应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2013,50(2):488 - 495. DOI:10.7679/j.issn.2095 - 1353.2013.067

桃园生草复合生态系统中桃蚜与草间小黑蛛种群的地统计学分析*

万年峰[1,2**] 季香云[1] 蒋杰贤[1***] 黄开华[1]

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所 上海市设施园艺技术重点实验室 上海 201403;
2. 复旦大学生物多样性研究所/全球环境变化研究所 生物多样性和生态工程教育部重点实验室 上海 200433)

摘 要 利用地统计学原理和地理信息系统(GIS)分析了桃园生草模式下不同时期桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)种群和草间小黑蛛 *Erigonidium graminicola* Sundevall 种群的空间分布格局和空间相关性。结果表明,不同时期桃蚜和草间小黑蛛种群均存在较强的空间相关性,其理想的半变异函数曲线为高斯、圆型、指数或球型,其空间格局均呈聚集分布,变程范围分别为 6.8630 ~ 12.0903 m、6.8630 ~ 12.6980 m,空间结构比例分别为 0.0113 ~ 0.6546、0.0676 ~ 0.6129,表明桃园生草模式下桃树草间小黑蛛对桃蚜在空间位置上具有追随关系,对其种群数量的控制有较大作用,草间小黑蛛是桃蚜的优势天敌。

关键词 白三叶草,桃园,桃蚜,草问小黑蛛,空间格局,地学统计学

Geostatistic analysis for *Myzus persicae* and *Erigonidium graminicola* population in the compound ecosystem of peach orchards with ground cover vegetation

WAN Nian-Feng[1,2**] JI Xiang-Yun[1] JIANG Jie-Xian[1***] HUANG Kai-Hua[1]

(1. Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Ecological Environment Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science and Research Institute for the Changing Global Environment, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract The study was conducted in the Shanghai Municipality of Eastern China (121.41° E, 31.03° N, 4.3 m elevation) to evaluate the potential of ground cover vegetation in enhancing the pest-controlling ability of natural enemies to pests in peach orchards. Based on the principles of geostatistics and geographic information system (GIS), the spatial distribution pattern and spatial correlation for *Myzus persicae* (Sulzer) and *Erigonidium graminicola* Sundevall population in different periods in the compound ecosystem of peach orchards with ground cover vegetation was analyzed. The spatial distribution of *M. persicae* and *E. graminicola* population was also simulated by ordinary Kriging interpretation. The results indicated that *M. persicae* and *E. graminicola* population of different periods was both correlated spatially in the study area, respectively; the ideal semivariograms of *M. persicae* and *E. graminicola* could be described by Gaussian, Circular, Exponential or Spherical Model which all indicated aggregated spatial arrangement; the both ranges of *M. persicae* and *E. graminicola* varied from 6.8630 - 12.0903 m, 6.8630 - 12.6980 m, respectively; the proportion of spatial structure of *M. persicae* and *E. graminicola* was 0.0113 - 0.6546, 0.0676 - 0.6129, respectively. It could be concluded that the "following effect" of *E. graminicola* on *M. persicae* existed in spatial distribution and *E. graminicola* population had great controlling effect on *M. persicae*, and revealed that *E. graminicola* was the dominant natural enemy influencing *M. persicae* in the compound ecosystem of peach orchards with ground cover vegetation.

* 资助项目:上海市自然科学基金青年项目(12ZR1449100);上海市科委重大科技攻关项目(08DZ1900401)。

** E-mail: nfwan@hotmail.com

*** 通讯作者,E-mail:jiangjiexian@163.com

收稿日期:2012-01-13,接受日期:2012-11-20

Key words　*Trifolium repens*, peach orchard, *Myzus persicae*, *Erigonidium graminicola*, spatial pattern, geostatistics

空间格局是昆虫种群的重要属性之一,研究空间格局可以揭示昆虫种群的空间结构、种群下结构的状况及物种间的空间联系(丁程成等,2005;赵紫华等,2012)。从早期的频次分布法到以后的扩散型指数法、回归模型分析法,其共同点都是依赖于样本频次分布或均值、方差关系及其相应的判定准则确定空间分布格局,这些方法忽视了样本的空间位置和方向,不能区别不同空间格局的差异,并受样方和抽样区域大小的影响(Sawyer,1989;Hurlbert,1990)。而用地统计学方法研究昆虫种群空间格局,考虑了样点的位置和彼此距离,直接测定了空间结构相关性和依赖性,可用于研究有一定随机性和结构性的各种变量和空间分布规律(Liebhold *et al.*,1993;毕守东等,2000;丁程成等,2005)。近年来,国内外学者运用地统计学对昆虫种群的空间结构进行了较多研究(黄保宏等,2003;丁程成等,2005;Ifoulisb and Savopoulou-Soultania,2006;王瑞等,2009),而研究桃园生草模式下昆虫种群空间结构的报道鲜见。为此,作者应用该方法研究了桃园生草复合生态系统中不同时期桃树桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)与其优势性天敌草间小黑蛛 *Erigonidium graminicola* Sundevall 种群空间结构空间相关性,以期较深入地了解其在生草桃园中的具体空间分布及其动态,为作物多样化控害机制研究奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　样本区概况

试验在上海市浦东新区新场镇果园村水蜜桃基地(31.03°N,121.41°E)进行。桃园地处长江三角洲冲积平原前沿,海拔 4.3 m,属于北亚热带南缘东亚季风盛行地区。桃园地面以前覆盖生草(2008 年),桃树病虫害防治主要使用有机磷和菊酯类化学农药,地面不覆盖生草。为修复桃园生态系统,2009 年开始在桃园地面覆盖种植白三叶草(*Trifolium repens* L.)。试验区面积 3 hm^2,水蜜桃品种"新凤蜜露",8 年树龄为主,树高 2 ~ 2.5 m、株行距为 4 m × 4 m。

1.2　调查方法

在生草桃园以桃树南北为行,采用 4 m × 4 m 网络化取样调查方法(毕守东等,2003;黄保宏等,2003),共抽取样树 60 株,分 5 行每行 12 株;在每棵桃树树冠东、南、西、北 4 个方位和上、中、下 3 层各取 1 代表性枝条;调查每个枝条从梢部向内 30 cm 长度内桃蚜和草间小黑蛛的种群数量,同时对样地情况作详细记录(蒋杰贤等,2011;万年峰等,2011)。调查工作自 2010 年 4 月至 9 月,每 15 ~20 d 调查 1 次,共调查 10 次。调查期间,生草桃园按常规管理措施进行农事操作,不使用化学农药。

1.3　分析方法

1.3.1　空间结构分析　根据区域化变量理论(Schotzko and O'keffe,1990;王政权,1999),对于观察的数据系列 $Z(x_i)$,($i=1,2,3,\cdots,n$),样本半变异函数值 $\gamma(h)$ 可用下式计算:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]。$$

式中,$N(h)$ 是被 h 分割的数据对(x_i, x_i+h)的对数,$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是在点 x_i 和 x_i+h 处样本的测量值,h 是分割两样点的距离。

半变异函数的 3 个重要参数——基台值 C_0+C(sill)、变程 α(range)和块金值 C_0(nugget),可反映昆虫种群空间格局及空间相互依赖关系,同时还给出种群间的空间相关范围。变程是指使半变异函数达到平衡(基台值)时的 h 值,说明该昆虫种群在此范围内存在空间相关性;基台值指达到平衡时的半变异函数值;块金值指变异函数曲线被延伸至间隔距离为零时的截距,表示随机部分的空间异质性。

在空间上昆虫种群数量是区域化变量,因而可用区域化变量理论和方法进行研究。通过计算桃蚜和草间小黑蛛种群的半变异函数曲线和选择适合的半变异函数模型,分析其种群的空间格局及空间相关关系。空间结构分析在 ArcGIS 9.2 软件平台的 Geostatistical Analysis 模块上进行。

1.3.2　构建半变异函数最优模型　模型的选择取决于半变异图的性质和特征,本研究选择的模拟模型为球型模型、指数模型、高斯模型和圆型模型(Cliff and Ord,1981;丁岩钦,1994),具体选择时主要根据模拟误差最小原则。一个较好的模拟模

型应该满足以下条件:平均预测误差(mean error)尽可能接近0;均方根误差(root mean square error)尽可能小;平均克立格标准差(average standard deviation)尽可能地小;无偏估计(mean std)尽可能接近0;一致性估计(RMS Std)接近1(王正军等,2004)。

球型、指数型半变异函数说明所研究的种群属聚集分布;非水平直线型的半变异函数表明种群是中等程度的聚集分布,其空间依赖范围超过研究尺度。如果是随机分布,则 $\gamma(h)$ 随距离无一定规律性变化,完全随机或均匀的数据,$\gamma(h)$ 呈水平直线或稍有斜率,表明在抽样尺度下没有空间相关性(王政权,1999)。

空间结构比例(即块金值与基台值之比)可以揭示变量的空间相关性程度,若比值 <0.25,表明变量具有强烈的空间相关性;若比值 >0.75,则空间相关性很弱;若比值介于 0.25 ~0.75 之间,表明变量具有中等的空间相关性(Cambardella *et al.*,1989;郭旭东等,2000)。

1.3.3 空间分布模拟 在用空间统计学的理论和方法解决未知点性状值的预测或估计问题时,用 Kriging 插值法定量地分析所采集样本性状值的空间分布特征,再用半变异函数确定其权重后进行拟合(张蓉等,2007)。插值的生成在 ArcMap9.2 软件平台的 Spatial Analyst 模块支持下进行。

2 结果与分析

2.1 桃蚜和草间小黑蛛的半变异函数和最优模型的构建

在 ArcMap 软件平台下,用普通克立格空间插值法模拟不同半变异函数模型,得出 10 个时期桃蚜和草间小黑蛛最优半变异函数模型(表 1)。

表 1 用普通克立格空间插值法计算的桃蚜和草间小黑蛛最优半变异函数模型的误差

Table 1 Error of the optimal semivariogram models with ordinary Kriging interpolation for *Myzus persicae* and *Erigonidium graminicola*

取样日期(月-日) Sampling date (month-day)	物种 Species	模型类型 Model type	平均预测误差 Mean error	均方根误差 Root mean square error	平均预测标准差 Average standard deviation	无偏估计 Mean standardized	一致性估计 Root mean square standardized
4-13	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	0.0369	1.8600	2.1330	0.0153	0.8746
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	0.0014	0.3354	0.4231	0.0035	0.7990
4-29	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	-0.1881	8.7890	9.3460	-0.0182	0.9435
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	-0.0067	1.0640	1.1350	-0.0058	0.9377
5-12	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	0.0319	9.2150	11.6000	0.0031	0.7964
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	-0.0162	1.7080	2.1360	-0.0063	0.8032
5-28	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	-0.0838	9.4420	10.0400	-0.0068	0.9450
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	-0.0054	2.1190	2.4560	-0.0018	0.8691
6-14	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	0.0031	7.8700	8.2240	0.0018	0.9578
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	0.0125	2.3710	2.8600	0.0037	0.8346
6-30	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	-0.0477	5.3370	5.6670	-0.0064	0.9418
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	0.0030	2.2920	2.7180	0.0006	0.8479
7-15	桃蚜 *M. persicae*	圆型 Circular	-0.0022	0.6673	0.7121	-0.0015	0.9405
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	-0.0025	0.4969	0.5898	-0.0039	0.8524
7-30	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	-0.0061	0.7183	0.7609	-0.0054	0.9423
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	-0.0110	0.3984	0.5048	-0.0193	0.7993
8-16	桃蚜 *M. persicae*	圆型 Circular	-0.0248	0.5659	0.7000	-0.0305	0.8105
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	0.0089	2.3430	2.7860	0.0026	0.8471
9-3	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	-0.0216	1.2990	1.5140	-0.0119	0.8553
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	0.0196	1.9920	2.2910	0.0069	0.8747

由表 1 可以看出:1) 草间小黑蛛在 4 月 13 日的圆型函数模型平均预测误差和无偏估计最接近 0,而桃蚜在 7 月 15 日的圆型函数模型平均预测误差和无偏估计最接近 0;2) 草间小黑蛛在 4 月 29 日的指数函数模型一致性估计最接近 1,而桃蚜在 6 月 14 日的指数函数模型一致性估计最接近 1;3) 草间小黑蛛和桃蚜的圆型函数模型均方根误差最小值分别在 4 月 13 日和 8 月 16 日;4) 草间小黑蛛和桃蚜的圆型函数模型平均预测标准差最小值分别在 4 月 13 日、8 月 16 日。

2.2　桃蚜和草间小黑蛛的空间结构

桃蚜和草间小黑蛛种群数量的空间分析结果表明(表 2,图 1,图 2),其数量在不同发生时期都显示了明显的空间结构,空间格局均为聚集分布,都存在一定的空间相关性和明显的结构性。说明种群分布具有空间连续性,且随着距离的延长,其强度变化幅度减少。

表 2 表明,桃蚜和草间小黑蛛的分布都有较强的距离相关性,其变动范围分别为 6.8630 ~ 12.0903 m、6.8630 ~ 12.6980 m;对于空间结构比例 $C_0/(C_0 + C)$,桃蚜和草间小黑蛛分别为 0.0113 ~ 0.6546、0.0676 ~ 0.6129,这说明其在田间种群格局均呈聚集分布。

在桃蚜发生初期(4 月 13 日),其种群密度不高,块金值(C_0)和基台值($C_0 + C$)较低,而其空间分布属中等聚集程度,种群空间相关范围为 7.2620 m (图 1:A),即桃蚜在直径为 7.2620 m 的区域中能相互影响。4 月中旬至 6 月底,桃蚜种群密度较大,块金值和基台值分别在 14.1250 ~ 73.4409、31.3295 ~ 156.9041 之间,而种群相关范围为变化不大(图 1:B ~ F),均呈中等聚集分布格局。进入 7 月,气温逐渐升高,桃蚜种群密度逐渐下降,块金值和基台值处在较低水平,变程在 8.8940 ~ 12.0903 m 之间(图 1:G ~ J),然而,9 月 3 日桃蚜种群聚集程度最强烈,空间结构比例仅为 0.0113。

在桃生长早期(5 月前),草间小黑蛛种群密度较低,块金值和基台值相对比较小,种群空间相关范围在 7.4997 ~ 8.5446 m 之间(图 2:A,B)。进入花蕾期(5 月后),草间小黑蛛种群数量逐渐增加,块金值和基台值也较高,其最高值均在 6 月 14 日,分别为 3.9552、7.8689,变程由 5 月 12 日的 9.3887 m 逐渐下降至 6 月 30 日的 6.8630 m(图 2:C ~ F),其种群仍处在中等聚集空间格局。7 月 15 日和 7 月 30 日两次调查发现,草间小黑蛛种群密度有一个回落的态势,其块金值和基台值都比较小,变程变化幅度大(图 2:G,H)。8 月中旬后草间小黑蛛种群密度又逐渐增大,块金值和基台值也比较大,在较小范围内(7.7721 ~ 7.9528 m),其种群呈聚集分布,其中,8 月 16 日的空间结构比例最小(0.0676),呈强烈的空间聚集分布。

3　讨论

利用昆虫种群空间格局的经典研究方法不仅不能充分获取种群数量分布的空间位置和空间方向,也不能确定空间依赖范围大小,而且容易导致同一组资料用不同方法拟合时可能会同时出现多种理想的空间分布格局,因而难以区别不同空间格局的差别,而地学统计学方法分析昆虫空间格局可以避免上述问题(Liebhold *et al.*,1993;毕守东等,2000)。

某昆虫种群空间分布可能与其固有的生物学特性(毕守东等,2000;周强等,2001;邹运鼎等,2001)、区域的地理特征(张蓉等,2007,2009)、种植模式与农事操作方式(万年峰等,2011)等有关,然而,害虫与其天敌种群在时空上的分布格局除与上述因素有关,可能还更与其捕食-被捕食或寄生-被寄生而产生的尾随关系有关(赵紫华等,2011)。截止目前,运用地计学方法分析果园常规种植模式下害虫与其天敌之间的尾随效应已有较多报道(毕守东等,2000;黄保宏等,2003;丁程成等,2005),而运用该方法研究果园生草复合生态系统中害虫与其天敌之间的空间格局关系未见报道。本研究表明,桃园生草复合生态系统中不同时期草间小黑蛛种群变程的变化趋势与桃蚜种群变程的变化趋势基本一致,具有较强的时空相关性和依赖性。丁程成等(2005)认为害虫的聚集格局是一种最佳的防御天敌、实现自我保护的空间格局,天敌的聚集格局则是攻击捕获食饵、提高攻击效率的最佳空间格局。本文通过地统计学分析表明,10 次调查数据中,草间小黑蛛和桃蚜都呈聚集分布格局,这充分说明桃园生草复合生态系统中草间小黑蛛种群对桃蚜种群在空间位置上具有较强的追随关系。丁程成等(2005)报道了李园常规单作模式下草间小黑蛛与桃蚜存在明显的追随

表 2 不同时期桃蚜和草间小黑蛛种群数量的半变异函数模型参数及空间格局

Table 2 Model parameters of semivariograms and spatial pattern for *Myzus persicae* and *Erigonidium graminicola* at different time

日期（月－日）Date (month-day)	物种 Species	模型类型 Model type	变程 Range (m) α	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	空间结构比例 Proportion of spatial structure $C_0/(C_0 + C)$	空间格局 Spatial pattern
4－13	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	7.2620	2.9168	4.6009	0.6340	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	8.5446	0.0855	0.2150	0.3977	中等聚集 Mid-aggregation
4－29	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	8.5609	46.1067	86.8282	0.5310	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	7.4997	0.7391	1.2059	0.6129	中等聚集 Mid-aggregation
5－12	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	7.8646	73.4409	156.9041	0.4681	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	9.3387	1.9652	5.4417	0.3611	中等聚集 Mid-aggregation
5－28	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	6.8630	54.2058	93.8387	0.5776	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	7.7647	3.3631	6.3549	0.5292	中等聚集 Mid-aggregation
6－14	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	6.9276	35.6414	63.1979	0.5640	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	6.8630	3.9552	7.8689	0.5026	中等聚集 Mid-aggregation
6－30	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	7.6903	14.1250	31.3295	0.4509	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	6.8630	1.9699	7.2934	0.2701	中等聚集 Mid-aggregation
7－15	桃蚜 *M. persicae*	圆型 Circular	12.0903	0.3515	0.5969	0.5889	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	6.8630	0.1032	0.3412	0.3025	中等聚集 Mid-aggregation
7－30	桃蚜 *M. persicae*	高斯 Gaussian	9.5033	0.4196	0.6411	0.6546	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	球型 Spherical	12.6980	0.1204	0.3659	0.3291	中等聚集 Mid-aggregation
8－16	桃蚜 *M. persicae*	圆型 Circular	10.2518	0.2367	0.6746	0.3509	中等聚集 Mid-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	指数 Exponential	7.7721	0.5684	8.4110	0.0676	强烈聚集 High-aggregation
9－3	桃蚜 *M. persicae*	指数 Exponential	8.8940	0.0306	2.7149	0.0113	强烈聚集 High-aggregation
	草间小黑蛛 *E. graminicola*	圆型 Circular	7.9528	3.1839	5.4131	0.5882	中等聚集 Mid-aggregation

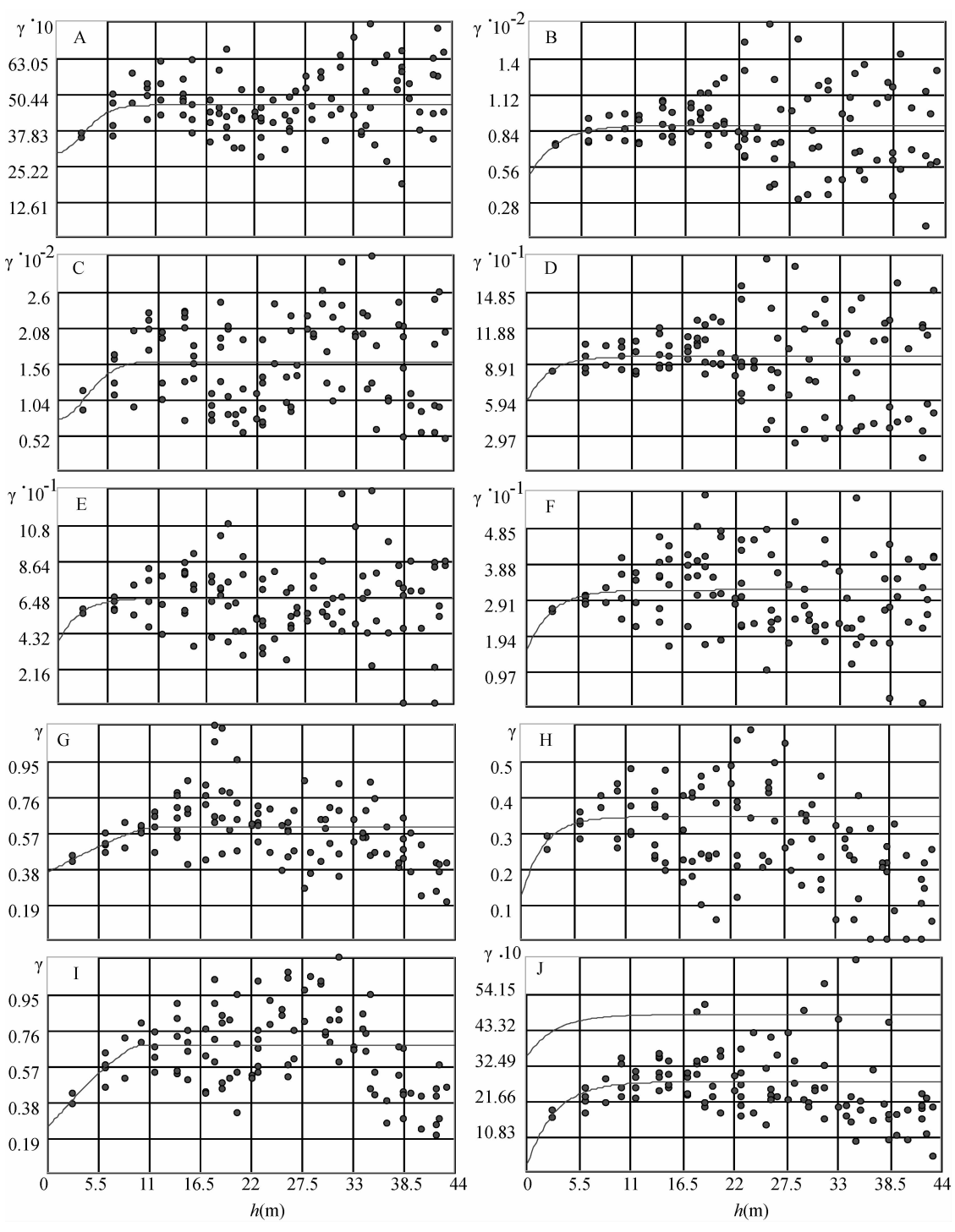

图 1　不同时期桃蚜种群的半变异函数曲线

Fig. 1　Semivariograms curve for *Myzus persicae* at different time

注:A ~ J 表示日期(月 - 日)。图 2 同。A - J indicates date(month-day). A:4 - 13; B: 4 - 29; C: 5 - 12; D: 5 - 28; E: 6 - 14; F: 6 - 30; G: 7 - 15; H: 7 - 30; I: 8 - 16; J: 9 - 3. The same for Fig. 2.

关系,这与本试验研究表明的桃园生草模式下草间小黑蛛与桃蚜存在明显的追随关系相一致,迫于人力、物力、财力等主客观因素的影响,本试验未进行桃园常规单作模式下桃树草间小黑蛛与桃蚜种群空间分析,桃园常规单作模式下桃树草间小黑蛛与桃蚜之间的尾随关系怎样? 这有待进一

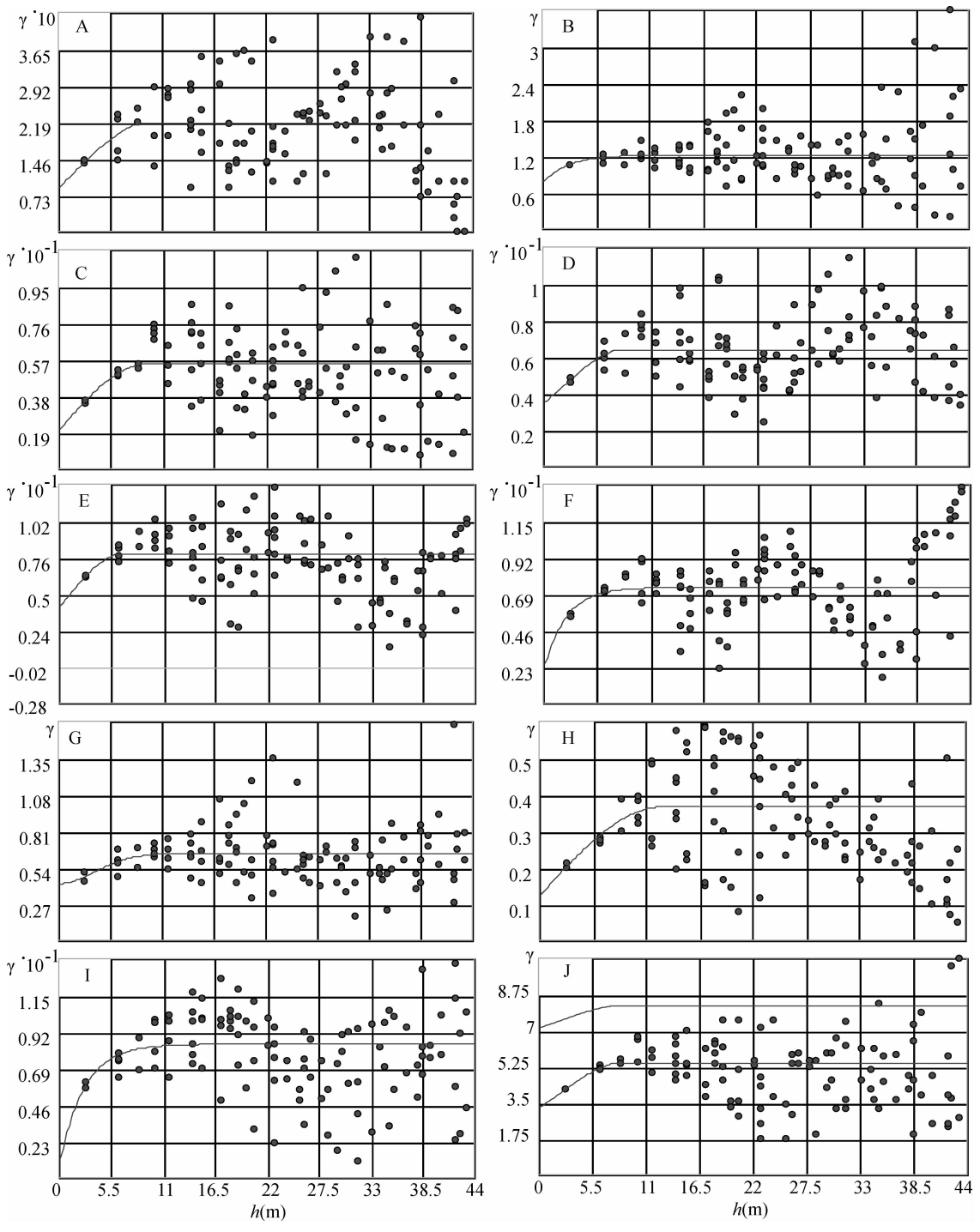

图 2　不同时期草间小黑蛛种群的半变异函数曲线

Fig. 2　Semivariograms curve for Erigonidium graminicola at different time

步研究。

参考文献(References)

Cambardella CA, Moorman AT, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501 – 1511.

Cliff AD, Ord JK, 1981. Spatial Processes: Models and Applications. London: Pion Ltd. 1 – 266.

Hurlbert SH, 1990. Spatial distribution of the montane Unicom. *Oikos*, 58:257 – 271.

Ifoulisb AA, Savopoulou-Soultania M, 2006. Use of