

Characteristics of Ground Penetrating Radar in Leakage Contamination of Gasoline Station and Its Implications*

—Taking Guiyang Shengfu Gas Station as an Example

Yuehua Jiang¹, Xun Zhou¹, Quanning Zhou¹, Ping Yuan¹, Muhua Zhao¹, Weiya Ge¹,
Shengyuan Yang², Jianjiang Zhang², Binjia Luo², Guoxuan Zhao²

¹Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing

²Guizhou Academy of Geo-Environment Monitoring, Guiyang

Email: jiangyuehua01@163.com; jiangyuehua01@sina.com

Received: Oct. 5th, 2011; revised: Nov. 2nd, 2011; accepted: Nov. 27th, 2011.

Abstract: The leakage and pollution status of gasoline station were studied by application of ground penetrating radar (GPR) in Guiyang Shengfu gas station. It was found that the pollutant anomalies of oil gas can be distinguished by GPR in near bedrock surface, bedrock cracks, resolved crevices, channels and faults of karst areas, and had different reflections of leakage pollution as compared with bedrock and clay. According to pollutant anomalies (contamination plume), contamination paths, depth and scopes of leakage pollutants can be mark with circle. Based on the validation of 13 drilling holes and sample analysis of water quality of groundwater, the authors farther found out the pollutant compositions, source and movement law in studied areas and approved that GPR method can be used as a nondestructive in situ detecting method which can fleetly and efficiently detect the leakage and pollutant distribution of underground oil storage tanks of gas stations. The authors put forward the advices of leakage prevention and cure and contamination father of underground oil storage tanks of gas stations on the basis of research in karst areas.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Gas Station; Groundwater; Soil; Organic Pollution

加油站渗漏污染地质雷达特征及其启示*

——以贵阳市省府加油站为例

姜月华¹, 周 迅¹, 周权平¹, 袁 平¹, 赵牧华¹,
葛伟亚¹, 杨胜元², 张建江², 罗炳佳², 赵国宣²

¹中国地质调查局南京地质调查中心, 南京

²贵州省地质环境监测院, 贵阳

Email: jiangyuehua01@163.com; jiangyuehua01@sina.com

收稿日期: 2011年10月5日; 修回日期: 2011年11月2日; 录用日期: 2011年11月27日

摘 要: 作者应用地质雷达对贵阳市省府加油站渗漏和污染状况进行了研究, 发现地质雷达能够辨别出岩溶地区基岩面附近、基岩裂隙、溶缝、溶洞和断裂中油气污染物的异常, 具有与基岩和粘土不同的渗漏污染地质雷达反射特征。根据识别出的污染异常(污染晕或污染羽), 圈定了渗漏污染物的污染通道、污染范围和污染深度。通过 13 口钻孔的验证和地下水水质样品的测试分析, 进一步查明了研究区污染物的组分、来源和运移规律, 并证实了地质雷达技术作为一种非破坏性地表原位探查技术, 能够快捷有效地探测加油站地下储油罐渗漏污染物的分布状况。在此基础上, 作者提出了岩溶地区加油站地下储油罐渗漏防治及污染治理建议。

关键词: 地质雷达; 加油站; 地下水; 渗漏; 有机污染

*基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: 121201063400、1212010634404、1012010914006)、贵州省政府项目(编号: QDH2007-04)和江苏省“333 工程”科研项目联合资助。

1. 引言

加油站目前已成为美国地下水污染的最大污染源,截止 2001 年美国有超过 44 万个地下储油罐被确认发生渗漏,70 年代以前建成的加油站地下储油罐几乎全部存在渗漏现象,而超过 20 年的储油罐也大部分存在渗漏^[1]。壳牌石油公司曾宣布在英国的 1100 个加油站中有 1/3 对土壤和地下水造成了污染,类似这样的加油站地下储油罐渗漏在捷克、匈牙利以及南美洲的一些国家都有发生。

近年来在南京、北京、广州、沈阳、西安、成都等地加油站渗漏引发的污染事故不时发生。如 2010 年上海江心沙路一 5000 m³ 的轻质油罐泄漏发生严重火灾并污染环境;2010 年平阳鳌江塘外江口路一厂房内的 15 吨油罐因管道老化发生泄漏引发火灾;2009 年广西灵山伯劳镇一加油站近 6 t 汽油发生泄漏;2009 年安徽芜湖一加油站柴油泄漏,使附近鱼塘变“油塘”;2009 年苏州自由路 46 号一厂房油罐泄漏燃起大火;2009 年宁都县国家粮食储备库 900 万 t 的食用油罐发生罐体泄漏;2009 年南京浦口滨江油库发生汽油泄漏,造成村中部分农田土壤和水渠受到污染;2009 年常州武进前黄一加油站发生汽油泄露事故,使周围地下水和土壤发生污染;2009 年西安蓝田县余家湾村村民王生印家用了十多年的水井因加油站 9.68 t 柴油泄漏而严重污染;2009 年长春经济技术开发区兴隆山镇汇泉加油站泄漏使附近安龙泉村居民井发生严重污染;2008 年浙江义乌某加油站油库泄漏,发生 1.7 t 油漏;2008 年长沙开福新港荷叶村因油库泄漏,附近一饮水井中抽出 7 t 柴油;2007 年云南滇池边某加油站泄漏柴油数百公斤,流出近 2 km;2007 年湖南邵阳市内一加油站出现汽油泄漏,引起附近群众恐慌;2006 年广州黄埔区某加油站超过 1 t 柴油泄漏;2006 年南京市龙蟠路某加油站地下储油罐发生 2 t 左右汽油泄漏,汽油流进窰井和附近通讯管道井,造成交通和通讯被迫中断;2006 年常州市三井加油站储油罐数百公升 93 号汽油发生泄漏;2006 年河南巩义一储油罐泄漏 6 t 柴油进入黄河支流;2006 年山东招远罗峰一加油站漏油数十吨并引发火灾;2005 年温州瓯海区南白象加油站地下储油罐渗漏,导致附近下水道连续发生爆炸,加油站附近地下形成了一小型“油田”;2002 年^[2,3]新疆克拉玛依石油公司发现 89 座储油罐存在不同

程度渗漏现象;1995 年北京安家楼加油站发生渗漏迫使附近以地下水为水源的供水厂停产数月,影响供水范围达 36 km²……我国的加油站渗漏已进入高发年。

加油站渗漏引起的土壤、岩层和浅层地下水污染问题在国内至今还尚未被充分重视。鉴于加油站数量日渐庞大,多分布于车水马龙的城市,难以方便开展工程勘查,完全有可能成为我国第一大地下有机污染源。此外,由于地下水和土壤遭受有机污染物污染后难以清理和修复,且许多有机物进入环境后对人体和生物具有致癌、致畸和致突变作用^[4-6],因此,开展以加油站等地下储油罐渗漏污染快速实用预测预警方法研究如地质雷达应用研究就十分必要和重要。

2. 地质雷达应用现状

地质雷达,也称探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR),是利用高频电磁波束的反射来探测地下目标的一种高分辨率电磁方法^[7],也被称为电磁波脉冲雷达法、脉冲微波法、脉冲无线电频率法^[8]等。由于在探测地雷、地下隧道方面的需要,美国军方在 20 世纪 60 年代中期到 70 年代早期,对地质雷达的发展起到了非常大的推动作用,并从那时起,地质雷达开始广泛应用于矿业及确定地下水位、土壤界面、岩性接触、岩石中孔穴、断层^[9]、层面节理和位面。80 年代以来,地质雷达抗干扰性、采样率和数据处理技术都有很大提高,应用领域已从传统的地质体调查^[10]、矿产勘查^[11]扩展到考古、环境等领域。国内在地质雷达的应用上目前主要集中于高速公路和隧道等工程勘查和监测上^[12,13]。

然而,最早在污染区使用地质雷达进行地下有机污染物探测的则是在 70 年代晚期^[14],Lord 和 Koemer^[15]曾认为在地下污染区的探测技术中,对于地下埋藏的储存罐和泄漏物、边界线的圈定及总体的地下地质特征描述方面(图 1 和 2),地质雷达是最为可靠的技术手段。Saintenoy 等也曾经对地质雷达的应用进行过一定的报道^[16-21]。但是,从总体看,应用地质雷达对地下污染物的探测研究文献并不多,且多集中在厚层砂岩地区^[22]和冰层地区^[23]。

国内在应用地质雷达进行加油站渗漏地下有机污染物的探测方面以前未开展过工作,本文以贵阳市省府加油站渗漏污染研究为例,旨在总结我国西南岩溶

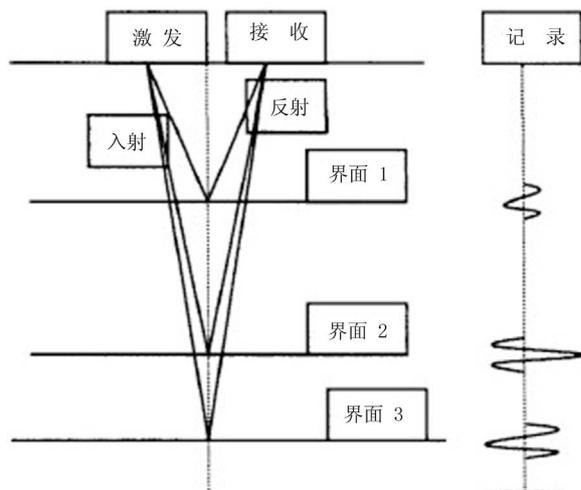


Figure 1. Sketch of technical principle of ground penetrating radar
图 1. 地质雷达技术原理图

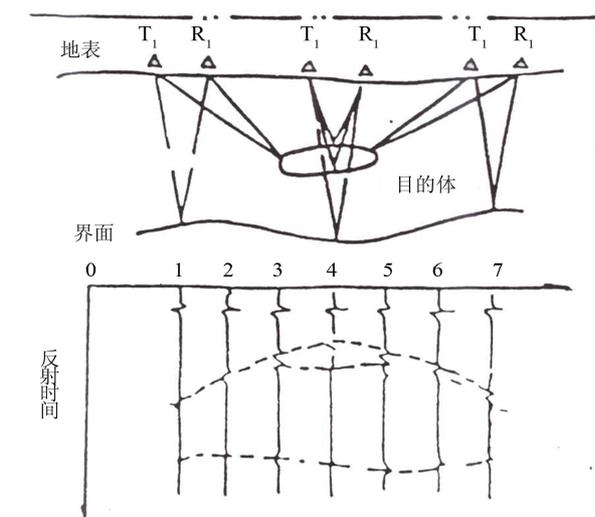


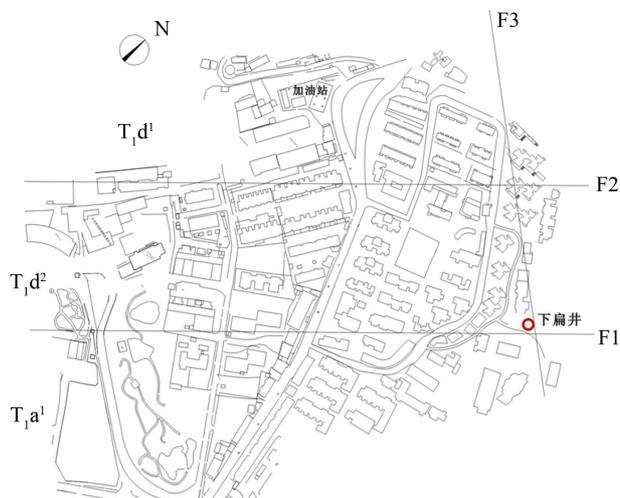
Figure 2. Sketch of waveform annal of ground penetrating radar
图 2. 雷达波形记录示意图

地区应用地质雷达探测加油站渗漏引起的地下有机物的相关特征和污染机理，并积累基岩地区地质雷达探测加油站的经验和相关数据资料。

3. 加油站周边地质背景和渗漏史

贵阳市省府加油站位于贵阳市市区，地势西北高东南低。从总体看，研究场地是以加油站为制高点，向东、东南、南和西南方向呈扇形地形逐渐降低。

该地地质构造复杂，断裂构造较为发育(图 3)，位于南北向向斜与 NE 向新华夏系构造体系交汇地带，其中，F1 断层属于阻水断裂，F3 断层属于导水断裂。由于阻水作用，导致大气降水渗入补给形成的地下水



T_{1a}¹-三叠系安顺组白云岩下段; T_{1d}¹-三叠系大冶组灰岩下段; T_{1d}²-三叠系大冶组灰岩上段。

Figure 3. Sketch of strata and structure in studied areas
图 3. 研究区地层和构造示意图

在断裂带附近由北西(NW)向南东(SE)方向径流。受阻于 F1 和 F3 断层主要集中于下扁井(S9)以上泉形式出露，流量 5~12 L/S。该地出露基岩主要为三叠系大冶组灰岩和安顺组白云岩，基岩上覆盖物为第四系残坡积、冲积松散沉积层，以粘土、亚粘土为主，厚度在 0~10 m 之间¹。

据资料²显示，从 1998 年 9 月 9 日至 1999 年 7 月 10 日间，位于调查场地东侧的宅吉小区化粪池共发现三次(70# 汽油)较大规模的渗入事件，且均为在当天或前几天大雨过后，共清除汽油约 4 t。研究场地加油站(共计 4 个储油罐，存储容量 21 m³/个)到场地东侧的宅吉小区化粪池间有两道堡坎，公路东侧堡坎脚 1998 年曾发生两次汽油渗出燃烧事故。同时，位于加油站 90°E 320 m 处的下扁井(井口 2 × 2 m，井深约 1.5 m)1998 年消防队曾抽出约 20 t 汽油。下扁井泉水至今仍有强烈汽油味存在而无法饮用。

加油站南侧的住宅区，未出现自然渗出事件，但是自 1998 年后不少建筑物在建时，于地基桩孔内发现存在有汽油味，且部分桩孔中气、液体均可以点燃。2008 年在建的第 9 幢住宅楼在北西侧基础人工挖孔桩施工期间，桩孔中发现有较浓的汽油味，用火柴可点

¹ 贵州省建筑工程勘察院，2006。贵州省政府办公厅职工房改经济适用房岩土工程勘察报告。

² 贵州省地质环境监测院，1998。贵阳市云岩区宅吉小区省财政厅宿舍化粪池渗入汽油事故调查鉴定报告。

燃孔中气体；2000年第12幢住宅楼西侧基础人工挖孔桩施工期间，桩孔中也发现有较浓的汽油味，施工人员用火柴即可点燃孔中气体。此外，在已建设的第19幢住宅楼及其东南并列的两栋住宅楼在基础施工时也发现有汽油味，但未能用明火点燃。

显然，研究场地是一处岩溶发育地区，加油站渗漏引起的污染后果不仅影响了周围地下水的饮用和使用，而且污染也使施工现场和建筑物存在安全隐患。

4. 研究方法

本次研究采取地质雷达勘查-直流电法勘查-钻探-水土样品采集和测试-综合研究的流程，对加油站渗漏污染状况进行了系统研究和分析。

地质雷达主要采用瑞典玛拉公司生产的RAMAC/GPR型探地雷达，配备了主机系列设备及50 MHz非屏蔽天线、100 MHz、250 MHz、500 MHz及1 GHz屏蔽天线等5种不同型号的天线。考虑到研究场地上覆土层的厚度、基岩埋深，本次勘测选用250 MHz和100 MHz屏蔽天线进行了作业，共布设地质雷达勘查线5325 m，其中250 MHz天线39条3630 m，100 MHz天线23条1695 m(图4)。

使用250 MHz屏蔽天线时，天线线距为0.36 m、采样点数为500、叠加次数为自动叠加、工作时窗为



Figure 4. Sketch of location of geophysical prospecting and drilling in studied areas

图4. 研究区前期物探和钻探点、线布设示意图

200 ns、道间距0.2 m；100 MHz屏蔽天线进行复测，天线线距0.5 m、采样点数为400、叠加次数为自动叠加、工作时窗为400 ns、道间距0.3 m。地质雷达采集的数据采用Reflexw探地雷达处理解释软件进行处理。处理过程包括预处理(标记和距离校正；剖面翻转和道标准化)和处理分析(浏览整个剖面，查找明显异常；去除直流漂移；移动开始时间；振幅增强；频谱分析；反褶积；滤波去噪；剖面修饰等)。

直流电法选用重庆地质仪器厂生产的DZD-6A多功能数字直流激电仪，电阻率测深选用对称4极装置，勘查点1个，极距计100 m。钻探分机械岩心钻和人工洛阳铲两种。机械岩心钻($\Phi 101$ mm)12口，人工洛阳铲3口。采集地下水有机污染分析样2件。样品由华东矿产资源监督检测中心测试，主要测试仪器有激光等离子体质谱仪、气象色谱仪、液相色谱仪、气象色谱质谱仪等。

5. 研究结果

5.1. 地质雷达

研究表明本次工作中250 MHz屏蔽天线所获得的信息更优于100 MHz屏蔽天线，这主要由研究区自身地质环境条件所决定，研究地区总体上上部土层一般不超过10 m厚，以2~6 m居多，土层之下为相对较致密的白云岩或灰岩。此外，地质雷达探测显示在干扰不太强烈的地段，对土层和基岩界面附近的油污染及基岩内部的含油裂隙、溶隙和溶洞均获得了较好的探测效果，并可与已在发现油污染及有钻孔验证地段作验证。

现将研究地区主要地层介质及内部结构体在地质雷达图像上的主要特征说明如下：

1) 第四系覆盖层：其主要成份为红粘土，顶部为杂填土。雷达波同相轴多呈连续、平行的条带状强反射(蓝色和紫色条带)(图5)，强度大，周期长。

2) 白云岩和灰岩：覆盖层下白云岩和灰岩结构致密，细晶质结构，岩质硬，雷达图像特征显示出内部反射层位少，反射强度弱(黑灰色和白色条带)(图5)，其周期较粘土明显增大。

3) 溶洞：溶洞雷达图像特点是被溶洞侧壁的强大反射所包围的弱反射空间，溶洞底界的反射则不太明显。当溶洞为空洞或充水时，洞体内雷达波几乎没有反射，

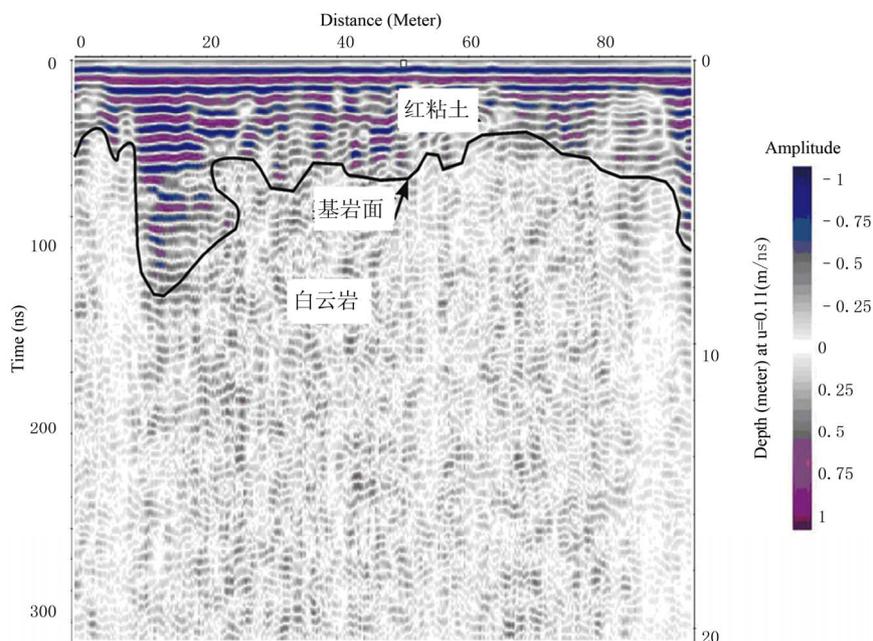


Figure 5. Reflection image of ground penetrating radar of unpolluted red clay and dolomite in 2 survey line
图 5. 2 号勘测线未受污染的红粘土和白云岩雷达反射图像

当溶洞充填粘土和污染物质时，则出现多组较短周期的强反射，这是由于洞内含油粘土或粘土与油、水混合物共同产生的结果(图 6)。

4) 溶缝、裂隙和断层：根据已有资料可知调查场地白云岩和灰岩表层由于风化作用，岩体相对较破碎，节理裂隙发育，岩芯多呈碎块状，向下岩体逐渐完整。裂隙内常有含油粘土等其它物质充填，与白云岩和灰岩有较大的差异，因此，能够形成较强的反射(图 6)。

5) 油污染物：由于油类污染物不是单独存在的，而是以液相、气相的形态赋存在土壤、地下水和岩石裂隙、溶洞及其充填物(图 6~图 8)中，因此，油气的特征实质上是指含油介质的雷达反射特征，脱离油气所赋存的背景介质，单独讨论其雷达反射特征是没有太大意义的。由于油气的介电常数与红粘土和基岩介电常数有较大差异，介于红粘土与基岩之间，因此，含油介质与不含油介质之间必然会产生雷达反射界面，这也是在浅部粘土和基岩中有效探测油气污染的理论依据。

根据调查场地的实际探测结果表明，赋存油污的地层介质，雷达图像主要呈现散状、点状、不连续的强弱相间的反射特征，且同一相位的水平方向连续性差，周期短，常呈现正负相位错位的特点。这种反射特征与基岩的反射特征反差较大，因此，基岩面以下的裂隙、溶缝、溶隙中赋存的油气污染较容易识别。由地质雷达获

得的信息而圈出的污染分布范围面积约 160,000 m²。

5.2. 直流电法

本次工作在第 12 号勘测线 190 m 处布设了直流电法勘测点(ZD1)，探测结果反演的深度模型显示(图 9)，地表以下的地层介质，在导电性参数上明显分三层：自上而下第一层厚约 2.3 m，电阻率在 240 Ω·m 左右，应属于内部不均匀的杂填土、红粘土；第二层厚约 1.4 m，电阻率急剧下降至 2.7 Ω·m，主要为含水较高的红粘土；第三层至 3.7 m 以下，电阻率急剧上升至 6300 Ω·m，表明已进入基岩。然而根据资料，一般白云岩的电阻率值为 350~2000 Ω·m，电阻率值达到 6000 Ω·m 以上显然反映了其内部有其它高电阻物质混杂其中，雷达剖面在 5 m~10 m 处反映了有污染异常显示(图 10)。将直流电法勘测点反演的深度与雷达资料相互印证后，可以看到，雷达资料反映的基岩面深度与直流电法反映的基岩面深度两者基本一致。

5.3. 钻探

为了验证地质雷达获得有关信息的可靠性，在雷达勘测工作结束后，本次研究工作的委托方随即安排实施了 16 口地质钻探(机械岩心钻{Φ101 mm}13 口，人工洛阳铲(Φ60 mm)3 口)，验证根据地质雷达圈定的

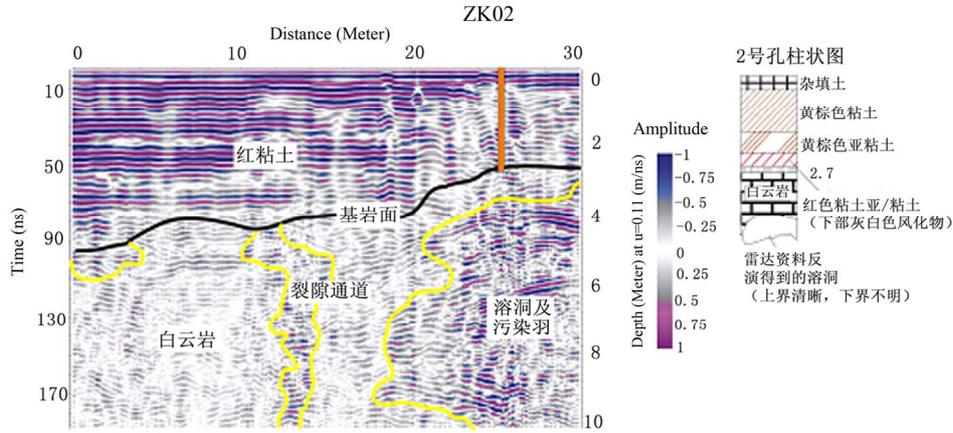


Figure 6. Reflection image of ground penetrating radar of polluted dolomite in 64 survey line
图 6. 64 号勘测线受到污染的雷达反射图像

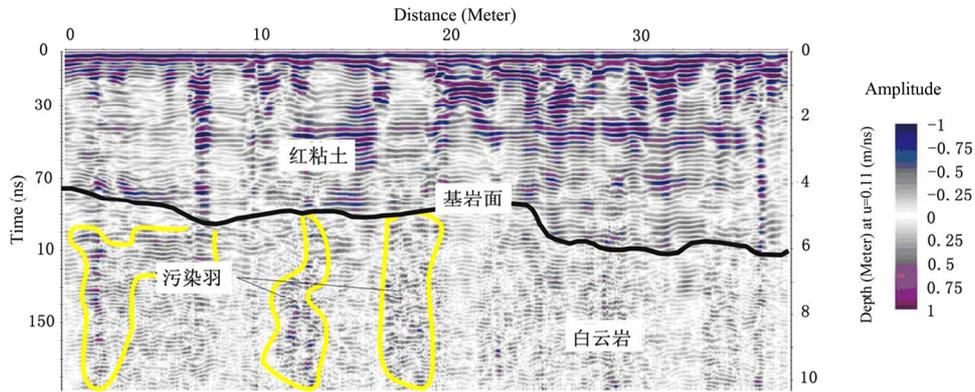


Figure 7. Reflection image of ground penetrating radar of polluted dolomite in 63 survey line
图 7. 63 号勘测线受到污染的雷达反射图像

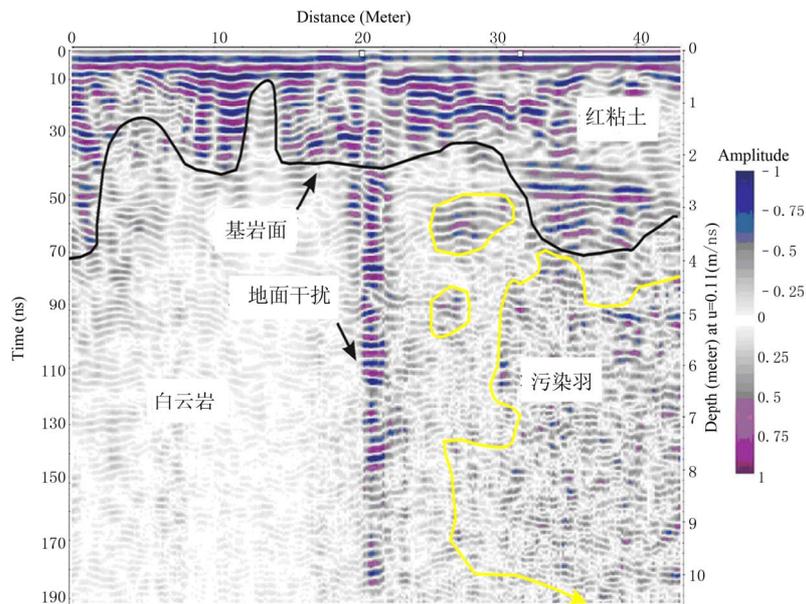


Figure 8. Reflection image of ground penetrating radar of polluted dolomite in 5 survey line
图 8. 5 号勘测线受到污染的雷达反射图像

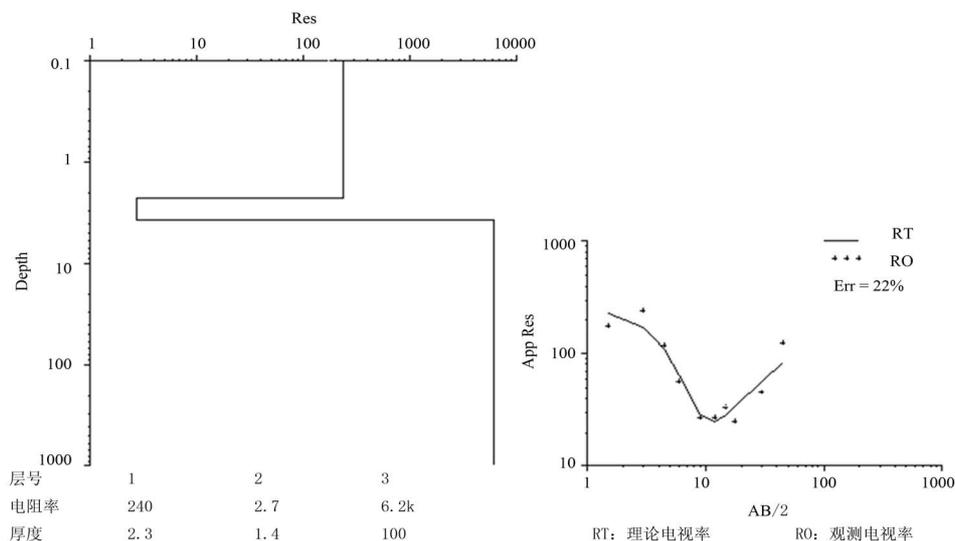


Figure 9. Inversed mode of depth in survey point of galvanic resistivity method
图 9. 直流电法勘测点(ZD1)深度反演模型图

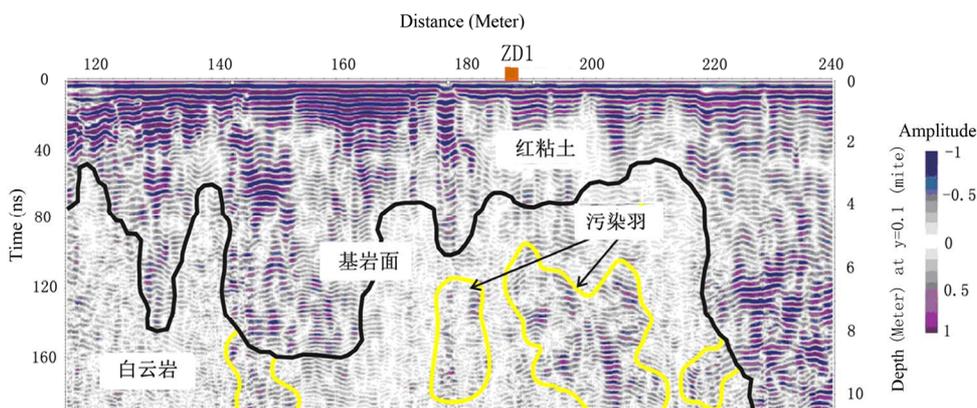


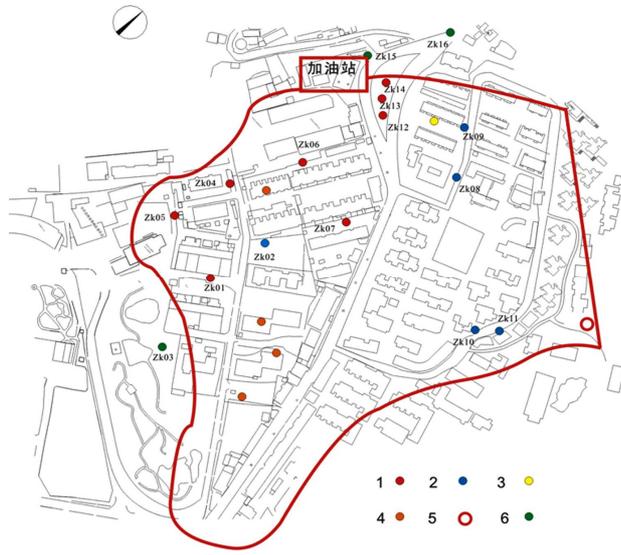
Figure 10. Location of survey point of galvanic resistivity method in GPR image
图 10. 直流电法点在雷达图像上的位置

污染范围, 其中, 在地质雷达勘查所圈定的加油站渗漏污染范围内安排了 13 口, 在地质雷达勘查圈定的污染范围外安排了 3 口。结果显示, 在地质雷达勘查圈定的污染范围外安排的 3 口井均未发生污染; 而在地质雷达勘查所圈定的加油站渗漏污染范围内有 8 口井肉眼就见岩芯有明显油污污染(图 11), 4 口井肉眼未见污染(注: 这 4 口井的上下游均存在污染井, 所以当时未对这 4 口井作地下水和土样分析, 因此, 不排除这些井存在弱污染或相应地形位置偏高的缘故), 1 口(ZK02 孔)肉眼也未见油污污染, 但是在 2.7~3.0 m 处基岩强风化层松散物(图 12)中可以闻到弱汽油味, 显示了有污染物的存在, 随后采集的 ZK02 孔地下水(贵 GY-01)样品被检出有机污染物也进一步得到证实。

5.4. 成分分析

本次工作分别对研究场地东南缘的下扁井上升泉水(贵 GY-02)和省政府后院住宅区 13 和 19 栋之间的钻孔(ZK02)地下水(贵 GY-01)采集了两组地下水水质样品。据 90 项有机物指标的定量分析显示, 2 组水样均检出大量有机污染物(表 1)。

从分析结果看, 两个取样点虽然有机污染物的浓度有所差异, 但是, 有机污染物的类型基本一致, 检出同一类有机物的比例很高, 达 68.75%, 反映了两个取样点有机污染物来自于同一个污染源。省府后院住宅区 ZK02 钻孔贵 GY-01 号水样有机污染物浓度稍低的原因主要与其所处基岩相对隆起部位和钻孔孔径较小(人工洛阳铲)的缘故。



1. 肉眼明显油污污染钻孔(ZK01, zk04, zk05, zk06, zk07, zk12, zk13, zk14); 2. 肉眼未见明显油污污染钻孔(zk02, zk08, zk09, zk10, zk11); 3. 污染化粪池; 4. 地基开挖见油污污染; 5. 油污污染的泉; 6. 未污染钻孔(zk03, zk15, zk16)。

Figure 11. Sketch of contamination scope and validating drilling holes in studied areas
图 11. 研究区污染范围及验证钻孔分布示意图

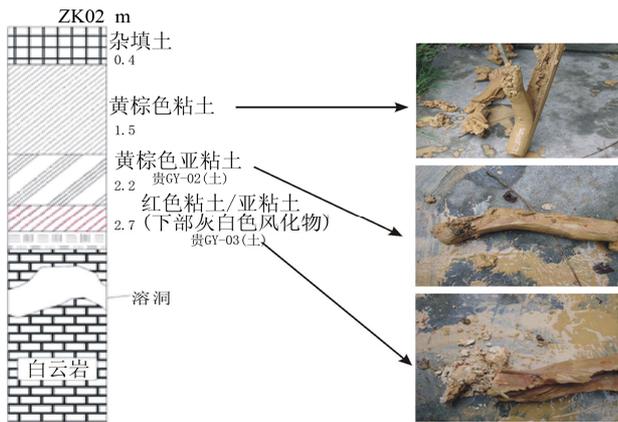


Figure 12. Histogram and rock cores in ZK02 drilling hole
图 12. ZK02 孔柱状图和岩芯

除了上述 90 项有机污染指标的定量分析数据外, 由质谱仪获得的定性污染相关信息也指示了地下水中的污染物质恰恰是汽油的主要组分。如以下扁井泉水为例, 其中含有大量 C5-C8 的烷烃、烯烃类化合物、苯、苯的烷烃、烯烃类取代物、硝基苯类取代物、苯的甲基、乙基等烷烃类取代物(图 13 和图 14)。

2004 年美国联邦陈列实验室(National Exposure Research Labortary)的 James W. Weaver 和佐治亚大学的 Lewis Jordan and Daniel B. Hall 对全美国的汽油进行了一次系统的取样分析, 从中共检测出了汽油有 312 中不同的化合物, 其中主要为以辛烷为代表的低

Table 1. Organic compositions of groundwater samples
表 1. 有机水样污染物检出浓度表

指标类型	污染物名称	检出限	检出浓度(µg/L)		超标限 (US.EPA) ^[24]
			贵 GY-01 (水)	贵 GY-02 (水)	
卤代烃	三氯甲烷	0.1	<0.1	50.8	
	顺-1,3-二氯丙烯	0.2	1.43	7.16	
	氯乙烯	0.1	<0.1	6.58	2.0
	1,2-二氯乙烷	0.2	0.464	5.70	5.0
挥发性有机组分	二氯甲烷	0.2	0.535	0.86	
	甲苯	0.1	43	72	
单环芳烃	苯	0.2	0.682	13.9	5.0
	邻二甲苯	0.1	<0.1	5.82	
	异丁苯	0.1	<0.1	0.307	
	1,2,4-三甲苯	0.1	<0.1	0.297	
多环芳烃	萘	0.2	1.06	0.654	
	芴	0.005	0.095	0.0112	
	芘	0.002	0.002	0.0023	
半挥发性有机组分	总六六六	0.002	0.0108	0.0234	
	滴滴涕	0.002	0.00279	0.00307	
	有机氯农药	0.002	0.00211	0.00270	
	硫丹 I	0.002	0.00211	0.00270	

分子量高挥发性的低碳烃(C4-C12 烷烃、烯烃)、芳香烃(苯、甲苯、二甲苯等)以及含氧的醇类和醚类等有机化合物和硫化物。

显然, 省政府后院住宅区及邻近地区地下水中的污染物主要来自于汽油, 系同一个污染源。结合雷达勘查成果, 表明污染源系省政府油站, 而非传言的解放前国民党可能留下的地下油站。

6. 讨论

贵阳市省府加油站在地形上是以其为制高点向北东、东、东南、南和南西方向海拔高度均逐渐降低。地下水流向与地形坡度一致, 也呈扇形向各方向流动, 有机污染物伴随着地下水呈扇形向各方向扩散。鉴于岩溶地区基岩面的凹凸不平和溶洞发育, 沿不整合面扩散的有机污染物虽然在场地各处均有出现, 但是,

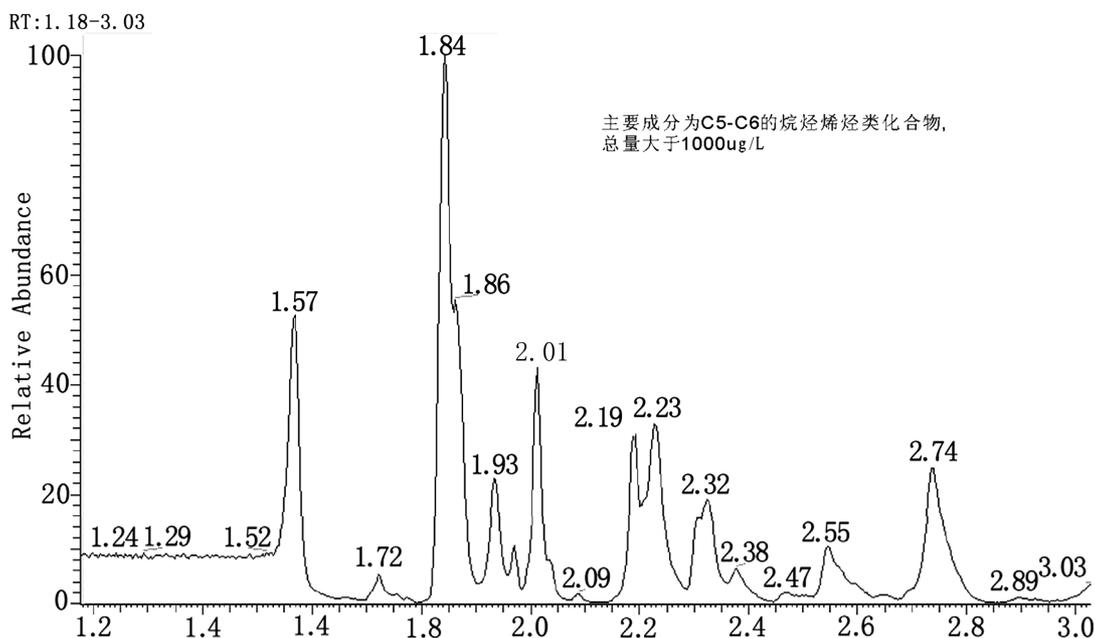


Figure 13. Mass spectrum map of compounds of alkyl hydrocarbons and alkenes in spring water of Xiabian well
图 13. 下扁井泉水烷烃、烯烃类化合物质谱图谱

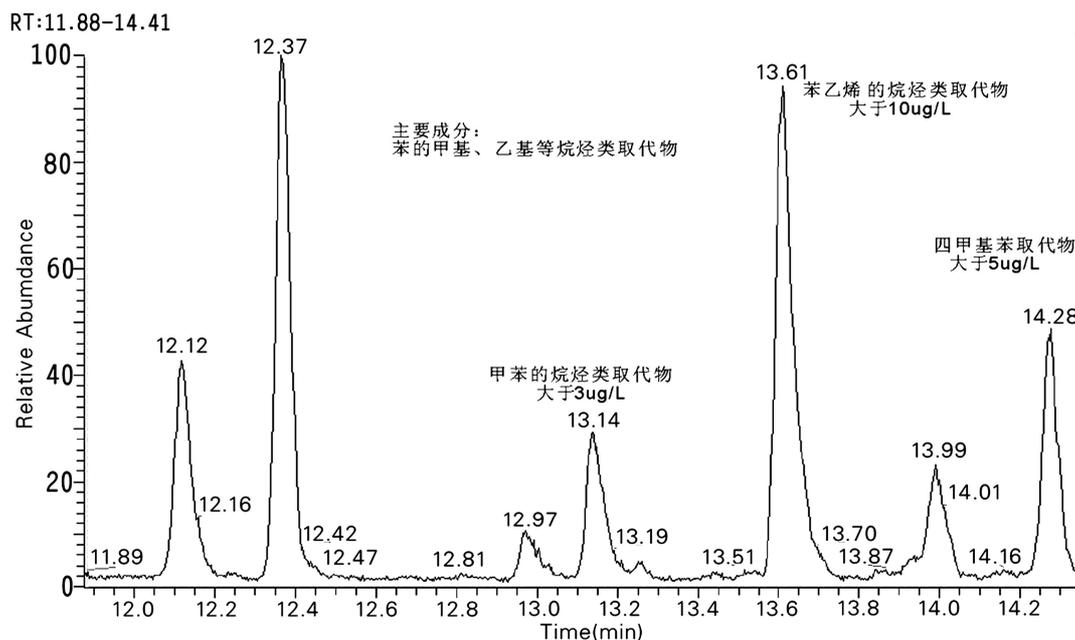


Figure 14. Benzene cymene and ethylic etc. alkyl hydrocarbons in spring water of Xiabian well
图 14. 下扁井泉水苯的甲基、乙基等烷烃类取代物质谱图谱

在溶洞或低洼之处出现的数量和浓度与凸起和平坦之处差别较大。污染物层位显示, 污染物主要沿基岩面及基岩顶部破碎岩层运移, 并优先在溶洞、溶缝和裂隙等通道中迁移。

研究场地红粘土覆盖层是良好的天然隔污层, 由于加油站地下储油罐及其附属管道基本穿透了粘土层

而位于基岩面上, 因此, 污染物沿着第四系和三叠系之间的不整合界面及溶洞、溶隙和裂隙发生大范围扩散。但在具体扩散方式上, 以贵阳市市北路为界, 界线以东呈条带状分布, 存在从污染源(加油站)至排泄点(如下扁井)的相对集中泄漏通道, 当然, 除主要集中泄漏通道以外, 还存在次要通道并在地形低洼处或

基岩面相对凹陷部位形成聚集。界线以西则相对呈面状分布，并存在多处低洼聚集部位。

研究表明，无论是地下水水位上升还是下降，在三叠系灰岩和白云岩中当水位经历一个来回的波动后，都会扩大有机污染物的分布范围。

地下水水位上升在一定程度上稀释了污染物浓度，但由于此类有机污染物只要微小的浓度就可达到污染限度，加之研究地区低洼凹坑和溶洞发育，水位上升可以进一步释放岩层中所积累的污染物，所以，地下水水位上升的后果仍然是加重了污染程度。这也是研究地区下扁井为什么经常在雨后出现油污染加重现象的原因。

有机污染物除了随地下水流动而迁移外，由于扩散溶解等作用，更由于汽油中有很多成分比重小于水，所以，浮在水体表面的污染物有可能因为水力坡度的影响，而逆水流方向发生迁移(图 15)^[25]。省府后院 9# 住宅楼和车队建筑物西北侧面以及研究地区中相对凸起部位或地形较高之部位等就存在这种现象。

总之，按污染物的赋存部位和运移通道来看，汽油污染物主要集中在基岩面、上覆强风化沉积物和顶部基岩中，红粘土只有最靠近基岩面的可以遭受汽油污染物的浸染。钻孔揭露情况表明，污染物向上浸染扩散程度并不高，主要受限于粘土本身对污染物的拦截吸附作用。从总体看，污染物主要在一个面状通道(不整合)运移，在遇到溶洞、溶隙或裂隙时，才在其中优先运移从而形成集中泄漏通道。研究地区污染物的运移模式见图 16。

7. 结论

1) 通过研究发现地质雷达能够辨别出省政府后院住宅区及邻近地区地下基岩面附近及基岩裂隙、溶缝、溶洞和断裂中油气污染物的异常。赋存油污的地层介质在雷达图像上主要呈现出散状、点状、不连续的强弱相间的反射特征，且同一相位的水平方向连续性差，周期短，呈现正负相位错位的特征。这种特征与基岩反射层位少、反射强度弱(黑灰色和白色条带)以及红粘土呈连续、平行的条带状强反射(蓝色和紫色条带)的特征明显有差异。

2) 查明了贵州省政府后院住宅区及邻近地区地下油气污染范围、污染深度和污染物的来源。通过地

质雷达的详细勘查并结合化学分析测试和钻孔资料，认为调查场地污染源为省政府加油站，污染物来源系省政府加油站发生渗漏，污染范围约 160,000 m²，污染深度各地不一，一般在 3 m~9 m，局部 10 m~20 m，污染物主要位于强风化层、基岩面、基岩面凹陷、基岩顶部岩层及溶洞、溶缝和裂隙部位。

3) 查明了贵州省政府后院住宅区及邻近地区地下油气污染物的组分和运移规律。定量分析测试结果表明，省政府后院住宅区及邻近地区地下水已发生严重污染，地下水共检出有机物种类有 16 种，单环芳烃、卤代烃检出率较高，其次为多环芳烃和有机氯农药(农药非本次污染)。其中，挥发性类有机物 10 种，包括氯乙烯、二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、三氯甲烷、甲苯、邻-二甲苯、顺-1,3-二氯丙烯、邻-二甲苯、异丁苯、1,2,4-三甲苯；半挥发性类有机物 6 种，包括萘、

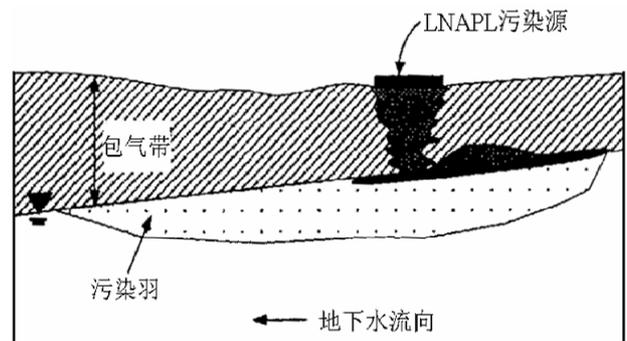


Figure 15. Sketch of waterpower gradient influence on movement of organic pollutants
图 15. 水力坡度对有机污染物迁移的影响^[26]

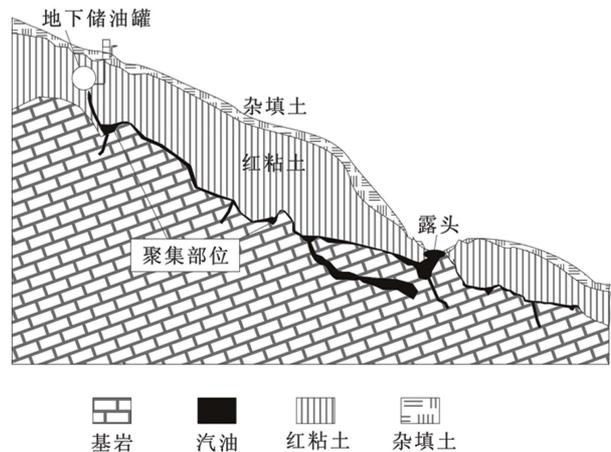


Figure 16. Sketch of movement model of organic pollutants in studied areas
图 16. 研究区污染物迁移模式示意图

芴、芘、总六六六、滴滴涕、硫丹 I。下扁井泉水中苯、氯乙烯和 1,2-二氯乙烷含量已超过美国 EPA 饮用水标准。污染物是以省府加油站为顶点,向北东、东、东南、南和南西方向呈扇形扩散,污染物主要沿基岩面及基岩顶部破碎岩层运移,并优先在不整合面、断裂、裂隙、溶缝、溶洞等通道中迁移扩散。无论是水位上升还是下降,在灰岩和白云岩中当水位经历一个来回的波动后,都会扩大有机污染物的分布范围。

4) 研究认为,由于主体油污染发生于十年前,因此,贵州省政府后院及邻近地区的住宅区目前是安全的,一般情况下不会再在地面发生因上次泄漏油气而引起爆炸和自燃现象,但是,油污事件引起的后果是严重的,岩层和地下水中的污染物将长期存在(自然降解可能需几十年),治理有一定难度。此外,仍需要指出的是由于已有污染物存在,故也不能完全排除目前不存在极微弱的污染渗漏现象。

8. 启示与建议

1) 加油站地下储油罐渗漏污染问题需要引起高度重视。我国加油站渗漏将进入或已经进入高发期,加油站一旦渗漏,地下水和土壤将遭到严重污染,本次的工作表明了应用地质雷达勘查地下有机污染方法可行。地质雷达技术作为一种非破坏性地表原位探查技术,能够现场提供实时剖面记录,图像清晰直观,工作效率高,重复性好。在地下水和土壤有机污染探测方面,与传统方法相比,地质雷达具有更高的时间和经济效率,因此,今后地质雷达技术将有可能广泛地应用于环境地质调查领域尤其在以往涉足较少的有机污染调查工作。

2) 为了避免再次发生泄漏而进一步加大污染程度和污染范围,并可能导致火灾或爆炸隐患,建议省府加油站及类似其它岩溶地区处于制高点位置的加油站应该予以尽早搬迁。贵阳及贵州大部分地区多属于岩溶地区,水资源十分宝贵,特别是地下水资源污染后治理十分困难,因此,同时建议各地的新老加油站场地应设立相应监测井进行观测,以防患未然。

3) 鉴于下扁井泉水有机物指标严重超标,目前仍具强烈刺激性味,因此,建议在下扁井附近树立“水体受到污染,严禁洗涤蔬菜水果”牌子,加大对当地居民及商贩的宣传。同时,要重视下扁井污染泉水的

流向,应避免再次进入地下,发生二次污染。

4) 建议在省政府后院住宅区及邻近区禁止开凿各类民井、机井等生活或生产用水井。

5) 省政府后院住宅区及邻近地区在新建建筑物时,如建设过程中穿透粘土层,出现人工揭露污染物,应加强建筑物地板的防水防渗,并保持日后房屋地下室的通风,防止有机物通过建筑基桩孔、岩石裂隙等毛细作用上升,在地下室等通风不良部位形成油气混合物,从而带来安全隐患。

6) 场地治理建议

① 采用溢出和抽出相结合处理技术:抽出处理是目前应用最广泛和成熟的技术,美国有 68%的地下水污染场地采用此技术^[27]。通过抽水井和溢出泉把已污染的地下水抽出来,然后通过地上处理设施处理,使溶于水中的污染物得以去除。最终,把净化水排入地表水体回用或回灌补给地下水。抽出的最终目标是,设计合适的抽水井,使之形成包含整个地下水污染羽状体的截获区,以便把已污染的地下水全部抽出来。

② 生物恢复技术:是处理地下水及包气带土层有机污染的最新方法^[28]。主要是向地下污染区(包气带和含水层)加入促进细菌生长的营养物和电子受体,从而加快生物降解速率和缩短处理时间。

9. 致谢

本文得到了中国地质调查局地质调查项目(编号:121201063400、1212010634404,1012010914006)、贵州省政府项目(编号:QDH2007-04)和江苏省“333 工程”科研项目联合资助,在此表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- [1] US EPA. Cleaning up the nation's waste sites: Markets and technology trends. Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G) EPA 542-R-04-015, Chapter 5, Underground Storage Tank Sites, 2004: 5-11.
- [2] 左慧君, 金文房, 高见村. 克拉玛依石化公司储油罐腐蚀现状调查及防腐对策[J]. 新疆石油学院院报, 2002, 14(3): 70-73.
- [3] 楚泽涵, 任平. 环境地球物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [4] 姜月华, 李云峰, 周权平, 周迅等. 癌症村地下水和土壤的污染状况和思考[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(增刊): 18-23.
- [5] P. J. Squillace, et al. Volatile organic compounds in untreated ambient groundwater of the United States, 1985-1995. Environmental Sciences & Technology, 1999, 33(3): 4176-4187.
- [6] 朱惠刚. 水中有机致突变物综合评价指标探讨[J]. 上海环境科学, 1995, 14(10): 44-49.

- [7] R. M. Morey, W. S. Harrington. Feasibility of electromagnetic subsurface profiling. EPA R2-72-082 (NTIS PB213 892), 1972.
- [8] D. L. Moffat, R. J. Puskar. A subsurface electromagnetic pulse radar. *Geophysics*, 1976, 41(3): 506-518.
- [9] M. Ferry, M. Meghraoui, J. F. Girard, T. K. Rockwell, et al. Ground-penetrating radar investigations along the North Anatolian fault near Izmit, Turkey: Constraints on the right-lateral movement and slip history. *Geology*, 2004, 32(7): 85-88.
- [10] J. A. Doolittle. Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. In: W. U. Reybold, G. W. Petersen, Eds., *Soil survey techniques*, 1987 SSSA Special Publication No. 20, Madison: Soil Science Society of America: 11-32.
- [11] W. E. Pittman, R. H. Church, W. E. Webb and J. T. McLendon. Ground-penetrating radar: A review of its application in the mining industry, US Bureau of Mines Information Circular 8964, 1984: 23.
- [12] 吕富雪. 地质雷达在高速公路路基勘察与处理中的应用[J]. *施工技术*, 2008, 37(增刊): 150-152.
- [13] 王兴照. 地质雷达在铁路隧道工程检测中的应用分析[J]. *土工基础*, 2008, 22(3): 47-58.
- [14] A. K. Benson. Applications of ground penetrating radar in assessing some geologic hazards-examples of groundwater contamination, faults and cavities. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1-3): 177-193.
- [15] J. A. E. Lord, R. M. Koemer. Nondestructive testing (NDT) techniques to detect contained subsurface hazardous waste. EPA/600/2-87/078 (NTIS PBS8102405), 1987.
- [16] A. Saintenoy, S. Schneider and P. Tucholka. Evaluating ground penetrating radar use for water infiltration monitoring. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 208-214.
- [17] J. J. Daniels, R. Roberts and M. Vendl. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1-3): 195-207.
- [18] M. L. Brewster and A. P. Annan. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release; 200 MHz radar. *Geophysics*, 1994, 59(8): 1211-1221.
- [19] M. L. King. Locating a subsurface oil leak using ground penetrating radar (in GPR 2000; Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar). SPIE Proceedings Series, 2000, 4084: 346-350.
- [20] T. Saarenketo, T. Scullion. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43(2-4): 119-138.
- [21] A. K. Benson. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards; examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1-3): 177-193.
- [22] M. Leopold, J. Völkel and K. Heine. A ground-penetrating radar survey of late Holocene fluvial sediments in NW Namibian river valleys: Characterization and comparison. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163: 923-936.
- [23] J. Woodward, M. J. Burke. Applications of ground-penetrating radar to glacial and frozen materials. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2007, 12(1): 69-85.
- [24] EPA 822-R-02-038. 2002 Edition of the drinking water standards and health advisories, office of water. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2002.
- [25] T. H. Wiedemeier. Technical protocol for implementing intrinsic remediation with long-term monitoring for natural attenuation of fuel contamination dissolved in groundwater. USA Parsons Engineering Science, 1995, 5: 421-437.
- [26] R. Bedient, N. Charles. Ground water contamination. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 1994.
- [27] R. Hanson, C. E. Ackerman and K. M. Scow. Biodegradation of methyl tert-butyl ether by a bacterial pure culture. *Applied Environmental Microbiology*, 1999, 65: 4788-4792.
- [28] 陈建孟, 蒲凤莲, 陈效, 孙永强. MTBE 的生物降解技术[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(1): 61-64.