土壤中石油烃类物质检测方法综述

龙 姿[1,2] 许德刚[1,2] 李斌莲[1,2] 李巨峰[1,2] 冉照宽[1,2]

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司;2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室)

摘 要 石油烃类物质具有高毒性、难降解等特征,土壤中石油烃类物质的高效、准确分析对土壤污染风险评估和修复工作具有重要意义。文章从原理、优缺点和实际应用情况等方面,对土壤中石油烃类物质的前处理和检测方法进行比对分析,总结发现加速溶剂萃取法/加压流体萃取法是效率高、回收率高的前处理方法;气相色谱分析法较为稳定,准确性和重复性较好,在目前实验室检测石油烃类物质中应用最为广泛。随着信息技术发展和对污染现场快速检测的需要,遥感技术和便携式检测设备逐渐广泛应用。

关键词 土壤;石油烃类物质;前处理方法;实验室测定方法;现场检测

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2022.05.001 **文章编号:** 1005-3158(2022)05-0001-06

Review on Detection Methods of Petroleum Hydrocarbons in Soil

Long Zi[1,2] Xu Degang[1,2] Li Binlian[1,2] Li Jufeng[1,2] Ran Zhaokuan[1,2]

(1. *CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology*;
2. *State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control*)

ABSTRACT Petroleum hydrocarbons (PHCs) are highly toxic and difficult to degrade. Hence, the establishment of fast and efficient analysis and detection methods to achieve rapid and accurate analysis of petroleum hydrocarbons in soil is of great significance to soil pollution risk assessment and soil remediation. Based on the current research situations, this article comprehensively analyzes pre-treatment methods and detection and analysis methods of petroleum hydrocarbons in the soil from the principles and actual application conditions. It is found that the accelerated solvent extraction method and the pressurized fluid extraction method are more efficient and low-cost with a better recovery rate; gas chromatography is a relatively stable, accurate and reproducible analysis method, and it is also the most widely used method for detecting petroleum hydrocarbons. With the need for rapid detection of contaminated sites, portable equipment for the detection of petroleum hydrocarbons in soil has gradually appeared.

KEYWORDS soil; petroleum hydrocarbons (PHCs); pre-treatment methods; detection methods in laboratory; field detection

0 引 言

随着我国经济和工业化水平不断发展,石油及其产品在工业生产和日常生活中的应用更加广泛,但石油在开采、输送、炼制、储存及使用过程中的渗泄漏对环境造成的污染已不容忽视。石油成分复杂,主要由烷烃、烯烃、芳烃和非烃类物质混合组成,石油烃类物质(PHCs)是石油的主要成分,约占石油总成分的 95%~99%[1],具有高毒性、难降解等特征。2017 年,国家全面启动重点行业企业用地土壤污染状况调查工作,PHCs 作为石油石化行业的特征污染指标,被列入 GB 36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》。建立快捷、高效的检测方法,实现 PHCs 的快速、精确定量对土壤污染调查和修复工作具有重要意义。

样品前处理和含量测定方法是 PHCs 检测的关键环节,本文从原理、优势、局限性和应用情况等方面梳理了国内外现有土壤中 PHCs 的前处理和含量测定方法,展望了今后的发展趋势,为研究和实际应用中方法技术的选择提供参考。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司直属院所基础科学研究和战略储备技术研究基金资助项目(2020D-5008)。

通讯作者:龙姿,2019 年毕业于北京师范大学分析化学专业,博士,现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事土壤和地下水环境监测技术研究工作。通信地址:北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼,102206。E-mail:zilong1226@cnpc.com.cn。

1 土壤中 PHCs 的前处理方法

1.1 索氏抽提法

索氏抽提法是利用溶剂在索氏提取器中产生回流和虹吸作用，将固体介质中的 PHCs 萃取至有机相中，抽提效率受溶剂种类、料液比、抽提温度和时间影响。杨慧娟团队使用索氏抽提法对土壤 PHCs 中 C_8～C_{34} 进行提取，溶剂为 70 mL 二氯甲烷，处理 16 h 后对各组分进行分析，检测结果准确反映了土壤的污染程度[2]。宋盼盼团队采用索氏抽提法对土壤中多环芳烃进行提取，平均回收率为 65.18%～87.68%[3]。该方法在油类检测分析方法中应用较早，具有设备简单、操作简便等优点，但提取速度较慢，提取时间较长才能达到较好的提取效果，通常需要 6～72 h。

1.2 超声辅助法

超声辅助法是依靠超声波作用产生强烈的空化效应，使固体样品快速离散，变成体积更小的固体，极大地增大了溶剂与样品间的接触面积，提高了提取效率。Tor 团队研究了溶剂种类、溶剂量、超声时间和提取次数对超声萃取效率的影响，使用 25 mL 石油醚-丙酮(1∶1，体积比)超声处理 25 min，循环 2 次，能得到最佳萃取效果[4]。Zhou 团队使用石油醚为萃取剂实现了土壤中 PHCs 的高效萃取[5]。曹放等使用探头式超声仪，实现了土壤中石油烃(C_8～C_{40})的提取。结果显示探头式超声法比超声波清洗槽反应器效率更高、更稳定[6]。该方法具有操作简单、溶剂用量少、回收率高、耗时少等优点。

近几年，研究者将超声法优化，提出超声泡沫萃取法，在超声振荡过程中向溶液中通入空气，协助土壤中 PHCs 更快解离脱落并不断上浮，形成较厚的泡沫层。该方法可缩短提取时间，减少提取次数，提高提取效率。溶剂、液固比、提取时间、提取温度、超声波功率是影响提取效率的主要因素。张博使用超声泡沫法提取土壤中 PHCs，回收率为 78.65%～85.73%[7]。冯新长也使用超声法实现了土壤 PHCs 的高效提取[8]。

1.3 微波辅助萃取法

微波辅助萃取法是在电磁场作用下，容器中极性分子由随机分布变成依照电场的极性排列取向，引起分子运动和相互摩擦产生热量，使介质温度不断升高，在极性溶剂体系中，可实现不同种类(极性和非极性)有机化合物的萃取。Chee 团队研究发现最佳萃取条件下微波辅助萃取法回收率可达到 80%以上，且处理 12 个样品仅需 30 min，效率很高[9]。Jiménez 团队采用微波辅助萃取法提取土壤中 PHCs，回收率达 90%以上[10]。微波萃取过程不会破坏物质结构，且同一批次可同时自动处理多个样品，大大提高了前处理效率。

1.4 加速溶剂萃取法/加压流体萃取法

加速溶剂萃取法或加压流体萃取法是指在较高温度和压力下使用有机溶剂萃取固态或半固态样品中的相关成分。工作温度通常为 50～200℃，工作压力通常为 6.895×10^3～$2.068\ 5\times10^4$ kPa，高温能减弱目标物分子和样品基质间的相互作用力，高压可使溶剂的温度高于其在常压下的沸点，增加目标提取物的溶解量，一般萃取时间为 10～20 min，萃取过程可自动进行。崔静团队和王玉功团队均使用加速溶剂法萃取土壤样品中 PHCs(C_{10}～C_{40})，几十分钟内完成萃取，研究发现，丙酮-正己烷(1∶1，体积比)混合溶液为最佳萃取剂，100℃为最佳萃取温度[11-12]。HJ 1021—2019《土壤和沉积物 石油烃(C_{10}～C_{40})的测定 气相色谱法》和 HJ 783—2016《土壤和沉积物 有机物的提取 加压流体萃取法》中使用加压流体萃取法对土壤中 PHCs 进行萃取。该方法具有速度快、萃取率高、自动化程度高、重现性好和绿色环保等优点，目前在各检测实验室应用十分广泛。

1.5 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法是指使用超临界流体(CO_2、CH_3OH、C_2H_6 等)作萃取剂，利用流体在临界点附近温度和压力的微小变化，增强目标成分的溶解能力。Lopez-avila 团队在 1992 年便使用超临界 CO_2 萃取土壤中 PHCs，研究结果表明其萃取效果与索氏抽提法相当[13]。2005 年，Nagpal 团队使用 CO_2 超临界流体实现了土壤中 PHCs 的提取，提取效率超过 80%。研究发现，温度、压力、共溶剂、超临界流体流速、土壤性质和萃取时间是影响萃取效率的重要因素，压力一定时，温度越高萃取效率越低，温度一定时，压力越高，萃取效率越高[14]。欧阳勋等也使用超临界 CO_2 实现了土壤 PHCs 中多环芳烃等多种污染物的提取[15]，研究发现，该方法最佳萃取时间为 40 h，耗时较长，萃取效率不高，因此该方法虽具有环保、节能的优势，但未被广泛应用于实际样品的分析。

1.6 固相(微)萃取

固相萃取是基于目标分析物在固相萃取柱上选择性吸附和脱附实现目标分析物的富集、分离和净化的方法。覃素姿等使用硅胶和氧化铝混合填附的固相萃取柱实现了 PHCs 中的烷烃和多环芳烃分离，回

收率为 85.3%～105.9%,该方法具有较好的重现性[16]。王娜联合加速溶剂萃取和固相萃取净化方法,同时提取了土壤 PHCs 中多环芳烃和有机氯,处理时间较短,具有较高的净化效率[17]。

固相微萃取在固相萃取的基础上发展而来,在熔融石英光导纤维或其他基质材料表面涂附不同性质的高分子固定相薄层,基于相似相溶原理,对目标分析物进行提取、富集,通过溶剂法或热解吸法将富集在光导纤维中的目标物解析后进行检测[18]。

1.7 多方法联合

综上可知,单一的前处理方法各具优缺点,因此,研究者们尝试将多种前处理方法联合使用来优化提取过程,提高提取效率。王如刚等研究比对超声法、索氏抽提法和超声-索氏抽提法对土壤中 PHCs 的提取效果,发现超声-索氏抽提法的平均萃取率最高,萃取时间最短,且数据重复性最好[19]。周瑞娟等联合超声法和往复振荡法萃取土壤中 PHCs(C_{10}～C_{40}),准确度和精密度均较好[20]。

因此,在实验室条件允许的情况下,使用多种前处理方法联合的方式对样品进行前处理,萃取效率较高,回收率也更高。表 1 列举了各种前处理方法的处理时长、萃取效率和优缺点,加速溶剂萃取法/加压流体萃取法是较好且目前应用较为广泛的前处理方法。

表 1　土壤中石油烃类前处理方法

序号	前处理方法	处理时长	萃取效率/%	优点	缺点
1	索氏抽提法[2-3]	6～72 h	65.18～87.68	设备简单;操作简便	提取速度较慢;溶剂耗费大
2	超声(泡沫)萃取法[4-8]	10～40 min	78.65～85.73	操作简便;成本低;同时处理多个样品,效率高	可能破坏样品结构,一般需要反复萃取 2～3 次
3	微波辅助萃取法[9-10]	30 min	>80	溶剂耗费少;成本低;可同时处理多个样品	重复性欠佳
4	加速溶剂萃取法/加压流体萃取法[11-12]	10～20 min	64.4～98.5	提取速度快;溶剂耗费少;回收率高;自动化程度高;重复性好;能同时处理多个样品	在较高温度下进行提取,可能引入干扰物影响分析结果
5	超临界流体萃取法[13-15]	40 h	>80	溶剂耗费少、选择性好	回收率较低、装置较复杂,成本较高
6	固相(微)萃取[16-18]	1～2 h	85.3～105.9	高效、可靠、溶剂消耗少	重复性难以保证

2　土壤中 PHCs 含量实验室测定方法

2.1 光谱分析法

2.1.1 紫外分光光度法

PHCs 中含有共轭双键的化合物和芳香族化合物在紫外区有特征吸收峰,分别在 215～235 nm 和 250～260 nm,采用紫外分光光度法可测定 PHCs 中不饱和烃和芳香烃含量。1996 年,李纪云等使用该方法对土壤中 PHCs 进行检测,加标回收率为 95.3%,最低检出限为 0.003 mg/kg[21]。程建安研究发现紫外分光光度法测定结果稳定,重现性好,测定了孤岛油区土壤样品的含油率[22]。该方法具有操作简便,仪器成本较低等优势,但不适用于饱和烃和环烷烃的检测,有一定的局限性。

2.1.2 红外分光光度法

PHCs 中烃类化合物中甲基、亚甲基的 C—H 键伸缩振动,在红外光谱波数为 2 930,2 960,3 030 cm^{-1} 处产生特征吸收峰,根据吸收峰强度可测定 PHCs 含量。马晓利等建立了快速溶剂萃取-红外分光光度法,在最优萃取条件下,实现了土壤中低含量 PHCs 的准确分析,测得新疆某污染罐区土壤中 PHCs 含量为 211.05～389.50 mg/kg[23]。马宏伟采用该方法测定土壤中 PHCs 总量,回收率可达 87.0%～96.4%[24]。该方法应用较为广泛,仪器结构简单、重复性较好、分析时间较短,但不能反映 PHCs 的具体成分信息,且极易出现假阳性结果。

2.1.3 荧光光谱法

PHCs 中的芳香烃在一定波长的激发光下能产生荧光,不同物质能发射不同特征波长的荧光,因此可采用荧光光谱法测定土壤中芳香烃含量。左兆陆搭建了土壤 PHCs 的激光诱导荧光实验系统,研究了不同湿度、粒度和土壤疏松度对荧光光谱的影响,实

现了土壤 PHCs 中多环芳烃的准确测定[25]。该方法灵敏度较高，但无法测定饱和脂肪烃的含量。

2.2 气相色谱法

气相色谱-火焰离子检测法（GC-FID）和气相色谱-质谱法（GC-MS）较广泛地用于土壤中 PHCs 的准确分析。HJ 1020—2019《土壤和沉积物 石油烃（C_6～C_9）的测定 吹扫捕集 气相色谱法》[26]和 HJ 1021—2019《土壤和沉积物 石油烃（C_{10}～C_{40}）的测定 气相色谱法》采用气相色谱法实现了 PHCs 中 C_6～C_9 和 C_{10}～C_{40} 的分段检测，具有较好的准确性和稳定性。

PHCs 成分复杂，传统的气相色谱分析过程需要 1 h 左右，样品分析耗时长，每日处理样品总量有限。安捷伦公司开发了 Agilent Intuvo 9000 气相色谱系统，建立了土壤中柴油类总石油烃的分段（C_{10}～C_{14}，C_{15}～C_{28}，C_{29}～C_{36}）快速检测方法，将样品分析时间缩短至 3.2 min 以内，大大减短了分析时间。许龙等使用 Agilent Intuvo 9000，结合加压流体萃取法实现了土壤中总石油烃的检测，由于使用 5 m 短柱、较大的柱流量和较高的升温速率（100，165，250℃/min），分析时间由传统方法的近 1 h 缩短至 2.75 min，突破了传统气相色谱法分析时间长的局限[27]。该方法具有灵敏度高、响应速度快、识别能力强和分析准确等优点，应用十分广泛。

2.3 重量分析法

重量分析法是通过称量样品的质量来测定物质含量。土壤中的 PHCs 萃取至有机溶剂中后，将溶剂蒸发除尽至样品恒重，称量样品质量即可得到 PHCs 含量。温晓露等使用重量法测定油污中的 PHCs，加标回收率达到 85%左右，但研究表明该方法检测时间较长，精密度与操作条件受操作人员熟练程度影响[28]。该方法不受油品限制，不需要特殊检测仪器，但灵敏度较低，适合测定含高浓度 PHCs 的土壤样品，由于溶剂蒸发过程中可能会损失低沸点的石油组分，不适用于 PHCs 中挥发性成分的测定，不能对 PHCs 的不同组分进行分别测定。

3 土壤中 PHCs 现场检测方法

3.1 遥感（电磁波谱）法

3.1.1 高光谱遥感法

高光谱遥感法是利用固定的电磁波段获取地面各种物质的连续光谱信息，根据光谱特征曲线对地物成分进行反演推算，实现地物成分的识别。使用该方法对土壤中 PHCs 含量进行反演推算能实现大范围原位实时无损监测，还可通过图像直接获取地物空间信息，获取大面积的污染信息。Pelta 团队使用高光谱（950～2 500 nm）成像技术对不同污染程度的不同土质中的 PHCs 含量进行检测，提出空间距离、土壤类型和土壤中 PHCs 的浓度均对该方法的检出限有影响[29]。任广波团队使用无人机高光谱遥感对海面溢油进行检测，对油膜厚度进行估算，得出 699 nm 和 675 nm 是海上溢油检测的有效特征波段，但对极薄的油膜没有检测能力，存在一定的局限性[30]。该方法快捷高效，但只能测定土壤表面的 PHCs 含量，仍不能完全替代传统的化学分析方法。

3.1.2 雷达法

雷达法是通过无线电磁波探测目标物并确定其空间位置，获得电磁波发射点与目标物的距离、方位、高度等信息。基于 PHCs 的电磁特性，可用来检测土壤中 PHCs。合成孔径雷达（Synthetic aperture radar，SAR）和探地雷达（Ground penetrating radar，GPR）较常应用于该领域。2008 年，Petrovic 团队为探明烃类渗漏后对美国犹他州某砂岩地貌的具体影响情况，基于高级星载热发射和反射辐射仪（Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer，ASTER）和 SAR 技术对土壤中烃类物质进行探测，实现了烃类物质的定性检测，明确了烃类污染物在土壤中的分布情况[31]。2013 年，葛佳团队为掌握加油站油品泄漏及污染情况，使用 GPR 对加油站进行初步探测，判断出场地内可能发生 PHCs 污染的区域，采样监测后发现该区域确实存在油品渗漏污染，验证了 GPR 探测结果的准确性[32]。2014 年，孙晓英团队采用采样-前处理-气相色谱检测方法验证雷达法对加油站埋地罐区 PHCs 进行泄漏检测的准确性[33]。2019 年，Shao 团队为了探明烃类污染地块中污染羽的具体分布情况，采用电阻率层析成像技术和 GPR 技术结合的方式，探明了烃类污染的分布情况[34]。该方法不仅能快速、准确地检测到泄漏点位置和泄漏量，而且检测过程不影响加油站的正常运行，具有很强的实用性。

3.2 便携式检测设备

由于现场快速检测需求越来越迫切，土壤中 PHCs 便携式快速检测设备逐渐在市场中出现，现场测量技术应具有成本低，节省时间，便于携带，且具有较高的准确性等优点。美国 Dexsil Petro FLAG 便携式土壤总石油烃快速检测仪可在 5 min 内完成土壤中总

石油烃的检测,方法已得到美国 EPA 认可,应用于风化汽油、重质粗油等不同油类的检测,在使用时用仪器自带的萃取液对样品进行萃取,用显色溶液将萃取液中的烃类沉淀出来,形成大小统一、能稳定存在一段时间的微团,然后将显色管放入分析仪中,基于浊度显色法定量,检测范围为 15～2 000 mg/kg,由于存在前处理过程,该设备用于现场快速检测有一定缺陷。澳大利亚 Ziltek RemScan 是用于土壤总石油烃测量的手持式仪器,检测 C_{10}～C_{36} 的石油烃(检测范围可根据客户需求调整),使用者只需在平整的样品表面停留 15～30 s 即完成测量,无需进行溶剂萃取等预处理,实现样品现场分析。该仪器对现场土壤样品的湿度有一定要求,土壤湿度小于 5%时才能准确测量。目前国产便携式仪器研发与国外先进水平还存在一定差距,有待突破。

土壤中 PHCs 检测方法见表 2。

表 2　土壤中 PHCs 检测方法

序号	检测方法	检测范围	优点	缺点	检出限
1	紫外分光光度法[21]	含有共轭双键或芳香族化合物	操作简便;仪器成本较低	不适用于不饱和烷烃的检测	3 mg/kg
2	红外分光光度法[23]	烃类化合物	仪器简单;重复性好;分析时间短	不能反映具体成分信息;极易出现假阳性结果	0.5 mg/kg
3	荧光光谱法[25]	芳香烃	检测速度快;灵敏度高;可用于现场检测	无法测定直链和支链烷烃;测定结果受样品中油品组成影响较大	141 mg/kg
4	气相色谱法[26]	C_6～C_{40}	灵敏度高;响应速度快;识别能力强;分析准确	传统气相色谱分析方法耗时较长	0.04 mg/kg(C_6～C_9) 6 mg/kg(C_{10}～C_{40})
5	重量分析法[28]	油品中难挥发成分	不受油品限制;不需要特殊检测仪器	灵敏度低;不适用于石油烃中挥发性成分的测定	85%(回收率)
6	高光谱遥感法[32-33]	石油烃类	大范围原位实时无损监测;获取大面积的污染信息	只能测定土壤表面的石油烃含量;准确度受湿度影响	1.32%,2.09%,2.90%(质量百分比)(不同土壤和空间区域检出限不同)
7	雷达法[34]	石油烃类	速度快;过程连续;分辨率高;操作方便灵活	探测深度与分辨率的矛盾无法解决;介质不均匀影响大	0.4 mg/kg
8	便携式检测设备	不同设备适用范围不同	便于携带;成本较低;效率较高	准确性不如实验室检测	50 mg/kg (Ziltek RemScan)

4　结论与展望

1)不同的前处理和测定方法对 PHCs 的检测将产生不同影响,每种分析方法各有利弊,选择分析方法时应综合考虑分析时长、操作的繁简、成本和检测结果准确性要求等各方面因素。

2)加压流体萃取法/加速溶剂萃取法是回收率和效率较高的前处理方法,气相色谱法基于其较好的准确性、稳定性和能实现物质分离等优点,被广泛应用于 PHCs 的检测。

3)随着传感技术和信息技术的迅速发展,简化或免除前处理过程,借助便携式检测设备实现污染现场的原位检测越来越有意义。

4)近年来,多传感器和数据融合技术在土壤性质测定方面的研究取得了显著进展,但对于环境样本中 PHCs 的检测,还处于起步阶段。未来,采用多传感器和数据融合方法,研发新型、国产化的集便携、快速、低耗于一体的 PHCs 检测方法,提高检测结果准确性和检测效率将成为新的研究趋势。

参 考 文 献

[1]　崔倩倩,刘朝阳.石油烃类污染物的微生物修复研究进展[J].江西科学,2020,38(3):326-330.

[2]　杨慧娟,刘五星,骆永明,等.气相色谱-质谱法分段测定土壤中的可提取总石油烃[J].土壤,2014,46(1):134-138.

[3]　宋盼盼,黄满红,陈东辉,等.高效液相色谱-DAD 检测法分离测定土壤中的多环芳烃[J].环境工程,2014,32(增刊 1):988-991.

[4]　TOR A, AYDIN M E, ÖZCAN S. Ultrasonic solvent

extraction of organochlorine pesticides from soil [J]. Analytica chimica acta, 2006, 559(2): 173-180.

[5] ZHOU J H, HUANG R X, YUAN Y H, et al. Microtitration assay of total petroleum hydrocarbons in contaminated soils using ultrasonic extraction and multiskan spectrum[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2017, 37(11): 3647-3652.

[6] 曹敏,胡祖国,郑存江,等.超声萃取-气相色谱法测定土壤中石油烃[J].理化检验-化学分册,2018,54(3):275-279.

[7] 张博.油污土壤中石油烃含量的测定方法[J].黑龙江科技大学学报,2019,29(1):110-114.

[8] 冯新长.超声波萃取-红外分光光度法测定土壤中石油类[J].环境监测管理与技术,2014,26(2):45-47.

[9] CHEE K K, WONG M K, LEE H K. Optimization of the microwave-assisted solvent extraction of petroleum hydrocarbons in marine sediment and soil [J]. Environmental monitoring and assessment, 1997, 44(1): 587-603.

[10] JIMÉNEZ O P, PÉREZ PASTOR R M, SEGOVIA O E. An analytical method for quantifying petroleum hydrocarbon fractions in soils, and its associated uncertainties [J]. Anlytical methods, 2014, 6(15): 5527-5536.

[11] 崔静,吴鹏.加速溶剂萃取-气相色谱法测定土壤中总石油烃(C_{10}-C_{40})[J].黑龙江环境通报,2018,42(2):46-49.

[12] 王玉功,马亮,李玉泽,等.ASE-气相色谱法测定油田区土壤中多种石油烃[J].环境监测管理与技术,2019,31(5):43-45.

[13] LOPEZ-AVILA V, BENEDICTO J, DODHIWALA N S, et al. Development of an off-Line SFE-IR method for petroleum hydrocarbons in soils[J]. Journal of chromatographic science, 1992, 30(9): 335-343.

[14] NAGPAL V, GUIGARD S E. Remediation of flare pit soils using supercritical fluid extraction [J]. Journal of environmental engineering and science, 2005, 4(4): 307-318.

[15] 欧阳勋,陈家玮,张小岗.超临界 CO_2 流体萃取土壤中污染物的应用研究进展[J].地质通报,2010,29(11):1655-1661.

[16] 覃素姿,王茹意,王宛.固相萃取法和 GC-MS 联用检测石油污染物中 17 种多环芳烃[J].广东化工,2014,41(11):227-229.

[17] 王娜.加速溶剂萃取-固相萃取净化-色谱法测定土壤中的多环芳烃和有机氯[J].环境化学,2013(3):524-525.

[18] 李福娟,孙培艳,高振会,等.基于石油烃全扫描的规整色谱图进行聚类分析[C].中国化学会第 26 届学术年会.天津:2008:1.

[19] 王如刚,王敏,牛晓伟,等.超声-索氏萃取-重量法测定土壤中总石油烃含量[J].分析化学,2010,38(3):417-420.

[20] 周瑞娟,任学蓉.超声振荡-气相色谱法测定土壤中可萃取总石油烃(C_{10}～C_{40})的研究[J].环境与发展,2019,31(2):137-138.

[21] 李纪云,李丽,冯成武.超声-紫外法测定土壤中石油类物质含量[J].中国石油大学学报(自然科学版),1999(6):82-83.

[22] 程建安.紫外分光法测定土壤中的石油污染物[D].济南:山东大学,2012:1-47.

[23] 马晓利,苏丽娜,庞林,等.快速溶剂萃取-红外分光光度法测定低含量油污染土壤中总石油烃的含量[J].理化检验-化学分册,2018,54(4):388-392.

[24] 马宏伟.红外分光光度法测定土壤中石油烃总量的方法研究[J].环境研究与监测,2010(2):47-48.

[25] 左兆陆.土壤石油烃类污染物荧光测量技术及应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2020:1-101.

[26] 生态环境部.土壤和沉积物 石油烃(C_6-C_9)的测定 吹扫捕集/气相色谱法:HJ 1020—2019[S].北京:中国环境出版集团,2019.

[27] 许龙,王佳,柳玲,等.一种快速测定土壤中总石油烃的方法[J].四川环境,2018,37(6):108-111.

[28] 温晓露,黄凌军,周文凯.重量法测定污泥中的矿物油含量[J].中国给水排水,2003,19(7):100-101.

[29] PELTA R, BEN-DOR E. Assessing the detection limit of petroleum hydrocarbon in soils using hyperspectral remote-sensing [J]. Remote sensing of environment, 2019, 224: 145-153.

[30] 任广波,过杰,马毅,等.海面溢油无人机高光谱遥感检测与厚度估算方法[J].海洋学报(中文版),2019,41(5):146-158.

[31] PETROVIC A, KHAN S D, CHAFETZ H S. Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Lisbon Valley, Utah[J]. Marine and petroleum geology, 2008, 25(8): 696-705.

[32] 葛佳,刘振鸿,杨青,等.加油站的油品渗漏污染调查及健康风险评估[J].安全与环境学报,2013,13(2):97-101.

[33] 孙晓英,肖安山,魏新明,等.加油站埋地罐区土壤中油气含量检测方法研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(1):64-67.

[34] SHAO S, GAO C, GUO X J, et al. Mapping the contaminant plume of an abandoned hydrocarbon disposal site with geophysical and geochemical methods, Jiangsu, China [J]. Environmental science and pollution research international, 2019, 26(24): 24645-24657.

(收稿日期 2021-12-02)

(编辑 郎延红)