

北京设施蔬菜基地蔬菜中邻苯二甲酸酯残留特征分析

陈佳祎^{1,2}, 李成^{1,2}, 栾云霞^{1,2}, 王纪华¹, 陆安祥^{1,2*}

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097; 2. 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: **目的** 研究北京设施农业蔬菜中的邻苯二甲酸酯类(phthalic acid ester, PAEs)的污染水平, 分析北京设施农业蔬菜中 PAEs 污染物特征。**方法** 采集北京市昌平区、延庆区和顺义区的 8 个典型设施蔬菜基地 16 份蔬菜样品, 利用超声提取、固相萃取柱净化、内标法定量, 气相色谱质谱联用技术分析蔬菜中 15 种 PAEs。**结果** 在分析的蔬菜样品中均检测出 PAEs, 15 种 PAEs 总浓度(Σ PAEs)为 0.15~6.94 mg/kg, 平均含量为 4.91 mg/kg。蔬菜中 PAEs 的单体分布相似, 其中以邻苯二甲酸(2-乙基)己酯(DEHP)含量最高, 占 Σ PAEs 的 36.9%, 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP)含量次之, 分别占 Σ PAEs 的 33.5%和 19.2%。**结论** 设施蔬菜基地地膜的使用导致 PAEs 存在于各类蔬菜, 蔬菜中的 PAEs 残留量应引起重视。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 蔬菜基地; 蔬菜

Analysis of residual characteristics of phthalate acid esters (PAEs) in vegetables from greenhouse vegetable production bases in Beijing

CHEN Jia-Yi^{1,2}, LI Cheng^{1,2}, LUAN Yun-Xia^{1,2}, WANG Ji-Hua¹, LU An-Xiang^{1,2*}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Objective To study the pollution level of phthalic acid ester (PAEs) and analyze the pollution characteristics in vegetables of facility vegetable base. **Methods** The 16 vegetable samples were collected from 8 typical vegetable production bases located in Changping, Yanqing and Shunyi District. Fifteen kinds of PAEs were analyzed through ultrasonic extraction, solid phase extraction column purification, isotope internal standard quantization and gas chromatography-mass spectrometry. **Results** PAEs were ubiquitous contaminants in vegetables, and total PAE concentrations ranged from 0.15 to 6.94 mg/kg, with the average content of 4.91 mg/kg in the vegetable samples. The distribution of PAEs monomer in various vegetables was similar. The concentration of bis (2-ethylhexyl) phthalate was the highest, followed by dibutyl phthalate and diisobutyl phthalate. The proportion of bis (2-ethylhexyl) phthalate, dibutyl phthalate and diisobutyl phthalate in PAEs was 36.9%, 33.5% and 19.2%, respectively. **Conclusion** The residual value of PAEs in vegetables deserves more attention due to widely

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401540)、北京市农林科学院青年基金(QNJJ201531)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41401540) and the Youth Scientific Funds of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (QNJJ201531)

*通讯作者: 陆安祥, 副研究员, 主要研究方向为检测技术研究。E-mail: luax@nrcita.org.cn

*Corresponding author: LU An-Xiang, Associate Professor, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Laboratory Building 1005, No.9 Shuguang Garden Middle Street, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: luax@nrcita.org.cn

application of film in facility vegetable base.

KEY WORDS: phthalic acid ester; vegetable base; vegetable

1 引言

邻苯二甲酸酯(phthalic acid ester, PAEs)又称酞酸酯,是邻苯二甲酸与醇形成的酯类,可用作农药载体、驱虫剂、化妆品、润滑油和去污剂生产原料^[1],作为增塑剂提高塑料制品的延展性和柔软度而广泛应用于棚膜、地膜生产中的一类人工合成有机化合物^[2-4]。数据表明,PAEs用于塑料中的增塑剂约占总产量的80%,塑料中PAEs的添加量高达20%~50%^[5]。PAEs与塑料制品中的基质是以氢键或范德华力等物理方式结合,并未通过化学键结合到产品的碳链上,随着时间的推移,PAEs在强光、雨淋、风寒等环境暴露下,不断从塑料中释放出来,从而进入土壤、水体和大气等环境介质中^[6,7]。

PAEs以稳定的形式存在于环境中,具有较强的生物蓄积毒性^[5],可以通过植物富集作用进入食物链危害人体健康,给人体和环境带来潜在危害与污染风险^[8]。大量研究表明,PAEs具有致癌、致畸、致突变作用^[5],国外对农业环境中有机污染物的研究较早,制定了PAEs的相关控制标准,我国尚未制定土壤及蔬菜中PAEs化合物的标准,美国国家环保局(USEPA)将邻苯二甲酸二甲酯(dimethyl phthalate)、邻苯二甲酸二乙酯(diethyl phthalate)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(benzyl butyl phthalate)、邻苯二甲酸正二辛酯(di-n-octyl phthalate)、邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate)、邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯(bis(2-ethylhexyl) phthalate)等6种邻苯二甲酸酯类化合物列为“优控污染物”,我国也将邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二甲酯和邻苯二甲酸正二辛酯列为“优控污染物”^[6]。

设施农业基地蔬菜的种植大量使用地膜、棚膜,如蔬菜幼苗被塑料地膜覆盖,生长在塑料大棚中,土壤和水环境在长期使用含有PAEs的地膜和棚膜,因此存在塑化剂残留的可能性。蔬菜的整个生长过程都暴露在PAEs环境,植物通过各种暴露途径而使污染物富集在植物组织中,发生生物富集作用^[9-12]。近年来,我国对土壤中的PAEs化合物污染特征及规律研究较多^[8, 13-18],但对典型农产品生产区域蔬菜中的PAEs污染特征和健康风险评价研究较少。因此,本研究选择北京市设施蔬菜基地典型区域(顺义区、延庆区、昌平区)的蔬菜进行调查取样,采用气相色谱质谱联用技术对土壤中的15种PAEs化合物进行测定,研究不同取样地点的蔬菜中PAEs类化合物的分布特征,初步探讨其污染水平,以期评估北京设施蔬菜基地PAEs的潜在风险提供数据基础。

2 材料与方法

2.1 仪器与试剂

正己烷、二氯甲烷、甲醇(色谱纯,美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

PAEs 标样(浓度为 1000 μg/mL, 美国 O2SI 公司), 15 种 PAEs 为: 邻苯二甲酸二甲酯(dimethyl phthalate)、邻苯二甲酸二乙酯(diethyl phthalate)、邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(benzyl butyl phthalate)、邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯(bis(2-ethylhexyl) phthalate)、邻苯二甲酸正二辛酯(di-n-octyl phthalate)、邻苯二甲酸二异丁酯(diisobutyl phthalate)、邻苯二甲酸二(2-甲氧基)乙酯(bis(2-methoxyethyl) phthalate)、邻苯二甲酸(4-甲基-戊基)酯(bis(4-methyl-2-pentyl) phthalate)、邻苯二甲酸二(2-乙氧基)乙酯(bis(2-ethoxyethyl) phthalate)、邻苯二甲酸二戊酯(dipentyl phthalate)、邻苯二甲酸二己酯(dihexyl phthalate)、邻苯二甲酸二(2-丁氧基)乙酯(bis(2-n-butoxyethyl) phthalate)、邻苯二甲酸二环己酯(dicyclohexyl phthalate)、邻苯二甲酸二苯酯(diphenyl phthalate); 内标物苯甲酸苄酯(浓度为 5000 μg/mL, 德国 Dr. Ehrenstorfer 公司); 标准替代物邻苯二甲酸二丁酯(DBP-D₄) (浓度为 100 μg/mL, 德国 Dr. Ehrenstorfer 公司)。

滤纸、脱脂棉等依次经过正己烷、二氯甲烷和甲醇进行索氏抽提 12 h 后烘干备用。层析用硅胶依次用二氯甲烷和甲醇进行索氏抽提后置于烘箱(130 °C~140 °C)烘 4 h, 保存至干燥器中备用, 硫酸钠(分析纯)放入坩埚置于马弗炉中烘 4 h, 保存至干燥器中备用。

QP-2010plus 气相色谱质谱联用仪(日本岛津公司); SX₂-12TP 马弗炉(美国 Sigma 公司); N-EVAP 氮吹仪(美国 Organomation 公司); LGJ-10 真空冷冻干燥机(北京松源华兴科技发展有限公司); R-210 旋转蒸发器(瑞士 Buchi 公司)。

2.2 试验方法

2.2.1 样品采集

根据蔬菜生产基地的分布状况、种植模式和周边环境,采取随机布点法,样品采集于 2014 年 3 月至 8 月,分别选择北京郊区昌平、顺义和延庆的蔬菜基地,在名称及编号为昌平 1(CP1)、昌平 2(CP2)、昌平 3(CP3)、昌平 4(CP4)、顺义 1(SY1)、顺义 2(SY2)、顺义 3(SY3)和延庆 1(YQ1)的 8 个代表性生产基地进行采样,每个基地采集蔬菜样品 1~3 个,每个样品重量约 1~2 kg,共 16 个蔬菜样,样品种

类包括辣椒、苦瓜、洋葱、芹菜、西红柿、豇豆。主要采集蔬菜可食用部分,装入牛皮纸袋。用蒸馏水冲净表面泥土,室内风干,置于真空冷冻干燥机-60℃干燥,去除水分后研磨成粉末至1mm备测。

2.2.2 样品前处理

提取:样品预处理方法采取超声波提取,称取蔬菜样品2g至30mL玻璃离心管中,加入10μL,10mg/L标物替代物DBP-D₄与20mL体积比为1:1的丙酮-正己烷混合,锡纸封口后加盖,涡旋1min混合均匀,超声提取15min,3000r/min离心5min,将上清液转移至圆底瓶中,重复上述提取步骤,合并提取液于圆底瓶,合并后提取液旋转蒸发至剩余1~2mL,加入5mL正己烷,旋转蒸发浓缩至剩余约1mL。

净化:样品净化参照Ma等的方法^[19],具体步骤为:分别用15mL的正己烷和15mL体积比为1:4的丙酮-正己烷混合液活化硫酸钠(2g)-三氧化二铝(6g)-硅胶(12g)层析柱,将提取液转移过层析柱分离,采用40mL(V:V,1:4)的丙酮-正己烷进行洗脱,洗脱液经旋转蒸发浓缩,转移到离心管,氮吹至体积小于1mL,迅速加入10μL10mg/L苯甲酸苄酯内标溶液,用丙酮-正己烷(V:V,1:4)定容至1mL,转移到进样瓶,供GC-MS分析。

2.3 样品GC-MS分析与质控

气相色谱质谱联用仪为岛津GC-MSQP2010Plus,色

谱柱为DB-5MS30m×250mm(*i.d.*)×0.25μm,载气为氦气(纯度99.999%),采取程序升温:初温60℃,保持1min,以20℃/min升至220℃,保持10min,再以5℃/min升至280℃,保持8min,总运行时间30min。采用不分流进样,接口温度为250℃,进样体积为1μL,流速0.8mL/min,电离方式:电子电离源,离子源温度:230℃,为提高灵敏度降低干扰,本方法采用SIM模式进行质谱全扫描,15种PAEs的保留时间、定性和定量离子见表1。

PAEs类化合物在环境中普遍存在,特别是DEHP、DBP和DIBP,为了控制本底过高造成实验误差,在实验中避免使用塑料器皿和仪器,实验选用玻璃离心管,玻璃移液管和进样针代替塑料离心管,塑料枪头,实验所用的玻璃仪器均用清洁剂清洗,超纯水冲洗,乙醇浸泡,通风厨中通风至乙醇挥发,经过马弗炉400℃烘烤6h,以最大程度降低本底干扰。

样品分析前均做程序空白、加标空白和基质加标空白实验,仅有少量DBP、DEHP和DIBP在仪器程序空白中被检测到,含量在0.0008~0.005mg/kg之间,蔬菜样品DBP、DEHP和DIBP的含量数据进行了矫正处理,并扣除背景值。每个样品均加入DBP-D₄作为回收率指示物监控分析过程,结果显示样品中的DBP-D₄回收率为81.2%±6.7%;基质加标回收试验中15种PAEs化合物的回收率为79.3%~108.6%(RSD<10%)。

表1 15种邻苯二甲酸酯类化合物的保留时间和监测离子
Table 1 Retention times and monitor ions of 15 kinds of phthalate esters

编号	缩写	中文名称	保留时间/min	定性离子	定量离子
1	DMP	邻苯二甲酸二甲酯	7.73	77,76	163
2	DEP	邻苯二甲酸二乙酯	8.593	177,176	149
3	DIBP	邻苯二甲酸二异丁酯	10.363	57,150	149
4	DBP	邻苯二甲酸二丁酯	11.147	150,56	149
5	DMEP	邻苯二甲酸二(2-甲氧基)乙酯	11.45	58,149	59
6	BMPP	邻苯二甲酸(4-甲基-戊基)酯	12.12	85,167	149
7	DEEP	邻苯二甲酸二(2-乙氧基)乙酯	12.825	72,149	73
8	DPP	邻苯二甲酸二戊酯	12.54	150,237	149
9	DHXP	邻苯二甲酸二己酯	12.967	150,251	149
10	BBP	邻苯二甲酸丁基苄基酯	15.177	91,206	149
11	DBEP	邻苯二甲酸二(2-丁氧基)乙酯	16.77	56,149	57
12	DCHP	邻苯二甲酸二环己酯	17.46	167,55	149
13	DEHP	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	17.63	57,167	149
14	DPhP	邻苯二甲酸二苯酯	17.81	77,76	225
15	DnOP	邻苯二甲酸正二辛酯	20.213	57,150	149

3 结果与分析

3.1 北京设施农业蔬菜中邻苯二甲酸酯的总含量(Σ PAEs)及分布特征

北京市不同蔬菜样品中 PAEs 的含量状况如表 2 所示。15 种 Σ PAEs 化合物的含量范围为 0.15~6.94 mg/kg 蔬菜干重, 平均含量 1.49 mg/kg。其中 CP2 基地的苦瓜样品中检测到的 Σ PAEs 含量最高, 为 6.940 mg/kg, CP3 基地的茄子中的含量最低, 为 0.200 mg/kg。北京市不同产区 Σ PAEs 含量在 0.5~1 mg/kg 的占 25%, Σ PAEs 含量在 1~5 mg/kg 的占 31%, 其中 Σ PAEs 含量 < 0.5 mg/kg 的占 37.5%, Σ PAEs 含量 > 5 mg/kg 的占 6% 左右。 Σ PAEs > 5 mg/kg 的是苦瓜, 在 0.5~5 mg/kg 之间的有辣椒、豇豆和西红柿, 其中 Σ PAEs 含量 < 0.5 mg/kg 的蔬菜有洋葱、茄子和芹菜。不同产区的同种蔬菜, Σ PAEs 含量具有明显差异, 如 CP1 两个生产基地辣椒 Σ PAEs 的平均含量为 3.825 mg/kg, 高于 YQ1 的辣椒的 Σ PAEs 含量 2.130 mg/kg。同一基地不同蔬菜之间的 Σ PAEs 含量的差异较大, 如 CP2 基地, 苦瓜的 Σ PAEs 含量为 6.94 mg/kg, 高于洋葱的 Σ PAEs 含量 0.260 mg/kg; 而 SY3 基地, 西红柿的 Σ PAEs 含量为 1.37 mg/kg, 高于辣椒

表 2 北京市蔬菜基地蔬菜中 PAEs 化合物总含量(mg/kg)
Table 2 Concentration of Σ PAEs in vegetables from greenhouse vegetable production bases in Beijing (mg/kg)

基地名称编号	蔬菜种类	范围	平均值
CP1	辣椒 1	3.190~4.460	3.825
	辣椒 2		
CP2	苦瓜	6.940	6.940
	洋葱	0.260	0.260
CP3	茄子 1	0.170~0.230	0.200
	茄子 2		
CP4	芹菜 1	0.270~0.340	0.305
	芹菜 2		
SY1	西红柿	0.550	0.550
SY2	豇豆 1	0.920~1.370	1.145
	豇豆 2		
SY3	西红柿	1.370	1.370
	辣椒	0.900	0.900
YQ1	西红柿 1	0.150~0.530	0.340
	西红柿 2		
	辣椒		

的 Σ PAEs 含量 0.900 mg/kg; YQ1 基地的辣椒 Σ PAEs 含量为 2.130 mg/kg, 高于同一基地西红柿 Σ PAEs 的平均含量 0.340 mg/kg。欧洲经济共同体食品科学委员会建议, 经口摄入的 PAEs 化合物总量不超过 0.3 mg/kg(以体质量计), 以 60 kg 体重为标准, 每人每日摄入 500 g 蔬菜, 在八个蔬菜基地中 Σ PAEs 含量最高的为 CP2 基地苦瓜, Σ PAEs 含量并未超出所建议的摄入范围, 因此北京八个典型蔬菜生产基地的农产品 Σ PAEs 含量并未超标。

3.2 北京设施农业蔬菜中邻苯二甲酸酯单体化合物含量特征

北京设施农业基地蔬菜中 15 种 PAEs 单体化合物含量差异较大, 但所含 15 种 PAEs 单体种类相似。如图 1 所示, DEHP、DBP 和 DIBP 为主要单体, 分别占 Σ PAEs 含量 36.9%、33.5%和 19.2%。如图 1 所示, DMP 含量范围为 0.003~0.017 mg/kg, 检出率 100%, 平均值为 0.008 mg/kg, 昌平、顺义和延庆三个产区的 DMP 含量范围相差不明显。DEP 的含量范围为 nd~0.036 mg/kg, 平均值为 0.011 mg/kg, DEP 的检出率为 94%, 其中 YQ1 产区蔬菜中的 DEP 平均值含量明显低于另外两个产区。DIBP 的含量范围在 0.008~2.028 mg/kg 之间, 平均值为 0.285 mg/kg, DIBP 的检出率为 100%, 其中 CP4 产区苦瓜中含量最高, 达到 2.028 mg/kg。DBP 的含量范围为 0.016~2.954 mg/kg, 平均值为 0.498 mg/kg, DBP 的检出率为 100%, 其中昌平产区的苦瓜含量最高, 高达 2.238 mg/kg。DEHP 的含量范围在 0.049~2.625 mg/kg 之间, 检出率为 100%, DEHP 的平均含量为 15 种 PAEs 中最高的单体化合物, 平均值为 0.549 mg/kg, 其中 CP1 和 CP2 产区的辣椒和苦瓜含量较高, DEHP 的平均含量分别为 1.77 mg/kg 和 2.625 mg/kg。美国环境健康危害评估办公室(OEHHA)指出, 人体每日最大的 DEHP 允许摄入量不超过 0.05 mg/kg(以体质量计), 若以 60 kg 体重计算, 每人每日获取 500 g 蔬菜, DEHP 含量最高的 CP1 和 CP2 基地的辣椒和苦瓜中, DEHP 含量均未超过 OEHHA 的建议范围, 因此可以放心食用。而蔬菜样品中 DMPP、BMPP、DEEP、DPP、DHXP、BBP、DBEP、DCHP、DPhP 和 DnOP 化合物含量普遍低, 因此, 北京市蔬菜基地三大产区的 PAEs 单体化合物含量以 DEHP 为主, 其次为 DBP 和 DIBP, 其含量在不同产区不同基地均有差异, 此结果可能与农用薄膜中 DEHP 与 DBP 是增塑剂的主要成分有关, 由于 DEHP 和 DBP 两种单体的分子量大, 水溶性差, 容易被土壤吸附, 不易通过其他途径分解, 因此在土壤中积累, 并且 DEHP 和 DBP 由于难以被植物降解, 有较强的生物富集性, 所以在蔬菜中的含量较高。

北京设施农业蔬菜与珠江三角洲、广州东莞和山东寿光地区蔬菜中 PAEs 含量相比^[20-23], 北京蔬菜基地蔬菜中 Σ PAEs 含量较低。如表 3 所示, 珠江三角洲地区芹菜、苦瓜和茄子的 Σ PAEs 含量范围 1.880~4.452 mg/kg, 其中芹菜

表3 其他设施农业蔬菜中 PAEs 污染特征(mg/kg)
Table 3 Concentration of PAEs in vegetables from vegetable fields (mg/kg)

采样地点	蔬菜品种	DMP	DEP	DBP	BBP	DEHP	DnOP	∑ PAEs
珠江三角洲	芹菜	0.108	0.238	1.401	0.041	2.604	ND	4.452
	苦瓜	ND	0.890	2.320	ND	0.000	ND	3.210
	茄子	ND	0.000	0.635	ND	1.245	ND	1.880
东莞	芹菜	0.071	0.021	0.656	0.021	2.455	ND	3.223
	豆角	-	-	0.314	0.450	0.046	-	0.811
寿光	辣椒	0.117	0.099	4.205	-	4.652	-	9.073

注: 表中 ND 表示未检出

的∑PAEs 含量 4.452 mg/kg, 东莞地区芹菜中∑PAEs 含量为 3.223 mg/kg, 高于 CP4 基地的∑PAEs 含量 0.305 mg/kg; 珠江三角洲地区苦瓜中的∑PAEs 含量 3.210 mg/kg 低于 CP2 基地的∑PAEs 含量 6.940 mg/kg; 珠江三角洲地区茄子中的∑PAEs 含量 1.880 mg/kg 高于 CP3 基地的∑PAEs 含量 0.200 mg/kg。山东寿光辣椒中测定的 DMP、DEP、DBP 和 DEHP 化合物总含量为 9.073 mg/kg, 显著高于 YQ1 基地的辣椒中∑PAEs 含量 2.130 mg/kg。

珠江三角洲、东莞和寿光设施农业基地蔬菜中 PAEs 单体化合物与北京典型设施农业蔬菜中的单体化合物种类相近, 其中 DMP、DEP、BBP 和 DnOP 含量均较低, 珠江三角洲地区芹菜、苦瓜和茄子中的 DnOP 均未检出, 苦瓜和茄子中仅检出 3 种 PAEs 化合物; 东莞地区芹菜中的 DEHP 含量较高, 达到 2.455 mg/kg, 其中 DnOP 未检出; 寿光地区辣椒中 PAEs 主要以 DBP 和 DEHP 为主, 分别达到 4.205 mg/kg 和 4652 mg/kg, 其中∑PAEs 的含量高达 9.073 mg/kg, 总体上, 珠江三角洲、东莞和寿光地区蔬菜基地中 DBP 和 DEHP 和∑PAEs 的含量高于北京设施农业中蔬菜的含量。

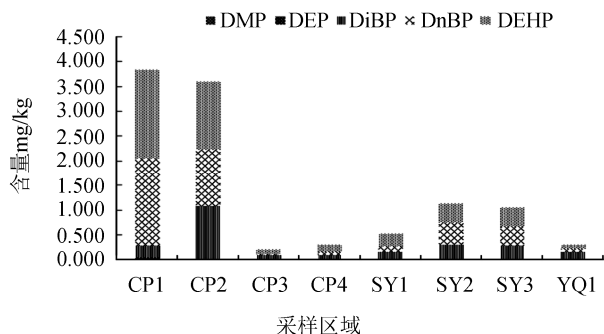


图1 北京市蔬菜基地蔬菜中 PAEs 化合物含量(mg/kg)

Fig. 1 Concentration of PAEs compound in vegetables from greenhouse vegetable production bases in Beijing (mg/kg)

4 结论

北京地区 8 个典型设施蔬菜生产基地中, ∑PAEs 含量范围为 0.15~6.94 mg/kg 干重, 15 种 PAEs 中以 DEHP 含量最高, 其次为 DBP 和 DIBP 的含量, 三者占∑PAEs 的 89.6%, 16 个蔬菜样品中均检出 PAEs 化合物, 表明北京市设施农业中蔬菜普遍受到了邻苯二甲酸酯的污染。北京设施农业蔬菜中 PAEs 单体种类相似, 含量因不同产区、不同基地和蔬菜品种等因素而异。北京蔬菜生产基地与珠江三角洲、东莞和寿光相比, 蔬菜中∑PAEs 的含量较低, 蔬菜中 PAEs 化合物单体含量各异, 但种类相似。北京典型蔬菜基地中∑PAEs 的含量及单体浓度较高的 DEHP 的含量均低于国际标准, 为探究北京设施农业基地蔬菜中 PAEs 化合物的污染对农产品安全的影响, 应对蔬菜中 PAEs 含量对人体健康的影响进行深入研究, 为北京地区设施蔬菜种植和安全生产提供现实意义的指导。

参考文献

- 王立鑫, 杨旭. 邻苯二甲酸酯毒性及健康效应研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2010, (03): 276-281.
Wang LX, Yang X. Research advance on toxicity and health effect of phthalate [J]. J Environ Health, 2010, (03): 276-281.
- 陈洪涛, 王力清, 黄翠莉, 等. 邻苯二甲酸酯毒理学研究进展[J]. 食品与机械, 2012, (05): 251-254.
Chen HT, Wang LQ, Huang CL, et al. Research advances on toxicology of phthalate esters [J]. Food Mach, 2012, (05): 251-254.
- 柳春红, 孙远明, 杨艺超, 等. 邻苯二甲酸酯类增塑剂的污染及暴露评估现状[J]. 现代食品科技, 2012, (03): 339-341.
Liu CH, Sun YM, Yang YC, et al. The contamination situation and exposure assessment of phthalate esters [J]. Mod Food Sci Technol, 2012, (03): 339-341.
- 张景, 王竹天, 樊永祥, 等. 邻苯二甲酸酯类的毒性、分析方法及使用规定[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, (05): 504-517.
Zhang J, Wang ZT, Fan YX, et al. A review of toxicity, analytical methods and regulations on phthalic acid esters [J]. Chin J Food Hyg, 2012, (05):

- 504-517.
- [5] 陈如, 蒋晓琪, 王建平. 邻苯二甲酸酯及其生态毒性[J]. 印染助剂, 2010, (09): 52-56.
Chen R, Jiang XQ, Wang JP. Phthalates and the ecological toxicity [J]. Textile Auxil, 2010, (09): 52-56.
- [6] 郭永梅. 邻苯二甲酸酯的毒性及相关限制法规[J]. 广州化学, 2012, (02): 75-79.
Guo YM. Toxicity and related restricted laws and regulations for phthalate esters [J]. Guangzhou Chem, 2012, (02): 75-79.
- [7] 胡雄星, 韩中豪, 刘必寅, 等. 邻苯二甲酸酯的毒性及其在环境中的分布[J]. 环境科学与管理, 2007, (01): 37-40.
Hu XX, Han ZH, Liu BY, *et al.* Distribution of phthalic acid esters in environment and its toxicity [J]. Environ Sci Manag, 2007, (01): 37-40.
- [8] 鲍佳沁, 王敏, 高曦, 等. 邻苯二甲酸酯类暴露风险评估研究进展[J]. 食品科学, 2014, (23): 337-341.
Bao JQ, Wang M, Gao X, *et al.* Progress in risk assessment of human phthalate ester exposure [J]. Food Sci, 2014, (23): 337-341.
- [9] 吴山, 李彬, 梁金明, 等. 汕头市蔬菜产区土壤-蔬菜中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, (10): 1889-1896.
Wu S, Li B, Liang JM, *et al.* Distribution characteristics of phthalic acid esters in soils and vegetables in vegetable producing areas of Shantou city, China [J]. J Agro-Environ Sci, 2015, (10): 1889-1896.
- [10] 黄慧娟, 蔡全英, 吕辉雄, 等. 土壤-蔬菜系统中邻苯二甲酸酯的研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, (9): 50-53.
Huang HJ, Cai QY, Lv HX, *et al.* Progresses on phthalic acid esters in the soil-vegetable system [J]. Guangdong Agri Sci, 2011, (9): 50-53.
- [11] Wang J, Y Luo, Y Teng, *et al.* Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film [J]. Environ Poll, 2013, 180: 265-273.
- [12] Zeng F, Cui K, Xie Z, *et al.* Phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou [J]. China Environ Poll, 2008, 156 (2): 425-434.
- [13] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉, 等. 中国土壤与沉积物中邻苯二甲酸酯污染水平及其吸附研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, (02): 472-479.
Cui XH, Li BH, Chen HH, *et al.* A review of phthalic acid esters contamination and sorption in soil and sediment, China [J]. Ecol Environ Sci, 2010, (02): 472-479.
- [14] 李彬, 吴山, 梁金明, 等. 中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征[J]. 环境科学, 2015, (06): 2283-2291.
Li B, Wu S, Liang JM, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of phthalic acid esters in agricultural products around the Pearl River Delta, South China [J]. Environ Sci, 2015, (06): 2283-2291.
- [15] 王凯荣, 崔明明, 史衍玺. 农业土壤中邻苯二甲酸酯污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, (09): 2699-2708.
Wang KR, Cui MM, Shi YX. Phthalic acid esters (PAEs) pollution in farmland soils: A review [J]. Chin J Applied Ecol, 2013, (09): 2699-2708.
- [16] 熊鹏翔, 龚娴, 邓磊. 南昌市农田土壤和水样中邻苯二甲酸酯污染物的分析[J]. 化学通报, 2008, (08): 636-640.
Xiong PX, Gong X, Deng L. Analysis of PAE pollution in farm soil and water samples in Nanchang city [J]. Chem Bull, 2008, (08): 636-640.
- [17] 张海光, 孙国帅, 孙磊, 等. 典型覆膜作物土壤中邻苯二甲酸酯污染的初步研究[J]. 中国环境监测, 2013, (04): 60-63.
Zhang HG, Sun GS, Sun L, *et al.* Preliminary study on phthalic acid esters pollution of typical plastic mulched crops soils [J]. Environ Monit Chin, 2013, (04): 60-63.
- [18] 赵胜利, 杨国义, 张天彬, 等. 珠三角城市群典型城市土壤邻苯二甲酸酯污染特征[J]. 生态环境学报, 2009, (01): 128-133.
Zhao SL, Yang GY, Zhang TB, *et al.* Characteristics of pathalic acid esters in soils in typical cities of Pearl River Delta [J]. Ecol Environ Sci, 2009, (01): 128-133.
- [19] Ma TT, Christie P, Luo YM, *et al.* Phthalate esters contamination in soil and plants on agricultural land near an electronic waste recycling site [J]. Environ Geochem Health, 2013, 35 (4): 465-476.
- [20] 张茂生, 李明阳, 王纪阳, 等. 东莞市蔬菜基地邻苯二甲酸酯(PAEs)的污染特征研究[J]. 广东农业科学, 2009, (06): 172-175.
Zhang MS, Li MY, Wang JY, *et al.* Occurrence of phthalic acid esters(PAEs) in vegetable fields of Dongguan city [J]. Guangdong Agric Sci, 2009, (06): 172-175.
- [21] 肖凯恩, 莫测辉, 蔡全英. 珠江三角洲蔬菜基地蔬菜中邻苯二甲酸酯的含量特征[J]. 四川环境, 2012, (03): 49-55.
Xiao KE, Mo CH, Cai QY. Concentrations of PAEs in vegetable fields of Pearl River Delta [J]. Sichuan Environ, 2012, (03): 49-55.
- [22] 李彬, 吴山, 梁金明, 等. 珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征[J]. 环境科学, 2016, (01): 317-324.
Li B, Wu S, Liang JM, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of phthalic acid esters in agricultural products around the Pearl River Delta, south China [J]. Environ Sci, 2016, (01): 317-324.
- [23] 孙若男, 陈美瑜, 林竹光. 气相色谱-质谱联用同时测定蔬菜中 16 种邻苯二甲酸酯残留[J]. 分析实验室, 2010, (12): 73-76.
Sun RN, Chen MY, Lin ZG. A simultaneous determination of 16 phthalates residues in vegetables by GC-MS/MS [J]. Chin J Anal Lab, 2010, (12): 73-76.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



陈佳祎, 主要研究方向为农田环境有机污染物分析与监测。
E-mail: cjiy_1666@126.com



陆安祥, 博士, 副研究员, 主要研究方向为检测技术研究。
E-mail: luax@nercita.org.cn