

高效液相色谱法测定土壤和河底泥中的 15 种邻苯二甲酸酯

杨丹旌, 王欣, 吴凌, 杨懿, 尹烁, 孙成均

四川大学华西公共卫生学院 / 四川大学华西第四医院, 四川 成都 610041

摘要: 目的 建立土壤和底泥中 15 种邻苯二甲酸酯的高效液相色谱测定方法, 并用于成都市土壤和河底泥中邻苯二甲酸酯(PAEs)的污染调查。方法 样品经二氯甲烷提取、离心后, 取上清液氮吹至干, 乙腈复溶后, 进样测定。以 Gemini C18(250 mm×4.6 mm, 5 μm)为分离柱, 乙腈-水为流动相梯度洗脱。结果 DBZP、DIBP、DEHP 和 DNP 的线性范围为 0.01~10.0 mg/L, 其他 PAEs 的线性范围为 0.005~10.0 mg/L, 相关系数均大于 0.9998。土壤的检出限(LOD)和定量限(LOQ)分别为 1.22~5.56 μg/kg 和 4.08~18.5 μg/kg, 加标回收率和相对标准偏差(RSD)分别为 76.4%~111%和 1.28%~16.2%; 底泥的检出限和定量限分别为 0.987~4.35 μg/kg 和 3.29~14.5 μg/kg, 加标回收率和相对标准偏差分别为 80.0%~116%和 2.11%~11.1%。结论 建立的方法具有简便、快速、灵敏、溶剂用量少等优点, 适用于土壤和底泥中 15 种 PAEs 的同时测定。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 高效液相色谱法; 土壤; 底泥

中图分类号: R124 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2019)08-1460-05

Determination of 15 phthalates in soil and river sediment by high performance liquid chromatography

YANG Dan-ni, WANG Xin, WU Ling, YANG Yi, YIN Shuo, SUN Cheng-jun

West China School of Public Health and West China Fourth Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: Objective The aim of this study was to establish a method for simultaneous determination of 15 phthalates (PAEs) in soil and river by high performance liquid chromatography and apply it to the investigation of PAEs pollution in soil and river sediment in Chengdu, China. **Methods** PAEs in sample was extracted with dichloromethane, then centrifugated. The supernatant was dried-up under gentle nitrogen flow. Finally, the residue was reconstituted with acetonitrile and the solution was subjected to HPLC analysis. The separation was performed with gradient elution on a Gemini C18 column (250 mm×4.6mm, 5μm) and the mobile phase was consisted of acetonitrile and water. **Results** The linear ranges for DBZP, DIBP, DEHP and DNP were 0.01–10.0 mg/L, and range for the other PAEs were 0.005–10.0 mg/L, with the correlation coefficients greater than 0.9998. The limits of detection (LODs) and the limits of quantification (LOQs) for soil were 1.22–5.56 μg/kg and 4.08–18.5 μg/kg, respectively. The recoveries for soil ranged from 76.4% to 111% with RSDs in the range of 1.28%–16.2%. For sediment, the LODs and LOQs were 0.987–4.35 μg/kg and 3.29–14.5 μg/kg, respectively. The recoveries for sediment ranged from 80.0% to 116% with RSDs in the range of 2.11%–11.1%. **Conclusion** This method is simple, quick, sensitive and solvent-saving. It is suitable for simultaneous determination of 15 PAEs in soil and sediment.

Keywords: Phthalates; High-performance liquid chromatography; Soil; Sediment

邻苯二甲酸酯(简称 PAEs)作为增塑剂被广泛应用于食品包装材料、装修材料、医疗器械、玩具、化妆品等^[1]。研究表明, PAEs 对内分泌系统和生殖系统有干扰作用, 部分具有致畸、致癌、致突变的危害^[2]。PAEs 和塑料制品间由氢键或范德华力连接, PAEs 容易游离出来进入周边环境^[3]。由于生物对 PAEs 的富

集作用, 环境中存在的 PAEs 有可能扰乱生态平衡, 危害人体健康^[4]。美国国家环保局(USEPA)将邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)等 6 种 PAEs 列为优先控制污染物, 其中 DEP、DOP、DMP 也是我国优先控制的有毒污染物^[5]。所以, 对土壤和底泥等环境介质中邻苯二甲酸酯污染情况的监测有着重要意义。国内外对土壤和底泥中

作者简介: 杨丹旌(1995-), 女, 医学硕士, 研究方向: 卫生理化检验方法及其应用

通讯作者: 孙成均 E-mail: sunchj@scu.edu.cn

PAEs 污染监测有很多报道^[6-7],但关于成都市区土壤和府南河底泥 PAEs 污染情况似未见报道。

PAEs 的测定方法主要有气相色谱法^[8]、高效液相色谱法^[9]、气相色谱 - 串联质谱法^[10]、超高效液相色谱 - 串联质谱法^[3]等,其中高效液相色谱法具有灵敏准确、操作简便、普及率高等优点,得到了广泛应用。土壤和底泥样品中 PAEs 的提取方法主要有索氏提取法^[11]、超声提取法^[10]、涡旋提取法^[9]、加速溶剂萃取法^[3]、微波萃取法^[8]等,相较于其他方法涡旋萃取法具有快速简便、对硬件要求低的特点。本文建立了涡旋溶剂萃取 - 高效液相色谱法并应用于成都城区不同功能区的土壤和成都市区府南河各段底泥中 15 种 PAEs 含量测定,初步了解 PAEs 的污染现状和分布特征,为污染治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

1.1.1 主要仪器 3000 型高效液相色谱仪,配紫外可变波长检测器(美国赛默飞世尔科技有限公司);涡旋混匀器(意大利 VELP 科技有限公司);TDL-80-2B 型低速台式离心机(上海安亭科学仪器厂);N-EVAP 氮吹仪(美国 Organomation 公司)。

1.1.2 试剂 邻苯二甲酸二乙酯(DEP, 99.0%)、邻苯二甲酸二丙酯(DAP, 98.0%)、邻苯二甲酸二异丙酯(DIPP, 98.5%)、邻苯二甲酸二丙酯(DPrP, 99.0%)、邻苯二甲酸二苯酯(DPP, 99.9%)、邻苯二甲酸二苄酯(DBZP, 99.4%)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP, 98.0%)、邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP, 99.4%)、邻苯二甲酸二(2-丁氧基)乙酯(BBEP, 99.0%)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP, 99.0%)、邻苯二甲酸二正戊酯(DPEP, 99.2%)、邻苯二甲酸二环己酯(DCHP, 99.9%)、邻苯二甲酸二正辛酯(DnOP, 99.0%)、邻苯二甲酸二壬酯(DNP, 99.0%),均购自德国 Dr.Ehrenstorfer 公司;邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP, 99.5%,成都艾科);二氯甲烷、乙酸乙酯、正己烷、丙酮(色谱纯,天津科密欧);氯化钠(分析纯,天津瑞金特);实验用水为超纯水(18.2 MΩ·cm)。

1.2 色谱条件 色谱柱:Gemini C18 (250 mm×4.6mm, 5 μm, 美国菲罗门);同类型预柱;流动相为乙腈-水,使用梯度洗脱程序(见表 1)进行分离;柱温:35℃;检测波长:225 nm;进样量:20 μL。

1.3 标准溶液的配制 分别准确称取适量各 PAEs 标准,用甲醇溶解配制成浓度为 1.00 g/L 的单标储备液;取各单标储备液适量用甲醇配制成浓度为 10.0 mg/L 的混合标准液,每周配制 1 次。标准储备液和混合标准液均于 -18℃ 冰箱中保存。

表 1 梯度洗脱程序

时间(min)	流速(ml/min)	乙腈(%)	水(%)
0.0	1.200	65.0	35.0
10.0	1.000	65.0	35.0
18.0	1.000	94.0	6.0
18.0	1.200	100.0	0.0
29.0	1.200	100.0	0.0
29.0	1.200	65.0	35.0
33.0	1.200	65.0	35.0

1.4 样品采集与处理

1.4.1 样品采集 2018 年 5 月,在成都城区居住区、学校、景区、医院、道路、公园、商业区等 12 个采样点采集表层土壤(0~20 cm),每个采样点采集平行双样,采样量为 1 kg。2018 年 9 月,在市区段内府河 8 个采样点,南河 6 个采样点采集 0~10 cm 深度的底泥,同一河道每个采样点距离 1 km 左右,均采集平行双样,采样量为 1 kg。采集后的样品均贮存于玻璃磨口瓶中,于 -18℃ 冰箱保存。土壤和底泥采样点分布见图 1。

1.4.2 样品处理 采集后的土壤和底泥样品剔除树叶、石块等杂质,于通风阴凉处自然风干,然后用研钵磨细后过 100 目筛,装玻璃磨口瓶备用。另取样品于 105℃ 烘干 4 h 恒重后测定水分含量,结果水分含量均低于 1%。所以,直接准确称取风干样品 1.0000 g 样品于 10 ml 玻璃离心管中,加入 4.00 ml 二氯甲烷,涡旋 2.5 min 进行萃取,3 000 r/min 离心 5 min,用移液管取 2.00 ml 上清液于玻璃离心管中,氮吹浓缩至干,加入 0.20 ml 乙腈涡旋 0.5 min 复溶,转入装有内插管的进样瓶中,进样 HPLC 分析。

1.5 污染控制 因 PAEs 分布广泛,需尽量减少 PAEs 的污染,避免本底值过高。本实验中未使用任何塑料制品,玻璃用具分别用自来水、超纯水清洗,甲醇浸泡过夜,200℃ 烘烤 1 h 后使用,每批实验均测定空白本底值,实验结果需减去本底值。

2 结果与讨论

2.1 色谱条件的优化 通过二极管阵列检测器在 190~400 nm 范围扫描 15 种待测物,得到最大吸收波长 225 nm。此外,实验考察了以乙腈-水为流动相的不同洗脱程序和不同的流速梯度对 PAEs 分离的影响。优化后的梯度洗脱程序和流速如 1.2 色谱条件所示。比较了不同柱温(25℃、30℃、35℃、40℃)对分离度和灵敏度的影响,结果显示,柱温升高,灵敏度增加,但柱温为 40℃ 时分离效果变差,故选择柱温 35℃。15 种 PAEs 经优化的色谱条件分离后的色谱图见图 2。

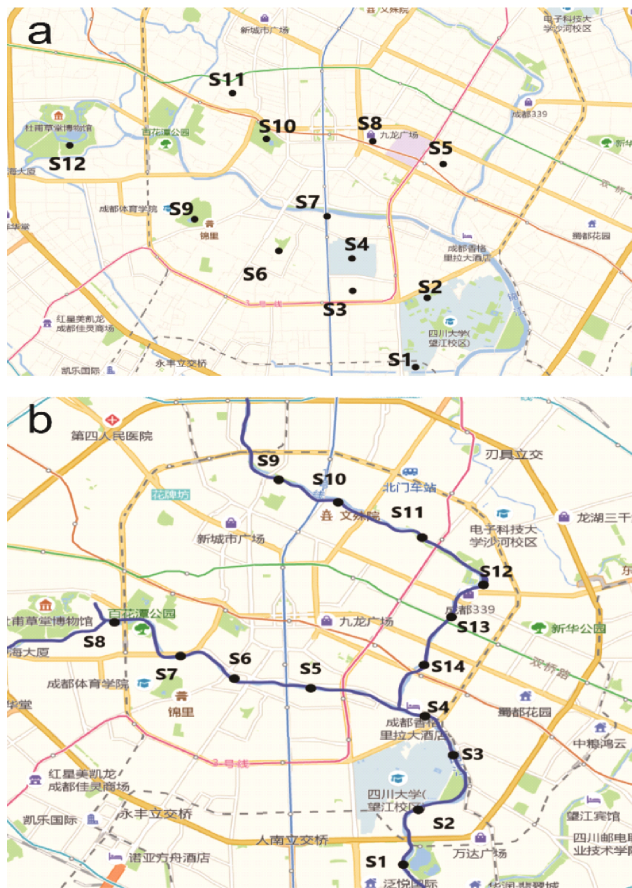
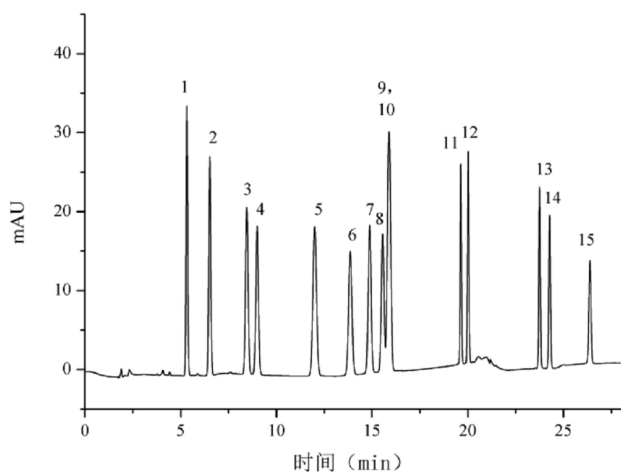


图1 成都市土壤(a)和底泥(b)的采样点



峰号: 1.DEP 2.DAP 3.DIPP 4.DPrP 5.DPP 6.DBZP 7.BBP 8.DIBP, 9.BBEP, 10.DBP, 11.DPEP, 12.DCHP, 13.DEHP, 14.DnOP, 15.DNP
图2 15种PAEs标准溶液色谱图(5.0 mg/L)

2.2 样品处理方法的优化

2.2.1 萃取剂种类和用量 土壤和底泥样品中有机物种类较多, 萃取剂需对待测的PAEs有较高的选择性和提取效率, 以尽量减少其他物质的共提取。根据待测物的极性, 比较了二氯甲烷、乙腈、乙酸乙酯、二氯甲烷-丙酮(1:1 v/v)、正己烷-丙酮(1:1 v/v)的提取效果。结果表明, 二氯甲烷和乙腈提取率最高, 均在85%以上, 且干扰物质较少, 但乙腈在后续的氮

吹时难以吹干, 故选择二氯甲烷为萃取剂。

实验考察了3.00、4.00、5.00 ml二氯甲烷对萃取效果的影响。结果显示, 4.00和5.00 ml二氯甲烷的提取效率均在90%以上, 3.00 ml二氯甲烷的提取效率在80%以上, 但3.00 ml二氯甲烷提取后的上清液量很小, 故选择4.00 ml二氯甲烷为萃取剂。

2.2.2 萃取时间优化 实验比较了涡旋1.0、2.5、4.0 min对提取率的影响, 其中涡旋1.0 min时提取率较低, 有11种待测物的提取率低于90%, 涡旋2.5 min和4.0 min提取率较高且相近, 均在90%以上, 故选择萃取时间2.5 min。

2.3 回归方程、检出限和定量限 用甲醇将10.0 mg/L的混合标准液稀释, 配制成0.0050、0.010、0.050、0.50、1.00、5.00、10.0 mg/L的标准系列进样分析, 以浓度(mg/L)对峰面积(mAU·min)绘制标准曲线。除DBZP、DIBP、DEHP、DNP的线性范围为0.01~10.0 mg/L外, 其他11种PAEs的线性范围均在0.005~10.0 mg/L, 相关系数均大于0.9998。检出限(LOD)和定量限(LOQ)分别由极低浓度加标样品重复测定7次的标准偏差的3倍和10倍计算得到, 本法对土壤和底泥检出限分别为1.22~5.56 $\mu\text{g/kg}$ 和0.987~4.35 $\mu\text{g/kg}$, 定量限分别为4.08~18.5 $\mu\text{g/kg}$ 和3.29~14.5 $\mu\text{g/kg}$ 。本法的回归方程、相关系数、检出限和定量限见表2。

2.4 准确度和精密度 土壤和底泥样品中分别加入20.0、100、1 000 $\mu\text{g/kg}$ 的标准溶液, 每个水平制备3个平行样, 按本法进行处理和测定。结果表明, 土壤样品中15种PAEs的加标回收率和相对标准偏差分别为76.4%~111%和1.28%~16.2%, 底泥样品加标回收率和相对标准偏差分别为80.0%~116%和2.11%~11.1%。

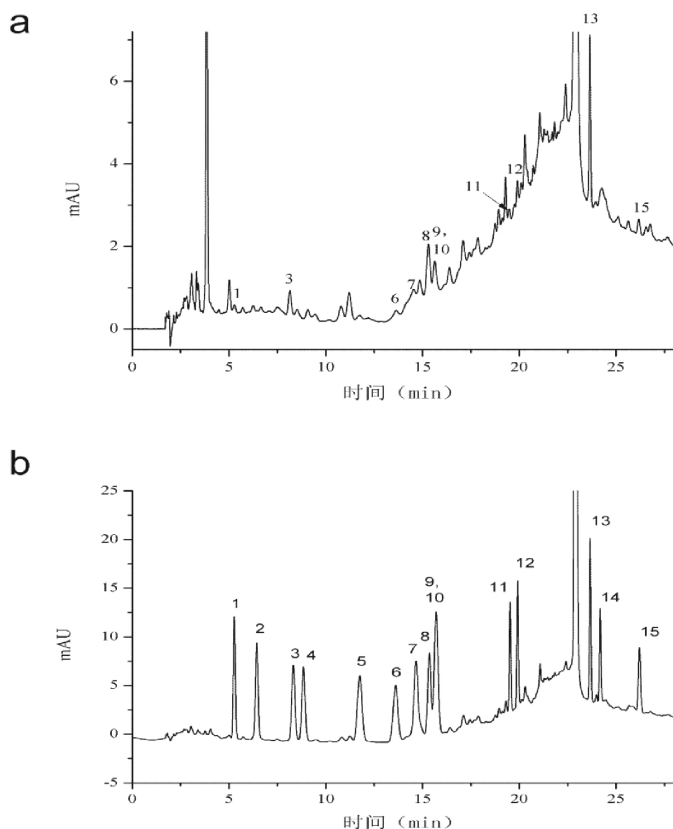
2.5 实际样品分析 采用本法对在成都市区采集的24个土壤和28个底泥样品中的15种PAEs含量进行了测定。所有底泥样品均检出DBZP、DIBP、BBEP/DBP、DPEP、DCHP、DEHP和DNP, 所有土壤样品均检出DIBP和DEHP。检出的PAEs在土壤和底泥样品中的含量范围分别是5.009~1 754 $\mu\text{g/kg}$ 和3.551~5 215 $\mu\text{g/kg}$ 。DEHP是使用最为广泛的塑化剂, 污染最为严重, 在土壤和底泥样品中的含量范围分别是49.57~1 754 $\mu\text{g/kg}$ 和474.0~5 215 $\mu\text{g/kg}$ 。从土壤检测结果来看, 由于人类活动频繁, 丢弃的塑料制品较多, 人流密集区土壤中检出的PAEs种类多, 含量高; 从底泥检测结果看, 采样点PAEs含量较高的地点均属车流量大、人口流动量大、建筑群密集的区域, 产生的废水、废气和废料较多。总体来看, 府南河底泥PAEs污染比土壤严重。由于河水中微生物和

颗粒物会吸附 PAEs 并沉降在底泥中,并且底泥中的 PAEs 的半衰期要长于土壤^[12],底泥可反映过去较长一段时期内水体 PAEs 的污染状况。关卉等^[11]调查了雷州半岛典型区域土壤 16 种 PAEs 污染情况,结果表明 DBP 和 DEHP 是最主要的 2 种塑化剂污染物,16 种 PAEs 含量在未检测到 2 605.5 $\mu\text{g/kg}$ 范围内,林莉等^[13]研究了三峡库区底泥中 6 种 PAEs 的分布,

含量范围为 192.9~3 473.4 $\mu\text{g/kg}$ Selvaraj 等^[14]测定了印度卡佛里河底泥中 6 种 PAEs 的含量,范围在 3.71~1 400 $\mu\text{g/kg}$,国内外相关研究测定的含量范围与本研究的基本一致。关于土壤和底泥中的 PAEs,国内外尚无权威的卫生标准,其对人体健康的具体影响还有待进一步研究。底泥样品和该样品加标色谱图见图 3。

表 2 方法的线性范围、回归方程、相关系数、检出限和定量限

PAEs	线性范围(mg/L)	回归方程	相关系数(<i>r</i> 值)	检出限		定量限	
				土壤 ($\mu\text{g/kg}$)	底泥 ($\mu\text{g/kg}$)	土壤 ($\mu\text{g/kg}$)	底泥 ($\mu\text{g/kg}$)
DEP	0.005~10.0	$y = 0.6533x + 0.009$	1.000	1.93	0.987	6.43	3.29
DAP	0.005~10.0	$y = 0.6588x + 0.008$	1.000	1.22	1.69	4.08	5.63
DIPP	0.005~10.0	$y = 0.6467x + 0.0121$	0.9999	3.23	3.30	10.8	11.0
DPrP	0.005~10.0	$y = 0.6183x + 0.0065$	1.000	2.79	1.89	9.31	6.32
DPP	0.005~10.0	$y = 0.8087x + 0.0199$	0.9998	2.56	0.988	8.55	3.29
DBZP	0.01~10.0	$y = 0.6416x + 0.0158$	0.9999	1.97	1.97	6.56	6.58
BBP	0.005~10.0	$y = 0.6578x + 0.009$	0.9999	4.14	3.48	13.8	11.6
DIBP	0.01~10.0	$y = 0.567x + 0.0076$	1.000	5.56	4.35	18.5	14.5
BBEP/DBP	0.005~10.0	$y = 1.2145x + 0.0179$	1.000	3.43	2.39	11.4	7.96
DPEP	0.005~10.0	$y = 0.4189x + 0.0046$	0.9999	2.99	2.73	9.97	9.10
DCHP	0.005~10.0	$y = 0.4533x + 0.0023$	1.000	3.34	2.25	11.2	7.49
DEHP	0.01~10.0	$y = 0.4091x + 0.0041$	1.000	3.78	2.23	12.6	7.42
DnOP	0.005~10.0	$y = 0.3776x + 0.0008$	1.000	3.06	2.08	10.2	6.92
DNP	0.01~10.0	$y = 0.3419x + 0.0043$	0.9999	2.89	1.86	9.65	6.20



峰号同图 2。

图 3 底泥样品(a)及其加标 1 000 $\mu\text{g/kg}$ 样品(b)的色谱图

3 小 结

建立了二氯甲烷涡旋萃取 - 高效液相色谱 - 紫外检测法测定土壤和底泥中 15 种 PAEs 的方法,相比于其他方法,操作简单、试剂用量少,提高了分析效率,并减少 PAEs 背景污染。利用该法对成都城区不同功能区的土壤和成都市区府南河底泥进行 PAEs 含量测定,可为成都市环境中 PAEs 的污染监测提供参考,也可为成都市的环境保护和污染治理提供科学依据。

参考文献

- [1] 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, 37(2): 75 - 79.
- [2] 成昊, 张丽君, 张磊, 等. 基质固相分散萃取 - 分散液相微萃取 - 气相色谱 / 质谱联用法测定土壤中的邻苯二甲酸酯[J]. 分析试验室, 2015, 34(5): 574 - 578.
- [3] 闫蕊, 邵明媛, 孙长华, 等. 加速溶剂萃取 - 高效液相色谱串联质谱法测定土壤中邻苯二甲酸酯[J]. 分析化学, 2014, 42(6): 897 - 903.
- [4] 罗丹玲. 城区土壤邻苯二甲酸酯污染特征研究[D]. 广州: 中山大学, 2005.
- [5] Net S, Delmont A, Sempéré R, et al. Reliable quantification of phthalates in environmental matrices (air, water, sludge, sediment and

- [1] Skwarczynski M, Toth I. Micro and Nanotechnology in Vaccine Development[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 127-147.
- [2] 孙晓敏, 陈勇. 人用疫苗佐剂的安全性[J]. 微生物学免疫学进展, 2018, 46(1): 1-6.
- [3] 聂伟, 张永祥. 多糖的免疫调节作用及其作用机制研究进展[J]. 中国药理学通报, 1999, 15(6): 484.
- [4] 倪峰. 免疫活性的中药多糖[J]. 福建中医学院学报, 2001, 11(1): 57-58.
- [5] Petrovsky N, Cooper PD. Advax (TM), a novel microcrystalline polysaccharide particle engineered from delta inulin, provides robust adjuvant potency together with tolerability and safety [J]. Vaccine, 2015, 33(44, SI): 5920-5926.
- [6] Saade F, Honda - Okubo Y, Trec S, et al. A novel hepatitis B vaccine containing Advax (TM), a polysaccharide adjuvant derived from delta inulin, induces robust humoral and cellular immunity with minimal reactogenicity in preclinical testing [J]. Vaccine, 2013, 31(15): 1999-2007.
- [7] Cooper PD. Vaccine adjuvants based on gamma inulin [J]. Pharmaceutical Biotechnology, 1995, 6: 559-80.
- [8] Cooper PD, McComb C, Steele EJ. The adjuvanticity of algamulin, a new vaccine adjuvant[J]. Vaccine, 1991, 9(6): 408-415.
- [9] Cooper PD, Steele EJ. Algamulin, a new vaccine adjuvant comprising gamma inulin particles containing alum: preparation and in vitro properties[J]. Vaccine, 1991, 9(5): 351-357.
- [10] Tindle RW. Vaccines for human papillomavirus infection and anogenital disease [M]. Austin: R.G Landes Company, 1999: 91-104.
- [11] Yu W, Hu T. Conjugation with an inulin - chitosan adjuvant markedly improves the immunogenicity of mycobacterium tuberculosis CFP10 - TB10.4 fusion protein [J]. Molecular Pharmaceutics, 2016, 13(11): 3626-3635.
- [12] Huang QR, Yu WL, Hu T. Potent Antigen - Adjuvant delivery system by conjugation of mycobacterium tuberculosis Ag85B - HspX fusion protein with Arabinogalactan - Poly(I:C) conjugate[J]. Bioconjugate chemistry, 2016, 27(4): 1165-1174.
- [13] Hayashi M, Aoshi T, Haseda Y, et al. Advax, a delta inulin microparticle, potentiates in - built adjuvant property of co - administered vaccines[J]. Ebiomedicine, 2017, 15: 127-136.
- [14] 雷建平. 关于 CD8 细胞在结核病免疫治疗效果评价中的意义之我见[J]. 中国防痨杂志, 2002, 24(1): 65-66.
- [15] Honda - Okubo Y, Saade F, Petrovsky N, et al. Advax?, a polysaccharide adjuvant derived from delta inulin, provides improved influenza vaccine protection through broad - based enhancement of adaptive immune responses[J]. Vaccine, 2012, 30(36): 5373-5381.
- [16] Hua S, Yu WL, Hu CY, et al. Conjugation of the CRM197 - inulin conjugate significantly increases the immunogenicity of Mycobacterium tuberculosis CFP10 - TB10.4 fusion protein [J]. Bioorganic and Medicinal Chemistry, 2017, 25(21): 5968-5974.
- [17] Wang LX, Barclay T, Song YM, et al. Investigation of the biodistribution, breakdown and excretion of delta inulin adjuvant[J]. Vaccine, 2017, 35(34): 4382-4388.
- [18] Azmi F, Fuaad AA, Skwarczynski M, et al. Recent progress in adjuvant discovery for peptide - based subunit vaccines[J]. Human Vaccines and Immunotherapeutics, 2014, 10(3): 778-796.

收稿日期 2018 - 09 - 30

(上接第 1463 页)

- soil): a review[J]. The Science of the Total Environment, 2015, 515-516: 162-180.
- [6] Hassanzadeh N, Sari AE, Khodabandeh SA. Occurrence and distribution of two phthalate esters in the sediments of the Anzali wetlands on the coast of the Caspian Sea (Iran)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 89(1/2): 128-135.
- [7] Li KK, Ma D, Wu J, et al. Distribution of phthalate esters in agricultural soil with plastic film mulching in Shandong Peninsula, East China[J]. Chemosphere, 2016, 164: 314-321.
- [8] 陈莎, 曹莹, 苏粤, 等. 微波萃取气相色谱法测定底泥中邻苯二甲酸酯[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(4): 498-503.
- [9] 魏丽琼, 呼世斌, 刘书慧, 等. QuEChERS - 高效液相色谱法测定土壤中邻苯二甲酸酯[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 148-151.
- [10] 李拥军, 黎小鹏, 李盛安, 等. GC - MS 法测定底泥中 7 种邻苯二甲酸酯[J]. 现代农业科技, 2016, (13): 221-222.
- [11] 关卉, 王金生, 万洪富, 等. 雷州半岛典型区域土壤邻苯二甲酸酯(PAEs)污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 622-628.
- [12] Net S, Sempere R, Delmont A, et al. Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(7): 4019-4035.
- [13] 林莉, 董磊, 李青云, 等. 三峡库区水体和底泥中多环芳烃和邻苯二甲酸酯类分布和来源[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 660-667.
- [14] Selvaraj KK, Sundaramoorthy G, Ravichandran PK, et al. Phthalate esters in water and sediments of the Kaveri River, India: environmental levels and ecotoxicological evaluations [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 37(1): 83-96.

收稿日期 2018 - 09 - 30