

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

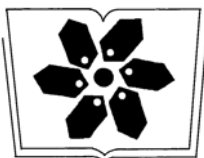
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 ..... 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 ..... 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

### 个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤  $\text{CH}_4$  吸收速率对模拟 N 沉降的响应 ..... 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度  $\text{O}_3$  及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 ..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 ..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 ..... 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 ..... 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 ..... 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

|                                                                                    |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析 .....                                                        | 李然然,章光新,张 蕾 (2663)   |
| 闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....                                                    | 曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674) |
| 环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....                                                  | 郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682) |
| 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....                                                        | 杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693) |
| 海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....                                                         | 李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702) |
| 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....                                                     | 杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712) |
| 杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....                                                                | 何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725) |
| 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....                                                           | 张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737) |
| 黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....                                                       | 申家朋,张文辉 (2746)       |
| <b>景观、区域和全球生态</b>                                                                  |                      |
| 南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....                                                    | 刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755) |
| 黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....                                                 | 徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765) |
| <b>资源与产业生态</b>                                                                     |                      |
| 基于 GIS 的山西省矿产资源规划环境影响评价 .....                                                      | 刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)   |
| 基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例 .....                                                    | 赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)   |
| <b>学术信息与动态</b>                                                                     |                      |
| 全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 <sup>nd</sup> Open Science Meeting) 会议述评 .....              | 段宝玲,卜玉山 (2796)       |
| 期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05 |                      |



**封面图说:** 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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

DOI: 10.5846/stxb201307241940

李锐, 李娜, 刘佳, 李生才, 洪坚平. 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理. 生态学报, 2014, 34(10): 2629-2637.

Li R, Li N, Liu J, Li S C, Hong J P. The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2629-2637.

## 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理

李 锐<sup>1</sup>, 李 娜<sup>1</sup>, 刘 佳<sup>1</sup>, 李生才<sup>1</sup>, 洪坚平<sup>2,\*</sup>

(1. 山西农业大学农学院, 太谷 030801; 2. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

**摘要:** 探讨低剂量杀虫剂对蜘蛛捕食效应的影响及其生化机理。采用药膜法, 测定了低剂量吡虫啉作用下, 星豹蛛和甘蓝蚜敏感性、捕食效应以及成蛛体内乙酰胆碱酯酶(AChE)、谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和中肠蛋白消化酶的活力变化。低剂量农药作用下, 星豹蛛对甘蓝蚜的功能反应类型为 Holling II 型, 与对照组相比, 随着猎物密度的增大星豹蛛的捕食量增加, 寻找效应降低, 对猎物的处理时间  $T_h$  缩短, 从而增强了对猎物的捕食作用; 低剂量农药处理后, 星豹蛛体内 AChE 和 GSTs 活性均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 说明酶活性受到抑制, 且抑制作用随吡虫啉浓度的增大而加强, 随作用时间的延长而减弱; SOD, CAT 和中肠蛋白消化酶活性显著增强, 与对照组相比存在显著或极显著差异 ( $P < 0.05$ ), 且随吡虫啉浓度增大和作用时间的延长而逐渐降低, 最后接近对照组。低剂量杀虫剂作用下, 蜘蛛体内 AChE 活性受到抑制, AChE 敏感性降低, 对神经递质乙酰胆碱的分解作用下降, 使蜘蛛的兴奋性增加; GSTs、SOD、CAT 等代谢酶活性发生变化, 使蜘蛛的新陈代谢加速, 从而刺激捕食; 中肠蛋白消化酶的活性增强, 提高了对猎物的消化吸收功能。总之, 在低剂量杀虫剂作用下, 星豹蛛通过外在的捕食行为和体内一系列酶系生理生化反应的综合作用促进蜘蛛对害虫的控制作用。

**关键词:** 星豹蛛; 低剂量杀虫剂; 捕食效应; 解毒酶; 代谢酶; 消化酶

## The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms

LI Rui<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, LI Shengcai<sup>1</sup>, HONG Jianping<sup>2,\*</sup>

1 College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

**Abstract:** Spiders are among the most abundant predators of insects and other invertebrates in agro- and forest ecosystems, playing an important ecological role by regulating invertebrate populations. Biological control using spiders may represent a sustainable method of controlling agricultural pest species and reducing the amount of pest damage on crops. However, pesticide application on agricultural crops may directly or indirectly impact spider foraging in the crop. In particular, pesticides may have mutagenic effects on spiders, negatively affecting the spider population abundance and transferring these effects to the next generation. Recent studies have reported that low-dose pesticides kill pests, but promote the predation of natural enemies. Therefore, revealing the mechanism behind low-dose pesticides on natural enemies is critical to improving predator ability, exploring the potential control of insect predators and coordinating bio- and chemical control. Our aim was to investigate the effect of low-dose pesticides on spider predation behavior and reveal the underlying mechanisms. *Pardosa astrigera* was treated with a low-dose of imidacloprid using the drug-film method. We determined the sensitivity of *P. astrigera*, the predation effect of *P. astrigera* on *B. brassicae* and the activity of acetylcholinesterase (AChE), glutathione S-transferase (GSTs), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and midgut proteinase. The

基金项目: 中国博士后基金(112125); 山西省科技攻关项目(20130311011-5, 20120311013-4); 山西省留学基金项目(2013-重点 6)

收稿日期: 2013-07-24; 网络出版日期: 2014-02-20

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

results showed that under different concentrations of imidacloprid, the predacious functional response of spiders on aphids belonged to the Holling type. Compared with the control, the theoretical maximal consumption increased, searching efficiency decreased and the prey handling time declined with increasing aphid density. Therefore, low-dose pesticide levels resulted in enhanced predation by spiders. When *P. astrigera* was treated with a low-dose of pesticide, this species showed a reduction in AChE and GSTs activity compared with the control ( $P < 0.05$ ), suggesting spider activity was inhibited. The inhibition was enhanced with increasing pesticide concentration and weakened with prolonged treatment. SOD, CAT and midgut proteinase activity were induced significantly at the low-dose of 1, 3 and 5 mg/L ( $P < 0.050$ ), but decreased gradually with increased concentration and extended treatment, with activity close to the control. After low-dose pesticide treatment, *P. astrigera* showed inhibited AChE activity, leading to reduced AChE sensitivity, less decomposition of AChE in nerve transfer and increased spider activity. Increased GSTs, SOD and CAT activity induced by low-dose pesticide, accelerated the spiders' metabolism, stimulating predatory behavior. Enhanced midgut proteinase activity may benefit food digestion and nutrient absorption. The low-dose pesticide regime may enhance the predatory behavior of *P. Astrigera* via three main pathways. First, it enhances the instant attack rate, shortens prey handling time and increases the amount of prey per day. Second, it affects physiological enzyme activity, inhibits to a degree the metabolic detoxification enzyme subject of: low doses of imidacloprid causing a reduction in AChE sensitivity of the neurotransmitter acetylcholine decomposition, resulting in higher spider excitability; increased protection enzyme, such as GSTs, SOD, CAT, function oxidases (MFOs) and esterase, resulting in the acceleration of spider metabolism, stimulating predator behavior. Third, on the physiological activity of digestive enzymes, low doses of pesticides activate protein midgut digestive enzymes, improving the digestion and absorption function of prey. In summary, certain concentrations of pesticide promote the predation function of *P. astrigera* against prey, changing spider behavior through a series of physiological and biochemical reactions.

**Key Words:** *Pardosa astrigera*; low-dose pesticide; predation; detoxifying enzyme; metabolizing enzyme; digestion enzyme

蜘蛛是农林生态系统中的优势类群,在控制害虫危害和发展无公害农业中起重要作用。化学防治为作物带来增产的同时,也给蜘蛛等害虫天敌造成严重的危害。近年来,不少研究报道了低剂量农药在杀伤害虫的同时,还能对天敌的捕食作用起到一定的促进作用。因此揭示低剂量杀虫剂对天敌的作用机理,对提高天敌的捕食能力,发掘天敌的控虫潜能,协调生防和化防具有重要意义。关于低剂量杀虫剂对天敌的影响,国内外学者从天敌的捕食功能、捕食行为和天敌神经系统兴奋性方面进行了深入的研究。毒物兴奋效应最早在 20 世纪 40 年代, Southam 和 Ehrlich 在研究红雪松提取物对真菌的作用时观察到一种双相的剂量-效应曲线,正式命名为毒物兴奋效应。1967 年, Gabliks 等把这种现象延伸到农药,如乐果、马拉硫磷和内吸磷等<sup>[1]</sup>。Lund 研究了低剂量杀虫剂对昆虫神经系统的影响,揭示了低剂量杀虫剂能激活昆虫细胞膜上潜在的离子通道

蛋白的活性<sup>[2]</sup>。Soderlund 和 Oppenoorth 等研究揭示了低剂量杀虫剂能加强昆虫神经系统的兴奋性<sup>[3-4]</sup>。国内关于毒物兴奋效应的研究较多,但关于天敌生物方面研究较少。张怡等研究了吡虫啉直接处理十三星瓢虫幼虫不同时间后,十三星瓢虫幼虫在高剂量作用下的捕食量小于低剂量作用下的捕食量,且日捕食量随时间延长而减少<sup>[5]</sup>。胡聪等研究了低剂量吡虫啉作用下,多异瓢虫捕食蚜虫量增加但其繁殖力有一定降低<sup>[6]</sup>。王智等研究了低剂量农药对稻田蜘蛛相对活力、拟环纹豹蛛对褐飞虱的功能反应、搜寻行为以及对稻田蜘蛛空间生态位影响<sup>[7-8]</sup>。从捕食行为和生理代谢酶活性变化角度来研究低剂量杀虫剂促进蜘蛛对害虫的捕食作用的机理,目前国内外尚未见报道。本研究采用药膜法,研究低剂量吡虫啉对星豹蛛捕食甘蓝蚜的捕食行为和体内代谢酶(解毒酶、保护酶和消化酶)活性的影响,从而探讨低剂量杀虫剂促进蜘蛛捕食效应的机理。



## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点

于 2012 年 5—10 月,在山西农业大学农业昆虫与害虫防治省级重点实验室进行。

### 1.2 试验材料

供试蜘蛛为星豹蛛 (*Pardosa astrigera* L. Koch) 和个体大小一致的甘蓝蚜 (*Brevicoryne brassicae* Linn.) 均采自山西农业大学试验田,带回室内饲养。饲养条件为:温度 ( $25 \pm 1$ ) °C,光照 16h/d,相对湿度 70%—80%。

供试农药为 94.76% 吡虫啉原药,青岛凯源祥化工有限公司提供。

供试试剂:乙酰胆碱酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶试剂盒,南京建成生物工程研究所生产;其他试剂均为国产分析纯。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 敏感性测定

星豹蛛的敏感性测定采用药膜法,根据厂商推荐浓度预试验找出药剂的作用范围,后进行测定。以杀死星豹蛛近 50% 个体浓度为标准,上下各配 2—3 个浓度。将供试药液倒入内径 1.5cm,长 8cm 试管,转动管壁形成药膜,后到掉余液让其自然凉干成药膜。引入虫体大小一致的星豹蛛,放入棉球保湿,用纱布包扎试管口,每管放置 1 头蜘蛛。分别于处理后 12、24h 后观察死亡情况;以蛛体不动作为死亡的判别标准,以丙酮处理作为对照。每处理重复 30 次。

#### 1.2.2 捕食作用的测定

根据敏感性测定结果,用分析纯丙酮将吡虫啉原药配制成 1、3、5、7、10 mg/L 5 个梯度浓度的药液备用(防治蔬菜蚜虫厂商推荐用量为 10 mg/L)。采用药膜法(方法同 2.2.1),在 5 个浓度的吡虫啉供试药液处理过的试管中放入 1 头大小相近已饥饿 24h 的星豹蛛成蛛,24 h 后接入甘蓝蚜。对每个浓度共设 5 个密度处理,即在每个试管中分别放入 10、20、30、40、50 头甘蓝蚜成虫。每个密度处理重复 10 次,清水作对照。24h 后检查各处理被食甘蓝蚜数,统计捕食量,并进行功能反应拟合。

#### 1.2.3 捕食功能反应参数的计算

##### (1) 功能反应

用 Holling II 型圆盘方程拟合<sup>[9-10]</sup>:

$$N_a = aTN_i / (1 + aT_h N_i)$$

式中, $N_a$  为捕食量, $a$  为瞬时攻击率, $T$  为捕食者用于寻找猎物的时间, $T_h$  为捕食者处理猎物的时间, $N_i$  为猎物密度。

将 Holling II 方程线性回归后用最小二乘法求解  $a$  和  $T_h$  的值<sup>[11]</sup>,拟合效果用  $F$  和  $x^2$  检验。

##### 2) 寻找效应估计<sup>[12]</sup>

$$S = a / (1 + aT_h N_i)$$

式中, $S$  为寻找效应, $a$  为瞬时攻击率, $T_h$  为天敌处理猎物的时间, $N_i$  为猎物密度。

#### 1.2.4 代谢酶系活性测定

(1) 酶液制备 采用药膜法(方法同 2.2.1),在 1、3、5、7、10 mg/L 5 个浓度梯度吡虫啉药液处理过的试管中放入饥饿 48h 的星豹蛛成蛛,共设 6、12、24、36、48、60、72 h 7 个处理时间,每个处理时间分别取 3 头星豹蛛。按每头加入 1mL 提取液冰浴匀浆,于高速冷冻离心机以 10000 r/min,4 °C 下离心 15min,取上清液作为酶源。每个处理时间重复 3 次,清水作对照。

(2) 乙酰胆碱酯酶 (AChE) 活性测定<sup>[13]</sup> 乙酰胆碱酯酶水解乙酰胆碱生成胆碱及乙酸,胆碱可以与巯基显色剂 (DTNB) 反应生成 TNB 黄色化合物,反应条件为 37 °C 水浴中反应 15 min,0.1mmol/L 的毒扁豆碱终止反应,用酶标仪测定 412nm 处 OD 值。

(3) 谷胱甘肽-S-转移酶 (GSTs) 活性测定<sup>[14]</sup> 以谷胱甘肽作底物,经 GSTs 作用,与还原型谷胱甘肽 (GSH) 反应可生成黄色硫醇尿酸衍生物,其活性以催化 GSH 氧化的反应速度及单位时间内 GSH 减少的量来表示,37 °C 水浴中反应 10min,用酶标仪测定 340nm 处 OD 值。

(4) 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定 以氯化硝基四氮唑蓝为底物,反应在 25 °C、4000lx 光照条件下 15min,用酶标仪测定 560nm 处 OD 值。以每毫克蛋白在 1mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个 SOD 活性单位 (U)。

(5) 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定 过氧化氢酶分解  $H_2O_2$  的反应可通过加入钼酸铵迅速中止,剩余的  $H_2O_2$  与钼酸铵作用产生一种淡黄色的络合物,在 405nm 处测定其生成量,以每毫克蛋白每秒分解 1  $\mu$ mol  $H_2O_2$  的量为一个活性单位 (U),计算 CAT 的

活性。

具体操作步骤:按南京建成生物工程研究所生产的 AChE、GSHs、SOD 和 CAT 试剂盒说明书进行。

1.2.5 星豹蛛中肠蛋白消化酶活性测定

(1)中肠酶液制备 取 10 头饥饿 48h 的星豹蛛成蛛,在体视显微镜下于冰块上解剖,取其中肠,加 2mL 的 1mmol/L 的磷酸缓冲液 (pH = 8.0) 冰浴研磨,匀浆在 4℃ 下 4000 r/min 离心 15min,取上清液作为酶源。

(2)中肠蛋白消化酶活性测定 取待测酶液 0.2、0.5mL 底物(酪蛋白,0.5%)及 0.015μL 的 1、3、5、7、10 mg/L 5 个浓度梯度吡虫啉药液混匀,37℃ 水浴反应 15 min,加入 1.3mL 20% 三氯乙酸(TCA)终止反应,静置 2 min 后于 4℃,4000 r/min 离心 10 min,取上清液 0.8mL 加 1.6mL Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 0.2mL Follin-酚混匀,在 37℃ 水浴中显色 15min。用酶标仪测定 680nm 处 OD 值,重复 3 次。在做好的标准曲线上查出对应的酪氨酸含量,确定酶活性大小。

1.2.6 蛋白含量测定

参照 Bradford 法<sup>[15]</sup>,采用考马斯亮蓝 G<sub>250</sub> 测定各酶液中可溶性蛋白含量。以牛血清蛋白制作标准曲线  $y = 0.0056x + 0.0412$  ( $r = 0.9889, P < 0.01$ ),式中  $x$  为蛋白含量(μg), $y$  为 OD 值<sup>[15]</sup>。

1.3 统计分析

采用相关系数  $r$  和  $X^2$  检验测定吡虫啉不同处理浓度与星豹蛛捕食量间相关性;采用双因素方差分析(two-way ANOVA) 比较农药不同处理浓度和处理时间对星豹蛛酶活力的影响,数据分析用 DPS9.50 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 吡虫啉对星豹蛛敏感性测定

吡虫啉对星豹蛛和甘蓝蚜敏感性测定结果见表 1,星豹蛛对吡虫啉的敏感性,LC<sub>50</sub> 为 10.0142mg/L。

表 1 吡虫啉对星豹蛛敏感性测定结果

| Table 1 The sensitivity of <i>Pardosa astrigera</i> to imidacloprid |                                   |                              |                               |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                                                                     | 回归方程<br>LD-P-line( $y = ax + b$ ) | LC <sub>50</sub> /<br>(mg/L) | 置信区间 95%<br>95%F.L/<br>(mg/L) |
| 星豹蛛<br><i>Pardosa astrigera</i>                                     | $y = 5.4344 + 2.6419x$            | 10.1042                      | 8.986—11.074                  |

3.2 低剂量吡虫啉作用下星豹蛛的捕食功能反应

低剂量吡虫啉农药作用下星豹蛛对甘蓝蚜的捕食功能反应见图 1。

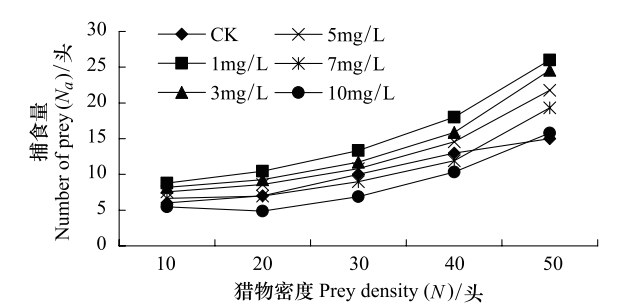


图 1 低剂量浓度吡虫啉作用下星豹蛛的捕食功能反应  
Fig.1 Functional responses of *Pardosa astrigera* predation under low concentrations of imidacloprid

由图 1 可得,不同浓度梯度的低剂量吡虫啉作用下星豹蛛的捕食功能反应符合 Holling II 反应模型。因此,可用圆盘方程  $N_a = aN / (1 + aT_h N)$  来描述,功能反应模型参数见表 2。

表 2 低剂量吡虫啉作用下星豹蛛功能反应模型参数及数学模型

| Table 2 Functional response parameters and mathematical models of <i>Pardosa astrigera</i> to pray aphids treated with low-dose of imidacloprid |                                      |                         |                                                               |          |                                                                        |       |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------|-------|--|
| 吡虫啉浓度<br>Imidacloprid<br>concentrations/<br>(mg/L)                                                                                              | 功能反应线型方程<br>$1/N_a = 1/(aN_0) + T_h$ | 相关系数 $r$<br>Correlation | 模拟方程<br>Simulation equations<br>$N_a = aN_0 / (1 + aT_h N_0)$ | $T_h(d)$ | 日最大捕食量<br>$N_{amax}$ /头<br>Maximum daily<br>number of<br>preyed aphids | $a$   |  |
| CK                                                                                                                                              | $1.221/N_0 + 0.055$                  | 0.971                   | $N_a = 0.819N_0 / (1 + 0.045N_0)$                             | 0.055    | 18.232                                                                 | 0.819 |  |
| 1                                                                                                                                               | $0.840/N_0 + 0.045$                  | 0.973                   | $N_a = 1.191N_0 / (1 + 0.045N_0)$                             | 0.037    | 26.753                                                                 | 1.191 |  |
| 3                                                                                                                                               | $0.881/N_0 + 0.049$                  | 0.970                   | $N_a = 1.134N_0 / (1 + 0.049N_0)$                             | 0.044    | 22.960                                                                 | 1.134 |  |
| 5                                                                                                                                               | $0.936/N_0 + 0.052$                  | 0.969                   | $N_a = 1.068N_0 / (1 + 0.052N_0)$                             | 0.048    | 20.653                                                                 | 1.068 |  |
| 7                                                                                                                                               | $1.030/N_0 + 0.059$                  | 0.965                   | $N_a = 0.971N_0 / (1 + 0.059N_0)$                             | 0.061    | 16.345                                                                 | 0.971 |  |
| 10                                                                                                                                              | $1.978/N_0 + 0.018$                  | 0.971                   | $N_a = 0.036N_0 / (1 + 0.018N_0)$                             | 0.036    | 27.930                                                                 | 0.036 |  |

由表 2 可知,对照组和处理组间  $1/N$  与  $1/N_a$  之间的相关系数  $r$  分别为 0.971、0.973、0.970、0.969、0.965、0.971,当  $d_f=5$  时  $r_{0.05}=0.898$ ,  $r>r_{0.05}$ ,表明猎物密度与捕食量呈显著相关。随着农药浓度梯度的增加,处理组对猎物的处理时间  $T_h$  为对照组的 0.673、0.800、0.873、1.109、1.532 倍;瞬时攻击率  $a$  为对照组的 1.454、1.385、1.304、1.186 和 0.044 倍;最大捕食量为对照组的 1.467、1.259、1.133、0.897 和 1.532 倍。为检验模型的精度,将  $N=10、20、30、40、50$  及圆盘方程各参数代入  $N_a=aN/(1+aT_h N)$  得理论捕食量,进行  $X^2$  检验,对照组和处理组  $X^2$  值分别为 1.090、3.783、4.916、3.852、4.809、3.445,当  $d_f=5$  时  $X^2_{0.05}=11.07$ ,  $X^2<X^2_{0.05}$ ,模型的理论值与实测值显著吻合。

### 2.3 低剂量吡虫啉对星豹蛛寻找效应的影响

低剂量吡虫啉处理星豹蛛对甘蓝蚜的寻找效应结果见图 2。

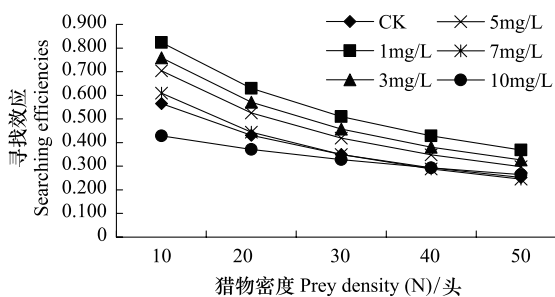


图 2 低剂量吡虫啉作用下星豹蛛寻找效应与猎物密度的关系  
Fig.2 Relationship between the searching rate and prey density of *Pardosa astrigera* treated with low concentrations of imidacloprid

由图 2 可知,低剂量吡虫啉作用下,星豹蛛对甘蓝蚜的寻找效应随着猎物密度的增大而逐渐降低。在 1、3、5、7mg/L 4 个浓度梯度的吡虫啉药液处理后,星豹蛛对猎物的寻找效应明显高于对照;而在 10 mg/L 较高吡虫啉浓度作用下,星豹蛛对猎物的寻找效应略低于对照。

### 2.4 低剂量吡虫啉对星豹蛛代谢解毒酶活性的影响

不同浓度低剂量吡虫啉处理星豹蛛成蛛后,代谢解毒酶乙酰胆碱酯酶(AChE)、谷胱甘肽-S-转移酶(GSTs)活性的变化结果见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可得,低剂量吡虫啉处理星豹蛛后体内的 AChE 和 GSTs 的活性在一定的处理时间和处理浓度范围内明显受到抑制,与对照组相比存在

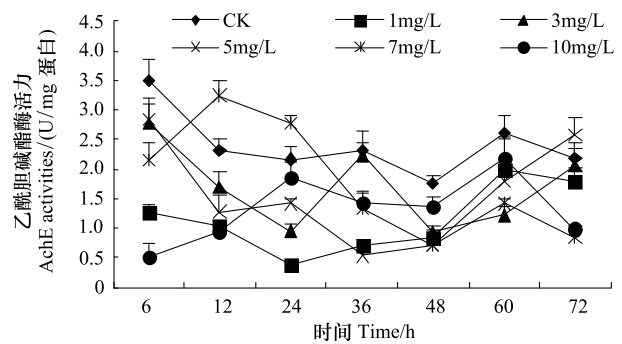


图 3 低剂量吡虫啉对星豹蛛乙酰胆碱酯酶活性的影响  
Fig.3 Effects of low-dose of imidacloprid on activities of AChE of *Pardosa astrigera*

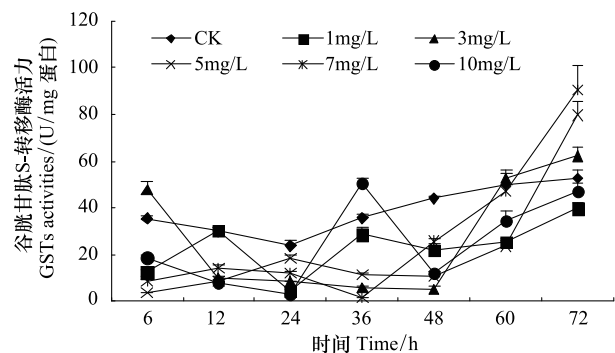


图 4 低剂量吡虫啉对星豹蛛成蛛体内谷胱甘肽 S-转移酶活性的影响  
Fig.4 Effects of low-dose of imidacloprid on activities of GSTs of *Pardosa astrigera*

显著差异( $P<0.05$ )。处理组 AChE 酶活性最高点出现在 7mg/L 浓度作用下 36h,其活性为  $(3.330 \pm 0.31)$  U/mg 蛋白,为对照组的 0.770 倍;最低点出现在 1mg/L 浓度作用下 24h,其活性为  $(0.375 \pm 0.04)$  U/mg 蛋白,仅为对照组的 0.173 倍。

GSTs 酶活性最高点出现在 7mg/L 浓度作用下 72h,其活性为  $(90.424 \pm 5.32)$  U/mg 蛋白,为对照组的 1.716 倍;最低点出现在 7mg/L 浓度作用下 36h,其活性为  $(1.465 \pm 0.00)$  U/mg 蛋白,仅为对照组的 0.095 倍。在处理时间内,处理组谷胱甘肽-S-转移酶活性变化趋势与对照组大致吻合,为逐渐升高的变化趋势。6—48h 酶活力变化较小,48—72h 都有不同程度的上升;在处理时间内酶活性处理组较对照组差异不显著,只有在吡虫啉浓度为 3、5 和 7mg/L 作用下 72h 和 10mg/L 浓度下 36h 高于对照组外,其他浓度和时间内酶活性均低于对照组。

### 2.5 低剂量吡虫啉对星豹蛛保护酶系活性的影响

不同低剂量浓度的吡虫啉处理星豹蛛,超氧化



物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性变化结果见图5、图6。

由图5、图6可得,低剂量吡虫啉处理星豹蛛后SOD和CAT酶活性显著增强,与对照组相比存在显著或极显著差异( $P<0.05$ )。SOD酶活性在24、48h出现两个高峰,最高值出现在1、5mg/L浓度下48h,其活性分别为( $557.760\pm5.78$ )、( $537.300\pm2.79$ ) U/mg蛋白,为对照组的1.909和1.839倍;最低点出现在7mg/L浓度作用下72h,其活性为( $32.738\pm0.52$ ) U/mg蛋白,仅为对照组的0.599倍。

CAT酶活性在36h活性最大,0h到6h,各处理

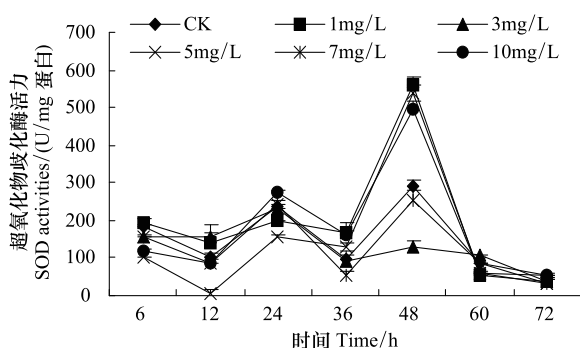


图5 低剂量吡虫啉对星豹蛛超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of low-dose of imidacloprid on activities of SOD of *Pardosa astrigera*

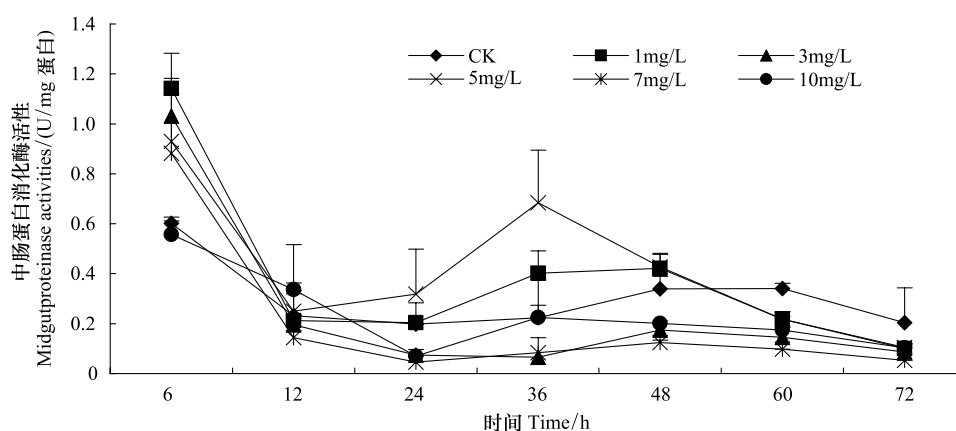


图7 低剂量吡虫啉对星豹蛛中肠蛋白消化酶活性的影响

Fig.7 Effects of low-dose of imidacloprid on activities of midgut proteinase of *Pardosa astrigera*

由图7可得,清水对照组星豹蛛的中肠蛋白消化酶活性变化不大,6h时酶活性最高,24h时最低。以吡虫啉处理后,酶活性最高点出现在1mg/L浓度作用下6h,其活性为( $1.142\pm0.04$ ) U/mg蛋白质;最低点出现在7mg/L浓度作用下72h,其活性为( $0.046\pm0.05$ ) U/mg蛋白质。在吡虫啉浓度梯度为

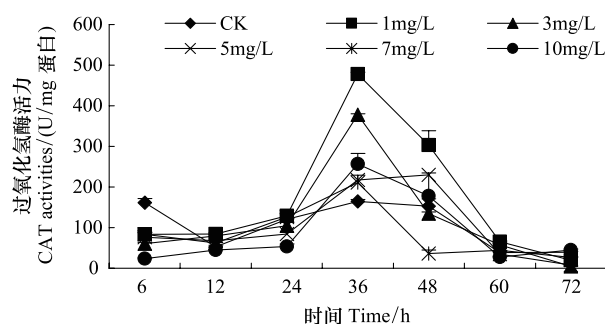


图6 低剂量吡虫啉对星豹蛛过氧化氢酶活性的影响

Fig.6 Effects of low-dose of imidacloprid on activities of CAT of *Pardosa astrigera*

组体内CAT活性均低于对照组,分别为对照组的0.515、0.375、0.473、0.514和0.147倍,说明农药处理后0h到6hCAT活性被抑制。12h到24h,各处理组的CAT活性都明显上升,到36h时,处理组的CAT活性达到最高,分别为对照组的2.901、2.297、1.322、1.282和1.561倍。48h后随着农药作用时间的延长,虫体受伤加重,处理组的CAT活性又开始下降,到72h下降到最低。

## 2.6 低剂量吡虫啉对星豹蛛中肠蛋白消化酶活性的影响

不同低剂量浓度的吡虫啉处理星豹蛛,中肠蛋白消化酶活性变化结果见图7。

1、3、5、7和10mg/L作用下,6h时其中肠蛋白消化酶活性分别为对照组的1.897、1.714、1.544、1.466和0.925倍。说明6h内是中肠蛋白消化酶活性最高时期,也是中肠消化解毒的关键时期。48h后,中肠蛋白消化酶活性呈显著下降趋势,中肠蛋白消化酶活性在农药作用后期明显降低,可能是因为吡虫啉被

消化后引起肠道 pH 发生变化影响蛋白酶的流行性,使蛋白酶活性下降。

### 3 讨论

#### 3.1 低剂量吡虫啉作用下星豹蛛的捕食功能

田间重复大量施药造成害虫抗药性增加,害虫再猖獗,农药残留的同时,还影响到天敌的行为和捕食,减少天敌的繁殖率,抑制天敌生长发育,杀伤猎物减少其捕食源,影响天敌的种群结构<sup>[16-18]</sup>。因此,田间施药种类、施药方式、药剂浓度,如何协调化学防治和生物防治两者间的矛盾,使之在害虫控制中发挥各自优势,已成为害虫综合治理的关键<sup>[19-21]</sup>。李锐等研究了应用微核试验和单细胞凝胶电泳技术检测四种杀虫剂对蜘蛛血细胞 DNA 的损伤程度,结果表明低剂下 DNA 损伤程度大于较高浓度是由于低浓度造成细胞 DNA 断裂,较高浓度下细胞 DNA 发生交联,部分受损细胞得到修复<sup>[22-23]</sup>。本研究进一步验证了 Southam 和 Ehrlich 的“毒物兴奋效应”,并发展了 Hueppe 和 Smyth 的“毒物低剂量效应学说”的观点,即在本项研究中,吡虫啉对星豹蛛敏感性测定结果  $LC_{50}$  为 10.0142mg/L 和在吡虫啉防治甘蓝蚜厂商推荐剂量为 10mg/L 前提下,当浓度为 1、3、5mg/L 的低剂量浓度是可以提高星豹蛛控虫力的有效浓度范围。

捕食功能结果表明,低剂量吡虫啉处理后星豹蛛的捕食功能可以用 Holling II 圆盘方程进行模拟,但模型参数均有改变;在不同浓度梯度作用下,随着吡虫啉浓度的增加,星豹蛛对甘蓝蚜的处理时间  $Th$  逐渐变短,同时对甘蓝蚜的瞬间攻击率  $a$  均有所增加。星豹蛛对甘蓝蚜的寻找效应随着猎物密度的增大而下降,随着农药梯度的增大而逐渐下降,最后接近对照组。说明低剂量农药处理星豹蛛后缩短了其对猎物的处理时间,提高了其瞬间攻击率,从而增加了其日捕食数量,提高了其对猎物的控制作用。由此可得,适当的低剂量吡虫啉处理和一定的处理时间可促进星豹蛛对甘蓝蚜的控制作用。而关于低剂量作用下蜘蛛的长期的控害能力、体内本酶系活性长期的动态监测有待于作进一步深入研究。

#### 3.2 低剂量吡虫啉对星豹蛛体内酶活性的影响

在杀虫剂中毒和解毒过程中,无疑解毒酶、保护酶和消化酶起着极为重要的作用,已经在不少昆虫

种类中发现,生物体对外源有毒物质发展了解毒、避毒和贮毒等适应方式,从而影响到生物体内解毒酶系在质或量上发生变化,从而改变其解毒能力,提高了对机体保护能力,对药剂的敏感性也发生变化<sup>[24-25]</sup>。本研究结果表明通过吡虫啉处理星豹蛛后,体内解毒酶和消化酶活性都发生了变化,引发蜘蛛体内一系列生理生化反应,从而提高机体对逆境的适应性。

消化酶主要是消化系统内分泌的营消化作用的酶类,在消化酶中,又依消化对象的不同而大致可划分为蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶和几丁质酶等多种。蛋白消化酶是一种存在于蜘蛛中肠细胞内,对底物蛋白质专一性很强的消化水解酶,其活性的强弱直接决定蜘蛛对害虫的捕食作用大小<sup>[26]</sup>。因此,深入研究低剂量的化学农药对蜘蛛中肠蛋白消化酶活性,为杀虫剂的合理使用、充分发掘蜘蛛等天敌的控虫潜能及天敌兴奋剂的开发研制提供理论依据。低剂量的吡虫啉处理星豹蛛中肠后,蛋白消化酶活性发生了变化。在 6h 和 36h 出现两个酶活性高峰期为星豹蛛消化解毒的关键时期。对合适的低剂量吡虫啉能激活星豹蛛中肠蛋白消化酶活性,从而增强蜘蛛捕食能力,提高对害虫的控制作用。其结果与王智等研究了甲胺磷对拟环纹豹蛛中肠蛋白消化酶活性影响的结果相一致。

#### 3.3 低剂量农药增强蜘蛛捕食能力的原因初探

低剂量农药增强星豹蛛的捕食能力的原因可能是:(1)在捕食行为上,增强了瞬间攻击率,缩短了其对猎物的处理时间,从而增加了其日捕食数量。(2)在代谢酶生理活性上,解毒酶受到一定程度的抑制,低剂量吡虫啉导致 AChE 敏感性降低,对神经递质乙酰胆碱的分解作用下降,使蜘蛛的兴奋性增加;同时低剂量农药导致蜘蛛的主要保护酶活性增加,例如 GSTs、SOD、CAT、多功能氧化酶系(MFOs)和酯酶等,使蜘蛛的新陈代谢加速,从而刺激捕食。(3)在消化酶生理活性上,低剂量杀虫剂在药后 6h 激活了中肠蛋白消化酶的活性,提高了对猎物的消化吸收功能。总之,在低剂量杀虫剂作用下,蜘蛛通过外在的捕食行为和内部一系列酶系生理生化反应的综合作用,增加了捕食量,提高了对猎物的捕食能力。

本研究结果在室内进行,与自然环境条件如:温度、湿度、光照、猎物密度、猎物分布、天敌密度以及

天敌之间的相互作用等存在一定差异,但结论对合理使用杀虫剂,协调生防与化防的关系具有重要意义。而有关杀虫剂促进蜘蛛捕食的分子调控机理有待于进一步深入研究。

#### 4 结论

**4.1** 本研究进一步验证了 Southam 和 Ehrlich 的“毒物兴奋效应”,并发展了 Hueppe 和 Smyth 的“毒物低剂量效应学说”的观点。吡虫啉对星豹蛛的  $LC_{50}$  为 10.1042 mg/L 与防治菜蚜厂商推荐剂量为 10mg/L 浓度相当,当浓度为 1、3、5mg/L 的吡虫啉溶液是提高其控虫力的有效浓度范围。

**4.2** 低剂量农药处理蜘蛛后缩短了其对猎物的处理时间,提高了其瞬间攻击率,从而增加了其日平均捕食量和最大捕食量,从捕食行为上提高了对猎物的控制作用。

**4.3** 在一定低剂量农药浓度作用下和一定处理时间内,蜘蛛体内的代谢解毒酶活性受到一定程度的抑制,激活了代谢保护酶和中肠蛋白消化酶活性,使蜘蛛的新陈代谢加速,从而刺激捕食。

由此可得,在一定处理时间内,适当的低剂量农药可促进蜘蛛对害虫的控制作用。

#### References:

- [ 1 ] Wayland J, Hayes Jr.// Feng Z Y Translated. Toxicology of pesticides. Beijing Chemical Industry Press, 57-134.
- [ 2 ] Lund A E. Insecticides; effects on the nervous system//Kerhut pharmacology. Oxford: Pergamon Press, 1985, 12(7): 9-56.
- [ 3 ] Soderlund D M. Molecular neurology; implications for insecticide action and resistance. Pesticide Science, 1989, 26(4): 359-374.
- [ 4 ] Oppenoorth F J. Biochemistry and genetics of insecticide resistance//Kerhut GA, Gileert L I, eds. Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology. Oxford: Pergamon Press, 1985, 12(9): 731-774.
- [ 5 ] Zhang Y, Sun H X. Time-concentration-mortality modeling for responses of *Adonia variegata* (Goeze) larvae and *Aphis* sp. To imidacloprid. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(6): 236-239.
- [ 6 ] Hu C, Li B B, He D H, Zhao L, Ma S Y. Effect of low-dose treatments of imidacloprid on predatory response and reproduction in *Hippodamia variegata* (Goeze). Journal of Agricultural Sciences, 2008, 29(3): 23-25.
- [ 7 ] Wang Z, Yan H M, Wang H Q. The influence of low-dose pesticides on the insect-control power of paddyfield spiders. Acat Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 346-350.
- [ 8 ] Wang Z, Song D X, Zhu M S. Functional response and searching behavior to the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* by the wolf spider, *Pardosa pseudoannulata* under low-dose chemical pesticides. Acat Entomologica Sinica, 2006, 49(2): 295-301.
- [ 9 ] Holling C S. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. Canadian Entomologist, 1959, 91: 385-398.
- [ 10 ] Holling C S. The component of predation as revealed by a study of small mammal predation of the European pine sawfly. Canadian Entomologist, 1959, 91: 293-320.
- [ 11 ] Ding Y Q. Mathematical ecology of insect population: principles and applications. Beijing: Science Press, 1980: 256-626.
- [ 12 ] Ma X, Wei D Y, Zhao Q. The predational function of *Menochilus sexmaculata* (Fabricius) to *Toxopteracitricida*. Tillage and Cultivation, 1996, 16(3): 55-57.
- [ 13 ] Liu B, Gao X W, Zheng B Z. Effects of sublethal doses of anticholinesterase agents on toxicity of insecticides and their induction to acetylcholinesterase (AChE) activity in *Helicoverpa armigera*. Acat Entomologica Sinica, 2003, 46(6): 691-696.
- [ 14 ] Gao X W, Dong X L, Zheng B Z, Chen Q. Glutathione S-transferase (GSTS) of *Helicoverpa armigera*: induction of insecticides and plant allelochemicals and metabolism of insecticides. Acat Entomologica Sinica, 1997, 40(2): 122-125.
- [ 15 ] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 1976, 7(2): 248-254.
- [ 16 ] Li J Q, Zhao Z M, Wu S Y, Luo Y J, Ming K. Control function of predators in co-existent system of three spiders and two rice insect pests. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(2): 146-151.
- [ 17 ] Gu D J, Waage J K, Wright D J. The influence of low-dose pesticides on *Plutella xylostella* (L.) and their natural enemies *Diadegma eucerocephala*. Journal of Plant Protection, 1994, 21(3): 265-268.
- [ 18 ] Yu Y S, Shen G Q, Lu Y T, Cheng G H. Advances in the hormesis of pesticides to the natural enemies. Plant Protection, 2009, 35(5): 10-13.
- [ 19 ] Guedes N M P, Tolledo J, Corrêa A S, Guedes R N C. Insecticide-induced hormesis in an insecticide-resistant strain of the maize weevil, *Sitophilus zeamais*. Journal of Applied Entomology, 2010, 134(2): 142-148.
- [ 20 ] Guedes R N C, Magalhães L C, Cosme L V. Stimulatory sublethal response of a generalist predator to permethrin: Hormesis, hormoligosis, or homeostatic regulation?. Journal of Economic Entomology, 2009, 102(1): 170-176.
- [ 21 ] Murado M A, Vázquez J A. The notion of hormesis and the dose-response theory: a unified approach. Journal of Theoretical Biology, 2007, 244: 489-499.
- [ 22 ] Li R, Li S C, Liu J. Studies of hemocytes DNA damage by two

- pesticides acetamiprid and chlorpyrifosin predaceous spiders of *Pardosa astrigera* L. Koch. *Acat Ecologica Sinica*, 2011, 31 (11): 3156-3162.
- [23] Li R, Li S C, Liu J, Yang H Q. Using micronuclei test and single cell gel electrophoresis assay to evaluate genotoxicity of pesticides to *Pardosa astrigera* L. Koch. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 58-62.
- [24] El-Ghar GES, El-Sayed AM. Long-term effects of insecticides on *Diaeretiella rapae* (M'Intosh), a parasite of the cabbage aphid. *Pesticide Science*, 1992, 36: 109-114.
- [25] Gang W, Tadashi Miyata. Susceptibilities to methamidophos and enzymatic characteristics in 18 species of pest insects and their natural enemies in crucifer vegetable crops. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2005, 82(1): 79-93.
- [26] Wang Z, Song D X, Fu X Q, Li Y L. Effect of methamidophos on midgut proteinase activity in the wolf spider, *Pardosa pseudoannulata* (Araneae: Lycosidae) assayed with piezoelectric bulk acoustic wave impedance analysis method. *Acat Entomologica Sinica*, 2006, 49(4): 700-704.
- [8] 王智, 宋大祥, 朱明生. 低剂量农药作用下拟环纹豹蛛对褐飞虱的功能反应及搜寻行为. *昆虫学报*, 2006, 49(2): 295-301.
- [11] 丁岩钦. 昆虫种群数学生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 1980: 256-626.
- [12] 马骁, 韦党扬, 赵琦. 六斑月瓢虫对桔蚜捕食作用的研究. *耕作与栽培*, 1996, 16(3): 55-57.
- [13] 刘波, 高希武, 郑炳宗. 抗胆碱酯酶剂亚致死剂量对棉铃虫毒力的影响及对乙酰胆碱酯酶的诱导作用. *昆虫学报*, 2003, 46(6): 691-696.
- [14] 高希武, 董向丽, 郑炳宗, 陈青. 棉铃虫的谷胱甘肽 S 转移酶 (GST): 杀虫剂和植物次生性物质的诱导与 GST 对杀虫药剂的代谢. *昆虫学报*, 1997, 40(2): 122-125.
- [16] 李剑泉, 赵志模, 吴仕源, 罗雁婕, 明珂. 多物种共存系统中蜘蛛对稻虫的控制作用. *中国农业科学*, 2002, 35(2): 146-151.
- [17] 古德就, Waage J K, Wright D J. 农药亚致死剂量对小菜蛾及其天敌优姬蜂的影响. *植物保护学报*, 1994, 21(3): 265-268.
- [18] 余月书, 沈国清, 陆贻通, 程国华. 农药对害虫天敌的 Hormesis 效应研究进展. *植物保护*, 2009, 35(5): 10-13.
- [22] 李锐, 李生才, 刘佳. 杀虫剂啉虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 损伤研究. *生态学报*, 2011, 31(11): 3156-3162.
- [23] 李锐, 李生才, 刘佳, 杨怀卿. 应用微核试验和单细胞凝胶电泳技术检测农药对蜘蛛的遗传毒性. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 58-62.
- [26] 王智, 宋大祥, 付秀芹, 李云龙. 甲胺磷对拟环纹豹蛛中肠蛋白消化酶活性影响的压电传感监测. *昆虫学报*, 2006, 49(4): 700-704.

#### 参考文献:

- [5] 张怡, 孙海霞. 吡虫啉对小十三星瓢虫幼虫-枸杞蚜虫的时间-剂量-死亡率模拟分析. *西北农业学报*, 2006, 15(6): 236-239.
- [6] 胡聪, 李蓓蓓, 贺达汉, 赵丽, 马世谕. 低剂量吡虫啉对多异瓢虫捕食蚜虫及繁殖的影响. *农业科学研究*, 2008, 29(3): 23-25.
- [7] 王智, 颜亨梅, 王洪全. 低剂量农药对稻田蜘蛛控虫力的影响. *生态学报*, 2002, 22(3): 346-350.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ..... ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies .....  
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants .....  
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem ..... QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants .....  
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

### Autecology & Fundamentals

- Responses of CH<sub>4</sub> uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China .....  
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern  
marginal zones of the Tarim Basin, China ..... GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic  
productivity classification ..... ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*  
plantations ..... YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids .....  
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O<sub>3</sub> concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation  
of winter wheat ..... SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat .....  
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation .....  
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice ..... LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation .....  
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea .....  
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes  
in Poyang Lake ..... YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration .....  
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms ..... LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and  
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera) .....  
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

**Population, Community and Ecosystem**

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake ..... LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province ..... LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland ..... LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ..... ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ..... ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China ..... YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise ..... LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China ..... DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil ..... HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ..... ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region ..... SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region ..... LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China ..... XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

**Resource and Industrial Ecology**

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS ..... LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ..... ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

# 《生态学报》2014 年征订启事

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

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                       |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                      |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                                               |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                   |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                   |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元