

DOI: 10.5846/stxb201709221699

梁霞, 赵贝, 李媛, 胡祖庆, 赵惠燕. 紫外长期胁迫对高世代麦长管蚜生命表参数的影响. 生态学报, 2018, 38(17): - .

Liang X, Zhao B, Li Y, Hu Z Q, Zhao H Y. Effects of ultraviolet continuous processing on life table parameters of high generations of *Sitobion avenae* (Fabricius). Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

紫外长期胁迫对高世代麦长管蚜生命表参数的影响

梁霞, 赵贝, 李媛, 胡祖庆, 赵惠燕*

西北农林科技大学植物保护学院, 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 为了评估紫外连续处理对第 20 代以后麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fabricius) 种群动态的影响, 采用特定年龄生命表方法, 设置不同强度 (0, 0.50, 0.70 mW/cm²) UV-B 连续多代处理麦长管蚜成虫, 统计经紫外处理后的麦长管蚜第 22 代, 第 27 代, 第 32 代, 第 37 代麦长管蚜生命表种群参数的变化并总结了 1—37 代麦长管蚜内禀增长率的变化规律。结果表明: (1) 处理组供试麦长管蚜平均世代周期 (T) 呈先显著升高后下降的趋势。(2) 低强度处理组内禀增长率 (r_m)、净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ) 均呈先升高后下降又升高的趋势, 高强度处理组供试麦长管蚜内禀增长率 (r_m)、净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ) 呈先下降后显著升高的趋势, 且均在 G37 达到最大值。(3) 1—37 代处理组麦长管蚜 r_m 呈现先显著增高后下降又升高又下降又显著升高的变化规律, 且均在 G37 达到最大值。由此可见: 麦长管蚜经过多代的 UV-B 胁迫后, 对其生命表参数的影响依然显著, 在 G37 麦长管蚜对紫外的适应能力最强。本研究的创新点在于解析了第 22 代以后紫外胁迫对麦长管蚜种群动态的影响, 从而为全面深入的阐述紫外胁迫对麦长管蚜生长繁殖的影响规律, 掌握不同紫外胁迫下的剂量效应关系及麦长管蚜的适应性提供实验基础和理论依据。

关键词: 麦长管蚜; UV-B 辐射; 存活率; 生殖价值; 生命表

Effects of ultraviolet continuous processing on life table parameters of high generations of *Sitobion avenae* (Fabricius)

LIANG Xia, ZHAO Bei, LI Yuan, HU Zuqing, ZHAO Huiyan

State Key Laboratory of Crop Stress in Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

Abstract: With the appearance of the hole in the ozone and depletion of the stratosphere and the ozone, there is increasing concern about the changing trend in UV-B radiation levels and the impact of increased UV-B on organisms and ecosystems. As the environment is continuously being destroyed, irradiation intensity of UV-B has been enhanced. The aphid, *Sitobion avenae* (Fabricius), belonging to the suborder Homoptera, and the family Aphididae, is distributed in wheat-producing regions in China. Aphids are parasites of wheat, barley and oats, rice, corn, sugar cane, and grasses in southern China. In the early stages, aphids accumulate on the front or back of leaves, and in the later stages, they accumulate in ear to suck out the fluid, causing the injured plant to experience reduced growth, tiller reduction, 1000-grain weight. Aphids are an important pest in grain crops, which are also the dominant plants attacked by aphids that have a short growth cycle, breed quickly, and are highly adaptable. Studies on the effects of UV-B on insects are rare. Thus, additional studies are required to predict the effect of increased UV-B irradiation on the genetic evolution of *S. avenae*. In order to investigate the effects of ultraviolet continuous processing on the population dynamics of *S. avenae* after the 20th generation, we adopted certain age life tables to calculate the *S. avenae* life table parameters and used different strength UV-B (0, 0.50, and 0.70 mW/cm²)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (39970112, 20470268); 高校博士点基金 (20130204110004); 陕西省科技厅国际合作项目 (2012)

收稿日期: 2017-09-22; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohy@nwsuaf.edu.cn

to treat *S. avenae* after the 20th generation. This analysis was intended to provide a theoretical foundation for understanding the long-term development, growth, and reproduction of *S. avenae*. Changes in the population parameters of the 22nd generation, the 27th generation, the 32nd generation, the 37th generation, and the intrinsic rate of increase from the first generation to the 37th generation of the aphid were studied. The results showed that: (1) The average generation cycle (T) of treatments significantly increased and then decreased; (2) in the low-intensity treatment group, intrinsic rate of increase, net appreciation rate, and weekly growth rate increased first and then decreased, before increasing again; in the high-intensity treatment group, net appreciation rate, weekly growth rate, and fecundity decreased first and then significantly increased, and they all reached the maximum in the 37th generation; and finally, (3) in the treatment group, the intrinsic rate of increase of the aphids significantly increased and then decreased twice and then significantly increased. Our study showed that after several generations of UV-B stress, the effect on the life table parameters was significant and the ability of aphids to adapt to UV radiation was strongest in the 37th generation. The aim of this study was to reveal and analyze the effects of UV stress on population dynamics of *Sitobion avenae* after the 22nd generation. Consequently, our data provide a long-term and in-depth understanding of the developmental effects of UV stress on the growth and reproduction of *Sitobion avenae*. In addition, the findings provide experimental and theoretical bases for elucidating the dose-effect relationship under different ultraviolet stress levels and the adaptability of a long-tube aphid to increased UV-B levels.

Key Words: *Sitobion avenae*; UV-B radiation; survival rate; reproductive value; life table

UV-B 波长在 290—315 nm 之间,是到达生物圈的很重要的太阳光谱^[1]。随着 20 世纪 80 年代中期南极地区臭氧层空洞和平流层臭氧层损耗的出现,人们对 UV-B 辐射水平的变化趋势以及 UV-B 对生物和生态系统的影响越来越关注^[2-4]。由于工业废气的污染,大气中的臭氧层逐渐变薄,试验证明大气中臭氧每减少 1%,照射到地面的 UV-B 就增加 2%,过量的紫外线进入生物圈,势必对生物产生强大的选择压力^[5]。有研究证实中纬度地区的日常 UV-B 辐射水平可以影响浮游植物的能动性^[6]、浮游植物和大型海藻的产量^[7-8],以及植物和植食性动物之间的互作^[9]。UV-B 辐射减少了曼陀罗植物白天幼苗的出现、抑制了茎的伸长,增加了 DNA 损伤^[10]。有关 UV-B 对昆虫的影响研究并不多见;研究表明,UV-B 对昆虫具有直接影响和间接影响两方面^[11]:直接影响表现为紫外辐射可被昆虫识别、接收并转变成特定行为反应而影响昆虫的定位、飞行、取食及两性间的交互作用^[5,12-13];UV-B 对昆虫的间接影响表现为寄主植物、微生物介导的 UV-B 对昆虫的影响。UV-B 增强对植物的形态建成、生长发育及生理生化有着深刻的影响^[14-15],植物的这种变化必然影响到昆虫的生存环境和食物的供应,从而间接影响昆虫种群^[16],UV-B 增强和 O₃ 浓度升高共同作用也可能提高植物的抗虫害能力^[14]。

麦长管蚜, *Sitobion avenae* (Fabricius) 是小麦生产中最重要害虫之一,不仅在穗部直接刺吸汁液,导致千粒重下降,同时传播病毒病,每年造成小麦产量损失 15%—30%,严重时达 60%,特别是蚜虫为典型的 R 对策特征:个体小、生命周期短、繁殖快、繁殖量大、能短时间适应新的不利环境。当全球气候变暖、紫外线增强时蚜虫能很快适应这种环境而进化。然而,多大的紫外线强度、多长照射时间、经历多少世代蚜虫适应这种紫外线的增强而进化目前还不清楚。本研究团队前期进行了不同紫外线强度、不同照射时间、照射强度与照射时间交互作用等研究,确立了 0.2, 0.75 mW/cm² 代表当今全球紫外线平均强度和未来全球温度上升 3 摄氏度时的紫外线前度试验条件,在这个条件下团队已经研究了 17 个世代蚜虫的适应性^[17-18]。后续世代蚜虫是否已经适应了这种环境条件,正是本研究的科学问题。

为了探明紫外连续胁迫 20 代以后对麦长管蚜的影响,本研究从第 17 代麦长管蚜 1 龄若蚜开始,用生命表的方法继续探索紫外线对麦长管蚜的影响,以期提前预测在全球气候变化导致的紫外辐射强度升高的情况下麦长管蚜是如何适应变异及遗传进化的规律,从而为逆境胁迫下蚜虫的生态遗传与进化机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试虫源

供试麦长管蚜为西北农林科技大学昆虫生态学实验室提供的单克隆种群,经过不同紫外强度(0, 0.50 mW/cm²和 0.70 mW/cm²)连续处理 3d 的第 16 代麦长管蚜成蚜所产 1 龄若虫(1—37 代麦长管蚜成蚜均经相同紫外处理),饲养条件:温度为 21℃;光周期为 16 L: 8 D;湿度(60±5)%。17 代以后麦长管蚜的处理条件、饲养环境与前 16 代相同^[19]。

1.1.2 供试小麦品种

小麦品种为矮抗 58,由西北农林科技大学农学院提供。剪取 14 日龄的未经紫外处理的小麦叶片(二叶期至三叶期)用于饲喂麦长管蚜,小麦生长条件同麦长管蚜。

1.2 紫外辐射处理

试验处理选用普通日光灯管及紫外灯管(YZ10-58W 313 nm,中国上海荣波有限公司)作为光源,高强度辐射组(0.70 mW/cm²)采用 3 支同样规格的紫外灯管及普通日光灯,低强度辐射组(0.50 mW/cm²)(全球温度上升 2 度时的紫外线强度)则采用 2 支紫外灯管和普通日光灯,对照组采用普通日光灯管作为光源,其中紫外灯管都均匀分布在普通灯管中间,普通日光灯管用滤光器 UVILEXTM 390 Z(SCHOTT Inc,中国上海)去除灯光中的紫外线,且对紫外灯使用 Schott N-WG280 滤光膜罩上使其所发光线中只有 UV-B 波段的光可以透过。各处理中白光强度均为 75 μmol 光子 m⁻² · s⁻¹[光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)],UV-B 辐射强度采用 UV-B 测量仪(VLX-3W, Vilber Lourmat Inc.,法国托尔西)测量。试验麦长管蚜置于培养皿中,培养皿置于灯管下方 30 cm 处,每代成虫分别在低强度和高强度紫外光下辐照 48 h(每天 16 h),待紫外处理后,将培养皿转移到普通日光灯对照组下进行饲养。

1.3 生命表研究

放置一层沾湿滤纸于培养皿(直径 60 mm, NEST 生物技术有限公司)中,挑取新鲜小麦叶片于滤纸上,将不同紫外强度处理 48 h(每天 16 h)下的麦长管蚜成虫取出,当天所产 1 龄若蚜于小麦叶片上进行单头饲养,每个处理设置 3 个重复,每个重复 20 头蚜虫。每天定时记录其蜕皮、生长及产仔情况,待麦蚜发育至成虫产仔时,将每天所产仔蚜计数后移出培养皿,定时更换新鲜的小麦叶片。

1.4 数据处理

采用 TWOSEX-MSChart^[20]的方法统计存活率、生殖价值(v_{xj})(表示年龄 x 阶段 j 的个体对未来种群的贡献)、平均世代周期(T)、内禀增长率(r_m)、净增殖率(R_0)、周限增长率(λ),将所得的生命表数据采用 IBM SPSS Statistics 20 分别对不同紫外强度和世代进行单因素方差分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)采用 Student-Newman-Keuls(SNK)多重比较检验法进行多重比较,各处理间的显著性差异均设为 $P < 0.05$ 水平,用 Sigma Plot 12.5、Mathematica 作图。

存活曲线应用威布尔(Weibull)模型^[21]进行拟合,公式为: $S_p(t) = \exp[-(t/b)^c]$,其中 t 表示存活时间, b 为尺度参数, c 为形状参数。当 $c > 1$ 时,存活曲线为 I 型;当 $c = 1$ 时,存活曲线为 II 型;当 $c < 1$ 时,存活曲线为 III 型。如果 c 值相同, b 值越大,存活率越高。

2 结果与分析

2.1 不同辐射强度下 UV-B 对麦长管蚜存活的影响

麦长管蚜存活曲线形状参数(c)均大于 1,说明在此紫外胁迫条件下死亡主要发生在生长发育后期。同一世代不同紫外处理条件下,除第 22 代处理组的尺度参数(b)显著小于对照组外,其余各世代处理组的尺度参数(b)均大于对照组,表明:长期紫外照射后,蚜虫的抗性提高,存活率增大,适应性增强。分析不同世代的

b 值发现:低强度处理下不同世代 b 值先增大后减小,说明存活率呈现先升高后下降的趋势,在第 27 代达到最大值且与第 32 代、第 37 代间差异不显著;高强度处理下 b 值一直呈现增大趋势,说明随着世代的延续存活率呈递增趋势,适应性增加(表 1)。

表 1 不同世代及辐射强度下蚜虫生存曲线 Weibull 模型 $S_p(t) = \exp[-(t/b)^c]$ 的参数估计

Table 1 Estimation of Weibull model's parameters at different generations and different intensities of UV-B radiation

参数 Parameters	世代 Generation	辐射强度 UV-B intensity/(mW/cm ²)		
		0	0.5	0.7
b	22	17.9535±0.30430aB	16.1281±0.19302bB	14.4557±0.13107cC
	27	16.0826±0.31566cC	20.6411±0.17457aA	18.6556±0.05515bB
	32	17.8344±0.17613bB	20.1561±0.15052aA	19.8709±0.45311aA
	37	19.3908±0.47098aA	20.1654±0.17741aA	20.7509±0.30910aA
c	22	5.5259±0.15339aA	4.0200±0.05347bB	5.2566±0.02057aA
	27	5.7513±0.09586aA	3.1989±0.11395bC	3.1650±0.13391bC
	32	4.6404±0.26733aB	3.7240±0.03166bB	3.0037±0.04536cC
	37	3.5077±0.11629bC	4.5600±0.19595aA	4.9083±0.05943aB

表中数据为平均值±标准误, n 为 3 次重复。数据后不同大写字母表示同一 UV-B 辐射强度下,不同世代间的显著性差异,不同小写字母表示不同 UV-B 辐射强度下,同一世代间的显著性差异(Student-Newman-Keuls 检验, $P<0.05$, one-way ANOVA)

2.2 UV-B 辐射对麦长管蚜各阶段生殖价值的影响

不同强度 UV-B 辐射下,麦长管蚜各阶段生殖价值随龄期增加而增大,且在成蚜期为最大值,即成蚜期对未来种群的贡献最大。不同处理同一世代条件下,随着世代的升高,在 G32、G37 成蚜期生殖价值高强度处理组大于低强度处理组大于对照组。同一处理不同世代条件下,低强度处理组成蚜期生殖价值先升高后下降再升高的马鞍形规律,在 G37 时值最大为 11 头/成蚜,高强度处理组成蚜期生殖价值先降低再升高,在 G37 时值最大为 12 头/成蚜。同一处理不同世代,随世代的升高,成蚜贡献期间先升高后下降(图 1)。

2.3 不同强度紫外处理后麦长管蚜不同世代种群参数变化

从表 2 不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜子代种群参数的比较可以看出:同一世代,不同 UV-B 辐射强度下,麦长管蚜种群生态学参数内禀增长率(r_m)和周限增长率(λ)受不同强度 UV-B 处理第 27 代处理组显著

表 2 不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜子代种群参数的比较

Table 2 Comparison of the population parameters of filial generation of *Sitobion avenae* exposed to different intensities of UV-B radiation

参数 Parameters	世代 Generation	辐射强度 UV-B intensity/(mW/cm ²)		
		0	0.5	0.7
内禀增长率(r_m)	G22	0.2686±0.00722aA	0.2223±0.00957bC	0.2497±0.00734abB
Intrinsic rate of increase	G27	0.2687±0.00203aA	0.2435±0.00457bB	0.1903±0.00790cD
	G32	0.2170±0.00409aB	0.2052±0.00199bC	0.2192±0.00274aC
	G37	0.2199±0.00349cB	0.2665±0.00279bA	0.2846±0.00423aA
净增殖率(R_0)	G22	21.2680±0.95409aA	13.3548±0.99339bC	15.3564±0.81248bC
Net reproductive rate	G27	17.5607±0.47306bB	25.2542±1.24262aA	14.3637±0.64644cC
	G32	15.1862±0.30045cB	18.2180±0.70358bB	21.3043±0.88265aB
	G37	18.0724±1.31137cB	25.0371±1.10077bA	30.9074±0.79566aA
平均世代周期(T)	G22	11.3670±0.19372aC	11.5673±0.16775aD	10.8747±0.18660aC
Mean generation time	G27	10.6260±0.05700cD	13.1827±0.08437bB	13.8903±0.55203aA
	G32	12.4787±0.17409bB	14.0540±0.10104aA	13.8653±0.35341aA
	G37	13.0577±0.14584aA	12.0563±0.03956bC	12.0410±0.11238bB
周限增长率(λ)	G22	1.3083±0.00940aA	1.2492±0.01200bC	1.2839±0.00939abB
Finite rate of increase	G27	1.3085±0.00265aA	1.2759±0.00584bB	1.2098±0.00958cD
	G32	1.2425±0.00509aB	1.2279±0.00244bC	1.2452±0.00341aC
	G37	1.2461±0.00434cB	1.3055±0.00365bA	1.3294±0.00562aA

G22: 第 22 代, the 22nd generation; G27: 第 27 代, the 27th generation; G32: 第 32 代, the 32nd generation; G37: 第 37 代, the 37th generation

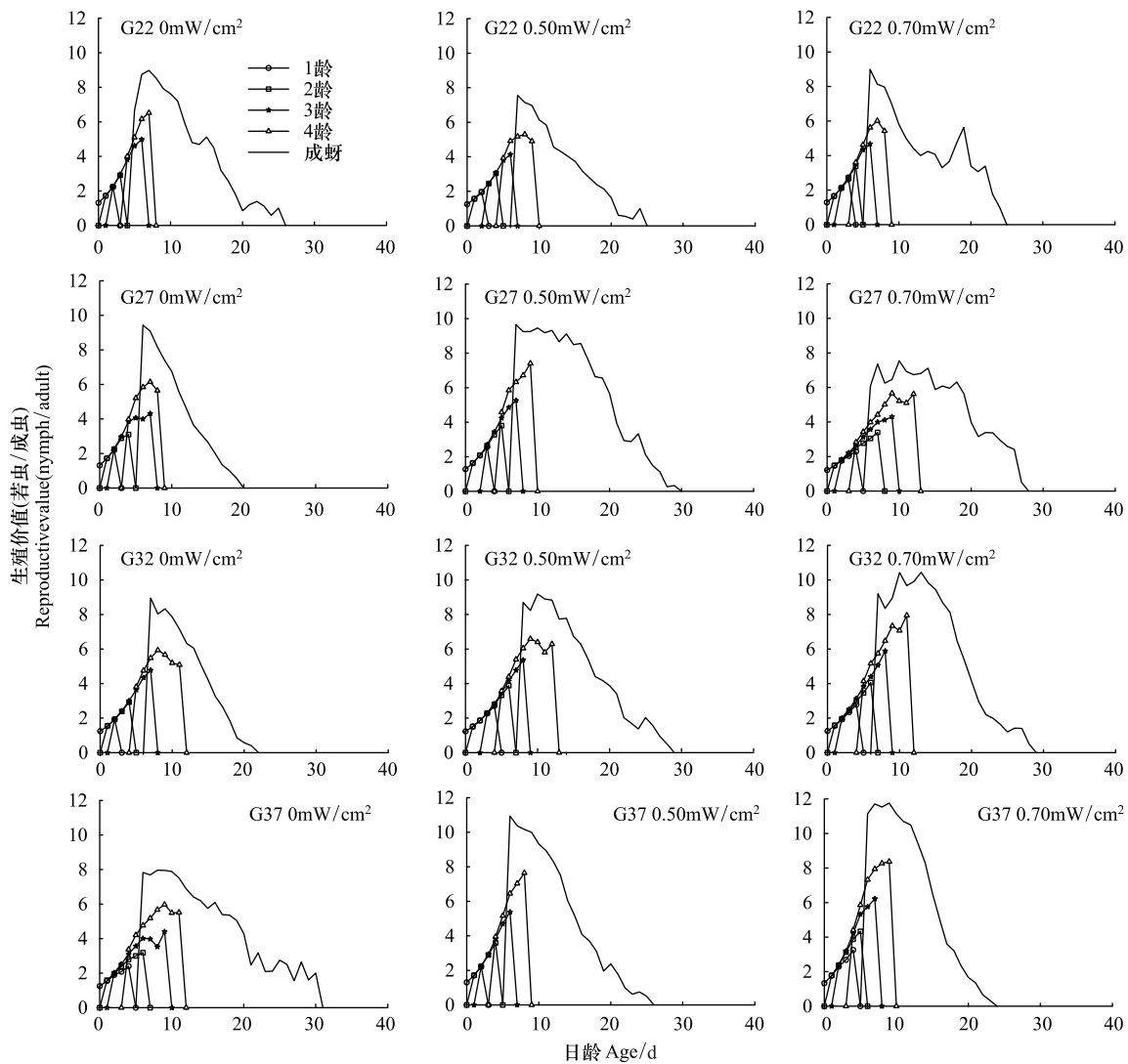


图1 麦长管蚜在不同紫外处理下的特定年龄-龄期生殖价值(v_{xj})

Fig.1 Age-specific reproductive value (v_{xj}) of *Sitobion avenae* at different UV-B treatments

G22: 第22代, the 22nd generation; G27: 第27代, the 27th generation; G32: 第32代, the 32nd generation; G37: 第37代, the 37th generation

低于对照组,第22代、第32代低强度处理组显著低于对照组,高强度处理组与对照相比差异不显著,第37代处理组显著高于对照组。对于 R_0 第22代、第27代、第32代、第37代处理组与对照组间差异显著。平均世代周期(T)第22代各组之间差异不显著,第27代和第32代处理组与对照组之间差异显著且显著高于对照,第37代处理组显著低于对照。

在不同世代之间,同一UV-B辐射强度下,低强度处理组内禀增长率(r_m)、净增殖率(R_0)、周限增长率(λ)呈先升高后下降又升高的趋势,且内禀增长率(r_m)、周限增长率(λ)在G37达到最大值,净增殖率(R_0)在G27达到最大值。平均世代周期(T)从G22到G37呈现先显著升高后显著下降的趋势且在G32达到最大值。高强度处理组内禀增长率(r_m)、净增殖率(R_0)、周限增长率(λ)呈先下降后显著升高的趋势,且均在G37达到最大值,平均世代周期(T)呈先显著升高后下降的趋势且在G27达到最大值。处理组种群参数只有 T 的变化规律与其他各参数变化规律不同,这可能是由于紫外处理影响了麦长管蚜各龄期的蜕皮或胚胎发育所致。

2.4 不同强度紫外处理1—37代麦长管蚜内禀增长率变化规律

不同世代,1—37代麦长管蚜处理组 r_m 呈先显著增高后下降又升高又下降又显著升高的变化规律,高强

度处理组 r_m 在 G36 代达到最大值, 在 G37 代 r_m 高于其他各统计世代, 低强度处理组在 G37 达到最大值 (图 2)。

3 结论与讨论

本研究中, 运用特定年龄生命表的方法探究不同 UV-B 处理对第 22 代以后麦长管蚜发育情况和种群动态影响。在 22—37 代这个长期的胁迫过程中, 存活率反应了种群消长趋势, 在紫外处理条件下均随时间的延长而降低。生殖价值反应各阶段对未来种群的贡献, 各紫外处理条件下成蚜期贡献明显高于若蚜期, 低强度处理组和高强度处理组的贡献时间分别在 G27 和 G32 达到最大值, 呈先升高后下降的趋势。

处理组种群参数平均世代周期 (T) 的变化规律呈先显著升高后下降的趋势, 与其他各参数变化不同, 这

可能是由于紫外处理影响了麦长管蚜各龄期的蜕皮或胚胎发育所致, 具体是什么原因需要我们做进一步的研究, 这与朱国平^[22]的 UV-B 处理使麦长管蚜若虫发育历期延长的结果相似。在 G37, 处理组麦长管蚜平均世代周期 (T) 缩短, 内禀增长率 (r_m)、净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ) 均达到最大值, 且处理组与对照组间差异显著, 可能是由于长期 UV-B 辐射后, 麦长管蚜适应了紫外环境, 高、低紫外处理均促进了麦长管蚜的生长发育, 本研究认为在本实验处理条件下, 麦长管蚜在 G37 对紫外的适应能力最强, 至于后续麦长管蚜的生命表参数如何变化, 还需要我们继续进行饲养。不同世代, 低强度处理组, 内禀增长率 (r_m)、净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ) 均呈先升高后下降又升高的趋势, 高强度处理组内禀增长率 (r_m)、净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ) 呈先下降后显著升高的趋势, 本结果所表现出的先下降后升高的趋势, 与朱国平等^[22]研究的结果相一致, 说明麦长管蚜对紫外环境的适应能力。1—37 代麦长管蚜处理组 r_m 呈现先显著增高后下降又升高又下降又显著升高的变化规律。这种规律产生的原因可能是由于前期环境胁迫增强麦长管蚜的适应能力, 随着蚜虫自身的调节, 亲代麦长管蚜的毒害效应会逐渐减弱, 但随着胁迫代数的累加, UV-B 的剂量累计超过了麦长管蚜的适应范围, 其毒害效应再次传递给子代, 影响子代的各项生长发育, 麦长管蚜需要再次启动自身的防御体系, 呈现一个循环的调节过程。到底是麦长管蚜体内酶作用的结果还是基因突变后新的适应需要我们做进一步深入研究。

李军等^[23]用紫外线处理桃蚜 4 h 后得出超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 的活力水平均高于正常虫体, 证明了 3 种酶可能参与了抗辐射过程。刘新仿等^[24]通过农杆菌介导法转化拟南芥, 使其在拟南芥中得到大量表达, 证实了该 GST 的过量表达可明显增强拟南芥对紫外辐射损伤作用的耐受性。姚建秀等^[25]用 RAPD 技术对紫外线连续辐射诱导一代麦长管蚜产生的 DNA 多态性进行了分析, 证实紫外线是诱导蚜虫变异的条件之一。都二霞等^[26]利用 SSR 技术分析了不同剂量紫外线诱导下桃蚜的 DNA 变异, 结果表明 F_1 代桃蚜产生可遗传的变异致使 F_2 代的 DNA 发生变异。前人的研究结果表明, 紫外条件下会对蚜虫体内的酶和 DNA 产生一定影响, 而本研究仅是就 UV-B 胁迫下麦长管蚜的一个长期的生命表参数进行了研究, 对于长期的胁迫过程中生命表参数发生变化的内在原因比如基因表达量的变化、基因突变、呼吸代谢等一系列变化是否和初期胁迫一样还有待于进一步探索。本研究结果表明, 随着紫外处理条件下麦长管蚜世代的延续, 麦长管蚜对紫外的适应能力增强, 应加强对麦长管蚜的防治, 如果这种适应性的增强是由基因突变引起的, 可以采用 RNA 干扰的方法对麦长管蚜进行防治。此外, 本研究为全面深度的阐述紫外胁迫对麦长管蚜生长繁殖的影响规律, 掌握不同紫外胁迫下的剂量效应关系及麦长管蚜的适应性提供实验基础和理论依据。

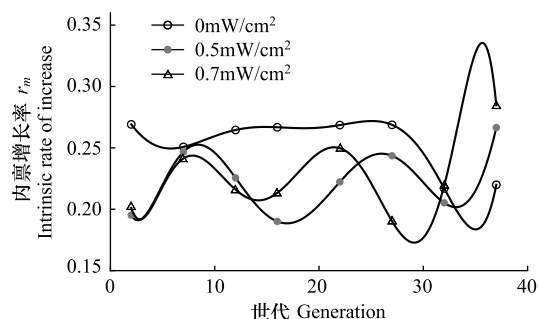


图 2 麦长管蚜在不同紫外处理下的内禀增长率变化规律 (r_m)

Fig. 2 Change rule of 1th to 37th generation *Sitobion avenae* exposed to different intensities of UV-B radiation

致谢:西北农林科技大学生态学实验室给予我大力协助,赵惠燕老师在实验上给予的支持,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Mazza C A, Gimenez P I, Kantolic A G, Ballare C L. Beneficial effects of solar UV-B radiation on soybean yield mediated by reduced insect herbivory under field conditions. *Physiologia Plantarum*, 2013, 147(3): 307-315.
- [2] Ballare C L, Caldwell M M, Flint S D, Robinson A, Bornman J F. Effects of solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. Patterns, mechanisms, and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, 10(2): 226-241.
- [3] Haeder D P, Helbling E W, Williamson C E, Worrest R C. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, 10(2): 242-260.
- [4] Zepp R G, Erickson D J I, Paul N D, Sulzberger B. Effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling: interactions and feedbacks. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, 10(2): 261-279.
- [5] 杨志敏, 颜景义, 王传海. 紫外线辐射增加对生物的影响. *生物学通报*, 1995, 30(5): 17-18.
- [6] Sebastian C, Scheuerlein R, Haeder D P. Graviperception and motility of three *Prorocentrum* strains impaired by solar and artificial ultraviolet radiation. *Marine Biology*, 1994, 120(1): 1-7.
- [7] Cullen J J, Neale P J. Ultraviolet radiation, ozone depletion, and marine photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 1994, 39(3): 303-320.
- [8] Grobe C W, Murphy T M. Inhibition of growth of *ulva expansa* (chlorophyta) by ultraviolet-b radiation. *Journal of Phycology*, 1994, 30(5): 783-790.
- [9] Bothwell M L, Sherbot D, Pollock C M. Ecosystem response to solar ultraviolet-b radiation: influence of trophic-level interactions. *Science*, 1994, 265(5168): 97-100.
- [10] Ballare C L, Scopel A L, Stapleton A E, Yanovsky M J. Solar ultraviolet-B radiation affects seedling emergence, DNA integrity, plant morphology, growth rate, and attractiveness to herbivore insects in *Datura ferox*. *Plant Physiology*, 1996, 112(1): 161-170.
- [11] 徐建祥, 杨海燕, 吴进才. 紫外 B 辐射增强对植食性昆虫的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(7): 845-850.
- [12] 张辉, 李慧玲, 王定锋, 李良德, 王庆森, 曾明森, 吴光远. 紫外线辐射对不同虫龄茶尺蠖生长发育的影响. *福建农业学报*, 2016, 31(5): 487-490.
- [13] Mazza C A, Izaguirre M M, Zavala J, Scopel A L, Ballaré C L. Insect perception of ambient ultraviolet-B radiation. *Ecology Letters*, 2002, 5(6): 722-726.
- [14] 王勋陵. 增强紫外 B 辐射对植物及生态系统影响研究的发展趋势. *西北植物学报*, 2002, 22(3): 670-681.
- [15] 赵平, 曾小平, 孙谷畴. 陆生植物对 UV-B 辐射增量响应研究进展. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 122-127.
- [16] 王成树. 真菌杀虫剂剂型的研究现状(综述). *安徽农业大学学报*, 1996, 23(3): 375-380.
- [17] 杜一民, 王萍, 杨杰, 周冬, 李广雨, 赵惠燕, 胡祖庆, 胡想顺. 不同强度与持续时间 UV-B 辐射对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响. *昆虫学报*, 2014, 57(12): 1395-1401.
- [18] 王萍, 杜一民, 杨杰, 车文艳, 高欢欢, 赵惠燕, 胡祖庆, 胡想顺. UV-B 与重金属 Cd 双重胁迫对麦长管蚜种群生长发育和繁殖的影响. *昆虫学报*, 2016, 59(1): 55-63.
- [19] 车文艳, 梁霞, 王萍, 赵惠燕. UV-B 长期胁迫对麦长管蚜子代种群动态的影响. *生态学报*, 2017, 37(24): 8549-8555.
- [20] Chi H. TWOSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. (2013). <http://140.120.197.173/ecology/>.
- [21] Pinder J E I, Wiener J G, Smith M H. The Weibull Distribution: a new method of summarizing survivorship data. *Ecology*, 1978, 59(1): 175-179.
- [22] 朱国平, 杨杰, 张丽, 赵惠燕. 连续多代 UV-B 处理对麦长管蚜生态学的影响. *西北农业学报*, 2012, 21(8): 63-67.
- [23] 李军, 赵惠燕, 赵学达. 不同强度紫外线对蚜虫生态学特征及有关酶活性的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 61-64.
- [24] 刘新仿, 李家洋. 紫外线强烈诱导的谷胱甘肽转移酶基因的功能鉴定. *遗传学报*, 2002, 29(5): 458-460.
- [25] 姚建秀, 赵惠燕. 紫外条件诱导下麦长管蚜 DNA 的变异研究. *西北农业学报*, 2001, 10(1): 33-36.
- [26] 都二霞, 郭剑文, 赵惠燕. 紫外辐射诱导桃蚜 DNA 变异. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1245-1249.