

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0709-10

# 高效气源灶及其对形成高效气藏的作用

赵文智<sup>1</sup> 王兆云<sup>1</sup> 汪泽成<sup>1</sup> 王红军<sup>1</sup> 张水昌<sup>1</sup> 王云鹏<sup>2</sup> 赵长毅<sup>1</sup> 苗继军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国石油天然气股份公司石油勘探开发研究院 北京 100083) <sup>2</sup>(中国科学院广州地球化学所 广州 510640)

**摘要** 厘定了高效气源灶的概念和评价指标。高效气源灶是指具有一定分布范围的高有机质丰度气源岩在特定的热力或生物化学营力作用下高效生气,且这一过程与天然气聚集成藏作用在时、空间有良好耦合关系,从而在大中型气藏形成中高效发挥作用的气源灶。包含两方面涵义,生气的物质基础和生气的热动力学过程。因此,评价指标从三方面考虑,一是气源灶生气强度高,这里沿用戴金星提出的形成大中型气田的评价指标,大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$ ;二是主生气期的作用时间短,通过 、 、 型气源岩及原油的生烃动力学研究,以及对我国主要含气盆地气源灶主生气期作用时间统计分析,确定主生气期作用时间小于 40Ma,尤以小于 20Ma 为优;三是主生气期完成时刻距今的时间晚,晚期成藏有利于天然气的保存。高效气源灶对形成高效气藏的贡献在于单位时间内供气数量大,以及由此产生的高效运聚作用和天然气散失数量少等。根据源岩母质类型和生气的动力学过程,我国有三类六种高效气源灶。

**关键词** 高效气源灶 高效成藏作用 主生气期作用时间 评价指标 油裂解型气源灶

**第一作者简介** 赵文智 男 1958 年出生 博士 教授级高级工程师 石油地质

**中图分类号** P618 130.2 TE122 **文献标识码** A

气源灶是否发育及其质量的优劣是决定气藏能否形成及其规模大小的首要条件<sup>[1~3]</sup>。戴金星于 1996 年就提出生气强度大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$  是形成大中型气田的主控因素之一,其有效指导了我国天然气的勘探并进入天然气快速发展时期<sup>[4~7]</sup>。可见,气源灶的优质和生气总量大是形成大中型气田的物质保障。虽如此,但对于同样优质气源灶来说,由于生气过程不同以及主生气期发生的早晚不同,同样也控制气藏能否形成及其储量规模。为此,我们提出了高效气源灶的概念及其定量化的评价指标。

## 1 高效气源灶的概念及与有效气源岩、气源灶的异同

### 1.1 高效气源灶的基本概念及涵义

高效气源灶是针对高效气藏的高效成藏作用而提出的,它突出强调气源灶大量生气、排气与聚气的效率。因此,高效气源灶的基本概念定义为:高效气源灶是指具有一定分布范围的高有机质丰度气源岩在特定的热力或生物化学营力作用下高效生气,且这一过程与天然气聚集成藏作用在时、空间有良好耦合关系,从而在大中型气藏形成中高效发挥作用的气源

灶。包含两方面涵义,生气的物质基础和生气的热动力学过程。在生气潜力高强度前提下,生气强度大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$  (戴金星提出的形成大中型气田的评价指标),高效气源灶的热动力学过程是快速埋藏或高受热导致的快速熟化和高效生气,表现为生气作用时间短,单位时间内供气量大。

### 1.2 高效气源灶与有效气源岩、气源灶的异同

有效气源岩是指达到气源岩评价指标,能够生成工业性聚集的那些气源岩。气源灶是经气源对比和勘探证实已经为发现气藏提供了气源的有效气源岩,气源灶是在含油气系统划分的基础上,强调有效气源岩对工业性气聚集的贡献及现实性。高效气源灶是在气源灶基础上,加入经受的热动力学过程,即考察主生气期的作用时间,专指气源灶中那类质量优、生气效率高及生、排烃过程与优质圈闭有着良好耦合关系的气源灶,突出强调气源灶大量生气、排气与聚气的效率。三者间的相互关系示于图 1,三者分布的普遍性构成递减序列。

表 1 以四川盆地为例,讨论了有效气源岩、气源灶和高效气源灶间的关系。四川盆地发育 6 套有效气源岩。根据气藏成因及气源对比结果,可划分出 4

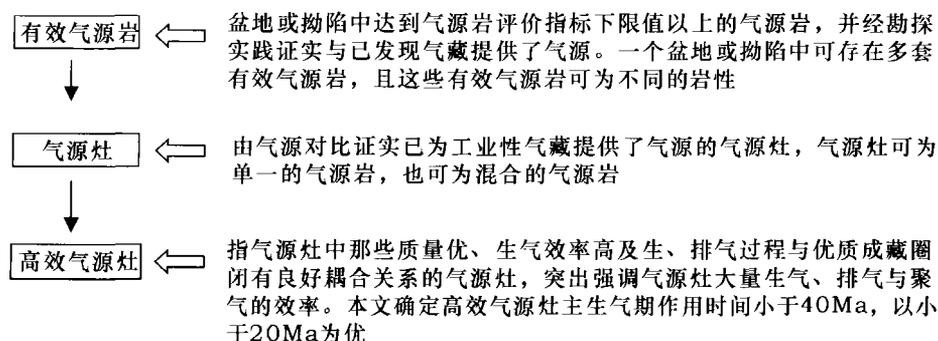


图 1 有效气源岩、有效气源灶和高效气源灶的关系

Fig 1 The relationship among effective gas source rocks, gas source kitchens and high effective gas source kitchens

表 1 四川盆地有效气源岩、气源灶及可能存在的高效气源灶

Table 1 Effective gas source rocks, gas source kitchens and possible high effective gas source kitchens developed in Sichuan basin

有效气源岩	含油气系统划分及气源灶				高效气源灶
	含气系统	气源灶	储层	典型气藏	
Z <sub>2</sub> 灯影组、 I <sub>1</sub> 邛竹寺组、 S <sub>1</sub> 龙马溪组、 P <sub>2</sub> 栖霞、茅口组	~Z S~C	海相泥岩、页岩、 Z藻白云岩 S海相泥岩、页岩	Z碳酸 盐岩 C碳酸 盐岩	威远震旦系气田、资 阳含气构造 五百梯、沙坪场、卧龙河、 罗家寨、铁山、渡口 河、铁山坡、金珠坪	海相泥(页)岩、 S海相泥(页)岩、 P泥岩、煤系和灰岩
P <sub>1</sub> 长兴组、 P <sub>1</sub> 龙潭组煤系	P <sub>2</sub> ~T <sub>1</sub> P自生自储 含气系统	主要: P <sub>2</sub> 泥页岩、煤系、灰岩 次要: P <sub>1</sub> 泥页岩、煤系、灰岩 P <sub>1</sub> 和 P <sub>2</sub> 泥页岩、煤系、灰岩	T <sub>1</sub> /鲕滩 P砂、生 物礁	沙湾场、沙坪坝	

个含油气系统<sup>[8]</sup>,其中威远气田、资阳含气构造属于Z+ ~Z含气系统,寒武系海相泥岩、页岩是其主要气源灶;五百梯、沙坪场、卧龙河等气藏属于S~C含气系统,志留系海相泥岩、页岩为其主要气源灶;罗家寨、铁山、渡口河等气藏属于P<sub>2</sub>~T<sub>1</sub>含气系统,P<sub>2</sub>泥岩、煤系、灰岩为其主要气源灶;沙湾场、沙坪坝等气藏属于二叠系(P)自生自储含气系统,P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>泥页岩、煤系、灰岩为其主要气源灶。这些气源灶生气强度均大于20×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>(图2)。

以志留系气源灶为例考察地质历史中的生油、气速率(表2)。三叠纪为主要生油期,随后依附于古隆起背景先形成大型油藏。侏罗纪中晚期进一步升温发生油裂解成气。古油藏的形成可视为高效气藏形成过程中有机质的一次富集过程。原油裂解生气活化能的正态分布范围与干酪根热降解成烃相比,具有分布更集中的特点<sup>[9-13]</sup>,表明原油可在较窄的温度范围内就能大量裂解成气,成气效率很高。因此,四川盆地的寒武系海相泥(页)岩、志留系海相泥(页)岩、二叠系泥岩、煤系和灰岩均是高效气源灶。古油

藏的分布和规模控制了现今大中型气田的分布,是“源控论”的另一种表现形式。因此,高效气灶可用图1表去表征,即生气强度等值线图 and 完成生气过程作用时间表。

### 1.3 研究高效气源灶的意义

高效气源灶是在气源灶基础上,加入气源灶经受的热动力学过程以及发生运移的天然气空间分配与可成藏圈闭在时、空间的耦合关系,因此,对形成高效气藏的贡献不仅在于单位时间内的供气数量大,而且也有气源灶内部因快速生气产生的微裂缝发生幕式排气<sup>[14]</sup>,使运移效率更高,由于单位时间的快速供气导致天然气运移疏导体系与常规气源灶的不同,以及成藏时间相对“短促”,减少了天然气散失数量等,这些都是高效气藏形成的重要因素。因此,从天然气运聚成藏机理分析,高效气源灶的排气机理和二次运移途径不同与常规气源灶;从高效气藏勘探效率分析,高效气源灶是高效气藏形成的基本条件,在高效气源灶发育区发现高效气田的几率最大。

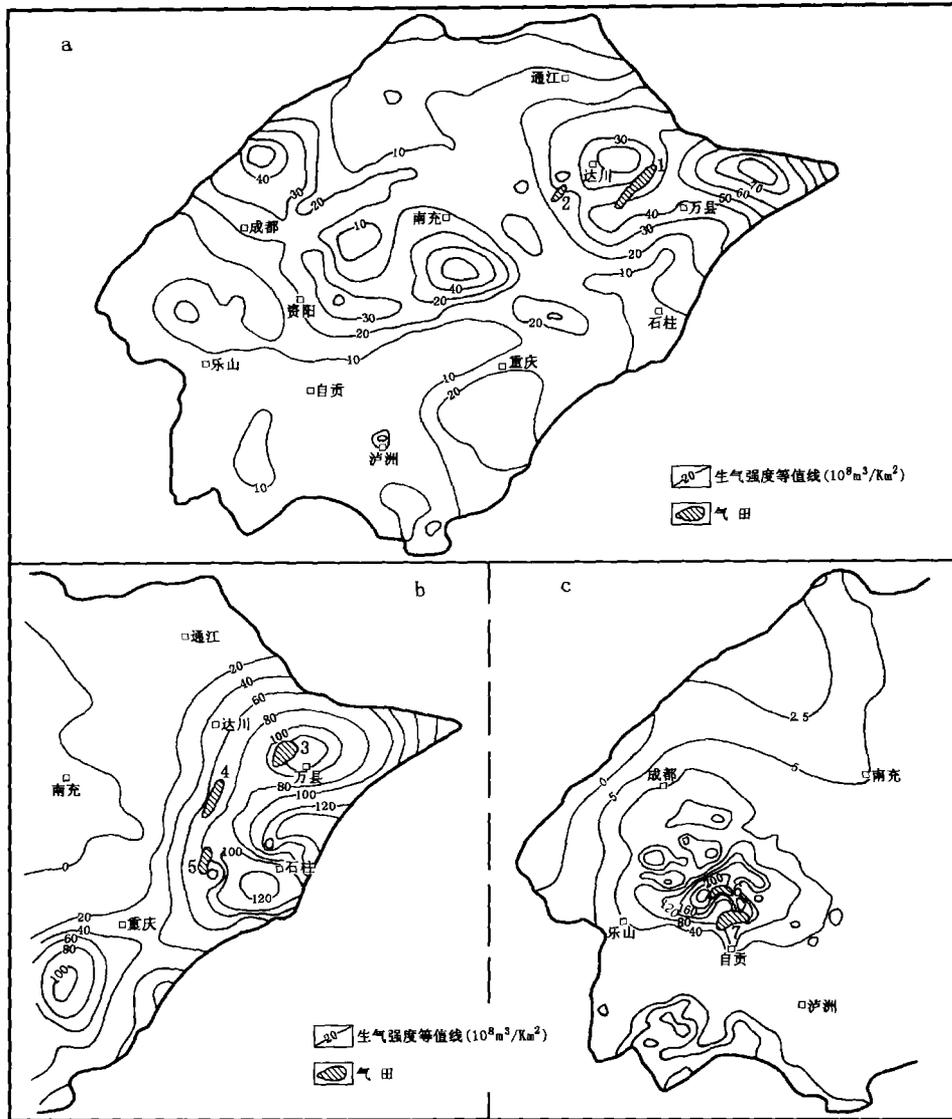


图 2 四川盆地上二叠统、志留系、寒武系气源灶生气强度与大气田分布

Fig 2 The gas generating intensity of upper Permian, Silurian and Cambrian and the distribution of large gas fields in Sichuan basin

a—上二叠统生气强度; b—志留系生气强度; c—寒武系生气强度。1 - 罗家寨气田; 2 - 铁山气田;  
3 - 五百梯气田; 4 - 沙坪场气田; 5 - 卧龙河气田; 6 - 威远气田; 7 - 资阳含气构造

a—upper Permian; b—Silurian; c—Cambrian 1 - Luojiatai; 2 - Tieshan; 3 - Wubaiti; 4 - Shapingchang; 5 - Wolonghe; 6 - Weiyuan; 7 - Ziyang

表 2 四川盆地志留系气源灶在地质历史过程中的生油气速率 (单位:  $10^8$  t/Ma)

Table 2 The oil and gas generation rate of Silurian gas source kitchen during the whole evolution process in Sichuan basin (Unit:  $10^8$  t/Ma)

油气产率 内容	时代	S	D	C	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	T <sub>1+2</sub>	T <sub>3</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>1+2</sub>	K	N
生油速率		3.03	0.92	1.68	1.13	1.86	8.67	6.73	2.68	-13.09*	-1.85*	-0.09*
生气速率		0.75	0.01	0.01	0.03	0.10	1.54	2.51	2.92	19.27	9.23	1.94
作用时间 /Ma		35	80	45	40	10	25	15	18	35	72	65

\* 负值表明油裂解生成了气

## 2 高效气源灶的评价指标

根据高效气源灶的概念和涵义,高效气源灶的评价指标从三方面考虑,一是气源灶生气强度大,这里沿用戴金星提出的形成大中型气田的评价指标,大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ;二是主生气期的作用时间短,本文通过 、 、 型气源岩及原油的生烃动力学研究,以及对我国主要含气盆地气源灶主生气期作用时间统计分析,确定主生气期作用时间小于 40 Ma,尤以小于 20 Ma 为优;三是主生气期完成时刻距今的时间晚,晚期成藏有利于天然气的保存。

### 2.1 不同热作用条件下天然气的生成速率比较

实际地质体中,不同盆地或同一盆地不同历史时期热演化速率不同。在较高的升温速率下,快速埋藏或高地温场条件,气源灶在相对较短的地质时期内就达到较高的天然气转化率,而在较低的升温速率下,需要较长的地质时间才能达到相同的天然气转化率。图 3 中曲线 7,以  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  的升温速率,气源灶则在 20 Ma 内就完成了整个生气过程;曲线 1 以  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  的升温速率,气源灶则需 250 Ma 才能完成整个生气过程。

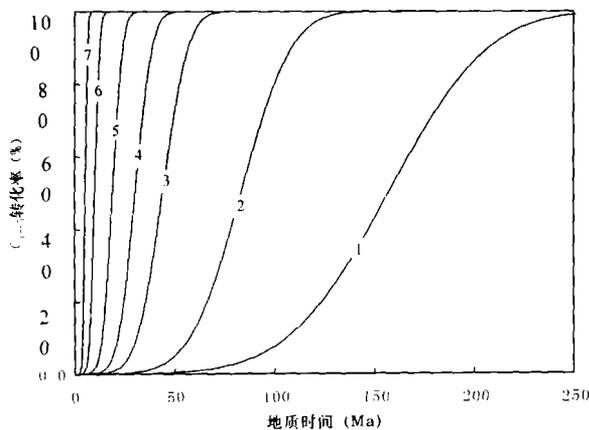


图 3 不同升温速率条件下天然气转化率曲线

Fig 3 Gas conversion ratio curve under different geothermal gradient  
1.  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ; 2.  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ; 3.  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ; 4.  $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ;  
5.  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ; 6.  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ; 7.  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$

快速埋藏和高受热是高效气源灶形成的动力。快速埋藏导致的快速受热或较高的地温梯度能使埋藏较浅或地质时代较新的气源岩大量生气,如印度尼西亚的中苏门答腊盆地沉积岩厚度小于 3 000 m,但由于高地温条件,包括靠近苏门答腊—爪哇火山链的

热传导以及火成岩侵入造成的局部热烘烤,生油窗很浅,约在 1 200 m,使烃源岩在上第三纪生成了  $37 \times 10^8$  的石油资源量。持续的高热和进一步的深埋,加速了有机质向烃类的转化,并导致液态烃进一步裂解为天然气。我国塔里木盆地库车拗陷和琼东南盆地乐东凹陷天然气藏的形成是快速埋藏和高受热导致的高效气源灶成藏,是形成高效气藏的典型实例。

#### 2.1.1 快速埋藏导致的高生气速率实例——塔里木盆地库车拗陷

塔里木盆地库车拗陷是一个中新世发育起来的前陆拗陷,已经发现了一批大中型气田,其中克拉 2 气田是一个储量大、整装好又高丰度的高效大气田,探明天然气地质储量  $2 830 \times 10^8 \text{ m}^3$  [15]。经气源对比确定气源岩是三叠—侏罗系的湖相泥岩和煤系。本文利用塔里木盆地库车拗陷钻探的却勒 1 井研究了该区的埋藏与受热历史。该井已钻穿白垩系,进入侏罗系完钻。因此可用白垩系底的埋藏、受热和热演化剖面,代表侏罗系顶的生烃演化历史(图 4a)。库车拗陷的受热史随时间呈降低变化,地温梯度在中生代为  $3.1 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$ ,自第三纪以来,从  $2.8 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$  降至现今的  $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  [13]。加之拗陷中中生界总厚度不够大,所以气源岩在晚第三纪以前一直处于未熟阶段,  $R_o < 0.6\%$ 。晚第三纪(23 Ma)以来,库车拗陷强烈沉降快速堆积了 5 000 m 以上的地层,尤其是上新世(5 Ma)以来堆积的厚度超过 3 500 m,导致气源岩快速埋深到 6 000 ~ 7 000 m 以下(图 4a)。从白垩系底的埋藏史看,三叠—侏罗系气源岩最迟在距今 15 Ma 以前就进入生油门限 ( $R_o = 0.6\%$ ), 5 Ma 时进入生油高峰 ( $R_o = 1.0\%$ ), 现今  $R_o$  达 2.1%。在短短的 5 Ma 期间,白垩系底  $R_o$  值从 1.0% 增至 2.1%, 5 Ma 以来的快速生气过程对库车拗陷高效气田的形成和保存十分有利。

#### 2.1.2 高地温场导致的高生气速率实例——琼东南盆地乐东凹陷

热作用是促使烃源岩成熟生烃的重要因素。琼东南盆地的天然气成藏是高受热成气的典型实例。琼东南盆地乐东凹陷现今地温梯度平均为  $4.25 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ,乐东 30-1-1A 井和崖 13-1-1 井最高地温梯度分别达  $6.28 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  和  $6.56 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。高受热及快速埋藏使上第三系有机质在极短时间内(2 ~ 3 Ma)经历了从未熟、成熟到高熟的生烃演化过程 [16, 17]。乐东凹陷第三系埋藏和气源岩热演化剖面示于图 4b,上第三系底于距今 15 Ma 左右就进入生

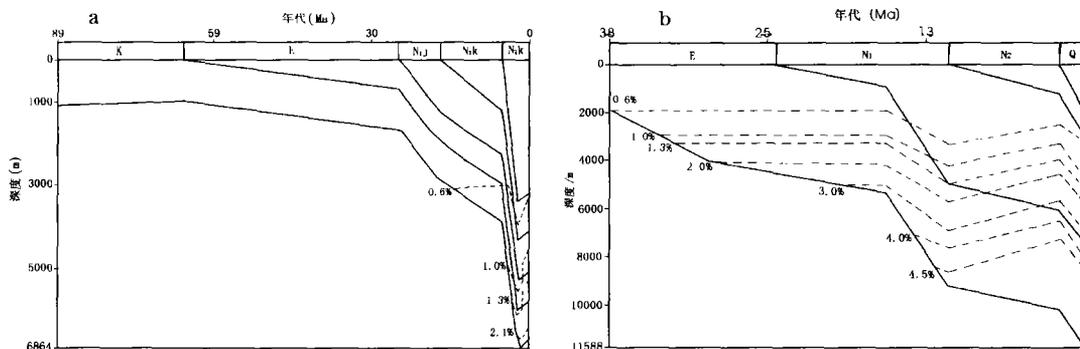


图 4 库车拗陷拜城凹陷却勒 1 井 (a)和琼东南盆地乐东凹陷第三系 (b)埋藏、受热和源岩演化史图 (图中数值为  $R_0$  值)

Fig 4 The burial, evolution history of gas source rocks (a) Well Quele 1 of Kuche depression, (b) the Tertiary source rocks of Ledong depression of Qiongdongnan Basin (The data in figure is  $R_0$  value)

油门限 ( $R_0 = 0.6\%$ ), 到 12 Ma 时已进入生油高峰 ( $R_0 = 1.0\%$ ), 距今 9 Ma 左右时  $R_0$  值达 2.0%, 加之 3 Ma 以来的快速埋藏, 现今  $R_0$  达到 4.0%, 这一过程使天然气生成、排出与聚集的效率极高。

### 2.2 不同成气母质主生气期的确定

天然气的生成贯穿于气源岩的整个演化过程, 但在不同演化阶段生气量不同, 每种类型气源岩均有一个大量生气的演化阶段或范围, 我们叫它主生气期。在主生气期内, 具有成气速率最快、生气量最多、效率最高的特点。因此, 抓关键问题, 即考察气源岩主生气期的作用时间, 此为天然气大量生成的关键时刻。

通过  $\Delta$ 、 $\Delta$  型气源岩的生烃动力学研究, 分别获得不同类型气源岩的天然气转化率曲线。 $\Delta$  型气源岩主生气期对应的  $R_0$  值为 1.2% ~ 2.3%;  $\Delta$  型气源岩主生气期对应的  $R_0$  值为 1.1% ~ 2.6%;  $\Delta$  型气源岩主生气期对应的  $R_0$  值为 0.7% ~ 2.0%。另外, 对塔里木盆地轮南地区下古生界海相烃源岩生成的原油, 轮古 2 井油的生气动力学研究, 主生气期对应的  $R_0$  值为 1.5% ~ 3.7%<sup>[18]</sup>。

### 2.3 高效气源灶的评价指标

针对高效气源灶生、排、聚气效率高的特点, 高效气源灶的评价指标用主生气期的作用时间来表示, 即完成大量生气过程所需的时间。基于生烃动力学研究数据, 作不同升温速率条件下干酪根的天然气转化速率和完成生气过程所需时间相关图 (图 5), 随着天然气转化速率的增大, 完成生气过程所需的时间缩短, 以作用时间 40 Ma 为拐点 (图 5 中曲线 4), 完成时间小于 40 Ma (5 Ma) 的气源灶, 天然气转化速

率急剧增大。而大于 40 Ma 的气源灶, 天然气转化率随作用时间的减少, 增大的幅度较小。因此, 主生气期的作用时间小于 40 Ma 是高效气源灶的评价指标之一。

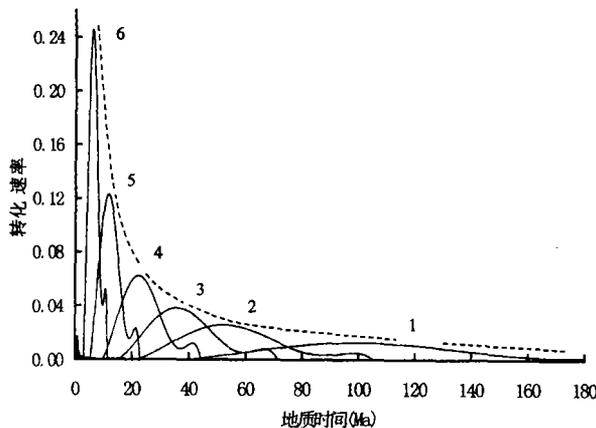


图 5 不同升温速率条件下天然气生成的作用时间与转化速率相关图

Fig 5 Gas conversion rate vs action time under the different geothermal gradient

- 1. 1 Ma; 2. 2 Ma; 3. 3 Ma;
- 4. 5 Ma; 5. 10 Ma; 6. 20 Ma

### 2.4 中国含气盆地主要气源岩主生气期作用时间分析

对中国大中型气田主要气源岩生气强度<sup>[19]</sup>和埋藏、受热史分析 (表 3), 主生气期作用时间以 40 Ma 为界, 小于 40 Ma 的气源灶, 均与盆地内发育的高效气藏有成因联系; 而大于 40 Ma 的气源灶, 盆地或拗陷中发育高效气藏的机率较小。因此, 根据气源灶主

表 3 截止 2003 年底中国大中型气田主要气源灶生气强度及主生气期作用时间

Table 3 Gas generation intensity and action time of finishing major gas generation process of main gas source kitchens of large-medium gas fields in China until 2003

盆地	气田	探明储量 / ( $\times 10^8 \text{m}^3$ )	主力 气层	储集层 主要岩性	主要 气源岩	最大生气强度 ( $\times 10^8 \text{m}^3 / \text{km}^2$ )	主生气期作用 时间 /Ma	主要成 因类型
四川	罗家寨	581.08	C、P	碳酸盐岩	P海相泥页岩、 灰岩、煤系	70	<40(油裂解气)	海相油 型气
	铁山	148.47	C、T <sub>1</sub>					
	五百梯	409.00	C、P					
	沙坪场	397.71	C					
	卧龙河	380.52	T、C、P					
	大池干井	237.09	C、P					
	龙门	211.62	C					
	西河口	137.90	C					
	高峰场	139.96	C					
	双家坝	101.70	C	碳酸盐岩	海相泥页岩	200	<40(油裂解气)	
	福成寨	101.74	C、T <sub>1</sub>					
	威远	408.61	Z					
	磨溪	375.72	T <sub>2</sub>	碳酸盐岩	P <sub>2</sub> 煤系	40	30	煤成气
	渡口河	271.65	T <sub>1</sub>					
	中坝	186.30	T <sub>3</sub> 、T <sub>2</sub>					
	平落坝	165.35	T <sub>3</sub> 、J					
	白马庙	268.72	J	砂岩、碳酸 盐岩	T <sub>3</sub> 煤系	100	30	
八角场	351.36	J <sub>1</sub> 、T <sub>3</sub>						
新场	652.04	J						
洛带	295.05	J <sub>3</sub>						
塔里木	和田河	616.94	O、C	碳酸盐岩、 砂岩	—O海相碳酸 盐岩、泥岩	70	<40(油裂解气)	海相油 型气
	吉拉克	127.05	T <sub>3</sub>					
	雅克拉	245.63	K <sub>1</sub>					
	克拉 2	2840.29	K	砂岩	J煤系	60	10	煤成气
	牙哈	376.45	E					
	英买 7	295.74	E					
	柯克亚	339.24	N、E <sub>1</sub>					
	羊塔克	249.07	E					
吐孜洛克	221.27	N						
迪那 2	807.61	E						
鄂尔多斯	长庆	5417.74	R、O	砂岩、碳酸 盐岩	C—P煤系、 C灰岩	80	80	煤成气
	苏里格	5336.52	P					
	长东	358.48	P					
准噶尔	克拉玛依	153.78	P	砂岩	P湖相泥岩	140	35	湖相油 型气
	莫索湾	145.90	P					
	呼图壁	126.12	E <sub>2</sub>					
柴达木	台南	425.30	Q	砂岩	Q亚煤系	80	<1.6	生物气
	涩北一号	990.61						
	涩北二号	826.33						
	南八仙	124.39						
吐哈	温吉桑	128.84	J <sub>2</sub>	砂岩	J煤系	30	120	煤成气
松辽	昌德	182.26	BS、J <sub>1</sub>	砂岩	K湖相泥岩、 煤系	60	30	湖相油 型气

续表 3

渤海湾	千米桥	358.78	E	砂岩	E湖相泥岩	35	35	湖相油型气
	板桥	195.97	E					
	兴隆台	170.80	A <sub>1</sub> E <sub>3</sub>					
	锦州 20-2	135.40	E, Pt	砂岩、结晶岩	C-P煤系	40	150	煤成气
	苏桥	125.62	O, P	碳酸盐岩、砂岩				
	白庙	106.99	E <sub>3</sub>	砂岩				
	文中	152.32	E <sub>3</sub>					
大牛地	1186.12	P			60	150		
莺琼	崖 13-1	978.51	E	砂岩	E煤系	80	18	煤成气
	东方 1-1	996.80	N					
	乐东 22-1	431.04						
	乐东 15-1	178.80						
	番禺 30-1	300.92						
东海	平湖	170.51	E	砂岩	E煤系	60	20	煤成气
	断桥	116.10						
	天外天	209.78						
	宝云亭	112.06						
	春晓	330.43						

生气期作用时间与高效气藏出现几率的统计分析,40 Ma作为高效气源灶划分的指标具有勘探应用价值。

### 3 高效气源灶对形成高效气藏的作用

#### 3.1 单位时间内供气数量大

在气源灶规模和质量已定的情况下,在最佳成藏时间段(如圈闭形成期后),气藏形成的可能性与规模决定于气源岩的生气效率,即  $Q_g = C_{org} \cdot V \cdot m \cdot K_r \cdot I_g$ ,其中  $Q_g$ 为气产量; $C_{org}$ 为残余有机碳含量; $V$ 为岩石体积; $m$ 岩石密度; $K_r$ 为恢复系数; $I_g$ 生气效率。而产气率是温度和时间的函数,快速受热可使气源岩经受生气所需的时间较短,单位时间产气率高,生气量大,对气藏的供气量亦大,因而在聚与散之间就容易有一个超量的富余。

#### 3.2 高效气源灶区天然气的疏导体系不同于常规气源灶

高效气源灶具有单位时间内天然气的大量生成和从源岩中排出的特点,因此高效气源灶区天然气的疏导体系与常规气源灶相比,疏导体系物性条件有所降低、产气量增大。鄂尔多斯盆地榆林—靖边高丰度快速供气区和伊盟隆起区低丰度慢速供气区的产气量对比可见不同,相关参数列于表 4。榆林—靖边气田处在高丰度( $28 \times 10^8 \sim 32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ )快速供气区(主生气期作用时间 38 Ma)内,有效运移通道(用含气层表示)物性下限值孔隙度和渗透率分别为

2.94%和  $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,形成的气藏丰度明显偏高( $0.924 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ),产量也高。伊盟隆起处在生气低丰度( $6 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ )、慢速供气区(完成大量生气作用需 120 Ma),有效运移通道物性下限值孔隙度和渗透率分别为 6.06%和  $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,形成气田的储量丰度偏低,规模偏小,产量也低。快速和慢速供气区相似物性条件下(孔隙度 10.99%~11.0%、渗透率  $1.07 \sim 1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )产气量分别为  $21.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和  $3.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,前者是后者的 5.7倍,说明快速供气对高效气藏形成的作用。

#### 3.3 单位时间内大量供气可缩短成藏作用时间,减少天然气散失量

天然气分子小、重量小、易扩散且速度快等特征决定了气藏的规模受控于聚气速率、聚气时间、散失速率和保持时间。高效气源灶提供了高效的聚气速率,在气藏封盖性能一定的条件下,短时间内的大量供气有利于气藏聚气总量与聚气丰度的增大。成藏作用时间短及晚期成藏减少了天然气散失数量<sup>[20]</sup>。表 5列举了松辽盆地昌德地区气藏储量与天然气扩散时间和扩散量的关系。昌德气藏目前探明地质储量  $117.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该气藏于泉头组沉积未形成,至今 125.1 Ma,扩散损失气量  $205.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是目

资料由戴金星提供。

表 4 快速和慢速供气区含气层物性和产气量对比

Table 4 The contrast of transport materiality and gas production between quick and slow gas supply area

地区		榆林—靖边地区	伊盟隆起	备注
气源灶类型		高丰度快速供气区	低丰度慢速供气区	
供气条件	生气强度 / ( $\times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$ )	28 ~ 32	6 ~ 8	
	白垩纪古地温 / ( $^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$ )	4.5 ~ 5.3	3.91	
	大量生气作用时间 / Ma	38	120	
含气层(有效运移通道)物性下限	孔隙度 / %	2.94	6.06	铺 1 井, 盒 8 段, 2124m
	渗透率 / ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0.11	1.13	盟 2 井, 盒 7 段, 2861m
相似物性条件下气层的产气量	孔隙度 / %	10.99	11	陕 99 井, 盒 8 段, 3361m 伊 17 井, 盒 6 段, 2674m
	渗透率 / ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	1.07	1.1	
	产气量 / ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	21.45	3.75	

表 5 松辽盆地昌德气藏天然气扩散散失时间及扩散量

Table 5 Gas diffusion time and diffusion quantity in the Changde gas field, Songliao basin

地质时期	扩散时间 (Ma)	扩散量 ( $10^8 \text{ m}^3$ )
青山口组	11.50	17.68
姚家组	4.50	7.59
嫩一段至嫩三段	7.77	12.70
嫩四段至今	101.33	167.50
总计	125.10	205.47

前储量的 175.5%。也就是说该气田在泉头组末期形成时是个储量为  $322.55 \times 10^8 \text{ m}^3$  的大气田, 由于扩散目前成为一个中型气田。

#### 4 高效气源灶类型

高效气源灶形成的动力是快速埋藏或高地温场导致的高受热或特定条件下的生物化学营力。根据源岩类型、生气的热动力学过程划分为三类六种高效气源灶, 详见表 6。我国煤系高效气源灶生烃高峰期和成藏期较晚, 均在第三纪和第四纪形成; 而叠合盆地中下部组合海相源岩形成的气田生烃高峰期和成藏期稍早, 但海相烃源岩优质的生烃母质决定了成烃过程中油气比高, 古油藏或分散型可溶有机质的形成是有机质一次富集过程, 原油在高温条件下的不稳定性以及达到裂解的热力学条件后, 快速成气。因此原油的热裂解是海相源岩成气的重要途径, 油裂解快速成气使海相源岩成为高效气源灶。生物气高效气源灶主要形成于第四纪。因此, 高效气源灶加晚期成藏, 对形成高效、大中型气藏的几率较大。

#### 5 结论

(1) 厘定了高效气源灶的基本概念。高效气源

表 6 我国高效气源灶类型及分布

Table 6 The type of high effective gas source kitchens and its distribution

类型	亚类	分布
煤系高效气源灶	低地温场晚期快速深埋型	塔里木盆地库车坳陷、塔西南坳陷、准噶尔南缘
	高地温场晚期快速深埋型	莺—琼盆地
	高地温场持续深埋型	松辽深层
	高地温场早期持续受热晚期停滞型	川西上三叠统
原油裂解高效气源灶	古油藏或分散原油裂解型	塔里木盆地寒武系—奥陶系、四川盆地寒武系、志留系、二叠系
生物气高效气源灶	浅层生物降解型	柴达木三湖地区第四系

灶是指具有一定分布范围的高有机质丰度气源岩在特定的热力或生物化学营力作用下高效生气, 且这一过程与天然气聚集成藏作用在时、空间有良好耦合关系, 从而在大中型气藏形成中高效发挥作用的气源灶。包含两方面涵义, 生气的物质基础和生气的热动力学过程。高效气源灶突出强调气源灶单位时间内的快速生气过程。

(2) 建立了高效气源灶的评价指标。高效气源灶评价指标从三方面考虑, 一是气源灶生气强度。这里沿用戴金星提出的形成大中型气田的评价指标, 大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$ ; 二是主生气期的作用时间。本文通过、型气源岩及原油的生烃动力学研究, 主生气期的作用时间 40 Ma 是个转折点, 小于 40 Ma 的气源灶, 天然气转化率急剧增大。另外, 对中国含气盆地主要气源岩主生气期作用时间统计分析, 小于 40 Ma 的气源灶, 均与盆地内发育的高效气藏有成因联系; 而大于 40 Ma 的气源灶, 盆地或坳陷中发育高

效气藏的几率较小。因此,高效气源灶主生气期作用时间小于 40 Ma,尤以小于 20 Ma 为优;三是主生气期完成时刻距今的时间晚,晚期成藏有利于天然气的保存。

(3) 高效气源灶形成的动力是快速埋藏或高地温梯度导致的高受热。高效气源灶对形成高效气藏的贡献在于单位时间内供气数量大,以及由此产生的高效运聚作用和天然气散失数量少等。根据源岩母质类型和生气的动力学过程,我国有三类六种高效气源灶。

### 参考文献 (References)

- 戴金星. 近四十年来世界天然气工业发展的若干特征. 天然气地球科学, 1991, 2(6): 245 ~ 52 [Dai Jinxing Characteristics on the development of the world natural gas industry during the recent 40 years Natural Gas Geoscience, 1991, 2(6): 245 ~ 52]
- Halbouty T.M. Geology of Giant Petroleum Fields Tulsa, Oklahoma, 1970
- 张子枢. 世界大气田概论. 北京:石油工业出版社, 1990. [Zhang Zishu Conspectus of the World Giant Gas Fields Beijing: Petroleum Industry Press, 1990]
- 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, 1996, 26(6): 481 ~ 487 [Dai Jinxing, Song Yan, Zhang Houfu Main factors controlling the foundation of medium-giant gas fields in China Science in China (Series D), 1996, 26(6): 481 ~ 487]
- 戴金星, 夏新宁, 洪峰. 天然气地质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 [Dai Jinxing, Xia Xinyu, Hong Feng Natural gas geology accelerated the large-scaled growth of natural gas reserve in China Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(5): 357 ~ 365]
- 戴金星. 加强天然气地质研究: 勘探更多大气田. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 1 ~ 14 [Dai Jinxing Emphasizing earth research of natural gas for exploring more large gas field Natural Gas Geoscience, 2003, 14(1): 1 ~ 14]
- 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, 2003 [Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning, et al China Large Gas Field and Their Gas Source Beijing: Science Press, 2003]
- 赵文智, 等. 中国含油气系统基本特征与评价方法. 北京: 科学出版社, 2003 [Zhao Wenzhi, et al The Features of Petroleum Systems in Superimposed Sedimentary Basin of China and their Evaluation Methodology Beijing: Science Press, 2003]
- Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, et al Gas formation mechanism of marine carbonate source rocks in China Science in China, 2005, 48(4): 441 ~ 453
- Behar F, Vandenbroucke M, Tang Y, et al Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation Organic Geochemistry, 1997, 26(5/6): 321 ~ 339
- Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz L, et al Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking Organic Geochemistry, 1992, 19(1-3): 173 ~ 189
- Andrew S Pepper, Timothy A Dodd Simple kinetic models of petroleum formation Part 1: oil-gas cracking Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(3): 321 ~ 340
- Schenk H J, Primio R Di, and Horsfield B. The conversion of oil into gas in petroleum reservoirs Part 1: comparative kinetic investigation of gas generation from crude oils of lacustrine, marine and fluviodeltaic origin by programmed-temperature closed-system pyrolysis Organic Geochemistry, 1997, 26(7-8): 467 ~ 481
- Robert R B, Anthony F G Primary migration by oil-generation microfracturing in low-permeability source rocks: application to the Austin Chalk, Texas AAPG Bulletin, 1999, 83(5): 727 ~ 756
- 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军, 等. 库车拗陷的油气成藏期. 科学通报, 2002, 47(增刊): 56 ~ 63 [Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhao Mengjun, et al Kuche depression oil-gas reserving period Chinese Science Bulletin, 2002, 47(Suppl): 56 ~ 63]
- 邓鸣放, 陈伟煌. 崖 13-1 大气田形成的地质条件. 见: 石宝珩, 天然气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1992. 73 ~ 81 [Deng Mingfang, Chen Weihuang The forming geology condition of Ya 13-1 giant gas field In: Shi Baoheng, ed Study on Natural Gas Geology Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. 73 ~ 81]
- 孙嘉陵. 南海崖 13-1 气田特征及富集成藏条件. 天然气工业, 1994, 12(4): 1 ~ 8 [Sun Jialing The characteristics of Nanhai Ya 13-1 gas field and its enrichment pool-formed conditions Natural Gas Industry, 1994, 12(4): 1 ~ 8]
- 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1 ~ 7 [Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al Successive generation of natural gas from organic material and its significant in future exploration Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1 ~ 7]
- 戴金星. 天然气地质和地球化学论文集 (卷一、二、三). 北京: 石油工业出版社, 1998. 2000. 2002 [Dai Jinxing Selected Works of Natural Gas Geology and Geochemistry Vol 1, 2, 3. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. 2000. 2002].
- 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, 13(1): 10 ~ 19 [Dai Jinxing, Wei Yanzhao, Zhao jinzhou Important role of the formation of gas accumulations in the late stage in the formation of large gas fields Geology in China, 2003, 13(1): 10 ~ 19]

## Concept, Connotation and Evaluation Index of High Effective Gas Source Kitchen and Its Action to the Formation of High Effective Gas Pool

ZHAO Wen-zhi<sup>1</sup> WANG Zhao-yun<sup>1</sup> WANG Ze-cheng<sup>1</sup> WANG Hong-jun<sup>1</sup>  
ZHANG Shui-chang<sup>1</sup> WANG Yun-peng<sup>2</sup> ZHAO Chang-yi<sup>1</sup> MIAO Ji-jun<sup>1</sup>

1( Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083)

2( Guangzhou Geochemical Institute, CAS, Guangzhou 510640)

**Abstract** Concept, connotation and evaluation index of high effective gas source kitchen are discussed in the paper. High effective gas source kitchen refers to those that not only has high abundance of organic matter and good quality type of source rocks which can generate large amount of gas under the geothermal and biology action, but also has a good coincidence with the large scale gas accumulation and pool forming in time and space, therefore, it plays an important role in the formation of large and medium gas pool. High effective gas source kitchen includes two profiles connotation, that are material basis and thermal kinetics process of gas generation. So, the evaluation index are discussed from three features as follows: the first is high intensity of gas generation (generally larger than  $20 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$ ), derived from large and medium gas field advocated by Jinxing-Dai; the second is short action time of main gas generation period, which is confirmed through gas generation kinetics studies of source rocks of type , and and crude oil, and the statistic analysis of main gas generation time of main gas source rocks in China, the major gas generation period of high effective gas source kitchen is usually less than 40Ma, especially better less than 20Ma. The third is that ending time of major gas generation period is very close to present, which is important to the formation of gas accumulations in the late stage. The contributions of high effective gas source kitchen to the formation of high effective gas pool lies in high rate of gas supply resulting in high effective accumulation and migration of gas, besides little loss of natural gas etc. According to the type of source rocks and kinetics process of gas generation, three groups, including six sub-groups, of high effective gas source kitchens are classified in China.

**Key words** high effective gas source kitchen, high effective gas pool, major gas generation period, evaluation index, oil cracked gas source kitchen