

中国大气区和大气田的地质特征

邹才能* 陶士振

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要 在国内外油气区和大气田研究广泛调研的基础上, 基于大气区和大气田的特征、属性和分布的分析, 提出了确认大油气区的三项标志: 空间标志、成藏标志和资源标志. 对中国气聚集域及大气区进行了划分. 分析了大气区和大气田分布的控制因素, 横向分布控制因素主要是: 高能沉积相与建设性成岩相、古隆起及其围斜带和深断裂等. 纵向分布控制因素主要是: 不整合面、蒸发岩系和深部低速高导层等. 揭示了中国大气区和大气田的主要地质特征: 四类盆地大气区(田)各具特色, 陆上大气区(田)主要发育于前陆盆地和克拉通盆地; 大气区主要存在三类气源, 以煤系气源为主, 生气强度大, 成因类型呈现多元化; 大气区(田)储集体岩石类型多样, 总体以中低孔渗的孔隙型储层为主; 中国大气区(田)构造圈闭和岩性地层圈闭并存, 分别形成密集型高丰度和大面积中低丰度大气区(田); 多数大气区(田)生烃高峰和成藏期较晚, 大多经历了“多期充注、晚期定型”的过程; 大气区(田)盖层和保存条件有利, 大型、特大型气田多发育蒸发岩盖层. 通过对大气区和大气田地质特征的分析, 以期对推进大气田的勘探和大气区的拓展有所启发.

关键词 大气区 大气田 大油气区标志 形成条件 分布特点 地质特征

大气田在世界石油工业的发展中具有举足轻重的地位^[1]. 尽管划分的标准不一, 但已有研究均表明, 世界上绝大多数天然气储量赋存于少数大气田中^[1,2-5]. 中国天然气工业的快速发展也有赖于大气田的发现和开发, 首先是大气田的发现促进了全国天然气储量的大幅度增长, 其次, 大气田的开发促进了天然气产量的迅速提高^[6]. 因此, 研究大气田(区)的成藏地质特征与分布规律对于天然气地质理论和勘探事业的发展具有重要的意义.

大气区是我国未来天然气深化勘探的主战场. 我国天然气资源丰富, 据新近完成的全国油气资源评价结果^[7], 天然气地质资源总量达 $43.87 \times 10^{12} \text{m}^3$, 探明率仅 10%. 五大气区天然气资源探明程度相对较高, 最高的为鄂尔多斯盆地, 探明率达到 31.2%; 最低的属于海域和塔里木盆地, 探明率分别为 2.7%

和 7.5%, 表明我国天然气具有广阔的勘探前景. 剩余资源量主要集中分布在五大气区, 累计剩余资源量 $32.7 \times 10^{12} \text{m}^3$, 占全国总剩余资源量的 83%, 这就决定了大气区是我国未来天然气工业发展的重要基地.

近年来, 地质与地球化学、定性 with 定量相结合的研究方法为进一步认识天然气成藏与分布规律提供了更为广阔的思路与先进的手段, 目前对天然气的地球化学特征^[8-10]、成因类型^[11,12]、判别标志^[11,13,14]、聚集区带^[15-17]和分布规律^[18-20]已进行了深入的研究. 本文在现有天然气成藏理论与研究方法的基础上, 将研究范围由大气田扩展到大气区, 主要采用地质统计和综合分析的方法, 着眼全球, 立足国内, 重点研究中国大气区和大气田的地质特征, 旨在探索大气区和大气田地质特征与分布的主控因素, 以期对大气区和大气田的勘探和建设提供参考.

1 大气区和大气田的概念和属性

大气区和大气田在天然气地质理论和勘探实践中具有重要的地位和意义。大气田主要集中分布于大气区中, 大气田的储量和产量在天然气工业中占据主导地位, 大气区的推进和拓展是目前勘探阶段的必然趋势。鉴于大气田的概念和属性已有了较多的研究^[18,21], 这里重点阐述大气区的概念和属性。

1.1 大气区和大气田的概念

在介绍大气区的概念之前, 首先交待一下含油气区的概念, 含油气区是地理上的术语, 可大可小, 从洲际规模到盆地中的区块, 如中国含油气区, 东北含油气区, 川东含油气区等等, 它是一个很随意的概念或术语。大气区是指处于统一构造动力学背景中, 由一系列在成因、类型和分布方面相联系或相关的气聚集区及其气聚集带构成的储量规模较大的含气区。同一大气区具有“统一(相似)的区域构造背景、广泛分布的优质烃源岩、相似的沉积环境和储集层类型、统一(相似)的区域有效盖层”等特征, 一般来说, 应具有 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上天然气最终可探明储量规模的气田群^[22]。

各国大油气田的划分标准不同, 国外大油田指最终石油可采储量超过 5×10^8 桶($6820 \times 10^4 \text{ t}$)的油田, 大气田指最终天然气可采储量超过 $3 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($850 \times 10^8 \text{ m}^3$)的气田^[1,23]。按照一桶石油折合 6000 ft^3 气的换算比例, 一个最终油气可采储量超过 5×10^8 桶油当量的油气田即构成一个大油气田。若石油的储

量超过天然气, 则该大油气田归类为大油田, 反之则归类为大气田^[24]。中国过去把探明储量等于或大于 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的气田列为大气田。2005年国土资源部颁发的石油天然气储量计算规范中关于天然气储量规模分类规定, 天然气可采储量达到 $(250 \sim 2500) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的定为大气田。

按照国际大油气田储量标准, 截至2002年底, 全球共发现大油气田877个, 这些大油气田集中分布于27个地区^[24], 在中东地区的波斯湾盆地和扎格罗斯盆地发现的大油气田最多, 达202个, 其次是俄罗斯的西西伯利亚盆地, 共发现大油气田93个。在发现的这些大油气田中, 油田有522个, 占总个数的59.52%, 其油气可采储量为 $1520.09 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量, 占油气总可采储量的53.72%; 气田有355个^[24], 占总个数的40.48%, 其油气可采储量为 $1309.62 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量, 占油气总可采储量的46.28%。表1列出了世界10个大气田的基本特征。可见, 大气田虽然个数少, 但在储量构成中占有很大比例, 储量达 $634020 \times 10^8 \text{ m}^3$, 油当量 $578.48 \times 10^8 \text{ t}$, 占44.17%。

1.2 大气区和大气田的属性

大气田的属性已有较多研究^[18,21], 这里重点讨论气区及大气区的属性。需要说明的, 纯粹的绝对气区是不多的, 多数是大区内油气并存, 只是各自的数量相对多少而已。因此, 在这里讨论其条件和属性时, 没有对气区和油区作绝对的分割, 而是讨论其一般赋存状态——即油气区的属性, 大油气区的确定或识别标志已涵盖了大气区, 且与大气区基本一致。

表1 世界10个最大气田基本特征

序号	名称	国家	盆地	可采储量				圈闭类型	储层岩性	储层时代
				油 / 10^6 t	气 / 10^8 m^3	凝析油 / 10^6 t	油当量 / 10^6 t			
1	北方(North Field) ^{a)}	卡塔尔	波斯湾		254849	1456	21920	构造	白云岩	晚二叠世
2	南帕斯(Pars South)	伊朗	波斯湾	177	99108	2428	10564	构造	白云岩	晚二叠世
3	乌连戈伊(Urengoy)	俄罗斯	西西伯利亚	164	94985	205	7995	构造	砂岩	晚白垩世
4	扬堡(Yamburg)	俄罗斯	西西伯利亚		43563	73	3571	构造	砂岩	晚白垩世
5	扎波利亚尔(Zapolyarnoye)	俄罗斯	西西伯利亚	44	34263	96	2891	构造	砂岩	晚白垩世
6	哈西鲁迈勒(Hassi R'Mel)	阿尔及利亚	古达米斯	8	28322	544	2826	构造	砂岩	晚三叠世
7	阿斯特拉罕(Astrakhan')	俄罗斯	滨里海		25383	640	2678	岩性地层	有孔虫灰岩	晚石炭世
8	西北穹隆(Northwest Dome)	卡塔尔	波斯湾		22653		1819	构造	碳酸盐岩	二叠纪
9	卡拉恰加纳克(Karachaganak)	哈萨克斯坦	滨里海		13929	682	1801	岩性地层	珊瑚灰岩	晚石炭世
10	拉格萨费德(Rag-E-Safid)	伊朗	扎格罗斯	421	16965		1783	构造	碳酸盐岩	中新世

a) 据Halbouty(2003)统计资料^[1,25], 北方气田和南帕斯气田实属同一气田, 但在统计上常作为2个气田对待

油气区以一定的盆地及其相应的沉积体系为载体,但有了沉积盆地及其沉积岩系只是前提和基础.最富集的油气区具有有利的地质动力学、古地理或沉积学条件及其时空上的优化组合.显然最重要的是从一开始就有强烈的沉降.没有沉降就没有盆地,也就没有油气区可言.此外,构造变形应适度,使生成的油气不会因侵蚀作用而散失.非常重要是沉积岩的分布及其经历的相关地质事件在时间和空间上的有利匹配,以便构成油气生成、储集和保存所必要的连接和组合.尤其需要在某些时期存在还原环境和多种高能相的古地理环境,有效烃源岩处于成熟区内,全部地层均由非渗透层广泛覆盖^[26,27].

大气区同各类矿产的聚集一样,均属特定的地质异常^[26,27],地质异常受较复杂的地质规律支配.大气区的形成与分布受地层、沉积、水文地质、构造等许多条件控制.这些条件控制着生油气层、储集层和盖层及其组合,进而控制气藏的形成和分布.总之,大气区犹如一个大工厂(系统)的成品库,是原材料、生产工艺、运输和仓储等要素和环节在时空上有机组合孕育的结果.

基于前人对油气区的研究^[26,27],本文提出了确认大油气区的 3 项标志,亦即大油气区的自身属性(表 2): (i)空间标志,即一定区域内某一或某些层系

中已证实的“有效”沉积面积(或体积),即含有油气的面积,通常在 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,该标志由地理、层系和面积(或体积)3 个要素构成; (ii) 成藏标志,即形成油气田(群)所需要的沉积、流体、地温、构造和水动力等区域地质条件及其有效的时空耦合; (iii) 资源标志,包括油气藏类型和数量、储量丰度和产地类型,发现的石油和天然气储量规模以及最终可探明的资源潜力(通常 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 以上的石油和/或 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的天然气).本文之所以考虑到剩余资源潜力,意在强调,不仅要关注已发现的现实油气区,还要关注潜在的和有远景的油气区.在上述标志中,尤以油气储量丰度和产地类型更为重要,这两方面直接反映了油气区内油气藏(田)分布状况、储量丰度和勘探对策.

2 大气区和大气田的类型和分布

2.1 大气区和大气田的类型

关于大气田的分类,多数划分为煤成气、油型气、生物气和无机气等,这方面戴金星等已做较多的深入研究^[11,20,28],这里重点讨论大气区的分类及其类型.

油气区依附于沉积盆地,但并不是每个沉积盆地都是一个油气区,每个油气区在地域上与一个或许多个沉积盆地叠合的.要发育有油气田群,重要的是必需要有一块能生油、储油、圈闭和保存油气藏的

表 2 大油气区确认的主要标志、构成要素与实例剖析

主要标志	内涵	构成要素	实例剖析 (以鄂尔多斯上古生界大气区为例)
空间标志	一定区域内某一或某些层系中已证实的“有效”沉积面积或体积,即含有油气的面积,通常在 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上	由地理、层系和面积(或体积)3 个要素构成	地理 层系 面积(或体积) 鄂尔多斯盆地中北部 上古生界石炭系-二叠系 约 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$
成藏标志	形成油气田(群)所需要的沉积、流体、地温、构造和水动力等区域地质条件及其有效的时空耦合	古环境标志(广义) 地史标志	沉积条件 水文地质条件 古地温条件 构造演化条件 地质动力学条件 以辫状河河流-三角洲体系为主 有一定的深盆地特征,部分气水关系倒置 中低古地温场,热演化速率中等 稳定的构造背景和平缓的斜坡为深盆气的聚集提供了良好而必要的构造条件 经历了太平洋构造域、特提斯-喜马拉雅构造域地壳运动,以及晚古生界的海西构造运动,形成了稳定沉降、拗陷迁移、扭动明显的多旋回克拉通叠合盆地
资源标志	油气藏类型和数量、储量丰度和产地类型,发现的石油和天然气储量规模以及最终可探明的资源潜力(通常 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 以上的石油和/或 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的天然气)	油气藏类型和数量 储量丰度 产地类型(集中型或分散型) 油气可采储量	以岩性油气藏为主,已发现苏里格、榆林气田、子洲气田等大中型气田 储量丰度 $(0.8 \sim 2.0) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 总体属于低丰度范畴 分散产地 可采储量持续增长,最终可突破 $10000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上

沉陷区^[27]。形成这样的油气聚集所需的地质条件中, 首先要具备的是相当规模的生油岩、储集层和盖层及其有效的时空匹配。生、储、盖层岩相的发育和分布显然受沉积盆地的演化密切控制。因此, 对油气区的分类应反映原型盆地类型及其沉积旋回和岩相组合。

为了从宏观上了解中国大气区的类型和分布特征, 在讨论大气区的分类之前, 有必要涉及大气区上一层次的含气区, 即气聚集域的概念。气聚集域指受相似的地质条件制约的具有相同地质时代同一类型气源岩的盆地群, 而这些盆地群中则发育有气源基

本同因的气田(藏)组成的若干气聚集带和气聚集区。气聚集域呈大区域、洲际性展布, 控制其形成是某些规模宏大的地质作用^[29]。基于前人的油气分区研究^[21,30,31], 本文将区域成盆动力学性质和环境作为气聚集域划分的基本依据, 将中国划为 5 种气聚集域, 即东亚岛弧-边缘海气聚集域、中国东部陆缘弧后裂谷气聚集域、中部构造稳定区气聚集域、西北挤压反转区气聚集域和特提斯强烈碰撞隆升区气聚集域(图 1)。

根据含油气层系所处的原型盆地类型把中国含气区划分出 8 个现实的大气区、1 个大油气区、2 个

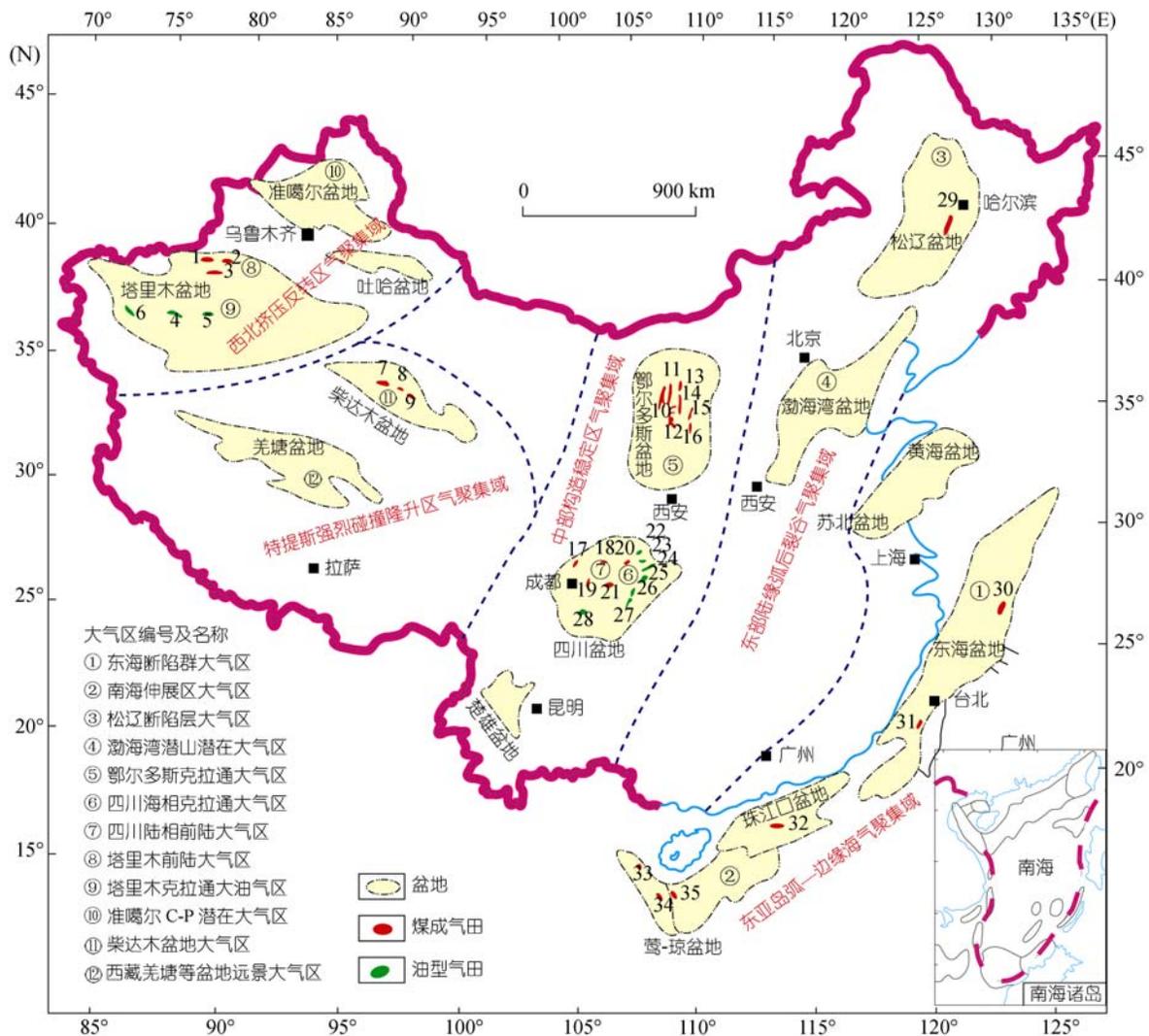


图 1 中国气聚集域、大气区和大气田分布图 (据戴金星等, 2006, 改编)

1. 克拉 2, 2. 迪那 2, 3. 牙哈, 4. 和田河, 5. 塔中, 6. 柯克亚, 7. 台南, 8. 涩北 1 号, 9. 涩北 2 号, 10. 苏里格, 11. 乌审旗, 12. 靖边, 13. 大牛地, 14. 榆林, 15. 长东, 16. 子洲, 17. 新场, 18. 八角场, 19. 洛带, 20. 普光, 21. 磨溪, 22. 铁山坡, 23. 渡口河, 24. 罗家寨, 25. 五百梯, 26. 沙坪场, 27. 卧龙河, 28. 威远, 29. 大庆, 30. 春晓, 31. 铁砧山, 32. 番禺 30-1, 33. 东方 1-1, 34. 乐东 22-1, 35. 崖 13-1

潜在的大气区和 1 个远景大气区(表 3)。另外, 根据油气藏特征、属性或勘探潜力等不同的研究和勘探需要又可对大气区作特定的类型划分, 见表 3。需要说明的是, 从天然气的纵横向聚集规律上考虑, 一个盆地与一个油气区并非完全对应。在横向上, 大气区可以比盆地大, 也可以比盆地小; 在纵向上, 大气区的分类是基于原型盆地(群), 故将四川含油气区划分为两个大气区, 即海相克拉通大气区和陆相前陆大气区。

2.2 大气田(区)分布的主控因素

2.2.1 大气区分布的控制因素

大油气区通常与大型盆地、大幅度沉降带和巨厚沉积岩系密切相关。目前发现的大油气区大都集中在一些不同类型的大地构造背景和古地理环境中^[32,33]。首先是中东, 它位于非洲阿拉伯和亚洲板块碰撞的地方, 集中了超过总发现量 1/3 的油(65×10^{12} t 以上)和 $20000 \times 10^{12} \text{m}^3$ 的气^[26]。其次是前苏联的古生

代、中生代、新生代三个大油气区累计储量为近 $150 \times 10^8 \text{t}$ 油和 $25000 \times 10^{12} \text{m}^3$ 气。非洲地中海南面有 3 个富油气盆地, 依次为阿尔及利亚的古生代盆地, 利比亚的中生代盆地和埃及的第三纪盆地, 发现 $120 \times 10^8 \text{t}$ 油和略多于 $50000 \times 10^8 \text{m}^3$ 气。其它超过 $10 \times 10^8 \text{t}$ 油的大型油气区分散在加利福尼亚、东印度、尼日利亚和北海^[26]。这些盆地或地区多具有盆地大、沉降幅度大和沉积岩系巨厚的特征。

首先分析一下全球大地构造和古地理概况与大油气区之间的关系。地球上大型沉积盆地发育于大构造单元的周缘, 尤其在前寒武纪大克拉通周缘。古生界盆地或位于克拉通本身较脆弱区(克拉通盆地), 或位于其边缘, 特别是在山脉褶皱后形成的沉降槽的边缘。这些克拉通内或克拉通周缘盆地以及某些较不稳定的克拉通内沉降盆地一般具有较厚的沉积岩系, 从油气地质条件看, 这些是大油气区形成的有利地域^[26,27]。中国海相克拉通盆地大气区主要发育

表 3 中国含气区分类

分类依据	分类细则			
	所属全球气聚集域类型	编号	大气区类型	备注
全球及区域构造动力性质、原型盆地类型	环太平洋主动型	东亚岛弧-边缘海气聚集域	① 东海断陷群大气区	东海盆地西湖凹陷等
			② 南海伸展区大气区	莺-琼盆地、珠江口盆地等
	大陆边缘巨型气聚集域	中国东部陆缘弧后裂谷气聚集域	③ 松辽断陷层大气区	上侏罗统-下白垩统火山岩和砂砾岩气藏以千米桥潜山气藏为代表
			④ 渤海湾潜山潜在大气区	
	大陆板块挤压碰撞型巨型气聚集域	中部构造稳定区气聚集域	⑤ 鄂尔多斯克拉通大气区	包括上、下古生界气层
			⑥ 四川海相克拉通大气区	海相克拉通气层 Z-T ₂
			⑦ 四川陆相前陆大气区	陆相前陆气层 T ₃ -J
		西北挤压反转区气聚集域	⑧ 塔里木前陆大气区	以库车坳陷、塔西南坳陷为代表
			⑨ 塔里木克拉通大油气区	以轮南油田、塔河油田、塔中油田的古生界为代表
			⑩ 准噶尔 C-P 潜在大气区	C-P 火山岩具有大气区的资源潜力
	特提斯强烈碰撞隆升区气聚集域	⑪ 柴达木盆地大气区	青藏高原唯一的大气区	
		⑫ 西藏羌塘等盆地有远景的大气区	以羌塘盆地为代表	
气藏类型、特征或勘探潜力	特殊分类依据		大油气区类型	实例
	油气藏(圈闭)类型		构造型大气区	库车前陆盆地构造型大气区
			岩性地层型大气区	鄂尔多斯盆地上古生界岩性地层型大气区
			复合型大油气区	四川须家河组构造-岩性复合型大气区
	储油气层岩石类型		碎屑岩大气区	鄂尔多斯盆地二叠系砂岩大气区
			碳酸盐岩大气区	鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩大气区
			火山岩大气区	松辽盆地深部火山岩大气区
	油气相态位置关系		单一型大气区	库车坳陷中生界单一型大气区
			叠合型大气区	四川盆地克拉通-前陆叠合型大气区
			混合型大油气区	塔里木台盆地古生界混合型大油气区
油气勘探前景		现实大气区	鄂尔多斯盆地上古生界大气区等	
		潜在大气区	准噶尔盆地 C-P 潜在大气区等	
		远景大气区	羌塘-伦坡拉盆地有远景的大气区等	

于古隆起风化壳、台缘礁滩相和海陆交互高能河道砂体中。

中生界和新生界盆地分布在较复杂的构造格局中。一些盆地分布于由古生界褶皱的、侵蚀的和固结的岩系所构成的克拉通之上或周缘。其它盆地分布于现代大洋裂开后的被动或主动边缘, 而有些地堑型的盆地则在伴有海洋裂开的地壳薄弱区生成。中生代盆地一般从三叠纪开始通常延续至现代。新生界盆地一般比老盆地面积小而沉降快。主要发育于中生代和第三纪的中国陆相盆地很具特色, 主要为断陷盆地和再生前陆盆地, 沉降很大, 常呈圆形或椭圆形^[26,27]。盆内烃源岩发育^[34], 具有有利的成藏组合, 具备大油气区发育的有利条件。

在最富集的油气区中, 典型的如巴西、Labrador 外海盆地和赤道非洲西岸盆地油气区。区域上这沉降区处于中非断裂带, 发育巨厚沉积岩, 如尼日利亚现代三角洲那样。伸展裂陷时期在海洋开口上产生一些断裂和地堑。刚性强和缺少盆地的非洲大陆却有大量富含油气的断陷谷。主动边缘盆地和山间盆地如太平洋四周第三纪盆地的形成或多或少直接与此地区的收敛边缘以及与象中国海和Okhost海等新海洋化地区有关^[26,27,35], 也是大油气区发育的有利地带, 如中国的东海盆地、莺-琼盆地和珠江口盆地等边缘海盆地油气区。

2.2.2 大气田分布的控制因素

大气田集中分布在大气区中, 并且是构成大气区的主体部分, 下面着重分析大气田纵横向分布的控制因素。

1. 大气田横向分布控制因素

(1) 高能沉积相和建设性成岩相与大气田

高能沉积相和建设性成岩相控制优质储层及大气田的分布。砂砾岩优质储集层受有利沉积相带控制, 如前陆盆地扇三角洲和辫状河三角洲体系, 海陆交互相富含煤系的三角洲前缘和高原高能叠置河道砂体是物性较好的孔隙型储层发育的有利区^[36]。碳酸盐岩优质储集层, 建设性成岩作用(白云岩化、次生溶蚀、TSR等)是关键, 古隆起背景下高能台缘礁滩相孔隙型或裂缝-孔隙型储层是大型气田分布的有利区。火山岩优质储集层受有利相、裂缝和溶蚀作用控制, 爆发相和溢流相是利孔隙型储集层及大型气田分布的有利区。火山岩优质储集层的物性优劣不受埋

深控制, 如松辽盆地北部庆深大气田。

克拉通台缘台内礁滩高能相带控制有利储集体及岩性大气田的形成和分布。在碳酸盐岩天然气成藏和富集的关键性条件中, 有利的沉积相带主要是台缘的生物礁滩发育带(四川盆地二叠系、三叠系礁滩); 建设性成岩相带包括次生孔隙发育带(塔里木盆地奥陶系)、白云岩化带(川东北飞仙关组鲕滩)和潜山风化淋滤带(渤海湾大港千米桥潜山)等。古隆起顶部碳酸盐岩储集层受风化淋滤相的控制(如鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组风化壳), 内幕储集层(包括白云岩和礁、滩体等)主要受沉积环境和成岩作用控制。

海陆交互高能河道砂岩是克拉通后拗陷盆地砂岩大气田形成的主要有利相带(图 2)。处于中国中部稳定过渡区的四川盆地三叠系须家河组和鄂尔多斯盆地上古生界, 广覆式煤系烃源岩与大规模成岩圈闭互层, 有利于形成大面积低丰度岩性大气田, 浅水三角洲平原-前缘过渡带是天然气富集的有利地区。首先, 浅水三角洲平原-前缘过渡带发育广覆式煤系烃源岩, 具备大面积生气和成藏的物质基础; 二是三角洲平原-前缘带广覆式煤系烃源岩与大面积分布的砂体紧密互层接触, 源储圈要素毗邻配置良好, 有利于大面积成藏; 三是三角洲平原-前缘带水下分流河

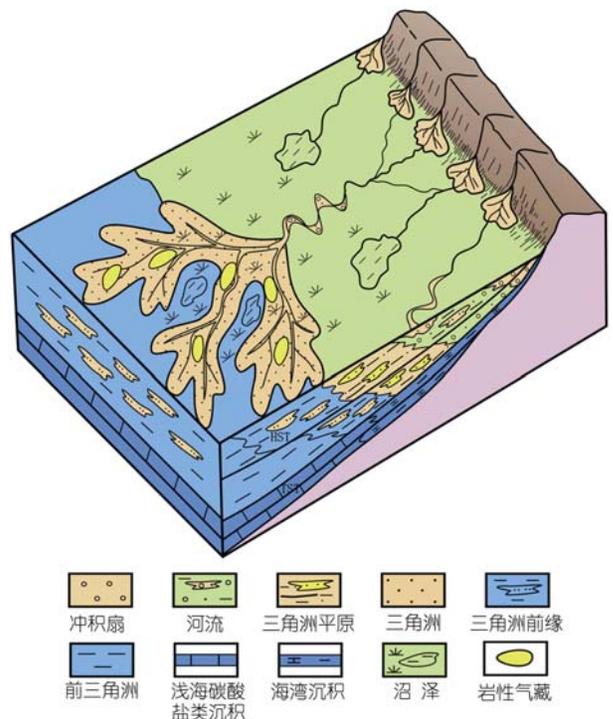


图2 鄂尔多斯二叠系海陆交互沉积体系及其气藏模式图

道等发育大规模成岩圈闭,与广覆式煤系烃源岩错叠,天然气运移距离短,输导条件良好,有利于大面积高效成藏;四是浅水三角洲平原-前缘过渡带发育有效区域性盖层,保存条件好.鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地须家河组目前勘探发现和探明的储量主要分布于三角洲平原-前缘过渡带,是大气田分布的有利相带.

(2) 古隆起及其围斜带与大气田

古隆起及其围斜带对天然气田的分布有明显的控制作用^[37].无论是中国的塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地的气田(图 3),还是前苏联卡拉库姆盆地(泽格里-达尔瓦札等大气田)、滨里海盆地(阿斯特拉罕大气田),或是西西伯利亚的乌连戈伊大气田、荷兰的格罗宁根大气田以及阿尔及利亚的哈西·鲁迈勒大气田,均受控于古隆起及其围斜带.

首先,古隆起通过控制浅水高能沉积相带进而

控制有利储层的发育.水下古隆起水体较浅,能量较高,常常发育高能环境下的碳酸盐岩储层,如亮晶砂、砾屑碳酸盐岩、鲕粒灰岩等,不仅原生孔隙发育,也有利于后期成岩作用改造形成次生溶蚀孔隙,形成碳酸盐岩的有利储集体.此外,在台地与斜坡、盆地之间,常常发育台地边缘礁高于台地和斜坡,因而发育礁体储层^[38].

其次,古隆起部位有利于白云石化和岩溶作用的进行,有利于形成白云岩储层和风化壳岩溶储层.由于古隆起经常出露水面,易于发育白云岩储集体,由混合白云岩化作用、蒸发泵作用形成的白云岩是十分良好的储集体.水上古隆起的发育有利于古风化壳和喀斯特化溶蚀孔洞的发育^[38].由于大气淡水淋滤而发生大规模的溶蚀作用,常形成有规律分布的溶洞、溶孔、洞穴.古风化壳一般可以划分成 4 个结构层.即风化残积层、破碎带、渗流带和潜流带.根

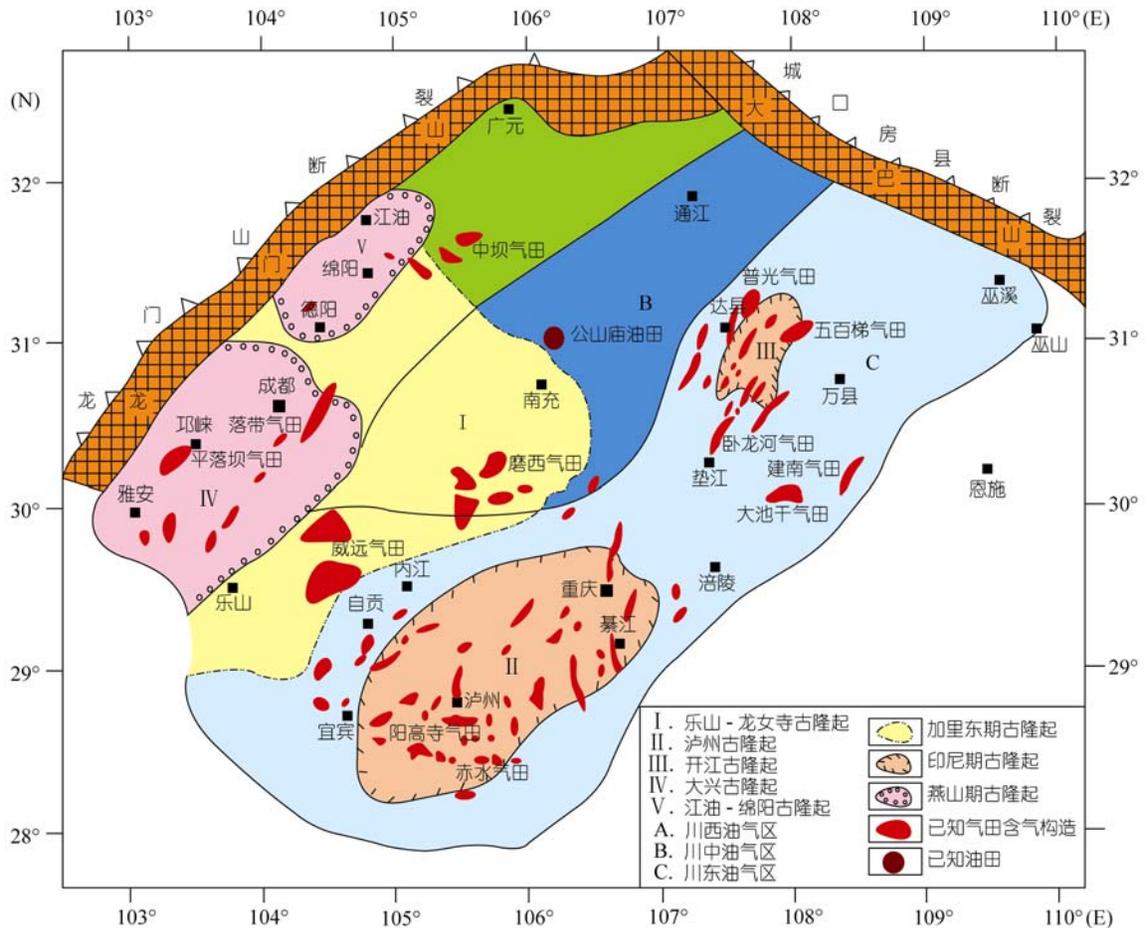


图 3 四川盆地古隆起与油气田分布图

据西南油气田分公司, 2006

据鄂尔多斯盆地奥陶系顶部、塔里木盆地地下古生界顶部古风化壳的研究, 破碎带由角砾状灰岩、白云岩、灰质白云岩组成, 这是由于风化作用产生破裂、天然水淋滤发生溶塌而成的。渗流带发育以垂向为主的溶洞, 潜流带发育以水平为主的洞穴。勘探证明, 破碎带和潜流带洞穴是储集天然气的主要场所。

最后, 古隆起是天然气运移和聚集的有利场所或指向区。油气常常从生油气坳陷区向隆起区运移。我国以古生界为主体的古隆起往往继承性发育, 既是圈闭和储层的发育区, 又是油气运移的长期指向和汇集区, 有利于油气藏的形成。隆起的时间和规模对油气的运移和分布起着重要的控制作用。古隆起高部位后期易受构造变动的影 响, 油气往往会发生调整性运聚, 在后期圈闭中形成次生油气藏; 而隆起的相对低部位即斜坡区是原生岩性地层油气藏形成的最有利区带。大型稳定沉积盆地长期发育的继承性古隆起, 圈闭形成与生烃灶及主要生烃期的时空配置, 有利于早期生成的天然气聚集和保存, 为二次成藏提供了有利的条件。克拉通盆地发育的古隆起对油气初次成藏和二次富集起关键性的控制作用。例如, 四川盆地印支期开江古隆起, 聚集和保存了成熟早的来自志留系烃源岩的油气, 形成含气面积 24541 km², 总聚气量大于 15000×10⁸m³的大面积层状古气藏^[39]。这个古气藏成为川东喜山期形成大天池-明月峡、铜锣峡-七里峡和大池干井-高峰场等构造带上的 8 个大中型气田二次成藏的主要气源(图 3)。

(3) 深断裂与大气田

深断裂与天然气的关系逐渐被人们所认识。俄罗斯的加弗里什较早总结了深断裂与油气运移聚集的关系。近年来, 郭占谦等论述了东部裂谷系含油气盆地中深断裂与油气藏分布的关系。准噶尔盆地的克-乌断裂带几乎控制了克拉玛依油区的分布。吐哈盆地的油气则与弧形断裂系统有关。莺歌海盆地的崖 13-1 大气田则与著名的 1 号断层有关^[40]。

盆地的深断裂与中浅层断裂的交汇部位是寻找大型天然气田的理想场所。前苏联地质学家也强调古老板块与年轻板块的结合部位, 最古老的前古生代断裂与最年轻的新生代断裂的交汇带最利于天然气的聚集(如蒂曼-伯朝拉盆地)^[40]。塔里木盆地所发现的大油气田多与深浅断裂的有效组合有关^[41]。世界上许多作为大中型气田盖层的盐类沉积大多位于

与深断裂有密切关系的构造活动区, 并不仅限于克拉通盆地。蒸发岩盆地的底部都是断块结构, 被深断裂所分割, 且多数深断裂控制着含盐系、盐岩相以及盐丘分布。中国东部中、新生代蒸发岩盆地大多具有这些特征。索赞斯基(1963, 1964)指出, 所有的含盐沉积都与沿深大断裂沉降而形成的坳陷有关。张景廉等^[42,43]还研究了这种含盐、含油气的盆地中油气的无机成因机理, 认为深部上地幔常呈上拱状, 而中、下地壳中常有低速、高导层。正是这种特殊的深部结构, 使得地幔流体可以上升。这种地幔流体的特点是: 富含 K, Na, Li 等碱金属, 富含 F, Cl, Br 等卤素, 富含 CO₂, CO, H₂, He 等挥发份及气体。这种地幔流体进入壳内低速、高导层后, 由于蛇纹石化橄榄岩中含有丰富的 Ni、V 等铁族元素, CO₂, CO 与 H₂ 得以进行费托合成反应, 从而形成了幔源烃。地幔流体富含 CO₂, He 的气体进入储集层后形成 CO₂ 气藏和 He 气藏。地幔流体进入沉积盆地, 与有机质、粘土、黄铁矿等反应, 或催化生烃, 或加氢生烃, 从而形成了一系列烃类包括未熟、低熟油、过渡带气等等, 在有的地区则具有热液烃的特点。

同时, 深断裂派生的次级断裂及其伴生裂缝对储层改造和油气运聚成藏具有显著的控制作用。断裂开启时期作为通道输导油气, 同时在断裂活动中造成岩石破碎对储层有明显的改造作用。另外, 沿深断裂上涌的深部热流体促使热液岩溶作用的发生, 大大改善了储集性能。断裂伴生的裂缝分为构造缝和成岩缝, 均对储层物性有显著的改造作用, 特别是对于低孔低渗的储层更是如此。

2. 大气田纵向分布控制因素

(1) 不整合面与大气田

不整合面对储集体分布、改造及油气的运移聚集和大型地层油气藏的形成起着重要的控制作用, 塔里木、鄂尔多斯、四川等盆地海相油气藏的形成, 均与碳酸盐岩的不整合面有关。尤其是地层圈闭, 受不整合面的控制更为明显, 一级层序界面控制大型地层圈闭的发育和分布, 二级层序界面控制中小型地层圈闭的发育和分布。岩性圈闭受相变(沉积相和成岩相)控制明显, 陆相盆地岩性圈闭多发育于主成盆地层层序内部即两个不整合面之间的三角洲或扇三角洲前缘带。

(i) 不整合面控制油气的输导作用。不整合面

不仅是构造运动或海(湖)平面变动事件的记录者,而且还代表了后期地质作用对前期沉积岩(物)不同程度的改造,这种改造程度的不均一性及后期下沉发生水进形成上覆岩石使得不整合面及其上下岩石具有了层状构造.沿不整合面风化裂缝孔洞发育,地表水淋滤作用强,次生孔隙、溶孔、溶洞发育,为油气运移的有利输导层^[44](图 4).碳酸盐岩和火山岩更易形成厚度较大的次生孔隙发育带^[45],对油气的侧向运移有重要的控制作用.(ii)不整合面对储层物性的改造作用.沿大型不整合面次生溶蚀和岩溶作用发育.首先,在不整合面形成过程中,褶皱及其断裂作用可形成许多构造裂隙,提高了孔隙之间的连通性和渗透性;其次,不整合面形成之后,大气淡水沿着早先形成的裂隙下渗,使下伏地层发生岩溶,在不整合面之下形成许多风化裂隙和溶蚀孔洞,在不整合面之上则形成溶蚀角砾岩,从而在很大程度上改善了储集性能^[46];还有,不整合面是形成古风化壳的前提,在不整合面形成期间,下伏地层遭受风化与剥蚀,碳酸盐岩主要发生岩溶作用,形成高孔高渗的风化壳^[47].不整合面对储层均有不同程度的改造,对于碳酸盐岩地层更为明显,国内外不乏这样的实例,如阿曼费胡德(Fahud)油田储层和较好的油气层分布明显与不整合面有关.(iii)不整合面对油气运聚的控制作用.不整合面对油气运聚具有重要的控制作用.塔里木盆地的古生界油气藏常分布于不整合面上下,这与不整合面输导油气的通道作用以及不整合面上下常分布有良好的储层有关.塔中 4 油气田和东河塘油田均位于石炭系与下伏地层的不整合面之上^[48].英买 32 油气藏白云岩储层由于地史时期塔北地区构造运动整体抬升,多次出露地表,遭受大气淡水淋滤剥蚀,形成上部以白垩系泥岩为盖层的古风化壳油气藏,在潜山面附近溶孔非常发育,储集空间以溶

孔、晶间孔、晶间溶孔、裂缝为主.储层孔隙度达 2%~10.4%,同时网络状的裂缝沟通溶蚀孔、洞,构成了网络状的输导体系,为油气运聚提供了良好的通道^[41].

(2) 蒸发岩系与大气田

研究表明膏盐与大气田的分布有着密切的关系,世界上大多数含盐盆地都是含油气区.统计表明,约 90%的油气与含盐盆地有关^[40,49].在世界上,天然气可采储量达 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的碳酸盐岩气田共 17 个,其中 10 个与蒸发岩系有关,占 60%.这 17 个大气田的储量约 $6 \times 10^{12} \text{m}^3$,与蒸发岩有关的储量为 $5 \times 10^{12} \text{m}^3$,占 83.3%,其中 5 个储量为 $(5000 \sim 14000) \times 10^8 \text{m}^3$ 的特大碳酸盐岩气田都与蒸发岩系有关,这 5 个特大型气田的储量共计 $43000 \times 10^8 \text{m}^3$,占碳酸盐岩大气田总储量的 71.7%.中国的一些大中型气田也与蒸发岩系有着密切的关系,如塔里木盆地克拉 2 大气田、四川盆地东北部飞仙关组大气田以及嘉陵江组气田等发育蒸发岩盖层.

由于天然气对封盖条件要求特别严格、苛刻,因此,天然气与膏盐的关系比原油与膏盐的关系更为密切,膏盐的存在对气藏的形成和保存具有更重要的意义.

(3) 深部低速高导层与大气田

盆地深部地壳低速、高导层的存在(即所谓的“无花岗岩”型盆地)是大气田形成的关键因素和重要条件^[40,49].一些含有大油气田的沉积盆地,其深部地壳结构有一个显著的特点,这就是具有低速高导层,俄罗斯学者称这些盆地为“无花岗岩型盆地”^[50].中国的松辽盆地、下辽河盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地(图 5)、塔里木盆地、吐哈盆地等均表明其深部地壳中存在低速高导层.而在国外,据沃里沃夫斯基、萨尔基索夫的研究,世界上发现的超巨型油气田都与“无花岗岩”盆地有关.

3 大气区和大气田的地质特征

21 世纪以来,我国天然气勘探工业突飞猛进,近几年发现大气田的数量和储量迅猛增长,这与致力于大气田的勘探和大气区的拓展紧密相关.目前勘探形势出现下列特点:四类盆地天然气勘探齐头并进,陆上断陷盆地已发现大气田;三类储集体竞相争辉,火山岩大气田异军突起;东中西部和深中浅层并举,逐步向东部和深层扩展;构造大气田与岩性地层

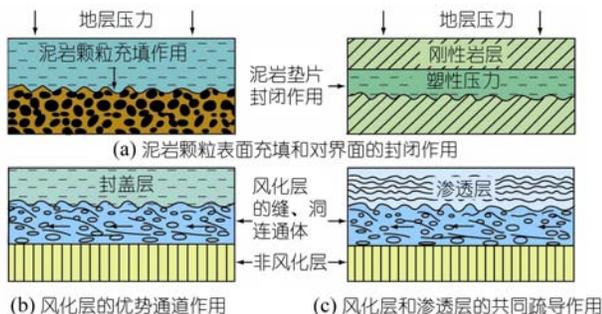


图 4 不整合对油气运移和封堵机理(据文献^[48])

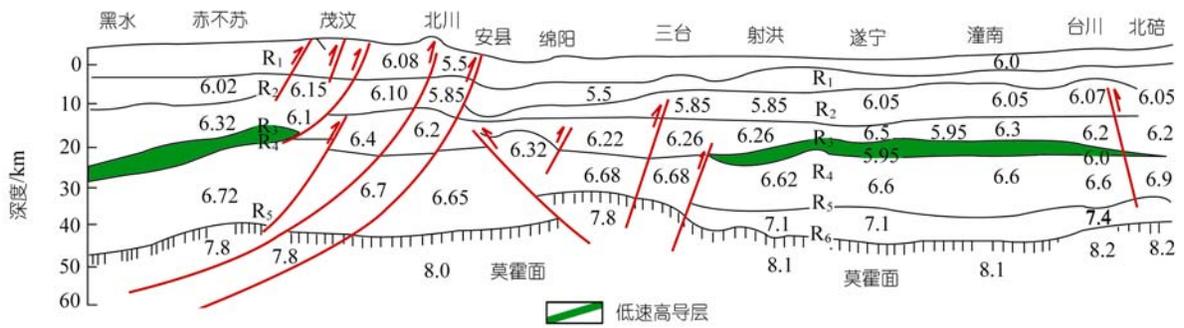


图 5 四川盆地黑水-北碚地壳测深剖面(据文献[43])

大气田并重, 岩性地层大气田已成为今后的重点勘探领域; 密集型高丰度大气田与大面积中低丰度大气田并存, 中低丰度大气田是未来的主要勘探对象。

统计表明, 大气田尽管各具特色, 但其形成与分布具有一定的规律性, 成藏地质要素和成藏作用过程控制着大气田的形成和分布^[51-53], 大气田的地质条件和分布特征表明其形成的主要控制因素为区域大地构造背景、有效烃源岩的分布、有利的储盖组合、圈闭类型及其规模和保存条件等^[54,55]。本文根据大气区和大气田的形成条件和主控因素, 结合中外对比, 重点剖析了中国大气区(田)的地质特征。

3.1 四类盆地大气区(田)各具特色, 陆上大气区(田)主要发育于前陆盆地和克拉通盆地

按照Mann等^[24]的盆地分类方案, 大陆裂谷盆地内发现的大气田最多, 达 304 个, 占大油气田总数的 34.66%, 其油气储量占大气田油气总储量的 39.41%; 其次为被动陆缘盆地, 这类盆地内发现有 95 个大气田, 个数占大气田总数的 30.90%, 储量占 37.44%; 陆-陆碰撞边缘盆地内发现有 77 个大气田, 个数占大气田总数的 21.69%, 储量占 15.85%^[25]。其余三类盆地(与地块增生、岛弧碰撞和/或浅俯冲相关的碰撞边

缘盆地、走滑盆地和俯冲边缘盆地)内, 发现大气田 50 个, 个数仅占总数的 14.08%, 储量只占到总储量的 7.3%。在 30 个超大型和巨型气田中, 大陆裂谷盆地、被动陆缘盆地和陆-陆碰撞盆地内分布的个数分别为 15 个、6 个和 6 个, 其余的三类盆地内各自有一个超大型或巨型气田^[25]。大气田的这种分布特征表明大陆裂谷盆地、被动大陆边缘盆地和陆-陆碰撞边缘盆地是寻找大气田的有益盆地类型。

按照构造动力学性质, 将中国的含油气盆地分为四类, 即陆相断陷、坳陷、前陆和海相克拉通盆地^[56]。四类盆地均发育有大气田, 但中国陆上大气田主要发育于前陆盆地和克拉通盆地(表 4)。断陷盆地以潜山和火山岩气田为主, 发育于东部弧后裂谷期, 深断裂对天然气成藏和分布具有显著的控制作用。坳陷盆地如四川前陆盆地川中隆后坳陷、构造背景类似于坳陷盆地的鄂尔多斯海陆交互相等沉积体系大规模展布, 构造平缓, 三角洲平原-前缘过渡带是天然气富集区, 多形成中低丰度岩性大气田。前陆盆地冲断带膏岩或其它致密岩性盖层以下发育高丰度的构造大气田(如克拉 2 大气田), 斜坡带发育中低丰度岩性地层大气田(如角场、磨溪等大气田)。海相克拉通盆地大气田形成和分布受礁滩高能相和古隆起风化

表 4 中国石油陆上四类盆地天然气储量对比表^{a)}

盆地类型	构造			岩性			地层			复合		
	气田个数	探明储量/ 10^8 m^3	储量百分比/%	气田个数	探明储量/ 10^8 m^3	储量百分比/%	气田个数	探明储量/ 10^8 m^3	储量百分比/%	气田个数	探明储量/ 10^8 m^3	储量百分比/%
断陷	44	1397.19	3.89	6	1084.92	3.02	2	362.08	1.01	27	409.81	1.14
坳陷	20	595.38	1.66	0	0	0.00	3	126.27	0.35	6	330.69	0.92
前陆	25	8593.9	23.90	3	81.59	0.23	1	153.78	0.43	17	1169.08	3.25
克拉通	88	3990.19	11.10	2	11567.13	32.17	6	1363.44	3.79	32	4731.6	13.16
总计	177	14576.66	40.54	11	12733.64	35.41	12	2005.57	5.58	82	6641.18	18.47

a) 根据国家储委公布的数据统计, 截至 2005 年底

壳等建设性成岩相控制, 共发育五种类型大气田: 风化壳地层圈闭大气田(长庆奥陶系马五段)、台缘台内礁滩岩性大气田(川东北二叠-三叠系)、内幕白云岩岩性大气田(长庆奥陶系马四段)、古隆起构造大气田(威远震旦系)、侏罗山式构造大气田(川东石炭系)。

3.2 大气区主要存在三类气源, 以煤系气源为主, 生气强度大, 成因类型呈现多元化

世界大气田统计表明^[25], 大气田分布于 90 多个沉积盆地, 但集中分布于 7 个沉积盆地。在这些盆地内, 为大气田供气的有效烃源岩既有海相泥灰岩(占 27.7%)和湖相烃源岩(占 35.3%), 又有煤系地层(占 37%)^[57]。天然气的成因类型包括煤成气、油型气、原油裂解气和生物气^[19,58,59]。不存在某一类成因的天然气的绝对优势, 这与我国的煤成气占天然气探明储量的 60%形成鲜明的对比。可见, 含有不同干酪根类型的烃源岩都能成为大气田的烃源岩。宏观上, 大气田的分布与烃源岩的展布密切相关, 这在特提斯构造域、西西伯利亚盆地、北海盆地和卡那封盆地等富气区都得到了充分体现。特提斯构造域为一介于冈瓦纳大陆和北部大陆群之间呈纬向展布的志留纪—全新世海域。相继发生的原特提斯洋、古特提斯洋和新特提斯洋的开启和闭合促进了优质烃源岩(黑色页岩、泥灰岩和碳酸盐岩)的发育, 为大气田的形成提供了良好的烃源岩条件, 故在该构造域内的波斯湾、扎格罗斯、卡拉库姆和美国墨西哥湾等盆地内发现了众多的大气田。

中国已发现的大气田的气源岩有 3 类, 一是陆相

煤系和湖沼烃源岩, 二是海相泥页岩和泥灰岩, 三是地幔无机气源。这几类气源岩中以煤系烃源岩为主, 煤系为“全天候”生气岩, 生气强度大, 大气田发育于生烃强度 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 以上的地区^[18,60,61]。随着勘探和研究程度的深入, 中国天然气勘探指导理论从油型气的“一元论”发展为油型气和煤成气的“两元论”。21 世纪初我国不仅探明, 同时研究确定世界上首批(昌德、兴城等)有充分地球化学根据的无机成因烃类气藏^[62], 使天然气勘探指导理论, 从“两元论”真正发展进入以油型气、煤成气、无机成因的“多元论”时期^[20,63]。

在大气田形成的众多控制因素中, 烃源岩的分布是最关键的因素, 有效烃源岩在时空上的展布在一定程度上控制了大气田的空间分布。从中国大气田的统计结果看, 烃源岩基本具备了厚度稳定、有机质丰度高、演化程度适中的特点。而我国目前发现的大气田主要是煤系烃源岩为主, 这与我国的陆相地层发育及其成煤环境有关。由于天然气具有易运移、易散失的特性, 所以天然气藏的形成较油藏对烃源岩的充注条件要求更高。只有持续、充分的气源供给, 才能形成较大规模的天然气田。据我国已发现的大中型气田的资料统计, 大中型气田分布于生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 的烃源岩分布区^[64], 一般发育在生气中心及其周缘(图 6)。鄂尔多斯盆地中部气田位于石炭-二叠系南北两个生气中心的鞍部, 同时又位于奥陶系生气中心之内, 具石炭-二叠系煤成气和奥陶系油型气双气源的供给^[65]; 四川盆地川东气区发现的 8 个大中型气田均位于主要气源岩志留系的生

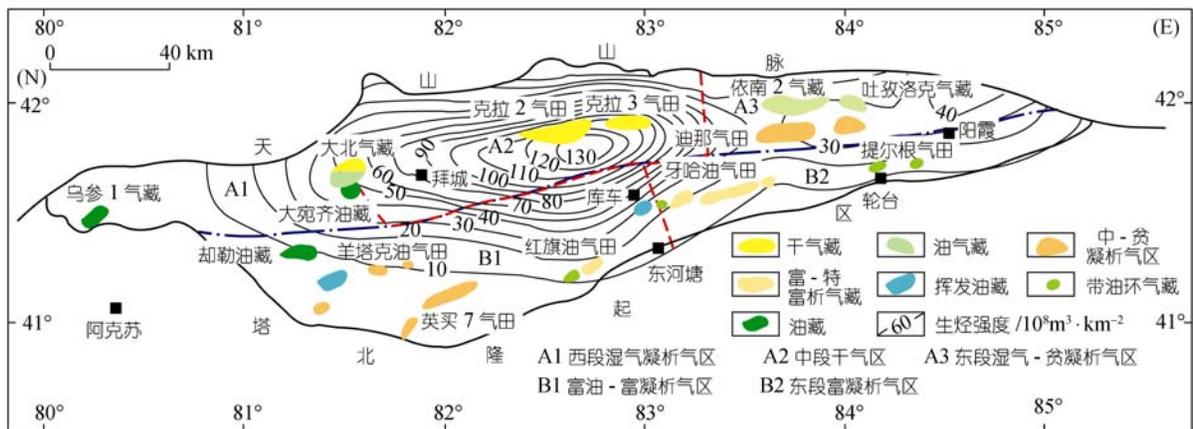


图 6 库车坳陷煤成油气田与侏罗系生气强度(据文献^[55], ^[62]综合改编)

气中心及其周缘, 生气强度最大可达 $125 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

3.3 大气区(田)储集体岩石类型多样, 总体以中低孔渗的孔隙型储层为主

世界大气田分布相当广泛, 除了志留系之外, 大气田在元古界至第四系的各个层系都有发现。随着储集岩时代的变老, 发现大气田的个数降低。大气田主要分布于二叠系-新近系, 这些层系内发现的大气田多达 317 个, 占大气田总数的 89.30%。发现大气田最多的层系为白垩系, 以白垩系为储集层的大气田达 95 个。大气田的储量主要存在于二叠系和白垩系, 分布于这 2 个层系的大气田的油气储量分别占大气田油气总储量的 32.41% 和 29.85%^[25]。中国大气田的分布从震旦系到第四系均有分布, 且总体上层系分布较为均衡, 不存在某一层位占绝对优势。这一纵向上的分布态势是由我国盆地类型多样、海陆层序并存、盆地演化的多旋回性和多套成藏组合决定的。

目前国内砂砾岩、碳酸盐岩和火山岩三类储集体都发现有大气田。以往已发现的大气田在陆相和海

陆交互地层以砂岩孔隙型储层为主, 海相碳酸盐岩以岩溶储层为主。近年来海相礁滩孔隙型储层和火山岩孔隙型储层的大气田逐渐被揭示出来。生气区内大面积孔隙型储集层的发育, 既作为天然气富集的有利储集空间, 又可成为天然气运移的良好输导层, 有利于发育大型气田。孔隙型储集层可以是沉积成因的砂岩、砾岩和粒屑状白云岩, 也可以是与成岩后生变化有关的碎屑岩次生孔隙发育带、白云岩化带及重结晶碳酸盐岩, 还包括各类风化壳, 即风化、淋滤、溶蚀造成的次生孔隙洞穴带^[20]。

戴金星等^[6]曾研究中国 10 余个大型气田储集层, 皆以孔隙型为主, 包括新发现的松辽深层火山岩大气田亦以孔隙型储层为主。据储集层物性参数统计, 砂岩储集层的孔隙度, 除四川盆地的一些气田稍低外(5%~12%), 其余多在 12% 以上(表 5), 渗透率多数大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 碳酸盐岩储集层的孔隙度一般大于 3%, 渗透率多数大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层物性好是大油气田形成丰富油气聚集的一个重要因素。世界大油

表 5 中国大型气田储量丰度及储层物性数据表

盆地	气田	层位	岩性	储量丰度/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
塔里木	克拉 2	E _{1-2km}	砂岩	44.29	8~20	51.46*
	迪那 2	E	砂岩	10.77	4~10**	0.1~1.5**
	牙哈	E _{1-2km} , K ₁	砂岩	4.36	14~18**	10~86**
	和田河	C _{1-2k} , C _{1b}	砂岩	3.11	13.68*	97.4*
柴达木	台南	Q _{1+2q}	砂岩	14.95	26.8*	595.22*
	涩北一号	Q _{1+2q}	砂岩	11.48	30.6*	104.9*
	涩北二号	Q _{1+2q}	砂岩	9.71	31.77*	571.72*
鄂尔多斯	苏里格	P ₁	砂岩	0.82	7~15	10*
	乌审旗	P	砂岩		9*	0.2~5
	靖边	O	白云岩	0.7	5.3~6.7	1~2.63
	大牛地	C ₃ , P ₁	砂岩	1.16	2~10**	0.025~2
	榆林	P	砂岩		5~13	1~7
四川	新场	J ₂ , J ₃	砂岩	3.99	12.31*	2.56*
	普光	T ₁	白云岩	31.53	6.7~7.1**	100.8*
	铁山坡	T ₁	白云岩	11.26	3.2~5.1**	1.05~9.9**
	渡口河	T ₁	白云岩	7.97	9.2*	9.57~109**
	罗家寨	T ₁	白云岩	5.67	5.5*	0.01~1160**
	五百梯	C ₂ , P ₂	白云岩	1.98	5.01~7.78**	2.5*
	沙坪场	C ₂	白云岩	3.89	4.6~7.2**	28.13*
	卧龙河	C ₂ , P ₁ , P ₂ , T	白云岩	3.32	6.39~10.12**	0.0004~0.77**
	威远	P ₁ , Z	白云岩		3.73~4.5	0.1~2**
松辽	庆深	K _{1y}	火山岩	8	0.5~18.7	0.1~1
莺琼	东方 1-1	N	砂岩	2.43	12.0~21.33	0.02~8.32
	崖 13-1	E, N	砂岩	13.84	14.8*	100*
	乐东 22-1	N	砂岩	1.51	23.1~25.7	33.5~71.3

* 为平均值, ** 为主值区间

气田统计表明, 储量与孔、渗、饱没有正相关性, 但多数大油气田都具有较高的孔隙度、渗透率和饱和度. 主要含油层系平均孔隙度多数在 17%~27%, 最高达 38%. 储层渗透率没有明显的分布规律^[57]. 全球大气田的储集层也主要是孔隙型的: 砂岩大气田储集空间主要是孔隙型的, 纯产层的厚度一般为 25~45 m, 厚度下限是 6 m; 有效孔隙度主要在 15%~35%, 有效孔隙度的下限为 9%. 以碳酸盐岩为主要储集层的大气田, 储集空间主要是孔隙-裂缝型, 纯产层的厚度是 50~120 m, 厚度下限为 6 m, 有效孔隙度一般是 8%~18%, 下限为 5%, 渗透率变化很大, 为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 至 $4500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[58]. 国内外实例说明, 区域性孔隙型储集层是大型气田形成的一个重要条件与控制因素^[20].

中国大中型气田的储集层岩性以砂岩为主, 次为碳酸盐岩. 储层类型主要为孔隙型. 从表 5 中可以看出, 中国大中型气田砂岩储集层的孔隙度多在 30% 以下, 渗透率多在 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下, 碳酸盐岩、火山岩储集层的孔隙度多在 10% 以下, 渗透率多在 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下, 按照 2005 年国土资源部新颁储层划分标准, 均为中-低孔渗储层. 可见, 天然气田的储量规模与储集层的物性并非正相关, 即中-低孔渗性储集层完全能够形成大气田.

3.4 大气区(田)中构造圈闭和岩性地层圈闭并存, 分别形成密集型高丰度和大面积中低丰度大气区(田)

世界大油气田的圈闭类型主要为构造圈闭, 尤以背斜、断背斜为主. 在 355 个大气田中, 有 295 个属于构造型气田, 占总个数的 83.10%, 其油气储量占油气总储量的 87.70%, 表明构造型气田不仅个数多, 而且储量规模大; 岩性地层型和构造-岩性地层复合型气田 51 个, 占总个数的 14.09%, 其油气储量仅占总储量的 11.46%, 当然岩性大气田这样的低比例可能也与国外大气田的储量标准高有关. 另有 10 个气田的圈闭类型不详^[25]. 同时, 好的圈闭是油气大量富集的重要条件, 世界大油气田一般都发育较大的构造, 储量与圈闭容积有较好的相关性. 储量和圈闭的闭合高度与面积没有正相关性, 但大油气田的圈闭闭合高度多数大于 100 m, 而法国的 lacq 油田闭合度高达 3000 m^[57]. 但国内情况有所不同, 国内的大气田圈闭类型以岩性地层为主, 占 60% 左右(图 7), 特别是最近几年, 随着构造油气藏勘探程度的提高,

勘探对象越来越少, 岩性地层气藏成为今后重要的勘探领域.

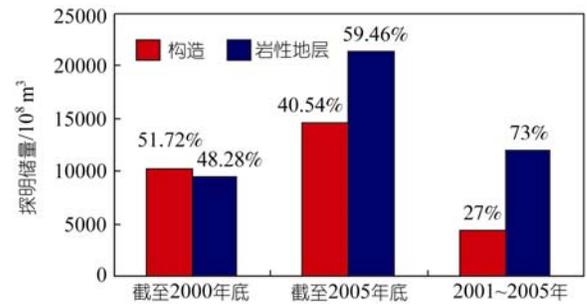


图 7 中国石油分阶段新增天然气探明储量的气藏圈闭类型构成
根据国家储委历年储量数据统计

中国目前发现的大气田高、中、低储量丰度并存, 构造圈闭多形成产地集中的密集型高丰度大气田, 岩性地层圈闭多形成大面积中低丰度大气田. 分析表明, 影响储量丰度的主要因素有, 一是圈闭类型对天然气储量丰度具有明显的控制作用, 构造圈闭天然气大规模汇聚程度高, 圈闭内储层连通性好, 因而储量丰度高. 而岩性圈闭、非潜山型的地层圈闭因单个圈闭规模小、大面积广泛分散分布, 储量丰度低; 二是储量丰度的高低直接与储层物性有关, 特低-低孔低渗储层中的储量丰度多偏低; 三是构造背景对储量丰度有明显的影 响, 平缓的构造背景, 如陆相拗陷盆地、前陆盆地宽缓斜坡、海陆交互相地层等因构造幅度小, 天然气大规模聚集程度低, 有利于形成大面积中低丰度气田. 因此, 国内岩性地层圈闭虽然规模和幅度不大, 但圈闭密集, 分布范围广, 同样可以形成大气田和大气区.

相对于油田来说, 低丰度气田在我国分布更为广泛, 已探明的中低丰度天然气地质储量在 $15000 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上, 占总储量的 65% 左右. 已发现的大型气田中, 从储量丰度分布来看, 高丰度气田仅占 36%, 而其余的 64% 属于中低丰度气田^[67]. 可见, 我国目前发现的气田大部分属中低丰度(可采储量丰度小于 $8 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$), 其中低丰度气田(小于 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$)主要发育于鄂尔多斯上古生界、四川盆地上三叠统须家河组 and 莺-琼盆地新生界. 中国石油近三年新增探明储量均为中低丰度(表 6), 随着勘探技术的提高, 中低丰度气田将成为我国天然气勘探开发的主要对象.

表 6 中国石油近三年新增探明和可采储量分丰度级别统计表

年度	低和特低丰度(<2.5)		中丰度(≥2.5~<8)		高丰度(≥8)		年度合计	
	地质储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	可采储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	地质储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	可采储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	地质储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	可采储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	地质储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²	可采储量 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²
2004	872.03	594.94	149.1	107.53	0	0	1021.13	702.47
2005	1689.88	998.39	1893.45	985.13	0	0	3583.33	1983.52
2006	2423.39	1365.28	1230.6	783.17	0	0	3653.99	2148.45
总计	4985.3	2958.61	3273.15	1875.83	0	0	8258.45	4834.44

3.5 多数大气区(田)生烃高峰和成藏期较晚, 大多经历了“多期充注、晚期定型”的过程

大气田要求晚期成藏是由其自身规律决定的, 是因为天然气的分子小、重量轻、难被吸附而易扩散, 其扩散能力随分子量的增大呈指数关系减少。由于石油分子比天然气大, 所以在其他成藏条件与气藏相同的条件下, 大油田形成既可是晚期成藏也可早期成藏, 而大气田晚期成藏才有利于保存。同时, 中国含油气盆地具有多旋回性, 后续旋回往往损害或降低先前旋回聚集气藏的保存条件和储量, 故晚期成藏就可避免此弊, 有利于大气田的形成^[68]。根据油气运聚动平衡的原理^[69], 气藏的形成存在着两个同时发生的过程, 即源岩中生成的天然气通过运移进入圈闭; 聚集在圈闭中的天然气因扩散等原因不断通过盖层逸散。当来自源岩的补充量大于通过盖层的散失量时, 圈闭中的天然气才能不断富集形成气藏。天然气藏一直处于这种“动态平衡”之中。因此, 成藏期越晚, 天然气的散失时间越短, 散失量越少。而成藏期的早晚又决定于主要烃源岩生烃高峰的时间, 生烃高峰期晚一方面控制成藏时间晚, 另一方面可保持现今仍有气源供给, 以弥补气藏的散失量。我国大中型气田中, 除了以下古生界为气源的四川盆地诸气田、鄂尔多斯盆地古生界中部气田(奥陶系)、上古生界气田(苏里格、榆林等)及塔里木盆地吉拉克气田生烃高峰期较早, 其它气田生烃高峰期均在第三纪—第四纪, 大部分气田源岩的镜质体反射率小于 2^[70], 表明现今仍有气的生成和排出。

中国大气田多经历了“多期充注、晚期定型”的过程。众所周知, 中国大陆及其沉积盆地经历了多旋回构造运动和演化阶段, 发育多套烃源岩, 升降运动频繁, 导致烃源岩二次生烃, 如库车前陆盆地中生界煤系、渤海湾盆地石炭—二叠系煤系等多发生了二次生烃过程, 多次生烃是多期充注的条件和基础。有的烃

源岩没有经过二次生烃, 但由于多层系烃源岩的生烃高峰期不同, 因而发生多源多期充注的现象, 如鄂尔多斯盆地下古生界气田既有上古生界煤成气又有下古生界油型气的注入, 然而在时间上不是同步的, 而是多期的。有的多期充注是由于构造调整, 原生气藏被破坏而发生的再次充注。因为天然气易散失, 现今多保存的多是晚期定型的天然气藏。也有少数是早期形成的, 但保存条件一直很好, 持续至今, 这对盖层要求非常严格。四川、鄂尔多斯、塔里木等盆地以下古生界为气源的气田, 其源岩镜质体反射率平均为 2.5%~3.5%^[70], 主要生烃期已过, 这表明我国广泛分布的下古生界海相地层, 尽管成烃期较早, 但也能形成大中型气田, 关键在于烃源岩成烃高峰期要有与之配套的烃类聚集和保存的有利条件, 以及后期的构造运动没有导致天然气的散失, 或经二次成藏得以继续保存。

3.6 大气区(田)盖层和保存条件有利, 大型、特大型气田多发育蒸发岩盖层

优质区域性盖层是天然气成藏和保存的关键条件。大气区内统一或相似的构造旋回和动力学背景造就了整个大气区地层沉积演化的相对一致性, 发育统一或相似的区域性盖层, 受晚期最大湖泛面控制。大型、特大型气田多发育蒸发岩盖层, 如塔里木库车坳陷膏泥盐区域性盖层(克拉 2 大气田)和四川盆地海相层系膏泥盐区域性盖层(普光等特大型气田)等。

大气田之所以对盖层条件要求非常苛刻, 是因为天然气比油轻、活动性强, 除非受到了封盖性优越的区域盖层, 特别是膏盐盖层的封堵, 否则天然气将趋于向上运移。优质区域盖层的发育是储集层中天然气得以保存的关键因素, 在东西伯利亚油气区, 元古界储集层内发现了 9 个大气田, 这些大气田的形成与保存得益于元古界储集层之上发育了一套数百米厚的下寒武统蒸发岩区域盖层^[25]。在波斯湾盆地和

扎格斯盆地, 上二叠统发育有良好的白云岩储集层, 而在储集层之上又发育了良好的石膏区域盖层, 结果导致志留系烃源岩生成的天然气在膏岩之下的二叠系内得以聚集成藏和保存. 全球最大的 2 个气田——北方气田和南帕斯气田都是以上二叠统为储集层的^[21]. 二叠系内发现的大气田的油气储量最多, 原因正是因为储层之上发育膏岩区域性盖层. 在中亚的卡拉库姆盆地, 上侏罗统碳酸盐岩大气田为生物礁气田, 而上覆于生物礁之上的上侏罗统蒸发岩则构成了有效的盖层, 这一蒸发岩盖层之下富集了卡拉库姆盆地的大部分天然气储量.

4 结论和认识

上文从全球对比的角度, 对中国大气区和大气田的概念、属性、分类、地质特征和分布控制因素进行了系统分析, 得出如下结论和认识.

(1) 提出了确认大油气区的三项标志: (i) 空间标志, 即一定区域内某一或某些层系中已证实的“有效”沉积面积(或体积), 即含有油气的面积, 通常在 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上, 该标志由地理、层系和面积(或体积)3 个要素构成; (ii) 成藏标志, 即形成油气田(群)所需要的沉积、流体、地温、构造和水动力等区域地质条件及其有效的时空耦合; (iii) 资源标志, 包括油气藏类型和数量、储量丰度和产地类型, 发现的石油和天然气储量规模以及最终可探明的资源潜力(通常 10×10^8 吨以上的石油和/或 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的天然气).

(2) 本文将区域成盆动力学性质和环境作为气聚集域划分的基本依据, 将中国划为 5 种气聚集域, 即东亚岛弧-边缘海气聚集域、中国东部陆缘弧后裂谷气聚集域、中部构造稳定区气聚集域、西北挤压反转区气聚集域和特提斯强烈碰撞隆升区气聚集域. 根据含油气层系所处的原型盆地类型把中国含气区划分出 8 个现实的大气区、1 个大油气区、2 个潜在的大气区和 1 个远景大气区.

(3) 全球大气田的天然气主要分布于二叠系—第四系, 其中白垩系内发现的大气田最多. 中国大气田的分布从震旦系到第四系均有分布, 且总体上层系分布较为均衡, 不存在某一层位占绝对优势. 这一纵向上的分布态势是由我国盆地类型多样、海陆层序并存、盆地演化的多旋回性和多套成藏组合决定的.

(4) 剖析了大气区和大气田空间分布的控制因素,

横向分布控制因素主要是: 高能沉积相与建设性成岩相、古隆起及其围斜带和深断裂等. 纵向分布控制因素主要是: 不整合面、蒸发岩系和深部低速高导层等.

(5) 揭示了中国大气区和大气田的主要地质特征: 四类盆地大气区(田)各具特色, 陆上大气区(田)主要发育于前陆盆地和克拉通盆地; 存在三类气源, 以煤系气源为主, 生气强度大, 成因类型呈现多元化; 大气区(田)储集体岩石类型多样, 总体以中低孔渗的孔隙型储层为主; 大气区(田)内构造圈闭和岩性地层圈闭并存, 分别形成富集型高丰度和大面积中低丰度大气区(田); 多数大气区(田)生烃高峰和成藏期较晚, 大多经历了“多期充注、晚期定型”的过程; 大气区(田)盖层和保存条件有利, 大型、特大型气田多发育蒸发岩盖层.

随着生产实践和理论认识程度的提高, 大气田的发现越来越多, 勘探领域逐渐拓展, 由大气田向大气区延伸. 勘探形势驱使天然气勘探由大气田走向大气区. 当然大气田是构成大气区的主体部分, 其成因和分布上具有依存性. 大气田的勘探需要大气区的理论做指导, 大气区的推进和拓展依赖于大气田的发现. 大气区中并非到处都有气, 正确认识和发现大气田是推进大气区建设的前提和基础. 大气区的全面推进和建设是天然气勘探工业发展的目标和归宿.

致谢 本文是在戴金星院士的指导和建议下完成, 成文过程中周慧硕士、谷志东硕士等做了一些具体工作, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990—1999, AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003. 1—340
- 2 Ahlbrandt T S, Charpentier R R, Klett T R, et al. Global Resource Estimates from Total Petroleum System, AAPG Memoir 86. Tulsa: AAPG, 2005. 57—138
- 3 Halbouty M T. Geology of Giant Oil and Gas Fields. AAPG Memoir 14. Tulsa: AAPG, 1970. 1—575
- 4 Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968—1978, AAPG Memoir 30. Tulsa: AAPG, 1980. 1—596
- 5 Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1978—1988, AAPG Memoir 54. Tulsa: AAPG, 1992. 1—526
- 6 戴金星, 夏新宇, 洪峰. 天然气地质学研究促进了中国天然气储量的大幅度增长. 新疆石油地质, 2002, 23(5): 357—365
- 7 赵文智, 汪泽成, 王红军, 等. 近年来我国发现大中型气田的地质特点与 21 世纪天然气勘探前景. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 687—692

- 8 戴金星, 戚厚发, 王少昌, 等著. 我国煤系的气油地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价. 北京: 石油工业出版社, 2001. 4—36
- 9 戴金星, 李剑, 丁巍伟, 等. 中国储量千亿元以上气田天然气地球化学特征. 石油勘探与开发, 2006, 32(4): 16—23
- 10 戴金星, 李剑, 罗霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比. 石油学报, 2005, 26(1): 18—26
- 11 戴金星. 各类烷烃气的鉴别. 中国科学, B 辑, 1992, 00B(2): 185—193
- 12 戴金星. 非生物天然气资源的特征与前景. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 1—6
- 13 戴金星, 陈英. 中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志. 中国科学, B 辑, 1993, 23(3): 303—310
- 14 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏. 天然气工业, 1995, 15(3): 22—27
- 15 戴金星. 气聚集带和气聚集区的分类及其在天然气勘探上的意义. 石油勘探与开发, 1991, 18(6): 1—10
- 16 戴金星. 中国大型气田有利勘探区带. 勘探家, 1996, (1): 6—9
- 17 戴金星, 何斌, 孙永祥, 等. 中亚煤成气聚集域形成及其源岩——中亚煤成气聚集域研究之一. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 1—6
- 18 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(6): 481—487
- 19 戴金星, 王庭斌, 宋岩, 等. 中国大型天然气气田形成条件与分布规律. 北京: 地质出版社, 1997. 184—198
- 20 戴金星, 胡安平, 杨春, 等. 中国天然气勘探及其地学理论的主要新进展. 天然气工业, 2006, 26(12): 1—5
- 21 戴金星. 中国气藏(田)的若干特征. 石油勘探与开发, 1997, 24(2): 6—9
- 22 邹才能, 陶士振. 大气气区的内涵、分类、形成和分布. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 5—12
- 23 Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the 1990s: an introduction/Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990—1999, AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003. 1—13
- 24 Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields // Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990—1999, AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003. 15—105
- 25 白国平, 郑磊. 世界大气田分布特征. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 161—167
- 26 Perrodon A. Dynamics of Oil and Gas Accumulations. Pau: Elf Aquitaine Press, 1983. 187—210
- 27 Emil G, Werner L, Daniel B, et al. Hydrocarbon provinces in the Swiss Southern Alps—a gas geochemistry and basin modelling study. Mar Petrol Geol, 1997, 14(1): 3—25[DOI]
- 28 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地学理论重要进展. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127—142
- 29 戴金星, 宋岩, 张厚福, 等. 中国天然气的聚集区带. 北京: 科学出版社, 1997. 194—198
- 30 陶明信. 论中国含油气区的构造环境性质、分区及其成油气专属性. 地球科学进展, 2001, 16(6): 746—754
- 31 Brooks J. Classic petroleum provinces. Geological Society Special Publication, 1990, 59: 1—8
- 32 李国玉, 唐养吾. 世界油田图集(上册). 北京: 石油工业出版社, 1997. 1—78
- 33 李国玉. 世界油田图集(下册). 北京: 石油工业出版社, 2000. 1—113
- 34 Klemme H D, Ulmishak G F. Effective petroleum source rocks of the world: Stratigraphic distribution and controlling depositional factors. AAPG Bull, 1991, 75(12): 1882—1896
- 35 Solheim A, Bryn P, Sejrup H P, et al. Ormen Lange—an integrated study for the safe development of a deep—water gas field within the Storegga Slide Complex, NE Atlantic continental margin; executive summary. Mar Petrol Geol, 2005, 22(1—2): 1—9[DOI]
- 36 邹才能, 陶士振, 薛叔浩. “相控论”的内涵及其勘探意义. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 7—12
- 37 戴金星. 古构造在气藏形成中的重大作用. 见: 李清波, 主编. 现代地质学研究文集(上). 南京: 南京大学出版社, 1992. 259—262
- 38 冉启贵, 陈发景, 张光亚. 中国克拉通古隆起的形成、演化及与油气关系. 现代地质, 1997, 11(4): 478—487
- 39 戴金星, 夏新宇, 卫延召, 等. 四川盆地天然气的碳同位素特征. 石油实验地质, 2001, 23(2): 115—121
- 40 张景廉, 赵应成, 王新民, 等. 大气田形成的一些控制因素探讨. 海相油气地质, 1999, 4(1): 41—48
- 41 杨宁, 吕修祥, 周新源, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩油气聚集带. 地质学报, 2006, 80(3): 398—405
- 42 张景廉, 朱炳泉, 张平中, 等. 地壳的新地地球物理与石油无机成说. 地球物理学进展, 1997, 19(4): 91—97
- 43 张景廉, 卫平生, 郭彦如, 等. 中国一些台油气盆地的深部地壳结构与油气藏关系的探讨. 天然气地球科学, 1998, 9(5): 28—36
- 44 吴亚军, 张守安, 艾华国. 塔里木盆地不整合类型及其与油气藏的关系. 新疆石油地质, 1998, 19(2): 101—105
- 45 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素. 地学前缘, 2005, 12(3): 21—30
- 46 窦立荣, 王一刚. 中国古生界海相碳酸盐岩油气藏的形成与分布. 石油实验地质, 2003, 25(5): 419—425
- 47 张彭熹. 中国蒸发岩研究中几个值得重视的地质问题的讨论. 沉积学报, 1992, 10(3): 78—84
- 48 张建林. 地层不整合对油气运移和封堵的作用. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 26—29
- 49 傅广, 段海凤, 孟庆芬. 不整合及输导油气特征. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 13—16
- 50 沃里沃夫斯基 B C, 萨尔基索夫 伊 O M, 著. 任俞译. 世界最大含油气盆地“无花岗岩型”盆地和地球物理参数. 北京: 石油工业出版社, 1991. 76
- 51 王庭斌. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 1—8
- 52 王庭斌. 中国含煤—含气(油)盆地的地质条件. 中国科学 D 辑:

- 地球科学, 2004, 34(2): 117—124
- 53 王庭斌. 中国大中型气田成藏的主控因素及勘探领域. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 572—589
- 54 周兴熙. 源-盖共控论述要. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 4—7
- 55 周兴熙. 成藏要素的时空结构与油气富集: 兼论近源富集成藏. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 711—716
- 56 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 257—272
- 57 宋芊, 金之钧. 大油气田统计特征. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 11—14
- 58 张子枢. 世界大气田概论. 北京: 石油工业出版社, 1990. 1—21, 268—269
- 59 Vandr  Claudius, Cramer Bernhard, Gerling Peter, et al. Natural gas formation in the western Nile delta (Eastern Mediterranean): Thermogenic versus microbial. *Org Geochem*, 2007, 38(4): 523—539[DOI]
- 60 戴金星, 夏新宇, 洪峰, 等. 中国煤成大型气田形成的主要控制因素. 科学通报, 1999, 44(22): 2455—2464
- 61 戴金星, 钟宁宁, 刘德汉, 等. 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, 2000. 206—222
- 62 戴金星 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略. 石油学报, 2001, 22(6): 5—10
- 63 Holloway S, Pearce J M, Hards V L, et al. Natural emissions of CO₂ from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy*, 2007, 32(7): 1194—1201[DOI]
- 64 戴金星, 秦胜飞, 夏新宇. 中国西部煤成气资源及大气田. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 12—21
- 65 Dai J X, Li J, Luo X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China. *Org Geochem*, 2005, 36(12): 1617—1635[DOI]
- 66 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源. 北京: 科学出版社, 2002. 164—194
- 67 邹才能, 陶士振, 谷志东. 低丰度大型岩性油气田形成条件和分布规律. 地质学报, 2006, 80(11): 1739—1751
- 68 戴金星, 卫延召, 赵靖舟. 晚期成藏对大气田形成的重大作用. 中国地质, 2003, 30(1): 10—19
- 69 郝石生, 高耀斌. 鄂尔多斯盆地中部大气田聚集条件及运聚动平衡. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(6): 488—492
- 70 宋岩, 戴金星, 李先奇, 等. 中国大中型气田主要地球化学和地质特征. 石油学报, 1998, 19(1): 1—5
- 71 胡安平, 周庆华. 世界上最大的天然气田——北方-南帕斯气田. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 753—759