

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)
降水空间异质性和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)	

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期

邓鹏辉¹, 蔡雅琴¹, 周航^{1,2*}, 刘雅¹, 杨文俊¹, 辜娇峰^{1,2*}, 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. 稻米品种安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 水稻不同生育期对 As 的吸收累积差异明显. 为研究水稻糙米 As 累积的关键生育期, 明确不同生育期吸收累积 As 对糙米 As 累积的贡献, 本研究通过水培试验, 分别在水稻分蘖期(30 d)、拔节期(16 d)、孕穗期(13 d)、灌浆期(17 d)、蜡熟期(15 d)、成熟期(13 d)和全生育期(104 d)添加外源 As, 及不添加外源 As 处理作为对照 CK. 结果表明: ①不同生育期 As 胁迫对水稻植株生物量有显著影响, 与对照 CK 相比, 单一时期 As 胁迫处理中仅分蘖期 As 胁迫处理下植株生物量增加, 其他处理均降低, 其中孕穗期 As 胁迫处理最低, 所有单一时期 As 胁迫处理植株生物量均高于全生育时期 As 胁迫下植株生物量; ②6 个单一时期 As 胁迫处理糙米中 As 含量均高于对照 CK 糙米中 As 含量, 范围为 0.08~0.24 mg·kg⁻¹, 其中孕穗期 As 胁迫处理糙米 As 含量最高, 为全生育时期 As 胁迫处理糙米 As 含量的 64.9%; ③6 个单一时期 As 胁迫处理糙米 As 的累积量均高于对照 CK, 范围为 1.4~4.5 μg·株⁻¹, 其中孕穗期 As 胁迫处理糙米 As 累积量最高, 其次是灌浆期, 而全生育时期 As 胁迫处理糙米 As 累积量为 5.7 μg·株⁻¹, 高于所有单一时期 As 胁迫处理糙米 As 的累积量; ④水稻孕穗期累积的 As 对水稻成熟期糙米中 As 累积量的相对贡献率最大, 为 40.3%, 其次是灌浆期, 相对贡献率为 26.0%, 孕穗期和灌浆期是水稻成熟期糙米 As 累积的关键生育期.

关键词: 水稻; As 胁迫; 生育期; 累积速率; 相对贡献

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4726-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004087

Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages

DENG Peng-hui¹, CAI Ya-qin¹, ZHOU Hang^{1,2*}, LIU Ya¹, YANG Wen-jun¹, GU Jiao-feng^{1,2*}, LIAO Bo-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)

Abstract: The absorption and accumulation of As at different stages of rice growth are significantly different. To study the key growth stages of As accumulation in brown rice and to determine the contribution of As accumulation at different growth stages to As contribution in brown rice, a rice hydroponics experiment was carried out by adding external As during the different rice growth stages: tillering stage (30 d), jointing stage (16 d), booting stage (13 d), filling stage (17 d), dough stage (15 d), maturity stage (13 d), and full growth period (104 d). The results showed that: ① As stress at different growth stages had a significant effect on the biomass of rice plants. In comparison with the control CK, the treatments of As stress with five single-stages decreased the rice biomass, except during the tillering stage. Among these treatments, although the As stress at booting stage had the lowest rice biomass, the biomass of all the rice plants were higher than that for As stress in the full growth period. ② The content of As in brown rice for all the treatments of As stress at six single-stages, ranging from 0.08-0.24 mg·kg⁻¹, was higher than that of CK. Among these six treatments, the As stress at booting stage had the highest As content in brown rice, accounting for 64.9% of the As content in the full growth period. ③ The accumulation of As in brown rice for all the treatments of As stress at six single-stages was higher than that of CK, and ranged from 1.4-4.5 μg·plant⁻¹. Among these six treatments, the As stress at booting stage had the highest As accumulation, followed by filling stage. The accumulation of As in brown rice treated with As stress was highest in the full growth period with a value of 5.7 μg·plant⁻¹. ④ The relative contribution of As stress at the booting stage was the highest for the As accumulation in brown rice and reached to 40.3%, followed by filling stage with 26.0%. Therefore, the rice growth stages of the booting stage and filling stage were the key stages of As accumulation in brown rice.

Key words: rice; Arsenic stress; growth stage; accumulation rate; relative contribution rate

砷(As)是土壤污染的主要元素之一, 2014 年全国土壤污染状况调查公报显示, 我国土壤 As 的点位超标率为 2.7%^[1]. 土壤中 As 污染的成因主要是自然地质和人为活动^[2], 开采矿物、煤炭消费、喷施农药化肥和污水灌溉^[3,4] 等是造成土壤 As 污染的主要来源. As 是毒性很强的元素之一, 具有致畸性, 可引起肺癌、膀胱癌、肝癌和皮肤癌^[5], 增加冠心病发病率^[6]. 无机 As 及其化合物被国际癌症研究机

构(IARC)列为人类 I 类致癌物^[7], 慢性接触无机 As 会损害中枢神经系统^[8]. 三价 As 可以抑制人体酶的活性, 造成人体代谢紊乱, 引发神经衰弱等问

收稿日期: 2020-04-09; 修订日期: 2020-04-29

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3881); 国家重点研发计划项目(2016YFD0800705); 长沙市科技计划项目(KQ1901138)

作者简介: 邓鹏辉(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与控制, E-mail: 987191187@qq.com

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

题,五价 As 毒性稍弱,但也可引起脊髓炎和贫血等症状^[9]. 水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国主要粮食作物^[10],对 As 具有较强的累积能力,能通过食物链威胁人体健康^[11].

研究水稻 As 吸收累积的过程与机制,是解决水稻 As 污染问题的关键途径. 水稻各部位在不同生育期对 As 的吸收累积能力有明显差异. 段明宇^[12]的研究发现水稻在生长前期根系吸收 As 能力更强,而程艳等^[13]的研究认为水稻在孕穗期对 As 累积能力更强. 水稻根系主要通过磷酸盐转运蛋白和根内的水通道 *ondulin26* 蛋白 *OsNIP2:1* (*Lsi1*),分别吸收 As(V) 和 As(III)^[14,15]. 水稻吸收的 As 主要富集在根部,其中部分 As 随水稻的生长发育迁移转运至茎、叶、穗、谷壳和糙米中^[16],而水稻糙米中 As 的累积受水稻不同生育期各部位中 As 吸收与转运影响. 由于水稻各个生育时期生长过程与营养需求状况的差异,不同生育期对 As 吸收累积必然存在一定的差异. 因此,本研究通过在不同时期添加外源 As 来探究水稻不同生育时期吸收累积 As 的差异,明确不同生育期 As 胁迫对水稻成熟期糙米 As 累积的影响,确定水稻 As 累积的关键生育期,以期为阻控水稻对 As 的吸收累积及 As 污染稻田安全利用提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验采用水稻品种为湘晚籼 13 号,为湖南省水稻研究所和金健米业股份有限公司合作选育的常规晚籼品种. 水稻培育营养液为木村 B 营养液^[17].

1.2 试验设计

本试验地点为长沙市中南林业科技大学水稻盆栽试验基地,基地光、气、热均为自然状态,为亚热带季风性气候,降水丰沛,气候温和,雨热同期. 用 30% H₂O₂ 对水稻种子消毒 15 min,用去离子水洗净,再用湿润的纱布包裹,置于人工培养箱(温度 60℃,湿度 50%)中培养发芽,芽长为 1 cm 左右时播种于未受 As 污染的土壤中. 2018 年 7 月 16 日,用自来水冲洗水稻幼苗根系,去除根系附着的黏土,用海绵包裹、泡沫浮板固定水稻幼苗,放入装有 18 L 营养液的无盖长方体容器(长 50 cm,宽 25 cm,高 15 cm)中培养,保证水稻幼苗生长满足后续试验需要. 2018 年 7 月 23 日,选择长势均匀一致的水稻幼苗,五叶一心,1 穴 2 株,移入装有 3 L 营养液的圆柱形塑料桶(高 18 cm,内径 17 cm)中进行水培试验.

本试验共设计 7 个外源 As[GSB 04-1714-2004, As 标准溶液,As(III)]添加处理,以全生育期不添加外源 As 为空白对照,每个处理重复 3 次,具体试验设计见表 1. 按照试验设计在各生育时期添加外源 As,使营养液中的 As 浓度为 20 μg·L⁻¹,控制营养液 pH 为 5.5(用 NaOH 和 HCl 调节),每 3 d 更换一次营养液直至水稻成熟收获. 水培试验期间根据实际情况喷洒农药.

1.3 样品分析测定方法

2018 年 11 月 4 日,培养 104 d 后收获水稻植株,用自来水洗净,然后用纯水、超纯水各 2 次冲洗,自然风干后放入烘箱,于 105℃ 杀青 30 min,70℃ 烘干至恒重,分别记录根、茎、叶、穗、谷壳和糙米的干重,所有样品粉碎并用密封袋保存待测.

表 1 试验设计与编号
Table 1 Experiment design and numbering

处理	As 的浓度	胁迫时期	胁迫时间/d	胁迫日期(月-日)
CK	不添加外源 As	无	0	无
TS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	分蘖期	30	07-23 ~ 08-21
JS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	拔节期	16	08-22 ~ 09-06
BS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	孕穗期	13	09-07 ~ 09-19
FS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	灌浆期	17	09-20 ~ 10-06
DS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	蜡熟期	15	10-07 ~ 10-21
MS	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	成熟期	13	10-22 ~ 11-04
CG	添加外源 As 使营养液中 As 浓度为 20 μg·L ⁻¹	全生育期	104	07-23 ~ 11-04

水稻样品中的 As 采用干灰法进行消解(GB/T 5009-2003),样品溶液中的 As 含量使用原子荧光光度计(海光,LS-AFS 9530)测定. 水稻样品分析过程中以标准物质湖南大米 GBW 10045 (GSB-23)进行质量控制,As 的回收率为 97.6%~101.5%,同时做空白试验.

1.4 数据统计与分析

水稻各部位(根、茎、叶、穗、谷壳和糙米)As 累积量(μg·株⁻¹)用 BA_i 表示:

$$BA_i = C_i \times B_i$$

$$\text{水稻植株 As 累积量} = \sum BA_i$$

式中,C_i 是水稻各部位(根、茎、叶、穗、谷壳和糙米)

As 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_i 是水稻各部位生物量(干重, $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$).

水稻不同生育期 As 胁迫下水稻植株和糙米 As 累积速率用 V 表示:

$$V = (C_j \times B_j - C_k \times B_k) / t_j$$

水稻不同生育期 As 累积对水稻成熟期植株、地上部位和糙米 As 相对贡献率用 P 表示:

$$P = \frac{C_j \times B_j - C_k \times B_k}{\sum (C_j \times B_j - C_k \times B_k)} \times 100\%$$

式中, C_j 是不同生育期 As 胁迫(分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期、蜡熟期和成熟期)下各部位 As 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_j 是不同生育期 As 胁迫下各部位生物量(干重, $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$); C_k 是 CK 处理各部位 As 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_k 是 CK 处理各部位生物量(干重, $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$);水稻植株和地上部位 As 累积速率中 t_j 是不同生育期 As 胁迫(分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期、蜡熟期和成熟期)的时间,其中 TS、JS、BS、FS、DS 和 MS 处理的 t_j 分别为 30、16、13、17、15 和 13 d;糙米 As 累积速率中 t_j 是糙米开始受到 As 胁迫到成熟收获的时间,其中 TS、JS、BS、FS、DS 和 MS 处理的 t_j 分别为 45、45、45、45、28 和 13 d.

本研究数据统计与分析使用 SPSS 23.0 软件进行,采用 Duncan 多重比较法对各处理数据结果进行差异性分析($P < 0.05$),使用 Origin 2018 绘制图形.

2 结果与分析

2.1 不同生育期 As 胁迫对水稻生物量的影响

水稻植株各部位生物量见表 2,水稻不同生育期 As 胁迫对不同部位生物量及总生物量有明显影响.与对照 CK 相比,6 个单一时期 As 胁迫处理中仅 TS 处理使水稻生物量增加,为 $121.1 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,而其他 5 个处理均使水稻生物量降低,降幅为 6.9%~24.4%,其中 BS 处理最低,仅为 $86.1 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$.所有单一时期 As 胁迫处理糙米和谷壳的生物量均低于对照 CK($21.7 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$),其中 BS、DS 和 MS 处理最低,糙米生物量分别比对照 CK 降低了 15.2%、15.2% 和 13.8%,谷壳生物量分别比对照降低了 22.7%、21.1% 和 18.6%.各单一时期 As 胁迫处理根、茎、叶和穗的生物量均为 TS 处理最高,且均显著高于对照 CK,除 MS 处理茎的生物量以外,其它处理根、茎、叶和穗的生物量均低于对照 CK.各单一时期 As 胁迫处理中 BS 处理的根、茎和叶生物量最低,与对照相比降低了 33.8%、35.9% 和 14.0%.表中还可以看出,全生育时期 As 胁迫处理(CG)中水稻各部位生物量和总生物量均低于对照 CK,其中糙米生物量仅为 $17.6 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,显著低于对照 CK 处理.此外,CG 处理糙米、谷壳、穗、叶和茎的生物量均低于各单一时期 As 胁迫处理.

表 2 不同生育期 As 胁迫对水稻生物量的影响¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$

Table 2 Effects of As stress at different growth stages on rice biomass/ $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$

处理	水稻各部位生物量						
	糙米	谷壳	穗	叶	茎	根	总生物量
CK	$21.7 \pm 1.3\text{a}$	$32.2 \pm 2.1\text{a}$	$1.8 \pm 0.1\text{bc}$	$17.9 \pm 1.8\text{b}$	$32.9 \pm 1.4\text{b}$	$7.4 \pm 1.2\text{b}$	$113.9 \pm 5.7\text{ab}$
TS	$20.1 \pm 1.7\text{ab}$	$30.3 \pm 2.7\text{a}$	$2.4 \pm 0.2\text{a}$	$21.2 \pm 1.9\text{a}$	$38.2 \pm 2.5\text{a}$	$8.9 \pm 0.6\text{a}$	$121.1 \pm 7.9\text{a}$
JS	$19.9 \pm 2.0\text{ab}$	$29.5 \pm 1.2\text{a}$	$1.6 \pm 0.1\text{cd}$	$17.0 \pm 1.3\text{c}$	$26.7 \pm 0.9\text{c}$	$6.4 \pm 0.9\text{bc}$	$101.0 \pm 1.5\text{cd}$
BS	$18.4 \pm 2.0\text{bc}$	$24.9 \pm 0.8\text{b}$	$1.3 \pm 0.1\text{de}$	$15.4 \pm 1.0\text{c}$	$21.1 \pm 2.0\text{d}$	$4.9 \pm 0.2\text{d}$	$86.1 \pm 5.3\text{e}$
FS	$20.4 \pm 2.1\text{ab}$	$31.5 \pm 2.5\text{a}$	$1.8 \pm 0.1\text{b}$	$16.9 \pm 1.6\text{c}$	$28.5 \pm 0.7\text{c}$	$7.0 \pm 0.7\text{bc}$	$106.0 \pm 4.4\text{bc}$
DS	$18.4 \pm 0.7\text{bc}$	$25.4 \pm 1.3\text{b}$	$1.1 \pm 0.2\text{ef}$	$16.5 \pm 1.6\text{c}$	$28.4 \pm 3.3\text{c}$	$5.9 \pm 0.5\text{cd}$	$95.7 \pm 5.6\text{d}$
MS	$18.7 \pm 1.1\text{ab}$	$26.2 \pm 0.3\text{b}$	$1.8 \pm 0.3\text{b}$	$17.8 \pm 1.6\text{b}$	$33.0 \pm 2.3\text{b}$	$6.7 \pm 0.3\text{bc}$	$104.3 \pm 4.9\text{cd}$
CG	$17.6 \pm 2.1\text{c}$	$21.8 \pm 1.4\text{c}$	$1.1 \pm 0.1\text{f}$	$14.9 \pm 0.8\text{c}$	$20.0 \pm 1.7\text{d}$	$6.5 \pm 0.7\text{bc}$	$79.6 \pm 4.5\text{e}$

1) 平均值 $\pm$ 标准偏差($n=3$); 同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

2.2 不同生育期 As 胁迫对水稻各部位 As 含量的影响

表 3 为不同处理水稻成熟期各部位中 As 含量.从中可知,水稻不同生育期 As 胁迫各部位中 As 含量均高于对照 CK 处理.6 个单一时期 As 胁迫处理糙米中 As 含量均高于对照 CK 糙米中 As 含量,范围为 $0.08 \sim 0.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,大小顺序为 $\text{BS} > \text{FS} > \text{JS} > \text{MS} > \text{TS} > \text{DS}$.各单一 As 胁迫处理中 TS 处理根系和茎中 As 含量最高,分别为 $25.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为 FS 处理,分别为 $21.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和

$1.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; DS 处理根系和茎中 As 含量最低,仅为 $12.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于其余各单一 As 胁迫处理.所有单一时期 As 胁迫处理谷壳和穗中 As 含量均为 BS 处理下最高,分别为 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他处理,其次为 FS 处理,而 DS 和 MS 处理中谷壳和穗中 As 含量较低.表 3 中还可以看出,全生育时期 As 胁迫处理(CG)中各部位 As 含量均显著高于对照 CK 和各单一 As 胁迫处理,其糙米 As 含量达到 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为 BS 处理的 1.5 倍.

表 3 不同生育期 As 胁迫对水稻各部位 As 含量的影响/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Effects of As stress at different growth stages on As contents in different rice tissues/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	水稻各部位 As 含量					
	糙米	谷壳	穗	叶	茎	根
CK	$0.06 \pm 0.01\text{f}$	$0.06 \pm 0.01\text{e}$	$0.13 \pm 0.01\text{e}$	$0.25 \pm 0.02\text{e}$	$0.36 \pm 0.02\text{d}$	$6.56 \pm 0.84\text{g}$
TS	$0.10 \pm 0.01\text{def}$	$0.21 \pm 0.03\text{bc}$	$0.38 \pm 0.09\text{de}$	$1.11 \pm 0.14\text{c}$	$1.17 \pm 0.16\text{b}$	$25.75 \pm 1.23\text{b}$
JS	$0.14 \pm 0.01\text{d}$	$0.12 \pm 0.02\text{c}$	$0.69 \pm 0.06\text{d}$	$0.95 \pm 0.03\text{c}$	$0.98 \pm 0.14\text{b}$	$15.19 \pm 0.35\text{e}$
BS	$0.24 \pm 0.01\text{b}$	$0.25 \pm 0.02\text{b}$	$2.54 \pm 0.50\text{a}$	$0.80 \pm 0.13\text{cd}$	$0.97 \pm 0.11\text{b}$	$19.05 \pm 2.77\text{d}$
FS	$0.17 \pm 0.02\text{c}$	$0.22 \pm 0.04\text{bc}$	$1.35 \pm 0.32\text{c}$	$2.18 \pm 0.20\text{b}$	$1.11 \pm 0.21\text{b}$	$21.89 \pm 1.10\text{c}$
DS	$0.08 \pm 0.01\text{ef}$	$0.18 \pm 0.01\text{c}$	$0.34 \pm 0.01\text{de}$	$0.52 \pm 0.07\text{de}$	$0.43 \pm 0.03\text{d}$	$12.22 \pm 1.10\text{f}$
MS	$0.11 \pm 0.02\text{de}$	$0.16 \pm 0.02\text{cd}$	$0.30 \pm 0.02\text{de}$	$0.53 \pm 0.06\text{de}$	$0.67 \pm 0.02\text{c}$	$17.30 \pm 1.50\text{de}$
CG	$0.37 \pm 0.06\text{a}$	$0.46 \pm 0.07\text{a}$	$2.10 \pm 0.06\text{b}$	$4.51 \pm 0.52\text{a}$	$5.89 \pm 0.23\text{a}$	$37.05 \pm 1.30\text{a}$

2.3 不同生育期 As 胁迫对水稻各部位 As 累积量的影响

图 1 为不同处理水稻成熟期各部位中 As 的累积量. 从中可知, 6 个单一时期 As 胁迫处理水稻植株 As 的累积量均显著高于对照 CK, 累积量变化范围为 $98.9 \sim 306.2 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 各部位累积量大小顺序为根系 > 茎 > 叶 > 谷壳 > 糙米 > 穗, 其中根系中 As 的累积量占比最大, 达到 $65.3\% \sim 75.1\%$, 糙米中 As 的累积量较低, 仅为 $0.63\% \sim 1.82\%$. 各单一时期 As 胁迫处理根系中 As 累积量范围为 $71.8 \sim 228.7 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 其中 TS 处理最高 ($228.7 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$), 其次为 FS 处理 ($153.6 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$), 分别为地上部位 As 累积量的 2.95 和 1.89 倍, 而 MS、JS 和 BS 处理根系中 As 的累积量相当, DS 处理根系中 As 的累积量最低. 各处理地上部位 As 累积变化趋势与根系 As 累积一致, 各单一时期 As 胁迫处理地上部位 As 累积量变化范围为 $27.2 \sim 81.5 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 其中 FS 处理最高 ($81.5 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$), 其次为 TS 处理 ($77.5 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$), 而 MS、JS 和 BS 处理地上部位中 As 的累积量相当, DS 处理地上部位中 As 的累积量最低. 全生育时期 As 胁迫处理 (CG) 中水稻植株累积量为 $442.0 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 显著高

于对照 CK 和各单一 As 胁迫处理, 其中糙米、谷壳、穗、叶、茎和根中 As 累积量分别为 5.7、10.0、2.2、66.7、117.9 和 $239.4 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$.

2.4 不同生育期 As 胁迫下水稻对 As 的累积速率

图 2 为不同生育期 As 胁迫下水稻植株和糙米中 As 的累积速率. 从中可知, 水稻植株 As 累积速率 FS 处理最高, 为 $9.804 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为 TS 处理 ($7.926 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), 而 DS 处理最低, 仅为 $2.032 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$. 各处理糙米中 As 的累积来源于各生育期 As 胁迫处理下水稻植株累积的 As 向糙米中转运. 各处理糙米 As 累积速率范围为 $0.001 \sim 0.069 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 其大小排序为: $\text{BS} > \text{MS} > \text{FS} > \text{JS} > \text{TS} > \text{DS}$. 图 2 中在水稻营养生长阶段 (分蘖期、拔节期和孕穗期) 对水稻进行 As 胁迫处理, 糙米 As 的积累速率由 TS 处理到 BS 处理呈现逐渐上升趋势, 在 BS 处理下达到最大累积速率 $0.069 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 而在水稻生殖生长阶段 (灌浆期、蜡熟期和成熟期) 对水稻进行 As 胁迫处理, 糙米 As 的累积速率 MS 处理下为 $0.054 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 而 DS 处理下仅为 $0.001 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$.

2.5 不同生育期 As 累积对水稻成熟期各部位 As 累积的相对贡献

表 4 为水稻不同生育期 As 胁迫对各部位 As 累

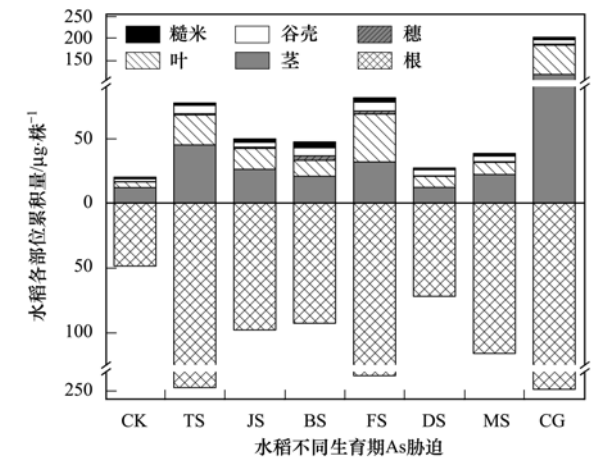


图 1 不同生育期 As 胁迫下水稻各部位 As 累积量
Fig. 1 As accumulation in different rice tissues under As stress at different growth stages

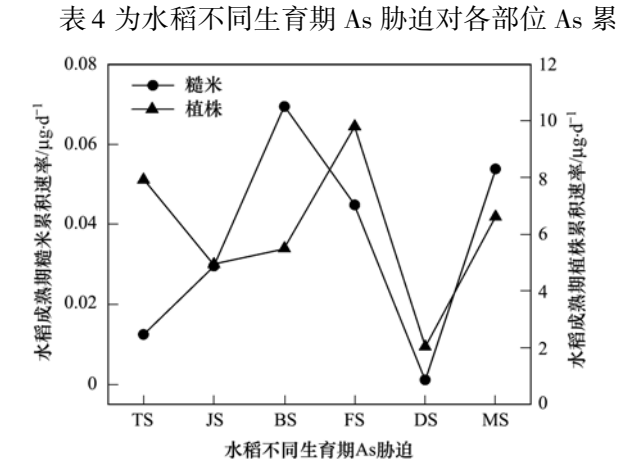


图 2 不同生育期 As 胁迫下水稻成熟期各部位 As 累积速率
Fig. 2 As accumulating rates in different rice tissues at maturity stage under As stress at different growth stages

积的相对贡献率. 从中可知, 水稻孕穗期 (BS) 累积的 As 对水稻成熟期糙米中 As 累积量的相对贡献率最大, 为 40.3%, 其次为灌浆期 (FS) 与拔节期 (JS), 其相对贡献率分别为 26.0% 和 17.1%, 而成熟期 (MS)、分蘖期 (TS) 和蜡熟期 (DS) 对糙米中 As 累积相对贡献率较低, 其相对贡献率分别为 9.0%、7.2% 和 0.4%. 对水稻植株和地上部位 As 累积的相对贡献率而言, 各处理相对贡献率趋势基本一致, 其中分蘖期 (TS) 和灌浆期 (FS) 的 As 累积相对贡献率较高, 而蜡熟期 (DS) 的相对贡献率最低.

表 4 水稻不同生育期 As 胁迫对成熟期各部位 As 累积的相对贡献率/%

Table 4 Relative contributions of As stress at different growth stages on As accumulation in different rice tissues at maturity stage/%

处理	水稻 As 累积相对贡献率		
	糙米	地上部位	水稻植株
TS	7.2	28.5	35.4
JS	17.1	14.7	11.8
BS	40.3	13.5	10.7
FS	26.0	30.5	24.8
DS	0.4	3.5	4.5
MS	9.0	9.1	12.8

3 讨论

水稻不同生育期 As 胁迫下成熟期各部位 As 含量 (表 3) 和累积量 (图 1) 均有着明显的差异. 分蘖期 As 胁迫处理 (TS) 下, 水稻根系、茎及植株中 As 累积量最高, 分别达到 228.7、44.9 和 306.2 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 其次是灌浆期 As 胁迫处理 (FS). 其原因在于, 一方面分蘖期是水稻发育中的主要营养生长期, 时间跨度最长 (30 d), 在这一时期水稻根系快速生长发育, 茎叶大量分蘖并快速生长^[18], 根系在吸收营养物质快速生长的同时, 吸收累积了大量的 As. 另一方面, 水稻分蘖期大量新生长的根系表面还没有覆盖根表铁膜, 而已经形成根表铁膜的部分根段其铁膜厚度还比较薄, 根表铁膜没有起到阻控根系吸收 As 的屏障作用. 有研究表明, 根表铁膜对水稻吸收 As 具有阻隔或富集作用^[19], 在不同生育期根表铁膜发挥作用不同, 在生育初期, 根表铁膜主要起富集作用^[20]; 郭伟等^[21]在研究分蘖期根表铁膜对水稻 As 吸收的影响中发现, 根表铁膜促进了水稻根部对 As 的吸收. 随着水稻生长发育, 根表铁膜生长完全, 阻隔了根系对 As 的吸收, 薛培英等的研究发现生育后期根表铁膜可使水稻根系中 As 含量比生育初期降低 50%~90%^[22].

本研究中孕穗期 (BS) 和灌浆期 (FS) As 胁迫下糙米中 As 的累积量最大, 分别为 4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 3.4 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ (图 1), 且孕穗期和灌浆期对糙米中 As

累积贡献较大, 其相对贡献率分别为 40.3% 和 26.0% (表 4). 同时孕穗期 As 胁迫下糙米 As 累积速率高于其他生育期, 为 0.069 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 其次为成熟期和灌浆期 (图 2), 说明水稻孕穗期和灌浆期吸收累积的 As 为糙米中 As 的主要来源. 有研究表明, 孕穗期水稻根系吸收的非结构碳水化合物在茎鞘中累积^[23], 然后在灌浆期转运至糙米中, 但孕穗期累积在茎鞘中的 As 也会在此过程中被夹带而进入糙米中累积, 同时在灌浆期叶片中的 As 也会通过茎的韧皮部介导转运累积到糙米中^[24]. 还有研究表明, 灌浆期是水稻生殖生长阶段, 根吸收大量养分的同时吸收了大量 As, 这些 As 能通过茎的木质部转运而进入到糙米中^[25], 但水稻茎节^[26]对 As 在木质部中的转运有阻隔作用, 水稻茎节是木质部和韧皮部转换的关键器官^[27]. 本研究灌浆期 As 胁迫下水稻糙米 As 累积量 (3.4 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$) 小于孕穗期 As 胁迫 As 累积量 (4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$), 说明水稻糙米中 As 主要来源于孕穗期韧皮部的转运作用, 其次来源于灌浆期木质部的转运作用. 陈丽娜^[28]在不同水分管理模式下水稻吸收累积 As 的研究中发现, 灌浆期到成熟期糙米中的 As 含量会随着生育期表现出下降趋势, 本研究中灌浆期、蜡熟期和成熟期的相对贡献率分别为 26.0%、0.4% 和 9.0%, 说明水稻糙米 As 累积能力从灌浆期开始降低. Honma 等^[29]在抽穗时改变土壤中 Eh、酸碱度和溶解态 Fe (II) 的浓度进而有效降低了水稻糙米中的 As 累积. 本研究中水稻糙米中 As 累积在营养生长阶段 (分蘖期和拔节期)、营养生长和生殖并进阶段 (孕穗期)、生殖生长阶段 (灌浆期、蜡熟期和成熟期) 的相对贡献率分别为 24.3%、40.33% 和 38.9%, 进一步说明水稻成熟期糙米中 As 主要来源于水稻的营养生长和生殖并进阶段, 说明孕穗期是水稻糙米 As 累积的关键时期, 其次是灌浆期. 水稻糙米中所累积的 As 究竟是主要来源于灌浆期至成熟期水稻籽粒形成过程中根部吸收的, 还是水稻生育前期植株内吸收累积 As 的转运累积, 还有待进一步研究.

4 结论

(1) 不同生育期 As 胁迫对水稻植株生物量有显著影响, 单一时期 As 胁迫处理除分蘖期外, 各时期 As 胁迫下水稻植株生物量均低于对照 CK, 所有单一时期 As 胁迫处理植株生物量均高于全生育时期 As 胁迫下植株生物量.

(2) 6 个单一时期 As 胁迫处理糙米中 As 含量范围为 0.08~0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中孕穗期 As 胁迫处理最高, 其次为灌浆期和拔节期 As 胁迫处理.

(3) 6 个单一时期 As 胁迫处理水稻植株 As 累积量为 98.9 ~ 306.2 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 其中分蘖期 As 胁迫处理最高, 而糙米中 As 累积量范围为 1.4 ~ 4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 其中孕穗期 As 胁迫处理最高。

(4) 孕穗期和灌浆期是水稻成熟期糙米 As 累积的关键生育期, 糙米 As 累积速率分别为 0.069 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 0.045 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 对糙米 As 累积相对贡献率分别为 40.3% 和 26.0%。

参考文献:

- [1] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [2] Oremland R S, Stolz J F. The ecology of arsenic[J]. Science, 2003, **300**(5621): 939-944.
- [3] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, et al. Hydrogeochemical controls on arsenic contamination potential and health threat in an intensive agricultural area, northern China[J]. Environmental Pollution, 2020, **256**: 113455.
- [4] Liu G, Shi Y, Guo G L, et al. Soil pollution characteristics and systemic environmental risk assessment of a large-scale arsenic slag contaminated site[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **251**: 119721.
- [5] Meliker J R, Wahl R L, Cameron L L, et al. Arsenic in drinking water and cerebrovascular disease, diabetes mellitus, and kidney disease in Michigan: a standardized mortality ratio analysis[J]. Environmental Health, 2007, **6**(1): 4.
- [6] Oberoi S, Devleeschauwer B, Gibb H J, et al. Global burden of cancer and coronary heart disease resulting from dietary exposure to arsenic, 2015[J]. Environmental Research, 2019, **171**: 185-192.
- [7] Tokar E J, Benbrahim-Tallaa L, Ward J M, et al. Cancer in experimental animals exposed to arsenic and arsenic compounds[J]. Critical Reviews in Toxicology, 2010, **40**(10): 912-927.
- [8] Wang B, Liu J, Liu B, et al. Prenatal exposure to arsenic and neurobehavioral development of newborns in China [J]. Environment International, 2018, **121**: 421-427.
- [9] Basu A, Mahata J, Gupta S, et al. Genetic toxicology of a paradoxical human carcinogen, arsenic: a review[J]. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2001, **488**(2): 171-194.
- [10] 刘笑然, 兰敦臣, 李越. 2014 年中国稻米产业研究[J]. 中国粮食经济, 2014, (12): 42-47.
- [11] 王永杰, 郑祥民, 周立旻. 稻米砷研究进展[J]. 中国水稻科学, 2010, **24**(3): 329-334.
- [12] Wang Y J, Zheng X M, Zhou L M. A review on arsenic in rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, **24**(3): 329-334.
- [13] 段明宇. AMD 污染土壤铁氧化物转化与水稻砷吸收关系研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [14] 程艳, 陈璐, 米艳华, 等. 络合型含铁材料对砷胁迫下水稻生理生化特性及砷累积的影响[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(8): 2482-2489.
- [15] Cheng Y, Chen L, Mi Y H, et al. Effects of complexed iron-bearing material on physiological and biochemical characteristics and arsenic accumulation in *Oryza sativa* L. under arsenic stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(8): 2482-2489.
- [16] Zhao F J, Ma J F, Meharg A A, et al. Arsenic uptake and metabolism in plants[J]. New Phytologist, 2009, **181**(4): 777-794.
- [17] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. Plant Physiology, 2002, **128**(3): 1120-1128.
- [18] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, **22**(4): 331-338.
- [19] Zhong W G, Yang J, Chen Z D, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2006, **22**(4): 331-338.
- [20] 薛应龙. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [21] 徐春梅. 水稻根际氧浓度对分蘖期根系形态和氮代谢的影响机制[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [22] 胡莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷污染土壤中不同基因型水稻根表铁膜的形成及其对砷吸收和转运影响[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(6): 923-930.
- [23] Hu Y, Huang Y Z, Liu Y X. Genotypic differences in iron plaque formation on root surface and their effect on arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) grown in Arsenic contaminated soil [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, **8**(6): 923-930.
- [24] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 根表铁锰膜对不同生育期水稻吸收和转运 As 的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(2): 163-171.
- [25] Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, et al. Influence of iron and manganese plaque on root surface on arsenic uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, **8**(2): 163-171.
- [26] 郭伟, 林咸永, 程旺大. 不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对砷吸收的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 496-502.
- [27] Guo W, Lin X Y, Cheng W D. Effect of iron plaque formation of root surface on As uptake by rice seedlings grown on different types of soils[J]. Environmental Science, 2010, **31**(2): 496-502.
- [28] 薛培英, 刘文菊, 刘会玲, 等. 中轻度砷污染土壤-水稻体系中砷迁移行为研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(5): 872-879.
- [29] Xue P Y, Liu W J, Liu H L, et al. Arsenic behaviors in the system of arsenic contaminated soil-rhizosphere-rice plants [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(5): 872-879.
- [30] 李绍波, 章志宏, 李绍清, 等. 直播水稻茎鞘非结构碳水化合物积累与转运的遗传剖析[J]. 植物学报, 2010, **45**(1): 29-35.
- [31] Li S B, Zhang Z H, Li S Q, et al. Genetic dissection of nonstructural carbohydrate accumulation and translocation in rice culms and leaf sheaths under direct sowing[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, **45**(1): 29-35.
- [32] Zhao F J, Stroud J L, Khan M A, et al. Arsenic translocation in rice investigated using radioactive ^{73}As tracer [J]. Plant and Soil, 2012, **350**(1): 413-420.
- [33] Kobayashi N I, Tanoi K, Hirose A, et al. Characterization of rapid intervacular transport of cadmium in rice stem by radioisotope imaging[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, **64**(2): 507-517.
- [34] Tisarum R, Chen Y S, Dong X L, et al. Uptake of antimonite and antimonate by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata*: effects of chemical analogs and transporter inhibitor[J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 49-55.
- [35] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative

- characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant [J]. *Plant Physiology*, 2010, **152**(4): 1796-1806.
- [28] 陈丽娜. 不同水分管理模式下砷在土壤-水稻体系中的时空动态规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- [29] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4178-4185.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019年11月19日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续18次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

环境科学

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)