

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第12期 Vol.31 No.12 2011

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 (SHENTAI XUEBAO)

第31卷 第12期 2011年6月 (半月刊)

目 次

基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例.....	李昊,蔡运龙,陈睿山,等 (3255)
扩散对破碎化景观上宿主-寄生种群动态的影响	苏敏 (3265)
湿地功能评价的尺度效应——以盐城滨海湿地为例	欧维新,叶丽芳,孙小祥,等 (3270)
模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响.....	樊后保,廖迎春,刘文飞,等 (3277)
中国东部森林样带典型森林水源涵养功能.....	贺淑霞,李叙勇,莫菲,等 (3285)
山西太岳山油松群落对采伐干扰的生态响应.....	郭东罡,上官铁梁,白中科,等 (3296)
长期施用有机无机肥对潮土微生物群落的影响	张焕军,郁红艳,丁维新 (3308)
云南元江干热河谷五种优势植物的内生真菌多样性.....	何彩梅,魏大巧,李海燕,等 (3315)
塔里木河中游洪水漫溢区荒漠河岸林实生苗更新.....	赵振勇,张科,卢磊,等 (3322)
基于8hm ² 样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换	张毓涛,梁凤超,常顺利,等 (3330)
古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应.....	周晓兵,张元明,陶冶,等 (3340)
Pb污染对马蔺生长、体内重金属元素积累以及叶绿体超微结构的影响	原海燕,郭智,黄苏珍 (3350)
春、秋季节树干温度和液流速度对东北3树种树干表面CO ₂ 释放通量的影响	王秀伟,毛子军,孙涛,等 (3358)
云南南部和中部地区公路旁紫茎泽兰土壤种子库分布格局.....	唐樱殷,沈有信 (3368)
利用半球图像法提取植被冠层结构特征参数.....	彭焕华,赵传燕,冯兆东,等 (3376)
黑河上游蝗虫与植被关系的CCA分析	赵成章,周伟,王科明,等 (3384)
额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征.....	庞科,姚锦仙,王昊,等 (3391)
九龙江河口浮游植物的时空变动及主要影响因素.....	王雨,林茂,陈兴群,等 (3399)
东苕溪中下游河岸类型对鱼类多样性的影响.....	黄亮亮,李建华,邹丽敏,等 (3415)
基于RS/GIS公路路域水土流失动态变化的研究——以渝昆高速公路为例	陈爱侠,李敏,苏智先,等 (3424)
流域景观结构的城市化影响与生态风险评价.....	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,等 (3432)
基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析.....	高宾,李小玉,李志刚,等 (3441)
若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响.....	李晋昌,王文丽,胡光印,等 (3451)
施用鸡粪对土壤与小白菜中Cu和Zn累积的影响	张妍,罗维,崔晓勇,等 (3460)
基于GIS的宁夏灌区农田污染源结构特征解析.....	曹艳春,冯永忠,杨引禄,等 (3468)
底墒和种植方式对夏大豆光合特性及产量的影响.....	刘岩,周勋波,陈雨海,等 (3478)
不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究——以南四湖过水区粮田为例	谭德水,江丽华,张骞,等 (3488)
丛枝菌根真菌对低温下黄瓜幼苗光合生理和抗氧化酶活性的影响	刘爱荣,陈双臣,刘燕英,等 (3497)
外源半胱氨酸对铜胁迫下小麦幼苗生长、铜积累量及抗氧化系统的影响	彭向永,宋敏 (3504)
专论与综述	
水平扫描技术及其在生态学中的应用前景.....	胡自民,李晶晶,李伟,等 (3512)
研究简报	
昆仑山北坡4种优势灌木的气体交换特征.....	朱军涛,李向义,张希明,等 (3522)
不同比例尺DEM数据对森林生态类型划分精度的影响	唐立娜,黄聚聪,代力民 (3531)
苏南丘陵区毛竹林冠截留降雨分布格局	贾永正,胡海波,张家洋 (3537)
外来种湿地松凋落物对土壤微生物群落结构和功能的影响	陈法霖,郑华,阳柏苏,等 (3543)
深圳地铁碳排放量	谢鸿宇,王习祥,杨木壮,等 (3551)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-06



封面图说:自然奇观红海滩·辽宁省盘锦市——在辽河入海口生长着大片的潮间带植物碱蓬草,举目望去,如霞似火,蔚为壮观,人们习惯地称之为红海滩。粗壮的根系加快着海滩土壤的脱盐过程,掉下的茎叶腐质后肥化了土壤,它是大海的生态屏障。

彩图提供:段文科先生 中国鸟网 <http://www.birdnet.cn> E-mail:dwk9911@126.com

外源半胱氨酸对铜胁迫下小麦幼苗生长、 铜积累量及抗氧化系统的影响

彭向永*, 宋 敏

(曲阜师范大学生命科学学院, 山东曲阜 273165)

摘要:采用滤纸培养法, 研究了不同浓度的 L-半胱氨酸 (L-Cys) 对 200 μmol/L 铜离子胁迫下小麦幼苗生长、铜积累量和抗氧化系统的影响。结果表明, (1) 200 μmol/L 的铜离子可抑制小麦幼苗生长, 使根长、生物量、总叶绿素含量极显著下降, 可溶性蛋白和还原性谷胱甘肽 (GSH) 含量, 超氧化物歧化酶 (SOD) 和抗坏血酸氧化酶 (APX) 活性略微上升, 丙二醛 (MDA) 含量和细胞膜透性极显著上升。(2) 外源 Cys 在 1.0—5.0 mmol/L 时, 受铜胁迫的小麦幼苗生长势与对照无差异, 在 1.0 和 2.5 mmol/L 下, 根长、生物量、叶绿素 a 和总叶绿素含量与对照无显著差异, 与 Cu 处理组差异显著 ($P < 0.01$)。(3) 高于 1.0 mmol/L 的外源 Cys 可极显著增加铜胁迫下小麦叶片和根系中的铜积累量。(4) 外源 Cys 极显著提高了铜胁迫下小麦幼苗可溶性蛋白和 GSH 含量, 并使 SOD 和 APX 活性持续维持在较低水平; 外源 Cys 浓度低于 2.5 mmol/L 时, MDA 含量极显著下降, 低于 5.0 mmol/L 时, 细胞膜透性极显著升高; 多酚氧化酶 (PPO) 活性先上升后下降, 除 Cys 为 0.5 mmol/L 处理外, 其它各处理间 PPO 活性均无显著差异。综合来看, 喷施 1.0—2.5 mmol/L 的外源 Cys 可提高小麦幼苗对铜胁迫的耐受性。

关键词: 半胱氨酸; 小麦幼苗; 铜胁迫; 谷胱甘肽; 抗氧化酶

Effects of exogenous cysteine on growth, copper accumulation and antioxidative systems in wheat seedlings under Cu stress

PENG Xiangyong*, SONG Min

Life and Science College of Qufu Normal University, Qufu 273165, China

Abstract: Cysteine (Cys) is one of the twenty basic amino acids and is converted to glutathione (GSH), phytochelatins (PCs) and other variety of metabolites in the body. GSH is an enzymatically synthesized tripeptide in which Cys is linked via peptide bonds to the γ -carboxyl group of glutamic acid (Glu) and the α -amino group of glycine (Gly) depending on peptide bonds. GSH serves as the first line of the organism defense against the products of oxygen metabolism, reactive oxygen species, and other electrophilic compounds such as toxins (herbicides), xenobiotics, and heavy metals. PCs are a family of heavy metal-inducible peptides important in the detoxification of heavy metals and can chelate the metals, have been identified in plants and some microorganisms. The inactive toxic metal ions of metal-PCs chelatins are subsequently transported from cytosol to vacuole before they poison the enzymes of life-supporting metabolic routes, and transiently store in vacuole to reduce the heavy metal concentration in cytosol. Thus, heavy metal detoxification is attained. When one considers that Cys plays a central role, it is perhaps understandable that the effects of exogenous Cys have been less well studied in higher plants. In this paper, the effects of exogenous Cys on growth, copper accumulation and antioxidative systems in wheat seedlings under 200 μmol/L copper stress culture method. The results showed that the growth of wheat seedlings were inhibited under 200 μmol/L copper stress, and that the radical elongation, biomass and total chlorophyll content decreased highly significantly, the contents of soluble protein and GSH, the activities of superoxidase dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX) increased slightly. Malondialdehyde (MDA) content and the membrane

基金项目: 曲阜师范大学“十一五”计划省级重点建设项目

收稿日期: 2010-06-11; 修訂日期: 2010-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pxy7303@yahoo.com.cn

permeability enhanced significantly. At 1.0—5.0 mmol/L exogenous Cys level, the seedling growth was similar to that of the control ones, and at 1.0 and 2.5 mmol/L exogenous Cys level, the radical elongation, biomass, chlorophyll a and total chlorophyll content were no significantly different compared with those of the control ones, while significantly different from those with Cu treatments ($P<0.01$). Above 1.0 mmol/L exogenous Cys level, copper accumulation increased continuously in wheat leaves and roots. Exogenous Cys significantly enhanced the contents of soluble protein and GSH, and maintained the activities of SOD and APX at a low level continuously. In contrast, MDA content decreased significantly at the level of less than 2.5 mmol/L Cys, while the membrane permeability increased significantly. Polyphenol oxidase (PPO) activity increased firstly and then decreased, showing no significant differences from control ones except with 0.5 mmol/L treatment. On the whole, spraying 1.0—2.5 mmol/L exogenous Cys can enhance the tolerance of wheat seedlings to copper.

Key Words: cysteine (Cys); wheat seedlings; copper stress; glutathione (GSH); antioxidant enzyme

在采矿、冶金和化工等行业中,大量的重金属通过各种途径进入土壤、水体中,造成不同程度的环境污染;其中,铜是造成生态环境重金属污染的主要元素之一。铜是光能自养生物生长发育所必需的微量元素之一,可作为细胞色素氧化酶(COX)、多酚氧化酶(PPO)、抗坏血酸氧化酶(APX)、过氧化物歧化酶(SOD)等多种酶的辅基参与代谢。农业生产中适量提高铜肥的供应量,能有效地促进植物的营养和生殖生长^[1-2]。但是,过量的铜会毒害植物,影响植株的生长发育,造成光合作用速率降低,生长缓慢甚至死亡^[3-4]。

L-半胱氨酸(L-Cys)是组成蛋白质的20种基本氨基酸之一,在植物和细菌中,一些含硫物质如无机硫、亚硫酸、牛磺酸、硫化氢等可转化为Cys,并在生物体内进一步合成其它具有特殊生理功能的含硫有机物。Cys上的巯基为其活性基团,易与铅、汞、砷、铜等重金属盐络合,形成不溶性的硫醇盐,还可与芳香族化合物缩合成硫醚氨酸而具有解毒作用;由半胱氨酸、谷氨酸和甘氨酸各一分子结合形成的谷胱甘肽(GSH),具有重要的抗氧化和整合解毒作用;由GSH为前体合成的植物螯合肽(PCs),是植物和一些真菌所特有的重金属螯合短肽^[5]。关于Cys的功能研究多集中在动物上,如一定浓度的Cys可以提高动物的免疫和抗氧化功能^[6-7]并具有抑菌作用和类SOD活力^[8],而Cys对植物体的直接功能研究较少^[9]。鉴于Cys在机体新陈代谢过程中具有抗氧化及解毒功能的重要作用,本文采用外源Cys与铜胁迫共同作用,研究其对铜胁迫下小麦幼苗生长、铜积累量和抗氧化系统的影响,以探讨外源Cys对重金属胁迫下植物毒害的缓解作用。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

供试小麦品种为济宁16,购自曲阜市种子公司。

选饱满均匀的小麦种子,用5%次氯酸钠浸泡消毒25 min,蒸馏水冲洗4次,再用蒸馏水浸泡12 h,在直径为10 cm培养皿内采用滤纸培养法培养,每个培养皿80粒种子,培养温度25℃,光照强度2500 lx,光周期为光照13 h,黑暗11 h,每24 h用蒸馏水冲洗根部1次。1周后,选取生长状况较一致的幼苗进行处理。

试验设3组,共7个处理:A,培养皿内未加CuSO₄,喷施蒸馏水的处理为对照组(CK);B,培养皿内加入5 mL浓度为200 μmol/L的CuSO₄,并喷施蒸馏水的处理为Cu处理组;C,培养皿内加入5 mL浓度为200 μmol/L的CuSO₄,并分别喷施0.5、1.0、2.5、5.0、10.0 mmol/L Cys溶液的5个处理为Cys处理组。此后于每天9:00用蒸馏水冲洗根部后,向B、C组培养皿内加入5 mL浓度为200 μmol/L的CuSO₄,A组加入等量蒸馏水;再用喷雾器向Cys处理组各处理喷施不同浓度的Cys溶液5 mL,A、B喷施等量的蒸馏水,连续处理7 d。每处理设3个重复,于第8天9:00开始取材测定理化指标。

1.2 试验方法

1.2.1 根长测定采用直接测量法,每处理随机取10株幼苗,分别测定根长,求平均数。

1.2.2 生物量的测定^[10]每处理取10株幼苗,先用自来水洗净,再用去离子水冲洗,擦干,分别对叶片和根称重,然后在95℃下杀青15 min,65℃下烘干、称重,计算生物量。

1.2.3 叶绿素、类胡萝卜素含量的测定^[10]

取各处理植株叶片 0.5g, 研磨匀浆, 80% 丙酮提取, 测定 663、645、440nm 吸光值并计算叶绿素、类胡萝卜素含量, 用 mg/g 表示。

1.2.4 铜含量的测定^[11]

取 1.2.2 中材料研磨, 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 的混合酸浸泡消解 8h, 0.45 μm 膜过滤, 用 TAS-990 原子吸收分光光度计在波长 324.8nm、狭缝宽度 1.3nm、乙炔量 2.0L/min、灯电流 7.5mA 条件下测定铜含量, 用 μg/g 表示。

1.2.5 GSH 含量测定采用荧光分光光度计法^[12]

取 0.5g 小麦的叶片, 先用自来水洗净, 再用去离子水冲洗, 擦干, 加预冷的 EDTA 研磨, HClO_4 沉淀, 再加入邻苯二醛的甲醛溶液, 激发波长 340nm, 发射波长 420nm 下测定荧光强度, 用 μmol/g 表示。

1.2.6 其它生理生化指标的测定

取各处理植株叶片 0.5g, 先用自来水洗净, 再用去离子水冲洗, 擦干, 测定下列指标。

可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝法^[13], 用 mg/g 表示; SOD 活性采用 NBT 光化还原法^[14], 以抑制 NBT 光化还原 50% 所需酶量为 1 个酶活力单位, 用 $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示; PPO 和 APX 活性测定采用碘液滴定法^[10], 以每克鲜组织每分钟氧化 1mg 抗坏血酸为 1 个酶活力单位, 用 $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示; 采用 DDS-307 型电导仪测定电导率并计算叶细胞膜相对透性^[10]; 硫代巴比妥酸(TBA) 法测定 MDA^[15], 用 nmol/g 表示。

1.3 数据分析

试验结果为 3 次重复的平均值±标准误差。采用 Excel2003 及 SPSS10.0 软件进行数据处理与分析, 并进行方差分析和 LSR(0.01 水平) 多重比较。

2 结果与分析

2.1 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗形态、根长和生物量的影响

对照组(CK)小麦幼苗生长势较强, 叶色绿, 植株健壮; Cu 处理组小麦幼苗生长最弱, 部分植株死亡, 且植株矮小、稀疏, 叶色淡绿; 随 Cys 浓度的升高, 小麦幼苗长势逐渐好于 Cu 处理组, 1.0、2.5 和 5.0mmol/L 浓度下, 小麦幼苗生长健壮, 与对照比较几乎无差异; 当 Cys 浓度达到 10.0mmol/L 时, 植株的生长势又变弱。这说明 1.0—5.0mmol/L 的 Cys 利于小麦幼苗缓解铜胁迫。

表 1 可知, Cys 浓度在 1.0 和 2.5mmol/L 下, 植株根长与对照无显著差异, 与 Cu 处理组差异极显著($P<0.01$); 高于 5.0mmol/L 时, 与对照差异极显著, 与 Cu 处理组无差异($P<0.01$)。与对照植株比较, 除 1.0 和 2.5mmol/L 外, 其它 Cys 处理组的根生物量差异极显著

($P<0.01$); 与 Cu 处理组相比, Cys 浓度低于 2.5mmol/L 时, 根生物量差异极显著($P<0.01$)。随 Cys 浓度的升高, 叶片生物量先上升后下降, Cys 浓度在 1.0 和 2.5mmol/L 下, 与对照无显著差异, 与 Cu 处理组差异极显著($P<0.01$)。从小麦幼苗根长和植株生物量来看, Cys 的浓度影响了铜胁迫下小麦根长及生物量的积累, 1.0—2.5mmol/L 的 Cys 利于小麦幼苗缓解铜胁迫。

2.2 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

表 2 可见, 叶绿素 a 和总叶绿素含量均随 Cys 浓度的升高先上升后下降, 低于 5mmol/L 时与对照无差异, 与 Cu 处理组差异极显著($P<0.01$); 不同处理间叶绿素 b 含量无差异, 类胡萝卜素含量变化先上升后下降, 但除 10mmol/L 外, 各 Cys 处理植株及 Cu 处理组与对照比较均无显著差异($P<0.01$)。由此可见, 一定浓度的



图 1 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of Cys on growth of wheat seedlings under copper stress

从左到右依次为: 对照组, Cu 处理组, Cys 处理组(0.5、1.0、2.5、5.0、10.0mmol/L)

Cys 可以提高铜胁迫下小麦幼苗叶片叶绿素 a 含量,而对叶绿素 b 和类胡萝卜素含量影响较小。

表 1 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗根长和生物量的影响

Table 1 Effects of Cys on radical elongation and biomass of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	根长/cm Radical elongation	根生物量/% Root biomass	叶生物量/% Leaf biomass
对照 Control (CK)	4.899±0.245B	18.437±0.281A	14.535±0.117A
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	3.224±0.317C	15.907±0.058C	10.356±0.109D
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	5.395±0.330A	17.135±0.146B	12.942±0.157B
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	4.219±0.263B	18.307±0.131A	14.609±0.098A
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	4.924±0.186B	17.359±0.083AB	14.902±0.150A
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	3.138±0.192C	15.570±0.182C	11.496±0.381C
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	3.714±0.288C	16.121±0.137C	11.425±0.187C

不同字母代表处理间经 LSR 分析,差异极显著($P<0.01$)

表 2 Cys 对铜胁迫下对小麦幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 2 Effects of Cys on chlorophyll and carotenoid contents of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b	总叶绿素/(mg/g) Total chlorophyll	类胡萝卜素/(mg/g) Carotenoid
对照 Control (CK)	0.981±0.014AB	0.243±0.008B	1.223±0.020A	0.339±0.031AB
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	0.672±0.005D	0.273±0.002AB	0.945±0.007B	0.294±0.030AB
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	0.936±0.022B	0.326±0.008 A	1.261±0.030A	0.345±0.008A
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.087±0.042A	0.242±0.007 B	1.328±0.038A	0.312±0.013AB
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.027±0.029AB	0.278±0.005 B	1.305±0.075A	0.353±0.016A
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	0.868±0.048BC	0.243±0.011AB	1.111±0.043A	0.264±0.014BC
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	0.798±0.019C	0.194±0.012 B	0.993±0.134B	0.220±0.021C

2.3 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗铜积累的影响

表 3 可以看出,对照组叶片和根中的 Cu 含量分别为 2.337 μg/g 和 2.796 μg/g,说明 Cu 是植物生长发育的必需元素;而 200 μmol/L 铜离子胁迫下,小麦幼苗铜积累量极显著高于对照,且根部铜积累量均明显高于叶片。随施用 Cys 浓度的升高,叶片和根中铜积累量均呈上升趋势,当 Cys 浓度高于 1.0 mmol/L 时,与 Cu 处理组比较差异极显著($P<0.01$)。结果说明,小麦植株可吸收并积累铜离子,喷施 Cys 可增加铜胁迫下小麦幼苗根和叶片中的铜离子的吸收和积累量。

表 3 Cys 对铜胁迫下小麦铜积累量的影响

Table 3 Effects of Cys on copper accumulation of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	叶片铜含量/(μg/g) Leaf Cu content	根铜含量/(μg/g) Root Cu content
对照 Control (CK)	2.337±0.377D	2.796±0.236E
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	94.364±3.836C	445.677±21.923D
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	79.859±4.702C	481.412±20.259D
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	111.411±3.686B	804.360±24.008C
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	150.364±2.693A	1182.902±50.245B
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	126.807±5.903B	1334.642±24.415A
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	165.413±3.923A	1396.452±20.010A

2.4 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗蛋白质和 GSH 含量的影响

由表 4 可知,Cu 处理组小麦叶片中蛋白质含量为 6.834 mg/g,略高于对照,二者无显著差异,施用外源 Cys 后,小麦幼苗叶片的蛋白质含量与对照及 Cu 处理组比较均达到了极显著差异水平($P<0.01$),说明 Cu 胁迫可引起植株蛋白质表达量增加,施用外源 Cys 可诱导蛋白质大量表达。Cu 处理组小麦 GSH 高于对照,但无显著差异,施用 Cys 后,小麦叶片中 GSH 含量均高于对照和 Cu 处理组,且差异极显著($P<0.01$)。这说明

Cu 胁迫可诱导植株 GSH 表达,而外源 Cys 可提高铜胁迫下小麦幼苗叶片中 GSH 含量。

表 4 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗蛋白质和 GSH 含量的影响

Table 4 Effects of Cys on protein and GSH contents of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	蛋白质含量/(mg/g) Protein content	GSH 含量/(μmol/g) GSH content
对照 Control (CK)	6.516±0.336C	9.556±1.104C
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	6.834±0.146C	10.312±0.972C
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	7.138±0.420B	12.355±1.355B
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	8.681±0.317A	15.012±1.462A
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	7.367±0.313AB	14.494±1.479A
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	7.710±0.217AB	14.798±2.272A
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	7.793±0.469AB	14.921±1.342A

2.5 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗 SOD、PPO 和 APX 活性的影响

表 5 显示,Cu 处理组植株 SOD 和 APX 活性均较高,喷施 Cys 后,小麦叶片 SOD 和 PPO 活性下降并维持在低水平,这两种酶活性与对照均无显著差异,与 Cu 处理组差异显著($P<0.01$)。随 Cys 浓度的升高,PPO 活性虽然表现为先上升后下降趋势,但不同浓度 Cys 处理小麦幼苗 PPO 活性与对照及 Cu 处理组均差异不显著($P<0.01$)。说明铜胁迫诱导了植株 SOD 和 APX 活性的升高,外源 Cys 可降低 Cu 胁迫引起的抗氧化酶 SOD、APX 活性升高。

表 5 Cys 对铜胁迫下小麦幼苗 SOD、PPO 和 APX 活性的影响

Table 5 Effects of Cys on SOD, PPO and APX activities of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	SOD 活性/(U·min ⁻¹ ·g ⁻¹) SOD activity	APX 活性/(U·min ⁻¹ ·g ⁻¹) APX activity	PPO 活性/(U·min ⁻¹ ·g ⁻¹) PPO activity
对照 Control (CK)	37.945±1.051BC	1.301±0.104B	0.345±0.004AB
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	47.933±0.982A	1.663±0.098A	0.330±0.004AB
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	34.653±1.315C	1.294±0.088B	0.297±0.003B
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	39.286±1.160BC	1.320±0.095B	0.408±0.004A
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	40.946±1.800B	1.263±0.135B	0.416±0.002A
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	36.798±0.644BC	1.148±0.065B	0.376±0.002A
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	36.921±0.349BC	1.264±0.086B	0.311±0.003AB

2.6 Cys 对铜胁迫下小麦叶片 MDA 含量和膜透性的影响

由表 6 可知,对照小麦幼苗叶片 MDA 和相对膜透性均较低,而 Cu 处理组则较高。Cys 浓度低于 2.5 mmol/L 时,MDA 含量与对照无显著差异,与 Cu 处理组及其它浓度差异显著($P<0.01$)。Cys 浓度低于 5.0 mmol/L 时,各处理细胞膜透性与对照均无显著差异,但与 Cu 处理组差异极显著($P<0.01$)。说明一定浓度的 Cys 可以降低铜胁迫下小麦幼苗 MDA 的积累,降低膜透性,缓解重金属胁迫对植株造成的伤害。

表 6 Cys 对铜胁迫下小麦叶片 MDA 含量和膜透性的影响

Table 6 Effects of Cys on MDA content and membrane permeability of wheat seedlings under copper stress

处理 Treatment	MDA 含量/(nmol/g) MDA content	细胞膜透性/% Membrane permeability
对照 Control (CK)	1.357±0.034B	72.829±2.086B
200 μmol/L Cu 处理组 treatment	2.099±0.150A	81.046±2.430A
0.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.324±0.149B	74.263±3.596B
1.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.417±0.128B	68.875±2.381BC
2.5 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.426±0.051B	70.781±2.659B
5.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	1.898±0.115A	78.638±1.313AB
10.0 mmol/L Cys+200 μmol/L Cu	2.020±0.106A	84.839±1.417A

3 讨论

高浓度的铜积累于根部,致使根受到损伤,根尖硬化,生长点细胞分裂受到抑制,主根不能伸长^[16];铜还可与植物叶绿体中蛋白质功能基团-SH结合或取代其中的Fe²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺等离子,致使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化而失活,叶绿素含量降低^[17-18]。本试验结果显示,单独使用200μmol/L Cu处理组小麦幼苗生长势受到抑制、根长变短,生物量、叶绿素和类胡萝卜素含量下降,膜质过氧化产物MDA含量和细胞膜相对透性提高,这与前人结果一致^[19-20]。重金属对植物造成氧化胁迫产生活性氧(ROS),植物可通过一系列的抗氧化酶(SOD、CAT、PPO、APX等)及非酶促抗氧化剂(GSH、Cys、维生素C等)清除ROS^[19,21-22]。植株一旦受到重金属胁迫,GSH的含量无论是在硫供给充足或者不足的情况下都会上升^[23],本试验结果表明,Cu处理组小麦幼苗叶片中GSH以及抗氧化酶活性(SOD、PPO)均高于对照,说明高浓度的Cu可作为胁迫信号分子,激活了植株叶片中的活性氧清除系统^[24],并引起了一些非酶促抗氧化剂含量的升高。

Cys是植物硫营养代谢中的枢纽,它在细胞内积累量很低,但通量很高,植物以Cys为前体,合成众多具有重要生物学功能的代谢产物如GSH、植物螯合肽(PCs)、甲硫氨酸(Met)、S-腺苷蛋氨酸(SAM)、金属硫蛋白(MTs)等,直接关系到植物耐逆境胁迫和农作物的产量与品质^[25]。有报道称,耐镉毒的黑麦植株中硫的积累成倍增加,这与作物体内含有硫的金属螯合肽的大量形成有关^[26];过量表达GSH1的植物对于重金属Cd²⁺的耐受力显著提高^[27];还有报道显示在重金属胁迫的情况下,拟南芥幼芽中Cys含量上升,同时GSH还原酶的活性显著升高^[28]。而外源Cys能够提高大麦叶片中抗氧化物的含量,降低脂质过氧化,缓解SO₂造成的损伤^[9];外源GSH则能够缓解拟南芥^[29]、青菜和大白菜镉毒害^[30]。本试验结果显示,Cys在1.0—5.0mmol/L时,受铜胁迫的小麦幼苗生长势与对照无差异,在1.0和2.5mmol/L下,根长、生物量、叶绿素a和总叶绿素含量与对照无显著差异,与Cu处理组差异显著($P<0.01$),这与杨靖在Cys对拟南芥、白菜种子萌发研究结果一致^[31]。本试验还发现,外源Cys可提高铜胁迫下小麦幼苗可溶性蛋白和还原性谷胱甘肽(GSH)含量,使SOD和APX活性持续维持在较低水平,降低MDA含量和相对膜透性。其原因可能有以下几个方面,首先,Cys及其代谢产物如GSH、PCs等易与铅、汞、砷、铜等重金属盐络合,形成不溶性的化合物,降低了细胞内游离的重金属离子浓度,防止金属离子敏感酶变性失活,这些复合物随之转运到液泡,并且在其它酶的作用下被排出细胞外,从而减轻了重金属对植物的毒害作用^[32-34]。其次,Cys上的巯基作为活性基团,比GSH有更高的还原电位,更容易被氧化,进入植株体内后可直接参与保护叶绿体及其它膜结构的完整性,调节体内抗氧化系统平衡。第三,Cys是合成植物体内重要抗氧化物GSH的直接底物,由GSH参与的维生素C-谷胱甘肽-辅酶(AsA-GSH-NADPH)循环,被认为是重要的过氧化氢(H₂O₂)非酶促清除活性氧途径^[35],在抗氧化系统中占有非常重要的地位;适宜浓度的Cys大幅提高了小麦幼苗GSH的含量,降低了SOD、PPO等抗氧化酶活性,可能是Cys在谷胱甘肽合成酶的作用下大量合成GSH作为有机硫的贮存和运送形式,代替了一些活性氧清除酶行使清除ROS功能,降低了抗氧化酶活性^[36-38]。

Lee等报道,施用过量的Cys时,可对转入AtPC1基因的拟南芥造成毒害^[29]。本试验也发现,喷施10mmol/L的高浓度的Cys可减弱植株的生长势,降低生物量及叶绿素含量,提高MDA含量和细胞相对膜透性。转入AtPC1基因的拟南芥虽然比野生型具有更高的PCs产量,但对镉却高度敏感;PCs是富含Cys的化合物,因此Lee等认为,虽然PCs可螯合植物体内的金属并有缓解重金属毒害的作用,但仅仅使PCs过量合成并不足以提高植物对镉的抗性,过量的PCs本身可能对植物产生毒害作用,还应该同时考虑细胞中与抗Cd有关的其它一些因素的协调性,如PC-Cd²⁺复合体向液泡转运的能力等^[39]。施用Cys提高了植株PCs的合成量,进而螯合进入体内的铜离子,但由于PCs的解毒作用还依赖于PC-Cd²⁺复合体向液泡转运的能力,因此,随Cys浓度的升高,小麦叶片和根系中的铜积累量呈上升趋势。另外,本试验采用滤纸水培方式,根部首先接触到重金属,根细胞壁中存在的大量交换位点可以吸附并固定重金属离子,根部分泌的一些有机物质也可以与铜离子结合形成稳定的配位化合物,从而阻止重金属离子向茎叶运输,致使植株根部铜积累量明显高于叶片。

Cys含有活性巯基,不能跨膜运输,需要一些转运载体介导跨膜,Cys在溶液中非常不稳定,数小时内就会

被氧化成胱氨酸^[40]。迄今已经分离了20多种哺乳动物氨基酸转运载体蛋白(LAT1)^[41],在大脑、肝脏、骨髓等组织和癌细胞中均有大量表达,可用于多种氨基酸的跨膜运输^[42],但至今未见有关于植物体内专一性Cys转运子分离、定位的报道。有报道在水稻中分离出一个GSH的转运蛋白家族,并发现这类转运子不仅可以介导GSH跨膜,而且还能够帮助一些含S的短肽和蛋白跨膜^[43]。因此,推测本试验中喷施的Cys可能是以胱氨酸的形式被小麦植株叶片吸收并进入细胞内部后,再分解成Cys用于合成其它活性物质,这还有待进一步研究。

综上所述,200μmol/L的铜离子胁迫减弱小麦幼苗的生长势,降低生物量及叶绿素含量,刺激了GSH含量、SOD、APX活性升高,提高MDA含量和细胞相对膜透性,而1.0—2.5mmol/L的外源Cys能增强铜胁迫下小麦幼苗的生长势,提高生物量和叶绿素含量,诱导了GSH的大量表达,降低了SOD、APX活性、MDA含量和细胞相对膜透性,有效地缓解小麦幼苗铜毒害作用。

References:

- [1] Li H Y, Wang W L, Yang J T, Hou Y L. Effects of combined application of copper and nitrogen on grain yield and protein in winter wheat. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008, (3): 63-65.
- [2] Zheng X, Xiao W. The effects of Cu on the germination and seedling growth of wheat. *Journal of Xuzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2003, 21(3): 64-66.
- [3] Brown M T, Newman J E. Physiological responses of *Gracilaria longissima* (S. G. Gmelin) Steentoft, L. M. Irvine and Farnham (Rhodophyceae) to sub-lethal copper concentrations. *Aquatic Toxicology*, 2003, 64(2): 201-213.
- [4] Han T, Kang S H, Park J S, Lee H K, Brown M T. Physiological responses of *Ulva pertusa* and *U. armoricana* to copper exposure. *Aquatic Toxicology*, 2008, 86(2): 176-184.
- [5] Zenk M H. Heavy metal detoxification in higher plants — a review. *Gene*, 1996, 179(1): 21-30.
- [6] Tang W J, Tu Q, Liu Z Q, Huang R L. Research advances in cysteine metabolism and immune function. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2010, 22(2): 150-154.
- [7] Aruoma O I, Halliwell B, Hoey B M, Butler J. The antioxidant action of N-acetylcysteine: its reaction with hydrogen peroxide, hydroxyl radical superoxide, and hypochlorous acid. *Free Radical Biology and Medicine*, 1989, 6(6): 593-597.
- [8] Chen Y K. Study on bacteria-inhibiting effects of cysteine and its SOD-like activity. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2004, 27(1): 65-67.
- [9] Yi H L, Liu J. Protective effects of cysteine against SO₂-induced oxidative damage in barley. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(2): 270-273.
- [10] Gao J F. *Technology of Plant Physiology*. Xi'an: World Publishing Company, 2000: 129-132, 192-203.
- [11] Xie S J, Xie S L, Xie B M. Analysis of Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn in algae. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(3): 615-616.
- [12] Cao X Z, Chen Y. Measuring of glutathione in wheat germ with a fluorophotometer. *Cereal and Feed Industry*, 2001, (11): 46-47.
- [13] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [14] Beyer W F Jr, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 1987, 161(2): 559-566.
- [15] Heath R L, Parker L. Photoperoxidation of isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1968, 125(1): 189-198.
- [16] Ni C Y, Zeng H, Huang Y Y, Jian M F, Zhu D. Antidotal function of calcium to resist copper toxicity during the growth of *Astragalus Sinicus* L. *Ecology and Environmental*, 2009, 18(3): 920-924.
- [17] Liu S H, Liu X H, Hou J, Chi G Y, Cui B S. Study on the spectral response of *Brassica Campestris* L. leaf to the copper pollution. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(2): 202-208.
- [18] Rousos P A, Harrison H C. Identification of differential responses of cabbage cultivars to copper toxicity in solution culture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1987, 112(6): 928-931.
- [19] Hu Z B, Chen Y H, Wang G P, Shen Z G. Effects of copper stress on growth, chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities of zea mays seedlings. *Chinese Bulletin of Botany*, 2006, 23(2): 129-137.
- [20] Collén J, Pioto E, Pedersen M, Colepicolo P. Induction of oxidative stress in the red macroalga *gracilaria tenuistipitata* by pollutant metals. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 45(3): 337-342.
- [21] Halliwell B, Gutteridge J M. Oxygen toxicity, oxygen radicals, transition metals and disease. *Biochemical Journal*, 1984, 219(1): 1-14.
- [22] Fernandes J C, Henriques F S. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants. *The Botanical Review*, 1991, 57(3): 246-273.
- [23] Xiang C B, Oliver D J. Glutathione metabolic genes coordinately respond to heavy metals and jasmonic acid in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 1998, 10

- (9) : 1539-1550.
- [24] Zhang H Y, Jiang Y N, He Z Y, Ma M. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*). *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(9) : 977-984.
- [25] Loscos J, Naya L, Ramos J, Clemente M R, Matamoros M A, Becana M. A reassessment of substrate specificity and activation of phytochelatin synthases from model plants by physiologically relevant metals. *Plant Physiology*, 2006, 140(4) : 1213-1221.
- [26] Li S T, Lin B, Zhou W. Effects of previous elemental sulfur applications on oxidation of additional applied elemental sulfur in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 42(2) : 146-152.
- [27] Hesse H, Nikiforova V, Gakière B, Hoefgen R. Molecular analysis and control of cysteine biosynthesis: integration of nitrogen and sulphur metabolism. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(401) : 1283-1292.
- [28] Li Y, Dhankher O P, Carreira L, Balish R S, Meagher R B. Arsenic and mercury tolerance and cadmium sensitivity in *Arabidopsis* plants expressing bacterial γ -glutamylcysteine synthetase. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(6) : 1376-1386.
- [29] Lee S, Moon J S, Ko T S, Petros D M, Goldsbrough P B, Korban S S. Overexpression of *Arabidopsis* phytochelatin synthase paradoxically leads to hypersensitivity to cadmium stress. *Plant Physiology*, 2003, 131(2) : 656-663.
- [30] Liu C P, Zheng A Z, Tian N, Shen Z G. Alleviation of glutathione on cadmium toxicity of *Brassica chinensis* L. and *Brassica pekinensis* Rupr. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(4) : 26-30.
- [31] Yang J, Sun H Y, Li Y Y. Stress on the growth of plants in vitro of non-essential amino acids. *Biotechnology*, 2008, 18(4) : 72-74.
- [32] Ha S B, Smith A P, Howden R, Dietrich W M, Bugg S, O'Connell M J, Goldsbrough P B, Cobbett C S. Phytochelatin synthase genes from *Arabidopsis* and the yeast *Schizosaccharomyces pombe*. *Plant Cell*, 1999, 11 : 1153-1164.
- [33] Tripathi R D, Rai U N, Gupta M, Chandra P. Induction of phytochelatins in *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle under cadmium stress. *Bull of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 56(3) : 505-512.
- [34] Alscher R G. Biosynthesis and antioxidant function of glutathione in plants. *Physiologia Plantarum*, 1989, 77(3) : 457-464.
- [35] Noctor G, Foyer C H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49 : 249-279.
- [36] Gomez L D, Noctor G, Knight M R, Foyer C H. Regulation of calcium signaling and gene expression by glutathione. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(404) : 1851-1859.
- [37] Fratelli M, Goodwin L O, Ørom U A, Lombardi S, Tonelli R, Mengozzi M, Ghezzi P. Gene expression profiling reveals a signaling role of glutathione in redox regulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(39) : 13998-14003.
- [38] Meyer A J, Hell R. Glutathione homeostasis and redox-regulation by sulfhydryl groups. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3) : 435-457.
- [39] De Knecht J A, Koevoets P L M, Verkleij J A C, Ernst W H O. Evidence against a role for phytochelatins in naturally selected increased cadmium tolerance in *Silene vulgaris* (Moench) Garcke. *New Phytologist*, 1992, 122(4) : 681-688.
- [40] Leustek T, Saito K. Sulfate transport and assimilation in plants. *Plant Physiology*, 1999, 120(3) : 637-644.
- [41] Yanagida O, Kanai Y, Chaikroungdua A, Kim D K, Segawa H, Nii T, Cha S H, Matsuo H, Fukushima J I, Fukasawa Y, Tani Y, Taketani Y, Uchino H, Kim J Y, Inatomi J, Okayasu I, Miyamoto K I, Takeda E, Goya T, Endou H, Kanai Y. Human L-type amino acid transporter1 (LAT1): characterization of function and expression in tumor cell lines. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2001, 1514(2) : 291-302.
- [42] Asano S, Kameyama M, Oura A, Morisato A, Sakai H, Tabuchi Y, Chaikroungdua A, Endou H, Kanai Y. L-type amino acid transporter-1 expressed in human astrocytomas, U343MGa. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2007, 30(3) : 415-422.
- [43] Zhang M Y, Bourbouloux A, Cagnac O, Srikanth C V, Rentsch D, Bachhawat A K, Delrot S. A novel family of transporters mediating the transport of glutathione derivatives implants. *Plant Physiology*, 2004, 134(1) : 482-491.

参考文献:

- [1] 李红英, 王文亮, 杨建堂, 侯彦林. 铜氮配施对冬小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响. *中国土壤与肥料*, 2008, (3) : 63-65.
- [2] 郑曦, 肖炜. Cu 对小麦种子萌发及幼苗生长的影响. *徐州师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 21(3) : 64-66.
- [6] 汤文杰, 涂强, 刘志强, 黄瑞林. 半胱氨酸的代谢与免疫功能研究进展. *生命科学*, 2010, 22(2) : 150-154.
- [8] 陈月开. 半胱氨酸的抑菌作用与类SOD活力. *山西大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(1) : 65-67.
- [9] 仪慧兰, 刘静. 半胱氨酸对 SO₂致大麦氧化损伤的缓解作用. *山西大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(2) : 270-273.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验技术. 西安: 世界图书出版社, 2000: 129-132, 192-203.
- [11] 谢苏婧, 谢树莲, 谢宝妹. 藻类植物中钙、镁、铁、锰、铜和锌含量分析. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(3) : 615-616.
- [12] 曹心志, 陈彦. 荧光法测定小麦胚中的谷胱甘肽. *粮食与饲料工业*, 2001, (11) : 46-47.
- [16] 倪才英, 曾珩, 黄玉源, 简敏菲, 朱筠. 钙对紫云英铜害的解毒作用. *生态环境学报*, 2009, 18(3) : 920-924.
- [19] 胡筑兵, 陈亚华, 王桂萍, 沈振国. 铜胁迫对玉米幼苗生长、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性的影响. *植物学通报*, 2006, 23(2) : 129-137.
- [30] 刘传平, 郑爱珍, 田娜, 沈振国. 外源GSH对青菜和大白菜镉毒害的缓解作用. *南京农业大学学报*, 2004, 27(4) : 26-30.
- [31] 杨靖, 孙海燕, 李友勇. 11种非必需氨基酸对离体植物生长的胁迫作用. *生物技术*, 2008, 18(4) : 72-74.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31 ,No. 12 June ,2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Effect assessment of the project of grain for green in the karst region in Southwestern China: a case study of Bijie Prefecture	LI Hao, CAI Yunlong, CHEN Ruishan, et al (3255)
The effect of dispersal on the population dynamics of a host-parasite system in fragmented landscape	SU Min (3265)
The effect of spatial scales on wetland functions evaluation: a case study for coastal wetlands in Yancheng, Jiangsu Province	OU Weixin, YE Lifang, SUN Xiaoxiang, et al (3270)
Effects of simulated nitrogen deposition on nutrient balance of Chinese fir (<i>Cunninghamia lanceolata</i>) seedlings	FAN Houbao, LIAO Yingchun, LIU Wenfei, et al (3277)
The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of eastern China	HE Shuxia, LI Xuyong, MO Fei, et al (3285)
The ecological responses of <i>Pinus tabulaeformis</i> forests in Taiyue Mountains of Shanxi to artificial Harvesting	GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (3296)
The influence of the long-term application of organic manure and mineral fertilizer on microbial community in calcareous fluvo-aquic soil	ZHANG Huanjun, YU Hongyan, DING Weixin (3308)
Endophytic fungal diversity of five dominant plant species in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province, China	HE Caimei, WEI Daqiao, LI Haiyan, et al (3315)
Seedling recruitment in desert riparian forest following river flooding in the middle reaches of the Tarim River	ZHAO Zhenyong, ZHANG Ke, LU Lei, et al (3322)
Scaling up for transpiration of <i>Pinaceae schrenkiana</i> stands based on 8hm permanent plots in Tianshan Mountains	ZHANG Yutao, LIANG Fengchao, CHANG Shunli, et al (3330)
Responses of soil enzyme activities and microbial biomass N to simulated N deposition in Gurbantunggut Desert	ZHOU Xiaobing, ZHANG Yuanning, TAO Ye, et al (3340)
Effects of Pb on growth, heavy metals accumulation and chloroplast ultrastructure of <i>Iris lactea</i> var. <i>Chinensis</i>	YUAN Haiyan, GUO Zhi, HUANG Suzhen (3350)
Effects of temperature and sap flow velocity on CO ₂ efflux from stems of three tree species in spring and autumn in Northeast China	WANG Xiuwei, MAO Zijun, SUN Tao, et al (3358)
The soil seed bank of <i>Eupatorium adenophorum</i> along roadsides in the south and middle area of Yunnan, China	TANG Yingyin, SHEN Youxin (3368)
Extracting the canopy structure parameters using hemispherical photography method	PENG Huanhua, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (3376)
The CCA analysis between grasshopper and plant community in upper reaches of Heihe River	ZHAO Chengzhang, ZHOU Wei, WANG Keming, et al (3384)
Community structure characteristics of phytoplankton in argun River Drainage Area in autumn	PANG Ke, YAO Jinxian, WANG Hao, et al (3391)
Spatial and temporal variation of phytoplankton and impacting factors in Jiulongjiang Estuary of Xiamen, China	WANG Yu, LIN Mao, CHEN Xingqun, et al (3399)
Effect of bank type on fish biodiversity in the middle-lower reaches of East Tiaoxi River, China	HUANG Liangliang, LI Jianhua, ZOU Limin, et al (3415)
Study on dynamic changes of soil and water loss along highway based on RS/GIS: an example of Yujing expressway	CHEN Aixia, LI Min, SU Zhixian, et al (3424)
The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment	HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (3432)
Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern	GAO Bin, LI Xiaoyu, LI Zhigang, et al (3441)
Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau	LI Jinchang, WANG Wenli, HU Guangyin, et al (3451)
Effect of chicken manure application on Cu and Zn accumulation in soil and <i>Brassica sinensis</i> L.	ZHANG Yan, LUO Wei, CUI Xiaoyong, et al (3460)
GIS analysis of structural characteristics of pollution sources in irrigable farmland in Ningxia China	CAO Yanchun, FENG Yongzhong, YANG Yinlu, et al (3468)
Effects of pre-sowing soil moisture and planting patterns on photosynthetic characteristics and yield of summer soybean	LIU Yan, ZHOU Xunbo, CHEN Yuhai, et al (3478)
<i>In situ</i> study on influences of different fertilization patterns on inorganic nitrogen losses through leaching and runoff: a case of field in Nansi Lake Basin	TAN Deshui, JIANG Lihua, ZHANG Qian, et al (3488)
Effects of AM fungi on leaf photosynthetic physiological parameters and antioxidant enzyme activities under low temperature	LIU Airong, CHEN Shuangchen, LIU Yanying, et al (3497)
Effects of exogenous cysteine on growth, copper accumulation and antioxidative systems in wheat seedlings under Cu stress	PENG Xiangyong, SONG Min (3504)
Review and Monograph	
The horizon scanning technology and its application prospect in Ecology	HU Zimin, LI Jingjing, LI Wei, et al (3512)
Scientific Note	
The gas exchange characteristics of four shrubs on the northern slope of Kunlun Mountain	ZHU Juntao, LI Xiangyi, ZHANG Ximing, et al (3522)
Effect of DEM data at different scales on the accuracy of forest Ecological Classification system	TANG Lina, HUANG Juecong, DAI Limin (3531)
Canopy interception of rainfall by Bamboo plantations growing in the Hill Areas of Southern Jiangsu Province	JIA Yongzheng, HU Haibo, ZHANG Jiayang (3537)
Effects of exotic species slash pine (<i>Pinus elliottii</i>) litter on the structure and function of the soil microbial community	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3543)
The carbon emission analysis of Shenzhen Metro	XIE Hongyu, WANG Xixiang, YANG Muzhuang, et al (3551)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

*《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

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 31 卷 第 12 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 12 2011

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