

梁勇生, 黄杏, 龙明华, 等. 多环芳烃胁迫对菜心生长及生理特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 54-60.

# 多环芳烃胁迫对菜心生长及生理特性的影响

梁勇生<sup>1,2</sup>, 黄杏<sup>1,3</sup>, 龙明华<sup>1</sup>, 巫桂芬<sup>1</sup>, 张会敏<sup>1</sup>, 乔双雨<sup>1</sup>

(1 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2 南宁市农业科学研究所, 广西南宁 530021; 3 广西甘蔗遗传改良重点实验室/农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/广西农业科学院甘蔗研究所, 广西南宁 530007)

**摘要:**【目的】明确多环芳烃 (PAHs) 胁迫对菜心 *Brassica parachinensis* 生长的影响, 探讨 PAHs 胁迫对菜心的生理毒性。【方法】采用萘 (Nap)、菲 (Phe)、荧蒽 (Flt)、苯并芘 (BaP) 和茚并芘 (InP) 5 种 PAHs 混合溶液施入土壤胁迫菜心, 在移栽定植后第 10、17 和 24 天分析菜心叶片丙二醛 (MDA)、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和脯氨酸 (Pro) 含量以及抗氧化酶活性的变化, 观察测定定植后第 24 天菜心的生长情况。【结果】PAHs 胁迫下菜心株高增加, 以 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理的株高最高; 0.4 和 0.8 mg·kg<sup>-1</sup> 处理对菜心的茎粗影响不大, 对提高单株鲜质量和根鲜质量有一定的促进作用, 2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理不同程度地降低了菜心的茎粗、单株鲜质量和根鲜质量; PAHs 胁迫下, 菜心叶片中 MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 Pro 含量随着胁迫时间的延长和 PAHs 含量的增大而升高。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性随着胁迫浓度的增大而增强; 过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性随着 PAHs 含量的增大呈先升高后下降的趋势。【结论】低含量 PAHs 胁迫对菜心的生长影响不大, 高含量 PAHs 胁迫抑制菜心的正常生长, 表现为茎径变小、单株鲜质量和根鲜质量降低且开花提前。PAHs 胁迫下, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和膜脂过氧化产物 MDA 含量提高, 对菜心产生不利的效应, 可以通过提高脯氨酸含量和抗氧化酶活性来缓解。

**关键词:** 多环芳烃; 菜心; 生长; 生理特性; 丙二醛; 脯氨酸; 抗氧化酶

中图分类号: S511; S502

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2018)06-0054-07

## Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons stress on growth and physiological characteristics of *Brassica parachinensis*

LIANG Yongsheng<sup>1,2</sup>, HUANG Xing<sup>1,3</sup>, LONG Minghua<sup>1</sup>, WU Guifen<sup>1</sup>, ZHANG Huimin<sup>1</sup>, QIAO Shuangyu<sup>1</sup>

(1 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Nanning Agricultural Science Institute, Nanning 530021, China; 3 Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture/Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** 【Objective】To determine the effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) stress on the growth of Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis*), and explore the physiological toxicity of PAHs. 【Method】The PAHs solution mixing naphthalene, phenanthrene, fluoranthene, benzopyrene and indenopyrene was applied to soil to stress the growth of *B. parachinensis*. The changes of malondialdehyde (MDA), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and proline contents and antioxidase activities in leaves of *B. parachinensis* were analyzed on the 10th, 17th, and 24th day after planting, and the growth was measured on the 24th day after planting. 【Result】The plant height of *B. parachinensis* was increased by PAHs treatments, and it was highest under 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> PAHs

收稿日期: 2018-04-03 网络首发时间: 2018-10-19 11:35:25

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20181016.1349.014.html>

作者简介: 梁勇生 (1979—), 男, 高级农艺师, 博士研究生, E-mail: [b9523@163.com](mailto:b9523@163.com); 通信作者: 龙明华 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: [longmhua@163.com](mailto:longmhua@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (31360479); 国家现代农业产业技术体系广西蔬菜瓜果创新团队项目 (nycytxgxcxttd-10-03); 广西自然科学基金 (2013GXNSFBA019091); 广西研究生教育创新计划项目 (YCBZ2012007)

treatment. The treatments of 0.4 and 0.8 mg·kg<sup>-1</sup> PAHs had little effects on stem diameter of *B. parachinensis*, but had some promotions on individual plant fresh weight and root fresh weight. The stem diameter, individual plant fresh weight and root fresh weight of *B. parachinensis* were decreased by 2.0, 5.0 and 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> PAHs treatments for different degrees. The contents of MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and proline in leaves of *B. parachinensis* increased with the stress time and PAHs content increasing. With the PAHs content increasing, the activity of superoxide dismutase(SOD) increased, and the activities of peroxidase(POD), catalase(CAT) and ascorbic acid peroxidase(APX) increased firstly and then decreased. 【Conclusion】 Stress from low content of PAHs has little effect on the growth of *B. parachinensis*, while stress from high content of PAHs can inhibit plant normal growth as it decreases stem diameter, individual plant fresh weight and root fresh weight and also causes earlier blooming. *B. parachinensis* could alleviate the disadvantageous effects from increasing contents of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA under PAHs stress by increasing proline content and antioxidant enzyme activities.

**Key words:** polycyclic aromatic hydrocarbon; *Brassica parachinensis*; growth; physical characteristic; malondialdehyde; proline; antioxidant enzyme

多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 属于中性或非极性的一类芳香烃有机化合物<sup>[1]</sup>, 也是一类环境中无处不在的持久性有机污染物<sup>[2-3]</sup>。近年来, 环境中 PAHs 的污染问题日益严重, 对生态环境和人民的健康造成威胁。目前, 有关 PAHs 的研究多数集中在其对环境的污染、转移和降解机制及 PAHs 污染土壤的生物修复方面<sup>[4-6]</sup>, 也有部分学者研究了 PAHs 胁迫对植物生长发育和生理生化特性的影响。焦婷婷<sup>[7]</sup>研究表明, PAHs 胁迫下植物的根长、根表面积、叶面积和株高等生长指标均受到明显抑制; 拟南芥在 PAHs 胁迫后, 其根毛减少、毛状体变形、植物根茎生长下降, 最终生长受到抑制而坏死<sup>[8]</sup>; Maliszewska-Kordybach 等<sup>[9]</sup>研究表明, 当土壤中的 PAHs 质量浓度低于 10 mg·L<sup>-1</sup> 时, 对玉米和燕麦等 6 种作物的生长发育具有刺激作用; 蔡顺香等<sup>[10]</sup>采用不同浓度芘处理黑麦草根系, 结果表明, 黑麦草根系的过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 含量显著升高, 从而保护根细胞免受活性氧的伤害。柯钦雨等<sup>[11]</sup>研究了 PAHs 胁迫下, 拟南芥抗氧化酶活性系统的变化情况, 结果表明随着 PAHs 处理浓度的增加, 拟南芥叶片的超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbate peroxidase, APX) 活性均增强。而有关 PAHs 胁迫对菜心 *Brassica parachinensis* 生长发育和生理影响的研究报道较少。本文以菜心为供试材料, 用萘 (Naphthalene, Nap)、菲 (Phenanthrene, Phe)、荧蒽 (Fluoranthene, Flt)、苯并芘 (Benzoapyrene, BaP) 和茚并芘 (Indenopyrene, InP) 这 5 种不同苯环数的 PAHs 混合溶液施入土壤

胁迫菜心, 系统地研究不同质量分数 PAHs 胁迫对菜心生长、膜脂过氧化作用、渗透调节和抗氧化系统的影响, 以进一步揭示植物对 PAHs 胁迫的生理响应机制, 试验结果可为 PAHs 对植物毒害机理的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试菜心品种为四九甜脆菜心, 生长周期为 35~40 d, 由柳州市兴旺蔬菜良种经营部提供。

供试土壤为菜园土, 取样地点为广西大学农学院蔬菜试验基地, 土壤的主要理化性状为: pH6.2、有机质 10.3 g·kg<sup>-1</sup>、速效氮 65.5 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 15.8 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 70.2 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤中的 16 种优控 PAHs 总质量分数为 103.46 μg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

从 16 种优控 PAHs 中选择 Nap(苯环数 2)、Phe(苯环数 3)、Flt(苯环数 4)、BaP(苯环数 5)、InP(苯环数 6) 这 5 种在本地菜园土中检出率较高的 PAHs, 等量溶于丙酮, 配制成不同质量分数 PAHs 混合溶液处理土壤。试验采用完全随机设计, 设 6 个处理, 分别为 0(CK, 未添加外源 PAHs, 其土壤中的 PAHs 含量为采回土壤本身所含有的量)、0.4、0.8、2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 用长×宽×高规格为 46 cm×21 cm×15 cm 的泡沫箱种植, 每箱装土 10 kg, 种植菜心 6 株, 每个处理重复 3 次。

### 1.3 菜心种植及采样

试验于 2016 年 4—5 月在广西大学农学院蔬菜基地蔬菜大棚内进行。将菜心种子播种于育苗盘, 用泥炭土育苗基质培养至 3 叶龄时, 选取长势

较一致的菜心幼苗定植到各处理土壤中,分别在定植后第10天(现蕾期)、第17天(快速抽薹期)、第24天(开花期)取第4张叶片,去离子水清洗干净后,用锡纸包裹放于液氮中冷冻,之后放置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冰箱保存备用,测定菜心叶片的各项生理指标。

#### 1.4 生长性状测定

菜心生长性状统一在定植后第24天(开花期)进行测定,每个处理随机测定6株,用直尺测量植株株高、游标卡尺测量第2~3片叶间菜薹茎径、电子天平称量单株鲜质量和根鲜质量,观察记录每株菜心开花的时间。

#### 1.5 生理指标测定

过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量测定参照Sergiev等<sup>[12]</sup>的方法测定;丙二醛(Malondialdehyde, MDA)和脯氨酸(Proline, Pro)含量测定参照赵世杰等<sup>[13]</sup>的方法;SOD活性测定参照李关荣等<sup>[14]</sup>的方法,以抑制氮蓝四唑降解50%为1个酶活性单位;POD活性测定参照刘祖祺等<sup>[15]</sup>的方法,以每分钟 $D_{470\text{ nm}}$ 上升0.01为1个酶活性单位;CAT活性测定参照王晶英<sup>[16]</sup>的方法,以每分钟内 $D_{240\text{ nm}}$ 减少0.01为1个酶活性单位;APX活性测定参照沈文鹰等<sup>[17]</sup>的方法,根据单位时间内 $D_{290\text{ nm}}$ 减少值计算APX活性,抗坏血酸氧化量按消光系数 $2.8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 计算。

## 1.6 数据处理和分析

数据分析和处理采用Microsoft office 2016以及SPSS 19.0软件,采用Duncan's法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 PAHs胁迫对菜心生长的影响

采用PAHs胁迫后第24天,菜心的生长情况见表1。不同质量分数PAHs处理对菜心株高、茎粗及生长量影响的程度不同。从株高来看,经PAHs处理的菜心株高均高于未经PAHs处理的,其中以 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理株高最大,比CK增长了27.42%,差异显著。中低质量分数( $0.4$ 和 $0.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )PAHs处理对菜心的茎粗影响不大,对提高单株鲜质量和根鲜质量都有一定的促进作用,但与CK差异不显著;2.0、5.0和 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PAHs处理对菜心的茎粗、单株鲜质量和根鲜质量造成了不同程度的抑制,其中以 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理对菜心的生长抑制最大,茎粗、单株鲜质量和根鲜质量分别比CK的下降了20.20%、15.13%和21.16%,2.0和 $5.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK差异未达显著水平, $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK间差异显著。从PAHs胁迫对菜心生长的影响可见, $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PAHs处理下,菜心的正常生长被抑制。此外, $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理菜心从定植至开花的天数显著低于其他处理,比CK提早开花2.11 d。

表1 PAHs胁迫下菜心生长的影响<sup>1)</sup>

Table 1 The effects of PAHs on the growth of *Brassica parachinensis*

| w(PAHs)/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 株高/cm        | 茎径/cm       | 单株鲜质量/g      | 根鲜质量/g      | 定植至开花天数/d   |
|--------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 0 (CK)                         | 26.91±2.57b  | 1.98±0.10a  | 86.78±6.72ab | 1.89±0.12a  | 22.83±0.33a |
| 0.4                            | 27.25±3.09b  | 1.98±0.13a  | 89.94±4.38a  | 1.93±0.19a  | 22.61±0.63a |
| 0.8                            | 27.37±2.86b  | 1.96±0.16a  | 88.73±5.12ab | 1.95±0.13a  | 23.00±0.33a |
| 2.0                            | 28.21±1.05b  | 1.85±0.09ab | 84.26±8.26ab | 1.87±0.12a  | 22.56±0.35a |
| 5.0                            | 29.76±1.83ab | 1.79±0.11ab | 83.51±7.42ab | 1.78±0.07ab | 22.28±0.10a |
| 10.0                           | 32.29±2.86a  | 1.58±0.14b  | 73.65±5.84b  | 1.66±0.08b  | 20.72±0.35b |

1)表中数据为6次重复的平均值±标准误;同列数据后凡是有同一个相同小写字母者,表示差异不显著( $P>0.05$ , Duncan's法)

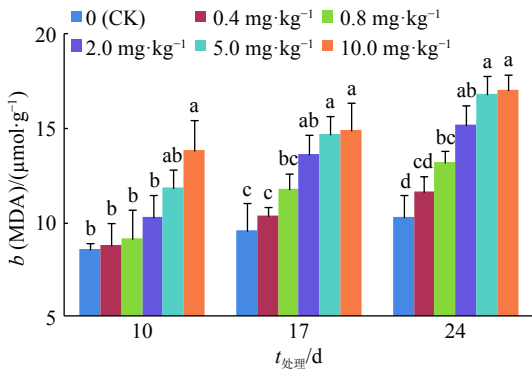
### 2.2 PAHs胁迫对菜心叶片MDA含量的影响

从图1可知,随着PAHs胁迫时间的延长,叶片中MDA的含量不断升高。经PAHs处理后,菜心叶片内MDA含量均高于对照,并随着处理质量分数的升高而升高。在胁迫后第10天,以 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK间差异最大,比CK升高了61.74%,差异显著;在胁迫后第17天,0.4、0.8、2.0、5.0和 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 各处理的菜心叶片中MDA积累加剧,分别比CK增加了8.19%、23.65%、42.90%、53.57%和56.29%,0.4和 $0.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK差

异不显著,2.0、5.0和 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK间差异达显著水平;在胁迫后第24天,各处理中MDA含量达最大,分别比CK升高了13.05%、28.30%、48.03%、63.61%和66.10%,0.8、2.0、5.0和 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与CK间差异达显著水平。

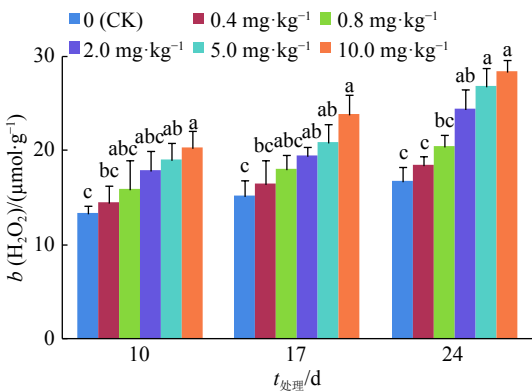
### 2.3 PAHs胁迫对菜心叶片H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

$\text{H}_2\text{O}_2$ 是一种重要的活性氧,具有很强的氧化作用,虽不能直接启动膜脂过氧化,但会转化为羟基离子产生连续性的膜脂过氧化作用,对植物造成毒害。从图2可见,随着PAHs胁迫时间的延长,叶片



图中相同处理时间的柱子上方凡是有一个相同小写字母者, 表示不同处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

图 1 不同含量 PAHs 胁迫下菜心叶片 MDA 含量的变化  
Fig. 1 Changes of MDA content in leaves of *Brassica parachinensis* under stress from different contents of PAHs



图中相同处理时间的柱子上方凡是有一个相同小写字母者, 表示不同处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

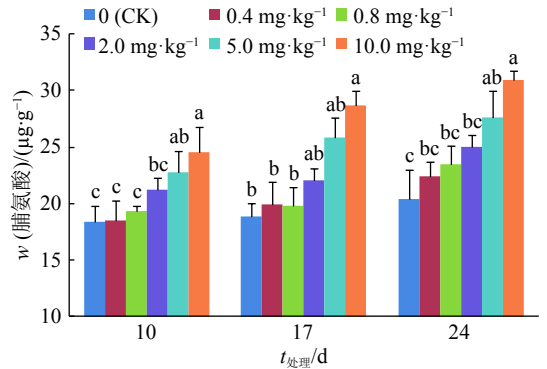
图 2 不同含量 PAHs 胁迫下菜心叶片 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的变化  
Fig. 2 Changes of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content in leaves of *Brassica parachinensis* under stress from different contents of PAHs

中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量逐渐增加, 并随着 PAHs 质量分数的升高, 叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量呈逐渐递增趋势。与 CK 相比, 在胁迫后第 10 天, 0.4、0.8、2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 各处理叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别提高了 8.15%、18.51%、33.49%、41.83% 和 52.27%, 其中 5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 间差异显著; 在胁迫后第 17 天, 各处理叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别比 CK 提高了 8.98%、19.43%、27.99%、38.16% 和 57.04%, 其中 2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 间差异达显著水平; 在胁迫后第 24 天, 各处理叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 积累进一步加剧, 其中 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量最高, 比 CK 提高了 69.76%, 差异水平显著。可见随着 PAHs 胁迫时间的延长, 菜心体内积累的大量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 未能被及时清除, 菜心受到毒害, 正常生理代谢被干扰。

#### 2.4 PAHs 胁迫对菜心叶片脯氨酸含量的影响

Pro 参与植物的渗透调节作用, 它的积累能使 <http://xuebao.scau.edu.cn>

植物保持细胞膨压和降低渗透势, 以维持自身的正常生理功能。从图 3 可见, 随着 PAHs 胁迫时间的延长, 菜心体内 Pro 含量逐渐增加, 各处理的 Pro 含量均高于 CK, 并随着 PAHs 质量分数的升高而升高。在胁迫后第 10 天, 0.4、0.8、2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 各处理的 Pro 含量分别比 CK 提高了 0.93%、5.30%、15.57%、23.76% 和 33.59%, 其中 5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 间差异显著; 在胁迫后第 17 天, 各处理的 Pro 含量分别比 CK 提高了 5.20%、4.58%、16.97%、36.97% 和 51.53%, 其中 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 间差异显著; 在胁迫后第 24 天, 各处理的 Pro 含量分别比 CK 提高了 9.74%、15.14%、22.91%、35.62% 和 51.52%, 其中 5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 间差异显著。

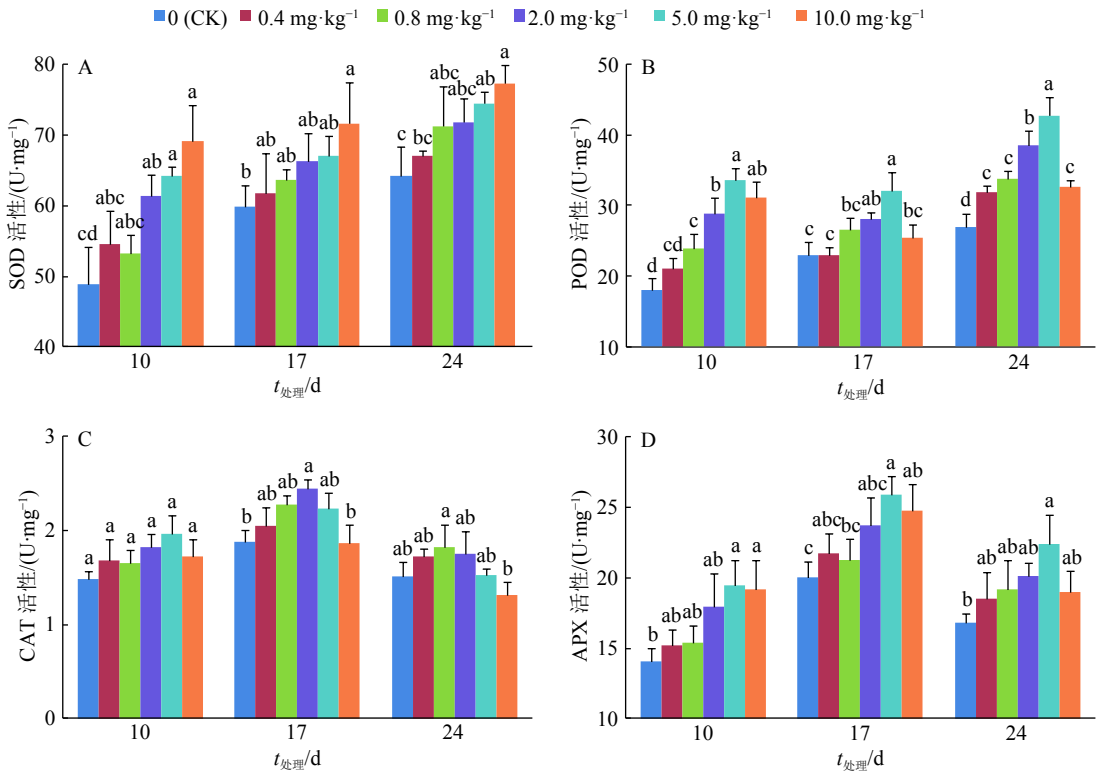


图中相同处理时间的柱子上方凡是有一个相同小写字母者, 表示不同处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法)

图 3 不同含量 PAHs 胁迫下菜心叶片脯氨酸含量的变化  
Fig. 3 Changes of proline content in leaves of *Brassica parachinensis* under stress from different contents of PAHs

#### 2.5 PAHs 胁迫对菜心叶片 SOD 活性的影响

SOD 是植物体内最重要的抵御活性氧伤害的酶, 它能将超氧根离子歧化为 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 而 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 又会被抗坏血酸和过氧化氢酶分解为 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>, 以减轻不利环境对植物造成的伤害。从图 4A 可见, 随着 PAHs 胁迫时间的延长, 菜心叶片中 SOD 活性逐步上升, 各处理中叶片 SOD 活性均高于 CK, 并随着 PAHs 质量分数的升高呈递增趋势。在胁迫后第 10 天, 随 PAHs 质量分数的上升, 0.4、0.8、2.0、5.0 和 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 各处理 SOD 活性分别比 CK 升高了 11.70%、9.03%、25.79%、31.50% 和 41.60%; 胁迫后第 17 天, 各处理 SOD 活性分别比 CK 升高了 3.42%、6.31%、10.94%、12.22% 和 19.64%; 胁迫后第 24 天, 各处理 SOD 活性分别比 CK 升高了 4.38%、10.86%、11.82%、15.82% 和 20.12%; 其中以 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理的菜心叶片 SOD 活性最高, 与 CK 间差异均达显著水平。说明菜心叶片 SOD 活性



各图中相同处理天数的不同处理间凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著 ( $P > 0.05$ , Duncan's 法)

图4 不同含量 PAHs 胁迫下菜心叶片抗氧化酶活性的变化

Fig. 4 Changes of antioxidant enzyme activities in leaves of *Brassica parachinensis* under stress from different contents of PAHs

对 PAHs 胁迫响应敏感,清除超氧根离子的能力明显升高。

## 2.6 PAHs 胁迫对菜心叶片 POD 活性的影响

POD 是防止膜脂过氧化的主要酶,它可以清除植物体内的  $H_2O_2$ ,保持膜的完整性。从图 4B 可见,随着 PAHs 胁迫时间的延长,叶片中 POD 的活性呈逐渐上升趋势,随着 PAHs 质量分数的升高,POD 活性先升高后降低,在  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下 POD 活性最高,更高质量分数处理则 POD 活性开始下降,但经 PAHs 处理的菜心叶片 POD 活性都高于 CK 的。在胁迫后第 10 天,0.4、0.8、2.0、5.0 和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  各处理 POD 活性分别比 CK 升高了 16.57%、32.89%、59.31%、86.50% 和 72.52%;胁迫后第 17 天,各处理 POD 活性分别比 CK 升高了 0.15%、15.38%、35.13%、54.17% 和 24.86%;胁迫后第 24 天,各处理 POD 活性分别比 CK 升高了 18.47%、25.56%、43.41%、58.90% 和 21.21%。0.4、0.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的菜心叶片 POD 活性在处理前期与 CK 差异不明显,在胁迫后第 24 天,各处理的菜心叶片 POD 活性与 CK 差异都达到显著水平。说明菜心叶片 POD 活性对 PAHs 胁迫响应敏感。

## 2.7 PAHs 胁迫对菜心叶片 CAT 活性的影响

CAT 是植物清除体内  $H_2O_2$  的重要保护酶类。

从图 4C 可见,随着 PAHs 胁迫时间的延长,菜心叶片中 CAT 活性先升后降,随着 PAHs 质量分数的升高,叶片中 CAT 活性也呈先升后降的趋势。在胁迫后第 10 天,以  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的 CAT 活性最大,比 CK 升高了 33.14%,但差异不显著;在胁迫后第 17 天,以  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的 CAT 活性最大,比 CK 升高了 30.33%,差异显著;在胁迫后第 24 天,以  $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的 CAT 活性最大,比 CK 升高了 21.10%,差异不显著。在胁迫初期(第 10 天), $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理菜心叶片 CAT 活性高于 CK,升高了 16.46%,胁迫中后期(第 17、24 天),CAT 活性则低于 CK,分别降低了 0.69% 和 12.81%,但差异不显著。

## 2.8 PAHs 胁迫对菜心叶片 APX 活性的影响

APX 是植物清除叶绿体中  $H_2O_2$  的关键酶。从图 4D 可见,随着 PAHs 胁迫时间的延长,菜心叶片中的 APX 活性呈先升高后下降的趋势,在胁迫后第 17 天达到最大;随着 PAHs 质量分数的增高,各处理叶片中的 APX 活性也呈先升高后降低的趋势,以  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下 APX 活性最大,更高质量分数处理的 APX 活性开始下降,这与 POD 变化规律相似,但经 PAHs 处理的菜心叶片 APX 活性都高于 CK。在胁迫后第 10 天,0.4、0.8、2.0、5.0 和

10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 各处理分别比 CK 升高了 7.89%、9.38%、27.36%、37.95% 和 35.96%; 胁迫后第 17 天, 各处理分别比 CK 升高了 8.54%、6.29%、18.58%、29.12% 和 23.78%; 胁迫后第 24 天, 各处理分别比 CK 升高了 9.92%、13.90%、19.24%、33.14% 和 12.53%。PAHs 胁迫过程中, 5.0 mg·kg<sup>-1</sup> 处理与 CK 的差异都达显著水平。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 PAHs 胁迫对菜心生长的影响

植物形态和生长的变化是植物受到逆境胁迫后最直观的表现。本研究中, 0.4~5.0 mg·kg<sup>-1</sup> PAHs 处理菜心的生长变化不大, 株高、茎粗等生长指标差异不明显, 而在 10.0 mg·kg<sup>-1</sup> PAHs 处理下菜心的正常生长受到明显抑制, 表现为茎径变小、单株鲜质量和根鲜质量降低以及开花提前。说明菜心对于土壤中 PAHs 的处理浓度耐受值在 5.0~10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 低于此耐受值范围, 菜心生长受到的影响较小, 甚至表现为促进生长, 但超过此耐受值范围, 菜心的正常生长受到抑制。洪有为等<sup>[18]</sup>研究表明, 秋茄幼苗根系和地上部分的生长随着菲浓度的升高呈先升后降的趋势, 低浓度处理刺激了秋茄根系和地上部分生长量的增加, 高浓度处理不利于植株生长, 本研究结果和上述研究结果一致。低浓度 PAHs 处理促进了菜心的生长, 株高、单株鲜质量和根鲜质量都有不同程度的提高, 马丽等<sup>[19]</sup>采用萘胁迫水稻幼苗的研究结果也证实了这一点, 推测引起这类现象的原因可能是由于 PAHs 具有与植物生长素等激素相似的环状结构, 这种结构的相似性使其具有与生长素相似的作用<sup>[20]</sup>。Maliszewska-Kordybach 等<sup>[9]</sup>用芘、苜、葱胁迫处理燕麦和玉米等作物, 发现 PAHs 质量浓度低于 10 mg·L<sup>-1</sup> 时, 对作物生长有促进作用, 最低的植物毒害阈值达到 100 mg·L<sup>-1</sup>。本研究中, 菜心的毒害阈值在 5.0~10.0 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 远小于玉米和燕麦等作物的耐受阈值, 可见不同作物对 PAHs 的耐受阈值不同, 它们对不同种类的 PAHs 耐受阈值也不同。

#### 3.2 PAHs 胁迫对菜心膜脂过氧化作用和渗透调节物质的影响

PAHs 胁迫会对植物细胞膜造成伤害, 这种伤害通常表现在 MDA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的积累, 膜脂过氧化作用加剧<sup>[21]</sup>。蔡顺香等<sup>[22]</sup>研究表明, 芘胁迫下小白菜叶片中的 MDA 含量和细胞质膜透性显著增加, 膜脂过氧化作用增大, 并在胁迫第 32 天达到最高。本研究中菜心叶片中 MDA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量随着

<http://xuebao.scau.edu.cn>

PAHs 胁迫时间的延长和胁迫质量分数的增大而升高, 表明菜心体内膜脂过氧化作用不断加剧, 这一研究结果与菲胁迫下拟南芥叶片中膜脂过氧化作用的变化情况相同<sup>[11]</sup>。结合对 PAHs 胁迫下菜心叶片抗氧化保护酶活性变化的分析, PAHs 胁迫下抗氧化保护酶都产生了积极的响应, 但仍未能及时将 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 清除, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 不断累积, 造成膜脂过氧化作用加剧, 膜脂过氧化产物 MDA 含量积累, 从而导致膜系统受损。

逆境胁迫下, 渗透调节是植物提高自身忍耐程度的重要生理机制之一, 游离 Pro 是植物体内重要的渗透调节物质, 多数研究者认为在逆境胁迫下该物质的增加, 可以从一定程度上减少逆境对细胞的伤害<sup>[23-24]</sup>。本研究中, Pro 含量随着 PAHs 胁迫时间的延长和 PAHs 质量分数的增大呈逐步上升趋势, 这对菜心抵御 PAHs 的胁迫发挥了重要作用, 这与菲胁迫对苏柳 172 Pro 含量的变化不大这一研究结果有所不同<sup>[25]</sup>, 可能与不同植物对 PAHs 的种类及敏感性不同有关。

#### 3.3 PAHs 胁迫对菜心抗氧化保护酶的影响

活性氧是植物代谢过程中不可避免的产物, 它在植物生长发育和抵御逆境胁迫中起重要作用。尹颖等<sup>[26]</sup>研究表明苦草茎叶在芘胁迫下产生大量自由基。抗氧化酶作为植物体内清除活性氧的主要保护酶类, 当胁迫条件下活性氧生成量增加时, 抗氧化酶活性成分的合成也随之改变<sup>[27]</sup>。研究表明, 不同浓度 PAHs 胁迫下, 拟南芥叶片 SOD、POD 和 APX 的活性随着处理浓度的增加而增强<sup>[11]</sup>。Li 等<sup>[28-29]</sup>研究结果表明 PAHs 胁迫下黑麦草和水稻叶片中 SOD 和 POD 活性均随 PAHs 浓度的增加呈现出增强趋势。本研究中, 菜心叶片中 SOD 的活性随着 PAHs 质量分数的增加而增强, 清除活性氧的能力提高, 这也与他们在拟南芥、黑麦草和水稻上的研究结果相符。而 POD、CAT 和 APX 的活性随着 PAHs 质量分数的增加呈先升高后降低的趋势。这可能是由于随着菜心体内 PAHs 吸收量的增加, 氧化作用增强, 膜脂过氧化作用加剧, 导致抗氧化酶蛋白受到了一定程度的消耗和破坏, 细胞膜受损。PAHs 对植物抗氧化系统的影响除了与胁迫浓度相关, 还与胁迫时间有很大关系。本研究中, 随着 PAHs 胁迫时间的延长, SOD 和 POD 的活性呈逐渐升高趋势, CAT 和 APX 的活性先升高后降低, 不同抗氧化酶之间的相互协调机制还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] JUNG J E, LEE D S, KIM S J, et al. Proximity of field

- distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons to chemical equilibria among air, water, soil, and sediment and its implications to the coherence criteria of environmental quality objectives[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(21): 8056-8061.
- [2] CHEN F, TAN M, MA J, et al. Efficient remediation of PAH-metal co-contaminated soil using microbial-plant combination: A greenhouse study[J]. *J Hazard Mater*, 2016, 302: 250-261.
- [3] PATROLECCO L, ADEMOLLO N, CAPRI S, et al. Occurrence of priority hazardous PAHs in water, suspended particulate matter, sediment and common eels (*Anguilla anguilla*) in the urban stretch of the River Tiber (Italy)[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(11): 1386-1392.
- [4] GHOSAL D, GHOSH S, DUTTA T K, et al. Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review[J]. *Front Microbiol*, 2016, 7: 1369.
- [5] LI X F, HOU L J, LIU M, et al. Abundance and diversity of polycyclic aromatic hydrocarbon degradation bacteria in urban roadside soils in Shanghai[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2015, 99(8): 3639-3649.
- [6] NIU J, DAI Y, GUO H, et al. Adsorption and transformation of PAHs from water by a laccase-loading spider-type reactor[J]. *J Hazard Mater*, 2013, 248/249: 254-260.
- [7] 焦婷婷. 多环芳烃荧蒽对植物和土壤生物毒害的剂量-效应关系及其土壤环境基准初探[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [8] ALKIO M, TABUCHI T M, WANG X, et al. Stress responses to polycyclic aromatic hydrocarbons in *Arabidopsis* include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms[J]. *J Exp Bot*, 2005, 56(421): 2983-2994.
- [9] MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMRECZAK B. Ecotoxicological activity of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Effect on plants[J]. *Environ Technol*, 2000, 21(10): 1099-1110.
- [10] 蔡顺香, 颜明娟, 林琼, 等. 黑麦草根系抗氧化系统和细胞膜透性对土壤中芘胁迫的响应[J]. *福建农业学报*, 2012, 27(2): 162-166.
- [11] 柯钦雨, 叶媛蓓. 不同浓度多环芳烃(菲)胁迫下拟南芥的生理响应[J]. *环境卫生工程*, 2009, 17(S1): 110-116.
- [12] SERGIEV I, ALEXIEVA V, KARANOV E. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective system and stress markers in plant[J]. *Cr Acad Bulg Sci*, 1997, 51: 121-124.
- [13] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 120-164.
- [14] 李关荣, 李天俊, 冯建成. 生物化学实验教程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 116-119.
- [15] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 369-385.
- [16] 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 83.
- [17] 沈文鹰, 徐朗莱, 叶茂炳, 等. 抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨[J]. *植物生理学通讯*, 1996, 32(3): 203-205.
- [18] 洪有为, 袁东星. 秋茄 (*Kandelia candel*) 幼苗对菲和荧蒽污染的生理生态效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 445-455.
- [19] 马丽, 盛连喜, 何春光, 等. 萘对松前水稻 (*Oryza sativa* cv. *Matsumae*) 生长和生理的影响及其残留[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 1997-2004.
- [20] 陈世军, 祝贤凌, 冯秀珍, 等. 多环芳烃对植物的影响[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2): 9-11.
- [21] 徐胜, 王慧, 陈玮, 等. 土壤中多环芳烃污染对植物生理生态的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1284-1290.
- [22] 蔡顺香, 何盈, 邱孝煊, 等. 多环芳烃芘对小白菜生长和元素吸收及营养品质的影响[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 452-457.
- [23] 汤章城. 逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义[J]. *植物生理学通讯*, 1984(1): 15-21.
- [24] RATHINASABAPATHI B. Metabolic engineering for stress tolerance: Installing osmoprotectant synthesis pathways[J]. *Ann Bot-London*, 2000, 86(4): 709-716.
- [25] 周源. 多环芳烃(菲)胁迫对苏柳 172 幼苗生理特性的影响[J]. *江西理工大学学报*, 2012, 33(1): 1-5.
- [26] 尹颖, 孙媛媛, 郭红岩, 等. 芘对苦草的生物毒性效应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1528-1533.
- [27] BACCOUCH S, CHAOUI A, FERJANI E E. Nickel-induced oxidative damage and antioxidant responses in *Zea mays* shoots[J]. *Plant Physiol Biochem*, 1998, 36(9): 689-694.
- [28] LI J H, GAO Y, WU S C, et al. Physiological and biochemical responses of rice (*Oryza sativa* L.) to phenanthrene and pyrene[J]. *Int J Phytoremediat*, 2008, 10(2): 106-118.
- [29] LI J H, YU X Z, WU S C, et al. Responses of bioaugmented ryegrass to PAH soil contamination[J]. *Int J Phytoremediat*, 2011, 13(5): 441-455.

【责任编辑 庄 延】