

文章编号: 1000-0747(2010)06-0641-13

中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力

邹才能^{1,2}, 董大忠^{1,2}, 王社教^{1,2}, 李建忠^{1,2}, 李新景^{1,2},
王玉满^{1,2}, 李登华^{1,2}, 程克明^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 提高石油采收率国家重点实验室)

基金项目: 国家大型气田与煤层气开发项目 (2008ZX05001)

摘要: 以四川盆地为重点, 介绍中国海相、海陆过渡相、陆相三大类型页岩形成的沉积环境、地球化学与储集层特征、含气量与远景资源量。中国海相页岩是一套高有机质丰度 (TOC 为 1.0%~5.5%)、高一过成熟 (R_o 值为 2.0%~5.0%)、富含页岩气 (含气量 1.17~6.02 m³/t)、以陆棚相为主的沉积, 主要分布在华南扬子地区古生界、华北地台古生界和塔里木盆地寒武系—奥陶系; 海陆过渡相煤系炭质页岩有机质丰度高 (TOC 为 2.6%~5.4%)、成熟度适中 (R_o 值为 1.1%~2.5%); 中生界陆相页岩有机质丰度高 (TOC 为 0.5%~22.0%)、低熟—成熟 (R_o 值为 0.6%~1.5%)。在对四川盆地古生界页岩储集层研究中首次发现, 寒武系和志留系海相页岩发育大量与北美地区相似的微米—纳米级孔隙。综合评价认为四川盆地发育的多套页岩气层系是勘探开发的现实领域, 四川盆地中南部威远—长宁等地区的寒武系和志留系是页岩气勘探开发的核心区与层系, 其特点是: 热演化程度较高 (R_o 值为 2.0%~4.0%)、孔隙度较高 (3.0%~4.8%), 含气量较高 (2.82~3.28 m³/t)、脆性矿物含量较高 (40%~80%)、埋深适中 (1 500~4 500 m), 有利于开采。图 7 表 7 参 38

关键词: 非常规油气; 页岩气; 纳米级孔隙; 页岩油; 致密油; 源岩油气

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China

Zou Caineng^{1,2}, Dong Dazhong^{1,2}, Wang Shejiao^{1,2}, Li Jianzhong^{1,2}, Li Xinjing^{1,2},
Wang Yuman^{1,2}, Li Denghua^{1,2}, Cheng Keming^{1,2}

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

Abstract: With Sichuan Basin as focus, this paper introduces the depositional environment, geochemical and reservoir characteristics, gas concentration and prospective resource potential of three different types of shale in China: marine shale, marine terrigenous shale and terrigenous shale. Marine shale features high organic abundance (TOC : 1.0%~5.5%), high over maturity (R_o : 2.0%~5.0%), rich accumulation of shale gas (gas concentration: 1.17~6.02 m³/t) and continental shelf deposition, mainly distributed in the Paleozoic in the Yangtze area, Southern China, the Paleozoic in Northern China Platform and the Cambrian-Ordovician in Tarim Basin; Marine terrigenous coalbed carbonaceous shale has high organic abundance (TOC : 2.6%~5.4%) and medium maturity (R_o : 1.1%~2.5%); Terrigenous shale in the Mesozoic and Cenozoic has high organic abundance (TOC : 0.5%~22.0%) and low to middle maturity (R_o : 0.6%~1.5%). The study on shale reservoirs in the Lower Paleozoic in Sichuan Basin firstly indicated that Cambrian and Silurian marine shale developed lots of micro- and nanometer sized pores, which is quite similar to the conditions in North America. Through comprehensive evaluation, it is thought that several shale gas intervals in Sichuan Basin are the practical targets for shale gas exploration and development, and that the Weiyuan-Changning area in the Mid-South of Sichuan Basin is the core area for shale gas exploration and development, which is characterized by high thermal evolution degree (R_o : 2.0%~4.0%), high porosity (3.0%~4.8%), high gas concentration (2.82~3.28 m³/t), high brittle mineral content (40%~80%) and proper burial depth (1 500~4 500 m).

Key words: unconventional hydrocarbon; shale gas; nanometer sized pore throat; shale oil; tight oil; source rock hydrocarbon

1 页岩气勘探开发现状

油气工业的生命周期大致有 300 年 (1880—2180 年) 历史, 发展主要历经构造油气藏、岩性地层油气藏、非

常规油气藏 (场) 勘探开发 3 个阶段和三大领域。油气藏分布方式分别有单体型、集群型、连续型 3 种类型。从构造油气藏向岩性地层油气藏转变是第一次理论技术创新, 以寻找油气圈闭为核心; 从岩性地层圈闭油气藏向非

常规连续型油气藏转变是第二次理论技术创新或革命,以寻找有利油气储集体为核心,致密化“减孔成藏”机理新论点突破了常规储集层物性下限与传统圈闭找油的理念^[1]。随着勘探开发技术不断进步,占有 80% 左右资源的非常规油气(一般将空气渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或地层渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储集层内的油气称为常规油气,把空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或地层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油气称为非常规油气)如页岩气、煤层气、致密气、致密油、页岩油等已引起广泛关注(见图 1),并得到有效开发,在油气储、产量中所占比例也逐年提高。传统观点仅认识到页岩可生油、生气,没认识到页岩亦可储油、储气,更未认识到还能聚集工业性页岩油、页岩气。近年来,典型页岩气的发展尤为迅速,地质认识不断进步,优选核心区方法、实验分析技术、测井评价技术、资源评价技术、页岩储集层水平井钻完井、同步多级并重复压裂等先进技术获得应用,形成“人造气”是页岩气快速发展的关键因素。页岩气突破的意义在于:①突破资源禁区,增加资源类型与资源量;②挑战储集层极限,实现油气理论技术升级换代,水平井多级压裂等核心技术应用于其他致密油气等非常规和常规油气储集层中更加经济有效,可大幅度提高油气采收率;③带动非常规油气技术发展,推动致密油气、页岩油等更快成为常规领域。





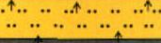



资源类型		聚集形态	聚集方式	资源比例	实例
构造油气藏			常规圈闭	20%±	松辽盆地长垣
岩性地层油气藏					准噶尔盆地西北缘
连续型油气藏	致密油		非常规储集层	80%±	鄂尔多斯盆地T
	页岩油				松辽盆地K
	致密气				鄂尔多斯盆地C-P
	煤层气+页岩气				塔里木盆地O
	碳酸盐岩缝洞油气				四川盆地E-S
	页岩气				

图 1 油气资源类型与聚集形态图

全球页岩气勘探开发自 1821 年在美国东部泥盆系页岩中钻成第 1 口页岩气井、1914 年发现第 1 个页岩气田——Big Sandy 气田^[2]以来,历经 1821—1978 年偶然发现、1978—2003 年认识创新与技术突破、2003—2006 年水平井与水力压裂等技术推广应用、2007—2010 年全球化发展(页岩气中国年、欧州年)等 4 个阶段。1981 年被誉为“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以来,实现了真正意义的页岩气突破。至

2009 年底,北美发现页岩气盆地 30 个,开发井 50 000 余口,井深 2 500~4 500 m;2009 年年产量 $950 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3],占北美天然气总产量的 12% (其中美国产量 $889 \times 10^8 \text{ m}^3$)。中国页岩气走过了裂缝油气藏勘探与偶然发现(2005 年以前)、基础研究与技术准备(2005—2009 年)和工业化突破(2010 年)等 3 个阶段。1966 年四川威 5 井在寒武系筇竹寺组页岩中获日产气 $2.46 \times 10^4 \text{ m}^3$,为中国最早的页岩产气井^[4];2008 年中国石油勘探开发研究院在四川长宁地区钻探的长芯 1 井^[5]为中国第 1 口页岩气地质井;2009 年中国石油在四川威远—长宁、富顺—永川等地区启动了首批页岩气工业化试验区建设;2010 年中国石油勘探开发研究院在四川长宁地区建立了第 1 条中国页岩气数字化标准剖面;2010 年中国石油钻探的四川盆地威 201 井在寒武系、志留系页岩中获工业气流,实现中国页岩气首次工业化突破。

北美地区经过多年的研究和开发实践,在页岩气形成机理、富集条件等方面已形成重要认识和技术^[6-15]。本文重点分析中国页岩气基本特征、形成机理与富集条件、面临的难题等,对中国页岩气资源潜力进行预测,以期为中国页岩气的研究和勘探开发提供依据。

2 中国富有机质页岩分布特征

源岩油气是一种新资源类型,包括页岩油、页岩气、煤层气等,自生自储,主要产自源岩内储集层中。

页岩(shale)是由粒径小于 0.003 9 mm 的细粒碎屑、黏土、有机质等组成,具页状或薄片状层理、易碎裂的一类沉积岩,亦即美国所称的粒径小于 0.003 9 mm 的细粒沉积岩。

页岩气(shale gas)是指从富有机质黑色页岩中开采的天然气,或自生自储、在页岩纳米级孔隙中连续聚集的天然气。

中国 3 类富有机质页岩泛指海相、海陆交互相以及陆相页岩和泥岩,重点指含油气盆地中的优质泥质烃源岩,图 2 为依据中国页岩发育的层系和分布特点编制的 3 类页岩分布图。中国南方扬子地区海相页岩多为硅质页岩(如扬子地区牛蹄塘组底部页岩)、黑色页岩、钙质页岩和砂质页岩,风化后呈薄片状,页理发育。海陆过渡相页岩多为砂质页岩和炭质页岩。陆相页岩页理发育,渤海湾盆地、柴达木盆地新生界陆相页岩钙质含量高,为钙质页岩,鄂尔多斯盆地中生界陆相页岩石英含量较高。

2.1 富含页岩气的核心区特征

目前进行页岩气经济开发的核心区有 5 个富集高产条件(见表 1),通常是指 TOC 值大于 2%、处在生气窗内、脆性矿物含量大于 40% 的有效页岩。有效页岩

厚度大于 30~ 50 m(有效页岩连续发育时大于 30 m, 断续发育或 *TOC* 值小于 2% 时, 累计厚度大于 50 m) 时亦足以满足商业开发要求。北美产气页岩有效厚度最小为 6 m(Fayetteville), 最大为 304 m(Marcellus),

核心区有效页岩厚度均大于 30 m。
基于北美页岩气勘探开发实践、统计分析 & 关键实验等结果, 认为有利页岩气及核心区具有 4 方面主要地质特征和 3 方面主要开发特点, 详见表 1。

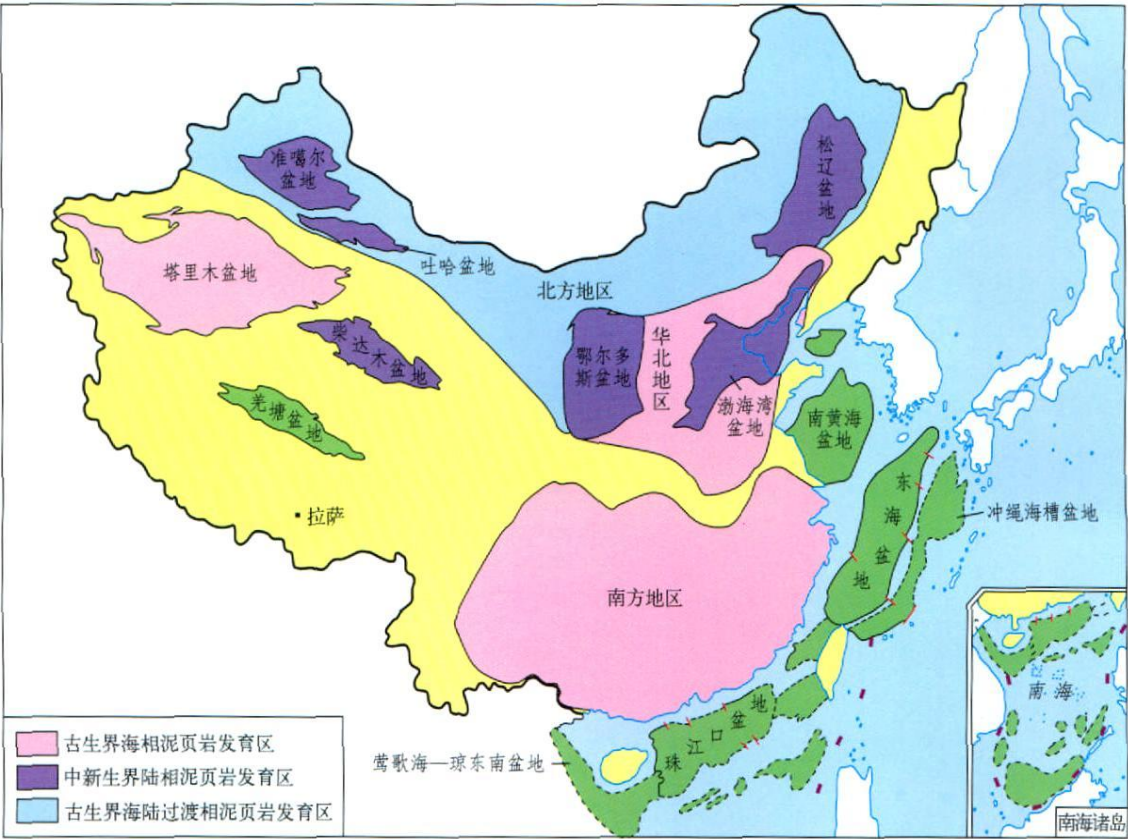


图 2 中国 3 种主要页岩类型分布略图

表 1 页岩气主要特征简表		
地质特征	开发特点	核心区富集高产条件
源储一体, 持续聚集, 饱和成藏; 无明显圈闭界限, 封闭层或盖层仍必不可少	一般单井产量低, 生产周期长	① <i>TOC</i> > 2% (非残余有机碳); ②石英等脆性矿物含量大于 40%、黏土矿物含量小于 30%; ③暗色富有机质页岩 <i>R_o</i> 值大于 1.1%; ④充气孔隙度大于 2%、渗透率大于 $0.0001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; ⑤有效富有机质页岩连续厚度大于 30~ 50 m
储集层致密, 以纳米级孔隙为主; 天然气以吸附、游离等多种方式赋存	非达西流为主, 一般不产水或产水很少	有效开发需要水平井及多级或同步压裂等先进开发技术, 提高“人造”网状渗透率
不受构造控制, 大面积连续分布, 与有效保存的生气源岩面积相当	采收率低	
资源规模大, 有“甜点”核心区		

2.2 中国页岩形成的区域地质背景

古生代, 在中国南方、华北及塔里木地区形成了广泛的海相和海陆过渡相沉积, 发育多套海相富有机质页岩和海陆过渡相煤系炭质页岩^[6]。在后期改造过程中, 部分古生界海相页岩经历了挤压变形或隆升, 如南方的扬子地区, 多为后期隆升改造。四川盆地、华北地区、塔里木盆地构造相对稳定, 地层保存条件较好。

中、新生代以来, 形成了中国独特的陆相湖盆沉

积^[6]。陆相沉积盆地一般面积不大, 但在盆地稳定沉降阶段常形成分布广泛的陆相生油岩, 生烃潜力很大^[6], 如松辽盆地下白垩统青山口组、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组陆相页岩, 均是盆地主要烃源岩。

2.3 页岩的沉积特征

盆地不同演化阶段直接控制富有机质页岩的发育与分布^[16]。根据沉积环境, 可将富有机质页岩划分为海相页岩、海陆交互相煤系炭质页岩、陆相页岩 3 种基本类型(见表 2)。

表 2 中国页岩分类及分布地区

沉积类型	分布地区
海相页岩	扬子地区古生界, 华北地区元古界—古生界, 塔里木盆地寒武系—奥陶系等
海陆过渡相煤系页岩	鄂尔多斯盆地石炭系本溪组、下二叠统山西组—太原组, 准噶尔盆地石炭—二叠系, 塔里木盆地石炭—二叠系, 华北地区石炭—二叠系, 中国南方地区二叠系龙潭组等
陆相页岩	松辽盆地白垩系, 渤海湾盆地古近系, 鄂尔多斯盆地三叠系, 四川盆地三叠系—侏罗系, 准噶尔盆地—吐哈盆地侏罗系, 塔里木盆地三叠系—侏罗系, 柴达木盆地第三系等

中国南方、华北地台及塔里木地台发育的古生界海相黑色页岩多形成于水深 200 m 左右、生物化石丰富、强还原环境的深水陆棚相, 如四川盆地发育的寒武系筇竹寺组、志留系龙马溪组黑色页岩为受大陆边缘拗陷控制的深水陆棚相沉积^[17](见图 3), 富有机质黑

色页岩面积 $13.5 \times 10^4 \sim 18.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 厚 200~400 m, 有机质丰富, 含海洋浮游生物笔石化石及自生黄铁矿等, 有机碳含量 1.85%~4.36%, 最高达 11.0%~22.3%。在这两套黑色页岩中均发现了大量页岩气。

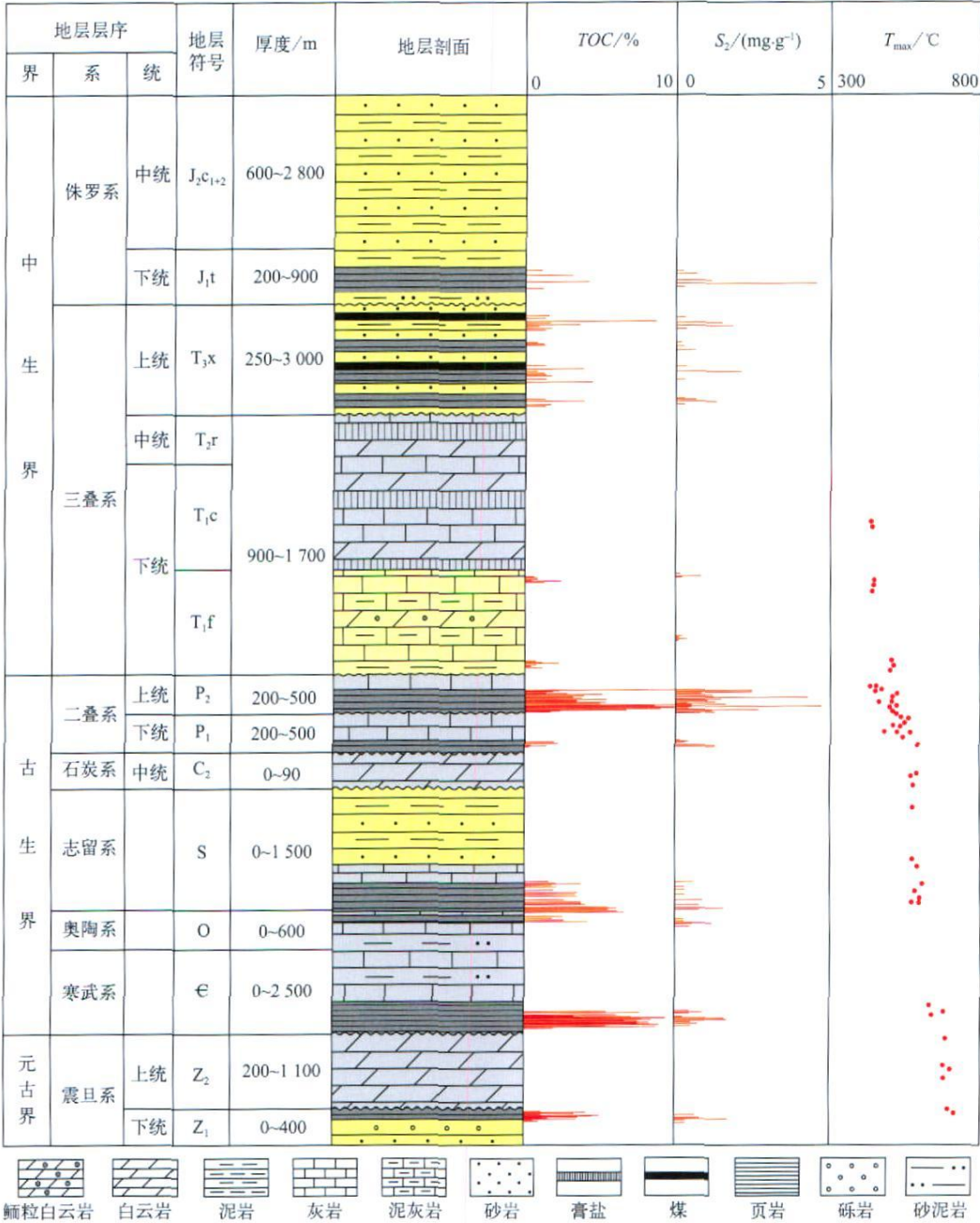


图 3 四川盆地黑色页岩综合柱状图

海陆过渡相形成的煤系页岩,如鄂尔多斯盆地石炭系本溪组及下二叠统山西组—太原组、准噶尔盆地石炭—二叠系、塔里木盆地石炭—二叠系、华北地区石炭—二叠系、中国南方地区的二叠系龙潭组等,也是大型油气田的主要烃源岩,如鄂尔多斯盆地上古生界炭质页岩是苏里格等大气区的主要气源岩。三叠系—侏罗系和第三系发育多套与煤层相伴生的炭质页岩,同样亦是优质气源岩,吐哈盆地发现的油气田多数来源于侏罗系煤系页岩。

中国发育陆相含油气盆地页岩:渤海湾盆地古近纪、松辽盆地白垩纪、鄂尔多斯盆地三叠纪、四川盆地侏罗纪、塔里木盆地三叠纪—侏罗纪、准噶尔盆地侏罗纪均为大型湖盆沉积,在湖盆的扩张期,形成了分布广

泛且厚度大的湖相页岩,有机质十分丰富,含介形虫、孢粉、细菌、高等植物等化石,厚度 200~2 500 m,有机碳含量 2%~3%,最高达到 7%~14%。在中新生代发现了众多规模不等的油气聚集带^[18],大庆油田、胜利油田、辽河油田、鄂尔多斯中生界油气聚集区等,其油气就源于该套湖相泥岩。

2.4 页岩的分布特征

中国海相页岩十分发育,分布广、厚度大^[19]。主要发育在古生界的陡山沱组(Z_2)、筇竹寺竹组($-C_1$)、大乘寺组(O_1)、五峰—龙马溪组(O_3-S_1)、罗富组(D_2)、德坞组—大塘组(C_1)、龙潭组(P_2)(见表 3)。发育最好的页岩分布在下寒武统、上奥陶统顶部—下志留统底部,以扬子克拉通地区最为典型。

表 3 中国海相页岩分布

地层		厚度/m		面积/ 10^4 km^2	分布地区
		范围	平均		
石炭系	德坞组—大塘组(C_1)	50~150	100	6	滇黔桂
泥盆系	罗富组(D_2)	100~600	200	13	滇黔桂、湘西—湘南
志留系	五峰—龙马溪组(O_3-S_1)	20~700	120	42	扬子区
奥陶系	大乘寺组(O_1)	20~100	40	3	上扬子西部
寒武系	筇竹寺组($-C_1$)	50~700	100	30~50	扬子区
	$-C_{1+2}$	50~110	80	7	塔里木盆地
震旦系	陡山沱组(Z_2)	10~100	47	15	上扬子东部—中扬子西部

下寒武统海相页岩在中上扬子区发育好,有机质类型为腐泥型—混合型。从沉积环境看,川东—鄂西、川南及湘黔 3 个深水陆棚区下寒武统海相页岩最发育^[20],平均厚度 100 m, TOC 值平均高达 8% 左右。四川盆地下寒武统海相页岩全盆地发育,以硅质页岩、炭质页岩、粉沙质页岩和黑色页岩为主,厚度平均为 139 m, TOC 值平均 1.0%~5.5%,盆地南部页岩埋藏浅于 4 000 m。

上奥陶统一下志留统海相页岩在川东南、川东北、鄂西渝东、中下扬子等区广泛发育^[5],以黑色页岩、炭质页岩、黑色笔石页岩、钙质页岩为主,平均厚 120 m, TOC 值平均 4% 左右,干酪根为腐泥型。四川盆地上奥陶统一下志留统海相页岩在川南—川东地区发育较好。据笔者综合运用伽马能谱、元素捕获、探地雷达及陆地激光三维全信息扫描等手段建立的长宁双河上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组海相页岩地层数字化标准剖面(见图 4)统计,川南上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色页岩厚度大于 308 m,有机质类型为腐泥型, TOC 值平均 2.94%,最高达 8.75%。

海陆交互相及陆相煤系炭质页岩在华北、华南地区和塔里木盆地广泛分布(见表 4)。北部主要发育在天山—兴蒙海槽。鄂尔多斯盆地海陆交互相山西组—太原组—本溪组页岩厚 40~120 m,单层厚度不大,多数与煤层、致密砂岩甚至薄层灰岩交互出现。准噶尔

盆地石炭系滴水泉组炭质页岩最厚达 249 m,二叠系芦草沟组黑色页岩累计厚度超过 200 m。中国南方地区的二叠系龙潭组(P_2)炭质页岩厚 20~200 m,最厚达 670 m,分布面积约 $30\times10^4\sim50\times10^4\text{ km}^2$ 。其中,滇黔桂地区上二叠统龙潭组页岩厚度为 20~60 m,四川盆地上二叠统页岩厚 10~125 m,川中和川西南一带厚 80~110 m,四川盆地西北缘、北缘及东北缘较薄,多小于 20 m。中新生代陆相煤系炭质页岩主要发育在坳陷和断陷湖盆中,如鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地侏罗系、四川盆地上三叠统(厚 150~1 000 m)、吐哈盆地侏罗系(厚 50~400 m,最厚达 1 200 m)等。

总体上,中国海陆交互相和中新生代陆相炭质页岩除上扬子及滇黔桂地区单层厚度较大外,多数地区单层厚度都不大,常与煤和致密砂岩甚至灰岩互层,单层平均厚度一般小于 15 m,单独开发这套薄层煤系页岩气将面临很大的挑战,进行页岩气、致密气、煤层气等多目的层联合开发是有效开发的新途径。

主要分布于陆相含油气盆地的湖相页岩沉积范围最广(见表 5),广泛发育湖相页岩油、致密砂岩油与致密页岩油。松辽、鄂尔多斯、四川等中新生代坳陷盆地^[21]及渤海湾新生代断陷盆地都沉积了厚层湖相富有机质页岩、砂岩与泥岩^[22]。如松辽盆地嫩江组和青山口组两套页岩十分发育,嫩江组在全盆地稳定分布,中

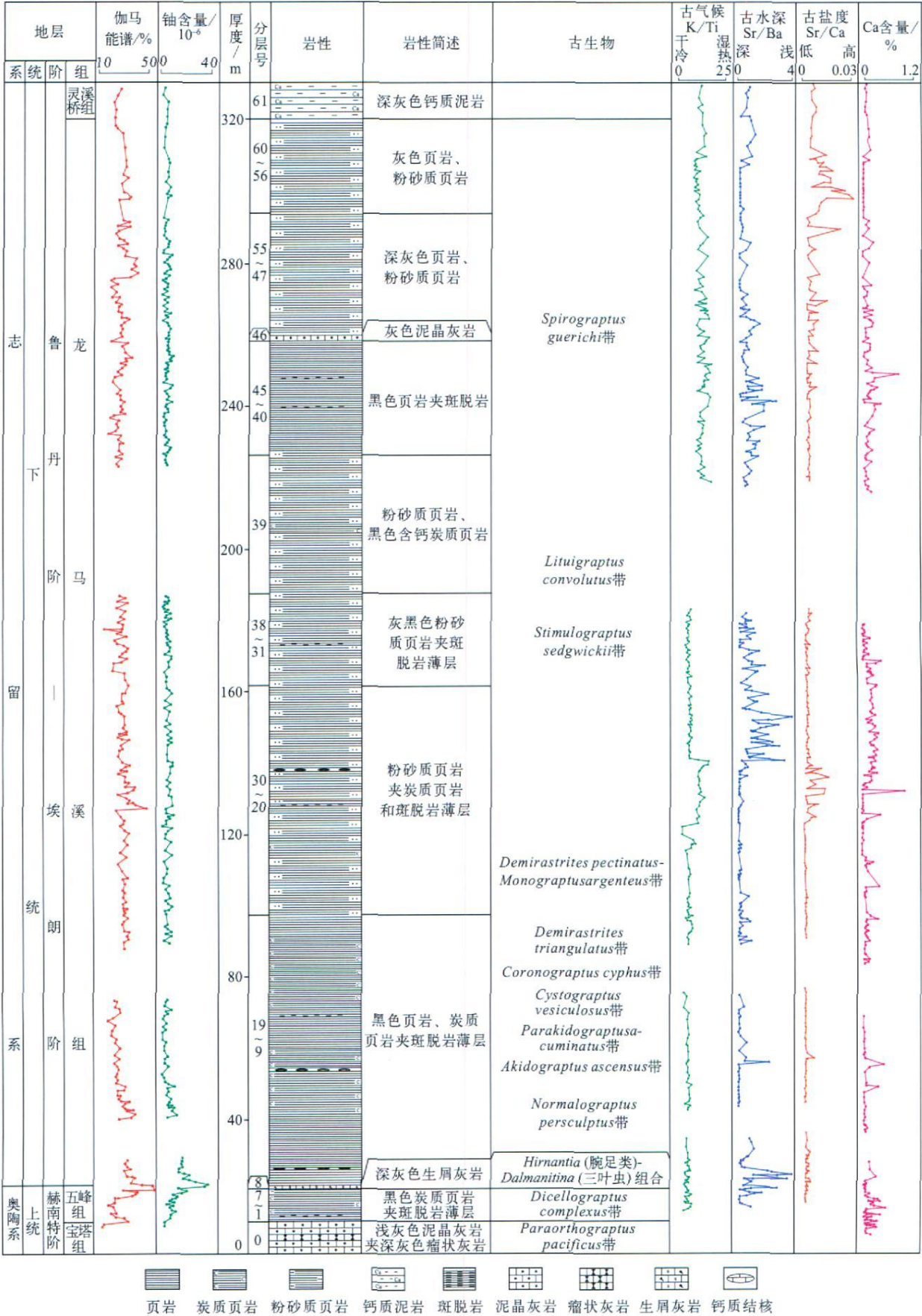


图 4 四川盆地长宁双河地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩综合柱状图

表 4 中国海陆交互相及陆相煤系炭质页岩分布

地层	页岩层段	页岩厚度/ m	面积/ 10 ⁴ km ²	分布地区
白垩系	沙河子组(J ₃ sh)	100~ 350	4. 0~ 5. 0	松辽盆地
	水西沟群(J ₁₋₂ sh)	50~ 600	0. 3~ 0. 5	吐哈盆地
侏罗系	西山窑组(J _{2x})	350~ 400	2. 0~ 3. 0	准噶尔盆地
	克孜勒努尔组(J _{2k}), 阳霞组(J _{1y})	300~ 800	7. 0~ 9. 0	塔里木盆地
上三叠统	须家河组(T _{3x})	150~ 1 000	3. 0~ 4. 0	四川盆地
石炭-二叠系	龙潭组(P _{2l})	20~ 200	30. 0~ 50. 0	扬子地区
	山西组(P _{1s}), 太原组(P _{1t}), 本溪组(C _{2b})	50~ 180	20. 0~ 30. 0	华北地区
	芦草沟组(P _{2l}), 滴水泉组(C _{1d})	200~ 450	2. 0~ 3. 0	准噶尔盆地

表 5 中国湖相页岩分布

时代	厚度/ m	面积/ 10 ⁴ km ²	分布地区
中生代	T—J	1 200~ 1 500	2. 0~ 3. 0 准噶尔盆地
	T	20~ 160	4. 0~ 5. 0 鄂尔多斯盆地
	K	200~ 400	4. 0~ 5. 0 松辽盆地
	J	300~ 1 000	0. 3~ 5. 0 吐哈、四川盆地
新生代	E	800~ 2 300	0. 8~ 1. 0 辽河拗陷
	E	2 000~ 2 500	1. 0~ 1. 5 黄骅拗陷
	E	220~ 1 300	1. 2~ 1. 5 济阳拗陷
	E—N	800	0. 3~ 0. 5 柴达木盆地

央拗陷区厚度超过 250 m, 青山口组一段在中央拗陷区几乎全部为黑色页岩, 厚度为 60~ 80 m, 干酪根类型为 I—II 型, R_o 值为 0. 9%~ 1. 8%。鄂尔多斯盆地延长组长₇段主要为深湖相沉积, 富有机质页岩平均厚度 20~ 40 m, 分布面积超过 4×10^4 km², 有机碳含量平均高达 14%, 干酪根类型为 I—II 型, R_o 值为 0. 6%~ 1. 2%。最近, 在该套湖相页岩地层内发现了大量致密油, 油层为厚 10~ 20 m、孔隙度 10. 2%、渗透率 $0. 21 \times 10^{-3}$ μm^2 的致密粉砂岩, 有工业油气流井近 200 口, 平均产量 8. 6 t/d。该特征与北美在 Williston 盆地 Bakken 页岩层中发现的致密油极为相似^[23]。Bakken 地层位于上泥盆统顶部, 由下向上分 9 段, 最下面第 1 段页岩厚度 12~ 15 m, TOC 值高达 14%~ 18%, R_o 值为 1. 1%~ 1. 3%, 为富有机质页岩层。上覆第 2 段致密粉砂岩油层孔隙度 10%~ 13%, 渗透率 $0. 01 \times 10^{-3}$ ~ 1×10^{-3} μm^2 , 厚 5~ 15 m, 面积约 75 563 km², 1999

年 USGS 专家估算页岩中致密油地质资源量为 578×10^8 t, 一般预测为 241×10^8 ~ 518×10^8 t。致密油是继页岩气突破后又一重大发现, 成为新亮点。

3 中国页岩气地球化学特征

页岩气是富有机质烃源岩层系中以甲烷为主的天然气。作为一种重要的“有机矿物颗粒”, 有机质不仅为常规油气藏提供丰富的物质基础, 其自身也可以储集并产出油气。大量研究表明, 对于热成因页岩气区带的初步筛选, 通常要求页岩达到某些地球化学指标, 如: 有机质丰度(TOC) 大于 2%, 成熟度(R_o) 大于 1. 1%, 满足这些约束条件的地区, 可有效降低页岩气勘探开发风险。

3. 1 页岩的基本地球化学特征

中国海相、海陆交互相以及陆相页岩广泛分布^[24-27], 不同沉积环境形成的有机质类型不同, 倾油、倾气性也有差别, 很多盆地或区块达到富集页岩气所需基本地球化学标准(见表 6)。四川盆地下古生界寒武系筇竹寺组和志留系龙马溪组两套海相黑色页岩属 I—II₁ 型干酪根, 显示良好的倾油性, 当 R_o 值高于 1. 2% 时, 在高过成熟的页岩地层中, 先生油, 后裂解成气, 形成海相页岩“连续”生气与聚气。中国北方古生界石炭-二叠系、中生界侏罗系含煤层系炭质页岩作为重要的气源岩, 已形成了大规模天然气聚集, 有机质主要是 II 型, 属腐殖型干酪根, 在整个成熟演化阶段, 以成气为主; R_o 值为 1. 0% 时, 天然气转化率已达到 40%

表 6 中国 3 类页岩有机地球化学参数

页岩类型	地区	地层及岩性	TOC / %		R_o / %	干酪根类型
			范围	平均值		
海相	四川盆地	寒武系黑色页岩	1. 00~ 5. 50		2. 30~ 5. 20	I—II ₁
		志留系龙马溪组黑色笔石页岩	2. 00~ 4. 00		1. 60~ 3. 60	I—II ₁
	塔里木盆地	寒武系深灰色泥灰岩、黑色页岩	0. 18~ 5. 52	2. 28	1. 90~ 2. 04	
		下奥陶统黑色泥岩	0. 17~ 2. 13	1. 15	1. 74	I—II ₁
	上扬子东南缘	五峰组—龙马溪组底部	1. 73~ 3. 12	2. 46	1. 83~ 2. 54	I
海陆过渡相	河西走廊	石炭系暗色泥岩	0. 19~ 37. 98	4. 20	0. 60~ 1. 90	II—III
		炭质泥岩	0. 27~ 50. 52	5. 44		
	鄂尔多斯盆地	黑色、深灰色炭质页岩	2. 68~ 2. 93		1. 10~ 2. 50	III
陆相	鄂尔多斯盆地	三叠系延长组长 ₇ 段黑色页岩	6. 00~ 22. 00	14. 00	0. 90~ 1. 16	I—II ₁
	松辽盆地	白垩系青山口组黑色页岩	0. 50~ 4. 50		0. 60~ 1. 20	I—II ₁

以上; R_o 值为 2.5% 时,天然气转化率达到 95%; R_o 值为 0.8%~2.5% 是煤系有机质主生气期^[28]。富氢组分含量相对较高区块,更有利于形成页岩气富集区。可见,中国的 3 类主要页岩具备形成页岩气资源的条件。

中国页岩气潜力区的部分地球化学特征不同于北美页岩气主产区。如:包括四川盆地在内的扬子地台大部分地区古生界烃源岩是区域主力烃源岩,虽属 I 型干酪根,但成熟度普遍为高或过成熟,连续生油、生气、聚气,残余生烃潜力低;中国大中型煤型气田,如鄂尔多斯、塔里木、华北地区上古生界石炭-二叠系炭质页岩,其有机质丰度一般都比较低, R_o 值为 1.1%~2.5%,有机质类型则多为 II—II 型;鄂尔多斯盆地中生界三叠系长 7 黑色页岩为优质烃源岩,呈较高自然伽马、高电阻率、较低密度、高声波时差,有机质类型为 I 型,具有很高的生烃潜力,但 R_o 值为 0.90%~1.16%,尚属生油高峰阶段。

中国陆相地层中广泛发育页岩油。页岩油是生油岩内纳米—微米级孔隙与裂缝聚集的石油,如在松辽盆地古龙凹陷已发现下白垩统青山口组和嫩江组页岩油聚集,页岩富有机质,总厚 300~620 m,一般异常高压,干酪根为 I—II 型, R_o 值为 0.9%~1.2%。最早在大安构造大 4 井青山口组泥岩段获日产油 2.66 t,另有 50 余口井见油气显示,4 口井产少量油气(古 501 井、英 15 井、英 3 井、大 111 井),5 口井获工业油气流(英 12 井、英 18 井、英 16 井、古 1 井、大 4 井)。盆地南部新北油田泥岩裂缝性油藏几口井已开采 10 余年,累计产油超过 3×10^4 t。鄂尔多斯、渤海湾等盆地生油层系中也发育页岩油。页岩油是页岩气之后又一“源岩油”领域,值得重视。

3.2 关键地球化学参数与页岩储集能力的相关性

自生自储的页岩气储集层,其有机地球化学关键参数,如有机质丰度和成熟度等,与页岩储集层含气性、储集空间的发育密不可分。北美地区页岩含气量往往与有机质丰度(TOC)呈正相关性,I、II 型干酪根往往具有较高的吸附能力^[29]。中国四川盆地高一过成熟海相页岩实验测试数据也证明,有机质丰度高者,含气量相对丰富,更有条件成为优质页岩储集层。

随着成熟度增加,干酪根、原油热裂解大量生烃,除了生成大量油气、为常规油气藏提供丰富的物质来源之外,有机质本身可产生 5~200 nm 左右纳米级孔隙^[30]。笔者在对四川盆地寒武系和志留系高一过成熟海相页岩储集层的研究中首次发现,这两套地层下部不仅有机质丰度高、含气量高,而且呈分散状、纹层状分布的“有机质颗粒”内部形成大量微米—纳米级

孔隙(见图 5),这些孔隙大者 3~4 μm ,小至几个纳米,一般都大于 100~200 nm,为丰富的页岩气资源提供了充足的储集空间,有力地说明中国南方致密的海相页岩具备优质储集条件,在有机质丰度比较高的层段和区域,勘探开发前景良好。

澳大利亚 Beetaloo 盆地在全球最老地层(约 14×10^8 a)——元古界发现了页岩气,有机碳含量 4%, R_o 值高达 3.49%,预测页岩气资源量 $5600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

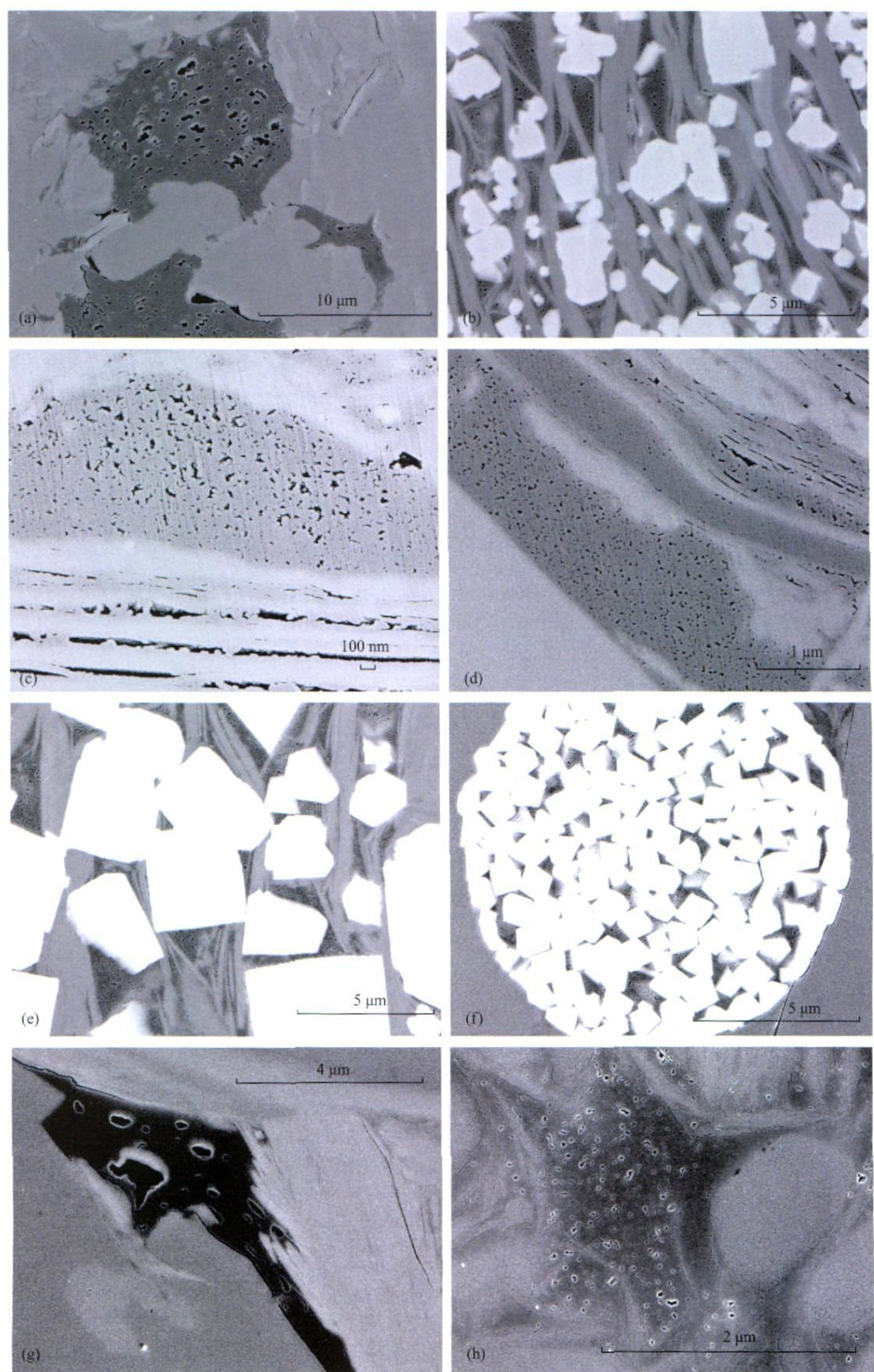
4 页岩气形成机理及储集层特征

4.1 页岩气形成机理

页岩气形成机制是原位“滞留成藏”,连续型分布。甲烷在页岩微孔(孔径小于 2 nm)中顺序填充,在介孔(孔径为 2~50 nm)中多层吸附至毛细管凝聚,在大孔(孔径大于 50 nm)中甲烷以压缩或溶解态赋存。成藏中经过吸附、解吸、扩散等作用。有机质生气或油裂解成气,天然气先在有机质孔内表面饱和吸附;之后解吸扩散至基质孔中,以吸附、游离相原位饱和聚集;过饱和气初次运移至上覆无机质页岩孔中;气再饱和后,二次运移形成气藏(见图 6)^[31,32]。

4.2 岩石矿物组成

脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造方式等的重要因素。页岩中黏土矿物含量越低,石英、长石、方解石等脆性矿物含量越高,岩石脆性越强,在人工压裂外力作用下越易形成天然裂缝和诱导裂缝,形成多树—网状结构缝,有利于页岩气开采。而高黏土矿物含量的页岩塑性强,吸收能量,以形成平面裂缝为主,不利于页岩体积改造。美国产气页岩中石英含量为 28%~52%、碳酸盐含量 4%~16%,总脆性矿物含量为 46%~60%。笔者对中国 3 种不同类型页岩的矿物组成进行测试后发现,无论是海相页岩、海陆过渡相炭质页岩,还是陆相页岩,其脆性矿物含量总体比较高,均达到 40% 以上,如:上扬子区古生界海相页岩石英含量 24.3%~52.0%、长石含量 4.3%~32.3%、方解石含量 8.5%~16.9%,总脆性矿物含量 40%~80%(见表 7、图 7);四川盆地上三叠统须家河组黏土矿物含量一般为 15%~78%,平均为 50% 左右,石英、长石等脆性矿物含量一般为 22%~85%,平均为 50% 左右。鄂尔多斯盆地上古生界含煤层系炭质页岩石英含量 32%~54%,平均 48%,总脆性矿物含量 40%~58%;鄂尔多斯盆地中生界陆相页岩石英含量 27%~47%,平均 40%,总脆性矿物含量 58%~70%。



a—四川盆地长芯 1 井龙马溪组黑色页岩有机质内近圆形微孔隙; b—四川盆地长芯 1 井龙马溪组黑色页岩伊利石、黄铁矿间散布的有机质内纳米级孔隙; c、d—四川盆地威 201 井龙马溪组黑色页岩分散状、纹层状有机质内纳米级孔隙; e、f—威 201 井筇竹寺组砂质页岩黄铁矿晶间散布的有机质内纳米级孔隙; g、h—威 201 井筇竹寺组砂质页岩粒间有机质微米、纳米级孔隙

图 5 四川盆地下古生界页岩有机质微米—纳米级孔隙分布特征

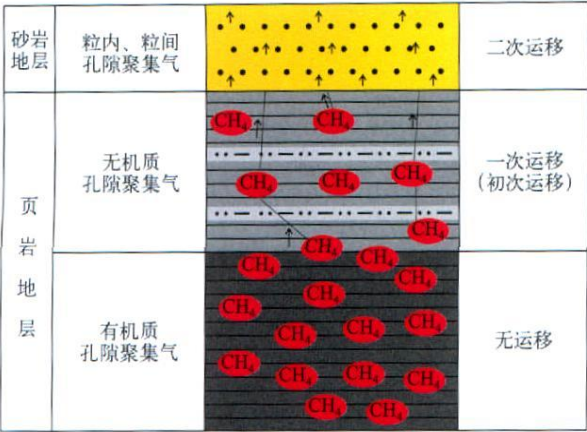


图6 页岩气原位“滞留成藏”机理

岩石矿物组成对页岩气后期开发至关重要,具备商业性开发条件的页岩,一般其脆性矿物含量要高于40%,黏土矿物含量小于30%。

4.3 孔渗特征与微裂缝

4.3.1 孔渗特征

岩石孔隙是储存油气的重要空间和确定游离气含

量的关键参数。据统计,有平均50%左右的页岩气存储在页岩基质孔隙中。页岩储集层为特低孔渗储集层,以发育多类型微米甚至纳米级孔隙为特征,包括颗粒间微孔、黏土片间微孔、颗粒溶孔、溶蚀杂基内孔、粒内溶蚀孔及有机质孔等。孔隙大小一般小于2 μm,有机质孔喉一般100~200 nm,比表面积大,结构复杂,丰富的内表面积可以通过吸附方式储存大量气体^[33]。一般页岩的基质孔隙度为0.5%~6.0%,众数多为2%~4%。四川盆地华蓥山红岩煤矿龙马溪组和威远地区筇竹寺组页岩实测结果:龙马溪组页岩孔隙度为2.43%~15.72%,平均4.83%;筇竹寺组页岩孔隙度为0.34%~8.10%,平均3.02%。鄂尔多斯盆地中生界陆相页岩实测孔隙度0.4%~1.5%,渗透率0.012×10⁻³~0.653×10⁻³ μm²。

中国海相富有机质页岩微米—纳米孔十分发育(见图5),既有粒间孔,也有粒内孔和有机质孔,尤其有机质成熟后形成的纳米级孔喉甚为发育,这些纳米级孔喉是页岩气赋存的主要空间。

表7 四川盆地与北美页岩地质条件对比

页岩	页岩时代	深度/ m	有效厚度/ m	TOC/ %	R _o / %	石英含量/ %	总孔隙度/ %	含气量/ (m ³ ·t ⁻¹)	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)
Barnett	Miss.	1 981~ 2 926	30.00~ 183.00	2.00~ 7.00	1.10~ 2.00	35~ 50	4.00~ 5.00	8.50~ 9.91	7.15
Fayetteville	Miss.	305~ 2 287	6.10~ 76.20	2.00~ 9.80	1.20~ 4.00		2.00~ 8.00	1.70~ 6.23	6.30
Haynesville	J ₃	3 048~ 4 115	616.00~ 91.44	0.50~ 4.00	2.20~ 3.20		8.00~ 9.00	2.83~ 9.34	8.71
Woodford	D ₃	1 829~ 3 353	36.58~ 67.10	1.00~ 14.00	1.10~ 3.00	60~ 80	3.00~ 9.00	5.66~ 8.50	2.29
Antrim	D ₃	183~ 732	21.00~ 37.00	1.00~ 20.00	0.40~ 0.60	20~ 41	9.00	1.13~ 2.83	0.69
Lewis	K ₂	914~ 1 829	61.00~ 91.00	0.45~ 2.50	1.60~ 1.90		3.00~ 55.00	0.40~ 1.30	1.74
Marcellus	D ₂	475~ 2 591	15.20~ 304.00	3.00~ 12.00	1.50~ 3.00	50~ 70	10.00	1.70~ 2.83	1.73
Montney	T	400~ 4 400	30.00	1.20~ 1.60	1.75~ 3.75	50~ 70	5.00~ 9.50	0.44	
筇竹寺组	-C ₁ q	2 600~ 4 600	20.00~ 80.00	2.30~ 4.20	1.50~ 5.70	28~ 56	1.46~ 2.61	1.17~ 6.02	0.90~ 2.30
龙马溪组	S ₁ l	1 600~ 4 200	20.00~ 100.00	1.60~ 3.60	1.88~ 4.36	24~ 44	1.00~ 5.00	1.73~ 3.28	1.00~ 2.50

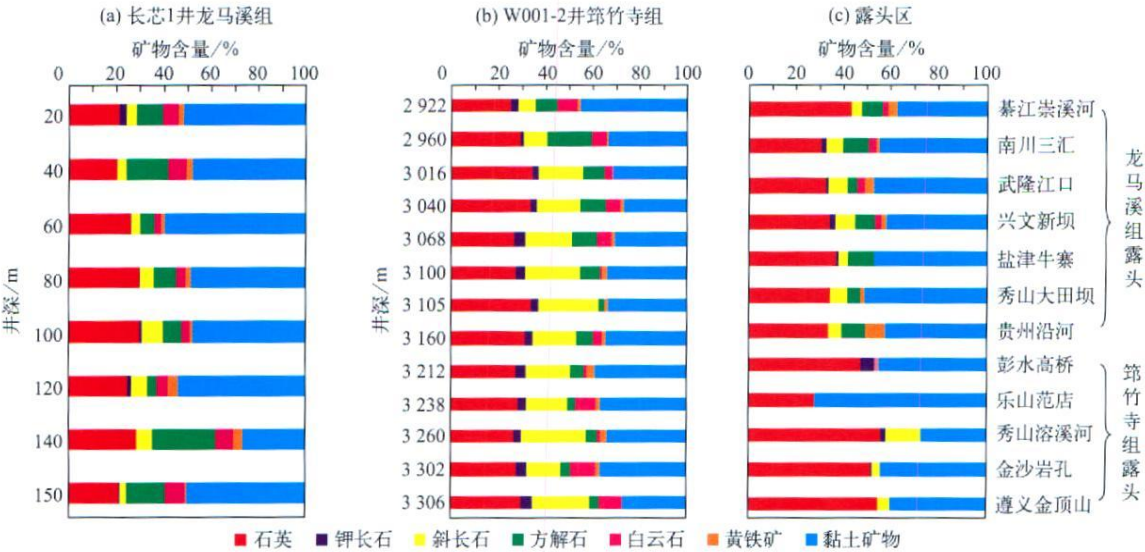


图7 四川盆地下古生界矿物组成

4.3.2 微裂缝

裂缝包括地下原始裂缝和后期人造裂缝, 可为页岩气提供充足的储集空间、运移通道, 更能有效提高页岩气产量^[2]。在不发育裂隙情况下, 页岩渗透能力非常低。

石英含量的高低是影响裂缝发育的重要因素, 富含石英的黑色泥页岩段脆性好, 裂缝的发育程度比富含方解石的泥页岩更强^[34]。Nelson 认为, 除石英外, 长石和白云石也是泥页岩中脆性组分^[35]。一般页岩中具有高含量的黏土矿物, 但暗色富有机质页岩中的黏土矿物含量通常则较低。页岩气勘探必须寻找能够压裂成缝的页岩, 即页岩的黏土矿物含量足够低 ($< 50\%$)、脆性矿物含量丰富, 使其易于成功压裂。

中国海相页岩、海陆交互相炭质页岩和陆相页岩均具有较好的脆性特征, 无论是野外地质剖面还是井下岩心观察, 发现其均发育较多的裂缝系统。如: 上扬子地区寒武系筇竹寺组、志留系龙马溪组黑色页岩性脆、质硬, 节理和裂缝发育, 在三维空间成网络状分布, 岩石薄片显示, 微裂缝细如发丝, 部分被方解石、沥青等次生矿物充填; 鄂尔多斯盆地上古生界山西组岩心切片可看到呈网状分布的微裂缝; 鄂尔多斯盆地中生界长7段黑色页岩页理十分发育, 风化后呈薄片状。

4.4 含气性

页岩气区根据含气性可划分为核心区、外围区。页岩含气量是衡量页岩气核心区是否具经济开采价值和进行资源潜力评估评价的重要指标, 页岩含气量包括游离气、吸附气及溶解气等。哈里伯顿公司认为商业开发远景区的页岩含气量最低为 $2.8 \text{ m}^3/\text{t}$, 目前北美已商业开发的页岩气, 其含气量最低约为 $1.1 \text{ m}^3/\text{t}$, 最高达 $9.91 \text{ m}^3/\text{t}$ 。实测发现四川盆地寒武统寒武系筇竹寺组黑色页岩含气量为 $1.17 \sim 6.02 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均 $2.82 \text{ m}^3/\text{t}$, 龙马溪组黑色页岩含气量为 $1.73 \sim 3.28 \text{ m}^3/\text{t}$, 与北美产气页岩的含气量 (见表 7) 相比, 均达到了商业性页岩气开发下限, 具备商业性开发价值。由于中国页岩气尚未进入开发阶段, 钻探页岩气井少, 因此无法获取更多的页岩含气量数据。但根据老井复查结果, 在已往的钻井中, 钻遇的黑色页岩段发现了大量的气测显示, 有井涌和井喷现象发生, 证明页岩段含气性很好。如: 四川盆地威远地区钻穿筇竹寺组的 107 口井中, 32 口井 52 个井段出现不同级别气测显示, 威 5 井在钻至 $2\,795 \sim 2\,798 \text{ m}$ 筇竹寺组页岩层段时发生井喷, 中途测试获日产 $2.46 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的天然气; 钻穿川南地区下志留统龙马溪组页岩层段的 15 口井中 32 个层段见良好气测显示, 阳 63 井 $3\,505 \sim 3\,518 \text{ m}$ 龙马溪

组页岩段测试后获日产天然气 $3\,500 \text{ m}^3$ 。

5 资源潜力及特殊性

有不少学者或机构对中国页岩气资源潜力做过预测, 总体评价乐观^[36-38]。

页岩气与常规气存在明显差异, 不仅包括地质条件的不确定性, 也有开发中的经济风险性, 尤其是采收率的确定需要依赖井控数据。因此, 客观、准确预测页岩气资源潜力具挑战性。

中国页岩气勘探开发尚处于起步阶段, 可用于页岩气资源潜力预测的资料非常有限。尽管中国不同地区在富有机质页岩发育规模、页岩质量等方面具广泛的相似性, 但中国地质条件复杂, 尤其是构造演化、沉积环境、热演化过程等, 使不同地区页岩气形成、富集存在许多差异。中国古生界海相富有机质页岩分布范围广、连续厚度大、有机质丰度高, 但演化程度高、构造变动多; 中生界陆相富有机质页岩横向变化大, 以厚层泥岩或砂泥互层为主, 有机质丰度中等, 热成熟度低。因此, 基于地质类比对中国页岩气资源潜力进行预测。中国古生界海相富有机质页岩有利领域展布面积 $63 \times 10^4 \sim 90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中生界陆相富有机质页岩有利领域展布面积 $23 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4 \text{ km}^2$, 有效页岩厚度 $20 \sim 300 \text{ m}$, 有机碳含量 $0.50\% \sim 25.71\%$, R_o 值为 $0.8\% \sim 4.5\%$, 预测页岩气资源量 $30 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 这些预测数据都是初步结果, 而中国页岩气的技术与经济可采资源量正在研究之中。

目前, 中国已在四川盆地南部等地区启动了多个页岩气工业化生产试验区建设, 已取得突破; 正在开展的中下扬子、鄂尔多斯、塔里木等地区的前期评价, 将优选出页岩气有利接替地区。开发页岩气对缓解中国天然气资源紧缺现状、改变能源结构、保障国家能源安全具有战略意义, 同时对石油地质理论创新与勘探开发技术革新也有重大科学价值。

中国页岩气与北美页岩气对比, 有 3 个特殊性: ①海相页岩热演化程度较高 (R_o 值为 $2.5\% \sim 5.0\%$)、构造活动较强, 需寻找保存条件有利的地区, 避开露头 and 断裂破坏区; ②陆相页岩热演化程度较低、分布非均质性较强, 有效开发需针对性技术; ③地面多山地、丘陵等复杂地表, 埋藏较深 ($5\,000 \sim 7\,000 \text{ m}$), 还面临水资源与环保等问题, 需采用适用技术降低成本。因此, 中国页岩气勘探开发应特别注意复杂地表、埋藏深度、后期保存等特殊地质条件, 如塔里木盆地海相页岩埋藏深度大, 南方部分地区页岩出露后面面临保存、开发中地表多山地等难题, 因此, 要加强有利核心区优选与经济评价。

6 结论

中国陆上广泛发育海相、海陆过渡相、陆相三大套富有机质黑色泥页岩,均具备形成页岩气的基本地质条件。它们有共性,也有特殊性,勘探开发实践与研究中一定要注意区别对待。盆地内古生界页岩以海相沉积为主,区域稳定分布,厚度大,有机质丰富,演化程度高,已见大量气显示,是页岩气勘探开发的现实领域。

中国石炭-二叠系、三叠-侏罗系煤系中发育高炭泥页岩、煤层,与砂岩伴生,连续分布有页岩气与致密气。中新界陆相泥页岩、泥岩与砂岩、灰岩互层,成熟度低,连续分布的页岩油与致密油是战略新领域。

源岩油气是新领域,包括页岩油、页岩气、煤层气等形成机制是原位“滞留成藏”。页岩气与上下连续型分布的致密砂岩气、煤层气等同步开发,可提高产量和效益。

四川盆地内发育海相、海陆过渡相、陆相多套页岩气层系,是中国页岩气勘探开发最现实的地区。四川盆地古生界页岩地层发育丰富的微米-纳米级孔隙,页岩含气饱和度较高,盆地中南部的威远-长宁等地区是页岩气有利分布区,也是勘探开发突破的重要核心区之一。对中国其他盆地要加强核心区优选与经济评价。

致谢:感谢中国石油勘探开发研究院胡素云、朱如凯、梁狄刚、李晋超、张世本、高晓辉、陶士振、黄陵、黄金亮、袁选俊、侯连华、贾进华、吕维宁、唐惠等在页岩气方面所作的工作;感谢戴金星院士为本文提出了宝贵的修改意见;感谢邱中建、贾承造、赵政璋、王道富、赵文智、马新华等院士与专家的支持;感谢中国石油西南油气田公司廖仕孟、陈更生、王世谦、王兰生、吕宗刚等专家的帮助。

参考文献:

- [1] 邹才能,陶士振,朱如凯,等. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布——以四川盆地上三叠统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, et al. 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 Exploration and Development, 2009, 36(3): 307-319.
- [2] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [3] Kuuskraa V A, Stevens S H. Worldwide gas shales and unconventional gas: A status report [EB/OL]. <http://www.rpsa.org/attachments/articles/239/KuuskraaHandoutPaperExpandedPresentWorldwideGasShalesPresentation.pdf>, 2009-12-07.
- [4] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-16.
Li Jianzhong, Dong Dazhong, Chen Gengsheng, et al. Shale gas resource prospects and its strategic position in China[J]. Natural

Gas Industry, 2009, 29(5): 1-16.

- [5] 王社教,王兰生,黄金亮,等. 上扬子地区志留系页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 45-50.
Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 45-50.
- [6] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 133-141.
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 133-141.
- [7] 张爱云,武大茂,郭丽娜,等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 1-19, 72-81.
Zhang Aiyun, Wu Damao, Guo Lina, et al. The geochemistry and mineralization significance of marine black shale construction [M]. Beijing: Science Press, 1987. 1-19, 72-81.
- [8] 钱凯,周云生. 石油勘探开发百科全书[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008. 307.
Qian Kai, Zhou Yunsheng. Encyclopedia of petroleum exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. 307.
- [9] 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学(卷二)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. Natural gas geology in China (Vol. 2) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [10] 关德师,牛嘉玉,郭丽娜. 中国非常规油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Guan Deshi, Niu Jiayu, Guo Lina. Unconventional oil and gas geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [11] 董大忠,程克明,王世谦,等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 33-39.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.
- [12] 王世谦,陈更生,董大忠,等. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 5-18.
Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 5-18.
- [13] 程克明,王世谦,董大忠,等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 40-44.
Cheng Keming, Wang Shiqian, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 40-44.
- [14] 张金川,聂海宽,徐波,等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [15] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Editorial Committee of “Shale gas geology and exploration and development practice series”. New progress of shale gas exploration and development in North American[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [16] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 115-118.
Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. Development characteristics of rich organic shale and strategic selection of shale gas exploration area in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 115-118.
- [17] 刘树根,曾祥亮,黄文明,等. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),

- 2009, 36(6): 578-591.
- Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming, et al. Basic characteristics of shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 578-591.
- [18] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Qin Jianzhong. Hydrocarbon source rocks in China[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [19] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): F16.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): F16.
- [20] 杨勤生. 滇东下古生界页岩气成藏层位及远景[J]. 云南地质, 2010, 29(1): 1-6.
- Yang Qinshe. The horizon & potentiality of lower Palaeozoic shale gas deposit in east Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2010, 29(1): F6.
- [21] 王广源, 张金川, 李晓光, 等. 辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析[J]. 西安石油大学学报, 2010, 25(2): 1-5.
- Wang Guangyuan, Zhang Jinchuan, Li Xiaoguang, et al. Accumulation conditions of the Paleogene shale gas in the eastern sag of Liaohe Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(2): F5.
- [22] 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 26-29.
- Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang, et al. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 26-29.
- [23] Energyindustryphotos.com. What is the Bakken formation and how big is it? [EB/OL]. http://www.energyindustryphotos.com/how_much_oil_is_in_the_bakken_sh.htm, 2010-6-20.
- [24] 马森, 林琳, 王建新. 草湖北部寒武系一中下奥陶统烃源岩研究[J]. 内蒙古石油化工, 2010, (8): 188-189.
- Ma Sen, Lin Lin, Wang Jianxin. The study of Cambrian to middle and lower Ordovician source rock in northern of Caohu[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, (8): 188-189.
- [25] 腾格尔, 高长林, 胡凯. 上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 359-365.
- Tengger, Gao Changlin, Hu Kai, et al. High quality source rocks in the lower combination in southeast Upper Yangtze area and their hydrocarbon generation potential[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(4): 359-365.
- [26] 马素萍, 漆亚玲, 张晓宝, 等. 西峰油田延长组烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 51-53.
- Ma Suping, Qi Yaling, Zhang Xiaobao, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of the source rocks in Yanchang Formation, Xifeng Oilfield, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 51-53.
- [27] 魏建设, 卢进才, 魏仙样, 等. 河西走廊地区石炭系烃源岩的特征[J]. 地质通报, 2010, 29(2-3): 367-373.
- Wei Jianshe, Lu Jincai, Wei Xianyang, et al. Characteristics of Carboniferous hydrocarbon source rocks in Hexi Corridor region, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2-3): 367-373.
- [28] 戴金星, 倪云燕, 周庆华, 等. 中国天然气地质和地球化学研究对天然气工业的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 513-525.
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Zhou Qinghua, et al. Significances of studies on natural gas geology and geochemistry for natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 513-525.
- [29] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. The suggestion from the exploration and production of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [30] Reed R M, Loucks R G. Imaging nanoscale pores in the Mississippian Barnett Shale of the northern Fort Worth Basin[J]. AAPG Annual Convention Abstracts, 2007, 16: 115.
- [31] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 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, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [32] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 14-18.
- Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 14-18.
- [33] King G R, 华桦, 张伦友. 关于有限水侵的煤层和泥盆系页岩气藏的物衡平衡方法[J]. 天然气勘探与开发, 1994, 16(3): 62-70.
- King G R, Hua Hua, Zhang Lunyou. Material balance method for coal measure and Devonian shale gas pool with limited water influx[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1994, 16(3): 62-70.
- [34] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [35] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985. 320.
- [36] 胡文瑞, 翟光明, 雷群, 等. 非常规油气勘探开发新领域与新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Hu Wenrui, Zhai Guangming, Lei Qun, et al. New fields and technique of unconventional petroleum exploration and development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [37] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109-114.
- Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.
- [38] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.

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、岩性油气藏、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: 2010-06-10 修回日期: 2010-08-27

(编辑 王大锐 单东柏 绘图 李秀贤)