

液相色谱-串联四极杆质谱法测定海水 和海底泥中的有机磷酸酯类阻燃剂

作者

刘星, 孙禾琳, 王卫平, 姚子伟
国家海洋环境监测中心,
国家环境保护近岸海域生态环境
重点实验室

万正瑞, 杜伟, 吴翠玲
安捷伦科技(中国)有限公司

摘要

本应用简报基于最近的论文^[1], 介绍了基于液相色谱-串联四极杆质谱联用技术同时测定海水和海底泥中 22 种常见有机磷酸酯类 (OPEs) 阻燃剂的方法。海水中的 OPEs 经过极性修饰的 Agilent Bond Elut PPL 反相聚合物固相萃取柱富集和净化后, 通过同位素稀释法进行定量。在 0.5–100 ng/L 的浓度范围内, 大部分 OPEs 的线性响应良好, 线性相关系数高于 0.99。海水中 OPEs 的方法检测限在 0.0003–0.79 ng/L 之间; 低、中、高三个加标水平下的加标回收率和相对标准偏差分别在 51.8%–123.0% 和 0.7%–13.6% 之间; 海底泥中 OPEs 的方法检测限在 0.0001–0.02 µg/kg 之间, 加标回收率和相对标准偏差分别在 52.1%–118.1% 和 1.5%–12.0% 之间。结果表明, 该方法灵敏、准确、可靠, 可以满足环境海水与海底泥样品中痕量 OPEs 检测的要求。

前言

有机磷酸酯 (Organophosphate esters, OPEs) 是由磷酸基团的氢被取代而形成的一类化合物, 因其具有良好的阻燃性和延展性, 常作为阻燃剂、增塑剂添加至塑料制品、纺织品、电子设备、建筑材料以及家具装饰材料等中。目前常用的 OPEs 类阻燃剂超过 20 种^[2,3]。近年来, 卤系阻燃剂由于对环境的严重危害而逐步受到限制, OPEs 类阻燃剂的用量逐年增加, 其对生态环境和人类健康的影响日益受到人们的关注。

有研究表明, OPEs 具有致癌性、神经毒性和生殖毒性^[4,5]。OPEs 已经普遍存在于环境水体、底泥、土壤和生物体内中, 但在海水和海底泥中的检测和对海洋环境和生态的影响所知不多, 需要开展更广泛、更深入地研究。因此, 亟需建立一种适用于检测海水和海底泥中 OPEs 的简单、全面、高效的方法, 以评价 OPEs 对海洋环境的污染状况。

OPEs 的检测方法主要包括气相色谱法 (GC)、气相色谱-质谱法 (GC-MS)、液相色谱-质谱法 (LC-MS) 等^[3,6,7]。其中液相色谱-串联四极杆质谱法 (LC-MS/MS) 的优势在于灵敏度和选择性高，特别适用于分析复杂海水和底泥中分子量较大、不易挥发的 OPEs。本文将固相萃取技术与液相色谱-串联四极杆质谱相结合，建立了一种同时检测海水和海底泥中 22 种 OPEs 的分析方法。该方法简单、准确、基质干扰较少且回收率高，完全能够满足海洋环境中 OPEs 的分析要求。

实验部分

试剂和样品

实验用甲醇、甲酸、乙腈、乙酸乙酯为色谱纯（美国 Fisher 公司）；实验用水为经 Milli-Q 系统净化的超纯水（电阻率 18.2 MΩ）。各种 OPEs 标准品及同位素标准品购自美国 AccuStandard 公司 (100 µg/mL, 以甲苯或异辛烷作为溶剂)，配制工作液时，准确吸取一定量标准储备液，用氮气缓慢吹干，经甲醇重新定容后使用。实验用海水样品在取样后放入容器并冷藏于 4 °C 的冰箱中，底泥样品在烘干后经粉碎过筛放入容器中备用。

仪器和设备

采用 Agilent 1290 Infinity 液相色谱/Ultivo 三重四极杆液质联用 (LC/MS/MS) 系统；Agilent Vac Elut 20 位固相萃取装置。其它设备：3K-15 离心机（美国 Sigma 公司）、氮吹仪（普立泰科公司）、涡旋混匀器（德国 IKA 公司）、Milli-Q 超纯水装置（美国 Millipore 公司）。

在样品前处理中采用 Agilent Bond Elut PPL 反相聚合物固相萃取柱 (200 mg, 3 mL)、Bond Elut Plexa (200 mg, 3 mL) 和 Bond Elut C18 (500 g, 6 mL)，Bond Elut 储液管 (60 mL)。

色谱柱采用了 Agilent Zorbax Eclipse plus C18 (2.1 × 100 mm, 1.8 µm)、Agilent Poroshell EC-C18 (2.1 × 150 mm, 2.7 µm) 和 Agilent Zorbax SB-Aq (2.1 × 150 mm, 1.8 µm)。

样品前处理

准确量取 500 mL 海水样品，静置沉降后取上层清液，向其中加入 10 µL 1 µg/mL 混合内标液以及 50 mL 甲醇，混合均匀，待过柱。Bond Elut PPL (200 mg, 3 mL, 部件号 12105005) 柱在使用前用 3 mL 乙酸乙酯淋洗，开启固相萃取装置 3 min，将其抽干，然后用 3 mL 甲醇和 3 mL 水依次活化小柱，小柱上方用适配器连接 Bond Elut 60 mL 储液管 (60 mL, 部件号 131005) 上

海水样品，保持流速 5–8 mL/min；上样结束后用 10 mL 10% 甲醇水淋洗；开启固相萃取装置 3 min，将小柱抽干；然后用 6 mL 乙酸乙酯洗脱，收集全部洗脱液；氮吹至干，用甲醇定容至 1 mL，进 LC-MS/MS 进行检测。

准确称取 5.0 (±0.05) g 海底泥样品，向其中加入 10 µL 1 µg/mL 混合内标液，涡旋混合均匀；再加入 10 mL 乙腈并涡旋 1 min，超声提取 10 min；在 8000 r/min 下离心 5 min，取上清液加入 50 mL 空离心管中；然后加入 10 mL 乙腈重复萃取一次，合并乙腈提取液，在 40 °C 下氮吹浓缩至 2 mL；加入 8 mL 水，涡旋混合均匀；过 Bond Elut PPL 柱，控制流速为 1–2 mL/min。其它操作与海水样品前处理操作相同。

液质分析条件

色谱柱：	Agilent ZORBAX SB-Aq, 2.1 × 150 mm, 1.8 µm, 部件号 859700-914	
柱温：	40 °C	
进样量：	2 µL	
流动相：	A) 0.1% 甲酸水溶液 B) 甲醇	
流速：	0.3 mL/min	
梯度程序：	时间 (min)	B (%)
	0	50
	10	62
	12	70
	22	75
	27	100
	32	100
后运行时间：	5 min	

质谱分析条件

离子模式：	ESI, 正离子模式
干燥气温度：	250 °C
干燥气流速：	6 L/min
鞘气温度：	350 °C
鞘气流速：	11 L/min
雾化器压力：	30 psi
毛细管电压：	3000 V
喷嘴电压：	0 V

多反应监测 (MRM) 采集参数：见表 1

表 1. 各种 OPEs 及同位素内标的 MRM 采集参数

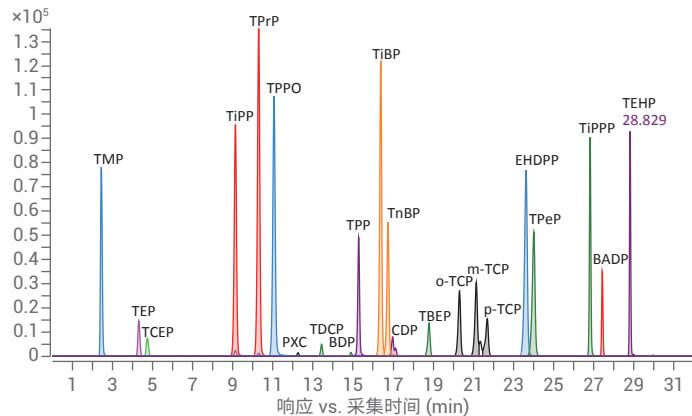
化合物	母离子 (<i>m/z</i>)	子离子 (<i>m/z</i>)	碰撞能量 (V)	碎裂电压 (V)
双酚 A 双(磷酸二苯酯) (BAPD)	6932	327.1/367.1	34/38	225
双(2,3-二溴丙基)磷酸酯 (BDP)	498.7	298.8/98.9	6/17	170
磷酸甲苯二苯酯 (CDP)	341.1	152.1/90.9	42/42	175
2-乙基己基二苯基磷酸酯 (EHDPP)	363.2	251.1/76.9	6/50	50
2,2-双氯甲基-三亚甲基-双 [双(2-氯乙基)磷酸酯] (PXC)	580.9	358.9/235	18/34	155
磷酸三丁氧乙酯 (TBEP)	399.2	299.2/199.1	9/12	110
磷酸三(2-氯乙基)酯 (TCEP)	285	98.8/62.9	26/30	100
磷酸三甲苯酯 (TCP (o-, m-, p-))	369.1	165.1/90.9	50/42	175
磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯 (TDCP)	430.9	209/98.8	14/34	145
磷酸三(2-乙基己基)酯 (TEHP)	435.4	113.1/98.8	5/17	100
磷酸三乙酯 (TEP)	183.1	98.8/80.9	18/42	60
三(2-异丙基苯基)磷酸 (TiPPP)	453.2	369.1/327.1	22/34	155
磷酸三甲酯 (TMP)	141	109/78.9	14/22	90
磷酸三丁酯 (TnBP)/ 磷酸三异丁酯 (TiBP)	267.2	211.1/98.8	2/14	55
磷酸三正戊酯 (TPeP)	309.2	239.2/98.8	6/18	85
磷酸三苯酯 (TPP)	327.1	152.1/76.9	46/50	150
三苯基氧化膦 (TPPO)	279.1	201.1/76.8	26/50	160
磷酸三丙酯 (TPrP)/ 磷酸三异丙酯 (TiPP)	225.1	183.1/98.8	2/14	65
TBEP-D27	426.2	317.2	10	125
TPrP-D21	246.1	101.9	22	65
TEHP-D51	486.7	101.9	36	65
TEP-D15	198.1	101.9	22	75
TMP-D9	150.1	115	18	110
TnBP-D27	294.2	101.9	18	85

结果与讨论

质谱与色谱条件的优化

首先在正离子模式下进行质谱扫描以得到目标化合物的 $[M+H]^+$ 母离子，然后分别优化毛细管碎裂电压和碰撞电压，使碎片离子强度尽可能高。最终选择离子强度最高和次高的碎片离子，分别用于化合物的定量和定性确认。优化后的各参数见表 1。

确定质谱参数条件后，由于存在 TPrP/TiPP、TnBP/TiBP 和 o-TCP/m-TCP/p-TCP 三对同分异构体，因此选取 Agilent Zorbax Eclipse plus C18、Poroshell EC-C18、Zorbax SB-Aq 三种色谱柱以及水/甲醇、水/乙腈两种流动相体系，考察不同分离体系的分离效率。最终选择 Zorbax SB-Aq 色谱柱和 0.1% 甲酸水溶液/甲醇体系进行分离，经梯度优化后，所得典型色谱图如图 1 所示，各组同分异构体基本实现了基线分离。对于海水和生物样品等复杂基质，当目标化合物流出色谱柱后，采用纯甲醇继续冲洗 5 min，使残留基质尽可能流出色谱柱。

图 1. OPEs 标准样品溶液 (10 $\mu\text{g/L}$) 的 MRM 提取色谱图

海水样品萃取净化条件的优化

本方法中涉及的各种 OPEs 化合物包括从强极性小分子 TMP 到非极性较强的化合物 TEHP，理化特性差异较大。考虑到海水中的基质干扰物质主要为盐类，并且海水中的痕量目标化合物的检测限要求苛刻，因此需要对 OPEs 进行富集。

传统的液液萃取方法主要依靠手动操作，耗时较长，因此本研究考虑使用反相固相萃取柱进行萃取和富集，且评估了不同聚合物反相固相萃取柱 Bond Elut PPL 和 Plexa (200 mg, 3 mL) 以及硅胶基体反相柱 Bond Elut C18 (500 mg, 6 mL) 的性能。将 10 mL 水加入一定量的代表性 OPEs 标准品中，参考安捷伦应用文献^[8] 采用甲醇:乙腈 (50:50, V/V) 进行洗脱，然后根据 OPEs 的回收率来选择合适的固相萃取小柱。从图 2 中可以看出，采用 Bond Elut PPL 使大多数化合物均获得了良好的回收率，但是仍然需要优化洗脱条件以改善几种 OPEs 的回收率。

考虑到回收率较低的化合物具有强的非极性，参考安捷伦应用文献^[8]尝试不同的上样溶剂和洗脱溶剂来优化 Bond Elut PPL 对 OPEs 的保留和洗脱。首先采用洗脱体积 5 mL，从丙酮-乙酸乙酯(1:1)、正己烷-二氯甲烷(1:1)、乙腈-甲醇(1:1)、乙腈、5% 氨化乙腈和乙酸乙酯中筛选出合适的洗脱溶剂，然后进一步优化洗脱体积。最终确定采用 6 mL 乙酸乙酯，能够使大多数 OPEs 化合物获得可接受的回收率结果，结果如图 3 所示。

采用超纯水作为上样溶剂评价基质。分别在 500 mL 水样中分别加入 25、50、75、100 mL 甲醇过 PPL 柱时，发现加入 50 mL 甲醇时使部分非极性 OPEs 的绝对回收率得到较大程度的改善。当甲醇含量过高时，多种化合物在 500 mL 的上样体积下会发生不同程度的穿漏，部分极性较强的 OPEs 的回收率极低，结果如图 4 所示。最终选择在 500 mL 水中加入 50 mL 甲醇混合后上样（甲醇含量约 10%）。

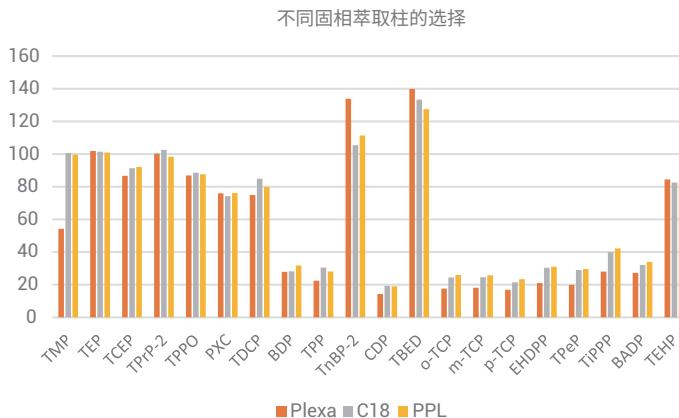
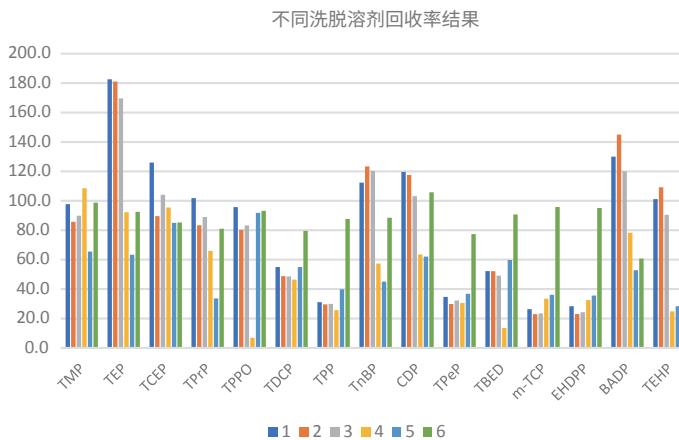


图 2. 优化选择不同的固相萃取柱



1. 5% 氨化乙腈；2. 乙腈；3. 乙腈-甲醇(1:1)；4. 正己烷-二氯甲烷(1:1)；
5. 丙酮-乙酸乙酯(1:1)；6. 乙酸乙酯

图 3. 不同洗脱溶剂洗脱效果

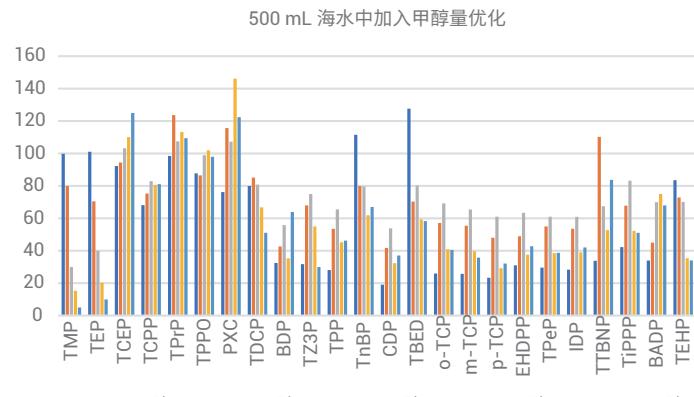


图 4. 海水基质固相萃取上样条件的优化

海底泥样品萃取净化条件的优化

对于海底泥样品，参考海水样品的固相萃取方案。取 5 g 底泥样品，分别优化了 20 mL 乙腈提取一次和 10 mL 乙腈重复两次提取的方案。结果发现，采用重复萃取两次的方案可以获得更出色的回收率结果。因此，该方法最终选择 20 mL 乙腈分两次 10 mL 乙腈进行萃取。由于海底泥的最终上柱体积为 10 mL，远小于海水上样体积，因此重新对上样条件进行优化。萃取后，用氮气吹扫至近干，分别加入 0.5、1、1.5、2 mL 乙腈，涡旋超声溶解后；然后向其中分别加入 9.5、9.0、8.5、8.0 mL 水，涡旋混合均匀后载入 PPL 柱；采用 6 mL 乙酸乙酯进行洗脱，结果见图 5。最终选择采用 20% 乙腈水溶液作为上样溶剂。

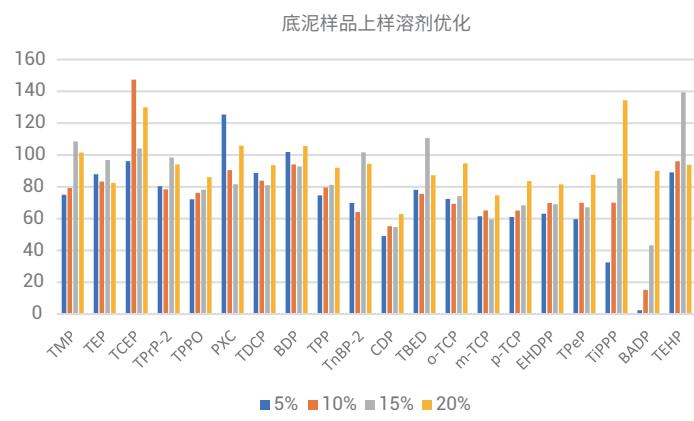


图 5. 海底泥样品固相萃取上样条件的优化

校准曲线与方法的检测限

采用同位素稀释法进行定量，在 0.1–100 ng/L 的浓度范围内选择 0.1、0.5、1、5、10、50、100 ng/L 七个浓度（其中内标浓度为 10 ng/L）考察各种 OPEs 的线性范围。结果详见表 2。大部分 OPEs 的线性良好，线性系数均达到 0.99；而 PXC、TDCP 和 BDP 由于仪器响应灵敏度问题，导致其定量下限高于 0.5 ng/L。以最低空白加标浓度（水样 5.0 ng/L，海底泥 0.50 g/kg）下的色谱图外推至信噪比为 3 时对应的浓度，得到海水中 OPEs 方法检测限低至 ng/L 水平，底泥中低至 ng/kg 水平（见表 2）。

表 2. OPEs 的线性关系及检测限

化合物	保留时间 (min)	线性范围 (ng/L)	R ²	检测限	
				水 (ng/L)	海底泥 (μg/kg)
TMP	2.43	0.5–100	0.9972	0.79	0.010
TEP	4.31	0.5–100	0.9999	0.11	0.006
TCEP	4.73	0.5–100	0.9983	0.14	0.004
TiPP	9.11	0.5–100	0.9997	0.06	0.020
TPrP	10.27	0.5–100	0.9994	0.07	0.005
TPPO	11.03	0.5–100	0.9993	0.04	0.010
PXC	12.28	5.0–100	0.9996	0.04	0.008
TDCP	13.51	1.0–100	0.9990	0.50	0.010
BDP	14.91	5.0–100	0.9997	0.03	0.001
TPP	15.23	0.1–100	0.9969	0.37	0.001
TiBP	16.36	0.1–100	0.9997	0.04	0.006
TnBP	16.72	0.5–100	0.9999	0.04	0.006
CDP	16.92	0.5–100	0.9998	0.38	0.011
TBEP	18.74	0.5–100	0.9990	0.06	0.003
o-TCP	20.30	0.5–100	0.9982	0.35	0.004
m-TCP	21.07	0.5–100	0.9971	0.37	0.004
p-TCP	21.60	0.5–100	0.9988	0.16	0.020
EHDPP	23.59	0.1–50	0.9979	0.02	0.001
TPEP	24.02	0.5–100	0.9991	0.08	0.003
TiPPP	26.82	0.5–100	0.9961	0.0003	0.0001
BADP	27.44	0.5–100	0.9983	0.003	0.0001
TEHP	28.83	0.1–10	0.9987	0.083	0.003

方法准确度和精密度

分别选择纯净水和石英砂作为基质来评价方法的准确度和精密度，并采用海水样品评价净化效果。考虑到该方法对海水中各种化合物的检测灵敏度，选择 20、50、100 ng/L 三个加标水平，在每个加标水平下重复测定三次。结果列于表 3 中。从中可以看出，各种 OPEs 化合物的回收率结果均在 52.1%–118.1% 之间，相对标准偏差均小于 12.0%。对于海底泥样品，选择的三个加标水平分别为 1、4、10 μg/kg，结果同样列于表 3 中。从中可以看出，各种 OPEs 化合物的回收率结果均在 52.1%–118.1% 之间，相对标准偏差均小于 12.0%。表明本文所述的方法具有良好的准确度和精密度。

表 3. 海水和底泥中三个加标水平方法验证数据

OPEs	海水						海底泥					
	20 ng/L	RSD (%)	50 ng/L	RSD (%)	100 ng/L	RSD (%)	1 µg/kg	RSD (%)	4 µg/kg	RSD (%)	10 µg/kg	RSD (%)
TMP	60.5	6.0	64.3	4.9	92.3	8.4	88.1	4.3	98.7	4.4	98.1	6.2
TEP	115.8	11.0	71.9	8.8	99.2	3.6	90.2	3.5	92.5	3.3	93.4	4.3
TCEP	85.0	9.8	102.6	12.0	90.0	8.0	65.3	7.9	85.3	4.9	86.1	6.5
TiPP	68.1	11.6	72.5	10.3	74.2	8.0	95.1	6.4	69.2	3.6	76.9	7.3
TPrP	100.5	0.8	96.0	4.8	102.2	0.3	93.3	10.1	104.8	0.7	102.4	8.5
TPPO	87.4	2.6	94.7	4.6	104.5	12.1	88.3	3.0	93.2	0.4	90.1	2.5
PXC	79.9	4.0	90.7	7.8	100.5	11.9	88.4	4.1	79.5	5.0	80.4	3.2
TDCP	60.0	12.0	97.2	6.9	95.0	8.8	86.5	1.2	87.6	8.3	85.7	3.3
BDP	78.1	6.1	103.3	9.8	87.4	7.3	87.6	3.5	96.4	1.1	90.4	4.8
TPP	74.8	0.9	79.2	6.2	86.0	12.0	85.7	3.0	89.6	5.4	88.5	6.8
TnBP	88.1	8.3	80.3	7.5	123.0	13.6	108.3	10.0	106.0	5.6	105.8	4.5
TiBP	82.7	19.3	72.5	10.3	78.8	19.8	89.2	3.7	95.4	1.8	101.4	3.1
CDP	73.0	0.7	64.3	3.9	81.0	5.8	75.7	3.5	80.5	2.8	77.4	3.6
TBED	79.9	1.9	88.1	4.0	100.7	0.3	84.8	3.5	100.7	3.9	90.7	2.8
o-TCP	65.2	8.4	71.4	7.1	72.6	6.0	90.2	4.2	100.9	4.5	92.5	3.5
m-TCP	61.1	7.6	82.9	5.5	67.9	3.2	88.2	9.5	97.5	5.2	95.8	5.6
p-TCP	62.6	7.9	61.5	3.2	68.8	4.6	82.0	3.8	98.9	4.0	96.4	3.8
EHDPP	51.8	8.3	79.9	4.6	60.4	3.0	76.2	6.4	99.6	5.3	95.1	5.1
TPeP	59.0	6.3	74.8	4.6	68.2	7.0	69.0	1.5	104.8	8.7	100.7	4.3
TiPPP	62.0	6.1	70.0	4.7	75.0	1.9	65.6	6.8	118.1	5.0	112.3	4.3
BADP	119.2	5.8	88.9	3.6	113.7	3.4	52.1	7.5	64.2	6.1	60.7	5.2
TEHP	112.1	4.0	95.3	4.2	109.6	2.0	104.0	3.5	89.9	5.6	92.5	4.3

实际样品分析

使用本方法对某海域的海水样品和底泥样品进行检测，结果见表 4。由表中的数据可以看出，某海域 OPEs 污染物主要为 TEP、TCEP、TPPO、TnBP 和 TiBP 等。

表 4. 某区域海水和底泥样品 OPEs 污染物含量测定（海水样品中的化合物浓度以 ng/L 为单位，底泥海水样品中的化合物浓度以 µg/kg 为单位）

目标化合物	海水样品 1	海水样品 2	海水样品 3	海底泥样品 1	海底泥样品 2	海底泥样品 3
TEP	2.2	103.8	707.4	ND	ND	ND
TCEP	64.4	99.4	281.4	2.9	7.0	1.4
TPPO	8.9	10.2	151.0	0.2	0.3	0.2
TPP	ND	2.8	5.2	ND	ND	ND
TDCP	ND	ND	8.8	0.2	0.1	0.3
TBED	1.2	4.4	60.4	0.1	0.03	0.3
BATP	1.5	ND	11.4	0.3	0.5	0.2
TEHP	0.7	ND	ND	1.2	ND	3.6
TnBP	ND	12.4	105.4	1.9	0.05	0.3
EHDPP	ND	5.2	2.4	ND	0.05	ND
TiBP	12.0	ND	ND	ND	0.05	ND

注：ND = 未检出

结论

本文采用液相色谱-串联四极杆质谱法结合同位素稀释法同时测定海水与海底泥中 22 种常见有机磷酸酯类阻燃剂。该方法可有效富集并去除基质干扰，灵敏度高，线性范围宽。针对海水样品，各种 OPEs 化合物的回收率结果均在 52.1%–118.1% 之间，相对标准偏差均小于 12.0%；在底泥中各种 OPEs 化合物的回收率结果均在 52.1%–118.1% 之间，相对标准偏差均小于 12.0%，方法整体回收率和精密度均满足准确定量要求，适用于分析海水和海底泥中的痕量 OPEs。

参考文献

1. 刘星, 万正瑞, 杜伟, 孙禾琳, 王卫平, 吴翠玲, 姚子伟. 液相色谱-串联四极杆质谱法测定海水和海底泥中的有机磷酸脂类阻燃剂[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2947-2951
2. 李素珍, 付卫强, 冯承莲. 有机磷酸酯阻燃剂的环境暴露、环境行为和毒性效应研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(9): 180-184
3. Xin Wang, Qingqing Zhu, Xuetong Yan, Yawei Wang, Chunyang Liao, Guibin Jiang. A review of organophosphate flame retardants and plasticizers in the environment: Analysis, occurrence and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 139071
4. 单岳, 王诗雨, 谷雷严, 陈苏, 罗庆. 有机磷酸酯暴露水平与毒性效应的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(6): 15-18
5. 顾杰, 顾爱华, 石利利, 吉贵祥. 有机磷酸酯环境分布及神经毒性研究进展. 环境与健康杂志, 2018, 35(3): 277-281
6. 郭佳佳, 姚帮本, 祝红蕾. 有机磷酸酯类阻燃剂检测方法研究进展. 安徽化工, 2018, 44(6): 3-5
7. Julia Regnery, Elisabeth Korte. Determination of Organophosphates in Lake Water (湖水中有机磷酸酯的测定). 安捷伦科技公司应用简报, 出版号 Si-02094, 2014
8. Ruijie Zhang, Kefu Yu, An Li b, Weibin Zeng, Tian Lin, Yinghui Wang. Occurrence, phase distribution, and bioaccumulation of organophosphate esters (OPEs) in mariculture farms of the Beibu Gulf, China: A health risk assessment through seafood consumption. Environmental Pollution, 2020, 263: 114426

查找当地的安捷伦客户中心：

www.agilent.com/chem/contactus-cn

免费专线：

800-820-3278, 400-820-3278 (手机用户)

联系我们：

LSCA-China_800@agilent.com

在线询价：

www.agilent.com/chem/erfq-cn



微信搜一搜

Q 安捷伦视界 |

www.agilent.com

安捷伦对本资料可能存在的错误或由于提供、展示或使用本资料
所造成的间接损失不承担任何责任。

本文中的信息、说明和技术指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司, 2020
2020年12月25日, 中国出版
5994-2978ZHCN

