小麦田地下害虫幼虫的空间分布型与抽样技术

陆俊姣^{1*} 任美凤¹ 李大琪¹ 李霞² 史高川³ 董晋明^{1*}

(1. 山西农业大学植物保护学院, 农业有害生物综合治理山西省重点实验室, 太原 030031;

2. 临汾市农业农村局, 山西 临汾 041000; 3. 山西农业大学棉花研究所, 运城 044000)

摘要: 为明确山西省南部小麦田地下害虫的空间分布型及抽样技术, 采用连片调查法对小麦田地下害虫种群进行系统调查, 通过5个聚集度指标、 m^*-m 回归模型和 Taylor 幂法则对其不同种群空间分布型进行分析, 利用聚集均数分析其聚集原因, 确定其理论抽样数和序贯抽样模型。结果表明, 小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和蝼蛄的聚集度指标扩散系数 $C > 1$, 丛生指数 $I > 0$, 负二项分布 K 值 > 0 , 久野指数 $C_A > 1$, 聚块指数 $m^*/\bar{x} > 1$, 空间分布型均表现为聚集分布。金针虫的1组数据所有指标均不符合聚集分布, 其余符合聚集分布。由 m^*-m 回归模型和 Taylor 幂法则拟合模型得出小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的空间分布型为聚集分布, 聚集度依赖于种群密度, 且聚集程度随着种群密度的升高而升高。混合种群、金针虫和蝼蛄的种群个体间相互排斥, 基本成分为单个个体 ($\alpha < 0, \beta > 1$), 而蛴螬种群基本成分是个体群, 个体间相互吸引 ($\alpha > 0, \beta > 1$); 聚集原因随种群密度而变化。经 Iwao 方法分析, 当允许误差 D 为 0.3, 地下害虫混合种群、蛴螬种群和金针虫种群的虫口密度均为 4 头/ m^2 时, 所需的理论抽样数分别为 44、26 和 114 m^2 。

关键词: 地下害虫; 空间分布型; 小麦; 抽样技术

Spatial distribution pattern and sampling technique of the larvae of subterranean pest insects in wheat fields

Lu Junjiao^{1*} Ren Meifeng¹ Li Daqi¹ Li Xia² Shi Gaochuan³ Dong Jinming^{1*}

(1. Shanxi Key Laboratory of Integrated Pest Management in Agriculture, College of Plant Protection,

Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi Province, China; 2. Bureau of Agriculture

and Rural Affairs of Linfen, Linfen 041000, Shanxi Province, China; 3. Cotton Research Institute,

Shanxi Agricultural University, Yuncheng 044000, Shanxi Province, China)

Abstract: In order to clarify the spatial distribution pattern and sampling technique of the subterranean pests in wheat fields in southern Shanxi Province, the population of the subterranean pests was systematically investigated, and the spatial distribution patterns of different populations were analyzed by using five aggregation indexes, m^*-m regression model and Taylor's power law. The reasons for aggregation were analyzed by aggregation mean, and the optimum sampling number and sequential sampling model were determined. The results showed that the spatial distribution patterns of the mixed population of subterranean pests, white grubs and mole cricket belonged to aggregated distribution, with the diffusion coefficient $C > 1$, the clumping index $I > 0$, the negative binomial distribution parameter $K > 0$, the Kuno index $C_A > 1$ and the patchiness index $m^*/\bar{x} > 1$. However, all the indexes for one group of data of the wireworms did not conform to the aggregation distribution, and the rest was in accordance with the aggregation distribution. Based on the parameters of m^*-m regression model and Taylor's power law, the spatial

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200404-9), 国家公益性行业(农业)科研专项(201503124)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: lujunjiao@126.com, dongjinming59@163.com

收稿日期: 2020-04-09

distribution patterns of the mixed population of subterranean pests, white grubs and wireworms in wheat fields belonged to aggregated distribution; the aggregation degree depended on the density, and the aggregation degree increased with increasing population density. The fundamental components of the aggregation of the mixed population of subterranean pests, wireworms and mole cricket were individuals that were mutually exclusive ($\alpha < 0, \beta > 1$), while the fundamental components of the white grubs were colonies by mutual attraction ($\alpha > 0, \beta > 1$). The reasons for aggregation varied with the population density. The optimum sampling numbers for the mixed populations of subterranean pests, white grubs and wireworms under different error rates and population densities were determined by using Iwao's method: when the permissible error D was 0.3 and their population densities were 4 larvae/m², the optimum sampling numbers were 44 m², 26 m² and 114 m², respectively.

Key words: subterranean pest insects; spatial distribution pattern; wheat; sampling technique

种群分布格局是指种群内个体在其生存空间的分布形式,是种群的重要属性之一。种群的空间分布图式包括2个概念:分布是指数理统计学上变量的分布,可分为Poisson分布、正二项分布和负二项分布;图式是指有机体在空间定位所表现出来的图式,可分为随机分布、均匀分布和聚集分布(戈峰,2008)。两者之间存在着对应关系,随机分布图式符合数理统计上的Poisson分布,均匀分布图式符合数理统计上的正二项分布,聚集分布图式符合数理统计上的负二项分布(丁岩钦,1980)。种群的分布型不但因种而异,而且同一种的虫态、密度或抽样单位大小等不同时,分布型也有差异(丁岩钦等,1978)。目前,对昆虫种群空间分布格局的研究主要采用分布型指数法和回归模型法(于新文和刘晓云,2001),分布型指数法主要涉及扩散系数 C (丁岩钦等,1978)、丛生指数 I (David & Moore, 1954)、负二项分布 K 值(Waters, 1959)和久野指数 C_A (Kuno, 1969)等多个聚集度指标;回归模型法主要为Taylor幂法则(Taylor, 1961)和Iwao回归分析法(Iwao, 1968; 1972)。目前已利用这2种方法成功研究了牧草盲蝽 *Lygus pratensis*、苹果全爪螨 *Panonychus ulmi* 和双斑长跗萤叶甲 *Monolepta hieroglyphica* 等多种昆虫的空间分布格局(闫文涛等,2011;张聪等,2013;王伟等,2016)。近年来,地统计学方法也被成功应用于红脂大小蠹 *Dendroctonus valens*(潘杰等,2011)、二点委夜蛾 *Athetis lepigone*(陈浩等,2015)、柳毒蛾 *Leucoma salicis*(孙鹏举等,2015)和褐梗天牛 *Arhopalus rusticus*(陈潜等,2018)等多种昆虫的空间分布研究,而经典的频次分布检验法由于计算较为复杂、信息损失较大等原因应用较少(于新文和刘晓云,2001)。

中国地下害虫种类有320余种,近年来严重为

害农作物的主要有蛴螬、金针虫、蝼蛄、网目拟地甲 *Opatrum subaratum*、种蝇以及小地老虎 *Agrotis ipsilon* 等种类(魏鸿钧等,1989;曹雅忠等,2005)。山西省临汾市小麦田地下害虫主要以蛴螬、金针虫和蝼蛄为主,占地下害虫种群数量的98%以上(陆俊姣等,2017)。地下害虫发生隐蔽,田间观测及取样难度较大,了解地下害虫的分布格局不仅有助于对其生物学特性进行深入研究,而且是制定科学抽样技术及对其种群动态进行准确测报的基础。苏骏等(1989)对细胸金针虫 *Agriotes subrittatus* 的田间分布型进行研究,发现在不同深度土层和不同为害季节幼虫的空间分布存在一定差异;Oyafuso et al. (2011)对蛴螬的田间分布型也进行了相关研究。但地下害虫在田间一般是混合发生的,加之近20年来大面积推行浅耕或免耕等保护性耕作,且当前条件下地下害虫在土壤中的分布是否发生变化尚不清楚,因此明确地下害虫的空间分布型对其防控具有重要的实践意义。

地下害虫对小麦的为害主要集中在苗期和返青至拔节期。本课题组前期研究了小麦-夏玉米轮作田地下害虫种群随季节变化在土壤中上下垂直迁移的活动规律,明确了地下害虫不同类群在土壤中的迁移规律(陆俊姣等,2017)。本研究将针对小麦苗期和返青至拔节期地下害虫分布最广的30 cm深土层进行调查,明确地下害虫混合种群及主要优势种群的空间分布型,并进行抽样技术分析,以期为准了解地下害虫种群扩散行为和制定种群管理及持续控制对策提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试数据来源:在山西省运城市盐湖区北相镇

选择2块地、万荣县选择1块地和临汾市尧都区选择3块地,共6块样地,每块样地面积不小于300 m²,在小麦越冬前和返青后分别调查1次,每块田采用逐行逐株取样法调查,每样方大小为长50 cm×宽50 cm×深30 cm,根据其所在位置,将小麦根际挖出的地下害虫数量按照蛴螬、金针虫和蝼蛄分别记录在坐标纸上,制成各个调查样地的地下害虫混合种群(包含上述所有地下害虫种类)以及蛴螬、金针虫、蝼蛄的田间实际分布图。据室内鉴定,蛴螬为铜绿丽金龟甲 *Anomala corpulenta*、暗黑鳃金龟甲 *Holotrichia parallela*、华北大黑鳃金龟甲 *Holotrichia oblita* 和苹毛丽金龟甲 *Proagopertha lucidula* 的混合种群,金针虫以沟金针虫 *Pleonomus canaliculatus* 为优势种群,细胸金针虫也有发生,蝼蛄为东方蝼蛄 *Gryllotalpa orientalis*。经计算,样地1~6的地下害虫混合种群平均密度分别为1.00、0.85、1.53、3.46、4.02和3.71头/m²。

1.2 方法

1.2.1 聚集度指标的计算

将小麦田地下害虫混合种群以及蛴螬、金针虫、蝼蛄的调查数据进行整理分析,制成频次表,分别计算平均密度与方差,通过扩散系数 C (丁岩钦等, 1978)、丛生指数 I (David & Moore, 1954)、负二项分布 K 值 (Waters, 1959)、久野指数 C_A (Kuno, 1969) 和聚块指数 $m^*/\bar{x}$ (Lloyd, 1967) 这5个聚集度指标来确定各种地下害虫及混合种群的空间分布型。扩散系数 $C=S^2/\bar{x}$, 其中 S^2 为样本方差, $\bar{x}$ 为种群的平均密度; 当 $C<1$ 时, 种群为随机分布, 当 $C=0$ 时, 为均匀分布, 当 $C>1$ 时, 为聚集分布。丛生指数 $I=(S^2-\bar{x})/\bar{x}$, 当 $I<0$ 时, 种群为均匀分布, 当 $I=0$ 时, 为随机分布, 当 $I>0$ 时, 为聚集分布。负二项分布 K 值, $K=\bar{x}^2/(S^2-\bar{x})$, 当 $K<0$ 时, 种群为均匀分布, 当 $K>0$ 时, 为聚集分布, 当 $K\rightarrow\infty$ 时, 为随机分布。久野指数 $C_A=1/K=(S^2-\bar{x})/\bar{x}^2$, 当 $C_A<1$ 时, 种群为均匀分布, 当 $C_A=1$ 时, 为随机分布, 当 $C_A>1$ 时, 为聚集分布。聚块指数 $m^*/\bar{x}$ 中的 m^* 为平均拥挤度, $m^*=\bar{x}+(S^2-\bar{x})/\bar{x}$; 当聚块指数 $m^*/\bar{x}<1$ 时, 种群为均匀分布, 当 $m^*/\bar{x}=1$ 时, 为 Poisson 分布, 当 $m^*/\bar{x}>1$ 时, 为聚集分布。

1.2.2 线性回归方程检验

Iwao m^*-m 回归分析法 (Iwao, 1968; 1972): $m^*=\alpha+\beta m$ 。式中 α 为基本成分按大小分布的平均拥挤度; β 为在低密度下基本成分分布的相对聚集度。当 $\alpha=0$ 时, 分布的基本成分是单个个体; 当 $\alpha<0$ 时, 分布的基本成分是单个个体, 个体间相互排斥; 当 $\alpha>0$ 时, 分布的基本成分是个体群, 个体间相互吸引。

当 $\beta=1$ 表示随机分布, $\beta>1$ 表示聚集分布, $\beta<1$ 表示均匀分布。当 m^* 和 m 呈线性关系时, 优先使用 Iwao m^*-m 回归模型, 当 m^* 和 m 呈非线性关系时, 可采用徐汝梅等 (1984) 的改进模型 $m^*=\alpha'+\beta'm+\gamma m^2$, 式中 α' 为每个基本成分中个体数分布的平均拥挤度, β' 为在低密度下基本成分分布的相对聚集度, γ 为基本成分分布的相对聚集度随种群密度而变化的速率; 或采用于秀林和任朝佐 (1986) 再次改进的模型 $m^*=\alpha'+\beta'm+\gamma m^2+\delta m^3$, 式中 α' 和 β' 的定义同上, $\gamma'+2\delta m$ 为基本成分分布的相对聚集度随种群密度而变化的速率, 2δ 是基本成分分布的相对聚集度随种群密度而变化的加速率。多数情况下, 种群的 m^* 与 m 的关系呈线性回归关系, 而 α 与 β 的不同组合就提供了种群的不同分布型关系。当 $\alpha=0, \beta=0$ 时, 种群分布型为随机型; 当 $\alpha>0, \beta=1$ 或 $\alpha=0, \beta>1$ 或 $\alpha>0, \beta>1$ 时, 种群分布型均为聚集型。

Taylor 幂法则: Taylor (1961) 发现样本平均密度 $\bar{x}$ 与样本方差 S^2 的关系可用指数公式 $S^2=a\bar{x}^b$ 进行拟合, 可将指数公式变换为 $\lg S^2=\lg a+b\lg \bar{x}$, 式中 a, b 为常数。 b 表示种群聚集度对密度依赖性的一个测度, 当 $\lg a=0, b=1$ 时, $S^2=\bar{x}$, 种群为随机分布; 当 $\lg a>0, b=1$ 时, $S^2/\bar{x}=a$, 为聚集分布, 但聚集度不依赖于密度; 当 $\lg a>0, b>1$ 时, 为聚集分布, 聚集度依赖于密度; 当 $\lg a<0, b<1$ 时, 为均匀分布, 种群密度越高表明分布越均匀。

1.2.3 聚集原因的检验

通过聚集均数可以检验地下害虫的聚集原因, 聚集均数 λ 的计算公式为 $\lambda=0.5\bar{x}\gamma/K$, 其中 γ 是自由度为 $2K$ 的 $\chi^2_{0.05}$ 分布的函数值, 当 $2K$ 为非整数时, 通过线性内插法求得 $\chi^2_{0.05}$ 的值 (丁岩钦, 1980)。当 $\lambda<2$ 时, 种群的聚集是由某些环境因素引起的; 当 $\lambda\geq 2$ 时, 种群的聚集是由昆虫自身的聚集习性或者外界环境因素引起的。

1.2.4 理论抽样数的确定

基于 1.2.2 线性回归方程检验结果, 小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 间呈显著线性关系, 因此可应用 Iwao 模型进行抽样技术研究, 当确立了 $m^*=\alpha+\beta m$ 的直线回归方程并确定平均密度 m 后, 即可计算小麦田地下害虫在不同虫口密度下的理论抽样数 $n, n=t^2[(\alpha+1)/m+\beta-1]/D^2$, 式中, $t=1.96$ (保证可靠概率 95% 条件下的正态离差值), D 为允许误差, α, β 为聚集参数, 同 1.2.2。在调查中发现, 样地 4~6 蝼蛄种群数量极少, 而样地 1~3 的蝼蛄种群密度较低且样地量较少, 将

会导致理论抽样数模型模拟数据不准确,因此不对蝼蛄的理论抽样数进行分析。

1.2.5 序贯抽样模型确定

采用 Iwao (1975) 提出的序贯抽样决策模型 $T'(n) = nm_0 \pm t\sqrt{n[(\alpha + 1)m_0 + (\beta - 1)m_0^2]}$ 拟合得到小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的理论抽样数上下限,式中, $T'(n)$ 为理论抽样数上下限, m_0 为达到防治指标的种群密度,其他参数定义同1.2.4;同时计算最大抽样数 $n_{\max} = t^2[(\alpha + 1)/m_0 + (\beta - 1)]/D^2$,根据序贯抽样模型制定序贯抽样表,并以此作为是否采取防治措施的依据。

2 结果与分析

2.1 小麦田地下害虫的聚集度指标分析

样地1~6的地下害虫混合种群、蛴螬和样地1~3的蝼蛄以及样地1~2、样地4~6的金针虫的扩散系数 $C > 1$ 、丛生指数 $I > 0$ 、负二项分布 K 值 > 0 、久野指数 $C_A > 0$ 、聚块指数 $m^*/\bar{x} > 1$ (表1),均符合聚集分布的指标要求,表明样地1~6的地下害虫混合种群、蛴螬和样地1~3的蝼蛄以及样地1~2、样地4~6的金针虫在土壤中的分布属于聚集分布。而样地3金针虫的聚集度指标均不符合聚集分布。

表1 小麦田地下害虫不同种群的各项聚集度指标值

Table 1 Aggregation indices of various subterranean pest insect populations in wheat fields

种群 Population	样地编号 Field no.	扩散系数 Diffusion coefficient C	丛生指数 Clumping index I	负二项分布 K 值 Negative binomial distribution K value	久野指数 Kuno index C_A	平均拥挤度 Mean crowding m^*	聚块指数 Patchiness index $m^*/\bar{x}$
混合种群 Mixed population	1	1.17	0.17	1.49	0.67	0.42	1.67
	2	1.16	0.16	1.30	0.77	0.38	1.77
	3	1.14	0.14	2.71	0.37	0.52	1.37
	4	1.74	0.74	1.17	0.86	1.60	1.86
	5	1.51	0.51	1.96	0.51	1.52	1.51
	6	1.87	0.87	1.07	0.94	1.80	1.94
蛴螬 White grubs	1	1.16	0.16	0.52	1.92	0.25	2.92
	2	1.04	0.04	1.20	0.83	0.08	1.83
	3	1.11	0.11	1.84	0.54	0.30	1.54
	4	1.11	0.11	3.33	0.30	0.46	1.30
	5	1.31	0.31	2.10	0.48	0.96	1.48
	6	1.08	0.08	3.07	0.33	0.31	1.33
金针虫 Wireworms	1	1.11	0.11	1.42	0.70	0.28	1.70
	2	1.16	0.16	1.06	0.95	0.33	1.95
	3	0.98	-0.02	-8.80	-0.11	0.16	0.89
	4	1.87	0.87	0.33	3.03	1.15	4.03
	5	1.14	0.14	2.01	0.50	0.41	1.50
	6	1.94	0.94	0.56	1.80	1.47	2.80
蝼蛄 Mole cricket	1	1.53	0.53	0.42	2.37	0.76	3.37
	2	1.05	0.05	1.56	0.64	0.13	1.64
	3	1.41	0.41	0.42	2.40	0.58	3.40

2.2 线性回归方程检验

2.2.1 Iwao m^*-m 回归分析法

小麦田地下害虫混合种群平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 的线性关系极显著 ($P=0.001$), 因此直接采用 m^*-m 回归模型检验, 得到回归方程 $m^* = -0.043 + 1.784m$ ($R^2=0.948$), $\alpha = -0.043 < 0$ 、 $\beta = 1.784 > 1$, 说明小麦田地下害虫混合种群的空间分布型为聚集分布, 个体间相互排斥, 基本成分为单个个体。

小麦田蛴螬平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 的线

性关系极显著 ($P < 0.001$), 因此直接采用 m^*-m 回归模型检验, 得到回归方程 $m^* = 0.041 + 1.353m$ ($R^2 = 0.965$), $\alpha = 0.041 > 0$ 、 $\beta = 1.353 > 1$, 说明小麦田蛴螬种群分布的空间分布型为聚集分布, 基本成分是个体群, 个体间相互吸引。

小麦田金针虫平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 的线性关系显著 ($P = 0.009$), 因此直接采用 m^*-m 回归模型检验, 得到回归方程 $m^* = -0.299 + 3.492m$ ($R^2 = 0.789$), $\alpha = -0.299 < 0$ 、 $\beta = 3.492 > 1$, 说明小麦田地下害

虫混合种群的空间分布型为聚集分布,基本成分为单个个体,个体间相互排斥。

小麦田蝼蛄平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 的线性关系显著 ($P=0.029$), 因此直接采用 m^*-m 回归模型检验, 得到回归方程 $m^* = -0.192 + 4.324m$ ($R^2=0.991$), $\alpha = -0.192 < 0$, $\beta = 4.324 > 1$, 说明小麦田地下害虫混合种群的空间分布型为聚集分布, 基本成分为单个个体, 个体间相互排斥。

2.2.2 Taylor 幂法则

小麦田地下害虫混合种群平均密度与方差之间的幂函数关系为 $\lg S^2 = 0.231 + 1.282 \times \lg m$ ($R^2=0.984$, $P < 0.001$), 相关性显著, $\lg a = 0.231 > 0$, $b = 1.282 > 1$, 说明小麦地下害虫混合种群在任何密度下都为聚集分布, 聚集度依赖于种群密度, 而且聚集程度随着种群密度的升高而升高。

小麦田蛴螬平均密度与方差之间的幂函数关系为 $\lg S^2 = 0.094 + 1.055 \times \lg m$ ($R^2=0.996$, $P < 0.001$), 相关性显著, $\lg a = 0.094 > 0$, $b = 1.055 > 1$, 说明小麦蛴螬种群在任何密度下都为聚集分布, 聚集度依赖于种群密度, 而且聚集程度随着种群密度的升高而升高。

小麦田金针虫平均密度与方差之间的幂函数关系为 $\lg S^2 = 0.445 + 1.531 \times \lg m$ ($R^2=0.928$, $P=0.001$), 相关性显著, $\lg a = 0.445 > 0$, $b = 1.531 > 1$, 说明小麦金针虫种群在任何密度下都为聚集分布, 聚集度依赖于种群密度, 而且聚集程度随着种群密度的升高而升高。

2.3 聚集原因的检验

地下害虫混合种群在样地 4~6 的聚集均数 λ 均大于等于 2, 说明地下害虫混合种群的聚集可能是由昆虫自身的聚集习性或者外界环境因素引起的; 而样地 1、2、3 的地下害虫混合种群和所有样地的蛴螬及金针虫的聚集均数 λ 均小于 2, 说明这些地下害虫种群的聚集可能是由某些环境因素引起的(表 2)。

表 2 小麦田地下害虫的聚集均数

Table 2 Bliackiths values of subterranean pest insect populations in wheat fields

样地编号 Field no.	混合种群 Mixed population	蛴螬 White grubs	金针虫 Wireworms
1	0.50	0.31	0.34
2	0.49	0.11	0.48
3	0.78	0.42	-
4	2.22	0.67	1.66
5	2.00	1.49	0.65
6	2.61	0.48	1.81

将地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的平均密

度和聚集均数进行相关性分析, 得到各自的线性回归方程, 混合种群为 $y = 2.507x - 0.088$ ($r^2=0.921$, $P=0.010$), 蛴螬为 $y = 2.130x + 0.021$ ($r^2=0.974$, $P < 0.001$), 金针虫为 $y = 3.946x - 0.130$ ($r^2=0.696$, $P=0.039$), 其中 y 为平均密度, x 为聚集均数。地下害虫混合种群和蛴螬的平均密度和聚集均数均呈极显著线性相关, 金针虫的平均密度和聚集均数呈显著线性相关, 聚集均数均随着种群密度的增加而增大。通过地下害虫的平均密度得到聚集均数的发展趋势, 当地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的平均密度分别低于 3.33、3.72 和 2.16 头/ m^2 时, 聚集均数均小于 2, 其聚集可能是由天气、土壤性质、作物种类及其生长状况等环境因素引起的; 当地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的平均密度分别高于 3.33、3.72 和 2.16 头/ m^2 时, 聚集均数均大于 2, 表明其聚集可能是地下害虫自身聚集习性和环境因子综合作用的结果。

2.4 理论抽样数的确定

小麦田地下害虫混合种群 Iwao 回归模型的 $\alpha = -0.043$, $\beta = 1.784$; 小麦田蛴螬 Iwao 模型的 $\alpha = 0.041$, $\beta = 1.353$, 小麦田金针虫 Iwao 回归模型的 $\alpha = -0.299$, $\beta = 3.492$ 。取 $t = 1.96$, $D = 0.1, 0.2, 0.3$, 得到小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫在不同虫口密度下的理论抽样数(表 3)。结果表明, 在允许误差一定的情况下, 地下害虫虫口密度越大, 所需的抽样数越少; 允许误差越大, 所需的抽样数越少。当允许误差 D 为 0.2, 地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的虫口密度为 4 头/ m^2 时, 所需的理论抽样数分别为 98、59 和 256 m^2 , 而当允许误差 D 为 0.3 时, 地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫的虫口密度为 4 头/ m^2 时, 所需的理论抽样数分别为 44、26 和 114 m^2 。

2.5 序贯抽样模型的确定

应用 Iwao 序贯抽样模型对小麦田地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫理论抽样数的上下限进行分析。取 $t = 1.96$, $m_0 = 4$ 头/ m^2 时, 小麦田地下混合种群的抽样模型为 $T'_1(n) = 4n \pm 7.93\sqrt{n}$, 蛴螬种群的抽样模型为 $T'_2(n) = 4n \pm 6.14\sqrt{n}$, 金针虫种群的抽样模型为 $T'_3(n) = 4n \pm 12.80\sqrt{n}$ 。

设允许误差 D 为 0.3, 地下害虫混合种群、蛴螬、金针虫的虫口密度为 4 头/ m^2 时, 所需理论抽样数分别为 44、26 和 114 m^2 。当调查 5 m^2 内的地下害虫混合种群时, 如果累积虫量大于 38 头, 则需要防治; 如果累积虫量小于 2 头, 则不需要防治; 如果累积虫量在两者之间, 则继续调查(表 4)。依此

类推,直至达到理论抽样数 44 m²,此时累积虫量如果大于 176 头,则需要进行防治。当调查 5 m²内的蛴螬种群时,如果累积虫量大于 34 头,则需要进行防治;如果累积虫量小于 6 头,则不需要进行防治;如果累积虫量在两者之间,则继续调查(表 4)。依此类推,直至达到理论抽样数 26 m²,此时累积虫量

如果大于 104 头,则需要进行防治。当调查 20 m²内的金针虫种群时,如果累积虫量大于 137 头,则需要进行防治;如果累积虫量小于 23 头,则不需要进行防治;如果累积虫量在两者之间,则继续调查(表 4)。依此类推,直至达到理论抽样数 114 m²,此时累积虫量如果大于 456 头,则需要进行防治。

表 3 小麦田地下害虫种群在不同虫口密度下的理论抽样数

Table 3 Optimum sampling sizes under different densities of subterranean pest insects in wheat fields

种群 Population	允许误差 Permissible variation	虫口密度/(头/m ²) Density of larvae/(No. of larvae/m ²)							
		1	2	4	6	8	10	20	30
混合种群 Mixed population	0.1	669	485	393	362	347	338	320	313
	0.2	167	121	98	91	87	84	80	78
	0.3	74	54	44	40	39	38	36	35
蛴螬 White grubs	0.1	536	336	236	202	186	176	156	149
	0.2	134	84	59	51	46	44	39	37
	0.3	60	37	26	22	21	20	17	17
金针虫 Wireworms	0.1	1 227	1 092	1 025	1 002	991	984	971	966
	0.2	307	273	256	251	248	246	243	242
	0.3	136	121	114	111	110	109	108	107

表 4 小麦田地下害虫的序贯抽样表

Table 4 Sequential sampling table of subterranean pest insects in wheat fields

抽样面积 Area sampled/m ²	混合种群 Mixed population		蛴螬 White grubs		金针虫 Wireworms	
	上限 Upper	下限 Lower	上限 Upper	下限 Lower	上限 Upper	下限 Lower
1	12	-	10	-	17	-
2	19	-	17	-	26	-
3	26	-	23	1	34	-
5	38	2	34	6	49	-
8	54	10	49	14	68	-
10	65	15	59	21	80	-
20	115	45	107	53	137	23
30	163	76	154	86	190	50
40	210	110	199	121	240	79
50	256	144	243	157	291	109
80	391	249	375	265	435	205
100	479	321	461	339	528	272

3 讨论

地下害虫幼虫在土壤中的分布格局是制定调查方法、预测预报及采取不同防治措施的依据。本研究通过 5 个不同聚集度指标、应用 Taylor 幂法则和 Iwao m^*-m 回归模型拟合结果均表明地下害虫混合种群、蛴螬和金针虫均为聚集分布,这与花生田蛴螬和细胸金针虫等的田间分布研究结果一致(苏骏等, 1989; 刘爱芝等, 2003)。通过对聚集原因的分析,地下害虫混合种群聚集原因可能是由昆虫自身的聚集

习性或者外界环境因素引起的,而蛴螬金针虫的聚集原因则可能是由某些环境因素引起的。这可能除了与金龟甲和叩头甲类成虫的产卵习性(如华北大黑鳃金龟甲成虫出土后群集取食交尾并在附近土壤中产卵)有关外,植被条件、土壤质地和土壤含水量等环境条件也直接影响华北大黑鳃金龟甲和暗黑鳃金龟甲等的聚集。同样,气候条件如温湿度等、寄主植物、土壤质地和耕作方式等均可影响金针虫种群的聚集与繁殖(曹雅忠和武予清, 2015)。本研究结果表明,小麦田地下害虫种群在不同密度下,聚集分

布的原因不同,样地4~6的地下害虫种群密度明显高于样地1~3的,而在聚集原因检验中样地1~3的地下害虫聚集原因与样地4~6的地下害虫聚集原因不同,这是由于不同样地的虫口密度不同所致。

不同种类地下害虫造成的为害损失不同。以蛴螬为例,其成虫金龟甲的为害虫态各异,有的以成虫为害,幼虫不为害,如白星花金龟甲 *Protaetia brevitarsis* 等;有的以幼虫为害,成虫不为害,如毛黄鳃金龟甲 *Holotrichia trichophora* 和弟兄鳃金龟甲 *Melolontha frater* (曹雅忠和武予清,2015),因此在根据地下害虫的理论抽样数和序贯抽样表进行地下害虫的调查时,还应结合地下害虫的种类和防治指标等综合确定地下害虫的取样数量及防治指标。在无法确定地下害虫的种类时,因部分地下害虫幼虫不造成害,因此建议适当放宽地下害虫的防治指标,以减少化学农药的使用量。

选择适合的抽样调查方法对保证抽样质量和节省人力方面显得尤为重要(沈佐锐,2009)。在地下害虫的监测与取样技术方面,科学家们也进行了探索。如 Brandhorst-Hubbard et al. (2001) 研究结果表明声学技术是一种很有前途的地下害虫检测工具。Zhang et al. (2003) 利用单传感器和多传感器声学检测系统对蛴螬种群密度进行监测,四传感器装置能够准确估计出检测范围内的白蛴螬数量,但比使用单个传感器测试花费的时间更长,操作更复杂; Benefer et al. (2012) 对条纹锥尾叩甲 *Agriotes lineatus* 成虫和幼虫的分布与为害进行调查,发现不同的取样方法影响对其分布的判断,应以幼虫的取样调查来预测其为害程度; Jordan et al. (2012) 研究结果显示在秋季对玉米田蛴螬取样调查可以准确预测其在春季的为害程度。相较而言,使用挖土法对地下害虫的发生进行预测预报及防治是准确可靠的,可根据当地地下害虫的优势种类及严重程度选择合适的取样时间、取样方法及抽样面积,取样深度也至关重要,建议取样深度应达到 20~30 cm (Oyafuso et al., 2001; 陆俊姣等, 2017)。总之,针对地下害虫更先进更精准的取样方法还有待进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Benefer CM, Knight ME, Ellis JS, Hicks H, Blackshaw RP. 2012. Understanding the relationship between adult and larval *Agriotes* distributions: the effect of sampling method, species identification and abiotic variables. *Applied Soil Ecology*, 53(3): 39–48
- Brandhorst-Hubbard JL, Flanders KL, Mankin RW, Guertel EA, Crocker RL. 2001. Mapping of soil insect infestations sampled by excavation and acoustic methods. *Journal of Economic Entomology*, 94(6): 1452–1458
- Cao YZ, Li KB, Yin J. 2005. Brief analysis in progress of occurrence and management on underground pests in China. // Cheng ZM. Disaster prevention and control of biological agriculture. Beijing: China Agricultural Scientific & Technical Press, pp. 389–393 (in Chinese) [曹雅忠, 李克斌, 尹姣. 2005. 浅析我国地下害虫的发生与防治现状. // 成卓敏. 农业生物灾害预防与控制研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, pp. 389–393]
- Cao YZ, Wu YQ. 2015. Soil insect pests. // Guo YY. Crop diseases and insect pests in China: Part 2. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, pp. 1494–1524 (in Chinese) [曹雅忠, 武予清. 2015. 地下害虫. // 郭予元. 中国农作物病虫害: 中册. 第3版. 北京: 中国农业出版社, pp. 1494–1524]
- Chen H, Men XY, Yu Y, Zhang AS, Wang ZY, Li LL. 2015. Geostatistical analysis on spatial distribution of *Athetis lepigone* (Möschler) larvae and its correlation with damage rate of maize seedlings. *Journal of Plant Protection*, 42(4): 598–603 (in Chinese) [陈浩, 门兴元, 于毅, 张安盛, 王振营, 李丽莉. 2015. 基于地统计学的二点委夜蛾幼虫田间分布及与玉米受害率之间的关系. 植物保护学报, 42(4): 598–603]
- Chen Q, Xu ZC, Zhang LS, Lu PF, Zhang YF. 2018. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Arhopalus rusticus* larvae and adults. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 975–983 (in Chinese) [陈潜, 许志春, 张连生, 陆鹏飞, 张永福. 2018. 褐梗天牛幼虫和成虫空间分布的地统计学研究. 生态学报, 38(3): 975–983]
- David FN, Moore PG. 1954. Notes on contagious distributions in plant populations. *Annals of Botany*, 18(1): 47–53
- Ding YQ. 1980. The principle and application of mathematical ecology of insect population. Beijing: Science Press, pp. 1–17 (in Chinese) [丁岩钦. 1980. 昆虫种群数学生态学原理与应用. 北京: 科学出版社, pp. 1–17]
- Ding YQ, Li DM, Chen YP. 1978. Studies on the patterns of distribution of the oriental migratory locust and its practical significance. *Acta Entomologica Sinica*, 21(3): 243–259 (in Chinese) [丁岩钦, 李典谟, 陈玉平. 1978. 东亚飞蝗分布型的研究及其应用. 昆虫学报, 21(3): 243–259]
- Ge F. 2008. Principle and methods of insect ecology. Beijing: Higher Education Press, pp. 176–202 (in Chinese) [戈峰. 2008. 昆虫生态学原理与方法. 北京: 高等教育出版社, pp. 176–202]
- Iwao S. 1968. A new regression method for analyzing the aggregation pattern of animal populations. *Researches on Population Ecology*, 10(1): 1–20
- Iwao S. 1972. Application of the m^*-m method to the analysis of spatial patterns by changing the quadrat size method to the analysis of spatial patterns by changing the quadrat size. *Researches on Population Ecology*, 14(1): 97–128
- Iwao S. 1975. A new method of sequential sampling to classify populations relative to a critical density. *Researches on Population Ecology*, 16(2): 281–288
- Jordan TA, Youngman RR, Laub CL, Tiwari S, Kuhar TP, Balderson

- TK, Moore DM, Saphir M. 2012. Fall soil sampling method for predicting spring infestation of white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae) in corn and the benefits of clothianidin seed treatment in Virginia. *Crop Protection*, 39: 57-62
- Kuno E. 1969. A new method of sequential sampling to obtain the population estimates with a fixed level of precision. *Researches on Population Ecology*, 11(2): 127-136
- Liu AZ, Li SJ, Tao LM. 2003. Regulation of the distribution of peanut white grubs and evaluation of the effectiveness of insecticides in controlling this pest. *Entomological Knowledge*, 40(1): 45-47 (in Chinese) [刘爱芝, 李素娟, 陶岭梅. 2003. 花生蛴螬空间分布型研究及药效评价方法探讨. *昆虫知识*, 40(1): 45-47]
- Lloyd M. 1967. Mean crowding. *Journal of Animal Ecology*, 36(1): 1-300
- Lu JJ, Dong JM, Ren MF, Li X, Wu YP, Li DQ, Ma EB. 2017. Migration patterns of subterranean pest insects in the soil of winter wheat-summer corn rotation field in Linfen, Shanxi. *Acta Entomologica Sinica*, 60(9): 1046-1059 (in Chinese) [陆俊姣, 董晋明, 任美凤, 李霞, 武宇鹏, 李大琪, 马恩波. 2017. 山西临汾冬小麦-夏玉米轮作田地下害虫种群在土壤中的迁移规律. *昆虫学报*, 60(9): 1046-1059]
- Oyafuso A, Ota M, Ishimine M, Arakaki N. 2011. Vertical distribution of female adults and larval offspring of the white grub *Dasylepida ishigakiensis* (Coleoptera: Scarabaeidae) in the soil of a sugarcane field on Miyako Island, Okinawa. *Applied Entomology and Zoology*, 46(2): 171-176
- Pan J, Wang T, Zong SX, Wen JB, Luo YQ. 2011. Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of *Dendroctonus valens* population. *Acta Ecologica Sinica*, 31(1): 195-202 (in Chinese) [潘杰, 王涛, 宗世祥, 温俊宝, 骆有庆. 2011. 红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术. *生态学报*, 31(1): 195-202]
- Shen ZR. 2009. The ecological principle of insect ecology and pest control. Beijing: China Agricultural University Press, pp. 1-529 (in Chinese) [沈佐锐. 2009. 昆虫生态学及害虫防治的生态学原理. 北京: 中国农业大学出版社, pp. 1-529]
- Su J, Cui JY, Li ZX. 1989. The spatial distribution pattern and the sampling methods of the larvae of wireworm in the field. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 4(3): 110-115 (in Chinese) [苏骏, 崔景岳, 李仲秀. 1989. 细胸金针虫田间分布型及抽样技术. *华北农学报*, 4(3): 110-115]
- Sun PJ, Luo YQ, Yao DH, Liu CL, Zong SX. 2015. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Leucoma salicis* larvae and pupae. *Journal of Plant Protection*, 42(4): 604-611 (in Chinese) [孙鹏举, 骆有庆, 姚东华, 刘春亮, 宗世祥. 2015. 柳毒蛾幼虫和蛹的空间分布的地统计学分析. *植物保护学报*, 42(4): 604-611]
- Taylor LR. 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature*, 189(4): 732-735
- Wang W, Zhang RF, Liu HY, Zhang Y, Yao J. 2016. Spatial distribution pattern of common meadow bug *Lygus pratensis* (Linnaeus) in Xinjiang cotton fields. *Journal of Plant Protection*, 43(6): 972-978 (in Chinese) [王伟, 张仁福, 刘海洋, 张瑜, 姚举. 2016. 新疆棉田牧草盲蝽的空间分布规律. *植物保护学报*, 43(6): 972-978]
- Waters WE. 1959. A quantitative measure of aggregation in insects. *Journal of Economic Entomology*, 52(6): 1180-1184
- Wei HJ, Zhang ZL, Wang YC. 1989. Chinese soil pests. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, pp. 1-5 (in Chinese) [魏鸿钧, 张治良, 王荫长. 1989. 中国地下害虫. 上海: 上海科学技术出版社, pp. 1-5]
- Xu RM, Liu LF, Ding YQ. 1984. The improving of IWAO's M^*-M model. *Acta Ecologica Sinica*, 4(2): 111-118 (in Chinese) [徐汝梅, 刘来福, 丁岩钦. 1984. 改进的IWAO M^*-M 模型. *生态学报*, 4(2): 111-118]
- Yan WT, Qiu GS, Zhou YS, Zhang HJ, Chen HJ, Zhang P, Liu CL, Zheng YC. 2011. Spatial distribution pattern and time series dynamics of *Panonychus ulmi* Koch in an apple orchard of Liaoning Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(11): 3053-3059 (in Chinese) [闫文涛, 仇贵生, 周玉书, 张怀江, 陈汉杰, 张平, 刘池林, 郑运成. 2011. 苹果全爪螨的空间分布格局及时序动态. *应用生态学报*, 22(11): 3053-3059]
- Yu XL, Ren CZ. 1986. The farther improving of IWAO's M^*-M model. *Acta Ecologica Sinica*, 6(3): 193-196 (in Chinese) [于秀林, 任朝佐. 1986. 再次改进的IWAO M^*-M 模型. *生态学报*, 6(3): 193-196]
- Yu XW, Liu XY. 2001. Review of research methods on spatial pattern of insect population. *Journal of Northwest Forestry University*, 16(3): 83-87 (in Chinese) [于新文, 刘晓云. 2001. 昆虫种群空间格局的研究方法评述. *西北林学院学报*, 16(3): 83-87]
- Zhang C, Ge X, Zhao L, Wang ZY, He KL, Bai SX. 2013. The spatial distribution pattern of overwintering egg of *Monolepta hieroglyphica* (Motschulsky) in corn field. *Acta Ecologica Sinica*, 33(11): 3452-3459 (in Chinese) [张聪, 葛星, 赵磊, 王振营, 何康来, 白树雄. 2013. 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型. *生态学报*, 33(11): 3452-3459]
- Zhang ML, Crocker RL, Mankin RW, Flanders KL, Brandhorst-Hubbard JL. 2003. Acoustic estimation of infestations and population densities of white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae) in turfgrass. *Journal of Economic Entomology*, 96(6): 1770-1779

(责任编辑: 李美娟)