

中国非常规油气勘探与研究新进展

邹才能, 陶士振, 杨 智, 袁选俊, 朱如凯, 侯连华, 贾进华,
王 岚, 吴松涛, 白 斌, 高晓辉, 杨 春

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要: 全球油气勘探目标的转移和石油地质学的发展, 具有从毫-微米孔喉的圈闭油气, 逐渐向纳米孔喉的连续型油气聚集发展的趋势。近十年非常规油气资源在全球能源格局中的地位愈发重要, 致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为勘探开发的重点领域, 致密油成为亮点领域, 页岩气成为热点领域。中国致密气、页岩气、致密油、煤层气等非常规油气资源勘探开发取得重要突破, 油页岩、天然气水合物、油砂矿等有重要进展。中国非常规油气研究也取得重大进展, 陆相敞流湖盆大型浅水三角洲砂体、湖盆中心砂质碎屑流沉积和湖相碳酸盐岩等, 提供了湖盆中心储集体形成和分布的理论依据; 创新发展了连续型油气聚集理念, 明晰了连续型油气聚集的 10 个基本地质特征和 2 项关键标志, 为大面积非常规油气规模勘探开发奠定了理论基础; 系统表征了致密油气储层的纳米级微观孔喉结构, 首次发现了纳米孔喉中油气的赋存, 推动了纳米孔喉中油气流动机制和分布规律的研究。随着全球石油工业和纳米等技术的快速发展, 提出了“纳米油气”概念, 并指出这是未来石油工业的发展方向, 需要发展纳米油气透视观测镜、纳米油气驱替剂、纳米油气开采机器人等换代技术, 油气智能化时代即将到来。

关 键 词: 连续型油气聚集; 非常规油气; 纳米级孔喉; 湖盆中心储集体; 致密气; 致密油; 页岩气; 纳米油气

中图分类号: TE132.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)04-0312-11

New Advance in Unconventional Petroleum Exploration and Research in China

ZOU Cai-neng, TAO Shi-zhen, YANG Zhi, YUAN Xuan-jun, ZHU Ru-kai, HOU Lian-hua,
JIA Jin-hua, WANG Lan, WU Song-tao, BAI Bin, GAO Xiao-hui, YANG Chun
PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

Abstract: The global hydrocarbon exploration targets and the research of petroleum geology tend to switch from mm- μ m-size pore-throats of hydrocarbon traps to continuous hydrocarbon accumulation in the coexisting sources and reservoirs with nano size pore-throats. In recent 10 years, the status of the unconventional petroleum resources is being more and more important in the global energy framework. The unconventional hydrocarbons, tight gas, coal-bed methane, heavy oil and tar sands have become major domains in the exploration development of unconventional hydrocarbons worldwide; tight oil has become an attractive domain for global exploration and development of unconventional oil; and shale gas has become a promising domain for the recovery of unconventional gas in the world. In China, the exploration and development of tight gas, shale gas, tight oil and coal-bed methane have significant breakthroughs and the studies of oil shales, gas hydrates and tar sands have been progressed greatly. Correspondingly, the unconventional hydrocarbon researches in recent years in China have processed a lot in following three aspects: ① depositional models of shallow-water delta sandbodies, central-basin sandy debris and lacustrine phase carbonates in large open depression lake basins; ② innovation of unconventional continuous accumulation theory; ③ discovery and characterization of the nano size pore-throats in unconventional tight reservoirs. In terms of the rapid development of global petroleum industry and nano technology, this paper proposes a concept of nano hydrocarbons and indicates that “nano hydrocarbon” is the development direction of oil and gas industry in the future,

收稿日期: 2012-01-16 收到, 03-20 改回

基金项目: 国家油气重大科技专项资助项目(2011ZX05001)

第一作者简介: 邹才能(1963—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向: 非常规油气地质. E-mail: zcn@petrochina.com.cn.

urgently requiring developing vicarious technologies, such as nano hydrocarbon perspective viewing mirror, nano hydrocarbon displacement agent and nano hydrocarbon exploration robots. The time of petroleum intellectualization is coming to us.

Key words: continuous hydrocarbon accumulation; unconventional hydrocarbon; nano size pore-throats; basin center reservoir; tight oil; tight gas; shale gas; shale oil; nano hydrocarbon

全球油气勘探目标的转移和石油地质学的发展(表 1),具有从毫-微米孔喉的圈闭油气,逐渐向纳米孔喉的连续型油气聚集发展趋势。从 19 世纪 50 年代利用油气苗找油开始,到 19 世纪 80 年代的背斜理论^[1, 2],20 世纪 20 年代的圈闭理论^[1, 2]、四五十年代的干酪根晚期热降解生烃及陆相生油理论^[3~5]、60~80 年代的陆相盆地“定凹选带”源控论^[6, 7]、复式油气聚集带理论^[8~10]及煤成气理

论^[11~13]、90 年代“从源岩到圈闭”的含油气系统理论^[14],以及 21 世纪初的中-低丰度岩性地层油气藏理论^[15~17],再到最近的非常规油气系统^[18, 19]和大面积连续型油气聚集理论^[20~24]。从现象外形找油,到构造高点找油,再到圈闭找油,进而到有利油气聚集区(带)找油,延伸到源内或近源的源储共生聚集层系的成因找油。理论创新、技术进步、市场驱动,推动石油工业实现一次次的飞跃。

表 1 常规油气与非常规油气特征比较

Table 1 Comparison of conventional and unconventional hydrocarbon characteristics

项 别	常 规 油 气	非 常 规 油 气
聚集单元	构造、岩性地层等常规圈闭,圈闭作用明显	无明显界限的非闭合圈闭,圈闭作用不明显
储层特征	常规毫-微米孔喉储层	非常规纳米孔喉储层,滞留作用明显
源储配置	一般源外成藏,排聚时刻匹配	大面积源储共生
水动力作用	明显,重力分异、浮力聚集	不明显,流体分异差、浮力作用受限
运移方式	远距离二次运移为主	一次运移或短距离二次运移
渗流机理	达西渗流或管流	非达西渗流为主
油气水关系	上油气下水,界面明显	无统一油气水界面与压力系统,饱和度差异大,油气水易共存
分布和聚集	单体型、集群型非连续分布,局部富集	盆地中心、斜坡等大面积(准)连续型分布,有“甜点”
技术应用	直井、酸化压裂等常规勘探开发技术	水平分支井、分段分层压裂等特殊技术

随着世界油气需求的不断增长、国际油价持续高位震荡,以及应对气候变化、发展低碳经济的现实需要,具有很大资源潜力和发展空间的非常规石油天然气,特别是非常规天然气越来越受到各个国家和石油公司的高度重视。

当前,全球油气勘探从单个圈闭勘探,向大面积层状储层勘探跨越,其发展有三大趋势:即勘探地区由陆地向深水发展;勘探深度由中深层向万米超深层延展;勘探资源由常规油气向非常规油气拓展。非常规油气开采取得三大创新:一是“纳米级”孔喉系统连续型油气聚集的地质理论创新;二是形成“人造渗透率”的水平井多级体积压裂的核心技术创新;三是平台式“工厂化”经济的开发模式创新。在三大创新体系的支撑下,油砂、重油、致密气、煤层气等已成为全球非常规石油天然气勘探开发的重点领域,页岩气成为全球非常规天然气勘探开发的热点领域,致密油成为全球非常规石油勘探开发的亮点领域。非常规油气的突破,改变了全球能源传统格局,形成了以中东为核心的东半球油气版图,以及以北美为核心的西半球油气版图。截至 2010 年底,全球

常规石油剩余探明储量 188.8 Gt,天然气剩余探明储量 187 Tm³,分别占探明储量规模的 39% 和 40%;后者以非常规油气资源为主,到 2020 年,加拿大油砂、巴西盐下深水油气与美国致密油产量可能分别达到 0.15 Gt、0.25 Gt、0.15 Gt,推动了世界石油新秩序的形成^[24]。

常规油气是指单体型或集群型分布的圈闭油气资源,现今常规技术能经济开采;非常规油气是指连续型或准连续型分布的大面积油气资源,现今常规技术无法经济开采,需水平井、“工厂化”等特殊开采方法。常规与非常规油气的本质区别在于是否受圈闭控制、是否连续分布、单井是否有自然工业产量。常规油气研究的灵魂是成藏,目标是回答圈闭是否有油气;非常规油气研究的灵魂是储层,目标是回答储集有多少油气。目前,常规油气面临非常规的问题,常规领域的难动用储量、剩余的致密储层等成为非常规油气,而致密油和气、页岩油和气和等非常规需要发展成新的“常规”。随着理论技术进步,非常规可以向常规转化。非常规油气资源在全球能源结构中具有重要的战略地位,其中源储共生层系油气聚

集(包括致密油气、页岩油气和煤层气等),是未来非常规油气储产量增长的主体之一。基于此,本文在全面回顾近十年国内外非常规油气勘探进展的基础上,从非常规油气储集体成因、连续型油气聚集和纳米级孔喉结构表征等三个方面对中国非常规油气研究进展进行了归纳总结,最后对非常规油气的研究意义和纳米油气工业化时代进行了展望。

1 全球非常规油气勘探进展

全球油气工业三百年左右的发展历史,主要经历了构造油气藏、岩性地层油气藏和非常规油气藏三个发展阶段或三大领域(图 1)。油气藏分布方式分别有单体型、集群型、连续型三种类型。从单体型构造油气藏向集群型岩性地层油气藏跨越,是第一次理论技术创新,核心是寻找圈闭油气藏;从岩性地层油气藏向非常规油气藏的跨越,是第二次理论技术创新,核心是寻找有利储集体,突破了常规储层物性下限与传统圈闭找油的理念。

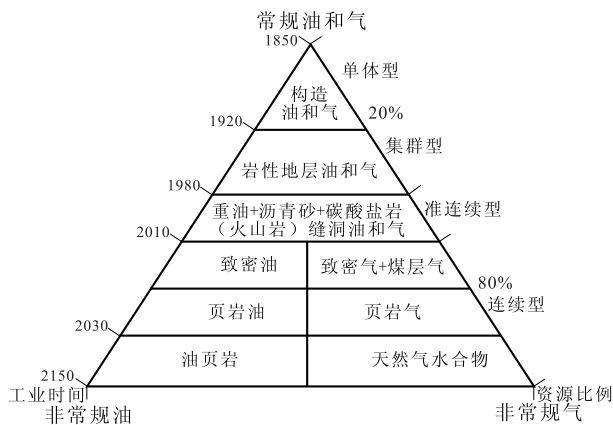


图 1 油气资源类型特征三角图
Fig. 1 Triangular diagram for types and characteristics of oil and gas resources

1.1 全球非常规油气勘探进展

非常规油气是现今无法用常规方法和技术手段进行经济性勘探开发的资源。油气藏分布方式分别有单体型、集群型、准连续型或连续型三种类型。非常规资源开发需要具备必需的技术、经济条件,才能推动非常规资源转为常规资源。

近年来,伴随理论认识的深化和勘探开发技术的进步,全球非常规油气勘探开发取得一系列重大突破。致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为全球非常规石油天然气勘探开发的重点领域,页岩气成为全球非常规天然气勘探开发的热点领域,致密油成为全球非常规石油勘探开发的亮点领域。全球非常规油气产量快速增长,在全球能源供应中的地位

日益凸显。2008 年全球非常规石油资源规模达 449.5 Gt,与常规石油资源基本相当;全球非常规天然气资源规模达 3921 Tm³,是常规天然气资源的 8 倍,非常规天然气产量快速上升,已占到天然气产量的 18%^[24]。

致密砂岩气:1927 年发现于美国的圣胡安盆地,1976 年在加拿大阿尔伯达盆地西部深拗陷区北部发现了大型的埃尔姆沃斯致密砂岩气田。上世纪 60 年代末至 70 年代初,致密天然气被国外认为是天然气的第二个主要领域。据美国联邦地质调查局研究,全球已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有 70 个左右,资源量约为 210 Tm³;2008 年全球致密砂岩气产量约 432 Gm³,大约占全球天然气总产量的七分之一。美国、加拿大在致密砂岩气勘探开发方面处于世界领先地位,已实现致密砂岩气的大规模商业化生产,目前美国在 30 个盆地中大约有 900 个气田生产致密砂岩气,可采储量 13 Tm³ 左右,生产井超过 4×10⁴ 口,2010 年产量达 175.4 Gm³,占美国当年天然气总产量(611 Gm³)的 30%^[24]。

页岩气:北美地区是全球发现页岩气最早的地区,1821 年在美国东部泥盆系页岩中钻成第一口页岩气井,并由此拉开了世界天然气工业发展的序幕;1914 年发现第一个页岩气田——Big Sandy 气田。1981 年,被誉为 Barnett 页岩气之父的乔治·米歇尔,对 Barnett 页岩 C. W. Slay No. 1 井实施大规模压裂并获成功,实现了真正意义的页岩气突破。与世界石油发现相比,页岩气的发现要早于石油近 40 年。至 2009 年底,北美地区仍是全球页岩气勘探开发最成功的地区,在约 50 个盆地的古生代和中生代地层中发现含气页岩,在近 10 个盆地进行页岩气生产,开发井 50000 余口,井深 2500~4500 m;2009 年年产量 95 Gm³,占北美天然气总产量的 12%,使北美进入了天然气富裕的新时代^[24]。

煤层气:上世纪 80 年代以来,美国、加拿大等国家煤层气的勘探取得了重要进展,目前美国煤层气年产量可达 50 Gm³ 以上^[24]。

致密油:正成为全球非常规石油勘探的亮点领域,是继页岩气突破后的又一热点领域。2000 年,威利斯顿盆地泥盆系巴肯(Bakken)致密油开发取得重大突破,日产油 7000 t,致密油被称为“黑金”。2008 年,巴肯致密油实现规模开发,是当年全球十大发现之一。同年,德克萨斯南部 Eagle Ford 致密油开发获突破。目前,北美已发现致密油盆地 19 个,主力致密油产层 4 套,2009 年致密油探明可采储量达 0.64 Gt,年产量 12.3 Mt^[24]。

重油沥青:加拿大位居首位,约 3.0 T 桶,占世界总量的 48%。委内瑞拉位居第二,为 1.2 T 桶,占总量的 19%。前苏联地区位居第三,约为 1.0 T 桶,占总量的 16%。其次分别为伊拉克、科威特、美国和中国^[24]。

水合物:天然气水合物广泛存在于大陆边缘外围的永久冻土和海底沉积物中。不断增加的证据表明,用常规油气开采技术从天然气水合物中提取天然气是可能的^[25]。过去十年,天然气水合物已从美国布雷克海台的南部海岸、美国和加拿大的卡斯卡底陆缘、中美洲海沟、秘鲁海岸、印度海岸、中国海岸、韩国海岸以及日本中部和西部陆缘的深部沉积物中提取出来。研究程度最高的两个与永久冻土带相关的天然气水合物聚集区,是加拿大麦肯齐河三角洲的 Mallik 和阿拉斯加北坡的 Eileen 天然气水合物聚集。近几年,全球天然气水合物资源评价项目的运行大大加快,然而很多重要的天然气水合物勘探开发问题仍然难以解决。

1.2 中国非常规油气勘探进展

中国的重油、致密油、致密气、页岩气、煤层气等非常规油气资源也非常丰富。鄂尔多斯盆地华庆地区中生界已发现大规模连续分布的致密大油区。作为我国致密砂岩气成功勘探开发的典型代表,鄂尔多斯盆地苏里格地区成为目前唯一探明储量超 3 Tm³、年产量超百亿立方米的大气区。煤层气经过近二十年的技术攻关与工业化试验,已取得重要进展,初步建成年产 2.5 Gm³ 的生产能力。页岩气的勘探研究与产业化试验也已起步,2010 年在四川盆地成功钻探了两口页岩气井,首次发现了页岩气,证实我国具有发展页岩气的资源基础。2010 年,中国非常规油气探明储量已占新增探明储量的 75%,成为储量增长的主体。

我国非常规油气资源类型多,地质条件差别大,认识程度、技术条件和发展现状差异很大。

致密气:已成为我国天然气增储上产的重要现实领域。早在 20 世纪 60 年代,四川盆地川西地区就发现致密气,因技术问题长期没有大发展。近年来,随着大型压裂改造技术进步和规模化应用,致密气勘探开发取得重大进展,形成了鄂尔多斯盆地苏里格、四川盆地须家河组两大致密气区,在塔里木、吐哈、松辽、渤海湾等盆地也有发现。2011 年,苏里格致密砂岩大气区实现探明储量超 3.0 Tm³,产量 13.5 Gm³;四川盆地须家河组致密砂岩大气区资源量也超过 5.0 Tm³,已发现三级地质储量达到 1.0 Tm³。此外,在松辽盆地登娄库组、吐哈盆地水西

群、准噶尔盆地八道湾组、库车东部侏罗系及西部深层巴什基奇克组致密砂岩均具备致密气大气区的条件,都已取得了重大发现。至 2010 年底,我国致密气累计探明地质储量 3.1 Tm³,年产量 20.9 Gm³,约占全国天然气总产量的 1/5,展现出中国致密气很大的潜力,可采资源量 1.5~2.0 Tm³。

煤层气:勘探开发取得实质性突破,年产量突破 10×10⁸ m³。经过近二十年的发展,初步形成了适合不同类型煤层气的勘探开发配套技术,在山西沁水、陕西韩城等地区成功实现了工业化开采。至 2010 年底,在鄂尔多斯、沁水、渤海湾等盆地已探明煤层气田 12 个、地质储量 262 Gm³,已钻各类井 5400 余口,年产量 1.5 Gm³。

页岩气:地质研究与工业化先导试验已取得重大进展。2005 年以来,借鉴美国页岩气发展的成功经验,我国有关部门和企业开始进行页岩气资源调查、成藏条件研究以及工业化试验。目前,全国已钻页岩气地质浅井 20 口、评价井 14 口、水平井 6 口。其中,四川盆地威 201 井、宁 201 日产气 10 km³ 左右,阳 101 井获日产 50~60 km³ 工业气流,初步证实我国具有形成页岩气的地质条件,具备一定的资源基础。四川盆地中南部是页岩气最有利的开采区。中国页岩气特别需要注意的是陆相、海陆过渡相含气页岩分布与储集空间具有非均质性、海相页岩有高热演化性、构造活动较强、主目的层埋藏较深、地表多山地与丘陵、水资源较缺乏、环境保护等情况,中国页岩气的技术可采储量和经济可采储量还需进一步研究。因此,页岩气规模化发展需要突破理论、技术、成本和环境“四道关”。

致密油:中国致密油分布范围广,类型多。以鄂尔多斯盆地中生界延长组致密砂岩、川中侏罗系致密砂岩与致密灰岩最为典型,在烃源岩、储层、地层压力、原油品质等方面与 Bakken 致密油、Eagle Ford 致密油具有可对比性。此外,松辽盆地中深层青山口组和扶杨组致密砂岩、准噶尔盆地二叠系平地泉组和芦草沟组白云岩、三塘湖盆地二叠系芦草沟组致密灰岩、吐哈盆地侏罗系致密砂岩、酒泉盆地白垩系致密灰岩等均具备形成致密油的地质条件,初步评价中国致密油地质资源量达 11.0~13.5 Gt,具有广阔的勘探前景,需要重新评价技术可采资源量与经济可采资源量。

油页岩:开发利用已有 80 余年历史,受成本与技术制约,长期没有大的进展。1959 年,我国从油页岩中提炼的页岩油产量达 79×10⁴ t,占当年全国石油产量的 21%。随着大庆等常规油气田的发现,

油页岩的开发逐渐萎缩。近年来,随着石油供需缺口不断加大、国际油价不断走高,辽宁抚顺、吉林桦甸等地先后恢复页岩油生产,2010年全国页岩油产量约 55×10^4 t,其中抚顺矿业集团生产 30×10^4 t。但因传统干馏工艺存在环境、成本等问题,在原位开采技术突破前,不可能获得更大规模的发展。

油砂矿:资源品位差,开发潜力有限。通过对24个盆地100余个油砂矿带的资源调查与评价,我国油砂油可采资源量约2.26 Gt。与北美油砂相比,我国油砂实际上属于“干沥青”范围,资源品位总体很差,含油率大于10%的油砂油可采资源量仅0.04 Gt,只占油砂油资源总量的2%。准噶尔盆地乌尔禾、松辽盆地图木吉等油砂矿开采试验表明,我国油砂矿经济有效开发的潜力十分有限。

天然气水合物:尚处于前期研究和资源调查阶段,距离工业化开发还有相当长的距离。1999年,广州海洋地质调查局在西沙海槽取得海底天然气水合物的地球物理标志(BSR)。2007年,在南海神狐海域钻获天然气水合物实物样品,样品甲烷含量99.7%。2009年,中国地质调查局在青海祁连山南缘冻土带钻获天然气水合物实物样品。中石油一直关注并超前开展天然气水合物研究,2008年在南海矿权区初步发现天然气水合物的地球物理证据。

1.3 非常规油气勘探突破的启示

非常规油气突破带来如下重要启示:一是非常规油气发展要分层次展开和工业化试验,中国非常规油气近期优先发展的是致密气、致密油,特别是加强在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地、松辽盆地等进行致密油的工业化试验,而煤层气、页岩气、页岩油、油页岩等要坚持技术攻关和准备,需要继续研究技术可采储量与经济可采储量;二是技术突破与规模化应用,是推动非常规油气发展的关键,重点是发展直井多级压裂、水平井分段压裂、高分辨率三维地震储层预测与流体检测等核心技术;三是开发模式和管理创新,采用工厂化低成本开发模式,实现工业化效益开采;四是国家的政策扶持与较高油气价格,为非常规油气发展提供了强劲动力;五是非常规重大领域突破,需要长期基础理论创新与技术攻关储备。思想误区就是勘探的禁区;解放思想,才能解放油气,才能推动非常规转为常规开采。

核心技术的突破与创新是非常规油气实现高效勘探开发的关键。三维地震预测储层和裂缝展布,水平井-多分支井的多级分段压裂技术改善了储层物性,提高了渗流能力,有效支撑了北美致密油的商业化开发。目前 Bakken 致密油双分支井分段压裂

已达80段,初期产量达100 t/d,稳产期产量约为20 t/d;目前,川中侏罗系致密油多采用直井技术,开采方式为自然能量衰减或弹性驱动,无后期酸化压裂等增产措施,单井平均产量为0.9 t/d;鄂尔多斯盆地延长组7段,目前有300余口井应用压裂技术获得工业性油流,新应用大型混合水压裂方法,单井日产超20 t,成为中国致密油发展最现实的地区。因此,加强长水平段水平井、多级分段压裂技术的规模应用,是实现中国致密油效益勘探开发的关键。

2 中国非常规油气研究进展

2.1 陆相湖盆沉积学研究进展

近十年来,我国陆相盆地油气勘探揭示出大型坳陷湖盆中心发育分布面积广、成因类型丰富的砂体,湖盆中心砂体已成为中国陆相盆地岩性油气藏最重要的勘探目标。国内已意识到湖盆中心砂体成因与浅水三角洲和砂质碎屑流有关,对于浅水三角洲形成条件、微相构成、发育类型以及前三三角洲湖盆中心砂体的成因类型与分布模式等方面,仍缺乏系统研究与总结。坳陷湖盆中心储集体是岩性油气藏勘探的重要目标,是大面积低丰度岩性油气田形成的基础^[26]。深入系统研究湖盆中心储集体的形成机制、发育类型与分布规律,对于我国陆相盆地岩性地层油气藏深入勘探有重要意义。

2.1.1 陆相湖盆大型浅水三角洲成因机理与分布

浅水三角洲的概念最早由 Fisk 提出,Donaldson 等在研究石炭纪陆表海时发现水深是一个重要控制因素,并进一步总结了浅水三角洲的概念。国内外根据已有的三角洲类型与模式分析,划分为一种较新的类型——浅水三角洲,在地形平缓、整体沉降缓慢的坳陷盆地或稳定克拉通盆地背景下河流注入浅水湖盆时易形成此类三角洲。浅水三角洲沉积总体发育于较浅水湖泊中,沉积特征不同于一般三角洲,以河流作用为主,三角洲平原及前缘水下分流河道比较发育而前缘亚相中河口坝及远砂坝不发育,有别于正常的河流三角洲沉积及具陡坡带的经典湖泊三角洲沉积。

浅水曲流河三角洲在我国现代湖盆内极为发育,特别是潮湿气候环境下的浅水三角洲沉积特征更是明显。已建立潮湿、干旱气候条件下大型浅水三角洲发育模式:潮湿背景下,敞流型湖盆是浅水三角洲河道发育的主要因素(四川盆地须家河组),明显区别于闭流型湖盆;干旱背景下,河水主要以地表蒸发、植被消耗等泄水(松辽盆地登娄库组)。重点开展了三个方面的研究:①考察了鄱阳湖-赣江、洞

庭湖浅水三角洲现代沉积,通过解析浅水三角洲基本特征、洪水期和枯水期浅水三角洲发育特征与微相构成和浅水三角洲探地雷达响应,发现敞流浅水湖盆中心发育牵引流河道砂体,三角洲砂体分布面积占湖盆面积 60% 以上;②26 组水槽物理模拟实验表明,敞流浅水三角洲分流河道面积占 60% 以上,河口坝可达 40%,储集体发育;③通过对四川盆地须家河组等典型地区解剖,以敞流浅水三角洲模式为指导,工业化制图,推动万亿方大气区快速发展。

2.1.2 陆相湖盆砂质碎屑流成因机理与分布 砂

质碎屑流由 Hampton^[27] 引入,Shanmugam 等^[28, 29] 在 365 m 的露头观察与 4650 m 岩心分析基础上完善砂质碎屑流概念。他认为浊流沉积在深水沉积物中所占比例较小,绝大部分为砂质碎屑流与底流改造沉积物。前者代表在粘性与非粘性碎屑流之间的连续作用过程,从流变学特征看属于宾汉塑性流体,具有分散压力、基质强度和浮力等多种支撑机制。后者流体浓度较高,泥质含量低到中等,颗粒沉积表现为整体固结。沉积盆地中,浊流可以延伸到盆地平原,砂质碎屑流往往在盆地斜坡部位沉积下来(图 2)。

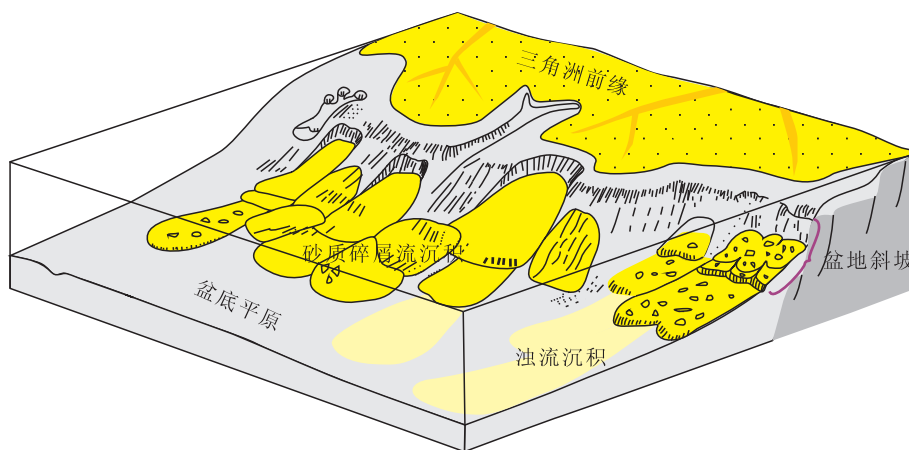


图 2 砂质碎屑流沉积模式

Fig. 2 The deposition model of sandy debris

陆相盆地深水重力流砂体的各项研究可参照海洋深水扇研究成果,但仍需考虑陆相湖盆沉积特色。重点开展了三个方面的研究工作:①国内外深水沉积研究,传统浊流理论受到挑战,深水砂质碎屑流广泛分布,储集体规模大,成为勘探研究热点;②按斜坡类型、水位高低、流量大小等进行 22 组水槽实验,表明砂质碎屑流分布在坡折带的下斜坡;③通过对鄂尔多斯盆地湖盆中心三叠系延长组 6 段等典型地区解剖,发现其发育大套深水砂岩,侧向具一定连续性,垂向累积厚度较大,砂质碎屑流的朵体发育于三角洲缘的坡折带下,纵向延伸不远但横向叠置连片,是湖盆斜坡与中心部位最有利的目标区,指导了沉积相编图与勘探部署。

陆相深水砂质碎屑流理论的总结,是对现行经典浊流理论的部分否定与补充。在许多深水盆地中,运用浊流鲍马序列、扇模式等不能够完全解释所有的深水重力流,更多深水砂体是砂质碎屑流的产物。新的沉积模式可以使我们对陆相湖盆斜坡和深水区有不一样的视角,提出新的目标区,对勘探部署有一定的指导作用,预测砂质碎屑流在我国松辽、渤

海湾、四川等陆相湖盆中是广泛分布与存在的。

2.1.3 湖相碳酸盐岩沉积模式与分布 湖相碳酸盐岩是指在内陆湖泊盆地中形成的碳酸盐岩,包括淡水湖盆碳酸盐岩、半咸水—咸水湖盆碳酸盐岩和盐湖中的碳酸盐岩。湖相碳酸盐岩是古湖盆从淡水向咸水直到盐、碱湖演变过程的必然产物。

湖相碳酸盐岩由于具备储集条件且多靠近油源,形成油气藏的可能性较大,在有合适圈闭和盖层条件下,就能形成油气藏。湖相碳酸盐岩受自身结构、分布规律等条件影响,多以岩性和地层油气藏为主,也有成岩圈闭油气藏和构造油气藏。国内外油气勘探实例表明,湖相碳酸盐岩在一定条件下既是生油层又是储集层。近年来,在我国泌阳凹陷和柴达木盆地西部等地区发现了工业油气流,表明湖相碳酸盐岩具有巨大的油气潜力,极具经济价值。

大多数湖盆的湖相碳酸盐岩以灰岩沉积为主。其发育特点是:①在湖盆形成、发育和萎缩这个发展阶段,湖相碳酸盐岩一般发育于构造活动相对稳定、湖盆水体持续扩张的阶段;②在一个层序内部,湖相碳酸盐岩一般发育于湖侵体系域;③湖相碳酸盐岩

较多地形成于温热的气候条件;④在陆源物质影响不到的地区,如湖盆中的水下隆起,尤其是碳酸盐岩水下隆起等部位,有利于湖相碳酸盐岩的发育。

2.2 连续型油气聚集研究进展

对非常规油气地质的研究,可追溯到 20 世纪 30 年代,W. B. Wilson^[30]在油气藏分类中提出开放油气藏,虽然当时认为其没有勘探价值,但 Wilson 已预测到非常规油气藏的存在。由于油气资源品位低,储层差,成藏机理复杂,勘探开发难度大,非常规油气资源一直没有得到勘探界的重视;直到 20 世纪 90 年代,随着油气勘探方向的转变和技术进步,非常规油气资源,如盆地中心气、煤层气、页岩气、致密砂岩气及页岩油才逐渐成为储量增长的主体,石油地质家才将注意力转移到非常规油气地质研究上^[24]。经过近二十年的努力,非常规油气地质学得到较大发展,涵盖非常规油气资源的内涵、种类、地质特征、资源评价方法和开发技术等多个方面。

USGS 的 Schmoker^[31]和 Gautier 等^[32]提出“连续型油气聚集”的概念,泛指在含油气盆地的致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中,大面积聚集分布,圈闭和盖层界限不清,缺乏明确油气水界面的油气资源。基于这一概念,USGS 对致密砂岩气、页岩气、盆地中心气、煤层气、浅层微生物气及天然气水合物等天然气资源进行了评价^[33, 34],有效地指导了美国非常规油气资源的开发。Law 等^[18]提出非常规油气系统的概念,认为其与构造圈闭无关,基本不受重力分异的影响,区域上存在大规模的普遍含油气区带,并简要介绍了煤层气、深盆地气及天然气水合物等

几种非常规天然气资源^[18]。2007 年,由 SPE、AAPG、WPC(世界石油委员会)和 SPEE(石油评价工程师学会)联合发布的“油气资源管理系统”,定义了非常规油气资源的相关概念,认为连续型矿产(continuous-type deposit)和非常规资源(unconventional resources)基本等同,是指大面积连续分布、受水动力影响很小的油气聚集,包括盆地中心气、页岩气、天然气水合物、天然沥青及油页岩等,同时强调了其技术难度及经济可行性。

2008~2011 年,邹才能等^[21~23, 35]立足中国非常规油气勘探实际,结合全球油气勘探情况^[36],创新发展了连续型油气聚集概念,明晰了连续型油气聚集的 10 个基本地质特征和两项关键标志。连续型油气聚集指在大范围非常规储集体中,油气连续分布的非常规圈闭油气聚集。非常规连续型油气聚集与传统意义常规圈闭油气在储集层特征、源储配置、聚集特征、渗流机理、分布特征等 10 个方面存在明显差别(图 3)。连续型油气聚集,主要是滞留在烃源岩内,或经一次运移或近源短距离二次运移,在盆地中心、斜坡等大面积非常规储集体中准连续或连续分布的油气聚集,无明显圈闭与盖层界限,流体分异差,无统一油气水界面和压力系统,含油气饱和度差异大,单井无自然工业产能。连续型油气聚集有两个关键标志:①源储共生,无明显圈闭界限,大面积含油气致密储集体呈连续型分布;②非浮力聚集,持续充注,不受水动力效应的明显影响,无统一油气水界面,无统一压力系统。控制这两个地质特征的核心因素是广泛分布的纳米孔喉网络系统:孔

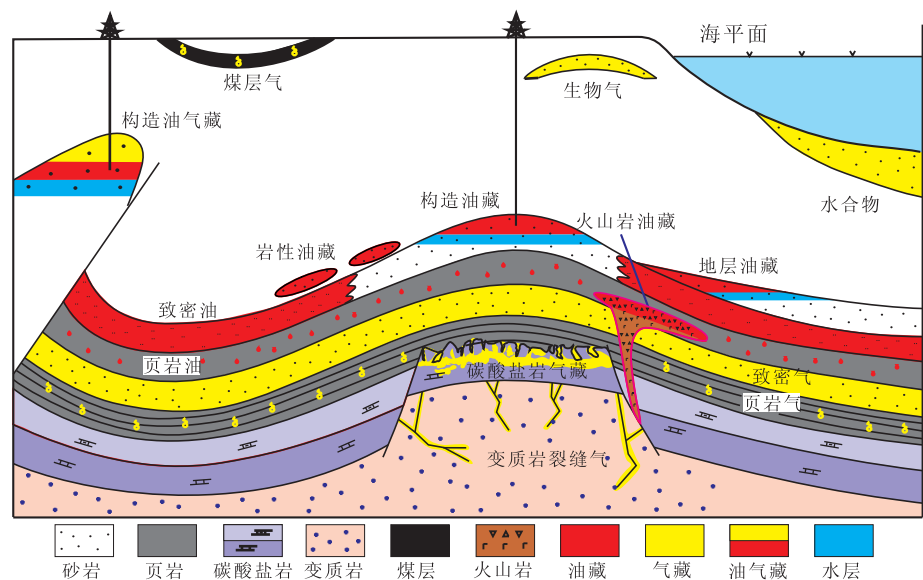


图 3 常规与非常规油气聚集类型分布

Fig. 3 Distribution of conventional and unconventional hydrocarbon accumulation types

喉直径大多为 100~900 nm,起沟通作用,控制连续型油气聚集的分布。大面积连续型油气聚集的勘探,关键是确定有利油气储集体的空间展布和人工增大储集体中油气流动能力。

“连续型”油气聚集与“非常规”油气概念不同。“非常规”油气是就资源概念和经济技术条件而言,而“连续型”油气聚集概念更能准确反映油气形成、聚集机理和分布特征,具有科学性和规范性。

中国连续型油气聚集类型丰富,不仅存在多种连续型气聚集,还广泛发育连续型油聚集。在松辽盆地中浅层油、鄂尔多斯盆地三叠系大面积连续分布的大油区(层),主要呈层状分布的烃源岩与大面积分布的砂体错叠连片,形成“连续型”油,分布面积 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上。稠油、沥青(中国东部第三系重质油,南方广泛分布中、古生界沥青脉)、油砂(准噶尔盆地西北缘风城地区)、油页岩(辽宁抚顺、广东茂名、吉林桦甸、汪清、山东龙口和甘肃省炭山岭等)和页岩油(四川盆地侏罗系)也广泛发育。

2.3 纳米级微观孔喉结构研究进展

油气赋存于储层孔隙中,孔隙类型及发育程度是衡量储层物性好坏的关键指标。按直径大小,一般将岩石孔隙划分为毫米级(孔径大于 1 mm)、微米级(孔径 $1 \text{ mm} \sim 1 \mu\text{m}$)和纳米级(孔径小于 $1 \mu\text{m}$),常规储集岩中孔-喉大小(直径)通常大于 $2 \mu\text{m}$,致密含气砂岩介于 $2 \sim 0.03 \mu\text{m}$,而页岩孔-喉直径通常则介于 $0.1 \sim 0.005 \mu\text{m}$ 。烃类分子、沥青质、环状构造、链烷烃和甲烷形成了另外一种连续谱,从沥青质的 $100 \text{ \AA}$ (10 nm)变化到甲烷的 $3.8 \text{ \AA}$ (0.38 nm),它们的分子直径远比我们想象的要小^[37, 38]。在毫米级孔隙中流体可在其中自由流动,形成“管流”,服从静水力学规律;在微米级孔隙中毛细管阻力限制流体自由流动,形成“渗流”,服从达西渗流规律;在纳米级孔隙中流体与周围介质之间存在巨大的粘滞力和分子作用力,一般条件下,流体不能自由流动,形成“滞留”,即使改变温压条件也仅能以分子或分子团的状态进行扩散,如粉细砂岩、页岩、粘土等非常规致密层的孔隙即属该种类型。

常规油气储层主要包括中粗砂岩、孔隙型碳酸盐岩等,一般以微米级孔隙为主。缝洞型碳酸盐岩、疏松砂岩的孔隙可以达到毫米级,也可以视为常规储层。受分析仪器精度的限制,传统方法无法识别孔径 $1 \mu\text{m}$ 以下的纳米级孔隙,这类储层常常笼统称之为“致密层”,如致密砂岩、泥页岩等,一般认为由于缺乏储集空间而不能作为有效工业化储层。

利用场发射扫描电镜技术和纳米 CT 技术,在对鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩油与生油岩、鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气、四川盆地侏罗系致密砂岩油与灰岩油、四川盆地地下古生界海相含气页岩等储层研究中,在含油气致密储集层中发现了广泛发育的孔喉直径小于 1000 nm 的纳米级孔喉,并首次在其中观察到石油的赋存(图 4)。致密储层主体孔径为 20~500 nm,其中页岩气储层一般为 100~200 nm(图 4A),生油岩内的孔径一般为 20~200 nm(图 4B),致密砂岩孔径一般为 100~500 nm(图 4C、D)。非常规储层丰富的纳米孔,有利于油气滞留聚集,连续分布。在我国已探明致密油气储量中,还有 $1/3 \sim 1/5$ 的纳米孔隙滞留的理论储量没有计算在内,如目前苏里格已发现的近 3 万亿方工业储量,实际具备 4 万亿方理论储量的规模。这一新发现和纳米采油气新技术的研发,对推动我国致密油、致密气、页岩油、页岩气等非常规油气资源规模利用,具有重大的理论价值和实践意义。

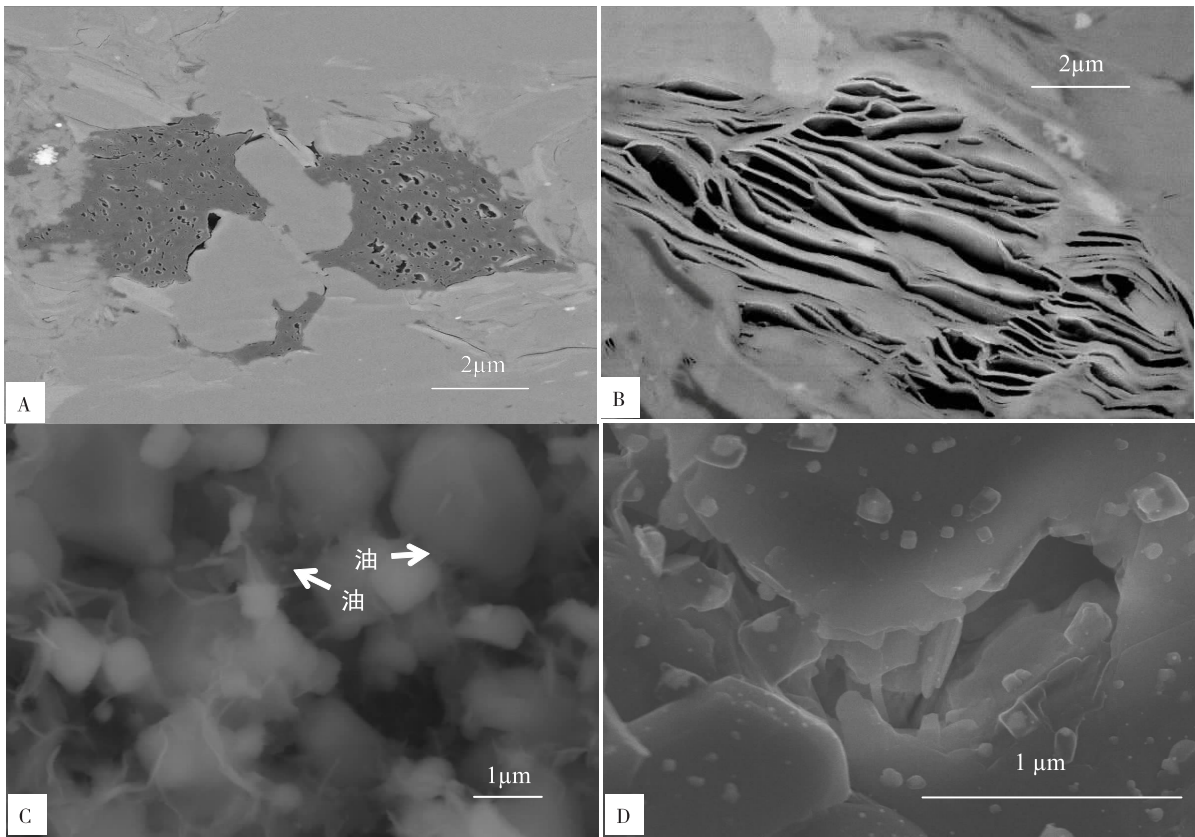
3 非常规油气与未来石油工业展望

中国非常规油气勘探发展非常快,近十年来,每年提交的探明地质储量中,致密储集层油气比例分别从不到 10% 提高到近 60%,从 30% 提高到 90%,总体上非常规致密储集层油气当量比例从 15% 提高到 70% 以上。中国近期增储上产领域是致密气和致密油,加强工业化攻关领域是煤层气和页岩气等,应加强探索研究水合物、页岩油和油页岩等。

近期非常规油气的研究重点集中于湖盆中心细粒沉积模式和纳米孔喉中油气形成、分布、技术研发这两个方面。

非常规油气勘探向湖盆中心大规模进军的趋势将更加明显,亟需加强各类细粒沉积岩的精细研究。它是粒度小于 0.1 mm、颗粒含量大于 50% 的沉积岩,主要由粘土和粉砂的陆源碎屑颗粒组成,也包含少量盆地内生的碳酸盐、生物硅质、磷酸盐等颗粒,占全球各主要沉积岩的 75% 以上。研究重点包括细粒沉积物的形成条件、物源、沉积过程、主控因素、分布特征等。

连续型油气聚集是广泛分布的纳米级孔喉系统中的大面积油气聚集方式,纳米级孔喉起着沟通和连接的决定性作用,控制着油气连续性聚集和分布。研究重点是纳米级孔喉中油气形成分布和技术研发两个方面,即纳米油气攻关。纳米油气是指用纳米技术研究和开采聚集在纳米级孔喉储集系统中的油



A-四川盆地威 201 井志留系页岩有机质内孔;B-鄂尔多斯盆地张 2 井上二叠统延长组 7 段页岩片状绿泥石基质孔;C-鄂尔多斯盆地宁 57 井上二叠统延长组致密砂岩纳米级孔喉中含油;D-鄂尔多斯盆地苏 315 井上古生界下石盒子组 8 段致密砂岩石英粒间孔

A-Inner pores within organic matter of Siliurian shale in Well Wei-201 of Sichuan Basin, pore throat diameter between 100-200 nm; B-Matrix pores within flaky chlorite of shale, Member-7, Yanchang Formation, Upper Triassic Series in Well Zhang-2 of Ordos Basin, pore throat diameter between 40-300 nm; C-Oil found in nano-sized porethroats within tight sandstone, Yanchang Formation, upper Triassic Series in Well Ning-57 of Ordos Basin; D-Intergranular pores within quartz of tight sandstone, Member8, Xiashihezi Formation, upper Palaeozoic Group in Well Su-315 of Ordos Basin, pore throat diameter between 50-250 nm

图 4 中国非常规致密储集层纳米级孔喉典型微观照片

Fig. 4 Typical micrographs of nano size pore-throats in shale oil-gas and tight oil-gas reservoirs in China

气,主要分布在烃源岩层及与其大面积紧密接触的
近源致密储集层系中,涵盖了页岩油、页岩气、煤层
气、致密砂岩油、致密砂岩气、致密灰岩油等,储集层
孔喉直径一般为纳米级;油气水在纳米孔喉中渗流
能力差,相态分异难,主要依靠超压驱动,油气被滞
留吸附,在源储共生致密层系中大面积连续分布。
非常规油气聚集突破了储集层物性下限,开拓了
新的领域,即源储共生致密油气层系。纳米孔喉
油气系统聚集机理是非常规油气地质的重要基础,
需深入分析纳米孔喉油气的流动、聚集机制,探索
非常规油气资源的评价方法。中国非常规油气勘探
开发的“陆海”模式不同于北美的“海相”模式,突破
的关键在于水平井压裂、提高采收率等技术的支撑。

我们预测纳米油气是未来石油工业发展的重要
方向之一^[39, 40]。伴随全球第六次科技革命的来临,
生命科技、信息科技与纳米科技等成为未来发展的
主体。初步预计到 2030 年前后,石油工业将进入纳
米等科技时代,形成的关键技术包括:①纳米油气透
视观测镜,基于纳米 CT 重构三维储层模型、三维地
震透视等;②纳米油气驱替剂,最大限度提高油气采
收率;③纳米油气开采机器人,应用于油气勘探开发
全过程。纳米、信息等新技术将成为石油工业的核
心和常规技术之一,油气智能化时代也随之到来。

参考文献 (References):

[1] Levorsen A I. Geology of petroleum[M]. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1956.

- [2] Levorsen A I. Geology of petroleum (2nd Edition) [M]. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1967.
- [3] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin, DEU: Springer-Verlag, 1978.
- [4] Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1979.
- [5] Pan Z X. Nonmarine origin of petroleum in North Shensi and the Cretaceous of Szechuan, China [J]. AAPG Bulletin, 1941, 25: 2058—2068.
- [6] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析 [J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1—7.
Hu Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi-quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 胡朝元. 生油区控制油气田分布-中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论 [J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9—13.
Hu Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邱中建. 加速渤海湾油气勘探的几点想法: 复式油气聚集(区)带机理 [R]. 石油勘探开发规划研究院, 1974.
Qiu Zhongjian. Several thoughts on accelerating the petroleum exploration in Bohai-Bay Basin: Formation mechanism of complex petroleum accumulation zones [R]. Research Institute of Petroleum Exploration, Development & Planning, PetroChina, 1974.
- [9] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布 [J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1—8.
Hu Jianyi, Xu Shubao, Tong Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin [J]. Petroleum Explor. Develop., 1986, 13(1): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景 [J]. 石油学报, 1986, 7(1): 1—21.
Li Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai gulf of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 1—21. (in Chinese with English abstract)
- [11] 戴金星, 邹才能, 陶士振, 刘全有, 周庆华, 胡安平, 杨春. 中国大气田形成条件和主控因素 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 473—484.
Dai Jinxing, Zou Caineng, Tao Shizhen, Liu Quanyou, Zhou Qinghua, Hu Anping, Yang Chun. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China [J]. Natural Gas Geosci., 2007, 18(4): 473—484. (in Chinese with English abstract)
- [12] 戴金星. 中国煤成气研究 30 年来勘探的重大进展 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 264—279.
Dai Jinxing. Major developments of coal-formed gas exploration in the last 30 years in China [J]. Petroleum Explor. Develop., 2009, 36(3): 264—279.
- [13] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气与石油 [J]. 石油勘探与开发, 1979, 6(3): 10—17.
Dai Jinxing. Petroleum and natural gas generation in coalification [J]. Petroleum Explor. Develop., 1979, 6(3): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [14] Margoon L B, Dow W G. The petroleum system: from source to trap [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, 1994.
- [15] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 李明, 池英柳, 姚逢昌, 郑晓东, 刘晓, 殷积峰. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 3—9.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Li Ming, Chi Yingliu, Yao Fengchang, Zheng Xiaodong, Liu Xiao, Yin Jifeng. Two key technologies about exploration of stratigraphic lithological reservoirs [J]. Petroleum Expl. Develop., 2004, 31(3): 3—9. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵文智, 汪泽成, 王红军, 王兆云. 中国中、低丰度大油气田基本特征及形成条件 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 641—650.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Hongjun, Wang Zhaoyun. Principal characteristics and forming conditions for medium-low abundance large scale oil/gas fields in China [J]. Petroleum Explor. Develop., 2008, 35(6): 641—650. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邹才能, 袁选俊, 陶士振, 朱如凯, 侯连华. 岩性地层油气藏 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 121—132.
Zou Caineng, Yuan Xuanjun, Tao Shizhen, Zhu Rukai, Hou Lianhua. Litho-stratigraphic Reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 121—132. (in Chinese)
- [18] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG Bull., 2002, 86(11): 1851—1852.
- [19] Law B E. Basin-centered gas systems [J]. AAPG Bull., 2002, 86(11): 1891—1915.
- [20] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems [J]. AAPG Bull., 2002, 86(11): 1993—2000.
- [21] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 袁选俊, 李伟, 张光亚, 张响响, 高晓辉, 刘柳红, 徐春春, 宋家荣, 李国辉. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布-以四川盆地须家河组煤系大气区为例 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 307—319.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Li Wei, Zhang Guangya, Zhang Xiangxiang, Gao Xiaohui, Liu Liuhong, Xu Chun, Song Jiarong, Li Guohui. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: A case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin [J]. Petroleum Explor. Develop., 2009, 36(3): 307—319. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 朱如凯, 董大忠, 李伟, 王岚, 高晓辉, 公言杰, 贾进华, 侯连华, 张光亚, 李建忠, 徐春春, 杨华. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669—682.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Zhu Rukai, Dong Dazhong, Li Wei, Wang Lan, Gao Xiaohui, Gong Yanjie, Jia Jinhua, Hou Lianhua, Zhang Guangya, Li Jianzhong,

- Xu Chunchun, Yanghua. Global importance of "continuous" petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation[J]. *Petroleum Explor. Develop.*, 2009, 36(6): 669—682. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邹才能,陶士振,袁选俊,朱如凯,侯连华,王岚,高晓辉,公言杰. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 324—331.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Wang Lan, Gao Xiaohui, Gong Yanjie. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 324—331. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011.
- Zou Caineng. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [25] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, Boswell R. Natural gas hydrates: A Review. Collett T, Johnson A, Knapp C, Boswell R. Natural gas hydrates-energy resource potential and associated geologic hazards[M]. *AAPG Memoir*, 2009, 89: 146—219.
- [26] 邹才能,陶士振,谷志东. 中国低丰度大型岩性油气田形成条件和分布规律[J]. *地质学报*, 2006, 80(11): 1739—1751.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Gu Zhidong. Formation conditions and distribution rules of large lithologic oil-gas fields with low abundance in China [J]. *Acta Geological Sinica* 2006, 80(11): 1739—1751. (in Chinese with English abstract)
- [27] Hampton M A. Competence of fine-grained debris flows[J]. *J. Sediment. Petrol.*, 1975, 45: 834—844.
- [28] Shanmugam G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence(Pennsylvanian Jackford Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma[J]. *Am. Asso. Petr. Geol. Bull.*, 1995, 79: 672—695.
- [29] Shanmugam G. Ten turbidite myths[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 2002, 58: 311—341.
- [30] Wilson W B, Wrather W E, Lahee F H. Proposed classification of oil and gas reservoirs[A]. *Problems of Petroleum Geology*, AAPG 1934:433—445.
- [31] Schmoker J W. National assessment report of USA oil and gas resources [DB/CD]. Reston: USGS, 1995.
- [32] Gautier D L, Mast R F. US geological survey methodology for the 1995 national assessment[J]. *AAPG Bull.*, 1995, 78: 1—10.
- [33] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. *AAPG Bull.*, 2002, 86(11): 1993—2000.
- [34] Schmoker J W. U S Geological Survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations[EB/OL]. http://certmapper.cr.usgs.gov/data/noga00/natl/text/CH_13.pdf, 2005.
- [35] 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641—653.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, Li Jianzhong, Li Xinjing, Wang Yuman, Li Denghua, Cheng Keming. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Explor. Develop.*, 2010, 37(6): 641—653. (in Chinese with English abstract)
- [36] 邹才能,张光亚,陶士振,胡素云,李小地,李建忠,董大忠,朱如凯,袁选俊,侯连华,瞿辉,赵霞,贾进华,高晓辉,郭秋麟,王岚,李新景. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 129—145.
- Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, Hu Suyun, Li Xiaodi, Li Jianzhong, Dong Dazhong, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Qu Hui, Zhao Xia, Jia Jinhua, Gao Xiaohui, Guo Qiulin, Wang Lan, Li Xinjing. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. *Petro. Explor. Develop.*, 2010, 37(2): 129—145. (in Chinese with English abstract)
- [37] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. *AAPG Bull.*, 2009, 93(3): 329—340.
- [38] 邹才能,朱如凯,白斌,杨智,吴松涛,苏玲,董大忠,李新景. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857—1864.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, Yang Zhi, Wu Songtao, Su Ling, Su Ling, Dong Dazhong, Li Xinjing. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857—1864. (in Chinese with English abstract)
- [39] 邹才能,杨智,陶士振,李伟,吴松涛,侯连华,朱如凯,袁选俊,王岚,高晓辉,贾进华,郭秋麟,白斌. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 13—26.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, Li Wei, Wu Songtao, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Wang Lan, Gao Xiaohui, Jia Jinhua, Guo Qiulin, Bai Bin. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. *Petroleum Explor. Develop.*, 2012, 39(1): 13—26. (in Chinese with English abstract)
- [40] 邹才能,朱如凯,吴松涛,杨智,陶士振,袁选俊,侯连华,杨华,徐春春,李登华,白斌,王岚. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173—187.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, Yang Zhi, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Yang Hua, Xu Chunchun, Li Denghua, Bai Bin, Wang Lan. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional petroleum accumulations-taking tight oil and tight gas in China for an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 173—187. (in Chinese with English abstract)