

# 一种水体及土壤/沉积物中直链烷基苯的前处理方法及GC-MS方法

张席席<sup>1</sup>, 王继忠<sup>1,2</sup>, 张迪<sup>1</sup>, 黄贵凤<sup>1</sup>, 邹敬<sup>1</sup>, 张锡涛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>广电计量检测(合肥)有限公司, 安徽 合肥

<sup>2</sup>安徽建筑大学, 环境与能源工程学院, 安徽 合肥

<sup>3</sup>合肥工业大学, 资源与环境工程学院, 安徽 合肥

Email: zhangxx5@grgtest.com

收稿日期: 2021年3月21日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

## 摘要

建立了水体中及土壤/沉积物中直链烷基苯(LABs)的前处理和定量方法分析方法。水体样品经GF/F纤维膜过滤后, 量取1.0 L的水样在分液漏斗中通过二氯甲烷(100 mL)液液萃取三次, 合并萃取液。土壤/沉积物样品经自然风干后, 称取10.0 g样品放在玻璃纤维滤膜上, 包裹起来, 放入自动索氏提取器的套筒内, 在不锈钢量杯中加入80 mL二氯甲烷溶剂, 沸腾60 min, 淋洗60 min, 溶剂回收10 min, 完成提取, 收集萃取液。上述得到的水样萃取液和土壤/沉积物样品提取液均通过无水硫酸钠除去提取液中的水分, 然后在旋转蒸发仪中浓缩至1 mL后, 加入过量正己烷(10 mL), 交换溶剂, 并再次浓缩至1.0 mL, 浓缩液通过内径为1.0 cm填充3.0 g硅胶(100~200目)及0.5 g无水硫酸钠的层析柱, 并加入25 mL正己烷淋洗, 收集淋洗液后, 浓缩并定容至1.0 mL, 通过气相色谱-质谱(GC-MS)选择离子外标法定量。

## 关键词

直链烷基苯, 分子标志物, 前处理, 气相色谱-质谱

# A Pretreatment Method and GC-MS Method for Linear Alkylbenzene in Water and Soil/Sediment

Xixi Zhang<sup>1</sup>, Jizhong Wang<sup>1,2</sup>, Di Zhang<sup>1</sup>, Guifeng Huang<sup>1</sup>, Jing Zou<sup>1</sup>, Xitao Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hefei GRG Metrology & Test Co., Ltd., Hefei Anhui

<sup>2</sup>College of Environmental and Energy Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei Anhui

<sup>3</sup>College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

Email: zhangxx5@grgtest.com

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 张席席, 王继忠, 张迪, 黄贵凤, 邹敬, 张锡涛. 一种水体及土壤/沉积物中直链烷基苯的前处理方法及GC-MS方法[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 391-401. DOI: 10.12677/aep.2021.112043

## Abstract

A method of pretreatment and quantitative analysis of linear alkylbenzenes (LABs) in water and soil sediments was developed. Water samples were filtered by GF/F fiber membrane, the 1.0 L filtered water sample was extracted three times by dichloromethane (100 mL) in a separatory funnel, and then the extraction fluid was combined. After the soil sediment sample is naturally air dried, place 10.0 g sample on the fiberglass membrane, wrap it and place it in the sleeve of the Soxhlet extractor. Add 80 mL dichloromethane to a stainless steel measuring cup. After it boils for 60 minutes, wash it for 60 minutes. Then after we recycle the solvent for 10 minutes, the extraction is completed. The extract can be collected. Both the obtained water sample extract and the soil sediment sample extract are removed water by anhydrous sodium sulfate. The solution was then concentrated to 1 mL in Rotary evaporator, then an excess of 10 mL of n-hexane was added, the solvent was exchanged, and the concentration was again reduced to 1.0 mL, the concentrated solution was filled with 3.0 g Silica Gel (100~200 Mesh) and 0.5 g anhydrous sodium sulfate through a column with an internal diameter of 1.0 cm, and 25 mL n-hexane was added to the column. After collecting the eluent, it was concentrated and fixed to 1.0 mL; ion external standard method was selected and quantified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS).

## Keywords

Linear Alkylbenzenes, Molecular Marker, Pretreatment, Gas Chromatography-Mass Spectrometry

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



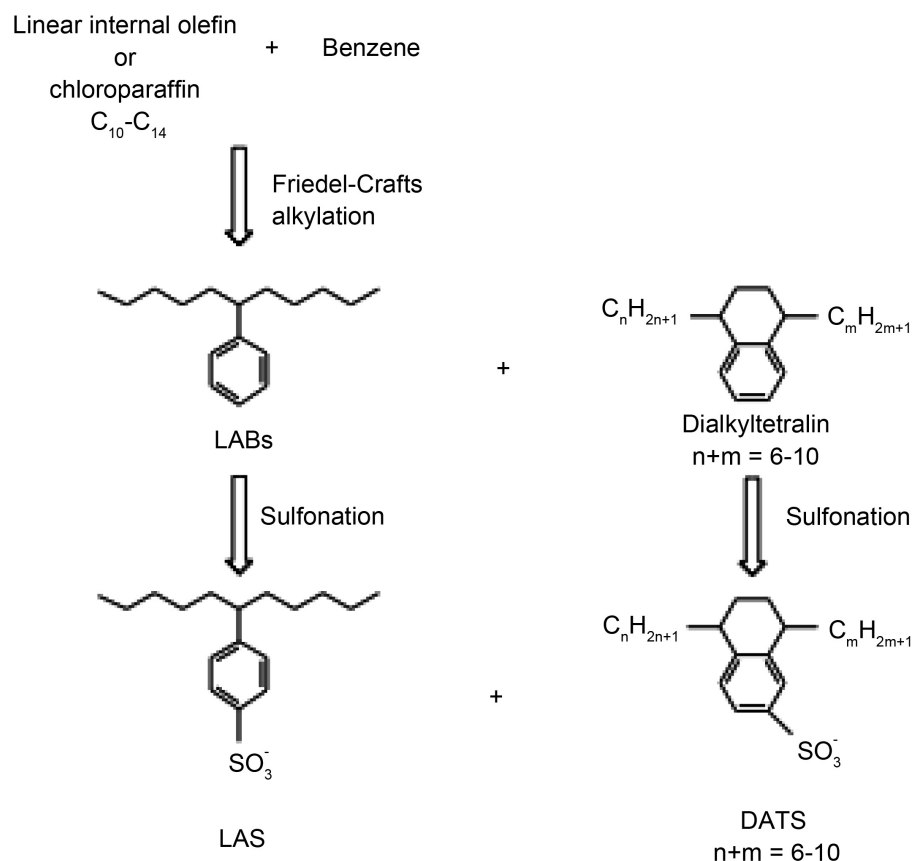
Open Access

## 1. 引言

分子标志物(molecular markers)又称为“分子过程探针”(molecular process probes),系指所有能提供有机物成因及其所经历的生物、化学、物理和地质过程的有机分子,可以构成当代和古代环境中有机物质的示踪指标体系,不仅适用于现代海洋、湖泊水域的环境沉积学演化、古今气候的变迁规律、区域性环境地球化学景观与人类健康的关系等理论问题的研究,而且为环境有机地球化学研究提供了重要的追踪手段,在资源环境的合理开发和利用、环境质量的有效控制以及人类生存、健康等诸方面展示出广阔的应用前景。目前,分子标志物的概念已经得到新的发展,已经成为有机地球化学家们用于了解有机污染物的来源、迁移以及归宿的一种指标体系。

直链烷基苯(Linear alkylbenzenes, LABs)是工业上合成阴离子洗涤剂链状烷基苯磺酸盐(linear alkylbenzene sulfonates, 简称 LAS)的原料(图 1),但在合成过程中会有部分未被磺化的链状烷基苯混入产品 LAS 中[1] [2]。LAS 型洗涤剂的使用及随后的处理将 LABs 带入水生环境中。

LABs 可以看作是含有 10~14 个碳的正烷烃碳链上一个氢原子被苯基取代的烷烃衍生物,苯基取代位置的不同构成系列同系物,统称直链烷基苯,主要用于工业合成长链烷基苯磺酸盐(LAS)——自 1960 年以后广泛使用的阴离子洗涤剂的主要成分[1] [2]。由于在合成过程中 LAS 型洗涤剂会有少量的 LABs 残留,因此,LABs 会随着该型洗涤剂的使用及随后的处置而进入水环境。鉴此,LABs 可以用作指示来源于民用污水的污染物质的环境分子标志物,也常被作为指示工具来研究市政管道排出水体中颗粒物或其



**Figure 1.** The reaction process of synthesizing linear alkylbenzene sodium sulfonate from linear alkylbenzene

**图 1.** 直链烷基苯合成直链烷基苯磺酸钠的反应过程

它憎水性有机污染物的来源及其随后的传输过程。自从 1983 年首次在环境中发现 LABs 的存在，并提出其作为分子标志物使用的可能性以来，LABs 就在全世界许多地区被广泛地作为环境分子标志物，用以研究人类活动与环境污染之间的相关性[3]。

目前水体中 LABs 的分析方法尚未有标准，仅有的方法仅限于科学研究，其主要采用 XAD 树脂吸附 - 多层层析柱净化 - 气相色谱质谱分析法[4]，该方法中 XAD 树脂价格昂贵，且易于穿透，目标物质流失，在实验过程中难以把握。同时所采用硅胶 - 氧化铝多层层析柱进行净化，填充材料复杂而且消耗溶剂量大。文献报道的用顶空单液滴微萃取 - 气相色谱法测定水中卤代烃和烷基苯的含量[5]，适合于低分子量的烷基苯类化合物，不适合于本文所测定的癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯、十三烷基苯。

同时，由于 LABs 疏水性强，易于吸附在土壤和底部沉积物中，因此在环境中，土壤环境中为其主要富集介质。尤其受到污水灌溉或者居民较为聚集的区域土壤/沉积物中含有较高浓度 LABs。目前土壤或沉积物中 LABs 的分析方法尚未有标准，仅有的方法仅限于科学研究，主要采用快速溶剂萃取仪提取 - 多层层析柱净化 - 气相色谱质谱分析法[6]。该方法所用加速溶剂萃取仪价格昂贵，仪器操作复杂，管道容易堵塞，由于在高温高压下进行萃取，易造成目标污染物降解，也不适合含有机碳或者脂肪高的样品，同时所采用硅胶 - 氧化铝多层层析柱方法进行净化，填充材料复杂而且消耗溶剂量大，且回收效率不高。张婷等[7]使用传统索氏提取方法对岩石样品进行了提取，提取时间为 72 h，耗时较长，不适用于大批量样品分析。

本研究通过对水体和土壤/沉积物样品中直链烷基苯的前处理方法进行优化, 建立一种简单快捷且低消耗的适合于水体及土壤沉积物中 LABs 前处理方法和仪器定量方法。

## 2. 实验方法

### 2.1. 仪器与材料

分析仪器: 7890B-5977B 气相色谱质谱联用仪(美国 Agilent 公司)。

土壤/沉积物样品提取仪器: ST255 全自动索氏脂肪抽提仪(福斯 FOSS)。

色谱柱: HP-5MS, 30 m × 0.25 μm × 0.25 mm。

标准溶液: 癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯、十三烷基苯(纯度分别 99.8%、99.2%、99.3%、99.5%, 质量均为 100 mg), 市售有证标准物质, AccuStandard。

正己烷, HPLC, CNW。

二氯甲烷, HPLC, CNW。

无水硫酸钠, 优级纯, 国药, 400℃烘 4 h 以上。

玻璃纤维膜, 孔径 0.7 μm, 400℃烘 4 h 以上。

玻璃纤维滤膜, 直径 110 mm, 孔径 0.45 μm, 400℃烘 4 h 以上。

100~200 目柱层析用硅胶, 沪试。

100~200 目柱层析用中性氧化铝, 沪试。

硅胶和中性氧化铝使用前需在甲醇中超声清洗 3 次后, 再用二氯甲烷超声清洗 3 次, 自然晾干后在烘箱里以 180℃烘烤 24 小时, 冷却后密封保存。

水体样品来自巢湖流域。

### 2.2. 溶液配制

用正己烷将 4 种直链烷基苯标准溶液混合配制成 10,000 mg/L 混合标准储备液, 稀释标准储备液, 配制标准曲线系列浓度, 各点浓度分别为 5、50、100、500、1000、5000 μg/L。供 GC-MS 分析使用。

### 2.3. 样品前处理步骤

#### 2.3.1. 样品萃取与提取

##### 1) 水样的萃取

用孔径为 0.7 μm 滤膜过滤水样, 通过真空抽滤或者溶剂过滤器过滤, 取过滤后的水样进行液液萃取。量取 1.0 L 的过滤水样加入到分液漏斗中, 用 100 mL 二氯甲烷萃取, 振摇 5 min, 静置 3 min 后, 收集下层萃取液, 重复萃取步骤 3 次, 合并萃取液。

##### 2) 土壤/沉积物样品的提取

将土壤/沉积物样品置于搪瓷或玻璃托盘中, 除去枝棒、叶片、石子等异物。自然风干后称取 10.0 g 风干样品, 将称好的样品用直径 110 mm, 孔径 0.45 μm 玻璃纤维滤膜包裹起来, 放入自动索氏提取器的套筒内, 在不锈钢量杯中加入 80 mL 二氯甲烷溶剂, 沸腾 60 min, 淋洗 60 min, 溶剂回收 10 min, 完成提取, 收集提取液。

#### 2.3.2. 萃取液的浓缩与溶剂交换

将收集到的萃取液与提取液使用旋转蒸发仪进行浓缩, 设定加热温度低于 35℃, 真空度保持 >260 Pa。当浓缩至 2 mL 左右时, 加入 10 mL 正己烷进行溶剂替换, 继续浓缩至约 1.0 mL。

### 2.3.3. 净化

将浓缩液转移至净化柱。净化柱由 3 g 硅胶及 0.5 g 无水硫酸钠填充, 转移前, 用 20 mL 正己烷润洗净化柱。然后将浓缩液转移至净化柱, 并用 2 mL 正己烷润洗 3 次, 后加入 25 mL 正己烷淋洗净化柱, 收集淋洗液。

### 2.3.4. 浓缩与定容

净化后的试液再次按照氮吹浓缩或旋蒸浓缩的步骤进行浓缩, 用正己烷浓缩定容至 1.0 mL, 转移至进样瓶中, 上机待测。

## 2.4. 仪器分析与定量

色谱条件:

进样口温度: 290°C, 不分流。

进样量: 1.0  $\mu$ L, 柱流量: 1.2 mL/min。

柱温: 80°C 保持 0 min; 以 10°C/min 速率升至 160°C, 保持 0 min; 以 3°C/min 速率升至 210°C, 保持 0 min; 再以 10°C/min 速率升至 290°C, 保持 0 min。

质谱条件:

离子源温度: 230°C;

接口温度: 280°C;

四级杆温度: 150°C;

扫描模式: 选择离子模式(SIM)模式;

定量方式: 外标法。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 净化实验条件的影响

#### 3.1.1. 净化柱填充方式的影响

净化柱填充方式 1: 水样过滤后, 取 1 L 液液萃取, 浓缩后通过层析柱净化, 其净化柱填充方式为 3.0 g 硅胶及 0.5 g 无水硫酸钠填充, 用 25 mL 正己烷淋洗层析柱, 收集浓缩定容, 仪器分析。

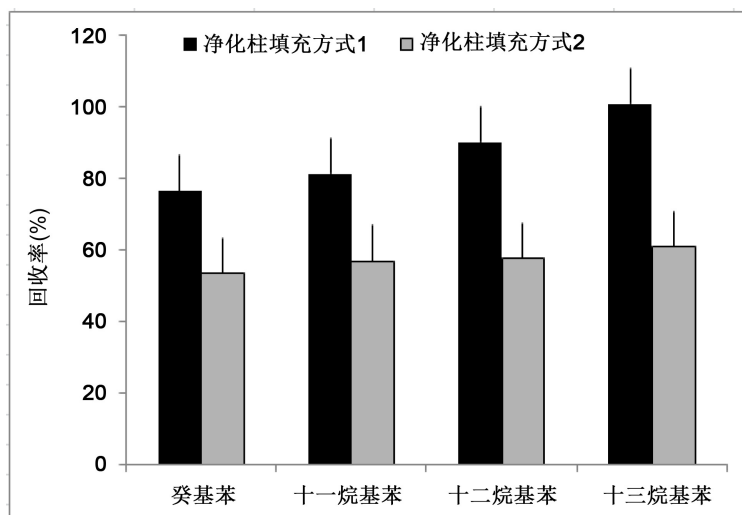
净化柱填充方式 2: 水样过滤后, 取 1 L 液液萃取, 浓缩后通过层析柱净化, 净化柱填充方式为由 1.5 g 氧化铝、6 g 硅胶及 0.5 g 无水硫酸钠填充, 用 15 mL 正己烷层析柱淋洗并弃去, 再用 15 mL 正己烷淋洗收集, 浓缩定容, 仪器分析。

分别做实际样品加标实验, 结果显示: 净化柱填充方式 1 所获得的癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯回收率分别为(76.5%  $\pm$  4.2%), (81.4%  $\pm$  3.5%), (90.2%  $\pm$  2.9%), (101.0%  $\pm$  4.4%), 而采用净化柱填充方式 2 所获得的 4 种 LABs 的回收率分别为(53.2%  $\pm$  8.0%), (56.8%  $\pm$  7.5%), (57.4%  $\pm$  7.9%) 和(60.9%  $\pm$  11.7%) (图 2), 净化柱填充方式 1 所获得的回收率显著高于净化柱填充方式 2 ( $p < 0.05$ )。由此可见, 较净化柱填充方式 2, 净化柱填充方式 1 不仅处理步骤简单, 容易操作, 节约溶剂和耗材, 同时也具有较好的回收效率。

因而最终实验选择净化柱填充方式为 3.0 g 硅胶及 0.5 g 无水硫酸钠填充。

#### 3.1.2. 淋洗溶剂体积的影响

为了优化净化过程的实验条件, 在保证最好的回收效率的前提下, 能节约淋洗溶剂, 共设置了 4 组不同体积淋洗方案:



**Figure 2.** Comparison of the effect of purification column packing method 1 and purification column packing method 2

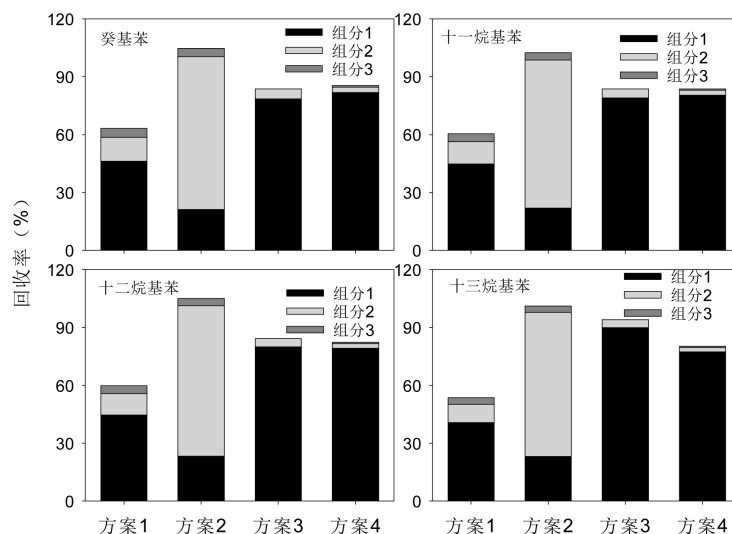
**图 2.** 净化柱填充方式 1 与净化柱填充方式 2 效果比较

方案 1: 1 mL 正己烷中含 1000 ppb 的标准溶液转移至 3.0 g 硅胶层析柱中, 淋洗条件如下: 先加入 5 mL 正己烷淋洗层析柱, 并弃去; 后加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集液组分 1; 再加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集组分 2; 再加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集组分 3。浓缩上机测定。

方案 2: 1 mL 正己烷中含 1000 ppb 的标准溶液转移至 3.0 g 硅胶层析柱中, 加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集组分 1; 后加入 15 mL 正己烷淋洗, 收集组分 2; 再加入 5 mL 正己烷, 收集组分 3。浓缩上机测定。

方案 3: 1 mL 正己烷中含 1000 ppb 的标准溶液转移至 3.0 g 硅胶层析柱中, 加入 25 mL 正己烷淋洗, 收集组分 1; 后加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集组分 2。浓缩上机测定。

方案 4: 1 mL 正己烷中含 1000 ppb 的标准溶液转移至 3.0 g 硅胶层析柱中, 加入 30 mL 正己烷淋洗, 收集组分 1; 后加入 5 mL 正己烷淋洗, 收集组分 2, 再加入 5 mL 正己烷, 收集组分 3, 浓缩上机测定。



**Figure 3.** The recovery rate of different linear alkylbenzenes under elution conditions in silica gel chromatography column

**图 3.** 不同直链烷基苯在硅胶层析柱中淋洗条件下回收率



通过图 3 可以看出, 方案 1 中先淋洗 5 mL 层析柱, 并弃去, 会导致回收率降低, 四种 LABs 的回收率均接近于 60%, 可见前面 5 mL 淋洗液中含有一定量的 LABs。方案 2 中, 将前 5 mL 淋洗液保留, 第二组分采用 15 mL 的正己烷作为淋洗液, 两组分的回收率共计可以达到 90% 以上, 再增加 5 mL 正己烷淋洗, 获得第三组分, 其含有的 LABs 仅占总回收率的 3% 左右。尽管继续增加萃取溶剂(方案 3 和 4), 其回收效率基本保持在 80%~90% 之间, 同时, 增加淋洗液体积, 回收率呈现下降的趋势, 可能因为淋洗液体积增加, 浓缩时间加长, 导致污染物挥发损失。

因此最终淋洗溶剂体积选为 25 mL 正己烷。

## 3.2. 空白及空白准确度分析

### 3.2.1. 水样空白及加标

取一级纯净水分别做水体样品空白实验及空白加标实验, 空白加标量为 1000 ppb。通过 1 实验方法步骤进行过滤、液液萃取、浓缩、净化、浓缩定容和仪器分析。4 次空白实验和 3 次空白加标实验结果如下:

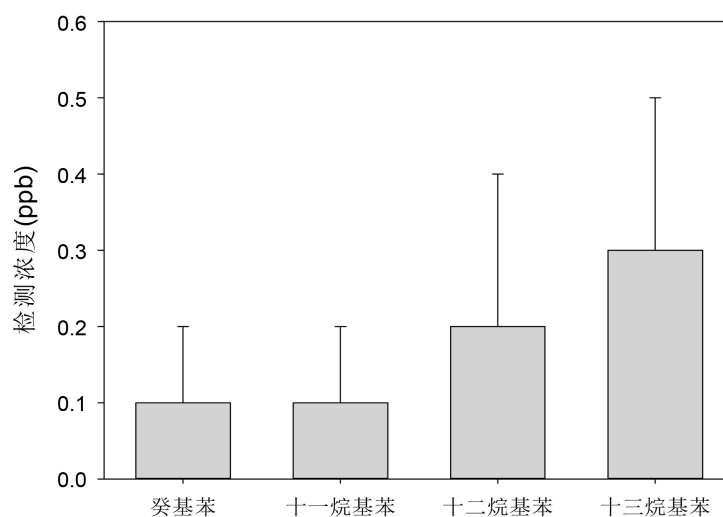


Figure 4. The detection results of LABs of 4 blank samples

图 4. 4 次空白样品的 LABs 的检出结果

4 次空白样品中均检出 LABs, 其中癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯的检出浓度分别为  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.2 \pm 0.2$  和  $0.3 \pm 0.2$  ppb (图 4), 反映了本实验过程的实验空白较低, 引入的目标污染物较少, 为后期实际样品的分析提供能力。

空白加标实验结果显示, 3 次重复样品中癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯的回收率分别为  $(89.0\% \pm 14.2\%)$ ,  $(94.0\% \pm 14.7\%)$ ,  $(90.7\% \pm 14.5\%)$  和  $(96.3\% \pm 15.2\%)$  (图 5)。由此可见, 本方法对目标污染物的回收效率较好, 能很好地处理水体样品中 LABs 的处理净化和分析。

### 3.2.2. 土壤/沉积物空白及加标

取石英砂分别做土壤/沉积物空白实验及空白加标实验, 空白加标量为 1000 ppb。通过 1 实验方法步骤进行提取、浓缩、净化、浓缩定容和仪器分析。3 次空白实验和 13 次空白加标实验结果如下:

3 次空白样品中均检出 LABs, 其中癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯的检出浓度分别为  $4.8 \pm 1.2$ ,  $3.3 \pm 0.4$ ,  $2.0 \pm 0.2$  和  $3.5 \pm 0.4$  ppb (图 6), 反映了本实验过程的实验空白较低, 引入的目标

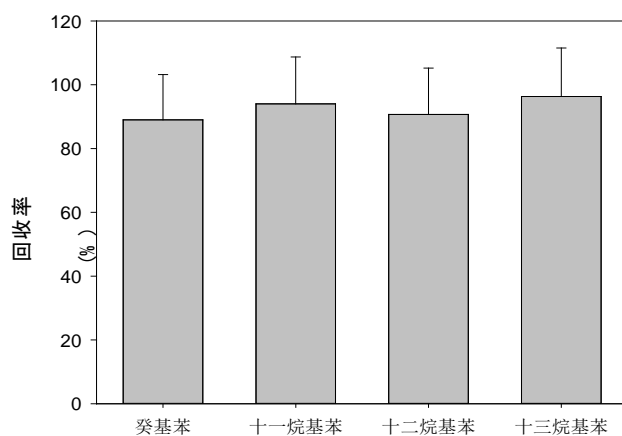


Figure 5. The recovery rate of blank spiked LABs

图 5. 空白加标样品 LABs 的回收率

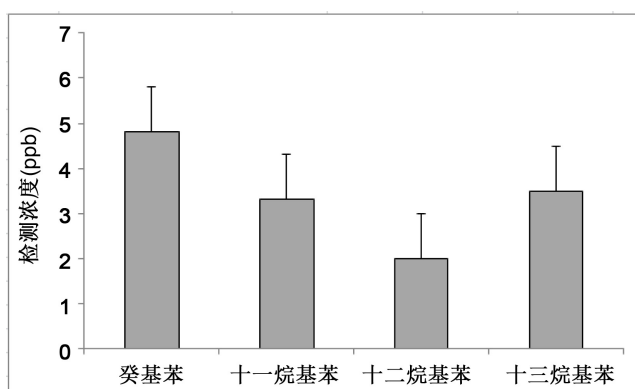


Figure 6. LABs detection results of 3 blank samples

图 6. 3 次空白样品的 LABs 的检出结果

污染物较少，为后期实际样品的分析提供能力。

空白加标实验结果显示，13 次重复样品中癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯的回收率分别为(79.1% ± 13.3%)，(83.5% ± 13.4%)，(89.0% ± 17.2%)和(108.7% ± 32.2%) (图 7)。由此可见，本方法对目标污染物的回收效率较好，能很好地处理土壤样品中 LABs 的处理净化和分析。

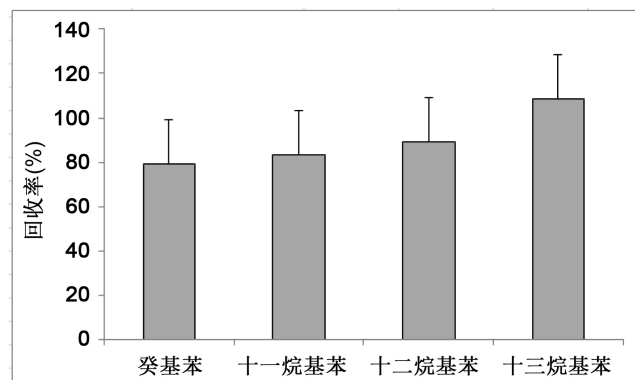


Figure 7. The recovery rate of blank spiked LABs

图 7. 空白加标样品 LABs 的回收率



### 3.3. 样品及样品准确度分析

量取实际水样样品做加标实验, 加标量为 1000 ppb, 结果显示: 实际样品所获得的癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯回收率分别为(76.5% ± 4.2%), (81.4% ± 3.5%), (90.2% ± 2.9%), (101.0% ± 4.4%) (图 8)。

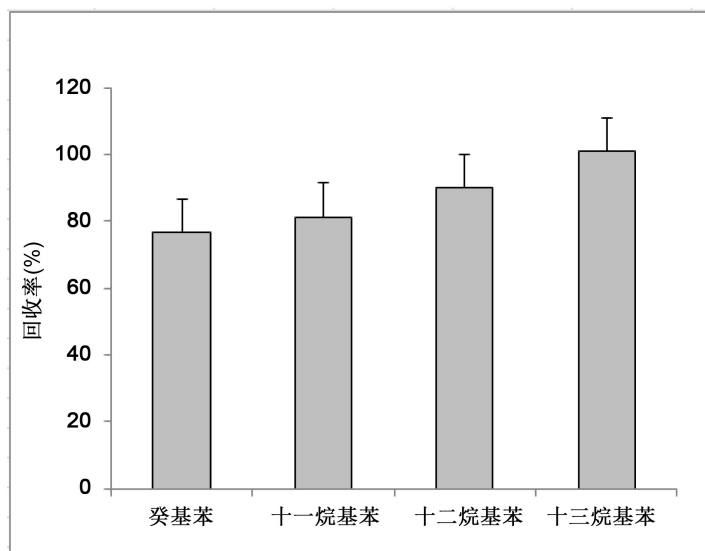


Figure 8. The recovery rate of LABs of water sample spiked sample  
图 8. 水样加标样品 LABs 的回收率

称取实际土壤样品进行加标实验, 加标量为 1000 ppb。通过 1 实验方法步骤进行提取、浓缩、净化、浓缩定容和仪器分析, 结果如下。土样加标实验结果显示, 6 次重复样品中癸基苯、十一烷基苯、十二烷基苯和十三烷基苯的回收率分别为(85.7% ± 11.2%), (89.4% ± 17.9%), (91.7% ± 23.1%)和(99.5% ± 38.1%) (图 9)。

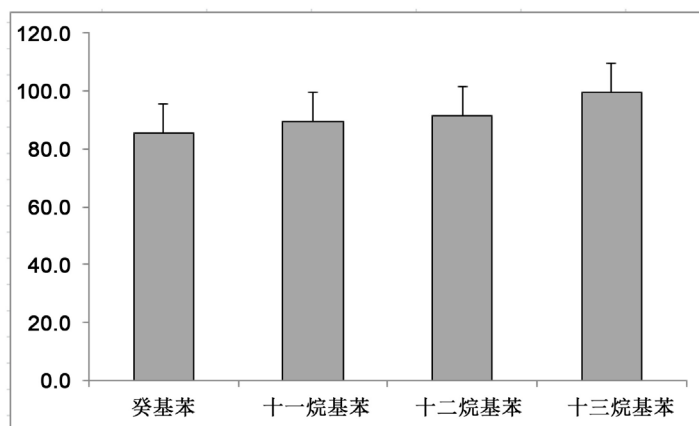
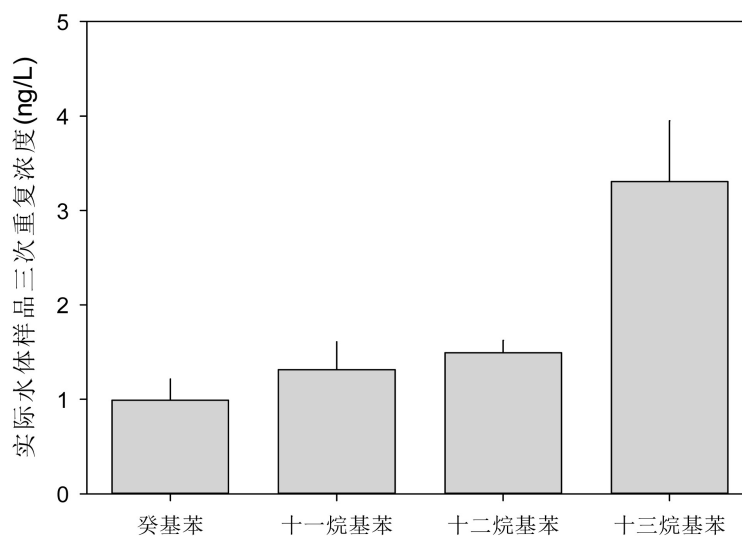


Figure 9. Recovery rate of LABs in soil spiked samples  
图 9. 土壤加标样品 LABs 的回收率

由此可见, 本方法对目标污染物的回收效率较好, 能很好地处理水体样品和土壤沉积物中 LABs 的处理净化和分析。

### 3.4. 样品重复性分析

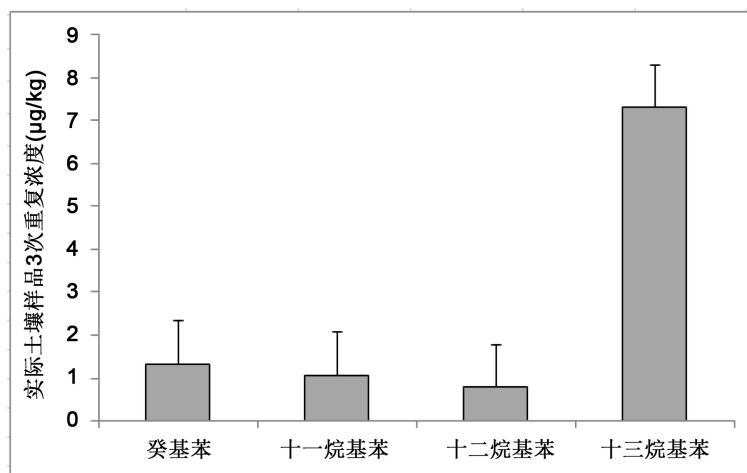
取实际水样，按照 1 实验方法进行前处理，进行 3 次重复实验，结果如下。测得的实际河水水体中四种 LABs 的浓度分别为  $0.99 \pm 0.22$  ng/L,  $1.31 \pm 0.30$  ng/L,  $1.49 \pm 0.13$  ng/L 和  $3.31 \pm 0.64$  ng/L, 相对标准偏差分别为 22.5%, 22.6%, 8.8% 和 19.5% (图 10)。



**Figure 10.** The concentration and relative standard deviation of LABs in 3 replicate samples of actual river water

**图 10.** 实际河水 3 个重复样品中 LABs 的浓度与相对标准偏差

取实际土壤样品，按照 1 实验方法步骤进行前处理，进行 3 次重复实验，结果如下。测得的实际土壤中四种 LABs 的浓度分别为  $1.33 \pm 0.47$   $\mu$ g/kg,  $1.06 \pm 0.14$   $\mu$ g/kg,  $0.79 \pm 0.24$   $\mu$ g/kg 和  $7.30 \pm 2.69$   $\mu$ g/kg, 相对标准偏差分别为 17.7%, 6.5%, 15.4% 和 18.5% (图 11)。



**Figure 11.** The concentration and relative standard deviation of LABs in 3 replicate samples of actual river water

**图 11.** 实际河水 3 个重复样品中 LABs 的浓度与相对标准偏差

由此可见，本方法用于实际样品的分析中，具有较好的重复性。

## 4. 结论

通过优化水体及土壤/沉积物中 LABs 的前处理和仪器定量方法, 建立了一种以液液萃取 - 硅胶净化 - 气相色谱质谱法定量的方法, 可以用于水体中 LABs 的定量分析, 以全自动索氏脂肪抽提仪提取 - 硅胶净化 - 气相色谱质谱法定量的方法可以用于土壤沉积物中 LABs 的定量分析, 相对于先前报道的分析方法而言, 不仅简单易于操作, 而且节约溶剂, 且回收效率高, 适合于实际分析检测中批量水体及土壤/沉积物样品分析。

## 参考文献

- [1] 徐特, 曾辉, 倪宏刚. 直链烷基苯指示城市化过程初步研究[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 262-269.
- [2] 张金昌, 李成岳, 朱佐刚, 陈标华, 李英霞. 合成直链烷基苯环境友好固体酸催化剂的研究 II. 固体酸催化剂合成直链烷基苯工艺条件实验研究[J]. 石油化工, 2002, 13(12): 970-972.
- [3] Bayona, J.M., Chalaux, N., Dachs, J., Maldonado, C., Venkatesan, M.I. and Albaiges, J. (1996) Use of Trialkylamines as a Marker of Sewage Addition into the Marine Environment. In: Eganhouse, R.P., Ed., *Molecular Markers in Environmental Geochemistry ACS Symposium Series*, American Chemical Society, 261-275. <https://doi.org/10.1021/bk-1997-0671.ch017>
- [4] 倪宏刚. 直链烷基苯和苯并噻唑作为分子标志物在海岸环境中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2008.
- [5] 项素云, 相秉仁. 顶空单液滴微萃取-气相色谱法测定水中卤代烃和烷基苯的含量[J]. 中国药科大学学报, 2007, 38(4): 336-339.
- [6] 杨华. 黄河三角洲潮间带直链烷基苯分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [7] 张婷, 王作栋, 钱宇, 王永莉, 王晓锋, 李晓斌. 长直链烷基苯及其异构体母质来源研究及地球化学意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(4): 843-852.