

doi: 10.13745/j.esf.2017.01.014

松辽盆地白垩系大陆科学钻探“松科 2 井”选址

王璞珺¹, 刘海波¹, 任延广², 万晓樵³, 王树学⁴, 瞿雪姣⁵, 蒙启安²,
黄永建³, 黄清华², 高有峰⁶, 王成善³

1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061
2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712
3. 中国地质大学 生物地质与环境地质国家重点实验室; 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
4. 大庆钻探工程公司 地质录井一公司, 黑龙江 大庆 163411
5. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331
6. 吉林大学 古生物学与地层学研究中心, 吉林 长春 130026

WANG Pujun¹, LIU Haibo¹, REN Yanguang², WAN Xiaoqiao³, WANG Shuxue⁴, QU Xuejiao⁵,
MENG Qi'an², HUANG Yongjian³, HUANG Qinghua², GAO Youfeng⁶, WANG Chengshan³

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China
3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences; School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
4. No.1 Geo-logging Company, Daqing Drilling and Exploration Engineering Company, Daqing 163411, China
5. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China
6. Research Center of Palaeontology & Stratigraphy, Jilin University, Changchun 130026, China

WANG Pujun, LIU Haibo, REN Yanguang, et al. How to choose a right drilling site for the ICDP Cretaceous Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin (SK2), Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 216-228

Abstract: The Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin has been done since 2005, which include the SK1, having finished in 2007, and the SK2 that started drilling in 2014 and is expected to finish in 2017. The purposes of the project are as followings, to drilling through the whole Cretaceous sequence of the Songliao Basin, to obtain continuous high resolution continental geological records by the means of the so-called “2 wells 4 holes drilling procedures”, to research the Cretaceous greenhouse climate changes in order to be better prepared with the challenge caused by the nowadays global warming event. According to the goals above we proposed the rules for the site selection of the SK2 as follows. Firstly, stratigraphic sedimentary records should be continuous. Secondly, sedimentary rocks are preferred, especially the lacustrine fine clastic rocks. Thirdly, thickness of the overburden cap rocks should be as thin as possible. Fourthly, faults should be avoided of. At last, ground conditions should be as good as possible such as roads, electric power, water supply, and so forth. We finally chose the site of SK2 in the Songzhan area where the lacustrine mudstone is well developed in the Xujiaweizi faulted depression of the Songliao Basin. The major target drilling succession is the Lower Cretaceous, namely, Yingcheng, Shahezi, and Huoshiling Formations. The strata under drilling are interbedding sequence of sandstone, siltstone, mudstone and coal, which are intercalated with volcanic rocks and pyroclastic rocks. They are mainly dark rocks of lacustrine facies which reflect the reduced environment. We shall drill through the top boundary (T₄) and bottom boundary (T₅) of rift fill successions, the boundary between the Upper and Lower Cretaceous, the boundary between Cretaceous and Jurassic (K/J). All these boundaries indicate important geological events which reflect changes of regional tectonics and basin filling

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB822002); 中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目(DD20160207-06)

作者简介: 王璞珺(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质勘查、沉积学与火山岩储层方面的研究与教学。E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2017, 24(1)

styles. With the continuous coring section, we can also obtain some other important geological records with global meanings such as the Cretaceous normal polarity superchron (CNS) and oceanic anoxic event (OAE-1).

Key words: ICDP drilling in the Songliao Basin; lake and fluvial sedimentary sequence; Cretaceous greenhouse climate; Tithonian to Albian

摘要: 松辽盆地大陆科学钻探工程已经进行了十余年(2005—2016), 松科1井于2007年完钻, 松科2井于2014年开钻, 预计2017年底完钻。该工程的目的是通过实施“2井4孔”钻探, 打穿松辽盆地白垩系, 获取万米连续高分辨率的陆相地质记录, 用以研究白垩纪时期的温室气候变化, 以期更好地应对全球变暖使人类面临的挑战。据此确定松科2井的选址原则: 地层沉积记录连续; 以沉积岩为主, 尤其是以湖相细碎屑岩为主; 厚度尽可能薄; 构造简单; 地面施工条件好。松科2井选在松辽盆地徐家围子断陷中沙河子组湖相泥岩最为发育的宋站地区。钻探主要目的层为下白垩统断陷层序的营城组、沙河子组和火石岭组。钻遇主要岩性为含火山岩和火山碎屑岩的砂岩、粉砂岩、泥岩、煤层互层序列, 以河湖相反映还原环境的暗色岩系为主。期间穿过断陷层顶(T_4)、底(T_5)界面, 上下白垩统界面和白垩系/侏罗系(K/J)界面等反映区域构造-成盆作用的重要地质界线, 还会取得与白垩纪超静磁带(CNS)和全球大洋缺氧事件(OAE-1)等重要地质事件相对应的连续岩心记录。

关键词: 松辽盆地大陆科学钻探; 河湖相沉积序列; 白垩纪温室气候; 蒂托阶至阿尔必阶

中图分类号: P534.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2017)01-0216-13

1 国际大陆科学钻探计划与中国科钻工程

1.1 关于国际大陆科学钻探计划(ICDP, International Continental Scientific Drilling Program)

大陆科学钻探始于20世纪70年代前苏联在北极克拉半岛实施的若干科学钻探, 其中最著名的为SG-3井, 终孔深度达12 261 m^[1]。1987年至1994年, 德国进行了“联邦德国大陆深钻计划(KTB, 德文为Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland)”钻探项目, 主孔终孔深度达9 101 m^[2]。1992年11月, 在世界经济合作与发展组织(OECD)的大科学论坛上, 与会各方为了协调世界范围内的大陆科学钻探活动, 减轻各国实施该活动的成本和风险, 实现成果共享, 最终促进大陆科学钻探在地学研究中的推广应用, 建议成立“国际大陆科学钻探计划”(ICDP)。1993年8月30日至9月1日, 德国地学研究中心(GFZ, 德文为GeoForschungsZentrum)在波茨坦召开科学钻探国际会议, 有来自28个国家的250余人出席了此次会议, 会后正式讨论了成立ICDP的科学目标和组织机构, 宣布执行全球大陆科学钻探的执行纲领^[3]。1996年2月26日, 中国地质矿产部、美国自然科学基金和德国联邦教育科技部的代表分别代表各国政府正式签署合作备忘录(MoU), ICDP宣告成立。其总部设在德国波茨坦的德国地学研究中心。中国、美国和德国由此成为ICDP的3个发起国。目

前, ICDP已经有24个成员, 其中23个为国家成员, 另外一个为联合国教科文组织(UNESCO)。ICDP已在全球13个国家打了一百余口深浅不一的大陆科学钻探。ICDP资助项目的科学目标主要分为资源、环境和灾害3个方面(图1)。

1.2 中国大陆科学钻探项目(东海科钻、青海湖科钻、松辽盆地科钻)

1997年1月, 中国正式加入了ICDP, 成为该组织的理事国之一。目前, 我国已经实施的ICDP项目有3项, 分别为东海CCSD-1井、青海湖环境钻探和松辽盆地SK1和SK2井^[4-7]。1996年我国向ICDP提交了在中国实施第一口国际大陆科学钻探工程立项建议并于1998年正式获得批准, 同时该项目列入国家重大科技工程并于2001年6月25日开钻。2005年4月18日中国大陆科学钻探工程正式竣工^[4-5]。2004年ICDP批准了我国第二口科学钻探工程“青海湖环境科学钻探”, 并于同年开始实施^[6]。松辽盆地大陆科学钻探是我国获得ICDP资助的第三个项目, 由松科1井和松科2井两部分组成。在国家科技部和大庆油田有限责任公司共同资助下, 松科1井已于2007年完钻, 完成取心进尺2 577.24 m, 获取岩心总长2 485.89 m, 取心收获率96.46%, 是迄今为止世界首次取得的最长的白垩纪陆相盆地沉积记录^[7]。松科1井钻探分两孔进行, 称为“一井双孔”。北孔完成泰康组底部到嫩二段的取心任务, 取心进尺1 630.41 m, 心长1 541.66 m, 收获率94.56%。南孔完成了嫩二段底部至泉三段顶部的取心任务, 取心进尺946.83 m, 心长944.23 m, 收获率99.73%^[8-9]。国内外相关专



图2 2005年以来从松科1井到松科2井若干时间节点相关活动照片

Fig. 2 Key activities and milestone times during the management of the SK1 and SK2 since 2005

物演化、烃源岩成因和古地磁等4个科学小组(Science Team), 分别进行相关科学问题的论证和申请书的编写。经中方学者统稿、修改, 于2008年1月18日正式向国际大陆科学钻探委员会提交了题目为《白垩纪松辽盆地大陆科学钻探项目: 连续高分辨率陆相沉积记录与温室气候变化》的项目完整申请书。

(4) 申请书的评审。经过国际大陆科学钻探组织专家委员会(SAG)和执行委员会(EC)的评审, 认为该项目科学和资源两方面都具有重要意义, 所以原则上批准了该项目, 并在当年在挪威召开的第32届国际地质大会上向大会代表发布了这

一消息。在此次大会上, 国际大陆科学钻探计划组织执行主席 Emmermann 教授还就松辽盆地科学钻探问题向参会的国际大陆科学钻探计划中国委员会副主任许志琴院士征求了意见, 许志琴院士也向他表达了全力支持该项目实施的意见。同时, 鉴于预算和钻探技术与井址等问题, 2008年5月ICDP返回对项目完整申请书的24条修改意见。以中方为主的申请书撰写人员, 通过对评审意见的细致分析, 对评审意见进行了逐一的回答, 并在2008年10月将评审意见的回复, 以附录的形式再次提交国际大陆科学钻探委员会。

(5) 申请书的批准。在 2009 年 8 月举行的国际大陆科学钻探组织国家理事会(AOG)年会上,该项目获得了批准。据悉,同批次申报项目超过 10 余项,最终获准的仅为 3 项。项目首席科学家于 2009 年 9 月收到国际大陆科学钻探计划组织执行主席 Emmermann 教授签发的项目批准信函。据项目资助信函的要求,同时也是基于国际大陆科学钻探计划项目的惯例,本项目首席科学家王成善教授于 2009 年 9 月至 2010 年 1 月期间,就该项目的执行与国际大陆科学钻探组织达成相关协议(Joint Research Venture, JRV)并签署了相关的文件。

2 在松辽盆地实施科学钻探的地质条件优势

“唯一性”原则是国际大陆科学钻探计划的基本规则之一,即,同一时代的地层 ICDP 全球通常只能支持一口科探井^[3]。这就意味着,松辽盆地白垩系大陆科学钻探计划(松科 2 井)获得 ICDP 资助的

前提,是以往没有实施过陆相白垩系大陆科学钻探;同时还意味着,松科 2 井科钻计划实施后,ICDP 通常不会再资助相同地质时代的类似科探计划。也就是说,ICDP 资助项目通常具有很强的排他性。这也是获得 ICDP 资助难度大的重要原因之一。能够说服国际同行专家最终获得 ICDP 资助的先决条件主要有,选区地质条件、先期工作基础和工程可行性及其环境效应等。其中,是否具有全球对比优势的地质条件,同时还能够提供令人信服的相关证据,是获准 ICDP 资助的基础和必要条件^[3]。

松辽盆地地处欧亚大陆东缘,中生代位于北部蒙古—鄂霍茨克缝合带与东部太平洋板块俯冲带之间,沉积了厚达万米的白垩系火山-沉积序列^[11]。早白垩世时期,包括松辽盆地在内的广大东北亚地区,在北部蒙古—鄂霍茨克和东部锡霍特阿林两个活动陆缘带的共同作用下,形成了大范围以火山沉积序列为主的下白垩统裂谷盆地群。晚白垩世时期,在太平洋板块作用下松辽盆地进入快速沉降期,沉积了厚达 6 000 余米的上白垩统沉积,嫩江组时

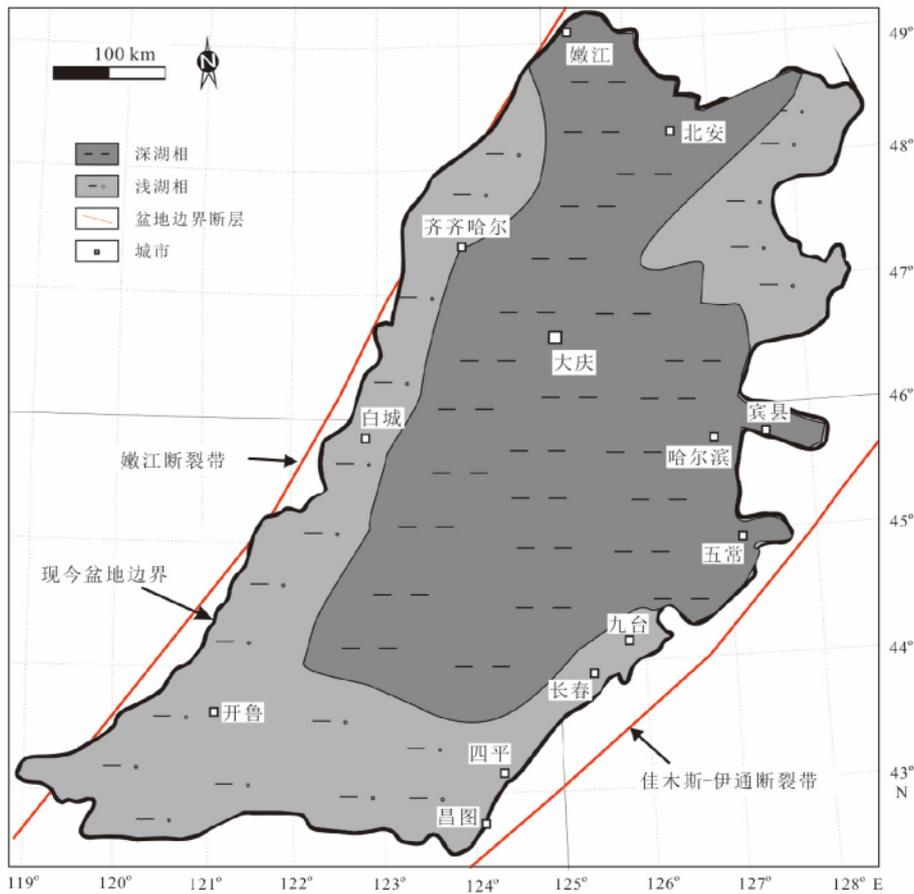


图 3 松辽盆地嫩江组早期盆地范围和沉积相展布 (据文献^[13]修改)

Fig. 3 Basin size and facies distribution of the Upper Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin

期湖区面积超过 30 万 km² (图 3)^[12]。松辽盆地白垩纪时期经历了同裂谷(syn-rift, 150~105 Ma)、后裂谷(post-rift, 105~79.1 Ma)和构造反转(structural inversion, 79.1~64 Ma)3 个构造演化阶段, 连续成盆和接受沉积的时间长达 86 Ma^[13]。与全球同期白垩系主要盆地相比(图 4), 松辽盆地发育历史最长、沉积厚度最大、主期沉积速率最大(地层沉积记录的分辨率最高)。同时松辽盆地面积也是比较大的, 晚白垩世沉积范围大于 26 万 km²^[23], 而且湖相细粒碎屑沉积在整个白垩系沉积序列中占主体, 这为白垩纪古气候研究提供了理想的地质记录^[24-25]。这些地质条件优势, 是我们最终获得 ICDP 资助, 在与欧美强有力对手竞争中能够胜出的基本保障。

3 松科 2 井科学目标、选址原则和选址结果

3.1 松科 2 井科学目标

松科 2 井的科学目标, 用一句话来表述就是, 获

取连续高分辨率陆相地质记录用以研究白垩纪时期的温室气候变化。实际上松科 2 井是在松科 1 井成功实施的基础上部署的, 松科 2 井与松科 1 井在钻探层位方面是相互衔接的, 在科学目的方面是一致的。把两口科探井结合起来, 更能够完整、准确表述松辽盆地大陆科学钻探的目的和意义。可以说这是一项系统工程, 其目的包括获取岩心实物资料本身、获取这些岩心用于古气候和大规模烃源岩成因研究、建立白垩系陆相地层标准, 以及通过深孔科学钻探工程带动行业技术进步等。这些内容可表述为: 通过科学钻探工程, 实现“两井四孔、万米连续取心, 钻穿白垩系”, 获取松辽盆地白垩系完整岩心, 填补完整的、连续的白垩纪陆相沉积记录世界空白, 为研究距今 6 500 万年至 1.45 亿年间地球温室气候环境变化奠定坚实基础。同时, 阐明大庆油田形成的原因、过程和结果, 建立起为建设“百年大庆”和基础地质服务的“金柱子”。通过获取松辽盆地深达 6 400 m 的原位、连续地球物理参数, 为松辽盆地及其相关类似盆地的地球物理勘探提供科学“标尺”。以大陆深部科学钻探为平台, 全面提升我国深部科

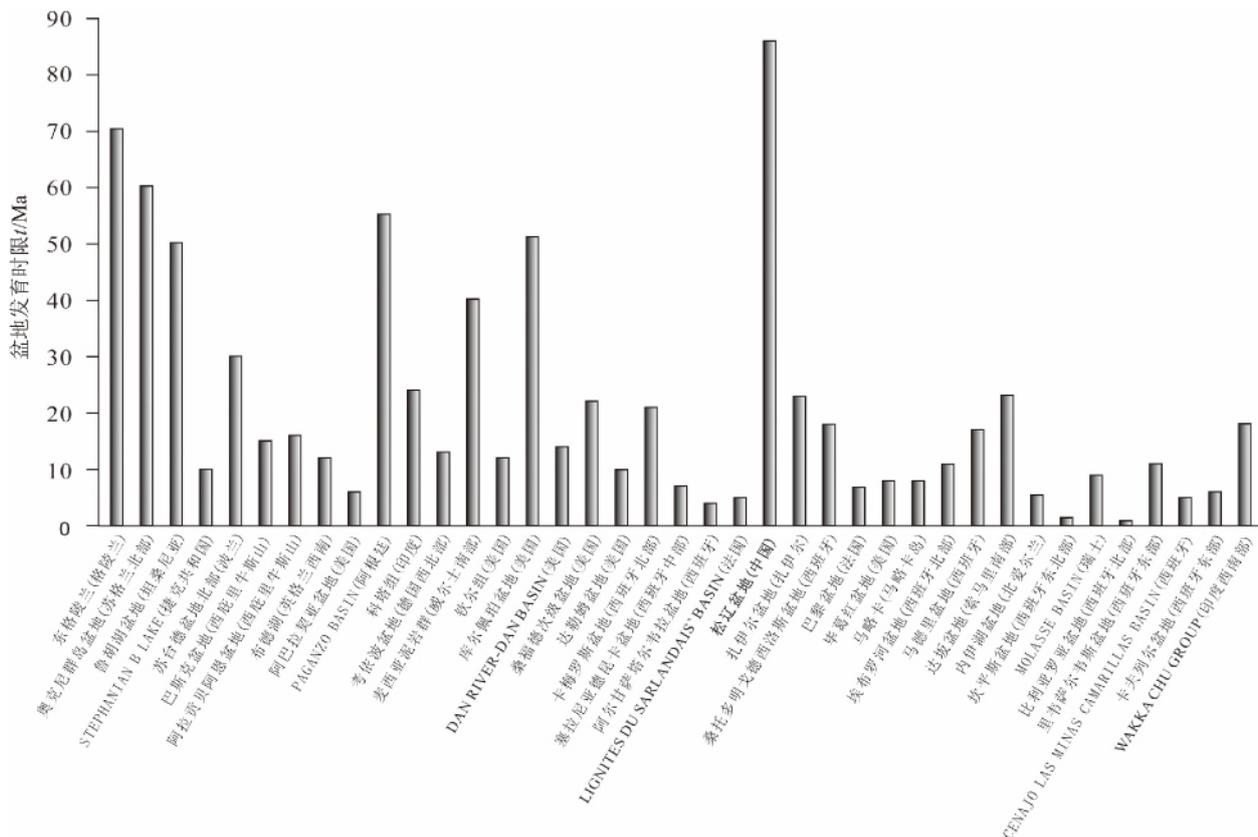


图 4 白垩纪松辽盆地发育时限及其与全球同期主要盆地的对比^[11,13-22]

Fig. 4 Duration of the Cretaceous Songliao Basin and its comparison with the contemporary basins on the globe^[11,13-22]

学钻探技术水平, 最终形成具有我国自主知识产权的科学钻探技术和方法体系, 为我国万米超深井科学钻探提供技术储备, 使我国深部大陆科学钻探技术研发水平达到国际先进水平, 为我国重大地球科学新发现和矿产资源储量快速增加提供技术保障。

3.2 松科2井选址原则

首先这里需要解释一下, 上一节提到的“两井四孔、万米连续取心, 钻穿白垩系”, 这是由松辽盆地自身的发育特点和演化历程所决定的。松辽盆地晚白垩纪时期, 经历了沉积沉降中心自东南向西北不断迁移的演化过程。这就导致了松辽盆地

晚白垩世早期的沉积记录在东部更发育, 而晚期的地层主要集中在西部。这也意味着, 在盆地的任何一点都难以获取完整的从早期到晚期的白垩纪地质记录, 因此, 需要在东部钻探较为下部的白垩系地层, 在西部钻探较为上部的地层。如图5所示, 两井四孔指松科1井(南北两孔)和松科2井(东西两孔), 万米连续取心和钻穿白垩系指两井四孔钻探工程能够获取累计约1万m长的岩心, 这些岩心构成松辽盆地跨越整个白垩系(150~64 Ma)的完整地层记录。

以温室气候研究为目标, 基于松辽盆地地质条

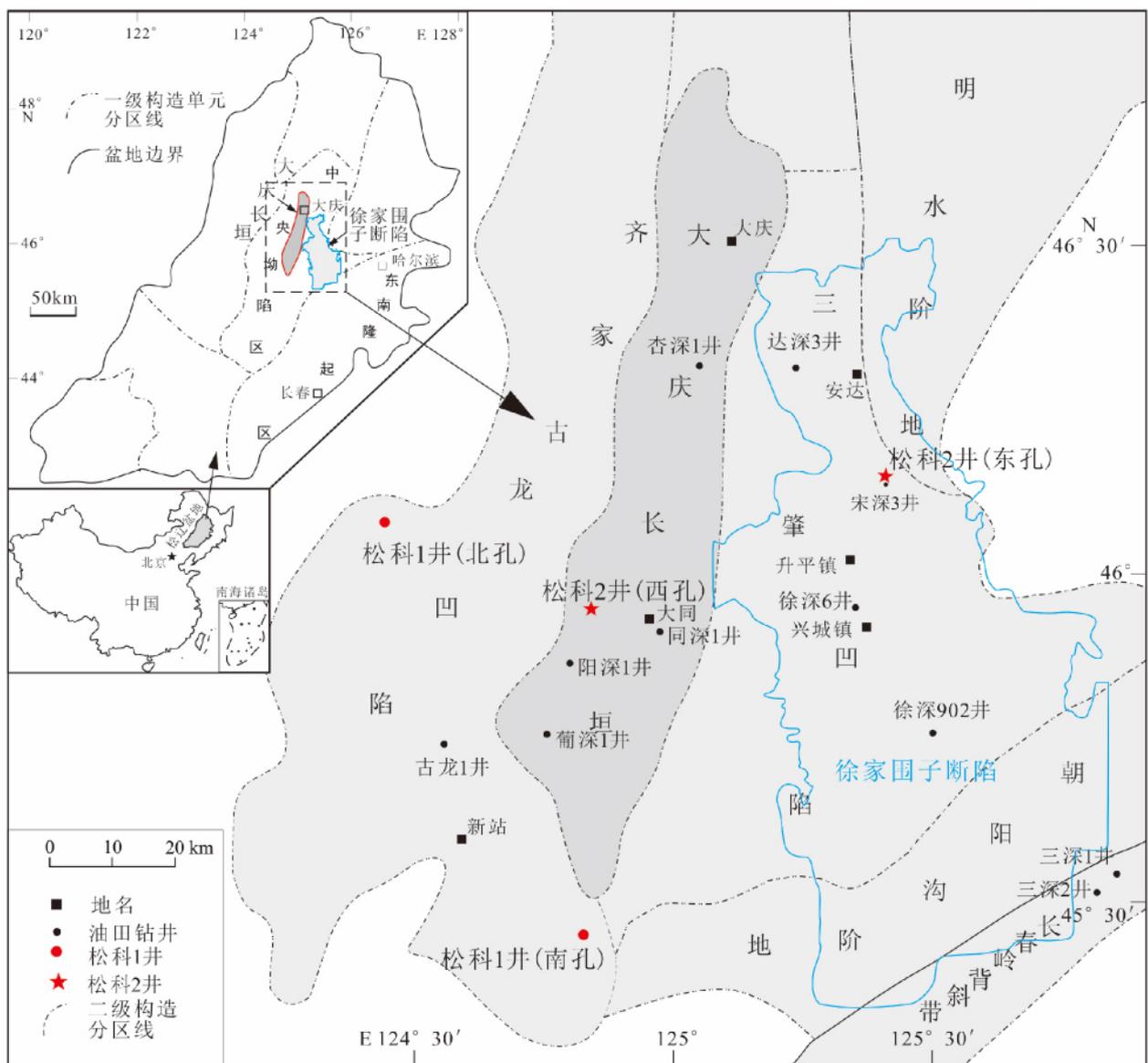


图5 松辽盆地松科1井(南北孔)和松科2井(东西孔)地理与构造位置图
(据文献[26]修改)

Fig. 5 Geographical and structural locations of the SK1 and SK2 in the Songliao Basin

件,考虑工程可行性和尽量降低工程难度,我们确定松科2井选址原则为:地层发育连续、地层记录完整,尽量选择泥质岩发育较多的地区(能反映古气候变化、地层记录齐全且厚度薄),上覆地层尽量薄(选择构造高部位),构造简单(避开主干断裂、小型断层尽量少)。在满足地质要求基础上,地面施工条件要尽量好,道路、供电等现有基础设施尽量完善。松科2井东孔钻探目的层位是下白垩统,该层序营城组顶部为全区发育的 T_4 反射层(全盆地和断陷内均可对比),因此,双孔方案用 T_4 作为衔接标志层。在松科2井的实际实施中,我们具体确定出松科2井井址选择遵循5点基本原则:(1)地层沉积记录连续;(2)以沉积岩为主,尤其是以湖相细碎屑岩为主;(3)厚度尽可能薄;(4)构造简单;(5)施工条件好。其具体内涵如下。

(1)地层发育连续、地层记录缺失最少。科学钻探的重要特征是对钻遇地层进行取心,连续取心获得的高精度、连续的沉积记录是进行海-陆对比、气候-环境研究和油气资源精细评价的基础。同时陆相地层易于受构造运动、气候变化等因素影响,连续性较海相地层通常要差些,地层缺失亦不可避免,因此更应该在全盆地范围内选择连续的、缺失最少的地区开展科学钻探。

(2)以湖相细粒沉积为主。在构造活动较弱的地区,湖相沉积物对气候-环境变化、重大地质事件反应敏感,尤其是含有较少外源碎屑的深湖相泥岩;其地层记录齐全且厚度薄,又是陆相成油气的主要烃源岩,因此是科学钻探的理想目标层位。

(3)上覆地层尽量薄。松科2井的主要目的层为松辽盆地泉头组及其以下的登娄库组、营城组、沙河子组和火石岭组地层。选择在上覆地层尽量薄的地区开展钻探,可尽快到达目的层,可以大大减少钻探进尺、节省资金和时间。

(4)构造简单。断裂发育可能会导致地层缺失、倒转、重复甚至在大型构造带附近会发生轻微变质作用(如糜棱岩化或千枚岩化),从而引起地层不连续或者原始沉积记录被破坏,影响古气候研究的效果,同时也会给工程实施带来重大质量和安全隐患。因此,选址过程中要求尽量避免各种规模的断层。

(5)地面工程难度最小。科钻井选区所在的松辽盆地,湖沼湿地广布。在地理位置上,科学钻探的井位应当处于既有较好地面施工条件,同时又交通便利的位置,以最大限度降低施工难度和风险。

3.3 松科2井选址过程和结果

不同于通常的地质类科研项目,松辽盆地大陆科学钻探属于较大规模的科学技术工程,涉及面较广,需要不同部门间协调和多学科专业技术人员的共同智慧和集体力量。我们在此对这项科技工程的实施过程进行简要回顾,以期对类似科技项目有借鉴意义。表1是对代表性实施活动概括性总结,其中主要表述两个要点:(1)突出典型会议及其研讨的目的和意义;(2)各项活动在职探井部署过程中的逻辑关系(包括其普适性,即,其他科探井部署,可能也要进行的流程)。松科2井选址结果列于表2。

表1 松辽盆地科钻工程松科2井选址实施过程中代表性活动及其时间流程
Table 1 The representative activities and process in the management of the Continental Scientific Drilling Project in the Songliao Basin (SK2)

时间	名称	会议地点	主要内容	决议	项目实施阶段
2011年 2月20日	松辽盆地科学钻探工作会议	北京	讨论松辽盆地科学钻探的钻探实施方案、费用预算和安排近期工作计划等	安排完成经费预算、地质设计、工程设计和组织井位踏勘	筹备
2011年 6月11日	松辽盆地大陆科学钻探工程项目可行性论证会	北京	进行项目论证工作汇报,项目组回答评审专家提问,并征求专家意见	专家组形成最终评审意见并一致同意通过该项目的可行性论证	申请立项
2011年7月 6—7日	松科2井东孔井位论证会	大庆	讨论松科2井东孔井位和现场实验室问题,并到井址现场进行考察	选定松科2井东孔井位	井位论证、踏勘

表 2 松科 1 井和松科 2 井位置和主要地质和工程参数表^{[8-9], ①}Table 2 Locations and main geological and engineering parameters of the SK1 and SK2^{[8-9], ①}

项目	松科 1 井(南孔)	松科 1 井(北孔)	松科 2 井(东孔)	松科 2 井(西孔)
地理位置	黑龙江省大庆市肇源县茂兴镇幸福村赵家窝棚屯东 2.5 km	黑龙江省大庆市大同区小庙子屯东约 150 m 处	黑龙江省安达市羊草镇六撮房村东南约 0.25 km	黑龙江省大庆市大同区八井子乡西北约 4.0 km
构造位置	松辽盆地北部中央坳陷区古龙凹陷敖南鼻状构造	松辽盆地北部中央坳陷区古龙凹陷他拉哈向斜	松辽盆地东南断陷区徐家围子断陷带宋站鼻状构造	松辽盆地中央坳陷区古龙凹陷高西鼻状构造
完钻井深/ 设计井深	1 935.00 m	1 811.80 m	6 400.00 m	5 225.00 m
完钻层位	泉头组三段	嫩江组一段	基底	营城组
(设计) 取心层位	嫩江组、姚家组、青山口组、泉头组	泰康组、明水组、四方台组、嫩江组	嫩江组、营城组、沙河子组、火石岭组、基底	泉头组、登娄库组
(设计) 取心井段	968.17~1 915.00 m	164.77~1 795.18 m	1 073.91~1 147.56 m; 1 182.74~1 256.01 m; 2 826.48~6 400.00 m	1 555.00~5 225.00 m
取心进尺	946.83 m	1 630.41 m	2 592.66 m ^②	
岩心长度	944.23 m	1 541.66 m	2 520.56 m ^②	
岩心收获率	99.73%	94.56%	97.22% ^②	
施工时间	2006 年 8 月 18 日开钻; 2006 年 11 月 4 日完钻	2006 年 8 月 29 日开钻; 2007 年 10 月 20 日完钻	2014 年 4 月 13 日开钻; 未完钻	待钻

4 松科 2 井地层序列

模拟地层柱状图在松科 1 井和松科 2 井钻探施工中,发挥了不可替代的重要作用,可能成为以后类似科探工程的成功范例。模拟地层柱状图的想法最初是由首席科学家王成善教授提出来的,亦即,在钻探施工之前依据现有所有的地质-地球物理等相关资料,预测出将要钻遇地层的岩性序列,而且精度要尽可能的高(需要预测到米级至分米级厚度)。松科 1 井北孔和松科 2 井东孔,按照工程招投标程序向社会公开招标;然后由中标单位分别实施钻探、测井、录井和井控等相关具体工程。模拟地层柱状图是投标文件中,工程设计和费用计算的最主要依据。松辽盆地石油勘探已经进行了 50 余年,积累的丰富的钻井和地震资料,这是在松辽盆地实施大陆科学钻探的资料优势。我们根据邻井钻孔资料和工区三维地震层位对比,预测出松科 2 井地层序列、岩

石类型和相关的地下温度、压力和流体情况^[26-27]。松科 2 井地层序列如下(图 6)。

登娄库组:组底部为暗紫色泥岩与灰色粉砂岩、灰白色细砂岩呈不等厚互层,与下伏地层呈不整合接触。

营城组:上部为绿灰色粗砂岩、砾岩和砂砾岩,下部为厚层紫色凝灰岩,厚层绿色、灰色凝灰岩夹灰色安山玄武岩,与下伏地层呈不整合接触。

沙河子组:黑色泥岩夹黑色煤线,夹薄层灰色细砂岩、深灰色粉砂岩和泥质粉砂岩,底部为灰色砂砾岩、粗砂岩与灰黑色泥岩呈不等厚互层,与下伏地层呈不整合接触。

火石岭组:上部为灰色凝灰岩、泥岩,绿灰、灰绿色英安岩、安山岩和黑色安山岩,下部为暗色泥岩夹细粉砂岩,含煤,与下伏地层呈不整合接触。

石炭—二叠系基底:为杂色、绿色砾岩,绿色变质岩(可能为极低级或高级成岩的石炭—二叠系沉积地层)。

① 吉林大学,大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,大庆钻探工程公司地质录井一公司. 松辽盆地大陆科学钻探 2 号井(松科 2 井)钻井地质设计, 2013. 松科 2 井西孔钻井地质设计(初稿), 2011.

② 数据统计更新截至 2016 年 7 月 14 日.

5 讨论

5.1 松科 2 井主要地质界面

松科 2 井将钻穿松辽盆地整个下白垩统陆相地层, 自上而下包括登娄库组下部、营城组、沙河子组、火石岭组和石炭—二叠系基底极低级变质沉积岩类(图 6)。钻遇的主要地质界面有断陷层序顶部的 T_4 反射层, 断陷层序底部或基底顶部的 T_5 反射层。其中, T_4 界面标志着同裂谷演化阶段结束和大规模整体拗陷或者后裂谷期的开始, 可称之为“裂谷顶部不整合(top-of-rift unconformity)”^[13]。 T_5 界面标志着裂谷作用的开始, 是基底岩石在裂谷前隆升或掀斜作用下遭受剥蚀的结果, 可称之为裂前剥蚀不整合(pre-rift erosional surface)^[13]。除此之外, 侏罗系与白垩系的界限 J/K 界面可能位于火石岭组下部的沉积层序之中^[28]。

5.2 松科 2 井关键地质事件

除补充采取了松科 1 井关键层段嫩江组岩心外, 松科 2 井取心井段为营城组至火石岭组(图 6), 其地质年代相当于 105~150 Ma, 即, 从晚侏罗世 Tithonian 到早白垩世末期的 Albian 中部。这期间发生了一系列值得高度关注的全球性地质事件。例如, 白垩纪超静磁带(CNS)的启动时间(M_0 , 约 125 Ma)^[29-31]可能出现在营城组下部到沙河子组上部, 全球性大洋缺氧事件(OAE-1a)可能对应于营城组火山岩底部^[32]。松科 2 井连续取心记录, 对于揭示全球(大洋)事件的陆地响应及其形成机理, 将会起到不可估量的重要作用。

5.3 一井双孔方案

一井双孔是指以上白垩统为目的层的松科 1 井实际实施南、北两孔钻探完成; 以下白垩统为目的层的松科 2 井将要通过东、西两孔钻探完成。该方案是 2006 年初在大庆油田研究院讨论松辽盆地科探井选址时, 由王达(东海科钻总工程师)和王苏民与王成善教授共同提出并经集体商讨确定下来。实践证明, 由于这样的钻探实施方案, 可在埋深较浅的位置取得深部地层的岩心, 因此降低了施工难度, 缩短了工期, 大大节省了钻探经费。该方案充分利用松辽盆地的地质条件, 即, 松辽盆地白垩纪期间, 沉积沉降中心自东南向西北持续迁移, 因此, 早期地层东部发育而晚期地层西部发育。我们按照盆地的迁移规律部署科探井, 不仅能取全所有层位, 而且能够实

现“万里取心”的目标; 其实我们 4 孔中最大深为 6 400 m(表 2)。由于盆地沉积沉降中心在地质演化过程中发生某种形式的迁移, 是盆地形成演化的一般性规律, 具有一定的普遍性。因此, 一井双孔方案在类似沉积盆地的科学钻探中, 应该具有借鉴意义。

5.4 科探井与产业结合

德国 KTB 科钻井前期研究和选址费用占总费用的 3%, 为 1 583.4 万德国马克(注: 工程总费用 5.278 亿德国马克, 1995 年前后 1 马克大约兑换 6 元人民币)^[2]。与之相比, 松科 1 井和松科 2 井的前期研究和选址工作所产生的费用就很少了。总的费用没做过详细统计, 估计不超过 1~2 百万元人民币。虽然花销很少, 但我们对地下地质情况(包括地层、岩性、断层、地温和压力等)的预测结果与实际钻探情况的吻合程度高达 80%~90%, 比德国 KTB 的情况要好得多。这种又快、又好、又省的结果, 完全得益于科探井与产业的结合。因为, 我们充分利用了松辽盆地油气勘探几十年积累下来的大量钻孔和地震资料。选址过程中, 产-学-研人员联合攻关, 不仅充分利用已有资料, 更发挥出了集体的智慧和各自的勘探和研究经验。已经完成的取心结果证明, 我们在整个松辽盆地 26 万 km^2 范围内, 确实选出了最佳井位。松科 1 井于 2007 年完成, 相关研究工作已经进行将近十年。研究经验表明, 科探井与产业结合还能够产生“成果放大作用”, 亦即, 科探井周围的邻井资料对相关研究也大有用处, 通过多井对比往往能够使得科探井资料的科学价值大大增加。这些成功经验对以后的科探井实施也应具有借鉴意义。

6 结论

松科 2 井的科学目的是获取连续高分辨率陆相地质记录, 研究白垩纪时期的温室气候变化, 为目前人类面临的全球变暖问题进行科学研究储备; 以期对人类一旦重新进入“温室气候”状态, 将会出现怎样的环境和生态状况有所预知。

科学目的决定选址原则, 简而言之, 松科 2 井就是在全盆地的范围内选择构造简单(断层较少)的湖相泥岩发育区, 进行钻探。最终筛选出整个松辽盆地沙河子组湖相沉积最为发育的徐家围子断陷北部的宋站构造带。井位距哈大高速、203 国道和 302 国道距离都在 6 km 之内, 交通和供电等基础条件

都比较好。

松科 2 井主要目的层为下白垩统至上侏罗统顶部的营城组、沙河子组和火石岭组, 相当于 Tithonian 至 Albian 中部, 对应的同位素年代 150~105 Ma。松科 2 井钻遇的主要岩性为含火山岩及火山碎屑岩的河湖相碎屑岩层序。其中, 互层状砂岩、粉砂岩、泥岩和煤层是主体岩性。总体上以灰色、灰黑色等暗色岩石为主, 反映温湿气候和还原背景的河湖相环境。

松科 2 井会穿过 T_4 (断陷层序顶界面)、 T_5 (断陷层序底界面/石炭二叠系基底顶界面) 两个区域性地震反射层, 以及 T_{4-1} 、 T_{4-2} 、 T_{4-a} 、 T_{4-b} 和 T_{4-c} 等 5 个局部地震反射界面。前者代表区域性构造-成盆事件, 后者代表盆地或断陷尺度内盆地充填过程和序列的变化。这期间还会钻遇上下白垩统界面、侏罗系与白垩系之间的 K/J 界面, 以及基底顶部剥蚀面等重要具有区域或全球意义的重要地质界面。尤其值得指出的是, 松科 2 井连续取心资料, 对详细研究白垩纪 125~83.5 Ma 之间的白垩纪超静磁带 (CNS), 尤其是其内部的短期反极性磁事件, 会具有难以预知的特殊意义。另外, 松科 2 井营城组下部至沙河子组上部的连续岩心, 对于研究发生在 121 Ma 前后的全球大洋缺氧事件 (OAE-1), 也是值得高度关注的。

参考文献

- [1] KOZLOVSKY Y A. The superdeep well of the Kola Peninsula[M]. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- [2] ENGESER B. KTB Report 95-3. Das kontinentale tiefbohrprogramm der bundesrepublik deutschland KTB bohrtechnische dokumentation [M]. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1996.
- [3] HARMS U, KOEBERL C, ZOBACK M D. Continental scientific drilling: a decade of progress, and challenges for the future[M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [4] 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 等. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展[J]. 中国地质, 2005, 32(2): 177-183.
- [5] WANG D, ZHANG W, ZHANG X X, et al. The China continental scientific drilling project[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [6] AN Z S, COLMAN S M, ZHOU W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. Scientific Reports, 2012, 2(8): 1036-1036.
- [7] 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等. 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, 2008, 82(1): 9-20.
- [8] 高有峰, 王璞珺, 王成善, 等. 松科 1 井南孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 669-675.
- [9] 高有峰, 王成善, 王璞珺, 等. 松科 1 井北孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 104-112.
- [10] 王成善, 孙友宏, 冯志强. 中国地质调查局新开计划项目可行性报告. 松辽盆地白垩纪大陆科学钻探: 连续高分辨率陆相沉积记录和温室气候变化[R]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [11] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 99-117.
- [12] WANG C S, SCOTT R W, WAN X Q, et al. Late Cretaceous climate changes recorded in Eastern Asian lacustrine deposits and North American Epiherc sea strata[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126: 275-299.
- [13] WANG P J, MATTERN F, DIDENKO N A, et al. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: an inverted active continental margin basin[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 82-102.
- [14] RAMOS V A, JORDAN T E, ALLMENDINGER R W, et al. Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes [J]. Tectonics, 1986, 5(6): 855-880.
- [15] HILLIER S. Origin, diagenesis, and mineralogy of chlorite minerals in Devonian lacustrine mudrocks, Orcadian Basin, Scotland[J]. Clays & Clay Minerals, 1993, 41(2): 240-259.
- [16] ALONSO J, ARILLO A, BARRÓN E, et al. A new fossil resin with biological inclusions in Lower Cretaceous deposits from Álava (Northern Spain, Basque-Cantabrian Basin)[J]. Journal of Paleontology, 2000, 74(1): 158-178.
- [17] RIMMER S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. Chemical Geology, 2004, 206(3/4): 373-391.
- [18] LINDHOLM R C. Triassic-Jurassic faulting in eastern North America: a model based on pre-Triassic structures[J]. Geology, 1978, 6(6): 365-368.
- [19] GONZÁLEZ-ACEBRÓN L, ARRIBAS J, MAS R. Provenance of fluvial sandstones at the start of Late Jurassic -Early Cretaceous rifting in the Cameros Basin (N. Spain)[J]. Sedimentary Geology, 2007, 202(1/2): 138-157.
- [20] MACKENZIE A S, PATIENCE R L, MAXWELL J R, et al. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France; I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(11): 1709-1721.

- [21] HILDENBRAND A, KROOSS B M, BUSCH A, et al. Evolution of methane sorption capacity of coal seams as a function of burial history: a case study from the Campine Basin, NE Belgium[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66 (3): 179-203.
- [22] MCGRAW S. Census, habitat preference, and polyspecific associations of six monkeys in the Lomako Forest, Zaire[J]. *American Journal of Primatology*, 1994, 34(4): 295-307.
- [23] FENG Z Q, JIA C Z, XIE X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 79-95.
- [24] WANG G D, CHENG R H, WANG P J, et al. High resolution continuous sedimentary records of Upper Cretaceous obtained from the continental drilling (SK-D) borehole in Songliao Basin: Sifangtai and Mingshui Formations[J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6: 895-912.
- [25] GAO Y F, WANG P J, WAN X Q, et al. High resolution continuous sedimentary records of Upper Cretaceous obtained from the continental drilling (SK-D) borehole in Songliao Basin: Nenjiang Formation[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7: 19-37.
- [26] 瞿雪姣. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井关键地质问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [27] 瞿雪姣, 杨立伟, 薛璇, 等. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井: 井底温度、地层压力预测[J]. *地学前缘*, 2017, 24 (1): 257-264.
- [28] 瞿雪姣, 王璞珺, 高有峰, 等. 松辽盆地断陷期火石岭组时代归属探讨[J]. *地学前缘*, 2014, 21(2): 234-250.
- [29] 胡修棉. 白垩纪中期异常地质事件与全球变化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 222-230.
- [30] 朱日祥, 潘永信, 史瑞萍. 地球磁场强度对地球内部动力学过程的制约[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(4): 265-270.
- [31] HE H Y, PAN Y X, TAUXE L, et al. Toward age determination of the M0r (Barremian-Aptian boundary) of the Early Cretaceous[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2008, 169(1/2/3/4): 41-48.
- [32] WANG P J, CHEN C Y, LIU H B. Aptian giant explosive volcanic eruptions in the Songliao Basin and Northeast Asia: a possible cause for global climate change and OAE-1a[J]. *Cretaceous Research*, 2016, 62: 98-108.

欢迎向英文刊《Geoscience Frontiers》投稿

《Geoscience Frontiers》是 2010 年获国家新闻出版总署批准的新英文刊物, 由中国地质大学(北京)、北京大学主办, 2010 年 10 月创刊出版。《Geoscience Frontiers》的办刊宗旨为: 瞄准国际地学领域学科前沿, 发表国内外地学前缘研究成果, 探索地学前缘发展态势, 为推动地学事业和加速我国现代化建设服务。诚邀国内外地学专家向《Geoscience Frontiers》投稿。

本刊参考文献采用著者-出版年制。

投稿系统: <http://www.elsevier.com/locate/gsf>

地址: 北京市学院路 29 号 中国地质大学(北京)《Geoscience Frontiers》编辑部

邮编: 100083 电话/传真: 010-82322283 E-mail: geofrontier@cugb.edu.cn