

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



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

# 外源亚精胺对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响

刘书锦<sup>1,2</sup>, 黄益宗<sup>1\*</sup>, 保琼莉<sup>1</sup>, 黄永春<sup>1</sup>, 张盛楠<sup>1</sup>, 韩廿<sup>1</sup>, 刘玉荣<sup>2</sup>, 胡红青<sup>2</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** 农田 As 污染对农作物生长有毒害作用, 导致农作物产量降低、品质下降。研究了外源添加亚精胺(Spd)对  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明, 外源添加 Spd 能够促进  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子的萌发过程, 提高种子的发芽势和发芽率, 促进幼苗根系生长。添加 Spd 可以不同程度地提高  $As^{5+}$  胁迫下水稻幼苗和根系中的抗氧化酶系统过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)的活性, 降低水稻幼芽和根系中的丙二醛(MDA)含量。当  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 添加  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 使水稻根系中的 MDA 含量比对照处理分别降低 12.3% 和 31.3%, 水稻幼芽 CAT 活性分别提高 105.1% 和 101.4%, 水稻根系 CAT 活性分别提高 29.9% 和 57.1%。添加 Spd 也影响水稻对 As 的吸收积累。当  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 添加  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻幼芽 As 含量与对照相比分别降低 69.4% 和 75.1%, 水稻根系 As 含量分别降低 7.6% 和 24.4%。Spd 可以有效地缓解  $As^{5+}$  对水稻的毒害作用。

**关键词:** 水稻; 砷; 亚精胺(Spd); 种子萌发; 氧化损伤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1505-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909083

## Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under $As^{5+}$ Stress

LIU Shu-jin<sup>1,2</sup>, HUANG Yi-zong<sup>1\*</sup>, BAO Qiong-li<sup>1</sup>, HUANG Yong-chun<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-nan<sup>1</sup>, HAN Nian<sup>1</sup>, LIU Yu-rong<sup>2</sup>, HU Hong-qing<sup>2</sup>

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** As pollution in farmland has a toxic effect on the growth of crops, which reduces their yield and quality. The effects of exogenous spermidine (Spd) on rice seed germination and seedling growth under  $As^{5+}$  stress were studied. The results showed that exogenous Spd could promote the germination of rice seeds under  $As^{5+}$  stress, improve the germination potential and germination rate of seeds, and promote the growth of seedling roots. The addition of Spd could increase the activity of catalase (CAT), peroxidase (POD), and superoxide dismutase (SOD) of rice seedlings and roots under  $As^{5+}$  stress, and reduce the content of malondialdehyde (MDA) in rice buds and roots. When  $As^{5+}$  concentration was  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , adding  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd, MDA content in rice roots was decreased by 12.3% and 31.3% and CAT activity of rice shoots was increased by 105.1% and 101.4%, and CAT activity of rice roots was increased by 29.9% and 57.1%, respectively. The addition of Spd also affected the uptake and accumulation of As in rice. When the concentration of  $As^{5+}$  was  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , adding  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd, the concentration of As in rice shoots decreased by 69.4% and 75.1%, and As concentration in rice roots decreased by 7.6% and 24.4%, respectively. Spd could therefore effectively alleviate the toxic effect of  $As^{5+}$  on rice.

**Key words:** rice; arsenic; spermidine(Spd); seed germination; oxidative damage

我国重金属污染包含 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Cr 和 Ni 等污染, 其中 As 属于一种类重金属元素<sup>[1]</sup>。环境中 As 污染严重影响着人类的健康。造成土壤 As 污染的来源有两种, 一是自然来源, 另外一个是为人为来源<sup>[2]</sup>。自然界中的 As 存在于许多常见成岩矿物中, 如硫化矿物、磷酸盐和其他矿物。受地质、水文和含水层沉积物地球化学的影响, 成岩矿物中的一些 As 会释放到土壤中。人为来源包括以下几个方面: 矿产开采及冶炼、金属收购和加工、大气沉降、污水灌溉、污泥使用、用于农业和畜牧业生产杀虫剂如除藻剂和杀虫剂、用于治疗疾病生产的含 As 药物、垃圾焚烧等<sup>[3]</sup>。据调查湘江流域土壤 As 总含

量分别在  $4.25 \sim 549.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  范围之间, 72 个土壤样品中 As 超标率为 22.2%, 其中 As 重度超标率为 2.8%<sup>[4]</sup>。我国有上千万人生活在土壤砷污染的高风险区, 我国有  $58 \text{ km}^2$  土地的土壤砷浓度超过  $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[5]</sup>。矿业活动也会带来严重的砷污染问题, 我国在广西、湖南、云南、四川和陕西等地区砷采出量(截止到 2003 年底)都在 1 万 t 以上, 采出的砷

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801500); 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02)

作者简介: 刘书锦(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: polvdemon@163.com

\* 通信作者, E-mail: yizonghuang@126.com

70%都留在尾矿中,通过土壤和食物链危害人类环境<sup>[6]</sup>.

水稻在中国已经耕作上千年,是国民赖以生存的粮食作物.在中国西南及南方矿产发达的地区,稻田土壤 As 污染比较严重.我国稻田 As 污染 90%以上为中轻度污染,由于独特的地理特点与耕作制度使得稻田土壤中 As 活性较高<sup>[7]</sup>.陈同斌等<sup>[8]</sup>的研究发现低浓度的 As 对水稻生长发育有刺激作用,而 As 浓度较高时则会对水稻产生严重的毒害作用.赵维钧<sup>[9]</sup>的研究发现,As 对水稻毒害作用很强,具体表现为水稻生长缓慢、平均株高低、植株瘦弱、叶片有黄枯死症状、根部颜色为褐色且发育较差、水稻分蘖受到抑制.种子萌发是水稻生长发育的开端,此时的生长状况将会影响水稻以后的生长发育,因此在水稻种子萌发时缓解重金属胁迫将有利于水稻产量和品质的提高.另外种子萌发实验可以很好地用来研究植物重金属胁迫及其缓解效应<sup>[10-12]</sup>.

亚精胺属于多胺的一种,多胺包括腐胺(Put)、尸胺(Cad)、亚精胺(Spd)和精胺(Spm)等在内的一类小分子脂肪族化合物.多胺类的物质可以通过他们的离子键和氢键与核酸、蛋白质带负电荷基团的磷脂和其他生物大分子结合,调节其生物活性,广泛影响着植物的生物活性<sup>[13]</sup>.Spd 是一种关键的植物生长促进化合物<sup>[14]</sup>.多胺影响着植物的生长和发育过程,例如影响植物细胞分裂、阻断块茎的休眠和影响种子的萌发等<sup>[15]</sup>.Roychoudhury 等<sup>[16]</sup>研究了外源添加 Spd 和 Spm 对 NaCl 盐胁迫下水稻生长的影响,发现这两种物质可通过促进水稻生长、防止各种形式的细胞损伤、维持适当的  $K^+/Na^+$  平衡和提高抗氧化酶活性等来缓解盐胁迫对水稻的抑制作用. Mostofa 等<sup>[17]</sup>研究了高温对于水稻的影响,发现高温暴露导致水稻鲜重和叶片叶绿素含量降低,脂氧合酶活性、丙二醛(MDA)、过氧化氢( $H_2O_2$ )和脯氨酸(Pro)含量均显著提高,多种酶活性也显著降低,外源添加 Spd 可以保护水稻幼苗免受高温损害,其特征是 MDA、 $H_2O_2$  和 Pro 含量较低,同时各种酶活性提高.目前外源添加 Spd 对  $As^{5+}$  胁迫下植物生长的影响鲜见报道.本文以水稻为研究对象,探讨外源添加 Spd 对  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子萌发和水稻幼苗吸收积累 As 的影响,以期为农业生产过程 As 污染防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

水稻(*Oryza sativa* L.)选用中嘉早 17,属籼型常规水稻,是由中选 181 与 D001-2 杂交选育而成的水

稻品种.在长江中下游作双季早稻种植,全生育期平均 109.0 d.株型适中,分蘖力中等,茎秆粗壮,叶片宽挺,熟期转色好,每亩有效穗数 20.6 万穗,株高 88.4 cm,穗长 18.0 cm,每穗总粒数 122.5 粒,结实率 82.5%,千粒重 26.3 g.

磷酸钠( $Na_3AsO_4 \cdot 12H_2O$ ),分析纯;亚精胺(Spd),化学名称为 N-乙酰基-5-甲氧基色胺,分子式为  $C_7H_{19}N_3$ ,优级纯.

### 1.2 实验设计

设置 3 个  $As^{5+}$  浓度处理:0、10 和 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  及 3 个 Spd 浓度处理:0、500 和 1 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,共组合成 9 个实验处理.供试重金属 As 以  $Na_3AsO_4 \cdot 12H_2O$  的形式加入.选取饱满的水稻种子,实验前用 5% 的过氧化氢消毒浸泡 15 min,然后用去离子水冲洗 3~5 遍放置于恒温培养箱中( $28^\circ\text{C}$ )培养 1 d 催芽,从中挑选露白一致的种子,将其放置于直径 9 cm 的培养皿中,每个培养皿中铺一张滤纸,每皿放置 30 粒种子,按照上述设置处理加入 10 mL 含有不同浓度  $As^{5+}$  和 Spd 的处理液.将所有添加处理液的培养皿放置于  $28^\circ\text{C}$  的恒温培养箱中进行避光培养和萌发.每个处理 3 次重复.实验每 2 d 更换一次处理液,观察和记录种子的发芽情况.

### 1.3 测定项目与方法

(1)生长指标测定 处理 3 d 和 7 d 后记录水稻种子有效萌发个数并分别用于计算水稻发芽势和发芽率.水稻种子的胚根长与种子长相等,且胚芽长为种子长一半时记为有效萌发<sup>[18]</sup>.

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第 3 d 水稻种子有效萌发个数}}{\text{水稻种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{第 7 d 水稻种子有效萌发个数}}{\text{水稻种子总数}} \times 100\%$$

处理 7 d 后收取萌发种子样品,测定芽长,方法为在每个培养皿中选取长势均匀的 5 株测量长度,取平均值.将收取的水稻分为芽和根两部分,用滤纸吸干表面水分,称量芽重和根重,每个处理的重量按一个培养皿所有植株重量统计.

(2)根系扫描分析 从每个培养皿中选取长势均匀的 6 株,用根系扫描仪测定水稻总根长、根表面积、根体积、根尖数和根分叉数.将水稻幼苗放入扫描根盘中,采用台式扫描仪(Epson Expression 1680)将根系图像扫描到电脑中,然后采用图像分析软件 Win RHIZO(加拿大 Regent Instruments 公司)分析水稻幼苗的总根长、根表面积、根体积、根尖数和根分叉数,每个指标重复测定 10 次取其平均值.

(3)生理指标测定 培养 7 d 后将水稻根和芽分开标记好并用液氮速冻,放入  $-80^\circ\text{C}$  超低温冰箱

里用于测定各个生理指标. 采用苏州科铭生物技术公司提供的试剂盒测定水稻样品中的丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性.

(4)  $As$  含量测定 收获处理 7 d 后的水稻萌发种子, 将幼芽与根在  $80^{\circ}C$  下烘干至恒重, 分别称取幼芽和根重量, 剪碎后置于消煮管内, 用 7 mL 浓  $HNO_3$  (Mos 级) 浸泡过夜, 再用 Digi Block ED54 型电热消解仪消煮, 消煮液冷却后转移到 25 mL 容量瓶中定容, 同时也消煮了标准物质 [GBW07603 (GSV-2) 国家标准物质中心], 用双道原子荧光光度计 (AFS-9760) 测定水稻幼芽和根的  $As$  含量, 标准物质中的  $As$  含量为  $(1.25 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 实验测得的  $As$  含量为  $(1.35 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

#### 1.4 数据处理

采用 origin 9.1 和 SPSS 21 统计分析软件对实验所得数据进行分析及差异显著性检验, 对同一 Spd 处理浓度下的不同处理的数据进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较. 文中数据以平均值  $\pm$  标准差的形式表示.

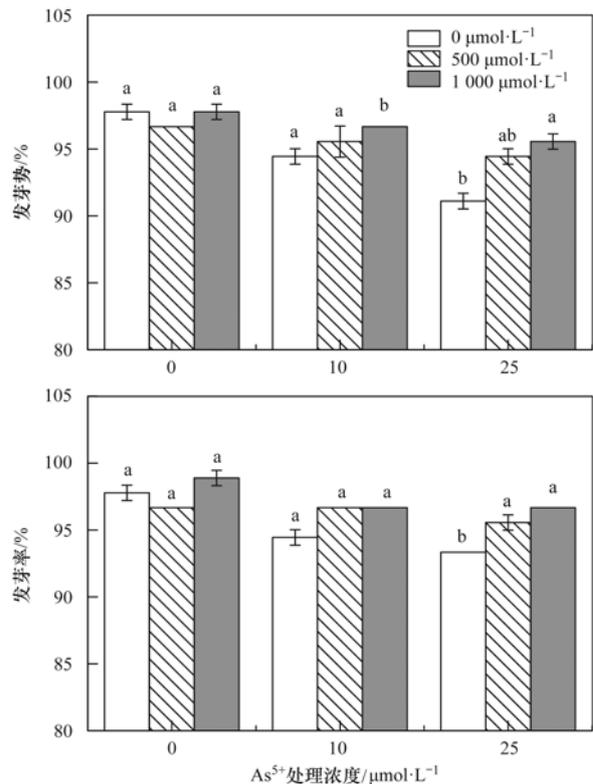
## 2 结果与分析

### 2.1 Spd 对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻种子发芽势和发芽率的影响

图 1 为外源添加 Spd 对  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子发芽势和发芽率的影响, 从中可以看出  $As^{5+}$  胁迫使水稻的发芽势和发芽率均比对照降低, 发芽势在  $As^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 比对照降低了 3.3%. 当  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 比对照降低了 6.7%. 而发芽率在这两个浓度下分别降低了 3.3% 和 4.4%. 添加 Spd 对水稻发芽势和发芽率有提高趋势. 当  $As^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Spd 导致水稻种子发芽势显著提高 2.2%; 当  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 外源添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Spd 使发芽势显著提高 4.4%. 在  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $As^{5+}$  浓度处理下, 添加  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Spd 均没有显著提高水稻种子发芽率, 但是在  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $As^{5+}$  浓度处理下, 外源添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Spd 水稻种子发芽率显著提高 3.3%.

### 2.2 Spd 对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻生物量和芽长的影响

图 2 为  $As^{5+}$  胁迫下外源添加不同浓度的 Spd 对水稻芽鲜重和根鲜重的影响. 从中可以看出,  $As^{5+}$  胁迫对水稻芽鲜重影响不明显. 在  $As^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的处理中, 当外源添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 时水稻芽鲜从 0.74 g 提高到 0.80 g, 提升了 8.1%, 而  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 处理的水稻芽鲜重没有显著提



不同的英文小写字母表示同一  $As^{5+}$  处理下添加不同浓度 Spd 的处理之间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 1 Spd 对  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子发芽势和发芽率的影响

Fig. 1 Effects of Spd on germination potential and germination rate of rice seeds under  $As^{5+}$  stress

升. 同样在  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻芽鲜重显著从 0.72 g 提高到 0.83 g, 提高了 15.3%. 在没有  $As^{5+}$  胁迫的处理中, 外源添加 Spd 对于水稻芽鲜重没有显著影响. 对于根鲜重来说,  $As^{5+}$  胁迫使水稻根鲜重明显降低, 在  $10$  和  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $As^{5+}$  胁迫下水稻根鲜重分别比对照降低 0.24 g 和 0.29 g. 在  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $As^{5+}$  胁迫下, 添加  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻根鲜重比对照处理显著提高 18.0%.  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $As^{5+}$  胁迫下, 添加  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 使水稻根鲜重从 0.64 g 提高到 0.74 g, 显著提高了 15.6%.

图 3 是外源添加 Spd 对水稻芽长的影响, 从中可知, 两个浓度  $As^{5+}$  胁迫使水稻芽长显著降低. 在没有  $As^{5+}$  胁迫时,  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Spd 处理使水稻芽长分别比对照提高 6.3% 和 6.4%. 当  $As^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 添加  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻芽长分别比对照提高 9.8% 和 10.4%;  $As^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 这两个浓度的 Spd 导致水稻芽长分别提高 6.9% 和 8.0%.

### 2.3 Spd 对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻根系形态的影响

表 1 是利用根系扫描仪扫描水稻幼苗根系得出

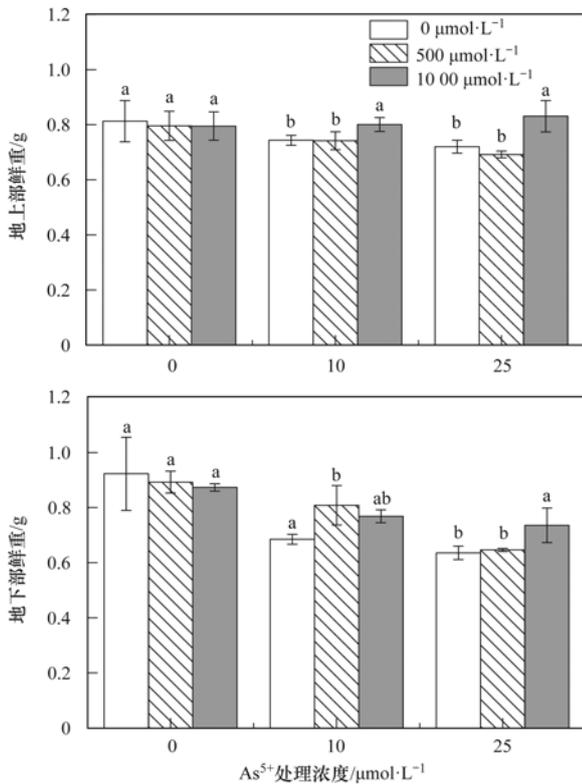


图2 Spd对As<sup>5+</sup>胁迫下水稻芽鲜重和根系鲜重的影响

Fig. 2 Effects of Spd on shoot fresh weight and root fresh weight of rice under As<sup>5+</sup> stress

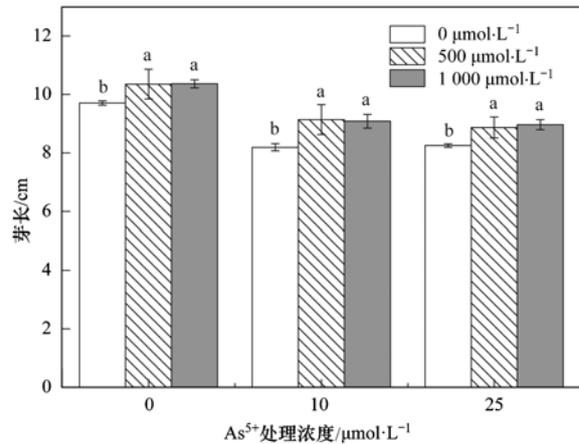


图3 Spd对As<sup>5+</sup>胁迫下水稻芽长的影响

Fig. 3 Effect of Spd on bud length of rice under As<sup>5+</sup> stress

的数据,其中包括总根长、根表面积、根体积、根尖数和分叉数.从中数据可以看出,在10 μmol·L<sup>-1</sup>和25 μmol·L<sup>-1</sup>As<sup>5+</sup>胁迫下,上述指标均表现出下降趋势.在没有As<sup>5+</sup>胁迫的处理中,添加Spd使水稻总根长和根尖数显著提高,其它指标无显著变化.无As<sup>5+</sup>胁迫时添加500 μmol·L<sup>-1</sup>和1000 μmol·L<sup>-1</sup>Spd使水稻总根长分别比对照处理显著提高12.0%和14.2%.

当As<sup>5+</sup>浓度为10 μmol·L<sup>-1</sup>时,添加500

表1 Spd对As<sup>5+</sup>胁迫下水稻幼苗根系形态的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of Spd on root morphology of rice seedlings under As<sup>5+</sup> stress

项目	总根长 /cm·株 <sup>-1</sup>	根表面积 /cm <sup>2</sup> ·株 <sup>-1</sup>	根体积 /mm <sup>3</sup> ·株 <sup>-1</sup>	根尖数/个	分叉数/个
CK	31.62 ± 1.07b	7.01 ± 0.26a	50.7 ± 2.91a	193.33 ± 6.64b	178.33 ± 7.52a
Spd500 <sup>2)</sup>	35.40 ± 2.26a	7.33 ± 0.27a	53.5 ± 2.57a	190.39 ± 6.33b	179.44 ± 10.78a
Spd1000	36.12 ± 1.54a	7.21 ± 0.49a	56.7 ± 4.57a	213.5 ± 14.78a	183.17 ± 9.51a
As10 <sup>3)</sup>	27.82 ± 2.10b	6.27 ± 0.19b	47.4 ± 0.27b	172.33 ± 4.01b	166.56 ± 8.18b
Spd500 + As10	31.77 ± 2.67ab	6.56 ± 0.23ab	49.6 ± 0.15b	191.89 ± 1.23a	220.06 ± 3.75a
Spd1000 + As10	33.63 ± 1.65a	6.92 ± 0.21a	57.2 ± 2.7a	201.05 ± 15.70a	222.17 ± 15.73a
As25	26.45 ± 1.14b	6.31 ± 0.02b	38.4 ± 1.35b	162.78 ± 4.23b	160.78 ± 7.70b
Spd500 + As25	32.03 ± 1.67a	6.56 ± 0.15ab	50.4 ± 2.37a	206.28 ± 17.69a	211.39 ± 10.37a
Spd1000 + As25	31.86 ± 1.66a	6.76 ± 0.28a	52.2 ± 3.01a	209.72 ± 16.81a	225.83 ± 13.43a

1) 不同的小写字母表示同一As<sup>5+</sup>处理下添加不同浓度Spd的处理之间的差异显著(P < 0.05); 2) Spd500和Spd1000表示添加浓度为500 μmol·L<sup>-1</sup>和1000 μmol·L<sup>-1</sup>的亚精胺的处理; 3) As10和As25表示添加浓度为10 μmol·L<sup>-1</sup>和25 μmol·L<sup>-1</sup>的As<sup>5+</sup>的处理

μmol·L<sup>-1</sup>和1000 μmol·L<sup>-1</sup>Spd使水稻根尖数分别比对照处理提高11.4%和16.7%,分叉数分别提高32.1%和33.4%;添加1000 μmol·L<sup>-1</sup>Spd使水稻总根长、根表面积和根体积分别比对照处理提高20.9%、10.4%和20.7%.当As<sup>5+</sup>浓度为25 μmol·L<sup>-1</sup>时,添加500 μmol·L<sup>-1</sup>和1000 μmol·L<sup>-1</sup>Spd使水稻总根长分别比对照处理提高21.1%和20.5%,根体积分别提高31.3%和36.0%,根尖数分别提高26.7%和28.8%,分叉数分别提高31.5%和40.5%.

2.4 Spd对As<sup>5+</sup>胁迫下水稻幼芽MDA含量和酶活性的影响

图4为外源添加Spd对As<sup>5+</sup>胁迫下水稻芽和

根MDA含量的影响.从中可以看出,在As<sup>5+</sup>浓度为10 μmol·L<sup>-1</sup>时,添加500 μmol·L<sup>-1</sup>和1000 μmol·L<sup>-1</sup>Spd导致水稻芽中MDA含量分别比对照处理降低13.6%和18.2%.在As<sup>5+</sup>浓度为25 μmol·L<sup>-1</sup>时,高浓度处理的Spd使水稻芽中MDA含量比对照降低了49.0%.对于水稻根,在As<sup>5+</sup>浓度为10 μmol·L<sup>-1</sup>时,两个Spd处理浓度的水稻根MDA含量变化与对照相比均没有达到显著水平;而在As<sup>5+</sup>浓度为25 μmol·L<sup>-1</sup>时,这两个Spd处理使水稻根中MDA含量与对照相比分别降低了12.3%和31.3%.

外源添加Spd对水稻幼芽和根中CAT活性的

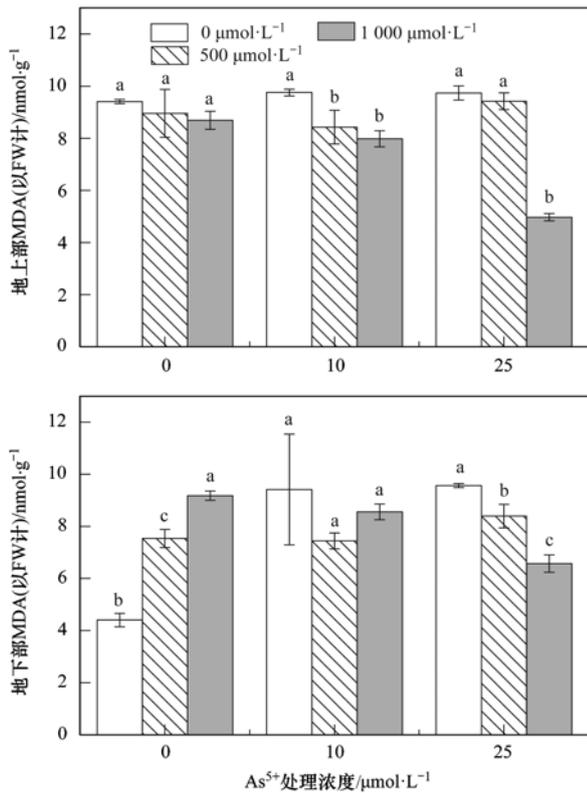
图4 Spd对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻幼芽和根系中MDA含量的影响

Fig. 4 Effects of Spd on MDA content of rice shoots and roots under  $As^{5+}$  stress

影响见图5,从中看出 $As^{5+}$ 胁迫使水稻幼芽和根中CAT活性降低,外源添加Spd以后可以提高CAT活性,从而缓解 $As^{5+}$ 胁迫.当 $As^{5+}$ 的浓度为 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,添加 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd可以使水稻幼芽CAT活性比对照处理显著降低15.3%,而添加 $1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻幼芽CAT活性显著提高38.9%,使水稻根系CAT活性显著降低26.4%.当 $As^{5+}$ 的浓度为 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,添加 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Spd使水稻幼芽CAT活性分别提高105.1%和101.4%,使水稻根系CAT活性分别提高29.9%和57.1%.

外源添加Spd对水稻幼芽和根中POD活性的影响见图6. $As^{5+}$ 胁迫使水稻幼芽和根中POD活性降低,外源添加Spd以后可以提高POD活性.当没有受到 $As^{5+}$ 胁迫时,外源添加不同浓度的Spd均能提高水稻幼芽和根中的POD活性.当 $As^{5+}$ 的浓度为 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,添加两个浓度的Spd都可以显著地提高水稻幼芽和根中POD活性,幼芽中分别提高了28.2%和25.9%,根系中分别提高了26.9%和39.0%.当 $As^{5+}$ 的浓度为 $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,添加两个浓度的Spd均分别比对照处理显著提高水稻幼芽的POD活性30.75%和35.24%,对根系POD活性没有显著影响.

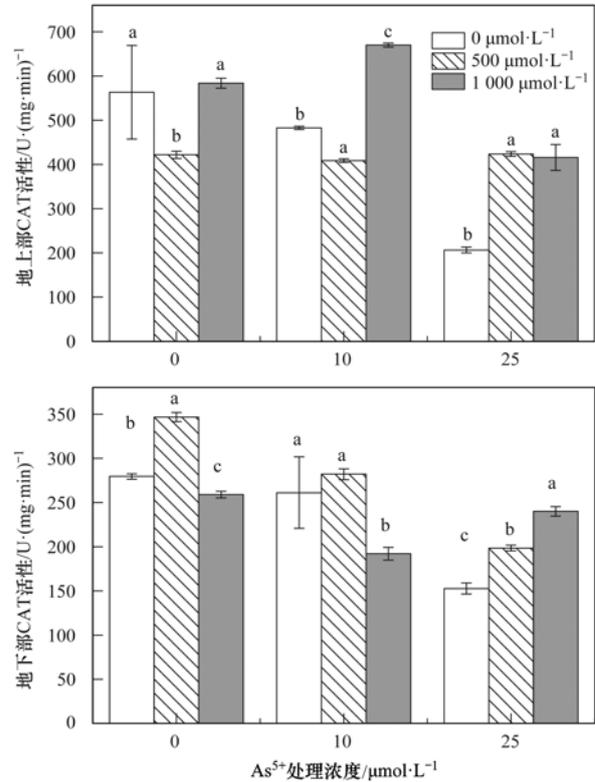
图5 Spd对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻幼芽和根系中CAT活性的影响

Fig. 5 Effects of Spd on CAT activity of rice shoots and roots under  $As^{5+}$  stress

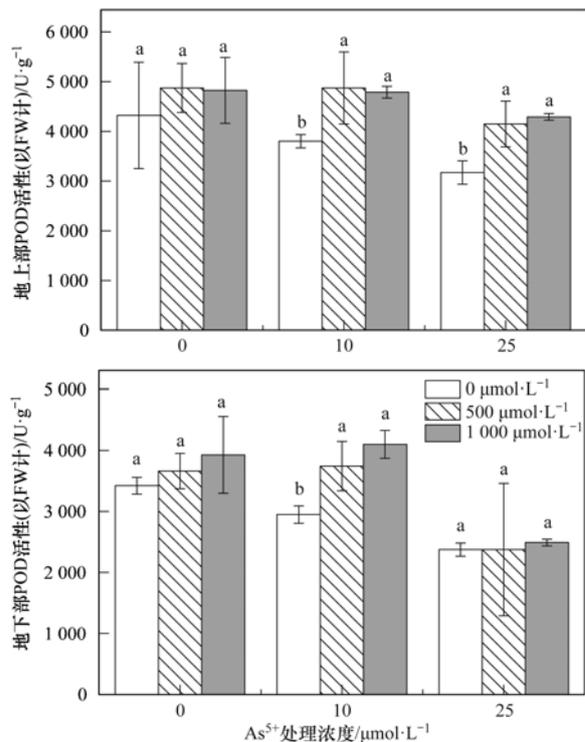
图6 Spd对 $As^{5+}$ 胁迫下水稻幼芽和根系中POD活性的影响

Fig. 6 Effects of Spd on POD activity of rice shoots and roots under  $As^{5+}$  stress

图7为不同浓度 $As^{5+}$ 胁迫下,外源添加Spd对水稻幼芽和根系中SOD活性的影响.从中可知,当不

受  $\text{As}^{5+}$  胁迫时,外源添加不同浓度的 Spd 均能显著地提高水稻幼芽的 SOD 活性,分别提高了 21.9% 和 24.9%. 当  $\text{As}^{5+}$  的浓度为  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,外源添加  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 比对照处理可以显著提高水稻根系中的 SOD 活性达 32.6%. 当  $\text{As}^{5+}$  的浓度为  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,添加  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Spd,可分别提高水稻幼芽和根系中的 SOD 活性 39.1% 和 41.3%.

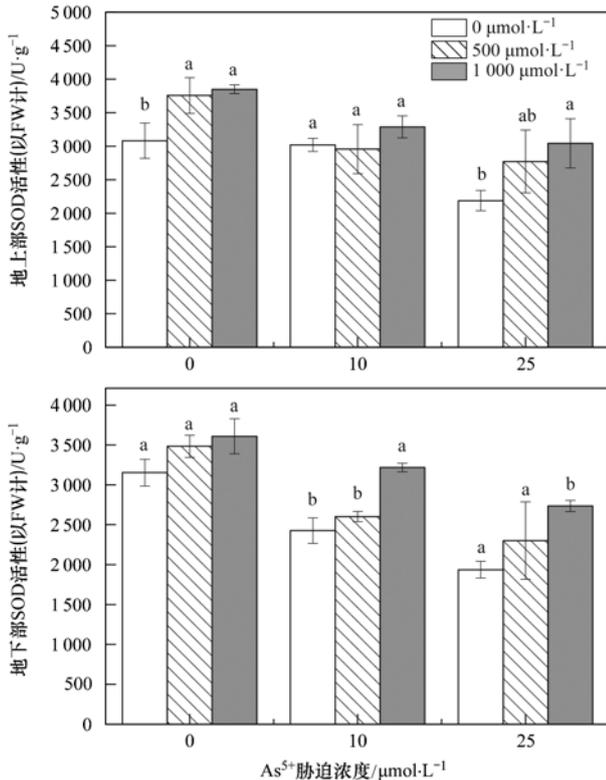


图 7 Spd 对  $\text{As}^{5+}$  胁迫下水稻幼芽和根系中 SOD 活性的影响  
Fig. 7 Effects of Spd on SOD activity of rice shoots and roots under  $\text{As}^{5+}$  stress

## 2.5 Spd 添加对水稻幼芽和根系中 As 含量的影响

如图 8 所示,外源添加 Spd 可以降低水稻幼芽和根系对 As 的吸收积累. 对于水稻幼芽,当  $\text{As}^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,外源添加  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻幼芽 As 含量与对照相比显著提高了 44.7%. 当  $\text{As}^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,外源添加  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻幼芽 As 含量与对照相比分别降低了 69.4% 和 75.1%. 对水稻根系来说,当  $\text{As}^{5+}$  浓度为  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,外源添加  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd 使水稻根系 As 含量比对照处理分别显著降低 7.6% 和 24.4%. 当  $\text{As}^{5+}$  浓度为  $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,外源添加这两个浓度的 Spd 同样可以显著降低水稻根系对 As 的吸收积累,与对照相比分别降低了 34.9% 和 17.0%.

## 3 讨论

植物 As 胁迫作用包括抑制发芽和生长、根细

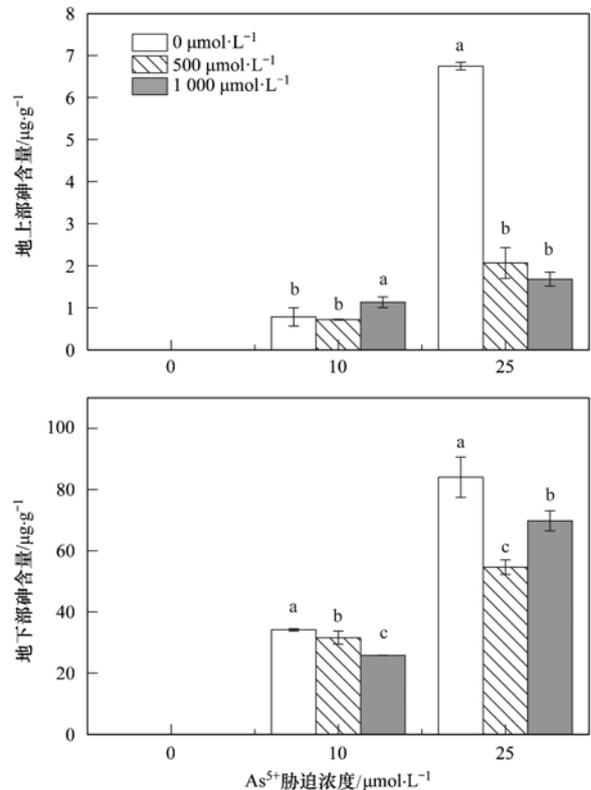


图 8 Spd 对  $\text{As}^{5+}$  胁迫下水稻幼芽和根系中 As 含量的影响  
Fig. 8 Effects of Spd on As concentration of rice shoots and roots under  $\text{As}^{5+}$  stress

胞质壁分离、叶萎、叶尖和边缘坏死、叶片和叶面积减少、叶绿体膜变形、光合作用抑制和抑制淀粉水解酶等,另外砷酸盐将取代 ATP 分子的磷酸盐,从而破坏植物细胞的能量流动<sup>[19]</sup>. As 是一种常见的植物活性氧(ROS)诱导剂,它可以直接在  $\text{As}^{5+}$  转化为  $\text{As}^{3+}$  的过程中诱导产生活性氧,也可以通过与抗氧化剂的硫醇基团结合而使其失活来间接诱导活性氧. As 引起的氧化应激引起植物一系列代谢功能紊乱<sup>[20]</sup>. 本研究发现: $\text{As}^{5+}$  胁迫明显抑制水稻种子的萌发过程, $\text{As}^{5+}$  胁迫会使水稻幼苗的发芽势和发芽率显著降低,水稻幼苗鲜重减少,生长发育受到抑制,并且随着  $\text{As}^{5+}$  浓度升高其胁迫作用增强,外源添加 Spd 可以有效地缓解  $\text{As}^{5+}$  的胁迫作用. Chai 等<sup>[21]</sup> 的研究发现外源添加 Spd 可以促进盐胁迫下甜高粱的萌发过程. Li 等<sup>[22]</sup> 的研究发现外源添加 Spd 可以促进对聚乙二醇 6000 诱导的水分胁迫下白三叶种子的萌发,与本文的研究结果一致.

植物对 As 的摄取主要是通过磷酸转运蛋白途径,As 进入植物细胞后,可严重阻碍植物的新陈代谢过程,引起各种生理紊乱发生,进而影响植物的生长发育,甚至导致作物减产从而造成损失<sup>[23]</sup>. 由于抗氧化防御系统与不同细胞区室中活性氧(ROS)过量产生,重金属污染可引起强氧化应激,导致膜破裂(脂质过氧化)以及蛋白质和核酸变性,这个过程会

对光合作用和碳固定等重要代谢过程产生负面影响<sup>[24]</sup>. MDA 是多不饱和脂肪酸氢过氧化物的分解产物, 经常被用作脂质过氧化的合适生物标志物, 这是氧化损伤的作用<sup>[25]</sup>. 本实验水稻种子萌发过程中,  $As^{5+}$  胁迫使植物产生过量的活性氧, 从而引起氧化应激反应, 破坏膜系统的脂质, 所以水稻幼芽和根中的 MDA 含量较高. 本实验研究发现随着  $As^{5+}$  胁迫浓度的增加, MDA 含量也随之大幅提高, 说明  $As^{5+}$  浓度越高其对水稻的毒害作用越大. 外源添加 Spd 后水稻幼芽和根中的 MDA 含量显著降低, 这说明 Spd 可以缓解  $As^{5+}$  胁迫产生的过氧化损伤.

$As^{5+}$  胁迫对水稻幼苗和根系的抗氧化酶活性也有影响. Cao 等<sup>[26]</sup> 的研究发现, 低含量的  $As$  可以促进蜈蚣草的生长但  $As$  含量达到  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时会抑制植物生长, 植物中的 SOD、CAT、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 和谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 的活性降低. Rai 等<sup>[27]</sup> 的研究表明  $As$  高耐受的水稻叶片中的 SOD、APX、GPX 和 CAT 等活性显著提高, 而在一些  $As$  低耐受水稻中的这些酶活性显著降低. 本研究中  $As^{5+}$  胁迫导致的抗氧化酶活性变化与  $As$  低耐受性水稻中的抗氧化性酶的规律一致, 即随着  $As^{5+}$  胁迫浓度的提高水稻幼芽和根中的 POD、SOD 和 CAT 活性与空白对照相比显著降低, 说明  $As^{5+}$  破坏水稻幼芽和根中的抗氧化系统, 降低水稻对  $As$  胁迫的抗氧化应激反应, 但是外源添加 Spd 后可以不同程度地提高抗氧化酶活性, 从而提高水稻对  $As$  的耐受能力 (图 4~8). CAT、POD 和 SOD 酶是存在于植物体内的几种常见的抗氧化酶. 过氧化氢酶 (CAT) 可以维持植物体内氧化还原平衡, 并维持细胞内  $H_2O_2$  平衡. 植物的 POD 含有血红素的单体糖蛋白, 其利用  $H_2O_2$  或  $O_2$  来氧化多种分子<sup>[28]</sup>. SOD 是含金属的酶, 该酶可以催化超氧自由基 ( $O_2^- \cdot$ ) 歧化为氧和过氧化氢<sup>[29]</sup>. 外源添加 Spd 可以提高水稻幼苗和根系中 POD、SOD 和 CAT 酶的活性, 并有效缓解  $H_2O_2$  和等活性氧物质的胁迫, 使细胞免受氧化损伤, 这可能是 Spd 缓解水稻  $As^{5+}$  胁迫的机制之一. Drolet 等<sup>[30]</sup> 的研究发现, 多胺 (包括 Spd) 可以有效地抑制衰老的微粒体膜产生超氧自由基. Spd 抑制水稻产生超氧自由基, 防止脂质过氧化, 这可能是 Spd 缓解水稻  $As^{5+}$  胁迫的另一机制.

Couée 等<sup>[31]</sup> 的研究发现, 多胺会影响植物初生根生长, 且影响侧根和不定根的形成. 根对植物生长和作物生产力至关重要. 水稻的根是与环境进行物质交换的重要器官, 根系的形态与健康状况影响着水稻的生长发育. Jang 等<sup>[32]</sup> 的研究发现用  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 处理野生型拟南芥幼苗 4 周后, 可使

拟南芥根长增加 39%, 幼苗重量提高 44%. 根长、根表面积、根体积、根尖数和分叉数是表征水稻根系的健康状况的重要指标. 本研究中  $As^{5+}$  胁迫使水稻根系以上指标数据下降, 外源添加 Spd 后可以使根系指标数据有所提高, 说明 Spd 可以促进水稻根系生长, 从而利于水稻植株的生长发育. 提高植物的抗逆性一直是科研工作者的研究重点, 常见的提高植物抗逆性的方法是通过外源添加营养元素、植物激素和植物生长调节物质等来降低环境对植物的胁迫作用. 多胺 (包括 Spd) 可以充当缓冲剂抑制 pH 的波动、调节酶活性, 以及增强 DNA 复制和转录. 同时多胺还参与植物细胞分裂, 影响细胞伸长和生根, 并且在某些情况下可以替代植物生长素<sup>[33]</sup>. 目前, Spd 在大田中应用较少, 因此在实际的农业生产中应根据不同的重金属种类、植物种类和土壤条件等选择适宜的 Spd 用量, 以达到缓解作物重金属胁迫的目的.

#### 4 结论

(1) 外源添加 Spd 可以促进  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子的萌发, 并且可以提高种子的发芽势和发芽率, 促进水稻幼苗和根系生长, 尤其高浓度的 Spd ( $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 效果更好;

(2)  $As^{5+}$  胁迫下添加 Spd 可以不同程度地降低水稻幼芽和根系中的 MDA 含量, 提高 CAT、SOD 和 POD 的活性, 说明外源添加 Spd 可以缓解  $As^{5+}$  胁迫产生的膜脂过氧化, 缓解  $As^{5+}$  的毒害作用, 促进水稻种子的萌发和幼苗生长;

(3) 添加 Spd 可降低水稻对  $As$  的吸收积累, 在  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $As^{5+}$  胁迫下, 添加  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Spd 导致水稻幼芽  $As$  含量与对照相比分别降低 69.4% 和 75.1%, 水稻根系  $As$  含量分别降低 7.6% 和 24.4%.

#### 参考文献:

- [1] 王瑶瑶, 郝毅, 张洪, 等. 珠三角地区大米中的镉砷污染现状及治理措施[J]. 中国农学通报, 2019, 35(12): 63-72. Wang Y Y, Yan Y, Zhang H, et al. Cadmium and arsenic pollution in rice in the pearl river delta and the countermeasures [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(12): 63-72.
- [2] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417. Huang Y Z, Zou X W, Lei M, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 409-417.
- [3] Garelick H, Jones H, Dybowska A, et al. Arsenic pollution sources [A]. In: Reviews of Environmental Contamination Volume 197 [C]. New York, NY: Springer, 2009, 197: 17-60.
- [4] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 260-265. Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, et al. Soil contamination and

- assessment of heavy metals of Xiangjiang river basin [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 260-265.
- [ 5 ] 纪冬丽, 孟凡生, 薛浩, 等. 国内外土壤砷污染及其修复技术现状与展望[J]. 环境工程技术学报, 2016, **6**(01): 90-99.  
Ji D L, Meng F S, Xue H, *et al.* Situation and prospect of soil arsenic pollution and its remediation techniques at home and abroad[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, **6**(1): 90-99.
- [ 6 ] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, **27**(1): 201-212.  
Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, *et al.* Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China[J]. Geographical Research, 2008, **27**(1): 201-212.
- [ 7 ] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉污染阻控原理与技术应用[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1418-1426.  
Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, *et al.* Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1418-1426.
- [ 8 ] 陈同斌, 刘更另. 砷对水稻生长发育的影响及其原因[J]. 中国农业科学, 1993, **26**(6): 50-58.  
Chen T B, Liu G L. Effect of arsenic on rice (*Oryza sativa* L.) Growth and development and its mechanism [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, **26**(6): 50-58.
- [ 9 ] 赵维钧. 砷污染对水稻的影响[J]. 云南环境科学, 1998, (3): 18-20.  
Zhao W J. Influence of arsenic pollution to paddy rice [J]. Yunnan Environmental Science, 1998, (3): 18-20.
- [ 10 ] 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 等. 褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用. 环境科学, 2017, **38**(4): 1675-1682.  
Liu S X, Huang Y Z, Luo Z J, *et al.* Alleviation effects of exogenous melatonin on Ni toxicity in rice seedlings [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1675-1682.
- [ 11 ] 蒋航, 黄益宗, 杨秀文, 等. 外源褪黑素对 As<sup>3+</sup> 胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(1): 229-240.  
Jiang H, Huang Y Z, Yang X W, *et al.* Effects of exogenous melatonin on seed germination of rice under As<sup>3+</sup> stress [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(1): 229-240.
- [ 12 ] 黄益宗, 蒋航, 王农, 等. 外源褪黑素对不同价态砷胁迫下水稻种子萌发和生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(6): 1730-1737.  
Huang Y Z, Jiang H, Wang N, *et al.* Effects of exogenous melatonin on seed germination and physiological indices of rice under As<sup>3+</sup> and As<sup>5+</sup> stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(6): 1730-1737.
- [ 13 ] 刘宽灿, 梁秋芬, 赵丽红, 等. 多胺在植物生长发育过程中的生理作用[J]. 氨基酸和生物资源, 2005, **27**(1): 22-26.  
Liu G C, Liang Q F, Zhao L H, *et al.* Physiological roles of polyamines in plant growth and development [J]. Amino Acids and Biological Resources, 2005, **27**(1): 22-26.
- [ 14 ] Xie S S, Wu H J, Zang H Y, *et al.* Plant growth promotion by spermidine-producing *Bacillus subtilis* OKB105 [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2014, **27**(7): 655-663.
- [ 15 ] Bachrach U, Heimer Y M, Bagni N. Polyamines in plant growth and development [J]. Physiology of Polyamines, 1989, **2**: 107-120.
- [ 16 ] Roychoudhury A, Basu S, Sengupta D N. Amelioration of salinity stress by exogenously applied spermidine or spermine in three varieties of indica rice differing in their level of salt tolerance [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, **168**(4): 317-328.
- [ 17 ] Mostofa M G, Yoshida N, Fujita M. Spermidine pretreatment enhances heat tolerance in rice seedlings through modulating antioxidative and glyoxalase systems [J]. Plant Growth Regulation, 2013, **73**(1): 31-44.
- [ 18 ] 许昊, 苏锋, 高孝美. 砷和草甘膦复合污染对水稻种子萌发的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(22): 5540-5543  
Xu H, Su F, Gao X M. Effect of combined pollution of arsenic and glyphosate on rice seed germination [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, **54**(22): 5540-5543.
- [ 19 ] Chandrakar V, Pandey N, Keshavkant S. Plant responses to arsenic toxicity: morphology and physiology [A]. Hasanuzzaman M, Nahar K, Fujita M (Eds.). Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants. Singapore: Springer, 2018. 27-48.
- [ 20 ] Chandrakar V, Naithani S C, Keshavkant S. Arsenic-induced metabolic disturbances and their mitigation mechanisms in crop plants: A review [J]. Biologia, 2016, **71**(4): 367-377.
- [ 21 ] Chai Y Y, Jiang C D, Shi L, *et al.* Effects of exogenous spermine on sweet sorghum during germination under salinity [J]. Biologia Plantarum, 2010, **54**(1): 145-148.
- [ 22 ] Li Z, Peng Y, Zhang X Q, *et al.* Exogenous spermidine improves seed germination of white clover under water stress via involvement in starch metabolism, antioxidant defenses and relevant gene expression [J]. Molecules, 2014, **19**(11): 18003-18024.
- [ 23 ] Mitra A, Chatterjee S, Gupta D K. Plants response and tolerance to arsenic-induced oxidative stress [A]. In: Hasanuzzaman M, Nahar K, Fujita M (Eds.). Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants [M]. Singapore: Springer, 2018. 105-128.
- [ 24 ] Gratão P L, Alves L R, Lima L W. Heavy metal toxicity and plant productivity: role of metal scavengers [A]. Srivastava S, Srivastava A, Suprasanna P (Eds.). Plant-Metal Interactions. Cham: Springer, 2019. 49-60.
- [ 25 ] Dewir Y H, Chakrabarty D, Ali M B, *et al.* Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of *Euphorbia millii* hyperhydric shoots [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **58**(1-3): 93-99.
- [ 26 ] Cao X D, Ma L Q, Tu C. Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) [J]. Environmental Pollution, 2004, **128**(3): 317-325.
- [ 27 ] Rai A, Tripathi P, Dwivedi S, *et al.* Arsenic tolerances in rice (*Oryza sativa*) have a predominant role in transcriptional regulation of a set of genes including sulphur assimilation pathway and antioxidant system [J]. Chemosphere, 2011, **82**(7): 986-995.
- [ 28 ] Lagrimini L M, Bradford S, Rothstein S. Peroxidase-induced wilting in transgenic tobacco plants [J]. The Plant Cell, 1990, **2**(1): 7-18.
- [ 29 ] Bowler C, Van Camp W, Van Montagu M, *et al.* Superoxide dismutase in plants [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1994, **13**(3): 199-218.
- [ 30 ] Drolet G, Dumbroff E B, Legge R L, *et al.* Radical scavenging properties of polyamines [J]. Phytochemistry, 1986, **25**(2): 367-371.
- [ 31 ] Couée I, Hummel I, Sulmon C, *et al.* Involvement of polyamines in root development [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2004, **76**(1): 1-10.
- [ 32 ] Jang S J, Choi Y J, Park K Y. Effects of polyamines on shoot and root development in *Arabidopsis* seedlings and carnation cultures [J]. Journal of Plant Biology, 2002, **45**(4): 230-236.
- [ 33 ] Gaspar T, Kevers C, Penel C, *et al.* Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture [J]. In vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 1996, **32**(4): 272-289.

## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)