



移动扫码阅读

籍龙杰,陈芒,张维琦,等.原位热脱附去除土壤有机污染机理及技术研究[J].能源环境保护,2022,36(5):46-52.

Ji Longjie, CHEN Mang, ZHANG Weiqi, et al. Study of organic pollutant removal mechanism and technology for in-situ thermal desorption in soil[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):46-52.

原位热脱附去除土壤有机污染机理及技术研究

籍龙杰^{1,2,3}, 陈 芒³, 张维琦², 李承志¹, 余 韬², 李书鹏^{1,2}, 詹明秀³, 焦文涛^{3,*}

(1.北京建工绿色能源环境科技有限责任公司,北京 100015;2.北京建工环境修复股份有限公司,北京 100015;3.中国科学院生态环境研究中心,城市与区域国家重点实验室,北京 100085)

摘要:作为有机污染场地主流修复技术,原位热脱附具有无需土壤开挖、设备移动性强、修复周期短等优势。以往研究主要侧重于原位热脱附的修复效果和影响因素,针对修复机理和去除路径的研究更有利于工艺优化。本文介绍了有机污染物在土壤中的赋存状态及影响因素,分析了有机污染物在土壤加热过程中的脱附机理,探讨了有机污染物转移到气相后的处理技术,为后续应用研究提出了建议。

关键词:原位热脱附;有机污染场地;修复机理;尾气处理

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0046-07

Study of organic pollutant removal mechanism and technology for in-situ thermal desorption in soil

Ji Longjie^{1,2,3}, CHEN Mang³, ZHANG Weiqi², LI Chengzhi², YU Tao²,
LI Shupeng^{1,2}, ZHAN Mingxiu³, JIAO Wentao^{3,*}

(1.Beijing Construction Engineering Group Green Energy Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China;
2.Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation Co., Ltd., Beijing 100015, China;3.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: As a main remediation technology for organic contaminated sites, in-situ thermal desorption has advantages such as no need to excavate and transport soil, high equipment mobility and short remediation cycle. Previous research focused on the repair effect and influencing factors of in-situ thermal desorption. However, the research on repair mechanism and removal path was more conducive to process optimization. The occurrence characteristics and influencing factors of organic pollutants in soil were introduced. The desorption mechanism of organic pollutants during soil heating was analyzed. The treatment process of organic pollutants, which was transferred to tail gas, was discussed, and some suggestions for further application research were put forward.

Key Words: In-situ thermal desorption; Organic contaminated site; Remediation mechanism; Exhaust gas treatment

0 引言

随着我国产业结构调整和城市化进程的加

速,大批企业搬迁、关停遗留了大量污染场地,尤其是石油化工类污染场地^[1],造成多种有机污染物如石油烃类、多环芳烃类、有机磷农药类以及多

收稿日期:2022-05-16;责任编辑:金丽丽

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1802100);中国博士后科学基金面上资助项目(2019M660823)

第一作者简介:籍龙杰(1989—),男,博士,山东临沂人,高级工程师,研究方向为污染土壤及地下水修复技术。E-mail:jilongjie@bceer.com

通讯作者简介:焦文涛(1978—),男,博士,河南新乡人,研究员,研究方向为污染土壤及地下水修复技术。E-mail:wtjiao@rcees.ac.cn

氯联苯、亚硝胺等对土壤造成污染,该污染过程通常具有累积性、隐蔽性、动态性和不可逆性^[2],且有机污染物大多具有持久性、半挥发性、生物富集性和高毒性^[3],对人体健康和生态环境造成严重威胁,对污染场地的修复带来巨大挑战。原位热脱附技术自 20 世纪 70 年代开始应用于有机污染场地的修复,其原理是在土壤气相抽提技术的基础上,在原地对污染土壤进行加热,达到一定温度后促使污染物挥发并集中收集处理。系统组成如图 1 所示,主要由加热单元、气相抽提单元、尾气处理单元以及控制单元等组成^[4]。根据加热方式的不同,原位加热技术可分为蒸汽强化抽提技术、电阻加热技术和热传导技术^[5-7],其中热传导技术根据燃料不同又包括电加热和燃气加热两种方式^[8-9]。

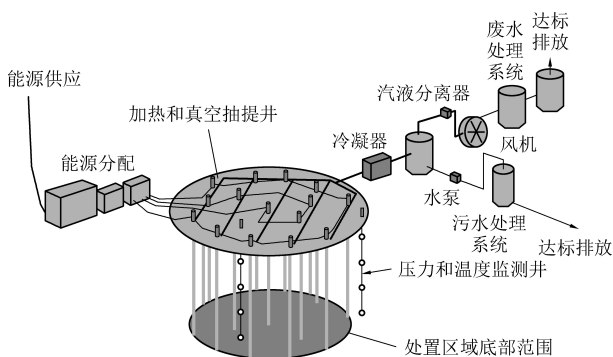


图 1 原位热脱附技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of in-situ thermal desorption technology

相较于异位热脱附,原位热脱附具有无需对场地进行开挖和土壤运输、设备移动性强、修复周期短、适用性强等优势^[10]。近年来原位热脱附技术逐渐应用于国内挥发性和半挥发性有机污染场地,如苯、氯苯、石油烃、有机磷农药和焦化类污染,修复效率均在 95% 以上^[11-14]。原位热脱附技术在已广泛应用于国外污染场地,但国内仍处于起步阶段。前期对于热脱附技术的研究多在于去除效率和影响因素的分析,但仍存在去除机理不明确、能源利用率低、二次污染物等瓶颈问题,成为制约原位热脱附技术在我国污染场地规模化实施的限制因素。

基于以上分析,旨在明晰有机污染物在土壤中赋存状态的基础上,探究加热过程中的热量传递、污染物性质改变及迁移过程,分析其脱附或降解的变化过程,以及对尾气处理工艺的归纳,为原位热脱附技术的精准参数设计和能耗降低提供理

论指导。最后,对原位热脱附修复技术在研究和工程应用中应关注的问题进行总结归纳,为我国原位热脱附修复技术的发展应用提供支撑。

1 土壤中有有机污染物的赋存特征及影响因素

土壤由各种颗粒状矿物质、有机质、水分、空气及微生物等组成,是化学成分和结构形态高度不均匀的复杂成分。有机污染物进入土壤后主要以吸附的形式赋存于不同土壤组分,且土壤环境的复杂性和污染物化学性质的多样性会导致其赋存状态存在显著差异。有机污染物进入土壤后会发生挥发、扩散、迁移、吸附以及降解等反应,使污染物形态发生变化,以不同相态存在于土壤中。例如多环芳烃(PAHs)在土壤中的赋存形态分为水溶态、酸溶态、结合态和锁定态^[15]。此外,污染物在土壤中的赋存特征因土壤环境、污染物性质的不同而不同。

土壤有机质、矿物质、粘粒含量、土壤温度、pH、老化时间等都会对赋存特征产生影响。其中土壤有机质是影响有机污染物赋存特征的重要因素,是污染物的主要吸附剂且受热最难脱附,如吴启航等^[16]研究表明河流沉积物中仅占重量 9.1% 的有机质富集了 81.5% 的 PAHs 污染物和 77.2% 的 OCPs。此外,前人研究发现土壤粒径越大污染物含量越低、有机质含量越高污染物含量越高、碱性土壤含量高于酸性土壤、含水率越高污染物含量越高、温度越高污染物含量越低^[17]。此外,老化时间越长,污染物与土壤成分的结合越强烈,扩散速度越慢^[18]。

污染物自身性质的差异也是影响其赋存状况的重要因素。污染物的疏水性、分子大小、极性等性质影响其与土壤组分的相互作用力,进而影响其赋存形态。例如高环 PAHs 在土壤中的吸附速率和吸附量就显著高于低环 PAHs^[19];荧蒽与其同分异构体芘,由于结构不同而引起疏水性不同,荧蒽的溶解度远大于芘^[20];非吸附性的污染物在外界条件改变时易挥发降解,而吸附性强的污染物需要先解吸且部分为吸附不可逆状态。

2 原位热脱附修复机理

原位热脱附的去除机理主要包括物理脱附和化学降解两部分。土壤加热过程中,污染物赋存状态发生改变进而从土壤中挥发去除,同时发生

热解、水解、氧化、炭化等化学反应而降解达到去除的目的。

2.1 土壤加热升温过程

热量通过加热井传递到周边土壤,呈阶梯状逐渐升高。土壤吸收的热量,一部分用于其自身升温,一部分通过热传导、热对流、热辐射、相变换热等方式传送给临近土层升温。热传导为主要方式,可传递80%以上的热量,发生在土壤层或不流动的液态水或气体层中,是由于温差的存在导致物质中大量分子热运动,使能量从高温部分传至低温部分。热对流是土壤内部存在的流动液态水、蒸汽及空气在受迫对流和自然对流的作用下发生的热量传递,更常见于高渗透率场地的热量传递。热辐射过程不需任何媒介,且温度越高,辐射出的能量越大,主要作用于距离热源较近且温差大的区域^[21]。土壤内温度梯度的存在导致液体的气化和蒸汽的液化,产生相变换热。土壤内各组分的热质迁移机制如图2所示。

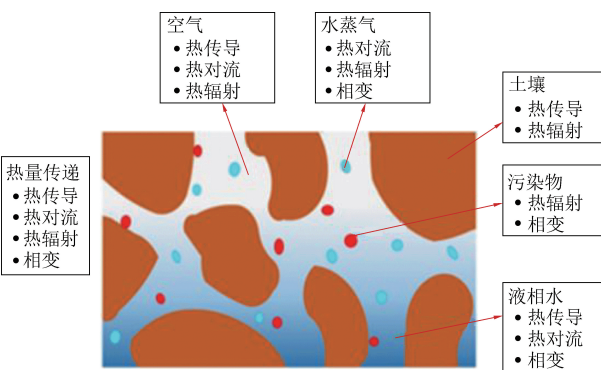


图2 土壤内热质迁移机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat and mass transfer mechanism in soil

加热区域的温度梯度、土壤及地下水介质的热导率和保温隔热性能等因素严重影响着传热效率^[22]。相邻土壤温差越大,热量传递效果越明显。由于水的体积热容量较大(约为空气的3 000多倍),所以土壤含水量越高,热容量越大,且孔隙度大的土壤,热量传递越快。

根据加热过程不同阶段各影响因素的变化进行分析:在土壤加热初期,由于土壤中水分未蒸发,且水是热的良导体(约为空气导热率的28倍),从而增强相互之间的热量传输作用,土壤导热率较高,升温速率较快^[23];随着温度的升高,尤其是升温到水的沸点时,水分蒸发消耗大量热量,导热率逐渐降低,导致升温速率较慢;土壤水分消耗完后,热量将主要用于干土温度的升高,升温速

率加快。如籍龙杰等^[24]对单根加热棒原位加热土壤的研究,在距离加热棒25 cm处的监测井温度从4.6℃升高至80℃,用时88 h;而从80℃升高至100℃却用时120 h,是由于该阶段水分蒸发消耗大量热量,升温速度较慢;在100℃左右停留一段时间后,土壤温度稳定增加至目标温度。

2.2 污染物物理脱附过程

脱附过程中,由于土壤内热量的传递,土壤中的有机污染随着温度的变化进行着复杂的传质过程,图3为有机污染物在土壤内传质输送的典型过程^[21]。当温度升高到一定程度,吸附在土壤中的有机污染物逐步从土壤介质中解吸、挥发。在此过程中,有机污染物在土壤中的传质主要分为两个阶段,第一阶段是溶解相、土壤缝隙及土壤颗粒表面所附着的有机污染物的受热挥发,挥发速率较快;第二阶段是土壤颗粒内部或者孔隙填充相有机污染物的解吸和挥发,解吸速率受土壤颗粒内传热、传质效率的限制。例如对于土壤中六氯苯(HCBz)的热脱附,加热前20 min,脱附效率较快,尤其是加热温度超过或接近HCBz沸点时,HCBz的脱附效率最快,而20 min后,其脱附效率显著降低^[25]。

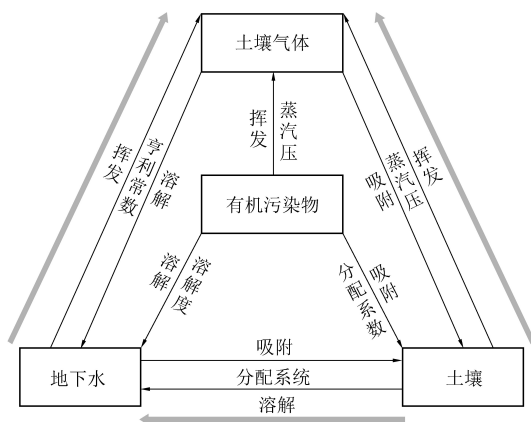


图3 土壤内有机污染物质运输过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of material transport process in organic contaminated soil

如图3所示,污染物在传质过程中各相态的分布与污染物的蒸汽压、溶解度、亨利常数、等理化性质紧密相关,且土壤温度的升高也会导致污染物本身性质发生变化,进而促进污染物的脱附去除。

(1)蒸汽压增大。当土壤温度从环境温度增加到水的沸点以上时,土壤中固相、液相污染物向气相转变的速率显著增加,同时加大了污染物的蒸汽压,通常污染物的蒸汽压会增加10~30倍。

例如当二氯氟苯温度从 125 ℃ 升高到 228 ℃ 时,饱和蒸汽压从 5.3 kPa 增加到 101.3 kPa^[26]。

(2) 溶解度增加。随着土壤温度的升高,土壤中污染物的溶解度会逐渐增大,促使污染物更容易进入地下水,从而被真空抽提井抽出。宋斌^[27]对几种酚类化合物在水中溶解度的研究结果表明其溶解度随温度的升高而增大。

(3) 亨利常数增加。从微观的角度来说,温度升高,分子动能高,污染物更易于从约束力较强的聚集状态逃逸而进入约束力较弱的聚集状态,即从液相逃逸到气相,这就在宏观上表现出来气相中的分压增大,而液相中的浓度减少,于是亨利系数变大,进入气相中的污染物数量增加,从而使得污染物更容易被去除。HERON 等^[28]的研究发现,当温度由 23 ℃ 升至 99 ℃ 后,TCE 亨利常数增加了 8 倍。

(4) 黏度系数降低。对于大多数有机污染物,温度每增加 1 ℃,黏度系数大约降低 1%。吴敏艳^[29]等对生物柴油性质的研究发现温度由 30 ℃ 上升到 78 ℃ 时其粘度降低了 3.4 左右。因此随着污染物的温度升高,污染物与土壤之间的黏度系数逐渐减小,污染物的流动性增加,更容易进入地下水和土壤空气中,从而促使污染物更容易被抽提井提取。

(5) 共沸。在原位热脱附土壤加热过程中,随着土壤温度的升高,在达到沸点温度前,已有部分污染物通过共沸共溶的形式挥发到气相中,且实际的脱附温度要比理论共沸点高。孟宪荣等^[30]原位电阻热脱附研究中,利用 1,2-二氯乙烷和水共沸点(72 ℃)为设定温度,加热 12 h 时,污染物去除效果不佳,提高设定温度至 95 ℃,延长加热时间至 36 h 时,1,2-二氯乙烷去除率可达 78.3%~100%。

因此,随着土壤温度的升高,污染物理化性质的变化促进土壤中污染物的传质输送过程,明晰该反应原理,可结合污染物具体性质对脱附过程各运行参数进行精准调控,提高脱附效率,符合发展高效节能修复方案的趋势。

2.3 污染物化学降解过程

理论上热脱附技术是一种以解吸和挥发为主要修复机理的技术,但在实际加热过程中由于土壤中的氧气和氧化物质的存在,随着土壤温度升高和时间延长,部分污染物进行会发生热解、水解、氧化和炭化等降解反应,且反应强度随着温度

的升高和含氧量的增加而增加^[10]。正如祁志福^[31]对多氯联苯(PCBs)的研究,在较低加热温度条件下,尾气中 PCBs 的组成特性和未处理土壤相似,蒸发是 PCBs 的主要去除机理;随温度升高,尾气中组成特性发生明显变化,有了明显的脱氯,发生了化学降解。

土壤中的天然氧化物和微生物都会与污染物发生氧化降解。这些常见的变价元素,其表面带有电荷的氧化物与还原性有机污染物发生氧化还原反应,在增加金属元素活动性的同时使有机污染物通过电子转移发生氧化降解作用而去除^[32],而土壤中的有机污染物可作为土壤微生物的碳源被利用而发生降解^[33]。在无氧或缺氧的土壤环境条件下,加热使有机物发生裂解转化为气体、热解油和焦炭或半焦炭的降解过程称为热解,也是作为土壤热脱附处理的一种伴随机制而发生,常见于石油类污染的去除过程^[34]。土壤中的一些酯类化合物如有机磷农药,由于其自身结构的性质,在遇到水时容易发生水解反应而降解,温度的升高也会促进水解反应的进行^[35]。炭化过程是指在土壤热脱附过程中将土壤中的有机污染物转变成稳定且无害的炭的一种附加降解机制。

3 脱附后污染物处理技术

土壤中的有机污染物经脱附抽提后,进入地面的尾水尾气系统进行处理,实现污染物的彻底降解。抽提气体一般包括气相有机污染物、水蒸气和空气,首先将尾气进行气液分离,使部分有机污染物进入液相,经污水处理设备进行处理,剩余的气相污染物经处理达标后排入大气,处理流程如图 4 所示。

气液分离系统一般包括汽水换热器、气液分离器、喷淋塔和除雾器等装置,经换热冷凝以降低进气口温度、减少尾气粉尘量,使大部分有机污染物和水蒸气冷凝成液相,同时也防止粉尘对后续尾气设备造成堵塞影响正常运转。由于加热阶段的不同或热脱附工艺技术的不同,会造成脱附气体温度和气体量的波动,因此,需根据实际工程情况增加平行并联处理系统或备用切换系统,使气液分离更为彻底。

分离后的液相经沉淀池、过滤器、一体化膜处理、深度氧化池等设备进行污水处理,而液相中所含有的粉尘、重油等污染物质经沉淀后分离送至危废处理厂进行集中处理。根据污染物质及处理

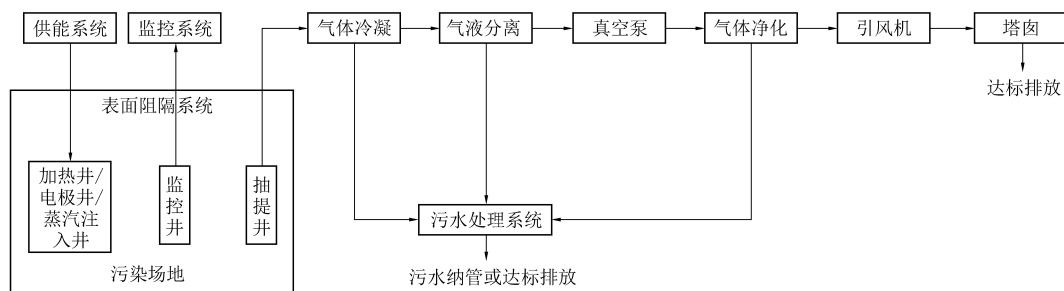


图4 脱附污染物处理流程示意图

Fig.4 Schematic diagram of desorbed pollutant treatment process

量的不同采用合适的处理工艺和设备,经处理达到地表水环境质量标准要求后排放。气相污染物处理过程一般包括除雾器的进一步去除水分、二级或三级的活性炭吸附以及新型的UV高效光解氧化设备,经吸附、除尘或降解后达标排放。

目前的尾水尾气处理工艺可达到90%的处理效率,且具备模块化组合、安装维护简单、运行稳定、节能环保等优势,可自动、灵活地操控和管理设备。但仍存在设备针对性不强、粉尘堵塞设备、污染物对设备腐蚀性大、设备工艺冗长以及设备抗环境干扰能力差、运行不稳定等问题,需在实际工程应用过程中根据场地情况进行调整和改进,以提高尾水尾气处理能力和效率。

4 前景展望

以上明晰了污染物热脱附的去除机理和路径,促进了原位热脱附技术的应用与创新,但仍存在热源能耗高成本高、工艺设备抗环境干扰能力差以及对土壤结构破坏性大等限制因素。基于以上分析,为后续研究和应用工作提出如下几点发展方向建议。

(1)加强理论基础研究,科学设置数值参数。污染物种类、土壤性质及加热条件的不同都会对脱附效果产生影响,涉及多因素的交互作用,且降解过程中不仅存在物理挥发这一种去除途径,随着温度的升高,氧化、水解、共沸、炭化等各种化学反应也会随之发生。因此,在基础理论研究上应更加注重各因素各水平的定量/半定量关系,建立污染物迁移模型,精准判断污染物的传热传质过程,设置热脱附各参数条件,提高污染物去除的高效性,降低修复不足或过度修复的现象,同时提高能量的有效利用率,降低修复成本。

(2)提高尾水尾气处理工艺,增加灵活稳定性。探究热脱附升温过程前后脱附气体中污染物

的种类及数量变化情况,在掌握污染物变化规律的基础上,设置可调控的处理装备,防止设备资源的浪费或粉尘量大而造成堵塞影响设备运行。同时,提高尾水尾气的二次利用率,开发安全、高效、集约化的尾水尾气处理系统是目前该技术工程应用的关键。

(3)发展绿色修复,降低能源消耗。对于热脱附的热源能耗较高的问题,可采用多种修复技术耦合工艺,探索热脱附技术与其他技术的联合交叉应用,克服单一技术的局限性,达到“双赢”。例如热活化耦合化学氧化修复技术,低价的氧化剂成本可降低一部分能耗成本;利用余热促进微生物对有机污染物的降解活动,提高能源利用率,降低对土壤的破坏性。

参考文献

- [1] GWOREK B, BACZEWSKA-DABROWSKA A H, KALINOWSKI R, et al. Ecological risk assessment for land contaminated by petrochemical industry [J]. Plos One, 2018, 13 (10): e0204852.
- [2] 左静, 秦丰林, 方国东. 电化学活化过硫酸盐修复土壤有机污染研究进展 [J]. 现代农业科技, 2021 (13): 179-185. ZUO Jing, QIN Fenglin, FANG Guodong. Research progress on remediation of soil organic pollution by electrochemically activated persulfate [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021 (13): 179-185.
- [3] 翟亚男. 土壤有机污染治理研究 [J]. 资源节约与环保, 2020 (11): 95-96. ZHAI Yanan. Study on soil organic pollution control [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2020 (11): 95-96.
- [4] 谢炳坤, 姜祖明, 曾俊, 等. 多环芳烃类污染场地应用原位电热脱附技术的能效分析 [J]. 环境工程, 2021, 39 (8): 173-178+187. XIE Bingkui, JIANG Zuming, ZENG Jun, et al. Energy efficiency analysis in-situ electrothermal desorption in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated site [J]. Environmental Engineering, 2021, 39 (8): 173-178+187.

- [5] 康绍果, 李书鹏, 范云. 污染地块原位加热处理技术研究现状与发展趋势 [J]. 化工进展, 2017, 36 (7): 2621-2631.
KANG Shaoguo, LI Shupeng, FAN Yun. Research status and development trend of in situ thermal treatment technologies for contaminated site [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36 (7): 2621-2631.
- [6] 张学良, 廖朋辉, 李群, 等. 复杂有机物污染地块原位热脱附修复技术的研究 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 993-1000.
ZHANG Xueliang, LIAO Penghui, LI Qun, et al. Remediation of complex organic compounds in contaminated plot with in-situ thermal desorption [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (4): 993-1000.
- [7] 刘伟, 汪华安, 尚浩冉, 等. 有机污染场地原位电加热热脱附修复技术综述 [C] //《环境工程》2018 年全国学术年会论文集 (下册), 2018: 746-750.
- [8] R H P, G M K. Gas production and transport during bench-scale electrical resistance heating of water and trichloroethene [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014, 165: 24-26.
- [9] MIHAILA M, HOTNOG C, THEODOR V, et al. In situ thermal treatment (ISTT) for source zone remediation of soil and groundwater [J]. British Medical Journal, 2013, 31 (31): 482-484.
- [10] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review [J]. Chemosphere, 2019, 221: 841-855.
- [11] 赵涛, 周宇, 马刚平, 等. 焦化类污染场地原位热脱附修复效果试验 [J]. 环境工程, 2021, 39 (4): 201-205.
ZHAO Tao, ZHOU Yu, MA Gangping, et al. Experimental study on restoration effect of in situ thermal desorption in coking contaminated sites [J]. Environmental Engineering, 2021, 39 (4): 201-205.
- [12] 刘惠. 污染土壤热脱附技术的应用与发展趋势 [J]. 环境与可持续发展, 2019, 44 (4): 144-148.
LIU Hui. Application and development trend of thermal desorption technology for contaminated soil [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44 (4): 144-148.
- [13] 古祺鹏, 杨洁, 刘亚男. 原位热脱附技术修复多环芳烃污染土壤的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39 (11): 99-101.
GU Qipeng, YANG Jie, LIU Yanan. Research progress of in-situ thermal desorption technology for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39 (11): 99-101.
- [14] 杨成良. 原位热脱附技术在有机磷农药污染场地修复中的应用及二次污染防治措施 [C] //中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集 (二), 2021: 365-370+375.
- [15] WANG C, ZHU L, ZHANG C. A new speciation scheme of soil polycyclic aromatic hydrocarbons for risk assessment [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (5): 1139-1149.
- [16] 吴启航, 麦碧娴, 杨清书, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药赋存状态 [J]. 中国环境科学, 2004 (1): 90-94.
WU Qihang, MAI Bixian, YANG Qingshu, et al. The distribution state of PAHs and organochlorine pesticides in sediments [J]. China Environmental Science, 2004 (1): 90-94.
- [17] 刘玉峰. 青岛某污染场地有机污染现状调查及修复技术筛选研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020: 28-37.
- [18] WANG A, LI S, TENG Y, et al. Adsorption and desorption characteristics of diphenylarsenicals in two contrasting soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25 (6): 1172-1179.
- [19] 杨坤, 李尤, 刘琼枝, 等. 多环芳烃 (PAHs) 在不同腐殖酸组分中的赋存特征和氧化降解效果研究 [J]. 环境科学学报, 2017, 37 (11): 4277-4286.
YANG Kun, LI You, LIU Qiongzi, et al. Distribution characteristics and degradation effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different humus acid components [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (11): 4277-4286.
- [20] 吴翔. 典型土壤有机污染物赋存形态及影响因素 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 43-48.
- [21] 李书鹏, 焦文涛, 李鸿炫, 等. 燃气热脱附技术修复有机污染场地研究与应用进展 [J]. 环境工程学报, 2019, 13 (9): 2037-2048.
LI Shupeng, JIAO Wentao, LI Hongxuan, et al. Research and application progress of gas thermal desorption technology for the remediation of organic contaminated sites [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13 (9): 2037-2048.
- [22] 王愚, 胡泽勇, 苟学义, 等. 藏北高原土壤热传导率参数化方案的优化和检验 [J]. 高原气象, 2013, 32 (3): 646-653.
WANG Yu, HU Zeyong, XUN Xueyi, et al. Optimization and test of soil thermal conductivity parameterization schemes in Northern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32 (3): 646-653.
- [23] 杨佳希, 李振朝, 韦志刚, 等. 稀疏植被地表分光辐射及其反照率特征研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38 (3): 852-859.
YANG Jiayi, LI Zhenchao, WEI Zhigang, et al. Characteristics of solar spectral radiation and corresponding albedo in sparse vegetation region [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38 (3): 852-859.
- [24] 籍龙杰, 刘鹏, 韦云霄, 等. 单根加热管原位加热土壤过程中温度变化规律 [J]. 环境工程, 2019, 37 (2): 165-169.
JI Longjie, LIU Peng, WEI Yunxiao, et al. Research on temperature variation in soil during in-suit heating with single heating tube [J]. Environmental Engineering, 2019, 37 (2): 165-169.
- [25] 赵中华. 含氯有机污染土壤热脱附及联合处置研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 93-94.
- [26] 杨金杯, 许秋菊, 俞舒月, 等. 2, 5-二氯氟苯密度、黏度以及饱和蒸汽压测定与关联 [J]. 化学工程, 2020, 48 (7): 53-58.

- YANG Jinbei, XU Qiuju, YU Shuyue, et al. Measurement and correlation for density, viscosity and saturated vapor pressure of 2, 5-dichlorofluorobenzene [J]. Chemical Engineering, 2020, 48 (7): 53-58.
- [27] 宋斌. 酚类化合物水溶性及正辛醇/水分配系数的测定与研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011: 33-42.
- [28] HERON G, ZUTPHEN M V, CHRISTENSEN T H, et al. Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: A laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low-permeable soil contaminated with trichloroethylene [J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32 (10): 1474-1481.
- [29] 吴敏艳, 周瑛, 王文洁, 等. 生物柴油吸收 VOCs 的特性及热力学 [J]. 中国环境科学, 2021, 41 (7): 3153-3160.
- WU Minyan, ZHOU Ying, WANG Wenjie, et al. Absorption and thermodynamics of VOCs by biodiesel [J]. China Environmental Science, 2021, 41 (7): 3153-3160.
- [30] 孟宪荣, 葛松, 许伟, 等. 原位电阻热脱附修复氯代烃污染土壤 [J]. 环境工程学报, 2021, 15 (2): 669-676.
- MENG Xianrong, GE Song, XU Wei, et al. Remediation of chlorohydrocarbon contaminated soil by insitu electrical resistance heating [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15 (2): 669-676.
- [31] 祁志福. 多氯联苯污染土壤热脱附过程关键影响因素的实验研究及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 42-58.
- [32] GAO J, HEDMAN C, LIU C, et al. Transformation of ulfamethazine by anganese xide in queous olution [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (5): 2642-2651.
- [33] 付保荣, 刘述凤, 鄢雨朦, 等. 石油污染土壤微生物修复研究进展 [J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41 (3): 54-60.
- FU Baorong, LIU Shufeng, QIE Yumeng, et al. Advances in microbial remediation of petroleum contaminated soil [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41 (3): 54-60.
- [34] 戴梦嘉. 重质石油污染土壤的熟石灰强化热解机理研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020: 5-8.
- [35] 林存旺. 水解及臭氧化技术降解有机磷农药的效能研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018: 2-8.