水稻收割高度和旋耕对二化螟越冬幼虫种群的影响

戴长庚[1,2]， 于 晶[1]， 钟玉琪[1]， 程益宇[1]， 龚佑辉[1*]， 侯茂林[1*]

（1. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193；
2. 贵州省农业科学院植物保护研究所，贵阳 550006）

摘要 二化螟越冬幼虫数量直接影响翌年田间发生危害程度。本研究调查二化螟越冬幼虫在稻株内的垂直分布特征，并评估水稻收割高度和旋耕对越冬幼虫的防控效果，旨在为农业防控措施的应用提供科学依据。采用裂区设计，主区为收割高度，设 30 cm 和 10 cm；副区为旋耕次数，设 0 次（不旋耕）、1 次（春耕）和 2 次（冬耕＋春耕）。结果表明，水稻收割前二化螟越冬幼虫在稻茎内的分布随高度增加而递减，10 cm 低茬收割相比 30 cm 高茬收割越冬种群数量显著减少。随着旋耕次数增加，二化螟虫口减退率显著增加。无论是低茬还是高茬收割，2 次旋耕均使二化螟越冬种群数量大幅度降低，分别减少 99.3%和 96.5%。鉴于我国普遍存在高茬机械收割，建议收割后立即旋耕，以破坏二化螟幼虫的越冬场所，并于翌年水稻播种前再次旋耕，以实现对二化螟越冬种群的有效控制。

关键词 收割高度； 旋耕； 二化螟； 越冬幼虫

中图分类号： S 435.112.1 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2024675

Influence of rice harvest height and rotary tillage on the overwintering larval population of *Chilo suppressalis*

DAI Changgeng[1,2]， YU Jing[1]， ZHONG Yuqi[1]， CHENG Yiyu[1]， GONG Youhui[1*]， HOU Maolin[1*]

（1. *Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing* 100193, *China*; 2. *Institute of Plant Protection, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang* 550006, *China*）

Abstract The population size of overwintering *Chilo suppressalis* larvae directly influences the severity of damage in the subsequent rice season. This study investigated the vertical distribution of overwintering larvae within rice stems and evaluated the effects of harvest height and rotary tillage on larval survival, aiming to provide a scientific basis for agricultural control measures. A split-plot experimental design was employed, with harvest height (30 cm and 10 cm) as the main factor and rotary tillage frequency (0＝no tillage, 1＝spring tillage, 2＝winter tillage＋spring tillage) as the sub-factor. The results showed that, before harvest, distribution of *C. suppressalis* larvae in the stems show a decreasing pattern with increasing height. 10 cm short stubble cutting significantly reduced the overwintering larval population compared to 30 cm cutting. The reduction rate of overwintering larvae increased significantly with the frequency of rotary tillage. Regardless of harvest height, two tillage operations significantly reduced the overwintering larval population by 99.3% and 96.5%, respectively. Given the widespread use of high-stubble mechanized harvesting in China, it is recommended that rotary tillage be performed immediately after harvest to destroy larval overwintering sites, followed by an additional tillage before rice sowing in the next spring, to achieve effective control of overwintering population of *C. suppressalis*.

Key words harvest height; rotary tillage; *Chilo suppressalis*; overwintering larvae

二化螟 *Chilo suppressalis* 是水稻的重要害虫，在我国大部分稻区都有不同程度发生，年均发生面积达 1 400 hm^2，约占我国水稻种植面积的 1/2，造成产量损失约 56 万 t，严重威胁我国粮食安全[1]。目前，稻农主要依赖化学农药防治二化螟，但长期使用同一类化学农药易导致二化螟产生抗药性[2]，这

收稿日期： 2024-12-23 **修订日期**： 2025-06-30
基金项目： 国家重点研发计划(2024YFD1400700)
* 通信作者 E-mail：龚佑辉 gongyouhui01@caas.cn；侯茂林 mlhou@ippcaas.cn

不仅降低了田间防效,还使得二化螟田间种群数量常年居高不下[3],同时对生态环境造成不利影响[4]。

人工收割水稻时,留茬不到 10 cm,剩余秸秆被用作牲畜的饲料、或作为烹饪和取暖的薪材,这能极大地减少二化螟越冬种群数量[5]。然而,近年来我国稻区基本实现了机械化收割,虽然减轻了稻农劳动强度并提高了收割效率,但机械收割平均留茬约 30 cm,这不仅增大二化螟越冬种群,还可能有利于其越冬存活[6],这无疑增加了二化螟的防治难度。随着机械化收割的普及,稻农常通过焚烧秸秆减少田间残留物,间接减少二化螟越冬种群[7],但这种做法因污染环境等原因而被禁止[8]。

害虫综合治理策略可有效防治害虫,同时有利于保护环境,因此在农业生产中被广泛应用[9]。农艺调控措施对环境友好、有效且经济可行,是水稻害虫综合治理技术体系的重要组成部分。比如冬季旋耕可直接杀死部分二化螟幼虫,同时破坏其越冬场所(稻茬),间接增大其越冬死亡[10]。这项技术对环境没有不利影响,且随着旋耕机日益普及,其应用前景广阔。因此,本研究拟探究收割高度和旋耕对二化螟越冬种群的调控效果,为其应用于二化螟种群治理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验在农业农村部桂林作物有害生物科学观测实验站(25°36′N,110°41′E)开展。水稻栽培和管理均为常规管理。

1.2　试验设计

采用裂区设计,主区为收割高度,设 30 cm 和 10 cm;副区为旋耕次数,设 0 次(不旋耕)、1 次(春耕)和 2 次(冬耕+春耕)。共 6 个处理,每处理重复 4 次,合计 24 个小区。小区随机排列,小区面积 57 m^2(19 m×3 m),同一区组内各小区间距 0.5 m,区组间隔 1 m(每区组为 1 块田)。2022 年 10 月 18 日按照设置的稻茬高度人工进行收割,将收割后的稻草搬至远离试验田的地里,以避免对试验产生干扰。2022 年 11 月 13 日(冬耕)和 2023 年 3 月 29 日(春耕)采用久保田 M954-KQ 拖拉机进行旋耕。

1.3　二化螟在稻株中的分布高度调查

水稻收割前 1 d,4 块田分别随机调查 18 株,一共调查 72 株、剥查 1 608 头幼虫,记录每头幼虫在稻茎的分布高度,分别统计各丛稻茎基部以上每 10 cm 长度稻茎中的二化螟幼虫数量。

1.4　收割高度和旋耕对二化螟越冬幼虫数量的影响

分别在收割后 1 d、冬耕后 2 d、春耕前 2 d、春耕后 2 d 进行调查。其中旋耕小区随机调查 3 点,每点调查 1 m^2 旋耕层内残存稻茬及土中的二化螟幼虫数。不旋耕小区则平行跳跃取样 3 行稻茬×4 丛/行,剥查二化螟越冬幼虫数量。据田间调查,1 m^2 稻田有 14 丛水稻,据此折算不旋耕小区的每平方米虫量。根据调查数据,计算虫口减退率和累计虫口减退率。

虫口减退率=(处理前幼虫数量−处理后幼虫数量)/处理前幼虫数量×100%;

累计虫口减退率=(收割前幼虫数量−处理后幼虫数量)/收割前幼虫数量×100%。

1.5　数据处理

采用裂区设计和双因素方差分析检验收割高度和旋耕次数对春耕后二化螟幼虫累计虫口减退率(最终效果)影响的显著性;采用单因素方差分析检验收割高度或旋耕次数对各调查期内二化螟虫口减退率和累计虫口减退率影响的显著性,采用单因素方差分析检验不同稻茎高度对幼虫分布比例影响的显著性,用 LSD 法检验处理间的差异显著性。

聚集度指标计算。将 0−10、10−20……50−60 cm 稻茎中二化螟幼虫数量制成频次表,采用丛生指数 I、聚集度指数 M^*/m、久野指数 C_A、扩散系数 C、负二项分布指数 K 来确定二化螟的空间分布型[11]。计算公式如下:$I=S^2/m-1$;$M^*/m=[\sum x_j(x_j-1)]/[(\sum x_j)\times m]$;$C_A=(S^2-m)/m^2$;$C=S^2/m$;$K=m^2/(S^2-m)$。式中,$x_j$ 为某样方中第 j 株稻株中二化螟幼虫的个体数;M^* 为平均拥挤度;m 为样方中幼虫的平均密度(每 10 cm 稻茎中虫数);S^2 为样本方差。当 $M^*/m<1$,$C<1$,$K<0$,$I<0$,$C_A<0$ 时,为均匀分布;当 $M^*/m=1$,$C=1$,$K\to\infty$,$I=0$,$C_A<0$ 时,为随机分布;当 $M^*/m>1$,$C>1$,$K>0$,$I>0$,$C_A>0$ 时,为聚集分布。

线性回归方程检验及聚集原因分析。采用 Taylor 幂法和 Iwao M^*-m 回归分析法[12-13],对二化螟在稻茎中的分布型进行检验。Taylor 幂法则:$\lg S^2=\lg a+b\lg m$,当 $b<1$ 时为均匀分布;$b=1$ 时为随机分布;$b>1$ 时为聚集分布。Iwao M^*-m 回归

分析法：$M^*=\alpha+\beta m$，α 为分布基本成分的平均拥挤度，当 $\alpha>0$ 时，个体间相互吸引，且存在着个体群；当 $\alpha=0$ 时，分布的基本成分是单个的个体；当 $\alpha<0$ 时，个体间相互排斥。β 为基本成分的空间分布型，$\beta>1$ 时为聚集分布，$\beta=1$ 时为随机分布，$\beta<1$ 时为均匀分布。采用 Blackith 聚集均数(λ)法[14]，分析二化螟幼虫的聚集原因：当 $\lambda\leqslant 2$ 时，聚集由环境条件引起；当 $\lambda>2$ 时，聚集由昆虫行为或环境条件引起。

期望效益计算。期望效益＝预期增产效益－额外耕作成本，其中预期增产效益＝最终的(春耕)累计虫口减退率×增产系数×稻谷价格，增产系数设为 1[15]，稻谷按 2.7 元/kg 计，由于收割和春耕是常规生产环节，其成本不计入，仅将冬耕作为额外的措施，按 200 元/667m^2 计。

数据统计分析利用 DPS 19.05 软件进行[16]。

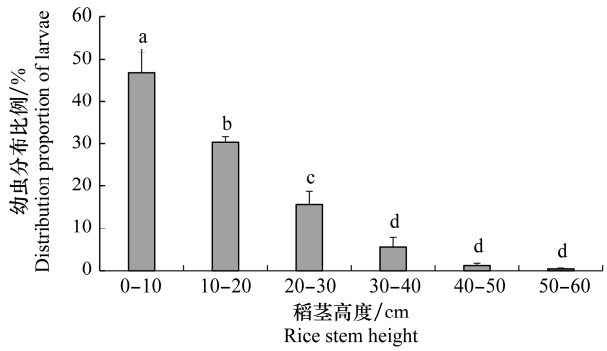
2 结果与分析

2.1 二化螟幼虫在稻茎中的分布高度

二化螟幼虫在不同高度稻茎中的分布数量存在显著差异($F_{5,18}=50.62$，$P<0.001$)(图 1)。随着稻茎高度增加，二化螟幼虫分布比例越低；稻茎地上部 0～10 cm 的高度内二化螟幼虫分布占比 46.9%，10 cm 以上稻茎内幼虫分布占比 53.1%。

2.2 二化螟幼虫在稻茎中的空间分布型

通过二化螟幼虫在不同高度稻茎中的分布数量，分析其在稻茎的空间分布型。从表 1 可见，1～4 号样地丛生指数 $I>0$，聚集度指数 $M^*/m>1$，久野指数 $C_A>0$，扩散系数 $C>1$，负二项分布指数 $K>0$，属于聚集分布。采用 Iwao M^*-m 回归模型分析，得到方程 $M^*=22.83+1.53m$($r=0.996$)，式中 $\alpha=22.83>0$；$\beta=1.53>1$，表明二化螟个体间相互吸引，分布的基本成分为个体群，在稻茎中为聚集分布。采用 Taylor 幂模型分析，得到方程 $\lg S^2=0.91+1.48\times\lg m$($r=0.990$)，$\lg a=0.91>0$，$b=1.48>1$，表明二化螟在稻茎中为聚集分布，且与密度有关。聚集均数为 8.03～69.76，均大于 2，说明二化螟种群聚集在稻茬底部是由昆虫行为引起或环境条件引起的。



图中数据为平均值±标准误，柱上不同小写字母表示在0.05水平差异显著(LSD检验)。下同。
Data are presented as mean±SE. Different lowercase letters aove the bars indicate significant differences at the 0.05 (LSD test). The same applies below.

图 1 二化螟幼虫在稻茎不同高度中的分布比例

Fig. 1 Vertical distribution of *Chilo suppressalis* larvae within rice stems

表 1 二化螟在稻茎中的空间分布型

Table 1 Spatial distribution pattern of *Chilo suppressalis* larvae within rice stems

样地号 Field code	虫口密度(m)/(头/10 cm) Population density	平均拥挤度(M^*) Mean crowding degree	丛生指数(I) Clumping index	聚集度指数(M^*/m) Aggregation index	久野指数(C_A) Kuno index	扩散系数(C) Diffusion coefficient	负二项分布指数(K) Negative binomial distribution index	聚集均数(λ) Aggregation mean
1	92.33	164.29	71.96	1.78	0.78	72.96	1.28	69.76
2	24.33	53.72	29.39	2.21	1.21	30.39	0.83	15.51
3	18.00	54.80	36.80	3.04	2.04	37.80	0.49	8.03
4	39.00	84.64	45.64	2.17	1.17	46.64	0.85	25.25

2.3 收割高度和旋耕对二化螟越冬虫量的影响

收割高度($F_{1,44}=123.89$，$P<0.001$)和旋耕($F_{2,44}=190.49$，$P<0.001$)对二化螟越冬幼虫累计虫口减退率存在显著影响，且存在显著的交互作用($F_{2,44}=18.48$，$P<0.001$)。低茬收割＋旋耕 2 次(冬耕＋春耕)和高茬收割＋旋耕 2 次(冬耕＋春耕)的累计虫口减退率分别达 99.3%和 96.5%，比低茬收割＋旋耕 1 次(春耕)和高茬收割＋旋耕 1 次(春耕)分别高 27.4 百分点和 55.8 百分点，比低茬收割＋不旋耕和高茬收割＋不旋耕分别高 42.1 百分点和 78.9 百分点(表 2)。低茬收割＋旋耕 1 次(春耕)的累计虫口减退率显著高于高茬收割＋旋耕 1 次(春耕)、低茬收割＋不旋耕和高茬收割＋不旋耕。

收割高度($F_{1,22}=31.70$，$P<0.001$)和旋耕时

期(冬耕后 2 d:$F_{3,44}=4.07$,$P=0.012$;春耕前 2 d:$F_{3,44}=112.12$,$P<0.001$;春耕后 2 d:$F_{5,66}=150.12$,$P<0.001$)对二化螟越冬幼虫的虫口减退率均存在显著影响(表 2)。低茬收割的虫口减退率达 52.9%,比高茬收割的高 43.6 百分点。冬耕后 2 d 的虫口减退率平均为 19.1%,比冬季不耕平均高 17.8 百分点。春耕前 2 d 调查,发现冬耕虫口减退率平均达 70.9%,比冬季不耕平均高 62.7 百分点。旋耕 2 次(冬耕+春耕)虫口减退率平均为 88.7%,比旋耕 1 次(春耕)和未旋耕分别高 54.8 百分点和 87.7 百分点。因此,低茬收割和旋耕均可有效降低二化螟越冬幼虫种群数量。

表 2　收割高度和旋耕对二化螟越冬虫量的影响[1)]

Table 2　Effects of harvest height and rotary tillage on the population size of overwintering larvae of *Chilo suppressalis*

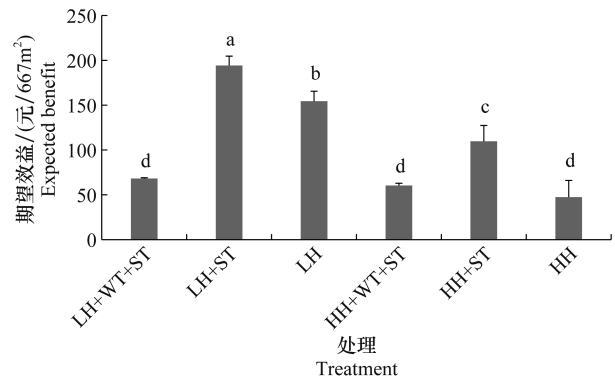
处理 Treatment	收割前幼虫数/(头/m²) Number of larvae before harvest	收割后 1 d 虫口减退率/% RNL 1 d after harvest	冬耕后 2 d 2 d after winter tillage		春耕前 2 d 2 d before spring tillage		春耕后 2 d 2 d after spring tillage	
			虫口减退率/% RNL	累计虫口减退率/% Cumulative RNL	虫口减退率/% RNL	累计虫口减退率/% Cumulative RNL	虫口减退率/% RNL	累计虫口减退率/% Cumulative RNL
低茬收割+冬耕+春耕 LH+WT+ST	303.6± 117.9	(52.9± 6.1)a	(23.3± 7.1)a	(62.1± 5.9)a	(72.1± 3.5)a	(88.4± 2.6)a	(92.1± 3.7)a	(99.3± 0.3)a
低茬收割+春耕 LH+ST	303.6± 117.9	(52.9± 6.1)a	(0.2± 2.2)b	(53.3± 4.2)a	(8.8± 3.1)b	(56.8± 4.4)c	(37.2± 4.2)b	(71.9± 3.9)b
低茬收割 LH	303.6± 117.9	(52.9± 6.1)a	(0.2± 2.2)b	(53.3± 4.2)a	(8.8± 3.1)b	(56.8± 4.4)c	(0.8± 1.5)c	(57.2± 4.1)c
高茬收割+冬耕+春耕 HH+WT+ST	303.6± 117.9	(9.3 ± 4.8)b	(15.0± 6.1)ab	(21.5± 7.6)b	(69.6± 3.5)a	(75.3± 4.2)b	(85.3± 3.6)a	(96.5± 0.9)a
高茬收割+春耕 HH+ST	303.6± 117.9	(9.3 ± 4.8)b	(2.4± 4.8)b	(11.3± 6.2)b	(7.6± 3.6)b	(17.2± 6.1)d	(30.6± 3.4)b	(40.6± 6.6)d
高茬收割 HH	303.6± 117.9	(9.3 ± 4.8)b	(2.4± 4.8)b	(11.3± 6.2)b	(7.6± 3.6)b	(17.2± 6.1)d	(1.3± 2.3)c	(17.6± 6.9)e

1) 冬耕后 2 d 和春耕前 2 d 调查时春耕还未实施,因此 LH+ST 与 LH 小区合并调查,HH+ST 和 HH 小区合并调查。RNL:虫口减退率;LH:低茬收割;HH:高茬收割;WT:冬耕;ST:春耕。表中数据为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。

Spring tillage was not operated when the surveys were conducted two days after WT and two days before ST, therefore the LH+ST and LH plots as a combined group, HH+ST and HH plots as a combined group were surveyed. RNL: Reduction in larval number; LH: Low stubble harvest; HH: High stubble harvest; WT: Winter tillage; ST: Spring tillage. Data are presented as mean ± SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level (LSD test).

2.4　期望效益

收割高度和旋耕($F_{5,66}=17.17$,$P<0.001$)对累计效益存在显著影响(图 2)。低茬收割+春耕的期望效益最高(194.2 元/667m²),其次为低茬收割(154.4 元/667m²)、高茬收割+春耕(109.7 元/667m²),而低茬收割+冬耕+春耕、高茬收割+冬耕+春耕和高茬收割的期望效益最低。



LH: 低茬收割; HH: 高茬收割; WT: 冬耕; ST: 春耕。
LH: Low harvest; HH: High harvest; WT: Winter tillage; ST: Spring tillage.

图 2　收割高度和旋耕的期望效益

Fig. 2　Expected effects of harvest height and rotary tillage

3　结论与讨论

害虫在寄主植物中的分布可为制定防治策略提供依据。本研究揭示了水稻收割前二化螟幼虫在稻株中的垂直分布情况,发现幼虫主要集中在稻株底部(0~10 cm),平均分布比例为 46.9%,其次分布于 10~20 cm(占比 30.3%)和 20~30 cm(占比 15.6%),该结果与先前在辽宁盘锦、江西南昌、广西桂林的调查结果一致[17-19]。然而,Jiang 等[7]在浙江台州调查发现在超级稻'甬优 6 号'中,仅 14.3%的

越冬幼虫分布在稻株 0～10 cm 内。这可能与稻株含水率有关，稻株含水量较低时，幼虫倾向于稻株底部；若稻株含水量较高时则分布相反[20]。

二化螟冬后存活个体构成当年虫源，采取农业防治措施降低冬后种群数量将减轻水稻生产季节的危害。本研究发现，低茬收割显著减少二化螟越冬种群数量，这一结果与王藕芳等[21]在浙江金华的结果一致。这可能与幼虫分布有关，本研究发现分别有 46.9%、45.9%和 7.2%的二化螟越冬幼虫分布在稻株地上部 0～10、10～30 cm 和 30 cm 以上高度，高茬收割（30 cm）后，约 90%幼虫仍留在稻桩中，而低茬收割（10 cm）时只有一半幼虫仍留在稻桩中，因此，低茬收割能显著减少越冬幼虫数量。

旋耕防治二化螟越冬幼虫是常见的农业措施。本研究发现，冬耕对二化螟虫口减退率的持续效应高于冬耕的直接效应。该结果与其他调查结果一致，Jiang 等[7]研究发现，冬耕导致二化螟虫口数量降低 14.4%，冬后累积虫口数量降低 73.5%。旋耕作业在切碎稻茬的同时直接杀死稻茬中的部分二化螟幼虫，切碎（杀虫）效果与旋耕机刀片结构相关[22]。切碎后秸秆长度平均为 6.7 ～ 11.0 cm[23-24]，相当于将稻茬分成若干段，大部分幼虫可能并未遭受旋耕机刀片的直接杀伤，所以冬耕作业对幼虫的直接致死作用有限。旋耕使得大部分稻茬及其中的二化螟幼虫被埋于泥土下，从而改变幼虫越冬生境，如氧气含量、温湿度等。土壤中氧气含量较少，尤其是降雨后土壤氧气含量更少，这可能导致幼虫窒息而亡。冬季土壤中的温度一般高于气温[25]，然而温度高不利于二化螟幼虫越冬存活[26-27]。掩埋的稻茬更易腐烂，可能导致二化螟幼虫直接暴露，没有“庇护所”后可能更容易遭受天敌和病原菌侵害。冬耕后的二化螟幼虫处在这种不利环境下近 4 个月，可能导致越冬幼虫大量死亡，使得冬耕的间接致死效应大于冬耕的直接致死作用。

随着我国机械化收割水稻的推广，稻茬中残留的二化螟数量显著增加[6]。本研究发现，无论是高茬收割（30 cm）还是低茬收割（10 cm），旋耕 2 次（冬耕＋春耕）均能有效减少二化螟越冬种群数量；低茬收割＋春耕也能降低越冬虫口数量。因此，冬耕＋春耕或者低茬收割＋春耕能显著降低我国普遍高发的二化螟种群。冬耕会产生额外的成本，导致旋耕两次的期望效益最低。但是，旋耕两次更显著减少二化螟幼虫数量，冬耕如果结合种植冬季作物（如蔬菜、油菜、小麦等），反而能增大其期望效益。

综上所述，无论是高茬收割还是低茬收割，旋耕两次（冬耕＋春耕）大幅度减少二化螟越冬种群数量（虫口减退率为 96.5% ～ 99.3%），低茬收割＋春耕也能有效降低越冬虫口数量（虫口减退率为 71.9%）。因此，建议水稻收割后结合冬种进行旋耕，破坏二化螟幼虫越冬场所，并在翌年水稻播种前再次旋耕，从而极大减少二化螟冬后种群；或者采用低茬收割＋春耕。这样在降低二化螟越冬种群的同时可获得较好的期望效益。

参考文献

[1] 车琳，蒋沁宏，王也，等. 我国水稻五大产区虫害发生及防控情况差异的比较分析[J]. 植物保护，2022，48(3)：233－241.

[2] ZHAO Xia，XU Xiang，WANG Xuegui，et al. Mechanisms for multiple resistances in field populations of rice stem borer，*Chilo suppressalis*（Lepidoptera：Crambidae）from Sichuan province，China [J/OL]. Pesticide Biochemistry and Physiology，2021，171：104720. DOI：10.1016/j.pestbp.2020.104720.

[3] 全国农业技术推广服务中心. 2021 年全国粮食作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊，2021，41(1)：37－42.

[4] GHANBARI F，MOATTAR F，MONAVARI S M，et al. Human health risk assessment of organophosphorus pesticide in rice crop from selected districts of Anzali International Wetland basin，Iran [J/OL]. Human and Experimental Toxicology，2017，36(5)：438－444.

[5] 欧信阳. 收割期螟虫居留部位与低割禾兜治螟[J]. 江西农业科技，1981(9)：18.

[6] 吴生伟，彭兆普，蒋桂芳，等. 晚稻收割方式和稻茬处理对二化螟越冬的影响[J]. 湖南农业科学，2014(4)：48－50.

[7] JIANG Weihua，JIANG Xiaojing，YE Jianxiong，et al. Rice striped stem borer，*Chilo suppressalis*（Lepidoptera：Pyralidae），overwintering in super rice and its control using cultivation techniques [J]. Crop Protection，2011，30：130－133.

[8] HUANG Ling，ZHU Yonghui，LIU Hanqing，et al. Assessing the contribution of open crop straw burning to ground-level ozone and associated health impacts in China and the effectiveness of straw-burning bans [J/OL]. Environment International，2023，171：107710. DOI：10.1016/j.envint.2022.107710.

[9] HAJJAR M J，AHMED N，ALHUDAIB K A，et al. Integrated insect pest management techniques for rice [J/OL]. Sustainability，2023，15：4499. DOI：10.3390/su15054499.

[10] 戴志一，杨益众，王春安，等. 不同耕作技术对二化螟、三化螟越冬存活率影响差异显著[J]. 植物保护，1993，19(4)：48－49.

（下转 194 页）

[26] IONIN A A, IVANOVA A, KHMELNITSKII R, et al. Antibacterial effect of the laser-generated Se nanocoatings on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* biofilms [J/OL]. Laser Physics Letters, 2018, 15: 015604. DOI: 10.1088/1612-202X/aa897f.

[27] LIU Wenwen, GOLSHAN N H, DENG Xuliang, et al. Selenium nanoparticles incorporated into titania nanotubes inhibit bacterial growth and macrophage proliferation [J]. Nanoscale, 2016, 8(34): 15783-15794.

[28] BEHESHTI N, SOFLAEI S, SHAKIBAIE M, et al. Efficacy of biogenic selenium nanoparticles against *Leishmania major*: *in vitro* and *in vivo* studies [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2013, 27(3): 203-207.

[29] HASHEM A H, KHALIL A M A, REYAD A M, et al. Biomedical applications of mycosynthesized selenium nanoparticles using *Penicillium expansum* ATTC 36200 [J]. Biological Trace Element Research, 2021, 199(10): 3998-4008.

[30] RAJAEE BEHBAHANI S, IRANBAKHSH A, EBADI M, et al. Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an *in vitro* experiment [J/OL]. PLoS ONE, 2020, 15(7): e0235556. DOI: 10.1371/journal.pone.0235556.

[31] UDALOVA Z V, FOLMANIS G E, KHASANOV F K, et al. Selenium nanoparticles-an inducer of tomato resistance to the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* (Kofoid et White, 1919) Chitwood 1949 [J]. Doklady Biochemistry and Biophysics, 2018, 482(1): 264-267.

[32] 张波，孙爱青，李培培，等. 木质素还原制备纳米硒及抑菌活性的研究[J]. 广州化工，2020，48(15)：81-83.

[33] 张琪，李亚妮，周荣娟，等. 阿维链霉菌合成纳米硒的物理化学表征及其对枸杞病原真菌的抑菌活性[J]. 生物工程学报，2025，41(2)：693-705.

[34] SU Xiaofeng, YAN Shuo, ZHAO Weisong, et al. Self-assembled thiophanate-methyl/star polycation complex prevents plant cell-wall penetration and fungal carbon utilization during cotton infection by *Verticillium dahliae* [J/OL]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124354. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124354.

[35] ZHANG Huan, ZHANG Honglu, DEMIRER G S, et al. Engineering DNA nanostructures for siRNA delivery in plants [J]. Nature Protocols, 2020, 15(9): 3064-3087.

[36] QIAO Lulu, NIÑO-SÁNCHEZ J, HAMBY R, et al. Artificial nanovesicles for dsRNA delivery in spray-induced gene silencing for crop protection [J]. Plant Biotechnology Journal, 2023, 21(4): 854-865.

（责任编辑：张文蔚）

（上接 170 页）

[11] 徐汝梅，成新跃. 昆虫种群生态学：基础与前沿[M]. 北京：科学出版社，2005.

[12] TAYLOR L R. Aggregation, variance and mean [J/OL]. Nature, 1961, 189(4766): 732-735.

[13] IWAO S. A new regression method for analyzing the aggregation pattern of animal populations [J]. Researches on Population Ecology, 1968, 10(1): 1-20.

[14] 王亚桥，杨龙，潘云飞，等. 南疆苹果园绣线菊蚜种群时空动态与调查抽样技术[J]. 植物保护，2024，50(2)：261-266.

[15] 于深州，马晓慧. 盘锦稻区二化螟发生情况及对水稻减产的调查[J]. 北方水稻，2017，47(1)：38-40.

[16] TANG Qiyi, ZHANG Chuanxi. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research [J]. Insect Science, 2013, 20: 254-260.

[17] 苏建伟，宣维健，盛承发，等. 东北稻区二化螟越冬幼虫的生物学研究[J]. 昆虫知识，2003，40(4)：323-325.

[18] 黄水金，刘剑青，秦文婧，等. 二化螟越冬幼虫在稻株内的分布及其控制技术研究[J]. 江西农业学报，2010，22(11)：91-93.

[19] DAI Changgeng, ZHONG Yuqi, YU Jing, et al. Behavioral and physiological adaptation to soil moisture in the overwintering larvae of the rice stem borer in the subtropics [J/OL]. Agriculture, 2023, 13: 2177. DOI:10.3390/agriculture13122177.

[20] 沈庆型，吴中林，孙宝瑛，等. 二化螟 *Chilo suppressalis* Walker 研究报告Ⅱ[J]. 应用昆虫学报，1958，1(4)：331-347.

[21] 王藕芳，包生土，贾华凑，等. 晚稻不同收割方式对二化螟越冬虫量的影响[J]. 上海农业科技，2002(5)：41.

[22] 郭俊，张庆怡，MUHAMMAD S M，等. 仿鼹鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(6)：43-50.

[23] 罗伟文，顾峰玮，吴峰，等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：42-52.

[24] 芦新春，陈书法，杨进，等. 全量碎秸覆埋还田施肥播种机的设计与试验[J]. 农机化研究，2023(7)：107-111.

[25] 陈奇，祁栋林，霍金虎，等. ERA-interim 气温、土壤温度再分析数据在青海东部农业区的适用性评估[J]. 沙漠与绿洲气象，2023，17(1)：69-76.

[26] 王小奇，李朝飞，刘大军，等. 水稻二化螟滞育解除的初步研究[J]. 沈阳农业大学学报，1999，30(3)：298-302.

[27] XIAO Haijun, CHEN Junhui, CHEN Liyuan, et al. Exposure to mild temperatures decreases overwintering larval survival and post-diapause reproductive potential in the rice stemborer *Chilo suppressalis* [J/OL]. Journal of Pest Science, 2017, 90: 127. DOI:10.1007/s10340-016-0769-0.

（责任编辑：杨明丽）