

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响

张义贤¹, 付亚萍¹, 肖志华¹, 张喜文², 李萍²

(1. 山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2. 山西省农业科学院谷子研究所, 长治 046011)

摘要: 采用室内盆栽土培法, 以4种基因型谷子(D2-8、安06、黄米、朝谷)为供试材料, 研究了不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对谷子幼苗体内可溶性糖、脯氨酸、丙二醛(MDA)含量和基因组DNA多态性的影响。结果表明, 经50~400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cu^{2+} 处理30 d后, 4种谷子幼苗体内可溶性糖含量与对照相比呈现先上升后下降的趋势, 在50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值。当浓度为200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上时, 4种谷子的可溶性糖含量的平均降幅为对照的32.44%~56.5%。脯氨酸则表现为低含量($\leq 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的促进和高含量($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的抑制效应, MDA含量均有增加且与对照差异显著($P < 0.05$)。 Cu^{2+} 胁迫下不同基因型谷子幼苗基因组DNA的RAPD图谱发生明显变化, 表现为单条或多条RAPD谱带的增加和缺失或者荧光强度的改变, 细胞中基因组模板DNA的稳定性下降, DNA多态性变化与 Cu^{2+} 浓度之间存在剂量-效应关系。不同基因型谷子对 Cu^{2+} 胁迫的生理和遗传损伤响应存在差异。利用RAPD技术获得的DNA多态性变化可作为检测 Cu^{2+} 遗传毒性效应的生物标记物。

关键词: 谷子; Cu胁迫; 生理特性; RAPD; DNA多态性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4090-06

Effects of Cu^{2+} Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes

ZHANG Yi-xian¹, FU Ya-ping¹, XIAO Zhi-hua¹, ZHANG Xi-wen², LI Ping²

(1. College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Millet Research Institute of Shanxi Academy of Agricultural Science, Changzhi 046011, China)

Abstract: Cu^{2+} is an essential element for plant growth, and is one of the major elements in the environment. In order to investigate the physiological characteristics and geno-toxicity effects of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv) under different Cu^{2+} stress, four genotypes of foxtail millet (Zhaogu, Huangmi, An06, D2-8) from Shanxi, China were cultivated for 30 days in a pot filled with soil of with different mass concentrations of Cu^{2+} (0, 50, 100, 200, 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Effects of Cu^{2+} stress on DNA damage of genome in foxtail millet were studied using random amplified polymorphic DNA (RAPD), and the contents of soluble sugar, proline and MDA were tested. The result showed that the content of soluble sugar had a trend of initial increased followed by decline in all four foxtail millet seedlings in response to the rising Cu^{2+} concentration, and the maximum value was 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. At Cu^{2+} concentrations of 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ or more, the soluble sugar content in the four kinds of millet showed an average reduction of 32.44% to 56.5% compared to that of the control group. The result showed that proline synthesis was enhanced at low concentrations (less than 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), but inhibited at high concentrations (more than 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and the contents of MDA in the four genotypes of foxtail millet were significantly increased compared with the control group ($P < 0.05$). The changes occurring in random amplified polymorphic DNA profiles of the four genotypes of foxtail millet following Cu^{2+} treatment included loss of normal bands, appearance of new bands and variation in band intensity compared to the plantlet without treatment, showing that Cu^{2+} significantly affected the stability of the genomic DNA in the cells of millet seedlings. Additionally, the effect of DNA polymorphism changes was dose-dependent with the Cu^{2+} concentration. The different genotypes of millet showed different response in the physiological and genetic damage under Cu^{2+} stress. The change of DNA polymorphism using RAPD technique could be used as the biomarkers to find genotoxic effects of Cu^{2+} .

Key words: foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv); Cu stress; physiological characteristics; RAPD; DNA polymorphism

Cu 是植物生长发育所必需的微量营养元素, 是多种调节蛋白和氧化还原酶的组成成分, 直接参与光合作用和呼吸作用中的电子传递, 对植物的正常生理代谢有着重要的影响^[1]。近年来, 由于铜矿的开采, 冶炼厂三废的排放, 含 Cu 化学物质和农药的大量使用等, Cu 已成为农田土壤中一种重要的环境污染物质, 植物受 Cu 毒害的报道逐渐增多^[2,3]。现有

研究表明, 过量的 Cu 有很强的植物毒性, 能够阻碍植物的生长发育和光合作用, 诱导活性氧的产生, 造成生物膜透性增大, 酶活性降低, 诱发染色体畸变,

收稿日期: 2013-01-24; 修订日期: 2013-04-27

基金项目: 国家农业产业技术体系专项基金项目(nycyt-13); 山西省自然科学基金项目(2006011074)

作者简介: 张义贤(1955~), 男, 教授, 主要研究方向为污染生态学和遗传毒理学, E-mail: zhangyx@sxu.edu.cn

并对蛋白质和 DNA 等生物大分子造成损伤,严重时导致植物细胞凋亡^[4~6]. 因此,研究 Cu 污染对植物的遗传损伤效应及机制具有重要的理论与现实意义.

20 世纪 90 年代以来,以 PCR 技术为基础发展的 RAPD 分子标记技术因其快捷、灵敏、特异性强等特点,被广泛应用于环境污染物(辐射、盐害、农药、重金属等)对生物体基因组 DNA 损伤的检测与突变效应研究^[7,8]. 迄今,许多学者利用 RAPD 技术研究了重金属 Cd、Cr 等对大麦^[9]、蚕豆^[10]、拟南芥^[11]基因组 DNA 的损伤效应,而利用 RAPD 技术检测 Cu 胁迫对谷子基因组 DNA 多态性影响的研究则鲜见报道. 本研究采用盆栽土培法,以山西省栽培的 4 种基因型谷子为试验材料,采用 RAPD 分子标记技术,分析了 Cu 胁迫对谷子幼苗基因组 DNA 的损伤效应,并比较分析不同浓度 Cu 处理后谷子幼苗体内可溶性糖、脯氨酸和 MDA 含量的变化,旨在为探讨 Cu 胁迫对作物的毒性机制以及为环境监测中 Cu 污染预警与评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试谷子品种为 D2-8、安 06、黄米、朝谷,由山西省农业科学院谷子研究所提供. 试验所用土壤为褐土,取自山西省农业科学院试验田表层土(0 ~ 20 cm 厚). 土壤 pH 值为 7.2,有机质含量为 8.3 g·kg⁻¹,总铜含量 3.35 mg·kg⁻¹. 试验所用外源铜为 CuCl₂·2H₂O (分析纯).

1.2 试验设计

Cu²⁺ 染毒浓度参照我国农田土壤环境质量标准^[12] 临界指标范围,设置 50、100、200、400 mg·kg⁻¹ 这 4 个处理组,对照组不添加重金属. 土壤风干后过 2 mm 筛,装入 20 cm × 22 cm 陶瓷盆中,每

盆土重 6 kg. 将配置的 Cu 溶液分别加入各盆,使供试土壤中的全铜含量达到上述浓度,充分混匀后平衡 35 d 备用. 谷子种子经 5% NaClO 消毒 30 min 后洗净,置于 26℃ 培养箱中避光发芽. 每盆种植发芽一致的种子 20 粒,在室内条件下培养 30 d,昼/夜温度为 27℃/20℃,湿度为 35% ~ 50%,每天定时补充水分,每一处理设置 3 个重复.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 谷子幼苗可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量的测定

可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[13],单位(以鲜重计):mg·g⁻¹;脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法^[13],单位(以鲜重计):μg·g⁻¹;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸加热显色法^[13],单位(以鲜重计):μmol·g⁻¹.

1.3.2 谷子幼苗 DNA 的提取和 RAPD 分析

采用 CTAB 法^[14] 提取幼苗基因组 DNA, DNA 粗提取液用 RNaseA 37℃ 消化 60 min,去除 RNA 污染,所得 DNA 浓度和纯度用蛋白-核酸含量测定仪(Eppendorf Biophotometer plus)检测.

RAPD 分析所用的 8 条 10 bp 随机引物(表 1)及 RNaseA、*Taq* DNA polymerase 和 dNTP 均购自大连宝生物工程有限公司. 每个引物制备反应混合物,以去离子水代替模板作为负对照,25 μL PCR 反应混合液中各成分分别为:2 μL 20 μmol·L⁻¹ 随机引物,2.5 μL 200 μmol·L⁻¹ dNTPs,2.5 μL 10 × 缓冲液,3 U *Taq* DNA polymerases,100 ng 基因组总 DNA. PCR 扩增程序为:94℃ 预变性 5 min,94℃ 变性 1 min,38℃ 退火 1 min,72℃ 延伸 1min,35 个循环,最后在 72℃ 保温 10min. RAPD 扩增产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳分离,EB 染色后,经凝胶成像分析系统(TMW-20 Transilluminator,美国)进行观察保存.

表 1 试验中所用的 8 条引物序列(5'-3')
Table 1 Sequences of the 8 primers used in the experiment (5'-3')

引物编号	引物名称	引物序列	引物名称	引物编号	引物序列
1	S30	GTGATCGCAG	S1050	5	GTTACCGCGA
2	S45	TGAGCGGACA	S1426	6	CCAGAACGGA
3	S1042	TCGCACAGTC	S1471	7	AAGACCGGGA
4	S1048	GTGCTCCCTC	S1485	8	CCCGATCAGA

1.3.3 基因组模板稳定性(GTS)的计算

$$GTS(\%) = (1 - P/n)$$

式中,*P* 为处理组 RAPD 多态性谱带,即为处理组比对照组新出现的和消失的谱带,*n* 为对照组的总谱

带数.

1.4 统计分析方法

试验数据采用 Excel 软件进行处理,差异显著性分析采用 SPSS 16.0 软件进行 Duncan 检验.

2 结果与分析

2.1 Cu²⁺胁迫对不同基因型谷子幼苗可溶性糖含量的影响

由表2可知,4种谷子幼苗中可溶性糖含量与对照相比呈现先升后降的趋势,但不同品种间存在差异.在50~100 mg·kg⁻¹浓度范围内,安06和D2-8的可溶性糖含量分别比对照高出22.83%和13.59%,而黄米和朝谷仅在50 mg·kg⁻¹浓度下分别高出1.64%和17.8%.随着Cu²⁺处理浓度的增高,4种谷子中可溶性糖含量持续下降,在400 mg·kg⁻¹时达到最低值,且各处理组均与对照组差异显著($P < 0.05$).总体来看,4种谷子(D2-8、安06、黄米、朝谷)可溶性糖含量平均值分别比对照降低了56.5%、32.44%、36.76%、43.84%,表明朝谷和D2-8的可溶性糖含量对Cu²⁺胁迫最为敏感.

2.2 Cu²⁺胁迫对不同基因型谷子幼苗脯氨酸含量的影响

不同浓度Cu²⁺胁迫下,4种基因型谷子幼苗体内的脯氨酸含量变化规律见表2,随着Cu²⁺处理浓

度的升高均表现为先升高后下降的趋势,且各处理组均与对照组差异显著($P < 0.05$).在低浓度(50 mg·kg⁻¹)处理组中,4种谷子幼苗的脯氨酸含量与对照相比均有增加,增幅最大的为安06(25.88%)和朝谷(46.58%),表明低浓度的Cu²⁺对脯氨酸的生成具有刺激作用.当Cu²⁺浓度为100 mg·kg⁻¹以上时,4种谷子体内的脯氨酸含量均比对照组显著下降,降幅顺序为黄米(57.28%) > D2-8(46.33%) > 安06(36.06%) > 朝谷(35.16%).

2.3 Cu²⁺胁迫对不同基因型谷子幼苗MDA含量的影响

Cu²⁺处理30 d后,4个品种谷子幼苗MDA含量均随处理浓度升高而不断增加(表2),在400 mg·kg⁻¹时达到最大值,与对照相比差异均显著($P < 0.05$).在相同处理条件下,不同基因型谷子幼苗MDA对Cu²⁺胁迫存在明显差异,D2-8、安06、黄米、朝谷的平均MDA含量分别为对照组的1.94、2.67、1.94、2.11倍.表明安06和朝谷在受Cu²⁺胁迫时膜脂过氧化水平高,受氧化损害作用较强.

表2 Cu²⁺对不同基因型谷子幼苗可溶性糖、MDA和脯氨酸含量的影响¹⁾

Table 2 Effects of Cu²⁺ stress on the content of soluble suger, malondialdehyde and proline in different genotypes of foxtail millet seedlings

品种	浓度 /mg·kg ⁻¹	可溶性糖含量 /mg·g ⁻¹	MDA含量 /μmol·g ⁻¹	脯氨酸含量 /μg·g ⁻¹
D2-8	CK	51.74 ± 3.41 ^b	5.62 ± 0.11 ^a	2.41 ± 0.02 ^d
	50	69.40 ± 2.16 ^{dD}	6.63 ± 0.98 ^{bD}	2.89 ± 0.03 ^{eA}
	100	57.70 ± 3.33 ^{cA}	7.07 ± 1.02 ^{cA}	1.53 ± 0.06 ^{cB}
	200	22.49 ± 1.09 ^{aA}	14.11 ± 1.11 ^{dD}	1.34 ± 0.04 ^{bD}
	400	22.52 ± 1.11 ^{aC}	16.72 ± 0.97 ^{eB}	1.01 ± 0.02 ^{aA}
安06	CK	54.36 ± 4.78 ^c	4.07 ± 0.77 ^a	2.32 ± 0.03 ^d
	50	64.34 ± 3.99 ^{eD}	5.01 ± 0.89 ^{bA}	3.13 ± 0.09 ^{eB}
	100	59.16 ± 2.56 ^{dC}	10.22 ± 1.02 ^{cB}	1.99 ± 0.05 ^{cC}
	200	30.80 ± 4.03 ^{bC}	13.11 ± 2.11 ^{dB}	1.29 ± 0.06 ^{bC}
	400	20.22 ± 2.11 ^{aB}	15.17 ± 1.09 ^{eA}	1.17 ± 0.05 ^{aC}
黄米	CK	60.73 ± 3.07 ^d	4.77 ± 0.99 ^a	2.77 ± 0.06 ^d
	50	61.73 ± 2.89 ^{eC}	5.99 ± 1.02 ^{bB}	3.11 ± 0.01 ^{eB}
	100	45.78 ± 2.11 ^{cB}	12.13 ± 0.78 ^{dC}	1.27 ± 0.22 ^{eA}
	200	36.54 ± 1.97 ^{bD}	11.21 ± 0.11 ^{cA}	1.17 ± 0.11 ^{bB}
	400	32.89 ± 1.67 ^{aD}	17.14 ± 2.07 ^{eC}	1.11 ± 0.01 ^{aB}
朝谷	CK	50.34 ± 2.35 ^d	4.12 ± 0.77 ^a	2.19 ± 0.31 ^c
	50	59.30 ± 2.11 ^{eB}	5.78 ± 0.96 ^{bC}	3.21 ± 0.03 ^{dC}
	100	39.21 ± 2.12 ^{cA}	10.27 ± 1.02 ^{cB}	1.99 ± 0.16 ^{bC}
	200	28.06 ± 3.09 ^{bB}	13.42 ± 1.04 ^{dC}	1.15 ± 0.09 ^{aA}
	400	17.55 ± 2.13 ^{aA}	19.23 ± 1.12 ^{eD}	1.12 ± 0.01 ^{aB}

1) 同列相同基因型不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); 相同浓度不同基因型不同大写字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.4 Cu²⁺胁迫下不同基因型谷子幼苗RAPD图谱的变化

筛选的8条10 bp寡核苷酸序列引物中,有3

条能扩增出特异、稳定的PCR产物.经3条引物扩增后,D2-8、安06、黄米、朝谷这4种谷子幼苗对照基因组DNA的RAPD图谱中共扩增出27条、33

条、32 条和 34 条谱带,其分子量在 220 ~ 2 340 bp 之间,并且条带清晰,表明在此 PCR 条件下的扩增较为理想.

由图 1、表 3 可知,与对照相比,50 ~ 400 mg·kg⁻¹ Cu²⁺ 处理后,谷子幼苗基因组 DNA 的 RAPD 图谱发生明显变化,表现为单条或多条 RAPD 谱带的缺失、增加或荧光强度的增强或减弱. 随着 Cu²⁺ 处理浓度的增大,产生的多态性谱带数(*P* 值)和变化的谱带数(*C* 值)均逐渐增多,表现为浓度-剂量效应. Cu²⁺ 处理组中多态性谱带变化较少,变化的谱带数主要是原有谱带荧光强度的改变. 4 种基因型谷子(D2-8、安 06、黄米、朝谷)经 3 条引物扩增后产生变化的谱带分别为 19 条、22 条、28 条和

41 条,表明 Cu²⁺ 胁迫对黄米和朝谷的基因组 DNA 的损伤效应大于 D2-8、安 06.

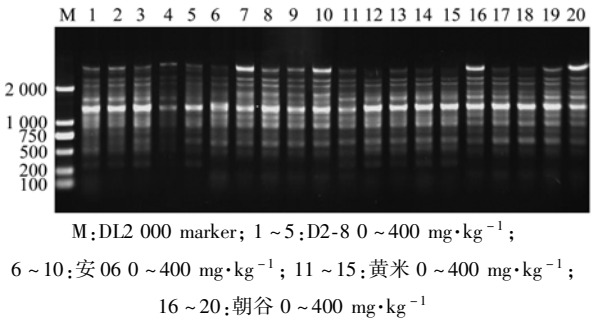


图 1 不同浓度 Cu²⁺ 胁迫下谷子幼苗基因组 DNA 的 RAPD 图谱(引物 1 为例)

Fig. 1 RAPD profiles of genome DNA from foxtail millet seedlings under Cu²⁺ stress

表 3 Cu²⁺ 胁迫下谷子幼苗基因组 RAPD 图谱的变化¹⁾

Table 3 RAPD profile changes in foxtail millet seedlings under Cu ²⁺ stress																					
品种 浓度	D2-8					安 06					黄米					朝谷					
	CK	50	100	200	400	CK	50	100	200	400	CK	50	100	200	400	CK	50	100	200	400	
引物 1	+		0	0	0	0		0	0	1	0		0	0	1	0		0	0	0	1
	—		0	0	1	2		0	1	0	2		0	1	0	2		0	1	2	4
	I	11	1	1	0	1	10	0	0	2	0	11	2	2	1	0	11	0	1	1	0
	D		0	0	1	0		1	1	0	5		0	0	2	4		3	4	4	3
	P		0	0	1	2		0	1	1	2		1	1	1	2		0	1	2	5
	C		1	1	2	3		1	2	3	7		3	3	4	6		3	6	7	8
	T			7					13					16					24		
引物 2	+		0	0	1	2		0	1	0	0		1	0	0	0		0	0	0	0
	—		0	1	0	1		0	0	2	1		0	0	2	3		0	0	2	3
	I	10	0	0	0	0	11	1	0	0	0	10	1	1	0	2	11	0	0	1	2
	D		1	2	4	2		0	0	0	3		1	2	5	0		1	3	3	2
	P		0	1	1	3		0	1	2	1		1	0	2	3		0	0	2	3
	C		2	3	5	5		1	1	2	4		3	3	7	5		1	3	6	7
	T			15					8					18					17		
引物 5	+		0	0	0	0		0	0	0	2		0	0	0	0		0	0	0	1
	—		0	0	1	3		0	0	1	3		1	2	4	4		0	1	2	3
	I	6	0	2	1	0	12	1	3	1	0	11	0	0	0	0	12	1	0	0	3
	D		2	2	2	3		1	0	2	3		0	0	3	3		0	2	4	0
	P		0	0	2	3		0	0	1	3		1	2	4	4		0	1	2	4
	C		2	4	4	6		2	3	4	8		1	2	7	7		1	3	6	7
	T			16					17					17					17		

1) + 新增的谱带; - 减少的谱带; I 荧光强度增加的谱带; D 荧光强度减弱的谱带; P 多态性谱带; C 变化的谱带; T 各品种在 50 ~ 400 mg·kg⁻¹ 共产生变化的谱带

基因组模板的稳定性(GTS 值)可以定性地衡量 RAPD 图谱的变化趋势. 由表 3 和图 2 可知,随着 Cu²⁺ 处理浓度的增加,基因组模板稳定性逐渐降低,与 Cu²⁺ 剂量呈负相关. 低含量(50 ~ 100 mg·kg⁻¹) Cu²⁺ 处理组中,4 种谷子幼苗基因组模板稳定性(GTS 值)与对照差别不大. 高含量(200 ~ 400 mg·kg⁻¹) 处理组中基因组模板稳定性明显下降. 不同基因型谷子幼苗基因组模板稳定性的降幅

存在差异,如 400 mg·kg⁻¹ 处理后, D2-8、安 06、黄米和朝谷基因组模版稳定性分别为对照的 85. 19%、85. 29%、84. 38% 和 84. 85%,表明 Cu²⁺ 胁迫对黄米和朝谷基因组 DNA 损伤效应强于 D2-8 和安 06.

3 讨论

作物体内的可溶性糖含量代表碳水化合物的运

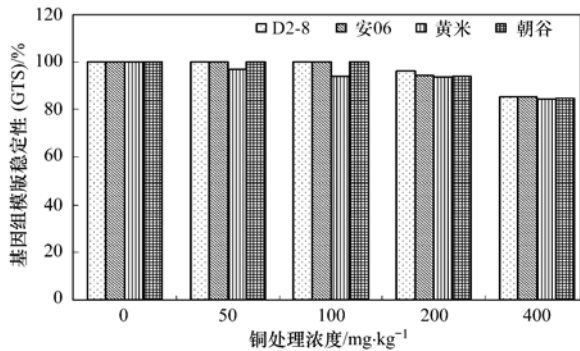


图2 Cu^{2+} 胁迫下谷子幼苗基因组模版稳定性

Fig. 2 Stability of genome template of foxtail millet seedlings under Cu^{2+} stress

转情况,可作为 Cu^{2+} 毒害效应的生理指标之一^[15]. 本试验结果显示,与对照相比,4种谷子幼苗可溶性糖含量均随着 Cu^{2+} 浓度的增大呈现先上升后下降的趋势,表现为低浓度的促进和高浓度的抑制作用. 这与杨红飞等^[16]在铜污染水稻土中油菜的研究结果相一致. Cu^{2+} 作为植物体正常生理代谢的必需微量营养元素,低浓度 Cu^{2+} 可以激发植物体的防御机制,使不溶性糖降解为可溶性糖或者是激活葡萄糖酶和蔗糖酶活性,通过增加可溶性糖含量来调节渗透胁迫,保护细胞免受伤害. 高浓度 Cu^{2+} 导致可溶性糖含量大幅下降,可能是由于 Cu^{2+} 积累会干扰营养物质的吸收和分配,破坏了光合作用系统,造成了体内不溶性糖和蛋白质的分解以及运输受阻有关^[15].

脯氨酸是细胞内重要的渗透调节物质,具有调节细胞渗透平衡、增强细胞结构稳定性和阻止氧自由基产生的作用^[17]. 本试验中,4种谷子幼苗脯氨酸含量随着 Cu^{2+} 处理浓度的升高均表现为先升高后下降的趋势,这与丁佳红等^[18]、王文星等^[19]对小飞蓬和紫花苜蓿的研究结果相似. 在 Cu^{2+} 浓度较低 ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时谷子体内脯氨酸含量的增加是对逆境胁迫的一种适应性反应. 而当 Cu^{2+} 浓度进一步增大时脯氨酸含量急剧下降,低于对照,表明细胞的结构和功能受到伤害,从而抑制了脯氨酸的合成^[19].

MDA 反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[20]. 本研究表明,不同浓度 Cu^{2+} 处理后,4种基因型谷子幼苗体内的 MDA 含量比对照均有增加,表明膜脂过氧化程度加剧,细胞膜透性逐渐增大. 细胞膜透性增大导致细胞内含物流失严重,对植物产生的毒害作用亦加剧. 努扎艾提·艾比布等^[21]研究表明,随着 Cu^{2+} 浓度的增加,香根草体

内的 MDA 积累,造成膜结构受损伤程度加深. 蔡琪敏等^[22]研究发现, Cu^{2+} 胁迫导致两种苔藓体内的 MDA 含量增加. 本研究结果与之相同.

随机扩增 DNA 多态 (RAPD) 可以在不确定研究对象基因组序列的情况下,以 10 bp 寡核苷酸序列为引物,以研究对象的基因组 DNA 为模板进行 PCR,对整个基因组 DNA 进行多态性检测,反映出基因组相关区域的 DNA 特性. 苟本富^[23]、齐雪梅等^[24]的研究指出 Cu 可造成蚕豆、大麦基因组 DNA 的多态性增加,改变量与 Cu 浓度有剂量-效应关系. Mengoni 等^[25]的研究发现, Cu 使奇异花瓶草的 RAPD 谱带增加. 本试验结果表明,不同浓度 Cu^{2+} 胁迫后,经不同引物扩增得到的谷子幼苗 RAPD 谱带差异明显,表现为原有谱带的增加和减少或荧光强度的变弱和增强,表明 Cu^{2+} 胁迫对谷子幼苗基因组 DNA 造成了损伤,对基因组模版的稳定性也产生较大的影响. 谷子幼苗基因组 DNA 谱带的变化可能是由于与引物互补结合的模板 DNA 的位点序列发生了改变,导致互补位点增加或减少,从而使扩增片段数增加或减少^[8]; 或者是由于 Cu^{2+} 胁迫下使植物体细胞内单链或双链 DNA 的断裂、插入或缺失片段、DNA 加合物、DNA 蛋白质交联甲基化等多种形式的 DNA 损伤,引起 DNA 构象的改变,形成了新的 RAPD 图谱; 也可能是由于在多拷贝引物结合位点上,某些位置的碱基发生了突变,导致结合量增加或减少,扩增的 DNA 量也随之变化,使 RAPD 谱带强度变化^[26]. 因此, RAPD 标记可以直接、有效地反映植物基因组 DNA 损伤效应,可作为 Cu^{2+} 污染指示的生物标记物.

4 结论

(1) 不同浓度 Cu^{2+} 处理后,4种基因型谷子幼苗体内可溶性糖和脯氨酸的含量随处理浓度升高均表现为低浓度的促进和高浓度的抑制效应. 而 MDA 含量则随处理浓度升高逐渐增加,表明 Cu^{2+} 处理下,谷子幼苗体内产生大量活性氧,使膜质过氧化水平升高. 证明谷子幼苗对 Cu^{2+} 胁迫的生理响应较为敏感.

(2) 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下,4种谷子幼苗基因组 DNA 的 RAPD 图谱发生明显变化,主要表现为 RAPD 谱带的增加和减少或者荧光强度的改变,表明基因组模版 DNA 的稳定性下降. 尤其是高含量 ($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上) 对 DNA 的损伤效应更为显著.

(3) 不同基因型谷子对 Cu^{2+} 胁迫的生理和遗

传损伤响应存在差异. 4 种基因型谷子中, 朝谷和安 06 对 Cu^{2+} 胁迫的生理响应较为敏感, 黄米和朝谷对 Cu^{2+} 胁迫的遗传损伤响应强于朝谷和 D2-8.

参考文献:

- [1] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2001. 27-42.
- [2] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 344-350.
- [3] Xu J K, Yang L X, Wang Z Q, *et al.* Toxicity of copper on rice growth and accumulation of copper in rice grain in copper contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(2): 602-607.
- [4] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(2): 199-205.
- [5] Nagalakshmi N, Prasad M N V. Copper-induced oxidative stress in *Scenedesmus bijugatus*: protective role of free radical scavengers[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, **61**(5): 623-628.
- [6] 齐雪梅, 李培军, 刘宛, 等. Cu 对大麦和玉米的毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(2): 286-290.
- [7] Atienzer F A, Venier P, Jha A N, *et al.* Evaluation of the random amplified polymorphic DNA (RAPD) assay for the detection of DNA damage and mutations[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2002, **521**(1-2): 151-163.
- [8] 齐雪梅, 李培军, 刘宛, 等. DNA 指纹技术在污染土壤生态毒理诊断中的应用[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(11): 1351-1356.
- [9] Liu W, Li P J, Qi X M, *et al.* DNA changes in barley (*Hordeum vulgare*) seedlings induced by cadmium pollution using RAPD analysis[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(2): 158-167.
- [10] 解莉婧, 刘宛, 李培军, 等. 镉胁迫对蚕豆幼苗基因组 DNA 多态性的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(1): 35-39.
- [11] 詹振楠, 刘宛, 孙梨宗, 等. 镉胁迫对拟南芥幼苗基因组 DNA 多态性的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(6): 1234-1239.
- [12] GB 15618-1995, 中华人民共和国国家标准, 土壤环境质量标准[S]. 1995.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 184-217.
- [14] 魏群. 分子生物学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 110-115.
- [15] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 857-860.
- [16] 杨红飞, 王友保, 李建龙. 铜、锌污染对水稻土中油菜 (*Brassica chinensis* L.) 生长的影响及累积效应研究[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(10): 1470-1477.
- [17] 李靖, 刘苑秋, 周欢胜, 等. 模拟铜矿区土壤酸化条件下构树叶片的生理生化变化[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2010, **39**(2): 202-205.
- [18] 丁佳红, 刘登义, 李征, 等. 土壤不同浓度铜对小飞蓬毒害及耐受性研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(4): 668-672.
- [19] 王文星, 曹成有, 崔振波, 等. 紫花苜蓿对土壤中铜的富集效应及其生理响应[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, **27**(10): 1161-1164.
- [20] Kanazawa S, Sano S, Koshiba T, *et al.* Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, **109**(2): 211-216.
- [21] 努扎艾提·艾比布, 刘云国, 宋华晓, 等. 重金属 Zn Cu 对香根草生理生化指标的影响及其积累特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(1): 54-59.
- [22] 蔡琪敏, 陈洁, 张志祥, 等. 铜胁迫对两种苔藓植物生理生化的影响[J]. *浙江林业科技*, 2008, **28**(6): 24-27.
- [23] 苟本富. 铜胁迫对蚕豆幼苗基因组 DNA 损伤效应的研究[J]. *北方园艺*, 2011, (4): 158-160.
- [24] 齐雪梅, 李培军, 刘宛. Cu 胁迫对大麦幼苗生长及 DNA 损伤效应的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(5): 1925-1928.
- [25] Mengoni A, Gonnelli C, Galardi F, *et al.* Genetic diversity and heavy metal tolerance in populations of *Silene paradoxa* L. (Caryophyllaceae): a random amplified polymorphic DNA analysis[J]. *Molecular Ecology*, 2009, **9**(9): 1319-1324.
- [26] Jones C, Kortenkamp L. RAPD library fingerprinting of bacterial and human DNA: applications in mutation detection[J]. *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*, 2000, **20**(2): 49-63.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行