

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

胡祖庆¹, 亢菊侠², 赵惠燕^{1,*}, 汤兴春¹, 胡想顺¹

(1. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨凌 712100; 2. 杨凌职业技术学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 研究紫外(UV-B)辐射对红和绿色型麦长管蚜的生物学特征的影响, 探求紫外辐射在蚜虫种下体色分化及遗传中的作用。采用两种不同体色型的麦长管蚜[*Sitobion avenae* (Fab.)] 成蚜经过 30W 紫外线(UV-B)照射不同时间后, 单头饲养在不同小麦品种上, 分别测定了各处理 F_2 代麦长管蚜的发育历期、体重差及相对日均体重增长率等生物学参数。结果表明: 在 1h 紫外辐射处理后, 在德国品种 Astron 上, 红色型 F_2 代麦长管蚜的生长发育显著加快, 而绿色型无显著变化; 而在中国品种小偃-22 上, 两种体色型 F_2 代麦长管蚜均无显著变化; 在 8h 紫外辐射处理后, 在两种小麦品种上, 两种体色型 F_2 代麦长管蚜的生长发育均显著延缓, 且绿色型延缓比例均比红色型大。说明紫外辐射对两种体色型的麦长管蚜生长发育的影响均能遗传到 F_2 代, 在 Astron 小麦品种上, 短时间紫外辐射能够促进红色型麦长管蚜的生长发育; 在小偃 22 和 Astron 小麦品种上, 长时间紫外辐射均能抑制两种体色型麦长管蚜的生长发育, 且绿色型比红色型敏感。表明紫外辐射在蚜虫体色遗传中起着重要作用。

关键词: UV-B 辐射; 体色型; 麦长管蚜; 相对日均体重增长率

Effect of UV-B radiation on biological characteristics of two body color biotypes of *Sitobion avenae* (Fab.) offspring

HU Zuqing¹, KANG Juxia², ZHAO Huiyan^{1,*}, TANG Xingchun¹, HU Xiangshun¹

1 College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: The objective of the study was to examine the influence of ultraviolet radiation on the offspring of two body-color biotypes (i. e., red and green) of *Sitobion avenae* (Fab.), and to elucidate the role of ultraviolet radiation in the body color differentiation of aphids. Under controlled conditions in artificial bioclimatic chambers, adult aphids of red and green biotypes of *Sitobion avenae* were placed on two wheat varieties ('Astron' and 'Xiaoyan-22') and treated under 30W lamp of UV-B for different durations respectively. The impact of UV-B on development duration (T), weight and mean relative growth rate (MRGR) of the 2nd generation aphids (F_2) were subsequently measured. After being exposed to 1h of UV-B radiation, the development of red biotype of F_2 aphids fed on Astron were accelerated significantly, while the development of red and green biotypes on Xiaoyan-22 showed no changes; however, after being exposed to 8h UV-B radiation all aphids, both on Xiaoyan-22 and Astron displayed reduced development rate. Compared to the control, the reduction of development rate of green biotype were greater than that of the red biotype. The effects of UV-B radiation on aphids have inherited to F_2 ; Exposure to relatively short duration of UV-B radiation (1 h) can only accelerate the development rate of red biotype aphids on Astron, while exposure to relatively long time (8 h) of UV-B radiation can reduce development of both red and green biotypes on Astron and Xiaoyan22, and the green biotype of aphids is more sensitive to UV-B radiation than the red biotype. The findings from this study suggested that the UV-B radiation influenced the biology of red and green biotypes of *S. avenae* differently, which indicated that the UV-B radiation tolerance is likely to play an important role in aphid body

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39970112, 30470268); 中德农业合作资助项目(2006/2007(04))

收稿日期: 2009-01-21; **修订日期:** 2009-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohy1983@yahoo.com.cn

color differentiation and inheritance.

Key Words: UV-B radiation; body-color biotypes; *Sitobion avenae*; mean relative growth rate (MRGR)

由于环境污染,大气臭氧层破坏日趋明显,导致大量的紫外线(UV-B)辐射至地表,过量的紫外线对人类、动植物以及微生物等都会产生伤害^[1-5]。高强度紫外胁迫对昆虫产生了强烈的选择压力,从而导致昆虫种下遗传分化^[6-7]。蚜虫是一古老而高速进化的类群,由于紫外胁迫或其他环境胁迫,其种下遗传分化十分严重^[8-10]。蚜虫的种下分化严重是导致蚜虫广泛成灾的内在要素,也是蚜虫治理研究的核心问题。本研究通过研究紫外(UV-B)辐射对不同体色型麦长管蚜的影响,探求紫外辐射在蚜虫种下体色分化过程中的作用,为蚜虫生态遗传与进化及害虫辐射治理提供理论依据。姚建秀等通过 RAPD 分析证明了紫外辐射是诱导蚜虫种下遗传分化的主要因素之一^[11];都二霞等利用微卫星标记技术证明了不同紫外辐射时间和强度处理后, F_1 代桃蚜产生的可遗传的变异,且变异大小是由照射时间和强度共同决定的^[12]。但紫外辐射对蚜虫种下体色分化的影响尚未见报道。本研究在不同紫外辐射时间下,在不同抗性品种小麦上接不同体色型麦长管蚜,通过对 F_2 代表麦长管蚜发育历期、体重差、及相对日均体重增长率的测定来研究不同紫外辐射时间对不同体色型麦长管蚜 F_2 代的影响,以期阐明紫外辐射对蚜虫种下体色分化的影响,同时为蚜虫的综合治理提供依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

供试小麦品种 Astron,是德国主栽抗蚜品种;小偃-22,由中国小麦和偃麦草远源杂交育成,综合抗逆性好,为陕西关中主栽品种。

供试虫源麦长管蚜采自联邦德国农林生物研究中心(BBA, Braunschweig, Germany)试验田,在人工智能控制温室内饲养(温度:白天 20℃,夜晚 18℃;光周期 16L:8D;相对湿度(60 ± 5)%)。不同体色型分开饲养 5—6 代,此时的蚜虫为单克隆系,取发育比较好的一代单克隆系蚜虫备用。

1.2 试验地点及试验方法

试验于 2007 年在 BBA 进行。分别经过两种孔目(4 目, 8 目)的筛子筛选后取中间颗粒大小一致的小麦种子,再经过 1‰的电子天平称量,最后选取重量在 0.0556mg 左右的 Astron 及 0.0458mg 左右的小偃-22 小麦种子种在 9cm × 9cm × 10cm 的塑料盆中,单株/盆。放入人工智能控制温室内生长,所有条件严格统一。土壤条件为,沙:腐殖质:黑壤土 = 1:3:3;温度:白天 20℃,夜晚 18℃;光周期 16L:8D;相对湿度:(48 ± 5)% ;按需等量浇水。麦苗长至 10—15 日龄待用。

采集上述温室培养的红、绿色四龄麦长管蚜若蚜若干头接于小麦上饲养,第 2 天将羽化的成蚜移植到新的小麦上,选择 3 日龄成蚜进行紫外辐射处理。紫外辐射发生用紫外灯管(30W, 峰值波长为 313nm, Q-PANEL 公司产品)。处理方法为:将塑料托盘放置在紫外光源下 30cm 处,托盘内放入适量水以防蚜虫逃脱(第 1 道防线),再将塑料培养皿底部及周边用滤纸包裹(保湿),倒置在小塑料托盘内,小托盘内也放入适当水以防蚜虫逃脱(第 2 道防线),将蚜虫放置在小托盘的培养皿上进行紫外照射,紫外辐射强度为 25.2 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (313 nm)。照射 1、2、3、4、6h 和 8h,处理完毕后将蚜虫接种于供试小麦品种上,第 2 天产仔后剔除成蚜,留下 F_1 代若虫,移入人工智能气候室内生长。对照组不做紫外照射外,其他条件同处理。

待第 F_1 代成蚜产仔后,收集第 3 天产下的仔蚜(F_2 代)进行称重(W1),单头单株接种于供试小麦品种上,用直径 4.5cm,高 24cm,一端用纱布蒙着的玻璃管罩住,移入人工智能气候室内生长,此后每日检查两次,待若蚜变成成虫后再进行称重(W2),计算体重差(different weight between 1st star larva and adult,简写 dW, $dW = W2 - W1$),发育历期(development days,简写 DD,为初产 1 龄若蚜至羽化时的时间)和相对日均体重增长率(mean relative growth rate,简写 MRGR, $MRGR = (\ln W2 - \ln W1)/DD$)^[13]。每个处理设 30 个重复。

1.3 数据处理

数据分析采用 SPSS(SPSS Inc., USA)系统,对不同处理进行方差分析,平均数进行 Duncan 新复极差法

检验,显著水平 $P=0.05$ 。

2 结果

2.1 在品种小偃-22 上,不同辐射时间对两种体色型 F_2 代表长管蚜生物学参数的影响

由表 1 可知,在品种小偃-22 上,(1)当辐射时间为 8h 时,红色型 F_2 代表长管蚜发育历期与对照有显著差异($P<0.05$),增加了 6%;但当辐射时间为 3、4、6、8h 时,绿色型发育历期均与对照组有显著差异($P<0.05$),且当辐射时间为 8h 时,绿色型发育历期增加了 15.8%。说明紫外辐射对绿色型 F_2 代表长管蚜的发育历期影响要大于红色型。(2)在不同的辐射时间下,红色型 F_2 代表长管蚜体重差与对照无显著差异,而当辐射时间为 8h 时,绿色型体重差与对照显著差异($P<0.05$),说明紫外辐射对绿色型 F_2 代表长管蚜的体重差的影响要大于红色型。(3)当辐射时间为 8h 时,红色型 F_2 代表长管蚜相对日均体重增长率与对照有显著差异($P<0.05$),减少了 13.6%,但当辐射时间为 3、4、6、8h 时,绿色型相对日均体重增长量均与对照差异显著($P<0.05$),且当辐射时间为 8h 时,绿色型相对日均体重增长量减少了 18.7%,说明紫外辐射对绿色型 F_2 代表长管蚜相对日均体重增长率影响要大于红色型。综合以上 3 个指标可知,在品种小偃-22 上,紫外辐射的效应能够遗传到 F_2 代,随着紫外辐射时间的增长,两种体色型 F_2 代表长管蚜的生长发育逐渐延缓。且绿色型 F_2 代表长管蚜比红色型敏感。

表 1 在品种小偃-22 上不同紫外诱导时间对两种体色型麦长管蚜 F_2 代生物学参数*

Table 1 Biological parameters of different body-color biotypes of *Sitobion avenae* in different time of UV-radiation on the wheat variety Xiaoyan-22

照射时间/h Treatment Time	样本数 Numbers of Sample	发育历期/d Developmental duration		体重差/mg Weight difference		相对日均体重增长率/% Mean relative growth rate	
		红色型 Red type	绿色型 Green type	红色型 Red type	绿色型 Green type	红色型 Red type	绿色型 Green type
CK	30	7.371 ± 0.037 b	7.372 ± 0.066 c	0.700 ± 0.020 a	0.826 ± 0.019 a	0.176 ± 0.0023 a	0.185 ± 0.0025 a
1	30	7.680 ± 0.034 ab	7.570 ± 0.063 c	0.644 ± 0.031 a	0.767 ± 0.014 a	0.167 ± 0.0014 ab	0.180 ± 0.0035 a
2	30	7.732 ± 0.050 ab	7.413 ± 0.078 c	0.680 ± 0.040 a	0.772 ± 0.012 a	0.167 ± 0.0027 ab	0.174 ± 0.0039 ba
3	30	7.541 ± 0.046 ab	7.809 ± 0.084 b	0.691 ± 0.048 a	0.696 ± 0.021 ab	0.170 ± 0.0023 ab	0.165 ± 0.0022 b
4	30	7.554 ± 0.051 ab	7.801 ± 0.056 b	0.692 ± 0.041 a	0.728 ± 0.023 ab	0.175 ± 0.0033 a	0.164 ± 0.0026 b
6	30	7.795 ± 0.066 ab	7.929 ± 0.061 ba	0.634 ± 0.029 a	0.691 ± 0.023 ab	0.165 ± 0.0023 ab	0.162 ± 0.0038 b
8	30	7.912 ± 0.056 a	8.537 ± 0.082 a	0.585 ± 0.028 a	0.674 ± 0.022 b	0.153 ± 0.0013 b	0.151 ± 0.0023 c

表中数据为平均值 ± 标准误,列内平均数后不同字母表示差异达 5% 显著水平(新复极差检验)

2.2 在品种 Astron 上,不同辐射时间对两种体色型 F_2 代表长管蚜生物学参数的影响

由表 2 可知,在品种 Astron 上,(1)紫外辐射时间为 1、2h 时,红色型 F_2 代表长管蚜的发育历期显著低于对照($P<0.05$),且辐射时间为 1h,红色型发育历期最短,绿色型的发育历期与对照无显著性差异,说明短时间紫外辐射能够缩短红色型蚜虫的发育历期,而对绿色型无影响;当紫外辐射时间为 8h 时,红色型发育历期显著高于对照组($P<0.05$),增加了 7.3%,而当紫外辐射时间为 6h、8h 时,绿色型发育历期显著高于对照组($P<0.05$),且当紫外辐射时间为 8h 时,绿色型发育历期增加了 15.8%,说明长时间的紫外辐射能够延长两种体色型麦长管蚜的发育历期,且对绿色型影响要大于红色型。(2)在不同的辐射时间下,红色型 F_2 代表长管蚜和绿色型的体重差均与对照无显著差异,说明紫外辐射对两种体色型 F_2 代表长管蚜均无影响。(3)紫外辐射时间为 1h 时,红色型相对日均体重增长率显著高于对照($P<0.05$),而绿色型与对照无显著性差异,说明短时间紫外辐射能够增加红色型的相对日均体重增长率;而对绿色型无影响;当紫外辐射时间为 8h 时,绿色型 F_2 代表长管蚜相对日均体重增长率显著小于对照($P<0.05$),而红色型与对照相比无显著差异,说明长时间紫外辐射对绿色型 F_2 代表长管蚜的相对日均体重增长率影响要大于红色型。综合以上 3 个指标可知,在品种 Astron 上,紫外辐射的效应能够遗传到 F_2 代,短时紫外辐射能加速红色型 F_2 代表长管蚜的生长发育,随着紫外辐射时间的增长,两种体色型 F_2 代表长管蚜的生长发育逐渐延缓。且绿色型 F_2 代表长管蚜比红色型

敏感。

表 2 在品种 Astron 上不同紫外诱导时间对两种体色型麦长管蚜 F_2 代生物学参数

Table 2 Biological parameters of different body-color biotypes of *Sitobion avenae* in different time of UV-radiation on the wheat variety Astron

照射时间/h Treatment Time	样本数 Numbers of Sample	发育历期/d Developmental duration		体重差/mg Weight difference		相对日均体重增长率/% Mean relative growth rate	
		红色型 Red type	绿色型 Green type	红色型 Red type	绿色型 Green type	红色型 Red type	绿色型 Green type
CK	30	7.513 ± 0.062 b	7.551 ± 0.058 b	0.687 ± 0.028 a	0.670 ± 0.029 a	0.151 ± 0.0057 b	0.156 ± 0.0054 a
1	30	7.028 ± 0.070 c	7.619 ± 0.065 b	0.690 ± 0.047 a	0.630 ± 0.047 a	0.171 ± 0.0056 a	0.155 ± 0.0051 a
2	30	7.031 ± 0.068 c	7.652 ± 0.057 b	0.685 ± 0.045 a	0.654 ± 0.038 a	0.159 ± 0.0069 ab	0.155 ± 0.0048 a
3	30	7.582 ± 0.056 b	7.659 ± 0.062 b	0.794 ± 0.067 a	0.742 ± 0.045 a	0.148 ± 0.0048 b	0.153 ± 0.0041 a
4	30	7.628 ± 0.068 b	7.771 ± 0.081 ab	0.683 ± 0.034 a	0.692 ± 0.033 a	0.146 ± 0.0046 b	0.148 ± 0.0041 ab
6	30	7.658 ± 0.059 ba	7.868 ± 0.075 a	0.650 ± 0.033 a	0.708 ± 0.033 a	0.145 ± 0.0035 b	0.147 ± 0.0048 ab
8	30	7.762 ± 0.092 a	7.930 ± 0.065 a	0.662 ± 0.048 a	0.725 ± 0.040 a	0.141 ± 0.0053 b	0.132 ± 0.0053 b

表中数据为平均值 ± 标准误,列内平均数后不同字母表示差异达 5% 显著水平(新复极差检验)

3 讨论

研究表明,长时间紫外辐射条件下,不同体色型 F_2 代表长管蚜在不同小麦品种上均表现为发育延缓,说明紫外辐射效应能够遗传到 F_2 代,这与姚建秀^[11]、都二霞^[12]等人的研究结果基本一致。本试验还进一步证明两种体色型蚜虫对紫外辐射的反应不同,绿色型比红色型敏感;30W 紫外灯照射 1、2h 时,在小麦品种 Astron 上,红色型 F_2 代表长管蚜变为生长发育加快,这是因为低剂量辐射存在毒物兴奋效应^[14],即在低剂量条件下表现为适当的刺激(兴奋)反应,而在高剂量条件下表现为抑制作用。此现象普遍存在^[15-16],如低水平的环境因素如镉、糖精、二噁英、大量的多环芳烃、紫外线、X 射线和 C 射线可降低一些动物的肿瘤发生率;低剂量的 X 射线可增加小鼠和豚鼠的寿命;多种环境刺激因素可以延长线虫的寿命;许多毒物(如镉、铅)可促进不同植物的生长等。毒物兴奋效应可能是全身免疫系统参与的一种机体适应性反应。

研究环境胁迫对蚜虫的影响表现最详细的方法为生命表^[17],但实验条件要求较高,费时较长。发育历期、体重差和相对日均体重增长率是国外学者评价环境辐射对蚜虫影响的一种简便易的办法^[18-19]。蚜虫日均体重增长率(MRGR)是反映蚜虫是否适应寄主植物、正常生长发育的生物学参数,日均体重增长率大,表示蚜虫在某种程度上对环境有一定的适应性;日均体重增长率变小,表示外界环境对蚜虫有一定程度的干扰,所以通过日均体重增长率的变化来判断昆虫是否生长发育正常,是否适宜于在某一环境下取食,MRGR 已经被认为能更好用于反映昆虫变异的生态学参数^[20-21]。

前人研究紫外诱导时主要采用 UVC 波,而自然界中能够到达地球表面的紫外线主要是 UVB 波,本实验采用的光源是 UVB(峰值波长为 313nm),这更接近自然条件,研究结果也更易被实际应用。在进行诱导处理时,前人主要采用接上蚜虫照射植物的方法,由于蚜虫所在位置不同,各个蚜虫所接受的辐射量不同,本试验采用直接照射蚜虫的方法,保证了每头蚜虫的辐射量相同,保证了试验条件的一致性。

为了进一步从深层次研究紫外辐射对不同体色型的麦长管蚜的影响,在此基础上继续利用刺探电位图谱(EPG)技术对上述处理进行一系列的试验;由于本实验只照射了蚜虫的成虫,因而结果有一定的局限性。需要使用在不同虫态进行照射来增加实验的可信度。关于紫外辐射在蚜虫体色分化中的作用,更多的直接证据还需要通过田间实验、甚至生物化学和分子生物学来研究和验证。

致谢:本试验的设计和完成得到了联邦德国农林生物研究中心 Udo Heimbach 先生,联邦德国生物测定实验室 Thomas Thieme 先生的具体指导,特此感谢。

References:

- [1] Ji M G, Feng H Y, An L Z, Wang X L. Present status and prospects in research on effect of enhanced UV-B radiation on plants. Chinese Journal

- Applied Ecology, 2002, 13(3):359-364.
- [2] Hu Q L, Ding Z H, Tan X H, Wang H. The characteristics of DNA cleavage of apoptotic NH3T3 cells induced by ultraviolet irradiation. Progress in Biochemistry and Biophysics, 1998, 25(1):53-56.
- [3] Li Y, Zu Y Q, Wang X L. Effect of enhanced UV-B radiation on chemical composition, fungal colonization and decomposition of spring wheat plant. Chinese Journal Applied Ecology, 2001, 12(2):223-225.
- [4] An L Z, Feng H Y, Wang X L. Effects of enhanced UV-B radiation on the growth of some crops. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(2):249-253.
- [5] Yang Z M, Yan J Y, Zheng Y F. Effects of elevated ultraviolet radiation on the growth and photosynthesis of soy bean. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(2):154-159.
- [6] Lin W X, Wu X C, Liang K J, Guo Y C, He H Q, Cheng F Y, Liang Y Y. Effect of enhanced UV-B radiation on polyamine metabolism and endogenous hormone contents in rice (*Oryza sativa* L.). Chinese Journal Applied Ecology, 2002, 13(7):807-813.
- [7] Inaizumi M. Life cycle of *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae) with special reference to biotype differentiation on various hostplants. Kontyu, 1981, 49(2):219-240.
- [8] Tanaka K, Kamiuchi S, Ren Y. UV-induced skin carcinogenesis in xeroderma pigmentosum group A (XPA) gene-knock-out mice with nucleotide excision repair-deficiency. Mutation Research, 2001, 477(2):31-40.
- [9] Tang X M, Dai Y M, Xiong Z, Zhang C G. Effect of natural stress on genetic diversity of Frankia in *Alnus* nodules. Chinese Journal Applied Ecology, 2003, 14(10):1743-1746.
- [10] Ziegler A, Leffell D J, Kunala S. Mutation hotspots due to sunlight in the P53 gene of non-melanoma skin cancers. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1993, 90:4216-4220.
- [11] Yao J X, Zhao H Y. Study on the DNA mutation of wheat aphid under the ultraviolet. Acta Agricultural Boreali-Occidentalis Sinica, 2001, 10(1):33-36.
- [12] Du E X, Guo J W, Zhao H Y. UV-induced DNA mutation of peach aphid. Chinese Journal Applied Ecology, 2006, 17(7):1245-1249.
- [13] Adams J B, van Emden H F. The biological properties of aphids and their host plant relationships; Aphid Technology. London, 1972, 47-49.
- [14] Stebbing A R D. Homesis the stimulation of growth by low levels of inhibitors. Science of the Total Environment, 1982, 22(1):213-234.
- [15] Beaumont A R, Newman P R. Low levels tributyl in reduces growth of marine microalgae. Marine Pollution Bulletin, 1986, 17(10):457-461.
- [16] Jin S Z, He S M, Liu S Z. The effects of low dose ionizing radiation on the activity of Cu, Zn, SOD in peritoneal macrophages of mice. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2002, 20(3):209-212.
- [17] Zhao H Y, Du L F, Zhang G S. Advances in wheat anti-insect&disease gene orientation. Acta Agricultural Boreali-Occidentalis Sinica, 1998, 6:68-72.
- [18] Cailaud C M, Dedryver C A, Simon J C. Reproductive potential of the cereal aphid *Sitobion avenae* on resistant wheat lines (*Triticum monococcum* line). Annals of Applied Biology, 1994, 125:219-232.
- [19] Thieme T, Heimbach U. Development and reproductive of cereal aphids (Homoptera: Aphididae) on winter wheat cultivars. IOBC/WPRS Bulletin, 1996, 19(3):1-8.
- [20] Wellings P W, Leather S R, Dixon A F G. Seasonal variation in reproductive potential: A programmed feature of aphid life cycle. Journal of Animal Ecology, 1980, 49:975-985.
- [21] González W L, Ramírez C C, Olea N, Niemeyer H M. Host plant changes produced by the aphid *Sipha flava* consequences for aphid feeding behavior and growth. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2002, 103:107-113.
- [22] Thomas Thieme. Adaptive significance of brown coloration in *Sitobion avenae*. IOBC/WPRS Bulletin, 1998, 21(8):7-13.

参考文献:

- [1] 祭美菊,冯虎元,安黎哲,王勋陵. 增强的 UVB 辐射对植物影响的研究. 应用生态学报, 2002, 13(3):359-364.
- [2] 胡庆柳,丁振华,谭小华,王红. 紫外辐射诱发 NIH3T3 细胞凋亡时 DNA 断裂的特性. 生物化学与生物物理进展, 1998, 25(1):53-56.
- [3] 李元,祖艳群,王勋陵. 增强的 UV-B 辐射对春小麦植株化学成分、真菌定殖和分解的影响. 应用生态学报, 2001, 12(2):223-225.
- [4] 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. 生态学报, 2001, 21(2):249-253.
- [5] 杨志敏,颜景义,郑有飞. 紫外线辐射增加对大豆光合作用和生长的影响. 生态学报, 1996, 16(2):154-159.
- [6] 林文雄,吴兴春,梁康迳,郭玉春,何华勤,陈芳育,梁义元. UV-B 辐射增强对水稻多胺代谢及内源激素含量的影响. 应用生态学报, 2002, 13(7):807-813.
- [9] 唐晓萌,代玉梅,熊智,张忠泽,张成刚. 自然环境胁迫对旱冬瓜 Frankia 菌基因多样性的影响. 应用生态学报, 2003, 14(10):1743-1746.
- [11] 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.
- [12] 都二霞,郭建文,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.
- [16] 金顺子,何淑梅,刘树铮. 低剂量电离辐射对小鼠腹腔巨噬细胞 Cu、Zn、SOD 活性的影响. 辐射研究与辐射工艺学报, 2002, 20(3):209-212.
- [17] 赵惠燕,杜利锋,张改生. 小麦抗病虫基因定位研究进展. 西北农业学报, 1998, 6:68-72.