

沉积盆地盐构造热效应及其油气地质意义

刘绍文^{1*}, 杨小秋², 邱楠生³, 杨树春⁴, 李旭东¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023;

2. 中国科学院南海海洋研究所, 边缘海地质重点实验室, 广州 510301;

3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

4. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心, 北京 100027

* 联系人, E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

2017-01-18 收稿, 2017-02-24 修回, 2017-02-27 接受, 2017-05-03 网络版发表

国家自然科学基金(41272143, 41106086)和中国石油科技创新基金(2015D-0506-0105)资助

摘要 海相沉积盆地广为发育盐岩, 盆内油气藏多与盐岩有关. 塔里木盆地是中国最大的海相沉积盆地, 该区以往的盐构造研究主要集中于其作为良好盖层的封堵性能和作为构造圈闭的盐相关构造. 实测表明, 盐岩热导率远大于普通沉积岩(约2~3倍), 盐岩这一强烈的热物性差异必然会对盆地地层温度分布及烃源岩热演化产生显著影响, 但该问题尚未引起重视. 本文基于系列理论模型和库车前陆盆地盐构造地震解释剖面, 采用二维有限元数值模拟实验, 定量探讨了盐构造的热效应及其对烃源岩热演化的影响. 研究表明, 盐体会造成盐上地层显著增温(3%~13%)和盐下地层降温(11%~35%), 进而分别加速盐上烃源岩和抑制盐下烃源岩的热演化过程. 盐体的热导率、几何形态、厚度和埋深是控制地热异常幅度的主要因素. 异常范围与盐体尺寸有关, 横向上可达盐体宽度的2倍、垂向上为盐体厚度的2~3倍. 盐构造使得库车前陆盆地盐下地层温度显著降低, 造成盐下侏罗系烃源岩镜质体反射率(R_o)降低约18%, 从而有利于盐下深层油气的保存. 库车前陆盆地东、西部的盐构造在埋深、厚度、成分和构造变形样式等方面均存差异, 这可能是造成该区内中生界烃源岩有机质成熟度时空差异分布的原因. 上述盐构造的热效应对中国海相沉积盆地深层油气资源潜力评价与勘探具有重要意义.

关键词 盐构造, 地温梯度, 热物性, 热演化, 库车前陆盆地

膏盐岩是蒸发岩的一种主要类型, 它由石盐、石膏、硬石膏、变水石膏组成, 含少量白云石、黏土、有机质、铁氧化物等. 由于其成分含量不同, 文献中常见盐膏、膏盐和盐岩等不同称谓, 这里统一把它们称为膏盐岩. 膏盐岩主要集中于北半球, 以欧亚板块最多, 其次是北美地区, 南半球相对较少. 世界海相沉积盆地普遍发育膏盐岩, 盆内油气藏的形成多与膏盐层有关. 尽管膏盐层在盆地沉积岩系中所占的比例较小, 但具有良好的致密性能, 从而是许多大型、特大型油气田的重要盖层, 对油气聚集成

藏与保存具有重要的影响和控制作用^[1~7]; 特别是对后期构造变革强烈的含油气盆地, 作为盖层的膏盐岩对油气的保存意义尤为重要, 如全球约55%的油气储量与膏盐岩相关^[7,8]. 此外, 膏盐岩还具有易溶、易变和可塑性, 它会引起盆地地层构造变形样式发生变化, 形成不同性质和类型的盐相关构造, 成为盆地重要的构造圈闭类型和运聚通道^[1,3,9]. 据统计, 全球已发现的115个油气田中, 58%为含盐盆地, 这些含盐盆地控制了已探明石油储量的89%和天然气储量的80%^[10].

引用格式: 刘绍文, 杨小秋, 邱楠生, 等. 沉积盆地盐构造热效应及其油气地质意义. 科学通报, 2017, 62: 1631–1644

Liu S W, Yang X Q, Qiu N S, et al. Geothermal effects of salt structures on marine sedimentary basins and implications for hydrocarbon thermal evolution (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1631–1644, doi: 10.1360/N972017-00076

实际上,除了上述的致密性和可塑性之外,膏盐岩还具有一种特殊的热物性:高热导率和低生热率.实测表明,膏盐岩热导率高达 $6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,为普通沉积岩的2~3倍,生热率低至 $0.01\sim 0.23\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,为普通沉积岩的 $1/20\sim 1/30$ ^[11~14].众所周知,光在不同介质内传播时,因介质光学性质不同会引起光的折射现象,地热学中把这种因岩石热物性差异造成热流传导发生变化的过程类比为“热折射”(thermal refraction).油气的生成和保存与地层温度的分布和演化过程息息相关,膏盐岩与周围岩层的热物性强烈差异势必会造成盆地热体制变化.研究海相盆地膏岩层的热效应对揭示盆地热状态特征和油气资源评价均具有重要意义.

大量观测表明,膏盐层之上的地表热流明显高出其周边区域的背景热流^[15~20].Nagihara等人^[16]分析墨西哥湾近海大陆架热流数据时,发现盐体之上的地表热流明显偏高,比周边无盐区的热流高2~3倍.Norden等人^[19]也发现东北德国盆地盐底辟之上的地表热流高达 $100\text{ mW}/\text{m}^2$,认为该高热流异常变化与盐体几何形态及测点与盐体的距离有关.最近,Khutorskoi等人^[20]对欧亚北部的滨里海、Priyat和北德国盆地等含盐盆地的地表热流进行了系统研究,指出盆内盐丘体之上的热流都表现出高值异常,认为是盐体和周围层系的热导率不同而引起的“热折射”所致.此外,Ismail-Zadeh等人^[21,22]对滨里海盆地盐下碳酸盐构造进行地热模拟时,同样发现盐底辟体之上的地层具有高温正异常,而盐体内的地温却为负异常.Bauer等人^[23]对一条穿越德国Grob Schonebeck地热田的地震剖面进行了温度场模拟,指出盐枕之上地层温度正异常为 $2\sim 4^\circ\text{C}$,而盐下地层的温度负异常达 14°C .国外虽有一些研究涉及盐构造热效应,但只是关注其对现今地层温度的影响^[15,24~26],缺乏对烃源岩热演化和油气成藏影响的研究^[27];此外,这些研究都是针对具体研究区域,缺乏从普适的角度来定量表征盐构造的热效应,从而造成研究成果无法被产业界采用.

国内学界虽然对沉积盆地膏盐层极为关注,但多从盐构造变形和封堵盖层的角度进行研究^[4~8],而鲜有关注意到膏盐层的地热效应.邱楠生等人^[13]较早地注意到了东营凹陷膏盐层对地层温度的影响,指出 1000 m 厚的膏盐层会引起地温近 20°C 的变化.杨树春等人^[28]研究库车前陆盆地中生界烃源岩热演化

时,指出膏盐层会降低盐下地层有机质热演化程度.韩冬梅^[29]基于地温和镜质体反射率(R_o)资料,讨论了东营凹陷沙四段膏盐层周围地温及烃源岩成熟度变化特征,指出膏盐层会加速盐上烃源岩的热演化,延缓盐下烃源岩的热演化.郑德顺等人^[30]从 R_o , $T_{\max}$ 和伊利石结晶度等热演化指标,论证了东营凹陷膏盐层对烃源岩热演化确有影响.刘绍文等人^[31]曾初步报道了膏盐层热效应.上述研究虽然认识到了盐构造的热效应,但需要深入地定量分析这一机制.

塔里木盆地是中国最大的海相含盐盆地,盆内发育多套膏盐层系,面积广泛.目前该区盐构造相关研究主要是强调膏盐层的构造变形、盖层效应及油气聚集关系,而膏盐层对地温场影响的认识还有待深入和系统研究.本次结合2D有限元数值模拟技术,从理论模型上定量探讨了膏岩层对地温场影响的幅度、范围及其主控因素.进而结合塔里木盆地北部库车前陆盆地盐构造地震解释剖面,分析了膏盐层对现今地层温度和有机质热演化的影响.

1 地质背景

塔里木盆地是中国面积最大的前寒武纪克拉通盆地,膏盐层普遍发育,已发现克拉2、迪那2气田和塔河油田等大型油气田,是中国目前油气勘探的重点区域.钻井和地震资料显示,塔里木盆地发育了多套不同厚度、不同层系(早-中寒武世、早石炭世和古近系等)的膏盐层^[5,6,32~35].岩性多为膏盐、盐岩、含膏质白云岩、含膏泥岩等,分布面积大、厚度不均,从几十米到几千米不等;广泛分布于库车凹陷、塔北隆起、西南凹陷、巴楚和满加尔等地区.其中,早-中寒武世盐岩在柯坪地区可见露头,古近系盐岩野外出露于南天山山前、库车地区的克拉苏构造带和秋立塔格构造带.上述膏盐层作为重要的盖层,或发育不同样式的盐相关构造圈闭,对油气聚集和保存具有重要作用.迄今为止,塔里木盆地已发现的克拉2、大北1等大型油气田多与盐构造密切相关^[5,35].

库车前陆盆地位于塔里木北部、天山以南,面积约 $2.8\times 10^4\text{ km}^2$,是塔里木盆地的主力产气区块(图1).盆地内发育两套膏盐层,分别为古近系-始新统库姆格列木组($E_{1-2}km$)和新近系-中新统吉迪克组(N_{1j}),前者分布在库车西段,而后者分布在库车东段,前者厚度和分布范围远大于后者^[32],发育盐撤凹陷、盐底辟、盐背斜、盐席推覆体、外来盐席等盐构造单

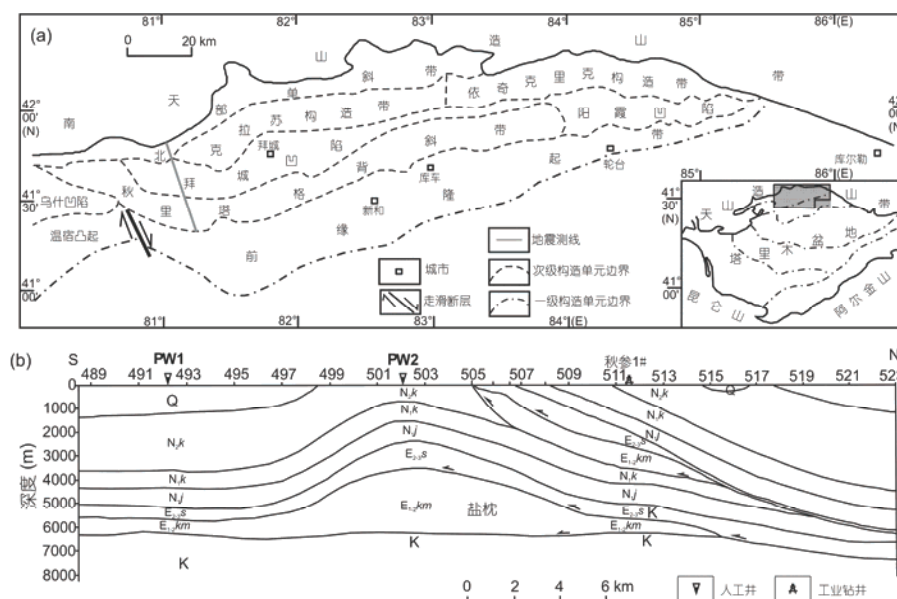


图1 库车前陆盆地构造分区及盐构造剖面解释(修改自文献[34])

Figure 1 Sketch showing structural subdivision and interpreted salt structure profile for the Kuqa Foreland Basin (modified from Ref. [34])

元^[5,32~35]. 不仅东、西部盐构造具有不同的变形特征, 东段盐盆宽广但盐层较薄、西段盐层较厚但盐盆狭窄, 而且盐上、下地层具有不同变形特征, 纵、横向差异显著^[32~34]. 此外, 盐构造演化上具有显著的阶段性: 早渐新世晚期, 开始发育盐盆; 晚渐新世晚期, 受地层重力差异负载作用, 形成盐底辟构造; 晚中新世晚期以来, 受构造挤压, 盐体挤出, 形成大规模的逆冲推覆构造, 形成盐席和推覆体, 前期盐底辟构造在后期推覆构造发育中表现出继承性活化^[32~34]. 盐层厚度及横向展布特征是上述不同时空格局下盐构造差异发育的主要因素. 这些相关的盐构造解释也为本项工作中的地质建模提供了可靠的参考格架.

2 模型及实验

本项研究中设计了两项数字实验. 首先是理论模型研究, 结合库车地区已发现的盐构造发育形态, 选择盐构造的不同几何形态、埋深、厚度和热导率等因素, 在有限元数值模拟平台FEPG(finite element program generator)上进行系列数字实验, 考察它们对温度场影响的方式、幅度和范围. 这组系列实验中所用的模型均为二维剖面, 其长度设定为100 km、宽度为10 km. 其中, 模型内嵌的盐构造形态分别设置盐丘、盐柱和矩形等主要类型, 具体的几何参数详见表1.

图2给出了系列数值模拟实验中盐丘的几何模型. 盐丘体(salt dome)尺寸长度设置为100 km, 最高处为4 km(盐体中心), 随后线性递减至边缘处的0.5 km. 网格剖分的疏密与盐体形态有关, 越靠近盐体的区域, 其网格剖分越细; 远离盐体的区域, 其网格相对稀疏. 本项研究中, 矩形、柱状等形态的网格划分为20000个, 丘状模型网格为24000个. 模型顶部边界设为温度边界, 取地表温度15℃; 底部边界为热流边界, 基底热流为50 mW/m². 左右边界为绝热条件, 即地温梯度为0, 无侧向热交换. 其中, 盐体周边其他地层的热导率取2 W/(m·K), 盐体热导率在模型中调整(3~6 W/(m·K)不等). 根据上述模型和边界条件, 利用有限元数值解如下的2D稳态热传导方程:

$$K \nabla^2 T = 0. \quad (1)$$

此外, 本文结合库车前陆盆地的一条盐构造地震解释剖面(图1(b)), 以实测热物性参数为基准, 利用数值模拟, 考察盐构造引起的该剖面温度场变化情况.

3 结果

下面首先展示了盐构造对地层温度场扰动的主要模式. 随后通过调整膏盐层的热导率、几何形态、厚度和埋深等相关参数, 来考察膏盐层热效应的幅度、范围和主控因素.

表 1 膏盐层热效应模拟中所采用的模型几何参数及描述

Table 1 Description of geometric parameters in thermal modeling for salt structures

模型	盐体形态	盐热导率 (W/(m K))	尺寸 (km)	埋深 (km)	厚度 (km)	备注
1	 丘状	3	100	7	4+0.5	尺寸指盐丘长度; 盐丘中心厚 4 km 并线性 递减至边界处 0.5 km
2		4	100	7	4+0.5	
3		6	100	7	4+0.5	
4		6	100	6	4+0.5	
5		6	100	5	4+0.5	
6	 柱体	3	5	6	1	模型为柱体+盐席组合; 尺寸指模型半径大小
7		4	5	6	1	
8		6	5	6	1	
9		6	7.5	6	1	
10		6	10	6	1	
11		6	10	5	1	
12		6	10	5	2	
13	 矩形	6	10	3	2	尺寸指盐体的半长
14		6	10	4	2	
15		6	10	5	2	

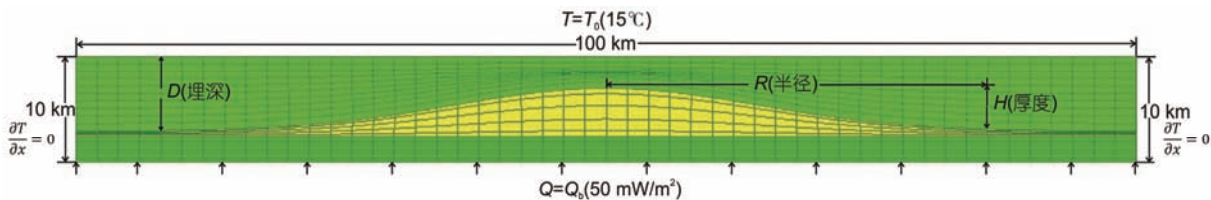


图 2 盐丘数字实验研究中的几何模型(黄色区域为盐丘构造)

Figure 2 Geometrical model of salt dome in numerical experiments (yellow area indicates the salt dome)

3.1 膏盐层对地层温度的影响模式

结合盐丘模型，并考虑盐丘不同的热导率和埋深等地质参数，利用2D有限元数值模拟研究膏盐层对地层温度分布的影响模式。图3给出了盐丘构造引起的地层温度场分布图(对应表1中的模型3)。明显可以看出，同一深度上，盐内及盐下地层的地温线整体下凹，即相对周边地层其温度降低；盐上地层的地温线上凸，也即温度相对周边升高。因此，盐构造的存在能显著地改变地温场分布格局，造成地温异常，其热效应表现为盐上地层温度的相对增加，而盐下地层温度相对降低。此外，地温场扰动最为显著的地方为盐体正上和正下方，随着远离盐体，其温度异常逐渐消失。当然，温度异常的幅度、范围等还与盐体的热导率、厚度和几何形态等诸多因素有关。

3.2 膏盐层热导率对地温异常的影响

若膏盐层和周边其他地层的岩石热导率一样，则不存在地温场异常。因此，膏盐层热导率是造成地温场异常的主要因素之一。模型中假定周边地层的岩石热导率为2 W/(m K)(常规沉积岩热导率)，通过调整膏盐层热导率来考察热导率对地温场影响的大小。前已述及，库车前陆盆地膏盐层的成分较为复杂，既有盐岩，也有含膏、泥质等成分。实测数据表明，纯盐岩的热导率最大(5~6 W/(m K))，膏质、泥质的热导率相对小一些(2~4 W/(m K))。图4给出了柱状模型中膏盐层热导率(K)分别为3, 4, 6 W/(m K)时引起的盐上下地层温度异常情况(表1中的模型6~8)。此外，考虑到库车烃源岩与盐体埋深之间的实际情况，这里所有模型主要考察两个界面处的地热异常：盐

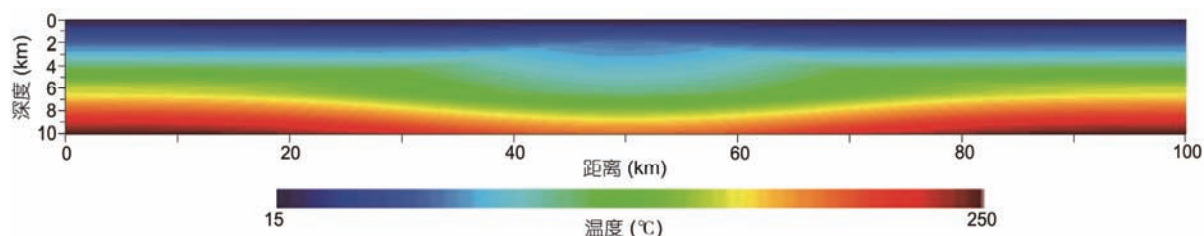


图3 盐丘构造对地层温度场的影响模式

Figure 3 Temperature pattern distributed by the salt dome in the numerical experiment

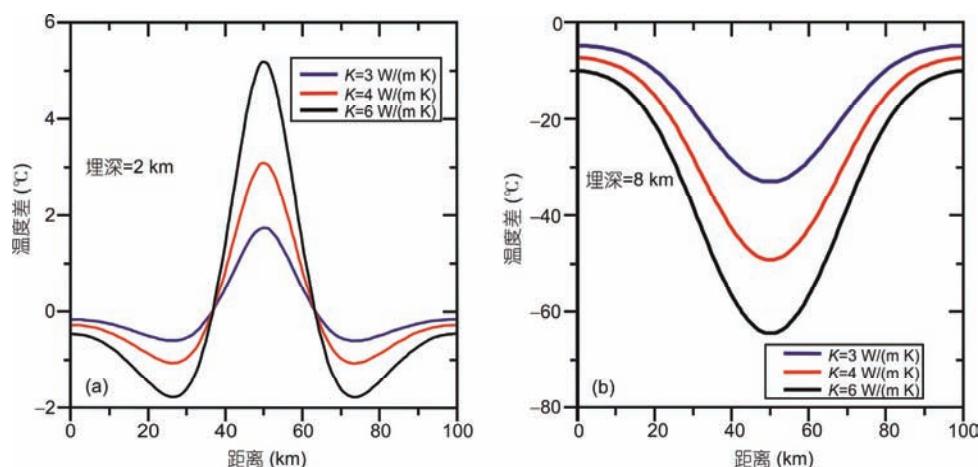


图4 膏盐层热导率变化对盐上、下地层温度异常. (a) 盐上地层温度异常; (b) 盐下地层温度异常

Figure 4 Temperature anomalies of supra- and sub-salt layers derived from variations of salt thermal conductivity. (a) Temperature anomalies of the supra-salt layer; (b) temperature anomalies of the sub-salt layer

上层取埋深(D)2 km处的界面, 盐下层取埋深8 km处(即盐下2 km处)的界面。

膏盐层造成了盐上地层温度升高, 盐下地层温度降低。最大温度异常位于盐体的正上、下方, 并向两侧方向逐步降低。此外, 随着盐体的热导率变大, 其异常值也增大。膏盐层热导率为3 W/(m K)时, 造成盐上温度异常为1.5℃左右, 盐下最大温度异常为-30℃(图4)。盐层热导率增大到4 W/(m K)时, 盐上温度异常为3℃, 盐下最大异常为-50℃; 膏盐层热导率为6 W/(m K)时, 盐上最大温度异常为5℃, 盐下最大温度异常接近-60℃。考虑同一深度(8 km处)的正常地温为215℃(模型中底部边界为50 mW/m², 顶部边界为15℃, 不考虑生热, 且平均热导率为2 W/(m K)), 该温度异常高达30%。盐上温度异常达10%左右(2 km处, 计算方法同上)。因此, 随着盐层热导率变化, 引起的盐上温度异常为3%~10%, 盐下温度异常达15%~30%。

3.3 膏盐层几何形态对地温异常的影响

除了上述膏盐层热导率影响地温异常外, 膏盐

层几何形态差异也是造成地温异常的关键因素。模型仍采用柱状模型(柱头之下的盐席厚度为1 km, 长度为100 km, 对应模型8~10), 通过改变柱体半径(R)大小来考察几何形态变化对地温异常的影响。

如图5所示, 随着盐柱体的几何半径变大, 盐上地层温度正异常则表现为垂向异常幅值变小, 但横向异常范围变大。当柱体半径为5 km时, 引起的温度正异常最大达8℃左右, 这一异常为13%; 半径增为7.5 km时, 温度正异常为6℃左右, 异常接近10%; 半径增大为10 km时, 异常值约为4.5℃, 异常幅度为7%左右(图5(a))。然而, 盐体半径变化对盐下温度异常更为显著, 且随其增大而增大。盐柱体半径为5 km时, 最大负异常为48℃, 异常幅度为22%左右; 半径增大为7.5 km时, 最大负异常为55℃, 异常幅度为25%左右; 当半径为10 km时, 最大负异常接近60℃, 异常幅度为28%左右(图5(b))。显然, 随着盐体半径从5 km增为10 km, 其引起的盐上温度正异常幅度约为7%~13%, 盐下地层温度负异常为22%~28%。

此外, 本文还分析了盐体几何形态变化对热流

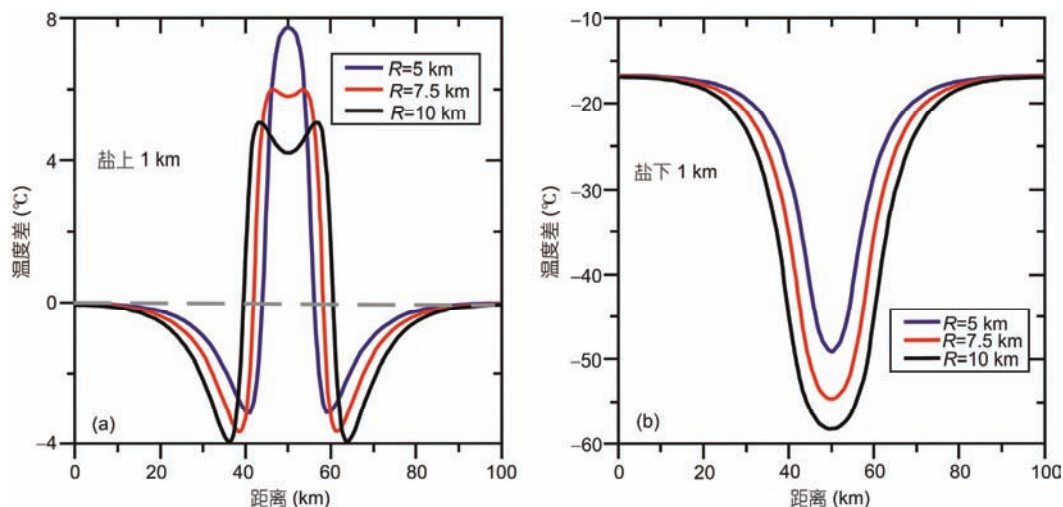


图5 盐体几何形态变化对盐上、下地层温度异常的影响. (a) 盐上温度异常; (b) 盐下温度异常

Figure 5 Temperature anomalies of supra- and sub-salt layers derived from variations of salt geometry. (a) Temperature anomalies of the supra-salt layer; (b) temperature anomalies of the subsalt layer

的影响. 图6是埋深2 km处地层界面的热流随盐体半径变化的情况. 盐柱体半径变化引起的热流正异常为5~8 mW/m², 其幅度为10%~15%. 值得注意的是, 盐上的温度和热流异常均随着盐体半径增大时, 逐渐从单峰向双峰模式转变, 且随半径变化, 盐体中心的热流增加幅度要小于其边界(图5(a)和6). 当盐体半径较小时, 形成一个狭窄的热流快速通道, 因此温度和热流异常最大且为单峰模式; 随着半径变大, 盐体的几何边际效应逐渐体现出来, 热流开始向边界集中, 因为形成了“两边高、中间低”的下凹双峰模式.

盐体几何形态差异除了横向上展布外, 还有垂直向上的厚度变化. 本文利用柱状模型讨论了膏盐层厚度(H)对温度异常的变化(对应模型11和12). 图7展示的是埋深8 km处地层的温度异常随盐体厚度变化的情况. 当盐体厚度(厚度这里指柱状模型中盐席和柱头厚度之和. 柱体厚度保持为3 km, 仅调整盐席厚度为1或2 km)为4 km时, 引起盐下温度负异常最大值58°C, 其幅值达27%; 而当盐体厚度增厚为5 km时, 引起的温度负异常为75°C, 幅度为35%左右. 由此可见, 盐体厚度是控制地层温度异常的核心因素.

3.4 膏盐层埋深对地层温度异常的影响

采用矩形模型来考察盐体埋深(D)对盐上下地层温度异常的影响(模型13~15). 本文选取了2种表达方式: (1) 考虑盐上下某一固定深度处界面的温度异常变化(盐上取埋深1 km处, 盐下取埋深9 km处)(图8);

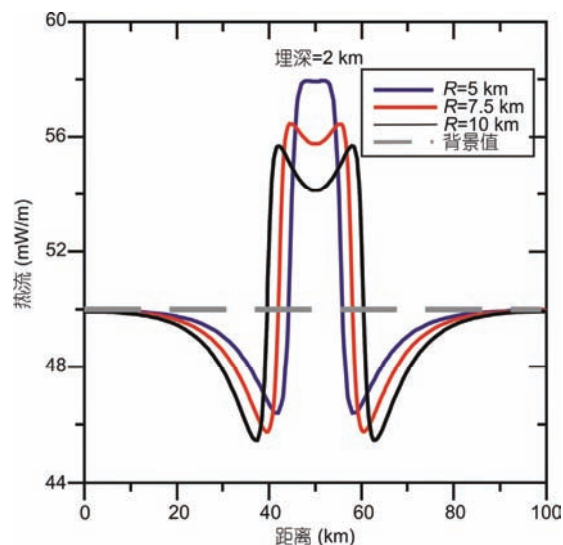


图6 热流随膏盐层几何形态的变化

Figure 6 Variation of heat flow above salt with the change of geometry of salt layer

(2) 考虑随盐体上下某一相对深度界面的温度异常变化(这里盐上下各1 km处)(图9). 需要指出的是, 后者实际埋深界面将会随盐体埋深变化而变化.

如图8(a)所示, 盐上部分表现为增温过程, 盐体周边地层因热折射效应表现为降温过程, 其幅度和增温基本相同. 随着埋深变大, 其增温幅度和影响范围均逐渐减小. 埋深为3 km时, 最大温度正异常为1.5°C左右; 埋深5 km时, 最大温度正异常为0.8°C, 埋深变化引起的盐上温度正异常幅度为2%~4%. 盐

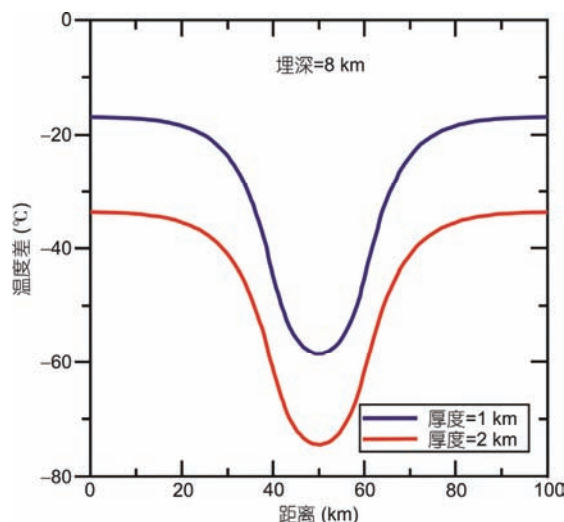


图7 盐下温度异常随盐体厚度的变化

Figure 7 Variation of temperature anomalies below salt with the change of salt thickness

下地层随着埋深增加,其降温过程明显,温度负异常显著;与盐上地层一样,其温度异常幅度随埋深变化不大(图8(b)).埋深为3 km时,最大温度负异常为27℃,异常幅度为11%;埋深为4 km时,最大温度负异常为28℃;埋深为5 km时,最大负异常为29℃左右,基本约11%~12%.

盐体埋深变化时引起其上下各1 km处的地温变化情况如图9所示.温度异常模式基本与上述固定埋深类似,但幅度有所变化.埋深变化造成的盐上最大温度正异常为3~3.8℃.埋深3 km时,最大温度正异

常为3℃,异常幅度为2%;埋深5 km时,最大异常幅度为3%左右(图9(a)).盐下最大温度负异常都接近29℃(图9(b)),其温度变化幅度为13%~18%.

3.5 库车前陆盆地盐构造引起的地温异常

上述系列理论模型研究揭示了膏盐层热效应的基本特征和影响因素.库车前陆盆地普遍发育膏盐.结合库车前陆盆地的含盐构造地震剖面,分析了盐构造引起的温度场异常(图10).模拟中,岩石热导率均来自塔里木盆地的实测数据^[37],本文分别考虑含盐和不含盐(将盐的热导率调整与周边沉积岩热导率一致)情况,然后从含盐的温度剖面中扣除不含盐构造的温度场,即可获得盐构造引起的温度异常.由图10可见,上述系列理论模型中观察到的盐构造对地温场影响的效应均有体现:盐上温度表现为增温正异常,最大异常可达28℃;盐下表现为降温冷却负异常,最大异常幅度可达8℃.需要说明的是,这条剖面得到的盐上温度异常幅度要大于盐下温度异常,与前面理论模型有所差异.这是因为,一方面本剖面中盐丘体模型的尺寸相对剖面而言较大(剖面尺寸仅为35 km×8 km;盐丘约为20 km×2 km),造成盐上聚热效应显著;此外,盐上地层内发育断层构造,深部热流沿着断裂通道向上运移,也会造成热流相对集中.另外,对于浅层而言,盐的热导率相对更大,而其他地层因孔隙发育,热导率偏低,因故两者的差异更大,引起的热异常也更明显.

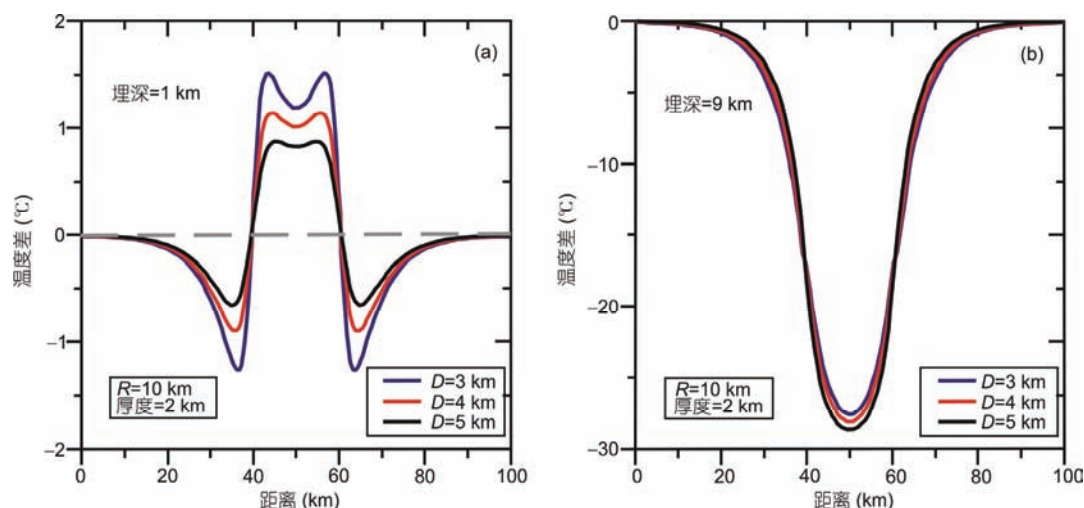


图8 膏盐层之上、下地层温度异常随盐体埋深的变化关系.(a) 盐上(埋深1 km处);(b) 盐下(埋深9 km处)

Figure 8 Temperature anomalies of supra- and sub-salt layers derived from variations of salt depth. (a) Temperature anomalies at 1 km depth of the supra-salt layer; (b) temperature anomalies at 9 km depth of the sub-salt layer

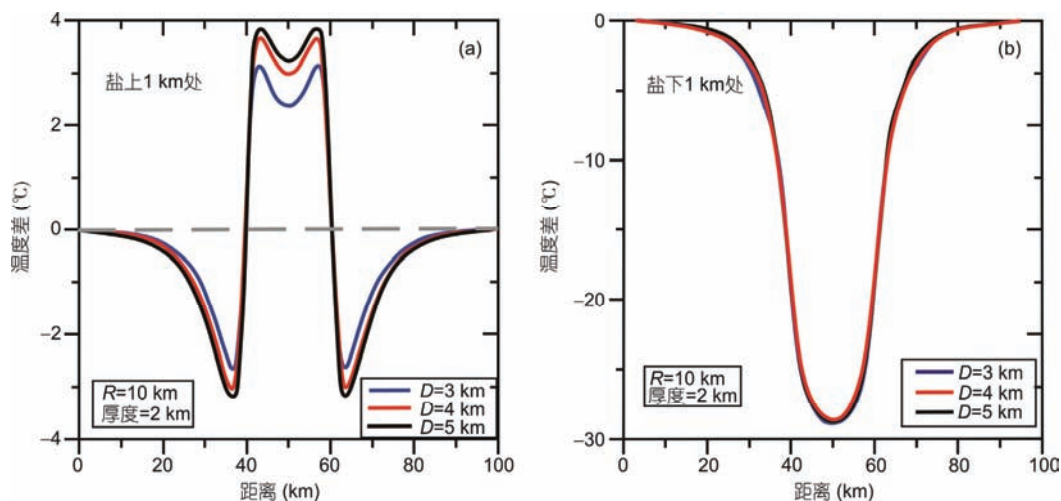


图9 膏盐层上、下各1 km深度处的温度异常随埋深的变化。(a) 盐上1 km处温度异常;(b) 盐下1 km处温度异常

Figure 9 Temperature anomalies of supra- and sub-salt layers derived from variations of salt depth. (a) Temperature anomalies of the supra-salt layer; (b) temperature anomalies of the sub-salt layer

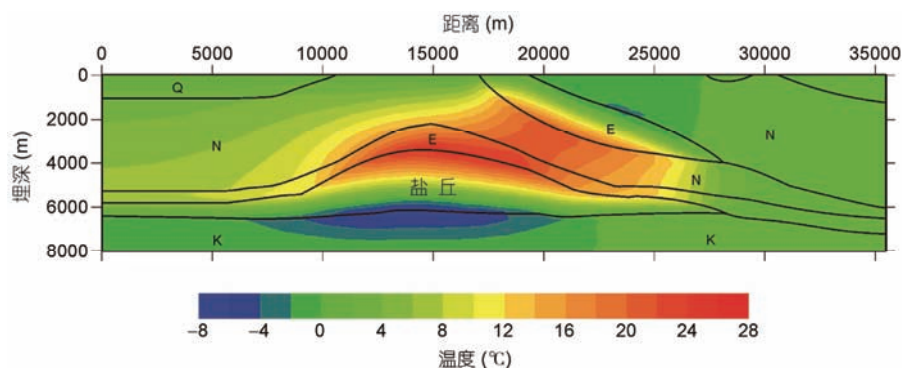


图10 库车前陆盆地含盐构造的温度异常分布模式

Figure 10 Temperature anomaly pattern associated with salt structure for the Kuqa Foreland Basin

4 讨论

膏盐层在海相沉积盆地中普遍发育, 探勘表明盐构造与油气关系密切. 膏盐层热效应研究要回答两个问题: (1) 对现今温度场影响的幅度、范围以及主控因素; (2) 温度异常效应对烃源岩有机质热演化的影响. 下面结合上述的模型研究对这些问题进行了讨论.

4.1 膏盐层热效应的影响幅度和范围

膏盐层的热导率、几何形态、厚度和埋深等因素都会造成温度异常幅度的变化. 理论模型数字实验表明, 膏盐层热导率(K)的改变($3\sim 6\text{ W/(m K)}$)可造成 $3\%\sim 10\%$ 的盐上温度正异常, 盐下地层温度负异常可达 $15\%\sim 30\%$. 膏盐层几何形态(R)改变造成的盐上地

层最大温度正异常为 $7\%\sim 13\%$; 盐下地层温度负异常为 $22\%\sim 28\%$; 盐上地层热流正异常为 $5\sim 8\text{ mW/m}^2$, 变化幅度为 $10\%\sim 15\%$. 膏盐层厚度(H)变化造成盐下温度负异常近 35% . 膏盐层埋深(D)变化造成的盐上地层最大温度正异常为 $2\%\sim 4\%$, 盐下温度负异常为 $11\%\sim 18\%$. 综上所述, 大体可以判断, 膏盐层造成的盐上温度正异常可达 $3\%\sim 13\%$, 引起盐下温度负异常为 $11\%\sim 35\%$; 另外, 盐下异常的幅度整体大于盐上异常. Yu等人^[26]曾对墨西哥湾盐构造的热效应进行了分析, 提出它可造成盐上 30°C 的温度正异常, 盐下近 50°C 的负异常, 温度异常与盐体的尺寸和埋深等因素有关. 此外, 研究表明, 美国路易斯安纳西部海域的盐体亦可造成盐上地温近 30°C 的正异常^[15,24]. Mello等人^[27]结合美国东德克萨斯盐盆, 认为盐构造直接暴露地表时的吸热能力最强, 可造成盐下地层

近85℃的降温. 由于这些研究都是结合研究区盐构造的埋深、展布和厚度等具体地质情况进行分析, 给出的也都是绝对温度异常值; 这些数据会因地而变, 没法和本次模拟的结果进行对比. 我们认为, 相对温度异常幅度可能是一个比较合适的表达.

采用矩形模型来讨论膏盐层引起的地层温度异常的可能波及范围(图11). 盐体引起的温度异常横向范围为30~40 km. 考虑到模型中盐体半径(R)设为10 km, 因此, 温度异常横向范围可达盐体宽度的1.5~2倍. 然而, 本次模型中垂向尺度仅设置为10 km, 且盐体尺寸较大, 没法给出盐体引起的温度异常在垂向上的波及范围. Jensen^[25]的研究表明, 垂向上可影响到盐体厚度2~3倍的深度. 综合起来, 盐体能对其周边横向上宽度为1.5~2倍、垂向上厚度为2~3倍的区域内造成显著的温度异常.

4.2 膏盐层热效应的主控因素

以1D稳态热传导为例, 并假定盐体周边其他地层的热导率一致, 盐体引起的温度异常可简化为如下的公式^[36]:

$$\Delta T = -Q \cdot d \left(\frac{1}{K_{\text{ref}}} - \frac{1}{K_{\text{salt}}} \right), \quad (2)$$

式中, Q 为热流(mW/m^2), d 为盐体厚度(km), K_{ref} 为周边地层热导率(W/(m K)), K_{salt} 为盐岩热导率(W/(m K)). 可见, 温度异常与盐与周边地层之间的热导率差异、

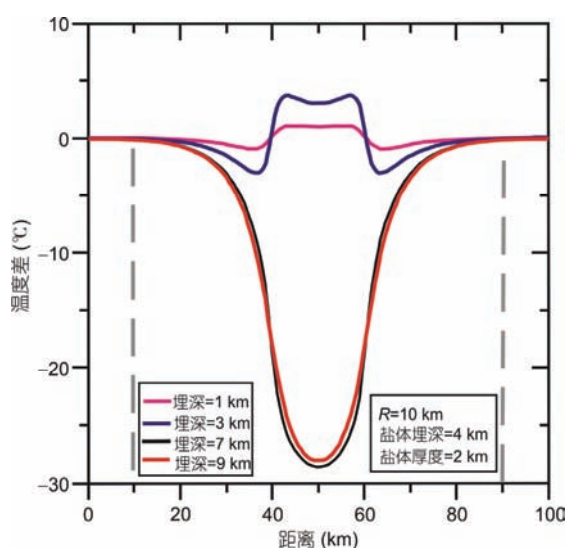


图 11 盐构造导致的温度异常的横向展布范围

Figure 11 Lateral distribution of temperature anomalies associated with salt structure

盐体厚度和热流等因素都有关.

如图4所示, 膏盐层热导率越大, 也即与围岩热导率的差异越大, 其造成的温度异常幅度也越大. 显然, 高热导率是膏盐层热效应的根本因素. 若无热导率差异, 也不会造成温度扰动. 特别是, Jensen^[25]提出只有当膏盐层热导率为周边岩性的2倍以上时, 方可形成较为明显的温度异常. 岩石热导率与其矿物成分、结构和孔隙等因素有关^[12,37]. 沉积岩类中, 盐岩的热导率最高, 约为6 W/(m K) , 大于其他沉积岩热导率的最大值. 因此, 盐含量的高低是膏盐层(这里泛指含膏质、含盐岩和石膏、盐岩等)热导率变化的关键. 对库车前陆盆地膏盐岩进行了采样测试, 西部地区的盐岩热导率较高, 平均值为4.510 W/(m K) ; 东部地区膏盐岩因膏质、泥质含量高, 热导率相对偏低, 平均值为1.884 W/(m K) . 显然, 库车前陆盆地西部的盐体热效应整体要大于其东部地区.

此外, 盐构造的几何形态、厚度和埋深等参数也是重要因素. 本次模拟中, 考察了盐丘、柱状和矩形等不同盐体形态的热效应, 其中, 盐丘的热效应最为显著. Jensen^[25]也指出球状盐体的温度异常大于柱状盐体的影响. 另外, 盐体厚度越大, 其热阻越小, 更易造成周缘热流急剧流向此处, 引起的温度和热流异常幅度也越大. O'Brien和Lerche^[24]对墨西哥湾的盐体(厚约9000 m、埋深1500 m)进行分析, 指出其可造成地表热流近30%的正异常, 温度异常可达25℃. 邱楠生等人^[13]模拟表明1000 m厚的盐层可以引起约20℃温度异常. 一般地, 盐体埋深越浅、其热异常幅度越大、但范围也越集中; 随着埋深增加, 虽然热异常幅度会变小, 但影响范围增大. 比如, Mello等人^[27]模拟表明, 若盐体直接暴露于地表, 可造成盐体正上方的地表热流异常高达3倍, 盐体周边的地表热流则降低近一半; 埋深至250 m时, 其热流异常约为2倍, 埋深至1000 m时, 热流异常约为10%. 本文给出的模拟结果中, 取的参考面大多为盐上埋深1~2 km处, 其异常幅度(3%~13%)与前人认识一致.

需要指出的是, 若盐层均匀覆盖于下伏地层之上, 其引起的温度差异呈整体变化. 只有当盐层厚度在横向上变化时, 才会造成厚度小的区域之下的热流流向厚度大的地区, 从而引起强烈的热流横向再分配, 形成区域上的热流和温度异常. 因此, 深部地层中盐体形态和尺寸的精准解译是探索其热效应的前提.

4.3 膏盐层热效应对烃源岩热演化的意义

温度是影响有机质热演化及油气生成的关键因素之一,膏盐层上述热效应如何影响其周边地层有机质热演化是油气资源评价与勘探中的重要问题.众所周知,烃源岩温度每升高 10°C ,其有机质热演化速度加快1倍^[38,39].仍以1D模型为例,利用BasinMod软件考察了1000 m厚的膏盐层对下伏烃源岩热演化的影响(图12).如图所示,1000 m厚的膏盐层可使得其下地层的温度“相对冷却”近 20°C ;相应地,这一降温过程会进一步推迟烃源岩进入生烃门限,其滞后时间约20 Ma.由此可见,膏盐层因热导率大,快速散热冷却,抑制盐下烃源岩热演化过程,从而对深层盐下油气具有保护作用,这样拓展了油气勘探的范围.特别是近年来,库车前陆盆地盐下6500~8000 m埋深的碎屑岩储层内发现了一批高产、稳产的优质天然气田^[40].上述盐构造的地热效应可能是库车前陆盆地盐下深层-超深层油气勘探取得重大突破的原因之一.

Mello等人^[27]虽然讨论了盐构造对其下地层烃源岩热演化成熟度(R_o)的影响,指出盐体能抑制下部地层的有机质热演化,但缺乏定量表达.库车前陆盆地在构造挤压应力作用下,古新统库姆格列木组

($E_{1-2}km$)膏盐层自身发生塑性流动,导致了大规模的盐岩聚集,局部形成盐背斜构造,主要发育在克拉苏构造带和秋里塔格构造带核部.为了评估膏盐层对下伏烃源岩有机质成熟度的影响,我们选取了该测线剖面上的两口人工井(PW1和PW2),进行对比分析.结合地震剖面解释给出的盐构造发育情况和相应的参数计算下伏烃源岩(侏罗系和三叠系)成熟度 R_o ,然后再假定古新统库姆格列木组不含盐时,计算其成熟度,对比两者的差异.

分析表明,含膏盐层时,下伏烃源岩有机质的成熟度降低,降低幅度取决于地层的含盐量和厚度情况.如下图所示(图13),PW1井的古新统厚度为527 m,不考虑含盐时,现今 R_o 为1.86%;考虑含盐时, R_o 为1.80%.虽然 R_o 有所减小,但幅度不大,仅为3.3%.PW2井处的盐层厚度为3187 m,不含盐时的有机质成熟度为2.07%,考虑含盐后, R_o 降低至1.69%,降幅为18.3%.从而使得原本处于过成熟阶段的烃源岩现今仍为生气阶段,具有较大的潜力.由此可见,膏盐层会抑制下伏烃源岩有机质热演化,其幅度取决于盐层厚度.

膏盐层热导率相对周边地层偏高,形成热流的快速通道.类似水体向阻力最小的方向流动,膏盐层因热阻低,会造成其下部和周边的热流快速流向盐

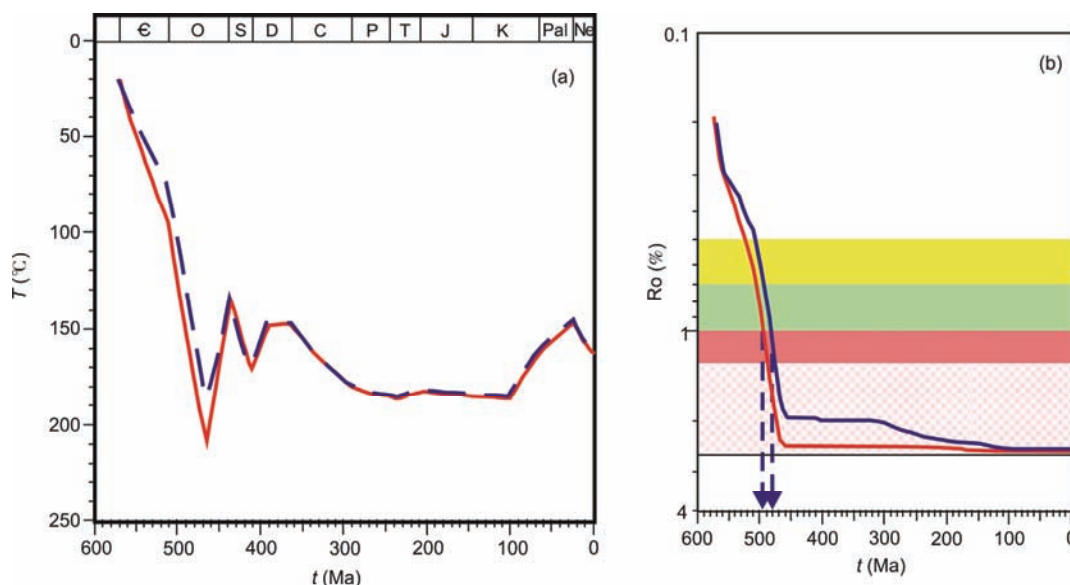


图12 膏盐层对盐下温度及生烃时限的影响(蓝线表示含1000 m厚的膏盐层,红线表示无膏盐层). (a) 对盐下地层温度的影响; (b) 对盐下烃源岩热成熟度的影响

Figure 12 Effects of salt structure on the subsalt temperature and hydrocarbon generation. The blue line means the salt with a thickness of 1000 meter, while the red one without salt. (a) Effects of salt layer on sub-salt temperature; (b) effects of salt layer on sub-salt thermal maturity

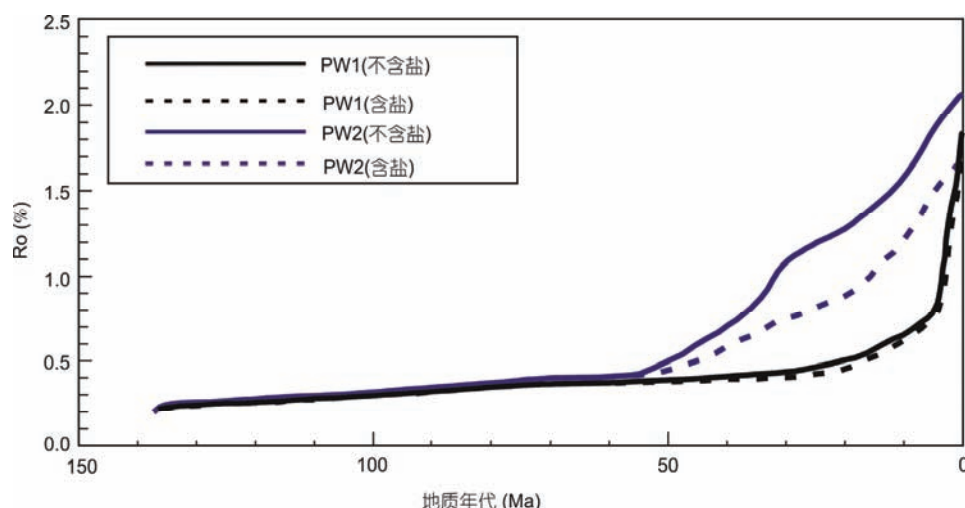


图 13 膏盐层对库车前陆盆地侏罗系烃源岩有机质成熟度的影响

Figure 13 Effects of salt layer on thermal maturity of Jurassic source rocks for the Kuqa Foreland Basin

层, 具有“吸热”功能, 导致下伏岩层的温度及有机质热演化迅速降低, 构成了上覆层的“烟囱效应”(chimney effect). 除了厚度之外, 膏盐层热效应对其下烃源岩热演化影响程度还与盐体就位的时间有关. 一般地, 如果盐体覆盖于烃源岩之上的时间越长, 冷却降温过程对有机质热演化的抑制作用也越大. 比如, 巴西东部大陆边缘的盐体在主力烃源岩沉积之后就沉积下来, 盐体导致的热异常对烃源岩影响时间已超过了100 Ma, 强烈抑制盐下烃源岩热成熟度, 因此该区的盐下深部油气具有很大潜力^[27].

库车前陆盆地发育一套古近系-新近系膏盐层, 厚度一般在200~900 m, 局部可超过4500 m, 但其东西部的膏盐层在其成分、厚度和埋深等方面均有所差异. 其中, 西部主要为库姆格列木群($E_1 \sim 2km$)盐层, 分布范围广, 埋深大, 厚度大, 最大厚度可超过4500 m; 东部主要为吉迪克组(N_1j), 分布面积较小, 埋深也浅, 厚度较小、最厚处约1800 m^[32,40]. 此外, 西部膏盐层主要以盐岩为主, 热导率较大; 东部以含膏质、泥质为主, 热导率偏低. 前面的理论模型分析表明, 上述各种地质因素的差异会使得库车前陆盆地东、西部膏盐层对烃源岩热演化的影响也存在差异. 库车前陆盆地盐下的中生界烃源岩埋深大, 膏盐层覆盖区至今没有钻遇到深层烃源岩, 相关实测数据较少. 不过, 根据甲烷碳同位素与镜质体反射率(R_o)之间的换算关系而获得的大北2气田的 R_o 为1.64%~1.78%, 克深2-克拉2气田的 R_o 为1.90%~2.25%^[41]. 若不考虑膏盐层影响, 仅按该区正常地温条件计算获

得的克深2三叠系烃源岩 R_o 值约为4.5%. 两者相差甚大, 显然, 膏盐层显著地抑制和延缓了下伏烃源岩的热演化过程. 库车前陆盆地相继探明发现了克拉2和大北1等大型气田. 然而, 前人早期工作中在没考虑膏盐层影响的情况下, 指出库车前陆盆地烃源岩生烃高峰为新近纪的康村期至库车期^[42], 但该区冲断带盐下大规模构造圈闭的形成期却要晚一些, 为库车期至第四纪^[43], 两者不甚匹配. 显然, 古近系巨厚膏盐层抑制和延缓了下伏中生界(侏罗系和三叠系)烃源岩的热演化过程, 才使得冲断带盐下的烃源岩生气高峰期推迟进而与构造圈闭有效期匹配, 形成了上述大气田, 否则早期形成的油气会随着断裂而散失. 鲁雪松等人^[44]结合库车前陆盆地的实际地质情况和多种可能影响因素, 综合分析了该区中生界烃源岩成熟度的时空分布特征, 发现 R_o 分布具有显著的南北差异和东西差异. 前已述及, 库车前陆盆地的盐构造空间分布也存在上述的南北和东西差异, 我们推测烃源岩成熟度的时空分布差异应与盐构造有关. 由于现有实际资料的限制, 我们只是针对部分人工井开展了膏盐层对烃源岩成熟度影响的模拟, 没有从面上来勾勒库车前陆盆地盐构造对成熟度分布的影响.

5 结论

通过上述研究, 获得如下认识.

盐岩的高热导率这一特殊热物性能显著改变盐体周缘地层的地热分布格局, 具体表现为造成盐上地层温度升高, 加速盐上烃源岩热演化; 使得盐下地

层温度降低,进而抑制盐下烃源岩热演化.地热异常的幅度和范围与盐层热导率、盐构造几何形态、厚度和埋深等因素有关.

库车前陆盆地古近系盐构造发育使得其下伏侏

罗系烃源岩热演化过程受到明显抑制,可造成烃源岩成熟度 R_o 值降低18%,从而为盐下深层油气资源保存和探寻提供了科学依据.海相油气资源潜力评价与勘探中应关注盐构造的热效应.

致谢 本研究基础资料收集方面得到中国石化石油勘探开发研究院的大力支持.南京大学尹宏伟教授对库车前陆盆地盐构造建模提供了有益的意见.美国加州理工学院Joann M. Stock教授对英文摘要进行了润色.

参考文献

- Jackson M P A, Roberts D G, Snelson S. Salt tectonics: A global perspective. AAPG Mem, 1996, 65: 454
- Rowan M G, Jackson M P A, Trudgill B D. Salt-related fault families and fault welds in the northern Gulf of Mexico. AAPG Bull, 1999, 83: 1454–1484
- Warren J. Evaporites: Their Evolution and Economics. Oxford: Blackwell Science, 1999. 438
- Jia C Z, Zhao W Z, Wei G Q, et al. Salt structures and exploration of oil and gas (in Chinese). Petrol Explor Dev, 2003, 30: 17–19 [贾承造, 赵文智, 魏国齐, 等. 盐构造与油气勘探. 石油勘探与开发, 2003, 30: 17–19]
- Tang L J, Jin Z J, Jia C Z, et al. Multi-stage salt structure and hydrocarbon accumulation in Tarim Basin (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2004, 34(SI): 89–97 [汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 塔里木盆地多期盐构造与油气聚集. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I): 89–97]
- Jin Z J, Zhou Y, Yun J B, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China (in Chinese). Oil Gas Geol, 2010, 31: 715–724 [金之钧, 周雁, 云金表, 等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向. 石油与天然气地质, 2010, 31: 715–724]
- Jin Z J. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2011, 41: 910–926 [金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2011, 41: 910–926]
- Jin Z J, Long S X, Zhou Y, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China (in Chinese). Oil Gas Geol, 2006, 27: 571–583 [金之钧, 龙胜祥, 周雁, 等. 中国南方膏盐岩分布特征. 石油与天然气地质, 2006, 27: 571–583]
- Alsop G I, Blundell D J, Davison I. Salt Tectonics. London: Special Issue of Geological Society, 1996, 100: 310
- Ma X H, Hua A G, Li J M, et al. Salt Bearing Oil and Gas Basins (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 1–111 [马新华, 华爱刚, 李景明, 等. 含盐油气盆地. 北京: 石油工业出版社, 2000. 1–111]
- Robertson E C. Thermal Properties of Rocks. USGS, 84–441 Open file Report. Reston: United States Geological Survey, 1988. 1–106
- Clauser C, Huenges E. Thermal conductivity of rocks and minerals. In: Ahrens T J, ed. Rock Physics and Phase Relations—A Handbook of Physical Constants. AGU Reference Shelf Series 3. Washington DC: American Geophysical Union, 1995. 105–126
- Qiu N S, Hu S B, He L J. Theory and Application of Geothermal Regime in Sedimentary Basins (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. 34–36 [邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 2004. 34–36]
- Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al. Present-day geothermal regime in Tarim Basin, northwest China (in Chinese). Chin J Geophys, 2009, 52: 2752–2762 [冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 塔里木盆地现今地热特征. 地球物理学报, 2009, 52: 2752–2762]
- Vizgirda J, O'Brien J J, Lerche I. Thermal anomalies on the flanks of a salt dome. Geothermics, 1985, 14: 553–565
- Nagihara S, Sclater J G, Beckley L M, et al. High heat flow anomalies over salt structures on the Texas continental slope, Gulf of Mexico. Geophys Res Lett, 1992, 19: 1687–1690
- Corrigan J, Sweat M. Heat flow and gravity response over salt bodies: A comparative model analysis. Geophysics, 1995, 60: 1029–1037
- Nagihara S. Three-dimensional inverse modeling of the refractive heat flow anomaly associated with salt diapirism. AAPG Bull, 2003, 87: 1207–1222
- Norden B, Forster A, Balling N. Heat flow and lithospheric thermal regime in the Northeast German Basin. Tectonophysics, 2008, 460: 215–229
- Khutorskoi M D, Teveleva E A, Tsybulya L A, et al. Heat flow in salt dome basins of Eurasia: A comparative study. Geotectonics, 2010, 44: 289–304
- Ismail-Zadeh A, Wilhelm H, Volozh Y. Geothermal evolution of the Astrakhan Arch region of the Pricaspian Basin. Inter J Earth Sci, 2008, 97: 1029–1043

- 22 Ismail-Zadeh A, Wilhelm H, Volozh Y, et al. The Astrakhan Arch of the Pricaspian Basin: Geothermal analysis and modeling. *Basin Res*, 2010, 22: 751–764
- 23 Bauer K, Moeck I, Norden B, et al. Tomographic P wave velocity and vertical gradient structure across the geothermal site Grob Schonbeck (NE German Basin): Relationship to lithology, salt tectonics and thermal regime. *J Geophys Res*, 2010, 115: B08312, doi: 10.1029/2009JB006895
- 24 O'Brien J J, Lerche I. The influence of salt domes on paleotemperature distribution. *Geophysics*, 1984, 49: 2032–2043
- 25 Jensen P K. Analysis of the temperature field around salt diapirs. *Geothermics*, 1990, 19: 272–283
- 26 Yu Z, Lerche I, Lowrie A. Thermal impact of salt: Simulation of thermal anomalies in the Gulf of Mexico. *Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans*, 1992, 42: 181–192
- 27 Mello U T, Karner G D, Anderson R N. Role of salt in restraining the maturation of subsalt source rocks. *Mar Petrol Geol*, 1995, 12: 697–716
- 28 Yang S C, Lu Q Z, Song C Z, et al. Evolution of Mesozoic source rock's organic maturation in Kuqa Foreland Basin and its influence factors (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2005, 26: 770–785 [杨树春, 卢庆治, 宋传真, 等. 库车前陆盆地中生界烃源岩有机质成熟度演化及影响因素. *石油与天然气地质*, 2005, 26: 770–785]
- 29 Han D M. Effect of gypsum salt on geotherm and hydrocarbon evolution in Dongying depression (in Chinese). *West-China Explor Eng*, 2011, 9: 84–86 [韩冬梅. 东营凹陷膏盐层对地温及成烃演化的影响. *西部探矿工程*, 2011, 9: 84–86]
- 30 Zheng D S, Li M L, Cai J G, et al. Effect of deep gypsum on thermal evolution of source rock and its distribution in Dongying sag (in Chinese). *Petrol Geol Eng*, 2011, 25: 1–3 [郑德顺, 李明龙, 蔡进功, 等. 东营凹陷深层膏盐岩分布及其对烃源岩热演化的影响. *石油地质与工程*, 2011, 25: 1–3]
- 31 Liu S W, Yang X Q, Yang S C, et al. Thermal effect of salt bed in sedimentary basin: Implications for hydrocarbon thermal evolution (in Chinese). In: *Chinese Geophysics 2009*. Beijing: Science and Technology of China Press, 2009. 736 [刘绍文, 杨小秋, 杨树春, 等. 沉积盆地膏岩层的热效应及其对有机质热演化的影响. 见: *中国地球物理 2009*. 北京: 中国科学技术出版社, 2009. 736]
- 32 Wang X, Wang Z M, Xie H W, et al. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2010, 40: 1655–1668 [汪新, 王招明, 谢会文, 等. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2010, 40: 1655–1668]
- 33 Yin H W, Wang Z, Wang X, et al. Characteristics and mechanics of Cenozoic salt-related structures in Kuqa Foreland Basins: Insights from physical modeling and discussion (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2011, 17: 308–312 [尹宏伟, 王哲, 汪新, 等. 库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制: 物理模拟和讨论. *高校地质学报*, 2011, 17: 308–312]
- 34 Wu Z Y, Yin H W, Wang X, et al. Characteristics and deformation mechanism of salt-related structures in the western Kuqa depression, Tarim Basin: Insights from scaled sandbox modeling. *Tectonophysics*, 2014, 612–613: 81–96
- 35 Yu Y X, Tang L J, Yang W J, et al. Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. *AAPG Bull*, 2014, 98: 135–159
- 36 Sandiford M. Mechanics of basin inversion. *Tectonophysics*, 1999, 305: 109–120
- 37 Liu S W, Feng C G, Wang L S, et al. Measurements and analysis of thermal conductivity of rocks in Tarim Basin, NW China. *Acta Geol Sin*, 2011, 85: 598–609
- 38 Lopatin N V. Temperature and geologic time as factors in coalification (in Russian). *Akad Nauk SSSR Izv Ser Geol*, 1971, 3: 95–106
- 39 Waples D W. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1980, 64: 916–926
- 40 Wang Z M, Li Y, Xie H W, et al. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa Foreland Basin (in Chinese). *China Petrol Explor*, 2016, 21: 37–43 [王招明, 李勇, 谢会文, 等. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识. *中国石油勘探*, 2016, 21: 37–43]
- 41 Zhuo Q G, Meng F W, Zhao M J, et al. The salt chimney effect: Delay of thermal evolution of deep hydrocarbon source rocks due to high thermal conductivity of evaporites. *Geofluids*, 2016, 16: 440–451
- 42 Li M, Bao J P, Wang H, et al. The analysis of the maturity parameters of source rock and hydrocarbons in Kuqa Foreland Basin, Tarim Basin (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2004, 15: 367–378 [李梅, 包建平, 汪海, 等. 库车前陆盆地烃源岩和烃类成熟度及其地质意义. *天然气地球科学*, 2004, 15: 367–378]
- 43 Neng Y, Qi J F, Xie H W, et al. Structural characteristics of northern margin of Kuqa depression, Tarim Basin (in Chinese). *Geol Bull China*, 2012, 31: 1510–1519 [能源, 漆家福, 谢会文, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部边缘构造特征. *地质通报*, 2012, 31: 1510–1519]
- 44 Lu X S, Song Y, Zhao M J, et al. Thermal history modeling of complicated extrusional section and source rock maturation characteristics in Kuqa Foreland Basin (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2014, 25: 1547–1557 [鲁雪松, 宋岩, 赵孟军, 等. 库车前陆盆地复杂挤压剖面热演化历史及烃源岩成熟度演化特征. *天然气地球科学*, 2014, 25: 1547–1557]

Summary for “沉积盆地盐构造热效应及其油气地质意义”

Geothermal effects of salt structures on marine sedimentary basins and implications for hydrocarbon thermal evolution

LIU ShaoWen^{1*}, YANG XiaoQiu², QIU NanSheng³, YANG ShuChun⁴ & LI XuDong¹

¹ Key Laboratory of Coast and Island Development, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

² Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, China Academy Sciences, Guangzhou 510301, China;

³ State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China Petroleum University, Beijing 102249, China;

⁴ Research Institute of China National Offshore Oil Corp. (CNOOC), Beijing 100027, China

* Corresponding author, E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

Evaporitic salt is prevalent in marine sedimentary basins, and many discovered hydrocarbon reservoirs are generally associated with salt structures in the world; accordingly salt structures have attracted much attention from academia and industry during the past decade. The Tarim Basin, located in northwest China, is the largest marine sedimentary basin in China with great hydrocarbon resource potential. Previous studies of salt structures in this basin mainly focused on its strong sealing capacity and structural traps created by salt structures. However, besides its extreme impermeability and low viscosity, rock salt has other unique thermal properties, including a large thermal conductivity as high as 5–6 W/(m K), usually 2–3 times greater than that of other common sedimentary rocks, but a relatively low radiogenic heat production. This strong contrast in thermal properties could change the evolving thermal regime and associated thermal history of the source rocks around salt bodies, but it has not been understood well. Herein based on the theoretical models and interpreted salt-bearing seismic profiles from the Kuqa Foreland Basin, northern Tarim Basin, we use 2D finite element numerical experiments to investigate the impacts of salt structures on the basin geothermal regime and associated hydrocarbon thermal evolution. Our results show that, owing to their high efficiency in heat conduction, the salt rocks would result in obviously positive temperature anomalies (3%–13%) above the salt body and negative temperature anomalies (11%–35%) in the subsalt, enhancing and restraining the thermal maturation of source rocks above and below the salt body, respectively. The amplitude and extent of geothermal effects of salt structures depend on the thermal conductivity, geometry, thickness and burial depth of the salt bodies. The thermally affected area around the salt body can be 2 times the salt radius laterally and 2–3 times the salt thickness vertically. Salt structures in the Kuqa Foreland Basin can prominently cool the subsalt formation temperature and accordingly reduce the thermal maturity (Ro) of Jurassic source rocks as much as 18%, enabling the source rocks to stay in the range of gas generation rather than reaching an over-mature stage as expected previously; this situation is favorable for deep hydrocarbon preservation below salt. Because the salt structures in the west and east Kuqa Foreland Basin show strong differences in their thickness, geometric pattern, burial depth and composition, the thermal effects of salt structures on thermal maturation of subsalt source rocks should differ accordingly, which is supported by the observed temporal-spatial variation of Ro for Jurassic source rocks in this basin. Finally, we propose that the geothermal effects of salt structures will be of great importance in the deep hydrocarbon resources potential assessment and exploration in marine sedimentary basins in China.

salt structure, geothermal gradient, thermal property, thermal evolution, Kuqa Foreland Basin

doi: 10.1360/N972017-00076