

# 垃圾渗滤液污染地下含水层及修复过程的 动态监测技术研究

## 摘 要

城市垃圾填埋场渗滤液的渗漏是造成土壤与地下水污染的重要因素。基于此类高浓度多组分渗滤液渗入地下后引起地层介质的导电性变化,电阻率法正在成为渗滤液污染地下介质区域调查和污染过程监测的重要手段。

为研究渗滤液侵入对地下介质电阻率的影响,确定地下含水层中垃圾渗滤液污染区的电异常特征,首先开展了垃圾渗滤液侵入对壤土、饱和砂土、不饱和砂土、粉土四种类型地下介质的电阻率改变实验以及渗滤液中各主要污染组分的浓度变化对砂土电阻率的改变实验。在此基础上,结合垃圾填埋场的结构特点,自行设计了埋设于填埋场衬层系统下的专用三维电学动态监测系统,并利用此系统对垃圾填埋场渗滤液在地下含水层中动态扩散及污染层修复过程开展了室内、野外相关监测实验。实验结果表明渗滤液的侵入会引起含水砂层电阻率降低,电阻率的变化幅度和污染程度存在一定的量化关系;渗滤液在含水层中的扩散过程会引起不同时期实测电剖面上低阻异常区的动态变化。对比分析这种变化特征可确定渗滤液扩散区的污染程度、扩散速度及扩散方向。注水修复过程中,污染区污染物含量的降低会引起对应低阻异常区实测视电阻率值的升高和异常区范围的减小。开挖观测结果显示实际污染区和异常分布区具有良好的对应关系。

研究成果明确了地下不同类型介质被渗滤液污染后的电性变化规律和电阻率异常特征变化规律,为垃圾渗滤液污染地下含水层动态监测和预警系统的工程实施提供理论和实践基础。保证了智能型、生态型垃圾填埋场建设的可能性。

**关键词:** 垃圾场渗滤液; 含水层污染; 电阻率法; 动态监测

# Study of Monitoring the Change of Polluted Area in Underground Aquifers Being Polluted by Leachate of Landfill and Renovating Process with 3-D Electrical Method

## Abstract

Leakage of municipal landfill leachate is one of the major causes for the pollution of soil and underground water. Because after high-concentration and multi-component landfill leachate soak into underground, underground media's conductivity will change, electrical resistivity method is becoming an important means in investigating areas polluted by leachate and monitoring the process of pollution.

In order to study effects of leachate invasion on electrical resistivity of underground media, and then confirm abnormal characteristics of electrical resistivity of areas in underground aquifers polluted by leachate, experiments of studying changes of electrical resistivity of saturated sand, unsaturated sand, loam soil and silt samples with increase of leachate content and concentration of different component of leachate are carried out first at this paper. On this base, a three-dimensional electro-monitoring system buried under the impermeable layer of landfill is specially devised according to the design feature of landfill. We use this system to monitoring the change of polluted area in underground aquifers polluted by leachate of landfill and renovating process in laboratory and filed. Experimental results indicate that the electrical resistivity of underground sandy aquifers will decrease because of leachate invasion, and that the amplitude of variation of electrical resistivity has a quantized correlativity with the degree of pollution. The diffusing process of leachate in the aquifer behaves as the dynamic change of low-resistivity abnormal zone on electrical resistivity sections obtained in different periods of time. Pollution level, diffusing velocity and direction can be known from contrast analysis of such a change. The renovating process behaves as the increase of apparent electrical resistivity and change of abnormal characteristics distribution on electrical resistivity sections with the

decreasing of pollutant content. The actually polluted areas are well corresponding with the distribution of abnormal zone.

The study results make clear of the change law of electric property and resistivity abnormality of different underground media polluted by leachate and supply theoretical and practical base for the execution of systems of monitoring and prewarning the pollution of underground aquifers polluted by leachate. That makes sure of building of intelligent and ecotype landfill.

**Keywords: landfill leachate; pollution of underground aquifers; electrical resistivity method; dynamic monitoring**

# 独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得\_\_\_\_\_（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：魏丽

签字日期：2006年6月13日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：魏丽

导师签字：

签字日期：2006年6月13日

签字日期：

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：青岛建筑设计研究院

电话：1307297110

通讯地址：

邮编

## 0 前言

垃圾渗滤液是垃圾填埋场使用过程及封场后的主要产出物。渗滤液成分复杂,污染负荷高,自然沉降性能较差(张锡根,1996;喻晓,2002),常导致对土壤及地下水的严重污染(贾永刚,2003;赵新泽,2002;夏立江,2001)。为了防止渗滤液侵入地下介质而导致的污染,和世界其他国家一样,2001年我国颁布的《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ17-2001)中,对垃圾填埋场中天然防渗层渗透系数及厚度指标专门做了规定。然而受诸多因素的影响,渗滤液侵入地下介质导致的污染案例仍时有发生,如广东大田山垃圾场、湖南岳阳羊角山垃圾场、山东蓬莱垃圾场、武汉郭茨口垃圾场、青岛湖岛垃圾场都发现渗滤液对地下环境造成了不同程度的污染(贾永刚,2003)。

为了防止这类污染的发生,国内外研究的重点都集中在的防渗系统的设计、施工和检测方面。对垃圾场运营过程和封场后的实时监测却做的不够,通常在监测到地下介质污染时,已经造成了很严重的污染。

如果能够从垃圾场使用伊始,实时监测渗滤液渗入地下情况及在地下的三维动态扩散过程,根据渗滤液的扩散程度,及时采取针对性处理措施,对防止地下环境大范围污染,尤其是地下环境敏感区段的保护,具有重要意义。

基于此,2003年在齐鲁石化地下污水探查项目(XTJS031101)的资助下进行了相关研究。本论文是该研究课题的部分内容,主要在研究渗滤液的侵入如何改变地下介质电阻率的基础上,利用自行设计的三维电学动态监测系统,通过室内、野外实验开展了垃圾场渗滤液在地下水层中的动态扩散及污染层修复过程的实时监测研究。研究结果证实了检测方法的有效性和监测系统的可行性,明确这种检测手段对于实现垃圾填埋场分布区地下水层现状调查、污染预警及修复监测所具有的重要意义,研究成果可为建设新型生态智能垃圾填埋场提供技术支撑。

# 1 绪论

## 1.1 垃圾渗滤液污染危害现状

早期建造的垃圾填埋场就是简单的露天堆放,较少考虑环境保护。据 1977 年资料,美国共有 18500 个垃圾填埋场,几乎有一半对水体产生污染,垃圾中大量的有机和无机污染物通过降水淋滤,进入周围地下水。水质中硬度、氯化物、砷、铬、钴的含量远远超过生活饮用水标准,迫使自来水厂不得不到更远的河流上游取水(郑铣鑫,1989)。

许多专家的研究表明渗滤液中的污染物对地下水的影响将会长期存在,即使填埋场封闭后的一段时期内仍然如此(张红梅,2003)。

在我国垃圾渗滤液造成的地下水污染问题更为严重。刘东等(1993)对武汉市郭茨口垃圾场环境污染调查表明,该垃圾场已经对附近的汉江造成严重污染。对广州市北郊老虎窿填埋场、大田山填埋场周围水环境长达 5 年的追踪监测表明,垃圾渗滤液对地下水的影响确实存在,尤其是不易降解的有机污染物和微量重金属元素的影响应该引起足够的重视(郑曼英等,1998)。对北京北天堂地区地下水调查研究表明,2000 年北京天堂周围  $1.2 \times 10^6 \text{m}^2$  范围内的地下水已不能饮用,且随着时间的推移,地下水的污染范围逐年增大,地下水环境质量的恶化越来越严重(王翊虹等,2002)。2002 年,北京市市政管委会委托一个研究小组对北京市的阿苏卫、北神树等几个大型垃圾填埋场周边的地下水水质进行了检测,结果发现由垃圾填埋场渗漏出来的有毒物质已经污染到了地表 30 米以下的地下水。北京西北郊的阿苏卫垃圾填埋场和六里屯垃圾填埋场,建在北京市西北郊的山前冲洪积扇上,是首都优质地下水补给区,垃圾填埋渗漏后会直接影响到 2008 奥运场地中心一带的居民住宅小区。2005 年 3 月,北京市地勘局地调院发布了我国第一个城市生活垃圾地质环境调查成果—《北京城市生活垃圾处理现状及选址地质环境调查》。调查结果显示,北京市垃圾处理场 95% 违规,这些非正规垃圾处理场多使用露天堆放或简易填埋等原始方式处理,污染水体、土壤、大气并传播疾病。

## 1.2 垃圾渗滤液污染控制措施的研究现状

### 1.2.1 填埋场场底防渗系统

填埋场场底防渗系统是通过在填埋场底部和周边铺设低渗透性材料来建立衬层系统以阻隔填埋气体和渗滤液进入周围的土壤和水体,并防止地下水和地表水进入填埋场,有效控制渗滤液的产生量。填埋场场底防渗系统通常包括渗滤液收排系统、防渗系统(层)、保护层和过滤层等。

根据填埋场场底防渗设施铺设方向的不同,填埋场场底防渗分为垂直防渗和水平防渗,这两种防渗系统适用于不同的水文地质条件。填埋场的垂直防渗系统建在填埋场的四周,主要是利用在填埋场基础下方存在的不透水或弱透水层,将垂直密封建筑建于其上,以便封闭填埋场气体和渗滤液于填埋场之中。垂直防渗系统在山谷型填埋场中应用较多。

水平防渗系统是在填埋场场底及四周基础表面铺设防渗衬层,将垃圾渗滤液封闭于填埋场中进行有控地导出。通常分为单层衬层防渗系统(图1)、单复合衬层防渗系统(图2)、双层衬层防渗系统(图3)和双复合衬层防渗系统(图4)。

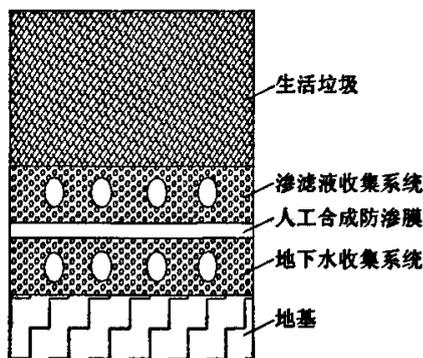


图1 单层衬层防渗系统

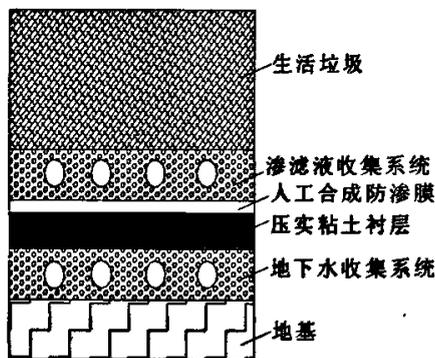


图2 单复合衬层防渗系统

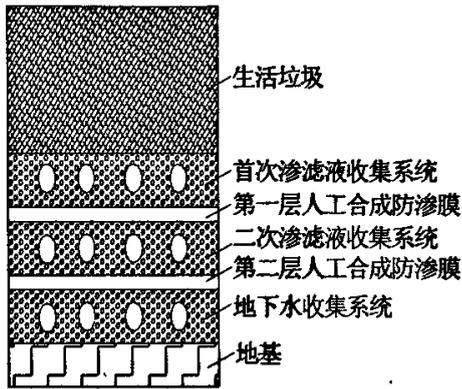


图3 双层衬层防渗系统

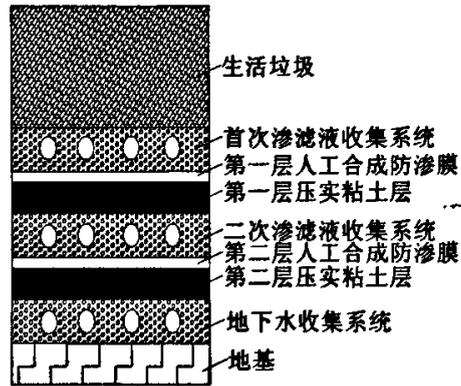


图4 双复合衬层防渗系统

## 1.2.2 垃圾填埋场渗漏检测

即使按照规定采取了垃圾填埋场防渗措施,大多垃圾填埋所产生的渗滤液还是会向地下渗漏。据刘建国等(2004)研究,填埋场防渗衬层施工时,在施工质量保证较好的情况下,复合衬层土工膜上存在 $8-10$ 孔/ $\text{hm}^2$ ;质量保证较差的情况下,土工膜上存在 $17$ 孔/ $\text{hm}^2$ ;即使在质量保证极好的情况下,土工膜上孔密度至少为 $1-2$ 孔/ $\text{hm}^2$ 。这就需要对填埋场进行渗漏检测,以便采取适当的控制措施。

目前针对垃圾填埋场渗漏检测开展的研究集中在两个方面:一种是在垃圾填埋场的建设期间,检测其防渗衬层的施工质量,减小发生渗漏的可能性。另一种是在垃圾填埋场的运营期间,检测垃圾填埋场是否发生渗漏以及渗漏发生后渗滤液形成的羽状体在地下的扩散过程。

### 1.2.2.1 填埋场建设期间防渗衬层的施工质量检测

#### (1) 水枪技术 (Rollin A.L. et al, 1999)

整个系统检测流程是:检测人员手持可以持续供水并通有一定电流的检测器在土工膜上行走,利用土工膜的绝缘性和水流的导电性,如果HDPE膜的铺设没有漏洞,则整个系统电流形成回路,检测器会有电流显示并以声音鸣叫作为提示(图5)。这种技术在一些发达国家已经有比较成熟的经验及成型的产品。

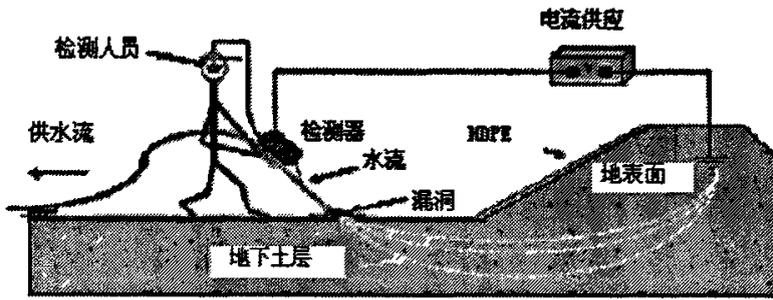


图 5 水枪技术工作原理示意图

(2) 双电极法 (White C.C. et al, 1997)

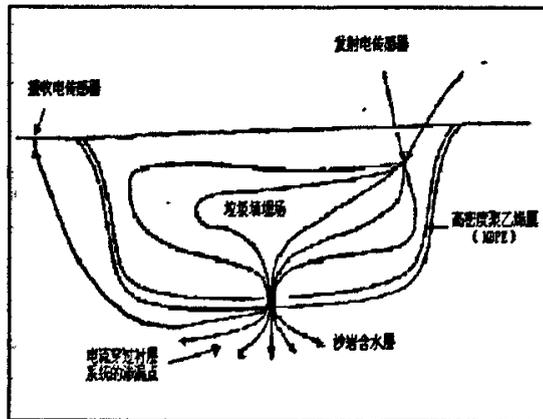


图 6 双电极法剖面图

双电极法是在垃圾填埋场内埋设一个发射电传感器,在填埋场外地表面放置一个接收电传感器,对埋设于填埋场内部的发射电传感器供电。利用垃圾填埋场的衬层系统普遍采用的高密度聚乙烯膜 (HDPE) 的绝缘性,以及渗漏点的导电性,实现对填埋场的渗漏检测。如果 HDPE 膜没有破损,给两个电传感器施加一定的电压时,不会形成回路,也就检测不到电流。当 HDPE 膜发生破损时,在电流表上显示一定的电流值 (图 6)。

双电极法的优点是检测方法简便,检测费用低。不足之处是,这种方法只能检测渗漏点的有无,而不能检测出渗漏点的位置、大小和数量。

### 1.2.2.2 填埋场运营期间监测

#### (1) 监测井法 (Godfrey, 1987)

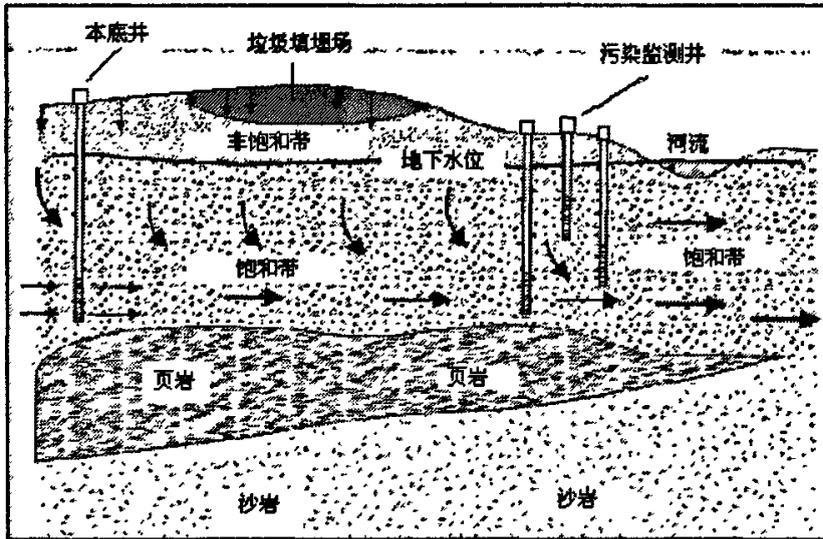


图 7 监测井法剖面图

目前,国内外最普遍的渗滤液渗漏监测方法就是设置地下水监测井,直接监测垃圾填埋场地周围的地下水是否受到污染(图7)。这种方法比较简单,技术要求低。但是这种方法的缺点很多,主要表现在:不能及时有效的发现渗漏;不能判断垃圾填埋场的渗漏点;很难估测出垃圾渗滤液在地下羽流的几何形态。

#### (2) 示踪剂法 (M. O. Looser et al, 1999)

示踪剂法是把一种化学示踪剂注入正在运营的或已经封场的垃圾填埋场内,利用采样探测器在填埋场区外进行采样分析,如果探测器检测到示踪剂,则表明有渗漏发生。这种监测技术的优点是,可以用于任何填埋场和填埋场的任何阶段的渗漏监测。但是,大多数示踪系统只能确定是否发生渗漏,而不能发现渗漏点的位置。另外,系统自动化及分析采集样品的技术不成熟。

#### (3) 扩散管法 (Stammler et al, 1985)

扩散管法是将可以透过气体的管路系统放置在填埋场下,一个运转周期后,渗滤液产生的气体进入管路系统(图8)。因为从渗漏点扩散出的渗滤液蒸汽在土壤中按照一定的体积比例进入管内,通过分析管内水蒸汽中污染物的浓度可以

近似得到漏洞大小。该系统的优点是自动化程度高，减小操作费用。不足之处是，如果渗滤液不产生蒸汽，则管路系统需要排列紧密以便能够接触到渗滤液，而这会极大的增加系统的建设费用。

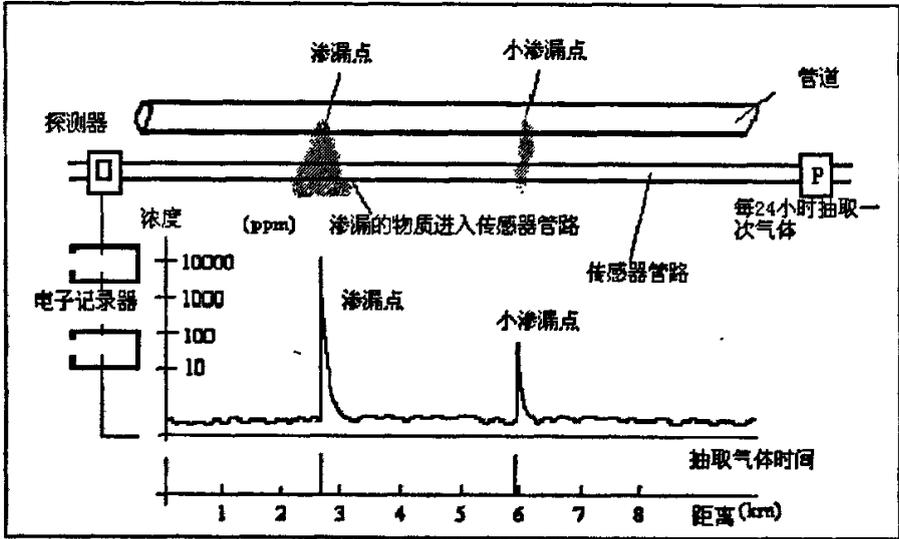


图 8 扩散管法示意图

(4) 电极格栅法 (White et al, 1997)

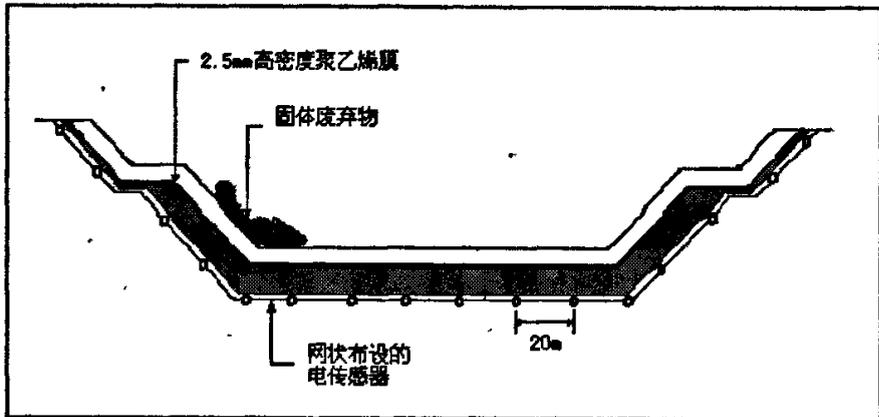


图 9 电极格栅法剖面图

电极格栅法是在衬层系统建设初期，在其下面预先埋设网状电传感器（用导线做的格栅，每根导线上都按一定的距离布置若干电传感器）。对电传感器格栅进行供电，由于渗漏的渗滤液相对于土壤和水来说有更高的电导性，根据不同区域电压的不同，可以判断渗漏点的位置、大小和数量（图9）。

### (5) 地球物理方法

地球物理方法是根据被渗滤液污染的土壤及地下水与其周围介质在物理(化学)性质上的差异,借助先进的地球物理仪器设备测量其物理场的分布状态,再配合适当的地球化学分析,通过分析和研究物理场的变化规律,结合地质、水文等有关资料,推断解释渗滤液污染区的分布特征,以达到检测的目的(杨进, 2000)。

受污染地区地下水和土壤的化学性质和物理特征发生变化是地球物理探测的前提(Atekwana, 2000; Belousova, 1999; Chen Z, 2001)。目前对垃圾填埋场渗滤液污染探测的地球物理方法有电阻率法(DC)、探地雷达法(GPR)、瞬变电磁法(TEM)、激发极化法(IP)、放射性法(刘海生, 2003)。从国内外大量成功的事例来看,电阻率法(含高密度电阻率法)仍然是应用最广泛,效果最显著的方法之一(e.g., Lima et al., 1995; Dahlin, 1996; Frohlich et al., 1996; Bernstone et al., 2000; Kamura, 2002),而自然电位法对于此类问题的探测是直流电阻率法重要的补充手段(Ogilvy et al., 1969; Monteiro Santos et al., 2002)。

## 1.3 研究课题的提出

### 1.3.1 已有监测技术的优缺点比较

表1 各种监测技术的优缺点

监测技术	任何时候 都可安装	确定渗漏 点位置	确定渗 漏范围	能否广 泛应用	能否重 复使用	自动化 程度
水枪技术	●	●		●	●	
双电极法	●				●	
监测井法				●	●	
扩散管法		●	●		●	●
示踪剂法	●			●	●	
电极格栅法		●	●	●	●	●
地球物理法	●	●	●	●	●	●

目前应用于垃圾填埋场渗漏监测的技术各有其优缺点及适用条件（如表1）。其中电极格栅法和地球物理法的实用性最强。电极格栅法的优点是可以监测衬层系统下的整个区域，埋设于地下的电极格栅可以使用几十年，比较准确的判断渗漏点的位置、大小和数量；缺点是整套系统需要预先埋设在垃圾填埋场的底部，而且目前尚不能检测出渗漏的渗滤液在地下的运移状态。虽然用于填埋场渗漏探测的地球物理方法优点明显，但已开展的研究只是对填埋场分布区地下污染状况的静态评价，尚无法进行长期的实时在线监测，起到污染预警的作用。

为避免垃圾填埋场渗滤液侵入对地下水造成严重的污染，除做好填埋场的结构防渗外，还有必要设计有效的垃圾填埋场渗滤液渗漏实时在线监测系统以便在渗滤液发生渗漏后能及时地发现预警、准确的确定渗漏点，监测渗滤液污染区动态扩散过程，这也是建设智能型、环保型垃圾填埋场要解决的一个关键问题。

### 1.3.2 电阻率法进行填埋场渗滤液污染区的探测研究

城市垃圾填埋场渗滤液的渗漏是造成土壤与地下水污染的重要因素。基于此类高浓度多组分渗滤液渗入地下后引起地层介质的导电性变化，电阻率法正在成为地下介质渗滤液污染区调查的重要手段。

Maxwell A. Meju (2000) 通过研究提出了垃圾填埋场地下理论电导率剖面模型（如图10）。垃圾填埋场最上面为顶部覆土层，第二层粘土层电导率增大。覆土层和粘土层的电阻率值会随着季节而改变。在雨季，渗透水驱赶出土壤孔隙中的气体（主要是甲烷和二氧化碳），电阻率下降；在旱季电阻率上升。第三层是不饱和填埋层，有机物被快速降解，无机物被氧化，大量溶解质被去除，这一层电阻率值随着时间的变化逐渐增大。第四层饱和填埋层，淋滤显著，电阻率降低。如果填埋场设在难渗透的底层土之上，渗滤液将聚集在第四层的底部，饱和填埋层就将是填埋场导电性最强的部位。如果填埋场设在易渗透的土层之上，渗滤液聚集在地下水平面附近（地下水平面在第五层和第六层之间波动），第五、六层（衬层）将是导电性最强的部位。第七层为羽状污染层，渗滤液与地下水混合并与底层土中介质反应形成一个导电性较强的羽状污染地带。第八层为非侵入土层，TDS和电阻率值取决于周围介质的本来性质。

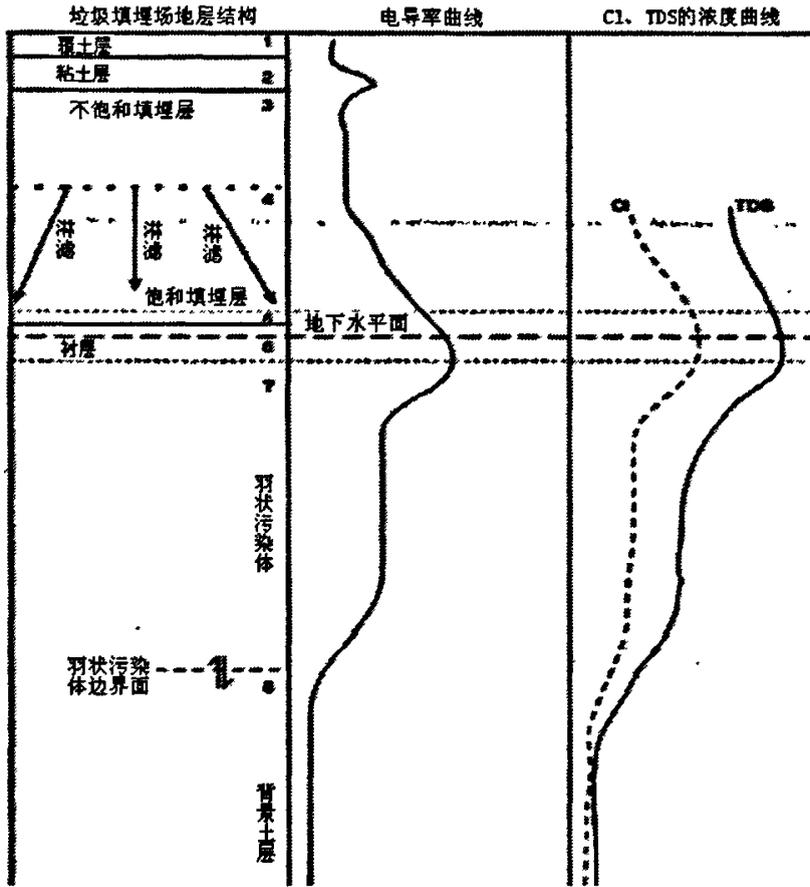


图10 垃圾填埋场理论电阻率剖面模型图

目前国外学者通常用电阻率法来圈定垃圾填埋场的边界、填埋物厚度及渗滤液扩散范围 (Barker,1990; Buselli et al.,1992; Meju,1993; Bernstone and Dahlin,1998;).

E.Aristodemou and A.Thomas-Betts(2000) 为调查垃圾填埋场地下水层污染状况,沿垂直于垃圾填埋场地下水流运动的方向布设五条电测线 (L3、L1、W1、L2、B)。测线B (填埋场正上方) 的实测电剖面 (如图11) 清楚的显示了填埋场内填充的不同性质的填埋物的边界,并且探测出地下水平面的位置 (如图11中虚线)。E.Aristodemou 和 A.Thomas-Betts通过对比填埋场一侧的测线L3和另一侧测线L1、W1、L2的实测电阻率剖面图 (如图12),大致可看出垃圾渗滤液的扩散方向及污染程度。

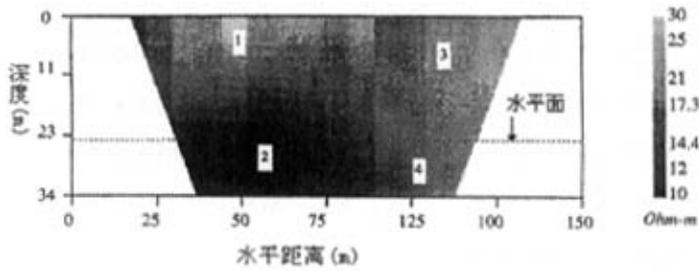


图11 测线B的实测电阻率剖面图

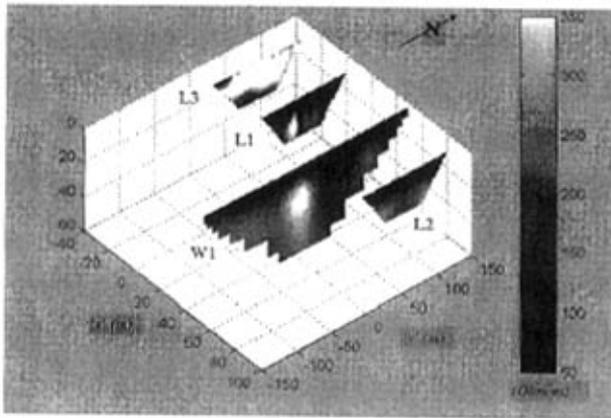


图12 测线L1、L2、L3、W1的实测电阻率剖面图

Mota et al (2004) 利用电阻率法中的温纳、偶极装置, 电测深, 自然电位法综合探测了坐落在花岗岩裂隙带上的垃圾填埋场。指出电阻率法配合其它几种电法同时探测, 相互验证, 探测效果及可靠性更好。并且由于垃圾渗滤液沿填埋场基底的花岗岩裂隙方向扩散, 通过探测出渗滤液的扩散方向探测出了裂隙发育方向。评价了电阻率法作为探测地质裂隙发育方向的一种方法是可行的。

国内的相关研究不多, 程业勋等(2004)用高密度电阻率法(HDR)、瞬变电磁法(TEM)、探地雷达法(GPR)、地温法同时检测了北京市两个垃圾填埋场。结果发现被污染的土壤和地下水呈低电阻率特征, 视电阻率在 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 左右可定性为被渗滤液污染, 垃圾场渗滤液的实测电阻率均在 $0.4 \Omega \cdot \text{m}$ 左右。并且比较了各方法的效果, 结合钻孔资料发现, 高密度电阻率法在探测土壤与地下水污染方面效果显著, 与瞬变电磁法的结果具有良好的相关性。

不少学者根据多年的研究经验提出一些需要继续研究的问题：(1) 渗滤液与土壤和地下水相互作用的物理化学规律研究甚少，使电阻率探测方法的解释还不够完善，必须近期对常见的主要污染物进行相关的物理性质研究。(2) 毒性大的污染物，其含量往往很低，引起的电阻率差异就更小，用电阻率法对其探测是急需解决的课题，解决的可能途径，第一是提高弱信息的提取技术，第二是采用综合的方法或者找出新的物理参数。

### 1.3.3 本文的研究意义与研究内容

我国的垃圾卫生填埋工程起步较晚，随着经济建设的发展和对垃圾处理的需求，目前各大中城市都在新建各种规模的垃圾填埋场。研究垃圾填埋场运营期渗滤液渗漏的实时监测技术，预防渗滤液对地下环境造成严重污染，实现垃圾填埋场的清洁生产，是摆在我国环境工作者面前的一个重要课题。

从目前的研究情况看，关于垃圾填埋场地下污染区调查的问题，国内外的学者所采用的电阻率方法多为一维或二维的方法，研究的问题多为垃圾填埋场施工建设期间及运营期的渗漏检测，渗滤液污染地下水的物理化学特征，垃圾场分布区的地质分布状况，污染物运移所必经的地质环境，用电阻率方法圈定垃圾填埋场的边界、填埋物厚度及渗滤液扩散范围及污染状况。但利用电阻率法进行地下含水层渗滤液污染区动态扩散过程及修复过程的三维实时监测的研究尚不多见。

本论文利用自行设计的三维电学观测系统，通过室内、野外实验方式开展了垃圾场渗滤液在地下含水层中的动态扩散及污染修复过程的实时监测研究。良好的监测效果显示了自行设计的监测系统和监测技术的有效性，并对于实现垃圾填埋场分布区地下含水层现状调查、污染预警及修复监测具有重要意义，是建设新型生态、智能型垃圾填埋场的重要组成部分。

本文主要研究的科学问题包括：

(1) 渗滤液侵入对不同类型的地下介质电阻率的综合影响以及渗滤液中各主要污染组分对地下介质电阻率的影响。

(2) 渗滤液污染地下含水层三维电学动态监测系统的设计，确定一种合理的电阻率采集方式，确定合理的数据处理及视电阻率剖面形成方法。

(3) 垃圾填埋场的地下含水层渗滤液污染区在视电阻率剖面上对应的异常

区特征。

(4) 如何根据视电阻率剖面上异常区的分布及扩散、运移状况判断填埋场地下含水层渗滤液污染区的扩散边界，扩散方向和速度。

(5) 在渗滤液污染区注水修复过程中，视电阻率剖面上异常区的变化特征以及如何根据异常区变化特征来判断修复效果的好坏。

(6) 三维电学动态监测系统的适用性分析，包括灵敏度、探测精度、探测深度、成本分析。

## 2 垃圾渗滤液侵入引起地下含水层的电性改变

### 2.1 垃圾渗滤液侵入对地下介质电阻率影响的研究现状

#### 2.1.1 地下介质电阻率的影响因素

土壤电阻率包含了土壤品质和物理性质的丰富信息。从 Archie (1942) 提出非饱和土的电阻率模型以来, 含水率、饱和度、孔隙度、孔隙水的导电性、土的种类、土颗粒的矿物成分被广泛认为是影响土壤电阻率的主要因素 (Sam Gyu Park et al, 1999; 刘国华等, 2004)。刘国华等 (2004) 在实验室内研究了影响土的电阻率变化因素, 认为其影响因素的主次顺序是: 含水率、孔隙水的导电性、饱和度、土的种类。郭秀军等 (2003) 也通过室内实验, 认为在含水性及密实性相同的情况下, 土中粘粒含量越多, 电阻率越小, 但如果土都在饱和状态, 电阻率则相差不大。土的电阻率是随着其含水率及饱和度的增加而逐渐减小的, 但是不同成分的土有不同的变化规律, 即使相同成分的土, 其含水率及饱和度在不同范围内变化规律也是不尽相同的, 含水率在 5%—10% 变化时, 电阻率的变化最剧烈, 当含水率大于 10% 时, 电阻率的变化较小。在饱和度或含水率一定的情况下, 土越密实, 其电阻率越大, 反之, 土越疏松, 其电阻率越小。

#### 2.1.2 不同污染物质对土的电阻率的影响

土壤孔隙水的导电性是影响土的电阻率的重要因素之一。污染物质渗入土壤后, 将改变孔隙水的导电性, 从而引起土壤电阻率改变。不同种类、不同浓度的污染物对土的电阻率改变不同。Gil Lim Yoon (2001) 研究了不同浓度的垃圾渗滤液 (体积占水的 0%、5%、10%、30%) 的侵入对不同种类的砂土 (砂、风化砂土、粉质砂土) 的电阻率的改变, 指出含有大量的无机离子及有机物质成分复杂的渗滤液, 渗入土壤孔隙中会使土的电阻率大幅度减小; 含水量一定时, 三种土的电阻率均随渗滤液浓度的增大而减小, 其中粉质砂土由于细粒含量较多, 初始电阻率较小, 因此电阻率变化幅度最小。

李金铭 (1999) 在给含水砂样 (含水率一定) 中加入了不同浓度的无机污染

物 ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{FeCl}_3$ ) 后, 实验观测结果显示砂样的电阻率均随孔隙水中污染物浓度的增大而减小。

多数学者认为石油污染的不同种类土的电阻率均增大, 油类污染物侵入地下介质引起的异常应为高阻异常 (Schneider and Greenhouse, 1992; de Ryck et al, 1993; Schneider et al, 1993; Allan J. Delaney, 2001; M. Fukue, 2001), 但是 Estella A. Atekwana et al (2000) 和 Sauck et al (1998) 在实际研究中发现地下含油污染区的低阻异常特征, 并指出污染区的电性特征随污染区的扩散在不断变化, 并直接受到地下水位面的影响。郭秀军等 (2005) 进一步深入研究发现含油污水对饱和土和不饱和土的电阻率影响正好相反。对于不饱和土而言, 含油污水的侵入会改变土的饱和度而引起其电阻率的降低, 侵入量越大其导电性越强, 而饱和土不再吸附含油污水中的水分, 同时在土颗粒表面形成油膜, 因此饱和土的电阻率随含油污水侵入量的增大而增大直到趋于稳定。

### 2.1.3 垃圾渗滤液侵入对填埋场地下介质电学性质的影响

垃圾填埋场防渗衬层下依次为包气带和饱水带, 它们之间构成一种动态的平衡过程 (图 13)。当防渗衬层发生渗漏时, 渗滤液渗入包气带和饱水带, 有机物质被生物降解, 产生大量的酸与含水土层介质发生反应, 渗滤液中的无机物质溶解于地下水中, 导致包气带和饱水带的化学和物理性质发生变化, 进而使地下介质电学性质发生改变, 这是用电阻率法探测填埋场地下污染区域的前提条件。

在垃圾填埋场发生渗漏后, 渗滤液入侵到包气带中, 土体的电阻率随着含水率的增大而减小, 当渗滤液继续向下迁移至饱水带时, 由于渗滤液中含有很多离子, 其电阻率小于水的电阻率, 因此使土层中孔隙水的电阻率减小, 进而使土层的电阻率减小。总而言之, 一般垃圾填埋场渗滤液侵入地下后, 会使土体电阻率减小, 在地下土层中形成一个低阻区域。垃圾渗滤液在土层中横向和纵向扩散, 形成一个三维的羽状体污染区域 (图 14) (Maxwell A. Meju, 2000)。通过探测地下土体电阻率的异常就可以检测到渗滤液扩散的区域。

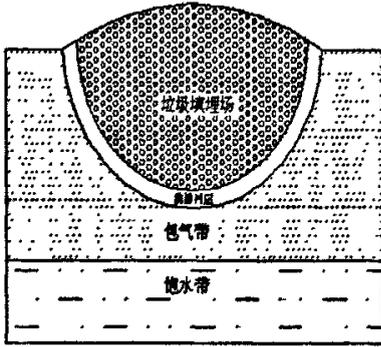


图 13 垃圾填埋场地下地质结构特征

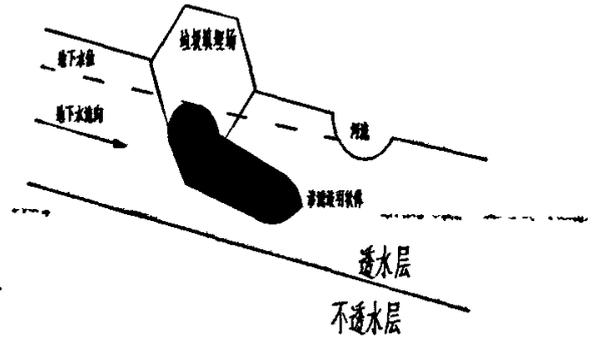


图 14 垃圾填埋场渗漏后渗滤液羽状体形态

## 2.2 渗滤液侵入对不同种类土的电阻率的改变

为深入研究渗滤液的侵入对不同类型的地下介质电阻率的改变情况,从而确定不同类型的地下介质中垃圾渗滤液污染区的电异常特征。我们进行了渗滤液侵入量对壤土、饱和砂土、不饱和砂土、粉土四种土样的电阻率改变实验。

实验所用渗滤液取自青岛市小涧西垃圾填埋场,其主要污染物组分见表 2。电阻率测试仪器采用稳压稳流供电仪和数字万用表两种,测量样品装入一个专门制作的长方形有机玻璃盒内 (22.5cm×5.5cm×5.5cm),供电电极、测量电极均用铜片,实验装置及线路连接如图 15。测量样品有四类:壤土、饱和砂土、不饱和砂土、粉土。各种土的基本物理指标如表 3。

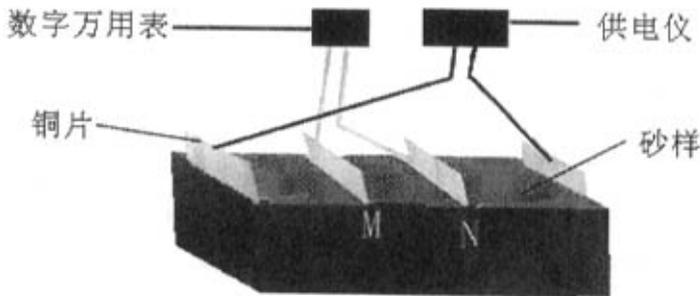


图 15 电阻率测试装置图

表 2 实验用垃圾渗滤液的主要污染物浓度

水样	COD(mg/l)	NH <sub>3</sub> -N(mg/l)	PH	Hg(ug/l)	电导率(us/cm)
渗滤液	5682.56	2044.5	7.74	748	3300

表 3 土样的基本物理指标

种类	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比重	含水率(%)	孔隙比	饱和度(%)
壤土	1.39	2.7	15.5	1.244	33.6
不饱和砂土	1.72	2.65	12.6	0.734	45.5
饱和砂土	1.90	2.66	29.1	0.807	95.9
粉土	1.49	2.7	15.6	1.095	38.5

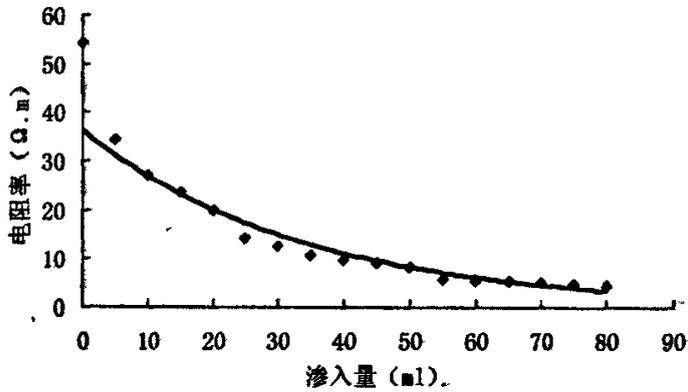


图 16 渗滤液对不饱和砂土电阻率的变化

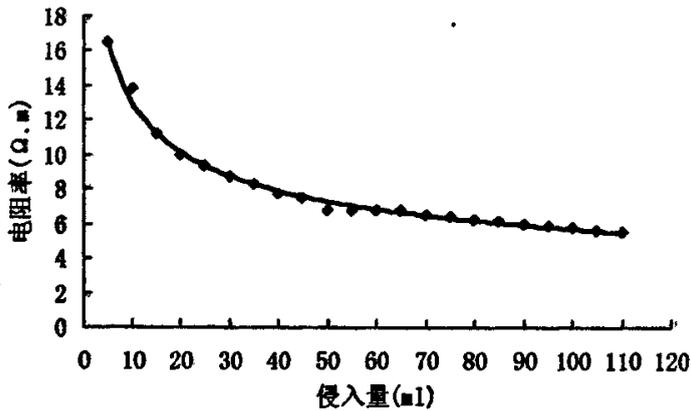


图 17 渗滤液对饱和砂土电阻率的变化

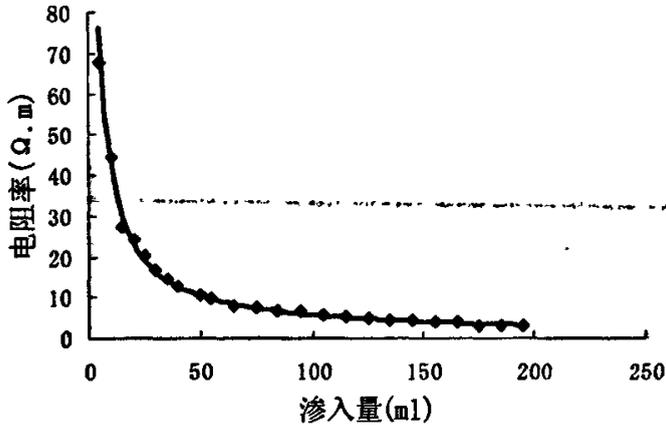


图 18 渗滤液对壤土电阻率的改变

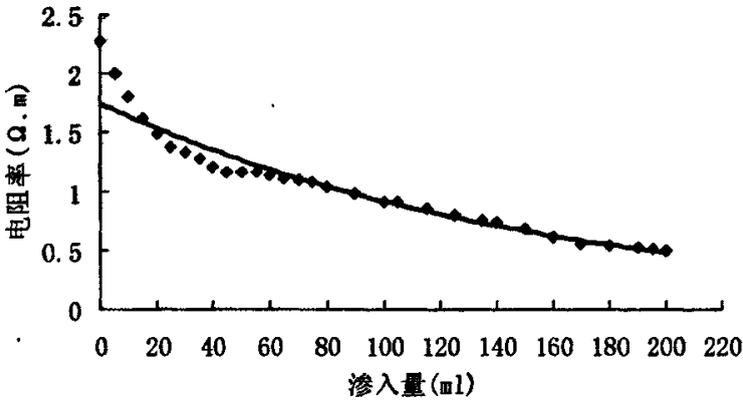


图 19 渗滤液对粉土电阻率的改变

图 16 为不饱和砂土中渗滤液侵入量与其电阻率的关系曲线，图中实线为指数函数关系拟合得到的趋势线，拟合公式为： $y = 37.398e^{-0.0308x}$ ，相关系数  $R^2 = 0.9529$ 。不饱和砂土初始电阻率为  $54.4 \Omega.m$ ，随渗滤液注入量的增大，其电阻率快速降低，当渗滤液注入量达到  $25ml$  时，电阻率降低幅度减缓，此时电阻率为  $14.3 \Omega.m$ ，经计算此点砂土含水率为  $15\%$ ，饱和度为  $54.2\%$ ；当注入量达到  $55ml$  时，电阻率降低趋于平缓，此点砂土含水率为  $17.9\%$ ，饱和度为  $64.6\%$ 。

图 17 为饱和砂土中渗滤液侵入量与其电阻率的关系曲线，图中实线为幂函数关系拟合得到的趋势线，拟合公式为： $y = 29.735x^{-0.3591}$ ，相关系数  $R^2 = 0.9927$ ，

相关性很高。饱和砂土整体电阻率改变量较小，初始电阻率为  $20 \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻率随渗滤液注入量增大而降低，当渗滤液注入量达到  $50 \text{ml}$  时，此后电阻率降低趋于平缓，此时砂土电阻率为  $6.7 \Omega \cdot \text{m}$ ，含水率为  $33.8\%$ ，饱和度为  $100\%$ 。

图 18 为壤土中渗滤液侵入量与其电阻率的关系曲线，图中实线为幂函数关系拟合得到趋势线，拟合公式为： $y = 303.36x^{-0.8613}$ ，相关系数  $R^2 = 0.9955$ ，相关性很高。壤土初始电阻率较高为  $122 \Omega \cdot \text{m}$ ，最初电阻率随渗滤液注入量增大幅度降低，当渗滤液注入量达到  $20 \text{ml}$  时，此后电阻率降低幅度减小，此点电阻率为  $24.2 \Omega \cdot \text{m}$ ，经计算壤土此时含水率为  $17.9\%$ ，饱和度为  $39\%$ ；当注入量达到  $65 \text{ml}$ ，电阻率降低趋于平缓，此时壤土含水率为  $23.4\%$ ，饱和度为  $50.8\%$ ；当渗滤液注入量达到  $175 \text{ml}$  时，壤土含水率为  $38.1\%$ ，饱和度为  $82.1\%$ ，此后电阻率不再降低。

图 19 为粉土中渗滤液侵入量与其电阻率的关系曲线，图中实线为指数函数关系拟合得到的趋势线，拟合公式为： $y = 1.7579e^{-0.0066x}$ ，相关系数  $R^2 = 0.9552$ 。粉土初始电阻率较低为  $2.3 \Omega \cdot \text{m}$ ，最初电阻率随渗滤液注入量增大降低，当渗滤液注入量达到  $45 \text{ml}$  时，电阻率降低幅度减缓，此时粉土电阻率为  $1.16 \Omega \cdot \text{m}$ ，含水率为  $21.3\%$ ，饱和度为  $51.5\%$ ；当注入量达到  $170 \text{ml}$  时，电阻率降低趋于平缓，基本不再降低，此时粉土含水率为  $35\%$ ，饱和度为  $86.3\%$ ，已达饱和。

综上所述，对比实验测试结果图 16、17、18、19 可以看到，粉土的初始电阻率最小，而壤土的初始电阻率最大。原因是粉土的细粒含量最多，在含水性及密实性基本一致的情况下，土中细粒含量越多，电阻率越小。渗滤液的注入对四种不同种类的土样的电阻率的改变作用明显，整体表现为随注入量的增多，电阻率均逐渐降低，并且初始电阻率改变幅度较大，当渗滤液渗入量达到一定体积后，电阻率降低幅度减小，存在一个突变点，再后来电阻率降低趋于平缓。在工程实践中，按饱和度的大小将土的饱水程度划为如下三种状态： $S_r < 50\%$  为稍湿的， $S_r = 50\% - 80\%$  为很湿的； $S_r > 80\%$  为饱和的。实验中的不饱砂土、壤土、粉土这三种不饱土样初始饱和度均小于  $50\%$ ，注入渗滤液电阻率快速降低，突变点的饱和度均达到  $50\%$  以上，此时土样为很湿，因此之后电阻率降低幅度减缓，当继续注入渗滤液，电阻率趋于平缓，但仍稍有降低，此时土样饱和度均大于  $80\%$ ，已达饱和。饱和砂土初始饱和度已很高为  $95.9\%$ ，因此电阻率整体降低较缓，当饱

和度达到 100%后, 电阻率趋于平缓。究其原因主要是由于渗滤液渗入不饱和土样中首先提高了不饱和土的孔隙水含量, 同时提高了饱和度, 这两者的变化都会提高土样的导电性。虽然渗滤液中的污染物质使得土样孔隙水的导电性增强, 提高土样的导电性。但相对于前两者的影响, 其影响程度占次要地位。

渗滤液侵入后引起地下介质电阻率的明显降低, 为采用电阻率法进行渗滤液污染区探测提供了前提。壤土、不饱和砂土等含水率较低且粘粒含量较小的地下介质, 初始电阻率大, 渗滤液侵入后, 电阻率整体改变幅度大, 因此渗滤液污染区的低阻异常明显。但粉土, 饱和砂土等初始电阻率已经较小的土, 渗滤液侵入后并不能使其电阻率再明显降低, 形成的低阻异常不明显, 针对此类地下介质的渗滤液污染区的电阻率探测难度较大。

### 2.3 渗滤液中各主要污染组分对土的电阻率的改变

渗滤液中污染物成分对土样电性改变实验是通过室内配样的方式实现的。用葡萄糖溶液,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液,  $\text{NaCl}$  溶液,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液分别代表渗滤液主要污染成分中的 COD、氨氮、氯化物、硫酸盐来配制。为了使实验更符合实际情况, 将葡萄糖溶液,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液,  $\text{NaCl}$  溶液,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度 (换算后) 调配得与真实的垃圾渗滤液中 COD、氨氮、氯化物、硫酸盐在垃圾填埋前期—后期不同时间段的浓度一致 (见表 4) (刘海生, 2003)。测试土样为砂土, 基本物理指标如表 5, 电阻率测试装置如图 15。

表 4 垃圾填埋场渗滤液中各主要污染组分随时间的变化趋势

污染物成分	时间/年			
	0~5	5~10	10~20	>20
pH	5~6	6~7	7~7.5	7.5
COD (mg/l)	15000~25000	1000~20000	1000~5000	<1000
氨氮 (mg/l)	500~1500	300~500	50~200	<30
Cl (mg/l)	1000~3000	500~2000	50~200	<100
硫酸盐(mg/l)	500~2000	200~1000	300~500	<50

表 5 土样的基本物理指标

种类	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比重	含水率 (%)	孔隙比	饱和度 (%)
砂土	1.69	2.65	13.5	0.78	46.8

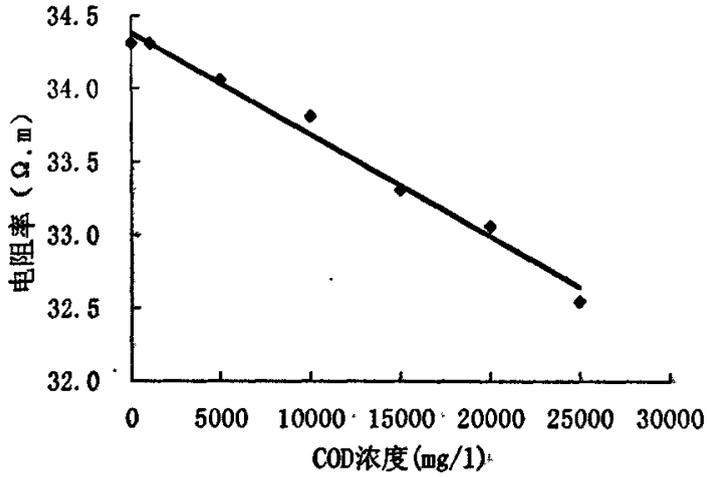


图 20 砂土孔隙液 COD 浓度与其电阻率的关系

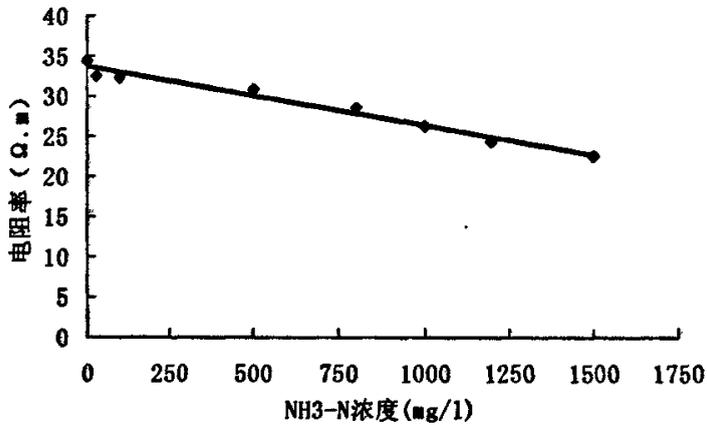


图 21 砂土孔隙液氨氮浓度与其电阻率的关系

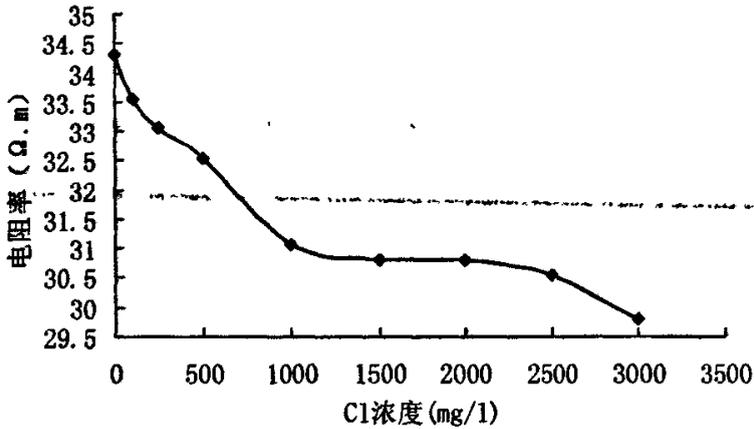


图 22 砂土孔隙氯化物浓度与其电阻率的关系

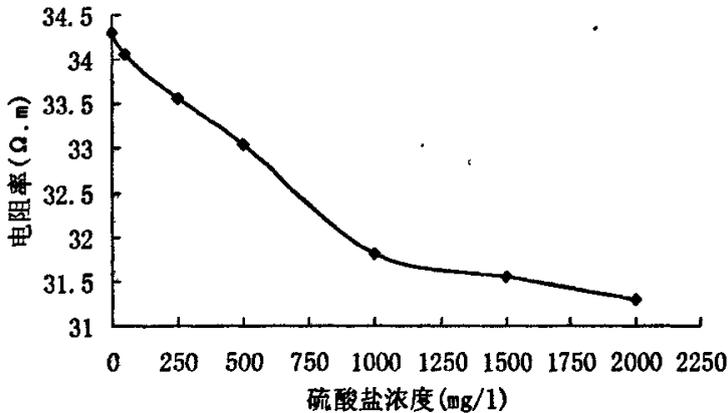


图 23 砂土孔隙水中硫酸盐的浓度与电阻率的关系

图 20、21、22、23，显示了垃圾填埋场运营的不同时期，渗滤液中各主要污染组分对砂土电阻率的改变过程。其中图 20 为砂土孔隙液 COD 浓度与其电阻率的关系，图中实线为线性拟合曲线。砂土初始电阻率为  $34.3 \Omega \cdot m$ ，其电阻率随 COD 浓度的增大而降低，基本成线性关系，拟合公式为： $y = -7E-05x + 34.385$ ，相关系数  $R^2 = 0.9877$ ，相关性较高。

图 21 为砂土孔隙液氨氮浓度与其电阻率的关系，图中实线为线性拟合曲线。其电阻率随氨氮浓度增大而降低，基本成线性关系，拟合公式为： $y = -0.0073x + 33.646$ ，相关系数  $R^2 = 0.9751$ ，相关性较高。

图 22 为砂土孔隙液氯化物浓度与其电阻率的关系，最初砂土电阻率随氯化钠浓度升高而快速降低，基本成线性关系，当浓度达到  $1000 \text{mg/l}$  后，电阻率降

低趋于平缓，当浓度达到 2000mg/l 后，其电阻率继续降低，但降低幅度已小于初始电阻率降低幅度。

图 23 为砂土孔隙水中硫酸盐的浓度与电阻率的关系，最初砂土电阻率随硫酸盐浓度升高而快速降低，成线性关系，当浓度达到 1000mg/l 后，电阻率降低幅度减小。

综上所述，砂土孔隙液中 COD、氨氮、Cl 离子、硫酸盐的浓度升高对土样电阻率整体的改变量不大，尤其是砂土孔隙液中 COD（有机质）的浓度对土样的电阻率改变很小。改变的过程规律也不尽相同，但都表现为随浓度的升高而降低，其中 COD、氨氮对电阻率改变基本成线性关系，氯化物、硫酸盐对电阻率的改变过程有起伏，存在突变点（氯化物、硫酸盐浓度达到 1000mg/l）。对比图 20、21、22、23，氨氮对电阻率的整体改变幅度最大，即垃圾渗滤液中污染组分氨氮的浓度对被污染地下介质的电阻率起决定性作用。

## 2.4 小结

根据垃圾渗滤液侵入对地下介质电阻率影响的实验研究，可以得出以下结论：

(1) 渗滤液侵入地下介质后，导致地下渗滤液污染区与周围介质的电阻率存在差异，为用电阻率法进行垃圾填埋场地下水含水层污染调查提供了理论基础。

(2) 渗滤液的侵入对不同类型地下介质电阻率的改变作用明显，整体表现为随注入量的增多，电阻率逐渐降低，当侵入污染介质的污染物达到一定的浓度后，电阻率降低幅度减小，最后趋于平缓。原因是渗滤液渗入不饱和土样中首先提高了不饱和土的孔隙水含量，同时提高了饱和度，这两者的变化都会提高土样的导电性。虽然渗滤液中的污染物质使得土样孔隙水的导电性增强，但相对于前两者的影响，其影响程度占次要地位。

(3) 细粒含量高、含水率高的地下介质初始电阻率小，渗滤液侵入后电阻率降低幅度不大，因此形成的低阻异常不明显，针对此类地下介质的渗滤液污染区的电阻率探测难度较大。

(4) 虽然渗滤液中 COD、氨氮、Cl 离子、硫酸盐等不同污染物成分对地下介质电性改变量很小，改变的过程规律也不尽相同，但都表现为随浓度的升高而降低。其中氨氮对地下介质电阻率的改变幅度最大。

### 3 渗滤液污染地下水含水层三维电学监测系统设计

#### 3.1 三维电学监测系统构成

三维电学监测系统(如图 24)包括:

(1) 电传感器系统, 由埋设于垃圾填埋场场区内通过电缆相连的电传感器组成, 向地下供电建立电场并监测电场电位, 实现监测填埋场衬层下的电阻率的功能;

(2) 电传感器信号转换系统, 接受数据处理与分析系统的指令, 选择填埋场区内电传感器的供电和测量方式, 同时将电传感器的测量信号传给数据处理与分析系统;

(3) 数据处理与分析系统, 控制整个三维在线监测系统的各个动作, 同时对采集数据进行实时处理分析, 判断垃圾填埋场的渗漏点和污染扩散范围。

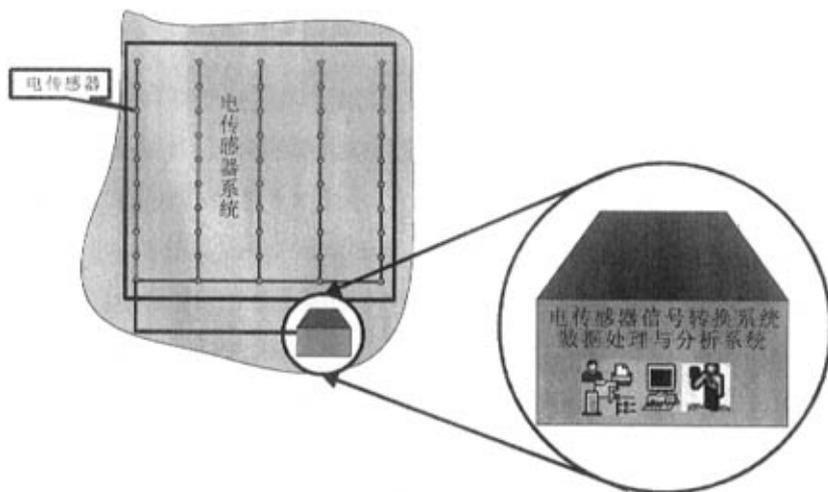


图 24 三维在线监测系统结构俯视图示意图

在实际运营的垃圾填埋场中, 电传感器系统布设在新建垃圾场防渗层的下方, 电传感器系统通过电传感器信号转换系统(智能电缆)接到填埋场地表, 与数据处理与分析系统连接。实际工作可以在垃圾填埋场区内设置一个污染监测站(见图 24 中监测站), 电传感器信号转换系统和数据处理与分析系统整合在一起, 通过监测人员控制整套系统的运行及维护, 在垃圾填埋场运营期、废弃后及

污染修复期可对其进行实时动态监测，实现垃圾填埋场的智能化、环保化。

### 3.2 电传感器的布设

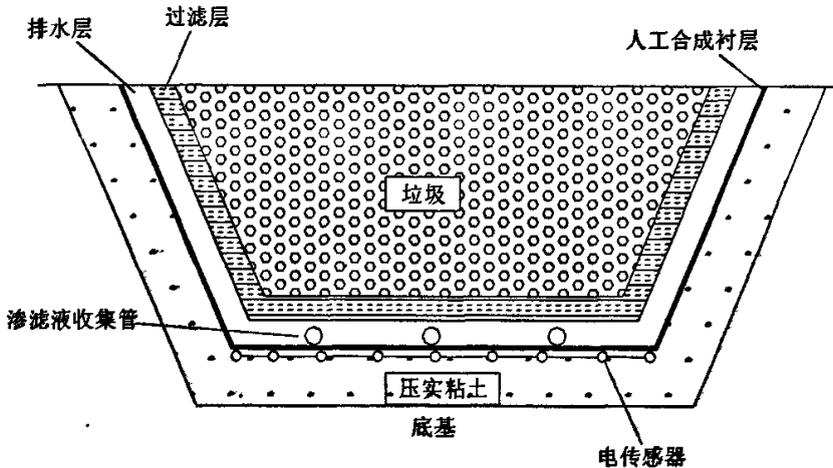


图 25 系统结构垂向剖面图

电传感器通常在垃圾填埋场人工合成衬层（最常用的是高密度聚乙烯膜）下的粘土层中埋设（其垂向剖面见图 25）。电传感器的布设根据垃圾填埋场分布区的地层情况而定，在需要特殊监测的位置（比如垃圾渗滤液的汇集处），可以加密电传感器的布设。电传感器的布设间距根据地下水位面的深度、监测的精度和监测成本共同确定。电传感器的间距可在 5-20 米区间不等。

### 3.3 系统监测流程

在垃圾填埋场的衬层系统建设完毕填埋垃圾之前，对电传感器供电测量，得到垃圾填埋场下土壤未受污染的电阻率背景值。在填埋场的运营期间，定期（检测频率根据填埋场实际运行情况来定）用电阻率法对垃圾填埋场进行实时监测，用于确定渗漏是否发生以及渗漏点的位置及数量。渗漏点确定后，可以通过选取不同的电传感器作为供电和测量电极，测量渗漏点下一定深度、一定范围内的电阻率分布情况，并根据其电性分布差异进而确定渗滤液形成的羽状体在地下土层的扩散区域，根据对不同时期的电性分布比较可以确定渗滤液污染区域的变化规律，推算污染物可能扩散的范围。具体监测流程见图 26。

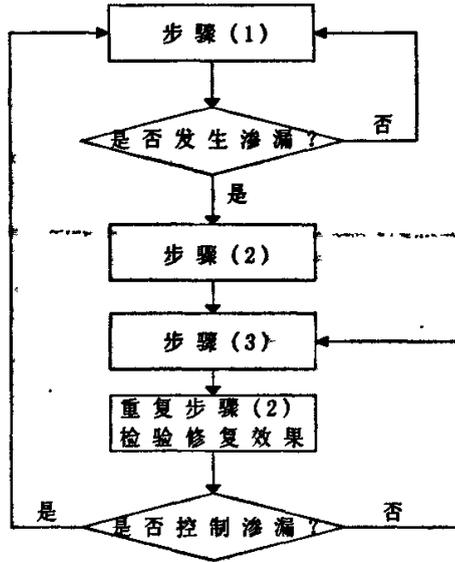


图 26 系统监测流程图

- (1) 测量垃圾填埋场下土壤的电阻率背景值。根据垃圾填埋场实际运行情况，定期测量不同电传感器之间的自然电位，当发现自然电位差异时，推断垃圾填埋场渗漏点的位置及数量；
- (2) 通过外加一定的工作电压，测量任意两个电传感器之间的电压值和电流值，利用数据处理系统得到渗漏的渗滤液形成的羽状体形态，另外也验证了步骤 (1) 中推断的渗漏点位置及数量的准确性；
- (3) 根据推断的渗滤液羽状体的扩散形态，采取相应的工程防渗措施（如垂直防渗墙等）防止渗漏的渗滤液进一步对地下环境尤其是地下水造成的严重污染。重复步骤 (2) 以检测防渗工程的工程效果。当确定防渗工程有效地控制了渗滤液对地下的污染后，改用步骤 (1) 的自然电位法定期监测；否则一直采用步骤 (2) 进行观测直至达到要求为止。

## 4 渗滤液污染地下水含水层及修复过程的三维动态监测研究

### 4.1 室内模拟实验

#### 4.1.1 实验设计

室内模拟实验是在一个有机玻璃钢槽(150cm×150cm×200cm)中进行的(如图 27)。槽的最底层铺设一定坡度 30cm 厚的砂土层,砂土层上铺设 2cm 厚的粘土层,粘土层上铺设一层塑料膜,塑料膜上铺设用来模拟地下水含水层的 40cm 厚砂土层,最上层为厚度约 2cm 的粘土层(含水率 39.8%),用来模拟垃圾填埋场的防渗衬垫层(如图 28)。在模拟地下水含水层一端的 10cm 深度水平埋设进水管;另一端 40cm 深度水平埋设排水管。进水管及排水管上均匀布有小孔,以保证含水层中的注水和排水过程均衡,实验时可通过和进水管相连的水龙头控制地下水流速。渗滤液注入点位于模拟含水砂层厚度较薄的一侧,通过导管和实验槽上方的渗滤液箱相连,渗滤液的注入速度由水箱下部阀门控制。整个装置可用来模拟垃圾填埋场渗滤液污染地下水含水层的过程。

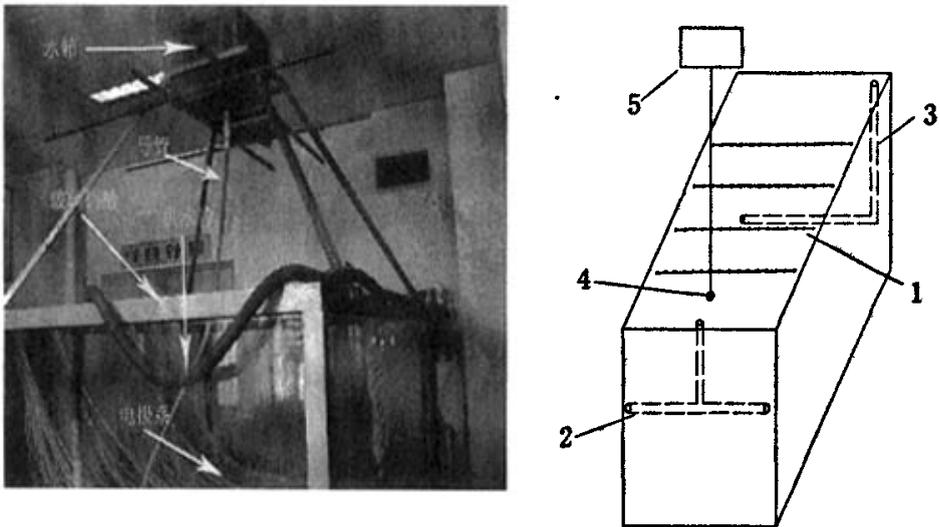


图 27 三维电学监测系统室内模型图

(1 电传感器系统 2 进水管 3 排水管 4 渗漏点 5 渗滤液箱)



图 28 实验槽中土层分布图

为了克服室内实验的尺度效应，监测实验时在粘土层表面布设 4 列电传感器，列间距 30cm；每一列 16 个电传感器，相邻电传感器间距 6cm。每一个电传感器通过智能电缆（电传感器信号转换系统）与 E60B 型高密度电阻率采集仪相连。渗漏点位于第一列电传感器前面的中心位置（见图 29）。渗滤液取自青岛市小涧西垃圾填埋场，渗滤液主要污染组分浓度见表 2，侵入的渗滤液总体积为 20L。

向模拟土层注入渗滤液之前先进行本底监测，得到含水层电阻率背景值。然后将渗滤液开始注入土层，为了模拟真实垃圾填埋场渗滤液缓慢渗漏的过程，将流速控制为 0.1ml/s。同时打开进、排水管，模拟地下水在含水砂层中的流动，保证注入渗滤液随地下水的流动而扩散。在此期间定期监测土层的电阻率变化。

在渗滤液污染监测实验结束后，进行污染修复监测实验：停止注入渗滤液，增大进水管注入水量，同时在砂土层的另一侧排水，模拟人工注水清洗地下污染含水层的修复过程。在注水修复期间定期监测土层的电阻率变化。

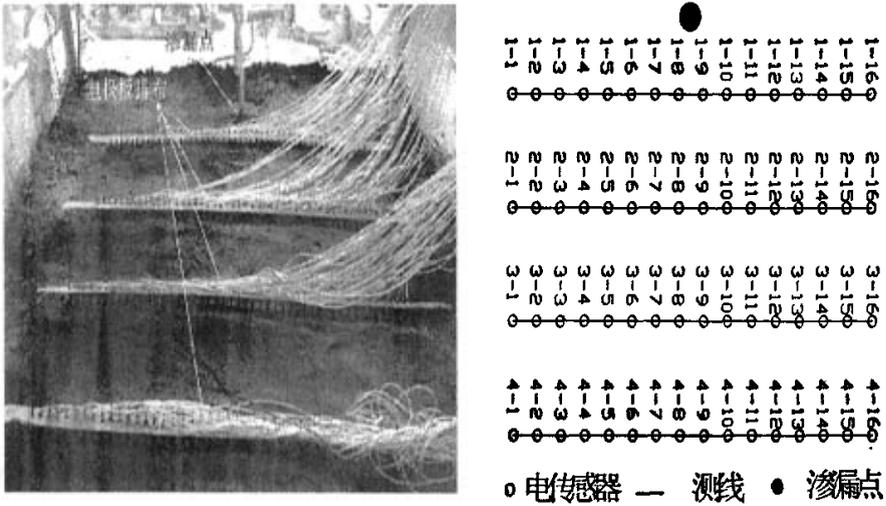


图 29 电传感器系统布设图

#### 4.1.2 数据处理及视电阻率剖面的形成

##### (1) 数据处理

整个监测系统的视电阻率测量通过二极装置实现。无穷远极布设在整个电极系统的一侧有限距离内，在数据处理时通过远极校正技术将其校正到无穷远。

视电阻率由公式 (1) 求得：

$$\rho_{\text{观测}} = 2 \pi a \Phi / I \quad (1)$$

其中： $\Phi$  为测量电位值， $I$  为供电电流值， $a$  为电极传感器系统中供电和测量电极间距。

无穷远极效应由公式 (2) 确定：

$$\rho_s = \rho_{\text{观测}} / f \quad (2)$$

其中： $f = (1/r_{11} - 1/r_{12} - 1/r_{21} + 1/r_{22}) / (1/r_{11})$  称为远电极校正系数。 $r_{11}$ 、 $r_{12}$ 、 $r_{21}$ 、 $r_{22}$  分别为电极观测系统中的电流、电位极和两个无穷远极间的距离。其相对位置关系见图 30。

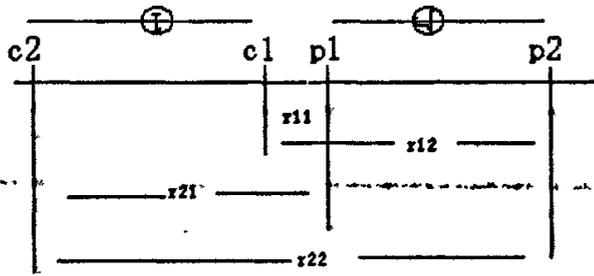


图 30 二极观测装置的电极位置关系（其中：C1、C2 为电流极、P1、P2 为电位极）

## (2). 数据剖面的形成

根据二极法原理，以垂直于测线方向为  $x$  轴，平行于测线方向为  $y$  轴，深度方向为  $z$  轴，电极测点 1-1 为原点建立直角坐标系，采集的视电阻率数据点在供电、测量极中点，深度为极间距一半，对应坐标为  $(x, y, z)$  的位置。取  $z$  值相同（即相同深度）的  $(x, y, \rho_s)$  数据，采用 Surfer 软件对数据进行网格化处理，确定不同电阻率所代表的不同颜色（色阶），绘制图像，即可以得到地下介质不同深度处的视电阻率剖面图。另外，取  $x$  值相同（即沿测线方向）的  $(y, z, \rho_s)$  数据，利用 Surfer 软件处理数据，同样确定色阶，可以得到沿测线方向上的电阻率在深度上的反映，即纵向电阻率剖面图。通过这样的处理以后，可以在电阻率剖面图上通过等值线及颜色的变化比较直观的反映渗滤液动态扩散的过程。

### 4.1.3 室内模拟实验结果分析

#### 4.1.3.1 渗滤液污染地下水层过程的电剖面动态变化

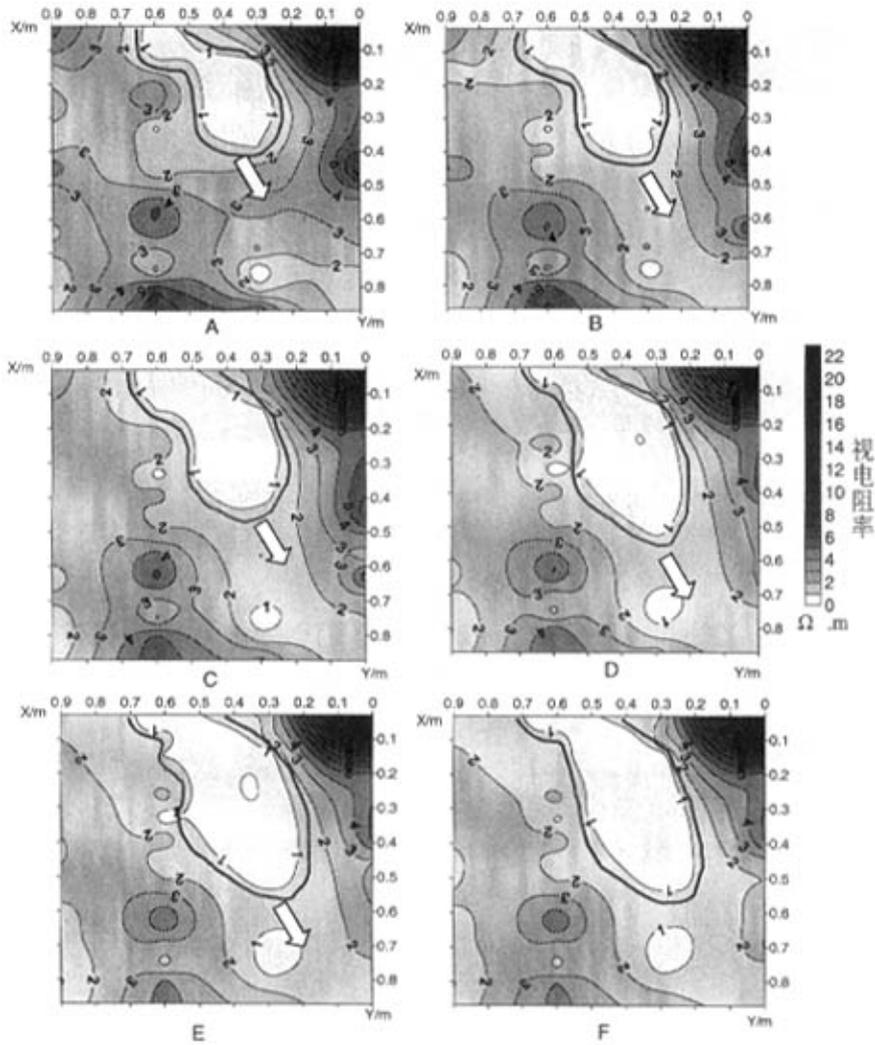


图 31 污染过程地下 0.06m 处视电阻率动态变化水平剖面图

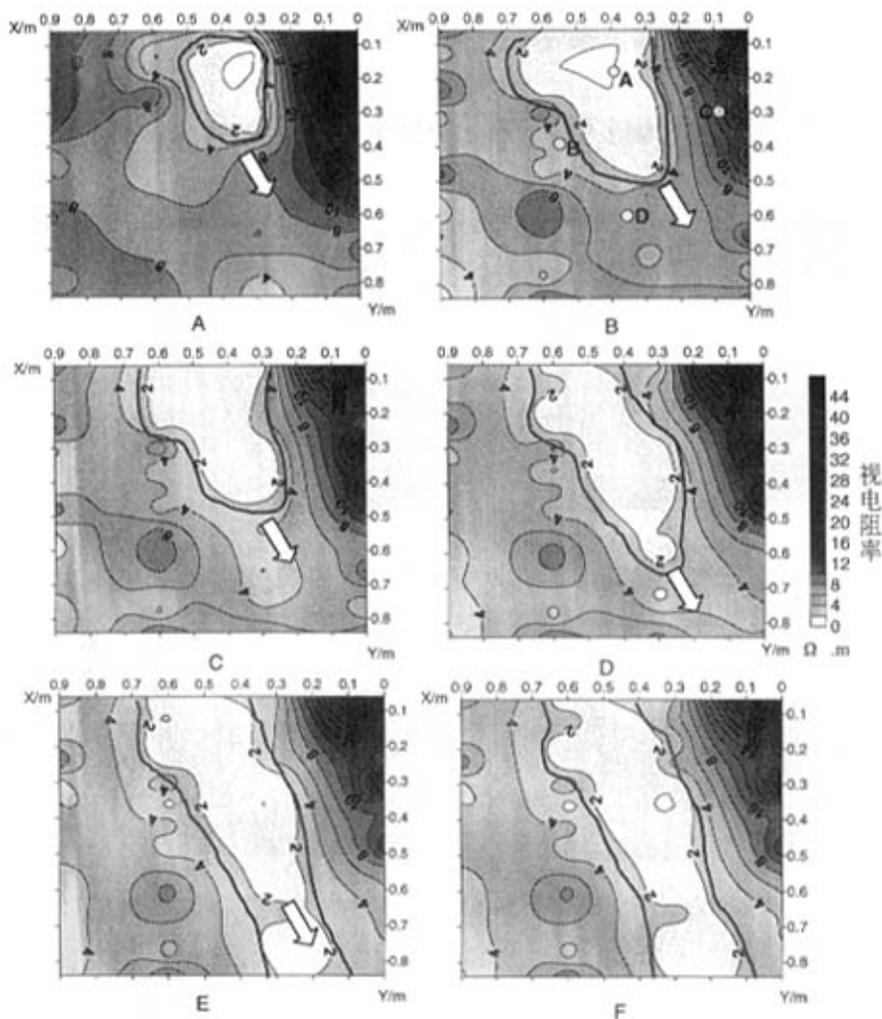


图 32 污染过程地下 0.12m 处视电阻率动态变化水平剖面图

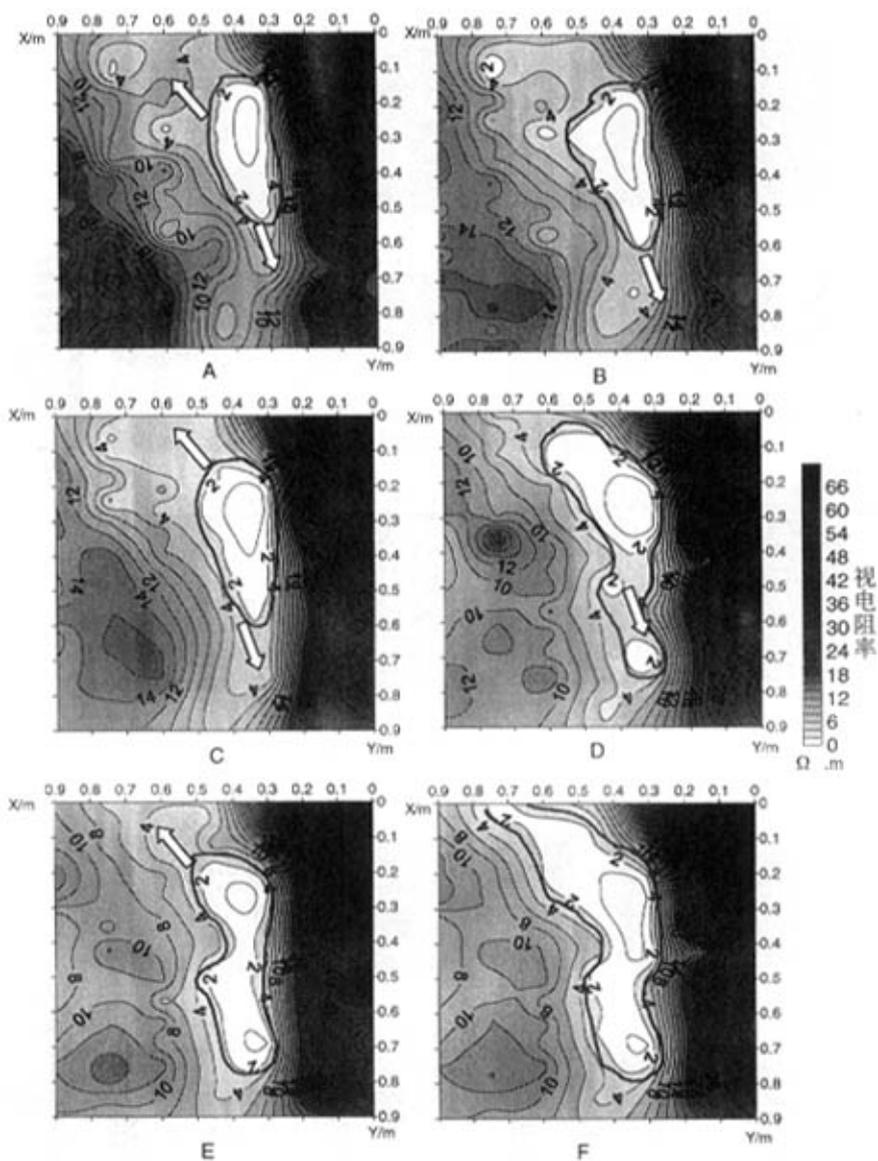


图 33 污染过程地下 0.3m 处视电阻率动态变化水平剖面图

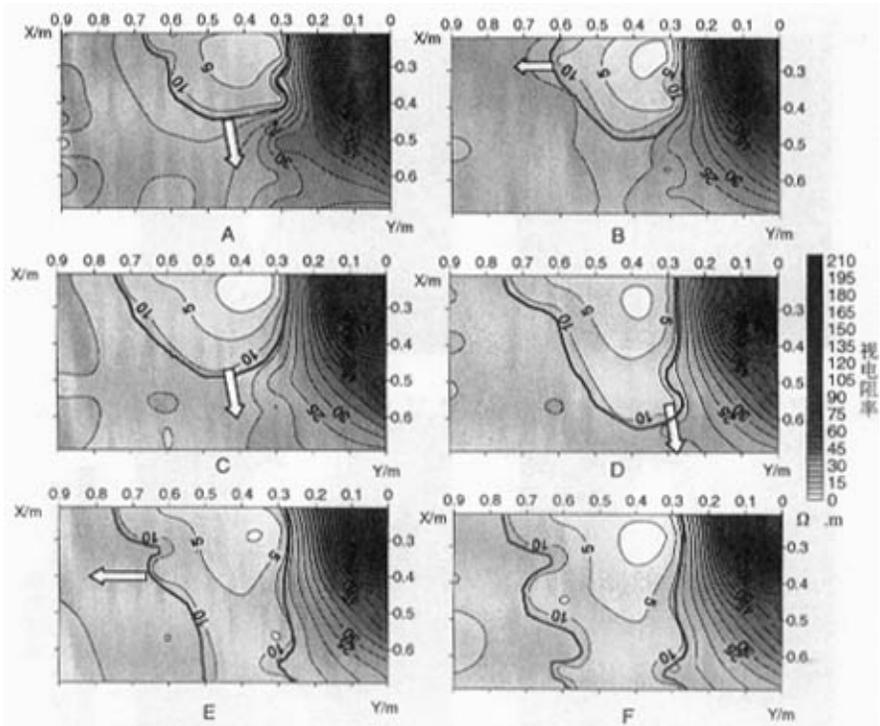


图 34 污染过程地下 0.42m 处视电阻率动态变化水平剖面图

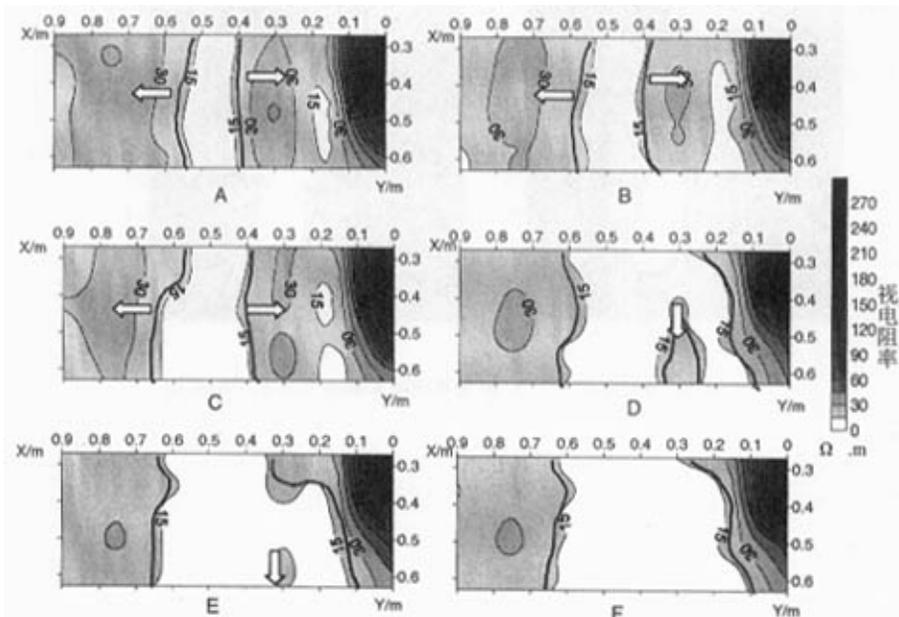


图 35 污染过程地下 0.6m 处视电阻率动态变化水平剖面图

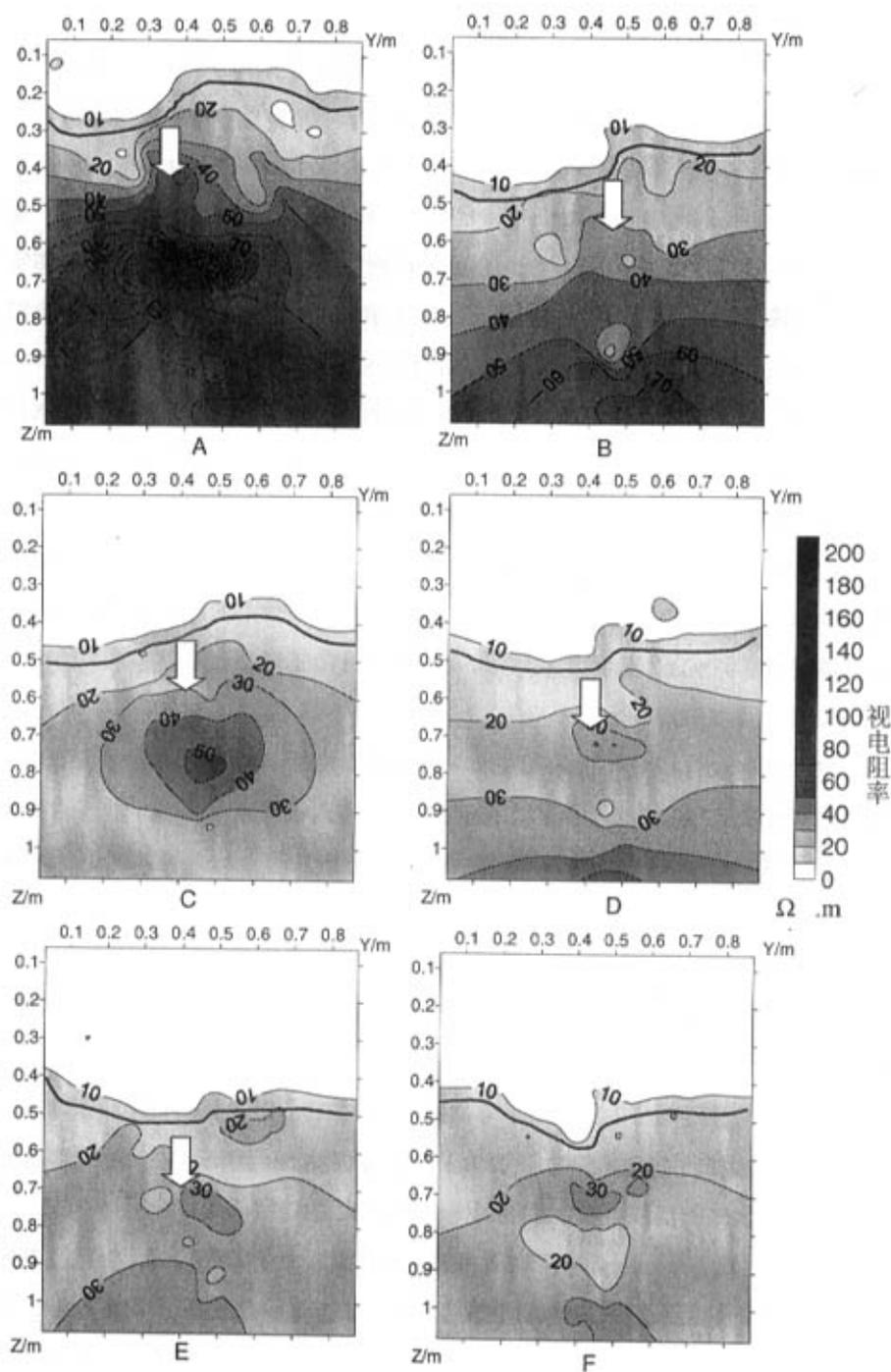


图 36 污染过程  $X=0.3\text{m}$  处的纵向视电阻率动态变化图

### (1) 污染区电剖面动态变化特征

污染过程中监测得到的地下介质不同深度视电阻率数据见附表 1。图 32 为渗滤液侵入过程中不同时期监测得到的地下 0.12m 处水平分布位置视电阻率动态变化剖面图。其中图 32A、B、C、D、E、F 依次为渗滤液侵入 0 小时（通水后背景）、12 小时、24 小时、36 小时、48 小时、60 小时后监测到的电剖面图。如图 32A，含水砂层视电阻率不均一是由原始砂层密实度不同造成的，通水后密实度小的区域孔隙度大，含水量大，使得电阻率值偏低，出现低阻异常区。视电阻率小于  $2\Omega\cdot\text{m}$ （如图 32A 中粗框线）。高阻异常区（图 32A 中视电阻率大于  $10\Omega\cdot\text{m}$  区域）则是由于土层较密实使得含水量变小所致。图 32B 显示渗滤液侵入含水层后首先向侵入点附近疏松的部位汇集，由于渗滤液的侵入会引起含水砂层电阻率的降低，因此汇集的结果使得低阻异常区的分布范围扩大。随着渗滤液的不间断侵入，汇集区沿含水层的疏松部位扩散表现为低阻异常区沿一定方向的扩展（如图 32B、C、D）。当渗滤液连续侵入 48 小时后，从图 32E 中低阻区的贯通可以反映出渗滤液在测试区已形成运移通道，并随渗滤液的不间断侵入沿已经形成的运移通道扩散（见图 32F）。

地下 0.06m 处水平电剖面（图 31）的动态变化规律与地下 0.12m（图 32）的相似：两者原始砂层的低阻异常区位置一致，侵入渗滤液后低阻异常区的扩展方向（如图中箭头）基本一致，低阻异常区扩展范围有差异。可知地下 0.06m 与 0.12m 的渗滤液污染区扩散方向一样，地下 0.06m 处比 0.12m 处的污染区扩散范围小。

图 33 为地下 0.3m 处水平电剖面动态变化图。如图，低阻异常区（图中粗框线）首先向左上方和右下方同时扩展（如图 33A、B、C），扩散速度较慢，扩展范围小，然后快速向左上方及右下方扩展（如图 33D、E），扩展范围快速增大，并逐渐形成运移通道（如图 32F）。可知地下 0.3m 的渗滤液污染区的实际运移状况与电剖面上反映的低阻异常区扩展规律一致，如图中箭头所示。

图 34 为地下 0.42m 处水平电剖面动态变化图。原始砂层的低阻异常区首先向下方扩展，速度很慢（图 34A）；紧接着向左方扩展，速度增快（图 34B）；然后继续快速向下方扩展（图 34C、D），并逐渐形成向下方的运移通道，继而向左方扩展（图 34E）。

图 35 为地下 0.6m 处水平电剖面动态变化图。原始砂层的低阻异常区首先向左方和右方同时扩展，扩展速度较慢（图 35A、B）；紧接着快速向右方扩展（图 35C），然后低阻异常区逐渐向下扩展，形成运移通道（图 35D、E）。

图 36 为渗滤液侵入过程中不同时期监测得到的  $X=0.3\text{m}$  处纵向电阻率动态变化剖面图。其中图 36A、B、C、D、E、F 依次为渗滤液侵入 0 小时（背景）、12 小时、24 小时、36 小时、48 小时、60 小时后监测到的电剖面图。最上层为低阻异常区（如图 36 中粗线），视电阻率小于  $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 。随着渗滤液的连续侵入，渗滤液向下扩散，渗滤液污染区向下推移，在电剖面上反映为：低阻异常区逐渐向下扩展，并且土层不同深度的视电阻率整体逐渐降低。

可见在渗滤液污染地下水含水层的过程中，渗滤液污染区的动态扩散过程可以通过不同时期监测的视电阻率剖面图中低阻异常区的扩展过程和视电阻率值的变小得到反映。该系统可动态监测渗滤液污染地下水含水层的过程。

## (2) 污染区扩散边界的确定

水平方向上以  $Z=0.12\text{m}$  深度处的视电阻率动态变化图（图 32）为例，图中边界为  $2\ \Omega\cdot\text{m}$  的低阻异常区域（如图 32 中粗框线）随着渗滤时间的延长，逐渐向图中箭头所示方向扩展。因此认为在该深度的电剖面上， $2\ \Omega\cdot\text{m}$  可以作为污染区扩散的边界。同样道理，在其它深度处也出现一个比较明显的低阻区域边界。各层污染区扩散边界的视电阻率值见表 6。

表 6 含水层不同深度处渗滤液污染边界的视电阻率值

深度 $Z$ (m)	视电阻率值 ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
0.06	1
0.12	2
0.3	2
0.42	10
0.6	15

纵向上，以  $X=0.3\text{m}$  处的视电阻率动态变化图（图 36）为例，图中边界为  $10\ \Omega\cdot\text{m}$  的低阻异常区域（如图 36 中粗线）随着渗滤时间的延长，逐渐向下扩展。因此认为在  $X=0.3\text{m}$  处的纵向电剖面上， $10\ \Omega\cdot\text{m}$  可以作为渗滤液纵向扩散的边界。

#### (4) 污染区扩散速度的确定

对比  $Z=0.12\text{m}$  深度处的不同时期监测的电剖面上的低阻异常区范围(图 32A、B、C、D、E、F), 经分析计算得到, 渗滤液污染区在  $y$  轴方向上的扩散速度为: 渗滤液侵入 0-12 小时内, 扩散速度为  $2.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 12-24 小时内, 在  $y$  轴方向上基本没有扩散; 24-36 小时内, 扩散速度为  $3.5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 36-48 小时内, 为  $6.9 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。可见当渗滤液侵入 0-12 小时内, 初始扩散速度较慢; 12-24 小时内, 处于渗滤液向土层疏松处汇集阶段, 扩散基本停滞; 当侵入 24-36 以及 36-48 小时内, 运移通道逐渐形成, 因此扩散速度逐渐增快。

地下  $Z=0.06\text{m}$  深度处渗滤液污染区在  $y$  轴方向上的扩散速度为: 渗滤液侵入 0-12 小时内, 扩散速度为  $6.9 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ; 12-24 小时内, 扩散速度为  $2.3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ; 24-36 小时内, 扩散速度为  $2.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 36-48 小时内, 为  $2.3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 。

地下  $Z=0.3\text{m}$  深度处渗滤液污染区在  $y$  轴方向上的扩散速度为: 渗滤液侵入 0-12 小时内, 扩散速度为  $1.9 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 12-24 小时内, 在  $y$  轴方向上基本没有扩散; 24-36 小时内, 扩散速度为  $1.9 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 36-48 小时内, 为  $1.9 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。48-60 小时内, 为  $4.2 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。

地下  $Z=0.42\text{m}$  深度处渗滤液污染区在  $y$  轴方向上的扩散速度为: 渗滤液侵入 0-12 小时内, 扩散速度为  $9.3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ; 12-24 小时内  $6.9 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ; 24-36 小时内, 为  $2.5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 36-48 小时内, 为  $2.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 48-60 小时内, 在  $x$  轴方向上的扩散速度为  $1.2 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。

地下  $Z=0.6\text{m}$  深度处渗滤液污染区在  $x$  轴方向上的扩散速度为: 渗滤液侵入 0-12 小时内, 扩散速度为  $6.9 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ; 12-24 小时内  $2.5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; 24-36 小时内, 扩散速度为  $5.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。

#### 4.1.3.2 地下含水层渗滤液污染区的化学分析验证

为确定渗滤液侵入过程中监测得到的电剖面上异常区域所对应的地下含水层的实际污染状况, 分别在渗滤液侵入 0 小时、12 小时、24 小时、36 小时、48 小时后, 从  $0.12\text{m}$  深度的电剖面(图 32)的不同异常区取出砂样, 进行污染物化学分析, 取样点位置见图 32B 中 A、B、C、D 点。化学分析结果见表 7。

表 7 砂样污染物浓度分析

侵入时间	取样点号	取样点坐标 (x, y)	COD(mg/l)	氨氮(mg/l)	对应的视电阻率( $\Omega \cdot m$ )
0 小时	A	(0.4, 0.2)	341.5	12.2	2.0
	B	(0.6, 0.4)	417.2	15.8	5.3
	C	(0.15, 0.3)	380.5	14.3	15.6
	D	(0.4, 0.6)	355.8	13.5	7.6
12 小时	A	(0.4, 0.2)	1420.8	123.8	1.3
	B	(0.6, 0.4)	1098.9	103.3	3.4
	C	(0.15, 0.3)	720.4	50.8	11.2
	D	(0.4, 0.6)	942.5	100.2	5.9
24 小时	A	(0.4, 0.2)	1877.4	180.0	1.0
	B	(0.6, 0.4)	1240.3	120.4	3.0
	C	(0.15, 0.3)	765.8	52.3	11.1
	D	(0.4, 0.6)	1150.6	115.6	4.1
36 小时	A	(0.4, 0.2)	2311.0	270.0	0.6
	B	(0.6, 0.4)	1500.6	132.4	2.8
	C	(0.15, 0.3)	776.4	55.0	11.1
	D	(0.4, 0.6)	1652.3	158.7	2.1
48 小时	A	(0.4, 0.2)	2765.5	326.5	0.5
	B	(0.6, 0.4)	1800.76	175.2	2.5
	C	(0.15, 0.3)	787.5	58.4	11.0
	D	(0.4, 0.6)	2080	250.5	1.4

对照图 32、表 7 可知,背景土层(渗滤液侵入 0 小时)中各取样点污染物浓度相差不大,都很小,但电阻率值相差很大,主要是因为通水后各取样点的密实度不同导致含水率不同,电阻率差异是含水率不同造成的,并不是污染物浓度造成的。渗滤液侵入后,电剖面反映的低阻异常区对应的污染物浓度高,高阻区对应的污染物浓度低,并且随着渗滤液侵入时间的增长,各取样点的污染物浓度

均增大，视电阻率均减小。取样分析结果和电剖面反映的情况相一致，两者相互验证。

#### 4.1.3.3 渗滤液污染区修复过程的电剖面动态变化

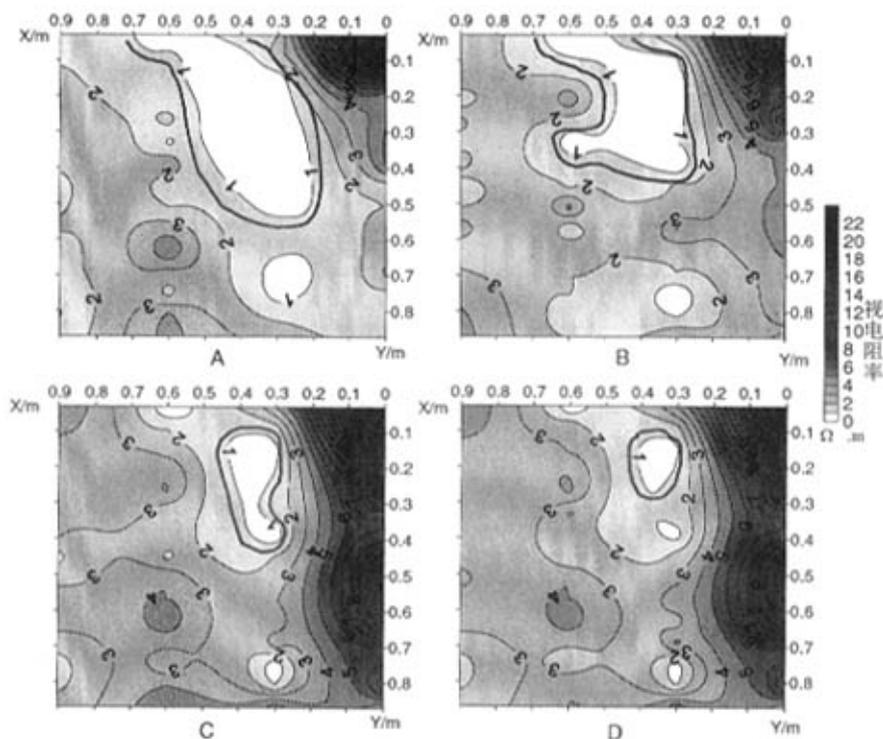


图 37 修复过程地下 0.06m 处视电阻率动态变化剖面图

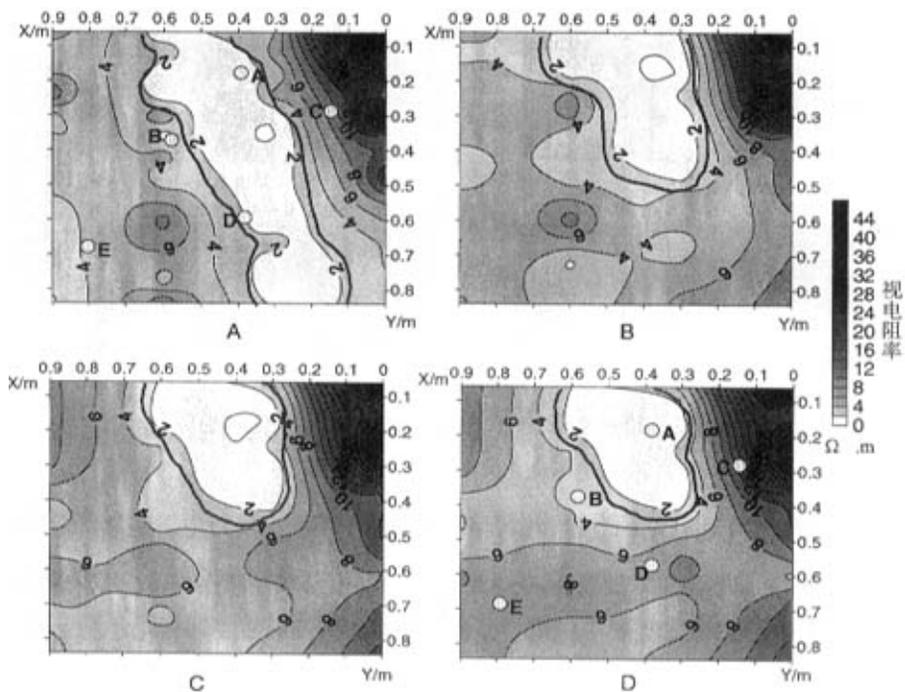


图 38 修复过程地下 0.12m 处视电阻率动态变化剖面图

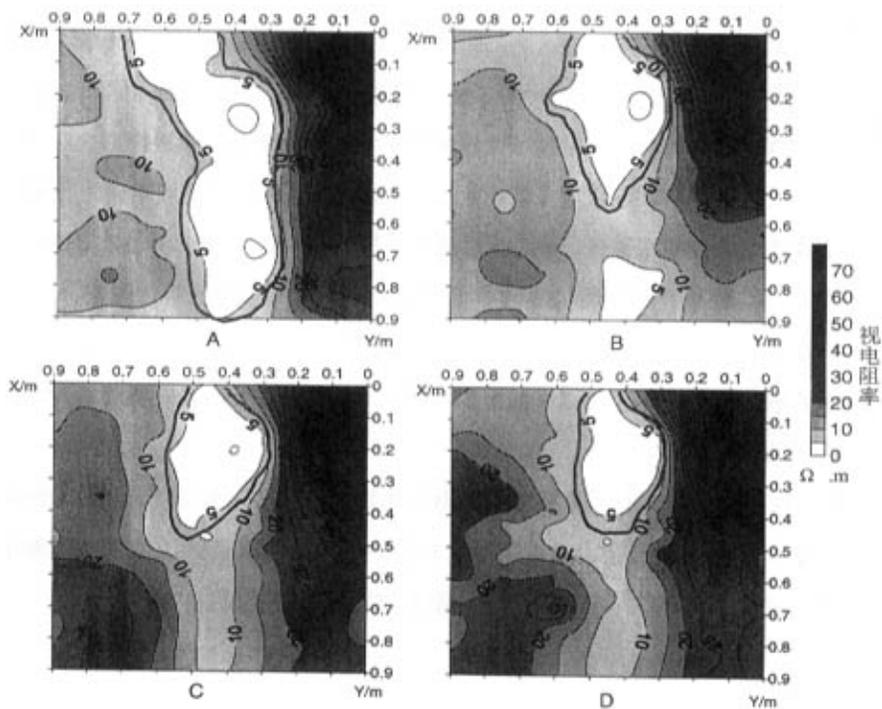


图 39 修复过程地下 0.3m 处视电阻率动态变化剖面图

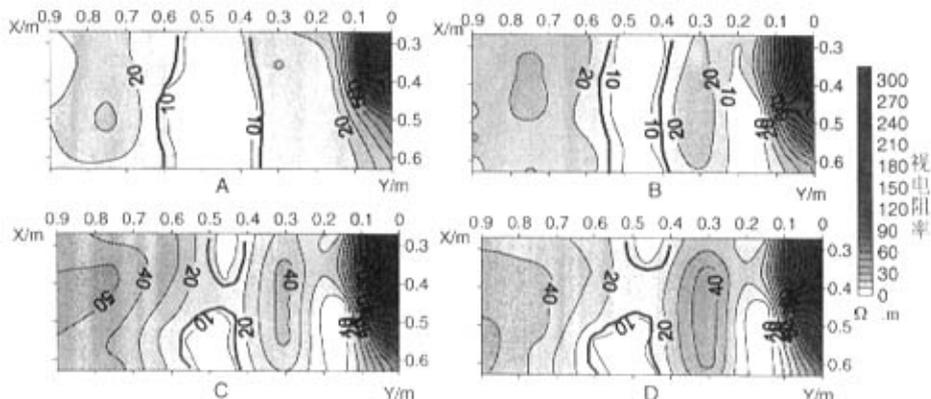


图 40 修复过程地下 0.6m 处视电阻率动态变化剖面图

渗滤液污染区注水修复过程监测得到的地下不同深度视电阻率数据见附表 2。分别取不同深度  $Z=0.06\text{m}$  (图 37)、 $Z=0.12\text{m}$  (图 38)、 $Z=0.3\text{m}$  (图 39)、 $Z=0.6\text{m}$  (图 40) 处，注水修复过程中不同时期监测到的水平分布位置电阻率动态变化剖面图。其中图 A、B、C、D 依次为注水修复 0 小时、24 小时、48 小时、72 小时后监测得到的电剖面图。

如图 38 ( $Z=0.12\text{m}$ ) 所示，随着连续的注水修复，电剖面中视电阻率小于  $2\ \Omega\cdot\text{m}$  的低阻异常区（图中粗框）范围逐渐缩小，视电阻率大于  $8\ \Omega\cdot\text{m}$  的高阻异常区和视电阻率为  $4\text{--}8\ \Omega\cdot\text{m}$  的次高阻区域范围逐渐扩大，并且视电阻率逐渐增大，总之剖面图中视电阻率整体逐渐增大。可见在注水修复过程中，含水层中砂土孔隙中的渗滤液逐渐被自来水替代，从而使污染区不断变小，并且在注水修复前期，对比图 38A、B，低阻异常区面积的减小幅度较大；而注水修复后期（图 38C、D），低阻异常区范围变化甚小。推断原因为：注水修复前期，含水层污染物大量减小，因此渗滤液污染区面积大幅减小；而注水修复后期，大部分污染物已被清除，因此污染区范围变化小。

图 37、39、40 与图 38 有相似的动态变化规律。可见注水修复过程中，污染区的修复同样可以通过实测视电阻率剖面图中低阻异常区的缩小和视电阻率值变大得到反映。该系统可动态监测注水修复过程及修复效果。

## 4.1.3.4 渗滤液污染区修复过程的化学分析验证

为确定注水修复过程中监测得到的电剖面上异常区的变化特征所对应的实际修复情况，以及注水修复效果的好坏，在注水修复 0 小时、72 小时后，分别从地下 0.12m、0.3m 深处电剖面（图 38、39）的不同异常区取出砂样，进行污染物化学分析，取样点位置见图 38A、D 所示，化学分析结果见表 8。

表 8 注水修复过程中砂样污染物质浓度分析

深度	注水时间	取样点号	取样点坐标 (x, y)	COD(mg/l)	氨氮(mg/l)	对应的视 电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )
Z=0.12m	0 小时	A	(0.4, 0.2)	2765.5	326.5	0.5
		B	(0.6, 0.4)	2311.0	250.2	2.5
		C	(0.15, 0.3)	765.3	58.4	11.0
		D	(0.4, 0.6)	2083.8	175.2	1.4
		E	(0.8, 0.7)	1099.0	103.3	5.5
	72 小时	A	(0.4, 0.2)	644.5	55.9	1.7
		B	(0.6, 0.4)	568.71	52.9	3.6
		C	(0.15, 0.3)	417.2	40.1	15.0
		D	(0.4, 0.6)	644.5	55.9	7.5
		E	(0.8, 0.7)	417.2	40.1	8.6
Z=0.3m	0 小时	A	(0.4, 0.2)	2221.0	250.2	2.8
		B	(0.6, 0.4)	1477.7	132.4	7.1
		C	(0.15, 0.3)	644.5	55.9	42.6
		D	(0.4, 0.6)	1800.76	175.2	2.0
		E	(0.8, 0.7)	1098.9	98.4	12.2
	72 小时	A	(0.4, 0.2)	544.5	55.9	3.1
		B	(0.6, 0.4)	468.71	52.9	9.2
		C	(0.15, 0.3)	417.2	40.1	50.0
		D	(0.4, 0.6)	544.5	55.9	10.1
		E	(0.8, 0.7)	417.2	40.1	22.3

对照图 38、39、表 8 可知, 仍然是电剖面反映的低阻异常区对应的污染物浓度高, 高阻区对应的污染物浓度低; 并且随着注水修复时间的增长, 各取样点的污染物浓度大幅减小, 视电阻率均增大。注水修复 72 小时后, 0.12m、0.3m 深度各取样点污染物浓度值比土层背景(渗滤液侵入 0 小时)浓度值只是略大一些, 可见大部分污染物已被清除, 注水修复效果较好。

## 4.2 现场动态监测实验

室内动态监测实验中, 自行设计的三维电学监测系统已成功的动态监测出垃圾渗滤液污染地下含水层的过程。但地下土层是人工模拟的, 并且电传感器系统设计受到尺寸限制, 与实际情况相差较大。为检测三维电学动态监测系统的实用性, 将电传感器系统按比例放大, 用于野外真实的地下土层的渗滤液污染区动态监测, 以观测到更真实有效的监测结果。

### 4.2.1 实验区地质情况

野外实验区选在东营黄河入海口刁口地区, 形成于 1964-1976 年。1964 年以前, 本区东南角为陆地, 西侧为一向陆地凹进的海湾形海区, 基本处于冲淤平衡状态。黄河行水神仙沟时, 本区发生过一定程度的淤积。当 1964 年黄河改道由刁口流路入海后, 随着黄河巨大的挟沙造陆作用, 不断进积, 短短 12 年间形成了厚度十几米、岸线外移 15km 的黄河三角洲堆积体。由于陆地的迅速向海推进, 水下岸坡迅速变陡, 海区潮流场发生弯折改变, 并开始在水下底坡的较深区域形成强潮流区, 潮流速增大, 对海底的侵蚀作用逐渐加强。在三角洲推进后期, 由于河口的不断向海推进, 河流长度增加, 水流坡降减小, 造成局部河段淤积堵塞, 河道弯曲出叉, 在河口横向上发育形成了一系列三角洲进积体, 使三角洲进积体侧向加宽。1976 年以后, 黄河行水清水沟, 本流路由于缺失了大量泥沙的物源支持, 进积停止, 原有的沉积动力平衡条件被打破, 开始了仅有海洋动力作用的冲刷改造、再沉积过程。海洋动力对刁口流路水下三角洲底坡的改造, 根据强度大致分为以下三个阶段: 1976-1980 年快速冲刷阶段; 1981-1992 年缓慢冲刷阶段; 1992 年至今基本达到冲淤平衡状态。

该实验区以往的研究成果表明, 1 米深度范围内的土体主要成分为粉土, 砂粒含量在 0.4%-5.2%之间, 粉粒含量在 84.5-92.3%之间, 粘粒含量在 6.2%-15.1%

之间。基本物理力学指标为：含水量为 23.8%~29.1%，密度为 1.91~1.94g/cm<sup>3</sup>，孔隙比为 0.73~0.81，塑性指数为 7.7~8.7，液性指数为 0.34~0.71，粘聚力  $c_u$  为 10~25kPa，内摩擦角  $\phi_u$  为 49.3~52.2，压缩系数为 0.147~0.236MPa<sup>-1</sup>，属于中低压缩性土。

现场实验中电传感器系统布设区土层较均一，为粉土。在电传感器系统布设区的地表取一原状土样进行室内土工实验，土的基本物理指标见表 9。

表 9 土样的基本物理指标

含水率 (%)	天然密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比重	天然孔隙比	天然孔隙率 (%)	饱和度 (%)
20.8%	1.98	2.71	0.652	39.5	86.2

#### 4.2.2 实验设计

现场监测实验布置如图 41：在实验区地表平行设置 4 列电传感器，电传感器为自制的铜电极，每一列有 16 个电传感器，相邻电传感器间距 30cm，列间距 60cm。每一个电传感器通过智能电缆与型号为 E60B 高密度电阻率采集仪相连，电传感器系统详细布设方式见图 42。在中间两列电极的中间挖一直径为 40cm，深 30cm 的坑作为渗滤液注入点。在注入渗滤液之前先进行本底监测，得到土层的电阻率背景值，然后向坑中倒入渗滤液，定期监测土层的电阻率变化。渗滤液取自青岛市小涧西垃圾填埋场，渗滤液成分见表 2，侵入的渗滤液体积为 50L。



图 41 现场监测实验布置图

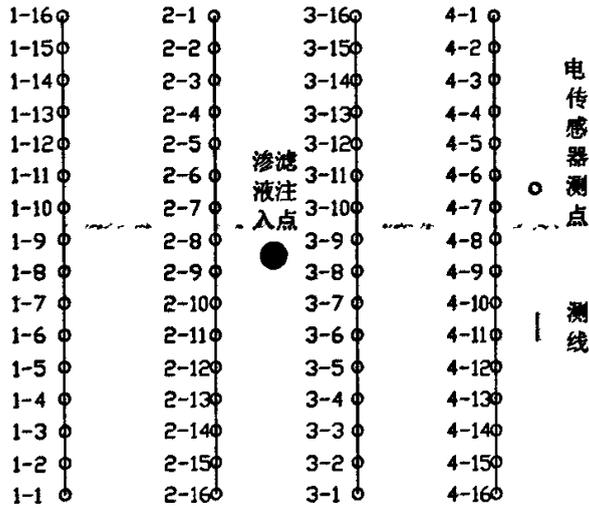


图 42 电传感器系统布设图

### 4.2.3 现场动态监测实验结果分析

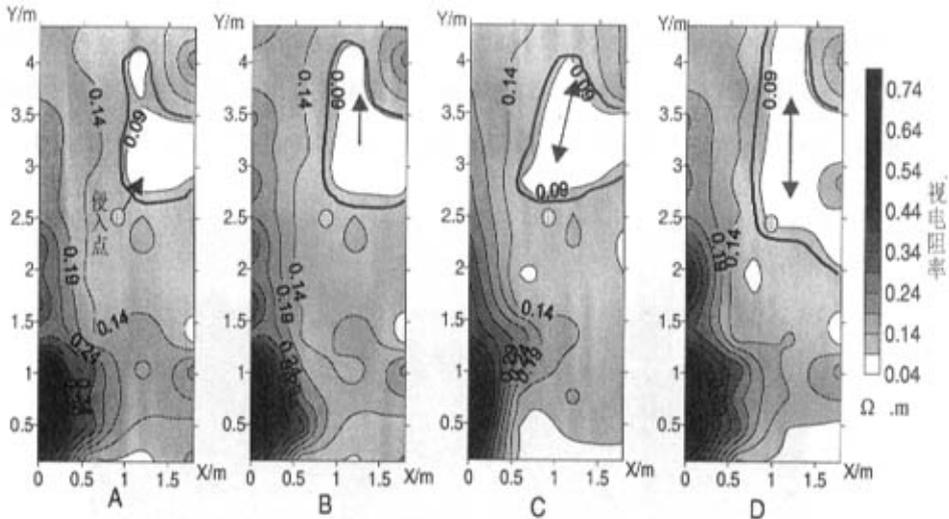


图 43 地下 0.3m 处的视电阻率动态变化剖面图

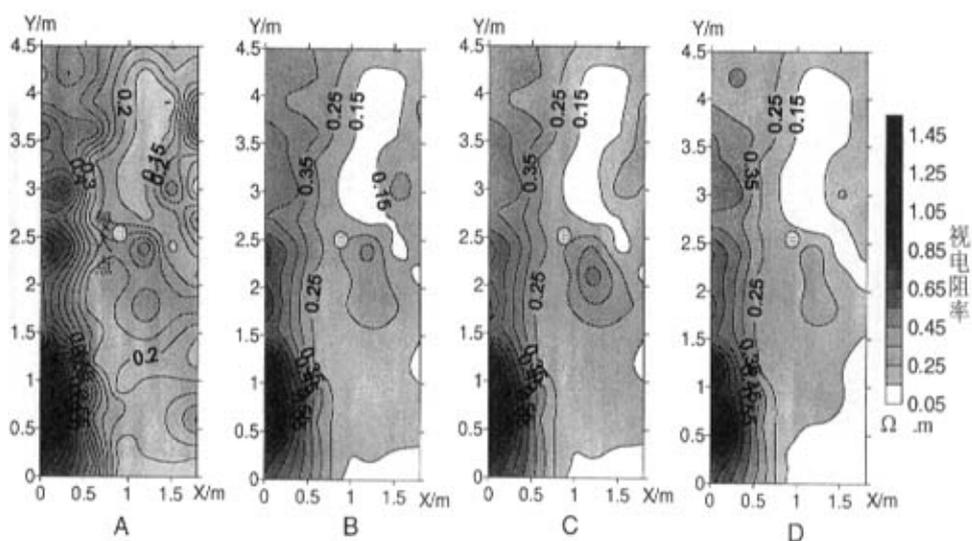


图 44 地下 0.6m 处的视电阻率动态变化剖面图

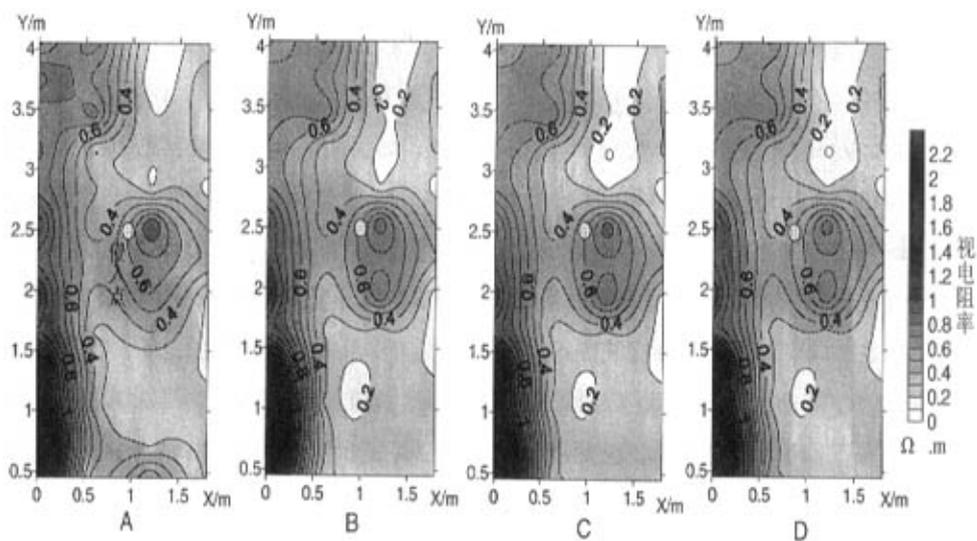


图 45 地下 0.9m 处的视电阻率动态变化剖面图

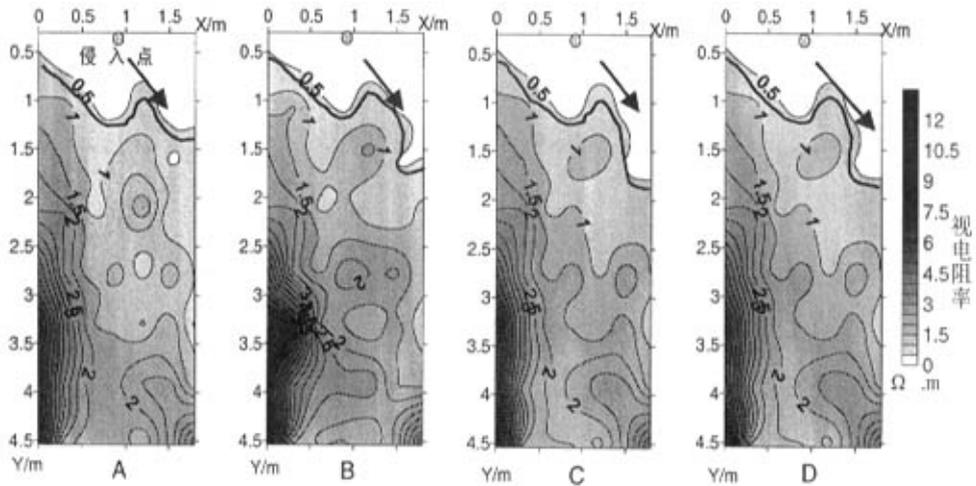


图 46 Y=2.25m 处的纵向视电阻率动态变化剖面图

现场监测实验得到的地下介质不同深度的视电阻率数据见附表 3。图 43 为渗滤液侵入过程中不同时期监测得到的深度  $Z=0.3\text{m}$  处的水平分布位置电阻率动态变化剖面图，其中图 43A、B、C、D 依次为渗滤液侵入 0 小时（背景）、24 小时、48 小时、72 小时监测到的电剖面图。如图 43，由于实验区地下介质为饱和粉土，所以视电阻率整体较小，均小于  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 。实验区土质比较均一，土层原始视电阻率不均一是由于地层密实度不同造成的，实验区右前方侵蚀严重，密实度小，含水量大，使得电阻率值偏低，出现低阻异常区（图 43A 中粗框）。对比图 43B、C、D 可知：渗滤液侵入土层后首先向侵入点附近较疏松的地方渗透；由于渗滤液的侵入会引起粉土层的电阻率降低，因此汇集的结果使得低阻异常区的分布范围扩大。随着渗滤液的不不断侵入，汇集区沿含水层的疏松部位扩散表现为低阻异常区沿一定方向的扩展，渗滤液扩散规律如图中箭头所示。

深度  $Z=0.6\text{m}$ （图 44）与  $Z=0.9\text{m}$ （图 45）处的电剖面动态变化图中，低阻异常区的范围变化不明显。可见实验区土层渗透性差，渗滤液在深度方向上渗透很慢，主要沿渗滤液侵入点附近水平方向上渗透迁移。

图 46 为渗滤液侵入过程中不同时期监测得到的  $Y=2.25\text{m}$  处纵向视电阻率动态变化剖面图，低阻异常区的扩展规律如图中箭头所示，可知渗滤液在深度方向上的扩散过程反映为低阻异常区的扩展过程，即渗滤液从侵入点附近向侵蚀严重的区域（右下方）逐渐渗透。

### 4.3 小结

(1) 自行设计的三维电学动态监测系统通过室内模拟实验、现场监测实验的验证,可有效的实现垃圾渗滤液污染地下含水层及修复过程的动态监测,在垃圾填埋场运营期、废弃后及污染修复期可对其进行实时动态监测,实现垃圾填埋场的智能化、环保化。

(2) 渗滤液的侵入使地下含水层介质的电阻率变小,渗滤液污染区在视电阻率剖面图中表现为低阻异常区。

(3) 随污染区域的变化,低阻异常区范围也相应改变,并具有良好的对应关系。渗滤液污染区的扩散边界、扩散方向、扩散速度以及污染程度变化可以通过对比不同时期监测结果分析得到。

(4) 通过注水修复的方法来减少垃圾填埋场渗滤液的污染是可行的。注水修复过程中,污染区的修复同样可以通过实测视电阻率剖面图中低阻异常区的缩小和视电阻率值变大得到反映。该系统可动态监测注水修复过程及修复效果。

## 5 三维电学动态监测系统的适用性分析

### 5.1 三维电学动态监测系统的监测效果分析

#### 5.1.1 灵敏度分析

以渗滤液污染区化学分析验证的实验结果(表7)为例,污染区各取样点在不同时间的COD浓度与监测到该点的视电阻率的对应关系见图47。从图中可看出,污染物浓度大时,对应的视电阻率小;污染物浓度小时,对应的视电阻率大。在渗滤液侵入12小时,取样点A、B、C、D中,12-B点与12-D点之间的COD浓度差值最小,为156.4mg/l,此时两点视电阻率差值为2.5Ω.m;侵入24小时,各点COD浓度差值最小为89.7mg/l,视电阻率差值为1.1Ω.m;侵入36小时,各点COD浓度差值最小为151.7mg/l,视电阻率差值为0.7Ω.m;侵入48小时,各点COD浓度差值最小为279.3mg/l,视电阻率差值为1.1Ω.m。可见当地下介质污染物浓度变化较小时,该监测系统能反映出其视电阻率的改变,灵敏度较高。

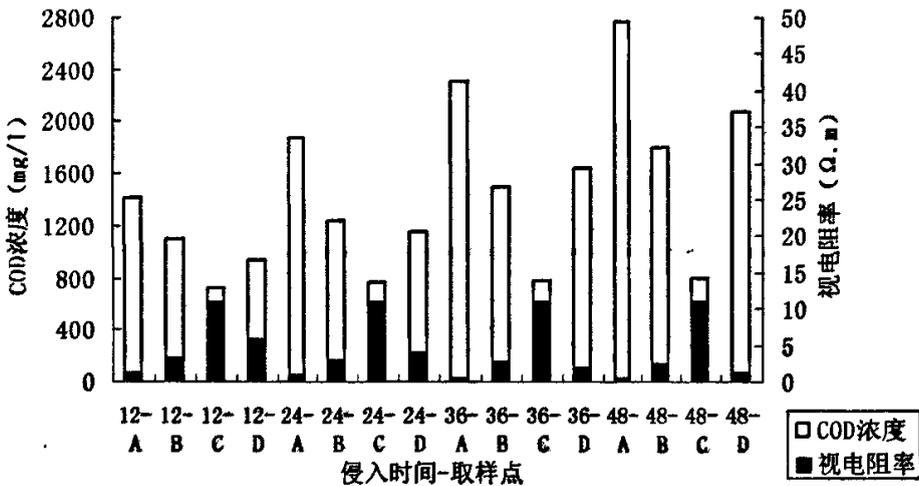


图 47 污染区各点 COD 浓度与其视电阻率的对应关系图

### 5.1.2 污染分布区探测精度分析

渗漏结束后，对渗滤液污染区域进行逐层开挖，根据渗滤液实际渗漏的范围测量得到  $z=0.06\text{m}$  (图 48),  $z=0.12\text{m}$  (图 49),  $z=0.24\text{m}$  (图 50) 深度处的实际渗漏区域平面图。

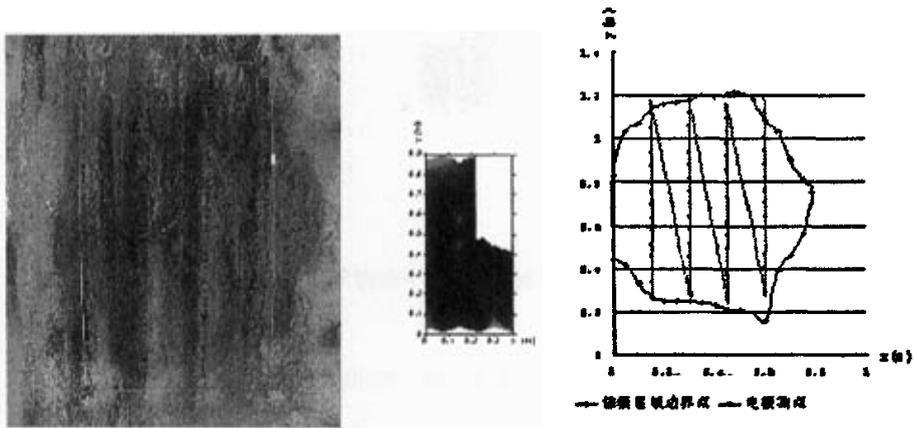


图 48  $z=0.06\text{m}$  处实测渗漏区域平面图与电剖面图的比较

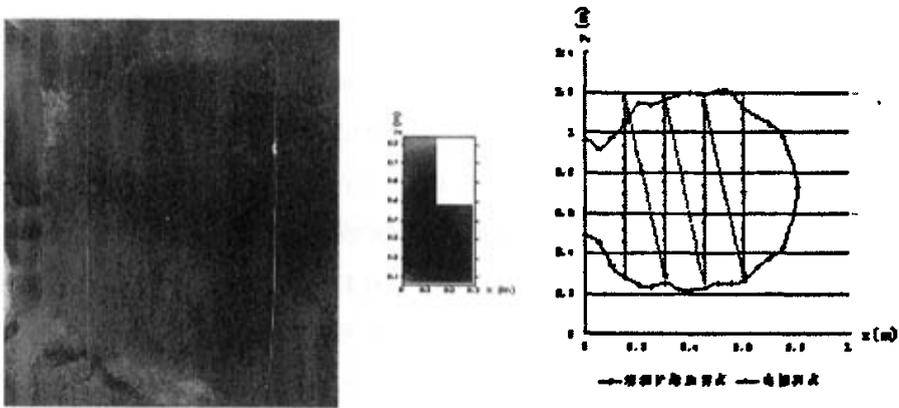


图 49  $z=0.12\text{m}$  处实测渗漏区域平面图与电剖面图的比较

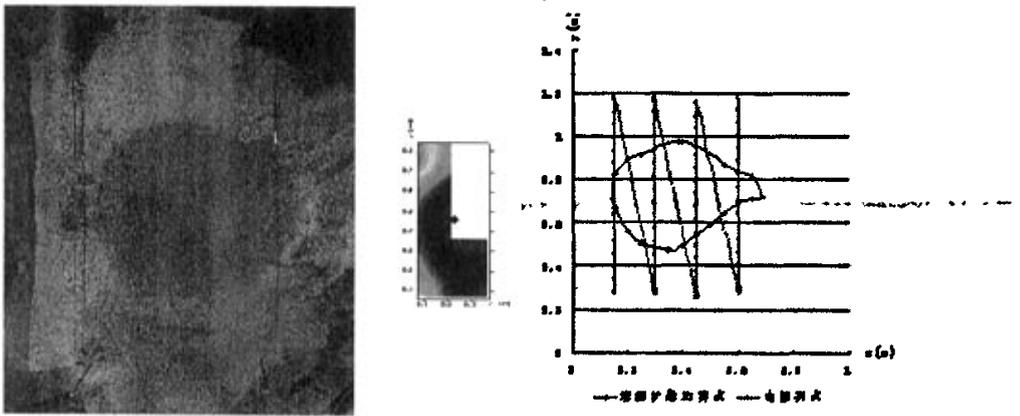


图 50  $z=0.24\text{m}$  处实测渗漏区域平面图与电剖面图的比较

表 10 污染区域实测面积

土层深度 (m)	开挖后污染区域实测面积 (m <sup>2</sup> )
0.06	0.612950
0.12	0.617400
0.18	0.533820
0.24	0.167986

当渗滤液污染区域的面积改变一定量时,在电阻率剖面图上能够清晰辨认出污染区域的范围,定义此时污染区域面积的最小改变率为装置的分辨率。表 10 列出了不同深度开挖后污染区域实测的面积。当污染区域面积由  $0.612950\text{m}^2$  改变到  $0.617400\text{m}^2$  时,在对应的电剖面图上不能够十分清晰的辨认出污染区域的范围,而当污染区域面积由  $0.617400\text{m}^2$  改变到  $0.533820\text{m}^2$  或由  $0.533820\text{m}^2$  改变到  $0.167986\text{m}^2$  时,在对应的电剖面图上能够很清晰的辨认出污染区域的范围,此时污染区域面积的改变量分别为  $(0.617400-0.533820)/0.617400=0.135$ ,  $(0.533820-0.167986)/0.533820=0.585$ 。取污染区域面积的最小改变率 0.135,作为实验装置所能达到的分辨率。

该系统的分辨率为 0.135,在真正的垃圾填埋场内,填埋区占地面积  $500\text{m}\times 500\text{m}=250,000\text{m}^2$ ,因此当渗漏区域面积大于  $250,000\text{m}^2\times 0.135=33,750\text{m}^2$  时,该三维电学监测系统才能探测出其渗滤液在地下介质中的扩散形态。但此时污染已较严重,可见该系统的污染区探测精度较低。

### 5.1.3 探测深度分析

根据室内、现场实验的监测数据来看,该系统可以探测的深度为电传感器最小间距的 10 倍。例如,室内监测实验电传感器间距为 0.06m,探测的深度则为 0.6m;现场监测实验电传感器间距为 0.3m,探测的深度则为 3m。该系统的探测深度可通过调节电传感器的间距来控制。

## 5.2 三维电学动态监测系统的成本分析

该系统是针对我国目前真正意义上的“卫生”填埋场而设计的,而且需要在填埋场的建设期间在衬层系统下预先埋设电传感器。以一个中等规模的城市生活垃圾卫生填埋场为例,假设其填埋作业区占地面积  $500\text{m} \times 500\text{m} = 250,000\text{m}^2$ 。在衬层系统下埋设的铜制防腐蚀电传感器间距为 20m,那么在填埋区水平方向上需布设 25 道电传感器测线,每道测线上有 26 个电传感器,总计为 650 个电传感器。在填埋场区建设一个污染监测站,里面设置电传感器信号转换系统和数据采集分析系统,需配备电信号转换箱、数据采集仪、计算机及数据处理分析软件,配备系统维护工作人员一名。三维电学动态监测系统各部分的造价如表 11。

表 11 三维电学动态监测系统造价

系统组成	项目	数量	单价(元)	总计(元)
电传感器系统	防腐蚀电传感器	650 个	10	6,500
	电缆及铺设费用	15000 米		30,000
电传感器信号转换系统	电信号转换箱	1 台		100,000
数据采集、分析系统	数据采集仪	1 台		200,000
	数据处理分析软件	1 套		10,000
监测站建设				10,000
合计				356,500

## 6 结论与建议

### 6.1 结论

本文在广泛研究国内外研究成果的基础上,针对我国的研究现状,提出一种三维电学动态监测系统,用于垃圾填埋场地下含水层污染及修复过程的三维动态监测。在实验室内、现场开展了模拟实验,得出以下几点结论:

(1) 渗滤液侵入地下土层后,使地下介质的物理性质和化学性质发生了明显改变,并导致地下介质电阻率的变化,为用电阻率法进行垃圾填埋场地下含水层污染调查提供了理论基础。

(2) 渗滤液的侵入对不同类型的地下介质电阻率的改变作用明显,整体表现为随注入量的增多,电阻率逐渐降低。初始电阻率快速降低,当渗滤液侵入地下介质达到一定量后,电阻率降低幅度减小,此后电阻率降低趋于平缓。原因是渗滤液渗入不饱和土中首先提高了不饱和土的孔隙水含量,同时提高了饱和度,这两者的变化都会提高土的导电性。虽然渗滤液中的污染物质使得土样孔隙水的导电性增强,提高土样的导电性。但相对于前两者的影响,其影响程度占次要地位。

(3) 细粒含量高、含水率高的地下介质初始电阻率小,渗滤液侵入后电阻率整体降低幅度不大,因此形成的低阻异常不明显,对此类地下介质的渗滤液污染区的电阻率探测难度较大。

(4) 虽然渗滤液中不同污染物成分例如 COD、氨氮、Cl<sup>-</sup> 离子、硫酸盐对地下介质单一的电性改变量很小,改变的过程规律也不尽相同,但都表现为随浓度的升高而降低。其中氨氮对地下介质电阻率的改变幅度最大。

(5) 室内模拟实验显示渗滤液的侵入使地下含水层介质的电阻率变小,渗滤液污染区在视电阻率剖面图中表现为低阻异常区。随污染区域的变化,低阻异常区范围也相应改变,并具有良好的对应关系。渗滤液污染区的扩散边界、扩散方向、扩散速度以及污染程度变化可以通过对比不同时期监测结果分析得到。

(6) 通过注水修复的方法来减少垃圾填埋场渗滤液的污染是可行的。注水修复过程中,污染区的修复同样可以通过实测视电阻率剖面图中低阻异常区的缩小和视电阻率值变大得到反映。该系统可动态监测注水修复过程及修复效果。

(7) 现场监测实验中, 垃圾渗滤液在饱和粉土地下介质中的三维扩散过程同样可在视电阻率动态变化剖面图中得到反映, 良好的监测效果显示了监测系统和监测技术的有效性。

(8) 自行设计的三维电学动态监测系统通过室内模拟实验、现场监测实验的验证, 可有效的实现垃圾渗滤液污染地下水含水层及修复过程的动态监测, 在垃圾填埋场运营期、废弃后及污染修复期可进行实时动态监测, 实现垃圾填埋场的智能化、环保化。

(9) 通过对三维电学动态监测系统的适用性分析得到, 该系统的灵敏度较高, 污染分布区探测精度较低, 分辨率为 0.135, 探测深度为电传感间距的 10 倍, 探测深度可通过调节电传感器的间距来自由控制, 估算建立一套系统的总成本为 356,500 元。

## 6.2 建议及进一步研究的问题

- (1) 提高三维动态监测系统的探测精度, 降低探测成本
- (2) 研究利用实测视电阻率剖面来反演实际污染区分布的方法
- (3) 基于探测结果的垃圾填埋场地下环境污染预警系统研究

建立地下环境敏感区判别标准, 在地理信息系统平台上实现对垃圾填埋场渗滤液地下运移扩散过程的动态显示, 并在地理信息系统平台上实现地下环境敏感区污染预警。

## 参考文献

- [1] 程业勋, 刘海生, 赵章元. 城市垃圾污染的地球物理调查[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(1): 26-30.
- [2] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 151~155.
- [3] 郭秀军等. 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, 3:100-105.
- [4] 贾永刚等. 环境工程地质学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2003.
- [5] 李金铭, 张春贺, 肖顺. 水污染的导电性和激电性与污染浓度变化关系的几个实验结果[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3): 428-433.
- [6] 刘东, 刘洪海, 方满. 武汉市郭茨口垃圾场环境污染调查与评价[J]. 中国环境科学, 1993(4): 297-302.
- [7] 刘国华, 王振宇, 黄建华. 土的电阻率特性及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87.
- [8] 刘海生等. 土壤与地下水污染的地球物理地球化学勘查[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 307-311.
- [9] 刘建国等. 填埋场不同防渗配置下渗滤液及污染物泄漏[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1684-1687.
- [10] 王翊虹, 赵勇胜. 北京北天堂地区城市垃圾填埋对地下水的污染[J]. 水文地质工程地质, 2002(6): 45-63.
- [11] 夏立江, 温小乐. 生活垃圾堆填区周边土壤的性状变化及其污染状况[J]. 土壤与环境, 2001, 18(1): 17-19.
- [12] 杨进等. 水环境地球物理方法的应用综述[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 107-110.
- [13] 喻晓, 张甲耀, 刘楚量. 垃圾渗滤液污染特征及其处理技术研究和应用趋势[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(5): 43-45.
- [14] 张红梅, 速宝玉. 垃圾填埋场渗滤液及对地下水污染研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2003(6): 110-115.
- [15] 张锡根等. 城市垃圾填埋的地质环境效应及地质处理[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [16] 赵新泽, 孙学成, 陈燕. 垃圾填埋场渗滤液的处理研究发展[J]. 三峡大学学报, 2002, 24(1): 83-86.
- [17] 郑曼英, 李丽桃, 刑益和, 雷泽辉. 垃圾浸出液对填埋场周围水环境污染的研究[J]. 重庆环境科学, 1998(6): 17-20.
- [18] 郑铎鑫. 城市垃圾处理场对地下水的污染[J]. 环境科学, 1989(3): 89-92.
- [19] Allan J. Delaney et al. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, 32: 107-119.
- [20] Archie. G. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of American Institute of Mining Engineers, 1942, 146: 54-62.
- [21] Atekwana E A, Sauck W A, Werkema D D. Investigations of geo-electrical signatures at a hydrocarbon contaminated site [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 40(2-3): 167-180.
- [22] Barker, R., Investigation of groundwater salinity by geophysical methods [J]. Geotechnical and environmental Geophysics, Vol. II. Environmental and Groundwater, 1990, 201-211.
- [23] Belousova A P, Krainov S R, Ryzhendo B N, Evolution of groundwater chemical composition

- under human activity in an oilfield [J]. *Environmental Geology*, 1999,38(1): 34-36.
- [24] Bernstone, C., Dahlin, T., DC resistivity mapping of old landfills: two case studies [J]. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*,1998, 2(2): 127-136.
- [25] Bernstone,C., Dahlin,T., Ohlsson,T., Hogland,W. DC resistivity mapping of internal landfill structures: two preexcavation surveys[J]. *Environ.Geol*, 2000, 39: 360-371.
- [26] Buselli,G., Davis,G.B., Barber,C., Height,M.I., Howard,S.H.D.,. The application of electromagnetic and electrical methods to groundwater problems in urban environments [J]. *Exploration Geophysics*, 1992, 23: 543-555.
- [27] Chen Z, Kostaschuk R, Yang M. Heavy metals on tidal flats in the Yangtze Estuary, China [J]. *Environmental Geology*, 2001,40(6): 742-749.
- [28] Dahlin,T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering application[J]. *First Break*, 1996, 14: 275-283.
- [29] E.Aristodemou, A.Thomas-Betts. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000,44:275-302.
- [30] Estella A. Atekwana., William A .sauck., Douglas D, Werkema Jr. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site[J] . *Journal of Applied Geophysics*, 2000,44: 167-180.
- [31] Frohlich,R.K., Fisher,J.J., Summerly,E. Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill Rhode Island, USA[J]. *J.Appl.Geophys*, 1996,35: 249-259
- [32] Gil Lim Yoon, Jun Boum Park. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils [J]. *Journal of Hazards Materials*, 2001, B84:147-161.
- [33] Godfrey K.A. Monitoring for hazardous waste leaks [J]. *Civil Engineering*, 1987, 57:48-49
- [34] Kamura,K. Relationships between electrochemical properties of leachate and resistivity of strata in the landfill site consisting mainly of combustion residuals[J]. *Environ.Geol*, 2002,41: 537-546.
- [35] Lima, O.A.L., Sato, H.K., Porsani, M.J. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques[J]. *J.Appl.Geophys*, 1995, 34: 93-108.
- [36] M.Fukue, T.Minato et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. *Engineering Geology*, 2001,60:361-369.
- [37] M.O.Looser, A.Parriaux and M.Bensimon. Landfill underground pollution detection and characterization using inorganic traces [J]. *Water research*, 1999, 33(17):3609-3616.
- [38] M.Stammler and J.Boł. Evaluation of methods for monitoring landfill barriers [J]. *International TNO Conference on Contaminated Soil*, 1985:477-500.
- [39] Maxwell A.Meju. Geoelectrical investigation of ole/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 44:115-150.
- [40] Meju,M. Geophysics and computers models in the evaluation of landfill site in Blaby [J]. *Proceedings of the Symposium GREEN'93-Geotechnics related to the Environment*, Bolton, UK. 1993.
- [41] Monteiro Santos,F.A., Almeida,E., Castro,R., Nolasco,R.,. Mendes-Victor,L. A hydrogeological investigation using EM34 and SP surveys. *Earth Planets Space*, 2002, 54:655-662.
- [42] Ogilvy,A.A, Ayed,M.A., Bogolovsky,V.A. Geophysical studies of water leakages from

- reservoirs[J]. *Geophys.Prospect*, 1969,17: 36-62.
- [43] R.Mota, F.A.Monteriro Santos, et al. Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004,57:11-22.
- [44] Rollin A.L, Marcotte M, Jacquelin T, Chaput L. Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique [J], *Geosynthetics'99*, Boston.
- [45] Ryck,S.M., Redman,J.D., Annan,A.P., 1993 . Geophysical monitoring of a controlled Kerosene spill. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP' 93)* , San Diego,CA, pp.5-20.
- [46] Sam Gyu.Park, Hiroshi Fujiwara etc. Fundamental study on resistivity of soils[J].*BUTSURI-TANSA*,1999,52 (4) : 299-306.
- [47] Sauck,W.A., Atekwana,E.A., Nash,M.S. Elevated conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques[J]. *Journal of Environmental and engineering Geophysics*, 1998, 2: 203-212.
- [48] Schneider,G.W.,Greehouse,J.p., 1992. Geophysical detection of perchloroethylene in a sandy aquifer using resistivity and nuclear logging techniques. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP' 92)* , Oakbrook,IL, pp.619-628.
- [49] Schneider,G.W., de Ryck, S.M., Ferre,P.A., 1993. The application of automated high resolution D.C resistivity in monitoring hydrogeological field experiments . *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP' 93)* , San Diego,CA, pp.145-162.
- [50] White C.C. and Barker R.D. Summer. Electrical leak detection system for landfill liners: a case history [J]. *Ground Water Monitor Remediation*, 1997, 17(3):153-159.

附表 1 渗滤液污染过程的室内模拟实验数据

(1) 深度 Z=0.06m 处

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 12 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 24 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 36 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 48 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 60 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$
0	0.03	22.41	22.23	22.03	21.72	21.39	20.82
0	0.09	16.00	14.87	14.80	14.71	14.57	14.36
0	0.15	8.80	8.53	8.43	8.22	8.21	8.20
0	0.21	5.96	5.0	4.60	4.58	4.40	4.00
0	0.27	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
0	0.33	5.82	5.72	5.32	5.25	5.24	5.20
0	0.39	6.23	6.00	5.74	5.20	5.20	5.10
0	0.45	8.00	6.82	6.62	3.49	2.93	2.56
0	0.51	5.00	3.87	3.61	3.50	3.50	2.00
0	0.57	3.24	3.15	3.09	3.08	2.93	2.50
0	0.63	6.16	5.72	4.00	3.18	2.65	2.30
0	0.69	3.20	2.97	2.94	2.74	2.54	2.38
0	0.75	1.97	1.87	1.86	1.77	1.77	1.75
0	0.81	1.80	1.70	1.60	1.60	1.50	1.50
0	0.87	1.94	1.70	1.66	1.44	1.43	1.30
0.3	0.03	4.17	2.70	2.65	2.47	2.30	1.99
0.3	0.09	2.63	2.62	2.97	2.76	2.63	2.75
0.3	0.15	0.67	0.66	0.48	0.40	0.29	0.23
0.3	0.21	0.61	0.39	0.40	0.30	0.28	0.30
0.3	0.27	0.26	0.16	0.12	0.12	0.10	0.10
0.3	0.33	0.99	0.75	0.70	0.48	0.31	0.10
0.3	0.39	1.00	0.79	0.57	0.37	0.15	0.10
0.3	0.45	2.22	1.49	1.36	0.78	0.64	0.56
0.3	0.51	2.84	1.71	1.54	0.85	0.61	0.61
0.3	0.57	3.59	1.54	1.47	1.38	0.94	0.90
0.3	0.63	2.26	1.63	1.75	1.37	1.20	1.14
0.3	0.69	3.22	2.12	1.60	0.95	0.74	0.62
0.3	0.75	0.61	0.53	0.46	0.3	0.19	0.12
0.3	0.81	1.91	1.59	1.56	1.54	1.40	1.27
0.3	0.87	6.07	4.29	4.19	3.47	3.03	2.95
0.6	0.03	0.46	0.15	0.16	0.15	0.11	0.08
0.6	0.09	0.66	0.55	0.53	1.20	1.24	1.33
0.6	0.15	1.34	1.19	1.09	1.00	1.10	0.96
0.6	0.21	3.71	2.43	2.30	1.72	1.54	1.46
0.6	0.27	3.48	2.91	3.00	2.52	2.35	2.33

0.6	0.33	0.76	0.74	0.70	0.48	0.30	0.34
0.6	0.39	2.79	2.67	2.64	2.55	2.43	2.04
0.6	0.45	1.40	1.44	1.39	1.36	1.16	1.14
0.6	0.51	3.00	2.50	2.30	2.10	2.00	2.00
0.6	0.57	5.21	4.62	4.48	3.83	3.56	3.52
0.6	0.63	5.28	5.23	5.19	5.07	5.00	4.85
0.6	0.69	3.09	2.99	2.93	2.84	2.82	2.73
0.6	0.75	1.84	1.76	1.74	1.68	1.61	1.61
0.6	0.81	6.00	5.70	5.60	4.88	4.29	4.18
0.6	0.87	6.71	6.16	5.61	4.72	4.32	4.26
0.9	0.03	5.47	3.69	3.56	2.01	1.66	1.37
0.9	0.09	4.69	3.34	3.38	2.34	1.93	1.80
0.9	0.15	2.79	2.62	2.37	2.23	2.24	2.20
0.9	0.21	3.00	2.70	2.50	2.30	2.20	2.20
0.9	0.27	3.29	2.87	2.45	2.30	2.37	2.28
0.9	0.33	2.89	2.78	2.91	2.70	2.51	2.53
0.9	0.39	2.58	2.37	2.22	2.16	1.98	2.07
0.9	0.45	5.00	4.28	3.00	2.34	1.96	1.88
0.9	0.51	2.44	2.40	2.22	2.15	2.08	1.90
0.9	0.57	3.04	2.48	2.56	2.18	2.04	2.12
0.9	0.63	2.20	1.72	1.64	1.41	1.32	1.31
0.9	0.69	2.27	2.26	2.13	2.05	1.89	1.94
0.9	0.75	1.46	1.45	1.25	1.24	1.19	1.22
0.9	0.81	1.31	1.14	1.09	0.94	0.92	0.93
0.9	0.87	1.83	1.67	1.52	1.51	1.36	1.43

(2) 深度 Z=0.12m 处

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 12 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 24 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 36 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 48 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 60 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$
0	0.06	46.43	45.83	45.59	45.30	44.81	45.21
0	0.12	37.07	22.62	22.43	22.30	22.28	21.61
0	0.18	23.43	21.29	20.15	18.95	18.64	17.93
0	0.24	8.10	10.81	8.00	9.00	8.00	9.00
0	0.3	28.97	28.03	28.01	27.25	27.69	24.76
0	0.36	10.93	10.83	10.27	10.15	10.03	9.40
0	0.42	17.82	17.41	17.36	16.72	10.73	10.92
0	0.48	13.99	13.99	13.53	13.06	12.51	12.42
0	0.54	9.00	8.65	8.50	8.48	7.46	8.61
0	0.6	6.68	6.16	6.14	6.06	5.64	5.73
0	0.66	17.21	10.85	10.49	5.81	4.82	4.32
0	0.72	8.76	4.75	4.60	4.50	4.43	4.20
0	0.78	3.55	3.54	3.33	3.12	3.13	2.37

垃圾渗滤液污染地下水层及修复过程的动态监测技术研究

0	0.84	12.72	8.04	7.88	4.40	3.69	3.32
0.3	0.06	4.02	3.47	3.05	0.85	0.71	0.40
0.3	0.12	6.00	6.03	5.38	4.05	2.65	2.40
0.3	0.18	7.34	5.00	4.20	3.55	3.00	2.00
0.3	0.24	4.92	4.44	4.09	3.40	2.73	2.00
0.3	0.3	0.62	0.5	0.44	0.35	0.30	0.32
0.3	0.36	0.64	0.58	0.43	0.32	0.26	0.15
0.3	0.42	0.31	0.30	0.27	0.20	0.12	0.11
0.3	0.48	3.50	3.00	1.69	1.59	1.50	1.30
0.3	0.54	8.01	4.97	4.41	2.08	1.43	1.43
0.3	0.6	6.04	2.76	2.55	0.86	0.51	0.12
0.3	0.66	5.25	4.16	3.62	3.53	3.21	3.06
0.3	0.72	5.17	2.62	2.39	1.26	1.01	0.88
0.3	0.78	5.00	4.50	4.40	4.60	1.50	0.63
0.3	0.84	8.75	7.81	7.10	2.30	2.01	1.74
0.6	0.06	2.64	1.59	1.33	0.53	0.29	0.19
0.6	0.12	3.62	3.34	2.60	2.29	1.52	1.46
0.6	0.18	2.00	1.60	1.50	0.51	0.59	0.68
0.6	0.24	9.46	1.75	1.51	0.44	0.14	0.08
0.6	0.3	9.23	7.76	8.09	6.61	6.12	6.03
0.6	0.36	2.29	2.31	2.10	1.49	1.23	1.02
0.6	0.42	5.12	5.13	5.11	4.91	4.53	3.42
0.6	0.48	2.92	2.79	2.69	2.71	2.68	2.36
0.6	0.54	8.61	8.38	8.00	6.16	5.43	5.22
0.6	0.6	9.80	9.70	9.60	9.52	8.79	8.64
0.6	0.66	8.45	8.46	8.21	7.59	7.52	7.34
0.6	0.72	5.56	5.26	5.38	5.04	4.74	4.75
0.6	0.78	3.59	3.52	3.39	3.21	3.04	3.10
0.6	0.84	10.60	10.59	10.50	10.40	10.30	10.11
0.9	0.06	8.94	8.89	8.66	8.07	7.85	7.54
0.9	0.12	7.00	5.00	4.96	4.14	3.88	3.61
0.9	0.18	7.14	6.52	6.26	5.93	5.89	5.81
0.9	0.24	10.60	10.50	10.40	10.30	10.35	9.85
0.9	0.3	7.07	3.53	3.66	3.30	3.25	3.05
0.9	0.36	4.58	4.47	4.24	4.28	4.05	4.10
0.9	0.42	4.75	4.64	4.51	4.36	4.16	4.23
0.9	0.48	10.13	10.00	9.65	6.34	5.02	5.02
0.9	0.54	4.13	4.09	3.95	3.94	3.68	3.79
0.9	0.6	6.61	3.05	2.92	2.79	2.91	2.61
0.9	0.66	7.61	5.28	5.40	3.79	3.16	2.93
0.9	0.72	4.13	3.97	3.71	3.60	3.51	3.47
0.9	0.78	2.73	2.61	2.67	2.38	2.32	2.21
0.9	0.84	3.10	1.92	1.89	1.80	1.73	1.53

## (3) 深度 Z=0.30m 处

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 12 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 24 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 36 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 48 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 60 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$
0	0.15	60.00	60.00	60.00	60.00	50.00	50.00
0.15	0	60.00	60.00	60.00	60.00	52.54	51.39
0	0.21	60.00	60.00	60.00	60.00	44.23	45.30
0.15	0.06	67.32	64.47	62.39	62.10	54.96	50.00
0	0.27	66.00	66.00	64.00	63.00	58.00	50.00
0.15	0.12	68.39	67.04	66.89	65.88	63.71	50.19
0	0.33	61.52	59.56	58.66	59.43	58.93	57.45
0.15	0.18	60.00	59.00	50.00	45.00	45.00	45.00
0	0.39	60.00	59.00	50.00	32.86	32.76	32.51
0.15	0.24	61.31	61.90	59.84	58.04	30.00	30.00
0	0.45	50.00	26.15	26.51	25.60	25.82	25.98
0.15	0.3	40.22	37.98	36.32	36.04	35.94	35.56
0	0.51	52.82	49.97	39.00	35.00	33.98	29.08
0.15	0.36	52.85	43.88	45.04	35.00	32.00	30.00
0	0.57	38.88	39.10	38.29	34.64	32.32	31.50
0.15	0.42	35.81	30.00	25.03	24.13	15.48	12.64
0	0.63	33.00	30.00	27.00	25.00	16.47	16.15
0.15	0.48	31.08	28.70	28.28	28.19	29.66	27.49
0	0.69	24.00	23.18	20.13	21.10	21.80	16.02
0.15	0.54	33.45	32.58	31.00	29.54	23.00	20.00
0	0.75	33.43	32.78	32.02	23.44	22.07	17.71
0.15	0.6	30.00	28.00	25.00	25.00	23.62	22.69
0.15	0.66	29.63	26.73	23.75	23.43	23.17	16.06
0.15	0.72	27.17	26.00	24.00	25.61	21.00	21.00
0.15	0.78	28.00	27.00	26.61	24.00	24.00	19.29
0.15	0.84	29.59	27.97	24.99	24.52	22.24	18.57
0.15	0.9	28.45	22.56	20.00	20.00	18.33	16.65
0.3	0.15	10.85	9.93	9.22	7.34	6.12	4.55
0.45	0	7.87	6.42	5.00	4.97	4.00	4.00
0.3	0.21	4.08	3.40	3.00	2.46	1.91	1.82
0.45	0.06	4.37	3.99	3.57	2.94	2.90	2.50
0.3	0.27	3.56	3.00	1.91	1.19	0.27	0.51
0.45	0.12	3.00	3.00	2.00	0.40	2.00	7.49
0.3	0.33	3.42	3.18	2.48	2.26	1.53	0.52
0.45	0.18	3.83	2.60	2.40	1.09	1.08	0.33
0.3	0.39	5.95	4.76	3.00	2.00	2.00	1.00
0.45	0.24	2.00	1.00	1.00	1.00	0.39	0.27
0.3	0.45	4.85	3.60	2.00	2.00	1.00	0.50

垃圾渗滤液污染地下水层及修复过程的动态监测技术研究

0.45	0.3	2.00	1.05	1.00	1.01	0.81	0.71
0.3	0.51	5.75	5.81	5.10	2.00	1.95	0.92
0.45	0.36	4.19	3.13	3.00	2.91	2.12	2.02
0.3	0.57	8.72	4.00	4.00	3.00	3.00	1.80
0.45	0.42	6.11	5.49	4.93	3.59	3.00	1.65
0.3	0.63	5.00	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00
0.45	0.48	5.80	4.94	4.69	1.69	0.57	0.80
0.3	0.69	6.02	3.50	3.69	1.14	0.07	0.05
0.45	0.54	9.31	7.25	5.42	2.43	1.80	1.53
0.3	0.75	11.00	3.03	2.87	2.78	2.55	2.03
0.45	0.6	12.70	8.07	6.99	3.81	2.62	2.62
0.45	0.66	11.74	6.82	6.06	4.00	3.00	2.00
0.45	0.72	7.65	5.66	4.97	4.48	3.84	3.60
0.45	0.78	6.00	5.79	5.01	5.00	3.97	3.00
0.45	0.84	5.04	4.52	3.91	3.65	3.86	3.42
0.45	0.9	6.60	5.01	4.98	4.82	4.76	4.17
0.6	0.15	6.90	5.35	3.00	2.85	1.75	1.89
0.75	0	6.00	6.00	5.00	5.00	2.95	1.51
0.6	0.21	6.68	6.79	6.36	6.65	6.09	2.00
0.75	0.06	7.78	7.76	2.55	2.13	1.48	1.67
0.6	0.27	6.00	6.00	3.00	2.00	1.33	1.00
0.75	0.12	6.50	5.87	5.73	4.03	1.76	1.31
0.6	0.33	8.00	7.00	7.00	6.00	5.00	4.00
0.75	0.18	9.78	9.97	9.30	9.04	9.03	8.85
0.6	0.39	12.57	11.23	9.62	8.48	6.00	6.00
0.75	0.24	9.00	9.00	9.00	9.00	3.53	3.43
0.6	0.45	10.05	9.90	9.62	9.48	7.92	7.69
0.75	0.3	10.00	10.00	10.00	10.00	9.00	8.00
0.6	0.51	11.64	11.79	11.19	10.75	10.42	9.96
0.75	0.36	21.80	13.00	8.00	8.00	7.00	7.00
0.6	0.57	13.00	6.65	5.87	5.74	5.51	5.35
0.75	0.42	17.36	14.39	15.78	12.74	12.02	12.39
0.6	0.63	16.00	15.00	13.00	11.00	11.00	11.00
0.75	0.48	16.00	15.29	11.48	10.30	9.70	9.72
0.6	0.69	16.00	16.00	13.00	9.00	9.00	8.00
0.75	0.54	18.00	16.00	13.00	8.45	8.20	7.90
0.6	0.75	20.81	16.95	16.00	13.66	12.74	12.87
0.75	0.6	25.00	16.00	15.00	12.00	12.00	12.00
0.75	0.66	25.00	16.60	15.15	12.90	12.09	12.09
0.75	0.72	27.64	16.00	15.00	14.00	13.00	11.00
0.75	0.78	22.11	18.88	16.03	15.00	14.20	11.00
0.75	0.84	26.00	13.09	12.29	11.85	11.17	11.22
0.75	0.9	30.05	19.76	13.00	11.21	9.08	8.17

0.9	0.15	14.15	13.87	13.64	13.31	12.49	12.56
0.9	0.21	17.01	16.72	15.53	14.00	13.00	12.00
0.9	0.27	15.92	14.13	13.95	13.65	13.38	13.38
0.9	0.33	22.69	15.00	14.54	8.21	6.95	6.15
0.9	0.39	24.78	15.00	13.00	7.00	7.00	6.00
0.9	0.45	20.00	13.00	12.00	7.40	6.70	6.35
0.9	0.51	14.38	11.11	10.80	8.03	6.91	7.01
0.9	0.57	27.05	17.46	15.73	9.65	7.73	7.07
0.9	0.63	11.58	10.84	10.87	8.89	8.91	9.68
0.9	0.69	23.69	19.58	12.00	11.00	10.00	10.00
0.9	0.75	13.78	13.77	13.07	13.01	12.19	12.05

(4) 深度 Z=0.42m 处

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值	侵入 12 小时监测值	侵入 24 小时监测值	侵入 36 小时监测值	侵入 48 小时监测值	侵入 60 小时监测值
		$\rho_s(\Omega \cdot m)$					
0	0.21	206.48	159.44	152.86	126.15	122.42	122.13
0	0.27	153.81	151.49	136.76	134.97	105.59	152.80
0	0.33	171.94	168.06	160.01	155.37	157.25	146.48
0	0.39	99.32	84.82	81.09	66.87	66.62	66.68
0	0.45	70.42	60.49	58.89	58.63	58.06	57.13
0	0.51	60.02	59.30	56.38	55.48	54.95	55.17
0	0.57	50.03	49.98	46.28	45.58	44.83	41.90
0	0.63	40.41	37.00	36.00	35.00	34.00	30.00
0	0.69	27.20	24.30	24.29	23.94	23.45	23.78
0.3	0.21	9.14	8.90	6.19	4.94	1.97	1.00
0.3	0.27	5.00	3.84	2.53	1.76	1.94	0.50
0.3	0.33	19.49	9.65	9.48	5.22	4.94	4.45
0.3	0.39	12.00	10.18	8.96	8.10	6.95	2.05
0.3	0.45	23.08	18.02	16.85	12.87	10.62	11.08
0.3	0.51	40.27	24.70	21.11	10.92	8.20	8.21
0.3	0.57	25.72	14.32	14.80	6.97	5.36	3.91
0.3	0.63	25.34	21.09	18.43	17.86	16.28	16.86
0.3	0.69	33.93	19.11	16.62	9.47	7.77	6.76
0.6	0.21	14.55	4.14	2.08	1.73	1.74	1.03
0.6	0.27	11.19	9.23	9.03	9.00	8.78	8.78
0.6	0.33	13.46	11.62	11.11	10.14	10.96	8.39
0.6	0.39	19.11	13.00	11.66	10.00	9.09	6.84
0.6	0.45	17.00	13.75	13.76	13.00	12.00	3.92
0.6	0.51	16.35	15.30	13.67	13.47	13.06	12.96
0.6	0.57	18.79	17.89	17.62	15.76	15.33	15.08
0.6	0.63	16.00	13.00	13.00	11.10	9.69	9.32

0.6	0.69	16.00	15.00	14.00	13.00	11.00	10.00
0.9	0.21	21.02	16.26	15.95	14.57	13.52	13.49
0.9	0.27	16.97	16.40	16.03	15.65	14.95	14.78
0.9	0.33	25.55	19.36	18.72	13.07	11.15	11.46
0.9	0.39	18.97	17.89	16.72	16.21	16.10	14.88
0.9	0.45	29.18	20.35	20.58	13.54	11.07	10.27
0.9	0.51	10.63	10.30	10.26	9.12	9.13	8.74
0.9	0.57	26.26	17.55	17.88	10.44	8.18	8.56
0.9	0.63	29.08	19.54	18.58	10.25	8.57	7.52
0.9	0.69	19.51	16.89	15.64	14.46	13.47	7.00

## (5) 深度 Z=0.6m 处

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 12 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 24 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 36 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 48 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$	侵入 60 小时监测值 $\rho_s(\Omega \cdot m)$
0	0.3	285.13	230.73	228.81	188.07	187.98	181.98
0	0.36	286.62	286.54	281.08	225.46	220.26	218.65
0	0.42	230.00	200.00	200.00	150.00	150.00	140.00
0	0.48	180.41	115.55	107.85	76.89	73.30	73.98
0	0.54	137.38	119.56	117.67	63.00	60.00	60.00
0	0.6	72.65	59.65	56.48	49.27	44.14	42.45
0.3	0.3	33.00	32.24	30.00	17.41	13.39	11.71
0.3	0.36	41.68	33.12	31.51	21.77	14.00	13.00
0.3	0.42	44.00	37.08	33.60	17.19	13.33	13.22
0.3	0.48	48.89	30.45	28.31	15.73	14.00	12.38
0.3	0.54	44.19	36.18	32.13	20.00	16.00	12.00
0.3	0.6	44.00	35.94	28.00	25.72	17.81	12.00
0.6	0.3	29.79	25.00	19.96	14.81	12.97	12.64
0.6	0.36	29.09	23.34	24.15	19.78	18.48	18.36
0.6	0.42	27.00	20.00	20.00	8.70	13.00	10.19
0.6	0.48	25.00	21.83	17.74	15.00	11.00	9.00
0.6	0.54	22.00	18.00	11.21	11.04	11.03	9.52
0.6	0.6	32.21	22.46	15.65	13.86	13.11	9.29
0.9	0.3	36.08	19.66	20.55	18.60	18.07	16.90
0.9	0.36	18.48	18.41	16.64	15.71	14.96	14.19
0.9	0.42	32.08	21.00	20.00	19.08	15.72	14.94
0.9	0.48	25.94	25.01	25.12	22.59	20.87	20.63
0.9	0.54	23.00	23.00	20.00	19.00	18.00	18.00
0.9	0.6	21.03	21.02	18.86	17.87	18.01	10.68
0.15	0.27	37.13	37.45	36.79	35.49	32.81	32.44
0.15	0.33	35.81	28.00	28.00	28.00	27.00	25.00
0.15	0.39	24.24	22.64	20.91	20.60	19.93	19.89

0.15	0.45	18.46	18.49	18.10	17.56	14.83	14.07
0.15	0.51	24.38	23.26	21.42	18.93	15.00	14.00
0.15	0.57	13.55	12.49	10.63	9.83	9.85	9.68
0.15	0.63	15.52	10.70	10.35	7.09	6.72	6.61
0.45	0.27	8.00	5.00	4.92	4.77	2.80	1.34
0.45	0.33	9.22	8.36	7.57	7.44	7.28	5.61
0.45	0.39	10.00	10.00	9.00	7.00	6.00	4.00
0.45	0.45	13.55	12.13	8.48	7.42	5.65	3.52
0.45	0.51	5.57	4.65	4.29	3.90	3.00	2.89
0.45	0.57	13.54	6.00	4.00	4.00	3.50	3.00
0.45	0.63	4.84	3.97	3.38	3.20	3.00	3.00
0.75	0.27	42.00	34.19	31.14	24.83	23.16	23.31
0.75	0.33	48.62	36.29	35.14	24.10	21.48	21.04
0.75	0.39	41.16	37.13	36.00	32.03	28.09	22.73
0.75	0.45	42.56	35.00	35.04	32.12	30.84	29.83
0.75	0.51	42.78	37.48	36.09	34.98	34.22	33.12
0.75	0.57	42.00	31.99	29.63	26.48	24.88	24.99
0.75	0.63	45.30	32.10	32.16	21.07	18.29	17.72

(6) X=0.3m 处纵向剖面

X(m)	Y(m)	侵入 0 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$	侵入 12 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$	侵入 24 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$	侵入 36 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$	侵入 48 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$	侵入 60 小时监测值 $\rho s(\Omega \cdot m)$
0.06	0.03	4.17	3.07	2.70	2.47	2.30	1.99
0.06	0.09	2.97	2.76	2.75	2.63	2.63	2.07
0.06	0.15	0.67	0.47	0.48	0.40	0.29	0.23
0.06	0.21	0.61	0.40	0.30	0.30	0.29	0.28
0.06	0.27	0.54	0.40	0.26	0.16	0.12	0.10
0.06	0.33	0.75	0.70	0.55	0.48	0.31	0.30
0.06	0.39	1.00	0.57	0.60	0.38	0.37	0.10
0.06	0.45	2.22	1.68	1.36	0.78	0.64	0.56
0.06	0.51	2.84	2.02	1.54	0.85	0.61	0.61
0.06	0.57	3.59	2.46	1.54	1.47	1.38	0.94
0.06	0.63	2.26	1.75	1.53	1.37	1.20	1.14
0.06	0.69	3.22	2.16	1.60	0.95	0.74	0.62
0.06	0.75	1.58	1.50	1.10	0.53	0.61	0.12
0.06	0.81	1.59	1.56	1.54	1.40	1.27	0.79
0.06	0.87	6.07	4.29	3.66	3.47	3.03	2.95
0.12	0.06	4.02	3.47	3.05	0.85	0.71	0.52
0.12	0.12	6.03	5.38	4.05	2.65	2.40	0.80
0.12	0.18	5.00	4.20	3.55	3.00	2.00	0.90

垃圾渗滤液污染地下水层及修复过程的动态监测技术研究

0.12	0.24	4.92	4.44	4.09	3.40	2.00	0.25
0.12	0.3	0.96	0.50	0.44	0.35	0.32	0.30
0.12	0.36	0.90	0.58	0.50	0.43	0.32	0.26
0.12	0.42	0.81	0.77	0.30	0.31	0.27	0.20
0.12	0.48	3.00	1.69	1.59	1.50	1.26	1.30
0.12	0.54	8.01	5.40	4.41	2.08	1.43	1.43
0.12	0.6	6.04	3.63	2.55	2.00	0.86	0.51
0.12	0.66	5.25	4.16	3.91	3.53	3.21	3.06
0.12	0.72	5.17	3.68	2.39	1.26	1.01	0.88
0.12	0.78	5.00	4.60	4.40	3.00	1.50	0.63
0.12	0.84	8.75	7.81	2.39	2.30	2.01	1.74
0.18	0.09	3.00	2.00	2.00	2.00	1.50	0.25
0.18	0.15	2.99	2.66	2.08	1.88	1.89	1.84
0.18	0.21	2.20	2.00	1.54	1.40	1.40	0.73
0.18	0.27	2.59	2.11	1.20	1.00	0.50	0.30
0.18	0.33	1.08	0.90	0.88	0.43	0.39	0.02
0.18	0.39	3.78	2.39	1.49	0.58	0.32	0.20
0.18	0.45	1.52	1.37	1.16	0.80	0.36	0.31
0.18	0.51	5.32	2.00	0.86	0.77	0.70	0.38
0.18	0.57	15.74	8.29	4.01	2.85	0.60	0.70
0.18	0.63	5.00	3.74	1.98	1.72	0.65	0.64
0.18	0.69	8.86	8.09	6.51	5.97	5.78	2.00
0.18	0.75	4.43	3.81	3.90	3.12	2.83	1.07
0.18	0.81	4.00	3.00	1.00	0.99	0.94	0.74
0.24	0.12	3.00	3.00	2.32	2.00	2.00	1.17
0.24	0.18	3.33	3.04	2.55	2.14	2.11	1.00
0.24	0.24	2.50	2.00	1.31	1.30	0.83	0.80
0.24	0.3	3.82	2.51	1.86	1.03	0.21	0.06
0.24	0.36	2.46	2.03	1.37	0.79	0.73	0.09
0.24	0.42	9.13	4.48	2.20	1.62	1.84	0.50
0.24	0.48	2.76	2.17	1.93	1.43	1.12	0.75
0.24	0.54	10.97	8.00	7.18	5.54	5.04	4.59
0.24	0.6	7.00	7.00	5.00	4.62	4.00	2.60
0.24	0.66	6.06	6.00	5.00	3.71	2.40	0.85
0.24	0.72	12.42	9.61	8.74	6.00	6.00	1.00
0.24	0.78	4.00	4.00	1.23	1.16	1.16	0.21
0.3	0.15	4.85	4.55	2.49	2.00	2.00	2.00
0.3	0.21	4.08	3.94	3.40	2.46	1.91	1.82
0.3	0.27	3.56	1.91	1.80	1.19	0.27	0.51
0.3	0.33	5.00	3.18	2.48	2.26	1.53	0.52
0.3	0.39	9.87	5.95	4.76	3.00	2.00	1.00
0.3	0.45	11.44	4.85	3.60	2.00	2.00	0.50
0.3	0.51	11.00	5.81	5.75	5.10	1.95	2.00

0.3	0.57	10.01	8.72	4.00	4.00	3.00	3.00
0.3	0.63	6.00	5.00	4.00	3.00	3.00	3.00
0.3	0.69	6.02	3.69	3.00	2.23	2.00	1.14
0.3	0.75	11.00	4.32	3.03	2.87	2.78	2.00
0.36	0.18	7.10	6.34	6.01	5.54	2.90	2.00
0.36	0.24	3.18	3.08	2.59	1.60	0.67	0.82
0.36	0.3	10.59	4.83	2.71	2.00	1.81	1.65
0.36	0.36	6.80	5.58	4.85	4.54	1.00	0.58
0.36	0.42	1.76	1.67	1.30	0.97	0.84	0.68
0.36	0.48	26.82	18.00	14.62	6.91	4.98	4.94
0.36	0.54	25.51	16.87	12.44	6.13	4.45	1.91
0.36	0.6	20.17	16.15	14.87	13.46	6.00	3.00
0.36	0.66	33.86	18.00	15.76	9.51	8.09	6.48
0.36	0.72	16.00	8.00	6.00	4.72	3.24	1.15
0.42	0.21	9.14	8.90	6.19	4.94	3.56	1.00
0.42	0.27	5.00	3.84	2.75	2.53	1.94	1.76
0.42	0.33	19.49	14.10	9.48	5.22	4.94	4.45
0.42	0.39	14.00	12.00	10.18	8.96	8.10	6.95
0.42	0.45	23.08	15.52	16.85	12.87	10.62	8.00
0.42	0.51	40.27	26.49	15.00	10.92	8.20	8.21
0.42	0.57	25.72	15.19	14.80	6.97	7.00	5.36
0.42	0.63	25.34	19.93	17.86	8.00	7.00	6.00
0.42	0.69	33.93	23.80	19.11	9.47	7.77	6.76
0.48	0.24	20.00	20.00	12.63	11.64	10.53	9.50
0.48	0.3	22.00	21.95	6.27	5.85	4.89	4.47
0.48	0.36	30.07	21.00	16.01	9.51	7.55	7.41
0.48	0.42	20.00	18.00	16.93	10.00	6.15	3.75
0.48	0.48	29.06	20.14	21.99	15.39	14.56	12.00
0.48	0.54	36.47	21.00	28.03	14.84	11.43	11.33
0.48	0.6	20.00	16.00	16.00	15.00	14.91	10.47
0.48	0.66	31.03	21.95	21.33	20.99	17.00	12.00
0.54	0.27	26.00	23.04	20.78	18.02	18.02	9.12
0.54	0.33	25.00	19.97	16.69	16.00	14.00	9.50
0.54	0.39	45.61	30.49	24.64	17.00	11.67	8.75
0.54	0.45	49.14	34.15	26.92	19.00	15.28	11.70
0.54	0.51	35.91	28.75	26.50	23.46	21.57	20.59
0.54	0.57	32.25	28.00	28.00	24.71	20.00	16.00
0.54	0.63	24.00	24.00	20.00	19.65	17.00	14.00
0.6	0.3	32.24	33.00	17.41	15.99	11.71	13.39
0.6	0.36	41.68	33.12	29.29	21.77	14.00	13.00
0.6	0.42	44.00	33.60	30.00	17.19	13.33	13.22
0.6	0.48	48.89	31.55	28.31	15.73	14.00	12.38
0.6	0.54	44.19	36.18	33.86	20.00	16.00	12.00

垃圾渗滤液污染地下水层及修复过程的动态监测技术研究

0.6	0.6	44.00	35.94	26.00	25.72	12.00	17.81
0.66	0.33	40.00	38.66	27.44	26.77	26.79	18.79
0.66	0.39	52.01	40.12	37.97	32.33	30.36	28.73
0.66	0.45	55.72	42.53	32.00	24.79	19.96	20.04
0.66	0.51	46.63	40.00	28.06	26.00	15.12	14.00
0.66	0.57	49.56	41.98	34.00	35.39	20.00	17.00
0.72	0.36	72.90	49.42	45.36	26.97	21.46	12.45
0.72	0.42	58.98	48.95	45.92	41.43	38.17	36.81
0.72	0.48	48.28	45.00	44.00	41.35	36.60	35.62
0.72	0.54	46.00	45.00	33.00	27.00	25.00	23.75
0.78	0.39	70.60	45.67	44.41	28.00	25.09	18.59
0.78	0.45	69.49	57.24	48.47	30.00	25.00	20.00
0.78	0.51	68.82	52.27	45.00	39.25	25.00	18.00
0.84	0.42	67.69	45.67	42.01	25.16	19.80	17.33
0.84	0.48	46.00	33.00	29.93	23.84	22.79	20.19
0.9	0.45	46.38	37.67	28.00	24.10	17.20	14.94
0.937	0.36	69.89	61.69	35.00	35.79	25.00	22.00
0.937	0.42	73.51	34.64	39.84	27.07	23.41	22.36
0.937	0.48	49.37	31.00	17.67	15.63	15.75	15.62
0.937	0.54	86.46	70.00	29.43	24.22	22.00	21.53
0.984	0.39	65.00	39.13	33.75	31.85	29.90	28.22
0.984	0.45	65.00	36.00	31.00	29.04	27.72	19.51
0.984	0.51	68.79	64.14	40.49	31.23	30.77	27.50
1.032	0.42	60.00	42.00	30.44	29.13	27.76	22.82
1.032	0.48	76.68	54.37	45.32	32.89	30.00	28.00
1.082	0.45	95.37	70.00	58.09	30.00	30.00	27.00

附表 2 污染区修复过程的室内模拟实验数据

(1) 深度 Z=0.06m 处

X(m)	Y(m)	注水 0 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 24 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 48 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 72 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.03	14.87	18.63	19.79	22.23
0	0.09	14.87	16.01	20.80	21.59
0	0.15	8.43	8.95	12.79	12.63
0	0.21	4.00	6.00	6.62	7.75
0	0.27	5.00	10.04	11.95	13.36
0	0.33	4.00	5.20	7.00	7.08
0	0.39	4.48	5.10	5.36	7.35
0	0.45	2.56	4.12	9.98	11.04
0	0.51	2.00	5.00	11.87	12.82
0	0.57	3.08	4.50	10.00	11.00
0	0.63	2.30	4.29	10.26	11.00
0	0.69	3.20	3.31	5.87	7.00
0	0.75	1.77	3.50	6.00	6.70
0	0.81	1.80	4.11	7.17	7.89
0	0.87	1.94	2.5	2.91	4.00
0.3	0.03	1.99	3.24	4.14	4.50
0.3	0.09	1.00	1.60	2.00	2.75
0.3	0.15	0.29	0.50	0.80	1.03
0.3	0.21	0.30	0.60	1.05	1.19
0.3	0.27	0.26	0.75	1.41	2.00
0.3	0.33	0.10	1.00	1.37	1.47
0.3	0.39	0.37	0.40	0.49	0.70
0.3	0.45	0.56	2.16	2.34	2.70
0.3	0.51	0.61	2.00	2.54	2.80
0.3	0.57	1.54	2.97	4.00	4.08
0.3	0.63	1.14	2.25	2.37	2.48
0.3	0.69	0.62	2.00	3.59	4.40
0.3	0.75	0.61	0.20	0.37	0.70
0.3	0.81	0.87	1.06	1.00	1.59
0.3	0.87	2.95	3.00	4.48	5.82
0.6	0.03	0.01	0.04	0.07	0.08
0.6	0.09	1.33	1.50	1.97	2.59
0.6	0.15	1.19	1.91	2.50	3.00
0.6	0.21	1.46	3.77	3.88	3.91
0.6	0.27	1.52	2.33	4.07	4.50

0.6	0.33	0.74	0.85	1.10	2.13
0.6	0.39	1.50	2.79	2.85	2.90
0.6	0.45	1.36	1.69	1.78	2.20
0.6	0.51	2.00	4.00	4.00	4.36
0.6	0.57	1.06	3.52	4.00	4.00
0.6	0.63	3.00	4.25	4.70	5.00
0.6	0.69	2.00	2.73	3.12	3.32
0.6	0.75	1.61	2.07	2.23	2.26
0.6	0.81	1.07	4.00	4.00	4.18
0.6	0.87	2.00	4.26	5.00	5.00
0.9	0.03	1.37	3.00	5.06	5.80
0.9	0.09	1.80	2.00	4.45	4.45
0.9	0.15	2.24	3.02	3.36	3.63
0.9	0.21	1.24	2.20	3.30	3.60
0.9	0.27	2.37	3.35	3.87	4.00
0.9	0.33	2.53	2.57	3.16	3.63
0.9	0.39	2.07	3.66	3.13	3.50
0.9	0.45	1.00	1.15	1.70	1.88
0.9	0.51	1.90	2.00	2.33	2.57
0.9	0.57	2.12	3.24	3.62	3.70
0.9	0.63	1.31	2.00	3.40	3.80
0.9	0.69	1.94	2.56	2.83	3.15
0.9	0.75	1.22	1.55	1.58	3.67
0.9	0.81	0.93	1.79	2.00	4.14
0.9	0.87	1.43	2.37	3.00	4.33

(2) 深度 Z=0.12m 处

X(m)	Y(m)	注水 0 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 24 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 48 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 72 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.06	37.51	40.00	43.00	45.21
0	0.12	18.28	19.09	19.60	22.62
0	0.18	21.29	21.19	26.93	28.00
0	0.24	9.00	32.16	32.32	33.00
0	0.3	22.95	27.53	27.00	28.03
0	0.36	8.86	10.03	12.33	13.15
0	0.42	9.00	10.92	12.00	12.50
0	0.48	10.17	11.85	12.46	13.99
0	0.54	8.61	8.96	9.23	11.76
0	0.6	5.32	6.16	7.30	7.96
0	0.66	4.32	7.50	8.50	10.00
0	0.72	4.20	8.34	10.97	11.50
0	0.78	3.55	9.00	11.00	12.00

0	0.84	3.32	9.77	13.10	13.60
0.3	0.06	2.23	4.02	4.29	4.64
0.3	0.12	1.26	1.73	2.00	5.38
0.3	0.18	0.14	0.30	0.76	2.00
0.3	0.24	2.69	3.19	3.35	4.92
0.3	0.3	0.35	0.30	0.40	1.00
0.3	0.36	0.50	0.76	0.87	1.10
0.3	0.42	0.57	0.70	1.68	2.30
0.3	0.48	1.30	1.60	4.79	5.60
0.3	0.54	1.43	5.88	7.52	8.00
0.3	0.6	0.12	4.95	7.22	9.12
0.3	0.66	3.06	3.04	5.18	5.31
0.3	0.72	0.88	4.03	5.01	5.20
0.3	0.78	0.63	5.50	6.00	6.00
0.3	0.84	1.74	6.61	7.00	7.00
0.6	0.06	0.29	1.26	1.79	2.00
0.6	0.12	0.85	1.50	1.70	3.62
0.6	0.18	0.68	1.00	1.27	1.40
0.6	0.24	0.08	4.00	4.00	6.74
0.6	0.3	4.00	4.00	6.03	6.62
0.6	0.36	1.02	2.30	3.38	3.85
0.6	0.42	2.85	3.50	4.15	5.11
0.6	0.48	2.71	3.00	3.21	4.00
0.6	0.54	5.22	6.00	7.00	8.00
0.6	0.6	7.50	8.00	8.64	9.24
0.6	0.66	5.30	7.34	7.62	8.00
0.6	0.72	1.61	2.83	4.75	6.02
0.6	0.78	2.84	3.10	4.55	4.88
0.6	0.84	3.00	4.00	5.00	10.11
0.9	0.06	5.50	7.54	8.35	9.00
0.9	0.12	2.47	3.88	8.66	9.00
0.9	0.18	5.81	5.94	8.47	9.00
0.9	0.24	5.30	8.40	9.00	9.85
0.9	0.3	3.30	6.00	8.44	9.00
0.9	0.36	4.10	5.00	6.04	6.30
0.9	0.42	2.79	3.00	4.00	4.23
0.9	0.48	3.50	4.00	4.00	5.02
0.9	0.54	3.79	4.39	4.50	5.00
0.9	0.6	2.91	4.54	7.80	8.60
0.9	0.66	2.93	3.94	7.31	7.60
0.9	0.72	3.60	5.00	5.50	6.00
0.9	0.78	2.38	5.50	6.00	6.30
0.9	0.84	1.73	6.30	6.40	6.70

(3) 深度 Z=0.3m 处

X(m)	Y(m)	注水 0 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 24 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 48 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 72 小时 监测值 $\rho s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.15	40.00	50.00	55.00	60.00
0.15	0	52.00	55.48	60.00	68.95
0	0.21	39.64	51.05	54.51	60.00
0.15	0.06	54.00	62.70	67.32	70.00
0	0.27	42.00	47.00	55.00	66.00
0.15	0.12	51.75	56.41	66.89	74.02
0	0.33	44.62	49.50	55.18	57.45
0.15	0.18	45.00	47.00	52.00	67.00
0	0.39	32.76	38.90	45.22	49.76
0.15	0.24	30.00	44.23	53.11	67.77
0	0.45	25.98	28.30	38.98	40.20
0.15	0.3	36.32	41.51	45.43	45.42
0	0.51	17.81	37.30	36.72	52.82
0.15	0.36	30.00	38.00	40.00	45.04
0	0.57	18.18	20.00	29.00	39.10
0.15	0.42	21.06	30.00	32.03	34.16
0	0.63	14.45	21.97	22.32	30.00
0.15	0.48	25.42	28.06	28.70	30.60
0	0.69	18.71	19.42	21.80	26.00
0.15	0.54	22.00	28.00	30.50	32.58
0	0.75	13.22	18.00	22.00	33.46
0.15	0.6	30.00	19.10	28.48	30.64
0.15	0.66	15.00	24.00	26.00	29.63
0.15	0.72	17.00	26.00	28.00	27.17
0.15	0.78	14.48	21.54	25.76	28.00
0.15	0.84	14.00	20.00	24.00	29.59
0.15	0.9	14.00	16.65	24.00	26.00
0.3	0.15	4.56	4.86	4.83	10.85
0.45	0	3.50	4.60	4.80	4.97
0.3	0.21	2.42	4.08	4.54	4.79
0.45	0.06	2.64	3.07	3.39	4.37
0.3	0.27	1.91	2.60	7.00	7.00
0.45	0.12	2.00	2.50	4.00	7.49
0.3	0.33	3.18	6.85	10.15	11.58
0.45	0.18	1.09	1.69	2.10	4.66
0.3	0.39	4.76	9.94	16.23	16.83
0.45	0.24	0.96	1.00	2.47	2.94
0.3	0.45	3.60	11.07	12.05	14.67

0.45	0.3	1.05	1.17	1.56	2.00
0.3	0.51	5.81	14.79	20.29	22.06
0.45	0.36	1.11	1.55	1.90	4.19
0.3	0.57	4.00	8.89	15.26	15.97
0.45	0.42	3.20	4.93	6.50	7.12
0.3	0.63	3.00	10.00	13.00	15.00
0.45	0.48	0.80	4.36	4.60	4.66
0.3	0.69	0.05	11.23	13.00	16.33
0.45	0.54	1.53	4.79	6.98	8.68
0.3	0.75	2.78	4.00	12.00	15.00
0.45	0.6	2.62	7.00	8.34	9.20
0.45	0.66	3.00	6.43	7.97	11.13
0.45	0.72	3.60	4.31	7.92	8.24
0.45	0.78	3.97	4.50	8.00	8.50
0.45	0.84	3.86	4.63	8.00	8.00
0.45	0.9	4.98	5.80	8.00	9.00
0.6	0.15	2.85	8.24	10.20	11.89
0.75	0	5.00	10.29	14.38	14.55
0.6	0.21	3.04	5.47	6.51	6.65
0.75	0.06	7.76	9.02	13.00	14.00
0.6	0.27	6.00	8.00	9.00	9.00
0.75	0.12	6.50	10.00	13.00	16.00
0.6	0.33	8.00	10.00	10.00	11.00
0.75	0.18	9.03	11.00	13.00	17.00
0.6	0.39	7.00	8.48	11.00	15.59
0.75	0.24	9.00	12.00	17.00	18.00
0.6	0.45	5.15	7.26	9.90	12.00
0.75	0.3	10.00	13.00	19.00	20.00
0.6	0.51	7.60	10.42	11.30	13.00
0.75	0.36	7.00	13.72	20.17	25.97
0.6	0.57	5.35	12.00	18.00	20.00
0.75	0.42	12.39	12.31	13.94	17.64
0.6	0.63	11.00	11.00	17.00	20.00
0.75	0.48	9.72	10.30	17.20	17.70
0.6	0.69	8.00	10.00	20.00	33.64
0.75	0.54	7.90	8.95	13.13	16.00
0.6	0.75	12.87	15.01	17.25	21.61
0.75	0.6	11.00	12.00	21.00	25.00
0.75	0.66	12.09	12.60	20.00	24.00
0.75	0.72	14.00	19.45	23.79	28.60
0.75	0.78	16.03	16.99	23.72	26.67
0.75	0.84	11.22	11.95	23.00	26.90
0.75	0.9	8.17	18.14	25.00	27.45

0.9	0.15	9.17	12.56	14.43	14.69
0.9	0.21	12.36	15.53	18.33	21.80
0.9	0.27	10.62	13.38	15.53	22.00
0.9	0.33	6.15	13.05	19.84	23.47
0.9	0.39	7.00	16.07	18.00	23.28
0.9	0.45	7.40	14.00	15.00	20.00
0.9	0.51	7.01	12.00	13.94	22.00
0.9	0.57	7.07	15.52	23.33	24.36
0.9	0.63	8.91	14.00	17.00	22.00
0.9	0.69	10.00	14.10	21.28	22.25
0.9	0.75	10.60	12.19	16.58	17.47

## (4) 深度 Z=0.6m 处

X(m)	Y(m)	注水 0 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 24 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 48 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	注水 72 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.3	181.98	257.88	258.46	310.99
0	0.36	218.65	240.64	265.64	287.13
0	0.42	140.00	203.90	237.18	242.35
0	0.48	73.98	131.88	141.69	169.29
0	0.54	60.00	104.71	121.51	134.47
0	0.6	42.45	44.57	74.05	74.19
0.3	0.3	17.41	22.61	29.71	36.53
0.3	0.36	21.77	25.06	45.13	45.47
0.3	0.42	13.22	28.00	43.50	46.00
0.3	0.48	14.00	30.04	42.63	46.56
0.3	0.54	16.00	26.55	43.49	44.57
0.3	0.6	17.81	24.00	38.00	44.00
0.6	0.3	12.64	22.01	26.62	34.06
0.6	0.36	18.36	21.28	29.38	33.63
0.6	0.42	10.19	18.00	25.00	28.00
0.6	0.48	11.00	14.35	22.47	23.85
0.6	0.54	9.07	11.03	11.42	20.00
0.6	0.6	12.11	12.24	16.94	25.27
0.9	0.3	18.60	25.45	39.62	43.72
0.9	0.36	15.71	20.00	45.00	48.00
0.9	0.42	14.94	22.00	47.03	58.33
0.9	0.48	17.21	20.63	50.00	53.00
0.9	0.54	19.00	32.54	49.93	53.14
0.9	0.6	18.01	17.03	40.00	53.00
0.15	0.27	15.76	17.53	20.78	35.49
0.15	0.33	25.97	28.00	34.14	38.30

0.15	0.39	20.60	22.64	31.66	32.83
0.15	0.45	2.98	3.28	4.98	18.49
0.15	0.51	2.00	3.00	3.25	15.00
0.15	0.57	4.00	4.00	5.00	12.49
0.15	0.63	3.68	4.07	7.45	10.70
0.45	0.27	3.72	4.89	5.00	6.12
0.45	0.33	2.26	5.61	7.44	9.79
0.45	0.39	4.00	5.00	10.00	12.00
0.45	0.45	3.52	7.43	12.56	14.34
0.45	0.51	2.89	6.22	8.73	8.58
0.45	0.57	3.00	8.72	10.10	12.67
0.45	0.63	3.97	4.17	6.40	7.28
0.75	0.27	21.61	23.31	31.85	31.48
0.75	0.33	21.04	32.64	39.06	48.64
0.75	0.39	22.73	30.28	45.40	51.34
0.75	0.45	29.83	35.79	42.51	48.58
0.75	0.51	28.18	33.12	42.15	45.42
0.75	0.57	24.99	25.03	35.10	35.30
0.75	0.63	17.72	31.34	37.44	46.93

附表3 现场监测实验数据

(1) 深度 Z=0.3m 处

X (m)	Y(m)	侵入0小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入24小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入48小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入72小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.15	0.48	0.46	0.45	0.44
0	0.45	0.73	0.69	0.65	0.56
0	0.75	0.69	0.53	0.51	0.50
0	1.05	0.71	0.62	0.62	0.57
0	1.35	0.39	0.29	0.26	0.26
0	1.65	0.40	0.39	0.37	0.37
0	1.95	0.50	0.34	0.30	0.28
0	2.25	0.35	0.34	0.34	0.30
0	2.55	0.26	0.23	0.23	0.21
0	2.85	0.29	0.26	0.25	0.24
0	3.15	0.23	0.22	0.21	0.19
0	3.45	0.26	0.25	0.23	0.20
0	3.75	0.19	0.19	0.19	0.17
0	4.05	0.18	0.17	0.17	0.15
0	4.35	0.24	0.18	0.17	0.15
0.6	4.35	0.16	0.16	0.15	0.13
0.6	4.05	0.14	0.14	0.13	0.13
0.6	3.75	0.16	0.15	0.14	0.12
0.6	3.45	0.15	0.14	0.14	0.12
0.6	3.15	0.16	0.15	0.14	0.12
0.6	2.85	0.13	0.12	0.12	0.09
0.6	2.55	0.15	0.13	0.12	0.11
0.6	2.25	0.13	0.12	0.12	0.10
0.6	1.95	0.12	0.11	0.10	0.08
0.6	1.65	0.15	0.14	0.12	0.11
0.6	1.35	0.28	0.14	0.13	0.11
0.6	1.05	0.33	0.32	0.22	0.19
0.6	0.75	0.27	0.25	0.25	0.13
0.6	0.45	0.36	0.33	0.33	0.08
0.6	0.15	0.08	0.08	0.08	0.07
1.2	0.15	0.08	0.08	0.07	0.06
1.2	0.45	0.12	0.11	0.11	0.08
1.2	0.75	0.16	0.16	0.15	0.14
1.2	1.05	0.12	0.12	0.12	0.11
1.2	1.35	0.19	0.19	0.15	0.15

1.2	1.65	0.13	0.13	0.13	0.12
1.2	1.95	0.11	0.11	0.11	0.10
1.2	2.25	0.16	0.16	0.15	0.13
1.2	2.55	0.14	0.14	0.14	0.06
1.2	2.85	0.07	0.07	0.06	0.05
1.2	3.15	0.07	0.06	0.06	0.05
1.2	3.45	0.09	0.08	0.07	0.06
1.2	3.75	0.09	0.08	0.08	0.07
1.2	4.05	0.09	0.08	0.07	0.07
1.2	4.35	0.13	0.12	0.10	0.08
1.8	4.35	0.20	0.14	0.13	0.12
1.8	4.05	0.28	0.27	0.21	0.20
1.8	3.75	0.20	0.18	0.17	0.17
1.8	3.45	0.09	0.09	0.07	0.07
1.8	3.15	0.08	0.06	0.05	0.05
1.8	2.85	0.17	0.11	0.10	0.09
1.8	2.55	0.10	0.10	0.09	0.08
1.8	2.25	0.10	0.09	0.08	0.07
1.8	1.95	0.12	0.12	0.09	0.10
1.8	1.65	0.10	0.10	0.10	0.10
1.8	1.35	0.10	0.06	0.05	0.05
1.8	1.05	0.27	0.26	0.22	0.10
1.8	0.75	0.19	0.18	0.14	0.11
1.8	0.45	0.11	0.11	0.11	0.07
1.8	0.15	0.16	0.15	0.07	0.05

(2) 深度 Z=0.6m 处

X (m)	Y(m)	侵入 0 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 24 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 48 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 72 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.3	0.96	0.96	0.90	0.90
0	0.6	1.50	1.49	1.49	1.43
0	0.9	1.03	1.03	0.98	0.83
0	1.2	1.26	1.19	1.19	1.16
0	1.5	0.59	0.58	0.58	0.56
0	1.8	0.79	0.78	0.73	0.58
0	2.1	0.64	0.63	0.61	0.57
0	2.4	0.75	0.70	0.70	0.68
0	2.7	0.46	0.45	0.45	0.42
0.3	2.4	0.60	0.53	0.53	0.49
0	3	0.57	0.49	0.48	0.48

垃圾渗滤液污染地下水含水层及修复过程的动态监测技术研究

0.3	2.7	0.43	0.38	0.36	0.36
0	3.3	0.47	0.47	0.45	0.40
0.3	3	0.65	0.53	0.53	0.52
0	3.6	0.55	0.51	0.51	0.46
0.3	3.3	0.46	0.44	0.45	0.43
0	3.9	0.40	0.38	0.38	0.36
0.3	3.6	0.44	0.43	0.43	0.39
0	4.2	0.32	0.32	0.35	0.35
0.3	3.9	0.35	0.33	0.33	0.31
0.3	4.2	0.46	0.39	0.39	0.37
0.3	4.5	0.41	0.38	0.38	0.33
0.6	4.2	0.37	0.35	0.35	0.32
0.6	3.9	0.29	0.29	0.29	0.28
0.6	3.6	0.45	0.36	0.36	0.34
0.6	3.3	0.23	0.22	0.20	0.20
0.6	3	0.27	0.25	0.25	0.23
0.6	2.7	0.23	0.23	0.22	0.21
0.6	2.4	0.33	0.27	0.27	0.25
0.6	2.1	0.22	0.21	0.21	0.19
0.6	1.8	0.20	0.20	0.20	0.18
0.9	2.1	0.20	0.20	0.20	0.18
0.6	1.5	0.29	0.22	0.22	0.19
0.9	1.8	0.27	0.24	0.24	0.21
0.6	1.2	0.24	0.21	0.21	0.20
0.9	1.5	0.24	0.18	0.18	0.16
0.6	0.9	0.46	0.43	0.43	0.40
0.9	1.2	0.21	0.17	0.17	0.16
0.6	0.6	0.36	0.35	0.35	0.34
0.9	0.9	0.18	0.18	0.18	0.16
0.6	0.15	0.53	0.41	0.41	0.41
0.9	0.75	0.29	0.21	0.21	0.18
0.9	0.3	0.17	0.16	0.16	0.13
0.9	0	0.17	0.15	0.15	0.13
1.2	0.3	0.22	0.17	0.17	0.14
1.2	0.6	0.21	0.16	0.16	0.15
1.2	0.9	0.22	0.21	0.20	0.20
1.2	1.2	0.18	0.18	0.18	0.17
1.2	1.5	0.28	0.22	0.22	0.20
1.2	1.8	0.35	0.35	0.34	0.31
1.2	2.1	0.43	0.30	0.28	0.27
1.2	2.4	0.42	0.41	0.37	0.33
1.2	2.7	0.13	0.11	0.11	0.09
1.5	2.4	0.12	0.11	0.11	0.10

1.2	3	0.15	0.10	0.09	0.07
1.5	2.7	0.15	0.14	0.14	0.13
1.2	3.3	0.12	0.12	0.11	0.10
1.5	3	0.36	0.29	0.29	0.27
1.2	3.6	0.12	0.12	0.12	0.11
1.5	3.3	0.26	0.24	0.24	0.21
1.2	3.9	0.12	0.11	0.11	0.09
1.5	3.6	0.16	0.14	0.13	0.12
1.2	4.2	0.11	0.11	0.11	0.09
1.5	3.9	0.11	0.11	0.10	0.09
1.5	4.2	0.25	0.14	0.12	0.12
1.5	4.5	0.31	0.27	0.27	0.25
1.8	4.2	0.20	0.19	0.18	0.17
1.8	3.9	0.45	0.29	0.28	0.26
1.8	3.6	0.51	0.30	0.25	0.20
1.8	3.3	0.28	0.22	0.19	0.15
1.8	3	0.24	0.22	0.18	0.09
1.8	2.7	0.37	0.24	0.24	0.22
1.8	2.4	0.25	0.20	0.20	0.18
1.8	2.1	0.14	0.12	0.12	0.10
1.8	1.8	0.29	0.25	0.25	0.25
1.8	1.5	0.15	0.15	0.15	0.13
1.8	1.2	0.13	0.13	0.13	0.11
1.8	0.9	0.24	0.16	0.16	0.13
1.8	0.6	0.36	0.21	0.20	0.12
1.8	0.15	0.18	0.11	0.11	0.10

(3) 深度 Z=0.9m 处

X (m)	Y(m)	侵入 0 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 24 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 48 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 72 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
0	0.45	2.02	1.52	1.47	1.44
0	0.75	2.23	2.21	2.19	2.09
0	1.05	2.17	2.12	1.45	1.38
0	1.35	1.81	1.80	1.76	1.71
0	1.65	1.00	0.93	0.93	0.88
0	1.95	1.21	1.20	1.19	1.08
0	2.25	0.99	0.99	0.87	0.85
0	2.55	1.09	1.04	1.03	0.99
0	2.85	0.74	0.69	0.69	0.65
0	3.15	0.84	0.84	0.69	0.69

0	3.45	0.74	0.74	0.71	0.64
0	3.75	0.97	0.77	0.77	0.69
0	4.05	0.57	0.57	0.56	0.52
0.6	4.05	0.86	0.82	0.82	0.78
0.6	3.75	0.66	0.62	0.62	0.62
0.6	3.45	0.85	0.80	0.80	0.77
0.6	3.15	0.33	0.33	0.31	0.29
0.6	2.85	0.41	0.37	0.37	0.36
0.6	2.55	0.35	0.35	0.32	0.31
0.6	2.25	0.45	0.41	0.41	0.37
0.6	1.95	0.36	0.32	0.32	0.29
0.6	1.65	0.29	0.29	0.29	0.26
0.6	1.35	0.41	0.34	0.34	0.29
0.6	1.05	0.35	0.31	0.31	0.28
0.6	0.75	0.49	0.43	0.43	0.40
0.6	0.45	0.37	0.37	0.36	0.35
1.2	0.45	0.72	0.26	0.26	0.22
1.2	0.75	0.25	0.24	0.24	0.22
1.2	1.05	0.25	0.23	0.23	0.21
1.2	1.35	0.22	0.22	0.21	0.19
1.2	1.65	0.40	0.26	0.26	0.23
1.2	1.95	0.81	0.81	0.71	0.60
1.2	2.25	0.68	0.68	0.67	0.67
1.2	2.55	0.93	0.88	0.88	0.76
1.2	2.85	0.19	0.19	0.19	0.16
1.2	3.15	0.22	0.18	0.16	0.08
1.2	3.45	0.21	0.20	0.20	0.17
1.2	3.75	0.15	0.15	0.11	0.11
1.2	4.05	0.17	0.15	0.15	0.13
1.8	4.05	0.23	0.22	0.22	0.20
1.8	3.75	0.40	0.32	0.32	0.29
1.8	3.45	0.38	0.32	0.31	0.29
1.8	3.15	0.35	0.32	0.31	0.31
1.8	2.85	0.15	0.15	0.14	0.12
1.8	2.55	0.37	0.28	0.27	0.25
1.8	2.25	0.48	0.41	0.41	0.38
1.8	1.95	0.18	0.14	0.14	0.12
1.8	1.65	0.18	0.16	0.16	0.14
1.8	1.35	0.19	0.19	0.19	0.16
1.8	1.05	0.24	0.24	0.24	0.20
1.8	0.75	0.26	0.24	0.24	0.20
1.8	0.45	0.29	0.24	0.24	0.21

## (4) Y=2.25m 处纵剖面

Z(m)	X(m)	侵入 0 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 24 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 48 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	侵入 72 小时 监测值 $\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
4.54	0.3	2.48	2.33	2.30	2.08
4.54	1.5	2.70	2.67	2.65	2.57
0.30	0	0.35	0.35	0.34	0.34
0.90	0	0.99	0.99	0.87	0.85
1.50	0	1.97	1.77	1.74	1.73
2.10	0	2.49	2.48	2.47	2.34
2.70	0	5.54	5.26	5.09	4.89
3.30	0	7.89	7.34	7.32	6.94
3.90	0	7.11	6.99	6.98	6.53
4.50	0	10.43	10.32	10.27	7.69
0.67	0.3	0.51	0.47	0.46	0.44
0.67	0.3	0.60	0.59	0.59	0.54
1.08	0.3	1.57	1.27	1.27	1.24
1.08	0.3	0.82	0.81	0.72	0.78
1.62	0.3	1.57	1.57	1.49	1.43
1.62	0.3	1.41	1.34	1.34	1.26
2.18	0.3	2.85	2.85	2.76	2.58
2.18	0.3	1.40	1.32	1.32	1.21
2.77	0.3	2.59	2.58	2.43	2.37
2.77	0.3	1.78	1.58	1.58	1.52
3.35	0.3	8.10	3.88	3.74	3.74
3.35	0.3	2.46	2.04	2.01	1.77
3.95	0.3	4.08	3.41	3.08	2.90
4.54	0.3	6.19	5.69	5.65	5.62
0.30	0.6	0.12	0.10	0.10	0.09
0.90	0.6	0.45	0.41	0.41	0.37
1.50	0.6	0.59	0.58	0.58	0.51
2.10	0.6	0.85	0.79	0.79	0.74
2.70	0.6	1.17	1.14	1.14	1.02
3.30	0.6	2.01	1.76	1.75	1.54
3.90	0.6	2.88	1.95	1.94	1.76
0.67	0.9	0.24	0.22	0.22	0.20
0.67	0.9	0.24	0.23	0.23	0.21
1.08	0.9	0.41	0.37	0.37	0.33
1.08	0.9	0.43	0.40	0.39	0.35
1.62	0.9	1.42	1.14	1.13	1.13
1.62	0.9	2.20	1.88	1.86	1.73
1.62	0.9	0.61	0.50	0.50	0.01

2.18	0.9	1.27	1.25	1.23	1.23
2.18	0.9	2.14	1.80	1.73	1.51
2.77	0.9	2.50	1.92	1.91	1.81
2.77	0.9	3.34	3.10	2.97	2.96
3.35	0.9	1.54	1.54	1.52	1.46
3.95	0.9	2.63	2.16	2.14	1.95
3.95	0.9	1.33	1.01	1.00	0.91
4.54	0.9	2.07	2.07	2.06	1.91
4.54	0.9	1.22	1.22	1.21	1.02
0.30	1.2	0.16	0.13	0.13	0.11
0.90	1.2	0.68	0.68	0.67	0.67
1.50	1.2	1.66	1.42	1.42	1.40
2.10	1.2	0.54	0.53	0.53	2.52
2.70	1.2	1.95	0.68	0.68	0.58
3.30	1.2	1.01	1.04	1.03	0.93
3.90	1.2	2.96	2.84	2.82	2.53
4.50	1.2	1.57	1.30	1.30	1.12
0.67	1.5	0.12	0.12	0.09	0.09
0.67	1.5	0.14	0.12	0.12	0.11
1.08	1.5	0.46	0.35	0.35	0.30
1.08	1.5	0.22	0.21	0.21	0.17
1.62	1.5	0.46	0.44	0.44	0.40
1.62	1.5	0.38	0.34	0.34	0.33
2.18	1.5	0.70	0.67	0.66	0.57
2.18	1.5	0.68	0.62	0.62	0.55
2.77	1.5	2.12	1.96	1.95	1.87
2.77	1.5	0.79	0.75	0.74	0.68
3.35	1.5	2.05	2.00	1.99	1.81
3.35	1.5	1.61	1.06	1.06	0.94
3.95	1.5	2.90	2.86	2.81	1.50
4.54	1.5	1.38	1.28	1.28	1.14
0.30	1.8	0.09	0.07	0.07	0.07
0.90	1.8	0.48	0.41	0.41	0.38
1.50	1.8	0.68	0.46	0.31	0.30
2.10	1.8	1.16	0.86	0.86	0.73
2.70	1.8	1.03	0.95	0.95	0.91
3.30	1.8	0.51	0.51	0.49	0.38
3.90	1.8	1.30	1.15	1.15	0.99
3.95	0.3	3.24	2.57	2.56	2.28
4.50	0.6	2.11	2.09	1.94	1.92
3.95	1.5	3.28	2.89	2.68	2.67
4.50	1.8	5.53	5.14	5.10	4.81

## 致谢

硕士研究生学习阶段转瞬即逝，三年辛苦，感慨良多，终有所得。

首先，感谢我的指导教师—贾永刚（博士生导师）、郭秀军。贾永刚教授平易近人的品德，对本专业丰富的知识，严谨的治学态度，都给我以很大的影响。贾永刚教授极为注重我们研究生人文素质的培养，在他的带动下，我对中国古典文化产生了兴趣，我想，这会使我一生都受益匪浅。在我的学位论文的写作过程中，贾老师提出了很多宝贵的修改意见和建议，在此深深表示感谢。

郭秀军老师虽然年轻，但在地球物理探测方面造诣颇深，他对待科研工作一丝不苟、勇于科研创新的精神深深感染了我。郭老师在我论文的选题、实验的进行等方面做了很多细致的工作，平时对我的学习及研究工作要求严格、指导细致，而且带我参加野外实践工作，拓宽了我的知识面，学到了课本上所学不到的东西。在我的学位论文的写作过程中，从立题到最后修改，郭秀军老师都给予了耐心的指导，付出了很大心血，在此深深表示感谢。

在三年的学习和研究工作中受到孟庆生、刘汝海、阵友媛、刘红军、许国辉、单红仙、郑建国、刘贯群、王秀海等老师的多方指导和关心，实验过程中得到环境科学与工程学院李鸿江、郭健、远航、冯玉岩、孟祥梅等同学的大力帮助，在此表示衷心的感谢。与马媛、顾莹莹、张晓辉、董好刚、张建民、刘兴超、纪大伟、郑琳等同学三年，得到他们的帮助很多，在此一起表示感谢。