

文章编号: 0253-2697(2012)01-0001-17

中国含油气盆地地温-地压系统

刘 震¹ 朱文奇¹ 孙 强¹ 金 博² 许晓明³ 张厚福¹

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

2. 中国石油长城钻探工程公司解释研究中心 北京 100101; 3. 中海油研究总院 北京 100027)

摘要:地温-地压系统作为盆地流体动力场的耦合,直接控制着油气的运移和聚集。在中国不同类型含油气盆地中,地温-地压系统特征存在很大差异,依据含油气盆地深部和浅部温压系统的斜率关系,划分出 3 大类地温-地压系统模式:高压型复式温压系统模式(浅部地层压力为静水压力、深度地层压力表现为高压异常)、低压型复式温压系统模式(浅部地层压力为静水压力、深度地层压力表现为低压异常)和单一型温压系统模式(浅部与深部地层压力均为静水压力)。高压型复式温压系统内,浅层系统的斜率分布范围较窄,地区差异小;深层系统的斜率分布范围很宽,地区差异较大。低压型复式温压系统内,浅层系统的斜率分布范围较宽,地区差异很大;深层系统的斜率分布范围较窄,地区差异相对较小。单一型温压系统深、浅层系统的斜率一致且分布比较集中,地区差异不明显。地温-地压系统特征分析表明,高压型复式温压系统内深浅部地层连通性很差,在垂向断裂附近,深层流体向上运移动力很强;低压型复式温压系统内深浅部地层连通性较差,在垂向断裂附近,浅层流体具有向下运移的趋势;单一型温压系统内深浅部地层连通性很好,流体垂向运移动力不足。在中国 3 大类含油气盆地中,伸展型盆地主要发育高压型复式温压系统,低压型复式温压系统次之;挤压型盆地以高压型复式温压系统为主,也有低压型复式温压系统发育;克拉通盆地发育低压型复式温压系统或高压型复式温压系统。

关键词:中国;含油气盆地;复式地温-地压系统;温压系统斜率;油气运移

中图分类号:TE112

文献标识码:A

Characteristics of geotemperature-geopressure systems in petroliferous basins of China

LIU Zhen¹ ZHU Wenqi¹ SUN Qiang¹ JIN Bo² XU Xiaoming³ ZHANG Houfu¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Geoscience Center, Greatwall Drilling Company, CNPC, Beijing 100101, China; 3. Research Institute,

China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China)

Abstract:As the coupling of hydrodynamic fields in petroliferous basins, a geotemperature-geopressure system (Geo-TPS) directly controls the migration and accumulation of oil and gas. Studies have showed that characteristics of the Geo-TPS in China differ greatly from one petroliferous basin to another. Based on the relationship of Geo-TPS slopes in shallow and deep formations, three types of Geo-TPS models were put forward: the high-pressure multiple Geo-TPS (HP-MGeo-TPS), the low-pressure multiple Geo-TPS (LP-MGeo-TPS) and the single Geo-TPS (S-Geo-TPS). As for the HP-MGeo-TPS, the slope range of the Geo-TPS is narrower in shallow formations but wider in deep formations. On the contrary, as for the LP-MGeo-TPS, the slope range of the Geo-TPS is wider in shallow formations but narrower in deep formations. And as for the S-Geo-TPS, the slope range of the Geo-TPS is relatively concentrated and regionally identical in both shallow and deep formations. A wider slope range indicates a big variation of the Geo-TPS with different basins, while a narrower slope range means a small change of the Geo-TPS with different basins. The difference of Geo-TPS characteristics suggests that a vertical connectedness in subsurface is better in the S-Geo-TPS than that either in the HP-MGeo-TPS or in the LP-MGeo-TPS. A poor connectedness may lead to an upward migration tendency of deep fluids in the HP-MGeo-TPS but a downward migration tendency of shallow fluids in the LP-MGeo-TPS along vertical fractures. Statistic data show that in China, both the HP-MGeo-TPS and the LP-MGeo-TPS develop well in extensional petroliferous basins; the HP-MGeo-TPS is more common than the LP-MGeo-TPS in compressional basins; and either the LP-MGeo-TPS or the HP-MGeo-TPS occurs in craton basins.

Key words:China; petroliferous basin; multiple geotemperature-geopressure system; slope of geotemperature-geopressure system; oil and gas migration

地层温度和地层压力是含油气盆地内控制油气生成、演化以及赋存状态的两个最基本的物理参数,油气藏就是有机质在这两个物理量参与并起主要作用的温

压场中演化形成的。地温和地压在油气藏形成的整个过程中并不是孤立作用的,而是相互联系、共同作用的,特别是现今的地温和地层压力对油气的分布起到

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219408)和国家重大科技专项(2008ZX05001 和 2008ZX05002)资助。

第一作者及通讯作者:刘 震,男,1963 年 2 月生,1990 年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事石油地质学和层序地层学基础研究和教学工作。E-mail:liuzhenjr@163.com

重要的控制作用。因此,在油气藏形成和分布的研究中应将两者有机地结合起来,这样才能获得对油气成藏过程更为客观的认识。

沉积盆地实际上是一个巨大的低温热化学反应器,地温是决定有机质成烃演化的最重要控制因素^[1-3]。Baybakov^[4]用220个油气藏的烃类状态与地层温度和压力的关系说明温度是控制烃类性质的主要因素。20世纪70年代,Walter^[5]用地温指标建立了“液态窗”概念,并认为世界上绝大多数液态烃出现在65.5~147℃的范围之内,进一步阐明了地温与烃类生成的关系。Lewis和Rose分析了高压(高孔隙带)和低压(低孔隙带)的地温特征^[6],指出隔热层具有高温高压特征而导热层则具有低温低压特性。Barker^[7]提出“水热增压效应”概念,即当地温梯度高于1.5℃/hm时,随着温度升高,封闭岩体内流体压力增大的速度比其外部流体压力增大的速度快,从而在其内部形成异常高压。

地层压力是地下流体动力场的最直接表达。在20世纪80年代提出的“含油气系统”概念中,Magoon^[8]就认为油气运移子系统主要受包括压力和温度合成关系在内的物理作用控制,而90年代的“流体压力封存箱”理论^[9]则将地下地层单元按地层压力划分为不同的水动力系统,不同的水动力系统之间靠密封层隔开,彼此间的流体压力不能相互连通。地下地层压力随埋深增加表现出各种不同的特征,可以是异常高压,或者是异常低压^[10-13],甚至是静水压力。在异常压力研究中,超压与油气分布的关系最为密切,全球约有三分之一的油气田表现出超压特征^[14]。但在低压系统中也可以发育各种油气藏^[15],异常低压流体封存箱的形成演化及负压的成因对低压油气藏的运聚成藏起着重要的控制作用。在中国各典型含油气盆地中异常地层压力普遍存在,不同类型的含油气盆地从古生代到新生代地层压力有增大的趋势^[16]。比较而言,前陆盆地多以异常高压油藏为主,克拉通盆地油藏压力多见低压或轻微超压,裂谷盆地异常低压油藏也有一定分布。

关于中国含油气盆地地温-地压系统研究,前人做了许多工作,取得了很有价值的认识^[17-26]。从前人的研究成果来看,中国含油气盆地温压系统比较复杂,不同盆地温压系统各有特点,同一盆地不同拗陷/凹陷,甚至同一拗陷/凹陷不同构造部位温压系统也各不相同。加之前人研究主要集中在某一个盆地、某一个凹陷或者某个构造部位,缺乏对不同类型盆地温压系统的对比分析和总结。笔者尝试通过对中国各主要含油气盆地地层温度和地层压力特征的分析,以及温压系统类型与地下

流体动力关系的研究,总结中国含油气盆地存在的基本温压系统类型并阐明不同类型温压系统的基本特征,从而为油气运移聚集规律研究提供动力学依据。

1 中国含油气盆地基本类型

含油气区划分的基本单元是沉积盆地^[27]。在对盆地分类研究中,国内外学者曾经提出过多种分类方案^[28-35]。同时,中国地质学家结合本国的油气勘探实践,对中国的含油气盆地的性质提出了各自的观点。李德生^[36]和张恺^[37]的观点比较接近,认为中国的含油气盆地具有明显的三分性:东部主要为拉张型盆地,以渤海湾盆地为代表;西部主要为挤压型盆地,如塔里木盆地、准噶尔盆地等;中部四川盆地、鄂尔多斯盆地则为过渡型盆地。金之钧等^[16]将中国典型含油气盆地分为三类:裂谷盆地(松辽盆地、渤海湾盆地济阳拗陷、准噶尔盆地腹部);前陆盆地(塔里木盆地库车拗陷、准噶尔盆地南缘山前拗陷、柴达木盆地西部山前);克拉通盆地[塔中隆起、塔北隆起、四川东部(古生界)、鄂尔多斯(早中生界)]。

在对中国含油气盆地类型划分的研究中,动力学机制始终是主导原则,各种其他分类方案都是在此基础上再考虑其他因素而提出的。所以,本次研究在参考前人研究的基础之上采用当前比较流行的盆地成因动力学分类方案,将中国中生代沉积盆地分为伸展型盆地(渤海湾盆地、二连盆地、松辽盆地、莺歌海盆地等)、挤压型盆地(塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地等)和克拉通盆地(鄂尔多斯盆地、四川盆地)三大类,并在各大类盆地中选取勘探程度较高、资料相对丰富的富油拗陷/凹陷,分别对其温压系统进行全面分析和深入的探讨。

2 地温-地压系统基本概念

如果把地下温度与地层压力作为一个整体,那么含油气盆地的地温-地压系统基本属于一种封闭系统。在这个系统内,地层温度与孔隙流体压力具有独特的关系,而相邻系统之间只有能量传递,而无物质交换,系统内的热能(由地温控制)和机械能(由地层压力控制)特征将影响地层孔隙中流体的温度-压力特性。将含油气盆地内部地层温度与地层压力耦合而成的这样一个封闭系统称为地温-地压系统。

在每一个这样的“封闭系统”内,地层温度与地层压力保持直线关系^[38],其数学表达式为

$$T = Kp + L$$

式中: T 为地层温度,℃; p 为地层压力,MPa; K 、 L 为常数。对于不同的温压系统,温压直线关系的斜率一

般不同。

含油气盆地在纵向上一般具有两个或两个以上的温压系统,通常包括一个浅层温压系统和至少一个深层温压系统,不同温压系统在纵向上表现出一种“折线模式”^[39-40]。浅层温压系统的地层压力呈正常静水压力状态,而深层温压系统的孔隙流体压力为异常压力,浅层温压系统与深层温压系统共同构成一个复式温压系统。沉积盆地存在 3 类温压系统,即高压型复式温压系统(浅部地层压力为静水压力,深部地层压力表现出高压异常)、低压型复式温压系统(浅部地层压力为静水压力,深部地层压力表现为低压异常)以及单一型温压系统(浅部和深部地层压力都为静水压力)。对于同一类型的含油气盆地,三大类地温-地压系统可能都存在。

3 伸展型盆地地温-地压系统

中国东部中生代断陷盆地非常发育,除渤海湾盆地、松辽盆地、二连盆地等大型富油断陷盆地外,众多的中小型断陷盆地也都具有极为丰富的油气资源。本次研究共分析了中国东部各大盆地中的 14 个主要富油凹陷,以及 3 个大陆边缘裂谷盆地的温压系统特征。研究发现中国伸展型盆地平均地温梯度较高,深层异常压力发育;温压系统类型以高压型复式温压系

统为主,低压型复式温压系统次之。

3.1 渤海湾盆地

渤海湾盆地位于华北板块东部,是在太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中华北板块东缘岩石圈伸展背景下形成的中生代陆相断陷—坳陷盆地,古近系是盆地内主要的含油层系。

3.1.1 地温特征

渤海湾盆地现今地温梯度整体较高。辽东湾地区地温梯度集中在 $2.5\sim 3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,平均 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [图 1(a)]。辽西低凸起地温梯度为 $3.2\sim 3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,明显高于辽中凹陷和辽西凹陷。东营凹陷现今平均地温梯度为 $3.59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [图 1(b)]。李善鹏等^[41]认为东营凹陷现今平均地温梯度为 $3.61\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,与杨绪充^[42]得出的 $3.60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 一致。陈墨香^[43]认为东营凹陷现今平均地温梯度更高一些,为 $3.70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,但差别不大,主要集中在 $3.5\sim 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。沾化凹陷现今平均地温梯度为 $3.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [图 1(c)],与东营凹陷接近。惠民凹陷现今平均地温梯度为 $3.2\sim 3.46\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [图 1(d)],主要集中在 $3.39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 左右,低于东营凹陷和沾化凹陷。大民屯凹陷现今地温梯度较低,平均地温梯度为 $2.92\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,各组地层具有较为统一的地温梯度[图 1(e)]^[44]。总体上看大民屯凹陷古近系平均地温梯度较辽河盆地西部、东部凹陷要低一些^[45]。

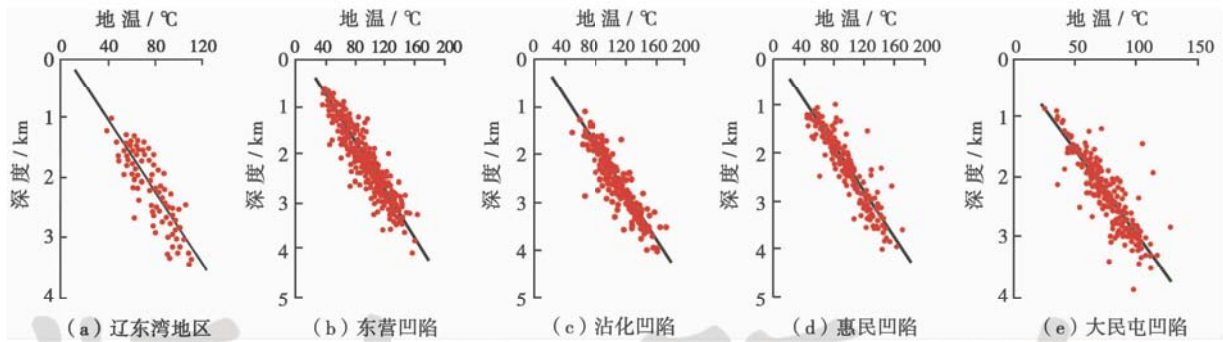


图 1 渤海湾盆地各凹陷地层温度与埋深关系

Fig. 1 Relationship between geotemperature and buried depth in different sags of Bohai Bay Basin

3.1.2 地层压力特征

渤海湾盆地各个凹陷纵向地层压力变化较大。辽东湾地区浅层为正常地层压力,深层超压明显,压力系数高达 1.9,超压起始深度为 2 100 m 左右[图 2(a)]。东营凹陷超压发育,以 2 200 m 深度为界[图 2(b)],上部为正常压力带,下部为超压发育带,压力系数可达 1.9,一般为 $0.9\sim 1.8$,但在不同地区其异常高压出现的深度存在较大差异。沾化凹陷沙河街组在 2 600 m 以上基本保持静水压力[图 2(c)],而在该界面之下开始出现异常高压,过剩压力为 $5\sim$

25 MPa,压力系数可达 1.7,一般在 $0.7\sim 1.8$,且超压的幅度随深度增加呈逐步增高之势。从层位上看,超压主要出现在沙三段、沙一段,二者之间及其上、下地层流体压力逐渐降低,趋于正常压力。惠民凹陷的临南洼陷具有明显的异常低压特征,压力系数在 1.0 附近较集中。从 1 300 m 压力系数开始出现压力系数小于 0.9 的点,但幅度较小,随埋深增加,压力系数小于 0.9 的点继续增加,变化幅度也有所增加,但仍在静水压力带附近较为集中,尽管局部出现高压点,但整体仍为负压特征[图 2(d)]。大民

屯凹陷现有钻井压力多属正常压力系统^[46], 深层出现低压异常[图2(e)], 低压幅度不大。纵向上, 沙三上亚段和中亚段上部为正常压力, 压力系数小于

1.2; 沙三中亚段下部大部分表现出弱低压异常到正常静水压力特征; 沙三下段和沙四段又回到正常静水压力附近。

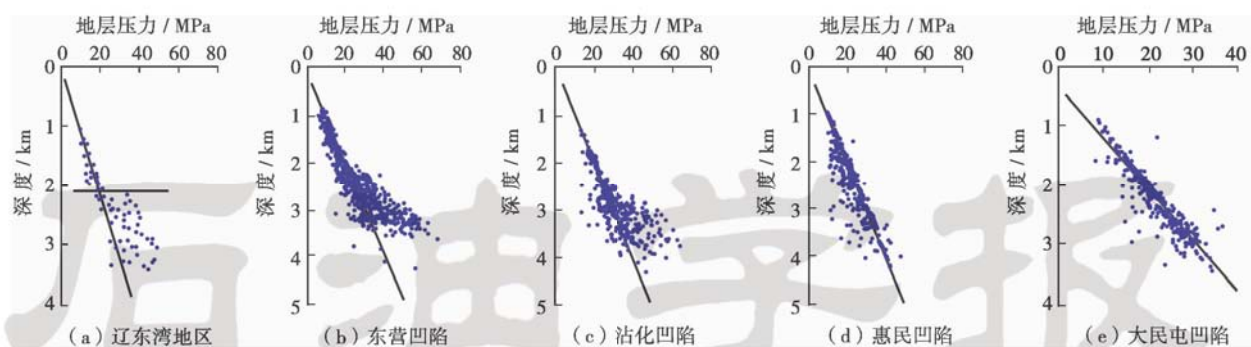


图2 渤海湾盆地各凹陷地层压力与埋深关系

Fig. 2 Relationship between geopressure and buried depth in different sags of Bohai Bay Basin

3.1.3 地温-地压系统特征

渤海湾盆地以高压型复式温压系统为主, 同时也发育低压型复式温压系统。辽东湾地区浅层为静压型温压系统, 斜率为0.41; 深层发育高压型温压系统, 斜率为1.09; 深浅层系统斜率比值为2.67, 在纵向上构成一个典型的强高压型复式温压系统[图3(a)]。东营凹陷和沾化凹陷分别以2200 m与2600 m为界, 浅层都发育静压型温压系统, 斜率分别

为0.27和0.24; 深层都发育高压型温压系统, 斜率分别为1.05和0.6; 深浅层系统斜率比值分别为3.85和2.53, 纵向上构成强高压型复式温压系统[图3(b)和(c)]。惠民凹陷表现为低压型复式温压系统特征[图3(d)], 以1300 m为界, 浅层发育静压型温压系统, 深部为低压型温压系统, 上下两个温压系统的直线斜率一致为0.27, 比值为1, 但错开较为明显, 属于左移式低压型复式温压系统。

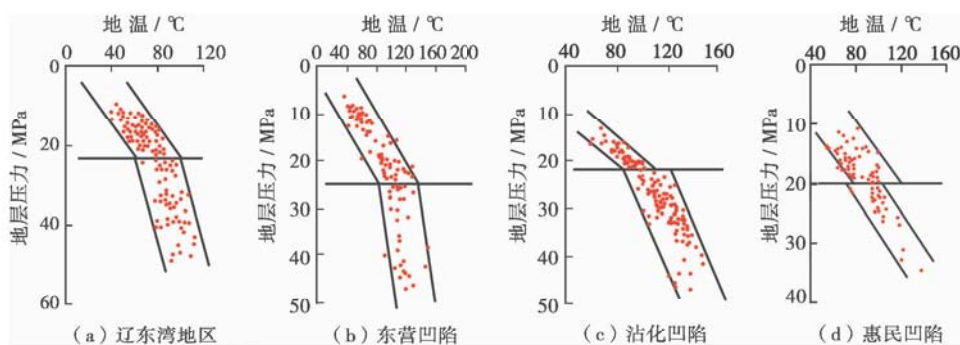


图3 渤海湾盆地各凹陷地温-地压系统类型

Fig. 3 Geotemperature-geopressure systems in different sags of Bohai Bay Basin

3.2 二连盆地

二连盆地构造上位于蒙古—兴安裂谷系中部, 是在海西褶皱基底和侏罗系残留盆地基础上发育起来的中新生代断陷沉积盆地, 下白垩统阿尔善组和腾格尔组为盆地主要烃源岩层, 白垩系是其主要的产油层系。

二连盆地大约在1000 m深度, 地温为37~55℃, 平均45℃, 平均地温梯度约为3.0℃/hm; 2000 m深度, 地温为78~88℃, 平均地温梯度3.8℃/hm; 3000 m深度, 地温约115℃, 平均地温梯度为3.2℃/hm。即腾

格尔组地温梯度较高, 而在浅层和深层地温梯度相对偏低。从全区来看, 乌里雅斯太凹陷地温梯度相对较高, 而巴音都兰凹陷和阿南凹陷地温梯度相对较低(图4)。

二连盆地整体上为静水压力体系—低压体系, 以弱低压体系为主(图5)。异常低压出现的深度在不同的凹陷略有不同, 最浅的为阿南凹陷, 在770 m左右就出现了异常低压, 最深的为乌里雅斯太凹陷, 在1350 m左右开始出现异常低压。由于压力体系以低压为主, 因此二连盆地整体上垂向油气运移动力不强, 油气基本上在浮力作用下以顺层运移为主。

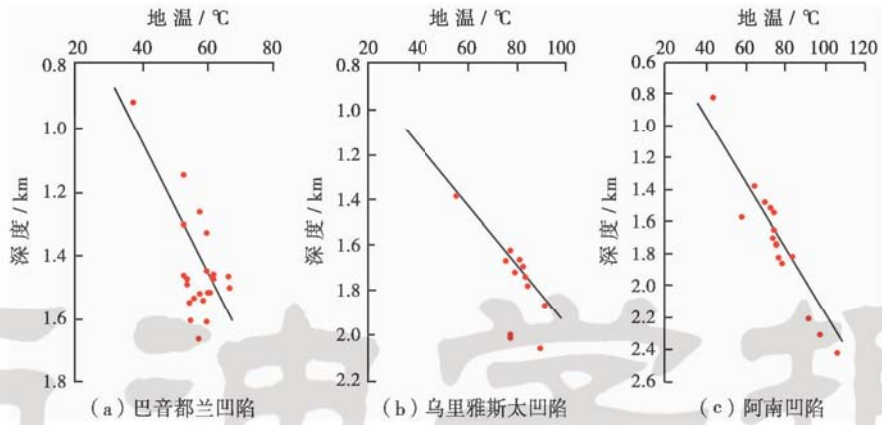


图 4 二连盆地重点凹陷地温与埋深关系
 Fig. 4 Relationship between geotemperature and buried depth in the major sags of Erlian Basin

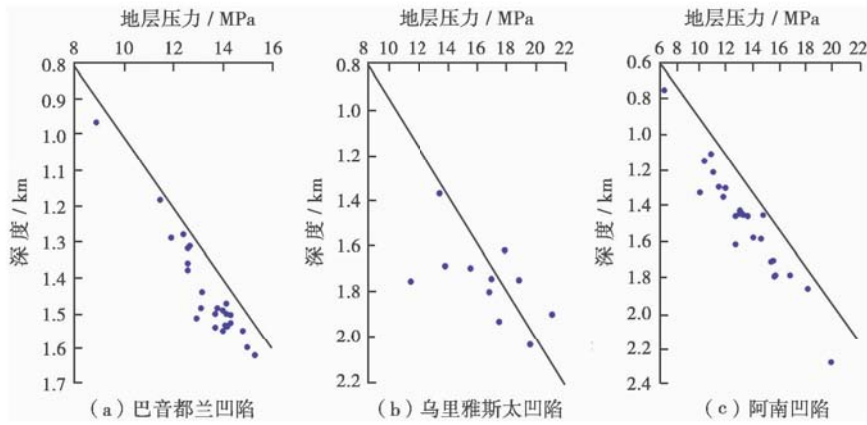


图 5 二连盆地重点凹陷地层压力与埋深关系
 Fig. 5 Relationship between geopressure and buried depth in the major sags of Erlian Basin

二连盆地深层实际上表现出低压型温压系统特征(图 6)。二连盆地 3 个主要富油凹陷巴音都兰凹陷、乌里雅斯太凹陷和阿南凹陷的深层温压系统斜率分别为 0.36、0.33 和 0.27,都小于低压型复式温压系统深层斜率的平均值 0.37;这 3 个凹陷深层温压系统的截距分别为 -6.85、-7.80 和 -5.10,都大于低压型复

式温压系统深层系统截距的平均值(高压型: -68.55; 低压型: -8.05;单一型: -14.42),所以二连盆地为典型的低压型复式温压系统。

3.3 松辽盆地西斜坡

松辽盆地位于东亚活动陆缘,南与华北板块相接,是晚中生代以来发育的大型陆内裂隙盆地,具有典型

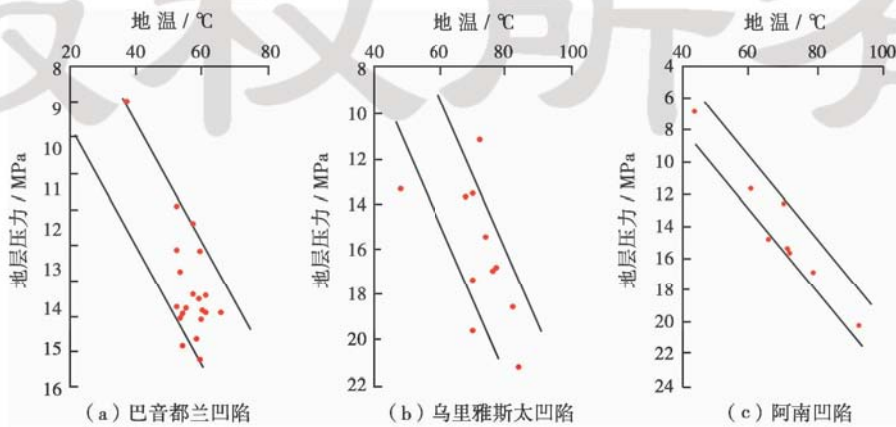


图 6 二连盆地重点凹陷地温-地压系统类型
 Fig. 6 Geotemperature-geopressure(Geo-TP) systems in the major sags of Erlian Basin

的断陷—坳陷复合结构,盆地内白垩纪—第三纪沉积的各种湖相碎屑岩是其最重要的含油层系。

松辽盆地主要生油区和产油区现今平均地温梯度为 $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,是中国大型盆地中地温梯度较高分布区之一。松辽盆地西斜坡现今地温梯度平均为 $4.65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [图 7(a)],高于松辽盆地全盆地现今平均地温梯度。地温梯度随深度变化的特征是浅处高,深处低。

在松辽盆地西斜坡白垩系地层中,大约 1700 m 处

有一个十分明显的压力界限[图 7(b)],其上为正常静水压力,实测压力点非常集中;其下发育异常高压,高压幅度相对较大。

松辽盆地西斜坡深浅层存在着两个明显的温压系统,以 1700 m 深度为界,其上静压型温压系统的斜率为 0.22,其下高压型温压系统的斜率为 0.69,深浅层温压系统斜率比值为 3.12,上下两个温压系统在纵向上构成一个典型的强高压型复式温压系统[图 7(c)]。

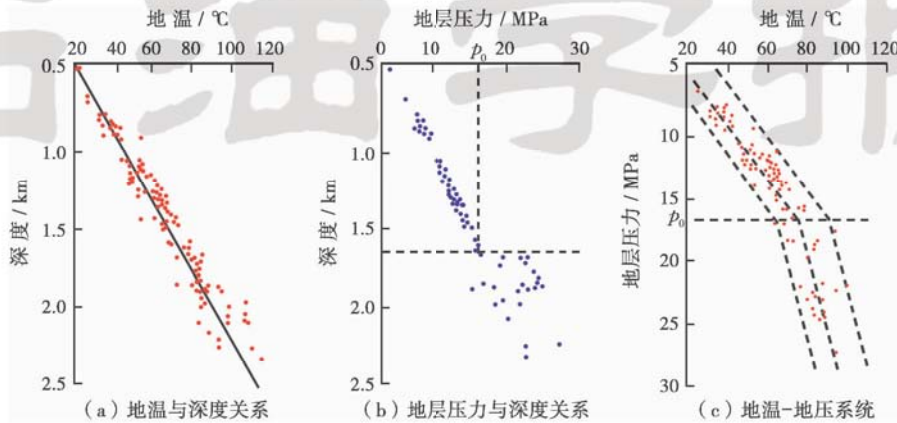


图 7 松辽盆地西斜坡地温、地层压力及地温-地压系统特征

Fig. 7 Characteristics of geotemperature,geopressure and Geo-TP system in western slope of Songliao Basin

3.4 伊通盆地莫里青断陷

伊通盆地位于郯庐断裂的北延部分,为第三系陆相断陷盆地。莫里青断陷位于伊通盆地南部,断陷内发育始新统双阳组和奢岭组两套烃源岩,其中双阳组为区内主力的生油层。

莫里青断陷地温梯度主要分布在 $3.2\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,平均为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。纵向上,在 2400 m 以上地温与埋深大致为直线关系,在 2400 m 以下低温点增多[图 8(a)],浅部的地温梯度高于深部,浅部地温梯度多大于 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,而深部地温梯度通常小于 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ [22]。总体上看,现今莫里青断陷具有相对较高的地温背景。

莫里青断陷以 2400 m 为界,其上基本为比正常静水压力偏低的低压段,压力系数多为 $0.7\sim 1.1$;其下为异常高压段,高压幅度相对较小,压力系数为 $1.1\sim 1.4$ [26] [图 8(b)]。

莫里青断陷发育弱高压型复式温压系统[图 8(c)] [22-23,26]。以 2400 m 为界,浅层的静压型温压系统斜率为 0.42,深层的高压型温压系统斜率为 0.96,深浅层温压系统斜率比值为 2.25;深层温压系统的截距为 -69.40 ,与高压型温压系统深层系统截距的平均值 -68.55 极为接近,上下两个温压系统在纵向上构成弱高压型复式温压系统。

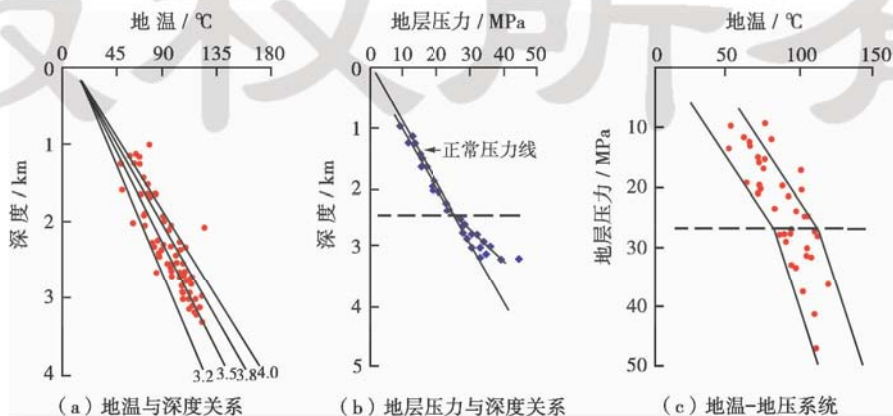


图 8 莫里青断陷地温、地层压力及地温-地压系统特征

Fig. 8 Characteristics of geotemperature,geopressure and Geo-TP system in Moliqing faulted depression

3.5 莺歌海盆地

莺歌海盆地位于中国南海北部大陆架上,走向西北,是在岩石圈拉伸和红河断裂走滑双重机制下形成的新生代转换—伸展盆地^[47]。莺歌海盆地沉积了巨厚海相泥岩,天然气资源丰富,是一个年轻的高温超压沉积盆地。

莺歌海盆地具有较高的地温梯度,实测地温梯度平均值高达 4.25~4.6℃/hm[图 9(a)]。

莺歌海盆地中央泥底辟带钻遇超压地层,压力系数可达 2.2[图 9(b)]。底辟带乐东区超压出现深度较

浅,超压顶界面最浅为 1 480 m;东方区超压顶面约为 2 200 m;非底辟区超压顶面为 3 000 m 左右;莺东斜坡带尚未钻遇异常地层压力,总体为正常压力。

莺歌海盆地中央泥底辟带发育弱高压型复式温压系统[图 9(c)],浅层静压型温压系统斜率为 0.44,深层高压型温压系统斜率为 1.06,深浅层温压系统斜率比值为 2.39;深层温压系统截距为 -82.77,小于高压型复式温压系统深层截距平均值。莺东斜坡带发育单一型温压系统[图 9(d)],温压直线斜率为 0.53,比值为 1。

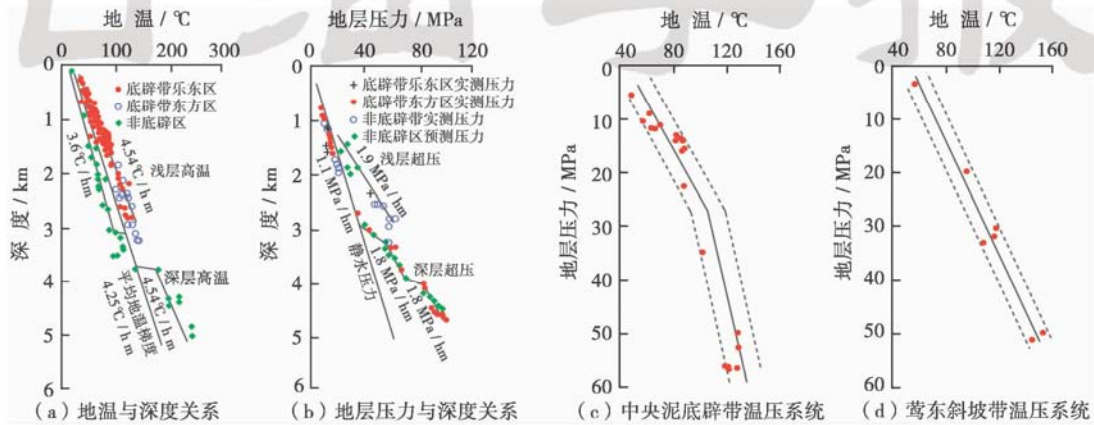


图 9 莺歌海盆地地温、地层压力及地温-地压系统特征

Fig. 9 Characteristics of geotemperature,geopressure and Geo-TP system in Yinggehai Basin

4 挤压型盆地地温-地压系统

受印度板块向北与欧亚板块碰撞,以及北部西伯利亚板块向南挤压的影响,中国西部主要为挤压型含油气盆地,位于各碰撞挤压带之间的有准噶尔、塔里木、柴达木和藏北等大型复合型盆地^[48]。中国西部挤压型盆地具有平均地温梯度低、深层异常压力发育和温压系统类型多样等基本特征。

4.1 地温特征

塔里木盆地的现今地温梯度普遍偏低,平均在 2.0℃/hm 左右^[49],属于低温冷盆,而且不同构造部位的地温梯度稍有差异。在塔北库车坳陷,地温梯度随

深度的增加而降低[图 10(a)],但在不同地质构造条件下其变化的速率不同。山前带的地温梯度较高,从山前带向南,地温梯度逐渐降低,主要分布在 1.8~2.8℃/hm^[50],平均 2.23℃/hm,略高于塔里木盆地的平均地温梯度。塔北隆起带的地温梯度为 1.72~2.0℃/hm^[51],平均约为 1.93℃/hm;满加尔凹陷现今地温梯度为 1.7~2.0℃/hm^[54],平均 1.82℃/hm;中央隆起区深部和浅部地温分布比较分散[图 10(b)],现今地温梯度变化范围较大,主要在 1.7~2.93℃/hm,平均为 2.33℃/hm;塔中凹陷区的地温梯度小于隆起区的梯度^[52]。虽然中央隆起区也表现为相对低温冷盆的热状态特征,但却是塔里木这一低温

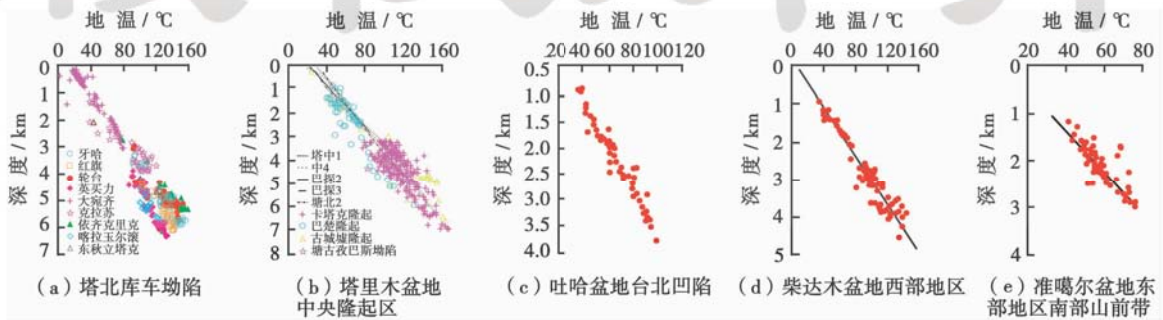


图 10 中国西部挤压型盆地地温与埋深关系

Fig. 10 Relationship between geotemperature and buried depth in compressional basins of western China

冷盆中的相对高温区。塔西南地区现今平均地温梯度为 2.1℃/hm 左右^[45]。

吐哈盆地台北凹陷深层和浅层地温梯度变化不大[图 10(c)],平均地温梯度只有 2.18℃/hm,而且地温分布相对较为集中,地温梯度相对较低。柴达木盆地西部地区地温梯度集中在 2.0~4.5℃/hm,平均值约为 3.1℃/hm[图 10(d)],相对于中国西部其他地区来说地温梯度较高。准噶尔盆地准东地区地温梯度值集中在 1.8~3.1℃/hm,平均地温梯度约为 2.6℃/hm,相对较低。其中南部山前带的地温最低,平均地温梯度为 2.2℃/hm[图 10(e)],属于低温区带。

4.2 地层压力特征

塔里木盆地库车坳陷异常压力十分发育,周兴熙^[53]将库车油气系统的中、新生界流体压力纵向上分为 3 个带[图 11(a)]:第四系和上新统的正常压力带;中新统和古近系的压力过渡带;以及中生界(包括古近系底部的砂岩段)的高压带(库车油气系统的北部)。塔里木盆地轮南地区和塔中地区现今仍保留有一定过剩压力,最大幅度值在轮南,为 20~30 MPa,而塔中地区仅 5~10 MPa[图 11(b)]^[54]。塔中地区在 3 500 m 附近石炭系底部有一个实测压力突变带,其上储层基本为静水压力,石炭系底油气藏则处于相对高压环境中^[55]。

吐哈盆地台北凹陷主力油田侏罗系地层在 2 500 m 以上呈现正常静水压力[图 11(c)],但 2 500~2 800 m 之间有一低压异常段,再往下地压又增加到正常静水压力梯度附近。

柴达木盆地西部地区在 2 300 m 深处开始出现异常高压[图 11(d)],最大压力系数可达 2.0。该区下干柴沟组下段压力系数在平面上呈现出以狮子沟油藏为高压中心,向四周呈环状逐渐降低的特征。上干柴沟组压力系数在平面上总体呈现北部高、南部尤其是西南部和东南部低的特征,在狮子沟、咸水泉及油泉子之间压力系数最高,并向四周降低,南部整体压力系数较低,但在绿草滩地区发育一局部次高压区。下油砂山组总体上压力系数不高,大部分为接近静水压力的常压区。

准噶尔盆地东部地区南部山前带为超压。超压的顶界比较明显,大约在 1 600 m 深度[图 11(e)],其上为静水压力,其下为超压,超压幅度非常大,最大超 30 MPa,压力系数高达 2.0。

4.3 地温-地压系统特征

吐哈盆地台北凹陷发育低压型复式温压系统[图 12(a)]:以 2 500 m 深度分界,上下两个温压系统斜率一致为 0.56,但错开明显,深层温压系统截距为 - 17.72,

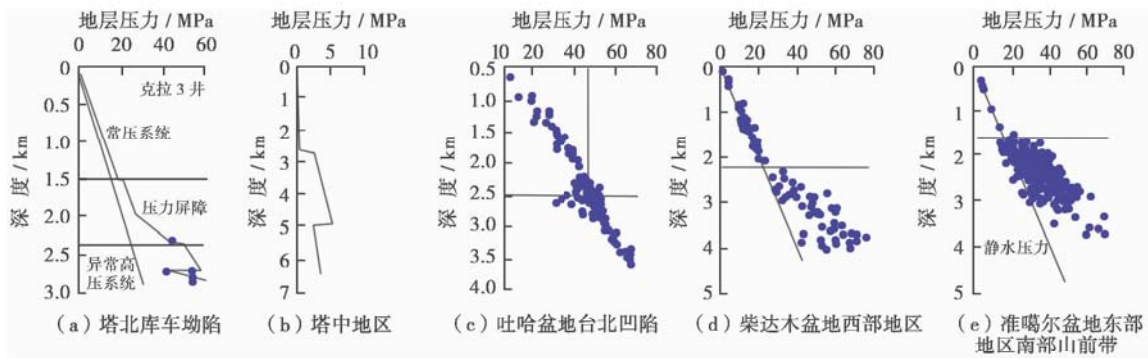


图 11 中国挤压型盆地地层压力与埋深关系

Fig. 11 Relationship between geopressure and buried depth in compressional basins of western China

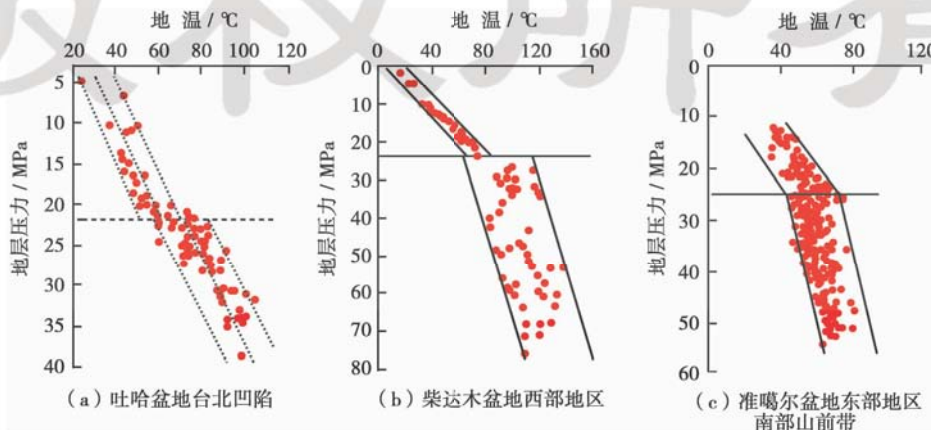


图 12 中国挤压型盆地地温-地压系统类型

Fig. 12 Geo-TP systems in compressional basins of western China

与单一型温压系统截距平均值 -14.42 接近,属于右移式低压型复式温压系统。柴达木盆地西部地区和准噶尔盆地南部山前带发育典型的高压型复式温压系统^[20][图 12(b)和(c)]。柴达木盆地西部地区以 2300 m 为界,浅层静压型温压系统斜率为 0.37,深层温压系统斜率为 1.16,深浅层系统斜率比值为 3.09,纵向上构成典型的强高压型复式温压系统;准东南部山前带温压关系在 1600 m 发生突变,浅层温压系统斜率为 0.50,深层温压系统斜率为 1.49,深浅层斜率比值为 2.99,纵向上构成典型的强高压型复式温压系统。

5 克拉通盆地地温-地压系统

中国中部主要发育克拉通盆地。鄂尔多斯盆地是发育在华北板块西部边缘的一个大型不稳定克拉通富油气盆地,晚二叠世开始发育陆相河湖沉积。太原组和山西组是盆地内主要气源岩系;上三叠统延长组和侏罗系延安组、直罗组、安定组是盆地内主要的含油层系。四川盆地是在扬子板块西部元古界变质基底上形成的一个大型克拉通盆地,晚三叠世由海相转变为陆相沉积。盆地震旦系、石炭系、二叠系及三叠系的海相碳酸盐岩是主要含气层系,上三叠统及侏罗系是主要的陆相含油层系。两大盆地平均地温梯度都较低,鄂尔多斯盆地表现出明显的低压特征,而四川盆地则普遍发育高压气藏。

5.1 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地地层温度随埋深增加而升高,呈稳定的直线关系[图 13(a)],表现出典型的传导型地温场特征。现今地温梯度主要集中在 2.5~3.0℃/hm,平均

为 2.8℃/hm,低于地壳平均地温梯度(3.0℃/hm)。在平面上,鄂尔多斯盆地东部的地温梯度高达 3.1℃/hm,向西则逐渐降低,至西缘逆冲带只有 2.4℃/hm。盆地南部黄陵地区现今地温梯度 2.6℃/hm,低于北部东胜地区的 2.9℃/hm^[56]。与中国其他各大盆地地温梯度相比,鄂尔多斯盆地总体上属于中温型地温场。

鄂尔多斯盆地地层压力绝大部分低于静水压力[图 13(b)],负压现象显著。负压现象从 200 m 左右时就开始出现,但幅度较小,随埋深的增加负压的幅度逐步增大。盆地东部上古生界地层目前处在常压状态,甚至有些地区处在负压状态,尤其是石千峰组,储层压力系数在 0.39~1.0;下石盒子组—山西组储层压力基本为静水压力,压力系数在 1.0~1.15^[57]。盆地北部杭锦旗地区,上古生界各层位地层压力系数在 0.75~0.87,均表现为明显的异常低压^[58]。盆地南部镇泾地区延长组储层均表现出低压—常压特征,压力系数一般在 0.55~1.01。

由于鄂尔多斯盆地早白垩世以后的剥蚀未得到补偿,加之后期地温梯度的下降,从而造成上古生界、中生界储层压力的降低。但三叠系延长组泥岩地层欠压实的普遍发育,证明泥岩仍保留着最大埋深时的压力状态。

鄂尔多斯盆地表现出一种特殊的低压型复式温压系统[图 13(c)];浅层静压型温压系统斜率比较大(1.18),深层温压系统斜率相对小的多(0.46),与单一型温压系统斜率平均值极为接近,深浅层斜率比值为 0.39,明显小于 1,纵向上构成特殊的低压型复式温压系统。由此可以看出,鄂尔多斯盆地的低压型复式温压系统实际上是由浅层的相对高压造成的。

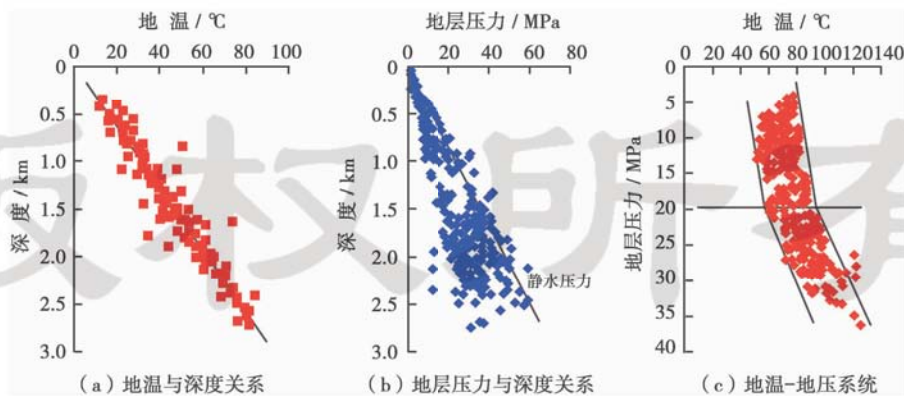


图 13 鄂尔多斯盆地延长组地温、地层压力及地温-地压系统特征

Fig. 13 Characteristics of geotemperature, geopressure and Geo-TP system of Yanchang Formation in Ordos Basin

5.2 四川盆地

四川盆地素以“冷盆”著称,现今地温梯度主要集中在 2.0~2.5℃/hm,而且横向上具有由盆地中心向边缘逐渐减小的趋势,如上三叠统现今地温梯度在川西坳陷为 1.93℃/hm,在川中隆起带为 2.44℃/hm^[59]。

盆地东部地区黄龙场、五百梯、渡口河等构造带二叠系长兴组现今地温梯度与三叠系飞仙关组相近,基本上为 1.9~2.7℃/hm[图 14(a)],平均值为 2.35℃/hm^[60]。成都坳陷地温梯度在 2.1℃/hm 左右,而且由南东向西北逐渐减小,川西北平均地温梯度在 2.2℃/hm 左

右^[61];川东北地区现今地温与深度具有很好的线性关系[图 14(b)],地温梯度为 1.8~2.5℃/hm,平均为 2.1℃/hm^[62]。

四川盆地东部地区黄龙场、五百梯等构造带长兴组气藏现今压力系数较大[图 14(c)],主要集中在 1.09~1.70,平均为 1.41,绝大多数在 1.2 以上,属于超压气藏。从平面分布特征上看,普光、罗家寨构造带现今地层基本为常压系统,压力系数在 1.0~1.2;温泉井和沙罐坪地区处于强超压区,压力系数基本在 1.6 以上;而黄龙场、五百梯构造带处于超压区,压力系数处于 1.2~1.6^[54]。四川盆地西北部地区自 2 800 m 以下,地层压力开始偏离静水压力线,且随深度增加迅

速增高;3 700 m 以下地层压力升至 38 MPa,再向下又逐渐降低[图 14(d)]。四川盆地西南部在 800~2 000 m,地层压力一直保持 2~4 MPa 的低幅超压;2 100 m 以下除个别点有明显超压外,大部分点接近常压。川西坳陷从侏罗系开始发育异常高压,超压主要发育在上三叠统须家河组、下三叠统和二叠统的部分地层,压力系数最高可达 2.36,该地区异常高压主要与地层层位有关,而与深度关系不大^[63]。川中—川南地区须家河组储层内压力自上而下分为 3 段:2 000 m 以上为常压段,压力系数在 0.90~1.05;2 000~2 500 m 为高压段,压力系数在 1.1~1.4;2 500 m 以下为超压段,压力系数在 1.40~1.98^[64]。

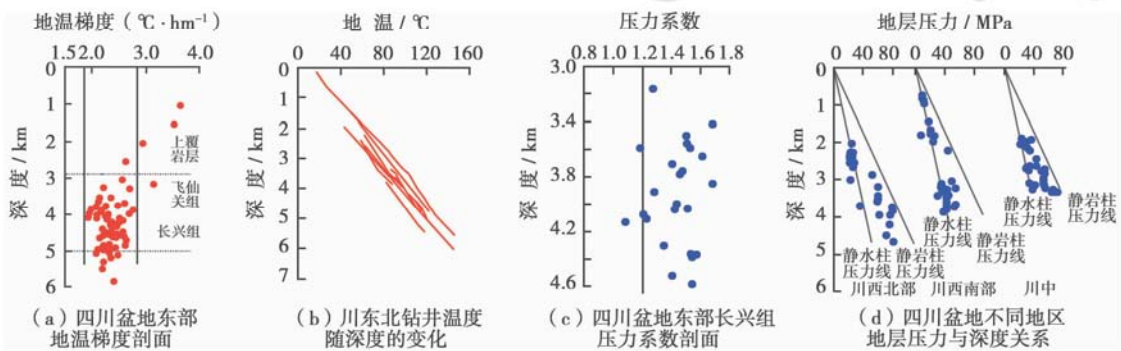


图 14 四川盆地地温、地层压力特征

Fig. 14 Characteristics of geotemperature and geopressure in Sichuan Basin

6 中国含油气盆地温压系统特征及类型

中国含油气盆地类型多样,盆地结构复杂,油气资源丰富,不同类型盆地的地温、地层压力特征各不相同,同一类型盆地的不同构造部位地温、地层压力特征也相差甚远。因此系统研究中国含油气盆地地温、地层压力特征,以及温压系统类型对于指导中国不同盆地油气勘探具有十分重要的意义。本次研究共统

计了中国 13 个含油气盆地中的 36 个沉积单元的地温、地压或温压系统参数(表 1),并在此基础之上做了详细的分析和对比,发现中国不同类型含油气盆地的地温场、地压场以及温压系统各有其独特的规律性。

6.1 中国含油气盆地地温特征

统计发现(表 1 和图 15),中国伸展型盆地、挤压型盆地和克拉通盆地的平均地温梯度分别为 3.72℃/hm、2.41℃/hm 和 2.52℃/hm。可以看出,中

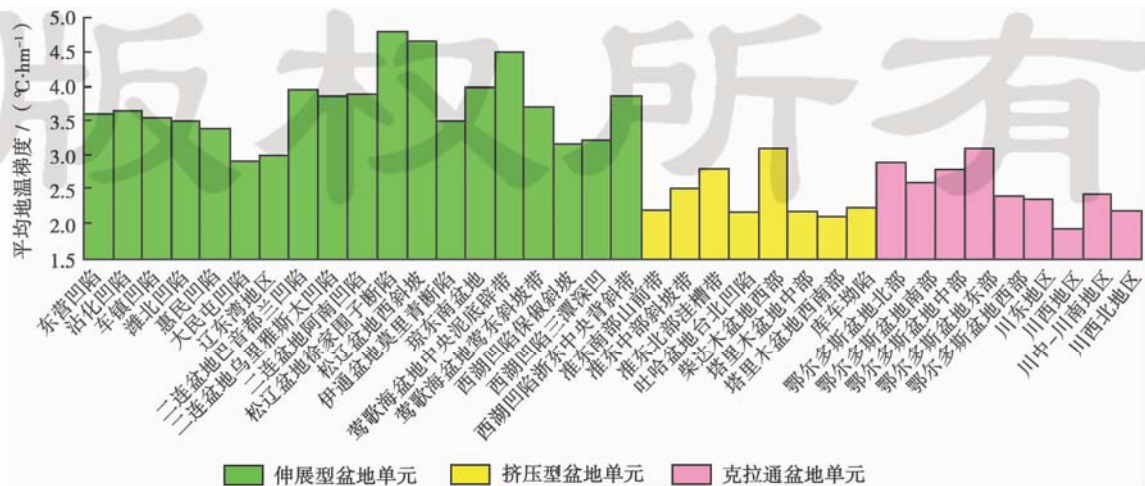


图 15 中国不同类型盆地或坳陷/凹陷平均地温梯度分布

Fig. 15 Distribution of average geotemperature gradient in different types of basins or sags of China

表 1 中国含油气盆地地温-地压系统各主要参数及类型统计

Table 1 Main parameters and types of Geo-TP systems in petroliferous basins of China

盆地类型	沉积单元	平均地温梯度 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$)	最小压力系数	最大压力系数	异常压力带 起始深度/m	浅层温压系统		深层温压系统		地温-地压系统类型			
						斜率	截距	斜率	截距	高压型	低压型	单一型	
渤海湾盆地	东营凹陷	3.59	0.90	1.80	2200	0.27	-4.17	1.05	-84.00	★			
	沾化凹陷	3.63	0.70	1.80	2600	0.24	-2.25	0.60	-43.33	★			
	惠民凹陷	3.39	0.50	1.00	1300	0.27	-6.00	0.27	-3.95			★	
	车镇凹陷	3.54	0.80	2.00	3500					★			
	大民屯凹陷	2.92	0.55	1.22	1500							★	
	辽东湾地区	3.00	0.85	1.90	2100	0.41	-8.83	1.09	-63.00	★			
	淮北凹陷	3.50	0.50	1.10	700							★	
	二连盆地	巴音都兰凹陷	3.97	0.77	0.97	1450			0.36	-6.85			★
		乌里雅斯太凹陷	3.86	0.60	1.00	1350			0.33	-7.80			★
		阿南凹陷	3.88	0.69	0.97	770			0.27	-5.10			★
		松辽盆地西斜坡	4.65	0.82	1.36	1700	0.22	0.44	0.69	-35.90	★		
		鹿乡断陷		0.65	1.01		0.35	-12.08	0.35	-12.08			★
	伊通盆地	岔路河断陷		0.50	1.55	2800	0.24	-1.20	0.48	-27.00	★		
		莫里青断陷	3.50	0.70	1.40	2400	0.42	-17.40	0.96	-69.40	★		
		京东南盆地	4.00		2.40						★		
莺歌海盆地	中央泥底辟带	4.50	0.92	2.17	1480	0.44	-19.15	1.06	-82.77	★			
	莺东斜坡带	3.70	1.03	2.10		0.53	-27.45	0.53	-27.45			★	
东海西湖凹陷	保俶斜坡	3.16	1.00	1.88	3350	0.63	-42.60	1.24	-117.80	★			
	三潭深凹	3.22	0.91	1.35	3700	0.47	-26.88	0.99	-98.30	★			
	浙东中央背斜坡	3.87	0.90	1.05		0.36	-16.10	0.36	-16.10			★	
准噶尔盆地东部地区	南部山前带	2.20	1.40	2.00	1600	0.50	-5.70	1.49	-53.85	★			
	中部斜坡带	2.50	1.00	1.30		0.40	-2.03	0.40	-2.03			★	
	北部洼槽带	2.80	0.70	1.05	1300	0.34	-3.60	0.34	0.90			★	
	吐哈盆地台北凹陷	2.18	0.63	1.27	2500	0.56	-12.15	0.56	-17.72			★	
	柴达木盆地西部地区	3.10	0.87	2.03	2300	0.37	-4.35	1.16	-78.70	★			
	塔里木盆地	库车坳陷	2.23	1.00	2.20								★
塔中地区		2.18	1.00	1.33	2700							★	
塔西南		2.10	1.00	2.02	2100							★	
鄂尔多斯盆地	北部	2.90	0.75	1.00	200								
	南部	2.60	0.55	1.01									
	中部	2.80	0.21	1.22		1.18	-70.50	0.46	-15.86			★	
	东部	3.10	0.38	1.15									
	川东地区	2.35	1.27	1.90									
四川盆地	川西地区	1.93	1.20	2.36	1700								
	川中-川南地区	2.44	1.10	1.98	2000							★	
	川西北地区	2.20	1.01	2.11	2800								

注:★为推测温压系统类型。

国伸展型盆地的平均地温梯度明显高于其他两种类型盆地,同时也高于全球地壳平均地温梯度($3.0^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)。只有大民屯凹陷最低为 $2.92^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,最高在松辽盆地徐家围子断陷,高达 $4.80^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。而挤压型盆地和克拉通盆地的地温梯度比较接近,克拉通盆地平均地温梯度略高于挤压型盆地,这两类盆地各级次沉积单元中除了柴达木盆地西部地温梯度较高外($3.10^{\circ}\text{C}/\text{hm}$),其他各级次沉积单元的平均地温梯度均低于全球地壳平均地温梯度。

6.2 中国含油气盆地地层压力特征

中国三大类含油气盆地地层压力纵向分布比较复杂,深、浅层压力变化比较大,异常高压和异常低压起始深度变化也比较大(表 1)。由于受地层年代、埋深、

构造部位、过压实和欠压实等多种地质因素和地质过程的影响,三大类盆地深层既可以是异常高压,也可以形成异常低压,甚至还可以是静水压力环境,而且在纵向上受不同流体分割单元的控制,异常高压和异常低压在纵向上交替出现的现象十分常见。对于油气储层而言,同样可以是高压储层(如东营凹陷沙三段、柴达木盆地地下干柴沟组)也可以是低压储层(如惠民凹陷沙二段、鄂尔多斯盆地延长组)。

在中国的含油气盆地中,伸展型盆地异常高压和异常低压都大量存在,异常高压的发育与其具有较高的地温梯度有直接的关系,高地温梯度有利于油气的生成和地层流体体积的膨胀,从而导致地层压力增大。而异常低压的形成则主要源于盆地本身活跃的构造运

动,抬升剥蚀和断裂的发育导致了地层压力的释放。挤压型盆地由于发育在挤压应力背景之下,普遍具有较高的地层压力,但异常低压也有分布(如吐哈盆地台北凹陷),这与其所处的构造部位以及低温背景有很大关系。克拉通盆地地层压力具有整体性特征,异常地层压力受到盆地整体地质过程的影响,如鄂尔多斯盆地早白垩世以来的大规模整体抬升,造成盆地卸载释压,而且后期的地温调整后,盆地整体地温梯度明显降低也是低压产生的主要原因之一;对于四川盆地,高压的形成主要是低密度天然气的生成,储层的致密化是

超压得以保存的原因^[58]。

尽管中国三大类盆地异常压力在纵向上的分布特征比较复杂,但异常高压和异常低压在起始深度上却具有明显的特征(图 16),异常低压出现的深度大都比较浅,除了吐哈盆地台北凹陷异常低压出现的起始深度(2500 m)比较深外,其他盆地或者凹陷的异常低压起始深度都不超过 1500 m(大民屯凹陷);而所有盆地或凹陷异常高压出现的起始深度却比较深,除莺歌海盆地中央凹陷带(1480 m)外,其他盆地或者凹陷异常高压起始深度都大于 1500 m。

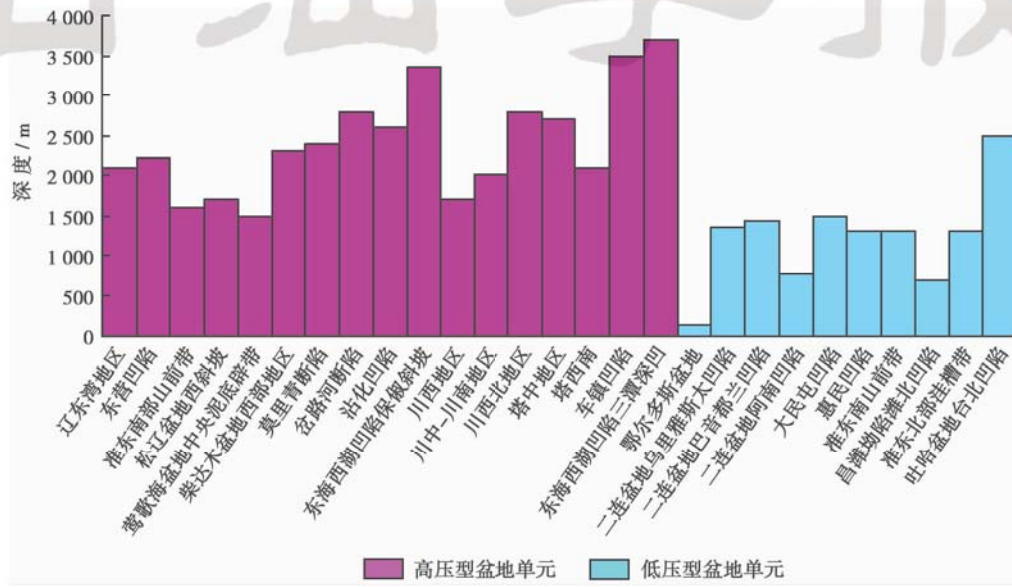


图 16 中国含油气盆地异常高压和异常低压起始深度分布

Fig. 16 Distribution of starting depth of abnormal high and abnormal low formation pressure in petroliferous basins of China

6.3 中国含油气盆地温压系统类型及特征

根据深浅层温压系统的斜率和截距,将中国含油气盆地温压系统模式划分为 3 个大类和 5 个亚类(图 17)。第一大类是高压型复式温压系统模式,即深层温压系统斜率大于浅层温压系统斜率,深层截距小于浅层截距,其浅层的地层压力为静水压力,深层地层压力为异常高压。第二大类是低压型复式温压模式,其浅层的地层压力为静水压力,深层地层压力局部出现异常低压段。低压型复式温压系统模式又包含 3 个亚类:左移式(深浅层温压系统斜率相同,但深层截距大于浅层截距)、右移式(深浅层温压系统斜率相同,但深层截距小于浅层截距)和一般式(深层温压系统斜率小于浅层温压系统斜率,深层截距大于浅层截距)。第三大类是单一型温压系统模式,深浅层温压系统斜率和截距都相同,其浅层和深层都为静水压力。

根据复式温压系统深浅层系统斜率比值关系可以

将高压型复式温压系统分为:强高压型复式温压系统(深浅层斜率比值大于 2.5)和弱高压型复式温压系统(深浅层斜率比值为 1~2.5)。

三大类温压系统在中国含油气盆地温压系统斜率交汇图上具有明显的分区性(图 18)。高压型复式温压系统浅层温压系统斜率分布范围比较窄,主要集中在 0.22~0.63,说明浅层静水压力系统地区差异较小,纵向上压力受温度影响较小,水热增压作用不明显;而深层斜率分布范围较宽,大概分布在 0.48~1.49,表明地层深部压力随温度增加变化幅度很大,水热增压作用显著,地区差异较大;深浅层温压系统斜率比值范围在 1.97~3.85,明显大于 1,说明深浅层地层连通性很差,深层流体具有很高的势能,在局部断裂系统沟通的情况下,深层流体向上运移的动力大于浅层流体产生的静水压力,流体具有向上运移的趋势。

低压型复式温压系统浅层温压系统斜率分布范围较宽,大概在 0.27~1.18,分布不均,表明浅层静水压

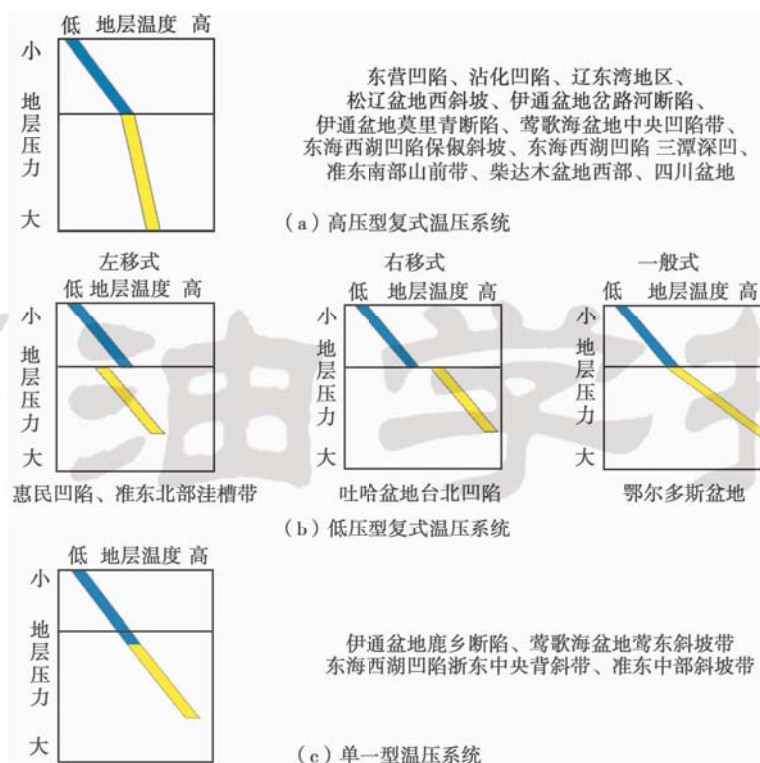


图 17 中国含油气盆地地温-地压系统模式及典型实例

Fig. 17 Models and typical examples of Geo-TP systems in petroliferous basins of China

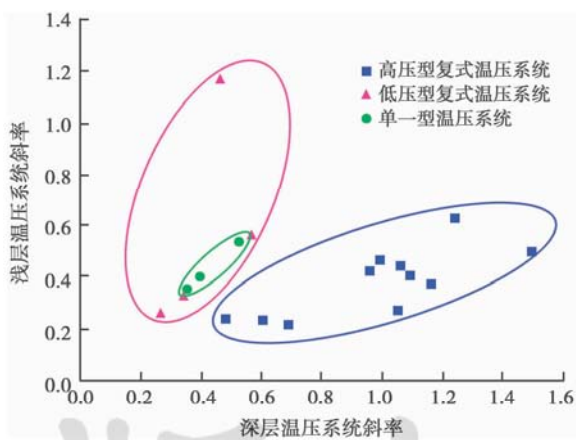


图 18 中国含油气盆地深浅层温压系统斜率

Fig. 18 Slope of shallow and deep Geo-TP systems in different petroliferous basins of China

力系统地区差异较大;而深层温压系统斜率分布范围较窄,主要集中在 0.27~0.56,表明深层水热增压作用极不明显,地区差异小;深浅层温压系统斜率比值范围在 0.39~1.00,说明深浅层地层连通性较差,深层流体势能很低,在局部断裂系统沟通的情况下,深层流向上运移的动力小于浅层流体产生的静水压力,系统内流体具有向下倒灌的趋势。

单一型温压系统深浅层斜率一致,而且分布非常集中,主要分布在 0.35~0.53,深浅层温压系统斜率比值恒等于 1,说明地层深浅层都为静水压力系统,由

于垂向断裂的大量发育深浅层地层连通性较好,水热增压作用不明显,地区差异也较小。

6.4 中国含油气盆地温压系统与油气垂向运移关系

盆地内部的温压系统对油气的分布起着非常重要的控制作用,不同类型的温压系统在垂向上具有不同的油气运移特征。高压型复式温压系统模式中,地层深部封闭流体具有较高的动能,而且盆地深浅层连通性较差,深部流体具有向浅部层位运移的趋势。在深层温压系统内,油气会沿着断层或裂隙垂向运移到该温压系统浅部的圈闭中聚集,或油气沿断层或裂隙从深部层系垂向运移到该温压系统之上的浅层温压系统中的圈闭里聚集。如果没有断层等的沟通,深层一般会发育孤立的高压岩性油气藏。

如辽东湾地区发育典型的高压型复式温压系统,从该地区纵向上的油气分布状况来看[图 19(a)],石油探明储量主要位于上下两套温压系统分界附近,上部静压型温压系统内部和下部超压型温压系统内部的石油探明储量少;天然气探明储量主要位于上下两套温压系统分界附近和下部超压型温压系统内部。又如莺歌海盆地中央泥底辟带,该底辟带发育典型的高压型复式温压系统,天然气主要分布在该复式温压系统上部的静压型温压系统内及下部的超压型温压系统中[图 19(b)].中央泥底辟带发生过多期多源的底辟活动,不仅在烃源岩的上覆地层形成了一系列背斜构造,

而且产生了许多断裂和裂缝。深部流体在高压动力驱动下驱使天然气沿断层、裂缝垂向运移到该复式温压系统的中浅部圈闭中聚集成藏。DF1-1 气田和 LD22-1 气田主要就是天然气从深部的高压地层沿断裂垂向运移到浅层正常压力层段中聚集而成。

低压型复式温压系统模式中,地下深层流体动力非常弱,同时盆地深浅层连通性也较差。由于浅层势能相对较高,故深部流体无法向浅层运移,相反有向下倒灌的趋势。深部油气只能在深部层位中的圈闭里聚集,形成深盆气或深盆油,一般容易形成自生自储式油气藏,或者上生下储式油气藏,纵向上油气储量主要集中在深部层位。

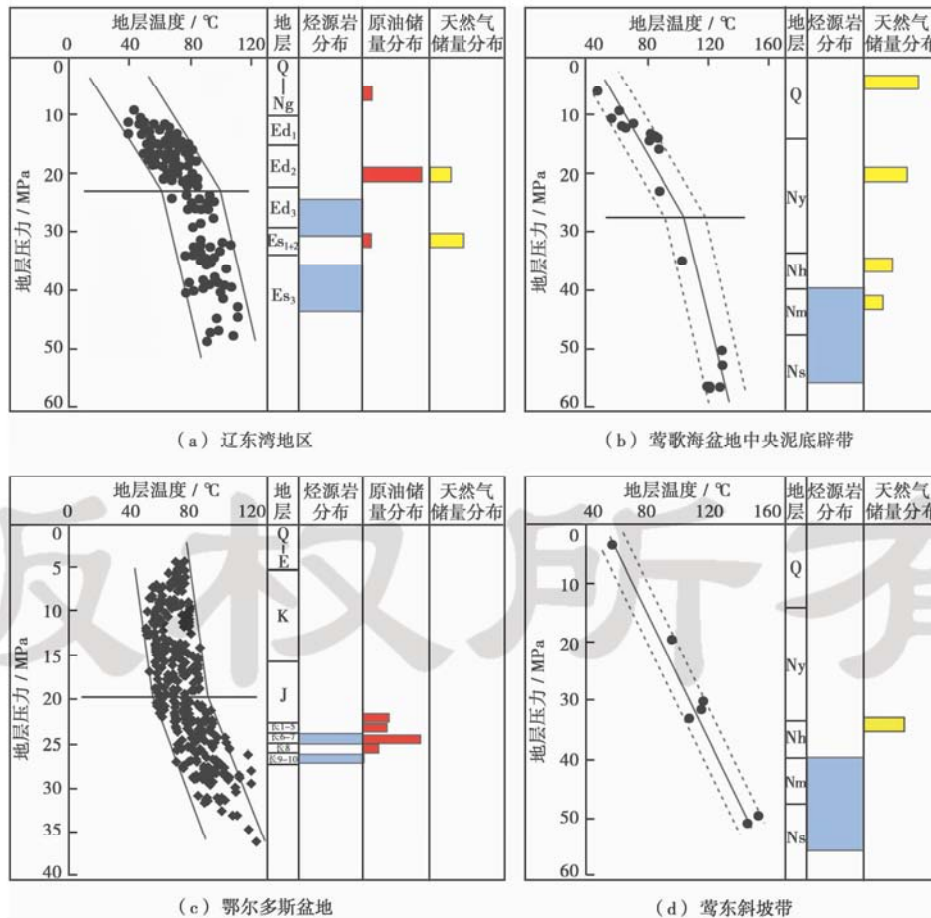
如鄂尔多斯盆地为典型的低压型复式温压系统,盆地内油气资源主要集中在中生界三叠系延长组、侏罗系底部的延安组。到 2006 年底,三叠系累计探明含油面积 1 156.7 km²,累计探明储量 11.55 × 10⁸ t,其中长 1—长 4 + 5 占总探明储量的 24.7%,长 6—长 7 占总探明储量的 58.64%,长 8 占 16.43%,长 9—长 10 发现较少,不到 0.2%;侏罗系延 9—延 10 累计探明储

量也达到 3.06 × 10⁸ t。从储量纵向分布可以看出,鄂尔多斯盆地储量主要集中在复式温压系统的深部系统中,浅层却很少有发现,而且长 8 油气主要来自上部的长 7 段烃源岩,为典型的上生下储型成藏组合[图 19(c)]。

单一型温压系统模式中,地下流体纵向运移动力较弱,所以在纵向上流体运移不明显,但可以在横向上短距离运移。深层生成的油气只能在同层系圈闭中聚集成藏,形成自生自储式原生油气藏,浅层有可能发育与深断裂有关的小型深源油气藏。纵向上油气储量取决于各层系自身资源量。单一型温压系统有时也反映出地层深部和浅部具有良好的连通性。

如莺歌海盆地莺东斜坡带发育单一型温压系统,浮力是天然气垂向运移的主要动力,目前只发现黄流组气藏[图 19(d)],天然气藏多以自生自储型原生气藏为主,而且在储量规模上要比中央泥底辟带小得多。

从温压系统类型与油气储量关系来看,高压型复式温压系统和低压型复式温压系统内油气聚集效率最高,油藏规模和油气储量也比较大,单一型温压系统内一般不易聚集较大规模油气储量。



Q—第四系;Ng—明化镇组;Ed₁—东一段;Ed₂—东二段;Ed₃—东三段;Es₁₊₂—沙一二段;Es₃—沙三段;Ny—莺歌海组;Nh—黄流组;Nm—梅山组;Ns—三亚组。

图 19 典型地温-地压系统与油气储量分布关系

Fig. 19 Relationship between typical Geo-TP systems and oil-gas reserves

7 结 论

(1) 中国含油气盆地存在三大类地温-地压系统模式:高压型复式温压系统模式(强高压型和弱高压型)、低压型复式温压系统模式(左移式、右移式和一般式)和单一型温压系统模式。

(2) 高压型复式温压系统内,其浅层系统的斜率分布范围较窄,斜率值偏小,系统特征地区差异小;深层系统的斜率分布范围很宽,斜率值相对偏大,地区差异明显,水热增压作用显著;深浅层系统斜率比值明显大于 1。高压型复式温压系统斜率特征表明,深浅部地层在纵向上的连通性很差,深部地层流体势能很高,流体具有向上运移的趋势。对于高压型复式温压系统,油气储量主要分布在浅层温压系统的下部和深层温压系统的上部,储量规模一般都比较小。

(3) 低压型复式温压系统内,其浅层系统的斜率分布范围较宽,地区差异较大;深层系统斜率分布范围相对较窄,斜率值相对偏小,地区差异相对较小,水热增压作用极不明显;深浅层温压系统斜率比值小于 1。低压型复式温压系统斜率特征表明,深浅部地层在纵向上的连通性较差,深部地层流体势能较低,流体具有向下运移的趋势。对于低压型复式温压系统,油气储量主要分布在深层温压系统内,储量规模一般较大。

(4) 单一型温压系统内,深浅层系统斜率一致,都为静水压力系统,斜率值分布比较集中而且相对较小,地区差异小,水热增压作用不明显,深浅层地层连通性很好。在单一型温压系统内,流体垂向运移动力不足,油气储量主要受烃源岩分布的影响,而且储量规模一般较小。

(5) 伸展型盆地主要发育高压型复式温压系统,低压型复式温压系统次之;挤压型盆地以高压型复式温压系统为主,也有低压型复式温压系统发育;克拉通盆地发育低压型复式温压系统或高压型复式温压系统。

参 考 文 献

- [1] 郝芳,孙永传,李思田,等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(1): 68-72.
Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Sitian, et al. Enhancement of organic maturation and petroleum generation by hydrothermal fluids[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(1): 68-72.
- [2] 孙永革,傅家谟,刘德汉,等. 火山活动对沉积有机质演化的影响及其油气地质意义——以辽河盆地东部凹陷为例[J]. 科学通报, 1995, 40(11): 1019-1022.
Sun Yongge, Fu Jiamo, Liu Dehan, et al. Effects of volcanic activity on organic evolution and its petroleum geological significance: Taking eastern Liaohe basin as an example[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(11): 1019-1022.
- [3] 张保民,王素娟,向华. 盆地岩浆侵入的热演化及其对生油窗的影响[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 696-698.
Zhang Baomin, Wang Sujuan, Xiang Hua. Thermal evolution of magma intrusion and its effect on oil-generating window in sedimentary basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(6): 696-698.
- [4] Baybakov V V. Effect of the thermodynamic conditions on the distribution of hydrocarbon pools[J]. Doklady Earth Sciences, 1970, 187: 889-902.
- [5] Walter C P. How to evaluate potential gas and oil source[J]. World Oil, 1973, 176(5): 71-75.
- [6] Lewis C R, Rose S C. A theory relating high temperature and overpressures[J]. JPT, 1970, 22: 11-16.
- [7] Barker C. Aquathermal pressuring: Role of temperature in development of abnormal-pressure zones[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(10): 2068-2071.
- [8] Magoon L B. The petroleum system: A classification scheme for research, resource assessment, and exploration (abstract) [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 587-601.
- [9] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [10] Bradley J S. Abnormal formation pressure[J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 957-973.
- [11] Bishop R S. Calculated compaction states of thick abnormally pressured shales[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(6): 918-933.
- [12] Plumley W J. Abnormally high fluid pressure: Survey of some basic principles[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(3): 414-422.
- [13] Carstens H, Dypvik H. Abnormal formation pressure and shale porosity[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(2): 344-350.
- [14] 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 138-139.
Du Xu, Zheng Hongyin, Jiao Xiuqiong. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(4): 138-139.
- [15] 金博, 刘震, 张荣新, 等. 沉积盆地异常低压(负压)与油气分布[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 351-356.
Jin Bo, Liu Zhen, Zhang Rongxin, et al. The anomalous low pressure (negative pressure) and hydrocarbon accumulation in a sedimentary basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(3): 351-356.
- [16] 金之钧, 谢方克. 中国典型含油气盆地地层压力分布特征[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(6): 1-16.
Jin Zhijun, Xie Fangke. Distribution features of formation pressure in typical petroliferous basin of China[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2002, 26(6): 1-16.
- [17] 肖焕钦, 刘震, 赵阳, 等. 济阳拗陷地温-地压场特征及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2003, 29(3): 68-70.
Xiao Huanqin, Liu Zhen, Zhao Yang, et al. Characteristics of geotemperature and geopressure fields in the Jiyang Depression and their significance of petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 29(3): 68-70.
- [18] 谢启超, 刘震. 渤南洼陷地温-地压场特征及其石油地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(2): 29-30.
Xie Qichao, Liu Zhen. Characteristics on geothermal-formation pressure field in Bonan subsag and its petroleum geologic significance[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2004, 11(2): 29-30.
- [19] 肖伟, 刘震, 杜金虎, 等. 二连盆地温压系统特征[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 610-613.
Xiao Wei, Liu Zhen, Du Jinhu, et al. Characteristic of geotherm-

- geopressure system in Erlian Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(6): 610-613.
- [20] 李鹤永, 刘震, 党玉琪, 等. 柴西地区地温-地压系统特征及其与油气分布的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(1): 37-44.
Li Heyong, Liu Zhen, Dang Yuqi, et al. Characteristics of geotemperature-geopressure system in western Qaidam Basin and their relationship with oil and gas distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(1): 37-44.
- [21] 李维莲, 刘震, 于水, 等. 地温-地压场特征与油气分布的关系——以辽东湾地区为例[J]. *天然气工业*, 2006, 26(9): 17-20.
Li Weilian, Liu Zhen, Yu Shui, et al. Characteristics of geotemperature-geopressure fields and their relationships with distribution of oil and gas: Taking Liaodong Bay as an example[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 17-20.
- [22] 曹强, 叶加仁. 伊通盆地莫里青断陷地温地压系统与油气成藏关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(3): 99-103.
Cao Qiang, Ye Jiaren. Relation between geotemperature-geopressure system and petroleum accumulation in Moliqing rift in Yitong Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(3): 99-103.
- [23] 石兰亭, 李本才, 巩固, 等. 断陷型盆地温压系统与油气成藏——以伊通地坳莫里青断陷为例[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(1): 73-77.
Shi Lanting, Li Bencai, Gong Gu, et al. The temperature-pressure systems and the oil and gas accumulation in Moliqing Sag of Yitong Graben[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 73-77.
- [24] 金博, 刘震, 李绪深, 等. 莺歌海盆地地温-地压系统特征及其对天然气成藏的意义[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 49-55.
Jin Bo, Liu Zhen, Li Xushen, et al. Relationship between accumulation of natural gas and geotemperature-geopressure system in Yinggehai Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 49-55.
- [25] 张先平, 陈海红, 张树林, 等. 东海西湖凹陷温压系统与油气成藏[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 87-90.
Zhang Xianping, Chen Haihong, Zhang Shulin, et al. Geotemperature-geopressure systems and related reservoir formation in the Xihu Sag, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 87-90.
- [26] 史朋, 叶加仁, 张晓宝, 等. 伊通盆地莫里青断陷温-压系统特征及对油气分布的影响[J]. *天然气勘探与开发*, 2008, 31(4): 1-4.
Shi Peng, Ye Jiaren, Zhang Xiaobao, et al. T-P system characteristics of Moliqing faulted sag in Yitong basin and its impacts on hydrocarbon distribution[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2008, 31(4): 1-4.
- [27] 朱夏. 我国中生界含油气盆地的大地构造特征及有关问题[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 4-26.
Zhu Xia. Geotectonic characteristics and related problems of Mesozoic and Cainozoic petroliferous basins of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 4-26.
- [28] Klemme H D. Petroleum basins: Classification and characteristics[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1980, 3(2): 187-207.
- [29] Kingston D R, Dishroon C P, Williams P A. Global basin classification system[J]. *AAPG Bulletin*, 1983, 67(12): 2175-2193.
- [30] Bally A W. Basins and subsidence: A summary in dynamics of plate interiors[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 1980: 15-20.
- [31] 朱夏. 试论古全球构造与古生代油气盆地[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(1): 1-33.
Zhu Xia. Notes on ancient global tectonics and Paleozoic petroliferous basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 1983, 4(1): 1-33.
- [32] 叶连俊, 孙枢. 沉积盆地的分类[J]. *石油学报*, 1980, 1(3): 1-6.
Ye Lianjun, Sun Shu. Classification of sedimentary basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1(3): 1-6.
- [33] 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1993, 18(6): 699-724.
Liu Hefu. Dynamic classification of sedimentary basins and their structural styles[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1993, 18(6): 699-724.
- [34] 甘克文. 世界含油、气盆地的基本类型及其远景评价[J]. *石油学报*, 1982, 3(增刊): 24-33.
Gan Kewen. Basic types of oil basins in the world and their prospect evaluation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(Supplement): 24-33.
- [35] 陆克政. 关于盆地分类问题的讨论[J]. *华东石油学院学报: 自然科学版*, 1987, 11(4): 1-6.
Lu Kezheng. Discussion on basin classification[J]. *Journal of East China Petroleum Institute: Edition of Natural Science*, 1987, 11(4): 1-6.
- [36] 李德生. 中国含油气盆地的基本特征[J]. *地球学报*, 1994(3/4): 159-166.
Li Desheng. Basic characteristics of oil and gas basins in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1994(3/4): 159-166.
- [37] 张恺, 罗志立, 张清, 等. 中国含油气盆地的划分与远景[J]. *石油学报*, 1980, 1(4): 1-15.
Zhang Kai, Luo Zhili, Zhang Qing, et al. Classification of basins and potential hydrocarbon resources in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1(4): 1-15.
- [38] 刘震, 张万选, 曾宪斌, 等. 含油气盆地地温-地压系统浅析[J]. *天然气地球科学*, 1996, 7(1): 34-38.
Liu Zhen, Zhang Wanxuan, Zeng Xianbin, et al. A primary analysis of geotemperature-pressure systems in petroliferous basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1996, 7(1): 34-38.
- [39] 刘震, 曾宪斌, 张万选, 等. 沉积盆地地温与地层压力关系研究[J]. *地质学报*, 1997, 71(2): 180-184.
Liu Zhen, Zeng Xianbin, Zhang Wanxuan, et al. Relation between subsurface temperature and formation pressures in sedimentary basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(2): 180-184.
- [40] 曾宪斌, 刘震, 张万选. 地下温-压体系相关性理论研究[J]. *天然气地球科学*, 1997, 8(1): 23-27.
Zeng Xianbin, Liu Zhen, Zhang Wanxuan. A theory research about the correlations of underground temperature-pressure systems[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1997, 8(1): 23-27.
- [41] 李善鹏, 邱楠生. 应用镜质体反射率方法研究东营凹陷古地温[J]. *西安石油学院学报: 自然科学版*, 2003, 18(6): 9-11.
Li Shanpeng, Qiu Nansheng. Studying the palaeogeotherm of Dongying Sag by using vitrinite reflectance[J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 2003, 18(6): 9-11.
- [42] 杨绪充. 东营凹陷地温特征及深部勘探问题[J]. *石油学报*, 1984, 5(3): 19-26.
Yang Xuchong. Geothermal features and exploration potential at depth in Dongying Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1984, 5(3): 19-26.
- [43] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 50-100.
Chen Moxiang. Geothermal of North China Basin[M]. Beijing: Science Press, 1988: 50-100.
- [44] 叶加仁, 郝芳, 陈建渝. 辽河盆地大民屯凹陷流体动力场特征[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(2): 128-133.

- Ye Jiaren, Hao Fang, Chen Jianyu. Characteristics of fluid dynamical field in Damintun Depression, Liaohe Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(2): 128-133.
- [45] 姜建群, 李军, 史建南, 等. 大民屯凹陷古今地温场特征及其成藏意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(3): 541-547.
Jiang Jianqun, Li Jun, Shi Jiannan, et al. Geothermal characteristics of Damintun sag and its significance for petroleum accumulation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(3): 541-547.
- [46] 郭金瑞. 辽河盆地大民屯凹陷流体势及油气运聚[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2007, 34(1): 62-69.
Guo Jinrui. The fluid potential and hydrocarbon movement and accumulation of Damintun Depression in Liaohe Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2007, 34(1): 62-69.
- [47] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 118-122.
Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Analysis and petroleum accumulation in marginal basins of northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 118-122.
- [48] 李德生, 姚永耘, 陈蟒蛟. 中国西部地区含油气盆地的地质特征[J]. *石油勘探与开发*, 1991, 18(2): 1-10.
Li Desheng, Yao Yongyun, Chen Mangjiao. The geological characteristics of petroliferous basins in western China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1991, 18(2): 1-10.
- [49] 周中毅, 盛国英. 塔里木盆地古地温与深部找油(气)前景[J]. *地球化学*, 1985(3): 236-241.
Zhou Zhongyi, Sheng Guoying. Paleogeothermal gradient in the Tarim basin and oil(gas)prospects at great depths[J]. *Geochimica*, 1985(3): 236-241.
- [50] 王良书, 李成, 刘绍文, 等. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 403-406.
Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen, et al. Geotemperature gradient distribution of Kuqa foreland basin, north of Tarim, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 403-406.
- [51] 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 等. 塔里木盆地的热史[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 613-616.
Li Huili, Qiu Nansheng, Jin Zhijun, et al. Geothermal history of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 613-616.
- [52] 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 塔里木盆地中央隆起区现今地温场分布特征及其与油气的关系[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(4): 645-654.
Feng Changge, Liu Shaowen, Wang Liangshu, et al. Present-day geotemperature field characteristics in the Central Uplift Area of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation and preservation[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(4): 645-654.
- [53] 周兴熙. 塔里木盆地库车油气系统中、新生界的流体压力结构和油气成藏机制[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 351-360.
Zhou Xingxi. The Mesozoic-Cenozoic fluid pressure structure and reservoir-forming mechanism process in the Kuqa petroleum system in the Tarim basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4): 351-360.
- [54] 王震亮, 陈荷立. 塔里木盆地满加尔凹陷及周围地区地层压力分布特征[J]. *西北地质*, 1998, 19(2): 242-245.
Wang Zhenliang, Chen Heli. The distribution of formation pressure in Manjiaer sag and its surrounding areas, Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 1998, 19(2): 242-245.
- [55] 王红军, 黄晓明. 塔中地区地层压力结构与油气的分布[J]. *石油实验地质*, 1999, 21(3): 242-245.
Wang Hongjun, Huang Xiaoming. Pressure structure and petroleum distribution in Tazhong area[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1999, 21(3): 242-245.
- [56] 于强, 任战利. 鄂尔多斯盆地黄陵、东胜地区地温场对比[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38(6): 933-936.
Yu Qiang, Ren Zhanli. Comparison of geothermal fields in the Huangling and Dongsheng areas, Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(6): 933-936.
- [57] 杨华, 姬红, 李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石千峰组低压气藏特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 29(7): 413-418.
Yang Hua, Ji Hong, Li Zhenhong, et al. Characteristics of under-pressured gas pool in Upper Paleozoic Shiqianfeng Formation of eastern Ordos Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2007, 29(7): 413-418.
- [58] 袁京素, 李仲东, 过敏, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界异常压力特征及形成机理[J]. *中国石油勘探*, 2008(4): 18-21.
Yuan Jingsu, Li Zhongdong, Guo Min, et al. Characteristics and formation mechanism of Upper Paleozoic abnormal pressure in Hangjinqi area of Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2008(4): 18-21.
- [59] 伍大茂, 吴乃苓, 郜建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义[J]. *石油学报*, 1998, 19(1): 18-23.
Wu Damao, Wu Nailing, Gao Jianjun. Paleogeotemperature in Sichuan Basin and its geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(1): 18-23.
- [60] 史建南, 郑荣才, 徐发波, 等. 四川盆地东部长兴组温压场特征及成藏效应[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(5): 531-537.
Shi Jiannan, Zheng Rongcai, Xu Fabo, et al. Characteristics and accumulation effects of temperature-pressure fields in Changxing Formation, eastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2009, 36(5): 531-537.
- [61] 谢晓黎, 于津. 四川盆地地区地温场的特征[J]. *成都地质学院学报*, 1988, 15(4): 107-112.
Xie Xiaoli, Yu Huijin. The characteristics of the regional geothermal field in Sichuan Basin[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1988, 15(4): 107-112.
- [62] 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1110-1116.
Lu Qingzhi, Hu Shengbiao, Guo Tonglou, et al. The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1110-1116.
- [63] 贝东. 四川盆地川西拗陷高异常地层压力分布特征[J]. *矿物岩石*, 1995, 15(1): 58-62.
Bei Dong. Distributing characteristics of abnormal pressure in the west Sichuan depression of Sichuan basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1995, 15(1): 58-62.
- [64] 郝国丽, 柳广弟, 谢增业, 等. 川中-川南地区上三叠统须家河组气藏异常压力分布及成因[J]. *世界地质*, 2010, 29(2): 298-303.
Hao Guoli, Liu Guangdi, Xie Zengye, et al. Distribution and origin of abnormal pressure in Upper Triassic Xujiahe Formation reservoir in central and southern Sichuan[J]. *Global Geology*, 2010, 29(2): 298-303.