

文章编号:1000-0747(2010)02-0129-17

全球油气勘探领域地质特征、重大发现 及非常规石油地质

邹才能^{1,2}, 张光亚^{1,2}, 陶士振^{1,2}, 胡素云^{1,2}, 李小地^{1,2}, 李建忠^{1,2},
董大忠^{1,2}, 朱如凯^{1,2}, 袁选俊^{1,2}, 侯连华^{1,2}, 瞿辉^{1,2}, 赵霞^{1,2},
贾进华^{1,2}, 高晓辉^{1,2}, 郭秋麟^{1,2}, 王岚^{1,2}, 李新景²

(1. 提高石油采收率国家重点实验室; 2. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 国家大型气田与煤层气开发项目(2008ZX05001)

摘要: 全球常规类大型、特大型油气田主要分布在特提斯域、被动陆缘、前陆冲断带和克拉通等盆地中。非常规类油气田主要分布于前渊斜坡、盆地(凹陷)中心、克拉通向斜区和冻土带等。21 世纪以来全球油气勘探重大发现主要集中在被动陆缘深水区、碳酸盐岩、岩性-地层、前陆冲断带、成熟探区、新地区新盆地及非常规油气藏(场)等 7 大领域。这些重大发现涉及油气勘探中的常规与非常规 2 类油气资源。常规石油地质强调在单一明确圈闭中的油气运聚和成藏规律; 非常规石油地质重点研究非常规资源、非常规储集层、非常规成藏与非常规技术等。非常规油气藏(场)在地质特征、分类方案、研究内容、评价方法和勘探阶段等方面与常规油气藏有明显不同, 需要加强非常规石油地质研究, 发展非常规石油地质理论。图 8 表 7 参 63

关键词: 全球勘探发现领域; 地质特征; 非常规石油地质理论; “连续型”油气藏(场)

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration

Zou Caineng^{1,2}, Zhang Guangya^{1,2}, Tao Shizhen^{1,2}, Hu Suyun^{1,2}, Li Xiaodi^{1,2}, Li Jianzhong^{1,2},
Dong Dazhong^{1,2}, Zhu Rukai^{1,2}, Yuan Xuanjun^{1,2}, Hou Lianhua^{1,2}, Qu Hui^{1,2}, Zhao Xia^{1,2},
Jia Jinhua^{1,2}, Gao Xiaohui^{1,2}, Guo Qiulin^{1,2}, Wang Lan^{1,2}, Li Xinjing²

(1. State Key Laboratory of EOR, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of
Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Large and extra-large oil/gas fields are mainly distributed in Thetys areas, passive margins, foreland thrust belts, and craton basins in the world. Unconventional oil/gas fields are mainly distributed in foreland slopes, basin (depression) centers, craton synclines, and tundras. Since the 21st century, the major exploration discoveries across the globe have been mainly concentrated in the deep water area of passive margins, carbonate rock, lithologic-stratigraphic zone, foreland thrust belt, mature exploration area, new basin and unconventional oil/gas reservoir (field). These major discoveries involve conventional and unconventional oil/gas resources. The conventional oil geology stresses the oil/gas migration and reservoir-forming rules in individual traps; the unconventional oil geology focuses on unconventional resource, reservoir, reservoir-formation and technologies. The geological features, classification program, research content, evaluation method and exploration phase of unconventional oil/gas reservoirs (fields) are different from those of conventional ones. Research should be strengthened on unconventional oil geology to develop unconventional oil geological theories.

Key words: global exploration discoveries; geological feature; unconventional petroleum geological theory; “continuous” petroleum reservoir (field)

0 引言

全球板块构造演化经历了 2 次大规模分合, 最终

主要发育了古生代和中、新生代 2 个世代的盆地, 形成了北方劳亚、中部特提斯、南部冈瓦纳和太平洋 4 大油气聚集域^[1,2]。全球大中型沉积盆地约 624 个, 产油气

盆地约 160 个,可分为中东、中亚—俄罗斯、北美、南美、非洲、亚太 6 大油气区,其中中东地区油气资源最为富集,剩余可采石油储量约 $1\ 012\times 10^8\text{ t}$ 、可采天然气储量 $72\times 10^{12}\text{ m}^3$,待发现可采石油储量约 $460\times 10^8\text{ t}$ 、可采天然气储量约 $52\times 10^{12}\text{ m}^3$ [3,4]。

大油气田是指可采储量油大于 $6\ 850\times 10^4\text{ t}$ ($5\times 10^8\text{ bbl}$)、气大于 $850\times 10^8\text{ m}^3$ ($3\times 10^{12}\text{ ft}^3$) 的油气田,巨型油气田的可采储量油大于 $6.85\times 10^8\text{ t}$ ($50\times 10^8\text{ bbl}$)、气大于 $8\ 500\times 10^8\text{ m}^3$ ($30\times 10^{12}\text{ ft}^3$) [5,6]。至 2008 年底,全球共发现大油气田 951 个,大油气田储量约占全球发现储量的 50% 以上,主要分布在中东波斯湾、西西伯利亚等富油气区,如波斯湾地区发现的大油气田数超过 200 个。大油气田主要分布在被动大陆边缘 (341 个,占 35.85%)、大陆裂谷 (283 个,占 29.76%)、大陆碰撞边缘 (182 个,占 19.14%) 等盆地中 [5,6]。

大油气田发现的高峰在 20 世纪 60 至 70 年代,近年来仍不断有重大发现。勘探呈现出 3 个显著特征:①老油气区仍是增储的主体,据统计,自 1996 至 2003 年,全球年新增石油可采储量 $41\times 10^8\text{ t}$,年新增天然气可采储量 $7.5\times 10^{12}\text{ m}^3$,其中老油气区年均新增石油可采储量 $29\times 10^8\text{ t}$ 、新增天然气可采储量 $5.9\times 10^{12}\text{ m}^3$,分别占全球年新增储量的 71% 和 79% [4];②全球剩余探明油气储量和产量持续增长,据 BP 能源 2007 年统计,全球石油和天然气储采比基本稳定,石油年产量在 $40\times 10^8\text{ t}$ 左右,储采比稳定在 45 左右,天然气年产量 $3\times 10^{12}\text{ m}^3$ 左右,储采比高达 60 以上;③非常规油气资源得到重视,产量大幅度增加 [7],到 2008 年底,全球非常规油 (包括油砂油、页岩油) 产量达到 $6\ 000\times 10^4\text{ t/a}$ 以上,“连续型”非常规天然气产量达到 $5\ 612\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,其中致密砂岩气 $4\ 139\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、煤层气 $771\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、页岩气 $583\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,美国非常规气总产量已达到 $2\ 886\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (致密气 $1\ 756\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、煤层气 $557\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、页岩气 $573\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$) [4,8]。

全球常规油气资源总量丰富,待发现资源潜力大。全球常规石油可采资源量 $4\ 582\times 10^8\text{ t}$,至 2008 年底已累计采出 $1\ 422\times 10^8\text{ t}$,采出率 31%;剩余探明石油可采储量 $1\ 686\times 10^8\text{ t}$,占 37%;待发现石油可采资源量 $1\ 474\times 10^8\text{ t}$,占 32% [3,4]。全球共有天然气可采资源量 $488\times 10^{12}\text{ m}^3$,至 2007 年底已累计采出 $80\times 10^{12}\text{ m}^3$,采出率 16%,剩余探明天然气可采储量 $177\times 10^{12}\text{ m}^3$,占 36%,待发现可采资源量 $231\times 10^{12}\text{ m}^3$,占 48%。

全球非常规石油 (重油、天然沥青和页岩油等) 可

采资源量约 $4\ 495\times 10^8\text{ t}$,与常规石油资源基本相当;非常规天然气 (煤层气、致密砂岩气、页岩气和水合物等) 可采资源量约 $4\ 000\times 10^{12}\text{ m}^3$,是常规天然气资源的 8 倍左右 [3,9]。

2000—2008 年,全球发现大油气田 90 个,主要分布在亚太、南美、北美、中东和非洲等地区 [5,10]。这些重大发现主要分布在被动陆缘深水区、碳酸盐岩、岩性-地层、前陆冲断带、成熟探区、新地区新盆地及非常规油气藏 (场) 等 7 大领域。本文将分领域对所发现的大型油气田的类型、规模、特征、分布、形成条件及发现历程进行分析,以期对未来油气勘探、研究有所启示。

1 大型、特大型油气田分布规律

全球油气具有不均一分布的特点,以区域构造盆地为单元,集中分布在特定的油气聚集域和聚集区中。常规大型、特大型油气田分布主要受大的构造背景控制,在构造域上,主要以特提斯构造域为主;在构造类型上,以被动大陆边缘、前陆冲断带和克拉通正向构造为主。非常规大型、特大型油气田分布于大型负向构造区或斜坡区,如盆地中心、大型构造的斜坡或向斜区、高寒地带与高纬度区的冻土带等。

1.1 常规大型、特大型油气田分布

1.1.1 特提斯构造域

在地球古纬度南北纬 30° 之间,温暖洋流适于大量生物发育生长,有机质丰富,发育优质烃源岩,以泥质岩为主 [11,12]。通常灰岩烃源岩的 TOC 和 S_1+S_2 仅是泥质烃源岩的 $1/10\sim 1/8$ 。海相油气烃源岩主要分布在陆棚及斜坡相、台内凹陷等 (占 70%);陆相油气烃源岩主要分布在湖盆中心 (占 90%)。在特提斯构造域发现了中东地区的大型、特大型油气田,如发育全球最大的加瓦尔油田 (探明可采储量 $133\times 10^8\text{ t}$) [4] 和全球最大的北方-南帕斯气田 (探明可采储量 $38\times 10^{12}\text{ m}^3$) [4] 等。

1.1.2 被动大陆边缘

被动大陆边缘具有有利的成藏条件,下断上拗,发育膏盐层,形成良好生储盖组合,如冈瓦纳大陆裂解经历 4 个演化阶段后,大西洋两岸形成被动陆缘,发育海域“金三角”富油气区。尤其是深水大规模砂质碎屑流新认识促进了勘探突破,砂质碎屑流比浊流沉积形成的砂体厚度更大、分布更广,为全球深水勘探提供了重要理论依据 [13]。中国南海海域具有被动陆缘性质,油气呈“内环油、外环气”分布,资源潜力大,已获多处发现,近期 Liwan3-1 井获得重大突破 [14]。

1.1.3 前陆冲断带大型构造

前陆盆地具有形成大油气田的有利条件。冲断带

构造活动形成背斜与断层群,一般成排成带分布,发育有利的构造圈闭,烃源岩、储集体和圈闭有效配置。如中东扎格罗斯前陆盆地,具有双层结构,下部被动陆缘发育海相优质烃源岩,上部发育有利储盖组合,大型构造圈闭成排成带分布,资源丰度高,储量丰度高。2000年扎格罗斯、安第斯等主要前陆盆地群有重大发现,如Homa、Day、Tabnak等大气田。中国中西部前陆盆地如库车克拉苏构造冲断带获重大发现。前陆冲断带发育煤系,有利于构造富气^[15-17]。

1.1.4 克拉通大型正向构造

克拉通大型正向构造长期发育的古隆起,构造和地层圈闭发育早,后期处于烃类运聚的指向区,持续接受烃类供给,构成了圈闭和生烃排聚在时空上的最佳有效配置。同时,大型古隆起由于其特殊的地形地貌,还控制着浅水高能沉积相带、地层尖灭带的发育,且后期暴露遭受剥蚀淋滤作用。大型古隆起通过控制沉积、成岩作用进而控制优质储集层的发育和分布,如在塔里木盆地发现了轮南、塔中等大油气田。

1.2 非常规大型、特大型油气田分布

1.2.1 前渊拗陷与斜坡

前陆盆地前渊及斜坡区大范围广泛展布,坡度较缓,有利于大规模沉积体系发育,为形成大型地层圈闭与大面积“连续型”油气藏奠定了地质基础,如委内瑞拉Orinoco重油带^[18]与加拿大阿尔伯达省天然沥青^[19]地层油藏。加拿大西部阿尔伯达盆地还发现艾尔姆华士大型深盆气藏等^[19]。中国四川盆地前陆斜坡须家河组广泛发育“连续型”特低孔渗(致密)砂岩气藏。

1.2.2 盆地(拗陷)中心与斜坡

盆地(拗陷)中心是“连续型”油气藏(区)发育的最有利部位,烃源岩大面积发育,有机质丰度高,保存条件好。如美国圣胡安和加拿大阿尔伯达等盆地中心广泛发育致密砂岩气。拗陷盆地中心发育煤系,煤层、泥页岩与致密砂岩共生,紧密接触,普遍含气,因此,含煤层系勘探无禁区。

1.2.3 克拉通向斜与斜坡部位

向斜部位与盆地中心成藏地质条件相似,是烃源岩和致密砂岩发育的有利区,有利于发育页岩气、致密砂岩气等。中国松辽盆地白垩纪、鄂尔多斯盆地三叠纪拗陷湖盆向斜区广泛发育“连续型”低孔渗油藏,如松辽盆地的古龙凹陷、长岭凹陷,鄂尔多斯盆地的华庆、白豹等地区。

1.2.4 高寒地带、高纬度区等冻土带

天然气水合物广泛分布在陆地永冻层和海底沉积层。高寒地带、高纬度区等冻土带有利于天然气水合

物的形成,如中国青藏高原、南海海域及高纬度区冻土带等^[20]。

2 21世纪以来全球油气勘探重大发现与启示

2.1 大油气田分布特征

2000—2008年全球共有90个大发现,主要分布在亚太、南美、北美、中东等地区^[5,10],其中大气田54个,多于大油田(36个)。这些大发现主要分布在被动陆缘深水区、碳酸盐岩、岩性-地层、前陆冲断带、成熟探区、新地区新盆地及非常规油气藏(场)等7大领域。其中被动陆缘深水区是近年来获得油气重大发现的主要领域,全球4大深水勘探区主要包括墨西哥湾、巴西海岸、西非海岸、澳大利亚西北陆架等;碳酸盐岩发现仍然集中在波斯湾和滨里海等地区,同时在中国的四川、塔里木盆地台缘礁滩体油气勘探也不断取得大发现;岩性-地层油气藏勘探近年来呈不断增长的趋势,如北海盆地、波斯湾地区及中国的鄂尔多斯、四川、松辽、渤海湾等盆地;前陆盆地油气大发现主要在扎格罗斯山前和沿南美安第斯山脉等分布的前陆盆地群;非常规油气藏(场)近年来成为天然气勘探的重要新领域,在美国、加拿大及中国四川、鄂尔多斯等盆地不断获得新突破。

2.2 岩性-地层油气藏

2000—2008年,全球发现的岩性-地层大油气田主要分布在北美、北海、北非、中东及中国等地区的裂谷、前陆、克拉通内盆地中(见表1)。圈闭类型以地层尖灭型和成岩型为主,圈闭单体规模大,层位从寒武系到第三系均有分布,储集层岩性主要为海相三角洲、滨岸、浅海及深海扇的砂岩,物性总体较好。海相碎屑岩是全球重要勘探领域,剩余资源潜力大。全球发现的海相碎屑岩油气田探明石油储量 $1\,600\times 10^8\text{ t}$ 、天然气储量 $100\times 10^{12}\text{ m}^3$,分别占全球总探明储量的52%和38%。高分辨率三维地震资料采集、正确的地质模式建立及层序地层学应用是岩性-地层油气藏大发现的关键。

2001年在英国北海油气区发现的Buzzard大油田是通过老油田深化地质认识、建立正确地质模式、技术攻关获得高品质三维地震资料以及坚持勘探的理念从而获得大发现的典型实例^[21,22]。Buzzard油田位于Outer Moray Firth盆地,处于地堑低部位,是侏罗系海相砂岩顺裂谷轴向物源方向尖灭、两侧被断裂封堵而形成的复合圈闭,可采储量达 $1.7\times 10^8\text{ t}$,是北海地区近十几年来最大的发现。储集层埋深2 377 m,孔隙度为23%~27%,渗透率为 $1\,000\times 10^{-3}\sim 3\,000\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,最高可达 $15\,000\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

表 1 2000—2008 年发现的部分岩性-地层大油气田统计表

地区	油气田	发现时间	油气类型	最终可采储量		圈闭类型	储集层岩性	地层年代
				油/ 10^8 t	气/ 10^8 m ³			
中东	Ghazal	2000	气		1.58	构造-地层	砂岩	P
鄂尔多斯	苏里格	2000	气		4 602.00	岩性-地层	砂岩	P
北海	Buzzard	2001	油	1.700		地层	砂岩	J
中东	Khazzan	2001	气		850.00	构造-地层	砂岩	Є—O
北非	Palogue	2003	油	0.840		构造-地层	砂岩	E
鄂尔多斯	西峰	2004	油	0.788		岩性-地层	砂岩	T
中东	Du-ayban	2005	油	0.343		构造-地层	砂岩	P ₁ —C ₃

注:数据来自文献[10]

20 世纪 90 年代初期,由于地震资料品质很差, Buzzard 油田圈闭一直难以落实。1998 年,通过对三维地震资料重新处理,使剖面品质得到明显改善,可清晰地反映地层尖灭位置,在精细目标刻画的基础上确定了井位,于 2001 年钻探 20/6-3 井并一举获得成功。此后建立了砂体沉积模式,认为该目标属于顺裂谷轴向沿下切谷形成的深水砂体,通过建立油藏模式,最终发现了 Buzzard 大油田。

1998 年在为评价 Makarem 高地新元古界碳酸盐岩气田而钻探 MKM-3 井时,偶然发现相对较浅的巴瑞克砂岩段有强烈的气显示,据此认为存在巴瑞克砂岩向上倾方向逐渐变薄尖灭而形成的地层气藏。按照该思路于 2002 年在 Makarem 高地东南翼、MKM-3 井下倾方向约 200 m 处有针对性地钻

探了 KZN-1 井,获得成功,发现了 Khazzan 气田。建立正确地质模式、不断探究是 Khazzan 气田勘探获得成功的关键^[23]。

2.3 前陆冲断带构造油气藏

前陆冲断带是发现构造油气藏的主要领域。2000—2008 年在该领域发现的大油气田主要分布在扎格罗斯、安第斯与塔里木等前陆盆地造山带中(见表 2),圈闭主要为大型背斜和断块。前陆盆地发育典型双层结构,下部被动陆缘发育海相优质烃源岩,上部发育有利储盖组合,大型构造圈闭成排成带分布,储量丰度高。三维地震技术进步、构造建模准确落实圈闭、钻井技术进步是前陆冲断带不断取得大发现的关键,如南美亚诺斯盆地 Cusiana(库西亚纳)油田^[24]和中东伊朗 Tabnak(塔巴纳克)气田的发现。

表 2 2000—2008 年前陆盆地发现的部分大油气田统计表

所属地区	油气田	盆地	油气类型	可采储量		储集层岩性	圈闭类型	发现时间
				油/ 10^8 t	气/ 10^8 m ³			
扎格罗斯	Homa	Zagros	气		1 330.9	白云质灰岩	背斜	2000
	Day	Zagros	气		1 019.4	鲕粒灰岩	背斜	2001
	Yadavaran	Zagros	油	23.800		碳酸盐岩	背斜	2002
	Lavan 1ST	Zagros	气		1 699.0	碳酸盐岩	背斜	2003
	Azar	Zagros	油	1.430		碳酸盐岩	背斜	2005
	Kish2	Zagros	气		10 194.0	碳酸盐岩	背斜	2006
南美北部	Red Mango	Trinidad	油	0.826		砂岩	背斜	2000
安第斯山	Incahuasi x-1	Chaco	气		1 982.0	砂岩	背斜	2004

注:资料来自文献[10]

亚诺斯盆地是安第斯褶皱带东侧的中、新生代前陆盆地,经历古生代裂谷发育期、中生代弧后裂谷和坳陷发育期、古近纪前陆盆地发育期和新近纪挤压活动期。上白垩统瓜达卢佩组海相页岩和碳酸盐岩是盆地主要烃源岩,TOC 值一般在 2% 以上,有机质类型主要为 I、II 型。上白垩统一渐新统滨浅海相和河流三角洲相石英砂岩是主要的储集层。中新统一更新统(莱昂组)厚层页岩为区域性盖层。盆地中由挤压、逆掩作用形成的背斜和断层圈闭是主要油气聚

集场所。圈闭形成期主要是晚白垩世—中新世早期。目前已发现的绝大部分油气是中新世早期以来聚集成藏的。

该盆地油气勘探始于 20 世纪 60 年代,早期勘探目标为南部白垩系构造-地层圈闭及第三系构造和构造-地层圈闭,仅 Guavio 1 井获日产油 73 t,其后的评价井均失利;20 世纪 80 年代转入北部巴里纳斯构造带勘探,相继发现了一些中小型油气藏。经地质研究论证中部亚诺斯逆掩带具最佳成藏条件,于 20 世纪 80

年代末期开展勘探,库西亚纳-2A 井获得突破,发现库西亚纳大油田,石油可采储量 2.0×10^8 t。2000 年以来通过地震攻关,深化构造建模,落实冲断带夹片及下盘、深层目标,不断取得大发现^[25]。

2.4 碳酸盐岩油气藏

全球海相碳酸盐岩以大型、特大型油气田为主,油气田储量规模大,表 3 中 10 个油气田总可采储量 651.9×10^8 t 油当量,平均 65.19×10^8 t。近年在碳酸盐岩勘探领域仍不断有重大发现,2000—2008 年发现的大型碳酸盐岩油气田主要分布在中东、滨里海、中国等国家和地区^[10,26-28],表 4 中 9 个油气田总可采储量 68.83×10^8 t 油当量,平均约 7.6×10^8 t。碳酸盐岩油气田储量规模大,如 Kashagan 油田最终可采储量为 25.55×10^8 t,Kushk 油田为 2.09×10^8 t,Karan 6 气田为 $2\,548 \times 10^8$ m³^[10]。碳酸盐岩储集层类型主要为台地边缘生物礁、台地边缘和台地内部颗粒滩;圈闭类型以盐下地层、构造和构造-岩性圈闭为主。

滨里海盆地是晚元古代至早古生代克拉通边缘盆地,分布面积达 55×10^4 km²,沉积地层厚达 22 000 m,已发现油气田 160 多个(见图 1),其中巨型油气田 5 个。盆地发育泥盆系—二叠系大规模生物礁体,厚达

1 000~3 000 m,平均孔隙度 8%~14%,渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 1\,000 \times 10^{-3}$ μm²,圈闭类型主要为盐下发育的大型隆起和生物礁及盐上发育的盐丘构造。20 世纪 60 年代至 80 年代初,在环滨里海礁带(陆上)获得一系列大发现,如 Astrakhan、Karachaganak 油气田^[29]。20 世纪 80 年代对陆上进行持续勘探,除发现 Tengiz 大油田外,其他仅找到一些中小型礁体油气田。20 世纪 90 年代对该区进行区域地质研究后认为,陆上勘探发现的大型礁体应向海域延伸,并于 1997 年起开始对海域进行二维地震勘探,初步发现了大型礁体;20 世纪 90 年代末,在海域开展三维地震勘探,对礁滩体和储集层进行精细刻画,发现了 Kashagan(卡莎干)礁体,并于 2000 年发现了 Kashagan 油田,石油可采储量 18.7×10^8 t,气 0.86×10^{12} m³。Kashagan 油田储集层为 D₃—P 碳酸盐岩,埋深 3 900~4 600 m,平均孔隙度 7%,平均渗透率 $1\,020 \times 10^{-3}$ μm²。Kashagan 油田的发现带动滨里海海域勘探取得一系列大发现^[30]。

2.5 成熟探区

成熟探区主要是指油气勘探处于中后期阶段,资源探明率大于 30%,单井控制面积 5 km² 左右,主要处在富油气盆地、凹陷或区带中,储量仍可保持较长时间

表 3 全球十大海相碳酸盐岩油气田统计表

序号	油气田	盆地	可采储量/ 10^8 t	层位	储集层岩性	深度/km	发现时间
1	North Field (气)	Arabian	220.1	T	白云岩	2.76	1971
2	Ghawar (油)	Arabian	133.0	J	颗粒灰岩	1.69	1948
3	Pars South (气)	Arabian	106.0	P	白云岩	2.85	1991
4	Kirkuk (油)	Zagros	36.1	O	台缘礁滩	0.85	1927
5	Marun (油)	Zagros	34.5	Mz	台缘礁滩	2.19	1964
6	Astrakhan (气)	Caspian	26.9	C	礁灰岩	3.85	1976
7	Zakum (油)	Arabian	26.4	K	灰岩	2.44	1964
8	Manifa (油)	Arabian	24.1	K	滩相灰岩	2.34	1957
9	Gachsaran (油)	Zagros	23.3	Mz	灰岩	0.13	1928
10	Shaybah (油)	Arabian	21.5	K	礁灰岩		1968

注:资料来源于文献[10]

表 4 2000—2008 年发现的部分碳酸盐岩大油气田

盆地	油气田	发现时间	油气类型	可采储量(油当量)/ 10^8 t	圈闭类型	储集层岩性
滨里海	Kashagan	2000	油+气	25.55	地层+构造(盐下)	礁灰岩
滨里海	Rakushechnoye	2001	气	0.97	喀斯特碳酸盐岩	碳酸盐岩
滨里海	Aktote	2003	油	0.97	地层+构造(盐下)	礁灰岩
中东	Kushk	2001	油	2.09	构造	礁灰岩
中东	Umm Niqa	2005	油	2.90	构造	礁灰岩
中东	Karan 6	2006	气	2.03	构造	碳酸盐岩
扎格罗斯	Yadavaran	2002	油	23.80	构造	礁灰岩
扎格罗斯	Kish 2	2005	气	8.12	构造	鲕粒灰岩
四川盆地	普光气田	2002	气	2.40	岩性	礁滩体

注:资料来源于文献[10]



图1 滨里海盆地和Kashagan油田分布图^[31]

稳定增长的探区^[7]。

2000—2008年全球成熟探区中发现的大油气田主要分布在勘探历史很长的西西伯利亚、北海、北非、南美马拉开波与中国渤海湾等盆地^[5]。目前,勘探领域由陆地向海洋(滩海)、目的层由浅向深、圈闭由构造向岩性-地层型转变^[5,29]。

马拉开波盆地处于委内瑞拉北部,面积 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$,1914年以来共发现油气田81个,探明石油可采储量 $51 \times 10^8 \text{ t}$,待发现石油可采资源量 $12.5 \times 10^8 \text{ t}$,待发现天然气可采资源量 $4\,974 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[32,33]。2000年发现的Cueta-Tomoporo(休达—托莫波)油田是近10年来全球油气大发现之一,位于马拉开波湖东南部,储集层为 N_1 与 E_2 浅海相或河流三角洲砂岩,埋深一般在4 570~5 180 m,孔隙度12%~17%,渗透率 $180 \times 10^{-3} \sim 1\,800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储量 $1 \times 10^8 \text{ t}$ ^[34]。

西西伯利亚盆地北部亚马尔地区面积 $21.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,已发现油气田51个,天然气可采储量 $30.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[35]。该区主力烃源岩为侏罗系、白垩系海相—海陆过渡相煤系,储集层以白垩系大型三角洲、沿岸砂坝砂岩为主,孔隙度20%~30%,渗透率 $200 \times 10^{-3} \sim 2\,700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[35]。2000年发现的卡米诺米—莫瑞(Kamen Nomysskoye-More)气田是盆地北部海域最大的突破,可采储量 $4\,894 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[36,37]。亚马尔地区油气勘探始于20世纪60年代初,20世纪70年代大量运用二维地震揭示了中深层勘探领域,盆地储量增长迅速。1983—1991年,三维地震全面开展,陆上岩性-地层圈闭得到认识,勘探方向也开始向滩海转移。

2.6 被动陆缘深水地区

深水油气勘探领域已成为全球热点领域。目前,全球有60多个国家在深水开展油气勘探,已探明石油可采储量约 $300 \times 10^8 \text{ t}$ 。估计未来油气总储量的

40%将来自深水区^[5],且主要来自被动陆缘深水区。2000—2008年全球被动陆缘深水区(水深大于300 m)共发现37个大型油气田^[38](其中油田20个,气田17个),占全球同期发现大油气田总数的40%。

被动陆缘深水区油气主要分布在巴西近海、美国墨西哥湾、西非近海、亚太地区大陆边缘等4大富油气深水区。其中,巴西近海、美国墨西哥湾和西非近海是世界深水油气勘探和开发的热点(见表5)^[38]。自20世纪70年代开始深水勘探以来钻井水深逐渐增大。目前,巴西坎普斯盆地和墨西哥湾深水钻井记录均超过了3 000 m,例如墨西哥湾的Trident油田,最大钻井水深达3 272 m^[10]。

深水区油气的大发现除了深水领域本身蕴藏着大量的油气资源外,还主要得益于大型三角洲、大规模砂质碎屑流等沉积储集层地质新认识,此外,3D和4D海洋地震勘探、深水和超深水钻井船的发展均推动了深水勘探不断取得重大突破^[38]。

墨西哥湾盆地是世界第三大含油气盆地,总面积约 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$,其89%的油气集中在深水区^[38]。2000年以来该地区发现了6个大型油田^[5]。墨西哥湾被动陆缘盆地以中、新生代沉积为主,最厚达20 000 m。墨西哥湾盆地在中侏罗世是一个半封闭的海盆,发育了厚达500~600 m的含盐沉积,形成一系列与盐有关的圈闭,包括盐上和盐下2个成藏组合。上侏罗统到更新统普遍发育高丰度海相泥质烃源岩。古近系砂质碎屑流为油气发现的重点储集层。

巴西大坎普斯盆地深水区已经成为近年来大发现的热点地区。2000—2008年发现了13个大油气田,探明油气储量累计达 $68.25 \times 10^8 \text{ t}$ 。大坎普斯盆地包括坎普斯、桑托斯和埃斯皮里图桑托3个次盆,这3个次盆地地质特征相似。大坎普斯盆地属于典型的大西洋型被动陆缘盆地,经历了裂谷期、转换期和漂移期3个演化阶段^[39,40]。大坎普斯盆地主力烃源岩为下白垩统黑色湖相页岩,有机碳含量5%~6%,厚度大,分布广,是高效的优质生油岩。主力产层为砂岩,并被盐岩层分隔为盐上和盐下2套层系。盐岩层和第三系厚层海相页岩提供了良好的封盖条件。大坎普斯盆地发育盐构造和岩性-地层圈闭,盆内断层发育,油气输导条件良好^[41,42]。

澳大利亚西北大陆架包括北卡纳尔文、博纳帕特、布劳斯等盆地,探明天然气储量 $5.65 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占该地区油气储量的82.7%。2000—2008年共发现9个大型气田,平均钻井水深630 m。盆地经历了克拉通内拗陷、裂谷和被动大陆边缘几个演化阶段。古生界和中

表 5 2000—2008 年被动陆缘深水区发现的部分大油气田概况

地区	油田	发现时间	流体性质	水深/m	可采储量	
					油/ 10^8 t	气/ 10^8 m ³
巴西近海	Papa-Terra	2000	油	1 226.0	0.68	2 174.7
	Mexilhao	2001	气	529.0		
	Cachalote	2002	油	1 478.0	1.13	
	Jubarte	2002	油	1 245.0	0.78	
	Baleia Franca	2003	油	1 464.0	0.92	
	1-ESS-130	2003	油	>1 500.0	0.88	
	Golfinho	2003	油	1 397.0	0.78	
	RJS-628A	2006	油	2 126.0	6.72	
	Tupi	2007	油	>2 250.0	6.82~10.91	
墨西哥湾	Jupiter	2008	气/凝析油	>2 000.0	7.07	1 274.3
	Atlantis	1998	油	2 026.0	0.82	
	Thunder Horse North	2000	油	1 735.0	0.70	
	Tahiti	2002	油	1 231.0	0.68	
	Jack	2004	油	2 133.0	0.70	
	Silvertip	2004	油	2 827.0	0.68	
	Knotty Head	2005	油	1 005.0	0.48	
澳大利亚西北大陆架	Crux 1	2000	气	168.0		
	Jansz	2000	气	1 321.0		5 660.0
	Calliance	2000	气	4 23.7		1 123.0
	Callirhoe	2001	气	4 23.7		991.0
	lo	2001	气	1 321.0		849.5
	Wheatstone	2004	气	215.7		1 123.0
	Pluto 1	2005	气	976.0		1 307.0
	Chandon	2006	气	1 201.0		784.0
中国南海	Liwan3-1	2006	气	1 500.0		806.0

注：数据来源于文献[10]

生界均发育烃源岩，以煤系为主；储集层以中生界河流—边缘海相粗砂岩为主；上覆厚层页岩提供了很好的封盖条件^[43]。

在中国南海珠江口盆地水深近 1 500 m 的深水区，Liwan3-1 井获得重大突破，储量大于 800×10^8 m³（见表 5）^[44]。

2.7 新地区新盆地

2000—2008 年全球在新地区新盆地，包括向海域

延伸的新盆地（区），获得的大发现主要有苏丹麦卢特盆地 Palogue 大油田、孟加拉湾地区的 5 个大气田、越南九龙盆地 Su Tu Trang 气田、马来西亚 Baram 三角洲盆地 Gumusut 大油田、印尼 Kutei 盆地 Gula 大气田（见表 6）^[5]。

上述大发现具有以下特征：①盆地勘探程度低，如苏丹麦卢特盆地 2000 年以前只发现 2 个小油田，目前已发现包括亿吨级 Palogue 大油田在内的油气田 13

表 6 2000—2008 年全球在新地区新盆地获得的部分大发现

油田	发现时间	盆地	油气田	可采储量		岩性	层位	圈闭
				油/ 10^8 t	气/ 10^8 m ³			
Palogue	2003	麦卢特	油	1.400		砂岩	古近系	背斜
Deen Dayal	2005	克里斯纳—哥达瓦里	气		5 663	砂岩	白垩系	背斜
Dhirubhai	2002	克里斯纳—哥达瓦里	气		6 062	浊积砂岩	第三系	构造-地层
Mya 1	2006	若开	气		850	砂岩	上新统	构造-地层
Shwe	2004	若开	气		1 278	砂岩	上新统	构造-地层
Shwe Phyu	2005	若开	气		340	砂岩	上新统	构造-地层
Su Tu Trang	2003	九龙	气		1 506	砂岩、闪长岩	第三系、上白垩统	构造、不整合、基岩
Gula	2000	Kutei	气		933	砂岩	始新统	构造
Gumusut	2003	Baram 三角洲	油	0.685		砂岩	第三系	构造

注：数据来源于文献[10]

个;②石油地质条件优越,如苏丹麦卢特盆地为陆内裂谷盆地,与相邻的油气主产区穆格莱德盆地具有相似的地质构造和演化历史及良好的油气地质条件,其他几个获得重大发现的盆地均属于被动陆缘盆地,石油地质条件优越;③勘探工作量大,印度克里斯纳—哥达瓦里盆地海域陆架边缘发育高位体系域三角洲体系、低位扇楔状体及斜坡/盆底扇等,优质生储盖组合和大型岩性-地层圈闭发育,具备形成大油气田的优越条件^[45],该盆地早期以陆上勘探为主,2000年以来海域大发现连续不断,2002年在海域第三系发现了印度最大的 Dhirubhai(迪卢拜)气田,探明天然气可采储量 $6\,062\times 10^8\text{ m}^3$ ^[4];2005 年发现 Deen Dayal(迪达亚)白垩系大气田,其发现井 KG8 井钻探深度 5 061 m,是盆地最深的探井,该气田的发现

进一步揭示海域纵向上存在多套有利成藏组合,深层勘探潜力很大^[46]。

2.8 非常规油气藏(场)

非常规油气藏包括“连续型”油气藏(场)与“断续型”油气藏(场),前者如致密砂岩气、页岩气、煤层气与天然气水合物等,后者如南、北美洲大规模分布的重油与天然沥青砂,其中重油资源 $658\times 10^{12}\text{ t}$ 、天然沥青砂达 $1\,067\times 10^8\text{ t}$,资源潜力很大^[13,47]。

2000—2008 年全球“连续型”油气藏(场)获得的最大突破是美国、加拿大为主的北美地台区致密砂岩气与页岩气藏的发现(见表 7)^[48,49],同时中国也在鄂尔多斯盆地华庆地区中生界发现大规模分布的“连续型”油气藏,在四川盆地地下寒武统一志留统发现了“连续型”页岩气^[50]。

表 7 北美地台区页岩气藏的发现

盆地	层位	页岩组	含气面积/km ²	气藏深度/m	有效厚度/m	地质储量/10 ¹² m ³	技术可采储量/10 ¹² m ³
沃斯堡	石炭系	Barnett	15 500	1 981~2 590	30~183	9.259 7	1.245 9
阿科马	石炭系	Fayetteville	23 310	305~2 134	6~61	1.472 5	1.178 0
路易斯安那	上侏罗统	Haynesville	23 310	3 200~4 115	60~91	20.303 3	7.107 6
阿帕拉契亚	中泥盆统	Marcellus	246 050	1 220~2 590	15~61	42.475 5	7.419 1
阿科马	泥盆系—石炭系	Woodford	28 490	1 830~3 353	37~67	0.651 3	0.322 8
密西根	上泥盆统	Antrim	31 080	183~670	21~37	2.152 1	0.566 3
伊利诺斯	泥盆系—石炭系	New Albany	112 665	150~610	15~31	4.530 7	0.543 7
西加拿大盆地	上三叠统	Montney	10 118	2 500~4 400	100~500	3.400 0~27.500 0	1.100 0~9.100 0

注:数据来源于文献[51]

2000—2008 年,北美地台区发现页岩气藏的盆地由 5 个(密西根、阿帕拉契亚、伊利诺斯、沃斯堡和圣胡安盆地)发展到以沃斯堡、阿科马、路易斯安那、西加拿大盆地等为主的 30 多个盆地,页岩气产层包含了北美地台区所有的海相页岩烃源岩,美国页岩气藏的钻探深度自发现初期的 600~2 000 m 逐渐加深到目前的 2 500~4 000 m,部分盆地的钻探深度实际已达到约 6 000 m(见图 2)。2000 年北美页岩气生产井约 28 000 口,页岩气年产量不足 $100\times 10^8\text{ m}^3$,到 2009 年生产井已经超过 42 000 口,预计页岩气年产量增长至 $1\,200\times 10^8\text{ m}^3$ 以上,占北美天然气总产量的近 20%。2005 年阿帕拉契亚盆地发现泥盆系 Marcellus 页岩气藏,气藏面积达 $24.605\times 10^4\text{ km}^2$,地质储量 $42.48\times 10^{12}\text{ m}^3$,可采储量 $7.4\times 10^{12}\text{ m}^3$,成为目前美国最大的气田之一。推动“连续型”页岩气藏大发现的主要因素在于:页岩气藏资源潜力很大、领域非常广阔;水平井钻井技术和连续油管分段压裂技术等低成本开发技术的突破和规模应用;成熟管网、市场需求、飙升的气价格和国家政策的大力扶持等。北美发现致密砂岩气盆地 30 余个,发现可采储量 $13\times 10^{12}\text{ m}^3$,美国目前生产井有约 40 000 口,年产量达到 $1\,775\times 10^8\text{ m}^3$ 。如美国 Pinedale 致密砂岩气

田,面积 560 km^2 ,可采储量 $5\,862\times 10^8\sim 7\,080\times 10^8\text{ m}^3$,气藏深度 2 100~4 200 m,气层厚度 1 830 m,孔隙度 4%~12%,渗透率 $0.01\times 10^{-3}\sim 0.05\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,年产气 $108\times 10^8\text{ m}^3$,后期开发单井稳定日产 2 800~7 000 m^3 ,最高达 $5.7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。该气田 2002 年开发井距 400 m,建井周期 60 d;2007 年

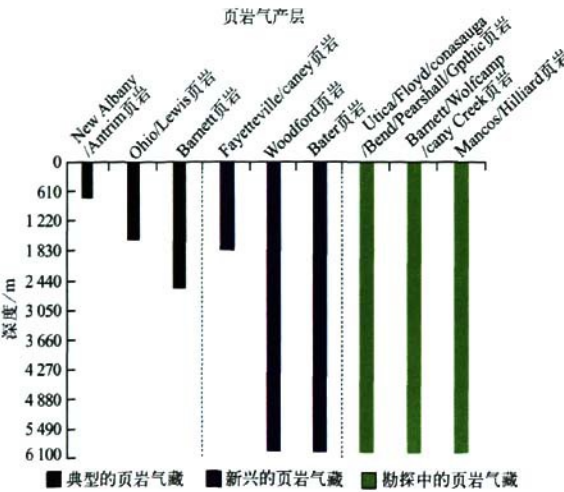


图 2 北美地台区页岩气藏开发深度图^[52]

开发井距 200 m,建井周期 14~20 d;采取欠平衡与丛式井等钻井技术;主要用连续油管分段压裂,同一井场钻 4~5 口井,一周可以压裂 80 层,实现了快速经济开发。

非常规“连续型”油气藏(场)分布面积广、储量规模大,具有形成大油气区(层)的地质条件,需要研究评价其含油气区的空间边界和三级储量规模,针对性开展资源评价、储集层和流体检测,并进行增产改造以提高采收率^[53]。

3 中国油气勘探领域进展

全球油气勘探实践表明,油气田大部分聚集在特定的地带和区域,即富集在油气域、油气区和油气带中,形成 4 大油气聚集域、5 大油气区,中东油气最为富集。中国陆上油气勘探总体进入了发现大油气田、构建大油气区的新阶段,如松辽和渤海湾大油区,四川和鄂尔多斯大气区等。

3.1 岩性-地层油气藏、冲断带构造油气藏等领域是发现大油气田和增储的主体

近年来,中国的陆上发现了多个大油气区,如在塔里木盆地台盆区、准噶尔盆地西北缘、鄂尔多斯盆地三叠系长₁₀、渤海湾滩海等发现了 $5 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$ t 级大油区(层)。在松辽盆地深层火山岩、四川盆地中部三叠系须家河组、库车前陆冲断带、准噶尔盆地陆东石炭系火山岩、鄂尔多斯盆地苏里格砂岩中发现了 $3\,000 \times 10^8 \sim 10\,000 \times 10^8$ m³ 以上大气区(层),这些重大发现和储量增长主要分布在岩性-地层、前陆冲断带构造等领域。这些领域包括了中国陆上剩余油气资源量的主体,仍是今后相当长时期发现大油气田和增储的重点。

岩性-地层油气藏仍将是近期增储的重点,主要包括碎屑岩、碳酸盐岩与火山岩等储集类型。陆相湖盆未来勘探领域包括鄂尔多斯盆地与四川盆地大面积岩性油气藏、塔里木盆地海相地层油气藏等。鄂尔多斯盆地二叠系—三叠系及四川盆地三叠系须家河组大规模连续分布储集体都易于形成“连续型”分布的大油气区。畅流型大型浅水三角洲易形成满盆富砂、湖盆中心深水区发育大规模砂质碎屑流以及湖盆中心发育碳酸盐岩储集体(柴达木盆地西南凹陷碳酸盐岩分布面积达 3×10^4 km²、渤海湾歧口凹陷达 0.3×10^4 km²,资源量都在 $5 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8$ t)等新认识使岩性勘探从湖盆边部推进到湖盆中心。中西部海相盆地发育多级不整合面,形成大型地层圈闭,塔里木盆地志留系、海相东河砂岩地层超覆和削截等大型地层油气

藏潜力大。中国海相碎屑岩分布范围广,古生代发育 4 期海相碎屑岩,发育三角洲、海滩等 5 种类型大面积分布的砂体,油气藏以岩性、地层型为主,资源潜力较大。渤海湾兴隆台等变质岩潜山内幕也有重大发现。

中国海相碳酸盐岩分布范围广,分布面积逾 300×10^4 km²,其中覆盖区海相碳酸盐岩(以古生界为主)面积约 150×10^4 km²,主要分布在塔里木、华北和扬子克拉通盆地。海相烃源岩发育层位多、分布广。碳酸盐岩分布区主要发育泥质烃源岩,而不是灰岩。干酪根降解成油、原油裂解成气 2 种模式均可形成大中型油气田。在塔里木轮南—塔中已发现干酪根成油 9.9×10^8 t,在塔中、川东石炭系、乐山龙女寺等发现原油裂解气 1.2×10^{12} m³。中国碳酸盐岩发育岩溶、白云岩与礁滩 3 类主要储集体,主要有萨布哈蒸发泵、回流、渗透、埋藏、热液白云石化等作用。古隆起斜坡顺层岩溶与多期供烃可形成大型、特大型油气田(群),隆起斜坡整体含油气,拓展了勘探深度与范围;层间岩溶可形成大面积、连续与断续准层状分布的缝洞储集层及油气,拓展了勘探面积;礁滩储集层、断裂与烃源有效配置控制了礁滩油气藏分布,台缘带与构造复合控制高丰度大油气田,台内滩可大面积含油气;风化剥蚀地层尖灭与气源“倒灌”渗入式成藏,可形成大型地层油气藏。勘探从潜山、隆起高部位,扩展到现今斜坡低部位、台缘礁滩、台内礁滩与层间岩溶等领域,近年来在塔里木轮南、塔中及四川北部等地区取得重大突破。针对海相碳酸盐岩,未来勘探方向包括:深化岩溶风化壳与台缘礁滩 2 大领域油气勘探,开拓颗粒滩及白云岩储集体的勘探,重点立足塔里木、四川、鄂尔多斯 3 大盆地,寻找大型油气田,发展大油气区;积极准备羌塘、南方等新区油气勘探。

近几年,全球共发现火山岩油气田 169 个,最大油田是印度尼西亚的 Jatibarang 油田,玄武岩储集层中可采储量 1.64×10^8 t;最大气田是澳大利亚 Scott Reef 气田,玄武岩储集层中可采储量 $3\,877 \times 10^8$ m³^[54]。中国火山岩勘探从东部岩性油气藏发展到中西部地层油气藏。在松辽盆地深层发现储量大于 $1\,000 \times 10^8$ m³ 的徐深气田、准噶尔盆地发现千亿立方米级克拉美丽气田、三塘湖盆地发现亿吨级以上牛东油田。中国为多陆块拼合大陆,地史时期火山活动强烈,火山岩分布广泛。火山岩油气成藏一是受有效生烃凹陷控制,具有近源成藏的特点;二是受储集层控制,后期改造和风化淋滤作用是火山岩储集层发育的关键。平面上火山岩储集层主要分布在深大断裂附近,有利相带为火山口相、火山颈相、喷发相、溢流相;剖面上火山岩储集层分

布受不整合控制,有利储集层主要分布在风化面之下 450 m 范围之内。烃源岩、储集层、烃源断裂及区域盖层的良好配置是火山岩能否成藏的关键。未来火山岩领域的勘探重点是松辽盆地深层新断陷岩性油气藏、北疆地区石炭系等重点盆地地层油气藏^[55]。

中国前陆盆地主体为陆内前陆盆地,主要发育于中、新生代。陆相煤系、湖相烃源岩发育,冲断带构造圈闭类型主要为盖层滑脱型、基底卷入型背斜/断背斜,具备形成大油气田的有利地质条件,资源丰富,盆内冲断带、冲断带下盘、深层是进一步勘探的重点领域。如库车西秋构造带,克拉苏构造带的下盘和深层;准噶尔盆地南缘的霍玛吐背斜带构造发育,圈闭完整,深层(K 或 J)成藏条件较好;塔西南前陆冲断带已在第一、第二排构造带发现阿克莫木气田和柯克亚油气田,未来勘探领域包括第三、第四排构造带;四川大巴山—米仓山前(P—T)也是未来勘探的重要方向。

中国成熟探区以陆相地层为主,在富油气凹陷(区带)中主要发育断块、背斜、岩性圈闭等,虽然其单体规模较小,但可大面积叠合连片,形成具有规模的大型油气藏群。未来成熟盆地富油气凹陷(区带)勘探主要方向是滩海等新区、岩性-地层等新圈闭类型与深层等,如准噶尔西北缘与渤海湾滩海地区等。

3.2 新地区新盆地资源潜力大、勘探前景良好

中国新地区新盆地主要分布在海域、高原、外围中小盆地等。中国南海深水区与国外被动陆缘具有相似的地质条件,资源潜力大。中国海域面积 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$,界内盆地面积为 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$,近海远景资源量 $152 \times 10^8 \text{ t}$ 。以往海域勘探主要集中在近海海域,南海深水区资源潜力大,勘探程度低,是突破的重点地区。中小规模盆地具备有利的油气地质条件,资源潜力较大。包括青藏地区在内的 20 余个盆地勘探尚处于起步阶段,勘探前景良好。

3.3 非常规连续型油气藏(场)是未来勘探重要类型

与常规油气藏勘探开发相比,尽管“连续型”油气藏(场)的发现历史已很悠久,近年来也不断取得重大突破,但总体勘探开发程度低,地质特征、资源前景与开发潜力尚在逐步认识中,未来大发展的前景十分明确。中国沉积盆地的形成及发展历经古生代海相与中、新生代陆相 2 个世代,“连续型”非常规油气藏形成的地质条件优越。致密砂岩气、煤层气、页岩气、生物甲烷气及天然气水合物等资源丰富,勘探程度很低,是实现天然气大发现、天然气快速发展的战略领域。断续型油气藏(场)如准噶尔盆地西北缘油砂等,也有勘探潜力。

中国致密砂岩气的主要勘探方向是古生界海相致密砂岩气和中、新生代陆相致密砂岩气,这些砂岩气多数与煤系伴生,源储紧邻,大范围分布。古生界海相致密砂岩气以塔里木地台的志留系、华北地台的石炭-二叠系、扬子地台的泥盆系-志留系、东北地区的石炭-二叠系为勘探重点,面积约 $260 \times 10^4 \text{ km}^2$,累计砂岩厚度 500~2 700 m;中、新生代陆相致密砂岩气领域涵盖了我国主要陆相沉积盆地(鄂尔多斯、四川、塔里木、准噶尔、柴达木、松辽、渤海湾与吐哈等盆地),远景资源量大于 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

中国拥有海相与陆相 2 类页岩气资源。重点领域包括 3 大海相地区和 5 大陆相盆地。3 大海相地区是扬子地台古生界海相页岩(页岩气中发育如图 3 所示的微孔渗储集层)、华北地台—河西走廊古生界海相页岩和塔里木盆地寒武系—奥陶系海相页岩;5 大陆相盆地是松辽盆地白垩系、渤海湾盆地古近系、陕甘宁盆地上三叠统、准噶尔盆地石炭系—侏罗系和吐哈盆地中一下侏罗统;页岩气有利勘探面积约 $83 \times 10^4 \sim 120 \times 10^4 \text{ km}^2$,初步预测远景资源量约 $80 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。四川盆地古生界是近期发展重点。

中国的天然气水合物在南海海域和青藏高原冻土区已有重大发现,近期在中国南海北部陆坡、青藏高原发现的天然气水合物预测远景资源量达到 $500 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量左右,资源潜力很大,目前勘探处于探索起步阶段,未来勘探开发需要加强地质理论、勘探开发技术及配套设施研究。

4 加强非常规石油地质研究的必要性

20 世纪 90 年代以来,油气勘探难度越来越大,人们开始更加重视从成藏过程角度认识油气分布规律,油气成藏理论得到了快速发展。21 世纪以来,随着石油勘探从常规油气延伸到非常规油气领域,非常规油气地质研究日益受到重视,笔者认为需要发展和建立非常规石油地质理论。

根据油气的运聚和分布特征,可把油气藏分为常规(典型)圈闭油气藏和非常规(非典型)圈闭油气藏。前者圈闭界限明显(如克拉 2 气藏等),后者包括“断续型”油气藏(场)和“连续型”油气藏(场)。

4.1 常规石油地质

石油地质学是矿床学的一个分支学科,1917 年美国石油地质学家协会成立,并出版了 AAPG Bulletin,标志着石油地质学已成为一门独立的科学^[56]。石油地质学理论经历“油气苗”现象→“背斜”理论→“圈闭”理论→非(常规)圈闭理论的发展历程。油气藏一般是指常

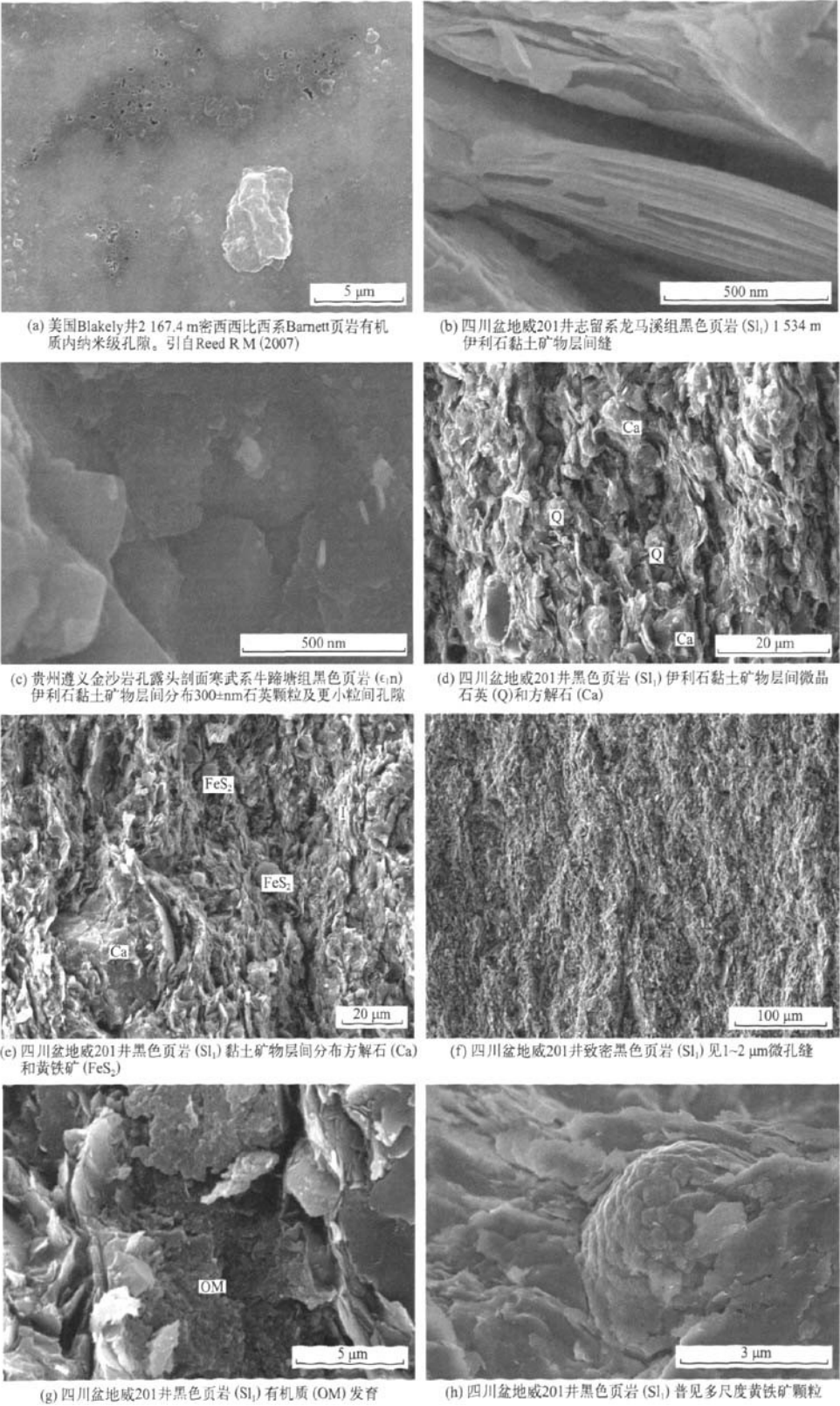


图3 美国与中国四川盆地及周边海相页岩电子显微特征

常规圈闭意义上的油气藏,常规圈闭油气藏是指独立圈闭油气藏,即油气在单一明显圈闭中的聚集,是地壳上油气聚集的最基本单元,具有统一的压力系统和油(气)水界面^[57]。

常规石油地质理论研究的基本问题通常概括为生、储、盖、圈、运、保,其主要内容可以概括为油气成因、成藏、分布与富集规律 3 大基本科学问题。常规圈闭成藏经历一次和二次运移,显著特征是油气在浮力作用下聚集成藏,油气运移遵循达西渗流规律,采用常规的二维或三维地震、钻井等技术进行勘探。中国油气勘探的快速发展极大地促进了中国石油地质学的发展和完善,形成了具有中国特色的石油地质理论,如陆相生油理论、源控论、复式油气聚集带理论、海相碳酸盐岩油气成藏理论、火山岩油气成藏理论、天然气地质理论等。

油气藏是勘探直接对象,圈闭是油气藏的核心。常规油气地质理论以常规油气藏为研究对象,不同学者对油气藏有不同的分类方案^[58-62],对于常规圈闭油气藏,主要是基于常规圈闭类型进行分类,如划分为构造圈闭、岩性圈闭、地层圈闭和复合圈闭油气藏等。

4.2 非常规石油地质

4.2.1 非常规石油地质基本内涵

非常规石油地质研究非常规油气的资源潜力、形成与分布、评价方法与发展战略等。

不同油气运移状态形成不同的油气藏类型,远距离二次运移易于形成常规油气藏,源内一次运移或短距离二次运移易于形成“连续型”油气场(见图 4、图 5)。统计与研究表明,一般在孔喉半径小于 $1\ \mu\text{m}$ 、孔隙度小于 10%、空气渗透率小于 $1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的地质条件下,易于形成“连续型”油气场,反之易于形成常规圈闭油气藏(见图 4);如果同时还满足有机碳含量大于 1%、镜质体反射率(R_o 值)大于 0.7%、源储压差大于 10 MPa 的条件,一般则易于形成高丰度“连续型”油气场(见图 4)。达到生油气温压条件后的烃源岩经历生物成因、热成因、高过成熟等多阶段生烃后,具有“连续生烃、连续充注、高峰期强排、连续或断续分布、局部富集”的特点,过去强调生烃高峰期成藏的观点需要重新认识。

非常规油气藏(场)是非常规石油地质研究的核心。这里的非常规油气藏中的“藏”,已不是传统意义圈闭形成的藏,也可称之为“场”,或称非常规油气场,是油气聚集的场所,已突破圈闭概念,从分布特征可分为“连续型”油气场与“断续型”油气场 2 种基本类型。

威尔逊(Wilson W B)1934 年把油气藏划分为闭

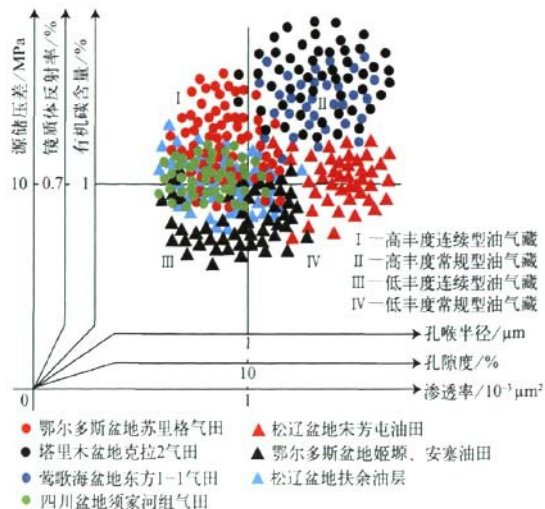


图 4 “连续型”油气藏(场)形成分区图

合油气藏和开放油气藏 2 大类,已预测到开放油气藏的存在,但认为没有勘探价值。

目前对非常规油气藏(场)的不同类型没有统一进行定义,未系统提出严格标准和评价规范。如对致密砂岩气没有明确定义和统一储集体物性标准。本文认为致密砂岩气(tight sandstone gas)是指孔隙度小于 10%、原地渗透率小于 $0.1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 或空气渗透率小于 $1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 、孔喉半径小于 $1\ \mu\text{m}$ 、含气饱和度小于 60% 的砂岩中储集的天然气,一般无自然工业产量,但在一定经济条件和技术措施下可以获得工业天然气产量。1980 年美国联邦能源管理委员会(FERC)根据“美国国会 1978 年天然气政策法”(NGPA)的有关规定,确定致密气藏的注册标准为原地储集层渗透率小于 $0.1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。中国一般将平均孔隙度小于 10%,空气渗透率小于 $1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的砂岩称为特低孔渗储集层。不同地区有一定差别,鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏砂岩平均孔隙度 8.3%,平均渗透率 $1.1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;四川盆地上三叠统须家河组平均孔隙度 4.77%,平均渗透率 $0.19\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔喉直径均值 $0.313\ \mu\text{m}$;吐哈盆地山前带侏罗系水西沟群储集层孔隙度一般 6%~9%,渗透率一般小于 $0.05\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;松辽盆地深层砂岩孔隙度 4.0%~5.5%,渗透率 $0.06\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,砾岩孔隙度大于等于 2.7%、渗透率大于等于 $0.05\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

页岩气是成熟烃源岩内自生自储气,源储一体,页岩气形成及资源丰度与有机质丰度、热成熟度和脆性矿物等 3 大关键因素密切相关,一般 TOC 值大于 2%, R_o 值大于 1%,石英等脆性矿物含量大于 40%。页岩气的孔渗性很低,储集空间一般是原始有机质成气后形

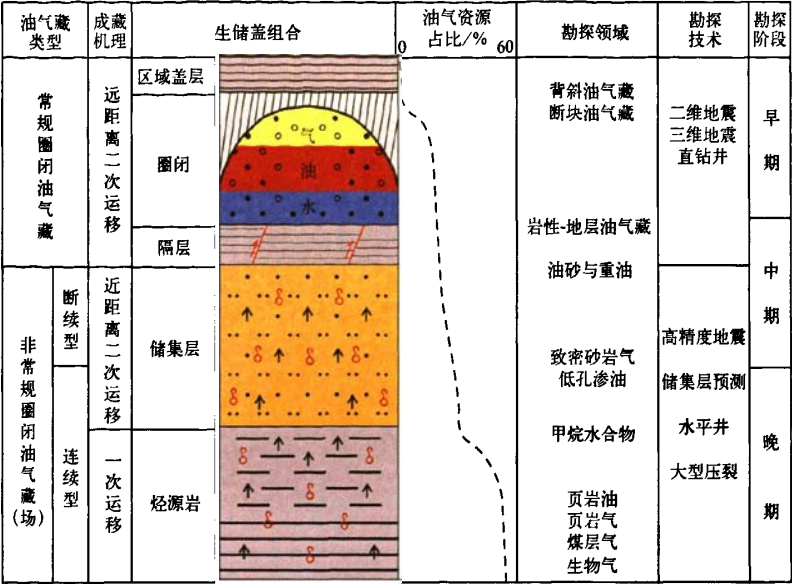


图 5 油气藏形成机理与类型划分图

成的微孔及构造与成岩作用等形成的微裂缝,孔喉直径一般为 0.005~0.100 μm 。相对于致密砂岩气、煤层气等而言,页岩气有其自身的特殊性:一是多阶段成气,包括低阶生物成因气和不同阶非热成因气;二是游离气和吸附气并存,分子或原子渗流,开采过程连续性和持续性强,产量不高,但单井稳产,产量一般在 0.5×10⁴~1.0×10⁴ m³/d 左右,可持续生产 30~50 a 以上。

随着勘探开发的深入,源内运移滞留在生烃层中的页岩气、煤层气、水合物,或近距离一次运移至储集层中的致密砂岩气等,成为非常规油气勘探和地质研究的重要内容。非常规石油地质主要研究 2 类资源,一是致密砂岩油气、页岩油气、煤层气、水合物等“连续型”分布的油气资源;二是油砂、稠油、不连通缝洞油气等“断续型”分布的油气资源。

“连续型”油气藏(场)的基本内涵是在大范围非常规储集体系中,没有明显圈闭界限,油气连续或渐变分布的非常规圈闭油气藏(场)。“连续型”油气藏与传统意义的单个常规圈闭油气藏在形成机理、分布特征和评价技术上有本质区别,它们主要受储集层的孔喉直径、孔隙度、渗透率以及烃源岩的残余有机质含量、热演化程度、源储压差等因素控制,最终形成不同丰度的油气藏类型,缺乏明显圈闭与盖层界限,流体分异较差,没有统一油、气、水边界和压力系统,含油气饱和度差异较大,油、气、水常多相共存。

“断续型”油气藏(场)如塔里木盆地部分不连通碳酸盐岩缝洞油气藏,发育准层状缝洞风化淋滤体系,无明显圈闭界限的孔缝洞体系形成相对独立的油气水单元,多

期成油,晚期注气,多期调整,油气水分布复杂,无统一压力系统,无统一边底水界限和深度,每个孔洞体系的油气水容量与产量变化很大,上油下气、上水下油现象普遍。

4.2.2 非常规油气藏(场)分类

与常规油气藏不同,非常规油气藏没有明显的圈闭界限和形态,一般不象常规油气藏主要基于圈闭进行分类。以往研究非常规油气,是据当时勘探发现所涉及到的领域和类型,指出非常规油气包括致密砂岩油气、油砂、煤层气、页岩油气、气水合物等类型。目前国内还没有提出“连续型”油气藏(场)分类方案。本文根据油气藏(场)分布的本质特征,提出了几种初步分类方案。根据储集岩类型,可分为低一特低孔渗(致密)砂岩油气藏、页岩油气藏、碳酸盐岩孔缝洞型油气藏、火山岩孔缝油气藏、煤层气藏与天然气水合物等;根据油气成因,可分为热成因油气藏、生物成因油气藏和混合成因油气藏;根据油气赋存状态,可分为吸附型、游离型和混合型。

4.2.3 非常规油气藏(场)地质特征

非常规油气藏(场)的地质特征、分类、研究内容和评价方法与常规油气藏有明显不同。

非常规油气藏(场)的本质特征是缺乏明显圈闭界限与直接盖层,分布范围广,发育于非常规储集体系之中,可以认为是无圈闭、非(常规)圈闭、非闭合圈闭,或“无形”、“隐形”圈闭,没有统一油气水边界和压力系统,含油气饱和度差异大,油气水常多相共存。

4.2.4 非常规油气藏(场)研究内容

非常规油气藏由于上述特殊的地质特征,决定了

其研究不象常规油气藏针对生、储、盖、运、圈、保成藏要素及其成藏作用过程展开。非常规油气藏(场)研究在某些方面(如烃源岩和储集层等成藏静态要素的地质评价)与常规油气藏类似,但重点突出非常规资源、非常规储集层、非常规成藏、非常规技术等研究、评价和开发,尤其是研究微米、纳米级微观储集空间形成机理、油气运聚与分布规律、经济可采储量与发展战略等。

4.2.5 非常规油气藏(场)资源分布预测技术

根据非常规油气藏成因机理和分布规律,需要开发其空间分布评价技术。如基于四川盆地合川—潼南—安岳三叠系须家河组气区的典型解剖,建立了“连续型”油气藏的空间分布数值模拟预测方法,其成藏与分布模拟流程包括地质建模、成藏动力平衡方程建立和聚集量计算等步骤(见图6),形成了软件系统UNRAMS 1.0。

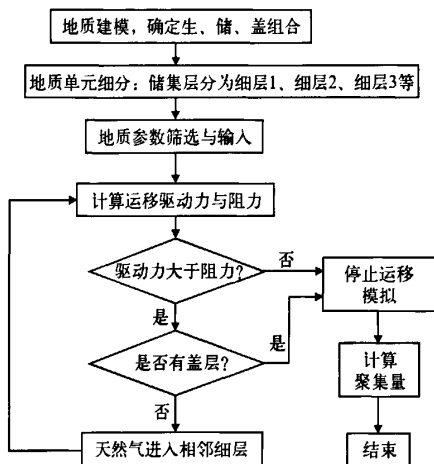


图6 “连续型”气藏成藏模拟流程图

以上方法在四川盆地的应用取得了明显效果,预测合川—潼南地区须二段未发现气资源比例达50%以上(见图7)。

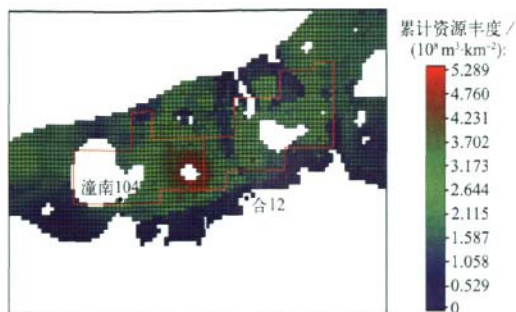


图7 四川合川—潼南地区“连续型”气藏模拟结果

4.2.6 非常规油气藏(场)评价方法

非常规石油地质理论的核心是“连续型”油气成藏

与分布,除运用常规的一些研究方法之外,还需要采用一些针对性的特殊方法,如“连续型”油气藏(场)具有与常规油气藏完全不同的资源评价方法,目前美国地质调查局(USGS)提出了“连续型”油气藏(场)资源评价的FORSPAN模型评价方法。此外,还需研究模拟油气运聚非达西渗流的高温、高压及超高压设备和技术方法、开展特殊的钻井与提高采收率开发技术等。

4.2.7 非常规油气藏(场)勘探潜力与发展战略

油气生成后运移聚集形成油气藏,一般会经历源内一次运移、近距离二次运移和远距离二次运移3个阶段,每一个阶段都可形成油气聚集。过去勘探主要研究远距离二次运移聚集的常规圈闭油气藏(如背斜油气藏和断层油气藏),是勘探早中期的主要目标,一般占总资源的10%~20%(见图5)。但油气在源内滞留、近距离二次运移保存在储集体中的油气资源,是当前或今后勘探和研究的新领域,分别占总资源的30%~50%和20%~30%,这类油气资源勘探总体处于盆地勘探的中晚期,需储集层预测、水平井与大型压裂等特殊技术。

油气资源的工业评价标准和开发战略取决于油价和技术条件(见图8),在一定阶段认为没有经济价值的“连续型”油气藏(场)资源,特别是一部分“连续型”气藏(场),随着技术进步和油价上升,都能逐步具有开采价值。

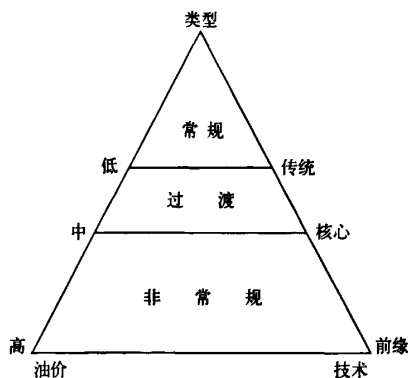


图8 油气资源勘探开发与发展三角图

4.3 找油启示

全球油气勘探历程与重大发现启示我们找油有哲学思想和理念。只要有油,没有找不到的油;只有想不到的油,没有找不到的油。Dickey P曾说:“我们常常用旧的观点在新的地方发现油气,有时候我们也用新的观念在老的地方发现油气,但是我们很少用旧的观点在老的地方发现更多的油气”^[63]。

①认识的误区就是勘探的禁区。在储集层类型和勘探深度上都曾有过误区。在储集层类型上,过去把火

山岩、泥页岩和致密砂岩看成勘探禁区,现在成为勘探对象和热点;在勘探深度上,过去认为4 500 m以深缺乏优质储集层,现在发现5 000~6 000 m深度的碎屑岩仍存在好储集层,如塔里木库车坳陷深层;6 000~7 000 m的碳酸盐岩储集层仍有工业价值,如塔里木台盆地。

②从常规向非常规延伸是一次解放思想,是一场地质革命,也是地质理论与技术的突破。美国石油地质学家华莱士 E 普拉特在一篇《找油的哲学》论文里写到:“作为一个找油者,保持新油田有待发现的想象力,受到勘探投资鼓励,可以继续发现新油田”^[63]。

③常规的思想找不到非常规的油气,常规的技术也拿不到非常规的油气。只有解放不了的思想,没有解放不了的油气,非常规颠覆了常规思想,非常规颠覆了圈闭概念。页岩气已突破了常规找油思想。要用智慧透视地球,用技术降低风险。美国一位地学家1952年指出:“归根到底,首先找到石油的地方正是在人们的脑海里。未发现的石油仅是作为一种想法存在于某些找油者的脑海里,如果没有人相信有更多的石油有待去寻找,将不会有更多的石油被发现”^[63]。

④要去想不到的地方找油。已从外形找油,向成因找油发展。只有枯竭的思想,没有枯竭的油气。地质家就是指出油气,勘探家就是打出油气。干井不干。找油,就是找信心;找油,就是找规律。

5 结论

截至2008年,全球共发现大油气田951个,剩余油气资源丰富,历经百余年勘探仍不断有大发现,目前总体勘探程度较低,尤其是非常规资源未来勘探潜力很大,已成为勘探的亮点。全球21世纪以来油气大发现揭示,被动陆缘深水区成为全球大油气田发现的最主要领域;碳酸盐岩仍然是发现大型、特大型油气田的重要领域;地质认识深化和技术进步使岩性-地层大油气田发现不断增多;前陆冲断带构造勘探不断发现大油气田;成熟探区仍不断有新发现。新地区新盆地加强勘探,也会带来大发现。

“连续型”油气藏(场)分布面积广、储量规模大。主要类型有低孔渗一致密砂岩油气、煤层气、页岩油气和天然气水合物等,需要研究评价其含油气区的空间边界和三级储量规模,针对性开展资源评价、特殊钻井、连续油管压裂、提高采收率等技术研究。“连续型”油气藏(场)是全球战略性接替领域。

非常规石油地质主要是研究油气生成后在源内滞留、近距离二次运移保留在储集层中的油气资源,有“连续型”与“断续型”油气藏(场)2种基本类型。它们

在地质特征、分类方案、研究内容、评价方法和勘探阶段等方面与常规油气藏有明显不同,需要加强非常规石油地质研究,发展和建立非常规石油地质理论。

认识的误区就是勘探的禁区。从常规向非常规延伸是解放思想;只有解放不了的思想,没有解放不了的油气;用智慧透视地球,用技术降低风险;常规的思想找不到非常规的油气;非常规颠覆了圈闭;要去想不到的地方找油;只有枯竭的思想,没有枯竭的油气;只要有油,没有找不到的油;只有想不到的油,没有找不到的油;地质家就是指出油气,勘探家就是打出油气;干井不干;找油气,就是找规律。

致谢:感谢邱中建、翟光明、戴金星、胡见义、贾承造、童晓光、赵政璋、王道富、高瑞琪、赵文智、杜金虎等院士与专家给予的指导,感谢潘校华、周慧、吴亚东、郑民、贺正军、张静、梁英波、赵喆、白斌等给予的帮助。

参考文献:

- [1] 翟光明, 宋建国, 靳久强, 等. 板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
Zhai Guangming, Song Jianguo, Jin Jiuqiang, et al. Plate tectonic evolution and its relationship to petroliferous basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [2] 张厚福. 油气藏研究的历史、现状与未来[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Zhang Houfu. The history, present and future of the research of the study [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [3] USGS. Oil and gas, USA [EB/OL]. <http://energy.usgs.gov/oilgas.html>, 2009.
- [4] BP. BP statistical review of world energy June 2008 [EB/OL]. [http://www2.iefs.org.sa/whatsnew/Documents/BP Statistical Review.pdf](http://www2.iefs.org.sa/whatsnew/Documents/BP%20Statistical%20Review.pdf), 2008.
- [5] Mann P, Horn M, Cross I. Tectonic setting of 79 giant oil and gas fields discovered from 2000-2007: Implications for future discovery trends [C]. Tulsa: AAPG, 2007.
- [6] Simmons M R. The world's giant oilfields [EB/OL]. <http://www.simmonsco-intl.com/files/giantoilfields.pdf>, 2010-01-15.
- [7] 赵政璋, 吴国干, 胡素云, 等. 全球油气勘探新进展[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 119-126.
Zhao Zhengzhang, Wu Guogan, Hu Suyun, et al. Recent development of global oil and gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 119-126.
- [8] International Energy Agency. World energy outlook 2009 [EB/OL]. <http://www.worldenergyoutlook.org/>, 2009.
- [9] EIA. International data [EB/OL]. <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>, 2009.
- [10] IHS. Energy-worldwide Houston, Texas [EB/OL]. <http://www.ihs.com/>, 2009.
- [11] 李周波, 陈振林, 彭兴芳. 鄂尔多斯北部地区烃源岩评价[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(1): 18-20.

- Li Zhoubo, Chen Zhenlin, Peng Xingfang. Evaluation of oil source rock in the northern Ordos Basin [J]. Resources Environment & Engineering, 2007, 21(1): 18-20.
- [12] 许效松, 汪正江. 对中国海相盆地油气资源战略选区的思路[J]. 海相油气地质, 2003, 8(1): 1-9.
- Xu Xiaosong, Wang Zhengjiang. Thought clew to search after strategic prospecting precincts of oil and gas resources in marine facies basins in China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2003, 8(1): 1-9.
- [13] 邹才能, 陶士振, 袁俊俊, 等. 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, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [14] 吕福亮, 贺训云, 武金云. 世界深水油气勘探形势分析及对我国深水油气勘探的启示[J]. 海洋石油, 2007, 27(3): 41-45.
- Lü Fuliang, He Xunyun, Wu Jinyun. The current situation and trend of deepwater oil and gas exploration of the world and the inspiration for us [J]. Offshore Oil, 2007, 27(3): 41-45.
- [15] 赵孟军, 张宝民. 库车前陆陷形成大气区的烃源岩条件[J]. 地质科学, 2002, 37(增刊): 35-44.
- Zhao Mengjun, Zhang Baomin. Source rocks for a giant gas-accumulating area in the Kuqa foreland depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(Supp.): 35-44.
- [16] 赵力彬, 马玉杰, 杨宪彰. 库车前陆盆地乌什凹陷油气藏特征[J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 21-24.
- Zhao Libin, Ma Yujie, Yang Xianzhang. The characteristics of hydrocarbon accumulation in the Kuqa foreland depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(10): 21-24.
- [17] 梁狄刚. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成(卷六)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Liang Digang. The continental oil and gas generation in the Kuqa Depression, Tarim Basin (Vol. 6) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [18] 穆龙新, 韩国庆, 徐宝军. 委内瑞拉奥里诺科重油带地质与油气资源储量[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 784-789.
- Mu Longxin, Han Guoqing, Xu Baojun. Geology and reserve of the Orinoco heavy oil belt, Venezuela[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 784-789.
- [19] 孙肇才. 前陆类含油气盆地共性与案例分析[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Sun Zhaocai. The commonness and case analysis in the foreland petroliferous basins[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [20] 秦建中. 青藏高原羌塘盆地油气资源潜力分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 566-573.
- Qin Jianzhong. Study on the petroleum resource potential in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(6): 566-573.
- [21] 徐建山. 世界大油气田分布及油气发现规律[J]. 世界石油工业, 1995, 3(2): 1-9.
- Xu Jianshan. The distribution of the giant oil & gas field and founding rules of petroleum [J]. World Petroleum Industry, 1995, 3(2): 1-9.
- [22] Robbins J, Doré G. The Buzzard Field, Outer Moray Firth, Central North Sea [EB/OL]. <http://www.searchanddiscovery.com/documents/2005/av/robbins/softvnetplayer.htm>, 2005.
- [23] Millson J A, Quin J G, Idiz E, et al. The Khazzan gas accumulation, a giant combination trap in the Cambrian Barik Sandstone Member, Sultanate of Oman; Implications for Cambrian petroleum systems and reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(7): 885-917.
- [24] Warren E A, Mitchell A, Estrada C. The Cusiana field, Llanos foothills, Colombia; Lessons learned from the rapid development of a giant oil field [A]. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999; AAPG Memoir 78 [C]. Tulsa: AAPG, 2003. 139-140.
- [25] Cazier E C, Hayward A B, Espinosa G. Petroleum geology of the Cusiana Field, Llanos Basin Foothills, Colombia [J]. AAPG Bulletin, 79(10): 1444-1462.
- [26] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 12-29.
- Zhang Baomin, Liu Jingjiang. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 12-29.
- [27] 赵宗举. 海相碳酸盐岩储集层类型、成藏模式及勘探思路[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 692-703.
- Zhao Zongju. Types, accumulation models and exploration concepts of marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 692-703.
- [28] 张景康, 王新民, 李相博, 等. 从滨里海盆地上古生界油气探讨中国海相碳酸盐岩油气勘探的科学思路[J]. 海相油气地质, 2002, 7(3): 50-58.
- Zhang Jinglian, Wang Xinmin, Li Xiangbo, et al. The discussion of scientific idea of China marine carbonate reservoirs exploration according to the exploration of Upper Paleozoic petroleum in Caspian Basin [J]. Marine Petroleum Geology, 2002, 7(3): 50-58.
- [29] 刘洛夫, 郭永强, 朱毅秀. 滨里海盆地盐下层系的碳酸盐岩储集层与油气特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 53-63.
- Liu Luofu, Guo Yongqiang, Zhu Yixiu. Reservoir characteristics and oil-bearing characters of the carbonate reservoir beds in the pre-salt of Pre-Caspian Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2007, 22(1): 53-63.
- [30] Halbouty M T. 世界巨型油气田(1990—1999)[M]. 夏义平, 黄忠范, 袁秉衡, 等(译). 北京: 石油工业出版社, 2006.
- Halbouty M T. The gaint oil and gas fields in the world [M]. Xia Yiping, Huang Zhongfan, Yuan Bingheng, et al (Trans.). Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [31] 李永宏, Burlin Y K. 滨里海盆地南部盐下大型油气田石油地质特征及形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 840-846.
- Li Yonghong, Burlin Y K. Characteristics of petroleum geology and formation conditions of large oil and gas fields below halite in southern Pre-Caspian basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 840-846.
- [32] IHS. IHS basin monitor; Maracaibo Basin, Venezuela, Colombia [R]. Englewood: HIS Inc., 2008.
- [33] Escalona A, Mann P. An overview of the petroleum system of

- Maracaibo Basin [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(4): 657-678.
- [34] IHS. IHS Field Iris Basic: Ceuta-Tomoporo Oil Field [R]. Englewood: HIS Inc., 2008.
- [35] Nikitin Y, Ostapenko S, Dolson J. Regional Late-Paleozoic tectono-stratigraphic settings and perspectives for discoveries at the Pricaspian Basin's north-western margin, Russia [A]. AAPG. Presentation at AAPG International Conference [C]. Tulsa: AAPG, 2006.
- [36] IHS. IHS Basin Monitor: South Kara-Yamal Province (West Siberia Basin), Russia [R]. Englewood: HIS Inc., 2008.
- [37] IHS. IHS Field Iris Basic: Kamennomysskoye-More Gas Field [R]. Englewood: HIS Inc., 2008.
- [38] 金庆煊. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点[J]. 科学中国人, 2006, 11: 18-20.
- Jin Qingxuan. Deep-water oil & gas is the main hot spot of marine petroleum exploration [J]. Scientific Chinese, 2006, 11: 18-20.
- [39] Weimer P, Slatt R M. Petroleum system of deepwater settings [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- [40] Edwards J D, Santogrossi P A. Divergent/passive margin basins: AAPG Memoir 48 [C]. Tulsa: AAPG, 1990.
- [41] Mello M R, Katz B J. Petroleum systems of south Atlantic margins: AAPG Memoir 73 [C]. Tulsa: AAPG, 1997.
- [42] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999: AAPG Memoir 78 [C]. Tulsa: AAPG, 2003.
- [43] Guardado L R, Spadini A R, Brandão J S L, et al. Petroleum system of the Campos Basin [A]. Mello M R, Katz B J. Petroleum systems of south Atlantic margins: AAPG Memoir 73 [C]. Tulsa: AAPG, 1997. 317-324.
- [44] 张建球, 钱桂花, 郭念发, 等. 澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Zhang Jianqiu, Qian Guihua, Guo Nianfa, et al. Large sedimentary basin and oil reservoir formation in Australia [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [45] 李晚兰. 荔湾3-1含气构造评价并喜获成功[J]. 海洋石油, 2009, 29(3): 78.
- Li Xiaolan. The report of petroleum founding of evaluation Well Liwan 3-1 [J]. Ocean Petroleum, 2009, 29(3): 78.
- [46] Bastia R, Nayak P, Singh P. Shelf delta to deepwater basin: A depositional model for Krishna-Godavari Basin [EB/OL]. <http://www.searchanddiscovery.net/documents/2007/07011bastia/images/bastia.pdf>, 2007.
- [47] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [48] Schmoker J W. U S geological survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations [M]. Denver: US Geological Survey, 2005. 1-9.
- [49] Hill R G, Zhang Etuan, Katz B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [50] GeoGlobal Resources Inc. Presentations of Haywood International Oil and Gas Conference [C]. London: GeoGlobal Resources Inc., 2005.
- [51] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “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, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [52] DOE. US Department of Energy [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Department_of_Energy, 2009.
- [53] Snow N. Study: US unconventional gas resources underestimated [J]. Oil & Gas Journal, 2008, 106(29): 30-31.
- [54] Schmoker J W. National assessment report of USA oil and gas resources [DB/CD]. Reston: USGS, 1995.
- [55] Petford N, McCaffrey K J W. Hydrocarbons in crystalline rocks [M]. London: The Geological Society of London, 2003.
- [56] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.
- Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [57] 陈荣书. 石油及天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质出版社, 1994.
- Chen Rongshu. Petroleum and natural gas geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.
- [58] 张厚福, 张万选. 石油地质学(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- Zhang Houfu, Zhang Wanxuan. Petroleum geology (3rd Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [59] 潘钟祥. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- Pan Zhongxiang. Petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [60] 胡见义. 非构造油气藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- Hu Jianyi. Non-structural reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [61] 张厚福, 张万选. 石油地质学(第一版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981.
- Zhang Houfu, Zhang Wanxuan. Petroleum geology (1st Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981.
- [62] 张厚福, 张万选. 石油地质学(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- Zhang Houfu, Zhang Wanxuan. Petroleum geology (2nd Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [63] 刘宝和. 从勘探实践看找油的哲学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005. 1-10.
- Liu Baohe. Philosophy in practice of oil exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005. 1-10.

第一作者简介: 邹才能(1963-), 男, 重庆江北人, 博士生导师, 中国石油勘探开发研究院副院长兼总地质师, 主要从事大油气区、岩性-地层油气藏、“连续型”与“断续型”非常规油气藏(场)地质等基础理论与核心技术研究, 以及油气重大勘探领域与风险井位评选等勘探生产实践等工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: zcn@petrochina.com.cn

收稿日期: 2009-09-10 修回日期: 2010-01-11

(编辑 王大锐 绘图 李秀贤)

作者: [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](#), [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](#)

作者单位: [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](#), [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](#) (提高石油采收率国家重点实验室; 中国
石油勘探开发研究院), [李新景](#), [Li Xinjing](#) (中国石油勘探开发研究院)

刊名: [石油勘探与开发](#) **ISTIC EI PKU**

英文刊名: [PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT](#)

年, 卷(期): 2010, 37 (2)

被引用次数: 1次

参考文献(63条)

1. [翟光明](#). [宋建国](#). [靳久强](#) 板块构造演化与含油气盆地形成和评价 2002
2. [张厚福](#) 油气藏研究的历史、现状与未来 2007
3. [USGS](#) Oil and gas, USA 2009
4. [BP](#) statistical review of world energy June 2008 2008
5. [Mann P](#). [Horn M](#). [Cross I](#) Tectonic setting of 79 giant oil and gas fields discovered from 2000-2007 2007
6. [Simmons M R](#) The world's giant oilfields 2010
7. [赵政璋](#). [吴国干](#). [胡素云](#). [宋岩](#) 全球油气勘探新进展[期刊论文]-石油学报 2005 (6)
8. [International Energy Agency](#) World energy outlook 2009 2009
9. [EIA](#) International data 2009
10. [IHS](#) 查看详情 2009
11. [李周波](#). [陈振林](#). [彭兴芳](#) 鄂尔多斯北部地区烃源岩评价[期刊论文]-资源环境与工程 2007 (1)
12. [许效松](#). [汪正江](#) 对中国海相盆地油气资源战略选区的思路[期刊论文]-海相油气地质 2003 (1)
13. [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[期刊论文]-石油学报 2009 (3)
14. [吕福亮](#). [贺训云](#). [武金云](#). [孙国忠](#). [王根海](#) 世界深水油气勘探形势分析及对我国深水油气勘探的启示[期刊论文]-海洋石油 2007 (3)
15. [赵孟军](#). [张宝民](#) 库车前陆拗陷形成大气区的烃源岩条件[期刊论文]-地质科学 2002 (z1)
16. [赵力彬](#). [马玉杰](#). [杨宪彰](#). [雷刚林](#). [吴超](#) 库车前陆盆地乌什凹陷油气成藏特征[期刊论文]-天然气工业 2008 (10)
17. [梁狄刚](#) 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成 2004
18. [穆龙新](#). [韩国庆](#). [徐宝军](#) 委内瑞拉奥里诺科重油带地质与油气资源储量 2009 (6)
19. [孙肇才](#) 前陆类含油气盆地共性与案例分析 2007
20. [秦建中](#) 青藏高原羌塘盆地油气资源潜力分析[期刊论文]-石油实验地质 2006 (6)
21. [徐建山](#) 世界大油气田分布及油气发现规律 1995 (3)
22. [Robbins J](#). [Doré G](#) The Buzzard Field, Outer Moray Firth, Central North Sea 2005
23. [Millson J A](#). [Quin J G](#). [Idiz E](#) The Khazzan gas accumulation, a giant combination trap in the Cambrian

2008(7)

24. [Warren E A. Mitchell A. Estrada C](#) [The Cusiana field, Llanos foothills, Colombia, Lessons learned from the rapid development of a giant oil field](#) 2003

25. [Cazier E C. Hayward A B. Espinosa G](#) [Petroleum geology of the Cusiana Field, Llanos Basin Foothills, Colombia](#)

26. [张宝民. 刘静江](#) [中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2009(1)

27. [赵宗举](#) [海相碳酸盐岩储集层类型、成藏模式及勘探思路](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2008(6)

28. [张景康. 王新民. 李相博. 于均民. 周晓峰](#) [从滨里海盆地上古生界油气探讨中国海相碳酸盐岩油气勘探的科学思路](#)[期刊论文]-[海相油气地质](#) 2002(3)

29. [刘洛夫. 郭永强. 朱毅秀](#) [滨里海盆地盐下层系的碳酸盐岩储集层与油气特征](#)[期刊论文]-[西安石油大学学报（自然科学版）](#) 2007(1)

30. [Halbouty M T. 夏义平. 黄忠范. 袁秉衡](#) [世界巨型油气田\(1990--1999\)](#) 2006

31. [李永宏. Burlin Y K](#) [滨里海盆地南部盐下大型油气田石油地质特征及形成条件](#)[期刊论文]-[石油与天然气地质](#) 2005(6)

32. [IHS IHS basin monitor: Maracaibo Basin, Venezuela, Colombia JR1](#) 2008

33. [Escalona A. Mann P](#) [An overview of the petroleum system of Maracaibo Basin](#) 2006(4)

34. [IHS IHS Field Iris Basic = Ceuta-Tomoporo Oil Field](#) 2008

35. [Nikitin Y. Ostapenko S. Dolson J](#) [Regional Late-Paleozoic tectono-stratigraphic settings and perspectives for discoveries at the Pricaspian Basin's north-western margin, Russia](#) 2006

36. [IHS IHS Basin Monitor: South Kara-Yamal Province \(West Siberia Basin\), Russia](#) 2008

37. [IHS IHS Field Iris Basic: Kamennomyskoye-More Gas Field](#) 2008

38. [金庆焕](#) [深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点](#)[期刊论文]-[科学中国人](#) 2006(11)

39. [Weimer P. Slatt R M](#) [Petroleum system of deepwater settings](#) 2005

40. [Edwards J D. Santogrossi P A](#) [Divergent/passive margin basins](#) 1990

41. [Mello M R. Katz B J](#) [Petroleum systems of south Atlantic margins](#) 1997

42. [Halbouty M T](#) [Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999](#) 2003

43. [Guardado L R. Spadini A R. Brandao J S L](#) [Petroleum system of the Campos Basin](#) 1997

44. [张建球. 钱桂花. 郭念发](#) [澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏](#) 2008

45. [李晓兰](#) [荔湾3-1含气构造评价井喜获成功](#) 2009(3)

46. [Bastia R. Nayak P. Singh P](#) [Shelf delta to deepwater basin: A depositional model for Krishna-Godavari Basin](#) 2007

47. [Bowker K A](#) [Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion](#) 2007(4)

48. [Schmoker J W U S](#) [geological survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations](#) 2005

49. [Hill R G. Zhang Etuan. Katz B J](#) [Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas](#) 2007(4)

50. [GeoGlobal Resources Inc](#) [Presentations of Haywood International Oil and Gas Conference](#) 2005

51. [邹才能, 陶士振, 袁选俊](#) [“连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价](#) 2009(6)
52. [DOE](#) [查看详情](#) 2009
53. [Snow N](#) [Study:US unconventional gas resources underestimated](#) 2008(29)
54. [Schmoker J W](#) [National assessment report of USA oil and gas resources](#) 1995
55. [Petford N, McCaffrey K J W](#) [Hydrocarbons in crystalline rocks](#) 2003
56. [邹才能, 赵文智, 贾承造, 朱如凯, 张光亚, 赵霞, 袁选俊](#) [中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2008(3)
57. [陈荣书](#) [石油及天然气地质学](#) 1994
58. [张厚福, 张万选](#) [石油地质学](#) 1999
59. [潘钟祥](#) [石油地质学](#) 1986
60. [胡见义](#) [非构造油气藏](#) 1986
61. [张厚福, 张万选](#) [石油地质学](#) 1981
62. [张厚福, 张万选](#) [石油地质学](#) 1989
63. [刘宝和](#) [从勘探实践看找油的哲学](#) 2005

引证文献(2条)

1. [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](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2010(6)
2. [孙海涛, 钟大康, 张思梦](#) [非洲东西部被动大陆边缘盆地油气分布差异](#)[期刊论文]-[石油勘探与开发](#) 2010(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sykykf201002001.aspx