

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究

郭磊¹, 贾永刚^{1,2*}, 付腾飞¹, 刘晓磊¹, 赵战坤¹

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境岩土工程研究所, 青岛 266100)

摘要: 地下污水管线的泄漏将会对土壤、地下水环境产生严重的影响. 本研究建立一套基于高密度电阻率测量的地下污水管线泄漏原位自动监测装置, 通过室内模拟实验, 验证该装置在不同地下水水位条件下对地下污水管线泄漏进行实时监测的可行性. 结果表明, 当泄漏管线位于包气带中时, 能够迅速监测到管线发生的小流量泄漏; 当管线位于地下水水位附近, 也能迅速监测到管线发生的小流量泄漏, 而且通过管线以上土层电阻率的梯度变化, 还可推测污染物泄漏的程度; 当管线位于地下水水位以下时, 由于污染物在地下水中迅速的混合并扩散, 只有当泄漏达到一定浓度, 使电阻率产生能够观测到的变化, 才能监测到泄漏发生. 本研究所使用的装置能够对位于不同地下水水位和埋深条件下的污水管线泄漏进行实时自动监测.

关键词: 地下污水管线; 泄漏; 自动监测; 高密度电阻率; 模拟实验

中图分类号: X832.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)12-4352-09

Experimental Research on *In-Situ* Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage

GUO Lei¹, JIA Yong-gang^{1,2}, FU Teng-fei¹, LIU Xiao-lei¹, ZHAO Zhan-kun¹

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Institute of Geo Environmental Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: The leakage of underground sewage pipes may seriously affect the soil and the environment of groundwater. In this paper, an *in-situ* automatic monitoring device on basis of multi-electrode resistivity method was developed for the leakage of underground sewage pipelines, and it was validated by a simulated experiment in laboratory that the feasibility of the new device is feasible for real-time monitoring the leakage of underground sewage pipelines at many different groundwater levels. The experimental results indicated that small leakage of sewage pipelines could be rapidly detected by the developed monitoring device when the pipeline was located in the vadose zone. The leakage could also be monitored in a prompt manner when the pipeline was located near the groundwater level, and the extent of pollutant leakage could be speculated with the gradient change in resistivity of the soil layer above the pipeline. When the pipeline was located below the groundwater level, the device could only monitor the leakage if it reached a certain concentration to produce notable changes in resistivity, because of the rapid mixing and diffusion of the pollutant in groundwater. The device set up in this paper was found capable of real-time automatic monitoring the leakage of underground sewage pipelines buried in different depths and groundwater levels.

Key words: underground sewage pipeline; leak; automatic monitoring; multi-electrode resistivity; simulated experiment

由于管道在输送液体、气体、浆体等方面具有独特的优势, 目前已成为继铁路、公路、水路、航空运输以后的第五大运输工具. 但因为不可避免的管道老化、腐蚀、焊缝缺陷及其它自然或人为损坏等原因, 管道泄漏事故频频发生, 威胁到人们的生命财产, 污染生存环境, 并产生严重的社会后果^[1-3]. 我国对此研究相对较少, 由泄漏引起的污染问题不可忽视^[4]. 在国外, Eiswirth 等^[5]列出地下污水管网泄漏是地下水的污染源之一. Wakida^[6]通过氮平衡确定出其泄漏率为 13%; Trowsdale 等^[7]通过室内实验, 确定地下管道泄漏率在 5% ~ 10% 之间. 污水管道一旦泄漏, 将会对土壤、地下水环境产生严重的影响. 主要表现为: 改变土壤的理化性质, 引起土壤

污染, 造成土壤富营养化, 进而导致地下水污染, 减少淡水资源, 引起水土流失.

传统的泄漏探测技术一般分为直接检漏法和间接检漏法^[8]. 直接检漏法包括检漏电缆系统法、导电高聚物检漏法、油检测元件法、油溶性压力管法、气体法、机载红外法、封入气体压力检测法、水面检测法等; 间接检漏法也包括: 质量平衡检漏法、水力坡降线法、泄漏音频检漏法、声信号分析法、统计检漏法、基于神经网络的检漏方法、压力

收稿日期: 2012-02-28; 修订日期: 2012-04-19

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

作者简介: 郭磊(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境岩土工程, E-mail: rendar_lx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

波检漏技术、新型负压波检漏技术、压力点分析检测法等。各方法都有自身的优缺点,在选用过程中,因具体的工作环境、工作对象的不同,采用的技术也各不相同。

20 世纪 80 年代以来,国内相继开展了针对流体管道泄漏检测的研究工作。主要是从流体的流动、性质、传热及过程控制系统进行了深入研究。虽然对管道泄漏检测和定位方法的研究已有几十年的历史,并在工程实践中得到了广泛的应用,取得了一定的经济效益,也促进了环境保护工作的开展,但与此同时也暴露了许多有待解决的关键技术问题。例如多泄漏点管网的泄漏检测与定位;长输管道的小泄漏检测及其定位;长输管道的非线性分布参数的时间滞后等问题。

目前的泄漏检测和定位手段是建立在多学科多技术集成的基础之上,随着传感器技术、神经网络、通信技术、信号处理技术和模糊逻辑、专家系统、模式识别技术、粗糙集理论等人工智能技术的发展,为泄漏检测定位技术提供了新的视角。可以通过对诸如压力、密度、温度、流量、黏度等管道和流体信息进行采集和处理,通过建立数学模型或通过信号处理,或通过神经网络的模式分类,或通过模糊理论对检测区域或信号进行模糊划分,利用粗糙集理论简约模糊规则,从而提取故障特征等基于知识的方法进行检测和定位。将建立管道的数学模型和某种信号处理方法相结合、将管外检测技术和管内检测技术相结合、将智能方法引入检测和定位技术实现智能检测、机器人检测和定位等作为研究方向。

本研究立足于管道埋设环境与运移污染物之间的电学性质差异,试图从泄漏过程电阻率的变化揭示污染物的运移扩散过程,并对污染物的泄漏事故作出实时报警。

生活污水和工业废水中都含有成分复杂的无机盐,有时还夹杂着一些有机物,这些成分都将对污染物的电阻率值产生影响。在污染物成分组成确定的前提下,其电阻率值基本是确定的。当污染物的电阻率值与污水管线埋设土壤环境的电阻率值不同时,理论上可以通过监测管线埋设土壤环境的电阻率值变化来监测污水管线的泄漏情况。

赵勇等^[9]通过对市金水河、东风渠、熊耳河 3 条河流的连续定位监测,发现废水中的电导和 COD 两者之间存在着线性关系,在正常情况下,测定电导后,根据两者之间的线性关系,可以求算 COD 的值。

管道发生渗漏后,管内含烃污染物会侵入地层造成地下介质的物性变化,有研究基于对这种物性变化特征的分析,采用电阻率、探地雷达等地球物理方法实现了污染区的探测^[10~16]。

郭秀军等^[17,18]和刘贯群^[19]采用了电阻率法,自然电位法,探地雷达结合室内化学分析的方式,研究了探测区含砾石饱和黏土层收油量很低的工业废水污染时,地下介质的电阻率和介电常数的变化规律及污染区在不同方法探测剖面上的异常特征,并通过对污染区分布特征的分析成功确定了渗漏点的存在。

由于地下污水管道输送成分的复杂性、管道所处环境的多样性、泄漏形式的不确定性及监测对象的具体性,使得目前没有一种简单可靠、通用的方法解决管道泄漏监测和定位问题,特别是小流量的泄漏监测和泄漏点定位问题。本研究通过原位模拟泄漏实验,监测在不同地下水位条件下,污染物的垂向运移扩散过程。并通过分析污染物扩散过程中电阻率的变化,探讨通过电阻率监测装置对地下污水管线泄漏进行实时监测的可行性,以期对地下污水管线泄漏的原位监测提供一套可靠的泄漏事故判定方法,最终为埋地管线泄漏监测提供一种新的手段。本研究对加强管道泄漏检测与定位技术的研究与应用,提高管道输送管理效率,减少经济损失和环境污染,具有一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 供试砂土和自配污染物

室内水槽实验选取了青岛石老人海滩海滨砂作为实验砂土样品。经筛分实验,砂土平均粒径为 0.195 mm,其中 >0.5 mm 的颗粒含量为 7.0%,0.5~0.25 mm 占 16.9%,0.25~0.063 mm 占 76.0%。本实验在准备阶段时,对砂土样品进行淋洗脱盐。

实验所用污染物按照生活污水成分配置,其具体配方如表 1。

1.2 电阻率监测装置

本实验采用课题组自行研制的集实时采集、无线通讯、数据处理、监测预警、远程控制、供电自给等功能于一体的原位实时监测装置^[20~23],如图 1。该装置可以测得电阻率沿探杆垂向分布情况,装置下位机为电阻率探杆,其工作原理采用高密度电阻率测量方法^[24~27]。电阻率探杆共有 100 个电极环,电极环间距 10 mm,自下向上依次编号为 1~100。装置测量分辨率为 5 mm,电阻率探杆全长 1 m。

表 1 实验用污染物配方

Table 1 Basic properties of test sewage			
项目	指标浓度 /mg·L ⁻¹	药品	药品浓度 /mg·L ⁻¹
COD	500	葡萄糖	530.00
	25	硫酸铵	117.86
	25	碳酸铵	85.71
N	4	磷酸氢二钾	22.45
	4	磷酸二氢钾	17.55
P		氯化钙	5
		硫酸镁	20
		硫酸亚铁	2
无机盐		硫酸氢钠	
调节 pH			



图 1 监测装置实物示意

Fig. 1 Schematic diagram of the monitoring device

电阻率监测装置的 A/D 有效分辨率可达 20 位,系统最终的电阻测试精度为 0.012 Ω,分辨率为 2.5 mm. 该监测装置已在海床侵蚀淤积、地下水位变化、土壤盐渍化、海水入侵等众多领域得到推广应用.

1.3 其它实验装置

(1)实验水槽

实验采用水槽尺寸为1 200 mm × 1 000 mm × 300 mm,底部有出水阀. 水槽两侧有透水挡板,可以在阻断砂土侧漏的情况下保证液体在挡板两侧自由流动.

(2)污染物运移管道

实验采用直径 25 mm 硬塑料管作为污染物运输管线,全长 5 m,在中间 3 m 每隔 10 cm 打一个直径 3 mm 穿孔作为污染物泄漏通道,两端各留 1 m 长度管线注水.

1.4 实验方法及过程

(1)实验准备及砂土脱盐

在水槽中安装电阻率监测装置,填入实验用砂土,厚度至电极环 30 位置,平整砂土界面. 在砂土表面围绕电阻率监测装置环形布设污染物运输管

线,如图 2. 而后继续填入实验用砂土至电极环 60 位置,并平整砂土界面,如图 3. 在水槽中通入自来水直至浸没全部砂土,而后放水,反复多次以达到对砂土脱盐的目的.

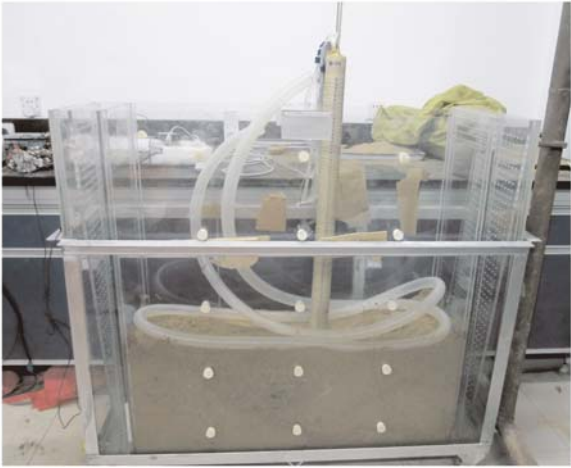


图 2 管线布设位置

Fig. 2 Location of the pipeline



图 3 电阻率探针布设

Fig. 3 Electrical resistivity probe within the tank

以便于下文讨论,将电极环 1 ~ 25 位置称为管下砂土层,25 ~ 35 位置称为管线砂土层,35 位置以上称为管上砂土层,电极环 9 ~ 17 位置称为泄漏敏感区. 如图 3 中标注.

(2)实验过程

脱盐结束后,启动电阻率监测装置,进行自动实时采集. 采集时间间隔设为 2 min,首先进行 2 轮电阻率采集作为脱盐砂土的初始状态,也同时作为 0 cm 地下水位的初始状态^[28,29].

向埋入水槽的污染物运输管线加入自配污染物,每次加入 4 L,共加 3 次,相邻两次间隔 20 min,观察电阻率变化情况。

打开水槽底部控水阀,放掉污染物,而后加入足量自来水再放掉,反复洗盐多次,待电阻率值基本稳定为止。

关闭水槽底部控水阀,加入自来水至电极环 30 位置,作为模拟地下水。此时,模拟地下水水位与管线埋设高度基本一致。而后向管线加入自配污染物,每次加入 4 L,共加 3 次,相邻两次间隔 20 min,观察电阻率变化情况。

打开水槽底部控水阀,放掉污染物,而后加入足量自来水再放掉,反复洗盐多次,待电阻率值基本稳定为止。

关闭水槽底部控水阀,加入自来水至电极环 60 位置,作为模拟地下水。此时,模拟地下水水位与砂土界面高度基本一致,高于管线埋设高度。而后向管线加入自配污染物,每次加入 4 L,共加 3 次,相邻两次间隔 20 min,观察电阻率变化情况。

1.5 污染泄漏判别方法

目前,电阻率监测系统的测试误差在 $\pm 3\%$ 以内,但该误差变化并无一致性,各点误差体现为随机波动,所以,在大多数自动监测过程中,将基础值 $\pm 3\%$ 的上下界作为警戒阈值,以连续 5 个点的一致变化作为报警触发条件^[30,31]。即在地下管线的监测过程中,相邻两组监测数据对应点的电阻率值,有连续 5 个达到警戒阈值时,发出报警。设 i 代表测量电极, t 代表测量时刻, $X_{t,i}$ 代表 t 时刻的第 i 个数据。此时,若电阻率变化率:

$$\zeta_{t,i} = \frac{|X_{t,i} - X_{(t+1),i}|}{\max\{X_{t,i} - X_{(t+1),i}\}} > 0.03, X_{t,i} \text{ 将记为一个警戒点。}$$

若 $i \sim i+4$ 均成立,则认为监测结果发现异常,系统自动发出报警信号。该运算过程由客户端控制软件自动完成。

$\zeta_{t,i}$ 监测灵敏度高,但却有其局限性。在一些特殊情况下,污染物发生泄漏,电阻率值虽然发生了变化, $\zeta_{t,i}$ 变化却不大,难以达到报警条件。例如管线位于地下水位以下,稀释作用明显, $\zeta_{t,i}$ 变化缓慢而持久,难以达到报警条件;又例如采集频率设置过高时, $\zeta_{t,i}$ 的相对变化较小,增加了事故的识别难度。所以事故判别系统在计算上述 $\zeta_{t,i}$ 的同时,引入电阻率初值偏移率:

$$\gamma_{t,i} = \frac{|X_{t,i} - X_{0,i}|}{\max\{X_{t,i} - X_{0,i}\}}$$

上式表示电阻率的累积变化情况。若 $\gamma_{t,i} > 0.5$,则认为电阻率累积发生变化,记为一个警戒点。若 $i \sim i+4$ 均使 $\gamma_{t,i} > 0.5$ 成立,则同样认为监测结果发现异常,系统自动发出报警信号。 $\gamma_{t,i}$ 的计算过程也由客户端控制软件自动完成。监测过程中, $\zeta_{t,i}$ 和 $\gamma_{t,i}$ 同时运算,独立报警。

1.6 电阻率曲线特征

现实情况下,管线运移的污染物虽然成分差异较大,但大多数情况下都含有丰富的导电粒子,电阻率一般会比较小;管线埋设的土壤环境往往含水量较少,其中的各类杂质成分不足以充分溶解形成连续、稳定的导电介质,导致土壤表现出的电阻率值往往偏大。本研究使用自行设计开发的电阻率实时监测系统,以管线埋设环境与管线运移污染物之间的电阻率差异为着眼点,试图通过监测埋设地下污水管线土壤环境的电阻率变化,解决污水管线小流量泄漏问题。

然而,电阻率作为一个多因素影响下的综合性参数,在实际应用中往往是由多种外界因素共同作用的结果,用单因子反映甚至反演多因子综合作用的结果,就需要综合各类影响因素本身的特征,不仅要计算电阻率的数值变化,还要通过电阻率曲线的整体变化特征加以区分。通过积累大量的使用经验、掌握现场环境特征,可以从电阻率曲线的变化特征初步判断出事故原因。常见的电阻率曲线特征有变化源点、变化范围和变化速率。

(1) 电阻率变化源点

电阻率变化源点是指事故发生时电阻率值率先发生跳跃变化的监测位置。通过 1.4 节介绍的管线布设情况可以看出,当管线发生泄漏事故时,电阻率的变化源点必定位于管线布设位置附近,即电阻率探杆的中部开始。而降雨时,对于地表水下渗过程,电阻率的变化源点位于电阻率探杆垂向监测长度的顶端。两者存在着明显的差异,可以将变化源点的位置作为判断泄漏事故的标准之一。

(2) 电阻率变化范围

电阻率变化范围是指事故发生时电阻率的曲线的变化幅度、数值趋于稳定时的上下限阈值。污水管线的泄漏会带来大量的水和导电粒子,导致管线埋设环境电阻率值大幅减小。随着将水过程所带来的地下水位变化和地表水下渗过程,大多数情况下是描述淡水的运移过程,在非盐渍土等特殊环境下,仅通过溶解土壤中有限的可溶性杂质,其电阻率降低的程度并不大,有时甚至会出现稀释土壤溶液,电

阻率增大的情况.但是,当现场环境为饱和盐渍土水溶液等极端情况时,电阻率的变化将不再存在明显差异.

(3) 电阻率变化速率

电阻率的变化速率是指事故发生后电阻率单位时间内的变化量,与土壤含水量、粒径等众多因素有关,在不同环境下表现出的差异较大.但在同一环境下,电阻率的变化率往往最能体现泄漏事故的规模,是事故等级评定的重要参数之一.

2 结果与讨论

2.1 污染物的垂向运移扩散过程分析

在定量的一次性管线泄漏发生后,污染物的垂向运移扩散过程是在毛细力、重力和地下水动力的同时作用下进行的.在地下水位以上区域,毛细力作用相对较强,使污染物向上扩散;在管线下邻近区域,污染物在重力作用下向下扩散最为明显;而在地下水位之下的区域,地下水动力的运输是污染物扩散的动力,其稀释作用阻碍污染物的累积.在不同地下水动力条件下,污染物表现出不同的运移扩散规律,将影响电阻率值的垂向分布变化情况.

从图4~6中可以看出,在不同的地下水位条件下发生泄漏,电阻率曲线均产生了规律性的变化.随着泄漏的进行和污染物的扩散,砂土垂向电阻率分布总体上随时间推移在不断减小,但垂向各部分变化情况差异较大.

0 cm 水位条件下,管线位于包气带,实验结果如图4(a).可以观察到,管上砂土层电阻率值几乎没有变化;管线砂土层电阻率值随时间变化相对较小, $\zeta_{t,i}$ 仅为1%~3%;管下砂土层变化相对明显但存在短时的滞后,泄漏敏感区的变化最为明显,如图4(b).在6 min左右 $\zeta_{t,i}$ 达到5%~7%.

由此可见,当管线位于包气带时,变化主要发生在管下砂土层的上层,污染物在重力的作用下扩散最为明显.泄漏发生后,管线砂土层几乎没有发生电阻率变化.管线砂土层的电阻率值随时间变化逐渐减小,对应各个时刻形成递减的层次曲线,但在时域变化相对缓慢且不够清晰.管下砂土层在重力的作用下,运移速度相对较快,电阻率值随时间推移变化清晰且反应相对较快.

30 cm 水位条件下,管线位于地下水位附近,实验结果如图5(a).可以观察到,管上砂土层电阻率值随时间变化显著且趋势清晰, $\zeta_{t,i}$ 达到9%~16%,但其主要变化体现在泄漏发生10~20 min,有一定

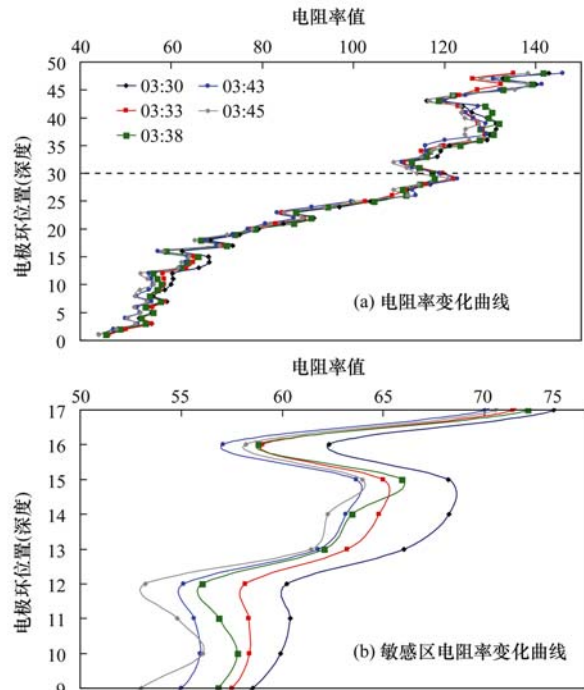


图4 0 cm 水位泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 4 Variation of soil resistivity in the leakage at the 0 cm level

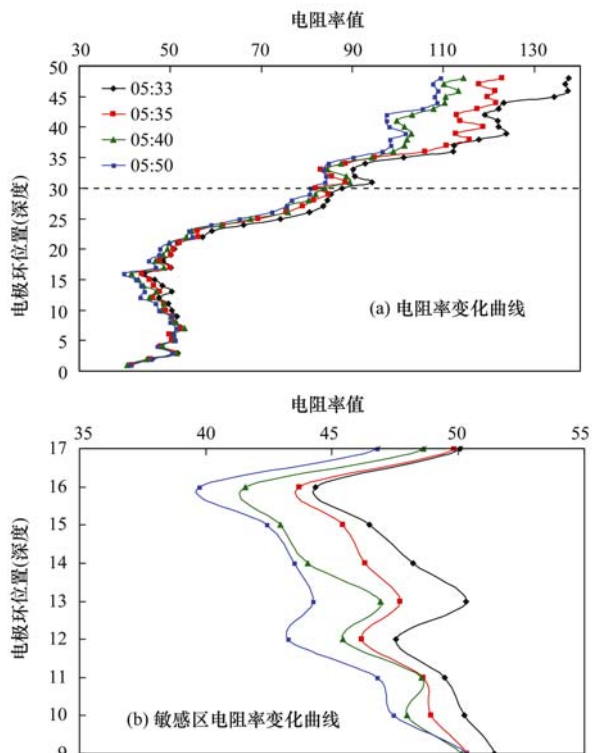


图5 30 cm 水位泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 5 Variation of soil resistivity in the leakage at the 30 cm level

的滞后性;管线砂土层电阻率值随时间变化相对较小但层次清晰;管下砂土层的变化,尤其表现在泄漏敏感区,如图5(b).在3 min左右 $\zeta_{t,i}$ 达到4%~6%.其余部分完全浸没于潜水层中,其电阻率变化

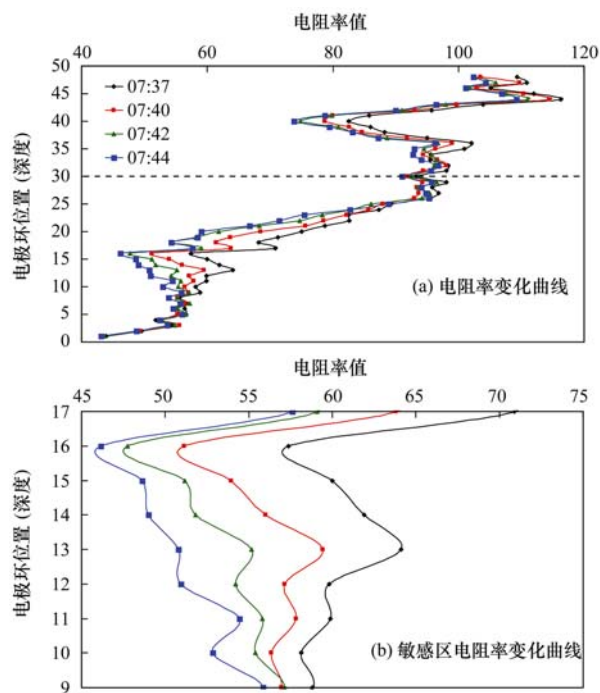


图6 60 cm 水位泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 6 Variation of soil resistivity in the leakage at the 60 cm level

呈层次递减但变化不大,难以达到监测指标。

由此可见,当管线位于地下水位附近时,管上砂土层砂土饱和度较小,导致在毛细力作用下,污染物向上扩散过程缓慢但具有良好的渐变趋势。泄漏发生后,该层的电阻率值随时间变化逐渐减小,对应各个时刻形成递减的层次曲线,但在时域上具有滞后性,并不适合作为报警参数的第一选择。由于该区域电阻率值随时间推移变化十分平稳有序,可以根据该区域电阻率值的变化情况定性推测泄漏事故的时间与程度。管线砂土层由于砂土的饱和度较高,在毛细力和重力共同作用下,运移速度较快,电阻率值随时间推移变化层次清晰且反应迅速。管下砂土层敏感区以下部分位于地下水位深层,扩散至该区域的污染物由于地下水的稀释,浓度变化并不大,使用 $\zeta_{t,i}$ 报警将失去作用。污染物只有在一定的积累之后,依靠 $\gamma_{t,i}$ 才可能达到报警阈值发出警戒指示。

60 cm 水位条件下,管线位于地下水位之下,实验结果如图6。泄漏发生后,垂向各区域电阻率值均持续减小,管上砂土层和管下砂土层都体现出了较好的层次性递减。大约在泄漏开始后3~5 min,泄漏敏感区的 $\zeta_{t,i}$ 达到5%~9%,满足报警条件。由于管下砂土层累积作用明显, $\gamma_{t,i}$ 在泄漏发生5~8 min 达到报警条件; 管线砂土层变化较小且曲线相互交错,规律性较差。

由此可见,当管线完全浸没于潜水层时,地下水动力的运移作用使污染物在泄漏发生之初迅速扩散,污染物在垂向上同时向上下运移,电阻率呈现出良好的层次性递减。于此同时,污染物也被地下水稀释,污染物浓度的累积速率逐渐减小, $\zeta_{t,i}$ 逐渐减小。本实验中 $\zeta_{t,i}$ 在泄漏初期达到报警条件,若泄漏量较小,使 $\zeta_{t,i}$ 在泄漏初期无法进行有效监测,也可以通过一段时间的浓度累积,使 $\gamma_{t,i}$ 达到报警条件。

2.2 持续离散泄漏动态过程分析

如本研究1.4节中实验过程所述,将0、30和60 cm 水位脱盐后的电阻率值分别做为该水位的初始状态值。各水位下间隔20 min 加入一次污染物,对模拟泄漏过程进行原位监测。将各次泄漏发生的电阻率曲线与初始状态电阻率曲线相比较,如图7~9。取每次泄漏发生后3 min 的电阻率值作为该次泄漏的代表数据。

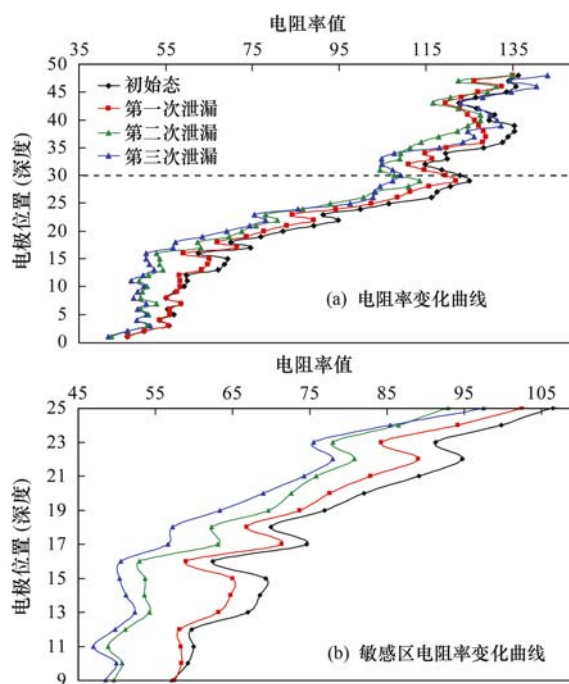


图7 0 cm 水位持续泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 7 Variation of soil resistivity in the Continuous leakage at the 0 cm level

对于大流量的连续泄漏,以 $\zeta_{t,i}$ 为判定依据的报警较为准确及时。但若管线泄漏流量很小, $\zeta_{t,i}$ 的变化将是一个长期稳定且微小的过程,此时, $\gamma_{t,i}$ 对泄漏事故的判定将起主要作用。

0 cm 水位下3次泄漏依次发生,电阻率曲线结果如图7(a)。3次泄漏发生后的电阻率曲线整体趋势逐次递减,表现出良好的层次性和一致性。管上砂土层变化相对无序; 管线砂土层变化幅度较小;

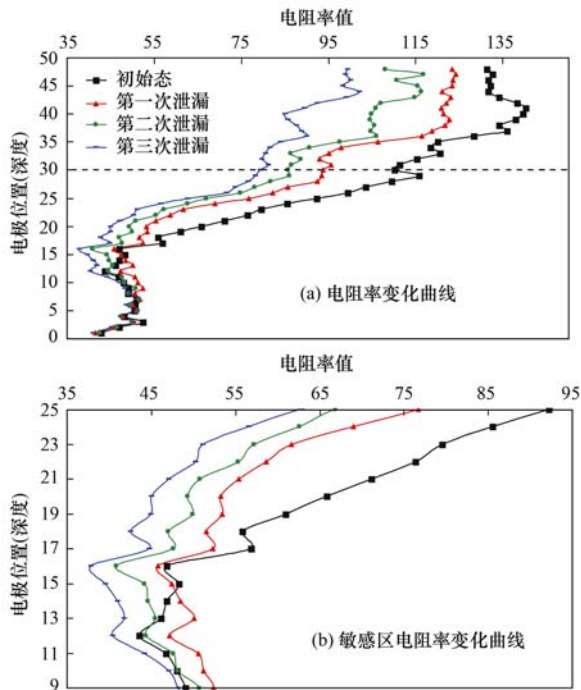


图8 30 cm 水位持续泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 8 Variation of soil resistivity in the Continuous leakage at the 30 cm level

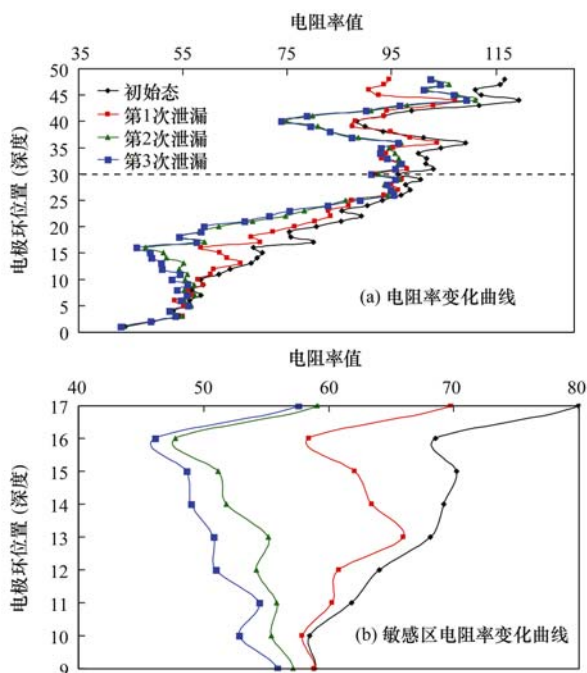


图9 60 cm 水位持续泄漏发生后电阻率变化曲线

Fig. 9 Variation of soil resistivity in the Continuous leakage at the 60 cm level

管下砂土层尤其是泄漏敏感区体现出了较好的层次性和一致性。随泄漏过程的持续,污染物浓度逐渐增高, $\gamma_{t,i}$ 不断增大。在泄漏敏感区,如图7(b) $\gamma_{1,i}$ 平均约为4%, $\gamma_{2,i}$ 约为9%, $\gamma_{3,i}$ 约为12%。

由此可见,在地下管线位于包气带时,重力是泄漏扩散的主要作用力,管下砂土层变化显著。在持续泄漏条件下,污染物在无地下水的管下砂土层累积作用明显,应用 $\gamma_{t,i}$ 可准确判定泄漏事故的发生。

30 cm 水位下3次泄漏依次发生,电阻率曲线结果如图8(a)。3次泄漏发生后的电阻率曲线整体趋势逐次递减,表现出良好的层次性和一致性。管上砂土层电阻率值减小趋势均匀稳定,层次鲜明, $\zeta_{t,i}$ 在很短的时间内就能达到8%~15%,泄漏全过程中 $\gamma_{1,i}$ 约为10%, $\gamma_{2,i}$ 约为19%, $\gamma_{3,i}$ 约为27%;管线砂土层和管下砂土层电阻率值变化幅度随深度增加逐渐减小,在泄漏敏感区,如图8(b),电阻率曲线也表现出了清晰的递减层次, $\gamma_{1,i}$ 约为8%, $\gamma_{2,i}$ 约为18%, $\gamma_{3,i}$ 约为39%,但随着深度的增加,电阻率值的变化急剧减小,在相对较深的层次(电极位置1~10),电阻率值几乎没有变化。

由此可见,当管线位于地下水位附近时,重力与毛细力同时作为污染物扩散的动力,使污染物在垂向上迅速向两端蔓延,在垂向各区域均可轻易监测到明显的电阻率变化情况,能够对泄漏事故做出准确的判定。只有在较深的管下砂土层,由于地下水的稀释,观察到的电阻率值变化较小。

60 cm 水位下3次泄漏依次发生,电阻率曲线结果如图9(a)。从总体趋势来看,该条件下电阻率的变化情况相对复杂,电阻率值的变化过程分为两个阶段:第一阶段,泄漏发生初期,主要体现在第一、二次泄漏发生后,电阻率值迅速减小并体现出较好的层次性和一致性, $\gamma_{1,i}$ 约为9%, $\gamma_{2,i}$ 约为17%;第二阶段,在泄漏发生一段时间之后,电阻率变化速度逐渐减慢并趋于停止,而在几次泄漏发生间隔,电阻率值甚至逐渐恢复。

由此可见,当管线位于潜土层内,地下水动力成为污染物扩散的主要作用力。泄漏发生初期,在地下水的运移作用下,污染物迅速扩散,导致电阻率减小。泄漏发生一段时间以后,随着污染物的累积,地下水的稀释作用逐渐突显,直至污染物的扩散速度与地下水的稀释速度相等,污染物浓度达到最大并保持不变。泄漏事故发生初期,电阻率值变化幅度主要取决于污染物与地下埋设环境的电阻率差异,也取决于污染物的泄漏速度。若泄漏发生初期电阻率值的相对变化率 $\zeta_{t,i}$ 不足以引发报警条件,则只能通过 $\gamma_{t,i}$ 的变化监测污染物的累积变化进行报警。此时,监测时间将达到15 min左右。

3 结论

(1) 本研究在不同地下水位条件下, 监测污染物的垂向运移扩散过程和污染物持续离散泄漏动态过程, 试图通过电阻率方法来解决地下污水管线的小流量泄漏问题. 实验结果表明, 该方法基本能够准确地探测到地下污水管线的泄漏事故, 并能较快的做出报警.

(2) 本研究通过引入 $\zeta_{t,i}$ 和 $\gamma_{t,i}$ 这 2 个变量作为报警条件, 能够简单快速的达到自动报警的目的. $\zeta_{t,i}$ 监测电阻率的快速变化, 灵敏度高, 报警反应时间较短, 能够在泄漏发生的第一时间发出报警; $\gamma_{t,i}$ 监测污染物的累积变化, 报警反应时间长, 但具有一定的记忆力, 对小流量持续泄漏有较好的效果.

(3) 通过污染物垂向运移扩散过程监测和污染物持续离散泄漏动态过程监测的对比可以发现: 在一次性泄漏事故发生一段时间以后, 随着污染物的扩散, 埋设环境的污染物浓度会逐渐降低, 趋向于恢复到泄漏前的状态; 而持续泄漏事故发生以后, 污染物浓度不断累积增大, 趋向于饱和状态. 这种差异在地下水动力较强时表现得尤为明显. 该结果能够表明土壤在一定的污染范围内具有自我修复能力.

(4) 在以上实验过程中发现, 不论是在一次性泄漏还是持续性泄漏发生时, 管线布设位置下方 15 cm 左右的区域对泄漏事故的响应最为准确和迅速, 故称该区域为泄漏敏感区, 通过对该区域的监测能够准确地完成大多数泄漏事故的报警工作.

(5) 本研究使用自行设计开发的电阻率实时监测系统, 以管线埋设环境与管线运移污染物之间的电阻率差异为着眼点, 通过监测地下污水管线埋设土壤环境的电阻率变化, 探索地下污水管线泄漏事故发生后, 污染物在土壤中的运移扩散规律, 为地下污水管线泄漏的原位实时监测报警提供了一种全新的手段.

参考文献:

- [1] 陈华波, 涂亚庆. 输油管道泄漏检测方法综述[J]. 管道技术与设备, 2000, (1): 38-41.
- [2] 刘恩斌, 彭善碧, 李长俊. 现代管道泄漏检测技术探讨[J]. 管道技术与设备, 2004, (5): 17-19.
- [3] 李伟, 朱芸. 长输管线泄漏检测与定位方法分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 105-107.
- [4] 高秀花, 李俊梅, 王娟. 地下污水管道泄漏对环境影响研究进展[J]. 地下水, 2009, 31(4): 85-88.
- [5] Eiswirth M, Hitzl H. Groundwater contamination by leaking

sewerage systems [A]. In: Water Down Under [C]. Barton, ACT: Institution of Engineers, 1994. 21-25.

- [6] Wakida F T, Lerner D N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study [J]. Water Research, 2005, 39(1): 3-16.
- [7] Trowsdale S A, Lerner D N. A modeling approach to determine the origin of urban ground water [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1-2): 171-183.
- [8] 王占山, 张化光, 冯健, 等. 长距离流体输送管道泄漏检测与定位技术的现状与展望[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30(5): 5-10.
- [9] 赵勇, 李有, 王永刚, 等. 城市污水中电导率与 COD 相关性分析[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(2): 36-38.
- [10] Schneider G W, Greehouse J P. Geophysical detection of perchloroethylene in a sandy aquifer using resistivity and nuclear logging techniques [A]. In: Proceedings of the 5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems [C]. San Diego, CA: SAGEEP, 1992. 619-628.
- [11] De Ryck S M, Redman J D, Annan A P. Geophysical monitoring of a controlled Kerosene spill [A]. In: Proceedings of the 6th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems [C]. San Diego, CA: SAGEEP, 1993. 5-20.
- [12] Schneider G W, De Ryck S M, Ferre P A. The application of automated high resolution DC resistivity in monitoring hydrogeological field experiments [A]. In: Proceedings of the 6th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems [C]. San Diego, CA: SAGEEP, 1993. 145-162.
- [13] 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 and engineering Geophysics, 1998, 2(3): 203-212.
- [14] William A S. 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.
- [15] Atekwana E A, Sauck W A, Werkema D D Jr. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44(2-3): 167-180.
- [16] Liu G Q, Jia Y G, Liu H J, et al. A case study to detect the leakage of underground pressureless cement sewage water pipe using GPR, electrical, and chemical data [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(5): 1077-1085.
- [17] 郭秀军, 孟庆生, 王基成, 等. 地球物理方法在含油工业污水管道渗漏探测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 279-282.
- [18] 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.
- [19] 刘贯群. 地下管线泄漏的综合调查方法 [J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 358.

- [20] 高峰, 曲建岭, 周玉平. 不同小波基下滤波性能之比较[J]. 仪器仪表学报, 2002, **23**(4): 437-440.
- [21] 靳世久, 王立宁, 李健. 原油管道漏点定位技术[J]. 石油学报, 1998, **19**(3): 93-97.
- [22] 张布悦, 王桂增, 刘吉东, 等. 输油管线泄漏检测和定位技术综述[J]. 上海海运学院学报, 2001, **22**(3): 13-16.
- [23] 王海生, 张布悦, 王桂增, 等. 输油管道实时泄漏监测系统的设计与应用[J]. 油气储运, 2001, **20**(12): 17-22.
- [24] 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. 48-59.
- [25] Won. The geometrical factor of a marine resistivity probe with four ring electrodes[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, **12**(1): 301-303.
- [26] Ridd P V. A sediment level sensor for erosion and siltation detection[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1992, **35**(4): 353-362.
- [27] Lauer-Leredde C, Pezard P A, Dekeyser I. FICUS, a new *in-situ* probe for resistivity measurements in unconsolidated marine sediments[J]. Marine Geophysical Research, 1998, **20**(2): 95-107.
- [28] 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.
- [29] Verde C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines[J]. Control Engineering Practice, 2001, **9**(6): 673-682.
- [30] 税爱社, 周绍骑, 李生林, 等. 长输管道泄漏诊断专家系统的开发[J]. 油气储运, 2002, **21**(4): 1-3.
- [31] 李健, 王立宁, 倪世坤, 等. 一种新型原油集输管网泄漏自动监测系统的研制[J]. 化工自动化及仪表, 1999, **26**(1): 45-48.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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