

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲,赵三平,周文 (1645)

环境损害评估:国际制度及对中国的启示 张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑,刘萌,朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪,康荣华,罗遥,段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕,李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰,黄小平,施震,刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD₅和COD污染特征及其初始冲刷效应 王骏,毕春娟,陈振楼,周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙,沈芳,张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO₂与浮游植物生物量的关系 袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松 (1767)

纳米Fe₃O₄-H₂O₂非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 何洁,杨晓芳,张伟军,王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟,刘国光,吕文英,姚锬,周丽华,谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐,胡筱敏,英诗颖,王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮 (1822)

倒置A²/O-MBR处理城市污水的中试研究 张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N₂O释放特性 梁小玲,李平,吴锦华,王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏,陈永亨,李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 赵继红,赵永升,张宏忠,张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲,能昌信,王彦文,董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬,银燕,秦彦硕,陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏,郑祥民,周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面CO₂浓度变化特征研究 李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b 郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国,欧阳志云,刘芄,孙力,王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿,王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博,李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807,1821,1881,1987) 专辑征稿通知(1863)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究

王玉玲^{1,2,3}, 能昌信^{2*}, 王彦文³, 董路²

(1. 山东工商学院计算机科学与技术学院, 烟台 264005; 2. 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012; 3. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了分析重金属污染场地的电阻率法探测效果, 建立典型污染场地的电阻率模型, 采用有限元法对电阻率法探测进行数值模拟, 分析电阻率法探测的典型装置——温纳装置对于不同污染程度和污染区域的探测效果. 模拟结果表明, 电法装置的探测效果受到污染程度和污染区域埋深的影响, 污染程度越严重, 探测得到的低阻异常越明显, 污染区域越容易识别; 反之, 污染程度较轻时(污染土壤与背景土壤电阻率比值大于60%), 温纳装置探测无法得到明显的低阻异常, 不利于污染区域判断; 污染区域越靠近地表, 则越容易被检测出, 污染区域埋深较深时, 视电阻率断面图异常不明显, 不易污染区域判断. 实际场地电阻率法探测结果也表明, 电阻率法能够正确检测出污染相对严重的区域.

关键词: 电阻率法; 温纳装置; 重金属污染场地; 数值模拟; 有限元法

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1908-07

Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites

WANG Yu-ling^{1,2,3}, NAI Chang-xin², WANG Yan-wen³, DONG Lu²

(1. School of Computer Science and Technology, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China; 2. Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mineral Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to analyze the effects of electrical resistivity in heavy metal contaminated sites, we established the resistivity model of typical contaminated sites and simulate the DC resistivity method with Wenner arrays using the finite element method. The simulation results showed that the electrical method was influenced by the contamination concentration and the location of pollution. The more serious the degree of pollution was, the more obvious the low resistivity anomaly, thus the easier the identification of the contaminated area; otherwise, if there was light pollution, Wenner array could not get obvious low resistivity anomalies, so it would be hard to judge the contaminated area. Our simulation results also showed that the closer the contaminated areas were to the surface, the more easily the pollution was detected and the low resistivity anomalies shown in the apparent resistivity diagram were influenced by the Layered medium. The actual field survey results using resistivity method also show that the resistivity method can correctly detect the area with serious pollution.

Key words: electrical resistivity survey; Wenner array; heavy metal contaminated sites; numerical simulation; infinite element method

调查研究表明,我国存在大量的重金属污染场地,这些污染对人类健康和环境产生严重危害^[1~3],因此,对重金属污染场地的检测和修复是亟待解决的问题.电阻率法污染探测由于具有快速、无损检测的特点,近年来被逐步应用于环境调查领域^[4~7].Aristodemou等^[8]研究了直流电阻率法和时域激发极化法在垃圾填埋场中监测污染物运移的应用;Abdelatif等^[9]采用电阻率成像法对垃圾填埋场对地下水和土壤的污染进行调查;Reyes-López等^[10]综合采用地球物理的两种方法——电阻率法和雷达方法对墨西哥的一个填埋场周边环境进行调查,识别和划分出垃圾填埋场渗漏液的污染羽,化学分析数据证实了垃圾填埋场渗漏液对地下水的影响.Sainato等^[11]采用电阻率法对阿根廷的一个饲养场

进行调查,得出饲养场地下介质的电导率模型,指出受到动物排泄物的浸出液污染的土壤的电导率高于背景土壤,并且电导率异常沿着地下水流的方向增加.我国学者对电阻率法应用于污染场地探测也进行了相关研究,Liu等^[12]对齐鲁石化含油污水排海管线渗漏造成的地下污染进行探测,程业勋等^[13]对北京阿苏卫垃圾填埋场渗漏污染区进行工程探测及郭秀军等^[14,15]开展了输油管线渗漏探测.董路

收稿日期: 2012-08-23; 修订日期: 2012-09-25

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209022); 山东省住房和城乡建设厅建设科技计划项目(2011YK056); 山东省软科学项目(2012RKB01220); 山东工商学院青年科研基金项目(2011QN084)

作者简介: 王玉玲(1981~),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为污染探测和电阻率法正反演, E-mail: anguingwyl@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: naicx@126.com

等^[16]利用高密度电阻率法对硫酸废液污染的场地进行污染调查,圈定硫酸废液侵入土壤中的分布范围、侵蚀深度以及扩散羽流。刘汉乐等^[17]利用三维电阻率检测系统对柴油在砂土中的迁移过程进行的室内模拟监测。这些研究推进了电阻率法在污染探测领域的应用,然而,对于重金属污染场地的电阻率法探测仍处于起步阶段。

韩立华等^[18]和白兰等^[19]通过实验研究指出污染土的电阻率比未污染土要低,随着污染成分含量的增加电阻率呈指数形式降低,得出结论应用电阻率法对重金属污染土进行检测是切实可行的。能昌信等^[20]和刘豪睿等^[21]进一步针对铬污染土壤的电学参数进行研究,给出了电阻率、复电阻率和复介电常数随着污染物浓度变化的变化规律。这些研究为采用电阻率法进行重金属污染场地探测提供了理论依据。这些研究结果同时表明,污染物浓度不同造成的土壤电阻率差异性相对较小,这对于应用电阻率法进行污染探测提出了严峻挑战^[22]。为了明确电阻率法对重金属污染场地调查的探测能力,提高数据解释的准确性和其应用效果,本研究针对不同污染程度和不同污染区域的典型污染场地进行建模,利用有限元法对电阻率法污染场地探测进行数值模拟,分析电阻率法对不同污染场地模型下的污染区域识别能力,以期为采用电阻率法进行实际场地探测提供参考。本研究最后给出了一个实际重金属污染场地的电阻率法探测案例。

1 电阻率法污染探测原理与方法

1.1 电阻率法检测原理^[23,24]

电阻率法测量的目的是通过在地表进行测量推断出地下介质的电阻率分布,从而进一步确定地下介质分布。电阻率法测量通过向地下介质注入稳定电流,建立稳定的人工电场,通过仪器测量其电场的大小,进而研究电场的分布规律,推断地下电阻率的分布状况,从而获得地下介质的信息。在点电流源作用下,得到稳定电流场的电势分布满足以下微分方程:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla U) = -2I\delta(A)$$

式中, σ 为电导率, $\sigma=1/\rho$, ρ 为电阻率; U 为电势; I 为电流源的电流强度; A 为电流源坐标。

该方程称为泊松方程,描述了电势分布与介质电阻率分布及点电源的关系。

1.2 温纳装置^[25,26]

根据建立人工电场的电流源和观测电势点位的

不同,电阻率法可分为多种装置类型。温纳装置是对称四极装置的一种,具有良好的抗噪声性能,在电法探测中有着广泛应用。温纳装置采用四电极进行测量,其中,A、B为供电电极,M、N为测量电极。温纳装置布极特点是 $AM=MN=NB=a$,如图1所示。根据测量电极的电势值,计算测量电极的电势差:

$$\Delta U_{MN} = U_N - U_M,$$

进一步计算视电阻率为:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I},$$

式中, K 为装置系数,对于温纳装置 $K=2\pi a$ 。

在视电阻率成像中,该计算值被认为是在AB中点,深度为AB距离乘以1/4或1/6处的电阻率。改变电极的位置和极间距 a ,得到不同点位的视电阻率。在电法二维测量中,通常沿测线布置多个电极,按照温纳装置原理,通过开关实现供电电极和测量电极转换,得到不同点位的视电阻率,从而形成视电阻率断面图,如图2所示。

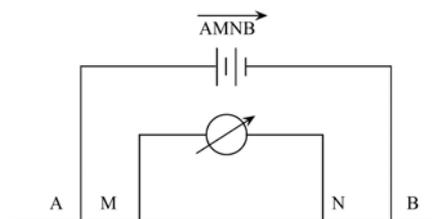


图1 温纳装置示意

Fig. 1 Wenner array

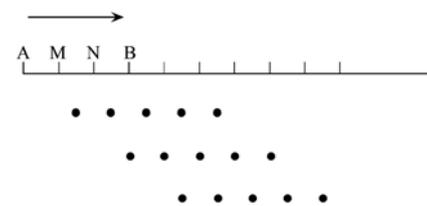


图2 温纳测量点位示意

Fig. 2 Measure points of Wenner array

2 电阻率法探测重金属污染场地数值模拟

根据韩立华等^[18]和能昌信等^[20]的研究结果,污染物浓度越高,土壤的电阻率越低,因此,用不同的电阻率特性对不同污染浓度进行建模,污染程度越重,土壤电阻率越低;污染程度越轻,土壤电阻率越接近土壤电阻率背景值。

检测装置设为温纳装置,采用地面测量方式,设

沿测线布置 64 个电极,极间距 a (m),因此以测深为 $1/6$ 倍最大极距计算可知,最大测深约为 $64 \times a/6$ m,这里为方便起见,假设极间距为 1 m,则最大测深约为 11 m.

2.1 均匀介质中的污染区域模拟

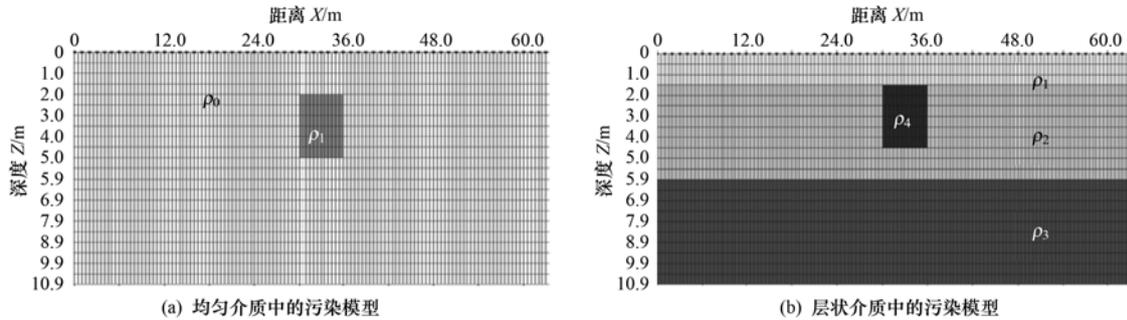


图 3 典型重金属污染场地模型

Fig. 3 Typical resistivity models of heavy metal contaminated sites

由于土壤的电阻率的取值范围一般在几 $\Omega \cdot m$ 到几百 $\Omega \cdot m$ 之间,随着重金属污染程度的增加,土壤电阻率呈现下降趋势,因此污染区域的电阻率应低于土壤背景电阻率. 为了探讨不同污染程度的场

为了对污染区域场地进行模拟,建立模型一,假设在均匀的土壤介质中,存在一重金属污染区域,污染区域为长方形,大小为 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,如图 3(a) 所示,假设污染区域的电阻率为 ρ_1 ,土壤背景电阻率为 ρ_0 .

地电法探测异常响应情况,设置模型一中土壤背景电阻率 ρ_0 为 $50 \Omega \cdot m$,污染区域的电阻率 ρ_1 分别为 10 、 20 、 $30 \Omega \cdot m$. 得到的不同污染程度模拟测量结果如图 4 所示.

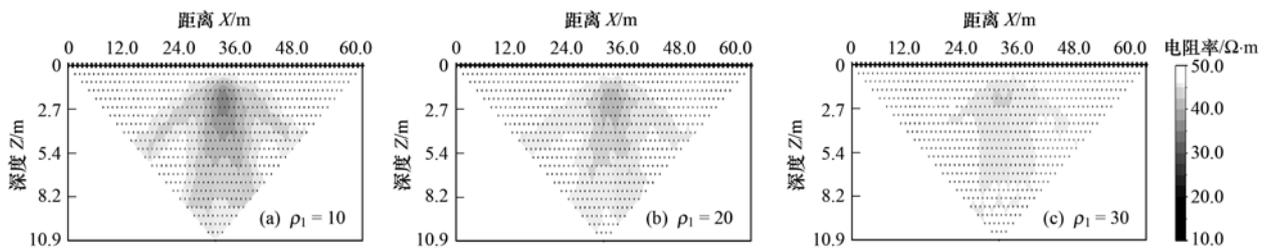


图 4 不同污染程度的模拟测量结果 ($\rho_0 = 50$)

Fig. 4 Measured apparent resistivity of sites with different contamination concentration ($\rho_0 = 50$)

由于电阻率法是对地下介质的综合反映,因此,电阻率法对于不同深度的目标体的探测能力是不同的. 为了探讨位于不同深度的污染区域的电阻率法探测效果,调整模型一中污染区域的位置,设其深度 h 分别为地下 0 、 1 、 2 、 4 m,污染区域的电阻率 ρ_1 为 $20 \Omega \cdot m$,土壤的背景电阻率 ρ_0 为 $50 \Omega \cdot m$,得到模拟测量结果分布如图 5 所示.

2.2 层状介质中的污染区域

多数场地的地下介质分布并不均匀,不同深度下地质体并不相同,通常呈现出分层特性,建立模型二,如图 3(b) 所示,该模型分为上中下三层,第一层为覆盖层,深度为地表到地下 1.5 m,电阻率为 ρ_1 ,第二层为黏土层,深度为地下 $1.5 \sim 6$ m,厚度为 4.5 m,电阻率为 ρ_2 ,第三层为基岩,深度为地下 6 m 以下,电阻率为 ρ_3 . 在第二层中存在一污染区域,假设

为长方形,大小为 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,电阻率为 ρ_4 .

第二层黏土层的电阻率 ρ_2 设定为 $50 \Omega \cdot m$,第三层基岩电阻率 ρ_3 设定为 $500 \Omega \cdot m$. 第一层的电阻率设置分为两种情况:一是覆盖层为回填土,这种情况下,回填的物质和填埋方法的不同使得覆盖层的电阻率有所不同,这里假定 ρ_1 为 $200 \Omega \cdot m$,二是由于地表存在污染源,使得覆盖层受到严重污染,电阻率有所降低,假定电阻率 ρ_1 为 $10 \Omega \cdot m$. 设定污染区域的电阻率 ρ_4 为 $10 \Omega \cdot m$. 得到视电阻率断面图如图 6 所示.

3 结果与讨论

3.1 对不同污染程度的识别

电阻率法探测是基于地下介质的电阻率差异性的,因此,其探测效果会受到污染土壤电阻率与未污

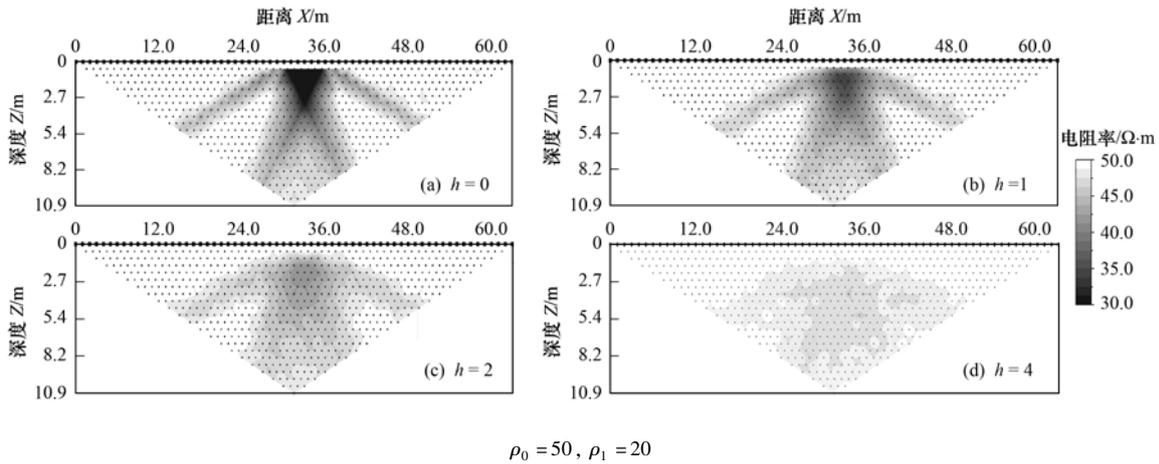


图 5 不同污染深度的模拟测量结果

Fig. 5 Measured apparent resistivity of sites with different contamination depth

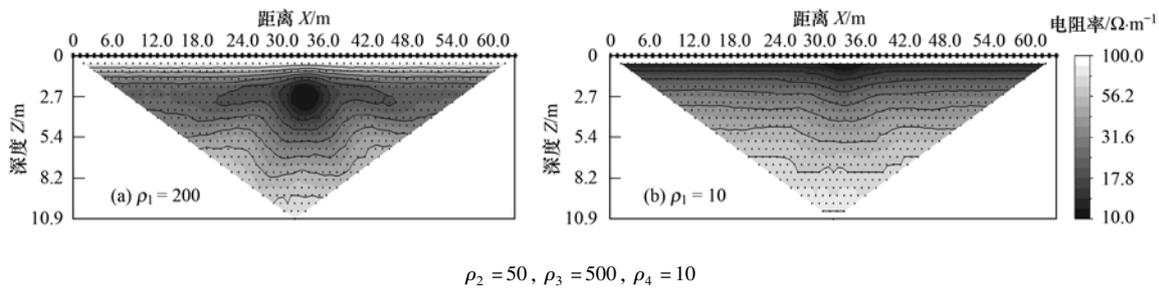


图 6 层状场地的模拟测量结果

Fig. 6 Measured apparent resistivity of layered media

染土壤电阻率之间的差异性的影响. 从图 4 可以看出,电阻率法探测得到的视电阻率剖面图在污染区域对应的位置出现低阻异常,并且,污染程度越重(即污染区域电阻率越小),异常响应越明显. 最大异常率 = (最大值 - 最小值)/最大值,当电阻率为 $10 \Omega \cdot m$ 时,最大异常率为 32.05% (表 1),结合图 4 可见,此时低阻异常区域很明显. 当电阻率为 $30 \Omega \cdot m$ 时,视电阻率剖面图的最大异常率仅为 14.21%,此时低阻异常区域已经不明显. 可以推断,若污染区域的电阻率继续增大(不超过 $50 \Omega \cdot m$),则视电阻率异常进一步下降. 因此,对于污染程度较轻的场地,若污染引起的电阻率差异性小到一定的程度,再加上噪声的影响,电阻率法无法很好识别. 另外,图 4 中异常区域的形态与模型设置的长方形有差异,可以通过后期的电阻率反演进行

表 1 图 4 电阻率取值统计

污染区域电阻率 / $\Omega \cdot m$	最小值 / $\Omega \cdot m$	最大值 / $\Omega \cdot m$	最大异常率 /%
10	34.87	51.32	32.05
20	41.20	51.78	20.24
30	44.26	51.59	14.21

修正.

3.2 对不同深度污染区域的识别

从图 5 中可以看出,污染区域埋深靠近地表,视电阻率剖面图中低阻异常区域越明显,埋深越深,视电阻率剖面图中的低阻异常区域越不明显. 由表 2 可见,当污染区域位于靠近地表时(埋深为 0 m),视电阻率最大异常率为 62.66%,而当污染区域埋深为 4 m 时,视电阻率最大异常率为 11.3%. 从低阻异常出现的深度来看,污染区域的埋深越深,其视电阻率剖面图上低阻区域出现的深度也就越深,但是,视电阻率剖面图中低阻区域的深度并不与模型中设定的污染区域深度精确对应,这主要是由于电阻率法是对地下介质的综合反应,造成在比污染区域实际深度更浅的位置开始出现低阻异常.

表 2 图 5 电阻率取值统计

污染区域深度 /m	最小值 / $\Omega \cdot m$	最大值 / $\Omega \cdot m$	最大异常率 /%
0	20.80	55.71	62.66
1	34.05	52.44	35.07
2	41.30	51.78	20.24
4	45.60	51.41	11.30

3.3 层状介质中污染区域的识别

图 6(a)中,在覆盖层为回填的情况下,视电阻率断面图呈现出上层高阻,中间低阻,下层高阻的 3 个层次,在中间层中存在一明显低阻体与污染区域对应. 从电阻率取值情况看,第一层的电阻率取值范围在 $130 \sim 200 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,接近模型设定值,第二层的电阻率取值范围为 $70 \sim 120 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,高于设定值,第三层的电阻率取值在 $130 \sim 200 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,低于模型设定值. 低阻体的取值在 $46.5 \sim 70 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,远大于模型中的设定值.

图 6(b)中,对于覆盖层为受污染土壤的情况,视电阻率由浅至深呈现出增加趋势,无明显分层界限. 在测线 30 ~ 36 m 处,低阻区域的深度比其他区域深. 这是对于模型中设定的低阻区域的响应,但是不能很好反映出污染范围.

4 实际污染场地探测

4.1 场地概况

重庆某化工厂始建于 1959 年,以生产重铬酸钠、铬酐等产品为主,生产规模为 $4\,000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 由于早期该厂铬盐生产工艺落后,产生的大量铬渣未得到有效处理,再加上当时对铬渣的环境危害认识不足,将铬渣长期堆放在未经任何处置的厂区地面上,对周边环境造成了严重的污染. 为了开展对污染场地的治理和修复工作,采用电阻率法结合化探对污染场地的污染情况进行调查.

4.2 检测结果及分析

本次电阻率法检测采用美国 AGI 公司研发的 SuperSting-R8 高密度电法仪. 检测装置采用温纳装置. 测线从北向南布线,贯穿整个生产厂房,极间距 4 m,布置 56 个电极,测线总长度为 220 m,如图 7 所示. 调整电极插入土壤深度,使电极接地电阻在 $2\,000 \Omega$ 以内,电法仪测量时采用两个 12 V 电池供电,最大输出功率为 400 W. 探测的主要目的是明确污染区域.

测线视电阻率断面图如图 8 所示. 在测线前半

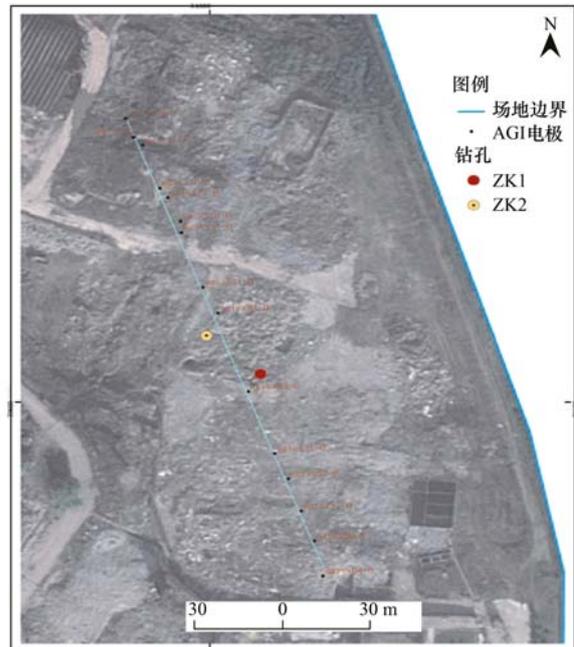


图 7 污染场地测线及钻孔位置

Fig. 7 Survey line and sampling points in the contaminated site

段及剖面图深处电阻率相对较高,而在测线浅层区域存在部分低阻区域. 为了更为准确地进行污染区域识别,对视电阻率剖面图采用主流的反演算法——光滑模型反演算法进行反演,得到电阻率剖面图如图 9 所示,可以看出,在地下 10 m 以内的范围内存在三处电阻率相对较低的地方:分别为测线 80 ~ 88 m,测线 140 ~ 164 m 及测线 196 ~ 212 m. 可以推断,这三处区域很有可能污染情况更为严重.

在对场地进行电阻率法探测的同时,在测线 124 m 及 153 m 处分别进行了钻孔取样,钻孔编号为 ZK1 和 ZK2,根据钻孔情况显示,测线 124 m 处,0 ~ 3 m 为回填土,主要由建筑垃圾构成,3 ~ 14 m 为粉质黏土,14 ~ 15.8 m 为泥质砂岩,测线 153 m 处,0 ~ 4 m 为回填土,主要由建筑垃圾构成,4 ~ 15 m 为粉质黏土,15 ~ 16.5 m 为砂岩. 土壤样品按照 GB/T 15555. 6-1995《固体废物总铬的测定 直接吸入火焰原子吸收分光光度法》进行铬含量测定. 土样的铬含量如图 10 所示. 从中可以看出,153 m 处土壤

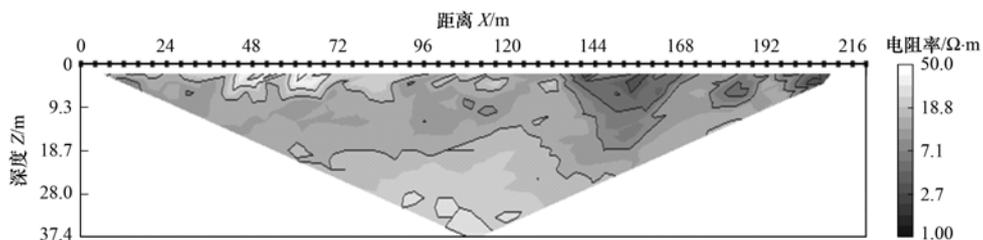


图 8 某化工厂电阻率法探测视电阻率断面图

Fig. 8 Measured apparent resistivity in an abandoned chemical factory

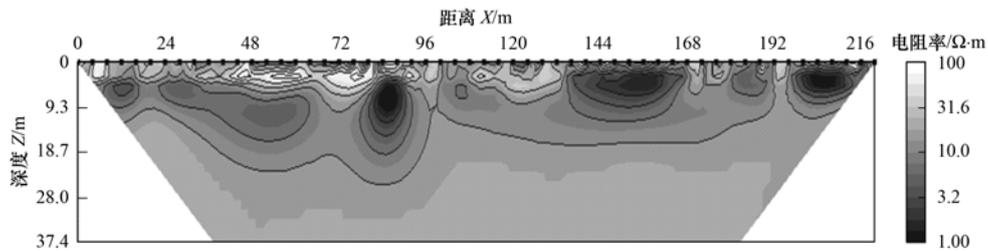


图9 某化工厂电阻率法探测反演结果

Fig. 9 Inversion model section from the measured data

的样品的铬含量为 $4\ 300 \sim 8\ 460\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 124 m 处的土壤样品铬含量在 $424 \sim 3\ 550\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 测线 153 m 处的铬含量远高于 124 m 处的土壤铬含量。

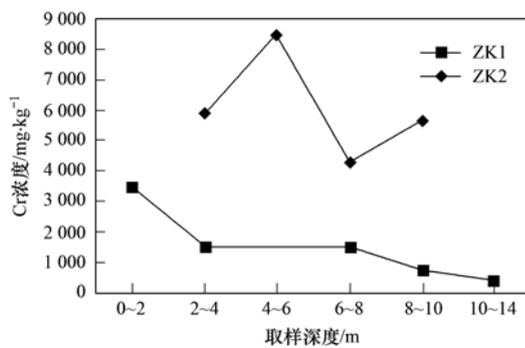


图10 钻孔铬浓度随深度变化曲线

Fig. 10 Cr content changes with depth

从电阻率断面图中提取 124 m 及 153 m 处电阻率随深度的变化曲线如图 11 所示, ZK2 的电阻率高于 ZK1, 这与两个钻孔的浓度比较结果一致。在靠近地表处, 两条曲线电阻率偏高, 这是由于回填的建筑垃圾结构松散, 使得电阻率较高, 在较深处(12 m 以下)两者的电阻率趋于一致, 这主要是由于深处基岩的影响。

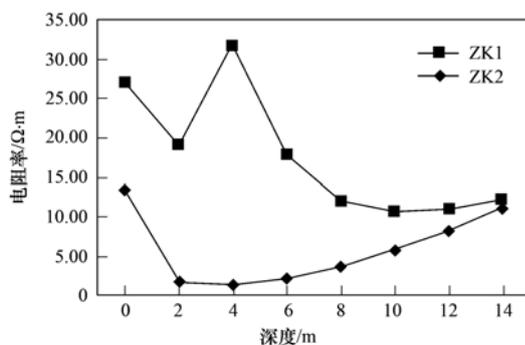


图11 钻孔处电阻率随深度变化曲线

Fig. 11 Resistivity changes with depth

5 结论

(1) 数值实验及实际应用结果表明, 电阻率法探测能够成功地检测出由于污染造成的电阻率低阻异常。

(2) 污染程度和污染区域的深度会对检测造成影响, 污染程度越重, 污染区域越靠近地表, 则更容易检测出低阻异常。

(3) 在层状介质的情况下, 污染区域的检测会受到地质体的影响, 某些情况下不能精确反映污染深度。

(4) 电阻率法探测是基于目标体差异性判断地下介质分布的一种方法, 获得的电阻率取值通常具有相对意义, 根据电阻率断面图可以推断污染分布的大致趋势, 但由于影响电阻率因素较多, 不能仅仅通过电阻率值判断污染物浓度, 还需结合化探等手段进一步精确确定污染程度。

参考文献:

- [1] 刘玉强, 李丽, 王琪, 等. 典型铬渣污染场地的污染状况与综合整治对策[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 248-253.
- [2] 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1210-1216.
- [3] 张浩, 王济, 曾希柏, 等. 城市土壤重金属污染及其生态环境效应[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(2): 11-18.
- [4] Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites [R]. United States Environment Protection Agency Office of soil waste and Emergency Response. 2000. 8.
- [5] 何继善. 电法勘探的发展和展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(Supp. 1): 308-316.
- [6] Rucker D F, Fink J B, Loke M H. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 74(4): 242-254.
- [7] Hermans T, Vandenbohede A, Lebbe L, et al. Imaging artificial salt water infiltration using electrical resistivity tomography constrained by geostatistical data[J]. Journal of Hydrology, 2012, 438-439: 168-180.

- [8] 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**(2-3): 275-300.
- [9] Abdelatif M A, Sulaiman W N. Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey[J]. *Environmental Management*, 2001, **28**(5): 655-663.
- [10] Reyes-López J A, Ramírez-Hernández J, Lázaro-Mancilla O, *et al.* Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: a case in México[J]. *Waste Management*, 2008, **28**(Suppl. 1): S33-S39.
- [11] Sainato C M, Losinno B N, Malleville H J. Assessment of contamination by intensive cattle activity through electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, **76**: 82-91.
- [12] Liu G Q, Jia Y G, Liu H J, *et al.* A case study to detect the leakage of underground pressureless cement sewage water pipe using GPR, electrical, and chemical data[J]. *Environmental science & Technology*, 2002, **36**(5): 1077-1085.
- [13] 程业勋, 杨进. 地下水污染环境地球物理勘查的进展[C]. 地下渗漏污染检测处置研讨会论文集, 2005. 12-18.
- [14] 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.
- [15] 郭秀军. 污染含水介质 ERT 法探测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [16] 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.
- [17] 刘汉乐, 周启发, 吴华桥. 轻非水相液体污染过程的高密度电阻率成像法室内监测[J]. *地球物理学报*, 2008, **51**(4): 1246-1254.
- [18] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(8): 1028-1032.
- [19] 白兰, 周仲华, 张虎元, 等. 污染土的电阻率特征分析[J]. *环境工程*, 2008, **26**(2): 66-69.
- [20] 能昌信, 刘玉强, 刘豪睿, 等. 铬污染土壤的导电性、频谱激电性和介电特性的实验结果[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 758-765.
- [21] 刘豪睿, 能昌信, 刘玉强, 等. 基于介电特性获取污染土壤中污染物含量的研究[J]. *地球物理学进展*, 2010, **25**(6): 2184-2192.
- [22] Pozdnyakova L A. Electrical properties of soils[D]. Wyoming: Wyoming College of Agriculture, 1999. 1-138.
- [23] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [24] Corwin D L, Lesch S M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines[J]. *Agronomy Journal*, 2003, **95**(3): 455-471.
- [25] Zhu J J, Kang H Z. Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land[J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(6): 801-812.
- [26] Goyal V C, Niwas S, Gupta P K. Theoretical evaluation of modified Wenner array for shallow resistivity exploration[J]. *Ground Water*, 1991, **29**(4): 582-586.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行