

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

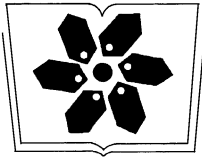
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112021843

汪楠楠, 胡珊, 吴丹, 王友保. 柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 0631-0639.

Wang N N, Hu S, Wu D, Wang Y B. Effects of CA and EDTA on growth of *Chlorophytum comosum* in copper-contaminated soil. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0631-0639.

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响

汪楠楠¹, 胡珊¹, 吴丹¹, 王友保^{1,2,*}

(1. 安徽师范大学 生命科学院, 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学 生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室, 芜湖 241000)

摘要:通过盆栽试验研究了在铜污染条件下, 柠檬酸和 EDTA 作为活化剂对铜污染土壤中吊兰生长状况的影响。结果表明, 柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集量的影响与其对土壤中铜的活化能力呈显著性正相关。柠檬酸对土壤铜有较强的活化作用, 能够有效提高吊兰对铜的吸收, 且在浓度为 5mmol/L 时效果最为明显, 而较高的铜富集量又抑制了吊兰的生长; EDTA 对吊兰富集能力的影响相对较弱, 对吊兰的生长也无显著影响。相比而言, 柠檬酸对铜污染土壤中吊兰生长状况的影响比 EDTA 大。

关键词:铜; 柠檬酸; EDTA; 吊兰; 生长

Effects of CA and EDTA on growth of *Chlorophytum comosum* in copper-contaminated soil

WANG Nannan¹, HU Shan¹, WU Dan¹, WANG Youbao^{1,2,*}

1 College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

2 Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui, Wuhu 241000, China

Abstract: Rapid development of industry and unceasing emergence of factories lead to an increased soil pollution and make it an urgent and rigorous environmental issue worldwide. During which, one of the most serious problems is metal pollution due to the growing risk of heavy metal uptake by human and livestock. Copper is an essential element for all organisms at low concentrations, while it is toxic when absorbed excessively. The normal concentration of copper in plant tissues is 5—20 mg/kg, and the toxicity effects are likely to occur if it exceeds the upper limit. During recent decades, in comparison with physical and chemical remediation, phytoremediation had been reported to be more effective, non-intrusive and less expensive. All these characteristics together with the aesthetically pleasing feature make it the most socially approved technology to remediate polluted soil. Ornamental plant has become a novel source of phytoremediation species due to their multi-functions: pollution monitoring and control as well as landscaping. Extensive studies of the tolerance and accumulation of heavy metal by plants underpinned their utilizations in the restoration of heavy metal contaminated soil. Phytoextraction, a form of phytoremediation, is one example of applying plants to remove contaminants from soil by concentrating them in the harvestable parts and based on the hyper-accumulation capacity of heavy metal by certain species. To improve metal enrichment of plants, chelators could be used as activators of metal to facilitate the procedure of plants to absorb available metal. Citric acid (CA), a natural metal chelator, is a kind of low-molecular-weight organic acids (LMWOAs). And ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) is a representative kind of artificially synthesized metal chelators. Recently, numerous articles focused on the researches about activation of heavy metal by chelators.

This paper explored the effects of CA and EDTA on the growth of *Chlorophytum comosum*, a type of ornamental plants,

基金项目:国家自然科学基金(31070401);安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ 2009 A 104, KJ 2010 A 152);重要生物资源保护与利用研究安徽省重点实验室基金资助项目;安徽师范大学生命科学院重点实验室与重点学科开放基金资助项目

收稿日期:2011-12-02; 修订日期:2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wybpmm@126.com

in copper-contaminated soil by pot-planting. The experiments included effects of CA and EDTA on content of available copper in soil, copper enrichment, morphological indicators, biomass, some physiological indexes and activities of antioxidant enzymes of *C. comosum*. The results showed that, the relationship, between influence of CA and EDTA on copper enrichment of *C. comosum* and capability of them on activating copper in soil, was a significantly positive correlation. CA could effectively improve the ability on copper absorption of *C. comosum* through activating copper in soil, and the best concentration was 5mmol/L. However, higher metal enrichment inhibited the growth of plants, so the morphological indicators and biomass of *C. comosum* both showed a crosscurrent to the trend of copper enrichment under treatments of CA. The influence of EDTA on copper enrichment of *C. comosum* was less intensively, and the effects on growth of *C. comosum* was also not significant. In contrast, the effects of CA on growth of *C. comosum* in copper-contaminated soil was superior to EDTA, which provided theoretical foundation and scientific basis for widely applying CA and EDTA in phytoremediation.

Key Words: copper; CA; EDTA; *C. comosum*; growth

随着我国经济建设的腾飞,工矿业迅速发展,环境污染问题也日益严峻,其中土壤的重金属污染更是令人堪忧。在此背景下,土壤的铜污染已经日益成为人们关注的焦点,而铜污染土壤的修复和治理也作为一个全球性研究课题,吸引着众多的学者和专家。经过近年来的不断探索,污染土壤的植物修复技术由于其成本低、效果显著以及不会造成二次污染等优点,为解决土壤重金属污染问题提供了一条新的绿色途径^[1]。

重金属在土壤中一般以多种形态赋存,不同的化学形态对植物的有效性不同。重金属生物有效态是指能被植物所吸收的那部分重金属^[2]。植物修复的首要目标应是减少土壤有效态重金属浓度,而不是土壤重金属总量,所以植物修复技术的效率在很大程度上取决于对重金属生物有效态的吸收^[3]。

研究表明,螯合剂对土壤中的重金属有一定的活化作用,能够通过扰动污染物在土壤液相浓度和固相浓度之间的平衡,提高重金属的有效态含量。这种施用螯合剂或配位基诱导或强化植物超富集作用被称为螯合诱导修复技术(Chelate-induced phytoremediation)。林琦等人研究认为,柠檬酸可降低土壤对铅、镉的吸附,即活化了土壤中的铅和镉^[4]。吴龙华等人对人工螯合剂 EDTA 进行了研究,发现施用 3mmol/kg EDTA 大幅度提高了土壤溶液中铜、锌、镉和铅的浓度^[5]。

观赏植物吊兰(*Chlorophytum comosum*)隶属于百合科吊兰属,具有分布性广,环境竞争力强和易于栽培等特点,对重金属具有较好的耐性与积累特性^[6]。柠檬酸(Citric acid, CA)是一种低分子有机酸,为天然螯合剂;EDTA(Ethylenediaminetetraacetic acid, 乙二胺四乙酸)则是人工合成螯合剂的代表性物质。

本文采用吊兰对土壤中的铜进行提取,通过对相关指标的实验分析,初步讨论了在梯度浓度柠檬酸或 EDTA 的影响下,铜污染土壤中吊兰生长状况的变化,为柠檬酸和 EDTA 在土壤植物修复中的应用提供了理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试植物为吊兰。2011 年 9 月自吊兰母枝剪下带有气生根的吊兰幼苗,培养 2 周,待幼苗生根稳定后,选取根长 5cm、株高 8cm 左右,生长状况近似的幼苗进行实验。供试土壤来源于安徽师范大学后山,基本性质为黄棕壤,最大持水量为 60%,有机质含量 13.35g/kg,全氮、全磷、全钾和土壤全铜含量分别为 1.25、0.15、10.89、26.35g/kg。

1.2 实验设计

土壤风干后过 2mm 筛备用。在直径为 12.5cm 的塑料花盆中分别加入上述土壤 250g,在前期预实验的基础上,一次性加入 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,使土壤的初始铜含量为 400mg/kg,以不添加铜的土壤作为空白组(CK),将土壤静置 2 周。

静置结束后,将吊兰幼苗栽入实验组盆中,每盆 2 株。(每种处理各设置 4 盆;3 盆为栽种吊兰的实验组,1 盆为不种吊兰的对照组。)吊兰栽培 20d 后,采用滴灌的方法施加柠檬酸或 EDTA 溶液。柠檬酸和 EDTA 分别设置了 5 个处理浓度,即 0、2.5、5、7.5、10mmol/L,施加量为 5mL/d,共 40d。待栽培结束,立即对土壤和吊兰的相关指标进行实验分析。

1.3 实验方法

1.3.1 土壤全铜和有效态铜含量的测定

将花盆中的土壤倒出,风干,过 0.1mm 筛备用。取土样经盐酸-硝酸-高氯酸消解后,使用日本岛津(SHIMADZU)AA-6800 型原子吸收分光光度计,以火焰原子吸收分光光度法测定其全铜含量。另取土样经 0.1mol/L 稀 HCl 浸泡并振荡 90min 后,同样采用火焰原子吸收分光光度法测定其有效态铜含量。

1.3.2 吊兰铜富集量的测定

称取烘干后的吊兰材料粉末 0.2g,加 10mL 混酸(HNO_3 :60% HClO_4 : H_2SO_4 = 8:1:1)浸泡过夜。次日高温消化至溶液澄清,以 0.5% HCl 定容至 25mL。双层滤纸过滤,取滤液,用日本岛津(SHIMADZU)AA-6800 型原子吸收分光光度计测定其吸光度和对应的待测液铜浓度,分别计算吊兰地上部分和地下部分的铜含量,单位为 mg/kg。

1.3.3 吊兰形态学指标的测定

将吊兰从盆中连根移出,仔细清理掉附着在根系表面的土壤,并用刻度尺(最小分度单位为 mm)分别量取吊兰的根长(cm)和株高(cm)。

1.3.4 吊兰生物量的测定

将吊兰洗净,用剪刀从根部剪开,再用电子天平分别称取其地上部分和地下部分鲜重(g)。

1.3.5 吊兰叶片几种生理指标的测定

电导率(Electrical conductivity, EC):剪取吊兰叶片 0.2g,剪成 1cm 长小段,加 20mL 双蒸水浸泡,振荡 90min,用 DDS-11A 数显电导仪测定电导率,单位为 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

分别以 TCA 和丙酮提取丙二醛(Malondialdehyde, MDA)和叶绿素(Chlorophyll, Chl),并用 WFJ7200 型可见光分光光度计测定其含量^[7]。

1.3.6 吊兰叶片抗氧化酶活性的测定

过氧化氢酶(Catalase, CAT)的活性测定采用高锰酸钾滴定法^[8]。

过氧化物酶(Peroxidase, POD)的活性测定采用愈伤木酚法^[7]。

超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)的活性测定采用 NBT 光还原法^[7]。

1.4 数据分析

本节主要采用的是 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 两种软件。使用 Microsoft Excel 2003 对平行样的平均值和标准差进行计算,同时使用 SPSS 17.0 进行不同处理之间的多重比较,以及数据之间的相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 柠檬酸和 EDTA 对土壤中铜含量的影响

如图 1 所示,随着柠檬酸施加浓度的上升,土壤全铜含量先增大后减小,且在柠檬酸浓度为 7.5mmol/L 时达到峰值 394.9mg/kg,显著高于不施加柠檬酸时的 371.2mg/kg;在 EDTA 浓度为 2.5mmol/L 时,土壤全铜的含量达到最大值 384.8mg/kg,高于在相同浓度柠檬酸调节下的土壤全铜含量,而在其他浓度的 EDTA 处理下,土壤全铜含量均低于柠檬酸的处理结果。

土壤中重金属的环境行为和生态效应除了受到土壤中重金属的总含量的影响,主要取决于其存在的形态,即生物有效态。有效态一般主要是指提取的水溶态和交换态等重金属,这部分重金属在土壤中具有较大的活性,容易被植物所吸收利用^[9]。因此,土壤有效态铜含量的变化可以直接反映柠檬酸和 EDTA 对铜的活化效果的优劣。

如图 2 所示,随着柠檬酸处理浓度的上升,土壤中有效态铜的含量同样是先增大后减小,且在柠檬酸浓度为 5mmol/L 时达到峰值 255.4mg/kg,显著高于不施加柠檬酸时的 235.45mg/kg;EDTA 对土壤铜的活化效果要低于相同浓度的柠檬酸,且土壤有效态铜含量在 EDTA 的影响下出现波动,也在浓度为 5mmol/L 时达到峰值 245.25mg/kg。

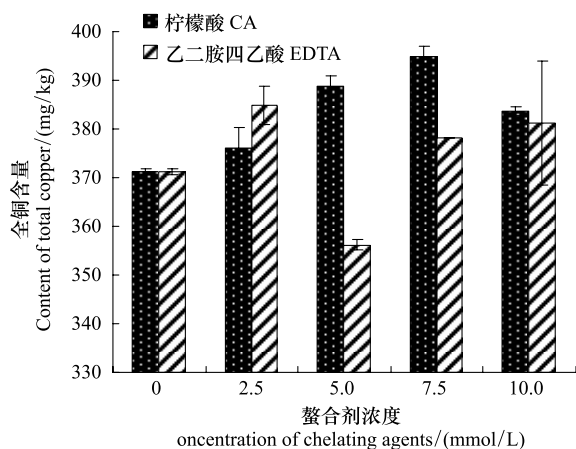


图 1 柠檬酸和 EDTA 对土壤全铜含量的影响

Fig. 1 Effects of CA and EDTA on content of total copper in soil

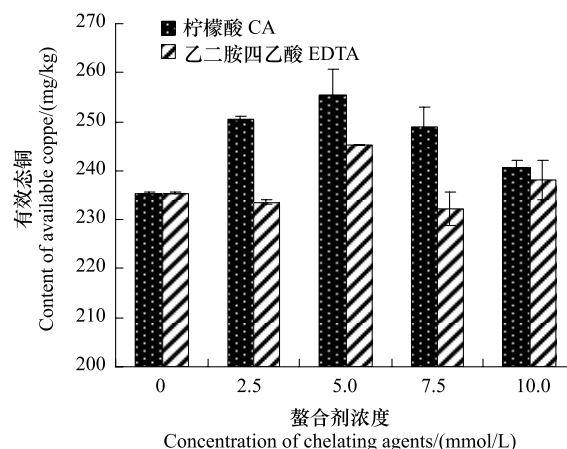


图 2 柠檬酸和 EDTA 对土壤有效态铜含量的影响

Fig. 2 Effects of CA and EDTA on content of available copper in soil

由图 1、图 2 可知,低浓度的柠檬酸和 EDTA 能够显著活化土壤中的铜,而这种活化作用在高浓度水平时却有所降低。这可能是由于高浓度的柠檬酸和 EDTA 会让土壤的 pH 值略有下降,从而使土壤中的各种生理生化活动都受到一定的影响,间接导致了这两种螯合剂对土壤铜活化作用的减弱。

可见,柠檬酸和 EDTA 对土壤铜的活化作用均在浓度为 5mmol/L 时达到最大,且柠檬酸的活化效果更强。

2.2 柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集作用的影响

由图 3 可知,随着柠檬酸浓度的增大,吊兰对铜的富集量先上升后下降,地下部分富集量在柠檬酸浓度为 2.5mmol/L 时达到峰值 1078.25mg/kg;地上部分的富集量在柠檬酸浓度为 5mmol/L 时达到峰值 190.188mg/kg。由此可见,吊兰的地下部分比地上部分对柠檬酸更为敏感。在 EDTA 的调节下,吊兰对铜的富集量出现了大幅度的波动,且地下部分富集量明显低于相同浓度条件下柠檬酸调节的吊兰,其最大富集量出现在 EDTA 浓度为 5mmol/L 时,为 808.375mg/kg,仅为柠檬酸调节下吊兰地下部分最大富集量的 74.97%。可以看出,柠檬酸比 EDTA 对吊兰富集量的影响更大。

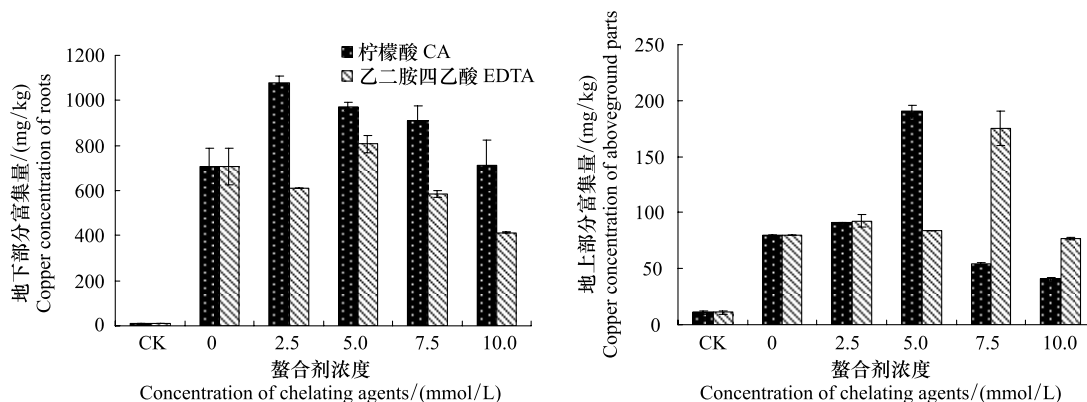


图 3 柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集作用的影响

Fig. 3 Effects of CA and EDTA on copper enrichment of *C. comosum*

由图 2 和图 3 可知,在柠檬酸和 EDTA 的作用下,吊兰对铜富集量的变化趋势与土壤中有有效态铜含量的变化趋势基本吻合。经 SPSS 分析,在柠檬酸和 EDTA 的影响下,土壤的有效态铜含量与吊兰地下部分的铜富集量为显著性正相关(表 1)。结合本章第一节的讨论,可以得出以下结论:由于柠檬酸对土壤中铜的活化能力较强,所以其对吊兰富集作用的影响比 EDTA 大。

表 1 土壤有效态铜含量与吊兰对铜富集量的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of available copper in soil and copper enrichment of *C. comosum*

螯合剂处理 Chelating agents	相关性系数 Correlation coefficient	
	地下部分 Roots	地上部分 Aboveground parts
柠檬酸 CA	0.946 **	0.566
乙二胺四乙酸 EDTA	0.895 *	0.687

** 代表 $P<0.01$,极显著性相关; * 代表 $0.01<P<0.05$,显著性相关; $P>0.05$,不相关

此外,生物富集系数(BC)是指植物中重金属的浓度除以土壤的全铜浓度所得到的值。通常用来描述植物对重金属的富集能力^[10]。如图 4 所示,在柠檬酸影响下吊兰的 BC 曲线高于 EDTA 影响下的吊兰,且值均大于 1,这进一步肯定了以上结论。

为什么柠檬酸和 EDTA 在高浓度时会明显抑制吊兰对土壤铜的吸收呢?首先,由 2.1 部分的讨论可知,在高浓度螯合剂的影响下,土壤有效态铜的含量有所降低,这直接影响了吊兰对铜的富集效果;其次,高浓度螯合剂施入土壤后会与阳离子形成稳定的络合物,而复杂结构形态的重金属生物活性较差,所以会抑制植物对其的吸收作用^[11]。因此,低浓度的柠檬酸和 EDTA 通过活化土壤中的铜,能够促进吊兰对铜的吸收;而高浓度的柠檬酸和 EDTA 使土壤溶液中的高稳定螯合剂-重金属复合物增多,反而不利于吊兰的吸收。

2.3 柠檬酸和 EDTA 对铜污染条件下吊兰生长的影响

2.3.1 柠檬酸和 EDTA 对铜污染条件下吊兰形态学指标的影响

由表 2 可知,吊兰的根长在柠檬酸浓度低于 2.5mmol/L 时下降,在柠檬酸浓度高于 2.5mmol/L 时数值明显上升;吊兰株高以 5mmol/L 柠檬酸为界,先减小后变大。这与柠檬酸对吊兰地下部分和地上部分铜富集量的影响恰好相反,说明柠檬酸对土壤铜的活化作用将间接抑制吊兰的生长。

表 2 柠檬酸对吊兰形态学指标的影响

Table 2 Effects of CA on morphological indicators of *C. comosum*

柠檬酸 CA/(mmol/L)	根长 Length of roots/cm	耐性指数 TI/%	株高 Length of aboveground parts/cm
CK	13.80±2.72bc *	100.00	15.10±2.08a
0.0	12.77±2.71abc	92.51	14.03±2.12a
2.5	10.13±3.16a	73.43	14.32±3.95a
5.0	11.13±2.74ab	80.68	13.55±1.67a
7.5	14.72±1.73c	106.64	18.22±1.87b
10.0	15.03±2.44c	108.94	19.58±2.97b
R	-0.250	—	0.119

TI: 耐性指数 Tolerance Index, TI(%) = 实验组根长的均值×100/空白组根长的均值^[12]; * 表格中的字母用来表示同一个指标在不同处理条件下的差异性,数据之间若含有相同的字母则说明差异不显著,即 $P>0.05$;反之,则差异显著,即 $P<0.05$; R 是指土壤指标与对照组土壤全铜含量之间的相关性

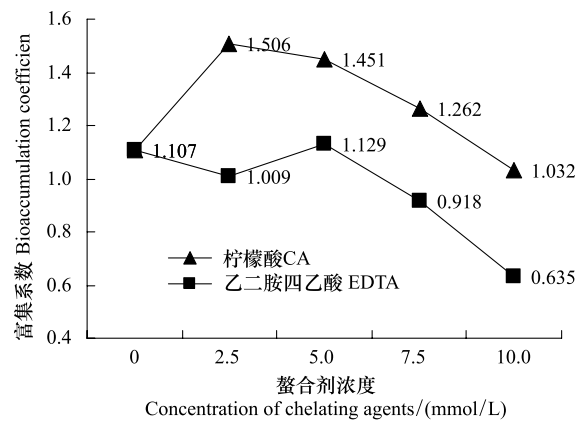


图 4 柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集系数的影响

Fig. 4 Effects of CA and EDTA on bioaccumulation coefficient of *C. comosum*

本实验采用的土壤铜浓度为 400mg/kg,接近吊兰存活条件的临界值,在这种水平的铜胁迫下,吊兰生长会受到一定程度的抑制。从相关性系数上看,在柠檬酸和 EDTA 的影响下,吊兰根长与土壤有效态铜含量呈不显著负相关,吊兰株高则是与两种螯合剂的浓度变化基本无关。然而,吊兰的根长和株高均在柠檬酸浓度为 10mmol/L 时达到最大值,分别是 15.03、19.58cm,都超过了空白组(CK)的数值 13.8、15.1cm,耐性指数 TI 也达到了最大值 108.94%。也就是说,在高浓度柠檬酸的作用下,铜污染土壤中吊兰的形态学指标恢复到了正常生长水平以上。可以看出,柠檬酸本身对吊兰的生长可能还具有一定的促进作用。

已知在 EDTA 的影响下吊兰对土壤铜的富集量呈波动状态。如表 3 所示,随着 EDTA 浓度的上升,吊兰的形态学指标数据也呈现出不规律波动的变化趋势。其中,根长只在 EDTA 浓度为 5mmol/L 时与不添加 EDTA 时的值差异显著,株高则在各个处理之间均表现为差异不显著。说明 EDTA 对铜污染土壤中吊兰的生长没有明显的影响。

表 3 EDTA 对吊兰形态学指标的影响

Table 3 Effects of EDTA on morphological indicators of *C. comosum*

乙二胺四乙酸 EDTA/(mmol/L)	根长 Length of roots/cm	耐性指数 TI/%	株高 Length of aboveground parts/cm
CK	13.80±2.72b	100.00	15.10±2.08a
0.0	12.77±2.71ab	92.51	14.03±2.12a
2.5	11.90±2.24ab	86.23	16.65±3.26a
5.0	14.03±2.58b	101.69	15.60±1.41a
7.5	9.58±2.64a	69.44	14.48±1.69a
10.0	11.35±5.08ab	82.25	14.67±2.54a
R	-0.425	—	0

2.3.2 柠檬酸和 EDTA 对铜污染条件下吊兰生物量的影响

如图 5,与形态学指标相似,在柠檬酸的影响下,吊兰的鲜重水平以 5mmol/L 柠檬酸为转折点先减小后变大;在 EDTA 的影响下,吊兰的生物量大致呈现出了无显著差异性的波动。结合 2.1 部分的讨论,吊兰生物量的变化与吊兰对土壤铜的富集量密切相关,即吊兰的生物量间接地与柠檬酸和 EDTA 对土壤铜的活化作用相关。

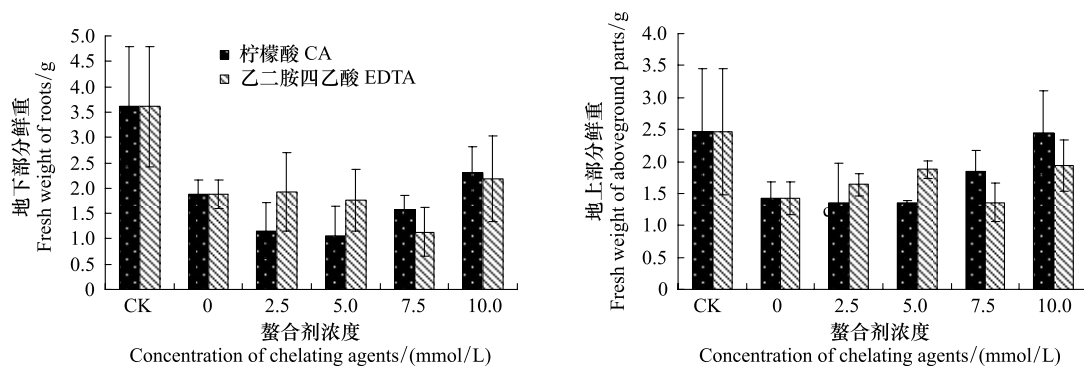


图 5 柠檬酸和 EDTA 对吊兰生物量的影响

Fig. 5 Effects of CA and EDTA on biomass of *C. comosum*

2.3.3 柠檬酸和 EDTA 对铜污染条件下吊兰叶片几种生理指标的影响

当植物处于逆境时,自由基增多,作用于脂质发生过氧化反应,产生的大量活性氧会打破动态平衡,给植物体造成严重的损伤,从而导致电解质外泄。因此,电导率(EC)是检测叶片损伤程度的重要指标。而叶绿素含量(Chl)则是反映植物光合作用强度的指标之一^[13-14]。

由表 4、表 5 可知,在土壤中加入柠檬酸和 EDTA 后,吊兰叶片的电导率以较大幅度的波动对铜胁迫产生应答,且电导率的实验组数据均比空白组(CK)大。叶绿素含量则呈现出幅度较小的变化。由表中的相关性系数可知,两种螯合剂对吊兰生理指标的影响虽不显著,但相比而言,柠檬酸的影响要略小于 EDTA。

可以看出,柠檬酸和 EDTA 对因土壤铜污染而受到损伤的吊兰叶片没有明显的修复作用。

表 4 柠檬酸对吊兰几种生理指标的影响

Table 4 Effects of CA on some physiological indexes of *C. comosum*

柠檬酸 CA/(mmol/L)	电导率 EC/($\mu\text{s}/\text{cm}$)	叶绿素 a Chla/(mg/L)	叶绿素 b Chlb/(mg/L)
CK	60.15 $\pm$ 2.19a	4.765 $\pm$ 0.696ab	1.776 $\pm$ 0.302abc
0.0	93.00 $\pm$ 5.80d	4.169 $\pm$ 0.449a	1.250 $\pm$ 0.207a
2.5	75.20 $\pm$ 1.56bc	3.718 $\pm$ 0.023a	1.459 $\pm$ 0.022ab
5.0	97.05 $\pm$ 1.06d	4.639 $\pm$ 0.238ab	1.964 $\pm$ 0.176bc
7.5	72.15 $\pm$ 2.05b	4.302 $\pm$ 0.772a	1.825 $\pm$ 0.321abc
10.0	81.05 $\pm$ 2.05c	5.766 $\pm$ 0.639b	2.317 $\pm$ 0.276c
R	0.695	-0.162	0.002

表 5 EDTA 对吊兰几种生理指标的影响

Table 5 Effects of EDTA on some physiological indexes of *C. comosum*

乙二胺四乙酸 EDTA/(mmol/L)	电导率 EC/($\mu\text{s}/\text{cm}$)	叶绿素 a Chla/(mg/L)	叶绿素 b Chlb/(mg/L)
CK	60.15 $\pm$ 2.19a	4.765 $\pm$ 0.696ab	1.776 $\pm$ 0.302ab
0.0	93.00 $\pm$ 5.80c	4.169 $\pm$ 0.449a	1.250 $\pm$ 0.207a
2.5	77.60 $\pm$ 9.48b	5.532 $\pm$ 0.293ab	2.031 $\pm$ 0.434b
5.0	75.20 $\pm$ 1.98b	7.024 $\pm$ 0.914c	2.337 $\pm$ 0.206b
7.5	91.30 $\pm$ 2.12c	5.868 $\pm$ 0.618bc	1.973 $\pm$ 0.160b
10.0	73.70 $\pm$ 4.38b	5.928 $\pm$ 0.149bc	1.973 $\pm$ 0.054b
R	0.716	0.413	0.176

2.3.4 柠檬酸和 EDTA 对铜污染条件下吊兰叶片的丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

当植物受到环境胁迫时,会由于自由基增多而导致过氧化损伤,而氧化终产物丙二醛(MDA)则常被用来指示植物叶片的受损程度。如表 6、表 7 所示,在土壤中加入柠檬酸和 EDTA 后,吊兰叶片的丙二醛含量表现为各个处理之间无统计学差异,且实验组数据均比空白组(CK)大。

细胞中 H_2O_2 的积累能降低 CO_2 的固定效率,尤其是 H_2O_2 和 O_2^- 通过 Haber-Weiss 反应会产生更多的活性氧,所以及时清除 H_2O_2 对防止活性氧十分重要。在正常情况下,生物体会通过抗氧化酶的联合作用对活性氧自由基进行清除,以减轻机体损伤。超氧化物歧化酶(SOD)是 O_2^- 的净化剂,通过消除 O_2^- ;过氧化氢酶(CAT)可将高浓度的 H_2O_2 清除;过氧化物酶(POD)可清除植物组织中产生的低浓度的 H_2O_2 [15-16]。

当生物体受到轻度逆境胁迫时,抗氧化酶活性会应激性升高,增强对活性氧的清除能力;当受到重度环境胁迫时,细胞抗氧化系统的平衡遭到破坏,抗氧化酶活性会受到抑制,体内活性氧积累,带来机体损伤,所以抗氧化酶活性也是反映生物体对环境胁迫适应程度的重要指标[17]。在土壤铜浓度为 400mg/kg 的环境下,吊兰的抗氧化酶活性应该是处于受到抑制的状态。

如表 6、表 7 所示,在柠檬酸和 EDTA 的作用下,吊兰叶片 CAT 的活性出现小幅度波动,可见柠檬酸和 EDTA 对铜污染环境下吊兰 CAT 活性所受到的抑制没有明显的缓解作用。

在柠檬酸和 EDTA 的影响下,实验组吊兰的 POD 活性表现为先显著低于空白组(CK),后随着柠檬酸和 EDTA 浓度的升高而有所上升,特别是 EDTA 调控下的吊兰 POD 活性呈现出明显的上升趋势,在 EDTA 浓度为 7.5mmol/L 时达到最大值 111.833 $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于不添加 EDTA 时的 73.167 $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,活性提高

了 52.846%。

实验组吊兰的 SOD 活性虽然随着柠檬酸和 EDTA 浓度的增加有一定的波动,但仍表现为低于空白组 (CK),甚至高浓度处理组还低于未施加调节剂的组别。这是由于在受到胁迫时,SOD 的灵敏度较高,通常会首先发生变化^[18]。且根据相关性分析的结果也不难看出,吊兰的抗氧化酶活性对两种螯合剂的敏感度依次为:SOD>POD>CAT。因此在高浓度铜的胁迫下,吊兰的 SOD 活性整体上是受到抑制的,而且柠檬酸和 EDTA 对土壤中铜的活化可能还加重了这种抑制。

从以上分析可以得出,柠檬酸和 EDTA 对铜污染环境下吊兰抗氧化酶活性的影响主要体现在有利于 POD 活性的提高,且 EDTA 效果较好。

表 6 柠檬酸对吊兰的丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

Table 6 Effects of CA on content of MDA and activities of antioxidant enzymes of *C. comosum*

柠檬酸 CA /(mmol/L)	丙二醛 MDA /($\mu\text{mol/L}$)	过氧化氢酶 CAT /(0.1NK MnO_4 , mL/g)	过氧化物酶 POD /($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	超氧化物歧化酶 SOD /(U/g)
CK	0.542 $\pm$ 0.136a	28.80 $\pm$ 0.42ab	108.333 $\pm$ 5.657cd	130.938 $\pm$ 2.258c
0.0	1.008 $\pm$ 0.426ab	28.95 $\pm$ 2.33ab	73.167 $\pm$ 2.593a	113.107 $\pm$ 4.893bc
2.5	0.830 $\pm$ 0.024ab	31.95 $\pm$ 0.21b	85.000 $\pm$ 7.542ab	104.591 $\pm$ 1.882ab
5.0	0.692 $\pm$ 0.030ab	26.85 $\pm$ 3.18a	80.333 $\pm$ 10.842ab	122.422 $\pm$ 14.678bc
7.5	1.043 $\pm$ 0.104b	31.95 $\pm$ 0.21b	110.500 $\pm$ 0.707d	100.599 $\pm$ 8.657ab
10.0	0.946 $\pm$ 0.146ab	31.05 $\pm$ 1.06b	92.167 $\pm$ 9.192bc	83.699 $\pm$ 14.114a
R	0.720	0.258	-0.525	-0.611

表 7 EDTA 对吊兰的丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

Table 7 Effects of EDTA on content of MDA and activities of antioxidant enzymes of *C. comosum*

乙二胺四乙酸 EDTA/(mmol/L)	丙二醛 MDA /($\mu\text{mol/L}$)	过氧化氢酶 CAT /(0.1mol/L KMnO_4 , mL/g)	过氧化物酶 POD /($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	超氧化物歧化酶 SOD /(U/g)
CK	0.542 $\pm$ 0.136a	28.80 $\pm$ 0.42ab	108.333 $\pm$ 5.657bc	130.938 $\pm$ 2.258a
0.0	1.008 $\pm$ 0.426a	28.95 $\pm$ 2.33ab	73.167 $\pm$ 2.593a	113.107 $\pm$ 4.893a
2.5	0.743 $\pm$ 0.063a	27.60 $\pm$ 0.42a	80.833 $\pm$ 10.135ab	86.094 $\pm$ 34.438a
5.0	1.018 $\pm$ 0.083a	32.25 $\pm$ 0.21c	100.833 $\pm$ 25.220abc	84.764 $\pm$ 22.018a
7.5	1.079 $\pm$ 0.144a	29.70 $\pm$ 1.27abc	111.833 $\pm$ 10.135c	107.784 $\pm$ 20.700a
10.0	0.659 $\pm$ 0.252a	31.35 $\pm$ 1.06bc	111.333 $\pm$ 1.886c	90.885 $\pm$ 17.501a
R	0.660	0.314	-0.302	-0.785

3 结论

(1)柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集量的影响与其对土壤中铜的活化能力呈显著性正相关。柠檬酸对土壤铜有较强的活化作用,能够有效提高吊兰对铜的吸收,且在浓度为 5mmol/L 时效果最为明显;而 EDTA 对吊兰富集作用的影响相对较弱。

(2)柠檬酸本身对吊兰生长可能具有一定的促进作用,但其通过提高吊兰的铜富集量,间接抑制了吊兰的生长,且这种抑制主要体现在形态学指标和生物量上;EDTA 对吊兰生长无显著影响,对吊兰叶片的 POD 活性却有明显的促进作用。相比而言,柠檬酸对吊兰生长状况的影响比 EDTA 大。

References:

- [1] Bai X Y, Liu H H, Hu J J, Qin F, Su X L. Research progress and development trend of floral bioremediation technology in the soil polluted by heavy metal. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(18): 8672-8674.
- [2] Shang A A, Liu Y R, Liang Z S, Dang Z. Research progress of bioavailability of heavy metals in soil. Soils, 2000, 6: 294-300.
- [3] Jiang L Y, Yang X E, Shi W Y, Ye Z Q. Activation of soil heavy metals for phytoremediation. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(2):

154-157.

- [4] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, Zheng C R. Effect of organic acids on soil chemical behavior of lead and cadmium and their toxicity to plants. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 619-622.
- [5] Wu L H, Luo Y M, Zhang H B. Research of environmental risk in strengthening phytoremediation by organic complexation I. Effect of EDTA on TOC and heavy metals dynamic changes in composite contaminated soil. Soils, 2001, 4: 189-192.
- [6] Wang Y B, Yan A L, Zhang X Q, Wu T T. Effect of the growth of *Chlorophytum comosum* on Cd forms and content in soil. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 163-172.
- [7] Zhang Z L, Qu W J. Guidance of Plant Physiological Experiments, 3rd ed. Bei Jing: Higher Education Press, 2003: 67-69, 123-124, 268-269, 274-276.
- [8] Bai B Z, Tang X J. Testing Technology of Plant Physiology. Bei Jing: Science and Technology Press of China, 1993: 82-83.
- [9] Hou M, Wang X G. Study on extraction conditions and extractants for available vanadium in soil. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5): 1241-1245.
- [10] Monni S, Salemaa M, White C, Tuittila E, Huopainen M. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland. Environmental Pollution, 2000, 109: 211-219.
- [11] Yu G F, Jiang X, Sun L, Wang F, Bian Y R. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 770-776.
- [12] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. New Phytologist, 1978, 80: 623-633.
- [13] Burzynski M, Klobus G. Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd, and Pb stress. Photosynthetica, 2004, 42(4): 505-510.
- [14] Faisal M, Anis M. Changes in photosynthetic activity, pigment composition, electrolyte leakage, lipid peroxidation, and antioxidant enzymes during ex vitro establishment of micropropagated *Rauwolfia tetraphylla* plantlets. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2009, 99: 125-132.
- [15] Fu C, Guan Y, Xu N. Effect of salt stress on the activity of antioxidative enzymes of glycine soja and glycine max. Soybean Science, 2007, 26(2): 144-148.
- [16] Gajewska E, Sklodowska M. Effect of nickel on ROS content and antioxidative enzyme activities in wheat leaves. BioMetals, 2007, 20: 27-36.
- [17] Ou X M, Lei M X, Wang X G, Fan D F. Effect of novel insecticide HNPC-A9908 on physiological and biochemical characteristics of green algae *Chlorella pyrenoidosa* chick. Journal of Agro-environment Science, 2004, 23(1): 154-158.
- [18] Jiang L, Chen S Y, Yin D Q. Effects of tetracycline on photosynthesis and antioxidant enzymes of *Microcystis aeruginosa*. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(6): 564-567.

参考文献:

- [1] 白向玉, 刘汉湖, 胡佳佳, 秦峰, 苏晓丽. 重金属污染土壤的花卉植物修复技术研究进展及发展趋势. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8672-8674.
- [2] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重山, 党志. 土壤中重金属的生物有效性研究进展. 土壤, 2000, 6: 294-300.
- [3] 姜理英, 杨肖娥, 石伟勇, 叶正钱. 植物修复技术中有关土壤重金属活化机制的研究进展. 土壤通报, 2003, 34(2): 154-157.
- [4] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 郑春荣. 有机酸对 Pb、Cd 的土壤化学行为和植株效应的影响. 应用生态学报, 2001, 12(4): 619-622.
- [5] 吴龙华, 骆永明, 章海波. 有机络合强化植物修复的环境风险研究 I. EDTA 对复合污染土壤中 TOC 和重金属动态变化的影响. 土壤, 2001, 4: 189-192.
- [6] 王友保, 燕傲蕾, 张旭情, 吴亭亭. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响. 水土保持学报, 2010, 24(6): 163-172.
- [7] 张志良, 瞿伟菁主编. 植物生理学实验指导, 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 67-69, 123-124, 268-269, 274-276.
- [8] 白宝璋, 汤学军主编. 植物生理学测试技术. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 82-83.
- [9] 侯明, 王香桂. 土壤有效态钒的浸提剂和浸提条件研究. 土壤通报, 2010, 41(5): 1241-1245.
- [11] 余贵芬, 蒋新, 孙磊, 王芳, 卞永荣. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述. 生态学报, 2002, 22(5): 770-776.
- [15] 付畅, 关畅, 徐娜. 盐胁迫对野生和栽培大豆中抗氧化酶活性的影响. 大豆科学, 2007, 26(2): 144-148.
- [17] 欧晓明, 雷满香, 王晓光, 樊德方. 新杀虫剂 HNPC-A9908 对蛋白核小球藻生理生化特性的影响. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 154-158.
- [18] 姜蕾, 陈书怡, 尹大强. 四环素对铜绿微囊藻光合作用和抗氧化酶活性的影响. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 564-567.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元