

天然气地质研究及应用

宋 岩 魏国齐 洪 峰 李亚红 主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本论文集总结了“九五”前三年天然气科技攻关在地质研究方面的部分新成果。重点介绍天然气地质理论新进展及其在四川、鄂尔多斯、莺歌海、准噶尔等盆地天然气勘探中的应用。本书可供科研机构、生产部门天然气科研人员及有关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气地质研究及应用/宋岩等主编.
北京:石油工业出版社,2000.9
ISBN 7 - 5021 - 3103 - 5

. 天...
. 宋...
. 石油天然气地质 - 研究 - 中国
. P618 .130 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 46701 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京施奈德自动化录入排版中心排版
北京密云华都印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 367 千字 印 1—1000
2000 年 9 月北京第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7 - 5021 - 3103 - 5 TE·2373
定价:28.00 元

前 言

天然气将是人类未来重要的洁净、优质能源,已经成为人们的共识。相应地天然气地质研究和勘探工作也在不断深入和加快。特别是“六五”、“七五”、“八五”和“九五”四次国家天然气科技攻关,促进了我国天然气工业的发展,使我国天然气勘探呈现出前所未有的景象,天然气地质理论研究也达到了国际水平。

“九五”科技攻关前三年,参加攻关的中国石油天然气集团公司、中国新星石油公司、中国海洋石油总公司、中国科学院及有关高等院校广大科技工作者相互协作,积极进取,采用新思路、新方法和新技术,在天然气地质理论研究和勘探技术攻关方面取得了重大进展,可概括为以下几方面。

1. 烃源岩生烃机制研究方面:定量评价了不同沉积和不同热演化阶段碳酸盐岩烃源岩中有机质的赋存形式、生烃机理和生烃贡献,确定干酪根、氯仿沥青“ A ”和氯仿沥青“ C ”三类有机质的生气转化率为氯仿沥青“ A ”> 氯仿沥青“ C ”> 干酪根。首次研究了我国主要煤系的煤岩显微组分组成密度分布特征及其成烃贡献,认为我国煤系以镜质组—惰性组组合类型和过渡型为主,故以生气为主,生油为辅。

2. 含气盆地构造和沉积特征研究方面:对我国主要含气盆地构造类型、构造演化特征及其对天然气富集的控制作用进行了系统的分析研究。根据造山带的时代与大地构造相特征对我国陆上八大盆地进行了盆地类型划分,提出复合前陆盆地为最有利的含气盆地类型。进一步深化了对我国主要含气盆地主要含气层系的沉积、储层特征的认识,例如,鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳沟槽解释模式、上古生界沉积相、沉积微相模式;四川盆地川东石炭系“膏盐湖—咸化陆表湖—陆表海”沉积模式、上二叠统“碳酸盐海槽—陆棚边缘—深缓坡”沉积模式等一系列沉积模式的建立,为大中型气田分布规律的认识提供了地质基础。

3. 天然气成藏机制和成藏模式研究方面:将地质分析、物理模拟和数字模拟相结合,建立了天然气扩散运移量、吸附损失量、水溶析出量等数字模型,在此基础上建立了不同成藏条件下天然气二次运移量动态模型。对我国主要含气盆地不同类型天然气藏成藏条件进行了系统分析,总结出了四川盆地生物礁气藏、川西浅层气气藏、鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气藏、准噶尔盆地山前逆冲带气藏、莺歌海盆地热流体气藏的成藏机制和成藏模式。

4. 大中型气田分布规律研究方面:“八五”攻关对我国大中型气田分布规律进行了总结,认为生气中心、古隆起、异常压力封存箱、成藏期晚等有利于形成大中型气田。“九五”攻关在上述基础上更加深入和完善,强调构造背景对大中型气田分布的控制作用;前陆冲断带、前渊斜坡和前缘隆起对中生界天然气藏具重要控制作用;克拉通盆地的大型继承性古隆起不整合面上易形成古生界大中型气田。

5. 天然气勘探技术研究方面:天然气勘探技术在攻关实践中不断完善,例如,四川盆地礁相及礁气藏的测井响应识别技术及多元信息预测技术;石炭系厚度地震预测技术和密度约束反演预测技术;鄂尔多斯盆地地震目标处理解释综合技术;莺歌海盆地热流体气藏勘探目标综合评价技术;川西浅层气气层预测和判识技术等。上述技术在天然气勘探和储量增长上起到了决定性作用。

6. 大中型气田勘探目标评价方面:攻关紧密结合勘探实践,开展了大中型气田有利目标评价和优选工作,在四川、鄂尔多斯、准噶尔、莺歌海、东海等主要含气盆地优选出一批大中型气田勘探目

标,为我国发现更多的大中型气田提供了新的领域和层系。

依靠上述先进的天然气地质理论和勘探技术,“九五”前三年我国天然气勘探取得了令人瞩目的成果。三年新增天然气探明储量 $5515.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,发现探明储量大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大中型气田 13 个(包括新增探明储量大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的气田)。

本论文集汇总了“九五”前三年天然气科技攻关在地质研究方面所取得的部分新进展,可供国内外天然气地质工作者借鉴。不当之处请予以指正。

作 者

2000.7.3

目 录

鄂尔多斯盆地地表烃类的遥感探测研究.....	王云鹏等(1)
生物标志化合物在碳酸盐岩气—源对比中的应用.....	李振西等(6)
中国中部深盆气成藏机制及潜力评价	张金亮等(17)
鄂尔多斯盆地中东部前石炭纪古岩溶地貌与天然气富集研究	马振芳等(32)
鄂尔多斯盆地中东部奥陶系古风化壳储层的分形及灰色系统评价	马振芳等(37)
水—岩化学平衡饱和指数技术在鄂尔多斯盆地中东部储层研究中的应用	马振芳等(43)
鄂尔多斯盆地长庆气田晚古生代沉积特征	范正平等(50)
鄂尔多斯盆地长庆气田上古生界碎屑储集岩成岩作用及孔隙演化	范正平等(57)
中国大中型气田富集的主要构造区带	魏国齐等(66)
模糊数学方法在陆上天然气勘探靶区评价中的应用	马硕鹏等(73)
深层油气研究进展与前景展望	妥进才等(78)
四川盆地东部长兴组生物礁气藏测井识别方法及其预测技术	任兴国等(88)
川东上二叠统生物礁地震预测方法研究	罗 蓉等(98)
重点含气盆地天然气资源丰度.....	李 剑等(106)
中国大中型气田分布特点.....	冯恩源等(120)
准噶尔盆地天然气成藏条件与勘探方向.....	王宜林等(129)
中国东部、中部典型盆地天然气中非烃气体(N_2 、 CO_2 、 Hg)的成因及地质地球 化学意义.....	陈践发等(139)
我国煤系地层的层序特征与倾油气性的关系.....	陈恭洋等(146)
莺歌海盆地烃源岩特征及高温超压环境成烃演化模式.....	黄保家等(156)
莺—琼盆地天然气的成因类型及气源研究.....	张国华等(168)
莺—琼盆地活动热流体与成藏动力学研究.....	张敏强等(177)
莺歌海盆地中央泥拱带天然气成藏动力学模式分析.....	杨计海等(188)
莺歌海盆地储层及储盖组合.....	吕 明(199)
西北侏罗系煤成大中型气田形成主要控制因素及有利勘探方向.....	赵 林等(211)
超压泥质岩盖层封闭油气机理的新认识.....	付 广等(219)
中国大中型气田成岩作用对气藏形成的控制.....	赵澄林等(224)

鄂尔多斯盆地地表烃类的遥感探测研究

王云鹏 耿安松 刘德汉

(中国科学院广州地球化学研究所)

摘要 利用遥感技术对鄂尔多斯盆地地表烃类进行了遥感探测研究,分析了鄂尔多斯盆地由于烃类微渗漏造成的“褪红”、粘土矿化、碳酸盐化及热惯量和地温异常等地表异常标志的成分特征与光谱响应。发现油区土壤具有典型“褪红”蚀变与粘土矿化和碳酸盐化的成分特征,“褪红”蚀变可造成油区土壤 TM1/3 和 TM2/3 的增高,粘土矿化和碳酸盐化可造成油区土壤 TM5/7 增高。利用比值主成分分析方法从 TM 图像中提取出本区烃类综合蚀变信息。指出了乌审旗—榆林北、伊金霍旗—准格尔—神木、靖边—横山—乌审旗—盐池和环县—吴旗—延安等四个异常区。这些地表烃类异常区(带)与已知油气田和现有勘探结果具有较高的空间吻合率。

目前,在鄂尔多斯盆地下古生界、上古生界、中生界延长组和延安组四套地层中发现了油气田,而上覆地层主要为第四纪黄土,长期的烃类微渗漏必将影响上覆地层的理化状况,因此对全盆地地表烃类微渗漏特征、富集状况及蚀变的时空分布规律的探测和评价,对盆地含油气性的研究、评价与勘探及对深盆气的认识等方面都有重要的意义。本研究采用了 TM 遥感图像进行地表烃类微渗漏及相关蚀变的探测和评价。近年来随着遥感技术的发展,尤其是遥感器几何分辨率与光谱分辨率的提高,人们已可以利用遥感技术直接探测到由于长期烃类微渗漏而造成的地表地物矿物成分甚至化学成分的微弱变化(丁暄、王云鹏,1992;陈述彭、赵英时,1990)。这项技术已在国内外许多含油气盆地获得了成功应用(Segal D. B., Merin I. S. 1989; 郭德方、叶和飞,1995;王福印,1990;刘燕君等,1992;朱振海等,1990)。其主要原理是含油气盆地地下油气藏长期的烃类微渗漏会造成地表烃类的富集,并对地表地物(如土壤、岩石和植被)的理化状况造成改变,使得地物在可见—近红外及热红外波段的反射光谱发生变化,而这种变化可以为卫星遥感数据所捕获。通过对卫星遥感数据的处理可以将这种微弱的信息突出出来,达到直接探测和评价地表烃类蚀变的目的(丁暄、王云鹏、何在成,1994)。

一、烃类微渗漏及其蚀变的地表异常标志与光谱响应

烃类长期的微渗漏必将引起地球化学环境的改变。这种长期的环境改变必将使上覆地层岩石、矿物、土壤的理化性质、组成成分发生改变,这就是烃类蚀变或烃类蚀变异常(郭德方、叶和飞,1995)。其中具有较高遥感光谱响应的烃类蚀变有:“褪红”蚀变,即由于烃类微渗漏造成土壤或岩石中 Fe^{2+} 含量的增加和 Fe^{3+} 含量的降低。粘土矿化和碳酸盐化蚀变,即由于烃类微渗漏造成土壤或岩石中粘土矿物和碳酸盐矿物含量的增加。热惯量异常和地温高异常。这些异常有些是很明显的,目测即可识别,有些是很微弱的,目测无法识别,但可以通过一定的技术将其提取出来。对异常标志如何进行提取是利用遥感技术进行烃类检测的核心。现将烃类蚀变的标志、光谱响应与信息提取方法及在鄂尔多斯盆地的应用简述如下。

1.“褪红”蚀变及低价铁富集的光谱特征

“褪红”蚀变的光谱特征直接关系到“褪红”蚀变的提取。已知 Fe^{3+} 的吸收峰在 $0.9\mu m$ 附近, Fe^{2+} 的吸收峰在 $1.0\mu m$ 附近。另外,二价铁矿物在 TM3 波段的反射率相对于 TM1~2 波段和 TM4 波段要高,而三价铁矿物在 TM3 波段的反射率相对于其它波段并不突出。为了反映“褪红”蚀变的光谱效应在 TM 波段尤其是可见光波段的反映,分析了鄂尔多斯盆地典型油气区和非油区土壤样品的 Fe 含量及可见—近红外光谱,在表 1 中列出了其 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的含量及 TM 波段比值的统计值。

表 1 油区与非油区土壤铁含量(%)与 TM 反射率比值对比表

项 目	Fe_2O_3	FeO	TM1/ 3	TM2/ 3
非油区样点	3.61	0.57	0.630	0.796
油区样点	0.70	1.08	0.842	0.929
差 值	2.91	0.51	0.212	0.133

可以看出:油区土壤样品具有典型“褪红”蚀变的化学组成,即 Fe^{2+} 含量高, Fe^{3+} 含量低。油区与油区土壤相比在 TM1 和 TM2 波段反射率都升高,而在 TM3 波段反射率变化不大甚至略有降低。利用这一变化,可以使用比值法来确定“褪红”蚀变的强度。在表 1 中列出 TM1/ 3 和 TM2/ 3 在油区和非油区的对比,可以看出,油区土壤具有较高的 TM1/ 3 和 TM2/ 3。这就是采用这两个比值提取“褪红”蚀变信息的原因所在。

2. 粘土矿化和碳酸盐化的光谱特征

粘土矿物和碳酸盐矿物的吸收峰集中在 TM7 波段。强的粘土矿化和碳酸盐化可以引起 TM7 波段反射率的下降。通过综合对比本区典型油田和非油区上方土壤的光谱曲线,可以明显地发现油区土壤在可见—近红外波段明显低于非油区土壤。表 2 列出了油区与非油区土壤样品矿物平均含量与 TM 各波段平均反射率对比。

表 2 油区与非油区土壤矿物成分(%)及 TM 波段反射率对比表

矿 物	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	方解石		
油区样点	6.91	9.15	3.18	2.56	1.30		
非油区样点	3.66	7.58	2.72	1.06	0.38		
差 值	3.25	1.57	0.46	1.50	0.92		
TM 反射率	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	TM5/ 7
油区样点	16.95	21.74	30.72	33.73	46.79	35.24	1.328
非油区样点	21.68	32.65	41.46	42.89	50.87	47.82	1.064
差 值	4.73	10.91	10.72	8.16	4.08	12.58	0.264

可以看出:油区土壤中粘土矿物和碳酸盐矿物方解石含量明显高于非油区土壤,具有典型的“粘土矿化”和“碳酸盐化”特征,其中以蒙脱石化和绿泥石化最为显著,其次为方解石化、伊利石化和高岭石化。油区土壤在 TM 各波段平均反射率明显低于非油气区土壤,其中 TM7 波段降幅最大,达 12.58,这是由于粘土矿物和碳酸盐矿物的吸收峰主要集中于这个波段而造成的。表 2 中 TM5/ 7 的对比也很明显。即油气区具有高的 TM5/ 7,这对信息提取是至关重要的,可通过比值法突出粘土矿化和碳酸盐化信息。

3. 热惯量的异常和热异常的光谱特征

研究表明油区具有高的热惯量并存在热异常。卫星热红外通道具有较高的温度分辨力(达 1~2^{°C}),温度响应在 TM6 波段,因此常用来提取热异常。

二、地表烃类信息的提取方法

几种烃类异常标志在 TM 遥感图像上都有一定的光谱效应,但都十分微弱,因此增强就成了提取这些信息的关键。围绕这个问题国内外专家发展了许多技术,较成功的有比值及组合比值法和主成分分析法(丁暄、王云鹏、何在成,1993;王云鹏、丁暄、何在成,1994)。其中比值—主成分分析法是一种较有效的信息提取方法,结合上述分析,在鄂尔多斯盆地确定了下列信息提取方法。

TM1/3 提取“褪红”蚀变信息。具体方法为:对 TM1 和 TM3 波段数据进行大气散射校正,通过比值法生成 TM1/3 比值图像,对比值图像灰度做概率分布检验,确定全区 TM1/3 的背景值及异常下限值,将灰度值大于异常下限值的象元提取出来,最终生成“褪红”异常专题图像。

TM5/7 提取粘土矿化及碳酸盐化信息。对 TM5 波段及 TM7 波段灰度进行比值运算,对比值图像进行分布检验,背景值及异常下限值的确定(吴传壁、周书欣,1989),最终生成粘土矿化和碳酸盐化蚀变专题图像。

对 TM6 波段原始图像灰度经过分布检验,背景值及异常下限确定,最终生成区域热异常图像。

利用主成分分析综合上述三个异常图像,将等级大于背景值加二倍标准差的象元提取出后生成烃类蚀变信息综合图像或综合强度图像。为了突出异常同时也要求地物清楚,选择 TM5 波段做为背景,赋予绿色, TM3 波段赋予蓝色,异常赋予红色。合成了鄂尔多斯盆地全区地表烃类检测图。图像整体呈蓝绿等冷色调,水体呈蓝色,异常呈红—橙—黄色,地物也十分清晰。

三、结果分析

从异常的形态看,基本呈零星点状分布,从其空间分布特征来看,地表烃类异常集中的分布区主要有以下几个(见图 1)。

1. 乌审旗—榆林北异常区()

该异常区位于榆林、乌审旗、乌审召及秃尾河所围限的近椭圆形区域内,分布集中,是本区最强的地表烃类蚀变聚集带。构造位置上该异常位于陕北斜坡东北边缘与伊盟隆起的交接部位,也是下古生界东部生气中心北部及上古生界北部生气中心的东边缘,是中部气田的上倾方向。另外在伊盟隆起南部(如鄂 5、鄂 8 井)于奥陶系风化壳钻遇高产气流,是奥陶系气藏的预测远景区。因此该烃类异常区与中部气田及伊盟预测区的长期烃类微渗漏有密切关系。

2. 伊金霍旗—准格尔—神木异常区()

该异常区位于盆地的东北部,构造上属于伊盟隆起东部及伊盟隆起、陕北斜坡和晋西挠褶带交接的三角部位及上古生界镇川堡、子洲气田的上倾方向。这与已有化探资料吻合很好,与盆地东北部分布的油苗带吻合较好,有资料表明这些油苗主要来自上古生界的煤系烃源岩。所以该异常可能是上古生界气在陕北斜坡的北部遮挡造成的,如果是这样,对于盆地上古生界

图 1 鄂尔多斯盆地地表烃类遥感探测及评价图

深盆气的认识是一重要证据,从遥感图上看,其蚀变强度和分布都是比较强的。

3. 靖边—横山—乌审旗—盐池异常区()

该异常是盆地中部近环状分布的异常区,位于下古生界盆地靖边鞍部与西部生气中心(即盐池凹陷)的交汇部位。与化探、钻探及地震资料吻合的非常好,是中部气区勘探的一个新目标。

4. 环县—吴旗—延安异常区()

呈面状、星点状分布,与盆地南部油苗区吻合较好,与中生界油区及化探结果空间分布基本一致,所以这一异常蚀变带主要来自中生界油田的烃类。

从盆地地表烃类的空间分布及其与油气田的空间位置来看具有以下特征: 地表烃类异常区(带)与已知油气田(包括中生界、上古生界及下古生界油气田)都具有较高的空间吻合率,反映出这些地表烃类异常区(带)是油气田烃类长期微渗漏的结果。 地表烃类异常区(带)集中分布于构造交接部位或气田的上倾遮挡方向(如图 1 中的 、 和 区),反映出烃类沿构造裂缝微渗漏而造成地表烃类蚀变的特征。 在目前勘探基础上,地表烃类遥感探测结果和已有化探、钻探及地震等勘探成果具有较好的吻合性,反映了在北方黄土—沙漠地区地表烃类遥感探测的可行性。 对于地表烃类异常区,还须结合其它资料进行详细评价,通过基于 GIS

的遥感—非遥感资料的复合,可以对盆地烃类的聚集评价提供新的信息。

参 考 文 献

- 丁暄,王云鹏 .1992 .石油遥感应用研究进展综述 .遥感技术与应用,(1)
- 陈述彭,赵英时 .1990 .遥感地学分析 .北京:测绘出版社
- 郭德方,叶和飞 .1995 .油气资源遥感 .杭州:浙江大学出版社
- 王福印 .1990 .我国东部某地油气微渗漏的遥感研究 .国土资源遥感,(4)
- 刘燕君等 .1992 .遥感图像上的油气晕 .环境遥感,(1)
- 朱振海等 .1990 .遥感技术直接探测烃类微渗漏的方法研究 .科学通报,(5)
- 丁暄,王云鹏,何在成 .1993 .航天遥感探测烃类蚀变信息的应用研究 .科学通报,(38)11:1020~1023
- 王云鹏,丁暄,何在成 .1994 .江汉含油气盆地土壤光谱特征及烃类蚀变信息提取方案 .地球化学,23(增刊):
192~200
- 吴传壁,周书欣编译 .1989 .油气化探理论与方法 .北京:地质出版社
- Segal D B,Merin I S .1989 .Successful use of landsat thematic mapper data for mapping hydrocarbon microseepage induced mineralogic alteration,Lisbon Valley Utah .Photogrametric Engineering and Remote Sensing,55(8):1137~1145

生物标志化合物在碳酸盐岩气—源对比中的应用

李振西¹ 程克明² 崔明中¹ 杜丽¹ 张中宁¹

(1 中国科学院兰州地质研究所,

2 中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院)

摘要 采用井场直接吸附天然气中重烃组分的新方法从鄂尔多斯盆地古生界天然气中富集到了可用于碳酸盐岩气—源对比研究的正构烷烃(C₁₁—C₃₅)和甾、萜类生物标志化合物。通过详细研究天然气中生物标志化合物的分布形态、规律以及与可能源岩中生标的异同,探讨了应用天然气中的生物标志化合物进行母源追溯对比研究的可能性。研究表明: 天然气中的生物标志化合物确实携带着大量的原始烃类形成时的信息,它在天然气母源的追溯方面具有广阔的应用前景。林1井天然气中的生物标志化合物与该井奥陶系烃源岩的生物标志化合物在分布形态和规律上既有相似的方面,亦有不同之处。据此,可以推测林1井天然气很可能是具有多种气源供给的混源气。但仍以奥陶系气源岩为主力气源。陕81井天然气中的生物标志化合物则与该井下古生界烃源岩中的生物标志化合物在分布形态和规律上十分接近,这种相似性显示出该井的天然气强烈的海相沉积有机质的输入特性,为源自于下古生界碳酸盐岩烃源岩的单源气。陕98井天然气生物标志化合物与该井奥陶系烃源岩生物标志化合物的对比则表明该井的天然气在亲缘关系上与奥陶系的烃源岩存在着较多的矛盾之处,说明陕98井的天然气很可能是具有下古生界奥陶系碳酸盐岩烃源岩和上古生界石炭—二叠系煤系烃源岩二元气源输入的混源气。烃源岩酸解气态烃碳同位素对比的数据充分支持了上述结论,验证了利用天然气中的生物标志化合物进行气—源直接对比的可靠性。

研究实践证明,天然气中确实存在着极微量的重烃组分,其中包括烃源岩和原油中常见的一些特征生物标志化合物。利用常见的硅胶和氧化铝作为吸附剂,通过井场直接吸附的方法可以富集到天然气中的重烃组分,再采用室内溶剂抽提的方法,可以将吸附剂吸附的天然气中的重烃组分脱附下来,经石油醚过柱分离后得到饱和烃馏分,然后再通过色—质分析仪进行分析,最终获得可用于气—源直接对比的一系列生物标志化合物。现就鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳储层的三口气井中天然气的生物标志化合物分别予以讨论,重点为林1井和陕98井。表1为这三口气井天然气中正构烷烃的一些基本地球化学参数。

表1 古生界天然气正构烷烃的特征参数

井号	深度(m)	碳数分布	主峰碳	C ₂₁ - / C ₂₂ ⁺	Pr/ Ph	Pr/ nC ₁₇	Ph/ nC ₁₈
林1	3449.9 ~ 3453.4	C ₁₃ —C ₃₅	C ₂₉	0.76	1.29	0.28	0.37
陕81	3021.9 ~ 3025.3	C ₁₃ —C ₃₅	C ₁₇	2.24	1.90	0.27	0.15
陕98	3365.9 ~ 3370.1	C ₁₆ —C ₃₅	C ₂₉	0.49	0.13	0.25	1.15

一、林1井气—源对比

林1井位于鄂尔多斯盆地古生界气田的中部,距靖边5km,井深3510m。下古生界的储气层主要分布在马五¹—马五¹⁻⁴约55m的三个层段中(3430.6 ~ 3485.5m)。本次研究的天然气

采自马五¹⁻² 3449.9 ~ 3453.4m 的产层。图 1 为林 1 井奥陶系碳酸盐岩烃源岩和天然气气—质分析的总离子流图(TIC)。通过对比可以看出,林 1 井烃源岩的正构烷烃以低碳数烃($< C_{21}$)为主,3485m 烃源岩的高碳数烃部分略有增加,且呈明显的奇偶优势,但整个碳数的分布形态仍为前单峰形,它们的主峰碳分别是 C_{18} 和 C_{19} , C_{21}^- / C_{22}^+ 比值均大于 2.0,表现出了典型的高演化阶段海相母质输入的特征;而天然气中正构烷烃的分布形态则与烃源岩截然不同,高碳数烃超过了低碳数烃($C_{21}^- / C_{22}^+ = 0.76$),整个碳数的分布形态呈前、后基本对等的双峰形,主峰碳为高碳数部分的 C_{29} 。一般认为,正构烷烃低碳数部分和高碳数部分具有不同的母源输入,前者与海洋低等浮游生物的生源有关,而后的生源则多来自于高等植物(苔藓植物和维管植物)的贡献。但是任何事物都不是绝对的,在海相沉积有机质中也不乏高碳数正构烷烃占优势的例子,如本次研究中的陕 81 井 3005m 的烃源岩,其 C_{21}^- / C_{22}^+ 比值仅为 0.42,主峰碳亦为 C_{29} 。无独有偶,其它如南华北地区下古生界碳酸盐岩和塔里木盆地奥陶系中也曾报道过正构烷烃集中于高碳数部分且具强烈的奇偶优势,主峰碳位于高碳数部分的例子。实际上,有人对前寒武纪仅由菌藻类脂形成的干酪根进行了热解生烃的模拟实验,结果表明:当温度高于 450 °C 时,从这类干酪根上降解下来的石蜡烃的含量会急剧增加,使正构烷烃 C_{21}^- / C_{22}^+ 的比值小于 1。这说明古生界碳酸盐岩沉积有机质中某些高含量石蜡烃的出现也可能与成熟度较高的菌藻类脂形成的干酪根的降解有关。此外,研究还表明:下古生界碳酸盐岩中高碳数烷烃的存在与低碳数部分一样可归因于海洋低等生物的贡献,在岩石薄片的鉴定中,南华北地区碳酸盐岩中普遍含有介形虫和藻类,说明下古生界的母质输入确以低等水生生物和浮游生物为主(曾凡刚,1996)。细菌同样能产生一定数量的生物蜡,某些真菌的孢子中含有比较丰富的高碳数石蜡烷烃(碳数可延续到 nC_{38} 以上),并且在 nC_{23} — nC_{31} 之间呈明显的奇偶优势(黄第藩等,1994)。由此看来,仅凭林 1 井天然气中正构烷烃不同于一般海相沉积有机质的分布形态,我们还不能就此断定其母源中有陆相有机质的输入成分,这需要更多的地球化学数据来佐证。

图 1 林 1 井烃源岩和天然气气—质总离子流图

通过分析林 1 井烃源岩和天然气的 m/z 183 质量色谱图,发现 3446m 烃源岩中含有丰富的无环类异戊二烯烷烃,其碳数分布为 iC_{18} (降姥鲛烷)至 iC_{35} ,同时还检出了 iC_{32} 、 iC_{33} 和 iC_{35}

不规则长侧链类异戊二烯烷烃,尽管后者的相对含量不是很高,但在 m/z 183 质量色谱图上仍依稀可辨。3458m 烃源岩的长侧链类异戊二烯烷烃含量不及 3446m 烃源岩那么高,其碳数分布也略逊于 3446m 烃源岩,高碳数部分只延续到 iC_{31} 。此外,从 3485m 烃源岩中未能检出不规则的长侧链类异戊二烯烷烃。天然气的 m/z 183 质量色谱图表明:其无环类异戊二烯烷烃的碳数分布范围与 3485m 烃源岩相类似,从 iC_{16} 至 iC_{29} ,其中小于 iC_{20} 的类异戊二烯丰度较高,明显大于长侧链的类异戊二烯化合物。在天然气中亦没有发现不规则的长侧链类异戊二烯化合物,这一点也与 3485m 烃源岩相类似。总之,天然气中的长侧链类异戊二烯烷烃不论是在碳数分布上还是在丰度上都不及烃源岩那么广和那么高。通过对比可以看出林 1 井天然气中的类异戊二烯烷烃生物标志化合物的分布形态与同一口井的烃源岩比较接近,它们之间不存在较大的差异。

图 2 为林 1 井烃源岩和天然气 m/z 191 质量色谱图。通过对比可以看出烃源岩与天然气在三环萜烷的相对丰度上有十分明显的差别。林 1 井烃源岩中均含有丰富的三环萜烷,3446m 烃源岩和 3485m 烃源岩三环萜烷与五环三萜烷的比值分别为 1.52 和 1.65,说明其相对含量均要高出五环三萜烷许多,而天然气三环萜烷与五环三萜烷的比值却仅为 0.34,可见其相对含量远远低于五环三萜烷。鄂尔多斯盆地下古生界海相碳酸盐岩烃源岩中含有丰富的

图 2 林 1 井 m/z 191 质量色谱图

三环萜烷这已是公认的事实,林 1 井烃源岩中高丰度的三环萜烷及三环萜烷系列化合物中以 C_{23} 为最高峰均可视为是海相环境中原始菌藻类输入的特征之一。一般说来,当烃类物质从烃源岩中排出时,三环萜类化合物由于其分子结构小于五环三萜类化合物而更易优先排出。因此,原油中的三环萜类化合物的相对丰度通常会高于其在烃源岩中的含量。但林 1 井天然气中萜类化合物的分布情况却恰恰相反,这很可能暗示奥陶系海相碳酸盐岩烃源岩并非林 1 井天然气的唯一母岩。相比之下,林 1 井烃源岩和天然气中五环三萜烷的分布形态则颇为相似,它们均以 17 (H) C_{30} 藿烷为最高峰,都含有 18 (H) - 30 - 降新藿烷($C_{29}Ts$)和 17 (H) - 重排藿烷(C_{30}^*),其中 3446m 烃源岩和天然气中的 $C_{29}Ts$ 含量似乎更高一些。由于烃源岩中五环三萜烷的相对丰度要低于三环萜烷,故其在 17(H) C_{30} 藿烷之后流出的一些化合物的丰度显然不如天然气,在天然气中 17 (H), 21 (H) - 莫烷甚至 C_{33} 三升藿烷均有明显的显示。

通过对比林 1 井烃源岩和天然气中的甾类化合物(图 3)可以看出,它们之间存在着一定的差别。如 3446m 烃源岩的 C_{21} 孕甾烷丰度较高,相比之下 C_{22} 升孕甾烷的含量则显得较低;3485m 烃源岩中孕甾烷系列化合物的相对丰度则要略大于 3446m 烃源岩,其中升孕甾烷的丰度更要大于孕甾烷;在天然气中孕甾烷和升孕甾烷的含量显得旗鼓相当,不相上下。上述的这

图 3 林 1 井 m/z 217 质量色谱图

种差异仅限于孕甾烷系列化合物之间的相对含量,当孕甾烷系列化合物与规则甾烷系列化合物相比时,烃源岩与天然气之间几乎没有什么差别,它们孕甾烷/规则甾烷的比值分别为0.10、0.11和0.10,可以说是相当的一致。在规则甾烷(C_{27} — C_{29})的分布形态上,3446m 烃源岩以 C_{28} 甾烷占优势,而 C_{29} 甾烷的含量则明显低于奥陶系海相碳酸盐岩烃源岩中 C_{29} 甾烷的平均含量(40%)。此外,通常在 n - (R) 甾烷相对丰度中占有优势的 n - $C_{29}(R)$ 甾烷在3446m 烃源岩中也明显偏低,这可能是一个特例。3485m 烃源岩规则甾烷的分布形态则属于古生界海相烃源岩的典型分布形态,即 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$, n - $C_{29}(R)$ 甾烷在 n - (R) 甾烷相对丰度中占有明显的优势。天然气规则甾烷的分布特征为 n - $(R+S)$ 构型甾烷的丰度明显大于 n - $(R+S)$ 构型的甾烷,但整个规则甾烷的分布形态仍为 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$,与3485m 烃源岩颇为相似。除了规则甾烷外,在林1井烃源岩中均检出了一定丰度的重排甾烷和低含量的4-甲基 C_{30} 甾烷。相比之下,天然气中虽也含有少量的4-甲基 C_{30} 甾烷,但其重排甾烷含量却明显低于烃源岩,仅有 n - $C_{28}(R+S)$ 重排甾烷两个峰可以辨认。与烃源岩相比,天然气中重排甾烷的匮乏是本次研究中碰到的一个普遍现象,从几口井的分析结果来看,它们重排甾烷的相对丰度均要低于同一口井的烃源岩。研究表明,重排甾烷的形成机理是在成岩过程中由于粘土矿物的酸性催化作用或在高成熟度条件下由于水的存在而使氢原子的交换增强导致甾醇形成重排甾烯,然后再还原形成重排甾烷,其中13,17(H)20S和20R为重排甾烷的主要异构体,而13,17(H)20S和20R则为次要异构体。因此,如果排除了热成因因素,原油中低丰度的重排甾烷通常指示其源岩为还原环境下贫粘土矿物的碳酸盐岩。鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩烃源岩中均含有一定丰度的重排甾烷,这和鄂尔多斯盆地奥陶纪的沉积环境与通常意义上的海相碳酸盐岩沉积环境相比略为偏氧化以及奥陶系烃源岩的高演化程度均不无关系。有人通过加水热解实验曾经证实,在烃源岩的排烃过程中,重排甾烷与规则甾烷相比似乎更易排出(Peters, K. E.等,1990)。倘若确实如此,那么奥陶系的天然气中会含有比其烃源岩丰度更高的重排甾烷,或者至少也应具有与烃源岩丰度相当的重排甾烷。然而,有一点是可以肯定的,即依照目前对重排甾烷成因机理的认识,石炭—二叠系煤系烃源岩中应含有比奥陶系碳酸盐岩烃源岩丰度更高的重排甾烷的推理当能成立。所以,仅就古生界天然气比奥陶系烃源岩更匮乏重排甾烷的分析结果而言,它并不能成为古生界天然气源自石炭—二叠系煤系烃源岩而非奥陶系碳酸盐岩烃源岩的证据之一,尽管造成这种不一致的原因还有待于更深入的研究。

总之,通过生物标志化合物对比,林1井天然气与奥陶系烃源岩既有很多相似的方面,也有一些不同之处。比较明显的差别为:三环萜烷的相对丰度以及正构烷烃中高碳数部分的存在。据此,可以推测奥陶系烃源岩并非林1井天然气的唯一气源,林1井天然气很可能是具有多种气源供给的混源气,但仍以奥陶系气源岩为主力气源。

二、陕81井气—源对比

陕81井位于榆林附近,属古生界中部气田的东北部。本次研究的气样采自下古生界马五²⁻²含气层(3021.9~3025.3m)。通过对比陕81井奥陶系烃源岩和天然气的烷烃及甾萜类生物标志化合物的基本分布形态,可以得出,陕81井天然气重烃组分中的生物标志化合物与奥陶系烃源岩中生物标志化合物具有良好的可比性,它们之间的亲缘关系比较明显,由此可以推测陕81井的天然气很可能是产于下古生界碳酸盐岩的单源气(陕81井详细的气—源对比研究另文发表)。

三、陕 98 井气—源对比

陕 98 井位于鄂尔多斯盆地中部气田的中部,在靖边的南边约 50km 处,井深 3465m。下古生界产气层主要为两段:马五¹⁻³的 3365.9 ~ 3370.1m 和马五²⁻²的 3379.0 ~ 3383.4m。本次分析的气样采自下古生界气藏的上段,即马五¹⁻³。陕 98 井烃源岩和天然气气—质分析的总离子流图显示陕 98 井烃源岩正构烷烃的分布形态略具双峰形,前高后低,但仍以低碳数正构烷烃为主,其 C_{21}^- / C_{22}^+ 比值分别为 1.33(3368m 烃源岩)和 1.10(3380m 烃源岩),主峰碳为 C_{19} 和 C_{18} ;天然气中正构烷烃的分布具明显的双峰形,前低后高,高碳数正构烷烃占显著的优势, C_{21}^- / C_{22}^+ 比值仅为 0.49,与烃源岩的比值相差甚远,主峰碳也相应地后移至 C_{29} ,同时,高碳数正构烷烃部分具有明显的奇偶优势,碳数可达 C_{35} 。前已述及在海相碳酸盐岩烃源岩中亦不乏正构烷烃集中于高碳数部分($C_{21}^- / C_{22}^+ < 1$)并具奇偶优势的例子,因此,陕 98 井天然气正构烷烃以高碳数部分为主的双峰分布形态表明两种可能性的存在,即它的母源有上古生界石炭—二叠系煤系烃源岩成分或者仍为海相母质输入的特征。

陕 98 井烃源岩及天然气 m/z 183 质量色谱图表明,烃源岩和天然气中均含有较丰富的长侧链类异戊二烯化合物。其中 3368m 烃源岩中的长侧链类异戊二烯以低碳数($< iC_{26}$)为主,高碳数部分含量很低,且不见不规则长侧链类异戊二烯化合物;3380m 烃源岩与 3368m 烃源岩的不同之处在于除了含有低碳数的长侧链类异戊二烯烷烃而外,还具有丰度较高的高碳数长侧链类异戊二烯化合物($iC_{29}—iC_{36}$),与此同时还检出了一些头头相连的不规则长侧链类异戊二烯化合物(iC_{32} 、 iC_{33} 和 iC_{35});天然气中长侧链类异戊二烯的分布范围与 3368m 烃源岩相近,主要集中于 $< iC_{26}$ 的低碳数部分,但丰度却很高,大部分的相对含量均超过了相邻的正构烷烃的含量。如此高丰度的长侧链类异戊二烯烷烃在高碳数部分($> iC_{29}$)却踪影全无,只有零星的几个碳数还勉强能够辨认。虽然天然气中正构烷烃的碳数可延续到 C_{35} ,但在高碳数部分却几乎不含任何类型的类异戊二烯烷烃。与烃源岩相比,天然气中普遍缺乏高碳数($> iC_{29}$)的长侧链类异戊二烯化合物的现象,似乎在暗示长侧链类异戊二烯烷烃不仅在排出烃源岩的速率上低于正构烷烃,而且很可能受高成熟度的影响,使高碳数的类异戊二烯烷烃($> iC_{29}$)发生裂解从天然气中消失。从源岩和天然气的 m/z 183 质量色谱图中不难看出:陕 98 井天然气中长侧链类异戊二烯化合物的分布与同一口井奥陶系的烃源岩相比存在着明显的差异,即它在相对丰度上的变化完全不同于奥陶系的烃源岩。

图 4 为陕 98 井烃源岩和天然气 m/z 191 质量色谱对比图,从中可以看出 3368m 烃源岩和 3380m 烃源岩三环萜烷和五环三萜烷的基本分布形态很相似,在三环萜烷中均以 C_{23} 为最高峰,五环三萜烷中则以 17(H) C_{30} 藿烷为最高峰,但 C_{29} (Ts)和 C_{30}^+ 重排藿烷的丰度却很低,升藿烷系列中也只检出了 C_{31} 和 C_{32} 两组化合物。它们之间的不同之处似乎仅表现在 3380m 烃源岩三环萜烷的相对含量显得更高一些,故其 C_{28} 和 C_{29} 两组峰明显高于 3368m 烃源岩中的 C_{28} 和 C_{29} 。相比之下陕 98 井天然气中三环萜烷和五环三萜烷的分布形态则明显地有别于上述两个烃源岩。在天然气中与五环三萜烷相比三环萜烷占有绝对的优势,其三环萜烷与五环三萜烷的比值高达 2.80,而烃源岩的此比值则分别为 0.86(3368m 烃源岩)和 0.92(3380m 烃源岩)。在天然气的三环萜烷中, C_{21} 为最高峰,这明显不同于大多数海相碳酸盐岩烃源岩三环萜烷以 C_{23} 为最高峰的特征,故其三环萜烷的 C_{21} / C_{23} 比值也高达 1.39,而同一口井奥陶系烃源岩的这个比值却分别为 0.92(3368m 烃源岩)和 0.76(3380m 烃源岩)。尽管天然气具有高

图4 陕98井 m/z 191 质量色谱图

丰度的三环萜烷系列化合物,但相比之下其三环萜烷中大于 C_{25} 的化合物的相对丰度却非常低,尤其是 C_{28} 和 C_{29} 在 m/z 191 质量色谱图上仅有微弱的显示,与其高丰度的低碳数三环萜烷 ($< C_{25}$) 完全不成比例。天然气中的五环三萜烷系列化合物除了相对丰度较低而外,在分布形态上与源岩则相差无几,如仍以 17 (H) C_{30} 藿烷为主峰,升藿烷系列中也检出了 C_{31} 和 C_{32} 两组化合物等。在陕98井源岩和天然气三环萜烷和五环三萜烷的特征生物标志化合物参数中,天然气至少在三环萜烷 C_{21}/C_{23} ,三环萜烷/五环三萜烷、甾类/萜类、 $C_{29}(\text{+})/C_{30}(\text{+})$ 藿烷等比值上表现出既不同于奥陶系烃源岩也有别于其它下古生界气藏天然气的特性来。因此,可以说陕98井天然气在三环萜烷和五环三萜烷的生标分布特征上与奥陶系烃源岩的可比性较差。

陕98井天然气在甾烷系列化合物的分布上同样显示出了不同于奥陶系烃源岩的一些特性来。从陕98井烃源岩和天然气 m/z 217 质量色谱对比图(图5)中可以看出,陕98井烃源岩的甾类化合物分布特征是低丰度的孕甾烷和升孕甾烷,规则甾烷中仍以 C_{29} 占优势,其分布趋势均为 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$,具有相对丰度较高的重排甾烷,但4-甲基 C_{30} 甾烷的含量一如其它奥