

文章编号: 0253-9985(2006)02-0187-07

伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系

任战利^{1,2}, 张盛², 高胜利², 崔军平², 刘新社²

(1 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

2 西北大学, 陕西 西安 710069)

摘要: 伊盟隆起东胜地区在古生代和中生代早期, 地温梯度低, 烃源岩热演化程度低, 中生代晚期地温梯度增高, 地温梯度可达每百米 3.3℃。伊盟隆起东胜地区在中生代晚期发生的构造热事件, 以及后期的持续抬升是热流体运动活跃时期, 并使该区石炭-二叠系、三叠系及侏罗系的煤化作用主要发生在中侏罗-早白垩世, 早白垩世是古生代煤系地层的主要生气期, 从早白垩世至今为煤成气的主要运移与破坏时期, 也是东胜砂岩铀矿主要的成矿时期。通过镜质体反射率、磷灰石裂变径迹等资料对区内构造演化及生烃史的分析, 由于伊盟隆起东胜地区石炭-二叠系及侏罗系煤系地层尚处于低成熟或未熟演化阶段, 促使铀矿富集的还原剂-油气只能来自伊盟隆起以南成熟度较高地区的石炭-二叠系煤系地层。

关键词: 磷灰石裂变径迹; 古地温; 热演化史; 金属铀矿; 成藏期次; 伊盟隆起; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE111.1 文献标识码: A

Relationship between thermal history and various energy mineral deposits in Dongsheng area, Yineng uplift

Ren Zhanli^{1,2}, Zhang Sheng^{1,2}, Gao Shengli^{1,2}, Cui Junping^{1,2}, Liu Xinshe²

(1 Key Laboratory of Continental Dynamics Ministry of Education, Northwest University, Xi'an, Shaanxi

710069 2 Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069)

Abstract Geothermal gradient was low in Paleozoic and Early Mesozoic in Dongsheng area, Yineng uplift, resulting in a low level of thermal evolution of source rocks, and it increased up to 3.3℃/100m in Late Mesozoic. The Late Mesozoic tectonic thermal events and the later continuous uplifting in Dongsheng area would have resulted in the active movement of thermal fluid. As a result, the coalification of Permian-Carboniferous, Triassic

收稿日期: 2005-12-30

第一作者简介: 任战利 (1961-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 盆地热演化史与油气成藏及油气地质

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2003CB214605); 中国煤成气成藏机制及经济开采基础研究项目 (2002CB211704); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0559)

伊盟隆起目前已发现油气显示 45 处^[1]。近几年来在伊盟隆起东胜南部,核工业部 208 地质总队又在东胜侏罗系中发现了大型砂岩型铀矿矿层 (J_2z),东胜铀矿与油气、煤关系密切,因此东胜地区日益受到人们的关注^[2~8]。

由于盆地热演化史不仅控制油气的生成、运移、聚集及成藏,也控制煤、金属铀矿等多种能源矿产的形成与分布。不同学者根据不同的方法,对伊盟隆起区热演化程度、热演化史进行了分析,取得的新认识为进一步的热史研究奠定了基础^[9~16]。作者在执行多种能源 (973) 研究项目期间,系统地收集了伊盟隆起区地层测温、镜质体反射率、裂变径迹等资料,并采集了 50 块样品进行了镜质体反射率、裂变径迹、生热率等项目的分析测试,在此基础上对伊盟隆起现今地温、热演化程度、热演化史及多种能源矿产关系进行了探讨。

1 地质背景

伊盟隆起位于鄂尔多斯盆地北部,呈东西向展布。西起乌加庙,东至托克托,长 350 km,北与河套地堑相邻,南部以白眼井至东胜南一线为界,面积约 21 000 km²。伊盟隆起是一个长期隆起,地层向南倾斜,北部前寒武纪地层已出露地表。古生界沉积以前,伊盟隆起为一向南凸出的弧形隆起带,并以乌加庙-乌兰格尔断层为界分为以北的乌兰格尔凸起和以南的伊盟隆起南坡。盆地内各期古生代地层从南向北向伊盟隆起超覆减薄和尖灭,北部缺失下古生界。

中生代以来沉积了三叠系、早、中侏罗统、下白垩统,下白垩统与中侏罗统为微角度不整合。早白垩世沉积以后,该区整体抬升剥蚀,下白垩统、侏罗系遭受强烈抬升剥蚀,有些地区下白垩统已剥蚀殆尽,中侏罗统出露地表。

2 现今地温场特征

现今地温场是古地温恢复的基础,伊盟隆起区地层测温资料较少^[11,13],我们系统地收集了盆地北部伊盟隆起区及附近的地层测温资料,地层温度与深度线性关系很好。特别可贵的是我们收集到了神木以北煤矿区的浅井测温资料,该资料对测温曲线浅部的变化趋势有限定作用,使地层

温度与深度曲线的变化趋势更能真实反映伊盟隆起区的地温场状况。伊盟隆起为传导型地温曲线,地层温度随深度的增大而有规律的增加,地温梯度变化为每百米 2.7~3.1℃,对深度-温度关系曲线作回归分析,回归关系式

$$T = 0.030h + 11.8 \quad (1)$$

式中 T 为地层温度,℃; h 为深度, m; 11.8 为地表温度,℃。

由回归关系式可知,伊盟隆起的代表性地温梯度为每百米 3.0℃,属于中温型地温梯度(图 1)。

东胜金属铀矿富集的主要层位直罗组在杭锦旗以东地区,西部埋藏深,东部埋藏浅,直罗组埋深约 200~900 m,在东胜地区直罗组埋深约为 250 m。按现今地温梯度每百米 3.0℃、常温带地温 10℃计算,东胜铀矿区直罗组地层温度一般小于 20℃,现今东胜铀矿层处于低温环境。

3 热演化史研究

3.1 热传播方式及热演化程度

在收集大量镜质体反射率数据的基础上,我们新测试了 10 块样品的镜质体反射率值(表 1),从伊盟隆起镜质体反射率 (R_o) 与深度关系图中可以看出,镜质体反射率值随深度的增大而增加,呈明显的线性变化趋势(图 2),表明伊盟隆起区古地温主要以传导型为主,无明显的热对流存在。

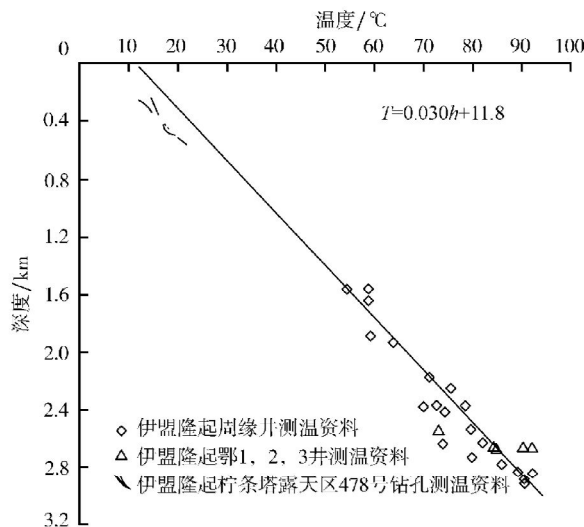


图 1 伊盟隆起地层温度与深度关系图

Fig. 1 Formation temperature vs depth in Yinmeng uplift

表 1 镜质体反射率测试结果

Table 1 Measured vitrinite reflectance data

样号	深度 /m	层位	镜质体反 射率值 /%	采样地点
yj01-r-3	322.80	直罗组	0.39	大柳塔
ZKA183-87-r-5	170.49	延安组	0.45	沙圪台
ZKA151-39-r-4	195.00	延安组	0.36	沙圪台
ZKA183-95-r-2	151.43	延安组	0.36	沙圪台
ZKA183-79-r-2	180.64	延安组	0.47	沙圪台
ZKA475-115-r-6	314.50	直罗组	0.35	灶火壕
4-40-r-5	254.00	直罗组	0.49	孙家梁
sh1-9-1	2 704.00	石盒子组	0.74	东胜地区
e1-r-1	2 621.00	太原组	1.07	东胜地区
e1-r-2	2 606.00	太原组	0.97	东胜地区

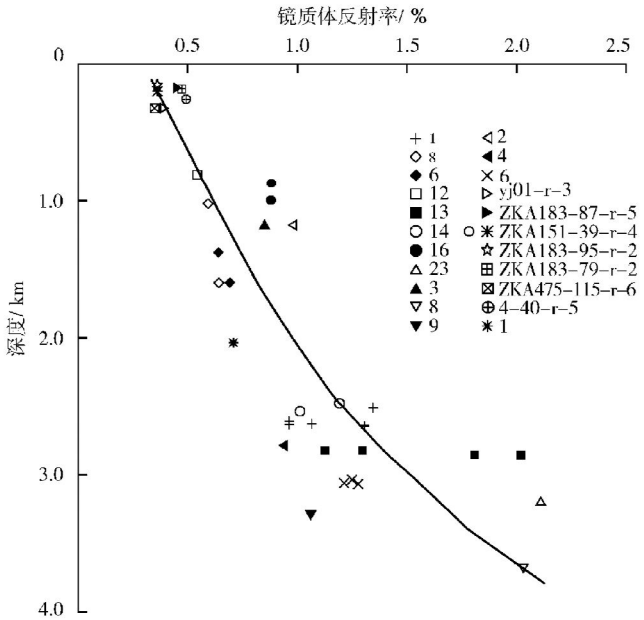


图 2 伊盟隆起镜质体反射率与深度关系
Fig. 2 Vitrinite reflectance vs depth in Yimeng uplift

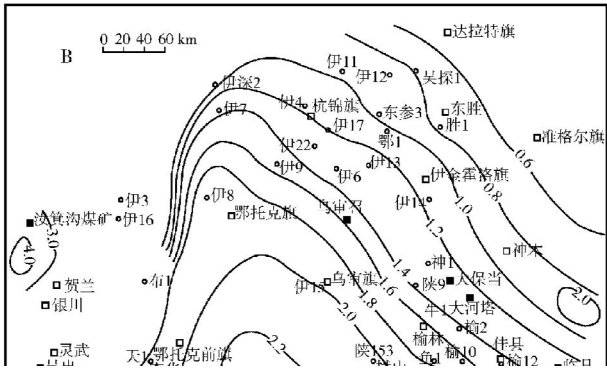
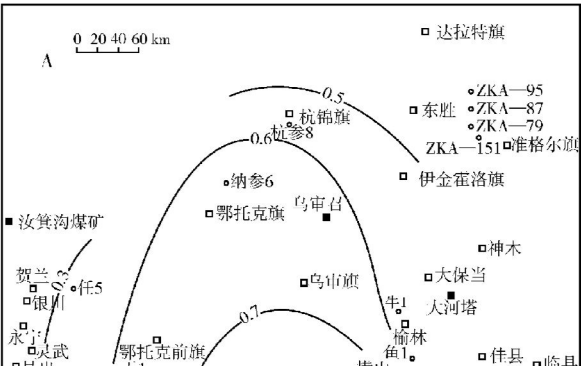
根据镜质体反射率实测值及镜质体反射率与深度关系求解的镜质体反射率, 绘制了伊盟隆起中侏罗统延安组及上古生界石炭-二叠系煤层的镜质体反射率平面分布图 (图 3), 可以看出伊盟隆起区热演化程度向西南方向增高, 向东北方向降低。在杭锦旗以东地区石炭-二叠系煤层的镜质体反射率为 0.6%~1.2%, 中侏罗统延安组镜质体反射率小于 0.6%, 东胜地区小于 0.5%, 反映了东胜地区有机质热演化程度较低。

3.2 古地温恢复

镜质体反射率与深度关系图主要反映了中生代晚期地层在达到或接近最大埋深时的古地温场状况, 因此可应用伊盟隆起镜质体反射率与深度关系求取古地温梯度及剥蚀厚度^[9 11 14 17]。

根据伊盟隆起镜质体反射率与深度关系, 利用 Baker 和 Pawlewicz 建立的最大埋藏温度 (T_{max}) 与平均反射率 (R_m) 之间的关系式 $\ln R_m = 0.0096 T_{max} - 1.4$ 近似地求得区内地层经历的最大古地温表明^[11 15 16]: 应用镜质体反射率恢复的伊盟隆起古地温与深度基本上为线性变化, 随深度的增加, 古地温增大, 恢复的早白垩世的最大古地温梯度约为每百米 3.85℃。但是, 由于伊盟隆起的镜质体反射率与深度剖面是由不同位置的井拼接起来的, 不同井在相同层位的深度有一定的差异, 因此恢复的最大古地温梯度值只可作为参考值。

根据图 3 东胜铀矿区延安组的镜质体反射率值约为 0.5%, 古地温约为 60℃, 实测镜质体反射率值恢复的剥蚀厚度约为 1 340 m, 东胜地区, 胜 1 井直罗组埋深为 202~250 m。胜 1 井距东胜铀



矿最近,根据东胜地区估算的剥蚀厚度 1 340 m 及胜 1 井现今的埋深,估算的古地温梯度约为每百米 3.1℃。

伊盟隆起已作的磷灰石裂变径迹资料^{[9 11 17] ①},经重新进行解释,划分了未退火带、部分退火带及冷却带(图 4):未退火带与部分退火带的界限埋深约为 700 m;部分退火带与冷却带的界限约为 2 440 m;2 440 m 以下为冷却带。估算的退火温度约为 70~125℃,伊盟隆起区古地温明显高于今地温,估算的古地温梯度约为每百米 3.2℃(图 4)。应用磷灰石裂变径迹资料恢复的结果与东胜铀矿区胜 1 井估算的古地温梯度每百米 3.1℃接近。

伊盟隆起冷却带(前完全退火带),记录的最早冷却年龄约为 60~70 Ma^[9 11 18],与伊盟隆起区在早白垩世之后抬升缺失上白垩统及其以上地层的地质事实相符合。表明伊盟隆起冷却较早,新生代以来主要是抬升冷却过程^[9 11 19],地层遭受强烈的剥蚀,温度明显降低的冷却过程。

在恢复古地温及古地温梯度的基础上,应用叠合盆地古地温叠加与改造的思路^[11 20 21 24],建

立的伊盟隆起区古地温演化模型^[10],用盆地模拟软件 EASY%R。模型进行模拟^[22],恢复了鄂尔多斯盆地伊盟隆起胜 1 井的热演化史(胜 1 井剥蚀厚度用 1 340 m 计算,模拟的最佳古地温梯度为每百米 3.3℃),与用古地温温标计算的古地温梯度值每百米 3.1~3.2℃比较接近(图 5),盆地模拟结果每百米 3.3℃有古温标恢复结果的约束,可代表早白垩世的地温梯度。

据此,东胜地区石炭-二叠系镜质体反射率小于 0.8%,古地温小于 130℃,热演化程度较低,东胜铀矿区石炭-二叠系未进入凝析油湿气阶段。

4 热演化史与多种能源矿产的关系

4.1 热演化史与油气、煤的关系

胜 1 井热演化史研究结果表明,伊盟隆起石炭-二叠系及侏罗系的煤化作用主要发生在中侏罗-早白垩世,煤的最高热演化程度在早白垩世,与区域上早白垩世为伊盟隆起以南石炭-二叠系油气生成高峰期的研究结果一致。早白垩世以后地层抬升,遭受剥蚀,地层温度明显降低,生烃作用明显减弱或停止^[9~11]。

从热演化程度来看,伊盟隆起石炭-二叠系热演化程度较低,镜质体反射率约为 0.8%。三叠系和侏罗系热演化程度更低,处于低成熟或未成熟阶段。因此,在东胜铀矿生成时起到还原剂作用的天然气可能来自于伊盟隆起以南更深、更远、成熟度更高的榆林-乌审旗-乌审召一带石炭-二叠系煤系地层。

近年来,在东胜地区直罗组含铀矿砂岩的方解石胶结物进行了流体包裹体测定,均一温度总体为 58~176℃,均一温度有两个比较明显的区间,其主峰分别为 90~100℃与 140~150℃,平均为 114.9℃。东胜铀矿矿石中有热液活动产物钛铀矿和锐钛矿组合,表明成矿流体的温度属低温热液流体^[23 24]。

东胜铀矿低温热液活动的层位主要位于直罗组下部物性好的砂岩中,低温热液运移的通道为砂岩孔隙、裂隙、微裂隙、破碎带。我们对直罗组上下及直罗组内部含矿层不同部位煤系地层的镜质体反射率进行了测试,在含矿层上下未发现有

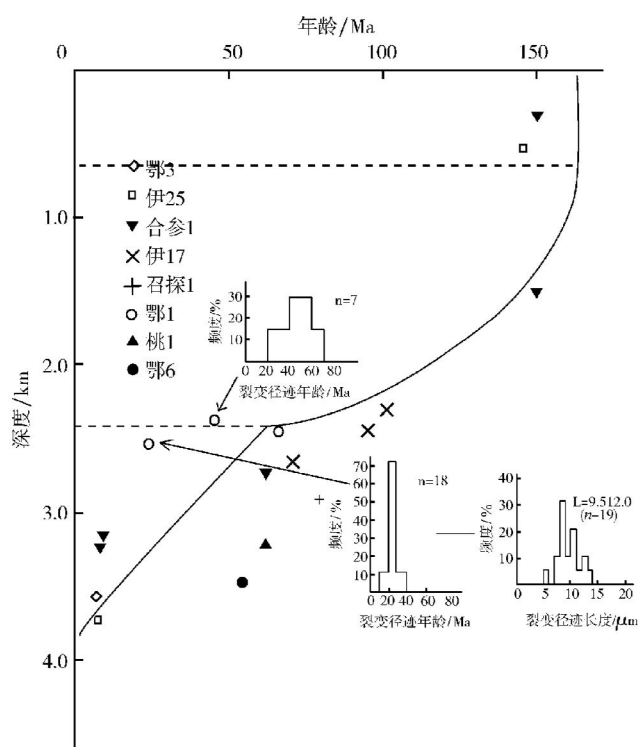


图 4 伊盟隆起磷灰石裂变径迹年龄-深度关系图

Fig. 4 Age from apatite fission track
vs depth in Yimeng uplift

① 孙晔. 鄂尔多斯盆地北部构造演化与铀成矿. 2005

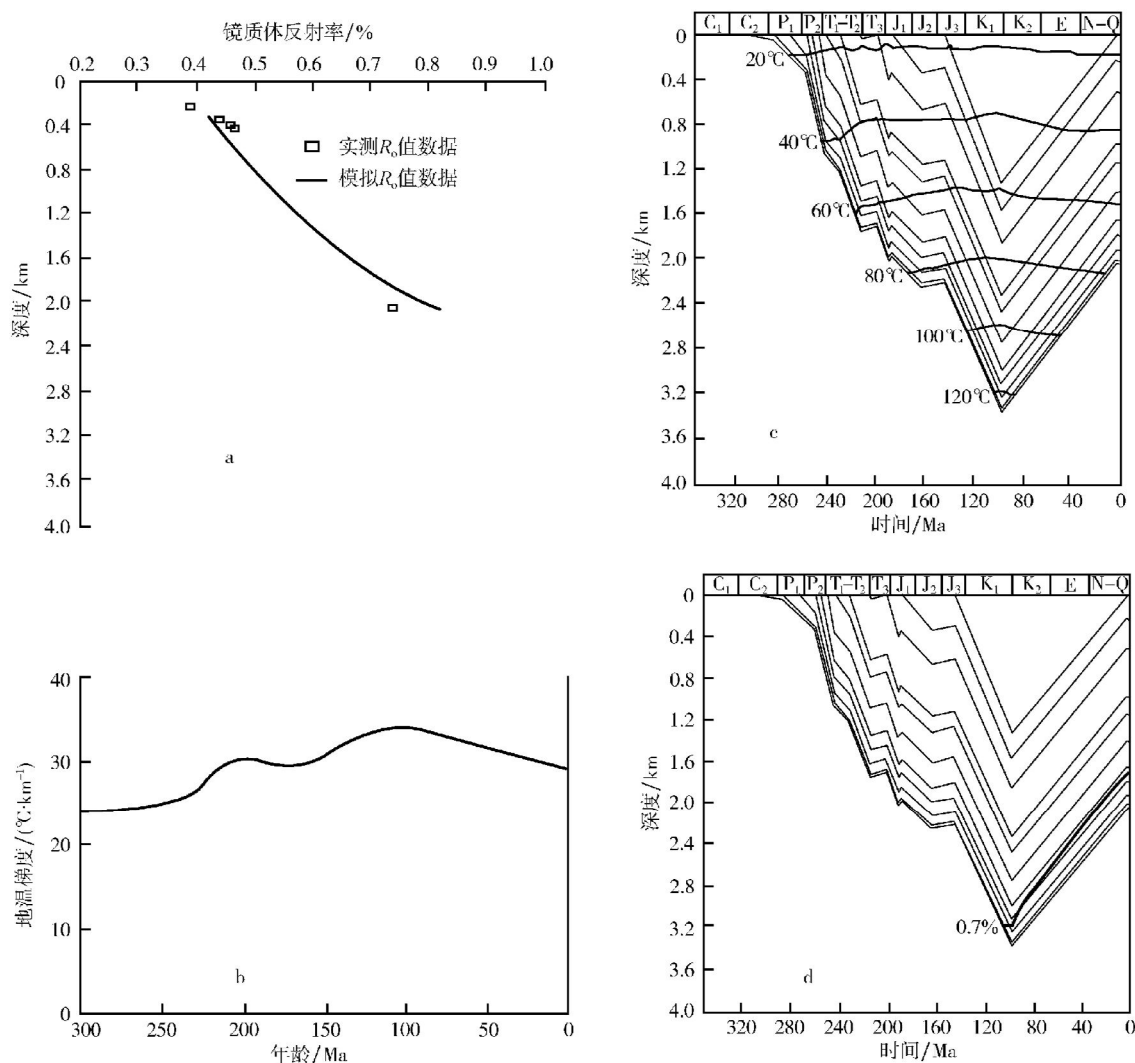


图 5 胜 1 井热演化史模拟结果图

Fig. 5 Diagram showing the simulated thermal evolution history of Sheng1 well

a—实测镜质体反射率值与计算镜质体反射率值对比图; b—古地温梯度演化图;

c—古地温演化史图; d—有机质成熟度演化图

明显的古地温异常 (表 1), 说明直罗组含矿层不存在大规模的热液活动及热对流^[25]。低温热流体仅沿着砂岩孔隙、裂隙、微裂隙、破碎带运移, 主要影响到运移通道本身, 没有明显的影响运移通道以外地层的热演化程度。

4.2 热演化史与铀矿的关系

砂岩铀矿与油气藏都为流体成因矿产, 因而成藏成矿期受盆地构造—热演化史的控制。鄂尔多斯盆地中生代晚期发生过构造热事件^[9~11, 13], 构造热事件发生时期, 构造断裂活动, 是热流体运移的活跃时期, 盆地边部油气藏易遭受破坏, 在盆地边部流体处于流动状态, 温度较高的盆地自生流体 (含油气流体) 向盆地边部流动与盆地表生流体相遇的均衡地带容易形成砂岩铀矿, 构造热事件发生时期

应是热—流体活跃时期, 也是金属铀矿成矿时期^[25]。

鄂尔多斯盆地北部东胜地区直罗组砂岩型铀矿的层间氧化带前锋线沿皂火壕—沙圪台—孙家梁一线呈近东西向展布, 控制长度约 40 km。砂岩型铀矿层间氧化带的发育期和成矿期自中侏罗世晚期至始新世末, 持续时间达 115 Ma。铀矿成矿时间为 107 ± 14 Ma 属早白垩世晚期^[26], 与地层达到的最高热演化时期及构造热事件发生时期一致^[9, 11, 20, 27, 28]。

伊盟隆起大多数油气显示均分布在距白垩系底部 60 m 的层段内, 含油岩层岩性以灰绿色砾状砂岩为主, 厚约 2~14 m, 下伏层位为上古生界二叠系石千峰统以下地层, 凡是白垩系与侏罗系或三叠系接触处均未见油气显示。油气显示的油质轻, 挥发性强, 具有强或弱的煤油味, 井下油砂可

见浅黄色油浸。分析化验证实白垩系油苗和二叠系原油相似,油源来自石炭-二叠系,而与河套盆地的第三系和鄂尔多斯盆地的三叠系、侏罗系原油无亲缘关系^[1]。油气应来源于热演化程度更高的伊盟隆起以南石炭-二叠系。

中生代晚期构造热事件发生时期,是盆地石炭-二叠纪油气大量形成时期^[9~11],来源于伊盟隆起以南温度较高的盆地自生流体(含油气流体)通过断裂进入直罗组,沿着直罗组下部砂体孔隙发育带、裂隙及微裂隙发育带等油气运移通道向盆地边部东胜地区运移,热流体活动有利于矿源层中铀发生活化及迁移,在与盆地地表生流体相遇的均衡地带,发生一系列的有机-无机相互作用,易于形成铀矿床^[28]。

5 结论

伊盟隆起东胜地区热演化史控制了油气、煤的形成和演化,也控制了铀矿的形成。根据镜质体反射率(R_o)值与深度的变化形式、盆地构造演化史、火成岩活动时期及盆地热史模拟结果,鄂尔多斯盆地在中生代晚期发生的构造热事件,使石炭-二叠系及侏罗系的煤化作用主要发生于中侏罗世一早白垩世,地层经历的最大古地温在早白垩世,早白垩世是古生代煤系地层的主要生气期和开始运移期。早白垩世以后伴随盆地整体持续抬升,促使盆地深部含油气流体向盆地边部流动,在与盆地地表生流体相遇的均衡地带,作为还原剂

tures of mineralogical zoning of epigenetic alteration at sandstone-type uranium deposit Dongsheng area Ordos basin [J].

Uranium Geology, 2004, 20(3): 136-140

- 4 朱西养,汪云亮,王志畅,等.东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J].地质地球化学,2003,31(2):39-45

Zhu Xiyang Wang Yunliang Wang Zhichang et al Trace element geochemistry of sandstone-type uranium deposits in Dongsheng area [J]. Geology-Geochemistry, 2003, 31(2): 39-45

- 5 张如良.鄂尔多斯深盆地与铀矿化关系初探[J].铀矿地质,2004,20(4):213-234

Zhang Ruliang Preliminary discussion on relationship between deep basin gas and uranium mineralization in Ordos basin [J]. Uranium Geology, 2004, 20(4): 213-234

- 6 焦养泉,陈安平,杨琴,等.砂体非均质性是铀成矿的关键因素之一——鄂尔多斯盆地东北部铀成矿规律探讨[J].铀矿地质,2005,21(1):8-15

Jiao Yangquan Chen Anping Yang Qin et al Sand body heterogeneity: one of the key factors of uranium metallogenesis in Ordos basin [J]. Uranium Geology, 2005, 21(1): 8-15

- 7 孙晔,李子颖,肖新建,等.油气圈闭与鄂尔多斯盆地北部铀成矿关系探讨[J].铀矿地质,2004,20(6):337-343

Sun Ye Li Ziyang Xiao Xinjian et al Relationship between oil-gas trap and uranium metallogenesis at northern Ordos basin [J]. Uranium Geology, 2004, 20(6): 337-343

- 8 潘爱芳,赫英,马润勇.鄂尔多斯盆地地表元素地球化学场与能源矿产关系初探[J].石油与天然气地质,2004,25(6):629-633

Pan Aifang He Ying Ma Runyong Preliminary study of relation between geochemical field of surface elements and energy minerals in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 629-633

- 9 任战利.利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J].地球物理学报,1995,38(3):339-349

Ren Zhanli Thermal history of Ordos basin assessed by apatite fission track analysis [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3):

ous energy resources in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 385-392

- 3 肖新建,李子颖,陈安平.东胜地区砂岩型铀矿床后生蚀变矿物分带特征初步研究[J].铀矿地质,2004,20(3):136-140

Xiao Xinjian Li Ziyang Chen Anping Preliminary study on fea-

ture of organic matter in the Ordos basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20(1): 20-23

- 13 孙少华,刘顺生,汪集旸.鄂尔多斯盆地热流场特征[J].大地构造与成矿学,1996,20(1):29-37

- Sun Shaohua, Liu Shunsheng, Wang Jiyang. The heat flow field in Ordos basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1996, 20(1): 29–37
- 14 Suggate R P. Relations between depth of burial, vitrinite reflectance and geothermal gradient [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(1): 5–32
 - 15 Bark C E. Temperature and time in the thermal maturation of sedimentary organic matter [A]. In: Naeser N D, McCulloh T H, eds. *Thermal history of sedimentary basins—methods and case histories* [C]. New York: Springer-Verlag, 1989: 75–98
 - 16 Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter [A]. In: Buntenbarth G, Stegena L, eds. *Paleogeothermics: lecture notes in earth sciences* [C]. New York: Springer-Verlag, 1986: 79–228
 - 17 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002
 - Yang Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002
 - 18 Naeser N D, Naeser C W, McCulloh T H. The application of fission-track dating to the depositional and thermal history of rocks in sedimentary basins [M]. In: Naeser N D, McCulloh T H, eds. *Thermal history of sedimentary basins—methods and case histories* [J]. Springer: Berlin, 1989 (S0): 157–180
 - 19 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地新生代抬升冷却事件的确定 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 109–113
 - Ren Zhanli, Xiao Hui, Liu Li, et al. Determination of Cenozoic uplift-cooling event in Qingshui basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 109–113
 - 20 任战利. 关于沉积盆地古地温恢复问题的探讨 [J]. *西北大学学报*, 1991, 21(增刊): 227–234
 - Ren Zhanli. Discussion on paleogeothermal recovery in sedimentary basin [J]. *Journal of Northwest University*, 1991, 21(S0): 227–234
 - 21 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比 [J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 33–37
 - Ren Zhanli. Comparison of thermal evolution history in sedimentary basins, North China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(1): 33–37
 - 22 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. *AAPG Bull*, 1990, 74(10): 1559–1570
 - 23 欧光习, 赵宏刚, 张建锋, 等. 盆地流体与砂岩型铀矿成矿作用研究现状 [A]. 见: 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏 (矿) 研究进展 [C]. 北京: 科学出版社, 2005: 54–56
 - Ou Guangxi, Zhao Honggang, Zhang Jianfeng, et al. Present research status of basin fluids and sandstone-type uranium ore formation [A]. In: Liu Chiyang. *The study progress of accumulation and distribution patterns for multiple energy mineral deposits coexisting in the basin* [C]. Beijing: Science Press, 2005: 54–56
 - 24 肖新建, 李子颖, 方锡珩, 等. 东胜砂岩型铀矿低温热液流体的证据及意义 [J]. *矿物岩石地球化学学报*, 2004, 23(4): 301–304
 - Xiao Xinjian, Li Ziyang, Fang Xiheng, et al. The evidences and significances of epithermal mineralization in the Dongsheng sandstone-type uranium deposit [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(4): 301–304
 - 25 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史研究现状及进展 [A]. 见: 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏 (矿) 研究进展 [C]. 北京: 科学出版社, 2005: 17–25
 - Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Present situation and progress on thermal history research of Ordos basin [A]. In: Liu Chiyang. *The study progress of accumulation and distribution patterns for multiple energy mineral deposits coexisting in the basin* [C]. Beijing: Science Press, 2005: 17–25
 - 26 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 等. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究 [J]. *铀矿地质*, 2003, 19(3): 129–136
 - Xia Yuliang, Lin Jinrong, Liu Hanbin, et al. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China [J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(3): 129–136
 - 27 任战利, 赵重远. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6): 1–4
 - Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. Recovery and comparison of geothermal gradient for late Mesozoic sedimentary basins in the northern part of China [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2001, 28(1): 1–4
 - 28 任战利, 赵重远, 陈刚, 等. 沁水盆地中生代晚期构造热事件 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 46–48
 - Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan, Chen Gang, et al. Tectonic thermal events of late Mesozoic in Qingshui basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 46–48

(编辑 李树森)