

中国深层天然气形成及保存条件探讨

刘文汇^{1,2} 张殿伟¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国科学院气体地球化学重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

提要:深层天然气是油气勘探潜在的重要领域, 加强深部勘探成为油气区资源发展的必然趋势。笔者将现有与深层气有关的概念进行了甄别分析, 最后厘定深层气为埋藏深度大于 4 500 m, 在高温、高压和环境介质共同作用下形成和聚集的天然气, 就有机质垂向演化而言, 主要指沉积层在生油窗以下层位形成和赋存的天然气, 并在此基础上对深层气存在的范围进行了探讨。结合有机-无机相互作用, 深入研究了深层天然气气源, 认为干酪根、聚集型可溶有机质和分散可溶有机质均对深层天然气的形成具有重大贡献, 特别是认为分散可溶有机质在叠合盆地可以作为深层气的重要气源。最后根据中国构造演化、烃源发育特点, 初步预测了中国深层天然气的分布状况与范围。

关键词:深层气; 生油窗; 气源; 分散可溶有机质

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)05-0937-07

1 深层气的概念

深层天然气的界定应该是一个勘探和科学研究概念的统一, 在勘探上深层可以作为一个技术指标来确定, 而在油气地质研究中, 深层是难以用一个简单方法划分的抽象定义。但对某一类型沉积盆地而言, 深层气应有其明确界定。笔者所研究深层气主要指有机成因烷烃气, 无机成因甲烷的存在已经得到广泛的共识, 但作为资源进行开发的主要是 CO₂ 和 N₂, 到目前为止仍没有足够的证据表明无机甲烷能够单独成藏, 达到工业气藏要求。

在讨论深层天然气形成及保存条件之前, 有必要先明确深层气的概念, 自 sugisak(1981) 提出深层气 (deep-seated gas) 概念以来, 沉积壳层深部的天然气研究引起了国内外石油天然气地质学家的极大关注, 史斗等^[1]对深层气概念进行了详细总结, 并认识到深层气的重要性。深层气, 顾名思义, 指深埋层位生成和聚集的天然气, 从现有观点来看, 对深埋层位上限的定义从 2 800 m 至 5 000 m。应该说每种提法都有其地质背景和实际意义, 所以深层气的深埋层位应该只是一个相对大的深度意义, 因为对不同的沉积盆地而言, 各自的生

油主带和生气主带的深度范围有很大不同。在探讨深埋层位时, 还有一个问题需要解决, 就是深层天然气不但包括“深生深储”的深层气, 还应该包括“深生浅储”的深层气, 即虽然天然气藏产层较浅, 但其气源位于沉积层深部, 仍可称之为深层气。通过以上分析, 可以明确地定义深层气是指在温度、压力和环境介质共同作用下所聚集的天然气, 主要指沉积层在生油窗以下层位形成和赋存的天然气。

以油气形成的分带性为基础的生油窗理论认为, 生油主带的位置由地温 70~120℃ 温度段决定, 取决于沉积层沉降速率和地温环境。生油主带的结束与深成作用中期第 II 阶段到第 III 阶段的演化程度 (R_o 为 1.10%~1.15%) 相当, 随着深度的增加, 生油主带变成凝析油气带, 再往下形成干气生成带^[2]。在研究中通常使用地球化学指标及镜质体反射率 (R_o) 来表示这种演化程度的变化。 R_o 通常变化在 0.4%~4% 之间, $R_o=1.34%$ 被认为是油相存在的临界值。如果平均地温梯度为 2.5~3.0℃/100 m, 深度为 4 000~5 000 m 时, 大量液态烃的生成趋于结束, 而转变为气态烃的生成。Tissot 等^[3]和徐永昌等^[4]分别针对有机质的演化建立了油气形成的经典模式。但是, 随着油气地质勘探的深入, 传统的油气形成分带理论中液态烃形成结束和气相生成带的开始门限指标的局限性

收稿日期: 2006-01-11; 改回日期: 2006-03-28

基金项目: 国家“973”项目 (2001CB209102) 资助。

作者简介: 刘文汇, 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 973 项目首席科学家, 主要从事天然气地质学及油气地球化学研究;

E-mail: whliu@pepris.com。

体现了出来,特别是深部液态有机质的保存。

2 深层天然气的形成

2.1 深层天然气的气源

萨姆维洛夫^[9]认为,深层气的气源有两种:一是由深层液态烃裂解作用生成的天然气;二是由分散干酪根深成作用生成天然气。勘探实践和模拟实验均表明:在高温高压条件下,液态烃会裂解成气态烃。早期形成的油藏中液态烃在高温高压条件下发生裂解,成为深层天然气的一个重要来源。总体讲,进入生油高峰后,原油累计生成量不断减少,而天然气累计生成量不断增加。由此不难看出,在凝析油-湿气阶段既包括干酪根的裂解也存在原油的裂解,且主要生成构成凝析油、湿气的烃类组分;在干气阶段主要是已生成烃类的高度裂解,主要生成甲烷。

深层分散有机质中,包括可溶有机质(分散石油)和不溶有机质(干酪根),深层分散不溶有机质主要是指高演化阶段的干酪根,高演化阶段干酪根生成天然气是深层气资源规模的重要问题。干酪根的化学构成决定着其生成物主要烃类的化学组成,周中毅^[10]对不同类型干酪根进行了高演化阶段生烃能力实验,研究结果表明,模拟实验温度 350℃,干酪根 R_o 相当于 1.2%, III 型干酪根已释放了全部烷基, I 型干酪根仍有 9% 的碳是烷基碳, II 型干酪根仍有 3.5% 的碳是烷基碳;模拟温度 500℃, R_o 相当于 2.2%, I 型干酪根仍有少量烷基碳和较多的烷基氢,保留了一定的生烃潜力。通过模拟实验发现, R_o 高于 2.0% 时,其产物主要为以甲烷为主的气态烃。McNeil 和 BeMent^[7]认为在油大量排出后,从残余干酪根中生成的几乎是纯的甲烷气体,在他们的模型中,干酪根中连接在芳环上的烷基很容易从第一个碳和第二个碳之间断裂而脱落甲基。但是断裂下来的烷基重新与芳环连接然后以甲基形式脱落形成了富 CH_4 气体。这一过程可以解释在所有温度下甲烷相对丰度的连续增加而不仅局限于沥青质生成的高峰期。

通过对不同生烃动力模型的研究^[8-11]表明:低地温条件的盆地更有利于深层气的形成, III 型干酪根在各种地温条件下产气量均高于 I 型干酪根。未排出烃源岩的原油在较低地温条件下(1℃/Ma)产气量相当于 II、III 型干酪根,可以作为深层气气源,在 10℃/Ma 的地温条件下则产气量很小要低于各种类型干酪根^[11]。有水和无水模拟实验表明:在 1℃/Ma 地温条件下,单位聚集型原油裂解产生的天然气是干酪根最高产气量的 4~7 倍,在 10℃/Ma 地温条件下,为 6~20 倍,这一差异和地质条件下原油具有更好的热力学稳定性相一致(图 1)。

实验表明,水的存在能够增加原油的稳定性,而在地质条件下水是广泛存在的,因此地质条件下原油具有广泛的存在条件,更有利于深层气的形成。总体来说,尽管原油裂解产生的天然气要高于单位干酪根裂解产生的天然气,但沉积盆

地深埋源岩干酪根的总量要高于深埋原油几个量级,因此高演化阶段的干酪根仍是深层气的重要气源之一。

分散石油是指地质体中以分散形式存在的可溶有机质,它们的存在与烃类气体形成的连续性是密不可分的。分散可溶有机质通常有两种赋存形式,一种是与不溶有机质共存,从沉积初始,直到有机质演化的终结,均未离开不溶有机质(干酪根)赋存的地质体(烃源岩),包括原始沉积的可溶有机质和演化过程中形成但未脱离母体的可溶有机质。原始沉积的可溶有机质成为未熟-低熟油的主要来源^[15,16]。而演化过程中形成但未脱离母体的可溶有机质则是传统干酪根裂解气的主要来源。这类可溶有机质对深层天然气有一定贡献。另一种是在演化过程中,随着演化程度的增加,由不溶有机质(含早期可溶有机质)形成的可溶有机质,经过排烃、运移等过程脱离源岩,部分聚集形成以聚集型可溶有机质油藏形式存在,而大部分则分散在运移途中,甚至通过各种过程散失。李明诚^[17]通过对聚集量进行模拟,得到石油的生聚率一般为 5%~10%,而天然气的生聚率一般为 0.5%~1%,可见有 90% 以上的烃类在运移过程中已散失。油气的运移聚集和油气的运移散失是共存的两个过程,散失的烃类一部分仍以分散可溶有机质的形式存在于运移通道或岩体之中,而另外一部分则由于断裂、剥蚀、生物降解等作用遭到破坏或散失到大气中,表现为地表的油气显示,有出露的油苗、气苗和含沥青的岩石。而聚集的可溶有机质根据其聚集的规模和程度划分为工业性油气藏和非工业性油气藏,所谓的工业性油气藏是指油气聚集数量够大,具有商业开采价值的油气藏。而在实际地质情况下,大多数液态烃类仍是以非工业相对分散的形式存在,这种情况在地质情况下表现为沉积岩体中的油迹、油斑等。聚集型可溶有机质(油藏)也可以通过各种后生作用最终以分散可溶有机质的形式出现。油藏在地质过程中由于圈闭本身遭到破坏,油气会部分甚至全部散失,或生物降解或水洗作用使石油变质破坏,最终导致油藏转变为沥青。储层沥青和沥青砂岩等便是上述作用的产物。固体沥青经常分散在岩石中,且以无定形态存在,所有这些形式的分散可溶有机质除沥青砂外,均不能作为有效资源加以利用,但这些在地质体中分布的分散可溶有机质在一定的条件下却可以作为天然气的气源,冯加良等^[18]对新疆克拉玛依油区白垩系中的石油沥青的模拟实验,发现 400℃ 时有近三分之一的沥青转化为轻质油,更高温时主要生成气,转化率可达沥青总量的近二分之一。这说明条件合适时沥青完全可以再次生烃,成为优质气源。

2.2 有机-无机相互作用对深层天然气的作用

在深层天然气的形成过程中,对于深层天然气的两种重要气源:聚集型可溶有机质和分散型可溶有机质发挥作用的有机-无机相互作用主要体现为催化作用和加氢作用。在液态烃开始生成时,有效的氢并不是一个关键因素。但随热演化程度的增加,有机质的转化需要的氢量增加,导致烃碳链长度减小,产物的 H/C 比值的增加。因此,加氢作用应是有

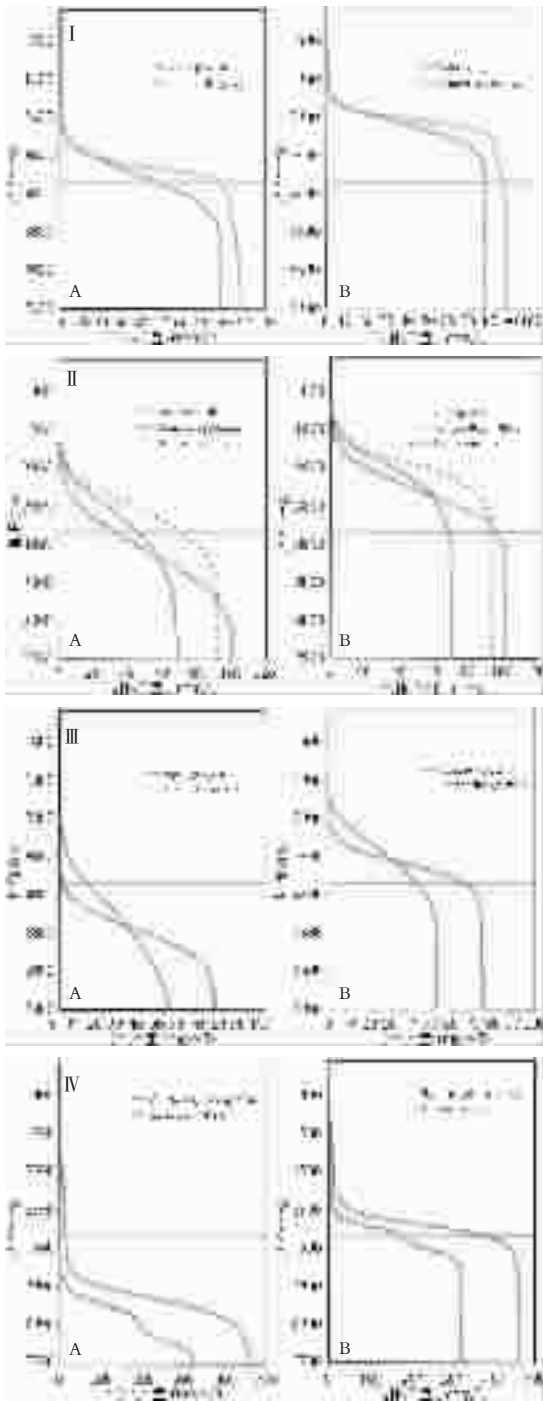


图 1 不同类型干酪根及原油在不同模拟条件和不同地质温度条件下随深度变化产气量(C₁—C₅)
 I—Ⅰ型干酪根;Ⅱ—Ⅱ型干酪根;Ⅲ—Ⅲ型干酪根;Ⅳ—原油;
 A—1°C/Ma; B—10°C/Ma (据文献[8~12]略有修改)

Fig.1 Change of gas production (C₁—C₅) from different types of kerogen and crude oil with depth under different simulation conditions and at different geological temperatures
 I—Type-I kerogen; II—Type-II kerogen; III—Type-III kerogen;
 IV—Type-IV kerogen; A—1°C/Ma; B— 10°C/Ma
 (modified from references [8~12])

机-无机相互作用生成烃类气体化学过程的体现,由于有机质与烃类相比主要是贫氢,因此,外来氢的加入将促进干酪根等有机大分子化合物向气态小分子烃类转化。从化学观点来看,有机质的生烃过程实际上就是原始物质被破坏并氢化的过程。具有高演化阶段烃源岩的大型叠合盆地形成天然气的主要因素在于地层中 H⁺ 的来源。加氢作用是形成天然气的主要过程。地壳中存在有机成因和无机成因两类氢,有机氢是有机质在演化过程中特别是在生物化学作用下转化形成的,但由于其化学性质很活泼,多以化合物形式存在。地壳中的无机氢是加氢作用中氢的主要来源,水是氢的重要来源,对水中的氢参与沉积有机质热演化过程的逐渐认识^[19-24],对传统的观点——源岩中的有机氢是限制石油和天然气形成的关键因素^[25]提出了挑战。水在高温条件下分解或在放射性元素作用下发生分解形成氢气,水与氧化亚铁在 300~500°C 下催化反应也可生成氢,深部流体也是氢的主要来源。上述作用中生成的氢可通过构造运动和岩浆活动运移到沉积有机质层,成为有机质加氢反应形成烃类中氢的重要来源。沉积岩中 Fe²⁺ 对加氢有明显的促进作用,在烃源岩演化过程中,还原条件下 Fe²⁺ 的广泛存在为加氢作用的进行提供了很好的催化剂,在低温阶段,粘土矿物的催化作用则是水中氢进入烃类的重要途径。因此,烃类的生成大多是有机与无机共同作用的结果,即碳来自有机质,氢则部分来自同沉积水的分解、地球深部的补给和岩石化学反应等。有机与无机相互作用成烃的实质在于:在有机质成烃的高演化阶段,有机质中富碳而贫氢;深部流体提供了成烃所需要的另一部分氢,如济阳拗陷、东营凹陷以及塔里木盆地塔中地区深部流体的研究中,已经发现富氢流体对干酪根的加氢生烃效应^[26,27]。粘土矿物和过渡金属——镍、钴、铁、铜及某些金属氧化物的催化作用使无机氢与有机质结合形成烃类^[28-30]。

普遍认为粘土矿物是最有效的一类催化剂,其主要特点是对有机质具有较强的吸附能力,并形成粘土有机复合物。矿物催化剂提高干酪根热解反应速度,在实际沉积层系中,粘土矿物对有机质转化有催化作用外,其吸附作用也不可忽略。矿物所具有的吸附性使它易与沉积有机质发生化学反应形成无机-有机复合物。在有机质沉积过程中,矿物的吸附、凝聚作用对有机质的迅速沉积和保存有着重要的作用。无机-有机复合体的构成为有机质的催化裂解和油气生成准备了至关重要的地球化学条件^[31]。

3 深层天然气的保存条件

3.1 深层气的圈闭条件

讨论深层天然气的保存条件首先要确定天然气能稳定存在的温压范围,罗德任芙斯卡娅^[32]认为:甲烷可存在于直至 750°C 的条件,因为天然气对深层环境的稳定性要高于石油。既然石油有自己的消失门限,说明石油不可能一直保存到沉积层基底,而天然气则不同,它可以一直保存到沉积层基底,

并且已有证据证明基底发育天然气。既然深层天然气主要是利用天然气形成的深度和演化程度,而且其既可以赋存在深部也能在浅部成藏,那么其保存条件首先要满足一般天然气的成藏条件。天然气在深层能否聚集成藏仍取决于圈闭的发育情况。深部油气藏的主要圈闭类型为构造圈闭^[2],不同盆地由于演化史不同和受力机制的差异,其深层气藏的圈闭类型有明显的差别,深层的圈闭类型也是多种多样。如:渤海湾盆地是古生代地台基础上受张应力作用的构造盆地,因此其圈闭以地层-潜山为主;中国西部地区的盆地是受应力作用的构造盆地,深层气藏圈闭通常与被复杂化的背斜构造有关。深层热液作用对油、气储层起着不同程度的改造作用。岩浆期后热液和火山热液以及变质和地下水热液作用在油、气进入前,将孔隙充填,使岩石胶结致密,这种地层可作为局部地区盖层,由于地层的不均一性和矿物的差异成岩作用,最终在盆地中形成穿时的封隔层和流体异常高压封隔体^[33-35],也为深层油气圈闭的形成提供了有利条件。

3.2 深层天然气的储、盖层条件分析

随着埋藏深度的增加,在压实和成岩作用的影响下,岩石的原生孔隙已经逐渐减少,一般埋深大于 4 000 m 就进入成岩作用后生期,岩石原生孔隙已经很少存在,而次生孔隙成为深部主要的储集空间。裘怿楠等^[2]总结了储层次生孔隙发育的 4 种机理,即:①有机酸和二氧化碳酸性水的溶解作用;②不整合面下的表生淋滤作用;③热化学硫酸盐还原作用产生的有机酸酸性水的溶解作用;④地层水热循环对流产生的溶解作用等均可形成次生孔隙,使深部储层物性变好。在中国一些深盆地和深凹陷中(如莺歌海盆地、岐口凹陷等)在深埋 4 000~5 000 m 的地层中甚至发育有孔隙度高达 18%~20%的储集砂层^[2]。并且,近数十年的深井钻探成果并未证实随着深度的增加而岩层的屏蔽性能会不可逆转地变差,其中包括泥质地层由于不可逆转的脱水作用和压实作用以及泥岩向泥板岩过渡时产生的裂缝导致屏蔽性能的丧失,深层构造的典型特点是上层构造与下层构造之间通常没有关联。如四川盆地含气下组合以及库车坳陷上下构造样式均不一致。由于温度高、常常存在异常高压、流体粘度高和烃类分子小等特点,深部油气藏比中浅部油气藏要求有更好的封闭条件,而区域性盖层的存在,在纵向上将油气封隔于不同层系中,形成不同深度、不同层位的油气藏,如四川盆地中三叠统膏盐岩作为区域性盖层,封隔了古生界地层所生的天然气(三叠系及以下层位都产干气),又如陕甘宁盆地上二叠统的泥岩作为有效的区域盖层,在纵向上封隔了古生界的天然气^[2]。

4 深层气在中国的分布

根据深层气的特点,深层天然气主要分布在继承型叠合盆地、改造型叠合盆地、中间地块盆地和前陆盆地内。中国已发现的深部天然气藏分布在前寒武纪到新近纪各个时代地层中,储层的岩石类型以碳酸盐岩为主。

4.1 高演化海相深层天然气分布

中国天然气主要包含 4 大含气领域:以碳酸盐岩为主的下古生界—前寒武系含气盆地、以碳酸盐岩和煤系为主的上古生界—三叠系含气领域、以陆相碎屑岩为主的中生界—古近系含气领域、以生物—热催化过渡带气及次生气藏为主的新近系—第四系含气领域。4 大含油气领域中,以古生界以下地层为烃源岩的含气领域占了 2 个,虽然戴金星等^[2]所指出 2 个含油气领域不一定完全都属于本文所说的深层气范畴,但若属于连续沉降盆地的天然气,无疑当属深层气。

中国古生界以海相碳酸盐岩为主,而中—新生界以陆相碎屑岩为主,如四川、楚雄、鄂尔多斯、塔里木以及渤海湾盆地等。这类盆地大多数在中、新生代继承性发育,元古界—古生界烃源岩得以良好地保存和不断发生的烃类热演化,相当部分的烃类已达到高成熟—过成熟阶段,是中国深层天然气的重要来源之一。但在中、新生代断裂构造活动强烈的盆地中,元古界和古生界油气藏被多次改造,古油气藏改造强烈,油气经历了多次运移、成藏、再运移聚集或逸散,分布十分复杂。

中国新元古代和古生代烃源岩主要为海相碳酸盐岩与暗色泥岩,主要分布在中西部的四川、鄂尔多斯、塔里木盆地和东部的华北地区。塔里木盆地寒武系—下奥陶统灰岩夹暗色泥岩,主要分布在满加尔地区,有机质类型以 I 型为主,目前处于过成熟阶段;石炭系海陆交互主要分布在塔西南地区,有机质以 III 型为主,热演化程度已达高成熟—过成熟演化阶段。而中、上奥陶统灰岩夹暗色泥岩,主要分布在塔中和塔北隆起区,有机质类型以 I 型为主,处于生油窗内,部分学者认为是目前塔里木盆地发现的海相原油的主要油源;四川盆地下寒武统黑色泥岩及含炭质页岩,志留系下部富含有机质的笔石页岩,下二叠统深灰色生物灰岩均处于过成熟阶段;在华北克拉通上,发育了下奥陶统灰岩、上石炭统本溪组和太原组、下二叠统山西组煤系,岩性多样,包括暗色泥岩、煤层和碳酸盐岩,在鄂尔多斯盆地,这两套烃源岩都处于高—过成熟阶段,以产干气为主。在华北地区则由于后期沉降幅度的差异,成熟度因不同地区而不同,可能普遍存在二次生烃和聚集过程。以上多套海相烃源岩都可作为深层天然气的烃源岩,控制着以上地区深层天然气的分布。

4.2 前陆盆地快速埋藏深层气分布

前陆盆地是位于造山带前缘与相邻克拉通之间的沉积盆地,前陆盆地是油气聚集的有利地区,但中国中西部前陆盆地地质情况复杂,大多数属于陆内前陆盆地,晚期冲断作用往往发育巨厚沉积成为深层天然气发育的有利条件。塔里木盆地库车坳陷发育了巨厚的中、新生代沉积,在喜山期形成复杂的逆冲构造控制了其深层油气的分布,库车坳陷天然气资源丰富,已发现大量深层天然气资源。塔里木昆仑山前前陆盆地沉积了 4 000~7 000 m 厚的磨拉石建造塔西南前陆逆冲带控制着塔西南地区中新生界油气聚集,已经发现柯克亚等油气田。其他如准噶尔盆地南缘前陆盆地、鄂尔多斯西

缘前陆盆地、龙门山前陆盆地等均是十分有利的深层天然气勘探地区。

4.3 深层天然气在中国各盆地的分布

从前面的分析可以看出,煤系及Ⅲ型干酪根以及低地温梯度是形成深层天然气的有利条件,因此中国西部具有较低地温梯度的含煤盆地是深层天然气的主要赋存地区。在东部也有发育,主要赋存于古生界及老地层中。松辽盆地深层的断陷带埋深达 10 000 m,距地壳深部地幔热源近,导致地温普遍升高。由于火山岩分布广、厚度大、导热系数高,因此该区气藏埋藏虽然较浅,但仍然具有深层天然气发育的条件^[9]。松辽盆地 1998 年发现了昌德深层气田,近期又在徐家围子得到突破,这些都证明松辽盆地深层天然气极具潜力。渤海湾盆地有 30 个凹陷具备深层气勘探的有利目标。冀中坳陷目前已发现 13 个深层油气藏,其中 7 个为油藏,2 个为气顶油藏,3 个凝析油气藏。最深的油藏埋深达 5 200 m^[40,41]。渤海湾其他坳陷都进行了一些有目的的深层油气勘探工作,发现了一些圈闭和油气藏。

中国西部地区四川盆地具有多套生油气层系的特点,天然气主力气藏埋藏深度大部分均属于深层天然气范围。川东地区下古生界,川中华蓥山西侧的复合圈闭和乐山—龙女寺古隆起,是四川盆地最大的古隆起,已在不少地区获工业气流,是今后深层气勘探的有利目标区;川南、川西南的下古生界资源潜力大、勘探程度低,是长远的勘探新领域。

鄂尔多斯盆地北部上古生界是今后勘探的主要目标区。盆地西缘地区也是一个有利的地区。塔里木盆地是目前中国天然气资源量最大的盆地。从近 10 年来勘探情况看,所发现的气田埋深大都超过 4 000 m,绝大多数资源都在深层,目标众多。库车坳陷、塔北隆起、塔中隆起及其北斜坡,油气源条件好,资源潜力大,保存条件有利,是寻找深层天然气田的主要方向;巴楚隆起、塔西南也是深层气分布的重要地区。准噶尔盆地深层天然气主要分布在盆地南缘。靠近天山的第二、三排构造是深层天然气勘探的有利地区,盆地腹部地区是中长期找气的有利地区。

5 结语

中国大陆在显生宙经历了古生代大陆板块与大洋板块分—合演化以及中、新生代盆—山耦合的发展,形成海相—海陆过渡相古生界与陆相中、新生界叠置的多旋回盆地(叠合盆地)。发育大套与深层天然气有关的烃源岩,深层气资源丰富。中国海相层系烃源岩大都以高演化为特点,其中古油藏调整裂解持续演化在古隆起发育区调整成藏是深层天然气形成的重要方式,而且分散可溶有机质作为气源,由于分散在矿物中的有机质具有更好的催化条件,应该引起更多的重视。根据深层天然气的形成特点,中国西部低地温梯度的含煤盆地应该作为深层气勘探的重点地区。

参考文献(References):

- [1] 史斗,刘文汇,郑军卫. 深层气理论分析和深层气潜力研究[J]. 地球科学进展, 2003,18(2):236~244.
Shi Dou, Liu Wenhui, Zheng Junwei. Theory analysis on deep seated gas and its potential study [J]. Advances in Earth Sciences, 2003,18(2):236~244(in Chinese with English abstract).
- [2] Mielenievskij V N. About deep zonation of oil-gas formation [J]. Exploration and Protection Minerals,1999,(11):42~43.
- [3] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence[M]. Berlin:Springer Verlag,1984.
- [4] 徐永昌,等. 天然气成因理论及应用[M]. 北京:科学出版社,1994 38~41.
Xu Yongchang, et al. The Theory of Natural Gas Generation and Its Application[M]. Beijing: Science Press,1994,38~41 (in Chinese).
- [5] Samvielav R G. The characteristic and distribution for generation of deep oil and gas reservoir [J]. Oil and Gas Geology,1995,(9):1~11.
- [6] 周中毅,范善发,潘长春,等. 盆地深部形成油气藏的有利因素[J]. 勘探家,1997,2(1):7~11.
Zhou Zhongyi, Fan Shanfa, Pan Changchun, et al. Hydrocarbon generation and accumulation in deep part of sedimentary basins [J]. Explorationist, 1997,2(1):7~11(in Chinese with English abstract).
- [7] Seewald J S, Benitez-Nenitez B C, Whelan J K. 天然气形成与组成的实验和理论因素[J]. 天然气地球科学,2000,11(4-5):37~44.
Seewald J S, Benitez-Nenitez B C, Whelan J K. Natural gases generation and composition experiment and theory [J]. Natural Gas Geoscience, 2000,11(4-5):37~44(in Chinese).
- [8] 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 [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26, 321~339.
- [9] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation—Part I, Oil and gas generation from kerogen [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995,12:291~319.
- [10] Knauss K G, Copenhaver S A, Braun R L, et al. Hydrous pyrolysis of New Albany and Phosphoria Shales—Production kinetics of carboxylic acids and light hydrocarbons and interactions between the inorganic and organic chemical systems [J]. Organic Geochemistry, 1997,27,477~496.
- [11] Tsuzuki N, Yokoyama Y, Takayama K, et al. Kinetic modeling of oil cracking [A]. Eastern Section American Association of Petroleum Geologists and The Society of Organic Petrology Joint Meeting, Lexington, Kentucky, Abstracts and Program, 1997,14:94~96.
- [12] Horsfield B, Schenk H J, Mills N, et al. An investigation of the in-reservoir conversion of oil to gas—Compositional and kinetic findings from closed-system programmed-temperature pyrolysis [J]. Advances in Organic Geochemistry, 1992,19,191~204.
- [13] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation—Part I, Oil and gas generation from kerogen [J]. Marine

- and Petroleum Geology, 1995,12:291~319.
- [14] Pepper A S, Dodd T A. Simple kinetic models of petroleum formation—Part II, Oil—gas cracking [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995,12:321~340.
- [15] 夏燕青, 张更新. 未成熟油可能主要源自原生可溶有机质——I. 饱和烃提供的直接证据[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4):439~445. Xia Yanqing, Zhang Gengxin. Immature crude oils possibly mainly originating from primary soluble organic matter - I. direct evidences from saturated hydrocarbons [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001,23(4):439~445(in Chinese with English abstract).
- [16] 黄第藩. 成烃理论的发展——(I)未熟油及有机质成烃演化模式[J]. 地球科学进展, 1996,11(4):329~335. Huang Difan. Advances in hydrocarbon generation theory -(I) immature oils and generating hydrocarbon and evolutionary model [J]. Advance in Earth Sciences, 1996,11 (4):329~335 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 149~153. Li Mingcheng. The Travel of Oil and Natural Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.149~153(in Chinese).
- [18] 冯加良, 吴士清. 沥青热解模拟及再生烃研究[J]. 南方油气地质, 1995,1(2):43~50. Feng Jialiang, Wu shiqing. Study on bitumen pyrolysis and regeneration hydrocarbon [J]. Geology Oil and Natural Gas in South. 1995,1(2):43~50(in Chinese with English abstract).
- [19] Helgeson H C, Knox A M, Owens C E, et al. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: Are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993,57:3295~3339.
- [20] Lewan M. D., Experiments on the role of water in petroleum formation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61:3691~3723.
- [21] Price L C. Metamorphic free-for-all [J]. Nature, 1994,370,253~254.
- [22] Seewald J S. Evidence for metastable equilibrium between hydrocarbons under hydrothermal control [J]. Nature, 1994,370,285~287.
- [23] Schimmelmann A, Boudou J P, Lewan M D, et al. Experimental controls on D/H and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of kerogen, bitumen and oil during hydrous pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 2001,32:1009~1018.
- [24] Schimmelmann A, Lewan M D, Wintsch R P. D/H isotope ratios of kerogen, bitumen, oil, and water in hydrous pyrolysis of source rocks containing kerogen types I, II, II S, III [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999,63(22):3751~3766.
- [25] Baskin D K. Atomic H/C ratio of kerogen as an estimate of thermal maturity and organic matter conversion [J]. AAPG Bull. 1997,81: 1437~1450.
- [26] 金之钧, 张刘平, 杨雷, 等. 沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002,27(6):659~666. Jin Zhijun, Zhang Liuping, Yang Lei, et al. Primary study of geochemical features of deep fluids and their effectiveness on oil/gas reservoir formation in sedimental basins [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002,27 (6):659~666 (in Chinese with English abstract).
- [27] 杨雷, 金之钧. 深部流体中氢的油气成藏效应初探[J]. 地学前缘, 2001,8(4):387~392. Yang Lei, Jin Zhijun. The effect of hydrogen from deep fluid on hydrocarbon generation [J]. Earth Science Frontiers, 2001,8(4):387~392(in Chinese with English abstract).
- [28] Frank D, Joe H. The catalytic decomposition of petroleum into natural gas [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61 (24): 5347~5350.
- [29] Frank D. Methane concentrations in natural gas: the genetic implications [J]. Organic Geochemistry, 2001,32:1283~1287.
- [30] Frank D, Joe Hightower. The catalytic decomposition of petroleum into natural gas [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61 (24):5347~5350.
- [31] 李术元, 林世静, 郭绍辉, 等. 矿物质对干酪根热解生烃过程的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 69~74. Li Shuyuan, Lin Shijing, Guo Shaohui, et al. Catalytic effects of minerals on hydrocarbon generation in kerogen degradation [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002,26 (1): 69~74 (in Chinese with English abstract).
- [32] 裘驿楠, 薛叔浩, 应凤祥. 中国陆相油气储集层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.210~217. Qiu Zenan, Xue Shuhao, Ying Fengxiang. Land Facies Reservoir of China Oil—Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.210~217(in Chinese).
- [33] Bridgewater D, et al. Fluid Movements—Element Transport and the Composition of the Deep Crust [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989.1~15.
- [34] 李明诚, 李剑, 万玉金, 等. 沉积盆地中的流体 [J]. 石油学报, 2001, 22(4):13~18. Li Mingcheng, Li Jian, Wan Yujin. Fluids in the sedimentary basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22 (4):13~18 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陶洪兴, 徐元秀. 热液作用与油气储层 [J]. 石油勘探与开发, 1994,21(6):92~98. Tao Hongxing, Xu Yuanxiu. Hydrothermal fluid action and oil—gas reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(6):92~98(in Chinese with English abstract).
- [36] 李小地. 中国深部油气藏的形成与分布初探[J]. 石油勘探与开发, 1994,21(1):34~39. Li Xiaodi. Deep hydrocarbon reservoir generation and distribution [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994,21(1):34~39(in Chinese with English abstract).
- [37] 田克勤, 李洪香. 异常压力与深层油气藏——黄骅凹陷为例[J]. 勘探家, 1998,3(9): 39~41. Tian Keqin, Li Hongxiang. Abnormal pressure and deep hydrocarbon

- reservoir in Huanghua depression[J]. *Explorationist*,1998, 3(9): 39~41(in Chinese with English abstract).
- [38] 戴金星,王庭斌,宋岩,等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京:地质出版社,1997.1~10.
Dai Jinxing, Wang Tingbin, Song Yan, et al. Big-and-middle-sized Natural Gas Field Generation Condition and Distribution[M]. Geological Publishing House, 1997. 1~10(in Chinese).
- [39] 李春光. 试论松辽盆地深层油气藏分布与形成[J].*油气地质与采收率*,2004,11(3):31~35.
Li Chunguang. Deep hydrocarbon reservoir generation and distribution in Songliao basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2004,11(3):31~35(in Chinese).
- [40] 妥进才. 深层油气研究现状及进展 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17 (4):565~571.
Tuo Jincai. Research status and advances in deep oil and gas exploration [J]. *Advance in Earth Science*, 2002,17 (4):565~571(in Chinese with English abstract).
- [41] 妥进才,王先彬,周世新,等. 深层油气勘探现状与研究进展[J].*天然气地球科学*,1999,10(6):1~8.
Tuo Jincai, Wang Xianbin, Zhou Shixin, et al. Deep oil and gas exploration status and research progress[J]. *Natural Gas Geoscience*. 1999,10(6):1~8(in Chinese).

Generation and preservation conditions of deep-seated gas in China

LIU Wen-hui^{1,2}, ZHANG Dian-wei¹

(1. *Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. *Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: Deep-seated gas is an important potential area of petroleum exploration and intensifying the effort to conduct deep-seated exploration is the inexorable trend of resources development in petroleum-bearing regions. In this paper the concepts concerning deep-seated gas are discriminated and analyzed and finally deep-seated gas is defined as natural gas generated and accumulated at >4500 m depth under the combined action of high temperature, high pressure and environment media. In the context of the vertical evolution of organic matter, deep-seated gas mainly refers to the natural gas generated and hosted in sediments below the oil generation window. On that basis, the scope of occurrence of deep-seated gas is discussed and in combination with the interaction between organic and inorganic matter, the deep-seated gas source is studied intensively. The authors think that kerogen, accumulated soluble organic matter and dispersed soluble organic matter make great contributions to the generation of deep-seated gas. Especially, dispersed soluble organic matter in superposed basin may act as an important gas source of deep-seated gas. Finally, according to the tectonic evolution and characteristics of hydrocarbon source rocks, the distribution and scope of deep-seated gas in China is preliminarily estimated.

Key words: deep-seated gas; oil generation window; gas source; disperse dissoluble organic matter

About the first author: LIU Wen-hui, male, born in 1957, senior hydrocarbon geologist and geochemist and PhD advisor, engages in the study of natural gas geology and hydrocarbon geochemistry; E-mail: whliu@pepris.com.