

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180561

钱秀娟, 张世鹏, 谢攀, 刘长仲. 紫外辐射对 9 个昆虫病原线虫品系存活率和致病力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 836-844

QIAN X J, ZHANG S P, XIE P, LIU C Z. Effects of UV-B radiation on entomopathogenic nematode survival and pathogenicity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 836-844

## 紫外辐射对 9 个昆虫病原线虫品系 存活率和致病力的影响\*

钱秀娟, 张世鹏, 谢攀, 刘长仲\*\*

(甘肃农业大学植物保护学院/甘肃省农作物病虫害生物防治工程实验室 兰州 730070)

**摘要:** 为探明紫外辐射对昆虫病原线虫(entomopathogenic nematodes, EPN)的作用, 以甘肃省分离得到的昆虫病原线虫为研究材料, 用室内模拟生测法, 测定了经 20 W、40 W 紫外线辐射后, 斯氏属(*Steinernema felitiae*, *S. krausseii*)和异小杆属(*Heterorhabditis brevicaudis*, *H. megidis*)4 种昆虫病原线虫 9 个品系的存活率, 并以大蜡螟(*Galleria mellonella*)为供试昆虫, 采用改良的 ONE ON ONE 法, 测定了其对大蜡螟的致病力。结果表明: 经 UV-B 辐射后供试的 9 个昆虫病原线虫品系存活率未发生显著变化( $P>0.05$ )。20 W 紫外辐射 30 min 后, *S. felitiae* 0639C 和 0663TD 2 品系对大蜡螟的致病力提高, 其中 *S. felitiae* 0639C 致病力显著升高( $P<0.05$ ), 侵染 32 h 后, 寄主昆虫死亡率由 13.3%升高到 73.3%; *S. felitiae* 0661YM 品系的致病力显著降低( $P<0.05$ ), 侵染 32 h 后, 寄主昆虫死亡率由 66.7%降低到 0; 其余各品系致病力均无显著变化。不同辐射时长和辐射强度对 *S. felitiae* 0639C 和 0663TD 引起寄主昆虫死亡的时间有影响, 较对照组而言, 经辐射预处理后, 2 品系线虫引起寄主昆虫死亡的时间均提前, 其中 *S. felitiae* 0639C 随着辐射强度的增大引起寄主昆虫开始死亡时间提前, 而 *S. felitiae* 0663TD 随着辐射强度增加引起寄主昆虫开始死亡时间延后。不同紫外辐射时长对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 致病力无显著影响, 30 min、60 min、90 min、120 min 辐射处理之间差异不显著( $P>0.05$ )。研究表明, 9 个供试昆虫病原线虫品系均对 UV-B 辐射具有一定的耐受能力; 20 W UV-B 辐射 30 min, 能刺激 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 侵染和致死寄主昆虫; 一定的辐射时长内(120 min), 辐射时长对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力无影响。

**关键词:** 昆虫病原线虫; UV-B 辐射; 大蜡螟; 存活率; 致病力; 非生物胁迫

中图分类号: S476+15 文献标识码: A 文章编号: 2096-6237(2019)06-0836-09

## Effects of UV-B radiation on entomopathogenic nematode survival and pathogenicity\*

QIAN Xiujian, ZHANG Shipeng, XIE Pan, LIU Changzhong\*\*

(College of Plant Protection of Gansu Agriculture University / Biocontrol Engineering Laboratory of Crop Diseases and Pests of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Entomopathogenic nematodes (EPN) possess many positive attributes as biocontrol agents. They are safe to humans and generally safe to other non-target organisms. To investigate the effects of ultraviolet radiation exposure on EPN, we studied the ef-

\* 甘肃农业大学科技创新基金-学科建设专项(GAU-XKJS-151)和甘肃省科技计划项目(18JR3RA162)资助

\*\* 通信作者: 刘长仲, 主要研究方向为昆虫生态及害虫治理。E-mail: liuchzh@gsau.edu.cn

钱秀娟, 主要研究方向为害虫生物防治。E-mail: qianxj@gsau.edu.cn

收稿日期: 2018-06-16 接受日期: 2018-10-09

\* The study was supported by the Science and Technology Innovation Fund of Gansu Agricultural University (GAU-XKJS-151) and The Science and Technology Fund of Gansu Province (18JR3RA162).

\*\* Corresponding author, E-mail: liuchzh@gsau.edu.cn

Received Jun. 16, 2018; accepted Oct. 9, 2018

fects of 20 or 40 W UV-B radiation for different time lengths (30, 60, 90, or 120 min) on the virulence of EPN infective juveniles (IJs) to *Galleria mellonella*, including 9 strains from 4 species (*Steinernema feltiae*, *S. kraussei*, *Heterorhabditis brevicaudis*, and *H. megidis*) isolated from Gansu Province. The results showed that there were no differences among the strains in the survival rate of IJs with and without 30 min UV-B irradiation. The virulence of IJs varied among strains after exposure to 20 W ultraviolet radiation for 30 min: virulence of two strains (*S. feltiae* 0639C and *S. feltiae* 0663TD) was increased ( $P < 0.05$ ), that of one strain (*S. feltiae* 0661YM) decreased ( $P < 0.05$ ), and that of all others (*H. brevicaudis* 0641TY, *H. megidis* 0627M, *S. feltiae* 0639C, *S. feltiae* 0619HT, *S. kraussei* 0663HT, and *S. kraussei* 0657L) showed no significantly change ( $P > 0.05$ ). For example, when measured at 32 h after infection, the mortality rate of host insects infected by *S. feltiae* 0639C increased significantly, from 13.3% to 73.3% ( $P < 0.05$ ), whereas that of insects infected by *S. feltiae* 0661YM decreased significantly from 66.7% to zero ( $P < 0.05$ ). At the same time, treating *S. feltiae* 0639C and 0663TD with UV affected host mortality 24 h after exposure to IJs: for *S. feltiae* 0639C, host mortality at 24 h was greater in the 40 W treatment than in either control or the 20 W treatment; for *S. feltiae* 0663TD, host mortality at 24 h was greater in the 20 W treatment than in either the control or the 40 W treatment. Ultraviolet radiation duration (30 min, 60 min, 90 min, or 120 min exposure) had no effect on the pathogenicity of *S. feltiae* 0663TD or *S. feltiae* 0639C ( $P > 0.05$ ). Therefore, the following conclusions were drawn: All of the 9 tested strains of EPN isolated from Gansu Province had some tolerance to UV-B radiation, and, in particular, *S. feltiae* 0622L had a high tolerance to ultraviolet radiation. In addition, ultraviolet radiation had a variable impact on the pathogenicity of EPN in Gansu Province, as there were differences among different species and strains. For example, 20 W UV-B radiation for 30 min enhanced the pathogenicity of *S. feltiae* 0663TD, whereas it significantly weakened that of *S. feltiae* 0661YM. Ultraviolet radiation stimulated *S. feltiae* 0663TD and *S. feltiae* 0639C to infect and kill host insects more quickly, although the radiation intensity that optimized the 24-h mortality rate varied between the two strains. After 48 h, however, there was no significant difference in the pathogenicity of *S. feltiae* 0663TD and *S. feltiae* 0639C between the different radiation intensities (20 and 40 W). Additionally, IJs of *S. feltiae* 0663TD and *S. feltiae* 0639C both had high pathogenicity after 48–72 h, regardless of the radiation intensity (20 W or 40 W) or the duration of exposure (30, 60, 90, or 120 min). These findings will shed more light on using entomopathogenic nematodes under ultraviolet radiation stress.

**Keywords:** Entomopathogenic nematodes; Ultraviolet radiation; *Galleria mellonella*; Survival rate; Pathogenicity; Abiotic stress

昆虫病原线虫(entomopathogenic nematodes, EPN)是指体内携带具病原性的共生细菌,能使节肢动物类发病并死亡的一类线虫<sup>[1-2]</sup>。该类线虫具有寄主范围广、毒力高、能主动寻找寄主、对人畜及环境安全无毒、并能人工大量培养等诸多优点,因此作为一种有效的生防因子,被广泛应用于地下害虫和隐蔽性害虫的防治,具有巨大的开发潜力和应用前景<sup>[3-7]</sup>。

昆虫病原线虫营自由生活阶段,要面临各种非生物胁迫,包括高温、低湿、紫外辐射(UV-B)、化学感应、土壤类型等;在实际应用中,决定昆虫病原线虫对害虫防治效果高低的关键因子之一,是在各种非生物因子的胁迫下,昆虫病原线虫能否在田间建立种群。因此研究非生物胁迫对昆虫病原线虫的影响,具有重要意义<sup>[8-10]</sup>。目前昆虫病原线虫对隐蔽性害虫的防治应用比较广泛,其对叶面害虫的防治室内试验表明也有较好的控制效能,但在田间应用时防治效果会有所降低,重要的影响因子就是UV-B辐射<sup>[11]</sup>。

近年来,随着生产和生活中大量生产和使用氯氟烃等消耗臭氧层的物质,以及大量废气的排放,破坏大气臭氧层,并导致地面紫外辐射(UV-B)增加。过量

紫外线对人类、动植物、微生物等会产生危害,并产生明显的生物学效应<sup>[11-15]</sup>。研究表明,紫外线辐射对秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)具有一定的影响,主要表现在生殖毒性,但是研究同时表明适当的紫外辐射预处理可防止行为缺陷机制的形成<sup>[15]</sup>。有关紫外辐射对昆虫病原线虫的影响和昆虫病原线虫对紫外辐射的抗逆性和适应性,相关报道较少<sup>[9]</sup>。本项目组前期研究发现甘肃省昆虫病原线虫资源丰富,分布广泛且对甘肃省主要的地下害虫有较高的控制作用,说明本土昆虫病原线虫对低湿、高温和紫外辐射等逆境有一定的耐受能力<sup>[9,16-19]</sup>。但当前环境中的UV-B辐射是否已经对昆虫病原线虫的生长发育具有一定程度的胁迫作用?甘肃省土著昆虫病原线虫,尤其是优势种对UV-B辐射的适应性如何?尚缺少足够的了解。本研究以甘肃省土著昆虫病原线虫为材料,通过模拟自然界强辐射的研究手段,以昆虫病原线虫研究中常用测试昆虫大蜡螟为目标昆虫,探究紫外辐射对昆虫病原线虫生物学特性如存活率与致病力的影响,可为利用昆虫病原线虫防治叶面害虫提供理论依据,以期进一步揭示昆虫病原线虫对UV-B辐射的适应特性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

大蜡螟(*Galleria mellonella*)由甘肃农业大学昆虫生态实验室养殖, 试验用 5 龄老熟幼虫其平均重量为 0.3 g 左右, 使用前需经滞育处理, 防止大蜡螟老熟幼虫吐丝、化蛹。

昆虫病原线虫: 从甘肃省诱集分离得到的 9 个品系, 分别为异小杆属的 *Heterorhabditis brevicaudis* 的 0627M 品系、大异小杆线虫(*H. megidis*)的 0641TY 品系和斯氏属的 *Steinernema feltiae* 的 0622L、0639C、0661YM、0619HT、0663TD 品系与 *S. kraussei* 的 0663HT、0657L 品系。已证实上述 9 个昆虫病原线虫品系对低湿胁迫具较强抗逆性, 对主要地下害虫蛴螬(*Scaabaeidae*)和韭蛆(*Bradysia difformis*)具较高控制效能<sup>[9,16-17]</sup>。均由大蜡螟老熟幼虫 White trap 法培养, 试验用的感染期线虫均新鲜培养, 并用 0.2% 柳硫汞进行表面消毒, 贮存于 4 ℃ 备用。

### 1.2 紫外(UV-B)辐射对昆虫病原线虫存活率影响的测定

本试验于 24 孔板中进行。将加有 9 个线虫品系悬浮液的 24 孔板, 每孔加入线虫悬浮液 1 000 μL(含线虫 1 000 头), 每品系 3 孔, 暴露于 20 W 和 40 W 紫外辐射灯下 20 cm 处(60 μW·cm<sup>-2</sup>、100 μW·cm<sup>-2</sup>)分别处理 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、3 h、4 h、5 h 和 6 h。以未经紫外辐射的 9 个线虫品系悬浮液为对照。到达处理时间后取出, 在室温下放置 1 h, 使线虫充分复苏, 复苏后统计每个处理中昆虫病原线虫的活虫平均数及平均存活率。

$$\text{线虫存活率}(\%) = \frac{\text{存活线虫数}}{\text{总线虫数}} \times 100 \quad (1)$$

### 1.3 紫外(UV-B)辐射对昆虫病原线虫致病力影响的测定

#### 1.3.1 紫外(UV-B)辐射对不同昆虫病原线虫种类(品系)致病力影响的测定

采用改良的 ONE ON ONE 法测定<sup>[1,17]</sup>。于 24 孔板中, 每孔放 2 g 经灭菌的细沙, 加无菌水使含水量为 15%(w/w), 每孔放 1 头大蜡螟 5 龄幼虫, 滴入经 20 W 紫外辐射 30 min 的线虫悬浮液 50 mL[每孔 50 头侵染期线虫(IJs)]。不同的线虫品系为不同处理, 以未经紫外辐射的线虫做相应对照组, 每处理重复 15 次(15 孔), 置于(25±1) 白天/(18±1) 夜晚, 8 h 白天/16 h 夜晚, 相对湿度 80% 的恒温箱内。每隔 8 h 观察记录大蜡螟死亡情况。

#### 1.3.2 紫外(UV-B)辐射强度及时长对 *Steinernema feltiae* 0639C 和 0663TD 致病力影响的测定

于 24 孔板中, 每孔放 2 g 经灭菌的细沙, 加无菌水使含水量为 15%(w/w), 每孔放 1 头大蜡螟 5 龄幼虫, 滴入经 20 W 和 40 W 的 UV-B 辐射强度处理 30 min、60 min、90 min、120 min 的 *S. feltiae* 0639C 和 0663TD 的悬浮液 50 L(50 IJs·孔<sup>-1</sup>), 以未经紫外辐射的线虫做相应对照组。每处理重复 10 次, 置于(25±1) 白天/(18±1) 夜晚, 8 h 白天/16 h 夜晚, 相对湿度 80% 的恒温箱内。每隔 8 h 观察记录大蜡螟死亡情况, 比较各处理强度 UV-B 辐射下昆虫病原线虫对大蜡螟致病力的影响。

试验数据用 SPSS 21.0 和 Microsoft Excel 2016 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 UV-B 辐射对昆虫病原线虫存活率的影响

表 1 表明, 经 20 W 和 40 W 紫外灯辐射 0.5 h 后, 昆虫病原线虫 *H. brevicaudis* 0627M、*H. megidis* 0641TY、*S. feltiae* 0622L、*S. feltiae* 0639C、*S. feltiae* 0661YM、*S. feltiae* 0619HT、*S. feltiae* 0663TD、*S. kraussei* 0663HT、*S. kraussei* 0657L 9 个品系(除 *S. feltiae* 0622L 40 W 外)与未辐射处理存活率差异不显著( $P>0.05$ ), 且不同品系之间差异不显著( $P>0.05$ ), 说明以上 9 个品系昆虫病原线虫均对短时间 UV-B 辐射有一定的耐受力。

20 W、40 W 紫外辐射灯处理下, 辐射时长对昆虫病原线虫存活率有显著影响。随着辐射时长的延长, 供试的 9 个昆虫病原线虫的存活率均逐步降低, 且在辐射时长大于 2 h 后, 存活率急剧下降, 与未经辐射的对照组相比较差异显著( $P<0.05$ )。辐射时长为 6 h 时, 供试各品系存活率均在 10% 以下, 但各品系之间差异不显著( $P>0.05$ ), 其中 *S. feltiae* 0639C、0661YM、*S. kraussei* 0663HT 存活率为 0。当辐射强度为 20 W 时, 2 h 的辐射时长为对昆虫病原线虫存活率影响较大的时间节点, 时长为 2 h 以内时, 除 *S. feltiae* 06622L 和 *S. kraussei* 0663HT 2 品系外, 不同辐射时长下, 其余供试 7 个昆虫病原线虫品系的存活率无显著变化, 与对照组之间差异不显著( $P>0.05$ ), 不同品系之间除 *S. kraussei* 0663HT 与其他供试 8 品系差异显著( $P<0.05$ )外, 其余各品系之间差异不显著( $P>0.05$ ); 但时长大于 2 h 后, 供试的 9 个昆虫病原线虫品系存活率均急剧下降, 因此后期研究均以 2 h 作为辐射时长的上限。辐射强度为 40 W 时, 辐射时长为 0.5 h 时, 除 *S. feltiae*

0622L 品系存活率与对照组差异显著( $P<0.05$ ), 其余供试品系与对照组差异均不显著( $P>0.05$ ), 且各品系之间差异不显著( $P>0.05$ ); 其余各辐射时长下, 供试 9 个昆虫病原线虫品系均随着辐射时长的增加, 其存活率下降且与对照组差异显著( $P<0.05$ )。说明随着 UV-B 辐射时间的延长, 昆虫病原线虫对 UV-B 辐射的抵抗力降低。长时间 UV-B 辐射对不同昆虫病原线虫品系存活率的影响不同。经 UV-B 辐射 4 h 内, *H. megidis* 0627M 的存活率较高, 说明 *H. megidis* 0627M 对长时间 UV-B 辐射有一定的耐受能力。

不同辐射强度对昆虫病原线虫存活率影响不同, 辐射时长在 2 h 之内, 随着辐射强度的增加, 昆虫病原线虫存活率降低, 40 W 与 20 W 差异显著( $P<0.05$ ), 2 h 之后不同辐射强度之间差异不显著( $P>0.05$ )。同一辐射强度时, 线虫存活率随着辐射时长的增加下降, 但在 2 h 之内, 各辐射时长之间线虫存活率无显著差异( $P>0.05$ ), 2 h 之后各品系线虫存活率均显著降低, 与对照组差异显著( $P<0.05$ )。综上所述, 辐射时长在 2 h 内, UV-B 强度是影响昆虫病原线虫存活率的主要因子, 辐射时长对其存活率无显著影响。

表 1 不同时间不同强度 UV-B 辐射对不同昆虫病原线虫品系存活率的影响

Table 1 Entomopathogenic nematodes infective juveniles (IJs) survival rate at different ultraviolet radiation intensities under different exposure time length

线虫种 Species	品系 Strain	处理 Treatment	存活率 Survival rate (%)									
			0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h		
<i>Steinernema feltiae</i>	0639C	CK	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	95.3±2.3aA	
		20W	92.3±1.7aA	90.0±0.5aA	87.1±2.1aA	83.3±2.3aA	56.1±2.1bABC	30.1±2.8bBC	12.6±0.5bB	0bB		
		40W	91.7±2.1aA	77.7±0.4bAB	63.1±0.4bA	60.3±1.1bAB	50.5±2.8bABC	26.7±2.4bBC	3.4±0.5bB	0bB		
	0661YM	CK	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.4aA	91.6±3.5aA	91.6±3.4aA	
		20W	89.9±4.1aA	86.4±1.5aA	84.6±2.1aA	84.6±3.6aA	34.5±2.6bBC	10.2±0.4bC	3.9±0.2bB	0bB		
		40W	89.1±3.7aA	81.1±0.9aA	75.1±3.5bAB	79.3±4.6bA	30.1±5.3bBC	4.9±1.0bC	0bB	0bB		
	0619HT	CK	98.7±0.5aA	98.8±0.5aA	98.8±0.5aA	98.8±0.5aA	98.8±0.5aA	98.8±0.5aA	98.8±0.5aA	98.7±0.5aA	98.8±0.5aA	
		20W	96.4±0.7aA	94.3±3.1aA	94.1±2.7aA	92.6±3.1aA	42.2±1.8bBC	15.2±5.7bBC	5.2±0.8bB	2.7±1.3bB		
		40W	95.3±2.5aA	89.7±3.5aA	80.6±4.8bA	78.4±2.1bAB	31.3±3.5bBC	8.7±2.5bC	2.1±0.5bB	1.7±0.4bB		
	0622L	CK	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.6±3.4aA	83.5±3.5aA	83.6±3.4aA	
		20W	80.3±4.5aA	69.0±3.7aAB	67.6±2.5aAB	59.3±1.3bAB	39.3±2.3bBC	12.5±3.6bC	3.6±1.2bB	3.2±0.6bB		
		40W	69.9±3.6bA	50.1±4.6bB	48.4±3.3bB	40.4±4.2bB	34.5±1.4bBC	9.3±3.2bC	3.4±0.8bB	1.4±0.3bB		
	0663TD	CK	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	93.3±2.4aA	
		20W	91.8±2.6aA	81.2±3.5abA	78.9±4.1abAB	77.8±2.5abAB	45.3±3.6bBC	24.6±3.1bBC	10.2±2.4bB	1.2±0.7bB		
		40W	91.0±1.3aA	68.7±2.8bAB	68.1±4.6bAB	64.8±3.4bAB	41.8±2.5bBC	20.3±4.1bBC	8.8±1.4bB	0.9±0.5bB		
	<i>Steinernema kraussei</i>	0657L	CK	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.3±0.2aA	99.2±0.2aA	99.3±0.2aA
			20W	98.7±0.9aA	97.4±0.9aA	94.8±4.1aA	96.3±2.1aA	83.3±9.9aA	23.6±6.3bBC	5.5±1.2bB	3.4±4.2bB	
			40W	96.2±1.4aA	92.4±2.3aA	91.5±2.3aA	90.8±1.7aA	74.2±4.1aAB	17.4±2.3bC	4.1±0.7bB	1.7±0.9bB	
0663HT		CK	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.9aA	83.3±6.8aA	83.3±6.9aA	
		20W	82.1±5.7aA	76.3±1.3aAB	67.7±0.9abAB	50.4±0.6bB	31.4±1.3bBC	9.6±0.4bC	1.6±0.3bB	0bB		
		40W	81.8±1.3aA	71.5±2.4bAB	60.1±2.4bAB	44.1±1.4bB	22.4±0.5bC	3.6±1.0bC	0bB	0bB		
<i>Heterorhabditis brevicaudis</i>	0627M	CK	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	87.7±5.8aA	
		20W	86.4±2.8aA	84.3±1.3aA	80.6±4.1aA	74.2±2.4abAB	38.4±0.5bBC	20.6±2.3bBC	6.5±4.1bB	1.7±0.7bB		
		40W	86.1±3.1aA	83.3±3.4aA	78.9±0.9aAB	70.6±4.1bAB	30.6±3.4bBC	12.3±1.2bC	4.1±0.7bB	0bB		
大异小杆线虫 <i>Heterorhabditis megidis</i>	0641TY	CK	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	98.8±1.1aA	
		20W	98.2±0.5aA	98.1±0.3aA	97.9±0.3aA	97.3±0.1aA	85.4±3.3abA	53.6±5.7bB	10.7±3.9bB	5.0±2.6bB		
		40W	97.1±1.0aA	84.2±0.7bA	84.2±1.2bA	82.3±1.4bA	79.4±2.7bAB	49.2±3.4bB	6.7±2.6bB	3.7±1.7bB		

采用 *t* 检验, 不同小写字母表示同一品系在不同处理之间差异显著( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示不同品系不同处理之间差异显著( $P<0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same strain, while different capital letters stand for the significant differences among different strains ( $P < 0.05$ ) by *t* test.

## 2.2 UV-B 辐射对不同昆虫病原线虫种类和品系致病力的影响

表 2 表明, 20 W UV-B 辐射 30 min 后, 昆虫病原线虫对大蜡螟的致病力发生变化, 不同种类和同一种类的不同品系变化不同。供试的 9 个品系中, *S. felitiae* 0663TD 致病力升高, 而 *S. felitiae* 0661YM 降低。其中 *S. felitiae* 0639C 在侵染后 32 h 和 40 h 时差异显著 ( $P < 0.05$ ), 分别由 13.3% 和 20.0% 升高到 73.3% 和 86.6%; *S. felitiae* 0661YM 在侵染 32 h、40 h 时, 经 UV-B 辐射的处理死亡率均为 0%, 而未经辐射处理的均达 66.7%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ); 而其余各品系致病力未改变或下降, 且各品系之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2.1 UV-B 处理后异小杆属线虫对大蜡螟致病力的影响

UV-B 辐射使异小杆属 *H. megidis* 0641TY 和 *H. brevicaudis* 0627M 2 个品系致病力下降, 且使寄主死亡的时间推后(表 2)。经 UV-B 辐射 30 min 后, *H. me-*

*gidis* 0641TY 和 *H. brevicaudis* 0627M 致病力均下降, 但无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 值得注意的是, 2 线虫品系对大蜡螟的致死速率均有延后。接入 *H. brevicaudis* 0627M 72 h 时, 对照组大蜡螟累积死亡率为 80.0%, 处理组为 73.3%; 80 h 时对照组死亡率达 100%, 而处理组在 88 h 后才达 100%; *H. megidis* 0641TY 对照组和处理组在 32 h 时引起大蜡螟死亡; 接入线虫 112 h 后, 对照组死亡率达 100%, 而处理组在接入线虫 120 h 后大蜡螟死亡率达 100%。说明 UV-B 辐射降低异小杆属线虫的致病力, 并延缓引起寄主昆虫死亡的时间。

### 2.2.2 UV-B 处理后斯氏属线虫对大蜡螟致病力的影响

经 UV-B 处理后斯氏属线虫对大蜡螟的致病力也发生变化, 但不同种类、同一种类不同品系之间均存在差异。*S. felitiae* 5 个供试品系, 0639C、0663TD 2 品系经 UV-B 辐射后对大蜡螟的致病力提高, 致死速率加快, 其中 *S. felitiae* 0663TD 的致病力显著升高

表 2 20W UV-B 辐射 30 min 下不同昆虫病原线虫品系对大蜡螟致病力的影响  
Table 2 Effects of 20 W ultraviolet radiation after 30 min exposure on entomopathogenic nematodes' pathogenicity to *Galleria mellonella*

线虫种 Species	品系 Strain	处理 Treatment	累积校正死亡率 Corrected mortality (%)											
			32 h	40 h	48 h	56 h	64 h	72 h	80 h	88 h	96 h	104 h	112 h	120 h
<i>Steinernema felitiae</i>	0639C	CK	13.3± 1.6bCD	20.0± 2.3bBCD	53.3±2.6 aABC	73.3± 4.1aABC	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
		UV	73.3± 4.1aA	86.6± 3.4aA	86.6±3.4 aAB	100.0aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
	0661YM	CK	66.7± 3.8aAB	66.6± 3.8aAB	80.0±6.7 aABC	100.0aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
		UV	0bD	0bD	20.0±2.3 bBC	20.0± 2.3bB	26.67bB	26.67bB	46.7± 4.1bA	66.7± 3.8aA	80.0± 6.7aAB	80± 6.7aA	93.3± 1.7aA	100aA
	0619HT	CK	53.3±2.6 aABC	86.6± 3.4aAB	93.3±1.7 aA	100.0aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
		UV	46.7±4.1 aABCD	46.7± 4.1aABC	60.0±3.1 aABC	60.0± 3.1aAB	73.3± 4.1aAB	73.3± 4.1aAB	73.3± 4.1aA	80± 6.7aA	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	100aA
	0622L	CK	13.3±1.6 aCD	3.9aABC	66.7±3.8 aABC	4.1aAB	73.3± 4.1aAB	80.0± 6.7aAB	80.0± 6.7aA	80.0± 6.7aA	80.0± 6.7aA	80.0± 6.7aA	86.7± 3.4aA	100aA
		UV	26.7±3.9 aABCD	46.7±4.1 aABC	53.3±2.6 aABC	73.3± 4.1aAB	86.7± 3.4aAB	86.7± 3.4aAB	86.7± 3.4aA	86.7± 3.4aA	86.7± 3.4aA	100aA	100aA	100aA
	0663TD	CK	66.6±3.8 aAB	66.7± 3.8aABC	66.7±3.8 aABC	93.3± 1.7aA	93.3± 3.4aA	93.3± 1.7aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
		UV	93.3± 1.7aA	100.0aA	100.0aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA
	<i>Steinernema kraussei</i>	0657L	CK	0aD	46.7± 4.1aABC	73.3±4.1 aABC	73.3± 4.1aAB	80.0± 6.7aAB	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	100aA	100aA	100aA	100aA
			UV	0aD	33.3± 1.7aABC	33.3±1.7 aABC	46.6± 4.1aAB	66.7± 3.8aAB	73.3± 4.1aAB	73.3± 4.1aA	86.7± 3.4aA	100aA	100aA	100aA
0663HT		CK	40.0±1.9 aABCD	60.0± 2.1aABC	60.0±2.1 aABC	60.0± 2.1aAB	66.7± 3.8aAB	73.3± 4.1aAB	86.7± 3.4aA	100aA	100aA	100aA	100aA	
		UV	20.0±2.3 aBCD	53.3± 2.6aABC	66.7±3.8 aABC	66.7± 3.8aAB	66.7± 3.8aAB	66.7± 3.8aAB	80.0± 6.7aA	86.7± 3.4aA	93.3± 1.7aA	100aA	100aA	
<i>Heterorhabditis brevicaudis</i>	0627M	CK	6.7± 1.1aCD	20.0± 2.3aBC	33.3±2.9 aABC	60.0± 3.1aAB	80.0± 6.7aAB	80.0± 6.7aA	100aA	100aA	100aA	100aA	100aA	
		UV	6.7± 1.1aCD	40.0± 1.9aABC	53.3±2.6 aABC	60.0± 3.1aAB	66.7± 3.8aAB	73.3± 4.1aA	86.7± 3.4aA	86.7± 3.4aA	100aA	100aA	100aA	
大异小杆 线虫	0641TY	CK	26.7±3.9 aABCD	60.0± 3.1aABC	80.0±6.7 aABC	80.0± 6.7aAB	86.7± 3.4aAB	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	100aA	100aA	
		UV	6.7±1.1 aCD	53.3±2.6 aABC	73.3±4.1 aABC	80.0± 6.7aAB	86.7± 3.4aAB	86.7± 3.4aA	86.7± 3.4aA	86.7± 3.4aA	93.3± 1.7aA	93.3± 1.7aA	100aA	

采用  $t$  检验, 不同小写字母表示同一品系在不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示不同品系不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same strain, while different capital letters stand for the significant differences among different strains ( $P < 0.05$ ) by  $t$  test.

( $P < 0.05$ ); *S. felitiae* 0622L 品系经 UV-B 辐射后其致病力无显著变化( $P > 0.05$ ), 且死亡速率基本相同(表 2); *S. felitiae* 的 0661YM 和 0619HT 经 UV-B 辐射后, 其致病力均呈降低趋势, 其中 *S. felitiae* 0661YM 的致病力显著降低( $P < 0.05$ ), 其余差异不显著( $P > 0.05$ ); *S. kraussei* 0657L 和 0663HT 品系经 UV-B 辐射后, 致病力均下降, 但差异均不显著( $P > 0.05$ ).

### 2.2.2.1 *S. felitiae* 0639C 和 0663TD 供试品系

经 UV-B 辐射 30 min 后, *S. felitiae* 0639C 和 0663TD 引起全部寄主死亡时间缩短(表 2)。 *S. felitiae* 0639C 对照组和处理组均在 32 h 时大蜡螟开始死亡, 处理组大蜡螟累积死亡率为 73.3%, 对照组为 13.3%, 存在显著差异( $P < 0.05$ ); 经 UV-B 辐射处理后, 接入线虫 56 h 后大蜡螟死亡率达 100%, 而对照组 64 h 时达 100%; *S. felitiae* 0663TD 对照组在接入线虫 24 h 时大蜡螟开始死亡, 处理组 32 h 时开始死亡; 对照组在接入线虫 80 h 后大蜡螟死亡率为 100%, 处理组在接入线虫 40 h 后大蜡螟的死亡率达 100%。

### 2.2.2.2 *S. felitiae* 0622L 供试品系

*S. felitiae* 0622L 品系经 UV-B 辐射后其致病力无显著变化( $P > 0.05$ ), 且死亡速率基本相同(表 2)。接入线虫 32 h 后, 对照组和处理组大蜡螟均开始死亡, 56 h 时大蜡螟的死亡率均为 73.3%; 对照组 112 h 后死亡率达到 100%, 处理组则在 104 h 后达 100%。

### 2.2.2.3 *S. felitiae* 0661YM 和 0619HT 品系与 *S. kraussei* 0663HT 和 0657L 品系

经 UV-B 辐射后 *S. felitiae* 0661YM 和 0619HT 品系与 *S. kraussei* 0663HT 和 0657L 品系的致病力均下降, 除 *S. felitiae* 0661YM 与对照组差异显著外, 其余品系差异不显著( $P > 0.05$ ), 且寄主开始死亡时间和引起供试全部种群死亡的时间均延长(表 2)。 *S. felitiae* 0661YM 品系, 对照组侵染后 32 h 寄主昆虫开始死亡, 56 h 时全部死亡, 而经紫外辐射后, 48 h 时寄主昆虫开始死亡, 120 h 时全部死亡; *S. felitiae* 0619HT 品系, 处理组和对照组均在 32 h 时引起寄主昆虫死亡, 对照组 56 h 时寄主昆虫死亡率达 100%, 而处理组在 120 h 时寄主昆虫死亡率达 100%。

*S. kraussei* 0663HT 品系的对照组和处理组, 均在接入线虫后 32 h 时大蜡螟开始死亡; 80 h 时对照组大蜡螟的死亡率是 86.7%, 处理组为 80.0%; 对照组 88 h 大蜡螟校正死亡率达 100%, 处理组 104 h 时才达 100%; *S. kraussei* 0657L 品系的 CK 和 UV-B 辐射组均在接入线虫后 40 h 时大蜡螟开始死亡; 80 h 时 CK 大蜡螟累积死亡率为 93.3%, 处理组为 73.3%; CK 组 88 h

大蜡螟死亡率达 100%, 处理组 96 h 时才达到 100%。

综上所述, 在 20W UV-B 辐射 30 min 后, 斯氏 *S. felitiae* 0639C 的致病力显著升高( $P < 0.05$ ), *S. felitiae* 0661YM 的致病力显著降低( $P < 0.05$ ), *S. felitiae* 0663TD、0622L 大蜡螟的致病力升高, 异小杆 *H. megidis* 0641TY 和 *H. brevicaudis* 0627M, 斯氏 *S. kraussei* 0657L、0663HT 和 *S. felitiae* 0619HT、0661YM 致病力下降, 但差异均不显著( $P > 0.05$ )。说明 UV-B 辐射对昆虫病原线虫致病力会产生影响, 且不同种类、同一种类的不同品系之间存在差异。

经 UV-B 辐射后, 供试昆虫病原线虫引起全部寄主昆虫死亡时间发生变化。致病力升高的品系, 其引起全部寄主昆虫死亡的时间缩短, 包括 *S. felitiae* 0639C 和 *S. felitiae* 0663TD; 而致病力降低的品系, 使寄主昆虫全部死亡的时间增长, 如 *S. felitiae* 0661YM 和 *S. felitiae* 0619HT 品系、*S. kraussei* 0663HT 和 *S. kraussei* 0657L 品系及 *H. megidis* 0641TY 和 *H. brevicaudis* 0627M 品系; 致病力未发生变化的品系, 其使寄主昆虫全部死亡的时间亦未发生显著变化, 如 *S. felitiae* 0622L。说明 UV-B 辐射对昆虫病原线虫致病力的影响, 不但包括毒力大小的影响, 同时也影响了其对寄主的致死速率。

## 2.3 不同 UV-B 辐射强度及时长对 *Steinernema felitiae* 0639C 和 0663TD 致病力的影响

图 1 表明, 与对照相比, *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 在 20 W 和 40 W UV-B 辐射 30 min、60 min、90 min、120 min 后, 引起寄主昆虫死亡的时间发生变化, 其中 *S. felitiae* 0639C 随着辐射强度的增大引起寄主昆虫开始死亡时间提前, 而 *S. felitiae* 0663TD 随着辐射强度增加, 引起寄主昆虫开始死亡时间延后; 不同紫外辐射时长对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 致病力无影响, 30 min、60 min、90 min、120 min 辐射处理之间差异不显著( $P > 0.05$ )。

从图 1a 可知, 40 W UV-B 辐射处理的 *S. felitiae* 0639C 线虫, 侵染 8 h 后引起寄主昆虫的死亡, 而经 20 W 辐射处理则侵染后 24 h 引起寄主昆虫死亡, 对照组在两个时间点均未引起寄主昆虫死亡; 侵染 24 h 时, 40 W 辐射处理的线虫致病力显著高于 20 W 和对照( $P < 0.05$ ), 48 h 时两种辐射强度处理的线虫引起寄主昆虫的累计死亡率之间差异不显著( $P > 0.05$ )。不同的紫外辐射时长后, *S. felitiae* 0639C 品系对大蜡螟的致病力无显著变化。

*S. felitiae* 0663TD 线虫在经 20 W UV-B 辐射后, 侵染 8 h 后就可引起寄主昆虫的死亡, 而经 40 W 辐射

处理的线虫, 侵染后 24 h 引起寄主昆虫的死亡, 对照组在此两个时间点均未引起寄主昆虫死亡, 且 24 h 时 20 W 辐射预处理后的线虫致病力显著高于 40 W 和对照组( $P < 0.05$ ), 48 h 后两种辐射强度处理后的线虫引起寄主昆虫的累计死亡率之间差异不显著( $P > 0.05$ ); 不同的紫外辐射时长后, *S. felitiae* 0663TD 品系对大蜡螟的致病力无显著变化。

综上所述, 紫外辐射能刺激 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 侵染和致死寄主昆虫, 侵染前期(24 h)紫外辐射强度对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力有影响, 随着 UV-B 辐射强度的增加, 处理强度(20W 和 40 W)对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力无影响; 一定的辐射时长内(120 min), 辐射时长对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力无影响。

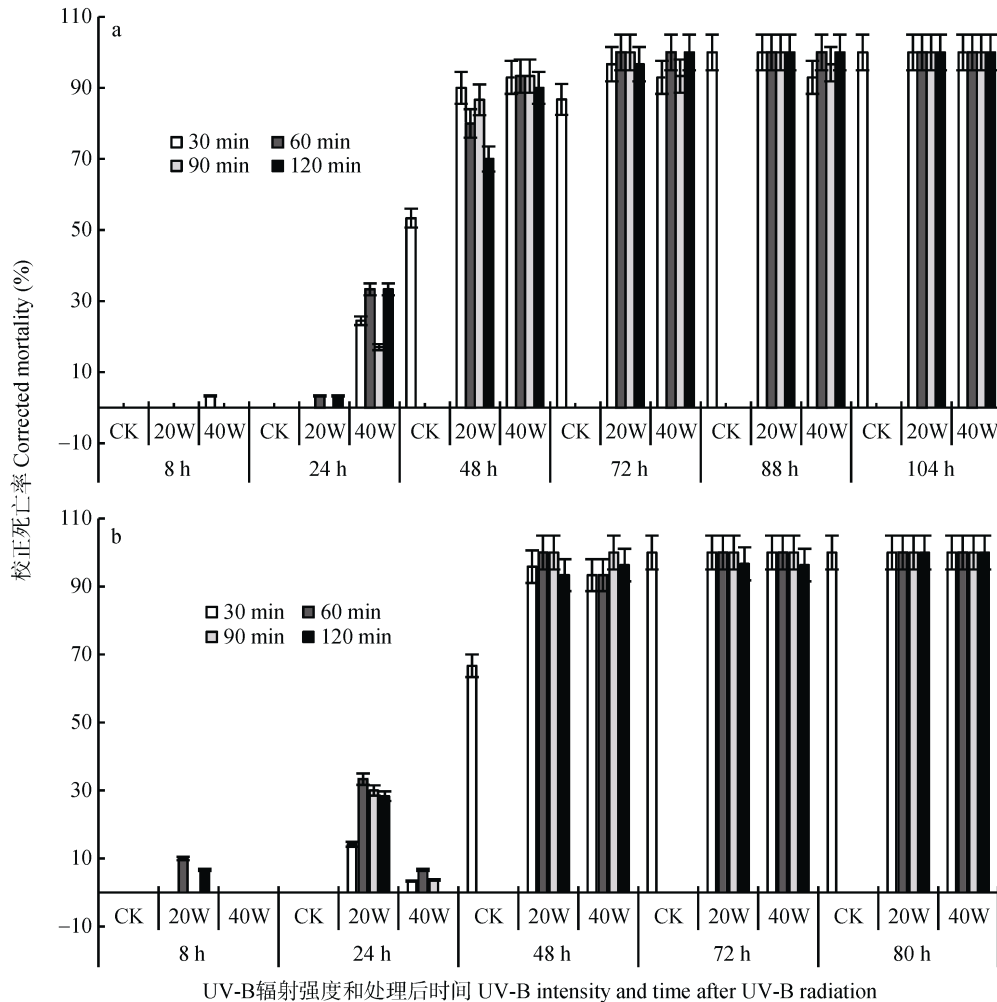


图 1 UV-B 辐射强度与处理时间对处理后不同时间 *S. felitiae* 0639C(a)和 0663TD(b)致病力的影响

Fig. 1 Effects of UV-B radiation time and intensity on pathogenicity of *S. felitiae* 0639C (a) and 0663TD (b) after different times of treatment

### 3 讨论与结论

全球环境与气候对臭氧层产生显著影响, 而臭氧层的破坏使地球表面的 UV-B 辐射不断增强, 地球上的生物也将面临逐渐增强的 UV-B 胁迫, 因此揭示 UV-B 胁迫对生命体的影响具有重要意义。以往研究结果表明, 平流层  $O_3$  的耗损及由此导致的太阳 UV-B 辐射强度的增加, 对生活在地球生物圈中的各种生物及其生存环境质量都会产生影响, 成年节肢动物的存活时间和逆境压力的强度、时长之间存在着明显的相关性, 但是自然种群在生境中的相关研究鲜见报道<sup>[11-12]</sup>。

UV-B 辐射增强对节肢动物或昆虫的影响也有相关报道<sup>[13-14]</sup>, 而 UV-B 辐射对昆虫病原线虫的影响相关报道较少。

昆虫病原线虫作为一种生命体, 逆境胁迫对其最明显的影响是对生物学特性的影响, 研究表明其存活率、侵入率、致病力和生殖力在受到逆境胁迫时都会发生变化<sup>[8-10]</sup>。且不同种或同一种类的不同品系昆虫病原线虫在不同发育阶段, 对不良环境条件的抵御能力均不同<sup>[8-10]</sup>。线虫的整个生活史中, 最能抵御逆境压力的阶段为抗逆性幼虫 daner juvenile (侵染期线虫), 逆

境对昆虫病原线虫侵染期线虫的影响及塑造, 直接决定了线虫是否能经过逆境条件进入下一个生活史阶段<sup>[1]</sup>。甘肃省大部分地区处于 500 mm 等雨量线以下, 总体气候特征为干旱, 且夏季降水集中, 占年降水的 70% 左右, 造成了干旱缺水、夏季日照时数长、紫外辐射强度大的地理气候大背景。项目组在前期的研究中发现, 甘肃省(跨古北区和东洋区)昆虫病原线虫资源比较丰富(8 种 51 个品系, 其中 4 种属中国新记录种)。本研究表明, UV-B 辐射对甘肃省诱集分离得到的昆虫病原线虫存活有影响, 但是在一定的胁迫强度和时长内, 大部分侵染期线虫能存活并完成生活史, 说明甘肃省昆虫病原线虫对当地强 UV-B 辐射胁迫有一定的适应性和抗逆性。

本研究表明, 不同昆虫病原线虫和同种不同品系昆虫病原线虫受不同逆境胁迫后, 其致病力的变化不同, 这与以往的研究结果相一致。分析其原因, 首先昆虫病原线虫对逆境胁迫的不同耐受程度首先取决于其遗传特性, 不同种、同种不同品系线虫对同种胁迫表现不同的耐受水平; 其次, 同一种线虫在对不同生存环境的长期适应中, 抗逆能力也会发生较大的变化以获得与生境相适应的特性<sup>[8-10, 20]</sup>。本研究所用不同昆虫病原线虫品系, 为甘肃省不同地区或不同生境中诱集分离得到。不同的地理环境和气候条件、非生物胁迫及当地作物栽培管理制度、适宜寄主昆虫等因素, 均可导致不同品系的线虫对紫外辐射的抗逆性和适应性发生分化, 从而使其经辐射后对大蜡螟的致病力发生不同变化。

昆虫病原线虫对隐蔽性害虫具有较高的防治效果, 但是对叶面害虫的防治效果较低, 其中一个重要的原因就是 UV-B 辐射对侵染期线虫的影响<sup>[8-10]</sup>。本研究结果表明, UV-B 辐射在一定的辐射时间内, 对甘肃省昆虫病原线虫的存活率无显著影响, 说明甘肃省土著昆虫病原线虫对 UV-B 辐射有一定的抗逆性, 为甘肃省昆虫病原线虫对叶部害虫的防治及推广提供了理论依据。

决定昆虫病原线虫对寄主昆虫的控制效能的因素, 除昆虫病原线虫自身毒力大小外, 还与其行为特征有关, 如寄主搜寻能力和迁移能力。昆虫病原线虫对叶面害虫或其他裸露性害虫的控制效能较低, 部分文献推测, 是因为紫外辐射降低了昆虫病原线虫的毒力<sup>[8-9]</sup>。但本研究表明, 经 UV-B 辐射后, 有 2 个品系的昆虫病原线虫的致病力升高, 充分说明紫外辐射有刺激昆虫病原线虫侵染和致死寄主昆虫的作用, 同时也说明 UV-B 辐射降低昆虫病原线虫对叶部害虫的防治效果,

主要因素不是因为存活率和致病力的下降, 而是其他原因造成的。根据现有的研究结果推测, 其中一个重要的原因应为 UV-B 辐射对昆虫病原线虫的迁移能力及趋性造成影响, 在后期可进行进一步的研究。

不同线虫品系的致病力大小和其能量储备量有关<sup>[10]</sup>。亦有研究表明, 昆虫病原线虫的能量物质是决定昆虫行为特征和对逆境响应的基础<sup>[8-9]</sup>, 关于 UV-B 辐射对昆虫病原线虫体内能量物质的影响, 及能量物质对致病力的影响是否取决于能量物质对其侵染行为和迁移能力的调控, 将在后期继续探讨。

本研究表明, 甘肃省昆虫病原线虫对紫外辐射有一定耐受能力和适应性。在 20 W 和 40 W 强度下, 短时间 UV-B 辐射对昆虫病原线虫 N 存活率无显著影响, 但随辐射强度增加, 其存活率会下降。经一定强度的紫外辐射后, 9 个甘肃省土著昆虫病原线虫品系的致病力存在差异, 同一种的不同品系之间, 其致病力变化不同。在 20 W UV-B 辐射 30 min 后, 斯氏 *S. felitiae* 0639C 的致病力显著升高( $P < 0.05$ ), *S. felitiae* 0661YM 的致病力显著降低( $P < 0.05$ ), 其余供试品系致病力变化差异均不显著( $P > 0.05$ )。

UV-B 辐射对昆虫病原线虫致病力的影响, 不但包括毒力大小的影响, 同时也影响了其对寄主的致死速率, 经 UV-B 辐射后, 供试昆虫病原线虫引起全部寄主昆虫死亡时间发生变化。致病力升高的品系, 其引起全部寄主昆虫死亡的时间缩短; 而致病力降低的品系, 使寄主昆虫全部死亡的时间增长; 致病力未发生变化的品系, 其使寄主昆虫全部死亡的时间亦未发生显著变化。

紫外辐射能刺激 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 侵染和致死寄主昆虫, 不同强度 UV-B 辐射对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 引起寄主昆虫死亡的时间有影响。经辐射预处理后, 2 品系线虫引起寄主昆虫死亡的时间较对照组均提前, 其中 *S. felitiae* 0639C 随着辐射强度的增大, 引起寄主昆虫开始死亡时间提前, 而 *S. felitiae* 0663TD 随着辐射强度增加, 引起寄主昆虫开始死亡时间延后。

侵染前期(24 h)紫外辐射强度对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力有影响, 随着 UV-B 辐射强度的增加, *S. felitiae* 0639C 致病力升高, 而 *S. felitiae* 0663TD 致病力降低(仍高于未辐射组), 但随着时间的推移(48 h 后), 辐射强度(20 W 和 40 W)对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力无影响; 一定的辐射时长内(120 min), 辐射时长对 *S. felitiae* 0663TD 和 *S. felitiae* 0639C 的致病力无影响。



## 参考文献 References

- [1] GAUGLER R. Entomopathogenic Nematodes[M]. Wallingford, UK: CAB International, 2002: 1–13
- [2] CUTHBERTSON A G S, AUDSLEY N. Further screening of entomopathogenic fungi and nematodes as control agents for *Drosophila suzukii*[J]. *Insects*, 2016, 7(2): 24
- [3] ILAN T, KIM-SHAPIRO D B, BOCK C H, et al. Magnetic and electric fields induce directional responses in *Steinernema carpocapsae*[J]. *International Journal for Parasitology*, 2013, 43(10): 781–784
- [4] KAPLAN F, ALBORN H T, VON REUSS S H, et al. Interspecific nematode signals regulate dispersal behavior[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e38735
- [5] KASPI R, ROSS A, HODSON A K, et al. Foraging efficacy of the entomopathogenic nematode *Steinernema riobrave* in different soil types from California citrus groves[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 243–253
- [6] SHAPIRO-ILAN D I, HAN R, DOLINSKI C. Entomopathogenic nematode production and application technology[J]. *Journal of Nematology*, 2012, 44(2): 206–217
- [7] WILLETT D S, ALBORN H T, STELINSKI L L. Multitrophic effects of belowground parasitoid learning[J]. *Nature Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2067
- [8] 曹翠玲, 刘倩, 简恒, 等. 昆虫病原线虫对非生物胁迫的响应机制[J]. *昆虫学报*, 2009, 52(3): 312–318  
CAO C L, LIU Q, JIAN H, et al. Response mechanisms of entomopathogenic nematode to abiotic stress[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2009, 52(3): 312–318
- [9] 钱秀娟. 甘肃省昆虫病原线虫资源及其对非生物胁迫的适应性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 29–50  
QIAN X J. Entomopathogenic nematodes resources of Gansu Province and its adaptation to abiotic stress[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014: 29–50
- [10] SHAPIRO-ILAN D I, BROWN I, LEWIS E E. Freezing and desiccation tolerance in entomopathogenic nematodes: Diversity and correlation of traits[J]. *Journal of Nematology*, 2014, 46(1): 27–34
- [11] 胡祖庆, 亢菊侠, 赵惠燕, 等. 不同紫外(UV-B)辐射时间对两种体色型麦长管蚜后代生物学特征的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1812–1816  
HU Z Q, KANG J X, ZHAO H Y, et al. Effect of UV-B radiation on biological characteristics of two body color biotypes of *Sitobion avenae* (Fab.) offspring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1812–1816
- [12] 闫生荣, 周青. 紫外辐射与复合胁迫对植物抗氧化酶系统的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(3): 195–197  
YAN S R, ZHOU Q. Effects of supplementary UV-B radiation and combined stresses on plant antioxidant enzymes[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 195–197
- [13] 杜军利, 吴德功, 张廷伟, 等. 紫外线(UV-B)辐射对不同色型豌豆蚜生物学特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1626–1630  
DU J L, WU D G, ZHANG T W, et al. Effects of UV-B radiation on biological characteristics of different color pea aphid morphs (*Acyrtosiphon pisum*)[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(12): 1626–1630
- [14] 唐莉娜, 林文雄, 梁义元, 等. UV-B 辐射增强对水稻蛋白质及核酸的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 40–42  
TANG L N, LIN W X, LIANG Y Y, et al. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on soluble protein and nucleic acid in rice leaves[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 40–42
- [15] ZHAO Y L, WANG D Y. Formation and regulation of adaptive response in nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2012, 2012: 564093
- [16] 钱秀娟, 谷黎娜, 邢玉芳, 等. 甘肃省昆虫病原线虫区系研究[J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 593–599  
QIAN X J, GU L N, XING Y F, et al. Occurrence of entomopathogenic nematodes in Gansu Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3): 593–599
- [17] 钱秀娟, 刘长仲, 阮艳娥. 昆虫病原线虫对甘肃省草地蛴螬的致病力研究[J]. *草地学报*, 2015, 23(2): 414–421  
QIAN X J, LIU C Z, RUAN Y E. Pathogenicity of entomopathogenic nematodes to grass grubs (Coleoptera: Scarabaeidae)[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(2): 414–421
- [18] QIAN X J, GU L N, XING Y F, et al. Entomopathogenic nematodes isolated from Gansu province and four new species in China[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 651/653: 328–336
- [19] 谷黎娜, 钱秀娟, 刘长仲. 甘肃省昆虫病原线虫 3 个优良品系的生物学特性研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2009, 44(2): 85–89  
GU L N, QIAN X J, LIU C Z. Biological characteristics of three fine strains of insect pathogenic nematode in Gansu Province[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2009, 44(2): 85–89
- [20] GREWAL P S, BORNSTEIN-FORST S, BURNELL A M, et al. Physiological, genetic, and molecular mechanisms of chemoreception, thermobiosis, and anhydrobiosis in entomopathogenic nematodes[J]. *Biological Control*, 2006, 38(1): 54–65