

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2017.03.006

安徽皖江地区页岩气地质调查地震勘探 数据采集技术研究

赵牧华¹, 石刚¹, 张安徽², 武磊彬²

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 2. 安徽省煤田地质局物探测量队, 宿州 234000)

摘要: 通过分析安徽皖江地区地质条件及岩性差异, 利用人工合成记录提取物性参数及研究区主要目的层的地球物理参数。利用室内模拟初步建立该区观测系统, 通过现场试验确定二维地震采集观测系统, 提高类似该区(丘陵地区)的剖面信噪比及分辨率, 采用以低速带调查为基础, 优选激发参数、多串检波器组合压制噪声和合理的观测系统进行野外资料采集, 可取得较好的效果。

关键词: 丘陵地区; 二维地震勘探; 数据采集; 页岩气

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2017)03-203-07

为了满足国家能源安全战略、油气矿权改革、公益性油气基础地质调查引领及地方经济发展的需要, 提高下扬子地区页岩气成藏地质条件与资源潜力认识, 圈定油气远景区、提交有利目标区和勘查区块已成为安徽皖江地区乃至整个华东下扬子地区页岩气地质调查工作的重点。在页岩气基础地质调查阶段, 摸清页岩层的区域空间分布(埋深、厚度及构造形态)是保证具有充足储存空间和有机质的重要条件, 而地球物理勘探是探测页岩气空间分布最有效、最准确的预测方法^[1]。地球物理勘探以不同岩矿石之间物理性质的差异为依据, 利用物理学原理, 观测各种地球物理场时空分布规律, 是深部矿产资源勘查的核心^[2]。应用于页岩气勘探开发的地球物理方法主要有重力、磁法、电磁法(大地电磁测深法、音频大地电磁法、可探源音频大地电磁法、复视电阻率法、谱激电法、广域电磁法、时频电磁法)及地震勘探法等^[3-13]。其中, 地震勘探法不仅能查明页岩区构造、页岩厚度和埋深, 还可以利用地震属性对页岩气敏感属性进行优选、分析和提取, 最终实现对页岩气“甜点”的预测^[3-5, 14-18]。

安徽皖江地区属典型的丘陵地貌, 地形复杂,

既有岩石出露区, 又有河流、沼泽及城镇、厂房, 影响地震激发和接收, 尤其大型河流附近发育的流沙层, 造成数据采集时激发能量衰减较快, 接收信号弱, 野外单炮数据信噪比较低, 能量较弱, 难以满足后期部署需要。针对上述问题, 在安徽皖江地区页岩气勘探中, 采用以低速带调查为基础, 优选激发参数、多串检波器组合压制噪声和合理的观测系统进行野外资料采集, 并取得了较好的效果。

1 地质概况

安徽皖江地区大地构造上属于下扬子陆块, 位于句容—南陵断裂带内南陵盆地南部、宣广盆地西部, 其西北侧为滁河断裂和郟庐断裂, 东南侧为江南断裂。其西北侧紧邻无为盆地, 西南端分布潜山盆地和望江盆地^[19](图1)。

1.1 地层

研究区地层主要归属扬子地层区下扬子地层分区, 东南角属江南地层分区。该区为海陆交互沉积地层, 区内发育寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及新生

* 收稿日期: 2016-08-19 修订日期: 2016-11-10 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查(编号: DD20160180)”和“安徽皖江地区1:5万页岩气地质调查(编号: 12120115100801)”项目联合资助。

第一作者简介: 赵牧华, 1981年生, 男, 高级工程师, 主要从事应用地球物理研究。

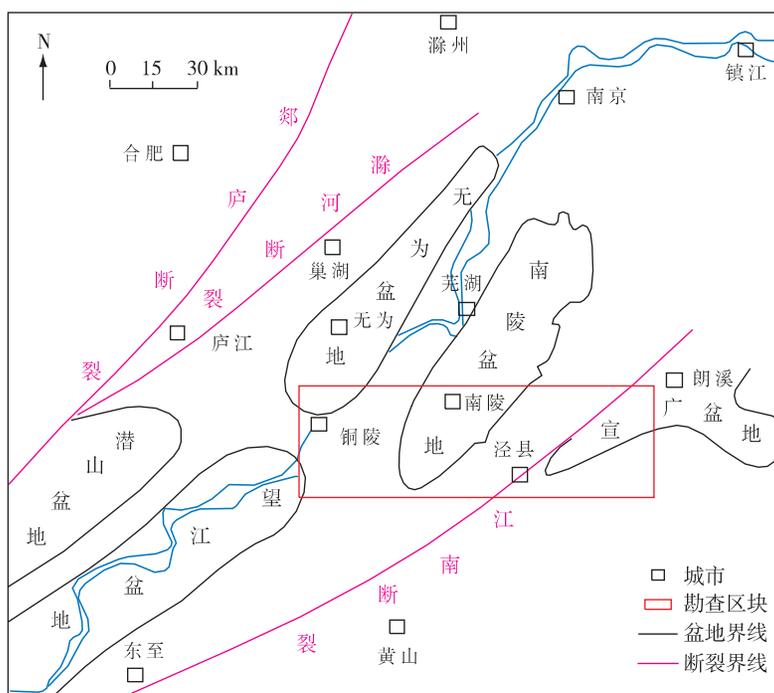


图1 研究区构造及盆地分布示意图(据安徽省区域地质志修编)

Fig. 1 Schematic map showing the structures and basin distribution of the study area (after Regional Geology of Anhui Province)

界地层,沉积总厚度达7 000 m^[19]。

1.2 构造

研究区及邻区构造复杂,已查明不同级别、不同形态褶皱20余个,断层百余条,以NE向构造带占主导。根据野外露头及地质资料,可识别的主要褶皱自北西向东南包括白笏—铜关里背斜、楼牌向斜、葛公镇—横北岭背斜、铜山—宴公堂向斜、寺门口背斜、王胡村向斜、桥头埠—九宫庙背斜和梅林向斜。

在泾县—水东一带,对该区构造格架具有控制作用的主要断裂有周王断裂、江南断裂和旌德—休宁西断裂等^[19]。

1.3 泥页岩

研究区赋存下寒武统、上奥陶统一志留统和中上二叠统3套富有机质泥页岩地层,其中二叠统孤峰组、龙潭组至大隆组硅质、钙质泥页岩厚度较大、分布范围较广,为本次调查的主要目标层系。

2 地震地质条件

2.1 表(浅)层地震地质条件

研究区南部丘陵山区相对高差较大,落差达

300多米,局部地势较陡,地质条件复杂,地表岩性差异明显。南部丘陵地区主要有冲积的粘土层、坚硬的裸露岩石或风化层,横向低降速带变化较大。平原水网地带多为胶泥、砂砾石(或流沙层)和淤泥,激发条件胶泥最好,砂砾石(或流沙层)次之,淤泥最差,且砂砾石(或流沙层)与淤泥可能引起塌孔等问题,成孔较困难。此外,受国道、村庄、森林、大型厂房等影响,地震勘探效果较差。

2.2 深层地震地质条件

本次勘探目的层主要为二叠纪龙潭组富有机质泥页岩。龙潭组是一套含煤沉积地层,以泥岩、粉砂质泥岩沉积为主,夹炭质泥岩、煤层及灰岩。龙潭组在该区埋藏相对较浅,一般为0~2 500 m,研究区东南部泾县—水东一带可见大量露头。龙潭组地层密度低、速度低,与围岩具有较好的波阻抗差异。

已有钻孔资料合成记录显示,煤层纵波速度约为2 000 m/s,上覆钙质页岩纵波速度约3 600 m/s,反射系数达0.55,可形成较强的复合反射波组(T_L 波),可作为该区波组对比追踪的主要标志层。

除第四系外,区内地层之间均为整合或平行不整合接触,自下向上有多层灰岩及砂泥岩相间赋存,波阻抗差异较大,一般可形成连续的强反射。不同地层之间由于岩性、形成时代不同,其沉积条件和压实程度存在差异,地层之间也存在波阻抗差,也能形成连续性反射。这些地层的反射波可作为地震资料解释中的辅助波,有助于准确识别和追

踪目的层反射波,确定断层和地层尖灭等地质现象,用于划分和建立地层层序。

3 正演模拟

利用已有钻孔结合邻区时间剖面,做人工合成记录,提取研究区主要目的层地球物理参数(表 1)。

表 1 地球物理参数
Table 1 Geophysical parameters of the study area

层位	T_0/S	叠加速度/($m \cdot s^{-1}$)	层速度/($m \cdot s^{-1}$)	埋深/m	倾角/ $^{\circ}$	最高频率/Hz	主频/Hz
三叠系	0.170	4 900	4 900	453	40	65	40
二叠系	0.485	5 254	5 100	1 359	40	65	40
下志留统	0.703	5 186	4 950	1 825	30	60	37
奥陶系	0.898	5 268	5 150	2 340	30	55	37
中—上寒武统	1.285	5 396	5 380	3 405	20	50	32
下寒武统	1.475	5 561	5 450	3 808	20	50	32

通过建立地质模型,进行不同道距(20 m、40 m、60 m)、不同最大炮检距(3 600 m、4 200 m、4 800 m、5 400 m、5 990 m)、不同覆盖次数(60、90、120、150)波动方程照明分析。通过正演模拟,结合主要目的层埋深范围、地层倾角变化等,同时兼顾寒武系地层(埋深3 000~4 500 m),认为道距 20 m、最大炮检距5 990 m、覆盖次数不低于 120 次可满足本次勘探需要。

4 数据采集技术

在正演模拟指导下,选取适合研究区的最佳激发、接收参数及适合研究区的观测系统,从而获得较高信噪比和分辨率的地震资料^[20]。

4.1 低、降速带调查

通过低、降速带调查获取地表、浅层的低、降速带厚度及层速度,选取合适的激发层位及替换速度。常见的低、降速带调查,分别为微测井法和小折射法^[21-23]。研究区地形属于丘陵地区,地形起伏较大,砂砾石层成孔困难,因此采用微测井法与小

折射法相结合进行低、降速带调查。

微测井法采用井中激发地面接收。偏移距 0 m,雷管激发点距 0.5 m,采样率 0.25 ms,记录长度 0.1S,前放增益 0 dB,记录格式 SEG-D。

小折射法采用相遇法观测系统施工,接收道数 24 道,排列长度 51 m,炮点偏移距 1 m,坑深 0.5 m,单炮药量 0.05~0.1 kg,采样率 0.1 ms,记录长度 0.5S,前放增益 0dB,记录格式 SEG-D。小折射观测排列为 0,1,2,3,4,6,8,10,12,15,18,23,28,33,36,39,41,43,45,47,48,49,50,51。小折射观测系统如图 2 所示。

利用多种专业软件分析微测井法、小折射法资料,获得各地层中低速带调查解释成果及测线低、降速层厚度(表 2)。

由表 2 可知,第一层速度较低,为低速层,速度为 500~1 500 m/s,厚度为 0.69~4.13 m。第二层速度较高,为降速层,速度为 1 500~2 700 m/s,厚度为 5~11 m。第三层为高速层,速度为 2 500~3 500 m/s。

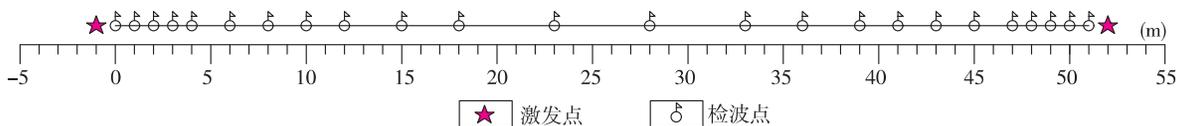


图 2 折射观测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the array of blasting and detecting stations

表2 测线 WJ2015-05 低速带调查成果表

Table 2 Survey results for low-velocity zone of test line WJ2015-05

桩号	高程	潜水面深度/m	H ₀ /m	H ₁ /m	H/m	v ₀ /(m·s ⁻¹)	v ₁ /(m·s ⁻¹)	v ₂ /(m·s ⁻¹)	备注
366	74.35	8.40	3.12	11.14	14.26	856	2 009	2 984	
561	94.28	2.10	1.54	5.46	7.00	980	1640	3 322	
645	87.36	1.90	4.13	11.27	15.40	1059	2075	2 991	微测井
1134	46.28	9.40	2.04	8.04	10.08	823	1571	2 588	
275	40.62	8.40	1.75	8.80	10.55	526	1607	2 527	
518.5	110.28	7.90	1.21	5.58	6.79	1 524	2785	3542	
855	72.50	—	1.88	—	—	1 445	3 506	—	小折射
791	70.33	—	0.69	—	—	1 328	3 180	—	

4.2 激发井深研究

为保证激发能量,在低速带调查的基础上,结合地层岩性、地表地形条件等,选择3个具有代表性的试验点开展激发井深试验。

试验点 S1 位于 WJ2015-05 号测线桩号 518.5 上,为白垩系地层,以黄土、砾石为主。该试验点以北为第四系冲积山间平原,以稻田地为主。根据微测井录井资料,地表为第四系黄土,地下 2 m 以深为砂砾互层。

试验点 S2 位于 WJ2015-06 号测线桩号 486.5 上,为白垩系地层。根据现场成孔记录,潜水面埋藏深度约 8.5 m,表层风化土厚约 1.1 m,下为砾石层,11 m 左右见较坚硬岩石。

试验点 S3 位于 WJ2015-04 号测线桩号 486.5 上,为白垩系地层。潜水面埋藏深度约 4.5 m,表层风化土厚约 1.1 m,下为砾石层,11 m 左右见较坚硬岩石。

试验点 S1,井深分别进行 10 m、12 m、13 m、15 m、18 m 及 20 m(药量 6 kg)试验,试验点 S2,井深分别进行 10 m、12 m、15 m、16 m、18 m 及 20 m(药量 6 kg)试验,试验点 S3,井深分别进行 8 m、10 m、12 m、15 m、18 m 及 20 m(药量 6 kg)试验。

试验点井深能量分析结果(图 3)表明,井深 15 m、16 m、18 m、20 m 激发能量差异较小,井深 10 m、12 m 时激发能量较强。

从试验点井深信噪比定量分析结果(图 4)可知,随井深增加,试验单炮记录信噪比提高。

4.3 激发药量研究

试验点 S1 和 S2 药量分别进行 3.0 kg、4.0 kg、6.0 kg、7.0 kg、8.0 kg 及 10.0 kg(井深 15 m)试验。试验点 S3 药量分别进行 2.0 kg、4.0 kg、6.0 kg、

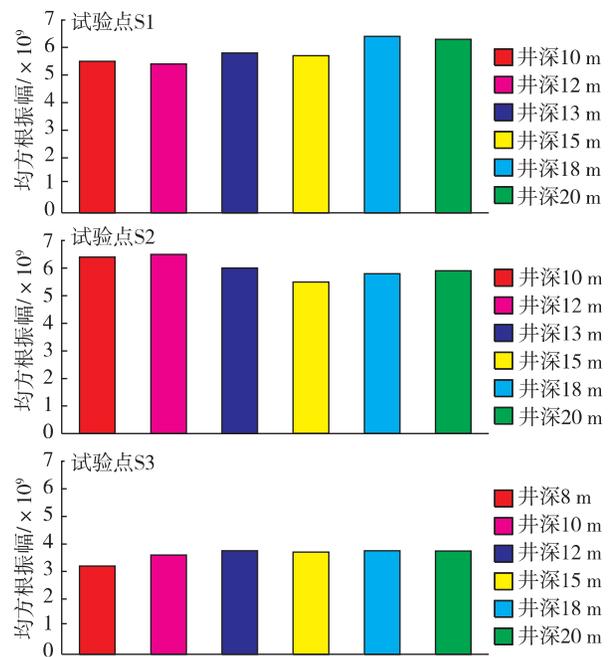


图3 试验点井深能量分析图

Fig. 3 Energy analysis of shothole depth

7.0 kg、8.0 kg 及 10.0 kg(井深 15 m)试验。

从试验点药量能量分析(图 5)可知,2 kg、3 kg 药量激发能量稍弱,8 kg 药量激发能量最强,4~10 kg 药量激发能量区别较小。

从试验点药量信噪比分析(图 6)可知,2 kg 药量激发单炮分析信噪比较低,6 kg 药量激发信噪比较高,4~8 kg 药量激发信噪比居中。

4.4 接收因素研究

(1) 检波器类型

由于研究区地表灰岩出露及第四系覆盖,大部分目的层埋藏较深,资料信噪比较低,不适合使用单道数字检波器接收,而更适合使用多个模拟检波器

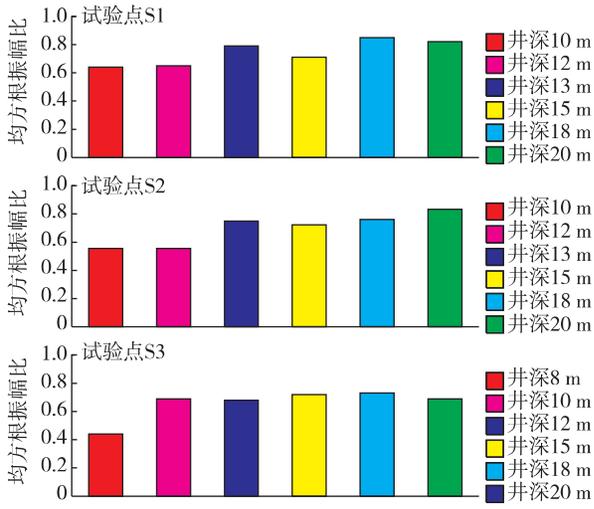


图 4 试验点井深信噪比分析图

Fig. 4 Signal to noise ratio analysis of shothole depth

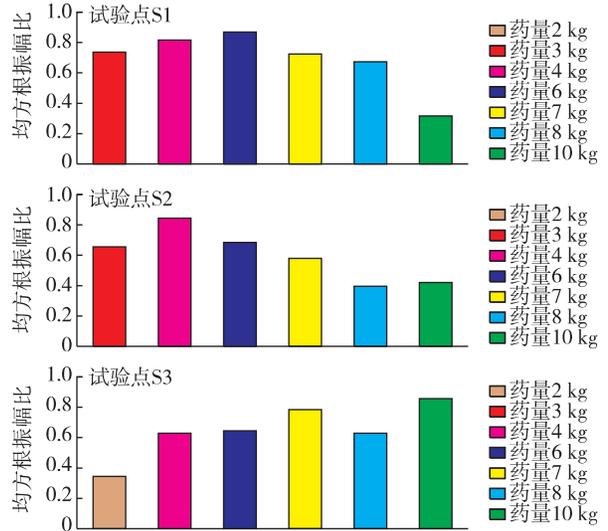


图 6 试验点药量信噪比分析图

Fig. 6 Signal to noise ratio analysis of charge doses

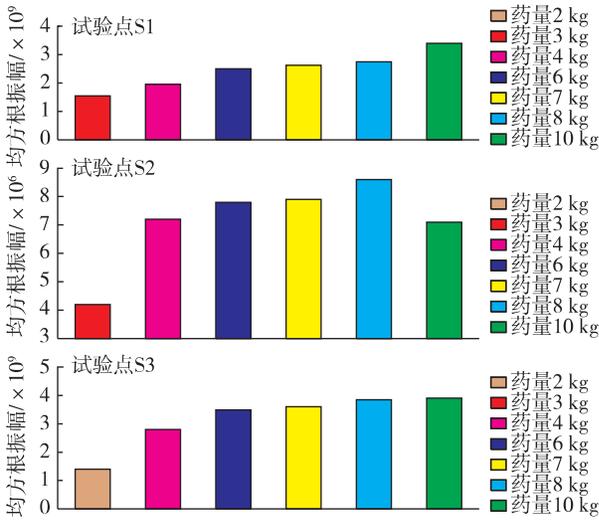


图 5 试验点药量能量分析图

Fig. 5 Energy analysis of charge doses

组合接收,既可提高各深度范围内反射波信噪比,也可压制各种不规则的随机干扰。由于研究区水系发育,需备置防水检波器与压电检波器。研究区地震波主频一般为 20~40 Hz,频宽为 8~80 Hz,为保留低频信号,拓宽资料频带,选用自然频率为 10 Hz 的检波器。

(2)组内高差

地形起伏造成的组内高差直接影响同一道内检波器接收的反射波同相叠加效果,损害有效波的高频成分,同一道内的组合高差必须以确保所要求的频率为原则,引起的时差应小于优势频率的 1/4

周期。

根据研究区实际,为保证同一道内检波器接收反射波同相叠加效果,在该区保护有效波的最高频率为 80 Hz,低降速层速度按 $V=800 \text{ m/s}$ 计算,允许组内高差为 2.5 m。

因研究区表层速度变化较大,拟定该区检波器组合高差 $< 1 \text{ m}$,保证同道的叠加效果。

(3)组合方式

研究区干扰波发育,干扰波类型多、能量强,尤其陡峭山体带来的侧面干扰及次生干扰更强,影响范围更广。野外组合的目的是压制环境噪声,组合图形以小组合为主。组合基距一方面大于环境噪声的相关半径,对环境噪声有较好的压制效果,另一方面须确保组合基距不会对视速度较低的绕射和侧面波产生消极影响。

根据施工经验及邻区施工参数,本次施工采用 12 个检波器面积组合,组内距 1 m,组合基距 L_x 为 3 m, L_y 为 2 m。检波器组合中心对准测量桩号,组内高差 $\leq 1 \text{ m}$ 。部分区域无法按正常组合埋置检波器时,采用等比例缩小的方式埋置。

4.5 仪器因素研究

仪器的高截频率滤波器,又称去假频滤波器,用于滤掉高频干扰信号,高截频率由采样间隔决定^[20],其关系式如下。

$$f_n = 1 / (4 \times \Delta t)$$

式中: Δt 为时间采样间隔, s; f_n 为高截频

率, Hz。

为避免产生时间域假频, 当采样间隔 Δt 为 2 ms 时, 相应的高截频率为 125 Hz; 采样间隔 Δt 为 1 ms 时, 对应的高截频率为 250 Hz。研究区主要目的层位的地震反射波主频约为 35~65 Hz, 因此 1 ms 采样率可满足要求。

区内岩层按保守平均速度 3 000 m/s 计算, 记录长度 6.0 s, 勘探深度可达 7 500 m, 预测目的层最深为 4 000 m。

4.6 采集参数确定

根据正常模拟、低降带调查、激发井深、激发参量、接收因素及仪器因素研究, 采用以下参数要求。

(1) 在基岩出露地区, 井深药柱顶面深度应 > 12 m, 药量 8 kg, 遇村庄房屋药量适度减小, 遇山顶药量适度增加。

(2) 在白垩系出露区, 根据低速带调查结果, 井深药柱顶面在高速层界面下 6 m, 药量 8 kg, 遇村庄房屋药量适度减小。

(3) 第四系覆盖区, 在潜水界面下 6 m 激发, 药量 6 kg, 遇村庄房屋药量适度减小。

(4) 在保证资料品质和施工安全前提下, 砾石区采用相应的井数和井深进行多井组合。

(5) 接收参数, 20DX-10Hz 检波器 12 个矩形面积组合, 组内高差 < 1 m, 组合基距 L_x 为 3 m, L_y 为 2 m (长边垂直测线), 组内距 1 m。

(6) 观测系统, 5990-10-20-10-5990, 150 次覆盖, 600 道接收, 20 m 道距, 40 m 炮距。

(7) 仪器参数, 428XL 遥测数字地震仪, 前放增益 12 dB, 采样间隔 1 ms, 记录长度 6S。

5 结论

(1) 以微测井法、小折射法结合低、降速带调查, 可查明有利激发层位分布范围和特征, 有利于提高单炮的信噪比。

(2) 采用检波器组合技术, 可更好地压制干扰, 有利于提高单炮信噪比。

(3) 可通过激发井深、激发药量现场试验分析及仪器因素研究, 可最终确定数据采集系统及接收参数。

参考文献

[1] 刘振武, 撒利明, 杨晓, 等. 页岩气勘探开发对地球物理

技术的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 810-818.

[2] 滕吉文. 强化第二深度空间金属矿产资源探查, 加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 729-748.

[3] 滕龙, 徐振宇, 黄正清, 等. 页岩气勘探中的地球物理方法综述及展望[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(1): 61-66.

[4] 刘伟, 贺振华, 李可恩, 等. 地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用和前景[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(6): 68-73.

[5] 昌书林, 秦启荣, 周毅. 地球物理技术在页岩气勘探过程中的应用研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2012, 14(4): 10-12.

[6] 刘光鼎, 郝天珧, 刘伊克. 重磁研究对认识盆地的意义[J]. 地球物理学进展, 1996, 11(2): 1-15.

[7] 闵刚, 王绪本, 张兵, 等. AMT 法在黔东北岑巩地区的页岩气勘探试验[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 815-824.

[8] 刘祜, 魏文博, 程纪星, 等. 音频大地电磁测深在江西修武盆地页岩气目标层研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 39(5): 904-908.

[9] 许传建, 徐自生, 杨志成, 等. 复视电阻率法(CR)探测油气藏的应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 31-36.

[10] 苏朱刘, 吴信全, 胡文宝, 等. 复视电阻率法(CR)在油气预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(10): 467-471.

[11] 郑冰, 李帝铨. 广域电磁法和大地电磁法在中国南方某页岩区块的对比试验[J]. 油气地球物理, 2015, 13(3): 45-49.

[12] 张春贺, 刘雪军, 周惠, 等. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探进一步研究[J]. 石油物探, 2015, 54(5): 627-634.

[13] 张春贺, 刘雪军, 何兰芳, 等. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3173-3183.

[14] 侯明汉. 桑植—石门地区页岩气地震勘探采集技术[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(5): 6-9.

[15] 谢治国, 王巧丽, 曾祥亮, 等. 重庆酉阳板溪页岩二维地震勘探研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2012, 9(8): 21-24.

[16] 李志荣, 邓小江, 杨晓, 等. 四川盆地南部页岩气地震勘探新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 40-43.

[17] 王延光, 杜启振. 泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 494-501.

[18] 陈祖庆. 海相页岩 TOC 地震定量预测技术及其应用—

- 以四川盆地焦石坝地区为例[J].天然气工业,2014,34(6):24-29.
- [19] 安徽省地质矿产局.安徽省区域地质志[M].北京:地质出版社,1987.
- [20] 陆基孟,王永刚.地震勘探原理[M].北京:中国石油大学出版社,2011.
- [21] 付小虎,任小丽,蒲青.低速带调查在三塘湖盆地中的应用[J].科技信息,2012,14(4):363-364.
- [22] 杨德义,牛良生.用简易微测井法进行低速带调查[J].中国煤炭地质,1997(5):68-69.
- [23] 杨德义,彭苏萍,常锁亮.地震勘探常规低速带调查方法应用中的问题探讨[J].物探与化探,2003,27(5):387-390.

Acquisition technology study of shale gas seismic prospecting data in the Wanjiang region, Anhui Province

ZHAO Mu-hua¹, SHI Gang¹, ZHANG An-hui², WU Lei-bin²

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;

2. Geophysical Exploration and Survey Team, Anhui Bureau of coal, Suzhou 234000, China)

Abstract: Based on integrated analysis of geological condition and lithological differences in the Yangtze River valley in Anhui Province, physical parameters and main layer parameters were extracted through synthetic records. The indoor simulation was employed to preliminarily establish the initial observation system in this area, and then a 2D seismic acquisition and observation system was determined using in-site test. The research shows that better exploration results can be obtained through increasing signal-noise ratio and resolution observation, low velocity zone investigation based optimal excitation parameters, multi series geophone array noise suppression and reasonable observation system for field data acquisition in the profiles of hilly areas. Therefore, this study has certain significance to seismic data acquisition technology during shale gas geological survey in hilly areas.

Key words: hilly area; 2D seismic exploration; data acquisition; shale gas