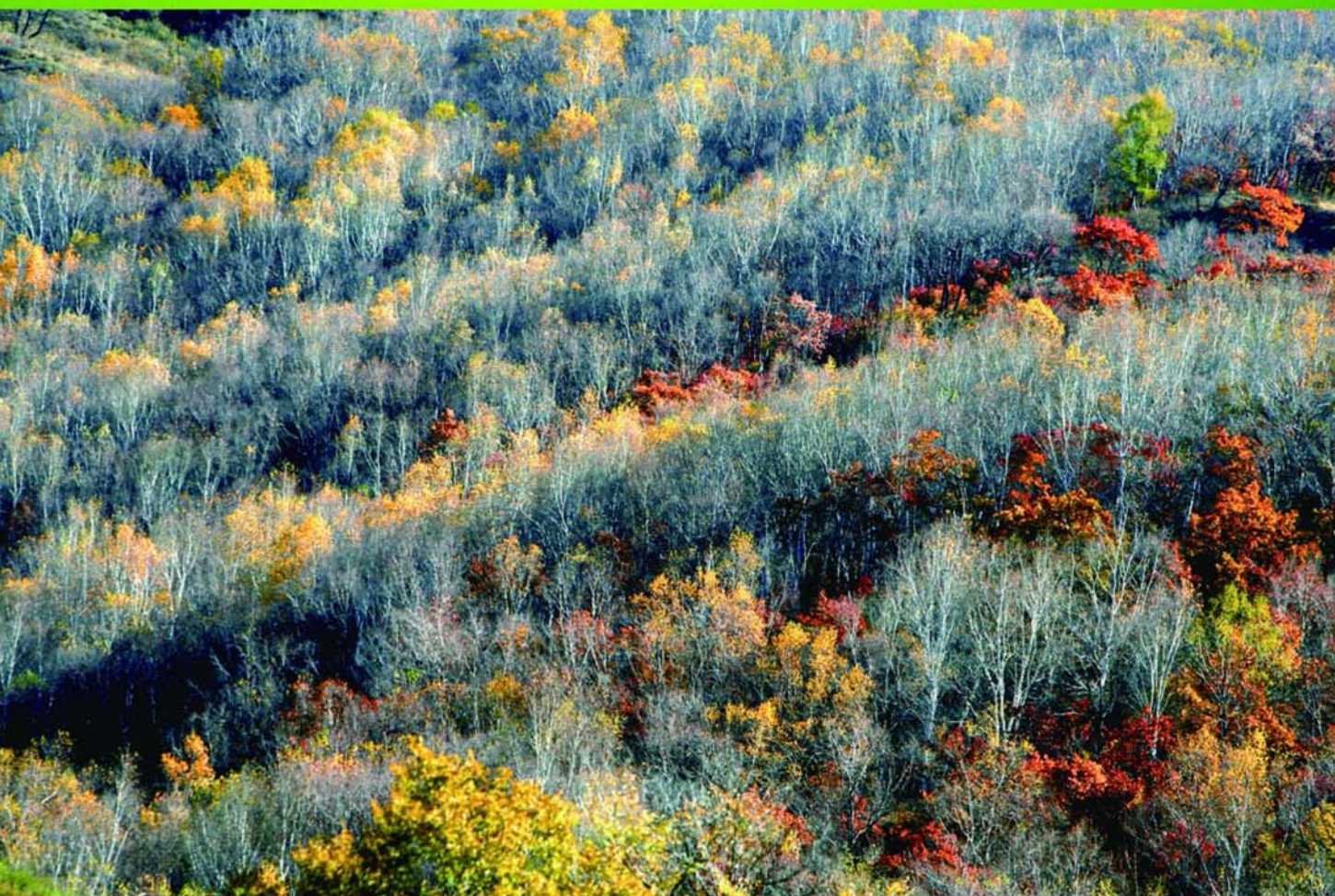


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 **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 16 期

2011 年 8 月 (半月刊)

目次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较·····	汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489)
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟·····	郎莹,张光灿,张征坤,等 (4499)
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响·····	秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509)
镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响·····	吴坤,吴中红,邵付菊,等 (4517)
条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较·····	蒋和平,郑青松,朱明,等 (4525)
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响·····	庞秋颖,陈思学,于涛,等 (4534)
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响·····	高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542)
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析·····	杜军,杨培岭,李云开,等 (4549)
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长·····	徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560)
基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价·····	田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响·····	张征田,庞振凌,夏敏,等 (4579)
印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构·····	周亚东,王春生,王小谷,等 (4586)
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例·····	张斌,袁晓,裴恩乐,等 (4599)
应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况·····	毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609)
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析·····	朱国平,吴强,冯春雷,等 (4620)
水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价·····	莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628)
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡·····	王小彬,王燕,代快,等 (4638)
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量·····	王永生,杨世琦 (4653)
太湖沉积物有机碳与氮的来源·····	倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661)
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响·····	马晶,孙建,张涛,等 (4671)
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较·····	吕进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化·····	兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689)
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征·····	韩路,王海珍,陈加利,等 (4699)
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略·····	乔琦,秦新生,邢福武,等 (4709)
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响·····	多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)
CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系·····	邵璞,曾晓东 (4725)
基于生态效率的辽宁省循环经济分析·····	韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)
专论与综述	
土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法·····	曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)
生态社区评价指标体系研究进展·····	周传斌,戴欣,王如松,等 (4749)
问题讨论	
不同胁迫条件下化感与非化感水稻 PAL 多基因家族的差异表达·····	方长甸,王清水,余彦,等 (4760)
研究简报	
钦州湾大型底栖动物生态学研究·····	王迪,陈丕茂,马媛 (4768)
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征·····	董凯凯,王惠,杨丽原,等 (4778)
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析·····	刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783)
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究·····	隋旭红,张建军,文万荣 (4791)
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N ₂ O 排放及影响因子·····	石兰英,牟长城,田新民,等 (4799)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-08	



封面图说:在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

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

张征田, 庞振凌, 夏敏, 梁子安, 杜瑞卿, 彭宇. 镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响. 生态学报, 2011, 31(16): 4579-4585.
Zhang Z T, Pang Z L, Xia M, Liang Z A, Du R Q, Peng Y. Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4579-4585.

镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响

张征田¹, 庞振凌¹, 夏 敏¹, 梁子安¹, 杜瑞卿¹, 彭 宇^{2,*}

(1. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 河南南阳 473061; 2. 湖北大学生命科学学院, 武汉 430062)

摘要:为探讨镉(Cd)对机体抗氧化功能及金属硫蛋白(MT)的影响,在室内分别用不添加Cd²⁺和添加浓度为20 mg/kg Cd²⁺培养基培养的黑腹果蝇来饲喂4种不同生境下(S1, S2, S3和S4)拟水狼蛛,于饲喂5d、10d和20d后,分别测定其体内MT和丙二醛(MDA)的含量及超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽转氨酶(GST)和过氧化氢酶(CAT)活性。结果表明:(1)不同生境拟水狼蛛用不添加Cd²⁺培养基培养的黑腹果蝇饲喂后,不添加Cd²⁺对照组拟水狼蛛MT的积累量和MT含量无显著变化,但均显著低于添加Cd²⁺污染组。添加Cd²⁺污染组拟水狼蛛MT的积累量和MT含量都显著高于对照组,且均随着饲喂时间的延长而显著升高,具有明显的时间-效应关系($P < 0.05$)。(2)在饲喂5d和10d后,不添加Cd饲喂的拟水狼蛛MDA含量和抗氧化酶系差异都不显著。添加Cd²⁺污染组(S1, S2和S3)MDA含量显著高于对照组(S4),MDA含量与饲喂时间呈显著正相关($P < 0.05$);GST、SOD和CAT等抗氧化酶活性污染组显著低于对照组,与饲喂时间呈显著负相关($P < 0.05$);饲喂20d后,污染组MDA含量和抗氧化酶(SOD和CAT)活性均与对照组无显著差异,但GST活性差异显著。

关键词:拟水狼蛛;镉;金属硫蛋白(MT);抗氧化酶

Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats

ZHANG Zhengtian¹, PANG Zhenling¹, XIA Min¹, LIANG Zian¹, DU Ruiqing¹, PENG Yu^{2,*}

¹ Department of Life Sciences, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

² Faculty of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Heavy metals such as Cadmium (Cd) are one of the most fundamental causes of soil and water pollution in industrialized and developing countries. Cadmium (Cd) is a heavy metal that accumulates in the environment and causes pollution as well as intoxication of both vertebrates and invertebrates, although the mechanisms responsible for the toxicity of Cd are not well understood. Organisms inhabiting chronically polluted environments require additional expenditure of energy for supplementary detoxification. Superoxide dismutase, catalase and glutathione S-transferase (GST), play key roles in protecting organisms from endogenous reactive oxygen species, whose activities are enhanced by environmental contaminants. The wolf spider *Pirata subpiraticus* (Araneae, Lycosidae) is a common, surface-active wolf spider that inhabits very wet places and can be used as a very important bio-indicator for heavy metals pollution. Here, we used the wolf spider *P. subpiraticus* as an organism to evaluate the oxidative stress and metallothionein (MT) content. The wolf spider *P. subpiraticus* inhabiting at four meadow sites along a gradient of heavy metal pollution (the polluted sites: S1, S2 and S3; the control site: S4) were collected and fed with the fruit flies *Drosophila melanogaster* under free and 20 mg/kg Cd²⁺ medium, respectively. The contents of MT and malondialdehyde (MDA), and the activities of antioxidases of

基金项目:南阳师范学院青年项目资助;河南省重点学科资助项目

收稿日期:2010-09-10; **修订日期:**2010-11-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengyu@hubu.edu.cn

P. subpiraticus were determined. There were no significant differences in Cd accumulation and MT content in *P. subpiraticus* fed with Cd-free fruit flies. In contrast, Cd accumulation and MT content were significantly less compared with that fed with 20 mg/kg Cd fruit flies. Feeding the fruit flies *Drosophila melanogaster* with 20 mg/kg Cd²⁺ medium significantly increased Cd accumulation and MT contents of *P. subpiraticus* from polluted sites, which exhibited the typical time-dependent pattern compared with the control ($P < 0.05$). There were no significant differences in MDA and antioxidant enzymes of *P. subpiraticus* fed with Cd-free. However, MDA of *P. subpiraticus* from the polluted sites successively increased and positively correlated with time compared with the control. On the contrary, the activities of GST, SOD, and CAT of *P. subpiraticus* from the polluted sites successively decreased and negatively correlated with time compared with the control. After 20 days, there were no significant differences in MDA, SOD, and CAT in *P. subpiraticus* from all sites, except GST.

This research indicates that MT production may be an important mechanism enabling *P. subpiraticus* populations to persist in ecosystems polluted with heavy metals above a certain level and antioxidant enzymes play key roles in protecting organisms from heavy metals polluted.

Key Words: *Pirata subpiraticus*; cadmium; metallothionein (MT); antioxidant enzyme

镉污染已经成为一个全球性的环境问题,人类生产活动是镉污染的主要来源,特别是矿产的开采、冶炼厂三废的排放、含重金属农业化学物质的施用加重了环境中镉的污染^[1]。镉(Cd)是一种机体非必需元素,具有蓄积性,现已被美国农业委员会列为当前最重要的一种农业环境污染物。环境中的镉不能被土壤微生物分解,易在土壤中积累,并通过食物链富集到动物以及人体中,其自然排泄十分缓慢,从而影响机体健康^[2]。Cd²⁺可以诱导富含巯基(-SH)的金属硫蛋白(Metallothionein, MT)的产生,也易与SOD、GSH-Px 抗氧化酶的巯基相结合,产生氧化损伤作用^[3]。MT与Cd等有毒重金属离子结合以及机体内抗氧化酶系统相互协调作用能减少其对组织的损害,具有解毒、调节机体抗氧化功能的作用,是影响Cd毒性作用的重要因素之一^[4]。

拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 是广布于河流、稻田和潮湿环境的一种游猎性优势蜘蛛^[5],是草地中常见肉食性节肢动物,活动范围有限,其食物主要为各种小型节肢动物,生活习性比较特殊,处在食物链的顶端,同样会通过呼吸、摄食、体表接触等遭受生态环境中镉离子的入侵。有关有关重金属污染对蜘蛛相近类群昆虫影响的文献逐渐较多,涉及Cd, Zn, Cu, Pb, Hg, Ni 和 As 等重金属对弹尾目、双翅目、鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和半翅目昆虫等抗氧化酶的影响^[6-10],但对害虫天敌蜘蛛的体内MT含量和抗氧化酶系报道较少^[11-12],本研究主要在对南阳市煤矿、石油和铜矿等污染地研究的基础上,以拟水狼蛛为实验材料,通过检测Cd饲喂后蜘蛛体内MT含量、抗氧化酶(GST、SOD和CAT)活性及丙二醛(MDA)含量的变化,为系统探讨Cd对害虫天敌的毒性作用机制、环境中Cd沿食物链传递规律及MT在抗氧化损伤中的作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2010年6月利用GPS定位在4个不同生境(桐柏铜矿 TBTK, 32°32'49"N, S1; 南阳油田 NYYT, 33°0'58"N, 112°27'10"E, S2; 南阳军工厂 NYJG, 33°1'24"N, 112°29'52"E, S3; 宝天曼 BTM, 33°2'17"N, 111°56'22"E, S4)采用平行线跳跃法手工采集200头雌性拟水狼蛛成蛛分别标记后带回实验室,饲养在底部垫有湿海绵的玻璃指管(12 cm×4 cm)中,分别用-Cd²⁺和+Cd²⁺培养基培养的黑腹果蝇进行饲喂,添加Cd²⁺培养基终浓度为20 mg/kg, Cd²⁺来源于CdCl₂·2.5H₂O,每天喂1次,所有蜘蛛均放置于RXZ智能人工气候箱内,饲养条件为T 28℃、RH 37%、L:D = 12 h:12 h。以桐柏铜矿、南阳油田和南阳军工厂样本为污染组,南阳宝天曼国家自然保护区为对照组。

1.2 Cd²⁺含量及金属硫蛋白含量测定

参照Templeton和Cherian等^[13]镉血红蛋白饱和法和原子吸收法并略加改进。对照组和污染组于饲喂后第5天、10天和20天分别随机取样30头,处死后,用1% HNO₃溶解去掉表皮毛上的重金属,电子天平称重,

精确到 0.1 mg。每克湿组织加 4 mL Tris-HCl 缓冲液(pH 8.60, 0.01 mol/L), 冰浴匀浆。匀浆后于 12 000 g, 4℃ 离心 15 min。取上清液 0.5 mL, 加入 0.5 mL 20 mg/L 的 CdCl₂ 溶液, 混合后室温放置 5 min, 加入 0.2 mL 新配制的 2% 牛血红蛋白充分混匀, 冰浴 5 min 后于沸水浴加热 2 min, 冷却后于 10 000 g, 4℃ 离心 10 min。重复加血红蛋白以后的步骤 2 次。上清液消化后, 通过火焰原子吸收法测定镉含量, 再按照每分子 MT 结合 6 个镉原子换算成 MT 的含量:

$$\text{MT 含量 (nmol/g)} = 1000 \times \text{Cd 含量} (\mu\text{g/g}) / 112.4 / 6$$

$$\text{Cd 的含量} (\mu\text{g/g}) = \text{上清液中 Cd 浓度} (\mu\text{g/mL}) \times 5 (\text{mL}) \div \text{组织质量 (g)}$$

1.3 GST、SOD 和 CAT 活性测定

蛋白质的测定采用考马斯亮蓝法; SOD 活性的测定采用黄嘌呤氧化法; GST 活性的测定采用 DTNB 显色法; CAT 活性的测定采用醋酸重铬酸钾氧化显色法; MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法。各种测定的所有步骤按照试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)操作说明进行。

1.4 数据处理与分析

所有数据 $\lg(x+1)$ 转换后采用 SPSS10.0 软件进行 One-way ANOVA 中的 Duncan 氏多重比较和线性回归来进行分析。

2 结果与分析

2.1 拟水狼蛛体内重金属镉的含量

由表 1 可知, 用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 Cd 积累量随饲喂时间延长无显著差异, 但均显著低于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后, 食物中过量 Cd²⁺ 能够通过猎物进行传递并在拟水狼蛛体内积累, 积累量随饲喂时间增加而增加。饲喂前不同生境 S1, S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内镉的含量均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$), 经 Cd 饲 5d、10d 和 20d 后, 对于同一样点, 拟水狼蛛体内镉的含量均显著高于饲喂前 ($P < 0.05$)。对于不同样点在同一饲喂时间下, S1, S2 和 S3 样点均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$)。简单相关分析表明, 不同生境拟水狼蛛体内镉的累积含量与饲喂时间呈显著正相关(相关系数 $r_1 = 0.876, P < 0.05$; $r_2 = 0.954, P < 0.01$; $r_3 = 0.862, P < 0.05$; $r_4 = 0.886, P < 0.05$), 表明拟水狼蛛体内镉的含量与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

表 1 不同生境拟水狼蛛体内镉的含量

Table 1 Cd concentrations in *Pirata subpiraticus* from different habitats ($\mu\text{g/g}$)

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	30.75±1.51 Aa	30.90±1.48 Aa	30.67±1.40 Aa	30.83±1.62 Aa	34.23±1.82 Ab	41.40±1.96 Ac	50.46±2.38 Ad
S2	23.58±1.34 Ba	23.80±1.24 Ba	23.46±1.23 Ba	23.75±1.38 Ba	28.21±1.21 Bb	34.55±1.45 Bc	42.36±1.75 Bd
S3	21.72±1.12 Ba	21.24±1.02 Ba	21.30±1.06 Ba	21.42±1.10 Ba	26.84±1.03 Bb	32.46±1.21 Bc	40.28±1.14 Bd
S4	3.12±0.69 Ca	3.10±0.64 Ca	3.08±0.65 Ca	3.16±0.78 Ca	7.68±1.08 Cb	14.52±0.95 Ce	21.35±0.91 Cd

同一列平均数后不同的大写字母表示不同样点在相同 Cd²⁺ 饲喂时间下差异显著; 同一行平均数后不同的小写字母表示同一样点在不同 Cd²⁺ 饲喂时间下差异显著 (Duncan 氏多重比较, $P < 0.05$)

2.2 拟水狼蛛 MT 含量的变化

由表 2 可知, 用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 MT 表达量随饲喂时间延长无显著差异, 但均显著低于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后, 不同 Cd 饲喂时间能诱导拟水狼蛛体内 MT 不同的表达, 表达量随饲喂时间延长而升高。饲喂前不同生境 S1, S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内 MT 的含量均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$), 表明在不同生境下拟水狼蛛积累的 Cd 已经诱导拟水狼蛛体内 MT 的表达。经 Cd 饲喂 5d、10d 和 20d 后, 对于同一样点, 拟水狼蛛体内 MT 的含量均显著高于饲喂前 ($P < 0.05$)。对于不同样点在同一饲喂时间下, S1, S2 和 S3 样点均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$)。简单相关分析表明, 不同生境拟水狼蛛体内 MT 的含量与 Cd 饲喂时间呈显著正相关关系(相关系数 $r_1 = 0.924, P < 0.01$; $r_2 = 0.985, P < 0.01$; $r_3 = 0.852, P < 0.05$; $r_4 = 0.864, P < 0.05$), 表明拟水狼蛛体内 MT 的含量与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

表 2 不同生境拟水狼蛛体内 MT 的含量/(nmol/g)

Table 2 MT concentrations in *Pirata subpiraticus* from different habitats

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	3.44±0.18Aa	3.62±0.24Aa	3.42±0.22Aa	3.53±0.24Aa	6.88±0.75Ab	9.85±0.70Ac	13.45±0.92Ad
S2	2.66±0.24Ba	2.91±0.27Ba	2.74±0.30Ba	2.86±0.32Ba	5.75±0.75Bb	7.34±0.54Bc	10.43±0.82Bd
S3	2.84±0.21Ba	2.53±0.18Ba	2.65±0.19Ba	2.78±0.22Ba	5.78±0.54Bb	7.50±0.46Bc	10.30±0.76Bd
S4	1.30±0.16Ca	1.48±0.22Ca	1.36±0.23Ca	1.48±0.26Ca	3.50±0.52Cb	5.20±0.58Cc	8.23±0.65Cd

2.3 Cd 饲喂对拟水狼蛛抗氧化酶系活性的影响

2.3.1 Cd 对拟水狼蛛 GST 活性的影响

由表 3 可知,用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 GST 活性随饲喂时间延长无显著差异,但均显著高于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后,不同 Cd 饲喂时间能显著抑制 GST 活性,GST 活性随 Cd 饲喂时间延长而降低。饲喂前不同生境 S1,S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内 GST 活性均显著低于 S4 样点($P<0.05$),表明在不同生境下拟水狼蛛积累的 Cd 已经抑制拟水狼蛛体内 GST 活性。经 Cd 饲喂 5d、10d 和 20d 后,对于同一样点,拟水狼蛛体内 GST 活性量均显著低于饲喂前($P<0.05$)。对于不同样点在同一饲喂时间下,S1,S2 和 S3 样点均显著低于 S4 样点($P<0.05$)。简单相关分析表明,不同生境拟水狼蛛体内 GST 活性与饲喂时间呈显著负相关(相关系数 $r_1=-0.984, P<0.01$; $r_2=-0.876, P<0.05$; $r_3=-0.852, P<0.05$; $r_4=-0.932, P<0.01$),表明拟水狼蛛体内 GST 活性与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

表 3 Cd 饲喂对拟水狼蛛 GST 活性的影响/($\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1}$ 蛋白质)Table 3 The activity of GST in *Pirata subpiraticus* under Cd feeding

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	5.74±0.21Aa	5.70±0.20Aa	5.68±0.20Aa	5.45±0.18Aa	4.34±0.62Ab	2.58±0.42Ac	1.64±0.21Ad
S2	6.34±0.20Ba	6.30±0.20Ba	6.22±0.18Ba	6.10±0.15Ba	5.31±0.32Bb	3.10±0.36Bc	2.12±0.16Bd
S3	6.80±0.26Ba	6.76±0.24Ba	6.65±0.22Ba	6.32±0.24Ba	5.54±0.46Bb	3.32±0.45Bc	2.42±0.18Bd
S4	9.85±0.24Ca	9.55±0.24Ca	9.42±0.25Ca	9.32±0.24Ca	7.45±0.50Cb	5.38±0.50Cc	3.23±0.54Cd

2.3.2 Cd 对拟水狼蛛 SOD 活性的影响

由表 4 可知,用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 SOD 活性随饲喂时间延长无显著差异,但均显著高于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后,不同 Cd 饲喂时间能显著抑制 SOD 活性,SOD 活性随饲喂时间延长而降低。饲喂前不同生境 S1,S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内 SOD 活性均显著低于 S4 样点($P<0.05$),表明在不同生境下拟水狼蛛积累的 Cd 已经抑制拟水狼蛛体内 SOD 活性。经 Cd 饲喂 5d、10d 和 20d 后,对于同一样点,拟水狼蛛体内 SOD 活性均显著低于饲喂前($P<0.05$),但经 Cd 饲喂 10d 和 20d 后,SOD 活性下降趋势不明显,表明 SOD 活性受抑制有一定的饲喂时间阈值。对于不同样点在同一饲喂时间下,S1,S2 和 S3 样点均显著低于 S4 样点($P<0.05$)。简单相关分析表明,在饲喂 0—10d 内,不同生境拟水狼蛛体内 SOD 活性与饲喂

表 4 Cd 饲喂对拟水狼蛛 SOD 活性的影响/(U/mg 蛋白质)

Table 4 The activity of SOD in *Pirata subpiraticus* under Cd feeding

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	45.10±5.70Aa	44.10±5.62Aa	44.68±5.20Aa	44.45±5.54Aa	38.63±4.52Ab	33.40±3.25Ac	32.23±3.21Ac
S2	50.80±6.86Ba	50.35±6.52Ba	50.35±6.35Ba	50.24±6.70Ba	42.15±4.34Bb	35.46±3.40Bc	33.45±3.62Ac
S3	53.10±6.90Ba	52.58±6.78Ba	52.28±6.45Ba	52.54±6.63Ba	45.64±5.04Bb	36.78±3.64Bc	34.42±3.34Ac
S4	61.85±7.54Ca	61.46±7.32Ca	60.92±7.05Ca	60.86±7.10Ca	50.28±5.20Cb	38.56±4.26Cc	35.45±4.12Ad

时间呈显著负相关关系(相关系数 $r_1 = -0.784, P < 0.05; r_2 = -0.876, P < 0.05; r_3 = -0.852, P < 0.05; r_4 = -0.768, P < 0.05$), 表明拟水狼蛛体内 SOD 活性与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

2.3.3 Cd 对拟水狼蛛 CAT 活性的影响

由表 5 可知, 用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 CAT 活性随饲喂时间延长无显著差异, 但均显著高于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后, 不同 Cd 饲喂时间能显著抑制 CAT 活性, CAT 活性随饲喂时间延长而降低。饲喂前不同生境 S1, S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内 CAT 活性均显著低于 S4 样点 ($P < 0.05$), 表明在不同生境下拟水狼蛛积累的 Cd 已经抑制拟水狼蛛体内 CAT 活性。经 Cd 饲喂 5d、10d 和 20d 后, 对于同一样点, 拟水狼蛛体内 CAT 活性均显著低于饲喂前 ($P < 0.05$)。对于不同样点在同一饲喂时间下, S1, S2 和 S3 样点均显著低于 S4 样点 ($P < 0.05$)。简单相关分析表明, 不同生境拟水狼蛛体内 CAT 活性与饲喂时间呈显著负相关(相关系数 $r_1 = -0.968, P < 0.01; r_2 = -0.924, P < 0.01; r_3 = -0.980, P < 0.01; r_4 = -0.896, P < 0.05$), 表明拟水狼蛛体内 CAT 活性与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

表 5 Cd 饲喂对拟水狼蛛 CAT 活性的影响/($\text{mmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ 蛋白质)

Table 5 The activity of CAT in *Pirata subpiraticus* under Cd feeding

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	43.06±3.84Aa	42.94±3.64Aa	42.80±3.48Aa	42.35±3.25Aa	36.38±3.32Ab	31.45±3.10Ac	30.52±2.54Ac
S2	47.12±4.80Ba	47.06±4.64Ba	46.92±4.54Ba	46.62±4.72Ba	40.56±3.35Bb	35.63±3.20Bc	31.65±3.44Ad
S3	49.14±6.82Ba	49.10±4.88Ba	48.46±4.66Ba	48.28±4.56Ba	41.28±4.12Bb	35.33±3.42Bc	32.42±3.28Ad
S4	55.08±8.48Ca	54.85±5.32Ca	54.48±5.44Ca	54.25±5.24Ca	46.15±4.22Cb	37.42±4.12Cc	33.45±3.85Ad

表 6 Cd 饲喂对拟水狼蛛 MDA 含量的变化/(nmol/mg 蛋白质)

Table 6 The content of MDA in *Pirata subpiraticus* under Cd feeding

样点 Site	-Cd ²⁺			+Cd ²⁺			
	20d	10d	5d	0 d	5d	10d	20d
S1	3.70±0.18Aa	3.64±0.16Aa	3.56±0.18Aa	3.48±0.15Aa	4.22±0.14Ab	5.06±0.16Ac	5.26±0.10Ac
S2	2.91±0.18Ba	2.84±0.16Ba	2.80±0.17Ba	2.65±0.14Ba	3.42±0.18Bb	4.63±0.15Bc	5.20±0.14Ac
S3	2.72±0.12Ba	2.68±0.14Ba	2.65±0.12Ba	2.46±0.10Ba	3.23±0.12Bb	4.35±0.14Bc	5.20±0.13Ac
S4	1.18±0.08Ca	1.16±0.05Ca	1.16±0.06Ca	1.12±0.06Ca	2.24±0.08Cb	3.85±0.10Cc	5.05±0.12Ac

2.4 拟水狼蛛 MDA 含量的变化

从表 6 可见, 用不添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛体内 MDA 含量随饲喂时间延长无显著差异, 但均显著低于添加 Cd 饲喂的拟水狼蛛。添加 Cd 饲喂后, 拟水狼蛛 MDA 含量随饲喂时间延长而增加。饲喂前不同生境 S1, S2 和 S3 样点拟水狼蛛体内 MDA 均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$), 说明饲喂前, 不同生境的拟水狼蛛已受到环境中 Cd 积累的过氧化损伤。饲喂 5d 和 10d 后, 对于同一样点, 拟水狼蛛体内 MDA 含量均显著高于饲喂前 ($P < 0.05$)。对于不同样点在同一饲喂时间下, S1, S2 和 S3 样点均显著高于 S4 样点 ($P < 0.05$)。饲喂 20d 后 MDA 含量升高趋势不明显, 与饲喂 10d 比较, 差异不显著 ($P > 0.05$)。简单相关分析表明, 在饲喂 0—10d 内, 不同生境拟水狼蛛体内 MDA 含量与饲喂时间呈显著正相关(相关系数 $r_1 = 0.824, P < 0.05; r_2 = 0.788, P < 0.05; r_3 = 0.802, P < 0.05; r_4 = 0.886, P < 0.05$), 表明拟水狼蛛体内 MDA 含量与 Cd 饲喂有显著的时间-效应关系。

3 讨论

已有许多研究表明, 环境中的镉能够通过食物链进行传递并在动物体内累积, 因此很多无脊椎动物作为环境指示生物^[14]。本研究采用不同生境拟水狼蛛作为试验对象, 通过饲喂镉培养的黑腹果蝇来模拟拟水狼蛛体内镉的累积情况、传递规律及生理生化防御机制。结果表明, 不同生境拟水狼蛛体内镉的累积不同, 污染点显著高于对照组, 分别用不添加 Cd 和添加 Cd 饲喂后, 随着时间延长, 不添加 Cd 饲喂组差异不显著, 但均

显著低于添加 Cd 饲喂组,进一步印证了环境中过量的 Cd^{2+} 能够通过食物链进行传递并在拟水狼蛛体内积累,积累量随 Cd 饲喂时间延长而增加,存在显著的时间-效应关系。这与刘雪梅等^[15]报道的土壤-作物-昆虫系统中镉在中华稻蝗体内的累积情况基本一致,也与其他高等动物对重金属的积累情况极为相似^[16-17]。

镉的摄入可以引起机体发生一系列毒理学变化,产生不可逆的生物损伤^[18],已有许多研究表明,许多重金属元素如锌、铜、镍和镉等均能诱导 MT 的生物合成^[19]。动物体内的镉绝大部分是以 Cd-MT 状态存在的,只要机体细胞功能正常,就可以不断地被刺激表达出 MT,并与 Cd 等重金属发生结合,缓解重金属的毒性^[20]。在镉的暴露下,生物体并不是产生单一的防御机制,而是多种防御机制的有机组合^[12]。Cd 可以通过与 MT 以及抗氧化酶 GST、SOD 和 GST 等富含的-SH 结合,从而减轻或消除重金属的氧化损伤作用^[21]。本研究结果表明,在 20 mg/kg Cd 浓度培养的黑腹果蝇饲喂下,拟水狼蛛体内镉的含量、MT 含量均随着饲喂时间的延长而升高,均显著高于不添加 Cd 饲喂组,二者在同一时间点上的变化趋势基本一致。相关分析表明,Cd 在拟水狼蛛体内的含量与 MT 的含量呈明显正相关,拟水狼蛛与相近类群昆虫不同^[22],昆虫防御机制主要是避免或者减少摄入,增强分泌能力^[23],蜘蛛主要是利用 MT 和微溶酶体在体内储存重金属颗粒。由此可见,MT 在一定程度上决定了 Cd 在机体中的积累,是 Cd 在机体中大量蓄积的重要原因。MDA 是过氧化代谢产物,其含量的变化常常可反映机体体内脂质过氧化的程度,间接反映出细胞损伤的程度^[24]。Cd 的毒性与细胞脂质过氧化反应密切相关,抗氧化酶 GST、SOD 和 GST 等活性的降低,直接导致机体内脂质过氧化物生成^[25]。本实验研究表明,在未饲喂前,由于生境不同,污染组 MDA 含量显著高于对照组,拟水狼蛛抗氧化酶 GST、SOD 和 CAT 等活性污染组显著低于对照组,说明长时间受环境中重金属胁迫,机体可能由于基因的变异,可能已经形成一套较为成熟的防御机制,进一步说明在自然选择中,基因可塑性决定了表型可塑性,从而允许有机体适应各种宽广的环境因子^[26]。在 20 mg/kg Cd 浓度培养的黑腹果蝇饲喂 0—10d,污染组 MDA 含量显著高于对照组,抗氧化酶 GST、SOD 和 CAT 等活性污染组显著低于对照组,说明在一定浓度、一定时间的饲喂下,Cd 能抑制抗氧化酶的活性,直接导致机体内脂质过氧化物生成,损伤机制可能与镉诱发组织细胞自由基的产生有关。但在饲喂 20d 后,MDA 含量升高趋势和抗氧化酶 SOD 和 CAT 活性下降趋势不明显,污染组和对照组差异不显著,GST 活性对照组显著高于污染组,说明对照组抗氧化酶 GST 对镉较为敏感,污染组机体可能产生污染物胁迫的适应性耐受机制,可能是一方面由于动物在长期的受生境中重金属污染,个体表现出一定的地理适应性,对各种逆境的防御机制也不尽相同^[27]。另一方面动物在长期的受重金属污染过程中,自身基因发生了一定的变异,从而是自己更能适应自然的选择。因此引起动物对重金属污染适应性的深层次原因将是下一步研究的重点。

References:

- [1] WarchalowskaŚliwa E, Niklińska M, Görlich A, Michailova P, Pyza E. Heavy metal accumulation, heat shock protein expression and cytogenetic changes in *Tetrix tenuicornis* (L.) (Tetrigidae, Orthoptera) from polluted areas. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2): 373-381.
- [2] Nummelin M, Lodenius M, Tulisalo E, Hirvonen H, Alanko T. Predatory insects as bioindicators of heavy metal pollution. *Environmental Pollution*, 2007, 145(1): 339-347.
- [3] Roesijadi G. Metallothionein and its role in toxic metal regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1996, 113(2): 117-123.
- [4] Martynowicz H, Skoczyńska A. Cadmium toxicity: Cadmium and hypertension. *Polskie Archiwum Medycyny Wewnętrznej*, 2004, 111(2): 243-249.
- [5] Li J Q, Shen Z R, Zhao Z M, Luo Y J. Biology and ecology of the wolf spider *Pirata subpiraticus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1478-1484.
- [6] Bongers M, Rusch B, van Gestel C A M. The effect of counterion and percolation on the toxicity of lead for the springtail *Folsomia candida* in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(1): 195-199.
- [7] Eeva T, Sorvari J, Koivunen V. Effects of heavy metal pollution on red wood ant (*Formica* s. str.) populations. *Environmental Pollution*, 2004, 132: 533-539.
- [8] Cervera A, Maymó A C, Martínez-Pardo R, Garcerá M D. Vitellogenesis inhibition in *Oncopeltus fasciatus* females (Heteroptera: Lygaeidae) exposed to cadmium. *Journal of Insect Physiology*, 2005, 51(8): 895-911.

- [9] Wang H, Wu G X, Ye G Y, Hu C, Chen J A. Accumulation of cuprum and cadmium and their effects on the antioxidant enzymes in *Boettcherisca peregrina* exposed to cuprum and cadmium. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2006, 32(1): 77-81.
- [10] Sun G, Wu H H, Xi Y Y, Yang M L, Ma E B, Guo Y P. Accumulation and distribution of cadmium in *Oxya chinensis* after feeding on wheat seedlings contaminated with Cd. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1812-1817.
- [11] Zhang Z S, Lu X G, Wang Q C, Zheng D M, Zheng N, Zhang Y Y, Zhang X W. Mercury contents and distributions in spiders around the zinc smeltery in Huludao city. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 481-484.
- [12] Zhang Z T, Pang Z L, Liang Z A, Peng Y, Du R Q. Distribution of heavy metals in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) and their effect on activities of antioxidant enzymes. *Acta Entomologica Sinica*, 2010, 53(6): 618-625.
- [13] Templeton D M, Cherian M G. Toxicological significance of metallothionein. *Methods in Enzymology*, 1991, 205: 11-24.
- [14] Morgan A J, Kille P, Stürzenbaum S R. Microevolution and ecotoxicology of metals in invertebrates. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(4): 1085-1096.
- [15] Liu X M, Li L J, Guo Y P, Xi Y Y, Ma E B. Cadmium accumulation in *Oxya Chinensis* in the ecosystem of soil-plant-insect. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 301-304.
- [16] Wang M Z, Jia X Y. Low levels of lead exposure induce oxidative damage and DNA damage in the testes of the frog *Rana nigromaculata*. *Ecotoxicology*, 2009, 18(1): 94-99.
- [17] Jia X Y, Shi C L, Liu X X. Effects of Cadmium on oxidative stress and metallothionein of liver in frog *Rana nigromaculata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 416-420.
- [18] Sanders M J, Du Preez H H, van Vuren J H J. The freshwater river crab *Potamonautus warreni* as a bioaccumulative indicator of iron and manganese pollution in two aquatic systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1998, 41(2): 203-214.
- [19] Hylland K, Haux C, Hogstrand C, Sletten K, Andersen R A. Properties of cod metallothionein, its presence in different tissues and effects of Cd and Zn treatment. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1994, 13(1): 81-91.
- [20] Lazo J S, Kondo Y, Dellapiazza D, Michalska A E, Choo K H, Pitt B R. Enhanced sensitivity to oxidative stress in cultured embryonic cells from transgenic mice deficient in metallothionein I and II genes. *The Journal of Biological Chemistry*, 1995, 270(10): 5506-5510.
- [21] Tian X L, Guo J H. Study advances of metallothionein. *Foreign Medical Sciences: Section on Pharmacy*, 2005, 32(2): 119-124.
- [22] Janssens T K S, Roelofs D, van Straalen N M. Molecular mechanisms of heavy metal tolerance and evolution in invertebrates. *Insect Science*, 2009, 16(1): 3-18.
- [23] Wilczek G, Babczyńska A. Heavy metals in the gonads and hepatopancreas of spiders (Araneae) from variously polluted areas. *Ekologia-Bratlava*, 2000, 19(S3): 283-292.
- [24] Shi C L, Zhang H J, Jia X Y. Ecotoxic responses of MDA and antioxidant enzymes in testes of the frog *Rana nigromaculata* due to exposures to lead and cadmium. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3569-3574.
- [25] Jia C S, Li J L, Xu S W. Effects of Cadmium on oxidative stress and metallothionein of blood vessel in hens. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(2): 178-183.
- [26] Terblanche J S, Kleynhans E. Phenotypic plasticity of desiccation resistance in *Glossina* puparia: are there ecotype constraints on acclimation responses? *Journal of Evolutionary Biology*, 2009, 22(8): 1636-1648.
- [27] Eraly D, Hendrickx F, Bervoets L, Lens L. Experimental exposure to cadmium affects metallothionein-like protein levels but not survival and growth in wolf spiders from polluted and reference populations. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2124-2131.

参考文献:

- [5] 李剑泉, 沈佐锐, 赵志模, 罗雁婕. 拟水狼蛛的生物生态学特性. *生态学报*, 2002, 22(9): 1478-1484.
- [9] 王慧, 吴国星, 叶恭银, 胡萃, 程家安. 铜和镉在棕尾别麻蝇体内的累积及其对三种抗氧化酶活性的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2006, 32(1): 77-81.
- [10] 孙鸽, 吴海花, 席玉英, 杨美玲, 马恩波, 郭亚平. 长期取食染镉小麦后中华稻蝗体内镉的累积分布. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1812-1817.
- [11] 张仲胜, 吕宪国, 王起超, 郑冬梅, 郑娜, 张新艳, 张秀武. 葫芦岛锌厂周围蜘蛛体内的汞含量及分布. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 481-484.
- [12] 张征田, 庞振凌, 梁子安, 彭宇, 杜瑞卿. 重金属在拟水狼蛛体内的分布及其体内抗氧化酶活性的影响. *昆虫学报*, 2010, 53(6): 618-625.
- [15] 刘雪梅, 李丽君, 郭亚平, 席玉英, 马恩波. 土壤-作物-昆虫系统中镉在中华稻蝗体内的累积. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 301-304.
- [17] 贾秀英, 施蔡雷, 刘晓旭. 镉致黑斑蛙肝脏氧化损伤与金属硫蛋白含量的变化. *生态学报*, 2010, 30(2): 416-420.
- [21] 田晓丽, 郭军华. 金属硫蛋白的研究进展. *国外医学: 药学分册*, 2005, 32(2): 119-124.
- [24] 施蔡雷, 张杭君, 贾秀英. 黑斑蛙精巢 MDA 和抗氧化酶对铅、镉暴露的生态毒性响应. *生态学报*, 2010, 30(13): 3569-3574.
- [25] 加春生, 李金龙, 徐世文. 镉致鸡血管氧化应激与金属硫蛋白含量的变化. *生态毒理学报*, 2007, 2(2): 178-183.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31, No. 16 August, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination	WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of <i>Prunus sibirica</i> L. under different soil water conditions	LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field	QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves	WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujun, et al (4517)
Comparative physiological responses of cadmium stress on <i>Enteromorpha clathrata</i> and <i>Enteromorpha linza</i>	JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
Effects of salt stress on glucosinolate contents in <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Thellungiella halophila</i> rosette leaves	PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field	GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia	DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
Seed characteristics and seedling growth of <i>Spartina alterniflora</i> on coastal wetland of North Jiangsu	XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model	TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in <i>Pirata subpiraticus</i> (Araneae: Lycosidae) in different habitats	ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current	ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area	ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary	MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
Population age structure of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey	ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province	MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems	WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period	WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake	NI Zhaoxui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi	MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in <i>Laodelphax striatellus</i> (Fallen) and <i>Nilaparvata lugens</i> (Stål)	LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear (<i>Helarctos malayanus</i>) in captivity	LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)
Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River	HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, <i>Bretschneidera sinensis</i>	QIAO Qi, QIN Xinsong, XING Fuwu, et al (4709)
Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress	DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency	HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)
Review and Monograph	
The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement	CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
Indicators for evaluating sustainable communities: a review	ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)
Discussion	
Differential expression of <i>PAL</i> multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions	FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)
Scientific Note	
Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay	WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration	DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics	LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
Study on sap flow in forest of <i>Quercus liaotungensis</i> and <i>Populus davidiana</i> by using the TDP method	SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
N ₂ O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

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 16 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 16 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	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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 70.00 元