

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期
Vol.31 No.2
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 2 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

长白山山杨种群的性比格局及其空间分布	潘春芳,赵秀海,夏富才,等 (297)
冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系	赵 梅,周瑞莲,刘建芳,等 (306)
黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析	王乃江,刘增文,徐 钊,等 (316)
两种抗生素对龙须菜的光合生理效应	简建波,邹定辉,刘文华,等 (326)
典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征	潘复静,张 伟,王克林,等 (335)
塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响	陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,等 (344)
基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价	宋富强,邢开雄,刘 阳,等 (354)
火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响	贺郝钰,苏洁琼,黄 磊,等 (364)
4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应	冯慧芳,薛 立,任向荣,等 (371)
城市带状绿地宽度与温湿效益的关系	朱春阳,李树华,纪 鹏,等 (383)
西藏斧钺水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化	张国钢,刘冬平,钱法文,等 (395)
王朗自然保护区大熊猫生境选择	康东伟,康 文,谭留夷,等 (401)
东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局	陶双伦,杨锡福,邓凯东,等 (410)
台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响	白 义,施时迪,齐 鑫,等 (421)
青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境	杜永芬,徐奎栋,类彦立,等 (431)
叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理	王培欣,白俊杰,胡隐昌,等 (441)
C ₃ 和 C ₄ 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响	叶乐夫,付 雪,戈 峰 (449)
3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系	毕守东,柯胜兵,徐劲峰,等 (455)
坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性	刘云慧,宇振荣,王长柳,等 (465)
若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征	牛 佳,周小奇,蒋 娜,等 (474)
红枣贮藏期果面微生物多样性	沙月霞 (483)
CO ₂ 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响	刘俊稚,葛亚明,Pugliese Massimo,等 (491)
丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响	彭思利,申 鸿,袁俊吉,等 (498)
新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析	吴江超,高小其,曾 军,等 (506)
石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响	黄逸君,陈全震,曾江宁,等 (513)
不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应	何俊瑜,任艳芳,王阳阳,等 (522)
基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析	潘 影,刘云慧,王 静,等 (529)
基于生态足迹的生态地租分析	龙开胜,陈利根,赵亚莉 (538)
深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系	刘语凡,陈 雪,李贵才,等 (547)
专论与综述	
美国、加拿大环境和健康风险管理方法	贺桂珍,吕永龙 (556)
植物蜡质及其与环境的关系	李婧婧,黄俊华,谢树成 (565)
油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展	庄 文,初立业,邵宏波 (575)
叶际微生物研究进展	潘建刚,呼 庆,齐鸿雁,等 (583)

不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应

何俊瑜^{1,2,*}, 任艳芳¹, 王阳阳¹, 李兆君²

(1. 贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部作物营养与施肥重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用水培试验, 以两个耐镉性不同的水稻品种为材料, 研究了不同浓度镉胁迫对水稻幼苗根系形态、根系活力、游离脯氨酸含量及抗氧化酶活性的影响。结果表明: 低于 5 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫对 2 个水稻品种总根长、根表面积、根体积、根干重、根系活力无明显影响, 在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 时, 甚至起促进作用。随 Cd 浓度增加表现出一定的抑制效应, 秀水 63 在 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下根系形态、根系活力明显受到抑制, 而秀水 09 在 25 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下明显受抑。随 Cd 胁迫浓度的增加, 游离脯氨酸含量、丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性均呈上升趋势, 两品种相比, 秀水 09 的游离脯氨酸含量、SOD 和 POD 增幅大于秀水 63, 而 MDA 含量增幅小于秀水 63; 过氧化氢酶 (CAT) 活性变化表现为先上升后下降, 10—100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下秀水 63 根系中 CAT 活性明显低于秀水 09。总之, 水稻对 Cd 毒害响应存在明显的品种差异, 且 Cd 胁迫下根系生理响应的差异是品种间耐性差异的重要原因之一。

关键词: 镉; 水稻; 根系形态; 根系活力; 抗氧化酶

Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress

HE Junyu^{1,2,*}, REN Yanfang¹, WANG Yangyang¹, LI Zhaojun²

1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025 China

2 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081 China

Abstract: Heavy metal pollution has received increasing attention duo to the public awareness of environmental issues. Cadmium (Cd), a divalent heavy metal cation, is one of the most toxic environmental pollutants with unknown physiological function, which could cause serious problems to plants, animals and human being. Toxic levels of Cd may be come up by contaminated soil containing abundant Cd, by agricultural manufacturing, mining, smelting, atmospheric deposition and other waste disposal practices, or by use of metal-containing pesticides and fertilizers in agricultural soils. In higher plants, roots may be the first organs contacting to the toxic metal ions during their absorbing process, therefore, roots usually response firstly to the toxic metal ions if there is any than do shoots. However, there are little studies dealing with the toxicity and mechanisms behind Cd tolerance concerning the root. The objective of the present study was to investigate the root morphology, physiological and ecological responses of rice root to cadmium stress. Two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars, differing markedly in Cd tolerance, Xiushui 09 (Cd-tolerant genotype) and Xiushui 63 (Cd-sensitive genotype), were adopted in the solution culture experiments. Seedlings were selected for uniformity and cultivated in IRRI's nutrient solution. Cadmium with 7 concentrations of 0 (the control), 1, 5, 10, 25, 50, and 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd in the form of CdCl_2 (calculated according to pure Cd) was added to the nutrient solution (pH 5.0) at 5-leaf stage of rice seedling. In the experiments, each treatment was replicated three times, and the nutrient solution was renewed every 4 days. After 12 days of cultivation, rice roots were sampled and root morphology, root biomass, root activities, content of proline and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40901260); 农业部作物营养与施肥重点实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2009-12-08; **修订日期:** 2010-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: junyuhe0303@126.com

malondialdehyde (MDA), the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) were determined. The results showed that Cd concentration higher than 5 $\mu\text{mol/L}$ in the solution inhibited root growth, while Cd concentration lower than 5 $\mu\text{mol/L}$ in the solution did not affect the total root length, root surface area, root volume, root dry weight and root activities. And Cd of 1 $\mu\text{mol/L}$ showed a slight stimulatory effects. Compared to Xiushui 09, cultivar Xiushui 63 had more pronounced inhibition effect in root growth and root activity under Cd supply. These root morphology parameters, root dry weight and root activities of Xiushui 63 and Xiushui 09 were significantly decreased under 10 $\mu\text{mol/L}$ and 25 $\mu\text{mol/L}$ Cd, respectively. In both cultivars compared with their corresponding control, the proline content and activities of SOD and POD were significantly enhanced with the increasing of Cd concentrations from 0 to 100 $\mu\text{mol/L}$ in the nutrient solution. Meanwhile, as Cd concentration varied from 0 to 100 $\mu\text{mol/L}$, MDA accumulation was enhanced notably, and the activity of CAT in roots increased at first and then decreased as the Cd concentration beyond 10 $\mu\text{mol/L}$, and being more pronounced effect in Xiushui 63 than in Xiushui 09. As an index of lipid peroxidation, the higher MDA content in the cultivar Xiushui 63 indicated the occurrence of more severe oxidative stress under Cd stress. In conclusion, Cd had obvious toxicity to rice roots, and there was significant different response to Cd between Xiushui 09 and Xiushui 63. The physiological characteristics of rice root responding to Cd might be important factors for the tolerance of cultivars.

Key Words: cadmium; rice; root morphology; root activity; antioxidant enzyme

镉(Cd)是生物毒性最强的重金属之一,被列为五大毒物(Cd、Hg、As、Cr、Pb)之首。近年来,由于工业“三废”排放、不合理的农业管理措施等,导致土壤 Cd 污染日趋严重。Cd 作为非必需元素,易被植物吸收和积累,Cd 积累过量能造成产量和质量下降,更为严重的是 Cd 经食物链进入人体,并在人体内富集,危害人类健康^[1-3]。国内外有关镉对植物影响的研究多是集中在研究镉对植物地上部分的影响方面,如引起植物光合能力的下降、养分和水分吸收的减少、营养元素失调、代谢过程中一些关键酶活性的丧失等,从而导致植株出现生长矮小、叶片失绿等症状,严重时导致死亡^[3-6]。但对根系生理生态效应研究报道不多。根系是植物吸收矿质营养和水分的主要器官,其构型的变化受植物遗传特性和环境因子的共同影响。根系直接与土壤接触,在土壤逆境条件下,它是植物最先感受逆境的器官,一般表现为根生物量的减少和根系形态的变化^[7-8],根系的形态变化可以直接影响根的生理功能,从而对植物生长产生重大影响。因此研究根系对重金属胁迫的响应对于揭示植物抵抗重金属胁迫的机理具有重要意义。目前对作物根系形态的研究虽然很多,但主要以缺磷和干旱胁迫为主^[9-10]。对于重金属 Cd 对根系的影响研究多集中在根生物量、根长及根尖细胞微观结构方面的研究^[11-13],而对根系其他方面的研究却较少。为了进一步探讨 Cd 胁迫对植物根系生长的毒害机理,本试验以耐性不同的两个水稻品种(*Oryza sativa* L.)作为试验材料,研究不同浓度 Cd 胁迫对水稻根系生长、根系活力、游离脯氨酸含量和抗氧化酶活性的影响,旨在明确水稻根系对 Cd 胁迫应答及品种间的差异,为进一步明确 Cd 对植物毒害的作用机制及其生化解毒机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

水稻 Cd 敏感品种秀水 63 (*Oryza sativa* L. cv. Xiushui 63) 和 Cd 耐性品种秀水 09 (*Oryza sativa* L. cv. Xiushui 09)^[14-15] 种子由浙江省嘉兴市农业科学院姚海根研究员惠赠。

1.2 试验设计

选取健康饱满的种子经 0.5% 次氯酸钠溶液消毒 25 min 后,去离子水反复冲洗干净,蒸馏水 30℃ 催芽 1d,然后播于湿润的滤纸上并保持 28℃ 恒温培养,24 h 后选择露白的种子浅播入水稻育秧盘中,蒸馏水培养 10d 后,转入 1/2 营养液中培养 7d,然后将水稻幼苗移至含有全素营养液的塑料桶中,每桶种 8 穴,每穴 3 株,营养液按国际水稻研究所(IRRI)推荐配方配置,营养液每 5d 换 1 次,调节 pH 值为 5.0—5.1。待幼苗长到 5 叶 1 心时期开始用不同浓度 Cd(0、1、5、10、25、50、100 $\mu\text{mol/L}$)处理,每处理设 3 次重复。培养液每隔 4 d 换

1 次,处理 12d 后取样进行各指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态指标测定

根系总长、根表面积、体积均采用 Epson 根系扫描仪析及 WinRHIZO 分析软件测定。根系用滤纸吸干表面水分,然后在 100—105℃ 杀青 15min 后,70℃ 左右烘至恒重,称量得到干重(DW)。

1.3.2 根系生理指标测定

根系活力采用 α -萘胺氧化法测定;脯氨酸采用酸性茚三酮比色法测定;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)反应法测定^[16];过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性参照 Shah 等的方法^[17]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS13.0 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对水稻根系形态指标的影响

如表 1 所示,Cd 胁迫下,两个水稻品种幼苗根系生长均受到不同程度的影响。与对照相比,随着 Cd 胁迫浓度的增加,根系总长、根表面积、根体积均呈先升高后又降低的趋势;在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 和秀水 09 的根系总长、根表面积、根体积均有所增加,秀水 63 的根系总长、根表面积、根体积分别比对照增加 7.92%、6.63%、5.73%;秀水 09 与对照相比分别增加 11.66%、9.75%、6.45%,其中秀水 09 根系总长、根表面积明显高于对照。随着 Cd 胁迫浓度的增加,根系总长、根表面积、根体积均受到不同程度的抑制,秀水 63 和秀水 09 分别在 Cd ≥ 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 25 $\mu\text{mol/L}$ 胁迫时明显低于对照。2 个品种相比,高于 5 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 根系总长、根表面积、根体积的受抑程度大于秀水 09,如 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,与对照相比,秀水 63 的根系总长、根表面积、根体积与对照相比分别降低 54.59%、54.67%、55.73%,差异极显著,而秀水 09 分别降低 39.74%、38.88%、40.86%,差异极显著。

Cd 胁迫下,两个水稻品种幼苗根系干重的变化与根系总长、根表面积、根体积的变化基本相似。与对照相比,当 Cd ≥ 10 $\mu\text{mol/L}$ 时,秀水 63 根系干重明显降低,10、25、50、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,根干重分别降低 13.77%、20.66%、33.23%、50.00%。而秀水 09 在 Cd ≥ 25 $\mu\text{mol/L}$ 时,根系干重表现出明显降低,25、50、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,干重分别降低 14.28%、22.67%、35.09%。

表 1 不同浓度 Cd 对水稻根系总长、根表面积、根体积和干重的影响

Table 1 Effect of Cd on root length, root surface area, root volume and dry weight of different rice cultivars

Cd 浓度 / ($\mu\text{mol/L}$)	根总长/(cm/株) root length		根表面积/(cm^2 /株) root surface area		根体积/(cm^3 /株) root volume		根干重/(g/株) dry weight	
	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09
	CK	1077.98a	1126.03b	165.71a	173.68b	1.92a	1.86a	0.334a
1	1163.39a	1257.29a	176.70a	190.62a	2.03a	1.98a	0.339a	0.333a
5	1023.85a	1110.59b	159.36a	173.00b	1.84a	1.84a	0.312a	0.314a
10	955.11b	1058.47b	148.04b	166.07b	1.67b	1.72a	0.288b	0.299a
25	845.36c	921.34c	134.99c	145.99c	1.49c	1.57b	0.265c	0.276b
50	716.62d	849.30c	100.60d	132.11d	1.22d	1.36c	0.223d	0.249c
100	489.48e	678.56d	75.11e	106.14e	0.85e	1.10d	0.167e	0.209d

同一列数据后带不同字母者表示差异达显著水平($P < 0.05$)

2.2 Cd 胁迫对水稻幼苗根系活力的影响

由图 1 可知,随 Cd 浓度的增加,两个水稻品种幼苗根系活力均表现为低浓度促进高浓度抑制。在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 和秀水 09 幼苗根系活力与对照相比均有所增加,但差异不显著($P > 0.05$)。当

Cd $\geq 10 \mu\text{mol/L}$ 时,秀水 63 根系活力的下降幅度高于秀水 09。与对照相比,秀水 63 和秀水 09 分别在 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 25 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下根系活力明显低于对照,表明在高于 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下秀水 63 根系活力受到更强的抑制作用。

2.3 Cd 胁迫对水稻幼苗根系脯氨酸含量的影响

Cd 胁迫均使两个水稻品种根系中脯氨酸含量增加(图 2)。与对照相比,在 Cd $\leq 5 \mu\text{mol/L}$ 时,秀水 63 和秀水 09 根中脯氨酸含量的增加幅度相差不大,但前者的含量高于后者。随着 Cd 胁迫浓度的增加,秀水 09 根系脯氨酸含量持续增加,而秀水 63 脯氨酸含量呈先增加后降低的趋势,在高于 50 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下开始下降,但仍显著高于对照($P < 0.01$),说明高浓度 Cd 胁迫下秀水 63 根系脯氨酸合成受阻。

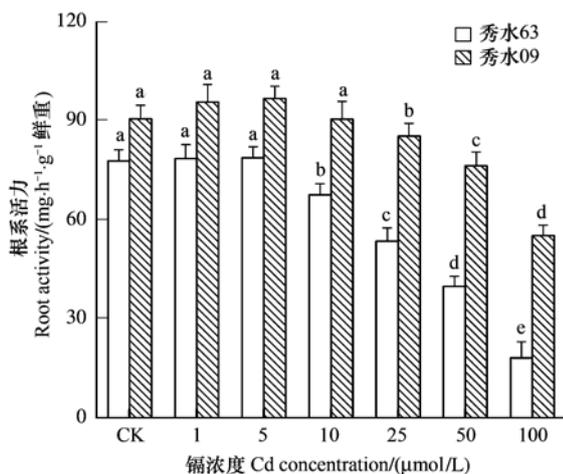


图 1 不同浓度 Cd 胁迫对水稻幼苗根系活力的影响

Fig. 1 Effects of different Cd concentrations on root activity of rice

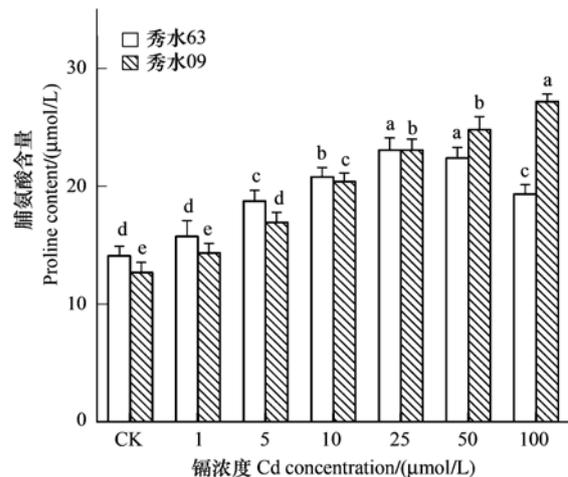


图 2 不同浓度 Cd 对水稻幼苗根系脯氨酸含量的影响

Fig. 2 Effects of different Cd concentrations on the content of proline in rice roots

2.4 Cd 胁迫对水稻幼苗根系 MDA 含量的影响

MDA 是细胞膜脂过氧化的产物,用作衡量膜脂过氧化损伤的指标。由图 3 可以看出,随 Cd 浓度的提高,水稻根系中 MDA 含量呈上升趋势。在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 根系中 MDA 含量急剧上升,与对照相比增加 12.55%,而秀水 09 增加 0.62%。在 5、10、25、50、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 根系中 MDA 含量与对照相比分别增加 24.29%、28.74%、38.06%、52.22%、68.02%,秀水 09 根系中 MDA 含量分别增加 6.50%、12.88%、22.29%、27.24%、37.46%。可见 Cd 胁迫下秀水 63 根系膜脂过氧化较秀水 09 严重。

2.5 Cd 胁迫对水稻幼苗根系抗氧化酶活性的影响

如图 4 所示,Cd 胁迫下秀水 63 和秀水 09 根系中 SOD 活性总体呈上升趋势,当 Cd $\geq 5 \mu\text{mol/L}$ 时,SOD 活性明显高于对照。两个品种相比,在低于 50 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 09 和秀水 63 根中 SOD 无明显差异。在 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,秀水 63 根中 SOD 活性有所下降,两品种间差异达极显著水平($P < 0.01$)。

图 5 表明,水稻根系中 POD 活性随 Cd 处理浓度的提高而明显增加,但增加幅度品种间存在明显差异,特别是在 Cd $\geq 50 \mu\text{mol/L}$ 胁迫下,秀水 09 根中的 POD 活性明显高于秀水 63 ($P < 0.01$)。随着 Cd 处理浓度的

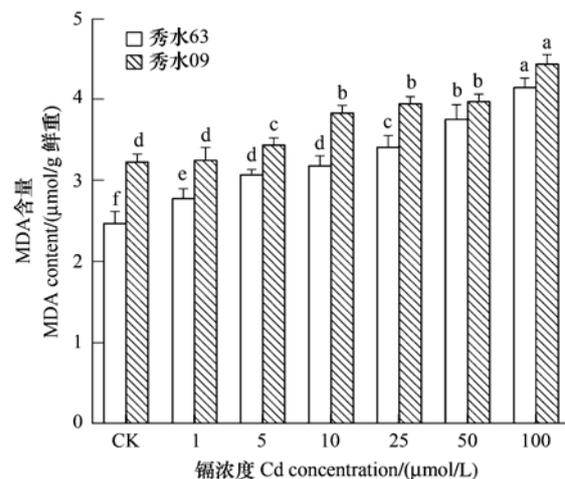


图 3 不同浓度 Cd 对水稻幼苗根系 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different Cd concentrations on the contents of MDA in rice roots

增加,秀水 63 和秀水 09 根系中 CAT 活性变化表现为先增加后降低的趋势。在 5 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫时,秀水 63 根系 CAT 活性最高,与对照相比增加 22.64%;而秀水 09 在 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下根系中 CAT 活性最大,与对照相比活性增加 29.38%。随 Cd 处理浓度增加 CAT 活性逐渐降低,秀水 63 和秀水 09 根系中 CAT 活性分别在 25 $\mu\text{mol/L}$ 和 50 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫时,明显低于对照 ($P < 0.05$)。2 个品种相比,当 $\text{Cd} \geq 10 \mu\text{mol/L}$ 时,秀水 09 根系中 CAT 活性明显高于秀水 63 ($P < 0.01$)。

2.6 Cd 胁迫对水稻幼苗根系的 SOD/POD 和 SOD/CAT 比值的影响

设对照 SOD/CAT、SOD/POD 为 1,从表 2 可以看出,随着 Cd 胁迫浓度的增加,秀水 63 和秀水 09 根系 SOD/POD 的比值与对照相比无明显差异,而 SOD/CAT 比值在低浓度下无差异,较高浓度下明显高于对照,特别是秀水 63。

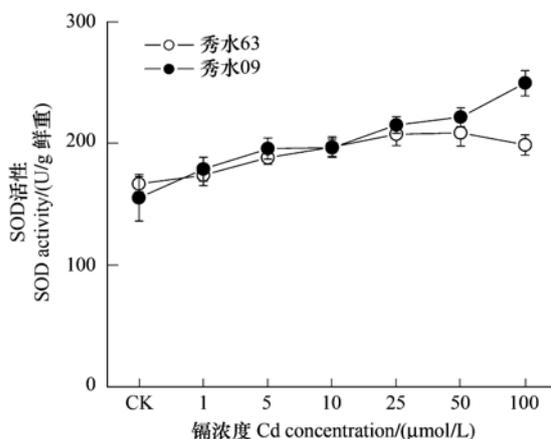


图 4 不同浓度 Cd 对水稻幼苗根系 SOD 活性的影响

Fig. 4 Effects of different Cd concentrations on SOD activities in rice roots

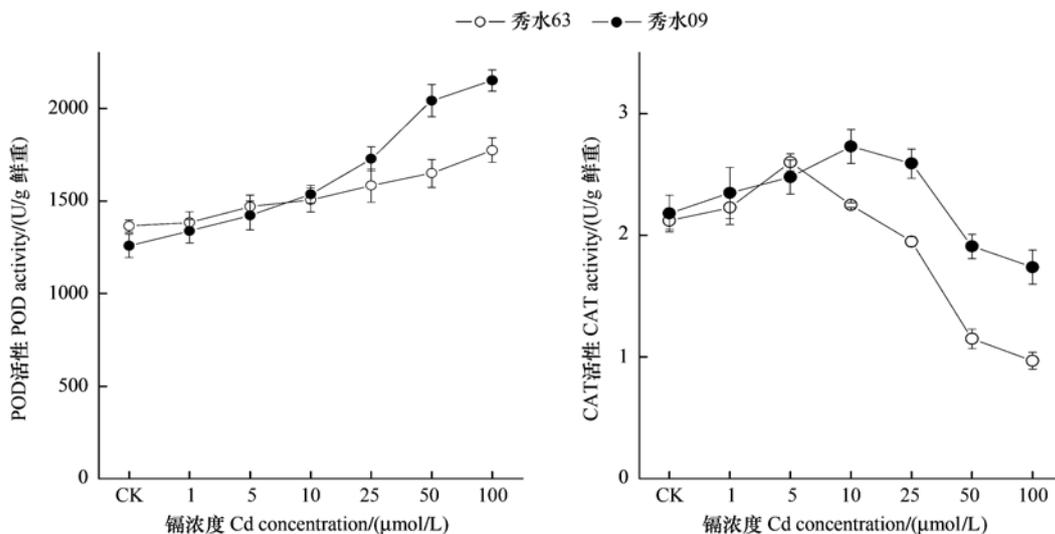


图 5 不同浓度 Cd 对水稻幼苗根系 POD 和 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of different Cd concentrations on POD (A) and CAT (B) activities in rice roots

表 2 不同浓度 Cd 对水稻幼苗根系 SOD/CAT 和 SOD/POD 比值的影响

Table 2 Effects of different Cd concentrations on ratios of SOD/CAT and SOD/POD in rice roots

Cd 浓度 Cd concentration/ ($\mu\text{mol/L}$)	SOD/CAT		SOD/POD	
	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09	秀水 63 Xiushui 63	秀水 09 Xiushui 09
CK	1.00e	1.00d	1.00a	1.00a
1	0.99e	1.07d	1.03a	1.08a
5	0.97e	1.10d	1.05a	1.11a
10	1.18d	1.05d	1.07a	1.04a
25	1.35c	1.16c	1.07a	1.01a
50	2.31b	1.57b	1.04a	0.97a
100	2.90a	2.01a	0.92a	0.94a

3 讨论

水稻根长、根表面积、根体积、根干重和根系活力均是反映其根系生长发育状况的指标。当作物遭受逆境胁迫时,作物最先感受胁迫的器官是根系,通过根系生长和代谢的相应调整以适应逆境胁迫^[9-10]。已有研究表明,Cd 可通过抑制细胞分裂、养分吸收等对根系生长表现出抑制作用,但不同种间或种内耐 Cd 性有很大的差异。耐性强的物种或品种表现出根生物量大和根较长^[3]。本试验结果表明,Cd 对根系总长、根表面积、根体积、干重和根系活力均有影响,且有一定的剂量效应,表现为低浓度促进($\leq 1 \mu\text{mol/L}$)和高浓度抑制($\geq 10 \mu\text{mol/L}$),这一结果与张玲、Lin 等^[18-19]对小麦在 Cd 胁迫下幼苗根系生长的结论相似。 $1 \mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫可提高或加速根系的某些生理生化反应,从而促进根系生长^[20],但在 $\text{Cd} \geq 10 \mu\text{mol/L}$ 胁迫下,大量 Cd 积累在根的生长部位,直接影响细胞的分裂和生长,从而表现为对根系生长的抑制、根系活力降低。2 个水稻品种在 Cd 胁迫下根系的反应存在差异。高于 $10 \mu\text{mol/L}$ Cd 对秀水 63 总根长、根系表面积、根体积、根干重和根系活力的影响明显大于秀水 09。

正常情况下,植物细胞中自由基的产生和清除处于动态平衡状态,自由基水平很低,不会伤害细胞;逆境胁迫下,细胞内活性氧产生与清除之间的平衡遭到破坏,自由基积累过多,它们能够直接或间接启动膜脂的过氧化作用,而 MDA 是膜脂过氧化反应的重要产物。本研究结果表明,Cd 胁迫使水稻根系 MDA 含量增加,说明 Cd 引起了植物体内活性氧的积累和膜脂过氧化作用的加剧,但 Cd 引起耐 Cd 品种秀水 09 MDA 的增加明显小于 Cd 敏感品种秀水 63,这与 Ekmekçi、邵国胜等研究结果一致^[6, 21]。SOD、POD、CAT 等组成的保护酶系统是植物体内高效的自由基清除系统。本试验结果表明,随着 Cd 胁迫浓度的提高,2 个水稻品种根系中 SOD 和 POD 酶活性增强,而 CAT 活性先增加后降低,这与 Shah 等^[17]报道的结果相似。SOD 活性增加表明了保护能力的启动和增强,将毒性较强的超氧自由基转化为毒性次级的 H_2O_2 ,进一步刺激了 POD 和 CAT 活性的提高。尽管如此,MDA 含量仍显著增加。这说明植物对 Cd 胁迫的抵御能力是有一定限度的,超过此限度植物就会受到伤害。另一方面,Cd 胁迫对水稻幼苗根系细胞内活性氧酶促清除系统的影响品种间存在显著差异,在高于 $10 \mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下,耐性较强的秀水 09, SOD 和 POD 活性的上升幅度大于敏感品种秀水 63,而 CAT 的下降和 MDA 含量的累积两个品种表现恰恰相反。耐 Cd 品种秀水 09 在 Cd 胁迫下能维持较高的活性氧清除能力,故 MDA 增加少,抗性较强,膜稳定性显著高于 Cd 敏感品种秀水 63。这一结果与 Wu 等^[22]对 4 个大麦基因型的研究中发现 3 个耐受基因型比相对敏感的基因型更少积累 MDA 相一致。SOD/CAT 或 SOD/POD 的正常酶活比不平衡可诱导活性氧的增加,导致植物的氧化损伤^[17, 23]。表 2 表明,Cd 胁迫下,根系 SOD/POD 变化不大,SOD/CAT 明显增加,表明 SOD/CAT 的增加可以导致水稻幼苗根系的氧化损伤。在 $\text{Cd} \geq 10 \mu\text{mol/L}$ 胁迫下,秀水 63 根系中的 SOD/CAT 的比值增幅较秀水 09 大,说明前者根系受 Cd 胁迫,导致氧化胁迫程度更严重。

在重金属胁迫下,植物体内脯氨酸会大量积累,因此脯氨酸含量的变化在一定程度上可以反映植物受到胁迫的程度以及抵抗逆境的能力^[24-25]。本研究结果表明,Cd 胁迫引起秀水 63 和秀水 09 根中脯氨酸含量积累,这是其对 Cd 胁迫的正常生理反应,大量积累的脯氨酸可清除活性氧、保持原生质与环境的渗透平衡、保护生物大分子的结构与稳定性等,这与在秋茄叶片研究中得出的结论相一致^[25]。有研究表明,Cd 胁迫下植物体内脯氨酸含量的增加是由于 Cd 刺激植物体内 mRNA 的合成造成的^[26]。当 $\text{Cd} \geq 50 \mu\text{mol/L}$ 时,秀水 63 的脯氨酸含量有所下降,说明在高浓度 Cd 胁迫下脯氨酸清除氧自由基等作用不再积极。因此,Cd 胁迫下根系保护酶系统活性和脯氨酸含量的差异是 2 个水稻品种耐 Cd 差异的生理机制之一。

References:

- [1] Cui Y J, Zhao Z Q, Liu W J, Chen S B, Zhu Y G. Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10): 2133-2143.
- [2] He J Y, Zhu C, Ren Y F, Yan Y P, Jiang D A. Genotypic variation in grain cadmium concentration of lowland rice. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169: 711-716.
- [3] Sanita di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105-130.

- [4] Ouairi O, Gouia H, Ghorbal M H. Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition and nitrate reduction. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1997, 35: 347-354.
- [5] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(366): 1-11.
- [6] Ekmekçi Y, Tanyolaç D, Ayhan B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(6): 600-611.
- [7] Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, Messedi D, Grignon C, Abdelly C, Ghorbel M H. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two *halophytes*: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(10): 133-140.
- [8] Li T Q, Yang X E, Lu L L, Islam E, He Z L. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169: 734-741.
- [9] Li F, Li M Y, Pan X H, Zhu A F. Biochemical and physiological characteristics in seedlings roots of different rice cultivars under low phosphorus stress. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(1): 48-52.
- [10] Zhang E H, Zhang X H, Wang H Z. Adaptable effects of phosphorus stress on different genotypes of *faba*-bean. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1589-1593.
- [11] Song Y F, Xu H X, Ren L P, Gong P, Zhou Q X. Eco-toxicological effects of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese cabbages in soils. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23(1): 103-107.
- [12] Ni C Y, Li H, Luo Y M, Chen Y X. The influence of copper, cadmium and their combined pollution on ultrastructure of *Commelina bengalensis* Linn. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 343-348.
- [13] Fusconi A, Galloa C, Camusso W. Effects of cadmium on root apical meristems of *Pisum sativum* L.: Cell viability, cell proliferation and microtubule pattern as suitable markers for assessment of stress pollution. *Mutation Research*, 2007, 632: 9-19.
- [14] Cheng W D, Zhang G P, Yao H G, Zhang H M. Genotypic difference of germination and early seedling growth in response to Cd stress and its relation to Cd accumulation. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(4): 702-715.
- [15] Zeng F, Mao Y, Cheng W, Wu F, Zhang G. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice. *Environmental Pollution*, 2008, 153(2): 309-314.
- [16] Zhang Z L, Qu W J. *Experimental Guiding of Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 36-38, 67-70, 258-260.
- [17] Shah K, Kumar R G, Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Science*, 2001, 161: 1135-1144.
- [18] Zhang L, Li J M, Wang H X. Physiological and ecological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) root to cadmium stress. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 61-65.
- [19] Lin R Z, Wang X R, Luo Y, Du W C, Guo H Y, Yin D Q. Effects of soil cadmium on growth, oxidative stress and antioxidant system in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Chemosphere*, 2007, 69(1): 89-98.
- [20] Duan C Q, Wang H X, Qu Z X. Studies on the effects of heavy metals on the contents of nucleic acids and activities of nucleases in the root tips of *Vicia faba*. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1992, 13(5): 31-35.
- [21] Shao G S, Muhammad J H, Zhang X F, Zhang G P. Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(3): 239-244.
- [22] Wu F B, Zhang G P, Dominy P. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50: 67-78.
- [23] Luo L X, Sun T H, Jin Y H. Accumulation of superoxide radical in wheat leaves under cadmium stress. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 495-499.
- [24] Dinakar N, Nagajyothi P C, Suresh S, Udaykiran Y, Damodharam T. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(2): 199-206.
- [25] Qin G Q, Yan C L, Wei L L. Effect of cadmium stress on the contents of tannin, soluble sugar and proline in *Kandelia candel* (L.) Druce seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3366-3371.
- [26] Chakravarty B, Srivastava S. Effects of genotype and explant during in vitro response to cadmium stress and variation in protein and proline contents in linseed. *Annals of Botany*, 1997, 79: 487-491.

参考文献:

- [1] 崔玉静, 赵中秋, 刘文菊, 陈世宝, 朱永官. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因素. *生态学报*, 2003, 23(10): 2133-2143.
- [9] 李锋, 李木英, 潘晓华, 朱安繁. 不同水稻品种幼苗适应低磷胁迫的根系生理生化特性. *中国水稻科学*, 2004, 18(1): 48-52.
- [10] 张恩和, 张新慧, 王惠珍. 不同基因型春蚕豆对磷胁迫的适应性反应. *生态学报*, 2004, 24(8): 1589-1593.
- [11] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 龚平, 周启星. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应. *环境科学*, 2002, 23(1): 103-107.
- [12] 倪才英, 李华, 骆永明, 陈英旭. 铜、镉及其交互作用对泡泡草细胞超微结构的影响. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 343-348.
- [16] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学试验指导*. 北京: 高等教育出版社, 2003: 36-38, 67-70, 258-260.
- [18] 张玲, 李俊梅, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系的生理生态变化. *土壤通报*, 2002, 33(1): 61-65.
- [20] 段昌群, 王焕校, 曲仲湘. 重金属对蚕豆(*Vicia faba*)根尖的核酸含量及核酸酶活性影响的研究. *环境科学*, 1992, 13(5): 31-35.
- [21] 邵国胜, Muhammad J H, 章秀福, 张国平. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响. *中国水稻科学*, 2004, 18(3): 239-244.
- [23] 罗立新, 孙铁珩, 靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 495-499.
- [25] 覃光球, 严重玲, 韦莉莉. 秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量对Cd胁迫的响应. *生态学报*, 2006, 26(10): 3366-3371.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in *Populus davidiana* in Changbai Mountain PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al (297)

The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al (306)

Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al (316)

Photosynthetic responses of *Gracilaria lemaneiformis* to two antibiotics JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al (326)

Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression PAN Fujing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (335)

Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al (344)

Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al (354)

Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al (364)

Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al (371)

Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al (383)

Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese *Anser indicus* during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al (395)

The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al (401)

Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*) TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al (410)

Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al (421)

Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al (431)

Population genetic variations and phylogeography of *Macropodus opercularis* WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al (441)

Contribution of C₃ and C₄ host plants for the overwintering and 1st generation of *Helicoverpa armigera* (Hübner) in Northern China YE Lefu, FU Xue, GE Feng (449)

Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al (455)

The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al (465)

Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al (474)

Microbial diversity of the jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages SHA Yuexia (483)

Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO₂ and temperature LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al (491)

Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al (498)

The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al (506)

The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al (513)

Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al (522)

Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al (529)

Analysis on ecological land rent based on ecological footprint LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali (538)

Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al (547)

Review and Monograph

Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada HE Guizhen, LÜ Yonglong (556)

Plant wax and its response to environmental conditions: an overview LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng (565)

Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo (575)

Advance in the research of phyllospheric microorganism PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al (583)

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 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 2 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

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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

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@cspg.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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

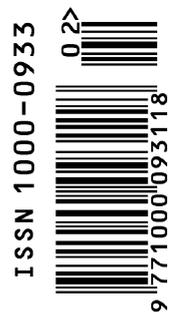
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

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@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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