



叶片涂施多环芳烃在黄瓜体内的积累效应及 对其生理特性的影响

张会敏¹,龙明华^{1*},乔双雨¹,赵体跃¹,龙彪²,梁勇生³

(1 广西大学 农学院,南宁 530004;2 六盘水市果树蔬菜工作站,贵州六盘水 553000;3 南宁市农业科学研究所,南宁 530000)

摘要:以黄瓜品种‘秀川 701’为材料,采用叶片涂施试验,考察了不同浓度的多环芳香烃(PAHs)萘、菲、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘混合液胁迫处理对黄瓜生长、生理和品质的影响及 PAHs 在黄瓜植株体内的积累特征,探究 PAHs 对蔬菜作物的生长影响及毒害机理。结果表明:(1)黄瓜 7 个部位(根、茎、叶片、叶柄、果皮、果肉、果瓢)中总 PAHs 含量随着叶片涂施浓度的升高呈先增加后降低的趋势,营养器官中以叶片含量最高、叶柄含量最低,果实中果皮含量最高、果瓢含量最低。(2)外源 PAHs 胁迫对黄瓜株高、茎粗、根长、叶长、叶宽、果实纵径、果实横径、单果重的影响均为低浓度促进中高浓度抑制。(3)外源 PAHs 处理使叶片 SOD、CAT 活性下降,MDA 含量先提高后降低,尤其是中浓度胁迫下 POD 活性、叶绿素含量均显著提高。(4)外源 PAHs 对黄瓜果实维生素 C、可溶性蛋白、可滴定酸含量的影响表现为低浓度促进中高浓度抑制,而对可溶性糖、可溶性固形物含量均具有抑制作用。研究认为,5 种 PAHs 在黄瓜体内呈现出了特定的分布规律,直接暴露于大气环境的部位更容易吸收、积累 PAHs; PAHs 作为典型有机污染物,给黄瓜生长发育带来伤害的同时也起到了正向促进作用,且叶片对 PAHs 的吸收以及 PAHs 对黄瓜生理特性的促进或抑制作用都有一定阈值。

关键词:多环芳香烃;黄瓜;积累效应;生长;果实品质;生理特性

中图分类号:Q945.78; S642.2

文献标志码:A

Accumulations and Physiological Performance Effects on Cucumber after Application of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Leaf

ZHANG Huimin¹, LONG Minghua^{1*}, QIAO Shuangyu¹,
ZHAO Tiyue¹, LONG Biao², LIANG Yongsheng³

(1 Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Liupanshui Fruiter Vegetable Workstation, Liupanshui, Guizhou 553000, China; 3 Nanning Institute of Agricultural Sciences, Nanning 530000, China)

Abstract: Cucumber leaf was treatment with different concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) such as NAP, PHE, FLA, BaA and BaP mixture by the smear method. We studied the effects of PAHs on growth, physiological performance, and quality of cucumber and to understand their patterns of accumulations in different parts. Objective was to investigate the growth effects and toxicity mechanisms for vegetable with PAHs stress. The result showed that:(1) with PAHs treatment concentration rising, PAHs accumulation in seven parts of cucumber firstly ascended then descended. The highest PAHs con-

收稿日期:2019-02-01;修改稿收到日期:2019-05-31

基金项目:国家自然科学基金(31360479);广西自然科学基金(2014GXNSFAA118100);国家现代农业产业技术体系广西瓜果蔬菜创新团队建设项目(nycytxgxctd-10-03)

作者简介:张会敏(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事蔬菜栽培生理与品质调控研究。E-mail:936208326@qq.com

* 通信作者:龙明华,博士,教授,主要从事蔬菜育种及农产品质量安全研究。E-mail:longmhua@163.com

tents were in leaves for the vegetative organ, the lowest contents in flesh for the fruit. (2) Low concentration of PAHs stress had positive effects on cucumber plant height, stem diameter, root length, leaf length, leaf width, fruit longitudinal stem, fruit cross stem and single fruit weight, whereas medium and high concentrations had negative impacts. (3) With PAHs treatment, leaf SOD and CAT activities reduced, MDA activity firstly ascended then descended. With intermediate concentration PAHs stress, POD activity obviously enhanced. (4) Low concentration of PAHs stress had positive effects on cucumber fruit vitamin C, soluble protein, titrate acid, whereas medium and high concentrations had negative impacts, the reduced soluble sugar and soluble solids were inhibited by PAHs. The study considers the PAHs had distribution characteristics in cucumber and the part easier to absorb and accumulate PAHs that exposed directly to the atmosphere. As a typical organic pollutant, PAHs have brought about harms also plays a positive role in growth and development of cucumber. There are certain threshold values for the leaves absorption of PAHs and the positive or negative effects on physiological characteristics of cucumber.

Key words: cucumber; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); accumulation; growth and development; fruit quality; physiological performance

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, 简称 PAHs) 是广泛存在于环境中的典型持久性有机污染物,生物体癌症病变为 70%~90% 是环境中化学物质引起的,而 PAHs 则是环境致癌化学物质中最大的一类^[1],还具有强烈的致畸、致突变作用^[2]。石油工业、供暖燃煤、机动车尾气等通过一次排放或者二次转化形成 PAHs,并永久积累在空气、土壤、水体等介质中,已经成为当前环境科学领域的研究热点^[3]。PAHs 也可以在植物体内迁移、代谢、累积,从而影响植物的正常生长,并在食物链中被逐级放大,影响人类健康^[6]。植物吸收环境中 PAHs 的途径主要有叶片从大气中吸收、根系从土壤中吸收^[4]。近年来,PAHs 土壤污染及植物修复备受关注,国内外多处农田土壤中的 PAHs 背景值被报道^[5],所以关于蔬菜的研究多集中在蔬菜对土壤中 PAHs 的吸收和富集方面,胁迫处理也是以土培方式为主。如今,与日俱增的机动车尾气排放、供暖排放等直接贡献大量 PAHs 于大气中,植物叶片作为天然的空气过滤器,气孔和角质层吸收 PAHs 的途径不可忽视^[6],所以本研究采取叶片涂施作为 PAHs 处理方式。此外,PAHs 对蔬菜作物的生理影响、含量水平研究较常见,而生长、品质影响及在蔬菜体内的分布特征探索相对较少,且蔬菜对 PAHs 的吸收、积累及对其污染响应的研究还处于探索阶段,已有研究结果不尽相同,具体污染响应机制和分布、迁移机理尚不明确。

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 为葫芦科黄瓜属一年生草本植物,是一种世界性的主要蔬菜作物,也是中国栽培面积大、种植范围广的蔬菜之一,具有很高的食用、营养和药用价值。本试验研究了美国环

境保护局 (EPA) 公布的 16 种优控 PAHs 中萘、菲、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘对黄瓜生长、生理及品质的影响,测定了 5 种 PAHs 在黄瓜 7 个部位的含量水平,探讨 PAHs 在黄瓜体内的分布特征和积累规律,为分析 PAHs 对黄瓜的毒害机理及其响应机制提供依据,为科学评估黄瓜蔬菜污染的生态风险及农产品安全生产提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试黄瓜品种为‘秀川 701’,种子由广州市伟兴利种子有限公司提供。主要试剂包括萘、菲、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘、正己烷、二氯甲烷、丙酮、乙腈(色谱纯)等,主要仪器设备包括高效液相色谱仪 (Waters 2695, 2988 紫外检测器)、色谱柱 (SUPELCOSILTM LC-PAH)、旋转蒸发仪、超声波清洗器、高速冷冻离心机、弗罗里硅土 SPE 柱、分光光度计等。

1.2 样品处理与采集

试验于 2017 年 7~9 月在广西大学蔬菜实验基地温室大棚内进行。黄瓜种子浸种催芽后播至穴盘中基质育苗,长到 2 叶 1 心时选健壮的幼苗定植于培养箱土培,设 4 个小区,每小区 20 株,独立成小塑料棚,样品设 3 个重复。待植株第一朵雌花开放,用事先配好的萘、菲、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘混合溶液进行第一次处理,混合液浓度 0 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (对照)、300 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (低浓度)、600 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (中浓度)、900 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (高浓度) 分别对应 4 个不同的小区,混合液中各成分比例为 1:1:1:1:1。处理方式为叶片上表皮和下表皮均匀涂抹,每隔 3 d 处理 1 次,

共处理5次。第一次处理3张叶片,随着新叶的长出,每次处理叶片数增加1张(前面处理的叶片后面反复处理),被处理的叶片间有间隔。常规管理,统一主蔓结瓜,每株于第二雌花和第四雌花节位处留2个果,黄瓜商品成熟时进行样品采集。均匀采集根、茎、未处理的叶片、叶柄、果实用于PAHs含量检测和生理品质指标检测。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 黄瓜体内多环芳烃含量 将采集的黄瓜样品根、茎、叶片、叶柄、果皮、果肉、果瓢,杀青、烘干、粉碎,取2g以正己烷(分析纯)为提取剂用超声波提取法^[7]重复提取3次,选择浓硫酸磺化法^[8]去除样品中的脂类物质和叶绿素干扰,采用固相萃取法^[9]以佛罗里硅土柱为萃取小柱进行净化。利用高效液相色谱检测,流动相为乙腈-水,采用梯度洗脱、流速变化的方法分离检测5种PAHs,柱温30℃,检测波长254 nm,进样体积30 μL^[10]。样品中5种

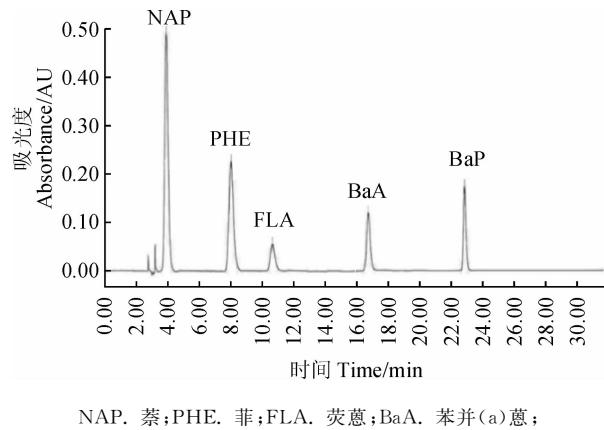


图1 5种PAHs标准色谱图

NAP. Naphthalene; PHE. Phenanthrene; FLA. Fluoranthene; BaA. Benzo(a)anthracene; BaP. Benzo(a)Pyrene

Fig. 1 The standard chromatogram of five kinds of PAHs

目标化合物的定性通过标准样品和化合物的色谱图对照进行,用保留值定性分析法来确定,该检测方法精密度高、重现性好。5种多环芳烃的线性方程、相关系数、检出限、相对标准偏差及回收率见表1,标准色谱见图1。

1.3.2 生长指标 黄瓜收获时用卷尺测量其株高,用游标卡尺测定其根长、茎粗(距地面15 cm处)、叶长、叶宽,采摘后测定其果实纵径、果实横径、单果重。

1.3.3 叶片生理指标 采用丙酮提取法^[11]测定叶绿素含量,采用氮蓝四唑法^[12]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用氧化愈创木酚法^[12]测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外分光光度法^[12]测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用硫代巴比妥酸法^[13]测定丙二醛(MDA)含量,以上生理指标皆是以采集的叶片样品为测定对象。

1.3.4 果实品质指标 参考曹建康等^[14]方法测定黄瓜果实品质指标,维生素C含量以2,6-二氯酚靛滴定法测定,可溶性蛋白质含量以考马斯亮蓝染色法测定,可滴定酸含量以氢氧化钠溶液滴定法测定,可溶性糖含量以蒽酮试剂法测定,可溶性固形物含量用手持式折光仪测定。

1.4 数据处理

采用Excel2016进行数据处理,采用SPSS17.0软件对数据进行单因素方差分析,采用Duncan's多重比较法进行差异显著性检测。

2 结果与分析

2.1 外源PAHs对黄瓜不同部位PAHs积累量的影响

2.1.1 根茎叶PAHs含量 表2显示,黄瓜根中NAP含量处理组均低于对照,处理组FLA含量均高于对照,随着PAHs混合液处理浓度的增加,PHE、

表1 多环芳烃标准曲线信息及回收率

Table 1 Standard curve information and recovery percentage of PAHs

多环芳烃 PAHs	线性方程 Linear equation	相关系数 Correlation coefficient	检出限 LOD / (μg · kg ⁻¹)	相对标准偏 差 RSD/%	回收率 Recovery/%
NAP	$y = 1.13e+003x - 4.43e+005$	0.999 925	2.0	0.92	70.01 ± 7.82
PHE	$y = 6.19e+002x + 3.39e+004$	0.999 726	2.0	1.87	139.23 ± 6.37
FLA	$y = 1.66e+002x - 4.72e+003$	0.999 995	0.5	0.96	111.56 ± 11.59
BaA	$y = 6.89e+001x - 1.97e+003$	0.999 388	1.0	0.53	97.39 ± 10.77
BaP	$y = 6.36e+001x - 1.41e+003$	0.999 988	0.5	0.53	89.45 ± 13.21

注:NAP. 萘;PHE. 菲;FLA. 荧蒽;BaA. 苯并(a)蒽;BaP. 苯并(a)芘;下同

Note: NAP. Naphthalene; PHE. Phenanthrene; FLA. Fluoranthene; BaA. Benzo(a)anthracene; BaP. Benzo(a)Pyrene; The same as below

BaA、BaP 含量先升高后降低,并分别在中、低、中浓度下达到最大值;根中总 PAHs 积累量呈现先升高后降低的变化趋势,并在中浓度下达到最大值,且显著高于对照、低浓度处理,表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照组(表 2)。将 4 个处理组累加后,单体 NAP、PHE、FLA、BaA、BaP 的含量分别占 PAHs 总含量的 11.80%、25.61%、27.38%、18.26%、16.95%,FLA 占比最大,NAP 占比最小。

其次,PAHs 混合液处理后,随着处理浓度增加,黄瓜茎中 NAP、PHE 含量表现为先升高后降低,均在中浓度处理组达到最大值,并显著高于其余处理;FLA 含量在 4 个处理浓度之间无显著差异;BaA、BaP 含量分别在高、中浓度下达到最大值,且 BaP 显著高于其他处理组;茎中 PAHs 总含量表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照,且中浓度处理显著高于其余处理(表 2)。4 个处理组累加后,单体 NAP、PHE、FLA、BaA、BaP 的总含量分别占 PAHs 总含量的 9.55%、34.07%、29.58%、16.18% 和 10.61%,PHE 占比最大,NAP 占比最小。

再次,经不同浓度混合液处理后,黄瓜叶片中 3 种单体 PAHs 和总 PAHs 含量在各处理组间均差

异显著(表 2)。其中,NAP、PHE、BaA 含量随着处理浓度增加均表现为先升高后降低,分别在低浓度、中浓度、中浓度组显著最高;BaP 含量则先降低后升高,在高浓度组最大;FLA 含量整体呈降低趋势,在对照组显著较高;叶片中 PAHs 总量表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照。4 个处理组累加后,单体 NAP、PHE、FLA、BaA、BaP 的检出总量分别占 PAHs 总量的 10.82%、30.48%、19.74%、24.66%、14.35%,PHE 占比最大,NAP 占比最小。

另外,PAHs 混合液处理后,随着处理浓度增加,黄瓜叶柄中的 NAP 含量逐渐升高;PHE、BaP 含量表现为先升高后降低,并分别在中浓度和低浓度组达到最大值;FLA 和 BaA 含量先降低再升高,分别在对照和中浓度组达到最大;叶柄中 5 种 PAHs 的总含量仍表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照。4 个处理组累加后,单体 NAP、PHE、FLA、BaA 和 BaP 的检出总量分别占 PAHs 总含量的 9.20%、31.52%、22.72%、16.88% 和 19.68%,PHE 占比最大,NAP 占比最小。

2.1.2 果皮、果肉、果瓢 PAHs 含量 表 3 显示,不同浓度 PAHs 混合液处理后,黄瓜果皮中 NAP 含量

表 2 不同浓度下黄瓜根茎叶中多环芳烃的含量变化

Table 2 Concentrations of individual and total PAHs in root, stem and leaf of *Cucumis sativus* L.

部位 Position	PAHs 处理浓度 PAHs concentration ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	多环芳烃含量 PAHs content/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					多环芳烃总量 Total PAHs
		NAP	PHE	FLA	BaA	BaP	
根 Root	0	13.20 \pm 2.37a	2.82 \pm 1.48c	14.56 \pm 2.34b	14.33 \pm 0.91b	12.32 \pm 0.78b	57.23 \pm 5.36c
	300	10.95 \pm 0.60a	23.27 \pm 2.00b	24.36 \pm 2.43b	19.15 \pm 0.70a	12.04 \pm 1.93b	89.77 \pm 5.42b
	600	12.54 \pm 0.55a	33.04 \pm 14.34a	19.77 \pm 9.82b	15.42 \pm 0.95b	22.01 \pm 2.85a	102.78 \pm 6.28a
	900	3.83 \pm 0.90b	28.84 \pm 2.54a	35.37 \pm 4.57a	13.82 \pm 1.31b	11.86 \pm 1.31b	93.72 \pm 7.43ab
茎 Stem	0	9.06 \pm 1.50c	22.26 \pm 1.97c	46.79 \pm 4.14a	26.46 \pm 3.70ab	18.16 \pm 4.05b	122.73 \pm 1.29c
	300	12.35 \pm 1.59c	23.20 \pm 3.38c	51.03 \pm 2.26a	27.75 \pm 5.97ab	10.23 \pm 0.96c	124.55 \pm 6.79c
	600	24.92 \pm 3.00a	108.40 \pm 5.37a	51.08 \pm 3.87a	21.81 \pm 0.84b	24.98 \pm 0.56a	231.19 \pm 8.22a
	900	18.00 \pm 3.99b	75.56 \pm 4.04b	50.30 \pm 2.47a	32.94 \pm 1.84a	18.05 \pm 1.97b	194.85 \pm 5.07b
叶片 Leaf	0	19.05 \pm 3.18b	9.17 \pm 2.66d	51.64 \pm 0.60a	24.53 \pm 4.03d	25.19 \pm 2.27bc	129.53 \pm 3.99d
	300	28.74 \pm 1.25a	26.60 \pm 4.78c	23.50 \pm 2.61c	46.79 \pm 3.16b	20.90 \pm 2.00c	146.53 \pm 7.65c
	600	18.21 \pm 1.46b	103.37 \pm 3.52a	36.37 \pm 1.03b	71.70 \pm 3.67a	26.40 \pm 2.08b	256.07 \pm 3.00a
	900	13.67 \pm 1.98c	85.04 \pm 4.74b	33.86 \pm 1.39b	38.64 \pm 1.43c	33.22 \pm 1.96a	204.43 \pm 6.85b
叶柄 Petioles	0	3.64 \pm 0.93b	6.05 \pm 1.25c	22.17 \pm 3.23a	12.23 \pm 2.05b	4.33 \pm 1.27c	48.42 \pm 0.59c
	300	4.30 \pm 1.91b	19.13 \pm 2.07b	11.88 \pm 1.58c	6.69 \pm 0.97c	22.43 \pm 1.97a	64.43 \pm 3.74b
	600	7.18 \pm 1.15a	32.33 \pm 3.09a	6.65 \pm 2.72d	16.53 \pm 1.49a	11.65 \pm 1.00b	74.34 \pm 5.33a
	900	8.28 \pm 1.95a	22.49 \pm 2.56b	17.08 \pm 1.59b	7.49 \pm 0.66c	11.65 \pm 0.89b	66.98 \pm 4.78ab

注:同列相同部位不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著;下同

Note: The different normal letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below

在4个处理组之间无显著差异;PHE含量表现为中浓度处理组显著高于其他处理组;FLA、BaA含量随着处理浓度增加表现为先升高后降低,并均在中浓度处理组最高;BaP含量则表现为持续升高;果皮中5种PAHs的总含量表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照,且前两者显著高于后两者(表3)。4个处理组单体NAP、PHE、FLA、BaA和BaP的检出总量分别占PAHs总含量的11.18%、25.25%、29.81%、19.07%和14.69%,FLA占比最大,NAP占比最小。

同时,黄瓜果肉中NAP、FLA含量均在对照组最高,不同浓度处理后都有所降低;中、高浓度处理组PHE含量显著高于对照和低浓度处理组;BaA含量随着处理浓度增加先升高后降低,在中浓度组最高且显著高于对照组;BaP含量以高浓度组最高,但在中浓度处理组未检测到;果肉中5种PAHs的总含量同样表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照,且前两者显著高于后两者。4个处理组单体NAP、PHE、FLA、BaA、BaP的检出总量分别占PAHs总含量的11.87%、35.75%、29.88%、13.46%和9.03%,PHE占比最大,BaP占比最小。

另外,黄瓜果瓢中单体NAP、BaA含量在处理组间无显著差异(表3)。PHE含量随着处理浓度的增加逐渐升高;FLA含量在中浓度处理下最高,并显著高于其余处理;BaP含量在低浓度组最高,并显著高于中浓度组和对照;果瓢中5种PAHs的总

含量表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照,且前两者显著高于后两者。将4个处理组相累加,单体NAP、PHE、FLA、BaA和BaP的检出总量分别占PAHs总含量的5.92%、33.59%、18.64%、11.18%和12.23%,PHE占比最大,NAP占比最小。

此外,同一处理浓度水平下,总PAHs含量在黄瓜7个部位的分布特征对比(图2)显示,4个处理组均是叶片含量最高,低、中、高浓度处理组叶片都显著高于其他部位,4个处理组果肉与果瓢含量差异均未达到显著水平;对照组中叶片总PAHs含量与茎含量接近,中浓度处理组茎总PAHs含量与果皮的含量接近。4个处理组黄瓜总PAHs含量在7个部位分布规律表现相同,即叶片>茎>果皮>根>叶柄>果肉>果瓢。

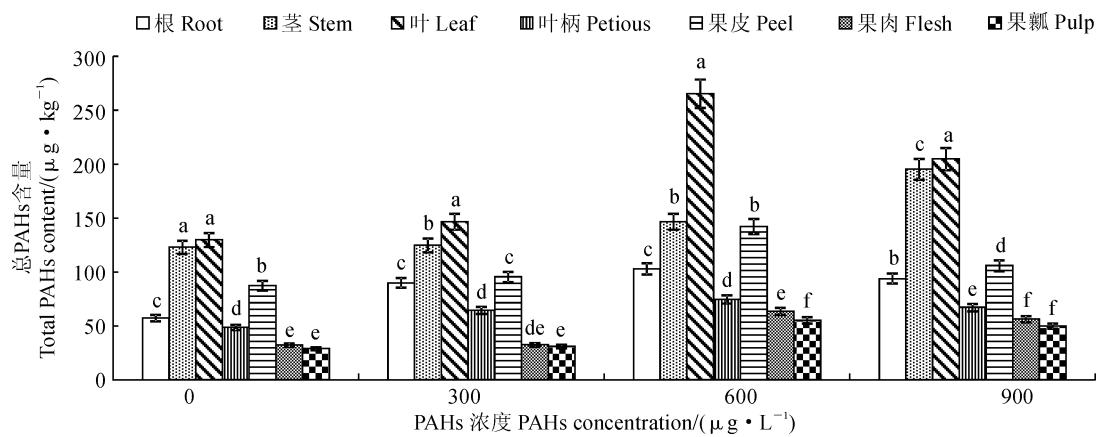
2.2 外源PAHs处理对黄瓜生长指标的影响

植株的生长指标包括外部形态和生物量等,其变化直接反映出对某种物质胁迫的响应情况。不同浓度外源PAHs处理下黄瓜重要生长指标的变化情况(表4)显示,低浓度处理对生长指标有一定的促进作用,其株高、根长、叶长、果实横茎分别比对照升高了7.54%、5.61%、7.31%和3.83%,但未达到显著水平,其茎粗、叶宽、果实纵径和单果重分别比对照显著升高了12.33%、9.78%、7.36%和9.80%($P<0.05$);中浓度处理和高浓度处理对黄瓜植株生长造成了不同程度的抑制,其中以中浓度处理的

表3 不同浓度下黄瓜果皮、果肉各果瓢中多环芳烃的含量变化

Table 3 Concentrations of individual and total PAHs in petiole, pulp and flesh of *C. sativus* L.

部位 Position	PAHs处理浓度 PAHs concentration ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	多环芳烃含量 PAHs content($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
		NAP	PHE	FLA	BaA	BaP	PAHs 总量 Total PAHs
果皮 Petiole	0	12.87 \pm 3.07a	21.11 \pm 4.50bc	27.41 \pm 2.32b	13.28 \pm 1.64c	12.40 \pm 1.64c	87.07 \pm 6.46c
	300	11.37 \pm 1.41a	15.19 \pm 3.07c	29.52 \pm 0.46b	23.81 \pm 2.65a	15.38 \pm 1.94bc	95.28 \pm 3.73c
	600	11.44 \pm 3.04a	47.42 \pm 3.76a	40.08 \pm 2.18a	26.33 \pm 2.07a	16.78 \pm 1.28ab	142.05 \pm 1.89a
	900	12.38 \pm 1.02a	24.82 \pm 3.75b	31.15 \pm 1.01b	18.58 \pm 1.88b	18.61 \pm 0.31a	105.53 \pm 4.41b
果肉 Pulp	0	7.62 \pm 2.15a	3.51 \pm 0.46b	14.92 \pm 1.17a	3.25 \pm 0.50c	2.84 \pm 0.19b	32.14 \pm 2.16b
	300	4.96 \pm 0.58b	3.31 \pm 0.23b	13.62 \pm 0.96ab	4.30 \pm 1.25bc	6.21 \pm 1.43a	32.39 \pm 3.43b
	600	5.42 \pm 1.21ab	33.01 \pm 2.06a	14.84 \pm 0.66a	10.11 \pm 2.38a	0.00c	63.38 \pm 3.80a
	900	3.85 \pm 0.51b	25.97 \pm 0.93a	11.62 \pm 1.75b	7.12 \pm 1.5ab	7.56 \pm 2.68a	56.13 \pm 4.45a
果瓢 Flesh	0	2.80 \pm 1.65a	4.24 \pm 2.42c	10.41 \pm 0.09b	6.40 \pm 0.88a	4.73 \pm 0.12b	28.58 \pm 0.45c
	300	1.53 \pm 0.26a	10.58 \pm 0.30b	5.48 \pm 1.20c	5.22 \pm 0.88a	7.99 \pm 0.22a	30.80 \pm 0.88c
	600	2.94 \pm 0.79a	31.03 \pm 0.79a	14.00 \pm 1.41a	4.82 \pm 0.61a	2.34 \pm 0.93c	55.10 \pm 1.47a
	900	2.45 \pm 0.45a	32.29 \pm 1.86a	5.52 \pm 1.02c	3.00 \pm 0.76a	6.46 \pm 1.28a	49.72 \pm 4.05b



同一浓度水平不同小写字母表示部位间在 0.05 水平存在显著性差异。

图 2 总 PAHs 含量在黄瓜 7 个部位的分布特征

The different normal letters in the same concentration level mean significant difference at 0.05 level

Fig. 2 The distribution characteristics of total PAHs content in seven parts of cucumber

表 4 不同浓度外源多环芳烃处理下黄瓜的生长情况

Table 4 The growth indicators of *C. sativus* L. plants under different concentrations of exogenous PAHs

生长指标 Growth indicator	PAHs 浓度 PAHs concentration/(μg·L⁻¹)			
	0	300	600	900
株高 Plant height/m	1.99±0.18ab	2.14±0.13a	1.84±0.12b	1.90±0.15ab
茎粗 Stem thick/cm	0.73±0.06b	0.82±0.03a	0.61±0.05c	0.67±0.02bc
根长 Root length/cm	8.56±0.11a	9.04±0.12a	7.86±0.97a	8.04±0.75a
叶长 Leaf length/cm	14.64±0.56ab	15.71±0.67a	13.01±0.14c	13.95±1.10bc
叶宽 Leaf width/cm	17.69±0.88b	19.42±0.78a	16.00±0.23c	16.90±0.71bc
果实纵茎 Fruit longitudinal diameter/cm	28.94±0.81b	31.07±0.35a	26.92±0.35c	27.67±0.31c
果实横茎 Fruit cross diameter/cm	3.66±0.11ab	3.80±0.65a	3.23±0.11c	3.51±0.10b
单果重 Single fruit weight/g	305.87±13.25b	333.95±4.24a	285.75±4.45c	295.85±6.02bc

注:同行相同部位内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著;下同

Note: The different normal letters in the same row mean significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below

抑制作用更明显,此时株高、根长、叶长、果实横径、茎粗、叶宽、果实纵径、单果重分别比对照显著降低了 7.54%、16.44%、8.18%、11.13%、9.55%、6.98%、11.75% 和 6.58%;高浓度处理对黄瓜生长的抑制程度较轻,其中叶长、果实纵径、果实横径分别比对照显著降低了 4.71%、4.39% 和 4.10%,其他几个指标与对照差异不显著。以上结果说明 PAHs 胁迫对黄瓜生长的影响存在阈值,当外源 PAHs 处理浓度 $\leq 300 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 可促进各项生长指标的增加,当 $\geq 600 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时则抑制其生长。

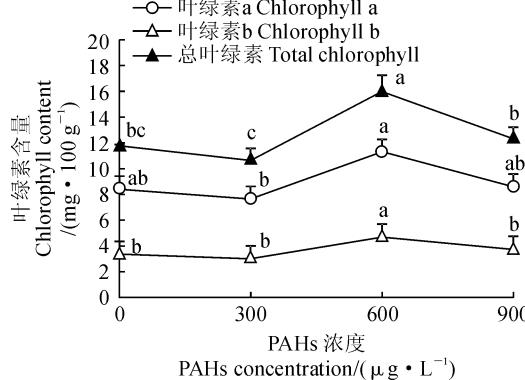
2.3 外源 PAHs 处理对黄瓜叶片叶绿素含量和抗氧化酶活性的影响

叶绿素 a 和叶绿素 b 分别是高等植物光合作用的主要色素和辅助色素,其含量在一定程度上体现了光合作用的大小^[15]。黄瓜叶片叶绿素 a、b 和总

叶绿素含量随着 PAHs 处理浓度的变化趋势相同,且低浓度处理组低于对照,中、高浓度高于对照(图 3)。其中,叶绿素 a、b 和总叶绿素含量在低浓度处理组比对照组分别降低了 9.61%、10.45 和 9.85%,在中浓度处理组分别升高了 33.81%、40.60% 和 35.74%,在高浓度处理组分别升高了 1.78%、11.35% 和 4.58%。说明外源 PAHs 影响叶绿素的阈值为 $600 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,超过此浓度可促进叶绿素的产生。

SOD 是植物活性氧代谢的关键酶,它能催化体内分子氧活化的第一个中间产物超氧化物分离自由基 O_2^- 而形成氧分子和 H_2O_2 ^[16],SOD 在各种酶促活性氧清除系统中处于第一道防线^[17]。POD 存在于细胞溶质中,它的作用是将 H_2O_2 直接分解为水和氧予以清除^[18]。CAT 在细胞内主要存在于过氧

化物体中,通过酶促降解,作用也是将 H_2O_2 直接分解为水和氧予以清除^[18]。图 4 显示,黄瓜叶片的 SOD 活性随着 PAHs 胁迫浓度增加而逐渐降低,低、中、高浓度处理组分别比对照下降了 11.90%、28.60% 和 38.10%,中、高浓度处理组降幅达到显著水平;说明黄瓜叶片 SOD 活性对中、高浓度 PAHs 胁迫有敏感的响应,SOD 清除氧的能力在 PAHs 胁迫下有明显下降。同时,黄瓜叶片 POD 活性在中浓度处理组达到最高值,比对照升高了 60.00%,在低、高浓度处理组分别比对照降低了 20.00% 和 60.00%,各处理组之间均差异显著;中浓度处理的 POD 活性比低浓度处理提高了 1 倍,说明 PAHs 处理浓度由 $300 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $600 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,黄瓜叶片的 POD 活性对 PAHs 胁迫有敏感的响应,且清除 H_2O_2 的能力有明显提高。另外,黄瓜



同一指标内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著;下同
图 3 不同浓度 PAHs 处理下黄瓜叶片叶绿素含量的变化
The different normal letters in the same index mean significant difference at 0.05 level, the same as below

Fig. 3 The chlorophyll contents in cucumber leaf stressed by PAHs with different concentrations

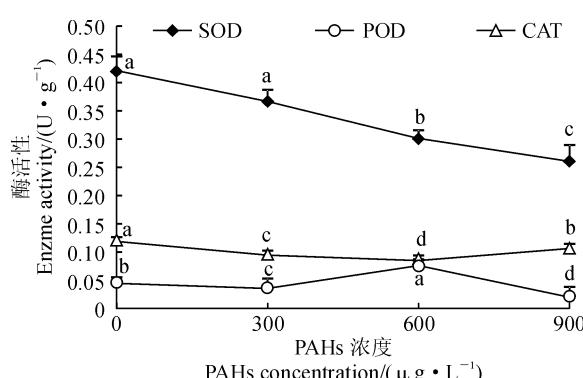


图 4 不同浓度 PAHs 处理下黄瓜叶片抗氧化酶活性的变化

Fig. 4 The enzyme activities in cucumber leaf under different concentrations of PAHs

叶片 CAT 活性随着 PAHs 处理浓度的增加呈先降低后升高趋势;其 CAT 活性在低、中、高浓度 PAHs 处理下分别比对照降低了 25.00%、33.33% 和 16.67%,且以中浓度胁迫组的降幅最大;各处理组 CAT 活性之间差异均达到显著水平,说明 CAT 活性对 PAHs 胁迫较为敏感,明显受到抑制。

MDA 是生物膜系统膜脂过氧化的产物之一,其在植物体内的含量可反映机体内脂质过氧化的程度并间接反映出细胞的受损程度,植物在受到外界因素胁迫时,膜受损程度会增大,MDA 含量会随之增加^[19]。图 5 显示,随着 PAHs 胁迫浓度的增加,黄瓜叶片 MDA 含量不断增加,低、中、高浓度处理组 MDA 含量分别比对照增加了 40.45%、73.03% 和 56.18%,且均达到显著水平。说明黄瓜叶片在各浓度 PAHs 处理组均受到显著的氧化胁迫,细胞膜受到明显损伤。

2.4 外源 PAHs 处理对黄瓜果实营养品质的影响

维生素 C 又称抗坏血酸,是高等动物和少数生物必需的营养物质,对抗氧化胁迫的病症具有良好的防护作用,在动物和植物体内都有重要的生理功能^[20]。从图 6 可以看出,黄瓜果实维生素 C 含量在低浓度处理下比对照增加了 8.06%,在中、高浓度处理下分别比对照降低了 17.46%、1.85%,但各处理变化均未达到显著水平。即低浓度 PAHs 对黄瓜果实维生素 C 含量有一定的促进作用,中高浓度有抑制作用。

可溶性蛋白具有较强的亲水胶体性质,植物通过它的主动积累来降低渗透势,影响着细胞的保水力^[21]。可溶性糖是植物体内重要的渗透调节物质之一,其可以稳定植物细胞内的渗透压并保护酶构型,当植物收到逆境的干扰时,植物体内的可溶性糖含量会发生很大的变化^[22]。图 6 显示,黄瓜果

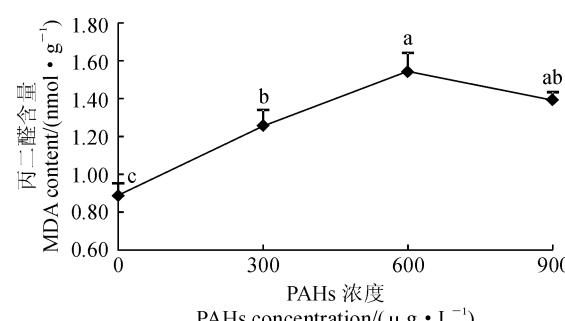
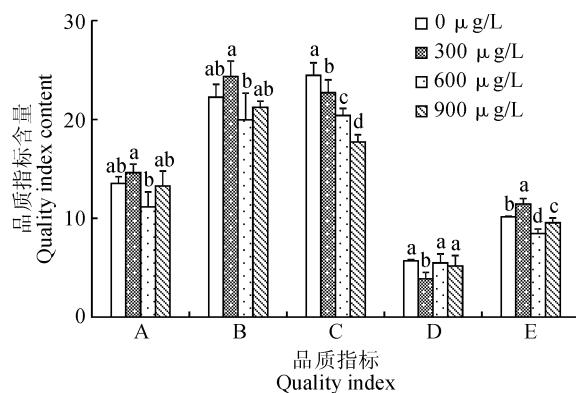


图 5 不同浓度 PAHs 处理下黄瓜叶丙二醛含量的变化

Fig. 5 The MDA content in cucumber leaf under different concentrations of PAHs



A. 维生素 C; B. 可溶性蛋白; C. 可溶性糖; D. 可溶性固形物;
E. 可滴定酸

图 6 不同浓度 PAHs 处理对黄瓜果实品质的影响
A. Vitamin C (mg/100 g); B. Soluble protein (mg/100 g);
C. Soluble sugar (mg/g); D. Soluble solids (%);
E. Titrate acid (mg/10 g)

Fig. 6 The quality change of cucumber fruit under different concentrations of PAHs

实中可溶性蛋白含量在低浓度处理组最高,比对照增加了 9.43%,在中浓度处理组与对照差异显著,比对照降低了 10.24%,在高浓度处理组略低于对照,比其降低了 4.88%。但各浓度处理与对照差异均不显著。同时,黄瓜果实可溶性糖含量随着 PAHs 胁迫浓度的增加不断降低,各处理分别比对照显著下降了 7.19%、16.48% 和 27.63%,说明可溶性糖对 PAHs 胁迫较为敏感。

为满足消费者对水果品质日益提高的需求,可溶性固形物成为传统水果分选基础上新的分选分级指标^[23],可滴定酸含量的高低是衡量也果实采后风味、物质保留程度的重要指标之一^[24]。从图 6 可以看出,低、中、高浓度处理组黄瓜果实可溶性固形物含量分别比对照下降了 31.87%、3.70% 和 8.98%,但仅低浓度处理降幅达到显著水平;同时,黄瓜果实可滴定酸含量在低浓度处理组比对照显著增加了 12.71%,在中、高浓度处理分别比对照显著下降了 16.73% 和 5.99%。说明黄瓜果实中的可溶性固形物积累在低浓度 PAHs 胁迫下受到显著抑制,其可滴定酸含量受到低浓度 PAHs 处理显著促进,中、高浓度处理显著抑制。

3 讨 论

3.1 PAHs 在黄瓜不同部位的积累分布特征

外源 PAHs 处理浓度会直接影响植物体内 PAHs 的积累量。谢峰等^[25]通过系列浓度盆栽试验发现,秋茄叶片和根系内 PHE、Pyr 含量均随着

沙培土壤 PAHs 处理浓度的增加而增加,高值出现在 20 mg·dm⁻³,而在高浓度处理组则有所降低;Gao 等^[26]通过水培研究发现,污染物菲和芘处理浓度在 $\leq 74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 范围内,增强了植物对菲和芘的吸收,但是当浓度 $\geq 148 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,植物对这两种污染物的吸收作用显著被限制;本研究中黄瓜植株体内 PAHs 含量随着处理浓度增加而增加,于中浓度处理下达到最高,而高浓度处理组则有所降低,与上述研究结果相同,可能是 PAHs 急性毒害以及刺激引起黄瓜各部位应激代谢增加共同导致。同时,在本研究黄瓜根、茎、叶柄、果瓢、果肉中都是菲的含量占比最大,林道辉^[27]检测 8 个茶叶品种中的 PAHs 含量,也得出菲的浓度占比最高,因为菲的水溶解度相对高,叶片涂施过程中滴入或沉降至土壤中的 PHE 也可以随植物根部吸收进入植物体。另外,本研究检测的 7 个部位中有 5 个部位都是萘的占比最小,原因是萘分子量最小、容易挥发或代谢。随着处理浓度的增加,单体 PAHs 在黄瓜各部位积累规律不同,因为植物吸收积累 PAHs 是一个复杂的过程,受植物生物学特征、PAHs 理化性质和环境条件等多种因素的影响。

Hulster 等^[28]认为黄瓜主要通过地上部分从空气中吸收有机污染物,郭雪^[29]研究中莴苣不同部位 PAHs 含量表现为叶片 > 茎 > 根,秦宁等^[30]研究 PAHs 在 3 种挺水植物中的分布时发现,同种植物叶片含量最高、茎中次之、根中最低,本研究结果与之相同。因为植物叶片含有丰富的有机物质,具较大的表面积,可通过气孔或角质层吸附大气中的 PAHs,且黄瓜叶片和茎表面粗糙、披绒毛更易捕获 PAHs。戴仕林等^[31]用低、高浓度菲和芘处理沉积物,探讨黑三棱对 PAHs 的吸收分布,得出根中 PAHs 积累量最高,高浓度处理下块茎含量大于叶片,低浓度处理下叶片含量高于块茎,与本实验结果存在差异。黄瓜营养器官中叶柄 PAHs 含量最低,叶柄具支持输导功能,可能叶片中大量 PAHs 通过叶柄又传输至植株其他部位,叶柄本身富集能力有限,关于植物叶柄中 PAHs 的含量水平还未见报道。Wang 等^[32]分析了洋葱、甜菜、西红柿及其生长土壤中 PAHs 含量,发现 PAHs 主要存在于蔬菜果皮中,与本研究结果一致,这与果皮暴露程度、果实脂肪含量及 PAHs 的亲脂性相关。由于瓜类蔬菜特殊的果实结构,本试验将果瓢分离出来作为一个部位进行研究,果瓢中 PAHs 含量最低,因为黄瓜为单性结实未经过受精过程,果瓢中几乎都是没有

胚和胚乳的空壳种子,且从坐果到果瓢采集经历的时间较短。张会敏等^[33]研究表明露地栽培条件下16种PAHs在黄瓜7个部位的分布特征为:叶片>茎>果皮>根>叶柄>果肉>果瓢,与本研究大棚栽培条件下5种PAHs在黄瓜体内的分布特规律相同,栽培环境条件改变、检测PAHs种类不同只影响到植株吸收PAHs的量,在同种蔬菜体内的分配并未受到影晌,与植物和PAHs之间的相互作用方式有关。

3.2 不同浓度PAHs胁迫下黄瓜生长指标的变化特征

Maliszewska-Kordybach等^[34]报道,芴、蒽、芘和屈4种PAHs在低浓度时能促进小麦、玉米及燕麦的生长,在高浓度时则抑制生长;洪有为等^[35]研究表明,低浓度Phe处理促进了秋茄根系和地上部分生长量的增加,高浓度处理则不利于植株生长。本研究中低浓度PAHs处理促进黄瓜生长,中浓度处理组吸收PAHs量最多,对黄瓜生长产生显著抑制。植物对外来物质的胁迫有耐受阈值,在一定阈值内,可能植物生长受到的抑制影响不明显,低浓度PAHs对植物生长的促进作用,陈世军等^[36]推测可能是由于PAHs具有与植物生长素等激素相似的环状结构,结构相似性使其具有与生长素类似的功能,从而刺激植物生长。

3.3 不同浓度PAHs胁迫下黄瓜生理特性的变化特征

据报道,拟南芥叶片叶绿素含量随着荧蒽胁迫浓度的升高而降低^[37],萘和菲对秋茄幼苗叶片叶绿素含量有促进效应^[15],而本研究结果表现为低浓度PAHs抑制黄瓜叶片叶绿素产生,中、高浓度PAHs则具有促进作用。推测活性氧积累导致黄瓜叶绿素分解是其降低原因,促进作用有可能是植物受PAHs伤害而发生的异常现象。另外,本研究中PAHs胁迫使黄瓜叶片SOD和CTA活性降低,它们为清除H₂O₂而产生积极的响应,但当胁迫程度超过它们的清除能力时,活性氧自由基的产生和清除这个动态平衡就会被破坏,活性氧自由基含量就会过量累积,可能启动并加速膜脂过氧化链式反应

或膜脂脱脂作用,这时它们的酶活性就呈下降趋势^[38]。这样,随着PAHs积累量的增加MDA含量随之增加,因为逆境胁迫导致植物体内产生过量活性氧,MDA作为活性氧氧化脂膜的产物,其含量也增加。

3.4 不同浓度PAHs胁迫下黄瓜果实营养品质的变化特征

本研究中低浓度PAHs处理促进了黄瓜果实维生素C、可溶性蛋白、可滴定酸的积累,而中、高浓度PAHs处理下则降低这些营养物质的含量,这与PAHs对黄瓜生长的影响结果相吻合,也与梁勇生^[39]研究PAHs对菜心可溶性蛋白含量影响的结果一致。同时,本研究中PAHs胁迫对黄瓜果实可溶性糖和可溶性固形物含量表现为抑制作用,又说明PAHs影响了黄瓜的口感和贮藏性能,但其间具体的响应因子与调控机制需要更进一步的研究。

4 结 论

本研究在黄瓜植株第一朵雌花开放时,用萘、菲、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘配置的混合溶液均匀涂抹叶片上表皮和下表皮,混合液浓度分别为0 μg·L⁻¹(对照)、300 μg·L⁻¹(低浓度)、600 μg·L⁻¹(中浓度)、900 μg·L⁻¹(高浓度),结果表明黄瓜体内5种多环芳香烃(PAHs)单体和总积累量呈现出特定的分布规律,营养器官中以叶片含量最高、叶柄含量最低,果实中果皮含量最高、果瓢含量最低,即直接暴露于大气环境的部位更容易吸收、积累PAHs;在不同浓度处理组,黄瓜每个部位中5种PAHs的总含量均表现为中浓度>高浓度>低浓度>对照;PAHs作为典型有机污染物,给黄瓜生长发育带来伤害的同时也起到了一定的正向促进生长作用,无论是叶片对PAHs的吸收还是PAHs对黄瓜生长、生理、品质特性的促进、抑制作用都是有一定阈值,该阈值受PAHs种类、生理学特性等多种因素共同影响。通过该研究结果可知生活中将黄瓜削皮食用更科学安全,黄瓜叶片可起到净化大气颗粒物(PM2.5)中PAHs的作用,寻找防治PAHs对黄瓜污染的措施也可从减少叶片暴露方面入手。

参考文献:

[1] 聂麦茜,张志杰.环境中多环芳烃污染规律及其生物净化技

术[J].环境导报,2001,(1):18-21.

NIE M X, ZHANG Z J. The pollution patterns of polycyclic

- aromatic hydrocarbons and the progress of biotechnology for purification of them[J]. *Environment Herald*, 2001, (1): 18-21.
- [2] BUEHLER S S, HITES R A. Peer reviewed: the great lakes/integrated atmospheric deposition network[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(17): 354A-359A.
- [3] 王雅琴,左谦,焦杏春,等.北京大学及周边地区非取暖期植物叶片中的多环芳烃[J].环境科学,2004, **25**(4): 23-27. WANG Y Q, ZUO Q, JIAO X C, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in plant leaves from peking university campus and nearby in summer season[J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(4): 23-27.
- [4] GUILLEN M D, SOPELANA P, PARTEARROYO M A. Food as a source of polycyclic aromatic carcinogens[J]. *Reviews on Environmental Health*, 1997, **12**(3): 133-146.
- [5] 单德鑫,刘霄,甘露,等.山东省东营市农田土壤PAHs污染特征及风险评估[J].东北农业大学学报,2019,(1): 77-87. SHAN D X, LIU X, GAN L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Dongying City, Shandong Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, (1): 77-87.
- [6] ZUO Q, LIN H, ZHANG X L, et al. A two-compartment exposure device for foliar uptake study[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(1): 126-128.
- [7] 刘永波,薛瑞芳,崔磊.超声波提取-气相色谱-质谱联用法测定城市污水处理厂脱水污泥中16种多环芳烃[J].化学分析计量,2015, **24**(6): 77-80. LIU Y B, XUE R F, CUI L. Determination of 16 PAHs in dewatering sludge from sewage treatment plants by ultrasonic extraction-GCMS [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2015, **24**(6): 77-80.
- [8] 刘庆学,王磊,安彩秀,等.硫酸净化法测定土壤中的六六六、滴滴涕及多环芳烃[J].分析试验室,2009,(s2): 116-121. LIU Q X, WANG L, AN C X, et al. Determination of BHC, DDT and PAHs in soil by sulfuric acid purification[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2009,(s2): 116-121.
- [9] 龙明华,龙彪,唐璇,等.南宁市不同区域五种蔬菜的多环芳烃含量分析[J].北方园艺,2018,(5): 7-14. LONG M H, LONG B, TANG X, et al. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in five vegetables in different regions of nanning[J]. *Northern Horticulture*, 2018, (5): 7-14.
- [10] 龙彪.南宁市菜地土壤及蔬菜中多环芳烃的含量及来源分析[D].南宁:广西大学,2017.
- [11] 张志良,翟伟菁,李小芳.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [12] 路文静,李奕松.植物生理学实验教程[M].北京:中国林业出版社,2012.
- [13] 刘新.植物生理学实验教程[M].北京:中国农业出版社,2015.
- [14] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [15] 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.
- [16] 夏铁骑.自由基、活性氧、SOD及植物衰老机理研究的现状与进展[J].濮阳职业技术学院学报,2005, **18**(2): 23-24. XIA T Q. The status and progress on free radical, reactive oxygen species, SOD and plant senescence research[J]. *Puyang Vocational and Technical College*, 2005, **18**(2): 23-24.
- [17] 骆爱玲,刘家尧,马德钦,等.转甜菜碱醛脱氢酶基因烟草叶片中抗氧化酶活性增高[J].科学通报,2000, **45**(18): 1 953-1 956. LUO A L, LIU J Y, MA D Q, et al. Increased antioxidant enzyme activity of being changed to beet BADH geneon tobacco leaf[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(18): 1 953-1 956.
- [18] 耿德贵,韩燕,王义琴,等.杜氏盐藻的耐盐机制研究进展和基因工程研究的展望[J].植物学报,2002, **19**(3): 290-295. GENG D G, HAN Y, WANG Y Q et al. Progress in studies on salt resistant mechanism and prospects of gene engineering of *Dunaliella salina*[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002, **19**(3): 290-295.
- [19] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, **108**(1): 7-14.
- [20] 孟纯阳,魏小春,姚秋菊,等.辣椒维生素C生物合成及代谢研究进展[J].基因组学与应用生物学,2018, **37**(8): 2 558-2 565. MENG C Y, WEI X C, YAO Q J, et al. The research progress on biosynthesis and metabolism of vitamin C in pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2018, **37**(8): 2 558-2 565.
- [21] 汪月霞,索标,赵会杰,等. Na_2CO_3 胁迫对芦荟幼苗叶片绿体保护酶和渗透调节物质的影响[J].西北植物学报,2010, **30**(11): 2 184-2 190. WANG Y X, SUO B, ZHAO H J, et al. Antioxidant enzyme activities in chloroplasts and osmotica contents in leaves of *aloe nobilis* seedlings under Na_2CO_3 stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, **30**(11): 2 184-2 190.
- [22] DING X M, YANG Y F. Variations of water-soluble carbohydrate contents in different age class modules of *Leymus*

- chinensis populations in sandy and saline-alkaline soil on the songnen plains of China[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, **49**(5): 6.
- [23] 马奎荣. 水果可溶性固形物在线检测通用模型建立与升级方法研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2018.
- [24] 侯 茜. 鲜切黄瓜品质影响因素的研究[D]. 河北邯郸:河北工程大学, 2016.
- [25] 谢 峰, 严重玲, 卢豪良, 等. 菲与芘在砂基培养的红树植物秋茄中的分布与可视化定位[J]. 应用海洋学报, 2012, **31**(4): 489-494.
- XIE F, YAN Z L, LU H L, et al. Phe and Bap in the mangrove culture of *Kandelia obovata* distribution and visual positioning[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2012, **31**(4): 489-494.
- [26] GAO Y, LING W, WONG M H. Plant-accelerated dissipation of phenanthrene and pyrene from water in the presence of a nonionic-surfactant[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(9): 1 560-1 567.
- [27] 林道辉. 茶叶中多环芳烃的浓度水平、源解析及风险[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [28] HULSTER A, MULLER J F. Soil-plant transfer of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofuran-ns to vegetables of the cucumber family (*cucurbitaceae*)[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, **28**: 1 110-3 057.
- [29] 郭 雪. 上海市郊区土壤—蔬菜系统中多环芳烃污染效应研究[D]. 上海:华东师范大学, 2015.
- [30] 秦 宁, 朱 樱, 吴文婧, 等. 多环芳烃在小白洋淀挺水植物中的分布、组成及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 49-56.
- QIN N, ZHU Y, WU W Q, et al. The distributions, composition and their determining factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in emergent macrophytes in Small Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(1): 49-56.
- [31] 戴仕林, 王新胜, 吴啟南. 水生药用植物黑三棱对多环芳烃的吸收、分布和代谢研究[J]. 中国民族民间医药, 2017, **26**(23): 21-25.
- DAI S L, WANG X S, WU Q N. Absorption, distribution and metabolism of PAHs in aquatic medicinal plants *Sparganium stoloniferum* Buch.-Ham[J]. *Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy*, 2017, **26**(23): 21-25.
- [32] WANG D T, MERESZ O. Occurrence and potential uptake of polynuclear aromatic hydrocarbons of highway traffic origin by proximally grown food crops[C]. Sixth International Symposium on PAHs. Battelle Columbus Lab. Columbus, Ohio, 1981: 228-234.
- [33] 张会敏, 龙明华, 乔双雨, 等. 瓜类蔬菜体内多环芳烃的分布特征及健康风险评估[J]. 华南农业大学学报, 2019, **40**(2): 83-93.
- ZHANG H M, LONG M H, QIANG S Y, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in *cucurbitaceae* vegetables[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, **40**(2): 83-93.
- [34] MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMRECZAK B. Ecotoxicological activity of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) effect on plants[J]. *Environmental Technology Letters*, 2000, **21**(10): 12.
- [35] 洪有为, 袁东星. 秋茄幼苗对菲和荧蒽污染的生理生态效应[J]. 生态学报, 2008, **29**(1): 445-455.
- HONG Y W, YUAN D X. Eco-Physiological responses of *Kandelia candel* seedlings to Phenanthrene (PHE) and fluoranthene (FLA) treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **29**(1): 445-455.
- [36] 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.
- CHEN S J, ZHU X L, FENG X Z, et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on plants[J]. *Bulletin of Biology*, 2010, **45**(2): 9-11.
- [37] 叶媛蓓. 拟南芥对多环芳烃胁迫的生理响应[D]. 福州:福建农林大学, 2007.
- [38] 胡位荣, 张昭其, 季作樑, 等. 冷害对荔枝果皮膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2004, **25**(3): 6-9.
- HU W R, ZHANG Z Q, JI Z L, et al. Effect of chilling injury on membrane lipid peroxidation and activities of cell defense enzyme in litchi pericarp[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2004, **25**(3): 6-9.
- [39] 梁勇生. 菜心对多环芳烃吸收及胁迫响应机理的研究[D]. 南宁:广西大学, 2018.

(编辑:裴阿卫)