

土壤湿度和浸水对草地贪夜蛾羽化和繁殖的影响*

徐婷婷^{1**} 胡 飞¹ 胡本进¹ 毕思佳¹ 王振营^{2***} 徐丽娜^{1***}

(1. 安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所, 合肥 230031;

2. 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘 要 【目的】研究土壤不同含水量和浸水对草地贪夜蛾羽化和繁殖的影响, 为其发生趋势预测提供依据。【方法】室内分别设置土壤不同含水量和不同浸水时间处理, 研究不同环境条件下草地贪夜蛾羽化和繁殖的情况。【结果】土壤相对含水量为 30%和 40%时, 草地贪夜蛾的羽化率最高, 为 100.00%, 含水量为 50%-90%时, 羽化率均达到 93.33%, 显著高于 0、10%和 100%各处理的羽化率 26.67%-73.33% ($P<0.05$); 但不同土壤相对含水量对羽化的草地贪夜蛾成虫平均产卵量不具有显著影响 ($P>0.05$)。土壤浸水 1-4 d, 对入土前幼虫的羽化率无显著影响; 但土壤浸水对蛹的影响较大, 随着浸水时间的延长, 蛹的羽化率显著降低, 土壤浸水 4 d 后蛹不能羽化。直接淹水对老熟幼虫和蛹的羽化率均有一定影响, 随着淹水时间的延长, 羽化率均持续降低, 老熟幼虫淹水 10 h 后不能羽化; 蛹淹水 10 h 后羽化率与对照相比下降了 69.70%。【结论】田间积水对草地贪夜蛾的羽化具有显著影响, 因此可以结合天气降雨情况对草地贪夜蛾的发生动态和种群数量变化进行预测, 并据此调整土壤含水量以淹蛹灭虫。

关键词 草地贪夜蛾; 土壤含水量; 淹水; 羽化率

Effect of soil moisture and flooding on the emergence and reproduction of *Spodoptera frugiperda*

XU Ting-Ting^{1**} HU Fei¹ HU Ben-Jin¹ BI Si-Jia¹
WANG Zhen-Ying^{2***} XU Li-Na^{1***}

(1. Institute of Plant Protection and Agro-products Safety, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the effects of different soil moisture levels and duration of flooding on the emergence and reproduction of *Spodoptera frugiperda*, and thereby determine if these factors affect the occurrence of this pest.

【Methods】*S. frugiperda* were randomly assigned to different soil moisture and duration of flooding treatment groups in a laboratory. 【Results】The highest eclosion rate (100.00%) was recorded at relative soil moisture levels of 30% and 40%. The eclosion rate reached 93.33% at a relative soil moisture of 50%-90%, which was significantly higher than that at soil moisture levels of 0, 10% and 100% (26.67%-73.33%). However, relative soil moisture had no significant effect on the average number of eggs laid. There was no significant difference in the emergence rate when soil had been soaked for 1-4 days before larvae entered it. However, soil flooding significantly affected the emergence rate of pupae, which decreased significantly with the duration of flooding; no adults were observed after soil had been flooded for 4 days. Direct flooding affected the emergence rate of both mature larvae and pupae. The emergence rate of larvae continued to decrease with the duration of flooding, and mature larvae did not emerge after 10h of flooding. The emergence rate of pupae was 69.70% less than that of the control

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1400700); 安徽省自然科学基金 (2008085MC75)

**第一作者 First author, E-mail: xuttingah@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: caasxln@163.com; zywang@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2022-09-23; 接受日期 Accepted: 2023-03-21

group after 10h of flooding. **【Conclusion】** Excessive accumulated water significantly inhibits the emergence of *S. frugiperda*. This information can be combined with weather and rainfall data to predict the population dynamics of *S. frugiperda*, and used to adjust soil water levels to control adult emergence.

Key words *Spodoptera frugiperda*; soil moisture; flooding; emergence rate and reproduction

2019 年重大迁飞性害虫, 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) 入侵中国, 当年即迅速蔓延至全国 26 个省(自治区、直辖市), 发生范围横跨 25.83 个经度, 22.05 个纬度, 且发生为害具有明显的区域性, 西南、华南等周年繁殖区, 发生面积占比在 80% 以上, 长江中下游和江淮等迁飞过渡区, 发生面积占比为 10%-20%, 北方重点防范区发生面积占比不足 1% (姜玉英等, 2019)。气象条件是影响昆虫生长发育及分布范围的重要因素 (Broufas et al., 2009) 其中, 环境湿度和降雨对昆虫生长、发育、繁殖的影响日渐受到关注。

土壤湿度对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 的化蛹及羽化有一定影响, 土壤含水量在 90% 以下时棉铃虫化蛹率一般在 90% 以上, 羽化率在 80% 以上, 最适为 40% 左右 (杨燕涛等, 1998), 而土壤相对含水量低于 20% 有利于棉铃虫羽化出土, 当土壤相对湿度大于 40% 则显著降低棉铃虫羽化出土率 (陈法军等, 2003)。土壤相对含水量对粘虫 *Mythimna separate* (Walker) 入土化蛹、羽化出土及土中历期亦有显著影响, 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 (李立坤等, 2019)。土壤含水量显著影响桃蛀果蛾 *Carposina sasakii* Walsingham 蛹羽化为成虫, 土壤太干或太湿均不利于成虫羽化, 适宜成虫羽化的土壤含水量为 11% 左右 (孙瑞红等, 2013)。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)。

除了土壤相对含水量, 淹水对昆虫发生亦有一定影响。随着水淹时间延长, 二点委夜蛾 *Athetis le pigone* (Möschler) 各龄期幼虫存活率均随之下降 (马继芳等, 2014)。浸水可以使橘

小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel 的蛹期延长, 每浸水 1 d, 蛹期延长 1 d, 蛹浸在水中 72 h 造成死亡率增加。浸水时间长短影响桃蛀果蛾蛹羽化, 短期浸水有利于蛹羽化为成虫, 以浸泡 20 min 处理的羽化率最高, 随着浸泡时间延长, 羽化率逐渐降低, 浸水 48 h 的蛹不能羽化 (孙瑞红等, 2013)。棉铃虫化蛹后浸水, 蛹的死亡率主要取决于浸水时间的长短, 浸水 1-2 d, 对蛹的影响较小, 羽化率一般在 50% 以上, 浸水 3-4 d, 羽化率则一般低于 20% (杨燕涛等, 1998)。

与棉铃虫、粘虫的生物学特征相似, 草地贪夜蛾老熟幼虫亦具有入土化蛹和羽化的生物学过程, 明确土壤湿度和积水对其羽化和繁殖力的影响, 对准确掌握其发生动态、种群数量和消长规律具有重要意义。现有研究发现, 土壤相对含水量过低或过高均不利于草地贪夜蛾羽化出土, 然而关于土壤相对湿度对草地贪夜蛾繁殖能力的影响及淹水对草地贪夜蛾羽化、繁殖影响的研究相对较少 (He et al., 2021; 闫三强等, 2022)。本研究从土壤相对含水量和淹水处理入手, 模拟田间不同湿度条件下草地贪夜蛾羽化和繁殖情况, 以探索降雨对草地贪夜蛾发生的影响, 为进一步明确其发生及消长规律, 进行准确测报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及土壤

供试草地贪夜蛾系 2020 年 9 月采自安徽省阜阳市太和县秋玉米田, 在室内用人工饲料饲养数代的实验室种群。饲养环境条件为温度 (27 ± 1) °C, 光周期 L:D=14:10, 相对湿度 60%±10%。

供试土壤采自安徽省农业科学院试验田, 取田块中间位置, 深度 10 cm 左右土壤, 土壤类型为砂壤土, 在室外晾干并粉碎, 用筛子筛除杂质

后, 120 °C 烘烤 48 h 备用。

1.2 土壤相对含水量设置

参照羌烨等(2014)、李立坤等(2019)的方法, 测定土壤最大持水量, 并以此计算土壤饱和含水量。根据土壤相对含水量计算公式: 土壤相对含水量 = (土壤实际含水量/土壤最大持水量) × 100%, 向装有深 10 cm 烘干后土壤的塑料杯中(高度 15 cm, 底部直径 9 cm)加入适当灭菌水, 分别配制成土壤相对含水量为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 和 100% 共计 11 个土壤湿度处理。

1.3 土壤不同湿度对草地贪夜蛾羽化和繁殖的影响

取人工饲养的草地贪夜蛾 6 龄幼虫备用, 试验设置 0-100% 土壤相对含水量共 11 个处理, 每处理 5 个塑料杯, 重复 3 次。将试虫以 5 头/杯的密度放置于各处理土壤表面, 并提供少量人工饲料补充营养, 以纱网(40 目)覆盖防止逃逸。幼虫发育成熟后, 自行入土, 每天观察试虫羽化情况, 见到第 1 头成虫记为第 1 天, 此后逐日记录各处理羽化蛾量, 并将当天羽化成虫移出塑料杯, 连续 3 日未查见成虫, 即将试虫挖出确认存活状态, 同时调查蛹室所处土壤深度, 至所有试虫羽化或死亡, 调查结束, 计算羽化率。试验环境条件同 1.1。

分别从同一处理中随机选取一定数量同天羽化的雌、雄成虫放于塑料杯(高度 15 cm, 底部直径 9 cm)中进行产卵能力试验。每杯放入一对成虫, 杯口用纱布覆盖, 并悬挂浸有 5% 蜂蜜水的脱脂棉球补充营养。每天调查记录塑料杯内所有介质上的产卵量和成虫死亡情况, 至雌成虫死亡。每处理若可配对成虫对数多于 5 对即选 5 对进行产卵试验, 若不足 5 对即全部进行产卵试验。随后, 收集各处理同一天草地贪夜蛾新鲜卵粒 100 粒, 放置于垫有湿滤纸的培养皿(直径 6 cm)中进行孵化率试验。每天调查卵粒孵化情况, 计算孵化率, 每处理重复 3 次。试验环境条件同 1.1。

1.4 土壤浸水对草地贪夜蛾羽化的影响

参照杨燕涛等(1998)的方法进行不同浸水时间对草地贪夜蛾羽化影响的试验。向装有深 10 cm 烘干后土壤的塑料杯中(高度 15 cm, 底部直径 9 cm)加入适当灭菌水配制成相对含水量为 40% 的土壤备用, 分别使用 6 龄幼虫和蛹(化蛹后 24 h)进行土壤浸水试验。幼虫处理即将 6 龄幼虫放置在土壤表面, 同时在土表撒施少量人工饲料补充营养; 蛹处理即将蛹埋入土层下 1 cm 处。每杯放入 5 头试虫后进行浸水处理。根据 1.2 土壤饱和含水量, 补水至杯中土壤湿度稍超过饱和含水量, 分别保持 1、2、3 和 4 d 后, 将杯子置于自然光下晒至土壤含水量为 40%(使用称重法进行判断), 移至 1.1 环境条件下饲养, 并每日定时观察记录羽化情况, 标准同 1.3。每处理 5 个塑料杯, 重复 3 次。

1.5 水淹对草地贪夜蛾羽化和产卵的影响

参照马继芳等(2014)的方法进行水淹试验。使用纱布分别包裹不少于 120 头的草地贪夜蛾 6 龄幼虫或蛹(化蛹后 24 h), 并将其浸入水中, 分别淹水 0.5、1、2、4、6、8 和 10 h, 将淹水后的幼虫或蛹接入养虫盒, 放入人工饲料单头饲养, 观察其羽化情况, 以不淹水处理作为对照, 每处理重复 3 次。分别从同一处理中随机抽取一定数量同天羽化的雌、雄成虫配对放于透明塑料杯, 每杯一对, 进行产卵能力比较试验, 计算产卵数, 具体操作和记录方法同 1.3。

1.6 统计方法

使用 Excel 和 SAS8.0 软件进行数据分析, 采用 Turkey HSD 检验 ($P < 0.05$) 不同土壤湿度处理间和不同浸水处理间草地贪夜蛾羽化率、产卵量或卵孵化率之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同土壤湿度下草地贪夜蛾羽化率

调查发现, 试验开始后第 7 天, 土壤相对含水量为 30%-100% 的 8 个处理试虫开始羽化, 相

对含水量为 100%处理的羽化率为 6.67%,其余 7 个处理的羽化率均为 13.33%,各处理间无显著差异 ($P>0.05$)。开始羽化后的第 2 天,除相对含水量为 0 处理外,其它各处理均有成虫继续羽化,其中相对含水量为 30%-60%处理,累积羽化率显著高于其它各处理 ($P<0.05$),而相对含水量为 100%的羽化率最低。开始羽化后的第 3 天,相对含水量为 0 处理试虫仍未羽化,其它各处理均有新羽化成虫,其中 40%和 50%两处理的累积羽化率最高,均达到 93.33%。开始羽化后第 4 天,相对含水量为 0 处理组开始羽化,除相对含水量为 40%和 100%处理无羽化外,其它各处理也均有新的羽化成虫;到羽化后第 5 天,相对含水量 30%和 40%处理,成虫羽化率达到 100%,50%-90%各处理,羽化率均达到 93.33%,

100%处理未见新羽化成虫;直至羽化后第 6 天,只有 0 处理有新增羽化成虫,其它各处理,羽化数均未改变。此后,连续调查 3 d,各处理均未见新羽化成虫(表 1)。

2.2 不同土壤湿度下草地贪夜蛾化蛹深度

调查发现当土壤相对含水量较低或较高时,草地贪夜蛾都会选择在土壤表层构筑蛹室并化蛹,土壤相对湿度为 0 和 70%以上时,蛹室均在土壤表层,化蛹深度 0 cm;相对而言,土壤含水量适中时,草地贪夜蛾化蛹的位置比较深,土壤含水量从 10%-50%,化蛹深度依次为 0.13、1.16、1.36、1.76 和 1.47 cm(图 1),推测当土壤相对含水量较高时,草地贪夜蛾会选择土壤表层化蛹,以减少羽化过程中土壤板结覆盖的阻力。

表 1 不同土壤相对含水量下草地贪夜蛾的逐日羽化率
Table 1 Daily emergence rate of *Spodoptera frugiperda* at different relative soil moisture content

相对湿度 (%) Relative soil moisture content (%)	逐日累计羽化率 (%) Daily emergence rate (%)					
	第 1 天 1st day	第 2 天 2nd day	第 3 天 3rd day	第 4 天 4th day	第 5 天 5th day	第 6 天 6th day
0	0.00±0.00 a	0.00±0.00 b	0.00±0.00 d	6.67±6.67 d	20.00±11.55 d	26.67±6.67 d
10	0.00±0.00 a	26.67±6.67 ab	53.33±6.67 c	73.33±6.67 bc	73.33±6.67 bc	73.33±6.67 bc
20	0.00±0.00 a	26.67±6.67 ab	60.00±20.00 bc	80.00±20.00 ab	86.67±13.33 ab	86.67±13.33 ab
30	13.33±6.67 a	60.00±20.00 a	86.67±6.67 ab	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
40	13.33±6.67 a	53.33±29.06 a	93.33±6.67 a	93.33±6.67 ab	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
50	13.33±6.67 a	46.67±6.67 a	93.33±6.67 a	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab
60	13.33±6.67 a	46.67±17.64 a	80.00±11.55 abc	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab
70	13.33±6.67 a	33.33±17.64 ab	66.67±17.64 abc	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab
80	13.33±6.67 a	26.67±6.67 ab	60.00±0.00 bc	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab
90	13.33±6.67 a	26.67±6.67 ab	53.33±6.67 c	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab	93.33±6.67 ab
100	6.67±6.67 a	20.00±11.55 ab	53.33±6.67 c	53.33±6.67 c	53.33±6.67 c	53.33±6.67 c

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Turkey HSD 检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。下表同。
Data in the table are mean±SE, and followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level by Turkey HSD test. The same below.

2.3 不同土壤湿度下羽化后成虫的繁殖能力

不同处理的草地贪夜蛾成虫配对后进行产卵试验(图 2)。结果表明,土壤相对含水量为 0 时,羽化的草地贪夜蛾单雌产卵数为 0,显著低于其它各处理($P<0.01$)。土壤相对含水量为 30%

时,羽化的草地贪夜蛾单雌平均产卵量最高,达到 1 021.67 粒;相对含水量为 100%时,羽化的草地贪夜蛾单雌平均产卵量最低,为 651.67 粒,但相对含水量 10%-100%各处理间羽化的草地贪夜蛾单雌平均产卵量差异不显著 ($P>0.05$)。

不同土壤相对含水量羽化成虫产卵孵化率

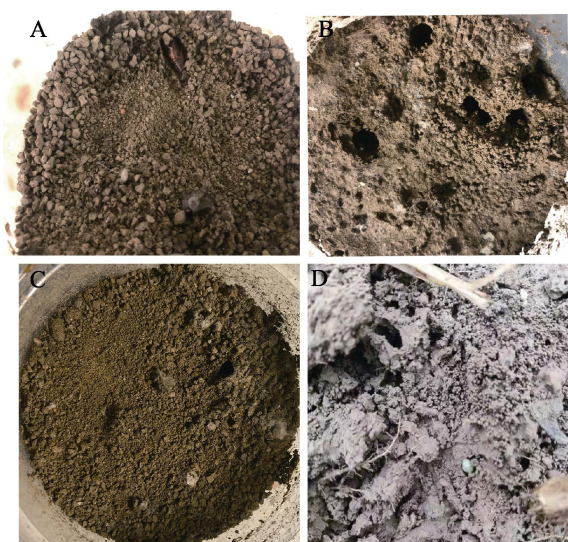


图 1 不同土壤相对含水量草地贪夜蛾化蛹深度

Fig. 1 Pupal depth of *Spodoptera frugiperda* at different relative soil moisture

A. 10%土壤相对含水量, 土表化蛹; B. 80%土壤相对含水量, 土表化蛹; C. 40%土壤相对含水量, 土层下 1-2 cm 处化蛹; D. 田间在土壤表层化蛹。

A. Pupation on the soil surface at 10% relative moisture;
B. Pupation on the soil surface at 80% relative moisture;
C. Pupation at 1-2 cm below the soil at 40% relative moisture;
D. Pupation on the soil surface in the field.

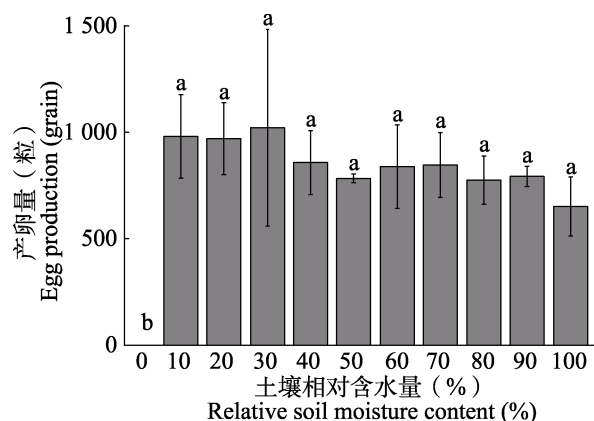


图 2 不同土壤相对含水量羽化的草地贪夜蛾单雌产卵量

Fig. 2 Average eggs laid per female *Spodoptera frugiperda* at different relative soil moisture content

柱上不同小写字母表示不同处理之间经 Turkey HSD 检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。下图同。

Different small letters above the bars mean significant differences among treatments ($P<0.05$, Tukey HSD test). The same below.

见图 3, 土壤相对含水量为 10% 时, 卵孵化率最低, 为 84.67%; 相对含水量为 20% 和 30% 处理

的卵孵化率分别为 90.33% 和 92.67%, 均显著低于 40%-100% 处理组 ($P<0.05$), 卵孵化率 100% (图 3)。

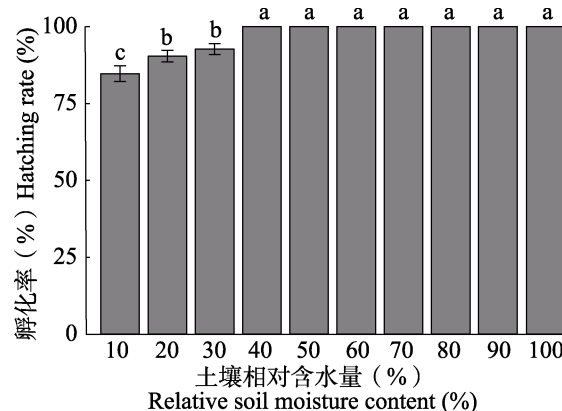


图 3 不同土壤相对含水量羽化后成虫产卵孵化率

Fig. 3 Hatching rates of eggs after emergence at different relative soil moisture content

2.4 土壤不同浸水时间对草地贪夜蛾羽化的影响

老熟幼虫入土前不同的浸水天数对草地贪夜蛾的羽化率无显著影响 (图 4: A), 除浸水 4 d 处理, 在第 1 天未见成虫羽化, 其他 3 个处理, 均有羽化成虫; 自第 2 天, 各处理即均有羽化成虫, 直至第 6 天, 各处理的累积羽化率均达到最高, 其中浸水 1 d 和 3 d 的成虫羽化率均达到 93.33%, 且各处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

与幼虫入土前浸水相比, 化蛹后浸水对草地贪夜蛾羽化影响较大 (图 4: B)。见成虫的前 3 d, 仅浸水 1 d 的处理有羽化成虫; 见虫第 4 天, 浸水 2 d 和 3 d 的处理陆续见羽化成虫, 而浸水 4 d 处理, 一直没有羽化成虫; 见虫后第 6 天, 浸水 1、2 和 3 d 各处理成虫羽化率均达到最高, 且 3 个处理间差异显著 ($P<0.05$), 连续 3 d 未见成虫后调查确证其余试虫死亡。

2.5 水淹对老熟幼虫和蛹羽化和产卵的影响

水淹对草地贪夜蛾老熟幼虫 (图 5: A) 和蛹 (图 5: B) 的羽化均有一定影响。水淹 6 h 后, 草地贪夜蛾老熟幼虫的羽化率显著下降 ($P<0.01$), 与对照相比下降 69.96%, 水淹 8 h 后, 羽化率下降 95.22%; 淹水 10 h 后, 幼虫均

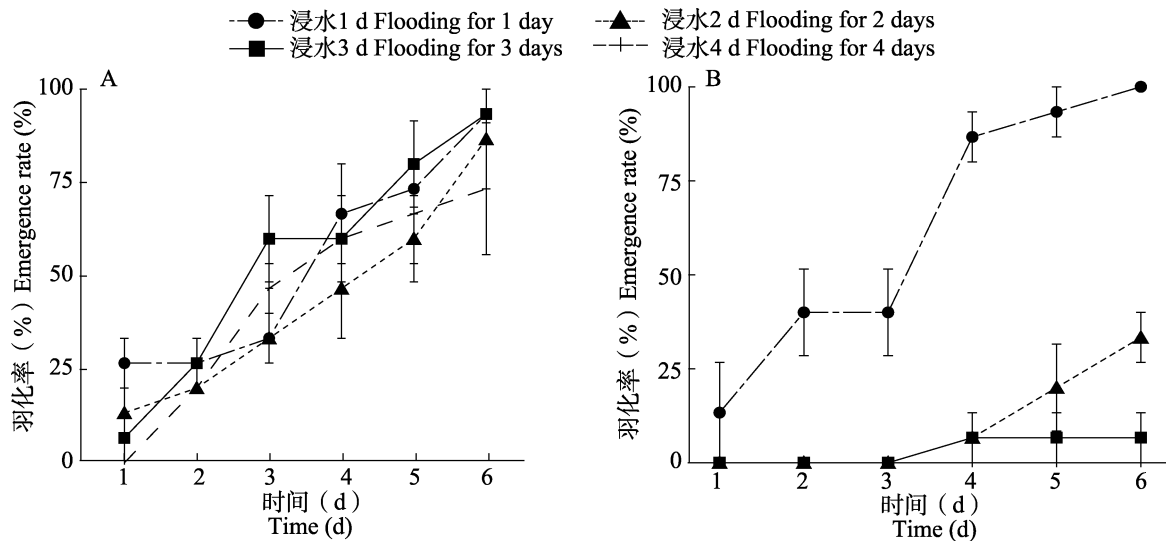


图4 不同浸水天数对羽化的影响

Fig. 4 The emergence rate of *Spodoptera frugiperda* when the soil flooded for 1-4 days

A. 幼虫入土前土壤浸水; B. 蛹期土壤浸水。

A. The soil flooded before the larvae enters the soil; B. The soil flooded after pupation.

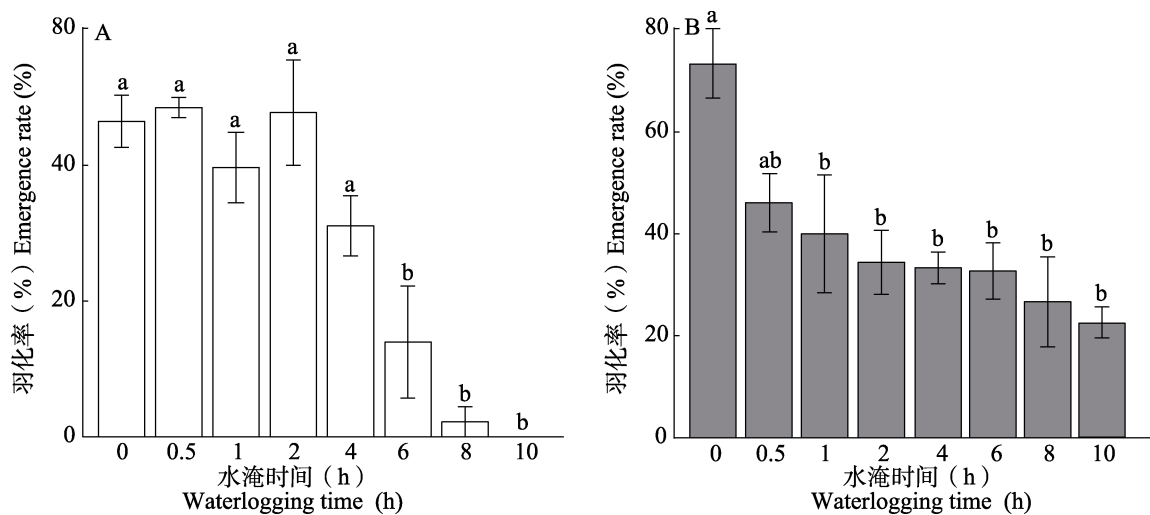


图5 水淹对草地贪夜蛾老熟幼虫 (A) 和蛹 (B) 羽化的影响

Fig. 5 Effects of water logging on emergence rate of mature larvae (A) and pupae (B) of *Spodoptera frugiperda*

不能羽化; 但水淹时间小于 4 h 对幼虫羽化的影响不显著 ($P>0.05$)。水淹 0.5 h 蛹的羽化率与对照相比差异不显著, 水淹 0.5-8 h 后, 蛹的羽化率逐渐下降。水淹 1 h 后, 蛹羽化率显著低于对照 ($P<0.05$); 蛹水淹 10 h 后仍能羽化, 但羽化率只有对照的 30.30%, 下降了 69.70%。

直接水淹后的草地贪夜蛾老熟幼虫 (图 6: A) 和蛹 (图 6: B) 羽化后的产卵试验结果显示, 水淹不同时间后, 老熟幼虫中能正常羽化的成虫产卵量与未水淹的成虫产卵量没有明显的下降

趋势; 蛹水淹不同时间羽化后产卵量均低于对照, 水淹 8 h 后的产卵量与对照相比下降了 61.29%, 但各处理与对照间产卵量无显著性差异 ($P>0.05$)。

3 讨论

气候条件是影响昆虫生长、发育和繁殖的重要因素, 也造成害虫发生期、发生量和发生程度的不同, 研究气候因素与昆虫发生之间的关系, 对于害虫的预测预报和综合治理具有重要意义

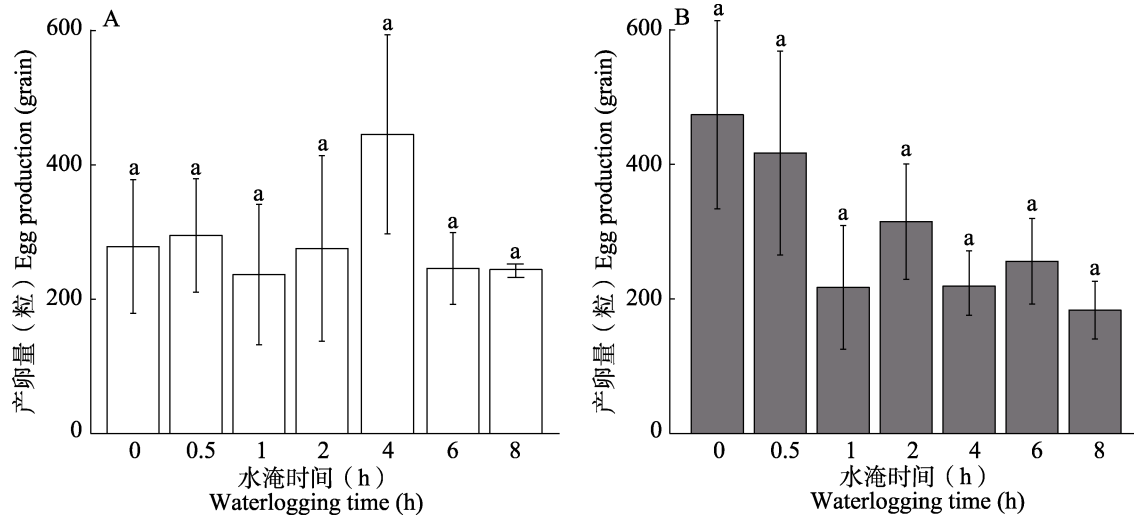


图 6 水淹草地贪夜蛾老熟幼虫 (A) 和蛹 (B) 对其成虫产卵的影响

Fig. 6 Effects of waterlogging on egg production of mature larvae (A) and pupae (B) of *Spodoptera frugiperda*

(常晓娜等, 2008)。以往的研究往往更关注温度和光照对昆虫发生的影响, 对降雨及环境湿度与昆虫之间关系的研究相对较少。降雨除了造成对昆虫的机械冲刷外, 还通过影响空气湿度和土壤含水量作用于昆虫的生长、发育、存活和生殖等(陈法军等, 2003)。万鹏等(2023)研究发现降雨, 特别是暴雨和大暴雨, 对草地贪夜蛾的卵和幼虫存活和发育均有不利影响。而蛹期模拟降雨处理对草地贪夜蛾蛹羽化率的影响显著, 蛹期土壤相对含水量维持在 40%-60% 有利于草地贪夜蛾羽化出土, 土壤相对含水量过低 (<20%) 和过高 (>80%) 均极不利于草地贪夜蛾羽化出土(闫三强等, 2022)。He 等(2021)研究发现, 随着空气相对湿度的增加, 草地贪夜蛾成活率和蛹量显著增加, 其中 80% 空气湿度最适合草地贪夜蛾繁殖。

He 等(2021)研究发现 6.8%-47.59% 的土壤湿度最适宜草地贪夜蛾的化蛹和羽化, 在 88.39% 和 95.19% 土壤湿度下, 草地贪夜蛾无法正常化蛹。本次试验发现土壤相对含水量为 30% 和 40% 时, 草地贪夜蛾入土化蛹羽化率最高, 为 100.00%; 50%-90% 各处理羽化率均达到 93.33%, 显著高于 100% 条件下的羽化率 53.33%。调查发现当土壤湿度较高时, 草地贪夜蛾会选择在土壤表层构筑蛹室并化蛹, 相对而言, 土壤含水量适中时, 其化蛹的位置较深, 推测当土壤相

对含水量较高时, 草地贪夜蛾会选择土壤表层化蛹, 以减少羽化过程中土壤板结覆盖的阻力。与高含水量相比, 土壤含水量过低对草地贪夜蛾入土化蛹羽化的影响更大, 本次试验发现土壤含水量为 0 时草地贪夜蛾的入土化蛹羽化率仅为 26.6%, 且羽化的草地贪夜蛾单雌产卵数为 0, 显著低于其它各处理。

降雨除了影响土壤相对湿度, 还可能造成田间积水, 对于地下害虫或草地贪夜蛾这些具有土中生活阶段的昆虫, 存在生存环境, 如蛹室被冲垮、虫体受淹而呼吸代谢受阻, 导致窒息死亡或羽化出土通道堵塞而不能正常羽化的风险。马继芳等(2014)发现随着水淹时间延长, 二点委夜蛾各龄期幼虫存活率均随之下降。浸水使橘小实蝇的蛹期延长, 每浸水 1 d, 蛹期延长 1 d, 蛹浸在水中 72 h 造成死亡率增加。本次试验发现, 与土壤含水量的影响相比较, 浸水对草地贪夜蛾的羽化影响更大, 尤其是化蛹后浸水会显著降低草地贪夜蛾的羽化率, 化蛹后浸水 2 和 3 d 后, 草地贪夜蛾羽化率显著低于浸水 1 d, 化蛹后浸水 4 d, 草地贪夜蛾未见羽化; 与化蛹后浸水相比, 幼虫入土前浸水对其羽化影响较小, 推测是在幼虫入土前浸水时, 幼虫可借助塑料杯壁短期躲避水淹处理, 或者钻入水下土壤中, 待杯中土壤湿度下降后, 仍可成功羽化, 从而减少浸水的影响。直接对草地贪夜蛾幼虫虫体进行水淹试

验,水淹 6 h 后,草地贪夜蛾的羽化率显著降低,水淹 10 h 后,草地贪夜蛾均不能羽化;而蛹水淹 1 h,其羽化率便显著下降。

综上所述,本次研究发现与高湿度相比,土壤含水量过低对草地贪夜蛾羽化和繁殖的不利影响更大,田间浸水可以显著降低草地贪夜蛾的羽化率,建议进行草地贪夜蛾虫情测报时要充分考虑降雨的影响,在其化蛹期间也可通过调整土壤含水量以淹蛹灭虫。

参考文献 (References)

- Broufas GD, Pappas ML, Koveos DS, 2009. Effect of relative humidity on longevity, ovarian maturation, and egg production in the olive fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 102(1): 70–75.
- Chang XN, Gao HJ, Chen FJ, Zhai BP, 2008. Effects of environmental moisture and precipitation on insects: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 27(4): 619–625. [常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 翟保平, 2008. 环境湿度和降雨对昆虫的影响. 生态学杂志, 27(4): 619–625.]
- 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.]
- He LM, Zhao SY, Ali A, Ge SS, Wu KM, 2021. Ambient humidity affects development, survival, and reproduction of the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in China. *Journal of Economic Entomology*, 114(3): 1145–1158.
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Li LK, Wang XH, Liu JW, Wang YH, Chen FJ, 2019. Effect of soil moisture on the pupation and emergence of the armyworm, *Mythimna separata*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1324–1330. [李立坤, 王晓辉, 刘佳文, 王艳辉, 陈法军, 2019. 土壤湿度对粘虫入土化蛹和羽化出土的影响. 应用昆虫学报, 56(6): 1324–1330.]
- Ma JF, Li LT, Gang YJ, Dong L, Dong ZP, 2014. Effect of moisture on development and reproduction of *Athetis le pigone*. *China Plant Protection*, 34(7): 46–50. [马继芳, 李立涛, 甘耀进, 董立, 董志平, 2014. 湿度对二点委夜蛾生长发育及繁殖的影响. 中国植保导刊, 34(7): 46–50.]
- Qiang Y, Zhang JM, Wang DH, Qian J, Chen FY, 2014. Influence of water immersion and the soil humidity on the survival of eggs and young larvae of *Holotrichia diomphalia* of North China. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2014(4): 149–150. [羌烨, 张建明, 王东华, 钱建, 程枫叶, 2014. 浸水和土壤湿度对华北大黑金龟子卵及低龄幼虫成活的影响初探. 农业科技通讯, 2014(4): 149–150.]
- Sun RH, Wu HB, Zhang KP, Li AH, Zhang XP, 2013. Influence of the humidity and water immersion on egg hatch and adult emergence of *Carposina sasakii*. *Journal of Fruit Science*, 30(3): 449–451. [孙瑞红, 武海斌, 张坤鹏, 李爱华, 张学萍, 2013. 相对湿度和浸水对桃蛀果蛾卵孵化和成虫羽化的影响. 果树学报, 30(3): 449–451.]
- 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.]
- Wan P, Yuan WF, Lv BQ, Lu H, Tang JH, Yan SQ, Liu YL, 2023. Effect of simulated rainfall on *Spodoptera frugiperda* eggs and larvae. *Journal of Environmental Entomology*, 45(4): 935–941. [万鹏, 袁伟方, 吕宝乾, 卢辉, 唐继洪, 闫三强, 刘彦龙, 2023. 模拟降雨对草地贪夜蛾卵和幼虫的影响. 环境昆虫学报, 45(4): 935–941.]
- Yan SQ, Lv BQ, Tang JH, Lu H, Tang X, Su H, Xiang KP, 2022. Influence of simulated rainfall on the emergence of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Environmental Entomology*, 44 (1): 18–26. [闫三强, 吕宝乾, 唐继洪, 卢辉, 唐雪, 苏豪, 向凯萍, 2022. 模拟降雨对草地贪夜蛾羽化出土的影响. 环境昆虫学报, 44 (1): 18–26.]
- Yang YT, Wang DH, Zhu MH, Yi HJ, 1998. Studies on the relationship between soil moisture and the occurrence of cotton bollworm. *Acta Gossypii Sinica*, 10(4): 43–48. [杨燕涛, 王东华, 朱明华, 易红娟, 1998. 土壤水分与棉铃虫化蛹的关系及对下代发生的影响研究. 棉花学报, 10(4): 43–48.]