

蚜虫种群时空分布动态模型

李 丹, 赵惠燕*, 胡想顺

(西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 种群空间格局是昆虫种群的重要属性, 是为害虫防治提供动态信息的重要前提。关于种群空间格局的时空动态, 前人曾建立了富立叶模型和有阻尼自由震荡模型, 但忽略了生境资源和空间资源的限制, 不能很好地描述昆虫种群在自然界摆布状况的动态行为。因此, 在前人研究的基础上, 根据蚜虫在自然界的聚集扩散行为逐步建立了描述蚜虫种群聚集扩散规律的变幅、变周期时空分布动态模型, 即: $y = Ae^{-mt} [\sin(w_0 e^{mt} t + \phi) + b] + c$, 并应用该模型对麦长管蚜 (*Sitobion avenae* Fabricius)、麦二叉蚜 (*Schizaphis graminum* Rondani)、禾缢管蚜 (*Rhopalosiphum padi* Linnaeus) 和玉米蚜 (*Rhopalosiphum maidis* Fitch) 的实验数据进行了拟合。结果表明, 麦蚜种群和玉米蚜种群呈现出不同的规律, 3 种麦蚜均为减幅减周期的变化趋势, 玉米蚜则表现为减幅增周期的变化趋势。此外, 该模型的拟合效果较好 ($R^2 > 0.942$, $SSE < 2.6$)、生物意义明确, 不仅可用于描述蚜虫以及蚜虫以外的其他昆虫和螨类种群的时空动态, 还可准确描述不同年龄阶段和不同空间位置上种群的动态, 具有普遍适用性。应用该模型考察不同种蚜虫在同一作物上的竞争情况和蚜虫与其天敌的空间分布动态, 可为害虫的综合防治奠定基础; 对不同小麦抗性品种上同一种蚜虫的聚集扩散行为进行刻画、分析, 还可为小麦的抗性育种提供参考依据。

关键词: 昆虫种群; 时空动态; 空间格局; 聚集度指标; 模型

A model to describe the spatio-temporal distribution dynamics of aphid populations

LI Dan, ZHAO Huiyan*, HU Xiangshun

College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China

Abstract: Spatial distribution is an important property of insect populations and an important premise to provide dynamic information for pest control. A large number of papers have studied the aggregation index of various insects and mite species populations and described their spatial distributions. Most of these results indicated a similar phenomenon that the behaviours of populations tend to fluctuate either from aggregation to diffusion or from diffusion to aggregation. Regarding these general phenomena of organisms' aggregation pattern, many researchers have set up Fourier models and damped vibration models to capture the spatio-temporal distribution dynamics of populations. However, these models could not clearly describe the distributions of insect and mite populations because they ignored the constraints of resources and spaces. In this paper, we proposed a novel model based on previous studies and the aggregation-diffusion behaviours of aphids. The amplitude and cycle in this model were variable ($y = Ae^{-mt} [\sin(w_0 e^{mt} t + \phi) + b] + c$). The model was utilised to express the spatio-temporal distribution dynamics of aphid populations with patchiness index as a dependent variable. We applied this model to fit with the experimental data from English green aphid (*Sitobion avenae* Fabricius), greenbug (*Schizaphis graminum* Rondani), oat bird-cherry aphid (*Rhopalosiphum padi* Linnaeus), corn leaf aphid (*Rhopalosiphum maidis* Fitch), grasshopper, and *Tetranychus viennensis* Zacher respectively. The fitting results of the four aphid populations showed that the dynamics of wheat aphid populations and maize aphid population were different. Decreasing amplitude and decreasing cycle were a common characteristic of all the distribution trends of the three wheat aphid species' populations. The trends of the maize aphid population, on the other hand, showed a different characteristic: decreasing amplitude and increasing

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30470268/C0111); 陕西省科委重点项目 (2001SM01)

收稿日期: 2009-07-30; **修订日期:** 2010-02-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohy1983@yahoo.com.cn

cycle. Meanwhile, according to all experimental results, we also showed the advantages of our novel model over the existing ones. First, it implied clearer biological significance, because each parameter in this model had a definite biological meaning. Second, it gave satisfying data fitting results ($R^2 > 0.942$, $SSE < 2.6$). Finally, the application fields of this model could be extended to describe the spatio-temporal dynamics of other insects and mite populations, including populations of different age-phases and populations of different positions on the same host plant. For example, the model can be used to study the spatial dynamic relationships of insect pest aphids and their natural enemies as well as to identify the dominant species of natural enemies and the competition mechanism with their enemies. Furthermore, the competition of different aphid populations on a certain plant can also be studied with this model. This will be helpful for us to demonstrate their competitive relation and find the dominant insect pest species at different periods. All these applications can provide guidance for the agricultural workers in the management of insect pest, laying a foundation for integrated pest management. The model can also be applied to describe the aggregation-diffusion behaviours of the population of a certain aphid species on wheat of different resistance varieties at the same period, which will help people to select the wheat cultivar resistant to the aphid.

Key Words: insect population; spatio-temporal dynamics; spatial pattern; aggregation index; model

种群空间格局是昆虫种群的重要属性之一,由物种的生物学特性和生境条件所决定,反映了种群栖息生境的行为习性和环境同质性或异质性的叠加影响,也是反映种群有效占有资源的重要生态特征。它既是确定昆虫种群抽样技术和资料代换的基础,也是为有害生物防治提供准确动态信息的前提^[1-3]。

蚜虫以植物汁液为食,其在取食过程中常常会将携带的植物病毒传播到宿主植物上。在农业生产中,多种蚜虫种群对农作物的取食和作物病毒的传播等对作物产量和品质造成了巨大的损失,比如:麦长管蚜(*Sitobion avenae* Fabricius)、麦二叉蚜(*Schizaphis graminum* Rondani)、禾缢管蚜(*Rhopalosiphum padi* Linnaeus)等小麦蚜虫,每年造成10%—20%的产量损失,严重时达30%以上。因此,本研究以麦蚜为主要研究对象,分析蚜虫种群时空分布动态规律,以期推导出描述蚜虫种群时空分布动态的普遍模型,从而为有害生物综合治理提供理论依据。

关于蚜虫种群的时空分布动态,前人已有大量的研究。早在1964年,Shiyomi M.等^[4]就通过温室实验研究了无翅蚜种群由随机分布和均匀分布到聚集分布的格局变化。之后,Trumble等^[5]研究了冬季草莓上蚜虫种群空间分布格局的时序变化,发现蚜虫聚集度随时间变化而波动,而且随着种群数量增加,种群逐渐扩散为随机分布。赵惠燕等^[6]对麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜自然种群在小麦田中的空间动态进行研究,发现3种麦蚜种群均表现为聚集-扩散-聚集的趋势。何连生等^[7]的研究证实了小麦植株上麦长管蚜和禾谷缢管蚜的聚集扩散趋势,而且发现在不同年份间两种蚜虫也表现出相似的规律。汪信庚等^[8]、刘树生等^[9]分别对结球甘蓝和小白菜上的萝卜蚜和桃蚜种群的空间格局及时序动态做了定量分析,发现萝卜蚜和桃蚜种群在两种蔬菜上终年呈聚集分布,聚集强度有明显的高低变化。Winder L.等^[10-11]研究了麦长管蚜在冬小麦上的时空分布动态,发现麦长管蚜的聚集分布大多是暂时的,分布格局没有稳健的一致性,聚集强度呈现波动变化。邹运鼎等^[12]对木槿上棉蚜的扩散迁飞动态进行研究,发现其聚集强度也呈现高低不同的波动变化。王永宏等^[13]、丁伟等^[14]和太一梅等^[15]在对玉米蚜和梨二叉蚜种群的研究中也发现了类似的规律。这一规律在其他昆虫种群(如:烟粉虱^[2-3]、草地蝗虫^[16]、叶蝉^[17-18]、象甲^[19]、步甲^[20]、龟纹瓢虫^[21-22]、食蚜蝇和蚜茧蜂^[22]、稻黑蝽^[23]、茄瘤缘蝽^[24]、美国白蛾^[25])和螨类种群(如:桔全爪螨^[6]、草间小黑蛛^{[21][26]}、二斑叶螨^[27]、山楂叶螨^[28])的时空动态研究中也有体现。针对这一变化规律,周新远等^[6]用富立叶级数刻画了桔全爪螨聚集强度的周期性变化。但是自然界的资源有限,空间有限,昆虫和螨类的聚集强度变化不会是等幅的。赵惠燕等^[6]运用谐波分析和有阻尼振动方程对麦蚜的聚集扩散规律进行了分析,发现用有阻尼振动方程描述麦蚜的聚集规律反映了资源的限制,因而更加准确而且生物意义更加明确,然而由于空间的限制,昆虫的聚集扩散规律不

可能是等周期的。为此,本文在前人研究的基础上,建立了变幅变周期的描述蚜虫种群聚集扩散规律的模型,并对文献^[6,13]中的数据和 2003—2004 年的田间调查数据进行了拟合分析。

1 聚集指标的选择

用于种群空间格局分析的指标有很多,通常应用较多的有平均拥挤度(m^*)、聚集度指标(m^*/m)、扩散系数(Ca)、Taloy 的 b 指数、负二项分布 K 值等。在这些指标中,聚集度指标(m^*/m)和负二项分布 K 值受种群密度影响较小,更能反映空间格局变化过程中种群因素的作用,这在李小珍、汪信庚、王永宏等文献中都进行了分析检验。因此,本文以聚集度指标(m^*/m)作为聚集强度分析研究种群的空间格局变化。

聚集度指标(m^*/m):Lloyd 定义平均拥挤度(m^*)与平均密度(m)的比值为聚集度指标。平均拥挤度表示平均每个个体与多少个其他个体在同一样方中。按照 Lloyd 的判断法则:当 $m^*/m = 1$ 时,种群为随机分布;当 $m^*/m < 1$ 时,种群为均匀分布;当 $m^*/m > 1$ 时,种群为聚集分布^[29]。

2 模型建立

以麦蚜的聚集度指标 y 为因变量,时间 t 为自变量建立种群聚集扩散模型。为方便模型的建立,提出以下假设:

- (1) 种群生存环境条件均匀,气候条件稳定,没有极为特殊的天气变化,如:连续半月降雨等;
- (2) 没有剧烈的人为因素的干扰,如:喷施农药等;
- (3) 种群生境的环境最大容纳量为一定值;
- (4) 种群数量达到环境最大容纳量时,该种群的空间分布为均匀分布,而在种群数量达到环境最大容纳量之前,种群分布型为聚集分布或随机分布,不会达到均匀分布(即 $y \geq 1$);
- (5) 该种群聚集-扩散的周期变化率相同,即等周期。

根据以上假设,考虑在种群数量达到环境最大容纳量之前,种群的聚集-扩散是随着种群数量的增加,以其之前的聚集中心为中心的辐射扩散过程,从而逐步接近均匀分布,因此建立以下模型:

$$y = Ae^{-nt} [\sin(wt + \phi) + b] + 1 \quad (b \geq 1, t < t_{\max}) \quad (1)$$

式中, y 为聚集度指标, t 为时间, e^{-nt} 为环境阻尼系数, w 为聚集-扩散周期变化率, ϕ 为初相角, $t_{\max}$ 为麦蚜种群数量达到环境最大容纳量的时间, $Ae^{-nt}(1+b)+1$ 为 t 时刻所在周期内麦蚜种群所能达到最大聚集度, $A[\sin(wt + \phi) + b] + 1$ 为麦蚜种群本身的聚集变化规律。

在实际过程中,麦蚜种群每次聚集-扩散的周期变化率并不相同,同样受到环境条件的制约,取为 $w = w_0(e^{nt})^d$,将其代入方程(1),得到:

$$y = Ae^{-nt} [\sin(w_0 e^{dnt} t + \phi) + b] + 1 \quad (b \geq 1, t < t_{\max}) \quad (2)$$

令 $m = dn$ 得到:

$$y = Ae^{-nt} [\sin(w_0 e^{mt} t + \phi) + b] + 1 \quad (b \geq 1, t < t_{\max}) \quad (3)$$

再者,由于麦蚜种群生境的环境最大容纳量为某一定值,且种群数量在达到环境最大容纳量时种群分布型是均匀分布,但实际蚜虫种群数量往往达不到环境最大容量,它们可能为均匀分布、随机分布,也可能是聚集分布;而其他生境如玉米蚜的环境最大容纳量非定值,种群数量在达到环境最大容纳量时可能为均匀分布、随机分布,也可能是聚集分布,在此之前,其分布型和每次扩散-聚集的拐点也并不总是聚集分布或随机分布,有可能是均匀分布,从而改进方程(3)得到:

$$y = Ae^{-nt} [\sin(w_0 e^{mt} t + \phi) + b] + c \quad (4)$$

方程(4)就是变周期的、有阻尼自由震荡的蚜虫种群的时空动态模型。

3 数据拟合

通过 1stopt 软件,用模型(4)分别对文献^[6,13]中麦蚜和玉米蚜的聚集度指标的时序动态进行了拟合,得到拟合方程如下:

麦长管蚜

$$y = 6.5523e^{-0.0267t} [\sin(0.0479e^{0.0283t} + 2.9844) + 1.0425] + 0.8208 \quad (R^2 = 0.9491 \quad SSE = 2.5898)$$

麦二叉蚜

$$y = 2.9982e^{-0.017t} [\sin(0.2292e^{0.0108t} + 4.7173) + 0.1601] + 2.9119 \quad (R^2 = 0.9829 \quad SSE = 0.2415)$$

禾谷缢管蚜

$$y = 12.7934e^{-0.034t} [\sin(0.2689e^{0.0079t} + 18.4246) + 0.4385] + 2.0389 \quad (R^2 = 0.9422 \quad SSE = 1.6148)$$

玉米蚜

$$y = 3.8105e^{-0.0008t} [\sin(0.6243e^{-0.0388t} + 0.5312) + 2.2334] - 1.8197 \quad (R^2 = 0.9692 \quad SSE = 1.4801)$$

拟合效果见图 1—图 4。

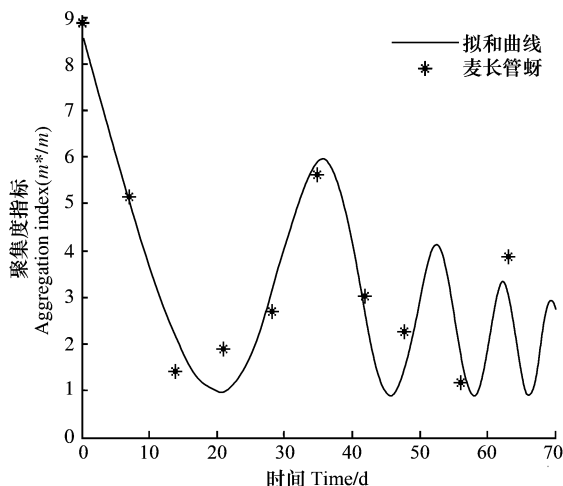


图 1 麦长管蚜的数据拟合

Fig. 1 Data fitting of *Sitobion avenae* Fabricius

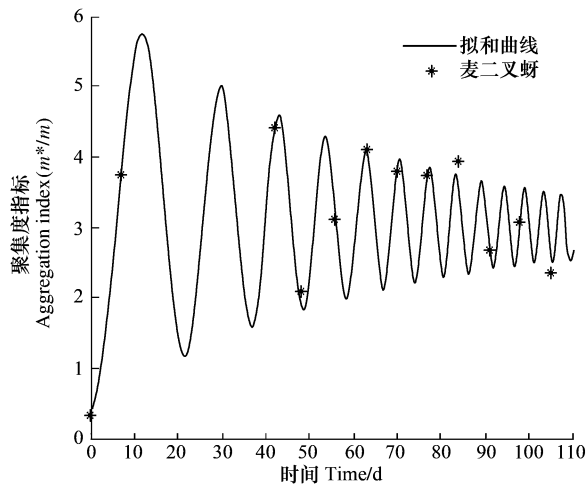


图 2 麦二叉蚜的数据拟合

Fig. 2 Data fitting of *Schizaphis graminum* Rondani

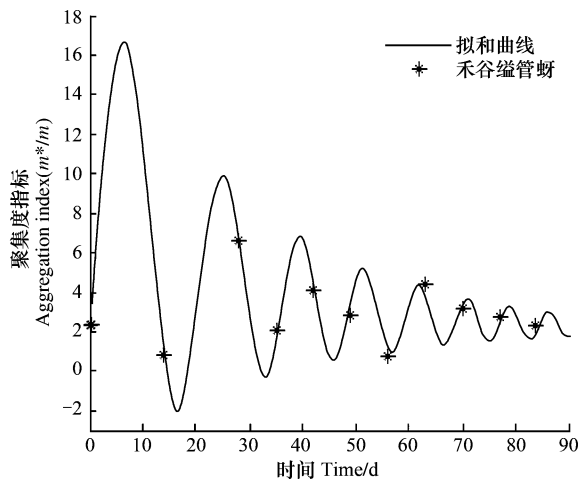


图 3 禾谷缢管蚜的数据拟合

Fig. 3 Data fitting of *Rhopalosiphum padi* Linnaeus

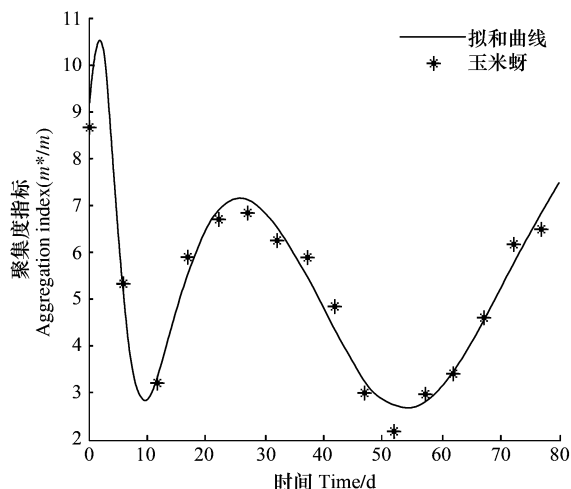


图 4 玉米蚜的数据拟合

Fig. 4 Data fitting of *Rhopalosiphum maidis* Fitch

由拟合结果可发现,应用模型(4)所得的麦长管蚜、麦二叉蚜、禾谷缢管蚜和玉米蚜的拟合决定系数分别为 0.9491,0.9829,0.9422,0.9692,残差平方和分别为 2.5898,0.2415,1.6148,1.4801,说明该模型对蚜虫聚集度的时序变化拟合效果较好。3 种麦蚜和玉米蚜的聚集强度均表现为减幅的振动趋势,说明生境条件对于这几个种群的聚集强度有制约作用。3 种麦蚜的聚集度随时间变化均表现为周期缩短的振动趋势,而玉米蚜

表现为周期增长的变化趋势,这可能与玉米叶面的环境容量远远大于蚜虫的虫口数量有关。

为了检验模型的适用性,对自 1987 年以来小麦上蚜虫种群的系统调查资料进行了数据拟合,发现蚜虫种群均表现出类似的规律,从而对模型进行了进一步的验证。以 2003 年 11 月—12 月和 2004 年 4 月—5 月 Batis 小麦上麦长管蚜的系统调查资料为例,得到的拟合结果显示麦长管蚜的聚集扩散规律符合减幅减周期的振动趋势,拟合方程和拟合效果见图 5—图 6。

2003 年 11 月—12 月

$$y = 1.8421e^{-0.025t} [\sin(0.0977e^{0.0242t}t + 0.4906) + 0.9205] + 1.6349 \quad (R^2 = 0.9825 \quad SSE = 0.1209)$$

2004 年 4 月—5 月

$$y = 0.6039e^{-0.0029t} [\sin(0.0806e^{0.018t}t + 2.7224) + 9.8291] - 3.7586 \quad (R^2 = 0.9459 \quad SSE = 0.0916)$$

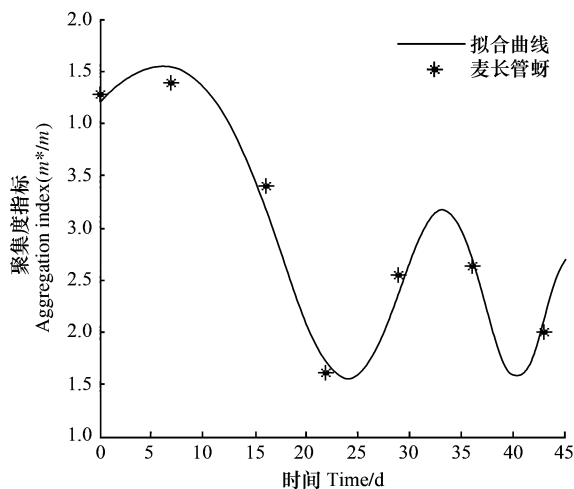


图 5 2003 年 Batis 小麦上麦长管蚜的数据拟合

Fig. 5 Data fitting of *Sitobion avenae* Fabricius on Batis in 2003

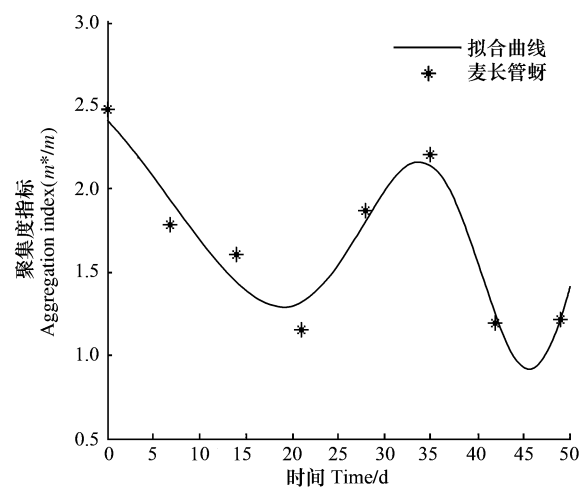


图 6 2004 年 Batis 小麦上麦长管蚜的数据拟合

Fig. 6 Data fitting of *Sitobion avenae* Fabricius on Batis in 2004

4 结论与讨论

昆虫种群聚集强度的高低变化,直接刻画了昆虫的聚集扩散行为,从而能够准确地反映昆虫种群的时空分布格局的变化。因此,本文在文献^[6]的研究基础上,提出假设将问题简化,以聚集度指标为因变量建立了描述蚜虫种群等周期聚集扩散行为的模型(1),而后考虑到蚜虫聚集扩散行为的实际规律,对模型(1)进行了逐步改进,最终推导出变周期的、有阻尼自由震荡的蚜虫种群的时空动态模型(4)。

通过对昆虫和螨类种群聚集度指标数据的拟合分析,发现:

(1) 该模型生物意义明确 模型各变量均有明确的生物学含义;

(2) 模拟效果好 模型对麦长管蚜、麦二叉蚜、禾谷缢管蚜和玉米蚜的拟合决定系数均大于 0.94,残差平方和小于 2.6,拟合度比较高,真实刻画了三种麦蚜和玉米蚜种群的时空分布动态;

(3) 适用范围广 应用该模型对蚜虫以外的其他种群:蝗虫^[16]和山楂叶螨^[28]种群进行拟合分析发现:模型(4)对蝗虫若虫和成虫种群的拟合决定系数和残差平方和分别为 0.9446,0.9357 和 0.3034,0.0366;对苹果树冠上、中、下 3 种不同方位上山楂叶螨种群的拟合决定系数和残差平方和分别为 0.937,0.9936,0.9976 和 0.2712,0.0172,0.049。其中各种群的拟合决定系数均大于 0.935,残差平方和均小于 0.5,说明该模型不仅能真实描述其他昆虫和螨类种群的聚集扩散行为,还能对不同年龄结构和同一寄主植物上不同方位的种群的聚集扩散行为进行准确刻画,具有普遍适用性。

因此,可以考虑应用该模型研究同一植株上不同蚜虫种群的分布动态,对同一作物上不同种蚜虫间的竞争情况进行分析,从而有助于确定危害作物的主要蚜虫种类。通过该模型考察蚜虫与其天敌的时空分布动

态,研究蚜虫与其天敌的空间关系,可为确定天敌优势种、了解种间竞争机制提供有力工具,从而为害虫的综合防治奠定基础。此外,应用该模型对不同小麦抗性品种上同一种蚜虫的聚集扩散行为进行刻画、分析,根据同一时期该种蚜虫所表现出的聚集度和聚集扩散周期的差异,可为小麦的抗性育种提供参考依据。

庞保平^[30]对麦长管蚜种群的空间格局动态进行研究,发现麦蚜聚集-扩散趋势具有周期性,这验证了前人的研究。但其同时发现聚集指标的变化并不都是减幅的,而是呈现不规则变化,这可能与取样方法、气候影响等因素有关,有待进一步研究。

References:

- [1] Li Z, Ji R, Xie B Y, Li D M. Review on the insect spatial ecology. *Entomological Knowledge*, 2004, 40(1): 1-6.
- [2] Niu X L, Wu H C, Zou Y D, Bi S D, Ren C N, Liu C S, Zhao Y H, Tao J C, Wang W J. The spatial distribution pattern and its temporal dynamics of *Bemisia tabaci* adult population inhabiting on the cucumbers. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 457-461.
- [3] Zhou F C, Ren S X, Du Y Z, Qin J Y, Zhou G S, Liu Z Q. Spatial patterns of *Bemisia* (Gennadius) population in cotton fields. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1239-1244.
- [4] Shiyomi M, Nakamura K. Experimental studies on the distribution of the aphid counts. *Researches on Population Ecology*, 1964, 6(2): 9-87.
- [5] Trumble J T, Oatman E R, Voth V. Temporal variation in the spatial dispersion patterns of aphids (Homoptera: Aphididae) infesting strawberries. *Environmental Entomology*, 1983, 12(2): 595-598.
- [6] Zhao H Y, Wang S Z, Dong Y C. Spatial dynamics of wheat aphid population under nature conditions. *Chinese Journal of Ecology*, 1990, 9(4): 16-19.
- [7] He L S, Ni H X, Li G B, Guo Y Y. Preliminary study on aggregation and dispersion behavior of wheat aphids. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, 11(2): 8-13.
- [8] Wang X G, Liu S S, Wu X J. Spatial pattern and its time series dynamics in a population of *Lipaphis erysimi*. *Journal of Zhejiang Agriculture University*, 1995, 21(5): 508-512.
- [9] Liu S S, Wang X G, Wu X J, Shi Z H. Spatial pattern and its time series dynamics in the population of *Myzus Persicae* on Two *Brassica* spp. *Acta Entomology Sinica*, 1996, 39(2): 158-165.
- [10] Winder L, Holland J M, Perry J N. The within-field spatial and temporal distribution of the grain aphid (*Sitobion avenae*) in winter wheat // *Proceedings of the Brighton Conference: Pests*. Farnham, The British Crop Protection Council, 1998: 1089-1094.
- [11] Winder L, Perry J N, Holland J M. The spatial and temporal distribution of the grain aphid *Sitobion avenae* in winter wheat. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1999, 93(3): 277-290.
- [12] Zou Y D, Zhou X Z, Li G T, Liu T W. Diffusion and migration dynamics of *Aphis gossypii* on *Hibiscus syriacus* plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 699-702.
- [13] Wang Y H, Wu J X, Su L. Spatial dynamics of *Rhopalosiphum Maidis* population. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2002, 30(4): 55-58.
- [14] Ding W, Wang J J, Zhao Z M, Chen G H. Studies on the population dynamics of aphids on spring sown maize. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(1): 13-16.
- [15] Tai Y M, Fu Y, Yang B L, Chen G H, Tao M. Study on the analysis of spatial distribution for the population of *Schizaphis piricola* Matsumura on pear and the aggregation cause. *Journal of Yunan Agricultural University*, 2004, 19(3): 287-289.
- [16] Wang W M. Analysis on the spatial pattern of grasshopper population in the alpine prairie. *Acta Prataculturaesnica*, 1999, 8(2): 50-55.
- [17] Li X Z, Liu Y H, Zhao Z M, Zhou L F. Temporal and spatial dynamics of *Cicadulina bipunctella* natural populations. *Zoological Research*, 2004, 25(3): 221-226.
- [18] Park Y L, Perring T M, Farrar C A, Gispert C. Spatial and temporal distributions of two sympatric *Homalodisca* spp. (Hemiptera: Cicadellidae): Implications for areawide pest management. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2006, 113(1/4): 168-174.
- [19] Ferguson A W, Klukowski Z, Walczak B, Perry J N, Muggleston M A, Clark S J, Williams I H. The spatio-temporal distribution of adult *Ceutorhynchus assimilis* in a crop of winter oilseed rape in relation to the distribution of their larvae and that of the parasitoid *Trichomalus perfectus*. *Entomological Experimentalis et Applicata*, 2000, 95(2): 161-171.
- [20] Thomas C F G, Parkinson L, Griffiths G J K, Garcia A F, Marshall E J P. Aggregation and temporal stability of carabid beetle distributions in field and hedgerow habitats. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(1): 100-116.
- [21] Zou Y D, Meng Q L, Geng J G, Ji J, Chen G C, Wang G M. Relationship between distribution patterns of *aphis gossypii* and its natural enemies.

Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(2): 172-175.

- [22] Mei C J, Yang S M, Wang X S, Hu B M, Shen Y, Cheng H R, Shao Z S, Zou Y D, Li G T, Meng Q L, Geng J G. Study on dynamic relationship between wheat aphides and their natural enemies populations in space and number. Journal of Anhui Agricultural University, 2000, 27(4): 358-361.
- [23] Kim H, Kim S T, Jung M P, Lee J H. Spatio-temporal dynamics of *Scotinophara lurida* (Hemiptera: Pentatomidae) in rice fields. Ecological Research, 2007, 22(2): 204-213.
- [24] Fujisaki K. Studies on the mating system of the winter cherry bug, *Acanthocoris sordidus* Thunberg (Heteroptera: Coreidae) I. Spatio-temporal distribution patterns of adults. Researches on Population Ecology, 1980, 21(2): 317-331.
- [25] Suzuki N, Kunimi Y, Uematsu S, Kobayashi K. Changes in spatial distribution pattern during the larval stage of the fall webworm, *Hyphantria cunea Drury* (Lepidoptera: Arctiidae). Researches on Population Ecology, 1980, 22(2): 273-283.
- [26] Ding C C, Zou Y D, Bi S D, Gao C Q, Liu X L, Cao C W, Meng Q L, Li C G. Geostatistics analysis on spatial patterns of *Myzus persicae* and *Erigonidium graminicola* in plum orchard. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7): 1308-1312.
- [27] Liu C Z, Wang G, Wang W X, Zhou S R. Spatial pattern of *Tetranychus urticae* population in apple tree garden. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 993-996.
- [28] Zhao W W. Preliminary Study on Population Diffusion and Behaviour of *Tetranychus viennensis* Zacher. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [29] Xu R M, Cheng X Y. Insect Population Ecology: Basis and Frontier. Beijing: Science Press, 2005: 7-11.
- [30] Pang B P, Zhao J X, Zhou X R, Guan M Z. Spatial pattern of *Sitobion avenae* (Fabricus) and its application. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry, 1999, 20(2): 83-86.

参考文献:

- [1] 李哲, 季荣, 谢宝瑜, 李典谟. 论昆虫空间生态学研究. 昆虫知识, 2004, 40(1): 1-6.
- [2] 牛新利, 巫厚长, 邹运鼎, 毕守东, 任翠农, 刘承社, 赵燕红, 陶金昌, 汪文俊. 黄瓜上烟粉虱成虫种群空间分布格局及时序动态. 中国农学通报, 2007, 23(7): 457-461.
- [3] 周福才, 任顺祥, 杜予州, 秦洁洋, 周桂生, 刘宗泉. 棉田烟粉虱种群的空间格局. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1239-1244.
- [6] 赵惠燕, 汪世则, 董应才. 麦蚜自然种群的空间动态. 生态学杂志, 1990, 9(4): 16-19.
- [7] 何连生, 倪汉祥, 李光博, 郭豫元. 麦蚜聚集与扩散行为的初步研究. 生态学杂志, 1992, 11(2): 8-13.
- [8] 汪信庚, 刘树生, 吴晓晶. 萝卜蚜种群的空间格局及其时序动态. 浙江农业大学学报, 1995, 21(5): 508-512.
- [9] 刘树生, 汪信庚, 吴晓晶, 施祖华. 甘蓝和白菜上桃蚜种群的空间格局及其时序动态. 昆虫学报, 1996, 39(2): 158-165.
- [12] 邹运鼎, 周夏芝, 李桂亭, 刘同文. 棉蚜在木槿上的扩散迁飞动态. 应用生态学报, 1999, 10(6): 699-702.
- [13] 王永宏, 仵均祥, 苏丽. 玉米蚜种群的空间动态. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 55-58.
- [14] 丁伟, 王进军, 赵志模, 陈贵红. 春玉米田蚜虫种群的数量消长及空间动态. 西南农业大学学报, 2002, 24(1): 13-16.
- [15] 太一梅, 傅杨, 杨本立, 陈国华, 陶玫. 梨二叉蚜种群空间分布型及聚集成因的研究. 云南农业大学学报, 2004, 19(3): 287-289.
- [16] 王伟明. 高山草原蝗虫种群空间格局研究. 草业学报, 1999, 8(2): 50-55.
- [17] 李小珍, 刘映红, 赵志模, 周利飞. 二点叶蝉自然种群的时空动态. 动物学研究, 2004, 25(3): 221-226.
- [21] 邹运鼎, 孟庆雷, 耿继光, 季近, 陈高潮, 王公明. 棉蚜与其天敌种群分布格局的关系. 应用生态学报, 1995, 6(2): 172-175.
- [22] 梅长军, 杨守明, 王祥胜, 胡本明, 沈阳, 程慧荣, 邵之生, 邹运鼎, 李桂亭, 孟庆雷, 耿继光. 麦蚜与其天敌种群在数量及空间上的动态关系. 安徽农业大学学报, 2000, 27(4): 358-361.
- [26] 丁程成, 邹运鼎, 毕守东, 高彩球, 刘小林, 曹传旺, 孟庆雷, 李昌根. 李园桃蚜和草间小黑蛛种群空间格局的地学统计学研究. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1308-1312.
- [27] 刘长仲, 王刚, 王万雄, 周淑荣. 苹果园二斑叶螨种群的空间格局. 应用生态学报, 2002, 13(8): 993-996.
- [28] 赵微微. 山楂叶螨种群扩散与行为研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [29] 徐汝梅, 成新跃. 昆虫种群生态学: 基础与前沿. 北京: 科学出版社, 2005: 7-11.
- [30] 庞保平, 赵建兴, 周晓榕, 关明卓. 麦长管蚜种群空间格局及其应用. 内蒙古农牧学院学报, 1999, 20(2): 83-86.