环境昆虫学报 2022，44（1）：18－26
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2022. 01. 3

闫三强，吕宝乾，唐继洪，卢辉，唐雪，苏豪，向凯萍. 模拟降雨对草地贪夜蛾羽化出土的影响[J]. 环境昆虫学报，2022，44（1）：18－26.

模拟降雨对草地贪夜蛾羽化出土的影响

闫三强[1,2]，吕宝乾[2*]，唐继洪[2]，卢 辉[2]，唐 雪[2]，苏 豪[3]，向凯萍[3]
（1. 海南大学林学院，海口 570228；2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所/农业农村部热带作物有害生物综合治理重点实验室/海南省热带农业有害生物监测与控制重点实验室，海口 571101；3. 海南大学植物保护学院，海口 570228）

摘要： 为了探究降雨对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 羽化出土的影响，本试验在室内条件下模拟不同级别降雨，研究不同质地土壤在不同模拟降雨量下的水分状况对草地贪夜蛾土中蛹历期和羽化率的影响。结果表明：不同土壤相对含水量对于草地贪夜蛾土中蛹历期无显著性影响；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% 有利于草地贪夜蛾的羽化出土，土壤相对含水量过低（＜20%）和过高（＞80%）均极不利于草地贪夜蛾的羽化出土；砂壤土比砂土更适合草地贪夜蛾蛹羽化出土。此外，研究结果还表明，草地贪夜蛾在相对干旱的大田环境下暴发为害的可能性更大；适时进行大田漫灌，营造高湿土壤环境可有效降低草地贪夜蛾蛹的羽化率。本研究结果可为草地贪夜蛾灾变规律、预测预报和绿色防控研究提供理论依据。

关键词： 草地贪夜蛾；模拟降雨；羽化出土；预测与防控
中图分类号： Q965；S433　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1674－0858（2022）01－0018－09

Influence of simulated rainfall on the emergence of *Spodoptera frugiperda*

YAN San-Qiang[1,2]，LV Bao-Qian[2*]，TANG Ji-Hong[2]，LU Hui[2]，TANG Xue[2]，SU Hao[3]，XIANG Kai-Ping[3]（1. College of Forestry，Hainan University，Haikou 570228，China；2. Institute of Environment and Plant Protection，Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Grops，Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Hainan Key Laboratory for Monitoring and Control of Tropical Agricultural Pests，Haikou 571101，China；3. College of Plant Protection，Hainan University，Haikou 570228，China）

Abstract: In order to explore the influence of rainfall on the eclosion of *Spodoptera frugiperda*，this experiment simulated different levels of rainfall under indoor conditions，and studied the effects of soil moisture conditions of different texture soils under different simulated rainfall on the pupal duration and emergence rate of *S. frugiperda*. The results showed that：Different relative water content of soil had no significant effect on the pupal duration of *S. frugiperda*；Simulated rainfall treatment had a significant impact on the emergence rate of *S. frugiperda*，and the relative soil moisture content maintained at 40% ～60% was conducive to the emergence of *S. frugiperda* in pupal stage，low relative water content of soil（＜20%）and high relative water content of soil（＞80%）were extremely unfavorable to the emergence of *S. frugiperda*；Sandy loam was more suitable for emergence of *S. frugiperda* than sandy soil. The results showed that the outbreak of *S. frugiperda* was more likely to break out in the relatively dry field environment，and timely flooding irrigation in the field and creating a high wet soil environment can

基金项目： 国家重点研发计划（2019YFD03001）；国家重点研发计划（2021YFD1400702）；农业农村部财政项目（1630042020020）
作者简介： 闫三强，男，硕士研究生，研究方向为森林保护，E－mail：940590095@qq. com
* **通讯作者** Author for correspondence：吕宝乾，男，博士，研究员，研究方向为害虫入侵与生物防治，E－mail：lvbaoqian@hotmail. com
收稿日期 Received：2020－12－14；**接受日期** Accepted：2021－02－19

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

effectively reduce the emergence rate of the pupae of *S. frugiperda*. The results of this study can provide a theoretical basis for the outbreak mechanism, prediction and green prevention and control of *S. frugiperda*.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; simulated rainfall; emergence; prediction and control

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*，隶属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuida 灰翅夜蛾属 *Spodoptera*，原产于美洲热带地区（Goergenet *et al.*，2016），具有适应性广、繁殖能力强、暴发性为害、防控难度大等特点（郭井菲等，2019）。草地贪夜蛾是联合国粮农组织全球预警的跨国界迁飞性农业害虫（杨普云和常雪艳，2019；Liu *et al.*，2020），迅速在北美洲、中美洲、加勒比群岛、南美洲和亚洲地区的 100 多个国家蔓延扩散，定殖为害（Brévaultet *et al.*，2017；Toumnouet *et al.*，2018；Kajugaet *et al.*，2018；Sharanabasappaet *et al.*，2018；Albasiniet *et al.*，2020）。自 2018 年底，我国云南发现草地贪夜蛾幼虫以来，现该虫已扩散到华南、西南、华中和华东地区 27 个省 1 423 个县，并已经向我国黄淮海夏玉米产区和北方春玉米产区蔓延（郭井菲等，2019），成为严重威胁我国农业生产的重大灾害性害虫。草地贪夜蛾低龄幼虫主要取食玉米的叶片和茎秆，高龄幼虫还会钻蛀玉米的雌穗和雌穗，严重影响作物叶片和果穗的正常发育，从而造成玉米大面积减产（王亚如等，2020）。

草地贪夜蛾在我国的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、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）。草地贪夜蛾属入侵害虫，抗性相关基因扫描检测发现，入侵我国的草地贪夜蛾本身已经具有较高的抗药性（Zhang *et al.*，2020），而且国内长期单一和不合理使用农药，草地贪夜蛾的化学防治效果已经受到影响（王芹芹等，2019；李永平等，2019；秦梦真等，2020）。此外，化学药剂的残留对环境和生态的污染和破坏严重，不利于农业的可持续发展（苏湘宁等，2020）。在这种形势下，探索草地贪夜蛾迁飞监测预警体系和绿色防控体系刻不容缓。草地贪夜蛾的生长发育和田间暴发为害与气象因子密不可分，其中温度是国内外研究较多较深入的一个因子（Du Plessis *et al.*，2020；张红梅等，2020；Sampaio *et al.*，2021）。而土壤水分条件是昆虫化蛹、羽化和繁殖的重要限制因子，害虫的种群密度与各世代的数量均会受到其影响（Chen *et al.*，2019）。但国内外针对降雨影响草地贪夜蛾羽化出土的研究甚少。本试验在室内条件下模拟不同级别降雨，研究两种不同质地的土壤在不同模拟降雨量下的水分状况对草地贪夜蛾土中蛹历期和羽化率的影响，为草地贪夜蛾灾变规律、预测预报和绿色防控研究提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点

于海南省儋州市中国热带农业科学院环境与植物保护研究所（下文简称环植所）实验大棚里进行试验。大棚内温度为 27.5 ± 2.5℃，光周期为 L∶D = 14∶10。

1.2　供试材料

1.2.1　供试虫源

试验所用草地贪夜蛾由海南省儋州市环植所害虫扩繁实验室提供，饲养条件为温度 26℃、光周期 L∶D = 14∶10、相对湿度 70%。

1.2.2　供试土壤

供试土壤分为两种，其中干砂土购买于儋州琼西建材市场，砖红壤（土质类型为砂壤土）（杨帆，2011；张骏达等，2015）则收集于海南省儋州市环植所实验楼下玉米地内表层（20 cm），其中一部分直接用于试验，一部分粉碎过筛后在 120℃ 烘箱中烘干 24 h 备用。

1.3　试验方法

1.3.1　模拟降雨量设置

根据国家气象部门对降水量的定义：1 mm 降水量相当于于每亩地里增加 0.667 m^3 的水，经过换算有 1 mm 降水量就等于每 1 cm^2 地里增加 0.1 mL 的水。试验所用花盆上部面积为 200.1 cm^2，取不同降水级别一天降雨量的中位数，即可得不同级别的模拟降雨量，详见表 1。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 模拟降雨量

Table 1 Simulated rainfall

降水级别 Rainfall grade	总雨量/d (mm) Total rainfall/day	供试土壤 Solis uesd for experiment	模拟降水量/d (mL) Simulated rainfall/day
小雨 (A) Light rain	1 ~ 10	烘干砂土/烘干砖红壤 Dry sand / Driedlatosol	120.6
中雨 (B) Moderate rain	10 ~ 25	烘干砂土/烘干砖红壤 Dry sand / Driedlatosol	361.8
大雨 (C) Heavy rain	25 ~ 50	烘干砂土/烘干砖红壤 Dry sand / Driedlatosol	763.8
对照 - 1 (D) CK - 1	0	烘干砂土/烘干砖红壤 Dry sand /Driedlatosol	0
对照 - 2 (E) CK - 2	0	大田砖红壤 Field latosol	0

1.3.2 草地贪夜蛾羽化出土观察试验设置

试验分为两次进行，第一次试验的供试土壤为砂土，第二次试验供试土壤为砂壤土。其中第一次试验于 2020 年 7 月 29 日开始，在养虫室选取鲜活的草地贪夜蛾预蛹 150 头，待预蛹化蛹完成且体色呈淡绿色时，选取 120 头发育经历一致的鲜活蛹，分置于 12 个盛有砂土的塑料花盆中，保持蛹上面的覆土厚度在 2 cm 左右，然后在花盆外罩细眼窗纱并扎紧下缘。第一次试验分为 A、B、C 和 D 共计 4 个处理，每个花盆放置 10 头蛹作为一个处理，每个处理设置 3 个重复，对不同处理浇灌相应的模拟降水量。模拟降雨后，用土壤水分测定仪（深圳沁之泉净水设备有限公司）每天定期测定每个处理花盆里 0 ~ 8 cm 土壤相对含水量，每个处理的土壤相对含水量取 3 个重复的平均值，观察并记录蛹羽化情况。

蛹的羽化出土观察时间为 20 d，羽化出土且具备正常生命体征的成虫记为羽化成功。20 d 后翻开土壤挖出未能羽化的蛹，体表皱缩或破裂且触碰后腹部暴露蛹壳外的体节无反应的蛹个体以及未正常羽化，体态畸形，不具备飞行能力的个体记为羽化失败。

第二次试验于 2020 年 8 月 17 日开始，采取上述的试验方法，选取 150 头形态一致的鲜活蛹，分置于 15 个盛有砂壤土的塑料花盆中。分为 A、B、C、D 和 E 共计 5 个处理，每个处理设置 3 个重复，其中 A、B、C 和 D 处理的供试土壤均为过筛、烘干后的砂壤土，E 处理则采用大田砂壤土（土壤相对含水量为 66%），不做模拟降雨处理。

1.4 数据统计分析

数据采用 Excel 2019 进行统计整理，应用 SPSS 23.0 version 对数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA)，以平均值 ± 标准误的形式表示，并采取 LSD 检验 ($P < 0.05$) 分析不同级别模拟降雨处理间草地贪夜蛾土中蛹历期和出土羽化率的差异显著性。应用 Origin 2019b version 软件绘图。

土中蛹历期 = 羽化出土日 - 化蛹日

出土羽化率(%) = (羽化出土数/10头) × 100

2 结果与分析

2.1 不同级别模拟降雨对草地贪夜蛾土中蛹历期的影响

研究发现，在供试土壤为砂土的情况下，不同级别的模拟降雨对草地贪夜蛾土中蛹历期的影响差异不显著 ($F = 1.064$，$P = 0.3959 > 0.05$)。不同处理下蛹历期排列为：B 中雨(7.18 ± 0.18 d) > C 大雨(7.00 ± 0.00 d) > A 小雨(6.75 ± 0.25 d) > D 对照 - 1(6.50 ± 0.50 d)(图1)。A、B、C 和 D 处理两两之间均无统计学差异 ($P > 0.05$)。

在供试土壤为砂壤土的情况下，不同级别的模拟降雨对草地贪夜蛾土中蛹历期的影响差异不显著 ($F = 1.4090$，$P = 0.2435 > 0.05$)。不同处理下蛹历期排列为：C 大雨(7.75 ± 0.25 d) > B 中雨(7.71 ± 0.36 d) > A 小雨(7.35 ± 0.19 d) > D 对照 - 1(7.10 ± 0.23 d) > E 对照 - 2(7.05 ± 0.19 d)。C 处理与 E 处理表现出显著性差异 ($P < 0.05$)，与其他处理则均无统计学差异 ($P > 0.05$)(图 2)。

综上可得，不同级别的降雨处理对砂土和砂壤土中草地贪夜蛾蛹历期均无显著性影响，中雨和大雨处理对草地贪夜蛾土中蛹历期有一定的延长作用。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

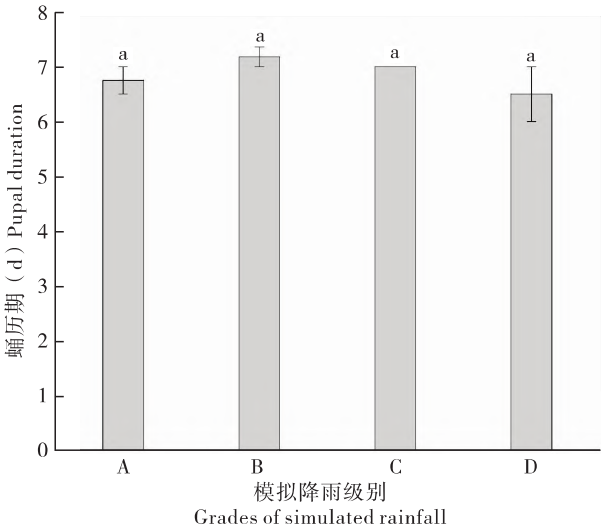

图 1　不同级别模拟降雨处理下草地贪夜蛾砂土中的蛹历期

Fig. 1　Pupal duration of *Spodoptera frugiperda* in sandy soil in different grades of simulated rainfal

注： A，**小雨**；B，**中雨**；C，**大雨**；D，**对照** －1。Note：A，Light rain；B，Moderate rain；C，Heavy rain；D，CK－1.

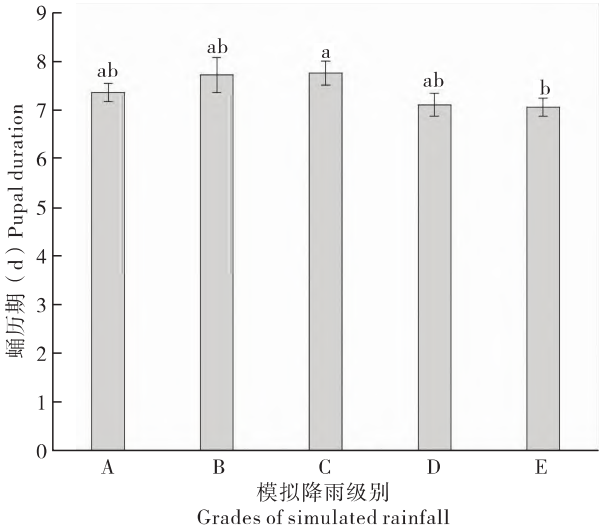

图 2　不同级别模拟降雨处理下草地贪夜蛾在砂壤土中的蛹历期

Fig. 2　Pupal duration of *Spodoptera frugiperda* in sandy loam in different grades of simulated rainfall

注： A，**小雨**；B，**中雨**；C，**大雨**；D，**对照** －1；E，CK－2。Note：A，Light rain；B，Moderate rain；C，Heavy rain；D，CK－1；E，CK－2.

2.2　不同级别模拟降雨对草地贪夜蛾出土羽化的影响

不同级别模拟降雨处理对草地贪夜蛾在砂土中羽化率的影响差异极显著（$F = 11.619$，$P = 0.003 < 0.05$）。不同处理下蛹的羽化率排列为：B **中雨**（36.7% ± 6.7%）> A **小雨**（13.3% ± 3.3%）> D **对照** －1（6.7% ± 3.3%）> C **大雨**（3.3% ±3.3%）（**表** 2）。B **处理蛹的羽化率显著大于其他处理**（$P < 0.05$），A、C、D **处理两两之间均未表现出显著性差异**（$P > 0.05$）。**砂土中的草地贪夜蛾蛹主要在入土后** 6～7 **天羽化出土。分析不同级别模拟降雨处理间砂土的水分状况变化趋势**（**图** 3）**可知，砂土** 10 d **内水分含量变化幅度较大。**A、B、C、**和** D **处理第** 6～7 **天的土壤相对含水量分别为** 0～15%、38%～45%、82% **和** 0（**图** 3）。**结合羽化日附近不同土壤相对含水量对应的羽化率分析，草地贪夜蛾蛹在相对含水量为** 38%～45% **的砂土中羽化率最高，土壤相对含水量过大**（>80%）**和过小**（<20%）**均极不利于蛹的羽化。**

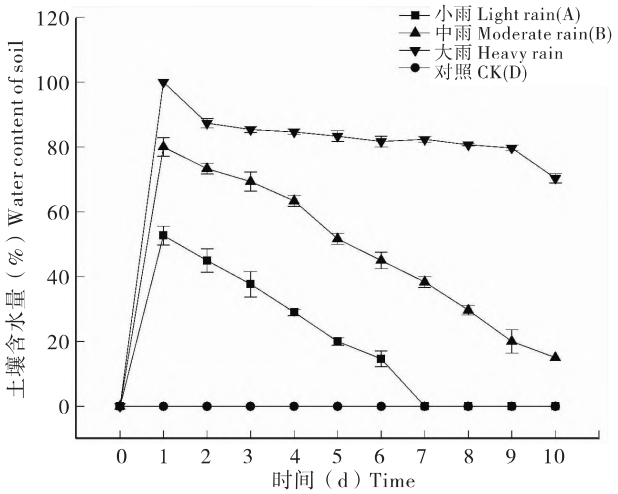

图 3　砂土 0～8 cm **土壤水分变化情况**

Fig. 3　Changes of 0～8 cm water content of sandy soil

不同级别模拟降雨处理对草地贪夜蛾在砂壤土中羽化率的影响差异极显著（$F = 19.115$，$P = 0.000 < 0.05$）。**不同处理下蛹的羽化率排列为：**E **对照** －2（70.0% ± 5.8%）> A **小雨**（56.7% ± 8.8%）> D **对照** －1（33.3% ± 3.3%）> B **中雨**（23.3% ± 3.3%）> C **大雨**（13.3% ± 3.3%）（**表**3）。A **处理与** E **处理蛹的羽化率无显著性差异**（$P > 0.05$）**且均显著高于** D **处理、**B **处理和** C **处理**（$P < 0.05$）。C **处理蛹的羽化率最低且与** A **处理、**D **处理和** E **处理均表现出显著性差异**（$P < 0.05$）。**砂壤土中的草地贪夜蛾蛹主要在入土后** 6～8 d **羽化出土。砂壤土** 10 d **内土壤水分状况相对稳定，**A、B、C、D **和** E **处理第** 6～8 **天的土壤相对含水量分别为** 45%～55%，83%～90%，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同级别模拟降雨处理下草地贪夜蛾砂土中羽化情况

Table 2 Emergence of *Spodoptera frugiperda* in sandy soil under different levels of simulated rainfall

降水级别 Rainfall grade	重复 Duplication	羽化进度记录（头）The record of eclosion progress						羽化率（%） Eclosion rate
		第 5 天	第 6 天	第 7 天	第 8 天	第 9 天	第 10 天	
小雨（A） Light rain	A－1（10）	0	0	2	0	0	0	13.3 ± 3.3 b
	A－2（10）	0	1	0	0	0	0	
	A－3（10）	0	0	1	0	0	0	
中雨（B） Moderate rain	B－1（10）	0	0	2	1	0	0	36.7 ± 6.7 a
	B－2（10）	0	1	2	2	0	0	
	B－3（10）	0	0	3	0	0	0	
大雨（C） Heavy rain	C－1（10）	0	0	1	0	0	0	3.3 ± 3.3 b
	C－2（10）	0	0	0	0	0	0	
	C－3（10）	0	0	0	0	0	0	
对照（D） CK	D－1（10）	0	0	1	0	0	0	6.7 ± 3.3 b
	D－2（10）	0	1	0	0	0	0	
	D－3（10）	0	0	0	0	0	0	

注：羽化率后标有不同小写字母表示不同级别模拟降雨处理处理间经 LSD **检验差异显著（**$P < 0.05$**）。下同。** Note: Data with different lowercase letters indicated significant difference among different grades of simulated rainfall by the LSD test at $P < 0.05$. The same below.

表 3 不同级别模拟降雨处理下草地贪夜蛾砂壤土中羽化情况

Table 3 Emergence of *Spodoptera frugiperda* in sandy loam under different levels of simulated rainfall

降水级别 Rainfall grade	重复 Duplication	羽化进度记录（头）The record of eclosion progress						羽化率（%） Eclosion rate
		第 5 天	第 6 天	第 7 天	第 8 天	第 9 天	第 10 天	
小雨（A） Light rain	A－1（10）	0	0	3	1	0	0	56.7 ± 8.8 a
	A－2（10）	0	0	3	3	1	0	
	A－3（10）	0	2	2	2	0	0	
中雨（B） Moderate rain	B－1（10）	0	0	2	0	0	0	23.3 ± 3.3 bc
	B－2（10）	0	0	1	0	1	0	
	B－3（10）	0	0	1	1	1	0	
大雨（C） Heavy rain	C－1（10）	0	0	1	1	0	0	13.3 ± 3.3 c
	C－2（10）	0	0	0	1	0	0	
	C－3（10）	0	0	0	1	0	0	
对照－1（D） CK－1	D－1（10）	0	0	2	1	0	0	33.3 ± 3.3 b
	D－2（10）	0	2	1	1	0	0	
	D－3（10）	0	0	2	1	0	0	
对照－2（E） CK－2	D－1（10）	0	2	3	1	0	0	70.0 ± 5.8 a
	D－2（10）	0	3	2	2	0	0	
	D－3（10）	0	1	4	2	1	0	

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

95～100%，0 和 40%～58%（图 4）。结合羽化日附近不同土壤相对含水量对应的羽化率分析，草地贪夜蛾蛹在相对含水量维持在 40%～60% 的砂壤土中羽化率最高，在干砂壤土中的羽化率次之，在土壤相对含水量大于 80% 的条件下羽化率极低。

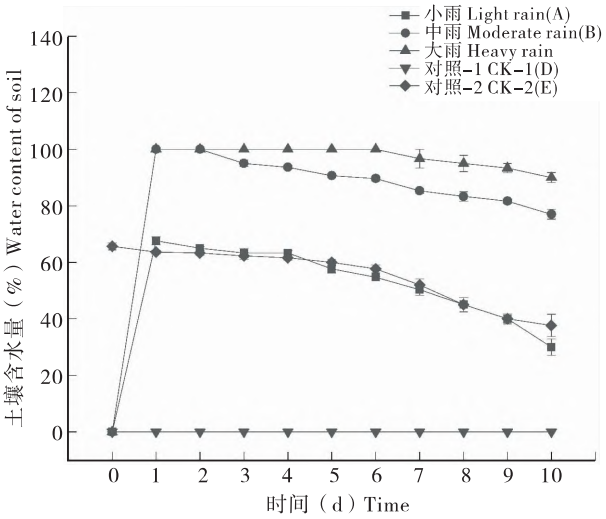

图 4　砂壤土 0～8 cm 土壤水分变化情况

Fig. 4　Changes of 0～8 cm water content of sandy loam

2.3　模拟降雨处理草地贪夜蛾蛹在不同质地土壤中羽化率比较

A 处理砂土和砂壤土在草地贪夜蛾羽化日的土壤相对含水量分别为 0～15% 和 40%～55%，蛹在 45%～55% 的土壤水分条件下的羽化率显著高于 0～15% 的（$P<0.05$）。同时也可以发现，A 处理和 E 处理砂壤土在蛹羽化日的土壤相对含水量范围相对一致，分别为 45%～55% 和 40%～58%，而蛹的羽化率在这种土壤水分条件下表现出相对最高的水平，且两者之间无显著性差异（$P>0.05$），分别为 56.7% ±8.8% 和 70% ±5.8%。B 处理的土壤相对含水量分别为 38%～45% 和 83%～90%，这两种土壤水分条件下蛹的羽化率未表现出显著性差异（$P>0.05$），分别为 36.7% ±6.7% 和 23.3% ±3.3%。C 处理砂土和砂壤土的土壤相对含水量分别为 82% 和 95%～100%，这两种土壤水分条件下蛹的羽化率均相对最低且未表现出显著性差异（$P>0.05$），分别为 3.3% ±3.3% 和 13.3% ±3.3%。D 处理蛹羽化日的土壤相对含水量均为 0，在这种土壤水分条件下，砂土中蛹的羽化率显著低于砂壤土的（$P<0.05$），羽化率分别为 6.7% ±3.3% 和 33.3% ±3.3%。而在土壤相对含水量相对适中（40%～60%）的条件下，砂土中蛹的羽化率也显著低于砂壤土的（$P<0.05$），分别为 36.7% ±6.7%，56.7% ±8.8% 和 70% ±5.8%。

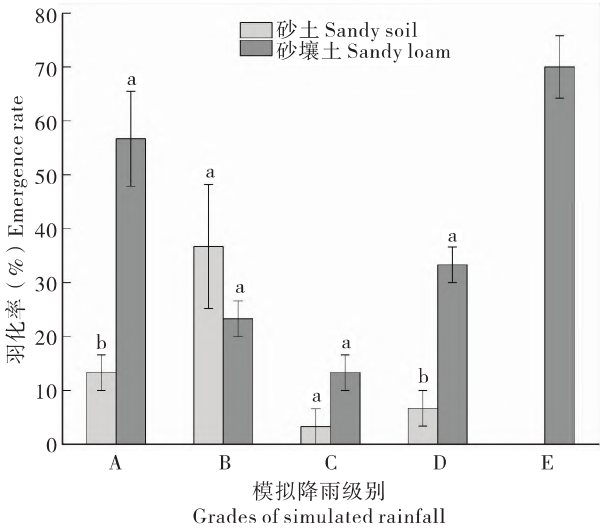

图 5　草地贪夜蛾蛹在不同质地土壤中羽化率比较

Fig. 5　Comparison of emergence rate of *Spodoptera frugiperda* pupae in different soil textures

注：A，小雨；B，中雨；C，大雨；D，对照－1；E，对照－2。Note：A，Light rain；B，Moderate rain；C，Heavy rain；D，CK－1；E，CK－2.

3　结论与讨论

草地贪夜蛾无滞育现象，其生活史可分为卵、幼虫（1～6 龄）、蛹和成虫 4 个阶段。本研究结果发现，草地贪夜蛾的土中蛹历期为 6～9 d，且主要集中在第 7～8 天羽化出土。不同级别模拟降雨处理，即不同土壤相对含水量对于草地贪夜蛾土中蛹历期无显著性影响。李立坤等（2019）研究发现，不同土壤相对含水量对粘虫 *Mythimna separata*（Walker）土中历期无显著影响。这与本研究结果一致。此外，本试验研究发现过大的土壤相对含水量对草地贪夜蛾的蛹历期具有一定程度的延长作用，且这种延长作用在砂壤土中表现出差异性。相关研究认为，昆虫发育进度的快慢在一定程度上反应了其生长环境的优劣。昆虫发育越快，历期越短，表明环境条件越适宜其生长（唐继洪，2016）。土壤相对含水量过高或过低均延长了粘虫蛹的历期（李立坤等，2019）。陈法军（2003）研究发现，当土壤相对含水量不大于 20%

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和不小于 60% 时均能显著延长棉铃虫 *Helicoverpa armigera*（Hübner）蛹的历期。本研究未发现过低的土壤相对含水量对草地贪夜蛾的历期表现出明显的延长作用，这可能和本试验的供试土壤有关，具体原因有待于进一步分析。同时，这在一定程度上也说明草地贪夜蛾更适合在相对干燥的土壤环境中羽化出土。

草地贪夜蛾常在 2 ~ 8 cm 深的土壤中化蛹，有时也在果穗或叶腋处化蛹。相关研究表明，完全变态昆虫的羽化率会受到土壤含水量的显著影响（韩云等，2015），且土壤相对含水量小于或等于 20% 有利于棉铃虫的羽化出土，土壤相对含水量大于或等于 40% 的对其羽化出土不利，100% 土壤相对含水量则会造成棉铃虫蛹大量死亡，羽化失败率高达 90%（陈法军等，2003）。小菜蛾 *Plutella xylostella*（Linnaeus）在土壤相对含水量（换算后）30.0%、37.2%、74.4% 和 100% 条件下，羽化率分别为 53.33% ± 5.75%、6.67% ± 0.57%、3.33% ± 0.45% 和 0.00 ± 0.00（周福才等，2012）。李立坤等（2019）研究发现，粘虫羽化出土的适宜土壤相对含水量为 60%，0% 和 100% 的土壤相对含水量都不利于粘虫正常的羽化出土。刘茂松等（2012）研究表明，羽化期间降雨显著影响杨小舟蛾 *Micromelalopha troglodyta*（Graeser）蛹的存活，土壤湿度越大，蛹羽化和存活率越低。本试验结果表明，蛹期模拟降雨处理对草地贪夜蛾的羽化率影响显著，蛹期土壤相对含水量维持在 40% ~ 60% 的范围内有利于草地贪夜蛾的羽化出土，土壤相对含水量过低（< 20%）和过高（> 80%）均极不利于草地贪夜蛾的出土羽化。可以看出，不同种类完全变态昆虫羽化出土的最适土壤水分含量有所差异，但过大的土壤水分含量对上述昆虫的羽化出土均极其不利。有学者研究表明，蛹末期到羽化前期是完全变态昆虫发育阶段的脆弱时期，此时昆虫体内进行着剧烈的生理代谢活动，并伴随着组织的解离和再生，更易受到外界环境变化的影响（陈法军等，2003）。杨燕涛（2000）研究发现，土壤遇雨后棉铃虫蛹死亡的主要机制是土壤中过大的水分含量会恶化通气，导致蛹窒息而亡；其次是雨后导致蛹室和羽化通道的坍塌从而影响棉铃虫的羽化出土。本试验发现小雨处理的砂土出现板结的情况，且部分蛹破裂或呈现“半羽化”的状态，其原因可能是本试验供试砂土经过高温烘干，导致了土壤有机质的散失，土壤结构的破坏和土料的分散，较低的模拟降雨量加之砂土较差的保水性使得土壤中的水分很快蒸发流失，从而导致土壤在蛹羽化前板结，一定程度上阻塞了蛹羽化出土的通道，使得昆虫难以破蛹而出或羽化但难以出土（杨燕涛，2000；党志浩和陈法军，2011）。这说明土壤的板结也会影响昆虫蛹的羽化出土。

入土化蛹昆虫的羽化在一定程度上也受到土壤质地的影响（韩云等，2015）。本试验研究发现，在土壤相对含水量过低（< 20%）、适中（40% ~ 60%）和过高（> 80%）的情况下，草地贪夜蛾蛹在砂壤土中的羽化率均高于在砂土中的，从而在一定程度上说明砂壤土相对于砂土有利于草地贪夜蛾蛹的羽化出土。这与砂壤土最适宜豆大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 羽化的结论一致（韩云等，2015），而与桑褐瘿蚊 *Cotarina* sp. 在砂土中的羽化率显著高于砂壤土的结论不同（任杰群等，2018）。完全变态昆虫在不同质地土壤中羽化率表现出差异的原因尚不明晰，可能受到土壤质地和昆虫生理特性的共同影响（陈法军等，2003）。

不同质地土壤的特性不同，砂土孔隙性好，但水稳性差，水分渗透和蒸发速度快，难以维持土壤含水量。砂壤土兼具砂土和壤土的特性，通气透水性和保水性均相对较好（苏杨等，2013）。结合大田环境下的自然降雨分析，蛹期频繁降雨一定程度上有利于砂质土壤维持相对适宜的土壤含水量，适宜蛹的羽化出土，而干旱条件下土壤含水量过低则不利于蛹的羽化出土；壤土或砂壤土的田间持水量较大，加之其相对较好的水稳性，土壤含水量可以较长时间保持在一定范围内，在干旱条件下更适合草地贪夜蛾蛹的羽化出土，在雨水充足的条件下则不利于其羽化出土（任杰群等，2018）。鉴于我国玉米产区的种植用土以砂壤土居多，则草地贪夜蛾在相对干旱的大田环境下暴发为害的可能性更大，须对此加以防控。土壤水分含量过大对草地贪夜蛾蛹羽化出土的影响是毁灭性的，在实际生产中适时进行大田漫灌，营造高湿土壤环境可有效降低草地贪夜蛾蛹的羽化率，从而可达到防治目的。

土壤湿度对草地贪夜蛾出土成虫的生产力、繁殖力和交配力是否有影响？土壤有机质含量、腐殖质含量和 pH 等化学特性是否也是影响昆虫蛹羽化出土的因素？上述问题有待于深入研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献（References）

Albasini C，António M，Luisa S，*et al*. First report of native parasitoids of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）（Lepidoptera：Noctuidae）in Mozambique [J]. *Insects*，2020，11（9）：615.

Brévault T，Ndiaye A，Badiane D，*et al*. First records of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae），in Senegal [J]. *Entomologia Generalis*，2018：129－142.

Chen FJ，Zhai BP，Zhang XX. Effects of soil moisture during pupal stage on population development of cotton bollworm，*Helicoverpa armigera*（Hübner）[J]. *Acta Ecologica Sinica*，2003，1：112－121. [陈法军，翟保平，张孝羲. 棉铃虫蛹期土壤水分对其种群发生的影响 [J]. 生态学报，2003，1：112－121]

Chen C，Jeffrey A，Arjen B，*et al*. Rain downpours affect survival and development of insect herbivores：The specter of climate change? [J]. *Ecology*，2019，100（11）：e02819.

Dang ZH，Chen FJ. Responses of insects to rainfall and drought [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*，2011，48（5）：1161－1169. [党志浩，陈法军. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应 [J]. 应用昆虫学报，2011，48（5）：1161－1169]

Du Plessis H，Schlemmer ML，Van den Berg J，*et al*. The effect of temperature on the development of *Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae）[J]. *Insects*，2020，11（4）：228.

Goergen G，Kumar PL，Sankung SB，*et al*. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*（J E Smith）（Lepidoptera，Noctuidae），a New Alien Invasive Pest in West and Central Africa [J]. *PLoS ONE*，2016，11（10）：e0165632.

Guo JF，He KL，Wang ZY. Biological characteristics，trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*，and the strategy for management of the pest [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*，2019，56（3）：361－369. [郭井菲，何康来，王振营. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策 [J]. 应用昆虫学报，2019，56（3）：361－369]

Han Y，Tang LD，Fu BL，*et al*. The influences of different soil moisture and type on pupation and eclosion of *Megalurothrips usitatus* [J]. *Journal of Environmental Entomology*，2015，37（4）：710－714. [韩云，唐良德，付步礼，等. 土壤含水量和土壤类型对豆大蓟马蛹期发育和羽化的影响 [J]. 环境昆虫学报，2015，37（4）：710－714]

Jiang YY，Liu J，Xie MC，*et al*. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019 [J]. *Plant Protection*，2019，45（6）：10－19. [姜玉英，刘杰，谢茂昌，等. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测 [J]. 植物保护，2019，45（6）：10－19]

Kajuga J，Edgington S，Uzayisenga B，*et al*. First record of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith，1797）（Lepidoptera：Noctuidae），in Rwanda [J]. *Entomological Society of Southern Africa*，2018，26（1）：244－246.

Liu MS，Li YM，Li JX. Influence analysis of plain area rainfall on development and survival of *Micromelalopha troglodyta* Pupae [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*，2012，35（S1）：55－57. [刘茂松，李彦民，李俊霞. 平原地区降雨量对杨小舟蛾蛹发育与存活的影响分析 [J]. 气象与环境科学，2012，35（S1）：55－57]

Liu T，Wang J，Hu X，*et al*. Land－use change drives present and future distributions of fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）（Lepidoptera：Noctuidae）[J]. *Science of the Total Environment*，2020：706.

Li YP，Zhang S，Wang XJ，*et al*. Current status of insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* and strategies for its chemical control [J]. *Plant Protection*，2019，45（4）：14－19. [李永平，张帅，王晓军，等. 草地贪夜蛾抗药性现状及化学防治策略 [J]. 植物保护，2019，45（4）：14－19]

Li LK，Wang XH，Liu JW. *et al*. Effect of soil moisture on the pupation and emergence of the armyworm，*Mythimna separata* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*，2019，56（6）：1324－1330. [李立坤，王晓辉，刘佳文，等. 土壤湿度对粘虫入土化蛹和羽化出土的影响 [J]. 应用昆虫学报，2019，56（6）：1324－1330]

Qin MZ，Gao ZF，Xu YL，*et al*. Research progresses in the resistance mechanisms of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to insecticides [J]. *Journal of Plant Protection*，2020，47（4）：692－697. [秦梦真，高正辉，徐义流，等. 草地贪夜蛾对农药主要抗性机制的概述 [J]. 植物保护学报，2020，47（4）：692－697]

Ren JQ，Chen L，Yang Y，*et al*. Preliminary report on the effect of soil type and water content on the emergence rate of *Cotarina* sp. [J]. *South China Agriculture*，2018，12（19）：56－58. [任杰群，陈力，杨义，等. 土壤类型及含水量对桑椹瘿蚊羽化率的影响研究初报 [J]. 南方农业，2018，12（19）：56－58]

Sampaio F，Krechemer FS，Marchioro CA，*et al*. Temperature－dependent development models describing the effects of temperature on the development of *Spodoptera eridania* [J]. *Pest Management Science*，2021，77（2）：919.

Sharanabasappa，Kalleshwaraswamy CM，Asokan R，*et al*. First report of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）（Lepidoptera：Noctuidae），an alien invasive pest on maize in India [J]. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*，2018，24（1）：23－29.

Su XN，Liao ZX，Li CY，*et al*. Resistance of *Spodoptera frugiperda* in Guangdong against two commonly used pesticides and the effects of auxiliaries and synergist on toxicity to pesticides [J]. *Journal of Southern Agriculture*，2020，51（6）：1274－1281. [苏湘宁，廖章轩，李传瑛，等. 广东草地贪夜蛾对 2 种常用农药的抗药性及助剂和增效剂对农药毒力的影响 [J]. 南方农业学报，2020，51（6）：1274－1281]

Su Y，Zhu J，Wang P，*et al*. Research progress on soil water holding capacity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*，2013，29（14）：140－145. [苏杨，朱健，王平，等. 土壤持水能力研究进展 [J]. 中国农学通报，2013，29（14）：140－145]

Tang JH. Responses and Adaptation of the Beet Webworm，*Loxostege sticticalis*（Lepidoptera：Carambidiae）to the Variations in Temperature and Humidity [D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2016. [唐继洪. 草地螟对温湿度变异的适应与反应 [D]. 北京：中国农业科学院，2016]

Toumnou LA，Reo－Ndouba R，Wango SP，*et al*. The first survey of

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Spodoptera frugiperda on maize in the farms and in the traditional Post – harvest conservation in Central African Republic [J]. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 2018, 8 (3): 1 – 6.

Wang QQ, Cui L, Wang L, *et al*. Research progress on insecticides resistance in fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2019, 21 (4): 401 – 408. [王芹芹, 崔丽, 王立, 等. 草地贪夜蛾对杀虫剂的抗性研究进展 [J]. 农药学学报, 2019, 21 (4): 401 – 408]

Wang YR, Cai XY, Wang JD, *et al*. Current opinions on the important alien invasive insect, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (4): 806 – 816. [王亚如, 蔡香云, 王锦达, 等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾的研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (4): 806 – 816]

Yang PY, Chang XY. The occurrence, influence, prevention and control strategies of *Spodoptera frugiperda* in Asia and Africa [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (6): 88 – 90. [杨普云, 常雪艳. 草地贪夜蛾在亚洲、非洲发生和影响及其防控策略 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (6): 88 – 90]

Yang YT. Effects of Raining on the Pupation and Emergence of Cotton Bolllworm and its Occurrence [D]. Nanjing: Nanjing Agrieulutral Universiy, 2000. [杨燕涛. 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 [D]. 南京: 南京农业大学, 2000]

Yang F. Theory and Practice of Taxonomy of Soil Series in Danzhou City [D]. Haikou: Hainan University, 2011. [杨帆. 儋州市土系划分的理论和实践 [D]. 海口: 海南大学, 2011]

Zhang JD, Sun XY, Liu Y, *et al*. Attribution of laterite of Danzhou, Hainan Province in Chinese soil taxonomy [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42 (10): 46 – 52. [张骏达, 孙向阳, 刘艳, 等. 海南省儋州市砖红壤在中国土壤系统分类的归属研究 [J]. 广东农业科学, 2015, 42 (10): 46 – 52]

Zhang HM, Wang Y, Yin XQ, *et al*. Effects of short – term high temperature in egg and pupal stages on the growth and development of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 831 – 838. [张红梅, 王燕, 尹艳琼, 等. 卵和蛹短时高温对草地贪夜蛾生长发育的影响 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 831 – 838]

Zhang HM, Yin YQ, Zhao XQ, *et al*. The growth and development characteristics of *Spodoptera frugiperda* under different temperature conditions [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (1): 52 – 59. [张红梅, 尹艳琼, 赵雪晴, 等. 草地贪夜蛾在不同温度条件下的生长发育特性 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (1): 52 – 59]

Zhang L, Liu B, Zheng W, *et al*. Genetic structure and insecticide resistance characteristics of fall armyworm populations invading China [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2020, 20 (6): 1682 – 1696.

Zhou FC, Hu QJ, Jiang JZ, *et al*. Effects of temperature, soil humidity and soil cover on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) pupae emergence [J]. *Chinese Journal of Eco – Agriculture*, 2012, 20 (12): 1621 – 1625. [周福才, 胡其靖, 江解增, 等. 温度、湿度和覆土对小菜蛾羽化的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (12): 1621 – 1625]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net