DOI: 10.5846/stxb202004010771
杜志伟,杨肖松, 刘月仙,解小凡,张瑞丽,张萌,王伟.有机污染物芘胁迫下白菜生理特性变化规律.生态学报,2021,41(3):998-1005.
Du Z W, Yang X S, Liu Y X, Xie X F, Zhang R L, Zhang M, Wang W.Analysis of physiological characteristics of Chinese cabbages under pyrene stress. Acta Ecologica Sinica,2021,41(3):998-1005.

有机污染物芘胁迫下白菜生理特性变化规律

杜志伟[1],杨肖松[1], 刘月仙[1,*],解小凡[1],张瑞丽[1],张 萌[2,3],王 伟[4]

1 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049
2 中国矿业大学化学(北京)与环境工程学院, 北京 100083
3 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 102211
4 农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191

摘要:为探究多环芳烃芘对白菜生理特性的影响,通过盆栽实验对华北地区常见的 11 种白菜进行不同浓度芘胁迫下的培养,研究白菜生理指标的变化规律。结果表明:白菜的种类和芘的浓度对白菜生理指标(生物量、丙二醛、叶绿素)均有显著影响,且随芘浓度变化,不同种类白菜的生理指标呈现不同的变化规律。白菜的生物量随芘的添加呈现两种变化:一是随芘添加浓度增加白菜生物量逐渐下降;二是在中低浓度芘(5、15、45 mg/kg)处理白菜生物量升高,高浓度(135、405 mg/kg)胁迫下生物量下降。白菜的丙二醛(MDA)含量随芘浓度的增加,表现出 3 种不同规律:各浓度之间均无显著性差异,MDA 含量逐渐升高,以及显著低于对照组。叶绿素含量随芘浓度的增加,主要呈现出先下降后上升和逐渐上升 2 种变化趋势。京春白(JCB)和中白 50(ZB-50)对芘的胁迫具有良好的耐受性,生理指标变化较小;中浓度芘胁迫下京翠 60(JC-60)和京春绿(JCL)较为敏感,高浓度下京秋 65(JQ-65)和吉红 308(JH-308)生理指标变化显著,可以作为中低浓度和高浓度芘污染土壤指示作物。

关键词:芘;白菜;丙二醛;叶绿素

Analysis of physiological characteristics of Chinese cabbages under pyrene stress

DU Zhiwei[1], YANG Xiaosong[1], LIU Yuexian[1,*], XIE Xiaofan[1], ZHANG Ruili[1], ZHANG Meng[2,3], WANG Wei[4]

1 *College of Resources and Environment, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
2 *School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing* 100083, *China*
3 *State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing* 102211 *China*
4 *Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin* 300191, *China*

Abstract: In order to explore the effects of Pyrenes, one kind of polycyclic aromatic hydrocarbons, on vegetables, eleven kinds of Chinese cabbages, which are common varieties in North China, were cultured with the treatments of different concentrations of pyrene through pot experiments. We analyzed the physiological characteristics based on three indicators, including biomass, malondialdehyde, and chlorophyll. The results showed that different treatments of pyrene concentrations had significant effects on the physiological characteristics of various species of Chinese cabbage. There were two results of the pyrenes on biomass of Chinese cabbage: one was that biomass gradually decreased with the increase of pyrene concentrations; the other was that biomass increased with the treatment of low and medium concentration stress (5, 15, 45 mg/kg), and decreased with the treatment of high concentration (135, 405 mg/kg). The content of malondialdehyde (MDA) in Chinese cabbage showed rather different with the treatments of pyrene concentration: (1) no significant difference among the different treatments; (2) gradually increase of MDA with the treatment of increase concentrations of

基金项目:国家重点研发规划项目(2016YFC0503604,2017YFD0801401)
收稿日期:2020-04-01; **网络出版日期**:2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuyuexian@ucas.ac.cn

pyrene; and (3) significantly lower than the control group. As to the content of chlorophyll in the Chinese cabbage, there were two different results with the treatment of pyrene, such as rising with the treatment of low and medium concentration of pyrene, then decreasing under high concentration, and gradually increase of chlorophyll with the increase of the concentration of pyrene. The species of Chinese cabbages, such as JCB and ZB- 50, were observed to have the characteristics of well tolerance to the stress of pyrene, based on no significant changes of the above physiological indicators. The species of JC-60 and JCL were more sensitive with the treatment of medium concentration of pyrene, while species of JQ-65 and JH- 308 showed more sensitive at high concentrations of pyrene. These could be indicative vegetable for the contaminated soil with low, medium, or high concentrations of pyrene.

Key Words: pyrene; Chinese cabbage; malondialdehyde; chlorophyll

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons,PAHs)是一类具有两个或两个以上苯环的芳香烃,其中有 16 种被美国环保署确定为优先控制的有机污染物质[1],是典型的持久性有机污染物,具有潜在致癌性、致突变性和毒性的特点[2],近几十年来备受关注。PAHs 主要由不完全燃烧的过程形成,如化石燃料燃烧、生物质燃烧和石油泄漏等[3]。多环芳烃释放到环境中后,可通过干湿大气沉降和直接空气-土壤交换的方式沉积到土壤中[4],土壤作为重要的环境介质,承担着 90%以上的 PAHs 环境负荷[5]。近些年来,土壤污染问题日益严重,对人体健康以及生态环境都造成了一定的威胁,根据全国 2005-2013 年全国土壤污染普查结果显示,我国部分地区土壤污染严重,全国现有近 1/5 耕地受到不同程度的污染,多环芳烃类有机物污染点位超标率为 1.4%[6]。与低分子量 PAHs(≤ 3 个苯环)相比,高分子量 PAHs(≥4 个苯环)更难被降解而在土壤环境中长期存在[7]。而芘是有 4 个苯环结构的多环芳烃,与 PAHs 有良好的相关性,是高分子量多环芳烃的典型代表,常作为监测的指示化合物[7-8]。Peng 等[9]测得北京土壤中的芘浓度范围在 6.9—1560.8 μg/kg,平均值为 127.3 μg/kg;朱媛媛等[10]对天津市土壤的多环芳烃进行分析,芘含量在 12.5—183 μg/kg 之间;李静雅等[11]在长江三角洲区域 11 个行政市测定表层土壤中 16 种优控 PAHs 浓度范围 10.1—3058.6 μg/kg。

目前,已有不少针对多环芳烃对不同植物生长影响的研究,不同植物对有机污染物的毒性响应具有明显差异[12]。较高浓度的 PAHs 对植物生长具有抑制作用,高浓度多环芳烃胁迫下的拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)、辣椒(*Capsicum annuum* L.)、小麦(*Triticum acstivnm*)、白菜(*Brassica pekimensis*)、西红柿(*Solanum lycopersicum*)、玉米(*Zea mays* L.)和红豆(*Vigna angularis*)都出现了生长受抑制的现象[13];蔡顺香[14]研究发现:50—200 mg/kg 施芘水平下菠菜幼苗叶片的各项叶绿体色素含量与对照无显著差异,施芘浓度大于 50 mg/kg 时株高、根和茎叶的鲜重显著降低,且丙二醛积累量提高;而 Maliszewska-Kordybach 等[15]研究发现,玉米、燕麦等作物在低于 10 mg/L 的 PAHs 质量浓度的土壤中时,具有刺激其生长发育的作用。白菜是我国主要种植的蔬菜,也是大量食用的蔬菜,目前针对不同品种的白菜在多环芳烃胁迫下的生理特征研究较少,以华北地区常见的 11 种白菜为研究对象,探究有机污染物芘对白菜的生理指标影响具有重要意义,旨在为 PAHs 对植物的毒害机理研究和蔬菜的安全生产提供一定的理论依据。

1　研究材料和方法

1.1　实验材料

选取我国华北地区常见的 11 个不同品种的白菜作为实验对象:京翠 60(JC-60),京秋 65(JQ-65),京春娃 2 号(JCW-2),京春白(JCB),京翠 70(JC-70),京春绿(JCL),北京桔红二号(JH-2),中白 50(ZB-50),吉红 308(JH-308),菊心(JX)和快菜 1 号(KC-1),均购自北京市农林科学院京研益农种业科技有限公司和中国农业科学院蔬菜花卉研究所。芘(>95%,GC)购自上海阿拉丁生化股份有限公司。

实验土壤取自北京市怀柔区中国科学院大学后山,自然风干后挑出碎石枝叶过 3 mm 筛,储存备用。实验土壤有机质含量为 5%,pH 为 8.42;土壤中芘的浓度为 0.09 mg/kg,根据相关文献[16],土壤中的芘含量

<0.4 mg/kg时,可以忽略不记。

1.2 实验设计

根据杨肖松等[7]进行的茚对白菜生长预实验,设置 5、15、45、135、405 mg/kg 以及对照组共六个茚浓度处理水平。土壤毒性配置方法参照孙铁珩[17]推荐的方法,具体为:称取 35 g 茚于适量的丙酮中溶解,加入到 10 kg 的土壤中,即茚浓度为 3500 mg/kg 的土壤,置于通风橱中过夜,待丙酮完全挥发后搅拌均匀。在上述土壤中分别加入不同质量且未被茚污染的土壤,进行稀释搅拌,配置成不同处理浓度的土壤。分别称取六种茚处理浓度的土壤各 7 kg 于高 18 cm、上口径为 23 cm、下口径为 21 cm 的花盆中。为了确保白菜有足够的养分进行正常的生长,每个花盆中加入氮($CO(NH_2)_2$)、磷(KH_2PO_4)、钾(KCl)肥各 2.24、3.07、0.32 g,同时浇水至田间持水量平衡一周。白菜种子需预先进行消毒处理,在 75%酒精中浸泡 5 min 后,用蒸馏水洗净,再置于 55°C 的水中搅拌浸泡。

将 11 种白菜种子在每个花盆中播种 15 粒,置于温室中培养,平均低温 24℃,平均高温 32℃。待长出四片真叶后,每盆中留一株白菜幼苗,每个品种进行 3 次重复。白菜从播种到成熟收获共历时 80 d。

1.3 实验方法

(1)生物量(鲜重)的测定

白菜整株收获后用自来水冲洗掉表面的土及灰尘,再用去离子水冲洗三遍,滤纸擦干表面水分后,用天秤称取植株的重量。

(2)丙二醛(MDA)的测定

丙二醛的含量采用植物 MDA 检测试剂盒(TBA 比色法)测定,购自北京雷根生物科技有限公司。具体步骤为称取 0.4 g 样品剪碎后,加入 4 mL 组织匀浆液充分研磨,经 4000 r/min 离心 10 min,取 1 mL 上清液,先后分别加入 0.005 mL 抗氧化剂、TBA 工作液,测定其在 450、532、600 nm 处的吸光度值。

(2)叶绿素的测定

叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量测定根据 Gitelson 等[18]采用的方法,称取待测白菜叶片 0.1 g 置于研钵中,加入少量 95%乙醇和少量的 $CaCO_3$,研磨成白色匀浆,过滤至 25 mL 比色管中,用 95%的乙醇定容后,于波长 665、649、470 nm 处测定吸光度值。

1.4 数据处理及分析

采用 Excel 2016、SPSS 24.0 进行数据处理和多因素方差分析,采用最小显著性差异法(LSD,$P<0.05$)进行多重比较;利用 Origin 2018 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 生物量(鲜重)

白菜的生物量在不同浓度茚作用下以及不同种类之间的双因素方差分析表明,白菜的种类和茚浓度均对生物量有显著影响($P<0.001$),且白菜种类和茚浓度存在交互作用。表 1 显示的是 11 种白菜生物量在不同浓度茚作用下的变化情况,总体呈现两种规律:一是倒“U”型,二是随着茚浓度的增加,白菜生物量降低。其中,京春娃 2 号、京春白、京翠 70、京春绿、北京桔红二号、中白 50、吉红 308、菊心、快菜 1 号这 9 种白菜品种的生物量随着茚浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势,即倒“U”型。与对照组相比,9 种白菜在中低浓度茚胁迫下,快菜一号的生物量变化最大,在添加茚浓度为 45 mg/kg 时,生物量显著升高了 178.62%,而品种京翠 70 是这 9 种白菜品种变化最小的,在添加茚浓度为 15 mg/kg 时生物量仅升高 16.12%,其他 7 种白菜生物量上升的变化范围为 17.57%—158.40%。京翠 60、京秋 65 这两种白菜品种的生物量随着茚浓度升高而逐渐降低;其中,在 405 mg/kg 茚浓度的胁迫下生物量显著降低,京翠 60 的生物量降低率(59.25%)高于京秋 65 生物量降低率(47.96%)。

2.2 丙二醛(MDA)

根据双因素方差分析,不同白菜品种的丙二醛(MDA)含量存在显著性差异($P<0.001$)。丙二醛是反映植

物脂质过氧化程度的指标,是生物膜系统脂质过氧化的产物,能够间接的反映植物在受到外界的胁迫时,细胞的受损程度,MDA 含量越大,膜受损程度越大[19]。如图 1 所示,华北地区 11 种白菜在不同浓度土壤芘胁迫下的 MDA 含量呈现出不同的变化规律:一是不同浓度芘胁迫下,白菜 MDA 含量无显著性变化,以京春娃、京春白和中白 50 这 3 种白菜品种为代表,与对照组相比,京春娃的 MDA 下降率最高(26.35%),京春白上升率最高(19.9%);二是白菜 MDA 含量随芘浓度的增加而呈上升趋势,如京翠 60、京秋 65、吉红 308 和快菜一号这四种白菜品种,与对照相比,MDA 含量升高率为 0.18%—98.13%,且在高浓度 405 mg/kg 芘处理时,MDA 含量显著性升高。三是白菜 MDA 含量在不同芘胁迫下均低于对照组,如京翠 70、京春绿和北京桔红二号这 3 个白菜品种的 MDA 在低浓度芘胁迫时(5 mg/kg)显著降低,降低率分别为 25.72%、60.38%、26.8%;高浓度芘胁迫(135、405 mg/kg)下与对照组相比,京翠 70 的 MDA 含量显著降低(41.51%),京春绿和北京桔红二号略有下降但不显著。

表 1　芘胁迫对白菜生物量的影响

Table 1　Effect of pyrene stress on biomass of Chinese cabbage

白菜品种 Chinese cabbage varieties	土壤中芘添加浓度 Concentration of pyrene in soil/(mg/kg)					
	0	5	15	45	135	405
京翠 60	364.24±13.29a	268.55±65.48b	332.59±0.31ab	302.04±19.41ab	293.73±26.54ab	148.42±42.99c
京秋 65	441.31±16.78a	402.05±12.02ab	416.49±62.74ab	329.31±129.25b	272.49±10.64c	229.67±8.19c
京春娃 2 号)	161.74±25.74b	326.65±103.00a	417.93±83.15a	334.88±11.83a	152.12±39.49b	77.22±17.65b
京春白	413.71±123.71c	698.76±21.23a	604.24±79.00ab	649.44±24.04ab	545.07±127.74b	292.33±40.34c
京翠 70	342.07±15.13a	350.16±18.39a	397.20±47.54a	380.63±103.08a	361.17±78.61a	337.95±45.14a
京春绿	445.79±4.76b	635.97±94.32a	591.43±101.73a	691.08±12.09a	431.55±117.07b	248.92±14.33c
桔红 2 号	437.93±17.70bc	514.88±45.76a	471.26±39.71abc	487.93±80.36ab	411.05±2.07c	352.51±14.25d
中白 50	400.60±4.31b	463.28±63.47ab	449.57±13.765ab	536.49±36.07a	474.95±0.74ab	237.27±111.50c
吉红 308	382.94±164.88b	466.00±94.23ab	650.90±127.46a	544.59±111.96ab	526.53±35.82ab	352.25±103.68b
菊心	419.70±8.44b	533.71±12.43a	508.58±30.50a	487.79±58.97a	522.19±27.10a	364.19±10.73c
快菜 1 号	124.65±0.80b	282.58±55.99a	296.60±48.87a	347.30±61.29a	278.50±30.43a	121.25±74.26b

表中数据为 3 次重复的平均值±标准误;不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著

2.3　叶绿素

对叶绿素 a 和叶绿素 b 进行双因素方差分析,结果显示白菜的品种和芘的浓度都会显著影响白菜叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量($P<0.001$)。叶绿素是高等植物进行光合作用的重要色素,直接影响到植物的光合作用,叶绿素含量的变化可以作为衡量叶片衰老的重要生理指标[20],也能在一定程度上反映植物的代谢情况和抗逆性[21]。如图 2 和图 3 所示,同种白菜的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量随着土壤芘浓度的增加呈现出相同的变化趋势。而 11 种白菜的叶绿素含量在芘胁迫下存在不同的变化规律:一是叶绿素含量在低浓度芘胁迫下(5 mg/kg)有上升趋势,如京翠 60、京秋 65 和菊心三种白菜,其中京翠 60 的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著升高,分别升高 106.9%和 102.8%;在中低浓度芘处理(15、45 mg/kg)下,叶绿素含量略有下降趋势,相比对照组,叶绿素 a 和叶绿素 b 分别降低了 9.86%—12.34%和 8.25%—20.21%;在高浓度(135、405 mg/kg)胁迫下与对照组相比,京翠 60 的叶绿素 a 含量显著升高 136.32%,京秋 65 的叶绿素 b 含量显著增加 157.53%。二是中低浓度芘胁迫下下降,高浓度上升的变化规律,如京春娃、北京桔红、中白 50 和快菜一号四种白菜在 5 mg/kg 芘浓度下叶绿素 a 含量降低了 7.83%—23.71%,叶绿素 b 含量降低了 16.9%—39.74%;在中高浓度(45、135、405 mg/kg)的芘胁迫下呈现上升的趋势,叶绿素 a 和 b 的增加率分别为 1.53%—21.34%和 2.51%—18.86%。三是叶绿素含量随着胁迫浓度的增加而逐渐升高,如京春白、京翠 70、京春绿和吉红 308 四种白菜,在 405 mg/kg 浓度芘胁迫下,4 种白菜的叶绿素 a 和叶绿素 b 分别升高了 84.1%—122.53%和 77.37%—120.29%。

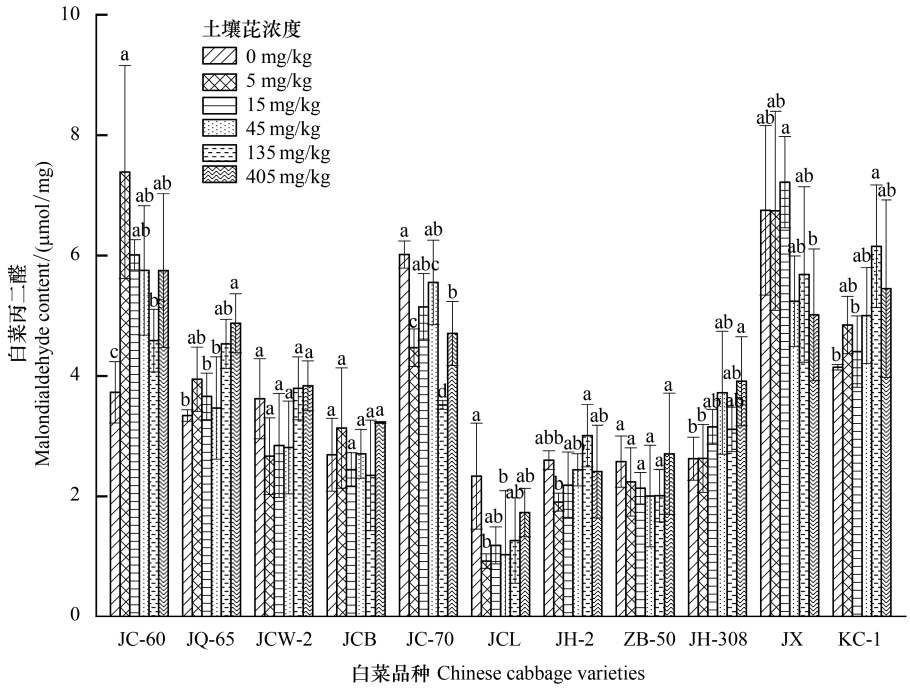

图 1 芘胁迫对白菜丙二醛(MDA)的影响

Fig.1 Effect of pyrene stress on Malondialdehyde content of Chinese cabbage

图中同一品种白菜小写字母相同表示浓度间无显著性差异;京翠 60(JC-60);京秋 65(JQ-65);京春娃 2 号(JCW-2);京春白(JCB);京翠 70(JC-70);京春绿(JCL);桔红 2 号(JH-2);中白 50(ZB-50);吉红 308(JH-308);菊心(JX);快菜 1 号(KC-1)

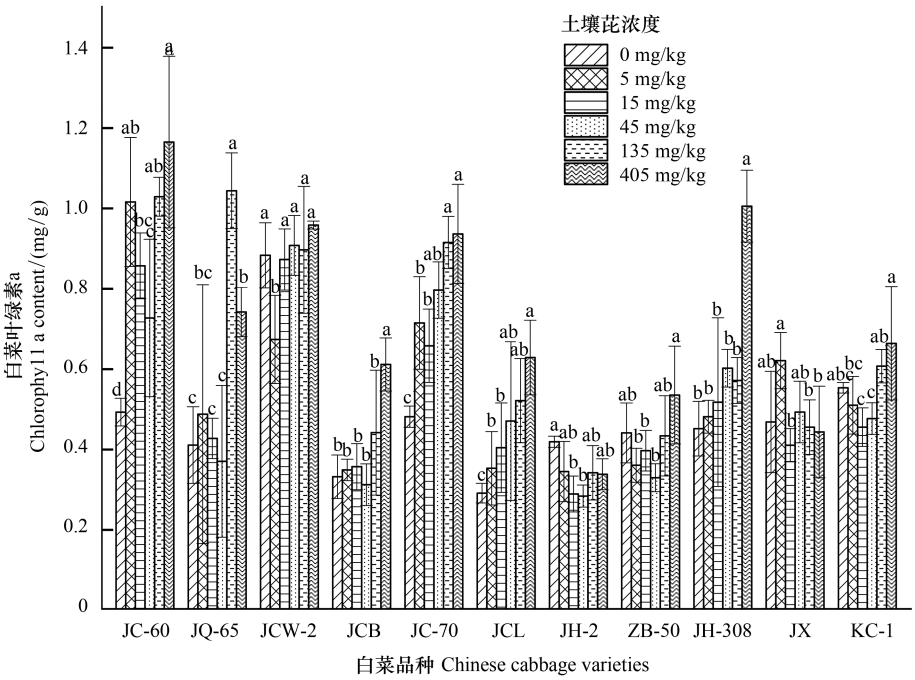

图 2 芘胁迫对白菜叶绿素 a 的影响

Fig.2 Effect of pyrene stress on chlorophyll a content of Chinese cabbage

图中同一品种白菜小写字母相同表示浓度间无显著性差异

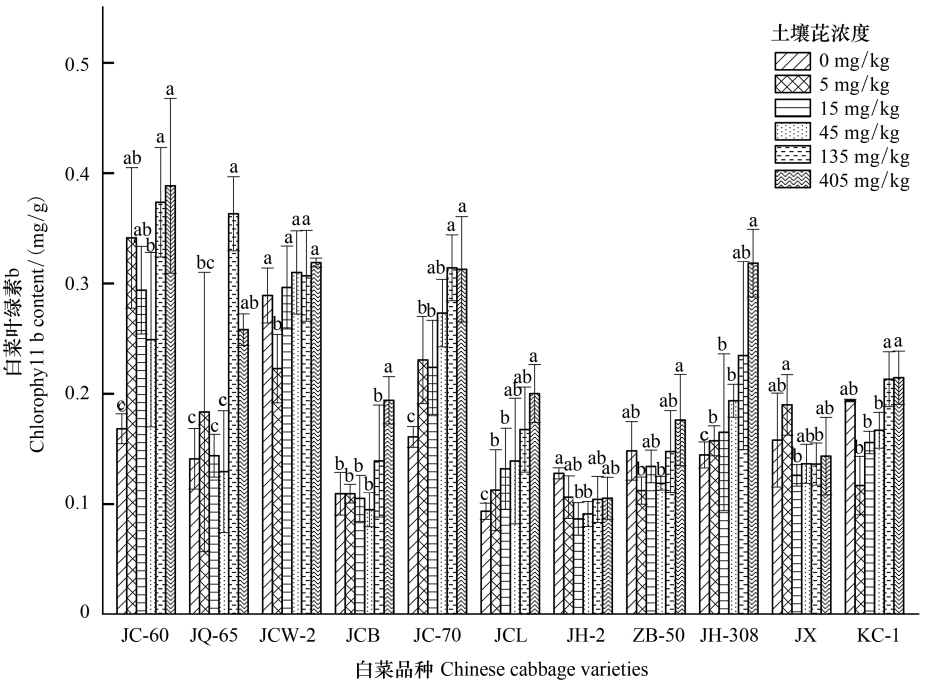

图 3　芘胁迫对白菜叶绿素 b 的影响

Fig.3　Effect of pyrene stress on chlorophyll b content of Chinese cabbage

图中同一品种白菜小写字母相同表示浓度间无显著性差异

3　讨论

3.1　芘胁迫对生物量的影响

植物的生物量变化是植物在受到胁迫时最直观的表现指标,通常植物对多环芳烃的胁迫有一定的耐受阈值,阈值内植物生物量变化不明显,阈值以外则生长受到抑制[22]。在本研究中,生物量在芘胁迫下表现两种变化规律,京翠 60 和京秋 65 这两种白菜品种随着芘浓度的增加,生物量有逐渐下降趋势,可能是 PAHs 阻碍植物根系从被污染土壤中吸收养分和水,进而影响植物的生长和生理特性[23]。而另外 9 种白菜生物量呈现“倒 U 型”变化趋势,在芘胁迫下生物量表现为低浓度升高,高浓度降低,这与尹东雪等[24]采用芘对拟南芥毒性效应的研究以及陆志强[25]、洪有为等[26]对秋茄在芘胁迫下的生长情况研究结果是一致的。高浓度的多环芳烃对植物的生长具有抑制的作用,使植物的根毛减少、叶片发黄、株高下降、生物量显著降低[13]。而在低浓度的多环芳烃胁迫时,对植物起到了刺激作用,目前大多认为低浓度的刺激作用可能是因为 PAHs 的环状结构与植物体内的生长素等内源激素具有相似性,使其具有与生长素相似的作用[27],促进植物生长。

3.2　芘胁迫对 MDA 的影响

多环芳烃会对植物产生氧化胁迫,破坏细胞膜结构,造成细胞内电解质外渗率增大,丙二醛(MDA)含量可以一定程度上反应细胞受伤害和对逆境的反应程度[28]。白菜在不同芘的浓度条件下,丙二醛含量存在不同的变化规律。在本研究中部分白菜品种在中低浓度的芘处理下 MDA 含量无显著变化,在高浓度芘胁迫下,白菜 MDA 含量均显著升高,这与蔡顺香等[29]人和朱灿等[30]人的研究结果一致,说明这些白菜品种在中低浓度芘胁迫下细胞受到的损害较小,而高浓度的芘会对植物造成一定程度的损伤。同时研究发现部分白菜品种在受到芘胁迫时,MDA 含量均显著降低,在胁迫浓度范围内均未高于对照组,推测多环芳烃在一定的浓度下会对植物的正常应激性机制造成伤害[21,23],长时间暴露在多环芳烃胁迫下抗氧化酶的酶活力会被诱导[32-33],导致脂质过氧化作用产生的 MDA 含量降低。也存在植物在多环芳烃胁迫下代谢失衡产生活性氧,

作为信号分子传导到植物体内后触发抗氧化系统的防御机制,进而适应环境[34-35]。

3.3 芘胁迫对叶绿素含量的影响

一般认为土壤有机物污染会破坏植物体内的叶绿素合成酶,或者激活叶绿素降解酶,导致叶绿素含量下降[20],但也存在抗逆性较强的植物,在有机物胁迫下叶绿素含量上升[36]。我们研究发现多环芳烃芘的添加量会对白菜叶绿素含量产生一定的影响,如京翠 60、京秋 65 等这些白菜品种中的叶绿素含量在低浓度芘处理下有上升的趋势,在中浓度的胁迫下略有下降的趋势,变化不显著,在高浓度胁迫下与对照组相比叶绿素含量显著升高。唐璇[37]研究发现,中浓度的多环芳烃胁迫萝卜幼苗,叶绿素 b 的合成受到抑制,高浓度胁迫下促进叶绿素 a 的合成,同时尹东雪等[24]用芘对拟南芥生物毒性的研究中,叶片的叶绿素呈现出先上升后下降的趋势,与本实验在中低浓度下的反应相似,可能是在低浓度的污染下,相关的酶活性未受到抑制,植物可以充分自我调节。同时,京春白等 4 种白菜随着芘浓度的增加,叶绿素含量呈现逐渐增高的趋势,在高浓度芘胁迫下与对照组相比显著升高。与蔡顺香等[38]用芘对小白菜(日本华京冠菜)幼苗胁迫的实验结果相反,而孙成芬等[39]在土壤萘对玉米苗期的生理影响的研究中发现在培养 3 周后,叶片中的叶绿素含量大于对照组,陆志强[40]也通过芘和萘对秋茄幼苗的胁迫中发现了对叶绿素的促进效应,在与本实验结果相似。京春娃等白菜品种中的叶绿素含量呈现中低浓度芘胁迫下降,高浓度上升的变化趋势,变化不显著。杨志峰等[41]通过芘对辣椒的胁迫实验中,发现芘浓度为 50 mg/kg 时叶绿素含量达到最小值,而中高浓度胁迫下叶绿素略有增加,与本实验结果一致。赖闻玲等[42]研究菖蒲在萘胁迫下的生理影响时发现随时间推移菖蒲逐渐适应萘污染,叶绿素恢复正常水平,推测本实验中白菜在高浓度芘胁迫下生长能够逐渐适应,叶绿素开始升高。有研究[43]表明,脯氨酸是植物体内的渗透调节物质,会随着芘浓度的增加而急剧增长,能够缓解芘胁迫下对细胞的伤害使叶绿素含量升高。

4 结论

(1)华北地区 11 种白菜在中低浓度(5、15、45 mg/kg)的芘胁迫下,生物量未显著下降甚至出现升高的现象,说明白菜在中低浓度芘污染的土壤中对其生长抑制作用较小,而在高浓度(135、405 mg/kg)胁迫时不能够正常的生长。

(2)除京翠 60、京翠 70 和京春绿外,其余 8 种白菜 MDA 含量在中低浓度的胁迫下变化无显著性差异,也说明白菜在中低浓度下受到细胞损害较小,其中京春娃二号、京春白和中白 50 即使在高浓度芘胁迫下与对照组相比,MDA 含量也未有显著增加,推测其对芘的耐受性较好。

(3)11 种白菜中叶绿素 a 含量均大于叶绿素 b 含量,且在不同芘浓度的胁迫下两种叶绿素具有相似的变化规律和显著性,即芘对白菜叶绿素 a 和 b 的胁迫作用相似。在中低浓度芘胁迫下,京翠 60、京翠 70 和京春绿叶绿素含量显著升高,京春娃二号叶绿素含量显著降低。其余 7 种白菜品种均变化不显著,且在高浓度胁迫中有升高的趋势,与植物自身抗性的阈值有关[41],具体机制还有待进一步研究。

大部分白菜在中低浓度的土壤芘胁迫下受到影响较小,高浓度胁迫下受到损伤无法正常生长。其中,京春白和中白 50 对芘的胁迫具有良好的耐受性,生理指标变化较小;京翠 60 和京春绿对于中低浓度芘胁迫下较为敏感,生理指标变化较大,可以作为中低浓度芘污染土壤的指示作物;高浓度芘处理下,京秋 65、吉红 308 的生理指标变化显著,可以作为高浓度芘污染土壤的指示作物。

参考文献(References):

[1] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 郑威. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4195-4202.

[2] Zhang J M, Liu F, Huang H, Wang R J, Xu B L. Occurrence, risk and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from a large-scale coal mine, Huainan, China. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 192: 110269.

[3] Wang Y, Bao M J, Zhang Y W, Tan F, Zhao H X, Zhang Q N, Li Q L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere and soils of Dalian, China: Source, urban-rural gradient, and air-soil exchange. Chemosphere, 2020, 244: 125518.

[4] Bozlaker A, Muezzinoglu A, Odabasi M. Atmospheric concentrations, dry deposition and air - soil exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an industrial region in Turkey. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(3): 1093-1102.
[5] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, Wei H Y, Liu Q Y, Liu L L, Wu H W, Yang S H, Chen Y X. Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China. Environmental Pollution, 2020, 260: 114016.
[6] 国土资源部环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
[7] 杨肖松, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟. 基于物种敏感性分布法预测芘对白菜毒害的生态风险阈值. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2127-2134.
[8] Strickland P, Kang D. Urinary 1-hydroxypyrene and other PAH metabolites as biomarkers of exposure to environmental PAH in air particulate matter. Toxicology Letters, 1999, 108(2/3): 191-199.
[9] Peng C, Chen W P, Liao X L, Wang M E, Ouyang Z Y, Jiao W T, Bai Y. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: status, sources, distribution and potential risk. Environmental Pollution, 2011, 159(3): 802-808.
[10] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 魏复盛. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价. 环境化学, 2014, 33(2): 248-255.
[11] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源. 环境科学, 2016, 37(1): 253-261.
[12] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 任丽萍, 宋雪英, 龚平. 菲、芘、1,2,4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应. 生态学报, 2002, 22(11): 1945-1950.
[13] 陈世军, 祝贤凌, 冯秀珍, 黄烈琴, 梅运群. 多环芳烃对植物的影响. 生物学通报, 2010, 45(2): 9-11.
[14] 蔡顺香. 芘胁迫对菠菜生长、叶片叶绿素和抗氧化酶活性的影响. 福建农业学报, 2009, 24(2): 157-161.
[15] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B. Ecotoxicological activity of soils polluted with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)-effect on plants. Environmental Technology, 2000, 21(10): 1099-1110.
[16] 曾小康, 董明杰, 杨磊, 雷安平, 李凤兰. 芘对红树植物桐花树幼苗生理生化指标的影响. 生态科学, 2017, 36(1): 95-101.
[17] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2001: 93-94.
[18] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691-2697.
[19] Kumar Tewari R, Kumar P, Nand Sharma P. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. Scientia Horticulturae, 2006, 108(1): 7-14.
[20] 赖闻玲, 赖姝灵, 张晓媛, 方蕾. 萘胁迫对菖蒲生长和生理特性的影响. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 151-153.
[21] 周源, 邹小丽, 陈光才, 单奇华, 张建锋. 多环芳烃(菲)胁迫对苏柳 172 幼苗生理特性的影响. 江西理工大学学报, 2012, 33(1): 1-5, 34-34.
[22] 徐胜, 王慧, 陈玮, 何兴元, 苏道岩, 李波, 李梅. 土壤中多环芳烃污染对植物生理生态的影响. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1284-1290.
[23] Reilley K A, Banks M K, Schwab A P. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(2): 212-219.
[24] 尹冬雪, 苏玉红, 乔敏. 多环芳烃芘对拟南芥的生物毒性效应. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14217-14220, 14255-14255.
[25] 陆志强, 郑文教, 马丽. 萘和芘胁迫对红树植物秋茄幼苗膜透性及抗氧化酶活性的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(5): 757-760.
[26] 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. 生态学报, 2009, 29(1): 445-455.
[27] 梁勇生, 黄杏, 龙明华, 巫桂芬, 张会敏, 乔双雨. 多环芳烃胁迫对菜心生长及生理特性的影响. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 54-60.
[28] 刘静, 周美利, 张楠, 陈国平, 赵瑞瑞, 高鑫, 石福臣. 多环芳烃菲和芘对互花米草生长和生理特征的影响. 南开大学学报: 自然科学版, 2015, 48(1): 14-20.
[29] 蔡顺香, 何盈, 邱孝煊, 兰忠明. 多环芳烃芘对小白菜生长和元素吸收及营养品质的影响. 土壤通报, 2010, 41(2): 452-457.
[30] 朱灿, 刘慧刚, 顾彦, 席颖, 任东, 黄应平. 外源硒对萘胁迫下车前草生长及土壤修复能力的影响. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2511-2519.
[31] 唐璇, 龙明华, 乔双雨, 李朋欣, 张会敏, 梁勇生. 不同种类蔬菜幼苗对多环芳烃胁迫的生理反应. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 166-170.
[32] 慕君玲, 薛祯祯, 郭红岩, 李佳华, 王晓蓉, 尹大强, 张景飞. 微齿眼子菜对菲的去除及其对菲暴露的生理效应. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 171-177.
[33] 王蔚, 崔素霞, 杨国仁, 张承烈. 两种生态型芦苇胚性悬浮培养物对渗透胁迫的生理响应Ⅱ. 抗氧化酶类活性的变化. 西北植物学报, 2003, 23(2): 224-228.
[34] 李霞, 马晓东, 邹竣竹, 周晓星, 孙振元, 韩蕾. 菲胁迫下蒿柳抗氧化系统的响应. 林业科学研究, 2020, 33(2): 138-144.
[35] Davletova S, Schlauch K, Coutu J, Mittler R. The zinc-finger protein Zat12 plays a central role in reactive oxygen and abiotic stress signaling in Arabidopsis. Plant Physiology, 2005, 139(2): 847-856.
[36] Huang X D, El-Alawi Y, Penrose D M, Glick B R, Greenberg B M. Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. Environmental Pollution, 2004, 130(3): 453-463.
[37] 唐璇. 不同种类蔬菜幼苗对多环芳烃胁迫的响应[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
[38] 蔡顺香, 何盈, 王煌平, 邱孝煊, 兰忠明. 芘对小白菜幼苗生长和一些生理生化指标的影响. 植物生理学通讯, 2008, 44(4): 643-646.
[39] 孙成芬, 马丽, 盛连喜, 吴东芳. 土壤萘污染对玉米苗期生长和生理的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 443-448.
[40] 陆志强. 多环芳烃对秋茄幼苗的生理生态效应及其在九龙江口红树林湿地的含量与分布[D]. 厦门: 厦门大学, 2002.
[41] 杨志峰, 史衍玺. 芘胁迫对辣椒生理指标的影响. 山东农业科学, 2006, (4): 20-22.
[42] 赖闻玲, 张晓媛, 赖姝灵, 方蕾. 水体萘污染对菖蒲的生长和生理的影响. 赣南师范学院学报, 2014, 35(6): 53-55.
[43] 蔡顺香, 何盈, 兰忠明, 邱孝煊. 小白菜叶内叶绿素和抗氧化系统对芘胁迫的动态响应. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 460-465.