

土壤干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊种群动态的影响*

王宝山^{1**} 孙丽娟¹ 王英磊² 郑长英^{1***}

(1. 青岛农业大学植物医学学院, 山东省病虫害防控重点实验室, 青岛 266109; 2. 烟台市农业技术推广中心, 烟台 264001)

摘要 【目的】为明确土壤干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia cellarum* Frey 生长发育、繁殖和种群动态的影响。【方法】基于年龄-龄期两性生命表的理论, 研究韭菜迟眼蕈蚊分别在土壤干旱条件下和土壤湿润条件下的生命表参数和繁殖力参数; 通过成虫期干旱处理试验进一步验证干旱胁迫对迟眼蕈蚊种群的影响。【结果】土壤干旱处理后卵、1龄幼虫、2龄幼虫和蛹的发育历期显著长于土壤湿润处理 ($P<0.05$); 干旱处理的迟眼蕈蚊在土壤湿润条件下, 单雌产卵量较湿润处理降低 37.8%, 净增殖率 (R_0)、内禀增长率 (r) 和周限增长率 (λ) 与湿润处理相比均显著降低 ($P<0.05$)。成虫试验表明, 土壤干旱条件下, 在韭菜断口处获得汁液的成虫产卵率和产卵量分别为 5% 和 1.30 粒, 显著低于土壤湿润处理的 100% 和 85.50 粒 ($P<0.05$), 而当成虫无法从韭菜断口处获取汁液时所产的卵不能孵化。【结论】干旱胁迫抑制了韭菜迟眼蕈蚊的种群数量, 且在 10% 土壤相对含水量的干旱条件下种群无法生存。本试验为控水防治韭菜迟眼蕈蚊提供依据。

关键词 韭菜迟眼蕈蚊; 土壤含水量; 年龄-龄期两性生命表; 发育历期; 种群参数

Effect of drought stress on the population dynamics of *Bradysia cellarum*

WANG Bao-Shan^{1**} SUN Li-Juan¹ WANG Ying-Lei² ZHENG Chang-Ying^{1***}

(1. Key Laboratory of Integrated Crop Pest Management of Shandong Province, College of Plant Health and Medicine, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Agricultural Technology Promotion Center of Yantai, Yantai 264001, China)

Abstract 【Objectives】To determine the effect of drought stress on the growth, development, reproduction and population dynamics of *Bradysia cellarum* Frey. 【Methods】Based on an age-stage, two-sex life table, the life table and fecundity parameters of *B. cellarum* were calculated under dry and wet soil conditions. The effects of drought stress were further verified using a drought treatment experiment during the adult stage. 【Results】Drought treatment significantly prolonged the developmental duration of the egg, 1st instar, 2nd instar and pupal, stages relative to the control group ($P<0.05$). Furthermore, female fecundity was 37.8% less than that of the control group. The net reproductive rate (R_0), intrinsic growth rate (r) and limited growth rate (λ) were also significantly less in the drought treatment group than in the control ($P<0.05$). The oviposition rate and number of eggs laid by the drought treatment group were 5% and 1.30, respectively, significantly less than the corresponding values of 100% and 85.50 for the control group ($P<0.05$). Eggs failed to hatch when adults were unable to obtain juice from chives. 【Conclusion】The population dynamics of *B. cellarum* are adversely affected by drought conditions and populations are unable to survive if the relative soil moisture content is 10% or less. These results provide a scientific basis for controlling *B. cellarum* through managing soil moisture content.

Key words *Bradysia cellarum*; soil moisture; age-stage two sex life table; developmental duration; population parameter

*资助项目 Supported projects: 山东省蔬菜产业技术体系 (SDAIT-05); 青岛市科技惠民示范专项——韭菜优质安全生产及质量安全控制技术集成与示范推广 (21-1-4-ny-28-nsh)

**第一作者 First author, E-mail: 8505848944@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhengcy67@qau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-03-04, 接受日期 Accepted: 2022-07-29

韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia cellarum* Frey, 属双翅目 Diptera, 眼蕈蚊科 Sciaridae, 迟眼蕈蚊属 *Bradysia*, 是韭菜生产过程中的重要害虫之一。其幼虫俗称“韭蛆”, 食性广, 可为害百合科、菊科、藜科、十字花科、葫芦科、伞形科等 7 科 30 多种蔬菜(梅增霞等, 2003)。该虫幼虫聚集为害韭菜根部鳞茎, 为害隐蔽, 发生程度重时可造成整个鳞茎腐烂, 韭菜枯萎发黄, 可减产 40%-60%(薛明和王永显, 2002)。由于幼虫为害具有隐蔽性, 对其防治比较困难。目前, 化学农药防治仍然是生产中主要方法, 导致韭菜农药残留超标现象时有发生。因此, 寻找新的非化学防治手段防治韭菜迟眼蕈蚊, 对实现韭菜绿色安全生产具有十分重要的意义。

已有大量研究表明, 土壤湿度可以对昆虫的生长发育、繁殖和种群动态等产生影响(陈法军, 2001; 韩云等, 2015)。周仙红等(2016)研究发现土壤湿度对韭菜迟眼蕈蚊成虫产卵有显著影响, 土壤相对湿度为 40%和 50%时, 成虫的落卵率超过 25%, 落卵量大于 480 粒, 显著高于土壤相对湿度为 10%、20%、30%和 60%时; 徐志松(2016)研究发现韭菜迟眼蕈蚊卵期的适宜土壤含水量为 10%-22%, 幼虫期适宜土壤含水量为 15%-20%, 而蛹期适宜土壤含水量为 5%-20%, 土壤含水量越低韭菜迟眼蕈蚊产卵量越少。史彩华等(2016)调查发现土壤湿度大则韭菜迟眼蕈蚊为害重。本课题组前期研究表明, 在韭菜养根期进行控水处理可以抑制韭菜迟眼蕈蚊的发生, 且控水时间越长韭菜迟眼蕈蚊发生量越少, 当土壤湿度低于 10%时, 种群几乎灭绝(孙丽娟等, 2019)。上述研究表明, 土壤湿度对韭菜迟眼蕈蚊种群产生较大影响, 土壤干旱可抑制其发生, 但是土壤湿度对韭菜迟眼蕈蚊种群影响的生态学机制尚不清楚。

年龄-龄期两性生命表是研究昆虫种群生态学变化的重要方法, 在害虫种群生态学和综合治理中有着重要的作用(齐心等, 2019), 它可以帮助我们获得如昆虫种群生长发育、繁殖、存活以及种群动态预测等详细参数。不同于传统生命表, 年龄-龄期两性生命表充分考虑种群个体之

间的发育差异, 并完善了以平均发育历期进行计算和忽略雄性个体对种群贡献的不足等缺陷(Chi and Liu, 1985; Chi, 1988)。韭菜迟眼蕈蚊除成虫外, 其他虫态均在土壤中生活, 土壤是其赖以生存的栖息场所, 研究土壤干旱胁迫对其种群动态的影响为生态防治提供依据具有重要意义。本研究通过构建韭菜迟眼蕈蚊年龄-龄期两性生命表的方法, 明确韭菜迟眼蕈蚊土壤干旱胁迫对其生长发育、繁殖和种群动态的影响, 通过成虫干旱试验进一步探究干旱胁迫对其成虫期的影响, 揭示控水技术防控韭菜迟眼蕈蚊的机制, 为韭菜迟眼蕈蚊绿色防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试韭菜迟眼蕈蚊采自青岛市即墨区移风店镇青岛银杏家食品有限公司的韭菜种植基地, 以未施农药的雪韭 *Allium tuberosum* 进行喂养, 在实验室建立种群, 利用饲养了 3 代以上的种群进行试验。

1.2 供试仪器

解剖镜(Olympus SZ51), 光照培养箱(RDN-300D-4, 宁波东南仪器有限公司)。

1.3 供试土壤含水量处理

供试土壤采自上述韭菜种植基地, 土质为沙壤土。在烘箱中 120 °C 烘干 24 h, 过孔径为 1.2 mm 圆筛备用。

根据前期研究土壤控水的检测结果, 大田控水 30 d 后的 5 cm 土层土壤相对含水量约为 10%左右, 正常浇水管理 5 cm 土层的土壤含水量约为 40%左右。因此, 本试验干旱处理土壤相对含水量设定为 10%, 湿润处理土壤相对含水量设定为 40%。

供试土壤饱和含水量测定方法参照李立坤等(2019)的方法并稍作修改: 将塑料杯底部替换为 200 目纱网, 取烘干土 100 g 放入塑料杯(6.5 cm×10.0 cm)中, 后放入水盆中让其自然吸水, 吸水饱和后进行称重, 增加的重量便为土

壤的饱和含水量。经测定,土壤的饱和含水量为 34.4%。通过公式:土壤相对含水量=土壤实际含水量/土壤最大持水量 $\times 100\%$,计算出配置 10% 相对含水量需注入 3.44 mL 水,配置 40% 相对含水量需注入 13.76 mL 水。为方便描述,10% 土壤相对含水量和 40% 土壤相对含水量全文分别统称为土壤干旱处理和土壤湿润处理。

1.4 土壤相对含水量的配置

土壤相对含水量的配置:将 100 g 土壤装入塑料杯中,用注射器缓缓注入不同体积的水并用玻璃棒充分搅拌使土壤水分均匀,配置成相对含水量为 10% 和 40% 两个梯度的土壤,用于生命表研究。为便于观察,塑料杯中土壤用尼龙纱网一分为二分为上下两层,每一层分别用 100 目纱网将土壤包裹,在两层中间放置试虫,每 3 d 通过称重法测量土壤含水量,使用注射器进行补水,杯口用保鲜膜封口,并用昆虫针扎小孔透气。

1.5 两性生命表研究

将当天羽化的雌雄成虫 1:1 进行配对,12 h 后随机挑取 50 粒卵。将卵放在卷状韭菜薄片(长宽约为 1.5 cm,厚度为 1 mm)中,后埋入塑料杯两层土中间,每个处理设置 6 个重复,共 300 粒卵。将接入虫卵的塑料杯放入温度为(25 \pm 1) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 65% \pm 10%,光周期光暗比为 14 L:10 D 的光照培养箱中培养。卵和 1 龄幼虫因体积较小,需借助解剖镜观察其发育情况。每 24 h 在解剖镜下展开卷状韭菜薄片观察发育情况,及时将初孵 1 龄幼虫放置于卷状韭菜薄片转移到相同处理的新塑料杯中培养,每 24 h 观察记录幼虫发育情况;2 龄幼虫期后体积变大肉眼直接进行观察,每 24 h 观察发育情况,观察完后更换韭菜薄片。幼虫化蛹后,及时将虫蛹转移到相同处理的新塑料杯中培养,记录成虫羽化时间;成虫羽化后分别将同一天羽化的雌雄成虫按 1:1 配对,放置于产卵盒中供其产卵。试验发现,韭菜迟眼蕈蚊在土壤干旱处理中无法正常产卵,但为了观察干旱处理对成虫产卵量的影响,将不同湿度处理两个种群羽化后的成虫分别

放入装有 40% 相对含水量土壤的产卵盒中,同时放入 1 cm 长新鲜韭菜段,每 24 h 观察记录成虫的产卵数量及存活情况,直至成虫全部死亡。

1.6 土壤干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊繁殖的影响

将相对含水量为 10% 和 40% 的土壤分别放入产卵盒($d=2$ cm)中,同时放入 1 cm 长新鲜韭菜段。将 10% 相对含水量的土壤设置为两组处理,其中一组韭菜段断口用吸水纸吸水后接入当天羽化的成虫 1 对,另一组韭菜段断口不吸水接入成虫 1 对,每组处理重复 20 次。记录产卵数,观察卵的孵化情况,统计产卵率及孵化率。雌成虫死亡后进行卵巢解剖,检查并记录卵巢残留的卵数。

1.7 数据处理

依据 Chi 和 Liu (1985) 及 Chi (1988) 的理论,使用年龄-龄期两性生命表软件 TWOSEX-MSChart (Chi, 2020b) 进行分析。统计韭菜迟眼蕈蚊各个发育阶段的发育历期、产卵前期 (Adult preoviposition period, APOP, 指从雌成虫羽化至第一次产卵的历期)、总产卵前期 (Total preoviposition period, TPOP, 指新个体离开母体至第一次产卵的历期)、单雌产卵量 (Fecundity)、成虫寿命 (Adult longevity)、净生殖率 (R_0)、内禀增长率 (r)、平均世代周期 (T) 和周限增长率 (λ) 等种群参数。使用 TIMING-MSChart 程序 (Chi, 2020a) 预测 60 d 的种群动态。

种群参数计算公式如下:净增殖率 $R_0 =$

$$\sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x; \text{平均世代周期 } T = \ln R_0 / r; \text{内禀增长率 } r$$

以 Euler-Lotka 方程式 $\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1$ 求出;周

限增长率 $\lambda = e^r$ 。式中: x 为年龄 (d), l_x 为特定年龄存活率, m_x 为特定年龄繁殖力。年龄-阶段寿命期望值 (e_{xj}) 是依据 Chi 和 Su (2006) 的理论进行计算。繁殖值 (v_{xj}) 是依据 Huang 和 Chi (2011) 与 Tuan 等 (2014a, 2014b) 的公式进行计算。

使用两性生命表软件的 bootstrap 算法 ($B =$

100 000) 计算发育历期和其他种群参数的标准误, 采用 Paired bootstrap test (Wei *et al.*, 2020) ($P<0.05$) 对处理间的 bootstrap 结果进行差异显著性检验, 使用 SigmaPlot 12.0 作图。成虫干旱处理试验数据采用 SPSS20.0 统计软件进行分析, 处理间的差异显著性检验采用单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊发育历期的影响

由表 1 可以看出, 土壤干旱处理韭菜迟眼蕈蚊卵、1 龄幼虫、2 龄幼虫和蛹的发育历期分别为 5.56、5.06、4.04 和 5.32 d; 与土壤湿润处理的相比均存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 1 韭菜迟眼蕈蚊在不同含水量土壤中的发育历期
Table 1 Development duration of *Bradysia cellarum* in the soil with different water content

虫态 Stage	发育历期 (d) Developmental duration (d)	
	干旱处理 Drought treatment	湿润处理 Moist treatment
	卵 Egg	5.56±0.05 a
1 龄幼虫 1st instar larva	5.06±0.08 a	4.09±0.05 b
2 龄幼虫 2nd instar larva	4.04±0.08 a	3.23±0.04 b
3 龄幼虫 3rd instar larva	3.46±0.11 a	3.63±0.05 a
4 龄幼虫 4th instar larva	4.79±0.15 a	4.59±0.06 a
幼虫期 Larval stage	17.32±0.26 a	15.40±0.09 b
蛹 Pupa	5.32±0.12 a	3.74±0.06 b

表中数据为平均值±标准误, 同行数据后标有不同小写字母代表不同土壤含水量处理间差异显著 ($P<0.05$, paired bootstrap test)。表 2, 表 3 同。

Data are mean±SE, and followed by different lowercase letters in the same row represent significant differences between different soil moisture content treatments at 0.05 level by paired bootstrap test. The same as table 2 and table 3.

由表 2 可以看出, 土壤干旱处理的韭菜迟眼蕈蚊雌成虫寿命和雄成虫寿命分别为 3.48 d 和 3.36 d, 且显著短于土壤湿润处理的雌成虫寿命

(3.95 d) 和雄成虫寿命 (4.20 d) ($P<0.05$); 土壤干旱处理的产卵前期和总产卵前期分别为 2.48 d 和 30.90 d, 显著长于土壤湿润处理的 ($P<0.05$); 土壤干旱处理的雌虫平均产卵量为 53.86 粒, 比土壤湿润处理的 (83.84 粒) 降低 37.8%, 且二者存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 2 韭菜迟眼蕈蚊不同种群成虫在 40% 土壤相对含水量条件下的发育历期及繁殖力

Table 2 The development duration and fecundity of different population adult of *Bradysia cellarum* under 40% soil relative water content

参数 Parameters	干旱处理 Drought treatment	湿润处理 Moist treatment
雌成虫寿命 (d) Female adult longevity (d)	3.48±0.19 b	3.95±0.17 a
雄成虫寿命 (d) Male adult longevity (d)	3.36±0.10 b	4.20±0.12 a
成虫产卵前期 (d) Adults preoviposition period (d)	2.48±0.19 a	1.51±0.19 b
总产卵前期 (d) Total preoviposition period (d)	30.90±0.50 a	25.09±0.21 b
产卵量 (粒) Fecundity (grain)	53.86±6.61 b	83.84±4.86 a

表 3 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群参数的影响
Table 3 The effects of drought treatment on the population parameters of *Bradysia cellarum*

参数 Parameters	干旱处理 Drought treatment	湿润处理 Moist treatment
净增殖率 (R_0) Net reproductive rate (R_0)	3.927±0.88 b	26.830±1.23 a
平均世代周期 (T) Mean generation time (T)	31.84±1.24 a	25.83±2.35 b
内禀增长率 (r) Intrinsic rate of increase (r)	0.042 9±0.01 b	0.127 3±0.01 a
周限增长率 (λ) Finite rate of increase (λ)	1.043 9±0.01 b	1.135 8±0.01 a

2.2 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群参数的影响

土壤干旱条件下, 韭菜迟眼蕈蚊成虫因不能正常产卵而无法完成整个生活史, 但土壤干旱处理羽化的成虫在 40% 相对含水量土壤中可正常产卵。由表 3 可以看出, 干旱处理组的净增殖率 (3.927)、内禀增长率 (0.042 9) 和周限增长率

(1.043 9) 均显著低于土壤湿润处理 ($P < 0.05$); 而平均世代周期 (31.84) 显著高于土壤湿润处理组 ($P < 0.05$)。

2.3 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊存活率的影响

由图 1 可以看出, 土壤干旱处理中, 卵、

1 龄幼虫和蛹的存活率分别为 44.1%、78.0%和 81.3% (图 1: A), 而土壤湿润处理中, 卵、1 龄幼虫、蛹的存活率分别为 87.7%、89.7%和 99.5% (图 1: B)。其中, 卵期受土壤湿度影响最大, 死亡率高。由于个体之间发育速度存在差异, 所以图像呈现重叠现象。

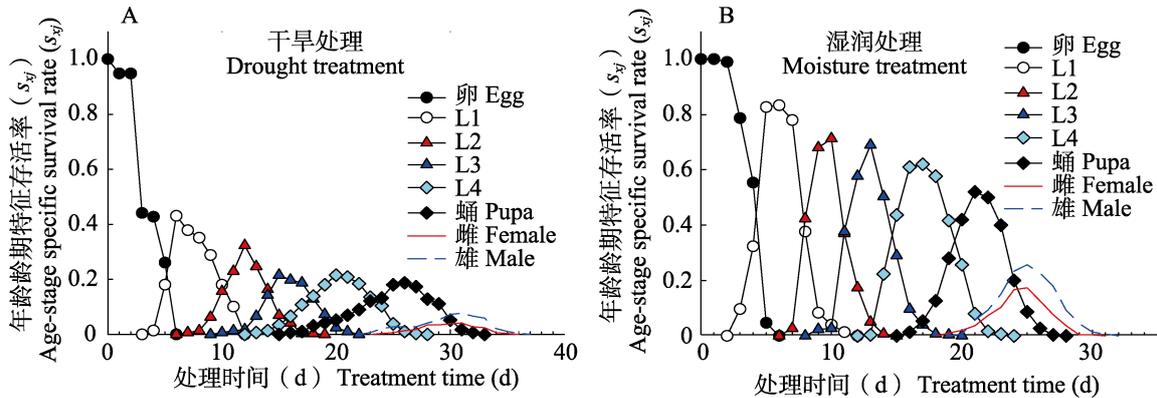


图 1 干旱处理 (A) 与湿润处理 (B) 下韭菜迟眼蕈蚊年龄-龄期存活率 (s_{xj})

Fig. 1 Age-stage survival rate (s_{xj}) of drought treatment (A) and moist treatment (B) of *Bradysia cellarum*

L1: 1 龄幼虫龄期; L2: 2 龄幼虫龄期; L3: 3 龄幼虫龄期; L4: 4 龄幼虫龄期。图 3, 图 4, 图 5 同。

L1: 1st larval instar; L2: 2nd larval instar; L3: 3rd larval instar; L4: 4th larval instar. The same as Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5.

2.4 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群年龄特征存活率和繁殖力的影响

由图 2 可以看出, 在土壤干旱处理组中, l_x 线前期下降的非常快, 表明在土壤干旱胁迫下卵的孵化率较低 (图 2: A), 土壤湿润处理组前期也有小幅度下降, 表明卵期受影响较大 (图 2:

B)。两组处理的雌成虫繁殖力 (f_{x7})、种群繁殖力 (m_x) 和种群净繁殖力 ($l_x m_x$) 呈先低后高的趋势; 土壤湿润处理组的繁殖力参数值均高于土壤干旱处理组, 土壤湿润处理组的繁殖力曲线 (f_{x7} , m_x , $l_x m_x$) 自第 18 天开始, 到第 31 天结束; 而土壤干旱处理组的繁殖力曲线自第 26 天开始, 到第 36 天结束, 表明湿润处理组的繁殖较快。

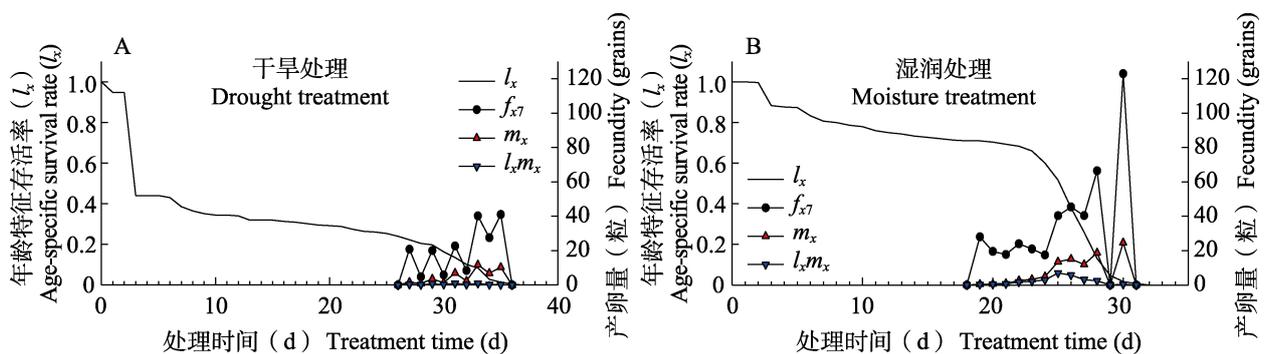


图 2 干旱处理 (A) 和湿润处理 (B) 韭菜迟眼蕈蚊种群年龄特征存活率 (l_x)、雌虫繁殖力 (f_{x7})、年龄特征繁殖力 (m_x) 及特征年龄繁殖值 ($l_x m_x$)

Fig. 2 Age-specific survival rate (l_x), age-stage specific fecundity (f_{x7}), age-specific fecundity (m_x), and age-specific maternity ($l_x m_x$) of drought treatment (A) population and moist treatment (B) population of *Bradysia cellarum*

2.5 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊寿命期望值的影响

由图 3 (A, B) 可以看出, 土壤干旱处理组的韭菜迟眼蕈蚊新生卵预期寿命为 12 d, 而土壤湿润处理的新生卵预期寿命为 21 d, 土壤干旱处理组的卵期和幼虫期的特征寿命期望值先低后高, 说明土壤干旱处理组前期有较高的死亡率。土壤干旱处理组最大寿命期望值出现在 2 龄幼

虫期, 而湿润处理最大寿命期望值出现在卵期。

2.6 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群繁殖值的影响

由图 4 可以看出, 韭菜迟眼蕈蚊的繁殖期望值随着天数的增加而增加, 雌虫羽化后, 繁殖期望值达到最大, 土壤干旱处理组的最高值出现在第 34 天, 为 53 粒 (图 4: A), 土壤湿润处理组的最高值出现在第 30 天, 为 123 粒 (图 4: B)。

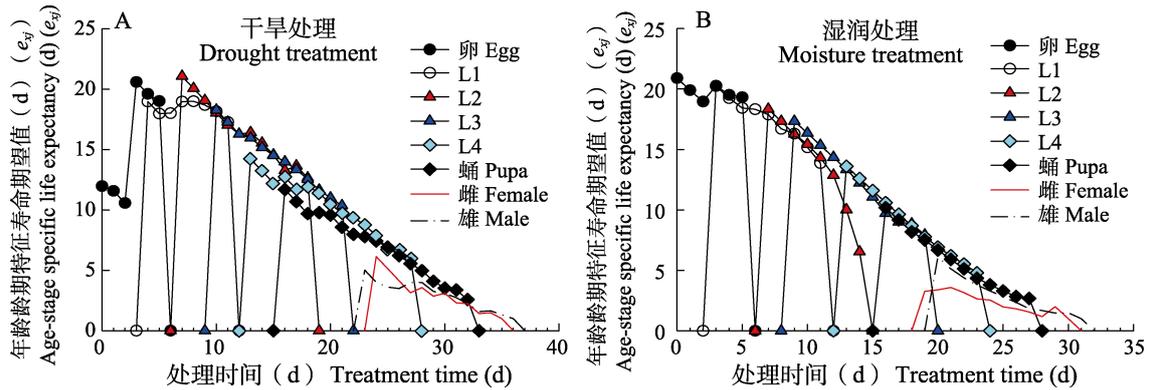


图 3 干旱处理 (A) 与湿润处理 (B) 下韭菜迟眼蕈蚊种群年龄-龄期寿命期望 (e_{xj})
Fig. 3 Age-stage specific life expectancy (e_{xj}) of drought treatment (A) population and moist treatment (B) population of *Bradysia cellarum*

2.7 干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群消长趋势的影响

由图 5 (A, B) 可以看出, 韭菜迟眼蕈蚊在不同土壤含水量条件下种群消长动态差异明显。60 d 后干旱处理组种群正处在第 2 代成虫羽化产卵高峰期, 而土壤湿润处理组种群处在第 2 代成

虫末期, 并出现了第 3 代卵、1 龄幼虫、2 龄幼虫、3 龄幼虫、4 龄幼虫和蛹, 且都处于快速增长期; 且在不同土壤含水量条件下的种群消长数量也不同, 干旱处理组第 3 代卵数量为 409 粒, 而湿润处理组卵数量达到 1 082 粒, 经过土壤干旱处理组的种群发生程度要远远地低于土壤湿润处理组。

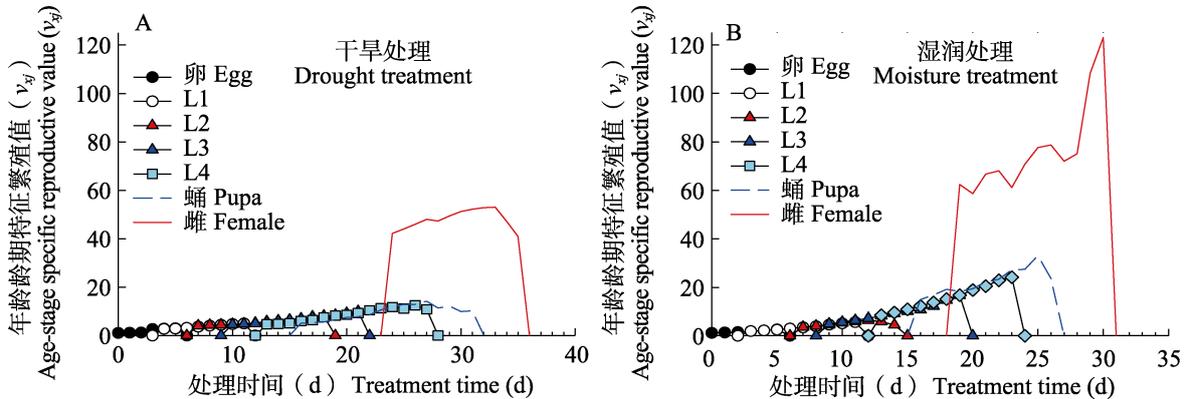


图 4 干旱处理 (A) 与湿润处理 (B) 下韭菜迟眼蕈蚊种群年龄-龄期特征繁殖值 (v_{xj})
Fig. 4 Age-stage reproductive value (v_{xj}) of drought treatment (A) population and moist treatment (B) population of *Bradysia cellarum*

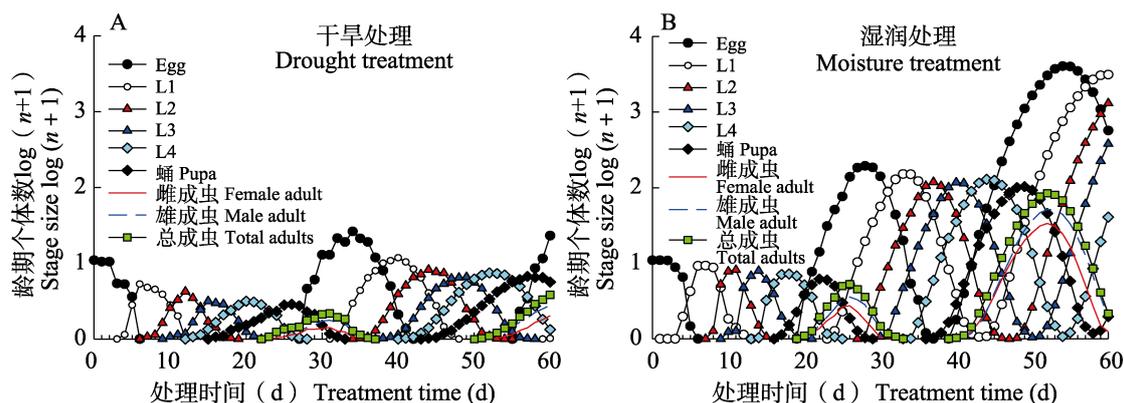


图 5 干旱处理 (A) 与湿润处理 (B) 下韭菜迟眼蕈蚊种群消长趋势

Fig. 5 The population growth and decline trend of *Bradysia cellarum* under drought treatment (A) and moist treatment (B)

2.8 干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊繁殖的影响

由表 4 可以看出, 土壤干旱处理下成虫的平均产卵量、产卵率非常低。饲喂韭菜未经吸水处理的雌成虫产卵量、产卵率和卵的孵化率分别为 3.80 粒、15% 和 41.77%; 而当饲喂韭菜段经吸水

处理后, 雌成虫产卵量、产卵率和卵的孵化率分别为 1.30 粒, 5% 和 0; 土壤湿润处理下的成虫产卵量为 85.50 粒, 产卵率为 100%, 且卵的孵化率为 82.62%。两组土壤干旱处理成虫卵巢中残存卵量分别为 26.10 粒和 23.40 粒, 显著高于土壤湿润处理 (5.60 粒) ($P < 0.05$)。

表 4 干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊繁殖的影响

Table 4 The effect of drought stress on the fertility of *Bradysia cellarum*

土壤相对含水量 Soil relative moisture	产卵量 (粒) Fecundity (grains)	产卵率 (%) Oviposition rate (%)	残存卵量 (粒) Remaining eggs (grains)	卵孵化率 (%) Hatching rate (%)
10% (吸水处理 Water uptake treatment)	1.30±1.30 b	5	26.10±1.61 a	0±0 c
10%	3.80±2.60 b	15	23.40±1.80 a	41.77±0.02 b
40%	85.5±2.13 a	100	5.60±2.16 b	82.62±0.01 a

表中数据为平均值±标准误, 同列数据后标有不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 多重检验)。Data are mean±SE, and followed by different lowercase letters in the same column represent significant differences between different treatments at 0.05 level by Duncan's multiple range test.

3 讨论

土壤含水量影响昆虫的生长发育和存活。韩云等 (2015) 对豆大蓟马 *Megalurothrips usitatus* Bagrall 研究发现, 5% 土壤含水量显著延长其蛹的发育历期并降低蛹的羽化率; 刘旭等 (2019) 研究发现土壤含水量不适会延长眼斑芜菁 *Mylabris cichorii* Linnaeus 的发育历期, 并导致幼虫存活率明显下降。本研究表明土壤干旱胁迫对韭菜迟眼蕈蚊的卵、幼虫、蛹和成虫都会产生不利影响, 各虫态存活率下降, 这可能是因为昆

虫在逆境下取食行为减少, 同时需要消耗更多的能量以维持机体正常代谢 (Krebs and Holbrook, 2001), 导致其发育历期延长, 存活率降低。

湿度对昆虫繁殖具有重要意义, 湿度不适宜会导致昆虫繁殖力下降。土壤湿度过低对大黑腮金龟 *Holotrichia olita* 卵巢发育不利, 导致产卵量下降 (郑方强等, 1996); 台湾缺痣 *Forcipomyia taiwana* Shiraki 在土壤含水量低于 10% 时雌蠓不在此土壤产卵 (陈家慧等, 2021); 梨小食心虫 *Grapholitha molesta* Busck 在室内相对湿度 25% 时其产卵量和孵化率最低 (庾琴等, 2017)。湿

度是影响韭菜迟眼蕈蚊种群的重要因素,成虫仅靠补充水分便可交配产卵是其种群大规模发生的原因之一(周仙红等,2016)。我们的研究结果表明土壤干旱条件下羽化的成虫无法产卵,但成虫转移至土壤湿润条件下后,便可正常产卵,但其产卵量比土壤湿润处理降低了37.8%,说明土壤干旱胁迫对成虫的繁殖能力造成影响。如果成虫期处在在土壤干旱胁迫条件下其产卵量显著下降,即使产卵,卵也无法孵化。研究结果与已报道的结果相似,但是其调控机制尚需进一步研究。

生命表种群参数是预测昆虫未来种群动态的重要参数,昆虫在不利于其种群发展的环境条件下其种群参数较低。Yang等(2015)研究发现在70%-80%的空气湿度范围内,韭菜迟眼蕈蚊内禀增长率(r)、周限增长率(λ)以及净增殖率(R_0)最高,平均世代时间(T)最短;He等(2021)发现草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 在80%相对空气湿度下其种群参数最高,而在20%相对空气湿度下种群参数最低。我们研究结果表明,土壤干旱处理下的韭菜迟眼蕈蚊种群净增殖率(R_0)、内禀增长率(r)及周限增长率(λ)显著降低。本研究利用Timing软件分析结果表明,干旱胁迫抑制了韭菜迟眼蕈蚊种群的发展,韭菜迟眼蕈蚊在受到土壤干旱胁迫时会导致种群数量显著下降,即使在幼虫期遭遇土壤干旱胁迫,其繁衍3代后,种群数量仅为土壤湿润处理的1/3左右。

控水技术在韭菜迟眼蕈蚊防控中具有成本低、周期短、见效快等优点。在设施生产中,韭菜迟眼蕈蚊发生高峰期为11月-翌年5月(祝国栋等,2017),韭菜收割期一般为12月-1月左右,其余皆为养根阶段,若在养根期进行合理控水,使土壤湿度保持较低的水平使其不利于成虫产卵和幼虫存活,则可以有效压低虫口数量,实现对韭菜迟眼蕈蚊的防控,但控水后对韭菜产量品质是否产生影响还应进一步研究。在生产过程中,根据韭菜生育周期和韭菜迟眼蕈蚊发生动态,合理选择控水尺度。在韭菜露天生产中,可用防雨布进行防雨处理,根据往年种群发生动态提前进

行控水,使大田湿度在韭菜迟眼蕈蚊发生盛期不适宜其发生,实现对韭菜迟眼蕈蚊的绿色防控。

参考文献 (References)

- Chen FJ, 2001. Effect of soil moisture on the growth, survival and reproduction of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [陈法军, 2001. 蛹期土壤水分状况对棉铃虫生长发育和繁殖的影响. 硕士毕业论文. 南京: 南京农业大学.]
- Chen JH, Liu Y, Xie KQ, Gong L, Zhang SH, Jia FL, 2021. Effects of soil humidity on the oviposition and larval development of the *Forcipomyia taiwana* (Shiraki). *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*, 60(4): 12–18. [陈家慧, 刘阳, 谢恺琪, 龚理, 张韶华, 贾凤龙, 2021. 土壤湿度对台湾狭螽 *Forcipomyia taiwana* (Shiraki)产卵与幼虫发育影响. 中山大学学报(自然科学版), 60(4): 12–18.]
- Chi H, 1988. Life-Table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals. *Environmental Entomology*, 17(1): 26–34.
- Chi H, 2020a. TIMING-MSChart: A computer program for the population projection based on age-stage, two-sex life table. <http://140.120.197.173/Ecology/Download/Timing-MSChart.rar>.
- Chi H, 2020b. TWSEX-mschart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. [Http://140.120.197.173/Ecology/Download/ Two sex-ms chart.rar](http://140.120.197.173/Ecology/Download/Two%20sex-ms%20chart.rar).
- Chi H, Fu JW, You MS, 2019. Age-stage, two-sex life table and its application in population ecology and integrated pest management *Acta Entomologica Sinica*, 62(2): 255–262. [齐心, 傅建伟, 尤民生, 2019. 年龄-龄期两性生命表及其在种群生态学与害虫综合治理中的应用. 昆虫学报, 62(2): 255–262.]
- Chi H, Liu H, 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology Academia Sinica*, 24(2): 225–240.
- Chi H, Su HY, 2006. Age-stage, two-sex life tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with mathematical proof of the relationship between female fecundity and the net reproductive rate. *Environmental Entomology*, 35(1): 10–21.
- Han Y, Tang LD, Fu BL, Qiu HY, Wu JH, Liu K, 2015. The influences of different soil moisture and type on pupation and eclosion of *Megalurothrips usitatus*. *Journal of Environmental Entomology*, 37(4): 710–714. [韩云, 唐良德, 付步礼, 邱海燕, 吴建辉, 刘奎, 2015. 土壤含水量和土壤类型对豆大蚜马蛴期发育和羽化的影响. 环境昆虫学报, 37(4): 710–714.]
- 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.
- Huang YB, Chi H, 2011. The age-stage, two-sex life table with an offspring sex ratio dependent on female age. *Journal of Agriculture and Forestry*, 60(4): 337–345.
- Krebs RA, Holbrook SH, 2001. Reduced enzyme activity following Hsp70 overexpression in *Drosophila melanogaster*. *Biochemical Genetics*, 39(1): 73–82.
- 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.]
- Liu X, Luo XG, Yang G, Liu CH, Chen S, Chen QD, Li C, Yi CY, 2019. Effects of temperature and soil water content on development of *Mylabris cichorii*. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 32(12): 2896–2899. [刘旭, 罗孝贵, 杨刚, 刘昌华, 陈松, 陈庆东, 李超, 易春燕, 2019. 温度和土壤含水量对眼斑芜菁生长发育的影响. *西南农业学报*, 32(12): 2896–2899.]
- Mei ZX, Wu QJ, Zhang YJ, Hua L, 2003. The biology, ecology and management of *Bradysia odoriphaga*. *Entomological Knowledge*, 40(5): 396–398 [梅增霞, 吴青君, 张友军, 花蕾, 2003. 韭菜迟眼蕈蚊的生物学、生态学及其防治. *昆虫知识*, 40(5): 396–398.]
- Shi CH, Yang YT, Han HL, Cheng JX, Wu QJ, Xu BY, Zhang YJ, 2016. Population dynamics and summer and winter habitats of *Bradysia odoriphaga* in the Beijing area. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(6): 1174–1183. [史彩华, 杨玉婷, 韩昊霖, 程佳旭, 吴青君, 徐宝云, 张友军, 2016. 北京地区韭菜迟眼蕈蚊种群动态及越冬越冬场所调查研究. *应用昆虫学报*, 53(6): 1174–1183.]
- Sun LJ, Chen JM, Zheng CY, 2019. Effect of drought during the root nourishing period of Chinese chives on the population dynamics of the chive gnat, *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(3): 351–357. [孙丽娟, 陈杰民, 郑长英, 2019. 韭菜养根期干旱处理对韭菜迟眼蕈蚊种群动态的影响. *昆虫学报*, 62(3): 351–357.]
- Tuan SJ, Lee CC, Chi H, 2014a. Erratum: Population and damage projection of *Spodoptera litura* (F.) on peanuts (*Arachis hypogaea* L.) under different conditions using the age-stage, two-sex life table. *Pest Management Science*, 70(5): 1936.
- Tuan SJ, Lee CC, Chi H, 2014b. Population and damage projection of *Spodoptera litura* (F.) on peanuts (*Arachis hypogaea* L.) under different conditions using the age-stage, two-sex life table. *Pest Management Science*, 70(5): 805–813.
- Wei MF, Chi H, Guo YF, Li XW, Zhao LL, Ma RY, 2020. Demography of *Cacopsylla chinensis* (Hemiptera: Psyllidae) reared on four cultivars of *Pyrus bretschneideri* and *P. communis* (Rosales: Rosaceae) pears with estimations of confidence intervals of specific life table statistics. *Journal of Economic Entomology*, 113(5): 2343–2353.
- Xu ZS, 2015. Effects of temperature on storage proteins of *Bradysia odoriphaga* and of soil water content on the survival and reproduction of the pest. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [徐志松, 2015. 温度对韭菜迟眼蕈蚊储存蛋白的影响和土壤含水量对该害虫生存与生殖的影响. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Xue M, Wang YX, 2002. Study on the insecticides of controlling *Bradysia odoriphaga* and unpolluting vegetable. *Pesticides*, 41(5): 29–31. [薛明, 王永显, 2002. 韭菜迟眼蕈蚊无公害治理药剂的研究. *农药*, 41(5): 29–31.]
- Yang YT, Li WX, Xie W, Wu QJ, Xu BY, Wang SL, Li CR, Zhang YJ, 2015. Development of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae) as affected by humidity: An age-stage, two-sex, life-table study. *Applied Entomology and Zoology*, 50(1): 3–10.
- Yu Q, Feng YT, Guo XJ, Guo GM, Hao C, Fan RJ, 2017. Effects of humidity on the survival and fecundity of *Grapholitha molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(6): 659–665. [庾琴, 封云涛, 郭晓君, 郭贵明, 郝赤, 范仁俊, 2017. 湿度对梨小食心虫存活和繁殖的影响. *昆虫学报*, 60(6): 659–665.]
- Zheng FQ, Fan YG, Feng JX, 1996. Effects of soil moisture on reproduction of *Holotrichia oblitata* Falderman. *Entomological Knowledge*, 33(3): 160–162. [郑方强, 范永贵, 冯居贤, 1996. 土壤含水量对大黑鳃金龟生殖的影响. *昆虫知识*, 33(3): 160–162.]
- Zhou XH, Cao X, Shen YF, Zhuang QY, Zhang SC, Yu Y, Zhang AS, 2016. Effects of supplementary nutrition and water on the reproduction and longevity of *Bradysia odoriphaga*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(6): 1205–1210. [周仙红, 曹雪, 沈一凡, 庄乾营, 张思聪, 于毅, 张安盛, 2016. 营养物质和水分对韭菜迟眼蕈蚊成虫繁殖和寿命的影响. *应用昆虫学报*, 53(6): 1205–1210.]
- Zhu GD, Li ZX, Wang CX, Ma C, Liu F, Ji GX, Xue M, 2017. Occurrence of *Bradysia odoriphaga* on Chinese chives under different protected cultivations and its influencing environmental factors. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(10): 134–139. [祝国栋, 李朝霞, 王承香, 马冲, 刘芳, 纪桂霞, 薛明, 2017. 不同设施栽培韭菜韭蛆的发生规律及其影响的环境因素. *中国农学通报*, 33(10): 134–139.]