

文章编号: 0253-9985(2007)03-0355-07

济源-中牟-黄口坳陷带热演化史与油气的关系

刘 丽, 任战利

(西北大学 大陆动力学国家重点实验室 地质系, 陕西 西安 710069)

摘要: 济源-中牟-黄口坳陷带的上古生界烃源岩经历了复杂的构造热演化历史。在中三叠世之前, 坳陷带具有相似的热演化史, 而于侏罗纪晚期-白垩纪发生的差异性沉降导致各构造单元上古生界烃源岩的热演化程度出现差异。济源凹陷在三叠纪之后没有或轻微抬升, 连续沉积中、新生界, 侏罗纪-古近纪为主要生烃期; 中牟凹陷自新生代以来大幅沉降, 古生界持续升温, 主要生烃期为古近纪; 黄口凹陷从侏罗纪开始沉降, 晚始新世再度沉降, 热演化程度低, 白垩纪-古近纪为主要生烃期。

关键词: 古地温; 热演化史; 生烃期; 济源-中牟-黄口坳陷带

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Relations between geothermal history and hydrocarbon generation in Jiyuan-Zhongnou-Huangkou depression belt

Liu Li Ren Zhanli

(State Key Laboratory of Continental Dynamics & Department of Geology,
Northwest University, Xi'an, 710069)

Abstract The Upper Palaeozoic source rocks in Jiyuan-Zhongnou-Huangkou depression belt experienced complicated structural and thermal evolution. The three depressions were similar in thermal history before the Middle Triassic, but the differential subsidence during the late of the Jurassic-Cretaceous period led to their difference in thermal evolution of the Upper Paleozoic source rocks. Jiyuan depression suffered no or tiny uplifting after the Triassic and received continuously Mesozoic and Cenozoic deposits. The Jurassic-Eogene period is its main hydrocarbon generation stage. Zhongnou depression passed through extensive subsidence since the Cenozoic resulting in continuous rising of the temperature of the Palaeozoic. The Eogene is its main hydrocarbon generation period. Huangkou depression began to subside since the Jurassic and subsided again in the Late Eocene. Its thermal maturity is low and the Cretaceous-Eogene period is the main stage of hydrocarbon generation.

Key words palaeotemperature; thermal history; hydrocarbon generation stage; Jiyuan-Zhongnou-Huangkou depression

南华北盆地济源-中牟-黄口坳陷带是由济源、中牟、民权、黄口、四户凹陷及武陵、昨城-兰考、曹县凸起等组成的北西西向带状凹陷, 与我国东部以北北东向构造线为主体的渤海湾盆地呈斜交组合关系, 由于北东和北西向两组构造线在本

区同时存在、彼此切割、相互制约, 从而导致了其在地温场、构造、深部地质、生油等方面有别于渤海湾盆地。对研究区地温场特征进行研究, 不仅对探讨盆地形成机制和热演化史, 而且对于生烃期的研究具有十分重要的意义。

收稿日期: 2006-10-18

第一作者简介: 刘丽 (1979-), 女, 博士研究生, 盆地热史与油气成藏

基金项目: 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)

1 古地温对比研究

1.1 现今地温

现今地温场是古地温场演化的最后一幕,是盆地古地温恢复的基础,它一方面体现了现今盆地特别是烃源岩所处的温度环境,同时又是进行古地温反演的必要约束条件,今、古地温的研究是密不可分的。现今地温场受岩石圈结构、盆地构造性质、盆地结构等控制^[1~4]。

根据以前钻井和近年来所钻新井的测温资料,计算了各凹陷的平均地温梯度。所利用的测温数值全部为连续测温,静井时间长,测井深度最深可达 4 015 m,各钻孔的温度-深度线性关系好(图 1)。就地温梯度而言,济源凹陷济参 1 井为每百米 2.63℃,邓 5 井为每百米 3.69℃,郭 1 井为每百米 2.42℃,平均为每百米 2.91℃。中牟凹陷开深 1 井为每百米 2.54℃,中 1 井为每百米 2.11℃,平均为每百米 2.33℃。黄口凹陷丰参 1 井为每百米 2.64℃,商 1 井为每百米 2.85℃,平均为每百米 2.75℃。

从测温资料来看,济源凹陷地温梯度最高,黄口凹陷居中,而中牟凹陷最低。南华北盆地济源-中牟-黄口坳陷带本身是一个受边界断裂控制的第三纪地堑构造,与相邻的渤海湾盆地类似。

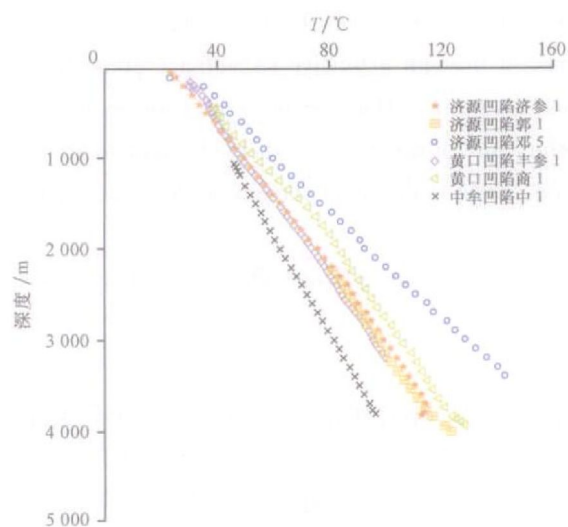


图 1 济源-中牟-黄口坳陷带地层测温与井深
Fig. 1 Measured temperature vs well depth in the
Jiyuan-Zhongmou-Huangkou depression belt

但地温梯度值明显低于渤海湾盆地平均每百米 3.3℃的地温梯度^[5],反映了形成构造背景的差异。

南华北盆地济源-中牟-黄口坳陷带,除受由于亚洲大陆与库拉-太平洋板块之间发生近南北向左行剪切平移运动产生的北北东向断裂控制外,还兼受中生代由于秦岭造山带陆内造山推挤而生成的北西西向断裂的控制。在第三纪古新世末-始新世初,包括本区在内的华北东部地区在太平洋板块弧后扩张作用和印度次大陆北推在中国东、西部之间产生的近南北向右旋剪切作用下发生地堑断陷,与已形成的北北东向和北西西向两组断裂、相互牵制、相互影响,没有充分的拉开,形成的地堑面积小,沉积环境不稳定,油气资源分散,地幔隆起幅度小,热流值低,不利于生油岩的成熟和转化。而渤海湾盆地主要受中生代亚洲大陆与库拉太平洋板块之间近南北向左旋剪切平移运动产生的北北东-北东向断裂的控制,第三纪北西-东南向拉张作用下,渤海湾盆地北东、北北东向断裂与拉张方向近于垂直,产生了最大拉张量、地壳明显减薄、形成的地堑面积大、沉积环境稳定、油气资源丰富。地幔隆起幅度大,地温梯度高,热流值大,有利于生油岩的成熟和转化。

1.2 济源-中牟-黄口坳陷带热演化程度对比分析

镜质体反射率(R_o)作为热成熟度的指标,已在盆地综合分析和油气勘探中得到了广泛的应用^[1,6~11]。济源凹陷不同构造单元 R_o 值随深度变化规律不同,中央隆起带和南、北两次凹的变化规律不同。邓 2 井、豫深 2 井位于中央隆起区,邓 5 井、济参 1 井更靠近南部次凹,可分别代表中央隆起和南部次凹 R_o 值随深度的变化规律,在 3 100 m 深度,南部次凹邓 5 井的 R_o 值约为 1.2%,而中央隆起上相同埋深的 R_o 值为 2.0%,明显较大(图 2)。济源凹陷受燕山运动以来多期构造运动的影响,断裂十分发育,豫深 2 井位于中央隆起后构造带上,受 NE 向切割基底的二级张性断裂带影响,演化程度高。从 R_o 值与埋藏深度的关系判定,中央隆起带古近系与新近系之间为欠补偿,说明新近纪以来剥蚀较大。

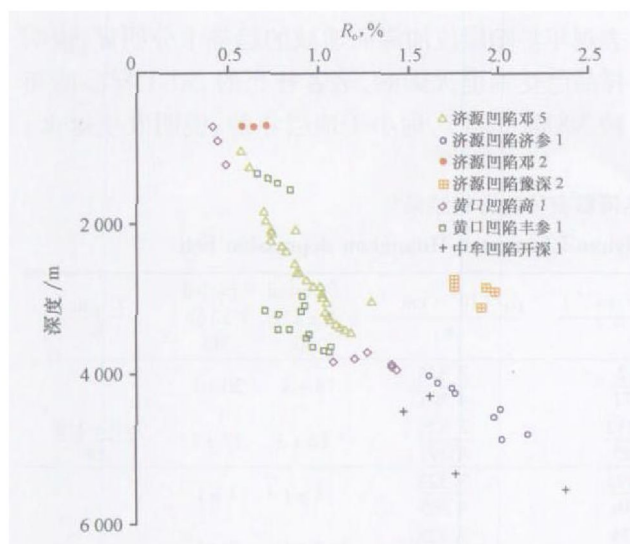


图 2 济源-中牟-黄口坳陷带镜质体反射率与深度

Fig. 2 Vitrinite reflectance vs. depth in the Jiyuan-Zhongmou-Huangkou depression belt

中牟凹陷 R_o 测试结果较少, 主要是采用东吴次凹开深 1 井古近系孔店组的 4 个 R_o 测点值, R_o 值变化为 1.48% ~ 2.37%, 随深度增加 R_o 值增大。黄口凹陷商 1 井和丰参 1 井 R_o 资料较全, 但丰参 1 井 R_o 资料较分散。总体上, 随着埋深增大, R_o 值逐渐增加, 从沙河街组三段的 0.4% 增加到石炭-二叠系的 1.4%。当 R_o 为 0.5% 时, 埋深为 1243.7 m。比较济源、黄口、中牟凹陷, 黄口凹陷 R_o 值随深度变化曲线梯度较小。

济源-中牟-黄口坳陷带不同构造单元演化程度差异较大, 根据不同构造单元 R_o 与深度的关系, 建立现今埋藏深度和 R_o 值的回归方程, 结合石炭-二叠系顶面构造图, 准确绘制了石炭-二叠系

顶面 R_o 平面分布图 (图 3)。

从济源-中牟-黄口坳陷带石炭-二叠系顶面 R_o 值平面分布图可以看到济源凹陷中央隆起带的 R_o 值相对较高, R_o 值分布在 2.0% ~ 2.6%; 南、北两次凹具有相同的变化规律, 由隆起区向南北次凹, 随着埋藏深度的增加, R_o 值由 3.2% 逐渐增加到 4.4%; R_o 值最高区分布在南、北次凹的最深部位。济源凹陷石炭-二叠系顶面 R_o 值高, 已达过成熟干气演化阶段。中牟凹陷构造复杂, 各次凹埋深差别大。石炭-二叠纪地层随着埋深的增加, 热演化程度增加, R_o 值分异性大, 主要分布为 1.3% ~ 3.8%, 热演化程度高, 已达高成熟-过成熟阶段。在东吴次凹石炭-二叠纪地层 R_o 值最高, 最高可达 3.8%; 原阳次凹和杜营次凹的 R_o 最大值可以达到 3.2%。黄口凹陷石炭-二叠系顶面 R_o 值平面分布具有南低北高的特点, R_o 值分布为 0.8% ~ 2.0%, R_o 值最高处靠近凹陷北部断裂带, R_o 值最大值可达 2.3%。

1.3 不同构造单元主要热演化阶段古地温梯度的恢复

济源-中牟-黄口坳陷带不同构造单元由于构造演化历史的不同, 古、今地温差异很大, 深入研究不同构造单元的古地温及其演化对烃源岩生烃研究有重要意义。不同古地温研究方法估算的古地温有一些差异^[1, 6~11], 本文选用磷灰石裂变径迹分析^[1, 11~14]、矿物包裹体测温^[15]以及 Easy% R_o 数值模拟^[6~11]等方法, 分析测试不同构造单元代表性样品, 结合沉积演化史对古生界古、今地温场进

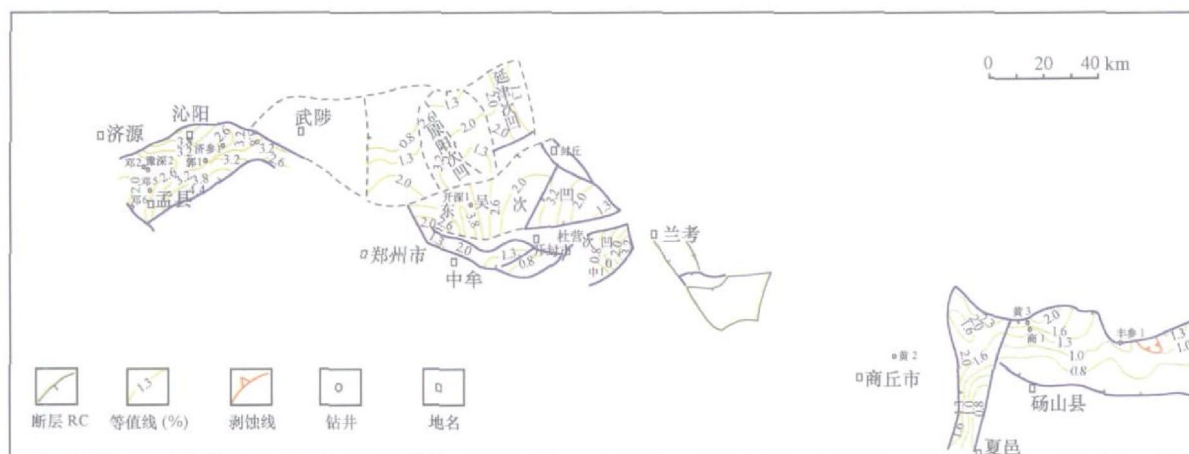


图 3 济源-中牟-黄口坳陷带石炭-二叠系顶面镜质体反射率等值线

Fig. 3 Contour of vitrinite reflectance on top of the Permian-Carboniferous in the Jiyuan-Zhongmou-Huangkou depression belt

行对比分析,来恢复古地温演化史。表观年龄随层位加深而递减的趋势十分明显,说明样品已受到退火影响,笔者补充的 gu1-1 样品的年龄为 8Ma(表 1),远小于地层年龄,说明发生退火;

结合济源凹陷前人裂变径迹样品的结果^[16],邓 2 井古近系样品测得的年龄均为 135~ 124 Ma

表 1 济源-中牟-黄口坳陷带裂变径迹分析结果

Table 1 Result of apatite fission track in the Jiyuan-Zhongnong-Huangkou depression belt

构造单元	井号	层位	颗粒数 / 颗	$\rho_s / (10^5 \cdot \text{cm}^{-1})$ n_s	$\rho_i / (10^5 \cdot \text{cm}^{-1})$ n_i	$\rho_d / (10^5 \cdot \text{cm}^{-1})$ n_d	(Central $T \pm 1$) / Ma	(Pooled $T \pm 1$) / Ma	$L / \mu\text{m}$ n
济源	gu1-1	J ₂	19	$\frac{2.044}{368}$	$\frac{13.2}{2\,377}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	8 ± 3	20 ± 1	
	zl-1	E _s	22	$\frac{1.476}{162}$	$\frac{11.712}{1\,285}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	16 ± 3	17 ± 1	$\frac{8.9 \pm 2.0}{58}$
中牟	zl-3	E _s	18	$\frac{0.53}{81}$	$\frac{15.992}{2\,446}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	5 ± 1	4 ± 1	
	zl-4	E _s	27	$\frac{0.38}{81}$	$\frac{9.574}{2\,416}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	4 ± 1	5 ± 1	
黄口	sl-3	E	17	$\frac{2.945}{557}$	$\frac{19.758}{3\,737}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	17 ± 2	20 ± 1	$\frac{10.9 \pm 2.3}{104}$
	sl-5	K	19	$\frac{1.183}{266}$	$\frac{14.339}{3\,224}$	$\frac{7.325}{4\,395}$	10 ± 1	11 ± 1	

注: ρ_s . 矿物中 ^{238}U 自发裂变径迹密度; n_s . 测定的自发裂变径迹条数; ρ_i . 矿物中 ^{238}U 诱发裂变径迹密度; n_i . 测定的诱发裂变径迹条数; ρ_d . 标准玻璃的诱发裂变径迹密度; n_d . 标准玻璃的诱发裂变径迹条数; Central T . 中值年龄; Pooled T . 总体年龄; L . 平均径迹长度; n . 测量的径迹数。

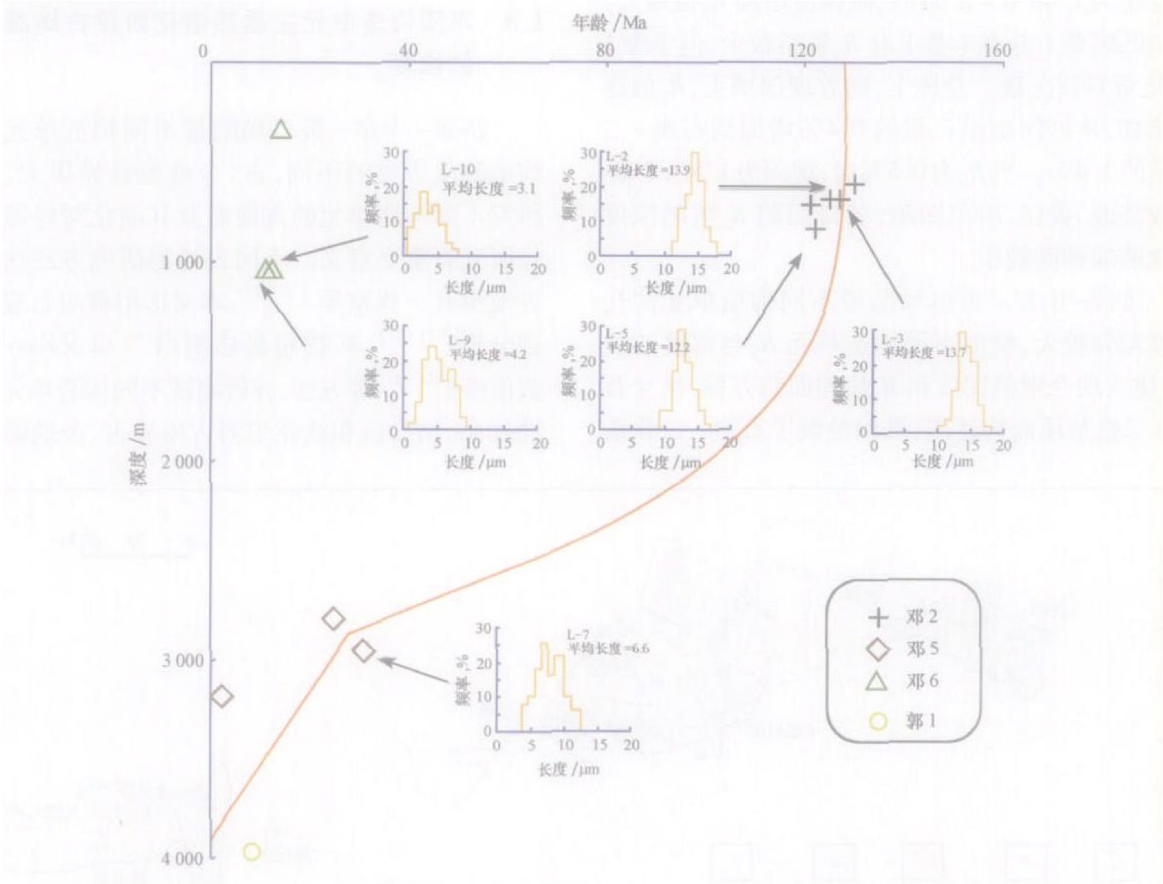


图 4 济源凹陷裂变径迹年龄与深度关系

Fig. 4 Apatite fission track age (AFTA) vs depth in Jiyuan depression

表 2 济源- 中牟- 黄口坳陷带流体包裹体分析结果
Table 2 Analysis of fluid inclusions from the Jiyuan-Zhongnong-Huangkou depression belt

构造单元	编 号	层 位	包裹体数 /个	岩 性	宿主矿物	包裹体类型	均一温度 /℃
济源	d6-3	T	2	砂岩	石英裂隙	盐水	89. 9, 106. 9
	jc1-1	J	4	砂岩	石英裂隙	盐水	137. 6, 137. 6, 137. 6, 155. 2
	jc1-3	E	4	细砂岩	石英裂隙	盐水	168. 9, 175, 175, 230. 6
中牟	z1-3	Es	5	砂岩	石英裂隙	盐水	212. 5, 220. 4, 220. 4
	z1-4	Es	2	砂岩	石英裂隙	盐水	189. 6, 191. 7
	ks1-1	Es	4	砂岩	石英裂隙	盐水	202. 8, 202. 8, 220, 220
黄口	s1-3	E	4	砂岩	石英裂缝	盐水	193. 7, 193. 7, 195. 8, 197. 3
	s1-5	K	3	砂岩	石英裂缝	盐水	194. 5, 197. 6, 197. 6

根据磷灰石裂变径迹年龄与深度的关系判定退火带为 1 000~ 2 800 m, 退火温度为 70~ 130℃ (图 4); 分析济源凹陷的有机包裹体测温资料 (表 2), 古近纪以来形成的包裹体, 均一温度多超过 150℃; 采用 Easy% R_o 法, 根据实测 R_o 值, 对济源凹陷 4口井 (分别位于隆起与次凹) 进行数值模拟, 反演各地质演化阶段的热史, 计算的济源凹陷古地温梯度为每百米 3. 3℃, 古近纪地温梯度比现今略高。不同的方法分析得到的古地温与济源凹陷现今地温进行对比, 发现济源凹陷古地温总体上明显高于现今地温, 表明济源凹陷受喜山运动的影响, 抬升剥蚀。

在中牟凹陷 2 800~ 3 600 m 处的 3个磷灰石裂变径迹样品都已退火, 退火温度为 100~ 130℃ (表 1); 分析中牟凹陷的有机包裹体测温资料 (表 2), 古近纪以来形成的包裹体, 均一温度多超过 180℃; 中牟凹陷 R_o 测试结果较少, 开深 1井古近系的孔店组的 4个测点 R_o 值, 变化为 1. 48~ 2. 37, 采用 Easy% R_o 法进行数值模拟, 最后计算的中牟凹陷古地温梯度为每百米 3. 5℃。

黄口凹陷商 1井作了第三系及白垩系两个裂变径迹样品分析, 样品都已退火, 古温度约在 100~ 125℃ (表 1); 分析黄口凹陷的有机包裹体测温资料 (表 2), 均一温度主要分布在 190℃左右; 采用 Easy% R_o 法, 根据实测 R_o 值进行数值模拟。总体而言, 黄口凹陷古地温稍高于今地温, 计算的古近纪末黄口凹陷古地温梯度为每百米 3. 16℃。

2 热演化史恢复

根据济源- 中牟- 黄口坳陷带沉积构造演化

史, 将古地温梯度演化趋势及关键点的古地温梯度作为重要的约束条件, 采用 Easy% R_o 法对各构造单元进行了热史模拟, 使计算的 R_o 值与实测 R_o 资料达到最佳拟合状态为止 (图 5)。

济源凹陷中央隆起带古地温梯度及热流演化趋势与区域演化规律一致 (图 5a)。石炭- 二叠系烃源岩最高热演化程度是在古近纪达到的, 新近纪以来处于抬升降温阶段。古生代地层自沉积以来, 虽然有小的剥蚀, 总体而言地层连续沉积, 中生代- 古近纪持续增温随着沉积厚度不断增加, 古生代地层温度不断升高, 新近纪以来抬升剥蚀, 古生代地层温度降低。济源凹陷南、北次凹古近纪沉积厚度大 (图 5b), 新近纪以来沉积厚度小。石炭- 二叠系虽然现今处于最大埋深, 但由于古近纪地温梯度高, 石炭- 二叠系在古近纪达到最大古地温, 古生代地层自沉积以来, 虽然有小的剥蚀, 总体而言地层连续沉积, 古生代地层温度不断升高。

中牟凹陷 R_o 测试结果较少, 开深 1井古近系孔店组有 R_o 值, 对开深 1井热史模拟结果古地温梯度和热流演化与区域演化趋势

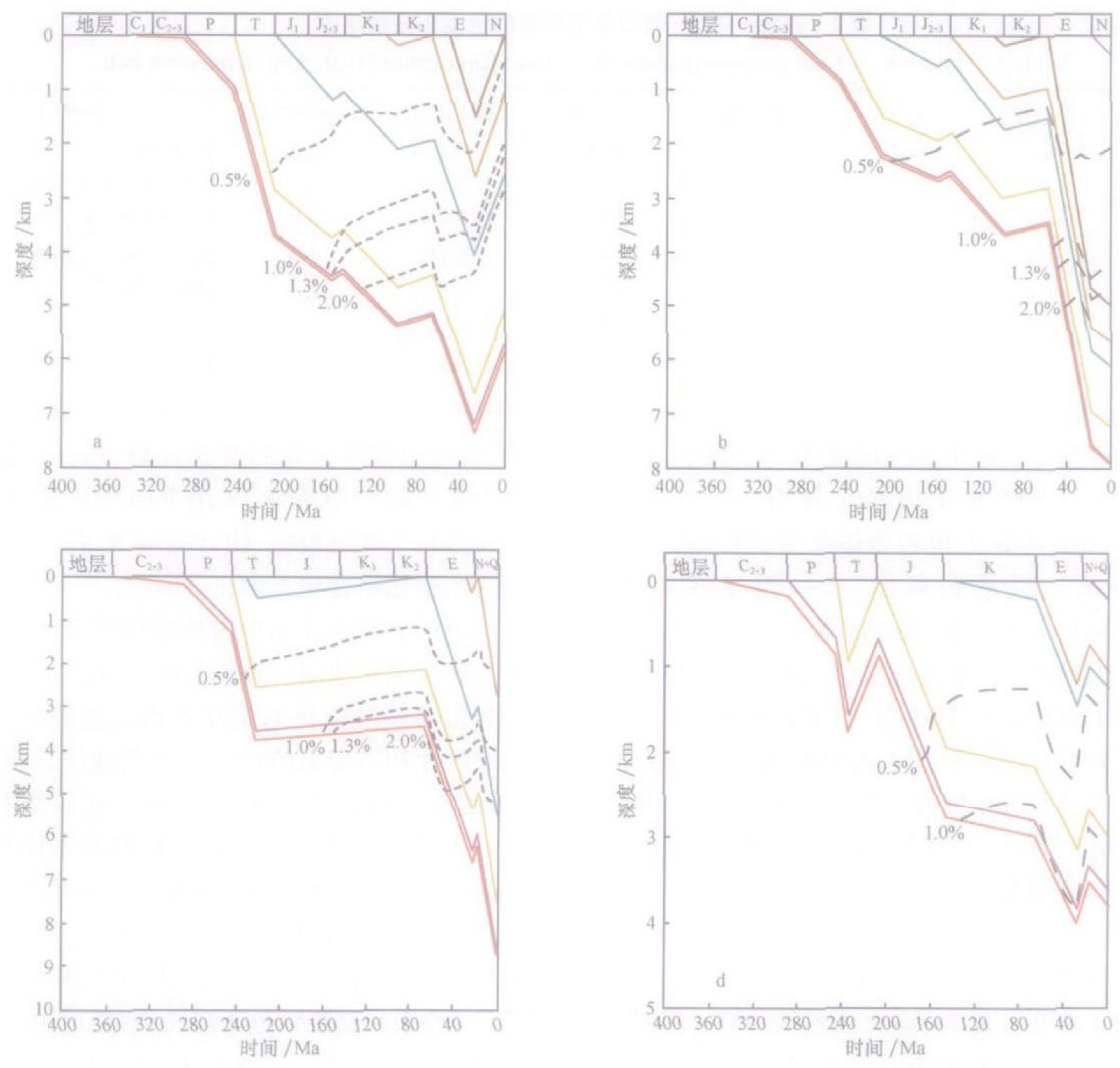


图 5 济源-中牟-黄口坳陷带不同构造单元热演化史
Fig. 5 Thermal history of different tectonic units in Jiyuan-Zhongnong-Huangkou depression belt

强烈时期相对应。而新生代地温梯度及大地热流值逐渐降低则对应华北裂谷系从裂陷发展至坳陷的演化阶段。

3 盆地热演化史与油气的关系

济源-中牟-黄口坳陷带上古生界烃源岩自沉积以来,经历了复杂的构造热演化历史,不同构造单元由于构造演化历史不同,造成上古生界烃源岩的埋藏史、热演化史和成藏条件的差异。济源-中牟-黄口坳陷带不同的构造单元上古生界烃源岩在中三叠世之前,由于有相似的埋藏历史和地温场特征而具有相似的热演化历史,上古生界烃源岩热演化史的差异主要在三叠纪之后,导致了上古生界烃源岩热演化程度在各构造单元的

差异。
印支期属于正常地温场一次生烃阶段。自中石炭世开始,本区再次沉降,普遍沉积了石炭-三叠系,上古生界煤系埋深不断加大,至三叠纪末期埋深达 2 800~ 3 500 m,地温梯度较低,煤系地层 R_o 达 0.65% ~ 0.8%。济源凹陷、中牟凹陷上古生界有机质在三叠纪末期演化程度较高,成熟度 R_o 范围为 0.5% ~ 1.0%,成熟度普遍超过 0.5%,处于成熟早期,而中心部位达到 1.0%,进入生油高峰期。
三叠纪之后,济源凹陷没有抬升或轻微抬升,之后连续沉积中、新生界地层,上古生界烃源岩演化至过成熟阶段, R_o 达 2.5% 以上,侏罗纪-新生代为主要生烃期。中牟凹陷中生代晚期未沉积侏罗、白垩纪地层,处于抬升降温过程。喜

马拉雅期发生差异性断隆作用,在断陷区,古生界源岩再次被深埋至 4 000~10 000 m,演化至高成熟-过成熟阶段;该阶段是石炭-二叠系烃源岩的二次生气期,也是最为有效的生气期。新生代以来沉降幅度大,随着沉积厚度不断增加,古生代地层温度不断升高。中牟凹陷古生代地层主要沉降期和生烃期为第三纪,有利于油气藏的形成。黄口凹陷燕山运动中期,沉积了一定厚度的侏罗-白垩纪地层,古近纪末期上古生界烃源岩演化至成熟阶段,大量生烃,晚始新世再度沉降,但由于沉降幅度小,热演化程度低,不利于天然气的大量生成。

从热演化史来看,济源-中牟-黄口凹陷带上古生界烃源岩主要有两次生烃期,印支期属于正常地温场一次生烃阶段,二次生烃主要在喜马拉雅期,成熟度水平普遍达到 1.3% 以上,基本上只有气态烃的生成。其中中牟凹陷是二次生烃的最有利地区。

4 结论

1) 济源凹陷平均地温梯度为每百米 2.91℃,中牟凹陷平均为每百米 2.33℃,黄口凹陷平均为 2.75℃,低于渤海湾盆地平均地温梯度为每百米 3.3℃;反映其在形成机制与渤海湾盆地的不同。

2) 济源凹陷中央隆起带石炭-二叠系烃源岩最高热演化程度是在古近纪达到的,新近纪以来处于抬升降温阶段。济源凹陷南、北次凹古生代地层自沉积以来,地层连续沉积,石炭-二叠系烃源岩虽然现今处于最大埋深,但新近纪以来沉积厚度小,古近纪地温梯度高,总体而言,古生界温度不断升高。中牟凹陷烃源岩第三纪以来沉降幅度大,达到最高热演化程度。黄口凹陷石炭-二叠系烃源岩在侏罗纪末期开始生烃,早白垩世-古近纪达到最大演化程度。

3) 济源凹陷上古生界烃源岩演化至过成熟阶段, R_o 达 2.5% 以上,以气态烃为主,侏罗纪-古近纪为主要生烃期;中牟凹陷新生代以来沉降幅度大,古生代地层温度不断升高,主要生烃期为古近纪,也是最为有效的生气期;济源凹陷、中牟凹陷上古生界烃源岩主要生成天然气;而黄口凹陷

在侏罗纪末期开始达到生烃门限,早白垩世-古近纪大量生成液态烃,但由于晚始新世沉降幅度小,烃源岩热演化程度低,不利于天然气的大量生成。

参 考 文 献

- 1 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 5~14
- 2 程本和. 济阳拗陷沾化东区现今地温场及热历史 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(2): 238~244
- 3 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 等. 渤海湾盆地大地热流分布特征 [J]. 科学通报, 2002, 47(2): 151~155
- 4 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳凹陷地温场分布特征 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 652~658
- 5 肖卫勇, 王良书, 李华, 等. 渤海盆地地温场研究 [J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(2): 105~110
- 6 任战利. 沉积盆地热演化史研究新进展 [J]. 地球科学进展, 1992, 7(3): 43~49
- 7 Barker C E, Goldstein R H. A fluid inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer [J]. Geology, 1990, 18: 1003~1006
- 8 Tissot B P, Pelet R, Ungerer P. Thermal history of sedimentary basins: maturation indices and kinetics of oil and gas generation [J]. AAPG Bulletin, 71(12): 1445~1466
- 9 魏志彬, 张大江, 许怀先, 等. EASY% R_o 模型在我国西部中生代盆地热史研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 43~46
- 10 Uysal I T, Glikson M, Golding S D, et al. The thermal history of the Bowen basin, Queensland, Australia: vitrinite reflectance and clay mineralogy of Late Permian coal measures [J]. Tectonophysics, 2000, 323: 105~129
- 11 施小斌, 汪集旸, 罗晓容. 古温标重建盆地热史的能力探讨 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 386~392
- 12 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
- 13 Green P F, Duddy I R, Gleadon A J W, et al. Apatite fission track analysis as a paleotemperature indicator for hydrocarbon exploration [J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(2): 41~62
- 14 Duddy I R, Green P F, Laslett G M. Thermal annealing of fission tracks in apatite: variable temperature behaviours [J]. Chemical Geology, 1988, 7(3): 25~38
- 15 王红军, 蔡迎春. 流体包裹体常规特征在油气成藏研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 43~46
- 16 赵伟卫, 金强, 王伟峰. 华北盆地济源凹陷古地温梯度的研究——