

• 调查与评价 •

环境地球物理在污染场地调查中的现状及展望

叶腾飞^{1,2}, 龚育龄², 董路¹, 能昌信¹, 吴曲波², 陈勇³

(1 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2 东华理工大学核工程技术学院, 江西 抚州 344000

3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 简述了国内外对不同污染场地调查环境地球物理方法的研究现状及成果, 指出了目前存在的问题。针对污染场地调查污染深度浅、污染浓度低的特点, 提出了建立重金属污染在浅层迁移的数学物理模型和提高设备检测精度的必要性。对环境地球物理方法在环境领域的应用进行了展望。

关键词: 环境地球物理; 污染场地调查; 数学物理模型

中图分类号: X820 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2009)03-0023-05

Status and Development of Environmental Geophysics in the Investigation of Contaminated Sites

YE Teng-fei^{1,2}, GONG Yu-ling², DONG Lu¹, NENG Chang-xin¹, WU Qu-bo², CHEN Yong³

(1 Chinese Research Academy of Environment Science, Beijing 100012, China; 2 School of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi 344000, China;

3 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract The investigating methods of environmental geophysics were briefly described on different contaminated sites at home and abroad. It was necessary to establish shallow mathematical physics transfer model and improve the detecting equipments accuracy in heavy metal pollution sites survey which often appears shallow depth and low concentration. The methods of environmental geophysics were prospected in the future.

Key words Environmental geophysics; Contaminated site investigation; Mathematical physical model

随着我国经济快速发展, 环境污染日益严重, 土壤和地下水的污染问题也非常突出, 影响到我国经济与社会的可持续发展^[1]。目前, 环境地球物理是探测地下污染源及其污染介质分布范围的新型学科, 被应用于解决环境污染的监测、生态环境变化预测、环境治理措施的效果检查等方面^[2-4]。

根据污染物(源)与其周围介质在物理性质上的差异, 借助专用设备测量其物理场的分布状态, 通过分析和研究地下一定深度范围内地球物理场的分布, 结合地质、水文等相关资料, 推断地下污染的空间分布, 达到对污染场地调查的目的。了解污染物的空间分布和污染物浓度是进行污染场地治理与修复的前提, 传统的钻孔采样方法可进行污染场地的勘探和检测^[5-6]。但这些常规方法有 3 个明显缺点。

(1) 调查采样数量有限, 基本上是“一孔之见”, 难以做到全面了解;

(2) 地质钻孔或贯入探测会破坏污染物在地下的分布和富集的结构, 可能造成污染物沿着钻孔或贯入探头继续向更深处运移;

(3) 常规环境监测周期长, 实时性差, 不适合作长期的监测。

环境地球物理方法与常规的钻孔采样方法相比, 具有空间的全面性、原位无损、速度快等特点, 还可以根据流体在不同介质中的不同迁移速度, 预

收稿日期: 2008-11-20 修订日期: 2009-02-20

基金项目: “八六三”高科技研究发展计划基金资助项目 (2007AA 061303)

作者简介: 叶腾飞 (1979-), 男, 江西抚州人, 在读研究生, 研究方向为岩土与环境地球物理探测技术。

测出污染物发展趋势,为环境监测和污染治理提供可靠的依据^[7]。

环境地球物理与传统的地球物理相比,前者具有研究的目标体大多涉及浅层(近地表层),较多地集中在工业中心和大城市,而且与周围物质的物性差异很小等特点。针对污染场地调查的独特特点,环境地球物理常用的方法包括磁法、电法(包括直流电法、电磁法)、探地雷达和放射性法等,针对不同的调查目标,可选用不同的方法或方法的有效结合^[8]。

1 污染场地调查环境地球物理方法和应用前提

地质体在环境发生变化时(污染、破碎、挤压等),产生相应的地球物理效应,引起各种地球物理场(重力、电、磁、热、地震波、放射性等)的变化,环境地球物理就是通过对这些物理场的观测和研究来认识和解决环境问题^[9]。当前最常用的环境地球物理方法有磁法、电法、地质雷达和放射性法。受污染场地化学性质和物理特征发生物性差异变化是环境地球物理探测环境污染的前提^[10-11]。

1.1 磁法

磁性就是磁石或磁铁所具有的物理特性,物质在磁场中受磁场影响也会产生磁性,这种过程叫做磁化,而物质磁化的程度用磁化强度来表示,物质磁化的难易程度用磁化率表示。磁法勘探是以物质磁性差异为基础,借助一定的仪器和观测方法获取磁场信息,通过分析研究磁场信息的变化,从而达到圈定污染场地的目的。自然界中各种介质(固态和液态)在地球磁场等作用下,都能产生强弱不同的磁场,污染物的介入可能会改变介质(土层)的磁化率和磁化强度,产生磁异常,通过磁力仪测定这些磁性异常和分析岩层中磁性层的分布,可以推测地质构造的分布,间接查出受污染的地质体的分布,从而达到确定污染位置和污染范围或环境构造的目的^[12]。

工业生产过程中的燃烧产生的尾渣(含有磁性物质 Fe_3O_4),其磁化率是黄土、粘土、湖底沉积物的几十倍^[2]。战争遗弃的炮弹、地雷以及城市生活垃圾等均含有大量铁磁性物质,与周边环境介质的磁化率存在较大的差距,可利用磁法进行探测。

1.2 电法

电法是电法勘探的简称,包括直流电法、电磁法等地球物理方法。是以地壳中岩石、矿石、流体

的电磁学性质的差异为物质基础,利用电磁场(人工电磁场源和天然电磁场)的空间和时间分布规律,研究地质构造以及寻找能源和矿产等的一组地球物理勘探方法。目前,电法勘探已成为环境污染调查、监测、治理和管理中一种有效和应用广泛的物探方法^[2]。

通常的地质体(土层、岩石层等)在电场的作用下,会产生相应的电磁学特性响应,采用相应的电法仪器可以测定出地质体的电阻率、电导率或感应磁场等参数,而这些参数与地质体的特性和分布有对应关系。污染废弃物的集中堆放,通过物理、化学和生物作用,会产生大量的渗滤液,从而使得地下水和土壤污染区域的电学性质发生变化,使得污染场地与周边未受到污染的环境介质存在导电性、电化学反应性等电学特性产生差异,采用相应电法仪器测定电阻率、电导率等特性参数时,就会观测到数据异常,为电法勘探提供了物理基础。

1.3 地质雷达

地质雷达是一种利用高频电磁脉冲波的反射探测地下目标的方法,采用非接触性测量,可做快速连续检测,对检测对象无损,能比较直观地表现检测目标物。因此,地质雷达技术成为环境地球物理勘查的重要方法。

污染源中呈酸性的渗滤液溶液可将土壤中矿物侵蚀出来,增加了固体溶解物含量和孔隙度,在地下水位升降作用的带动下,不断为地下水带入大量的固体物和可溶性颗粒。固体溶解物主要在潜水面附近形成一个透镜状或层状异常体,随离子浓度、盐类、固体溶解物的增加,使得污染场地与周边环境的介电性存在差异,使得污染区域电磁反射的能力强,为探地雷达(GPR)探测提供了物理基础。

2 污染场地调查的研究现状

2.1 无机物污染场地调查

污染物中无机物进入土壤和地下水中,大部分具有化学活动性,与周围介质发生氧化还原反应,加速了生物作用,提高了地下水中固体总量,土壤中产生了大量的盐类物质,使得污染场地与周边环境存在导电性、电化学反应性和电导磁性差异。

国内外很多学者对无机物污染场地调查中的应用作了很多的基础性工作,通过室内模拟试验、地电基础性研究和相关化学分析,积累了很多宝贵的理论成果,为电法探测提供了技术保障^[13-21],并

对无机物污染场地进行了大量的调查工作。程业勋等采用高密度电阻率法、瞬变电磁法、探地雷达和地温法在北京市两个垃圾填埋场检测垃圾渗漏液的扩散范围、扩散深度,发现垃圾场在堆放多年后,都不同程度存在渗滤液对土壤和地下水的污染^[22];王丽娟等^[23]利用综合地球物理方法成功地探测到新疆某氧化塘污水渗漏点; Bemstone 等采用 2D 直流电法和激发极化法对垃圾填埋场内部结构和周边环境进行调查,取得了较好的结果^[24-25]; Joge 等^[26]在巴西东南部某垃圾填埋场采用垂向电测深电阻率法和地质雷达探测地下污染羽状分布; A tekwana 等利用雷达检测剖面,圈定了污染的深度与范围和地下水污染分布^[27-28]; 杜树春^[29]用探地雷达的方法在慕尼黑北郊垃圾填埋中的应用,确定了填埋场的分布范围、填埋种类和厚度;董路等^[30]应用电阻率成像技术圈定了某污染场地的硫酸废液渗入土壤中的范围和污染土壤的体积。

2.2 有机物污染场地调查

有机污染物主要是各种碳氢化合物,是环境地球物理研究的新课题。含油或烃类污水侵入不饱和土中改变了土壤的饱和度,侵入量越大其电阻率越低,而在饱和土中污水侵入量越大电阻率趋于稳定,表现为相对高阻区^[18]。因此,在土壤中有有机物污染的程度也可以用电法勘探探测。

William^[31]构建轻非水相液体(LNAPL)污染物在砂质沉积物中羽流和羽流周边电阻率结构模型,并用垂向电阻率方法进行验证,探测结果与模型一致; Reinhard 等^[32]利用一维直流电法研究有机物污染场地渗透区的电阻率变化特征,绘制了污染羽流,调查结果与地质钻孔资料一致。

2.3 城市环境调查

随着城市化进程的不断加快,城市土壤对城市环境质量和人类健康的影响日益受到关注。目前土壤环境质量总体呈现出下降的趋势,主要来源于土壤环境的重金属污染、农药污染、化肥污染及放射性元素污染等,车辆等交通工具的排放物,电厂、水泥厂、冶炼厂等排放的烟尘、废物、废水和生活垃圾等^[2]。

冶金工业排放的灰尘和飞灰中含有磁铁矿,可直接引起表土磁化率升高,研究表明磁化率值随着离源区距离增大而减小^[33-34]; Tetyana 等^[35]亦通过大量测试数据证明表土磁化率值可作为土壤污

染的指标; Thompson 和 Oldfield 发现城镇和工业区附近的土壤与其他地方的土壤相比具有较高的磁化率,从而污染区域的污染程度^[36]; Hoffmann 和 Knab 等通过表土磁化率来研究道路交通污染,研究表明表土磁化率沿高速公路成条带状分布,距离沥青路面 2 m ~ 3 m 范围内为高磁化率区^[37]; Joe 等^[38]用高精度磁测圈定汉密尔顿港口污染沉积物,充分说明高精度磁法在污染场地调查中具有快速、原位、无损等特点。

辐射监测,查明人们工作和生活环境中放射性污染状况和污染源的位置,从而达到监测和预防的目的。杨进等^[39]介绍了地下水中氡浓度监测,对了解地下水中氡的浓度水平,确定水源地、减少和预防氡辐射危害提供了帮助。张展适等^[39-40]分析了我国硬岩型袖矿山开采区、废石堆、露天采场废墟及尾矿库中普遍存在的辐射环境污染及其发生和运移特点。

2.4 固体废弃物

磁法勘探在某些地下固体填埋物的探测方面具有优势,因为这些地下填埋物往往具有较强的磁性,如废弃的炮弹、处理后的工业垃圾等^[41]。

在整治永定河河道时,李远强等^[42]利用质子磁力仪探测,绘出了磁异常区域图,后经实挖,掘出了数十发废弃炮弹;朱义仁等^[43]利用高精度磁力仪探测废弃物掩埋场,结合全球卫星定位系统(GPS),探测结果经地球物理综合解释后,作为选择取样位置定点及废弃物开挖规划的依据。

3 存在的问题及其展望

环境地球物理主要应用于研究环境问题的地球物理新理论、新技术、新方法。我国环境地球物理研究起步相对较晚,但是环境地球物理具有其他环境分支学科不可替代的优势,为了更好地服务于环境领域的科学研究,需要有针对性地加强研究工作。

3.1 建立污染物(受到污染的介质)物性参数和电化学特性数据库

目前,对于受环境污染的环境介质(例如土壤、岩石等)的物性参数研究还处于起步阶段,仅仅针对个别有机物或无机物污染物进行过研究,加强这方面的研究是当前的首要工作。在使用地球物理测量仪器进行探测研究时,必须了解探测目标体的相关物性参数,选择不同的环境地球物理方法

和对探测仪器中的参数进行合理设置, 才能更有效地对污染场地进行调查。

3.2 建立污染场地水作用下污染物迁移数学物理模型

分析污染场地水作用下的污染物的迁移, 可以更准确地确定污染源的位置。同时由于污染场地水作用下物质的迁移比扩散迁移要快, 通过对水迁移物质的分析, 将有可能更快地预测潜在的污染点。另一方面, 如果水位浅, 而且污染源的深度又不是很大的话, 比方说固体废物填埋场, 污染源的扩散是相当快的。因此研究污染场地水作用下污染物的迁移在环境保护中具有很重要的意义。

3.3 开展弱信号提取技术研究

毒性大的污染物, 其含量往往很低, 引起物性变化的差异就更小, 对污染场地进行调查, 显然仪器要求达到垂向和横向分辨率相当高, 有时需要达到厘米级的精度要求。因此, 需要研制高分辨率、抗各种干扰能力强、弱信号探测技术的专用环境地球物理设备。

3.4 开展有机污染物三维动态监测

有机污染物分三类, 低密度非水相流体 (LNAPL)、高密度非水相流体 (DNAPL) 和溶解于水的有机污染物^[44]。地下污染和渗滤液的扩散调查不是一次性使用环境地球物理方法, 而是对监测环境的控制参数的形状和变化进行连续跟踪。需要多学科的综合研究, 更好地了解有机物污染在各种不同地质条件下的运移、滞留、降解以及与周围土壤及其岩石存在的物理性质的差异。对污染场地调查的任务达到开展三维动态测量, 如监测污染流随时间水流向羽状分布和变化, 揭示地下污染物的运移机制。

3.5 开展重金属污染场地调查

典型重金属 (铬、砷) 污染在土壤中发生电化学反应后引起土壤周围电阻率和极化率的变化。通过模型实验和数值计算, 可建立重金属污染物浓度变化与土壤电阻率和极化率等物性参数之间互变关系函数。在此基础上, 研究相应的反演算法, 利用模型和典型污染场地野外实测数据对反演算法进行检验, 为利用电阻率和极化率参数变化评价铬污染异常提供手段, 得到地球物理方法快速探测重金属污染场地理论依据。

4 结语

环境地球物理在污染场地调查中已经有很多成功的实例, 在涉及浅 (近地表) 层, 较多地集中在工业中心和大城市, 而且在与周围物质的物性差异很小的特殊条件下, 应该结合各种有效方法, 使之更适合污染场地调查。

环境地球物理在污染场地调查中涉及多个交叉学科领域, 研究方向包括: 建立污染物物性参数和电化学特性数据库, 建立污染场地水作用下污染物迁移的数学物理模型, 开展弱信号提取技术研究, 开展对有机污染物三维动态监测, 开展重金属污染场地调查, 加快对污染场地快速探测环境地球物理方法研究。

总之, 环境地球物理应用前景广阔, 正处发展阶段, 但还需要更多的实践和探索, 不断提高技术水平, 扩大应用范围。

[参考文献]

- [1] 程业勋, 杨进, 赵章元. 环境地球物理学的现状与发展 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1364-1369
- [2] 程业勋, 杨进. 环境地球物理学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2005
- [3] 楚泽涵, 王小波. 地球物理学在生态环境及其相关领域中的应用 [J]. 地球物理学进展, 1997, 12(3): 9-14
- [4] 楚泽涵, 李幼铭. 关于环境地球物理学的思考 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10(3): 1-9
- [5] 韩宝平, 王小英, 朱雪强, 等. 某市岩溶地下水四氮化碳污染特征研究 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 982-988
- [6] MARK L K. Complex NAPL site characterization using fluorescence Part I: selection of excitation wave length based on NAPL composition [J]. Soil & Sediment Contamination, 2004(3): 103-118
- [7] WELLER A, FRANGES W, SEICHTER. Three dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 40(2-3): 67-83
- [8] 奚家鉴. 蓝洞水库大坝病险综合物探勘查 [J]. 物探与化探, 1999, 23(5): 356-362
- [9] 朱海龙. 环境地球物理学及其研究现状 [J]. 石油物探译丛, 1999(1): 1-7
- [10] BELOUSOVA A P, KRANOV SR, RYZHENDO B N. Evolution of ground-water chemical composition under human activity in an oil field [J]. Environmental Geology, 1999, 38(1): 34-46
- [11] CHEN Z, KOSTASCHUK R, YANG M. Heavy metals on tidal flats in the Yangtze Estuary, China [J]. Environmental Geology, 2001, 40(6): 742-749
- [12] GALINA G M, ALEXEY Y, KAZANSKY, et al. The use of magnetic methods in an environmental study of areas polluted with nonmagnetic wastes of the mining industry (Sakir region,

- Western Siberia, Russia [J]. *Geochemistry Exploration Environment Analysis* 2005 (5): 75–89
- [13] 郭秀军, 章光新, 谭笑平. 物理探查方法在土壤改良中的应用研究 [J]. *地理科学*, 1999, 19(5): 470–474
- [14] 能昌信, 董路, 王琪. 填埋场地电模型的电学特性 [J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 758–760
- [15] 李金铭, 张春贺. 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): 428–435.
- [16] 李鸿江, 郭秀军. 垃圾填埋场渗漏电学监测系统设计及室内模拟试验 [J]. *环境污染与防治*, 2005, 27(4): 311–313
- [17] 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): 45–47
- [18] 郭秀军, 孟庆生, 王基成, 等. 地球物理方法在含油工业污水管道渗漏探测中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1): 279–282.
- [19] 刘海生, 侯胜利, 马万云, 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
- [20] 杨进, 刘庆成, 程业勋, 等. 环境地球物理方法在地下水污染监测中的应用 [J]. *环境科学研究*, 1998, 11(6): 43–46
- [21] LAURENT M, STEPHANE R, SERGIO P L, et al. A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2006 (60): 55–67.
- [22] 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.
- [23] 王丽娟, 王支农, 郝书军. 地球物理方法在环保工作中的应用实例 [J]. *勘察科学技术*, 2003(2): 58–61
- [24] BERNSTONE C, DAHLN T, OHLSSON T, et al. DC-resistivity mapping of internal landfill structures—two pre-excavation surveys [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(3–4): 360–371
- [25] ARISTODEMOU E, THOMAS A. DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2000(44): 275–302
- [26] JORGE LP, WALTER M F, VAGNER R E, et al. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site—a case study in SE Brazil [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2004(55): 199–209
- [27] ATEKWANA E A, SAUCK W A, WERKEMA D D. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated Site [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2000, 40(2–3): 167–180.
- [28] DAVIS J L, ANNAN A P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy [J]. *Geophysical Prospecting* 1989(37): 531–551
- [29] 杜树春. 地质雷达及其在环境地质中的应用 [J]. *物探与化探*, 1996, 20(5): 384–392
- [30] 董路, 叶腾飞, 能昌信, 等. ERT技术在无机酸污染场地调查中的应用 [J]. *环境科学研究*, 2008, 21(6): 67–71.
- [31] WILLIAM A S. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2000(44): 151–165
- [32] RENHARD K F, PATRICK J B, THOMAS B. Investigating changes of electrical characteristics of the saturated zone affected by hazardous organic waste [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2008(64): 25–36.
- [33] HANSEN L D, SILBERMAN. Crystalline components of stack-collected size-fractionated coal fly-ash environment [J]. *Sci Technol* 1981(15): 1057–1062.
- [34] MITCHELL R S, SILSKOTER. Mineralogy of ash of some American coals [J]. *Fuel* 1976(55): 90–96.
- [35] TETYANA B, ROBERT S, HELGE S, et al. Top soil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements [J]. *Journal of Applied Geophysics* 2004(55): 249–259.
- [36] THOMPSON R, OLDFELD F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986
- [37] HOFFMANN V, KNABM A. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66: 313–326.
- [38] JOE B, MATT P, BILL M, et al. High resolution magnetic mapping of contaminated sediments in urbanized environments [J]. *The Leading Edge* August 2001, 885–890
- [39] 张展适, 李满根, 杨亚新, 等. 硬岩型铀矿山氧辐射环境污染及治理 [J]. *地球与环境*, 2007, 35(3): 228–232
- [40] 张展适, 李满根, 杨亚新, 等. 赣、粤、湘地区部分硬岩型铀矿山辐射环境污染及治理现状 [J]. *铀矿冶*, 2007, 26(4): 191–196
- [41] 叶腾飞, 龚育龄, 能昌信, 等. 环境地球物理方法在污染场地调查中的应用 [J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2008, 22(3): 9–14.
- [42] 李远强, 李祥强. 利用高精度磁法探测地下遗弃炮弹 [J]. *北京地质*, 2002(2): 27–29
- [43] 朱义仁, 董伦道, 车明道. 物探技术提高污染场址取样命中率之研究 [C] // 台湾工程地质技术应用研讨会 (XI) 论文集. 2000
- [44] 燕永利, 陈杰, 张宁生, 等. 地下土壤、水中 DNAPLs 污染的修复技术研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2007, 19(5): 38–42.