

引用格式:

巫桂芬, 龙明华, 乔双雨. 南瓜器官中多环芳烃的分布与积累[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 185–190.

WU G F, LONG M H, QIAO S Y. Distribution and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbon in organs of *Cucurbita moschata*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(2): 185–190.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 南瓜器官中多环芳烃的分布与积累

巫桂芬<sup>1</sup>, 龙明华<sup>2\*</sup>, 乔双雨<sup>2</sup>

(1.广西民族师范学院化学与生物工程系, 广西 崇左 532200; 2.广西大学农学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:**以金韩蜜本南瓜为材料,采用高效液相色谱检测其根、茎、叶、花、果实的多环芳烃(PAHs)含量,探讨南瓜各器官中多环芳烃的分布、迁移和积累。结果表明:南瓜雄花和嫩叶中仅有3种多环芳烃,幼果中有11种;南瓜器官中多环芳烃含量均值为994.11 μg/kg,其中营养器官中的为1169.59 μg/kg,生殖器官中的为854.11 μg/kg;南瓜器官中屈的含量为607.28–953.75 μg/kg,明显高于其余15种多环芳烃的含量;南瓜器官中的多环芳烃主要以2环、3环、4环芳烃为主,其中4环芳烃的含量为7364.27 μg/kg,占多环芳烃总量的81.18%,5环和6环芳烃含量为339.27 μg/kg,仅占3.74%。不同器官中多环芳烃总量与含水量呈正相关。

**关键词:**南瓜;器官;多环芳烃;分布;积累

中图分类号: S642.101

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2021)02–0185–06

### Distribution and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbon in organs of *Cucurbita moschata*

WU Guifen<sup>1</sup>, LONG Minghua<sup>2\*</sup>, QIAO Shuangyu<sup>2</sup>

(1.Department of Chemical and Biological Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo, Guangxi 532200, China; 2.College of Agricultural, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

**Abstract:** *Cucurbita moschata* was used as the materials. The content of polycyclic aromatic hydrocarbon in *Cucurbita moschata* roots, stems, leaves, flowers, fruits was determined by high-performance liquid chromatography to analyze the distribution, migration and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbon. The result showed that the male flowers and young leaves had only 3 species, while young fruits had 11 species. The average content of polycyclic aromatic hydrocarbon was 994.11 μg/kg in *Cucurbita moschata* organs, in which the average content of vegetative organs was 1169.59 μg/kg, and the average content of reproductive organs was 854.11 μg/kg. Chrysene content in organs of *Cucurbita moschata* was ranging from 607.28 to 953.75 μg/kg, which was higher than the content of the other 15 polycyclic aromatic hydrocarbons. Polycyclic aromatic hydrocarbon in organs of *Cucurbita moschata* were dominated by 2, 3 and 4 rings, of which the sum of the 4 rings was 7364.27 μg/kg, accounting for 81.18% of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbon. The content of 5 and 6 rings was 339.27 μg/kg, accounting for only 3.74% of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbon. Positive correlation was found between the total content of polycyclic aromatic hydrocarbon and water content in *Cucurbita moschata*.

**Keywords:** *Cucurbita moschata*; organs; polycyclic aromatic hydrocarbon; distribution; accumulation

收稿日期: 2020–04–28

修回日期: 2020–10–30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360479); 广西壮族自治区农业农村厅广西农业科技创新联盟办公室“蔬菜产业科技先锋队”(桂农科盟202005–1); 国家现代农业产业技术体系广西大宗蔬菜创新团队项目(nycytgxxt-03–10–1)

作者简介: 巫桂芬(1985—), 女, 广西崇左人, 博士, 助理研究员, 主要从事农作物遗传育种研究, [wuguifen9999@163.com](mailto:wuguifen9999@163.com); \*通信作者, 龙明华, 教授, 主要从事农产品安全生产研究, [longmhua@163.com](mailto:longmhua@163.com)

煤、石油、木材、烟草、有机高分子化合物等不完全燃烧时产生挥发性碳氢化合物多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs),是环境和食品污染物<sup>[1-2]</sup>。多环芳烃污染物可造成蔬菜多环芳烃的积累<sup>[3]</sup>。16种优控的多环芳烃中,具有致癌、致畸、致突变作用的种类累积在蔬菜体内,通过食物链进入人体,对人类健康构成威胁<sup>[4-5]</sup>。LU等<sup>[6]</sup>认为,土壤中的多环芳烃不会向植物根内迁移。韩菲<sup>[7]</sup>认为地上部分的多环芳烃主要来自大气,但也有研究<sup>[8]</sup>发现多环芳烃可以在植株中传输。DELLA TORRE等<sup>[9]</sup>研究表明,胡萝卜和莴苣顶部的苯并(a)芘浓度高于底部的。PARRISH等<sup>[10]</sup>指出,植物地上部分多环芳烃含量显著高于根系的。万开等<sup>[11]</sup>研究了不同类别蔬菜中多环芳烃的分布特征,叶菜类较果菜类多环芳烃含量高。笔者以南瓜为材料,研究不同器官中多环芳烃的分布和积累,现将结果报告如下。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

金韩密本南瓜(*Cucurbita moschata* Duch. ex Poiret),购于广西南宁鸿林蔬菜种子经营部。

16种多环芳烃混合标准样品,2000 μg/mL,美国AccuStandard出品。

### 1.2 方法

试验于2017年在广西大学农学院基地进行。9月20日播种,播种前催芽,移苗栽培行株距为1.2 m×0.7 m,待南瓜幼苗长至20 cm后立架扶苗。

11月16日分别采集南瓜根、茎(未去皮和去皮)、老叶(从根部向上数第3、4片叶)、嫩叶(从顶部向下数第1、2片真叶)、雄花、雌花、幼蕾、幼果,11月24日,相同器官、相同节位再次取样。用蒸馏水洗净后晾干表面水分,恒温(55℃)烘干,研磨,置于4℃保存。

参考文献[12],提取南瓜各器官多环芳烃,用

高效液相色谱仪测定其含量。

参照文献[13],计算每种多环芳烃的毒性当量。运用苯并芘毒性当量法评价南瓜各器官多环芳烃的风险。16种多环芳烃总毒性当量等于每种毒性当量因子乘以该物质含量之和<sup>[14]</sup>。

### 1.3 数据处理

采用Excel 2013进行数据处理,SPSS 18.0进行相关性分析及差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 南瓜器官中多环芳烃的种类和含量

测定结果(表1)表明,南瓜不同器官中的多环芳烃种类和含量都有差异。南瓜幼果所含多环芳烃的种类最多,为11种(萘、芴烯、芘、芴、菲、荧蒹、芘、苯并(a)蒽、屈、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)二萘嵌苯);雄花和嫩叶中种类最少,仅有3种(萘、芴烯、屈);雌花中多环芳烃的种类是雄花的3倍以上,差别很大。南瓜各器官中均可检测到萘和芴烯,其中萘含量为32.95~321.41 μg/kg,芴烯含量为75.52~130.57 μg/kg;南瓜各器官中未检测到蒽、苯并(k)荧蒹和苯并(a)芘。南瓜不同器官中芴烯和屈的含量比其他多环芳烃的含量高,其中屈的含量最高,为607.28~953.75 μg/kg。南瓜去皮茎和未去皮茎的多环芳烃种类相同,但未去皮茎中的萘、菲、芘和苯并(g,h,i)二萘嵌苯的含量比去皮茎的低。未去皮茎中芴烯、芴、荧蒹、苯并(a)蒽、屈和二苯并(a,h)蒽的含量高于去皮茎的。除屈外,雌花中检测到的其他多环芳烃含量均比雄花中的高。南瓜各器官中的多环芳烃主要以2环、3环和4环芳烃为主(占90%以上),其中4环芳烃的含量为7364.27 μg/kg,占多环芳烃总量的81.18%,5环和6环芳烃的含量为339.27 μg/kg,仅占多环芳烃总量的3.74%,说明南瓜不同器官对不同类别多环芳烃的合成、吸收与运输具有一定的选择性。

表 1 南瓜器官中多环芳烃的含量

Table 1 Contents of polycyclic aromatic hydrocarbons in *Cucurbita moschata* organs

| 南瓜器官 | 多环芳烃/( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |         |        |       |       |   |        |        |
|------|---|---------|--------|-------|-------|---|--------|--------|
|      | 萘   | 芘烯      | 芘      | 苊     | 菲     | 蒽 | 荧蒽     | 芘      |
| 根    | 32.53b                                    | 119.47a | —      | 8.84a | 1.27c | — | 1.89c  | 13.82d |
| 未去皮茎 | 32.98b                                    | 106.67c | —      | 6.17b | 0.17d | — | 14.43a | 17.75c |
| 去皮茎  | 33.32b                                    | 75.52h  | —      | 6.12b | 0.61d | — | 1.84c  | 18.13c |
| 老叶   | 36.32a                                    | 97.35e  | 51.70a | —     | —     | — | —      | 8.33e  |
| 嫩叶   | 32.94b                                    | 101.85d | —      | —     | —     | — | —      | —      |
| 雄花   | 33.05b                                    | 83.18g  | —      | —     | —     | — | —      | —      |
| 雌花   | 34.12b                                    | 87.78f  | 43.12b | 5.28b | 2.38b | — | 2.31b  | 30.42b |
| 幼蕾   | 33.32b                                    | 99.87d  | —      | —     | —     | — | —      | —      |
| 幼果   | 35.73a                                    | 109.36b | 43.88b | 8.27a | 4.53a | — | 2.08c  | 58.59a |

| 南瓜器官 | 多环芳烃/( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |         |         |         |        |           |               |                |
|------|---|---------|---------|---------|--------|-----------|---------------|----------------|
|      | 苯并(a)蒽                                    | 屈       | 苯并(b)荧蒽 | 苯并(k)荧蒽 | 苯并(a)芘 | 二苯并(a,h)蒽 | 苯并(g,h,i)二萘嵌苯 | 茚并(1,2,3-c,d)芘 |
| 根    | 3.16d                                     | 935.83b | —       | —       | —      | 69.75a    | 4.45d         | —              |
| 未去皮茎 | 0.84e                                     | 935.03b | —       | —       | —      | 33.68b    | 10.01b        | —              |
| 去皮茎  | 0.64e                                     | 820.46d | —       | —       | —      | 21.36d    | 48.99a        | —              |
| 老叶   | 39.31b                                    | 953.75a | —       | —       | —      | —         | 8.07c         | —              |
| 嫩叶   | —   | 903.54c | —       | —       | —      | —         | —             | —              |
| 雄花   | —   | 629.45g | —       | —       | —      | —         | —             | —              |
| 雌花   | 11.70c                                    | 607.28h | —       | —       | —      | 16.18e    | —             | —              |
| 幼蕾   | —   | 656.28e | 86.3    | —       | —      | —         | —             | —              |
| 幼果   | 48.82a                                    | 648.57f | —       | —       | —      | 29.96c    | 10.53b        | —              |

同列不同字母表示不同器官中多环芳烃含量差异显著( $P<0.05$ )；“—”表示未检测出。

## 2.2 南瓜不同器官中多环芳烃总量及差异性

南瓜各器官中 16 种优控多环芳烃总量平均值为  $994.11 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，其中营养器官多环芳烃总量平均值为  $1169.59 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，生殖器官多环芳烃总量平均值为  $854.11 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，表现为营养器官多环芳烃总量比生殖器官的高。南瓜根的多环芳烃总量最高，为  $1191.02 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。比较老嫩器官多环芳烃总量，老叶中所含的多环芳烃总量比嫩叶中多  $122.04 \mu\text{g}/\text{kg}$ ；幼蕾比雄花的高  $72.55 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，但比雌花低  $14.4 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。可见多环芳烃总量大小与器官的成熟度有关，且与器官的功能有关。

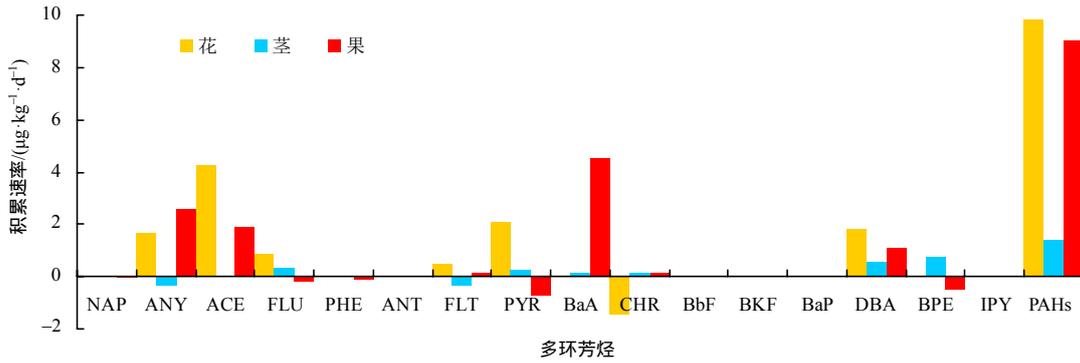
## 2.3 南瓜不同器官的含水量对多环芳烃的影响

南瓜不同器官多环芳烃总量与其含水量的相

关性分析结果表明，不同器官的多环芳烃总量与其含水量在 0.01 水平上显著相关，相关系数达到 0.833，表明南瓜器官中含水量与其体内多环芳烃含量呈正相关。

## 2.4 南瓜不同器官中的多环芳烃含量随时间的变化速率

16 种多环芳烃的含量变化，有正效应，也有负效应(图 1)。经过 8 d 后，南瓜花、茎和果实中 16 种多环芳烃含量变化速率在横坐标的两侧均有分布，且表现为总的正效应大于总的负效应。花、茎和果实中变化速率最快的多环芳烃分别为芘、苯并(a)蒽和苯并(g,h,i)二萘嵌苯。从多环芳烃总量的变化速率来看，雄花的变化速率最大，其次是果实，茎的变化速率比花和果实的弱。



NAP 为萘, ANY 为芴烯, PHE 为菲, FLU 为芴, ACE 为芘, ANT 为蒽, FLT 为荧蒽, PYR 为芘, BaA 为苯并(a)蒽, CHR 为屈, BbF 为苯并(b)荧蒽, BKF 为苯并(k)荧蒽, BaP 为苯并(a)芘, DBA 为二苯并(a,h)蒽, IPY 为茚并(1,2,3-c,d)芘, BPE 为苯并(g,h,i)二萘嵌苯。

图 1 16 种多环芳烃在南瓜器官中的积累速率

Fig.1 Accumulative rate of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in different organs of *Cucurbita moschata*

### 2.5 南瓜不同器官中多环芳烃的空间累积效应

根据 16 种多环芳烃在南瓜不同器官中积累量所占的百分比(图 2)可知, 芴烯和屈的含量在各器官中所占比例差别不大。萘、芴烯、屈和二苯并(a,h)

蒽表现为在根→茎→雌花→果实的传递链中容易受植物本身的生理作用影响, 而出现明显的累积效应, 而二苯并(a,h)蒽的致癌性极强, 应重点防控其在食用器官中的积累。

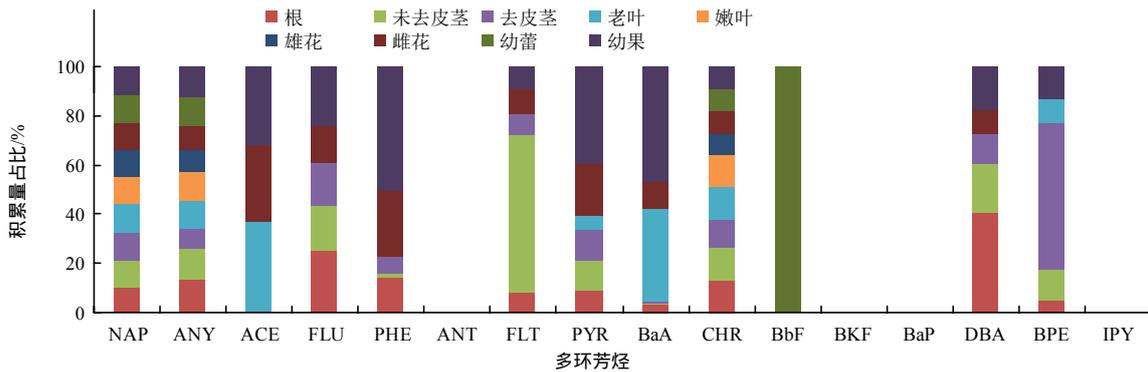


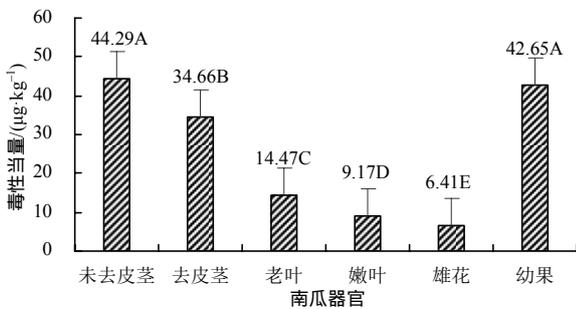
图 2 南瓜不同器官中 16 种多环芳烃的占比

Fig.2 Percentages of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in different organs of *Cucurbita moschata*

### 2.6 南瓜各器官中多环芳烃的毒性特征

图 3 结果表明, 南瓜可食用部分(去皮茎、嫩叶、雄花和幼果)中, 幼果的毒性当量值最大, 其次是去

皮茎, 毒性最小的是雄花。以去皮茎、嫩叶、雄花和幼果的毒性当量总和定为 100%, 则这 4 种食用器官的毒性贡献率分别为 37.32%、9.87%、6.90% 和 45.91%。未去皮茎比去皮茎毒性高 10.36%; 老叶的毒性比嫩叶的高 6.41%。



不同字母表示不同器官中多环芳烃总含量的毒性当量差异极显著( $P < 0.01$ )。

图 3 南瓜不同器官中多环芳烃总量的毒性当量

Fig.3 Toxicity equivalence of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons in different organs of *Cucurbita moschata*

### 3 结论与讨论

本研究结果表明, 南瓜不同器官中的多环芳烃含量与其含水量呈正相关, 含水量大小直接影响多环芳烃的分布与迁移。各器官中的多环芳烃主要以 2 环、3 环和 4 环芳烃为主, 不同器官的 2 环芳烃含量基本一致; 高环芳烃主要以二苯并(a,h)蒽和苯并(g,h,i)二萘嵌苯的形式分布在根、茎、叶和果实中。南瓜茎和果实中多环芳烃毒性当量较高, 去皮

可在一定程度上降低多环芳烃的污染风险。

南瓜营养器官的多环芳烃总量远大于繁殖器官中的多环芳烃总量,说明多环芳烃容易分布于吸收营养的器官中,这是因为营养器官有吸收和运输物质的结构或通道<sup>[15]</sup>。从多环芳烃环数分布来看,南瓜各器官内多环芳烃以低环为主,5 环以上的多环芳烃在南瓜各器官内的含量较低。主要由于二苯并(a,h)蒽和苯并(g,h,i)二萘嵌苯的毒性大,因此这 2 种物质在蔬菜体内的富集应引起高度重视。植物体内多环芳烃的分布不仅与其器官的结构功能有关,还与物质构型或构象有关<sup>[16-17]</sup>。环数低、构象简单且亲水性好的多环芳烃容易在蔬菜植株体内迁移和重新分配<sup>[18]</sup>。

植物不同生育期的含水量和代谢强度不同,吸收多环芳烃的能力也不同<sup>[19-20]</sup>。南瓜的多环芳烃含量与含水量的相关系数为 0.833,表明南瓜的含水量与多环芳烃含量有强的相关性,含水量越高,越有利于多环芳烃的转移或转化。水在植株体内除了作为溶剂外,还充当了载体的作用<sup>[21-22]</sup>。植物体内水的流向可为多环芳烃的运输作导向。幼嫩器官中多环芳烃的迁移比衰老器官的快,因为幼嫩器官的营养更新快。多环芳烃积累量表现为衰老器官中的高于幼嫩器官中的,是衰老器官中的多环芳烃经过了长时间积累的结果。物质在某一器官的迁移速率大,其积累量不一定就最大,还要考虑该物质在器官中的积累时间。多环芳烃在植物不同器官中迁移与积累,既有正效应,也有负效应,且速率大小也不同。雄花、未去皮茎和幼果中都表现为总的正效应大于总的负效应,其中变化速率最快的多环芳烃分别为蒽、苯并(a)蒽和苯并(g,h,i)二萘嵌苯。雄花对蒽、蒽、芴、荧蒽、芘、苯并(a)蒽和二苯并(a,h)蒽有吸收和积累作用,而对屈则表现为外排或清除作用;未去皮茎对芴、菲、芘、苯并(a)蒽、屈、二苯并(a,h)蒽和苯并(g,h,i)二萘嵌苯有吸收和积累作用,对萘、芘和荧蒽表现为外排或去除作用;果实对蒽、蒽、荧蒽、苯并(a)蒽、屈和二苯并(a,h)蒽有吸收和积累作用,而对萘、芴、菲、芘和苯并(g,h,i)二萘嵌苯为外排或去除作用。这些结果表明,南瓜不同器官对多环芳烃的吸收、转移和积累具有选择性,结构复杂的物质的迁移难度较大。

南瓜的嫩茎、嫩叶、雄花和果实常被用作食材,

这 4 种器官多环芳烃毒性当量对毒性的贡献率分别为 37.32%、9.87%、6.90%和 45.91%,嫩叶和雄花的毒性比茎和果实的低得多,可见茎和果实是南瓜中多环芳烃积累的主要器官。当植株存在一定生态风险时,应避免食用毒性较大的茎和果实。对于尚不存在生态风险的植株,以上 4 个部位均可食用。

本研究发现,未去皮茎比去皮茎的毒性高 10.36%;老叶的毒性比嫩叶的高 6.41%,提示食用未去皮的南瓜茎或较老南瓜叶可能会增加多环芳烃等有害物质的摄入量。

#### 参考文献:

- [1] VOUTSA D, SAMARA C. Dietary intake of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons via vegetables grown in an industrial Greek area[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, 218(2/3): 203-216.
- [2] KHAN S, CAO Q. Human health risk due to consumption of vegetables contaminated with carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(2): 178-184.
- [3] 滕芝妍, 崔雨同, 应学兵, 等. 不同南瓜品种的综合评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(1): 143-150.
- [4] TENG Z Y, CUI Y T, YING X B, et al. Comprehensive evaluation of pumpkin cultivars based on a principal component analysis[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2020, 37(1): 143-150.
- [5] FISMES J, PERRIN-GANIER C, EMPEREUR-BISSONNET P, et al. Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1649-1656.
- [6] AKHBARIZADEH R, MOORE F, KESHAVARZI B, et al. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons risk assessment in coastal water and sediments of Khark island, SW Iran[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 108(1/2): 33-45.
- [7] LU L, WANG Z, PEI J G. Sources and contamination characteristics of pahs in environmental media in a karst underground river system(southern China)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(7): 2315-2325.
- [7] 韩菲. 多环芳烃来源与分布及迁移规律研究概述[J]. *气象与环境学报*, 2007, 23(4): 57-61.
- [8] HAN F. Review on origin, distribution and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007, 23(4): 57-61.
- [8] ASHRAF M W, TAQVI S I H, SOLANGI A R, et al. Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic

- hydrocarbons in vegetables grown in Pakistan[J]. *Journal of Chemistry*, 2013, 2013: 1–5.
- [9] DELLA TORRE C, CORSI I, NARDI F, et al. Transcriptional and post-transcriptional response of drug-metabolizing enzymes to PAHs contamination in red mullet(*Mullus barbatus*, Linnaeus, 1758): a field study[J]. *Marine Environmental Research*, 2010, 70(1): 95–101.
- [10] PARRISH Z D, WHITE J C, ISLEYEN M, et al. Accumulation of weathered polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) by plant and earthworm species[J]. *Chemosphere*, 2006, 64(4): 609–618.
- [11] 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 G Y, et al. Distribution characteristics of PAHs in vegetables of typical City of Pearl River Delta[J]. *Soils*, 2009, 41(4): 583–587.
- [12] 巫桂芬, 龙明华, 乔双雨, 等. 不同栽培环境下豇豆体内多环芳烃源解析及风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12): 2651–2659. WU G F, LONG M H, QIAO S Y, et al. Source analysis and risk assessment of PAHs in *Vigna unguiculata*(Linn.) Walp in different culture environments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2651–2659.
- [13] HUSSAR E, RICHARDS S, LIN Z Q, et al. Human health risk assessment of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of chattanooga, tennessee, USA[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2012, 223(9): 5535–5548.
- [14] 龙明华, 巫桂芬, 梁勇生, 等. PAHs胁迫对菜心品质及其解毒系统的影响[J]. *南方农业学报*, 2017, 48(6): 1036–1041. LONG M H, WU G F, LIANG Y S, et al. Influence of PAHs stress on *Brassica parachinensis* Bailey quality and its detoxification system[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(6): 1036–1041.
- [15] SHI T, TIAN K, BAO H, et al. Variation in foliar uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons in six varieties of winter wheat[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(35): 27215–27224.
- [16] PENG C, WANG M E, ZHAO Y, et al. Distribution and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban and rural soils of Beijing with various land uses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(3): 1–12.
- [17] HU J, LIU C Q, ZHANG G P, et al. Distribution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in the Liao River drainage basin, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4): 1–12.
- [18] FENG J L, LI X Y, ZHAO J H, et al. Distribution, transfer, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in soil-wheat systems of Henan province, a typical agriculture province of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(22): 18195–18203.
- [19] WANG L, XU X, LU X. Composition, source and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in vegetable soil from the suburbs of Xianyang City, Northwest China: a case study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 75(1): 1–13.
- [20] KIPOPOULOU A M, MANOLI E, SAMARA C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 106(3): 369–380.
- [21] HAN J H, KIM M J, SHIN H S. Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbon contents and risk assessment for infant formula in Korea[J]. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2014, 57(2): 173–179.
- [22] GAO H X, CAO Y H, LIU Y L, et al. Study of the genotoxicity of organic extracts from wastewater-irrigated vegetables using in vitro and in vivo biological tests[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(8): 7051–7059.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维