

油气耗散——油气地质研究和资源评价的弱点和难点

刘池洋¹, 马艳萍², 吴柏林¹, 刘超¹

(1. 西北大学“大陆动力学”国家重点实验室, 含油气盆地研究所, 陕西 西安 710069;

2. 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 油气生成后运移的结果有3种: 1) 聚集成藏; 2) 散于岩层和流体中; 3) 与途经的流体-围岩相互作用所耗损或暴露地表而散失, 后者称之为“耗散”。在油气运移过程中, 耗散部分最为活跃, 与聚集成藏的油气联系最为密切; 为油气地质研究、勘探部署和资源评价等不可或缺的重要研究内容。根据油气耗散前、后数量和性质等方面的差异, 将油气耗散划分为数量减少、相态转变、成份改变和性质转化4种类型, 分别不同程度地体现了油气耗散的环境、条件和特点等方面的差异。其中性质转化类通常发生在埋藏不很深的表浅层或地表, 油气与围岩、流体或大气等相互作用所形成的各种还原蚀变等后生产物及矿产, 一般已不具烃类的表现特征。但其油气耗散量通常十分巨大, 应给以足够的重视。将这类一般不具烃类特征的产物与直接显示油气耗散的结果(如油气苗、沥青、稠油等)相结合, 对其追根溯源, 可能为探讨和解决油气耗散及其规模这一国际难题的重要途径; 也是示踪、发现和预测相关矿床的有效线索和重要标志。本文探讨了鄂尔多斯盆地东北部与上古生界天然气耗散有关的各种后生产物的类型、基本特征、地球化学性质、形成环境和分布特点等。

关键词: 油气耗散; 油气藏破坏; 油气运移; 流岩作用; 后生还原蚀变; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Weakness and difficulty of petroleum geology study and resource assessment: hydrocarbon dissipation

Liu Chiyang¹, Ma Yanping², Wu Bolin¹, Liu Chao¹

(1. Institute of Petroliferous Basin, State Key Laboratory of Continental Dynamics (Northwest University),

Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Hydrocarbon migration may have three results: (1) accumulation, (2) diffusion in rocks and fluids, or (3) loss due to interactions with fluids and surrounding rocks or surface exposure. The latter is defined here as dissipation. The dissipation is most active during hydrocarbon migration and is closely linked to hydrocarbon accumulation, thus study of the phenomenon become an indispensable part of petroleum geology research, and petroleum exploration and resource assessment. Hydrocarbon dissipations can be divided into four types according to the differences of quantity and quality of hydrocarbons before and after dissipation: quantity decrease, phase transformation, composition alteration, and quality conversion, reflecting the differences in environment, conditions and characteristics of dissipation. The quality conversion often occurs at surface or near surface, where hydrocarbons will interact with surrounding rocks, pore fluids or air. The epigenetic products and minerals resulted from these interactions generally have no apparent features of hydrocarbons, but the amount of dissipated hydrocarbons is huge, thus much attention should be given to this phenomenon. These products in combination with di-

收稿日期: 2008-05-26。

第一作者简介: 刘池洋, 笔名刘池阳(1953—), 男, 教授、博士生导师, 油气地质与勘探、盆地动力学。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB214607); 教育部长江学者和“油气盆地”创新团队发展计划资助项目(IRT0559); 国家自然科学基金项目(40372096)。

rect evidences of hydrocarbon dissipation (such as seepage, bitumen and heavy oil) can not only serve as an important means to address the puzzle of hydrocarbon dissipation and its scale, but also provide effective clues and significant indicators for tracing hydrocarbon pathways, searching for oil and gas pools, and evaluating the scale of dissipations. This paper analyzes and discusses the types, basic characteristics, geochemical properties, environments of formation and distributions of various epigenetic products related with gas dissipation in the Upper Paleozoic in northeastern Ordos Basin.

Key words: hydrocarbon dissipation; destruction of oil and gas pools; hydrocarbon migration; fluid-rock interaction; epigenetic reductive alteration; Ordos Basin

1 问题的提出和研究意义

1.1 盆地后期改造与油气藏破坏

中国大陆活动性强,后期改造强烈是中国沉积盆地的重要特点之一^[1,2]。油气为流体矿产,极易随所处环境的变化而发生流动或散失^[2,3],甚至形成的油气藏也会破坏消失^[2~12]。对全球350个大油田的统计发现,其寿命均较短暂,中值年龄平均为35Ma。这些油田均处于动态变化之中,破坏率很高,其中有1/3的油田存在聚集成藏后遭破坏的证据^[5]。

油气成藏后遭受不同形式、不同程度的破坏^[4~12],是含油气盆地后期遭改造的重要表现^[1~3,13]。

对寻找沉积矿产而言,在盆地后期改造中表现强烈、且发生普遍的地质作用主要为构造运动、抬升-剥蚀作用、沉降-深埋作用、热力-岩浆作用和水动力作用。其中构造运动最为重要,直接影响或制约着其他地质作用的发生和改造强度^[13]。流体矿产油气对后期改造或破坏的响应,较盆地更为敏感和强烈。导致油气藏遭受破坏,除以上5种地质作用外,重力作用、生物化学作用及大气作用也有重要的影响(表1)。结合前人有关研究^[3~15],将这些动力作用对油气藏破坏的形式和类型简要综合归纳于表1。

1.2 油气耗散及其研究意义

在油气地质和成藏的长期研究中,一般比较重视油气生成后在烃源岩内的运移及排出(即初次运移)和排出后的进一步运移(即二次运移)^[15,16]。但对后者,目前大多侧重于油气在储集层中的运动及聚集成藏等相关研究。对油气藏破

表1 油气藏破坏的动力作用、形式和类型

Table 1 The dynamic processes, forms and types of destruction of oil and gas pools

动力类型	油气破坏形式	破坏类型
构造作用	断裂切割泄流,裂缝渗漏; 断褶作用使圈闭的完整性和盖层的封闭能力破坏, 圈闭容积或形态改变	构造变动型
抬升-剥蚀作用	温压降低,改变盖层封闭及储层储集性能,油气逸散、脱溶气;圈闭的完整性、形态和幅度破坏或改变	抬升剥蚀型
沉降-深埋作用	温度增高,原油裂解、轻烃损失、重烃残留等;压力增大,盖层封闭能力降低;气涌和气顶膨胀	深埋温压增加型
热力-岩浆作用		热力破坏型
流体作用	水动力冲刷,水洗;表浅层水下渗氧化,水中生物降解;油气成分变化	流体破坏型
重力作用	天然气扩散、自然微渗漏、气洗	天然气扩散型
生物化学作用	微生物降解;油气成分变化	微生物降解型
大气作用	氧化、挥发、散失	氧化散失型
综合作用	以上两种或多种作用综合破坏	复合破坏型

坏后油气的再次运移或多次运移进而聚集成藏,虽也有所论及,但研究薄弱。特别是对油气排出烃源岩后或油气藏破坏后油气的耗散,近年来虽开始有所涉足和探索^[3~12],但尚缺乏专门、系统的研究,总体研究薄弱。

油气生成后发生的运移,不论其途径、期次、动力、相态及其模式和过程等多么复杂多变,其结果只有3种:1)聚集成藏(含储层吸附);2)散于地下的源岩和运移途经的围岩及流体中;3)与途经的流体-围岩相互作用而耗损和暴露地表或大气

而损失。对前者,讨论最多,直接用于认知油气藏的形成和影响油气勘探及资源评价。对其二,研究颇弱,在油气资源评价中,仅在选取综合参数中略有间接体现。对后者,探讨甚少,在油气资源评价和储量计算中鲜有涉及。对这部分笔者曾称之为“逸散”^①,考虑到这部分既有耗损又有散失,称作“耗散”似更确切。

在油气运移的“聚”、“散”、“失”3部分中,损失的部分最为活跃,所处的地质环境和所经的途径最有利于流体运移;与聚集成藏的部分联系也最为密切。前者可视作本应聚集成藏的油气,由于运移途中没有有效的圈闭和聚集场所,然却类同殊途,各得其果。故若对油气损失的部分研究薄弱和缺乏全面认识,常会不同程度地影响盆地油气资源评价和勘探远景决策。

对耗散的油气,以往在油气资源评价中,通常仅据盆地类型和演化特点等的不同略有间接体现,很少有意识专门考虑油气耗散的程度及其可能规模。显然,这直接影响资源量中聚集量的客观估算。如对青藏高原腹部羌塘盆地中生界油气资源的评价,曾有上百亿吨、几十亿吨甚至十多亿吨的数据,评价结果相差约3~10倍。各结果自有其评价依据,但对盆地后期改造过程中油气的耗散缺乏理性认识而考虑程度不同,应是评价结果差别甚远的主要原因。

在后期改造较明显的含油气盆地,油气资源耗散的规模不可忽视,有的十分巨大。如我国南方的麻江古油藏^[8]、准噶尔盆地西北缘^[7]、塔里木盆地中部隆起^[9]和柴达木盆地的油砂山,推断耗散的石油储量可达几亿吨到几十亿吨。仅根据油气散失后留下的沥青砂岩估算,塔里木盆地的志留系在华力西运动早期损失的油气资源量就达 $133.17 \times 10^8 \text{ t}$ ^[10]。再如,在加拿大西部阿尔伯达(加西)盆地东部的油砂矿区,探明的稠油储量就达 $240 \times 10^8 \text{ t}$ ^[17]。又如,世界油气资源最丰富的波斯湾盆地,从盆地北部扎格罗斯山跨土耳其到黑海边,地表出露的各类油气苗和古油藏北西向延展达2 000 km^[18],表明古波斯湾盆地油气资源更为丰富。显而易见,在资源量探明程度或剩余待探明资源量估算中,对油气损失的部分若不考虑,或估计不足,就会使资源估算结果明显偏大,

与客观实际相差甚远。

在我国能源盆地所发现的煤成气储量,远少于预测资源量中的预期比值^[19],是否与天然气耗散有关或没有考虑天然气耗散的影响值得进一步研究。

综上所述,在油气地质研究、勘探部署和有利远景区预测、资源评价和各级资源量估算中,对油气耗散部分应高度重视和充分考虑。

2 油气耗散的类型与可能的研究途径

油气耗散在浅表层所遗留的分布有限、产状各异的油苗,其显示的资源规模与实际散失的量相差甚远;天然气(藏)的散失几乎不留任何残余。故对油气耗散研究,特别是对其耗散规模的确定难度颇大、探索性强,是迄今尚无重要进展的国际难题。

2.1 油气耗散的类型、形式和结果

对油气耗散的类型及其分类依据,因人而异、差别较大,目前尚无统一的标准和方案。笔者根据油气耗散前、后数量和性质等基本特征方面的差异,将油气耗散划分为数量减少、相态转变、成份改变和性质转化4种类型(表2)。这4种类型的含义是明确的,其间的差别也较明显。各种类型分别不同程度地体现了油气耗散过程中地质构造背景、温压条件、地球化学环境、埋藏深度、耗散特点和程度等方面的差异。如油气相态的某些转变,往往反映经历了较高温度的改造(如焦沥青等)。

表2 油气耗散的类型、形式和结果
Table 2 The types, forms, and results of hydrocarbon dissipation

耗散类型	耗散形式	结果或产物
数量减少 (量变)	断裂切割油气泄流,微裂缝 渗漏	油苗,气苗,油砂,沥青 脉,含沥青岩石, 各类沥青,地蜡,稠 油,重烃,凝析油,甲 烷
相态转变 (相变)	石油液体转变为气体,胶 体,或固体	
成份改变 (性变)	轻烃扩散、微渗漏、逸散;生 物降解,产生CO ₂ 和H ₂ S等	
性质转化 (质变)	与围岩、流体、大气等相互 作用,参与形成不具烃类表 观特征或直接属性的现象 或矿产	砂岩漂白、(灰)绿色 化、碳酸盐化、铀矿 化、其他矿物蚀变等

① 刘池洋. 油气逸散——油气地质研究和资源评价的弱点和难点. 油气运移会议, 2007

在此有必要指出,在油气耗散过程中,其数量、相态、成份和性质一般均不同程度地同时发生变化,各种耗散形式也大多相伴或相继进行;特别是前3种耗散类型的最终产物(表2),通常大同小异,很难据结果将其截然分开。由于上述各类型的耗散形式和结果联系密切,在具体研究和应用时,应在对其耗散形式、产物、过程和地质背景及环境等综合分析的基础上,择相对重要和主要的特征作为依据进行类型划分。

2.2 油气耗散研究的可能途径

以往对油气耗散的研究大多关注的是直接显示结果,如在地表及地下遗留的油气苗、沥青、稠油等(表1)。如前述根据所残留的沥青或沥青砂岩,推算古油藏破坏前可能的储量^[7,8]或资源量^[10]等。这些油气遗迹或标志,在地表或地下的分布有限、产状各异,既与本身所耗散油气的实际规模相差甚远,也不能作为所在地区油气耗散产物的全部代表。

油气是一种成分极为复杂的有机流体。在其途经的岩层和散失的浅表层,应发生有机与无机、非金属与金属、流体与固体多种形式的相互作用和相关成矿过程,自然也会留存有相应的各种后生产物和矿产。但值得注意的是,这些作用的结果或现象,一般已不具烃类的特征或属性(表2)。正因为如此,长期以来对其尚未引起油气地质人员的普遍注意。但其油气耗散量一般十分巨大,应给以足够的关注。

油气与围岩和流体的相互作用及其产物,一般随作用物质的岩石矿物类型、地球化学性质、温压条件和环境等的不同而变化,可形成相应丰富多彩、复杂而有序的系列标志性后生产物及其组合和地质现象。这些产物和现象是确定油气是否曾存在、经过及其相互作用程度和耗散规模的重要依据,在有些情况下甚至可能是主要证据;也是示踪、发现和预测相关矿床的有效线索和重要标志。

将这些与周邻流岩相互作用形成的各种还原蚀变等后生产物及矿产(一般不具烃类的直接特征)和直接显示的油气耗散结果(如油气苗、沥青、稠油等)相结合,对其追根溯源,可能为探讨和解决油气耗散及其规模这一国际难题的重要途径;也将会使能源等沉积矿产研究和勘探中人们期盼

已久的顺藤摸瓜、由此及彼、举一反三的科学预测成为可能。

3 油气化学蚀变研究进展

近年来,国内外对烃类微渗漏和耗散过程中与流体-岩石相互作用的研究日渐增加。

Schumacher 总结烃类蚀变作用在土壤与沉积物中的主要表现形式有:1)微生物异常;2)矿物变异,如形成方解石、黄铁矿、铀、硫、铁的氧化物和硫化物;3)红层的漂白作用;4)粘土矿物蚀变等^[20,21]。

笔者主持的国家重点基础研究发展规划(973)项目研究揭示,在鄂尔多斯盆地东北部的广阔范围,上古生界天然气大规模向北运移散失,与途经的流岩相互作用,在浅表层形成了多种还原蚀变后生产物和矿床(图1,图2)^[22-29]。

关于油气耗散过程中流岩相互作用形成的蚀变后生产物,在国内外存在普遍(图1)。其中以砂岩颜色的变化,特别是砂岩漂白现象研究相对较多。

自1922年发现红层漂白现象与烃类运移有关^[30]以来,国外诸多文献根据不同地区的实例对红层漂白与岩石中烃类耗散的空间分布和成因关系进行了多方面的研究,其中以美国中西部研究最多^[31-40]。这些研究表明,在红色地层被漂白或褪色蚀变为灰色所分布的地区,大多为油气区^[32-34,36,41]和(或)与油气显示关系密切。前者如在犹他-怀俄明逆掩断层带内,漂白的纳瓦霍砂岩储集体所在的气田累积产量超过 $3.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[41]。后者所发育的地区,一般都有因断裂活动、褶皱变形或区域隆升引起的油气运移和耗散发生(图1a, b)^[15,33,38-40]。如科罗拉多高原变形带中被漂白的纳瓦霍砂岩,经历了烃类流体的还原作用^[40]。

在这些实例中,与烃类接触的红层砂岩被漂白,但其他地方仍保留原岩的红色^[40]。其红色素来自薄的赤铁矿颗粒包壳,它是由铁镁质碎屑硅酸盐矿物(如辉石和角闪石)在成岩早期因铁的淋滤和破坏所形成^[42]。沉积物中的铁是 Fe^{3+} ,在正常的孔隙流体条件下流动性很差,必须被还原成 Fe^{2+} 才易于迁移。当还原性流体(烃类、有机酸、甲烷或硫化氢)进入红层后发生流岩作用,使 Fe^{3+} 被还原成可溶性较强的 Fe^{2+} 后易于从红层中移开,从而使红层漂白。

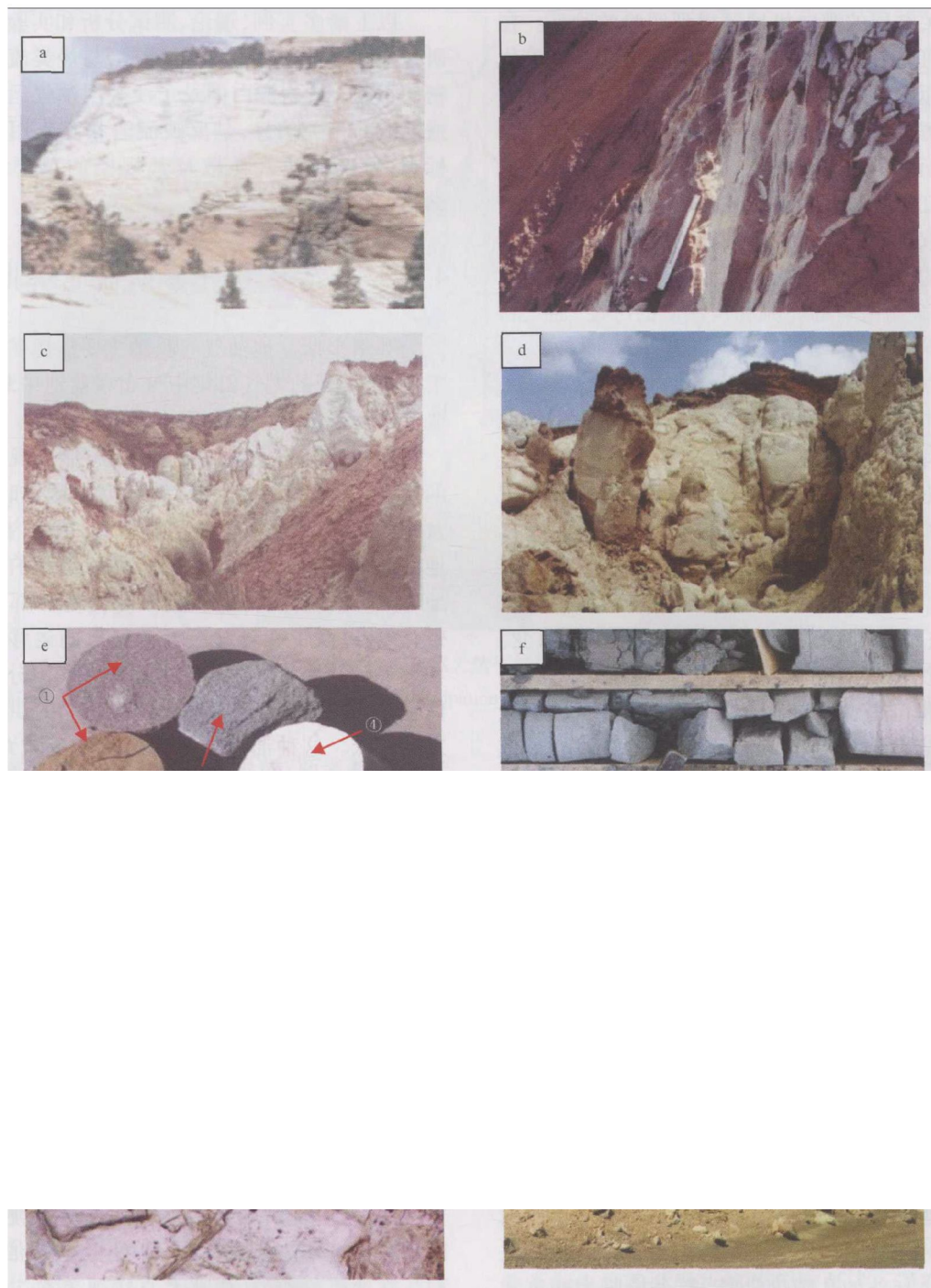


图1 油气耗散蚀变岩石野外及镜下照片

Fig. 1 Field photos and micrographs of altered rocks by hydrocarbon dissipation

a. 被漂白的纳瓦霍砂岩上部, 美国犹他州西南锡安山国家公园^[47]; b. 红色砂岩中白色碎裂变形带因油气通过而被漂白, 犹他州 Capitol Reef 国家公园^[48]; c, d. 规模宏大的漂白现象及与其相伴同存的红色砂岩, 东胜神山沟- 黄铁绵图沟; e. 钻孔岩心中的各种蚀变砂岩: ①早期流体氧化岩石, ②灰绿色岩石, ③原氧化残留部分, ④漂白岩石, ⑤原生灰色岩石, 东胜铀矿区; f. 绿色蚀变带岩心, 东胜铀矿 16-32 井, 井深 57.7 m; g. 绿色化砂岩的镜下组构特征, 胶结物以绿泥石粘土矿物为主, (10×10, 单偏光), 东胜铀矿 111-0 井, 井深 138 m; h. 直罗组砂岩中后生蚀变作用形成的凸镜状钙质胶结砂岩, 东胜神山沟

有关红层的漂白机理已得到实验的验证。在地表温度和压力条件下, Fe^{3+} 能有效地被氢硫化物还原而使红层漂白^[43]。对水-岩-烃类混合物高温分解(200~360℃下加热3~14 d)的试验结果^[44]显示,宾夕法尼亚州的 Tensleep 风成砂岩从原始的红色变成了浅粉红色、白色、灰色,或深灰色。选取现今犹他州纳瓦霍红色砂岩及地下水和储层中的甲烷进行的模拟显示^[40],当甲烷参与反应时,出现硫酸盐的还原和黄铁矿的沉淀,通过将红色砂岩中的赤铁矿转化为黄铁矿而使砂岩漂白。

近年通过岩石学、地球化学以及反映流体地球化学特征的流体包裹体、同位素等方面的研究,进一步论证了漂白现象的形成,和烃类运散过程中与周邻沉积岩(物)发生流岩作用有关^[38~40,45]。

在美国俄克拉荷马州中南部许多油田上方的二叠系红色砂岩,发生包括砂岩漂白以及黄铁矿、白铁矿、方解石和白云石胶结等成岩蚀变。在蚀变砂岩中,有的能闻到油味,有的可见沿裂缝分布和包裹颗粒的固体沥青。蚀变砂岩中碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大部分低于-15.0‰,最低达-39.2‰,表明大部分碳来自有机碳^[34,36]。在犹他州东南部侏罗系砂岩中方解石胶结物(脉)的碳氧同位素值,漂白砂岩明显低于未漂白的红色砂岩^[38]。

对 Lisbon 谷断层及其向东南延伸的 Dolore 断层带的 Sr-O 同位素组成分析认为,这些地区的红层被漂白是经历了烃类等还原性流体的改造^[45]。

Beitler 等^[39]认为,美国西部几千英尺厚的早侏罗世纳瓦霍砂岩被漂白(图1),“最可能的漂白剂是石油和天然气”。在科罗拉多高原拉腊米期隆起顶部的纳瓦霍砂岩,漂白区所指示的主要构造圈闭的位置,可能为过去的烃类储集体。据漂白地区延伸范围估算的复式构造圈闭的储集体面积,在风化剥蚀前达 $48.6 \times 10^3 \text{ km}^2$,堪称世界之最。若以15%的孔隙度计算,整个拉腊米期复式隆起区的储集空间将达 $2.2 \times 10^3 \text{ km}^3$ 。世界最大的油田沙特阿拉伯的加瓦尔油田,面积约 3500 km^2 ,石油地质可采储量约 $13 \times 10^9 \text{ m}^3$ (约 80×10^9 桶)^[39],天然气储量 $924 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[17]。据此推测,大约在6 Ma前,该区纳瓦霍砂岩内耗散到大气中的油气,远多于世界最大的加瓦尔油田的油、气储量。

以上诸多实例、理论、测试分析和实验模拟等研究证明,砂岩漂白现象的形成,与烃类流体活动密切相关。砂岩漂白记录了浅表层油气运移途经或耗散的相关信息,是反映流岩相互作用的重要标志;为论证油气耗散及其规模的重要证据和结果。

4 实例剖析:鄂尔多斯盆地东北部

鄂尔多斯盆地油气、煤、铀主要能源矿产资源丰富,已发现的大气田集中分布在盆地中北部,主要产层为石炭-二叠系不同层段。

国内外石油发生大规模耗散,形成规模巨大的稠油-沥青油砂区(带)的典型地区,如准噶尔盆地西北缘^[7]、阿尔伯达盆地东部、东委内瑞拉盆地南部、巴西巴拉那盆地东南部和东西伯利亚盆地^[17]等,其共同特点是,处于与隆起相邻的斜坡带,隆坡过渡带和隆起区为油气长期运移的指向和散失区。鄂尔多斯盆地中北部大气田分布区总体呈东北高西南低的区域斜坡,北邻的伊盟隆起东高西低。这种油气向东北运移的区域背景,与以上各盆地石油发生大规模运移和耗散的构造格局别无二致;所不同的是,该区为更易于运移的天然气。

在鄂尔多斯盆地大气区之北,尤其是盆地东北部的广阔范围,存在上古生界天然气明显逸散的多种直接证据,如地表油苗和表浅层大范围分布的上二叠统气测显示(图2)。上古生界天然气在所经过和耗散的浅表层,与周邻流岩相互作用同时形成了以下多种还原蚀变的典型现象^[22~28,29,46~49]等。

4.1 下白垩统油苗

在伊盟隆起东部的乌兰格凸南坡面积约 1300 km^2 范围内,已发现45处白垩系油苗(图2)。在油苗分布处,白垩系直接覆盖在二叠系石千峰组及以下地层之上;在白垩系与侏罗系或三叠系接触处未见油气显示。据此推断白垩系油苗源自上古生界。

在钻井中和处于石炭-二叠系鼻状构造开口端的基岩隆起上,于二叠系石盒子组和石千峰组下部见到的油砂。白垩系油苗与其物理性质相近^[47];油质轻,挥发性强,具有强弱不等的煤油味;

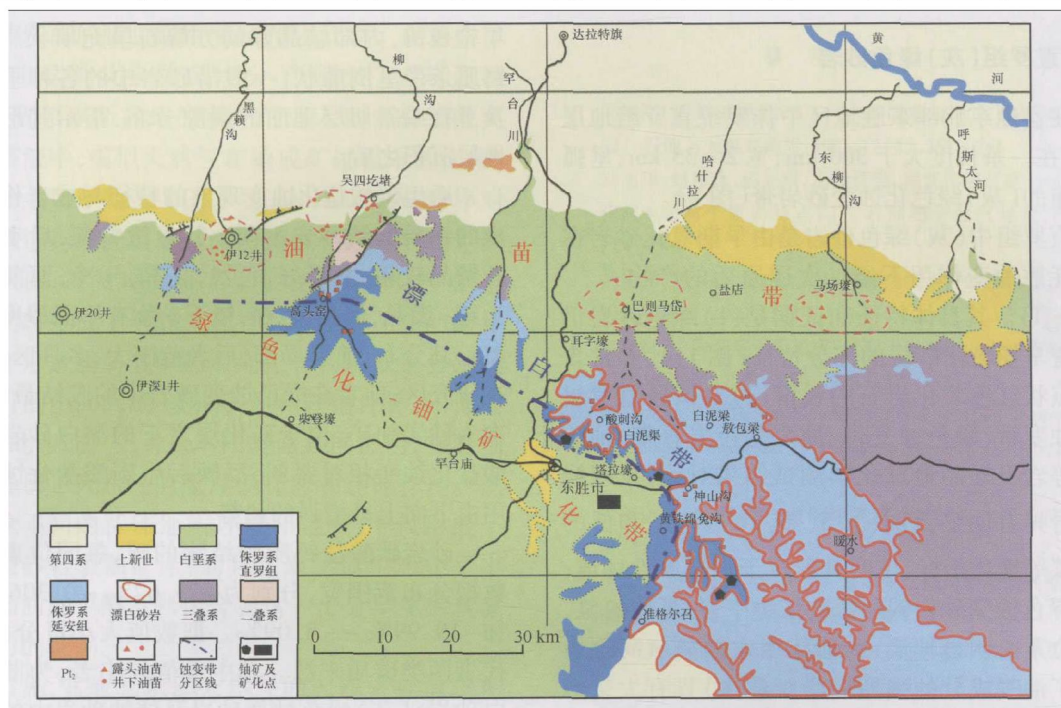


图2 鄂尔多斯盆地东北部天然气耗散及流岩作用结果分布

Fig. 2 The distribution of results of natural gas dissipation and fluid-rock alteration in northeastern Ordos Basin

经长期暴露氧化而未见沥青形成;两者都有荧光金黄、油质轻淡、可嗅而不可见等直观特征;但与河套盆地第三系原油黏度大,不易挥发的特点明显不同。

有机地化分析和碳同位素等测试结果^[22,49]的对比显示,白垩系油苗(砂)与盆地北缘井下的二叠系油砂相近,而与南部马岭油田中生界原油、奥陶系及延安组油气层和河套盆地第三系原油相差甚远。该油砂的组分为成熟原油,高等植物有机质有明显贡献;为源于煤系源岩的较高成熟度轻质油(凝析油)向上运移、经生物降解和轻烃类再次充注的结果^[22]。但在油苗分布区及近邻区,石炭-二叠系和侏罗系煤系地层镜质体反射率 R_o 分别小于0.8%或0.5%^[50],有机质处于低成熟或未成熟演化阶段。所以,油源不在本地,应来自该区之南上古生界煤系地层。

4.2 延安组顶部砂岩漂白现象

在油苗分布区之南的东胜(鄂尔多斯)北-东部东西长约120 km的范围内,于中侏罗世延安组顶部连续分布规模宏大的砂岩漂白现象^[22](图1c,d,图2),区内钻孔中亦多处钻遇(图1e)。

宏观和显微特征均显示,可见漂白砂岩与红色砂岩层相邻同存或白色向红色渐变的现象(图1c,b);同一样品在漂白与弱漂白微红接触部位出现颜色分界。岩石地球化学特征表明,漂白砂岩总铁含量(TFe)(0.53%)及 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值(0.43)都很低。相邻未漂白砂岩总铁含量为2.02%,说明该红层蚀变为漂白砂岩,是因原岩中的 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} 迁出的结果。在此过程中,该红层有近3/4(74%)的铁损失了。

紧邻漂白砂岩底板见有机质条带,有机质生物标志化合物显示,OEP值为1.12; C_{30} 藿烷20S/(R+S)比值为0.07; C_{29} 甾烷20S/(20R+20S)比值为0.35; C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 比值为0.41,同时存在相对丰富的重排甾烷等。区内石炭-二叠系和侏罗系煤层热演化程度低^[50],说明为外来的较高成熟度的有机质。

研究区包括延安组漂白砂岩、其上伏直罗组砂岩铀矿在内的侏罗系砂岩,在石英次生加大边和方解石胶结物中均发育一定数量的气烃及气液烃包裹体,成分主要为 CO_2 和 CH_4 ^[24,26]。这可与方解石中的碳存在有机碳源相互佐证,均与烃类气体息息相关。

4.3 直罗组(灰)绿色砂岩

在盆地东北部东胜地区中侏罗统直罗组地层中,存在一条长度大于300 km、宽2~35 km、呈弧形展布的(灰)绿色化蚀变砂岩带(图2)。

直罗组中(灰)绿色砂岩是由早期氧化砂岩在油气耗散蚀变作用下经二次还原后的产物^[24-27](图1e,f)。其具体特征和证据是:1)绿色砂岩仍保留有早期氧化砂岩的部分特征(图1e),并常含有星点状红色氧化岩石的残留;2)对该区直罗组氧化蚀变带、绿色蚀变带、原生灰色岩石带、铀矿化带等岩石样品地球化学测试结果对比,发现绿色砂岩具有明显低的 $\sum S$ 、高 Fe^{2+}/Fe^{3+} 和低的有机碳等地化指标,说明其形成于强还原性环境;3)在绿色蚀变砂岩碳酸盐胶结物中,包裹体的氢、氧同位素值明显偏高,为流体中水的氢氧同位素受到了油气成分的强烈混染所致;4)具有大量的后生铁绿泥石等还原性粘土矿物组成的矿物学特点(图1g);5)灰绿色砂岩中钍/铀比值高,其中铀有明显的迁出,说明灰绿色砂岩早期经历了较强的氧化作用。同时,钇、锆和铈等偏碱性元素的含量在灰绿色砂岩中高于灰色砂岩,是砂岩绿色(绿泥石)化过程中碱性流体带入的结果。

绿色蚀变带与东胜铀矿的 $\sum REE$ 含量别无二致,稀土元素配分曲线几近重叠。结合多种测年结果^[25]综合研究认为,油气耗散充注与绿色化和铀矿化的形成,在时间上基本同步,在环境上大体相同,在空间上彼此相邻或叠置^[24],说明二者的形成密切相关。

(灰)绿色蚀变带在空间上直接控制着东胜矿床的成矿作用和分布(图2)^[24-27,51],是该区直观、重要的铀矿找矿标志。

4.4 碳酸盐化蚀变现象

在盆地东北部,碳酸盐化蚀变非常发育,分布比较普遍。该钙质夹层一般为0~10层,平均累计厚度4.0 m,单层厚度变化较大,一般为0~10.5 m。

在直罗组砂岩中形成的“钙质层”,主要包括不连续分布的透镜状钙质砂岩团块(图1h)、局部强烈碳酸盐化的“钙化木”以及姜黄色砂岩中的白色钙质条带等。“钙化木”呈树干状,中心未见

年轮残留,内部结晶好的方解石呈充填状。白色钙质条带呈倒灌状,一般沿砂岩中的各种垂直缝及平行或斜切层理面的裂隙分布,指示其形成于地层沉积之后。

后生碳酸盐化蚀变现象的特征与成岩作用形成的钙质胶结砂岩不同。其显微特征,后者碳酸盐结晶较粗,晶形好,色浅,亮晶,干净;而前者多为细-微晶,泥晶,色深,镜下矿物有不同程度的水解。其分布,前者局部,后者范围大,多具区域性。在研究区,前者在绿色蚀变砂岩中的胶结最强烈,次为砂岩铀矿,位于矿化层之下的漂白砂岩中碳酸盐化蚀变相对要弱,反映后生碳酸盐化蚀变作用由下向上呈增强的趋势。

砂岩碳酸盐钙质胶结物的碳、氧同位素测试数据分布范围宽,分别为-23.62‰~0.306‰^[52]和-19.99‰~-8.09‰。据数值大小可分两组,代表两类碳质来源。其中数值较小者,为前述漂白砂岩、(灰)绿色蚀变砂岩及储铀砂岩中的方解石胶结物, $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的分布范围分别多集中在-23.62‰~-10.21‰(平均-10.23‰)和-17.13‰~-12.94‰(平均-13.22‰);指示其方解石胶结物的形成有机碳提供了部分碳源。

4.5 铀(矿)化砂岩

在盆地东北部直罗组发现的超大型东胜砂岩型铀矿床,位于油气长期运移、耗散指向的(最)高部位,外围被绿色化和漂白化砂岩弧型围限(图2)。

在东胜铀矿床,4价铀与铀含量呈明显的正相关关系,铀矿物主要为铀石,同时含少量钍铀矿及沥青铀矿;铀矿物与黄铁矿常共生或伴生^[51,53],表明其形成于强还原碱性环境。

铀矿区岩石在320~360 nm激光波长时出现的强度峰值,与轻质油、天然气的荧光特征相似。在绿色砂岩和铀矿石中发现大量油气包裹体^[51]。荧光对岩石烃含量进行对比^[48],富矿段中烃含量普遍较高,甲烷和乙烷含量值分别为无矿段的3倍多或近3倍。含矿层有机质地球化学参数及碳同位素测试结果显示,含矿层的有机流体与上古生界成熟天然气有关^[24]。这均说明烃类在铀矿富集中具有重要作用。

对东胜铀矿区直罗组含铀岩系中岩性不同、有机质含量变化范围很大的夹层测试,均检出了

含量非常高的脂肪酸甲酯系列化合物。在地质体中,检出这类化合物是十分罕见的^[54]。赵建社等^①将鄂尔多斯盆地的天然气通入到含有铀酰离子的溶液中,模拟天然气在铀成矿过程中的作用,得到的主要产物为 UO_2 。用 Gaussian 03w 程序对该实验进行理论模型过渡态模拟和通过气相色谱实验测试,均发现并证实甲烷在还原 UO_2^{2+} 的过程中同时生成了甲醇(CH_3OH)。甲醇与脂肪酸作用易于形成脂肪酸甲酯系列化合物。以上分别独立进行的不同测试、模拟实验和理论计算,不谋而合、彼此印证。三者从不同侧面共同证明,东胜铀矿区经历了天然气的大规模耗散和还原作用。这一与众不同的特殊地质环境和过程,不仅形成了超大型砂岩型铀矿床,而且在地质体中产生了丰富的脂肪酸甲酯系列化合物这一十分罕见的现象和有利的证据。

可见,盆地北东部天然气的大规模耗散所形成的还原性环境,是东胜大型铀矿床富集-保存和定位的关键因素和重要成矿环境。

综上所述,以上4类颇为壮观的后生还原蚀变和铀矿化,其位置相近、分布有序,地球化学性质和形成环境几近一致、有机相关,形成过程和期次基本相同、彼此响应;与油气苗和大范围分布的上二叠统气测显示赋存于同一区域,故其与油气,特别是天然气耗散作用在空间分布、时间过程和阶段、形成环境和区域背景等方面显示出密切相关的内在成因联系及演变规律(图2)。这些现象和特征共同证明,盆地东北部为天然气最终散失的指向区,在该区发生过大规模的天然气耗散。

对盆地东北部与各种现象形成有关的天然气耗散的规模,目前尚缺乏专门的研究,值得进一步探讨。根据理想气体状态方程和不同成岩序列包裹体的均一温度、捕获压力等参数的计算,相对于聚集成藏期,盆地北部天然气的散失量(体积)达39.7%^[29]。尽管此计算所依据参数的数据还很有限,方法和结论尚嫌粗略、有待进一步验证和完善,但约2/5的天然气散失量所提示的定性问题,即盆地北部有规模十分巨大的天然气发生耗散,确是一个值得油气勘探者、研究者和决策者共同关注和深入探讨的问题。

参 考 文 献

- 1 刘池洋. 后期改造强烈——中国沉积盆地的重要特点之一[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(4): 255 ~ 261
- 2 刘池洋, 赵重远, 杨兴科. 活动性强、深部作用活跃——中国沉积盆地的两个重要特点[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 1 ~ 6
- 3 刘池洋, 杨兴科. 改造盆地研究和油气评价的思路[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 11 ~ 14
- 4 王庭斌. 中国气藏主要形成、定型于新近纪以来构造运动[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 127 ~ 132
- 5 MacGregor D S. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oil-fields[J]. Petroleum Geoscience, 1996, 2: 197 ~ 217
- 6 吕延防, 王振平. 油气藏破坏机理分析[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 35(3): 5 ~ 9
- 7 吴元燕, 平俊彪, 吕修祥, 等. 准噶尔盆地西北缘油气藏保存及破坏定量研究[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 24 ~ 30
- 8 韩世庆, 王守德, 胡惟元. 黔东南江古油藏的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(4): 317 ~ 326
- 9 庞雄奇, 姜振学, 左胜杰. 叠合盆地构造变动破坏烃量研究方法探讨[J]. 地质论评, 2002, 48(4): 384 ~ 390
- 10 张俊, 庞雄奇, 刘洛夫, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的分布特征与石油地质意义[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊1): 169 ~ 176
- 11 刘方槐. 轻烃在盖层中的扩散研究进展及四川威远气田震旦系气藏的扩散破坏估算[J]. 天然气地球科学, 1992, 3(5): 11 ~ 16
- 12 傅广, 吕延芳. 大庆长垣以东地区深层天然气扩散系统及损失量研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(2): 101 ~ 104
- 13 刘池洋, 孙海山. 改造型盆地类型划分[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(2): 79 ~ 82
- 14 Doré A G, Jensen L N. The impact of late Cenozoic uplift and erosion on hydrocarbon exploration; offshore Norway and some other uplifted basins[J]. Global and Planetary Change, 1996, 12(1-4): 415 ~ 436
- 15 李明诚. 石油与天然气运移(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 16 赵重远. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1979
- 17 李国玉, 金之钧. 世界含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005
- 18 童崇光. 油气田地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1985. 271
- 19 钟宁宁, 陈恭洋. 煤系气油比分配控制因素及其与大中型气田的关系[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 20 Schumacher D. Hydrocarbon induced alteration of soil sand sediments[A]. In: Schumacher D, Abrams M A, eds. Hydrocarbon migration and its near surface expression[C]. AAPG Memoir 66, 1996. 71 ~ 89
- 21 Schumacher D. Surface geochemical exploration for oil and gas;

① 赵建社, 蔡义各, 梁玲玲, 等. 煤、气、油在铀成矿过程中作用的实验模拟. 国家重点基础研究发展规划(973)项目“多种能源矿产同盆共存、成藏(矿)机理与赋存条件的实验-模拟研究”专题讨论会(西北大学), 2008

- new life for an old technology [J]. *The Leading Edge*, 2000, 3: 258 ~ 261
- 22 马艳萍, 刘池阳, 王建强, 等. 盆地后期改造中油气运散的效应—鄂尔多斯盆地东北部中生界漂白砂岩的形成 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27 (2): 233 ~ 238
 - 23 马艳萍, 刘池阳, 赵俊峰, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩漂白现象与天然气逸散的关系 [J]. *中国科学*, 2007, 37 (专辑): 127 ~ 138
 - 24 吴柏林, 邱欣卫. 论东胜矿床油气逸散蚀变的地质地球化学特点及其意义 [J]. *中国地质*, 2007, 34 (3): 455 ~ 462
 - 25 Wu Bolin, Liu Chiyang, Wang Jianqiang. Basic characteristics of fluid geologic process of interlayer oxidation zone sandstone-type Uranium deposit [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50 (S II): 185 ~ 194
 - 26 吴柏林, 王建强, 刘池阳, 等. 东胜砂岩型铀矿形成中天然气地质作用的地球化学特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27 (2): 225 ~ 232
 - 27 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因 [J]. *中国科学*, 2007, 37: 139 ~ 146
 - 28 权建平, 樊太亮, 徐高中, 等. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀矿成矿作用讨论 [J]. *中国地质*, 2007, 34 (3): 470 ~ 477
 - 29 冯乔, 张小莉, 王云鹏, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义 [J]. *地质学报*, 2006, 80 (5): 748 ~ 752
 - 30 ganese oxides and fault-related fluid flow in Jurassic sandstones, Southeastern Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84 (9): 1 281 ~ 1 310
 - 39 Beitler B, Chan M A, Parry W T. Bleaching of Jurassic Navajo sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: Evidence of exhumed hydrocarbon supergiants? [J]. *Geology*, 2003, 31 (12): 1 041 ~ 1 044
 - 40 Parry W T, Chan M A, Beitler B. Chemical bleaching indicates episodes of fluid flow in deformation bands in sandstone [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88 (2): 175 ~ 191
 - 41 Chidsey T C. Rocky Mountain gas reservoirs—America's natural gas storehouse; Utah geological survey [J]. *Survey Notes*, 1995, 27: 1 ~ 2
 - 42 Walker T R. A study of global sand seas: Red color in dune sand [A]. In: McKee E D, ed. *A study of global sand seas* [C]. *US Geological Survey Professional Paper*, 1979. 61 ~ 81
 - 43 Moulton G F. Some features of red bed bleaching [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1926, 10: 304 ~ 311
 - 44 Shebl M A, Surdam R C. Redox reactions in hydrocarbon clastic reservoirs; Experimental validation of this mechanism for porosity enhancement [J]. *Chemical Geology*, 1996, 132: 103 ~ 117
 - 45 Breit G N, Meunier J D. Fluid inclusion and $\delta^{18}\text{O}$, and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ evidence for the fault-controlled copper mineralization, Lisbon Val-
 - 1984, 79: 284 ~ 296
 - 35 Surdam R C, Jiao Z S, MacGowan D B. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: a mechanism for significant porosity enhancement in sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 1 509 ~ 1 518
 - 36 Kirkland D W, Denison R E, Rooney M A. Diagenetic alteration of Permian strata at oil fields of south central Oklahoma, USA [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12 (6): 629 ~ 644
 - 37 Shebl M A, Surdam R C. Redox reactions in hydrocarbon clastic reservoirs; experimental validation of this mechanism for porosity enhancement [J]. *Chemical Geology*, 1996, 132: 103 ~ 117
 - 38 Chan M A, Parry W T, Bowman J R. Diagenetic hematite and mineralization and its relationship to fluid flow in the Permian of southeastern Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83 (12): 1 951 ~ 1 964
 - 46 化特征及其与东胜铀矿床对比 [J]. *地质学报*, 2006, 80 (5): 724 ~ 732
 - 52 杨晓勇, 罗贤冬, 凌明星. 鄂尔多斯盆地含铀砂岩碳酸盐胶结物 C—O 同位素研究及地质意义 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37 (8): 979 ~ 985
 - 53 向伟东, 方锡珩, 李田港, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式 [J]. *铀矿地质*, 2006, 22 (5): 257 ~ 266
 - 54 妥进才, 张明峰, 王先彬. 鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿区沉积有机质中脂肪酸甲酯的检出及意义 [J]. *沉积学报*, 2006, 24 (3): 432 ~ 439

(编辑 高岩)