

李 玮, 沈 琦, 古再丽阿依·司马义, 等. 不同生育期杏树果实中邻苯二甲酸酯含量及其在亚细胞组分中分布的变化与二者的关联性分析[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2149-2162.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.019

不同生育期杏树果实中邻苯二甲酸酯含量及其在亚细胞组分中分布的变化与二者的关联性分析

李 玮, 沈 琦, 古再丽阿依·司马义, 张路思, 贺云云, 王 伟
(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了明确不同生育期杏树果实中邻苯二甲酸酯(PAEs)含量及其在亚细胞组分中分布的变化与二者的关联性, 在新疆6个杏果主产区设置试验点, 采集杏树不同生育期的杏果样品, 综合气相色谱串联质谱、差速离心等方法, 分析样品及3种亚细胞组分中PAEs单体化合物的含量, 进而探讨不同生育期杏果PAEs含量及其在亚细胞组分中分布的变化与二者的关联性。结果表明, 从样品中共检出8种PAEs单体化合物, 其中邻苯二甲酸二丁酯(DBP)单体含量最高; 不同生育期杏果中的PAEs含量, 不同亚细胞组分中单体化合物PAEs的含量是变化的; 在不同亚细胞组分中, DBP的累积量与占比表现为可溶性组分>细胞器>细胞壁, 与其他单体的表现不一致; 随着取样时间的增加, 部分试验点杏果细胞壁中邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP)和邻苯二甲酸二甲酯(DMP)累积量和累积量占比的变化与杏果中PAEs累积量的变化相近。相关性分析结果显示, 邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、DIBP、DMP、DBP含量与细胞壁组分呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关, 相关系数分别为0.41、0.41、0.55、0.55。由研究结果得出, 可溶性组分占比高可能是导致杏果中DBP含量高于其他单体的原因, 细胞壁可能是影响杏果中BBP、DIBP、DMP、DBP含量变化的主要亚细胞组分。研究结果可为进一步研究PAEs在杏果内的代谢、吸收过程提供参考。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 生育期; 杏果; 亚细胞分布; 食品安全; 关联性分析

中图分类号: TS207.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)11-2149-14

Changes of phthalic acid ester content, subcellular distribution in apricot fruits at different growth stages and their correlation analysis

LI Wei, SHEN Qi, Guzailiayi·Simayi, ZHANG Lusi, HE Yunyun, WANG Wei
(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To clarify the changes in phthalic acid ester (PAEs) content, subcellular distribution and their correlations during different growth stages of apricots, experimental sites were established in six major apricot-producing areas in Xinjiang to collect the samples of apricots at different growth stages. A comprehensive analysis of the contents of PAEs monomer compounds in the samples and three subcellular fractions was conducted using methods such as gas chromatography-mass spectrometry and differential centrifugation. Furthermore, the changes of PAEs content and subcellular distribution during different growth stages of apricots and their correlation were investigated. The results indicated that eight PAEs monomer compounds were detected in the samples, with the highest content of the dibutyl phthalate (DBP) monomer. The content of PAEs in apricots during different growth stages and the content of PAEs monomer compounds in subcellular fractions were found to fluctuate.

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02006-1)

作者简介: 李 玮(2000-), 女, 山西交城人, 硕士研究生, 主要从事食品加工与安全方面的研究。(E-mail) 1883428881@163.com

通讯作者: 王 伟, (E-mail) ww2shz@163.com

In different subcellular fractions, the distribution pattern of DBP showed soluble fractions > organelles > cell walls, which was inconsistent with the distribution patterns of other monomers. With the increase of sampling time, the changes in the accumulation and proportion of diisobutyl phthalate (DIBP) and dimethyl phthalate (DMP) in the cell walls of apricot fruits at some test points were similar to the changes in the accumulation of PAEs. The results of correlation analysis showed that the contents of butyl benzyl phthalate (BBP), DIBP, DMP and DBP were significantly ($P < 0.05$) or extremely significantly ($P < 0.01$) positively correlated with the cell wall fractions, with correlation coefficients of 0.41, 0.41, 0.55 and 0.55, respectively. Therefore, it can be seen that the high proportion of soluble fractions may be the reason why the content of DBP in apricots is higher than that of other monomers, and the cell wall may be the main subcellular fraction affecting the changes in the content of BBP, DIBP, DMP and DBP in apricots. The aforementioned results can provide a reference for further research on the metabolism and absorption processes of PAEs in apricot fruits.

Key words: phthalates; growth period; apricot fruit; subcellular distribution; food safety; correlation analysis

由于邻苯二甲酸酯(PAEs)不与塑料单体发生化学结合,易从宿主塑料中溶出、释放^[1-3],使得环境中存在较多 PAEs,威胁着土壤环境和农产品安全^[4]。PAEs 被农作物吸收、汇集后,分布到植物的不同细胞室中,不同细胞室中的 PAEs 残留物被人摄入后可能表现出不同的生物利用度和活性,从而危害人体健康^[5]。在此背景下,探讨不同生育期杏果中 PAEs 含量、亚细胞分布的变化,解析其关联性,有利于为后期科学防控杏果中的 PAEs 奠定基础。

目前,研究者已经从亚细胞结构角度对作物中重金属富集的变化机制进行阐释,例如 Sun 等^[6]研究松萝凤梨叶片的不同亚细胞结构(细胞壁、细胞膜、液泡、细胞器)和不同细胞壁组分(果胶、半纤维素 1、半纤维素 2)中的汞(Hg)浓度发现,随着 Hg 浓度的增加,更多 Hg 通过分隔机制积累在液泡、细胞壁中,半纤维素中的 Hg 含量最高,表明半纤维素是细胞壁中 Hg 的主要结合组分。此外,目前已有关于多种农产品中 PAEs 污染水平的报道,如曹双瑜等^[7]评估了新疆产区甜瓜中 PAEs 的污染状况,结果显示,118 份甜瓜样品中 16 种 PAEs 的总检出率为 61.9%;Zhang 等^[8]分析了西安水果样品中 21 种 PAEs 单体化合物的含量,结果表明,水果样品中 21 种 PAEs 单体化合物含量的变化范围为 0.30~12.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均含量为 3.97 $\mu\text{g}/\text{kg}$,检出的单体主要是邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)、邻苯二甲酸二异壬酯(DINP)、邻苯二甲酸二异癸酯(DIDP)。

杏是新疆地区的特色果品,其产量多年来一直位居全国前列^[9-10],但是由于种种原因,目前关于不同生育期杏果实中 PAEs 含量及亚细胞分布变化的研究还不多。由此,本研究拟基于新疆杏的种植分

布概况,在 6 个代表性区域设置试验点,采集不同杏树生育期的杏果样品,综合气相色谱串联质谱、差速离心法等方法,测定杏果中 PAEs 单体化合物的含量和 3 种亚细胞组分中 PAEs 单体化合物的含量,进而探讨不同生育期杏果中的 PAEs 含量、亚细胞分布变化及其关联,以期为研究 PAEs 在杏果内的代谢、吸收过程和科学控制 PAEs 含量奠定研究基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据新疆地区杏果主产区的情况,2023 年在杏树盛花期后 20 d 开始采摘,分别于吐鲁番市高昌区亚尔镇村(4 月 20 日-5 月 18 日)、巴州轮台县(5 月 10 日-6 月 8 日)、喀什伽师县江巴孜乡(5 月 7 日-6 月 5 日)、阿克苏温宿县六团(6 月 1 日-7 月 9 日)、伊犁州霍城县六十一团(6 月 1 日-7 月 9 日)、乌鲁木齐市乌鲁木齐县干沟乡天山村(7 月 1 日-7 月 30 日)6 个区域设置试验点,每个试验点的面积为 40 m^2 ,试验点的基本情况见表 1,将试验点依次编号为 A、B、C、D、E、F。

在杏树盛花期后 20 d,待杏果生长到幼果期时,每间隔 10 d 取 1 次样,共取样 4 次(0 d、10 d、20 d、30 d),采样时在果树的东、南、西、北方向均匀采摘果实,再将采摘的果实充分混合,每份样品均包含不少于 2 kg 生长正常、无病害的杏果。采集杏果后,经去核、匀浆处理后装入硅胶袋中,置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存。

1.2 试剂与仪器

本研究所用 17 种 PAEs 标准品如下:邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯

二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二(2-甲氧基)乙酯(DMEP)、邻苯二甲酸二(4-甲基-2-戊基)酯(BMPP)、邻苯二甲酸二(2-乙氧基)乙酯(DEEP)、邻苯二甲酸二戊酯(DPP)、邻苯二甲酸二己酯(DHXP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、邻苯二甲酸二(2-丁氧基)乙酯(DBEP)、邻苯二甲酸二环己酯(DCHP)、邻苯二甲酸二正辛酯(DNOP)、邻苯二甲酸二壬酯(DNP)、DINP、DIDP、DIBP、DEHP,均由

德国 Dr.Ehrenstorfer GmbH 公司生产;氯化钠为优级纯,产自国药集团化学试剂有限公司,于 450 ℃灼烧 6 h,冷却后装至玻璃瓶中保存;正己烷、丙酮、乙腈均为色谱纯,产自赛默飞世尔科技公司;蔗糖,购自天津市鑫铂特化工有限公司;三羟甲基氨基甲烷盐酸盐(Tris-HCl),购自上海蓝季科技发展有限公司;二硫苏糖醇,购自上海蓝季科技发展有限公司。试验用水为蒸馏水。

表 1 试验点的概况
Table 1 Basic overview of the test sites

编号	地区	经度、纬度	气候	平均气温 (℃)	无霜期 (d)	年均降水量 (mm)	平均日照 时长(h)	土壤 类型
A	新疆吐鲁番市高昌区亚尔镇村	89.147 118°E、42.948 772°N	暖温带大陆性荒漠气候	16.0	224	16.0	3 056.0	棕漠土
B	新疆巴州轮台县	84.251 910°E、41.777 630°N	温带大陆性干旱气候	10.9	188	65.6	2 442.0	灌淤土
C	新疆喀什地区伽师县江巴孜乡	76.723 790°E、39.488 060°N	温带内陆性干燥气候	11.7	233	64.6	2 923.0	棕漠土
D	新疆阿克苏市温宿县六团	80.472 031°E、40.956 108°N	暖温带大陆性干旱气候	10.1	185	65.4	2 747.7	灌淤土
E	新疆伊犁州霍城县六十一团	80.737 946°E、44.189 625°N	温带大陆性半干旱气候	8.2	165	500.0	2 550.0	灌淤土
F	新疆乌鲁木齐市乌鲁木齐县干沟乡天山村	87.097 122°E、43.556 561°N	温带大陆性气候	6.0	179	208.4	2 813.0	灌淤土

标准品的配制:称取适量标准品,用正己烷配制 成 1 000 mg/L 混合标准储备溶液;移取适量 1 000 mg/L 混合标准储备溶液,用正己烷逐步稀释为质量浓度为 5 mg/L 的混合标准溶液。

试验仪器:Agilent 7000C 气相色谱串联质谱联用仪,产自美国安捷伦公司;Sigma 3-30K 高速冷冻离心机,产自德国西格玛公司;Christ alpha 1-4 LD plus 冷冻干燥机仪,产自德国 Christ 公司;N-EVAP 8125 恒温水浴氮吹仪,产自美国 Organomation 公司;701 series 自动均质仪,产自美国 Tomtec 公司;R-215 旋转蒸发仪,产自瑞士步琦有限公司;HNY-850 双层振荡器,产自天津欧诺仪器有限公司;BAS223S 电子天平(精度为 0.000 1 g),产自德国 Sartorius 公司;L18-Y31 玻璃破壁机,产自九阳股份有限公司;弗罗里硅土(Florisil)玻璃净化小柱,产自天津博纳艾杰尔科技有限公司。

色谱参数的设置:进样选择分流/不分流进样口(SSL)模式;使用 Agilent HP-5 MS UI 毛细管柱(15 m×0.25 mm×0.25 μm);载气为氦气;分析柱的柱流速为 1.0 mL/min(柱 1)、1.20 mL/min(柱 2);进样口温度为 280 ℃;传输线温度设为 280 ℃,进样量为 1 μL。升温程序:60 ℃保持 90 s;以 20 ℃/min

的速率升温至 220 ℃,保持 1 min;以 5 ℃/min 的速率升温至 280 ℃,保持 4 min。

质谱参数的设置:采用电子轰击离子源,离子源温度为 280 ℃,电离能力为 70 eV;四极杆 1 的温度为 150 ℃,四极杆 2 的温度为 150 ℃;碰撞气为氮气,压力为 0.133 Pa。采用多反应监测方式进行数据的采集。

1.3 试验方法

1.3.1 杏果中 PAEs 的提取及净化 参照彭祎等^[11]提取及净化 PAEs 的方法,称取至少 20.0 g 样品放入烧杯中,再加入 40 mL 乙腈,高速匀浆 2 min。用滤纸过滤匀浆样品后,将滤液收集在加了 5~6 g 氯化钠的 100 mL 具塞量筒内,剧烈振荡 1 min 后,静置至少 15 min 等待分层。待分层后,取 10.0 mL 乙腈溶液于 150 mL 圆底烧瓶内,旋转蒸发近干,再加入 3.0 mL 正己烷,待净化。

将玻璃 Florisil 柱依次用 5.0 mL 丙酮+正己烷溶液(体积比为 10:90)、5.0 mL 正己烷预淋洗,当溶剂液面到达吸附层表面时,立即倒入上述待净化的溶液,先用 15 mL 刻度离心管接收洗脱液,再用 6 mL 丙酮+正己烷溶液(体积比为 10:90)冲洗烧杯,随后淋洗玻璃 Florisil 柱 2 次。将盛有淋洗液的离心管置于氮吹仪上,在水浴温度为 50 ℃的条件下,

氮吹蒸发至淋洗液的体积小于 5 mL,用正己烷定容至 5.0 mL 后在漩涡混合器上混匀,将混匀后的液体移入 2 mL 自动进样器的样品瓶中,待测。

1.3.2 亚细胞组分分离方法 参照 Weigel 等^[12]的亚细胞分级方法,称取 0.500 0 g 杏果样品放入预冷的研钵中,再加入 10 mL 预冷的提取缓冲液[含有 250 mmol/L 蔗糖、50 mmol/L Tris-HCl (pH 值 7.5) 和 1.0 mmol/L 二硫苏糖醇]充分研磨至匀浆后,将匀浆液用不锈钢网于 60~100 目过滤,过滤所得滤渣即为细胞壁组分。在滤渣中加入液氮冻干,再加入 1 mL 正己烷,涡旋 10 min 后,于 15 000 r/min 离心 10 min,上机待测。将上述滤液于 15 000 r/min 离心 10 min,分离所得沉淀部分,即为细胞器及膜组分,加液氮对沉淀进行冻干处理后,加入 1 mL 正己烷涡旋 10 min,再于 15 000 r/min 离心 10 min,上机待测。上述离心后的上清液即为可溶性组分,加入 2 mL 正己烷涡旋 10

min,于 15 000 r/min 离心 10 min,上机待测。

1.4 数据统计分析方法

用 SPSS 进行杏果邻苯二甲酸酯类塑化剂含量的描述性统计分析,用 Origin 2022 绘制分组径向条形图和相关性热图。

2 结果与分析

2.1 杏果中 PAEs 含量的分析

在 6 个试验点(表 1),从不同生育期杏树的杏果中共检出 8 种 PAEs 单体化合物,分别是 BBP、DBP、DEHP、DEP、DIBP、DIDP、DNOP、DMP。由表 2 可知,8 种单体化合物中 DBP 的含量最高,含量范围为 137.3~769.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$;DIBP、DEHP 的含量较高,含量范围分别为 78.9~498.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、59.1~362.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 2 幼果期开始 0~30 d 不同地区杏果中邻苯二甲酸酯(PAEs)的平均含量

Table 2 The average content of phthalic acid esters (PAEs) in apricot fruits in different regions at 0~30 days since fruit set stage

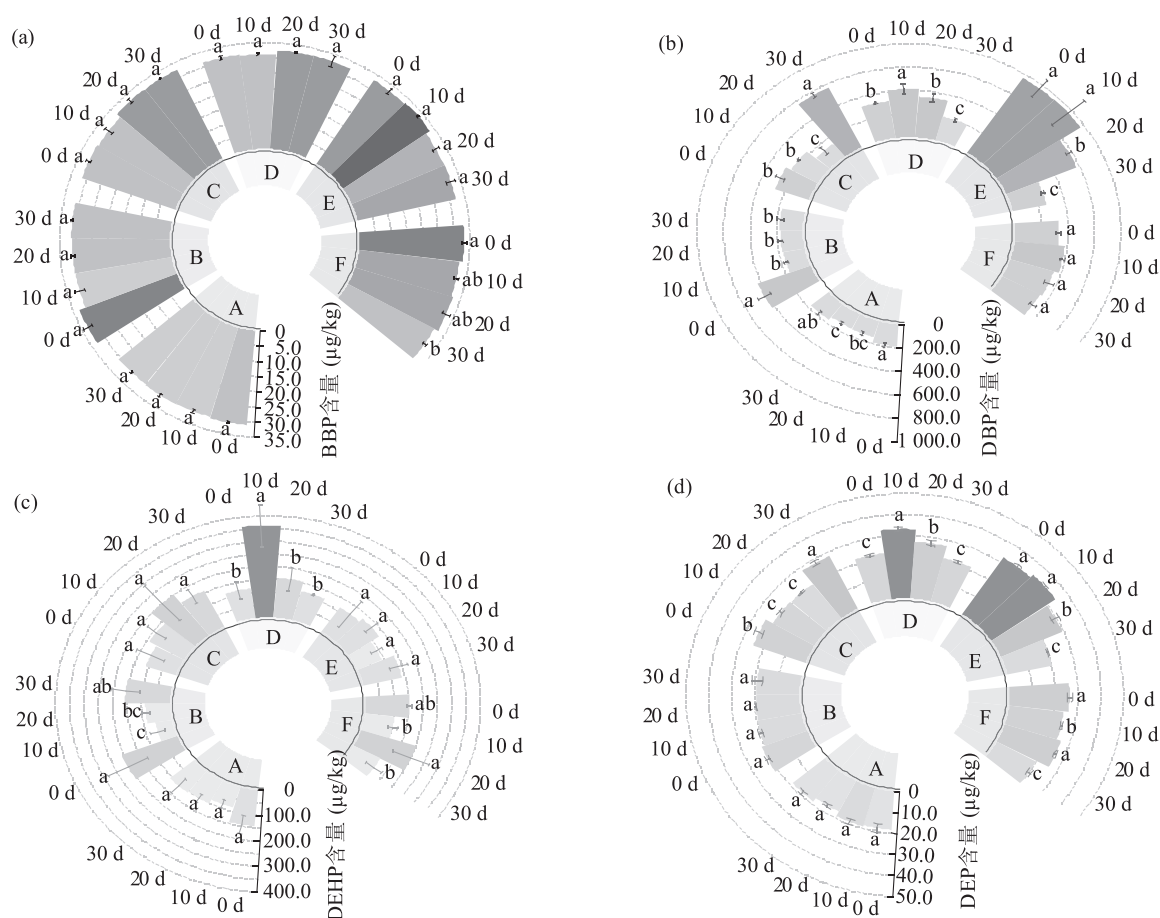
化合物	A 试验点		B 试验点		C 试验点		D 试验点		E 试验点		F 试验点	
	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	含量范围 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
BBP	30.6~31.1	30.8	31.0~33.0	31.6	31.1~32.5	31.9	31.0~32.5	31.7	31.9~33.4	32.6	31.1~33.1	32.2
DBP	137.3~190.5	160.8	165.2~423.9	234.6	137.5~566.8	301.9	209.3~413.1	323.2	259.8~769.0	592.9	326.7~382.3	345.7
DEHP	83.7~142.3	108.6	59.1~160.6	127.6	110.6~200.2	151.9	118.1~362.3	188.9	92.9~114.2	118.7	103.7~200.9	140.7
DEP	16.5~19.0	18.1	19.1~21.3	19.8	20.5~28.1	23.6	21.4~33.1	26.0	20.1~34.3	29.1	19.8~26.4	24.0
DIBP	83.1~123.2	105.5	119.5~246.5	152.7	78.9~333.7	187.7	148.2~259.0	212.7	178.0~498.1	382.8	164.0~245.9	217.5
DIDP	37.9~74.6	56.3	32.8~74.2	51.1	54.8~88.2	70.4	55.8~142.6	99.5	41.5~72.9	57.7	60.2~80.4	70.2
DMP	25.6~35.8	30.4	35.7~42.6	39.5	37.7~63.8	52.8	42.2~61.5	52.7	39.5~90.8	74.9	34.6~56.4	48.9
DNOP	44.5~58.2	48.8	43.2~60.2	48.5	47.3~189.0	84.1	50.6~111.6	67.8	49.2~53.3	52.3	48.0~49.6	48.9

BBP:邻苯二甲酸丁基苄基酯;DBP:邻苯二甲酸二丁酯;DEHP:邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯;DEP:邻苯二甲酸二乙酯;DIBP:邻苯二甲酸二异丁酯;DIDP:邻苯二甲酸二异癸酯;DMP:邻苯二甲酸二甲酯;DNOP:邻苯二甲酸二正辛酯。A、B、C、D、E、F 试验点见表 1。

2.2 不同生育期杏果中 PAEs 含量的变化

由图 1(a)可知,在杏树的不同生育期,各试验点杏果中的 BBP 含量接近,波动幅度不大,最小值为 30.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$,最大值为 33.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 1(b)可以看出,随着杏树生育期的推进,B、D、E 试验点杏果中的 DBP 含量呈波动降低的趋势,C、A 试验点杏果中的 DBP 含量呈先下降后上升的趋势;E 试验点杏果中的 DBP 含量相对较高,最大值为 769.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$,C 试验点杏果中 DBP 含量的波动较大,范围为 137.5~566.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 1(c)可以看出,在杏树的不同生育期,D、F 试验点杏果中的 DEHP 含量

呈波动变化;B 试验点杏果中的 DEHP 含量呈先下降后上升的变化趋势;杏果中 DEHP 含量的最高值出现在 D 试验点,为 362.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,且在该试验点杏果中 DEHP 含量的波动较大,范围为 118.1~362.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 1(d)可以看出,在杏树的不同生育期,A、B、C、F 试验点杏果中的 DEP 含量变化不大,最小值为 16.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,最大值为 28.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,D、E 试验点杏果中的 DEP 含量呈波动变化,整体表现为下降的趋势;E 试验点杏果中的 DEP 含量较高,最高值为 34.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,并且波动也较大,范围为 20.1~34.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。



同一试验点不同柱上标有不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。A~F 试验点见表 1。BBP: 邻苯二甲酸丁基苄基酯; DBP: 邻苯二甲酸二丁酯; DEHP: 邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯; DEP: 邻苯二甲酸二乙酯。

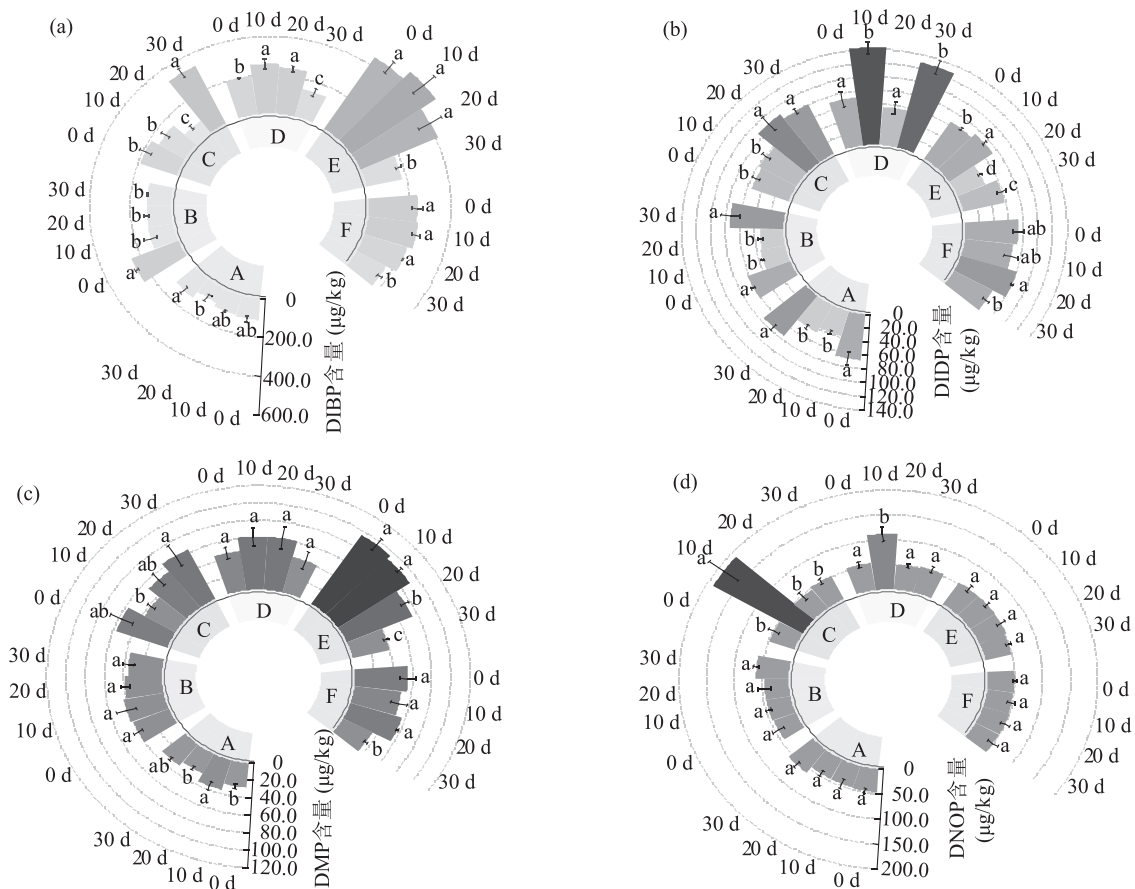
图 1 各地杏果在不同生育期 4 种邻苯二甲酸酯含量分布

Fig.1 Distribution of four phthalic acid esters in apricot fruits at different growth stages

由图 2(a)可以看出,在杏树的不同生育期,A、B、C、D、E、F 试验点杏果中的 DIBP 含量呈波动变化的趋势,其中 C 试验点杏果中的 DIBP 含量呈先下降后上升的变化趋势,且变化幅度较大,含量范围为 78.9~333.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$;E 试验点杏果中的 DIBP 含量较高,最高值为 498.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 2(b)可以看出,在杏树的不同生育期,A、B、C、D、E、F 试验点杏果中的 DIDP 含量呈波动变化的趋势,其中 A、B 试验点杏果中的 DIDP 含量呈先下降后上升的变化趋势,D 试验点杏果中的 DIDP 含量呈先上升后下降再上升的变化趋势,最高值为 142.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$,波动也较大,范围为 55.8~142.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 2(c)可以看出,在杏树的不同生育期,A、C、E、F 试验点杏果中的 DMP 含量呈波动变化的趋势,其中 C 试验点杏果中的 DMP 含量呈先下降后上升的趋势,E 试验点杏果中的 DMP 含量较高,最高值为 90.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$,且波

动较大,范围为 39.5~90.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由图 2(d)可以看出,在杏树的不同生育期,A、B、E、F 试验点杏果中的 DNOP 含量基本不变,C、D 试验点杏果中的 DNOP 含量呈先上升后下降的变化趋势,其中 C 试验点杏果中的 DNOP 含量较高,最高值为 189.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$,且波动较大,范围为 47.3~189.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

以上结果表明,在杏树的不同生育期,杏果中的 PAEs 含量是波动变化的,其中 BBP 含量的波动较为平缓;DBP、DEP、DIBP、DMP 含量在 E 试验点相对较高,并且随着时间的延长,含量整体呈下降的趋势;DEHP、DIDP 含量在 D 试验点较高,并且随着时间的延长,含量呈波动变化的趋势;C 试验点的 DNOP 含量较高,呈先上升后下降的趋势;在杏树不同生育期的杏果中,8 种 PAEs 单体含量在 A、B、F 试验点的变化相较于以上 3 个试验点小。



同一试验点不同柱上标有不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。A~F 试验点见表 1。DIBP: 邻苯二甲酸二异丁酯; DIDP: 邻苯二甲酸二异癸酯; DMP: 邻苯二甲酸二甲酯; DNOP: 邻苯二甲酸二正辛酯。

图 2 各地杏果在不同生育期 4 种邻苯二甲酸酯含量分布

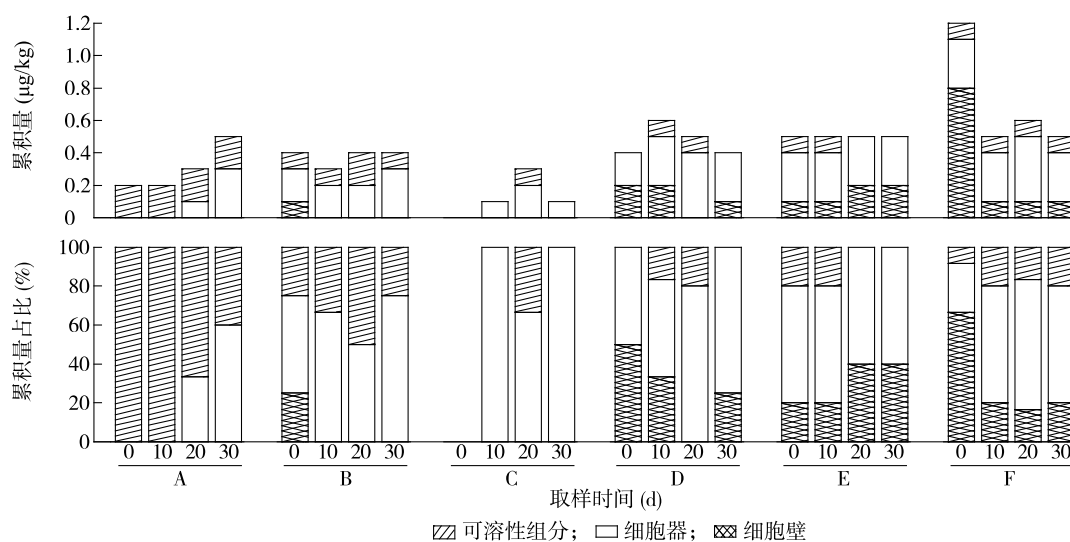
Fig.2 Distribution of four phthalic acid esters in apricot fruits at different growth stages

2.3 不同生育期杏果亚细胞组分中 PAEs 累积量的变化

从图 3 可知,不同生育期 A、B、C、D、E、F 试验点杏果中可溶性组分 BBP 的累积量和累积量占比的变化相对较小。杏果细胞器组分中 BBP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中 A、B、C、D、F 试验点的杏果细胞器中 BBP 累积量随着时间的变化呈波动变化的趋势;E 试验点的杏果细胞器中 BBP 累积量变化幅度相对较低。分析杏果细胞壁组分中 BBP 累积量的变化规律可知,B、D、E、F 试验点的杏果中 BBP 累积量呈波动变化的趋势。从总累积量来看,F 试验点杏果中 BBP 的总累积量高于其他试验点,C 试验点杏果中 BBP 的总累积量较低。在 D、E、F 试验点,杏果中 BBP 的累积量在亚细胞组分中的累积量占比排序如下:细胞器>细胞壁>可溶性组分。

由图 4 可以看出,随着时间的延长,A、B、C、D、E、F 试验点杏果的可溶性组分中 DBP 的累积量和累积

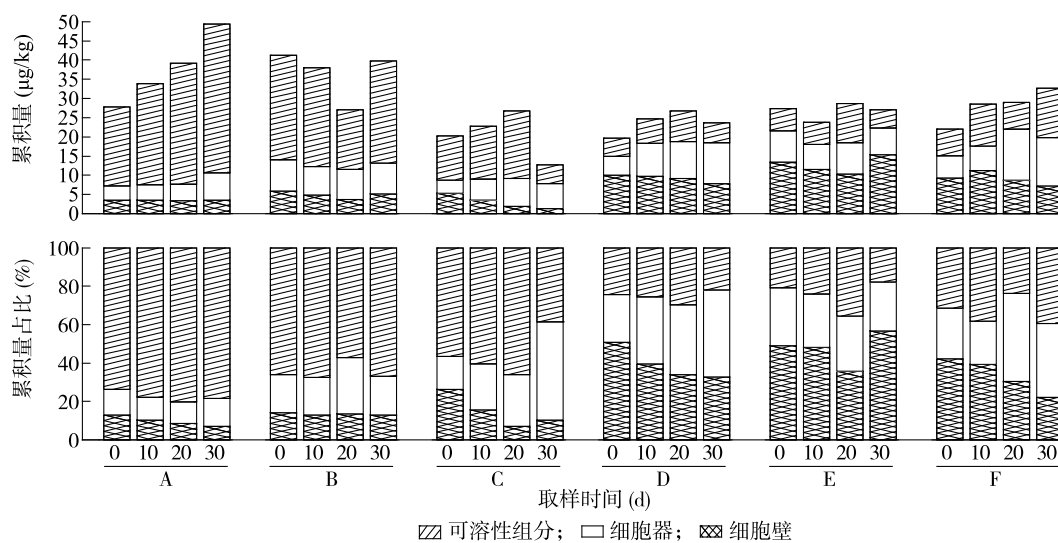
量占比变化可分为 2 类,其中 A、B 试验点的杏果可溶性组分中 DBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,DBP 的累积量整体呈上升趋势;C 试验点的杏果可溶性组分中 DBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为下降趋势。杏果细胞器组分中 DBP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中 C、D、F 试验点杏果细胞器组分中 DBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,基本表现为上升趋势;B、E 试验点杏果细胞器组分中 DBP 的累积量和累积量占比的变化相对较为平缓。杏果细胞壁组分中 DBP 的累积量和累积量占比的变化可分为 3 类,其中 A、B 试验点杏果细胞壁组分中 DBP 的累积量和累积量占比的变化较为平缓;C、D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为下降趋势;E 试验点杏果细胞壁组分中 DBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为上升趋势。



A~F 试验点见表 1。

图 3 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸丁基苄基酯 (BBP) 的累积量分配与占比

Fig.3 Cumulative distribution and proportion of butyl benzyl phthalate (BBP) in apricot fruit subcells at different growth stages



A~F 试验点见表 1。

图 4 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 的累积量分配与占比

Fig.4 Cumulative distribution and proportion of dibutyl phthalate (DBP) in apricot fruit subcells at different growth stages

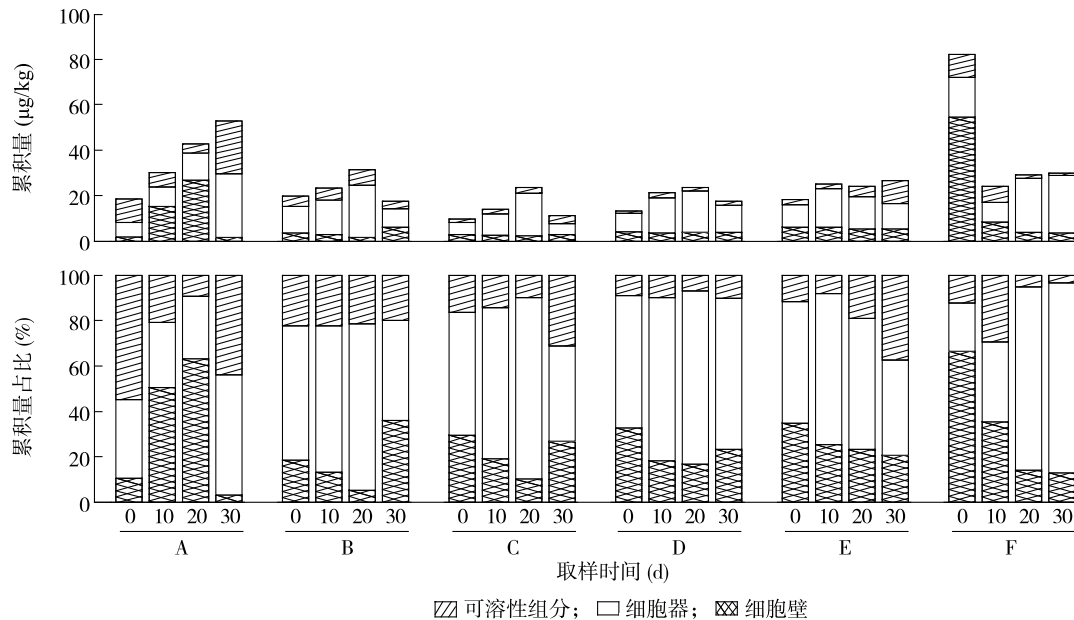
从整体上看,A、B 试验点杏果中 DBP 的累积量高于其他试验点,C 试验点杏果中 DBP 的累积量较低。从累积量占比上看,在 A、B、C、D、E、F 试验点,杏果中的 DBP 在亚细胞组分及可溶性组分中的分布规律整体表现为可溶性组分>细胞器>细胞壁。

由图 5 可以看出,随着时间的延长,杏果可溶性组分中 DEHP 的累积量和累积量占比的变化可分为 3 类,在 C、E 试验点杏果可溶性组分中 DEHP 的累积量呈波动变化,整体表现为上升的趋势,在 C、E 试验点 DEHP 的累积量占比呈波动变化,整体表现为上升

趋势;在 F 试验点杏果可溶性组分中 DEHP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为下降的趋势;在 D 试验点杏果可溶性组分中 DEHP 的累积量和累积量占比的变化较为平缓。杏果细胞器组分中 DEHP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,在 A、F 试验点杏果细胞器组分中 DEHP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为上升趋势;在 B、C、D、E 试验点杏果细胞器组分中 DEHP 的累积量和累积量占比呈波动变化。在杏果细胞壁组分中 DEHP 的累积量和累积量占比的变化可分为 3 类,其中 B 试验

点杏果细胞壁组分中 DEHP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为上升趋势;在 F 试验点杏果细胞壁组分中 DEHP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为下降趋势;在 C、D、E 试验点杏果细胞壁组分中 DEHP 的累积量和累积量占比变化较为

平缓。从总累积量来看,A、F 试验点杏果中 DEHP 的累积量高于其他试验点,C 试验点杏果中 DEHP 的累积量相对较低。从分配占比看,在 A、B、C、D、E、F 试验点杏果中 DEHP 在亚细胞组分及可溶性组分中的分布符合如下排序:细胞器>细胞壁>可溶性组分。



A~F 试验点见表 1。

图 5 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)的累积量分配与占比

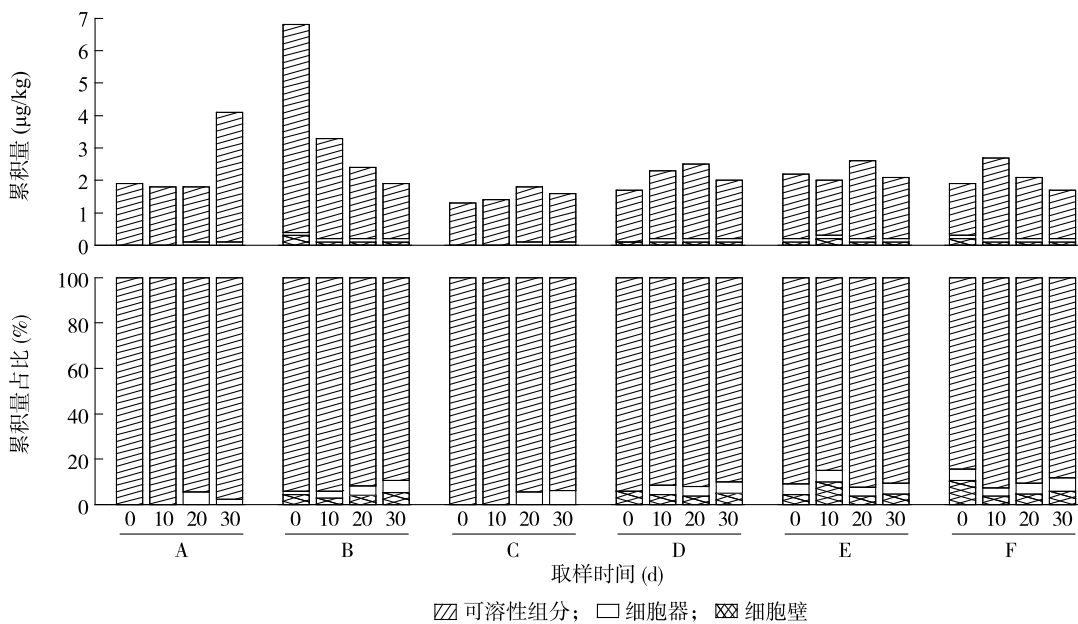
Fig.5 Cumulative distribution and proportion of di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in apricot fruit subcells at different growth stages

由图 6 可以看出,随着时间的延长,杏果可溶性组分中 DEP 的累积量的变化可分为 2 类,在 A、D 试验点,杏果可溶性组分中 DEP 的累积量呈波动变化,整体表现为上升趋势;在 B、E、F 试验点,杏果可溶性组分中 DEP 的累积量呈波动变化,整体表现为下降趋势;DEP 占比的变化规律不明显。在 A、B、C、D、E、F 试验点,杏果细胞器和细胞壁中 DEP 的累积量和累积量占比变化相对平缓。从总累积量来看,在 B 试验点杏果中 DEP 的累积量高于其他试验点,在 C 试验点杏果中的 DEP 累积量较低。从累积量占比看,在 A、B、C、D、E、F 试验点,杏果中的 DEP 在亚细胞组分与可溶性组分中的分布趋势表现为可溶性组分>细胞壁>细胞器。

由图 7 可以看出,随着时间的延长,杏果可溶性组分中 DIBP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中 A 试验点杏果可溶性组分中 DIBP 的累积量和累积量占比呈上升趋势;B、C 试验点杏果可溶性组分中 DIBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为下降趋势。在杏果细胞器组分中,

DIBP 累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中在 A、C、D、E、F 试验点杏果细胞器组分中 DIBP 的累积量和累积量占比呈波动变化,整体表现为上升趋势;在 B 试验点杏果细胞器组分中 DIBP 累积量呈波动变化,整体表现为下降趋势。杏果细胞壁组分中 DIBP 累积量和累积量占比的变化可分为 3 类,其中 E 试验点杏果细胞壁组分中 DIBP 累积量呈先下降后上升趋势;C、D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DIBP 累积量和累积量占比整体呈下降趋势;A、B 试验点杏果细胞壁组分中 DIBP 累积量和累积量占比的变化较为平缓。在杏果细胞壁组分中,A、B、D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DIBP 累积量和累积量占比的变化趋势与前文 DIBP 含量富集变化的趋势一致,推测细胞壁可能是影响杏果 DIBP 累积的主要亚细胞组分。

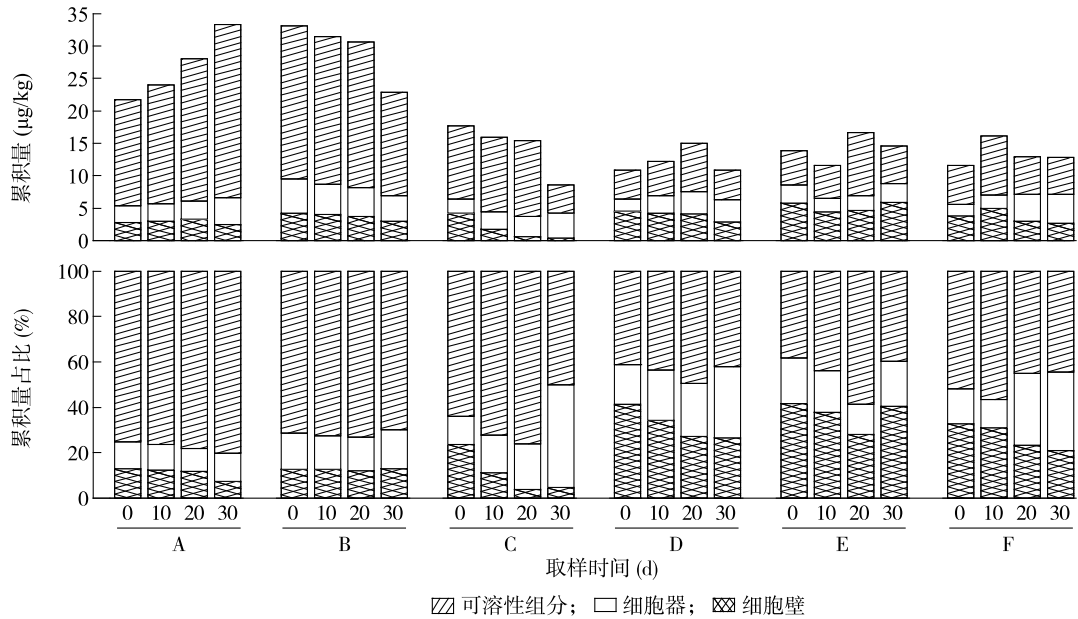
从总累积量来看,A、B 试验点杏果中 DIBP 的累积量高于其他试验点,D 试验点杏果中 DIBP 的累积量较低。从累积量占比看,在 A、B、C、D、E、F 试验点,杏果中 DIBP 在亚细胞组分、可溶性组分中



A~F 试验点见表 1。

图 6 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二乙酯 (DEP) 的累积量分配与占比

Fig.6 Cumulative distribution and proportion of diethyl phthalate (DEP) in apricot fruit subcells at different growth stages



A~F 试验点见表 1。

图 7 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二异丁酯 (DIBP) 的累积量分配与占比

Fig.7 Cumulative distribution and proportion of diisobutyl phthalate (DIBP) in apricot fruit subcells at different growth stages

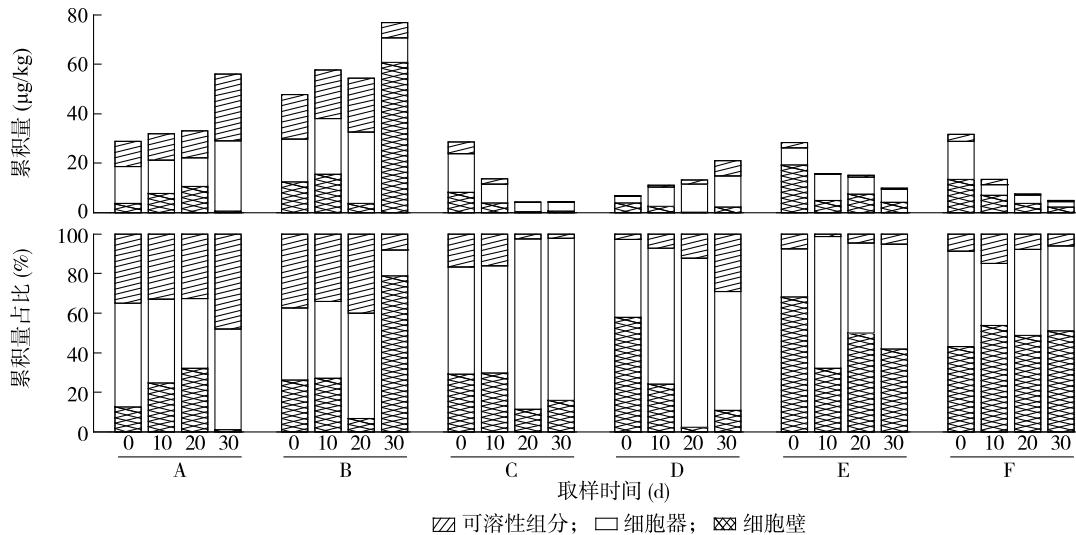
的分布趋势为可溶性组分>细胞壁>细胞器。

从图 8 可以看出,随着时间的延长,在杏果可溶性组分和细胞器组分中 DIDP 累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中在 A、D 试验点杏果可溶性组分和细胞器组分中 DIDP 的累积量呈波动上升的趋势;在 B、C、E、F 试验点杏果可溶性组分和细胞器

组分中 DIDP 累积量呈波动下降的趋势,在 B、F 试验点杏果可溶性组分和细胞器组分中 DIDP 的累积量占比呈波动下降的趋势。在细胞壁组分中,杏果中 DIDP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类,其中 B 试验点杏果中 DIDP 的累积量、B 试验点和 F 试验点杏果中的 DIDP 占比呈波动上升趋势;A、C、D、E

试验点杏果中 DIDP 的累积量和累积量占比呈波动下降的趋势。从总累积量来看, A、B 试验点 DIDP 的总累积量高于其他地区, C 试验点 DIDP 的总累积量

较低。从累积量占比看, 在 A、B、C、D、E、F 试验点, 杏果中 DIDP 在亚细胞组分、可溶性组分中的分布符合细胞器>细胞壁>可溶性组分的规律。



A~F 试验点见表 1。

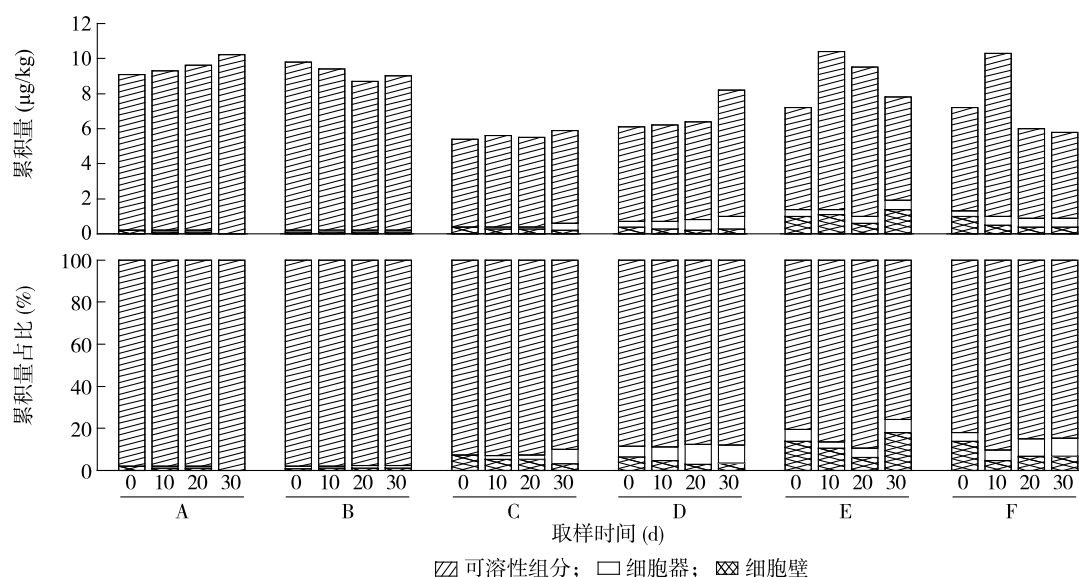
图 8 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二异癸酯 (DIDP) 的累积量分配与占比

Fig.8 Cumulative distribution and proportion of didecyl phthalate (DIDP) in apricot fruit subcells at different growth stages

从图 9 可以看出,随着时间的延长,杏果可溶性组分中 DMP 的累积量和累积量占比的变化可分为 2 类, A、D 试验点杏果可溶性组分中 DMP 的累积量、A 试验点杏果可溶性组分中 DMP 的累积量占比呈上升趋势; B、F 试验点杏果可溶性组分中 DMP 的累积量以及 B、C、D、E 试验点杏果可溶性组分中 DMP 的累积量占比呈波动下降趋势。在 A、B、C、D、E、F 试验点, 杏果细胞器组分中 DMP 累积量和累积量占比的变化相对较小。在杏果细胞壁组分中, DMP 累积量和累积量占比的变化可分为 3 类, 其中 A、B 试验点杏果 DMP 累积量和累积量占比变化较为平缓; C、D、F 试验点杏果 DMP 累积量和累积量占比整体呈下降趋势; E 试验点 DMP 累积量和累积量占比呈波动上升趋势。B、D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DMP 累积量和累积量占比的变化趋势与前文所述 DMP 累积量的变化趋势相似, 推测细胞壁组分可能是杏果中累积 DMP 的主要部位。

从总累积量来看, A、B 试验点杏果中 DMP 的累积量高于其他试验点, C 试验点 DMP 的累积量较低。从累积量占比看, A、B、C、D、E、F 试验点杏果在 DMP 亚细胞组分、可溶性组分中占比的分布规律为可溶性组分>细胞壁>细胞器。

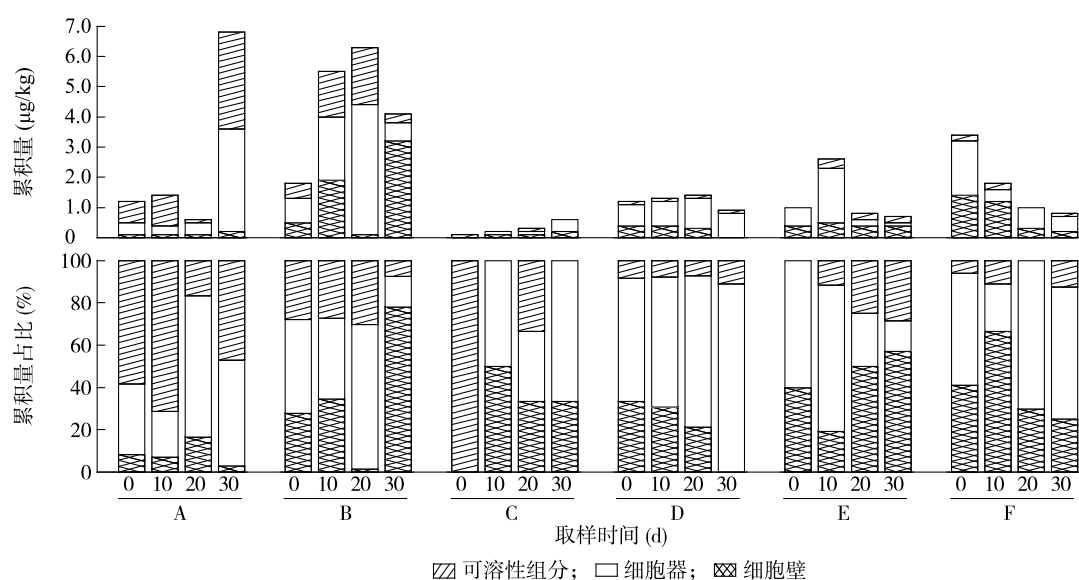
图 10 可以看出,随着时间的延长,在杏果可溶性组分中 DNOP 的累积量和累积量占比的变化可分为 3 类, 其中 A 试验点杏果可溶性组分中 DNOP 的累积量和累积量占比呈波动变化, DNOP 的累积量呈波动上升趋势; B、C 试验点杏果可溶性组分中 DNOP 的累积量和累积量占比呈波动下降趋势; D、E、F 试验点杏果可溶性组分中 DNOP 的累积量和 D 试验点杏果可溶性组分中 DNOP 的累积量占比变化较为平缓。在杏果细胞器组分中, DNOP 累积量和累积量占比的变化可分为 2 类, 其中 A、C、D 试验点杏果细胞器组分中 DNOP 的累积量, A、C、D、F 试验点杏果细胞器组分中 DNOP 的累积量占比呈波动上升趋势; B、E、F 试验点杏果细胞器组分中 DNOP 的累积量, B、E 试验点杏果细胞器组分中 DNOP 的累积量占比呈波动下降的趋势。在杏果细胞壁组分中, DNOP 的累积量和累积量占比的变化可分为 3 类, 其中 A、B 试验点杏果细胞壁组分中 DNOP 的累积量, B、E 试验点杏果细胞壁组分中 DNOP 的累积量占比呈波动上升的趋势; D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DNOP 的累积量和 A、D、F 试验点杏果细胞壁组分中 DNOP 的累积量占比整体呈下降趋势; A、C 试验点杏果细胞壁组分中 DNOP 的累积量相对较为平缓。



A~F 试验点见表 1。

图 9 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二甲酯(DMP)的累积量分配与占比

Fig.9 Cumulative distribution and proportion of dimethyl phthalate (DMP) in apricot fruit subcells at different growth stages



A~F 试验点见表 1。

图 10 不同生育期杏果亚细胞中邻苯二甲酸二正辛酯(DNOP)的累积量分配与占比

Fig.10 Cumulative distribution and proportion of di-n-octyl phthalate (DNOP) in apricot fruit subcells at different growth stages

从总累积量来看,A、B 试验点杏果中 DNOP 的累积量高于其他试验点,C 试验点杏果中 DNOP 的累积量较低。从累积量占比看,A、B、C、D、E、F 试验点杏果中 DNOP 的亚细胞组分、可溶性组分的分布规律如下:细胞器>细胞壁>可溶性组分。

综上所述,8 种 PAEs 化合物累积量在亚细胞组分中的变化规律不同,整体可分为平缓、波动上升和波动下降 3 种,B、D、F 试验点杏果中 DIBP、DMP 细

胞壁组分含量和占比的变化趋势与其累积量的变化趋势相似,推测细胞壁组分可能是影响杏果中 DIBP、DMP 累积的主要亚细胞组分。

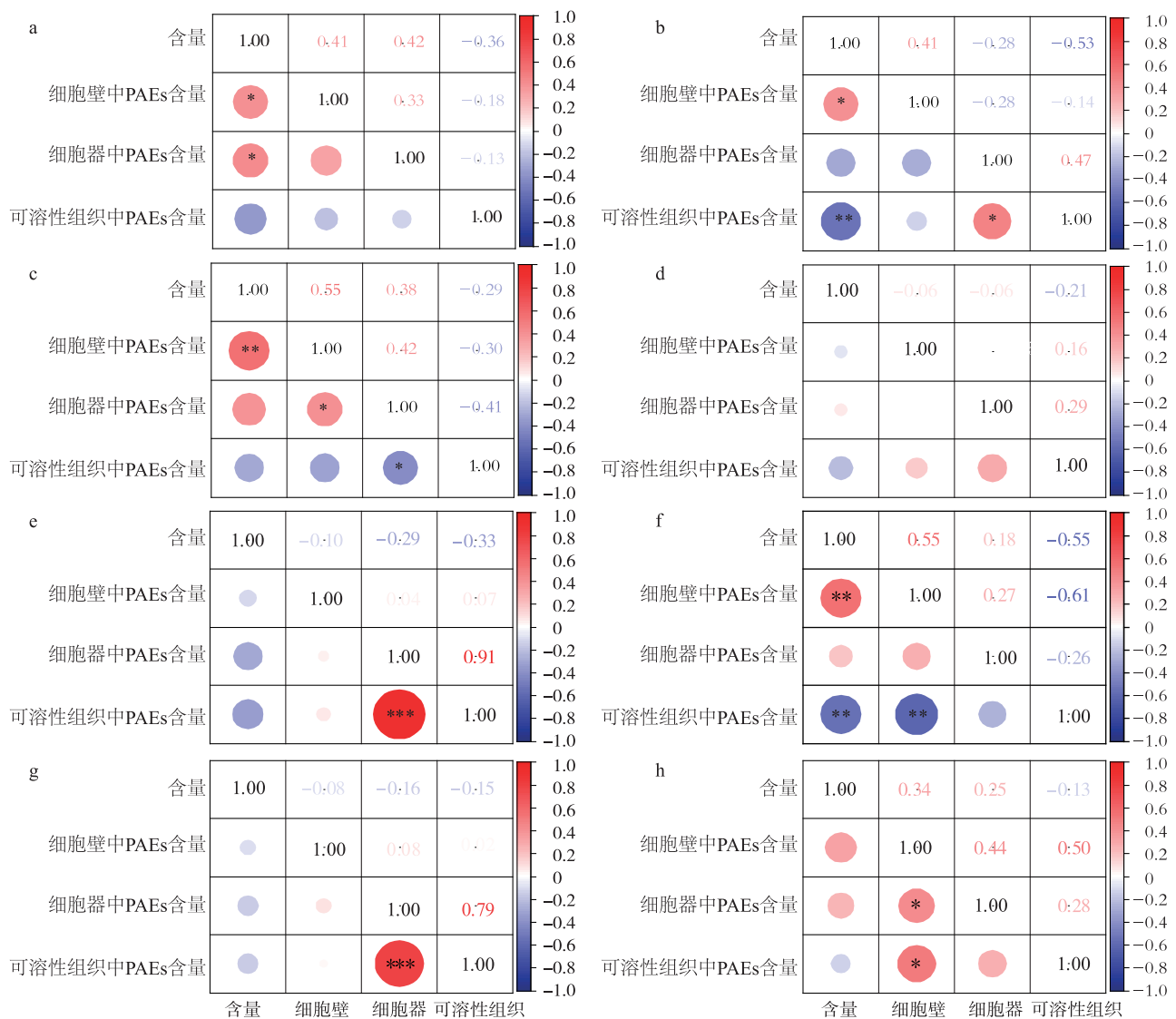
从总累积量来看,A、B 试验点 DBP、DIBP、DIOBP、DMP、DNOP 的累积量均高于其他 5 个试验点,C 试验点 PAEs 的累积量均低于其他 5 个试验点。因此推测 A、B 试验点 PAEs 的降解率较低,C 试验点 PAEs 的降解率较高。从分配占比看,BBP、DE-

HP、DIDP、DNOP 4 种 PAEs 单体累积量的亚细胞分布规律为细胞器>细胞壁>可溶性组分,DEP、DIBP、DMP 3 种 PAEs 单体累积量的亚细胞分布符合可溶性组分>细胞壁>细胞器,DBP 累积量的亚细胞分布规律为可溶性组分>细胞器>细胞壁。由此可知,可溶性组分占比高可能是导致杏果中 DBP 含量高于其他单体的原因。

2.4 杏果中 PAEs 含量与亚细胞组分中 PAEs 含量的相关性分析

为探明杏果中 PAEs 含量与亚细胞组分中

PAEs 含量的关系,对杏果亚细胞组分中 8 种 PAEs 单体化合物的含量开展相关性分析。从图 11 可以看出,杏果中 BBP、DIBP、DMP、DBP 4 种 PAEs 含量与细胞壁呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关,相关系数分别为 0.41、0.41、0.55、0.55。DEHP、DIDP、DNOP 3 种 PAEs 含量与细胞壁、细胞器、可溶性组分呈负相关,DEP 含量与细胞壁、细胞器、可溶性组分含量间的相关性较小。由此可以得出:细胞壁可能是影响杏果 BBP、DIBP、DMP 和 DBP 迁移的主要亚细胞组分。



a: 邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP); b: 邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP); c: 邻苯二甲酸二甲酯(DMP); d: 邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP); e: 邻苯二甲酸二异癸酯(DIDP); f: 邻苯二甲酸二丁酯(DBP); g: 邻苯二甲酸二正辛酯(DNOP); h: 邻苯二甲酸二乙酯(DEP)。*表示在 0.05 水平显著相关($P \leq 0.05$), **表示在 0.01 水平显著相关($P \leq 0.01$); ***表示在 0.001 水平显著相关($P \leq 0.001$)。

图 11 8 种邻苯二甲酸酯(PAEs)含量与亚细胞组分中 PAEs 含量之间的相关性

Fig.11 Correlation between contents of eight phthalic acid esters (PAEs) and the contents of PAEs in subcellular fractions

3 讨 论

不同 PAEs 单体在不同生育期杏果中含量的变化情况不同,这可能与杏果生长环境受塑化剂污染相关,如相关报道显示,大气^[13]、土壤^[14]、水体^[15]、动植物^[16]、工业废气^[17]、废水^[18]中存在检出 PAEs 的现象。Xu 等^[19]研究发现,降水、大气沉降、排水会造成土壤中 PAEs 含量的变化。土壤中塑化剂可通过植物根系、叶片的迁移进入植物体^[20-22],导致其在水果、蔬菜、粮食籽粒中积累^[23-25]。

Wang 等^[26]研究了 4 种 PAEs 单体降解率与其烷基链长度的关联性,结果显示:烷基链较短的 PAEs 比链较长的 PAEs 降解得更快。由此分析得出,受检杏果样品中不同的 PAEs 单体烷基链长度存在差异,短碳链的 PAEs 组分含量相对较低,可能由于这些短碳链的 PAEs 组分有较高的水溶性和较小的辛醇分配系数,容易被微生物分解或经其他途径分解,因此最终富集或迁移到杏果中的含量不同。

Cousins 等^[27-28]研究发现,可溶性组分是储存高极性、亲水性化合物的主要亚细胞组分,细胞器是储存疏水性相对较低的化学物质的主要亚细胞组分,细胞壁是储存疏水性相对较高的化学物质的主要亚细胞组分。BBP、DEHP、DIDP、DNOP 具有低疏水性,且细胞器(包括线粒体、高尔基复合体颗粒和核酸)的脂质含量相对较高,有机化合物的吸收量与脂质含量呈正相关^[29],同时细胞器又对有机化合物(如多环芳烃和 PAEs)具有高亲和力,由此分析得出:低疏水性和高脂质含量是杏果细胞器中 BBP、DEHP、DIDP、DNOP 含量相对较高的原因。可溶性组分中 DEP、DIBP、DMP、DBP 含量相对较高可能与这类单体的亲水性相对较强有关。

4 结 论

本研究通过对杏果样品及 3 种亚细胞组分中 PAEs 含量检测发现,不同亚细胞组分中 DBP 单体在可溶性组分中占比高可能是导致杏果 DBP 含量高于其他单体的原因;细胞壁可能是影响杏果 BBP、DIBP、DMP、DBP 含量变化的主要亚细胞组分。本研究结果为杏果中 PAEs 的分布积累提供了信息,可为 PAEs 在杏果体内的代谢、吸收过程和科学调控奠定前期研究基础。

参考文献:

- [1] 邓 龙,周 思,张瑞瑞,等. 气相色谱-质谱法测定鱼油胶囊壳中 22 种邻苯二甲酸酯类含量及迁移量[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 261-266.
- [2] CHAPRON L, PERU E, ENGLER A, et al. Macro- and microplastics affect cold-water corals growth, feeding and behaviour[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 15299.
- [3] 肖霞霞,杨 云,马丽雅,等. 大蒜内生巨大芽孢杆菌对邻苯二甲酸酯的共代谢降解特性及代谢途径分析[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 106-117.
- [4] 赵 岩,薛丽君,黄 婧,等. 邻苯二甲酸酯健康影响流行病学研究进展[J]. 首都公共卫生, 2020, 14(1): 9-12.
- [5] CHANG S I, REINFELDER J R. Bioaccumulation, subcellular distribution, and trophic transfer of copper in a coastal marine diatom[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(23): 4931-4935.
- [6] SUN X Y, LI P, ZHENG G L. Cellular and subcellular distribution and factors influencing the accumulation of atmospheric Hg in *Tillandsia usneoides* leaves[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 414: 125529.
- [7] 曹双瑜,吴培杉. 新疆产区甜瓜中邻苯二甲酸酯污染状况及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全导刊, 2022(2): 49-52.
- [8] ZHANG T, MA B B, WANG L J. Phthalic acid esters in grains, vegetables, and fruits: concentration, distribution, composition, bio-accessibility, and dietary exposure[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(2): 2787-2799.
- [9] 高雯雯,肖 凡,苏婧怡,等. 新疆野巴旦杏的资源现状和发展趋势分析[J]. 特种经济动植物, 2020, 23(8): 47-48.
- [10] 李自芹,杨 慧,李文绮,等. 新疆鲜杏保鲜技术研究现状[J]. 农产品加工, 2020(20): 89-94.
- [11] 彭 伟,王 璐,罗 铭,等. 气相色谱-串联质谱法测定蔬菜和土壤中 17 种邻苯二甲酸酯[J]. 理化检验-化学分册, 2015, 51(11): 1505-1510.
- [12] WEIGEL H J, JÄGER H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants[J]. Plant Physiology, 1980, 65(3): 480-482.
- [13] 杨微微,许 杉,黄玉琪,等. 城市大气颗粒物中塑化剂污染水平的影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023, 55(2): 55-61.
- [14] LYU H X, MO C H, ZHAO H M, et al. Soil contamination and sources of phthalates and its health risk in China: a review[J]. Environmental Research, 2018, 164: 417-429.
- [15] 刘 成,孙翠竹,张 贺,等. 胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1726-1733.
- [16] MO C H, CAI Q Y, TANG S R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in vegetables from nine farms of the Pearl River Delta, south China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 56(2): 181-189.

- [17] PLOTNIKOVA R N, KORCHAGIN V I, POPOVA L V. Bromination of phthalate-containing systems obtained from industrial waste [J]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya Khimicheskaya Tekhnologiya, 2021, 64(11): 112-116.
- [18] 陈其胜, 薛娟霞. 城市污水处理厂中邻苯二甲酸酯的分布规律及去除途径[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(1): 16-18.
- [19] XU G, LI F S, WANG Q H. Occurrence and degradation characteristics of dibutyl phthalate (DBP) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in typical agricultural soils of China[J]. The Science of the Total Environment, 2008, 393(2/3): 333-340.
- [20] KONG X, JIN D C, JIN S L, et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 353: 142-150.
- [21] CHEN N, SHUAI W J, HAO X M, et al. Contamination of phthalate esters in vegetable agriculture and human cumulative risk assessment[J]. Pedosphere, 2017, 27(3): 439-451.
- [22] 李海峰, 刘志刚, 任红松, 等. 葡萄植株对土壤中邻苯二甲酸酯的吸收累积特征[J]. 江西农业学报, 2022, 34(2): 55-61.
- [23] CAI Q Y, XIAO P Y, CHEN T, et al. Genotypic variation in the uptake, accumulation, and translocation of di-(2-ethylhexyl) phthalate by twenty cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 116: 50-58.
- [24] GAO M L, DONG Y M, ZHANG Z, et al. Metabolism and distribution of dibutyl phthalate in wheat grown on different soil types [J]. Chemosphere, 2019, 236: 124293.
- [25] 刘玉兰, 刘燕, 胡爱鹏, 等. 芝麻中塑化剂含量及其在制油过程中的迁移规律[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 312-317.
- [26] WANG J L, ZHAO X, WU W Z. Biodegradation of phthalic acid esters (PAEs) in soil bioaugmented with acclimated activated sludge[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12): 1837-1841.
- [27] COUSINS I T, MACKAY D. Strategies for including vegetation compartments in multimedia models [J]. Chemosphere, 2001, 44(4): 643-654.
- [28] CHENG Z P, YAO Y M, SUN H W. Comparative uptake, translocation and subcellular distribution of phthalate esters and their primary monoester metabolites in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 742: 140550.
- [29] COLLINS C, FRYER M, GROSSO A. Plant uptake of non ionic organic chemicals [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(1): 45-52.

(责任编辑:徐 艳)