网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.014

青海地区番茄潜叶蛾的发生动态及幼虫空间分布

赵原[1],邵海南[1],宋继昌[2],王康[3],刘雲祥[1],咸文荣[1]

(1 青海大学 青海省农业有害生物综合治理重点实验室,青海 西宁 810016;
2 青海省互助县高原特色现代农业示范园区管委会,青海 西宁 810016;
3 西北农林科技大学 植物保护学院 植物资源与病虫害治理教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】明确青海地区设施茄果类蔬菜重大入侵害虫番茄潜叶蛾(*Tuta absoluta*)的发生动态及其幼虫空间分布,为制定番茄潜叶蛾绿色精准防控策略提供科学依据。【方法】在青海省海东市平安区和黄南藏族自治州尖扎县共选取8个设施番茄大棚,采用性诱监测法对番茄潜叶蛾的种群动态进行监测,并运用Z型抽样法调查棚内番茄潜叶蛾幼虫的虫口密度。基于6种聚集度指标及Iwao回归模型分析番茄潜叶蛾幼虫种群的空间分布特征。【结果】番茄潜叶蛾在青海省海东市平安区和黄南藏族自治州尖扎县设施番茄大棚中均有发生,且其种群动态均呈现“早期潜伏-快速增殖-长期高位”三阶段特征。番茄潜叶蛾幼虫种群密度主要分布在0~4头/叶之间,其中0和1头/叶的频次占比最高,呈现出典型的“低密高频”特征。空间分布型适合度检验结果表明,青海省番茄潜叶蛾分布不符合二项分布及泊松分布等随机模型($P\leqslant0.001$),更符合奈曼分布、奈曼A型分布及负二项分布等聚集性分布模型,多数样地模型拟合度良好($P>0.05$)。丛生指数、聚块指数、久野指数、扩散系数、负二项分布参数均呈现聚集分布;Iwao回归方程的α与β均大于0,进一步表明番茄潜叶蛾个体间存在相互吸引关系。基于理论抽样模型,当番茄潜叶蛾幼虫密度为2头/叶时,建议抽样数为72片样叶;序贯抽样模型可判断种群密度是否超过经济阈值,指导适时防控。【结论】青海省设施番茄中番茄潜叶蛾种群呈现明显的聚集性分布,该种群于10月初进入暴发期并长期维持高位,应在关键发生阶段加强监测与分区治理。

[关键词] 番茄潜叶蛾;种群动态;空间分布;抽样模型
[中图分类号] S433.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0131-10

Population monitoring and larval spatial distribution patterns of *Tuta absoluta* in Qinghai Province

ZHAO Yuan[1], SHAO Hainan[1], SONG Jichang[2], WANG Kang[3],
LIU Yunxiang[1], XIAN Wenrong[1]

(1 *Key Laboratory of Agricultural Integrated Pest Management, Qinghai Province, Qinghai University, Xining, Qinghai* 810016, *China*; 2 *Management Committee of the Plateau Characteristic Modern Agricultural Demonstration Park, Huzhu County, Qinghai Province, Xining, Qinghai* 810016, *China*; 3 *Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management, Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to systematically investigate the occurrence patterns of *Tuta absoluta*, a major invasive pest in facility-grown solanaceous vegetables in the Qinghai Province and clarify the dynamics of the pest population and larval spatial distribution, thereby providing a scientific basis for green management strategies. 【Method】 A total of eight tomato greenhouses were selected in Ping'an District of Haidong

[收稿日期] 2025-06-09 [修回日期] 2025-11-28
[基金项目] 青海省科技成果转化项目(2024-NK-107)
[作者简介] 赵原(2000—),男,河北张家口人,在读硕士,主要从事设施蔬菜害虫绿色防控研究。E-mail:17736232615@163.com
[通信作者] 刘雲祥(1990—),男,青海海东人,副研究员,主要从事高原设施害虫绿色防控技术研究。E-mail:17791394452@163.com
咸文荣(1975—),男,青海西宁人,研究员,主要从事作物病害综合防控技术研究。E-mail:xianwr@sina.com

City and Jianzha County of Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province. Sex pheromone traps were used to monitor population dynamics of adult *T. absoluta*, and a Z-type sampling method was employed to determine larval density. Based on six aggregation indices and Iwao regression model, the spatial distribution patterns of the larvae were analyzed. 【Result】 *T. absoluta* was observed in all study sites, with its population dynamics exhibiting a three-phase pattern: early latency, rapid proliferation and sustained high abundance. Larval densities ranged from 0 to 4 larvae per leaf, with 0 and 1 larva per leaf showing the highest frequencies, indicating a characteristic pattern of "high frequency for low density". Spatial distribution analysis showed that the distribution did not fit for random models such as the binomial or Poisson distributions ($P \leqslant 0.001$). Instead, it fitted for aggregated distribution models, including the Neyman distribution, Neyman A-type distribution, and negative binomial distribution, with good model fitting for most sites ($P > 0.05$). Aggregation indices-including clumping indices, aggregation indices, Hisano indices, diffusion coefficients, and negative binomial distribution parameters-all indicated aggregated distribution patterns. In the Iwao regression, both α and β values were greater than 0, suggesting positive interactions among individuals within the population. Based on the theoretical sampling model, a sample size of 72 leaves was recommended when larval density reaches 2 larvae per leaf. The sequential sampling model can be used to determine whether the population density exceeds the economic threshold, thereby guiding timely control measures. 【Conclusion】 The larval population of *T. absoluta* in greenhouse-grown tomatoes in Qinghai Province exhibits a distinctly aggregated distribution pattern. The outbreak phase of the population starts in early October and remains at elevated levels for an extended period. It is recommended to enhance monitoring and implement zonal management during critical occurrence stages.

Key words: *Tuta absoluta*; population dynamics; spatial distribution; sampling model

昆虫种群特定空间分布模式,是长期进化过程中通过个体间社会行为或生存策略以及对外界环境响应能力共同作用形成的生态学表征[1]。昆虫的空间分布特征主要呈现规则型、集群型和散生型3种典型类别[2]。解析昆虫分布模式不仅为构建科学的监测取样体系提供理论依据,更能深度了解其种群的时空动态规律,特别是对揭示害虫暴发机制、追踪种群扩散路径具有重要价值[3],为有害生物精准防控策略的制定,实施生态友好型综合治理方案奠定科学基础[4]。不同昆虫种群分布型不同,且同一种昆虫分布型也会因虫态、种群密度和采样单元规模对空间分布模式评估产生显著影响[5]。近年来,国内外研究者均采用综合方法,将经典统计分析与现代空间建模技术相结合来解析各类农业害虫的空间分布特征[6],如设施辣椒上西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)的空间分布属于聚集分布[7];斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)1~4龄幼虫在香蕉园的分布型均为聚集分布,但随着幼虫龄期的增长,聚集强度逐渐减弱[8];在重度受害样地中短毛切梢小蠹(*Tomicus brevipilosus*)呈随机分布[9];露地番茄中番茄潜叶蛾(*Tuta absoluta*)为聚集分布[10]。

番茄潜叶蛾是一种毁灭性的世界性入侵害虫[11],起源于秘鲁中部高地[12],2017年在我国新疆伊犁露地番茄上首次被发现[13],随后迅速蔓延扩散至云南、贵州、宁夏、西藏等25个省(区)[14]。鉴于其地域扩张迅速,且对寄主危害严重,2023年农业农村部将其增补入《一类农作物病虫害名录》进行管理。近年来,作为一种新入侵的重要害虫,番茄潜叶蛾在我国的扩散趋势及为害特性引起了广泛关注。番茄潜叶蛾主要危害番茄、茄子、人参果、马铃薯等茄科作物,尤其喜食番茄[15]。其幼虫潜入寄主植物叶片并取食叶片,形成半透明、形状各异的潜道或潜斑,严重影响寄主植物的光合作用;其幼虫还可蛀食花蕾或果实,造成花蕾脱落或果实畸形、停止生长,严重影响作物产量,甚至造成绝产[12-13,16]。此外,番茄潜叶蛾还会作为番茄褐色皱纹果病毒(tomato brown rugose fruit virus, ToBRFV)等植物病毒的传播媒介。

青海省位于青藏高原腹地,是我国重要的高原冷凉绿色番茄等蔬菜的输出地,目前尚未见关于番茄潜叶蛾发生和空间分布型研究的报道。本研究团队前期调查发现,番茄潜叶蛾已在2021年通过番茄种苗引进入侵至青海省番茄主要种植区。目前,部分番茄产地防治不及时,番茄损失高达95%以上,严重影响了青海省蔬菜产业的健康发展和种植户的经济收益。为深入研究番茄潜叶蛾的空间分

布模式和科学测报该类害虫的发生动态，本研究对青海省平安区和尖扎县等番茄主要种植区设施番茄棚内番茄潜叶蛾的虫口密度进行详细调查，明确其在青藏高原地区设施番茄大棚中的发生规律；并利用统计学方法分析其空间分布特征，基于Iwao回归模型建立理论抽样数和序贯抽样模型，为高原设施蔬菜中番茄潜叶蛾田间精准抽样调查、种群密度分析及高效精准防控提供理论依据，也为揭示该类害虫的生态适应策略与扩散机制提供重要参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地设在青海省海东市平安区（101°49′40″ E，36°15′21″ N，海拔 2 100 m）和青海省黄南藏族自治州尖扎县（102°00′43″ E，35°05′00″ N，海拔 2 500 m）。两地设施大棚种植番茄品种均为普罗旺斯。2024 年 6 月底至 7 月初定植，株距为 35 cm，行距为 45 cm。田间管理水平一致。

1.2　番茄潜叶蛾发生规律调查

2024 年 6 月 15 日－11 月 28 日，在选定的番茄大棚内悬挂三角形诱捕器，其中平安区为样地 1～4，尖扎县为样地 5～8，诱捕器内置番茄潜叶蛾诱芯 1 个，白色粘虫板 1 张。诱芯每月更换 1 次，粘虫板每 7 d 更换 1 次。每个大棚悬挂三角形诱捕器 3 个，悬挂高度 50 cm，每 7 d 记录 1 次诱捕器诱集的番茄潜叶蛾成虫数量，直至番茄拉秧。

1.3　番茄潜叶蛾空间分布型分析

于 2024 年 7－9 月，在平安区和尖扎县番茄种植基地开展番茄潜叶蛾幼虫分布型调查。

（1）样地设置。选取 8 个设施大棚（面积 600～700 m²/棚），每个大棚作为独立样地（编号 1～8）；

（2）抽样方式。每个样地采用 Z 字形路径取样，每地随机选定 12 株番茄植株，每株按上、中、下部位各取 2 片叶，共 6 片/株，统计每片叶上的幼虫数量（即虫口密度 x），并记录不同虫口密度对应的实测频次 f。根据收集到的番茄潜叶蛾数据制作其虫口密度频次分布表，计算各大棚番茄潜叶蛾幼虫虫口密度的样本均数 m 和样本方差 S^2。

$$m=\sum_{i=1}^{k} f_i x_i / n;$$

$$S^2=\sum_{i=1}^{k} f_i (x_i - m)^2 / (n-1)。$$

式中：k 代表虫口密度的分组数量，也就是频次分布表中不同虫口密度等级的组数；i 是分组的序号，取值范围为 1 到 k；n 是总样本量。

（3）基于奈曼分布、奈曼 A 型分布、负二项分布（含最大或然法、零频率法、矩阵法）、泊松分布及二项分布模型，分别计算番茄潜叶蛾不同虫口密度对应的理论频次。其中泊松分布代表随机分布，二项分布对应均匀分布，其余均为聚集分布类型。

（4）分布型判定。通过 DPS 软件对理论频次与实测频次进行 χ^2 拟合优度检验，根据概率值（P 值）确定番茄潜叶蛾幼虫在样地的空间分布型。

1.4　聚集度指标法检验

根据传统统计学采用表 1 中的计算公式对青海地区设施番茄大棚中番茄潜叶蛾幼虫的空间分布特征进行分析。

表 1　聚集度指标及其计算公式

Table 1　Aggregation degree index and their calculation formula

聚集度指标 Aggregation degree indicators	计算公式 Calculation formula	判别标准 Classification criteria		
		聚集分布 Clustering distribution	均匀分布 Uniform distribution	随机分布 Random distribution
丛生指数（I） Clumping index	$I=(S^2/m)-1$	$I>1$	$I<1$	$I=1$
聚块指数（m^*/m） Clustering index	$m^*/m=\sum_{j=1}^{Q} x_j(x_j-1)/x_j$	$m^*/m>1$	$m^*/m<1$	$m^*/m=1$
久野指数（CA） Kuno index	$CA=(S^2/m)/m^2$	$CA>0$	$CA<0$	$CA=0$
扩散系数（C） Diffusion coefficient	$C=S^2/m$	$C>1$	$C<1$	$C=1$
负二项分布参数（K） Negative binomial distribution index	$K=m^2/(S^2-m)$	$0\leqslant K\leqslant 8$	$K<0$	$K>8$

注：m 为样本均数；S^2 为样本方差；m* 表示平均拥挤度。

Note: m denotes the sample mean; S^2 denotes the sample variance; m* denotes the average crowding measure.

1.5 线性回归方程检验

采用IWAO[17]提出的m^*-m回归分析法对番茄潜叶蛾的空间分布型进行判断,其回归方程为$m^*=\alpha+\beta m$。其中α为个体分布的基本成分,$\alpha>0$时个体形成群体化分布,彼此间存在吸引作用,呈现集群特征;$\alpha=0$时基本分布单元为独立个体,无群体聚集或排斥效应;$\alpha<0$时个体间呈现排斥性分布,表现为空间上的分散或竞争关系。β为基本成分的空间分布型,$\beta>1$时空间分布呈现聚集性特征,局部区域密度显著高于平均水平;$\beta=1$时空间分布符合随机模式,个体位置无明确规律;$\beta<1$时空间分布呈均匀分布,个体间规律性较强。

1.6 理论抽样数研究

(1)根据理论抽样原理,应用IWAO[17]的统计方法建立理论抽样数模型。

$$N=t^2(\alpha+1)/D^2[m+(\beta-1)]。$$

式中:N为理论抽样数;D为允许误差;α为分布的基本成分;β为基本成分的空间分布型;t为保证可靠概率为95%条件下的正态离差值。

(2)采用Iwao的序贯抽样理论[17]建立模型。根据该模型计算序贯抽样表,若田间抽样虫量大于累计虫数的上限,则需要防治;否则不需要防治。

其序贯抽样理论公式为:

$$T_{1(n)}=nm_0+t\sqrt{n[(\alpha+1)m_0+(\beta-1)m_0^2]};$$

$$T_{0(n)}=nm_0-t\sqrt{n[(\alpha+1)m_0+(\beta-1)m_0^2]}。$$

式中:$T_{1(n)}$, $T_{0(n)}$分别为累计虫数的上限值和下限值;m_0为达到经济阈值时的番茄潜叶蛾种群密度;n为田间累计抽样数;α为分布的基本成分;β为基本成分的空间分布型。

1.7 数据分析

采用Excel 2016、Python 3和生物统计软件DPS 17.10对调查数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 青海设施番茄大棚番茄潜叶蛾的危害特征

青海地区番茄潜叶蛾主要发生于设施番茄大棚中(图1-A),主要以幼虫潜叶危害(图1-B)。番茄潜叶蛾卵呈椭圆形,直径约0.2~0.3 mm,淡黄色半透明状,表面具珍珠光泽(图1-C);番茄潜叶蛾幼虫潜入叶片、顶梢、腋芽、嫩茎以及果实内,造成蛀食危害,形成半透明蛇形潜道(图1-D)及不规则褐斑(图1-E);果实受害表现为幼果表皮形成蛀食孔洞,诱发畸形果(图1-F);番茄潜叶蛾蛹呈不对称圆锥形,尾部尖细延伸,基部圆钝,长度约5 mm,表面呈棕褐色半透明状,多附着于叶片背面主脉凹陷处或潜道终止端,蛹体周围可见丝线粘连的植物碎屑及褐色排泄物(图1-G);番茄潜叶蛾成虫体长6~8 mm,前翅具有典型鳞翅目斑纹(图1-H)。



A. 青海地区番茄潜叶蛾生境;B. 受番茄潜叶蛾危害较为严重的番茄温室大棚;C. 番茄潜叶蛾卵;D,E. 受番茄潜叶蛾危害的番茄叶片典型特征;F. 番茄潜叶蛾危害番茄果实症状;G. 番茄潜叶蛾蛹;H,番茄潜叶蛾成虫。

A. Habitat of *T. absoluta* in Qinghai Region; B. Greenhouse tomato plantings severely affected by *T. absoluta*; C. Eggs of *T. absoluta*; D,E. Typical symptoms of *T. absoluta* damage on tomato leaves; F. Symptoms of *T. absoluta* damage on tomato fruits; G. Pupae of *T. absoluta*; H. Adult of *T. absoluta*.

图1 青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾的危害特征

Fig. 1 Illustration of damage characteristics of *Tuta absoluta* in greenhouse tomatoes in Qinghai

2.2 青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾的发生动态

利用性诱法监测青海地区设施番茄大棚中番茄潜叶蛾成虫的种群动态,结果(图2)表明,青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾的发生具有明显季节性,

成虫呈现“早期潜伏-快速增殖-长期高位”的三阶段特征。在平安区番茄定植初期就检测到番茄潜叶蛾成虫的活动，单个诱捕器平均诱虫量约30头，至8月中旬番茄潜叶蛾数量零星增加；之后番茄潜叶蛾成虫数量显著增加，10月中旬至番茄拉秧前，番茄潜叶蛾成虫发生量一直处于高峰期，单个诱捕器诱虫量达200头以上。尖扎县4个监测大棚从7月初到8月中旬期间均诱捕到零星成虫（单个诱捕器平均小于20头），8月17日前虫量始终处于低位。8月17日后虫量显著上升，单个诱捕量突破20头，呈现指数增长趋势。之后，虫口密度维持峰值水平达2个月，单个诱捕器平均捕获量超过200头，显示该时段为虫害防控关键期。

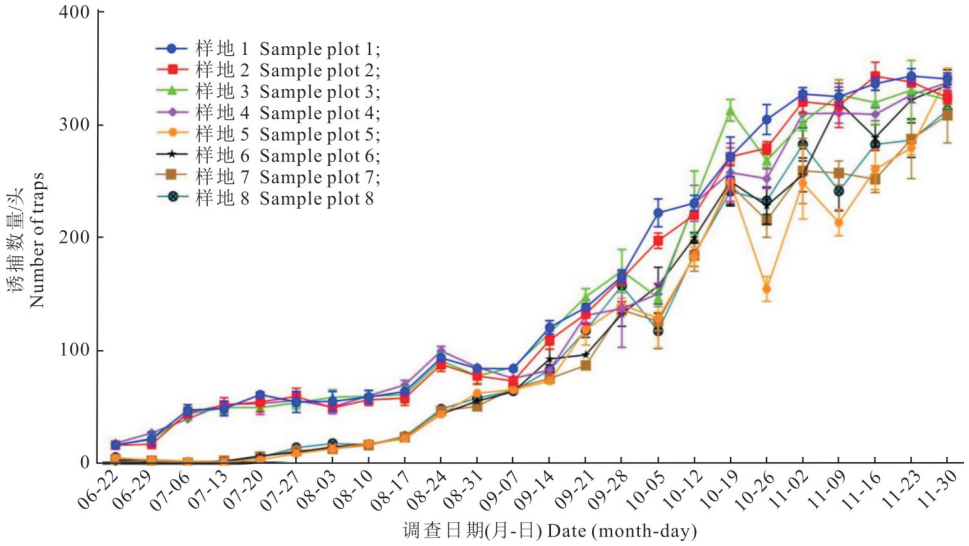


图2　青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾成虫的发生动态

Fig. 2　Occurrence dynamics of *Tuta absoluta* adults in different greenhouses in Qinghai

2.3　青海地区番茄潜叶蛾空间分布型的适合度检验

通过对8个样地番茄潜叶蛾的虫口密度进行归类与统计，构建番茄潜叶蛾的频次分布表。结果（表2）显示，番茄潜叶蛾虫口密度主要分布在0～4头/叶之间，其中0和1头/叶的频次占比最高，呈现出典型的“低密高频”特征。

表2　青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾虫口密度的频次分布表

Table 2　Frequency distribution of *Tuta absoluta* on greenhouse tomatoes in Qinghai

虫口密度/（头·叶$^{-1}$）Population density x	样地 1 Sample plot 1			样地 2 Sample plot 2			样地 3 Sample plot 3			样地 4 Sample plot 4		
	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2
0	47	0	0	44	0	0	44	0	0	45	0	0
1	13	13	13	15	15	15	13	13	13	15	15	16
2	7	14	28	7	14	28	7	14	28	6	12	24
3	4	12	36	4	12	36	7	21	63	4	12	36
4	1	4	16	2	8	32	1	4	16	2	8	32
虫口密度/（头·叶$^{-1}$）Population density x	样地 5 Sample plot 5			样地 6 Sample plot 6			样地 7 Sample plot 7			样地 8 Sample plot 8		
	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2	实测频次 Measured frequency f	fx	fx^2
0	46	0	0	44	0	0	50	0	0	47	0	0
1	13	13	13	14	14	14	13	13	13	13	13	13
2	7	14	28	8	16	32	5	10	20	6	12	24
3	5	15	45	4	12	36	3	9	27	5	15	45
4	1	4	16	2	8	32	1	4	16	1	4	16

注：fx. 虫口密度与对应实测频次的乘积；fx^2. 虫口密度的平方与对应实测频次的乘积。

Note: fx. Product of insect density and the corresponding observed frequency; fx^2. Product of the square of insect density (x^2) and the corresponding observed frequency.

为进一步明确其空间分布类型,采用样方均值与样本方差分析方法(表3)并构建多个理论分布模型,包括奈曼分布、奈曼A型分布、负二项分布、泊松分布和二项分布等,以拟合实测频次。

表3 青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾虫口密度的样本均值及样本方差

Table 3 Mean and variance of *Tuta absoluta* population density on greenhouse tomatoes in Qinghai

样地 Sample plot	样本均值(m) Mean of sample	样本方差(S^2) Variance of sample	样地 Sample plot	样本均值(m) Mean of sample	样本方差(S^2) Variance of sample
1	0.597	0.948	5	0.639	1.023
2	0.681	1.094	6	0.694	1.117
3	0.722	1.161	7	0.500	0.817
4	0.653	1.075	8	0.611	1.002

由表4可知,基于χ^2检验结果,在二项分布模型下,所有样地的P值均小于0.001,表明实测数据与该模型存在显著差异,不符合随机分布假设,无法反映番茄潜叶蛾的真实分布特征;在泊松分布模型中,全部样地的P值亦均小于或等于0.001,进一步说明其不适用于描述番茄潜叶蛾的分布模式。相比之下,奈曼分布、奈曼A型分布及负二项分布(最大或然法和矩阵法)的拟合效果较好,多数样地的P值超过0.05,未达显著差异,显示出良好的拟合度,能够较好地反映害虫的实际分布格局。此外,在负二项分布的零频率分布法拟合中,除样地3、样地5和样地8外,其余样地的P值亦均大于0.05,进一步支持该模型的适用性。

表4 青海设施番茄大棚中番茄潜叶蛾空间分布型的适合度检验

Table 4 Fitness test of the spatial distribution of *Tuta absoluta* on greenhouse tomatoes in Qinghai

样地 Sample plot	奈曼分布 Neyman distribution		奈曼A型分布 Neyman A-type distribution		负二项分布 Negative binomial distribution						泊松分布 Poisson distribution		二项分布 Binomial distribution	
					最大或然法 Maximum probability method		零频率分布法 Zero frequency method		矩阵法 Moment method					
	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value	χ^2	P值 P value
1	0.179	0.981	1.245	0.265	1.912	0.167	3.503	0.061	2.340	0.126	13.021	0.001	47.568	<0.001
2	0.226	0.973	0.521	0.471	0.659	0.417	2.454	0.117	1.065	0.302	14.977	0.001	78.313	<0.001
3	0.750	0.861	5.464	0.019	6.633	0.010	8.663	0.003	7.435	0.006	19.915	<0.001	47.064	<0.001
4	0.249	0.969	0.744	0.388	0.739	0.390	2.222	0.136	1.127	0.288	17.241	<0.001	91.598	<0.001
5	0.049	0.997	2.350	0.125	3.164	0.075	4.789	0.029	3.732	0.053	15.401	0.001	46.134	<0.001
6	0.295	0.961	0.640	0.424	1.025	0.311	2.831	0.093	1.522	0.217	14.979	0.001	73.798	<0.001
7	1.753	0.625	0.535	0.465	0.734	0.392	1.839	0.175	0.978	0.323	15.388	0.001	74.254	<0.001
8	0.161	0.984	2.459	0.117	3.232	0.077	4.538	0.033	3.795	0.051	17.235	0.000	53.065	<0.001

综上所述,青海地区设施栽培条件下番茄潜叶蛾的空间分布特征不符合随机分布模型(如二项分布和泊松分布),而更趋于符合聚集性分布模型,尤其是奈曼分布及负二项分布等聚集性模型更能有效反映番茄潜叶蛾的实地分布规律。该研究结果揭示了番茄潜叶蛾种群在设施番茄大棚中的分布规律,为今后精准制定该类虫害监测和防控策略提供了理论依据。

2.4 青海地区番茄潜叶蛾空间分布型的聚集度指标检验

对8个典型样地番茄潜叶蛾的聚集度指标进行系统分析,结果(表5)表明,所有样地番茄潜叶蛾空间分布型的聚集度指标均符合聚集型空间分布的判断标准。由表5可知,所有样地番茄潜叶蛾的丛生指数均大于0,表明该虫种群间存在一定程度的空间依附性;聚块指数均超过1,表明番茄潜叶蛾幼虫在某些区域呈现集中聚集现象;久野指数均为正值,进一步印证了番茄潜叶蛾幼虫聚集趋势的显著性;扩散系数均大于1,表明番茄潜叶蛾幼虫种群在单位面积内的分布趋于不均匀。同时,负二项分布参数在所有样地中也均大于0,且数值较小,均小于8,说明番茄潜叶蛾种群在空间分布上具有较强的聚集倾向,符合高度聚集型害虫的分布特性。

表 5　青海设施番茄大棚番茄潜叶蛾空间分布型的聚集度指标检验

Table 5　Aggregation index test of *Tuta absoluta* on greenhouse tomatoes in Qinghai

样地 Sample lot	平均拥挤度 Crowding degree	丛生指数 Clumping index	聚块指数 Patchiness index	久野指数 Kuno index	扩散系数 Diffusion coefficient	负二项分布参数 Negative binomial distribution index
1	1.185	0.588	1.985	0.985	1.588	1.015
2	1.288	0.607	1.891	0.891	1.607	1.123
3	1.330	0.608	1.842	0.842	1.608	1.187
4	1.299	0.646	1.990	0.990	1.646	1.010
5	1.240	0.601	1.940	0.940	1.601	1.063
6	1.304	0.610	1.878	0.878	1.610	1.139
7	1.134	0.634	2.268	1.268	1.634	0.789
8	1.251	0.640	2.047	1.047	1.640	0.955

2.5　青海地区番茄潜叶蛾空间分布型的线性回归方程检验

为进一步验证番茄潜叶蛾种群在设施农业环境下的空间分布特征,利用平均拥挤度 m^* 和样本均值 m 进行线性回归分析,结果表明青海地区设施番茄上番茄潜叶蛾分布的线性回归方程为 $m^*=0.673+0.911m$($R^2=0.910$),由该线性回归方程可知 $\alpha=0.673$,$\beta=0.911$。$\alpha>0$ 表明番茄潜叶蛾个体间相互吸引,分布的个体成分为个体群;$\beta>0$ 表明番茄潜叶蛾为聚集分布,这与聚集度指标检验结果一致。

2.6　青海地区番茄潜叶蛾的理论抽样数

根据上述回归模型中的参数 $\alpha=0.673$ 建立番茄潜叶蛾田间理论抽样数模型,即 $N=(1.673/m-0.0.089)t^2/D^2$,其中 D 为允许误差,t 为置信度分布值。利用该模型得到不同允许误差下番茄潜叶蛾不同虫口密度的抽样数,结果(表 6)表明,在允许误差保持不变的情况下,随着单位面积虫口密度的增加,番茄潜叶蛾理论抽样数呈递减趋势,样本代表性增强,减少了对大样本量的依赖;而当虫口密度恒定时,误差范围越小,所需抽样数则显著增加,表明精度要求越高,采样成本越大。番茄潜叶蛾理论抽样数与其虫口密度和允许误差呈负相关关系,揭示了抽样设计中密度敏感性和精度控制之间的动态平衡机制。由表 6 可知,在 0.2 的允许误差下,当番茄潜叶蛾虫口密度为 2 头/叶时,建议取样 72 片叶子。

表 6　不同允许误差和番茄潜叶蛾幼虫不同虫口密度下的理论抽样数

Table 6　Sampling size of *Tuta absoluta* larvae under different allowable errors and different population density

允许误差 Allowable error	理论抽样数/片 Theoretical sample size													
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1	1.5	2	2.5	3	3.5
0.1	6 393	3 179	2 108	1 573	1 251	884	769	680	609	394	287	223	180	150
0.2	1 598	795	527	393	313	221	192	170	152	99	72	56	45	37
0.3	710	353	234	175	139	98	85	76	68	44	32	25	20	17

2.7　青海地区番茄潜叶蛾的序贯抽样模型

在理论抽样数的基础上,构建番茄潜叶蛾的序贯抽样模型。经拟合得出番茄潜叶蛾的序贯抽样模型为 $T_{1(n)}=nm_0+1.96\sqrt{1.673m_0-0.089m_0^2}$,$T_{0(n)}=nm_0-1.96\sqrt{1.673m_0-0.089m_0^2}$。当抽样累计虫量落在抽样上限 $T_{1(n)}$ 之上,可初步判定番茄潜叶蛾种群密度已超过经济阈值,应启动防控措施;反之,当虫量落在抽样下限 $T_{0(n)}$ 之下,则可终止调查,无需进一步抽样(表 7)。

表 7　番茄潜叶蛾幼虫的序贯抽样表

Table 7　Sequential sampling of *Tuta absoluta* larvae

经济阈值/(头·叶$^{-1}$) Economic threshold/	项目 Item	累计虫量/头 Cumulative pest population													
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
0.4	抽样上限 Upper limit of sampling	15	26	36	46	56	65	75	84	93	102	112	121	130	139
	抽样下限 Lower limit of sampling	1	6	12	18	24	31	37	44	51	58	64	71	78	85

表7(续) Table 7(continued)

经济阈值/(头·叶$^{-1}$) Economic threshold/	项目 Item	累计虫量/头 Cumulative pest population													
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
0.8	抽样上限 Upper limit of sampling	26	46	65	84	102	120	138	156	174	191	209	226	244	261
	抽样下限 Lower limit of sampling	6	18	31	44	58	72	86	100	114	129	143	158	172	187
1.2	抽样上限 Upper limit of sampling	36	65	93	120	147	89	200	226	252	278	304	330	355	381
	抽样下限 Lower limit of sampling	12	31	51	72	93	115	136	158	180	202	224	246	269	291
1.6	抽样上限 Upper limit of sampling	46	83	120	155	191	158	260	295	329	363	398	432	465	499
	抽样下限 Lower limit of sampling	18	45	72	101	129	158	188	217	247	277	306	336	367	397
2	抽样上限 Upper limit of sampling	55	69	133	190	234	277	300	363	383	448	490	533	575	617
	抽样下限 Lower limit of sampling	25	69	107	130	166	203	164	277	337	352	390	427	465	503

3 讨 论

蔬菜产业是青海省重要的经济产业支柱之一,也是推动乡村振兴,巩固脱贫攻坚成果的基础。目前,全省设施蔬菜播种面积达9 293.33 hm^2,主要种植茄果类、瓜类及叶菜类蔬菜。为了深入贯彻落实习近平总书记对青海工作重要指示精神,坚持以科技创新为动力,以绿色有机为主线,加快高原冷凉蔬菜产业高质量发展,已成为当前农业发展的核心任务。然而,青海设施茄果类蔬菜种植区正面临番茄潜叶蛾的严重威胁,对产业绿色可持续发展构成挑战。已有研究表明,番茄潜叶蛾适应能力强,可在6~33 ℃完成生长发育,且发育周期随着温度升高而显著缩短[18],进一步加大了其防控难度。目前化学防治仍是青海省防控番茄潜叶蛾的主要手段,但受高海拔、冷凉气候等特殊地理条件的制约,化学农药降解速度慢,使其应用面临严格限制。本研究围绕茄果类蔬菜产业绿色发展的目标,通过持续监测该害虫的发生规律及空间分布特征,旨在明确其防治关键期,为科学防控提供理论依据。研究显示,青海省设施番茄种植区内的番茄潜叶蛾发生情况呈现明显的区域性与季节性特征。平安区4个大棚在监测初期,番茄潜叶蛾即呈现较高发生量,可能与上茬番茄拉秧后田间管理不善,致使虫源迁飞扩散有关;相比之下,尖扎县4个大棚因海拔较高、温度较低,番茄潜叶蛾初始发生量显著偏低。在青海设施番茄中,番茄潜叶蛾发生盛期主要集中在5月中下旬至番茄拉秧期;10月初进入最佳发育温度,其发生量呈指数型增长,数量急剧上升,且直至拉秧前都维持在极高的水平;在两地虫情最重的大棚内,每周每板诱蛾量可达300头以上。番茄潜叶蛾发生动态与气温、田间防控措施等密切相关。这与林澳丽等[19]在北京设施番茄中的研究结果高度一致。

昆虫的空间分布型不仅受自身生态行为影响,也与气候环境及寄主植物生长状况密切相关。本研究通过对青海设施番茄大棚进行系统调查,发现番茄潜叶蛾幼虫在该地区具有显著的聚集分布特征。这与已有研究结论[20-21]一致,番茄潜叶蛾在宁夏[20]、新疆[21]设施环境及欧洲温室番茄[4]中均呈聚集分布,且不受种群密度高低或栽培模式(大棚或露天)的影响。这种跨区域、跨生境分布模式的高度一致性,主要归因于番茄潜叶蛾迁飞能力较弱、自然扩散有限的自身习性。但值得注意的是,在温室大棚中,番茄潜叶蛾的聚集现象较露地种植区更为显著,这可能与温室中稳定的微环境条件及相对单一的作物布局有关[22]。从害虫生态管理的角度出发,准确掌握害虫的分布特征,有助于优化抽样策略与防控措施,从而提升资源利用效率,实现精准防控。在农业病虫害检测中,理论抽样与序贯抽样是2种广泛应用的方法。徐建霞等[23]通过Iwao回归模型,结合虫口密度防治指标,建立了贵州高粱田草地贪夜蛾幼虫的序贯抽样区间公式;王海旭等[20]利用Iwao模型,明确了宁夏地区不同虫口密度下番茄潜叶蛾幼虫和卵在温室大棚和露地环境中的理论抽样数。本研究基于对番茄大棚环境中番茄潜叶蛾幼虫数量的系统调查,构建了理论抽样数模型,同时通过设定允许误差和置信水平,得出最

大理论抽样数。该模型可在确定是否需要开展病虫害防治的前提下，有效避免过量抽样造成的资源浪费，为番茄潜叶蛾的田间监测提供量化依据。

本研究系统调查了青海地区设施番茄大棚中番茄潜叶蛾幼虫的发生规律与空间分布特征，初步证实设施番茄防控窗口期延误是导致番茄产量严重下降的关键因素之一。已有研究表明，海拔、前茬作物、温度、寄主植物的生长发育期及幼虫龄期等因素均会影响害虫的发生规律及空间分布[18,24-26]。因此，在后续研究中，需进一步综合解析多因子交互作用对番茄潜叶蛾空间分布的影响机制，以期为建立高效精准的监测体系及差异化区域防控策略提供理论依据。

[参考文献]

[1] TAYLOR L R. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations[J]. Annual Review of Entomology, 1984,29(1):321-357.

[2] 王辉，常春燕，秦伟春，等. 白斑新灰蝶卵的空间分布型及抽样技术[J]. 西北林学院学报，2017,32(6):220-223.
WANG H,CHANG C Y,QIN W C,et al. Spatial distribution pattern and sampling technique of *Neolycaena tengstroemi* eggs [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 220-223.

[3] 李俊洁，黄晓磊. 中国昆虫生物地理学进展与展望[J]. 地理学报，2022,77(1):133-149.
LI J J,HUANG X L. Progress and prospectives on insect biogeography in China[J]. Acta Geographical Sinica, 2022, 77(1): 133-149.

[4] COCCO A,SERRA G,LENTINI A,et al. Spatial distribution and sequential sampling plans for *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) in greenhouse tomato crops[J]. Pest Management Science,2015,71(9):1311-1323.

[5] 丁岩钦，李典谟，陈玉平. 东亚飞蝗分布型的研究及其应用[J]. 昆虫学报，1978,21(3):243-259.
DING Y Q,LI D M,CHEN Y P. Study and application of the distribution pattern of *Locusta migratoria manilensis*[J]. Acta Entomologica Sinica,1978,21(3):243-259.

[6] 陆俊姣，任美凤，李大琪，等. 小麦田地下害虫幼虫的空间分布型与抽样技术[J]. 植物保护学报，2021,48(2):340-347.
LU J J,REN M F,LI D Q,et al. Spatial distribution pattern and sampling technique of the larvae of subterranean pet insects in wheat fields[J]. Journal of Plant Protection,2021,48(2):340-347.

[7] 张治科，吴圣勇，雷仲仁，等. 宁夏辣椒花期西花蓟马的空间分布特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018,46(3):142-147.
ZHANG Z K,WU S Y,LEI Z R,et al. Spatial distribution pattern of *Frankliniella occidentalis* during pepper flowering stage in Ningxia[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2018,46(3):142-147.

[8] 杜浩，只佳增，李宗锴，等. 香蕉园斜纹夜蛾幼虫的空间分布格局和抽样技术[J]. 热带作物学报，2020,41(11):2267-2272.
DU H,ZHI J Z,LI Z K,et al. Spatial distribution pattern and sampling technique of *Spodoptera litura* larvae in banana parks[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2020,41(11):2267-2272.

[9] 武承旭，臧丽鹏，张苏芳，等. 云南松三种同域共存切梢小蠹梢转干期的空间分布格局[J]. 生态学报，2020,40(11):3646-3655.
WU C X,ZANG L P,ZHANG S F,et al. Spatial distribution patterns of three sympatric *Tomicus* species initially infesting *Pinus yunnanensis* trunks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (11):3646-3655.

[10] MARTINS J C,PICANÇO M C,SILVA R S,et al. Assessing the spatial distribution of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) eggs in open-field tomato cultivation through geostatistical analysis[J]. Pest Management Science, 2018, 74 (1):30-36.

[11] 薛育，丁嘉欣，王海旭，等. 番茄潜叶蛾不同龄期幼虫的肠道细菌群落组成及多样性特征[J]. 环境昆虫学报，2025,47(1):76-86.
XUE Y,DING J X,WANG H X,et al. Characteristics of the composition and diversity of gut bacterial communities in larvae of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) at various developmental stages[J]. Journal of Environmental Entomology, 2025,47(1):76-86.

[12] BIONDI A,GUEDES R N C,WAN F H,et al. Ecology, worldwide spread,and management of the invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: past, present, and future [J]. Annual Review of Entomology,2018,63:239-258.

[13] 张桂芬，马德英，刘万学，等. 中国新发现外来入侵害虫：南美番茄潜叶蛾(鳞翅目：麦蛾科)[J]. 生物安全学报，2019,28(3):200-203.
ZHANG G F,MA D Y,LIU W X,et al. The arrival of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in China[J]. Journal of Biosafety,2019,28(3):200-203.

[14] 陆永跃. 警惕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*(Meyrick)在我国持续扩散入侵[J]. 环境昆虫学报，2021,43(2):526-528.
LU Y Y. Beware of the continuous spread and invasion of tomato leaf miner *Tuta absoluta* (Meyrick) in China[J]. Journal of Environmental Entomology,2021,43(2):526-528.

[15] KARADJOVA O,ILIEVA Z,KRUMOV V,et al. *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae): potential for entry, establishment and spread in Bulgria[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science,2013,19(3):563-571.

[16] ARAÚJO SOARES M, RIBEIRO CAMPOS M. Phthorimaea absoluta (tomato leaf miner) [EB/OL]. CABI Compendium: 49260, (2020-11-30) [2025-05-22]. https://doi. org/10. 1079/cabicompendium. 49260.

[17] IWAO S. Analysis of contagiousness in the action of mortality factors on the western tent caterpillar population by using the m^*-m relationship [J]. Researches on Population Ecology,

1970,12(1):100-110.

[18] 张旭艳,贾尊尊,吐尔逊·阿合买提,等. 温湿度对番茄潜叶蛾生长发育及繁殖的影响[J]. 环境昆虫学报,2024,46(6):1358-1366.
ZHANG X Y,JIA Z Z,TURSUN A H M T,et al. Effects of temperature and humidity on the growth,development and reproduction of *Tuta absoluta*[J]. Journal of Environmental Entomology,2024,46(6):1358-1366.

[19] 林澳丽,黄建雷,姚佳祺,等. 番茄潜叶蛾在北京地区的发生动态调查及性诱剂田间控害效果评价[J]. 中国蔬菜,2025(4):143-150.
LIN A L,HUANG J L,YAO J Q,et al. Population monitoring and sex attractant trapping of *Tuta absoluta* in Beijing[J]. China Vegetables,2025(4):143-150.

[20] 王海旭,袁玲,丁嘉欣,等. 番茄潜叶蛾卵和幼虫在温室大棚及露地的空间分布型及抽样技术[J]. 应用昆虫学报,2024,61(4):731-740.
WANG H X,YUAN L,DING J X,et al. Spatial distribution patterns and sampling technique of *Tuta absoluta* eggs and larvae in greenhouses and open fields and sampling techniques for monitoring their abundance[J]. Chinese Journal of Applied Entomology,2024,61(4):731-740.

[21] 阿米热·牙生江,付开赟,阿地力·沙塔尔,等. 番茄潜叶蛾幼虫和卵在新疆大棚番茄的空间分布型及理论抽样数[J]. 生物安全学报,2021,30(2):102-109.
AMIRE Y S J,FU K Y,ADILI S T E,et al. Spatial distribution patterns and theoretical sampling of *Tuta absoluta* (Meyrick) of larvae and eggs in a tomato-producing greenhouse in Xinjiang,China[J]. Journal of Biosafety,2021,30(2):102-109.

[22] GHADERI S,FATHIPOUR Y,ASGARI S. Population density and spatial distribution pattern of *Tuta absoluta* (Lepidoptera:Gelechiidae) on different tomato cultivars[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2018,20(3):543-556.

[23] 徐建霞,向中华,徐海英,等. 贵州省高粱田草地贪夜蛾幼虫发生及其空间分布研究[J]. 应用昆虫学报,2024,61(4):880-892.
XU J X,XIANG Z H,XU H Y,et al. Occurrence and spatial distribution of *Spodoptera frugiperda* larvae in sorghum fields in Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Applied Entomology,2024,61(4):880-892.

[24] CHEN L X,LI X W,ZHANG J M,et al. Comprehensive metabolome and volatilome analyses in eggplant and tomato reveal their differential responses to *Tuta absoluta* infestation [J]. Frontiers in Plant Science,2021,12:757230.

[25] 康志伟,渠成,曹利军,等. 番茄重要害虫与番茄攻防互作研究进展[J]. 昆虫学报,2025,68(4):525-540.
KANG Z W,QU C,CAO L J,et al. Research advances of the attack-defense interactions between important tomato pests and tomato[J]. Acta Entomological Sinica,2025,68(4):525-540.

[26] 张桂芬,殷惠军,王玉生,等. 番茄潜叶蛾幼虫的龄数和龄期测定[J]. 中国生物防治学报,2023,39(2):340-345.
ZHANG G F,YIN H J,WANG Y S,et al. Determination of larval instars and duration of the tomato leaf miner, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Chinese Journal of Biological Control,2023,39(2):340-345.

(责任编辑:陈丽)

(上接第130页)

[34] 蔡毓新,唐艳领,史宣杰,等. 河南省设施保护地蔬菜根结线虫种类调查及鉴定[J]. 中国瓜菜,2018,31(10): 41-44.
CAI Y X,TANG Y L,SHI X J,et al. Investigation and identification of vegetable root knot nematodes species in Henan [J]. China Cucurbits and Vegetables,2018,31(10):41-44.

[35] 杨甜,马和芳,王香,等. 不同药剂种类对甜瓜苗期根结线虫的防治效果[J]. 中国瓜菜,2025,38(5):116-124.
YANG T,MA H F,WANG X,et al. Control effect of different pesticide types on root-knot nematode in melon seedlings [J]. China Cucurbits and Vegetables,2025,38(5):116-124.

[36] 凌文政,曹海潮,余佳敏,等. 氟吡菌酰胺纳米纤维剂的研制及其对南方根结线虫的生物活性[J]. 中国农业科学,2024,57(15):2997-3009.
LING W Z,CAO H C,YU J M,et al. Preparation of fluopyram-loaded nanofiber nematicide and its biological activity against *Meloidogyne incognita*[J]. Scientia Agricultura Sinica,2024,57(15):2997-3009.

[37] 吴蔚然,朱晓峰,王媛媛,等. 黄瓜南方根结线虫病生防芽孢杆菌的筛选鉴定及防效[J]. 微生物学报,2025,65(8):3748-3764.
WU W R,ZHU X F,WANG Y Y,et al. Screening,identification,and efficacy evaluation of *Bacillus* strains for biocontrol of cucumber root-knot nematodes [J]. Acta Microbiologica Sinica,2025,65(8):3748-3764.

[38] 匡超,王舒琪,张敏,等. 淡紫紫孢菌在水肥药一体化条件下对番茄根结线虫病的生物防治效果[J]. 植物病理学报,2025,55(4):872-885.
KUANG C,WANG S Q,ZHANG M,et al. Biological control effect of *Fusarium oxysporum* on tomato root-knot nematode disease under integrated water,fertilizer,and pesticide management conditions[J]. Journal of Plant Pathology,2025,55(4):872-885.

(责任编辑:陈丽)