

黄河下游堤防工程隐患探测技术与应用

邓洪亮¹, 谢向文^{1,2}, 郭玉松^{1,2}, 张晓予², 马爱玉²

(1. 北京工业大学, 北京 100022; 2. 黄河勘测规划设计有限公司工程物探研究院, 郑州 450000)

摘要 黄河下游堤防是各个时期逐步修筑而成的, 各次修筑质量参差不齐, 加上历史决口堵复时使用的物料腐烂和有害动物破坏, 近年来水量减少、断流增加, 河道淤积严重, 水流散乱, 河势极其不稳, 致使堤防工程形成众多险点隐患. 本文根据黄河下游堤防工程特点, 成功地运用高密度电阻率法技术探测堤防隐患, 取得了较好的探测效果, 为堤防工程的检测和监测提供了可靠的资料.

关键词 堤防隐患, 探测, 地球物理

中图分类号 TG115, P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)03-0936-06

The geophysical detection technology and application to hidden troubles of dikes in the lower reach of the Yellow River

DENG Hong-liang¹, XIE Xiang-wen^{1,2}, GUO Yu-song^{1,2}, ZHANG Xiao-yu², MA Ai-yu²

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Institute of Geophysical Prospecting, YREC, Zhengzhou 450000, China)

Abstract The embankment in the lower reach of the Yellow River was constructed stage by stage in history. There are a good deal of construct quality problems, for instance the materials to burst stifled in the last time were decomposed or destroyed by baneful animals. It has many hidden troubles in recent years such as river-way fill up, current messy and unstable river circumstance because of the decreasing river water and the water turnoff. This paper introduces the multi-electrode resistance method technology. Which can be used to detect hidden trouble in the lower reach of the Yellow River and obtained preferable results. It offers reliable data to check and inspect engineering interior quality of this area.

Keywords embankment hidden trouble, detection, geophysics

0 引言

黄河堤防工程是保证黄河安全渡汛的重要物质基础, 是抵御洪水泛滥的第一道屏障, 是黄河防洪的基础设施, 在黄河下游防洪中起着非常重要的作用. 新中国成立后, 黄河经过四次堤防加高加固, 大大增强了堤防的抗洪能力, 但由于黄河下游堤防是各个时期逐步修筑而成的, 各次修筑质量参差不齐, 加上历史决口堵复时使用的物料腐烂和有害动物破坏, 以及近年来水量减少、断流增加, 河道淤积严重, 水流散乱, 河势极其不稳, 致使堤防工程形成众多险点隐患, 增大了防洪出险机率^[1,2].

1 黄河下游堤防工程

黄河是中国的第二大河, 发源于青海省巴颜喀拉山北麓海拔 4500 m 的约古宗列盆地, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等 9 省(区), 在山东省垦利县注入渤海, 全长 5464 km, 流域面积 79.5 万 km². 黄河下游流域面积 2.3 万 km², 河道长 786 km, 落差 94 m, 平均比降 1.2‰. 由于泥沙长时间的大量淤积, 下游河道逐年抬高, 郑州花园口河段平均每年抬升 0.1 m, 目前滩面一般高出背河地面 3~5 m, 部分河段如河南封丘的曹岗附近滩面高出背河地面 10 m, 是世界上著名的“悬河”, 成为

收稿日期 2007-12-10; 修回日期 2008-02-20.

基金项目 水利部重大科技攻关项目(国科 99-01)资助.

作者简介 邓洪亮, 男, 1963 年生, 博士, 毕业于北京航空航天大学固体力学专业, 副教授, 主要从事土力学, 岩土工程和道路与桥梁工程研究. (E-mail: Denghongliang@bjut.edu.cn)

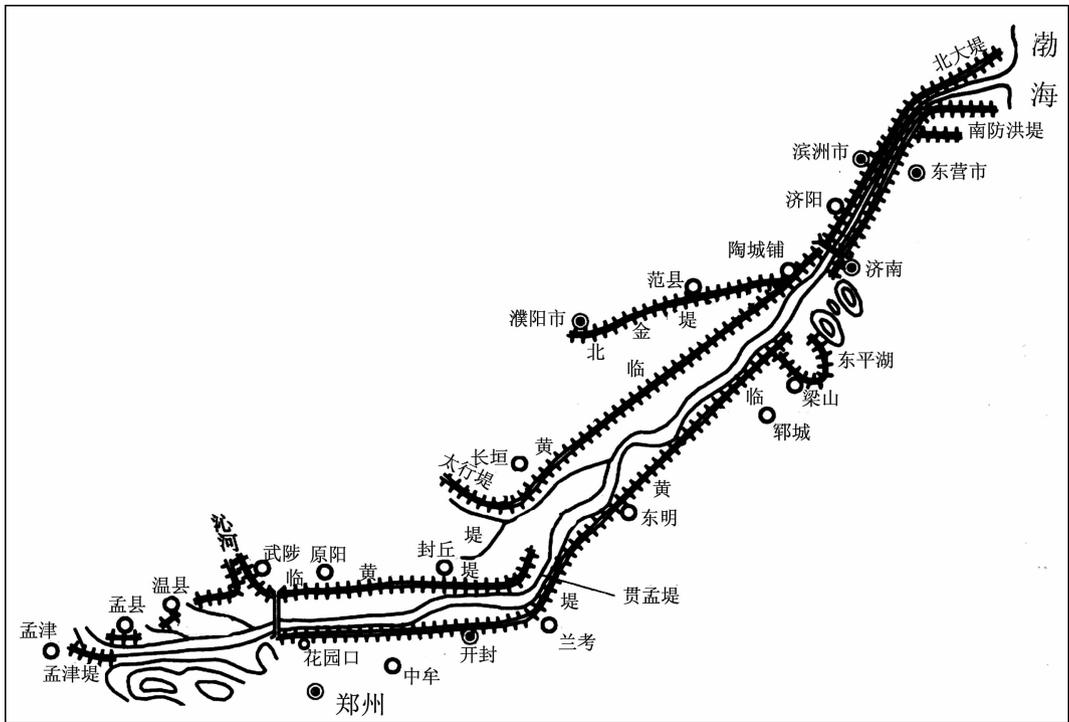


图 1 现行黄河下游临黄大堤示意图

Fig. 1 Sketch map showing dikes in the lower reaches of the Yellow River

淮河与海河的分水岭^[3~6].

黄河下游河道横贯于华北平原上,北岸自孟州以下,南岸自郑州铁路桥以下,除东平湖陈山口到济南玉符河段依山麓外,两岸都建有大堤,如图 1 所示. 现有各类堤防长 2290.81 km,其中现行黄河河道两岸堤防长 1371.227 km,是在不同时期修筑形成的^[3].

2 堤防隐患探测技术研究

黄河下游堤防隐患探测问题是黄河防洪工程中的老大难问题,历代黄河机构均十分关注,并投入相当多的力量探索解决问题的办法. 为了有效探测堤身隐患,消除堤身险点,清代河务机构曾用过“签堤”的办法;上世纪 50 年代就采用锥探灌浆的办法,进行堤防隐患探测和加固;到 60 年代初,山东黄河河务局与山东大学协作,曾用放射性钴 60 作过堤防隐患探测试验;70 年代,武涉修防段研制了电动打锥机,鞍山电子研究所研制了 YB-1 型暗缝探测仪,将黄河堤防隐患探测又推进了一步;80 年代,黄河水利委员会进行了声纳探测根石的技术试验,美国 SIR-8 型地质雷达试验等,但探测效果均不明显^[3~18].

上世纪 80 年代后期,日本研制了 SP-3 高密度

电法探测仪,是日本地质计测株式会社提出并发展起来的一种新型的电阻率方法探测仪,由于高密度电法可以实现电阻率的快速采集和现场数据的实时处理,从而改变了电法的传统工作模式. 它集电剖面和电测深于一体,采用高密度布点,进行二维地电断面测量,提供的数据量大、信息多,并且观测精度高、速度快,是寻找构造破碎带、土洞及溶洞最有效的物探方法之一^[7~18]. 高密度电法勘探的前提条件是地下介质间的导电性差异,它通过 A、B 电极向地下供电(电流为 I)然后测量 M、N 极电位差 ΔU ,从而求得该记录点的视电阻率值. 根据实测的视电阻率剖面进行计算、处理、分析,可获得地层中的电阻率分布情况,从而解决相应的工程地质问题^[15~18].

直流电法勘探无论采用什么装置,它都是一种体积效应,通常的二维剖面法测量方式,其结果主要反映了剖面下方地电体的影响,一定距离以外旁侧影响的体积效应无法考虑,因此,高精度、高分辨率的勘探应该开展三维电性结构的资料采集和反演成像处理. 高密度电法资料处理先将仪器内的测量数据通过传输软件传输到计算机中,进行坏点删除、地形校正、格式转换,然后将数据导入 Surfer 软件,绘成视电阻率等值线图. 在等值线图上根据视电阻率

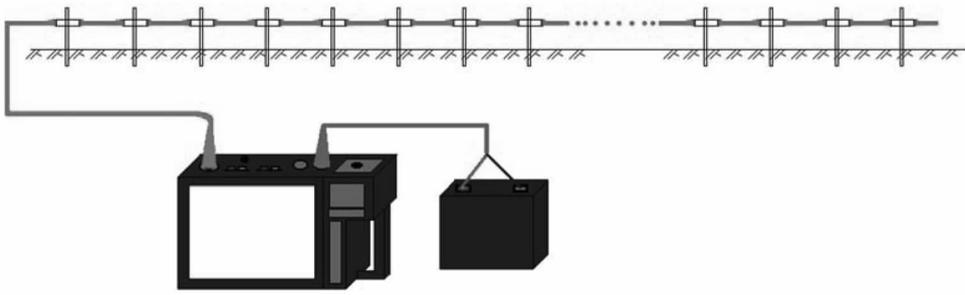


图 2 高密度电阻率法隐患探测工作示意图

Fig 2 Sketch of detecting hidden troubles by the multi-electrode resistance method

值的变化特征,结合钻探、地质调查资料作出地质解释,最后利用绘图软件 AutoCAD 绘制出物探成果解释图^[7~18]. 该仪器虽然在寻找构造破碎带、土洞及溶洞方面效果很好,但对于黄河隐患工程探测的特殊情况也无能为力.

为解决黄河堤隐患探测问题,1992 年初黄委会研制的“覆盖式高密度电阻率探测系统”投入黄河大堤隐患探测生产,取得了良好的效果. 1998 年水利部制定了“988”科技计划,将“堤防隐患和险情探测仪器开发”项目确立为水利部重大科技攻关项目,黄委会研制了“高密度电阻率法堤防隐患探测仪”,如图 2 所示,该仪器在堤防隐患探测中技术指标和功能总体上达到国际先进水平,其中分布式电极开关和专用电缆达到国际领先水平. 近年来,先后在黄河防洪工程中得到了多次的应用,完成探测工作 900 多公里,发现了大量的隐患工程异常点^[3,7~14],完成的黄可防洪工程隐患探测工作如表 1 所示.

表 1 黄河防洪工程隐患探测工作一览表

Table 1 Detection of hidden troubles in flood prevention engineering of the Yellow river

时间	长度(km)	隐患异常点(段)	老口门(段)	位置
1999.3	510.796	2343		黄河
1999.4	209.703	1024		黄河
2001.7	28.5	120	5	黄河
2001.11	38.0	90	3	黄河
2002.4	27.611	176		黄河
2002.7	10.2			东平湖
2004.6	92.644	580	5	黄河
2004.10	39.016	535		沁河
2004.12	9.65	20		东平湖

3 黄河下游堤防隐患探测技术应用实例

黄河下游堤身多为沙壤土、壤土修筑而成,也有少量的盐渍土和黏土. 堤基多为粉土、沙壤土、壤土、盐渍土,有的堤段夹有薄层黏土. 堤身隐患主要为裂缝、洞穴、不均匀松散体和软弱层等;堤基隐患则主要是老口门、渗水点、渗水段等.

3.1 堤身隐患探测

用于黄河下游堤身隐患探测的地球物理方法主要有电阻率剖面法和高密度电阻率法,主要采用斯龙贝格装置和温纳装置,其原理是在堤顶通过供电电极向地下供入直流电,形成人工电场,然后利用测量电极通过仪器观测其电场分布情况,研究不同隐患所引起的地下电场变化.

探测是在堤顶顺堤布置临河和背河测线,测点距离 2 m(详测时为 1 m). 仪器为自己开发研制的 HGH—Ⅲ 堤防隐患探测系统,高密度电测工作装置以斯龙贝格装置为主,根据黄河大堤堤身高度设置最大电极间隔 8 m 到 12 m.

在理想条件下,我们将大堤视为均质体,其电阻率在垂直和水平方向变化不大,电场分布均匀;当堤身或堤基存在隐患时,均质体被破坏,导致电场分布发生变化,它反映在隐患位置上,所观测的视电阻率发生变化;通过视电阻率成像和反演技术,结合地质情况,即可推断出隐患的性质、部位和埋深,最后绘制电阻率色谱图,并据此判定隐患. 黄河下游大堤探测实例如图 3 所示,图中高阻异常区即为堤身裂缝位置^[5~18].

3.2 堤基隐患探测

用于黄河下游堤基隐患探测的地球物理方法主要有瞬态面波法、瞬变电磁法和高密度电阻率法等.

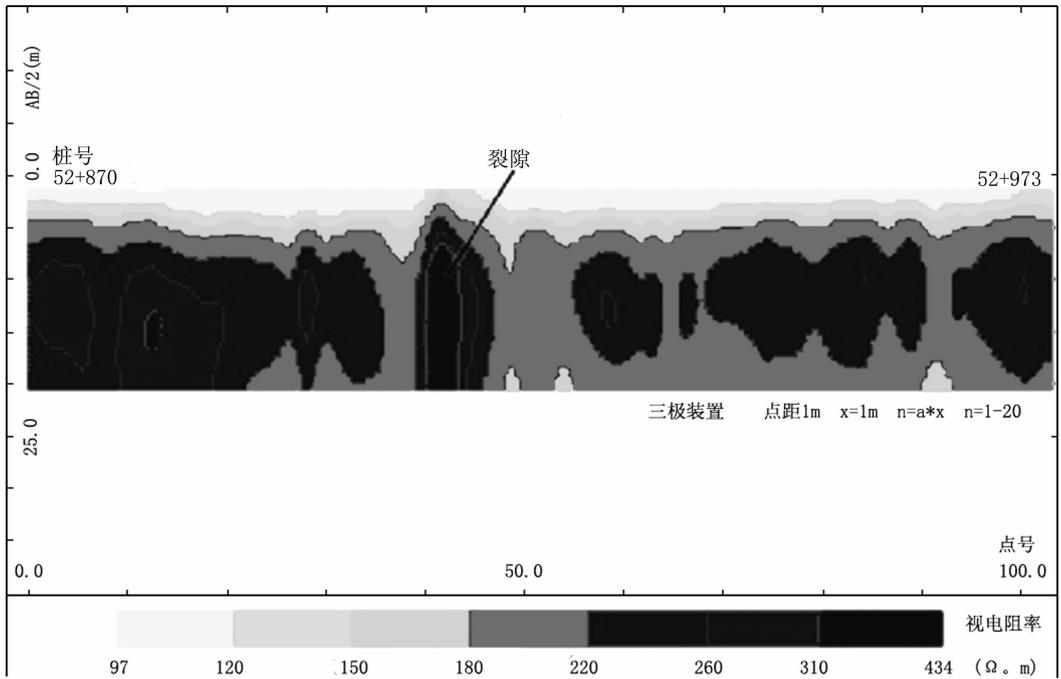


图 3 堤身裂缝探测成果图

Fig 3 Detection result of fissures in the dike

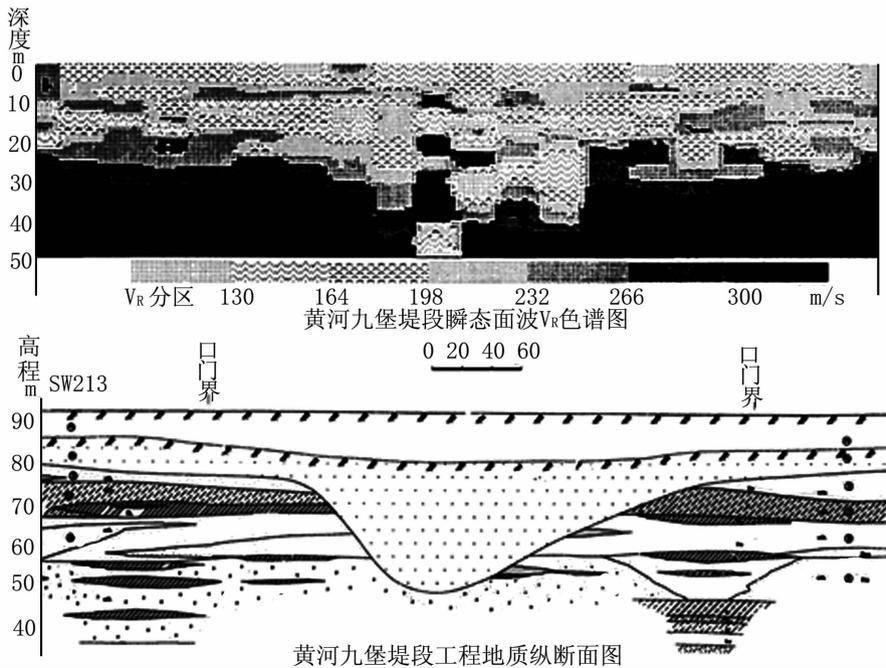


图 4 老口门堤基瞬态面波探测成果图

Fig. 4 Detection result of dike base at Laomenkou by transient surface wave

瞬态面波法原理是利用压缩波与 SV 型剪切波在地层界面附近的干涉叠加产生瑞雷面波,其能量大、速度低、频率低、衰减慢。根据瑞雷面波在均匀介质中传播时无频散性,在非均匀介质中瑞雷面波速

度随频率而变化,具有频散特性这一特点进行探测堤基隐患位置和大小。

黄河九堡老口门是 1843 年决口形成的,据堤基钻孔资料,揭露地层自上而下分为三层:①堤身填

土,人工填筑,厚度7~13 m;②老口门填土,人工填土有秸秆等杂物,厚度3~35 m;③大堤基底,中砂层为主,局部夹有薄层粘土.测量时选用500 kg,重锤提升0.5 m,然后自由下落击振产生面波,使用ES-1225地震仪接收,记录长度2000 ms,检波距离40 m,测点距离60 m,每个测点单边触发记录3到6组信号,黄河九堡老口门探测实例如图4所示,图中所示低速区域就是老口门堤基的位置.

瞬变电磁法原理是利用不接地回线向地下发送一次脉冲磁场,在一次场间歇期间利用另一回线接收测量由地下介质产生的感应电场即二次场随时间

的变化.二次涡流场的衰减快慢与地质体的电阻率有关,电阻率高时衰减较快,电阻率低时衰减较慢.由于老口门、渗水点、渗水段等堤基隐患主要表现为低阻异常,二次涡流场随时间衰减较慢.

通过在黄河九堡老口门利用瞬变电磁进行探测,工作装置为重叠回线装置,边框设计为 25×25 m的方框,发射线圈为双匝,接收线圈为单匝,发射电流为5 A,频率为225 Hz,测点间距为25 m,视电阻率小于 $60 \Omega \cdot \text{m}$ 的就是老口门堤基枯料腐烂形成的淤泥层,黄河九堡老口门探测实例如图5所示.

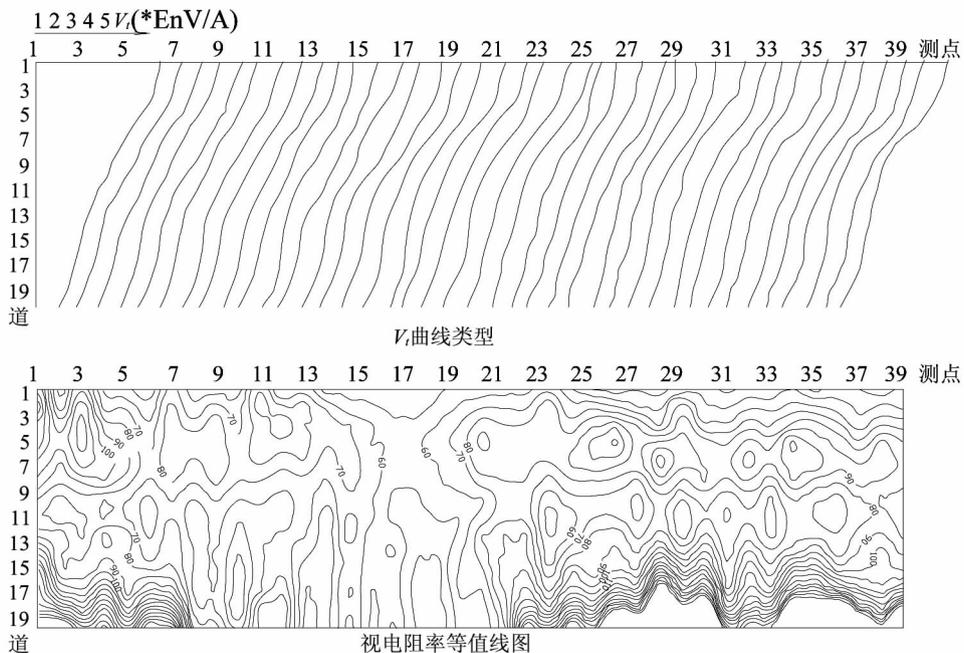


图5 老口门堤基瞬变电磁探测成果图

Fig. 5 Same as Fig. 4 but by transient electromagnetic sounding

4 结论与建议

汛期防洪抢险工作都是紧密围绕水情变化开展的,因此,堤防隐患的监测必须选择那些与水关系密切的地球物理参数,设计合理适当的观测方法,研制多参数联合作业的仪器设备,在堤防工程的险工险点和水工建筑部位布设监测断面,分析各参数的变化趋势,预测预报堤防出险几率.

采用HGH—Ⅲ堤防隐患探测系统可以有效、快速和准确的探测黄河下游堤防隐患,通过工程实际应用取了较好的应用效果,同时,一套设备可以监测多个堤坝,它是在工程表面工作,设备便于维护和

更新,是一种十分经济的监测方法.

采用地球物理无损检测技术进行隐患监测和险情预报无疑是一种新颖的技术思路,以电阻率成像、电磁成像、红外成像、弹性波场成像和放射性成像技术为基础体现了无损、快速、可靠、经济等特点,建立堤防工程健康档案,使水利工程数字化管理更进一步,为防汛、抢险和减灾提供科学依据,是未来水利科技发展方向,也是“数字水利”的具体实践.

参 考 文 献 (References):

- [1] 苗长运,杨明云,苏娅雯.黄河下游防汛与工程管理[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
Miao C Y, Yang M Y, Su Y W. Lower reaches flood preven-

- tion and engineering manage of YellowRiver[M]. Zhengzhou: Yellow River Irrigation Publishing Company (in Chinese), 2003.
- [2] 陈效国,李丕武,谢向文. 堤防工程新技术[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
Chen X G, Li P X, Xie X W. The new technology of embankment engineering [M]. Zhengzhou: Yellow River Irrigation Publishing Company (in Chinese), 1998.
- [3] 祁民,张宝林,梁光河. 高密度电法的三维数据场可视化[J]. 地球物理学进展,2006,21(3):981~986.
Qi M, Zhang B L, Liang G H. The visualization of three dimension data field of high-density electrical technique [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(3): 981~986.
- [4] 赵璧如,赵健等. PS100型IP到端可控源高精度大地电测仪系统—CDMA技术首次在地电阻率测量中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):676~684.
Zhao B R, Zhao J, et al. Qian fuye the PS100 high precision earth-eletricity instrument system (IP to IP) with controllable source—application of CDMA technology to the measurement of earth-resistivity for the first time[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(2): 676~684.
- [5] 黄俊革,王家林,阮百尧. 三维高密度电阻率E-SCAN法有限元模拟异常特征研究[J]. 地球物理学报,2006,49(4):1206~1214.
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey [J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 2006, 49(4): 1206~1214.
- [6] 黄俊革,王家林,阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1529~1538.
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(5): 1529~1538.
- [7] 黄俊革,阮百尧,王家林. 水下激发极化测深异常特征研究[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1851~1857.
Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. A study on anomaly features detected by subaqueous induced polarization sounding [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1851~1857.
- [8] 王克文,孙建孟,耿生臣,吴金龙. 不同矿化度下泥质对岩石电性影响的逾渗网络研究[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1867~1872.
Wang K W, Sun J M, Geng S C, Wu J L. Percolation network study of shale effects on rock electrical properties under different salinity [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1867~1872.
- [9] 谢向文. 黄河下游堤防隐患探测技术研究[J]. 水利技术监督,2000(4):20~23.
Xie X W. Study of embankment hidden trouble detect technology in the lower reaches of yellow River[J]. irrigation technology supervise (in Chinese),. 2000(4):20~23.
- [10] 马晓冰,孔祥儒,刘宏兵,闫永利. 青藏高原东北部地区地壳电性结构特征[J]. 地球物理学报,2005,48(3):689~697.
Ma X B, Kong X R, Liu H B, Yan Y L. The electrical structure of northeastern Qinghai-Tibet plateau[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(3): 689~697.
- [11] 吴小平. 非平坦地形条件下电阻率三维反演[J]. 地球物理学报,2005,48(4):932~936.
Wu X P. 3-D resistivity inversion under the condition of uneven terrain[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(4): 932~936.
- [12] 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1270~1275.
Ma Z G. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(6): 1270~1275.
- [13] 谢向文,马爱玉,等. 堤防隐患探测和险情监测技术研究[J]. 大坝安全与监测,2004(1):24~26.
Xie X W, Ma A Y, et al. Study of embankment hidden trouble detect and danger inspect [J]. Dam safety inspection (in Chinese), 2004,1:24~26.
- [14] 郭玉松,谢向文,等. 从堤防隐患探测到堤防隐患监测的思考[J]. 水利技术监督,2003(3):34~36.
Gu Y S, Xie X W, et al. The consider of embankment hidden trouble inspect by the reason detection [J]. irrigation technology supervise (in Chinese), 2003,3:34~36.
- [15] 嵇艳鞠,林君,等. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J]. 地球物理学进展,2005,20(3):828~834.
Ji Y J, Lin J, et al. Underground water prospecting by Transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese),. 2005,20(3):828~834.
- [16] 王友善,魏传根. 电磁测深方法研究[J]. 地球物理学报,2006,49(1):256~263.
Wang Y S, Wei C G. A study of the EM method to explore strata [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(1): 256~263.
- [17] 闫述,陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时-频分析解释[J]. 地球物理学报,2005,48(1):203~208.
Yan S, Chen M S. Interpretation of transient electromagnetic field data using joint time-frequency analysis [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(1): 203~208.
- [18] 黄俊革,鲍光淑,阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究[J]. 地球物理学报,2005,48(1):222~228.
Huang J G, Bao G S, Ruan B Y. A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(1): 222~228.