

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第13期 Vol.31 No.13 **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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 13 期 2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

我国东部北亚热带植物群落季相的时空变化	陈效速, 亓孝然, 阿 杉, 等 (3559)
华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素	黄 辉, 孟 平, 张劲松, 等 (3569)
东北东部 14 个温带树种树干呼吸的种内种间变异	许 飞, 王传宽, 王兴昌 (3581)
RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价	王一涵, 周德民, 孙永华 (3590)
应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构	蓝文陆, 王晓辉, 黎明民 (3601)
基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究	曲 艺, 王秀磊, 栾晓峰, 等 (3609)
融雪时间对大卫马先蒿生长和繁殖特性的影响	陈文年, 吴 彦, 吴 宁, 等 (3621)
巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 对海拔高度的响应	冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (3629)
宁南半干旱与半干旱偏旱区苜蓿草地土壤水分与养分特征	任晶晶, 李 军, 王学春, 等 (3638)
南岭小坑藜蒴群落地上部分生物量分配规律	李 根, 周光益, 王 旭, 等 (3650)
放牧对五台山高山、亚高山草甸牧草品质的影响	章异平, 江 源, 刘全儒, 等 (3659)
短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响	羊留冬, 杨 燕, 王根绪, 等 (3668)
锰胁迫对垂序商陆叶片形态结构及叶绿体超微结构的影响	梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 等 (3677)
土荆芥挥发油对蚕豆根尖细胞的化感潜力	胡琬君, 马丹炜, 王亚男, 等 (3684)
喀斯特城市杨树人工林微量元素的生物循环	王新凯, 田大伦, 闫文德, 等 (3691)
大兴安岭林区多孔菌的区系组成与种群结构	崔宝凯, 余长军 (3700)
铜绿微囊藻和斜生栅藻非稳态营养盐限制条件下的生长竞争特性	赵晓东, 潘 江, 李金页, 等 (3710)
陆地棉萌发至三叶期不同生育阶段耐盐特性	王俊娟, 王德龙, 樊伟莉, 等 (3720)
基于模式生物秀丽隐杆线虫的三丁基锡生态毒性评价	王 云, 杨亚楠, 简风雷, 等 (3728)
大庆油田石油开采对土壤线虫群落的影响	肖能文, 谢德燕, 王学霞, 等 (3736)
若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响	吴鹏飞, 杨大星 (3745)
洞庭湖湿地土壤环境及其对退田还湖方式的响应	刘 娜, 王克林, 谢永宏, 等 (3758)
渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟	张社红, 李 军, 王学春, 等 (3767)
黄土丘陵区不同土地利用下土壤释放 N_2O 潜力的影响因素	祁金花, 黄懿梅, 张 宏, 等 (3778)
东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较	宋广树, 孙忠富, 孙 蕾, 等 (3788)
硫对成熟期烤烟叶绿素荧光参数的影响	朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等 (3796)
高温强光对温州蜜柑叶绿素荧光、D1 蛋白和 Deg1 蛋白酶的影响及 SA 效应	邱翠花, 计玮玮, 郭延平 (3802)
覆膜对土壤-莴苣体系氮素分布和植物吸收的影响	李丽丽, 李非里, 刘秋亚, 等 (3811)
基于空间分带的崇明东滩水鸟适宜生境的时空动态分析	范学忠, 张利权, 袁 琳, 等 (3820)
驯鹿对苔藓植物的选择食用及其生境的物种多样性	冯 超, 白学良 (3830)
北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估	张 彪, 谢高地, 薛 康, 等 (3839)
专论与综述	
冻土甲烷循环微生物群落及其对全球变化的响应	倪永清, 史学伟, 郑晓吉, 等 (3846)
哺乳动物毛被传热性能及其影响因素	郑 雷, 张 伟, 华 彦 (3856)



封面图说: 滇金丝猴是我国特有的世界珍稀动物之一, 属国家一级重点保护物种。仅生活在滇藏交界处的高寒云冷杉林中, 是我国川、滇、黔三种金丝猴中唯一具有和人类一样美丽红唇的金丝猴。手中的松萝是它最喜爱的食物之一。

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

梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 王萍, 王钧. 锰胁迫对垂序商陆叶片形态结构及叶绿体超微结构的影响. 生态学报, 2011, 31(13): 3677-3683.

Liang W B, Xue S G, Shen J H, Wang P, Wang J. Manganese stress on morphological structures of leaf and ultrastructures of chloroplast of a manganese hyperaccumulator, *Phytolacca americana*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3677-3683.

锰胁迫对垂序商陆叶片形态结构及 叶绿体超微结构的影响

梁文斌¹, 薛生国^{2,*}, 沈吉红¹, 王萍¹, 王钧²

(1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 中南大学冶金科学与工程学院环境工程系, 长沙 410083)

摘要:以超富集植物垂序商陆为实验材料,通过温室水培实验,研究不同锰处理条件下垂序商陆叶片受害症状、叶片形态结构和叶绿体超微结构的变化。当生长介质中锰供应水平为 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,垂序商陆生长良好,叶片未表现出受害症状,其形态结构和超微结构也没有明显的变化;当锰供应水平为 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶片开始出现褪绿现象,叶肉细胞排列疏松,栅栏组织细胞膨胀,叶绿体数量减少,外膜部分解体,类囊体膨胀,基质片层扭曲,淀粉粒颗粒变小;当锰供应水平为 12 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶片发生大量的褪绿现象,伤害率高达 87.33%,并且伤害率随着锰胁迫时间的延长明显升高,叶肉细胞发生扭曲变形,叶绿体皱缩,外膜解体,类囊体空泡化加剧,基质片层严重扭曲,基粒排列紊乱甚至模糊成絮状,嗜锇颗粒增多。尽管在高锰浓度胁迫条件下植物叶肉细胞及叶绿体超微结构出现一定程度的毒害特征,但垂序商陆仍能完成部分功能,维持其个体的生长,这进一步表明超富集植物垂序商陆具有极强的锰耐性。

关键词: 锰胁迫;垂序商陆;形态结构;叶绿体;超微结构

Manganese stress on morphological structures of leaf and ultrastructures of chloroplast of a manganese hyperaccumulator, *Phytolacca americana*

LIANG Wenbin¹, XUE Shengguo^{2,*}, SHEN Jihong¹, WANG Ping¹, WANG Jun²

1 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Department of Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The toxicity symptoms, changes of leaf morphological structures and chloroplast ultrastructures of *Phytolacca americana* under manganese stress were investigated using hydroponic culture with different concentrations of manganese (Mn). The results indicated that this Mn hyperaccumulator species has a remarkable tolerance to Mn. Under nutrient culture conditions, *P. americana* could grow quite well with Mn supplied at a concentration of 1000 $\mu\text{mol/L}$. With the increase of Mn concentration in the culture solution, the leaf morphological structures and chloroplast ultrastructures of *P. americana* had some changes. At the Mn concentration reached 5000 $\mu\text{mol/L}$, the leaves showed chlorosis and injury symptoms with yellow-brown spots on the leaf surface. When Mn concentration exceeded 12000 $\mu\text{mol/L}$, the leaves showed purple spots on the surface during the 30-day Mn exposure, with an injury rate of 87.33%. Significant changes in leaf structure were noted, with swollen palisade cells which arranged loosely. When Mn concentration reached above 12000 $\mu\text{mol/L}$, the mesophyll and epidermal cells were distorted. With further increase of Mn concentration, the chloroplasts were shrunk with outer membrane disrupted, and the thylakoids swollen and became heavily hollowed. The stroma lamellae was distorted and grana disordered or blurred as floc, starch grains became smaller and less, and osmiophilic granules

基金项目:国家公益性(环保)行业科研项目(200909065;201109056);国家自然科学基金项目(40771181);中国博士后科学基金资助项目(20080430565);中国博士后科学基金特别资助项目(200801119)

收稿日期:2010-12-22; 修订日期:2011-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sgxue70@yahoo.com.cn

increased. Although the leaf morphological structures and chloroplast ultrastructures of *P. americana* had significant changes under heavy Mn stress, this species could still survive and grow. All these suggested that *P. americana* had an extraordinary tolerance to Mn.

Key Words: manganese stress; *Phytolacca americana*; morphological structure; chloroplast; ultrastructure

锰是植物生长发育必需的微量元素之一,参与体内多种重要的代谢过程,但锰含量过高将影响酶活性、造成植物伤害,锰毒害已经成为酸性土壤中限制作物生长的重要因素之一。锰在化工行业的广泛应用、锰矿的开采以及污泥农用等人类活动所导致的土壤污染越来越引起人们的广泛关注^[1]。然而,至今尚未找到经济而有效的锰污染环境治理方法。利用超富集植物清除土壤和水体环境中的金属和类金属污染的植物修复技术以其安全、廉价、高效等优点成为环境科学领域研究的热点。垂序商陆(*Phytolacca americana* L.)在中国首次发现为锰超富集植物,具有生长快、易繁殖、生物量大等特点,在锰污染土壤的植物修复技术方面具有巨大的潜力^[1-2]。近年来,垂序商陆的锰积累^[3]、锰耐性^[4-8]、锰胁迫生理^[9-13]等方面已有研究,但锰对垂序商陆植株形态结构及超微结构研究的报道很少。植物受重金属胁迫后,其结构的改变是植物一系列生理活动异常的细胞学基础,本文拟通过温室培养方法,研究不同锰供应水平对垂序商陆的叶片形态结构和叶绿体超微结构的影响,以期从组织细胞水平上探讨其锰耐性机理,进而为锰污染环境修复提供参考。

1 材料和方法

1.1 供试材料

以垂序商陆(*P. americana* L.)为实验材料,其种子采自湖南省湘潭锰尾矿废弃地。

1.2 研究方法

1.2.1 温室培养

将垂序商陆的种子低温处理后置于恒温箱(25±0.5)℃催芽,待种子露白后埋入河沙盆中,长到2叶1心时,选取生长一致的健壮幼苗移栽至体积为20 L的塑料盆内,采用Hoagland营养液进行培养,当幼苗生长至7叶时在培养液中添加锰处理($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$),处理浓度分别为1000、5000、8000、12000、15000 μmol/L,以Hoagland营养液中 Mn^{2+} 正常值5 μmol/L为对照处理(CK)。每处理为2盆计70株。营养液每5 d更换1次,用增氧泵通气,pH控制在6.0—6.2之间,培养温度平均为25℃。在锰处理30 d后采集植株顶部第5片叶用于叶片显微结构与超微结构的制片。

1.2.2 叶片伤害率

每处理随机采集分别种植15、30 d垂序商陆叶片20枚,采用WinFOLIA多用途叶面积仪扫描叶片,并使用其WinFolia软件测量叶片上受害面积与叶片总面积,并计算叶片伤害率,即受害面积与叶片总面积比值的百分数。

1.2.3 石蜡切片的制备

用双面刀片沿叶片主脉中部横切成约为0.5 mm×0.5 mm大小的小块,抽气,采用FAA固定液固定。按常规石蜡切片法制片,切片厚度为8 μm,番红-固绿双重染色,中性树胶封片。采用Motic数码显微镜(Motic B5 Professional Series)观察并拍照

1.2.4 透射电镜样品制备及观察

沿叶片主脉两侧切成长2—3 mm,宽1 mm的条形小块,放入2.5%的戊二醛(AR)溶液固定24 h以上,用磷酸缓冲液清洗,1%的锇酸固定样品2 h,磷酸缓冲液漂洗,经不同浓度的乙醇对样品进行梯度脱水处理后采用环氧树脂对样品进行渗透和包埋,用超薄切片机将制备的样品切成80 nm的薄片,切片染色后在JEOL-1230型透射电镜下观察并拍照。

2 结果与分析

2.1 不同锰处理水平条件下垂序商陆叶片的伤害率

随着锰供应水平的升高,垂序商陆逐渐出现毒害症状,主要表现为叶片褪绿和出现黄褐色斑块,伤害严重的叶片边缘明显卷曲甚至枯死。锰处理 15 d 后,垂序商陆处于营养生长旺盛期,对照条件下垂序商陆叶片呈绿色,5 000 $\mu\text{mol/L}$ 锰处理水平垂序商陆叶片颜色开始稍变浅,当锰供应水平达到 12 000 $\mu\text{mol/L}$ 时垂序商陆叶片出现褪绿现象。锰处理 30 d 后,垂序商陆植株进入生殖生长期,对照条件下垂序商陆叶片呈深绿色,在 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 锰处理下叶片开始褪绿呈浅黄绿色;在高浓度锰处理下(12 000 $\mu\text{mol/L}$),叶片大量褪绿,出现黄褐色伤害斑快,叶片边缘有枯萎现象;当锰处理浓度达到 15 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶片呈灰绿色,并出现大量紫色伤害斑快,叶片边缘有枯萎现象。因而,在长时间高锰胁迫下,叶片失绿现象很明显。

锰胁迫对叶片毒害的另一个明显的外部特征是出现伤害斑块。叶片受伤害的程度以伤害率来表示,不同锰胁迫条件对垂序商陆叶片的伤害有明显的差异(表 1)。当生长介质中锰浓度为 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶片生长正常。当锰浓度达到 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶片开始出现轻微伤害症状,在 15 d 时其伤害率为 8.24%,30 d 时为 14.42%,随着锰处理浓度的升高和胁迫时间的延长,叶片的伤害率逐渐增加,当生长介质锰浓度达到 15 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,胁迫 15 d 时叶片伤害率为 25.60%,在 30 d 时则达到 92.72%。因而锰胁迫时间越长,叶片伤害越明显。

表 1 不同锰浓度胁迫下垂序商陆叶片伤害率/%

Table 1 Injury rate of leaves under Mn stress

胁迫天数/d Stress days	锰浓度 Mn concentration / ($\mu\text{mol/L}$)					
	5 (CK)	1000	5000	8000	12000	15000
15	0.00±0.00d	0.00±0.00d	8.24±2.74c	10.55±2.37c	16.47±3.52b	25.60±6.34a
30	0.00±0.00d	0.00±0.00d	14.42±3.23c	33.63±5.68b	87.33±9.80a	92.72±10.31a

同一行不同小写字母表示数值间差异显著($P < 0.05$)

2.2 锰胁迫对垂序商陆叶片显微结构的影响

对照条件下,垂序商陆叶片栅栏组织仅由一层细胞组成,排列紧密、整齐,海绵组织排列相对疏松(图 1-A)。1 000 $\mu\text{mol/L}$ 锰处理条件下,叶片未出现明显变化,栅栏组织排列相对较疏松(图 1-B)。当锰供应水平达到 8 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶肉细胞排列疏松,栅栏组织细胞膨胀,形态极不规则(图 1-C、图 1-D)。在高度锰胁迫下(12 000 $\mu\text{mol/L}$ 和 15 000 $\mu\text{mol/L}$),叶肉细胞及表皮细胞发生收缩扭曲,尤其是上表皮收缩扭曲程度大(图 1-E、图 1-F)。

2.3 锰胁迫对垂序商陆叶片叶绿体超微结构的影响

当锰胁迫浓度达到 12 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,垂序商陆叶片表面出现大量伤害斑块、叶缘枯萎、叶肉细胞和表皮细胞发生收缩扭曲。当锰浓度不超过 8 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,垂序商陆的锰毒害特征则容易从叶绿体超微结构反映出来(图 2)。

对照条件下,垂序商陆叶肉细胞中叶绿体紧贴细胞壁单行排列,多呈梭形或椭球形,叶绿体膜平滑,靠近细胞壁的一面较平直,面向中央液泡的一面凸起,叶绿体中淀粉粒较多(图 2-A)。叶绿体内基粒和基质片层较丰富、清晰,片层结构发达,排列整齐,且基粒片层和基质片层的排列方向与叶绿体长轴基本平行(图 2-B、图 2-C)。

生长介质锰供应水平为 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 条件下,叶绿体数目、形态和排列未发生变化,叶绿体中淀粉粒正常(图 2-D),表明叶绿体光合能力没有下降。部分基粒和基质片层发生肿胀或微空泡化,由于类囊体片层产生的肿胀是不均匀的,所以此时的类囊体片层往往呈波状(图 2-E、图 2-F)。

生长介质锰供应水平为 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶绿体数目减少,叶绿体形状开始发生变化,由原来的梭形或椭球形变成球形,叶绿体中部分淀粉粒颗粒变小,数量也开始减少(图 2-G),表明叶绿体光合能力有所下降。

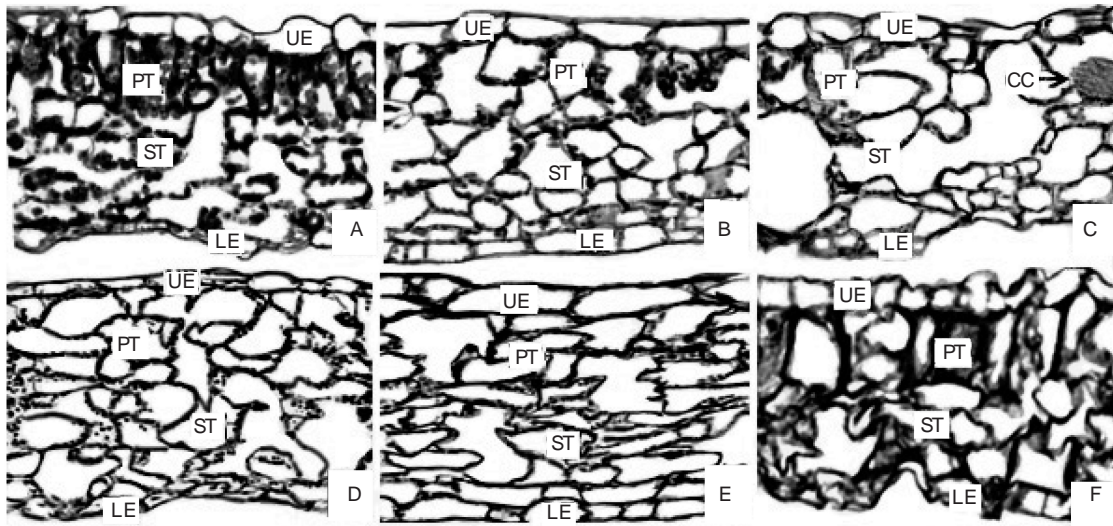


图1 不同锰浓度处理对垂序商陆叶片形态结构的影响

Fig. 1 Effects of different manganese concentrations on leaf morphological structures of *Phytolacca americana*

A. 对照(5 $\mu\text{mol/L}$), $\times 400$; B. 1000 $\mu\text{mol/L}$, 示栅栏组织排列较疏松, 不整齐, $\times 400$; C. 5000 $\mu\text{mol/L}$, 示栅栏组织形态极不规则, 排列杂乱, $\times 400$; D. 8000 $\mu\text{mol/L}$, 示栅栏组织形态极不规则, 排列杂乱, 表皮细胞变小, $\times 400$; E. 12000 $\mu\text{mol/L}$, 示叶肉细胞扭曲变形, $\times 400$; F. 15000 $\mu\text{mol/L}$, 示叶肉细胞和表皮细胞扭曲变形, $\times 400$; UE: 上表皮; LE: 下表皮, PT: 栅栏组织; ST: 海绵组织; CC: 结晶体(见 \rightarrow 处)

叶绿体中类囊体空泡化明显, 叶绿体外膜部分解体, 基质片层严重扭曲, 基粒类囊体膨胀, 基粒排列紊乱(图 2-H、图 2-I)。

当生长介质锰供应水平达到 8 000 $\mu\text{mol/L}$ 时, 叶绿体破坏较严重, 叶绿体皱缩, 淀粉粒颗粒数量明显减少(图 2-J), 表明叶绿体光合能力下降明显。叶绿体中类囊体发生极端空泡化, 外膜解体较严重, 基粒模糊成絮状, 所含嗜银颗粒有增大、增多趋势(图 2-K、图 2-L)。

3 讨论

锰是植物生长必需的微量元素之一。锰含量过高则抑制根系对 Fe、Mg 等元素的吸收和活性, 引起氧化性胁迫导致氧化损伤, 导致叶绿素的合成下降、叶绿体结构破坏及光合速率降低^[8]。随着锰胁迫浓度升高和时间延长, 垂序商陆叶绿体数目减少, 叶片褪绿严重, 叶片伤害率增大。叶片褪绿是由于在高锰胁迫下垂序商陆叶片叶绿素含量下降^[13]。叶绿素含量降低可以认为是当垂序商陆生长介质中锰离子处理浓度超过一定阈值时, 抑制了叶绿素合成必需元素 Mg、Fe 等的吸收, 使叶绿素合成受阻^[14-15], 同时, 叶片中叶绿素成为自由基攻击的靶分子, 造成叶绿素结构破坏, 加速了叶绿素的降解。

垂序商陆叶肉组织在低锰供应条件下其结构不受影响, 随着锰处理浓度升高, 叶肉组织形态和排列发生改变, 甚至导致细胞的死亡。垂序商陆在高锰胁迫条件下叶肉细胞排列疏松, 栅栏组织细胞增大, 有利于光合作用产生大量的有机酸, 同时增加植物的蒸腾作用使锰大量运输到叶片与有机酸等物质结合, 以提高植物的锰积累能力, 这与他人研究结果一致^[16-18]。在高锰胁迫条件下叶片上表皮细胞发生扭曲变形, 可能是由于受蒸腾作用使得锰在上表皮沉积较多, 这可从徐根娣^[7]等的研究中得到证实。

叶绿体是植物进行光合作用的主要细胞器, 其类囊体结构的完整性和有序性对叶绿体中进行正常而有效的光能转换是非常必要的, 叶绿体的破坏将直接影响光合电子传递链的正常功能。研究发现在低锰供应水平条件下, 垂序商陆叶片的叶绿体结构未发生明显变化, 基本上不影响光合作用。随着生长介质中锰供应水平的升高, 叶绿体开始出现不同程度的变化, 叶绿体变形、皱缩, 甚至外膜部分解体, 基质片层扭曲, 基粒模糊, 类囊体空泡化明显等, 表明高度锰胁迫对叶绿体结构已产生明显影响。锰胁迫下垂序商陆叶片叶绿素总量随着锰浓度的升高逐渐减少, 光合速率降低^[13], 这与本研究中随锰浓度的增高, 叶绿体结构逐渐破坏的结论一致。

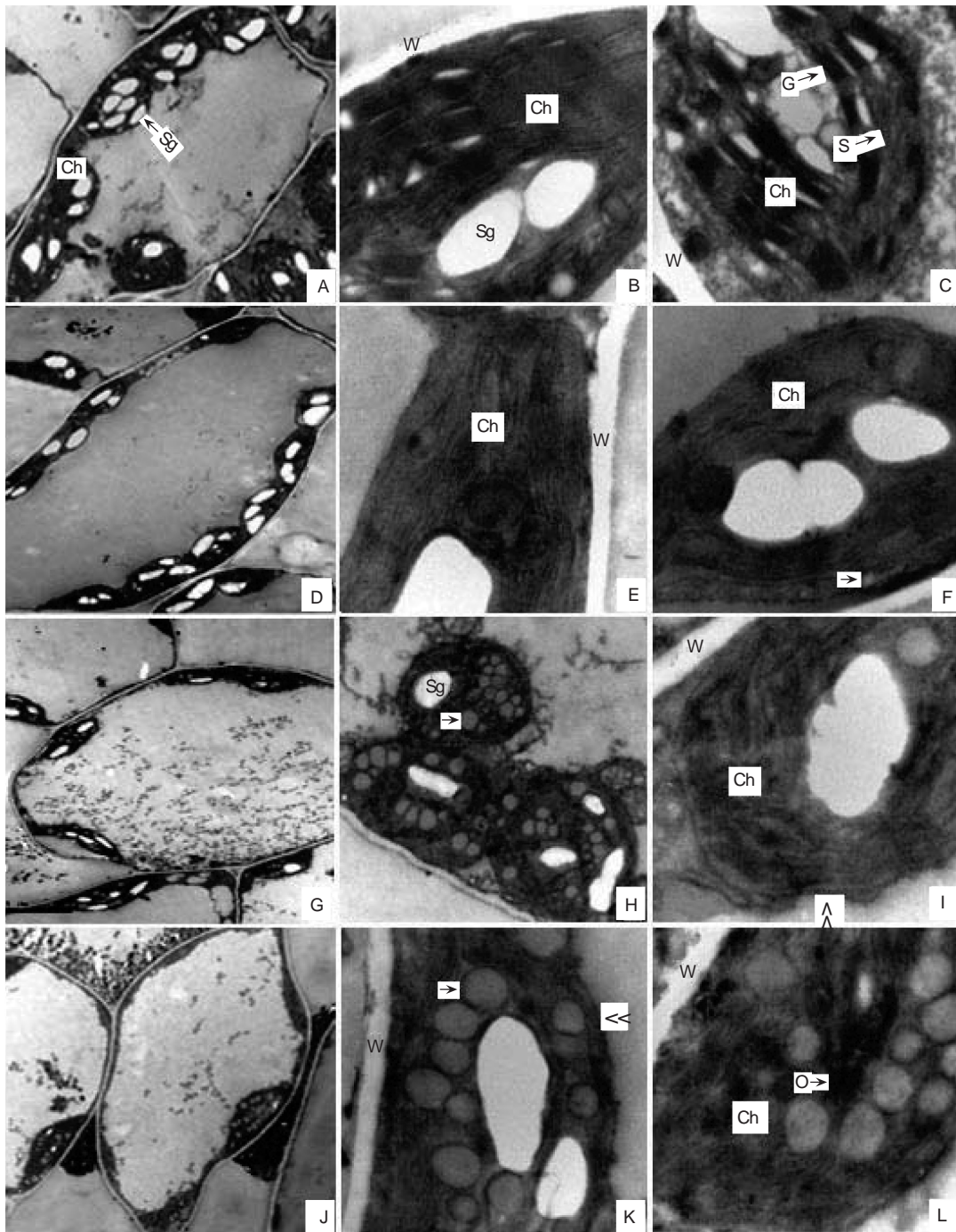


图 2 不同锰浓度处理对垂序商陆叶绿体超微结构的影响

Fig. 2 Effects of different manganese concentrations on structures of *Phytolacca americana* leaves

A. 对照条件的叶肉细胞, 示梭形或椭圆形的叶绿体紧贴细胞壁单行排列, 叶绿体中淀粉粒较多, ×6000; B. 对照条件的叶绿体, 示类囊体丰富、清晰, 排列整齐, ×40000; C. 对照条件的叶绿体, 示基粒片层和基质片层清晰, 排列有序, ×40000; D. 1000 μmol/L, 示叶绿体紧贴细胞壁排列及较多淀粉粒, ×6000; E. 1000 μmol/L, 示叶绿体部分基粒和基质片层发生肿胀, ×50000; F. 1000 μmol/L, 示类囊体微空泡化(见→), ×25000; G. 5000 μmol/L, 示变成球形叶绿体, 部分淀粉粒颗粒变小, 数量也开始减少, ×6000; H. 5000 μmol/L, 示类囊体空泡化明显(见→), ×15000; I. 5000 μmol/L, 示叶绿体外膜部分解体(见<<), 叶绿体基质片层严重扭曲, 基粒类囊体膨胀, 基粒排列紊乱, ×60000; J. 8000 μmol/L, 示淀粉粒颗粒数量明显减少, ×6000; K. 8000 μmol/L, 示类囊体发生极端空泡化(见→), ×40000; L. 8000 μmol/L, 示叶绿体外膜解体较严重(见<<), 基粒模糊成絮状, 嗜锇颗粒增多(见→), ×60000; Ch: 叶绿体; G: 基粒片层; S: 基质片层; Sg: 淀粉粒; O: 嗜锇颗粒

当锰胁迫浓度在 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 以上时,叶绿体由原来的梭形或椭球形变成圆球形,这可能是由于锰进入细胞后,引起膨压增大,导致叶绿体发生膨胀^[18]。

随着生长介质锰含量升高,叶绿体嗜饿颗粒增多,淀粉粒含量不断下降。一般植物叶绿体内含大量淀粉粒,且淀粉含量有昼夜的变化,白天气孔张开时淀粉含量下降,夜间气孔关闭时淀粉积累。淀粉降解为合成有机溶质提供碳骨架参与渗透调节^[19]。随着锰胁迫程度的加强,淀粉粒的数量减少说明植物体对胁迫采取了积极的防御措施,促进淀粉粒降解,合成更多的有机溶质,以调节渗透压,这与叶宝兴等^[20]的研究结果一致。随着锰供应水平增加垂序商陆叶绿体中嗜饿小体数量增多,这与徐信兰等^[21]的研究结果一致,这是否与垂序商陆的高锰耐性机制相关还有待进一步研究。

陈燕珍^[10]、沈吉红^[12]研究发现垂序商陆的抗氧化系统对其机体在锰胁迫下起着重要的抵御作用,但在长时间的高度锰胁迫下抗氧化系统的功能达到极限,机体遭到破坏,引起一系列生理生化紊乱,导致垂序商陆生长受到抑制^[9]。低锰供应条件下,垂序商陆叶片形态结构及叶绿体超微结构未发生变化,这可能是由于细胞膜的结构和功能进行一定的自我抵御,特别是抗氧化系统在清除锰胁迫引起的活性氧自由基方面具有重要功能。

4 结论

(1) 随着生长介质锰供应水平升高和胁迫时间的延长,垂序商陆叶片开始出现褪绿现象和伤害症状;当锰浓度达 12 000 $\mu\text{mol/L}$ 、胁迫 30 d 时,叶片大量褪绿,叶肉及表皮细胞发生扭曲变形,叶片伤害率达 87.33%。

(2) 高锰胁迫导致叶肉细胞中叶绿体数目减少和叶绿体超微结构不可逆转的损伤。随着锰处理水平的提高,叶绿体开始皱缩,外膜发生部分解体,类囊体发生膨胀及空泡化加剧,基质片层扭曲,基粒排列紊乱甚至模糊成絮状,淀粉粒颗粒变小、减少,嗜饿颗粒增多。

(3) 尽管在高锰胁迫条件下植物叶肉细胞及叶绿体超微结构出现一定程度的毒害特征,但垂序商陆仍能维持其个体的生长,这进一步表明超富集植物垂序商陆具有极强的锰耐性。

References:

- [1] Xue S G, Chen Y X, Lin Q, Xu S Y, Wang Y P. *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae): A new anganese hyperaccumulator plant from Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 935-937.
- [2] Xue S G, Wang J, Zhou X H, Liu H, Chen Y X. A critical reappraisal of *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae) — a manganese - hyperaccumulating plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 335-338.
- [3] Xue S G, Chen Y X, Reeves R D, Baker A J M, Lin Q, Fernando D R. Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae). *Environmental Pollution*, 2004, 131(3): 393-399.
- [4] Dou C M, Fu X P, Chen X C, Shi J Y, Chen Y X. Accumulation and detoxification of manganese in hyperaccumulator *Phytolacca americana*. *Plant Biology*, 2009, 11(5): 664-670.
- [5] Xue S G, Chen Y X, Baker A J M, Reeves R D, Xu X H, Lin Q. Manganese uptake and accumulation by two populations of *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae). *Water Air and Soil Pollution*, 2005, 160(1/4): 3-14.
- [6] Fernando D R, Bakkaus E J, Perrier N, Baker A J M, Woodrow I E, Batianoff G N, Collins R N. Manganese accumulation in the leaf mesophyll of four tree species: a PIXE/EDAX localization study. *New Phytologist*, 2006, 171(4): 751-758.
- [7] Xu G D, Sun W L, LIU P, Chen Y Z, Gong C F. Relationship between anatomize of vegetative organs and tolerance manganese of *Phytolacca acinosa* Roxb. *Journal of Zhejiang Normal University: Natual Sciences*, 2008, 31(4): 452-456.
- [8] Zhang Y X, Li L F, Chai T Y. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(4): 506-520.
- [9] Ren L M, Cheng Z F, Liu P, Li Z G. Studies on the physiological response of *Phytolacca americana* to manganese toxicity by FTIR spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(3): 582-585.
- [10] Chen Y Z, Tao Y M, Liang Z X, Liang Y L, Liu X C. Effects of protective enzymes of *Phytolacca acinosa* under Mn anganese stress. *Journal of Biology*, 2008, 25(3): 44-47.

- [11] Wang Z Y, Wu Y H, Liu P, Tang X M, Gong C F, Zhang D X, Li J S. Effect of manganese toxicity on reactive oxygen species metabolism of *Phytolacca americana*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(8): 47-50.
- [12] Shen J H, Liang W B, Xue S G, Wang P. Effects of manganese stress on the activity of antioxidant enzymes in the leaves of *Phytolacca americana*. *Guizhou Sciences*, 2009, 27(3): 58-61.
- [13] Liang W B, Xue S G, Shen J H, Wang P. Effects of manganese stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Phytolacca americana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 619-625.
- [14] Bot J L, Goss M J, Carvalho M J G P R, Beusichem M L V, Kirkby E A. The significance of the magnesium to manganese ratio in plant tissues for growth and alleviation of manganese toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wheat (*Triticum aestivum*) plants. *Plant and Soil*, 1990, 124(2): 205-210.
- [15] Hauck M, Paul A, Gross S, Raubuch M. Manganese toxicity in epiphytic lichens: chlorophyll degradation and interaction with iron and phosphorus. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(2): 181-191.
- [16] Xu X H, Shi J Y, Chen X C, Chen Y X, Wu J C, Wang X R. Subcellular distribution and chemical fractions of manganese in leaves of hyperaccumulator *Phytolacca acinosa* Roxb. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 515-520.
- [17] Bidwell S D, Batianoff G N, Woodrow I E, Sommer-Knudsen J. Hyperaccumulation of manganese in the rainforest tree *Austromyrtus bidwillii* (Myrtaceae) from Queensland, Australia. *Functional Plant Biology*, 2002, 29(7): 899-905.
- [18] Xu Q S, Shi G X, Du K H. Effects of Cr (VI) on physiological and ultrastructural changes in leaves of *Otelia alismoides* (L) Pers. *Guihaia*, 2002, 22(1): 92-96.
- [19] Bussis D, Heineke D. Acclimation of potato plants to polyethylene glycol-induced water deficit II. Contents and subcellular distribution of organic solutes. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49: 1361-1370.
- [20] Ye B X, Shu H R, Li D Q. Effects of PEG on stomata apparatus ultrastructure of *Mauls hupehensis*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 239-242.
- [21] Xu X L, Chen S W, Hu X Y. Heavy metal pollution on plant ultrastructure. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2006, 25 (Supplement): 257-258.

参考文献:

- [1] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 徐圣友, 王远鹏. 中国首次发现的锰超积累植物——商陆. *生态学报*, 2003, 23(5): 935-937.
- [7] 徐根娣, 孙文良, 刘鹏, 陈吟子, 龚春风. 美洲商陆营养器官的解剖结构与其耐锰的关系. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(4): 452-456.
- [8] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展. *植物学报*, 2010, 45(4): 506-520.
- [9] 任立民, 成则丰, 刘鹏, 李志刚. 美洲商陆对锰毒生理响应的 FTIR 研究. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(3): 582-585.
- [10] 陈燕珍, 陶毅明, 梁振鑫, 梁杨琳, 刘晓灿. 锰胁迫对商陆保护酶的影响. *生物学杂志*, 2008, 25(3): 44-47.
- [11] 王志颖, 吴玉环, 刘鹏, 唐秀梅, 龚春风, 张德兴, 李锦山. 锰毒对美洲商陆活性氧代谢的影响. *贵州农业科学*, 2009, 37(8): 47-50.
- [12] 沈吉红, 梁文斌, 薛生国, 王萍. 锰胁迫对垂序商陆叶片抗氧化系统的影响. *贵州科学*, 2009, 27(3): 58-61.
- [13] 梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 王萍. 锰胁迫对垂序商陆光合特性及叶绿素荧光参数的影响. *生态学报*, 2010, 30(3): 619-625.
- [16] 徐向华, 施积炎, 陈新才, 陈英旭, 吴吉春, 王晓蓉. 锰在商陆叶片的细胞分布及化学形态分析. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 515-520.
- [18] 徐勤松, 施国新, 杜开和. 六价铬污染对水车前叶片生理生化及细胞超微结构的影响. *广西植物*, 2002, 22(1): 92-96.
- [20] 叶宝兴, 束怀瑞, 李德全. 聚乙二醇对平邑甜茶叶片气孔器超微结构的影响. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 239-242.
- [21] 徐信兰, 陈少微, 胡晓颖. 重金属污染对植物超微结构的影响. *电子显微学报*, 2006, 25(增刊): 257-258.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 13 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Spatiotemporal variation of plant community aspections in the north-subtropical zone of eastern China	CHEN Xiaoqiu, QI Xiaoran, A Shan, et al (3559)
Seasonal variations and environmental control impacts of evapotranspiration in a hilly plantation in the mountain areas of North China	HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3569)
Intra- and inter-specific variations in stem respiration for 14 temperate tree species in northeastern China	XU Fei, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (3581)
Assessment of the ecological health of wetlands in Honghe supported by RS and GIS techniques	WANG Yihan, ZHOU Demin, SUN Yonghua (3590)
Phytoplankton community structure in Qinzhou Bay during flood season by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures	LAN Wenlu, WANG Xiaohui, LI Mingmin (3601)
Irreplaceability-based function zoning of nature reserves in the Three Rivers Headwater Region of Qinghai Province	QU Yi, WANG Xiulei, LUAN Xiaofeng, et al (3609)
Effects of snowmelt timing on individual growth and reproduction of <i>Pedicularis davidii</i> var. <i>pentodon</i> on the eastern Tibetan Plateau	CHEN Wennian, WU Yan, WU Ning, et al (3621)
Response of foliar $\delta^{13}\text{C}$ of <i>Quercus spinosa</i> to altitudinal gradients	FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (3629)
Soil water and nutrient characteristics of alfalfa grasslands at semi-arid and semi-arid prone to drought areas in southern Ningxia	REN Jingjing, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3638)
Aboveground biomass of natural <i>Castanopsis fissa</i> community at the Xiaokeng of NanLing Mountain, Southern China	LI Gen, ZHOU Guangyi, WANG Xu, et al (3650)
Impacts of grazing on herbage quality of the alpine and subalpine meadows within Wutai Mountain	ZHANG Yiping, JIANG Yuan, LIU Quanru, et al (3659)
Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of <i>Abies fabiri</i> (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain	YANG Liudong, YANG Yan, WANG Genxu, et al (3668)
Manganese stress on morphological structures of leaf and ultrastructures of chloroplast of a manganese hyperaccumulator, <i>Phytolacca americana</i>	LIANG Wenbin, XUE Shengguo, SHEN Jihong, et al (3677)
Allelopathic potential of volatile oil from <i>Chenopodium ambrosioides</i> L. on root tip cells of <i>Vicia faba</i>	HU WanJun, MA Danwei, WANG Yanan, et al (3684)
Contents and cycling of microelements in Karst urban poplar plantations	WANG Xinkai, TIAN Dalun, YAN Wende, et al (3691)
Fungal flora and population structure of polypores in the Great Xingan Mountains	CUI Baokai, YU Changjun (3700)
Growth competition characteristics of <i>Microcystis aeruginosa</i> Kutz and <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp.) Kutz under non-steady-state nutrient limitation	ZHAO Xiaodong, PAN Jiang, LI Jinye, et al (3710)
The characters of salt-tolerance at different growth stages in cotton	WANG Junjuan, WANG Delong, FAN Weili, et al (3720)
Assessment of tributyltin ecotoxicity using a model animal nematode <i>Caenorhabditis elegans</i>	WANG Yun, YANG Yanan, JIAN Fenglei, et al (3728)
Effect of oil exploitation on soil nematode communities in Daqing Oilfield	XIAO Nengwen, XIE Deyan, WANG Xuexia, et al (3736)
Effect of habitat degradation on soil meso- and microfaunal communities in the Zoigê Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau	WU Pengfei, YANG Daxing (3745)
Characteristics of the soil environment of Dongting Lake wetlands and its response to the converting farmland to lake project	LIU Na, WANG Kelin, XIE Yonghong, et al (3758)
Modeling the changes of yield and deep soil water in apple orchards in Weibei rainfed highland	ZHANG Shehong, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3767)
Potential soil N_2O emissions and its controlling factors under different land use patterns on hilly-gully loess plateau	QI Jinhua, HUANG Yimei, ZHANG Hong, et al (3778)
Comparison between physiological properties and cold tolerance under low temperature treatment during different growing stages of rice in northeast central region of China	SONG Guangshu, SUN Zhongfu, SUN Lei, et al (3788)
Effect of sulfur on chlorophyll fluorescence of flue-cured tobacco at maturation stage	ZHU Yinghua, TU Naimei, XIAO Hanqian, et al (3796)
Effects of high temperature and strong light on chlorophyll fluorescence, the D1 protein, and Deg1 protease in Satsuma mandarin, and the protective role of salicylic acid	QIU Cuihua, JI Weiwei, GUO Yanping (3802)
Effect of plastic film mulching on the distribution and translocation of nitrogen in soil-lettuce system	LI Lili, LI Feili, LIU Qiuya, et al (3811)
An analysis on spatio-temporal dynamics of suitable habitats for waterbirds based on spatial zonation at Chongming Dongtan, Shanghai	FAN Xuezhong, ZHANG Liqun, YUAN Lin, et al (3820)
The bryophyte consumed by reindeers and species diversity of bryophyte in reindeer habitats	FENG Chao, BAI Xueliang (3830)
Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing	ZHANG Biao, XIE Gaodi, XUE Kang, et al (3839)
Review and Monograph	
Advances in methane-cycling microbial communities of permafrost and their response to global change	NI Yongqing, SHI Xuwei, ZHENG Xiaoji, et al (3846)
Heat transfer property of mammal pelage and its influencing factors	ZHENG Lei, ZHANG Wei, HUA Yan (3856)

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 13 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 13 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
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
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@espg.net

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

订 购 全国各地邮局
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

Domestic All Local Post Offices in China
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