

天然气地球化学

天然气气源对比研究方法进展

申宝剑^{1,2}, 黄智龙¹, 刘洪文¹, 李向博^{1,3}, 林治家², 许 成¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 胜利油田现河采油厂地质所, 山东 东营 257062)

摘要:一直以来同位素地球化学在气源对比研究中发挥着重要作用, 天然气组分碳、氢稳定同位素已经用于判别天然气的烃源岩、源岩热演化程度和成藏过程, 稀有气体同位素也已经广泛运用于天然气的来源判别。近年来, 又发展了诸如流体包裹体气源对比方法, 利用苯、甲苯、二甲苯、甲基环己烷等轻烃单体碳同位素气源对比方法, 天然气组分的详细解剖与气源直接对比方法和气源动态综合对比方法等, 这些方法促进了天然气气源对比的深入研究。比较系统地介绍了气源对比方法上的发展、创新和今后发展的一些趋势。

关键词:气源对比; 流体包裹体; 稀有气体; 碳同位素

中图分类号: TE122.1⁺¹⁴

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2007)02-0269-06

国外最早运用气体的地球化学特征来判别天然气的类型、烃源岩特征、成熟度和气体是干酪根初次分裂还是二次分裂形成^[1-5]。本文主要介绍中国天然气气源对比研究取得的一些进展。我国多采用模式化的天然气成因鉴别指标方法^[6-11]。即综合分析已知气藏的地球化学特征, 结合地质实际, 总结出不同成因类型和成熟度天然气的系列鉴别指标(表 1), 用之于新发现气藏的气源对比研究。但是, 天然气藏普遍具有多源复合、多阶连续^[12]的成藏特征, 加上天然气成分简单、可供选择的指标较少, 气源对比研

究一直是油气地球化学研究的一个难点。尤其在我国的各盆地的地质情况都非常复杂, 气田普遍受到多期构造运动影响, 存在多套烃源岩。此外, 由于我国开展天然气气源对比专门研究的时间不是很长和受实验技术手段等的制约, 使得采用这种间接的成因鉴别指标方法存在很多问题^[13], 也存在很大争论, 如在发现已有 10 多年的鄂尔多斯盆地中部气田^[14-15]问题上。近年来, 人们建立了一系列新的气源直接对比研究方法, 如利用精确的 He、Ne、Ar、Kr、Xe 等稀有气体同位素比值进行气源对比, 利用流体

表 1 各成熟阶段天然气鉴别

项目	石蜡指数	庚烷值 (%)	烷-芳指数 (%)	Ro (%)	CH ₄ 含量 (%)	C ₂ + 含量 (%)	C ₁ /C ₁₋₅	C ₂ /C ₃	δ ¹³ C ₁ (‰)	¹³ C ₂ (‰)	δ ¹³ C ₃ (‰)	δ ¹³ CCO ₂ (‰)	δDCH ₄ (‰)	
生物气				<0.3	>95	<1~2	0.95~1.00	>2.0	<-55				-287~-158	
油型气	生物-热催化过渡带气	<1	<10	<2.5	0.3~0.6	>70	10 左右	0.7~0.97	1.0~5.0	-55~-48			-250~-180	
	原油伴生气	1~3	10~35	2.5~22	0.6~1.3	>50	>5	0.50~0.90	0.9~3.5	-48~-40	<-30.0	<-25.55*	<-10	-300~-165
	凝析油气	3~10	35~60	22~60	1.3~2.0	60	>5	0.60~0.90	0.9~3.0	-40~-36			>-250~-140	
	高温裂解气				>2.0	>95	<5	0.95~1.00	1.0~3.0	>-36			>-192~-130	
煤成气				<0.3	>95		0.95~1.00	>2.0	<-60				<-200	
气	生物-热催化过渡带气	<1.5	<10	>3.0	0.3~0.6	>70	>5	0.70~0.95	0.8~3.0	-60~-45	>-28.0	>-23.2*	<-10	-280~-180
	热解气	1.5~2.0	10~60	3.0~80	0.6~2.0	>70	>5	0.70~0.95	0.8~3.0	-45~-30			-230~-150	
	高温裂解气				>2.0	>95	<5	0.95~1.00	1.5~7.0	>-30			>-150	

注:表中数据据刘文汇、徐永昌(1996), * 数据据戴金星(1982)

收稿日期: 2006-09-10; 修回日期: 2007-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金“济阳坳陷火成岩地球化学、成因及其与非烃气成藏的关系研究”(编号: 04-12-01 05-12-01)资助。

作者简介: 申宝剑(1978-), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事深部流体与天然气成藏关系研究。E-mail: shenbaoj@163.com.

包裹体资料进行气源直接对比,利用苯、甲苯的碳同位素比值进行对比,对天然气组分的详细解剖与气源直接对比,在鉴别天然气类型的基础上进行气源动态对比。

1 利用成因鉴别指标进行气源对比

利用成因鉴别指标进行气源对比一直是气源对比的主要方法之一。成因鉴别指标一般可分为与天然气伴生的凝析油和储层沥青中生物标志化合物、同位素、气组分和轻烃 4 种。研究的初期阶段, C_1-C_4 稳定碳同位素是主要的对比方法,但受热成熟度、运移和扩散等因素的影响,用 C_1-C_4 稳定碳同位素方法不能直接进行天然气与源岩对应组分的稳定碳同位素值对比,因此对比的可靠性不是很好,甚至由于碳同位素系列的倒转而使对比结果存在多解性^[16],对一些复杂天然气藏的气源对比将无能为力^[17]。目前,研究人员一般采用多指标综合分析,如戴金星^[18]对威远气田的研究。威远气田是我国储层最老和气源岩最老的气田,对其气源一直存在无机成因和有机成因 2 种说法;有机成因又有气藏是来自灯影组白云岩和九龙洞泥页岩的混合气,或是灯影组含藻白云岩自生自储的裂解气,或主要来自灯影组气藏盖层的九龙洞组 3 种说法。戴金星^[18]经过研究,发现气藏中烷烃气含量为 85%~86% (干气), $\delta^{13}C_1$ 值小于 -31‰, $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2$, 气藏下部的花岗岩中 $\delta^{13}C_1$ 为 -32.35‰, $\delta^{13}C_2$ 为 -31.91‰, $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2$, CO_2 的碳同位素值为 -11.16‰~-15.81‰,认为天然气是有机成因的。戴金星^[18]同时认为灯影组气藏是上生(九龙洞组)下储的,理由是:①灯影组储层的沥青生物标志化合物特征与九龙洞组的具相似性;②气藏中 N_2 含量高,是高成熟度泥岩生成天然气的特征;③天然气中 $\delta^{13}C_1$ 比灯影组 $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 重,比九龙洞组泥岩 $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 轻;④灯影组样品有机碳平均含量为 0.12%,九龙洞组样品有机碳平均含量为 0.97%。

2 利用稀有气体进行气源对比

20 世纪 70 年代末,中国科学院兰州地质研究所把稀有气体同位素引入到油气地球化学研究中。在应用的初期阶段,主要是利用 Ar 和 He 的同位素比值鉴别有机成因气和无机成因气,同时根据 ^{40}Ar 的源岩年代积累效应进行气源对比研究^[19]。一般情况下, $^3He/^4He > 1.4 \times 10^{-6}$ 时具有幔源气混入; $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值则受源岩和储层年代累时效应以及源

岩 K 含量等多种因素影响,变化较大^[8]。长期以来,由于国内分析仪器和检测技术的限制,影响了稀有气体同位素在油气地球化学方面的应用。近年来,孙明良^[20]、李剑^[13]等利用改进的仪器装置比较准确地测定了天然气中 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值,同时实现了 Ar 与 Kr + Xe 的粗分离和天然气 Kr、Xe 同位素组成的检测。在此研究的基础上,刘文汇^[21-22]、李剑^[13]等研究了鄂尔多斯盆地天然气中 He、Ar、Kr、Xe 等稀有气体的同位素组成特征,并用之于气源对比上。刘文汇、李剑利用 $^{136}Xe/^{130}Xe - ^{129}Xe/^{130}Xe$ 关系图、 $^{129}Xe/^{130}Xe - ^{40}Ar/^{36}Ar$ 关系图与 $^{136}Xe/^{130}Xe - ^{40}Ar/^{36}Ar$ 关系图,并结合地质实际认为鄂尔多斯盆地气源来源复杂,但总体上以上古生界为主,并复合有一定量下古生界的天然气,而且下古生界气源对气田西南部贡献比东北部大。这个结果与李贤庆等^[23-24]用多指标进行综合对比的结果是一致的。

3 利用流体包裹体进行气源对比

20 世纪 90 年代以来,流体包裹体广泛应用于油气地质领域^[25-26],运用流体包裹体的组分、均一温度等数据研究盆地油气的生成、演化和运移,但应用于气源对比研究的并不多。陈孟晋等^[27]首次对同一世代群体包裹体气相组分的碳同位素进行测定,并应用于鄂尔多斯盆地中部气田气源对比研究。他们通过热爆裂法和真空球磨法提取测定流体包裹体中 CO_2 和 CH_4 等多种气体碳同位素,结果发现, $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值为 -9.22‰~-23.6‰,可能主要为有机成因; $\delta^{13}C_1$ 值分布在 -26.73‰~-43.60‰,平均为 -35.17‰; $\delta^{13}C_2$ 值主要分布在 -22.53‰~-25.80‰,平均 -24.14‰; $\delta^{13}C_3$ 分布在 -21.41‰~-26.26‰,碳同位素值较重,和上古生界煤成气性质相似,与下古生界风化壳产层天然气差别较大,推测鄂尔多斯盆地中部气田下古生界天然气成藏有 2 期,并且早期主要以上古生界煤成气来源为主。

陶士振等^[28]对流体包裹体方法在气源追踪对比中的应用进行了比较系统的研究,认为包裹体在成岩、成气的各个阶段和岩层内不同部位都广泛存在,客观有效地提取、鉴别各种具有不同生源属性、形成期次和次生变化的包裹体是利用流体包裹体进行有地质意义研究的关键。陶士振等首先对包裹体进行精细的鉴别分析,在此基础上,通过成岩自生矿物微量元素、包裹体相组成、均一温度和初熔温度等参数鉴别多期演化的油气充注;然后用激光拉曼探针分析同一世代乃至单个的烃类包裹体,确定包裹

体内的烃类组分,初步鉴别出煤成气和油型气;最后利用 GC 和 GC-MS 方法获得同一期包裹体生物标志化合物特征,确定某一期次的油气所对应的烃源层。陶士振等应用这一方法研究了四川盆地碳酸盐岩大型气田的气源,结果表明,其气源具有外源和混源的特征,并且不同气藏的气源岩不一样,如磨溪气田天然气来自上、下二叠统源岩,川东石炭系气藏天然气来自志留系和上、下二叠统源岩。

此外,常象春^[29]、周世新^[25]和陶士振^[30]等利用流体包裹体在气源对比方面都取得了有益的成果。但是由于目前测试方法和技术的局限性,特别是还不能就单个包裹体进行精确的烃组分、生物标志化合物和碳同位素分析,因此包裹体可作为重要的、有效的油气源对比的辅助手段,而不能作为这方面的主要手段^[23]。

4 利用苯、甲苯碳同位素比值进行气源对比

蒋助生等^[31]通过热模拟与在线同位素分析技术研究了天然气与源岩中苯、甲苯的碳同位素组成变化特征,发现同一类型气源岩热模拟产物中苯、甲苯碳同位素比值受温度的影响不大。在 400~600℃ 热模拟实验中,除个别点外,变化小于 1‰,说明气源岩产物基本上不受热成熟度的影响;而不同层位气源岩苯、甲苯碳同位素组成有明显区别,大多相差 3‰ 以上。同时,经脱吸附实验发现,在 150℃ 和 200℃ 连续脱吸附作用后,2 次测定 $\delta^{13}\text{C}_{\text{甲苯}}$ 值相差仅 2‰,在实验精度范围内可以认为甲苯在脱吸附过程中基本上没有分馏效应。将这种方法用于塔里木盆地气源对比,取得不错的效果。

李剑等^[32]对单一显微组分(藻类体和镜质体)进行了不同温度下热模拟产物的甲苯碳同位素值在线分析,结果发现藻类体热模拟产物的变化范围为 -27.1‰~-27.4‰,镜质体热模拟产物的变化范围为 -21.7‰~-23.0‰,即单一显微组分在不同温度下生成的甲苯碳同位素值变化范围为 1‰ 左右,据此可以认为成熟度的变化对甲苯碳同位素值的影响很小。当他们对不同盆地、不同层位和不同类型的气源岩进行热模拟实验时发现,热模拟产物中甲苯碳同位素值随加热温度升高有 2 种不同的变化形式:一是甲苯碳同位素值变化不大,二是甲苯碳同位素值随温度升高呈台阶式变化,在一定温度范围内保持不变。李剑等将对此解释为:不同类型干酪根的显微组分构成不一样,而不同显微组分的生烃高

峰期和生烃的碳同位素比值不一样。因此当源岩具有混合的干酪根类型时,热模拟产物甲苯碳同位素值随温度升高呈台阶式变化,在一定温度范围内保持不变。这个实验结果在塔里木盆地得到了很好的使用和验证^[17,33]。利用甲苯碳同位素值与其它气源对比指标相结合使用,不仅可以有效的判识气源,而且还可以判识天然气成熟度^[34]。

5 对天然气组分进行详细解剖和气源直接对比

传统气源对比方法主要采用天然气中 C_1-C_4 稳定碳同位素值进行对比,但是母质类型、热成熟度和运移等多重因素会严重影响对比结果。 C_6-C_8 轻烃和 $\text{C}_{27}-\text{C}_{30}$ 生物标志化合物在天然气中的含量虽然不高,但可供选择的指标较多,尤其对较高成熟度的天然气来说, C_6-C_8 轻烃和 $\text{C}_{27}-\text{C}_{30}$ 生物标志化合物是有机质演化形成甲烷的中间产物,与烃源岩具有更近的亲缘关系,在气源对比中可能有更重要的作用^[13];同时,运用 PY-GC 和 GC-MS 等实验技术,可以对气源岩热模拟产物组分及各组分碳同位素组成进行详细的解剖,这样就为气源之间的直接对比开辟了一条新途径。

实际上,戴金星、张义纲和林壬子等^[35]早在 20 世纪 90 年代就对轻烃在气源对比上的应用进行过比较详细的研究。张义纲在进行气源对比时采用了 8 个参数: $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 、 $i\text{C}_6/n\text{C}_6$ 、 C_7 环烷/(正+异)庚烷、甲基环己烷/正庚烷、甲基己烷/正庚烷、甲基环己烷指数、异庚烷指数及正庚烷指数。罗霞等^[36]利用轻烃参数、结合甲苯碳同位素进行综合分析,研究了千米桥奥陶系潜山天然气藏的气源问题,确定奥陶系潜山天然气主要来源于高成熟度的第三系烃源岩。

刘光祥等^[37]通过浓缩轻烃组成、 C_7 烃($n\text{C}_7$ 、MCC6、DMCC5)组成、 C_{6-7} 脂族烃组成和利用庚烷值(H)、异庚烷值(I)、Mango 参数(K_1 、 K_2)、甲基环己烷指数等一系列反映轻烃的特征和参数进行了气/气对比,探讨了川东、川东北区天然气的成因类型、热演化程度,并与研究区的烃源岩进行了对比。对比结果表明,川东北区的气源相对单一,主力气源层系可能为二叠系;川东建南气田石炭系产层天然气为源自下古生界原油的二次裂解水溶气,二叠系、三叠系产层天然气为源自二叠系过成熟裂解气与源自下古生界原油二次裂解水溶气的混合气。

李剑^[13]、李贤庆^[23-24]等利用天然气中 C_1-C_4 稳定碳同位素值、轻烃组成和生物标志化合物等多

指标、全组分的综合对比研究了鄂尔多斯盆地中部气田下古生界天然气的气源,确定该气田天然气既有石炭系—二叠系来源为主的煤成气,又有下古生界自身来源为主的油型气;中部气田东部区块的天然气主要为煤成气(石炭系—二叠系来源约占70%),中部气田北部、西部及南部区块的天然气主要为油型气(下古生界自身来源约占60%~70%)。因此,在一个含有多套气源岩的地区,利用天然气全组分(C₁—C₄稳定碳同位素值、C₆—C₈轻烃和C₂₇—C₃₀生物标志化合物)与烃源岩热模拟产物的直接对比,完全有可能识别出天然气的主要气源岩^[13]。

6 气源动态综合对比

天然气藏常是多源复合、多阶连续成藏的产物,而不同来源和成熟度的气态烃类在碳同位素组成及轻烃组成上均有一定差异,这就使得气源对比存在很大困难。基于此,李剑^[8]等提出“气源动态综合对比”的思想,具体思路如图1。在详细综合剖析各套气源岩在不同演化阶段生成的气态烃特征和初步确定天然气成熟度的基础上,用不同成熟度的天然气与成熟度相对应的气源岩产物进行直接对比,以确定与天然气具有亲缘关系的气源岩。李剑^[33]等用气

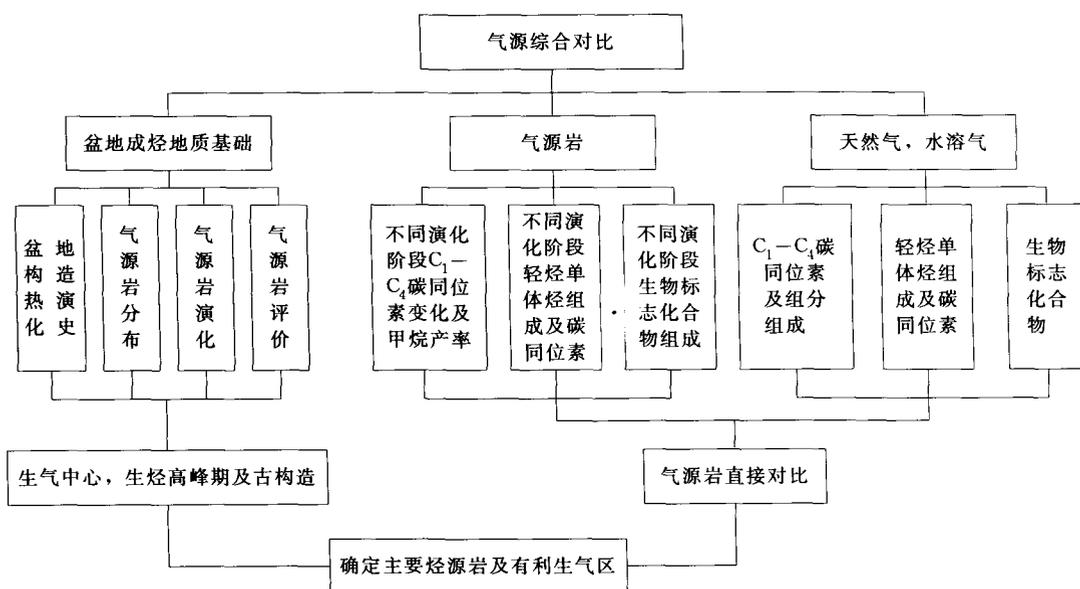


图1 气源综合对比流程^[8]

源动态对比方法研究了鄂尔多斯盆地林2、陕6井天然气的轻烃组成,确定其与下古生界气源岩有很好的亲缘关系。

7 结论

(1) 地球化学方法是进行天然气气源对比的主要方法,但是对比时有2条原则:一是气源对比要与区域地质情况结合起来,符合并且能够解释地质实际;二是气源对比结果符合烃源岩的评价结果;同时,为了对比的有效性,有必要进行多指标的动态综合对比和直接对比。

(2) 如何有效的确定天然气的运移方向一直是围绕天然气研究的重点和难点。最近 Alain Prinzhofer^[39-43]提出了一种新的多项地化参数评价方法,运用C₁/C₂以及CH₄、C₂H₆、C₃H₈碳同位素等11项天然气地化参数并用盖斯塔图表达了它们之间的关系,从而确定天然气藏上述各属性间的相关

性来判别油气的运移方向。应用该方法可以很好的对气藏成熟度及聚集效率、运移分馏的评价分析。

(3) 用稀有气体同位素可以区分热成因气和生物成因气和判识油气运移方向^[40-43]。其原理是:主要来自于深部扩散的氦和氩造成气藏中⁴He/⁴⁰Ar值较高,由于热成因气的形成温度较高,2种分子都容易气化散失,致使这类气体中⁴He/⁴⁰Ar值偏低,接近地壳平均值;而生物气形成温度低,氦和氩相对散失缓慢,致使此类气中⁴He/⁴⁰Ar值较高。同样,油气运移距离越大,氦和氩散失越多,因此⁴He/⁴⁰Ar、²⁰Ne/³⁶Ar降低的方向就是油气运移的方向。

(4) 地球化学多参数方法对认识和评价天然气藏的成熟度、运移分馏和聚集效率具有实用性。天然气运移反映了成气盆地的断层构造和气藏距离烃源岩的远近。结合盆地构造,判断气体的运移方向及圈闭的密封性,指导找气,及天然气可能沿断层运移的通道,以及在附近圈闭中的成藏。

参考文献:

- [1] James A T. Correlation of natural gas by use of carbon isotopic distribution between hydrocarbon components [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(7): 1176-1191.
- [2] James A T. Correlation of reservoir gases using the carbon isotopic compositions of wet gas components [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(9): 1441-1458.
- [3] Clayton C. Carbon isotope fractionation during natural gas generation from kerogen [J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8: 232-240.
- [4] Chung E M, Gormly J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: theoretical considerations of carbon isotope distribution [C]//Origins of Methane in the Earth M Schoell Chemical Geology, 1988, 71: 97-103.
- [5] Littke R, Cramer B, Gerling P, *et al.* Gas generation and accumulation in the West Siberian Basin [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83: 1642-1665.
- [6] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别 [J]. 中国科学: B 辑, 1992, 00B(2): 185-193.
- [7] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2-3): 1-10.
- [8] 刘文汇, 徐永昌. 天然气成因类型及判别标志 [J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 110-116.
- [9] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别 [J]. 中国海上油气地质, 1992, 6(1): 11-19.
- [10] 戴金星. 中国煤成气研究二十年的重大进展 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 1-10.
- [11] 王万春, 刘文汇, 高波, 等. 我国浅层复合气藏中天然气的成因鉴别 [J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 20-24.
- [12] 徐永昌, 刘文汇, 沈平. 含油气盆地油气同位素地球化学研究概述 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 161-168.
- [13] 李剑, 胡国艺, 谢增业, 等. 中国大中型气田天然气成藏物理化学模拟研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 60-100.
- [14] 夏新宇. 油气源对比的原则暨再论大庆气田的气源——兼答《论鄂尔多斯盆地中部气田混合气的实质》[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 101-105.
- [15] 陈安定. 论鄂尔多斯盆地中部气田混合气的实质 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 33-38.
- [16] 戴金星, 夏新宇, 秦胜飞, 等. 中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 1-7.
- [17] 孙明良. 天然气中 Ar 同位素测量的新技术 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 452-456.
- [18] 戴金星. 威远气田成藏期及气源 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 473-480.
- [19] 徐永昌, 刘文汇, 沈平, 等. 天然气地球化学的重要分支——稀有气体地球化学 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 157-166.
- [20] 孙明良. 天然气中稀有气体同位素分析技术 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 271-275.
- [21] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪 [J]. 科学报, 2001, 46(22): 1902-1905.
- [22] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪 [J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1902-1905.
- [23] 李贤庆, 胡国艺, 张爱云, 等. 鄂尔多斯中部气田下古生界天然气的气源研究 [J]. 现代地质, 2002, 16(2): 191-198.
- [24] 李贤庆, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田天然气混源的地球化学标志与评价 [J]. 地球化学, 2003, 32(3): 282-290.
- [25] 周世新, 王先彬, 孟自芳, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩中气体包裹体组成及其碳同位素特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(7): 665-672.
- [26] 谢奕汉, 范宏瑞, 王英兰. 流体包裹体与盆地油气的生成和演化 [J]. 地质科技情报, 1998, 17(增刊): 100-104.
- [27] 陈孟晋, 胡国艺. 流体包裹体中气体碳同位素测定新方法及其应用 [J]. 石油与天地质, 2002, 23(4): 339-342.
- [28] 陶士振, 张宝民, 赵长毅. 流体包裹体方法在油气源追踪对比中的应用——以四川盆地碳酸盐岩大型气田为例 [J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 327-336.
- [29] 常象春, 郭海花, 张金亮, 等. 江苏高邮坳陷永安气藏烃类流体包裹体特征和天然气成藏条件 [J]. 地质通报, 2003, 22(10): 808-815.
- [30] 陶士振, 秦胜飞. 塔里木盆地克伊构造带包裹体油气地质研究 [J]. 石油学报, 2001, 22(5): 16-24.
- [31] 蒋助生, 罗霞, 李志生, 等. 苯、甲苯碳同位素组成作为气源对比新指标的研究 [J]. 地球化学, 2000, 29(4): 410-415.
- [32] 李剑, 罗霞, 李志生, 等. 对甲苯碳同位素值作为气源对比指标的新认识 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 177-180.
- [33] 李剑, 谢增业, 罗霞, 等. 塔里木盆地主要天然气气藏的气源认识 [J]. 天然气工业, 1999, 19(2): 38-43.
- [34] 杨池银. 板桥凹陷深层天然气气源对比与成因分析 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 47-52.
- [35] 王涛. 中国天然气地质理论基础与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 10-80.
- [36] 罗霞, 胡国艺, 张福东, 等. 千米桥奥陶系潜山天然气气源对比 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 41-43, 59.
- [37] 刘光祥, 蒋启贵, 潘文蕾, 等. 干气中浓缩轻烃分析及应用——以川东北、川东区天然气气源对比研究为例 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 585-589.
- [38] 李剑, 陈孟晋, 蒋助生, 等. 塔里木盆地塔中地区天然气气源对比 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 33-35.
- [39] Prinzhofer A, Mello M R, Da Silva Freitas L C, *et al.* A new geochemical characterization of natural gas and its use in oil and gas evaluation [C]//Hedberg Conference, 2000, Rio de Janeiro, November 1997. Special publication of the AAPG.
- [40] Prinzhofer A, Pernaton E. Isotopically light methane in natural gases: bacterial imprint or segregative migration? [J]. Chemical Geology, 1997, 142: 193-200.
- [41] Prinzhofer A, Charlette I, Caja M, *et al.* Guzman-Vega, M Could gas really fractionate isotopically during its natural migration? [C]//Proceedings of the Hedberg Conference, Durango (CO, USA) 1999.
- [42] Prinzhofer A, Guzman M. Gas geochemistry of the Macuspana basin (Mexico): thermogenic accumulations in bacte-

rially impregnated sediments [J]. EAOG 1999, Istanbul, Turkey, Septembre, 1999.

[43] Prinzhofer A, Mello M R, Takaki T. Geochemical charact-

erization of natural gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimates [J].

AAPG Bulletin, 2000, 84:1152-1172.

ADVANCES IN THE STUDY OF GAS AND SOURCE ROCK CORRELATION

SHEN Bao-jian^{1,2}, HUANG Zhi-long¹, LIU Hong-wen¹, LI Xiang-bo^{1,3},

LIN Zhi-jia², XU Cheng¹

(1. State key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Xianhe Oil

Production Plant, Shengli Oilfield, Dongying 257062, China)

Abstract: Source rock correlation research has important practical and theoretical significance in the field of oil and gas exploration and development. Isotope geochemistry has been playing an important role in the gas and source rock correlation. Component carbon, hydrogen stable isotope of natural gas can identify source rock, thermal evolution of source rock, and accumulation process of natural gas. Noble gas isotope has been widely used to identify sources of natural gas. In recent years, some other methods are developed such as the method using fluid inclusions, benzene, toluene, xylene, methyl cyclohexane and other light hydrocarbons to study gas and source rock correlation, the direct contrast of gas source to the detailed anatomy of gas components, and the dynamic comprehensive comparison method. This paper introduces the development and innovation of gas and source rock correlation and its development trend in the future.

Key words: Gas and source rock correlation; Fluid inclusion; Noble gas; Carbon isotope.

(上接第 248 页)

STUDY ON THE GAS GENERATING ABILITY OF COAL IN DIFFERENT SYSTEMS

MI Jing-kui¹, DAI Jin-xing¹, ZHANG Shui-chang¹, LI Xian-qing²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. State Key

Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the authors simulated the gas generating ability of coal in semi-opened and closed systems. The results show that there is a great difference in the gas generating process of coal in the two systems. The temperatures at which coal begins to generate gas and the gas-generating peak appears in the semi-opened system are higher than those in the closed system. The generated gas amount in the semi-opened system is less than that in the closed system at the same temperature, one reason for this is that the heavy hydrocarbons can be expelled out in the semi-opened system and can not be cracked into methane at high temperatures. The pressure can be an advantage for gas generation. The opening degree of a system has a great influence on the gas generation ability of coal.

Key words: Simulation experiment; Gas generating ability; Closed system; Semi-opened system.