

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)	

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

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 通过砂培试验, 研究了铅(Pb)胁迫下不同品种玉米根、茎叶中 Pb 的化学形态变化, 进一步探讨玉米耐 Pb 机制。结果表明, 本试验中对 Pb 胁迫耐性最强的玉米品种为郑单 958 和隆平 206, 耐性最差的为联创 5 号。不同浓度 Pb 胁迫下玉米根、茎叶中 Pb 主要以无毒的醋酸提取态和盐酸提取态为主, 比例高达 60% ~ 87%, 这一比例根部略高于茎叶; 而活性较强的乙醇提取态和水提取态 Pb 含量两者合计所占比例为 6% ~ 20%。100 mg·L⁻¹ Pb 胁迫下隆平 206 茎叶中 Pb 的乙醇和水提取态合计值最低(0.52 mg·kg⁻¹), 其次是郑单 958(0.93 mg·kg⁻¹), 最高的为联创 5 号(2.78 mg·kg⁻¹); 800 mg·L⁻¹ Pb 胁迫下, 郑单 958 茎叶中 Pb 的乙醇提取态和水提取态合计值最低, 为 2.41 mg·kg⁻¹, 因此郑单 958 耐 Pb, 可能与体内有毒形态 Pb 向无毒形态 Pb 的转换有关。

关键词: 玉米; 铅; 胁迫; 根活力; 化学形态

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1468-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.046

Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead

CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, YANG Su-qin*, ZHAO Peng, SUN Xiao-xue, ZHOU Zhi-yun

(College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A sand-culture experiment was carried out to research the differences in lead (Pb) chemical-form among different maize varieties for roots and shoots under Pb stress, and further investigate into the mechanism of maize endurance to resist Pb. The results showed that the wheat varieties of Zhengdan 958 and Longping 206 have the maximum Pb tolerance, whereas Lianchuang 5's tolerance of Pb was the minimum. Pb form in roots and shoots were mainly harmlessness HAc-extractable and HCl-extractable, accounting for a high proportion of 60%-87%. Moreover, these values in roots were slightly higher than those in shoots. And concentrations of alcohol-extractable and water-extractable Pb accounted for the proportion of 6%-20%. Under 100 mg·L⁻¹ Pb stress, the alcohol-extractable together with water-extractable Pb content in shoots of Longping 206 was the lowest (0.52 mg·kg⁻¹), and that of in Zhengdan 958 shoots was 0.93 mg·kg⁻¹ which was also very low. However, for Lianchuang 5, the content could reach 2.78 mg·kg⁻¹. Under the stress of 800 mg·L⁻¹ Pb, content of alcohol-extractable together with water-extractable Pb in Zhengdan 958 shoots was 2.41 mg·kg⁻¹, which was still the lowest. These were probable reasons why Zhengdan 958 was more resistant to Pb stress than other varieties. Tolerance of Zhengdan 958 to Pb stress was related to its strong ability to convert toxic Pb into non-toxic Pb.

Key words: maize; lead; stress; root activity; chemical forms

玉米作为我国重要的粮食作物, 种植面积广, 具有生长速率快, 生物量大的特点, 无论在安全土壤还是污染性土壤都能较好地生长。目前, 利用筛选重金属低积累作物在污染耕地上种植, 以充分利用受污染耕地, 同时保障粮食安全已成为当前研究的热点问题^[1]。这一“边生产、边修复”办法也适合我国国情, 对于保证国家粮食安全具有重要意义。

据 2014 年 4 月环境保护部、国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤污染超标率达 16.1%, 耕地点位超标率达 19.4%, 铅的点位超标率达 1.5%^[2]。铅污染已成为威胁人们生存环境与健康的主要原因之一^[3~6]。铅污染耕地直接危害到植物生长的环境如土壤微生物、土壤酶活性^[7,8]等。植物吸收大量的铅会抑制其光合作用、呼吸作用^[9,10], 对叶绿体、线粒体都有一定程度的破坏^[11], 同时影响植物的生长, 导致作物产量、质

量下降^[12]。因此, 研究 Pb 胁迫下不同玉米品种的响应异同可为作物耐性初步筛选提供参考和依据。

玉米对 Pb 胁迫响应通常与金属 Pb 在植株体内的化学形态密切相关, 探明这一问题对于解析玉米耐 Pb 机制具有十分重要的意义。目前玉米低积累品种的筛选研究主要集中在吸收^[13]、生理生化研究^[14]、螯合剂诱导技术^[15]等方面。玉米体内 Pb 积累是否与重金属形态变化有关, 玉米如何通过改变体内重金属形态来应对外界胁迫, 是亟待解决的科学问题。有鉴于此, 本研究通过砂培试验, 分析了不同浓度 Pb 胁迫下玉米品种间根、茎叶中 Pb 化学形态的变化, 探讨玉米耐 Pb 机制, 以期玉米低积累

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-11-12

基金项目: 河南省重大科技攻关项目(122102310031)

作者简介: 程海宽(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: haikuancheng@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yang_suqin@126.com

品种筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试品种为:郑单 958、漯玉 336、联创 5 号、圣瑞 568、隆平 206。选择饱满均一玉米种子,播于装有洗净石英砂的花盆(长 10 cm,宽 10 cm,高 12 cm,盆底有孔)中,每盆 3 颗。萌发后,每天浇灌 1/2 Hoagland 营养液,3 d 后用完全营养液进行浇灌,一心一叶时选取长势均一的幼苗,每盆定苗 1 株。四叶期选用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 作为 Pb 源进行胁迫处理,Pb 的质量浓度分别为 0(对照)、100、200、400 和 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,共 5 个处理水平,每个处理设置 3 次重复,每天浇灌胁迫营养液至盆底有大量营养液流出,每 3 d 用去离子水冲洗后再用 Pb 胁迫营养液浇灌,以防止盐分累积。胁迫时间为 4 周。

1.2 样品处理及指标测定:

叶绿素含量:选取玉米最上部完全展开叶的中部,利用叶绿素仪(SPAD-502,日本)进行测定,重复 3 次,记录 SPAD 值读数。

根际活力:称取新鲜根样品 0.50 g,放入试管中,加入 0.40% 氯化三苯基四氮唑(TTC)溶液和 0.067 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH 7.0 磷酸缓冲液各 5 mL,将根充分浸没在溶液中,在 37℃ 下暗处保温 1 h,此后加入 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸 2 mL,以终止反应。将根取出,吸干水分,与 3~4 mL 的乙酸乙酯和少量石英砂一起研磨,以提出三苯基甲腈(TTF)。把红色提出液(含 TTF)移入试管,用少量乙酸乙酯把残渣洗涤 2~3 次,皆移入试管,最后加乙酸乙酯使总量为 10 mL,分光光度计 485 nm 下比色,计算根际活力。

Pb 化学形态:分别称取新鲜玉米根和茎叶样品各 2.00 g,剪碎,放置于 100 mL 离心管中,加 37.50 mL 提取剂,在 30℃ 恒温箱中放置过夜(17~18 h),次日回收提取液于 250 mL 烧杯中,再加入同体积提取剂,恒温箱中放置 2 h 后,将回收提取液并入烧杯中,24 h 内连续提取 4 次。提取液在电热板上蒸至近干,用硝酸-高氯酸混合酸(GR)消解至无色,定容后用原子吸收分光光度计(ZEEnit700,德国耶拿分析仪器股份公司)测定 Pb 质量分数。分级提取顺序为:80% 乙醇、去离子水、1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl、2% (体积比)醋酸、0.60 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸^[16]。其中 80% 乙醇主要提取硝酸盐、氯化物及氨基酸态 Pb 等;去离子水提取水溶性的有机酸盐;1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 主要提取果胶酸盐和与蛋白质呈结合态或吸

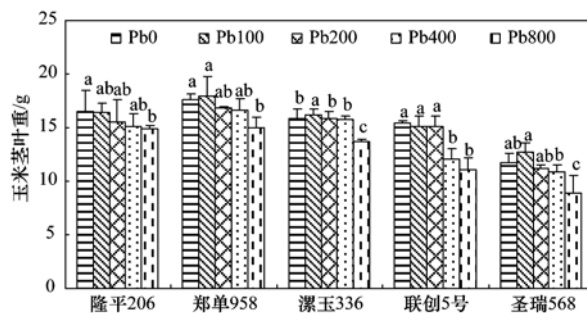
着态的盐等;2% 醋酸主要提取 Pb 的磷酸盐等;0.60 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸主要提取 Pb 的草酸盐等^[17];最后残渣部分可能以硅酸盐为主^[18,19]。

试验数据利用 Excel 2003、DPS 7.05 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 Pb 胁迫下各玉米品种地上部鲜重

Pb 胁迫下地上部生物量的变化,反映了植物对 Pb 的耐受性。由图 1 可知,在各浓度 Pb 胁迫下,郑单 958 地上部生物量明显高于其他品种。从 100~800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫,隆平 206 地上部鲜重减少量最低。不同品种在不同浓度 Pb 胁迫下其地上部鲜重的变化不尽相同,随着 Pb 胁迫浓度的逐渐增加,郑单 958、漯玉 336、圣瑞 568 地上部鲜重呈现先增加后降低的趋势,而联创 5 号、隆平 206 则逐渐降低。100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫下圣瑞 568、郑单 958 和漯玉 336 地上部鲜重较对照处理有小幅增加。Pb 胁迫浓度增加到 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时所有品种地上部鲜重开始低于对照组,即 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫下玉米受到伤害,生物量开始减少,但仍与对照和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫下差异不显著。800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫,地上部鲜重下降最为明显的为联创 5 号和圣瑞 568,与对照处理相比分别下降 28.53% 和 23.92%。



不同字母表示它们之间达到显著性差异($P < 0.05$),下同

图 1 Pb 对玉米植株地上部鲜重的影响

Fig. 1 Effects of lead on shoot fresh weight of maize

2.2 Pb 胁迫下各玉米品种根冠比

根冠比是植物根部鲜重与地上部鲜重的比值。Pb 胁迫下,根冠比可反映植物对 Pb 的耐受能力。随 Pb 胁迫浓度的增加,各品种根冠比均逐渐增大,但增幅各异(图 2)。对照条件下郑单 958 的根冠比最低。100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫,圣瑞 568 根冠比与对照相比略有减少。800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫,联创 5 号和隆平 206 的根冠比增幅最大,相比于对照分别增加了 26.37% 和 21.00%,郑单 958 根冠比增幅最少,仅

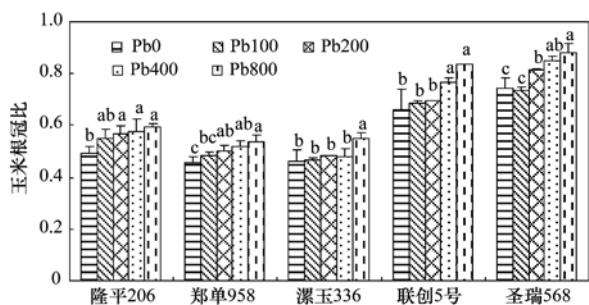


图2 Pb对玉米根冠比的影响

Fig. 2 Effects of lead on root-shoot ratio of maize

增加了 17.84%。

2.3 Pb胁迫下各玉米品种耐性指标

耐性指标指各处理根干重与对照组根干重的比值。由图3可知,随Pb胁迫浓度增加,各品种的耐性指标逐渐降低。100 mg·L⁻¹ Pb胁迫下,郑单958、漯玉336和圣瑞568的耐性指标均大于1,而隆平206的耐性指标略低于1,圣瑞568的耐性指标小于1。郑单958的耐性指标最高,为1.17。100 mg·L⁻¹ Pb胁迫时促进了郑单958、漯玉336和圣瑞568的根系生长,这可能是作物在低浓度Pb胁迫下通过根系的生长,增加自身体积,以稀释体内重金属浓度,提高自身对Pb的耐受性。800 mg·L⁻¹ Pb胁迫下各个品种的根系干重均显著低于对照组,其生长均受到抑制。800 mg·L⁻¹ Pb胁迫下郑单958和漯玉336的耐性指标大于其它品种,说明在高浓度Pb处理下郑单958和漯玉336对Pb的耐受性要高于其它品种。

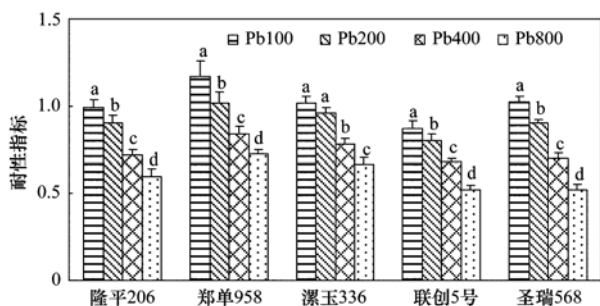


图3 Pb对玉米耐性指标的影响

Fig. 3 Effects of lead on index of tolerance of maize

2.4 Pb胁迫下玉米叶绿素含量

SPAD值反映植物叶片叶绿素相对含量。由图4可知,随着Pb胁迫浓度的增加SPAD值呈现先增加后逐渐减少的趋势,说明在低浓度Pb胁迫下,刺激了植物的生长,而在高浓度时,Pb对植物生长产生毒害作用。800 mg·L⁻¹ Pb胁迫下,相比对照郑单958下降的最少,为4.30%,其次为漯玉336、隆平206、圣瑞568,下降百分比分别为7.02%、8.38%

和8.52%。联创5号叶绿素含量变化最明显,相比对照下降17.20%。

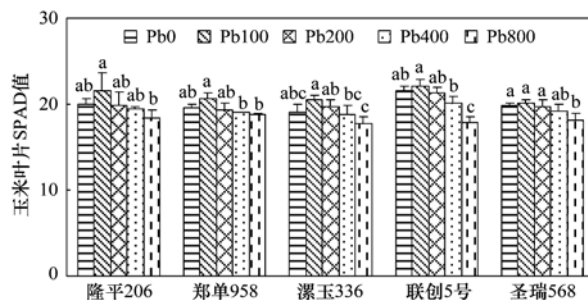


图4 Pb对玉米叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of lead on chlorophyll content of maize

2.5 Pb胁迫下玉米根活力

玉米根系是直接受重金属Pb伤害的部位,根系活力在一定程度上反映了植株受Pb胁迫时应急生长及代谢情况。由图5可知,在不同Pb胁迫条件下品种间根活力的变化趋势不同。隆平206、漯玉336、圣瑞568根活力随Pb胁迫浓度的增加而递减,其中隆平206在400 mg·L⁻¹ Pb时降低明显,而漯玉336和圣瑞568在100 mg·L⁻¹ Pb时就明显受到胁迫影响。郑单958和联创5号则在100 mg·L⁻¹ Pb胁迫时根活力有所增加,之后则减少。郑单958在400 mg·L⁻¹ Pb胁迫时根活力开始低于对照组。800 mg·L⁻¹ Pb胁迫下,相比对照隆平206根活力减小最为明显,为71.79%,其次是漯玉336,为60.40%,郑单958下降的最少,为25.30%。

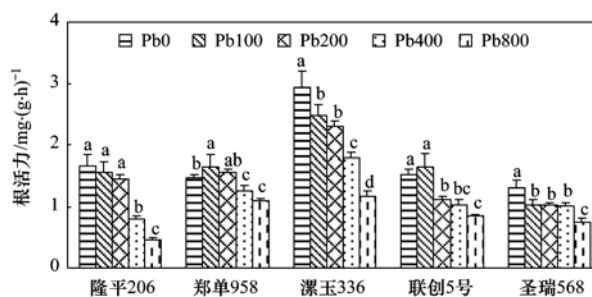


图5 Pb对玉米根活力的影响

Fig. 5 Effects of lead on root activity of maize

2.6 100 mg·L⁻¹ Pb与800 mg·L⁻¹ Pb胁迫下玉米体内Pb化学形态

不同玉米品种对Pb的吸收存在差异。由表1可知,同一浓度Pb胁迫下,不同玉米品种不同部位的Pb化学形态含量存在着显著差异。由图6、图7可知,所有品种在不同浓度Pb胁迫下茎叶和根部各形态Pb所占比例以醋酸提取态和盐酸提取态含量最高,两者合计值均大于50%。100 mg·L⁻¹ Pb胁迫

下郑单 958 和圣瑞 568 根部 Pb 醋酸提取态和盐酸提取态两者合计值高达 87.27% 和 83.12%。Pb 胁迫下,玉米通过将体内 Pb 转化为活性相对较低的磷酸盐和草酸盐等形式存在,以降低 Pb 对玉米的伤害。800 mg·L⁻¹Pb 胁迫下玉米体内 Pb 的 NaCl 提取态含量仅次于醋酸提取态和盐酸提取态含量。800 mg·L⁻¹ Pb 胁迫下玉米茎叶内 Pb 的水提取态含量均比乙醇提取态含量高,所有玉米品种茎叶和根内 Pb 的水提取态含量和乙醇提取态含量均高于残渣态。总体来说,800 mg·kg⁻¹ Pb 胁迫下玉米体内 Pb 各提取态含量依次为醋酸、盐酸提取态 > NaCl 提取态 > 水提取态 > 乙醇提取态 > 残渣态。但在 100 mg·L⁻¹Pb 胁迫下玉米体内 Pb 各提取态含量则随品种的不同而有所差异。

由表 1 可知,100 mg·L⁻¹Pb 胁迫下联创 5 号根部 Pb 乙醇提取态和水提取态合计值较其它品种高,为 6.45 mg·kg⁻¹,说明联创 5 号根内含较多迁移活

性强的无机盐形态 Pb,因此 Pb 容易从根部向地上部运输。联创 5 号茎叶中 Pb 乙醇提取态和水提取态合计值最高,为 2.78 mg·kg⁻¹,占总量的 25.41% (图 6); 最低的是隆平 206,为 0.52 mg·kg⁻¹,占总量的 5.76%,其次是郑单 958。表明联创 5 号茎叶中活性 Pb 向低活性态 Pb 转换能力较差,抵抗 Pb 毒害能力较弱。800 mg·L⁻¹Pb 胁迫下郑单 958 茎叶中 Pb 乙醇提取态和水提取态合计值最低,为 2.41 mg·kg⁻¹,其次是隆平 206,为 2.72 mg·kg⁻¹,联创 5 号 Pb 乙醇提取态和水提取态合计值最高,为 3.59 mg·kg⁻¹。各品种茎叶中 Pb 乙醇提取态和水提取态合计值占总量比例在 10.10% ~ 19.78% 之间。

不同玉米品种体内 Pb 存在的共同特征为: 800 mg·L⁻¹Pb 胁迫下根中各形态 Pb 含量均高于茎叶中对应形态 Pb 的含量,100 mg·L⁻¹Pb 胁迫下根中各形态 Pb 含量大部分高于茎叶中相应形态的含量,表明 Pb 在根中蓄积能力较强。

表 1 玉米不同部位 Pb 化学形态分析¹⁾

Table 1 Contents of different chemical Pb forms in different parts of corn									
Pb 处理 /mg·L ⁻¹	品种	部位	Pb 不同化学形态质量分数/mg·kg ⁻¹						提取率 /%
			乙醇提取态	水提取态	氯化钠态	醋酸提取态	盐酸提取态	残渣态	
100	隆平 206	茎叶	0.21 ± 0.01c	0.31 ± 0.01c	1.83 ± 0.19a	3.35 ± 0.11b	3.18 ± 0.19a	0.27 ± 0.04e	88
	郑单 958		0.21 ± 0.01c	0.73 ± 0.03bc	1.20 ± 0.36b	3.17 ± 0.19b	2.89 ± 0.27ab	0.55 ± 0.03c	82
	漯玉 336		0.43 ± 0.09b	0.75 ± 0.14bc	0.75 ± 0.07c	2.19 ± 0.17c	2.86 ± 0.30ab	0.43 ± 0.04d	92
	联创 5 号		0.10 ± 0.02d	2.68 ± 0.55a	1.30 ± 0.16b	3.44 ± 0.16b	2.46 ± 0.30b	0.98 ± 0.03b	91
	圣瑞 568		0.54 ± 0.05a	0.96 ± 0.26b	1.13 ± 0.12b	4.61 ± 0.50a	3.08 ± 0.41a	1.16 ± 0.11a	93
	隆平 206	根	0.68 ± 0.13c	2.29 ± 0.12b	1.29 ± 0.09c	4.56 ± 0.58bc	10.60 ± 0.75e	2.62 ± 0.09b	90
	郑单 958		0.61 ± 0.06c	4.06 ± 1.17a	1.82 ± 0.45bc	21.81 ± 1.22a	33.20 ± 3.03a	1.54 ± 0.12c	95
	漯玉 336		1.05 ± 0.12b	0.71 ± 0.12c	2.50 ± 0.36b	3.20 ± 0.38c	15.47 ± 2.12d	1.16 ± 0.08d	86
	联创 5 号		2.70 ± 0.10a	3.75 ± 0.58a	6.62 ± 0.60a	19.62 ± 4.13a	28.60 ± 2.14b	6.44 ± 0.30a	92
	圣瑞 568		0.48 ± 0.02d	2.93 ± 0.62ab	2.53 ± 0.57b	7.76 ± 1.01b	23.43 ± 1.03c	0.40 ± 0.08e	89
800	隆平 206	茎叶	0.40 ± 0.12d	2.32 ± 0.42a	2.48 ± 0.30c	4.01 ± 0.38d	4.51 ± 0.15d	0.04 ± 0.01d	91
	郑单 958		1.09 ± 0.11c	1.32 ± 0.16c	2.84 ± 0.29bc	7.15 ± 0.93b	6.79 ± 0.76c	0.22 ± 0.13c	95
	漯玉 336		1.34 ± 0.08b	1.87 ± 0.13ab	3.31 ± 0.70b	5.85 ± 1.43bc	4.14 ± 0.19d	0.73 ± 0.17b	86
	联创 5 号		1.64 ± 0.12a	1.95 ± 0.14ab	2.62 ± 0.03bc	4.70 ± 0.55cd	8.67 ± 0.22a	1.09 ± 0.19a	90
	圣瑞 568		1.40 ± 0.11b	1.68 ± 0.35bc	5.33 ± 0.23a	14.07 ± 0.91a	7.71 ± 0.54b	0.26 ± 0.12c	88
	隆平 206	根	2.09 ± 0.23c	3.13 ± 0.43d	13.19 ± 0.69b	28.80 ± 0.39d	11.37 ± 1.85d	0.19 ± 0.03c	89
	郑单 958		5.68 ± 1.06b	4.72 ± 0.06c	14.35 ± 0.61b	34.27 ± 2.04d	22.49 ± 0.59c	1.80 ± 0.10b	92
	漯玉 336		7.94 ± 0.35a	7.19 ± 0.33b	21.32 ± 3.60a	52.99 ± 2.26b	49.99 ± 5.78a	2.47 ± 0.42a	97
	联创 5 号		7.58 ± 0.52ab	7.52 ± 0.39b	19.32 ± 2.80a	44.26 ± 4.31c	35.04 ± 1.73b	2.45 ± 0.19a	83
	圣瑞 568		8.38 ± 1.17a	11.32 ± 1.05a	21.60 ± 1.79 a	85.73 ± 4.77a	48.90 ± 4.67a	2.08 ± 0.40ab	98

1) 同一处理同一部位同一列的英文小写字母不同表示品种间指标差异显著性(P < 0.05)

3 讨论

本试验中,不同玉米品种对不同程度 Pb 胁迫的响应不同。郑单 958 在受 Pb 胁迫时其地上部鲜重、叶绿素含量、根活力随 Pb 胁迫浓度的增加,呈现先增加后减少的趋势,且减少量较其它品种都低。隆平 206 地上部生物量和根冠比随 Pb 胁迫浓度的增

加,变化趋势较小。Pb 胁迫对植株的地上部生物量、根冠比、叶绿素含量、根活力等都有一定的影响,而植物受 Pb 胁迫时各项指标的高低直接反映了植物对 Pb 的耐受性^[20]。其中,地上部生物量最能反映植物对逆境条件下的适应性,由地上部生物量和根冠比分析,初步得出郑单 958 和隆平 206 对 Pb 的耐受性较强。

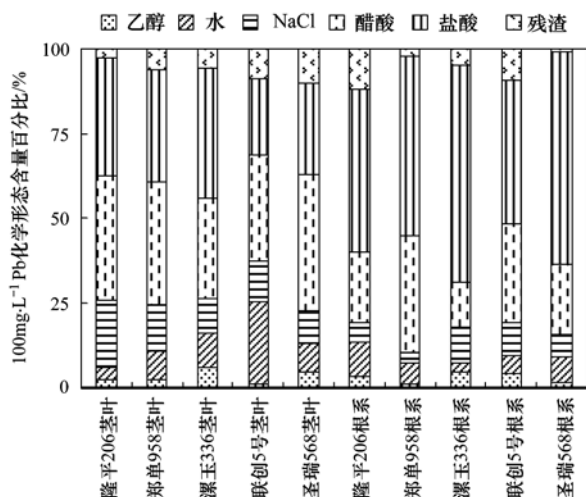


图6 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫下玉米不同部位
不同化学形态Pb所占百分比

Fig. 6 Percentages of different chemical forms of Pb in different parts of maize under $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress

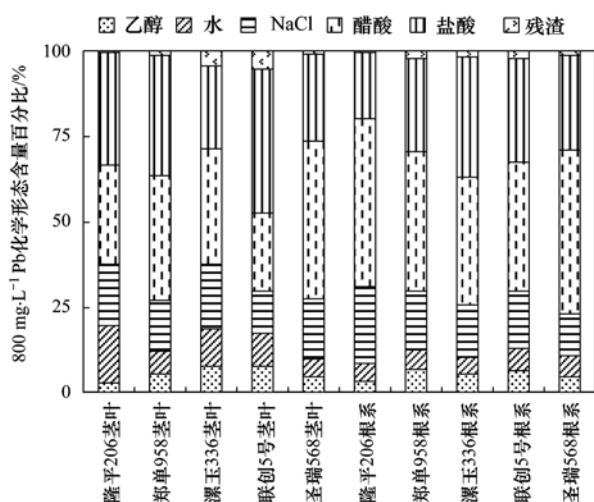


图7 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫下玉米不同部位
不同化学形态Pb所占百分比

Fig. 7 Percentages of different chemical forms of Pb in different parts of maize under $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress

本研究结果发现,不同玉米品种体内Pb以醋酸提取态和盐酸提取态较多,不同玉米品种其醋酸提取态和盐酸提取态所占比例不尽相同.徐劼等^[21]研究认为,同种植物不同品种其体内重金属的主要存在形式不同,茶树品种龙井43根中Pb醋酸提取态含量最高,品种迎霜根中NaCl提取态含量最高.不同植物体内重金属的主要存在形式亦不同,如金丝草体内的Pb主要以盐酸提取态为主,其次是醋酸提取态和NaCl提取态^[22],芦苇体内Pb主要以难溶性的醋酸和盐酸提取态为主^[23].玉米体内Pb的乙醇和水提取态含量越高毒性也越强.Pb的其它提取态主要是以难溶性的蛋白结合态、果胶酸盐、磷

酸盐结合态和草酸盐等形式为主,其迁移能力和毒性都比乙醇和水提取态Pb弱的多^[24].低浓度Pb胁迫下郑单958根中Pb醋酸提取态和盐酸提取态所占比例均高于其它品种,茎叶也处于较高水平,即郑单958体内Pb主要以难溶性磷酸盐、草酸盐形态存在,以致自由态Pb所占比例较低. $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫下郑单958茎叶中Pb乙醇提取态和水提取态合计值最低,其次是隆平206,而联创5号Pb乙醇提取态和水提取态合计值最高,郑单958和隆平206茎叶中Pb总量也最低.由此表明,郑单958受Pb胁迫时,玉米减缓Pb伤害机制,可通过控制体内Pb总量或将体内大部分可溶态Pb转换成活性低的草酸盐态Pb等方式来增加自身对Pb的耐性,这可能是其表现出比其它品种对Pb耐性更强的原因.

隆平206体内醋酸提取态和盐酸提取态含量较其它品种并没有明显增高,说明隆平206耐Pb机制与体内Pb化学形态的转化关系并不密切.隆平206在低浓度和高浓度Pb胁迫时其体内Pb的总吸收量都远低于其它品种.隆平206对Pb的吸收总量少,相应的体内活性Pb含量少,Pb对自身的毒害也相对较轻,隆平206地上部生物量、叶绿素含量等指标反映出较强的耐性.这种对Pb低吸收的原因,可能与隆平206根系分泌物有关,植物根系可以分泌分泌多种氨基酸、有机酸等有机物,这些分泌物与重金属结合在一定范围内降低了重金属的生物有效性,减少了对植物的毒害^[25~27].同时,Pb胁迫会影响植物根水势,导致根系失水,植物通过提高可溶性糖的合成量来增强细胞的保水能力,从而减少因根系细胞失水对根系造成损害.古红梅等^[28]研究证明随Pb胁迫浓度的增加,玉米体内的脯氨酸、可溶性蛋白含量呈现逐渐增加的趋势,是作物对逆境条件的适应和抵抗机制.林琦等^[29]研究表明Pb胁迫下,植物根际分泌物使得介质的pH轻微上升,有利于Pb离子呈羟基Pb化合物而沉淀,使得农作物免于吸收过量的Pb而中毒.隆平206可以有效地将地上部Pb浓度限制在较低水平,这可能是其耐Pb的主要原因.

联创5号在低浓度和高浓度Pb胁迫下其根、茎叶中乙醇提取态含量和水提取态含量合计值均比其它品种高,联创5号体内无机形态和有机可溶态Pb含量高,可能是造成其生长较为明显抑制的原因.试验结果显示,受Pb胁迫时联创5号地上部生物量、叶绿素含量、根活力下降较其它品种明显,根冠比增加趋势也较其它品种明显,由此说明联创

5 号无法将体内的大部分 Pb 转换成活性较低的 Pb, 因此导致其受 Pb 毒害较重, 这可能是联创 5 号对 Pb 耐性较差的原因之一。

4 结论

(1) 不同玉米品种对铅耐受性不同。郑单 958 和隆平 206 耐性最强, 而联创 5 号耐性最弱。

(2) 在 Pb 胁迫条件下, 隆平 206 可以有效地将地上部铅浓度限制在较低水平, 这可能是其耐铅的主要原因。

(3) 郑单 958 可最大程度将地上部乙醇提态和水提取态这两种毒性较高的铅含量降低。说明通过形态转化降低毒性是郑单 958 适应铅的重要方式。

(4) 漯玉 336、圣瑞 568 及联创 5 号对铅的耐性较差, 尤其是联创 5 号。这是因为它们无法通过减少对铅的吸收来降低铅的毒害, 且体内可溶态铅转换成活性低形态铅的能力较弱。

参考文献:

- [1] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage [J]. Field Crops Research, 2002, **77**(2-3): 93-98.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [3] Aelion C M, Davis H T, McDermott S, et al. Soil metal concentrations and toxicity: associations with distances to industrial facilities and implications for human health [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(7): 2216-2223.
- [4] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(7): 1406-1412.
- [5] 周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 [J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3675-3678.
- [6] 陈晓晨, 牛佳, 崔岩山. 城市表层土壤中铅的生物可给性及其对人体的健康风险评价: 以首钢厂附近小区域为例 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 3028-3035.
- [7] Zeng L S, Liao M, Chen C L, et al. Effects of lead contamination on soil enzymatic activities, microbial biomass, and rice physiological indices in soil-lead-rice (*Oryza sativa* L.) system [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **67**(1): 67-74.
- [8] Yang Z X, Liu S Q, Zhang D W, et al. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(6): 1135-1141.
- [9] Qiao X Q, Shi G X, Jia R, et al. Physiological and biochemical responses induced by lead stress in *Spirodela polyrhiza* [J]. Plant Growth Regulation, 2012, **67**(3): 217-225.
- [10] 明华, 曹莹, 胡春胜, 等. 铅胁迫对玉米光合特性及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2008, **16**(1): 74-78.
- [11] 雷冬梅, 段昌群, 何锋, 等. 不同蚕豆品种对铅污染的光合生理响应特征 [J]. 应用生态学报, 2006, **17**(6): 1095-1098.
- [12] 李勇, 黄占斌, 王文萍, 等. 重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2241-2245.
- [13] 李月芳, 刘领, 陈欣, 等. 模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间分配规律 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(12): 2260-2267.
- [14] 代全林. 玉米 (*Zea mays*) 对 Cd、Pb 胁迫响应的品种间差异及机理研究 [D]. 广州: 中山大学, 2005.
- [15] 杨晓英, 杨劲松, 黄铮, 等. 螯合剂对铅污染土壤上玉米幼苗生长及铅积累特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 482-486.
- [16] 周小勇, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等. 镉和铅对长柔毛委陵菜体内锌的亚细胞分布和化学形态的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 2028-2036.
- [17] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes [J]. Chemosphere, 2005, **60**(10): 1437-1446.
- [18] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨 [J]. 应用生态学报, 1995, **6**(1): 87-91.
- [19] 江行玉, 王长海, 赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究 [J]. 生态学报, 2003, **23**(5): 856-862.
- [20] 张利红, 李雪梅, 陈强, 等. 铅对不同品种玉米幼苗抗氧化酶活性及根系活力的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2006, **28**(2): 119-122.
- [21] 徐劼, 于明革, 陈英旭, 等. 铅在茶树体内的分布及化学形态特征 [J]. 应用生态学报, 2011, **22**(4): 891-896.
- [22] 侯晓龙, 陈加松, 刘爱琴, 等. Pb 胁迫对金丝草体内 Pb 化学形态及细胞分布的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(3): 271-276.
- [23] 江行玉, 赵可夫. 铅污染下芦苇体内铅的分布和铅胁迫相关蛋白 [J]. 植物生理与分子生物学报, 2002, **28**(3): 169-174.
- [24] 陆仲烟, 刘仲齐, 宋正国, 等. 大麦中镉的亚细胞分布和化学形态及 PCs 合成的基因型差异 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2125-2131.
- [25] 魏树和, 周启星, 张凯松, 等. 根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 143-147.
- [26] 徐卫红, 王宏信, 刘怀, 等. Zn、Cd 单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn、Cd 形态的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2089-2095.
- [27] Lin Q, Chen Y X, He Y F, et al. Root-induced changes of lead availability in the rhizosphere of *Oryza sativa* L. [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, **104**(3): 605-613.
- [28] 古红梅, 胡述龙, 王红星, 等. 重金属铅对玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 广东农业科学, 2011, **38**(1): 36-38.
- [29] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 小麦根际铅、镉的生态效应 [J]. 生态学报, 2000, **20**(4): 634-638.

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