

微波辐射对麦长管蚜生态学特征及抗氧化酶同工酶的影响

张洪亮,李 丹,陈 堃,赵惠燕

(西北农林科技大学 植物保护学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究不同强度微波照射对麦长管蚜(*Sitobion avenae*)生态学参数及体内抗氧化酶系统的影响,为麦长管蚜种群爆发、综合治理、微波辐射产生毒性效应的分子机理及微波对昆虫种群遗传进化的影响研究提供理论依据。【方法】用不同强度微波照射(功率分别为 2,4,6 W;照射时间分别为 10,20,30 s)麦长管蚜后,对第 2 代麦长管蚜进行特定时间生命表研究,分析微波辐射对麦长管蚜生态学参数的影响,并采用非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳(PAGE)方法,分析微波辐射对麦长管蚜体内抗氧化酶同工酶的影响。【结果】微波处理后,麦长管蚜的平均世代周期(T)、净增殖率(R_0)、内禀增长率(R_m)均在中低强度(2,4 W)照射时较对照有所提高,而在高强度(6 W)照射时较对照显著降低。微波处理对麦长管蚜过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶系统有明显影响,POD 同工酶有新酶带出现,CAT 和 SOD 同工酶酶带亮度随着微波辐射强度的增大而减弱。【结论】微波胁迫后麦长管蚜的生态学参数发生了变化,说明微波对麦长管蚜的毒害已遗传到下一代,高强度的微波处理对其影响更大。微波胁迫对麦长管蚜 POD 同工酶具有明显的激活效应,但是对 CAT 和 SOD 同工酶有抑制作用。

[关键词] 微波辐射;麦长管蚜;生态学特征;过氧化物酶同工酶;过氧化氢酶同工酶;超氧化物歧化酶同工酶

[中图分类号] S435.122⁺.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)12-0155-06

Effects of microwave radiation on the ecological characteristics and antioxidant isoenzyme of *Sitobion avenae* Fabricius

ZHANG Hong-liang, LI Dan, CHEN Qian, ZHAO Hui-yan

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

Abstract: 【Objective】The effects of microwave radiation on the ecological characteristics and antioxidant isoenzyme of wheat aphid, *Sitobion avenae* Fabricius were analyzed to provide theoretical basis for *Sitobion avenae* population breakout and integrated management, and to lay a foundation for further study on toxigenicity mechanism of microwave radiation and genetic evolution of aphid population. 【Method】The aphid was fed wheat leaves under the microwave radiation of different densities (2, 4 and 6 W for each power, 10, 20 and 30 s for each radiation period). Time-special life table of F_2 was made, the effects of microwave on the ecological parameters of aphid were analyzed and the influence of microwave on antioxidant isoenzyme was shown through polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE). 【Result】Compared with the control, the mean development time (T) was prolonged at low and medium intensity (2, 4 W) while the net reproductive rate (R_0) and the intrinsic rate of increase (R_m) were markedly increased. On the other hand, under high intensity (6 W), the development duration was significantly shortened while the reproductive

* [收稿日期] 2010-05-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(39970112;30470268)

[作者简介] 张洪亮(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,在读硕士,主要从事昆虫生态学及农业害虫防治研究。

E-mail: zhl1983xc@126.com

[通信作者] 赵惠燕(1956—),女,河南西平人,教授,博士生导师,主要从事昆虫生态遗传、害虫综合治理和作物抗虫性研究。

E-mail: zhaohy1983@yahoo.com.cn

rate and the innate capacity of increase were dramatically reduced. Different intensities of microwave treatment also had a significant effect on wheat aphids' antioxidant enzyme system from superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT). Specific bands of the POD enzymes produced; the band intensity of SOD and CAT changed. 【Conclusion】 The variation of ecological parameters indicated that the detrimental effects of the microwave radiation on aphids were inherited by the next generation and the higher microwave radiation intensity showed greater impact. Peroxidase was obviously activated by microwave; however, CAT and SOD were inhibited.

Key words: microwave radiation; *Sitobion avenae* Fabricius; ecological characteristic; peroxidase isozyme; catalase isozyme; superoxide dismutase isozyme

麦长管蚜(*Sitobion avenae* Fabricius)是我国重要的小麦害虫之一,严重危害小麦的生产^[1]。麦长管蚜以刺吸式口器取食小麦汁液,导致小麦产量、品质降低;同时,其在取食过程中能传播大麦黄矮病毒(Barley yellow dwarf virus, BYDV),并随着蚜虫的活动、迁飞引起病毒病的大范围流行,造成更大的危害^[2]。因此,在农业生产中对麦长管蚜进行有效的防治具有重要的意义。

随着通信和电力事业的高速发展以及电气设备的广泛应用,外部电磁环境急剧加强。有资料表明,人类生存空间的电磁辐射强度已达到上世纪的 1 亿倍以上^[3],电磁辐射的大量增加,势必会对生物造成一定的影响。昆虫作为全球生物多样性的重要组成部分,其因电磁辐射而受到的潜在影响同样不可忽视。目前,关于电磁辐射对昆虫毒性的研究,主要集中在生物机体组织中毒受害方面。Shayestehaand 等^[4]于 1996 年研究了微波辐射对仓储害虫拟谷盗(*Tribolium confusum*)以及印度谷螟(*Plodia interpunctella*)死亡率的影响。Bol'shakov 等^[5]研究发现,微波照射能够阻滞果蝇(*Drosophila melanogaster* (Meigen))的幼虫发育。Sripakdee 等^[6]在 2005 年研究了微波辐射对 *Chrysomya megacephala* (F.) 卵的影响。但有关电磁辐射对麦长管蚜生态遗传学参数、抗氧化酶活性和遗传变异的影响以及电磁辐射产生毒性效应的分子机理等方面的报道甚少。为此,本研究以麦长管蚜为试验材料,用不同强度微波照射麦长管蚜当代蚜虫,组建并分析第 2 代表长管蚜的特定时间生命表,分析微波辐射对麦长管蚜生态遗传学参数的影响,并采用非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳(PAGE)方法,研究不同强度微波对麦长管蚜体内过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)同工酶活性的影响,旨在探明微波对麦长管蚜生长发育、抗氧化酶系统的影响及其致毒机理,为进一步研究麦长管蚜的种

群暴发、综合治理和微波辐射产生毒性效应的分子机理及其对昆虫种群遗传进化的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在温室中采集若干头若蚜,每个培养皿中均放 1 头蚜虫,在人工气候箱内饲养,待其成熟后取 1 头发育良好的成蚜,逐日供以新鲜小麦叶片,在温度为白天 20 ℃、夜晚 18 ℃,光照时间 L:D=14 h:10 h,相对湿度为(60±10)%的条件下饲养 4~5 代,此时的蚜虫为单克隆系。待单克隆蚜虫达到试验要求数量后,取发育比较好的一代单克隆系成蚜备用。

1.2 蚜虫的微波处理

将单克隆系成蚜置于培养皿内,放入格兰仕微波炉(微波源为 2 450 MHz, 850 W)中照射,为减少微波的热效应,采用不加培养皿盖间歇式照射。微波照射功率分别为 2, 4 和 6 W,每次照射 10 s 冷却 10 s,累计照射时间分别为 10, 20 和 30 s。每个处理 50 头成蚜,待此代成蚜产仔后去除成蚜,保存于-60 ℃冰箱中,以备后续分子生物学试验用;将此第 2 代仔蚜接种于小麦上进行特定时间生命表试验。以在正常环境(即与最初 1 头蚜虫的饲养条件相同)中生长的蚜虫为对照。

1.3 蚜虫的生命表试验

蚜虫单头饲养,幼虫期每天观察 1 次蜕皮情况,成虫期每天观察记录产子数,直至蚜虫死亡,每个处理 30 头蚜虫,即 30 个重复。按丁岩钦^[7]、赵惠燕等^[8]的方法计算平均世代周期(T)、净增殖率(R_0)和内禀增长率(R_m)。

1.4 同工酶电泳及染色

1.4.1 酶液的制备 将各处理组的 50 头麦长管蚜放入 1.5 mL 离心管中,加 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 7.8) 0.5 mL 及少许石英砂,在冰浴条件下充分研磨成匀浆,12 000 r/min、4 ℃离心 15 min,上清

液即为电泳样品,置-20℃冰箱中保存备用。

1.4.2 电泳 非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳(PAGE)参照文献[9]的方法进行,电泳仪型号为DYY-12型。POD同工酶分离胶和浓缩胶的质量浓度分别为75和40g/L,上样量30μL/孔;CAT同工酶分离胶和浓缩胶的质量浓度分别为75和40g/L,上样量30μL/孔;SOD同工酶分离胶和浓缩胶的质量浓度分别为100和40g/L,上样量30μL/孔。电泳采用稳压方式,浓缩胶电压为150V,分离胶电压为200V,电极缓冲液为Tris-甘氨酸(pH8.3),以溴酚蓝作为前沿指示剂,在4℃条件下电泳约4.5h。

1.4.3 染色 电泳后进行剥胶染色,POD同工酶染色采用醋酸联苯胺染色法^[10],CAT同工酶染色采用铁染色法^[11],SOD同工酶染色采用NBT法^[12]。

1.5 数据处理

用SPSS 12.0软件对试验数据进行差异显著性检测。若有显著差异,则用LSD测验区分平均值,显著水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同微波强度对麦长管蚜生态学特征的影响

2.1.1 平均世代周期 由表1可见,在同一微波照

射强度下,随着照射时间的延长,麦长管蚜的平均世代周期缩短。当照射时间为10s时,各微波处理强度下麦长管蚜的平均世代周期较对照均有所延长;照射时间为20s时,除低强度(2W)处理的平均世代周期较对照有所延长外,其余处理均较对照缩短;而当照射时间为30s时,各处理的平均世代周期较对照均明显缩短,其中6W处理的平均世代周期较2W处理显著缩短。这表明经过短时间、低强度的微波照射后,麦长管蚜平均世代周期延长,其以牺牲种群增长速度为代价避免更多个体的死亡;而长时间、高强度的微波胁迫对麦长管蚜的伤害较大,使其来不及反应即已死亡,从而导致平均世代周期缩短。

2.1.2 净增殖率 由表1可以看出,在相同的微波照射时间下,随着微波照射强度的增大,麦长管蚜的净增殖率逐渐下降。2和4W处理后的麦长管蚜净增殖率高于对照,说明低强度的微波照射刺激了蚜虫的生殖力,使蚜虫的种群数量急剧增加,这可能是由于中低强度微波使控制蚜虫繁殖的某个基因发生了突变,从而改变了蚜虫体内的某种机制所致;而6W处理后的麦长管蚜净增殖率显著低于对照,表明高强度的微波辐射对麦长管蚜的生殖能力和种群增长呈现明显的抑制作用。

表 1 不同微波强度照射下麦长管蚜的生态学参数

Table 1 Ecological parameter of Aphid radiated by different microwave intensities												
照射强度/W Radiation intensity	T/d				R ₀ /%				R _m			
	0	10 s	20 s	30 s	0	10 s	20 s	30 s	0	10 s	20 s	30 s
CK	19.07 aXY	—	—	—	25.01 aX	—	—	—	0.168 aX	—	—	—
2	—	21.52 aX	19.83 aX	18.49 bX	—	40.54 aX	34.55 aX	26.95 aX	—	0.172 aX	0.179 aX	0.178 aX
4	—	20.23 aXY	19.06 aXY	17.01 bXY	—	30.86 aX	27.64 aX	25.56 aX	—	0.169 aX	0.174 aX	0.190 aX
6	—	19.33 aY	18.20 aY	13.67 bY	—	11.10 aY	9.51 aY	7.44 aY	—	0.124 aY	0.123 aY	0.146 aY

注:同行数据后标不同小写字母者表示不同微波辐照时间处理间差异显著,同列数据后标不同大写字母者表示不同微波辐射强度处理间差异显著(LSD测验,显著水平为0.05)。

Note:Different lowercase letters following the number denote significant differences among microwave radiation time,different capital letters following the number denote significant differences among microwave radiation,at α=0.05 with LSD.

2.1.3 内禀增长率 内禀增长率是种群的遗传特征,能灵敏地反映出环境对生物的影响。与对照相比,6W处理的内禀增长率显著降低,而2和4W处理的内禀增长率均有所升高(表1)。这可能是因为在中低强度的微波胁迫下,蚜虫对逆境产生了抗性,被照蚜虫的某些基因发生变异,使蚜虫能够适应新的环境;而在高强度的微波辐射下,由于微波的非热效应和极少热效应累积引起较剧烈的生理生化反应,使DNA及生物膜等生物大分子损伤严重,从而导致蚜虫内禀增长率降低。

2.2 不同微波强度对麦长管蚜抗氧化酶同工酶的影响

微波辐射对麦长管蚜POD同工酶的影响见图1。由图1可知,POD同工酶在微波胁迫下谱带数量发生了明显变化,共检测到5条同工酶带,其中对照组仅可见P₁、P₂2条主酶带;而经过微波胁迫的几个处理组则除含有P₁、P₂2条主酶带外,还有次酶带产生,如2W10s胁迫组增加1条次酶带P₅,6W10s胁迫组增加2条次酶带P₃和P₅,2W30s和6W20s胁迫组增加3条次酶带P₃、P₄和P₅。

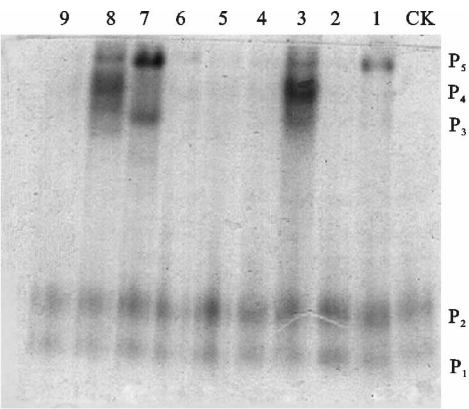


图 1 微波辐射对麦长管蚜 POD 同工酶的影响
1. 2 W 10 s; 2. 2 W 20 s; 3. 2 W 30 s; 4. 4 W 10 s; 5. 4 W 20 s;
6. 4 W 30 s; 7. 6 W 10 s; 8. 6 W 20 s; 9. 6 W 30 s。

Fig. 1 Effect of microwave radiation on POD isozymes of *Sitobion avenae*

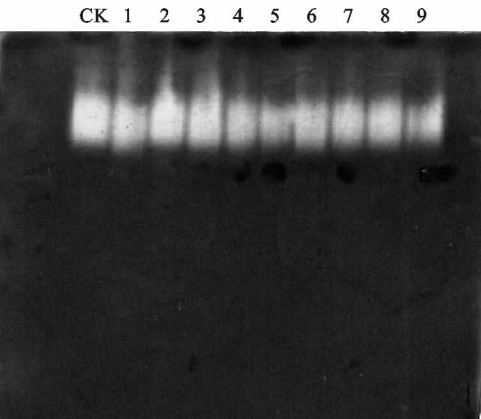


图 2 微波辐射对麦长管蚜 CAT 同工酶的影响
1. 2 W 10 s; 2. 2 W 20 s; 3. 2 W 30 s; 4. 4 W 10 s; 5. 4 W 20 s;
6. 4 W 30 s; 7. 6 W 10 s; 8. 6 W 20 s; 9. 6 W 30 s。

Fig. 2 Effect of microwave radiation on CAT isozymes of *Sitobion avenae*

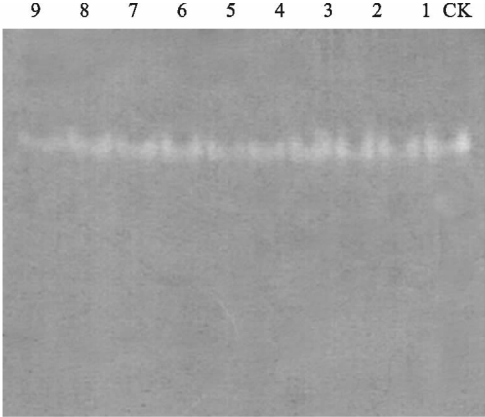


图 3 微波辐射对麦长管蚜 SOD 同工酶的影响
1. 2 W 10 s; 2. 2 W 20 s; 3. 2 W 30 s; 4. 4 W 10 s; 5. 4 W 20 s;
6. 4 W 30 s; 7. 6 W 10 s; 8. 6 W 20 s; 9. 6 W 30 s。下图同。

Fig. 3 Effect of microwave radiation on SOD isozymes of *Sitobion avenae*

表 2 不同微波强度下 CAT 和 SOD 同工酶谱带的灰度值

Table 2 Grayscale value of CAT and SOD isozymes under different microwave intensities

处理 Treatment	灰度值 Grayscale value		处理 Treatment	灰度值 Grayscale value	
	CAT	SOD		CAT	SOD
CK	235.50±4.28 A	192.70±11.95 A	4 W 20 s	172.90±20.28 D	175.40±6.02 B
2 W 10 s	213.90±14.48 B	178.50±10.60 B	4 W 30 s	190.80±10.75 CD	181.20±5.77 B
2 W 20 s	230.30±6.22 AB	179.90±10.94 B	6 W 10 s	185.60±10.82 CD	182.50±8.38 B
2 W 30 s	225.30±9.29 AB	184.10±6.42 AB	6 W 20 s	188.10±15.92 CD	179.70±5.81 B
4 W 10 s	194.60±19.06 C	179.30±4.97 B	6 W 30 s	189.80±27.63 CD	177.90±4.75 B

注:同列数据后标不同大写字母者表示处理间差异极显著($P<0.01$)。
Note: Different capital letters following the number denote significant differences among microwave radiation, at $P<0.01$.

3 讨 论

本研究结果表明,麦长管蚜的平均世代周期、净增殖率、内禀增长率在中低强度(2 和 4 W)微波照

微波辐射对麦长管蚜 CAT 和 SOD 同工酶的影响分别见图 2 和图 3。由图 2 和图 3 可知,CAT 和 SOD 的同工酶谱经过微波处理后,均只产生 1 条酶带,并无新酶带出现。不同微波强度下 CAT 和 SOD 同工酶谱带的灰度值见表 2。由表 2 可知,除 2 W 20 s 和 2 W 30 s 2 个处理与对照无显著差异外,其他各处理组的 CAT 同工酶谱带亮度均显著弱于对照。2 W 处理组的 CAT 同工酶谱带亮度显著高于 4 和 6 W 处理组,表明随着微波辐照强度的增大,CAT 同工酶表达活性显著下降。各胁迫组的 SOD 同工酶谱带亮度均极显著弱于对照(2 W 30 s 处理除外),但各胁迫组间差异不显著。综上分析说明,麦长管蚜体内的抗氧化酶同工酶在微波胁迫下发生了不同程度的变化。

射下均较对照有所提高,而在高强度(6 W)微波照射下则较对照显著降低,这是因为低剂量辐射存在毒物兴奋效应^[13],即在低剂量条件下表现为适度的刺激(兴奋)反应,而在高剂量条件下表现为抑制作

用。此结果同其他低剂量环境胁迫因子对生物影响的结果一致^[14-15],如低剂量的镉、糖精、二噁英、多环芳烃、紫外线、X 射线和 C 射线可降低一些种属动物的肿瘤发生率;低功率的微波可使小鼠血清抗体浓度增加,对基础免疫应答产生明显的刺激作用^[16];低剂量 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线辐照对螟黄赤眼蜂的生活力具有有利的刺激作用^[17];许多毒物(如铜、铅)可促进不同植物的生长等^[18]。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,在低强度微波辐射下,蚜虫细胞适应性免疫增强,其自身的一系列保护和水解酶系活性均有所增强。当生物体受到轻度微波逆境胁迫时,体内的保护酶系活性升高;而当受到重度微波逆境胁迫时,其活性通常降低,使生物体内积累过量的活性氧,从而导致生物体的伤害。本研究中,微波辐射对麦长管蚜生态遗传学参数的影响与其辐照强度密切相关,高强度的微波辐照对麦长管蚜的影响更大。微波辐射的剂量效应关系在害虫防治方面具有重要的利用价值,但到目前为止,关于这种现象的本质还没有详实的报道,尤其是对蚜虫种群遗传进化的影响需要更进一步研究。

抗氧化酶作为昆虫体内的一类重要酶系,在昆虫抵御外界不良环境的危害、保护其正常生长发育及生理功能的完成、维持体内活性氧的动态平衡等方面起着极其重要的作用。昆虫体内的自由基可以通过各种抗氧化酶(如 POD、SOD、CAT 等)的作用而清除。

同工酶是基因表达的直接产物,因而通过同工酶分析,能够比较直接地判断基因的存在与否及其表达规律。本研究中,经过微波胁迫的麦长管蚜,POD、CAT 和 SOD 的同工酶谱发生了不同程度的变化。POD 是广泛存在于动植物体内的一个重要酶类,其一方面作为保护酶系统中的组成部分,与 SOD、CAT 协调一致,维持细胞内自由基处于低水平,防止自由基毒害;另一方面可调节细胞内的生理代谢。许多证据表明,POD 对环境十分敏感,许多环境物理因素(微重力、激光、磁场等)都是通过 POD 活性的升高来调节生理代谢的^[19-21]。在本试验中,与对照相比,各处理组中的 POD 同工酶有新酶带出现,表明一定强度的微波辐射对 POD 有激活作用。这种激活作用可能是由于机体在受到微波胁迫后,影响了细胞的代谢进而导致麦长管蚜正常的生理条件发生了变化而引起的。在 CAT 和 SOD 同工酶酶谱中只有 1 条酶谱区带,没有特异谱带的产生,但各胁迫组酶带亮度较对照显著减弱,说明微

波胁迫对 CAT 和 SOD 产生了抑制作用。

微波的致突变作用是肯定的,但在本试验中,究竟是微波辐射直接作用于昆虫 DNA 引起变异,还是其穿透力使细胞壁通透性增加,导致核质变换而引起突变,还有待进一步深入研究。

[参考文献]

- [1] 张汝霖,于锁英,刘马俊,等.麦长管蚜种群动态研究[J].小麦研究,2001,22(1):35-36.
Zhang R L, Yu S Y, Liu M J, et al. Population dynamics of wheat aphid *Sitobion avenae* Fabricius [J]. Journal of Wheat Research, 2001, 22(1): 35-36. (in Chinese)
- [2] 张向才,周广和,史明,等.麦蚜远距离迁飞和传毒规律的研究[J].植物保护学报,1985,12(1):9-15.
Zhang X C, Zhou G H, Shi M, et al. Studies on the long-distance migration of and virus transmission by the aphid *Sitobion avenae* (F.) [J]. Journal of Plant Protection, 1985, 12(1): 9-15. (in Chinese)
- [3] 杨丽,乔晓艳,董有尔.磁场生物效应的研究现状与展望[J].中国医学物理学杂志,2009,26(1):1022-1024.
Yang L, Qiao X Y, Dong Y E. Status & prospect on the bioeffect of magnetic field [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2009, 26(1): 1022-1024. (in Chinese)
- [4] Shayestehaand N, Barthakurb N N. Mortality and behaviour of two stored-product insect species during microwave irradiation [J]. Journal of Stored Product Research, 1996, 32(3): 239-246.
- [5] Bol'shakov M A, Kniazeva I R, Lindt T A, et al. Effect of low-frequency pulse-modulated 460 MHz electromagnetic irradiation on *Drosophila* embryos [J]. Radiats Biol Radioecol, 2001, 41: 399-402.
- [6] Sripakdee D, Sukontason K L, Piangjai S, et al. Effect of microwave irradiation on the blow fly *Chrysomya megacephala* (F.) (Diptera: Calliphoridae) [J]. Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health, 2005, 36(4): 893-895.
- [7] 丁岩钦.昆虫数学生态学[M].北京:科学出版社,1993:252-316.
Ding Y Q. Mathematical ecology of insects [M]. Beijing: Science Press, 1993: 252-316. (in Chinese)
- [8] 赵惠燕,汪世泽,袁锋,等.不同温度与寄主条件下桃蚜生命表的研究[J].应用生态学报,1995,6(增刊):83-87.
Zhao H Y, Wang S Z, Yuan F, et al. Life table of *Myzus persicae* under different temperature and host plant conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6 (Suppl.): 83-87. (in Chinese)
- [9] 郭尧军.蛋白质电泳实验技术[M].2版.北京:科学出版社,2005:53-56.
Guo R J. Experimental techniques of protein electrophoresis [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005: 53-56. (in Chinese)
- [10] 陈毓荃.生物化学实验方法和技术[M].北京:科学出版社,2002:239-245.
Chen Y Q. Biochemical experimental method and techniques

[M]. Beijing: Science Press, 2002: 239-245. (in Chinese)

[11] 董泗建, 刘昌玲. 一种鉴定过氧化氢酶活性的铁染色法 [J]. 生物化学与生物物理进展, 1996, 23(1): 86-88.

Dong S J, Liu C L. An iron staining method for determination of catalase activity [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 1996, 23(1): 86-88. (in Chinese)

[12] 罗广华. 植物 SOD 凝胶电泳及活性的显色 [J]. 植物生理学通讯, 1983(6): 44-45.

Luo G H. Gel electrophoresis and activity display of SOD in plants [J]. Plant Physiology Communications, 1983 (6): 44-45. (in Chinese)

[13] Stebbing A R D. Homesis-the stimulation of growth by low levels of inhibitors [J]. Sci Total Environ, 1982, 22(1): 213-234.

[14] Beaumont A R, Newman P B. Low levels of tributyltin reduce growth of marine microalgae [J]. Mar Pollut Bull, 1986, 17(10): 457-461.

[15] 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 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2002, 20(3): 209-212.

Jin S Z, He S M, Liu S Z. The effects low dose ionizing radiation on activity of Cu Zn SOD in peritoneal macrophages of mice [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2002, 20(3): 209-212. (in Chinese)

[16] 张文辉, 孙 侠, 韩长城, 等. 不同强度微波辐射对小鼠免疫功能的影响 [J]. 广西预防医学, 2005, 11(3): 129-132.

Zhang W H, Sun X, Han C C, et al. Effects of microwave radiation on immunological function in mice at different power densities [J]. Guangxi Journal of Preventive Medicine, 2005, 11(3): 129-132. (in Chinese)

[17] 王恩东, 李咏军, 刘晓辉, 等. 射线低剂量辐照对螟黄赤眼蜂生活力的刺激作用 [J]. 核农学报, 2004, 18(5): 406-410.

Wang E D, Li Y J, Liu X H, et al. The stimulation effect of low doses ^{60}Co gamma irradiation on viability of *Trichogramma chilonis* [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2004, 18(5): 406-410. (in Chinese)

[18] 李文誉, 李德明. 盐碱及重金属对植物生长发育的影响 [J]. 北方园艺, 2010(8): 221-224.

Li W Y, Li D M. Effects of salinization and heavy metals stress on plant growth and development [J]. Northern Horticulture, 2010(8): 221-224. (in Chinese)

[19] 薛 淮, 蔡伟明, 刘 敏, 等. 模拟微重力条件下几种植物的过氧化物酶同工酶谱分析 [J]. 植物生理学报, 2000, 26(2): 137-142.

Xue H, Cai W M, Liu M, et al. Peroxidase isoenzymes analysis on some plants under simulated microgravity [J]. Acta Physiologica Sinica, 2000, 26(2): 137-142. (in Chinese)

[20] 朱新军, 钱增强, 王勋陵, 等. He-Ne 激光处理不同时期蚕豆幼苗对抗氧化系统的影响 [J]. 激光生物学报, 2006, 15(6): 551-556.

Zhu X J, Qian Z Q, Wang X L, et al. Changes of anti-oxidative enzymes in *Vicia faba* L. seedlings irradiated by He-Ne laser in different stages [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2006, 15(6): 551-556. (in Chinese)

[21] 华 宏, 沈永宝, 吴 文. 磁场对马尾松种子质量和 POD、SOD 酶活性的影响 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 39-42.

Hua H, Shen Y B, Wu W. Effects of magnetic field on seed quality, POD and SOD of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(3): 39-42. (in Chinese)