

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响

朱毅¹, 孙国新², 陈正³, 胡莹², 郑瑞伦^{1, 2*}

(1. 北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 西交利物浦大学环境科学系, 苏州 215123)

摘要: 通过 3 组水培试验研究了营养液不同供硼(B)浓度和叶面施 B 对水稻 (*Oryza sativa* L.) 幼苗吸收、转运和分泌砷(As)的影响。在 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 三价砷[As(III)]或五价砷[As(V)]处理下, 营养液 B 浓度没有显著影响水稻体内 As(III)、As(V)和总 As 的含量、转移系数和根吸收效率。叶面施 B 使得水稻幼苗地上部的 B 含量显著增加 15.8 倍, 使得 As(V)处理条件下的根部 As 含量和 As 根吸收效率分别显著降低 20.9% 和 18.0%, As(III)处理条件下的根部 As 含量和 As 根吸收效率分别降低 12.6% 和 13.8% ($P < 0.05$), 而地上部 As 含量降低不显著 ($P > 0.05$)。在 As(V)处理下, 叶面施 B 使根部 B 含量显著降低达 47.1%, 而 As(III)处理下根部 B 含量无显著变化。As(V)处理下的水稻根部 B 含量平均比 As(III)处理高 85.3% ($P < 0.05$)。叶面施 B 后, As(V)处理下水稻根部中总 As 含量和 As(V)含量均与根部 B 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。As(III)预处理后水稻幼苗根系分泌的 As 总量比 As(V)预处理高 105.2%。叶面施 B 使 As(III)预处理水稻的 As 外泌量增加 14.0% ~ 16.9% ($P > 0.05$), 对 As(V)预处理的水稻 As 外泌无影响。水稻根部有 45.9% ~ 70.7% 的 As 可以在 1 周内被外排到生长介质中。结果表明, 营养液供 B 浓度为 As 浓度的 4 倍时仍不能减少水稻幼苗对 As 的吸收累积, 而叶面施 B 有助于减少水稻对 As 的吸收。B 通道不是 As(III)进入水稻根系的主要途径; As(V)在水稻中的迁移分配机制可能与 B 的迁移运输有关。

关键词: 三价砷; 五价砷; 硼; 外泌; 吸收; 水稻

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3400-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712177

Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings

ZHU Yi¹, SUN Guo-xin², CHEN Zheng³, HU Ying², ZHENG Rui-lun^{1, 2*}

(1. Beijing Research & Development Center for Grasses and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Department of Environmental Science, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract: The impacts of boron (B) root application and foliar spray on arsenic (As) uptake, translocation, and efflux by/in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) were investigated in three hydroponic experiments. The addition of B to culture medium did not alter concentrations of arsenite (As[III]), arsenate (As[V]), and total As, nor did it alter transfer coefficients or uptake efficiency of As in rice seedlings under either As(III) or As(V) exposure. Foliar B supply increased shoot B concentrations 15.8-fold, and decreased root As concentrations and As uptake efficiency by 20.9% and 18.0% under As(V) treatment, and by 12.6% and 13.8% under As(III) treatment, respectively, yet did not significantly decrease shoot As concentrations ($P > 0.05$). Interestingly, foliar B supply reduced root B concentrations by up to 47.1% under exposure to As(V) but not As(III), and corresponding root B concentrations were 85.3% higher in As(V) treatment than in As(III) treatment on average ($P < 0.05$). Both total As and As(V) concentrations were positively related to B concentration in rice roots under As(V) treatment following foliar B supply ($P < 0.05$). Rice seedlings extruded 105.2% more As after As(III)-pretreatment than after As(V)-pretreatment. Foliar B supply increased the amount of As excreted by As(III)-pretreated rice root by 14.0%-16.9% ($P > 0.05$), and had no effect on the As efflux of As(V)-pretreatment seedlings. A range of 45.9%-70.7% of root As was excreted to solution during one week. These results indicate that the root application of B at four times the concentration of As can slightly decrease As accumulation by rice, whereas foliar B supply is conducive to a decline in As acquisition by rice roots. It is likely that the B channel is at least not the main pathway for As(III) entering into rice roots, and the As(V) distribution mechanism in rice plants may be shared with that of B.

Key words: arsenite; arsenate; boron; efflux; uptake; rice

无机砷(iAs)是全球公认的致癌物之一,它对人类和动物健康的危害极大^[1,2]。除了土壤和水之外,砷(As)主要通过食物链进入人体危害人体健康^[3]。与小麦和大麦等旱地作物相比,水稻更容易吸收累积 As^[4],因此食物链成为了以大米为主食的人群摄入 As 的一个主要途径^[5,6]。

五价砷 As(V) 和三价砷 As(III) 是 As 在淹水稻

收稿日期: 2017-12-21; 修订日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501336); 北京市优秀人才培养资助项目(2015000020060G141); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20170411)

作者简介: 朱毅(1984~),男,博士研究生,助理研究员,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: zhuyi@grass-env.com

* 通信作者, E-mail: zhengrui@grass-env.com

田土中的主要赋存形态,其中以As(Ⅲ)为主^[7,8].在酸性稻田土中,As(Ⅲ)主要以非解离的亚砷酸 $[\text{As}(\text{OH})_3]$ 中性分子存在,As(OH)₃的解离系数(pK_a)为9.22.已有研究表明As(Ⅲ)主要通过NIP水通道和硅(Si)通道进入植物根系^[9~11].Ma等^[11]的研究表明As(Ⅲ)和Si在进入水稻根系时共用同一个高效转运通道.Lsi1(OsNIP2;1)和Lsi2(非水通道蛋白)两种Si转运蛋白对水稻吸收累积As贡献很大,而且Lsi1对As(Ⅲ)的透性是双向的(吸收和外泌).施用Si肥可使水稻地上部和籽粒中的As含量分别降低78%和16%^[12].拟南芥中AtNIP5;1、AtNIP6;1和AtNIP7;1,水稻中OsNIP2;1、OsNIP2;2和OsNIP3;2以及百脉根中的LjNIP5;1和LjNIP6;1等NIP水通道蛋白在酵母中表达后可增加酵母对As(Ⅲ)的敏感性及As的富集量^[10].近年来,Katsuhara等^[13]发现水稻的OsNIP3;3和大麦的HvNIP1;2两种水通道蛋白也可以运输As(Ⅲ).OsNIP3;2对水稻侧根吸收As(Ⅲ)有重要作用,敲除OsNIP3;2基因可以显著降低水稻根部的As含量^[14].除了NIPs外,PIPs(质膜膜内蛋白)也被证实可以转运As(Ⅲ).Mosa等的研究表明^[15],水稻的两种PTPs(OsPIP2;4和OsPIP2;7)均可以双向转运As(Ⅲ),且水稻和许多其他植物根系均可将进入细胞内的As(V)还原为As(Ⅲ)后外泌到生长介质中^[16],植物根系对As(Ⅲ)的吸收和外泌作用与水通道蛋白有很大关系^[17,18].

硼(B)作为植物生长发育所必需的微量元素之一,主要以硼酸 $[\text{B}(\text{OH})_3]$ 的形式存在于土壤和生物体中. $\text{B}(\text{OH})_3$ 的分子机构与As(OH)₃相似, pK_a 为9.25,常以不带电荷的分子存在.因此植物体内的 $\text{B}(\text{OH})_3$ 运输通道也有可能运输As(OH)₃.有研究表明对As吸收和转运有促进作用的NIP通道蛋白,如OsNIP3;1、AtNIP5;1和AtNIP6;1,也是 $\text{B}(\text{OH})_3$ 载体,对水稻和拟南芥根系吸收B有重要作用^[19~22].同样,水稻中的PIP通道蛋白(OsPIP2;4和OsPIP2;7)对B和As的运输都有调节作用^[15,23],而且这些水通道蛋白的表达受外界环境中B含量水平的调控^[23,24].例如高B处理对OsPIP2;4和OsPIP2;7在根系中的表达起上调作用,对其在根地上部的表达则起下调作用^[23];高B或低B条件下,AtNIP5;1和AtNIP6;1两个基因均受到下调或上调作用^[21].负责侧根As(Ⅲ)转运的OsNIP3;2基因表达的组织特异性与B转运基因OsNIP3;1十分相似^[14,22].有研究表明,As(Ⅲ)处理可以普遍降低

(16%~17%)挪威槭等4个树种根部的B含量,认为这些树种主要通过B通道吸收As(Ⅲ)^[25].不过对于As超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata* L.),营养液中添加 $\text{B}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 均未影响其对As(Ⅲ)的吸收^[26],而磷酸盐可以减少蜈蚣草对As(Ⅲ)的吸收^[27].

综上所述,施B处理或许可以通过竞争吸收或基因表达调控来降低水稻对As的吸收累积,而施B能否以及如何影响水稻对As的吸收和外泌尚不明晰.本研究通过设计3组水培试验,旨在探明:①营养液不同供B浓度和叶面施B对水稻幼苗吸收As(V)和As(Ⅲ)的影响;②B与As(V)、As(Ⅲ)在水稻幼苗中分布的关系;③叶面施B对水稻幼苗根系外泌As的影响.

1 材料与方法

1.1 试验条件和植物培养

试验于人工气候室中进行,25℃/14 h光照和20℃/10 h黑暗,光照强度为 $350 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,相对湿度为60%~70%.挑选个大、饱满的水稻种子,用30%的双氧水浸泡15 min,然后用蒸馏水充分洗净,均匀放入湿润的珍珠岩中发芽.在珍珠岩中生长3周后,挑选生长一致的幼苗移栽到盛有500 mL不同B浓度的1/2强度营养液的盆中(高14 cm,直径7 cm)培养3 d,每盆2株.全营养液配方为:5.0 mmol·L⁻¹ NH₄NO₃、2.0 mmol·L⁻¹ K₂SO₄、4.0 mmol·L⁻¹ CaCl₂、1.5 mmol·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O、1.3 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄、50 μmol·L⁻¹ Fe(Ⅱ)-EDTA、5.0 μmol·L⁻¹ H₃BO₃、0.5 μmol·L⁻¹ ZnSO₄·7H₂O、0.5 μmol·L⁻¹ CuSO₄·5H₂O、2.5 μmol·L⁻¹ MnSO₄·H₂O、0.25 μmol·L⁻¹ Na₂MoO₄·2H₂O和0.1 μmol·L⁻¹ CoSO₄·7H₂O,营养液每3 d更换一次,并用0.2 mol·L⁻¹ KOH和4.0 mol·L⁻¹ HCl将pH值调至5.5.

1.2 根系供B对水稻吸收As的影响(试验一)

将预培养的水稻幼苗继续在不缺B全营养液中培养1周后,移入含有As(V)或As(Ⅲ)的不同B浓度的全营养液中.As(Ⅲ)、As(V)和B分别以优级纯NaAsO₂、Na₂HAsO₄·7H₂O和H₃BO₃的形式加入.B的处理浓度分别为0、10和40 μmol·L⁻¹,As(Ⅲ)和As(V)的浓度均为10 μmol·L⁻¹.共6个处理,每个处理4个重复,每盆2株水稻苗,500 mL营养液.As处理2 d后收获,将水稻幼苗根和地上

部分开,用去离子水洗净后用吸水纸吸干水分并称重后在液氮下研磨粉碎,用来测定As(V)、As(III)和总As含量。另外,准备与培养水稻幼苗相同的含As(III)或As(V)的全营养液各4盆,顶部加盖、不移入水稻,1周后检测营养液中As(III)和As(V)的浓度。

1.3 叶面施B对水稻吸收As的影响(试验二)

将上述在缺B的1/2营养液中预培养3d后的水稻幼苗移入缺B的全营养液中继续培养1周后开始As处理。在缺B营养液中添加浓度为 $10\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As(III)或As(V)。B以 H_3BO_3 的形式进行叶面喷施,浓度分别为9和 $36\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,并设置去离子水叶面喷施作为对照(所有喷施溶液均含有质量分数为0.0015%的Triton X-100, pH为6.0)。每盆喷施3 mL,每天喷施1次。喷施处理1周后,先将水稻幼苗地上部用质量分数为0.0015%的Triton X-100溶液浸洗3次,去除附着于叶表的B^[28],然后去离子水洗净、收获,液氮条件下分别研磨地上部和根样,测定B、As(V)、As(III)和总As的含量。

1.4 叶面施B对水稻根系外泌As的影响(试验三)

将水稻幼苗在缺B的全营养液中培养1周(如试验二),然后进行 $10\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As(III)或As(V)预处理1周后,将水稻根系在温度为 $0\sim 2^\circ\text{C}$ 的解吸附溶液($1\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}_2\text{HPO}_4$, $5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MES}$, $0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, pH 6.0)中漂洗10 s,再浸泡10 min以去除质外体上吸附的As后^[29],用 $0\sim 2^\circ\text{C}$ 的去离子水冲洗干净。在根系洗净后,随机取4盆As(V)预处理和4盆As(III)预处理的水稻幼苗收获,用来测定地上部和根的总As含量,作为As外泌前水稻幼苗体内的总As含量。将其余12盆As(V)预处理和12盆As(III)预处理的幼苗移入盛有40 mL全营养液(缺B、不加As)的盆中继续培养,每盆2株水稻幼苗,并立即进行叶面施B处理(同试验二)。每天记录盆中剩余营养液的体积,并将其避光储存于 2°C 冰箱,测定营养液中总As质量浓度。每天更换营养液和叶面施B,1周后取样,分别测定根系与地上部的总As含量。

1.5 测试方法

液氮条件下研磨的植物样品(0.05~0.10 g)用10 mL 1% (体积分数)的优级纯硝酸溶液于微波消解仪中进行消解,使用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用仪(HPLC-ICP-MS, 7500a, 安捷伦科

技有限公司)测定As(III)和As(V)^[30]。在消解和测试过程中通过空白、标准物质(GBW 07603, 灌木枝叶)、脉冲注入As(III)和As(V) ($0.5\text{mL As } 1000\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)来进行质量控制。消解和测试过程中的参数和程序设置参考文献[31]。

地上部和根中总As含量使用电感耦合等离子体质谱仪进行测定(ICP-MS, 7500a, 安捷伦科技有限公司)^[31]。液氮条件下研磨的植物样品(0.05~0.10 g)用2 mL优级纯浓硝酸于微波消解仪中进行消解。在消解和测定过程中使用试剂空白和标准物质(GBW 07603, 灌木枝叶)来进行质量控制,加标回收率为103%。

使用ICP-MS进行B质量浓度的测定。称取0.15 g研磨好的样品放入瓷坩埚中,于 100°C 烘干,然后在 500°C 条件下灼烧2 h。将灰分用10 mL $0.1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的优级纯HCl溶解后用超纯水定容。使用标准物质(GBW 07603, 灌木枝叶)来进行质量控制,B的加标回收率为110%。

1.6 数据分析

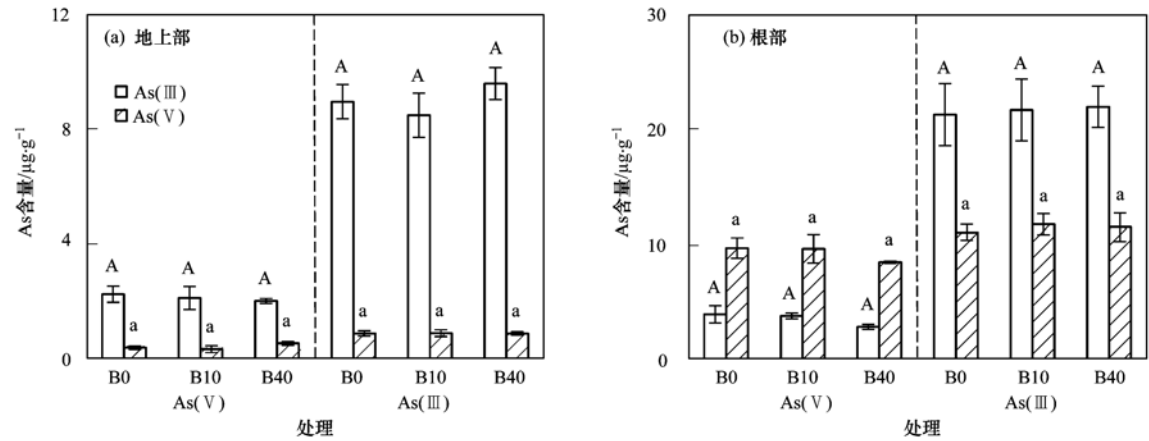
所有的试验数据使用双因素方差分析检验As(III)和As(V)处理和不同B水平处理下水稻幼苗吸收或外泌As的显著性差异、累积B的显著性差异,以及不同价态As与B水平处理的交互作用。使用最小显著性差异法比较不同处理数据平均值间的显著性差异($P<0.05$)。所有的数据均采用统计软件SPSS 16.0进行分析。As根吸收效率为水稻幼苗地上部和根部的As累积总量与根鲜重的比值,As转运系数为地上部As含量与根部As含量的比值。

2 结果与分析

2.1 营养液中不同B浓度对水稻幼苗吸收As的影响

试验一中,随着营养液中B浓度的增加,在两种价态As处理下,水稻根系和地上部的As(III)和As(V)含量均未有显著变化(图1)。如图1(a)所示,在As(V)和As(III)处理下,水稻地上部的As(III)含量平均比As(V)分别高出4.0倍和9.1倍($P<0.05$);而不论在何种B浓度水平下,As(III)处理下的水稻根部As(III)含量始终显著高于As(V),而As(V)处理下的As(III)含量则始终显著低于As(V) ($P<0.05$) [图1(b)]。

As(III)处理条件下,水稻地上部和根部的平均总As含量分别比As(V)处理高292.2%和



B0、B10 和 B40 分别表示营养液中 H_3BO_3 的浓度为 0、10 和 $40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ；
柱上方同一测定指标有不同的大写或小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 两种价态 As 处理条件下,营养液中不同供 B 浓度对水稻幼苗地上部及根部 As(III) 和 As(V) 含量的影响 (平均值 $\pm$ 标准误, $n = 4$)

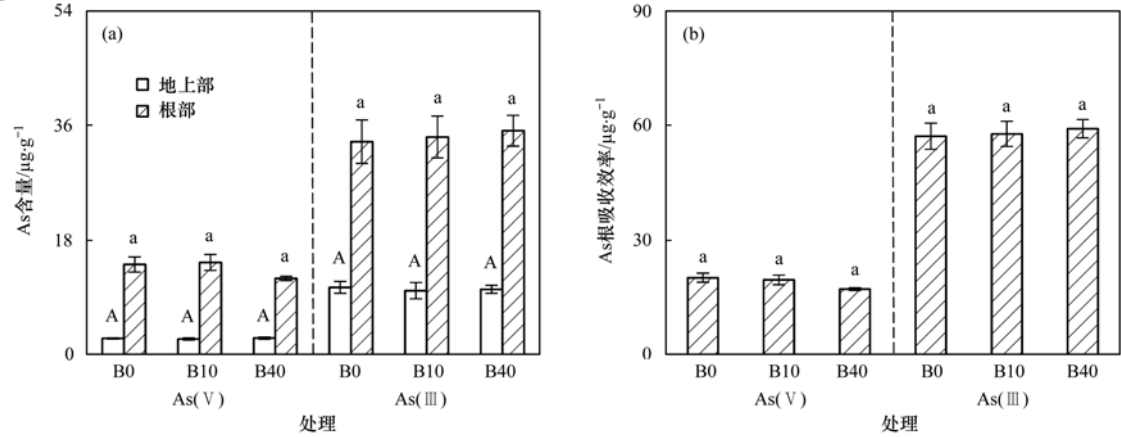
Fig. 1 Effects of B additions to culture solution with $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III) or As(V) on As(III) and As(V) concentrations in shoots and roots of rice seedlings (means $\pm$ SE, $n = 4$)

151.9% ($P < 0.05$), 总 As 根吸收效率平均比 As(V) 处理高出 203.8% ($P < 0.05$) (图 2). 同样, As(III) 处理下的 As 转运系数平均比 As(V) 处理高 56.7%. 但两种价态 As 处理下, 营养液中不同 B 水平对水稻苗期地上部和根部 As 含量、As 转运系数和根吸收效率均未产生显著影响 (图 2).

未培养水稻幼苗的营养液中, As(III) 或 As(V) 浓度在 1 周后无明显变化. 初始 As(III) 浓度为 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液中, 1 周后营养液中的 As(III) 有约 0.9% 氧化为 As(V) ($P > 0.05$); 初始 As(V) 浓度为 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液中, 1 周后营养液中的 As(V) 有约 0.2% 还原为 As(III) ($P > 0.05$).

2.2 叶面施 B 对水稻幼苗吸收 As 的影响

为探明植株体内 B 水平对水稻吸收 As 的影响, 开展了叶面施 B 对水稻幼苗吸收 As 的影响试验. 随着施 B 浓度的增加, 水稻地上部的 B 含量从最初的 $4.2\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增至 $70.4\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 而根部 As 含量和 As 根吸收效率在 As(V) 处理下分别降低了 20.9% 和 18.0%, 在 As(III) 处理下分别降低了 12.6% 和 13.8% ($P < 0.05$) (表 1). 但在两种价态 As 处理下, 叶面施 B 均未显著降低水稻地上部中 As(III) 和 As(V) 的含量和总 As 含量 ($P < 0.05$) [图 3(a) 和表 1]. As(III) 处理下的根部 As(V) 含量和两种价态 As 处理下的根部 As(III) 含量均未随



B0、B10 和 B40 分别表示营养液中 H_3BO_3 的浓度为 0、10 和 $40\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ；
柱上方同一测定指标有不同的大写或小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 两种价态 As 处理条件下,营养液中不同供 B 浓度对水稻幼苗地上部及根部总 As 含量和 As 根吸收效率的影响 (平均值 $\pm$ 标准误, $n = 4$)

Fig. 2 Effect of B additions to culture solution with $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III) or As(V) on As concentrations in shoots and roots and As uptake efficiency of rice seedlings (means $\pm$ SE, $n = 4$)

施 B 量的增加而显著变化,而叶面施 B 导致As(V)处理下水稻根部As(V)含量降低了 29.8% ($P < 0.05$)[图 3(b)].

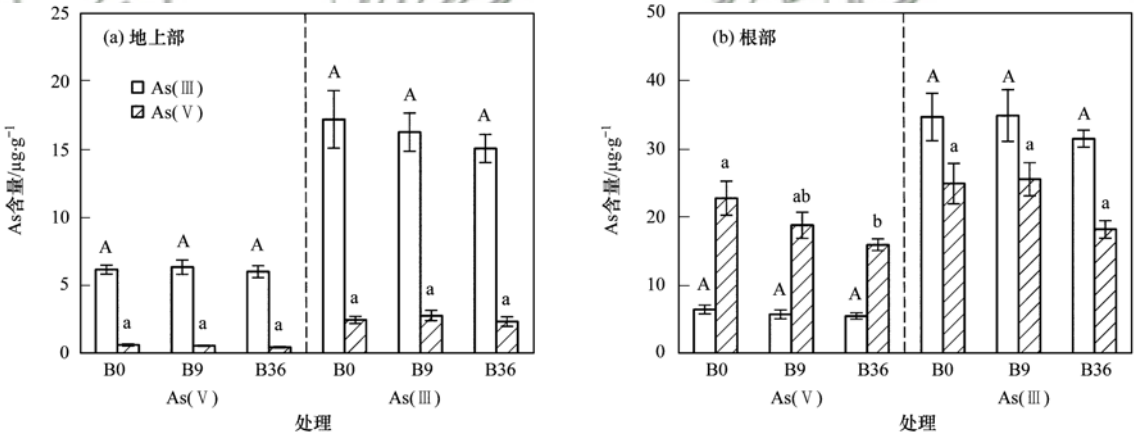
As(V)处理下,根部 B 含量随叶面施 B 水平的增加而最高降低 47.1% ($P < 0.05$),As(III)处理下根部 B 含量则无显著性变化,表现为不同价态 As

处理和叶面施 B 水平在对根部 B 含量的影响上存在显著交互作用(表 1). As(V)处理下的平均根部 B 含量比 As(III)处理高 85.3% ($P < 0.05$). As(III)处理中水稻地上部和根部的总 As 含量、As 转移系数和根吸收效率均高于As(V)处理(表 1),与试验一结果类似.

表 1 As(III)或As(V)处理条件下,不同叶面施 B 水平对水稻幼苗地上部和根部中的总 As 含量和 B 含量、As 根吸收效率和 As 转运系数的影响¹⁾

Table 1 Total As and B concentrations in the shoots and roots, uptake efficiency and transfer coefficient of As in rice seedlings grown in culture solutions with As(III) or As(V) under foliar sprays of different B concentrations							
As 价态	叶面施 B 水平	地上部 As 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	根部 As 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	地上部 B 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	根部 B 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	As 根吸收效率 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	As 转运系数
As(V)	B0	7.4	27.7	4.2	2.5	43.8	0.27
	B9	7.0	23.1	21.7	2.1	38.4	0.30
	B36	6.5	21.9	70.1	1.7	35.9	0.30
As(III)	B0	19.2	57.2	5.8	1.1	96.4	0.34
	B9	19.6	60.0	24.9	1.2	97.2	0.33
	B36	18.2	50.0	70.4	1.1	83.1	0.37
显著性							
As 价态(As)		***	***	ns	***	***	*
叶面施 B(B)		ns	*	***	*	**	ns
B $\times$ As		ns	ns	ns	*	ns	ns

1) As(V)和As(III)分别表示营养液中含有浓度为 $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As(V)和As(III); ***、**、*和ns 分别表示在 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 水平下差异显著和无显著差异



B0、B9 和 B36 分别表示叶面喷施 H_3BO_3 溶液浓度为 0、9 和 $36\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 柱上方同一测定指标有不同的大写或小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 叶面施 B 对水稻幼苗地上部和根部As(III)和As(V)含量的影响(平均值 $\pm$ 标准误, $n = 4$)

Fig. 3 Effects of foliar B supply on As(III) and As(V) concentrations in shoots and roots of rice seedlings (means $\pm$ SE, $n = 4$)

进一步分析表明,在As(V)处理条件下,随叶面施 B 水平的增加,根部 B 含量与根部总 As 含量和根部As(V)含量均呈显著正相关(图 4),而与根部As(III)无相关性. 这表明在As(V)处理条件下,随叶面施 B 浓度增加,根部中 B 含量与As(V)含量的变化趋势相同.

2.3 叶面施 B 对水稻幼苗外泌 As 的影响

经过As(V)或As(III)预处理的水稻幼苗在转

移至不含 As 与 B 的营养液中后便开始外泌 As. 经过As(III)预处理幼苗的每日 As 外泌量大于As(V)预处理的幼苗,外泌量峰值出现于移苗后的第 1 d,每盆幼苗的 As 外泌量分别为 $3.8 \sim 4.1\text{ }\mu\text{g}$ 和 $2.4 \sim 2.6\text{ }\mu\text{g}$,随后两种价态 As 预处理水稻幼苗的 As 外泌量均逐日下降. 经过As(III)预处理的水稻幼苗的外泌 As 总量比As(V)预处理幼苗高 105.2% ($P < 0.05$). As(III)预处理的水稻幼苗在叶

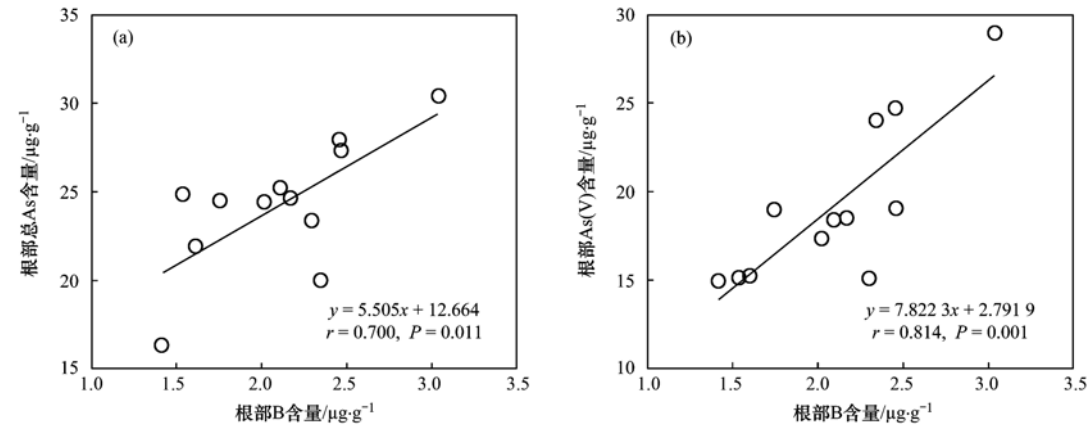
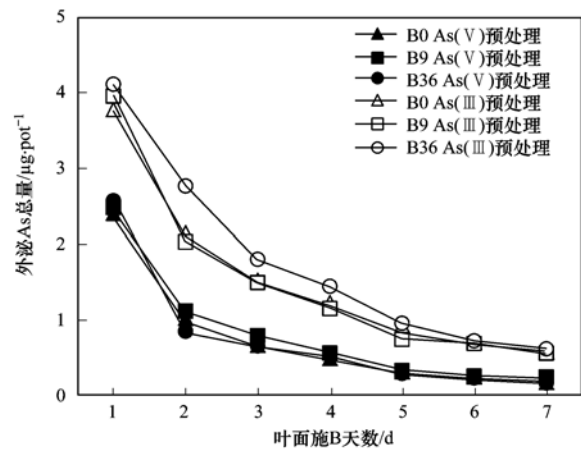


图 4 不同叶面施 B 水平及 As(V) 处理条件下,水稻幼苗根部 B 含量与根部总 As 含量和根部 As(V) 含量之间的相关关系

Fig. 4 Relationship between root B concentration of rice seedlings grown in culture solutions with 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(V) under foliar sprays of different B concentrations, and total As and As(V) concentrations in roots

面喷施 B 浓度最高 (36 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 时外泌 As 量最大,比其他两个施 B 处理高 14.0% ~ 16.9%, 但不显著; 叶面不同施 B 处理对 As(V) 预处理水稻幼苗的 As 外泌量没有显著影响 ($P > 0.05$) (图 5)。

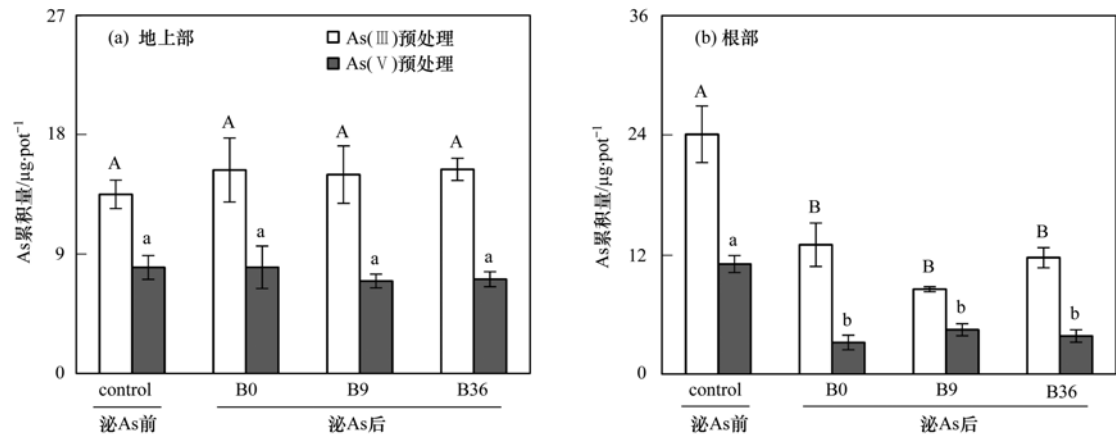
为进一步确定由水稻幼苗根部外泌的 As 是来自于地上部还是只是根部,是否存在 As 从地上部向根部的韧皮部转运,对泌 As 前后水稻地上部和根部的 As 含量进行测定. 不论叶面施 B 与否, As(III) 预处理的水稻地上部和根部的总 As 累积量均显著高于 As(V) 预处理 ($P < 0.05$) (图 6). As 外泌 7 d 后,经过 As(III) 和 As(V) 两种预处理的水稻地上部 As 总量均未有显著变化,但根部 As 总量均显著减少 ($P < 0.05$), 分别降低 45.9% ~ 64.3% 和 59.2% ~ 70.7%, 这表明 7 d 内有高达 70.7% 的 As 可以从水稻根部外泌到生长介质中. 上述结果表明,水稻根部外泌的 As 直接来自于根系而非地上部,即 As



B0、B9 和 B36 分别表示叶面喷施 H_3BO_3 溶液浓度为 0、9 和 36 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 5 叶面施 B 处理下水稻幼苗根系每日总 As 外泌量

Fig. 5 Daily amount of As excreted into culture solutions by rice seedlings under different concentrations of B foliar supply



B0、B9 和 B36 分别表示叶面喷施 H_3BO_3 溶液浓度为 0、9 和 36 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 柱上方同一测定指标有不同的大写或小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$); 水稻幼苗在含有 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III) 或 As(V) 的营养液中预培养 1 周后开始叶面施 B

图 6 叶面施 B 处理条件下水稻幼苗外泌 As 前后水稻幼苗地上部和根部的总 As 累积量

Fig. 6 Amounts of As in shoots and roots of rice seedlings before and after As extrusion under different concentrations of B foliar supply

没有通过韧皮部从地上部向根部运输. 不论经过 As(V) 或 As(III) 预处理, 不同叶面施 B 处理之间水稻地上部和根部的 As 总量均没有显著差异, 从另一方面说明叶面施 B 对水稻根部 As 外泌量没有显著影响.

此外, 3 组水培试验中, 不同处理之间水稻幼苗地上部和根系的生物量均未表现出显著性差异 (数据未列出), 说明 B 和 As 处理均未对水稻幼苗产生毒害作用.

3 讨论

在未培养水稻幼苗的营养液中, As(III) 或 As(V) 在 1 周后未发生明显的氧化或还原, 说明残留在营养液中的微生物或自然化学反应对 As 的氧化还原转化几乎不起作用, As(III) 和 As(V) 在营养液中均很稳定, 这与 Xu 等^[16]的研究结果相同.

有研究表明, 由于甘油和硅酸与 As(OH)₃ 的存在形态和分子结构相似, 可以通过共用相同的运输通道来影响水稻对 As(III) 的吸收^[11,32]. 在本研究中, 虽然 B(OH)₃ 与 As(OH)₃ 同样结构相近, 但当营养液中 B 浓度是 As 浓度的 4 倍时仍未显著降低水稻对 As(III) 和 As(V) 的吸收 (图 1). 这可能是由于负责 B(OH)₃ 转运的水通道蛋白上的 ar/R 选择性过滤器对 B 的识别调节相对于 As(III) 更加严格——水通道蛋白上的 ar/R 选择性过滤器以及其他结构域负责识别区分不同的底物, 如 B(OH)₃ 和 As(OH)₃. 植物体中许多水通道蛋白对 As(III) 都具有透性, 并且 As(III) 的转运似乎不受 ar/R 选择性过滤器控制^[11, 17]. 例如替换掉 B 转运通道蛋白 (AtNIP5;1) ar/R 选择性过滤器上第 5 螺旋的氨基酸, 则会导致 B 的转运活性大大降低, 但并不影响 As(III) 的转运活性^[33]. 这与 Si 的转运类似, 许多 NIP 蛋白可以透过 As(III), 而只有一小部分 NIP 蛋白允许 Si 通过^[11, 14, 34]. 因此, 尽管一些水通道蛋白 (如 OsNIP3;1、OsPIP2;4 和 OsPIP2;7) 对 As(III) 和 B 都具有选择透过性, As(III) 还能够通过除 B 通道蛋白之外的其他途径进入水稻根系^[20,22,23], 有可能通过转运 B 的水通道蛋白进入水稻根系的 As(III) 只占被吸收 As(III) 总量的极小部分. 而作为与磷酸盐的存在形态和结构相似的 As(V) 则是通过磷酸转运蛋白进入植物细胞^[18,35,36], 所以本研究在营养液中供 B 没有显著影响水稻吸收 As(V) (图 1 和图 2).

不论是根系供 B 或叶面施 B 试验, 在相同浓度

的 As(V) 或 As(III) 处理下, 水稻地上部的 As(III) 含量均显著高于 As(V) 含量 [图 1(a) 和图 3(a)]. Wu 等^[37]也得到了类似的结果: As(V) 处理 24 h 后, 水稻幼苗地上部中 87% 以上的 As 为 As(III). 这主要归因于根部 As 的还原: 当 As(V) 通过 P 通道进入水稻根细胞后可以被还原为 As(III), 被还原的 As(III) 除一部分被泌出根外或者与巯基络合并储存到液泡中外, 另一部分由 Lsi2 转运进入木质部, 进而运输累积到水稻地上部^[11, 17]. 所以, 在相同的 As(V) 或 As(III) 浓度处理下, 水稻地上部会更多地累积 As(III).

随着叶面施 B 浓度的增加, 水稻根部 As 含量和 As 根吸收效率均分别显著降低, 但均未显著降低水稻地上部中 As(III) 和 As(V) 的含量和总 As 含量 [图 3(a) 和表 1]. 这可能是由于叶面施 B 增加了水稻地上部的 B 含量, 使得位于根部的 B 转运通道 (如 OsPIP2;4 或 OsPIP2;7) 的表达量上调, 进行了 B 的外排过程, 部分 As 共享了 B 的外排通道, 一定程度上增加了根中 As 的外排 (图 5), 膜内在蛋白 OsPIP2;4 和 OsPIP2;7 在高 B 条件下参与 B 的外排过程^[23];也有可能水稻地上部 B 含量的增加使参与根部 B 吸收的通道或蛋白 (如 OsNIP3;1、OsBOR1) 停止表达的同时闭合了其他水通道蛋白, 从而阻止了部分 As(III) 进入根系, 降低了根部 As 含量. 以上解释只是推测, 仍需要进行大量的试验进行验证和深入研究. 而叶面施 B 增加了水稻地上部 B 含量, 从而减弱或停止参与 B 木质部转运的蛋白或通道的表达^[38,39], 但未显著降低水稻地上部的 As 含量, 说明参与 B 木质部转运的蛋白或通道没有参与 As 从根向地上部的转运. Ma 等^[11]的研究表明, 水稻根部和地上部 As 含量是由不同的转运蛋白分别调控的, As(III) 转入根细胞主要由 Lsi1 调控, 而将 As(III) 从根细胞转出到木质部主要由 Lsi2 负责, Lsi2 对调控水稻地上部 As 含量更加关键. 叶面施 B 导致水稻根部 B 和 As(V) 含量同步降低以及 As(V) 处理下根部的 B 含量与 As(V) 含量呈显著正相关 [表 1、图 3(b) 和图 4(b)] 均表明, As(V) 和 B 在水稻根部的转运可能存在相同的调控机制. 本研究中, As(III) 处理水稻地上部和根部的总 As 含量、As 转移系数和根吸收效率均高于 As(V) 处理 (图 2 和表 1), 这与其他学者的研究结果相一致, 也是导致在淹水条件下种植的水稻比其他作物更容易吸收累积 As 的原因^[18,29,32].

有研究表明, 叶面施 B 可以降低植物根系中的

B 含量^[40, 41]. 但在本研究中, 只有在 As(V) 处理下, 水稻根部 B 含量随着叶面施 B 浓度的增加而显著降低, 而在 As(III) 处理下, 水稻根部 B 含量没有显著变化, 而且不论叶面施 B 水平如何, As(V) 处理下的水稻根部 B 含量均高于 As(III) 处理(表 1). 此结果较难解释, 因为 As 在水稻体内的转运过程较为复杂, 需要有多种转运蛋白参与, 且涉及到 As 的络合与液泡的隔离解毒、木质部和韧皮部的装运和卸载等许多环节, 其转运机制尚有很多未知之处^[18, 42]. 因此还需要开展很多相关研究工作, 尤其是用分子生物学技术来阐明水稻植株体内 B 与 As 之间的吸收与转运关系.

对于 As 外泌, 尽管水稻植株内的 OsPIP2;4 和 OsPIP2;7 等相关水通道蛋白可以调控 B 和 As 的双向运输, 并受 B 含量水平的反调控, 可能参与 B 和 As(III) 从根系细胞泌排至外部介质的过程^[15, 23], 但本研究中叶面施 B 虽有助于增加水稻幼苗根对 As 的外泌, 但不显著(图 5 和图 6). 因此, 水稻外泌 As 可能不与 B 共享转运蛋白, 或者水稻根部通过转运 B 的水通道蛋白外泌的 As 占外泌 As 总量的极小部分. 本研究中水稻根系高达 70.7% 的 As 可在 7 d 内被泌排至生长介质中(图 6), 与 Duan 等^[43]的研究结果相近.

4 结论

(1) 营养液中不同 B 浓度未显著影响水稻幼苗对 As(V) 和 As(III) 的吸收以及 As 从根部到地上部的转运. 叶面施 B 使水稻根部的总 As 含量和 As 根吸收效率在 As(V) 处理下分别显著降低 20.9% 和 18.0%, 在 As(III) 处理下分别显著降低 12.6% 和 13.8%, 但对地上部总 As、As(III) 和 As(V) 含量的减少作用不显著.

(2) 在 As(V) 处理中, 叶面施 B 后水稻根部 B 含量与 As(V) 含量分别显著降低达 47.1% 和 29.8%, 且两者呈显著正相关.

(3) As(III) 预处理后水稻幼苗的 As 外泌量显著高于 As(V) 预处理. 不论 As(III) 或 As(V) 预处理, 叶面施 B 对水稻幼苗外泌 As 量的增加作用不显著. 水稻外泌的 As 直接来自于水稻根系, 不存在 As 从地上部到根部的韧皮部转运.

(4) B 吸收通道不是水稻吸收 As 的主要途径, 向生长基质中施 B 很难减少 As 在水稻体内的累积.

参考文献:

[1] Duker A A, Carranza E J M, Hale M. Arsenic geochemistry and

health[J]. *Environment International*, 2005, **31**(5): 631-641.

[2] Kim K W, Bang S, Zhu Y G, *et al.* Arsenic geochemistry, transport mechanism in the soil-plant system, human and animal health issues[J]. *Environment International*, 2009, **35**(3): 453-454.

[3] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species[J]. *New Phytologist*, 2002, **154**(1): 29-43.

[4] Su Y H, McGrath S P, Zhao F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2010, **328**(1-2): 27-34.

[5] Mondal D, Polya D A. Rice is a major exposure route for arsenic in Chakdaha block, Nadia district, West Bengal, India: a probabilistic risk assessment[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(11): 2987-2998.

[6] Li G, Sun G X, Williams P N, *et al.* Inorganic arsenic in Chinese food and its cancer risk[J]. *Environment International*, 2011, **37**(7): 1219-1225.

[7] Takahashi Y, Minamikawa R, Hattori K H, *et al.* Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 1038-1044.

[8] Xu X Y, McGrath S P, Meharg A A, *et al.* Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(15): 5574-5579.

[9] Bhattacharjee H, Mukhopadhyay R, Thiyagarajan S, *et al.* Aquaglyceroporins: ancient channels for metalloids[J]. *Journal of Biology*, 2008, **7**: 33.

[10] Bienert G P, Thorsen M, Schüssler M D, *et al.* A subgroup of plant aquaporins facilitate the bi-directional diffusion of As(OH)₃ and Sb(OH)₃ across membranes[J]. *BMC Biology*, 2008, **6**: 26.

[11] Ma J F, Yamaji N, Mitani N, *et al.* Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(29): 9931-9935.

[12] Li R Y, Stroud J L, Ma J F, *et al.* Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3778-3783.

[13] Katsuhara M, Sasano S, Horie T, *et al.* Functional and molecular characteristics of rice and barley NIP aquaporins transporting water, hydrogen peroxide and arsenite[J]. *Plant Biotechnology*, 2014, **31**(3): 213-219.

[14] Chen Y, Sun S K, Tang Z, *et al.* The Nodulin 26-like intrinsic membrane protein OsNIP3; 2 is involved in arsenite uptake by lateral roots in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, **68**(11): 3007-3016.

[15] Mosa K A, Kumar K, Chhikara S, *et al.* Members of rice plasma membrane intrinsic proteins subfamily are involved in arsenite permeability and tolerance in plants[J]. *Transgenic Research*, 2012, **21**(6): 1265-1277.

[16] Xu X Y, McGrath S P, Zhao F J. Rapid reduction of arsenate in the medium mediated by plant roots[J]. *New Phytologist*, 2007, **176**(3): 590-599.

[17] 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.
- [18] Zhao F J, McGrath S P, Meharg A A. Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, **61**: 535-559.
- [19] Takano J, Wada M, Ludewig U, *et al.* The Arabidopsis major intrinsic protein NIP5;1 is essential for efficient boron uptake and plant development under boron limitation[J]. *The Plant Cell*, 2006, **18**(6): 1498-1509.
- [20] Takano J, Miwa K, Fujiwara T. Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters[J]. *Trends in Plant Science*, 2008, **13**(8): 451-457.
- [21] Miwa K, Fujiwara T. Boron transport in plants: coordinated regulation of transporters[J]. *Annals of Botany*, 2010, **105**(7): 1103-1108.
- [22] Hanaoka H, Uruguchi S, Takano J, *et al.* OsNIP3;1, a rice boric acid channel, regulates boron distribution and is essential for growth under boron-deficient conditions [J]. *The Plant Journal*, 2014, **78**(5): 890-902.
- [23] Kumar K, Mosa K A, Chhikara S, *et al.* Two rice plasma membrane intrinsic proteins, OsPIP2;4 and OsPIP2;7, are involved in transport and providing tolerance to boron toxicity [J]. *Planta*, 2014, **239**(1): 187-198.
- [24] Mosa K A, Kumar K, Chhikara S, *et al.* Enhanced boron tolerance in plants mediated by bidirectional transport through plasma membrane intrinsic proteins [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 21640.
- [25] Budzyńska S, Krzesłowska M, Niedzielski P, *et al.* Arsenite phytoextraction and its influence on selected nutritional elements in one-year-old tree species[J]. *Microchemical Journal*, 2017, **133**: 530-538.
- [26] Wang X, Ma L Q, Rathinasabapathi B, *et al.* Uptake and translocation of arsenite and arsenate by *Pteris vittata* L.: Effects of silicon, boron and mercury [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, **68**(2): 222-229.
- [27] Huang Z C, An Z Z, Chen T B, *et al.* Arsenic uptake and transport of *Pteris vittata* L. as influenced by phosphate and inorganic arsenic species under sand culture [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(6): 714-718.
- [28] Zheng R L, Li H F, Jiang R F, *et al.* The role of root hairs in cadmium acquisition by barley [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 408-415.
- [29] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. *Plant Physiology*, 2002, **128**(3): 1120-1128.
- [30] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, *et al.* High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and nonimpacted Chinese rice [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 5008-5013.
- [31] Sun G X, Williams P N, Carey A M, *et al.* Inorganic arsenic in rice bran and its products are an order of magnitude higher than in bulk grain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(19): 7542-7546.
- [32] Meharg A A, Jardine L. Arsenite transport into paddy rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *New Phytologist*, 2003, **157**(1): 39-44.
- [33] Mitani-Ueno N, Yamaji N, Zhao F J, *et al.* The aromatic/arginine selectivity filter of NIP aquaporins plays a critical role in substrate selectivity for silicon, boron, and arsenic[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62**(12): 4391-4398.
- [34] Mitani N, Yamaji N, Ma J F. Characterization of substrate specificity of a rice silicon transporter, Lsi1[J]. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 2008, **456**(4): 679-686.
- [35] Cao Y, Sun D, Ai H, *et al.* Knocking out *OsPT4* gene decreases arsenate uptake by rice plants and inorganic arsenic accumulation in rice grains[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12131-12138.
- [36] 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 等. 含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3149-3154.
- Lei M, Zeng M, Liao B H, *et al.* Effects of phosphorus-containing substances on arsenic uptake by rice [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3149-3154.
- [37] Wu Z C, Ren H Y, McGrath S P, *et al.* Investigating the contribution of the phosphate transport pathway to arsenic accumulation in rice [J]. *Plant Physiology*, 2011, **157**(1): 498-508.
- [38] Nakagawa Y, Hanaoka H, Kobayashi M, *et al.* Cell-type specificity of the expression of *OsBOR1*, a rice efflux boron transporter gene, is regulated in response to boron availability for efficient boron uptake and xylem loading[J]. *The Plant Cell*, 2007, **19**(8): 2624-2635.
- [39] Tanaka N, Uruguchi S, Fujiwara T. Exogenous boron supplementation partially rescues fertilization defect of *osbor4* mutant[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2014, **9**(2): e28356.
- [40] Asad A, Blamey F P C, Edwards D G. Effects of boron foliar applications on vegetative and reproductive growth of sunflower [J]. *Annals of Botany*, 2003, **92**(4): 565-570.
- [41] 张君, 危常州, 梁远航, 等. 陆地棉对叶面施硼的吸收和分配[J]. *棉花学报*, 2012, **24**(4): 331-335.
- Zhang J, Wei C Z, Liang Y H, *et al.* Absorption and distribution of foliar applied boron in upland cotton [J]. *Cotton Science*, 2012, **24**(4): 331-335.
- [42] Awasthi S, Chauhan R, Srivastava S, *et al.* The journey of arsenic from soil to grain in rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 1007.
- [43] Duan G L, Kamiya T, Ishikawa S, *et al.* Expressing *ScACR3* in rice enhanced arsenite efflux and reduced arsenic accumulation in rice grains[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2012, **53**(1): 154-163.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)