

中国大陆上四大天然气产区

戴金星

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要: 凡年产天然气在 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ (相当年产油 $500 \times 10^4 \text{ t}$) 以上盆地(地区)称为大产气区。中国大陆上按年产量从大至小有鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地和柴达木盆地四个大产气区。鄂尔多斯盆地、塔里木盆地和柴达木盆地大产气区煤成气或煤型生物气的产量占 86 % 以上, 其气组分为烷烃气占 95 % 以上的经济效益高的优质气; 四川盆地大产气区以产含 H_2S 油型气为主, 页岩气次之, 煤成气最少。四大产气区 2017 年底共累计探明气层气地质储量 $100\,450 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产量为 $1\,060.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占全国气层气地质储量和年产量的 82.97 % 和 85.99 %, 因此, 四大产气区气层气的储量和年产量是中国天然气工业发展的主要保证和基地。

关键词: 煤成气; 中国; 大型气田; 气源岩; 大产气区

DOI: 10.3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2019. 02. 001

The Four Major Onshore Gas Provinces in China

Dai Jinxing

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing, 100083, China

Abstract: Large gas province refers to the basin with annual gas production over $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ (equivalent to annual oil production of $500 \times 10^4 \text{ t}$). According to the annual gas production, there are four major gas provinces in China: Ordos Basin, Sichuan Basin, Tarim Basin and Qaidam Basin. In the Ordos, Tarim and Qaidam basins, the production of coal-derived gas or coal-derived biogas accounts for more than 86 %, and its gas composition is composed of high-quality gas with high economic benefit, which accounts for more than 95 % of alkane gas. The gas province in the Sichuan Basin is dominated by H_2S -bearing oil-derived gas, followed by shale gas, and then coal-derived gas. At the end of 2017, the total proven geological reserves of gas zone gas in the four major gas provinces were $100\,450 \times 10^8 \text{ m}^3$, with an annual production of $1\,060.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 82.97 % and 85.99 % of the total geological reserves and annual production of gas zone gas in China, respectively. The reserves and annual production of gas in the four major gas provinces are the main guarantee and base for the development of natural gas industry in China.

Keywords: Coal-derived gas; China; Giant gas field; Gas source rock; Major gas producing area

收稿日期: 2019 - 04 - 06

基金项目: 国家自然科学基金(41472120); 中国石油天然气股份有限公司科技项目(2013 B - 0601)

作者简介: 戴金星(1935 -), 男, 浙江温州人, 教授级高级工程师, 中国科学院院士, 长期从事天然气勘探开发和地质研究工作。

0 前言

根据中国天然气工业现状,凡年产天然气在 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ (相当年产油 $500 \times 10^4 \text{ t}$) 以上盆地(地区)称为大产区。大产气区的天然气储量和年产量往往是一个国家天然气工业发展的主要保证和基地,而大气区中大气田则是大气区或某国储量和产量主要支柱。例如世界最大产区俄罗斯西西伯利亚盆地(北部)探明 7 个原始可采储量大于 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的超大型气田,总共原始可采储量 $283\,838 \times 10^8 \text{ m}^3$,至 2015 年底其中 5 个超大型气田累积产气 $145\,978 \times 10^8 \text{ m}^3$,对俄罗斯国民经济和天然气工业发展起重大作用^[1]。当然中国大产区储量与年产量规模比西西伯利亚盆地大产区小,但其对中国天然气工业的发展也起关键作用。中国鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地和柴达木盆地四个产区,2017 年底累计共探明气层气地质储量和年产量,分别占中国气层气地质储量和年产量的 82.97 % 和 85.99 %,这充分说明四大产区对中国天然气工业发展起支撑作用。所以要重视大产区的研究、勘探和开发。

1 鄂尔多斯盆地产区

鄂尔多斯盆地面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中古生界面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地油气分布的总格局为古生界聚气,主要气田分布在北部;中生界聚油,油田分布于南部^[2]。2017 年底为止,该盆地发现了苏里格、靖边、大牛地、神木、延安、榆林、子洲、乌审旗、东胜、柳杨堡和米脂 11 个地质储量 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的大气田,还有宜川、黄龙、胜利井、直罗和刘家庄 5 个小气田,共计 16 个气田。所有气田中仅直罗气田产层在中生界,并是一个唯一油型气田,气源岩为中生界延长组。靖边气田是以下古生界马家沟组碳酸盐岩储层为主气田,天然气类型有煤成气又有油型气与两者混合气。其他所有气田均为煤成气,储层为砂岩,气源岩为本溪组、太原组和山西组煤系。这些气田至 2017 年底历年共产气 $3\,783 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中煤成气占 90 % 以上。苏里格气田探明地质储量 $16\,448 \times 10^8 \text{ m}^3$ 超大型气田,2017 年产气 $212.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国年产量气的 14.2 %,同时该气田的历年产气总量为 $1\,564.23 \times 10^8 \text{ m}^3$,为鄂尔多斯盆地历年产气总量的 41.3 %。苏里格超大型气田,是中国目前探明地质储量最多的气田,也是气田年产量最高的气田。鄂尔多斯盆地至 2017 年底累计探明气层气储量 $4.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$,年产气层气 $435.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占中国气层气地质储量和年产量的 34.4 % 和 35.3 %,故成为中国第一产区^[1]。鄂尔多斯盆地气田分布见图 1。

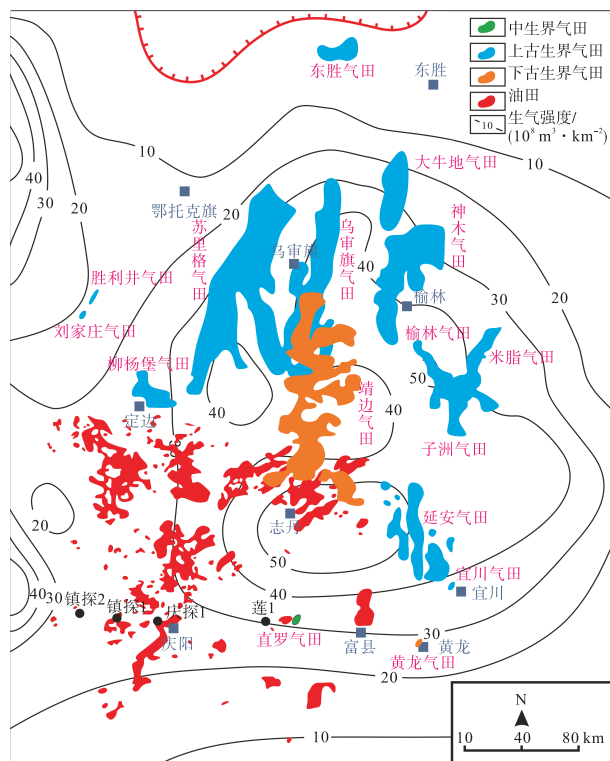


图 1 鄂尔多斯盆地气田分布图

此外,鄂尔多斯盆地还发现韩城、鄂东、延川南、榆林和临兴 5 个煤层气田,产层为太原组、山西组和本溪组,前 4 个煤层气田 2017 年共产气 $11.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,历年累产气 $39.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

该大气区天然气 95 % 以上为烷烃气,非烃气 N_2 和 CO_2 含量一般为 1 % ~ 3 %,不含毒性大的 H_2S 无需脱硫,是经济效益高的优质气。鄂尔多斯盆地大气田天然气主要组分见表 1。

鄂尔多斯盆地产气区的特征是产出以煤成致密砂岩气为主,气源岩为石炭一二叠系含煤地层;天然气的组分烷烃气占 95 % 以上,是不含 H_2S 的优质气。

2 四川盆地产区

四川盆地面积 $18.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界上最早勘探开发天然气的盆地之一,早在秦汉时期就出现了人工钻凿盐井,且伴随天然气生产的记录^[3]。震旦系至中三叠统发育海相地层,上三叠统至第四系发育陆相地层。盆地工业性油气层系多,常规、致密油气产层 25 个(海相 18 个),页岩气产层 2 个,是中国迄今发现工业性油气层最多的盆地^[4]。威远气田是中国储集层时代最老的震旦系气田。四川盆地产区是中国陆上大产区中天然气类型最多的,产出气中以油型气最多,页岩气其次,煤成气最少。2017 年底为止,产区共发现探明地质储量 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上大气田 23 个(包括涪陵、长宁、威远三个页岩气田),四川盆地大气田分布见图 2。2017 年底累

表 1 鄂尔多斯盆地大气田天然气主要组分表

气田	井号	层位	天然气主要组分及体积含量 / (%)						
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂
苏里格	苏 1	P ₁ s	92.47	4.26	0.86	0.20	0.16	0.51	1.25
	苏 6	P ₁ x	95.15	2.20	0.42	0.07	0.08	0.08	2.02
大牛地	DP14	P ₁ x	87.91	8.07	2.32	0.34	0.43	0	0.42
	DK16	P ₂ s	94.24	3.43	0.54	0.09	0.12	0.84	0.33
神木	台 1	P ₁ t	91.50	4.70	1.21		0.29	0.16	1.83
	双 18	P ₁ t	94.46	3.00	0.60	0.13	0.11	0.63	0.36
延安	Sh2	P ₂ h	96.68	0.73	0.09	0.02	0.06	1.07	1.41
榆林	榆 37	P ₁ s	94.66	2.93	0.42	0.06	0.06	0.66	1.11
子洲	洲 21-24	P ₁ s	94.22	3.12	0.48	0.08	0.07	0.32	1.58
乌审镇	陕 221	P ₁ s	82.73	10.95	2.59	0.75	0.38	1.73	0.39
东胜	伊深 1	P ₁ x	90.04	6.49	1.92	0.31	0.50	0.24	0.00
米脂	米 10	P ₂ s	96.14	1.96	0.39	0.07	0.07	0.62	0.60
靖边	林 1	O ₁ m	94.16	0.66	0.10	0.01	0.01	3.45	1.53

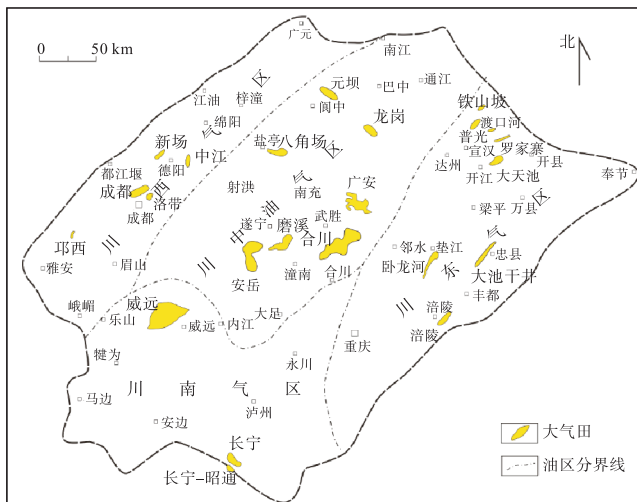


图 2 四川盆地大气田分布图

计探明天然气地质储量 $46\ 006 \times 10^8 \text{ m}^3$ (其中页岩气 $9\ 208.89 \times 10^8 \text{ m}^3$), 该年产气层气 $304.54 \times 10^8 \text{ m}^3$, 历年累计产气 $5\ 287.56 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为中国累计产气最多的盆地。四川盆地最大气田安岳气田 2017 年底共探明地质储量达 $10\ 569.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 属超大型气田, 年产气 $102.74 \times 10^8 \text{ m}^3$, 不仅成为四川盆地第一个年产上百亿立方米的气田, 也是中国第三个年产上百亿立方米的气田。雄厚的地质储量, 众多大气田的开发, 使四川盆地成为中国第二大产气区。

四川盆地产气区的气储层有碳酸盐岩、砂岩和页岩。同时一些碳酸盐岩和硫酸盐岩组合共生, 该组合地温已达 $100 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ 具备形成热化学硫酸盐还原 (TSR) 而生成毒性大的 H_2S ^[5], 人吸入浓度为 1 g/m^3 (相当天然气含 $0.064\% \text{ H}_2\text{S}$) 的 H_2S 在数秒钟内即可死亡^[6], 四川盆地具有这套组合的中三叠统至震旦系碳酸盐岩气藏往往含 H_2S 高, 需要脱硫后才可施用, 故 H_2S 气藏气

开发成本高, 四川盆地大气区天然气主要组分见表 2。

从表 2 可知, 煤成气和页岩气几乎不含 H_2S , 所以这些气不需要脱硫就可外输应用, 相对经济价值高。

四川盆地产气区的特征为中国五大产气区中产出气的类型最多 (H_2S 型油型气、煤成气和页岩气)^[7-11], 唯一产页岩气的产气区; 是中国发现工业性气层最多和气源岩层系最多的产气区。

3 塔里木盆地产气区

塔里木盆地面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是中国最大的含油气盆地, 是个典型的叠合盆地。台盆区发育震旦纪至泥盆纪为海相地层, 石炭纪至二叠纪为海陆交互相地层, 三叠纪至第四纪为陆相沉积。寒武系—奥陶系烃源岩目前以产油为主, 也部分成气, 如塔中 1 号气田; 中下侏罗统煤系为主要气源岩^[12]。塔里木盆地气藏从寒武系至新近系均有分布, 但储量主要集中在古近系、白垩系、新近系吉迪克组和中奥陶统。台盆区天然气主要为凝析气, 来自海相源岩的油裂解气^[13]; 煤成气主要分布于库车坳陷和塔西南地区, 库车坳陷是煤成气最丰富的地区, 已探明了克拉 2、迪那 2、大北和克深大气田, 以及许多中小型气田。2017 年累计探明气层气地质储量 $18\ 307.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 当年产气层气 $258 \times 10^8 \text{ m}^3$, 累计共产气层气 $2\ 496 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。盆地探明大气田 10 个 (克拉 2、迪那 2、大北、克深、柯克亚、阿克莫木、玉东、和田河、塔中 1 号和塔河), 大气田探明总储量为 $16\ 276.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产气量为 $218 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大气田总储量占盆地总储量的 88.9% , 年产气量占盆地的 84.5% , 塔里木盆地气田分布见图 3。2017 年盆地气层气储量和年产量中, 煤成气分别占 69.7% 和 86.0% 。由此可见, 煤成气在塔里木盆地产气区中起主宰作用。

表 2 四川盆地大气区天然气主要组分表

气类型	气田	井号	层位	储层岩性	天然气主要组分及体积含量 / (%)								文献
					CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	H ₂ S	
H ₂ S 型 油型气	普光	普光 4	T ₁ f	碳酸盐岩	73.80	0.03	0.00	0.00	0.00	0.59	8.47	17.10	[7]
		普光 6	P ₃ ch	碳酸盐岩	75.90	0.05	0.00	0.00	0.00	0.49	8.74	14.70	
	元坝	元坝 1	P ₃ ch	碳酸盐岩	53.25	0.09	0.00	0.00	0.00	3.04	30.20	13.33	[8]
			T ₁ f ₂	碳酸盐岩	78.30	0.05	0.25	—	0.016	12.82	7.70	0.20	
	龙岗	龙岗 2	T ₁ f ₁₋₃	碳酸盐岩	79.39	0.04	0.01	0.00	0.00	3.52	1.93	14.96	[4]
		龙岗 8	P ₃ ch	碳酸盐岩	83.80	0.05	0.00	0.00	0.00	0.25	8.63	7.24	
	威远	威远 2	Z ₁ d	碳酸盐岩	85.07	0.11	—	—	—	8.33	4.66	1.31	本文
	卧龙河	卧 63	T ₁ g ₄	碳酸盐岩	64.91	0.35	0.07	0.05	0.05	0.69	0.69	31.95	
	渡口河	渡 1	T ₁ f	碳酸盐岩	80.10	0.08	0.03	—	—	0.43	6.54	12.80	[9]
	罗家寨	罗家 1	T ₁ f	碳酸盐岩	75.30	0.11	0.06	—	—	0.18	10.40	10.50	
煤成气	铁山坡	坡 1	T ₁ f	碳酸盐岩	78.40	0.05	0.02	—	—	0.92	6.36	14.20	
		中坝	T ₂ l ₄	碳酸盐岩	74.45	3.73	1.37	1.40		1.56	3.58	13.30	本文
	新场	中 34	T ₃ x ²	砂岩	90.71	5.53	1.65	0.31	0.36	0.70	0.44	0.00	
		CX480-1	J ₂ s	砂岩	91.65	5.70	1.34	0.27	0.30	0.32	0.00	0.00	[10]
	广安	GA56	T ₃ x ⁶	砂岩	88.98	6.16	2.51	0.57	0.60	0.40	0.29	0.00	
	安岳	岳 101	T ₃ x ²	砂岩	84.38	7.87	2.50	0.69	0.79	0.71	0.35	—	
	八角场	角 33	T ₂ X ⁴	砂岩	92.25	4.93	1.14	0.20	0.24	0.38	0.00	—	
	洛带	Loug3	J ₂ p	砂岩	86.41	5.00	1.76	0.39	0.51	5.33	0.00	—	
	页岩气	威 201		页岩	98.32	0.46	0.01	0.00	0.00	0.81	0.36	—	[11]
		长宁	宁 211	页岩	98.53	0.32	0.03	0.00	0.00	0.17	0.91	—	
页岩气	涪陵	焦页 1		页岩	98.52	0.67	0.05	0.00	0.00	0.43	0.32	—	

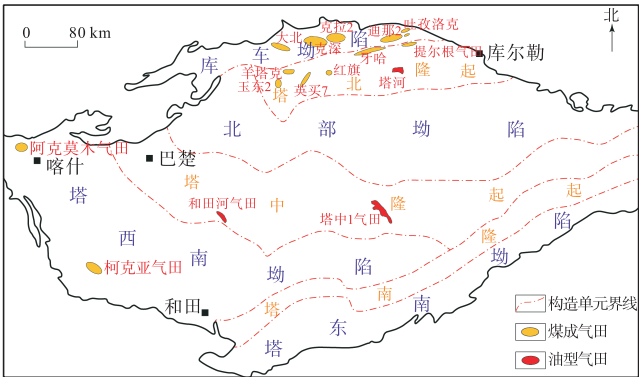


图 3 塔里木盆地气田分布图

表 3 塔里木盆地天然气主要组分表

气类型	气田	井号	层位	储层岩性	天然气主要组分及体积含量 / (%)							
					CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	H ₂ S
煤成气	克深	KS131	K ₁ bs	砂岩	95.95	1.86	0.23	0.05	0.05	0.69	1.13	—
		KS9	K ₁ bs	砂岩	98.73	1.01	0.14	0.03	0.05	—	—	—
	大北	DB101-2	K ₁ bs	砂岩	94.14	2.25	0.41	0.09	0.10	0.46	0.47	—
	迪那 2	DN102	E	砂岩	88.90	6.86	1.41	0.28	0.27	1.32	0.62	—
	克拉 2	克拉 201	K ₂ b	砂岩	97.70	0.59	0.50	0.00	0.00	1.21	0.50	—
	牙哈	YH701	E	砂岩	86.20	5.66	2.24	0.47	0.67	4.00	0.22	—
	柯克亚	KS102	E ₂ k	砂岩	88.84	5.58	1.30	0.30	0.66	1.89	0.00	—
H ₂ S 型 油型气	塔中 1 号	TZ86	O	碳酸盐岩	81.90	3.27	1.52	0.46	0.88	4.07	4.94	1.33
		ZG6	O	碳酸盐岩	70.70	2.31	1.15	0.47	0.57	3.05	5.07	23.10
	和田河	玛 8	O ₁	碳酸盐岩	72.84	0.50	0.02	—	—	12.24	14.39	0.11
	古城	GC12	O ₁₋₂ y	碳酸盐岩	98.80	0.48	0.02	—	—	0.97	0.06	0.07

以寒武系—奥陶系为源岩的油裂气产储量居次要地位，往往含 H_2S 需要脱硫。

4 柴达木盆地产气区

柴达木盆地是世界上海拔最高的大型含油气盆地，面积 $10.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，盆地有两个主要气源岩，一是第四系涩北组 (Q_1)，分布在三湖坳陷中，是区域主要气源岩分布段又是主要气藏发育段，岩性以深灰色、灰色泥岩和砂质泥岩为主，浅灰色粉砂岩，泥质粉砂岩次之，呈现为频繁间互的不等厚互层，成为自生自储成藏的基础。暗色泥岩平均累计厚达 1 000 m 左右，以Ⅲ型有机质为主，平均有机碳 5 % 以上。三湖坳陷有利生气范围约 $15\,000 \text{ km}^2$ ，其中最有利生气范围 $4\,500 \text{ km}^2$ ，最大生气强度 $80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，生气总量 $680\,661 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因处于未熟阶段，同时为Ⅲ型有机质故形成气为煤型生物气^[14]。目前在此发现了世界第四系中三个最大气田（台南、涩北一号、涩北二号），台南气田探明地质储量 $1\,061.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。柴达木盆地产气区绝大部分天然气产自此三大气田。另一个主要气源岩是中下侏罗统含煤地层，近年来阿尔金山前发现东坪大气田气源岩就是这套含煤地层，在主力生烃凹陷东坪凹陷等生气中心生气强度达 $200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，具备

强大的生气能力。东坪地区基岩储集层主要为花岗岩和花岗片麻岩，发现两类基岩储集层气藏：一种为基岩顶部裂缝孔隙型（风化壳）气藏；另一种基岩内部裂缝、内部裂缝—孔隙型气藏，气源为煤成气^[15-16]。柴达木盆地产气区 2017 年底累计探明天然气地质储量为 $3\,700.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，当年产气 $62.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历年累计产气 $713.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，共发现四个大气田（台南、涩北一号、涩北二号和东坪），柴达木盆地大气田分布见图 4。

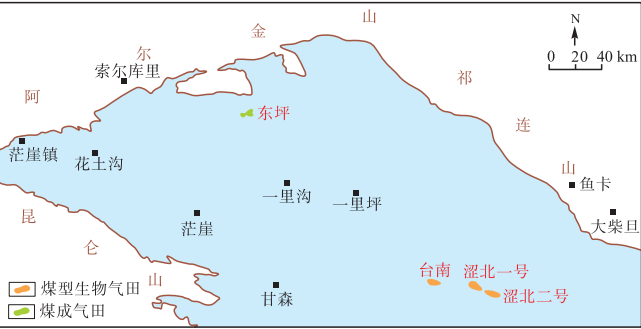


图 4 柴达木盆地大气田分布图

柴达木盆地产气区产出干气，烷烃气主要在 93 % 以上，非烃气含量在 8 % 以下，不含 H_2S ，故是经济效益高的优质气，天然气主要组分见表 4。

表 4 柴达木盆地天然气主要组分表

气类型	气田	井号	层位	天然气主要组分及体积含量 / (%)							文献
				CH_4	C_2H_6	C_3H_8	$i\text{C}_4\text{H}_{10}$	$n\text{C}_4\text{H}_{10}$	N_2	CO_2	
煤型生物气	台南	台南 4	Q_1	89.61	0.08	0.01	0	0	8.15	0	本文
		台南 6		98.24	0.05	0.03	0	0	1.05	0.59	
	涩北一号	涩深 13		99.24	0.06	0.02	0	0	0.68	0	
		涩 4-15		98.23	0.97	0.02	—	—	0.007	0.40	
	涩北二号	涩中 3		97.84	—	—	—	—	2.05	0.11	
		涩 21		99.21	0.25	0.06	—	—	0	0.44	
煤成气	东坪	东坪 1	D 花岗岩、花岗片麻岩	91.79	1.93	0.33	0.10	0.10	5.28	0.01	[15]

柴达木盆地产气区特点以产第四系Ⅲ型泥质岩为源岩的煤型生物气占绝对优势，而中下侏罗统含煤地层为源岩煤成气产量仅占总产量 4.1 %。

5 结论

中国陆上四大产气区 2017 年共探明气层气地质储量 $100\,450.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年气层气产量 $10\,605 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，分别占全中国气层气地质储量 $121\,059.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和年产量 $1\,233.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 82.97 % 和 85.99 %。因此，陆上四大气区气层气的储量和年产量是中国天然气工业发展的主要保证和基地。

中国陆上四大产气区中，鄂尔多斯盆地和柴达木盆

地两个产气区产出气层气几乎以煤成气为主；塔里木盆地产气区产出气层气中煤成气占 86 %；仅四川盆地产气区产出天然气中以油型气为主，页岩气次之，煤成气最少。四大产气区 2017 年共产出煤成气 $757.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占气层气年总产量的 61.43 %，由此可见，煤成气是四大产气区主力气。

参考文献：

[1] 戴金星,倪云燕,廖凤蓉,等.煤成气在产气大国中的重大作用[J].石油勘探与开发,2019,46(3):417-432.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Liao Fengrong, et al. The Significance

- of Coal-Derived Gas in Major Gas Producing Countries [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (3): 417 - 432.
- [2] 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[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 18 - 26.
- Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, et al. Alkane Carbon Isotopic Composition and Gas Source in Giant Gas Fields of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26 (1): 18 - 26.
- [3] 四川油气区石油地质编写组. 中国石油地质志: 卷十: 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 6 - 9.
- Compiling Group of Petroleum Geology of Sichuan Oil and Gas Area. Petroleum Geology of China: Vol 10: Sichuan Oil and Gas Area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 6 - 9.
- [4] 戴金星, 倪云燕, 秦胜飞, 等. 四川盆地超深层天然气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 588 - 597.
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Qin Shengfei, et al. Geochemical Characteristics of Ultra-deep Natural Gas in the Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4): 588 - 597.
- [5] Machel H G. Gas Souring by Thermochemical Sulfate Reduction at 140 °C: Discussion [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (10): 1870 - 1873.
- [6] 戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 1 - 4.
- Dai Jinxing, Hu Jianyi, Jia Chengzao, et al. Suggestions for Scientifically and Safely Exploring and Developing High H₂S Gas Fields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31 (2): 1 - 4.
- [7] 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增 II): 43 - 52.
- Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. Formation Mechanism of Deep-buried Quality Dolomite Reservoir in Puguang Gasfield [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37 (Suppl 2): 43 - 52.
- [8] Hu Guoyi, Yu Cong, Gong Deyu, et al. The Origin of Natural Gas and Influence on Hydrogen Isotope of Methane by TSR in the Upper Permian Changxing and the Lower Triassic Feixianguan Formations in Northern Sichuan Basin, SW China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2014, 32 (1): 139 - 158.
- [9] 胡安平. 川东北飞仙关组高含硫化氢气藏有机岩石学与有机地球化学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- Hu Anping. Organic Petrographic and Organic Geochemical Studies of the Sour Gas Accumulations in the Lower Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [10] Dai Jinxing, Ni Yunyan, Hu Guoyi, et al. Stable Carbon and Hydrogen Isotopes of Gases from the Targe Tight Gas Fields in China [J]. Science China, Earth Sciences, 2014, 57 (1): 88 - 103.
- [11] Dai Jinxing, Zou Caineng, Dong Dazhong, et al. Geochemical Characteristics of Marine and Terrestrial Shale Gas in China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 76: 444 - 463.
- [12] Dai Jinxing. Giant Coal Derived Gas Fields and Their Gas Sources in China [M]. Beijing: Science Press, 2016: 269 - 399.
- [13] Wang Zhaoming, Su Jin, Zhu Guangyou, et al. Characteristics and Accumulation Mechanism of Quasi-layered Ordovician Carbonate Reservoirs in the Tazhong Area, Tarim Basin [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2013, 31 (4): 545 - 567.
- [14] 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 73 - 93.
- Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning, et al. Large Gas Fields and Their Gas Sources in China [M]. Beijing: Science Press, 2003: 73 - 93.
- [15] 曹正林, 魏志福, 张小军, 等. 柴达木盆地东坪地区油气源对比分析[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(3): 17 - 20.
- Gao Zhenglin, Wei Zhifu, Zhang Xiaojun, et al. Oil-gas Source Correlation in Dongping Area, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25 (3): 17 - 20.
- [16] 马峰, 阎存凤, 马达德, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩储集层气藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 266 - 273.
- Ma Feng, Yan Cunfeng, Ma Dade, et al. Bedrock Gas Reservoirs in Dongping Area of Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (3): 266 - 273.