

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.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响

霍洋¹, 仇银燕¹, 周航^{1,2*}, 胡雨丹¹, 邓鹏辉¹, 魏宾纭¹, 辜娇峰^{1,2*}, 刘俊³, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004; 3. 有色金属矿区耕地重金属污染生态阻抗技术研究衡阳市重点实验室, 衡阳 421001)

摘要: 本研究通过水稻(黄华占)水培试验,在不同镉(Cd)浓度胁迫条件下,施加 10.0~45.0 mg·L⁻¹ 外源磷(NaH₂PO₄),研究磷(P)对水稻植株 Cd 累积与转运的影响。结果表明:① 随外源 P 浓度增加,水稻各部位生物量及光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)浓度均逐渐升高;② 施加外源 P 使水稻的茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量逐渐增加,水培溶液中 Cd 浓度为 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫下,糙米 Cd 含量分别增加了 2.8%~22.8% 和 40.9%~61.8%;③ 施加外源 P 使水稻植株 Cd 累积量增加,水培溶液中 Cd 浓度为 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫下,Cd 累积量范围分别从 395.1 μg·株⁻¹ 和 639.6 μg·株⁻¹ 增加到 542.6 μg·株⁻¹ 和 1082.0 μg·株⁻¹;④ 水稻根系 P/Cd 质量比随外源 P 施加量增加而增大,茎、叶、谷壳和糙米 P/Cd 质量比则呈下降趋势;增加外源 P 浓度使水稻根到茎(TF_{根-茎})和茎到叶(TF_{茎-叶})的 Cd 转运系数增加。水稻各部位中 P 和 Cd 表现出一定的协同作用,外源 P 促进了根系中 Cd 向地上部位转运,增加了糙米 Cd 含量。

关键词: 磷; 镉; 水稻; 转运系数; 光合色素

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4719-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202003048

Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress

HUO Yang¹, QIU Yin-yan¹, ZHOU Hang^{1,2*}, HU Yu-dan¹, DENG Peng-hui¹, WEI Bin-yun¹, GU Jiao-feng^{1,2*}, LIU Jun³, LIAO Bai-han^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Changsha 410004, China; 3. Key Laboratory of Hengyang City on Ecological Impedance Technology of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Nonferrous Metal Mining Area, Hengyang 421001, China)

Abstract: In this study, we investigated the effects of exogenous phosphorus on the accumulation and transportation of cadmium in rice plants through a hydroponic experiment. In the experiment, the rice variety was Huanghuazhan, P solution concentrations were 10.0-45.0 mg·L⁻¹ that was made using NaH₂PO₄, and Cd solution concentrations were 0.1 mg·L⁻¹ and 0.2 mg·L⁻¹. The results showed that: ① the biomass in all parts of rice plants and contents of photosynthetic pigment (chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid) increased gradually with an increase in exogenous P. ② Content of Cd in rice stems, leaves, husk, and brown rice increased gradually with an increase in the amounts of exogenous P. The content of Cd in brown rice increased by 2.8%-22.8% and 40.9%-61.8% when treated with Cd concentrations of 0.1 mg·L⁻¹ and 0.2 mg·L⁻¹ in hydroponic solutions, respectively. ③ Cd accumulation in rice plants was accelerated due to the application of exogenous P. Cd accumulating amounts increased from 395.1 μg·plant⁻¹ to 542.6 μg·plant⁻¹ and 639.6 μg·plant⁻¹ to 1082.0 μg·plant⁻¹ when treated with Cd concentrations of 0.1 and 0.2 mg·L⁻¹ in hydroponic solutions, respectively. ④ With an increase in the applied amounts of exogenous P, the P/Cd quality ratio in rice roots increased, while those in rice stems, leaves, husks, and brown rice decreased; meanwhile, the Cd transfer coefficients from root to stem (TF_{root-stem}) and stem to leaf (TF_{stem-leaf}) increased. This showed that there was a certain synergistic effect between P and Cd in the rice parts. Finally, the application of exogenous P promoted the transfer of Cd from the rice root to other rice tissues, resulting in a synergistic effect on Cd accumulation and transportation in various rice tissues and increased Cd contents in brown rice.

Key words: phosphorus (P); cadmium (Cd); rice; translocation factor; photosynthetic pigment

镉(cadmium, Cd)是一种极具毒性的重金属元素,有较强的生物迁移性和隐蔽性^[1]。水稻是亚洲国家的主要粮食作物,土壤中的 Cd 通过质外体和共质体等途径进入水稻根系中柱,再由非选择性阳离子通道进入根系细胞内^[2],其中一部分 Cd²⁺ 被截留在根系中,一部分 Cd²⁺ 随木质部继续向茎运输^[3]。水稻植株中过量的 Cd 能干扰叶绿素的生物合成,破坏叶绿体的结构和功能,影响光合作用^[4],抑制水稻生长,导致糙米 Cd 含量超标和粮食减产。

水稻 Cd 污染增加了以稻米为主食人群的健康风险。

当前含磷(phosphorus, P)肥料和含 P 土壤钝化

收稿日期: 2020-03-04; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907126); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3880, 2018JJ3881); 长沙市科技计划项目(kq1901138)

作者简介: 霍洋(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: muiyang1112@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouhang4607@163.com; gujiaofeng@163.com

修复材料,如钙镁磷肥、磷矿粉、羟基磷灰石和骨粉等常用于重金属污染土壤修复治理^[5].不同P肥和含P钝化修复材料对土壤Cd有效性及植物Cd吸收累积作用差异明显.有研究表明,钙镁磷肥和羟基磷灰石均能降低土壤中的有效态Cd含量^[6,7],抑制作物吸收累积Cd,而施加磷酸一铵、磷酸二铵等则会增加土壤中Cd的生物有效性,促进植物吸收Cd^[8,9].P作为植物生长不可或缺的大量元素之一,是核酸和磷脂的结构组成元素、能量传递反应的组成部分以及信号转导级联中的调节因子,参与了植物的许多生理代谢过程^[10],能影响到植物体内Cd的吸收、转运、分布和累积.有研究表明,P能减轻Cd对植株的毒害作用.Jia等^[11]的研究发现,在Cd胁迫下,外施0~80.0 mg·L⁻¹的KH₂PO₄(以P计)促进了黑麦草对Cd的解毒作用,减轻了脂质过氧化影响,降低了抗氧化酶水平,对脯氨酸(proline, PRO)、谷胱甘肽(glutathione, GSH)、植物螯合素(phytochelatins, PCs)和非蛋白硫醇等均有正向调节作用.植物根系中的OsHMA3转运蛋白能将Cd²⁺转入根细胞液泡中进行区室化固定^[1,12],而施P能增加植物体内PO₄³⁻含量,使其在液泡内与Cd²⁺形成Cd₃(PO₄)₂沉淀,将Cd²⁺滞留于根系,减少其向地上部位转运^[3,11,13].然而,也有一些研究发现外施P能促使水稻根系生长,增大其与土壤的接触面积,促进根系对Cd的累积^[14,15].Liu等^[16]在10.0 μmol·L⁻¹ Cd胁迫下,外源增施P(HPO₄²⁻)1.0 mmol·L⁻¹,能使水稻地下部和地上部Cd含量增加.刘文菊等^[17]的研究发现,随外源P浓度增加(0~15.0 mg·L⁻¹),水稻地上部位Cd累积量由5.6 mg·kg⁻¹增加到19.8 mg·kg⁻¹.

当前Cd污染稻田修复治理过程中长期施用大量P肥或含P物质修复,这些进入土壤中的P很容易被根系吸收而进入水稻植株,然而水稻植株中P对Cd的累积和转运影响目前还不明确.因此,本文通过水培试验,研究不同Cd污染水平下,外源P不同添加水平对水稻各个部位Cd累积和转运的影响,以期Cd污染稻田P肥和含P钝化修复材料的科学合理施用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻为黄华占(常规晚稻),由湖南亚华种业有限公司提供.水稻种子用10% H₂O₂溶液中消毒15 min,去离子水洗净浸泡24 h,两层纱布覆盖置于(30±0.5)℃暗室内放置48 h.萌发后的幼芽移入1/4木村B营养液^[10],在30℃/20℃(昼/夜)温

度周期,相对湿度为80%,14/10 h(昼/夜)光照周期环境下培养至三叶一心水稻幼苗^[18].木村B营养液各组分浓度分别为:(NH₄)₂SO₄ 48.2 mg·L⁻¹、KNO₃ 18.5 mg·L⁻¹、K₂SO₄ 15.9 mg·L⁻¹、Ca(NO₃)₂ 59.9 mg·L⁻¹、MgSO₄ 65.9 mg·L⁻¹、Na₂SiO₄ 100.0 mg·L⁻¹、H₃BO₃ 2.9 mg·L⁻¹、NaH₂PO₄ 24.8 mg·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.1 mg·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 0.2 mg·L⁻¹、MnCl₂·4H₂O 1.8 mg·L⁻¹、Na₂MoO₄·2H₂O 0.1 mg·L⁻¹和Fe-EDTA 8.4 mg·L⁻¹.为避免营养液中P素对试验结果的影响,水稻培养过程中以13.6 mg·L⁻¹ KCl代替营养液中的KH₂PO₄,营养液其他组分不变.

1.2 试验设计

本试验共设计9个处理,即3个外源Cd(CdCl₂·2.5H₂O,分析纯)添加浓度:0、0.1和0.2 mg·L⁻¹(以Cd计)以及3个外源P(NaH₂PO₄,分析纯)添加浓度:10.0、22.5和45.0 mg·L⁻¹(以P计,10.0 mg·L⁻¹为正常P水平),试验处理设置如表1所示.每个处理3次重复,共计27盆.

表1 试验设计各处理及编号

处理	Cd (0 mg·L ⁻¹)	Cd (0.1 mg·L ⁻¹)	Cd (0.2 mg·L ⁻¹)
P(10.0 mg·L ⁻¹)	Cd0P10	Cd0.1P10	Cd0.2P10
P(22.5 mg·L ⁻¹)	Cd0P22.5	Cd0.1P22.5	Cd0.2P22.5
P(45.0 mg·L ⁻¹)	Cd0P45	Cd0.1P45	Cd0.2P45

2018年7月23日,将长势一致的水稻幼苗移栽至含有2.5 L木村B营养液的圆柱形塑料桶内(直径×高:20.0 cm×24.0 cm),一穴两株,用海绵包裹水稻下茎部将其固定.然后按照试验处理分别将Cd和P添加进入营养液中,水稻种植过程中每3 d换一次营养液直至水稻成熟.水稻种植过程中,每天用1.6 mol·L⁻¹的HNO₃溶液和0.1 mol·L⁻¹的NaOH溶液调节营养液pH至5.5.该水培试验在中南林业科技大学生命科学楼水稻盆栽试验场地开展,水稻生长光热条件均为自然环境条件,期间依据水稻生长状况按常规农艺措施喷施农药.

1.3 样品采集

2018年11月9日,采集成熟期水稻并用自来水及去离子水洗净,分离水稻根、茎、叶、谷壳、糙米.留取一部分水稻叶片鲜样,用于测定叶绿素含量,其余水稻各部位样品于通风处晾干后,放入烘箱105℃下杀青30 min,70℃烘干至恒重.将烘干后的水稻各部位样品分别粉碎,置于塑封袋保存待测.

1.4 样品分析与测定

水稻叶片叶绿素采用分光光度法进行测定^[19],

叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素分别在紫外可见分光光度计 (UV2600, UNIC) 665、647 和 470 nm 波长下测定. 水稻各部位 Cd 含量采用干灰化法消解^[20], 样品 Cd 含量用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP 6300, ThermoFisher) 测定. 分析过程中以湖南大米 [GBW 10045 (GSB-23)] 进行质量控制分析. Cd 的回收率为 95.2%~104.2%, 同时做空白试验. 通过湿式消解钼锑抗比色法^[21]测定水稻各部位 P 含量, 样品 P 含量用紫外可见分光光度计 (UV2600, UNIC) 在 700 nm 波长下测定, P 的回收率为 96.3%~98.7%.

1.5 数据统计与分析

水稻各部位之间的转运能力用转运系数 (translocation factor, TF) 来表示, 为水稻后一部位中 Cd 浓度(ρ , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与前一部位中 Cd 含量的比值, 其中, $\text{TF}_{\text{根-茎}} = \rho_{\text{茎}}/\rho_{\text{根}}$, $\text{TF}_{\text{茎-叶}} = \rho_{\text{叶}}/\rho_{\text{茎}}$, $\text{TF}_{\text{茎-谷壳}} = \rho_{\text{谷壳}}/\rho_{\text{茎}}$, $\text{TF}_{\text{茎-糙米}} = \rho_{\text{糙米}}/\rho_{\text{茎}}$. 水稻各部位 Cd 累积量 (M) 为水稻各部位 Cd 含量(ρ) 与该部位生物量 (B) 的乘积: $M_i = \rho_i \times B_i$ (式中 i 表示水稻部位: 根、茎、叶、谷壳和糙米).

试验数据用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 进行统计处理, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n=3$). 采用单因素 ANOVA 中 Duncan 多重比较法分析各处理间差异 ($P<0.05$), 图采用 Origin Pro 2018 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 外源 P 对不同 Cd 浓度水培溶液中水稻生长的影响

由表 2 可知, 不同外源 P 和 Cd 处理对水稻株高和生物量影响显著, 而对水稻分蘖数影响不明显. 同一外源 Cd 胁迫下, 随外源 P 浓度增加 (10.0~45.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 水稻株高均呈逐渐下降趋势, 其中 Cd0P10 处理水稻株高最大 (93.3 cm), Cd0.2P45 处理水稻株高最低 (77.3 cm), 最大降幅达 17.1%. 在相同的外源 P 添加量处理下, 水培溶液中没有添加外源 Cd 处理 (Cd0) 的水稻株高均高于外源 Cd 浓度为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的水稻植株.

对于水稻生物量而言, 在同一 Cd 胁迫下, 水稻总生物量均随外源 P 浓度增加而呈增加趋势, 在 Cd0 和 Cd0.2 处理下上升趋势较为明显. 在水培溶液中 Cd 浓度分别为 0、0.1 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着外源 P 施用量从 10.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 45.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水稻总生物量增幅分别为 10.8%~48.9%、3.8%~12.3% 和 17.1%~33.1%; 同时, 随外源 P 施用量增加, 水稻各部位 (根、茎、叶、谷壳和糙米) 生物量均出现不同程度的增加, 其中糙米生物量在水培溶液中 Cd 浓度分别为 0、0.1 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 分别增加了 22.5%~38.0%、12.4%~25.5% 和 21.9%~38.5%.

表 2 各处理对水稻株高、分蘖数及生物量的影响¹⁾

处理编号	Cd 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	P 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	株高 /cm	分蘖数	各部位生物量/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$					总生物量 / $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$
					根	茎	叶	谷壳	糙米	
Cd0P10	0	10.0	93.3 $\pm$ 1.5a	11 $\pm$ 1.2b	3.7 $\pm$ 0.1abc	15.9 $\pm$ 0.5b	7.5 $\pm$ 0.0c	3.1 $\pm$ 0.1bc	10.5 $\pm$ 1.2bc	40.6 $\pm$ 0.9cd
Cd0P22.5	0	22.5	85.7 $\pm$ 0.6b	11 $\pm$ 0.6b	4.3 $\pm$ 0.7ab	16.9 $\pm$ 0.0b	7.4 $\pm$ 0.0c	3.7 $\pm$ 0.7ab	12.8 $\pm$ 2.2ab	45.0 $\pm$ 3.0bc
Cd0P45	0	45.0	85.0 $\pm$ 7.8bc	13 $\pm$ 3.2ab	4.6 $\pm$ 1.2a	23.7 $\pm$ 5.2a	13.2 $\pm$ 1.0a	4.4 $\pm$ 1.6a	14.4 $\pm$ 1.2a	60.4 $\pm$ 4.1a
Cd0.1P10	0.1	10.0	81.3 $\pm$ 1.2bcd	12 $\pm$ 1.2ab	3.0 $\pm$ 0.9c	14.6 $\pm$ 2.1b	7.4 $\pm$ 1.0c	1.5 $\pm$ 0.0d	11.2 $\pm$ 2.2abc	37.6 $\pm$ 2.5cd
Cd0.1P22.5	0.1	22.5	79.0 $\pm$ 1.0cd	13 $\pm$ 1.2ab	3.1 $\pm$ 0.3c	14.1 $\pm$ 2.7b	7.6 $\pm$ 0.6c	1.8 $\pm$ 0.1d	12.5 $\pm$ 1.3abc	39.1 $\pm$ 4.6cd
Cd0.1P45	0.1	45.0	78.3 $\pm$ 0.6d	11 $\pm$ 1.5b	3.3 $\pm$ 0.2bc	15.2 $\pm$ 2.0b	7.6 $\pm$ 0.2c	2.2 $\pm$ 0.1cd	14.0 $\pm$ 1.5a	42.3 $\pm$ 3.0bcd
Cd0.2P10	0.2	10.0	85.7 $\pm$ 1.5b	14 $\pm$ 0.6a	2.8 $\pm$ 0.0c	13.8 $\pm$ 4.0b	7.5 $\pm$ 1.6c	3.1 $\pm$ 0.0bc	9.1 $\pm$ 0.0c	36.3 $\pm$ 4.7d
Cd0.2P22.5	0.2	22.5	83.3 $\pm$ 6.1bcd	15 $\pm$ 1.0a	3.0 $\pm$ 0.8c	14.9 $\pm$ 4.1b	10.3 $\pm$ 1.5b	3.2 $\pm$ 0.0bc	11.1 $\pm$ 2.4abc	42.5 $\pm$ 6.7bcd
Cd0.2P45	0.2	45.0	77.3 $\pm$ 0.6d	11 $\pm$ 0.6b	4.2 $\pm$ 0.1ab	16.0 $\pm$ 0.0b	10.8 $\pm$ 1.6b	4.6 $\pm$ 0.2a	12.6 $\pm$ 2.8ab	48.3 $\pm$ 1.8b

1) 表中数据为平均值 $\pm$ 标准误差; 同列数据不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同

2.2 外源 P、Cd 对水稻叶片光合色素含量的影响

由表 3 可知, 3 个不同外源 Cd 添加水平 (0、0.1 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下, 施加外源 P 对水稻叶片中光合色素含量均影响明显. 在同一外源 Cd 水平下, 叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均随外源 P 添加量增加 (10.0~45.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 而呈升高趋势. 不添加外源 Cd 时, 外源 P 使叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量增幅分别为 3.5%~31.9%、9.5%~23.8% 和

6.8%~11.4%; 外源 Cd 为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 分别增加了 47.7%~103.1%、25.9%~59.3% 和 8.8%~47.1%; 外源 Cd 为 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 分别增加了 47.5%~54.1%、7.7%~26.9% 和 21.9%~53.1%. 在外源 Cd (0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下, 水稻叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量均低于无外源 Cd 处理. 这说明添加外源 P 促进水稻叶片光合色素合成, 而 Cd 胁迫则抑制了叶片光合色素合成.

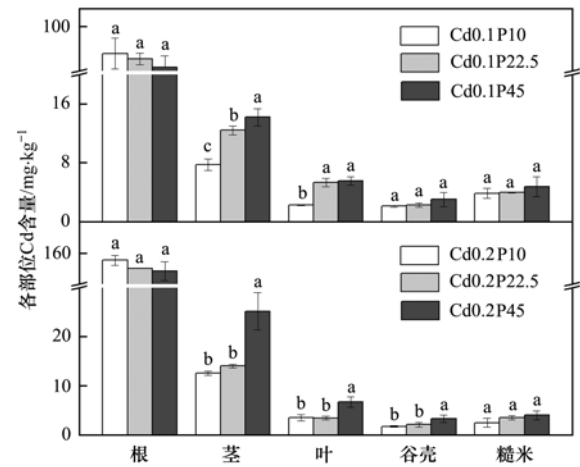
表 3 各处理水稻光合色素含量

Table 3 Contents of photosynthetic pigment in rice leaves with different treatments					
处理编号	Cd 浓度 /mg·L ⁻¹	P 浓度 /mg·L ⁻¹	叶绿素 a ¹⁾ /mg·g ⁻¹	叶绿素 b ¹⁾ /mg·g ⁻¹	类胡萝卜素 ¹⁾ /mg·g ⁻¹
Cd0P10	0	10.0	1.16 ± 0.00c	0.42 ± 0.02b	0.44 ± 0.03b
Cd0P22.5	0	22.5	1.20 ± 0.13c	0.46 ± 0.02b	0.47 ± 0.01ab
Cd0P45	0	45.0	1.53 ± 0.00a	0.52 ± 0.05a	0.49 ± 0.01a
Cd0.1P10	0.1	10.0	0.65 ± 0.03e	0.27 ± 0.01e	0.34 ± 0.01d
Cd0.1P22.5	0.1	22.5	0.96 ± 0.07d	0.34 ± 0.01c	0.37 ± 0.02cd
Cd0.1P45	0.1	45.0	1.32 ± 0.03b	0.43 ± 0.03b	0.50 ± 0.04a
Cd0.2P10	0.2	10.0	0.61 ± 0.02e	0.26 ± 0.03e	0.32 ± 0.01d
Cd0.2P22.5	0.2	22.5	0.90 ± 0.03d	0.28 ± 0.05de	0.39 ± 0.02c
Cd0.2P45	0.2	45.0	0.94 ± 0.01d	0.33 ± 0.02cd	0.49 ± 0.05a

1) 以水稻叶片鲜重计

2.3 外源 P 对水稻各部位 Cd 含量的影响

图 1 为不同外源 P 添加量对水稻各部位 Cd 含量的影响. 可以看出, 施加外源 P 对水稻各部位 Cd 含量存在一定影响, 水稻茎、叶、谷壳和糙米中的 Cd 含量随 P 添加量的增加 (10.0 ~ 45.0 mg·L⁻¹) 而呈增加趋势. Cd 浓度为 0.1 mg·L⁻¹ 胁迫条件下, 外源 P 添加量为 10.0 ~ 45.0 mg·L⁻¹ 时水稻茎、叶、谷壳和糙米 Cd 含量的最大增幅分别达 83.3%、148.7%、44.2% 和 22.8%; Cd 浓度为 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫条件下, 茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量最大增幅分别达 100.8%、90.3%、96.6% 和 61.8%. 而各处理水稻根系与其他各部位 Cd 含量变化趋势相反, 外源 P 添加量为 10.0 ~ 45.0 mg·L⁻¹ 时, 在 Cd 浓度分别为 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫条件下, 水稻根系 Cd 含量分别从 72.7 mg·kg⁻¹ 和 146.1 mg·kg⁻¹ 降低到 58.8 mg·kg⁻¹ 和 125.7 mg·kg⁻¹, 降幅分别达到 25.7% 和 16.8%.



不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著

图 1 不同处理下水稻不同部位的 Cd 含量

Fig. 1 Content of Cd in different tissues of rice plants with different treatments

2.4 外源 P 对水稻各部位 Cd 累积量的影响

图 2 为各处理水稻不同部位 Cd 累积量分布. 从

中可知, 各处理水稻植株 Cd 累积量范围为 395.1 ~ 1 082.0 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其中根系 Cd 累积量占 36.0% ~ 64.6%, 而糙米 Cd 累积量仅占 3.5% ~ 15.4%; 水稻各部位 Cd 累积量大小顺序基本上为: 根 > 茎 > 糙米 > 叶 > 谷壳. 在水培溶液中 Cd 分别为 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ 的胁迫条件下, 随外源 P 浓度升高 (10.0 ~ 45.0 mg·L⁻¹), 水稻植株 Cd 累积量逐渐增加, 增幅分别为 19.3% ~ 37.3% 和 6.0% ~ 69.2%. 从图 2 中还可以看出, 水稻茎、叶、谷壳和糙米 Cd 累积量均随 P 浓度增加而增加. 其中, Cd 浓度为 0.1 mg·L⁻¹ 胁迫条件下, 水稻茎、叶、谷壳和糙米 Cd 累积量增幅分别为 55.1% ~ 90.7%、144.0% ~ 155.6%、32.8% ~ 114.6% 和 3.8% ~ 94.5%; Cd 浓度为 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫条件下, 水稻茎、叶、谷壳和糙米 Cd 累积量增幅分别为 20.9% ~ 133.8%、34.3% ~ 174.2%、25.6% ~ 194.8% 和 71.9% ~ 158.6%. 各处理水稻根系 Cd 累积量除 Cd0.2P45 处理下增加了 29.0% (与 Cd0.2P10 处理相比) 以外, 其余各处理变化不明显.

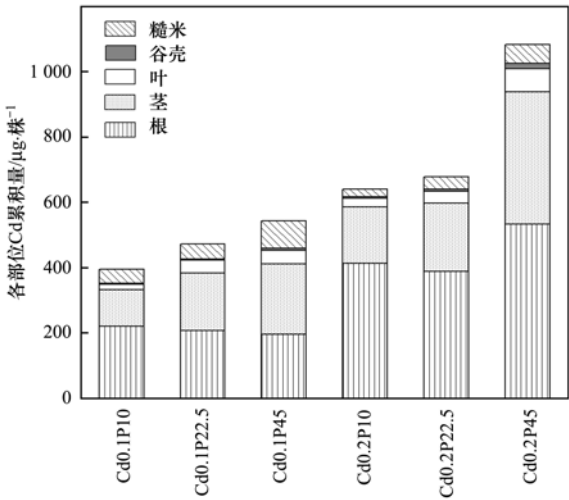


图 2 不同处理下水稻不同部位 Cd 累积量

Fig. 2 Cd accumulation in different tissues of rice plants with different treatments

2.5 水稻各部位 P 与 Cd 的质量比值

表 4 为各处理水稻不同部位中 P 与 Cd 的质量之间的比值,P/Cd 比值反映了在不同 P 和 Cd 处理下,水稻各部位对 P 和 Cd 的相对积累量. 从中可知,各处理下水稻不同部位 P/Cd 比值呈:糙米>叶>茎>谷壳>根. 在 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ 的 Cd 胁迫下,随营养液中 P 添加量增加(10.0~45.0 mg·L⁻¹),根系的 P/Cd 比值逐渐升高,而茎、叶、谷壳和糙米的 P/Cd 出现下降趋势. 其中,在 0.1 mg·L⁻¹ 的 Cd 胁迫下,随外源 P 浓度

的增加,根系的 P/Cd 比值增加了 7.3%~30.6%,而茎、叶、谷壳和糙米的 P/Cd 比值分别降低了 0.2%~18.7%、40.1%~53.6%、1.3%~17.1%和 1.8%~8.6%;在 Cd 浓度为 0.2 mg·L⁻¹ 胁迫处理下,根系的 P/Cd 比值增加了 65.5%~77.9%,而茎、谷壳和糙米的 P/Cd 比值分别降低了 3.4%~42.4%、15.0%~33.8%和 18.0%~41.8%. 这说明随着茎、叶、谷壳和糙米中 P 含量的增加,各部位中 Cd 含量显著增加,外源 P 促进了水稻各部位中 Cd 的累积.

表 4 不同处理下水稻各部位 P 与 Cd 的质量比值(P/Cd)

Table 4 Quality ratios of P to Cd (P/Cd) in various rice tissues with different treatments						
Cd 浓度 /mg·L ⁻¹	P 浓度 /mg·L ⁻¹	P/Cd				
		根	茎	叶	谷壳	糙米
0.1	10.0	25±6b	291±12a	815±55a	149±7c	7 446±1 031b
0.1	22.5	27±1b	236±31b	378±16d	147±20cd	7 583±58b
0.1	45.0	33±4a	290±18a	488±41c	123±5d	6 804±1 175b
0.2	10.0	10±0d	266±16ab	559±39c	234±16a	13 857±3 375a
0.2	22.5	17±2c	257±18ab	665±12b	199±10b	8 070±334b
0.2	45.0	18±1c	153±20c	498±55c	155±16c	11 353±1 982a

2.6 水稻各部位之间 Cd 的转运系数

外源 P 浓度的变化对水稻各部位之间 Cd 的转运能力有显著影响. 由表 5 可以看出,水稻各部位对 Cd 的转运能力差异明显,其转运系数大小关系为:TF_{茎-糙米}>TF_{茎-叶}>TF_{茎-谷壳}>TF_{根-茎},这说明茎中 Cd 向糙米中转运的能力要强于向叶和谷壳中转运的能力. 随外源 P 施用浓度增加

(10.0~45.0 mg·L⁻¹),Cd 在根到茎(TF_{根-茎})、茎到叶(TF_{茎-叶})的转运系数呈逐渐增加趋势,而茎到谷壳(TF_{茎-谷壳})、茎到糙米(TF_{茎-糙米})的转运系数呈逐渐降低趋势. 这说明随外源 P 浓度的增加,水稻根向茎转运 Cd 的能力和茎向叶转运 Cd 的能力逐渐增强,而茎向谷壳和糙米转运 Cd 的能力逐渐降低.

表 5 水稻各部位之间 Cd 的转运系数

Table 5 Translocation factors of Cd among various rice tissues					
Cd 浓度/mg·L ⁻¹	P 浓度/mg·L ⁻¹	TF _{根-茎}	TF _{茎-叶}	TF _{茎-谷壳}	TF _{茎-糙米}
0.1	10.0	0.11±0.01c	0.29±0.02b	0.27±0.01a	0.49±0.04a
0.1	22.5	0.19±0.01b	0.40±0.01a	0.18±0.02bc	0.32±0.01bc
0.1	45.0	0.24±0.03a	0.40±0.00a	0.22±0.04b	0.33±0.07b
0.2	10.0	0.09±0.00d	0.24±0.01d	0.14±0.00cd	0.26±0.01cd
0.2	22.5	0.11±0.00c	0.25±0.01cd	0.13±0.02d	0.24±0.01d
0.2	45.0	0.20±0.01b	0.26±0.01c	0.13±0.01d	0.16±0.02c

3 讨论

本研究中水稻植株 Cd 的累积量随外源 P(10.0~45.0 mg·L⁻¹) 的增加而增加,Cd0.2P45 处理 Cd 的累积量最高,为1 082.0 μg·株⁻¹,Cd0.1P10 处理 Cd 累积量最低,为 395.1 μg·株⁻¹(图 2),这说明添加外源 P 促进了水稻植株对 Cd 的累积. 这与刘文菊等^[17]的研究结果相似. 其原因在于,一方面添加外源 P 促进了水稻植株生长,随外源 P 添加量的增加,水稻各部位生物量显著增加(表 2);同时添加外源 P 能促进水稻叶片中叶绿素合成,本试验中施加外源 P(10.0~45.0 mg·L⁻¹)使叶绿素 a 和叶绿

素 b 含量最大增幅达 103.1% 和 59.3%(表 3),外源 P 能增强叶绿素生物合成过程中 δ-氨基酮戊酸(δ-aminolevulinic acid, δ-ALA)和胆色素原(porphobilinogen,PBG)合成酶的活性,提高光合作用速率^[22]. 这说明外源 P 能通过提高水稻叶片光合作用速率,促进水稻生长而增加了水稻地上部位对 Cd 的累积. 另一方面,外施 P 能够通过影响其他必要元素对非选择性阳离子通道的竞争而间接影响水稻对 Cd 的累积. Yang 等^[18]的研究发现,外施 P(0~322.9 μmol·L⁻¹)降低了水稻累积 Fe 元素而间接促进植株对 Cd 的累积. Gao 等^[14]的研究发现,随外源施 P 量增加,小麦吸收 Zn 减少,进一步促进了植

株对 Cd 的累积. 此外, 本研究中 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下水稻糙米中 Cd 含量和累积量略高于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下糙米 Cd 含量和累积量(图 1 和图 2), 但两者之间差异均不显著. 其原因在于 Cd 高浓度胁迫下水稻生长受到抑制, 水稻空壳率增加, 糙米生物量降低(表 2), 因此在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下糙米 Cd 累积量低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫处理.

本研究中水稻各部位之间 Cd 的转运系数 $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎-叶}}$ 随外源 P 浓度增加 ($10.0 \sim 45.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 而增大, 且转运系数大小顺序为: $\text{TF}_{\text{茎-糙米}} > \text{TF}_{\text{茎-叶}} > \text{TF}_{\text{茎-谷壳}} > \text{TF}_{\text{根-茎}}$ (表 5), 这说明施用外源 P 增强了水稻根系中 Cd 向茎转运以及茎中 Cd 向叶中转运, 根向茎、茎向叶的传输 Cd 的能力随外源 P 施用量增加而增强. 同时茎叶 Cd 累积量占总累积量比值范围为 $30.6\% \sim 43.8\%$, 仅次于根系 Cd 累积量(图 2). Ullrich 等^[23] 和 Schachtman 等^[24] 的研究表明, 在匍匐茎型植物 *Limnobium* 中 HPO_4^{2-} 进入根系细胞会导致膜电位降低, 导致质膜去极化, 而 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 均会导致质膜超极化, 由此推测 H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-} 可能与带正电的 Cd 离子存在共运关系. 有研究发现, 水稻累积的重金属随着蒸腾作用向茎叶转运, 高蒸腾作用下植株体内重金属明显高于低蒸腾作用^[25]. 外源 P 有可能通过增强水稻的蒸腾作用^[26], 使得更多的 Cd 随蒸腾流转移到地上部位^[27]. Yang 等^[18] 的研究表明, 水稻幼苗地上部位 GSH 和 PCs 随外源 P 浓度增加而增加. GSH/PCs 与 Cd 结合能生成新的毒性较低的复合物并固定于液泡中, 由此减弱了 Cd 对茎叶的毒害^[28], 增强了地上部位对 Cd 的耐受性, 促进 Cd 从根系向茎叶转运. 由图 2 可知, 根系 Cd 的累积量在不同 P 浓度处理下, 变化不明显, 而水稻总累积量随外源 P 浓度增加呈上升趋势. 由此可见, 水稻地上部位 Cd 的累积更大程度上受根系向上转运的影响, 而并不取决于根系对 Cd 的吸收, 这与文献[29, 30]的研究结果相似. 同时本研究通过对水稻各部位 P/Cd 质量比分析发现, 水稻茎、谷壳中 P/Cd 质量比值随外源 P 添加量而呈逐渐降低趋势(表 4), 而茎和谷壳的 Cd 含量随 P 浓度的增加而呈增加趋势(图 1); 当外源 P 浓度为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $45.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随 Cd 胁迫浓度增加 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 水稻糙米 P/Cd 增加, 增幅分别为 86.1% 和 66.9% , 说明水稻糙米吸收的 P 含量随外源 Cd 胁迫增强而增加. 这些结果均说明, 水稻茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 与 P 的转运存在协同作用.

4 结论

(1) 添加外源 P 促进水稻植株生长, 使水稻各

部位生物量和光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量均随外源 P 浓度增加 ($10.0 \sim 45.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 逐渐升高.

(2) 外源 P 浓度增加 ($10.0 \sim 45.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进水稻茎、叶、谷壳和糙米对 Cd 的累积, 水稻各部位 Cd 含量和累积量也随之增大; 水培溶液中 Cd 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 糙米 Cd 含量分别增加了 $2.8\% \sim 22.8\%$ 和 $40.9\% \sim 61.8\%$.

(3) 随外源 P 施加量增加, 水稻根系 P/Cd 质量比增大, 水稻茎、叶、谷壳和糙米中 P/Cd 质量比呈下降趋势, 转运系数 $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ 和 $\text{TF}_{\text{茎-叶}}$ 增加; 水稻各部位中 P 和 Cd 表现出一定的协同作用, 外源 P 促进了 Cd 由水稻根系向茎以及由茎向叶的转运, 增加了糙米对 Cd 的累积.

参考文献:

- [1] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1918-1925.
Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- [2] 刘仲齐, 张长波, 黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 721-727.
Liu Z Q, Zhang C B, Huang Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: a review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 721-727.
- [3] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. Plant and Soil, 2011, **347**(1-2): 105-114.
- [4] Wang Y W, Jiang X H, Li K, et al. Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses[J]. Biometals, 2014, **27**(2): 389-401.
- [5] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(4): 721-728.
Li J R, Xu Y M, Lin D S, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(4): 721-728.
- [6] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1491-1497.
Yan D M, Guo Z H, Huang F L, et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1491-1497.
- [7] 雷鸣, 曾敏, 胡立琼, 等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1527-1533.
Lei M, Zeng M, Hu L Q, et al. Effects of different phosphorus-containing substances on heavy metals migration in soil-rice system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(6): 1527-1533.
- [8] Grant C, Flaten D, Tenuta M, et al. The effect of rate and Cd concentration of repeated phosphate fertilizer applications on seed Cd concentration varies with crop type and environment[J]. Plant and Soil, 2013, **372**(1-2): 221-233.

- [9] 刘冲, 李虎, 赵一莎, 等. 镉胁迫下磷酸二铵对小麦生长及吸收镉的影响[J]. 土壤通报, 2015, **46**(2): 477-482.
Liu C, Li H, Zhao Y S, *et al.* Effects of application of DAP on the growth of wheat and absorption of cadmium under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(2): 477-482.
- [10] Li Y Y, Yu S H, Zhou X B. Effects of phosphorus on absorption and transport of selenium in rice seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(14): 13755-13761.
- [11] Jia H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Exogenous phosphorus treatment facilitates chelation-mediated cadmium detoxification in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **389**: 121849.
- [12] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.
- [13] Shi G L, Zhu S, Bai S N, *et al.* The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **299**: 94-102.
- [14] Gao X P, Flaten D N, Tenuta M, *et al.* Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization[J]. Plant and Soil, 2011, **338**(1-2): 423-434.
- [15] Seshadri B, Bolan N S, Wijesekara H, *et al.* Phosphorus-cadmium interactions in paddy soils[J]. Geoderma, 2016, **270**: 43-59.
- [16] 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.
- [17] 刘文菊, 张西科, 谭俊璞, 等. 磷营养对苗期水稻地上部累积镉的影响[J]. 河北农业大学学报, 1998, **21**(4): 28-31.
Liu W J, Zhang X K, Tan J P, *et al.* The effect of P in nutrient solution on Cd accumulated by rice shoot in the seedling stage[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1998, **21**(4): 28-31.
- [18] Yang Y J, Chen R J, Fu G F, *et al.* Phosphate deprivation decreases cadmium (Cd) uptake but enhances sensitivity to Cd by increasing iron (Fe) uptake and inhibiting phytochelatin synthesis in rice (*Oryza sativa*) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, **38**(1): 28.
- [19] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 134-137.
- [20] 王倩倩, 贾润语, 李虹呈, 等. Cd胁迫水培试验下水稻糙米Cd累积的关键生育时期[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(23): 4424-4433.
Wang Q Q, Jia R Y, Li H C, *et al.* Key growth stage of Cd accumulation in brown rice through a hydroponic experiment with Cd stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(23): 4424-4433.
- [21] Sayantan D, Shardendu. Phosphorus amendment competitively prevents chromium uptake and mitigates its toxicity in *Spinacea oleracea* L [J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2015, **53**(6): 395-405.
- [22] Arshad M, Ali S, Noman A, *et al.* Phosphorus amendment decreased cadmium (Cd) uptake and ameliorates chlorophyll contents, gas exchange attributes, antioxidants, and mineral nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under Cd stress[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, **62**(4): 533-546.
- [23] Ullrich C I, Novacky A J. Extra- and intracellular pH and membrane potential changes induced by K^+ , Cl^- , $H_2PO_4^-$, and NO_3^- uptake and fusicoccin in root hairs of *Limnium stoloniferum* [J]. Plant Physiology, 1990, **94**(4): 1561-1567.
- [24] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. Plant Physiology, 1998, **116**(2): 447-453.
- [25] Liu H W, Wang H Y, Ma Y B, *et al.* Role of transpiration and metabolism in translocation and accumulation of cadmium in tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. Chemosphere, 2016, **144**: 1960-1965.
- [26] Das N K, Saha A K, Adhikary P P. Water regimes and phosphorus on dry matter production, root porosity, transpiration and ion uptake of kharif rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Indian Journal of Soil Conservation, 2015, **43**(2): 153-158.
- [27] Liu J G, Qian M, Cai G L, *et al.* Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**(1-2): 443-447.
- [28] 邬飞波, 张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 632-636.
Wu F B, Zhang G P. Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(4): 632-636.
- [29] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉砷累积转运的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1910-1917.
Gu J F, Zhou H, Jia R Y, *et al.* Effects of a tribasic amendment on cadmium and arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- [30] Wu Z C, Zhao X H, Sun X H, *et al.* Xylem transport and gene expression play decisive roles in cadmium accumulation in shoots of two oilseed rape cultivars (*Brassica napus*) [J]. Chemosphere, 2015, **119**: 1217-1223.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)