

# 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造-热事件与油气运移

万丛礼, 付金华, 张 军

(长庆油田公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

[摘要] 应用构造学、岩石学、矿物学和古热史等研究方法, 证实鄂尔多斯西缘前陆盆地在中生代晚期发生了强烈的构造-热事件活动。生烃史表明, 这次事件与烃源岩的主生烃期相吻合, 它不仅使岩石产生大量裂缝, 为烃源岩排烃和油气二次运移提供了极好通道, 而且还产生强大动力, 促进烃源岩排烃和驱油油气二次运移。结果, 这次事件显著提高了烃源岩排烃率和油气运移效率, 并控制了油气运移方向和分布规律。中生代晚期的构造-热事件不仅是重要的生烃事件, 也是重要的成藏事件。

[关键词] 鄂尔多斯西缘; 前陆盆地; 构造-热事件; 油气运移

[中图分类号] TE122.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)02-0043-05

[作者简介] 万丛礼(1966-), 男, 吉林抚松人, 高级工程师, 博士, 从事石油天然气地质与勘探研究。

前陆盆地油气资源丰富, 已经引起了石油地质学家的高度关注。目前鄂尔多斯西缘前陆盆地发现了数个油气田, 呈现出较好的勘探前景, 并成为长庆油田勘探的主战场。另一方面, 前陆盆地油气分布也非常复杂, 严重制约了油气的深入勘探。如何进行前陆盆地油气勘探成为一个急待解决的课题。中生代晚期, 研究区发生了强烈的构造-热事件活动, 它为烃源岩提供了大量附加热能, 促进了油气形成<sup>[1-3]</sup>。但人们常常将构造-热事件简单地等同于热事件或构造-岩浆活动, 忽略了其构造属性及其在油气运移中的作用。笔者通过构造-热事件对烃源岩排烃和油气二次运移作用研究, 探讨了西缘前陆盆地油气运移机制, 以期对油气深入勘探提供依据。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯地块处于华北地块、秦祁褶皱带和阿拉善地块的接合部。晚三叠世以来, 该盆地一直处于北东向和近东西向挤压应力场中, 在其西缘形成了一个典型的前陆盆地。该盆地南北向展布, 北起内蒙古磴口, 南经宁夏银川、同心、固原及甘肃平

凉, 至陕西陇县一带; 西自中卫, 东至鄂托克旗一带。前陆盆地东西宽 50~200 km, 南北长达 600 km, 面积约 60 000 km<sup>2</sup> (图 1)。该区地层发育比较齐全, 且厚度大, 除缺失上白垩统和始新统外, 从太古界至第四系几乎均有出露。盆地自下而上发育 3 套烃源岩, 分别为下古生界碳酸盐岩烃源岩、上古生界煤系烃源岩和中生界泥质烃源岩。另外, 各层系都不乏储集岩, 如下古生界滩相颗粒灰岩、次生白云岩和孔洞状白云岩以及中生界延长组的水下扇和侏罗系的河道砂均具较好的储集性能, 而逆冲推覆形成的大量断裂是油气运移的理想通道。除岩性圈闭外, 本区背斜、断块、断鼻等构造圈闭尤为发育。所以, 西缘前陆盆地油气地质条件非常优越。

## 2 构造-热事件特征

构造-热事件是由于构造的强烈活动而导致地层(或岩石)变形、变位、变质以及深源流体(和火成岩)上涌的现象, 而深源流体是指赋存于盖层之下乃至地幔中的各种流体, 按成因可分为岩浆水、变质水和地幔水。通过现代火山喷气测试和地幔超镁铁质岩流体包裹体分析证实, 深源流体是一种以 H<sub>2</sub>O 为主, 含有丰富的 CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> 等挥发分以及 Fe, Cu, Pb, Au, W, Ni, V, Co, Ti 等金属

[收稿日期] 2004 06 26

[基金项目] 国家 973 项目(2003CB214600)

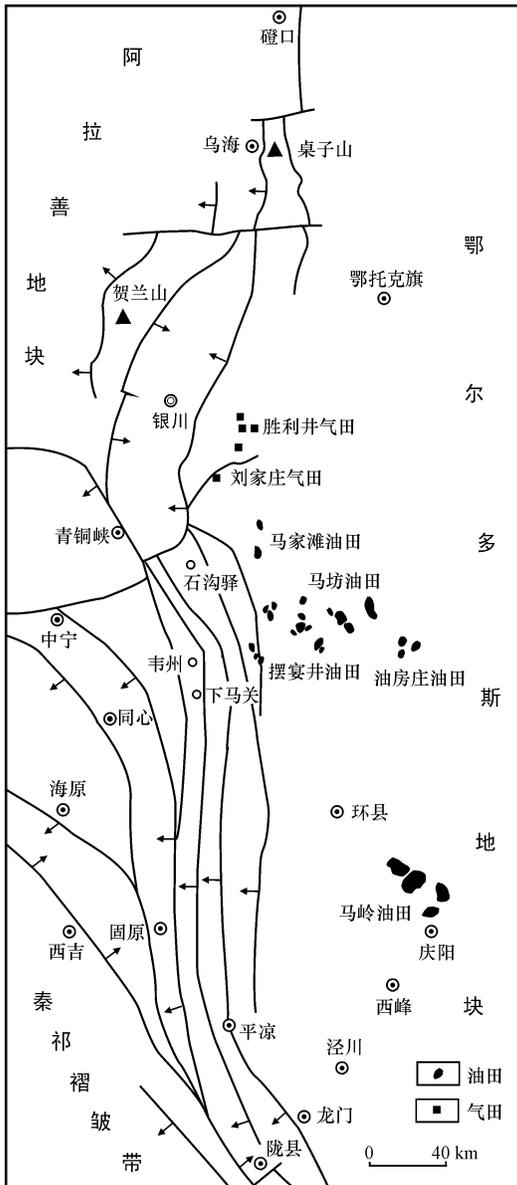


图 1 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造纲要及油气分布

Fig. 1 Construction program and oil distribution of the west of Ordos Basin

元素的体系<sup>[4-6]</sup>。所以,构造-热事件是热(包括深源热和构造转化热)、构造应力和地球化学的“三位一体”。构造-热事件对油气的运移作用在于其产生的强大应力改变了西缘地区的应变场和流体势场,促进了油气运移。

构造-热事件证据通过镜质体反射率、包裹体测温和磷灰石裂变径迹等方法,发现鄂尔多斯盆地古地温表现出明显异常,即从早古生代—中生代早期,古地温梯度一直呈平稳下降态势,范围在(2.9~2.8) °C/100 m,中生代晚期突升至(3.5~4.1) °C/100 m,新生代又回落到原来的趋势线上(2.89

°C/100 m),从而推测中生代晚期( $J_3 \sim K_1$ ) 研究区发生过强烈的构造-热事件活动<sup>[1-3]</sup>。

另外,火成岩是地下深部物质上涌的产物,也是构造-热事件最直接和最有效的证据。盆地周缘燕山期岩浆活动相当强烈,如秦祁褶皱带内发育的许多大型火成岩体;西缘地区已发现数个燕山晚期火成岩体,如汝箕沟玄武岩<sup>[7]</sup>、炭山辉绿岩以及华亭地区花岗岩。盆地内部龙 1 和龙 2 井三叠系闪长玢岩厚达 150 m 以上,很可能是燕山期构造运动的产物<sup>[8]</sup>。

西缘逆冲带以构造活动强烈和复杂而著称于世,主要由十余条西倾东冲的大型逆冲断裂所组成,按级别分为岩石圈断裂、壳断裂和基底断裂(见图 1)。另外,区内地层变形非常普遍,或直立,或倒转,或强烈褶皱,如贺兰山复向斜等。逆冲带地区岩石破碎异常严重,如贺兰山区小松山的侏罗系延安组煤层已严重劈理或片理化(图 2)。构造解析表明,该逆冲带主要形成并定型于中生代的燕山运动,所以,西缘地区的褶皱、裂缝和片理等构造主要是该期构造-热事件的结果。

再者,盆地内发现了许多内生热液矿床(或矿化),如卡布其铅锌矿、贺兰山区广泛发育的石英脉、岗德尔山、老爷山、苏峪口和平凉三关口的含方铅矿重晶石脉,李 1 井、李华 1 井和定探 1 井奥陶系碳酸盐岩中沿裂缝和溶孔充填的脉状和囊状次生黄铁矿、方铅矿化等。这些现象均说明深源流体活动较火成岩更强烈和普遍。

中生代晚期研究区高地温异常,燕山期火成岩和热液金属矿化的发育以及构造变形等不是孤立和偶然的地质现象,而是构造-热事件导致的“深源热、应力和化学流体”综合作用的结果。从区域上看,鄂尔多斯盆地西部处于特提斯构造域引起的祁连构造带地幔向东蠕散的终端<sup>9-10</sup>,即深部物质上



图 2 小松山地区侏罗系片理化煤岩

Fig. 2 Sliced coal in the in Xiaosong mountain

涌的理想地带。构造-热事件的发生主要是由于地幔蠕散导致特提斯构造域(或祁连构造域)向东挤压、推覆以致西缘地区发生逆冲、褶皱、断裂,同时引起岩浆和深源流体上涌。岩浆由于粘度大原因,较少达到盖层,仅在局部形成火成岩;而深源流体粘度小,活动性强,上涌进入沉积层后,继续沿各不整合面自西而东运移,并通过裂缝和孔隙侵入周围地层,最终造成高地温异常、多金属矿化和构造形变等现象,并为烃源岩排烃和油气运移提供了条件。

### 3 构造-热事件对油气运移作用

构造-热事件对油气运移作用研究,首先要查明它与烃源岩生烃的时间关系。只有构造-热事件发生时间与烃源岩生烃时间吻合,才能对排烃起到更加重要的影响。如前所述,研究区发育三套烃源岩,沉积埋藏史和生烃史分析表明,下古生界烃源岩在早三叠世开始成熟,侏罗纪末达到生烃高峰;上古生界烃源岩于中三叠世开始生烃,侏罗纪末达到生烃高峰;而中生界烃源岩于侏罗纪末才开始生烃,并于侏罗纪末达到生烃高峰<sup>①</sup>(图 3)。虽然这 3 套烃源岩生烃的起至时间有差别,但它们的生烃高峰非常一致,并且与构造-热事件发生时间相吻合。所以,构造-热事件必然对这 3 套烃源岩生烃、排烃以及整个研究区油气的二次运移起到重要影响。



图 3 西缘前陆盆地生烃史和构造热-事件时间关系

Fig.3 Relation between tectothermal event and hydrocarbon generation history of in the west of Ordos Basin

#### 3.1 构造-热事件对烃源岩排烃的促进作用

烃源岩排烃也称为油气初次运移,是指油气自烃源岩向储集岩的运移。烃源岩排烃是一个非常复杂的动态过程,目前发现主要存在 3 种排烃机理,即压实排烃、微裂缝排烃和扩散排烃。排烃动

力主要是由于烃源岩存在剩余压力,产生剩余压力的主要原因有压实作用、欠压实作用、蒙脱石脱水作用、有机质生烃作用和流体热增压作用等,而构造应力对排烃的作用长期以来一直被忽视,近年来才逐渐引起重视。构造-热事件对烃源岩排烃作用主要表现在产生排烃通道和提供排烃动力。

##### 3.1.1 排烃动力

在烃源岩不同演化阶段,其排烃作用力存在较大差别。在成岩阶段,孔隙度往往较高,原生孔隙水较多,正常压实是主要排烃动力。成熟初期,孔隙水大量被排出,孔隙度和渗透率变小,流体渗流受阻。此时烃源岩开始生烃,蒙脱石也大量脱水,所以,欠压实作用、生烃增压和蒙脱石脱水作用成为这一阶段主要的排烃动力。成熟中期,烃源岩进入生烃高峰,同时也是粘土矿物脱水的第二阶段,大量新生流体不断进入孔隙,导致孔隙压力不断增加,形成孔隙异常压力。当异常压力超过烃源岩骨架强度时,就产生裂缝,油气在异常高压作用下排出烃源岩。

构造-热事件对烃源岩排烃的动力包括构造应力、热应力和深源流体压力几方面。

(1) 构造应力对烃源岩排烃的驱动力主要是通过增加平均主应力,进而提高烃源岩的孔隙流体压力。如上所述,地球深部流体是一种以水为主,含有较高 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO 等组分以及具有较高温度、压力和化学活动性的超临界流体,这些流体不但为烃源岩生烃提供大量热能,促进了油气形成,而且在生烃过程中也产生增压作用,从而促进排烃。

(2) 深部流体中的 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO 是天然的驱油剂,能够减小烃的粘度和密度,即降低岩石对烃的吸附力,有助于从烃源岩中排出。

(3) 深源流体本身也具有一定的压力,能够增加烃源岩中剩余流体压力,对烃源岩排烃也具有积极意义。

所以,构造-热事件所产生的 3 种排烃动力以及降低排烃阻力对烃源岩排烃具有重要的影响,其合力将大大提高西缘地区烃源岩的排烃率,最终提高研究区的油气丰度。

##### 3.1.2 排烃通道

烃源岩的排烃通道主要有孔隙、微裂缝和层理面,但在不同地区或不同生烃阶段,排烃通道有明显

① 长庆油田. 鄂尔多斯西部前陆盆地综合物探及地震大剖面解释, 2003

差别。在未熟—低熟阶段,主要排烃通道是孔隙和微层理面;而在成熟—过成熟阶段排烃的途经主要是微裂缝。另外,研究发现排烃方式与盆地类型也有关。在拉张盆地,生烃门限较低,相应的烃源岩中孔隙较发育,所以压实排烃往往占主导地位;而挤压性盆地往往是地温梯度相对较小的冷盆地,生烃门限较高,烃源岩之原生孔隙不发育,微裂缝排烃更为重要,而研究区构造—热事件的发生以及构造裂缝的形成恰好为烃源岩的微裂缝排烃提供了便利条件。再者,构造应力产生的裂缝还有利于岩石和有机质的吸附和解吸作用,特别是对于岩性致密的烃源岩和煤系烃源岩排烃有更重要的意义<sup>[11]</sup>。研究区作为一个地温相对较低的挤压性冷盆地,而且煤系烃源岩非常发育(尤其是上古生界石炭—二叠系),构造应力产生的裂缝对烃源岩排烃更加重要。

生烃史分析发现,中生代晚期研究区下古生界碳酸盐岩、上古生界煤岩以及中生界暗色泥岩均进入成熟或高成熟演化阶段,烃源岩中的原生孔隙已很不发育,微裂缝排烃成为这一阶段的主要排烃方式。而恰在此时,研究区发生了强烈的构造—热事件活动,它不但为烃源岩提供了强大排烃动力,而且使岩石产生了众多断裂、裂缝,如西缘贺兰山—小松山地区暗色泥岩和煤岩由于构造挤压而严重片理化。所以,这些由构造应力产生的断裂、裂缝和片理无疑成为排烃的极好通道。再者,由于厚度大,烃源岩生成的油气往往不能排出,而成为死油,即烃源岩的有效排烃厚度是有限度的,这个厚度一般不超过 28 m。然而,构造—热事件在西缘逆冲带形成了大量的、透入性极好的裂缝,将烃源岩与储层充分沟通。所以,研究区几乎不存在因烃源岩太厚而排不出的情况,即构造应力将有效烃源岩的厚度加大,可以说西缘地区烃源岩有效排烃厚度是无限的。微裂缝排烃方向也不同于压实排烃,前者沿着裂缝方向进行,而后者向所有的方向排烃。

总之,构造—热事件不但大大提高了有效烃源岩的体积和分布范围,而且还显著提高了烃源岩的排烃率。

### 3.2 构造—热事件对油气二次运移的促进作用

油气二次运移是烃源岩排烃的继续,指油气进入储集层以后的一切运移。构造—热事件对油气二次运移作用也包括提供运移动力和产生运移通道。强大的构造应力所产生的大量透入性极好的断层、裂缝是油气二次运移的主要通道,无论在理论上,

还是在实际上都得到了确认,现主要对其在油气运移中的动力作用进行分析。

油气作为一种流体,流动是其最基本特性之一。油气二次运移是一个极其复杂的动态过程,也是油气成藏动力学研究的核心内容。从前浮力、水动力和异常压力被认为是二次运移的主要动力。但近年来,构造应力对油气的驱动作用逐步得到重视,研究发现,不连续的瞬间构造应力和连续的长期构造应力都是油气运移的主要驱动力<sup>[12]</sup>。另外,认为不同类型盆地油气运移动力不同,浮力往往是裂谷和克拉通盆地油气运移的主导动力,而构造应力是前陆盆地油气运移的主导动力。再者物理模拟表明,无论是挤压应力场还是拉张应力场,构造应力是构造活动期油气运移的主要驱动力<sup>[13]</sup>。构造—热事件对油气二次运移作用力包括岩石变形产生的异常流体压力、改变流体势和构造应力等方面,并以后者为主,因为强大的构造应力是其他力无可比拟的。

(1) 构造应力能够引起储集岩变形,产生异常流体压力,从而驱动油气运移。岩层体应变与平均应力成正比,而与体变模量成反比<sup>[13]</sup>。岩石变形导致其体积发生变化,而体积的变化主要表现在孔隙容积的变化,孔隙容积变化使岩层内流体孔隙压力增加或减少,产生压力梯度或势差,从而促进油气在储层内流动。中生代的构造—热事件使研究区地层强烈逆冲、推覆以及岩石严重变形,形成大量褶皱、挠曲,必然改变储集岩的孔隙度和渗透率,引起油气二次运移。

(2) 构造—热事件还使西缘地层发生整体变位,一改先前西高东低和南高北低,变为西低东高和北高南低的构造格局,引起流体势场和动水压力系统的变化,从而有助油气由西向东和由南向北运移。

(3) 构造—热事件产生的自西而东的强大侧向挤压力也会传递到孔隙流体上,增加流体能量,直接促进油气运移。

在构造应力作用下及微裂缝形成的同时,地层中的流体(油、气、水)体系平衡遭到破坏,油气向应力 $\sigma_3$ 减小的方向运移,直至达到新的压力平衡,而当新的微裂缝形成时,油气则向新的应力 $\sigma_3$ 减小的方向运移<sup>[14~15]</sup>。野外实测及综合研究确定,西缘地区中生代燕山期最大主应力( $\sigma_1$ )方向近于 $90^\circ$ ,最小应力( $\sigma_3$ )方向为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 。所以,在东西向挤压下,西缘地区油气主要向南北两侧运移,遇到合适的圈闭则聚集成藏,形成现今油气整体呈南北向

展布的格局, 自北而南可分为 3 个带, 依次为北部的胜利井和马家滩等油气田, 带中部的马坊、摆宴井等油田带以及南部的马岭等油田带(见图 1)。

综上所述, 中生代的构造-热事件不仅为烃源岩排烃和油气二次运移提供了通道, 而且为排烃和油气运移提供了强大的动力, 最终提高了烃源岩的排烃率和油气运移效率以及西缘地区的油气丰度, 并控制了油气运移态势和聚集规律, 此构造-热事件不仅是重要的生烃事件, 而且还是重要的成藏事件, 是西缘前陆盆地油气研究和深入勘探不可回避的研究课题。

## 4 结论

(1) 中生代晚期鄂尔多斯西缘前陆盆地发生的构造-热事件不是普通的地质现象和简单的热事件, 它使岩石产生大量裂缝, 并增加了流体压力, 为烃源岩排烃和油气二次运移提供了极好通道和驱动力, 显著提高了烃源岩排烃率, 并控制了油气运移方向和分布规律。

(2) 中生代晚期的构造-热事件对油气形成和演化非常有利, 也使油气成因机理、成藏机制以及油气富集规律复杂化, 应当引起足够重视。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 任战利, 赵重远, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[ J ]. 沉

积学报, 1994, 12(1): 57~64.

- [ 2 ] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地热史[ J ]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339~349
- [ 3 ] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [ 4 ] 王先彬, 刘刚, 陈践发. 地球内部流体研究的若干关键问题[ J ]. 地学前缘, 1996, 3(3~4): 105~118
- [ 5 ] 田世澄, 陈永进, 张兴国, 等. 论成藏动力系统中的流体动力学机制[ J ]. 地学前缘, 2001, 8(4): 329~336
- [ 6 ] 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[ M ]. 北京: 地质出版社, 1993
- [ 7 ] 高山林, 李芳, 李天赋, 等. 汝箕沟晚中生代玄武岩的确定与煤变质作用关系简论[ J ]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 8~10
- [ 8 ] 汤锡元, 郭忠铭, 陈荷立, 等. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[ M ]. 西安: 西北大学出版社, 1992
- [ 9 ] 冯益民. 祁连山大地构造与造山作用[ M ]. 北京: 地质出版社, 1996
- [ 10 ] 王瑜. 中生代以来华北地区造山带与盆地的演化及动力学[ M ]. 北京: 地质出版社, 1998
- [ 11 ] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1999
- [ 12 ] 叶加林, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力场[ J ]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 182~185
- [ 13 ] 宋岩, 王毅, 王震亮, 等. 天然气运聚动力学与气藏形成[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 2002
- [ 14 ] 吴巧生, 王华, 吴冲龙. 沉积盆地构造应力场研究综述[ J ]. 地质科技情报, 1998, 17(1): 811.
- [ 15 ] 王锋, 刘池洋, 赵红格. 鄂尔多斯西部南北向折离滑覆构造[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 7~20.

## Tectono thermal event in west foreland basin of Ordos and its effects on oil gas migration

WAN Cong li, FU Jin hua, ZHANG Jun

(Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

**Abstract** The tectono thermal event was demonstrated to have taken place in the west foreland basin of Ordos in the Mesozoic by using the methodology related to tectonics, lithology, mineralogy and palaeothermal evolution history. It was coeval with the main time of hydrocarbon generation of source rocks in the basin. Moreover, this event not only produced a great deal of fissures in source rocks, which provided good passages for hydrocarbon excluding from those rocks and oil gases migrating within layers, but also served as a powerful drive to the oil gas migration. As a result, both of excluding and migrating rates of hydrocarbon were increased greatly, and the migration and distribution of oil gases manifested certain laws. This suggests that the tectono thermal event acted as an important hydrocarbon generating process as well as an important oil gas storing one.

**Key words** west of Ordos; foreland basin; tectono thermal event; oil gas migration

[ 英文审定: 周军 ]