

# 浅层地震反射波法在塌陷勘察中的超前预报

张凯,汪青松

(安徽省勘查技术院,安徽蚌埠 233005)

**摘要:**为了解决采盐区出现的突发性塌陷,利用浅层地震反射波法对塌陷坑及周边进行全方位探查。初步查明塌陷成因,科学圈定安全范围,并对一处隐患塌陷提前73天成功进行了预报,起到了很好的社会效益和经济效益。

**关键词:**塌陷;溶腔;浅层地震反射波法;超前预报

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2010)01-0085-04

地面塌陷、地面沉降、崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等是常见的几种地质灾害现象,其本身具有自然演化和人为诱发的双重性<sup>[1]</sup>。其中,地面塌陷是指地表岩、土体及赋存其中的水、土所组成的综合体系,在自然或人为因素作用下,产生各种破坏其稳定平衡状态的力学效应,导致岩土体覆盖层向下陷落,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种地质现象<sup>[2]</sup>。

随着地下矿体的纵深开采、地下水的过量抽取以及地下工程的大面积建设,人为诱发地面塌陷(沉降)越来越频繁,已严重威胁人民生命财产安全,制约社会经济可持续发展。为此,迫切需要一批行之有效的科学手段对塌陷区进行调查、界定、评估、预报等,物探方法正日益广泛地应用于地质灾害调查中,浅层地震反射波法作为物探方法中的一种,具有分辨能力强,空间定位准确的技术特点而备受青睐。经验告诉我们,只要具备其地球物理前提,工作布置合理,采集参数准确,激发能量足够,数据处理精细,解释推断仔细,就会收到令人满意的效果<sup>[3-5]</sup>。本次在采盐区地面塌陷应急勘察中应用浅层地震反射波法,进行了塌陷预报。

2005年12月4日14时左右,位于皖中某大型采盐区地面出现突发性塌陷,造成采盐井陷入地下,坑内充满卤水。塌陷时爆发力极强并伴有强烈的轰鸣声,大量卤水和土体喷离地面数十米。陷坑近似椭圆形,面积约8000 m<sup>2</sup>。西北角有村庄,最近民房离塌陷坑边约110 m。

塌陷发生后,盐矿及当地政府立即封锁塌陷区域,连夜迁出附近的村民并迅速展开调查,要求查明塌陷成因并对采卤区域进行全面勘察评价,寻找隐患塌陷区,做到超前防范。鉴于塌陷性质、地层岩

性、构造特征、溶腔埋深、场地地形、施工安全等诸多因素,决定采用浅层地震反射波法对塌陷区及其外围进行全面勘查。

## 1 地质概况及地球物理特征

测区地形平坦,略有起伏,地面标高一般在65~75 m。时值冬季,稻田闲置干涸,麦田成片,野外施工颇为通畅。

盐矿为地堑式构造盆地控制的沉积矿床,第四系表土层发育覆盖整个测区,没有基岩出露,岩性以黏土、亚黏土为主。底部为含砂砾黏土,个别夹薄层细砂。地层厚约9~36 m,一般厚度约16 m,矿区中心部位厚度最大,向盆地边缘逐渐变薄。

第四系下伏地层为古近系(E),分上下两个组,下部为张桥组(E<sub>1</sub>),主要为山麓相、河流相的砖红色、棕褐色厚层中一粗粒砂岩及砾岩等,厚度在285~523 m,埋藏较深,本次地震探测深度未能达到。上部为定远组(E<sub>2</sub>),遍布于全测区,岩性以陆源的河床相、滨湖相及盐湖相砂岩、泥岩及含膏泥岩等,夹有厚层岩盐。其上部 and 底部有少量的薄层砾岩,总厚度为860~1820 m。含盐层位最大厚度达180多米,埋深在250~580 m,为主要探察层位。

以往地质勘探资料未显示盐矿开采区内有断裂构造存在,仅在矿区外缘南北两侧发现有走向近于东西的正断层,与区域构造方向一致。该区有两个稳定的波阻抗界面:第四系地层与古近系地层之间、岩盐上部的石膏层与古近系地层接触面。

## 2 工作布置及数据处理

矿区共布置18条测线,按线距200~300 m布

置北北东向剖面 10 条,按线距 400 ~ 500 m 布置近东西向剖面 8 条,总有效长度约为 35 km(图 1)。现采区和塌陷区适度加密测线,测线尽可能穿过每一个采盐井,对那些开采量较大或开采年限较长的盐井(尤其是溶腔较大的连通井)采取“十”字交叉测线穿过,以了解盐井溶腔状况,寻找隐患塌陷危险区,为灾害预防提供可靠资料。

地震采用单边激发六次覆盖观测系统,100 Hz

检波器,24 道接收,最小偏移距 60 m,道间距 5 m,采样间隔 0.5 ms,记录长度 1 000 ms。炸药震源激发,井深 5 m,药量 600 ~ 900 g,乳化防水炸药,电雷管引爆。为了探查塌陷坑内部情况,利用两条十字交叉测线,采取变观方式,最小偏移距 0 ~ 240 m。

用 PROMAX、OMEGA、CGG 等大型地震处理软件进行数据多次处理,获得反映地下构造形态、地层产状和岩性信息的高分辨率反射时距剖面<sup>[6-7]</sup>。

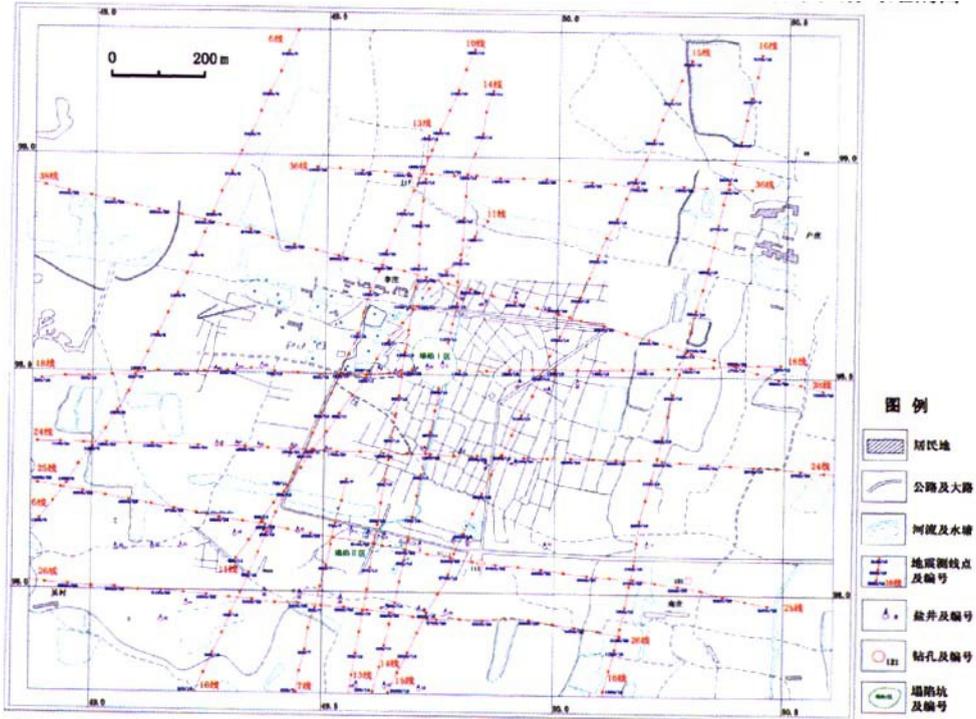


图 1 矿区浅层地震勘查测线布置

### 3 推断解释

利用区内大量的地质勘探钻孔资料和采盐井钻孔资料,在对全区地震剖面进行地质分层、构造推断、采卤腔体圈定等物探解释工作的基础上,进一步对塌陷成因进行分析。

全区地震时间剖面反射层序非常清楚,反射波形态和盆地地层形态也极其一致,表现为向下弯曲的弧形盆地特征,效果相当理想。每条剖面在 200 ~ 400 ms(地层埋深不同,反射时间有差异)有一条能量强、波形稳定、可连续追踪的强反射呈双相位出现,此为岩盐顶板含膏泥岩的反射界面,也是探察采卤溶腔腔体大小的目标层位,解释中作为全区地震反射主要标准层。

2006 年 1 月 10 日,在 13 线横穿 3、24、4 号连通

井轴线(470/13 ~ 660/13)的勘查过程中,发现 3 号井和 24 号井之间的岩盐顶板上部约 40 m(250 ~ 350 ms)的反射波同相轴层次杂乱、弯曲、错断,波形特征与两侧差异显著,顶板反射层原位变形,能量虚弱,强反射层明显上移并南偏,说明溶腔已突破岩盐石膏顶板,上移的强振幅反射层是溶腔卤水与上部地层界面反映。由于三井连通,溶腔大,开采时间长,确定是塌陷前的危险信号(图 1)。了解此情况之后,盐矿采取果断措施,闭井停采。

春节后的 2 月 13 日,正交于 13 线并平行于 3 号、24 号、4 号井连线南侧的 25 线,在三井附近(5010/25 ~ 5220/25)同样发现反射波异常(230 ~ 350 ms),且异常明显向上扩展。该异常位于 24 号井南约 30 m 处,说明卤腔穿透石膏顶板后继续南移(图 3)。

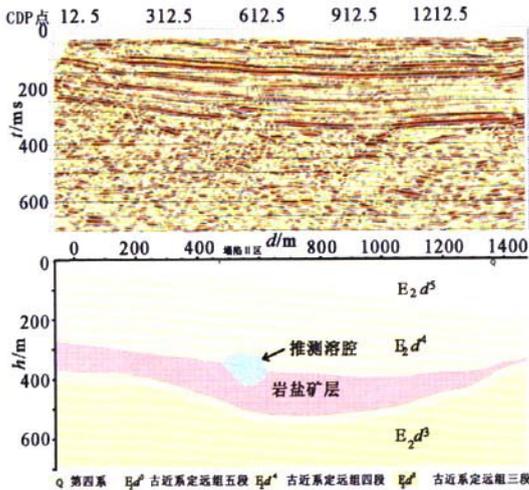


图2 13线地震时间剖面(上)及地质解释剖面(下)

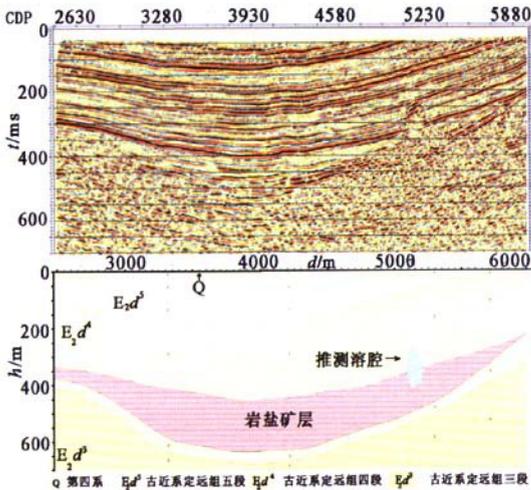


图3 25线地震时间剖面(上)及地质解释剖面(下)

从13线和15线两次勘察的结果分析,一旦盐层石膏顶板遭到溶腔破坏,上部水活性强、浸水易崩解的软质红层的稳定性将大大降低,在水的浸泡中不断崩解、塌落,坍塌速度加快<sup>[8]</sup>。通过计算,2006年1月10日,549/13号点显示溶腔顶面埋深约316 m,而在次月13日,5133/25号点显示溶腔顶面埋深约为272 m,两点为同一位置(两线交点),一个月时间顶面上升约44 m。

将这一结果急速通知矿方,矿上积极应对,做了大量的预防预警控制措施,圈定了警界范围,加大了防范力度。2006年3月25日凌晨5时20分左右,在勘探报告编写终稿阶段塌陷不可避免地发生了,此次塌陷称作塌陷Ⅱ区(有别于先前的塌陷Ⅰ区)。两次塌陷时隔112天,中心相距约450 m。从2006

年1月12日向公司报告至2006年3月25日塌陷产生,地震勘探预报整整提前了73天。

与塌陷Ⅰ区相似,塌陷Ⅱ区塌陷时伴随有大量卤水涌出、溢出,“隆隆”作响,坑内充满卤水。3号井悬于东侧坑边,24号井陷于坑内,井口因塌陷破损露出水面,卤水持续外喷。陷坑近似椭圆形,长轴近北西向,约50 m,短轴近北东向,约40 m,陷坑面积达2 000 m<sup>2</sup>,与地震勘探推测结果完全相符。此次塌陷使得该段内乡村主干公路完全陷入地下,因早有防范未造成任何人畜伤亡和社会恐慌。

此外,对盐矿怀疑可能有塌陷隐患的其他两处地段进行地震勘查后均予以明确否定,使生产、生活能够正常有序进行。

### 4 结论

(1)浅层地震反射波法在寻找地下深部洞穴方面有着独特之处,浅层地震与所有物探方法一样要想取得理想效果,必须具备相应的地球物理前提。盐矿区地形平坦,田地成片,地势广阔,现场施工极为便利。地表第四系覆盖,厚约9~36 m,无基岩出露,特别适合打孔放炮,炸药激发条件相当好。测区为地堑式构造盆地,层状沉积,盆地中心地层厚度大,边缘逐渐变薄,地层产状总体平缓,层间存在波阻抗差异,有利于地震勘探。岩盐矿体顶部的石膏层与上部砂岩、泥岩地层间存在极好的阻抗界面,反射能量强,信号清晰,是探测采卤溶腔的难得反射标准层。此层也是判断该区是否有塌陷危险的最佳标志层,一旦卤腔突破该层,就意味着上部地层失稳加速,塌陷隐患随之加剧。

(2)勘探目标明确,有的放矢。此地塌陷是典型的人为因素诱发引起的。由于地下盐层底部长期注水采盐,腔体动态扩大,体内充满卤水。当上部盐层溶尽并突破石膏顶板,脆弱、水活性强、浸水易崩解的软质红层在卤水的浸泡中便不断崩解、塌落,最终形成塌陷。探明塌陷成因和寻找隐伏塌陷病体就是探查卤腔的大小,工作的重点就是围绕采盐井下方卤腔的勘测。但因盐层及盐层上部石膏顶板的强反射屏蔽,盐层内的卤腔很难分辨,难以判别卤腔的空间位置、大小和形态,只得采取间接探查盐层上部石膏顶板的完整状况,一旦发现溶腔穿破石膏层就意味着腔体已具有较大规模了。为此,实际工作中每条采盐井位均布设测线通过,对重点井位尽可能布设两条“十”字交叉线,做到万无一失。

(3)浅层地震反射波法能否达到预期的地质效果取决于野外施工参数选择和后期数据处理,而野

外第一手资料的获取最为关键。浅地震通常探深100 m, 锤击震源探深就更小, 一般仅几米至数十米<sup>[9]</sup>。而本区探测的目标层深达数百米, 最浅也有250 m, 必须采用炸药震源深井激发。施工伊始, 采取变观的方式在塌陷 I 区进行了“十”字交叉两个方向的测量, 一方面对陷坑内部进行探查, 了解其成因和现状, 另一方面进行勘探试验, 获取有效数据和最佳观测参数, 指导全区工作。

(4) 塌陷 I 区面积约 8 000 m<sup>2</sup>, 属大型塌陷, 工作时陷坑周边仍在垮塌属活动塌陷, 安全生产极为重要。地震勘查采用炸药震源, 炸药爆炸的能量在陷坑附近也许会造成二次塌陷或次生灾害, 也极易诱发隐伏洞体的加速坍塌<sup>[10]</sup>。为此, 地震开工前先在全区进行了高密度电法扫面, 对地下 100 m 以浅进行摸底、排查, 大致圈定出安全区范围。采盐区陷坑或卤井周边地下只要有洞穴、断裂、裂隙等不稳定地质构造存在, 就会有卤水侵蚀、充填、运移, 而卤水是良导体, 电阻率极低, 很适合高密度电法判别。

(5) 本次地震工作取得了良好的社会效益和经济效益, 并已得到社会的认可。之后, 又于 2006 年 10 月、2009 年 5 月两次对该区进行了地震勘查, 对盐矿怀疑可能有塌陷隐患的多处地段均予以明确否定, 使矿区生产和当地村民生活能够正常有序进行。当然, 随着采盐的继续和采盐规模的扩大, 采区塌陷时刻存在着。为此, 盐矿已在采盐区地表设立多处

沉降监测点进行长期监测, 并保证每隔一、两年进行一次浅层地震反射波法勘探。

本次物探应急工作是浅层地震反射波法有效应用于塌陷灾害中的成功范例。在具备必要的地质和地球物理前提下, 只要方法选择得当, 测线布置科学合理, 严格数据采集过程, 精心数据处理, 严谨推断解释, 地球物理勘探在地质灾害发生、发展的各个阶段定会有其广阔的应用空间。

**参考文献:**

- [1] 刘传正. 地质灾害勘查指南[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [2] 郭建强. 地质灾害勘查地球物理技术手册[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [3] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 山东: 石油大学出版社, 2005.
- [4] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [5] 陈仲侯, 傅唯一. 浅层地震勘查[M]. 成都: 成都地质学院, 1986.
- [6] 孙家振, 李兰斌. 地震地质综合解释教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.
- [7] 张世洪. 勘查地球物理勘查地球化学文集第 21 集浅层地震方法技术应用研究专辑[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [8] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [9] 单娜琳, 程志平, 刘云祯. 工程地震勘查[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 2003.

**THE SHALLOW SEISMIC REFLECTION SURVEY  
IN THE PREDICTION OF THE COLLAPSE**

ZHANG Kai, WANG Qing-song

(Exploration and Technology in Anhui Province, Bengbu 233005, China)

**Abstract:** To solve the problem of sudden collapse in the salt mining area, the authors used two-dimensional shallow seismic reflection method to conduct a comprehensive exploration in the surrounding pit collapse area. The causes of the collapse were detected, the safety area was delineated, and a potential collapse area was predicted successfully 73 days before the collapsing. All this has yielded very good social and economic benefits.

**Key words:** collapse; cavity; shallow seismic reflection method; prediction

作者简介: 张凯(1966 - ), 男, 工程师, 主要从事地球物理及水工环地质研究工作, 公开发表学术论文数篇。