doi:10.3799/dqkx.2016.020

# 含煤盆地转化为含煤一含气(油)盆地的构造地质环境

### 王庭斌,张亚雄,董 立,张玉银

中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083

摘要:与含煤岩系相关大气田的开发是中国天然气储产量快速增长的主体,为了进一步阐明与含煤岩系相关大气田的勘探前景,在概述了已发现大气田分布特征的基础上,用实例总结了含煤一含气(油)盆地形成条件,明确指出虽然不同类型含煤盆地发展演化的构造地质环境不完全相同,但是所有含煤盆地能否转化成为含煤一含气(油)盆地的关键因素是相同的,即:含煤岩系沉积期间和含煤岩系沉积后是否以沉降为主,沉积期间及沉积后所经历的构造地质作用能否有效匹配上述构造地质环境持续时间越长,各种构造地质作用有效匹配程度越好,越利于转化成为含煤一含气(油)盆地,越有利于形成大型气田.中国特定的构造地质环境决定了含煤岩系是中国最重要的气源岩,一些大中型含煤盆地是构造地质环境最优越的盆地,还有较大勘探潜力,仍然可以继续发现更多的大型煤成气田,是未来相当长一段时间内中国天然气产量持续快速增长的主要勘探方向. 关键词:含煤岩系;含煤盆地;含煤一含气(油)盆地;构造地质环境;石油地质.

**中图分类号:** P618.3 **文章编号:** 1000-2383(2016)02-0265-14 **收稿日期:** 2015-08-11

## Geotectonic Setting of Coal-Bearing Basins Being Transformed into Coal- and Gas-(Oil-) Bearing Basins

Wang Tingbin, Zhang Yaxiong, Dong Li, Zhang Yuyin

Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

**Abstract:** The development of large coal-bearing gas fields is a major part of the rapid growth of the nature gas resource and production in China, this paper discusses the forming geotectonic setting affecting the hydrocarbon accumulation during and after the coal-bearing strata source rocks depositon period based on the distribution features of large coal-bearing gas fields, aiming to clarify the exploration potential of the large coal-related gas fields in China. It is found that potential coal-related basins being transformed into the coal- and gas-(oil-) bearing basins share the following key factors with different tectonic evolutions: there should mainly be stable subsidence both during and after the deposition of coal-bearing strata, and the various geotectonisms should effectively be matching to each other, and ensuring the total gas accumulation should be much larger than the total gas dissipation. The longer the above-mentioned geotectonic process is and the better matched the geotectonic factors are, the more favorable to large coal- and gas-(oil-) bearing basin formation. The coal-related basins are confirmed to be the most promising ones for future exploration due to the fact that they are major gas-source rocks and they remain the major exploration targets for large gas fields ensuring sharp increase of the production of natural gas industry.

Key words: coal-bearing strata; coal-bearing basin; coal- and gas-(oil-) bearing basins; geotectonic setting; petroleum geology.

0 引言

众所周知,自 20 世纪 80 年代以来中国天然气 产量进入了快速增长阶段,主要因为一批与含煤岩 系相关的大气田的发现(戴金星等,2010).至 2011 年底,我国共发现了 48 个储量大于 300×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 的 大气田,总储量为 66 675×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占全国气层气储 量的 87.93%(表 1),其中有 5 个为特大型(天然气 探明储量大于 3 000×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>),43 个为大型(天然气 探明储量为300~3000×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>).5个特大型气田

作者简介:王庭斌(1936-),男,教授级高级工程师,从事石油与天然气地质研究.E-mail: tingbin\_bj@sina.com

气田规模	主要气源	气田名称
	煤岩系	苏里格气田和大牛地气田
特大型	含煤岩系与海相层混源	靖边气田和普光气田
	源自海相层	塔中1气田
	源自含煤岩系	榆林气田、子洲气田、乌审旗气田、神木气田、米脂气田、新场 气田、安岳气田、广安气田、合川气田、八角场气田、洛带气田、 邛西气田;克拉2气田、迪那2气田、大北1气田、大北气田、 英近7气田、克拉美丽气田、玛河气田、松辽气田、长岭1号气 田、松南气田、龙深气田、春晓气田以及崖13-1气田
大型	含煤岩系与海相层混源	元坝气田、大天池气田、罗家寨气田、磨溪气田、铁山坡气田、 渡口河气田以及卧龙河气田
	含煤岩系与湖相层混源	东方 1-1 气田、乐东 22-1 气田、荔湾 3-1 气田、番禹 30-1 气 田、柯克亚气田、涩北 1 号气田、涩北 2 号气田、台南气田以及 徐深气田(可能含有无机气)
-	源自海相层	威远气田、和田河气田以及塔河气田

表1 中国大型、特大型气田

Table 1 Large and giant gas field in China

中有4个是以煤成气为主(3个以含煤岩系为主要 气源,1个是含煤岩系为主与海相岩系共源),其储 量为全国天然气储量的33.43%.43个大气田中(总 储量为61753×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,占全国气层气储量的81. 44%,占全国与煤成气相关储量的90.94%,占为全 国大气田储量的92.61%)有40个以煤成气为主(24 个以含煤岩系为主要气源,6个是含煤岩系为主与 湖相、海相岩系共源),其储量为全国天然气储量的 48%,表明了与含煤岩系相关的大气田是中国天然 气产量快速增长的主体.

勘探成果表明,与含煤岩系相关的大气田的形成机理都与含煤一含气(油)盆地的构造地质环境及 发展演化密切相关(冯福凯和吴乃苓,1988).为此, 本文以构造地质环境为主线,通过对这些大气田分 布特征的概述,论述中国含煤盆地转化成为含煤一 含气(油)盆地的构造地质环境特点及勘探前景,进 一步促进与含煤岩系相关大气田的勘探.

### 1 与含煤岩系相关大气田分布特征概述

### 1.1 有7套含煤岩系是主要气源岩

中国含煤岩系分布很广,在含煤岩系主要发育 阶段的主要沉积区都是重要的煤成气源岩(C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>、 P<sub>3</sub>、T<sub>3</sub>、J<sub>1-2</sub>、J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>、E-N和N-Q),形成了44个与含 煤岩系相关的大型、特大型气田(王庭斌,2004a).

据国土资源部 2011 年《全国各油气田油气矿产 探明储量表》资料统计(表 2):以 C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub> 含煤岩系为 主要源岩的大型、特大型气田最多(9 个),在全国煤 成气储量中比例最高(43.42%),主要分布在鄂尔多 斯盆地,其次为准噶尔盆地北部;以 P<sub>3</sub> 含煤岩系为 主,与海相岩系混源的大型、特大型气田次之(8 个),主要分布在四川盆地;以 J<sub>1-2</sub>含煤岩系为源岩的 大型气田主要分布在塔里木盆地库车坳陷,也广泛 分布在西部其他盆地;以 T<sub>3</sub> 含煤岩系为源岩的大 型气田分布在四川盆地;E-N 含煤岩系以及与湖相 岩系混源的大型气田主要分布在海域;以 J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub> 含 煤岩系(含有湖相岩系)为源岩的大型气田,主要分 布在松辽盆地;N-Q含煤岩系与湖相岩系混源的大 型生物气田仅分布在柴达木盆地三湖区.不同时代 煤成气源岩分布在不同的含煤一含气(油)盆地,为 与含煤岩系相关大气田广泛分布奠定了物质基础.

### 1.2 多数盆地含有海相、湖相岩系气源

沉积环境研究表明,四川盆地晚二叠世(P<sub>3</sub>)、海 域古近纪及新近纪(E-N)、柴达木盆地三湖区新近 纪一第四纪(N-Q)含煤岩系与海相或湖相地层时空 上互有相变;鄂尔多斯盆地晚石炭世一早二叠世  $(C_2-P_1)$ 、塔里木盆地早、中侏罗世 $(J_{1-2})$ 以及四川盆 地晚三叠世(T<sub>3</sub>)含煤岩系下部也含有少量海相或 湖相地层(杨起和韩德馨,1979;王仁农和李桂春, 1998).据地球化学资料,珠江口、莺歌海和柴达木盆 地的大气田是以含煤岩系为主与湖相泥质岩共源; 四川盆地普光、元坝、龙岗等大气田上二叠统至中三 叠统气藏具有以煤成气为主与海相油型气混源的特 征;鄂尔多斯盆地靖边特大型气田下奥陶统马家沟 组气藏部分含有海相油型气;松辽盆地北部徐深大 气田不仅含有湖相油型气,还含有无机成因的天然 气(沈平等,1991;戴金星等,2001),表明在多数含 煤一含气(油)盆地中含有海相、湖相层系气源,少数

### 表 2 5 大含煤成气区与 7 套含煤岩系气源相关储量及其特大型、大型气田储量比例

Table 2 Gas reserves related to five major coal-related gas areas and seven sets of coal-bearing sequence and the percentage of large and giant gas field in China

今相当玄乞酒	今相武与反	十一个世分山	与煤成气相关气田		特大型气田			大型气田		
召保石奈气你 召保成气区		土女百床盈地	储量(10 <sup>8</sup> m	³)比例(%)	气田(个	)储量(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	)比例(%)	气田(个)	储量(10 <sup>8</sup> r	n³)比例(%)
$C_2$ - $P_2$	华北区、西北区	鄂尔多斯、准噶尔	28 975	43.42	3	21 592	74.52	6	6 315	21.86
$P_3$	南方区	四川	9 890	14.82	1	3 762	38.04	7	5 206	52.64
$T_3$	南方区	四川	9 000	12.19				7	8 778	97.53
$J_{1-2}$	西北区	塔里木、准噶尔	8 597	12.88				7	6 653	77.39
$J_3$ - $K_1$	东北区	松辽	3 501	5.25				4	3 279	93.66
E-N	海域区	莺琼、东海、珠江口	4 578	6.86				6	3 291	71.89
N-Q	西北区	柴达木三湖区	3 056	4.58				3	2 877	94.14
小计	全国与煤成气	相关大气田储量	61 753	100.00	4	25 354	41.06	40	36 399	58.94

注:数据源自国土资源部(2011,全国各油气田油气矿产探明储量表,北京),储量为约数.

盆地还有无机成因气源的地质现象不可忽视.

#### 1.3 以含煤岩系内储盖组合为主,致密储层比例较大

与含煤岩系相关气田有含煤岩系内与含煤岩系 外两类储盖组合.虽然含煤岩系外组合储集条件总 体优于含煤岩系内组合,含煤岩系内组合以致密储 层为主,但是,含煤岩系内组合具有近源优势,加之 煤成气组成相对简单,对储集要求相对较低,在鄂尔 多斯、四川、松辽盆地以及准噶尔盆地形成了多个大 型、特大型气田,也发育在东海陆架盆地平湖组含煤 岩系及其他盆地深部含煤岩系,是目前中国近 2/3 大型、特大型煤成气田的主要生储盖组合.

### 1.4 气藏圈闭类型多与岩性变化有关

与含煤岩系相关气田的圈闭类型有岩性、构造、 构造一岩性、地层一岩性及构造一火山机构等多种 类型,其中只有构造类气田受岩性变化影响较小(表 3).在构造极不发育的鄂尔多斯盆地,大岩性体是所 有气田的主要圈闭类型.四川盆地虽有众多构造,但 在川中区构造发育程度较差,大煤成气田也以岩性 圈闭为主;川西区构造一岩性类圈闭气田,但产能主 要受制于岩性变化;川东北区普光等大气田均因为 处于台缘斜坡礁滩相带成为特大型、大型气田,属构 造一岩性类圈闭.鄂尔多斯盆地靖边特大型气田下 奥陶统马家沟组气藏为地层一岩性圈闭.松辽盆地 深部下白垩统及准噶尔盆地东北部石炭系是以火山 机构为主要圈闭的气田,产能变化也主要受制于火 山岩岩性和储集条件的变化.

以岩性圈闭、地层一岩性圈闭和构造一火山机构 圈闭为主的大气田,储量虽较大,但储集条件普遍较 差,以致密储层为主、非均质性强、储量丰度普遍偏 低,只有构造类和构造一岩性类气田的储集条件相对 较好.因此,努力找寻甜点,提高勘探经济效益是在与 含煤岩系相关的气田勘探开发中长期的攻关目标.

### 1.5 富煤成烃凹陷的生烃中心区及周缘是主要聚 集区

鄂尔多斯盆地大煤成气田群集中分布的伊陕斜 坡,是煤成气的主生烃区(戴金星,2009),四川盆地 上二叠统龙潭煤系最发育的主生气区,分布了由上 二叠统龙潭煤系与海相岩系共源的众多气田;川中 地区是上三叠统煤成气田的主要聚集区,也是上三 叠统含煤岩系的主生气区之一;川西区大、中型气田 主要分布的中坝、新场一丰谷、蒲江一彭山燕山期古 隆起带,位于或紧邻上三叠统含煤岩系生气中心(杨 克明,2006).东海陆架盆地西湖凹陷煤成气主要聚 集的西部斜坡及中央背斜构造紧邻生烃中心(戴金 星等,1997).库车坳陷煤成气主要聚集的北部冲断 带也是主生烃区,都显示了煤成气以近源运移、充注 为主,富煤成气凹陷的主生烃区是煤成气资源分布 主体的突出特点.

#### 1.6 喜马拉雅期是主成藏期

与含煤岩系相关大气田有4种成藏模式(图 1),其中的超晚期(上新世一第四纪)生聚型、晚生晚 聚(古近纪一中新世)型、早(中生代)生聚晚(新生 代)定型这3种成藏模式的气田都明显受制于喜马 拉雅期构造运动活动强度的影响(王庭斌,2003).鄂 尔多斯盆地早生早聚(中生代晚期)型气田,也因为 喜马拉雅期抬升而具负压特征.

由于喜马拉雅期是中国多数与含煤岩系相关大气 田的主成藏期,喜马拉雅期构造运动影响了不同时期 形成气田的储聚保存,因此,其对中国含煤一含气(油) 盆地的形成和大气田的分布格局都有明显的控制作用. 1.7 不同类型含煤一含气(油)盆地气田分布及成 藏特点

(1)克拉通内坳陷型盆地主要发育在鄂尔多斯 盆地和四川盆地晚古生代,气田成藏期长和演化历

#### 表 3 与含煤岩系相关的不同圈闭类型特大型、大型气田储量及储量丰度

Table 3 Statistics of reserves and reserve abundance of large and giant gas field of different coal related gas trap types

围口米司									
圈闪天型 -	特大型			气田名称	大型				气田名称
	累计 储量	比例	最大~最小 储量丰度		累计 储量	比例	最大~最小 储量丰度	丰度平 均值	
构造圈闭					10 253	29.56	59.05~ 2.20	13.04(以 特高一高 为主)	克拉 2、迪那 2、大北、 大北 1、英迈 7、柯克 亚、邛西、八角场、卧 龙河、春 晓、荔湾 3- 1、番禹 30-1、崖 13- 1、乐东 22-1、东方 1- 1 以及玛河
构造-岩性 圈闭	3 762	14.84	29.72(特高)	普光	8 831	25.46	28.80~ 2.00	12.19(以 特高-高 为主)	新场、广安、台南洛 带、涩北1、涩北2、铁 山坡、罗家寨、渡口河 以及磨溪
构造一火山 机构圈闭					4 575	13.19	28.80~ 7.79	14.57(以 特高一高 为主)	徐深、克拉美丽、长岭 1号、松南以及龙深
地层岩性圈闭	4 699	18.53	0.78(特低)	靖边					
岩性圈闭	16 893	66.63	1.38~2.41 (低)	苏里格、 大牛地	11 030	31.79	7.78~ 0.75	2.31(以 低为主)	神木、米脂、榆林、子 洲、乌审旗、合川、安 岳、元坝以及洛带

注:累计储量的单位是108 m3;比例单位是%;丰度单位是 108 m3/km2.



图 1 中国主要含煤盆地煤成气田(藏)成藏期示意

Fig.1 Hydrocarbon accumulation periods of major coal-bearing basins in China

Table 4 Basin types and reserves of large and giant caol-related gas fields

盆地(坳陷)		克拉通内坳陷盆地	类前陆盆地	陆内坳陷盆地	陆内断陷盆地	陆缘断陷盆地
鄂尔多斯		26 854(8)(1.21)				
	川西		2 691(3)(6.23)			
四川	川中	2 200(2)(3.07)		6 086(4)(3.20)		
	川东北	5 291(4)(16.15)				
14th pp _1_	库车		5 993(5)(22.86)			
冶里木	塔西南		348(1)(17.98)			
准噶尔			1 366(2)(15.55)			
柴达木			2 878(3)(22.07)			
松辽					3 279(4)(17.45)	
东海	西湖					330(1)(17.12)
珠江口	白云					775(2)(10.94)
莺琼	琼东南					978(1)(17.94)
	莺歌海					1 208(2)(2.87)
小计		34 345(14)(42.10)	10 398(11)(12.75)	8 964(7)(10.99)	3 279(4)(4.02)	3 291(6)(4.10)

注:表中 34 345(14)(56.03)含意为:探明储量(10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)、大型及特大型气田数(个)和全国气层气储量中的百分比(%);川东的卧龙河、大池 干井气田未统计在内;数据引自王庭斌(2004a).

史复杂.在鄂尔多斯盆地,气田成藏于中生代,保存 持续时间长达亿年,致使储量虽大,但储量丰度低. 四川盆地以碳酸盐岩礁、滩为主要储层,储集条件受 制于台缘礁滩发育程度及深埋藏硫酸盐岩热成岩作 用,气田具有早期(中生代)开始聚集,但最终成藏的 时间为新生代(即俗称"早聚晚定型")的特点(表4).

(2)类前陆型盆地发育于中、西部的中、新生代, 成藏条件受相邻造山带重新活动强度制约.库车坳 陷的大气田因为相邻天山在喜马拉雅晚期的强烈抬 升,具有超晚期(上新世一更新世)快速成藏特点;川 西坳陷的气田因为相邻龙门山在印支期、燕山期和 喜马拉雅期的多期活动,具早期聚集(中生代)、晚期 成藏(新生代)和多期幕式快速充注特点(表 4).

(3)陆缘断陷型盆地发育于海域新生代,受制于 滨太平洋构造域喜马拉雅期构造运动,气田具有三 快一高的特点,即高地温场、快速沉降和晚期(古近 纪一中新世)、超晚期(上新世一更新世)快速生烃、 快速成藏(表 4).

(4)陆内裂(断)陷型盆地,气田主要发育于松辽 盆地深部,受制于深部断裂的多期活动,气田主要由 火山机构及致密储层构成,普遍含无机成因二氧化碳 气,在盆地北部还混有少量无机成因甲烷气(表 4).

(5)陆内坳陷型盆地主要发育在四川盆地川中 区和柴达木盆地三湖区,川中区为高演化煤成气田, 具早聚(中生代)晚(新生代)定型特征;三湖区为煤 成生物气田,形成于第四纪,具快速成藏特征(表4).

### 1.8 形成了5个具有不同特点的含煤成气区

(1)西北区.类前陆型含煤一含气(油)盆地主要

发育区,是J<sub>1-2</sub>含煤岩系主要分布区,以及受制于相 邻造山带喜马拉雅期的重新活动,气田具有中、低地 温场和晚期、超晚期成藏特点.

(2)华北区.以鄂尔多斯盆地为主,C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>含煤 岩系是最主要的气源岩,形成了原生型(鄂尔多斯盆 地)与二次生烃型(渤海湾盆地及河淮盆地)两种不 同成藏历程的煤成气藏.

(3)南方区.以四川盆地为主,晚三叠世及晚二 叠世含煤岩系是重要气源,气藏普遍具有早聚晚藏 特点,气藏最终定型于燕山晚期至喜马拉雅早期的 四川运动.

(4)东北区.以松辽盆地深部为主,早白垩世含煤岩 系为主要气源,主要储集层为含煤岩系内的火山岩系 及致密砂岩,主要发育于盆地深部的众多小型断陷.

(5)海域区.广泛发育的新生代含煤岩系与海域、湖相沉积关系密切,受滨太平洋构造域和新特提 斯构造域构造动力机制的影响,普遍具有晚期、超晚 期快速成藏和勘探煤成气(油)前景.

以上与含煤岩系相关大气田分布特征概述,说 明了含煤岩系沉积环境以及沉积后构造地质环境是 含煤盆地能否转化成为含煤一含气(油)盆地和形成 大气田的关键(王庭斌,2003;李思田,2004).

### 2 煤成气源岩沉积环境

### 2.1 海西期以来中国大陆广泛发育含煤岩系

中国大陆构造格局在加里东末期发生了重大转变,进入海西期,海相沉积范围明显减小,陆相沉积

面积不断扩大;印支期后,海水基本退出中国大陆, 陆相沉积成为主体,加之气候湿润,为在中国大陆自 海西期以来长期、广泛发育含煤岩系提供了有利的 构造地质环境与自然地理环境(陈钟惠,1988).从石 炭纪至新生代发育了4大聚煤期和10个聚煤阶段, 形成了400余个含煤盆地,含煤岩系分布面积(含海 域)近400×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>(王仁农和李桂春,1998),在所 有主要沉积盆地中都发育有含煤岩系,特定的地质 构造环境,使中国成为世界上含煤岩系最发育和煤 炭资源最丰富的国家之一,也为形成丰富的煤成气 资源提供了有利的地质构造环境.

### 2.2 煤成气源岩沉积的构造地质环境

丰富的煤成气源岩是含煤盆地转化成为含煤一 含气(油)盆地的物质基础.虽然含煤岩系因为近陆 源,有大量陆源有机质输入,浅水湖沼或滨浅海沼泽 环境有利于植物生长、堆积和埋藏,有机质比较丰 富.但是,含煤岩系并不等同于是煤成气源岩,因为 含煤岩系有机质类型以腐殖型(Ⅲ型干酪根)为主, 生烃潜力差于海相、湖相烃源岩.因此,只有沉积厚 度较大、有机质丰度相对较高、有一定分布范围、沉 积后在其他有利地质条件的配合下能提供充裕气源 的含煤岩系才能称之为煤成气源岩.

据其厚度、沉积环境和构造地质特征,中国主要 煤成气源岩沉积可粗略分为两类,其一为广覆式,主 要发育于克拉通内坳陷型和陆内坳陷型盆地,煤成 气源岩(含煤岩系)厚度不大,但广布全盆,变化较 小,并夹有多层稳定分布的砂岩,有利于气源大面积 近源充注,成为优质煤成气源岩.其二为深凹式,主 要发育在类前陆型和裂、断陷型盆地,虽然盆地面积 较小,但含煤岩系厚度大,多超千米,在海域的陆缘 断陷型盆地中有海相、湖相烃源混入,在陆内裂断陷 型盆地中也夹有湖相沉积,有机质富集程度较高,有 利于形成储量丰度较大的气田.

虽然两类煤成气源岩特征不同,但其共同点是: 主要发育于盆地大构造发展旋回初始阶段,构造地质 环境比较稳定,沉积环境优越,并时有湖水、海水泛 滥、侵入.这样的构造地质环境持续的时间越长,越能 形成厚度较大、有机质比较丰富的优质煤成气源岩.

鄂尔多斯盆地晚石炭世一早二叠世含煤岩系是 广覆式富煤成气凹陷,发育于加里东期后构造旋回的 初始阶段,含煤岩系厚度虽仅百余米,但以滨海沼泽 和海陆交互相为主,优越的沉积环境稳定分布于全 盆,有机质丰富,总有机碳含量多在2.1%~2.6%;镜 质体反射率 R。为1.08%~2.50%,演化程度适中;全 盆 生 气 强 度 为  $18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2 \sim 40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,其中大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积达  $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,大于  $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积达  $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ (汪泽成等,2006),为形成多个大型、特大型 气田提供了丰富气源(图 2).

中国南方晚三叠世是印支运动后陆相沉积旋回 发育的初始阶段,此时气候温湿,盆底地形平缓西 倾,含煤岩系沉积以四川盆地区为主体,在川西坳陷 含煤岩系最厚处超过4000m,生气强度为60× 10<sup>8</sup>~100×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>(杨克明,2006),形成深凹 式富煤成气凹陷,为在四川盆地形成多个大煤成气 田提供了丰富气源.



Gus-Permian in Ordos ba 据戴金星(2009) 库车坳陷从晚三叠世至中侏罗世是南天山前缘 类前陆盆地陆相沉积体系发育的初始阶段,此时气 候温湿,盆底地形自塔里木盆地本部向天山南麓缓 缓下倾,全区广范发育河流一滨浅湖沼相沉积,含煤 岩系厚超千米,以坳陷北侧为中心的深凹式富煤成 凹陷生气强度为 60×10<sup>8</sup>~120×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>(王飞 宇等,2009),为形成克拉 2、迪那 2 等众多大气田的 煤成气聚集带提供了丰富气源.

# 3 含煤岩系内优质储盖组合发育的构 造地质环境

含煤岩系沉积因为近陆源,有多条河流注入,在 活动性较强的断陷型盆地,还有岩浆活动,在含煤岩 系内夹有砂岩、火山岩等多种储集岩类,形成"三明 治式"生储盖组合.据其形成条件,"三明治"式生储 盖组合可分为沉积型与火山机构型.

沉积型由泥质岩与砂岩、碳酸盐岩构成,如鄂尔 多斯盆地上石炭统一下二叠统、四川盆地上三叠统 气田,都是以含煤岩系内所夹砂岩为主要储集层,虽 然储集条件较差,以致密储层为主,但生储盖组合稳 定分布于全盆,具有大面积近源直接充注优势,形成 多个大煤成气田.砂岩的分布、发育程度及储集条件 受制于沉积环境和后期的成岩作用.

火山机构型由泥质岩与不同类型火山岩组成, 储集体为多种岩石类型的火山岩,是松辽盆地深部、 准噶尔盆地东北缘与含煤岩系相关大气田的主要生 储盖组合.虽也具有近源直接充注优势,但火山岩分 布局限,火山岩发育程度和储集条件主要受制于沟 通深部主干断裂的活动时间和强度、火山岩石的易 溶性和溶蚀条件,非均质性更强.

虽然沉积型在储集、充注条件上优于火山机构 型,但其共性是储集条件总体偏差,以致密储层为 主,非均质性也较强,影响气水分异作用,气水关系 比较复杂.川中区广安气田须家河组四段气藏可划 分为28个相对独立的储集单元,有不同压力系统 (郝国丽等,2010;赵文智等,2010).松辽盆地火山机 构型气田中,因为还有二氧化碳气、无机气的混入, 非均质性和气水关系更复杂.

### 4 沉积后的构造地质环境

含煤岩系沉积环境决定了有机质以生气为主,

煤成烃组成相对简单,对储集条件要求相对较低,可 以在致密、超致密储集层中形成大型、特大型煤成气 田;但更易运移,扩散能力更强,对保存条件要求更 高,对沉积后地质构造环境的要求更高,使沉积后的 构造地质环境对气田的形成、分布及储聚、保存的影 响更显著(李思田,2004).

含煤岩系沉积后的构造地质作用既可促进成 藏,也可以起破坏作用,通常两种相反的地质作用并 存,以何种作用为主和以其作用强度,取决于盆地的 发展演化历史、构造复杂程度及各种地质构造作用 间的相互关系.

#### 4.1 促进作用

促进成藏作用主要表现为:促进含煤岩系有机 质演化,增强煤成烃运聚动力和煤成气(油)藏封盖 保存能力.

**4.1.1 促进含煤岩系有机质演化** 对中国主要含 煤一含气(油)盆地二个门限值(*R*。=0.5%、*R*。= 1.3%)和3个演化阶段对应的地温及埋藏深度的统 计(王庭斌,1994;图3).

(1)不同类型盆地地温场特征不同.克拉通型盆 地基底固结程度较高,地温梯度偏低,以中、低温型 为主;滨太平洋构造域裂、断陷型盆地,地温梯度偏 高,以高温型及特高温型为主;特提斯构造域类前陆 型盆地,地温梯度最低,以低温型为主.

(2)地温场与时间是有机质演化程度的函数,不 同类型盆地中促进含煤岩系有机质演化的特点不 同.①时代偏老、沉降速率小、缓慢埋藏和有机质演 化历史长的克拉通型含煤岩系,经历的地温可以相 对偏低;时代较新者,类前陆型和陆缘断陷型沉降速 率较快和快速埋藏的含煤岩系,有机质达到同一演 化阶段需要的温度相对要高.②地温场低的盆地较 地温高的盆地因为有机质演化速度慢,达到相同成 熟阶段所需要的时间长,勘探深度明显拓宽.③在陆 缘断陷型盆地,因为地温高的地区及快速埋藏、地温 增长快的地区,有机质演化速度快,生成煤成油的时 限短,生成煤成气的范围增大.

**4.1.2 促进煤成烃的运储聚及煤成气(油)藏封盖保存** (1)断裂是构造应力作用的产物,在具有保存条件的情况下,可以是煤成气的高效输导通道.(2) 不整合面之下的岩溶地貌以及深埋藏岩溶作用可以较大地改善深部碳酸盐岩储层的储集条件,成为一些气田重要的储集层.(3)因为异常压力封存箱是一个生烃灶,对储集层的发育也有控制作用,也可以起封盖作用,异常压力封存箱是煤成气(油)生成、运



Fig.3 The difference of three major basin types and two threshold depth in China

移、聚集的重要单元,与含煤岩系有关的异常高压封 存箱及巨厚膏盐封盖层有利于形成大型气田.(4)喜 马拉雅构造运动是含煤岩系相关大气田晚期、超晚 期成藏的动力,也对一些气田有改造作用,影响气田 分布格局(王庭斌,2004b),在新生代强烈沉陷区也 是煤成生物气和古生代煤系二次生气的有利区.

### 4.2 破坏作用

含煤岩系生成的煤成气以甲烷为主,甲烷因为 分子量小,扩散系数为 2.12×10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/s,是乙烷的 近两倍,丙烷的近 4 倍(王涛,1997),煤成气易于散 失而难以保存的特点突出,在煤成气(油)成藏期及 成藏后形成的裂缝、断裂、渗漏、扩散、水溶流失等构 造地质作用都可能是主要的破坏方式.

崖 13-1 构造在聚气过程中累计扩散损失量高 达 2 192.5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,即每 Ma 的散失量就相当于一 个大中型气田的储量(郝石生,2002),是现今气田储 量的 2 倍以上.松辽盆地昌德气田从泉头组沉积末 期形成至今,仅扩散损失的气量也高达 205.47× 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,是现今气田储量的 1.8 倍以上(戴金星, 2007).鄂尔多斯盆地刘家庄气田,曾经是一个储量 近 500×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 的大气田,成藏后的散失作用使一 个大气田基本散失殆尽,其散失量为现今气田储量 的 266 倍,现今气田储量仅 1.9×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>(冯福凯等, 1995). 4.3 成藏期间构造地质演化特征影响成藏条件及 评价

**4.3.1 克拉通内坳陷型** 克拉通内坳陷型是中国最 古老的、分布面积最大的含煤一含气(油)盆地,含煤 沉积期间构造地质环境稳定,也比较相近,但是沉积 后(特别是成藏期间)因为构造地质环境及发展演化 历史的差异,成藏条件和勘探前景绝然不同(表 5).

(1)大华北区石炭纪一二叠纪含煤岩系因为后 期构造发展演化历史和构造地质环境的差异,西部、 东部、南部煤成气前景绝然不同.西部,鄂尔多斯盆 地长期保持了稳定的构造地质环境,以促进成藏作 用为主,形成多个大型、特大型煤成气田,成为重要 的含煤一含气盆地;东部,渤海湾盆地促进作用与破 坏作用并存,新生代强烈沉降的东濮、冀中、济阳等 均(凹)陷,以"二次生气"作用为主形成一批中、小型 煤成气田,隆起区无勘探前景;南部,南华北区后期 以抬升为主,保存条件差,目前仅在倪丘集断陷发现 残留的小型煤成油藏.

(2)中国南方晚二叠世龙潭组含煤岩系是重要 气源岩,因为印支期以来不同的演化历史,四川盆地 成为重要的含煤一含气(油)盆地,其他地区,部分演 变成为复杂的构造推覆体(如苏南、皖南),部分强烈 抬升(如贵州、云南、湘鄂西),形成的油气藏多被破 坏,在这些地区广布的沥青脉、古油藏和油气苗,就

表 5	成藏期盆地演化特征与特大型、大型煤成气田关系	

Table 5 The relationship between evolution features of various coal-bearing basins and large and giant coal-related gas fields

类型		特大型+大型			特大型			大型	
原型盆地-转化后 盆地类型	气田数 (个)	累计储量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	比例 (%)	气田数 (个)	累计储量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	比例 (%)	气田数 (个)	累计储量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	比例 (%)
克拉通内坳陷	8	26 854	43.49	3	21 592	85.16	5	5 262	14.45
克拉通内坳陷一高陡构造带	2	1 477	2.39				2	1 477	4.06
克拉通内坳陷-陆内坳陷	1	702	1.14				1	702	1.93
克拉通坳陷-类前陆	5	6 789	10.99	1	3 762	14.84	4	3 027	8.32
类前陆	11	10 398	16.84				11	10 398	28.57
陆内断陷一坳陷	4	3 279	5.31				4	3 279	9.01
陆内坳陷	7	8 963	14.51				7	8 963	24.62
陆缘断陷一坳陷	6	3 291	5.33				6	3 291	9.04
小计	44	61 753	100.00	4	25 354	100.00	40	36 399	100.00

是例证.只在局部有保存条件的地区发现低产轻质 原油(如黄桥地区华泰3井),残存的煤成油藏(苏南 句容);在部分新生代凹陷区,有"二次生烃"潜力及 保存条件,形成中、小型煤成气田,如朱家墩小型煤 成气田.

(3)四川盆地各构造单元沉积后因构造地质演 化历史的不同,成藏条件也受到很大影响.①川东北 区,晚三叠世以后从克拉通内坳陷型转变成为大巴 山前缘的类前陆型盆地,中、晚侏罗世沉积巨厚(上 沙溪庙组厚度超过3000m,遂宁组、蓬莱镇组厚达 2000 m),加速了龙潭煤系与海相地层有机质的演 化历程,促进了煤系之上的长兴组、飞仙关组礁滩相 碳酸盐岩储层的深埋岩溶作用(朱光有等,2005),加 之上覆有须家河组超压层及下三叠统嘉陵江组一中 三叠统雷口坡组巨厚膏盐层的双重封盖,普光气田 飞仙关组和长兴组成为中、高孔渗储层,形成高储量 丰度(29.72×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)的特大型气田(图 4)(马 永生等,2010).②川中区,晚三叠世以后为陆内坳陷 发育阶段,基本延续了含煤岩系沉积时期稳定的构 造格局,上覆沉积层厚度相对较小(上三叠统至侏罗 系厚度仅为川东北地区的 2/3),燕山晚期一喜马拉 雅期构造运动强度较弱,形成的构造面积虽大,但幅 度低,长兴组及飞仙关组礁滩相碳酸盐岩深埋溶蚀 作用强度较弱,龙岗、磨溪气田储集条件和储量丰度 明显差于普光气田.陆相含煤成气系统也因构造幅 度小,成岩作用强,形成的大型气田储量丰度较低, 气水的分异作用差,增加了勘探和开发难度.③川东 区,燕山晚期一喜马拉雅期的四川运动强度较大,形 成以隔挡式箱状褶皱为主的高陡构造带,只在侧翼 及向斜中的低背斜、潜伏背斜以及高陡构造上的部 分高点,保存了由龙潭煤系与其他海相地层共源的



图 4 四川盆地普光气田区气藏储盖层组合示意面 Fig.4 Sketch showing reservoir and cap rocks assemblages of Puguang gas field in Sichuan basin 据马永生等(2010)

气田(例如卧龙河气田嘉陵江组五段气藏).在高陡构造上,三叠系及其以上地层多已暴露,陆相含煤成 气系统被严重破坏,无勘探前景.

**4.3.2 类前陆型** 类前陆型含煤一含气(油)盆地 发现的大型煤成气田数量及储量,仅次于克拉通内 均陷型,是重要的煤成气聚集类型.因为发展演化历 史的差异,气田的运聚成藏特点不同.

(1)库车坳陷,类前陆盆地主要发育于上新世-第四纪,早、中侏罗世含煤岩系在上新世才被迅速深 埋,有机质快速演化至高成熟一过成熟阶段,在近5 Ma以来(甚至可能在2Ma以来)快速充注,在其他 有利构造地质条件的配合下,成为低温、超晚期、快 速高效成藏的典型地区(田作基等,2002;李峰等, 2015).

(2)川西坳陷,类前陆盆地发育时间从晚三叠世 须家河中期延续至早白垩世,晚三叠世含煤岩系厚 度由东向西,向龙门山前缘急骤增厚(1 200~ 4 000 m),有机质演化高峰期在西侧(龙门山前缘) 为晚三叠世末期,东部(坳陷本部)为侏罗纪晚期,区 内气田经历了早期(晚三叠世至早白垩世)运聚和燕 山晚期(晚白垩世)-喜马拉雅早期(古近纪)-四川 运动的多期改造和晚期定型.

新场大气田因为经历了多期构造运动改造,气 藏纵向分布从埋深大于5000m的上三叠统到浅层 小于1000m的侏罗系蓬莱镇组,构成了上三叠统 含煤岩系内"原生气藏"与侏罗系"次生气藏"的成藏 格局(图5),主要发生在燕山晚期至喜马拉雅期的 幕式充注和爆发式烟囱效应是次生气藏形成的主要 方式(王金琪,1997;刘树根等,2005),地层压力从深 部中、下侏罗统千佛崖组一自流组气层(约为 2.0 MPa/100m)至浅部上侏罗统蓬莱镇组气层 (1.32~1.36 MPa/100m),呈现阶梯式降低也显示 了"次生气藏"幕式充注的特点.

4.3.3 陆缘断陷型 陆缘断陷型与陆内裂(断)陷 型含煤一含气(油)盆地都是早期为断陷,晚期为坳 陷结构,煤成气源岩主要发育于早期的断陷或断坳 转换阶段,有机质生烃高峰期及主成藏期主要发育 在坳陷演化阶段,成藏历程因为后期的构造一沉降 历史及地温场演化历史的差异具有不同特点.

(1)琼东南盆地,因为上新世至第四纪剧烈沉降,崖城组含煤岩系快速增温,仅在 1.5 Ma 左右的时间内急增了 80~130 ℃.由于沉降和沉积速度太快,含煤岩系有机质演化节奏大大地滞后于地温急剧增长速度,当含煤岩系源岩刚刚进入成熟演化阶段后不久,就快速进入高一过成熟演化以生气为主阶段,大量生成煤成气,不利于生成煤成油,而有利于快速地形成崖 13-1 大气田(冯福凯等,1995).

(2)东海陆架盆地西湖凹陷,因为平湖组含煤岩 系沉积后的高地温场而快速生烃,主成藏期为新近 纪早期(中新世龙井运动).西部保俶斜坡众多煤成 气(油)田都具有"因断而生,因断而存"断控成藏特 点(图 6;杨丽娜和王丽顺,2007;雷闯等,2014),表 明在具有封闭保存条件下的断层也可以促进煤成气 运聚成藏.

(3) 莺歌海盆地,因水热增压和大量快速生烃, 在中新世莺黄组下部和梅山组形成异常高压封存箱 和泥拱构造带.强超压及底辟作用垂向破裂是天然 气聚集的主要动力,多期脉充式充注形成以封存箱 上型与底辟有关的圈闭为主的气藏.

**4.3.4 陆内断陷型** 陆内断陷型的松辽盆地也具 有断陷与坳陷双层结构,含煤岩系发育在深部的数

		地层					
系	统	组		代号	平均厚 度(m)	气藏	
第四系	全新统 更新统	雅台	安组	Q	200		
	上新统	大	邑组	$N_2d$	150		
第三系	始新统 古新统	芦山组 名山组		$E_2l$ $E_1m$	800		
古頭ズ	上统	灌	コ组	K <sub>3</sub> g	1 0 0 0	白亚玄与蔬	
日堂系	<u>中统</u> 下统	夹关组		K <sub>2</sub> j	700	口王尔、八八	浅
	上统	蓬莱	镇组	J <sub>3</sub> p	1 200	蓬莱镇组气藏	《层气藏
化翌亥		遂	デ组	J <sub>3</sub> 5	300	遂宁组气藏	1
	中统	沙 溪 店		$J_2 s^{\pm}$	600	沙溪庙组气藏	中层
		3 <u>H</u>	下	$J_2s^{\top}$	200		气
		干佛	崖组	$J_2q$	100	千佛崖组气藏	藏
	下统	白田	坝组	$J_1b$	200	白田坝组气藏	
			须五段	$T_3x^5$	400	须家河组五段气藏	
		须	须四段	$T_3x^4$	600	须家河组四段气藏	深
三叠系	上统	系 上统	$ \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 河 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 2 \\ \hline 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} $ L统 $ \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 \\ \hline 2 & 2 & 2 \\ \hline 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} $ T <sub>3</sub> x <sup>3</sup>	$T_3x^3$	800		层气藏
			须二段	$T_3x^2$	500	须家河组二段气藏	
		小塘	子组	T3t	150		
		马鞍	马鞍塘组		150		

图 5 新场气田气藏纵向分布

Fig.5 Vertical distribution of gas reservoirs in Xingchang gas field, Sichuan basin

十个小型断陷中,但含煤岩系厚度变化很大,只有长 岭、徐家围子等较大的断陷型盆地,含煤岩系发育较 全,厚度超千米,成为重要的煤成气源岩.因为含煤 岩系沉积期间构造稳定性较差,有多期火山活动,夹 于含煤岩系之中形成火山机构型生储盖组合,成为 主要储集层,储层非均质性强,以及有二氧化碳气、 无机气的混入,徐深大气田由 19 个气藏组成.

4.3.5 构造地质环境有效匹配是不同类型盆地转 化成为含煤一含气(油)盆地的关键 已知含煤一含 气(油)盆地和与含煤岩系相关大气田成藏条件的研 究表明,虽然不同类型含煤盆地转化成为含煤一含 气(油)盆地的构造地质环境不完全相同,但是,所有 含煤盆地转化成为含煤一含气(油)盆地必需具有的 构造地质环境是:含煤岩系沉积期间及沉积后以长 期持续沉降为主,各种地质构造条件匹配良好并且 相互促进.即含煤岩系有一定厚度,供烃量足够丰 富;并具有运移、充注、聚集成藏的地质条件;聚集的 煤成烃类能适时地得以保存的含煤盆地,方能转化





成为含煤一含气(油)盆地,形成与含煤岩系相关的 大气田.反之,如果含煤岩系沉积持续时间较短,或 沉积期间构造活动频繁,含煤岩系厚度不大,有机质 丰度不高;沉积后的地质构造作用以隆升为主,或沉 降幅度很小,含煤岩系没有被持续埋藏或埋藏的深 度不够,各种地质构造条件不能有效匹配,不利于有 机质演化,也不利于煤成烃的聚集、成藏,已形成的 煤成气田也难以保存而散失殆尽,含煤盆地不可能 转化成为含煤一含气(油)盆地(冯福凯等,1995;戴 金星等,2000;郝石生,2002;郝国丽等,2010).

(1)库车坳陷.库车坳陷仅是塔里木盆地总面积的 5%,但是,探明的天然气储量为盆地总量的 50%以上, 总结库车含煤一含气(油)盆地及形成克拉 2 气田等大 型气田的形成条件,不仅是在纵向构成优质生储盖组 合,更主要的是在新近纪以来将互为矛盾的构造地质 因素有机组合成为有利因素(曾联波等,2002).

新近纪以来的急剧沉降、快速堆积红色建造本身 不利于油气生成,却使深埋地腹的侏罗纪含煤岩系的 有机质在很短时间内快速演化,生成大量煤成烃;强烈 的构造挤压应力所产生的断层系统是天然气保存的不 利因素,但是在库车坳陷北侧,在古近系膏盐层之下形 成的十余条断层,沟通气源和储层而没断穿膏盐层,成 为深部煤成气高效的输导通道;推覆构造构成的巨大 储聚体(构造的闭合幅度高达 455~555 m)(贾承造等, 2002)成为储聚场所,以及异常流体压力封存箱内载气 水循环对流作用等有利构造地质条件,形成了以克拉 2 气田等大气田为主的天然气聚集区(图 7).

(2) 崖 13-1 气田. 崖 13-1 气田的气源主要为崖 南凹陷崖城组含煤岩系, 凹陷面积仅为 1 800 km<sup>2</sup>, 含煤岩系厚度只有 10.0~536.5 m, 暗色泥质岩有机

	200	150	100	50		地质年代 (Ma)
T <sub>2+3</sub>	$\mathbf{J}_{1+2}$	$J_{\rm L}$	K	Е	N	地质时代
						烃源岩
						储集层
						盖层
						上覆层
						封闭形成
					气	三叠系生烃
					浦气	侏罗系生烃
						保存时间
					1	关键时刻

图 7 库车坳陷克拉 2 气田成藏事件

Fig.7 Hydrocarbon accumulation event of Kela 2 gas field in Kuqa depression

据周兴熙(2003)

质的丰度并不高.但是,崖城凹陷在新近纪晚期-第 四纪的强烈沉降,使崖城组含煤岩系有机质在很短 时间内快速生气,生气强度达到 40×10<sup>8</sup>~60× 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,崖13-1构造又是早期形成的披覆背斜 构造,生成的煤成气能及时、快速地充注成藏,虽然 在聚气过程中累计扩散损失量是现今气田储量的 2 倍以上,但是目前还处于主生气期,还有大量气源补 给,形成了高储量丰度的大型煤成气田.

以上实例说明了含煤盆地能否转化成为含煤一 含气(油)盆地的关键主要是沉积期间以及沉积后是 否以沉降为主,各种地质构造环境是否能有效匹配. 但是,不同类型盆地构造地质环境的差异,将会影响 气田的成藏特点和勘探前景.

### 4.4 不同类型盆地构造地质环境对气田成藏及勘 探前景的影响

克拉通内坳陷型和陆内坳陷型的鄂尔多斯盆地

和川中区,虽然还有较大勘探领域,但其在地质历史 长河中过于稳定,构造不发育,气田的成藏期早,以 致密储层及岩性圈闭为主特点,因此气田的储量虽 大,但储量丰度普遍不高且非均质性强,气田的经济 可采储量和技术可采储量的比例很低.分布于中、西 的类前陆型盆地,受制于相邻造山带喜马拉雅晚期 构造活动强度影响不同,勘探前景差异较大,位于天 山南侧的库车坳陷明显优于天山北侧的准噶尔盆地 南缘.分布于东部的陆内裂(断)陷型盆地,只有具双 层结构有封盖条件者才具有勘探前景,松辽盆地深 部众多断陷具有找寻以火山岩及致密砂岩为主要储 层的气田.海域的陆缘断陷型盆地,是高温型晚期、 超晚期成藏的主要分布区,煤成气(油)田的勘探前 景普遍较好.造山带内断陷型盆地,构造地质环境比 较复杂,难以形成大煤成气田.大陆周缘型盆地也因 构造地质条件复杂,煤成气前景总体偏差.

### 5 结语

虽然目前只有 14 个含煤一含气(油)盆地中发 现了具工业价值的气田,仅有 9 个盆地发现了与含 煤岩系相关的大气田.但是,这些盆地是含煤岩系分 布的主体,约占全国含煤岩系面积的 60%,是构造 地质环境最优越的含煤一含气(油)盆地,中国还有 近 70%( $15 \times 10^{12} \sim 17 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>)有待探明的煤成 气资源(国土资源部油气战略研究中心,2010)主要 分布在这些盆地(戴金星等,1997,2000;戴金星, 2007).

例如,库车坳陷还有较大勘探潜力,因为形成克 拉2气田的地质条件并不是特例,形成克拉2气田 的物质基础在坳陷内分布较广,其最佳储盖组合广 泛分布,在坳陷北部还有一批与其相似的推覆构造 有待勘探.

鄂尔多斯盆地目前发现的大煤成气田的探明储 量仅为预测资源量的 25%,近年来,在盆地南部及 其外围地区也钻获了工业煤成气流,全盆地都是值 得重视的勘探区.

四川盆地近年来的勘探成果表明,从川西一川 中一川北一川东北区是上三叠统煤成气、上二叠统 煤成气与海相油型气共源的主要聚集区,有很大勘 探潜力.

海域含煤成气区是中国新生代含煤一含气(油) 盆地主要分布区,含煤岩系沉积巨厚,和与海密切关 联的沉积环境和构造格局,使莺中、崖南、白云、西湖 等众多坳(凹)陷不仅蕴藏有丰富的煤成气资源,也 具有形成煤成油的地质条件,近年来勘探成果显著.

总之,海西期以来特定的构造地质环境决定了 中国煤成气资源丰富的状况,有较广的勘探领域,还 可以发现更多的与含煤岩系相关的大气田,是中国 天然气工业未来相当长一段时间内持续快速增长的 主要原因.因此,既要继续加强对已知煤成气聚集盆 地和聚集区带的勘探,也要重视有持续沉降特点含 煤盆地(断陷、区带)的勘探与评价.

### References

- Chen, Z. H., 1988. Sedimentary Environment of Coal and Coal-Bearing Layer. China University of Geosciences Press, Wuhan, 9-15, 20-33 (in Chinese).
- Dai, J.X., 2007. Potential Areas for Coal-Formed Gas Exploration in China. Petroleum Exploration and Development, 34(6): 641-645(in Chinese with English abstract).
- Dai, J.X., 2009. Major Developments of Coal-Formed Gas Exploration in the Last 30 years in China. *Petroleum Exploration and Development*, 36(3): 264 271 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Huang, S. H., Liu, Y., et al., 2010. Significant Advancement in Natural Gas Exploration and Development in China during the Past Sixty Years. Oil & Gas Geology, 31(6):689-698(in Chinese with English abstract).
- Dai, J.X., Shi, X., Wei, Y.Z., 2001. Summary of the Abiogenic Origin Theory and the Abiogenic Gas Pools (Fields). Acta Petrolei Sinica, 22(6): 5-10(in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Wang, T. B., Song, Y., et al., 1997. Formation and Distribution of Medium-Large-Sized Gas Fields in China. Geological Publishing House, Beijing, 118 - 140 (in Chinese).
- Dai, J.X., Zhong, N.N., Liu, D.H., et al., 2000. Geologic Basis and Major Controlling Factors of Large-Middle Coal-Formed Gas Fields in China. Petroleum Industry Press, Beijing, 165-223 (in Chinese).
- Feng, F. K., Wang, T. B., Zhang, S. Y., et al., 1995. Natural Gas Geology in China.Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Feng, F.K., Wu, N.L., 1988. Dissection of Coal to Gas-(Oil-) Bearing Basins in China. In: Ministry of Geology and Mineral Resources, ed., Selected Papers on Petroleum and Natural Gas Geology, Humic Type Gas Study in China (Volume 1), Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hao, G.L., Liu, G.D., Xie, Z.Y., et al., 2010. Gas-Water Dis-

tributed Pattern in Xujiahe Formation Tight Gas Sandstone Reservoir and Influential Factor in Central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(3):427-433 (in Chinese with English abstract).

- Hao,S.S.,2002. Selected Academic Paper on Oil and Gas of Hao Shisheng. Petroleum Industry Press, Beijing, 21-26,32-40(in Chinese).
- Jia, C.Z., Zhou, X.Y., Wang, Z.M., et al., 2002. Petroleum Geology of Kela 2 Gas Field. *China Science Bulletin*, 47 (Suppl.):90-96(in Chinese).
- Lei, C., Ye, J. R., Wu, J. F., et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science*, 39 (7):837-847 (in Chinese with English abstract).
- Li, F., Jiang, Z.X., Li, Z., et al., 2015. Enriched Mechanism of Natural Gas of Lower Jurassic in Dibei Area, Kuqa Depression. *Earth Science*, 40(9):1538-1548 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., 2004. Basin Geodynamics Background of Formation of Huge Petroleum Systems. *Earth Science*, 29 (5): 505-512(in Chinese with English abstract).
- Liu, S.G., Li, G.R., Li, J.C., et al., 2005. Fluid Cross Formation Flow and Gas Explosion Accumulation in Western Sichuan Foreland Basin, China. Acta Geological Sinica, 79(5):690-697(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.S., Cai, X.Y., Guo, X.S., et al., 2010. The Discovery of Puguang Gas Field. *Engineering Science*, 12(10):14-23(in Chinese with English abstract).
- Shen, P., Xu, Y.C., Wang, X.B., et al., 1991.Gas Source Rocks, Gas Geochemical Features and Gas Accumulation Mechenism. Science and Technology Press in Lanzhou, Lanzhou, 12-26,43-53,72-88 (in Chinese).
- Strategic Research Center of Oil and Gas of the Ministry of Land and Resources, 2010. Resources Assessment. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tian,Z.J., Hu,J.Y., Song, J.G., et al., 2002. The Kuqa Intracontinental Foreland Basin and Its Significance for Petroleum Exploration. *Chinese Journal of Geology*, 37 (Suppl.):105-112(in Chinese with English abstract).
- Wang, F.Y., Du, Z.L., Zhang, S.C., et al., 2009. Source Kitchen and Natural Gas Accumulation in Kuqa Depression, Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 30 (4): 431-439 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Q., 1997. The Chimney Effects of Hydrocarbon Activity. Petroleum Geology & Experiment, 19(3):193-200(in Chinese with English abstract).
- Wang, R. N., Li, G. C., 1998. Evolution and Accumulation Rules of Coal-Bearing Basin in China.China Coal Indus-

try Publishing House, Beijing, 67-100 (in Chinese).

- Wang, T., 1997. Natural Geological Theory and Practice of China. Petroleum Industry Press, Beijing, 190 - 212 (in Chinese).
- Wang, T.B., 1994. Characteristics of Gas Fields (Poors) and Their Forming Conditions in China. In: Ministry of Geology and Mineral Resources, ed., Selected Papers on Petroleum and Natural Gas Geology, Humic Type Gas Study in China (Volume 4). Geological Publishing House, Beijing, 11-26 (in Chinese).
- Wang, T. B., 2003. Differences in Reservoiring Conditions of Oil and Natural Gas and Reservoiring Models of Gas Fields in China. Natural Gas Geoscience, 14(2):79-86 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. B., 2004a. Gas Pools in China Have Mainly Been Formed and Finalized during Tectonic Movements since Neogene. Oil & Gas Geology, 25(2):126-132(in Chinese with English abstract).
- Wang, T.B., 2004b.Geological Conditions of Coal and Gas-(Oil)-Bearing Basins in China. Science in China (Series D), 34 (2):117-124(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Chen, M. J., Wang, Z., et al., 2006. Simulation Analysis on Formation Mechanism of Coal-Formed Gas Reservoir in Intercratonic Depression of the Upper Paleozoic in Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 27(1):8-12(in Chinese with English abstract).
- Yang, K.M., 2006.Gas Reservoiring Mode in Xujiahe Formation of Western Sichuan Depression. Oil & Gas Geology, 27(6):786-793(in Chinese with English abstract).
- Yang, L.N., Wang, L.S., 2007. The Effect of Rupture on Oil Accumulation in Baochu Slope of Xihu Sag. Offshore Oil, 27(1):19-24 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Han, D.X., 1979. Coal Geology in China. China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zeng, L.B., Zhou, T.W., Lü, X.X., 2002. Influence of Himalayan Orogeny on Oil & Gas Forming in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Earth Science*, 27(6):741-744(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.Z., Wang, H.J., Xu, C.C., et al., 2010. Reservoir-Forming Mechanism and Enrichment Conditions of the Extensive Xujiahe Formation Gas Reservoirs, Central Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37 (2):146-157(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.X., 2003. Recognition on Reservoir-Forming Mechanism of Kela 2 Gas Field in Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 14(4):90-96(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G.Y., Zhang, S.C., Liang, Y.B., et al., 2005. Alteration of

Thermochemical Sulfate Reduction to Hydrocarbons. Acta Petrolei Sinica, 26(5): 48-52 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈钟惠,1988.煤和含煤岩系的沉积环境.武汉:中国地质大学 出版社,9-15,20-33.
- 戴金星,2007.中国煤成气潜在区.石油勘探与开发,34(6): 641-645.
- 戴金星,2009.中国煤成气研究 30 年来勘探的重大进展.石油 勘探与开发,36(3):264-271.
- 戴金星,黄士鹤,刘岩,等,2010.中国天然气勘探开发 60 年 的重大进展.石油与天然气地质,31(6):689-698.
- 戴金星,王庭斌,宋岩,等,1997.中国大中型天然气田形成条 个与分布规律.北京:地质出版社,118-140.
- 戴金星,钟宁宁,刘德汉,等,2000.中国煤成大中型气田地质 基础和主控因素.北京,石油工业出版社,165-223.
- 冯福凯,王庭斌,张士亚,等,1995.中国天然气地质.北京:地 质出版社.
- 冯福凯,吴乃苓,1988.中国含煤一含气(油)盆地分析.见:地 质矿产部编,石油地质研究所石油与天然气地质文集 (第1集).北京:地质出版社.
- 郝国丽,柳广弟,谢增业,等,2010.川中地区须家河组致密砂 岩气藏气水分布模式及影响因素分析.天然气地球科 学,21(3):427-433.
- 郝石生,2002.郝石生石油天然气学术论文选集.北京,石油工 业出版社,21-26,32-40.
- 贾承造,周新源,王招明,等,2002.克拉2气田石油地质特征. 科学通报,47(增刊):90-96.
- 雷闯,叶加仁,吴景富,等,2014.低勘探程度盆地成藏动力学 过程:以西湖凹陷中部地区为例.地球科学,39(7): 837-847.
- 李峰,姜振学,李卓,等,2015.库车坳陷迪北地区下侏罗统天 然气富集机制.地球科学,40(9):1538-1548.
- 李思田,2004.大型油气系统形成的盆地动力学背景.地球科 学,29(5):505-512.
- 刘树根,李国蓉,李巨初,等,2005.川西前陆盆地流体的跨层 流动和天然气爆发式成藏.地质学报,79(5):690-697.
- 马永生,蔡勋育,郭旭升,等,2010.普光大气田的发现.中国工

程科学,12(10):14-23.

- 沈平,徐永昌,王先彬,等,1991.气源岩和天然气地球化学特 征及成气机理研究.兰州:甘肃科学技术出版社,12-26,43-53,72-88.
- 田作基,胡见义,宋建国,等,2002.塔里木库车陆内前陆盆地 及其勘探意义.地质科学,37(增刊):105-112.
- 王飞宇,杜治利,张水昌,等,2009.塔里木盆地库车坳陷烃源 灶特征和天然气成藏过程.新疆石油地质,30(4): 431-439.
- 王金琪,1997.油气活动的烟囱作用.石油实验地质,19(3): 193-200.
- 王仁农,李桂春,1998.中国含煤盆地演化和聚煤规律.北京: 煤炭工业出版社,67-100.
- 王涛,1997.中国天然气地质理论基与实践.北京:石油工业出版社,190-212.
- 王庭斌,1994.中国天然气田(藏)特征及成藏条件.见:地质矿 产部编,石油地质研究所石油与天然气地质文集(第4 集).北京:地质出版社,11-26.
- 王庭斌,2003.天然气与石油成藏条件差异及中国气田成藏 模式.天然气地球科学,14(2):79-86.
- 王庭斌,2004a.中国含煤一含气(油)盆地的地质条件.中国科 学(D辑),34(2):117-124.
- 王庭斌,2004b.中国气藏主要形成,定型于新近纪以来的构造运动.石油与天然气地质,25(2):126-132.
- 汪泽成,陈孟晋,王震,等,2006.鄂尔多斯盆地上古生界克拉 通坳陷盆地煤成气成藏机制.石油学报,27(1):8-12.
- 杨克明,2006.川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨.石油 与天然气地质,27(6):786-793.
- 杨丽娜,王丽顺,2007.西湖凹陷保斜坡断裂特征及与油气成 藏的关系.海洋石油,27(1):19-24.

杨起,韩德馨,1979.中国煤田地质学.北京:煤炭工业出版社.

- 曾联波,周天伟,吕修祥,2002.喜马拉雅运动对库车坳陷油 气成藏的影响.地球科学,27(6):741-744.
- 赵文智,王红军,徐春春,等,2010.川中地区须家河组天然气 藏大范围成藏机理与富集条件.石油勘探与开发,37 (2):146-157.
- 周兴熙,2003.塔里木盆地克拉2气田成藏机制再认识.天然 气地球科学,14(5):354-361.
- 朱光有,张水昌,梁英波,等,2005.硫酸盐热化学还原反应对 烃类的蚀变作用.石油学报,26(5):48-52.