



鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义

任战利* 张 盛 高胜利 崔军平 肖媛媛 肖 晖

(大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069)

摘要 地层测温、热导率、生热率测试资料研究表明鄂尔多斯盆地现今平均地温梯度为 $2.93^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 平均大地热流值为 61.78 mW/m^2 , 属于中温型盆地. 现今地温梯度、大地热流值具有东高西低的分布特征. 在伊盟隆起东胜铀矿区直罗组砂岩生热率明显变高, 高于泥岩的生热率, 反映存在金属铀异常. 在对盆地现今地温场研究的基础上, 应用多种古地温研究手段恢复了盆地中生代晚期的古地温及古地温梯度, 根据中生代晚期古地温梯度异常及火成岩活动年龄测试结果确定了中生代晚期早白垩世存在一次构造热事件. 以建立的热史模型为约束条件, 应用盆地模拟软件进行了热史模拟, 重新恢复了鄂尔多斯盆地不同构造单元的构造热演化史. 鄂尔多斯盆地构造热演化史对油气、煤、金属铀矿的形成、演化、成藏(矿)有重要的控制作用, 特别是中生代构造热事件. 无论是下古生界气源岩还是上古生界气源岩, 天然气大规模生成期均在中生代晚期的早白垩世. 三叠系延长统主要生油期也是在早白垩世. 对于石炭—二叠系、三叠系及侏罗系的煤化过程而言, 煤的最高热演化程度也是在早白垩世达到的. 早白垩世也是金属铀矿重要的成矿期.

关键词 鄂尔多斯盆地 大地热流 地温梯度 古地温 构造热事件 热演化史 成藏期

鄂尔多斯盆地是位于华北克拉通西部的克拉通盆地, 盆地内油气、煤、金属铀矿等多种能源矿产资源丰富, 是我国重要的能源矿产基地. 自 1993 年以来人们用不同的方法, 从不同的角度对鄂尔多斯盆地热演化史研究进行了研究^[1~12]. 鄂尔多斯盆地古地温高于今地温, 属中温抬升冷却型盆地^[1~5,13]. 在盆地热演化史研究方面, 自任战利等^[1,2]提出鄂尔多斯盆地存在中生代晚期构造热事件以来, 关于盆地构造热事件的研究不断深入, 但在构造热事件发生期次及发生时间方面有不同认识^[1~12]. 在鄂尔多斯盆地构造热演化史与油气关系研究方面工作较多, 也较为深入, 而在盆地热演化史与煤、铀矿关系方面研究较弱.

盆地热演化史对多种能源矿产的形成与分布有重要的控制作用^[13], 近年来, 作者系统的补充了 211 口井新的地层测温资料及 600 多个镜质体反射率新

资料, 补充采集分析了 43 块放射性生热率、7 块磷灰石裂变径迹、4 块紫金山火成岩新样品. 在对现今地温场更深入分析的基础上, 对鄂尔多斯盆地热演化史进行了恢复. 进一步确定鄂尔多斯盆地构造热事件发生在早白垩世, 地层最大古地温是在早白垩世达到的, 认为早白垩世是鄂尔多斯盆地油气、铀矿的重要成藏成矿期.

1 现今地温场及分布特征

1.1 地温梯度

盆地现今地温场研究是盆地古地温恢复的基础, 鄂尔多斯盆地恒温带深度和温度前人基本未作系统的研究工作, 本次研究全面系统的收集了盆地已有的地温资料. 根据神木北部区柠条塔露天区的 478 号孔长期观测资料, 孔深 46 m 处, 井温始终保持为 11.5°C .

神木以北, 伊盟隆起以南地区为地温梯度低值区, 地温梯度小于 $2.80^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 在盆地南部庆阳—安塞—子长一带为地温梯度高值区, 地温梯度可达 $3.00^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以上, 地温梯度高值区呈北东向分布。

1.2 大地热流值及变化

在对 435 块岩石热导率分析测试资料分析的基础上, 对各井热导率及各构造单元的热导率变化趋势、变化规律进行了分析. 各构造单元岩石的热导率变化均随深度的增加而增加, 但岩性不同其变化特征各异: 砂岩的热导率高于泥岩, 白云岩、灰岩的热导率和砂岩接近且变化规律相同(图 3).

根据各个单井的地温梯度及热导率测试结果,分别计算了各单井的大地热流值,重新编制了鄂尔多斯盆地大地热流值分布图(图 4)。大地热流值等值

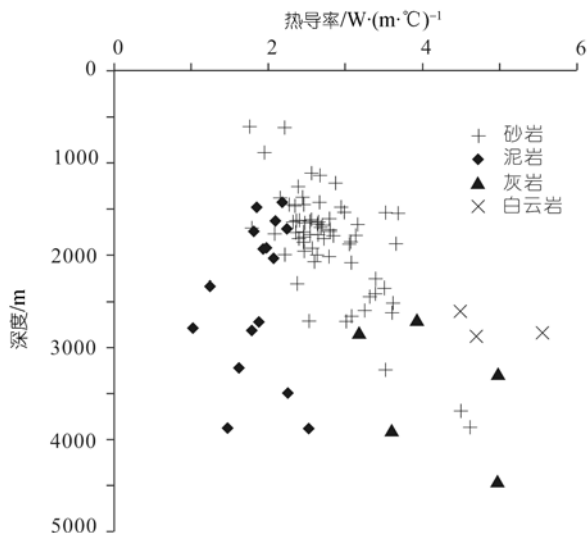


图3 陕北斜坡不同岩性热导率随深度变化图

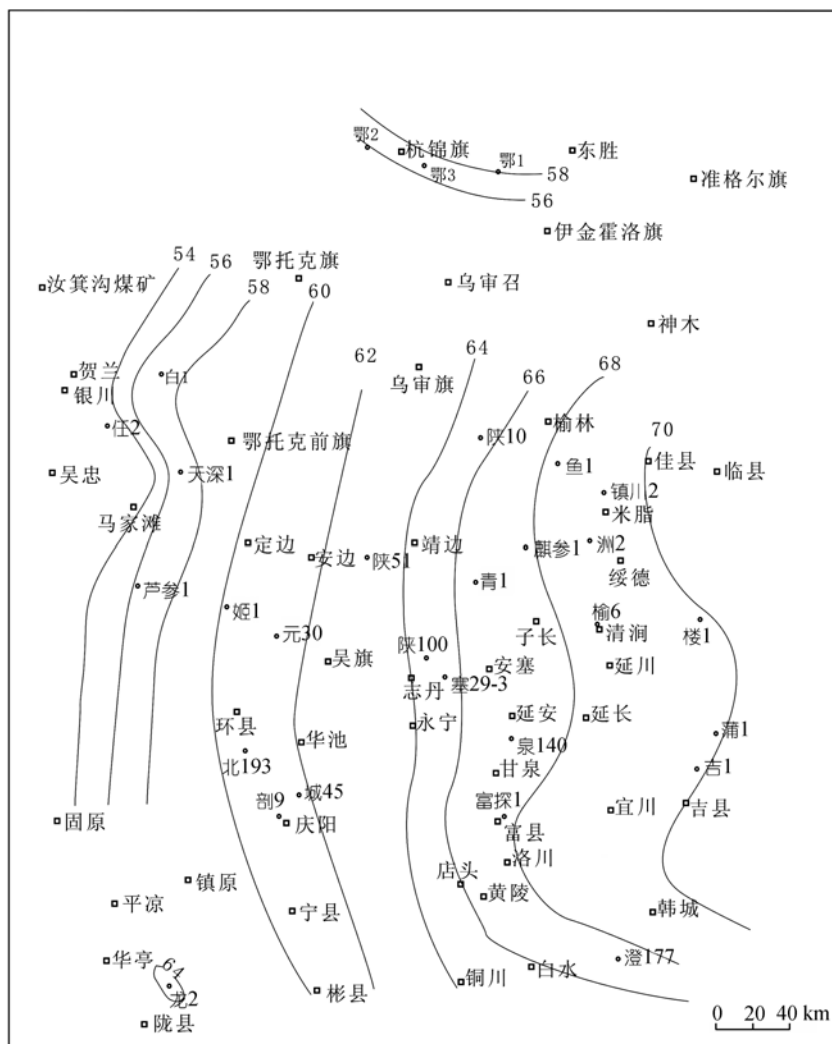


图 4 鄂尔多斯盆地大地热流等值线图(单位: mW/m^2)

线在盆地北部伊盟隆起及南部的渭北隆起近东西向分布,在盆地晋西挠褶带、陕北斜坡、西缘断裂带大地热流值等值线近南北向、北东向分布,热流值总体具有东高西低,南高北低的变化趋势。

鄂尔多斯盆地计算的大地热流值在 $43\sim70\text{ mW/m}^2$ 之间,根据实测的大地热流值确定的全盆地的平均大地热流值为 61.78 mW/m^2 ,该热流值接近全球平均热流值 61 mW/m^2 ,远低于现代大陆裂谷区和新生代构造活动区的热流值(如贝加尔裂谷: $(97\pm22)\text{ mW/m}^2$;美国盆地山脉省: 约 83 mW/m^2)。地温梯度也低于裂谷盆地和弧后盆地,高于被动大陆边缘盆地和前陆盆地。

1.3 深部热结构

鄂尔多斯盆地地表热流值是地壳、地幔各种因素综合作用的结果,研究各个层段放射性生热率的大小及对热流值的贡献,进而确定深部热流值对研究区的构造活动性有重要意义。一个地区深部热流值的确定,关键在于从地表所观测到的总热流量中,扣除掉由地壳浅部放射性元素富集层所提供的那部分热量或地壳热流。地壳深部温度计算通常采用一维稳态热传导方程计算,首先要给出一地区的地壳结构模型,并确定出各岩层段放射性生热率之后,即可采用“剥层”法逐层计算各层段所提供的热量,从而得出各层段底部的热流值。

我们在收集前人已有的 354 块岩石生热率资料的基础上,新测试了 43 块岩石生热率样品,进而分析了岩石生热率在纵向上的变化规律。研究发现鄂尔多斯盆地在石炭—二叠系、三叠系、侏罗系生热率值的总趋势是灰岩、砂岩生热率低,泥岩生热率高(图 5)。但在伊盟隆起东胜地区发现直罗组砂岩生热率明显变高,高于泥岩的生热率(图 6),反映有明显的金属铀异常。

地壳深部温度同样可用一维稳态热传导公式计算。计算的鄂尔多斯盆地莫霍面底部的热流和温度图反映盆地东部高于西部,南部高于北部。盆地热岩石圈厚度东薄西厚,南薄北厚,盆地中部庆阳地区热岩石圈厚度薄[14]。

鄂尔多斯盆地现今地温场地温梯度、大地热流值东高西低的分布特征主要受现今地壳厚度、岩石圈厚度东薄西厚、北厚南薄的岩石圈结构控制。

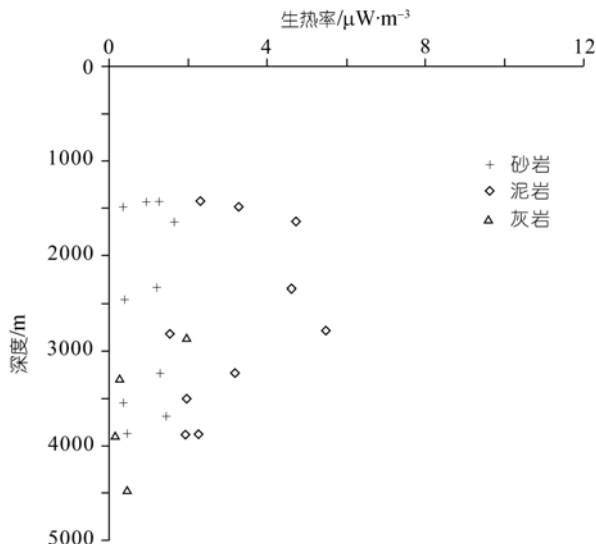


图 5 陕北斜坡生热率随深度变化图

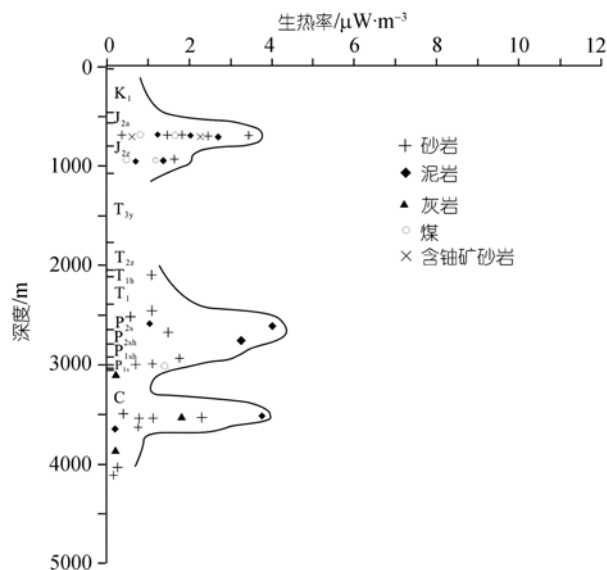


图 6 伊盟隆起岩石生热率随深度变化图

2 构造热演化史模型建立与热史模拟

鄂尔多斯盆地为叠合盆地,不同时期不同类型的盆地相互叠加,早古生代—晚古生代为华北陆缘海-滨浅海盆地,中生代晚三叠世—早白垩世为残延内克拉通盆地,晚白垩世以来进入盆地整体抬升,周边断陷阶段[15~17]。

2.1 古温标提供的古地温演化过程的信息

在系统收集和补充测试镜质体反射率的基础上,我们对鄂尔多斯盆地不同构造单元 1300 多个镜质体反射率(R_0)值与深度关系进行了分析,不同构造单元

镜质体反射率(R_o)与深度关系的差异主要表现在曲线的斜率及镜质体反射率(R_o)在接近地表的起始值不同. 不同构造单元镜质体反射率(R_o)与深度关系图中镜质体反射率(R_o)没有明显的错断, 仅在奥陶系顶面—石炭系煤层附近镜质体反射率(R_o)出现异常, 表明奥陶系顶面为一热流体活动的界面 [1,4,5] (图 7). 不同构造单元镜质体反射率(R_o)与深度关系图主要反映地层在达到最大埋深时的古地温梯度, 因此可应用不同构造单元镜质体反射率(R_o)与深度关系求取古地温梯度及剥蚀厚度 [2,5,18].

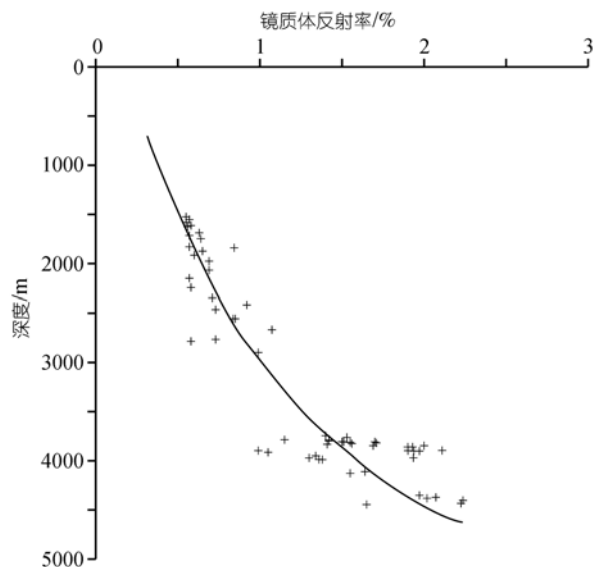


图 7 天环向斜 R_o 与深度关系图

根据不同构造单元镜质体反射率(R_o)与深度关系图恢复了各构造单元的剥蚀厚度, 地表镜质体反射率值取 0.2%, 镜质体反射率求取的剥蚀厚度为早白垩世以来总的剥蚀厚度, 剥蚀的地层主要为三叠系上统及以上地层, 不同构造单元剥蚀地层不同, 天环向斜西部剥蚀厚度小, 主要剥蚀白垩系, 陕北斜坡主要剥蚀侏罗、三叠系. 从计算的剥蚀厚度来看, 晋西挠褶带、渭北隆起经历了较大的剥蚀, 剥蚀厚度一般在 2000 m 以上; 伊盟隆起剥蚀厚度较小, 剥蚀厚度在 500~1300 m 之间; 陕北斜坡剥蚀厚度东大西小, 一般在 1000~2000 m 之间; 天环向斜剥蚀最小, 剥蚀厚度一般在 500~700 m 之间. 用镜质体反射率计算的剥蚀厚度 [1] 与陈瑞银等 [19] 用厚度趋势法估算的剥蚀厚度基本一致. 剥蚀厚度的计算为埋藏史的恢复史和热史的恢复提供了重要的限定条件 [1,3].

鄂尔多斯盆地已测试了大量的磷灰石裂变径迹分析样品 [2~7], 不同构造单元磷灰石裂变径迹年龄与深度关系规律性明显, 天环向斜、西缘逆冲断裂带出现部分退火带、冷却带, 在浅部为未退火带. 陕北斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带、伊盟隆起缺失未退火带及部分退火带上部地层 [2]. 表明鄂尔多斯盆地后期发生过大范围的抬升和冷却, 渭北隆起、陕北斜坡、晋西挠褶带剥蚀量大, 西缘逆冲带和天环向斜剥蚀量较少. 裂变径迹反映的剥蚀厚度趋势与用镜质体反射率计算的剥蚀厚度趋势一致 [2].

鄂尔多斯盆地磷灰石裂变径迹年龄与深度关系表明陕北斜坡的麒参 1 井、镇川 1 井 23 Ma 以前存在一期冷却事件, 天环向斜天深 1 井给出了 20 Ma 以前的冷却事件 [2,5]. 该冷却年龄的样品现今仍处于 80℃ 的地温环境, 因此该冷却年龄值偏小, 根据麒参 1 井裂变径迹资料的重新解释判定冷却年龄应在 40~50 Ma 前.

根据测试的新资料伊盟隆起冷却带(前完全退火带)记录的最早冷却年龄约为 60~70 Ma [2,20~22], 表明伊盟隆起冷却较早, 在新生代以来主要是抬升冷却过程 [2,21], 地层遭受强烈的剥蚀, 温度明显降低, 为一冷却过程.

裂变径迹资料反映鄂尔多斯盆地主体部位冷却事件发生在 40~50 Ma 前, 20~23 Ma 以来盆地快速抬升冷却 [2]. 根据盆地构造演化史及盆地残余地层推断鄂尔多斯盆地抬升剥蚀发生在晚白垩世以来, 古地温资料显示抬升剥蚀主要在新生代以来, 因此可以推断在晚白垩世盆地可能抬升剥蚀不强烈, 主要的抬升剥蚀期应在新生代以来, 新生代以来是盆地抬升降温时期.

2.2 中生代晚期古地温梯度的恢复及构造热事件的确定

鄂尔多斯盆地各构造单元 R_o 与深度关系曲线形态形似, 为似线性变化类型, 表明埋藏增温是主要的热机制, 不存在大规模的热对流现象. 鄂尔多斯盆地不同构造单元的 R_o - H 关系图反映在中生代晚期地层在达到最大埋深时的地温梯度(图 8), 多种古地温恢复方法表明中生代晚期的古地温梯度较高, 存在热异常 [1~5,23].

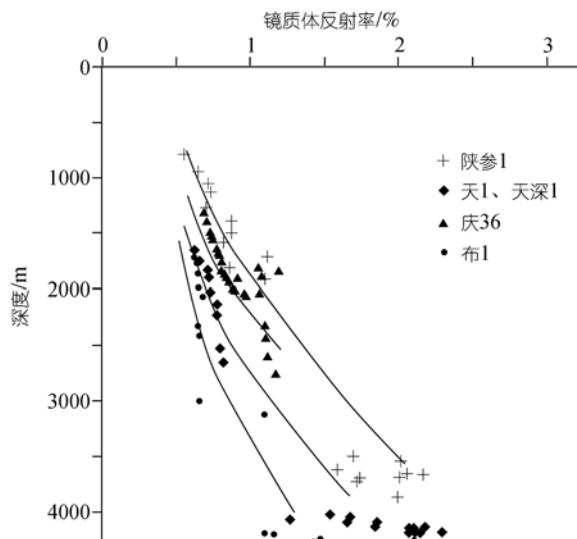


图 8 不同构造单元典型井 R_0 与深度关系图

根据鄂尔多斯盆地周缘及邻区火成岩年龄、磷灰石裂变径迹、强烈构造运动发生时期及古地温梯度恢复等资料,可以判定构造热事件主要发生在中生代晚期早垩世约 140~100 Ma^[2,5,24~29]。构造热事件发生时期为地温梯度、热流值异常时期,异常地温场主要分布于盆地中南部,异常地温场形成的根本原因在于中生代晚期早白垩世鄂尔多斯盆地岩石圈深部的热活动增强,鄂尔多斯盆地南部岩石圈深部热活动性比北部更强^[2,5,24~31]。鄂尔多斯盆地中生代晚期构造热事件发生时间与华北地块岩石圈全区范围内由亏损地幔性质转变为富集地幔性质时期、岩石圈减薄时期及华北东部构造体制转折的时期一致^[5,26~35]。

此次工作中对盆地东缘临县紫金山岩体进行了采样,对 4 块火成岩样品在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行主量、微量元素测定。主量元素用碱熔玻璃片法在 X 荧光光谱仪上测定;微量元素用 ICP-MS 测定,地球化学常量微量元素及岩石组合特征分析表明该岩体岩浆为幔源成因^[36]。选取所采样品 Zj03-r-1 (霓霞正长岩)送至河北省区域地质矿产调查研究所挑选锆石,获得的锆石数量多于 1000 颗。将双目显微镜下挑出的锆石样品置于环氧树脂中打磨,暴露出锆石的中心面,用于阴极发光(CL)和锆石 LA-ICP MS U-Pb 同位素组成分析。锆石的 CL 图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。锆石 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光

剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP MS)仪上完成。样品 Zj03-r-1 的 U, Th 含量分别为 $(199.12 \sim 1671.81) \times 10^{-6}$ 和 $(120.69 \sim 3357.49) \times 10^{-6}$, Th/U=0.3~2.5。在锆石 U-Pb 年龄谱和曲线图中,所获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主体集中在 (138.3 ± 1.1) Ma (图 9), 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 (138.3 ± 1.1) Ma (MSWD=2.3, 9 个样品点)。该年龄值表明紫金山杂岩体应属燕山期产物,该年龄值对中生代构造热事件发生的时代确定有重要意义。

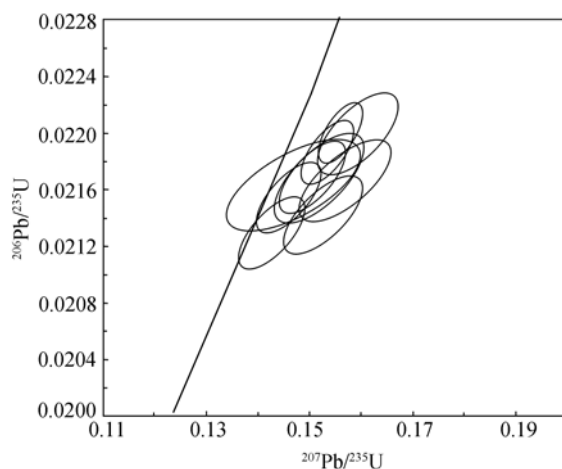


图 9 紫金山 Zj03-r-1 样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谱和谐图

盆地西缘汝箕沟鼓鼓台玄武岩同位素年龄约为 100 Ma^[30], 这说明早白垩世深部岩石圈地幔热活动性强,地幔发生底侵作用,岩石圈减薄,发生岩浆侵入和喷发,这应该是构造热事件发生的根本原因。中生代构造热事件不仅发生在华北东部,也发生在华北西部鄂尔多斯盆地及山西地区。山西地区中生代火成岩同位素年代测量数据表明,岩浆侵入和喷发从侏罗纪到白垩纪,其主要分布于 110~150 Ma 之间,主峰值 120~140 Ma,主峰年龄相当于早白垩世^[26]。

山西沁水盆地及周缘区岩浆活动主要集中在 110~141 Ma 之间,主峰值在 130~140 Ma 之间,塔儿山、狐堰山及西安里岩体里特曼-戈蒂里图解表明岩浆岩多位于造山与非造山之间的过渡区,属弱造山环境,反映沁水盆地中生代构造体制由挤压向伸展的转变。根据恢复的古地温梯度及大地热流估算,燕山期沁水盆地岩石圈应有明显的减薄,燕山晚期沁水盆地深部地幔热活跃,地幔上涌,岩石圈减薄,下地壳发生熔融和壳幔物质交换,形成异常地温场^[37,38]。

2.3 盆地热史模拟

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 [1~5,39~40], 根据建立的盆地热史模型 [3,5], 依据不同构造单元剥蚀厚度、古地温恢复结果及实测的镜质体反射率资料, 用盆地模拟软件方法进行了热史模拟分析 [41], 重新恢复了鄂尔多斯盆地不同构造单元的热演化史。

在模拟热史时, 将恢复的剥蚀厚度及中生代晚期的地温梯度作为限定条件, 不断修改热演化模型, 使盆地模拟结果中实测的镜质体反射率(R_o)与理论计算的镜质体反射率很好的一致时, 就认为此热史模型可以代表盆地的热演化史。

我们应用 Easy% R_o 模型, 对盆地不同构造单元的 7 口井进行了详细的热史模拟。陕北斜坡陕参 1 井用镜质体反射率法恢复的剥蚀厚度为 1000 m, 则计算的中生代晚期的地温梯度高达为 $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 值与用古地温温标计算的古地温梯度较接近(图 10)。

陕北斜坡南部热异常明显 [37], 庆 36 井在中生代晚期约 130~100 Ma 时地温梯度高达为 $4.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 此模拟值与用古地温温标计算的古地温梯度较接近 [37]。

天环向斜天 1 井恢复的剥蚀厚度为 120m, 计算的地温梯度为 $4.1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, $4.1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 值与用古地温温标计算的古地温梯度较接近(图 10)。

盆地热史模拟结果表明在中生代晚期的古地温梯度较高, 盆地南部古地温梯度高于盆地北部, 在盆地南部出现过异常高值。

3 热演化史与油气、煤、金属铀矿的关系

3.1 热演化史与油气、煤关系

从鄂尔多斯盆地热演化史与油气的关系来看, 无论是下古生界气源岩还是上古生界气源岩, 地层经历的最高古地温都是在早白垩世达到的, 天然气大规模生成期均在中生代晚期的早白垩世, 生气高峰期晚, 有利于天然气的保存。三叠系延长统主要生油期也是在早白垩世(图 11)。

对于石炭—二叠系、三叠系及侏罗系的煤化过程而言, 其煤化作用主要发生在晚侏罗世—早白垩世, 煤的最高热演化程度是在早白垩世达到的。煤的最高热演化程度形成时期与油气生成高峰期和成藏期基本一致 [42,43]。

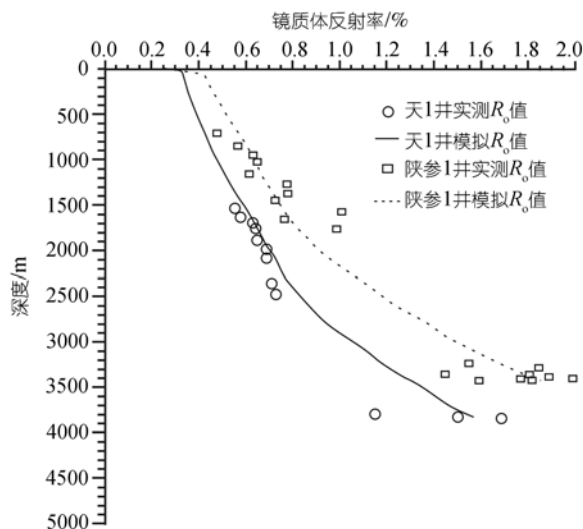


图 10 陕参 1 井与天 1 井热演化史模拟结果对比图

中生代晚期构造热事件加速了有机质的热解过程, 使盆地古生界碳酸盐岩及煤系地层在中生代晚期大量生成天然气并发生运移和聚集。鄂尔多斯盆地在新生代以来快速抬升冷却, 地温梯度减小及地层地温降低, 有助于天然气出溶成藏 [2,5], 油气生成速率明显减小或停止。

3.2 热演化史与金属铀, 矿床的关系

中生代构造热事件对金属铀矿、金属矿产的形成也有重要的控制作用, 中生代晚期构造热事件发生时期是热流体活动的时期, 也是金属铀矿重要的成矿时期。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 [13,22]。

鄂尔多斯盆地中生代晚期构造热事件发生时期, 构造断裂活动。鄂尔多斯盆地北部东胜地区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。铀矿主成矿时间为 $(107 \pm 14)\text{ Ma}$, 属早白垩世晚期, 与中生代晚期构造热事件发生时期一致 [13,28,44]。

中生代晚期构造热事件发生时期热流体沿奥陶系顶面活动强烈, 沿奥陶系顶面成矿。在盆地周缘及盆地内部的一些特殊构造部位或层位, 发生了热液矿化及动力变质现象, 这些热液矿化及热动力变质现象本身就显示了热-流体的活动, 是热事件存在的证据。热液矿(化)如卡布其 Pb-Zn 矿, 李 1 井、李华 1 井等的黄铁矿化, 陕 139 井风化壳之上的黄铁矿化

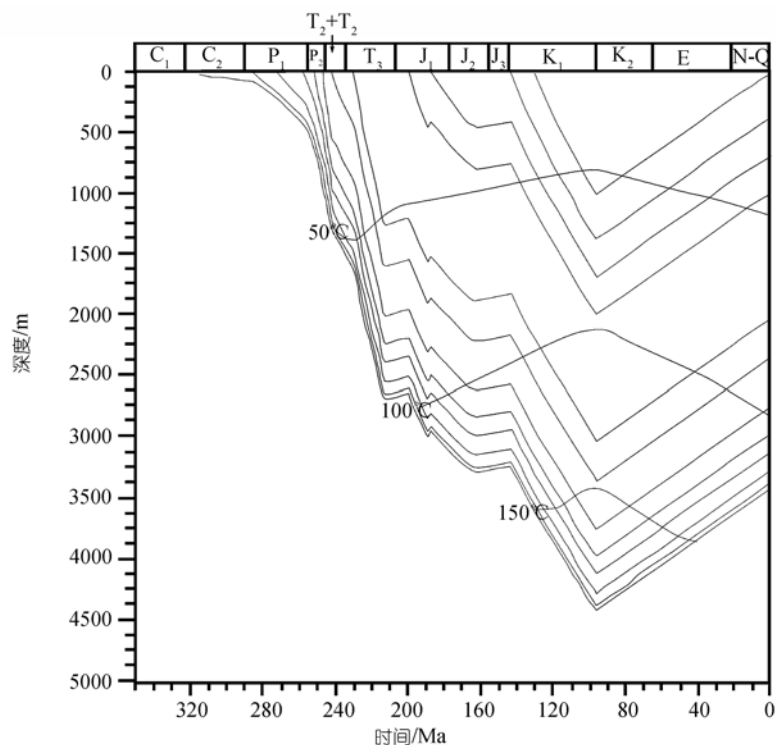


图 11 鄂尔多斯盆地陕参 1 井热演化史图

带厚 150 m 以上. 六盘山区是重要的燕山期多金属成矿带. 金属矿化集中于西缘深大断裂一线和奥陶系—石炭系不整合面附近 [45].

对伊盟隆起鄂 1、胜 1 井的热演化史研究表明, 伊盟隆起区石炭—二叠系热演化程度较低, 镜质体反射率小于 1.3%, 古地温小于 160°C, 胜 1 井更低. 胜 1 井和鄂 1 井处的中侏罗统直罗组地层达到的最高温度分别为约 60°C 和 80~90°C, 镜质体反射率分别约为 0.5% 和 0.6%. 我们对东胜铀矿直罗组铀矿层测试的镜质体反射率值小于 0.5%, 表明其热演化程度较低 [22]. 现今研究结果认为东胜地区侏罗系直罗组砂岩铀矿的形成不是偶然的, 砂岩铀矿形成与天然气有的密切关系, 天然气不断向东胜地运移, 起到了还原剂的作用. 但是从热演化程度来看, 伊盟隆起石炭—二叠系热演化程度较低, 天然气不可能来自伊盟隆起本身, 大规模的天然气可能来自于伊盟隆起南部更深、更远的榆林—乌审旗—乌审召一带 [22].

4 结论

根据地层测温、热导率、生热率测试新资料系统

的研究了鄂尔多斯盆地现今地温场特征与分布, 盆地现今地温梯度平均值为 2.93°C/100m, 大地热流平均值为 61.78 mW/m², 属于中温型盆地. 现今地温梯度、大地热流值东高西低的分布特征主要受现今地壳厚度、岩石圈厚度东薄西厚、北厚南薄的岩石圈结构控制.

鄂尔多斯盆地不同层位岩石生热率总体上具有泥岩生热率高于砂岩的特点, 但在伊盟隆起东胜铀矿区直罗组砂岩生热率明显变高, 高于泥岩的生热率, 反映存在金属铀异常.

在对盆地现今地温场研究的基础上, 应用多种古地温研究手段恢复了盆地中生代晚期的古地温及古地温梯度, 根据中生代晚期古地温梯度异常及临县紫金山火成岩体同位素年龄测定结果确定了中生代晚期早白垩世存在一次构造热事件. 将以上结果作为约束条件, 结合盆地构造演化史、盆地类型等资料, 建立了盆地热演化史模型. 根据不同构造单元剥蚀厚度、古地温恢复结果及实测的镜质体反射率资料, 应用建立的热史模型及盆地模拟软件 EASY% R₀ 模型进行了热史模拟, 重新恢复了鄂尔多斯盆地不同构造单元的构造热演化史.

鄂尔多斯盆地构造热演化史对油气、煤、金属铀矿的形成、演化、成藏(矿)有重要的控制作用,特别是中生代晚期构造热事件控制作用更为明显。无论是下古生界气源岩还是上古生界气源岩,其天然气的生成时间都较晚,天然气大规模生成期均在中生代晚期的早白垩世。三叠系延长统主要生油期也是在早白垩世。对于石炭—二叠系、三叠系及侏罗系的煤化过程而言,其煤化作用主要发生在晚侏罗世—早白垩世,煤的最高热演化程度也是在早白垩世达到的。早白垩世也是金属铀矿重要的成矿期。

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. 沉积学报, 1994, 12(1): 56—65
- 2 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史. 地球物理学报, 1995, 38(37): 339—349
- 3 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究. 石油学报, 1996, 17(1): 17—24
- 4 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究. 沉积学报, 1997, 15(2): 134—137
- 5 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究. 北京: 石油工业出版社, 1999. 1—50
- 6 高峰, 王岳军, 刘顺生, 等. 利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔多斯盆地西缘热历史. 大地构造与成矿学, 2000, 24(1): 87—91
- 7 孙少华, 李小明, 龚革联, 等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究. 科学通报, 1997, 42(3): 306—309
- 8 汤达祯, 杨起, 潘治贵. 河东煤田地史-热史模拟与煤变质演化. 现代地质, 1992, 6(3): 328—337
- 9 刘新社, 席胜利, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气生成. 天然气工业, 2000, 20(6): 19—23
- 10 赵孟为, Behr H J. 鄂尔多斯盆地三叠系镜质体反射率与热史. 石油学报, 1996, 17(2): 15—23
- 11 周江羽, 吴冲龙, 韩志军. 鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟度. 石油实验地质, 1998, 20(1): 20—23
- 12 赵孟为, Ahrendt H, Wemmer K. K-Ar 测年法在确定沉积岩时代中的应用. 沉积学报, 1996, 14(3): 11—21
- 13 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. 刘池洋, 主编. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展. 北京: 科学出版社, 2005. 17—25
- 14 孙少华, 刘顺生, 汪集旻. 鄂尔多斯盆地热流场特征. 大地构造与成矿学, 1996, 20(1): 29—37
- 15 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油出版社, 2002
- 16 赵重远, 刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 1990
- 17 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油出版社, 2003
- 18 Suggate R P. Relations between depth of burial, vitrinite reflectance and geothermal gradient. J Pet Geol, 1998, 21(1): 5—32[DOI]
- 19 陈瑞银, 罗晓荣, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义. 地质学报, 2006, 80(5): 685—693
- 20 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. In: Naeser N D, McCulloh T H, eds. Thermal History of Sedimentary Basins—Methods and Case Histories. Berlin: Springer, 1989. 157—180
- 21 Gleadow A J W, Duddy I R, Lovering J F. Fission track analysis. A new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. Apea J, 1986, 23: 93—102
- 22 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系探讨. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 187—193
- 23 Allen P A, Allen J R. Basin Analysis Principles and Application. Oxford London: Blackwell Scientific Publication, 1990
- 24 Barker C E. Temperature and time in the thermal maturation of sedimentary organic matter. In: Naeser N D, McCulloh T H, eds. Thermal History of Sedimentary Basin-methods and Case Histories. New York: Springer-Verlag, 1989. 75—98
- 25 Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. In: Buntebarth G, Stegena L, eds. Paleogeothermics, Lecture Notes in Earth Sciences, V. 5. New York: Springer-Verlag, 1986. 79—228
- 26 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 43—47
- 27 任战利, 赵重远, 陈刚, 等. 沁水盆地中生代晚期构造热事件. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 46—48
- 28 任战利, 赵重远. 中生代晚期中国北方沉积盆地古地热梯度及对比. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 1—4
- 29 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究. 沉积学报, 1997, 15(2): 134—137
- 30 高山林, 李芳, 李天斌, 等. 汝箕沟晚中生代玄武岩的确定与煤变质作用关系简论. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 8—10
- 31 吴利仁, 张兆忠, 张玉学, 等. 论山西台背斜碱性岩的成因与演化. 地质科学, 1964, (2): 128—132
- 32 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 1999, 29: 313—318
- 33 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(4): 289—299
- 34 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(10): 913—920

- 35 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379—388
- 36 黄锦江. 山西临县紫金山碱性环状杂岩体岩石学特征与成因研究. 现代地质, 1991, 5(1): 24—39
- 37 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨. 地质学报, 2004, 80(5): 674—684
- 38 任战利, 肖晖, 刘丽, 等. 沁水盆地构造热演化史的裂变径迹证据. 科学通报, 2005, 50(增 1): 87—92
- 39 任战利. 关于沉积盆地古地温恢复问题的探讨. 西北大学学报 1991, 21(增刊): 227—234
- 40 任战利. 沉积盆地热演化史研究进展. 地球科学进展, 1992, 7(2): 43—49
- 41 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG Bull, 1990, 74: 1559—1570
- 42 王龙樟, 戴槿谟, 彭平安. 自生伊利石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年技术及气藏成藏期的确定. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 39(1): 78—82
- 43 黄道军, 刘新社, 张清白, 等. 自生伊利石 K-Ar 测年技术在鄂尔多斯盆地油气成藏时期研究中的初步应用. 低渗透油气田, 2004, 9(4): 37—39
- 44 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. 铀矿地质, 2003, 198(3): 129—136
- 45 万丛礼, 付金华, 张军. 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造—热事件与油气运移. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 43—47