

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

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34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响..... 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)

呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子..... 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)

江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价..... 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

景观、区域和全球生态

中国自然保护综合地理区划..... 郭子良,崔国发 (1284)

近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)

人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)

2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 谈永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

资源与产业生态

三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布..... 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说：插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人 and 大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

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

DOI: 10.5846/stxb201305080982

付川, 余顺慧, 黄怡民, 邓洪平. 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究. 生态学报, 2014, 34(5): 1149-1155.

Fu C, Yu S H, Huang Y M, Deng H P. Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1149-1155.

紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的 傅里叶变换红外光谱法研究

付 川¹, 余顺慧¹, 黄怡民¹, 邓洪平^{2, *}

(1. 重庆三峡学院, 三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室, 重庆 404100;

2. 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:为阐明紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)对铜胁迫的耐性机理,采用准确度好、分辨率高和简便快捷的傅里叶变换红外光谱法(FTIR)研究在不同铜浓度(0、1、5、20、100 mol/L)处理时紫花苜蓿根、茎、叶化学组分的变化。结果表明:随着铜处理浓度的增加,紫花苜蓿根、茎、叶生物量变化不大。其根组织在 2924 cm⁻¹处峰高处呈现出先下降后上升的趋势,反映了在低铜(<5 mol/L)处理条件下紫花苜蓿分泌的有机酸不断螯合 Cu,造成羧酸 O—H 的减少,但随着 Cu 含量的升高,其羧酸螯合力变弱,有机酸含量渐渐升高;根组织在 1381 cm⁻¹处峰高先下降后上升,反映了含油脂化合物含量先下降后升高。可能与植物在细胞壁结构上增强抗逆性有一定关系,即低 Cu 处理下细胞壁可能通过提高阳离子交换能力(CEC),增强了耐 Cu 性;茎组织在 2924, 1643, 1381, 1064 cm⁻¹等处峰高无明显变化;叶组织所有峰值在低浓度(<5 mol/L)Cu 处理下变化不明显,高浓度(>5 mol/L)Cu 处理下所有峰值先升后降,随着这可能与可溶性糖及可溶性蛋白质等物质含量都呈现先升后降的趋势有关。这表明紫花苜蓿通过根部有机酸含量的变化和提高细胞壁阳离子交换能力,将吸收的 Cu 大部分积累在根部,阻止 Cu 向地上部分运输,有效地保护了植物地上部分组织。

关键词:紫花苜蓿; 铜胁迫; 化学组分; 傅里叶变换红外光谱法(FTIR)

Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy

FU Chuan¹, YU Shunhui¹, HUANG Yimin¹, DENG Hongping^{2, *}

1 Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 404100, China

2 Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Although copper (Cu) is required for plant growth and development, excessive levels of this element can be toxic to plants. Soil pollution and degradation take place when Cu is released into the environment through activities such as mining, discharge of “three wastes” (i.e., waste water, waste gas, and waste residue), and application of cupric fungicides. *Medicago sativa*, a perennial flowering plant native to Iran, has been cultivated as an important forage crop in many countries around the world. This species is reported to be a copper-hyperaccumulator, and studies suggest that it may be useful for phytoremediation.

To elucidate the mechanism of copper tolerance in *M. sativa*, changes in levels of chemical constituents of *M. sativa* treated with different concentrations of Cu solution were investigated using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), an accurate, simple, efficient technique with high resolution.

基金项目:三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室开放基金项目(WEPKL2012MS-01)

收稿日期:2013-05-08; **修订日期:**2013-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: denghp@swu.edu.cn

After germination in a seed tray, *M. sativa* seedlings of uniform size and appearance were selected and transplanted into a hydroponics system. After pre-cultivation with one-quarter strength Hoagland's solution for one week, the seedlings were treated with different concentrations of Cu^{2+} , i.e., 0, 1, 5, 20, and 100 mol/L. After 45 days of treatment with Cu^{2+} solution, roots, stems, and leaves were separated and dried to measure biomass and to detect changes in chemical constituent levels.

Although root, stem, and leaf biomass of *M. sativa* decreased slightly as concentrations of Cu^{2+} were increased, these changes were not found to be significant. After an initial decline, absorbance in roots of the dominant infrared band near 2924 cm^{-1} exhibited an increasing trend. This result indicates that at low Cu^{2+} concentrations ($<5\text{ mol/L}$), organic acids secreted by *M. sativa* were able to chelate Cu^{2+} , leading to a decrease in carboxylic acid O—H; at high Cu^{2+} concentrations ($>5\text{ mol/L}$), chelating activity decreased, which was followed by an increase in organic acids. Absorbance changes at 1381 cm^{-1} mirrored those at 2924 cm^{-1} as Cu^{2+} concentration was increased, indicating that fat levels increased after an initial decrease. The observed pattern of changes in fat concentration may have been due to increases in cell wall cation-exchange capacity that enhanced Cu resistance. In stems, absorbances of the dominant infrared bands near 2924, 1643, 1381, and 1064 cm^{-1} , which corresponded to organic acids, proteins and amino acids, fats, and carbohydrates, respectively, did not exhibit any obvious changes. In leaves, there were no obvious changes in absorbances of any dominant bands at low Cu^{2+} concentrations; at high Cu^{2+} concentrations, however, these absorbances fell after an initial rise. The observed trend may have been due to changes in levels of soluble sugar and soluble protein.

To summarize, roots of *M. sativa* are able to adjust organic acid content and to enhance cell wall cation-exchange capacity by accumulating Cu^{2+} and impeding transportation of Cu^{2+} from roots to shoots. As a result, shoots were effectively protected from Cu damage.

Key Words: *Medicago sativa* L.; copper stress; chemical composition; FTIR

Cu 是植物生长发育所必需的微量营养元素。过量的铜会抑制植物根的生长,抑制叶绿素的合成,使植物生理代谢紊乱,生长缓慢^[1]。铜矿的开采和冶炼厂三废的排放、含 Cu 农业化学物质和有机肥的施用,以及生活污水的排放,使农田土壤含 Cu 量显著增加,使农作物产量大幅度下降,对农业生产及环境质量构成极大威胁。有关 Cu 污染的植物修复受到广泛关注^[2],研究铜污染土壤和水体修复新技术具有重要意义。利用超积累植物对重金属的富集特性而进行植物修复,具有廉价、高效和安全等特点,已经成为土壤、水体重金属污染研究领域的一项新兴技术^[3]。Bert^[4]认为大多数的超积累植物都生长在金属富集的土壤上,对重金属具有超积累的特性,同时具有金属耐性的特征。Clemens^[5]认为植物忍耐和抵抗重金属毒害的生理机制,包括重金属元素的控制吸收、体内螯合固定、细胞内分隔、生化忍耐策略以及其它体内平衡机制等。其中体内螯合作用固定金属离子或者降低其生物毒性是植物对细胞内重金属解毒的主要方式。Baker^[6]认为,植物体内螯

合作用是以蛋白质类、有机酸等物质与重金属形成螯合物,如与 Cu 反应形成螯合物和沉淀降低自由态的 Cu。

植物在受到重金属胁迫时,体内重金属积累特征以及生长发育都会产生相应变化,同时微观响应机制也会产生变化^[7]。傅里叶红外光谱(FTIR)是一种基于化合物中官能团和极性键振动的结构分析技术,已广泛应用于大分子化合物结构分析以及蛋白质的二级结构解析,并且具有相对稳定的^[8]。任利民等应用 FTIR 技术研究美洲商陆对锰毒的生理响应,认为植物化学组份的变化有助于揭示超富集植物的锰耐性机理^[9]。薛生国等采用 FTIR 法探讨紫茉莉对铅胁迫生理响应的影响,发现紫茉莉通过根系有机物含量的变化,将植物吸收的 Pb 大部分积累在根部,阻止 Pb 向地上部分运输,有效的保护了植物地上部分^[10]。但国内研究材料多为野生品种(有的是外来入侵植物),多存在植株矮小,生物量低,生长缓慢等不足,很难在实际中大面积应用,而入侵植物虽然生物量大,但具有生态风险。紫花苜

苜蓿是一种原产于伊朗的多年生豆科草本植物,分布于世界各地,我国也有大面积种植。研究表明,紫花苜蓿对铜有很强的积累作用,其(地上和地下部分)富集系数大于 1,达到了超积累植物的标准。具有生长迅速、适应性强、生物量大等特点,很适合作为各地的重金属修复植物^[11]。由此,探讨不同铜处理条件下其化学组成上的差异将有利于揭示其耐铜机制。目前,国内外对铜耐性植物不同组织器官化学组分进行 FTIR 的研究较少,对紫花苜蓿的相关研究未见报道,因此,本研究将探讨不同铜处理条件下,利用 FTIR 对紫花苜蓿根、茎、叶的化学组分进行研究,以便为研究铜对牧草的毒害机制提供新的研究方法,对铜污染环境修复提供参考依据,对应用牧草进行铜污染水体及土壤修复等都具有指导意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及仪器

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 种子购自重庆市万州区宏远市场。 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)。所用仪器为 IRPrestige-21 红外光谱仪。

1.2 试验方法

1.2.1 实验材料预处理

挑选大小均匀饱满的紫花苜蓿种子 100 粒,用 0.1% 的 HClO 溶液消毒 10 min,用水洗净,均匀播种在装有培养基质(河沙)的育苗盘中,浇透水,在室内条件下培养,待小苗长出第 2 片真叶时,挑选长势一致的幼苗 45 株,移入水培装置中,每瓶 3 株苗。先采用 1/4 Hoagland 营养液预培养 1 周,再更换为含不同浓度 Cu 的培养液进行处理。

1.2.2 试验处理

配置 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 母液,分别稀释成 Cu^{2+} 浓度梯度为 0、1、5、20、100 mol/L 的培养液。每个浓度处理设 3 瓶。试验期间每天补水 1 次,3 d 换 1 次溶液,24 h 通气培养,所有处理溶液的 pH 值保持在 (6.5 ± 0.1) 。试验在实验室内进行,水培容器放在靠近窗边的试验台上,先采用 1/4 Hoagland 营养液预培养 1 周,再更换为含不同浓度 Cu^{2+} 的培养液进行处理,处理 45 d 后收获。

1.2.3 傅里叶红外光谱(FTIR)采集

分别取紫花苜蓿植株 105 °C 下杀青 0.5 h,80 °C 烘箱里干燥 24 h,将粉末样品和 KBr 一起用玛瑙研

钵研碎。并压成薄片,然后置于 FTIR 光谱仪的 IRsolution Chinese 采样器下,按照所设定的测试条件。在室温下直接测定样品的 FTIR,测试条件:光谱范围 $4000-400\text{cm}^{-1}$,分辨率 16cm^{-1} ,扫描累加次数 20 次,动镜速度 2.8,获得所需紫花苜蓿植株的光谱信息。

1.2.4 植物生长的分析

将收获的紫花苜蓿全株用蒸馏水洗净后放入 105 °C 下杀青 0.5 h,80 °C 烘干至恒重,分别称取根、茎、叶的干生物量。

1.2.5 数据分析及结果处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2003 进行统计分析和处理,并应用 Origin (7.0) 进行红外光谱数据图谱处理。

2 结果与分析

2.1 不同浓度铜处理对紫花苜蓿生长的影响

如图 1 所示,随着 Cu^{2+} 处理浓度的增加,紫花苜蓿根、茎、叶的生物量呈现出递减趋势。但不同铜处理条件下紫花苜蓿都能生长正常(能完成植物的生长发育过程),不同铜处理条件下生物量差异不显著 ($P>0.05$)。这表明紫花苜蓿对铜有较强的耐性。铜是植物生长发育所必需的微量营养元素,低浓度的 Cu^{2+} 会促进植物的生长,但高浓度的 Cu^{2+} 会抑制植物的生长。然而,受植物遗传学特性、生态学特性等因素所决定,不同植物对 Cu 污染的忍耐性是不同的。因此,对植物生长有利的铜浓度范围要根据植物的种类而定^[12]。有研究表明 Cu^{2+} 处理浓度低于

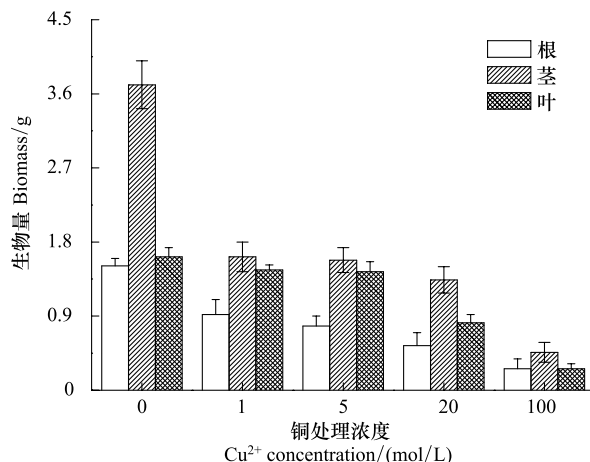


图 1 不同浓度铜处理对紫花苜蓿生物量的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of Cu on the biomass of *Medicago sativa* L.

15.6 $\mu\text{mol/L}$ 时促进烟草的生长, 高于 15.6 $\mu\text{mol/L}$ 时抑制烟草的生长^[13]。研究表明, 在 Cu^{2+} 处理浓度为 1 mol/L 时就开始抑制紫花苜蓿的生长, 高浓度铜 (100 mol/L) 处理下紫花苜蓿根部出现发黑, 叶稍微卷曲的特征; 呈现出随着培养液中 Cu^{2+} 浓度的增加, 紫花苜蓿的生物量越来越小的特征。但 Cu^{2+} 处理浓度与这种牧草的生物量差异不显著。

2.2 紫花苜蓿根的 FTIR 分析

3410 cm^{-1} 的自由羟基的伸缩振动峰主要来自于紫花苜蓿根系中多糖、纤维素、半纤维素等碳水化合物 (图 2)^[9], 由图 3 可以看出随着 Cu 浓度的升高, 处理峰高呈现先降后升的趋势。在低浓度 Cu 处理条件下, 处理峰吸光度下降, 在 5 mol/L 达到最低, 随 Cu 处理浓度的继续提高, 该峰吸光度上升。这可能是根外表皮细胞壁的羟基吸附结合 Cu^{2+} 形成稳定的化合物, 使细胞表面的氢键减少; 而高浓度 Cu^{2+} 处理下可能破坏了根外表皮细胞壁的羟基吸附结合 Cu^{2+} 的机制^[7], 导致根外表皮细胞壁的羟基不能结合 Cu^{2+} , 峰值升高。

2924 cm^{-1} 附近是羧酸 O—H 与甲基伸缩振动重叠峰^[7,14], 主要来自于维生素、各种膜及细胞壁的组织等成分。随着 Cu 浓度的增加, 该处峰高呈现先下降后上升的趋势, 如图 3 所示, 这可能是在低浓度 Cu 的胁迫下, 紫花苜蓿的根部由于抗性机制分泌的有机酸不断螯合 Cu, 造成羧酸 O—H 的减少, 导致羧酸谱带下降, 但随着 Cu 的处理浓度继续升高, Cu 对紫花苜蓿的毒害加重, 其羧酸螯合力变弱, 有机酸含量渐渐升高, 故其峰值开始上升。

1381 cm^{-1} 处为含油脂化合物 (各种膜和胞壁) 的组织中甲基的吸收带^[15-16]。随着 Cu 处理浓度的升高, 峰高表现出先下降后升高的趋势 (如图 3 所示), 反映了含油脂化合物含量先下降后升高。可能随着 Cu 处理浓度的升高 (1—5 mol/L), 细胞壁通过降低果胶甲基化程度, 使阳离子交换能力提高, 从而吸收更多的 Cu, 即通过细胞壁中积累 Cu 来增强抗逆性, 峰高逐渐下降, 但高浓度的 Cu (>5 mol/L) 已对紫花苜蓿产生了胁迫, 甲基化程度又开始升高, 峰值又呈上升态势。

1064 cm^{-1} 附近的峰是醇、酯基、醚基或酚类等碳水化合物的 C—O 基团的伸缩振动峰 (图 2)^[9,17-18]。随着 Cu 处理浓度的增加, 峰高先降后升 (图 3)。说

明随着 Cu 处理浓度的升高 (1—5 mol/mL), 这类物质运输通道受到一定影响, 致使部分这类物质无法运输到根部, 峰高逐渐下降, 但高浓度的 Cu (>5 mol/L) 已对紫花苜蓿产生了胁迫, 导致膜脂过氧化程度加深, 脂肪族酮类化合物过氧化产物在根部积累, 峰值又呈上升趋势。

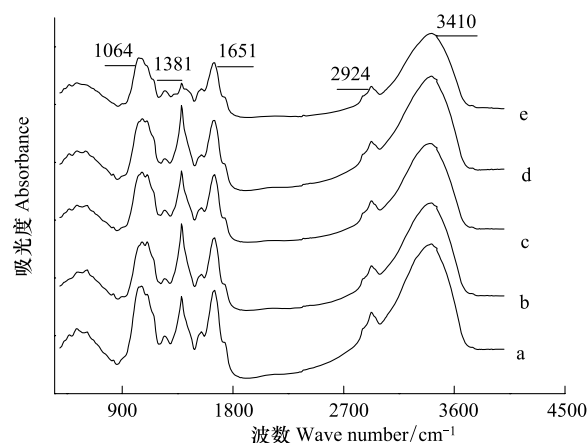


图 2 不同铜处理下紫花苜蓿根系的傅里叶红外光谱图 (400—4000 cm^{-1})

Fig.2 Absorption FTIR spectra in the 400 to 4000 cm^{-1} region in the roots of *M. sativa* L.

a: control; b: 1 mol/L; c: 5 mol/L; d: 20 mol/L; e: 100 mol/L

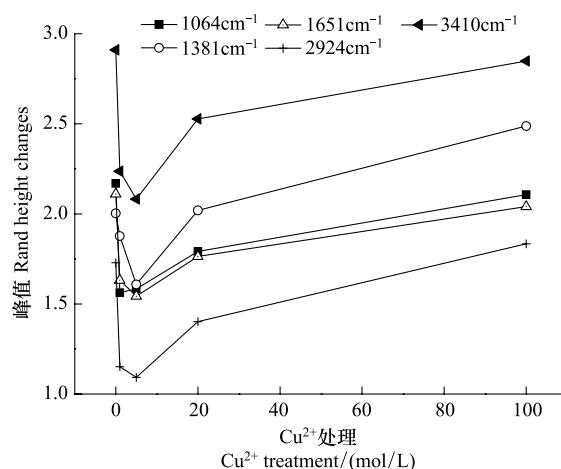


图 3 不同铜处理下紫花苜蓿根系的特征峰 (1064 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1651 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3410 cm^{-1}) 变化谱图

Fig.3 The band height changes of 1064 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1651 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3410 cm^{-1} in the roots of *M. sativa* L.

2.3 紫花苜蓿茎的 FTIR 分析

图 4 为不同铜浓度处理条件下紫花苜蓿茎组织的红外光谱图, 图 5 为不同铜浓度下紫花苜蓿茎组织的特征峰变化图。1064 cm^{-1} 附近的峰是醇、酯基、醚基或酚类等碳水化合物的 C—O 基团的伸缩振动

峰, 1381 cm^{-1} 附近的峰是为含油脂化合物的甲基 C—H 的变形振动峰, 在 1643 cm^{-1} 附近的峰是氨基酸, 多肽和蛋白质类物质 N—H 酰胺的弯曲振动峰, 2924 cm^{-1} 附近的峰是植物体内有机酸类物质的羧酸 O—H 的伸缩振动峰, 在 3402 cm^{-1} 附近的峰代表紫花苜蓿茎中碳水化合物分子间氢键 O—H 自由羟基的伸缩振动峰(图 5)。由图 5 看出, 除 3402 cm^{-1} 处峰值在高浓度出现上升外, 各处峰均无明显变化, 表明在 Cu 处理浓度不断升高的情况下, 紫花苜蓿茎中这几类有机物: 碳水化合物、有机酸、氨基酸、多肽和蛋白质等成分变化不明显。因此在一定浓度范围

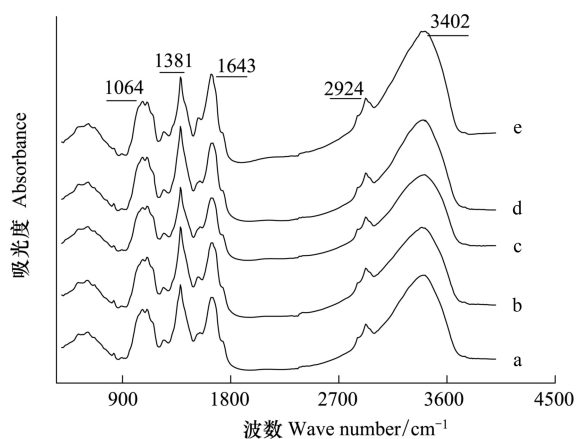


图 4 不同铜处理下紫花苜蓿茎的傅里叶红外光谱图 (400—4000 cm^{-1})

Fig.4 Absorption FTIR spectra in the 400 to 4000 cm^{-1} region in the stems of *M. sativa* L.

a: Control; b: 1 mol/L; c: 5 mol/L; d: 20 mol/L; e: 100 mol/L

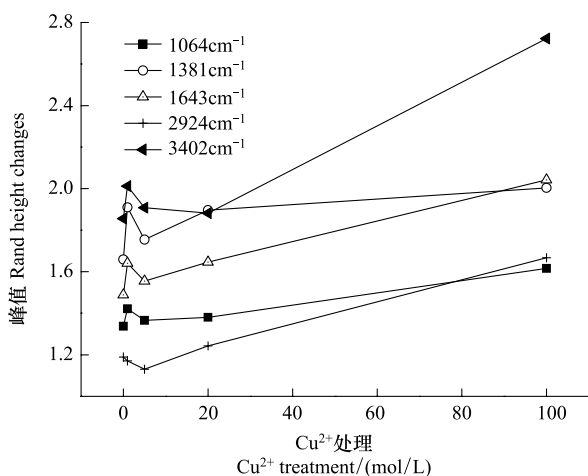


图 5 不同铜处理下紫花苜蓿茎的特征峰 (1064 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1643 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3402 cm^{-1}) 变化谱图

Fig.5 The band height changes of 1064 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1643 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3402 cm^{-1} in the stems of *M. sativa* L.

(0—100 mol/L) 的 Cu 胁迫下, 紫花苜蓿茎的生理生化过程受影响程度较小, 表现出紫花苜蓿作为 Cu 耐性植物的特性。

2.4 紫花苜蓿叶的 FTIR 分析

图 6 为不同铜浓度处理条件下紫花苜蓿叶的红外光谱图, 图 7 为不同铜浓度下紫花苜蓿叶的特征峰变化图。

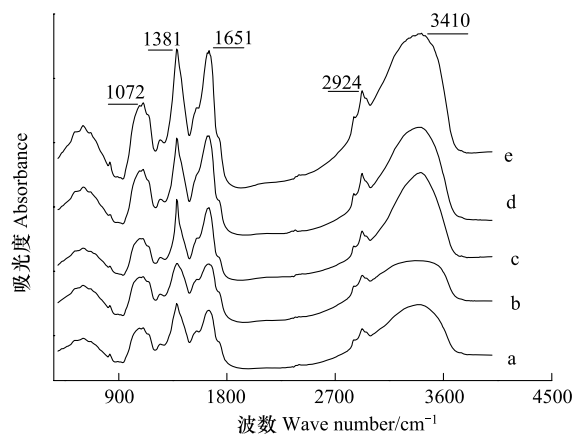


图 6 不同铜处理下紫花苜蓿叶的傅里叶红外光谱图 (400—4000 cm^{-1})

Fig.6 Absorption FTIR spectra in the 400 to 4000 cm^{-1} region in the leaves of *M. sativa* L.

a: Control; b: 1 mol/L; c: 5 mol/L; d: 20 mol/L; e: 100 mol/L

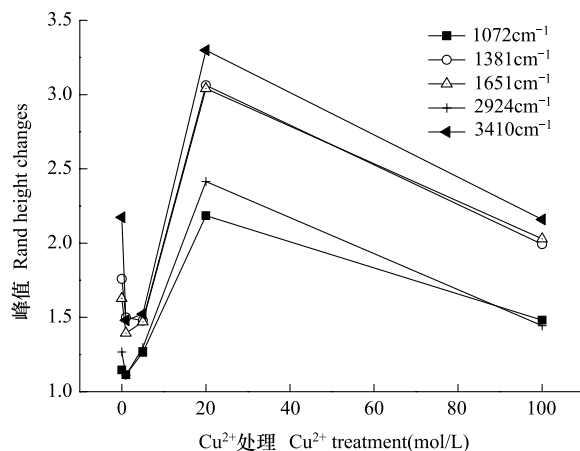


图 7 不同铜处理下紫花苜蓿叶的特征峰 (1072 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1651 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3410 cm^{-1}) 变化谱图

Fig. 7 The band height changes of 1072 cm^{-1} , 1381 cm^{-1} , 1651 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} and 3410 cm^{-1} in the leaves of *M. sativa* L.

1072 cm^{-1} 附近的峰是醇、酯基、醚基或酚类的 C—O 基团的伸缩振动峰; 1381 cm^{-1} 附近的峰是为含油脂化合物的甲基 C—H 的变形振动峰, 在 1651 cm^{-1} 附近的峰是氨基酸, 多肽和蛋白质类物质 N—H

酰胺的弯曲振动峰, 2924 cm^{-1} 附近的峰是植物体内有机酸类物质的羧酸 O—H 的伸缩振动峰, 在 3410 cm^{-1} 附近的峰代表紫花苜蓿叶中碳水化合物分子间氢键 O—H 自由羟基的伸缩振动峰。由图 7 看出, 所有峰值在低浓度 ($<5\text{ mol/L}$) Cu 处理下变化不明显, 说明紫花苜蓿叶的生理生化过程受影响程度较小, 表现出对 Cu 的耐性较强。高浓度 ($>5\text{ mol/L}$) Cu 处理下所有峰值先升后降。可能与可溶性糖及可溶性蛋白质等物质的含量的先升后降有关。可能是植物体对不良环境在一定适应性基础上的抵抗性反应。但是植物耐受重金属胁迫是有一定限度, 超过这个限度, 可溶性糖和蛋白质等物质的含量反而下降^[7,15]。

3 结论

(1) Cu 胁迫抑制了紫花苜蓿的生长, 但不同处理条件下生物量的差异不显著, 表明紫花苜蓿对铜胁迫有较强的耐受性。

(2) 从红外光谱可以看出, 经过重金属铜胁迫的紫花苜蓿, 吸收峰所对应的波数相对固定, 但各吸收强度有所变化, 说明重金属铜胁迫并不会改变紫花苜蓿基本的化学成分组成, 但对化学成分的含量有所影响。

(3) 紫花苜蓿根组织在 2924 cm^{-1} 处峰高随着 Cu 浓度的增加先下降后上升, 反映在低铜处理条件下紫花苜蓿分泌的有机酸不断螯合 Cu, 造成羧酸 O—H 的减少, 但随着 Cu 含量的升高, 其羧酸螯合力变弱, 有机酸含量渐渐升高。

(4) 紫花苜蓿茎组织在 $2924, 1643, 1381, 1064\text{ cm}^{-1}$ 等处峰高无明显变化, 表明其茎中的生理生化过程受影响的程度较小, 体现了紫花苜蓿作为 Cu 耐性植物的特性; 叶组织在重金属 Cu 胁迫下, 所有峰值在低浓度 ($<5\text{ mol/L}$) Cu 处理下变化不明显, 高处理浓度时, 随着浓度的升高可溶性糖及可溶性蛋白质等物质的含量都呈现先升后降的趋势。

致谢: 东南大学王大勇教授对写作给予帮助, 特此致谢。

References:

- [1] Madejón P, Ramírez-Benítez J E, Corrales I, Barceló J, Poschenrieder C. Copper-induced oxidative damage and enhanced antioxidant defenses in the root apex of maize cultivars differing in Cu tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67 (2): 415-420.
- [2] Janas K M, Zielińska-Tomaszewska J, Rybaczek D, Maszewski J, Posmyk M M, Amarowicz R, Kosińska A. The impact of copper ions on growth, lipid peroxidation, and phenolic compound accumulation and localization in lentil (*Lens culinaris* Medic.) seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(4): 270-276.
- [3] Zhang T P, Pan W B. Progress in the research of rhizosphere and phytoremediation of contaminated soils. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 76-80.
- [4] Bert V, Macnair M R, de Laguerie P, Saonmitou-Laprade P, Petit D. Zinc tolerance and accumulation in metalcolous and nonmetalcolous populations of *Arabidopsis halleri* (Brassicaceae). *New Phytologist*, 2000, 146(2): 225-233.
- [5] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 2001, 212(4): 475-486.
- [6] Baker A J M. Metal tolerance. *New Phytologist*, 1987, 106(1): 93-111.
- [7] 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.
- [8] Bosch A, Serra D, Prieto C, Schmitt J, Naumann D, Yantorno O. Characterization of Bordetella pertussis growing as biofilm by chemical analysis and FT-IR spectroscopy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 71(5): 736-747.
- [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] Xue S G, Zhu F, Ye S, Wang J, Wu X E. Physiological response of mirabilis jalapa Linn. to lead stress by FTIR spectroscopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6143-6148.
- [11] Li D X, Wen Y. Discussion on the application of hyperaccumulators in the remediation of heavy metal contaminated soil. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2011, 21 (1): 177-180.
- [12] Yang J R, Huang Y. Mechanism of heavy metal tolerance of plants. *Chinese Journal of Ecology*, 1994, 13(6): 20-26.
- [13] Zhang Y Y, Liu P, Xu G D, Zhou N. Effects of Cu stress on growth and physiological characteristics of tobacco seedlings. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(3): 32-35.
- [14] Zhang X B, Liu P, Li D T, Xu G T, Jiang M J. FTIR spectroscopic characterization of chromium-induced changes in root cell wall of plants. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28 (5): 1067-1070.
- [15] Gu Y H, Liu P, Cai Q M, Chen J, Xie H K. Effects of Cd stress on FTIR spectra and physiological traits of Hypnum fertile Sendtn. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 620-623.

- [16] Gong N, Li R H, Meng Z F, Yang G M. Physiological response of *Brassica chinensis* L. seeds in germination to cadmium toxicity by FTIR-ATR spectroscopy. *Journal of Argo-Environment Science*, 2010, 29(1): 9-14.
- [17] Xue S G, Huang Y H, Wang J, Tian S X, Lei J, He Z X. Physiological response of *Polygonum lapathifolium* to manganese stress by FTIR spectroscopy. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(6): 1528-1532.
- [18] Lu W Z, Yuan H F, Xu G T, Qiang D M. Modern near infrared spectroscopy analytical technology. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 19-26.
- 参考文献:
- [3] 张太平, 潘伟斌. 根际环境与土壤污染的植物修复研究进展. *生态环境*, 2003, 12(1): 76-80.
- [7] 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.
- [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] 薛生国, 朱锋, 叶晟, 王钧, 吴雪娥. 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究. *生态学报*, 2011, 31(20): 6143-6148.
- [11] 李东旭, 文雅. 超积累植物在重金属污染土壤修复中的应用. *科技情报开发与经济*, 2011, 21(1): 177-180.
- [12] 杨居荣, 黄翌. 植物对重金属的耐性机理. *生态学杂志*, 1994, 13(6): 20-26.
- [13] 张艳英, 刘鹏, 徐根娣, 周楠. 铜胁迫对烟草幼苗生长和生理特征的影响. *贵州农业科学*, 2009, 37(3): 32-35.
- [14] 张晓斌, 刘鹏, 李丹婷, 徐根娣, 蒋敏姣. 铬诱导植物根细胞壁化学成分变化的 FTIR 表征. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(5): 1067-1070.
- [15] 顾艳红, 刘鹏, 蔡琪敏, 陈洁, 谢鸿锴. FTIR 结合生理特性研究镉胁迫对果灰藓的影响. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 620-623.
- [16] 龚宁, 李荣华, 孟昭福, 杨公明. Cd 对小白菜萌发生理影响的 FTIR-ATR 研究. *农业环境科学学报*, 2010, 29(1): 9-14.
- [17] 薛生国, 黄艳红, 王钧, 田守祥, 雷杰, 何哲祥. 采用 FTIR 法研究酸模叶蓼对锰胁迫生理响应的影响. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(6): 1528-1532.
- [18] 陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 强冬梅. 现代近红外光谱分析技术. 北京: 中国石化出版社, 2000: 19-26.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill
sludge CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant
plants and soil in alpine meadow LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 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

本期责任副主编 象伟宁

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 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

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