

俄罗斯 CF-3 超深井钻探工程的启示

鄢泰宁¹, 张涛¹, 刘天乐^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 圣彼得堡国立矿业大学, 俄罗斯 圣彼得堡 199106)

摘要:在我国开展“中国大陆科学钻探工程选址与钻探试验”前期研究的背景下,回顾归纳了前苏联 CF-3 超深井科学钻探工程的巨大成就及其存在问题。通过对其经验教训的再思考,论述了我国未来超深科学钻探工程中应重视的科技目标与工程管理、科学选址、防治井斜和配套钻探新成果等问题,并得出相关结论。

关键词:俄罗斯 CF-3 超深井; 大陆科学钻探; 超深钻探; 科技目标; 工程管理

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)09-0001-05

The Enlightenment on Drilling Engineering of Russia CF-3 Ultra Deep Well/YAN Tai-ning¹, ZHANG Tao¹, LIU Tian-le^{1,2} (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Russia St. Petersburg National University of Mining, St. Petersburg 199106, Russia)

Abstract: Under the background of “the Chinese continental scientific drilling project location and drilling test” in China, the article reviews and summarizes the great achievements and problems of drilling engineering of Russia CF-3 ultra deep well. Based on the rethinking on the experience and lessons, some issues are discussed, which should be paid attention in future ultra-deep scientific drilling project in China, such as scientific target and engineering management, scientific location selection, well deviation control and new drilling achievements, the related conclusion are presented.

Key words: Russia CF-3 ultra deep well; continental scientific drilling project; ultra deep drilling; scientific target; engineering management

勤劳智慧的中国人在 19 世纪 30 年代就钻成了世界最深的超千米钻孔,欧洲人在一个世纪后才打破这个纪录^[1]。但近现代以来,我国的钻探技术落后了。目前世界最深的钻井记录是俄罗斯人在 CF-3 井创造的 12262 m,超过美国地质深钻纪录两千多米^[2]。该井自 1970 年 5 月开钻至 1992 年结束钻进,历时 22 年,既取得了巨大成就,也留下一些教训^[3]。目前我国为落实《国务院关于加强地质工作决定》的战略任务,提出了“地壳探测计划”并开展“中国大陆科学钻探工程选址与钻探试验”前期研究,有必要对俄罗斯 CF-3 超深井钻探工程的成果及问题进行再思考,并从中获得某些启示。

1 关于 CF-3 超深井的科技目标和工程管理

1.1 CF-3 超深井的立项带有明显的“冷战”色彩

20 世纪 50~80 年代,美苏两个超级大国处于激烈的冷战对抗和竞争中。先是苏联成功发射第一颗人造卫星震惊世界,然后美国的“阿波罗计划”首次实现了载人登月……。在航天热和信奉科技万能的背景下,美国人提出了钻穿地壳获取上地幔样品

的想法,并为深海钻探计划(DSDP)建造了“格洛玛·挑战者”号科学钻探船。几年来 DSDP 在各大洋钻孔 1092 口,为验证大陆漂移和海底扩张理论,为创建板块构造学说立下了丰功伟绩,使地质学作为一门科学获得了新的生命。

在美国大洋钻探成就的刺激下,苏联在 20 世纪 60 年代提出了“地球深部研究和超深钻探”计划,其着眼点不在海洋,而在大陆^[2]。当时的苏共中央总书记尼基塔·赫鲁晓夫批准了这个计划。当然他不是出于科学目的,而是不想落后于美国。于是,政治色彩浓厚、设计深度 15000 m 的世界最深科学钻探项目就这样上马了。

1.2 为政治目的而中途停钻造成钻探施工后患

CF-3 井于 1979 年 6 月钻达井深 9584 m,打破了美国曾创造的 9583 m 世界纪录。1983 年又创造了新的井深纪录 12066 m。这时离该井后来的最终深度只差 196 m。但为迎接 1984 年在莫斯科召开的第二十七届世界地质大会,为了借大会向国际社会宣传苏联成果,让与会者参观 CF-3 超深井钻探现场和来自地下深部的岩心,决定中途停钻,直至

收稿日期:2013-03-04

基金项目:国土资源部“深部探测技术与实验研究专项”的“科学超深井钻探技术方案预研究”(SinoProbe-05-06)

作者简介:鄢泰宁(1945-),男(汉族),江西人,中国地质大学(武汉)教授、博士生导师,俄罗斯外籍院士,享受国务院特殊津贴,探矿工程专业,长期从事钻探工程的教学与科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, tnyan@cug.edu.cn。

1984年9月才恢复钻进。恢复钻进后只钻了9m便在12000m以下发生了断钻杆事故,经过7个月处理不得不重新造斜钻进。在经历了“黑色的1984年”之后,又用了6年时间井深才接近12000m,于1990年达到最大深度12262m。又经历了几次事故之后,用尽各种现代技术都无法再增大井深了,于是1992年不得不结束钻进^[2]。

为在世界地质大会上展示苏联成就的政治目的而长时间中断钻进,违背了深井必须连续作业的常规,给CF-3井继续钻进留下后患,这是后人必须吸取的教训。

1.3 苏联解体使CF-3超深井的财政支持中断

俄罗斯原计划将CF-3井建成世界少有的天然实验室,借助仪器监测地壳深部的地质过程。但是苏联解体后这个宏伟的科学计划夭折了。由于财政支持中断,1995年全部科研工作停顿,被迫封井。性能优秀的乌拉尔-15000型钻机和其它设施长期不运行已开始生锈,钻探生产体系处于无人管理状态并开始对周边环境造成影响。2007年,俄罗斯矿业和财产鉴定专门委员会考察CF-3井钻探现场后决定拆除钻井设备。只有相当于20层楼高的巨大钻塔将长期竖立在科拉半岛,作为俄罗斯人引以自豪的深井钻探世界纪录纪念碑^[2]。学者们普遍反对封闭该井。他们不明白,为什么国家放弃在此建立地壳地质过程实验室的重大科学目标。

综上所述,如果我国实施“地壳探测计划”并开展超深大陆科学钻探工程试验,必须吸取CF-3井钻探工程的教训,应该为项目确立明确的科技目标、详细的连续作业计划和长期的财政预算。

2 关于超深井井位的科学选址

钻超深井面临的主要问题是深部的高温。按照平均地温梯度 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 计算,则15000m井底温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果按Kutasov在大量资料基础上得出的钻井液循环温度经验公式:

$$T_m = 58.82 + 0.01683h + 0.00315H$$

式中: h ——计算点深度,m; H ——井底深度,m。

计算得出井底循环钻井液温度为 $358.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这样高的温度常规钻探工具无法承受,对井下测量的电子仪表而言更是“致命的”。因此必须选择一个地下岩层温度较低的地方。俄罗斯地质学家David Huberman英明地把CF-3井选在科拉半岛古老的结晶岩板块。地球物理报告指出,十亿年前科拉板块就开始自行变冷,地温梯度约为 $0.8\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/100$

m。不过由于深部岩层中放射性元素增多,10000m之后的地温梯度为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[2]。

为得到真实温度值,俄罗斯曾用安装在钻杆上的自控温度计测量井内温度并作出曲线图(图1)^[4]。可见,实测井内温度梯度平衡带位于5000m深处,温度只有 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$,10000m处为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,12000m为 $212\text{ }^{\circ}\text{C}$,而不是预计的 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。从而为钻探工作的成功创造了很好的条件。

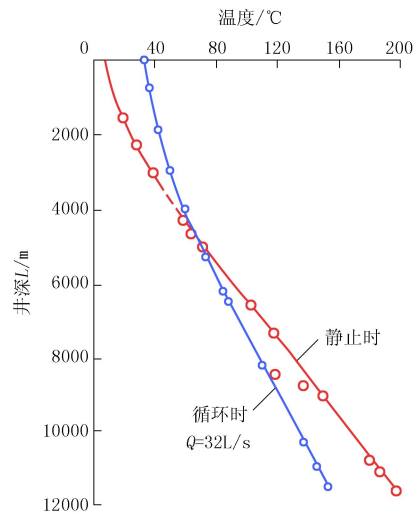


图1 井内温度分布图

俄罗斯CF-3井的实践证明,绝非地壳中处处温升梯度都为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,只要地质学家进行科学选址,井底的高温威胁是可以回避或减弱的,可为钻探工作减少许多困难并大大降低成本。

3 超深井轨迹弯曲的危害和事故处理

超深钻探的一大难题是钻孔弯曲。由于深部岩层更破碎,软硬夹层的情况更复杂,岩石的各向异性更明显,所以井眼轨迹必然出现偏斜。

CF-3井的井身仅在5000~6000m以浅的井段(元古代岩层)具有圆形截面,井径接近于额定值。但仍有10%~12%的区域由于构造的破坏作用使井径扩大,井身呈复杂的形状。而在5000~7000m(太古代岩层)及其以深的区域,井身则明显呈椭圆形截面,其短轴接近于额定直径,而长轴超过额定直径1~2倍,最大处的椭圆长短轴比例达3.7:1^[2]。因此,在弯曲井段起钻时很容易在长轴方向上发生卡钻事故。这类区域已占7000m以深井身剖面的25%。CF-3井井身横断面形状随井深变化的情况如图2所示。图中画出了自2000~12000m的井身剖面示意图,并用直方图表明了不同深度的井身容积,单位为 $\text{m}^3/250\text{ m}$ 。可以看出,

在7000~8000、9000~9700和10000m之后井身容积增大更多。井深超过7000m之后地质条件特别复杂,钻遇强度较小的裂隙性、带少量硬夹层的片麻岩、闪岩,椭圆形井身出现很多空洞,使一系列恶性井内事故频发,无法正常钻进。井深10000m以后,井内情况更加复杂,钻进工艺的每一步都要经过小样试验和风险分析。

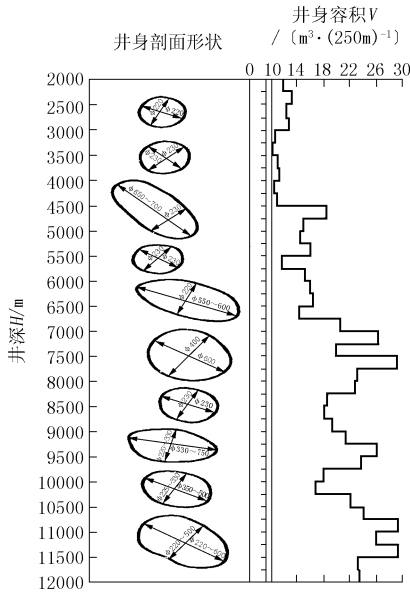


图2 CT-3井井身剖面形状及其容积随深度变化的情况

实践证明,上部井段基本是稳定的,而下部太古代岩层在水动力和机械外力作用下更容易出现井壁坍塌使井径增大,并使椭圆长轴方向的尺寸产生明显变化^[5,6]。为此,CT-3井不得不采用复杂的套管结构来护孔,其设计和实际的井身结构如图3所示。为了保护井壁安全和防止事故,既使用了活动套管,又把最后一层套管下到了8770m,比设计值

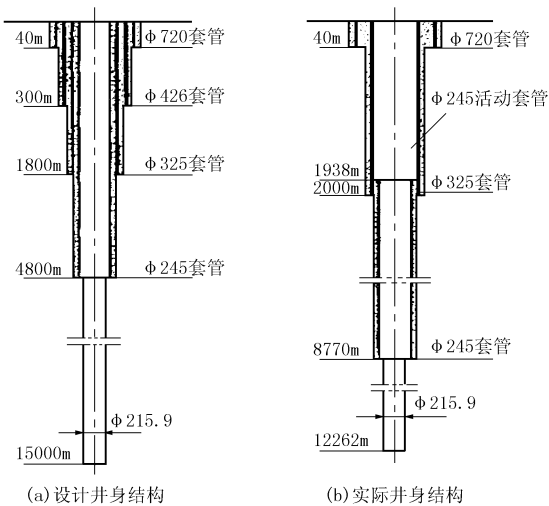


图3 CT-3超深井的计划(左)和实际(右)井身结构

将近加深了4000m。为此,增加了许多辅助作业时间和施工成本。

为处理复杂的断钻杆事故,俄罗斯钻探工程师们多次用侧钻的办法在不进行井内架桥的情况下钻出新井身,以避开无法继续处理的事故井段。CT-3井曾成功地在7700m以下钻了3个侧孔,加上其它纠斜孔,CT-3井内的孔身总数达14个。从CT-3井身的垂直投影示意图(图4)可以看出,虽然主孔1号孔曾达到11662m,但因多次出现无法处理的恶性事故,为了钻至设计深度15000m,只能分别从9350、7720和10140m处侧钻出新的2~4号孔,其中只有2号、3号孔深度超过了12000m。CT-3井井身轨迹的水平投影示于图5。由于地层

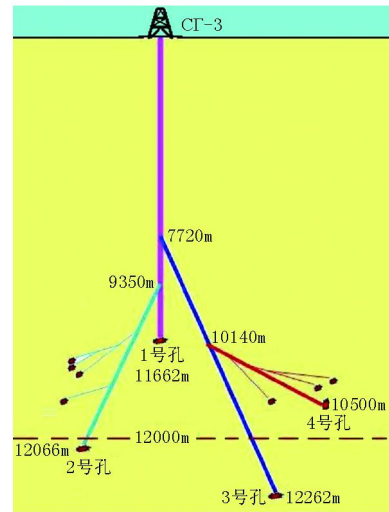


图4 CT-3超深井井身造斜情况的垂直投影示意图

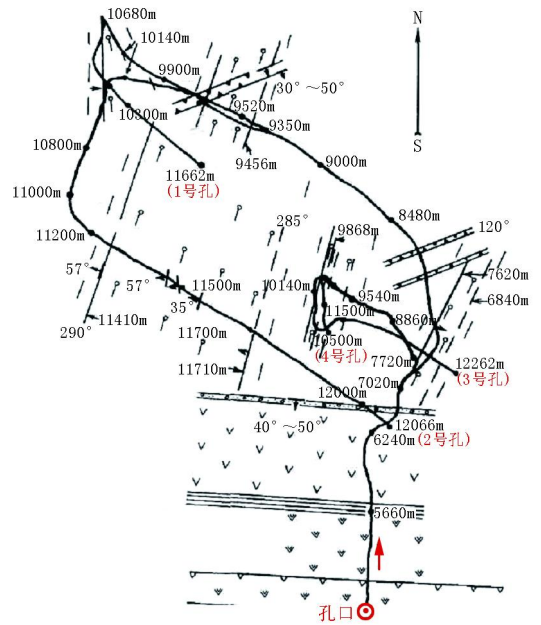


图5 CT-3超深井井身轨迹的水平投影图

造斜性能的影响,主孔和侧钻孔都具有左旋的特点。

图4、图5显示的CF-3井井身轨迹复杂程度从一个侧面说明了为什么该超深井钻至12262 m用了22年时间。也为我们准备从事超深井科学钻探的后来人留下了一条重要启示——必须高度重视超深井轨迹弯曲的危害并作好防治井斜和处理事故的预案。

4 超深科学钻探工程必须有一整套钻探新成果作为技术支撑

CF-3超深科学钻探工程由俄罗斯自然科学院Д.М.古勃曼院士领导,由苏联地质部专门组成的科拉地质勘探联合体(从1986年起称为地球深部联盟)实施。立项之初提出了“地质成果+钻探现代化”的科技目标,针对将面临的高温高压环境、强烈钻孔弯曲、钻杆和套管损坏严重、取心率低等难题,明确了完全采用本国技术和工艺实施超深钻探的指导思想。因为在坚硬结晶岩中钻超深井是前人没有干过的事情,所以为了达到前所未有的深度必须有一整套钻探新成果作为技术支撑。苏联科研和工业部门在比较短的时间内研发生产了30多种新型钻探技术与装备。

4.1 研制了“乌拉尔-15000”新型钻机

开始钻进时CF-3井使用的是石油、天然气勘探开采领域批量生产的“乌拉尔4Э”型钻机(起重能力2000 kN)和轻合金钻杆。用了4年时间钻到井深7263 m,然后更换为超深井专门研制的“乌拉尔-15000”型钻机。其设计井深为15000 m,起重能力4000 kN,钻井泵的压力为40 MPa。该钻机功率大,可靠性高,带有自动升降机构,在钻塔高68 m(立根长度33 m),自动拧管的条件下,升降12000 m钻杆柱需16~18 h^[3,7]。

该钻机通过直流驱动实现了钻头给进和其它基本作业过程的无级调节,配合使用涡轮钻进技术,使钻探效率提高几倍^[8]。整个钻进工艺实现了可视化,操作员在操纵台能及时了解钻头钻速并控制钻进过程^[4]。正是有了这种当时最现代化的钻机,才可能钻达地壳深部12262 m。

4.2 新型多级涡轮钻具

总长46 m的新型多级涡轮钻具与“乌拉尔-15000”钻机配合使用,实现了只让钻头回转而整个钻杆柱不回转的超深井钻进模式。为该超深井专门设计的带油浸密封轴承的耐高温低速涡轮钻具可稳定工作在80~200 r/min的范围内,或者只以2~40

r/min的慢速回转^[7,9]。允许其工作指标超过设计值15%~20%,在超深条件下允许短时间超过70%~100%^[2,3,8]。

研制了能在地表有效监测和传输井下信号并控制涡轮钻具的系统,并用于生产实践^[10]。其工作原理是以钻具水力通道作为信号通道,通过测量与被控参数成正比的钻井液压力脉冲来监控涡轮钻具的工作状态^[4]。没有信号监测和传输系统,井底动力机实际上不可能钻至8000~9000 m以深。

4.3 高可靠性轻合金钻杆

由于CF-3超深井内钻杆柱在钻井液中的总质量达200 t,所以必须采用专门研制的高可靠性轻(铝)合金钻杆。它是创造世界超深井纪录的关键技术之一。

铝合金的弹性模量是钢的1/3,而比强度(断裂强度极限与密度之比)却是钢的1.5~2倍。在钻机能力一定的条件下,用轻合金钻杆能钻达钢钻杆无法达到的深度^[8]。图6给出了目前世界上钢、铝合金和钛合金三类钻杆的最大允许使用长度(理论值),其中实线、虚线对应于不同的泥浆密度。可见,在同等条件下铝合金钻杆适用的井深最大,钛合金次之,钢钻杆最小。铝合金在腐蚀环境中的稳定性好,与井壁的摩阻小,可减轻起下钻阻力,节省20%~25%的起下钻时间。而且铝合金钻杆的弯曲应力远小于钢钻杆,便于侧钻;其无磁特性方便随钻测量仪器的使用;铝合金钻杆内泥浆的流动阻力小,可提高钻头的水功率。高可靠性铝合金钻杆采用梯形丝扣与钢接头连接,设置了内支撑端面 and 锥形配合面,通过高温装配工艺实现过盈配合,从而明显提高接头的抗疲劳强度^[11]。CF-3井中铝合金钻杆

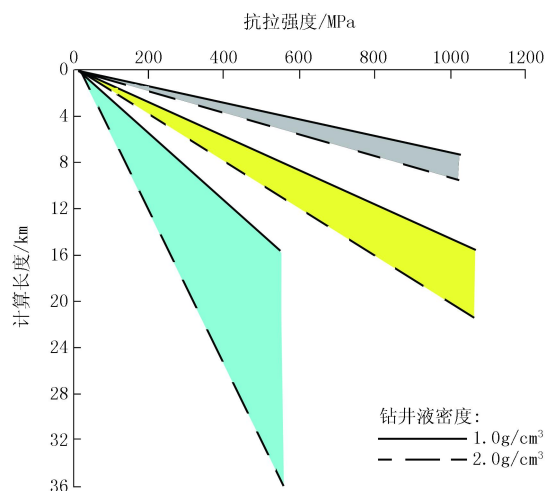


图6 三类钻杆最大允许使用长度(理论值)

的最大磨损量出现在7000~8000 m井段,其中钢接头最大磨损量6.8 mm,而在钢接头保护下铝合金钻杆本体的最大磨损量仅为0.92 mm^[2]。

4.4 新型取心钻具

钻得越深把岩心样品提至地表的难度越大。在超深钻进条件下,岩心一旦形成并从井底岩层母体中分割出来后,上覆几公里厚岩层产生的强大压应力突然释放将使其发生爆裂。裂成碎块状的岩心进入岩心管,并在钻进过程中不断被磨损。通常保存下来的岩心不超过所钻岩心总量的5%~10%。为了防止这种现象发生,设计了基于井底水力输送岩心进入岩心仓工作原理的新型取心钻具,可有效保护已磨损的岩心并把它们提升至地面,保障全井范围内达到较高的岩心采取率^[9]。使超深条件下的岩心采取率比传统方法提高了1~2倍。CG-3超深井使用新型取心钻具共取出900箱岩心样品。^[1,10,11]

此外,CG-3超深科学钻探工程项目还研制了一系列具有不同功能的非标准工具(扩孔器、校准器、防事故钻具等)^[2,9]。

5 几点结论

CG-3超深科学钻探工程取得了举世瞩目的成就,创造的世界纪录至今无人打破。我们在学习其经验的同时,也必须吸取其教训,在“中国大陆科学钻探工程”前期研究中重视以下问题。

(1)作为将来中国的超深大陆科学钻探工程,必须事先有非常明确的科技目标、详细的连续作业计划和长期的财政预算。

(2)井位的科学选址可以在相当程度上减轻高温高压的影响,对于超深井钻探至关重要。

(3)必须高度重视超深井轨迹弯曲的危害并作

好防治井斜和处理事故的预案。

(4)超深科学钻探工程必须根据所选井位地层条件提出一整套钻探预研究成果作为技术支撑:

①研制具有升降作业、操作过程自动化和可视化功能的大载重能力新型钻机;

②研制强度高、质量轻的轻合金钻杆柱;

③研制高性能的热稳定、减阻钻井液体系和固井液体系;

④研制可打捞式岩石破碎工具、井底动力机和高可靠性取心工具;

⑤研制高温高压条件下井内钻探信号采集、处理、远距离传输与钻进工艺自动控制系统。

参考文献:

- [1] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2001. 1-142.
- [2] Николай Н. А. Прикоснуться к мантии[M]. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1997, (6): 92-96.
- [3] 王达, 张伟. 俄罗斯深钻技术概况和特点[J]. 探矿工程, 1995, (1): 53-55.
- [4] 鄢泰宁, 胡郁乐, 张涛. 检测技术及钻井工程仪表[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2009. 103-199.
- [5] 张杰, 鄢泰宁. 小井眼钻具升降产生的孔内波动压力[J]. 煤田地质与勘探, 2009, (4): 77-80.
- [6] 李田军, 鄢泰宁. 动力水头对钻具轴向力的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2010, (6): 79-80.
- [7] (苏) E. A. 科兹洛夫斯基. 科拉超深钻井(下)[M]. 张秋生, 译. 北京: 地质出版社, 1989. 40-95.
- [8] И. С. Афанасьев и др. СПРАВОЧНИК по бурению геологоразведочных скважин[M]. Санкт-Петербург, 2000.
- [9] Н. В. Соловьев и др. БУРЕНИЕ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН[M]. Высшая школа, 2007.
- [10] 鄢泰宁, 张杰. 基于小波分析的钻探孔内工况识别技术[J]. 煤田地质与勘探, 2010, (5): 77-80.
- [11] 鄢泰宁, 薛维. 高可靠性铝合金钻杆及其在超深井和水平井中的应用[J]. 地质科技情报, 2010, (1): 112-115.

黔南地区页岩气勘探目标层锁定

《中国矿业报》消息 由贵州省地调院承担的《贵州省黔南地区页岩气资源调查评价》项目日前通过评审验收,专家组对该项目所取得的成果给予了充分的肯定。

据了解,该项目是由贵州省国土资源厅立项并组织实施的《贵州省页岩气资源调查评价》项目中的一个子项目。贵州省地调院接到任务后,迅速组织精干力量开展工作。通过努力,该院取得了以下认识和成果:一是确定了黔南地区寒武系渣拉沟组、牛蹄塘组,泥盆系火烘组,石炭系打屋坝组4

个页岩气主力目标层系,并初步评价了其资源潜力。二是提出了寒武系牛蹄塘组、石炭系打屋坝组是黔南地区最具勘探潜力的页岩气目标层。其中,石炭系打屋坝组含气性现场解析取得重大突破,现场解析含气量平均大于1.5 m³/t。三是初步计算了寒武系牛蹄塘组、石炭系打屋坝组远景区总资源量为1.9万亿 m³(包括有利区),可采资源量为0.34万亿 m³。四是初步掌握了页岩气调查评价的工作方法及手段。