

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究

潘玉英¹, 贾永刚^{1,2*}, 郭磊¹, 李进军¹, 单红仙^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 在海滨潮间带采集细砂, 通过室内柴油泄漏模拟试验, 利用自制电阻率监测系统对轻非水相液体在砂土-地下水系统垂向渗透过程进行电阻率变化动态监测; 通过配制不同含油率砂土测定其静态电阻率变化规律, 探讨电阻率变化的影响因素; 最后取样分析测定污染含水介质稳定后含水率及含油率, 对监测结果有效性进行了验证; 并利用显微成像法对污染砂土进行了微观形态分析. 结果表明, 柴油污染砂土微观形态上胶结现象明显; 柴油渗透海滨砂土过程电阻率大小同含水饱和度, 比电阻率和含油饱和度之间存在良好的相关性, 均可用 Archie 公式拟合, n 值分别为 2.36 和 0.15; 通过电阻率测定可以有效估算柴油透镜体厚度; 电阻率随深度的变化可以反映含油率和含水率的垂向分布. 本研究为轻质油品储罐或者海上油品运输过程泄露造成的海滨砂土地下污染扩散过程监测及机制研究提供了一种有效的方法, 也可对其他典型石油泄漏污染场地的电阻率法探测或监测提供参考.

关键词: 电阻率探杆; 非水相液体; 垂向迁移; 海滨砂土; 柴油

中图分类号: X83 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1744-09

LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method

PAN Yu-ying¹, JIA Yong-gang^{1,2}, GUO Lei¹, LI Jin-jun¹, SHAN Hong-xian^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Laboratory model tests of diesel spillage were performed on the beach sand samples collected from intertidal zone in Qingdao. The dynamic resistivity changes during the diesel infiltration in sand-water system were monitored by the self-made Resistivity Monitoring System. The impact factors on resistivity were discussed by preparing sand samples with different oil contents. The water content and oil content were measured by sampling after the simulation experiment to verify the monitoring data. The micro-structure of contaminated sand was tested by image technique using microscope. It shows that cementation is evident from the micro-structure of contaminated sand. The resistivity closely relates with the water saturation, and the specific resistivity with oil saturation, both fitted with Archie equation, the n values are 2.36 and 0.15 separately. Through electrical resistivity measurements, the thickness of diesel lens was effectively estimated. The vertical distribution of oil content and water content could be reflected by resistivity changes with depths. It provides an effective way for in-situ monitoring of light non-aqueous phase liquid (LNAPL) contaminating processes and mechanism research in beach sand after underground tank leakage or oil spillage during transport by seas. It can also supply reference to contamination detection or monitoring of typical petroleum contaminated sites using resistivity method.

Key words: resistivity rod; light non-aqueous phase liquid (LNAPL); vertical migration; beach sand; diesel

加油站、石化厂区、码头油品输运站的油类储罐经常发生泄漏事故, 同时海上油品运输及采油平台也经常发生溢油事件, 油类和其他有害物质进入地下含水介质中, 易对土体和地下水造成严重污染^[1~3]. 我国处在经济快速发展时期, 石油类物质作为重要的燃料和化工原料得到广泛应用, 因此不可避免地会由于储罐、输油管线等的泄露而对地下介质造成污染. 石油类物质密度比水小, 且难溶于水, 属于轻非水相液体 (light non-aqueous phase liquid, LNAPL). 由于其与水不混溶, 进入地下含水介质后, 易和地下水或空气形成多相流体系^[4~6], 其迁移特

征比较复杂, 不同于一般的溶质迁移, 研究起来比较困难, 目前国内对于轻油污染场地的评价与治理工作刚刚起步.

电法为集中地球物理探测提供了基础, 包括电阻率法、激发极化法、自然电位法、电磁诱导法和探地雷达等^[7]. 该类方法最初用来找矿, 目前很多技术已经被独立地或者联合应用于填埋垃圾和石油泄

收稿日期: 2011-08-22; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2008AA09Z109)

作者简介: 潘玉英 (1985 ~), 女, 博士, 主要研究方向为 LNAPL 地下污染机制, E-mail: pyyhj02bh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

漏的评价中^[8~14]. 电阻率法为应用最广泛的方法之一,有学者将其应用到 LNAPL 地下污染问题的探测和监测中,取得了一些成果. Gajdoš 等^[15]研究发现,当在砂土中加入油类污染物时,电阻率降低,当污染体积达到供试砂土体积 10% 后电阻率开始升高,当电阻率达到试验初始电阻率值时,油土混合物的电阻率快速升高. Sauck 等^[16]提出自然环境中的生物降解会引起土体电阻率特性的变化,随着时间的推移,电阻特性会转变为电导特性,因此不同时间段测得的电阻率结果可能会相反. Sauck^[17]通过对柴油污染场地多年的电阻率剖面观察,得出在渗透带的底部和含水层的上部存在一定范围的低阻异常区,这和通常认为的轻油污染地下介质高阻异常结论相悖,经验证认为是微生物降解作用,使得有机酸和碳酸盐被淋溶到该区所致. Delaney 等^[18]指出石油对地下介质的污染会产生高阻异常和低阻异常 2 种情况,通过对石油污染细粒冻土电阻率特性的研究发现,应用电阻率法对石油污染土体特性进行描绘是否成功仍取决于场地特征. Sentenac 等^[19]利用微电阻电极组合方式对模拟的无压含水层中柴油迁移进行了监测. 结果,利用微电阻电极组合的时域 ERT 成像技术,配合市售的商用仪器(电导率仪和溶解氧仪)和反演软件对于柴油(LNAPL)在无压含水砂层中非饱和带和饱和带中污染扩散的监测均很适用. 简单的流体特性测量,尤其是电导率 EC 和溶解氧 DO 能够方便地为推断得出的体电阻率空间和时间上的变化提供较真实的机制解释.

国内学者也开展了相关研究,但是起步较晚,集中在最近 3~6 a 内. 郭秀军等^[20]通过室内模拟土层污染和野外实地观察污染土层的方式研究了含油

污水污染不同饱和度土层的电剖面异常特征,在不饱和土层中污染区域表现为相对低阻异常区而在饱和土层中表现为相对高阻异常区. 白兰等^[21]室内测试了汽油污染黄土的电阻率,发现随污染土汽油含量增加,电阻率呈幂函数上升. 刘汉乐等^[22]通过室内试验利用三维电阻率成像法对柴油污染非饱和带过程进行了动态监测,结果表明由高密度电阻率成像法圈定的污染区域在范围与形状上都与实际的结果比较接近,并可通过三维电阻率相对值的时间变化明显的看出轻非水相液体的污染过程,验证了电阻率法探测地下 LNAPL 污染区的可行性.

综上,电阻率法是一项成熟的物探技术,目前已经开始应用于地下 LNAPL 环境污染问题的研究,大部分以室内试验为主,研究多基于特定场地环境,并且所得结论也不甚一致,柴油污染及电性反应机制尚不明确,国内对于纯油品泄露污染海滨细粒砂土研究还不多见. 由于 LNAPL 在初始渗漏过程中,垂向迁移占主要地位,因此利用本课题组开发研制的电阻率探杆自动监测系统,选用柴油作为轻油代表,采用海滨细粒砂土作为多孔介质,对柴油泄漏造成的地下污染扩散过程进行动态监测模拟和分析,目的在于探讨 LNAPL 污染砂质土体过程及电性反应机制,以期石油泄漏污染场地的电阻率法探测或监测提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验土样来源与制备

砂土取自青岛海滨细砂(地理位置:坐标 N36°05'29.95", E120°28'06.67"),风干,过 0.355 mm 筛,混合均匀. 风干砂土的基本物理指标见表 1.

表 1 供试砂土的基本物理指标
Table 1 Physical index of sand samples

粒径 ϕ 分布/%					比重	密度 ρ	含水率 ω	孔隙率 n	孔隙比 e	饱和含水率	饱和含油率
0.355 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.18 mm	0.18 ~ 0.125 mm	0.125 ~ 0.074 mm	<0.074 mm	G_s	$/g \cdot cm^{-3}$	$\%$	$\%$		$\%$	$\%$
4.6	21.1	66.1	6.8	1.4	2.33	1.4	0.16	40	0.66	28.5	37.9

1.2 试验仪器和试剂

仪器:柱筒状有机玻璃水槽(高 80 cm,直径 30 cm,侧壁开孔,孔径 1.5 cm,孔数 4 个,排水孔间距 15 cm)、桶状塑料水槽、分析天平(感量为 0.001 g)、铝盒、烘箱、体式显微镜(日本产 Nikon SMZ1500 型)、紫外分光光度计(日本岛津公司产 UV2550 型紫外可见分光光度计)、其他实验室常用玻璃仪器.

试剂: -10 号柴油、正己烷(天津市富宇精细化

工有限公司化学分析纯)

1.3 电阻率监测系统及 wenner 工作原理

本试验所采用的电阻率监测系统包括电阻率探杆、采集控制模块、远程传输模块以及上位机控制部分组成. 电阻率探杆是由 100 个绝缘中空尼龙模块插接而成,相邻 2 个尼龙模块之间嵌有外表面镀银的铜电极环. 探杆直径 3.6 cm,有效测试长度 100 cm,全长 112 cm,电极环间距 1 cm,数量为 100 个.

电极环通过导线与采集控制模块相连. 电阻率探杆作为现场数据采集传感器, 采用 Wenner 工作原理, 其工作过程受采集控制模块控制. 采集控制模块包括电源、中央控制单元、数据采集和存储、电极自动转换、实时时钟共 5 个模块. 采集控制模块根据预设工作流程控制电阻率探杆工作, 通过远程传输模块与上位机控制部分进行无线数据通讯, 实时同步上传采集数据, 并接受上位机控制命令. 远程传输模块以 GPRS 模块为核心, 负责原位装置与上位机的通讯. 上位机控制部分包括远程服务器和客户端软件两部分. 远程服务器有公网固定 IP, 负责数据在 Internet 的传输中转; 客户端软件处理接收到的实时采集数据, 同时也可以远程控制系统下位机的工作状态.

电阻率探杆采用 Wenner 法探测原理, 每 4 个电极为一组, AB 为供电电极, MN 为测量电极, 从探杆底部电极开始测量, 首次选用最底部的 4 个电极, 每次上移一个电极, 直到顶部作为一组测试数据, 由此完成 1 轮数据的采集, 然后回到底部重新测试, 不断往复直到结束, 可实现垂直空间上不同界面处电阻率的变化过程监测. 通过采集控制软件设置采集参数, 并启动 GPRS 进行远程信号传输, 可实现信号采集控制和接收双向传输过程, 接收到的电信号经过软件处理后通过用户友好界面以文本格式显示出电阻率数值, 供用户分析使用. 监测装置系统示意图 1, 电阻率探杆 Wenner 法探测原理见图 2.

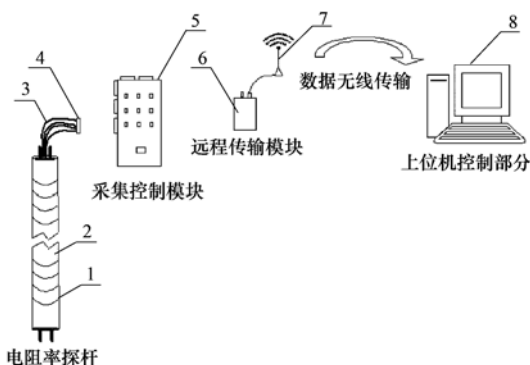
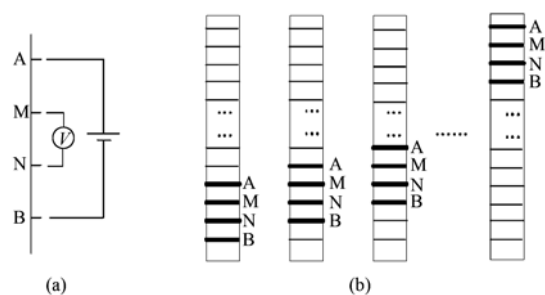


图 1 监测系统示意

Fig. 1 Sketch of the monitoring system

1.4 油污染土含水率和含油率的测定

烘干过程中油份的挥发会对土体含水量测定造成误差, 因此引入油品烘干损失率来校正传统的烘干法测量含水率^[24]; 含油率测定采用紫外分光光度法^[25].



(a) Wenner 测试方式; (b) 电极转换示意

图 2 探杆 Wenner 方式探测原理示意^[23]

Fig. 2 Sounding principle of resistivity rod

2 模拟监测过程

2.1 试验装置的组装与固定

(1) 砂槽的填装与探杆固定

将电阻率探杆置于柱筒状水槽中间, 扶正, 保持探杆与水槽垂直. 将筛分后的细砂混匀后均匀铺洒在水槽中, 分层填装, 每 10 cm 厚度压实一次, 以保证砂土的各向均质性, 砂层厚度 63 cm, 淹没电极数 55 个. 填砂过程中注意保持探杆垂直, 装砂完毕后轻轻晃动探杆, 检查其是否充分固定, 试验装置示意图 3.

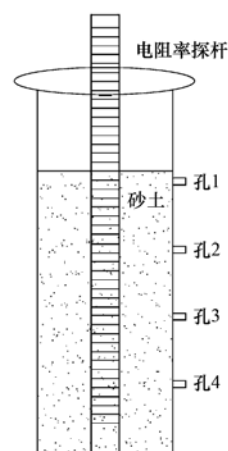


图 3 试验装置示意

Fig. 3 Sketch of test device

(2) 远程传输模块与采集控制模块的组装

将 GPRS 模块和无线信号接收天线按照插孔所示连接; 将连好的远程传输模块和探杆分别通过接口连接到采集控制电路板上; 每一部分均通过电源适配器和室内总电相连, 实现整个探测系统的供电.

(3) 上位机控制部分的开启

开启电脑设备, 打开客户端软件, 设定采集参数, 本次试验每轮数据采集设置 70 个工作点位, 采集时间间隔为 3 min.

2.2 非饱和含水层的形成与各层含水率的测定

(1) 从砂土表面漫灌自来水, 同时开启采集控制电路板, 并点击客户端软件的开始采集按钮, 开始采集纯水渗透砂土过程的电阻率变化. 待自来水渗透至砂槽底部时停止加水, 并打开底部排水孔, 进行重力排水, 稳定 24 h, 以形成稳定的含水砂层, 整个砂柱分为非饱和带、毛细带和饱和带, 底部排水孔以下为饱和带. 稳定过程中采集系统保持开启状态, 进行数据的连续采集.

(2) 检查最近时间段采集的电阻率数据是否稳定, 以判定稳定含水层是否形成, 若不同时间段采集数据变化较大, 则需延长稳定时间.

(3) 从稳定后的土柱中取砂样, 分别测不同深度的含水率, 取样点为砂土表层、孔 2、孔 3、孔 4 位置, 每个位置取 2 个平行样测平均值.

2.3 柴油入渗过程

本试验采用分次加油的方式进行.

(1) 首先从稳定后的含水层表面漫灌柴油, 一次性加入约 3 000 mL 柴油, 让其在重力条件下自由入渗, 并打开水槽底部排水孔, 保证油入侵后驱替出来的水排出. 加油的同时打开监测系统, 并记录采集时间, 监测其入渗过程电阻率变化.

(2) 为模拟柴油的不连续泄露过程, 第一次加油 10 h 后, 从表面再加入约 1 000 mL 柴油, 同时打开监测系统, 并记录数据采集时间. 第二次加油稳定 13 h 后, 封住底部排水孔, 继续从表面加入约 1 000 mL 柴油, 同时打开监测系统, 并记录数据采集时间.

2.4 加水淋滤过程与稳定后分层取样分析

(1) 待第 3 次加油 10 h 后, 打开水槽底部排水孔, 加过量水, 模拟纯水对油污染土层的淋滤过程, 打开监测系统, 监测其电阻率变化, 记录采集时间.

(2) 待监测数据稳定后, 沿着靠近探杆位置取不同污染程度的砂土用体式显微镜拍照, 做污染土微观形态分析.

(3) 沿着靠近探杆位置分层取土样, 每隔 5 cm 深度取样一次, 共 11 个样. 每个深度取 2 份样, 分别置于小烧杯中和自封袋中, 用来测量污染土的含油率和含水率.

2.5 非饱和砂土不同含油率电阻率变化的静态试验

为验证电阻率探杆自动监测系统测得柴油污染砂土电阻率的变化过程, 据 2.2 节测得的含水率, 取非饱和砂土含水率为 13.3%, 分别配置含油率为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 的污染砂土, 用

探杆测定其电阻率变化.

3 结果与讨论

3.1 含油污染砂土电阻率影响因素

影响土体电阻率的因素很多, 包括固体组分的性质和排列方式、含水率、孔隙流体组成和温度等^[26,27]. 本试验所用砂土为统一筛分所得, 并混合均匀, 砂土主要矿物成分为石英、长石、云母、橄榄石等, 均为高阻矿物, 因而固体颗粒对研究土体的电阻率影响可以忽略; 试验过程室内温度变化不大, 温度为 25℃; 孔隙流体由实验室内自来水和市售 -10 号柴油组成, 在这里讨论含水率和含油率对污染土体电阻率变化的影响.

3.1.1 不同含水率砂土电阻率变化

图 4 为土柱含水稳定后电阻率和含水率分布特征. 从中可以得出含水率分布随深度的增加而增大, 相应电阻率随深度下降, 电阻率和含水饱和度存在很好的反关系, 分层明显. 在工程实践中, 土体根据水饱和度分为 3 组: 饱和度 < 50% 称为“微湿”, 饱和度在 50% 到 80% 之间称为“较湿”, 饱和度 > 80% 称为“饱和”. 根据含水率的测定结果及试验过程中肉眼观察分析, 将稳定后的土层分为非饱和土层 (0 ~ 19 cm)、毛细层 (19 ~ 34 cm) 和饱和层 (34 ~ 51.5 cm). 在非饱和土层中, 电阻率随深度迅速降低, 下降率达 900%, 由此可见砂土本身导电性很差^[26]. 而在饱和土层中, 电阻率随深度降低幅度很小, 最大下降率在 71.4%.

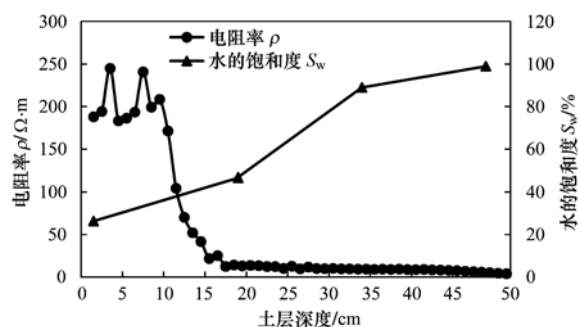


图 4 未污染含水砂土电阻率分布特征

Fig. 4 Resistivity characterization of uncontaminated sand aquifer

1942 年, Archie^[28] 通过试验得到了土体的电性模型, 历来被称为经典. 经过不断的发展与完善, 模型演化为如下形式:

$$\rho = \rho_w a \phi^{-m} S^{-n}$$

式中, ρ 为土的电阻率; ρ_w 为流体 (水) 的电阻率; ϕ 为孔隙率; S 为流体饱和度; a 为地层因子; m 和 n 分别为孔隙度指数和饱和度指数.

经测定,实验室内自来水的电阻率为 $25 \Omega \cdot \text{m}$, 根据试验控制条件,讨论土体电阻率和流体饱和度的关系方程. 通过图 5 可以看出,水的饱和度和电阻率关系可用 Archie 公式很好地拟合,相关系数为 0.966,拟合公式为 $\rho = 6.282 S^{-2.36}$.

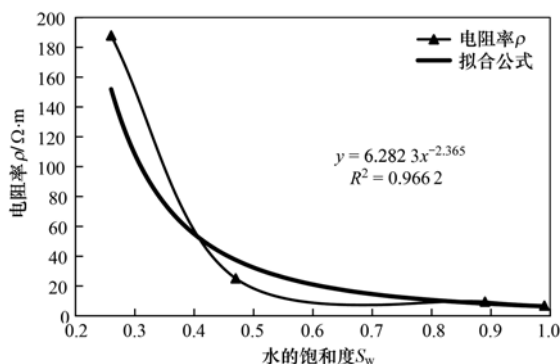


图 5 不同含水饱和度砂土电阻率变化

Fig. 5 Resistivity changes of sand with different water saturation

3.1.2 非饱和砂土不同含油率电阻率变化关系

为更好地表现电阻率随含油饱和度的变化趋势,定义不同含油率条件下电阻率值和电阻率初始值的比值为比电阻率:

$$P = \frac{\rho_n}{\rho_0}$$

式中, P 为比电阻率, ρ_n 为含油率为 n 时的电阻率, ρ_0 为初始电阻率.

本试验所用非饱和砂土饱和度为 50.9%,属于“较湿”范围,初始电阻率为 $8.909 \Omega \cdot \text{m}$. 图 6 为非饱和土不同含油率电阻率变化. 由图可得,随着含油量的增加,比电阻率 $P < 1$,电阻率总体呈下降趋势,但下降幅度不大,分析原因可能是由于含水率较大时电流受孔隙水导电的影响较大所致. 由图 6 还可以看出,曲线局部出现波动,随着油含量的增加电阻率先升高后下降然后逐渐趋于平缓,临界含油量分别为 5% 和 10%. 试验用土为海滨砂,当加入一定配比量的自来水后,其中所含的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等无机盐离子会溶解到土体孔隙水中. 当油污污染物进入孔隙空间后,污染物黏附在固体颗粒表面,并将土体中的水分推挤到孔隙的中间,引起了以离子态运移的自由离子的密度增加,因此增加了土体的导电性. 如果油污污染物的体积继续增加,则污染物阻断了离子运移路径,因此土体电导率降低,电阻率升高. 当含油率达到 10% 时,电阻率又出现了迅速的降低,这和 Gajdoš 等^[15]得出的当污染物积达到 10% 的启动体积后电阻率开始升高的结论

不一致,推测可能由于大量柴油的加入使得土粒表面吸附的无机离子进一步解析所致.

由于本试验步骤所用砂土含水率一定,因此研究油饱和度和电阻率关系方程. 由图 7 拟合公式可见,油的饱和度和比电阻率关系也可用 Archie 公式很好地拟合,相关系数为 0.859,拟合公式为 $P = 0.594 S^{-0.15}$.

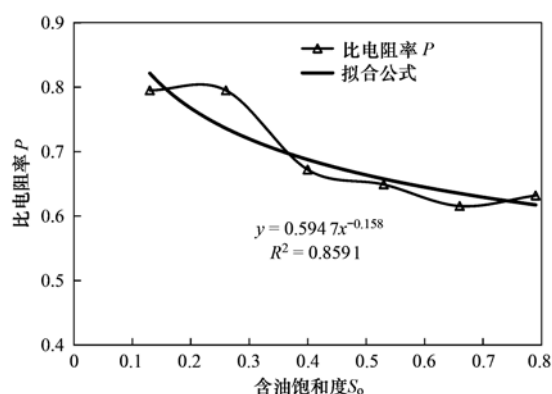


图 6 非饱和砂土不同含油饱和度的电阻率变化

Fig. 6 Resistivity changes of unsaturated sand with different oil saturation

3.2 柴油渗透过程整体电阻率空间变化规律

图 7 为柴油渗透过程不同时段电阻率变化. 由图可见,当柴油渗透进入砂土体后上层土柱电阻率迅速升高,由于砂土渗透性较好,且柴油黏滞度低,当第一次加入柴油后,柴油在 5 min 内迅速完成重力渗透,锋面下移,渗透深度达 12.2 cm. 2 h 后柴油渗透锋面下移至 17.9 cm, 8 h 后下移至 21.8 cm. 由于上层土体为非饱和带,经 24 h 排水稳定后所含水基本为结合水,含水率较小,柴油泄漏后迅速完成重力重新分布,故 2 h 后和 8 h 后上层土体电阻率基本不变,仅少量柴油继续下渗,冲破毛细压力的阻滞作用,造成渗透锋面的下移,不过下移速率较慢,仅 $0.65 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. 24 h 后由于有新的柴油泄漏,因此上层电阻率继续整体增大,而渗透锋面下移至 28 cm,

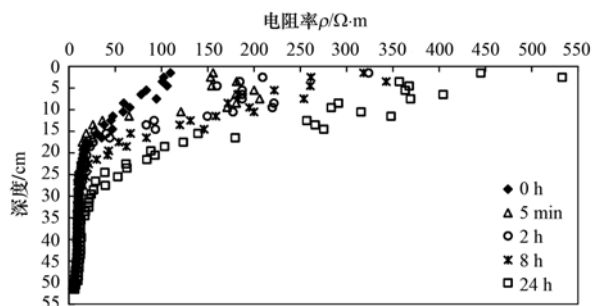


图 7 柴油渗透过程电阻率变化

Fig. 7 Resistivity changes during diesel infiltration

由此可见在排水良好的地质条件下,油污污染深度受油泄漏量的影响很大,而且随着水量的排泄,会将上层的石油污染物带到土体的底层。

从图 7 中还可以看出,毛细带和饱水带在柴油入渗过程电阻率基本保持不变,原因是柴油密度比水小,不容易冲破水的浮力进入底层,但是随着泄漏量的增加,一开始的水湿润性土体会由于油的饱和而转变为油湿润性,从而完成油水驱替,驱替出的水从土柱底部排水孔排出,造成毛细带下移,柴油继续污染下层土体。由于不同含水率条件下,柴油入渗过程有所差异,因此有必要分土层研究其入渗过程。

图 8 为土柱淋滤后电阻率变化。从中可得,油污污染土柱加水淋滤后非饱和土层电阻率有所降低,但对比土柱电阻率背景值仍为升高,得出降水淋滤会对污染土层起到冲洗作用,但由于油水不混溶,并且土体本身会截留一部分油成为残留态,冲洗作用不能对土层起到完全的净化作用,仍有部分的油残留造成土体污染。

淋滤后(34 h),电阻率曲线出现了一个“凸”型的中间带,分析认为由于水的冲洗导致上层砂土含水率降低,土体孔隙被水取代后柴油被迫下移,而由于底层饱和含水层的存在,柴油漂浮在地下水面上形成透镜体状浮油带,因此造成中间层电阻率值较上层和底层高。

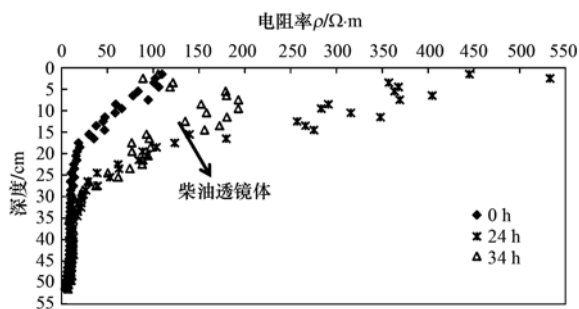


图 8 淋滤后土层电阻率变化

Fig. 8 Resistivity changes of sand with depths after precipitation

3.3 不同土层柴油渗透过程中电阻率变化

由于整个土柱含水率不均匀,呈现出垂向分层的特点,而且对于不同含水条件土层下柴油渗透过程有区别,故分别研究各层不同深度处柴油入渗过程的电阻率变化响应。

3.3.1 非饱和土层

图 9 为非饱和土层电阻率变化。从非饱和土层在柴油入渗过程不同深度电阻率响应曲线可以看出,越靠近表层(3.5 cm 和 7.5 cm),电阻率变化越剧烈,而中间层变化相对缓和(11.5 cm 和 15.5

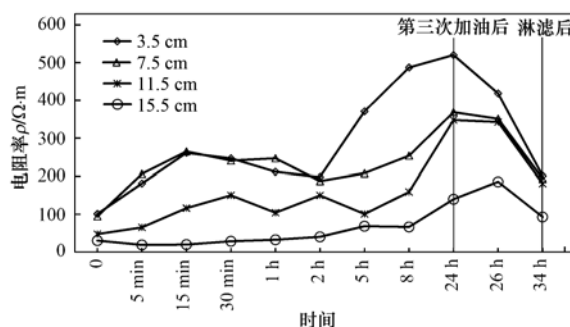


图 9 非饱和土层不同深度电阻率变化

Fig. 9 Resistivity changes of unsaturated sand with depth

cm),总体趋势为随着柴油的垂向扩散,土层电阻率升高。因为表层(3.5 cm)砂土含水率较低,土体系统为土-水-气三相系统,当油相入侵后,土体孔隙被非水相油充填,使得孔隙水中电荷分布变得不均匀,从而使得电阻率迅速增大,而随着柴油在深度方向上的重力扩散,上层土体电阻率开始有所降低,但相比初始值仍为升高,当上层土体完全被油浸润后,砂粒表面的结合水被油驱替后下渗,电阻率又出现了一定程度的升高,当第 2 次和第 3 次加油后,表层电阻率再次出现高的峰值,而淋滤后电阻率迅速下降,说明淋滤水对油污污染砂土起到了一定的冲洗净化作用。7.5 cm 深度处土层电阻率变化和 3.5 cm 处趋势相似,为先增大后减小,再增大,淋滤后电阻率降到最低值,但比初始电阻率值仍略有升高。由此可以看出,由于柴油黏滞性比水大,且不导电,在含水率较低的土层中其电阻率变化趋势会出现较多波动。

在 11.5 cm 深度处,由于土体的含水率相对较高,水分在土层中存在一定的水力连通性,因此随着柴油的入渗变化趋势较缓,先是缓慢增加,而当土体孔隙中的水分被驱替下渗后,电阻率值出现波动,说明该位置处已经充填油类,孔隙流体为油水的混合物,油类相对于水来说为绝缘体,因此对电流在土体中的传导起到了一定的阻滞作用,电阻率变化变的不稳定,但是随着时间的推移,该位置还是出现了较大的高阻异常。

由 15.5 cm 深度处电阻率变化曲线可得,由于柴油泄漏量的限制,一开始并没有扩散到该深度处,上部土层柴油入渗后对土体孔隙水分产生驱替,使得该处含水率增大,因此电阻率先降低,而后随着驱替水的不断排出,柴油扩散到该层后电阻率值出现一定幅度的升高,当第 2 次和第 3 次加油后,该处电阻率迅速升高,说明柴油渗透锋面已经到达。

根据不同深度处电阻率峰值的出现时间可以看

出,砂土渗透性较好,含水率越低柴油的相对渗透率越高,渗透越快,土层出现峰值时间间隔越短;而随着含水率的升高,土层间电阻率峰值出现时间出现了较长时间的延迟,如第3次加油后,11.5 cm和15.5 cm深度处电阻率峰值出现时间延后了近2 h.从4个不同深度的电阻率变化曲线得出,降雨淋滤对油污污染砂土的平均净化效率为53.3%.

3.3.2 毛细层

图10为毛细土层电阻率变化.对于毛细层,在柴油入渗前期电阻率基本不发生变化,是由于柴油还没有渗透到该层,1 h后深度21.5 cm处电阻率开始出现升高,但变化率仅为7.6%,经分析认为该层土含水率为接近饱和,土体水的毛细压力变大,且柴油密度比水小,因此柴油相对渗透率变小,渗透速度减慢.在3次加油及淋滤后,各深度处电阻率均出现先升高后减小的趋势,且随着深度的增加,电阻率值逐渐降低.相对于非饱和土层,该层电阻率变化曲线形式相对单一,规律更加明显.

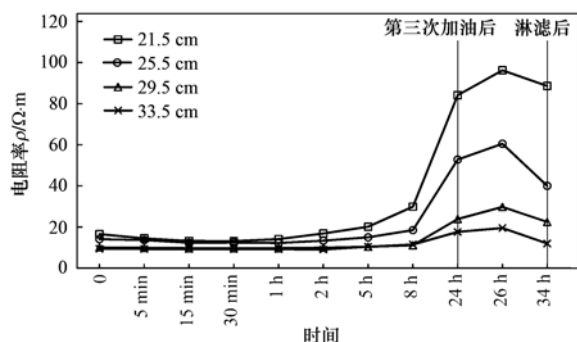


图10 毛细层不同深度电阻率变化曲线

Fig. 10 Resistivity changes of capillary zone with depth

3.3.3 饱和土层

图11为饱和土层电阻率变化.饱和土层电阻率变化幅度最小,主要原因是该层土体孔隙被水饱和,因此饱和土层电流主要受孔隙水的影响,前期电阻率基本不变;柴油和水不混溶,且柴油比重较小,易浮在地下水面上,形成浮油带.待3次加油和淋滤后,40.5~44.5 cm深度处电阻率先升高后降低,但降低幅度很小;而48.5~51.5 cm电阻率在第3次加油后先升高,淋滤后电阻率仍有小幅升高.分析原因是由于48.5 cm深度位于水槽底部排水孔以下,土层一直处于饱和状态,淋滤后柴油部分溶解到水中,造成电阻率值出现升高,但幅度很小,可见柴油溶解性很低.

综合各土层电阻率变化趋势,还发现每一土层不同深度电阻率变化规律出现分层,非饱和土层出

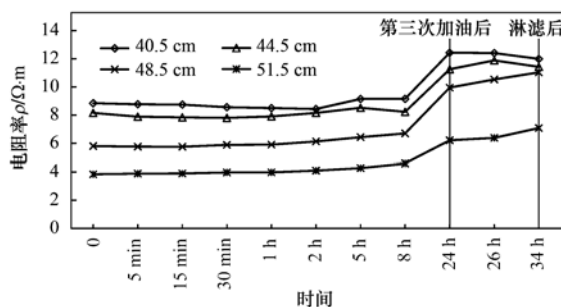


图11 饱和土层不同深度电阻率变化曲线

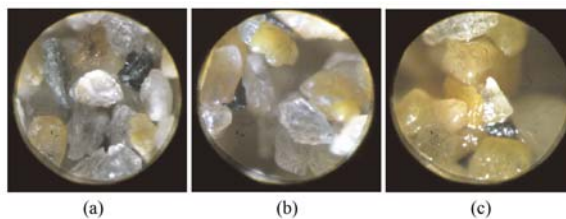
Fig. 11 Resistivity changes of saturated sand with depth

现在11.5 cm,毛细层为29.5 cm,饱和层为48.5 cm.据分析以及试验观察,不同含水层内部出现电阻率趋势差异的原因是土柱加水稳定以及多次加油造成的冲刷作用使砂土颗粒出现了细微的分层现象,较细颗粒在流体的带动下分配到底层,而粗颗粒相应的留在了上层,但总体差异不大.

3.4 不同污染程度砂土微观形态分析

为了更好地理解柴油污染砂土的机制,在试验结束后选取不同污染程度的砂土,利用体式显微镜对土样进行显微拍照,放大倍数为160倍,见图12.

由图12可见砂土经柴油污染后,油品包裹砂土颗粒,在砂土颗粒表面形成一层油膜,使流砂呈胶黏状态,污染越严重,油品和砂土颗粒之间的接触面增加,砂粒之间胶结越明显.砂粒润湿性发生改变,柴油的强疏水性造成了多孔介质的“莲花效应”,影响了土体水分的连通性,从而改变了土体电阻率.



(a) 未污染砂土; (b) 中度污染砂土; (c) 重度污染砂土

图12 不同污染程度砂土微观结构照片(160×)

Fig. 12 Micro-structure pictures of lightly contaminated, medium contaminated, heavily contaminated sand samples (160 ×)

3.5 监测数据有效性验证

图13为淋滤后稳定59 h后取样分析结果.从中可见,试验过程结束后,整个土柱随深度含水率逐渐升高,当含水率<10%时,含油率随深度不断减小,电阻率出现负值异常,但总趋势是随着深度不断减小,此时含水率范围为2.2%~5.8%,含油率范围为1.6%~2.8%.分析出现负异常的原因是,土柱稳定后上层含水率和含油率均较低,由于柴油为

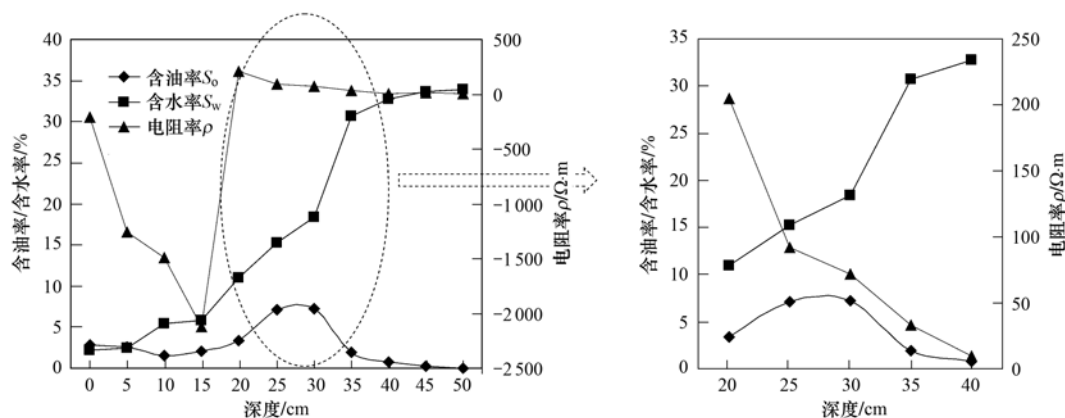


图 13 不同深度含油率/含水率/电阻率变化曲线

Fig. 13 Oil content/water content/resistivity changes with different depths

绝缘体,其分散于含水介质中,阻断了土体孔隙水中离子的连通性,电流不容易通过污染介质,显示为负电阻异常。当含水率为 10.9% ~ 18.4% 时,即 20 ~ 30 cm 深度处,出现了一个高含油率带,为透镜体状浮油带,此带含油率最高,含水率为较湿水平。选取该浮油带各参数数据重新作图,可见该区电阻率变化和含水率存在很好的反比关系,随着含水率的增加,电阻率减小,受含油率影响较小,但通过电阻率突变点可以确定该浮油带的上界,而浮油带下界为地下水位位置处,即电阻率曲线开始平滑处,本试验浮油带厚度为 15 cm。在 30 ~ 50 cm 深度处,含水率为 30.6% ~ 33.9%,为饱和含水带,含油率极低,为 0.06% ~ 0.81%,随着深度的增加,含油率降低,电阻率降低,但电阻率比初始值有所升高,说明有少量油溶解到土体饱和和水中。由此可见,电阻率监测数据与含油率和含水率有很好的相关关系,可以解释污染物迁移过程。

3.6 建议

本研究利用自制电阻率监测系统可以监测柴油入渗锋面随时间的推进过程及估算浮油带厚度,为储罐泄露或海上溢油后由于风力及波浪作用输送至海滩后对海滨砂土污染程度的评价及修复提供基础资料,亦可以为其他典型石油泄漏污染场地的电阻率法探测或监测提供方法参考。由于 LNAPL 污染土体电阻率变化因含水率、油品或土体类型不同而不同,所以利用电阻率法监测或探测地下非水相液体污染时需要先测定特定地区的电阻率本底值或者做室内电性模拟分析。

4 结论

(1) 非饱和和海滨砂土电阻率随含水饱和度,以

及比电阻率和含油饱和度的变化均可用 Archie 公式拟合, n 值分别为 2.36 和 0.15;海滨砂土含水率为 50.9% 时,电阻率随含油率增加总体呈下降趋势,并以含油率 5% 为分界点,先增大后减小,推测和海滨砂土中含有较多无机离子有关。

(2) 流动性好的轻质油品泄漏后前期渗透速度较快,在砂土中甚至几分钟内即完全渗入地下,以重力渗透过程为主,油水驱替过程为辅;之后由于土体的孔隙水压力,渗透变慢,主要为油水驱替过程。

(3) 砂土不同含水饱和度土层中柴油入渗造成的电阻率变化趋势不同:非饱和土层电阻率出现先增大后减小再增大的过程,波动较大,多次加油以及淋滤后电阻率先增加后降低;毛细层电阻率变化相对较缓,前期不变,渗透 1 h 后开始出现升高,多次加油后电阻率先增加后降低;饱和土层电阻率基本不发生变化,随着时间的推移会略有升高,但升高幅度很小。

(4) 不同污染程度砂土细微结构有所差异,经柴油污染后,在砂土颗粒表面形成一层油膜,使流砂呈现胶黏状态,污染越严重,砂粒之间胶结越明显。

(5) 含水率 < 5% 时,柴油污染砂土易出现负电阻异常,造成数据解译困难,但趋势可辨。随着污染过程的稳定,在非饱和区若含水率 < 5%,含油率随深度减小,电阻率减小;含水率为较湿水平,即毛细区,出现高含油率浮油带,通过电阻率变化趋势可以估算浮油带厚度;饱和水带含油率极低,随着时间的推移,仅少量油溶解,造成小幅的电阻率升高。

参考文献:

- [1] 吴俊文,郑西来,李玲玲,等. 沙土对可溶性油的吸附作用及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 2019-2023.

- [2] 王志强, 吴强, 邹祖光, 等. 地下水石油污染曝气治理技术研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 754-760.
- [3] 陈虹, 陈硕, 全燮, 等. 土壤-水体系中固/液比对溶解性石油烃吸附的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1295-1299.
- [4] 时新玲, 张富仓, 王国栋, 等. 非水相污染物在黄土性土壤中的入渗试验研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, **23**(4): 49-53.
- [5] 李永涛, 王文科, 王丽, 等. 非饱和带轻非水相液体污染研究进展 [J]. 地球科学与环境学报, 2007, **29**(3): 326-330.
- [6] 李永涛, 王文科, 王丽, 等. 轻非水相液体在地下多相渗流的 K-S-P 关系研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, **27**(6): 117-119.
- [7] Keller G V. Engineering applications of electrical geophysical methods [A]. In: Engineering Foundation (U. S.). Proceedings of conference on subsurface explorations for underground excavation and heavy construction [C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1974. 11-16.
- [8] Greenhouse J P, Slaine D D. Geophysical modelling and mapping of contaminated groundwater around three waste disposal sites in southern Ontario, Canada [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, **23**(3): 372-384.
- [9] Olhoeft G R. Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetration radar and complex resistivity [A]. In: Barbara J G. Proceedings of the NWWA conference on petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water [C]. Ann Arbor: Water Well Journal Publication Company, 1986. 12-14.
- [10] Daniels J J, Roberts R, Vendl M. Site studies of ground penetrating radar for monitoring petroleum product contaminants [A]. In: Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS). Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP 1992) [C]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1992. 597-609.
- [11] Benson A K, Payne K L, Stubben M A. Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods: a case study [J]. Geophysics, 1997, **62**(1): 80-86.
- [12] Meju M A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, **44**(2-3): 115-150.
- [13] Aristodemou E, Thomas-Betts A. DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, **44**(2-3): 275-302.
- [14] Ogilvy R, Meldrum P, Chambers J, *et al.* The use of 3D electrical resistivity tomography to characterise waste and leachate distribution within a closed landfill, Thriplow, UK [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2002, **7**(1): 11-18.
- [15] Gajdoš V, Král V. Influence of hydrocarbon pollution to soil conductivity [A]. In: Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS). Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP 1995) [C]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1995. 785-789.
- [16] Sauck W A, Atekwana E A, Nash M S. High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 1998, **2**(3): 203-212.
- [17] Sauck W A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, **44**(2-3): 151-165.
- [18] Delaney A J, Peapples P R, Arcone S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, **32**(2-3): 107-119.
- [19] Sentenac P, Montinaro A, Kulesa B. Diesel transport monitoring in simulated unconfined aquifers using miniature resistivity arrays [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **61**(1): 107-114.
- [20] 郭秀军, 武瑞锁, 贾永刚, 等. 不同土壤中含油污水污染区的电性变化研究及污染区探测 [J]. 地球物理学进展, 2005, **20**(2): 402-406.
- [21] 白兰, 周仲华, 张虎元, 等. 污染土的电阻率特征分析 [J]. 环境工程, 2008, **26**(2): 66-70.
- [22] 刘汉乐, 周启友, 吴华桥. 基于高密度电阻率成像法的轻非水相液体饱和度的确定 [J]. 水利学报, 2008, **39**(2): 189-195.
- [23] 夏欣. 基于电阻率测量的海床蚀积过程原位监测技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 48-49.
- [24] 梁春, 郑西来, 童玲, 等. 石油污染多孔介质含水量测定方法 [P]. 中国专利: 101936860A, 2011-01.
- [25] GB 17378.5-2007, 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析 [S].
- [26] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, *et al.* Electrical resistivity survey in soil science: a review [J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(2): 173-193.
- [27] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 83-87.
- [28] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of American Institute of Mining Engineers, 1942, **146**: 54-62.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	 ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	 CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	 SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[<i>a</i>]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	 GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	 LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	 QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人