn 添加量的增加, 三七景天叶和茎中 Cd 含量先增加

后下降, 在  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 添加情况下其叶、茎中 Cd 含量较  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 单一胁迫显著增加了  $41.9\%$  和  $188.0\%$  ( $P < 0.05$ ), 而根中 Cd 含量却显著降低  $50.9\%$  ( $P < 0.05$ ),  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 添加则对其各组织中 Cd 吸收均没有显著影响. 三七景天各组织中 Zn 浓度随 Zn 胁迫的增加而提高, Zn 浓度为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时添加  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 对三七景天各组织中 Zn 含量均有降低作用, 且根中 Zn 含量显著降低  $46.5\%$  ( $P < 0.05$ ), 而 Zn 浓度为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  情况下添加 Cd 对三七各组织中 Zn 吸收的影响均未达显著水平.

### 2.4 不同 Cd、Zn 浓度胁迫对三七景天 Cd、Zn 提取量的影响

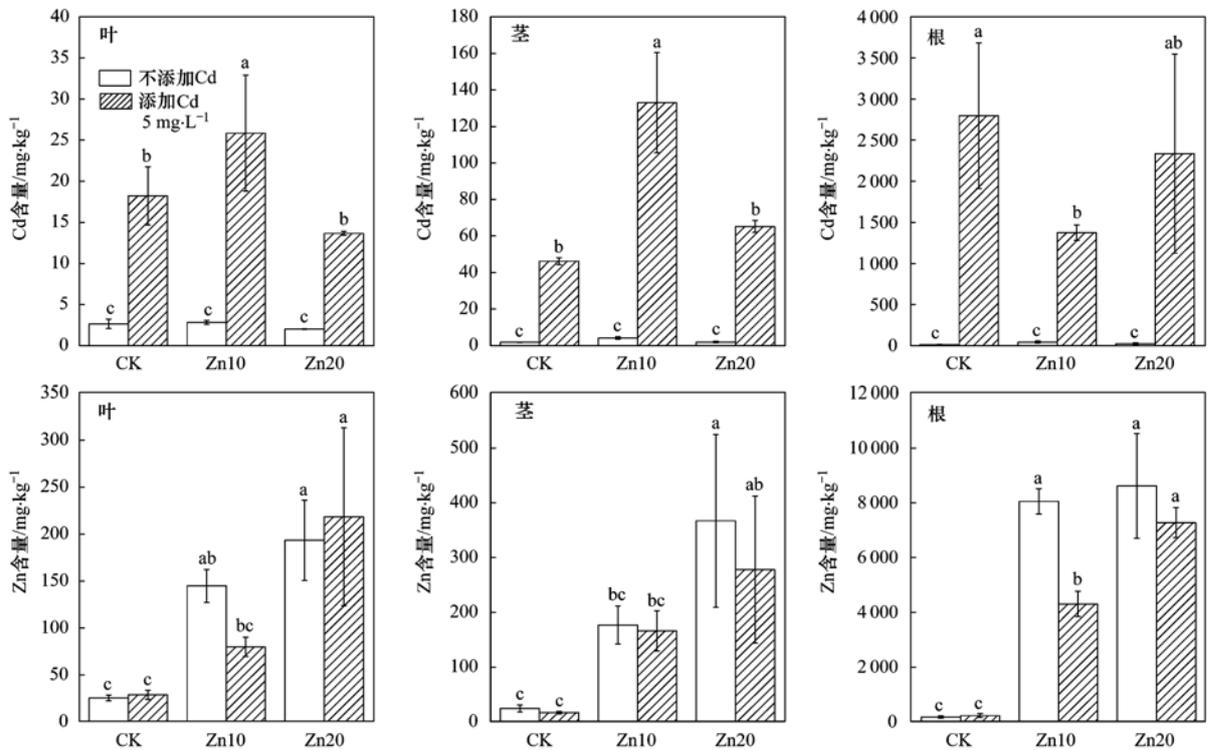
不同 Cd 浓度胁迫下添加  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 对三七景天 Cd、Zn 提取量的影响如图 3 所示, 从中可知, 在 Cd 单一胁迫下, 三七景天叶、茎和根中 Cd 提取量均随 Cd 胁迫的增加而显著增加, 添加 Zn 对 Cd 低浓度胁迫 ( $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 情况下三七景天各组织中 Cd 提取量均没有显著影响, 而高浓度 Cd 胁迫下 ( $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 添加 Zn 使其叶、茎和根中 Cd 提取量分别



CK、Cd2 和 Cd5 分别表示 Cd 添加量为 0、2 和 5 mg·L<sup>-1</sup>；数据为平均值 ± 标准差，不同字母代表差异显著 (P < 0.05)，下同

图 1 Zn 对不同 Cd 浓度胁迫下三七景天各组织中 Cd、Zn 含量的影响

Fig. 1 Effect of Zn on the Cd and Zn absorption of different tissues of *S. aizoon* under varying Cd stress for 16 d



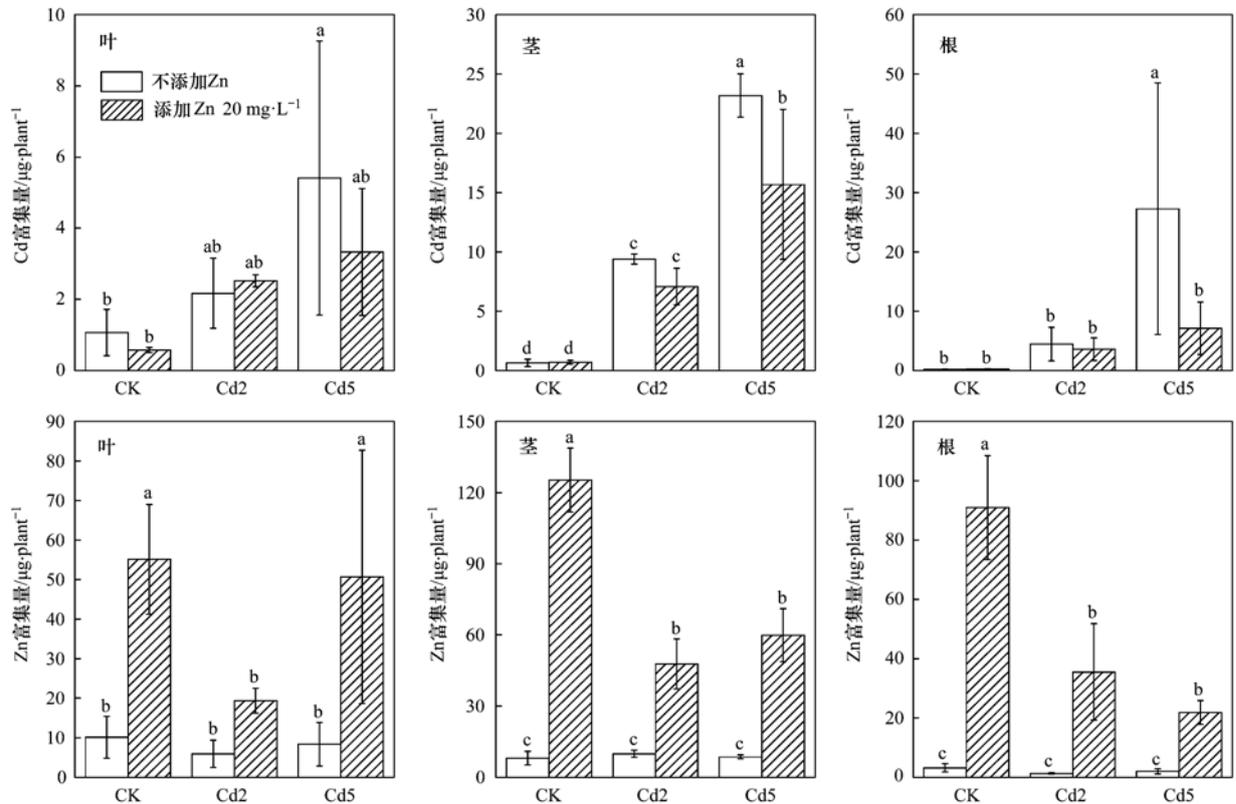
CK、Zn10 和 Zn20 分别表示 Zn 添加量为 0、10 和 20 mg·L<sup>-1</sup>

图 2 Cd 胁迫下添加不同浓度 Zn 对三七景天各组织 Cd、Zn 含量的影响

Fig. 2 Effect of Cd on the Cd and Zn absorption of different tissues of *S. aizoon* under varying Zn stress for 16 d

降低了 38.4%、32.4% 和 73.8%，且对茎和根的降低程度达到显著水平 (P < 0.05)。在 Zn 添加量为 20 mg·L<sup>-1</sup> 的条件下，不同 Cd 浓度胁迫均降低了三

七景天各组织中 Zn 的提取量，除 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd 添加时降低不显著外，其他处理均达到显著水平 (P < 0.05)。



CK、Cd2 和 Cd5 分别表示 Cd 添加量为 0、2 和 5 mg·L<sup>-1</sup>  
**图3 Zn 对不同 Cd 浓度胁迫下三七景天各组织中 Cd、Zn 提取量的影响**

Fig. 3 Effect of Zn on the Cd and Zn accumulation of different tissues of *S. aizoon* under varying Cd stress for 16 d

在 Cd 胁迫浓度为 5 mg·L<sup>-1</sup> 的条件下添加不同浓度 Zn 对三七景天各组织中 Cd、Zn 提取量的影响如图 4 所示, 从中可知, Cd 胁迫下随着 Zn 添加量的增加, 三七景天叶和茎中 Cd 提取量先增加后下降, 添加 10 mg·L<sup>-1</sup> Zn 使其显著提高了 87.4% 和 141.7%, 而 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn 却降低了其叶和茎中 Cd 提取量, 且对茎的降低程度达到显著水平 ( $P < 0.05$ ). Cd 胁迫下添加不同浓度 Zn 均降低了三七景天根中 Cd 提取量, 且在高 Zn 添加时差异显著 ( $P < 0.05$ ). 在 Zn 单一胁迫下, 三七景天各组分中 Zn 提取量均显著提高, 但随着 Zn 添加量的增加, 三七景天各组分中 Zn 提取量的变化趋势不一致, 叶中 Zn 提取量没有显著差异, 茎中显著提高 50.7%, 而根中显著降低 41.7% ( $P < 0.05$ ). 不同 Zn 浓度胁迫下添加 5 mg·L<sup>-1</sup> Cd 均降低了三七景天各组织中 Zn 提取量, 在 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn 情况下三

七景天茎中 Zn 提取量显著降低了 52.2% ( $P < 0.05$ ), 而根中 Zn 提取量在 10 mg·L<sup>-1</sup> 和 20 mg·L<sup>-1</sup> Zn 添加的情况下分别显著降低 71.0% 和 76.0% ( $P < 0.05$ ).

**2.5 Zn/Cd 浓度比例对三七景天生长和 Cd 吸收的影响**

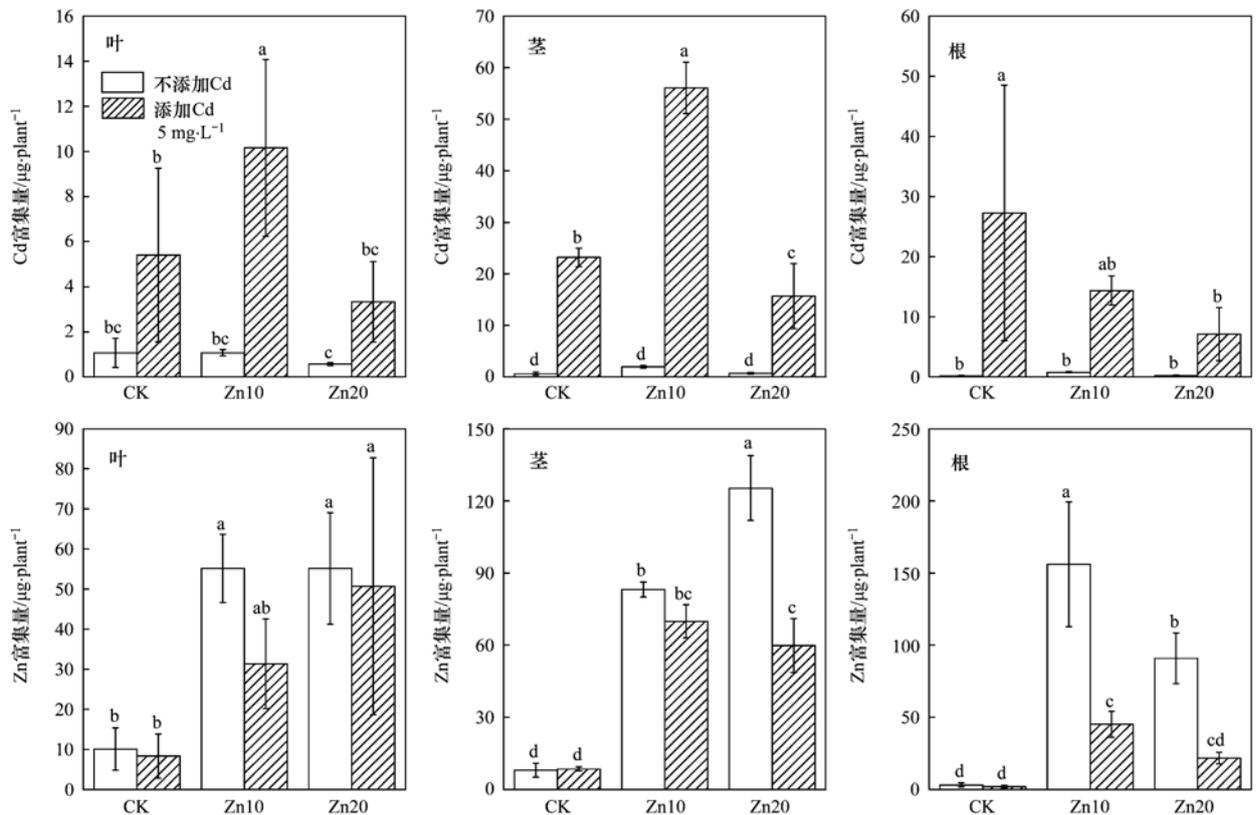
对 Zn/Cd 不同添加浓度比值与三七景天各组织的生物量与其 Cd、Zn 富集特征进行相关性分析, 结果如表 3 所示, Zn/Cd 浓度比值与三七景天地上部各组织的生物量、Cd 和 Zn 的浓度及其提取量均为负相关关系, 且与叶、茎中 Cd 浓度分别呈显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关, 其与三七景天茎中 Cd、Zn 提取量亦呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ). Zn/Cd 浓度比值与三七景天根生物量和 Cd 提取量也呈显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 而与根中 Zn 浓度则为极显著正相关 ( $P < 0.01$ ).

**表3 Zn/Cd 添加浓度比例与三七景天生长和 Cd、Zn 吸收富集的相关性分析<sup>1)</sup> (n=9)**

Table 3 Pearson correlation analysis between the Zn/Cd ratios and growth and the Cd absorption of *S. aizoon*

组织	生物量	Cd 浓度	Zn 浓度	Cd 提取量	Zn 提取量
叶	-0.520	-0.714 *	-0.197	-0.653	-0.389
茎	-0.361	-0.874 **	-0.196	-0.790 *	-0.733 *
根	-0.667 *	-0.297	0.911 **	-0.733 *	-0.106

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$



CK、Zn10和Zn20分别表示Zn添加量为0、10和20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图4 Cd胁迫下添加不同浓度Zn对三七景天各组织Cd、Zn提取量的影响

Fig. 4 Effect of Cd on the Cd and Zn accumulation of different tissues of *S. aizoon* under varying Zn stress for 16 d

### 3 讨论

植物受到Cd胁迫的最直观的特征是其生长受到影响,生物量下降<sup>[23]</sup>.而本研究中,Cd单一胁迫下,三七景天各组织生物量均没有显著降低,而在低浓度Cd胁迫时显著提高了其茎生物量.这与秦丽等<sup>[24]</sup>的研究结果一致,Cd胁迫对植物生长具有“低促高抑”的作用,低浓度Cd促进了Cd超富集植物续断菊的生长.高芳等<sup>[25]</sup>研究也表明轻、中浓度Cd促进了花生的营养生长,而高浓度则显著抑制了其生长.与之类似,Zn单一胁迫对三七景天地上部生长的影响亦呈“低促高抑”现象,在10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn添加量下促进了三七景天地上部生长,而在20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的添加量下则抑制了其生长.其原因可能是Zn为植物必需的微量营养元素,低浓度的Zn提高了植物体内叶绿素含量,促进其光合作用和碳水化合物的合成<sup>[5]</sup>,而过量的Zn则会造成离子稳态系统的紊乱,影响蒸腾作用和光合作用等代谢过程,从而抑制其生长<sup>[26-30]</sup>.目前多数研究结果认为,Zn的添加能缓解Cd的胁迫,促进植物根系和地上部生长<sup>[31,32]</sup>,而本研究中,Cd、Zn共同胁迫对三七景天生长的抑制作用大于单一胁迫,尤其是对根系生长的抑制作用更为显著,说明Cd、

Zn对三七景天生长的影响表现出协同作用.三七景天对Zn胁迫的耐性指数的研究结果也表明,三七景天对Cd、Zn单一胁迫均有较高的耐受性,而在Cd、Zn共同胁迫下其耐性降低,尤其是根系对Cd、Zn胁迫的响应更为敏感.Ammar等<sup>[31]</sup>的研究结果也表明,添加100~500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn加重了Cd胁迫对番茄生长的影响.

根系是植物和环境介质离子交换的主要界面,其对环境中重金属的胁迫最为敏感<sup>[33]</sup>,与根系生物量相比,根系形态的改变可能更能反映Cd、Zn胁迫对三七景天根系生长的影响<sup>[20]</sup>.本研究中,不同Cd浓度胁迫均显著降低了三七景天根系的长度、表面积、体积和根尖数,且降低幅度随Cd胁迫的增加而增大,而对根系直径则没有显著影响,这与索炎炎<sup>[34]</sup>的研究结果一致,其可能是由于Cd抑制了根尖分生细胞的有丝分裂,导致染色体畸变,减少根毛生长,形成了根表皮和皮层细胞以及细胞间隙的不对称,从而影响根系正常生长<sup>[22,35]</sup>.而Zn胁迫亦对三七景天根系生长有抑制作用,尽管低浓度Zn添加对根表面积、根平均直径和根体积的减少作用不显著,甚至对根平均直径有显著的提高作用,但高浓度Zn胁迫下则显著降低了根系长度、表面积、体积和根尖数,说明尽管Zn为植物必

需的营养元素,但其浓度超出植物需求范围并构成胁迫时,也会对植物生长造成严重影响<sup>[36, 37]</sup>。可知,本试验中 Zn 添加浓度本身已对三七景天根系生长造成了胁迫,因此其不仅未缓解 Cd 的毒害,反而在 Cd、Zn 共同胁迫下对三七景天根系形态各参数的抑制作用较单一胁迫更显著,其原因可能是高浓度 Zn 抑制了 Cd<sup>2+</sup> 诱导金属硫蛋白等 Cd 结合蛋白的表达,从而加重了 Cd 对根系的毒害效应<sup>[37]</sup>,这与 Saifullah 等<sup>[3]</sup> 对小麦的研究结果一致,同时还发现 Cd、Zn 交互作用对根尖数的影响最为明显,说明 Cd、Zn 胁迫对三七景天根尖细胞分化的影响要大于根细胞伸长的影响。

Cd 与 Zn 为同族元素,具有相近的地球化学性质,均可作为二价阳离子被植物吸收<sup>[9]</sup>,但其对植物生理学上的作用却截然相反,Zn 是植物必须的微量营养元素,而 Cd 是高毒性的重金属元素<sup>[31]</sup>。Cd、Zn 在植物体内可能存在相同的膜转运蛋白,如 HMA(heavy metal ATPase) 基因家族中 AtHMA4 为根维管系统周边组织质膜上存在的转运蛋白,其对 Zn<sup>2+</sup> 与 Cd<sup>2+</sup> 均有很高亲和力,介导其向地上部转运<sup>[38, 39]</sup>,此外 Cd、Zn 还共享诸如 IRT3 和 IRT1 等转运蛋白<sup>[40, 41]</sup>。因而 Cd、Zn 共存时,在植物吸收、转运过程中则会产生交互作用,Cd、Zn 胁迫对植物的交互作用一直是国内外学者研究的热点,不同学者得出了 Cd、Zn 具有协同作用、拮抗作用等不同结论。刘芸君等<sup>[30]</sup> 研究认为,Zn 对伴矿景天吸收 Cd 的作用为“低促高抑”,而 Cd 对 Zn 的吸收则表现为抑制作用。Zn 对东南景天 Cd 吸收的作用则与其生态型有关,对超积累型东南景天 Cd 的吸收表现为协同作用,而对非积累型东南景天则表现为拮抗作用<sup>[20]</sup>。本研究中,低浓度 Zn 显著提高了三七景天地上部 Cd 含量,尤其对茎中 Cd 含量提高作用更为明显,且显著降低了根中的 Cd 含量,而高浓度 Zn 则对三七景天 Cd 吸收没有显著影响,说明 Cd、Zn 交互作用对三七景天 Cd 吸收的影响随其 Cd/Zn 剂量而有显著差异<sup>[17]</sup>,且对不同组织也有不同影响<sup>[33]</sup>,Hassan 等<sup>[42]</sup> 研究了 Cd、Zn 交互作用对水稻 Cd 吸收的影响,发现 Zn 提高了水稻地上部 Cd 含量而降低了其根中 Cd 含量。Saifullah 等<sup>[3]</sup> 的研究也发现低浓度 Zn 添加促进了小麦中 Cd 由根部向地上部转运,与本研究结果一致,其原因可能为 Cd 进入植物根系诱导产生植物螯合肽(phytochelatin, PCs),其与 Cd 离子形成 Cd-PCs 络合物从而将其隔离在根细胞液泡内,减少其向地上部的转运<sup>[42, 43]</sup>,而添加 Zn 与 Cd 竞争其在根部与 PCs 结合点位,形成 Zn-PC 络合物,增加了 Cd 的自

由度,从而促进其向地上部转运<sup>[32]</sup>。同时,本研究中低浓度 Cd 胁迫显著提高了三七景天根部 Zn 的吸收,却抑制了三七景天地上部 Zn 的吸收,而低浓度 Zn 时,添加高浓度 Cd 显著抑制了三七景天根部 Zn 的吸收,而对地上部则没有显著变化,这说明了 Cd 对三七景天吸收 Zn 具有拮抗作用,但其与 Cd、Zn 添加量及其植物不同组织有显著关系<sup>[17, 44]</sup>。刘芸君等<sup>[30]</sup> 研究也发现添加 Cd 对伴矿景天吸收 Zn 存在拮抗作用。

低浓度 Zn 显著提高了三七景天地上部 Cd 提取量,而高浓度 Zn 则对三七景天各组织中 Cd 提取量均有显著降低作用。其主要机理除了低浓度 Zn 促进三七景天体内 Cd 由根部向地上部转运外,Zn 还是植物体内超过 300 多种酶的重要组分,尤其是 Cu-Zn SOD 酶的金属辅基,可通过提高三七景天地上部抗氧化酶活性<sup>[19]</sup>,以及维持细胞结构完整性和膜透性<sup>[4]</sup>,提高三七景天地上部对 Cd 的耐性,使其低浓度 Zn 条件下三七景天地上部生物量及 Cd 含量均有所提高,从而提高了其地上部 Cd 提取量,而高浓度 Zn 加重了 Cd 的胁迫<sup>[14, 45]</sup>,抑制了三七景天地上部生长,同时 Zn 可能与 Cd 竞争在转运通道上的结合位点,从而抑制了 Cd 在三七景天韧皮部的运输<sup>[46, 47]</sup>,降低了其向地上部的转运效率,因而其地上部 Cd 提取量显著降低。Cd 对三七景天各组织中 Zn 提取量亦表现为显著的拮抗作用,该结果与前人一致,Tkalec 等<sup>[33]</sup> 的研究表明添加低浓度 Zn 促进了烟草中 Cd 的积累,而 Cd 则抑制了其根部和叶对 Zn 的吸收。刘芸君等<sup>[30]</sup> 对伴矿景天的研究也发现类似规律。

Cd、Zn 外源添加比例也可能显著影响其对植物的交互作用<sup>[17]</sup>。华路等<sup>[48]</sup> 对小麦的研究认为,外源 Zn/Cd 比值较高时,Zn 对小麦吸收 Cd 有拮抗作用,而 Zn/Cd 比值较低时则呈协同作用,促进 Cd 在小麦中的积累。本研究中,Zn/Cd 添加浓度比例与三七景天根系生物量和地上部 Cd 吸收均呈显著负相关,比值越高,其交互作用对根系生长的抑制作用越强,且显著抑制了 Cd 向地上部的转运。同时,Zn/Cd 比值同三七景天地上部 Zn 提取量也呈显著负相关,而与其根中 Cd 浓度呈极显著正相关。由此可知,Zn/Cd 添加比例对三七景天生长和重金属吸收具有显著影响<sup>[49]</sup>,其比值较高时,Zn、Cd 对三七景天根系的生长呈协同作用,而对 Cd、Zn 向地上部转运则表现为拮抗作用,而 Zn/Cd 比值较低时则促进了三七景天中 Cd 向地上部的转运。

#### 4 结论

三七景天对 Cd、Zn 单一胁迫均有较强的耐受

性,且对 Cd 有较强的富集能力,地上部 Cd 含量可达  $133.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Cd、Zn 共同胁迫对三七景天生长的影响大于单一胁迫,而根系对其胁迫更为敏感,在 Cd、Zn 共同胁迫下其根系长度、表面积、体积和根尖数均显著降低,且对其根尖数的影响最为显著. Cd、Zn 交互作用对三七景天重金属吸收的影响与 Cd/Zn 添加剂量、比例以及三七景天不同组织部位有显著关系,低浓度 Zn 对三七景天地上部 Cd 吸收有协同作用,促进 Cd 由根部向地上部转运,而添加 Cd 则抑制了三七景天对 Zn 的吸收. 因此,三七景天具有较强的 Cd 富集能力,可应用于修复 Cd 污染土壤,而调节生长介质中 Cd、Zn 比例可促进三七景天对 Cd 的吸收效率.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Choppala G, Saifullah, Bolan N, *et al.* Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity [ J ]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, **33**(5): 374-391.
- [ 2 ] Tran T A, Popova L P. Functions and toxicity of cadmium in plants; recent advances and future prospects[ J ]. *Turkish Journal of Botany*, 2013, **37**(1): 1-13.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Hajiboland R, Amirzad F. Growth, photosynthesis and antioxidant defense system in Zn-deficient red cabbage plants [ J ]. *Plant Soil & Environment*, 2010, **56**(5): 209-217.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Hänsch R, Mendel R R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl)[ J ]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, **12**(3): 259-266.
- [ 7 ] Emamverdian A, Ding Y L, Mokherdoran F, *et al.* Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response[ J ]. *The Scientific World Journal*, 2015, **2015**: 756120, doi: 10.1155/2015/756120.
- [ 8 ] Qiu Q, Wang Y T, Yang Z Y, *et al.* Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars differing in cadmium accumulation [ J ]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, **49**(9): 2260-2267.
- [ 9 ] Chaney R L. Cadmium and zinc[ A ]. In: Hooda P S (Ed.). *Trace Elements in Soils* [ M ]. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 409-439.
- [ 10 ] Green C E, Chaney R L, Bouwkamp J. Increased zinc supply does not inhibit cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) [ J ]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, **40**(6): 869-877.
- [ 11 ] Balen B, Tkalec M, Šikić S, *et al.* Biochemical responses of *Lemna minor* experimentally exposed to cadmium and zinc[ J ]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(4): 815-826.
- [ 12 ] Tammam A A, Hatata M M, Sadek O A. Effect of Cd and Zn interaction on reactive oxygen species and antioxidant machinery of broad bean plants (*Vicia faba* L.) [ J ]. *The Egyptian Journal of Experimental Biology (Botany)*, 2016, **12**(2): 193-209.
- [ 13 ] Versieren L, Evers S, AbdElgawad H, *et al.* Mixture toxicity of copper, cadmium, and zinc to barley seedlings is not explained by antioxidant and oxidative stress biomarkers[ J ]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2017, **36**(1): 220-230.
- [ 14 ] Cherif J, Mediouni C, Ammar W B, *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.
- [ 15 ] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2002, **285**(1-3): 187-195.
- [ 16 ] Cojocaru P, Gusiatiu Z M, Cretescu I. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*) [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 10693-10701.
- [ 17 ] Rizwan M, Ali S, Abbas T, *et al.* Cadmium minimization in wheat: a critical review [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **130**: 43-53.
- [ 18 ] Wei S H, Zhou Q X. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by *Rorippa globosa* using two-phase planting (5 pp) [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, **13**(3): 151-155.
- [ 19 ] Aravind P, Prasad M N V. Zinc alleviates cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: a free floating freshwater macrophyte[ J ]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, **41**(4): 391-397.
- [ 20 ] Li T Q, Yang X E, Lu L L, *et al.* Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 734-741.
- [ 21 ] 吴彬艳, 邵冰洁, 赵惠恩, 等. 11 种广义景天属植物对 Cd 的耐性和积累特性[ J ]. *环境科学学报*, 2017, **37**(5): 1947-1956.
- [ 22 ] Wu B Y, Shao B J, Zhao H E, *et al.* Cd accumulation and tolerance characteristics of 11 species in *Sedum sensu lato* [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1947-1956.
- [ 23 ] Benáková M, Ahmadi H, Dučaiová Z, *et al.* Effects of Cd and Zn on physiological and anatomical properties of hydroponically grown *Brassica napus* plants [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(25): 20705-20716.
- [ 24 ] Jamali N, Ghaderian S M, Karimi N. Effects of cadmium and zinc on growth and metal accumulation of *Mathiola flavida* boiss [ J ]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014, **13**(12): 2937-2944.
- [ 25 ] 秦丽, 祖艳群, 李元. Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响[ J ]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(S1): 48-52.
- [ 26 ] Qin L, Zu Y Q, Li Y. Effects of Cd on the physiological characteristics and growth of the *Sonchus asper* L. Hill [ J ]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(S1): 48-52.
- [ 27 ] 高芳, 林英杰, 张佳蕾, 等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响[ J ]. *作物学报*, 2011, **37**(12): 2269-2276.
- [ 28 ] Gao F, Lin Y J, Zhang J L, *et al.* Effects of cadmium stresses on physiological characteristics, pod yield, and seed quality of peanut [ J ]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, **37**(12): 2269-2276.
- [ 29 ] Sagardoy R, Morales F, López-Millán A F, *et al.* Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in

- hydroponics[J]. *Plant Biology*, 2009, **11**(3): 339-350.
- [27] Kolusheva S, Friedman J, Angel I, *et al.* Membrane interactions and metal ion effects on bilayer permeation of the lipophilic ion modulator DP-109[J]. *Biochemistry*, 2005, **44**(36): 12077-12085.
- [28] Fernández-Martínez J, Zacchini M, Fernández-Marín B, *et al.* Gas-exchange, photo-and antioxidant protection, and metal accumulation in I-214 and Eridano *Populus* sp. clones subjected to elevated zinc concentrations [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, **107**: 144-153.
- [29] Stolířiková M, Vaculík M, Lux A, *et al.* Anatomical differences of poplar (*Populus × euramericana* clone I-214) roots exposed to zinc excess[J]. *Biologia*, 2012, **67**(3): 483-489.
- [30] 刘芸君, 钟道旭, 李柱, 等. 锌镉交互作用对伴矿景天镉吸收性的影响[J]. *土壤*, 2013, **45**(4): 700-706.  
Liu Y J, Zhong D X, Li Z, *et al.* Interaction of Zn and Cd on heavy metal phytoextraction efficiency of *Sedum plumbizincicola* [J]. *Soils*, 2013, **45**(4): 700-706.
- [31] Ammar W B, Zarrouk M, Nouairi I. Zinc alleviates cadmium effects on growth, membrane lipid biosynthesis and peroxidation in *Solanum lycopersicum* leaves [J]. *Biologia*, 2015, **70**(2): 198-207.
- [32] 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.
- [33] Tkalec M, Štefanić P P, Cvjetko P, *et al.* The effects of cadmium-zinc interactions on biochemical responses in tobacco seedlings and adult plants [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(1): e87582.
- [34] 索炎炎. 镉污染条件下叶面喷施锌肥对水稻镉积累的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
Suo Y Y. Effects of foliar Zinc application on Cadmium and zinc accumulation of rice grown in Cadmium contaminated soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [35] 何俊瑜, 任艳芳, 严玉萍, 等. 镉胁迫对水稻幼苗生长和根尖细胞分裂的影响[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(1): 138-144.  
He J Y, Ren Y F, Yan Y P, *et al.* Impacts of cadmium stress on the growth of rice seedlings and division of their root tip cells[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(1): 138-144.
- [36] 易诗明, 蒋丽娟, 易心钰, 等. 铅锌胁迫对蓖麻种子萌发与根系形态的影响[J]. *湖南林业科技*, 2017, **44**(1): 19-24, 29.  
Yi S M, Jiang L J, Yi X Y, *et al.* Effects of  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  stress on the seed germination and root morphology of *Ricinus communis* seedlings[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2017, **44**(1): 19-24, 29.
- [37] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(1): 5-8.  
Xu Q S, Shi G X, Zhou H W, *et al.* Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated Oxygen in Leaves of *Ottelia alismoides* (L.) Pers [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(1): 5-8.
- [38] Hussain D, Haydon M J, Wang Y W, *et al.* P-type ATPase heavy metal transporters with roles in essential zinc homeostasis in Arabidopsis[J]. *The Plant Cell*, 2004, **16**(5): 1327-1339.
- [39] Verret F, Gravot A, Auroy P, *et al.* Overexpression of AtHMA4 enhances root-to-shoot translocation of zinc and cadmium and plant metal tolerance[J]. *Febs Letters*, 2004, **576**(3): 306-312.
- [40] Lin Y F, Liang H M, Yang S Y, *et al.* Arabidopsis IRT3 is a zinc-regulated and plasma membrane localized zinc/iron transporter[J]. *New Phytologist*, 2009, **182**(2): 392-404.
- [41] Plaza S, Tearall K L, Zhao F J, *et al.* Expression and functional analysis of metal transporter genes in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, **58**(7): 1717-1728.
- [42] 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.
- [43] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, *et al.* Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, **90**(6): 925-937.
- [44] Perronnet K, Schwartz C, Morel J L. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(1): 19-25.
- [45] Taspinar M S, Agar G, Alpsyoy 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.
- [46] 张敏. 东南景天 Zn/Cd 耐性及积累相关基因功能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [47] Zhao F J, Jiang R F, Dunham S J, *et al.* Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*[J]. *New Phytologist*, 2006, **172**(4): 646-654.
- [48] 华珞, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用[J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(5): 393-398.  
Hua L, Bai Y L, Wei D P, *et al.* Combination of pollutants cadmium and zinc and its effects on Cd accumulation in wheat grain and adjustment by organic manure[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, **21**(5): 393-398.
- [49] 赵萍, 瞿华香, 张玉焯. 锌对镉胁迫下水稻幼苗镉吸收转运及根系形态的影响[J]. *广东农业科学*, 2017, **44**(5): 99-105.  
Zhao P, Qu H X, Zhang Y Z. Effects of zinc on cadmium uptake, transfer and root morphology of rice seedlings under cadmium stress[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, **44**(5): 99-105.

## CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 .....	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> ( 1 )
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Yangtze River Delta .....	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> ( 11 )
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai .....	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> ( 24 )
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM <sub>2.5</sub> Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing .....	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> ( 33 )
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> ( 44 )
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> ( 55 )
Transport Characteristics of PAN and O <sub>3</sub> in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer .....	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> ( 67 )
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Chemical Components in Chengdu in Winter .....	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> ( 76 )
Transport Pathways and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou .....	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> ( 86 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> During Spring in Changzhou .....	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> ( 94 )
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel .....	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> ( 104 )
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles .....	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> ( 114 )
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP .....	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> ( 121 )
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant .....	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> ( 126 )
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing .....	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> ( 135 )
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment .....	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> ( 143 )
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin .....	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> ( 149 )
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer .....	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 157 )
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary .....	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> ( 164 )
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs .....	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 172 )
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir .....	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 185 )
Water-Air Interface CO <sub>2</sub> Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors .....	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue ( 192 )
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application .....	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> ( 200 )
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin .....	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> ( 211 )
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu .....	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> ( 219 )
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) .....	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> ( 228 )
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City .....	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan ( 239 )
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin .....	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> ( 248 )
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing .....	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> ( 256 )
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics .....	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> ( 263 )
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water .....	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> ( 273 )
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS <sub>2</sub> /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities .....	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> ( 281 )
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water .....	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 293 )
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings .....	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> ( 300 )
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water .....	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> ( 310 )
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese .....	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> ( 318 )
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage .....	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 327 )
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode .....	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> ( 336 )
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System .....	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 343 )
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System .....	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> ( 352 )
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process .....	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> ( 360 )
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> ( 369 )
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> ( 376 )
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest .....	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> ( 383 )
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields .....	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> ( 392 )
Response of the Soil N <sub>2</sub> O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil .....	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> ( 401 )
Community Structure of CO <sub>2</sub> -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas .....	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 412 )
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China .....	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 421 )
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria .....	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> ( 430 )
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter .....	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> ( 437 )
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang .....	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping ( 445 )
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin .....	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 453 )
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake .....	XU Yi-yuan, HE Tian-rong ( 461 )
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i> .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> ( 470 )
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress .....	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> ( 480 )
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region .....	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> ( 488 )
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity .....	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> ( 496 )
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation .....	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> ( 504 )