

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

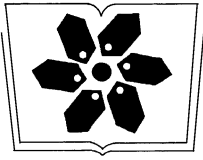
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第20期 Vol.31 No.20 **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 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

- 洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性..... 王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
- 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征..... 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
- 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析..... 薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
- 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护..... 刘吉平,吕宪国 (5894)
- 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
- 广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度..... 朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
- 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
- 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划..... 李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
- 苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素..... 周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
- 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
- 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子..... 李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
- 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响..... 蓝文陆 (5970)
- 万仙山油松径向生长与气候因子的关系 彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
- 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
- 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性..... 王亚婷,范连连 (5992)
- 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响..... 刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
- 遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响..... 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
- 云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应..... 王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
- 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
- 藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性..... 蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
- 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化..... 赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
- 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性..... 杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
- 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较..... 张继义,赵哈林 (6060)
- 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应..... 单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
- 退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联..... 赵成章,任 珩 (6080)
- 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
- 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
- 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
- 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响..... 张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
- 锌对两个品种茄子果实品质的效应..... 王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
- Cd²⁺ 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
- 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd ²⁺ 的生物吸附特性	李维焕,孟凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子	苏玉萍,林慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用	杨瑶君,刘超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响	何超,孟泉科,花蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响	汪洋,王刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变	程琳,李锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例	赵丹,李锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例	张勃,刘秀丽 (6251)
专论与综述	
孤立湿地研究进展	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型	孙军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展	文娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展	白杨,黄宇驰,王敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



封面图说: 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

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

刘俊祥, 孙振元, 巨关升, 韩蕾, 钱永强. 结缕草对重金属镉的生理响应. 生态学报, 2011, 31(20): 6149-6156.

Liu J X, Sun Z Y, Ju G S, Han L, Qian Y Q. Physiological response of *Zoysia japonica* to Cd²⁺. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6149-6156.

结缕草对重金属镉的生理响应

刘俊祥, 孙振元*, 巨关升, 韩蕾, 钱永强

(中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 采用水培的方法研究了不同浓度的 Cd²⁺ 对结缕草叶片枯黄程度的影响, 结果表明 5mg/L、10mg/L 和 30mg/L Cd²⁺ 处理对结缕草叶片的枯黄比例无显著影响; 以 10mg/L 的 Cd²⁺ 处理结缕草植株, 研究了结缕草对镉的生理响应。与对照相比, Cd²⁺ 处理 30d 时结缕草叶片的超氧阴离子自由基 (O₂⁻·) 含量、丙二醛 (MDA) 含量和相对电导率 (RC) 显著升高, 升高幅度分别为 58.69%、38.52% 和 68.69%, 表明 Cd²⁺ 对结缕草叶片产生了氧化胁迫。与对照相比, Cd²⁺ 处理 30d 时最大量子产量 (F_v/F_m) 和实际量子产量 (F_v'/F_m') 分别显著下降 3.90% 和 11.36%; 处理 20d 时实际光化学效率 (ΦPS II) 和相对电子传递速率 (rETR) 分别显著下降 22.22%、22.66%, 处理 30d 时分别显著上升 12.5%、18.12%; 处理 20d 时光化学猝灭系数 (q^p) 显著下降 14.29%, 非光化学猝灭系数 (NPQ) 则显著上升 38.54%, 表明结缕草叶片的光反应机构受到了伤害, 而光保护能力得到了提高。与对照相比, Cd²⁺ 处理下超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性先升高后降低, 而过氧化物酶 (POD) 活性先降低后升高; 脯氨酸、可溶性糖含量升高, 处理 30d 时可溶性糖含量显著上升 63.35%; 处理前 20d 时可溶性蛋白的含量高于对照, 处理 30d 时却低于对照。随着 Cd²⁺ 处理时间的增加, 结缕草地下部 Cd 含量逐渐升高; 地上部 Cd 含量先升高后降低, 差异显著; 处理 20d 时地上部镉含量最高, 转运系数最高, 达到 45.84%; 处理 10d 时镉在结缕草地上部的分布比例小于地下部, 而处理 20d、30d 时地上部镉的分布比例占优势, 表明结缕草具备修复植物的潜质。镉在结缕草地下部水溶态所占比例最大, 其次是氯化钠和醋酸提取态; 与地下部不同, 结缕草地上部醋酸提取态镉的含量要高于氯化钠提取态。综上, 结缕草对 Cd²⁺ 具有一定的耐受性。

关键词: 结缕草; 重金属; 镉; 生理响应

Physiological response of *Zoysia japonica* to Cd²⁺

LIU Junxiang, SUN Zhenyuan*, JU Guansheng, HAN Lei, QIAN Yongqiang

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/ Key Laboratory of Forest Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: *Zoysia japonica* is an important native grass species in China. The objective of this study was to study the physiological responses of *Zoysia japonica* to Cd²⁺. The plants were treated with six level of Cd²⁺ from 0 to 100mg/L for two weeks. The results demonstrated that the proportion of litter was not significantly affected when treated under 5, 10 and 30mg/L Cd²⁺. And the physiological responses of *Zoysia japonica* to 10mg/L Cd²⁺ were studied. Compared with the control, superoxide anion radical (O₂⁻·), malondialdehyde (MDA) and Relative Conductivity (RC) of *Zoysia japonica* leaves significantly increased by 58.69%, 38.52% and 68.69% after treatment for 30 days respectively, indicating that leaves were exposed to oxidative stress. Compared with the control, the maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and photochemical efficiency in the light (F_v'/F_m') significantly decreased by 3.90% and 11.36% after treatment for 30 days, respectively. The effective PS II quantum yield (ΦPS II) and the relative electron transport rate (rETR) significantly decreased by 22.22% and 22.66% after treatment for 20 days respectively, however, they significantly decreased by 12.5% and 18.12% after treatment for 30 days. After treatment for 20 days, the photochemical quenching coefficient (q^p) significantly decreased by 14.29%, whereas the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) significantly increased by

基金项目: 国家“863”项目 (2006AA100109)

收稿日期: 2011-06-20; 修订日期: 2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunzy@263.net

38.54%。The results demonstrated that the photoreaction agency was injured, whereas the capacity of photo-protective was increased. The activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) firstly increased and then decreased, whereas the activity of peroxidase (POD) presented inverse trend. The contents of proline and soluble sugar both increased. The soluble sugar content significant increased by 63.35% compared with the control after treatment for 30 days. Compared with the control, the content of soluble protein increased after treatment for 20 days, whereas decreased after treatment for 30 days. With the treatment time increasing, Cd concentration in under-ground part gradually increased, and Cd concentration in above-ground part firstly increased and then decreased with significance. After treatment for 20 days, the Cd content in above-ground part reached the peak with the highest transport coefficient of 45.84%. After treatment for 10 days, the Cd distribution proportion in above-ground part was lower than that in the under-ground part, whereas higher after treatment for 20 and 30 days, indicating that *Zoysia japonica* owned potential for phytoremediation of Cd pollution. The proportion of different forms of Cd in the under-ground part was highest for water extractable, followed by sodium chloride and acetic acid extractable. However, the proportion of acetate acid extractable was higher than the sodium chloride extractable in above-ground part. In conclusion, *Zoysia japonica* showed some resistance and tolerance to Cd²⁺ up to 10mg/L.

Key Words: *Zoysia japonica*; heavy metal; Cadmium; physiological response

随着人类活动的加强,工业“三废”排放量日益增加、农药化肥大量施用,土壤中重金属含量急剧增加。其中,镉在土壤中的移动性强、生物毒性大,易通过食物链进入人体,严重危害人类的健康^[1]。近年来,利用植物修复治理重金属污染成为研究的重点,许多镉超积累植物已被发现并被深入研究^[2],如天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)、东南景天(*Sedum alfredii*)、圆锥南芥(*Arabidopsis halleri*)等。但超积累植物普遍存在生长速度缓慢,生物量小等特点,限制了其在实际修复中的应用。结缕草(*Zoysia japonica*)是禾本科(Gramineae)画眉草亚科(Chloridoideae)结缕草属(*Zoysia*)植物,为重要的多年生暖季型草坪草,生物量大,具有耐热、耐旱、耐盐碱、耐瘠薄^[3]等优良特性。结缕草应用于镉污染土壤的修复已有报道^[4-5],而关于结缕草对重金属镉生理响应的研究仍处于空白阶段,使得结缕草的应用缺乏理论依据。植物对镉的生理响应包括镉对植物的毒性效应和植物对镉的解毒机制。当Cd²⁺在细胞中积累达到一定程度,会导致胞内离子失衡、产生氧化胁迫反应,从而使植物表现出叶片变黄、退绿、生长迟缓、植株矮小、产量下降等毒害症状^[6-7]。植物对镉的解毒可通过多种途径实现,如植物螯合肽的合成,细胞中镉的区室化分布,保护酶系统活性的提高,渗透调节物质含量的增加等^[8]。但实验材料不同,植物适应镉胁迫的生理生化机理不同。因此,为探明结缕草对Cd²⁺的响应机制,本文以水培的方法研究了镉对结缕草生长、生理生化特性的影响以及镉在结缕草中的积累特性,以期在草坪草中筛选重金属镉的修复植物提供理论参考和依据。

1 材料与方法

1.1 植株培养

实验在中国林科院科研温室内进行,2008年1月将结缕草(*Zoysia japonica*)‘Zenith’种子播于穴盘中,常规养护管理。2008年8月选取长势一致的结缕草健康植株,植株大小为(7±1)个分蘖,移栽到长33cm、宽15cm、高12cm含5L 1/2Hoagland营养液的塑料盒中,利用气泵不间断向营养液通气,7d后转至全Hoagland营养液中,新根长出后进行Cd²⁺处理。

1.2 试验设计

处理液Cd²⁺浓度为0、5、10、30、60、100mg/L,Cd²⁺由CdCl₂·2.5H₂O(分析纯)提供,以全Hoagland营养液配制,处理液pH值控制在5.5—6.0,每3d更换1次处理液。培养过程中,利用气泵不间断向营养液通气。完全随机区组实验设计,每处理1盒,每盒培养结缕草10株,重复3次。处理2周后对植株伤害症状进行评价。选择10mg/L的Cd²⁺浓度研究结缕草对镉的生理响应,以全Hoagland营养液为对照,每处理2盒,重复

3 次。

1.3 实验方法

1.3.1 叶片枯黄比例的计算

本实验将除全绿和仅叶尖枯黄外的完全展开叶定义为枯黄叶片, 枯黄比例 = 枯黄叶数/完全展开叶数。

1.3.2 生理指标、叶绿素荧光参数、镉含量及镉结合形态的测定

处理第 10 天、20 天、30 天, 每处理随机取去除叶尖和叶基的完全展开功能叶片 2g, 液氮保存, 参考高俊凤^[9]的方法测定各生理指标。

结缕草叶片叶绿素荧光参数使用 Li-6400 光合系统测定仪和荧光叶室 6400-40 测定: 处理第 10 天、20 天、30 天清晨, 测定暗适应整晚叶片的初始荧光 F_0 和最大荧光 F_m ; 9:00 到 10:00 在温室内自然光活化 1h 后, 测定叶片稳态荧光 F_s 和光下最大荧光 F_m' , 随后打开波长为 740nm 的远红光暗脉冲测定光下最小荧光 F_0' 。每株测定两片完全展开功能叶片, 每处理随机测定 10 株。参比室 CO_2 浓度控制在 $400\mu\text{mol/mol}$, 测定温度 25°C 。荧光参数的计算公式如下: 最大量子产量 $(F_v/F_m) = (F_m - F_0)/F_m$; 实际量子产量 $(F_v'/F_m') = (F_m' - F_0')/F_m'$; 实际光化学效率 $(\Phi_{\text{PS II}}) = (F_m' - F_s)/F_m'$; 相对电子传递效率 $(ETR) = 0.84 \times 0.5 \times PAR \times \Phi_{\text{PS II}}$; 光化学猝灭 $(q^p) = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$; 非光化学猝灭 $(NPQ) = (F_m - F_m')/F_m$ 。

处理第 10 天、20 天、30 天, 每处理随机取样, 将结缕草分为地上部和地下部。地下部用 $10\text{mmol/L Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液浸泡 15min, 以螯合根系表面吸附的镉离子。将地下部、地上部用去离子水洗净, 滤纸吸干, 105°C 下杀青 20min, 80°C 烘干至恒重。将烘干样品湿法消化, 用岛津 AA-6300c 原子吸收分光光度计的火焰检测器测定镉含量。镉积累量 = 镉含量 \times 样品干重; 转运系数 = 地上部镉含量/地下部镉含量; 地上部分布比例 = 地上部镉积累量/总镉积累量; 地下部分布比例 = 地下部镉积累量/总镉积累量。

处理第 40 天取样, 地下部用 $10\text{mmol/L Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液浸泡 15min, 螯合根系表面镉离子, 将地上部、地下部分开, 去离子水洗净。采用化学试剂逐步提取法^[10]提取结缕草中不同化学形态的镉。具体操作如下: 样品中加入 20mL 提取剂, 研磨成匀浆后转入 50mL 离心管中, 25°C 恒温振荡 22 h 后 5000r/min 离心 10min, 转移上清液至 50mL 新离心管, 在沉淀中再次加入 20mL 提取剂, 25°C 恒温振荡 1h, 5000r/min 离心 10min, 合并两次上清液。分别采用下列 5 种提取剂逐步提取: 80% 乙醇, 去离子水, 1mol/L NaCl 溶液, 2% 醋酸, 0.6mol/L 盐酸, 最后为残渣态。水提取自由离子态的或与水溶性有机酸结合的 Cd; 乙醇提取与醇溶性蛋白质、氨基酸盐等结合的 Cd; NaCl 提取与果胶酸、蛋白质结合或吸附的 Cd; 醋酸提取难溶于水的重金属磷酸盐; 盐酸提取草酸盐等。提取液直接在岛津 AA-6300c 原子吸收分光光度计上测定镉含量, 残渣用去离子水冲洗, 转入 100mL 三角瓶中, 于电热板上蒸干, 湿法消化, 火焰法测定镉含量。

1.4 统计分析

用 EXCEL2007 整理实验数据, 用 SPSS13.0 进行独立样本 T 检验、方差分析和 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 Cd^{2+} 对结缕草叶片枯黄程度的影响

由表 1 可知, 随着处理浓度的升高, 结缕草叶片的枯黄比例显著升高。 Cd^{2+} 浓度升至 60、100 mg/L 时, 枯黄比例分别较对照显著上升了 71.6%、98.2%。在 5、10、30mg/L 中本实验选择了 10mg/L 处理结缕草植株, 研究结缕草在不同镉胁迫时间下的生理响应。

2.2 镉对结缕草叶片生理功能的伤害

由表 2 可知, 叶片超氧阴离子自由基含量在 10d 时较对照显著上升了 42.26%, 20d 时较对照上升了 52.95%, 30d 时处理与对照差异显著, 较对照上升了 58.69%; 丙二醛含量在处理 10d、20d 时分别较对照上升了 20.53%、8.69%, 处理 30d 时较对照显著上升了 38.52%; 10d、20d 时处理叶片的相对电导率分别较对照上升 18.44%、2.49%, 30d 时与对照差异显著, 较对照上升了 68.69%。

表 1 镉对结缕草叶片枯黄程度的影响

Table 1 The effect of Cd²⁺ on the extent of turning yellow of *Zoysia japonica* leaves

处理 Treatment/(mg/L)	枯黄叶数 Number of litter	完全展开叶数 Number of complete expansion leaf	枯黄比例 Proportion of litter/%
0	13±3a	28±6a	48.1±13.2a
5	16±3a	25±2a	65.9±7.9ab
10	14±4a	21±2a	71.1±19.9ab
30	18±4a	25±1a	72.8±17.2ab
60	20±1a	25±3a	82.5±5.6bc
100	19±2a	21±3a	95.4±4.2c

表中数据为均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);表7与此相同

表 2 镉胁迫对结缕草叶片细胞膜透性的影响

Table 2 The effect of Cd²⁺ on membrane permeability in leaves of *Zoysia japonica*

处理时间 Treatment time /d	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration /(mg/L)	超氧阴离子自由基含量 O ₂ ⁻ · content /(μg/g,鲜重)	丙二醛含量 MDA content /(μmol/g,鲜重)	相对电导率/% RC
10	0	37.20±2.50a	22.06±1.79a	13.2±3.2a
	10	52.92±2.05b	26.59±6.46a	15.7±2.3a
20	0	37.24±19.57a	17.68±0.70a	15.3±1.3a
	10	56.96±18.51a	19.22±1.93a	15.7±0.7a
30	0	26.94±2.39a	18.52±1.12a	10.7±3.3a
	10	42.75±7.83b	25.66±3.08b	18.1±1.1b

表中数据为均值±标准差;相同处理天数数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),表3、4、5、6与此相同

由表 3 可知,在第 30 天时,Cd²⁺ 胁迫处理叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 分别较对照显著下降了 3.90%、11.36%; $\Phi PS II$ 、 $rETR$ 在第 20 天时急剧下降,与对照差异显著,分别较对照下降了 22.22%、22.66%,处理至 30d 时,分别较对照显著下降了 12.5%、18.12%;在第 20 天时,处理叶片 q^p 较对照显著下降了 14.29%, NPQ 则较对照显著上升了 38.54%。

表 3 Cd²⁺ 胁迫对结缕草叶片叶绿素荧光参数的影响Table 3 The effect of Cd²⁺ on the parameters of chlorophyll fluorescence in leaves of *Zoysia japonica*

处理时间 Treatment time /d	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration /(mg/L)	最大量子 产量 F_v/F_m	实际量子 产量 F_v'/F_m'	实际光 化学效率 $\Phi PS II$	相对电子 传递速率 $rETR$	光化学 猝灭系数 q^p	非光化学 猝灭系数 NPQ
10	0	0.73±0.03a	0.57±0.05a	0.17±0.01a	63.69±5.36a	0.30±0.03a	1.19±0.32a
	10	0.72±0.02a	0.58±0.04a	0.15±0.02a	57.71±5.84a	0.27±0.01a	1.02±0.27a
20	0	0.74±0.02a	0.42±0.03a	0.18±0.00a	66.27±0.80a	0.42±0.02a	2.05±0.21a
	10	0.74±0.01a	0.38±0.02a	0.14±0.00b	51.25±1.38b	0.36±0.02b	2.84±0.32b
30	0	0.77±0.01a	0.44±0.01a	0.16±0.01a	62.30±5.49a	0.37±0.03a	2.46±0.22a
	10	0.74±0.02b	0.39±0.02b	0.14±0.01b	51.01±2.41b	0.35±0.03a	2.52±0.42a

2.3 结缕草叶片保护酶系统、渗透调节物质和光合色素对镉的响应

由表 4 可知,结缕草叶片 SOD 活性在处理 10d 时较对照上升了 49.25%,20d、30d 时分别较对照下降了 8.51%、3.47%;10d 时 POD 活性较对照下降了 19.76%,20d、30d 时分别较对照上升了 4.82%、27.63%;10d 时 CAT 活性较对照上升了 8.79%,20d、30d 时分别较对照下降了 28.13%、13.08%。

由表 5 可知,Cd²⁺ 处理第 10 天、20 天、30 天时结缕草叶片脯氨酸含量分别较对照上升了 19.71%、13.58%、25.74%;10d、20d 时可溶性糖含量较对照分别上升了 43.11%、4.35%,30d 时与对照差异显著,较

对照上升了 63.35% ;可溶性蛋白含量在 10d、20d 时分别较对照上升了 67.70%、0.33% ,30d 时较对照下降了 1.58% 。

表 4 镉胁迫对结缕草叶片抗氧化酶活性的影响

Table 4 The effect of Cd²⁺ on antioxidant enzyme activity in leaves of *Zoysia japonica*

处理时间 Treatment time /d	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration /(mg/L)	超氧化物歧化酶活性 SOD activity /(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹ , 鲜重)	过氧化物酶活性 POD activity /(μg·g ⁻¹ ·min ⁻¹ , 鲜重)	过氧化氢酶活性 CAT activity /(U/g, 鲜重)
10	0	413.17±98.02a	93.26±20.72a	193.07±21.27a
	10	616.66±94.31a	74.83±44.22a	210.04±14.49a
20	0	370.24±67.44a	91.12±16.56a	170.12±33.13a
	10	338.75±44.20a	95.51±27.65a	122.26±50.72a
30	0	313.77±38.02a	86.60±36.65a	167.34±38.71a
	10	302.89±70.83a	110.53±45.34a	145.45±3.75a

表 5 镉对结缕草叶片游离脯氨酸、可溶性糖及可溶性蛋白含量的影响

Table 5 The effect of Cd²⁺ on the contents of Proline, Soluble Sugar and Soluble Protein in leaves of *Zoysia japonica*

处理时间 Treatment time /d	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration /(mg/L)	脯氨酸含量 Proline content /(mg/g, 干重)	可溶性糖含量 Soluble sugar content /(mg/g, 干重)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content /(mg/g, 干重)
10	0	3.40±2.48a	11.32±5.02a	348.66±85.61a
	10	4.07±1.61a	16.20±1.42a	584.72±175.36a
20	0	4.27±1.33a	13.10±1.09a	300.31±87.10a
	10	4.85±2.43a	13.67±1.13a	301.22±60.52a
30	0	5.75±1.61a	11.35±0.62a	363.59±121.88a
	10	7.23±0.92a	18.54±1.88b	357.84±110.43a

由表 6 可知,处理 10d、20d 时叶绿素 a 含量分别较对照下降了 11.05%、11.90% ,30d 时的降幅最大,较对照下降了 23.28% ;10d 时,叶绿素 b 含量较对照上升了 8.82% ,20d、30d 时分别较对照下降了 19.10%、37.36% ;10d 时叶绿素 a/叶绿素 b 较对照下降了 18.73% ,20d、30d 时分别较对照上升了 8.23%、17.81% ;10d、30d 时类胡萝卜素含量分别较对照下降了 8.33%、23.08% ,20d 时较对照上升了 8.82% 。

表 6 镉对结缕草叶片光合色素含量的影响

Table 6 The effect of Cd²⁺ on photosynthetic pigment contents in leaves of *Zoysia japonica*

处理时间 Treatment time /d	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration /(mg/L)	叶绿素 a 含量 Chla content /(mg/g, 鲜重)	叶绿素 b 含量 Chlb content /(mg/g, 鲜重)	叶绿素 a/叶绿素 b Chla/Chlb	类胡萝卜素含量 Car content /(mg/g, 鲜重)
10	0	1.90±0.24a	0.68±0.16a	2.83±0.36a	0.36±0.04a
	10	1.69±0.17a	0.74±0.12a	2.30±0.17a	0.33±0.04a
20	0	2.10±0.24a	0.89±0.25a	2.43±0.36a	0.34±0.15a
	10	1.85±0.41a	0.72±0.21a	2.63±0.21a	0.37±0.08a
30	0	1.89±0.22a	0.91±0.30a	2.19±0.48a	0.39±0.05a
	10	1.45±0.27a	0.57±0.14a	2.58±0.21a	0.30±0.05a

2.4 结缕草中镉的分布

由表 7 可知,随着 Cd²⁺处理时间的延长,结缕草地下部 Cd 含量逐渐升高。地上部 Cd 含量差异显著,Cd²⁺处理 20d 时地上部 Cd 含量最高,是 10d 时的 5.4 倍,30d 时的 1.7 倍。Cd²⁺处理第 20 天时结缕草对 Cd 的转运系数分别是第 10 天、30 天时的 4.6 倍和 2 倍。Cd²⁺处理第 10 天时镉在地下部的分布比例是地上部的 3.6 倍,Cd²⁺处理 20d、30d 时地上部的分布比例均高于地下部,分别是地下部的 1.6 倍和 1.4 倍。

表 7 10mg/L Cd²⁺处理后结缕草体内镉的分布Table 7 The distribution of Cd in *Zoysia japonica* treated by 10mg/L Cd²⁺

处理时间 Treatment time /d	地下部含量 Under-ground content /(mg/kg, 干重)	地上部含量 Above-ground content /(mg/kg, 干重)	转运系数 Translation coefficient /%	分布比例 Distribution proportion/%	
				地下部 Under-ground	地上部 Above-ground
10	395.02±25.75a	38.95±35.74a	9.9±9.0a	78.12±18.40a	21.88±18.40a
20	509.93±133.59a	210.68±28.03b	45.8±11.6a	37.84±7.85a	62.16±7.85a
30	583.42±77.91a	125.15±35.46ab	23.0±7.8a	40.87±10.82a	59.13±10.82a

2.5 结缕草中镉的结合形态

由图 1 可知,结缕草地下部、地上部各化学形态镉含量差异显著。镉在结缕草地下部水溶态所占比例最大,其次是氯化钠和醋酸提取态;与地下部不同,结缕草地上部醋酸提取态镉的含量要高于氯化钠提取态。

3 讨论

正常状态下,植物细胞内的抗氧化物质会保持胞内活性氧水平处于稳态,低于对植物造成伤害的阈值^[11]。重金属胁迫下,细胞内活性氧的产生和清除之间的平衡被打破^[12],植物活性氧代谢网络的运作发生了变化。

植物叶片中的活性氧主要来源于细胞内叶绿体的电子传递链^[13],本研究结果表明镉处理使得结缕草叶片的相对电子传递速率显著降低(表 3),因此反应中心激发的电子有了更多传递给氧气的机会,这可能导致了结缕草叶片超氧阴离子自由基含量的升高。活性氧自由基的积累会造成膜脂过氧化,对植物产生氧化胁迫,使植物生长异常。本研究结果表明,镉处理下结缕草叶片的丙二醛含量和细胞膜透性显著升高,与超氧阴离子自由基的变化趋势一致(表 2)。结缕草叶片的保护酶系统和渗透调节物质对镉胁迫出了不同的响应(表 4)。处理 10d 时,超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性均较对照升高,这可能是植物对活性氧的过量积累做出的正反馈,与陈朝明等^[14]得到的结果一致。镉能与蛋白质中的巯基、组氨酸和羧基群配位螯合,或者替代蛋白等生物大分子特异性结合位点上的阳离子,引起蛋白的氧化修饰,导致蛋白结构功能受损^[15]。随着处理时间延长,结缕草地上部镉含量逐渐升高(表 7),增加了镉与蛋白络合、替代的机会,这可能是处理 20d、30d 时结缕草叶片 SOD 和 CAT 活性下降的原因。SOD 活性的下降,造成了 O₂⁻的过量积累,加剧了膜脂过氧化,膜透性增加(表 2)。与 SOD 和 CAT 的变化趋势相反,结缕草叶片 POD 活性呈现出先降低后升高的趋势,POD 活性可能受结缕草叶片 H₂O₂的调控^[16],处理 20d 后 CAT 活性的下降导致了 H₂O₂的积累,刺激了 POD 活性的提高。本研究结果表明,Cd²⁺处理下结缕草叶片脯氨酸含量均较对照升高,且随处理时间延长,升高幅度增大(表 5),这与张义贤和李晓科得到的结果^[17]一致。植物内源脯氨酸具有清除活性氧的作用,这一生理功能已在重金属锌^[18]、铜和镉^[19]等胁迫下的多种植物中得到证实。此外,脯氨酸、可溶性糖共同行使调节渗透平衡的功能。镉处理下,脯氨酸和可溶性糖在结缕草叶片中的含量均较对照升高(表 5),使得胞内水势降低,在膜透性增加的前提下减少了胞内物质的外流。处理 10d、20d 时可溶性蛋白含量较对照升高,Cd 可能诱导结缕草叶片产生了 Cd 结合蛋白,进而降低 Cd 的毒性;处理 30d 时可溶性蛋白含量较对照降低,说明延长处理时间对蛋白质的合成起到破坏作用。

Cd 会抑制原叶绿素酯氧还酶的活性和影响氨基-γ-戊酮酸的合成,进而导致叶绿素含量下降。本研究结果表明,与对照相比镉处理降低了结缕草叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 含量,提高了叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值(表 6),这与 Gil 等得到的结果相一致^[20]。此外,植物体内聚集的二价镉离子会替代叶绿素卟啉环中的镁离子,形成了“镉替代叶绿素”^[21]。“镉替代叶绿素”具有很小的荧光量子产量,甚至不能发出荧光。当反应中

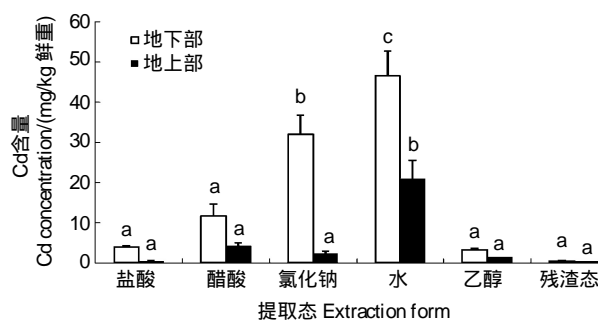


图 1 10mg/L Cd²⁺处理后结缕草体内不同化学形态镉的含量
Fig. 1 The content of Cd with different chemical forms in *Zoysia japonica* treated by 10mg/L Cd²⁺

图中同系列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

心叶绿素分子处于激发态时,镁-叶绿素具有最大的电子释放能力,“镉替代叶绿素”的电子释放能力很弱。本研究结果表明,Cd²⁺处理显著降低了结缕草叶片的最大量子产量、实际光化学效率及光化学猝灭(表3),这可能与“镉替代叶绿素”的形成和积累有关。镉胁迫下结缕草叶片的非光化学猝灭(NPQ)与类胡萝卜素呈现相同的变化规律,均是20d时较对照升高。NPQ是反映叶片光保护能力的参数,类胡萝卜素兼具天线色素和光保护的功能。类胡萝卜素可以猝灭激发态的叶绿素,将能量以热能的形式释放,避免光合机构受到破坏。因此,二者存在着正相关性。此外,类胡萝卜素又充当着抗氧化剂的角色,担任着活性氧中单线态氧的清除,减轻了镉对结缕草叶片的氧化胁迫。

镉超富集植物要求地上部镉含量超过100mg/kg干重,地上部富集系数(地上部镉含量与土壤镉含量的比例)大于1,转运系数大于1,且在镉污染的土壤上能够生长良好,不会发生毒害现象^[22]。结缕草地上部的镉含量超过了100mg/kg干重,对镉的富集系数很高,地上部能够积累大量的镉,可考虑在镉污染地的植物修复中应用。结缕草中镉的超量积累与结缕草对镉的解毒机理密切相关。在超积累植物体内,85%—90%的镉离子是与极性化合物相结合的,从而解除毒性^[23]。这些极性化合物含有大量的金属离子的配位基团,这些金属配位体在维持细胞镉离子的微量稳态方面起着重要作用。Cd在植物中的化学形态与Cd在植物体内的迁移能力相关联,乙醇可提取态和水溶态Cd迁移活性最强,氯化钠提取态次之,醋酸和盐酸提取态迁移活性最弱。本文对镉在结缕草中的结合形态做了初步的分析,结果表明结缕草地下部、地上部的镉均以水溶态为主。除水溶态外,地下部氯化钠提取态的镉含量最高,说明地下部的镉具有较强的迁移能力,促进了向地上部的转运,这可能是结缕草对镉具有较高转运系数的原因。与地下部不同,地上部醋酸提取态的镉含量要高于氯化钠提取态,使得镉在地上部的迁移能力减弱,镉可能以磷酸盐的形式区域化分布在结缕草地上部,进而降低毒性。

References:

- [1] Chen Y X. Plant Contamination Chemical of Soil Heavy Metal. Beijing: Science Press, 2008: 55-56.
- [2] Wei C Y, Chen T B. An overview on the status of research and application of heavy metal phytoremediation. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (6): 833-839.
- [3] Dong H D, Gong L J. *Ecology of Zoysia japonica and the Exploitation and Application of Its Resources in China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 2001: 5-5.
- [4] Zhang M. Study on the development and application in cadmium pollution farmland of *Zoysia japonica*. *Bulletin of Botanical Research*, 2002, 22 (4): 467-472.
- [5] Chen T, Wang X, Liang R L, Yang Y S, Yin H S, Zhang D N. Sewage sludge as fertilizer for grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 463-466.
- [6] Dong J, Wu F B, Zhang G P. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Journal of Zhejiang University Science*, 2005, 6 (10): 974-980.
- [7] Pereira G J G, Molina S M G, Lea P J, Azevedo R A. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. *Plant and Soil*, 2002, 239(1): 123-132.
- [8] Li Z J, Ma G R, Xu J M, He Y. Physiological and biological mechanism of plant for Adapting the Stress by Cadmium. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 234-238.
- [9] Gao J F. *Plant Physiological Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [10] Xu J L, Bao Z P, Yang J R, Liu H, Song W C. Chemical forms of Pb, Cd and Cu in crops. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(3): 244-248.
- [11] Mittler R, Vanderauwera S, Gollery M, van Breusegem F. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(10): 490-498.
- [12] Mller I M, Jensen P E, Hansson A. Oxidative modifications to cellular components in plants. *Plant Biology*, 2007, 58(1): 459-481.
- [13] Dat J, Vandenaabeele S, Vranová E, van Montagu M, Inzé D, van Breusegem F. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2000, 57(5): 779-795.
- [14] Chen Z M, Gong H Q, Wang K R. Effect of Cd on quality, physiological and biochemical characteristics of mulberry leaves and its mechanism.

- Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 417-423.
- [15] Sharma S S, Dietz K J. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. Trends in Plant Science, 2009, 14(1): 43-50.
- [16] He J Y, Ren Y F, Wang Y Y, Li Z J. Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 522-528.
- [17] Zhang Y X, Li X K. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* Seedling. Bulletin of Botanical Research, 2008, 8(1): 43-46.
- [18] Alia, Prasad K V S K, Pardha Saradhi P. Effect of zinc on free radicals and proline in *Brassica* and *Cajanus*. Phytochemistry, 1995, 39(1): 45-47.
- [19] Wu J T, Chang S C, Chou T L. Intracellular proline accumulation in some algae exposed to copper and cadmium. Botanical Bulletin of Academy Sinica, 1995, 36(1): 89-93.
- [20] Gil J, Moral R. Effects of cadmium on physiological and nutritional aspects of tomato plant I. Chlorophyll (a and b) and carotenoids. Fresenius Environmental Bulletin, 1995, 4: 430-435.
- [21] Küpper H, Küpper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(2): 259-266.
- [22] Wei S H, Zhou Q X, Koval P V. Flowering stage characteristics of cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their significance to phytoremediation. Science of the Total Environment, 2006, 369(1/3): 441-446.
- [23] Rauser W E. Structure and function of metal chelators produced by plants. Cell Biochemistry and Biophysics, 1999, 31(1): 19-48.

参考文献:

- [1] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学. 北京: 科学出版社, 2008: 55-56.
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状. 地球科学进展, 2002, 17(6): 833-839.
- [3] 董厚德, 宫莉君. 中国结缕草生态学及其资源开发与应用. 北京: 中国林业出版社, 2001: 5-5.
- [4] 张绵. 结缕草 (*Zoysia japonica*) 在镉 (Cd) 污染农田上开发与应用的研究. 植物研究, 2002, 22(4): 467-472.
- [5] 陈涛, 王新, 梁仁禄, 杨玉森, 尹宏生, 张大南. 污泥草地利用的初步研究. 应用生态学报, 2002, 13(4): 463-466.
- [8] 李兆君, 马国瑞, 徐建民, 何艳. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理. 土壤学报, 2004, 35(2): 234-238.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 刘虹, 宋文昌. 农作物体内铅、镉、铜的化学形态研究. 应用生态学报, 1991, 2(3): 244-248.
- [14] 陈朝明, 龚惠群, 王凯荣. Cd 对桑叶品质、生理生化特性的影响及其机理研究. 应用生态学报, 1996, 7(4): 417-423.
- [16] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 李兆君. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应. 生态学报, 2011, 31(2): 522-528.
- [17] 张义贤, 李晓科. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响. 植物研究, 2008, 8(1): 43-46.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port
..... WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
- Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer
..... FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
- Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) using landscape genetics
..... XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
- Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
- Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu
..... WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
- Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China
..... ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
- Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security; a case study of Jiansanjiang land reclamation area ...
..... LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
- Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern
..... LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
- Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province
..... ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
- Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China
..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
- Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau
..... LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
- Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts LAN Wenlu (5970)
- Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province
..... PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
- Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China
..... GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
- Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
- Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant
Thuja sutchuenensis LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
- Effects of shading on growth and quality of triennial *Clematis manshurica* Rupr.
..... HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
- Allelopathic effect of extracts from *Artemisia sacrorum* leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu
Mountain WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
- Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China
..... WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
- Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of *Stipa* L. in alpine grassland in northern Tibet in China
..... CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
- Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation
..... ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
- Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the
field DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land; determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu; a FACE study	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd ²⁺	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd ²⁺ using the fruiting bodies of two macrofungi	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i>	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth(Lepidoptera: Tortricidae)	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks; the case of Huaibei City	CHANG Hsiaoifei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent; a case study in Ningguo City, China	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model; a case study of Gansu Province, China	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
Review and Monograph	
A prospect for study on isolated wetland	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

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 20 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 20 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
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

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China
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