

# 不同离心强度损伤对绿豆芽抗病生理的影响\*

王向阳 王红艳

(浙江工商大学食品与生物工程学院, 杭州 310035)

**摘要:** 对绿豆芽 (*Vigna radiata*) 进行了可逆损伤(94g)、轻微损伤(376g)、中度损伤(845g)、严重损伤(1 503g)和破损伤(3 381g)的不同离心强度(加速度)的损伤,  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 测定过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、多酚氧化酶(PPO)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性以及超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^-$ )的产生速率、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )质量摩尔浓度、水杨酸(SA)质量浓度和木质素含量变化。包括可逆损伤在内的所有损伤, 在损伤初期都会诱导抗病生理。可逆损伤的游离态 SA 质量浓度、 $\text{H}_2\text{O}_2$  质量摩尔浓度和 POD 活性显著上升,  $\text{O}_2^-$  的产生速率、总酚质量浓度、木质素含量、SOD 活性、CAT 活性、PAL 活性和 PPO 活性变化不显著; 轻微损伤、中等损伤、严重损伤引起更多抗病生理指标显著变化, 特别是轻微和中等损伤的 POD 活性上升最为显著; 破损伤的游离态 SA 质量浓度、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、总酚、木质素含量上升最大, 但是  $\text{O}_2^-$  产生速率、CAT、PAL、PPO 活性下降也最大。SOD 活性对损伤敏感性较低。

**关键词:** 绿豆芽 机械伤害 抗病性 离心强度

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0198-06

## Effects of Different Centrifugal Intensity on Disease Resistance of Mung Bean Germinations

Wang Xiangyang Wang Hongyan

(College of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

**Abstract:** The Catalase (CAT), Peroxidase (POD), Superoxide dismutase (SOD), Polyphenol oxidase (PPO) and Phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity, the Superoxide anion free radical ( $\text{O}_2^-$ ) generation rate, the Hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Salicylic acid and Lignin content of mung bean germinations were detected, which were subjected to different centrifugal intensity (acceleration), such as reversible damage (94g), slight damage (376g), moderate damage (845g), serious damage (1 503g), and breakage damage (3 381g). One gravitational acceleration ( $g$ ) =  $9.8 \text{ m/s}^2$ . The results showed that the disease resistance would be induced by all the centrifugal damages including reversible damage in the early stage. The content of free Salicylic acid (SA) and  $\text{H}_2\text{O}_2$ , POD activity were significantly increased by reversible damage while the change of the  $\text{O}_2^-$  generation rate, total hydroxybenzene, lignin content, the SOD, CAT, PAL and PPO activity were indistinctive. The significant changes of more disease resistance indicators were caused by slight damage, moderate damage and serious damage. Especially the POD activity was increased remarkably under slight damage and moderate damage. The content of free SA,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , total hydroxybenzene and lignin rose in the maximum while the  $\text{O}_2^-$  generation rate, the CAT, PAL and PPO activity declined in the maximum when it was treated with breakage damage. Besides, the SOD activity was not sensitive to all the damages.

**Key words:** Mung bean germination Mechanical damage Disease resistance Centrifugal intensity

## 引言

果蔬在采后容易受到机械伤害,机械伤害会引起一系列生理性病变,使果蔬衰老加快,同时也为微生物侵染提供了机会,导致腐烂,造成果蔬采后的损失相当严重<sup>[1-2]</sup>。一些研究表明,损伤也是刺激因素,可以诱导果蔬产生抗病、抗虫和抗逆生理。目前,国内外学者通过复叶槭、番茄、豌豆和烟草等植物对机械损伤与植物体内信号物质及各种物质、酶活性变化的关系进行了比较详细的研究。刘艳研究发现,机械伤害能诱导豌豆叶片活性氧迸发,伤害防御反应中 PAL、PPO 活性提高,相应地,抗氧化酶类活性显著增强,降低膜脂过氧化水平,减轻括性氧损伤<sup>[3]</sup>。彭燕等对黄瓜损伤进行了研究,发现机械损伤可以有效地诱导提高黄瓜体内伤害防御酶(PAL、SOD、几丁质酶等)活性,从而产生对病毒、细菌和真菌等的抗病反应<sup>[4-5]</sup>。

前人对机械伤害的生理研究,不管是刺伤、碰伤、擦伤等都只是受试材料的局部损伤,取样检测抗病生理指标时,所取样品难以区分受伤组织、受伤口影响组织和正常组织,受伤组织的受伤程度也难以确定,影响了检测抗病生理指标的准确性。本文采用整体损伤,以绿豆芽为材料,通过整体离心强度损伤,检测损伤后的 CAT、POD、SOD、PPO、PAL 等酶活性,  $O_2^-$  的产生速率、 $H_2O_2$ 、SA 及木质素的质量浓度变化,了解植物对不同离心强度损伤的抗病生理反应。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料及处理

供试材料谷粒园绿豆购于杭州市超市。选择饱满、成熟、没有破损的绿豆,洗净后用体积分数为 0.5% (有效氯) 次氯酸钠溶液浸泡消毒 0.5 h, 料液比为 1:2。用蒸馏水冲洗 4 次, 25℃ 温水发泡绿豆种子 12 h, 料液比为 1:1, 放置潮湿滤纸上用蒸馏水催芽, 上盖 2 层纱布, 25℃、相对湿度 80% 的恒温培养避光培养 48 h, 期间补充水分。待绿豆芽胚轴长到 6~8 mm 时, 进行离心处理。离心速度为 1 000、2 000、3 000、4 000、6 000 r/min, 其对应离心强度分别为 94、376、845、1 503、3 381g, g 为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 离心力定义为地球重力加速度的倍数。每次离心 5 g 豆芽, 加 20 mL 水, 使豆芽在水中均匀受力, 离心 5 min。放置一定时间取样用于测定。

### 1.2 试剂与仪器

#### 1.2.1 主要试剂

氢氧化钠、无水乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、

丙酮、硫酸、聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)、次氯酸钠、EDTA、硫代巴比妥酸(TBA)、羟胺氯化物、对氨基苯磺酸、亚硝酸钠、正丁醇、邻苯二酚、柠檬酸、巯基乙醇、核黄素、甲硫氨酸、氯化硝基四氮唑蓝(NBT)、愈创木酚、 $\alpha$ -萘胺、30%  $H_2O_2$ 、乙醇、乙酸、水杨酸、浓盐酸、三氯乙酸、巯基乙酸、石油醚和甲醇(色谱纯)等。未标明的均为分析纯。

#### 1.2.2 主要仪器

LRH-150-S 型恒温恒湿培养箱(西安信恒检测仪器有限公司); AY-120 型电子天平(日本 SHIMADZU 公司); SiGmA 3-30 k 型台式高速离心机(北京五洲东方科技发展科技公司); UV-2550 型紫外可见分光光度计(日本 SHIMADZU 公司); XMTD-204 型水浴锅(上海博讯实验有限公司); R-210 型旋转蒸发仪(德国 BÜCHI); 高效液相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司)。

#### 1.3 测定方法

##### (1) 生长发育

将经离心处理后的绿豆芽置于 25℃、相对湿度 80% 下避光培养。用滤纸吸干 20 颗豆芽表面水分后, 分别测定质量和豆芽胚轴的长度。

##### (2) SA 质量浓度

参照文献[6]方法。取 5.0 g 新鲜绿豆芽, 测定游离态 SA 和结合态 SA。样品经 0.45  $\mu\text{m}$  的微孔过滤器后, 用高效液相色谱(HPLC)检测。色谱柱: Shimadzu ODS C18 柱(250 mm  $\times$  4.6 mm I. D. S-3  $\mu\text{m}$ )。流动相: 甲醇和乙酸缓冲液(pH 值 3.2)(体积比为 45:55)。岛津荧光检测器; 激发波长为 310 nm, 发射波长为 415 nm。流速 0.8 mL/min, 进样量 10  $\mu\text{L}$ 。标准曲线: 用上述缓冲液配制 0、0.125、0.25、0.5、1.0  $\mu\text{g/mL}$  的 SA 标准液, HPLC 测定。

##### (3) $O_2^-$ 产生速率

参照文献[7]方法, 以鲜重为基数, 以  $\text{NO}_2^-$  计, 单位为  $\text{mmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。

##### (4) SOD 活性

参照文献[4]的方法。以鲜重为基数, 以抑制 NBT 光氧化还原的 50% 酶量为 1 个酶活性单位(U), 活性单位为  $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。

##### (5) $H_2O_2$ 质量摩尔浓度

参照文献[8]方法。以鲜重为基数, 以质量摩尔浓度( $\text{nmol/g}$ )表示。

##### (6) CAT 与 POD 活性

CAT 测定参照文献[9]方法, POD 测定参照文献[3]以每 min 吸光值变化 0.01 为 1 U, 活性单位为  $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 。以鲜重为基数。

### (7) 总酚质量浓度

参照文献[10]方法。在波长 270 nm 处测定吸光值。以邻苯二酚作标准曲线,单位为 mg/mL。以鲜重为基数。

### (8) PAL 活性

参照文献[11]的方法,以每 min 吸光值变化 0.01 为 1 U,活性单位为 U/(g·min)。

### (9) PPO 活性

参照文献[12]的方法,以每 min 吸光值变化 0.01 为 1 U,活性单位为 U/(g·min)。

### (10) 木质素含量

参照文献[13]的方法,木质素含量以每 g 鲜重在波长 280 nm 处的吸光值表示。

## 1.4 数据分析

实验数据采用 Excel 2003 软件进行统计分析和作图,5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性以及单因素方差分析检验。极显著水平为  $P < 0.01$ ,显著水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿豆芽生长发育

图 1 为不同离心强度伤害下绿豆芽生长势的变化。图 2 为不同离心强度伤害下绿豆芽质质量的变化。结合台盼兰染色可知,94g 离心后绿豆芽没有明显损伤,处理后长势和质量基本正常,台盼兰染色发现没有死细胞,称为可逆损伤。376g 离心后,豆芽长势和质量增加受到一定抑制,极少数大细胞被染色呈浅蓝色,即轻微损伤。845g 离心后,长势受到严重抑制,质量增加缓慢,少数细胞被染色呈不同程度的蓝色,即中度损伤。1 503g 离心后,豆芽基本不再生长,质量不再增加,较多细胞被染色呈不同程度的蓝色,即严重损伤。3 381g 离心后豆芽不再生长,质量保持不变,大量细胞被染色呈深蓝色,说明细胞大量死亡,即破损损伤。

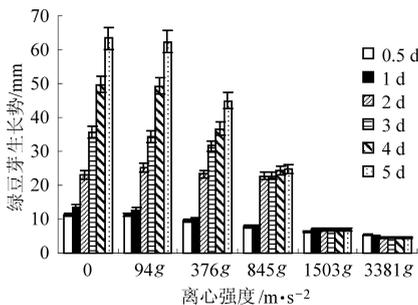


图 1 不同离心强度伤害下绿豆芽生长势的变化  
Fig. 1 Effects of different centrifugal intensity on growth vigor of mung bean germinations

### 2.2 游离态 SA、结合态 SA 和总 SA

图 3 为不同离心强度伤害下绿豆芽游离态 SA

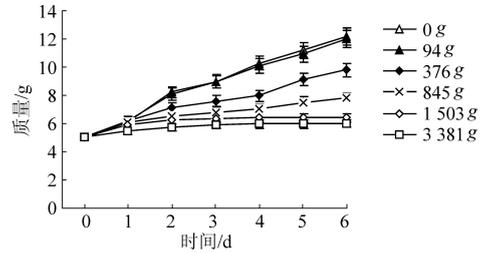


图 2 不同离心强度伤害下绿豆芽质质量的变化  
Fig. 2 Effects of different centrifugal intensity on weight of mung bean germinations

质量浓度的变化。由图 3 可知,随豆芽生长,24 h 后单位鲜重的游离态 SA 质量浓度显著下降。损伤后 0.5 h,3 种损伤的游离态 SA 质量浓度迅速增加,极显著高于对照。中度损伤、破损损伤的游离态 SA 质量浓度极显著高于可逆损伤。然而损伤后 3 h,其游离态 SA 质量浓度均极显著下降,中度损伤的游离态 SA 质量浓度低于可逆损伤和破损损伤。损伤后 24 h,其游离态 SA 质量浓度均极显著上升,损伤越重,上升越大。

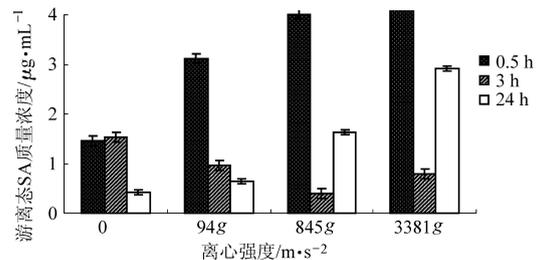


图 3 不同离心强度伤害下绿豆芽游离态 SA 质量浓度的变化

Fig. 3 Effects of different centrifugal intensity on free salicylic acid content of mung bean germinations

图 4 为不同离心强度伤害下绿豆芽结合态 SA 质量浓度的变化。由图 4 可知,随豆芽生长,24 h 内单位鲜重的结合态 SA 质量浓度没有显著变化。损伤后 0.5 h,3 种损伤的结合态 SA 质量浓度迅速增加,极显著高于对照。中度损伤和破损损伤的结合态 SA 质量浓度高于可逆损伤。3 h 和 24 h 的各种强度损伤的结合态 SA 质量浓度均极显著低于对照。破损损伤和轻度损伤的 3 h 的结合态 SA 质量浓度显著低于可逆损伤,中度损伤 24 h 的结合态 SA 质量浓度显著高于可逆损伤和破损损伤。

图 5 为不同离心强度伤害下绿豆芽总 SA 质量浓度的变化。损伤后 0.5 h,所有强度损伤的总 SA 质量浓度迅速增加,极显著高于对照。中度损伤和破损损伤的总 SA 质量浓度显著高于可逆损伤。在损伤后 3 h,所有损伤总 SA 质量浓度极显著低于对照。中度损伤的 SA 质量浓度为最低点,损伤进一步加大,总 SA 含量显著回升。在损伤后 24 h,可逆

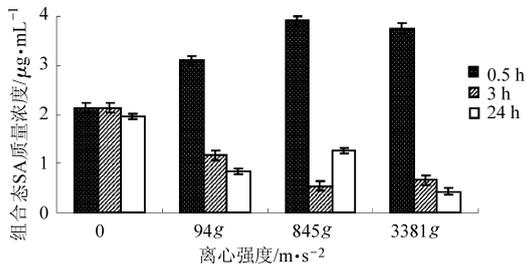


图 4 不同离心强度伤害下绿豆芽结合态 SA 质量浓度的变化

Fig. 4 Effects of different centrifugal intensity on bound salicylic acid content of mung bean germinations

损伤的总 SA 质量浓度显著下降,中度损伤和破损损伤的总 SA 质量浓度显著回升,损伤越重,回升越高。

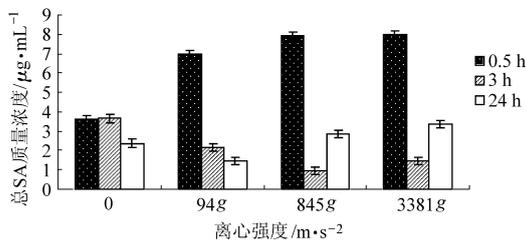


图 5 不同离心强度伤害下绿豆芽总 SA 质量浓度的变化

Fig. 5 Effects of different centrifugal intensity on total salicylic acid content of mung bean germinations

### 2.3 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率和 SOD 活性

图 6 为不同离心强度伤害下绿豆芽 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的变化。由图 6 可知,可逆损伤时,损伤后 5~24 h, O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率只有轻微下降。损伤后 3 h, O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率下降相对较大。可逆损伤与对照相比差异不显著。轻微损伤时,损伤后 0.5~24 h, O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率均出现显著下降,特别是损伤后 3 h 和 24 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率下降幅度很大。轻微损伤与对照之间差异显著。大于轻微损伤处理的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率与对照之间差异极显著。中度损伤时,损伤后 5 min~24 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率下降幅度极大,24 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率更大。0.5 h 和 3 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率也有显著下降。严重损伤时,损伤后 5 min、0.5 h、24 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率进一步显著下降,但是 3 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率与中度损伤没有显著差异。破损损伤时,损伤后 5 min、24 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率非常低,0.5 h 和 3 h 的也进一步显著下降。O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率下降幅度最小的是 0.5 h,下降幅度最大的是 24 h。

O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率随着离心强度的增大而减小,根据 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率可以清楚地区分不同程度的离心强度伤害。特别是损伤后 5 min 和 24 h 不同程度损伤之间的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的差异非常明显。细胞损伤后的 0.5 h 和 3 h 有一个明显的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率

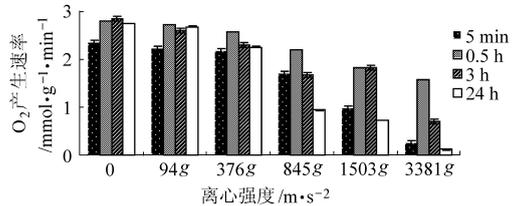


图 6 不同离心强度伤害下绿豆芽 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的变化

Fig. 6 Effects of different centrifugal intensity on O<sub>2</sub><sup>-</sup> generation rate of mung bean germinations

产生高峰。即使细胞受到破坏,该 2 个高峰还是存在,其中 0.5 h 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率高峰最明显。

图 7 为不同离心强度伤害下绿豆芽 SOD 活性的变化。由图 7 可知,不同强度离心损伤对 SOD 活性的影响较小。可逆损伤时,伤害后 5 min 和 24 h 的 SOD 活性出现下降,特别是 24 h 达到了显著水平。但是损伤后 2 h 和 5 h 的 SOD 活性与对照没有显著差异。轻微和中度损伤豆芽的 SOD 活性与对照没有显著差异。严重损伤时 24 h 的 SOD 活性出现下降,破损损伤时 24 h 的 SOD 活性进一步下降,与对照有显著差异。

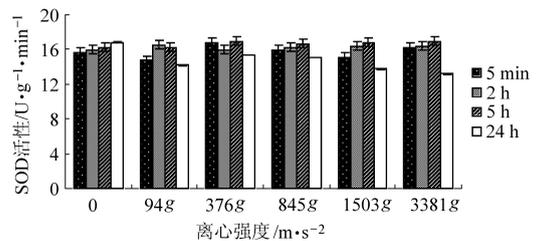


图 7 不同离心强度伤害下绿豆芽 SOD 活性的变化

Fig. 7 Effects of different centrifugal intensity on SOD activity of mung bean germinations

### 2.4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度和 CAT 活性

图 8 为不同离心强度伤害下绿豆芽 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度的变化。由图 8 可知,在伤害处理后 5 min,与对照相比,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度显著增加,但是不同强度损伤之间没有显著差别。在伤害处理后 3 h 和 24 h,所有损伤的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度与对照相比极显著增加。在伤害处理后 3 h,随损伤加重 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度逐步上升,均显著高于可逆损伤。细胞破裂损伤的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度显著高于其他强度的损伤。在伤害处理后 24 h,同样随损伤加重,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度逐步上升。细胞破裂损伤的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度显著高于其他损伤。伤害后 3 h 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度变化最为明显。

图 9 为不同离心强度伤害下绿豆芽 CAT 活性的变化。由图 9 可知,在伤害处理后 5 min,可逆损伤、轻微损伤、中等损伤和破损损伤的 CAT 活力显著高于对照和严重损伤,此时破损损伤的 CAT 活力最高,严重损伤的 CAT 活力最低。在伤害处理后

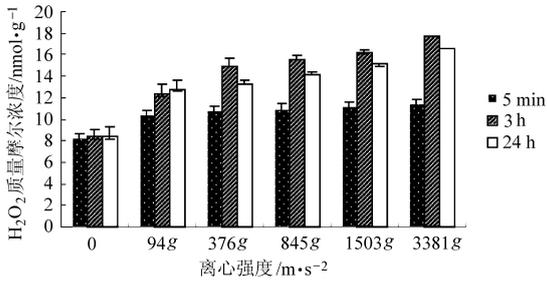


图8 不同离心强度伤害下绿豆芽 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 质量摩尔浓度的变化

Fig. 8 Effects of different centrifugal intensity on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content of mung bean germinations

1 h,可逆损伤、轻微损伤和中等损伤的 CAT 活力与对照相比没有显著差别。严重损伤和细胞破碎损伤的 CAT 活力显著低于对照。在伤害处理后 24 h,可逆损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和破损损伤的 CAT 活力都极显著高于对照,此时轻微损伤的 CAT 活力最高。

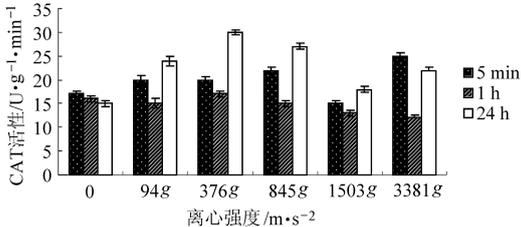


图9 不同离心强度伤害下绿豆芽 CAT 活性的变化  
Fig. 9 Effects of different centrifugal intensity on CAT activity of mung bean germinations

## 2.5 总酚质量浓度、木质素含量、PAL 活性、PPO 活性和 POD 活性

图 10 为不同离心强度伤害下绿豆芽总酚质量浓度的变化。由图 10 可知,损伤对绿豆芽总酚影响较小,与对照相比,伤害处理后 5 min、1 h、3 h、24 h,破损损伤的总酚质量浓度显著上升。

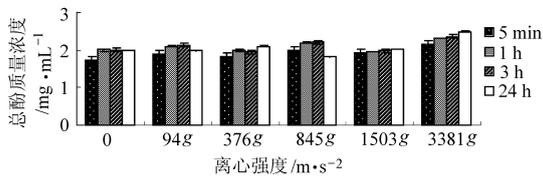


图 10 不同离心强度伤害下绿豆芽总酚质量浓度的变化  
Fig. 10 Effects of different centrifugal intensity on total hydroxybenzene content of mung bean germinations

图 11 为不同离心强度伤害下绿豆芽木质素含量的变化。由图 11 可知,损伤后木质素含量逐渐上升,损伤越重,木质素含量越高。细胞破损损伤的木质素含量最高。从时间看,损伤后 24 h 木质素含量最高。

图 12 为不同离心强度处理下绿豆芽 PAL 活性的变化。由图 12 可知,对照豆芽生长中有 PAL 活

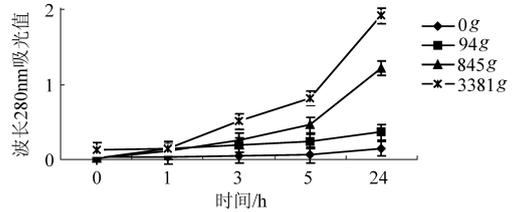


图 11 不同离心强度伤害下绿豆芽木质素含量的变化  
Fig. 11 Effects of different centrifugal intensity on lignin content of mung bean germinations

性高峰。在损伤后 24 h,随着损伤加重,PAL 活性逐步下降。损伤后 5 min、2 h 的 PAL 也有类似趋势。损伤后 5 h,可逆损伤的 PAL 活性最高,然后随损伤加重逐步下降。可逆损伤时,在伤害处理后 5 min、2 h 和 24 h 的 PAL 活性与对照没有显著差别。轻度损伤、中等损伤、严重损伤和破损损伤时,在伤害处理后 5 min、2 h 和 24 h 的 PAL 活性显著低于对照;可逆损伤、轻度损伤和中等损伤时,在伤害后 5 h,PAL 活性显著高于对照。严重损伤时,在伤害后 5 h,PAL 活性与对照没有显著差别。破损损伤时,在伤害处理后 5 h 的 PAL 活性显著低于对照。

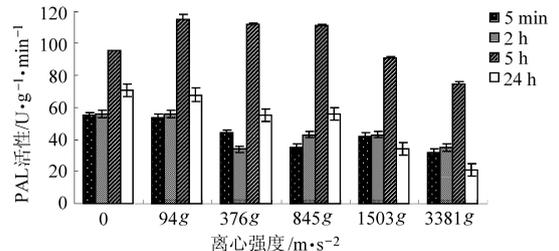


图 12 不同离心强度处理下绿豆芽 PAL 活性的变化  
Fig. 12 Effects of different centrifugal intensity on PAL activity of mung bean germinations

图 13 为不同离心强度伤害下绿豆芽 PPO 活性的变化。由图 13 可知,对照豆芽生长中 PPO 活性逐步下降。伤害处理 5 min 后,PPO 活性随伤害强度上升逐步下降,可逆损伤、轻微损伤和中等损伤下降幅度很小,但是严重损伤和破损损伤,PPO 活性极显著下降,后者 PPO 活性为最低。说明细胞严重损伤时,PPO 酶被细胞物质失活或被蛋白酶降解。伤害处理后 1 h,可逆损伤 PPO 酶活性与对照没有显

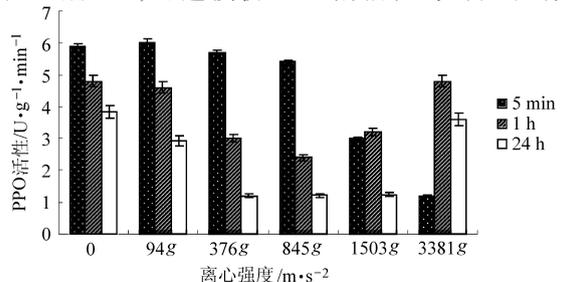


图 13 不同离心强度伤害下绿豆芽 PPO 活性的变化  
Fig. 13 Effects of different centrifugal intensity on PPO activity of mung bean germinations

著差异,轻微损伤、中等损伤和严重损伤的 PPO 酶都显著比对照低,中等损伤 PPO 活性最低。超过中等强度的严重损伤、破损损伤的 PPO 活性显著回升。伤害处理 24 h,可逆损伤、轻微损伤、中等损伤和严重损伤的 PPO 活性都显著低于对照。后三者之间没有显著差别,但均显著低于可逆损伤。同样破损损伤的 PPO 活性在 24 h 也出现极显著的回升。

图 14 为不同离心强度伤害下绿豆芽 POD 活性的变化。由图 14 可知,各种强度伤害处理 5 min 和 1 h,POD 活性只有较小变化。然而伤害处理后 24 h,所有损伤处理的 POD 活性有极显著的升高。

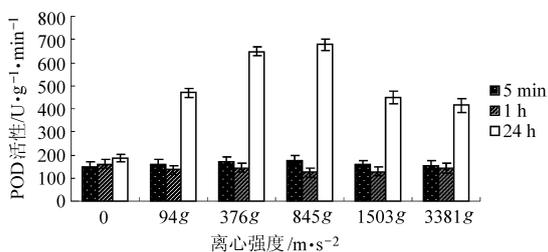


图 14 不同离心强度伤害下绿豆芽 POD 活性的变化  
Fig. 14 Effects of different centrifugal intensity on POD activity of mung bean germinations

轻微损伤和中等损伤的 POD 活性极显著高于可逆损伤。而严重损伤和破损损伤的 POD 活性极显著低于轻微损伤和中等损伤的 POD 活性。

### 3 结束语

损伤越重,绿豆芽生长势、质量抑制越明显。损伤后游离态和结合态 SA 质量浓度立即上升,损伤后 3 h 时有所下降,24 h 游离态 SA 质量浓度再上升,但结合态 SA 质量浓度下降。损伤越重, $O_2^-$  的产生速率、PPO 活性下降越显著,但细胞破损却导致 PPO 活性上升,PAL 活性相反,较轻的损伤刺激 PAL 活性上升,损伤太重 PAL 活性下降。损伤刺激  $H_2O_2$  质量摩尔浓度上升。损伤对 SOD 质量浓度影响较小,伤后 24 h 时 POD 活性和 CAT 活性上升幅度大。细胞破损导致总酚质量浓度积累,较轻的损伤对其影响较小,木质素含量在损伤后 3 ~ 24 h 显著上升,损伤越重,时间越久,上升越大。说明总酚质量浓度可能只是中间产物,其进一步合成木质素等物质。绿豆芽对细胞破损损伤、非破损的不可逆损伤和可逆损伤的生理响应存在巨大差异。

### 参 考 文 献

- Leea J Y, Parka H J, Lee C Y, et al. Extending shelf-life of minimally processed apples with edible coatings and antibrowning agents[J]. Food Science and Technology, 2003,36(3): 323 ~ 329.
- Amorim L, Martins M C, Lourenco S A, et al. Stone fruit injuries and damage at the wholesale market of Sao Paulo Brazil[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008,47(3): 353 ~ 357.
- 刘艳. 机械伤害诱导豌豆幼苗防御性反应及其调控机制——着重于茉莉酸和  $H_2O_2$  信息的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.  
Liu Yan. Studies on mechanical wounding-induced defense response and regulation with emphasis on signaling of jasmonic acid and  $H_2O_2$  in pea seedlings[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 彭燕. 采后黄瓜对机械损伤和低温胁迫的响应机制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.  
Peng Yan. Study on the response mechanism of mechanical wounding and chilling stress in postharvest cucumber[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- 赵艳. 黄瓜植株机械损伤效应及防御酶应答的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.  
Zhao Yan. A study on the mechanical wounding effects and the defense enzymes response after treating cucumber plants with mechanical wounding[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 张玉,陈昆松,张上隆. 猕猴桃果实中内源水杨酸的提取、测定及其在采后研究中的应用[J]. 中国食品学报, 2004,4(3): 6 ~ 9.  
Zhang Yu, Chen Kunsong, Zhang Shanglong. Extraction and determination of endogenous salicylic acid from Kiwifruit and its application to postharvest research [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2004, 4(3): 6 ~ 9. (in Chinese)
- 王爱国,罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990,26(6): 55 ~ 57.  
Wang Aiguo, Luo Guanghua. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. Plant Physiology Communications, 1990,26(6): 55 ~ 57. (in Chinese)
- Mukherjee S P, Choudhurl M A. Implications of water stress-induced changes in the levels of endogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide in Vigns seedlings[J]. Physidogia Plentarum, 1983,58(2): 166 ~ 170.
- 秦红霞,刘敬梅,宋玉霞. 转 AtDREB1A 的银新杨 APX 和 CAT 活性检测[J]. 江西农业学报, 2007,19(10): 89 ~ 91.  
Qin Hongxia, Liu Jingmei, Song Yuxia. Detection of APX and CAT activity in AtDREB1A transgenic Yinxin poplar[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007,19(10): 89 ~ 91. (in Chinese)
- 罗晓芳,田砚亭,姚洪军. 组织培养过程中 PPO 活性和总多酚含量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1999,21(1): 92 ~ 95.  
Luo Xiaofang, Tian Yanting, Yao Hongjun. Polyphenol oxidase activities and phenol contents in tissue culture [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1999,21(1): 92 ~ 95. (in Chinese)

- 3 Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95 ~ 107.
- 4 Gitelson A, Kaufman Y, Merzlyak M. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289 ~ 298.
- 5 Fernando Solari, John Shanahan, Richard Ferguson, et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 571 ~ 579.
- 6 宋文冲, 胡春胜, 程一松, 等. 作物氮素营养诊断方法研究进展 [J]. *土壤通报*, 2007, 37(2): 369 ~ 372.  
Song Wenchong, Hu Chunsheng, Cheng Yisong, et al. Research advancement on crop nitrogen nutrition diagnosis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 37(2): 369 ~ 372. (in Chinese)
- 7 Nicolas Tremblay, Wang Zhijie, Bao-Luo Ma, et al. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application [J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(2): 145 ~ 161.
- 8 Sudduth K A, Kitchen N R, Drummond S T. Comparison of three canopy reflectance sensors for variable-rate nitrogen application in corn [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, Colorado, USA, 2010.
- 9 王秀, 赵春江, 周汉昌, 等. 冬小麦生长便携式 NDVI 测量仪的研制与试验 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 95 ~ 98.  
Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Zhou Hanchang, et al. Development and experiment of portable NDVI instrument for estimating growth condition of winter wheat [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 95 ~ 98. (in Chinese)
- 10 焦学磊, 曹卫星, 田永超, 等. 用于作物光谱信息监测的微弱信号调理方法与电路设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1): 2461 ~ 2464.  
Jiao Xuelei, Cao Weixing, Tian Yongchao, et al. Feeble light signal conversion method and circuit design used in crop spectrum information inspection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 2461 ~ 2464. (in Chinese)
- 11 乔欣, 马旭, 张小超, 等. 大豆叶绿素和钾素信息的冠层光谱响应 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 108 ~ 111.  
Qiao Xin, Ma Xu, Zhang Xiaochao, et al. Response of coronary spectrum on chlorophyll and K information of soy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 108 ~ 111. (in Chinese)
- 12 李修华, 李民赞, 崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 252 ~ 256.  
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.): 252 ~ 256. (in Chinese)
- 13 刘海俊, 孙传范, 曹卫星, 等. 便携式作物氮素监测仪性能水稻田间测试 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 80 ~ 84.  
Liu Haijun, Sun Chuanfan, Cao Weixing, et al. Evaluation of portable crop nitrogen monitoring instrument based on rice field experiment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 80 ~ 84. (in Chinese)
- 14 梁留锁, 马旭, 乔欣. 大豆叶片氮素含量检测装置的研究 [J]. *农机化研究*, 2010(12): 121 ~ 124.  
Liang Liusuo, Ma Xu, Qiao Xin. Research of the soybean's total leaf nitrogen determination device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010(12): 121 ~ 124. (in Chinese)
- 15 倪军, 姚霞, 田永超, 等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 150 ~ 156.  
Ni Jun, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(6): 150 ~ 156. (in Chinese)
- 16 魏士平. 实时 NDVI 测量仪的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
Wei Shiping. Design and implementation of NDVI real-time measuring instrument [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- 17 李映雪, 朱艳, 田永超, 等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系 [J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 358 ~ 362.  
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. 2006, 32(3): 358 ~ 362. (in Chinese)
- 18 冯伟, 朱艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 23 ~ 32.  
Feng Wei, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 23 ~ 32. (in Chinese)
- 19 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 利用红边特征参数监测小麦叶片氮积累量状况 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 194 ~ 201.

(上接第 203 页)

- 11 宾金华, 姜胜, 黄胜琴, 等. 茉莉酸甲酯诱导烟草幼苗抗炭疽病与 PAL 活性及细胞壁物质的关系 [J]. *植物生理学报*, 2000, 26(1): 1 ~ 6.  
Bin Jinhua, Jiang Sheng, Huang Shengqin, et al. The relationship between methyl jasmonate induced anthracnose resistance of tobacco seedlings and phenylalanine ammonia lyase activity and cell wall substances [J]. *Acta Photophysica Sinica*, 2000, 26(1): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 12 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 141 ~ 145.  
Wang Xiangyou, Yan Congcong, Liu Zhanli. Effect of edible coatings on physiology and quality of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 141 ~ 145. (in Chinese)
- 13 An J S, Zhang M, Lu Q R. Changes in some quality indexes in fresh-cut green asparagus pretreated with aqueous ozone and subsequent modified atmosphere packaging [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 340 ~ 344.