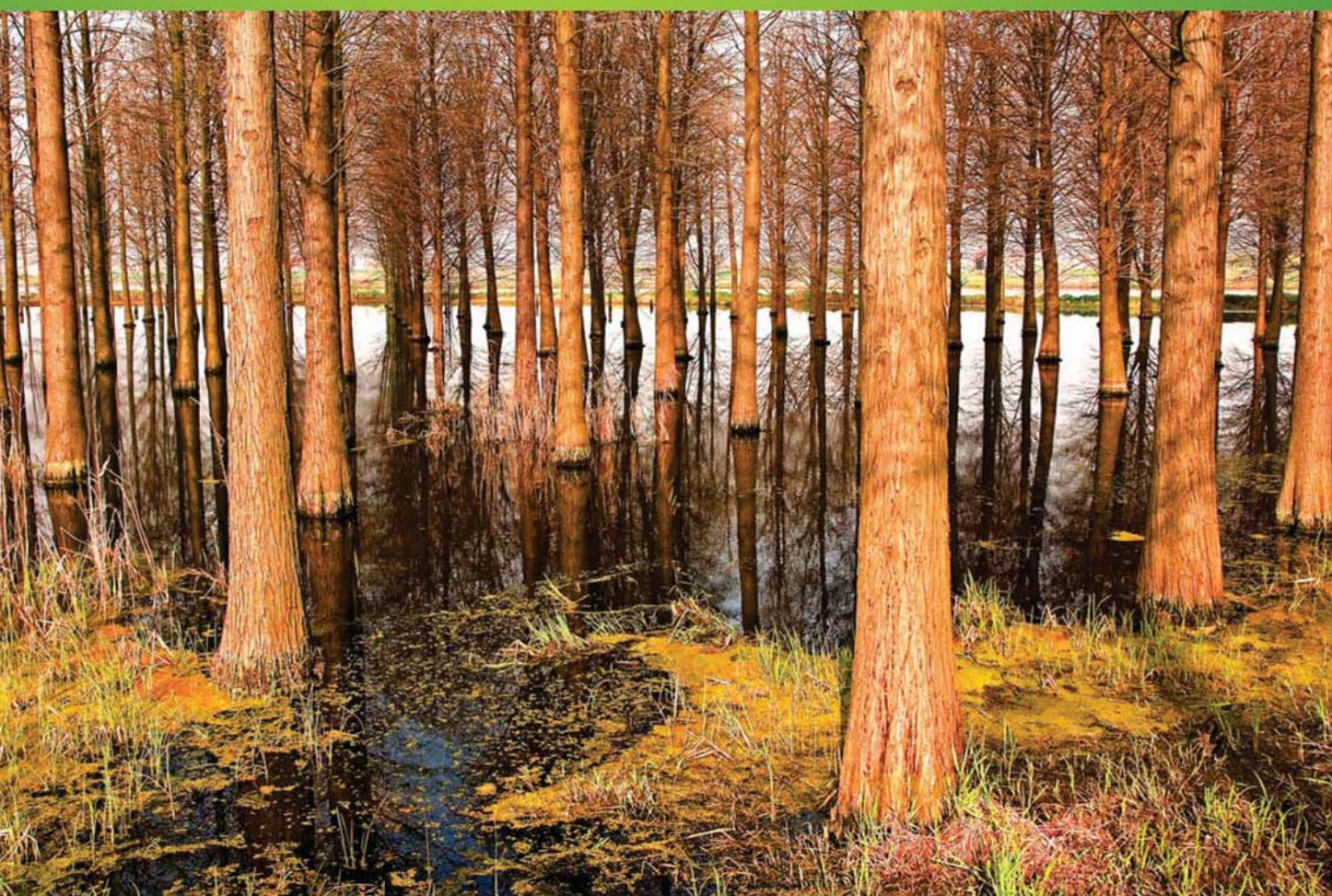


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第3期 Vol.32 No.3 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 3 期

2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

夏季可可西里雌性藏原羚行为时间分配及活动节律	连新明, 李晓晓, 颜培实, 等 (663)
热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 张禹, 张衡, 等 (671)
洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应	卢碧林, 严平川, 田小海, 等 (680)
广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程	刘亮, 范航清, 李春千 (690)
高浓度 CO ₂ 引起的海水酸化对小珊瑚藻光合作用和钙化作用的影响	徐智广, 李美真, 霍传林, 等 (699)
盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响	邹维娜, 袁琳, 张利权, 等 (706)
基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例	栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 等 (715)
城市化对本土植物多样性的影响——以廊坊市为例	彭羽, 刘雪华, 薛达元, 等 (723)
利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种	刘芳, 李迪强, 吴记贵 (730)
基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型	李海奎, 宁金魁 (740)
千岛湖社鼠种群遗传现状及与生境面积的关系	刘军, 鲍毅新, 张旭, 等 (758)
气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响	顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等 (767)
中国西北典型冰川区大气氮素沉降量的估算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等 (777)
植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响	童春富 (786)
黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征	邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等 (796)
云南中南部季风常绿阔叶林恢复生态系统萌生特征	苏建荣, 刘万德, 张志钧, 等 (805)
筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化	肖德荣, 袁华, 田昆, 等 (815)
三峡库区马尾松根系生物量的空间分布	程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等 (823)
兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异	王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等 (833)
内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力	何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞 (844)
不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系	葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等 (852)
不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响	彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等 (863)
不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程	刘目兴, 聂艳, 于婧 (871)
不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间	田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等 (879)
外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响	肖志华, 张义贤, 张喜文, 等 (889)
温度和盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼鳃 Na ⁺ -K ⁺ -ATPase 活力的联合效应	王海贞, 王辉, 强俊, 等 (898)
基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究	王晓学, 李叙勇, 吴秀芹 (907)
边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响	蔡妙珍, 王宁, 王志颖, 等 (915)
川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应	龚固堂, 黎燕琼, 朱志芳, 等 (923)
基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价	翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等 (931)
基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析	王翠平, 王豪伟, 李春明, 等 (942)
生态旅游资源非使用价值评估——以达赉湖自然保护区为例	王朋薇, 贾竞波 (955)
专论与综述	
基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建	袁菲, 张星耀, 梁军 (964)
硅对植物抗虫性的影响及其机制	韩永强, 魏春光, 侯茂林 (974)
研究简报	
光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例	占峰, 杨冬梅 (984)
Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响	陈小文, 祁鑫, 王海永, 等 (993)
汶川大地震灾后不同滑坡体上柏木体内非结构性碳水化合物特性	陈博, 李志华, 何茜, 等 (999)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-02



封面图说: 难得的湿地乔木——池杉池杉为落叶乔木, 高达 25 米, 主干挺直, 树冠尖塔。树干基部膨大, 常有屈膝状吐吸根, 池杉为速生树, 强阳性, 耐寒性较强, 耐干旱, 更极耐水淹, 多植于湖泊周围及河流两岸, 是能在在水里生长的极少数的大乔木之一, 故有湿地乔木之称。池杉原产美国弗吉尼亚沼泽地, 中国于本世纪初引种到江苏等地, 之后大量引种南方各省, 尤其是长江南北水网地区作为重要造树和园林树种而大量栽种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108281256

肖志华, 张义贤, 张喜文, 李萍. 外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响. 生态学报, 2012, 32(3): 889-897.

Xiao Z H, Zhang Y X, Zhang X W, Li P. Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 889-897.

外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗 生理生态特性的影响

肖志华¹, 张义贤^{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: 采用盆栽土培法, 研究了 4 种基因型谷子幼苗对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫的生长响应、DNA 损伤及吸收积累、迁移特性。结果表明, D2-8、安 06、黄米和朝谷幼苗对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的平均耐性指数分别为 0.87、0.81、0.78、0.71 和 0.96、0.97、0.79、0.74。在 400 mg/kg Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度下, 4 种谷子幼苗叶绿素 a、b 总量分别为对照的 33.3%、52.6%、37.5%、49.4% 和 113.5%、72.3%、51.9%、75.6%, 而叶绿素 a/b 值均高于对照。 Pb^{2+} 胁迫下 4 种谷子幼苗中可溶性蛋白质和 DNA 含量随浓度升高逐渐下降, Cu^{2+} 处理组则表现为低浓度 (≤ 100 mg/kg) 的促进和高浓度 (≥ 200 mg/kg) 的抑制效应。4 种谷子幼苗的 DNA 增色效应值在 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下均表现为先上升后下降的趋势, 其中 Pb^{2+} 对朝谷和 D2-8 的增色效应影响较大, 而 Cu^{2+} 对朝谷和安 06 的影响最为明显。D2-8 和朝谷对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸收富集能力高于安 06 和黄米, D2-8 和安 06 对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的转运能力大于朝谷和黄米。总体来看, Pb^{2+} 对谷子幼苗的生理生态影响和遗传毒害效应大于 Cu^{2+} , 4 种基因型谷子对 Pb^{2+} 胁迫的耐性顺序为安 06>D2-8>黄米>朝谷, 对 Cu^{2+} 的耐性顺序为 D2-8>安 06>朝谷>黄米。

关键词: 谷子; Pb、Cu 胁迫; 生长响应; 生理生态特性; 积累转运

Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes

XIAO Zhihua¹, ZHANG Yixian^{1,*}, ZHANG Xiwen², 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: The ions of Pb^{2+} , Cu^{2+} are two important environmental pollutants. Pb^{2+} is without biological functions but, once entering into the field, reduces the fertility, inhibits crops root growth, hinders physiological metabolism, damages the nucleolar structure and reduced the fidelity of DNA synthesis. Cu^{2+} is essential element; however, large Cu^{2+} accumulation in crops causes genotoxicity or even crop mortality. This study examined the growth, DNA damage, uptake and accumulation of Pb^{2+} and Cu^{2+} among four genotypes of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv) seedlings from Shanxi, China using a pot culturing. The foxtail millet seeds were cultured in incubators at 26°C for germination with no light, then planted in the pots spiked with four different concentration, namely 50, 100, 200, 400 (mg/kg of each kind of metal ions), respectively. The growth of roots and shoots, biomass, chlorophyll content, soluble protein content, DNA content, DNA hyperchromicity and the uptake and accumulation were studied after a growing period of 30 days.

The result showed that the average of Pb^{2+} tolerance indexes of D2-8, An 06, Huangmi, Zhaogu were 0.87, 0.81, 0.78 and 0.71, while those of Cu^{2+} were 0.96, 0.97, 0.79 and 0.74 respectively. In the photosynthetic pigment test, the

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

收稿日期: 2011-08-28; **修订日期:** 2011-12-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyx@sxu.edu.cn

total content of chlorophyll a and b of D2-8, An 06, Huangmi, Zhaogu exposed to 400 mg/kg Pb^{2+} were 33.3%, 52.6%, 37.5%, 49.4% as compared with the control group; while those were 113.5%, 72.3%, 51.9%, 75.6% as compared with control in Cu^{2+} (400 mg/kg) treatment. And the chlorophyll a/b values in foxtail millet of four genotypes were all higher than that of the control group. The content of DNA and the soluble protein decreased with the increasing of Pb^{2+} concentration, showing Cu^{2+} stimulated the DNA and soluble protein synthesis at low concentrations (less than 100 mg/kg), but inhibited at high concentrations (more than 200 mg/kg), respectively. DNA hyperchromicity indicates the disruption of the DNA primary structure, with the trend of initial increased followed by decline in all four foxtail millet seedlings in response to the rising Pb^{2+} and Cu^{2+} concentrations. In addition, the DNA hyperchromicity of Zhaogu and D2-8 were significantly affected by Pb^{2+} , so were Zhaogu and Huangmi affected by Cu^{2+} . The uptake and accumulation of Pb^{2+} or Cu^{2+} ranks (from high to low): D2-8, zhaogu, An 06, Huangmi. The transportation ability of D2-8 and An 06 from roots to stems and leaves was much better than that of Zhaogu and Huangmi. From the effects on the growth indexes and physiological indices, it was found that the ecophysiological- and geno-toxicities of Pb^{2+} on foxtail millet seedlings was higher than Cu^{2+} . The tolerance order of Pb^{2+} was An 06>D2-8>Huangmi>Zhaogu, and the tolerance of Cu^{2+} was D2-8>An 06>Zhaogu>Huangmi.

Key Words: foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv); Pb and Cu stress; growth response; eco-physiological characteristics; accumulation and transportation

植物重金属毒害效应及机理研究已成为当前污染生态学领域的研究热点。近年来,由于工业化、城市化规模的不断扩大和工业“三废”的大量排放,致使土壤-生态环境中重金属污染日趋严重,其中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 作为二种重要的重金属污染物,以其毒性强、危害大,在植物体内易积累、难降解的特性倍受人们的关注^[1]。已有的研究表明, Pb^{2+} 是植物生长的非必需元素,进入农田后不仅会降低土壤肥力,抑制作物的生长发育,引起各种生理代谢异常和遗传毒害效应,还可通过食物链的传递富集影响人体健康。 Cu^{2+} 虽然是作物生长所必需的微量营养元素,但在体内积累过量,仍会产生较高的植物毒性,严重时导致植物细胞死亡^[2-3]。

谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv) 属禾本科(Poaceae) 狗尾草属(*Setaria*),具有耐旱、耐瘠、抗逆性强、适应性广等特点,是我国北方重要的粮食作物之一^[4]。据报道,近年来我国部分谷子种植区由于重金属污染不断加重,致使谷子体内重金属含量严重超标,造成谷子产量和品质下降,并对人体健康产生潜在危害^[5]。目前,国内外有关重金属污染对谷子毒害效应的研究报道较少,仅有 Rout 等^[6] 和 Samantaray 等^[7] 分别研究了 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 对谷子愈伤组织生长及部分生理指标的影响,而有关 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对谷子幼苗的生理生态和遗传毒性的研究还未见报道。基于此,本文采用盆栽土培法,以山西省栽培的四种基因型谷子为试验材料,研究了外源 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下谷子幼苗的生长响应、DNA 损伤以及吸收、积累和转移特性,旨在探明不同基因型谷子对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫的适应性反应特性和生理生态毒性差异,揭示重金属在谷子体内吸收积累与转运规律,为污染地区谷子的栽培管理和重金属耐性品种筛选、鉴定及谷子品质改良提供实验依据。

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,由山西省农科院谷子研究所提供。供试土壤为褐土,取自山西省农科院试验田,土壤 pH 值 7.2,有机质含量 8.3 g/kg,总铅含量 11.62 mg/kg,总铜含量 3.35 mg/kg。试验所用外源铅为 PbCl_2 ,外源铜为 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,均为分析纯。

1.2 试验处理

重金属处理浓度参照我国农田土壤环境质量标准^[8] 中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 临界指标范围,各设置 4 个处理浓度组: 50、100、200、400 mg/kg(以纯 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 计),对照组不添加任何重金属。土壤风干后过 2 mm 筛,装入 20 cm×22 cm 的陶瓷盆中,每盆土重 4 kg,将配置的上述重金属溶液加入土壤,充分混匀后放置 24 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。每盆种植萌发的种子 20 粒,在室内条件下培养 30 d,昼/夜温度为 27/20℃,湿度为 30%—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

谷子幼苗整株取出,洗净、晾干后,用直尺测量幼苗的根长、苗长(以 10 株幼苗平均值计)(cm);将幼苗在 80 ℃ 烘干至恒重,用分析天平测定生物量(mg);根系耐性指数=各处理的根长(cm)/对照的根长(cm)^[9];吸收系数=植株根部和地上部的重金属含量(mg/kg)/土壤中添加的重金属含量(mg/kg)^[10];转运系数=植株地上部的重金属含量(mg/kg)/根部积累的重金属含量(mg/kg)^[10];重金属含量的测定采用原子吸收分光光度计(SHIMADZU AA-6300 型),分别称取烘干的根部和地上部样品各 0.2 g,经 HNO₃-HClO₄(4:1)消化,测定 Pb²⁺、Cu²⁺ 含量(mg/kg);叶绿素含量的测定采用浸提法(95% 乙醇:80% 丙酮=5:5)^[11](mg/g 鲜重);可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[12](mg/g 鲜重);CTAB 法^[13]提取谷子幼苗茎叶 DNA,紫外分光光度法测定 DNA 含量^[12](μg/g 鲜重);DNA 增色效应的测定与计算按文献^[13]方法。

1.4 数据处理

实验数据采用 Excel 软件处理,差异显著性分析采用 SPSS16.0 软件进行 Duncan 检验。

2 结果与分析

2.1 Pb²⁺、Cu²⁺ 胁迫对不同基因型谷子幼苗生长及生物量的影响

表 1 显示,Pb²⁺胁迫对谷子幼苗生长和生物量具有明显的抑制作用,随着 Pb²⁺浓度的增加,4 种基因型谷子幼苗的根长、苗长逐渐减小,生物量下降。其中朝谷和黄米所受影响最大,在 400 mg/kg 浓度时植株长度和生物量分别比对照降低 24.8%、38.1% 和 38.5%、37.8%。Cu²⁺处理组中,除黄米和朝谷的苗长随着浓度上

表 1 Pb²⁺、Cu²⁺ 对不同基因型谷子幼苗生长及生物量的影响

Table 1 Effects of the growth and biomass on different genotypes foxtail millet seedlings under Pb ²⁺ , Cu ²⁺ stress									
品种 Varieties	浓度 concentration/ (mg/kg)	Pb ²⁺				Cu ²⁺			
		根长 Root length /cm	苗长 Shoot length /cm	生物量 Biomass/ mg	根系耐 性指数 RTI	根长 Root length /cm	苗长 Shoot length /cm	生物量 Biomass/ mg	根系耐 性指数 RTI
D2-8	CK	5.38±0.12 e	10.65±0.20 e	178.51±4.76 e	1.00±0.00 d	5.34±0.17 c	10.65±0.20 e	178.51±4.76 b	1.00±0.00 c
	50	5.26±0.32 dD	9.40±0.16 cA	172.42±3.71 dA	0.99±0.02 dC	5.90±0.05 eD	11.23±0.22 eD	198.14±5.28 dA	1.10±0.02 eB
	100	4.65±0.27 bD	9.60±0.31 dA	171.21±5.78 cA	0.86±0.04 bC	5.70±0.31 dC	10.86±0.26 dC	201.32±9.68 eA	1.07±0.01 dC
	200	4.83±0.55 cD	8.80±0.14 bA	169.50±12.1 bA	0.90±0.03 cC	4.61±0.20 bC	9.51±0.31 bC	188.50±6.23 cA	0.86±0.03 bC
	400	3.88±0.91 aC	8.10±0.21 aA	132.53±9.19 aA	0.71±0.00 aC	4.30±0.29 aD	9.34±0.33 aB	146.33±1.13 aA	0.81±0.02 aC
安 06	CK	5.06±0.22 e	10.79±0.19 e	274.65±5.10 e	1.00±0.01 d	5.06±0.22 e	10.79±0.19 e	274.65±5.10 e	1.00±0.00 c
	50	4.91±0.45 dC	9.40±0.20 dB	248.90±8.19 dB	0.98±0.04 cC	4.63±0.23 cB	9.19±0.47 bB	280.21±6.70 dB	0.86±0.01 aA
	100	4.35±0.31 cC	9.10±0.23 cA	220.60±6.40 cB	0.87±0.03 bC	5.89±0.19 eC	11.06±0.66 eD	351.25±5.50 eD	1.18±0.03 dD
	200	4.22±0.23 bC	8.80±0.17 bA	208.41±3.21 bC	0.97±0.01 cD	4.53±0.46 bC	8.83±0.49 aB	239.63±4.30 bD	0.91±0.02 bD
	400	2.17±0.40 aB	8.40±0.30 aA	199.21±9.12 cA	0.43±0.01 aA	3.57±0.27 aC	9.42±0.37 cBC	216.47±7.20 aD	0.92±0.04 bD
黄米	CK	5.03±0.19 e	11.39±0.11 e	320.97±4.70 e	1.00±0.01 d	5.03±0.19 e	11.39±0.11 e	320.97±4.70 e	1.00±0.00 d
	50	4.16±0.21 dB	10.20±0.17 dA	312.85±8.76 dD	0.83±0.00 cA	5.48±0.60 eC	8.60±0.54 aA	331.54±5.40 eD	1.08±0.05 eB
	100	3.62±0.36 cB	9.80±0.25 cA	250.93±3.20 cC	0.74±0.03 bA	4.56±0.49 cB	9.73±0.31 cB	285.13±9.50 cC	0.91±0.01 cA
	200	3.51±0.21 bB	8.70±0.23 bA	239.60±4.54 bD	0.72±0.02 bB	3.65±0.29 bB	10.97±0.19 dD	230.50±7.90 bC	0.71±0.02 bB
	400	2.07±0.30 aA	8.10±0.19 aA	198.91±7.20 aC	0.41±0.03 aA	2.27±0.19 aB	9.52±0.27 bC	217.54±8.60 aD	0.45±0.01 aB
朝谷	CK	4.01±0.18 e	9.85±0.13 e	312.85±7.70 e	1.00±0.01 e	4.01±0.18 e	9.85±0.13 e	312.85±7.70 e	1.00±0.00 c
	50	3.65±0.32 dA	9.70±0.18 dA	268.72±9.43 dC	0.89±0.03 dB	4.45±0.36 eA	9.82±0.28 dC	320.76±8.20 eC	1.09±0.01 dB
	100	3.22±0.17 cA	8.80±0.26 cA	250.98±7.40 cC	0.77±0.05 cB	4.01±0.18 cA	8.91±0.55 cA	250.91±7.80 cB	0.98±0.02 cB
	200	2.78±0.20 bA	8.70±0.22 bA	196.71±3.50 bB	0.67±0.05 bA	2.05±0.22 bA	8.20±0.31 bA	207.65±9.90 bB	0.50±0.01 bA
	400	2.12±0.25 aA	8.30±0.27 aA	192.40±7.91 aB	0.50±0.01 aB	1.63±0.29 aA	8.07±0.43 aA	199.10±5.60 aB	0.40±0.01 aA

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($P<0.05$)

升而持续下降外,其余品种的根长、苗长和生物量均表现为低浓度的上升和高浓度的降低,并在 50—100 mg/kg 时达到峰值,与对照差异显著 ($P < 0.05$)。两种重金属对幼苗生长及生物量的抑制作用为 $Pb^{2+} > Cu^{2+}$ 。

根系耐性指数是反映植物体耐重金属能力的一个重要指标。由表 1 可知,在所试 Pb^{2+} 浓度范围内,4 种谷子幼苗的根系耐性指数均低于对照,表明 Pb^{2+} 胁迫对根系生长有明显抑制作用。在 Cu^{2+} 处理组中,4 种谷子幼苗的根系耐性指数均先上升后下降,在 50 mg/kg (D2-8、黄米和朝谷)和 100 mg/kg (安 06) 时达到峰值,耐性指数均大于 1.0 (CK),说明低浓度的 Cu^{2+} 对幼苗根系生长具有一定促进作用。D2-8、安 06、黄米和朝谷对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的平均耐性指数分别为 0.87、0.81、0.78、0.71 和 0.96、0.97、0.79 和 0.74,可见 4 种基因型谷子对 Cu^{2+} 的耐性均大于 Pb^{2+} ,D2-8 和安 06 对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的耐性大于黄米和朝谷。

2.2 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对不同基因型谷子幼苗茎叶叶绿素含量和叶绿素 a/b 值的影响

叶绿素含量的变化可在一定程度上反映环境因子对植物的影响。从表 2 可见,随着 Pb^{2+} 浓度的上升,4 种谷子幼苗的叶绿素 a、b 和叶绿素 a+b 含量缓慢下降,在 400 mg/kg 时降至最低值。其中黄米和 D2-8 的叶绿素总量降幅最大,其平均值分别为对照的 57.2% 和 70.1%,其次是朝谷(75.8%)和安 06(81.6%)。 Cu^{2+} 处理组 4 种谷子幼苗的叶绿素 a+b 含量则表现为先上升后下降,D2-8、安 06 和朝谷的叶绿素含量在 50 mg/kg 时达到峰值,分别为对照的 1.70 倍、1.42 倍和 1.52 倍,黄米在 100 mg/kg 含量最高,为对照的 1.25 倍 ($P < 0.01$)。说明低浓度 Cu^{2+} 有促进叶绿素合成作用, Pb^{2+} 对谷子幼苗叶绿素合成的影响明显大于 Cu^{2+} 。

表 2 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 对不同基因型谷子幼苗叶绿素含量的影响

Table 2 Effects on the content of chlorophyll in different genotypes foxtail millet seedlings under Pb^{2+} , Cu^{2+} stress

品种 Varieties	浓度 Concentration/ (mg/kg)	Pb^{2+}				Cu^{2+}			
		叶绿素 a Chl a/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 b Chl b/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 a/b Chl a/Chl b / (mg/g 鲜重)	叶绿素 a+b Chl a+Chl b (mg/g 鲜重)	叶绿素 a Chl a/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 b Chl b/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 a/b Chl a/Chl b / (mg/g 鲜重)	叶绿素 a+b Chl a+Chl b (mg/g 鲜重)
D2-8	CK	1.25±0.11 e	0.46±0.01 c	2.72±0.03 e	1.71±0.01 e	1.25±0.11 e	0.46±0.01 c	2.72±0.03 e	1.71±0.01 e
	50	1.20±0.01 dAB	0.42±0.01 dAB	2.86±0.07 cB	1.62±0.03 dB	2.36±0.17 dB	0.55±0.02 cA	4.29±0.02 dA	2.91±0.02 dB
	100	1.05±0.31 cB	0.43±0.03 dC	2.44±0.03 bA	1.58±0.07 cC	2.21±0.05 cB	0.50±0.01 bB	4.42±0.02 cC	2.71±0.03 bB
	200	0.66±0.12 bA	0.37±0.02 bB	1.78±0.11 aA	1.03±0.01 bB	1.98±0.12 cC	0.43±0.04 dC	4.61±0.03 bA	2.41±0.02 bC
	400	0.34±0.01 aA	0.23±0.01 aAB	1.48±0.01 dA	0.57±0.01 aA	1.64±0.06 aA	0.30±0.01 aB	5.45±0.03 eC	1.94±0.01 aC
安 06	CK	1.27±0.02 c	0.46±0.01 c	2.76±0.09 c	1.73±0.03 d	1.27±0.02 c	0.46±0.01 c	2.76±0.09 c	1.73±0.03 d
	50	1.23±0.07 bcB	0.45±0.02 dB	2.73±0.12 bA	1.64±0.04 dB	1.96±0.08 cA	0.49±0.02 bA	4.00±0.05 eA	2.45±0.08 eA
	100	1.22±0.09b cC	0.43±0.01 bC	2.84±0.06 dB	1.64±0.08 cC	1.79±0.13 bcA	0.41±0.07 bA	4.37±0.09 cC	2.20±0.07 bA
	200	1.11±0.15 bC	0.35±0.12 aB	3.17±0.17 eBC	1.46±0.11 bD	1.75±0.14 bcB	0.37±0.07 dB	4.73±0.12 dA	2.15±0.05 dB
	400	0.70±0.01 aC	0.21±0.01 aAB	3.33±0.02 aC	0.91±0.03 aB	1.05±0.01 aA	0.22±0.03 aA	4.77±0.04 aB	1.25±0.02 aB
黄米	CK	1.65±0.03 e	0.51±0.15 d	3.21±0.11 a	2.16±0.12 e	1.65±0.03 e	0.51±0.15 d	3.21±0.11 a	2.16±0.12 e
	50	1.11±0.02 dAB	0.33±0.01 cA	3.36±0.04 eD	1.44±0.03 dA	1.97±0.06 cA	0.55±0.07 cA	3.58±0.07 dA	2.52±0.09 eA
	100	0.74±0.01 cA	0.23±0.03 bA	3.22±0.05 cC	0.97±0.02 cA	2.11±0.02 bB	0.58±0.01 bC	3.64±0.03 cA	2.69±0.05 cB
	200	0.70±0.02 bA	0.21±0.01 abA	3.33±0.01 dC	0.91±0.01 bA	1.71±0.01 bB	0.41±0.02 bBC	4.17±0.01 eA	2.12±0.03 bB
	400	0.62±0.03 aBC	0.19±0.01 aA	3.26±0.02 bC	0.81±0.02 aB	0.91±0.01 aA	0.21±0.01 aA	4.33±0.01 aA	1.12±0.04 aA
朝谷	CK	1.17±0.01 d	0.43±0.12 d	2.72±0.07 b	1.60±0.01 e	1.17±0.01 d	0.43±0.12 d	2.72±0.07 b	1.60±0.01 e
	50	1.08±0.04 cA	0.35±0.01 cA	3.09±0.08 dC	1.43±0.05 dA	1.88±0.17 eA	0.55±0.09 cA	3.42±0.07 eA	2.43±0.09 eA
	100	1.07±0.07 cB	0.31±0.04 bB	3.45±0.05 eD	1.38±0.06 cB	1.74±0.09 dA	0.45±0.06 dAB	3.87±0.06 bB	2.19±0.07 cA
	200	0.93±0.05 bB	0.32±0.02 bB	2.91±0.07 cB	1.25±0.03 bC	1.25±0.05 bA	0.31±0.05 bA	4.03±0.04 cA	1.56±0.03 bA
	400	0.55±0.05 aB	0.24±0.03 aB	2.29±0.01 aB	0.79±0.01 aB	0.99±0.01 aB	0.22±0.04 aA	4.50±0.03 dAB	1.21±0.03 aAB

同列相同基因型不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.01$); 相同浓度不同基因型不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

叶绿素 a/b 值反映叶绿素组成的变化,其值越大说明植物对光能的利用效率越高^[14]。由表 2 可知,与 Pb^{2+} 胁迫下幼苗叶绿素含量逐渐下降的趋势不同,随着 Pb^{2+} 浓度的升高,安 06、黄米和朝谷的叶绿素 a/b 值均呈现上升的趋势,而 D2-8 的叶绿素 a/b 值则为先升高后下降,在 50 mg/kg 时达到最大值。 Cu^{2+} 处理组中,4

种谷子的叶绿素 a/b 值表现为随处理浓度的增加而逐渐升高,在 400 mg/kg 浓度时达到峰值,与对照差异显著($P<0.01$)。这表明在 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下,谷子幼苗叶绿素 a 受破坏程度可能低于叶绿素 b,此现象与燕傲蕾等^[14]在含羞草试验中所得结果相似。

2.3 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对不同基因型谷子幼苗可溶性蛋白质、DNA 含量和增色效应的影响

可溶性蛋白质的变化是植物受到胁迫时生长发育受到影响的直接指示。由表 3 可见,在 Pb^{2+} 处理组中,除 D2-8 在 50 mg/kg 时可溶性蛋白质含量比对照略有增加(4.87%)外,其余 3 种基因型谷子可溶性蛋白质含量均随处理浓度增加而逐渐下降,与对照差异显著($P<0.05$)。不同浓度 Cu^{2+} 处理后,4 种谷子幼苗可溶性蛋白质含量均表现为低浓度(50—100 mg/kg)的促进和高浓度(200—400 mg/kg)的抑制作用。 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下朝谷和黄米的可溶性蛋白含量降幅最大, Pb^{2+} 处理组平均降至对照的 68.8% 和 70.4%, Cu^{2+} 处理组平均降至对照的 80.0% 和 78.9%。可见,朝谷和黄米的可溶性蛋白质对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫最为敏感。

表 3 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 对不同基因型谷子幼苗茎叶可溶性蛋白质、DNA 含量和增色效应的影响

Table 3 Effects of Pb^{2+} , Cu^{2+} stress on the soluble protein contents, DNA contents and hyperchromicity in four genotypes foxtail millet seedlings

品种 Varieties	浓度 concentration /(mg/kg)	Pb^{2+}			Cu^{2+}		
		可溶性蛋白含量 soluble protein contents /(mg/g 鲜重)	DNA 含量 DNA contents/ (μ g/g 鲜重)	增色效应 DNA hyper- chromicity /%	可溶性蛋白含量 soluble protein contents /(mg/g 鲜重)	DNA 含量 DNA contents/ (μ g/g 鲜重)	增色效应 DNA hyper- chromicity /%
D2-8	CK	12.92 $\pm$ 1.07 d	119.43 $\pm$ 5.32 e	8.41 $\pm$ 0.19 c	12.92 $\pm$ 1.01 b	119.43 $\pm$ 11.45 e	8.41 $\pm$ 1.01 d
	50	13.55 $\pm$ 1.11 dA	113.70 $\pm$ 1.07 dB	12.73 $\pm$ 1.13 eA	18.56 $\pm$ 0.99 eB	159.63 $\pm$ 10.12 dB	8.89 $\pm$ 1.30 eB
	100	11.60 $\pm$ 0.96 cA	102.60 $\pm$ 2.09 cB	11.49 $\pm$ 1.53 dB	17.85 $\pm$ 2.11 dB	153.90 $\pm$ 2.67 cB	4.13 $\pm$ 0.89 cA
	200	10.53 $\pm$ 0.82 bA	90.80 $\pm$ 1.17 bB	7.07 $\pm$ 0.01 bB	11.05 $\pm$ 2.99 cA	113.50 $\pm$ 9.64 bA	2.34 $\pm$ 0.01 bA
	400	7.46 $\pm$ 0.45 aA	69.07 $\pm$ 0.99 aB	0.04 $\pm$ 0.01 aA	7.87 $\pm$ 0.45 aC	99.57 $\pm$ 4.51 aA	1.01 $\pm$ 0.02 aA
安 06	CK	13.61 $\pm$ 1.07 d	119.27 $\pm$ 2.41 e	7.32 $\pm$ 1.55 c	13.61 $\pm$ 0.89 c	119.27 $\pm$ 2.72 c	7.32 $\pm$ 0.98 d
	50	13.23 $\pm$ 1.45 dA	108.90 $\pm$ 0.95 dA	14.91 $\pm$ 1.87 eB	14.71 $\pm$ 1.33 eA	147.00 $\pm$ 10.49 eA	8.13 $\pm$ 0.39 cA
	100	12.99 $\pm$ 0.13 cB	98.23 $\pm$ 1.89 cA	11.27 $\pm$ 1.12 dB	13.72 $\pm$ 2.04 dA	136.70 $\pm$ 11.09 dA	5.09 $\pm$ 0.05 bB
	200	12.76 $\pm$ 1.02 bC	72.77 $\pm$ 2.01 bA	5.32 $\pm$ 0.80 bA	13.29 $\pm$ 0.31 bD	112.43 $\pm$ 5.50 bA	3.99 $\pm$ 0.01 aC
	400	9.16 $\pm$ 0.14 aB	64.23 $\pm$ 1.03 aA	0.05 $\pm$ 0.01 aA	5.91 $\pm$ 0.55 aA	102.70 $\pm$ 3.91 aB	1.17 $\pm$ 0.01 aB
黄米	CK	19.68 $\pm$ 1.26 d	151.77 $\pm$ 2.89 e	12.77 $\pm$ 0.99 c	19.68 $\pm$ 2.98 c	163.63 $\pm$ 3.33 c	12.77 $\pm$ 1.02 d
	50	19.73 $\pm$ 1.05 dB	145.50 $\pm$ 5.79 dD	15.42 $\pm$ 1.45 dB	22.24 $\pm$ 2.11 eC	187.27 $\pm$ 2.78 dC	13.11 $\pm$ 0.51 eC
	100	15.54 $\pm$ 0.88 cC	133.33 $\pm$ 10.11 cD	18.13 $\pm$ 2.09 eC	20.53 $\pm$ 2.01 dC	188.17 $\pm$ 3.61 eD	6.27 $\pm$ 0.22 cC
	200	10.93 $\pm$ 0.65 bB	121.30 $\pm$ 7.79 bC	7.07 $\pm$ 1.01 bB	12.22 $\pm$ 0.22 bB	162.73 $\pm$ 11.56 bC	4.11 $\pm$ 0.11 bD
	400	9.19 $\pm$ 0.31 aB	100.70 $\pm$ 2.98 aD	1.07 $\pm$ 0.01 aC	7.12 $\pm$ 0.16 aB	133.63 $\pm$ 10.67 aD	2.17 $\pm$ 0.01 aC
朝谷	CK	20.83 $\pm$ 0.47 d	163.63 $\pm$ 10.41 e	12.19 $\pm$ 0.31 d	20.83 $\pm$ 0.98 c	151.77 $\pm$ 10.99 c	12.19 $\pm$ 0.79 d
	50	20.51 $\pm$ 1.01 dC	138.03 $\pm$ 5.97 dC	12.99 $\pm$ 1.27 eA	23.56 $\pm$ 1.04 eD	201.30 $\pm$ 7.52 eD	13.21 $\pm$ 0.53 eC
	100	16.48 $\pm$ 0.98 cD	129.97 $\pm$ 2.78 bC	10.17 $\pm$ 1.07 cA	21.77 $\pm$ 0.99 dD	181.50 $\pm$ 4.31 dC	9.99 $\pm$ 0.56 cD
	200	10.99 $\pm$ 0.54 bB	130.60 $\pm$ 0.55 cD	8.70 $\pm$ 1.09 bC	12.75 $\pm$ 0.65 bC	124.97 $\pm$ 8.11 bB	3.15 $\pm$ 0.49 bB
	400	9.37 $\pm$ 0.37 aB	93.70 $\pm$ 2.01 aC	0.79 $\pm$ 0.01 aB	8.59 $\pm$ 0.49 aD	116.37 $\pm$ 2.19 aC	1.12 $\pm$ 0.01 aB

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($P<0.05$)

Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对不同基因型谷子幼苗的 DNA 含量的影响存在差异(表 3)。不同浓度 Pb^{2+} 胁迫下,4 种基因型谷子幼苗 DNA 含量随着处理浓度的增加而逐渐降低,在 400 mg/kg 时降至最低值。与对照相比,安 06 和朝谷的 DNA 降幅大于 D2-8 和黄米。 Cu^{2+} 处理组则表现为 4 种谷子在 50—100 mg/kg 时 DNA 含量均有增加,200 mg/kg 以上时随浓度增加而逐渐下降,与 Cu^{2+} 胁迫对谷子可溶性蛋白质的影响趋势相同。可以看出, Pb^{2+} 对 DNA 合成的破坏作用更强于 Cu^{2+} 。 Pb^{2+} 对朝谷、安 06 DNA 合成的影响较为显著, Cu^{2+} 对黄米和朝谷 DNA 含量的影响最大。

增色效应反映了重金属胁迫下 DNA 链的断裂和交联等损伤效应。由表 3 可知,当 Pb^{2+} 浓度为 50—100

mg/kg 和 Cu^{2+} 为 50 mg/kg 处理后,不同谷子幼苗 DNA 增色效应值均明显高于对照 ($P<0.05$),表明此浓度范围内引起 DNA 链的断裂。当 Pb^{2+} 浓度大于 200 mg/kg 而 Cu^{2+} 浓度为 100 mg/kg 以上时,4 种谷子幼苗的 DNA 增色效应值均低于对照,推测该浓度范围内 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 导致 DNA 链间交联或与蛋白质交联,从而使 DNA 解链温度提高。比较 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对谷子幼苗增色效应的影响,可以得出 Pb^{2+} 对 DNA 损伤效应的影响大于 Cu^{2+} 的结论。4 种基因型谷子中, Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 对朝谷和黄米的 DNA 增色效应影响最为明显。

2.4 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 在不同基因型谷子幼苗体内的吸收积累与迁移

吸收系数反映了植物对土壤中重金属的富集能力,转运系数能反映出重金属在植物体内的运输和分配状况^[15]。由表 4 可见,随着 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 处理浓度的增大,不同基因型谷子幼苗体内的重金属含量逐渐增加,至 400 mg/kg 时达到最大值,与对照组相比差异显著 ($P<0.05$)。在 50—400 mg/kg 浓度范围内,幼苗根部的 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 含量均明显高于地上部,表明重金属进入幼苗体后主要积累于根部。从谷子幼苗对二种重金属的吸收能力看, Pb^{2+} 的吸收系数均高于 Cu^{2+} ,表明 Pb^{2+} 较 Cu^{2+} 更易从土壤进入幼苗根部并富集。 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 由幼苗地下部向地上部的转运能力也有差异,不同处理组均表现为 Cu^{2+} 的转运系数大于 Pb^{2+} ,说明谷子将 Pb^{2+} 向地上部的运输能力较差。4 种基因型谷子相比较,朝谷和 D2-8 对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸收富集能力强于安 06 和黄米,而 D2-8 和安 06 对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的转运能力大于黄米和朝谷。

表 4 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 在不同基因型谷子幼苗体内的吸收、积累和迁移

Table 4 The uptake, accumulation and transformation of Pb^{2+} , Cu^{2+} in different genotypes foxtail millet Seedlings

品种 Varieties	浓度 Concentration/ (mg/kg)	Pb^{2+}				Cu^{2+}			
		地上部含量 Leaf and stem /(mg/kg)	地下部含量 Root /(mg/kg)	吸收系数 Uptake coefficient	转运系数 TF	地上部含量 Leaf and stem /(mg/kg)	地下部含量 Root /(mg/kg)	吸收系数 Uptake coefficient	转运系数 TF
D2-8	CK	30.56±5.03 a	66.54±3.71 a	3.31±0.05 e	0.35±0.01 a	10.56±0.59 a	16.53±0.56 a	1.09±0.01 c	0.64±0.01 b
	50	120.43±10.44 bD	165.70±5.79 bA	2.36±0.03 dA	0.73±0.00 eD	74.57±4.38 bD	97.39±8.22 bB	1.39±0.05 dB	0.77±0.02 dD
	100	149.42±8.87 cC	226.85±9.13 cA	1.89±0.02 cA	0.66±0.01 dB	86.64±5.71 cB	135.40±10.66 cB	1.13±0.02 cB	0.64±0.03 bC
	200	211.63±9.75 dAB	369.32±6.04 dA	1.68±0.03 bA	0.57±0.01 cC	114.04±7.77 dB	164.52±12.26 dB	0.75±0.00 bA	0.69±0.04 cC
	400	243.63±8.39 eB	564.24±13.71 eB	1.34±0.00 aB	0.43±0.02 bB	149.79±9.32 eB	244.62±13.86 eB	0.58±0.00 aB	0.61±0.01 aB
安 06	CK	28.74±2.01 a	54.53±6.33 a	2.71±0.01 e	0.53±0.03 d	9.33±0.82 a	11.69±0.99 a	0.77±0.04 b	0.80±0.01 c
	50	56.8±3.92 bA	178.11±7.99 bB	2.54±0.02 dB	0.32±0.01 cB	57.63±6.01 bC	108.70±5.06 bC	1.72±0.01 cC	0.53±0.02 aB
	100	65.4±4.56 cA	223.98±32.17 cA	1.87±0.00 cA	0.29±0.03 bA	135.31±9.61 cC	174.57±13.95 cC	1.45±0.02 dC	0.78±0.04 bD
	200	80.62±5.56 dA	364.07±17.71 dA	1.65±0.00 bA	0.22±0.00 aA	158.18±7.81 dC	195.43±11.54 dC	0.89±0.03 cB	0.81±0.00 cD
	400	116.99±8.96 eA	487.57±33.16 eA	1.16±0.01 aA	0.24±0.01 aA	196.04±6.29 eD	245.92±8.85 eB	0.59±0.01 aB	0.80±0.01 bC
黄米	CK	26.33±4.72 a	42.35±9.25 a	2.11±0.02 b	0.62±0.02 d	5.02±0.65 a	9.95±0.66 a	0.66±0.04 b	0.51±0.02 d
	50	73.04±7.13 bB	193.58±12.39 bC	2.76±0.03 dC	0.38±0.02 bC	28.51±1.71 bA	49.19±6.25 bA	0.70±0.05 cA	0.58±0.00 eC
	100	103.59±7.88 cB	352.28±22.62 cB	2.93±0.03 eB	0.29±0.01 aA	34.21±4.92 cA	106.85±8.18 cA	0.90±0.02 eA	0.32±0.01 aA
	200	211.13±9.92 dAB	514.21±19.33 dB	2.34±0.02 cB	0.41±0.03 bB	57.79±5.67 dA	152.30±14.09 dA	0.76±0.03 dA	0.38±0.02 bA
	400	302.8±19.81 eD	627.31±20.53 eC	1.49±0.02 aC	0.48±0.02 cC	88.27±12.76 eA	183.95±15.55 eA	0.46±0.01 aA	0.48±0.03 cA
朝谷	CK	24.61±2.59 a	44.72±3.41 a	2.23±0.01 b	0.55±0.01 b	8.03±0.84 a	19.87±0.97 a	1.31±0.05 c	0.41±0.04 a
	50	92.1±9.68 bC	305.84±14.61 bD	4.36±0.01 eD	0.30±0.01 aA	48.55±4.17 bB	109.19±4.28 bC	2.18±0.03 eD	0.44±0.01 cA
	100	122.71±8.64 cB	428.63±17.91 cC	3.57±0.00 dC	0.29±0.00 aA	84.22±4.72 cB	206.88±7.32 cD	2.06±0.05 dD	0.41±0.01 aB
	200	392.16±29.07 dD	614.40±23.52 dC	2.79±0.03 cC	0.64±0.01 cD	167.78±9.19 dD	252.41±6.57 dD	1.26±0.04 bC	0.67±0.00 dB
	400	478.46±32.46 eD	721.30±21.33 eD	1.72±0.01 aD	0.66±0.03 dD	180.27±7.49 eC	383.05±9.48 eC	0.96±0.02 aC	0.47±0.02 bA

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 ($P<0.05$)

3 讨论

现有研究表明,外源重金属进入土壤后,植物可通过根系吸收进入根细胞内积累,并通过细胞间的运输向地上部移动。但重金属由于自身的化学性质和螯合能力的不同,在植物体内的积累和迁移能力存在差异^[16]。本实验证明, Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 进入谷子幼苗体内绝大部分积累在根部,虽然 Pb^{2+} 在根部的吸收积累能力高于 Cu^{2+} ,

但向地上部的转运能力不及 Cu^{2+} 。其原因可能是, Pb^{2+} 作为一种毒性较强的重金属元素, 对植物细胞膜结构具有较强损伤作用, 造成根细胞质膜的透性增大, 使植物以非正常生理代谢方式被动吸收 Pb^{2+} , 导致大量的 Pb^{2+} 离子积累于根部细胞。同时, Pb^{2+} 在根系细胞中主要以 PbCO_3 、 $\text{Pb}(\text{PO}_4)_2$ 等沉淀形式或络合态存在, 使其向地上部运输困难^[17]。而 Cu^{2+} 作为植物生长发育的必需营养元素较容易被根系吸收, 与细胞膜蛋白的活性位点结合, 并随蛋白质大分子转运到植物地上部^[16]。李向科等^[18] 在大麦中所得结果与此相同。

土壤中过量的重金属元素对植物生长是一种胁迫或者逆境, 若是这种胁迫超过植物自身的忍耐程度, 就会对植物生长产生抑制或伤害作用^[16]。本实验条件下, 不同浓度 Pb^{2+} 胁迫对谷子幼苗的根长、苗长均有抑制作用, 生物量明显减少。 Cu^{2+} 处理组则表现为随处理浓度增加先上升后下降, 这与齐雪梅等^[19] 在大麦和玉米的研究结果相同。有关资料表明, Pb^{2+} 是植物的非必需元素, 体内积累过量的 Pb^{2+} 会与 Ca^{2+} 竞争活性位点, 阻断了 Ca^{2+} 的跨膜运输, 使 CAM 和 Ca^{2+} -ATP 酶不被激活, 阻止有丝分裂的进行, 最终使根系生长受阻, 影响矿质元素的吸收和利用, 降低生物量^[16]。 Cu^{2+} 是植物生长所必需的微量营养元素, 适量的 Cu^{2+} 能刺激多酚氧化酶、细胞色素氧化酶活性, 促进幼苗生长。而过量的 Cu^{2+} 加速幼苗根系产生大量活性氧, 抑制各种酶活性, 使根系受损, 并影响到生物量的生成^[20-21]。

叶绿素含量的高低在一定程度上反映植物光合作用的强弱。本实验中, 不同浓度 Pb^{2+} 对 4 种基因型谷子幼苗叶绿素含量均有抑制效应, 而 Cu^{2+} 处理则表现为低浓度 ($\leq 100 \text{ mg/kg}$) 的促进和高浓度 ($\geq 200 \text{ mg/kg}$) 的抑制作用, 这与晁雷、袁霞等^[22-23] 在小麦、青菜实验中的结果相似。 Pb^{2+} 能引起叶绿体类囊体结构和功能的破坏, 使 PS I、PS II 间的电子传递受阻, 影响叶绿素合成中必需的叶绿素酸酯还原酶活性和氨基-r-酮戊酸的合成, 从而使叶绿素合成下降^[16]。 Cu^{2+} 在一定浓度范围内弥补了光合作用电子传递链中质体蓝素所需, 促进叶绿素含量合成; 但过量的 Cu^{2+} 与叶绿体蛋白的巯基结合或取代 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等叶绿体酶必需的活性因子, 使叶绿体蛋白中心体组成发生变化, 造成叶绿素含量降低^[23]。本研究还发现, 在 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下, 叶绿素 a/b 值随重金属浓度的上升而升高。在光合作用过程中, 叶绿素 b 主要进行光能的收集, 叶绿素 a 主要进行光能转换。叶绿素 a/b 值越高, 植物对光能的利用效率越高。因此, 在 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫造成叶绿素含量下降的情况下, 植物可通过提高叶绿素 a/b 值的途径提高光能利用效率来维持自身的生长^[14]。

可溶性蛋白质是植物细胞内未与膜系统特异结合的酶, 其含量越高表明体内生理生化反应与代谢活动越旺盛, 有利于植物抵抗逆境的胁迫和伤害^[24]。本文结果显示, 在所试 Pb^{2+} 浓度范围内, 谷子幼苗可溶性蛋白质含量随处理浓度增加不断下降, 与晁雷等^[22] 在小麦中的结果相同。目前的研究认为, 重金属 Pb^{2+} 可与植物细胞中酶活性中心或蛋白质中的-SH 结合, 导致蛋白变性而降解, 使蛋白质合成酶失活, 并影响蛋白质的合成^[16]。 Cu^{2+} 作为多种酶的活性中心, 参与蛋白质的合成。适量的 Cu^{2+} 可诱导出一些新蛋白质出现或使原有蛋白质含量增加, 参与抗逆性生理, 保证或促进植物体内可溶性蛋白的合成。高浓度 Cu^{2+} 则诱导了蛋白水解酶活性的增强, 加速了蛋白质的水解^[23]。本研究中 Cu^{2+} 处理后谷子幼苗可溶性蛋白含量出现低浓度的促进和高浓度的抑制现象亦证实了这一点。

增色效应值的变化反映了 DNA 的损伤程度。Black 等^[25] 的研究发现, 土壤中的 Pb^{2+} 能引起水生淡菜 DNA 发生断裂。葛才林等^[26] 的研究表明, Cu^{2+} 胁迫能造成水稻和小麦根叶中 DNA 含量降低, 使增色效应发生改变。Koch^[27] 指出, 增色效应可反映 DNA 的解链程度, DNA 断裂会使链长变短, 增色效应提高; 发生链间交联则使 DNA 解链温度提高, 增色效应下降。本研究表明, 在 50—100 mg/kg Pb^{2+} 和 50 mg/kg Cu^{2+} 处理后, 4 种基因型谷子幼苗 DNA 增色效应值均有提高, 表明 DNA 链发生不同程度断裂。此后随着浓度上升增色效应逐渐下降, DNA 发生链间交联或使解链温度升高, DNA 含量亦降低。重金属对 DNA 产生毒害的原因可能是, 大量的 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 进入细胞后与细胞核中带负电荷的核酸分子结合, 降低 RNase 和 DNase 的活性, 造成 DNA-蛋白质交联甲基化或使基因组中寡核苷酸位点发生变化等形式的 DNA 损伤, 引起核酸构象改变, 使 DNA 合成严重受阻^[3, 16]。 Pb^{2+} 对 DNA 的损伤效应强于 Cu^{2+} , 这是由于 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 相比, 二者在离子特征、有机络合性能等方面有较大差异, 从而对核酸代谢的影响作用有明显差别。

4 结论

4.1 Pb^{2+} 在 4 种基因型谷子幼苗根部积累量显著高于 Cu^{2+} , 但向地上部的转运能力不及 Cu^{2+} 。 Pb^{2+} 胁迫对谷子幼苗生长、生物量、生理生态影响及 DNA 的损伤效应均大于 Cu^{2+} 。

4.2 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下不同基因型谷子幼苗体内叶绿素含量、可溶性蛋白质、DNA 含量及增色效应指标变化更为明显, 可作为检测重金属污染的指示物。4 种基因型谷子对 Pb^{2+} 胁迫的耐性顺序为安 06>D2-8>黄米>朝谷, 对 Cu^{2+} 的耐性顺序为 D2-8>安 06>朝谷>黄米, 该结果可为谷子耐性品种鉴定、筛选与育种提供参考依据。

References:

- [1] Zhou Y F, Dong Y Y. Study progress on soil contamination and control measures of heavy metals. *Environmental Science Trends*, 2003, 1(1): 15-16.
- [2] Jiang X Y, Zhao K F. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 92-99.
- [3] Zhang Y X. Toxicity of heavy metals to *hordeum vulgare*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(2): 199-205.
- [4] Zhang X W, Wu Z. Foxtail Millet Cultivation and Physiology. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1993: 1-15.
- [5] Wang C B, Ning A R, Chang X B, Wu J K. A monitoring assessment on the pollution of five mail crops in Fenhe River Valley in Taiyuan. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(5): 208-212.
- [6] Rout G R, Samantaray S, Das P. *In vitro* selection and characterization of Ni-tolerant callus lines of *Setaria italica* L. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1998, 20(3): 269-275.
- [7] Samantaray S, Rout G R, Das P. *In vitro* selection and regeneration of zinc tolerant calli from *Setaria italica* L. *Plant Science*, 1999, 143(2): 201-209.
- [8] GB 15618—1995, Standard of Peoples Republic of China, Environmental quality standards for soil. 1995.
- [9] Li F M, Xiong Z Y, Zheng Z H. Research on tolerance and bioaccumulation of seven species (cultivars) of plants on lead. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(6): 246-250.
- [10] Huang Y Z, Zhu Y G, Hu Y, Liu Y X. Uptake and accumulation of arsenic by different soybean varieties. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1397-1401.
- [11] Liu Y, Peng Z S, Jiang G X. An influence of heavy metals' stress on chlorophyll of cabbage-typed rape. *Journal of Guiyang University: Natural Science*, 2007, 2(1): 46-49.
- [12] Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184-287.
- [13] Hei S M, She X P. Inhibition of root growth and DNA damage caused by Cr^{6+} stress in wheat seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(3): 541-545.
- [14] Yan A L, Wu T T, Wang Y B, Zhang X Q. The characteristics of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [15] Monnis S, Salemaa M, White C, Tuittila E, Huopalaainen M. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of Cu-Ni smelter, in southwest finland. *Environmental Pollution*, 2000, 109(2): 211-219.
- [16] Yang G, Wu J, Tang Y. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1507-1512.
- [17] Bringezu K, Lichtenberger O, Leopold I, Neumann D. Heavy metal tolerance of *Silene vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154(4): 536-546.
- [18] Li X K, Zhang Y X. Study of Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} on accumulation and distribution in *Hordeum vulgare* seedling. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S2): 484-488.
- [19] Qi X M, Li P J, Liu W, Ke X, Yin W. The toxicological response of wheat *Hordeum vulgare* L. and *Zea mays* to copper stress. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 286-290.
- [20] Skórzyńska-Polit E, Dąźkiewicz M, Krupa Z. Lipid peroxidation and antioxidative response in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium and copper. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 32(1): 169-175.
- [21] Li W Q, Khan M A, Yamaguchi S, Kamiya Y. Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Growth Regulation*, 2005, 46(1): 45-50.
- [22] Chao L, Zhou Q X, Chen S, Cui S. Effects of Pb on physiological mechanisms in wheat. *Ecologic Science*, 2007, 26(1): 6-9.

- [23] Yuan X, Li Y M, Zhang X C. Effect of copper addition on the growth and the activities of protective enzymes in Leaves of *Brassica chinensis*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 467-471.
- [24] Sun T G, Sha W, Liu Y. The effects of compound heavy metal stress on some physiological characteristics of two moss species. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2332-2339.
- [25] Black M C, Ferrell J R, Horning R C, Martin L K Jr. DNA strand breakage in freshwater mussels (*Anodonta grandis*) exposed to lead in the laboratory and field. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(5): 802.
- [26] Ge C L, Yang X Y, Sun J H, Wang Z G, Luo S S, Ma F, Gong Z. DNA damage caused by heavy metal stress in rice and wheat seedlings. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(6): 419-424.
- [27] Koch C J, Giandomenico A R. The alkaline elution technique for measuring DNA single strand breaks: increased reliability and sensitivity. *Analytical Biochemistry*, 1994, 220(1): 58-65.

参考文献:

- [1] 周以富,董亚英. 几种重金属土壤污染及其防治的研究进展. *环境科学动态*, 2003, 1(1): 15-16.
- [2] 江行玉,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(1): 92-99.
- [3] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究. *环境科学学报*, 1997, 17(2): 199-205.
- [4] 张喜文,武钊. 谷子栽培生理. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1993: 1-15.
- [5] 王存宝,宁安荣,常晓冰,武九昆. 太原市汾河流域五大粮食作物污染监测评价. *农业环境保护*, 1993, 12(5): 208-212.
- [8] GB 15618—1995, 中华人民共和国国家标准, 土壤环境质量标准. 1995.
- [9] 李锋民,熊治廷,郑振华. 7 种高等植物对铅的耐性及其生物蓄积研究. *农业环境保护*, 1999, 18(6): 246-250.
- [10] 黄益宗,朱永官,胡莹,刘云霞. 不同品种大豆对 As 吸收积累和分配的影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1397-1401.
- [11] 刘燕,彭钟山,蒋光霞. 重金属胁迫对甘蓝型油菜叶绿素的影响. *贵阳学院学报: 自然科学版*, 2007, 2(1): 46-49.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-217.
- [13] 黑淑梅,余小平. Cr^{6+} 胁迫对小麦幼苗根系生长的影响及 DNA 损伤效应研究. *西北植物学报*, 2005, 25(5): 541-545.
- [14] 燕傲蕾,吴亭亭,王友保,张旭情. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性. *生态学报*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [16] 杨刚,伍钧,唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1507-1512.
- [18] 李向科,张义贤. 重金属 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 在大麦幼苗体内积累与分布的研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S2): 484-488.
- [19] 齐雪梅,李培军,刘宛,可欣,尹炜. Cu 对大麦和玉米的毒性效应. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 286-290.
- [22] 晁雷,周启星,陈苏,崔爽. 小麦对 Pb 胁迫的生理生化反应研究. *生态科学*, 2007, 26(1): 6-9.
- [23] 袁霞,李艳梅,张兴昌. 铜对小青菜生长和叶片保护酶的活性影响. *环境科学学报*, 2008, 27(2): 467-471.
- [24] 孙天国,沙伟,刘岩. 复合重金属胁迫对两种藓类植物生理特性的影响. *生态学报*, 2010, 30(9): 2332-2339.
- [26] 葛才林,杨小勇,孙锦荷,王泽港,罗时石,马飞,龚峥. 重金属胁迫引起的水稻和小麦幼苗 DNA 损伤. *植物生理与分子生物学报*, 2002, 28(6): 419-424.

CONTENTS

Behavioural time budgets and diurnal rhythms of the female Tibetan gazelles in the Kekexili National Nature Reserve	LIAN Xinming, LI Xiaoxiao, YAN Peishi, et al (663)
The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) and thermocline characteristics in the tropic Indian Ocean	YANG Shenglong, ZHANG Yu, ZHANG Heng, et al (671)
Characteristics of algous facies of planktonic algae in lake honghu and its response to habitat	LU Bilin, YAN Pingchuan, TIAN Xiaohai, et al (680)
Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China	LIU Liang, FAN Hangqing, LI Chungan (690)
Effects of CO ₂ -induced seawater acidification on photosynthesis and calcification in the coralline alga <i>Corallina pilulifera</i>	XU Zhiguang, LI Meizhen, HUO Chuanlin, et al (699)
Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant <i>Cabomba caroliniana</i>	ZOU Weina, YUAN Lin, ZHANG Liquan, et al (706)
Prioritizing biodiversity in conservation planning based on C-Plan: a case study from northeast China	LUAN Xiaofeng, SUN Gongqi, QU Yi, et al (715)
Effects of urbanization on indigenous plant diversity: a case study of Langfang City, China	PENG Yu, LIU Xuehua, XUE Dayuan, et al (723)
Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve	LIU Fang, LI Diqiang, WU Jigui (730)
Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups	LI Haikui, NING Jinkui (740)
Population genetics of <i>Niviventer confucianus</i> and its relationships with habitat area in Thousand Island Lake region	LIU Jun, BAO Yixin, ZHANG Xu, et al (758)
Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia	GU RunYuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al (767)
Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (777)
Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh	TONG Chunfu (786)
The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province	XING Dan, LIU Hongyan, YU Pingping, et al (796)
Sprouting characteristic in restoration ecosystems of monsoon evergreen broad-leaved forest in south-central of Yunnan Province	SU Jianrong, LIU Wande, ZHANG Zhijun, et al (805)
Distribution patterns and changes of aquatic communities in Lashihai Plateau Wetland after impoundment by damming	XIAO Derong, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (815)
Spatial distribution of root biomass of <i>Pinus massoniana</i> plantation in Three Gorges Reservoir area, China	CHENG Ruimei, WANG Ruili, XIAO Wenfa, et al (823)
Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in <i>Larix gmelinii</i> plantations in Northeast China	WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (833)
Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (844)
Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged <i>Pinus massoniana</i> stands	GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (852)
Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure	PENG Sili, SHEN Hong, ZHANG Yuting, et al (863)
The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents	LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing (871)
Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems	TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, CHI Shuyun, et al (879)
Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes	XIAO Zhihua, ZHANG Yixian, ZHANG Xiwen, et al (889)
Combined effect of temperature and salinity on the Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity from the gill of GIFT tilapia juveniles (<i>Oreochromis niloticus</i>)	WANG Haizhen, WANG Hui, QIANG Jun, et al (898)
Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata	WANG Xiaoxue, LI Xuyong, WU Xiuqin (907)
The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls	CAI Miaozen, WANG Ning, WANG Zhiying, et al (915)
The suitable stand structure and hydrological effects of the cypress protection forests in the central Sichuan hilly region	GONG Gutang, LI Yanqiong, ZHU Zhifang, et al (923)
Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method	ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al (931)
Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images	WANG Cuiping, WANG Haowei, LI Chunming, et al (942)
Evaluation of non-use value of ecotourism resources: a case study in Dalai Lake protected area of China	WANG Pengwei, JIA Jingbo (955)
Review and Monograph	
Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance	YUAN Fei, ZHANG Xinyao, LIANG Jun (964)
Role of silicon in regulating plant resistance to insect herbivores	HAN Yongqiang, WEI Chunguang, HOU Maolin (974)
Scientific Note	
Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in <i>Osmanthus fragrans</i> and <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	ZHAN Feng, YANG Dongmei (984)
Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings	CHEN Xiaowen, QI Xin, WANG Haiyong, et al (993)
Studies of non-structural carbohydrates of <i>Cupressus funebris</i> in different landslides after Wenchuan Earthquake	CHEN Bo, LI Zhihua, HE Qian, et al (999)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 3 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 3 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元