

松辽盆地科学钻探工程松科二井东孔 上白垩统地球物理测井科学成果

邹长春^{1, 2)}, 张小环^{1, 2)}, 赵金环^{1, 2)}, 彭 诚^{1, 2)}, 张淑霞^{1, 2)}, 李 宁^{1, 2)},
肖 亮^{1, 2)}, 牛一雄³⁾, 丁娱乐⁴⁾, 秦宇星⁴⁾, 林 峰⁴⁾

1)中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

2)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学, 北京), 北京 100083;

3)中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 4)中国石油集团测井有限公司天津分公司, 天津 300280

摘要: 松辽盆地科学钻探工程是围绕地球深部资源、古环境与古气候等一系列重要地球科学问题而实施的重大科学工程。作为该工程的主体钻孔, 松科二井东孔设计为松辽盆地最深钻孔, 设计深度 6 400.0 m, 计划穿透白垩系地层、钻至盆地基底。由于上白垩统井段取心量非常少, 因此地球物理测井的作用尤为重要。该孔正式开钻后, 采用先进的成像测井设备对一开和二开钻井井段(上白垩统井段)先后实施 4 次裸眼井综合测井和套管井测井作业, 并系统地开展测井综合评价, 取得以下科学成果: (1)原位获取了常规测井、特殊测井和固井质量检查测井资料共 20 种, 资料丰富、质量优良, 建立了上白垩统连续的岩石物理参数标准剖面; (2)完成了上白垩统地层划分、岩性识别、沉积和构造精细解释; (3)识别出泉头组油气储层、嫩江组和青山口组烃源岩层、嫩江组高放射性异常层, 以及上白垩统地热开发潜力层; (4)探索了青山口组古气候分析的有利测井指标; (5)及时提供准确的井径、钻孔轨迹和固井质量等关键钻探工程信息。研究成果对于松辽盆地地球物理勘探科学“标尺”建立、古环境与古气候研究、钻探工程施工起到至关重要的作用, 为整个钻探工程科学目标的实现奠定良好基础。

关键词: 松辽盆地; 大陆科学钻探工程; 松科二井东孔; 上白垩统地层; 地球物理测井

中图分类号: P534.53; P631.8 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.101602

Scientific Results of Geophysical Logging in the Upper Cretaceous Strata, CCSD SK-2 East Borehole in the Songliao Basin of Northeast China

ZOU Chang-chun^{1, 2)}, ZHANG Xiao-huan^{1, 2)}, ZHAO Jin-huan^{1, 2)}, PENG Cheng^{1, 2)},
ZHANG Shu-xia^{1, 2)}, LI Ning^{1, 2)}, XIAO Liang^{1, 2)}, NIU Yi-xiong³⁾,
DING Yu-jiao⁴⁾, QIN Yu-xing⁴⁾, LIN Feng⁴⁾

1) School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083;

3) Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037;

4) Tianjin Branch, CNPC Logging, Tianjin 300280

Abstract: The Continental Scientific Drilling Project in the Songliao Basin, a major scientific project, was aimed at solving a variety of scientific problems involved in resources on deep strata, paleoclimate and paleoenvironment. As the main borehole of this project, the SK-2 East Borehole was designed to reach a depth of 6 400 m to penetrate the Cretaceous strata until reaching the base of the basin. Geophysical logs played an

本文由中国地质调查局地质调查专项(编号: 12120113017600)、国家自然科学基金委重大项目专题(编号: 41790455-1)和中国地质调查局公益性基础地质调查项目(编号: DD20179362)联合资助。为中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展第八名“松辽盆地资源与环境深部钻探工程(松科 2 井)三项技术破世界纪录”的成果之一。

收稿日期: 2018-10-10; 改回日期: 2018-10-15; 网络首发日期: 2018-10-18。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 邹长春, 男, 1969 年生。博士, 教授, 博士生导师。主要从事岩石物理、测井与井中物探、非常规能源与资源勘探、科学钻探等领域的教学和科研工作。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: zoucc@cugb.edu.cn。

important role in the subsequent geoscience researches because very few core samples were recovered over the Upper Cretaceous intervals (i.e., Spud 1 and Spud 2). After the borehole was officially drilled, 4 uncased and cased hole logging operations were carried out in the Upper Cretaceous intervals using advanced imaging logging tools. Comprehensive log evaluation was implemented systematically. The preliminary scientific results were summarized as follows: (1) Abundant logs including conventional logs special logs and CBL logs (more than 20 parameters) were obtained in situ, and continuous and standard petrophysical parameters profiles of the Upper Cretaceous interval were established; (2) Stratigraphic division, lithological identification and fine interpretation of sediments and structures were completed; (3) Hydrocarbon reservoirs in the Quantou Formation, source rocks in the Nenjiang and Qingshankou Formation, abnormally high radioactivity interval in the Nenjiang Formation, and potential geothermal development layers over the Upper Cretaceous strata were identified; (4) Favorable geophysical log indexes for paleoclimate analysis in the Qingshankou Formation were studied; (5) The key drilling engineering information including accurate temperature, caliper, borehole trajectory and cementing quality was provided in time. The scientific results are crucial for establishing the scientific scale of geophysical exploration in the Songliao Basin, investigating paleoclimate and paleoenvironment, and implementing drilling engineering, which have established good foundations for achieving the whole scientific goals of this drilling project.

Key words: Songliao Basin; Continental Scientific Drilling Project; SK-2 East Borehole; Upper Cretaceous strata; geophysical logging

松辽盆地科学钻探工程以调查松辽盆地深部能源、建立松辽盆地深部地层结构剖面、寻求白垩纪气候变化地质证据、研发深部探测技术为主要目标,是中国大陆获得国际大陆科学钻探计划(ICDP)资助的第3个国际大陆科学钻探工程(Wang et al., 2013; 王璞珺等, 2017; 侯贺晟等, 2018)。该工程计划实施“两井四孔”,其中松科二井东孔是钻探的主体钻孔,位于黑龙江省安达市羊草镇吉庆村六撮房屯东南约0.25 km处,设计深度6 400.0 m,为松辽盆地最深钻孔,计划穿透白垩系地层、钻至盆地基底(邹长春等, 2016; Zhu et al., 2018)。松科二井东孔钻探工程的组织实施由中国地质科学院勘探技术研究所承担,采用吉林大学研制的“地壳一号”万米科学钻机钻进(张金昌等, 2015; Sun et al., 2016)。

为实现松辽盆地科学钻探工程的科学目标,笔者借鉴国内外大陆科学钻探及其地球物理测井的成熟经验(许志琴, 1995, 2004; 李舟波和王祝文, 1998; 刘光鼎等, 1999; Pan et al., 2002; 牛一雄等, 2004, 2008; 李斌凯等, 2007; 王成善等, 2008; 邹长春等, 2012; 聂昕等, 2012; 高文利等, 2015; 苏德辰和杨经绥, 2016),结合钻孔实际情况确立松科二井东孔测井科学目标,制定完善的测井计划(邹长春等, 2016)。松科二井东孔测井主要科学目标是:(1)为白垩纪陆相沉积学研究和地球物理勘探科学“标尺”的建立提供完整、连续的岩石物理参数和井旁构造参数;(2)探索白垩纪距今6 500万年至1.4亿年间的地球温室气候和环境变化与测井信息之间的关系;(3)针对重点含油气层位进行储层划分和油气评价;(4)为钻探施工提供技术参数支持;(5)为未来充分利用

用松科二井开展深部长期观测与实验研究提供必要的基础资料。中国地质大学(北京)负责测井子工程的实施,主要承担测井作业监督与综合研究任务;中国石油集团测井有限公司天津分公司承担测井数据采集、资料处理与初步解释任务。

松科二井东孔上白垩统未进行全井段取心,仅在嫩江组取心130.87 m,由于取心量非常少,因此完备的测井资料和深入的测井研究尤为重要。该孔正式开钻后,采用国内外先进的成像测井设备对一开和二开钻井井段(上白垩统井段)先后实施了4次裸眼井综合测井和套管井测井作业。笔者围绕该孔的测井科学目标,针对上白垩统地层开展测井综合评价。本文主要介绍上白垩统地层测井数据采集、岩石物理特征和测井综合评价等方面进展与科学成果。

1 测井数据采集与岩石物理参数剖面

1.1 测井数据采集

松科二井东孔按计划分5个钻井开次钻进,笔者根据钻井计划设计了8次裸眼井综合测井和5次套管井固井质量检查测井。上白垩统地层位于一开和二开钻井井段范围之内,以钻前地质设计和测井设计为基础,结合一开和二开钻井的具体情况,确定最终的数据采集方案。为确保测井资料的质量,采用贝克阿特拉斯公司的ECLIPS-5700、哈里伯顿公司的EXCELL-2000和斯伦贝谢公司的MAXIS-500等国内外先进的成像测井设备进行数据采集。松科二井东孔测井设计的具体情况参见邹长春等(2016),上白垩统井段测井实施情况如图1所示。

一开钻井井段采用Φ444.5 mm钻头钻进成孔,再用Φ660.4 mm钻头扩孔,井径大,实施的测井项目较少。扩孔前完成裸眼井综合测井项目7项,包括自然电位、自然伽马、阵列感应、井径、井斜、井温和泥浆电阻率,测量深度为18.0~441.0 m。扩孔后完成裸眼井测井项目3项,包括自然伽马、井径和井斜,测量深度为18.0~429.0 m;完成套管井测井项目3项,包括自然伽马、水泥胶结和套管接箍测井,测量深度为18.0~382.2 m。

二开钻井井段采用直径较小的钻头(Φ215.9 mm)钻进成孔,再用Φ444.5 mm钻头扩孔,实施的测井项目多。扩孔前完成裸眼井综合测井项目17项,其中常规项目11项,包括自然电位、自然伽马、井径、双侧向、微球形聚焦电阻率、声波时差、中子、密度、井斜、井温和泥浆电阻率;特殊项目6项,包括阵列感应、阵列声波、自然伽马能谱、微电阻率扫描成像、核磁共振成像和元素俘获谱,测量深度为424.5~2 826.5 m(核磁共振成像和元素俘获谱测井仅采集1 370.0 m以下井段的数据)。扩孔后完成裸眼井测井项目3项,包括自然伽马、井径和井斜,测量深度为423.6~2 806.2 m;完成套管井测井项目3项,包括自然伽马、水泥胶结和套管接箍测井,测量深度为12.0~2 759.2 m。

上白垩统井段先后实施了4次裸眼井综合测井和套管井测井作业,完成常规测井、特殊测井和固

井质量检查测井项目共20种。测井数据采集过程严格执行测井行业规范,虽然浅部井壁稳定性较差、井眼扩径对测井资料造成一定影响,但是总体上测井资料丰富、质量优良,为后续的测井资料处理、解释和地学研究奠定了基础。

1.2 岩石物理参数剖面

岩石物理性质包括岩石密度、电、声、磁、核、热和力等特性。岩心分析测试是获取岩石物理参数的最直接途径,但是钻井取心和岩心分析测试成本高,难以得到连续的岩石物理参数剖面。依靠测井手段,可以在钻孔剖面上原位获取连续的岩石物理参数,甚至包括地球化学参数和资料处理得到的地层参数。广义上,测井获得的这些参数均被称为岩石物理参数。

通过对松科二井东孔上白垩统井段的各种测井资料进行预处理、处理和解释,获得了丰富的测井成果资料和图件,包括常规测井(标准、综合和工程成果等)、微电阻率扫描成像(电成像测井解释、地层构造和沉积处理成果)、阵列声波(幅度、各向异性、岩石强度分析成果)、阵列感应、自然伽马能谱、核磁共振成像和元素俘获谱测井成果,各类测井参数剖面有28条之多。图2所示为上白垩统井段常规测井岩石物理参数剖面,包含自然伽马、自然电位、井径、电阻率、声波时差、密度和中子孔隙度等7条曲线,这些曲线清楚地反映了上白垩统井

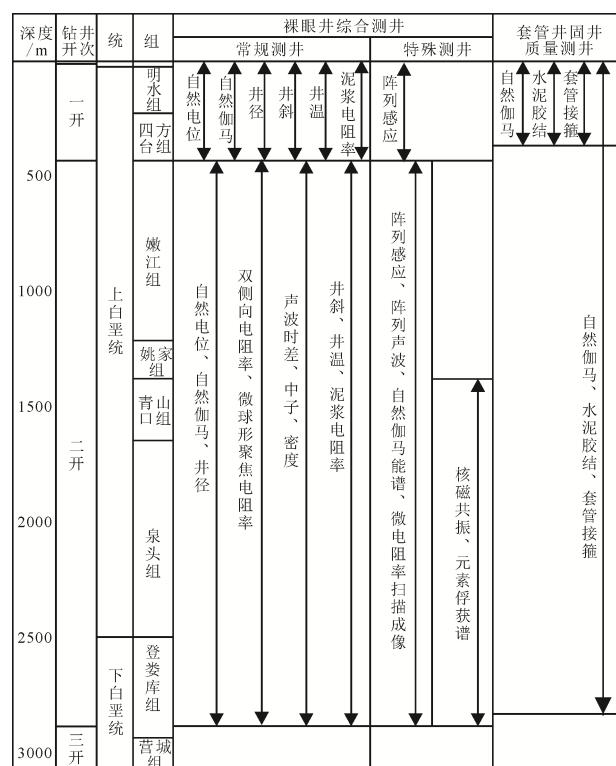


图1 松科二井东孔上白垩统井段测井实施情况

Fig. 1 Progresses in logging operations over the Upper Cretaceous intervals, SK-2 East Borehole

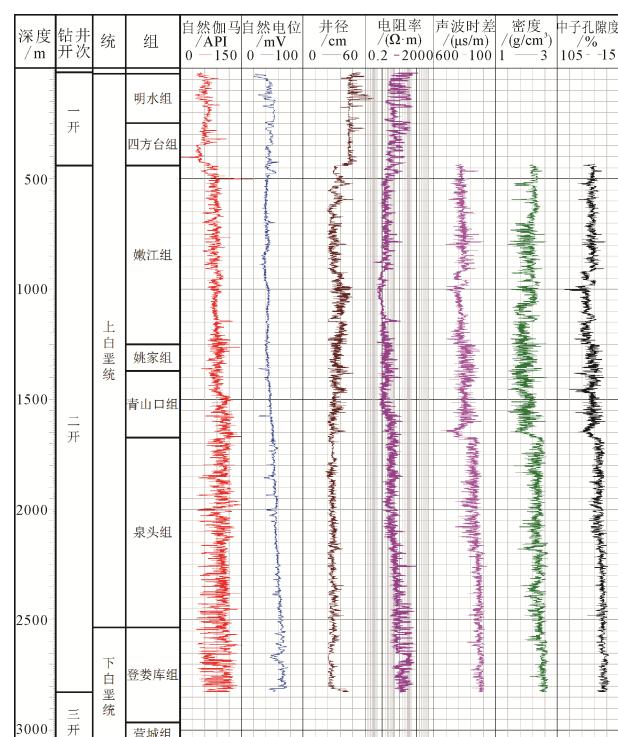


图2 松科二井东孔上白垩统常规测井
岩石物理参数剖面图

Fig. 2 Petrophysical profile of conventional logs in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole

段主要岩石物理特征,为地面电法和地震等地球物理反演提供精确的地层电性和速度等参数。

由于松科二井东孔是松辽盆地内实施的最深孔,上白垩统井段与下部井段测井参数结合,将形成盆地内深度范围最大、地层最完整的岩石物理参数剖面,从而作为松辽盆地的标准剖面或科学“标尺”,指导后续的地球物理勘探工作。

2 测井综合评价与工程应用

综合利用各种测井资料,结合录井和区域地质资料,开展了基础地质、矿产资源、古环境与古气候、钻探工程应用等方面的研究与探索。

2.1 基础地质研究

2.1.1 地层划分

根据松科二井东孔钻探结果,上白垩统自下而上依次为泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组,发育一套陆相碎屑沉积岩层,岩性总体上以砂岩、粉砂岩、泥岩和油页岩等为主。

参考本区域地层的标志层和测井分层标志,并详细分析该孔录井资料和自然伽马、电阻率等测井响应特征,对上白垩统地层进行了划分。上白垩统地层总厚度为2 509.7 m;泉头组顶底深度为1671.7~2 533.5 m,青山口组为1 372.0~1 671.7 m,姚家组为1 250.6~1 372.0 m,嫩江组为439.8~1 250.6 m,四方台组为247.8~439.8 m,明水组为23.8~247.8 m(图2)。泉头组和嫩江组地层最厚,青山口组、明水组和四方台组次之,姚家组地层最薄。

2.1.2 岩性识别与划分

根据地层划分结果和录井资料,选择自然伽马、自然电位、井径和电阻率等测井曲线,采用交会图法识别各组地层的岩性,完成各组地层岩性划分,并统计出各组不同岩性地层厚度和砂地比(表1)。测井识别出三类岩性,包括砂岩、泥岩和油页岩;岩性划分结果显示,四方台组和明水组砂地比高,砂体发育;嫩江组和泉头组砂地比次之,因地层厚度大,累计砂岩厚度较厚;姚家组砂体不发育;青山口组则主要发育泥岩。此外,嫩江组和青山口组分别发育17.64 m和7.88 m油页岩。根据测井岩

性评价结果建立的岩性剖面,不仅与录井岩性吻合较好,而且具有纵向上连续、深度准确的优点。

2.1.3 沉积特征和井旁构造分析

测井资料蕴含了丰富的地质信息,因此,利用测井资料可以研究沉积地层的沉积特征(沉积微相、层理构造和古水流方向等)和井旁构造特征。松辽盆地上白垩统地层发育于盆地的坳陷期和萎缩期,随着湖泊沉降中心的变化,形成了以湖泊相分布为主,伴有三角洲相和河流相的分布特征(刘招君等,1992; Feng et al., 2010; 黄清华等,2011)。

利用自然伽马和电阻率等测井资料,结合录井资料,开展了沉积微相划分;对微电阻率扫描成像测井资料进行沉积处理,提取出不同深度的层理构造特征和古水流方向信息。结果显示,上白垩统地层相序上呈现出河流—三角洲—湖泊—三角洲—湖泊—三角洲—河流相的沉积充填序列;识别出槽状、板状、波状和平行层理;古水流方向由南东向逐渐转换为西向。泉头组时期,主要发育以边滩、分流河道微相为主的曲流河—三角洲相沉积充填序列,槽状(图3a)、板状层理发育(图3b),古水流方向为北西—南东向(图4a);青山口组时期,沉积环境变为以滨浅湖微相为主的湖泊相沉积,主要发育平行层理,古水流方向转为西—东向;姚家组时期,为以河漫滩、分流间湾微相为主的三角洲相,层理不发育;嫩江组时期,沉积环境由早期滨浅湖微相为主的湖泊相转为晚期以边滩、河漫滩微相为主的河流相,主要发育波状层理,古水流方向为东—西向。

通过微电阻率扫描成像测井资料的构造处理解释,提取了不同深度地层界面的产状信息(李宁,2017)。泉头组地层倾角在4°~8°之间,倾向整体上为北西向(图4b);青山口组上部地层倾角在10°左右,倾向近西向,下部地层倾角减小到6°,倾向变化大;姚家组地层倾角在4°~8°之间,倾向为西向;嫩江组地层倾角在2°~4°之间,倾向为西偏南向。上白垩统地层倾角随着深度增大而逐渐增大,倾角从2°增大至8°;倾向整体上为近北西向。

2.1.4 岩石力学性质及地应力分析

通过对阵列声波测井资料处理,提取出准确的

表1 松科二井东孔上白垩统地层岩性划分结果
Table 1 Lithological division of the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole

组	深度范围/m	砂岩厚度/m	泥岩厚度/m	油页岩厚度/m	砂地比/%
明水组	23.8~247.8	83.90	140.10	-	37.5
四方台组	247.8~439.8	119.38	72.62	-	62.2
嫩江组	439.8~1 250.6	216.78	576.38	17.64	26.7
姚家组	1 250.6~1 372.0	24.90	96.50	-	20.5
青山口组	1 372.0~1 671.7	21.70	270.12	7.88	7.2
泉头组	1 671.7~2 533.5	196.05	665.75	-	22.7

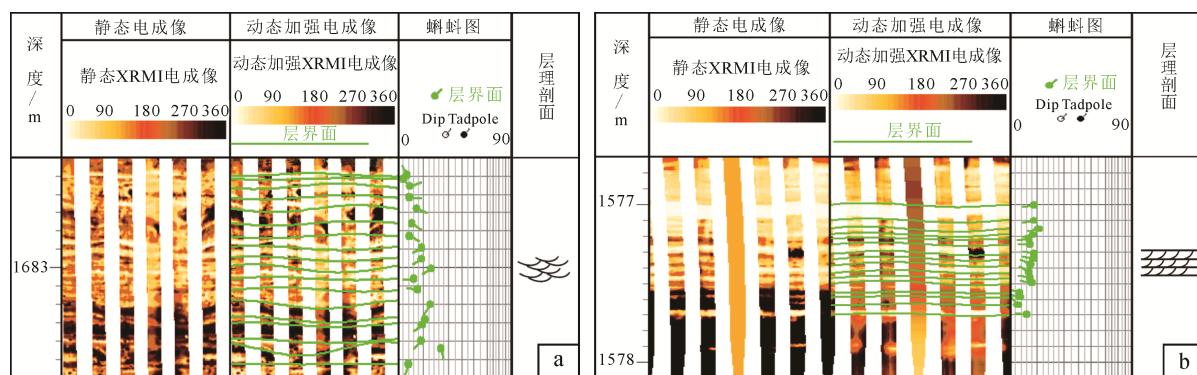


图3 松科二井东孔上白垩统槽状和板状层理示意图

Fig. 3 Furrow and slab lamination in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole

a-槽状层理(1 677.0~1 689.0 m); b-板状层理(1 574.0~1 579.0 m)

a-furrow lamination (1 677.0~1 689.0 m); b-slab lamination (1 574.0~1 579.0 m)

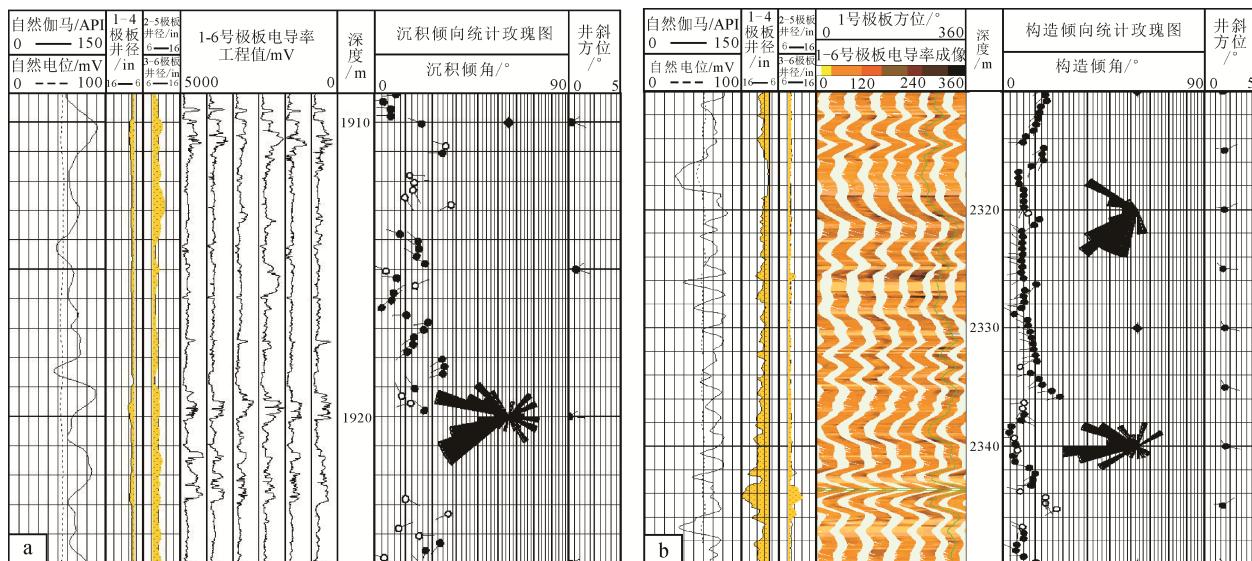


图4 松科二井东孔上白垩统微电阻率扫描成像测井沉积和构造处理成果图

Fig. 4 Sedimentation and structure shown on microresistivity imaging logs in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole

a-沉积处理结果(1 909.0~1 925.0 m); b-构造处理结果(2 310.0~2 350.0 m)

a-sedimentation (1 909.0~1 925.0 m); b-structure (2 310.0~2 350.0 m)

纵、横波速度等信息，结合密度和微电阻率扫描成像测井等资料，计算原位地层岩石强度参数和地应力参数，分析岩石力学性质、井壁稳定性及地应力特征(牛一雄等, 2004; Shen et al., 2010; Schmitt et al., 2012)。

结果表明，测井估算的地层压力系数为 0.84~1.05，而本区域地层压力系数一般为 0.88~1.00，计算结果与区域规律基本一致，本井段未见到异常高压地层；计算得到的理想钻井液密度为 1.10~1.30 g/cm³，使用的实际钻井液密度为 1.25 g/cm³，在 1 650.0 m 以上井段，实际钻井液密度偏小，可能是造成井眼扩径的原因之一；地层速度各向异性特征显著，指示了地层应力不均衡的特点，泉头组地层最大水平主应力方向为北东东—南西西向、青山口组为北东东—南西西向、姚家组和嫩江组为近东—西向、嫩江组地层为近东—西向。

总体上，上白垩统地层的水平应力、垂向应力和岩石强度随深度的加深而不断地增大，其井壁稳定性也随深度的加深而趋于稳定。

总之，在上白垩统井段岩心资料少的情况下，测井提供了十分重要的地质信息。

2.2 矿产资源评价

2.2.1 烃源岩评价

根据录井资料和测井岩性识别与划分结果，上白垩统青山口组和嫩江组烃源岩较发育，青山口组底部 1 543.0~1 671.7 m 井段发育暗色泥岩和黑褐色油页岩；嫩江组底部 985.0~1 100.6 m 层段发育暗色泥岩，1 139.1~1 149.3 m 层段发育黑褐色油页岩。

针对上述地层，利用常规测井、自然伽马能谱和元素俘获谱等多种测井资料，采用多参数组合法、交会图法、 $\Delta\log R$ 重叠法、Dual_Vsh 法和决策树模型等方法进行富含有机质烃源岩层的定性识别

研究, 优选出 $\Delta\log R$ 重叠法和Dual_Vsh法估算有机碳含量, 获得上白垩统地层烃源岩评价结果(Zhang et al., 2018; 张小环, 2018)。青山口组和嫩江组底部烃源岩有机碳含量分别高达7.56%和9.04%, 具有较大的生烃能力, 为研究区的重要烃源岩(图5)。

2.2.2 油气储层评价

松科二井东孔紧邻徐家围子断陷主要的生气区, 邻井测试结果显示, 宋深1、宋深3和宋深4井上白垩统泉头组分布有气层。利用常规测井和核磁共振成像测井等资料, 采用交会图和孔隙度重叠法划分油气储层, 采用岩石体积物理模型和阿尔奇公式计算储层参数, 进而综合评价上白垩统储层及其含油气情况, 并对储层孔隙结构进行细致研究(Zhao et al., 2017)。

上白垩统油气储层测井评价结果见表2, 测井

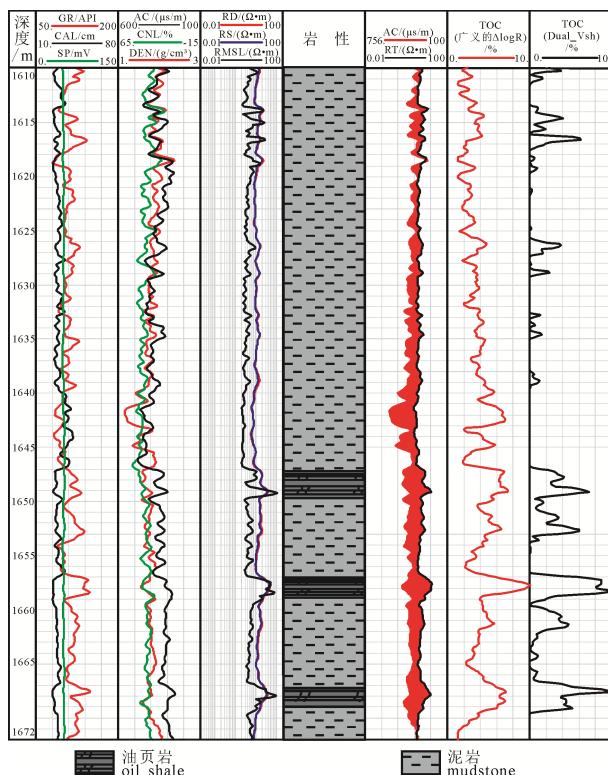


图5 松科二井东孔青山口组富含有机质烃源岩测井评价成果图(1 610.0~1 672.0 m)

Fig. 5 Results of log evaluation of the organic-rich source rocks in the Qingshankou Formation, SK-2 East Borehole (1 610.0~1 672.0 m)

解释气水同层1层, 水层15层, 干层62层; 储层物性随着埋深的增加而变差, 含油气储层较少。解释的气水同层位于泉头组1 930.8~1 936.3 m井段(图6), 厚度5.5 m, 储层电性高($15 \Omega \cdot m$), 物性较好(孔隙度为16.32%, 渗透率为48.61 mD), 气测全烃达到5.03%; 该层与邻井气层处于同一层位, 推测具有一定的产气能力。

2.2.3 高放射性异常层分析

通过分析松科二井东孔上白垩统地层自然伽马、自然伽马能谱等测井资料, 发现嫩江组497.5~502.0 m井段存在高放射性异常(图7)。该异常层的自然伽马最高182.0 API, 铀含量 5.0×10^{-6} ~ 17.0×10^{-6} , 钍含量 5.0×10^{-6} ~ 11.0×10^{-6} , 钾含量1.9%~2.9%, 电阻率3.0~11.0 $\Omega \cdot m$; 相对于围岩层, 异常层的铀含量明显偏高。根据测井资料解释结果, 该异常层岩性为粗砂岩, 具有较高的孔隙度和渗透率, 孔隙度19.0%~24.0%, 渗透率59.0~261.0 mD, 属于高铀异常层(张淑霞等, 2017)。

结合前人地质研究成果, 对嫩江组高铀异常层成因进行了分析, 初步认为构造条件和后生改造作用是导致异常层铀富集的关键因素。高放射性异常层的发现, 为松辽盆地铀资源勘探提供了重要线索, 同时表明测井对于及时发现放射性矿产资源能够起到关键作用。

2.2.4 热物性与地热分析

地热能是一种清洁可再生能源, 其资源潜力巨大, 有望成为接替传统化石能源的新能源。我国正在加快地热资源调查和开发利用研究, 松辽盆地是重点调查区之一。松科二井东孔一开和二开钻井完钻后采集了动态井温测井曲线, 动态井温受钻井液影响大, 与停钻时间关系密切。在三开钻探结束、钻孔静置41天后, 进行了一次恢复井温测井, 此时钻孔内温度基本恢复到平衡状态, 测量结果接近原始地层温度, 可用来计算地温梯度。

利用常规测井、恢复井温和自然伽马能谱测井等资料, 建立了地温梯度、地层热导率、大地热流、生热率等地层热物性参数评价方法。利用矿物体积含量、孔隙度、矿物热导率和孔隙中流体热导率等

表2 松科二井东孔上白垩统油气储层测井评价结果

Table 2 Hydrocarbon reservoirs from log evaluation in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole

组	气水同层				水层				干层			
	层数	累计厚度/m	平均孔隙度/%	平均渗透率/mD	层数	累计厚度/m	平均孔隙度/%	平均渗透率/mD	层数	累计厚度/m	平均孔隙度/%	平均渗透率/mD
嫩江组	-				3	25.8	28.41	573.15	1	13.2	9.52	5.54
姚家组	-				1	4.6	13.21	20.41	1	3.3	11.68	11.39
青山口组	-				1	4.1	20.61	151.39	5	7.5	11.51	13.43
泉头组	1	5.5	16.32	48.61	10	40.1	12.58	21.98	55	125.8	8.32	4.87

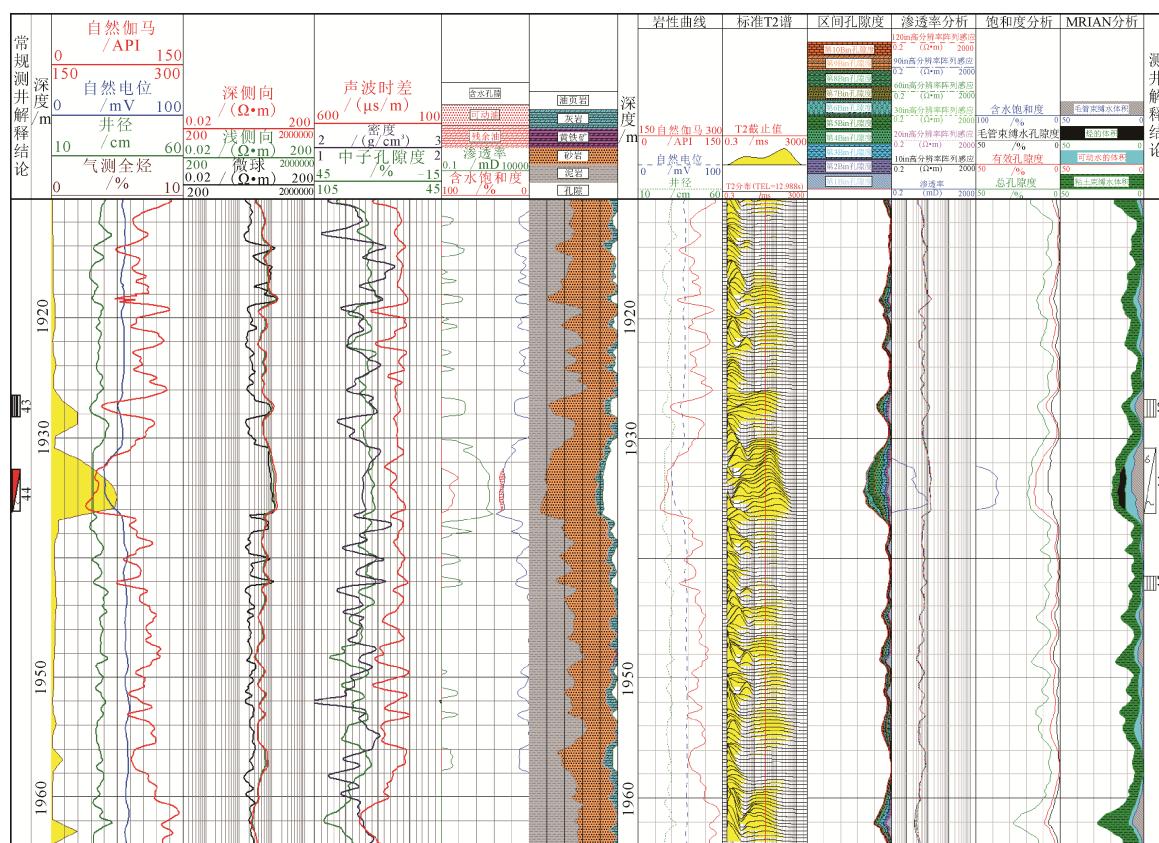


图 6 松科二井东孔泉头组储层测井综合评价成果图(1 910.0~1 964.0 m)

Fig. 6 Results of comprehensive log evaluation of reservoirs in the Quantou Formation, SK-2 East Borehole (1 910.0~1 964.0 m)

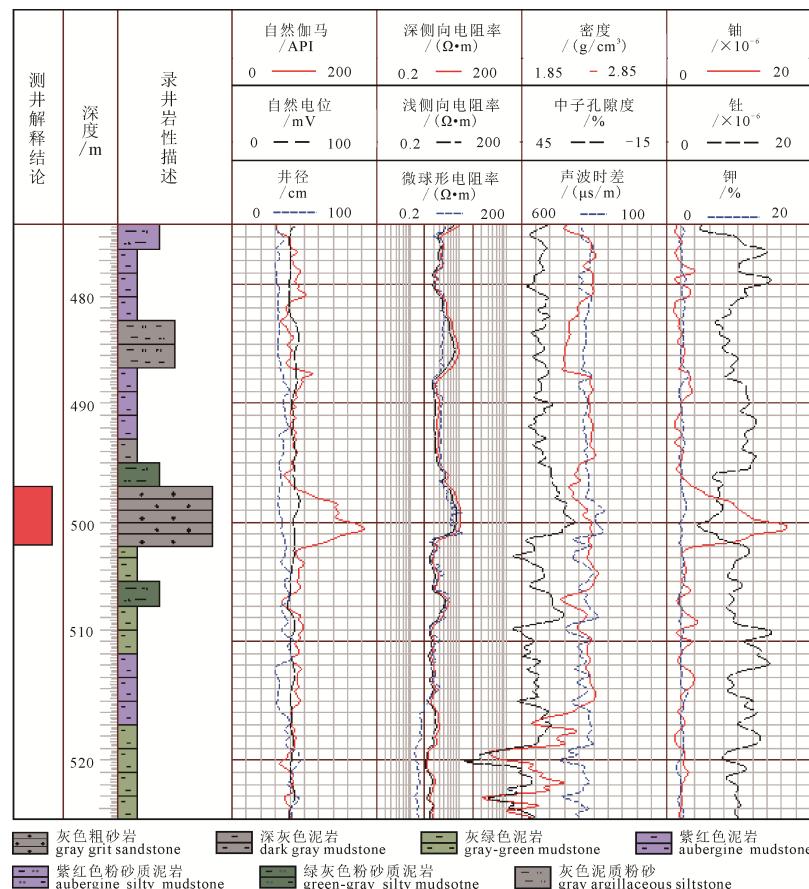


图 7 松科二井东孔嫩江组高放射性异常层测井响应特征图(475.0~525.0 m)

Fig. 7 Log response characteristics of the abnormally high natural radioactivity interval in the Nenjiang Formation, SK-2 East Borehole (475.0~525.0 m)

信息,采用几何平均模型来计算地层热导率(Fuchs and Förster, 2014);利用地层密度和放射性元素铀、钍和钾含量信息,确定地层生热率(Bachu and Burwash, 1991)。

恢复井温测井显示泉头组和青山口组地层温度和地温梯度均较高,地层温度分别为75.7~99.3°C和62.0~75.7°C;平均地温梯度分别为40.85°C/km和43.21°C/km,是地热研究的重要层位(图8)。热物性分析显示泉头组地层热导率、大地热流和地层生热率平均值分别为2.51 W/(m·K)、102.87 mW/m²和1.12 μW/m³,青山口组分别为2.61 W/(m·K)、112.72 mW/m²和1.11 μW/m³。综合分析岩性和物性特征,认为泉头组地层砂岩发育,是有利的储热层;青山口组泥岩发育,是良好的隔层,反映出上白垩统下部地层具有良好的地热开发潜力(邹长春等,2017)。

综上所述,上白垩统地层在油气、铀矿和地热方面具有一定的潜力。

2.3 古环境与古气候探索

通过对松科二井东孔上白垩统地层自然伽马、地球化学测井(包括自然伽马能谱与元素俘获谱测井)曲线进行频谱与小波分析,识别米兰科维奇旋

回信号,结合前人研究成果,探索测井资料对古环境、古气候变化的响应。

结果表明,松科二井东孔青山口组自然伽马(图9a, b)、钍元素(图9c, d)、铝元素(图9e, f)测井曲线具有较强的天文周期信号。青山口组地层提取了约13.5个405 ka周期,与松科1井南孔的研究结果较为一致(吴怀春等, 2008; Wu et al., 2009, 2013)。松科二井东孔铝钛比曲线与基于松科1井南孔岩心恢复的古湖泊生产力具有相同变化趋势(图10),指示了青山口组一段古湖泊生产力最大,青山口组二、三段次之,泉头组最小(Peng et al., 2017)。结果表明,自然伽马、钍元素、铝元素和铝钛比测井曲线可作为研究古气候古环境变化的替代指标。

2.4 钻探工程应用

在科学钻探中,测井不仅有助于解决基础地质、资源与环境等方面的科学问题,而且能够及时提供工程施工信息,解决科学钻井中的关键技术问题,在预测地层压力、估算钻井液密度安全窗口、分析井壁稳定性、评价地层岩石可钻性、进行钻头选型和钻速预测等方面具有重要作用(张传进等,2002; Zhang et al., 2018)。

在松科二井东孔一开和二开钻井施工中,测井

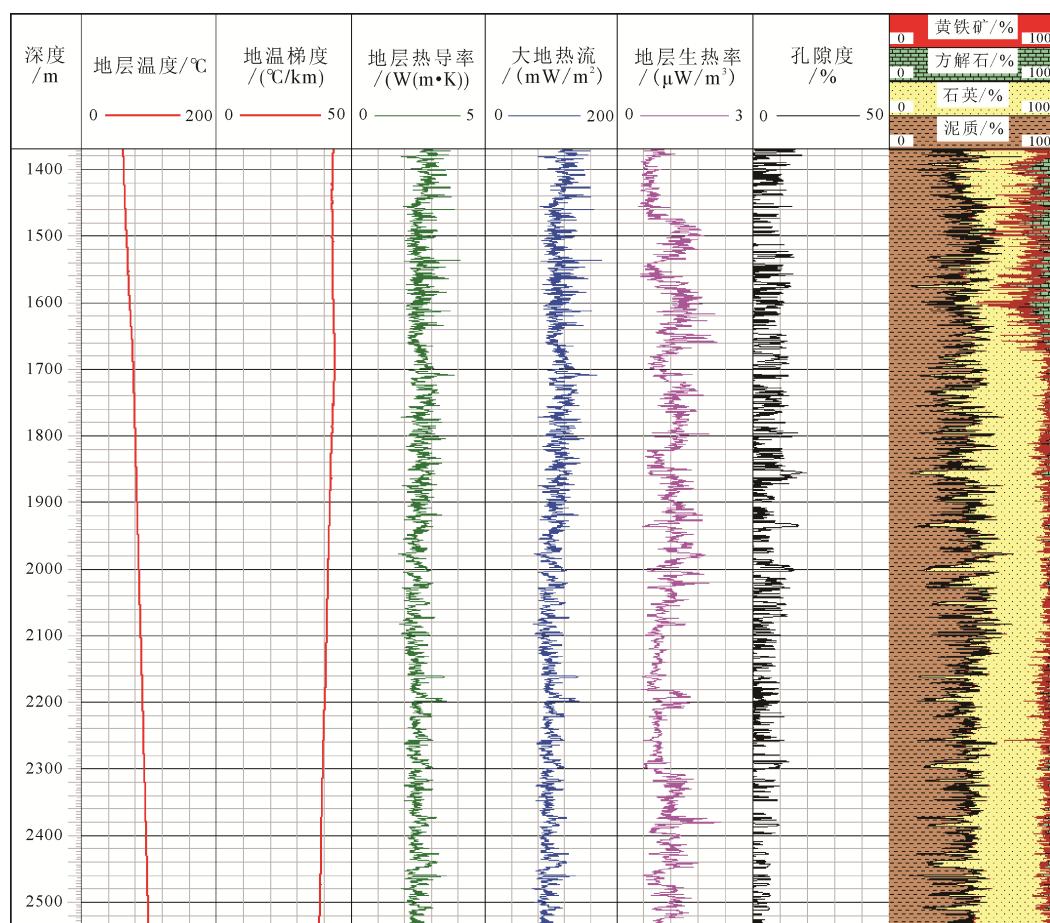


图8 松科二井东孔上白垩统地层测井热物性特征图(1 372.0~2 533.5 m)

Fig. 8 Thermal physical properties from well logs in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole (1 372.0~2 533.5 m)

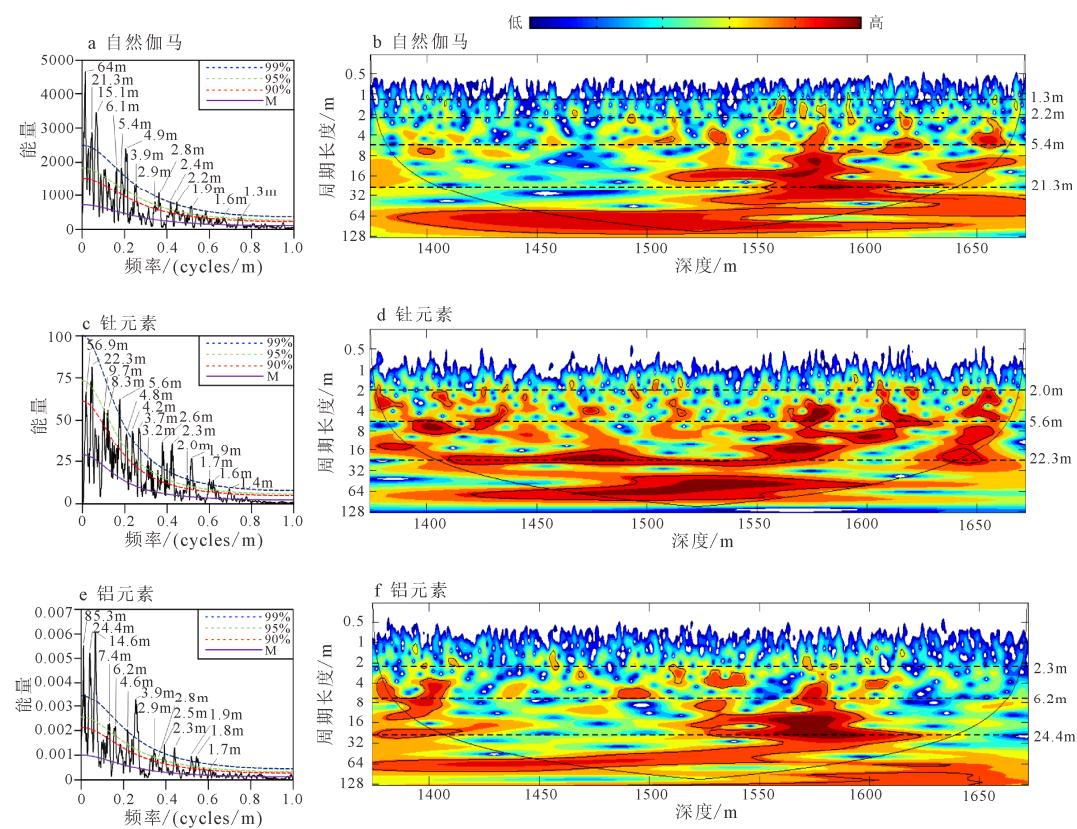


图 9 松科二井东孔上白垩统地球化学测井曲线频谱与小波分析结果(1 372.0~1 671.7 m)

Fig. 9 The frequency spectrum and wavelet analysis results of geochemical logs in the Upper Cretaceous strata, SK-2 East Borehole (1 372.0~1 671.7 m)

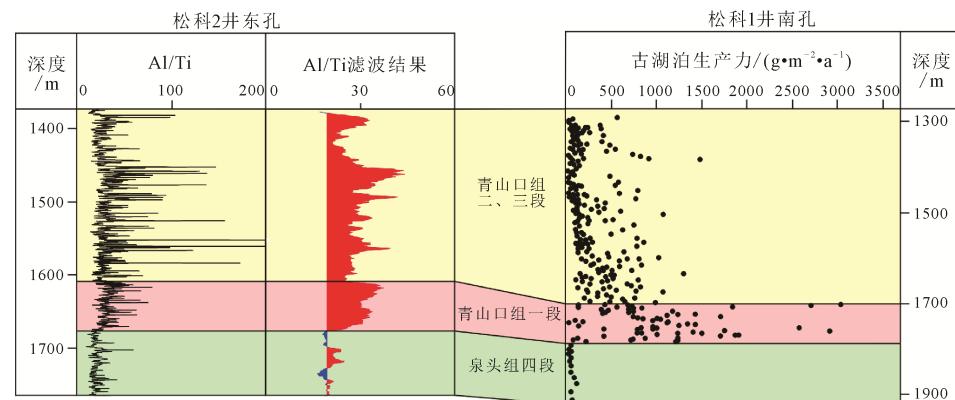


图 10 松科二井东孔上白垩统 Al/Ti 曲线与松科一井南孔基于岩心恢复的古湖泊生产力对比

Fig. 10 Al/Ti curves of the Upper Cretaceous strata from SK-2 East Borehole compared with productivity of the paleolake based on core sample recover from SK-1 Borehole

及时提供了井径、钻孔轨迹和固井质量检查等钻探工程资料。井径测井曲线反映上白垩统井段普遍存在扩径现象，井壁稳定性相对较差，泥岩地层坍塌尤为严重，泉头组下部地层压实程度增大、井壁趋于稳定，分析认为地层岩性、压实程度以及钻井液性质是影响该井段井壁稳定性的主要因素。井斜资料显示，上白垩统井段井斜角在 0° ~ 3° 之间，反映钻井施工质量好。此外，采用声幅测井评价了一开和二开钻井井段下套管后的固井质量。依靠工程测井，及时准确地掌握钻孔状况，有力地保障了科学钻探工程的顺利完成。

3 结论

针对松科二井东孔上白垩统地层开展测井综合研究，取得以下主要成果：

(1) 在测井数据采集方面，原位获取了上白垩统井段常规测井、特殊测井和固井质量检查测井资料 20 种，所获得的资料丰富、质量优良；并以此建立上白垩统连续的岩石物理参数标准剖面，为后续的地学研究提供数据支持。

(2) 在基础地质研究方面，确定了上白垩统各组的界面，上白垩统顶、底界面深度分别为 23.8 m 和

2 533.5 m; 建立了纵向上连续、深度准确的岩性剖面, 以砂岩和泥岩为主, 部分地层含油页岩; 重构了井旁构造特征, 地层倾角总体上由浅到深逐渐增大, 从 2° 增大到 8° , 倾向近北西向。在上白垩统井段岩心资料少的情况下, 测井提供了十分重要的地质信息。

(3) 在矿产资源评价方面, 识别出泉头组气水同层 1 层, 厚度为 5.5 m; 嫩江组和青山口组底部发育富含有机质的烃源岩, 有机碳含量分别高达 7.56% 和 9.04%; 在嫩江组发现高放射性异常层 1 层, 厚度为 4.5 m, 钿含量达到 16.58×10^{-6} ; 上白垩统地温梯度较高, 泉头组地层是有利的储热层。因此, 上白垩统地层在油气、铀矿和地热方面具有一定的潜力。

(4) 在古环境与古气候探索方面, 认为自然伽马、钍元素和铝元素测井曲线能够有效提取天文周期信号, 铝钛比曲线指示青山口组一段古湖泊生产力最大。从丰富的测井资料中, 已经发现了研究上白垩统古气候古环境变化的一些替代指标。

上述成果对于松辽盆地地球物理勘探科学“标尺”建立、古环境与古气候研究和钻探工程施工起到至关重要的作用, 为整个钻探工程科学目标的实现奠定良好基础。

本文仅为松科二井东孔阶段性成果总结, 希望能起到抛砖引玉的作用。下一步将继续围绕钻探工程的科学目标, 充分利用岩心和录井等地质资料, 开展全面和精细的研究。本课题组将陆续对各方面成果述之成文, 进行详细分析与讨论。

致谢: 本文工作得到了松辽盆地资源与环境深部钻探工程首席科学家王成善院士、总地质师王璞珺教授、总指挥张金昌教授、副总指挥冉恒谦教授、副总指挥兼总工程师朱永宜教授、钻井工程室主任王稳石工程师及钻井工程室副主任张恒春工程师的大力支持; 中国地质大学(武汉)的潘和平、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所的孔广胜、中海油服油田技术事业部的杨玉卿、中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司的刘国强、中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院的陆黄生、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院的李军和中国地质大学(武汉)的马火林等专家提供了宝贵意见和建议; 中国石油集团测井有限公司天津分公司测井队成员参加了测井数据采集工作, 在此一并表示衷心的感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 12120113017600 and DD20179362), Major Program of National Natural Science Founda-

tion of China (No. 41790455-1).

参考文献:

- 高文利, 孔广胜, 潘和平, 林振洲, 邱礼泉, 冯杰, 方思南, 邓呈祥, 李洋, 刘东明. 2015. 庐枞盆地科学钻探地球物理测井及深部铀异常的发现[J]. 地球物理学报, 58(12): 4522-4533.
- 侯贺晨, 王成善, 张交东, 马峰, 符伟, 王璞珺, 黄永建, 邹长春, 高有峰, 高远, 张来明, 杨瑨, 国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4): 641-657.
- 黄清华, 吴怀春, 万晓樵, 贺怀宇, 邓成龙. 2011. 松辽盆地白垩系综合年代地层学研究新进展[J]. 地层学杂志, 35(3): 250-257.
- 李斌凯, 马海州, 谭红兵. 2007. 测井技术的应用及其在科学钻探研究中的意义[J]. 地球物理学进展, 22(5): 1493-1501.
- 李宁. 2017. 松辽盆地科学钻探松科 2 井东孔成像测井岩心空间归位及井旁构造分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李舟波, 王祝文. 1998. 科学钻探中的元素测井技术[J]. 地学前缘, 5(1/2): 119-130.
- 刘光鼎, 李庆谋, 刘少华. 1999. 全球变化的地球物理测井研究 [J]. 地球物理学进展, 14(4): 1-8.
- 刘招君, 王东坡, 刘立, 刘万洙, 王璞君, 杜晓弟, 杨光. 1992. 松辽盆地白垩纪沉积特征[J]. 地质学报, 66(4): 327-337.
- 聂昕, 邹长春, 肖昆, 徐晋, 牛一雄, 孔广胜. 2012. 汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 孔成像测井岩心空间归位[J]. 地球物理学进展, 27(1): 75-82.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先, 朱留方, 许东辉. 2004. 中国大陆科学钻探主孔(0~2000m)地球物理测井[J]. 岩石学报, 20(1): 165-178.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先. 2008. 中国大陆科学钻探工程科钻一井变质岩测井技术[M]. 北京: 科学出版社.
- 苏德辰, 杨经绥. 2016. ICDP 创立 20 周年: 中国大陆科学钻探方兴未艾[J]. 地球学报, 37(S1): 118-128.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 王璞珺, 孔凡军, 冯子辉, 任延广, 杨甘生, 万晓樵, 黄永建, 张世红. 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展 [J]. 地质学报, 82(1): 9-20.
- 王璞珺, 刘海波, 任延广, 万晓樵, 王树学, 瞿雪姣, 蒙启安, 黄永建, 黄清华, 高有峰, 王成善. 2017. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探“松科 2 井”选址[J]. 地学前缘, 24(1): 216-228.
- 吴怀春, 张世红, 黄清华. 2008. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. 地学前缘, 15(4): 159-169.
- 许志琴. 1995. 中国大陆科学钻探面临解决的关键地球科学问题[J]. 地球学报, 16(1): 101-106.
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果 [J]. 岩石学报, 20(1): 1-8.
- 张传进, 鲍洪志, 路保平. 2002. 测井资料在钻井工程中应用现状及展望[J]. 天然气工业, 22(5): 55-57.
- 张金昌, 冉恒谦, 朱永宜, 谢文卫, 孙建华. 2015. 松辽盆地科

- 学钻探计划简介与松科2井工程组织架构[C]//第18界全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集, 1-6.
- 张淑霞, 邹长春, 彭诚, 赵金环, 李宁, 张小环. 2017. 松科2井东孔白垩系高放射性异常层的发现及测井分析[C]//2017中国地球科学联合学术年会论文集: 524.
- 张小环. 2018. 松辽盆地科学钻探井烃源岩测井响应特征及评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 邹长春, 刘东明, 聂听, 项彪, 牛一雄, 孔广胜. 2012. 利用成像测井资料分析汶川地震断裂带科学钻探3号孔(WFSD-3)裂缝特征[J]. 现代地质, 26(6): 1146-1153.
- 邹长春, 肖亮, 牛一雄, 侯颉, 彭诚. 2016. 松辽盆地科学钻探工程松科2井东孔测井设计[J]. 地学前缘, 23(3): 279-287.
- 邹长春, 张小环, 彭诚, 赵金环. 2017. 沉积盆地地层热物性测井评价方法及应用——以松辽盆地科学钻探工程松科2井东孔为例[C]//2017中国地球科学联合学术年会论文集: 1033-1035.
- References:**
- BACHU S, BURWASH R A. 1991. Regional-scale analysis of the geothermal regime in the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Geothermics, 20(5/6): 387-407.
- FENG Zhi-qiang, JIA Cheng-zao, XIE Xi-nong, ZHANG Shun, FENG Zi-hui, CROSS T A. 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, Northeast China[J]. Basin Research, 22(1): 79-95.
- FUCHS S, FÖRSTER A. 2014. Well-log based prediction of thermal conductivity of sedimentary successions: A case study from the North German Basin[J]. Geophysical Journal International, 196(1): 291-311.
- GAO Wen-li, KONG Guang-sheng, PAN He-ping, LIN Zhen-zhou, QIU Li-quan, FENG Jie, FANG Si-nan, DENG Cheng-xiang, LI Yang, LIU Dong-ming. 2015. Geophysical logging in scientific drilling borehole and find deep Uranium anomaly in Luzong basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4522-4533(in Chinese with English abstract).
- HOU He-sheng, WANG Cheng-shan, ZHANG Jiao-dong, MA Feng, FU Wei, WANG Pu-jun, HUANG Yong-jian, ZOU Chang-chun, GAO You-feng, GAO Yuan, ZHANG Lai-ming, YANG Jin, GUO Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Resource discovery and progress in earth science research[J]. Geology in China, 45(4): 641-657(in Chinese with English abstract).
- HUANG Qing-hua, WU Huai-chun, WAN Xiao-qiao, HE Huai-yu, DENG Cheng-long. 2011. New progress of integrated chronostratigraphy of the Cretaceous in Songliao basin[J]. Journal of Stratigraphy, 35(3): 250-257(in Chinese with English abstract).
- LI Bin-kai, MA Hai-zhou, TAN Hong-bong. 2007. Application of the welllogging technology and the significance in the scientific drilling[J]. Progress in Geophysics, 22(5): 1493-1501(in Chinese with English abstract).

- LI Ning. 2017. Study of Core Spatial Position Restoring and Describe the Structure Shapes of the CCSK-2 East Borehole in the Songliao Basin of Northeast China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- LI Zhou-bo, WANG Zhu-wen. 1998. Technique of elemental logging in scientific drilling project[J]. Earth Science Frontiers, 5(1/2): 119-130(in Chinese with English abstract).
- LIU Guang-ding, LI Qing-mou, LIU Shao-hua. 1999. Geophysical well log in global change[J]. Progress in Geophysics, 14(4): 1-8(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhao-jun, WANG Dong-po, LIU Li, LIU Wan-zhu, WANG Pu-jun, DU Xiao-di, YANG Guang. 1992. Sedimentary characteristics of the Cretaceous Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 66(4): 327-338(in Chinese with English abstract).
- NIE Xin, ZOU Chang-chun, XIAO Kun, XU Jin, NIU Yi-xiong, KONG Guang-sheng. 2012. Core spatial position restoring of WFSD-1 borehole with borehole imaging logging data[J]. Progress in Geophysics, 27(1): 75-82(in Chinese with English abstract).
- NIU Yi-xiong, PAN He-ping, WANG Wen-xian, ZHU Liu-fang, XU Dong-hui. 2004. Geophysical well logging in main hole (0~2000m) of Chinese continental scientific drilling[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(1): 165-178(in Chinese with English abstract).
- NIU Yi-xiong, PAN He-ping, WEN Wen-xian. 2008. Well logging technology of metamorphic rocks in mainhole of Chinese continental scientific drilling[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- PAN He-ping, NIU Yi-xiong, WANG Wen-xian. 2002. CCSK Well Logging Engineering Program[J]. Journal of China University of Geosciences, 13(1): 91-94.
- PENG Cheng, ZOU Chang-chun, LI Pan, NIU Yi-xiong. 2017. Application of geochemical logging for palaeoenvironmental research in the Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Chinese Continental Scientific Drilling Project-SK-2e, Songliao Basin, NE China[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 14: 865-877.
- SCHMITT D R, CURRIE C A, ZHANG L. 2013. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles[J]. Tectonophysics, 580: 1-26.
- SHEN B, ZHANG C M, MAO Z Q, XIAO C W. 2010. A formation pressure prediction method based on tectonic overpressure[J]. Applied Geophysics, 7(4): 376-383.
- SUN You-hong, ZHANG Fei-yu, WANG Qing-yan, CAO Ke. 2016. Application of “Crust 1” 10k ultra-deep scientific drilling rig in Songliao Basin Drilling Project (CCSD-SKII)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145: 222-229.
- WANG Cheng-shan, FENG Zhi-qiang, WU He-yong, WANG Pu-jun, KONG Fan-jun, FENG Zi-hui, REN Yan-guang,

- YANG Gan-sheng, WAN Xiao-qiao, HUANG Yong-jian, ZHANG Shi-hong. 2008. Preliminary Achievement of the Chinese Cretaceous Continental Scientific Drilling Project-SK-I[J]. *Acta Geological Sinica*, 82(1): 9-20(in Chinese with English abstract).
- WANG Chen-shan, FENG Zhi-qiang, ZHANG Lai-ming, HUAN Yong-jian, CAO Ke, WANG Pu-jun, ZHAO Bin. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385(5): 17-30.
- WANG Pu-jun, LIU Hai-bo, REN Yan-guang, WAN Xiao-qiao, WANG Shu-xue, QU Xue-jiao, MENG Qi-an, HUANG Yong-jian, HUANG Qing-hua, GAO You-feng, WANG Cheng-shan. 2017. How to choose a right drilling site for the ICDP Cretaceous Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin (SK2), Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 216-228(in Chinese with English abstract).
- WU Huai-chun, ZHANG Shi-hong, HUANG Qing-hua. 2008. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao basin of Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 159-169(in Chinese with English abstract).
- WU Huai-chun, ZHANG Shi-hong, JIANG Gan-qing, HUANG Qing-hua. 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3-4): 308-323.
- WU Huai-chun, ZHANG Shi-hong, JIANG Gan-qing, WANG Cheng-shan. 2013. Astrochronology of the Early-Turonian-Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385(3): 55-70.
- XU Zhi-qin. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese continental scientific drilling project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chuan-jin, BAO Hong-zhi, LU Bao-ping. 2002. Present situation and prospects for applying log data in drilling engineering[J]. *Nature Gas Industry*, 22(5): 55-57(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-chang, RAN Heng-qian, ZHU Yong-yi, XIE Wen-wei, SUN Jian-hua. 2015. The exploration plan of ICDP Cretaceous Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin (SK2) and the organization structure of the borehole SK2[C]//Proceedings of the 18th National Symposium on Technical and Academic Exchanges for Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling): 1-6(in Chinese).
- ZHANG Shu-xia, ZOU Chang-chun, PENG Cheng, ZHAO Jin-huan, LI Ning, ZHANG Xiao-huan. 2017. Geophysical log analysis for the abnormally high natural radioactivity intervals in the main borehole of the Continental Scientific Drilling Project of Cretaceous Songliao Basin[C]// Proceedings of the 2017 Annual Symposium on Chinese Geoscience Union: 524(in Chinese).
- ZHANG Xiao-huan, ZOU Chang-chun, ZHAO Jin-huan, LI Ning, ZHANG Shu-xia, XIAO Liang, MA Huo-lin, NIU Yi-xiong. 2018. Organic-rich source rock characterization and evaluation of the Cretaceous Qingshankou Formation: results from geophysical logs of the second scientific drilling borehole in the Songliao Basin, NE China[J]. *Geosciences Journal*(in press).
- ZHANG Xiao-huan. 2018. Source Rock Geophysical Log Response Characteristic and Evaluation from the Scientific Drilling Boreholes in the Songliao Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jin-huan, ZOU Chang-chun, FU Hai-cheng, XIAO Liang, PENG Cheng, NIU Yi-xiong. 2017. Pore structure characterization of the Cretaceous Quantou Formation: Results from microresistivity imaging logs in the second scientific drilling borehole (SK-2 east borehole) Songliao basin, northeast China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159: 915-926.
- ZHU Yong-yi, WANG Wen-shi, WU Xiao-ming, ZHANG Heng-chun, XU Jie, YAN Jia, CAO Long-long, RAN Heng-qian, ZHANG Jin-chang. 2018. Main technical innovations of Songke Well No.2 Drilling Project[J]. *China Geology*, 1(2): 187-201.
- ZOU Chang-chun, LIU Dong-ming, NIE Xin, XIANG Biao, NIU Yi-xiong, KONG Guang-sheng. 2012. Fracture Characterization Using Image Logging in Borehole 3 of Wenchuan Earthquake Fault Zone Scientific Drilling (WFSD-3)[J]. *Geoscience*, 26(6): 1146-1153(in Chinese with English abstract).
- ZOU Chang-chun, XIAO Liang, NIU Yi-xiong, HOU Jie, PENG Cheng. 2016. General design of geophysical logging of the CCSD-SK-2 east borehole in the Songliao basin of Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 279-287(in Chinese with English abstract).
- ZOU Chang-chun, ZHANG Xiao-huan, PENG Cheng, ZHAO Jin-huan. 2017. Method for Evaluating Thermal Properties of Sedimentary Basin Formation with Well Logs and Its Application: A Case Study of CCSD-SK-2 East Borehole[C]//Proceedings of the 2017 Annual Symposium on Chinese Geoscience Union: 1033-1035(in Chinese).