

doi:10.11937/bfyy.20172757

南宁市不同区域五种蔬菜的多环芳烃含量分析

龙明华¹, 龙彪¹, 唐璇¹, 李朋欣¹, 张会敏¹, 梁勇生^{1,2}

(1. 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2. 南宁市蔬菜研究所, 广西南宁 530000)

摘要:以南宁市4个传统的蔬菜基地中采集的不同季节、不同种类的辣椒、苦瓜、豆角、萝卜及菜心等5种蔬菜为试材,采用高效液相色谱法研究了不同区域5种蔬菜中EPA规定的16种优先控制的多环芳烃,以期为蔬菜安全生产监测与研究、多环芳烃风险评估以及环境污染治理等工作提供参考依据。结果表明:EPA规定的16种优先控制的多环芳烃在南宁市5种蔬菜中均有检出,5种蔬菜中 Σ PAHs的含量范围为 $(140.62 \pm 58.56) \sim (741.06 \pm 220.26) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$,其 Σ PAHs含量较国内外已有的研究数据高。4个区域蔬菜基地蔬菜中 Σ PAHs含量依次为那马镇>广西大学>五塘镇>双桥镇;不同季节蔬菜中 Σ PAHs含量有着明显的差异, Σ PAHs含量依次为2月(冬季)>11月(秋季)>5月(春季)>8月(夏季);不同种类蔬菜中 Σ PAHs含量差异明显, Σ PAHs含量依次为豆角>苦瓜>辣椒>菜心>萝卜,按照食用部位分类, Σ PAHs含量依次为果菜类>叶菜类>根菜类。

关键词:南宁市;蔬菜;多环芳烃;污染

中图分类号:S 601 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)05-0007-08

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类具有致癌、致畸和致突变作用的持久性有机污染物(POPs),广泛分布于大气、土壤、水体中。自然界的PAHs能够通过大气、水体的流动进行转移和扩散,被植物吸收和富集从而通过食物链进入人体,威胁人类的健康。同时,随着工业的发展,越来越多的PAHs进入环境中^[1-5]。蔬菜是人们生活中必不可少的食品,人体中绝大多数的维生素、膳食纤维等重要的营养主要通过食用蔬菜获取。除此之外,许多蔬菜还具有保健功能^[6],但是越来越多的研究发现,蔬菜能够从环境中吸收多环芳烃,从而对人类的健康产生威胁。

该试验对南宁市不同区域、不同季节及不同种类蔬菜中美国环保署(U. S. Environmental

Protection Agency, U. S. EPA)规定的萘(Nap)、蒽(An)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(An)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBA)、苯并[g,h,i]芘(BPE)和茚并[1,2,3-c,d]芘(IPY)等16种优先控制的多环芳烃进行监测,旨在为蔬菜安全生产监测与研究、多环芳烃风险评估以及环境污染治理等工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试辣椒(*Capsicum annuum* L.)、苦瓜(*Momordica charantia* L.)、豆角(*Vigna unguiculata*)、萝卜(*Raphanus sativus* L.)及菜心(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee)等5种蔬菜样品采自南宁市区及市郊的4个传统的蔬菜种植基地:西乡塘区广西大学农学院蔬菜基地、武鸣区双桥镇平福村、兴宁

第一作者简介:龙明华(1961-),男,博士,教授,研究方向为蔬菜营养品质与生理。E-mail:longmhua@163.com.

收稿日期:2017-10-30

区五塘镇沙坪村及良庆区那马镇新华村。

仪器设备及试剂:高效液相色谱仪(美国 Waters 2695,配 Waters 2998 紫外检测器),色谱柱(SUPELCOSILTM LC-PAH, 250 mm×4.6 mm, 5 μm, 美国色谱科公司),超声波清洗器(KQ5200DE, 昆山市超声仪器有限公司),旋转蒸发仪(RE-52A, 郑州亚荣仪器有限公司),高速冷冻离心机(3K15, 德国 SIGMA 公司),电子精密天平(TW3231, 日本岛津公司)。16 种多环芳烃混合标样, 2 000 μg·mL⁻¹(美国 Accu Standard 公司);乙腈, 色谱纯(FISHER 公司);二氯甲烷, 色谱纯(天津市大茂化学试剂厂);正己烷, 色谱纯(天津市大茂化学试剂厂);无水硫酸钠, 分析纯(天津博迪化工公司);弗罗里硅土 SPE 柱, 规格 1 000 mg(6 mL)(德国 Simon Aldrich 公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 蔬菜样品采集与处理

样品采集时间为 2015 年 2—11 月, 分别在 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季), 在选取的样地内按照“S”形采集蔬菜样品, 采集后立即运回实验室, 用蒸馏水洗去表面泥土, 切成小块后于 55℃ 鼓风干燥箱中烘干至恒质量, 同时测定其含水量, 用中药粉碎机粉碎, 过 60 目样品筛后保存于自封袋中, 挤出空气后于 4℃ 冰箱中避光保存。

1.2.2 多环芳烃的提取与测定

称取 2 g 样品于离心管, 加入 10 g 无水硫酸钠, 用 90 mL 二氯甲烷分 3 次萃取, 每次 30 mL,

超声时间 30 min, 5 000 r·min⁻¹ 离心后合并萃取液, 萃取液于旋转蒸发仪上蒸发至干, 用 30 mL 正己烷溶解, 待净化。磺化步骤: 按照提取液体积的 10% 加入 60% 浓硫酸, 震荡 5 min, 若出现乳化现象, 加入 2% 无水硫酸钠溶液 30 mL 破乳, 静置分层后弃去下层水相, 用超纯水洗涤有机层至中性, 将有机层通过无水硫酸钠柱后浓缩至 3 mL, 进行固相萃取净化。固相萃取净化步骤: 用 5 mL 正己烷活化弗罗里硅土小柱, 3 mL 样品上样, 用 12 mL 洗脱液(正己烷与二氯甲烷体积比为 2:8)洗脱, 收集液旋蒸至干, 加入 1.5 mL 乙腈充分溶解, 过 0.22 μm 有机滤膜后用 HPLC/UV 测定。

高效液相色谱仪色谱条件: 进样量 30 μL, 柱温 30℃, 检测波长 254 nm, 流动相为乙腈和水。为了使 16 种多环芳烃有效分离并尽量减少分析时间, 采用梯度洗脱、流速变化的方式(表 1), 采用外标法定量。图 1~3 分别为 16 种 PAHs 混合标准样品色谱图、空白基质色谱图、典型样品色谱图。

表 1 流动相梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution schedule of mobile phase

时间 Time/min	流速 Flow rate/(mL·min ⁻¹)	乙腈 Acetonitrile/%	水 Water/%
0	0.9	72	28
16	1.0	80	20
17	1.5	90	10
28	1.5	100	0
33	1.5	100	0

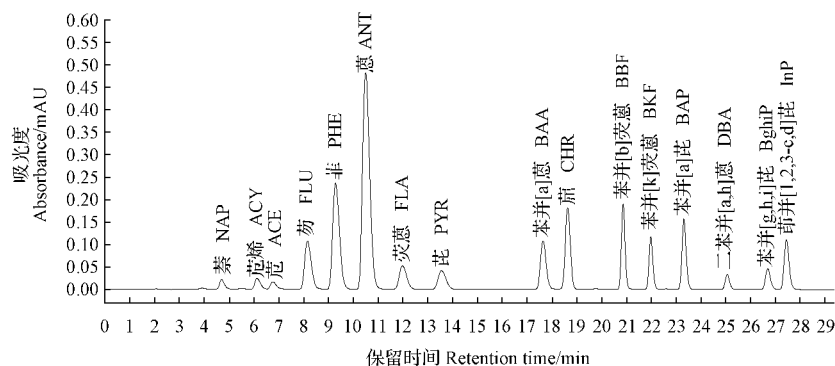


图 1 16 种多环芳烃混合标准样品色谱图

Fig. 1 Chromatogram of 16 PAHs mixed sample

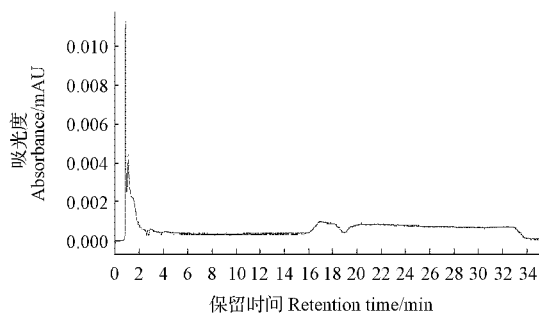


图 2 空白样品色谱图
Fig. 2 Chromatogram of blank sample

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据统计与处理。

2 结果与分析

2.1 方法验证结果

2.1.1 方法的线性范围、检出限及精密度

用多环芳烃混合标样分别配制 PAHs 浓度为 50、100、200、500、1 000、5 000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PAHs 标准溶液,采用自动进样器在相同条件下进样,以 PAHs 含量和峰面积绘制标准曲线,经过 EMPOWER 3.0 软件的数据处理程序得出 16 种多环芳烃的线性方程,各组分在 50~5 000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内线性关系良好;以信噪比 $S/N=3$ 计 16 种多环芳烃组分的检出限,检出限范围为 0.5~6.0 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;连续进样 6 次,用 PAHs 组分的峰

表 2 16 种多环芳烃的线性方程、相关系数、检出限及精密度
Table 2 Calibration curve,correlative coefficients,limits and precision of 16 kinds of PAHs

多环芳烃 PAHs	线性方程 Linear equation	相关系数 R^2	检出限 LOD /($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	相对标准偏差 RSD/%
萘(Nap)	$Y=1.05\text{e}+003X+1.14\text{e}+004$	0.999 97	2.0	0.18
蒽(An)	$Y=5.56\text{e}+001X+3.04\text{e}+002$	0.999 99	6.0	0.95
芘(Phe)	$Y=4.93\text{e}+001X+3.43\text{e}+002$	0.999 98	2.0	5.53
苊(Flu)	$Y=2.77\text{e}+002X+1.79\text{e}+003$	1.000 00	2.0	0.23
菲(Ph)	$Y=5.92\text{e}+002X+2.45\text{e}+003$	1.000 00	2.0	0.07
蒽(An)	$Y=1.29\text{e}+003X+1.77\text{e}+004$	0.999 94	0.5	0.27
荧蒽(Fla)	$Y=1.52\text{e}+002X+6.01\text{e}+002$	0.999 99	0.5	0.58
芘(Pyr)	$Y=1.28\text{e}+002X+6.67\text{e}+002$	0.999 99	1.0	0.23
苯并[a]蒽(BaA)	$Y=2.39\text{e}+002X+4.47\text{e}+004$	1.000 00	1.0	0.09
屈(Chr)	$Y=3.65\text{e}+002X+1.52\text{e}+004$	0.999 96	0.5	0.05
苯并[b]荧蒽(BbF)	$Y=2.75\text{e}+002X+5.25\text{e}+003$	0.999 99	0.5	0.08
苯并[k]荧蒽(BkF)	$Y=1.79\text{e}+002X+1.48\text{e}+003$	0.999 94	0.5	0.11
苯并[a]芘(BaP)	$Y=2.53\text{e}+002X+2.01\text{e}+003$	0.999 98	0.5	0.07
二苯并[a,h]蒽(DBA)	$Y=5.65\text{e}+001X+5.65\text{e}+002$	0.999 99	1.0	0.70
苯并[g,h,i]芘(BPE)	$Y=9.26\text{e}+001X+1.18\text{e}+002$	0.999 98	1.0	0.34
茚并[1,2,3-c,d]芘(IPY)	$Y=2.13\text{e}+002X+5.75\text{e}+002$	1.000 00	0.5	0.10

面积测定值计算的相对标准偏差(RSD)为 0.05%~5.53%。通过上述试验数据(表 2),表明该方法线性范围广、灵敏度高、精密度高,重现性好。

2.1.2 方法回收率

该方法通过空白加标(用等量石英砂替代分析样品加入 PAHs 混合标样)以及基质加标(用实际空白样品加入 PAHs 混合标样)进行回收率测定,加标水平为 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平行测定 5 次,得出空白加标的回收率为 44.89%~78.15%,标准偏差为 3.97%~7.19%;基质加标的回收率为 41.4%~75.48% 标准偏差为 2.03%~4.68%(表 3)。

2.2 南宁市不同区域蔬菜中多环芳烃的含量

由图 3 可知,在所抽检 4 个样点的蔬菜中,不同蔬菜的总多环芳烃含量不同。对 4 个样点 5 种蔬菜的 16 种多环芳烃总含量进行对比,结果表明,那马镇样点的 5 种蔬菜中,除了苦瓜以外其余 4 种蔬菜的 ΣPAHs 含量最大,超过了五塘镇、双桥镇及广西大学样点;广西大学样点除了辣椒和苦瓜样品的 ΣPAHs 含量比五塘镇样点低以外,其余 3 种蔬菜的 ΣPAHs 含量均超过了五塘镇样点;双桥镇样点的 5 种蔬菜中,豆角样品的 ΣPAHs 含量高于五塘镇豆角样品,其余蔬菜的含量趋势均位于曲线的最低点;五塘镇样点采集

表3 16种多环芳烃的方法回收率

Table 3 Recovery percentage of 16 kinds of PAHs under the method of SPE

多环芳烃 PAHs	空白加标回收率 Recovery percentage/%	基质加标回收率 Recovery percentage/%
萘(Nap)	44.89±3.97	41.40±2.03
芘(Acy)	51.37±4.76	49.59±2.99
芘(Ace)	54.80±5.07	52.90±3.21
芴(Flu)	69.50±6.41	67.12±4.13
菲(Phe)	72.68±6.70	70.19±4.33
蒽(Ant)	65.42±6.03	63.17±3.88
荧蒽(Fla)	72.27±6.66	69.80±4.31
芘(Pyr)	73.83±6.80	71.31±4.40
苯并[a]蒽(BaA)	47.31±4.39	45.66±2.74
蒽(Chr)	73.71±6.79	71.19±4.40
苯并[b]荧蒽(BbF)	76.74±7.07	74.12±4.59
苯并[k]荧蒽(BkF)	72.46±6.68	69.98±4.32
苯并[a]芘(BaP)	78.15±7.19	75.48±4.68
二苯并[a,h]蒽(DBA)	76.78±7.07	74.16±4.59
苯并[g,h,i]芘(BPE)	74.16±6.83	71.62±4.43
茚并[1,2,3-c,d]芘(IPY)	74.32±6.85	71.78±4.44

5种蔬菜中,ΣPAHs含量排名在与其它3个样点的对比中,顺序变化较大,出现了ΣPAHs含量最低的2种蔬菜为萝卜和豆角。ΣPAHs含量最高的为苦瓜。总体来看,南宁市4个样点的5种蔬菜呈现出ΣPAHs含量由高到低依次为那马镇样点>广西大学样点>五塘镇样点>双桥镇样点。

表4 不同区域5月菜心单体多环芳烃含量

Table 4 PAHs content in *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee of different sampling points in May

多环芳烃 PAHs	地点 Site			
	广西大学	那马镇	五塘镇	双桥镇
萘(Nap)	24.74±4.17	8.46±1.09	11.33±0.89	13.87±10.00
芘(Acy)	71.49±12.06	92.90±44.44	112.47±15.30	77.61±38.37
芘(Ace)	nd	9.15±0.85	4.82±4.82	6.25±5.46
芴(Flu)	12.55±2.12	19.46±9.19	25.51±1.66	15.45±8.21
菲(Phe)	15.74±2.66	30.05±15.13	43.87±0.39	22.43±14.10
蒽(Ant)	nd	0.22±0.19	0.12±0.18	nd
荧蒽(Fla)	13.41±2.26	4.04±2.30	7.36±3.29	7.71±5.60
芘(Pyr)	25.52±4.31	4.07±5.87	0.38±0.38	12.56±12.82
苯并[a]蒽(BaA)	26.64±0.69	nd	nd	nd
蒽(Chr)	2.89±0.08	nd	nd	nd
苯并[b]荧蒽(BbF)	9.18±0.24	nd	nd	nd
苯并[k]荧蒽(BkF)	9.15±0.24	1.55±0.23	0.74±0.74	nd
苯并[a]芘(BaP)	1.45±0.04	nd	nd	nd
二苯并[a,h]蒽(DBA)	46.29±1.21	63.06±9.47	29.94±29.94	nd
苯并[g,h,i]芘(BPE)	1.44±0.04	10.69±1.61	5.08±5.08	nd
茚并[1,2,3-c,d]芘(IPY)	0.92±0.02	nd	nd	nd

注:nd表示未检出。

Note:nd means not detected.

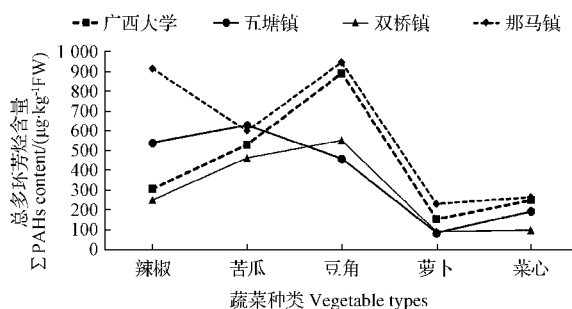


图3 不同区域蔬菜中总多环芳烃含量

Fig. 3 ΣPAHs content in different vegetable types of different sampling point

由表4可知,EPA公布的16种优先控制的多环芳烃在菜心样品中均有检出,其中,萘、芘、芴、菲、荧蒽和芘的检出率高达100%,高分子量的多环芳烃检出的样品较少,4个样点中,苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽及苯并[g,h,i]芘在除了双桥镇以外的3个样点有检出;另外,广西大学农学院蔬菜基地样点的菜心中,高分子量的多环芳烃被检出的种类是4个样点中最多的,苯并[a]芘作为致癌作用最强的多环芳烃之一在广西大学样点也有检出,含量为 $(1.45\pm0.04)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{FW}$ 。

2.3 南宁市不同月份蔬菜中总多环芳烃含量

由图4可知,2月(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)及11月(秋季)4个月菜心中 Σ PAHs含量分别为 272.23 ± 56.01 、 202.25 ± 85.07 、 95.95 ± 17.63 、 $208.7 \pm 26.95 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$, Σ PAHs含量范围为 $(95.95 \pm 17.63) \sim (272.23 \pm 56.01) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$,不同月份的 Σ PAHs含量差异明显, Σ PAHs含量依次表现为2月(冬季) $>$ 11月(秋季) $>$ 5月(春季) $>$ 8月(夏季)。

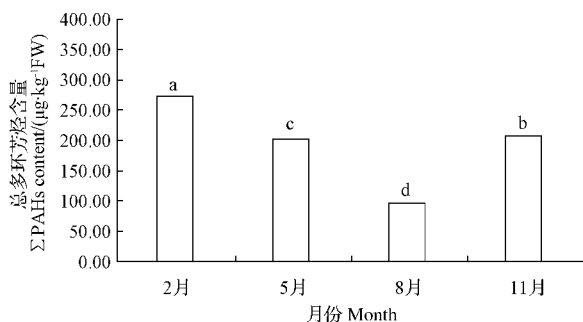


图4 不同月份菜心中总多环芳烃含量

Fig. 4 Σ PAHs content in vegetable soil of different month

2.4 南宁市不同种类蔬菜中总多环芳烃含量

5月和11月采集的5种蔬菜样品中,不同蔬菜中EPA规定的16种优先控制的 Σ PAHs含量存在明显差异。由图5可知,5种蔬菜的 Σ PAHs含量变化规律一致,均为豆角 $>$ 苦瓜 $>$ 辣椒 $>$ 菜心 $>$ 萝卜,按照食用部位分类, Σ PAHs含量为果菜类 $>$ 叶菜类 $>$ 根菜类。将所有月份和样点中同种蔬菜样品的测定结果进行平均后得出各蔬菜的

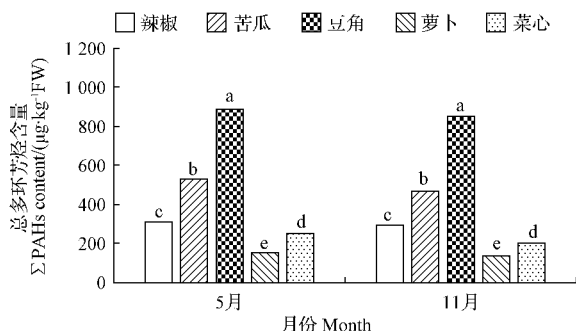


图5 不同月份蔬菜中总多环芳烃含量

Fig. 5 Σ PAHs content in different vegetable types of different month

Σ PAHs含量(表5)。可知,5种蔬菜中 Σ PAHs的含量范围为 $(140.62 \pm 58.56) \sim (741.06 \pm 220.26) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$,5种蔬菜的 Σ PAHs含量高低顺序与5月和11月测定结果单独对比趋势相同。

表5 不同蔬菜中16种总多环芳烃含量

Table 5 Σ PAHs content in different vegetable types

蔬菜种类 Vegetable types	$\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$		
	平均值 Average value	最大值 Max. value	最小值 Min. value
辣椒 <i>Capsicum annuum</i> L.	$462.30 \pm 277.83\text{c}$	916.73	251.48
苦瓜 <i>Momordica charantia</i> L.	$538.25 \pm 74.82\text{b}$	629.02	462.90
豆角 <i>Vigna unguiculata</i>	$741.06 \pm 220.26\text{a}$	948.37	458.47
萝卜 <i>Raphanus sativus</i> L.	$140.62 \pm 58.56\text{e}$	230.70	85.04
菜心 <i>Brassica campestris</i> L. ssp. <i>chinensis</i> var. <i>utilis</i> Tsen et Lee	$205.94 \pm 109.25\text{d}$	330.95	84.20

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

3 讨论

3.1 南宁市蔬菜中多环芳烃的污染水平

由表5可知,该研究区域的5种蔬菜, Σ PAHs含量相对于国内外同类研究(表6)所报道的数据来看相对偏高。由于蔬菜中 Σ PAHs含量的研究能查到的文献较少,不同蔬菜之间PAHs的种类和含量差异较大,且蔬菜中PAHs含量变化具有明显的季节性,样品采集时间、采集地对PAHs测定结果的影响较大。另外,蔬菜种植区域的地理环境差异也会造成 Σ PAHs含量的差异,各地区蔬菜体内的 Σ PAHs含量对比并无相当严格的参考性,但是总体来看,蔬菜中PAHs的种类或总体含量变化趋势却表现出较强的一致性。

3.2 不同蔬菜对于多环芳烃的吸收、富集规律初探

该研究发现,不同蔬菜中PAHs的种类和含量均有差异,特别是 Σ PAHs含量随蔬菜种类的不同表现出较大的差异。该研究对辣椒、苦瓜、豆角、萝卜及菜心5种蔬菜进行分析后发现, Σ PAHs含量的变化趋势为豆角 $>$ 苦瓜 $>$ 辣椒 $>$ 菜

表6 南宁市蔬菜与其他区域蔬菜中总多环芳烃含量的对比

Table 6 Comparison of Σ PAHs content of vegetables in Nanning city and other cities $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$

地点 Site	种类 Type	蔬菜种类 Vegetable types					文献 Reference
		辣椒	苦瓜	豆角	萝卜	菜心	
中国南宁	16	462.30	538.25	741.06	140.62	205.94	
中国佛山	16	—	—	—	—	315	[7]
中国临汾	8	114.51	—	106.53	—	—	[8]
中国河北	16	—	—	—	nd~30.00	nd~26.00	[9]
中国北京	16	118.00	—	180.00	—	—	[10]
中国杭州	16	—	—	—	221.00	—	[11]
中国青岛	16	95.67	—	—	—	—	[12]
沙特阿拉伯	8	—	—	—	9.26	—	[13]
中国江苏	16	—	—	—	11.62	—	[14]

注:—表示无数据或文献中未报道。

Note:— means there is no data in the reference.

心>萝卜,将采集的5种蔬菜分为果菜类、叶菜类及根菜类3类进行对比后发现,果菜类的3种蔬菜,即辣椒、苦瓜和豆角的 Σ PAHs含量比叶菜类的菜心及根菜类的萝卜要大。研究发现,不同种类蔬菜可食用部分的含量为叶菜类>果菜类>根菜类^[15],与该研究的结果有差异,但文献中报道的萝卜中 Σ PAHs含量均比叶菜类及果菜类低,与该研究结果一致。

目前大多数的观点认为由于PAHs的水溶性较差,吸附于植物根系的PAHs很难随着植物的水分运输系统进入植物体内。因此,陆生植物对于PAHs的吸收主要通过地上部分的叶片从大气中富集,而不是通过根系吸收^[15]。另外,申海燕^[16]研究发现,菜心对于PAHs的吸收主要是通过叶片途径而不是根系途径。由于豆角、辣椒及苦瓜3种果菜类蔬菜的植株相对于菜心及萝卜来说具有较大的叶面积,暴露于PAHs环境中的面积远远大于菜心和萝卜,因此吸收了较多的来自于大气中的PAHs;萝卜作为根菜食用部分则完全或几乎不在地面以上暴露,分析认为,萝卜样品中的PAHs主要来自于土壤根系的吸收以及萝卜植株地上部分的向下运输,因此萝卜样品中PAHs较低。除此之外,植物体内PAHs还可能与植株暴露在空气中的时间长短有关,叶菜类的菜心从育苗到采收的时间为30~40 d,果菜类的辣椒、苦瓜和豆角从定植到采收的时间分别为100~150、100~120、100~120 d,该研究结果表明,果菜类蔬菜中PAHs高于叶菜类,分析原因为果菜类蔬菜的生长周期远比叶菜类蔬菜生长周期长所致。

3.3 蔬菜吸收多环芳烃随季节的变化规律

尽管不同季节蔬菜中 Σ PAHs含量差异较大,但是一年4个季节中的PAHs种类近乎一致,PAHs表现出夏季低而冬季高的趋势。赵香爱^[17]在对延吉市柳树叶片的PAHs的研究中发现,柳树叶片内PAHs含量呈现出明显的季节性分布,春季增加而夏季最低,同时,大气中PAHs含量变化也表现出与植物叶片一致的趋势,与该研究结果基本一致,说明植物叶片对于PAHs的吸收和富集与植物所处环境中PAHs的种类和含量具有很大的关系。

PAHs在大气中能够被固体颗粒物吸附,通过大气中颗粒物沉降的形式附着于蔬菜的叶片表面,从而通过叶片进入蔬菜体内。胡健^[18]对贵阳市大气中悬浮颗粒物(TSP)吸附的PAHs进行了全年的监测,悬浮颗粒物的含量与PAHs具有正比例关系,且大气颗粒物中总PAHs的浓度2月最高、8月最低,冬季悬浮颗粒中PAHs的浓度总体高于夏季。此外,王超等^[19]对京津冀地区大气中的PM_{2.5}及PM₁₀中的PAHs进行了研究,发现2种颗粒物中PAHs也呈现出冬季>春季>秋季>夏季的特征,与该研究结果基本一致。因此,蔬菜中PAHs与大气中PAHs变化规律,特别是固体颗粒物中PAHs的变化规律具有一定的相关性,这同时也佐证了PAHs进入蔬菜体内的主要途径是通过叶片吸收而不是通过根系吸收的结论。

4 结论

EPA规定的16种优先控制的PAHs在南宁市5种蔬菜中均有检出,5种蔬菜中 Σ PAHs的含量变化范围为 $(140.62 \pm 58.56) \sim (741.06 \pm 220.26) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{FW}$, Σ PAHs含量相对于国内外同类研究所报道的数据来看相对偏高。南宁市4个区域蔬菜基地内种植的蔬菜中 Σ PAHs含量依次为那马镇>广西大学>五塘镇>双桥镇样点。通过对在广西大学农学院蔬菜基地采集春夏秋冬4个季节的菜心进行含量分析,结果表明,不同季节蔬菜中 Σ PAHs含量有着明显的差异, Σ PAHs含量由高到低依次为2月(冬季)>11月(秋季)>5月(春季)>8月(夏季),具有冬季高而夏季低的趋势。通过对5月(春季)和11月(秋季)采集的5种蔬菜进行PAHs含量分析,结果表明,5种蔬菜中 Σ PAHs含量有着明显差异,并且2个季节5种蔬菜的 Σ PAHs含量变化规律一致,均为豆角>苦瓜>辣椒>菜心>萝卜,按照食用部位分类, Σ PAHs含量为果菜类>叶菜类>根菜类。

参考文献

- [1] BUEHLER S S, HITES R A. The Great Lakes' integrated atmospheric deposition network[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(17): 354-359.
- [2] JONES K C, STRATFORD J A, TIDRIDGE P, et al. Polynuclear aromatic hydrocarbons in an agricultural soil: Long-term changes in profile distribution[J]. Environmental Pollution, 1989, 56(4): 37-351.
- [3] SIMONICH S L, HITES R A. Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere[J]. Nature, 1994, 370(6484): 9-51.
- [4] WILCKE W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: A review[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2000, 163(3): 229-248.
- [5] 宋冠群, 林金明. 环境样品中多环芳烃的前处理技术[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1287-1296.
- [6] 吴丽君, 王洁. 蔬菜的营养价值与保健功能[J]. 中国果菜, 2008(3): 55-56.
- [7] 张天彬, 万洪富, 杨国义, 等. 珠江三角洲典型城市农业土壤及蔬菜中的多环芳烃分布[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2375-2384.
- [8] 殷婧, 夏忠欢, 周彦池, 等. 临汾市售蔬菜中多环芳烃污染特征及致癌风险分析[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(3): 265-271.
- [9] 王敬, 项佳林, 韩林, 等. 固相萃取-气相色谱-串联质谱法测定蔬菜中的16种多环芳烃[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(12): 4878-4885.
- [10] 崔艳红, 巨天珍, 曹军, 等. 加速溶剂提取法测定蔬菜中的多环芳烃和有机氯化物[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 364-367.
- [11] 沈非, 朱利中. 钢铁工业区附近农田蔬菜PAHs的浓度水平及分布[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 669-672.
- [12] 王建华, 姜海燕, 王惠, 等. 气相色谱-质谱法测定蔬菜中的16种多环芳烃[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(2): 197-199.
- [13] ASHRAF M W, SALAM A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables and fruits produced in Saudi Arabia[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(4): 543-547.
- [14] CAO H, LI Q, CHAO S. Health risk assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in garden vegetables in Southern Jiangsu, China[C]//Emerging Economies, Risk and Development, and Intelligent Technology: Proceedings of the 5th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response. Tangier, Morocco: CRC Press, 2015: 95.
- [15] 王晓丽, 彭平安, 周国逸. 广州白云山风景区阔叶植物叶片中的多环芳烃[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1597-1601.
- [16] 申海燕. 多环芳烃对菜心品质的影响及其降解措施研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [17] 赵香爱. 多环芳烃(PAHs)在森林土壤和植物叶中的分布行为特征研究[D]. 延吉: 延边大学, 2016.
- [18] 胡健. 贵阳市大气-水体-土壤环境中多环芳烃的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [19] 王超, 张霖琳, 刀谔, 等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 1-6.

Analysis of Contents of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Vegetable Types of Nanning City

LONG Minghua¹, LONG Biao¹, TANG Xuan¹, LI Pengxin¹, ZHANG Huimin¹, LIANG Yongsheng^{1,2}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004; 2. Nanning Vegetable Research Institute, Nanning, Guangxi 530000)

doi:10.11937/bfyy.20173310

脱落酸浸种对铝胁迫下萝卜幼苗生长及生理特性的影响

练华山¹, 孙国超²

(1. 成都农业科技职业学院 园林园艺分院, 四川 成都 610000; 2. 四川农业大学 园艺学院, 四川 成都 610000)

摘 要:以萝卜种子为试材,采用不同浓度脱落酸(ABA)溶液浸泡萝卜种子,研究了ABA浸种对铝胁迫下萝卜幼苗生长、光合作用及生理特性影响,以期为ABA缓解蔬菜铝胁迫机理研究提供参考依据。结果表明:低于 $20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA浸种处理能缓解铝胁迫对萝卜幼苗生长的抑制,提高铝胁迫下萝卜幼苗叶片光合色素含量,提高净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr),增强光合作用,同时提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)的活性,降低丙二醛(MDA)的积累,保持细胞活性氧代谢平衡,增加可溶性蛋白质含量,缓解铝离子对植物细胞膜的伤害。因此,ABA浸种能提高萝卜幼苗的耐铝能力,且以 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的ABA浸种时效果最佳。

关键词:脱落酸;铝胁迫;生长;生理特性

中图分类号:S 631.104⁺.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)05-0014-06

萝卜(*Raphanus sativus* L.)属十字花科(Brassicaceae)萝卜属一二年生草本植物,起源于欧亚大陆,是一种根茎类蔬菜^[1]。萝卜营养丰富,

富含人体所需的多种营养成分,可增强机体免疫力^[2]。常吃萝卜还可预防冠心病、动脉硬化、胆结石等疾病^[3]。因此萝卜是兼具营养和药用的双重功能蔬菜。

第一作者简介:练华山(1979-),男,本科,副教授,现主要从事蔬菜和花木的教学及科研等工作。E-mail:49939450@qq.com.

收稿日期:2017-10-18

铝是地壳中含量最多的金属元素,达7.73%,通常情况下,土壤中的铝是以难溶性的硫酸盐、磷酸盐、硅酸盐和氧化物等形式存在的,对

Abstract: The contents of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which were on the list of priority control PAHs that stated by U. S. EPA in the 5 kinds of vegetables of different bases in Nanning city, were analyzed by HPLC. The results showed that 16 kinds of PAHs were all detected in the vegetable of Nanning city, the content range of Σ PAHs in vegetable were $(140.62 \pm 58.56) - (741.06 \pm 220.26)\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW, which was on the high level when compared with other area. The rank of Σ PAHs content in four bases of Nanning city was: Nama > Guangxi University > Wutang > Shuangqiao. Σ PAHs content in vegetable were significantly different in four seasons, The rank of Σ PAHs content in four seasons was: February (winter) > December (autumn) > May (spring) > August (summer). Σ PAHs content were significantly different in five kinds of vegetable, the rank of Σ PAHs content in four seasons of was: *Vigna unguiculata* > *Momordica charantia* L. > *Capsicum annuum* L. > *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee > *Raphanus sativus* L.

Keywords: Nanning city; vegetable; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution