

不同油料来源多环芳烃污染对圆叶海棠生长的影响

柴姗姗, 徐金, 王增辉, 毛云飞, 张曼曼, 赵晓红, 范义昌, 沈向*

山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安271018

摘要:以圆叶海棠为试材, 采用盆栽试验法研究不同油料来源(汽油、柴油和润滑油)多环芳烃(PAHs)胁迫对圆叶海棠的生长状况、净光合速率、荧光参数等生理参数和叶片矿质元素的影响。结果表明: 圆叶海棠的株高、茎粗和叶绿素含量受到低浓度($0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) PAHs胁迫的促进, 以及高浓度($0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) PAHs胁迫的抑制。除非光化学猝灭系数(NPQ)外, 植株净光合速率(P_n)和原初光能转换效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(q_p)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和电子传递效率(ETR)均随PAHs胁迫浓度的增加呈降低趋势, 且差异显著。植株叶片矿质元素的吸收量、器官全氮量及 ^{15}N 吸收量和 ^{15}N 利用率均随PAHs胁迫浓度的增加呈现显著降低趋势。与对照相比, 随处理浓度增加, 在植株叶片和根中的 ^{15}N 分配率大都显著降低, 在茎部的分配率显著增加, 同时, 对根系的正常生长也造成了负面影响。

关键词:多环芳烃; 光合作用; 矿质元素吸收与分配; 根系结构; 圆叶海棠

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类具有剧毒、致癌性和诱变性的有机化合物, 除干扰土壤的生物活性外, PAHs还可能对植物产生毒性影响并通过食物链危害人类健康(Lipińska等2015)。近年来, 对PAHs的研究已经成为国内外研究热点(Wang等2018; Sivaram等2018)。目前PAHs对植物影响研究多集中在植物修复、毒性效应及植物生长及生理生化影响等方面。张华等(2011)研究发现不同PAHs污染抑制栎树幼苗地径增长。周源等(2012)研究发现苏柳172幼苗根系活力随PAHs(菲)浓度升高而逐渐降低。王海翠等(2013)研究了荧蒽和苯并芘两种PAHs胁迫对油菜生长影响, 发现胁迫浓度增加对油菜叶长、地上生物量和叶绿素含量影响是低促高抑, 而株高和光合速率值显著下降。有关PAHs对圆叶海棠(*Malus prunifolia* var. *ringo*)影响研究尚未见报道。经前人研究表明土壤中PAHs污染主要为化石燃料污染(董彦等2013)。因此本研究通过探索不同油料来源中所含PAHs对圆叶海棠生长发育影响, 揭示PAHs对植物的毒性效应, 为深入研究植物受PAHs胁迫所产生的响应提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015年5月至2016年9月在山东农业大学园艺科学与工程学院果树根系实验室以及作物

生物学国家重点实验室进行。供试材料为圆叶海棠(*Malus prunifolia* Borkh var. *ringo* Asami)盆栽苗, 2015年5月份取圆叶海棠当年半木质化枝条剪成下斜面为马蹄形、长10 cm的枝段, 蘸取生根粉后扦插, 在配有间歇式自动喷雾装置的育苗池进行。第二年春天选取长势一致的扦插苗种植于装有15 kg处理土的瓦盆中。模拟PAHs污染(张华等2011a, b; 李忠文等2013; 李玉龙和刘永军2016)所用3种油料为中石化市售汽油95#、柴油0#和润滑油(道达尔5w30#矿物质油)。

1.2 试验设计

分别设置3个浓度梯度的汽油、柴油和润滑油, 与土壤混合来模拟PAHs污染土壤, 同时设置空白对照(表1)。每盆3株, 以每盆为1个处理, 每个处理设5个重复。土油充分拌匀, 薄层平铺, 置于露天环境中, 便于促进土壤充分吸附。处理42 h后置于瓦盆中(内径25 cm), 每盆15 kg污染土壤, 处理期间正常水肥管理。

1.3 项目测定

自2016年5月20日至9月20日, 每隔30 d对圆叶海棠株高、地径和叶绿素含量进行测定, 每处理重复测定5次。

收稿 2018-09-16 修定 2019-01-27

资助 国家科技支撑计划项目(2014BAD6B102)和山东现代农业产业技术体系创新团队项目(SDAIT-06-07)。

* 通讯作者(guanshangguoshu@163.com)

表1 试验设计
Table 1 Test design

油样	浓度/g·kg ⁻¹
对照	0
汽油	0.1
	0.2
	0.5
柴油	0.1
	0.2
	0.5
润滑油	0.1
	0.2
	0.5

1.3.1 株高和地径的测定

采用常规方法测定生物量,用卷尺测量植株株高,用电子游标卡尺测量植株地径并计算地径增长量(地径增长量=后一次测定的地径-前一次测定地径)。

1.3.2 叶绿素含量的测定

选取植株第5~7片成龄(自下而上)的、未受伤的完全展开的叶片,用SPAD-502便携式叶绿素仪测定叶绿素含量。

1.3.3 叶片净光合速率和荧光参数的测定

2016年8月16采用CIRAS-2型(PP-Systems)便携式光合作用测定系统于晴天上午9:00~10:00测定植株第5~7片成龄叶(自下而上)的净光合速率(P_n),测定时光照强度为1 000~1 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,每处理重复5次。采用Junior-PAM (德国WALZ)便携式荧光仪测定叶绿素荧光参数,测定叶片和测定时间与净光和速率一致,测量由电脑控制,测定过程:叶片预先暗适应30 min,先打测量光($<0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)测得最小荧光(F_o'),再打饱和脉冲光($10\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)测定最大荧光(F_m')。光适应测定:对处理后光适应下的叶片先打10 min作用光($190 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),再打饱和脉冲光($10\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),测定光适应下的最大荧光值(F_m'),每处理重复5次。荧光参数及计算参考李源等(2015)方法。

1.3.4 叶片矿质元素的测定

2016年9月7日取植株中部节位叶片,用去离子水冲洗干净,然后放在105°C烘箱中杀青15 min,80°C条件下烘干,粉碎后测定叶片矿质营养含量,

叶片全氮、全磷和全钾含量利用联合消煮(郝再彬等2004;鲍士旦2000),分别用凯氏定氮法、钼蓝比色法、火焰光度计法测定;镁、铁、钙、锰和锌含量利用原子吸收分光光度计法测定,每个样品重复3次试验。

1.3.5 ¹⁵N丰度的测定

2016年9月25日,对¹⁵N标记的植株进行整株取样分析。将植株解析为根系、枝条和叶片,将样品按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3次去离子水顺序冲洗后,在105°C下杀青30 min,随后在80°C下烘干,不锈钢电磨粉碎后过60目筛,装袋贮存待测。¹⁵N丰度由山东农业大学资源与环境学院原子能所用MAT-251质谱仪测定(党庆祝等2015)。

计算公式如下:

器官全氮量=器官总干重×器官中全氮百分含量;

氮肥分配率(%)=各器官从氮肥中吸收的氮量(g)/总吸收氮量(g)×100;

氮肥利用率(%)=[Ndff×器官全氮量]/施肥量×100。

1.3.6 根系结构的测定

2016年9月25日取植物地下部根系,用水小心洗净后用台式扫描仪(国产NUScan700)进行扫描,并用图像分析软件(Deta-TSCAN, Delta-TDevices Lad, Cambridge, U.K.)测算根系总长度、表面积、体积和平均直径等指标(韩甜甜等2012)。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel软件处理数据和制图,采用SPSS 19.0进行差异显著性分析。

2 实验结果

2.1 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠株高的影响

在同一时期,圆叶海棠株高随PAHs胁迫浓度增加而下降,对株高影响从大到小依次为润滑油>柴油>润滑油>对照。在5和6月份,0.1 g·kg⁻¹汽油胁迫下的株高分别比对照高15.78%和13.84%;0.2和0.5 g·kg⁻¹汽油胁迫对植株伤害大,株高低于对照。随处理时间延长,0.1 g·kg⁻¹汽油胁迫对植株促进作用减弱;7月份开始,汽油胁迫的株高均低于对照的(图1-A)。柴油胁迫下的植株株高整体表现为对照>0.2 g·kg⁻¹柴油>0.1 g·kg⁻¹柴油>0.5 g·kg⁻¹柴油,

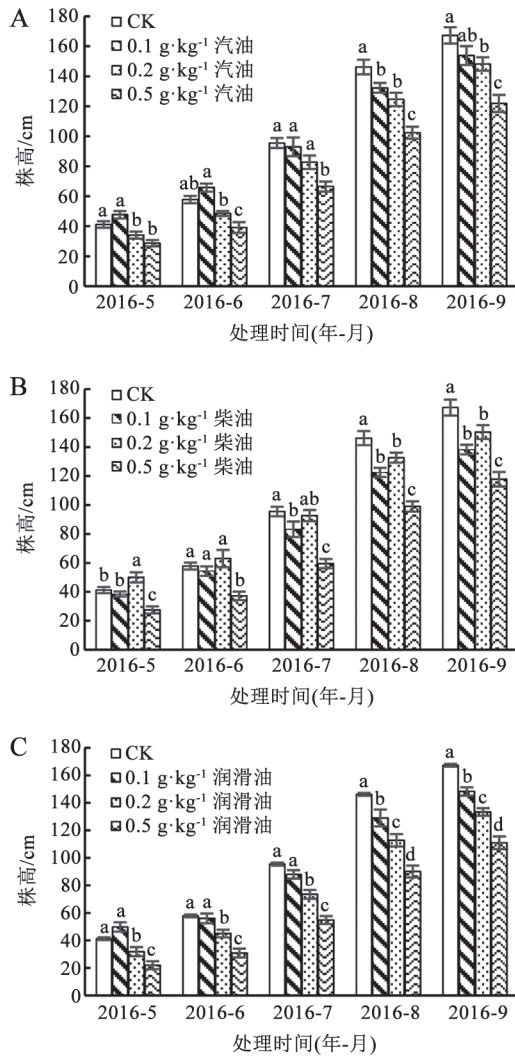


图1 不同PAHs对圆叶海棠株高的影响

Fig.1 Effects of different PAHs on plant height of *M. prunifolia* var. *ringo*

A: 汽油处理; B: 柴油处理; C: 润滑油处理。下图同此。

随时间延长, 柴油胁迫的株高与对照差异显著(图1-B)。在处理初期(5月份), 0.1 g·kg⁻¹润滑油胁迫下的株高高于对照20.87%, 之后植株生长加快, 润滑油处理的株高均低于对照, 且不同浓度之间差异显著(图1-C)。

2.2 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠地径增长量影响

圆叶海棠地径增长量总体呈现先上升后下降的趋势, 在7、8月达到最大, 9月则急剧下降。不同PAHs胁迫下的地径增长量受到不同程度的影响,

在植株生长期, 汽油胁迫的地径增长量大体高于柴油和润滑油胁迫。

在汽油胁迫初期(6月), 不同处理的地径增长量均显著低于对照, 且随处理浓度增大而下降; 之后, 汽油胁迫下的地径增长量快速上升, 于8月份高于对照(图2-A)。柴油胁迫初期, 0.1和0.5 g·kg⁻¹柴油胁迫的地径增长量显著低于对照, 而0.2 g·kg⁻¹柴油胁迫的略高于对照1.56%; 之后均呈现先上升

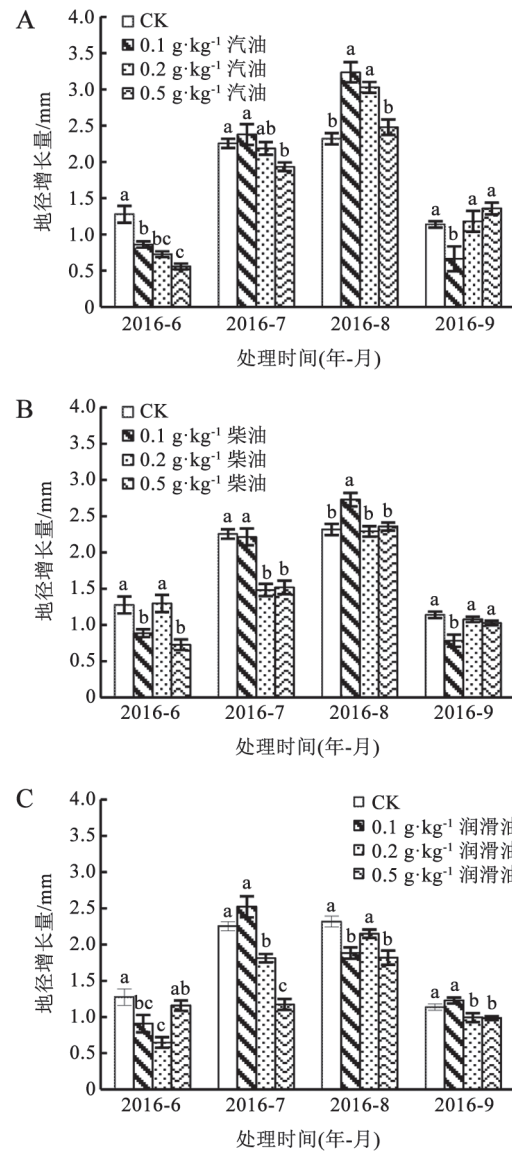


图2 PAHs对圆叶海棠径粗生长的影响

Fig.2 Effects of PAHs on diameter growth of *M. prunifolia* var. *ringo*

后下降(图2-B)。润滑油污染处理初期,各浓度处理的植株地径增长量均低于对照9.38%~49.22%,之后迅速上升缓慢下降(图2-C)。

2.3 不同来源PAHs处理对圆叶海棠叶绿素含量影响

同一时期,随PAHs浓度增加,叶绿素含量下降,对叶绿素含量影响从大到小依次为润滑油>柴油>汽油。在5月,0.1和0.2 g·kg⁻¹汽油胁迫的植株叶绿素含量高于对照1.45%和7.39%,这可能是圆叶海棠响应PAHs胁迫的反应;之后叶绿素含量均上升,然而在生长后期PAHs胁迫植株叶绿素含量低于对照。在植株生长初期(5、6月份),0.1 g·kg⁻¹柴油胁迫植株叶绿素含量高于对照,其他浓度则低于对照;之后,柴油处理的叶绿素含量植株低于对照,且浓度越高与对照差异越显著。润滑油胁迫下,植株叶绿素含量整体表现为随浓度的增加,叶绿素含量逐渐降低,其中0.5 g·kg⁻¹润滑油处理对植株叶绿素含量抑制作用显著。

2.4 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠叶片净光合速率和荧光参数影响

由表2可以看出,不同来源PAHs胁迫对植株叶片的光合速率和荧光参数有不同影响。植株叶片的 P_n 值随PAHs浓度增加而降低,影响程度从大到小依次为润滑油>柴油>汽油。其中,0.2和0.5 g·kg⁻¹润滑油胁迫作用显著,显著低于对照15.91%和20.26%,但两处理间差异不显著;而0.1和0.2 g·kg⁻¹汽油以及0.1 g·kg⁻¹柴油胁迫的 P_n 值高于对照6.96%、3.48%和4.35%。

除0.1和0.2 g·kg⁻¹汽油外,植株叶片 F_v/F_m 值均随PAHs浓度的增加而降低,不同浓度之间差异显著。而0.5 g·kg⁻¹润滑油胁迫的植株 F_v/F_m 值最低,显著低于对照30.00%。

与汽油和柴油胁迫相比,润滑油对植株 q_p 值影响抑制效果更加显著;0.5 g·kg⁻¹的汽油、柴油和润滑油胁迫显著低于对照19.83%、21.49%和28.93%,抑制作用显著。

低浓度PAHs胁迫对NPQ值无显著影响,而高浓度PAHs胁迫显著提高NPQ值。0.2和0.5 g·kg⁻¹润滑油胁迫的植株NPQ值最高,显著高于对照36.36%和39.39%,植株对外耗散的热量随胁迫程度的加强而增加。

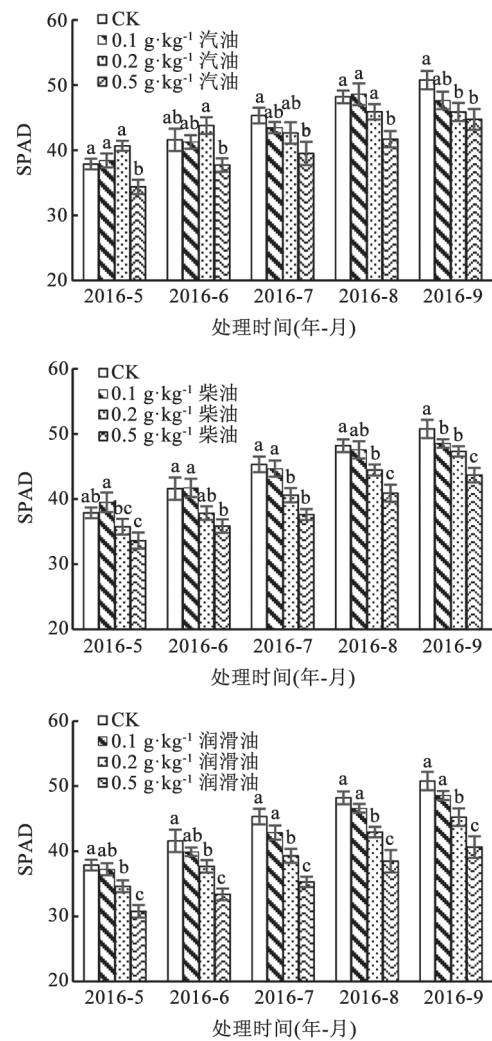


图3 PAHs对圆叶海棠叶绿素含量的影响
Fig.3 Effects of PAHs on chlorophyll content of *M. prunifolia* var. *ringo*

在PAHs胁迫下,植株 Φ_{PSII} 随胁迫浓度的增加而减小,0.5 g·kg⁻¹汽油、柴油和润滑油胁迫显著低于对照15.25%、18.64%和28.81%。润滑油胁迫作用明显高于其他两种。

PAHs胁迫对植株电子传递速率ETR整体表现为抑制作用,且抑制强度随胁迫浓度的增加而增强。

2.5 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠叶片矿质元素含量影响

矿质营养元素在作物体内物质组成和代谢过程都起着重要的作用。由表3可知,除了镁含量外,圆叶海棠叶片中各矿质元素含量基本随PAHs浓度

表2 PAHs对圆叶海棠叶片净光合速率和荧光参数的影响

Table 2 Effects of PAHs on net photosynthetic rates and fluorescence parameters of leaves in *M. prunifolia* var. *ringo*

处理	浓度/g·kg ⁻¹	P_n	F_v/F_m	q_p	NPQ	Φ_{PSII}	ETR
对照	0	11.50±0.126 ^{ab}	0.70±0.009 ^a	1.21±0.013 ^a	0.33±0.012 ^c	0.59±0.011 ^a	165.96±1.422 ^a
汽油	0.1	12.30±0.251 ^a	0.70±0.015 ^a	1.25±0.008 ^a	0.34±0.002 ^{de}	0.58±0.014 ^{ab}	153.90±0.711 ^c
	0.2	11.90±0.290 ^a	0.67±0.025 ^{ab}	1.21±0.015 ^a	0.37±0.007 ^{cde}	0.56±0.012 ^{bc}	149.69±0.925 ^d
	0.5	9.57±0.511 ^d	0.55±0.015 ^{cd}	0.97±0.009 ^c	0.42±0.019 ^{abc}	0.50±0.006 ^e	136.37±1.913 ^f
柴油	0.1	12.00±0.201 ^a	0.72±0.016 ^a	1.24±0.007 ^a	0.34±0.012 ^{de}	0.58±0.010 ^{ab}	159.87±0.559 ^b
	0.2	10.57±0.447 ^{bc}	0.64±0.014 ^b	1.08±0.017 ^b	0.39±0.004 ^{bcd}	0.53±0.002 ^d	144.60±0.682 ^e
	0.5	9.33±0.311 ^d	0.53±0.019 ^{de}	0.95±0.014 ^c	0.43±0.008 ^{ab}	0.48±0.004 ^e	135.55±1.567 ^f
润滑油	0.1	10.77±0.221 ^b	0.68±0.022 ^{ab}	1.07±0.038 ^b	0.39±0.019 ^{bcd}	0.54±0.013 ^{cd}	151.20±0.701 ^{cd}
	0.2	9.67±0.261 ^{cd}	0.58±0.007 ^c	0.97±0.015 ^c	0.45±0.036 ^a	0.49±0.009 ^e	137.20±0.825 ^f
	0.5	9.17±0.420 ^d	0.49±0.004 ^e	0.86±0.013 ^d	0.46±0.022 ^a	0.42±0.004 ^f	124.03±1.442 ^e

表中数据为3次重复平均值±标准误,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$),下表同此。

增大而逐渐降低。对于磷、镁和铜含量,汽油胁迫效果明显高于其他两种PAHs;对于氮、钙、铁和锌含量,润滑油胁迫效果显著;而柴油对钾含量的胁迫作用更加明显。

与其他矿质元素含量不同,柴油胁迫下圆叶海棠叶片的镁含量随浓度增加,呈现先上升后下降的趋势,且均显著高于对照,0.2和0.5 g·kg⁻¹柴油胁迫的Mg含量分别高于对照14.55%和5.16%。0.1和0.2 g·kg⁻¹润滑油胁迫的镁含量也都高于对照。

另外,0.1 g·kg⁻¹汽油胁迫植株叶片氮含量显著高于对照20.33%。0.2 g·kg⁻¹润滑油处理的植株叶片钙含量则显著高于对照41.05%。

2.6 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠氮元素分配规律影响

由表4可知,不同来源PAHs污染对植株氮素吸

收及¹⁵N利用率影响不同。植株全氮量随不同处理浓度的增加呈现降低趋势,除0.1 g·kg⁻¹柴油处理外,其余处理与对照差异显著。润滑油处理对植株全氮量影响最大,抑制作用高于柴油和润滑油处理,其中0.5 g·kg⁻¹润滑油处理的植株氮量最低,显著低于对照46.88%。在PAHs胁迫下,植株吸收¹⁵N的能力随浓度增加不断减弱,润滑油处理对植株¹⁵N吸收量影响最大。PAHs胁迫的植株¹⁵N利用率均随处理浓度增加而降低,0.5 g·kg⁻¹润滑油处理植株的¹⁵N利用率最低,低于对照46.71%。

¹⁵N分配率反映了肥料氮在植株内的分布及在各器官的迁移规律。由表5可知,在PAHs胁迫下,植株¹⁵N分配率大体呈现叶片和根部下降,茎部上升的趋势,其中汽油的效果最明显。叶片的¹⁵N分配率随PAHs浓度增加呈下降趋势,0.5 g·kg⁻¹柴油处理的最低。

表3 PAHs对圆叶海棠矿质元素含量的影响

Table 3 Effects of PAHs on nutrient contents of leaves in *M. prunifolia* var. *ringo*

处理	浓度/g·kg ⁻¹	氮含量/g·kg ⁻¹	磷含量/g·kg ⁻¹	钾含量/g·kg ⁻¹	钙含量/g·kg ⁻¹	镁含量/g·kg ⁻¹	铁含量/mg·kg ⁻¹	铜含量/mg·kg ⁻¹	锌含量/mg·kg ⁻¹
对照	0	12.15±0.34 ^b	2.36±0.02 ^a	12.44±0.08 ^a	1.34±0.08 ^{ab}	2.13±0.04 ^{cde}	83.66±7.86 ^a	21.30±1.37 ^a	149.87±0.71 ^a
汽油	0.1	14.62±0.10 ^a	1.99±0.04 ^{bcd}	9.33±0.30 ^c	0.96±0.04 ^{bcd}	2.07±0.02 ^{de}	79.58±5.94 ^a	18.19±0.99 ^{abcd}	144.76±0.27 ^{ab}
	0.2	11.50±0.09 ^{bcd}	1.93±0.04 ^{cd}	9.08±0.30 ^c	0.28±0.07 ^e	1.94±0.01 ^g	50.67±13.80 ^b	16.71±1.98 ^{cd}	140.99±1.64 ^{ab}
	0.5	10.52±0.38 ^{efg}	1.89±0.03 ^d	6.48±0.29 ^f	0.62±0.18 ^{bcd}	1.97±0.04 ^{fg}	77.62±9.84 ^a	15.80±1.47 ^d	137.50±7.47 ^{abc}
柴油	0.1	11.75±0.20 ^{bc}	2.01±0.02 ^{bcd}	8.91±0.22 ^{cd}	1.25±0.52 ^{abc}	2.18±0.03 ^{bc}	83.01±6.59 ^a	19.61±0.35 ^{abc}	132.93±6.42 ^{bc}
	0.2	11.18±0.03 ^{cdef}	1.98±0.03 ^{bcd}	7.82±0.17 ^e	1.04±0.07 ^{bcd}	2.44±0.03 ^a	84.48±12.28 ^a	17.49±0.46 ^{bcd}	138.31±1.17 ^{ab}
	0.5	10.28±0.55 ^{fg}	2.07±0.09 ^b	9.50±0.29 ^{bc}	0.58±0.18 ^{cde}	2.24±0.03 ^b	69.78±6.26 ^{ab}	18.83±1.36 ^{abcd}	134.54±1.34 ^{bc}
润滑油	0.1	11.39±0.46 ^{bcd}	2.03±0.02 ^{bc}	10.17±0.34 ^b	0.49±0.11 ^{de}	2.22±0.04 ^{bc}	68.31±7.70 ^{ab}	18.55±0.14 ^{abcd}	131.86±2.65 ^{bc}
	0.2	10.69±0.01 ^{defg}	1.94±0.06 ^{cd}	8.75±0.15 ^{cd}	1.89±0.37 ^a	2.15±0.03 ^{cd}	73.70±4.49 ^{ab}	20.81±0.76 ^{ab}	136.42±7.27 ^{abc}
	0.5	10.19±0.06 ^g	1.92±0.02 ^{cd}	8.16±0.17 ^{de}	0.24±0.04 ^e	2.05±0.03 ^{ef}	66.50±2.43 ^{ab}	20.59±0.68 ^{ab}	124.06±2.39 ^e

表4 PAHs对圆叶海棠¹⁵N吸收利用率的影响Table 4 Effects of PAHs on ¹⁵N uptake utilization in *M. prunifolia* var. *ringo*

处理	浓度/g·kg ⁻¹	植株全氮含量/g	¹⁵ N吸收量/g	¹⁵ N利用率/%
对照	0	1.60±0.038 ^a	0.033±0.0006 ^a	10.94±0.185 ^a
汽油	0.1	1.48±0.053 ^b	0.030±0.0011 ^b	10.00±0.367 ^b
	0.2	1.38±0.013 ^{cd}	0.028±0.0004 ^{cd}	9.29±0.088 ^{cd}
	0.5	1.30±0.009 ^{de}	0.026±0.0002 ^{de}	8.80±0.069 ^{de}
柴油	0.1	1.42±0.033 ^{ab}	0.028±0.0013 ^{ab}	9.72±0.225 ^{ab}
	0.2	1.35±0.017 ^{cd}	0.027±0.0006 ^{cd}	9.22±0.121 ^{cd}
	0.5	1.14±0.012 ^f	0.023±0.0002 ^f	7.76±0.075 ^f
润滑油	0.1	1.24±0.052 ^e	0.025±0.0010 ^{ef}	8.41±0.335 ^e
	0.2	1.23±0.030 ^{ef}	0.024±0.0011 ^{ef}	8.36±0.208 ^{ef}
	0.5	0.85±0.015 ^g	0.017±0.0007 ^g	5.83±0.096 ^g

茎部的¹⁵N分配率大部分显著高于对照,且随浓度的增加,逐渐上升。这可能是受PAHs胁迫增强,植株向叶片输送能力逐渐减弱,¹⁵N在茎部积累。

0.1和0.2 g·kg⁻¹柴油处理的根部¹⁵N分配率分别高于对照8.83%和4.51%。其他处理的根部¹⁵N分配率均低于对照,这显示¹⁵N逐渐从根部迁移至茎部。

2.7 不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠根系结构的影响

由表6可知,圆叶海棠根系总长度、根表面积、根尖数和根系总体积随PAHs浓度增加整体表现出先升高后降低的趋势,0.5 g·kg⁻¹润滑油胁迫的根系各项生长指标均最低。而柴油胁迫下的各指标明显高于其他两个PAHs。根系总长度值、根表面积和根尖数在0.2 g·kg⁻¹柴油浓度处理下达到最大值,较对照分别显著增加了13.30%、37.72%和28.69%。根系总体积在0.1 g·kg⁻¹柴油胁迫下达

表5 PAHs对¹⁵N-尿素在圆叶海棠各器官分配的影响Table 5 Effect of PAHs on the distribution of ¹⁵N-urea in various organs in *M. prunifolia* var. *ringo*

处理	浓度/g·kg ⁻¹	¹⁵ N分配率/%		
		叶	茎	根
对照	0	28.67±0.16 ^a	38.04±0.39 ^f	33.28±0.36 ^b
汽油	0.1	23.25±1.76 ^{bcd}	46.02±1.15 ^d	30.73±0.73 ^c
	0.2	25.16±0.21 ^b	46.98±0.41 ^{cd}	27.85±0.21 ^d
	0.5	19.90±0.78 ^e	48.97±0.93 ^{bc}	31.13±0.22 ^c
柴油	0.1	26.17±0.62 ^{ab}	37.62±0.68 ^f	36.22±0.14 ^a
	0.2	24.00±1.47 ^{bc}	41.22±0.86 ^e	34.78±0.67 ^a
	0.5	19.72±0.12 ^e	49.95±0.81 ^b	30.33±0.91 ^c
润滑油	0.1	24.94±1.61 ^b	43.41±1.38 ^e	31.65±0.23 ^c
	0.2	21.24±0.83 ^{cde}	52.78±0.51 ^a	25.98±0.34 ^e
	0.5	20.73±0.75 ^{de}	48.56±0.90 ^{bcd}	30.71±0.42 ^c

到最大值。PAHs胁迫下根系直径则基本呈现下降趋势。

表6 PAHs对圆叶海棠根系结构影响

Table 6 Effect of PAHs on plant root structure in *M. prunifolia* var. *ringo*

处理	浓度/g·kg ⁻¹	根系总长度/cm	根表面积/cm ²	根尖数/个	根体积/cm ³	根系直径/mm
对照	0	2 734.16±6.99 ^d	663.26±2.88 ^d	8 530±11.70 ^f	11.37±0.19 ^d	1.93±0.06 ^{ab}
汽油	0.1	2 757.28±23.21 ^d	632.81±4.20 ^e	8 864±11.47 ^e	11.03±0.09 ^d	2.03±0.11 ^a
	0.2	3 075.08±9.39 ^a	896.17±11.1 ^b	10 257±13.69 ^b	17.47±0.08 ^b	1.80±0.09 ^{bcd}
	0.5	2 125.14±3.38 ^g	515.44±7.28 ^h	6 722±5.95 ⁱ	7.57±0.01 ^g	1.46±0.02 ^f
柴油	0.1	2 800.85±4.17 ^c	787.97±7.46 ^c	8 955±16.89 ^d	19.43±0.26 ^a	1.85±0.06 ^{bc}
	0.2	3 097.87±4.71 ^a	913.47±3.23 ^a	10 977±24.10 ^a	17.00±0.55 ^b	1.66±0.05 ^{de}
	0.5	2 177.09±5.72 ^f	539.92±4.57 ^g	6 950±10.90 ^h	7.77±0.13 ^f	1.41±0.05 ^f
润滑油	0.1	2 831.88±6.85 ^b	792.61±3.74 ^c	9 313±10.36 ^c	14.70±0.22 ^c	1.73±0.03 ^{cd}
	0.2	2 566.10±3.66 ^e	583.82±2.93 ^f	7 837±5.10 ^g	9.20±0.30 ^e	1.54±0.05 ^{ef}
	0.5	1 973.09±4.33 ^h	467.30±4.64 ⁱ	6 527±18.91 ^j	7.07±0.03 ^g	1.23±0.05 ^g

3 讨论

本研究结果表明不同来源的PAHs污染对圆叶海棠株高表现为低浓度($0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)促进增长, 高浓度($0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)抑制增长; PAHs抑制了植株地径的增长, 且随浓度的增大, 抑制作用也增强。这与王海翠(2013)多环芳烃(PAHs)对油菜生长的影响及其积累效应研究结果相似。龙明华等(2017)研究PAHs胁迫对菜心品质及其解毒系统也有类似结果。叶绿素含量高低在一定程度上反映了植物的代谢情况和抗逆性, 常用来评价环境污染物对植物影响(周源等2012)。本试验研究发现PAHs对圆叶海棠叶绿素含量表现为“低促高抑”, 这与张静等(2015)研究结果相似, 而与孙成芬(2007)发现萘胁迫下玉米幼苗叶绿素含量显著增加的研究结果不同, 可能与植物种类不同有关, 有待进一步研究。

本试验研究发现圆叶海棠叶片的 P_n 值随PAHs浓度的增加呈降低趋势, 王海翠等(2013)在研究多环芳烃(PAHs)对油菜生长的影响及其积累效应中也证明这一点, 可能是植物的光合系统受PAHs污染而损害或植物受污染后其呼吸作用的增强(李忠文等2013)和叶绿素含量降低(Reilley等1996)等原因, 因此导致光合速率下降。由表2可知, 叶片 Φ_{PSII} 、ETR和 F_v/F_m 均表现为受PAHs抑制且与浓度成正比, 说明圆叶海棠受到毒害作用, 润滑油对净光合速率和荧光参数的抑制强度要大于汽油和柴油。植物根系是矿质营养吸收运输和感受外界营养状态的重要器官(晁代印和冷冰2017)。本试验发现, 根系的总长度、根表面积、体积和根尖数均随PAHs处理浓度增加表现出“低促高抑”, 这与陆志强等(2005)研究不同浓度萘和芘处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长影响的结果一致。

植株体内养分含量反应了植株的营养状况, 必然影响植株的生长(董顺德等2005)。本试验研究发现, 除了镁含量外, 圆叶海棠叶片中各矿质元素含量基本随PAHs浓度增大而逐渐降低。这可能与逆境胁迫影响了土壤养分的有效性(陈明等2016)和根系活力有关(董顺德等2005), 也可能是高浓度PAHs胁迫下光合作用以及呼吸作用受到明显抑制, 叶片细胞主动运输吸收矿质元素的能量减少

而导致(陈明等2016)。黄辉等(2010)对玉米幼苗的研究也表明, $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 柴油抑制光合作用从而抑制玉米对微量元素的吸收, 使其生长缓慢。

在研究不同来源PAHs胁迫对圆叶海棠植株全氮、 ^{15}N 吸收量和 ^{15}N 利用率影响中发现, 随处理浓度增加圆叶海棠对氮素吸收利用率不断降低, 影响程度从大到小依次为: 润滑油>柴油>汽油; ^{15}N 分配率在叶片中所占比例逐渐降低, 而茎部所占比例却不断增加, 说明植株根系向叶片运输效率逐渐降低, 可能是多环芳烃中的物质与土壤的无机氮、无机相结合, 与植物争夺氮, 减少植物可以利用的有机氮(赵北北等2015)。

参考文献(References)

- Bao SD (2000). Soil agrochemical analysis. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [鲍士旦(2000). 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社]
- Chao DY, Leng B (2017). Nutrient use efficiency of plants and heavy metal pollution. *Plant Physiol J*, 53 (8): 1337–1340 (in Chinese) [晁代印, 冷冰(2017). 植物养分高效与重金属污染. *植物生理学报*, 53 (8): 1337–1340]
- Chen M, Zhao MQ, Xu YQ, et al (2016). Effect of mercury stress in soil on the contents and correlation of mineral elements of flue-cured tobacco leaves. *J Henan Agric Sci*, 45 (2): 44–48 (in Chinese with English abstract) [陈明, 赵铭钦, 许跃奇等(2016). 土壤Hg胁迫对烤烟叶片矿质元素含量及其相关性的影响. *河南农业科学*, 45 (2): 44–48]
- Dang ZQ, Wang NN, Zhang YF, et al (2015). Effects of different fertilization mode on root growth, nitrogen uptake and distribution of young peach trees. *J Soil Water Conserv*, 29 (4): 171–176 (in Chinese with English abstract) [党庆祝, 王娜娜, 张亚飞等(2015). 不同施肥模式对桃幼树根系生长与氮素吸收分配的影响. *水土保持学报*, 29 (4): 171–176]
- Dong SD, Zhang YC, Sun DM, et al (2005). Relationship between content of mineral nutrients and yield and quality of flue-cured tobacco under drought stress. *Tobacco Sci. Tech*, (2): 30–34 (in Chinese with English abstract) [董顺德, 张延春, 孙德梅等(2005). 干旱胁迫下烤烟矿质养分含量与烟叶产、质量的关系. *烟草科技*, (2): 30–34]
- Dong Y, Huang CX, Wang R, et al (2013). Preliminary study on Shandong apple orchard PAHs pollution levels and sources. *J. Soil Water Conserv*, 27 (1): 182–185, 280 (in Chinese with English abstract) [董彦, 黄翠香, 王荣等(2013). 山东苹果园PAHs污染水平和来源初探. *水土保持学报*, 27 (1): 182–185, 280]
- Han TT, Hu YL, Mao ZQ, et al (2012). Effects of different soil

- interfaces on apple root architecture and soil properties. *Sci Agric Sin*, 45 (17): 3639–3645 (in Chinese with English abstract) [韩甜甜, 胡艳丽, 毛志泉等(2012). 土壤不同介质界面对苹果根系构型和土壤特性的影响. *中国农业科学*, 45 (17): 3639–3645]
- Hao ZB, Cang J, Xu Z (2004). *Plant Physiology Experiment*. Harbin: Harbin Industrial University Press (in Chinese) [郝再彬, 苍晶, 徐仲(2004). *植物生理实验*. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社]
- Huang H, Li S, Guo JL (2010). The influence of cadmium (Cd^{2+}) to the antioxidant system and photosynthesis of seedling of *Zea mays* L. *J Agro-Environ Sci*, 9 (2): 211–215 (in Chinese with English abstract) [黄辉, 李升, 郭娇丽(2010). 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化系统及光合作用的影响. *农业环境科学学报*, 9 (2): 211–215]
- Li Y, He BH, Mao WT, et al (2015). Effects of paclobutrazol on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of *Scaevola aemula* ‘Sunfan’. *J Henan Agric Sci*, 44 (11): 97–103 [李源, 何丙辉, 毛文韬等(2015). 多效唑对太阳菊叶片叶绿素含量及其荧光参数的影响. *河南农业科学*, 44 (11): 97–103]
- Li YL, Liu YJ (2016). Degradation of naphthalene phenanthrene and pyrene in soil and their effects on plant growth. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 44 (3): 96–102 (in Chinese with English abstract) [李玉龙, 刘永军(2016). 萘、菲、芘在土壤中的降解及其对植物生长的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 44 (3): 96–102]
- Li ZW, Yan WD, Zheng W, et al (2013). Effects on different concentrations of PAHs on photosynthesis characteristics of 4 greening tree species. *J Central South Univ For Technol*, 33 (08): 129–136 (in Chinese with English abstract) [李忠文, 闫文德, 郑威等(2013). 不同浓度PAHs对4种绿化树种光合特性的影响. *中南林业科技大学学报*, 33 (08): 129–136]
- Lipińska A, Wyszowska J, Kucharski J (2015). Diversity of organotrophic bacteria, activity of dehydrogenases and urease as well as seed germination and root growth *Lepidium sativum*, *Sorghum saccharatum* and *Sinapis alba* under the influence of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ Sci Pollut Res Int*, 22 (23): 18519–18530
- Long MH, Wu GF, Liang YS, et al (2017). Influence of PAHs stress on brassica parachinensis bailey quality and its detoxification system. *South Agric Sci*, 48 (6): 1036–1041 (in Chinese with English abstract) [龙明华, 巫桂芬, 梁勇生等(2017). PAHs胁迫对菜心品质及其解毒系统的影响. *南方农业学报*, 48 (6): 1036–1041]
- Lu ZQ, Zheng WJ, Ma L, et al (2005). Effect of naphthalene and pyrene on hypocotyl germination and growth of mangrove plant *Kandelia candel* (L) druce. *J Agric Univ Xiamen*, 44 (4): 580–583 (in Chinese with English abstract) [陆志强, 郑文教, 马丽等(2005). 不同浓度萘和芘处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长的影响. *厦门大学学报*, 44 (4): 580–583]
- Reilley KA, Banks MK, Schwab AP (1996). Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *J Environ Qual*, 25: 212–219
- Sivaram AK, Logeshwaran P, Subashchandrabose SR, et al (2018). Comparison of plants with C3 and C4 carbon fixation pathways for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soils. *Sci Rep-UK*, 8 (1): 2100
- Sun CF (2007). The influence of soil Naphthalin pollution on growth of corn—primary study on mechanism and approach of stress (dissertation). Changchun: Northeast Normal University (in Chinese with English abstract) [孙成芬(2007). 土壤萘污染对玉米生长发育的影响—污染途径和机理的初步研究(学位论文). 长春: 东北师范大学]
- Wang HC, Hu LL, Li M, et al (2013). Growth effects and accumulations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rape. *Chin J Plant Ecol*, 37 (12): 1123–1131 (in Chinese with English abstract) [王海翠, 胡林林, 李敏等(2013). 多环芳烃(PAHs)对油菜生长的影响及其积累效应. *植物生态学报*, 37 (12): 1123–1131]
- Wang X, Shen ZX, Zeng YL, et al (2018). Day-night differences, seasonal variations and source apportionment of PM_{10} -bound PAHs over Xi’an, Northwest China. *Atmosphere*, doi: 10.3390/atmos9020062
- Zhang H, Yan WD, Zheng W, et al (2011). Effect of different pollution levels of PAHs on photosynthetic characteristics and growth of *Koeleruteria paniculata* seedlings. *J Central South Univ For Technol*, 31 (5): 111–116 (in Chinese with English abstract) [张华, 闫文德, 郑威等(2011). 不同PAHs污染水平对栎树幼苗光合特性和生长量的影响. *中南林业科技大学学报*, 31 (5): 111–116]
- Zhang J, Zhao XX, Jiang X, et al (2015). Effects of cadmium stress on the growth and physiological property of *Oenanthe javanica*. *Plant Physiol J*, 51 (11): 1969–1974 (in Chinese with English abstract) [张静, 赵秀侠, 汪翔等(2015). 重金属镉(Cd)胁迫对水芹生长及生理特性的影响. *植物生理学报*, 51 (11): 1969–1974]
- Zhao BB, Liu Y, Li CH et al (2015). Effects of nitrogen nutrition on diesel fuel removal by rhizosphere of two mangrove seedlings. *J Agro-Environ Sci*, 34 (10): 1865–1872 (in Chinese with English abstract) [赵北北, 刘永, 李纯厚等(2015). 氮营养对两种红树植物根际去除柴油污染的影响. *农业环境科学学报*, 34 (10): 1865–1872]
- Zhou Y, Zou XL, Chen GC, et al (2012). Effect of phenanthrene on physiological characteristics of salix jiangsuensis CL J-172 seedlings. *J Jiangxi Sci-Tech Univ*, 33 (1): 1–5, 34 (in Chinese with English abstract) [周源, 邹小丽, 陈光才等(2012). 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*, 33 (1): 1–5, 34]

Effect of PAHs pollution from different oil sources on the growth of *Malus prunifolia* var. *ringo*

CHAI Shan-Shan, XU Jin, WANG Zeng-Hui, MAO Yun-Fei, ZHANG Man-Man, ZHAO Xiao-Hong, FAN Yi-Chang, SHEN Xiang*

State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

Abstract: The effects of PAHs stress from different oil sources (gasoline, diesel oil and lubricating oil) on the growth, net photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, physiological parameters and mineral elements in leaves of *Malus prunifolia* var. *ringo* were studied by pot experiment. The results showed that the plant height, stem diameter and chlorophyll content of *M. prunifolia* var. *ringo* were promoted by low concentration ($0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and inhibited by high concentration ($0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) of PAHs stress from different sources. Except for photochemical quenching coefficient (NPQ), the net photosynthetic rate (P_n), primary photoenergy conversion efficiency (F_v/F_m), photochemical quenching coefficient (q_p), actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}) and electron transport efficiency (ETR) of plants decreased with the increase of PAHs concentration. The uptake of mineral elements, total nitrogen in organs and ^{15}N uptake and ^{15}N utilization rate in leaves decreased significantly with the increase of PAHs concentration. Compared with the control, most ^{15}N distribution rate decreased significantly with the increase of treatment concentration in leaves and roots, increased significantly in stems, and it also had a negative impact on the normal growth of roots.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; photosynthesis; mineral element absorption and distribution; root structure; *Malus prunifolia* var. *ringo*

Received 2018-09-16 Accepted 2019-01-27

This work was supported by National Science and Technology Support Plan Project (2014BAD6B102), and Shandong Modern Agricultural Industry Technology System Innovation Team Project (SDAIT-06-07).

*Corresponding author (guanshangguoshu@163.com).