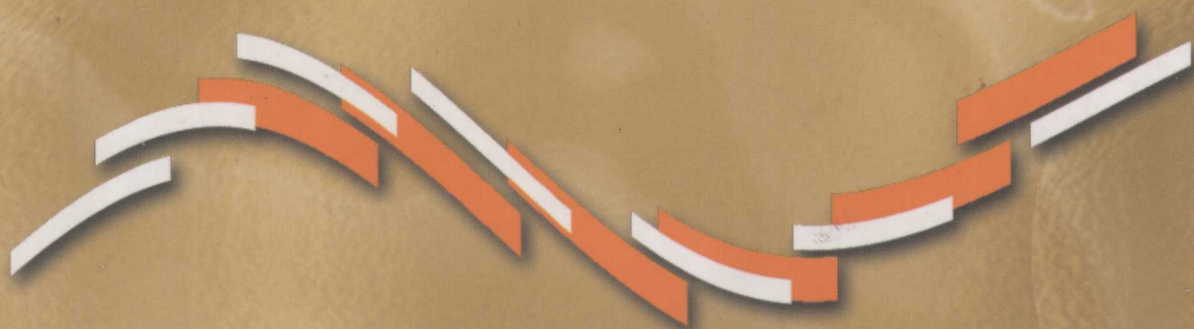


天然气运聚动力学 与气藏形成

宋 岩 王 毅 王震亮 夏新宇 胡圣标 等著



石油工业出版社

Petroleum Industry Press

天然气运聚动力学与气藏形成

宋 岩 王 毅 王震亮 夏新宇 胡圣标 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在利用各种基础资料对热力、流体动力、构造应力和异常压力等各种因素反映的基础上,将物理模拟、数学模拟等先进方法与天然气综合地质研究紧密结合,对热力、流体动力、构造应力和异常压力等各种因素在天然气运聚中的作用进行全面分析,并寻找各种作用的内在联系和耦合关系,以揭示天然气的运聚规律。

本书可供天然气勘探、开发科技工作者参考,也是大专院校相关专业师生的良好参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

天然气运聚动力学与气藏形成/宋岩等著.

北京:石油工业出版社,2002.11

ISBN 7-5021-3928-1

I. 天…

II. 宋…

III. ①油气运移-动力学-作用-油气藏-形成

②油气聚集-动力学-作用-油气藏-形成

IV. P618.130

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第082791号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里三区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 10.25印张 2插页 258千字 印1—1000

2002年11月北京第1版 2002年11月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3928-1/TE·2838

定价:25.00元

前 言

天然气运聚动力学问题是天然气成藏中的关键问题，也一直是人们关注并试图阐明的热点问题。但由于天然气的运聚深处地下，无法直接观察测试，难以在实验室准确模拟，多年来一直是天然气地质学领域研究中最薄弱的环节。其研究内容涉及到热力、压力、构造应力、流体动力等多个领域，不但每个因素都是天然气运聚研究中复杂的研究课题，而且这些因素之间存在内在的联系，相互影响、相互制约。从影响油气运移的动力分析，主要有浮力、水动力（狭义）、异常流体压力、毛细管力、地应力及热力等。其中地应力和热力是形成异常压力的因素之一，而分子扩散力的大小又与热力有密切关系。将这些力进行归纳后发现：由密度差引起的浮力、由地层高差（海拔）引起的狭义水动力、由种种原因形成的异常流体压力、以及由岩石润湿性、表面张力和吸附作用引起的毛细管力可体现于流体势构成的广义水动力中，而地应力和热力分别受地下应力场和温度场的控制。因此，温度、应力、压力、流体动力是影响天然气运移、聚集的主要动力，将它们置于地下三维空间内，即可建立所谓“四场”。由于油气本身的活动性，他们在地下的运移是一直进行的，只是在不同时期的运移方式有所差异。因此，在对现今的动力分析基础上，更重要的是恢复古运聚动力场，这样才有助于对油气运移可能的“历史过程”进行分析。因此天然气运聚动力学研究是一项多学科交叉渗透的难度较大的研究课题。

本书研究的目的和思路是，在利用地质、测井、地震、钻井和流体性质等大量基础资料对热力、流体动力、构造应力和异常压力等各种因素反映的基础上，将物理模拟、数学模拟等先进方法与天然气综合地质研究紧密结合，对热力、流体动力、构造应力和异常压力等各种因素在天然气运聚中的作用进行全面系统的分析，并寻找各种作用的内在联系和耦合关系。

研究表明，热力、流体动力、构造应力和异常压力与天然气运聚成藏有着密切的关系。这之间的耦合关系是：流体势全面反映天然气的运聚，影响流体势的因素除了地层深度等地质参数外，主要取决于流体压力和毛细管力。根据研究结果，在构造活动期，流体压力主要受构造应力引起的岩石体积剧烈变化的影响，取决于构造应力。相应地，采用构造应力引起的流体压力来计算构造挤压期的流体势，构造应力强的地区，流体势则高。需要强调的是，只有在强烈构造活动的时期，构造应力能够造成岩层超压并形成大量断裂和断层，才对天然气运移起明显的作用。在构造稳定期，流体压力的变化主要取决于地层沉降抬升以及地层内部的流体物理化学过程，后者又受到地热场变化的影响。异常压力的出现会明显改变流体势的分布。我国含油气盆地异常高压现象比较常见，造成异常高压的原因很多，除构造挤压期的构造应力之外，欠压实作用是最普遍的成因。地层过剩压力高的地区，流体势亦高，因此当储层中存在欠压实引起的超压、并且超压的形成早于主要生烃期或者与之同时，则不利于深部烃源岩生成的天然气在浅部储层聚集成藏。

本书研究取得的主要成果包括：

1. 在新一轮热流数据汇编的基础上，编制了我国主要含油气盆地的热状态图。以准噶尔盆地为例，系统分析了盆地现今的地温场特征，即为低热流（约 42mW/m^2 ）和低地温梯

度（约 $21.2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）的“冷盆”。采用古热流法对盆地热史进行了恢复，揭示了准噶尔盆地二叠纪的高热流（ $65\sim 80\text{mW}/\text{m}^2$ ）属性和中生代盆地持续冷却的过程及烃源岩的热演化轨迹，编制了下二叠统和下侏罗统烃源岩不同地质时期的生烃状态分布图。

2. 在承认天然气以游离态运移是主要的运移方式的前提下，利用真实砂岩模型驱替实验系统，对鄂尔多斯盆地 5 块粗、细不同的岩石微观模型进行了相应的气驱水实验。实验发现：油气在孔隙介质中运移时广泛发生聚并—卡断现象；气比油的界面效应更明显，气泡顶端形态的略微变化，都会带来尾部形态的明显调整；一旦入气口到出气口形成主运移通道，则气体将主要沿主运移通道运移，而向其他方向的运移活动较弱。

3. 立足于压汞法获得的毛细管压力曲线，结合数值模拟出的古孔隙度，可计算任一时期、任一埋深下的毛细管压力，并且将毛细管压力的作用体现在流体势的计算中。准噶尔盆地的实际计算结果表明，毛细管压力对气势大小和分布的影响是明显的，不考虑毛细管作用的气势不能完全反映地下天然气运移、聚集时的流体动力条件。

4. 利于物理模拟的方法，表现了油气在不同应力场作用下的运移规律及其与构造变形的关系。实验结果表明，在构造应力作用下，产生的断层附近往往形成低值应力区，且油气运聚滞后于沉积岩石变形，油气运移有由分散到集中、由远离断层的应力高值区向断层附近的应力低值区运移的趋势。

5. 对构造应力作用于天然气运移的机理进行了理论分析和数值模拟，从而证实构造应力在构造强烈活动期可以成为油气运移的主要驱动力，油气从生油凹陷高值应力区向其低值应力区运移并富集成油气藏，其方式是构造应力场引起的沉积岩石变形导致构造应力场大小的非均一性分布，从而形成若干个能量汇聚或耗散中心，为石油和天然气的运移和聚集提供了有利的构造物理场条件。准噶尔盆地构造应力场与油气运聚关系研究表明，在各构造运动期，准噶尔盆地二叠系油气系统油气运聚主要受印支期构造应力场控制与驱动；而侏罗系油气系统油气运聚主要在南缘受喜山期构造应力场控制与驱动。

6. 通过理论研究认为异常高压最主要的成因包括欠压实、构造挤压和天然气生成，其他成因不普遍或只有理论意义，构造抬升容易引起异常低压而不是异常高压。三种主要成因的鉴别方法是：欠压实作用表现为声波时差增大、密度测井减小、有效应力与声波时差呈线性关系；构造挤压表现为双侧向电阻率异常增大、并存在高的挤压应力场；天然气生成在测井曲线上无明显响应，但如果其引起超压，气源岩当处于生气高峰。这一套方法对超压成因的判别实用而有效。

7. 利用数值模拟的方法，对淮南和库车地区由沉降作用形成的超压的演化史进行模拟，结果表明，除吐谷 1 井后期的构造挤压作用弥补了构造抬升引起的降压、以及呼 2 井后期泄压造成现今常压之外，其他地区欠压实作用造成的超压均保持至今。库车坳陷白垩—下第三系在晚第三纪之前超压的主要成因是欠压实作用，晚第三纪末以来强烈的构造挤压作用取代了欠压实作用成为超压的主要成因。

8. 通过对淮南、库车构造发展史、沉积史、生烃史、成藏史及异常压力演化史的综合分析以及对呼图壁气田和克拉 2 气田的剖析，建立了不同的成藏模式：淮南呼图壁气田成藏模式为浅部泄压、后期成藏；库车克拉 2 气田成藏模式为强烈构造运动使超压带内成藏。后一种超压带内成藏模式必须具备较强的构造活动和封闭性好、塑性强的封盖层的匹配。

9. 对热力、流体动力、构造应力、异常压力在天然气运聚中的作用进行了深入系统的分析研究，总结出了这些作用之间的耦合关系：流体势是流体运移趋势的综合体现，它主要

与流体压力、重力、毛细管力有关。在构造稳定期，这些因素主要取决于地层升降、流体性质以及岩石的孔隙结构。在构造强烈活动期，构造应力对流体运动起着明显的作用，不仅改变了流体压力，而且还形成裂隙、断层和断裂，从而改变了天然气的运移趋势。异常压力也是通过改变流体压力来影响流体势的分布，同时异常压力的形成时间以及在纵向上的分布直接影响着天然气成藏的有利与否。

本书第一章由胡圣标、王社教执笔，第二章由王震亮执笔，第三章由王毅、杨伟利执笔，第四章由夏新宇、宋岩、房德权执笔，第五章由宋岩、王震亮、王毅执笔。宋岩、夏新宇负责最终统稿工作。

本书属国家“九五”天然气科技攻关成果，在研究工作中得到了中国石油天然气股份有限公司科技与信息管理部、中国石油天然气集团公司科技发展部、中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司、中国石油勘探开发研究院有关领导以及新疆油田分公司、塔里木油田分公司有关领导和同行的大力支持，在此一并表示感谢。

宋 岩

2002 年 10 月

目 录

第一章 热力场与天然气运聚的关系	1
第一节 现今地温场与天然气田分布	1
一、中国主要含油气盆地现今热状态特征	1
二、现今地温场与天然气田分布的关系	2
三、典型盆地地温场分析及其与天然气田产出的关系	3
第二节 盆地热史与天然气的生成	9
一、盆地热史恢复的方法	9
二、热史恢复结果	15
三、烃源岩热演化及生烃状态的时空分布	18
四、盆地热史与天然气的成藏和保存	29
第二章 天然气流体动力学及其运聚特征分析	32
第一节 流体动力学的研究思路和方法	32
一、研究内容	32
二、研究思路	33
三、古流体动力的涵义	33
四、古流体动力的恢复方法	34
五、模型实现中有关参数的选取	35
第二节 油气运聚中的毛细管效应分析	40
一、微观孔隙模型与气驱水实验	40
二、毛细管压力对流体势分布的影响	45
第三节 天然气流体动力学演化特征	50
一、水势的分布和演化	50
二、气势的分布和演化	56
第四节 天然气的运聚特征分析	61
一、有效运聚系统的划分	62
二、运聚特征分析	66
第三章 构造应力场对天然气运聚的作用	70
第一节 构造应力场驱动油气运移的动力学分析	70
一、构造应力场驱动油气运移的基本原理	70
二、构造应力对油气二次运移作用的模式	73
第二节 构造应力场与油气运聚关系的构造物理模拟实验	77
一、构造应力场与油气运聚关系的构造物理模拟实验方法	77
二、构造物理模拟实验结果	77
第三节 古构造应力场与油气运聚的关系（以准噶尔盆地为例）	81
一、印支期古构造应力场与油气运移的关系	81

二、喜山期古构造应力场与油气运移的关系	85
第四章 异常高压与天然气聚集的关系	90
第一节 异常高压的成因及鉴别	90
一、异常压力成因综述	90
二、异常高压成因的鉴别及定量分析	97
第二节 异常压力演化模拟	115
一、古压力演化模拟方法	115
二、淮南地区异常压力演化	117
三、库车坳陷异常压力演化	120
第三节 异常压力在天然气成藏中的作用	126
一、异常压力与天然气成藏实例分析	127
二、成藏模式的建立和对比	132
第五章 运聚动力学与天然气成藏	137
第一节 天然气形成过程中的动力学特征	137
一、天然气生成的动力作用	137
二、天然气运聚中的动力作用	139
第二节 运聚动力学在准噶尔盆地的综合应用	142
一、盆地天然气运聚特征及有利区预测	142
二、重点地区的运聚动力学特征分析	144
参考文献	151

第一章 热力场与天然气运聚的关系

热力场对于天然气的运聚存在多方面的影响。盆地的现今地温场代表了盆地现今的热状态，对盆地内烃源岩的生烃状态具有重要影响。反过来，天然气的运移和聚集也将对地温场产生一定影响，流体的运移使得盆地内热传递表现为传导和对流的复合形式。盆地热史和烃源层受热史对其生烃状态和生排烃过程（生排烃量和持续时间）具有决定性作用。而生烃量决定了初次运移量，并对烃源层中的流体压力和流体势产生重要影响，且地温场的变化影响地层中流体（油、气和水）的粘度、油气的性质（密度）和相态以及天然气在油和水中的溶解度，从而影响天然气的运移属性。同时各相饱和度也将发生变化，而饱和度的变化又将影响毛细管压力、浮力等油气运聚的动力。因此，油气盆地中地温场的时空变化不仅是天然气运聚过程中的重要物理条件，而且间接构成了油气运移的动力。因而决定了油气运移和热力场之间的耦合关系。

本章着重讨论了热力场与天然气形成和分布的关系，并为后续天然气运聚章节提供地温场和烃源岩热演化背景。首先在中国主要含油气盆地现今热状态图编制的基础上，分析了盆地现今热状态与天然气田分布的关系。以准噶尔盆地为例，系统分析了准噶尔盆地现今地温场特征，并开展了盆地热史的恢复。通过盆地现今地温场的研究和盆地热史的恢复，揭示准噶尔盆地烃源岩成熟度史及其时空分布，进而探讨了今、古地温场与天然气形成及分布的关系。

第一节 现今地温场与天然气田分布

一、中国主要含油气盆地现今热状态特征

我国大陆地区盆地尺度的热流异常比较普遍，表明盆地对热流分布具有重要影响。东部的中、新生代裂谷盆地，如松辽盆地、渤海湾盆地和苏北盆地等，通常以较高热流（ $>65 \text{ mW/m}^2$ ）为特征。西北部地区的类克拉通盆地，如准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地等则表现出低热流（ $<50 \text{ mW/m}^2$ ）特征。中部的四川盆地和鄂尔多斯盆地地表热流介于 $50 \sim 60 \text{ mW/m}^2$ 。显然，盆地的成因类型、形成时代等决定了盆地的热状态。在中国大陆地区热流数据汇编（资料截止 1999 年 9 月）的基础上，编制了中国主要沉积盆地现今热状态图（图 1—1）。

图 1—1 显示了我国含油气盆地由于盆地的构造背景及其中、新生代构造—热演化的差异而形成的“热”盆（热流 $>65 \text{ mW/m}^2$ ）、“冷”盆（热流 $<50 \text{ mW/m}^2$ ）和“温”盆（热流介于 $50 \sim 65 \text{ mW/m}^2$ ）分野：东部和西南地区表现为“热”盆；中部则为“温”盆；西北地区表现为“冷”盆。准噶尔盆地位于“冷”盆区，反映了较为稳定陆块的构造背景及缺乏中、新生代构造—热活动。因此，Wang（1996）根据盆地的热流和地温梯度特征，将中国大陆地区的盆地分为东部地区的“热”盆、中部地区的“温”盆和西北部地区的“冷”盆。盆地内的热流分布主要受控于盆地内基底的隆起与拗陷，原因在于地层热导率侧向变化引起的侧向热传递。准噶尔盆地体现现今区域热状态特征的大地热流值不高，平均为 42.3 mW/

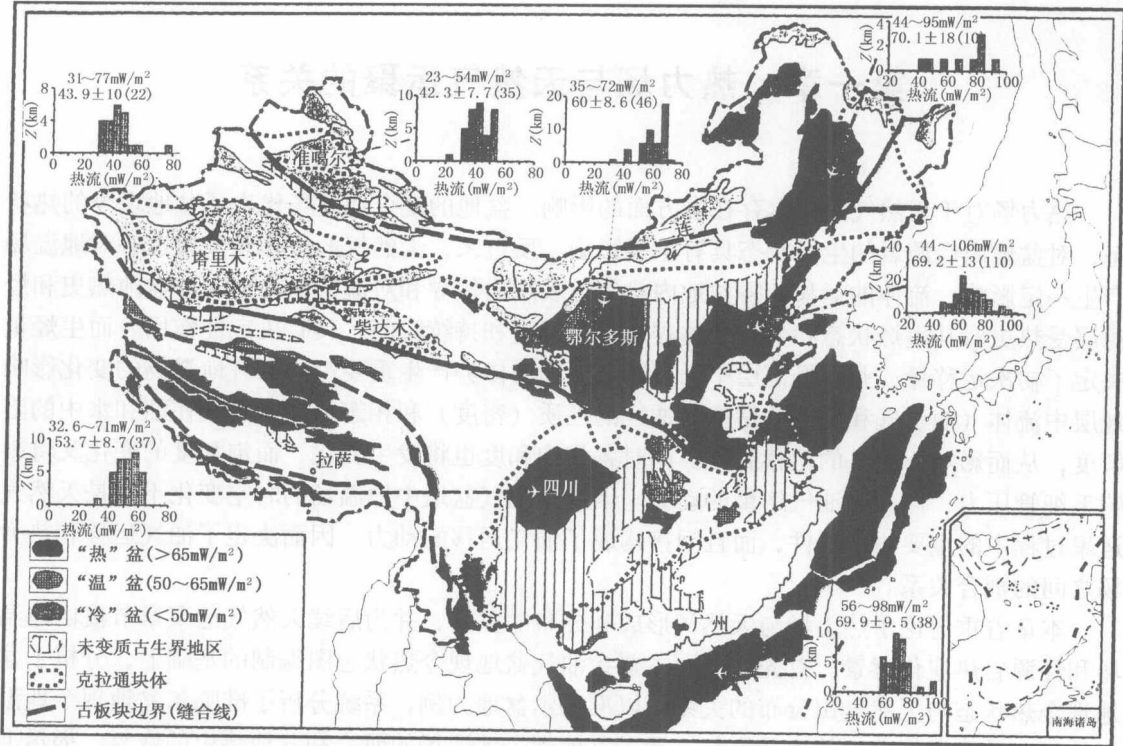


图 1—1 中国大陆地区主要沉积盆地现今热状态

m^2 ，低于全球大陆平均热流 65 mW/m^2 (Pollack, et al., 1993)，也低于我国大陆地区的平均热流值 $61 \pm 15.5 \text{ mW/m}^2$ (Hu, et al., 2000) 和我国大陆中部与东部多数盆地的大地热流，属相对低温的“冷盆” (图 1—1)。

二、现今地温场与天然气田分布的关系

中国大陆地区主要沉积盆地天然气地质特征表明，盆地中烃源岩的有机质类型及有机质热演化历史决定了油气的生成比例和分布状况。有机质的热演化史决定于盆地热状态的演变 (热流史) 和烃源岩的埋藏史。单纯从盆地现今热状态看，“温”盆区以产气为主；“冷”盆区则油气兼而有之；“热”盆区以产油为主，但在晚新生代沉积厚度较大的边缘海盆地产气。我国主要气盆或处于“温”盆区 (如四川盆地和鄂尔多斯盆地)，或处于高热流区 (如莺一琼盆地等)。前者属于克拉通或前陆盆地，今、古热流变化较小，沉积盖层 (尤其是中新世) 厚度较大，烃源岩埋藏较深，天然气生成的时间较早但持续时间较长，较低热背景使得气窗深度范围较宽；后者系新生代裂谷盆地，处于持续加热状态，晚新生代沉积速率和厚度较大，烃源岩中天然气生成时间较晚，高热流背景导致气窗深度范围较窄。它们的共同特点是中新世持续埋藏增温，烃源岩由于巨大的埋深而现今处于最高古地温时期。换言之，它是烃源岩埋藏深度和热流的有效组合决定了天然气的生成和保存条件，天然气生成时间越晚或持续时间越长，盖层厚度和范围越大，越有利于天然气的成藏与保存。除此之外，西北地区现今处于“冷”盆状态，且中新世盆地经历了持续的冷却过程，早期 (如晚古生代—中生代早期) 烃源岩或由于所处的埋藏深度较小而未达到天然气生成的成熟度，主要形成油藏，或生成的天然气由于当时或后期剧烈的构造活动而难以保存，只有在一些中新世沉积

厚度巨大的前陆盆地或次级凹陷区，如准噶尔盆地的北天山前陆凹陷（昌吉凹陷），塔里木盆地的库车、塔西南凹陷等，由于新生代的快速沉积，巨大的埋藏深度导致烃源岩得以在低热流背景下通过埋藏增温而产出大量天然气。我国东部地区的裂谷盆地如渤海湾盆地等，尽管热流背景较高，但由于下第三系烃源岩到达最高古地温的时间在东营期末，且受盆地规模的制约，晚第三纪和第四纪沉积厚度有限，通常以油为主，只在凹陷中心才有大量天然气生成。

在特定条件下，由于天然气溶于地下流体中后随活动流体的垂向运移，对于晚近的活动流体系统，垂向流体的活动可导致深部热通过对流向浅部储层传递，而气藏降低了储层的热导率，从而可能导致现今地温与气藏间形成伴生关系。一个典型的例子是莺歌海盆地，该盆地内已知气藏与高地温梯度区具有良好的伴生关系。与之相邻的琼东南盆地则未观测到类似关系，原因在于琼东南盆地内流体主要以侧向运移而非垂向运移为主。

三、典型盆地地温场分析及其与天然气田产出的关系

作为一个研究实例，本节系统分析了准噶尔盆地现今地温场特征及其与天然气田分布的关系。

1. 地温分布

准噶尔盆地现有 196 口井的测温数据，其中多数井的测温数据为电测井时测量的井底温度，其余为连续的井温测量曲线。准噶尔盆地现今钻井地温随深度的变化如图 1—2 所示。从图 1—2 可以看出，多数井随深度的增加温度呈线性增加，部分井温度增加异常快，在 2000m 左右呈异常高温（>150℃），而少部分井尽管温度与深度的变化趋势与多数井一致，但其偏离总体趋势线，呈低温现象。上述地温异常现象是由于断层及水循环造成的。当断层开启时，若下伏地层水势较高，使得下面高温热水沿断层上涌，加热上覆地层而导致在断层面附近出现高温异常现象；若下伏地层水势能低，上伏地层水势高，地表或近地表的低温水向下补给将冷却下伏地层，导致在断层面附近出现低温异常现象。

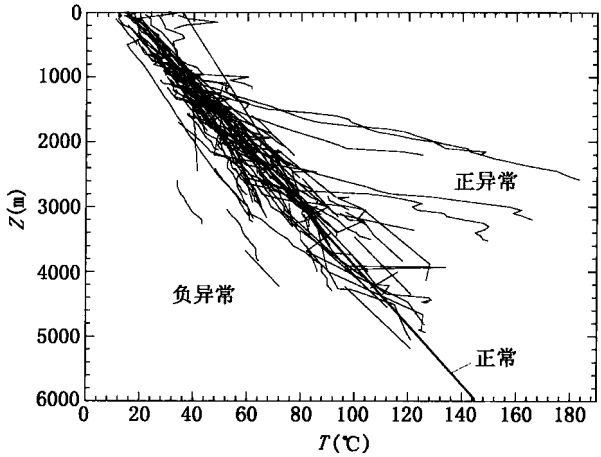
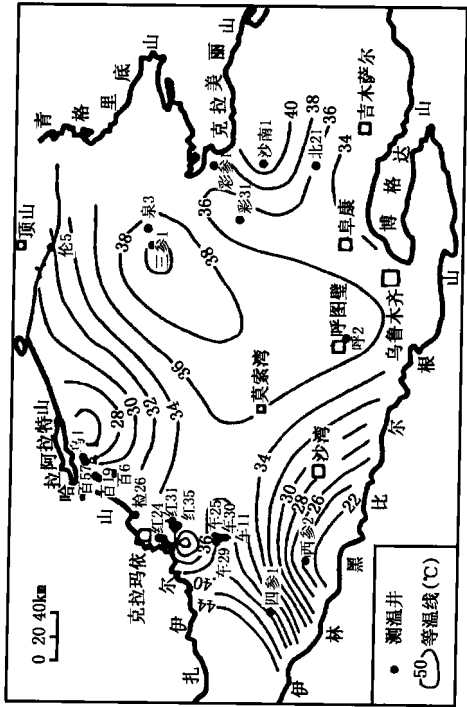


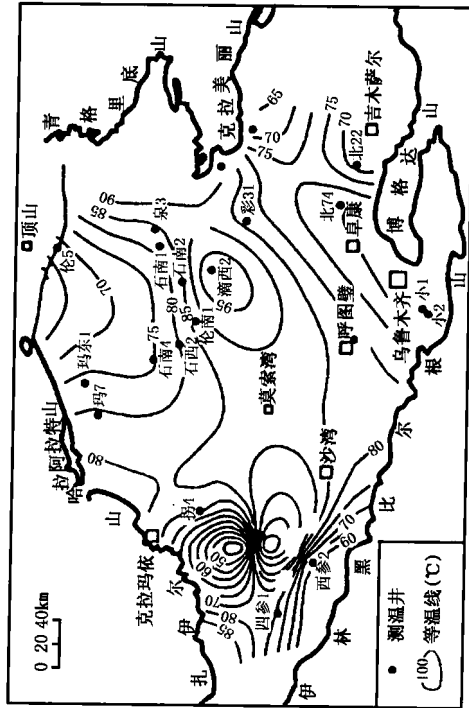
图 1—2 准噶尔盆地温度—深度关系

不同深度上温度的平面分布图（图 1—3）显示：1000m 深为 24.2～42℃，平均为 35.3℃；2000m 深为 40.2～71.1℃，平均为 57.9℃；3000m 深为 60.2～104℃，平均为 79.7℃。区域上，无论是 1000m，还是 2000m、3000m 等温线，均表现为盆地腹部的地温高，并向南、北两方向温度逐渐降低的特征。总体上，以陆南至彩南地区最高，东部隆起次之，北天山前拗陷温度最低。

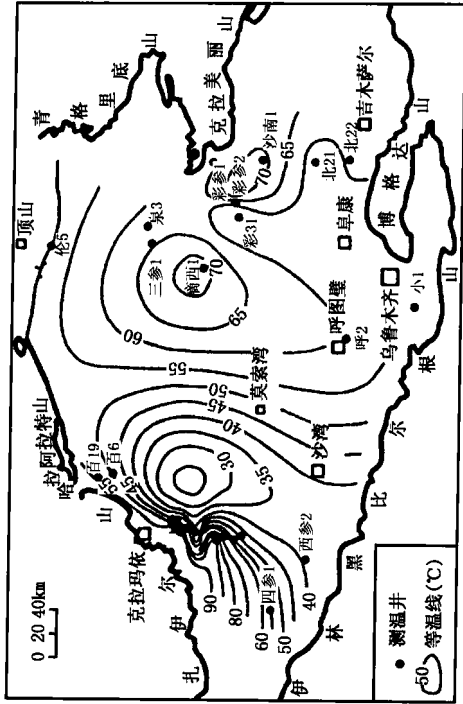
准噶尔盆地 1000 m 深温度分布图显示（图 1—3a），最低温度分布于天山山前拗陷的西参 2—乌鲁木齐以南地区，平均为 26～30℃。三参 1 井和泉 3 井周围形成高温分布区（38～40℃），东部隆起彩参 1—沙南 1—北 21 一线以东温度高于 36℃，呈异常高温区。玛湖—盆 1 井西凹陷区的温度不高，介于 26～36℃ 之间。



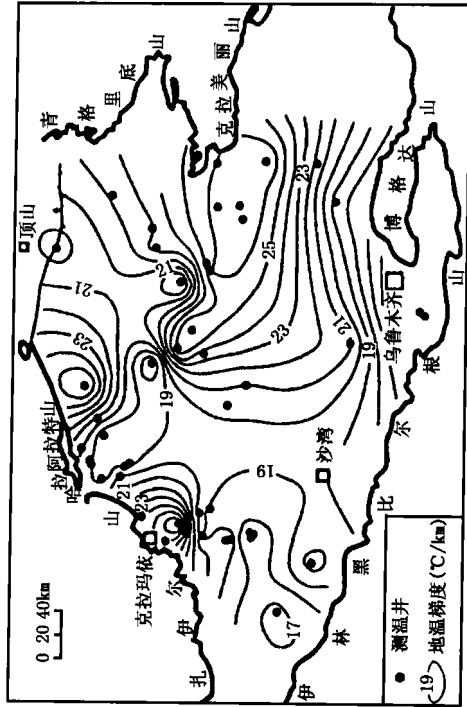
(a) 1000m深温度等值线图



(c) 3000m深温度等值线图



(b) 2000m深温度等值线图



(d) 地温梯度等值线图

图 1—3 准噶尔盆地温度及地温梯度分布图

从准噶尔盆地 2000 m 深温度分布图上看 (图 1—3b), 三个高温分布区位于陆梁隆起滴西 1—三参 1 井周围、彩参 1—彩参 2—沙南 1 井区以及克—夏断阶带和车拐隆起, 温度介于 65~70℃ 之间。玛湖—盆 1 井西凹陷至西参 2 井一带呈低温异常现象。

准噶尔盆地 3000 m 深温度分布与 1000 m 和 2000 m 深温度分布差异性不大 (图 1—3c), 陆梁隆起的滴西 2、陆南 1 井区依然为高温分布区, 阜康—乌鲁木齐一线为低温分布带, 玛湖—盆 1 井西凹陷的温度变化较小, 为 80~85℃, 值得一提的是在车 51 以南至西参 2 井区出现高温异常现象, 温度高达 104℃。

2. 地温梯度

地温梯度是地温场研究常用的基本物理参数。受地下水活动及岩石热导率等因素的影响, 地温梯度随深度的增加变化较大。由于准噶尔盆地测温井段差异大, 因此, 共选择具有传导特征的 28 个钻井地温计算了梯度值。这些钻井中地温与深度的相关性非常好, 相关系数在 0.992 以上, 基本反映了准噶尔盆地传导型地热场的特征。

准噶尔盆地现今地温梯度 (图 1—3d) 变化于 11.6~27.6℃/km 之间, 平均 21.2℃/km, 低于我国东部及中部地区多数盆地的地温梯度 (如松辽盆地 35~40℃/km, 华北盆地 34~35℃/km, 鄂尔多斯盆地 28~30℃/km), 而与相邻的塔里木盆地的地温梯度 20℃/km 相近, 属于相对低温的“冷盆”。

横向上, 以陆梁隆起、东部隆起及克拉玛依油田区地温梯度高, 平均 24~26℃/km。玛湖—盆 1 井西凹陷、北天山山前拗陷东部及四参 1 井区地温梯度低, 平均 16~22℃/km。此地温梯度分布同温度分布一样也基本上受控于基底的构造形态, 基底埋深较浅处地温梯度相对较高, 反之则较低。

3. 大地热流

大地热流是标志区域地热特征的综合性地球物理参数。地壳表层通过直接测量获得的地温值或地温梯度值在某些情况下也可作为衡量区域地热特征的标志, 因此, 大地热流的研究在盆地的热史研究及区域地温场研究中至关重要。

对于含油气盆地而言, 大地热流的研究具有以下几方面的实用意义: ①结合地质、地球物理资料和放射性元素等有关资料计算的大地热流值, 可以给出区域地壳深部热状况与热结构的具体特点, 可以对区域地质上的稳定程度或活动程度作出有说服力的判定; ②油气生成于一定的空间范围, 大地热流值可以比较准确地给出此空间内由地球内热提供的总热量, 从而对区域上总的生油气能力作出评价; ③大地热流值作为盆地动力学成因和构造—热演化过程的客观反映, 其大小反过来为盆地动力学及构造—热演化研究提供了基础条件; ④大地热流不仅表征了盆地的现今热状态, 同时它是盆地热史反演的一个重要已知参数。

大地热流是指地球内热经传导方式单位时间、单位面积内向地球表面流过的热量。此物理量不仅与地下热状态有关, 而且和地下介质的热传导特性相关, 因此, 大地热流在数值上等于反映地热特点的地温梯度与反映岩石传热能力的热导率的乘积:

$$Q = GK$$

式中 Q ——大地热流, mW/m^2 ;

G ——地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$;

K ——岩石热导率, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

本次研究共测试了 90 块岩石热导率样品, 收集岩石热导率数据 29 个 (余亮平等,

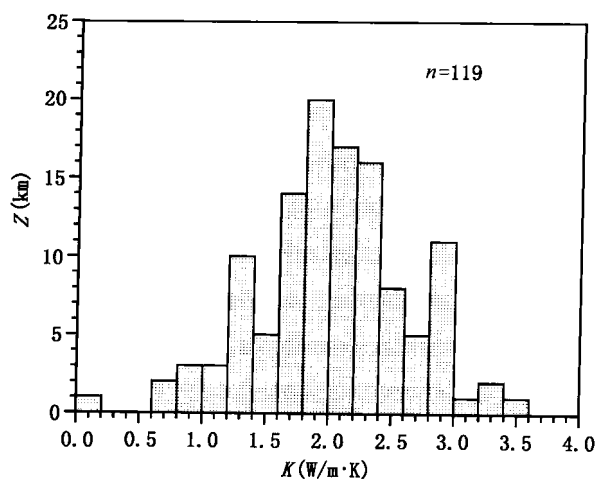


图 1—4 准噶尔盆地岩石热导率直方图

1990)。所有岩类热导率频率直方图(图 1—4)表明,准噶尔盆地的岩石热导率数值不大,主要介于 1.5~2.5W/m·K 之间,平均为 2.015W/m·K。此外,由于受取样条件的限制,无法对所需计算热流井的热导率系统测试,为减小计算误差,对所有热导率进行了时代和岩性的分类,并按计算热流的井段采用加权平均值的办法求取平均热导率。所测热导率的岩石类型比较齐全,既有沉积岩,也有火山岩和碳酸盐岩,代表了盆地沉积盖层的主要岩石类型。岩石热导率变化于 0.2~3.6 W/m·K 之间,平均约 2.0 W/m·K;比热分布在 0.8~1.2J/g℃,多集

中在 1.0J/g℃;岩石密度为 1.7~2.6g/cm³,峰值为 2.4 g/cm³。

表 1—1 准噶尔盆地实测大地热流数据表

序号	井号	东 经	北 纬	深度范围 (m)	主要岩性	地温梯度 (℃/km)		热导率 (W/m·K)	实测热流 (mW/m ²)
						G±SD	相关系数		
1	百 57	85°30'17"	45°59'20"	1350~1830	砂岩、砾岩	18.5±0.12	0.998	2.0825	38.5
2	百 6	85°29'14"	45°51'25"	260~2150	泥岩、砂岩	20.3±0.06	0.999	2.0860	42.3
3	北 21	88°48'08"	44°22'25"	100~2430	泥岩	21.5±0.11	0.998	1.9825	42.6
4	北 74	88°23'51"	44°14'28"	2190~3177	泥岩	18.5±0.08	0.996	1.9365	35.8
5	车 17	84°57'42"	44°44'42"	3040~3650	泥岩、砂岩	17.2±0.10	0.990	1.9290	33.2
6	车 2025	84°57'30"	45°51'25"	2410~3230	泥岩、砂岩	17.2±0.10	0.993	1.9036	32.7
7	车 2037	84°56'22"	44°46'16"	2400~3170	泥岩、砂岩	15.8±0.09	0.993	1.9116	30.2
8	车 30	84°52'59"	44°58'47"	30~2970	泥岩、砂岩	20.3±0.05	1.000	1.9333	39.2
9	彩 31	88°12'51"	44°56'03"	1800~3390	泥岩、砂岩	26.9±0.10	0.999	1.9528	52.2
10	彩参 1	88°48'16"	45°07'50"	700~3154	火山岩	26.0±0.14	0.999	2.0350	52.8
11	重 43	85°48'28"	46°08'20"	100~495	砂岩	20.1±0.06	0.997	2.1660	43.5
12	红 1	84°56'12"	45°12'14"	1560~2120	砂岩、泥岩	18.7±0.10	0.992	2.0367	38.1
13	红 31	85°02'51"	45°23'44"	320~2550	泥岩、砂岩	27.6±0.07	0.999	1.8926	52.3

续表

序号	井号	东 经	北 纬	深度范围 (m)	主要岩性	地温梯度 (°C/km)		热导率 (W/m·K)	实测热流 (mW/m ²)
						G±SD	相关系数		
14	红 35	85°01'30"	45°20'48"	200~2150	泥岩、砂岩	24.7±0.09	0.999	1.9795	48.9
15	呼 2	86°59'10"	44°10'40"	100~3500	泥岩、粉砂岩	21.4±0.29	0.998	1.9827	42.4
16	伦 5	87°53'46"	46°20'00"	0~3300	砂岩、砾岩	19.5±0.17	0.998	2.2140	43.2
17	西参 2	84°41'15"	44°23'01"	500~4000	泥岩、砂岩	20.5±0.22	0.997	1.8999	38.9
18	四参 1	84°09'00"	44°37'17"	35~4300	泥岩	16.5±0.16	0.998	1.9982	33.0
19	彩参 2	88°22'05"	45°51'25"	1600~2200	砂泥岩	25.7±0.11	0.998	2.0220	52.0
20	小 1	87°18'20"	43°37'18"	2600~3180	泥岩、粉砂岩	11.6±0.10	0.992	2.0209	23.4
21	沙南 1	88°49'26"	44°45'54"	200~2066	泥岩	27.1±0.28	0.995	1.9496	52.8
22	三参 1	87°55'06"	45°35'13"	100~2400	泥岩、粉砂岩	23.7±0.11	0.999	1.9438	46.1
23	泉 3	88°06'44"	45°37'11"	50~3450	泥岩、粉砂岩	22.9±0.12	0.998	1.9384	44.4
24	石南 4	86°44'04"	45°37'32"	2566~3302	砂岩	16.7±0.01	0.995	2.1191	35.4
25	石南 2	87°33'49"	45°24'57"	2506~4230	泥岩	18.1±0.15	0.995	1.9896	35.9
26	拐 4	85°09'54"	45°14'35"	1908~3472	砂泥岩	19.3±0.23	0.996	2.0670	39.9
27	玛东 1	86°27'14"	46°07'00"	3248~4548	泥岩	26.5±0.35	1.000	1.9663	52.1
28	滴西 2	87°41'24"	45°11'47"	3203~3835	泥岩、砂岩	26.0±0.56	0.992	1.9646	51.1
29	盆参 2 ^①	86°31'26"	44°54'55"	0~5180	砂泥岩	20.9		2.0076	42.0
30	艾参 1 ^①	85°39'25"	45°46'43"	0~5300	泥岩、砂岩	18.7		2.0236	37.8
31	盆 4 ^①	86°18'32"	45°03'02"	0~4265.6	砂泥岩	20.4		2.0076	41.0
32	莫北 2 ^①	86°44'23"	45°13'40"	0~4438	泥岩、砂岩	23.2		1.9783	45.9
33	石西 2 ^①	86°53'12"	45°26'04"	0~4578.5	砂岩、泥岩	26.2		2.0493	53.7
34	陆南 1 ^①	87°08'52"	45°18'47"	0~4349.9	泥岩、砂岩	26.2		2.0207	52.9
35	玛 2 ^①	85°57'18"	45°57'51"	0~2632.5	泥岩、砂岩	17.9		1.9956	35.7

①地温梯度来自测井的井底温度计算。

根据上述计算的热导率及传导型地温梯度的求取,计算的 28 个与估算的 7 个热流数据列于表 1—1。准噶尔盆地的大地热流不高,介于 23.4~53.7mW/m² 之间,平均为 42.3±7.67 mW/m², 低于全球大陆平均热流 65 mW/m², 也低于我国东部和中部多数盆地的热流

值 (Hu et al., 2000)。因此, 就反映区域地热特征的大地热流而言, 准噶尔盆地属于相对低温的“冷”盆。从准噶尔盆地热流分布上来看 (图 1—5), 陆梁隆起、盆地西北缘克拉玛依油田区、东部隆起区为盆地的高热流分布区, 尤以陆梁地区石西—陆南地区, 彩参 1—北 21 井区热流最高, 平均为 $50 \sim 55 \text{ mW/m}^2$ 。玛湖—盆 1 井西凹陷及北天山山前的沙湾—阜康区为低热流分布带。

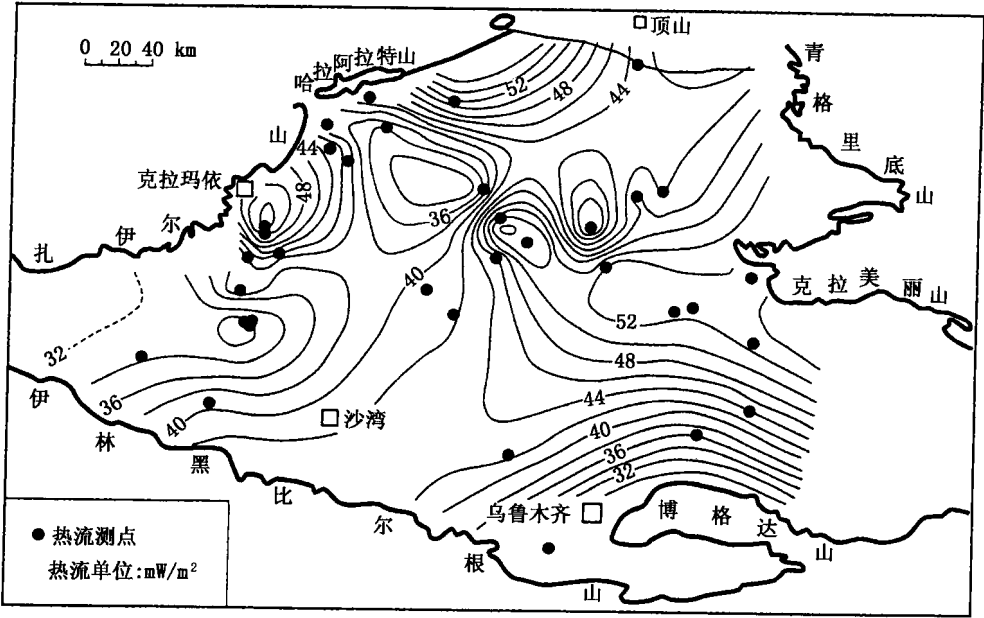


图 1—5 准噶尔盆地大地热流图

上述热流的分布格局基本上受控于盆地基底的构造形态, 隆起区表现为高热流特征, 坳陷区低热流现象比较明显。如陆梁隆起上的热流最高, 为 $33.2 \sim 52.9 \text{ mW/m}^2$, 平均为 $45.3 \pm 7.9 \text{ mW/m}^2$ (若扣除陆梁隆起中石南凹陷的热流, 平均值高达 $49.3 \pm 5.7 \text{ mW/m}^2$); 克夏断阶带 (百口泉、红山嘴) 的热流平均为 $43.9 \pm 5.7 \text{ mW/m}^2$; 东部隆起的大地热流平均为 $43.7 \pm 8.6 \text{ mW/m}^2$ 。而坳陷或凹陷中的热流则较低, 如玛湖—盆 1 井西凹陷中的玛 2 井和艾参 1 井, 热流分别为 35.7 mW/m^2 和 37.8 mW/m^2 ; 北天山山前的大地热流平均值为 $34.4 \pm 8.3 \text{ mW/m}^2$, 其中, 车排子地区的热流较低, 平均为 $33.8 \pm 3.8 \text{ mW/m}^2$, 而位于北天山山前凹陷, 即昌吉凹陷的小 1 井的热流最低, 仅为 23.4 mW/m^2 , 这可能是由于第三纪以来的北天山山前的快速沉降、至今仍未达到热平衡的原因。

总之, 准噶尔盆地的大地热流受基底构造的控制, 基底埋深较浅的隆起区热流值高, 埋深较大的坳陷区热流低。相对于邻近的塔里木盆地 (王钧等, 1995; 王良书等, 1996), 准噶尔盆地的热流略低。就现今地温场特征而言, 北天山山前凹陷具备了大量天然气形成的烃源岩和地温条件, 包括地温梯度较低, 二叠系和侏罗系烃源岩厚度较大, 新生代沉积速度较大。凹陷内烃源岩在低地温场背景下, 缓慢而持续的埋藏增温, 二叠系烃源岩生气时间早, 侏罗系烃源岩于早第三纪中期开始生气, 由于烃源岩于现今达到最高古地温, 因而天然气生成过程持续至今, 十分有利于在凹陷周边形成气藏 (图 1—6)。

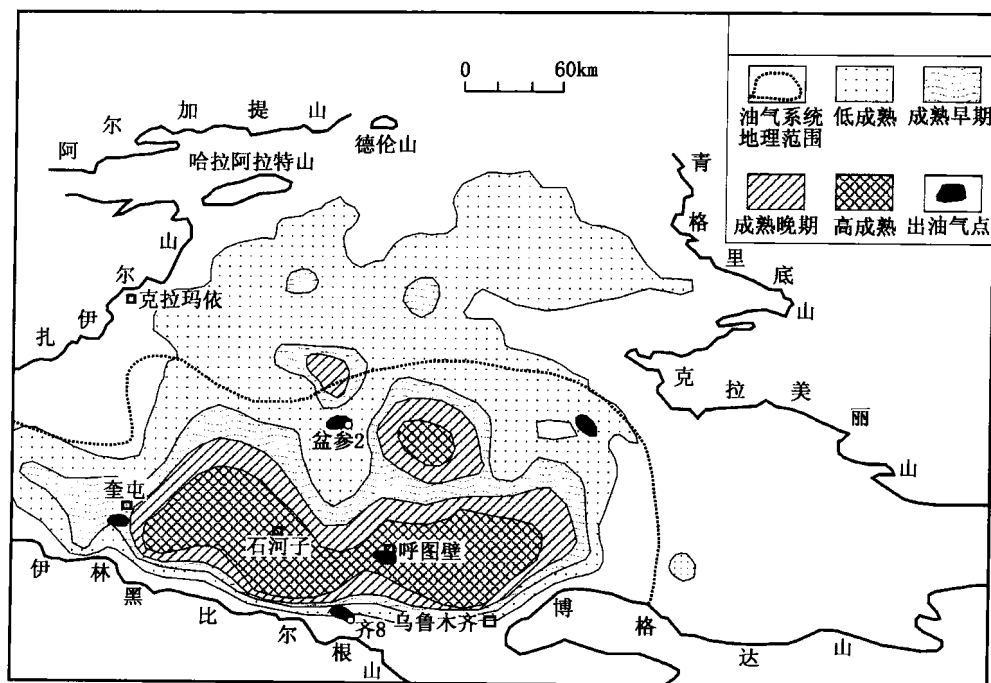


图 1—6 准噶尔盆地侏罗系含油气系统烃源层现今生烃状态及其与已知油田的空间关系

第二节 盆地热史与天然气的生成

一、盆地热史恢复的方法

在盆地的形成和演化过程中，其热状态不是一成不变的，而是随着时间的演变逐渐变化的，这种变化对含油气盆地而言，直接影响到盆地内油气的生、运、聚、圈、保等成藏动力学过程。盆地热史（包括盆地热流史和地层温度史）的恢复不仅对烃源层生烃期次、有机质成熟度史的确有重要的意义，而且也是研究盆地构造—热演化过程的一个重要方面。热史的恢复可以在岩石圈尺度或盆地尺度上进行。在岩石圈尺度上，盆地热史可根据盆地成因，通过盆地构造—热演化或地球物理模拟来恢复；在盆地尺度上，热史则是利用各种古温标（如 R_o 、裂变径迹等）来重建。古温标的种类繁多，但热史恢复的基本方法包括随机反演法、古地温梯度法和古热流法。

1. 随机反演法

所谓随机反演法系指在古温标的动力学模型（正演模型）的基础上，通过随机迭代样品所在层位的热史路径（温度时间史），以使根据该热史路径计算出的古温标值与样品实测古温标值相逼近，从而得到样品所在地层地温史的一种方法。其反演对象是单个样品的古温标数据，而反演结果是一组时间—温度曲线。一些研究者曾采用了这一方法进行了热史恢复研究（Corrigan, 1991; Lutz, et al., 1991），这一方法的优点是，可对单个样品进行反演，无需一组样品，但该方法致命的缺点是其反演结果即使是在简单热史条件下，也存在严重多解性。

2. 古地温梯度法

通常情况下，古地温梯度法（Bray, et al., 1991）中每一个样品的温标值都代表了它