

土壤湿度对粘虫入土化蛹和羽化出土的影响*

李立坤** 王晓辉 刘佳文 王艳辉 陈法军***

(南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095)

摘要 【目的】研究不同土壤湿度对粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 入土化蛹和羽化出土的影响, 并结合当地冬季地表温度分析, 以期对粘虫越冬种群预测及其防控提供指导。【方法】在山东德州地区, 通过设置室内和室外不同土壤相对含水量 (梯度分别为 0%、10%、20%、40%、60%、80% 和 100%), 并结合当地地表温度, 观察并分析粘虫入土化蛹和羽化出土情况。【结果】土壤不同相对含水量对粘虫入土化蛹、羽化出土及土中历期的影响差异显著。2016-2017 年, 土壤相对含水量为 0%、10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 的粘虫平均入土化蛹率分别为 75.0%、82.5%、92.5%、90.0%、77.5%、65.0% 和 60.0%; 2017-2018 年, 粘虫平均入土化蛹率分别为 70.0%、75.0%、90.0%、87.5%、77.5%、60.0% 和 57.5%。粘虫化蛹的最适土壤相对含水量在 20%-40%, 0% 和 100% 土壤相对含水量都不利于粘虫入土化蛹。2016-2017 年, 土壤相对含水量为 0%、10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 的粘虫平均羽化出土率分别为 12.5%、47.5%、42.5%、47.5%、77.5%、45.0% 和 7.5%; 2017-2018 年粘虫羽化出土率分别为 20.0%、27.5%、40.0%、57.5%、67.5%、52.5% 和 25.0%。粘虫羽化为成虫的最适土壤相对含水量为 60%, 0% 和 100% 土壤相对含水量都不利于粘虫正常的羽化出土。2016 年 11 月和 2017 年 11 月份在室外大田埋蛹, 发现相同土壤相对含水量处理下, 第二年春天均未见有粘虫成虫羽化出土。【结论】研究结果表明, 山东德州地区粘虫入土化蛹的适宜土壤相对含水量为 20%-40%, 而羽化出土的适宜土壤相对含水量为 60%。可见, 土壤相对含水量影响粘虫的入土化蛹和羽化出土, 过高或过低的土壤相对含水量导致粘虫土中蛹大量死亡而不能羽化出土。结合当地冬季地表温度分析, 山东德州宁津地区粘虫无法越冬存活。

关键词 粘虫; 土壤相对含水量; 化蛹; 羽化; 越冬存活

Effect of soil moisture on the pupation and emergence of the armyworm, *Mythimna separata*

LI Li-Kun** WANG Xiao-Hui LIU Jia-Wen WANG Yan-Hui CHEN Fa-Jun***

(Insect-Information Ecology Laboratory, Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing 210095, China)

Abstract [Objectives] To study the effects of soil humidity on the pupation and emergence of the armyworm, *Mythimna separata*, so that local winter soil surface temperature can be used to predict its overwintering period and subsequent emergence. [Methods] The relative water content of indoor and outdoor soil samples were set as 0, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%, respectively, and pupation and emergence rates of armyworm larvae in these samples were recorded and compared. [Results] Soil water content had significant effects on pupation, eclosion and overwintering period. (1) In soil with 0, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% relative soil water content, the average pupation rate was 75.0%, 82.5%, 92.5%, 90.0%, 77.5%, 65.0% and 60.0%, respectively (2016-2017). Experimental results in the second year were similar; 70.0%, 75.0%, 90.0%, 87.5%, 77.5%, 60.0% and 57.5%, respectively (2017-2018). The optimal soil water content was between 20% and 40%, and water content of between 0% and 100% was not conducive to pupation. (2) Soil with water content of 0, 10%,

*资助项目 Supported projects: 国家公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201403031) the State Public Industry (Agriculture) Research Project of China (201403031)

**第一作者 First author, E-mail: 2016102055@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: fajunchen@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2018-12-10; 接受日期 Accepted: 2019-03-05

20%, 40%, 60%, 80% and 100% had average armyworm emergence rates of 12.5%, 47.5%, 42.5%, 47.5%, 77.5%, 45.0% and 7.5%, respectively in the first year (2016-2017) and similar results in the second year (2017-2018); 20.0%, 27.5%, 40.0%, 57.5%, 67.5%, 52.5% and 25.0%, respectively. The optimal soil water content for adult emergence was 0%, 60% and 100%. (3) Pupae were buried under the same soil moisture content treatment in outdoor fields in November 2016 and November 2017 failed to emerge. **[Conclusion]** The most suitable soil moisture content for the pupation of armyworms in the Dezhou city region of Shandong province is between 20%-40%, whereas the optimal soil moisture content of excavated soil is about 60%. Although the water content of soil in winter had little effect on pupae and adults, the temperature was too low for worms to overwinter. Soil moisture content can affect the emergence of pupae and adults, especially the emergence of pupae. Soil moisture content can be changed by artificial irrigation or drought to control the emergence of armyworms.

Key words armyworm; soil moisture content; temperature and humidity; pupation; feather

粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 是一种多食性害虫, 主要为害玉米、小麦、水稻和粟等禾谷类粮食作物, 以及多种蔬菜植物。粘虫具有群聚性、迁飞性和暴食性等生物学特征, 大发生时其幼虫可将作物叶片全部食光, 特别是作为一种远距离迁飞害虫, 能造成严重的破坏, 对我国粮食的安全生产构成了重大威胁 (李光博等, 1964)。粘虫无滞育性, 可进行多代繁殖; 其生活史包括卵、幼虫、蛹和成虫 4 个时期。粘虫发生范围广、世代多, 且危害的历史长 (李光博等, 1964; 李光博, 1993)。近年来, 粘虫又出现了全国范围内的大面积暴发, 严重威胁着我国粮食作物的生产安全 (Jiang *et al.*, 2011; 张云慧等, 2012; 曾娟等, 2013)。

粘虫控害方面, 传统的农药控害效果并不显著, 且农药对环境的污染日益凸显, 探寻出对粘虫新的防控措施越来越重要。根据害虫不同生长发育阶段的特征, 从环境条件对于害虫的影响出发, 进行害虫防控以达到绿色防控的目的。相关研究表明, 降水和干旱对于害虫种群发生动态有一定的影响, 且与害虫暴发的频次和强度有较强相关性 (于革和沈华东, 2010)。据此, 通过控制田间湿度可防控害虫的发生, 例如人工降雨或者灌溉等 (张孝羲等, 1980; Fitt, 1989; 张建军等, 2001; Yu *et al.*, 2008; 党志浩和陈法军, 2011)。与棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner 的生物学特征相似, 粘虫老熟幼虫往往会钻入土中完成化蛹并羽化。相关研究显示, 不同的土壤含水量对棉铃虫的羽化出土有显著影

响, 且土壤相对含水量低于 20% 有利于棉铃虫羽化出土, 当土壤相对含水量大于 40% 则显著降低棉铃虫的羽化出土率 (杨燕涛, 2000; 陈法军等, 2002, 2003)。此外, 土壤相对含水量还能够影响棉铃虫的生殖力, 棉铃虫入土前和入土后降雨都会降低其生殖力, 最多可使成虫生殖力下降 57.50% (苏战平等, 2000)。棉铃虫发生程度受降雨的影响较大, 调查显示每年 6 月、7 月和 8 月累积降水量在 500 mm 以上时发生较轻, 而降水量在 400 mm 以下时则发生较重, 且随着降雨量的增大, 显著降低蛹期棉铃虫的存活率 (李登友等, 1996)。环境湿度对于田间害虫的影响不只在于蛹期和成虫 2 个阶段, 对于卵的孵化率、幼虫的存活和雌雄性比等均有一定的影响。如稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee 在低湿环境下的怀卵量和卵孵化率显著降低; 而在低于 80% 的相对湿度下, 粘虫成虫的寿命、单雌产卵率和繁殖能力随着相对湿度的下降而降低; 环境湿度过低会影响粘虫成虫的交配 (金翠霞, 1979; 徐金汉等, 1999; 白先达等, 2010)。

在当前粘虫再次出现全国范围内大面积暴发的形势下, 如何更好地开展该虫的有效防控是目前玉米生产面临的重大问题之一。当前我国农业害虫管理中, 化学防治的效果不佳, 加之化学防治对于环境污染严重, 与农业可持续发展的宗旨相悖。为保障农业生产安全, 顺应国际趋势, 探索绿色防控措施迫在眉睫 (陆宴辉等, 2017)。本研究通过模拟不同的土壤湿度来研究粘虫入土化蛹及羽化出土情况, 以明确土壤湿度对粘虫

入土化蛹和羽化出土的影响,为通过调节大田内土壤相对含水量来干扰粘虫入土化蛹和羽化出土等生物学过程,达到有效防治粘虫的目的。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及饲养

供试粘虫由河北省农林科学院植物保护研究所提供,室内培养箱内饲养保种。饲养条件为温度(25 ± 1)、光周期为 L:D=14:10,相对湿度为 $60\%\pm 10\%$ (GXZ-380B,宁波江南仪器厂)。室内饲养为人工饲料,饲料配比为:麦麸 320 g,玉米粉 320 g,蔗糖 40 g,酵母 100 g,山梨酸 10 g,尼泊金甲酯 8 g,维生素 C15 g,维生素 B10 g,氨苄青霉素 8 粒,头孢少许。加水 1 400 mL 搅拌均匀并放于高压灭菌锅内灭菌,待温度 90℃ 时加入 50 g 琼脂并再加 2 600 mL 水溶解搅拌后倒入托盘,保存取用。

1.2 供试土壤

供试土壤采自山东省德州市宁津县柴胡店镇于斗村东侧大田内表层(10 cm),土质类型为潮砂土。用筛子筛除杂质并将土粉碎,烘箱(DHG-9146A,上海精宏实验设备有限公司)120℃ 烘干 48 h 备用。

试验用土饱和含水量的测定:取烘干土 500 g 置于底部开孔、并垫有纱布的一次性塑料水杯(容量 1 000 mL,高度 18 mm,底部直径 58 mm,带盖)中,土层深度达 7 cm 左右。将塑料杯放入水中让其自然吸水,待其充分吸水后所增加的重量为试验用土最大持水量,即为饱和含水量。

1.3 土壤相对含水量设置

将土壤含水量换算成占田间持水量或全蓄水量的百分数,以表示土壤水的相对含量。土壤相对含水量的定义为土壤水分含量占饱和含水量的百分比或占田间持水量的百分比。根据土壤相对含水量的计算公式:土壤相对含水量=土壤实际含水量/土壤最大持水量 $\times 100\%$ 。向装有土的一次性塑料杯中加入适当的水,分别配置成土

壤相对含水量为 0、10%、20%、40%、60%、80%和 100%共计 7 个梯度的土壤湿度处理。

1.4 粘虫入土化蛹和羽化出土试验设置

试验在德州宁津试验基地开展,分别于 2016 年和 2017 年的 9 月 25 日开始。试验开始前,在人工气候箱内用玉米叶片将粘虫饲养至老熟幼虫备用。试验设置 0、10%、20%、40%、60%、80%、100%土壤相对含水量共计 7 个梯度的土壤湿度处理,每个土壤湿度梯度各设置 4 个重复。把老熟幼虫放于准备好的 500 mL 塑料水杯(直径:高=5 cm:12 cm;杯中装 9 cm 深供试土壤)表层,1 头老熟幼虫/杯,每个土壤湿度处理下的每个重复各 10 头老熟幼虫(即 10 杯),观察其入土化蛹和羽化出土情况,入土化蛹率=(入土数/10 头) $\times 100\%$;羽化出土率=(羽化出土数/10 头) $\times 100\%$;土中历期=羽化出土日-入土化蛹日。同时,相同土壤相对含水量处理下,于 2016 年 11 月和 2017 年 11 月份在室外大田埋蛹,并在地上用沙网罩住,第二年春天观察记录成虫羽化出土情况。

1.5 统计分析

运用 Excel、SPSS20.0 软件进行数据分析,采用 LSD 检验($P<0.05$)不同土壤湿度处理间粘虫老熟幼虫入土化蛹率、羽化出土率和土中历期之间的差异显著性。统计分析前,将百分比数据进行反正弦平方根转换以复合正态分布假设。

2 结果与分析

2.1 不同土壤相对含水量对粘虫入土化蛹的影响

在粘虫入土化蛹之前对土壤相对含水量进行梯度处理,对试验结果的差异显著性进行 LSD 检验($P<0.05$),如表 1。2016-2017 年数据显示,土壤相对含水量为 0、10%、20%、40%、60%、80%和 100%的粘虫平均入土化蛹率分别为 75.0%、82.5%、92.5%、90.0%、77.5%、65.0%、60.0%;2017-2018 年数据为 70.0%、85.0%、90.0%、87.5%、77.5%、60.0%、57.5%(表 2)。其中,粘虫化蛹的最适土壤相对含水量在 20%-40%之间,平均入土化蛹率高达 91.25%

(2016-2017 年)和 88.75% (2017-2018 年) 高于 40%或低于 20%的土壤相对含水量的粘虫入土化蛹率均降低, 且 100%土壤相对含水量下粘虫入土化蛹率最低, 仅为 60.0% (2016-2017 年) 和 57.5% (2017-2018 年)。

表 1 不同土壤相对含水量处理对于粘虫入土化蛹率(%) 和羽化出土率(%) 影响的单因子方差分析 (*F/P* 值)
Table 1 One-way ANOVA (*F/P* values) for the effects of different soil relative water content treatments on pupation and emergence rate of armyworms

测定指标 Measured indexes	不同土壤相对含水量处理 The different soil relative water content treatments	
	入土化蛹率 Pupation rate (%)	羽化出土率 Emergence rate (%)
2016-2017	5.51/0.001**	40.94/<0.001***
2017-2018	7.94/<0.001***	7.32/<0.001***

*** : $P<0.001$; ** : $P=0.01$; * : $P=0.05$.

2.2 不同土壤相对含水量对粘虫羽化出土的影响

不同土壤相对含水量显著影响粘虫的羽化出土率($F=40.94$, $P<0.001$, 2016-2017 ; $F=7.32$, $P<0.001$, 2017-2018), 如表 1。2016-2017 年试验中, 土壤相对含水量为 60%的粘虫羽化出土率(77.5%) 显著高于土壤相对含水量 10% (47.5%) 、20% (42.5%) 、40% (47.5%) 和 80% (45.0%) 的, 而这 4 个土壤相对含水量的粘虫

羽化出土率显著高于土壤相对含水量为 0 (12.5%) 和 100% (7.5%) 的; 2017-2018 年, 土壤相对含水量为 60%的粘虫羽化出土率(67.5%) 显著高于土壤相对含水量为 20% (40.0%) 、40% (57.5%) 和 80% (52.5%) 的, 而这 3 个土壤相对含水量的粘虫羽化出土率显著高于土壤相对含水量为 0 (20.0%) 、10% (27.5%) 和 100% (25.0%) 的羽化出土率(表 2)。

2.3 不同土壤相对含水量对粘虫土中化蛹历期的影响

统计粘虫从入土化蛹到羽化出土所需时间发现, 不同土壤相对含水量对粘虫土中历期无显著影响($F=1.817$, $P=0.098>0.05$)。土壤相对含水量为 10%-40%和 100%的粘虫在土中历期最短, 土壤相对含水量为 80%的粘虫在土中历期最长(图 1)。

2.4 田间埋蛹结果及当地土壤地表温湿度分析

在不同土壤相对含水量处理下, 于 2016 年 11 月和 2017 年 11 月份在室外大田埋蛹, 并在地上用沙网罩住, 第 2 年春天观察记录成虫羽化出土情况。结果各土壤相对含水量处理下均未发现粘虫羽化出土, 结果见表 2。2016-2017 和 2017-2018 年间, 粘虫越冬时期的土壤表层土 0-10 cm 的温湿度见图 2。可见, 这两个时间段

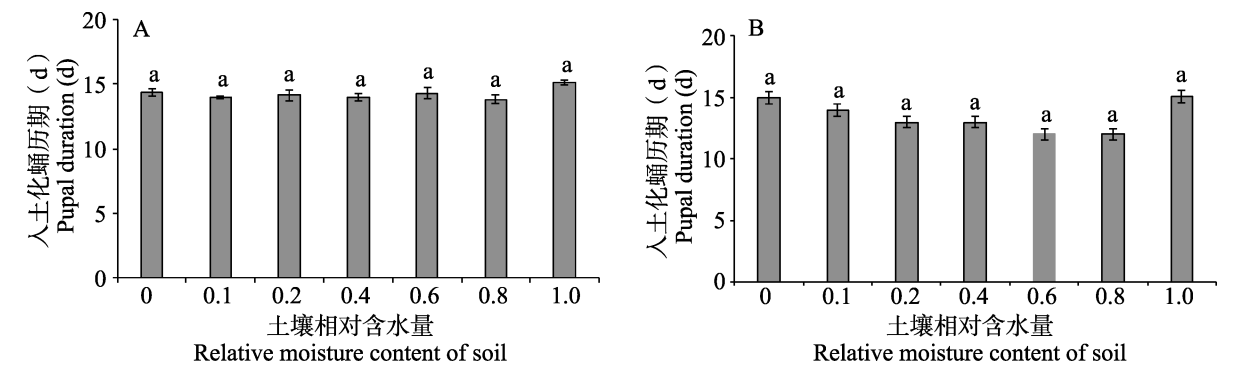


图 1 不同土壤相对含水量处理下粘虫入土化蛹和羽化出土期间的土中历期
Fig. 1 The duration in soil from the entering soil to the emergence out of soil for armyworm, *Mythimna separate* in different levels of soil relative moisture
A. 2016-2017 年数据; B. 2017-2018 年数据。柱上标有相同小写字母表示不同土壤相对含水量处理间经 LSD 检验差异不显著 ($P>0.05$)
A. 2016-2017 ; B. 2017-2018. Histograms with the same lowercase letters indicate no significant difference among different levels of soil relative moisture by LSD test at $P>0.05$.

表 2 不同土壤相对含水量处理下粘虫入土化蛹率(%)和羽化出土率(%)

Table 2 The effects of different soil relative water content treatments on pupation and emergence rate of armyworms

土壤相对湿度 Soil relative moisture	入土化蛹率 Pupation rate (%)		羽化出土率 Emergence rate (%)		野外田间羽化出土率 Emergence rate of wild field (%)	
	2016-2017	2017-2018	2016-2017	2017-2018	2016-2017	2017-2018
0	75.00±0.65ab	70.00±0.48ab	12.50±2.50c	20.00±7.07c	0.00	0.00
10%	82.50±0.25ab	75.00±0.29ab	47.50±2.50b	27.50±4.79c	0.00	0.00
20%	92.50±0.25a	90.00±0.41a	42.50±4.79b	40.00±8.16bc	0.00	0.00
40%	90.00±0.41a	87.50±0.25a	47.50±2.50b	57.50±4.79ab	0.00	0.00
60%	77.50±0.48ab	77.50±0.25ab	77.50±2.50a	67.50±7.50a	0.00	0.00
80%	65.00±0.87b	60.00±0.71b	45.00±6.45b	52.50±7.50ab	0.00	0.00
100%	60.00±0.41b	57.50±0.63b	7.50±2.50c	25.00±6.45c	0.00	0.00

数据后标有不同小写字母表示不同土壤相对含水量处理间经 LSD 检验差异显著 ($P<0.05$)。下表同。

Data with different lowercase letters indicate significant difference among different levels of soil relative moisture by the LSD test at $P<0.05$. The same below.

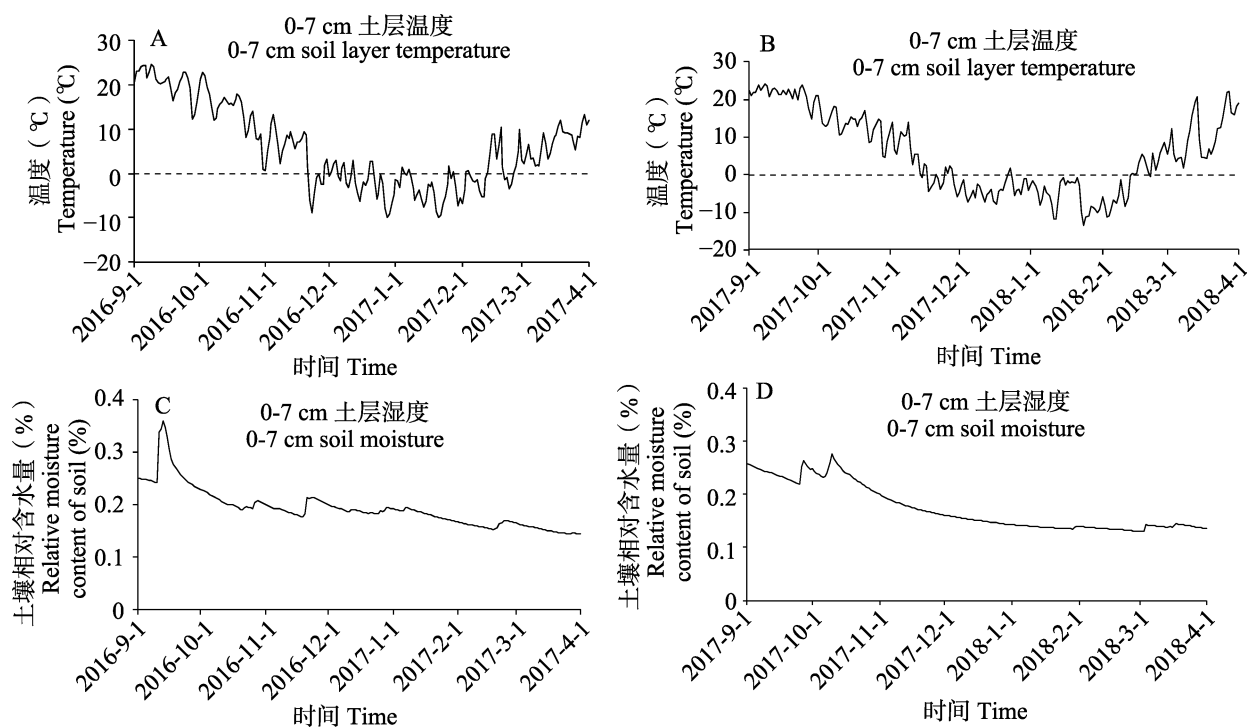


图 2 山东德州基地 0-7 cm 土层温度和土壤相对含水量

Fig. 2 Temperature and soil relative moisture in the surface layer (0-7 cm) of soil in the field station located at Dezhou of Shandong province

A. 2016-2017 年 9 月 1 日-4 月 1 日 0-7 cm 土层温度；B. 2017-2018 年 9 月 1 日-4 月 1 日 0-7 cm 土层温度；

C. 图 A 对应时间段内的土层湿度；D. 图 B 对应时间段内的土层湿度。

A. Soil layer temperature of 0-7 cm from September 1, 2016 to April 1, 2017; B. Soil layer temperature of 0-7 cm from September 1, 2017 to April 1, 2018; C. Soil moisture of 0-7 cm from September 1, 2016-April 1, 2017; D. Soil moisture of 0-7 cm from September 1, 2017 to April 1, 2018.

内的土壤表层相对含水量分别在 10%-40%和 10%-30%之间,均较适宜粘虫发育且含水量相对稳定;而在土壤表层温度方面,2016 年 9 月-2017

年 3 月土壤表层温度有 124 d 都在 7.8℃ 以下(其中,0℃ 以下 70 d),2017 年 9 月-2018 年 3 月土壤表层温度有 128 d 在 7.8℃ 以下(其中,0

以下 84 d)。而粘虫发育的起始温度为 7.8℃。可见, 2016 和 2017 年山东德州地区土壤表层温度不适宜粘虫越冬存活, 即便粘虫能入土化蛹, 而当年秋季羽化出土的种群由于冬春季的低温导致种群灭亡。由此可以得, 粘虫在山东德州宁津地区不能越冬存活。

3 结论与讨论

研究结果显示, 土壤相对含水量对于粘虫入土化蛹具有显著影响。粘虫入土前对土壤湿度进行梯度处理, 所有的处理中幼虫化蛹率存在差异。这与杨燕涛(2000)和陈法军等(2002)关于棉铃虫的相关研究结果相似, 土壤相对含水量在 20%-40%之间是粘虫入土化蛹最适湿度。在粘虫羽化出土时, 土壤相对含水量为 0 和 100%的粘虫羽化数量剧减明显低于其它处理的粘虫羽化出土率; 60%的土壤相对含水量较其他处理组粘虫的羽化量最高, 且差异性显著。60%的土壤相对含水量换算成试验所用土壤的含水量, 则是 16.1%土壤含水量, 这与金翠霞等(1965)关于粘虫入土化蛹研究的 15%结果相近。山东省德州宁津县(116.80°E, 37.64°N)位于北纬 37°, 而越冬北界可能北移到 34°N 左右。粘虫的入土化蛹首先是界定在一定的温度范围内进行的, 粘虫完成发育历期所需温度为 7.8℃, 因此, 在湿度条件适宜, 温度条件不满足的条件下, 粘虫无法正常进行生长发育与繁殖。而关于粘虫是否能在宁津本地越冬, 根据 2016 年和 2017 年冬季当地 0-10 cm 土壤温度、粘虫抗寒的能力、及粘虫大田笼罩越冬研究结果表明粘虫在德州当地不能越冬。这与安玉山等(1965)的研究证明粘虫不能在山东越冬结果相一致。不同的土壤相对含水量对粘虫蛹历期影响不显著, 蛹的历期平均在 13-15 d 之间, 略高于陈晓燕等(2017)研究结果, 但本研究结果表明土壤相对含水量过高或过低均延长粘虫蛹的历期。通过研究发现, 土壤相对含水量对于粘虫的入土化蛹和羽化出土均有一定的影响, 特别是对于粘虫的羽化出土影响更加显著。推测土壤含水量过高, 使得土壤内蛹大量死亡, 这一结论与前人对棉铃虫的研究结果一

致(张孝羲等, 1996; Yu *et al.*, 2008)。

综合以上所述, 粘虫属于迁飞性害虫, 每年都会迁飞至山东德州地区对玉米、水稻等粮食作物进行危害, 但是粘虫不能在山东地区越冬。土壤相对含水量能够影响粘虫的入土化蛹和羽化出土, 特别是对于粘虫羽化出土阶段, 土壤相对含水量过低或过高都会造成大量蛹死亡。因此, 在大田实际生产中, 可以在粘虫入土化蛹钻入地下的时期对大田进行灌溉, 提高土壤相对含水量, 致使土壤内大量粘虫蛹死亡, 从而达到防治粘虫危害的目的。

参考文献 (References)

- An YS, Zhang TW, Luo RW, 1965. Can adult armyworm overwinter in Shandong? *Plant Protection*, 3(2): 74-7. [安玉山, 张彤文, 罗瑞梧, 1965. 粘虫成虫能不能在山东越冬? 植物保护, 3(2): 74-77.]
- Bai XD, Huang CY, Tang GT, Li GG, Zou LX, Jia FZ, 2010. Analysis on meteorological conditions effecting on migration of the rice leaf roller. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(21): 262-267. [白先达, 黄超艳, 唐广田, 李国刚, 邹丽霞, 贾方墨, 2010. 气象条件对稻纵卷叶螟迁飞的影响分析. 中国农学通报, 26(21): 262-267.]
- Chen FJ, Zhai BP, Zhang XX, 2002. Biological habits of tunnelling and pupation of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Plant Protection*, 28(1): 18-20. [陈法军, 翟保平, 张孝羲, 2002. 棉铃虫入土化蛹的生物学习性. 植物保护, 28(1): 18-20.]
- Chen FJ, Zhai BP, Zhang XX, 2003. Effects of soil moisture during pupal stage on population development of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Ecologica Sinica*, 23(1): 112-121. [陈法军, 翟保平, 张孝羲, 2003. 棉铃虫蛹期土壤水分对其种群发生的影响. 生态学报, 23 (1): 112-121.]
- Chen XY, Liu JN, Hao RS, Li YH, Yang XC, Gui FR, 2017. Effects of the elevated atmospheric carbon dioxide levels on the growth, development and reproduction of *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 39(1): 144-151. [陈晓燕, 刘佳妮, 郝若诗, 李亚红, 杨学存, 桂富荣, 2017. 大气 CO₂ 浓度升高对粘虫生长发育和繁殖的影响. 环境昆虫学报, 39(1): 144-151.]
- Dang ZH, Chen FJ, 2011. Responses of insects to rainfall and drought. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1161-1169. [党志浩, 陈法军, 2011. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应. 应用昆虫学报, 48(5): 1161-1169.]

- Fitt, 1989. The ecology of *Heliothis* species in relation to agroecosystems. *Annual Review Entomology*, 34(1): 17–53.
- Jiang X, Luo L, Zhang L, Sappington TW, Hu Y, 2011. Regulation of migration in *Mythimna separata* in China: A review integrating environmental, physiological, hormonal, genetic, and molecular factors. *Environmental Entomology*, 40(3): 516–533.
- Jin CX, He Z, Ma SJ, 1965. Development and survival of armyworm *Leucania separata* Walker relationship with environmental humidity-II. *Acta Entomologica Sinica*, 14(3): 239–249. [金翠霞, 何忠, 马世骏. 粘虫 *Leucania separata* Walker 的发育和成活与环境湿度的关系——II. 前蛹和蛹. 昆虫学报, 14(3): 239–249.]
- Jin CX, 1979. The relationship between the number of armyworm and rainfall and relative humidity. *Acta Entomologica Sinica*, 22(4): 404–412. [金翠霞, 1979. 粘虫发生数量与降雨量及相对湿度的关系. 昆虫学报, 22(4): 404–412.]
- Li DY, Xu DW, Qian DJ, Cheng CL, 1996. A study on the relationship between occurrence of bollworm and rainfall in cotton fields in Fuyang area. *China Cotton*, 23(3): 17–18. [李登友, 许殿武, 钱德锦, 程存利, 1996. 阜阳地区棉田棉铃虫发生程度与降雨的关系研究. 中国棉花, 23(3): 17–18.]
- Li GB, 1993. Overview of the research and major advances of *Mythimna separate* (Walker) in China. *Plant Protection*, 19(4): 2–4. [李光博, 1993. 我国粘虫研究概况及主要进展. 植物保护, 19(4): 2–4.]
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. The hypothesis of seasonal migration of myxobacteria and the experiment of marking recovery. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–110. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. 植物保护学报, 3(2): 101–110.]
- Lu YH, Zhao ZH, Cai XM, Cui L, Zhang HN, Xiao HJ, Li ZY, Zhang LS, Zeng J, 2017. Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pests in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 349–363. [陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 崔丽, 张浩男, 肖海军, 李振宇, 张礼生, 曾娟, 2017. 我国农业害虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 54(3): 349–363.]
- Su ZP, Zhai BP, Zhang XX, 2000. Effect of soil moisture on pupal survival, emergence and fecundity of *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Scientia Agricultura Sinica*, 33(6): 104–106. [苏战平, 翟保平, 张孝羲, 2000. 土壤相对含水量对棉铃虫化蛹、羽化和生殖力的影响. 中国农业科学, 33(6): 104–106.]
- Xu JH, Guan X, Huang ZP, Yu CQ, 1999. Effect of different combinations of temperature and humidity on the development and fecundity of *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(3): 80–82. [徐金汉, 关雄, 黄志鹏, 余朝勤, 1999. 不同温湿度组合对甜菜夜蛾生长发育及繁殖力的影响. 应用生态学报, 10(3): 80–82.]
- Yang YT, 2000. Effects of raining on the pupation and emergence of cotton bollworm and its occurrence. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [杨燕涛, 2000. 降雨对棉铃虫化蛹和羽化的影响机制及对发生程度的抑制作用研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Yu FL, Wu G, Liu TJ, Zhai BP, Chen FJ, 2008. Effects of irrigation on the performance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) during different pupal stages. *International Journal of Pest Management*, 54(2): 137–142.
- Yu G, Shen HD, 2010. Impact of climate change on locust plagues in Chinese history. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 25(2): 207–210. [于革, 沈华东, 2010. 气候变化对中国历史上蝗灾爆发影响研究. 中国科学院院刊, 25(2): 207–210.]
- Zeng J, Jiang YY, Liu J, 2013. Analysis of the armyworm outbreak in 2012 and suggestions of monitoring and forecasting. *Plant Protection*, 39(2): 117–121. [曾娟, 姜玉英, 刘杰, 2013. 2012 年黏虫暴发特点分析与监测预警建议. 植物保护, 39(2): 117–121.]
- Zhang JJ, Yang YZ, Shao YD, Yu YS, Ren L, Qian K, 2001. Preliminary study about rain water and soil moisture on cotton bollworm. *Jiangsu Agricultural Research*, 4(4): 32–34. [张建军, 杨益众, 邵益栋, 余月书, 任璐, 钱坤, 2001. 雨水和土壤含水量对棉铃虫种群抑制作用初探. 江苏农业研究, 4(4): 32–34.]
- Zhang XX, 1996. Analysis of rampant population of cotton bollworm. *Chinese Bulletin of Entomology*, 33(2): 121–124. [张孝羲, 1996. 棉铃虫种群猖獗的剖析. 昆虫知识, 33(2): 121–124.]
- Zhang XX, Wang YC, Geng JG, Shen JL, 1980. Study on rampant factors of cotton bollworm-relationship between soil moisture content and pupation and feather formation. *Chinese Bulletin of Entomology*, 24(1): 9–13. [张孝羲, 王荫长, 耿济国, 沈晋良, 1980. 棉铃虫猖獗因子研究—土壤含水量与化蛹、羽化的关系. 昆虫知识, 24(1): 9–13.]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, 2012. Preliminary analysis of the third-generation armyworm *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 1–8. [张云慧, 张智, 姜玉英, 2012. 2012 年三代黏虫大发生原因初步分析. 植物保护, 38(5): 1–8.]