

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响

向猛^{1,2}, 黄益宗^{1*}, 蔡立群², 保琼莉¹, 黄永春¹, 王小玲³, 乔敏⁴, 胡莹⁴, 金姝兰⁵, 李季⁴, 王斐⁴

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 3. 江西省科学院生物资源研究所, 南昌 330096; 4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 5. 上饶师范学院历史地理与旅游学院, 上饶 334000)

摘要: 通过溶液培养实验, 研究两种价态锑 Sb(Ⅲ) 和 Sb(V) 与 B 交互作用对水稻吸收积累 Sb 和 B 的影响。结果表明, 这两种价态的 Sb 对水稻生长均有抑制作用, Sb(Ⅲ) 比 Sb(V) 对水稻毒害更明显, 增加 B 用量可缓解 Sb 对水稻的毒害。Sb(Ⅲ) 和 Sb(V) 的添加可显著地影响水稻根系和茎叶对 B 的吸收积累。当 B 的浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 添加三价 Sb $30 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 可以显著地降低水稻茎叶和根系中的 B 含量 57.6% 和 75.6% (与对照处理相比, $P < 0.05$)。同样, 增加 B 用量也影响水稻根系和茎叶对两个价态 Sb 的吸收积累。在 $10 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(Ⅲ) 处理下, 添加 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 B 可导致水稻根系和茎叶 Sb 含量分别比 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B 处理降低 39.1% 和 9.2%; 在 $10 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(V) 处理下, 添加 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 B 导致水稻根系 Sb 含量比 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B 处理降低 13.9%。B 的应用对 Sb 在水稻根系和茎叶中的富集系数和分配比率也有显著影响。研究结果表明, 在 Sb 污染农田中可通过施用硼肥来提高植物的硼营养, 降低植物对 Sb 的吸收积累, 从而降低 Sb 对人体健康的危害。

关键词: 硼; 锑; 水稻; 交互作用; 毒害; 富集系数

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1474-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.04.047

Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling

XIANG Meng^{1,2}, HUANG Yi-zong^{1*}, CAI Li-qun², BAO Qiong-li¹, HUANG Yong-chun¹, WANG Xiao-ling³, QIAO Min⁴, HU Ying⁴, JIN Shu-lan⁵, LI Ji⁴, WANG Fei⁴

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Institute of Biological Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 4. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 5. School of History Geography and Tourism, Shangrao Normal University, Shangrao 334000, China)

Abstract: Effect of interactions between boron (B) and antimony on the uptake and accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) seedling was investigated in solution culture. The results showed that Sb(Ⅲ) and Sb(V) could inhibit rice growth and Sb(Ⅲ) was more toxic than Sb(V). Concentrations of B in rice roots and shoots were significantly affected by the addition of Sb(Ⅲ) and Sb(V). The addition of $30 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(Ⅲ) could significantly decrease B of rice shoots and roots by 57.6% and 75.6%, and $30 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb(V) could decrease B of rice roots by 16.0%, compared with the control treatment, when the B concentration was $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Equally, adding B also significantly affected the concentrations of Sb in rice roots and shoots. The addition of $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B could decrease the concentrations of Sb in rice roots and shoots by 39.1% and 9.2%, respectively, compared with $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B, when the Sb(Ⅲ) concentration was $10 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Adding $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B could decrease Sb concentrations in rice roots by 13.9%, compared with $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B, when the Sb(V) concentration was $10 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Furthermore, adding B had significant effect on bio-accumulation factor and distribution ratio of Sb in rice roots and shoots. The results of the study demonstrated that Sb pollution in farmland could be alleviated by adding B fertilizer, thus protecting human health from Sb pollution.

Key words: boron; antimony; rice; interaction; poison; bio-accumulation factor

土壤锑(Sb)的背景值为 $0.054 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 通常 $< 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 我国土壤 Sb 的背景浓度范围 $0.38 \sim 2.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[1,2]。欧共体理事会(Council of the European Communities)(EU, 1976)和美国国家环境保护署(USEPA, 1979)早在 1976 年和 1979 年分别将 Sb 列为优先污染物^[3]。我国是世界上最主要的 Sb 矿储量和 Sb 生产大国, 总保有储量为 278 万 t, 居世界第 1 位, 主要集中在湖南、贵州、广西等南方

省区^[4]。在最近的几十年, Sb 的全球流动量增加了至少十倍^[5]。环境中 Sb 的毒性取决于其形态, Sb 形态毒性顺序为: 有机 Sb $<$ Sb(V) $<$ Sb(Ⅲ)^[6]。

收稿日期: 2014-09-18; 修订日期: 2014-11-13

基金项目: 江西省科学院省级重点实验室开放基金项目(2013-KLB-08, 2012-KLB-1); 国家自然科学基金项目(21377152); 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02)

作者简介: 向猛(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染修复, E-mail: xmeng1028@foxmail.com

* 通讯联系人, E-mail: hyz@rcees.ac.cn

Sb 与 As 相似,但又有着区别,有研究表明Sb(Ⅲ)毒性十倍于Sb(Ⅴ)的毒性^[7,8]。人类摄取的 Sb 主要来源于饮用水和食物。由于植物对 Sb 的富集作用,使其 Sb 含量高于水或土壤中的 Sb 污染水平,特别是在以水稻为主食的南亚和中国,水稻籽粒中积累的 Sb 显著高于水稻土和灌溉水的 Sb 含量,这将给人类健康带来很大风险。

硼(B)是植物生长发育所必需的矿质营养元素。对植物细胞壁和细胞膜的结构与稳定、碳水化合物运输、蛋白质和核酸的代谢、花粉萌发和花粉管的生长等都有着广泛的影响^[9]。在植物代谢中,B 和其他微量元素有所不同,它不是植物体的结构部分,也不参与氧化还原作用,它最重要的作用是促进碳水化合物的运输,使糖的运转顺利进行^[10]。在植物体内,Sb 的运输途径尚不明确。以往研究报道显示,生物体似乎没有专门的吸收系统参与 Sb 的吸收,Sb 的吸收可能利用了必需元素或者生物的分子吸收系统,而 B 作为植物生长发育必须的元素对植物的重金属胁迫具有拮抗作用,因此添加外源 B 对水稻吸收 Sb 可能会有重要影响。目前关于 B 缓解重金属胁迫的报道,多是关于 B 能减轻铝离子的毒害作用^[11],但关于 Sb 对水稻的毒性,及 B 对 Sb 毒性影响的报道较少,因此研究外源施用 B 对水稻吸收积累 Sb 的影响及其作用机制,以期为 Sb 污染土壤修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 水稻品种

水稻(*Oryza sativa* L.)品种为嘉花一号,由嘉兴农业科学院提供,是一种常见的南方晚稻品种。

1.2 实验方法

1.2.1 植株培养

挑选个大、饱满的水稻种子若干粒,用 15% 的双氧水浸泡 10 min,然后用蒸馏水完全洗净,均匀放入湿润的珍珠岩中发芽,定期浇水,保持珍珠岩湿润。在珍珠岩中生长 20 d 后,将幼苗从中转移出来用去离子水洗掉黏附在根上的珍珠岩颗粒,然后挑选生长一致的水稻苗移栽到 500 mL PVC 罐中(直径为 7.5 cm × 高为 14 cm,每罐两株苗),包含 1/3 强度的营养液,此营养液配方是参考 Hewitt 法^[12]并加以改进,配方为($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$): NH_4NO_3 , 5; K_2SO_4 , 2; MgSO_4 , 1.5; CaCl_2 , 4; KH_2PO_4 , 1.3; 和(M): $\text{Fe}(\text{II})$ -EDTA, 50; CuSO_4 , 1.0; ZnSO_4 ,

1.0; MnSO_4 , 5.0; H_3BO_3 , 10; Na_2MoO_4 , 0.5; CoSO_4 , 0.2。3 d 换一次营养液,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KOH 或 HCl 将 pH 值调到 5.5。

1.2.2 水稻生长条件

实验在可控光温度和湿度的生长室中进行,28℃/14 h 光照和 20℃/10 h 黑暗,光照强度为 $260 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,相对湿度为 60% ~ 70%。

1.2.3 实验处理

水稻幼苗在营养液中生长 15 d 后,Sb(Ⅲ)、Sb(Ⅴ)和 B 分别以分析纯的酒石酸锑钾、锑酸钾和硼酸的形式同时加入。营养液中 Sb 的浓度分别为 0、10 和 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,B 的浓度分别为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每个处理 4 次重复,每 3 d 换一次营养液。水稻幼苗处理 Sb 和 B 15 d 后收获。在生长期每天随机调整水培罐的位置。

1.3 样品的分析

收获后,水稻植株分为根和茎叶 2 部分,在 70℃ 下干燥 48 h,称量根、茎叶的干物质重量。称量 0.2 g 左右磨碎的根或茎叶样品放入消煮管中,加入 5 mL 优级纯的浓 HNO_3 后放置过夜,空白和标准样品(GBW10016 国家标准物质研究中心)同时做,以确保消煮后计算回收率。样品放入微波消解仪(MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. USA)中进行消解。消解程序:15 min 升到 180℃,在此温度下保持 15 min,然后 20 min 的降温过程(根据 CEM 公司推荐的方法修改)。消煮完成后用超纯水定容至 50 mL,过滤。用 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA)测定消煮液中的 Sb 和 B 的浓度。

1.4 数据分析

富集系数(Bio-accumulating factor, BAF):水稻植株中 Sb 或 B 浓度与水溶液中 Sb 或 B 浓度的比值,表示水稻富集 Sb 或 B 的能力。

所有的实验数据均采用统计软件 SPSS 17.0 和 SigmaPlot 12.5 进行统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 B 和 Sb 处理对水稻生长的影响

水稻的生物量随 Sb 处理浓度的增加而逐渐受到抑制(表 1)。经过 Sb(Ⅲ)处理后,水稻生长受到明显的抑制,表现为茎叶卷曲、叶片发黄、根系少而短,生长缓慢;低浓度 Sb(Ⅴ) ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理则促进水稻的生长(表 1),这与以往的文献报道

相一致^[8]. 由表 1 可知, Sb(Ⅲ)处理对水稻茎叶干重的影响达到极显著水平 ($P < 0.05$), 但低浓度 Sb(Ⅲ) ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理对水稻根干重的影响没有达到显著水平. 施 B 可缓解 Sb 对水稻的毒害, 尤

其对 Sb(Ⅲ) 处理水稻毒害缓解作用更明显 ($P < 0.05$). Sb(V) 处理对水稻叶干重和根干重有显著的影响, 同时 B 和 Sb(V) 对水稻茎叶干重有显著的交互作用影响 ($P < 0.05$).

表 1 B 对 Sb 胁迫下水稻生物量的影响¹⁾

Table 1 Effect of B on the biomass of rice seedlings under Sb stress

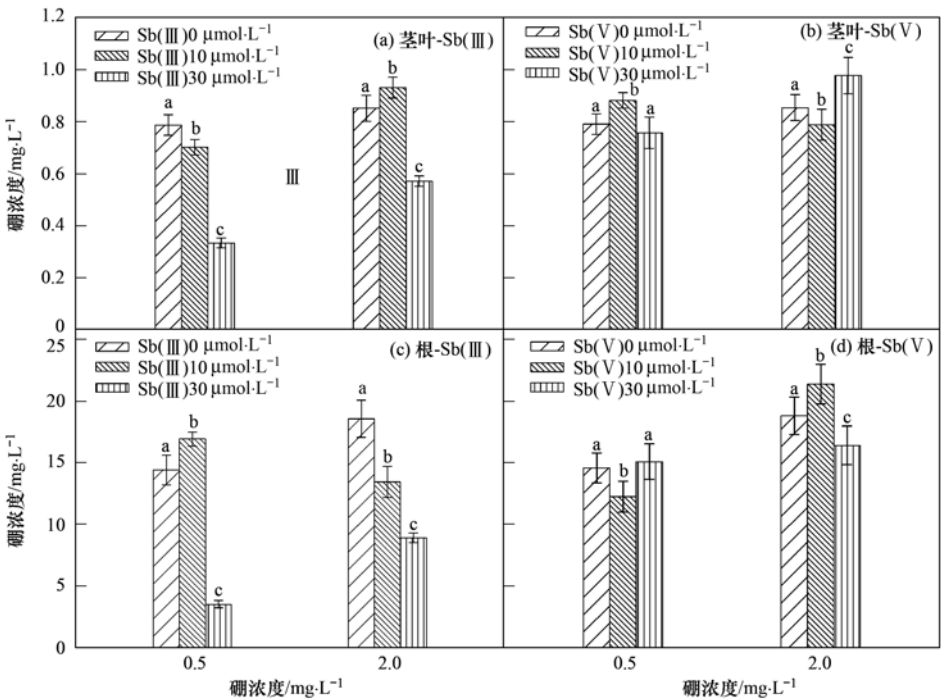
Sb 价态	Sb 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	B 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	叶干重/g	根干重/g
Sb(Ⅲ)	0	0.5	0.37 ± 0.05^a	0.09 ± 0.01^a
		2.0	0.36 ± 0.04^a	0.09 ± 0.01^a
	10	0.5	0.21 ± 0.02^b	0.11 ± 0.01^b
		2.0	0.26 ± 0.02^c	0.09 ± 0.01^a
	30	0.5	0.07 ± 0.01^c	0.03 ± 0.01^c
		2.0	0.13 ± 0.02^b	0.06 ± 0.01^b
Sb(V)	10	0.5	0.43 ± 0.04^b	0.12 ± 0.01^b
		2.0	0.44 ± 0.02^b	0.13 ± 0.01^b
	30	0.5	0.36 ± 0.01^a	0.10 ± 0.01^a
		2.0	0.35 ± 0.04^a	0.12 ± 0.01^b

1) 具有不同字母上标者为差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.2 B 和 Sb 交互作用对水稻吸收积累 B 的影响

图 1 为 B 和 Sb 处理对水稻茎叶和根系中 B 含量的影响, 从中可以看出, 当溶液中 B 浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 添加三价 Sb $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 均可以显著地降低水稻茎叶中的 B 含量 10.8% 和 57.6% (与对照处理相比, $P < 0.05$), 但是 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Sb(Ⅲ) 浓度却显著地提高水稻根系

的 B 含量, 而 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Sb(Ⅲ) 浓度则降低水稻根系 B 含量比率达 75.6% (图 1). 当溶液中的 B 浓度为 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 添加三价 Sb $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 导致水稻根系 B 含量分别比对照处理降低 27.7% 和 52.1% , 但 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Sb(Ⅲ) 浓度却显著地提高水稻茎叶的 B 含量, 而 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Sb(Ⅲ) 浓度降低水稻茎叶 B 含量比率



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 B 和 Sb 处理对水稻茎叶和根中 B 含量的影响

Fig. 1 Effect of B and Sb treatment on the B concentrations in shoots and roots of rice plants

达 32.9% (图 1)。

在低浓度 B 处理下(0.5 mg·L⁻¹),添加Sb(V)浓度为 10 μmol·L⁻¹时可显著地提高水稻茎叶 B 含量 11.6% (与对照处理相比),但却显著地降低水稻根系 B 含量比率达 16.0%; 30 μmol·L⁻¹的Sb(V)浓度对水稻茎叶和根系 B 含量影响不大. 在高浓度 B 处理下(2.0 mg·L⁻¹),添加Sb(V)浓度为 10 μmol·L⁻¹时可显著地降低水稻茎叶 B 含量 7.8% (与对照处理相比,*P* < 0.05),但却显著地提高水稻根系 B 含量比率达 12.0%; 30 μmol·L⁻¹的Sb(V)浓度可显著提高水稻茎叶 B 含量 12.6%,但却显著地降低水稻根系 B 含量比率达 12.8%。

统计水稻根系和茎叶中的 B 积累量,发现两种价态的 Sb 对 B 积累量的影响结果与其对水稻根系和茎叶 B 浓度的影响趋势类似(表 2),即 10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(III)浓度显著地降低水稻根系对 B 的积累,根系中 B 积累量比 CK 降低

27.5% 和 68.5% (B 2.0 mg·L⁻¹ 处理),但 10 μmol·L⁻¹的Sb(III)浓度却显著地促进了水稻根系对 B 的积累,积累量比 CK 提高 30.1% (B 0.5 mg·L⁻¹ 处理)。在 B 0.5 mg·L⁻¹ 处理下,10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(V)浓度可显著地提高水稻根系和茎叶对 B 的积累,B 积累量比 CK 提高 10.3% ~ 23.7% 和 12.8% ~ 6.9%; 在 B 2.0 mg·L⁻¹ 处理下,10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的 Sb(V)浓度均可显著地提高水稻根系和茎叶对 B 的积累. 不管是 B 0.5 mg·L⁻¹ 处理还是 B 2.0 mg·L⁻¹处理,10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(III)浓度均可以显著地降低水稻茎叶和根系对 B 的积累(*P* < 0.05),除了 10 μmol·L⁻¹ Sb(III) + 0.5 mg·L⁻¹ B 处理以外; 但 10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(V)浓度均可以显著地提高水稻茎叶和根系对 B 的积累(*P* < 0.05),除了 30 μmol·L⁻¹ Sb(III) + 0.5 mg·L⁻¹ B 处理以外。

表 2 Sb 对水稻根系和茎叶中 B 总量的影响

Table 2 Effect of different Sb forms on the total B amount in rice root and shoot

Sb 处理/μmol·L ⁻¹		根系/μg·pot ⁻¹		茎叶/μg·pot ⁻¹	
		B(0.5 mg·L ⁻¹)	B(2.0 mg·L ⁻¹)	B(0.5 mg·L ⁻¹)	B(2.0/mg·L ⁻¹)
CK	0	1.30 ± 0.02 ^a	1.67 ± 0.04 ^a	0.29 ± 0.04 ^a	0.31 ± 0.05 ^a
	10	1.86 ± 0.01 ^b	1.21 ± 0.06 ^b	0.15 ± 0.01 ^b	0.24 ± 0.05 ^b
	30	0.11 ± 0.00 ^c	0.53 ± 0.05 ^c	0.02 ± 0.00 ^c	0.07 ± 0.00 ^c
Sb(III)	10	1.45 ± 0.12 ^a	2.74 ± 0.04 ^c	0.38 ± 0.01 ^b	0.35 ± 0.01 ^a
	30	1.49 ± 0.21 ^a	1.94 ± 0.12 ^b	0.31 ± 0.01 ^b	0.34 ± 0.01 ^a
Sb(V)					

2.3 B 和 Sb 交互作用对水稻吸收积累 Sb 的影响

B 和 Sb 交互作用对水稻茎叶和根系中 Sb 含量的影响见图 2,从中可以看出,B 增加显著地降低水稻根系对两种价态 Sb 的吸收积累(*P* < 0.05). 当营养液中Sb(III)浓度为 10 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可导致水稻根系 Sb 含量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 9.2%,水稻茎叶 Sb 含量降低 39.1%; 当营养液中Sb(III)浓度为 30 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可导致水稻根系 Sb 含量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 25.6%,但却显著地提高水稻茎叶的 Sb 含量,Sb 含量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理提高 61.9%。

当营养液中Sb(V)浓度为 10 μmol·L⁻¹时,B 0.5 mg·L⁻¹处理的水稻茎叶和根系 Sb 含量分别为 15.2 mg·kg⁻¹和 53.5 mg·kg⁻¹,B 2.0 mg·L⁻¹处理显著地提高水稻茎叶 Sb 含量,但导致水稻根系 Sb 含量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 10.7%。当营养液中 Sb(V)浓度为 30 μmol·L⁻¹时,B 0.5 mg·L⁻¹处理的水稻茎叶和根系 Sb 含量分别为 27.9 mg·kg⁻¹和

74.5 mg·kg⁻¹,提高 B 浓度到 2.0 mg·L⁻¹对水稻茎叶 Sb 含量影响不大,但导致水稻根系 Sb 含量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 13.9%。

B 和 Sb 交互作用对水稻茎叶和根系 Sb 积累总量的影响结果表明(表 3),不管是 10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(III)处理,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可以显著地降低水稻根系对 Sb 的积累(*P* < 0.05); 但 10 μmol·L⁻¹和 30 μmol·L⁻¹的Sb(V)处理,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 对水稻根系 Sb 的积累影响不大. 当Sb(III)浓度为 10 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可导致水稻根系和茎叶 Sb 积累总量分别比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 25.7% 和 24.5%; 当Sb(III)浓度为 30 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可导致水稻根系 Sb 积累总量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理降低 49.7%。同样,当Sb(V)浓度为 10 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 可导致水稻茎叶 Sb 积累总量比 B 0.5 mg·L⁻¹处理提高 60.7%; 当Sb(V)浓度为 30 μmol·L⁻¹时,添加 2.0 mg·L⁻¹的 B 对水稻根系和茎叶 Sb 积累总量影响都不大。

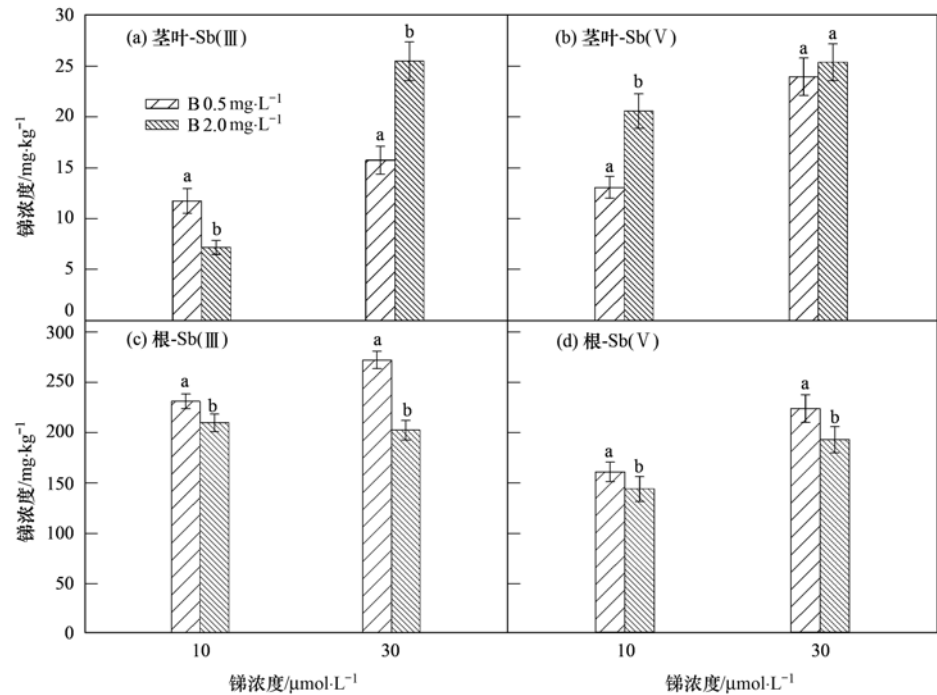


图2 B和Sb处理对水稻茎叶和根中Sb含量的影响

Fig. 2 Effect of B and Sb treatment on the Sb concentrations in shoots and roots of rice

表3 B对水稻根系和茎叶中Sb总量的影响

Table 3 Effect of B on the total Sb amount in rice root and shoot

B 浓度 /mg·L ⁻¹	根系/μg·pot ⁻¹				茎叶/μg·pot ⁻¹			
	Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(V)/μmol·L ⁻¹		Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(V)/μmol·L ⁻¹	
	10	30	10	30	10	30	10	30
0.5	25.44 ± 2.02 ^a	24.17 ± 1.53 ^a	6.41 ± 0.36 ^a	7.45 ± 0.61 ^a	2.47 ± 0.10 ^a	1.10 ± 0.04 ^a	6.55 ± 0.12 ^a	10.03 ± 0.59 ^a
2.0	18.89 ± 1.27 ^b	12.16 ± 1.04 ^b	6.20 ± 0.40 ^a	7.69 ± 0.67 ^a	1.86 ± 0.22 ^b	3.31 ± 0.15 ^b	10.53 ± 0.74 ^b	10.33 ± 0.81 ^a

2.4 Sb在水稻根系和茎叶中的富集系数和分配比率

不同B添加量对水稻根系和茎叶Sb富集系数的影响见表4。从中可见,水稻根系Sb的富集系数大于水稻茎叶Sb的富集系数。水稻根系中,Sb(Ⅲ)

处理的富集系数显著大于Sb(V)处理的富集系数。B浓度的增加显著地降低两种Sb价态处理后水稻根系中Sb的富集系数[除30 μmol·L⁻¹ Sb(V)处理外],但B增加反而提高某些处理水稻茎叶中Sb的富集系数。

表4 Sb在水稻根系和茎叶中的富集系数

Table 4 Bio-accumulation factor (BAF) of Sb in rice root and shoot

B 浓度 /mg·L ⁻¹	根系/μg·pot ⁻¹				茎叶/μg·pot ⁻¹			
	Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(V)/μmol·L ⁻¹		Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(V)/μmol·L ⁻¹	
	10	30	10	30	10	30	10	30
0.5	37.7 ± 3.11 ^a	14.8 ± 1.56 ^a	10.5 ± 1.07 ^a	4.9 ± 0.77 ^a	1.9 ± 0.11 ^a	0.9 ± 0.01 ^a	3.0 ± 0.12 ^a	1.8 ± 0.01 ^a
2.0	34.2 ± 2.23 ^b	11.0 ± 1.25 ^b	9.4 ± 0.58 ^b	4.2 ± 0.35 ^a	1.2 ± 0.08 ^a	1.4 ± 0.0 ^b	4.7 ± 0.01 ^b	1.9 ± 0.00 ^a

表5为不同B浓度处理下水稻根系和茎叶中Sb的分配比率,从中可以看出,Sb(Ⅲ)处理下有88.8% ~ 95.8%的Sb分配在根系里,4.2% ~ 11.2%的Sb分配在茎叶里;Sb(V)处理下有66.6% ~ 77.8%的Sb分配在根系里,22.2% ~

33.4%的Sb分配在茎叶里。不同B浓度处理对水稻根系和茎叶中Sb的分配比率影响有差异。B浓度的增加可显著地降低Sb(V)处理水稻根系中Sb的分配比率,而显著地提高Sb(Ⅲ)和Sb(V)处理下水稻茎叶中Sb的分配比率($P < 0.05$)。

表 5 Sb 在水稻根系和茎叶中的分配比率/%
Table 5 Distribution ratio of Sb in root and shoot/%

B 浓度 /mg·L ⁻¹	根系/μg·pot ⁻¹				茎叶/μg·pot ⁻¹			
	Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(Ⅴ)/μmol·L ⁻¹		Sb(Ⅲ)/μmol·L ⁻¹		Sb(Ⅴ)/μmol·L ⁻¹	
	10	30	10	30	10	30	10	30
0.5	95.8±4.15 ^a	94.5±3.14 ^a	77.8±3.37 ^a	72.8±4.75 ^a	4.2±0.22 ^a	5.5±0.12 ^a	22.2±2.63 ^a	27.2±1.26 ^a
2.0	94.7±2.99 ^a	88.8±2.65 ^a	66.6±2.68 ^b	68.5±3.54 ^b	5.3±0.16 ^b	11.2±0.92 ^b	33.4±2.76 ^b	31.5±1.73 ^b

3 讨论

Sb 在元素周期表中是与 As 同族的元素,它的一些性质类似于 As,对植物生长有毒害作用. 不同价态的 Sb 毒害作用有差异,一般来说Sb(Ⅲ)的毒性高于Sb(Ⅴ)^[13]. 本研究结果也发现,Sb 处理后水稻生长受到明显的抑制,Sb(Ⅲ)比Sb(Ⅴ)对水稻毒害更明显. 此次实验水稻对 Sb 的富集能力均表现为Sb(Ⅲ)最强,Sb(Ⅴ)次之(表 4),这可能是因为水稻对Sb(Ⅲ)和Sb(Ⅴ)的吸收转运机制不同而造成的,然而目前对植物体内 Sb 的吸收途径尚不明确. 有研究发现,在微生物体内Sb(Ⅲ)可通过 GlpF 蛋白、Fsp1 蛋白和水甘油通道蛋白(AQP1)进入细胞,通过 ArsB 蛋白、Acr3p 蛋白和 ABC 超家族转运蛋白流出细胞^[14,15]. 可见Sb(Ⅲ)进入细胞更多依赖于与运载蛋白有关的主动吸收作用^[16]. Tschan 等^[17]通过对许多文献数据的分析,总结出植物可能通过蒸腾的水流进行被动吸收和转运Sb(Ⅴ),并认为Sb(Ⅴ)通过蒸腾作用被动吸收必须要克服一些在植物根系存在的具有选择性的障碍,这些障碍控制着水份和土壤溶质从根部向茎叶中转运. 他们进而对这一推论进行解释:植物根系皮层中的质外体能够允许土壤溶液中的溶质直接进入根系内部,而在根系中柱,质外体被凯氏带从皮层分隔开(凯氏带迫使水分和溶质通过共质体运输通道进入内皮层细胞,以便达到根系中柱内部). 此外他们认为Sb(Ⅲ)可能通过水通道蛋白被动扩散,从非原生质体穿过细胞膜进入细胞内,但水通道蛋白不让Sb(Ⅴ)阴离子进入,Sb(Ⅴ)阴离子进入细胞内需要转运子调控.

硼(B)是植物生长发育必需的微量营养元素之一. B 虽然不是植物体内各种有机物的组成成分,但它的存在能加强植物的某些重要生理机能^[18]. 多数研究者认为 B 和 Ca 一样,属于被动吸收的营养元素,它在木质部中向上运输,主要受水分蒸腾作用控制,并通过水通道蛋白 PIP1(plasma membrane intrinsic proteins)进入植物细胞^[19]. B 的吸收速率

与植物的蒸腾速率成正比,随质流进入根部,在根表自由空间与糖络合,因而吸收作用很快. 植物在干旱、盐害、寒冷、养分缺乏、土壤酸化和光照变化等逆境胁迫下,在一定程度上均会通过调控水通道蛋白保持器官和细胞水分的平衡,以适应胁迫环境^[20]. 本研究结果发现,提高 B 浓度可缓解 Sb 对水稻的毒害,降低水稻根系和茎叶对 Sb 的吸收积累,并影响 Sb 在水稻根系和茎叶中的富集系数和分配比率(表 4 和表 5). 但是在实验过程中,B 与两种形态 Sb 的相互作用也出现不规律的影响,特别是 B 与Sb(Ⅴ)处理,导致这种现象的原因有两种:一是水稻吸收 B 和Sb(Ⅴ)有不同的机制,因此Sb(Ⅴ)与 B 之间相互的影响不大,但也会通过影响水稻的生长发育而影响两种元素在水稻植株中的分布;二是人工气候室光照的影响,尽管在实验过程中会有规律的调动培养罐的位置,但仍会受到光照不平衡的影响,特别是对依赖蒸腾作用在水稻植株中转运的 B 元素,影响的程度会更大. 前人也有关于 B 缓解其它重金属的报道,添加 B 可降低重金属的富集系数. 外源 B 缓解水稻 Sb 胁迫的机制目前还不太清楚,可能的机制:一方面是Sb(Ⅴ)和 B 具有拮抗作用,相互竞争,从而减少水稻对Sb(Ⅴ)的吸收;另一方面,B 通过水通道蛋白 PIP1(plasma membrane intrinsic proteins)进入植物细胞,这与Sb(Ⅲ)通过水通道蛋白被动扩散,从非原生质体穿过细胞膜进入细胞内的原理相似,进而形成竞争吸收,因此降低植株对Sb(Ⅲ)的吸收. 为了阐明外源 B 缓解水稻 Sb 毒害的机制,需要人们加强这方面的研究.

4 结论

(1)添加 30 μmol·L⁻¹的Sb(Ⅲ)或Sb(Ⅴ)均对水稻生长有抑制作用,但 10 μmol·L⁻¹的Sb(Ⅴ)则促进水稻的生长,Sb(Ⅲ)较Sb(Ⅴ)处理对水稻生长毒害更明显,增加 B 用量可缓解 Sb 对水稻的毒害,尤其对Sb(Ⅲ)处理的水稻毒害缓解作用更明显.

(2)三价 Sb 和五价 Sb 的添加均显著地影响水稻根系和茎叶对 B 的吸收积累. 当Sb(Ⅲ)浓度均

为 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可导致水稻茎叶和根系 B 含量分别比不施 Sb 的对照处理降低 57.6% 和 75.6%。

(3) B 浓度的增加也影响水稻对 Sb 的吸收积累,水稻根系的 Sb 含量均随着 B 浓度的增加而显著地降低,但是水稻茎叶 Sb 含量随 B 浓度的增加变化不一样,其中 Sb(V) 随着 B 浓度的增加而显著地提高,低浓度 Sb(III) 随着 B 浓度的增加而显著地降低,高浓度 Sb(III) 随着 B 浓度的增加而显著地提高。

参考文献:

- [1] 黄益宗, 胡莹, 刘云霞. 锑对水稻根生长的影响及锑的吸收动力学特性[J]. 环境化学, 2010, **29**(4): 640-643.
- [2] Miravet R, Bonilla E, López-Sánchez J F, *et al.* Antimony speciation in terrestrial plants. Comparative studies on extraction methods [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2005, **7**(12): 1207-1213.
- [3] USEPA. Water Related Fate of the 129 Priority Pollutants [EB/OL]. Washington DC, 1979, 1, EP-440/4-79-029A.
- [4] 徐峰, 黄益宗, 蔡立群, 等. 骨炭对水中不同形态 Sb 吸附和解吸的影响[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(12): 4659-4665.
- [5] Shtangeeva I, Bali R, Harris A. Bioavailability and toxicity of antimony [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, **110**(1): 40-45.
- [6] Filella M, Belzile N, Chen Y W. Antimony in the environment: a review focused on natural waters I. Occurrence [J]. Earth-Science Reviews, 2002, **57**(1-2): 125-176.
- [7] Qi C C, Wu F C, Deng Q J, *et al.* Distribution and accumulation of antimony in plants in the super-large Sb deposit areas, China [J]. Microchemical Journal, 2011, **97**(1): 44-51.
- [8] Sharma M, Patel K S. Determination and speciation of antimony in water [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993, **50**(1): 63-71.
- [9] O'Neill MA, Ishii T, Albersheim P, *et al.* Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, **55**: 109-139.
- [10] 唐湘如, 官春云. 施氮对油菜几种酶活性的影响及其与产量和品质的关系[J]. 中国油料作物学报, 2001, **23**(4): 32-37.
- [11] 王学. 外源硼缓解铅对蜈蚣萍毒害作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(23): 9861-9862, 9969.
- [12] Hewitt E J. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition [M]. (2nd ed.). England: Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royl, 1966.
- [13] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J]. 化学进展, 2004, **16**(1): 134-135.
- [14] Porquet A, Filella M. Structural evidence of the similarity of Sb(OH)₃ and As(OH)₃ with glycerol: Implications for their uptake [J]. Chemical Research in Toxicology, 2007, **20**(9): 1269-1276.
- [15] Filella M, Belzile N, Lett M C. Antimony in the environment: A review focused on natural waters. III. Microbiota relevant interactions [J]. Earth-Science Reviews, 2007, **80**(3-4): 195-217.
- [16] 冯人伟, 韦朝阳, 涂书新. 植物对锑的吸收和代谢及其毒性的研究进展[J]. 植物学报, 2012, **47**(3): 302-308.
- [17] Tschan M, Robinson B, Schulin R. Antimony uptake by *Zea mays* (L.) and *Helianthus annuus* (L.) from nutrient solution [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2008, **30**(2): 187-191.
- [18] 程恩庆, 施春辉, 夏激, 等. 我国硼肥生产应用现状及发展建议[J]. 辽宁化工, 2007, **36**(12): 833-835.
- [19] Oertli J J. The mobility of boron in plants [J]. Plant and Soil, 1993, **155-156**: 301-304.
- [20] Dordas C, Chrispeels M J, Brown P H. Permeability and channel-mediated transport of boric acid across membrane vesicles isolated from squash roots [J]. Plant Physiology, 2000, **124**(3): 1349-1361.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行