

# 6种茄果类蔬菜中多环芳烃分布特征及健康风险评估

胡静伊, 龙明华\*, 孙俏建, 乔双雨, 赵体跃, 陈忠良

(广西大学农学院, 南宁 530004)

**摘要:** **目的** 研究多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)在茄果类蔬菜中的分布特征和积累规律, 并对南宁市不同人群摄食茄果类蔬菜的健康风险进行评估。**方法** 以番茄、茄子、辣椒为研究对象, 采用高效液相色谱法测定 PAHs 含量, 分析番茄、紫茄子、黑茄子、彩椒、线椒、指天椒 6 种茄果类蔬菜中的 PAHs 组成, 并针对 3 个辣椒品种进行 PAHs 含量动态分析以及不同器官组织的 PAHs 差异分析。**结果** 6 种茄果类蔬菜中 PAHs 的含量范围为 525.03~1216.14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 大小依次为指天椒>线椒>紫茄子>彩椒>黑茄子>番茄, 不同品种间 $\Sigma$ 16 PAHs 存在显著性差异; 各苯环数 PAHs 含量占比大小为 3 环>4 环>5 环>6 环>2 环。随着采摘时间的推迟, 辣椒果实 $\Sigma$ 16 PAHs 含量呈逐渐升高趋势。 $\Sigma$ 16 PAHs 在辣椒不同器官部位富集规律为果实>根>叶片>茎, 各部位 PAHs 含量的差异达到显著性水平。健康风险分析表明, 南宁市居民摄食茄果类蔬菜终生致癌风险值为  $9.73 \times 10^{-7} \sim 8.84 \times 10^{-5}$ , 有潜在致癌风险。**结论** 16 种 PAHs 在 6 种茄果类蔬菜中均有检出, 对人体健康影响不容忽视。本研究为定量评价茄果类蔬菜 PAHs 污染的生态及健康风险提供理论依据, 同时对制定发展蔬菜产品相应的污染控制技术标准也有重要意义。

**关键词:** 茄果类蔬菜; 多环芳烃; 分布特征; 健康风险评估; 高效液相色谱法

## Distribution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in 6 kinds of solanaceous vegetables

HU Jing-Yi, LONG Ming-Hua\*, SUN Qiao-Jian, QIAO Shuang-Yu,  
ZHAO Ti-Yue, CHEN Zhong-Liang

(Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the distribution characteristics and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in solanaceous vegetables and evaluate the health risks of eating solanaceous vegetables for different populations in Nanning City. **Methods** The content of PAHs in tomato, eggplant and pepper were determined by high performance liquid chromatography. The composition of PAHs in 6 kinds of solanaceous vegetables including

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31360479)、广西自然科学基金项目(2014GXNSFAA118100)、科技先锋队“强农富民”“六个一”专项行动(桂农科盟 202005-1、桂农科盟 202105-1)、国家现代农业产业体系广西瓜果蔬菜创新团队建设项目(ncytxgxcxtd-10-03)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (31360479), the Guangxi Provincial Natural Science Foundation Program (2014GXNSFAA118100), the Science and Technology Vanguard ‘Strong Farmer Rich People’, ‘Six One’ Special Action (Guinongkemeng 202005-1, Guinongkemeng 202105-1), and the National Modern Agricultural Industry System Guangxi Fruits and Vegetables Innovation Team Construction Project (ncytxgxcxtd-10-03)

\*通信作者: 龙明华, 博士, 教授, 主要研究方向为蔬菜育种及农产品质量安全。E-mail: longmhua@163.com

\*Corresponding author: LONG Ming-Hua, Ph.D, Professor, Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China. E-mail: longmhua@163.com

tomato, purple eggplant, black eggplant, bell pepper, line pepper and conical redpepper fruit pepper were analyzed. The dynamic analysis of PAHs content and the difference of PAHs in different organs and tissues of 3 pepper varieties were analyzed. **Results** The content of PAHs in 6 kinds of eggplant and fruit vegetables ranged from 525.03 to 1216.14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , and the order was pepper>line pepper>purple eggplant>color pepper>black eggplant>tomato. There were significant differences in  $\Sigma 16$  PAHs among different varieties. The proportion of PAHs content in each benzene ring was 3 ring>4 ring>5 ring>6 ring>2 ring. With the delay of picking time, the content of  $\Sigma 16$  PAHs in pepper fruit increased gradually. The enrichment rule of  $\Sigma 16$  PAHs in different organs of pepper was fruit>root>leaf>stem, and the difference of PAHs content in each part reached a significant level. The health risk analysis showed that the life-long carcinogenic risk value of solanaceous vegetables in Nanning residents was  $9.73 \times 10^{-7}$ – $8.84 \times 10^{-5}$ , which had potential carcinogenic risk. **Conclusion** Sixteen kinds of PAHs are detected in 6 kinds of solanaceous vegetables, and their effects on human health can not be ignored. This study provides a theoretical basis for quantitatively evaluating the ecological and health risks of PAHs pollution in solanaceous vegetables, and is also of great significance for formulating the corresponding pollution control technical standards for developing vegetable products.

**KEY WORDS:** solanaceous vegetable; polycyclic aromatic hydrocarbons; distribution characteristics; health risk assessment; high performance liquid chromatography

## 0 引言

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类由两个或多个缩合芳香烃环组成的有机污染物, 芳香环数从 2~6 环不等, 通常分为低环 PAHs (2~3 环)、中环 PAHs (4 环)、高环 PAHs (5~6 环)<sup>[1-2]</sup>, 普遍存在于空气、水体、土壤和沉积物中, 主要来源于有机物的不完全燃烧和高温热解<sup>[3]</sup>。随着分子质量的增加, PAHs 的挥发性降低、溶解度减少、脂溶性增高, 易于被有机物吸附, 相对来说难以被微生物降解利用<sup>[4-6]</sup>; 作为持久性有机污染物, PAHs 易吸附于固体颗粒物表面, 进而在植物体内累积、迁移并在食物链中逐级放大, 最终影响人类健康<sup>[7]</sup>。PAHs 具有致癌、致畸、致突变的“三致效应”<sup>[8-10]</sup>, 使其成为近年来环境科学研究领域的一大热点。2011 年国际癌症研究中心最新公布的 942 种致癌物质名单中, 有 17 种是 PAHs 类化合物。截止到 2012 年欧盟法规《化学品的注册、评估、授权和限制》将 6 种 PAHs 类化合物列入高度关注物质清单<sup>[11]</sup>。

茄果类蔬菜中含有人体所必需的维生素、蛋白质、矿物质、碳水化合物等营养物质, 具有抗老化、预防多种癌症、消炎降脂等功效<sup>[12-16]</sup>, 在我国蔬菜生产中占重要地位。“十三五”期间我国番茄、茄子和辣椒的产量均居世界前列<sup>[17-19]</sup>。目前有关 PAHs 的研究主要集中在 PAHs 对环境的污染以及治理修复方面, 对蔬菜污染的研究报道主要以调查研究为主, 忽略了栽培环境对样品的影响, 而关于在相同环境条件不同茄果类蔬菜 PAHs 富集污染特性的研究还鲜有报道。

本研究以 16 种 PAHs 为目标化合物, 采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC), 检测茄果类蔬菜不同采摘时间和不同部位 PAHs 的含量, 探究

PAHs 在茄果类蔬菜中的分布特征和富集规律。同时对南宁市不同人群摄食 6 种茄果类蔬菜的健康风险进行评估, 为定量评价茄果类蔬菜 PAHs 污染的生态及健康风险提供理论依据, 本研究对制定发展蔬菜产品相应的污染控制技术 with 标准有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 茄果类蔬菜品种

万利达番茄、杭州一号紫茄子、黑霸一号黑茄子、奥峰椒王彩椒、领袖大椒线椒、艳阳指天椒种子均由广西南宁华稻种业有限责任公司提供, 在广西大学蔬菜试验基地进行栽培管理。广西大学蔬菜基地位于广西南宁市西乡塘区, 属湿润的亚热带季风气候, 年平均气温 17~23°C, 年均降雨量达 1304.2 mm, 平均相对湿度为 79%, 该基地属于南宁市传统蔬菜种植基地, 是“老菜区”的代表, 种植的蔬菜样品具有代表性。

#### 1.1.2 试剂与仪器设备

乙腈(色谱纯, 德国 Merck KGaA 公司); PAH MIX 16(上海安谱实验科技股份有限公司); 正己烷、二氯甲烷(色谱纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 无水硫酸钠(分析纯, 天津博迪化工股份有限公司)。

LC-6A 高效液相色谱仪[岛津(香港)有限公司]; JA-B5003 分析电子天平(精度 0.001 g, 上海凯鸿称重设备有限公司); XMTD-8222 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); 600A 粉碎机(浙江荣浩工贸有限公司); SUPELCOSILTMLC-PAH 液相色谱柱(250 mm×460 mm, 5  $\mu\text{m}$ , 美国 Supelco 公司); VGT-2013QTD 超声波清洗机(广东固特超声股份有限公司); RE-52A 自动升降旋转蒸发器

(上海耀特仪器设备有限公司); 3K15 高速冷冻离心机(德国 Sigma 公司); QQMD200-1 干式氮吹仪(上海启前电子科技有限公司); Vortex QL-902 涡旋混匀器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司)。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 样品采集与处理

试验蔬菜于 2021 年 3 月 1 日浸种催芽, 发芽后移至穴盘进行育苗, 番茄、黑茄子、紫茄子、彩椒、线椒、指天椒幼苗同时移栽至大田, 设 6 个小区, 各小区面积及栽培管理条件相同。以商品成熟为采摘标准, 采取 6 种不同茄果类蔬菜果实用于分析 PAHs 含量及组成特征; 3 种辣椒移栽后的第 70、80、90 d 采取果实用于分析 PAHs 含量的动态变化; 3 种辣椒移栽后 90 d 采取根、茎、叶片、果实用于分析不同器官部位的 PAHs 差异性。每个样品均为 6 棵单株采取的组织混合样, 设置 3 个生物学重复, 材料采取后, 用蒸馏水将材料清洗干净, 烘箱中 55℃ 烘干, 后进行含水量测定, 粉碎样品过 60 目标准检验筛于自封袋 4℃ 冰箱中避光储存。

### 1.2.2 PAHs 提取和检测

参考乔双雨等<sup>[20]</sup>和 HERNÁNDEZ-MESA 等<sup>[21]</sup>的方法, 对辣椒、茄子和番茄中的 PAHs 进行提取和检测。通过比较目标化合物的保留时间和质谱图, 确定 16 种 PAHs, 再以校准曲线法进行定量。获得线性方程相关系数均大于 0.99, 检出限为 0.58~6.25 μg/kg, 相对标准偏差范围为 0.06%~5.68%, 目标化合物加标回收率达 68.74%~123.12%。

## 1.3 茄果类蔬菜 PAHs 健康风险评估

### 1.3.1 毒性当量风险评价

苯并[a]芘[benzo(a)pyrene, BaP]因其强化学致癌性, 通常被选为致癌 PAHs 的参考化合物, 用于风险评估<sup>[22-24]</sup>。BaP<sub>eq</sub> 毒性当量计算公式见公式(1):

$$\text{BaP}_{\text{eq}} = C_i \times \text{TEF}_i \quad (1)$$

式(1)中,  $C_i$  为 16 种 PAHs 单体含量, μg/kg;  $\text{TEF}_i$  为 16 种 PAHs 单体相对于 BaP 的毒性当量因子<sup>[25]</sup>。

### 1.3.2 人体健康风险评估

依据美国国家环境保护署推荐的终生致癌风险(incremental lifetime cancer risk, ILCR)评估不同人群食用茄果类蔬菜中 PAHs 对人体的潜在致癌风险<sup>[26]</sup>, ILCR 公式见公式(2):

$$\text{ILCR} = \frac{\text{BaP}_{\text{eq}} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{SF} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式(2)中, IR 为蔬菜摄入量, g/d, 参考相关文献[27-28]及进行市场调研后确定, 见表 1; EF 为暴露频率, 365 d/a; ED 为暴露持续时间, a(年), 儿童和青少年取 7, 成年人取 43、老年人取 10; SF 为 BaP 摄食暴露致癌斜率因子, 7.30 mg/(kg·d)<sup>[29-30]</sup>; CF 为转化因子, 10<sup>-6</sup> mg/ng; BW 为平均

体重, 男性儿童、青少年、成年人、老年人体重均值分别为 25.13、49.04、65.07、63.17 kg, 女性儿童、青少年、成年人、老年人的体重则分别为 23.96、46.26、55.58、54.27 kg<sup>[31-32]</sup>; AT 为平均寿命, 25500 d<sup>[33]</sup>。

表 1 不同人群对茄果蔬菜的摄入量(g/d)

Table 1 Ingestion amounts of solanaceous vegetable for different groups of people (g/d)

茄果蔬菜	儿童		青少年		成年人	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性
番茄	2.09	1.98	3.52	3.08	5.28	4.48
黑茄子	0.95	0.90	1.60	1.40	2.40	2.20
紫茄子	1.14	1.08	1.92	1.68	2.88	2.64
彩椒	0.29	0.27	0.48	0.42	0.72	0.66
线椒	0.57	0.54	0.96	0.84	1.44	1.32
指天椒	3.33	3.15	5.60	4.90	8.40	7.70

美国环保局致癌风险划分规定 ILCR 大于 10<sup>-4</sup> 时具有较大的致癌风险, ILCR 在 10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup> 之间则被认为存在低致癌风险或潜在致癌风险, ILCR 小于 10<sup>-6</sup> 被认为不存在致癌风险或其致癌风险可以忽略<sup>[34]</sup>。

## 1.4 数据统计与分析

采用色谱数据软件 Empower 3 处理 PAHs 检测结果, 使用 Microsoft Excel 2010 处理试验数据, 运用 SPSS 19.0 和 GraphPad Prism 8 软件进行数据分析与制图。

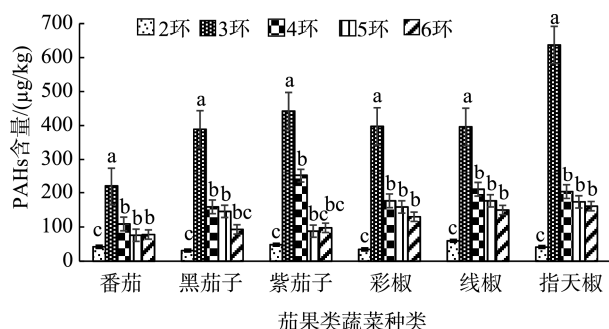
## 2 结果与分析

### 2.1 不同茄果类蔬菜中 PAHs 含量及组成特征

6 种茄果类蔬菜中 PAHs 含量如图 1 所示, Σ16 PAHs 含量范围为 525.03~1216.14 μg/kg, 含量大小差异为指天椒>线椒>紫茄子>彩椒>黑茄子>番茄。6 种茄果类蔬菜 PAHs 的组成特征相对一致, 均以 3 环 PAHs 占比最高, 达到 41.89%~52.39%, 4 环、5 环、6 环占比次之, 2 环 PAHs 比例最少, 仅占 3.41%~8.08%, 总体上中低环(2~4) PAHs 占比高于高环(5~6) PAHs。

低、中环 PAHs 由于其熔沸点较低, 可移动性较好, 主要以溶解态形式发生迁移, 在植物体内的富集趋势更为明显; 高环 PAHs 脂溶性高, 容易被固体颗粒或土壤有机质吸附沉积, 不易迁移, 在植物体内含量较少<sup>[35]</sup>。万开等<sup>[36]</sup>研究东莞市蔬菜中 PAHs 含量, 3、4 环 PAHs 均占到总量的 40%以上, 高环 PAHs 在蔬菜中含量较低。吴敏敏等<sup>[37]</sup>研究南京市居民日常消费量较大的 8 种蔬菜, 3、4 环 PAHs 共占总量的 83.5%, 2 环 PAHs 在蔬菜中含量较少。葛蔚等<sup>[38]</sup>研究的青岛市城郊 3 类蔬菜中的 PAHs, 3 环 PAHs 占总量的 51.4%~56.2%, 6 环 PAHs 的比例仅占 1.2%~1.6%。TUTEJA 等<sup>[39]</sup>研究发现菠菜和冬瓜中低环 PAHs(不含芘)约占 PAHs 总含量的 89%, 马铃薯和萝卜占比达到 95%。尚娜娜等<sup>[40]</sup>

研究樟树叶片中各环数 PAHs 占比, 3 个城市均以中低环为主, 高环所占比例较低。本研究结果蔬菜中 PAHs 的组成特征与前人研究结果大体一致。



注: 不同小写字母表示用邓肯新复极差法在  $P < 0.05$  水平差异显著, 下同。

图 1 茄果类蔬菜中各环数 PAHs 含量 ( $n=3$ )

Fig.1 PAHs content in different rings of solanaceous vegetables ( $n=3$ )

### 2.2 3 个辣椒品种不同采摘时间 PAHs 含量动态分析

不同采摘时间的彩椒、线椒、指天椒,  $\sum 16$  PAHs 含量分别为 703.18~893.35、764.41~1075.25、897.39~1216.14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 在辣椒定植 70 和 90 d 采摘时, 果实中 PAHs 含量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。比较同一采摘时间辣椒果实中  $\sum 16$  PAHs 含量得出规律: 指天椒 > 线椒 > 彩椒, 在辣椒定植 80 及 90 d 采摘时, 彩椒和指天椒果实中 PAHs 含量不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ ) (图 2)。彩椒、线椒、指天椒各环数 PAHs 的含量存在差异。3 环 PAHs 含量最高, 4、5 环次之, 6 环 PAHs 含量较低, 2 环 PAHs 含量最低 (图 3)。

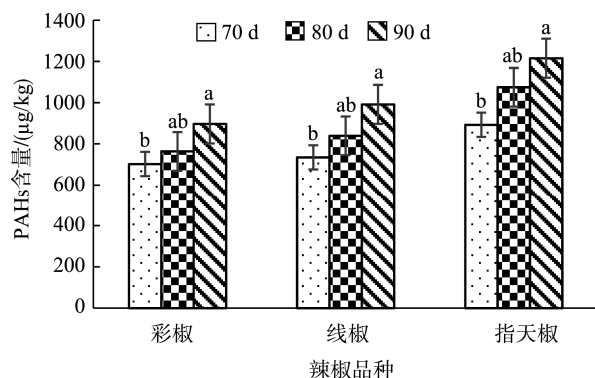


图 2 不同采摘时期辣椒果实 PAHs 的含量 ( $n=3$ )

Fig.2 PAHs content in different picking periods of pepper fruit ( $n=3$ )

暴露于污染物的时间长短, 决定了其受污染程度的高低。于洪玲<sup>[41]</sup>在研究柳树叶中 PAHs 季节性分布特征时发现, 最后一次采集的柳树叶样品中  $\sum 16$  PAHs 含量最高, 第一次采集柳树叶样品中  $\sum 16$  PAHs 含量最低, 具有显著性差异, 说明暴露时间延长, PAHs 含量增加。同时其研究

表明大气中 PAHs 的浓度与柳树叶中 PAHs 浓度变化具有明显的相关性, 各组分含量相似。有研究表明植物对空气中 PAHs 的摄取是主要途径<sup>[42-43]</sup>, 3 种辣椒果实 PAHs 含量随着采摘时间的推迟暴露时间延长而增加。贾晋璞<sup>[44]</sup>研究表明不同蔬菜的形态结构会影响同类蔬菜体内 PAHs 的含量和组分。指天椒果实簇生于枝端, 少有或没有叶片遮挡, 暴露在空气中更为完全; 线椒果实下垂, 线形稍弯曲, 果面皱褶有利于 PAHs 的吸附; 而彩椒果实上部多有叶片遮挡, 且果实表面较为平滑无褶皱, 可能是导致 3 种辣椒中 PAHs 含量最低的原因。

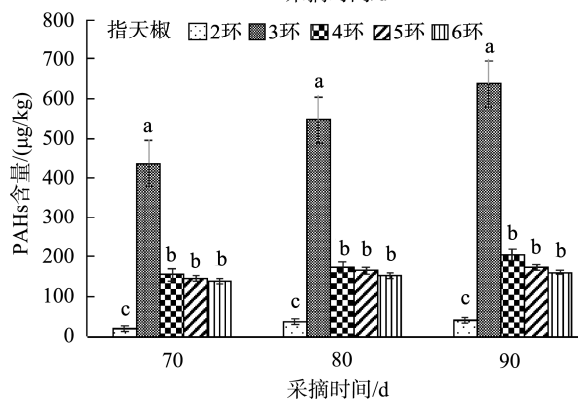
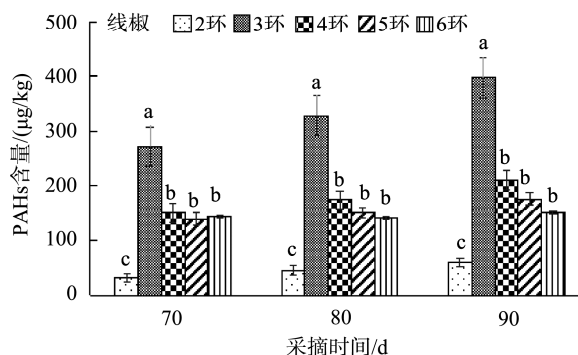
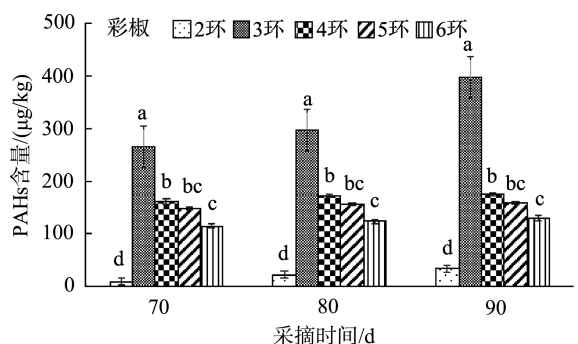


图 3 不同采摘时期辣椒果实中 PAHs 组分 ( $n=3$ )

Fig.3 PAHs components in different picking periods of pepper fruit ( $n=3$ )

### 2.3 3 个辣椒品种不同器官部位的 PAHs 含量差异分析

以辣椒为对象, 研究辣椒不同部位 PAHs 富集规律。

结果如表 2 所示, 3 种辣椒根、茎、叶片、果实中,  $\Sigma 16$  PAHs 范围分别为 815.56~1199.55、315.40~399.20、563.81~723.99、897.39~1216.14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。地上部分 PAHs 含量明显高于地下部分, 比较各部位 PAHs 总含量得出分布规律为果实>根>叶片>茎, 其中 3 环 PAHs 含量最高, 总体来看, 辣椒各部位中低环 PAHs 所占比例均高于高环 PAHs(图 4), 除指天椒的根和果实外, 3 种辣椒各部位 PAHs 存在显著性差异( $P<0.05$ )。

PAHs 较低的水溶性和较高的脂溶性易被土壤有机质吸附沉积, 限制了根系对 PAHs 的长期吸收, 分布在空气胶体或者空气沉积颗粒中的 PAHs 被植物捕获, 经表皮脂质层解析进入植物体内<sup>[45]</sup>。辣椒茎表面近无毛结构, 相对于叶片和果实来说比表面积较小, 不容易捕获大气中的 PAHs, 是其中含量较低的原因。曾小康等<sup>[46]</sup>研究深圳坝光红树林沉积物和植物 PAHs 的分布时发现, 红树植物叶片中 PAHs 总含量是地下根中 PAHs 总含量的 3.2 倍。有研究表明 PAHs 的性质与植物的种类都是影响植物吸收累积 PAHs 的重要因素<sup>[31]</sup>。郭雪<sup>[47]</sup>研究 4 种叶菜类蔬菜 PAHs 总含量都表现为叶>茎>根。叶菜类蔬菜较大的叶表面积提高了其对 PAHs 的富集能力。秦宁等<sup>[48]</sup>研究 3 种挺水生植物体内 PAHs 含量得出同种挺水生植物 PAHs 含量, 叶最高, 茎次之, 根中 PAHs 含量最低。PAHs 极强的疏水性影响了植物体对 PAHs 的吸收<sup>[49]</sup>。TAO 等<sup>[50]</sup>研究了天津两个污染场地种植的几种蔬菜中 PAHs 的含量, 发现蔬菜地上部分 PAHs 含量是根部的 6.5 倍, 从而认为叶片-植物体途径是吸收的主要途径。本研究中地上部分 PAHs 含量约为地下部分的 2 倍, 与前人研究结果基本一致。

## 2.4 6 种茄果类蔬菜果实中 PAHs 的健康风险分析

番茄、黑茄子、紫茄子、彩椒、线椒、指天椒果实中的 BaP<sub>eq</sub> 分别为 41.20、133.31、89.49、146.57、132.46 和 142.07  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。6 种茄果类蔬菜果实中 PAHs 终生致癌风险(ILCR)如表 3 所示, 致癌风险值为  $9.73 \times 10^{-7} \sim 8.84 \times 10^{-5}$ 。南宁市除青少年女性摄食彩椒在  $10^{-7}$  水平以外, 其他人群摄取茄果类蔬菜致癌风险值均在  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  之间, 存在潜在致癌风险。

对市场蔬菜 PAHs 致癌风险调查研究表明, 人体摄食蔬菜暴露 PAHs 致癌风险值在  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ <sup>[37,51-53]</sup>, 本研究中人体摄食茄果类蔬菜致癌风险值为  $9.73 \times 10^{-7} \sim 8.84 \times 10^{-5}$ , 与其结果相似。6 种茄果类蔬菜果实致癌风险高低为黑茄子>紫茄子>番茄>线椒>指天椒>彩椒。茄子中 5、6 环 PAHs 占比高于番茄, 相对于 BaP 单个 PAHs 毒性当量因子较大, BaP 总毒性当量大, 增加了茄子的致癌风险。PAHs 在植物体内迁移能力差, 大部分的 PAHs 主要累积在表面, 研究表明, 土豆和萝卜表皮 PAHs 含量显著高于内核<sup>[54]</sup>, 表明 PAHs 并未向内核迁移, 茄子和番茄果皮长时间暴露在空气中, 虽可食用但其致癌风险较高, 茄子和番茄去皮食用更为健康。4 类人群食用茄果类蔬菜致癌风险规律为成年人>老年人>儿童>青少年, 青少年体重高于儿童, 导致青少年食用茄果类蔬菜致癌风险较低。青少年儿童处于快速发展的阶段, 机体免疫力同成人相比较弱, 对构成健康风险的污染物更为敏感, 其健康问题更应该得到关注。

表 2 辣椒不同器官部位 PAHs 的含量差异( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $n=3$ )

Table 2 Difference of PAHs content in different organ parts of pepper ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $n=3$ )

辣椒种类	根	茎	叶片	果实
彩椒	815.56±26.13 <sup>b</sup>	399.20±21.11 <sup>d</sup>	563.81±23.08 <sup>c</sup>	897.39±58.91 <sup>a</sup>
线椒	825.20±39.06 <sup>b</sup>	315.40±18.74 <sup>d</sup>	662.63±17.50 <sup>c</sup>	992.02±68.05 <sup>a</sup>
指天椒	1199.55±27.61 <sup>a</sup>	349.24±21.41 <sup>c</sup>	723.99±24.04 <sup>b</sup>	1216.14±91.41 <sup>a</sup>
均值	946.77±126.42 <sup>b</sup>	354.61±42.16 <sup>d</sup>	650.14±80.82 <sup>c</sup>	1035.18±163.70 <sup>a</sup>

注: 同行不同小写字母表示用邓肯新复极差法在  $P<0.05$  水平差异显著。

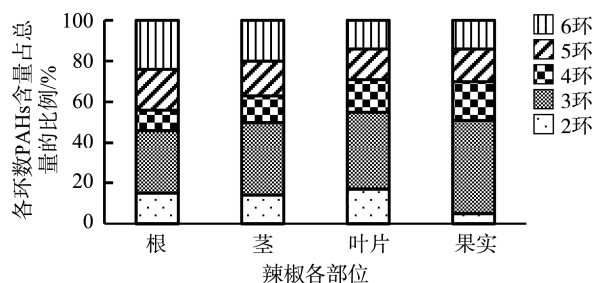


图 4 辣椒不同器官部位各环数所占比重分布图

Fig.4 Distribution map of different rings PAHs in different organs of bell pepper

## 3 结论

蔬菜体内 PAHs 污染水平受到多种因素影响, 本研究常见茄果类蔬菜可食用部分 16 种 PAHs 均有检出, 但总量存在差异, 不同品种辣椒 PAHs 含量不同, 说明蔬菜种类及同种蔬菜对 PAHs 的吸收富集规律不同; 茄果类蔬菜辣椒中 PAHs 总量随着采摘时间的延长而增加, 不同部位 PAHs 的富集规律表现为果实>根>叶片>茎, 造成富集吸收规律及 PAHs 如何在植物体内转运的机制还需进一步展开研究。茄果类蔬菜 PAHs 的组成特征表现为中高环占比较

表 3 4 类人群摄食不同茄果类蔬菜果实产生的 PAHs 终生致癌风险  
Table 3 Lifetime cancer risks from PAHs for 4 groups ingesting fruits of different solanaceous vegetables

茄果蔬菜	儿童		青少年		成年人		老年人	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
番茄	$2.51 \times 10^{-6}$	$2.49 \times 10^{-6}$	$2.16 \times 10^{-6}$	$2.01 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.49 \times 10^{-5}$	$3.44 \times 10^{-6}$	$3.49 \times 10^{-6}$
黑茄子	$3.67 \times 10^{-6}$	$3.66 \times 10^{-6}$	$3.18 \times 10^{-6}$	$2.95 \times 10^{-6}$	$2.21 \times 10^{-5}$	$2.37 \times 10^{-5}$	$5.07 \times 10^{-6}$	$5.13 \times 10^{-6}$
紫茄子	$2.97 \times 10^{-6}$	$2.95 \times 10^{-6}$	$2.56 \times 10^{-6}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$	$4.09 \times 10^{-6}$	$4.13 \times 10^{-6}$
彩椒	$1.24 \times 10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-6}$	$9.73 \times 10^{-7}$	$7.29 \times 10^{-6}$	$7.82 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-6}$
线椒	$2.20 \times 10^{-6}$	$2.18 \times 10^{-6}$	$1.90 \times 10^{-6}$	$1.76 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-5}$	$3.02 \times 10^{-6}$	$3.06 \times 10^{-6}$
指天椒	$1.38 \times 10^{-5}$	$1.37 \times 10^{-5}$	$1.19 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-5}$	$8.24 \times 10^{-5}$	$8.84 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$

高, 单体的分布在一定程度上预示了其潜在的来源, 3、4 环较高的占比可能主要受到化石燃料的燃烧污染, 但考虑到 PAHs 的沉降规律, 具体来源需结合基地土壤、大气、灌溉水的污染特征进一步确定。人们日常饮食中, 会增加蔬菜的品种以确保营养素的全面, 因此单一蔬菜暴露 PAHs 致癌风险值低并不代表联合食用蔬菜的风险值低, 现实生活中蔬菜食用方法、食用频率及个体差异不同, 本研究健康风险评估可能与实际存在一定的差异, 因此进一步完善蔬菜中 PAHs 残留标准应提上日程。

本研究探讨了茄果类蔬菜 PAHs 富集规律, 并对不同人群摄食蔬菜暴露 PAHs 风险进行评估, 结果表明, 不同茄果类蔬菜对 PAHs 吸收富集规律不同, 不同人群致癌风险值处于可接受范围内, 但潜在的致癌风险不可忽视。

#### 参考文献

- [1] WEI Y, HAN IK, HU M, *et al.* Personal exposure to particulate PAHs and anthraquinone and oxidative DNA damages in humans [J]. *Chemosphere*, 2010, 81(10): 1280–1285.
- [2] HOPF NB, SPRING P, HIRT-BURRI N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) skin permeation rates change with simultaneous exposures to solar ultraviolet radiation (UV-S) [J]. *Toxicol Lett*, 2018, 287: 122–130.
- [3] BUZYNSKA AJ, GEYPENS B, VAN GR, *et al.* Stable carbon isotopic ratio measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons as a tool for source identification and apportionment-A review of analytical methodologies [J]. *Talanta*, 2013, 105(4): 435–450.
- [4] QING L, LEIYAN G, YUE S, *et al.* Distribution, source apportionment, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils from Shenyang, China [J]. *Environ Geochem Health*, 2020, 42: 1817–1832.
- [5] 史哲明, 郭琳, 房桂明, 等. 微生物修复多环芳烃污染土壤的研究进展 [J]. *现代化工*, 2022, 42(10): 24–28.  
SHI ZM, GUO L, FANG GM, *et al.* Advances in microbial remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil [J]. *Mod Chem Ind*, 2022, 42(10): 24–28.
- [6] 丁润梅, 张翠, 贺子欣, 等. 银川市公园土壤中多环芳烃的来源及生态风险评估 [J]. *现代预防医学*, 2022, 49(15): 2724–2729.  
DING RM, ZHANG C, HE ZX, *et al.* Sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in park soils of Yinchuan City [J]. *Mod Prev Med*, 2022, 49(15): 2724–2729.
- [7] 刘阳. 深圳、重庆、宁波市农业土壤-蔬果系统中多环芳烃残留研究 [J]. *山东化工*, 2019, 48(16): 240–243.  
LIU Y. Study on PAHs residues in agricultural soil-vegetable and fruit systems in Shenzhen, Chongqing and Ningbo [J]. *Shandong Chem Ind*, 2019, 48(16): 240–243.
- [8] 招蔚弘, 陈志贤, 张小杰. 振荡提取-气相色谱质谱法测试土壤中多环芳烃 [J]. *广东化工*, 2022, 49(18): 184–186.  
ZHAO WH, CHEN ZX, ZHANG XJ. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by oscillation extraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2022, 49(18): 184–186.
- [9] CHEN SC, LIAO CM. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources [J]. *Sci Total Environ*, 2006, 366(1): 112–123.
- [10] 王亚琼, 钟水生, 张华锋, 等. 中药材中多环芳烃的残留量测定及风险评估 [J]. *安徽医药*, 2022, 26(3): 466–470.  
WANG YQ, ZHONG SS, ZHANG HF, *et al.* Determination and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons residues in Chinese medicinal materials [J]. *Anhui Med Pharm J*, 2022, 26(3): 466–470.
- [11] 郭伟强, 张培敏, 边平凤. 分析化学手册第三版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.  
GUO WQ, ZHANG PM, BIAN PF. Analytical chemistry handbook 3rd edition [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [12] 朱金芳, 王莹, 胡强, 等. 番茄红素胶束与番茄红素原料稳定性对比研究 [J]. *新疆医科大学学报*, 2017, 40(4): 503–508.  
ZHU JF, WANG Y, HU Q, *et al.* Comparative study on the stability of lycopene micelles and lycopene raw materials [J]. *J Xinjiang Med Univ*, 2017, 40(4): 503–508.
- [13] 王钊, 李磊, 杨玉阳, 等. 不同种类番茄中番茄红素含量及油脂烹制作用 [J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 64–67.  
WANG Z, LI L, YANG YY, *et al.* Lycopene content and oil cooking effect in different kinds of tomatoes [J]. *China Cond*, 2020, 45(2): 64–67.
- [14] URBONAVICIENE D, VISKELIS P, VISKELIS J, *et al.* Stability of tomato lycopene under thermal and light irradiation treatments in an oil based model system [J]. *Zemdirbyste*, 2015, 102(2): 185–192.
- [15] 丁昱文, 李志文, 李子昂, 等. 茄子果实生物碱提取液的抑菌活性研究 [J]. *食品科学*, 2009, 30(7): 95–98.  
DING YW, LI ZW, LI ZANG, *et al.* Study on antibacterial activity of alkaloid extract from eggplant fruit [J]. *Food Sci*, 2009, 30(7): 95–98.
- [16] 张正海, 曹亚从, 于海龙, 等. 辣椒果实主要品质性状遗传和代谢物组成研究进展 [J]. *园艺学报*, 2019, 46(9): 1825–1841.

- ZHANG ZH, CAO YC, YU HL, *et al.* Research progress on inheritance and metabolite composition of main quality traits of pepper fruit [J]. *Acta Horticult Sin*, 2019, 46(9): 1825–1841.
- [17] 李君明, 项朝阳, 王孝宣, 等. “十三五”我国番茄产业现状及展望[J]. *中国蔬菜*, 2021, (2): 13–20.
- LI JM, XIANG CY, WANG XX, *et al.* “13th Five-Year” present situation and prospect of tomato industry in China [J]. *China Veget*, 2021, (2): 13–20.
- [18] 刘富中, 舒金帅, 张映, 等. “十三五”我国茄子遗传育种研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021, (3): 17–27.
- LIU FZ, SHU JS, ZHANG Y, *et al.* Research progress on genetic breeding of eggplant in China during “13th Five-Year” period [J]. *China Veget*, 2021, (3): 17–27.
- [19] 王立浩, 张宝玺, 张正海, 等. “十三五”我国辣椒育种研究进展、产业现状及展望[J]. *中国蔬菜*, 2021, (2): 21–29.
- WANG LH, ZHANG BX, ZHANG ZH, *et al.* “13th Five-Year” pepper breeding research progress, industry status and prospect [J]. *China Veget*, 2021, (2): 21–29.
- [20] 乔双雨, 龙明华, 张会敏, 等. 正交试验优化蔬菜中多环芳烃检测前处理工艺[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 104–110, 118.
- QIAO SY, LONG MH, ZHANG HM, *et al.* Optimization of pretreatment process for detection of PAHs in vegetables by orthogonal test [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(23): 104–110, 118.
- [21] HERNÁNDEZ-MESA M, GARCÍA-CAMPAÑA AM. Determination of sulfonylurea pesticide residues in edible seeds used as nutraceuticals by QuEChERS in combination with ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2020, 1617: 460831.
- [22] 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 等. 乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, 72(15): 1–18.
- FAN Y, CAO SY, ARIJAN-NEL, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil JANS and crops in the suburb of Urumqi [J]. *Environ Sci*, 2022, 72(15): 1–18.
- [23] 程莉, 甘源, 唐晓琴, 等. 油炸食品中多环芳烃污染状况分析及健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(15): 1909–1913.
- CHENG L, GAN Y, TANG XQ, *et al.* Pollution analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried foods [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2021, 31(15): 1909–1913.
- [24] 吴灵敏, 邵劲松, 高芹, 等. 苏南地区农产品与产地环境中多环芳烃的污染研究[J]. *河南农业*, 2021, (14): 50–52.
- WU LM, SHAO JS, GAO Q, *et al.* Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural products and environment of producing areas in Southern Jiangsu [J]. *Agric Henan*, 2021, (14): 50–52.
- [25] 吴艳林, 张文宇, 李丽珍, 等. 云南某特色产业园区周边土壤中多环芳烃的源分析与健康风险评估[J]. *环境科学导刊*, 2021, 40(3): 75–82.
- WU YL, ZHANG WY, LI LZ, *et al.* Source analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around a characteristic industrial park in Yunnan [J]. *Environ Sci Surv*, 2021, 40(3): 75–82.
- [26] 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 等. 北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 592–598.
- PENG C, WANG ME, OUYANG ZY, *et al.* Residual characteristics and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in green space soil of Beijing Science and Education Park [J]. *Environ Sci*, 2012, 33(2): 592–598.
- [27] 翟凤英, 杨晓光. 中国居民营养与健康状况调查报告: 膳食与营养素摄入状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006.
- ZHAI FY, YANG XG. Investigation report on nutrition and health status of Chinese residents: Dietary and nutrient intake [M]. Beijing: People’s Health Publishing House, 2006.
- [28] 张珏坪. 广西南宁市蔬菜种子产业发展现状与对策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- ZHANG YP. Study on the development status and countermeasures of vegetable seed industry in Nanning, Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [29] NIE J, SHI J, DUAN X, *et al.* Health risk assessment on dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Taiyuan, China [J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408(22): 5331–5337.
- [30] MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMRECZAK B, KLIMKOWICZ-PAWLAS A. Concentrations, sources, and spatial distribution of individual polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soils in the eastern part of the EU: Poland as a case study [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(12): 3746–3753.
- [31] NAJMEDDIN A, KESHAVARZI B. Health risk assessment and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with PM10 and road deposited dust in Ahvaz metropolis of Iran [J]. *Environ Geochem Health*, 2019, 41(3): 1267–1290.
- [32] 杨晓光, 翟凤英, 朴建华, 等. 中国居民营养状况调查[J]. *中国预防医学杂志*, 2010, 11(1): 5–7.
- YANG XG, ZHAI FY, PIAO JH, *et al.* Nutritional status survey of Chinese residents [J]. *Chin Prev Med*, 2010, 11(1): 5–7.
- [33] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- ZHAO XG, DUAN XL. Summary of Chinese population exposure parameter manual (adult volume) [M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2014.
- [34] LIAO CM, CHIANG KC. Probabilistic risk assessment for personal exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwanese temples [J]. *Chemosphere*, 2006, 63(9): 1610–1619.
- [35] TOBISZEWSKI J. Namieśnik PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources [J]. *Environ Pollut*, 2012, 162: 110–119.
- [36] 万开, 江明, 杨国义, 等. 珠江三角洲典型城市蔬菜中多环芳烃分布特征[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 583–587.
- WAN K, JIANG M, YANG GY, *et al.* Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables of typical cities in Pearl River Delta [J]. *Soils*, 2009, 41(4): 583–587.
- [37] 吴敏敏, 夏忠欢, 张倩倩, 等. 南京市蔬菜中多环芳烃污染特征及健康风险分析[J]. *地球与环境*, 2017, (4): 447–454.
- WU MM, XIA ZH, ZHANG QQ, *et al.* Pollution characteristics and health risk analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables in Nanjing [J]. *Earth Environ*, 2017, (4): 447–454.
- [38] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 青岛市城郊蔬菜中多环芳烃污染特征和健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2017, (12): 4772–4778.
- GE W, CHENG QQ, CHAI C, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of PAHs in vegetables in Qingdao suburb [J]. *Acta Sci Circumst*, 2017, (12): 4772–4778.
- [39] TUTEJA G, ROUNT C, BISHNOI NR. Quantification of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in leafy and underground vegetables: A case study around Panipat city, Haryana, India [J]. *J Environ Sci Technol*, 2011, 4: 611–620.
- [40] 尚娜娜, 余何愚, 李茂蝶, 等. 城市绿化带樟树叶 PAHs 富集特征及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(8): 91–98.  
SHANG NN, YU HY, LI MD, *et al.* Enrichment characteristics and source analysis of PAHs in leaves of camphor tree in urban green belt [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 44(8): 91–98.
- [41] 于洪玲. 柳树叶中多环芳烃季节性分布特征[D]. 延吉: 延边大学, 2014.  
YU HL. Seasonal distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in willow leaves [D]. Yanji: Yanbian University, 2014.
- [42] 王东梅, 陈千喜, 张雪琪, 等. 我国生态环境中多环芳烃污染状况研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(5): 10–15.  
WANG DM, CHEN QX, ZHANG XQ, *et al.* Research progress of PAHs pollution in ecological environment in China [J]. *Admin Technol Environ Monit*, 2022, 34(5): 10–15.
- [43] LEHNDORFF E, SCHWARK L. Biomonitoring of air quality in the cologne conurbation using pine needles as a passive sampler-Part II: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) [J]. *Atmos Environ*, 2004, 38(23): 3793–3808.
- [44] 贾晋璞. 大气-叶菜-土壤系统中 PAHs 的累积特征及暴露风险[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.  
JIA JP. Accumulation characteristics and exposure risk of PAHs in the atmosphere-leaf vegetable-soil system [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [45] CHIOU CT, SHENG G, MANES M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(7): 1437–1444.
- [46] 曾小康, 李凤兰, 周凯, 等. 深圳坝光红树林沉积物和植物多环芳烃的分布[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(S2): 368–373.  
ZENG XK, LI FL, ZHOU K, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and plants of Shenzhen Baguang mangrove [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 36(S2): 368–373.
- [47] 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, 2018.  
GUO X. Study on the pollution effect of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil-vegetable system in Shanghai suburbs [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [48] 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 WJ, *et al.* Distribution and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in emergent plants of Xiaobaiyangdian Lake and its influencing factors [J]. *J Lake Sci*, 2010, 22(1): 49–56.
- [49] QUILLIAM RS, RANGECROFT S, EMMETT BA, *et al.* Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 96–103.
- [50] TAO S, CUI YH, XU FL, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin [J]. *Sci Total Environ*, 2004, 320(1): 11–24.
- [51] 王丽萍, 夏忠欢, 吴敏敏, 等. 徐州市售蔬菜中多环芳烃污染与健康危害[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3): 526–534.  
WANG LP, XIA ZH, WU MM, *et al.* Pollution and health hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables sold in Xuzhou [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2017, 12(3): 526–534.
- [52] 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.  
YIN J, XIA ZH, ZHOU YC, *et al.* Pollution characteristics and carcinogenic risk analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables sold in Linfen [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2016, 11(3): 265–271.
- [53] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 上海市居民暴露于多环芳烃的健康风险评估[J]. *生态环境学报*, 2014, 24(1): 126–132.  
DONG JY, LIU XR, ZHANG BZ, *et al.* Health risk assessment of PAHs exposure in Shanghai residents [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 24(1): 126–132.
- [54] ZOHAI A, SALIM AB, SOYIBO AA, *et al.* Residues of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides in organically-farmed vegetables [J]. *Chemosphere*, 2006, 63(4): 541–553.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

## 作者简介



胡静伊, 硕士研究生, 主要研究方向为蔬菜质量安全与栽培生理。  
E-mail: 2684687785@qq.com



龙明华, 博士, 教授, 主要研究方向为蔬菜育种及农产品质量安全。  
E-mail: longmhua@163.com