

# 杏仁种皮黑色素对果蝇的紫外辐射保护作用

李红姣<sup>1</sup>, 张双凤<sup>2</sup>, 李巨秀<sup>2,\*</sup>, 赵忠<sup>1,\*</sup>

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以果蝇西农12和果蝇中农e为实验模型,对果蝇进行紫外辐射处理后,在添加杏仁种皮黑色素的培养基中进行培养,通过测定果蝇繁殖力、寿命、超氧化物歧化酶(SOD)活力、丙二醛(MDA)含量、蛋白质量浓度、总抗氧化能力(T-AOC)等指标来研究杏仁种皮黑色素的抗紫外辐射活性。结果表明:紫外辐射组与对照组相比,两品系果蝇的繁殖力、寿命、总抗氧化能力显著降低,蛋白质量浓度、超氧化物歧化酶活力呈现先增后降趋势,丙二醛含量显著升高。当添加杏仁种皮黑色素质量浓度范围为0.02~0.2mg/mL时,与2min UV组相比,能显著提高两品系果蝇的繁殖力,但所设添加黑色素的实验组中相间组的果蝇繁殖力没有达到显著水平;与5min UV组相比,添加黑色素能显著提高两品系果蝇的寿命、蛋白质量浓度、总抗氧化能力、SOD活力,降低MDA含量。杏仁种皮黑色素对果蝇具有抗紫外辐射保护作用。

**关键词:**杏仁;黑色素;果蝇;紫外辐射

## Anti-UV Irradiation Effect of Melanin Derived from Apricot Kernel Skin in *Drosophila*

LI Hong-jiao<sup>1</sup>, ZHANG Shuang-feng<sup>2</sup>, LI Ju-xiu<sup>2,\*</sup>, ZHAO Zhong<sup>1,\*</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** After UV irradiation treatment, two *Drosophila* strains, Xinong 12 and *Drosophila* Zhongnong e, were cultured in a medium supplemented with melanin derived from apricot kernel skin (AS-M). Fecundity, lifetime, SOD activity, MDA content, protein concentration, total antioxidant capacity (T-AOC) were measured to evaluate the anti-UV irradiation effect of AS-M. Compared with control group, UV irradiation substantially reduced fecundity, lifetime and T-AOC in both *Drosophila* strains, protein concentration and SOD activity tended to first increase and then decrease, and MDA content markedly increased. AS-M addition at concentrations varying from 0.02 to 0.2 mg/mL could distinctly improve the fecundity of the two *Drosophila* strains compared with 2 min UV irradiation group. The difference between 0.02 mg/mL and 0.2 mg/mL treatment groups did not reach a significant level. Compared with 5 min UV irradiation group, AS-M addition resulted in a significant increase in lifetime, protein concentration, T-AOC, SOD activity and a reduction in MDA content. These results demonstrated that AS-M has anti-UV irradiation effect in *Drosophila*.

**Key words:** apricot kernel; melanin; *Drosophila*; ultraviolet irradiation

中图分类号: S662.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)21-0285-05

紫外线(UV)辐射可产生UV光子和自由基,它们能与DNA及其他的关键细胞成分发生反应<sup>[1-3]</sup>,对人类<sup>[4-5]</sup>和动植物<sup>[6]</sup>都造成了很大的危害。辐射对机体造成损伤的原因是引起细胞内生物大分子,特别是DNA与蛋白质各级结构的变化<sup>[7-8]</sup>,过量太阳光通过两种途径对DNA产生损伤:一是直接作用,二是在水介质(细胞的主要化学组成)中产生自由基和活性氧群,自由基和活性氧相互作用DNA产生所谓的间接性损伤,包括形成嘧啶二聚体、链

断裂、碱基氧化为二醇类和DNA-蛋白质交联等,直接与间接损伤都可能是引发突变和致癌的原因<sup>[9]</sup>。

由于黑色素显著的光化学性质,有关黑色素功能的研究大多数集中在它的光保护作用上。黑色素是良好的紫外线吸收剂,能有效的保护紫外辐射对蛋白质和DNA等生物大分子物质的伤害<sup>[10-11]</sup>。黑色素也具有抗日光、X射线、γ射线、宇宙射线、核辐射等多种辐射的作用。已有研究表明,乌鸡黑色素对果蝇紫外辐射具有保护作用

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 国家林业局林业公益性科研专项(200904020)

作者简介: 李红姣(1987—),女,博士研究生,研究方向为森林培育理论与技术。E-mail: lihongjiao0103@163.com

\*通信作者: 赵忠(1958—),男,教授,博士,研究方向为森林培育理论与技术。E-mail: zhaozh@nwsuaf.edu.cn

李巨秀(1972—),女,副教授,博士,研究方向为食品化学和功能食品。E-mail: juxiuli@msn.com

用<sup>[12-15]</sup>, 然而杏仁种皮黑色素对果蝇是否仍具有良好的辐射保护功能研究较少。本研究将杏仁种皮黑色素添加到果蝇培养基中, 探究杏仁种皮黑色素的紫外保护作用和抗氧化能力, 旨在为杏仁资源的开发利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

杏仁种皮黑色素 本实验室提取; 果蝇西农12 西北农林科技大学农学院; 果蝇中农e 中国农业大学动物科学与技术学院。

苯甲酸 天津市化学试剂六厂; 乙醚、冰乙酸 天津博迪化工有限公司; 乙醇 西安三浦化学试剂有限公司; 蛋白质试剂盒、丙二醛(MDA)试剂盒、总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒 南京建成生物工程研究所。

### 1.2 仪器与设备

EB-280-12型天平、424 UV1101型分光光度计 日本岛津公司; SPX-150型生化培养箱 上海悦丰仪器仪表有限公司; SW-CJ-1F型超净工作台 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司; 5417R型低温冷冻超速离心机 德国艾本德公司; KQ-500DE型数控超声波清洗机 昆山市超声波仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 杏仁种皮黑色素的提取

杏仁种皮黑色素的提取流程见图1<sup>[16]</sup>。

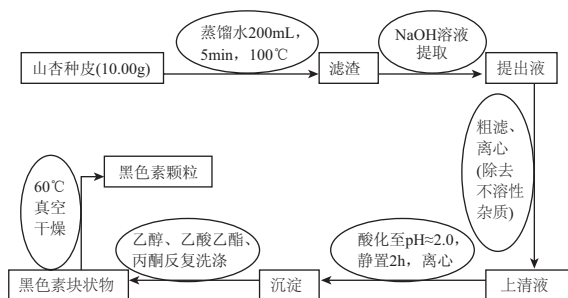


图1 杏仁种皮黑色素的提取工艺流程

Fig.1 Flow chart of AS-M extraction

#### 1.3.2 杏仁种皮黑色素饲喂方法

将杏仁种皮黑色素添加于刚煮沸的培养基中, 然后灭菌、分装、冷却、凝固, 使黑色素终质量浓度为0.02、0.04、0.1、0.2mg/mL。将果蝇放入添加了不同质量浓度黑色素的培养基中培养备用。

#### 1.3.3 紫外线对果蝇半数致死量的确定

LD<sub>50</sub>是指使一群体动物中半数死亡的剂量, 是衡量药物毒性或辐射强度大小的指标。

将果蝇轻度麻醉后置于培养皿中, 置于紫外灯正下

方15cm处, 通过控制辐射时间来控制辐射强度, 除对照组外, 辐射时间分别为3、5、7、10、15、20min。每组20只, 雌雄各半不分管, 照射完成后, 转移到正常培养基中培养, 记录一周内死亡的果蝇数量, 并计算死亡率。

#### 1.3.4 实验分组及果蝇寿命实验

实验共分7组: 对照组(不进行紫外辐射)、3min UV组、5min UV组、5min UV+0.02mg/mL黑色素(黑色素以mel表示, 下同)组、5min UV+0.04mg/mL mel组、5min UV+0.1mg/mL mel组、5min UV+0.2mg/mL mel组。

每个品种每组60只, 雌雄各半, 不分管, 每4d更换新鲜培养基, 每2d统计一次死亡的果蝇数量, 直到果蝇全部死亡。实验重复3次。

#### 1.3.5 果蝇繁殖力实验

实验共分7组: 对照组(不进行紫外辐射)、1min UV组、2min UV组、3.5min UV组、2min UV+0.02mg/mL mel组、2min UV+0.04mg/mL mel组、2min UV+0.1mg/mL mel组、2min UV+0.2mg/mL mel组。

收集8h内羽化的果蝇, 每管放置一雌一雄, 饲养一周后将亲本除去。每管从出现成虫的第1天起, 连续记录10d羽化的成虫数。实验重复10次。

#### 1.3.6 指标测定

实验分为7组: 对照组(不进行紫外辐射)、3min UV组、5min UV组、5min UV+0.02mg/mL mel组、5min UV+0.04mg/mL mel组、5min UV+0.1mg/mL mel组、5min UV+0.2mg/mL mel组。

各个实验组培养一周后, 每组取20只果蝇, 雌雄各半, 用预冷的生理盐水作为研磨介质, 将果蝇麻醉后收集于1mL的离心管中进行研磨, 研磨至匀浆状。待测完MDA和T-AOC后, 将剩余的匀浆用高速冷冻离心机在3°C、3600r/min条件下进行离心, 取上清液待测。

MDA含量、蛋白质量浓度、总抗氧化能力、SOD活力的测定采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行。

### 1.4 数据分析

用DPS7.55统计软件设计实验和分析数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 UV对果蝇的半数致死量

根据寇氏法原理<sup>[17]</sup>, 各品系果蝇半数致死量计算结果见表1。

表1 果蝇半数致死量的确定  
Table 1 LD<sub>50</sub> of AS-M for *Drosophila*

品系	LD <sub>50</sub> 下限/min	LD <sub>50</sub> 上限/min	LD <sub>50</sub> /min	标准误
中农e	5.17	10.11	7.23	0.0743
西农12	5.49	12.99	8.45	0.0954

由表1可知, 紫外线对果蝇中农e的LD<sub>50</sub>下限、LD<sub>50</sub>

上限以及LD<sub>50</sub>均低于果蝇西农12,表明果蝇中农e自身的抵抗紫外辐射的能力低于西农12。

## 2.2 杏仁种皮黑色素对果蝇寿命的影响

表2 果蝇西农12、中农e各处理组寿命结果

Table 2 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on the lifetime of *Drosophila*

处理组	样本量	平均寿命/d	
		西农12	中农e
对照组	60	58.6±0.6 <sup>aA</sup>	60.5±2.1 <sup>aA</sup>
3min UV组	60	20.1±1.7 <sup>cdBCD</sup>	22.4±1.0 <sup>bcBC</sup>
5min UV组	60	14.1±1.4 <sup>fE</sup>	16.8±2.0 <sup>efDE</sup>
5min UV+0.02mg/mL mel组	60	17.7±2.5 <sup>deDE</sup>	17.4±1.2 <sup>deDE</sup>
5min UV+0.04mg/mL mel组	60	18.9±1.6 <sup>deDE</sup>	17.8±0.9 <sup>deDE</sup>
5min UV+0.1mg/mL mel组	60	20.2±1.4 <sup>cdBCD</sup>	19.5±1.5 <sup>cdBCD</sup>
5min UV+0.2mg/mL mel组	60	23.8±2.4 <sup>bb</sup>	23.4±2.4 <sup>bb</sup>

注:小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ );大写字母不同表示差异极显著( $P < 0.01$ )。下同。

由表2可知,西农12和中农e品系间寿命没有显著差异;西农12和中农e果蝇的对照组、3min UV组、5min UV组间的果蝇寿命差异均为显著( $P < 0.01$ )。这说明紫外辐射能够明显缩短果蝇的寿命。对西农12来说,紫外辐射5min后,添加黑色素的果蝇寿命延长,与5min UV组相比差异显著( $P < 0.05$ )。随着黑色素添加量的增加,果蝇的寿命逐渐延长,但黑色素添加量为0.02mg/mL组与0.04mg/mL组以及0.04mg/mL组与0.1mg/mL组的果蝇寿命差异不显著,然而,0.2mg/mL组与0.1mg/mL组黑色素添加量的果蝇寿命有显著性差异( $P < 0.05$ )。对中农e来说,紫外辐射5min后,添加黑色素的果蝇寿命延长,但黑色素添加量为0.02mg/mL组与5min UV组的果蝇寿命差异不显著。随着黑色素添加量的增加,果蝇的寿命逐渐延长,但黑色素添加量为0.02、0.04、0.1mg/mL组的果蝇寿命差异不显著,但黑色素添加量为0.2mg/mL组与0.1mg/mL组果蝇寿命差异显著( $P < 0.05$ )。

由以上分析可知,紫外辐射显著缩短果蝇寿命,杏仁种皮黑色素能够显著降低紫外线对果蝇寿命的影响,延长果蝇的寿命,随着黑色素质量浓度的升高,果蝇抵抗紫外辐射的能力加强。

## 2.3 黑色素对果蝇繁殖力的影响

由表3可知,紫外辐射1min对西农12和中农e的繁殖力均没有显著影响,但随着辐射时间的增加,果蝇繁殖力逐渐降低且达到显著差异。结果说明低剂量的辐射对果蝇繁殖力影响较小,随着辐射强度的增大,果蝇繁殖力显著降低。对西农12来说,辐照2min,随着黑色素添加量的增加,果蝇繁殖力逐渐增大,当黑色素添加质量浓度为0.02mg/mL组与0.1、0.2mg/mL组之间的果蝇繁殖力均有显著差异( $P < 0.05$ )。对中农e来说,辐照2min,随着黑色素添加质量浓度的增加,果蝇繁殖力逐渐增大。黑色素添加量0.1mg/mL组与0.04mg/mL组比较,果蝇繁

殖力有显著差异( $P < 0.01$ ),其余添加黑色素组的繁殖力组间无显著差异。

表3 果蝇西农12、中农e各处理组繁殖力结果

Table 3 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on the fecundity of *Drosophila*

处理组	样本量	平均繁殖力/只	
		西农12	中农e
对照组	2	31.8±4.8 <sup>bb</sup>	45.2±4.5 <sup>aA</sup>
1min UV组	2	31.6±4.9 <sup>bb</sup>	42.9±7.4 <sup>aA</sup>
2min UV组	2	21.3±2.5 <sup>cdC</sup>	22.5±3.2 <sup>cC</sup>
3.5min UV组	2	8.7±1.9 <sup>hF</sup>	14.6±4.8 <sup>fgDE</sup>
2min UV+0.02mg/mL mel组	2	10.8±2.5 <sup>ghEF</sup>	12.5±4.3 <sup>fgEF</sup>
2min UV+0.04mg/mL mel组	2	13.0±3.3 <sup>ghEF</sup>	14.8±2.8 <sup>deDE</sup>
2min UV+0.1mg/mL mel组	2	15.6±3.8 <sup>efDE</sup>	20.5±1.8 <sup>cdC</sup>
2minUV+0.2 mg/mL mel组	2	18.6±4.2 <sup>deCD</sup>	22.9±3.1 <sup>cC</sup>

由上述分析可知,高强度的紫外辐射能显著降低果蝇的繁殖力,杏仁种皮黑色素能够显著降低紫外线的辐射伤害,增强果蝇的繁殖力。

## 2.4 黑色素对紫外辐射果蝇MDA含量的影响

丙二醛的含量常用来反应机体脂质过氧化的程度,在本研究中可以间接反应细胞表皮受紫外辐射的损伤程度。各处理组果蝇体内MDA含量测定的结果见图2。

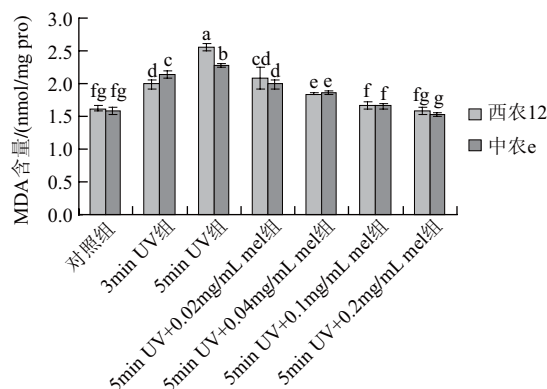


图2 各处理组果蝇MDA测定结果

Fig.2 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on MDA content in *Drosophila*

由图2可知,对果蝇西农12来说,随着紫外辐射的增强,对照组、3min UV组、5min UV组MDA的含量逐渐升高,且组间有显著差异( $P < 0.05$ ),而随着黑色素添加质量浓度的增加,果蝇MDA含量逐渐降低,除添加量为0.1mg/mL组与0.2mg/mL组之间果蝇MDA含量差异不显著,其余实验组间均有显著差异( $P < 0.05$ )。对果蝇中农e来说,对照组、3min UV组、5min UV组MDA的含量随着紫外辐射的增强逐渐升高,且各实验组间有显著差异( $P < 0.05$ );而添加黑色素的实验组中MDA含量随黑色素质量浓度增大而逐渐降低,各实验组间均有显著差异( $P < 0.05$ )。

由以上分析可知,紫外辐射能够显著升高果蝇体内MDA的含量,对果蝇表皮造成一定程度的损害,使果蝇



表皮脂质过氧化程度加强;杏仁种皮黑色素能够降低紫外辐射对果蝇的伤害,使MDA的含量降低;在一定的黑色素质量浓度范围内,随着黑色素质量浓度的升高,果蝇表皮脂质过氧化程度降低,效果显著,当黑色素质量浓度继续升高时,黑色素的抗紫外作用增强程度显著性降低。

## 2.5 黑色素对紫外辐射果蝇总抗氧化能力的影响

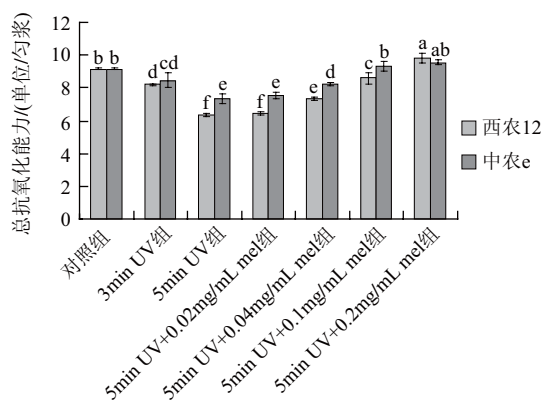


图3 各处理组果蝇总抗氧化能力测定结果

Fig.3 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on T-AOC in *Drosophila*

总抗氧化能力反映了机体抗氧化的整体水平,各处理组果蝇的总抗氧化能力测定结果见图3。对果蝇西农12来说,和对照组相比,3min UV组、5min UV组的总抗氧化能力显著降低( $P<0.05$ ),而随着黑色素添加质量浓度的增加,果蝇的总抗氧化能力逐渐升高,且各实验组间差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

对果蝇中农e来说,对照组、3min UV组、5min UV组的总抗氧化能力随着紫外辐射的增强而降低,各实验组间有显著差异( $P<0.05$ )。添加了黑色素的实验组的果蝇总抗氧化能力随着黑色素质量浓度增大而逐渐升高,除添加质量浓度为0.1mg/mL组与0.2mg/mL组果蝇的总抗氧化能力没有显著差异,其他组间抗氧化能力差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。

由以上分析可知,紫外辐射使果蝇的总抗氧化能力下降,杏仁种皮黑色素可以显著提高受到紫外辐射果蝇的抗氧化能力,在一定质量浓度范围内,黑色素质量浓度越高,抗紫外辐射能力越强,黑色素质量浓度继续增大时,黑色素的紫外保护增强程度减小。

## 2.6 黑色素对紫外辐射处理果蝇蛋白质质量浓度的影响

由图4可知,对果蝇西农12来说,3min UV组蛋白质质量浓度与对照组相比明显升高,紫外辐射至5min时,蛋白质质量浓度开始降低,对照组、3min UV组、5min UV组的蛋白质质量浓度有显著差异( $P<0.05$ )。培养基中添加黑色素后,果蝇的蛋白质质量浓度随着黑色素质量浓度的升高逐渐升高,添加量为0.02、0.04、0.1mg/mL组的果蝇蛋白质质量浓度组间有显著差异( $P<0.05$ ),而0.1mg/mL组与

0.2mg/mL组的蛋白质质量浓度没有显著差异。对果蝇中农e来说,3min UV组蛋白质质量浓度与对照组相比明显升高,紫外辐射至5min时,蛋白质质量浓度开始降低,对照组与3min UV组、3min UV组与5min UV组的蛋白质质量浓度差异均达到显著水平( $P<0.05$ ),但对照组与5min UV组蛋白质质量浓度没有显著差异,随着黑色素添加量5min UV+0.02mg/mL mel组、5min UV+0.04mg/mL mel组、5min UV+0.1mg/mL mel组的蛋白质质量浓度组间有显著差异( $P<0.05$ ),但5min UV+0.1mg/mL mel组、5min UV+0.2mg/mL mel组的蛋白质质量浓度组间没有显著差异。

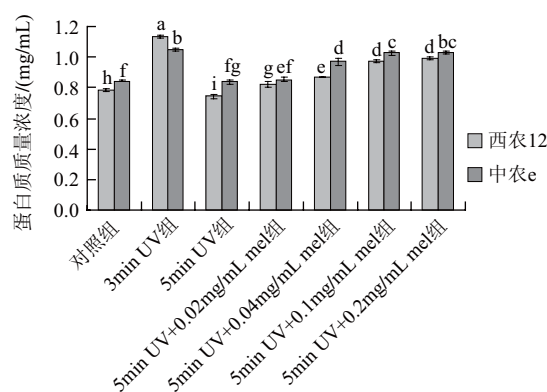


图4 各处理组果蝇蛋白质质量浓度测定结果

Fig.4 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on protein content in *Drosophila*

由上述分析可知,低强度的紫外线可使机体蛋白质质量浓度升高,原因可能是低剂量的辐射诱导了一些与抗性相关的基因的表达,导致一些新的与抗性有关的蛋白质的合成<sup>[18]</sup>;高剂量的紫外辐射造成DNA损伤,抑制基因的正常表达和蛋白质合成,而杏仁种皮黑色素对蛋白质的合成有紫外保护作用。

## 2.7 黑色素对紫外辐射果蝇超氧化物歧化酶活力的影响

SOD能够清除自由基,在保护机体免受氧化损伤方面具有重要作用。各处理组果蝇SOD活力的测定结果见图5。

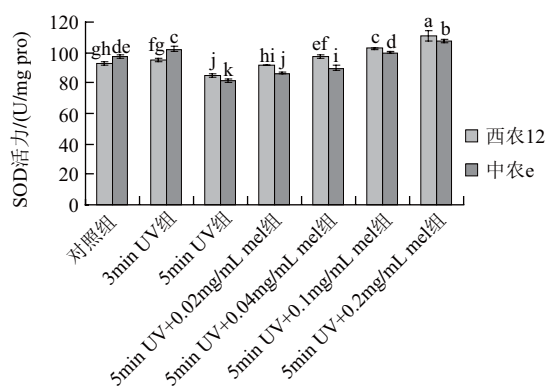


图5 各处理组果蝇SOD测定结果

Fig.5 Effect of UV irradiation alone and in combination with AS-M on SOD activity in *Drosophila*

由图5可知,对果蝇西农12来说,3min UV组SOD活力高于对照组,但差异不显著。5min UV组的SOD活力下降,与3min UV组相比,差异达到显著水平( $P<0.05$ )。随着添加黑色素质量浓度的提高,果蝇的SOD活力逐渐升高,且各实验组有显著差异( $P<0.05$ )。对果蝇中农e来说,3min UV组SOD活力高于对照组,5min UV组SOD活力开始下降,辐照前后果蝇的SOD活力达到显著差异均( $P<0.05$ )。随着培养基中黑色素质量浓度的增加,果蝇的SOD活力逐渐升高,各实验组间有显著差异( $P<0.05$ )。

由上述分析可知,低强度的紫外辐射使SOD活力升高,高强度的紫外辐射使SOD活力降低。原因可能是紫外辐射使果蝇体内自由基增多,为了适应环境,果蝇提高SOD活力以不断清除自由基,以最大限度的适应逆境。高强度的紫外线损伤细胞,使酶活性降低,而杏仁种皮黑色素对SOD有紫外保护作用。

### 3 讨论

3.1 紫外线对果蝇西农12的 $LD_{50}$ 是8.45min,对果蝇中农e的 $LD_{50}$ 是7.23min,表明西农12果蝇自身的抗紫外辐射的能力强于中农e果蝇。

3.2 紫外辐射时间为2~5min时,与对照组相比,两品系果蝇的繁殖力、寿命、总抗氧化能力显著降低,蛋白质量浓度、超氧化物歧化酶活力呈现先增后降趋势,丙二醛含量显著升高,表明紫外辐射对两品系果蝇的正常生理均有显著的损害。

3.3 与2min UV组相比,0.02~0.2mg/mL质量浓度范围的杏仁种皮黑色素能显著提高两品系果蝇的繁殖力,但相邻质量浓度梯度的繁殖力提高没有达到显著水平。与5min UV组相比,0.02~0.2mg/mL质量浓度范围的杏仁种皮黑色素能显著提高两品系果蝇的寿命、蛋白质量浓度、总抗氧化能力、SOD活力,降低MDA含量,表明杏仁种皮黑色素具有较强的抗紫外辐射的作用。

在一定质量浓度范围内,随着杏仁种皮黑色素质量浓度的升高,黑色素的紫外保护活性增强,抗氧化能力增强,当质量浓度增加到一定程度时,抗氧化活性的增强不再明显,具体原因尚待探究。Ezzahir等<sup>[19]</sup>通过研究黑色素对脂质过氧化作用的影响,得出黑色素消除 $O_2^{\cdot-}$ ,具有假SOD功能,防止脂质过氧化;刘望夷等<sup>[20]</sup>通过研究表明黑色素具有类似SOD的功能;王哲鹏等<sup>[15]</sup>研究了乌鸡黑色素对果蝇的紫外辐射保护作用,表明乌鸡黑色素能提高果蝇SOD活性,而杏仁种皮黑色素也能提高经高强度紫外辐射后的果蝇的SOD活性,说明杏仁种皮黑色素能够清除自由基,提高机体的抗氧化能力,提高机体在逆境中的生存能力,也可能具有“类SOD功能”。姚增玉等<sup>[21]</sup>通过体外实验研究表明杏仁种皮黑色素具有较强的

抗氧化能力,而本研究通过体内实验,表明杏仁种皮黑色素可以显著提高受到紫外辐射果蝇的抗氧化能力,因此杏仁种皮黑色素存在很大的应用价值,是一种很好的天然抗氧化剂资源,在保健食品、功能性食品、医药领域有很大的开发利用价值。

### 参考文献:

- [1] TADOKORO T, KOBAYASHI N, ZMUDZKA B Z, et al. UV-induced DNA damage and melanin content in human skin differing in racial ethnic origin[J]. *FASEB J*, 2003, 17(9): 1177-1179.
- [2] CADET J, SAGE E, DOUKI T. Ultraviolet radiation-mediated damage to cellular DNA[J]. *Mutat Res*, 2005, 571(1/2): 3-17.
- [3] SIES H, SCHULZ W A, STEENKEN S. Adjacent guanines as preferred sites for strand breaks in plasmid DNA irradiated with 193 nm and 248 nm UV laser light[J]. *Photochem Photobiol B*, 1996, 32(1/2): 97-102.
- [4] GALLAGHER R P, LEE T K. Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review[J]. *Prog Biophys Mol Biol*, 2006, 92(1): 119-131.
- [5] HERRLING T, JUNG K, FUCHS J. The role of melanin as protector against free radicals in skin and its role as free radical indicator in hair[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2008, 69(5): 1429-1435.
- [6] 晏斌, 戴秋杰. 紫外线B对水稻叶组织中活性氧代谢及膜系统的影响[J]. *植物生理学报*, 1996, 22(4): 373-378.
- [7] RAVANAT J L, DOUKI T, CADET J. Direct and indirect effects of UV radiation on DNA and its components[J]. *Photochem Photobiol B*, 2001, 63(1): 88-102.
- [8] CHOI J H, BESARATINIA A, LEE D H, et al. The role of DNA polymerase  $\eta$  in UV mutational spectra[J]. *Mutat Res*, 2006, 4(2/3): 211-220.
- [9] MATSUMURA Y, ANANTHASWAMY H N. Molecular mechanisms of photocarcinogenesis[J]. *Front Biosci*, 2002, 7: 765-783.
- [10] 宁华. 工程菌所产黑色素对生物大分子光保护作用的研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 35(1): 124-126.
- [11] GENG Jing, YU Shengbing, WAN Xia, et al. Protective action of bacterial melanin against DNA damage in full UV spectrums by a sensitive plasmid-based noncellular system[J]. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 2008, 70(6): 1151-1155.
- [12] 徐李莲, 庄苏, 陈伯祥. 乌鸡黑色素对延缓果蝇衰老的作用[J]. *南京农业大学学报*, 1999, 22(2): 105-108.
- [13] 张俊贤, 郭光艳, 齐志广. 紫外线对果蝇生长发育和表形变异的影响[J]. *河北师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(1): 90-93.
- [14] 张建民. 紫外线对黑尾果蝇的生物效应[J]. *昆虫知识*, 1994, 31(4): 242-244.
- [15] 王哲鹏, 邓学梅, 王安如. 乌鸡黑色素对果蝇的紫外辐射保护作用[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(1): 17-21.
- [16] 李巨秀, 李红姣, 赵忠, 等. 杏仁种皮黑色素提取工艺优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(8): 11-14.
- [17] 谭苹. 应用Excel软件计算半数致死量[J]. *山西医科大学学报*, 2010, 41(10): 914-916.
- [18] 罗丽琼, 陈宗瑜, 古今, 等. 紫外线-B辐射对植物DNA及蛋白质的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 572-576.
- [19] EZZAHIR W, YAMAGUCHI N. Antioxidation properties of decoloured melanoidin[J]. *New Food Industry*, 1991, 33(1): 76-80.
- [20] 刘望夷, 蔡菊娥, 沈枝安. 乌鸡黑色素元素组成与自由基状态初探[J]. *分子科学与化学研究*, 1982(9): 95-100.
- [21] 姚增玉, 李科友, 赵忠, 等. 山杏种皮黑色素的抗氧化活性[J]. *林业科学*, 2007, 43(10): 59-63.