

连续 UV-B 胁迫对绿色型豌豆蚜生物学特性的影响*

袁伟宁 吕 宁 孙小玲 刘长仲**

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室 兰州 730070)

摘 要 为了明确连续 UV-B 胁迫对绿色型豌豆蚜生长发育及种群参数的影响,将 12 h 内所产绿色型豌豆蚜若蚜经 40 W UV-B 辐射连续处理 8 代,每代 6 次,每天 1 次,每次分别处理 20 min、30 min、40 min、50 min 和 60 min,每次处理后单头饲养,最终采用实验种群生命表方法进行评价,获得多代种群内禀增长率(r_m)、净增殖率(R_0)、平均世代周期(T)和周限增长率(λ)等生命参数。结果显示,随着辐射时间延长,世代数增加,各处理下若蚜历期最终延长,最长为 8.11 d,成蚜寿命先延长后缩短, F_8 代为对照的 6.71%~21.27%;净增殖率先升高后降低, F_8 代为对照的 0.20%~22.32%;内禀增长率在 F_8 代时显著降低,最高为对照的 11.05%;周限增长率先升高后缩短, F_8 代为对照的 0.90%~22.14%; F_8 代平均世代周期显著缩短,相对于对照减短 8.54%~21.11%。连续 UV-B 胁迫试验中,处理时间越长,随着世代数增多,UV-B 对绿色型豌豆蚜生长发育和繁殖抑制作用越强,种群数量增长越慢。

关键词 豌豆蚜 UV-B 种群 生命参数 生物学特性

中图分类号: S435.79 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)08-1020-06

Effects of continuous UV-B stress on biological characteristics of green pea aphid

YUAN Weining, LYU Ning, SUN Xiaoling, LIU Changzhong

(Pratacultural College of Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Ecosystem of Ministry of Education / Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract Ozone depletion resulted in enhanced UV-B stress in middle and high latitude regions in the northern and southern hemispheres. This situation had generally been a key factor of pea aphid's genetic divergence. Pea aphid (*Acyrtosiphum pisum*) which transmitting many different plant viruses is a main species of harmful pests. It can cause significant loss to agriculture, particularly the production of alfalfa (*Medicago* spp.), pea (*Pisum sativum*), vicia faba (*Vicia faba*) and other crops. To determine the effect continuous UV-B stress on the development and population parameters of pea aphid and to provide theoretical basis for ecological heredity and population succession and integrated pest management, 8 generations of green pea aphid nymph born for 12 h were treated by UV-B 40 W. The treatment included 6 times per generation, once per day, 6 days per generation, and respectively 20 min, 30 min, 40 min, 50 min and 60 min per treat. The life parameters of the intrinsic rate (r_m), net reproductive rate (R_0), mean generation time (T) and finite rate of increase (λ) were determined for reared singles. The results showed that nymph development duration increased with added radiation time or generation, with the longest duration of 8.11 d. The lifetime of adult aphid extended initially and then shortened. Compared with the control, the lifetime of the eight generation (F_8) was only 6.71%~21.27% of the control. Net reproductive rate increased and then decreased, with F_8 of 0.20%~22.32% of the control. The intrinsic rate of F_8 declined obviously, with the high of 11.05% of the control. The finite rate increased and then shortened, with F_8 of 0.90%~22.14% of the control. Mean generation time of F_8 shortened by 8.54%~21.11%, compared with that of the control. Based on development and population parameters of the tested green pea aphid under continuous UV-B stress, green pea aphid grew well at its 4th generation irrespective of the period of time of UV-B stress treatment. However, the more was the generation added, the more was the increase in the process time of the same generation and the more was the inhibiting effect on the development and reproduction of green pea aphids, eventually slowing the increase in population growth.

* 国家自然科学基金项目(31260433)和高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20136202110007)资助

** 通讯作者: 刘长仲, 主要从事昆虫生态与害虫综合治理研究。E-mail: liuchzh@gsau.edu.cn

袁伟宁, 主要从事昆虫生态学研究。E-mail: nanjueyuan@126.com

收稿日期: 2014-12-16 接受日期: 2015-05-04

Keywords *Acyrtosiphon pisum* (Harris); UV-B; Population; Life parameter; Biological characteristics

(Received Dec. 16, 2014; accepted May 4, 2015)

近年来, 臭氧层破坏导致到达地球表面的 UV-B (280~315 nm) 辐射不断增强, 对整个生物界都产生了一定影响^[1-5]。蚜虫(*Aphidoidea* spp.) 作为世界性害虫, 在 UV-B 胁迫下, 种群也发生了很大变化^[6]。学者通过模拟 UV-B 辐射增强对麦田生态系统的影响, 发现在增强的 UV-B 辐射下麦蚜复合种群数量降低, 物种多样性改变^[6]。在对麦长管蚜 [*Sitobion avenae* (Fabricius)] 的研究中发现增强的紫外辐射引起了蚜虫 DNA 的变异^[7], 并且紫外辐射对蚜虫产生了强烈的选择压力, 可导致蚜虫种下遗传分化^[8]。胡祖庆等^[9]研究了增强的 UV-B 辐射对体色型麦长管蚜生物学特征的影响, 探求紫外辐射在蚜虫种下体色分化及遗传中的作用, 发现短时间紫外辐射能够促进红色型麦长管蚜的生长发育。有学者认为, 增强的紫外辐射产生的影响是可以逐代积累的^[10]。杜军利等^[11-12]通过研究不同紫外(UV-B)照射时间对豌豆蚜(*Acyrtosiphon pisum* Harris) 后代生物学特性的影响, 发现紫外胁迫对豌豆蚜的影响与苜蓿(*Medicago sativa* L.) 品种存在一定的相关性, 明确了不同温度条件下 UV-B 辐射对 2 种色型豌豆蚜的影响。李军等^[13-18]研究发现不同强度紫外线处理桃蚜 [*Myzus persicae* (Sulzer)] 后, 其生物学指标有显著差异, 并且紫外线强度越大, 蚜虫发育历期和平均世代周期越长, 净增值率和内禀增长率越大, POD、SOD、CAT 活力水平也均高于对照。虽然领域内学者做了较多关于紫外辐射对蚜虫影响的研究, 但多以高强度 UV-B 辐射处理^[19], 或只处理一代蚜虫^[20-21], 而自然环境中增强的 UV-B 辐射强度低, 并一直对生物产生胁迫, 前人处理条件与自然环境差异很大。本研究以豌豆蚜为材料, 小剂量 UV-B 连续胁迫多代, 以观察 UV-B 胁迫对豌豆蚜生物学特性的影响。

豌豆蚜是欧洲牧草上的主要害虫, 1776 年英国第一次报道。由于环境变化, 近几年, 我国豌豆蚜种群也发生了很大变化。豌豆蚜正从苜蓿田的次要害虫上升为主要害虫^[14]。本文采用“离体叶片”法在蚕豆(*Vicia faba* L.) 叶片上^[18,22]通过不同 UV-B 辐射时间对绿色型豌豆蚜连续多代胁迫处理的生物学特性的影响, 探求连续的 UV-B 辐射对绿色型豌豆蚜生长发育和繁殖的作用, 为豌豆蚜生态遗传与进化及害虫综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试绿色型豌豆蚜采自甘肃农业大学试验基地。将无翅胎生雌蚜单头饲养在盆栽‘临蚕 9 号’蚕豆植株上进行单克隆系的培养, 环境条件为: 温度(25±1) °C, 相对湿度 50%±10%, 光照 16 h : 8 h(L : D)。

供试蚕豆品种‘临蚕 9 号’的种子购买于甘肃农业科学研究院, 在室外盆栽备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试虫饲养

采用“离体叶片”饲养法。在培养皿底部垫一张定性滤纸, 滤纸中央铺一块与蚕豆叶片大小相仿的脱脂棉, 厚度不超过 2 mm, 脱脂棉上平铺一片蚕豆叶片, 背面朝上, 叶柄用脱脂棉缠裹, 往处理好的培养皿中注入蒸馏水, 以滤纸和脱脂棉含满水为宜。单头接入若蚜后在温度为(25±1) °C, 80%相对湿度, 光周期 L : D=16 h : 8 h 的 RH-250-G 型光照培养箱中进行饲养。

1.2.2 UV-B 辐射若蚜

每世代将 12 h 内产的若蚜待取食 12 h 后置于垂直距离为 30 cm 处的 40 W 紫外灯下分别辐射处理 20 min、30 min、40 min、50 min、60 min, 对照组(CK) 白炽灯照射。每个处理 60 头, 每天 1 次, 重复 6 次, 连续试验 8 代。

1.2.3 观察记载方法

对处理的蚜虫每隔 12 h 观察 1 次, 记录每头蚜虫的蜕皮和死亡时间, 产蚜量, 直至成虫死亡。

1.3 统计方法

隔代计算出种群参数。

$$\text{净增值率: } R_0 = \sum L_x M_x \quad (1)$$

$$\text{平均世代周期: } T = \sum x L_x M_x / \sum L_x M_x \quad (2)$$

$$\text{内禀增长率: } r_m = \ln R_0 / T \quad (3)$$

$$\text{周限增长率: } \lambda = \exp(r_m) \quad (4)$$

式中: x 为时间间隔(d), L_x 为在 x 期开始时的存活率, M_x 为在 x 期间平均单头产蚜量。数据处理采用 SPSS 19.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 UV-B 胁迫对豌豆蚜若蚜历期和成蚜期寿命的影响

由表 1 看出, F_8 代 40~60 min 处理下若蚜历期较对照显著延长。各处理下 F_8 代若蚜历期均显著长于

F₄代,并以 60 min 处理下最长,达 8.11 d。20 min 和 30 min 处理下 F₄代若蚜历期缩短,以处理 20 min 时最短,为 6.01 d。

由表 1 还可看出,20~50 min 处理下积累的 UV-B 胁迫导致 F₈代成蚜历期显著缩短($P<0.05$),最长为 2.88 d。出现这种情况是由于 F₈代若蚜期的显著延长和若蚜期死亡率高造成的。60 min 处理下成蚜期显著缩短发生在 F₆代,相对于其他处理,积累的影

响提前 2 代表现。

F₂代成蚜寿命在 30~60 min 处理下与对照相比显著缩短, F₄代随着处理时间的延长并无显著变化($P>0.05$), 60 min 处理下显著短于对照($P<0.05$), F₆代 60 min 处理显著短于其他各处理及对照, F₈代处理组的成蚜寿命显著短于对照,随着处理时间延长,成蚜寿命缩短,为对照的 6.71%~21.27%, 50~60 min 处理显著短于 40 min 处理。

表 1 不同 UV-B 胁迫时间对绿色型豌豆蚜若蚜历期和成蚜寿命的影响

Table 1 Effects of different time periods UV-B stress on development duration of green pea aphid nymph and lifetime of adult d

项目 Item	世代 Generation	处理时间 Treatment time (min)					
		0 (CK)	20	30	40	50	60
若蚜历期 Development duration of nymphs	F ₂	6.84±0.51aAB	7.66±0.16aA	7.30±0.57aAB	6.55±0.09bB	6.61±0.20cB	6.92±0.08bAB
	F ₄	7.04±0.17aAB	6.01±0.04cC	6.57±0.07bB	6.62±0.26bB	6.77±0.12cAB	7.24±0.11bA
	F ₆	7.28±0.26aAB	7.06±0.09bB	7.32±0.26aAB	7.73±0.23aA	7.29±0.04bAB	7.00±0.03bB
	F ₈	6.79±0.24aA	7.28±0.11bAB	7.28±0.15aAB	7.65±0.08aBC	7.78±0.20aBC	8.11±0.15aC
成蚜寿命 Lifetime of adult aphid	F ₂	13.21±0.39aA	11.35±0.64aA	9.10±0.18aB	8.51±0.75aB	9.20±0.25aB	8.96±1.03aB
	F ₄	12.22±0.39abA	11.55±0.72aAB	10.97±1.13aAB	10.01±0.15aAB	11.28±0.59aAB	9.94±0.54aB
	F ₆	11.65±0.19bA	9.37±0.73aAB	10.67±0.44aAB	8.95±0.50aB	11.25±1.30aAB	3.96±0.57bC
	F ₈	11.33±0.71bA	2.41±0.75bB	2.61±0.45bB	2.88±0.63bB	1.06±0.17bC	0.76±0.24cC

CK: 白炽灯照射, 对照; 小写字母表示不同世代间差异显著($P<0.05$), 大写字母表示不同处理时间间差异显著($P<0.05$), F₂、F₄、F₆和 F₈表示豌豆蚜饲养代数,下同。CK is the control of incandescent light. Different lowercase letters mean significant difference at 5% level among different generations. Different capital letters mean significant difference at 5% level among different treatment times. F₂, F₄, F₆ and F₈ mean the second, fourth, sixth, and eighth breeding generations of aphid. The same below.

2.2 UV-B 辐射对种群生命参数的影响

通过组建不同 UV-B 辐射时间下连续多代豌豆蚜实验种群生命表,隔代计算出主要生命参数(表 2)。由表 2 可以看出,对照组豌豆蚜的净增殖率在连续 8 代饲养中没有显著差异($P>0.05$)。各辐射处理下净增殖率随着饲养代数的增加总体呈先升高后降低的趋势, F₄代最高,依辐射时间长短分别为 77.27、64.23、63.08、62.69、58.80,除辐射处理 20 min 以外,均显著低于对照组($P<0.05$)。各辐射处理的 F₈代豌豆蚜净增殖率急剧下降,为对照的 0.2%~22.32%,最高只有 16.07,其中 50 min 和 60 min 处理的净增殖率分别仅为 0.53 和 0.19,均小于 1,因此 50 min 和 60 min 处理下不能建立 F₈代之后的种群。随着辐射时间的延长,相同世代的净增殖率逐渐降低,但 F₂代相邻两个处理之间差异不显著; F₄代 20 min 处理与对照之间没有显著差异,与 30 min 处理差异显著; 30~60 min 之间差异不显著; F₆代,至 60 min 处理时净增殖率显著下降。

对照各世代间对豌豆蚜的平均世代周期无显著差异($P>0.05$)。20 min 辐射处理对豌豆蚜平均世代周期无显著影响($P>0.05$)。30~50 min 辐射处理下,豌豆蚜 F₈代的平均世代周期显著缩短($P<0.05$),相对

于对照减短 8.54%~21.11%; 60 min 处理下 F₆代的平均世代周期也显著缩短($P<0.05$),为对照的 76.65%。表明低强度辐射处理对豌豆蚜平均世代周期无显著影响,随着辐射强度的增加,影响逐渐增大。

随着辐射世代的增加,除 30 min 处理组外,豌豆蚜种群内禀增长率呈“低-高-低”变化, F₄代达到最高值。20~30 min 处理下饲养至 F₈代时,内禀增长率显著低于 F₂代,且小于 1,说明种群呈衰颓态势,种群数量将越来越小。60 min 处理下 F₆代内禀增长率显著小于 F₂代,且小于 1。相同代数下, F₂代内禀增长率在 60 min 处理下显著降低($P<0.05$); F₄代时 30~60 min 处理均低于对照, 20 min 处理下内禀增长率显著高于 50~60 min 处理, F₈代时, 20~30 min 处理的内禀增长率均显著低于对照($P<0.05$),最高只有对照的 11.05%。

各世代对照间的周限增长率没有显著差异($P>0.05$)。处理组除 30 min 处理外,其他不同时间 UV-B 辐射处理后种群 F₄代周限增长率较 F₂代升高。自 F₄代开始各处理周限增长率持续降低, 20~50 min 处理下 F₈代显著低于 F₆代,为对照的 0.9%~22.14%。60 min 处理下, F₆代显著低于 F₄代。水平方向上,周限增长率在 F₂代时, 60 min 处理下显著低于对照, F₆

表 2 不同 UV-B 胁迫时间对绿色型豌豆蚜净增殖率、平均世代周期、内禀增长率和周限增长率的影响

Table 2 Effects of UV-B stress on net reproductive rate, mean generation time, intrinsic rate and finite rate of increase of green pea aphid

项目 Item	世代 Generation	处理时间 Treatment time (min)					
		CK	20	30	40	50	60
净增殖率 Net reproductive rate	F ₂	70.57±3.73aA	62.94±1.35abB	61.29±2.14aBC	55.07±0.99abCD	51.05±2.85bDE	47.15±1.29bF
	F ₄	79.01±3.17aA	77.27±5.41aA	64.23±2.70aB	63.08±6.10aB	62.69±2.83aB	58.8±1.84aB
	F ₆	79.38±2.10aA	59.52±8.31bB	53.56±1.67aB	48.60±3.58bB	47.86±0.48bB	19.52±4.48cC
	F ₈	72.00±2.41aA	16.07±2.41cB	11.77±1.31bB	5.22±1.83cC	0.53±0.28cD	0.19±0.19dD
平均世代周期 Mean generation time (d)	F ₂	13.18±0.18aA	13.62±0.38aA	13.56±1.39aA	12.20±0.27bA	11.74±0.32bcA	14.80±1.88aA
	F ₄	13.83±0.41aA	12.09±0.31aB	12.14±0.16aB	12.32±0.16bB	13.41±0.51aAB	12.11±0.53abB
	F ₆	13.96±0.13aAB	12.26±0.17aAB	13.05±1.50aAB	14.55±0.23aA	12.48±0.45abAB	10.70±0.10bC
	F ₈	12.98±0.75aA	12.98±0.72aA	10.24±2.01bA	11.88±0.48bA	10.50±0.36cA	—
内禀增长率 Intrinsic rate	F ₂	1.67±0.04aA	1.53±0.01aA	1.68±0.10aA	1.51±0.04aA	1.47±0.08aA	1.17±0.11aB
	F ₄	1.74±0.07aAB	1.85±0.07aA	1.66±0.04aAB	1.62±0.09aAB	1.54±0.08aB	1.58±0.07aB
	F ₆	1.74±0.03aA	1.56±0.14aAB	1.42±0.09aAB	1.20±0.07aAB	1.35±0.04aB	0.60±0.26bC
	F ₈	1.72±0.09aA	0.19±0.14bB	0.14±0.23bB	—	—	—
周限增长率 Finite rate of increase	F ₂	5.35±0.23aA	4.62±0.04bA	5.43±0.54aA	4.52±0.17aA	4.37±0.36aA	3.27±0.35bB
	F ₄	5.73±0.38aAB	6.40±0.48aA	5.29±0.19aAB	5.11±0.44aB	4.70±0.38aB	4.89±0.37aB
	F ₆	5.69±0.17aA	4.84±0.62bAB	4.19±0.38aBC	3.34±0.23bBC	3.84±0.15aC	1.93±0.43cD
	F ₈	5.60±0.52aA	1.24±0.18cB	1.45±0.40bB	0.45±0.17cC	0.05±0.03bD	—

“—”表示无此值。“—” means without this value.

代时 30 min 处理下显著低于对照, F₈ 代时 20 min 处理下显著低于对照。说明增强的 UV-B 辐射不利于豌豆蚜种群数量的增加。相同世代下, F₂ 代周限增长率在 60 min 处理下显著降低; F₄ 代 20 min 处理下显著高于 40 min 以后的各处理, 但各处理都与对照没有显著性差异, 其原因可能与 F₄ 代保护酶活性的提高有关。F₆ 代 30 min 以后的处理下周限增长率显著低于对照; F₈ 代受辐射处理的各组周限增长率均显著低于对照, 并随着辐射时间的延长显著降低。

3 讨论与结论

豌豆蚜作为一种重要的刺吸式口器害虫, 可以传播多种植物病毒, 危害苜蓿、豌豆、蚕豆等, 给农业生产造成重大损失。随着人类工业化进程的不断加快, 环境污染加剧, 导致到达地球表面的 UV-B (280~315 nm) 辐射不断增强^[23], 在 UV-B 胁迫下, 豌豆蚜种群也发生了很大变化^[6], 因此学者们做了多方面研究。杜一民等^[20,24]发现增强的 UV-B 辐射降低麦长管蚜的生长发育和种群参数, 并认为紫外辐射强度和持续时间二者存在交互作用。张丽等^[19]利用高强度 UV-B 辐射小麦植株后抑制了麦长管蚜的取食、生长发育和繁殖, 这种抑制可能是由于高强度的紫外辐射改变了小麦叶表面结构和次生代谢产物造成的。UV-B 胁迫对蚜虫的影响不只是间接的,

它还能打破蚜虫细胞内自由基产生与清除平衡, 引起具有强氧化作用的自由基堆积, 破坏生物分子, 如 DNA 等, 为了抵御外界的不良刺激, 蚜虫会调整 POD、CAT、SOD 等保护酶的活性以缓解 UV-B 辐射造成的损伤, 其中以 CAT 和 SOD 为主^[21]。

本研究以低强度 UV-B 连续胁迫绿色型豌豆蚜 8 代, 结果显示, 连续多代 UV-B 胁迫最终对豌豆蚜生长发育和繁殖有抑制作用, 随着代数的递增, 抑制作用越强。相同代数下, 辐射时间越长, UV-B 胁迫对繁殖力抑制作用越强。本研究中, UV-B 胁迫下 20 min 处理的 F₄ 代若蚜历期缩短, 成蚜寿命延长, 这可能是由于低剂量短时期辐射胁迫存在“毒物兴奋效应^[25]”, 能促进昆虫生长发育以适应环境。但辐射时间越长, 随着世代增加, 遗传积累量增大, 毒物兴奋作用转变为抑制作用^[11], 因此最长若蚜历期和最短成蚜寿命均出现在 60 min 处理下的 F₈ 代。这说明长时间 UV-B 胁迫对绿色型豌豆蚜生长发育有抑制作用, 与杜军利等^[11,16]的研究结果相似。20~60 min UV-B 胁迫下处理至 F₈ 代时, 由于遗传积累, 不能成功建立下一代种群。各处理下净增殖率以 F₄ 代最高, 但低于同世代的对照组, 之后随着辐射时间延长而逐渐降低。这可能是由于 UV-B 胁迫诱导保护酶活性增强的缘故^[13]。受 UV-B 胁迫的试验种群平均世代周期最长为 14.80 d, 最短为 8.24 d, 并且当单次

辐射时间长于 30 min 时,随着辐射时间的延长,平均世代周期延长越早出现,40 min 处理下出现在 F_6 代,50 min 处理下出现在 F_4 代,60 min 处理下出现在 F_2 代,而相对应的净增殖率、内禀增长率却没有显著增加,因此说明 30 min 以上的 UV-B 胁迫不利于豌豆蚜种群数量的增长,而胡祖庆等^[9,13]研究表明,单次采用最短辐射时间为 1 h 时对麦长管蚜种群增长有较强抑制作用,由于他没有设小于 1 h 的处理,虽然结果相似,但这种差异也可能是由于不同种供试蚜虫造成的。周限增长率(λ)是推算较长时间种群增长情况的指标, $\lambda > 1$ 时,种群将增长, $\lambda = 1$ 时种群稳定, $0 < \lambda < 1$ 时种群下降, $\lambda = 0$ 时种群将在一代时间中灭亡。当处理时间大于 40 min 时, $0 < \lambda_{F_8} < 1$,所以种群数量从 F_8 代开始下降。

连续 UV-B 胁迫 4 代以上,处理时间越长,世代数越大,对绿色型豌豆蚜生长发育和繁殖的抑制作用越强,种群数量增长越慢。本试验所得结果均是在实验室条件下获得的,仅就连续多代 UV-B 胁迫下豌豆蚜的种群参数做了研究,对 UV-B 诱导产生负作用的机理探究不明确,但仍然可以为紫外诱导豌豆蚜种群演替和害虫综合防治提供理论依据。若要完全明确 UV-B 胁迫在豌豆蚜种群演替和进化中的作用,还需从分子机理,相关蛋白和 DNA、RNA 等方面做进一步研究。

参考文献

- 王少彬, 苏维瀚, 魏鼎文. 太阳紫外线的生物有效辐射与大气臭氧含量减少的关系[J]. 环境科学学报, 1993, 13(1): 114-120
Wang S B, Su W H, Wei D W. Biologically effective radiation of solar ultraviolet radiation and the depletion of ozone layer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1993, 13(1): 114-120
- 安黎哲, 冯虎元, 王勋陵. 增强的紫外线-B 辐射对几种作物和品种生长的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(2): 249-253
An L Z, Feng H Y, Wang X L. Effects of enhanced UV-B radiation on the growth of some crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(2): 249-253
- Mewis I, Schreiner M, Nguyen C N, et al. UV-B irradiation changes specifically the secondary metabolite profile in Broccoli Sprouts: Induced signaling overlaps with defense response to biotic stressors[J]. Plant Cell Physiology, 2012, 53(9): 1546-1560
- Paul N D, Moore J P, McPherson M, et al. Ecological responses to UV radiation: Interactions between the biological effects of UV on plants and on associated organisms[J]. Physiologia Plantarum, 2011, 145(4): 565-581
- Caldwell M M, Flint S D. Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystems[J]. Climatic Change, 1994, 28(4): 375-394
- 李元, 王勋陵. 增强的 UV-B 辐射对麦田生态系统中种群数量动态的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 131-135
Li Y, Wang X L. Effects of enhanced UV-B radiation on population quantity dynamics of weeds, soil macroanimals and wheat aphids in the wheat field ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 131-135
- 姚建秀, 赵惠燕. 紫外条件诱导下麦长管蚜 DNA 的变异研究[J]. 西北农业学报, 2001, 10(1): 33-36
Yao J X, Zhao H Y. Study on the DNA mutation of wheat aphid under the ultraviolet[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2001, 10(1): 33-36
- 胡祖庆, 赵惠燕, 亢菊侠, 等. 紫外辐射对两种体色型麦长管蚜生物学特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 1002-1006
Hu Z Q, Zhao H Y, Kang J X, et al. Effects of UV-radiation on biological characteristics of different body-color biotypes of *Sitobion avenae* (Fab.)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 1002-1006
- 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
- 都二霞, 郭剑文, 赵惠燕. 紫外辐射诱导桃蚜 DNA 变异[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1245-1249
Du E X, Guo J X, Zhao H Y. UV-induced DNA mutation of peach aphid[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1245-1249
- 杜军利, 武德功, 张廷伟, 等. 不同紫外辐射时间对 2 种色型豌豆蚜后代生物学特性的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5): 961-966
Du J L, Wu D G, Zhang T W, et al. Effect of UV-B for different radiation durations on biological characteristics of two color morphs of pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Harris) offspring[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(5): 961-966
- 杜军利, 武德功, 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
- 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[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 61-64
Li J, Zhao H Y, Zhao X D. Study on effect of ecological characteristics and enzyme activity of Aphid radiated by different intensities of ultraviolet[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2005, 33(4): 61-64
- 武德功, 贺春贵, 刘长仲, 等. 不同苜蓿品种对豌豆蚜的生化抗性机制[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 497-501

- Wu D G, He C G, Liu C Z, et al. Biochemical resistance mechanism of *Medicago sativa* to *Acyrtosiphon pisum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(3): 497-501
- [15] 武德功, 王森山, 刘长仲, 等. 豌豆蚜刺吸胁迫对不同苜蓿品种体内单宁含量及生理活性的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 351-355
- Wu D G, Wang S S, Liu C Z, et al. Effects of herbivore stress by *Acyrtosiphon pisum* on the contents of tannin and physiological activity in different alfalfa cultivars[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(2): 351-355
- [16] 朱国平, 杨杰, 张丽, 等. 连续多代 UV-B 处理对麦长管蚜生态学的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(8): 63-67
- Zhu G P, Yang J, Zhang L, et al. Ecological effects on the aphid *Sitobion avenae* (Fabricius) exposed to UV-B radiation for several successive generations[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(8): 63-67
- [17] 张迎梅, 李元, 王勋陵, 等. 紫外辐射增强对麦二叉蚜发生量的影响[J]. 环境科学, 1999, 20(3): 66-68
- Zhang Y M, Li Y, Wang X L, et al. Effects of enhanced UV-B radiation on the appeared quantity of wheat aphid (*Schizaphis graminum*)[J]. Environmental Science, 1999, 20(3): 66-68
- [18] 刘树生. 介绍一种饲养蚜虫的方法: 新的叶子圆片法[J]. 昆虫知识, 1987, 24(3): 113-116
- Liu S S. A new method of raising aphids: Leaf discs method[J]. Chinese Bulletin of Entomology, 1987, 24(3): 113-116
- [19] 张丽, 周冬, 杨杰, 等. UV-B 胁迫小麦上麦长管蚜的生命表参数和取食行为[J]. 昆虫学报, 2013, 56(6): 665-670
- Zhang L, Zhou D, Yang J, et al. Life table parameters and feeding behavior of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) on wheat under UV-B stress[J]. Acta Entomologica Sinica, 2013, 56(6): 665-670
- [20] Hu Z Q, Zhao H Y, Thieme T. The effects of enhanced ultraviolet-B radiation on the biology of green and brown morphs of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae)[J]. Environmental Entomology, 2013, 42(3): 578-585
- [21] 周冬, 杜一民, 杨杰, 等. 连续多代 UV-B 照射对麦长管蚜保护酶活性的影响[J]. 昆虫学报, 2014, 57(7): 762-768
- Zhou D, Du Y M, Yang J, et al. Effects of UV-B radiation in successive generations on the activities of protective enzymes in the grain aphid, *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2014, 57(7): 762-768
- [22] 杨本立, 杜春雄. 豌豆蚜在蚕豆上的发育和繁殖及发生世代[J]. 云南农业大学学报, 1990, 5(4): 242-243
- Yang B L, Du C X. The development, reproduction and generation of Pea aphid on beans[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1990, 5(4): 242-243
- [23] 吴兑. 太阳紫外线辐射及其生物效应[J]. 气象, 2001, 26(4): 54-57
- Wu D. Surface sunny ultraviolet radiation and biology effect[J]. Meteorological Monthly, 2001, 26(4): 54-57
- [24] 杜一民, 王萍, 杨杰, 等. 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[J]. 昆虫学报, 2014, 54(12): 1395-1401
- Du Y M, Wang P, Yang J, et al. Effects of UV-B radiation intensity and duration on the growth, development and fecundity of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2014, 54(12): 1395-1401
- [25] Stebbing A R D. Homesis: The stimulation of growth by low levels of inhibitors[J]. Science of the Total Environment, 1982, 22(3): 213-234