

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

王成善¹⁾,冯志强²⁾,吴河勇²⁾,王璞珺³⁾,孔凡军⁴⁾,冯子辉²⁾,
任延广²⁾,杨甘生⁵⁾,万晓瞧¹⁾,黄永建¹⁾,张世红¹⁾

- 1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,100083; 2) 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,163712;
3) 吉林大学地球科学学院,长春,130026; 4) 大庆油田有限责任公司勘探分公司,163453;
5) 中国地质大学(北京)工程技术学院,100083

内容提要:获取全球环境与气候变化记录是世界科学钻探发展的必然趋势。白垩纪作为地质历史时期“温室气候”的典型范例时期,提供了温室气候条件下地球气候系统运作和变化的良好档案。但是目前国际上针对白垩纪地层的科学钻探主要限于海相地层,对陆相白垩系的科学钻探尚属空白。在我国松辽盆地北部新近完成的中国白垩纪大陆科学钻探工程—松科 1 井项目有望在此方面取得重要的突破。该项目经过一年多的努力,钻探工程已经全部结束,总计获取岩心长 2485.89 m,收获率达 96.46%,是目前为止所获取的国际上第一条最长而且连续的白垩系陆相沉积记录。针对岩心的全面研究工作正在开展并已取得初步成果。相关研究工作进展突出表现在通过厘米级样品的取样与分析,将传统地质学百万年的时间分辨率提高到万年尺度,预计其研究结果可为解决当今的全球变暖问题提供重要的参照。利用松科 1 井科学钻探工程的原始科学资料和研究成果,对岩心已经和在建的包括岩石地层、古生物、沉积相、古地磁、有机地化、旋回地层、地微生物等十大剖面系列,进行科学钻探成果的集成。初步研究在沉积学和有机地球化学、旋回地层学、松辽古湖泊温度变化、地微生物和古大气中 CO₂ 浓度定量重建方面已取得重要进展。“松科 1 井”全部岩心剖切后,除用于现阶段研究外,38%将馆藏保存,向全世界科学家提供研究资料,其后续工程“松科 2 井”也已经被列入国际大陆钻探计划(ICDP)候选项目。

关键词:大陆科学钻探;白垩纪;松辽盆地;松科 1 井;研究进展

“上天、入地、下海是人类探索自然的三大壮举”(许志琴,2005),其中科学钻探是入地的重要手段,被称为伸入地球内部的“望远镜”。1993 年国际大陆科学钻探委员会(ICDP)成立以来,作为三大发起国之一的中国已经在大陆科学钻探领域方面取得令人瞩目的成绩,现已成功申请到中国大陆科学钻探工程—科钻一井和中国环境科学钻探青海湖工程两项 ICDP 项目。由许志琴和安芷生作为首席科学家的这两项大陆科学钻探项目已在 2005 年圆满完钻(许志琴,2005;安芷生,2006),所获得的高水平的研究成果得到国际相关领域的普遍关注和高度评价(汪品先,2007)。2006 年 8 月 18 日在松辽盆地北部中央坳陷区开钻的中国白垩纪大陆科学钻探工程—松科 1 井科学钻探工程是国际大陆科学钻探计划(ICDP)框架下第一口陆相白垩系科学钻探井,所

以它也被称为“中国第三钻”。同时,它也是目前正在实施的国家重要基础研究发展计划(973 计划)“白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化”项目的重要组成部分。2007 年 10 月 20 日松科 1 井科学钻探工程顺利完钻,在钻探工程和科学研究方面都取得了令人满意的初步成果。

1 科学钻探的发展趋势

众所周知,科学钻探始于 1968 年开始实施的“深海钻探计划”(DSDP)。由于 DSDP 和随后的大洋钻探计划(ODP)的实施和取得的接连科学突破,改变了整个地球科学发展的轨迹(汪品先,2007)。同时科学界发现作为全球系统的一部分,大陆在地球科学研究中的作用也日益增强,因此国际大陆钻探计划(ICDP)应运而生(Williams et al., 1997;

注:本文为国家重点基础研究发展计划项目“白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化”(编号 2006CB701400)资助的成果。

收稿日期:2007-08-28;改回日期:2007-11-02;责任编辑:郝梓国。

作者简介:王成善,男,1951 年生。黑龙江哈尔滨人,教授,主要从事青藏高原地质和盆地分析研究。Email:chshwang@cugb.edu.cn。

Kashiwaya et al., 2001)。ICDP 自 1996 年正式成立以来,已从早期的德国、美国和中国三大发起国发展到今天的 20 多个成员国,并且已在 13 个国家打了近 100 多口深浅不一的大陆科学钻孔。这些大陆科学钻探的实施,使得人类在了解和认识大陆的板块运动、地壳应力和地震、火山过程、深部资源、生命起源、地震灾害、全球变化及气候多样性等获得了巨大的成功(Truman, 2000; Detlev et al., 2004)。1999 年春,在中国的设计和主持下,实施了南海大洋钻探 184 航次,取得了南海 3000 多万年来沉积记录,不仅揭示了南海和气候环境演变的历史,而且发现了大洋碳储库的长周期演变,为探索气候变化的热带驱动打开了新途径(汪品先, 2007)。2005 年 3 月胜利完成的东海大陆超深钻探位于世界上规模最大的超高压变质带苏鲁超高压变质带南部,是世界上首次在坚硬的超高压变质岩中实施的科学钻探,现已在巨量物质深俯冲、超高压深俯冲与折返的精确定年、超高压岩石的原岩形成背景、上地幔流变学、地幔特殊新矿物发现、地下流体异常及地下微生物发现等方面已取得重要进展(许志琴等, 2005; Liu et al, 2001; Zhang et al, 2005; 2006; Hartmut, 2002)。坐落于青藏高原东北缘的青海湖,东邻黄土高原,西连荒漠和沙漠,处于东亚季风湿润区和内陆干旱区的过渡带上,对气候和全球环境变化十分敏感,是研究我国西部环境变化、青藏高原隆升过程、环境效应及它们与全球联系的极佳场所(安芷生, 2006; Colman et al, 2007)。2005 年 7 月开钻的青海湖环境科学钻探,其目的就是通过青海湖科学钻探的岩心研究,查明青海湖湖盆形成演化,气候构造变化和青海湖波动的历史,来达到了解东亚季风气候和内陆干旱化变迁的目的(安芷生, 2006; Colman et al, 2007)。

当前,随着全球变暖的趋势发展越来越快,人类的生存和发展越来越需要资源的保障和环境的支撑,人们愈来愈关注其生存的环境演化及未来发展趋势。所以,2003 年开始的综合大洋钻探计划(IODP)雄心勃勃的试图进一步扩展对洋底的探索,并且把“环境的变化、过程和影响”作为其着重研究的三个大的科学领域之一。正在实施的国际大陆科学钻探项目有 30 余项,主要研究领域包括全球环境与气候变化、撞击构造、地质生物圈和早期生命、活动断层、火山和热体制、碰撞带与会聚板块边界、自然资源、地幔柱和裂谷等。而其中近一半的项目是针对“全球环境与气候变化”研究(图 1)。显然,对

全球环境的研究已经是全世界科学钻探发展的必然趋势,对未来全球气候长时间尺度的预测提供参照已成为科学钻探的共同目标。

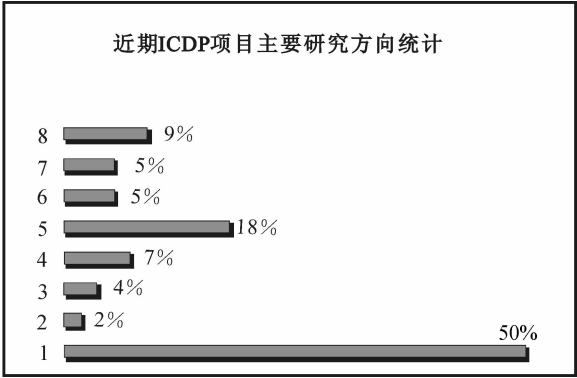


图 1 近期 ICDP 项目主要研究方向统计
(资料来源于 www. icdp-online. de)

Fig. 1 Recently the research directions of ICDP
(data from www. icdp-online. de)

- 1—气候变化和全球环境;2—撞击构造;3—地质生物圈和早期生命;4—活动断层;5—火山系统和热体制;6—碰撞带与会聚板块边界;7—自然资源;8—地幔柱和裂谷
- 1—Climate change and global environment; 2—Impact Structures; 3—Geobiosphere and early life; 4—Active faulting; 5—Volcanic Systems and Thermal Regimes; 6—Collision Zones and Convergent margins; 7—Natural resources; 8—Mantle plumes and rifting

2 中国白垩纪大陆科学钻探工程的目标与意义

最近时期的地球气候主要表现为冰室气候条件下的冰期/间冰期逐次轮换的特征(Miller et al., 1991; Wang, 2000),并可能主要受到地球轨道参数变化的控制。此现象可能与新近纪以来,大气 CO₂ 含量低于某个临界浓度有关(~560 ppmv, DeConto et al., 2003)。在此临界浓度之上,两极冰盖消失,地球将可能处于温室气候条件,气候系统的变化将遵循完全不同的模式。随着人类活动影响的加剧,大气 CO₂ 含量持续增加,可能在不远的将来突破该临界浓度,从而接近或达到白垩纪时期的浓度水平(Daniel et al, 2001; Berner, 2001)。因此了解温室气候条件下地球气候的变化机制就显得尤为重要。

白垩纪时期的地球代表了我们所知道的“温室气候”的典型状态(Tarduno, 1998; Skelton, 2003)。最近几十年以来主要通过稳定同位素,尤其是海相化石的碳、氧同位素研究表明,白垩纪气候演变的总

体趋势是早期气候较为凉爽、中期气候炎热、而到晚期温度又有所下降。例如有孔虫氧同位素数据表明,全球气温在 Turonian 期处于极端温室状态,当时地球平均表面温度比现今高 10℃ (Huber et al., 1995; Clarke et al., 1999; Huber et al., 2002; Wilson et al., 2002),白垩纪 CO₂ 含量是现今含量的 4~10 倍(Berner, 1994; Bice et al., 2003)。同时,白垩纪时期的大气/海洋系统发生了许多重要事件,例如造成富有机质黑色页岩在各大洋盆广泛发生的“大洋缺氧事件(Oceanic Anoxic Events, OAEs)”,被认为与气候变化密切相关(Schlanger et al., 1976; Arthur et al., 1994)。大洋缺氧事件通常伴随着海洋生物灭绝和碳同位素偏移(Erba, 2004),还常伴随对气候变化具有重大影响的海洋中甲烷-水合物的分解(Janhren, 2002)。在白垩纪大洋缺氧事件之后,在深水远洋、半远洋环境广泛出现一套以红色、紫红色为主的沉积物,被命名为白垩纪大洋红层(Cretaceous oceanic red beds, CORB)(Wang et al., 2004; Hu et al., 2005; 王成善等, 2005)。白垩纪大洋红层有机质含量极低,岩石类型多样,包括灰岩-泥灰岩、页岩-泥岩以及硅质岩等。白垩纪大洋红层在全球大洋深水环境广泛出现,并在约 80Ma 左右达到全球性分布。白垩纪大洋红层意义还在于,它表明了在该所谓白垩纪温室气候条件下,大气-海洋系统的不稳定性。这与以往通过古气候和古海洋模型得出的认识是不同的。

为了理解白垩纪气候快速变化,必须对海-陆相沉积记录进行整合研究。被子植物自 Barrimian-Aptian 的起源和快速辐射(Sun et al., 1998; 2002),为白垩纪早期的环境变化提供了最好的证据(Heimhofer et al., 2005)。脊椎动物化石同样可以提供重要的环境信息。由于白垩纪海平面的上升,使得原来连续的陆地被海水分隔为若干区域,为恐龙等动物的多样性演化提供了条件:小型恐龙主要繁盛在早白垩世;巨型陆地肉食动物(如暴龙)及大型鸭嘴龙则在晚白垩世出现(Ji et al., 1998, 1999, 2001, 2002; Chen et al., 1999; 钱迈平, 2007)。在过去 40 年期间内,国际科学界在深海和陆地实施了几十口针对白垩纪的海相科学钻探工程,白垩纪气候变化的海洋响应已得到很好地研究。但是,针对陆相沉积的科学钻探仍是空白。陆地作为地球表层系统的另外一个组成部分,大陆和陆相沉积也受地球表层系统重大地质事件的影响与控制。因此,它也是研究地球表层系统重大地质事件与温室气候变

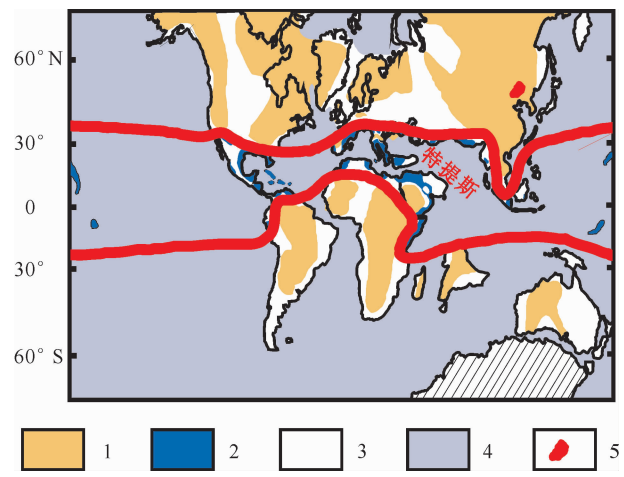


图 2 白垩纪 Cenomanian 期(约 98Ma)古地理重建
(据 Skeleton, 2003 有改动, 加示松辽盆地位置)
Fig. 2 Approximate reconstruction of Cretaceous palaeogeography about 98 Ma ago (Adapted from Skeleton(2003) with minor revision showing locality of Songliao Basin)
1—陆地; 2—温暖浅水碳酸盐; 3—陆棚海包括远洋白垩; 4—深水大洋包括远洋白垩, 红线显示碳酸盐台地分布带; 5—松辽盆地
1—land; 2—warm-water shallow-marine carbonate; 3—shelf sea including pelagic chalk; 4—deep ocean including pelagic chalk; 5—Songliao Basin. Red lines show the belt of carbonate platform development

化的不可缺少的组成部分(王成善, 2006)。
陆地环境的响应知之甚少主要原因在于陆地记录匮乏且不连续。白垩纪中期的海平面在过去 250 Ma 历史中处于最高位时期(Haq et al., 1987),由于高海平面的原因,全球陆地面积减少,最大的陆地出露在东亚地区(图 2),即我国松辽盆地所在地区。同时,根据盆地充填历史,位于当时世界最大的陆地上的中国东北的松辽盆地,可能形成了近乎完整的白垩纪陆相沉积记录。因此在松辽盆地开展大陆科学钻探,可以将获取完整的白垩纪陆相沉积记录的可能性转变为现实。
松辽盆地的大规模地质调查开始于上世纪五十年代,中国最大的油田——大庆油田的发现进一步促进了该地区地质调查工作的开展。至 2000 年末,共完成了总长度超过 250,000 km 的地震反射剖面,地震网的比例尺精度达到 0.5×0.5 至 2×4 km²之间,相当一部分区块还开展了三维地震反射。这不仅为科学钻探的选址提供了重要依据和资料基础,也为工程提供了丰富的钻探工作经验。
作为世界上最大的陆相含油气白垩纪湖盆之一,松辽盆地发育了完整的白垩纪陆相沉积,保留了

白垩纪重大地质事件的记录,为陆相白垩系研究提供了理想的地质条件。通过数十年的调查发现,白垩纪陆地环境变化的记录在松辽盆地可能具有良好的保存,例如早白垩世的生物演化(热河生物群)(张弥曼, 2001; Ji et al., 1998, 1999; Sun et al., 1998, 2002)、中白垩世缺氧事件 (Schlanger et al., 1976; Arthur and Sageman, 1994; 王成善, 1999), 甚至还有可能发现白垩纪-第三纪(K/T)界线事件的陆相响应等(孙革, 2003)。

白垩纪时期有限的陆地面积,导致了陆相沉积剖面具有出露不完整、露头差、样品难以采集等特点,“中国白垩纪大陆科学钻探工程—松辽盆地科学钻探—松科 1 井”(简称松科 1 井)工程将解决这一难题。松科 1 井是世界上第一口陆相白垩纪科学钻探,其目的在于获取连续的、高分辨率的、较少受到后期破坏或影响的白垩纪中期到晚期的陆相沉积记录(图 3)。在此基础上通过海洋/陆地记录的整合和白垩纪大洋缺氧事件和大洋红层的综合研究,开展古气候重建、沉积环境重建、重大地质事件的陆相沉积响应、陆相大规模烃源岩形成、陆地生物群更替、温室气候状态下快速气候变化等五大科学问题研究,进而探讨白垩纪温室气候变化的原因、过程和结果,为未来长周期的气候变化提供重要的参照,也为建设百年大庆提供新的科学支撑。

3 松科一井科学钻探工程的实施

3.1 松科 1 井的井址及方案论证

“松科 1 井”工程全称为“中国白垩纪大陆科学钻探——松科 1 井”,相应英文名称:China Cretaceous Continental Scientific Drilling Project; SK-I, SK-II。通过国外已经实施的陆地海相白垩纪科学钻探和国内前两个科学钻探工程的广泛的调研,于 2005 年 9 月在大庆由国家科技部基础司主持召开了“松科 1 井井址论证会”。在此次论证会上,确定了井址选择的基本原则和取心层位。井址选择的基本原则是:1)地层连续,无缺失;2)沉积厚度小;3)外源碎屑影响小,以深湖相泥岩沉积为主;4)工程难度最小。同时确定了在现有经费的前提下,取心层位为白垩系中-上部,并最好进入上覆的古近系或新近系,争取获得白垩-古近系界限。2006 年 1 月在大庆召开以技术专家为主参加的“松科 1 井工程论证会”,基于松辽盆地地层发育和盆地演化过程中沉积中心曾发生过南北向迁移的历史,在此次会议上明确提出了“一井双孔”的施工方案。所谓“一井

双孔”的施工方案,由“松科 1 井南孔”和“松科 1 井北孔”构成(图 4),在层位上两孔不重复。这种方案不但使得通过两孔同时钻探,钻探施工周期大大加快。同时,由于钻探进尺长度和深度减少,大大节省了资金,使原本不可能变成了可能。更为重要的是,由于“松科 1 井南孔”时代较老的地层埋深浅,热演化程度低,使得受地温控制的生物标记化合物等得到保存。“一井双孔”的施工方案充分利用大庆油田近半个世纪油气勘探的资料基础,利用被当地科技人员称为钢铁标志层的嫩二段底部的油页岩在全盆地具有可对比性作为两孔衔接的纽带(图 5)。2006 年 2 月中旬到 3 月上旬,完成了“松科 1 井总体设计”的内容,特别是松科 1 井井位问题进行了详细的论证和两次野外调研,最终确定了“一井两孔”的两个钻孔孔位,两口井直线距离是 77.35km(图 5)。在进行松科 1 井“一井双孔”方案的论证过程中,充分分析了邻井钻遇地层单元、厚度、地层顶底界面属性、沉积相,结合地震剖面解释分析了地层横向分布特征,进行了南、北两口井的钻井地质设计,并做出了两口井的模拟柱状图。

松科 1 井北孔(图 3 中的 SK-I)主要揭示发育较全的嫩二段以上层位地层,由国土资源部勘探技术研究所承担施工,钻井层位为新近系泰康组($1.75 \pm 0.05\text{Ma}$)-嫩江组一段($83 \pm 1\text{Ma}$),自泰康组($1.75 \pm 0.05\text{Ma}$)底以上 50m 至嫩二段底下 2m 连续取芯 1541.66 m。松科 1 井南孔(图 3 中的 SK-II)揭示发育全且厚度小的嫩二段以下层位地层,由大庆油田有限责任公司勘探分公司承担施工,钻井层位为下白垩统嫩江组二段($70.6 \pm 0.6\text{Ma}$)-泉头组三段($112 \pm 1.0\text{Ma}$),自嫩江组二段(Campanian)底以上 50m 至井底(泉头组三段($112 \pm 1.0\text{Ma}$))。

3.2 松科 1 井特殊的取心技术

科学钻探与普通的石油钻井不同,它要求进行连续的取心钻进,且对岩心的收获率和岩心表面质量等有很高的要求,对钻井液的要求也相当严格。因此,在进行取心作业时,其操作规程和程序也与普通石油钻井有所不同。针对上部地层松软、岩心易碎和下部地层岩心软硬程度不一,取心收获率难以保证问题。为了完成科学钻探特殊的要求,设计了四种取心方法,即常规取心方法、保形取心方法、定向取心方法、密闭取心方法。对不同的层段实施不同的取心方法:通过采用耐磨低阻、抗高温、易切割等特点的复合材料作保形衬筒,机械加压方式、隐蔽式岩心抓,防冲蚀、低口径的取心钻头,以及冷

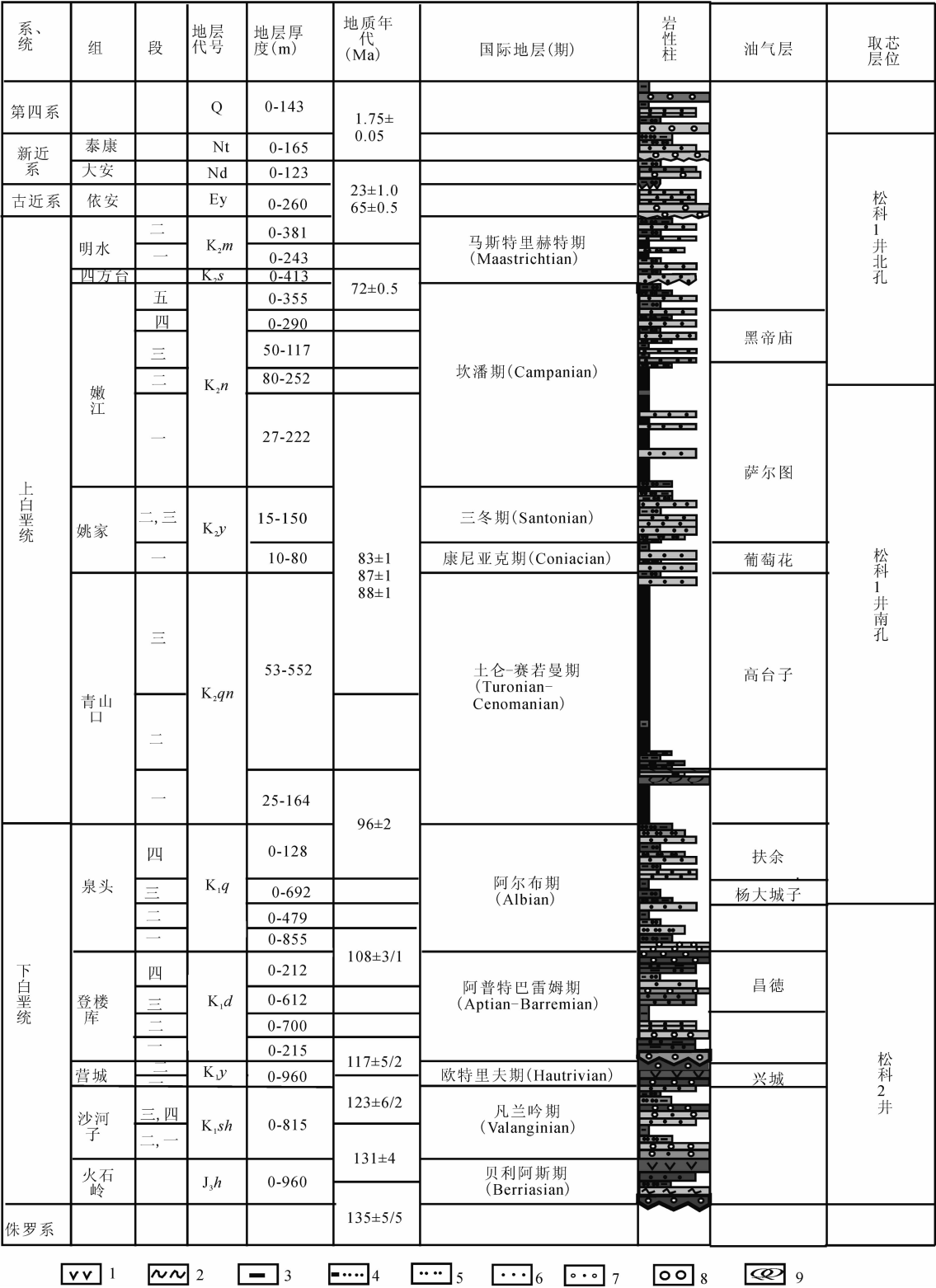


图 3 松辽盆地地层综合柱状图及松科 1 井、松科 2 井取心层位(据高瑞祺 (1999)、叶得泉等(2002)等综合而成)

Fig. 3 Stratigraphic column of the Mesozoic successions of the Songliao Basin

(Integrated from Gao Ruiqi(1999),Ye Dequan et al(2002))

1—安山岩;2—流纹岩;3—泥岩;4—泥质粉砂岩;5—粉砂岩;6—砂岩;7—砂砾岩;8—砾岩;9—含化石层

1—Andesite; 2—Rhyolite; 3—Mudstone; 4—argillaceous siltstone; 5—Siltstone; 6—Sandstone;

7—gravel; 8—conglomerate; 9—including fossil

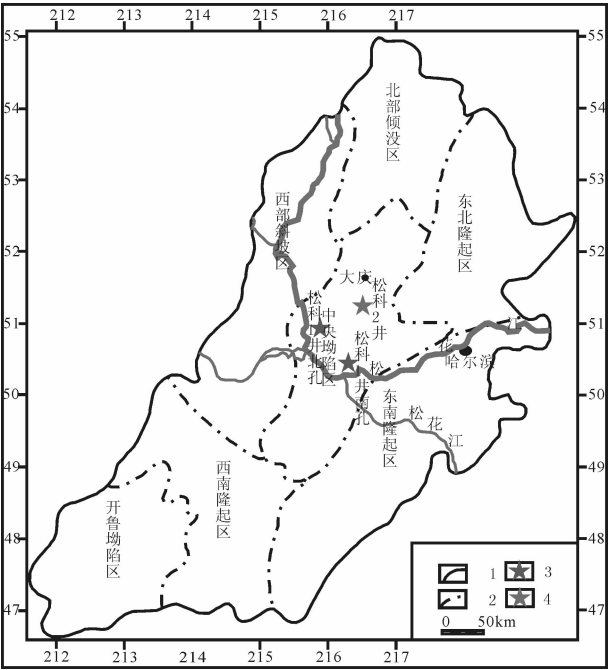


图 4 松科 1 井和松科 2 井井位图

Fig. 4 The sites of SK-I and SK-II on the Songliao Basin

1—盆地边界;2—次级构造单元;3—松科 1 井双孔孔位;
4—松科 2 井
1—Basin boundary; 2—Tectonic subdivision; 3—SK-I and SK-II; 4—SK-III

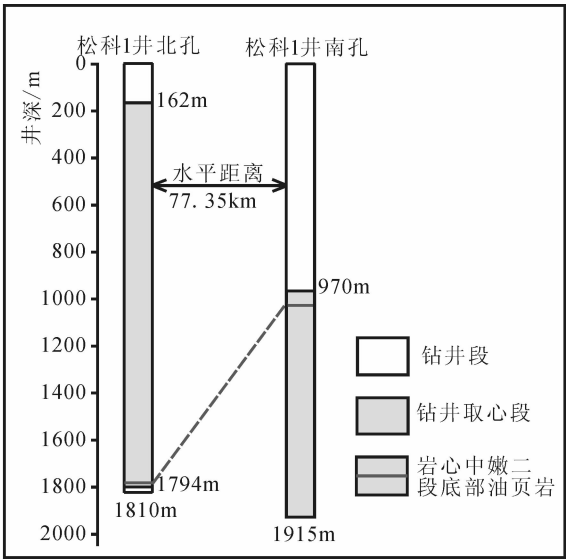


图 5 松科 1 井一井双孔取心示意图

Fig. 5 The depth of cores from sk-I and sk-II
1—钻井段;2—钻井取心段;3—标志层嫩二段底部油页岩
1—the depth of drilling; 2—cores; 3—the oil shale in the bottom of Nenjiang FM as the correlation maker

改进常规自锁式取心工具实现定向取心,使岩心归位准确,可在罗盘上读出裂缝、裂纹的发育方位,测定层理的倾角,读出地层的倾向;通过用泥浆稀释的荧光羧化微球混合液替代密闭液进行密闭取心,增加示踪液与岩心的长时间、大面积接触,用以检验在整个取心过程中泥浆对岩心柱表层的影响深度,实现对地微生物样品的污染评价。另外,还采用了液压出心技术,即通过取心筒顶部接水管不断向取心筒中施加液压使筒内岩心从底部被顶出,以保证取出的岩心基本保持在取心筒内的原始状态,把出心对岩心造成的损害减到最低。

3.3 松科 1 井顺利实施

由大庆油田有限责任公司钻井三公负责承担的松科 1 井南孔钻探,于 2006 年 8 月 18 日开钻,到同年 11 月 4 日完成了上白垩统到下白垩统上部的嫩江组二段底部、嫩江组一段、姚家组、青山口组、泉头组四段和泉头组三段顶部的取心任务(图 3),取心段进尺 946.83m,心长 944.23 m,完钻井深 1935 m。该井连续取心 104 筒次,总取心进尺 946.83 m,岩心总长 944.23 m,平均收获率高达 99.73%,创出了中国大陆科学钻探新的纪录。

松辽盆地科学钻探“松科 1 井”北孔钻探一开于 2006 年 8 月 29 日开始到同年 10 月 22 日结束,完成新近纪泰康组底部和上白垩统明水组二段顶部的松散层取心,取心段进尺 80.23m,心长 66.71m,取心收获率 83.15%;二开从 2007 年 4 月 10 日开始,经过 6 个多月的钻探施工,于 10 月 20 日完成上白垩统明水组、四方台组、嫩江组五段到嫩江组二段的取心任务(图 3),取心进尺 1550.18 m,心长 1474.95 m,二开取心收获率为 95.15%。二开结束后,松科 1 井北孔共完成取心进尺 1630.41 m,心长 1541.66 m,取心收获率达到 94.56%。

松科一井科学钻探工程项目包括钻探子项目、录井子项目、测井子项目、试验和物性子项目、数据库和信息系子项目、样品管理子项目。其中,测井子项目有三个系列,即常规 5700 系列:包括双侧向、井径、井温、流体电阻率、井斜与方位、阵列感应、自然伽马、微侧向、自然电位、数字声波、补偿中子、Z 密度。非常规系列:包括自然伽玛能谱测井, X-MAC 测井, ECS 元素测井, FMI 电成像测井。固井质量检查测井:包括声波变密度,磁定位,自然伽马。

综合松科 1 井北孔和南孔的取心情况,松辽盆地科学钻探 1 号井钻探工程共完成了从泰康组底部到泉头组三段顶部的连续取心(图 3),总取心进尺

冻、保形取样等方法实现对易碎地层进行保形取心,不仅提高了取心率,还是岩心保持了地下原态;通过

为 2577.24 m,心长共计 2485.89 m,总取心收获率达 96.46%,全井共完成常规取心 356 筒,心长 2268.09m;保形取心 103 筒,心长 113.68m;定向取心 19 筒,心长 95.44m;密闭取心 1 筒,心长 8.68m。它所取得的岩心资料为“白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化”项目的后续研究奠定了坚实的基础。

4 松科一井科学钻探初步的科学进展和与发现

中国白垩纪大陆科学钻探工程在工程技术上取得的成功,为后续的科学研究的奠定了雄厚的基础。通过前期的预研究和对早期获得岩心的先期研究,围绕松科一井科学钻探工程已经取得了较多的初步的科学进展和发现。

4.1 厘米级样品的取样与分析,将传统地质学百万年的时间分辨率提高到万年尺度

目前,由于全球变暖问题日趋严重,国际社会界希望传统地质学研究能够为预测未来全球环境变化提供更多的科学依据,这就要求传统地质学研究的时间分辨率大大提高,也就是尽可能把百万年的时间分辨率提高到万年尺度。事实上,在这一方面研究的成功范例就是国际地学界对古新世-始新世之交,大气和海洋发生一次全球性快速升温事件研究(PETM)(Bains,2000)。由于地质学家成功地把研究的时间尺度从百万年提高到万年到千年,所以得出当时温室气体的排放速率与当前人类活动的排放水平相当(Bains,2000),因此它不仅在研究地球历史方面具有重要意义,而且也未来环境预测提供了一个极佳的模型。

由于松科一井科学钻探工程高水平地完成并在岩心收获率上创造出中国大陆科学钻探新的纪录,这就为提高时间分辨率上奠定了重要的基础。所以,也就使得通过厘米级样品的取样与分析,将传统地质学百万年时间分辨率提高到万年尺度的目标实现成为可能。目前,已开展的各种取样工作都是围绕着这一要求进行的。从取样的密度上,只要有可能基本都是厘米级取样的,如环境磁学取样密度为 5cm/样,古地磁取样密度 20cm/样,炭黑、有机地化、碳氧稳定同位素、硫同位素等均为 100cm/样。通过对松辽盆地沉积速率分析,平均约为 7~10cm/ka,这就意味未来围绕松科一井研究成果的时间分辨率可能达到万年尺度。现在,2 万多件样品正在加紧分析的过程,其中一部分样品已送到国际高水

平实验室进行测试。

为了能够使得国内外感兴趣的研究人员都能够分享到松科一井的样品,出更多的高水平研究成果。在岩心取样之前,确定了取样五个原则:岩心不间断原则、及时测试原则、样品充分使用原则、关键层位取样协调原则和资料共享原则。岩心不间断原则的目的是取样结束后剩余岩心仍然保持连续。即用于研究的 62% 岩心,原则上全部取样不能超过其一半;及时测试原则是为了有效利用样品,要求一次取样结束后,尽量在同一年进行测试分析。样品充分使用原则的目的是同一件样品可以用作多项研究,如用于岩性鉴定的样品,磨制薄片后,剩余样品则可用于生物研究、常量、微量元素研究等,原则是要求样品完整性的测试项目优先进行。关键层位取样协调原则是指对样品数量的需求较大,同时总厚度远远小于其它层位的关键层位,在取样前先提出取样方案协商解决,以避免违反岩心不间断原则。资料共享原则是对可用于多项研究的测试分析数据进行共享,避免重复取样、重复测试分析。

4.2 已经和正在建立原始科学资料和数据十大剖面系统

通过松科一井科学钻探的完成和已获得原始科学资料和数据,已经和正在建立十大剖面系统,它们包括:连续的岩性剖面、高精度,多参数物性剖面、测井和深度归位与成像系统剖面、元素地化剖面、综合年代地层剖面、地微生物剖面、有机地化剖面、稳定同位素剖面、高分辨层序剖面、钻孔流体剖面。其中,连续的岩性剖面主要通过岩石薄片鉴定,重点是完成粒度统计、结构分析和碎屑成分鉴定以及含量统计,以达到精确定出岩石成分-结构-成因综合名称,进而建立精确岩性剖面,为后续研究提供高精度的岩性资料;高分辨层序剖面是通过沉积相、亚相和微相分析,划分沉积旋回,在较大尺度上观察和刻画显微组构特征及其变化规律,从而提供古环境及其变化等相关信息(尤其是界面样品)。同时,建立随深度增加粘土矿物组成、成分的变化和“海侵层序”和“火山灰夹层”的刻画性剖面的两个辅助层序剖面;元素地化剖面的取样目的是开展元素地球化学和活性磷研究,探讨松辽湖盆白垩纪时期物源变化,以获取古气候变化记录,探讨古湖泊营养条件变化;综合年代地层剖面是通过开展磁性地层学、放射性年代同位素和古生物年代学研究,尤其是火山岩和火山灰夹层的同位素年龄标定精细地层年代,结合前人的研究成果,以期建立松辽盆地精确的年代

地层序列和格架,为进行海-陆地层对比建立基础;稳定同位素剖面是通过有机和无机碳酸盐稳定同位素的研究,开展碳、氧稳定同位素测试与分析,力争弥补国际上白垩纪陆相环境的连续、高精度的碳氧稳定同位素曲线空白。有机地化剖面的目的是通过对松科 1 井钻孔剖面上有机质大量堆集的层段、有机质类型特征进行系统分析,根据有机质的丰度、母质类型、有机质来源、同位素组成的沉积变化,探讨用有机地化手段研究古气候、古环境和缺氧/富氧事件方法、研究温室气候对有机质堆积与大规模陆相烃源岩形成的控制作用。

4.3 在沉积学和有机地化方面取得重要的新认识与新发现

现已从松科 1 井的连续岩心上识别出 11 种类型深水沉积微相(Cheng, 2007)。它们分别是静水泥质沉积、深湖泥灰岩、深湖白云岩、油页岩、火山灰沉积、浊流、滑塌重力流、风暴重力流、震积岩、介形虫沉积和亮晶碳酸盐。这些类型的深水沉积微相可以归纳为两个大类,其一环境渐变形成的沉积微相(I 型),其二是突发事件形成的沉积微相(II 型)。I 型中除了广泛发育的静水泥质沉积外,还包括一些特殊细粒沉积,如泥灰岩、白云岩和油页岩。II 型中典型的事件沉积微相有火山灰沉积、浊流、滑塌重力流、风暴重力流、震积岩和介形虫沉积。而对于亮晶碳酸盐沉积而言,其可能既有环境渐变的因素背景也有事件的因素。广义而言静水泥质沉积可以作为背景沉积,其他类型的沉积均可以作为事件沉积,它们具有其独特的形成模式。深水沉积微相的形成模式可以反映气候与构造的控制作用。

此外,由于连续取心的原因,也取得了对生产勘探实践具有重要意义的一些新发现。如在嫩江组深湖相暗色泥岩中发现深湖相白云岩。白云岩在电阻率曲线表现为正偏小尖峰状,自然伽马曲线表现为负偏小尖峰状。岩心上见到白云岩呈层状和椭球状两种形状。单层厚度一般在几个厘米到十几个厘米,这对探索湖相白云岩成因和古环境具有意义。测井曲线上表现出来的高阻小尖峰特征在以往大庆油田探井中一般解释为介形虫层,从松科 1 井测井曲线与岩心的对应情况看,高阻小尖峰对应的岩心一般为泥灰岩层,对从新认识古环境和生储盖关系意义重大。松科 1 井北孔明水、四方台组岩心中同生变形构造远比以前认为的发育的多,可能显示松辽盆地晚白垩世晚期盆地构造活动强度有关。同时,也识别出湖相的红色泥岩,这突破了以往见到红

色岩层就解释为水上环境的认识。

在有机地化初步研究中,发现松辽盆地陆相沉积有机质是对大洋缺氧/富氧事件可能有明显的响应甚至对应关系(Hou et al., 2000)。叶腊碳同位素分析及碳黑含量在剖面上有明现的变化,叶腊碳稳定同位素值(C27, C29, C31)显示,从泉四到青一段中部,同位素逐渐变轻;而从青一段中部向上,同位素值开始有变重,至青一段顶部,叶腊同位素达到最大值,然后有降低的趋势。

4.4 旋回地层分析的地球物理替代性指标的建立与旋回地层分析的初步成果

精细沉积旋回研究是沉积历史、地质事件以及外驱动力如气候变化和构造运动分析的基础。通过对松科 1 井连续岩心,厘米级精确描述,根据颜色、岩性和岩相将松科 1 井岩心划分成 862 个米级旋回。Fisher 图解分析将松科 1 井岩心的米级旋回归并为更高级的 2 个级别旋回,分别是五级旋回和四级旋回。同位素年龄的旋回周期估算显示,米级旋回周期在 22.9ka~29.8ka 之间,五级旋回周期在 75.0ka~104.7ka 之间,四级旋回周期在 225.0ka~460.0ka 之间,分别与 Milankovitch 岁差周期 19ka~24ka、偏心率短周期 85ka~140ka 和偏心率长周期 350ka~400ka 存在着对应关系,说明松科 1 井旋回地层的形成受 Milankovitch 旋回的控制。

完成的松科 1 井测井曲线,也表现出良好的旋回周期性。利用高精度的测井信息,结合岩心描述与分析测试成果,初步建立了旋回地层分析的地球物理替代性指标。如姚一段底部到泉三段上部的自然伽玛数据,沿剖面显示较好的旋回性。对自然伽玛测井曲线进行小波频谱分析,结果显示自然伽玛测井数据在厚度上具有 40~64m, ~20m, 13~8m, 4m 等主要旋回周期,且沿剖面较为稳定。对测井数据进行~100m 滑动窗口频谱分析,揭示出松科 1 井完好的纪录了 Milankovitch 旋回,其中偏心率造成的地层旋回约为 13~8m,地轴斜率造成的地层旋回约为 6.37~3.58m,岁差造成的地层旋回约为 84~1.68m。根据地球轨道参数的旋回周期,推断出泉三段的平均沉积速率较低,大约为 7.5cm/ka。泉四段平均沉积速率加大,约为 12cm/ka,青山口组沉积环境较为稳定,沉积速率变化不大,主要为~9~10cm/ka,研究进一步精细了米兰科维奇周期。

4.5 松辽古湖泊温度变化与全球变化趋势基本一致的初步发现

由于陆相沉积缺乏连续的碳酸钙沉积,加上陆

相沉积不连续性的特点,所以直到目前为止国际上以陆相地层为主、长时间尺度的碳氧稳定同位素曲线一直没有建立起来,这对白垩纪古环境和古气候分析带来了相当大的局限性。为此,通过与美国斯坦福大学稳定同位素实验室的联合试验研究,发现利用松辽盆地地层中广泛分布的介形虫壳体,通过超微量分析可以获得可靠的碳氧稳定同位素数据。碳和氧稳定同位素初步数据分析结果显示,从青山口组上部到嫩江组二段底部,古沉积环境从湿热向较干冷转变,湖泊的生物生产力下降,温度降低了 9°C 左右(Chamberlain et al., 2007)。这个结果不仅与嫩江组二段底部介形虫种类减少、青山口组上部氧和钙元素富集所指示的当时的沉积古环境为湿热环境一致,而且与这一时期其他地区海相同位素分析结果一致,即在 Cenomanian /Turonian 期到 Campanian 期全球温度降低了 8°C (Huber et al., 2002)。同时,由于这项技术上的突破使得通过松科一井岩心的碳氧稳定同位素记录来研究快速气候变化成为可能。

4.6 地微生物研究果显示了令人兴奋的初步结果

通过微生物培养技术和克隆技术,对地下生命圈的存在、组成以及新陈代谢机制进行探讨,以期从古 DNA 角度对环境气候条件做出推测,现在已发展成为地球科学的一个新的最具生命力的分支(陈骏等, 2005)。为了从古 DNA 角度了解东亚地区古环境和古气候条件,从松科一井开钻前就设计了地微生物取样工作的流程和方法,现已完成与松科 1 井地微生物样品有关的取样工作,52 个岩石和泥浆样品已送往美国 Miami 大学地微生物实验室,进行测试和初步研究,并已取得了一些初步研究进展。通过该大学地微生物实验室对松科 1 井地微生物样品进行了包括磷脂酸分析(PLFA)和 16S rRNA 基因初步分析,结果表明不同岩性的岩心样品中微生物组合存在显著的差异,反映不同的环境特征(Zhang, 2006)。初步研究选取的两个岩心样品分别为 1170 米深绿黑色页岩和 1220 米红色页岩,通过 PLFA,两样品中的生物量相当约为 2×10^7 个/克。通过 PCR(聚合酶链式反应)扩增得到细菌的 16S rRNA,初步多样性分析发现在深绿黑色样品中扩增得到的克隆序列较接近于金属硫酸盐还原菌,指示一种缺氧的还原环境;而红色样品中扩增得到的克隆序列更接近于亚硫酸盐和硫的氧化菌,指示一种富氧的氧化环境(Dong, 2007)。这一结果与最新国外对白垩纪海相地层的研究结果可对比

(Inagaki, 2005)。

4.7 白垩纪大气中 CO_2 浓度定量重建的方面取得重要数据

为了更好地理解大气 CO_2 浓度与气候之间的耦合关系,维护自然与人类社会的可持续发展,精确重建古大气 CO_2 浓度的变化尤为重要。在众多研究古大气 CO_2 浓度的方法中,化石植物叶片气孔方法已被证明是一种比较精确和理想的方法(Sun, 2007)。通过对银杏叶片化石中气孔的研究,重建了中生代大气中的 CO_2 浓度变化,结果显示从中侏罗到早白垩期间,古大气中 CO_2 浓度从 1000~1600 ppmv 增加到 1500~2000 ppmv(Sun, 2007)。这一变化与全球平均表层温度变化曲线(赵希涛, 1984)一致,证实了 CO_2 浓度和温度变化有相关性, CO_2 浓度的升高有可能导致早白垩世的“温室气候”。

5 未来发展展望

以白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化为目标的中国白垩纪大陆科学钻探工程的科学研究工作才刚刚拉开帷幕,已取得了可喜的进展。松科 1 井的全部岩心在进行岩心的表面图像扫描后,按照“松科 1 井岩心切分方案”进行剖切,岩心的 62% 用于现在的科学研究,38% 装入 U 形槽中并进行注胶和抛光处理,用于馆藏,以便长期保存及后续研究。这是世界上迄今为止白垩纪所获取的第一条最长而连续的陆相沉积记录,以资源共享为原则,向全世界科学家提供宝贵的白垩纪研究资料。

鉴于松科 1 井取心层位不老于 Albian 期,无法获取白垩纪早期与热河生物群、大洋缺氧事件及侏罗纪/白垩纪界线有关的记录。因此,松科 2 井的申请与实施工作也在紧锣密鼓地进行中。松科 2 井是在现有松科 1 井科学钻探工程基础上,继续对松辽盆地 Albian 期之前的早白垩世地层进行科学钻探,计划从泉头组顶部开始连续取心到火石岭组地层底部,预计取心井段为 2000m~6000m(图 3,图 4)。如果松科 2 井成功实施,将会与松科一井一起构成获得完整的白垩纪陆相连续沉积记录,这对国际地质学界也将是一个重要的贡献。松科 2 井所获取的岩心资料对于解决 J/K 陆相地层界线,热河生物群对东亚气候的响应,大庆油田深层天然气成烃与储层分布,Mo 古地磁在陆相地层中的特征等科学问题有重要的作用。

按照国际大陆钻探计划(ICDP)的申请流程,申请程序分为初步申请(preliminary proposal),研讨

会申请 (workshop proposal) 和最终申请 (full-proposal) 三阶段进行。经过申请和 ICDP 的评审批准, 有关松辽盆地深部科学钻探计划 (松科二井) 的研讨会已于 2007 年 8 月在大庆成功召开, 这就意味着松科二井已被列入 ICDP 候选项目, 进入最终申请提交阶段。目前, 由我国学者与国际学者共同组成五个研究群体即将完成最终申请工作。

中国白垩纪大陆科学钻探工程成功的实施, 充分利用了中国大陆发育完好的白垩纪陆相地层及古生物记录, 填补了国际上对陆相白垩系科学钻探的空白, 对国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 产生了积极影响。同时, 对所获得的宝贵岩心开展广泛的国际合作进行研究, 这将会在我国白垩纪陆相的材料优势变成科学优势方面, 以及提高中国陆相白垩纪的研究水平和国际地位的进一步发展方面产生重要的作用。

致谢: 中国白垩纪大陆科学钻探工程松科一井的实施是在参与此项工程的钻井工人、研究和技术人员的艰苦努力下得以完成。同时该项工程的实施得到了国家科技部和大庆油田有限责任公司的资助, 国土资源部、国际大陆科学钻探计划委员会 (ICDP) 和 ICDP-China 委员会的支持, 以及众多院士和专家的指导。在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

安芷生, 王平, 沈吉, 张毅祥, 张培震, 王苏民, 李小强, 孙千里, 宋友桂, 艾莉, 张叶春, 姜绍仁, 刘兴起, 汪勇. 2006. 青海湖湖底构造及沉积物分布的地球物理勘探研究. 中国科学 D 辑 地球科学 2006, 36 (4): 332~341.

陈骏, 姚素平. 2005. 地质微生物学及其发展方向. 高校地质学报, 11(2): 154~166.

高瑞棋, 赵传本. 1999. 松辽盆地白垩纪石油地层孢粉学. 北京: 地质出版社.

胡修棉, 王成善, 李祥辉. 2001. 大洋缺氧事件的碳稳定同位素响应. 成都理工学院学报, 28(1): 1~8.

IODP 科学规划委员会. 2003. 地球海洋与生命. 上海: 同济大学出版社.

钱迈平, 邢光福, 陈荣, 蒋严根, 丁保良, 阎永奎, 章其华. 2007. 从浙江天台白垩纪蛋化石复原恐龙类群. 江苏地质, 31 (2): 81~89.

孙革, 孙春林, 董枝明, 孙跃武, 吕建生, 熊宪政, 周忠立, 余福林, 邢玉玲, 全成, M. A. Akhmetiev, A. R. Ashraf, E. Bugdaeva, D. L. Dilcher, L. Golovneva, K. Johnson, T. Kezina, T. Kodrul, H. Okada. 2003. 黑龙江嘉荫地区白垩纪—第三纪界线初步观察. 世界地质, 22(1): 8~15.

许志琴, 杨经绥, 张泽明, 刘福来, 杨文采, 金振民, 王汝成, 罗立强, 黄力, 董海良. 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展. 中国地质, 32(2): 177~184.

叶得泉, 黄清华. 2002. 松辽盆地白垩纪介形类生物地层学. 北京: 石油工业出版社.

王成善, 胡修棉, 万晓樵, 陶然. 1999. 西藏南部中白垩世 Cenomanian Tutoian 缺氧事件研究. 自然杂志, 21(4): 244~247.

王成善, 胡修棉. 2005. 白垩纪世界与大洋红层. 地质前缘, 12(2): 11~22.

王成善. 2006. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究——从重大地质事件探寻地球表层系统耦合. 地球科学进展, 21(7): 838~842.

汪品先. 2007. 人类何时才能钻穿地壳. 科学时报, 10 月 7 日.

张弥曼, 陈旭. 2001. 20 世纪古生物学的重大进展及 21 世纪战略重点. 地球科学进展, 5: 29~33.

赵希涛. 1984. 地质时代的气候. 北京: 海洋出版社.

Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, Michel H V. 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 208: 1095~1108.

Arthur M A, Sageman B B. 1994. Marine black shales; depositional mechanisms and environments of ancient deposits. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 22: 499~551.

Bains S, Norris R D, Corfield R. M. 2000. Termination of global warmth at the Palaeocene/Eocene boundary through productivity feedback. Nature, 407: 171~173.

Baudin F, Fiet N, Coccioni R, Galeotti S. 1998. Organic matter characterization of the Selli Level (Umbria-Marche Basin, central Italy). Cretaceous Research, 19: 701~714.

Berner R A. 1994. GEOCARB II: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. Am. Sci., 294: 56~91.

Berner R A, Kothavala Z. 2001. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. American Journal of Science, 301: 182~204.

Bice K L, Norris R D. 2003. Possible atmospheric CO₂ extremes of the warm mid-Cretaceous (late Albian-Turonian). Paleoclimatology, 17(4): 10~70.

Chamberlain C P, Blisniuk P, Wan X Q, Xi D P, Graham S. 2007. Preliminary oxygen and carbon isotope study of Cretaceous ostracods from the songliao basin, NE China. In: Huang Yongjian, Wang Pingkan, Gu Jian, Jing Shan (eds), Abstracts of Joint Workshop on Rapid Environmental/Climate Change in the Cretaceous Greenhouse World: Ocean-Land Interaction & Deep Terrestrial Scientific Drilling Project of the Cretaceous Songliao Basin, Daqing, China. 11.

Chen P J, Dong Z M, Zhen S N. 1999. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. Nature, 391: 147~152.

Cheng R H, Wang P J, Wang G D, Gao Y F. 2007. Microfacies of Deep Water Deposits and Forming Models of SLCORE-1. In: Huang Yongjian, Wang Pingkan, Gu Jian, Jing Shan (eds), Abstracts of Joint Workshop on Rapid Environmental/Climate Change in the Cretaceous Greenhouse World: Ocean-Land Interaction & Deep Terrestrial Scientific Drilling Project of the Cretaceous Songliao Basin, Daqing, China. 18.

Clarke L J, Jenkyns H C. 1999. New oxygen isotope evidence for

- long-term Cretaceous climatic change in the Southern Hemisphere. *Geology*, 27(8): 699~702.
- Colman S M, Shi Y Y, An Z S, Shen J, Henderson A C G. 2007. Late Cenozoic climate changes in China's western interior: a review of research on Lake Qinghai and comparison with other records. *Quaternary Science Reviews*, 26: 2281~2300.
- Daniel, L, Albritton, D L, Allen, M R, 2001. Summary for Policymakers, IPCC Third Assessment Report 2 Climate Change: The Scientific Basis. WMO&UNEP, 201
- DeConto R M, Pollard D. 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421: 245~249.
- Detlev R, Vlad G, Heinz H and Andrea F. 2004. The AIG10 drilling project (Aigion, Greece): interpretation of the litho-log in the context of regional geology and tectonics. *Comptes Rendus Geosciences*, 336: 415~423.
- Dong H L, Ji S S, Jiang H S. 2007. Geomicrobiological study of cretaceous black and red shales samples from songliao drilling pilot holes of 1 and 2. In: Huang Yongjian, Wang Pingkan, Gu Jian, Jing Shan (eds), Abstracts of Joint Workshop on Rapid Environmental/Climate Change in the Cretaceous Greenhouse World: Ocean-Land Interaction & Deep Terrestrial Scientific Drilling Project of the Cretaceous Songliao Basin, Daqing, China. 23.
- Erba E, Bartolini A, Larson R L. 2004. Valanginian Weissert oceanic anoxic event. *Geology*, 32: 149~152.
- Hartmut K, Jin Z M, Gao S, Till P, Xu Z Q. 2002. Physical properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu terrain, eastern central China: implications for the seismic structure at the Donghai (CCSD) drilling site. *Tectonophysics*, 354: 315~330.
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235: 1156~1167.
- Heimhofer U, Hochuli P A, Burla S. 2005. Timing of Early Cretaceous angiosperm diversification and possible links to major paleoenvironmental change. *Geology*, 33(2): 141~144
- Hildebrand A R, Boynton W V. 1990. Proximal Cretaceous-Tertiary boundary impact deposits in the Caribbean: *Science*, 248: 843~847.
- Hou B, Frakes L A, Alley N F, Stamoulis V, Rowett A. 2000. Geoscientific signatures of Tertiary palaeochannels and their significance for mineral exploration in the Gawler Craton region. *MESA Journal*, 19: 36~39.
- Hou D J, Li M W, Huang Q H. 2000. Marine transgressional events in the gigantic freshwater lake Songliao: paleontological and geochemical evidence. *Organic Geochemistry*, 31: 763~768.
- Hu X, Jansa L, Wang C, Sarti M, Bak K, Wagreich M, Michalik J, Sotak J. 2005. Upper Cretaceous Oceanic Red beds (CORB) in the Tethys: occurrence, lithofacies, age and environment. *Cretaceous Research*, 26: 3~20.
- Huber B T, Hodell D A, Hamilton C P. 1995. Middle-Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients. *GSA Bulletin*, 107(10): 1164~1191.
- Huber B T, Norris R D, MacLeod K G. 2002. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous. *Geology*, 30(2): 123~126.
- Inagaki F, Hisatake O, Alexander I T, Kenneth H N. 2005. The Paleome: A Sedimentary Genetic Record of Past Microbial Communities. *Astrobiology*, 5(2): 141~155.
- Jahren A H. 2002. The biogeochemical consequences of the mid-Cretaceous Superplume. *Journal of Geodynamics*, 34: 177~191
- Ji Q, Currie P J, Norell M A, Ji S A. 1998. Two feathered dinosaurs from northeastern China. *Nature*, 393: 753~761.
- Ji Q, Luo Z X, Ji S A. 1999. Chinese triconodont mammal and mosaic evolution of the mammalian skeleton. *Nature*, 398: 326~330.
- Ji Q, Norell M A, Gao K Q, Ji S A, Ren D. 2001. The distribution of integumentary structures in a feathered dinosaur. *Nature*, 410: 1084~1088.
- Ji Q, Luo Z X, Yuan C X, Wible J R. 2002. The Earliest Known Eutherian Mammal. *Nature*, 416: 816~822.
- Kashiwaya K, Ochiai S, Sakai H. 2001. Orbit-related long-term climate cycles revealed in a 12-Myr continental record from Lake Baikal. *Nature*, 410: 71~74.
- Liu FL, Xu Z Q, Ikuo K, Yang J S, Shigenori M. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 59: 199~215.
- Miller K G, Wight J K, Fairbanks R D. 1991. Unlocking the ice house: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion. *J. Geophys. Res.*, 96: 6829~6848.
- Schlanger S O, Jenkyns H C. 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: Cause and consequence. *Geologie en Mijnbouw*, 55: 179~184.
- Schlanger S O, Arthur M A, Jenkyns H C, et al. 1987. The Cenomanian-Turonian oceanic anoxic events: I, Stratigraphy and distribution of organic carbon-rich beds and the marine $\delta^{13}\text{C}$ excursion. In: Brooks J, Fleet A J (eds), *Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publications 26, 371~399.
- Skeleton P W, Robert A S, Simon P K. 2003. The Cretaceous World. Cambridge university press, 360.
- Sun B N, Xiao L, Xie S P. Stomatal analysis of fossil ginkgo from Jurassic and cretaceous in north China and its applications in reconstruction of paleoatmospheric CO₂ level. In: Huang Yongjian, Wang Pingkan, Gu Jian, Jing Shan (eds), Abstracts of Joint Workshop on Rapid Environmental/Climate Change in the Cretaceous Greenhouse World: Ocean-Land Interaction & Deep Terrestrial Scientific Drilling Project of the Cretaceous Songliao Basin, Daqing, China. 66.
- Sun G, Dilcher D, Zheng S L, Zhou Z K. 1998. In search of the first flower: a Jurassic angiosperm, *Archaeofructus*, from Northeast China. *Science*, 282: 1692~1695.
- Sun G, Ji Q, Dilcher D, Zheng S, Nixon K. C., Wang X F. 2002. *Archaeofructus*, a new basal angiosperm family. *Sciences*, 296:

899~904.

Tarduno J, Brinkman D B, Renne P R, Cottrell R D. 1998. Evidence for extreme climatic warmth from Late Cretaceous Arctic vertebrates. *Science*, 282: 2241~2244.

Truman P Y. 2000. Restoration ecology and conservation biology. *Biological Conservation*, 92: 73~83.

Wang C S, Huang Y J, Hu X M, Li X H. 2004. Cretaceous oceanic red beds: Implications for paleoclimatology and paleoceanography. *Acta Geologica Sinica*, 78: 873~877.

Wang Pinxian. 2000. Deep sea research and Earth sciences in new century. In: Lu Yongxiang (ed.), *Overview and Perspective of Sciences and Technology in Past 100 Years*. Shanghai: Shanghai Education Press.

Williams D F, Liu T S. 1997. The study of lake sediments for global change research. *Earth Science Frontiers*, 4 (1-2): 34~42.

Wilson P A, Norris R D, Cooper M J. 2002. Testing the mid-Cretaceous greenhouse hypothesis using "glassy" foraminiferal calcite from the core of the Turonian tropics on Demerara Rise. *Geology*, 30: 607~610.

Zhang G X, Dong H L, Xu Z Q, Zhao D G. 2005. Microbial Diversity in Ultra-High-Pressure Rocks and Fluids from the Chinese Continental Scientific Drilling Project in China. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(6): 3213~3227.

Zhang G X, Dong H L, Jiang H C. 2006. Unique Microbial Community in Drilling Fluids from Chinese Continental Scientific Drilling. *Geomicrobiology Journal*, 23: 499~514.

Completion and Preliminary Achievement of Chinese Cretaceous Continental Scientific Drilling Project-SK-I

WANG Chengshan¹⁾, FENG Zhiqiang²⁾, WU Heyong²⁾, WANG Pujun³⁾, KONG Fanjun⁴⁾,
FENG Zihui²⁾, REN Yanguang²⁾, YANG Gansheng⁵⁾, WAN Xiaoqiao¹⁾,
HUANG Yongjian¹⁾, ZHANG Shihong¹⁾

1) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083*; 2) *Institute of Exploration and Development of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, 163712*; 3) *School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, 130061*; 4) *Exploration Company of Daqing Oil Field Company Ltd., Daqing, 163453*; 5) *School of Engineering, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

Abstract

Obtaining the global environmental and climatic records is going to be the aim of international scientific drilling projects. As the time for the paradigm of greenhouse climate in the geological history, Cretaceous provides significant records of the global climate changes under the condition of greenhouse climate. So far, international scientific drillings programs regard on Cretaceous have been focusing on marine sediments; however, none terrestrial records have been recovered by any scientific program. SK-I and SK-II situating in the northern central of Songliao Basin are supposed to be an important breakthrough in this domain. After more than one year efforts, the drilling project has been finished, and the 2485.89m cores have been recovered, with a high recovery ratio of 96.46%, which are the longest and continuous Cretaceous terrestrial core all over the world. A number of important investigations on the cores from SK-I and SK-II have been carried out with preliminary results. One of the most significant contribution of this program, however, is to get the records with the resolution of ten thousand year by the centimeter-grade sampling and analysis, which in the contrary to the traditional records on the timescale of million years. When combine raw data and future research results of the core, it is expected to construct about 10 section series for the core hole, including biostratigraphy, chemostratigraphy, magnetostratigraphy and geomicrobiology and so on. The preliminary progress has been achieved on sedimentology, organic geochemistry, cyclo-stratigraphy, paleolimnology, geomicrobiology and reconstruction of pCO₂. The cores will be preserved in professional storeroom for long time after being cut for our researches, and they will open to the scientists all over the world. Fortunately, the next SK-III drilling program is on its way to be as one of the candidate program of ICDP (International Continental Drilling Project).

Key words: Continental Scientific Drilling Project; Cretaceous; Songliao Basin; SK-I and SK-II; Achievement