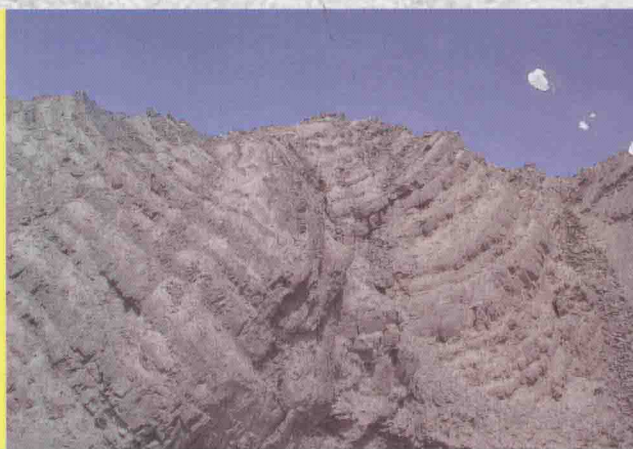
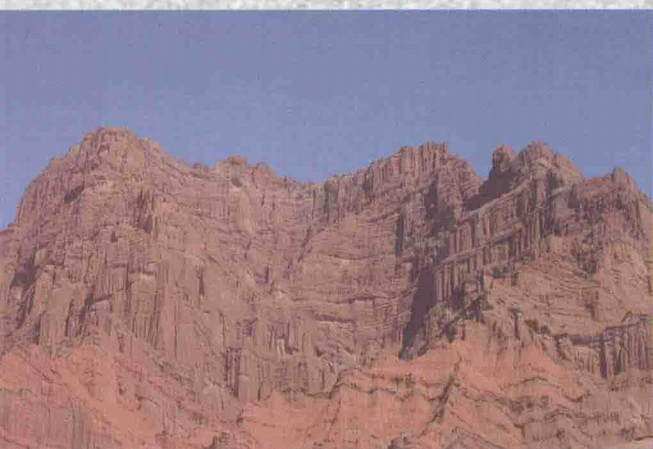


“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助

沉积盆地构造 热演化史研究及应用

——以塔里木盆地东北缘孔雀河地区为例

肖晖 著



CHENJI PENDI GOUZAO
REYANHUASHI YANJIU JI YINGYONG

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助

沉积盆地构造热演化史 研究及应用

——以塔里木盆地东北缘孔雀河地区为例

肖晖 著



中国石化出版社

内 容 提 要

本书简述了叠合沉积盆地构造热演化史恢复的思路和主要研究方法,运用多种古温标及低温热年代学研究方法,对塔里木盆地东北缘孔雀河地区构造热演化历史进行了恢复和重建,对寒武系—下奥陶统烃源岩热演化史、生烃史和油气成藏期次进行了系统的研究,总结了研究区海相油气藏成藏模式和控制因素。

本书是系统应用构造热演化史研究方法在山前叠合沉积盆地的具体实践,可供科研、教学和生产部门的石油天然气地质、基础地质等专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

沉积盆地构造热演化史研究及应用:以塔里木盆地
东北缘孔雀河地区为例 / 肖晖著. —北京:中国石化
出版社, 2013. 10

ISBN 978 - 7 - 5114 - 2418 - 1

I. ①沉… II. ①肖… III. ①塔里木盆地 - 沉积构造 -
地热史 - 研究 IV. ①P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 236104 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

http://www.sinopec-press.com

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 14 印张 306 千字

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

前言

含油气盆地热演化史是盆地动力学研究的重要内容,也是石油地质学研究的前缘领域。盆地热演化史不仅控制了油气的形成和演化,而且在大陆动力学、盆山耦合等研究方面也日益显示出其重要性。

低温热年代学定年技术是近年来地质年代学研究的重要分支和前沿领域,其研究领域主要包括裂变径迹定年和 $(U-Th)/He$ 两种定年手段,其研究成果被广泛应用在构造运动时间、盆地古地温演化及其烃源岩成熟、生排烃研究中,能够为地质问题提供定量的年代学依据。近年来,随着低温构造热年代学的迅速发展,能够有效记录古地温从 240°C 到 40°C 范围的热演化信息,这为研究沉积盆地构造—热演化史研究提供了直接定量的低温热年代学证据。

塔里木盆地东北缘孔雀河地区是近些年中国石化的油气勘探新区。该地区处在库鲁克塔格造山带与塔里木盆地的过渡带上,现今盆山耦合关系明显。孔雀河斜坡及其邻区构造热演化史受控于库鲁克塔格山的构造抬升及其盆山耦合作用。孔雀河斜坡区在海西早期随着库鲁克塔格的隆起而长期处于隆升状态,与盆地其他地区相比奥陶系地层埋藏较浅,古生界地层中的古温标保留了原始信息,反映了古生代的温度状况,为研究古生界地温场的演化提供了得天独厚的条件。

近些年来,随着孔雀河地区YN2井侏罗系油藏和KQ1井志留系湿气藏的相继突破,已有不同学者对孔雀河地区构造演化特征、油气富集规律及复式含油气系统特征等进行系统研究,取得了一些新的认识。相比而言,对该地区下古生界烃源岩生烃演化有重要控制作用的热演化史研究还比较薄弱。

沉积盆地热演化史研究主要包括地球热动力学模型法(正演法)和古温标法(反演法)。地球热动力学模型法研究主要集中在以裂谷、拗陷等伸展型盆地的热史研究中,各种模型应运而生,应用效果最好;古温标法是目前古地温场研究最为常用的手段,主要方法包括有机质成熟度温标法、黏土矿物法、包裹体测温法、矿物的裂变径迹法和 $(U-Th)/He$ 热定年法等。各种方法对于具体盆地都有适用范围。而对于叠合盆地早古生代古地温场的恢复,一直是热演化恢复的难点。本书以塔里木盆地东北缘孔雀河斜坡与库鲁克塔格山组成的盆山系统为研究对象,较为系统地开展了盆山构造及演化、盆地热演化史恢复及生烃史、油气成藏期次、成藏控制因素及含油气系统评价研究,重点应用多种古温标手

段,尤其是低温构造热年代学技术恢复了该地区早古生界地温场演化历史。这些成果对于塔里木盆地东北缘油气勘探具有重要的意义,也为研究沉积盆地尤其是叠合盆地构造—热演化史提供了研究范例。

自2006年以来,作者长期从事我国中西部沉积盆地热演化史与油气关系的研究工作,研究成果得到国家自然科学基金(41102082)、国家973项目(2003CB214605)、国家科技重大专项(2008ZX05005-004-08HZ)、中国石化西部新区勘探指挥部科技攻关项目(XBKY2006KY03003)和陕西省自然科学基金(2012JQ5011)等多个项目的支持。

本书共分七章,第一章和第二章系统介绍了沉积盆地热演化史研究的主要内容,包括现今地温场、古地温场研究的理论基础、主要方法和典型实例分析,着重介绍了(U-Th)/He热定年法在热史研究中的应用以及低温构造热年代学研究的新进展。第三章到第七章为实例应用部分,以盆山构造—热演化史研究为主线,对塔里木盆地东北缘山前构造演化及其与孔雀河地区油气关系进行系统研究。本书取得的主要认识有:

(1) 库鲁克塔格隆起与两侧盆地具有统一的动力学系统。孔雀河斜坡区中生代以来表现为平缓的斜坡,库鲁克塔格隆起向孔雀河斜坡挤压作用不强,无明显的前陆凹陷结构。

(2) 孔雀河斜坡与库鲁克塔格隆起发育海西、燕山两期重要的构造运动,主构造变形期以早海西期构造为主。古生界锆石样品的裂变径迹峰值年龄纪录了早海西期371~392Ma和晚海西期328~305.7Ma二次构造抬升年龄;对应磷灰石样品的裂变径迹年龄纪录了燕山期134.5~164Ma、73~100Ma和35.4Ma三次构造抬升年龄。

锆石裂变径迹样品在加里东晚期—早海西期达到最大古地温,之后经历了长期的抬升降温过程;在晚侏罗—晚白垩世,样品逐渐退出磷灰石部分退火带底界。海西期构造事件年龄反映了孔雀河斜坡由沉降转入抬升剥蚀演化阶段,对油气藏的形成具有重要意义;晚白垩世构造事件则反映了库鲁克塔格山的强烈隆升。

(3) 利用磷灰石构造热年代学年龄、有机质成熟度指标、磷灰石裂变径迹热史模拟和单井EASY%Ro热史反演等方法,对孔雀河地区构造热演化史进行恢复。结果表明:孔雀河斜坡下古生界烃源岩在志留纪末—早泥盆世到达最大热演化程度,模拟最大古地温梯度为3.5℃/100m,侏罗纪末古地温梯度为3.1℃/100m。在烃源岩热演化史详细研究的基础上,将研究区划分为3种生烃史类型:①孔雀河斜坡早期一次生烃型;②草湖凹陷持续生烃型;③英吉苏凹陷二次生烃型。

(4) 孔雀河地区主要经历过两次成藏期,第一期为加里东晚期—早海西期,

第二期为燕山晚期以来,其中主成藏期为加里东晚期—早海西期。孔雀河斜坡寒武系一下奥陶统烃源岩不具有二次生烃过程,无二次成藏。

(5) 划分了不同类型油气藏成藏区块及有利区带,认为孔雀河斜坡弱改造区、草湖凹陷、英吉苏凹陷深埋保存区是油气勘探的较有利区块。

本书是在我博士论文基础上修改完成的,在完成博士论文及本书的写作过程中,导师任战利教授给予了精心的指导,非常感谢任战利教授多年来的培养和鼓励!同时也感谢赵靖舟教授给予的指导和帮助,刘池洋、陈刚教授,崔军平、韩伟、于强博士,李建新高工,卿颖、史政、白奋飞硕士在科研中给予的指导和帮助。田雯、杨建光、魏昆龙等研究生在成书过程中协助完成部分图件的清绘工作。

本书为我多年的科研工作积累,中国石油大学的邱楠生教授,中国科学院地质与地球物理研究所的胡圣标研究员,高能物理研究所的袁万明研究员等都曾给予过大力的指导和帮助。向以上指导、支持、帮助过我的人们致以衷心的感谢!

通过在教学和科研工作中的不断积累、补充和完善,成就此书。囿于学识和水平,错误和不足之处难免,敬请各位专家批评指正!

目 录

第一章 沉积盆地热演化史研究方法及应用	(1)
第一节 现今地温场研究及应用	(1)
第二节 古地温场恢复方法	(23)
第二章 低温构造热年代学研究进展	(46)
第一节 (U-Th)/He 热定年法及在沉积盆地热史恢复中的应用	(46)
第二节 低温构造热年代学研究进展	(54)
第三章 区域构造地质特征与地层系统	(62)
第一节 区域构造地质特征	(62)
第二节 地层划分及对比	(68)
第四章 构造特征及盆山构造演化	(80)
第一节 构造变形特征	(80)
第二节 盆山关系及隆升历史	(100)
第三节 孔雀河地区盆山构造演化	(114)
第五章 盆地热演化史及生烃历史	(125)
第一节 沉降史分析	(125)
第二节 热演化史恢复	(139)
第三节 烃源岩热演化史与生烃史	(152)
第六章 典型油气藏解剖及油气成藏期次分析	(160)
第一节 典型油气藏解剖	(160)
第二节 油气成藏期次分析	(165)
第三节 孔雀河地区油气成藏过程和成藏模式	(170)
第四节 成藏控制因素	(172)
第七章 盆山演化对成藏要素的控制作用及有利区带预测	(174)
第一节 盆山关系及演化对成藏要素的控制作用	(174)
第二节 油气系统划分及评价	(177)
参考文献	(207)

第一章 沉积盆地热演化史研究方法及应用

沉积盆地热演化史包括沉积盆地现今地温场及古地温场研究两部分。现今地温场是古地温场发展演化的最后一幕，也是恢复盆地古地温的基础。盆地古地温场及其演化对油气的形成和分布具有重要的控制作用。

第一节 现今地温场研究及应用

沉积盆地现今地温场是现今岩石圈热状态的反映，它受深部岩石圈热动力学过程及浅部的盆地构造演化等双重地球动力学过程控制，不同类型盆地具有不同的地温场(Allen1990, 2000)。相应地，研究沉积盆地的地温场特征能为探讨盆地成因演化动力学过程提供地热学依据和约束。现今地温场研究包括地温测量、大地热流测定及深部热结构等内容。

一、现今地层测温

沉积盆地地温场研究主要借助各种钻孔测试的温度数据。这些测温数据因目的不一，故对测温的要求也不同。常见的地温数据可分为钻孔系统连续测温、地层试油温度(静温和流温)、孔底温度(BHT)等数据。上述各类温度数据中，系统连续测温数据和试油静温数据比较可靠，它们构成了盆地地温场研究的主要数据。其他测井温度数据(如 BHT 等)，由于静井时间不够，虽不能直接用，但经校正后仍可作为参考。

人们把井孔温度恢复达到平衡以后进行的井温测量称之为稳态测量。稳态测温的资料最为可贵，它对于原始地温场的评定和进行大地热流值的计算是不可缺少的。在含油气盆地地温测试资料中，最为常见的有系统连续测温资料和试油温度数据。前者是在完井停钻之后静井数天或数十天，甚至半年以上，每 10m 或 20m 测量一个温度点，循序连续测量后而获得的温度数据。这类测温数据因静井时间较长，井温基本恢复，接近真正的地层温度；后者指完井后，关井数天或长期关井后试油时将仪器下放至接近油层射孔段，进行压力和温度测量。

在含油气区收集地温资料时应尽量选择那些完钻较早的老井，例如各油田打开油层的第一批探井。由于它们的油层未受后来采油和注水的影响，试油关井测压时所获得井温度数据完全反映了地温场的原始状况，是十分理想的地温资料。

二、岩石热导率

用以表征岩石导热能力的系数称为岩石热导率。不同的岩石由于其矿物组合与结构、胶结程度、孔隙率以及饱水含油气性等方面的不同，其传热能力也可以有显著的不同。即使是同一类岩石，由于其结构和所含杂质的差异，其导热率也常有差别，并在一定的范围内变化。因此，在沉积盆地地热研究中，需对钻井岩样进行热导率测定。热导率测定可以视测试样品的不同，选用稳定平板热导仪、非稳态环形热源热导仪、非稳态导热探针及 QTM 型快速热导仪等不同的方法来测定。对于缺少岩心样品的钻井，可应用测井资料来确定岩石导热率。

影响岩石热导率的主要因素有：矿物成分、孔隙度、温度、压力和孔隙水饱和度等。岩石热导率随压力增加而升高，随温度增加而下降。在一定程度上，两者在地壳深部可以相互抵消(何丽娟等，2000，2007)。岩石的含水量对热导率有影响，一般随其含水量的增加而热导率增高。主要原因是水的热导率大于空气的热导率。因此，对高孔隙的砂岩一般需在饱和水条件下测定其热导率值，使其热导率值能代表在井下原位时的真实情况。对应埋藏深、压实紧密、孔隙度小的砂岩、灰岩和泥岩，由于干岩样热导率与饱和水岩样热导率差值较小，可以直接应用干岩样测试值。

三、大地热流

大地热流值是一个综合性参数，是地球内热在地表的唯一物理量。它比其他单项地热资料(温度、地温梯度)更能反映一个地区地热场的基本特点。

按一维稳态传导公式即可计算热流值：

$$q = -k \left(\frac{dT}{dH} \right) \text{ 或 } q = -kG \quad (1-1)$$

式中 q ——热流， mW/m^2 ；

k ——岩石热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

T ——温度， $^\circ\text{C}$ ；

H ——对应于 T 的深度， km ；

$\frac{dT}{dH}$ ——地温梯度 G ， $^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

热流是岩石导热率与地温梯度的乘积。只要测量地下某一深度间隔的地温梯度及相应段岩石的热导率，即可以求得热流值。准确求取地温梯度和岩石热导率是获得可信的热流数据的关键。地温梯度的求取，首先要保证测温井段是在稳态下测量的，其次得到的地温梯度必须是传导型的。在地下水活动强烈的地区和层段，由于水—热对流的影响，所得的结果不能反映地球内部的传导热流，不能用于大地热流的计算。在实际工作中要有意识地避开地下水活动影响的层段，选择不受干扰或少受干扰的地区和层段来研究，如盆地中部和钻井的井底段。确定地温梯度的方法有两种：一是利用一些钻井系统测温确定，这是最准确的；二是按地质条件相似的地区或油田区，对井底温度或油层温度与深度的关系作统计，求出该区或油田区的平均值，或某一层段的平均值。

岩石热导率可以通过如下方法确定：在一个地质构造区中，按综合地质柱状剖面系统采集一套岩心标本，分别测定其热导率，并按各地层单元和岩类分别统计其平均的热导率。有了各层段各岩类的平均热导率，根据岩屑录井和录井资料分别统计单井和某一层段，或一个地区和该区中某个层段各岩类的累积厚度，按下式计算其热导率(k)：

$$k = D \left(\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} + \cdots + \frac{d_n}{k_n} \right)^{-1} \quad (1-2)$$

式中 $k_1, k_2, k_3, \cdots, k_n$ ——各岩类的平均热导率；

$d_1, d_2, d_3, \cdots, d_n$ ——各岩类的累积厚度；

$D = d_1 + d_2 + d_3 + \cdots + d_n$ 。

四、深部热结构

虽然在地壳浅部测量的大地热流是地球内部最为直接的显示,并能给出发生于地球内部的各种作用过程之间能力平衡的深部信息。但是,热流测试的大量实践表明,一个地区在地表所观测到的热流值的变化范围较大。地表热流值的变化除受浅部的地质或环境因素影响外,更有其深部根源。地表大地热流实际上由两部分组成:一部分源于地壳浅部放射性元素(U、Th、 ^{40}K)衰变所产生的热量,这部分热流称为地壳热流;另一部分来自于地壳深处及上地幔的热量,称为深部热流。就某一地区或构造单元而言,地壳热流分布可因放射性元素含量的变化而有所差别,但深部热流一般比较稳定。不同构造单元深部热流变化很大,因此,深部热流普遍被认为是更能从本质上表征一个地区构造活动性的重要物理量。

一个地区深部热流值的确定,关键在于从地表所观测到的总热流量中,扣除掉由地壳浅部放射性元素富集所提供的那部分热量或地壳热流。首先要给出一地区的地壳结构模型,并确定出各岩层段放射性生热率之后,即可采用“剥层”法逐层计算各层段所提供的热量,从而得出各层段底部的热流值。

岩石放射性生热率 $A(\mu\text{W}/\text{m}^3)$ 可根据 $\text{U}(10^{-6})$, $\text{Th}(10^{-6})$ 和 $\text{K}(\%)$ 的浓度用下式求得:

$$A = \rho(9.51C_{\text{U}} + 2.56C_{\text{K}} + 3.48C_{\text{Th}}) \times 10^{-5} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——岩石密度, g/cm^3 。

只要测得了不同岩石的放射性生热率,就可以计算盆地各层段的平均生热率。地壳深部温度计算通常采用一维稳态传导公式:

$$T_z = T_0 + qH/k - AH^2/2k \quad (1-4)$$

式中 T_z ——深度 Z 处的温度;

T_0 ——各计算层段的表面温度(地表即为恒温带温度);

q ——各层段的地表热流(最上层取地表热流值);

H ——各层段厚度;

k ——岩石热导率;

A ——岩石生热率。

五、现今地温场研究实例

(一) 塔里木盆地现今地温场特征

自 20 世纪 80 年代以来,许多学者在塔里木盆地开展了大量的现今地温场研究,已初步揭示出该盆地具有低温冷盆的热状态特征(王良书等, 1995, 2003, 2005)。邱楠生等(2002)根据实测数据,首次系统报道了塔里木盆地的热导率、生热率等岩石物理参数及相关的分析和讨论。冯昌格等(2009, 2010)在汇编和甄选前人地热数据的基础上,补充了新的地温资料,较为完整的研究了塔里木盆地现今地温场特征。

研究表明,塔里木盆地地温梯度变化范围为 $17 \sim 32^\circ\text{C}/\text{km}$, 平均为 $(22.6 \pm 3.0)^\circ\text{C}/\text{km}$ 。盆地内部隆起区地温梯度高,多在 $20 \sim 26^\circ\text{C}/\text{km}$, 坳陷区地温梯度低,其地温梯度一般在 $18 \sim 22^\circ\text{C}/\text{km}$, 体现了埋深及基底起伏形态对现今地温场的控制作用。

根据各井平均地温梯度得到的塔里木盆地现今地温梯度平面分布图(图 1-1),从库车坳陷到沙雅隆起,地温梯度从北缘山前单斜带的 $26 \sim 28^\circ\text{C}/\text{km}$ 降低到沙雅隆起南部的 $20 \sim$

22℃/km。地温梯度由北向南逐渐降低的变化过程反映了天山—塔里木新生代盆山耦合从山前向盆内逐渐变弱的过程。

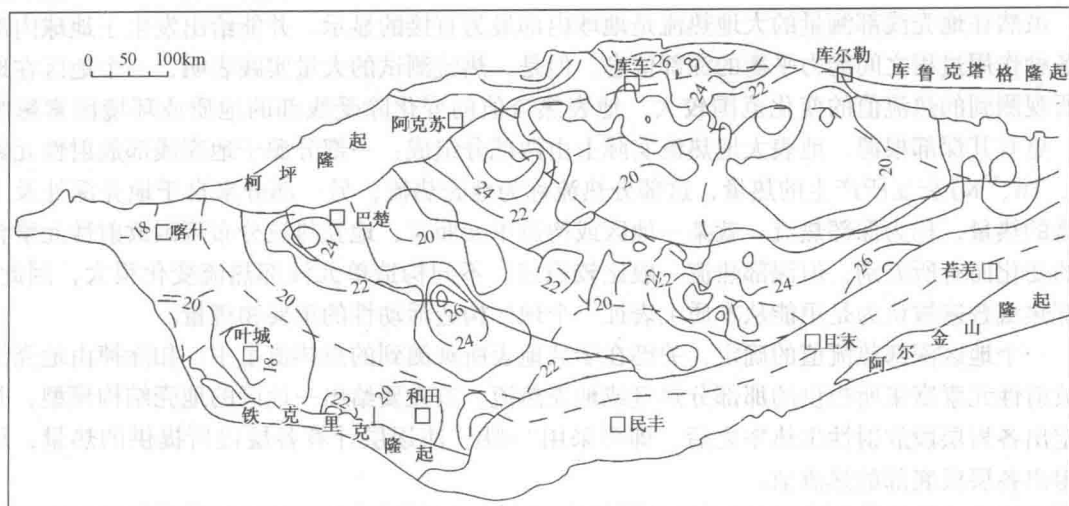


图 1-1 塔里木盆地台盆区现今地温梯度分布图(据冯昌格等, 2009)

塔里木盆地现今大地热流值介于 26.2~65.4mW/m²之间(图 1-2), 平均为(43±8.5)mW/m²。基底浅的隆起区热流较高, 一般大于 40mW/m², 如卡塔克隆起平均热流为 55.4mW/m², 巴楚隆起平均热流为 47.8mW/m², 麦盖提斜坡平均热流为 45.1mW/m², 古城墟隆起为 54.6mW/m², 沙雅隆起为 40.9mW/m²。基底坳陷区热流较低, 一般小于 40mW/m², 如塘古巴斯坳陷平均热流为 39.6mW/m², 喀什坳陷平均热流为 33mW/m², 满加尔凹陷为 35.2mW/m²。库车坳陷热流值较高, 平均热流值为 51mW/m²。整体而言, 盆地现今热流值的分布模式受基底起伏形态和埋深等影响。

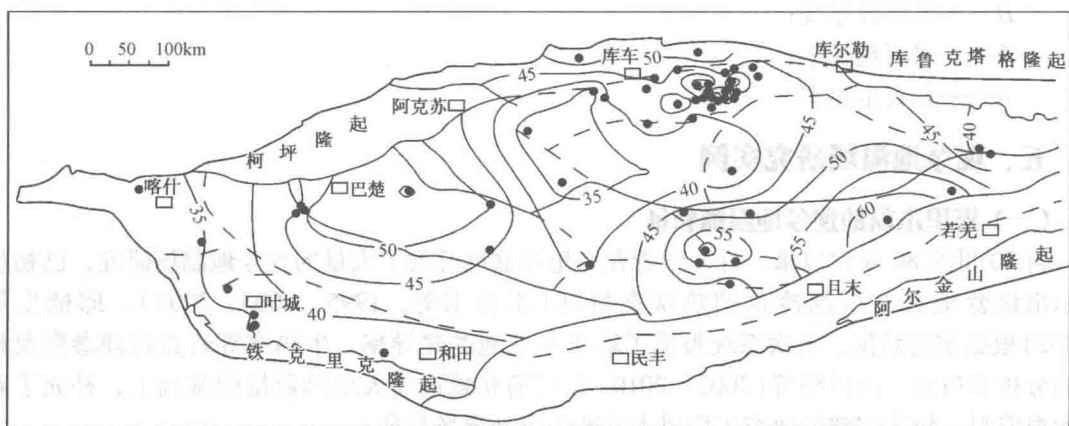


图 1-2 塔里木盆地现今大地热流值分布图(据冯昌格等, 2009)

塔里木盆地现今地温梯度(平均值在 22.6℃/km)与中国其他大中型沉积盆地相比, 表现为低温冷盆。相对于世界上典型克拉通油气盆地, 如美国 Michigan 盆地(22℃/km)(Speece M A, 1985)、Williston 盆地(<25℃/km)(Osadetz K G, 2002)及巴西 Paraná 盆地

($22^{\circ}\text{C}/\text{km}$) (Huter S J, 1996) 等, 塔里木盆地现今地温梯度与它们一致, 仍具有典型克拉通盆地地热状态。

塔里木盆地的大地热流介于 $26.2 \sim 65.4 \text{ mW}/\text{m}^2$, 平均为 $43 \pm 8.5 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。该背景值世界上典型的前寒武地盾区 [如印度地盾 $25 \sim 50 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Roy S, 2000)、加拿大地盾 $42 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Jaupart J, 1998)] 和克拉通盆地 (如美国 Michigan 盆地 $42 \sim 54 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Speece M A, 1985)、Williston 盆地 $49 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Osadetz K G, 2002) 和巴西的 Parana 盆地 $56 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Huter S J, 1996) 等相近。然而, 与我国大中型沉积盆地相比, 塔里木盆地大地热流值整体偏低。

影响塔里木盆地现今地温场分布的主要因素有: (1) 盆地大地构造背景决定了现今地温场特征。塔里木盆地岩石圈厚度大、莫霍面温度低, 整体以挠曲变形为主 (王良书等, 1996); (2) 盆地具有古老稳定的前寒武变质基底, 构造活动相对稳定, 中生代晚期至新生代期间没有岩浆活动; (3) 盆地内隆起区地温场相对较高, 拗陷区相对较低的格局受基底起伏控制。

(二) 四川盆地现今地温场特征

四川盆地位于扬子板块西缘, 是在扬子准地台的基底上发展起来的, 经历了古生代一早中生代的早期克拉通拗陷 (位于上扬子克拉通西部) 和晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地两个演化阶段。四川盆地地温场研究始于 20 世纪 80 年代, 早期研究学者利用盆地及周缘地区的几百口钻孔温度资料和大量的热导率、生热率等热物性参数, 报道过一大批大地热流数据 (郭正吾等, 1996; 王钧等, 1986; 黄少鹏等, 1990; 韩永辉等, 1993; 卢庆治等, 2005; 袁玉松等, 2006)。如川中地区热流值较高, 女基井的大地热流达 $73.8 \text{ mW}/\text{m}^2$, 川弥 87 井达 $68.83 \text{ mW}/\text{m}^2$, 川西北和川东北热流值相对较低。徐明等 (2011) 通过开展了一系列的油田稳态钻孔温度测量及大量的系统热导率、生热率测定, 获得了一批新的地温梯度和大地热流数据, 提出了沉积地层岩石热导率系列柱。

中国大陆地区, 上扬子地块为中—低地温梯度区, 地温梯度普遍介于 $20 \sim 35^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间, 四川盆地现今地温梯度为 $17.7 \sim 33.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 平均值为 $22.7^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 小于中扬子区江汉盆地 ($33.59^{\circ}\text{C}/\text{km}$) (徐明等, 2010) 和下扬子区苏北盆地 ($30^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 的地温梯度。

四川盆地地温梯度分布特征明显, 川中至川西南地区的地温梯度比较高, 介于 $24 \sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 沿东北方向向外逐渐下降至 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右, 川东北外缘甚至低至 $16^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。地温梯度与基底埋深基本上是负相关关系。在威远构造带, 基底埋深小, 最浅处小于 5 km , 地温梯度超过 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 在川中—川西南基底隆起两侧, 地温梯度基本上在 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右; 川东北山前裂隙发育, 地下水向下渗透, 引起局部地温梯度的进一步降低, 大大低于盆地的平均值。

岩石热导率随深度关系表明 (图 1-3), 砂岩、泥岩、硬石膏、灰岩和白云岩等, 热导率介于 $1.694 \sim 5.547 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 泥岩的平均值最小, 为 $2.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 硬石膏的平均值最大, 为 $3.81 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 大多数岩石样品的热导率主要集中在 $2 \sim 4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间。

四川盆地大地热流值介于 $35.4 \sim 68.8 \text{ mW}/\text{m}^2$, 平均值为 $53.2 \text{ mW}/\text{m}^2$ (图 1-4), 比下扬子区 $60 \text{ mW}/\text{m}^2$ 和中国大陆地区大地热流平均值 $63 \text{ mW}/\text{m}^2$ 要低 (王书良, 1995; 汪洋等, 2001), 与相邻的中扬子区江汉盆地 $52.3 \text{ mW}/\text{m}^2$ 相近 (徐明等, 2010), 比塔里木盆地 (王钧等, 1995; 王良书等, 1995; 冯昌格等, 2009) 和准噶尔盆地 (王社教等, 2000a; 2000b) 略高。

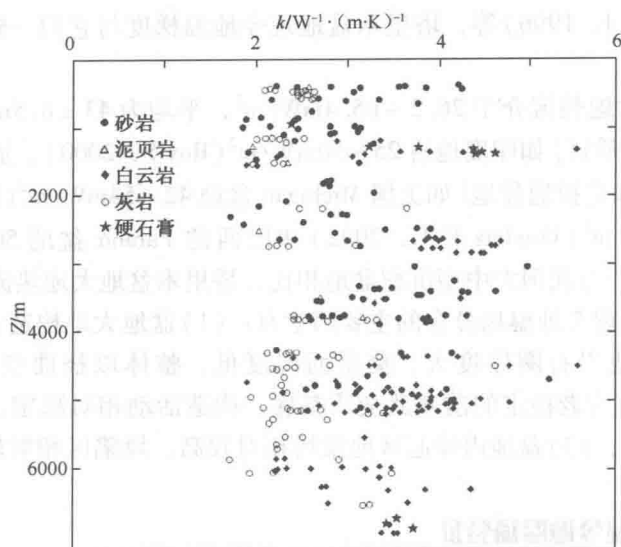


图 1-3 四川盆地岩石热导率随深度的变化(据徐明等, 2011)

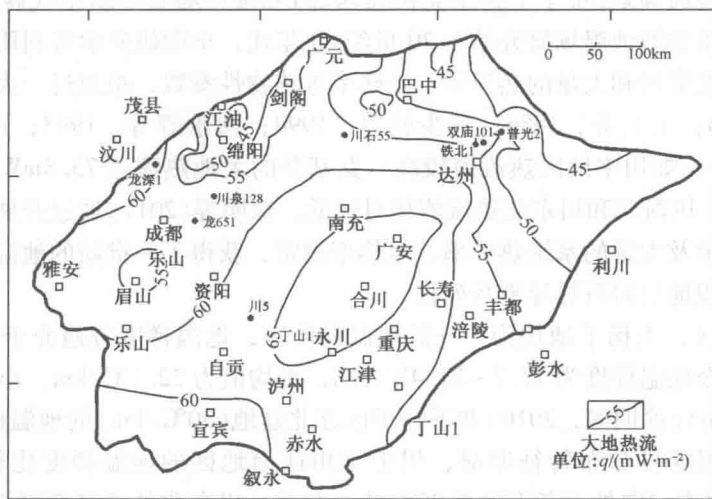


图 1-4 四川盆地大地热流值等值线图(据徐明等, 2011)

(三) 鄂尔多斯盆地现今地温场特征

鄂尔多斯盆地处于华北克拉通的最西部, 基底由太古界和下元古界的变质岩层所组成, 是一个稳定的古老地块。在结晶基底上接受下古生界碳酸盐岩、上古生界海陆交互沉积, 中生代逐渐转化为大型内陆湖盆, 早白垩世以后盆地整体抬升, 遭受剥蚀。根据资料, 鄂尔多斯盆地现今各井及全区平均地温梯度全球平均值约为 $3.19^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (图 1-5), 显示中地温场特征。盆地现今地温场分布不均匀, 地温梯度整体呈现南高北低, 东高西低的特征。

通过对各井和盆地各构造单元各时代地层温度和深度做回归分析, 得出盆地内地温梯度纵向变化的范围(表 1-1), 白垩纪地层的地温梯度在 $(2.6 \sim 3.1)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 之间波动, 侏罗纪地层的梯度分别为 $(2.0 \sim 3.1)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 和 $(2.0 \sim 2.9)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 石炭系地层的地温梯度普

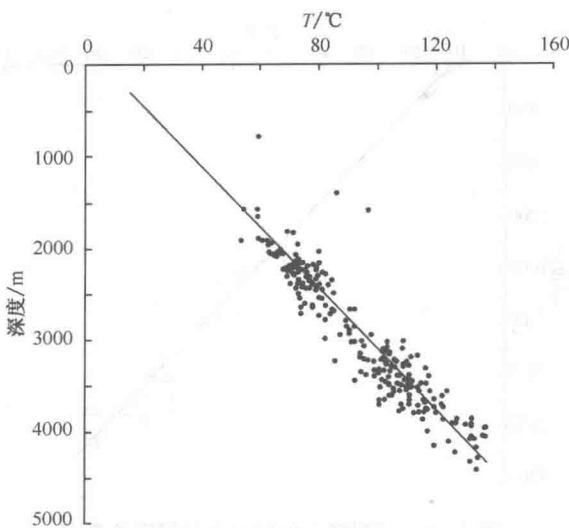


图 1-5 鄂尔多斯盆地地层温度与深度关系图

遍比较高，一般为(2.2~4.4)℃/100m，最高可达 6.2℃/100m，经过石炭纪地层，进入奥陶和寒武纪地层的较低地温梯度带，其值在(1.8~2.1)℃/100m 和(1.3~2.0)℃/100m 范围内变化，元古代的地温梯度大致在 2.1℃/100m。随着深度的增加，地层由新到老，地温梯度逐渐降低，但进入二叠—石炭纪煤系地层，地温梯度明显增大，穿过该层段后，地温梯度又急剧变小，并随深度的增加逐渐减小。盆地北部伊盟隆起的一些钻井测温资料，对其作深度—温度关系回归分析，得出了伊盟隆起的地温梯度约为(2.7~3.1)℃/100m，代表性地温梯度为 3.0℃/100m(图 1-6)。

表 1-1 鄂尔多斯盆地部分钻井分层地温梯度值

地层 地温梯度/ 井号 (°C/100m)	K	J	T	P	C	O	Є	Pt
楼 1 吉 1*			2.78	2.85	4.43	2.03*		
洲 2 ZK912*		3.02*	2.99	2.85	4.43			
麟参 1 ZK308*		2.95*	2.90	2.85	6.18			
陕 85	3.11	3.10	2.89	2.77	3.68	2.00		
陕 62		3.00	2.92	2.71				
庆深 1 阳 1*		3.01*	2.94	2.38				
天深 1 镇参*	2.97*	2.73	2.59	2.00	2.19	2.09	1.34	2.06
鹭探 1 李探 6*		3.19*	2.87	2.93		2.13 [⊙]		
发东 1 陇县井*		2.52*	2.09	2.27				
新耀 2 长武井*	2.71*	2.83*		2.52		1.77	1.95 ^Δ	

注：钻井名和数据上有*号为相对应的钻井及梯度，数据上标有⊙号者为任 2 井奥陶纪地层地温梯度，上标 Δ 号的数值是耀参 1 井寒武纪地层的地温梯度。

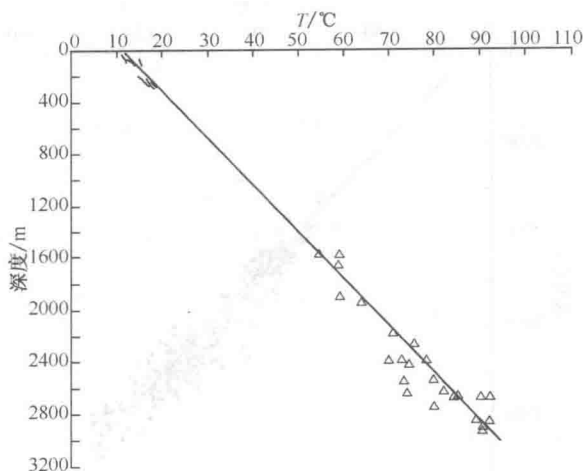


图 1-6 伊盟隆起地层温度与深度关系图

鄂尔多斯盆地地温梯度分布图表明盆地现今地温梯度总体为东高西低,南高北低,在鄂托克前旗—乌审旗—神木以北、伊盟隆起以南地区为地温梯度低值区,地温梯度小于 $2.80^{\circ}\text{C}/100\text{m}$;在盆地南部庆阳—安塞—子长一带为地温梯度高值区,地温梯度可达 $3.00^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上,地温梯度高值区呈北东西向分布(图 1-7)。

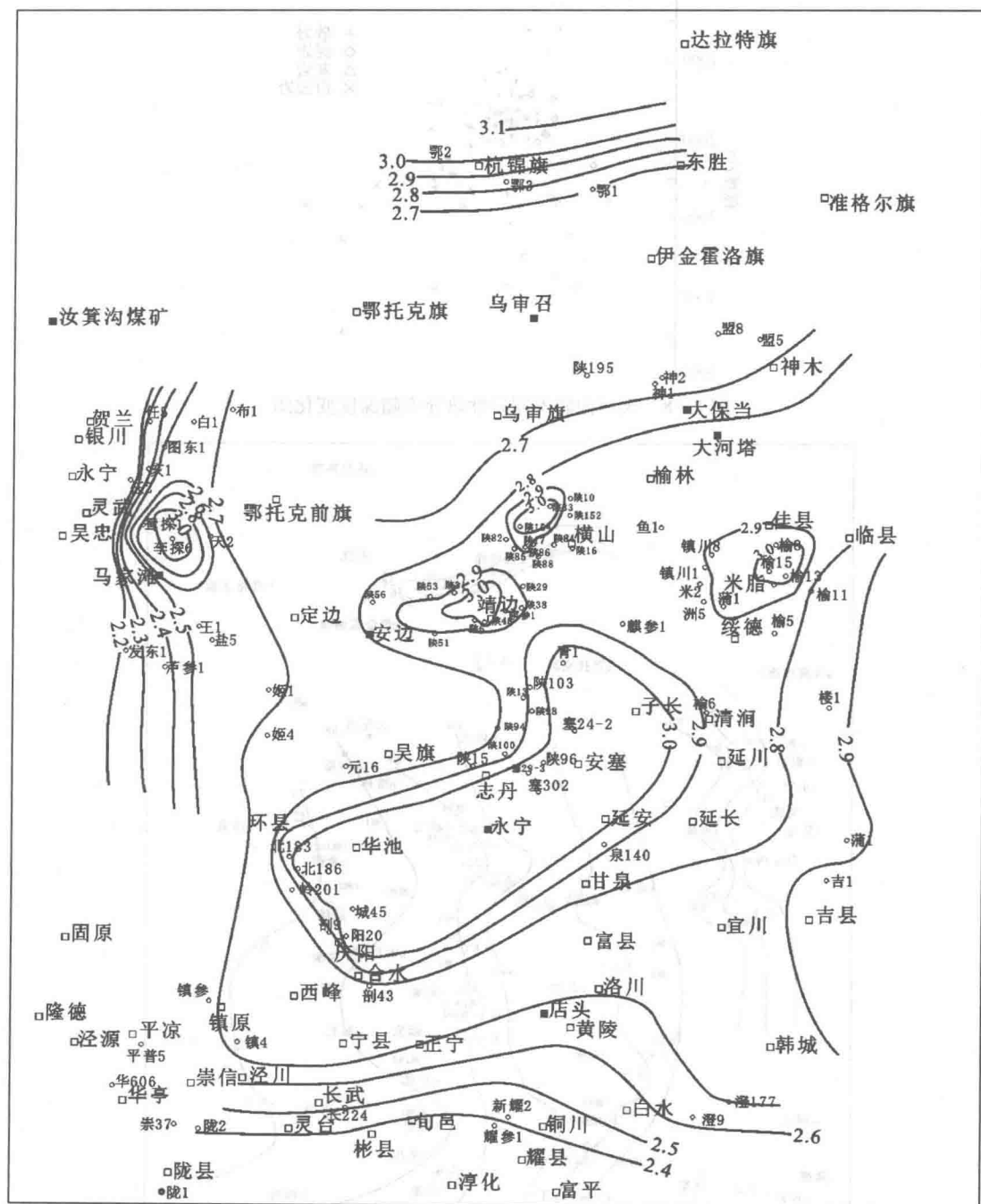
在对盆地热导率系统测试的基础上,对各井热导率及各构造单元的热导率变化趋势及变化规律进行了分析。如天环向斜不同钻井不同岩性的热导率数据分析表明,砂岩、泥岩热导率随深度的增加而增大,砂岩的热导率普遍高于泥岩(图 1-8)。

根据各个单井的地温梯度及热导率测试结果,分别计算了各单井的大地热流值,编制了鄂尔多斯盆地大地热流值分布图(图 1-9)。大地热流值与地温梯度变化趋势基本相同,总体为东高西低,南高北低的变化趋势。

晋西挠褶带蒲 1 井等 3 个测点大地热流值比较集中,平均值为 $69.57\text{mW}/\text{m}^2$;天环向斜的 10 个测点,除布 1 井外,各测点大地热流值都比较接近,平均值为 $56.43\text{mW}/\text{m}^2$;西缘逆冲带有 19 个测点,平均大地热流值为 $55.8\text{mW}/\text{m}^2$,属鄂尔多斯盆地中二级构造单元中热流值最低者(表 1-2)。确定了鄂尔多斯盆地全盆地的平均大地热流值为 $63.4\text{mW}/\text{m}^2$,接近全球平均热流值,属于中地温场。

表 1-2 盆地各构造单元大地热流值

构造单元	测点数	热流值范围/ (mW/m^2)	平均值/ (mW/m^2)	全盆地平均值/ (mW/m^2)
晋西挠褶带	3	69.2 ~ 69.8	69.57	63.4
陕北斜坡	28	61.7 ~ 68.8	65.6	
天环向斜	10	54.8 ~ 58.2	56.43	
西缘逆冲带	19	43.3 ~ 70	55.8	
渭北隆起	6	58.9 ~ 67.4	65.4	
伊盟隆起	2	62.32 ~ 67.43	64.87	

图 1-7 鄂尔多斯盆地地温梯度等值线分布图(单位: $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

