

文章编号:0253-9985(2010)06-0725-09

热力作用的地质、成矿(藏)效应及其判识

刘池洋

(西北大学 大陆动力学国家重点实验室,含油气盆地研究所,陕西 西安 710069)

摘要:本文重点讨论了热力作用在沉积盆地形成、构造变动、油气赋存等方面的地质效应和影响。研究认为:1)热力作用是盆地形成的重要动力和类型,论述了热力盆地形成机制和动力学过程;2)热力作用是富烃凹陷形成的必要条件,即国内外富烃凹陷一般均具有高-较高的地热背景;3)热力构造存在普遍,类型特殊,构造特征复杂。进而讨论了热力作用地质效应的判识及研究。

关键词:热力作用;热力盆地;热力构造;富烃凹陷;深部作用;盆地动力学

中图分类号:TE121 **文献标识码:**A

Geologic and metallogenic or pool-forming effects of the thermodynamic process and their identification

Liu Chiyang

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Oil and Gas Basin, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: This paper mainly discusses the geological effects of thermodynamic process on the formation of sedimentary basins, structural changes and hydrocarbon occurrence. Thermodynamic process is an important dynamo type of basin-forming. It is one of the necessary conditions for the formation of a hydrocarbon kitchen, which in the world generally have high or relatively high geothermal backgrounds. Thermodynamic structures are extensive in distribution, special in structural types, and complex in structural features. Identification methods of the geological effects of thermodynamic process are also discussed.

Key words: thermodynamic process, thermodynamic basin, thermodynamic structure, hydrocarbon kitchen, process in deep layers, basin dynamics

热力作用是地球上存在普遍、影响深远的主要地质动力^[1]和各种内动力地质作用的源头。它在地球演化、地幔对流、板块运动、变质作用、岩浆活动、构造变动、大地构造单元的本质属性及特征、不同圈层物质交换和内生矿产成矿作用等方面,均处于极为重要而不可轻视的地位;同时直接或间接地影响着多种外动力地质作用的进程、地貌演变、环境变迁、地质灾害发生和外生矿产资源的贫富、聚散及宏观分布等。

由于热力作用及其地质、成矿(藏)效应的发生过程形式多样、产生结果特征复杂,加之伴生和

后继发生的各种地质作用的叠加、改造,对其研究难度颇大,故在研究的深度、涉及的广度和系统性方面,总体仍很薄弱^[1-3]。

本文所讨论的热力作用,主要是指来自地壳深部或地幔的气液等热流体及深部热能向上运动所产生的地质作用和结果,一般不包括典型的岩浆活动,或没有规模的岩浆物质直接出现。主要由岩浆活动形成的火山机构和地貌景观等相关地质构造现象,也应属热力作用的结果,笔者将其划归热力作用和热力构造的端元类型。对岩浆作用及其相关地质构造的研究历史较长、论著甚丰,相

收稿日期:2010-12-07。

作者简介:刘池洋(1953—),笔名刘池洋,男,教授、博士生导师,盆地动力学、油气地质与勘探、构造地质、能源地质。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05023-001-002);国家自然科学基金重点项目(90814005);西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项。

对较易识别,不是本文讨论的重点。但在多数情况下,在气液等热流体和深部热能向上运动过程中,常不同程度地伴随有岩浆活动,二者可独立存在,也可互为因果;本文所及的有些热力构造,其深部可能就是深成岩浆侵入体,故本文的讨论也不同程度的涉及到岩浆活动,同时还借鉴以往对岩浆活动及其地质效应的研究成果。

本文重点讨论热力作用在沉积盆地形成、构造变动、油气赋存等方面的地质效应和影响,进而探讨热力作用地质效应的判识及研究。

1 盆地成因的重要动力

1.1 盆地成因及分类

沉积盆地的成因是当今地球科学讨论热烈、但尚未解决的重大前沿科学问题之一。从盆地形成和动态演化的角度来看,沉积盆地是地史上地壳或岩石圈较长时间相对沉降,沉积物在其中不断充填过程中的一种负向地壳构造^[1]。其中相对沉降是盆地的生命线。简言之,盆地的沉降机制,即为盆地的成因^[1]。

目前,关于沉积盆地成因的分类方案颇多。Boot、赵重远等曾先后将盆地形成的主要动力分为热力、应力和重力 3 种基本类型^[4,5]。在地球运动和演化、盆地等地质构造单元形成中,这是存在普遍、影响广泛、意义重要的 3 种主要地质动力^[1~5]。据此,可将盆地的成因分为热力、应力、重力^[4]和复合 4 种成因类型^[5]。我国学者以往多侧重于对应力成因的研究,甚至有些学者将应力成因及其压(挤压)、张(伸展)、剪(走滑)3 种性质的应力作为盆地形成的唯一动力条件和全部类型。致使盆地的热力和重力成因及其作用效应常被忽视。但热力和重力成因盆地独具个性,不仅不能被应力成因的研究所替代,而且仅从应力分析常会得出与实际情况相差较远或相悖的结论。故对热力、应力和重力 3 种动力的地质作用和效应均应重视^[1,2]。

1.2 盆地热力成因

盆地热力沉降成因的动力来源是:地球中深部(中、下地壳-地幔或其下)较高的热力活动异常和其空间分布的明显非均匀性^[1]。热力成因盆

地的显著共性是,盆地具有较高的热演化经历,至少在盆地初始发生和演化的早期阶段是如此。在沉积盆地形成过程中,深部热力作用的表现形式多样、作用过程复杂,已有论述各有侧重、个性明显。剔去研究案例的个性特征,可将沉积盆地热力成因的主要机理和形成过程总结归纳为以下 4 种类型(图 1)。

在地壳深部或地幔较高热异常作用(如源于深部的地幔柱或热点的上涌喷流、热地幔上拱等)的大背景下,1)随岩石圈的温度经历了显著增高、持续和后期快速或缓慢降低的变化过程,其体积相应发生了因增热而膨胀、隆升、破裂和遭受剥蚀改造,随后变冷而体积缩小、塌陷沉降、接受沉积和汇水,即沉积盆地形成的过程。2)下地壳的物质进入局部温压更高的环境中会发生相的转化,即向结构排列更紧密、密度更大的方向转化;致使体积缩小,促使上地壳浅部或表层发生沉降。3)深部高密度物质的局部上涌贯入,使地壳上部物质的数量和质量局部显著增加,在地球均衡作用下该区发生相对沉降。4)深部炙热的低密度异常地幔(如热液、气体等)的上侵,导致地壳或岩石圈膨胀、拱升并遭受剥蚀,随后的较快速冷却又使其体积发生收缩、引起地壳上部或表浅层塌陷沉降,形成沉积盆地。

对发生在特别大地构造环境和具有特殊演化过程的伸展裂陷热力盆地,如主动裂谷的发育、大陆破裂初期阶段三叉裂谷的产生、洋中脊扩张和大洋盆地的形成,以及被动裂谷的热衰减沉降等,对其形成与深部热地幔物质上涌、导致地壳-岩石圈破裂、沉降的过程和机理,前人已有诸多文献讨论。对产生在克拉通内部或造山带等构造单元的热力盆地,则论及甚少,且或然性和争议均较多。

对以稳定为特征的内克拉通盆地的成因,长

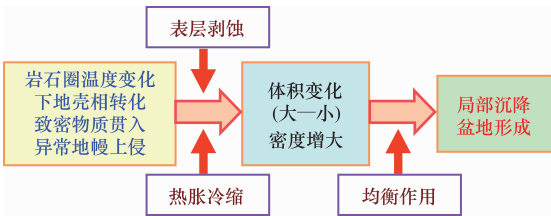


图 1 沉积盆地热力成因机理和形成过程示意图

Fig. 1 Sketch map showing thermodynamic forming mechanism and sedimentary process

期令人困惑。如出现在北美克拉通上、位于美加边境的古生代密歇根(Michigan)盆地(图2)。该盆地面积逾 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,整个盆地在形态上“惊人的圆”,缺少深大断裂切割、但各时代的沉积-沉降中心如同心圆状的容器在同一位置垂向重叠,累计沉积了约5 000 m以海相碳酸盐岩为主的地层;各时代地层分布稳定、产状平缓,向盆地边部厚度变薄至尖灭或超覆在下伏地层之上。分析该盆地的剖面图(图2b)显而易见,图中380 km处的背斜构造为晚古生代末或之后才形成。若剔去后期改造的影响,该盆地数个同心圆状盆地上下重叠构成的“深口袋”形状更为明显和典型(图2b)。对这种发生在大自然中结构独特、又缺乏构造活动行迹的盆地,其成因令人费解。后来发现,在该盆地发育之初寒武纪有过较高的区域热异常活动。于是,在综合多种资料研究的基础上,将该

盆地的成因概括为热鼓胀说,即深部较高热力异常作用上拱一局部隆升—遭受剥蚀—遂冷却沉降—充填堆积的盆地形成机理和过程^[6]。尽管对该盆地热力成因的细节仍有质疑之音,其热力证据尚需进一步完善,但多数人认为,对这类盆地,目前尚没有比热力成因或热鼓胀说更好的诠释。

笔者根据盆地的深部结构、地质构造特征和热演化特点及区域动力学背景等综合研究认为,我国新生代的南襄盆地(图3)^[7]、景谷盆地^①属热力成因盆地;中生代松辽盆地的形成演化也与热力作用有着密切的成因联系。南襄盆地“小而富”的油气地质特征、松辽盆地丰富的油气资源、面积仅85 km²的景谷微型盆地能够产油,均与其盆地属性和较高的热演化经历息息相关。

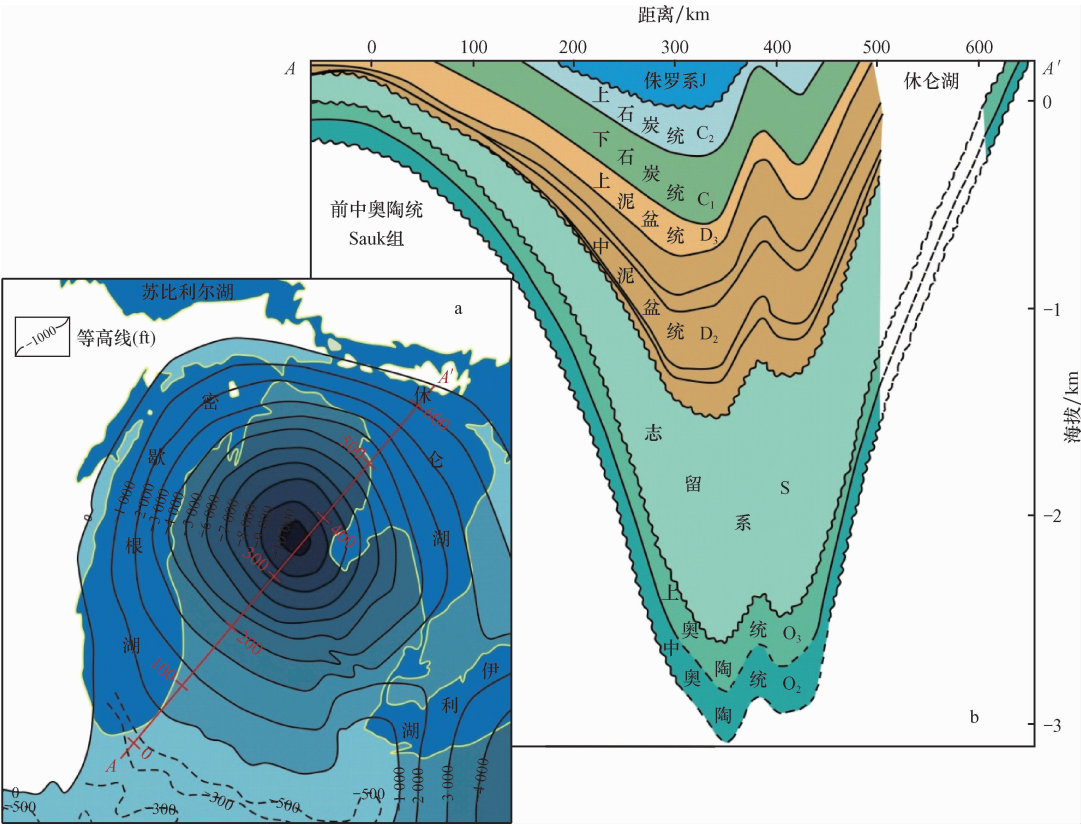


图2 密歇根盆地构造图(据文献17,18综合,有改动增补)

Fig. 2 Structural map of the Michigan basin

a. 中奥陶统特伦顿灰岩顶面构造等高线图;b. 剖面图(剖面位置见图2a)

① 刘池洋. 中国小型含油气盆地类型与油气赋存. 第二届中国石油地质年会交流论文,2006

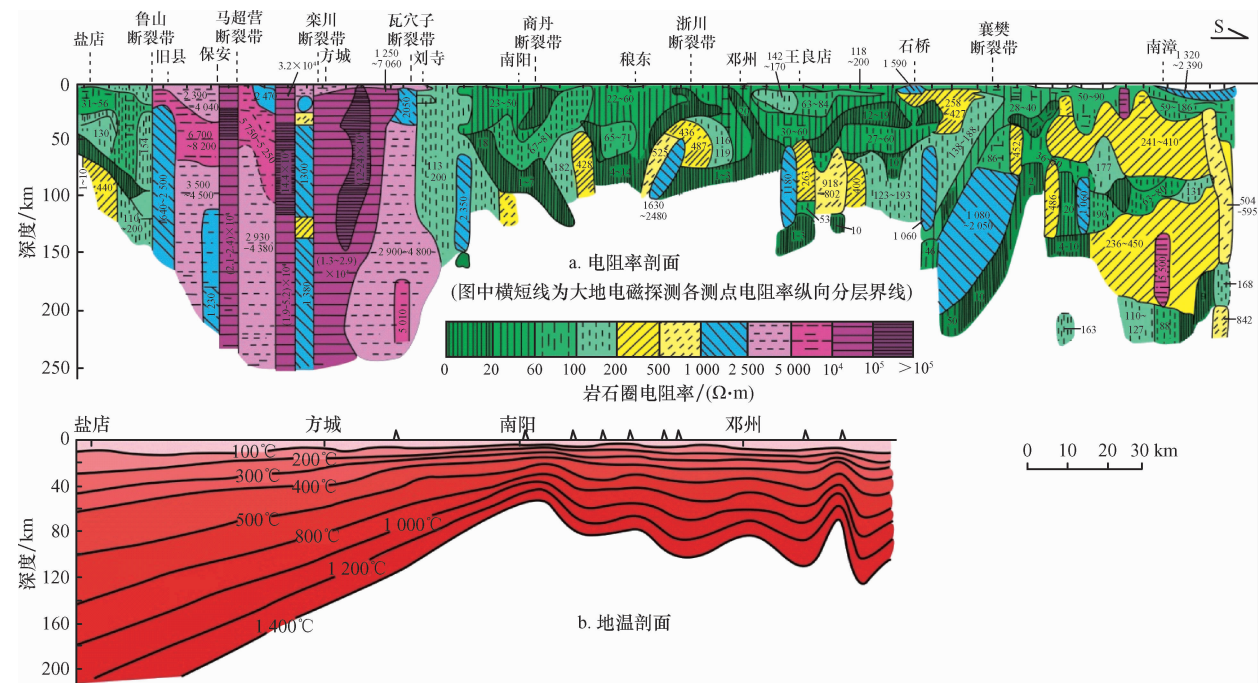


图 3 秦岭叶县-南漳断面岩石圈电阻率(a)和地温结构剖面(b)图(据文献 12,图 a 重新编绘)

Fig. 3 Profiles of resistivity (a) and geotemperature (b) of the lithosphere from Yiexian to Nanzhang in Qinling area^[12]

2 富烃凹陷形成的必要条件

包括油气在内的几乎所有矿产资源,大都明显的存在着富者更富、贫者愈贫、贫富相差极为悬殊的偏极性现象^[8]。对油气而言,目前全球石油剩余探明储量约 2/3 在中东地区, 3/5 以上在环波斯湾 5 个国家。不仅全球不同油气区油气资源贫富悬殊,就是在同一地区的不同盆地或同一个含油气盆地内的不同坳陷或凹陷,其地质特征貌似相同、相似或相近者,其油气资源规模或潜力常相差极大。陆相沉积盆地油气资源的有无和富贫,取决于烃源岩的有无和优劣,同时烃源岩控制着油气的分布。这即为从勘探实践中总结的“源控论”。烃源岩形成于大、中型盆地内的次级负向单元,如坳陷、凹陷或洼陷中。于是控制优质烃源岩形成和分布的“富烃凹陷”,就成为近年来油气勘探、资源评价关注的焦点和研究的热点。这是对“源控论”的拓展和深化,具有明显的陆相盆地特色。

笔者认为,在对富烃凹陷评价和遴选、对其形成条件或主控因素研究时,均应对凹陷(坳陷、洼陷)的热状态和其热演化过程给以足够的重视。

需要特别强调的是,这种重视不应仅限于对烃源岩热演化和成熟度的研究方面(当然,这也是富烃凹陷评价和研究必不可少的重要内容)。

在我国中生代陆相含油气盆地中,目前得到较普遍承认的富烃凹陷或石油资源丰度高的凹陷(坳陷),无论其结构构造为断陷(如烃源岩为古近系的渤海湾盆地辽西凹陷、大民屯凹陷、东营凹陷、渤中凹陷、东濮凹陷、饶阳凹陷等,南襄盆地的泌阳凹陷;酒西盆地的下白垩统青西凹陷等),还是大型坳陷(如松辽盆地的白垩系中央坳陷及其内部的主要生油凹陷,鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组富烃凹陷等),均具有或经历了比正常盆地和所在盆地其他凹陷明显要高的地热背景和热演化。而且,在这些富烃凹陷形成过程中,特别是主力优质烃源岩形成的沉积阶段,一般都具有更高或该区最高的地热环境。

在上述富烃凹陷中,我国单位面积石油资源丰度最高的几个“小而富”的凹陷或盆地均在其中,如辽西凹陷、大民屯凹陷、泌阳凹陷、酒西盆地等。在世界范围内,单位面积或体积石油资源丰度位居前列的几个盆地,如美国西部的洛杉矶盆地、文图腊盆地,印度尼西亚的中苏门答腊盆地

等,也均具有较高的热背景或热演化过程。

湖盆水体的性质和环境条件决定其营养水平和高生产力。微生物-各类浮游植物等的勃发和有机质群体的有效保存为优质烃源岩形成的物质基础。优质烃源岩发育是富烃凹陷形成的关键和根本。来自现代海洋及湖泊的各种生物群体的超常繁盛及其生存活动环境和相关实验表明,在微生物等有机体勃发、优质烃源岩形成和向烃类转化过程中,源于地壳或地幔深部、体现不同圈层物质交换的较高热力作用环境做出了不可替代、积极的重要贡献^[9]。所以,在对富烃凹陷形成条件和主控因素的研究中,较高热力作用和环境的重要作用远超出了烃源岩成熟度的单一方面。

尽管目前对富烃凹陷形成过程中热力作用的重要贡献及其作用细节的认识还较有限和表面化,对其作用的机理和过程仍需进一步探究和深化,但国内外大量的油气盆地勘探实例揭示,富烃凹陷形成于较高的热背景和热演化过程之中则毋庸置疑。换言之,较高的热背景是富烃凹陷形成的重要而必要的条件。

3 特殊而常见的热力构造

3.1 热力构造分类

热力构造的形成,主要是通过深部热物质向上拱升,热能向上传递、引起局部地区温度显著增高而发生变形所致。对此类构造研究薄弱,迄今尚无统一的分类方案。

笔者根据对羌塘盆地、渤海湾盆地、河西走廊-阿拉善地区诸盆地的具体研究,结合国内外相关文献,从盆地地质特征和研究应用的实际出发,提出了两种可并行、共用的热力构造分类方案^[7]。

3.1.1 地貌形态分类

根据构造地貌形态,结合周邻地层的分布和时代变化,可分为3类^[7]:1)穹窿型,即穹窿构造或其他正向隆起构造;2)塌陷型,在地表总体呈负向构造特征;3)边隆核陷型,构造边部隆起,中部塌陷沉降。边隆核陷型可近似地看作前两类构造的复合,即相当于中部已塌陷的穹窿型,或塌陷不完全的塌陷型。

穹窿型和塌陷型构造既分别代表了两类不同

的热力构造,可彼此独立存在;同时也分别体现了热力构造早、晚不同演化阶段构造的原型。因在热力构造形成的初期或早期,尚无例外的均发生过隆起。塌陷型热力构造就是由早期穹窿型构造演化而来的。如在讨论裂谷等“热”盆早期的构造环境和发育背景时,习称的“拱张”即包含了上拱隆升和张裂沉陷的双重含义。对热力构造而言,可以说穹窿型是塌陷型的早期阶段和构造原型。但需注意的是,由于受热力作用过程中伴随物质(如热液、岩浆性质等)的不同、后期区域构造环境的变化等因素的影响,并非所有热力构造的穹窿型必然都会演变为塌陷型。亦即,穹窿型热力构造是可以独立存在和发展的,目前所见者不一定都形成较晚,也未必将来都会向塌陷型演变。

3.1.2 热力作用物质上侵高度分类

根据热力作用上拱的深浅和影响深度,可分为两大类:1)表浅层喷出一侵入型,热液或岩浆已喷出地表,或侵入、上升到浅层。通常呈穹窿型,如热穹窿构造、变质核杂岩体等。后期的剥蚀改造可使已成岩的浅成侵入物质出露地表。这类构造相对较易识别和确定。这类构造若在地表呈塌陷型或边隆核陷型,其上覆盖的较新地层,既为确定其成因和形成时代提供了线索,又为深入研究增添了难度。2)中深层侵入型,热力作用的热物质一般在基底或中、下地壳内活动,但热力作用的影响可达盖层不同部位甚或地表。即一般不易直接见到参与热力作用的物质,但其影响或地质效应却可直接观察。这类构造无论是穹窿型或塌陷型,研究和识别的难度均较大、且常有多解性。

这两种类型热力构造在形成过程中,在地表均可产生前述3种不同的地貌形态。

3.2 构造特征

3.2.1 穹窿型热力构造

在深部热物质上升、热能向上传递的热力作用过程中,首先发生隆升,形成大小不等、形态各异、内部有不同程度起伏的复式隆起构造。但其外形总体以长宽近等或长宽比 $\leq 3:1$ 的穹窿形式居多,故以穹窿型作为该隆起构造类型的代表而命名。

在穹窿型热力构造隆升的同时,地壳发生破裂;破裂大致以隆升最高的部位为中心,呈放射状

向外延伸。随着隆起的范围扩大和高度增加,由破裂而演变的断裂数量增多、延伸增长、水平和垂直断距增大。在剖面上,断层倾向的定向性不明显;平直如刀切似的断面并不多见;断裂两盘的升降表象以正断层为主,在有些部位可见逆断层或擦断层。在平面上,典型笔直线性延展的断裂甚少;断裂向外扩展延伸时有分叉,产生新的分支断层。在深部热力作用导致地壳浅部隆升的过程中,与放射状断裂近于直交或大角度相交方向的横向断层并不发育;除隆升最高的中心局部外,这类数量不多的横向断层一般不会构成同心圆状式排布格局。这些大致由中心向外呈放射状分布的断裂及破裂的裂陷强度和数量,向外延展到热力作用影响范围的边缘地带明显变弱、减少到渐趋消失。故可据此断裂和破裂向外延展消失的包络线,大致圈定深部热力作用在浅表层影响的范围。此包络线一般以隆升最高的部位为中心,大致构成一个更大的准同心圆型外圈。由于深部热物质活动和热能传递的复杂性和多样性,此外圈的形态常是不规则、甚或多变的。上述这些断裂构造特征及其形成,与应力成因模式多有相悖,用后者难以自圆其说。

在穹隆型热力构造发育的断裂,一般以隆升最高的中心部位活动最强、断距最大。在隆升最高部位,若干断裂密集汇交、各下降盘裂陷联合,导致该部位常最早发生较小范围的沉降,形成小型断陷盆地和湖泊。如果将岩浆活动形成的火山看作穹隆型热力构造的一种端元类型的话,我国长白山天池可作为此现象的实例。

3.2.2 塌陷型热力构造

塌陷型热力构造一般经历了早、晚两个特征不同的发育阶段^[1,2,10]:1)早期深部热力-岩浆作用上拱并喷溢,地壳表浅层遂隆升,沉积厚度减薄甚或未沉积并遭受较强烈剥蚀;2)晚期深部热力衰减、冷却收缩,表浅层塌陷、发生快速沉降,接受较(巨)厚沉积。此过程使在同一地区发生的两种隆、坳性质截然相反、地质作用(强烈剥蚀和快速充填)完全不同的发育阶段和地质现象,在时间上前后相随,在空间上上下叠置。这种特别的构造及其演化过程和特征,为热力作用形成的构造所特有,是用应力成因模式难以解释的^[1,10]。

此演化过程和地质构造特征与热鼓胀型热力

成因盆地^[6]相似。所不同的是,早期的热力隆升阶段常为盆地的形成背景,一般并不将其划归盆地的演化时限;而盆地内的塌陷型热力构造可发育在盆地形成演化的不同阶段,特别是发生在盆地演化过程中或之后的此类构造更为常见,且意义重大。

热力隆起区晚期的塌陷-沉降和接受快速沉积,是通过断裂活动明显增强和断距显著增大来实现的。这些断裂的断面大多倾向塌陷区,并环塌陷区分布;随时间发展向外后移扩展,使沉降-沉积区不断扩大。从而形成了以早期隆升最高、裂陷较早的沉降区为中心,呈似同心圆状分布的多条断裂环带。由于这种断裂展布特点和构造格局,是在早期放射状断裂体系之上形成和发展的。因而,此断裂环带的形状极不规则,多呈由数条不同方向断层联合构成的锯齿状边界断裂带。

上述前、后两期差别较大的复杂构造,在同一位置上下叠加、限制和改造,使塌陷型热力盆地的构造特征更为复杂多变。其共同特点是:在平面上,断裂的展布既显不规则同心圆状的环带特点,又时见放射状断裂和构造行迹^[10,6]。但断层的平面展布和剖面结构常杂乱无序,缺乏明显的区域方向性,如断层的走向和倾向多变。垂向上断层两盘的相对升降关系复杂,断距变化快,具“正”、“逆”断层表象的断裂相伴同存邻。同时还伴生有不同特征的褶皱变形、滑覆构造和变质核杂岩等热穹隆构造。

这种热力构造特有的演化过程和构造特征,在力学性质上鲜有统一的规律性;体现不同力学性质的断裂构造表象共生同存,在平、剖面上多难以组合成统一的断裂系统,也不易划分为相关的先后形成序次^[6,10]。故一般用应力成因的统一模式均难以圆满解释,也不可能深刻揭示其成因机制与形成过程。

4 热力作用效应的判识和厘定

4.1 以特别的地质构造特征为线索

前已述及,热力作用在表浅层常形成诸多特有或特别的地貌景观和构造现象。如穹隆状隆起、准圆型负向构造(盆地、凹陷)、放射状断裂系统、似同心圆型环带状断裂排布;前述的断面特征、断层延展及分叉等;早期隆起剥蚀与晚期沉降-沉积在同一位置相继发生、上下叠置等现象。

这些特有或特别的地质构造现象,是发现、疑是和寻找热力作用效应的重要线索或信号。

有必要强调指出,仅据这些现象尚不足以最终厘定热力构造或热力作用的地质效应。因上述特别现象之表象在其他地质作用和构造环境中仍有可能形成。如近圆形穹窿构造,也可由较深部膏盐或泥的上拱所形成。这种盐底辟或泥底辟一般与较高热异常无关,而且与周邻地层相比大多还相对较凉。

4.2 以较高热状态和异常热演化为证据

热力构造或热力作用的其他地质效应,必然有比周邻更热地热状态或热演化经历。这是确定热力作用地质效应的必备条件。目前可用于沉积盆地热演化研究的方法较多,常用的如:有机质镜质体反射率(R_o)、磷灰石和锆石等矿物的裂变径迹、孢粉的色变指数、地层的成岩作用和相关矿物演变等。

值得注意的是,有时热演化程度相对较高的岩石也并不一定必然是热力作用的直接结果。如在较大型断裂的断面或断裂构造破碎带,较强烈的断裂活动沿断裂带会产生构造动力增温。同时,由于断裂的深切和沟通,可使深部的热能和不同相态、不同性质的热物质向上运动。与此有关的岩石较高热演化、温泉或热泉分布、岩浆的侵入或喷出等,虽与热力作用有关,但通常将其形成归属断裂活动(作用)的结果。

所以,厘定热力作用的地质效应,除相对明显较高的热演化特征外,还需结合地震等深部探测资料,排除深大断裂的存在及其相关地质作用。

4.3 深部背景和结构特征——必要的重要证据

热力作用的动力来自地壳中深部或地幔,故热力构造和热力作用的其他地质效应,应有明显的深部背景和结构特征。除少数深井可能偶然会钻遇热力构造外,对深部结构、构造的研究主要借助于各种地球物理勘探和测深资料。地球物理探测的重、磁、电、震、热各种方法所获资料,均可用来研究热力作用的深部背景及结构^[10]。由于地质条件和岩石地层物质组成的差异,使用各种物探方法的有效性因地而异。

以下通过实例剖析,讨论各种地球物理等方法在确定热力作用深部背景中的应用。

4.4 实例剖析

4.4.1 达卓玛穹窿型热力构造

达卓玛复背斜位于羌塘盆地东南部,近东西向展布,长约 55 km,中部宽达 8 km。关于其成因,一般认为与该地区其他褶皱一样,为燕山晚期盆地南界班公湖—丁青洋关闭,南北向挤压作用在盆地内产生的构造变形^[11]。通常水平挤压作用下形成的褶皱,特别是正向构造,卷入变形的地层主要发生在浅层及中部,向深部变形及其影响则渐趋减弱,以至消失。但各种地球物理资料显示,达卓玛复背斜具有明显的深部背景,地震和 MT(大地电磁测深)剖面清楚地显示,其影响深度远已超过 10 km。笔者根据该复背斜复杂多变的构造特征、出露地层的较高 R_o 值(T_3 达 3.26%, J_3x 为 1.07%)、地层分布及其层序和接触关系、地震反射剖面 and 大地电磁测深及航磁、重力等物探资料,确定该构造为穹窿型热力构造,局部发生塌陷^①。

在达卓玛复背斜通过的近南北向地震剖面,在桩号(CDP号)114.0—122.0之间,即复背斜轴部,存在一宽约 8 km、向深部直达剖面底部 6 s 线的杂乱反射相带,外形呈丘状。在桩号 108.6—123.6 之间,该剖面的地震反射波速度结构(图 4)从地表到剖面底线 6 s 处,均为明显的垂直低速带;与其南、北两侧较高的速度差别显著、高低分明(图 4,图 5)。通常情况下,地震反射波速度由浅向深增高。背斜构造将深部较高密度的物质抬高,其地震剖面的速度结构应表现为上拱,而不是图中所示的明显下凹(图 4)。该复背斜深部垂直的低速带,只能说明由下而上运动的热力作用,使其深部物质膨胀、破碎,岩石密度显著降低所致。在桩号 110.0—122.0 之间的典型低速区,宽达 12 km。该区带在地表的构造形态,北部呈复背斜(桩号 114.0—122.0)、南部具复向斜结构(桩号 114.0—110.0)。在南部复向斜中,地震反射波速度最低(图 4,图 5);在地表,上白垩统阿布山组 and 古近系双湖组未卷入变形,不整合覆盖在前期褶皱变形并遭剥蚀改造的侏罗纪—三叠纪不同时代地层之上。这佐证和记录了该热力构造南部后期又经历了塌陷和塌陷发生的时间。

① 刘池洋. 羌塘盆地构造特征及其演化. 中国石油天然气集团公司“九五”科技工程项目成果, 1999

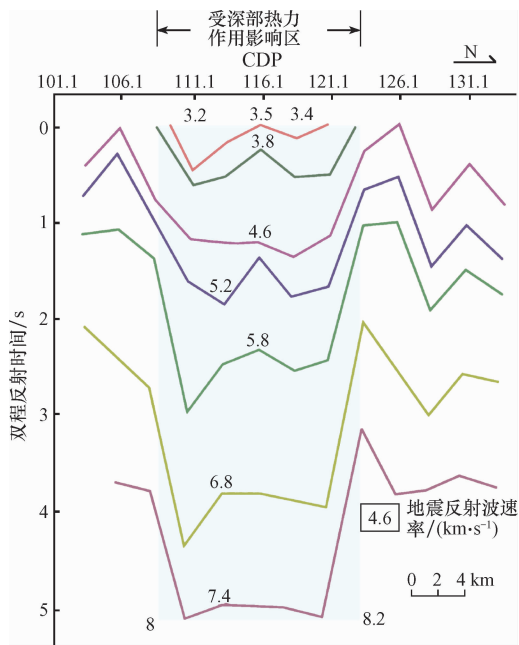


图 4 羌塘盆地达卓玛复背斜地震剖面速度结构图
Fig. 4 Velocity structure on the seismic profile crossing the Dazhuoma anticline in the Qiangtang Basin

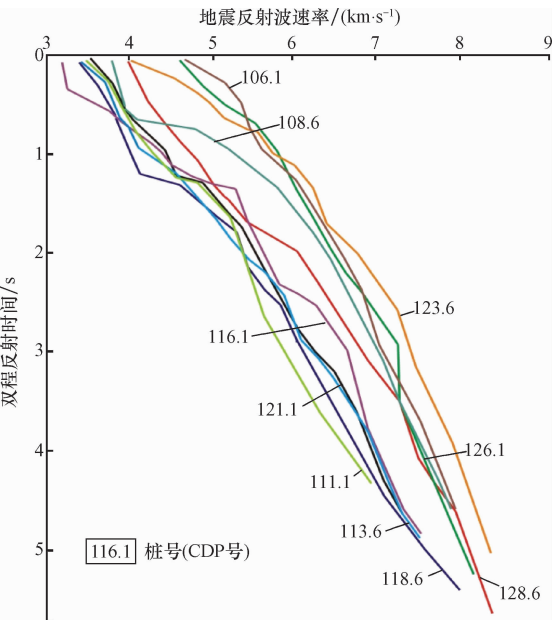


图 5 羌塘盆地达卓玛复背斜地震剖面时间-速度关系图
Fig. 5 Time-velocity relationship on the seismic profile crossing the Dazhuoma anticline in the Qiangtang Basin
注: 图内数据为对应图 4 内桩号

其他地球物理资料也不同程度的反映和印证了该复背斜的上述深部异常特征和演化过程。

4.4.2 南襄盆地——中深层侵入-塌陷型热力构造

南襄盆地位于秦岭-大别造山带的接合部位,

面积 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 白垩系-新生界厚达 9 000 m 以上。为我国著名的“小而富”的含油气盆地。盆地内的次级构造单元泌阳凹陷, 是我国油气丰度最高的富烃凹陷之一。对位于造山带内南襄小型含油气盆地的形成, 盆地内次级小型凹陷油气资源如此丰富的原因, 长期以来引起人们的关注和思考。

从秦岭中南襄盆地通过的河南叶县—邓州—湖北南漳深部反射地震剖面^[12~14] (图 6), 在包括南阳在内的南北宽超过 20 km 的范围内 (桩号 2 050—2 500), 在地震剖面双程反射时间 3 ~ 10 s (深度大致为 5 ~ 30 km) 区间基本上为空间反射, 被描述为“整个地壳都是透明的”^[14]。此特征在 300 km 长的地震剖面上绝无仅有。结合该区 10 s 之下和相邻区反射波的产状特征可知, 此段地震剖面为较典型的深部岩浆-热力作用上拱特征的反映^[1,2,7,10]。该区与地震低速区和重力低相对应, 在地球物理上作此解释是合理的^[14]。

沿叶—南剖面一线, 在南襄盆地范围内^[11,15], 电性结构主体为低阻, 电阻率一般小于 $200 \Omega \cdot \text{m}$, 多数为数十 $\Omega \cdot \text{m}$, 最低仅有几 $\Omega \cdot \text{m}$, 其中散夹有个别 $200 \sim 2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 的小型脉状异常体。这与相邻高达数千、上万, 甚至十几万 $\Omega \cdot \text{m}$ 的高阻区形成鲜明对比 (图 3a)。该区段岩石圈热结构较邻区明显要热 (图 3b), $1\,400^\circ\text{C}$ 的等温线, 在盆地范围内, 一般在 60 ~ 80 km 深处, 在南阳及其以南宽逾 10 km 的地段, 深度小于 60 km; 然而在盆地之外相邻地区, 却在 120 ~ 200 km 或更深。可见, 岩石圈的电性和热结构均显示, 南襄盆地现今仍为上地幔隆起区。从方城向南 60 km 到南阳附近, 中岩石圈厚度变化约 110 km, 如此巨大的变化, 只有用软流层上涌形成热力作用构造来解释^[15]。此地幔上隆区没有沿秦岭造山带的构造走向展布, 而是与之斜交, 显然, 其形成时间应在秦岭造山期之后。这与大别-东秦岭造山期后强烈的花岗岩浆侵位和秦巴地区东部以中性岩发育为特征的火山活动, 主要形成于早白垩世 (140 ~ 100 Ma)^[16] 相一致。

南襄盆地最早沉积的古近系及分布不均的白垩系各统组地层, 不整合覆盖在主要由中、上元古界变质岩及古生代火成岩组成的基底之上。可见, 南襄盆地裂陷沉降的时间、盆地发育前区域隆起与该区前期较高的热背景, 共同构成了一个在时间上相继发生、在构造特征上有序演变的热力作用动力学过程。

值得注意和尚需进一步探讨的问题是, 秦岭叶

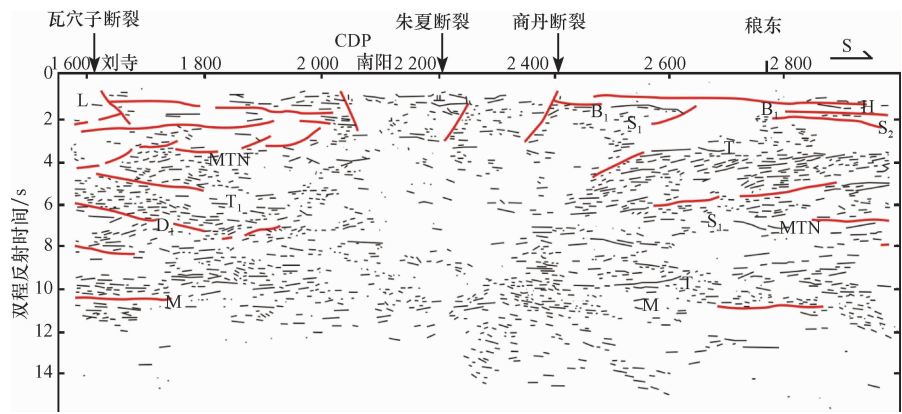


图6 秦岭叶县—南漳深部反射地震剖面(据文献 12,有改动)

Fig. 6 Reflection profile from Yiexian to Nanzhang in the deep of Qinling area

(图中 M 等符号为地震反射界面代号)

县—南漳诸测深剖面(图3,图6)所揭示的深部结构特征,应与泌阳富烃凹陷有着重要的联系,但此剖面线尚未从泌阳凹陷通过。测深剖面所显示的深部热结构特征是否能延伸到泌阳富烃凹陷? 在整体构造变动活跃的秦岭造山带,是否会发生深部向西、表浅层向东的上、下水平错位,从而使泌阳凹陷与早期深部热力作用的位置分离? 这确是深部作用与浅层效应等地球动力学研究值得思考和探索的问题。

最后有必要指出,在对热力作用和其地质效应厘定和研究时,应在区域地球动力学环境和演化的大背景下,剔除后期改造的可能影响,将重、磁、电、热、地震各种地球物理资料和地质、地球化学及钻井等资料综合研究、彼此补充、相互印证,才可能获得较客观的认识和结论。其中较高的热演化经历和显示热力作用的深部结构构造是重要和必需的基本素材和证据^[7,10,17~19]。

致谢:研究生邓煜、郭真、李健帮助清绘了图件,特致谢意!

参 考 文 献

1 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(1):1~23

2 刘池洋. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点[J]. 地学前缘,2005,12(3):113~124

3 杨兴科,刘池洋,杨永恒,等. 热力构造的概念分类特征及其研究进展[J]. 地学前缘,2005,12(4):385~396

4 Boot M H P. Mechanisms of basin subsidence:an introductory review[J]. Tectonophysics,1976,36(1-4):1-5

5 赵重远. 沉积盆地的成因和演化及其赋存的大地构造环境和油气资源[A]. 见:赵重远,编. 石油地质学进展[C]. 北京:地质出版社,1988. 241~262

6 Leighton M W. 内克拉通盆地[M]. 刘里斌,于福华,杨时榜,等译. 北京:石油工业出版社,2000. 573~619

7 刘池洋,魏永佩,赵红格. 造山带研究中值得注意的几个问题[A]. 马宗晋,杨士恩,吴正文. 构造地质学——岩石圈动力学研究进展[C]. 北京:地震出版社,1999. 130~137

8 刘池洋,张复新,高飞. 沉积盆地成藏(矿)系统[J]. 中国地质,2007,34(3):365~374

9 刘池洋,赵重远,杨兴科. 活动性强,深部作用活跃——中国沉积盆地的两个重要特点[J]. 石油与天然气地质,2000,21(1):1~6

10 刘池洋,杨兴科,任战利,等. 羌塘盆地雀莫错沉降-堆积中心成因:热力衰减塌陷沉降[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):147~154

11 李亚林,王成善,黄继,等. 羌塘盆地褶皱变形特征、定型时间及其与油气的关系[J]. 石油与天然气地质,2008,(03):283~289

12 张国伟,张本仁,袁学诚. 秦岭造山带过程和岩石圈三维结构图丛[M]. 北京:科学出版社,1996

13 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型[J]. 中国科学(D辑),1996,26(3):209~215

14 袁学诚,徐明才,唐文榜,等. 东秦岭陆壳反射地震剖面[J]. 地球物理学报,1994,37(6):749~758

15 金昕,任光辉,曾建华,等. 东秦岭造山带岩石圈热结构及断面模型[J]. 中国科学(D辑),1996,26(增刊):13~22

16 卢欣祥. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程——秦岭花岗岩研究进展[J]. 地球科学进展,1998,13(2):213~214

17 Sleep N H, Sloss L L. The Michigan basin[A]. In: Bally W, Bender P L, McGetchin T R, eds. Dynamics of plate interiors[C]. American Geophysical Union and Geological Society of America Geodynamics Series,1980,1:93~97

18 Kingston D R, Dishroon C P, Williams P A. Global basin classification system [J]. AAPG Bulletin,1983,67(12):2175~2193

19 吴冲龙,林忠民,毛小平,等. “油气成藏模式”的概念、研究现状和发展趋势[J]. 石油与天然气地质,2009,(16):673~683