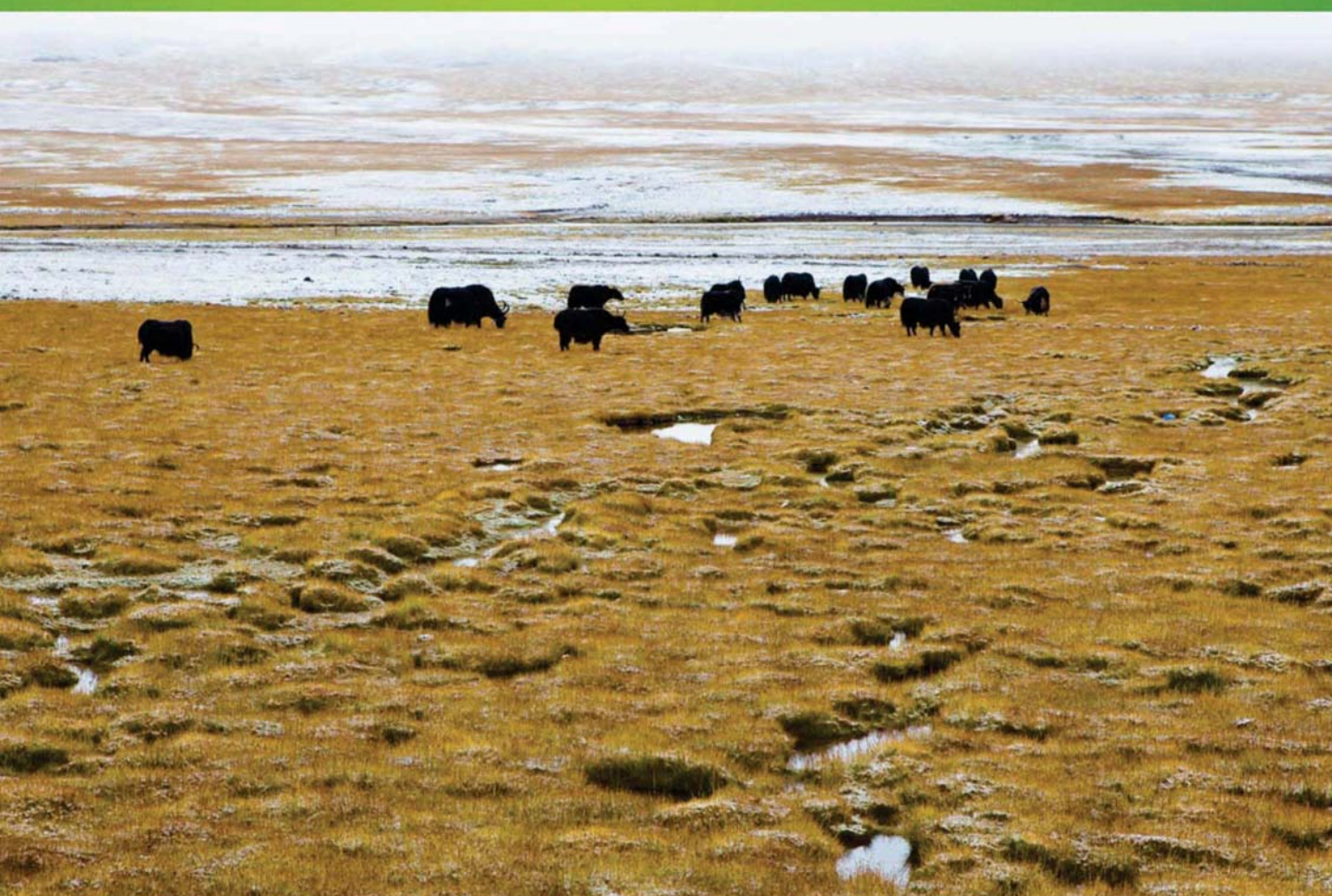


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **2013**

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 33 卷 第 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N₂O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 张 锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例..... 敖长林,陈瑾婷,焦 扬,等 (5109)

研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜 春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆 璞,张 伟,华 彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说: 高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4200m,是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地,也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来,国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示,近年来,三江源湖泊湿地面积逐步扩大,植被覆盖度得到提高,三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

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/stxb201305020890

赵志国, 荣二花, 赵志红, 孔维娜, 张金桐, 马瑞燕. 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型. 生态学报, 2013, 33(16): 5008-5016.
Zhao Z G, Rong E H, Zhao Z H, Kong W N, Zhang J T, Ma R Y. Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5008-5016.

性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及 经济阈值数学模型

赵志国¹, 荣二花¹, 赵志红², 孔维娜³, 张金桐¹, 马瑞燕^{1,*}

(1. 山西农业大学农学院, 太谷 030801; 2. 北京科技大学数理学院, 北京 100083;

3. 山西农业科学院植物保护研究所, 太原 030031)

摘要: 为更准确地对性信息素监测下田间害虫的发生量进行测报并指导有效防治, 建立了基于性信息素诱捕下种群的 Logistic 增长模型, 并与通常诱捕模式进行了比较分析。在性信息素诱捕环境下利用种群增长平衡点获得诱捕强度 (E) 与害虫的自然增长率 (r) 的数学关系, 建立了诱捕量与田间害虫发生虫量的数学模型, 明确了性信息素诱捕与害虫自然增长平衡时的各变量间的关系, 同时根据害虫发生规律研究了性信息素诱捕时的防治害虫的经济阈值 (E_s) 模型。以性信息素诱捕梨小食心虫为实例, 通过田间调查梨小食心虫成虫的发生, 拟合 Logistic 模型并测定 3 种性信息素诱捕强度下梨小食心虫的自然增长率, 据模型求解不同性信息素诱捕下的诱捕强度 (E), 确定了防控梨小食心虫的经济阈值 (E_s), 明确达到经济阈值时的持续诱捕数量。本模型为有效测报和诱捕防治害虫提供了基础理论与依据。

关键词: 性信息素; 诱捕强度; 经济阈值; Logistic; 数学模型

Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap

ZHAO Zhiguo¹, RONG Erhua¹, ZHAO Zhihong², KONG Weina³, ZHANG Jintong¹, MA Ruiyan^{1,*}

1 College of Agriculture, ShanXi Agricultural University, Taigu, 030801, China

2 College of Mathematics and Physics, University of Science & Technology Beijing, Beijing, 100083, China

3 Institute of Plant Protection, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan 030031, China

Abstract: The research on proper, accurate observation and monitoring pest population is of great significance in forecast and control pests based on sex pheromone trap. Construction of mathematical models by practical observation, measurement in fields and calculation is able to play an important role in the aspect concerned by many. Given this situation, in this study, occurrence and real-time monitoring of population dynamics of pests have been accomplished by application of production from sex pheromone of insects. According to the characteristics of sex pheromone trap of male insects, combined with the Logistic differential equation and based on the balanced point between sex pheromone trap and increase of population, relationships among several values were analyzed and compared with those under other common trappings. The values were as following: trapping intensity (E) at the time when a population was increasing under the condition of sex pheromone trap, the natural increasing rate of pests (r), the trapping amount ($x(t)$), the pest amount in fields (N). The maximal consistent trapping amount when the balanced point was reached was articulated [$h_{\max}^* = \frac{rN}{4}(1 - E^*)$], and at

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201103024); 山西农业大学创新基金(2010007)

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maruiyan2004@163.com

this moment, the relationship between the best trapping intensity (E^*) and the natural increasing rate of pest (r) were in accord with the formula of $E^* = \frac{r}{1+r}$. At the same time, in terms of the characteristics of harms of pests, on the foundation of analysis of the substantial field pest amount coefficient $\alpha = S_E \bar{F} \bar{R}$ (S_E meant the survival rate of larvae, F stood for the maximal reproductive vitality of each female pest, \bar{R} was the ratio between the maximal egg amount and the substantial egg amount), the expense of forecast and control utilizing sex pheromone trap and increasing output were analyzed. When $\lambda [\lambda = 2r \left(1 - \frac{c}{p\alpha N} \right) + 1]$ was assumed as the regulating coefficient (p meant the economic damage caused by larvae, its unit should be RMB Yuan), the following values were definite, the trapping intensity at the time of the highest profit was $E_R = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda}}{\lambda}$; the consistent trapping amount was $h_R = \frac{E_R N}{r} \left(1 - \frac{\sqrt{\lambda - 1}}{2r} \right)$ the trapping intensity at the time when the economic threshold was reached was $E_s = \frac{\lambda - 1}{\lambda}$ and it should be less than $\frac{2r}{2r+1}$. After illustration and calculation, the necessary condition of existence of the economic threshold was $p > \frac{c}{\alpha N}$, when $\frac{c}{\alpha N} < p < 2 \frac{c}{\alpha N}$, there was the relation ($E_R < E_s$) $E_{s2} < E^*$, that meant E_{s2} was the economic threshold; when $p > 2 \frac{c}{\alpha N}$, there was the relation $E_{s1} > E^*$, that meant E_{s1} was the ecological threshold. Taking the trap of Oriental Fruit Moth by sex pheromone as example, the model was verified. Furthermore, the amounts of adults of Oriental Fruit Moth *Grapholitha molesta* (Busck) in fields were investigated. By fitting Logistic model, the natural increasing rates of Oriental Fruit Month (r) under 3 sex pheromone trap intensities were measured. Subsequently, the trapping intensity (E) was acquired by the model established in this study; also, the largest consistent trapping amount when the value of economic threshold of Oriental Fruit Moth (E_s) was reached, which was determined with the economic threshold model. On the ground of analysis and articulation mentioned above, in this paper, the mathematical model based on sex pheromone trap of insects was established in order to provide measurement of the trapping intensity E in fields and the natural increasing rate of pests r with theoretical guide, in addition, it also could offer theoretical foundation to forecast and control of pests by sex pheromone of insects.

Key Words: insect sex pheromone; trapping intensity; economic threshold; logistic; mathematical model

对害虫的发生发展动态进行预测可通过构建数学模型来实现,模型的优劣能影响害虫测报的精确性^[1]。害虫防治中已使用多种模型,如种群动态常用算法有人工神经网络^[2]、遗传算法、模拟退火^[3]、Levenberg-Marquardt 算法^[4],以及 Logistic 模型。刘树生等研究桃蚜(*Myzus persicae*)在恒温下和变温下的规律发现接近经典的 logistic 曲线^[5],沈佐锐描述菜蚜的种群动态修正了 Logistic 模型^[6],尤民生等在褐飞虱种群动态模拟中使用 Logistic 模型^[7],程述汉等构建了作物害虫化学防治的 Logistic 数学模型,并应用此模型进行了相关的数据拟合,可反应用药后田间虫量的变化^[8]。

通过性信息素诱捕器诱捕量对害虫的发生量进行测报是害虫综合防治的一种重要措施^[9-11]。利用性信息素监测害虫中可以获知害虫的发生动态和诱捕数量,但无法获知田间实际虫量,特别是因此造成的危害无法确定,导致经济阈值也很难确定。本文将模拟性信息素诱捕害虫时田间虫量与诱捕量变化的过程,解析害虫发生时的性信息素诱捕强度、种群自然增长率、害虫发生量等生物学参数并建立数学关系。在相同的诱捕强度且虫量稳定的条件下,比较性信息素诱捕与通常诱捕方式(黑光灯^[12]、糖醋酒诱捕^[13])的不同。研究控制性信息素的诱捕强度使持续诱捕量达到最大的条件,探讨最佳防治害虫效果时诱捕强度、种群增长率,并确定梨小食心虫的经济阈值,以期性信息素防治害虫技术提供理论依据。

1 性信息素诱捕量模型

1.1 性信息素诱捕下 Logistic 种群模型

设 t 时刻田间的成虫虫量为 $x(t)$, 其中雌雄各占一半(不同昆虫要经过田间调查其性比而定), 关于 $x(t)$ 的自然增长和性信息素诱捕量作如下假设:

1) 在无诱捕时, 昆虫种群自然发生遵循 Logistic 模型, $x(t)$ 的增长服从 Logistic 微分方程^[6]。

$$x'(t) = rx \left(1 - \frac{x}{N}\right) \quad (1)$$

式中, $r > 0$ 是种群固有增长率(%), N 是田间容许的最大虫量, x 为田间实际虫量(头), $x'(t)$ 为增长虫量(头)。

2) 当田间虫量不是高密度时, 昆虫性信息素诱捕量 $h(x)$ 与田间雄虫量 $\frac{x(t)}{2}$ 成正比^[14]。

于是单位时间的诱捕量(雌虫)为:

$$h(x) = kx = \frac{Ex}{2} \quad (2)$$

式中, 各变量的含义为: 比例常数 k 表示单位时间诱捕率(%). $k = qE$, 其中 $E(0 < E < 1)$ 表诱捕强度(%), 是可以控制的参数, 譬如用诱捕器田间密度的诱捕效率来度量; q 称性信息诱芯的诱杀系数(%), 表示单个诱芯的诱杀率。令 $q = 1$, 即单个性信息素诱芯可以 100% 诱杀每只成虫。

由此可得当诱捕量 $h(x)$ 的雌虫时, 因雌雄比为 1:1 则相应数量的雌虫便不能繁殖后代, 那么能繁殖后代的虫量为 $x(t) - Ex(t)$, 令

$$f(x) = r(x - Ex) \left(1 - \frac{x}{N}\right) \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 表示利用性信息素诱捕单位时间内增加的虫量, 此时在有性信息素诱捕的情况下, 田间成虫虫量满足方程:

$$x'(t) = F(x) = f(x) - h(x) = r(x - Ex) \left(1 - \frac{x}{N}\right) - \frac{E}{2}x \quad (4)$$

式中, $F(x)$ 是田间诱捕后的单位时间内增加的成虫虫量(头), 从方程(4)可以从诱捕量得知的虫情动态 $x'(t)$ 的变化。那么, 在通常诱捕情况下(非性信息素诱捕, 如黑光灯、糖醋液、食物诱饵等), $h(x)$ 与田间成虫虫量 $x(t)$ 成正比。设诱捕强度为 \tilde{E} , 则单位时间的诱捕量为:

$$g(x) = kx = \tilde{E}x \quad (5)$$

由此可得到在通常诱捕情况下, 田间成虫虫量满足方程:

$$x'(t) = G(x) = rx \left(1 - \frac{x}{N}\right) - \tilde{E}x$$

式中, $G(x)$ 是通常诱捕后的单位时间内增加的成虫虫量(头), 从方程中可以从诱捕量得知的虫情动态 $x'(t)$ 的变化。如果要知道田间的稳定的成虫虫量和保持稳定的条件, 即时间 t 足够长后田间成虫虫量的 $x(t)$ 趋向, 则可以确定最大的持续诱捕量。

1.2 种群 Logistic 模型的平衡点

1.2.1 性信息素诱捕下的平衡点

利用性信息素诱捕和通常诱捕 2 种情况下寻找田间虫量模型的平衡点, 并分析其稳定性, 明确性信息素诱捕的优势。

利用性信息素诱捕情况下:

$$F(x) = r(x - Ex) \left(1 - \frac{x}{N}\right) - \frac{E}{2}x = 0$$

得到 2 个平衡点:

$$x_0 = N \left(1 - \frac{E}{2r(1-E)} \right), x_1 = 0 \quad (6)$$

且
$$F'(x_0) = \frac{E}{2} - r(1-E), F'(x_1) = r(1-E) - \frac{E}{2}$$

式中, $F'(x_0)$ 和 $F'(x_1)$ 为平衡点的田间虫量的增长率(%)。

若

$$E < \frac{2r}{1+2r} (< 1) \quad (7)$$

此时有 $F'(x_0) < 0, F'(x_1) > 0$, 由 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_0$ 可得出 x_0 点稳定, x_1 点不稳定。

1.2.2 通常诱捕下的平衡点

在通常诱捕情况下:

$$G(x) = rx \left(1 - \frac{x}{N} \right) - \tilde{E}x = 0$$

2 个平衡点

$$\tilde{x}_0 = N \left(1 - \frac{\tilde{E}}{r} \right), \tilde{x}_1 = 0$$

且

$$G'(\tilde{x}_0) = \tilde{E} - r, G'(\tilde{x}_1) = r - \tilde{E}$$

若

$$\tilde{E} < r \quad (8)$$

有 $G'(\tilde{x}_0) < 0, G'(\tilde{x}_1) > 0$ 。由 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_0$ 可得出 x_0 点稳定, x_1 点不稳定。

上述分析表明, 只要利用性信息素诱捕强度 $E < \frac{2r}{1+2r}$, 就可使田间成虫虫量稳定在 x_0 , 从而获得持续

诱捕量 $h(x_0) = E \frac{x_0}{2}$ 。

由式(7), (8)可以看出, 当 $r < \frac{1}{2}$ 时, 有 $\frac{2r}{1+2r} > r$ 。由于通常昆虫的固有增长率比较小, 例如梨小的增长率为 8.04%^[15], 所以利用性信息素诱捕的诱捕强度可选范围比通常诱捕的诱捕强度可选范围大, 这在实际应用中更容易实现。

1.3 最大持续诱捕量的控制

进一步讨论田间成虫虫量稳定在 x_0 前提下, 如何控制诱捕强度 E , 使持续诱捕量最大。

对于通常诱捕情况下, 根据式(1), (5)作抛物线 $y = rx \left(1 - \frac{x}{N} \right)$ 和直线 $y = \tilde{E}x$, 如图 1 所示, 在式(8)下, $y = rx \left(1 - \frac{x}{N} \right)$ 与 $y = \tilde{E}x$ 有交点 p' , p' 点横坐标就是稳定平衡点 \tilde{x}_0 。对于性信息素诱捕, 根据式(2), (3)作抛物线 $y = f(x)$ 和直线 $y = \frac{E}{2}x$ 。在式(7)下, $y = f(x)$ 与 $y = \frac{E}{2}x$ 有交点 p^* , p^* 点横坐标就是稳定平衡点 x_0 。

由图 1 可以知道, 当 $y = \tilde{E}x$ 与抛物线 $y = rx \left(1 - \frac{x}{N} \right)$ 顶点 p' 相交时, 可获得最大持续诱捕量。同样当 $y = \frac{E}{2}x$ 与抛物线 $y = f(x)$ 在顶点 p^* 相交时, 可获得性信息素诱捕的最大持续诱捕量。此时 2 种诱捕情况的稳定

的平衡点相同均为 x_0^* :

$$x_0^* = \frac{N}{2} \tag{9}$$

且单位时间的利用性信息素诱捕和通常诱捕最大持续诱捕量分别为 h_{\max}^* 和 h_{\max} :

$$h_{\max}^* = \frac{rN}{4}(1 - E^*) \quad \text{和} \quad h_{\max} = \frac{rN}{4} \tag{10}$$

由式(2), (5)不难算出保持田间成虫虫量在 x_0^* 的两种诱捕情况下诱捕强度 E^* 和 \tilde{E}^* 分别为:

$$E^* = \frac{r}{1+r} \quad \text{和} \quad \tilde{E}^* = \frac{r}{2} \tag{11}$$

式中, E^* 是性信息素诱捕下达到最大持续诱捕量时的诱捕强度, \tilde{E}^* 是通常诱捕下达到最大持续诱捕量时的诱捕强度。

因此可以看出,利用性信息素诱捕情况下,只要将诱捕强度控制在 E^* , 或者使田间成虫虫量保持在最大虫量的一半时,可以达到持续的最大诱捕量 h_{\max}^* 。与通常诱捕情况相比,利用性信息素诱捕的最大诱捕量 $h_{\max}^* < h_{\max}$, 便可使田间成虫虫量保持在最大虫量一半。另外,当虫口增长率 $r < 1$ 时,有 $E^* < \tilde{E}^*$, 即利用性信息素诱捕强度低于通常情况诱捕强度便可保证田间成虫虫量保持在最大虫量的一半。

综上所述,当田间害虫的固有增长率较小(如 $r < 1$)时,利用性信息素诱捕成虫比通常的诱捕情况所产生的诱捕效果好,以较小的诱捕强度,便可保持持续诱捕量。

2 性信息素防治害虫的经济阈值

2.1 性信息素诱捕下的利润构成

在这个模型中,主要对利用性信息素诱捕所产生的效益进行分析。假设幼虫对田间产品进行破坏而成虫对田间产品不造成破坏。从经济角度看不追求最大的诱杀量,而考虑效益最佳。假设:

1) 设昆虫雌雄比例为 1:1, 幼虫存活率为 S_E (%), 每个雌虫的最大生殖力 F (头), 最大卵量与实际卵量之比为 \bar{R} 。诱捕 $\frac{E}{2}x$ 雄虫所减少的幼虫为 $(Ex) S_E F \bar{R}$ [16]。

2) 诱杀一头幼虫可以使田间产品得以保留并获得收入, 设田间产品销售单价为 P (元), 幼虫的破坏率 k , 记 $p = Pk$, p 是幼虫造成的损失(元), 也是杀死幼虫后获得的收入(元)。

3) 开支 S (元) 的构成是诱捕强度的费用, 如一个诱捕器的投入成本, 设单位诱捕强度的费用为 c (元)。

4) 那么利润也就是收入 T 和支出 S 则为:

$$T = p(Ex) S_E F \bar{R} = p\alpha Ex, \quad S = cE \tag{12}$$

式中 $\alpha = S_E F \bar{R}$, 则利润 R 为:

$$R = T - S = p\alpha Ex - cE \tag{13}$$

在稳定条件 $x = x_0$ 下, 把(6)代入(13):

$$R(E) = T(E) - S(E) = p\alpha NE \left(1 - \frac{E}{2r(1-E)} \right) - cE \tag{14}$$

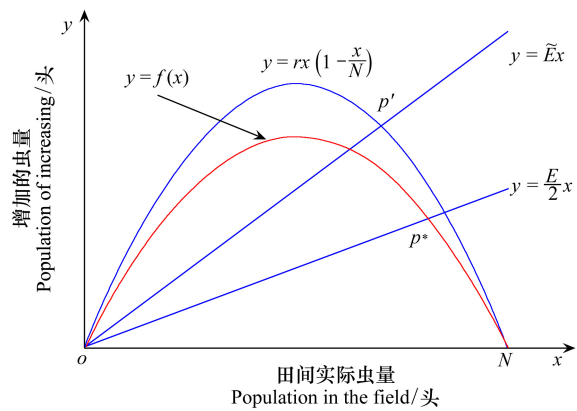


图1 性信息素诱捕与通常诱捕曲线

Fig.1 Curve of sex pheromone and normal trapping

图中 p' 通常诱捕下最大持续诱捕量点, p^* 性信息素诱捕下最大持续诱捕量点, \tilde{E} 通常诱捕下诱捕强度, E 性信息素诱捕下诱捕强度, x 田间实际虫量, N 环境可容纳虫量, r 种群固有增长率, y 增加的虫量

记 $\lambda = 2r\left(1 - \frac{c}{p\alpha N}\right) + 1$, 令:

$$E_R = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda}}{\lambda} \tag{15}$$

由微分法求出 $R'(E_R) = 0, R''(E_R) < 0$, 所以 E_R 是 $R(E)$ 的最大值, 即 E_R 是使得利润 $R(E)$ 最大的相应的诱捕强度。

将 E_R 代入(6)式可得最大利润下的田间稳定虫量 x_R 及单位时间的持续诱捕量 h_R 为:

$$x_R = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{\lambda} - 1}{2r}\right) \tag{16}$$

$$h_R = \frac{E_R x_R}{2} = \frac{E_R N}{r} \left(1 - \frac{\sqrt{\lambda} - 1}{2r}\right) \tag{17}$$

将(15)一(17)式与产量模型的(9)一(11)式相比较。可以看出当 $p\alpha N > c$ 时, 在考虑投入与产出比最小, 即最大经济效益原则下, 诱捕强度与持续诱捕量均有所减少, 而田间虫量有所增加, 显然和实际情况吻合。此时也是化学农业控制关键时期, 少量化学农药即达到防治效果。

2.2 确定经济阈值

上面的效益模型是以控制害虫数量的诱捕(或称封闭式诱捕)为基础的, 达不到应用性信息素诱杀害虫使田间虫量下降的目的。为达到使田间虫量下降到危害水平之下, 构建大量诱捕模型, 即利润与投入相同时的情况。

式(14)给出了利润与诱捕强度的关系 $R(E)$, 令 $R(E) = 0$ 的解为 E_s 可得:

$$E_s = \frac{\lambda - 1}{\lambda} \tag{18}$$

当 $E < E_s$ 时, $R(E) > 0$, 田间管理应当加强诱捕强度 E , 使田间虫量下降; 当 $E > E_s$ 时, $R(E) < 0$, 田间管理投入过大, 应当降低诱捕强度 E , 保证投入与产出之比。所以 E_s 是在大量诱捕下的一个经济界限。

图2以 E 为横坐标描绘了 $T(E)$ 曲线图, 可以看出当诱捕强度 E 大于 $\frac{2r}{2r+1}$ 时, 收入出现负值。也就是说利用性信息素诱捕时, 诱捕强度应小于 $\frac{2r}{2r+1}$ 。 E_s 也可以由图解法得到, 图3描绘了 $T(E), S(E)$ 曲线, 它们的交点就是 E_s , 其中 $\hat{E} = \frac{2r+1-\sqrt{2r+1}}{2r+1}$ 为 $T(E)$ 的最大值点, 显然 $E^* > \hat{E}$ 。

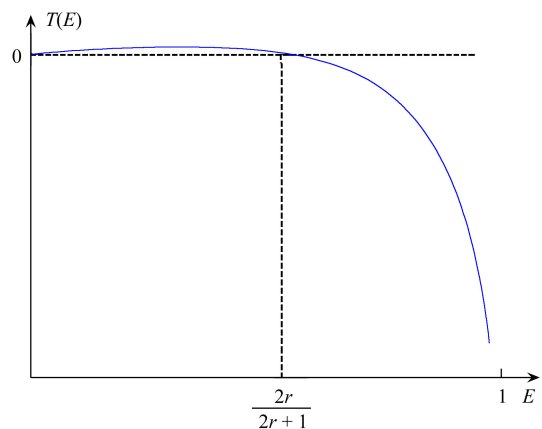


图2 T(E) 曲线图

Fig.2 T(E) curve

图中 E 是诱捕强度, $T(E)$ 是诱捕强度下的收入, r 是种群固有增长率

容易知道 E_s 存在的必要条件是:

$$p > \frac{c}{\alpha N} \tag{19}$$

即售价大于(相对于总量而言)成本。并且由(18)式可知, 成本越低, 售价越高, 则 E_s 越大。将(18)代入(6)式得到大量诱捕下的田间稳定虫量为 x_s :

$$x_s = \frac{c}{p\alpha} \tag{20}$$

对于某种特定的昆虫, x_s 完全由成本与价格比决定, 随着价格的上升和成本的下降, x_s 将迅速减少, 出现诱捕过度, 田间虫量减小, 达到防治目的。

比较式(15)和(18)可知,当式(19)成立时, $E_s > E_R$, 即大量诱捕强度比最大效益下诱捕强度大。从式(18)可以得到,当 $\frac{c}{\alpha N} < p < 2\frac{c}{\alpha N}$ 时 ($E_R < E_s < E^*$), 如图3中 E_{s2} , 成为经济阈值; 当 $p > 2\frac{c}{\alpha N}$ 时点 $E_s > E^*$, 如图3中 E_{s1} , 成为生态阈值。

3 性信息素诱捕梨小食心虫的实例

2011年4月28日—9月19日在山西省太谷县王海庄村 (E: 37° 29' 57. 85"; N: 112° 37' 32. 80"; H: 795m) 的桃园中, 设3种诱捕强度的不同处理, 每667m² 分别设5、9、13个诱捕器用于监测成虫发生。从6月27日开始调查虫果, 3种不同性信息素诱捕强度下, 成虫的增长量曲线与构建的 Logistic 曲线基本吻合, 见图4。

用 Origin pro 8 拟合梨小食心虫 Logistic 增长模型, 对田间调查的诱捕量进行 Logistic 曲线拟合, 并获得梨小食心虫自然增长率 r , 结果为 0. 064 ($R^2 = 0. 9979$)、0. 065 ($R^2 = 0. 9982$)、0. 061 ($R^2 = 0. 9982$)。应用性信息素下的经济阈值模型确定梨小食心虫的经济阈值。梨小食心虫相关生命参数已有报道^[17-18], 结合测定的种群增长率, 以及3种性信息素诱捕强度下的虫果率分别为 16. 73%、15. 02%、12. 44%。以2011年投入和收益市场价格为例: 由于防治设施的投入及农业产品的产出单位诱捕强度的费用为 c , 即诱捕器的投入成本, 诱捕器成本为4元/个, 性诱芯为1元/个, 1个世代要求换1次性诱芯, 1年共换4次, 费用 c 为40. 00、72. 00、104. 00元。桃子价格为 P , 设1kg为2元, 每kg有12—16个桃子, 平均14个。则不同处理下的桃园中害虫造成的损失 p , 结果为186. 86、323. 14、237. 86元。

根据经济阈值模型, 求解诱捕强度 E , 结果见表1。

由模型可知, 且 $p > 2\frac{c}{\alpha N}$, $E < E^*$, 则3种诱捕强度下都存在经济阈值 E_s , 达到经济阈值时的诱捕量, h_R 为单个诱捕器3d的总诱捕量, h_d 为单个诱捕器每天的诱捕量, 结果见表2。

各处理持续诱捕量可以看出, 不同诱捕强度下, 其达到经济阈值时的诱捕量随诱捕器数增加而减少, 13个/667m² 时达到最低, 5个诱捕器时最高。反映诱捕强度也经济阈值密切相关, 当诱捕器量达到 h_d 时, 即为防治经济阈值, 当诱捕量大于 h_d 时则可以有效的减少田间害虫的数量, 有效减少害虫虫量, 达到防治的目的。

3 讨论

生态学数学模型是对种群发生和动态真实的反映, 通过对害虫的种群变动规律进行研究, 实现对未来害虫的发生发展动态进行预测, 通过构建数学模型可以实现害虫的预测预报^[19]。通过捕获害虫的数量可间接反映实际害虫发生量, 是监测害虫发生的一种重要手段^[20], 解决诱捕种群问题可借鉴的数学模型有经典的捕鱼模型, 但和本模型相比捕获的种群明显不同, 性信息素只诱捕雄虫, 以较小的诱捕数量实现对种群的有效监

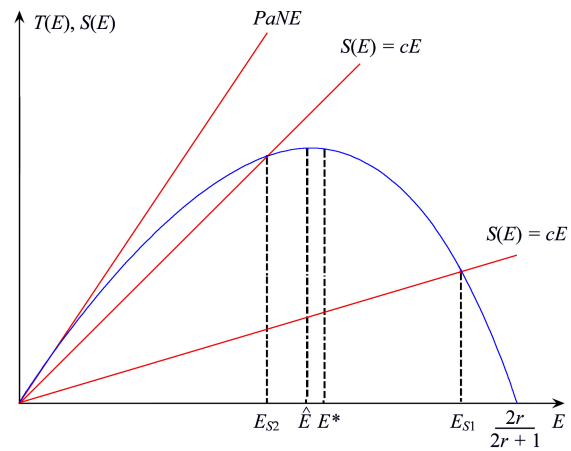


图3 诱捕强度与经济阈值

Fig. 3 Trapping intensity and economic threshold

图中 E 是诱捕强度, E_{s1} 为生态阈值, E_{s2} 为经济阈值, \hat{E} 最大诱捕强度, E^* 最大持续诱捕量诱捕强度, r 是种群固有增长率 $T(E)$ 是诱捕强度下的收入, $S(E)$ 是诱捕强度下的开支, p 获得的收入, α 田间幼虫存在比率, N 是田间容许的最大虫量, c 是单位诱捕强度的费用

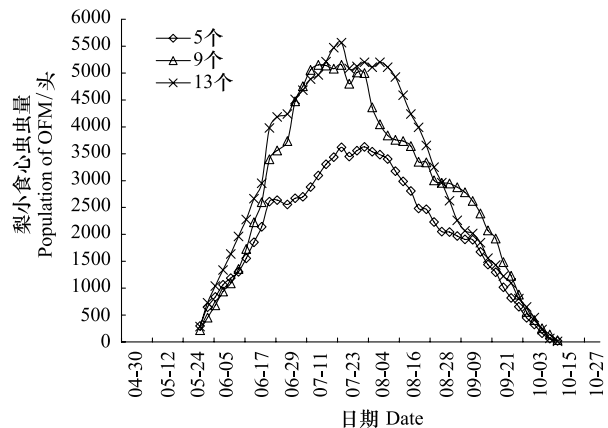


图4 3种诱捕强度的梨小食心虫量的动态

Fig. 4 Population of OFM under 3 trapping intensities

测。性信息素监测直接反映害虫的发生动态,但传统性信息素监测害虫发生测报中,对发生期、发生量多使用经验推断。如:美国在苹果蠹蛾(*Cydia pomonella*)防治中,根据信息素诱捕器的诱捕数制订出经济阈值。在纽约州每 20.25hm² 设置一个诱捕器,其经济阈值为 14 头雄蛾·星期⁻¹·诱捕器⁻¹;而密执安州的采用每 4.05 hm² 设置 2 个苹果蠹蛾信息素诱捕器,其经济阈值为 5—7 头雄蛾·星期⁻¹·诱捕器⁻¹,这些结果都是诱捕数和危害程度资料长期积累而得出的经验值,缺乏对其它害虫实际的普遍指导意义^[21-22]。基于实时、敏感、有效的性信息素监测数据,结合性信息素下害虫种群 Logistic 模型进行分析,及时、准确地实现对害虫危害高峰期、危害程度的测报。

表 1 梨小食心虫 3 个诱捕强度下的 E 值
Table 1 E value of OFM of 3 trapping intensities

	单位面积诱盆数/个 Trapping/ind.		
	5	9	13
E_R	0.0584	0.0593	0.0559
E^*	0.0602	0.0610	0.0575
E_{\max}	0.1135	0.1150	0.1087
\hat{E}	0.0584	0.0592	0.0559
E	0.0216	0.0203	0.0408

表 2 3 种诱捕强度下达到经济阈值的持续诱捕量 h_R
Table 2 h_R value at economic threshold trapped of OFM in 3 trapping intensities

	单位面积诱盆数/个 Trapping/ind.		
	5	9	13
h_R	123.3	178.8	88.1
h_d	8.2	6.6	2.3

此外,性信息素诱捕以较小的诱捕强度,实现对害虫的有效的预测和控制,应用本模型不仅可确定诱捕强度的大小,精准的控制诱捕器在田间的设置数量,而且实现科学、经济的进行防控资金投入,通过大量诱捕保证害虫的防控效果,可确定防治害虫的经济阈值,达到最佳经济效益。本例中拟合梨小食心虫性信息素诱捕下的 3 种诱捕器强度,发现梨小食心虫诱捕量符合 Logistic 模型,而且同时获得性信息素诱捕下的经济阈值,使用经济阈值模型求解得到 3 种诱捕强度下达到经济阈值的诱捕器持续诱捕量和最佳诱捕器设置。本模型可有效的指导应用性信息素进行测报和大量诱捕防治,同时兼顾生态平衡。此模型隶属于昆虫生态学的研究,结合害虫实际发生,对性信息素进行测报有一定的理论指导意义,同时可为建立计算机预测模型和专家系统奠定基础。但在实际生产中不同昆虫有特定的特殊性,本文所拟合的梨小也仅有一年的数据为例,仍需进一步改进和修正,才能更准确有效地进行测报和大量诱捕。

致谢: 感谢康乐院士对本研究的帮助,感谢山西农业大学郭玉明教授对数学模型的修正,以及李生才教授对经济阈值算法的建议。

References

- [1] Liu L F. Advance in research of ecological mathematical models. Chinese Journal of Ecology, 1991, 10(2): 41-44.
- [2] Ma F, Xu X F, Zhang X L, Cheng X N. A prediction model integrating phase space reconstruction and artificial neural network and its application in pest forecasting. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1297-1301.
- [3] Wang X, Lü J K, Hu X M, Xie D T. Intelligent prediction model for rice pests and its application. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 141-145.
- [4] Gao Y P, Yu H, Cui X Z, Jiang G X, Wang M N. Prediction model for rice stem borer based on L-M optimized algorithm and its preliminary application. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 162-165.
- [5] Liu S S, Meng X D. The change pattern of development rates under constant and variable temperatures in *Myzus Persicae* and *Lipaphis Erysimi*. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(2): 182-190.

- [6] Shen Z R. Logistic equation revised to describe density dynamics of an *Aphid* population on Chinese cabbage. *Journal of China Agricultural University*, 1985, 11(3): 297-304.
- [7] You M S, Pang X F. A computer simulation model of population dynamics of Brown Planthopper, *Nilaparvata Lugens* Stal. *Entomologia Sinica*, 1995, 2(2): 163-178.
- [8] Cheng S H, Xu C S, Li M, Xin Z S, Shu H R, Wang Y A. Mathematical model of chemical control of crop pest. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(S2): 32-35.
- [9] Byers J A. Active space of pheromone plume and its relationship to effective attraction radius in applied models. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34(9): 1134-1145.
- [10] Yao S T, Wu J X, Zheng Y L, Jin Z H, Lu Z J, Hu J J, Du Y J. Application of sex pheromone of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in monitoring its population. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54(4): 490-494.
- [11] Li X, Li X W, Zhao Z G, Li J, Ma R Y, Nie L Y. Approach to improvement of using the sex pheromone lure of *Carposina niponensis* (Lepidoptera: Carposinidae). *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2011, 31(3): 213-216.
- [12] Lu J, Teng Z W, Tan Z J, Chen J J. Computation and simulation of intensity distribution of black light lamp. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 247-251.
- [13] He L, Qin Y C, Zhu P X. Trapping effect of the mixture of sugar-acetic acid-ethanol to Oriental fruit moth (*Grapholitha molesta*) and smaller apple leaf roller (*Adoxophyes orana*). *Chinese Bulletin of Entomology*, 2009, 46(5): 736-739.
- [14] Xue Y H, Ma R Y, Li X W, Li L, Li J. Research and application on the sex pheromone of *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 2010, 26(2): 211-216.
- [15] Du J, Guo J T, Zhang Y S, Wu J X. Effect of temperature on development and reproduction of *Grapholitha Molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae). *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 314-318.
- [16] Ding Y Q. *Mathematical Ecology of Insects*. Beijing: Science Press, 1994: 210-210.
- [17] Zhang X Z. A preliminary report on the study of oriental Fruit Moth (1970—1978). *Journal of Plant Protection*, 1980, (4): 254-256.
- [18] Zhang D M, Sun Y S. Linear regression equation forecast for Oriental Fruit Moth. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 1986, (2): 22-26.
- [19] Ju R H, Shen Z R. Review on insect population dynamics simulation models. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2709-2716.
- [20] Johnson D T, Lewis B A, McCraw B D, Carroll B, Jervis B, Striegler K, Boozer B, Mulder P, Foshee W G, McVay J, Mizell R F III. Development and implementation of a peach Integrated Pest Management program in the Southern USA. *Proceedings of the 5th International Peach Symposium*, 2002, 592(1&2): 681-688.
- [21] Du J W. Review on the application of forecasting the insect by sex pheromone. *Forecast of Disease and Pest*, 1990, 1(1): 33-38.

参考文献:

- [1] 刘来福. 生态学数学模型的研究进展. *生态学杂志*, 1991, 10(2): 41-44.
- [2] 马飞, 许晓风, 张夕林, 程遐年. 相空间重构与神经网络融合预测模型及其在害虫测报中的应用. *生态学报*, 2002, 22(8): 1297-1301.
- [3] 汪璇, 吕家格, 胡小梅, 谢德体. 水稻虫害智能预测模型及其应用. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 141-145.
- [4] 高艳萍, 于红, 崔新忠, 姜国兴, 王美妮. 基于 L-M 优化算法的水稻螟虫预测模型及其初步应用. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 162-165.
- [5] 刘树生, 孟学多. 桃蚜、萝卜蚜发育速率在恒温 and 变温下的变化规律研究. *生态学报*, 1989, 9(2): 182-190.
- [6] 沈佐锐. Logistic 修正方程及其对菜蚜种群密度动态的描述. *北京农业大学学报*, 1985, 11(3): 297-304.
- [7] 尤民生, 庞雄飞. 褐飞虱种群动态的模拟模型(英文). *中国昆虫科学*, 1995, 2(2): 163-178.
- [8] 程述汉, 徐臣善, 李明, 辛泽山, 束怀瑞, 王衍安. 作物害虫化学防治的数学模型. *农业工程学报*, 2008, 24(S2): 32-35.
- [10] 姚士桐, 吴降星, 郑永利, 金周浩, 陆志杰, 胡加君, 杜永均. 稻纵卷叶螟性信息素在其种群监测上的应用. *昆虫学报*, 2011, 54(4): 490-494.
- [11] 李霞, 李先伟, 赵志国, 李捷, 马瑞燕, 聂磊云. 桃小食心虫性诱芯合理有效使用方法的研究. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 31(3): 213-216.
- [12] 卢军, 滕子文, 谭佐军, 陈建军. 黑光灯光场分布的计算与模拟. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 247-251.
- [13] 何亮, 秦玉川, 朱培祥. 糖醋酒液对梨小食心虫和苹果小卷叶蛾的诱杀作用. *昆虫知识*, 2009, 46(5): 736-739.
- [14] 薛艳花, 马瑞燕, 李先伟, 李亮, 李捷. 桃小食心虫性信息素的研究与应用. *中国生物防治*, 2010, 26(2): 211-216.
- [15] 杜娟, 郭建挺, 张亚素, 仵均祥. 温度对梨小食心虫 *Grapholitha molesta* Busck 生长发育及繁殖的影响. *西北农业学报*, 2009, 18(6): 314-318.
- [16] 丁岩钦. *昆虫数学生态学*. 北京: 科学出版社, 1994: 210-210.
- [17] 张星政. 梨小食心虫研究初报(1970—1978 年). *植物保护学报*, 1980, (4): 254-256.
- [18] 张德民, 孙友笙. 利用直线回归方程预报梨小食心虫. *山东林业科技*, 1986, (2): 22-26.
- [19] 句荣辉, 沈佐锐. 昆虫种群动态模拟模型. *生态学报*, 2005, 25(10): 2709-2716.
- [21] 杜家纬. 昆虫信息素测报应用研究的回顾和展望. *病虫测报*, 1990, (1): 33-38.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advances in theoretical issues of species distribution models LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguang, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

Autecology & Fundamentals

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F₁ progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and
crossostephium XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanxia, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N₂O fluxes in Chinese chestnut stands
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

Population, Community and Ecosystem

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal
Landsat TM images; a case study of the Yingxiu-Wenchuan section XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire
disturbance NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Exploring the space syntax under negative planning; a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge
species YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

《生态学报》2013 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,300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 王克林 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33卷 第16期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 2013)

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 王如松
主管 中国科学技术协会
主办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085

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@espg.net

订购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱
邮政编码:100044

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

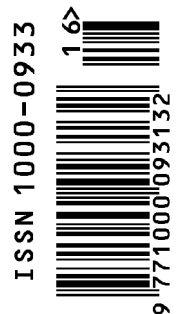
Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

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@espg.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 90.00 元