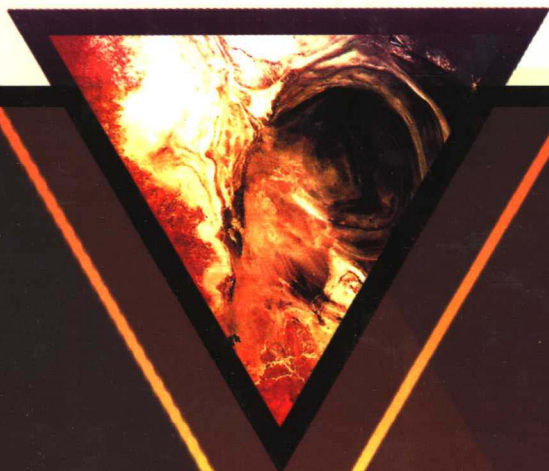


© 刘文汇 郑建京 妥进才 等著
李景贵 史斗 张殿伟

塔里木盆地 深层气



科学出版社
www.sciencep.com

国家重点基础研究规划(973)项目(2001CB209100) 联合资助
中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-111)

塔里木盆地深层气

刘文汇 郑建京 妥进才 等著
李景贵 史斗 张殿伟

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是我国深层油气研究领域的第一部著作。书中从深层烃源岩的分布、演化及其地球化学特征, 高温高压及不同介质条件下有机质成烃演化模拟, 深层有机质成烃过程的有机-无机相互作用, 深层油气地质、地球化学判识, 深层有机质成烃机制和盆地深层气形成的构造、沉积学条件等方面对深层气的成烃、成藏进行了系统研究。

本书可供地质、石油、天然气领域科研人员和产业部门人员, 高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

塔里木盆地深层气/刘文汇等著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018276-0

I. 塔… II. 刘… III. 塔里木盆地-天然气-油气藏-研究
IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第151409号

责任编辑: 胡晓春等 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 中飞时代

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年1月第一版 开本: 787×1092 1/16

2007年1月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 1—2 000 字数: 352 000

定价: 55.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

序

在能源资源需求猛增，我国西气东输管线业已建成，急需天然气后备资源补充的形势下，刘文汇等撰写的天然气地质专著《塔里木盆地深层气》的问世无疑是适时的，有重要意义的。

《塔里木盆地深层气》是中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国西北深层气与未熟-低熟烃研究”的重要组成部分。作为知识创新工程，这个项目的重要意义，一是抓住了国民经济建设对于油气资源的急需，二是在油气资源勘探已广泛开展的今天，当常规油气资源勘探强度已较高的情况下，看准了深层和低熟这两个勘探相对较少，而在理论上和生产实践上都有极大潜力亟待突破的领域。

关于低熟油，2003年黄第藩、张大江等的专著《中国未成熟石油成因机制和成藏条件》业已作了全面的总结，对国外相关研究也作了重点的论述，研究表明我国不但有一批低熟油田，而且低熟油的储量达52亿吨，是非常重要的潜在资源。关于低熟气，1998年刘文汇等出版的专著《生物-热催化过渡带气》，对于低熟气在理论上作了较全面的论述，在生产实践上，现有工作表明，俄罗斯西西伯利亚以乌连戈依为代表的一大批超大型气田，它们实际上不是生物气，而是成熟度(R^o)大约为0.4%~0.7%的低熟气。我国的吐哈盆地已探明的约1000亿立方米天然气也属于低熟气的范畴。这一切证明了浅部、烃源岩低演化阶段天然气资源的重要意义。关于深部油气，近年来已受到油气地学界的广泛关注，2002年妥进才在《地球科学进展》上发表了一篇“深部油气研究现状和进展”的综述性论文，系统地总结了当时国内外关于深层油气研究的进展和现状，并从深层油气的温度、分布、形成的物质基础、稳定性以及储集空间等论述了沉积盆地深层仍具有形成工业油气藏的条件和基础。同时列举了一些深层油气藏的实例，如美国西内盆地阿纳达科凹陷米尔斯兰奇气田在7663~8083m的下奥陶统碳酸盐岩内发现了世界上最深的气藏，储量达365亿立方米，美国墨西哥湾在6540m的深部发现了世界上最深的油藏列克-华盛顿湖油田。我国也有一些深层油气藏的实例，主要体现在塔里木盆地，如塔参1，完钻井深为7200m，为当时亚洲第一深井，并在5059~6930m钻遇12段油气显示层段；盆地内的东河塘油田油层埋深5700~5800m。而且盆地内曾测试的156个油气层段中，有58个油气层的底界均超过了5000m。但是，深层油气的研究不仅与常规油气相比较滞后，即使与低熟油气相比，这一领域也明显起步更晚，理论和实践都比较薄弱，应是一个极具潜力而亟待研究的领域。

《塔里木盆地深层气》是由中国科学院二十余名高中级研究人员历时三年，综合科考足迹遍及塔里木盆地主要油气区和典型地质剖面，在完成了大量实验分析的基础上，经系统总结，精心提升、酝酿完成的科学著作，是深层油气研究领域的第一部专著。这部专著从深层烃源岩的分布、演化及其地球化学特征，高温高压及不同介质条件下有机质成烃演化模拟，深层有机质成烃过程的有机-无机相互作用，深层油气地质、地球化

学判识，深层有机质成烃机制和盆地深层气形成的构造、沉积学条件等几个方面对深层气的成烃、成藏进行了系统、全面的探讨。为深层气领域提供了大量的新资料、新认识。

前人对于低熟气的概念进行了较为明确的厘定，但深层气的概念并不明确。记得上世纪 90 年代初，在德国汉诺威召开的“Deep gas workshop”国际天然气学术讨论会上，我与会议主持人 W. Stahl 教授就“Deep gas”的厘定进行磋商，他认为深层气的深层大致可以定义为地层埋深在 4000m 以下，在层位上一般为二叠系前的沉积。在我国对深层气以前未有非常明确的厘定，但是埋深 4000m 以下认为是深层在学术界是比较认可的。专著的作者们结合塔里木的实际厘定为“深层气是指（源岩）埋藏深度大于 5000m，在温度和压力及环境介质共同作用下所形成的天然气；深层气藏则指埋深大于 4500m 的含油气圈闭”。对塔里木盆地，这个概念应当是恰当的。这部专著对于这一名称的正确厘定是必需的、重要的。

兰州地质研究所长期从事油气资源的地学研究，上世纪 80 年代以来更是持续参加了天然气国家重点科技攻关的项目和中国科学院的许多油气资源地学方面的重大课题，在陆相石油成因、天然气成因理论和应用等领域都取得了一批重要的具有国内外先进水平的成果，同时也培育出了一批很有成就的中青年科学家，本专著的主要作者都是这支科技大军的重要成员，特别是刘文汇教授，从上世纪 80 年代开始一直从事天然气资源的地学研究，在《天然气成因理论及应用》，中、英文版的《天然气中稀有气体地球化学》等重要论著的撰写中都是主要作者，1998 年又以第一作者的身份完成了关于低熟气的第一部专著，现又在深层领域出版了《塔里木盆地深层气》，可以预期，该专著无论是对油气地学的科研人员还是勘探人员都将是一部很有参考价值的科学著作。

徐永昌

2006 年 10 月 11 日

前 言

《塔里木盆地深层气》是中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国西北深层气与未熟-低熟烃研究”(KZCX2-111)主要内容之一。重点研究塔里木盆地塔中、塔北地区和库车拗陷深层气成因、地质地球化学判识标志及其构造、沉积学条件。研究内容涉及六个方面:①深层烃源岩的分布、演化及其地球化学特征;②高温高压及不同介质条件下有机质成烃演化的模拟研究;③深层有机质成烃过程的有机-无机相互作用;④深层油气的地质、地球化学判识标志;⑤深层有机质成烃机制研究;⑥盆地深层气形成的构造、沉积学条件。

研究工作历时近三年,先后二十余人参与此项研究。研究工作以西部大开发战略和“西气东输”工程为契机,围绕有限目标探索我国塔里木盆地深层气的形成、地质地球化学特征、演化模式、运聚特征、成藏条件和规律,以期建立体现西北地域特色的深层气成因理论。本书在以下几个方面具有自己的特色:

厘定了深层气的概念:通过大量的研究资料分析,我们认为深层气是指(源岩)埋藏深度大于5000m,在温度和压力及环境介质共同作用下所形成的天然气;深层气藏则指埋深大于4500m的含油气圈闭。深层气主要有两种形成途径:①烃源岩在深层温度、压力和介质的作用下由于酪根裂解成气;②早期形成的液态烃在深层温度、压力和介质条件下发生裂解形成天然气。

塔里木盆地深层气地球化学特征:塔里木盆地存在两类深层气,即台盆区古生界海相碳酸盐岩为主的烃源岩高演化形成的油型气和前陆盆地中生界陆相煤系为主的烃源岩在快速深埋、高温演化下形成的煤型气。两类深层气在地球化学特征上有明显的体现。盆地构造活动的多期性,多层系天然气源岩分布和天然气易运移等特征导致了塔里木盆地天然气广泛发育多源复合特征,是造成部分天然气碳同位素组成系列倒转或部分倒转的重要原因。轮台油气区,重烃基本为同一来源(C_2 、 C_3 、 C_4),而偏重的甲烷可能来自煤系,可能反映塔北隆起南北两拗陷均对天然气藏有贡献,只是贡献组分有差异。天然气的组分和同位素组成,反映出塔里木盆地深层气具有干酪根直接成气和原油二次成气的特征。

煤岩高温高压模拟实验:煤岩有机质不同显微组分和不同介质、温度条件下的成烃系统模拟及产物分析研究,揭示了煤系有机质的成烃演化特征及产物的地球化学特征,建立了库车拗陷煤岩成烃的地球化学模式。研究表明,库车拗陷源岩的演化应涵盖从煤型生物-热催化过渡带至裂解气各个阶段,库车拗陷应存在形成煤型、生物-热催化过渡带至裂解气等各种气液态烃的源岩,存在不同演化阶段形成的同位素组成有一定差别的煤型气。库车拗陷侏罗系煤系主要以成气为主,液态烃形成主要受壳质组丰度的控制。

塔里木盆地寒武、奥陶系及中生界有效烃源岩的再认识：对烃源岩岩心样品有机碳和生烃潜量研究认为，寒武、奥陶系有利的沉积相带岩心样品总有机碳多低于0.5%，变化于0.08%至0.21%之间，平均值仅为0.13%，下古生界海相有效烃源岩有机碳下限值定为0.5%可能偏高。中生界湖相泥岩和沼泽相煤系烃源岩，样品的有机碳含量、生烃潜力、有机显微组成特征分析表明，煤系烃源岩在成烃方面不利于液态烃的形成，但仍然具有较高的生（烃）气潜力，这可能是库车拗陷形成以天然气藏为主的油气分布规律的主要原因。

海相深层液态烃有机组分的碳同位素逆转特征：分析数据表明，塔里木盆地台盆区寒武—奥陶系海相深层源岩可溶有机组分的碳同位素组成普遍发生强烈逆转，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现饱和烃>芳香烃>非烃>沥青质的完全反序分布特征。对于该区海相油藏而言，当油藏埋深大于5000m时，原油组分的碳同位素组成亦出现逆转现象，并有随着油藏埋深增大而逆转程度进一步加剧的趋势。塔里木盆地台盆区海相源岩可溶有机组分和海相原油组分的碳同位素逆转现象说明，在深层环境下，温度、压力、时间及环境介质等因素将对液态烃有机组分的碳同位素组成产生重要影响，而此种碳同位素逆转特征可能是深层源岩和原油在高演化阶段的一个重要的地球化学标志。

初步确定了深层气的形成条件及其成烃机理：塔里木盆地目前已发现的深层气中，既有由干酪根初次裂解形成的天然气，也有由原油或分散有机质（与干酪根的区别，是否应为分散的液态烃）二次裂解形成的天然气。其中塔北、塔中隆起上的天然气是由寒武—奥陶系烃源岩形成的高一过成熟干气，库车前陆盆地克拉通构造带上的天然气则是由三叠—侏罗系煤系烃源岩形成的高一过成熟干气，而塔中（塔东）和巴楚隆起上的天然气藏是由古油藏的二次裂解形成的。前者以碳同位素偏重的干气为特征，而后者则以碳同位素相对偏轻，组分中重烃含量相对较高为特征。

塔里木盆地深层气形成的构造、沉积学条件：塔里木盆地较低的地热背景条件和不同时期、不同类型盆地的复合叠合，重要演化阶段构造-热事件和构造运动过程中构造叠置作用的发生，新生代以来盆地整体沉降作用和巨厚沉积层系的填充是深层气形成的主要构造控制条件。盆地在长期地质演化过程中，受构造运动、海平面升降变化、沉积物充填速率等因素变化影响，形成了不同形式和不同级别的沉积间断——不整合面，构建了盆地层序地层格架。研究区古生代大体经历了（寒武—奥陶纪）海进→（志留—泥盆纪）海退→（石炭纪）海进→（二叠纪）海退的沉积旋回，形成了特征各异的层序序列，在古生界识别出3个Ⅰ级层序、6个Ⅱ级层序和12个Ⅲ级层序。不同的体系域和沉积相控制着烃类生储盖组合的分布和发育。

参加本项研究的主要人员有刘文汇、郑建京、妥进才、李景贵、史斗、张殿伟、夏燕青、陈国俊、张中宁、薛莲花、温德顺、孙省利、王晓锋、郑军卫、王琪、孙国强。研究中，项目负责人孟自芳研究员自始至终给予了支持和关注。

著作编写人员：前言：刘文汇、郑建京；第一章：郑军卫、刘文汇、史斗；第二章：郑建京、陈国俊、温德顺、薛莲花；第三章：刘文汇、李景贵、张中宁、王晓锋；第四章：张殿伟、刘文汇、王晓锋；第五章：李景贵、张中宁；第六章：妥进才、夏燕

青；第七章：刘文汇、孙省利、妥进才、夏燕青；第八章：郑建京、陈国俊、薛莲花、刘文汇、孙国强。最后由刘文汇、郑建京审阅和修改。

本项研究得到了中国科学院资环局、兰州地质研究所领导和科技处的关心和支持，在此表示衷心的感谢；特别感谢塔里木油田分公司对我们研究工作各个环节的大力支持和协助，感谢塔里木油田分公司勘探开发研究院在我们研究工作中给予的真诚帮助和无私的合作；同时感谢参与本项研究的二十余名分析测试人员在三年中的辛勤劳动和默默奉献。

目 录

序

前言

第一章 深层气的概念和国内外研究现状.....	1
第一节 深层气概念的厘定与甄别.....	1
第二节 国内外研究现状.....	4
第二章 塔里木盆地深层气形成的地质条件	17
第一节 塔里木盆地地温场特征与深层气形成	18
第二节 沉降拗陷演化过程中的沉积物填充与深层气形成	19
第三节 塔里木盆地深层气形成的生储盖组合条件	28
第四节 塔里木盆地深层气形成的构造地质条件	35
第三章 塔里木盆地深层气源岩及其地球化学特征	56
第一节 深层气源岩的分布	56
第二节 烃源岩地球化学特征	60
第四章 塔里木盆地深层天然气地球化学特征	77
第一节 塔里木盆地深层气分布	77
第二节 塔中地区高演化海相层系深层气	79
第三节 库车拗陷快速埋藏背景下深层气	85
第四节 轮南地区混源成藏深层气	96
第五章 深层液态烃产物的地球化学特征.....	103
第一节 深层原油类型及饱和烃有机地球化学特征.....	103
第二节 原油(烃源岩)芳香烃化合物的分布特征及油源对比.....	109
第三节 深层原油的碳同位素地球化学特征.....	139
第六章 深层气形成的实验地质学研究.....	146
第一节 样品与实验方法.....	147
第二节 模拟实验过程中的气体产率变化特征.....	147
第三节 模拟实验过程中的可溶有机质的产率变化特征.....	150
第四节 不同温度和介质条件下模拟实验气体产物的产率和含量变化特征.....	153
第五节 不同温度和介质条件下模拟实验气体产物的碳同位素组成.....	165
第六节 不同类型烃源岩热模拟产物的组成和热演化.....	171
第七节 库车拗陷天然气成因的实验研究.....	179
第七章 塔里木盆地深层气形成机制.....	184
第一节 传统成烃演化及其油气在空间上的分带性.....	184
第二节 深层气形成与保存的条件.....	186

第三节	台盆区古生界烃源岩的深层成烃机制·····	192
第四节	有机-无机相互作用下的成烃模拟·····	197
第五节	热流体在油气形成过程中的作用·····	207
第六节	深层加氢成烃作用·····	210
第八章	深层气的分布规律及研究趋势·····	215
第一节	深层气的分布规律及形成条件·····	215
第二节	深层气研究中存在的几个重要问题及发展趋势·····	223
参考文献	·····	227

第一章 深层气的概念和国内外研究现状

近年来,关于深层气的科学研究和勘探实践日益增多。美国地质调查局1995年对其本土深度大于4572m的深层未发现天然气的地区进行过资源评价。俄罗斯地质学家认为,预测俄罗斯境内油气资源量时,不应只计算到7000m深度,应把整个沉积盖层视为含油气区和含油气远景区。在我国东部盆地,不断加深天然气的勘探目的层;在西部的塔里木盆地,大于5000m深度的气藏业已付诸生产。种种情况表明,加强深层气的研究和勘探对扩大油气资源领域具有重要意义。

第一节 深层气概念的厘定与甄别

自 Sugisaki (1981) 提出了深层气 (deep-seated gas) 一词以来,关于沉积壳层深部的天然气研究引起了国内外石油地质学家的极大关注,陆续提出了许多观点和认识。深层气,顾名思义,指的是深埋层位生成与储集的天然气的,具体地说,就是地球沉积层深部层位形成或赋存的天然气。但是,近年来的一些文献在表述深层气时在“深层”和“深部”的概念上出现了一些混乱,还没有一个统一、明确的概念来限定深层气的范围。较长时间以来,石油地质学家对沉积壳层深部和地球深部的天然气给予了很大的关注,这方面的中外文献也比较多。据不完全统计,自1990年以来,冠以“深”字文献原文约有100余篇,按照中译文表述,英文文献的深部气比较多,俄文文献的深层气居多,中文文献的深层气也居多。但是对于“深部气”和“深层气”概念或者说内涵的表述上却不尽相同,甚至有明显混乱。我们依据俄、英、中三种文字的“深部气”、“深层气”地质学术语及其内涵的对照,试图辨析该两名词真正的天然气地质学意义,但并不过多涉及造成“深部气”和“深层气”的诸多因素。

1. 关于“深层气”

(1) 对于深层气“深”的概念,俄文文献的提法有:

- Большие глубины (大深度,深部);
- Сверхглубокая (超深);
- Глубинные горизонты (深成层,深层);
- Глубокозалегающие горизонты (深埋层,深层);
- Глубокопогруженные горизонты (深沉降层,深埋层,深倾伏层,深层)。

Лодженвская (1990) “深埋层的含油气性”一文中的“深埋层”指“含油气盆地4000m以下深度”及有机质演化的临界、超临界深度,并认为“在预测苏联境内油气资源量时,不只计算到7000m深度,应把整个沉积盖层视为含油气区和含油气远景区。”

Зонн (1994) 指出的“深部”为大于 4500m 的深度。

Самвелов (1995) 在“深部油气藏形成特点与分布”一文中指出：“在大于 4000~5000m 的地方原则上可以发现工业烃藏，从第三纪至古生代的沉积中，无论是陆源沉积还是碳酸岩层，在深部都有工业性油气。”

Меленевский (1997) “论油气形成的深部分带性”一文中的“深部”是指“大于 5000m 的深度”，并认为“随着深度的增加，生油主带变为凝析气带，再往下则成为干气带”。

Мехатиев (1991) “深埋层的地温前提条件”一文中“深埋层”是指“5500~6500m 深度”。

Велоконь (1999) “深部异常高层压发育特性”一文中的“深部”指的是“提马诺-伯朝拉盆地示范井”、“科耳瓦盆地深参数井”和“秋明超深井”的 6904m、7057m、7057m 深度。

Дмитриевский (1994) 在“深部含油气性理论和预测的系统方法”一文中指出：“系统的主要特征是沉积生成中构成的沉积体”，“在整个成岩演化期的沉积岩成岩各阶段中沉积岩对油气发育的意义”。

(2) 对于深层气的概念，英文文献有：

通过对 1975 年以来 SCI 收录刊物进行检索，检到冠有“深”字样的文献 349 篇，其中明确冠名“深部气” (deep gas) 的文献 58 篇，冠名“深层气” (deep-seated gas) 的文献 2 篇。

美国地质调查局 (Dyman *et al.*, 1995) 对其本土的深部沉积盆地 (deep sedimentary basin, 深度大于 4572m) 中的未发现天然气资源进行评价，指出其资源量约为 $3.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

Gold 和 Soter (1980) 在《Scientific American》杂志上发文提出了地球深部气体 (deep-earth-gas) 假说。

Carcione 和 Gangi (2000) 指出，“在不可预测的超压带钻探深部气资源 (deep gas resources) 存在很大的风险性……”。

Barker 和 Takach (1992) 对超深部 (ultradeep) 砂岩储层中的天然气进行了研究，指出：“随砂岩矿物杂质的不同，天然气可存在的最大深度为 3048~12192m。”

Burruss (1993) 对地壳深部 (deep crust) 的甲烷气体稳定性做了研究。

Sugisaki (1981) 提出了深层气 (deep-seated gas) 一词。

(3) 对于深层气，中文文献有：

王群、宋延杰 (1994)：大庆外围发现一些深层气 (埋深 2800m 以上)。

李小地 (1994)：“深部油气藏是指油气层埋深大于 4000m 的油气藏。”

李琳、任作伟 (1998)：辽河盆地“深层烃源岩指埋深大于 3500m 的烃源岩。”

妥进才等 (1999)：“渤海湾盆地深层主要指 3500m 以下范围。”

周世新等 (1999)：深层油气在“我国则主要指现今主要勘探层位以下的油气资源，深度上主要指埋深 4500m 以下，这还应该包括目前埋深虽然不大，但热演化程度却比较高的古生代海相碳酸盐岩烃源岩所生成的油气资源。”

李景坤、孔庆云 (1999)：“松辽盆地北部深层指泉二段以下地层。”

从上述文献可以清楚地看出,不论是冠以“深层”还是冠以“深部”,从绝对深度和时代上都指的是沉积层,所谓“深部”无疑是沉积层深部。“深”的含义在这里只有相对大的深度意义。

2. 关于“深部气”

Веселов (1995) “结晶基岩深部的含油气性”一文指出:“结晶基底及基底深处的坚固的原生非孔岩石中存在有大型油气藏”,“在深部的片麻岩、花岗岩和其他类似的地层中可以发现大型的油气藏”。

Шнип (1996) “含油气区内基岩储层的形成”一文指出:“在基岩内发现一系列大型油气聚集与沉积岩内已开采的老油田日趋衰竭有关。”

Вольвовский (1995) “陆壳烃类非生物成因的新论点”一文指出:“在结晶基底深变质岩体中及其深部……发现了固态、液态和气态烃。”

Gold (1980) 认为“在地球深部存在大量的原始甲烷”,“地下深部的碳是通过地球的脱气作用提供的”。

不论上述文献持何种成因观点,也不论文献对所指深度称“深部”也好,“深层”也好,其所指的天然气已超出了沉积岩层的范围。我们以为,将沉积盆地基底(或者结晶基底或者基岩)以下深度的天然气统称为“深部气”比较适宜,因为:①深度指向明确(以基底为界),区别于上述“深层气”;②那里的天然气有可能来自地球更深部。

尽管在具体环境下“深层”和“深部”都可能指沉积层深部层位或者现今勘探层位以下的层位,但涉及沉积层基底以下或者地球深部时,“深层”和“深部”的广义所指就容易混淆。因为“深”字只有相对大的深度意义,正如 Меленевский (1997) 所说,对不同盆地来讲,各自的生油主带和生气主带的深度范围是有很大的不同的;又如 Gold (1980) 认为,在地球深部存在大量的原始甲烷。Вольвовский (1995) 还指出,在结晶基底深变质体中及其深部发现了固态、液态和气态烃。可见,沉积层内的“深”和沉积层基底以下的“深”在天然气形成理论上是有原则区别的。通过大量的研究资料分析,我们认为,就沉积层而言,深层气是指埋藏深度大于 4500m,在温度和压力及介质条件共同作用下所储聚的天然气。从此界限开始到基底以上地层范围的天然气统统称为“深层气”。这样,当我们说到深层气,指的就是沉积层生油窗以下层位形成或赋存的天然气。就整个地球而言,宜将沉积层结晶基底和该基底以下的天然气统统称为“深部气”。如此界定之后,深层气和深部气各自的深度指向明确、概念清晰。也只有这样,才不会将深层气和深部气混为一谈(史斗、郑军卫,2001)。当然,探讨在绝对深度上“深生深储”深层气的同时,还应注意在绝对深度上“深生浅储”的“深层气”。即虽然天然气藏产层埋深小于 4500m,但其气源位于沉积深部,仍可称之为深层气。就有机质的深层成烃机制而言,4500m 内储集的深层气,其源岩的埋藏深度相应会更大,在讨论深层气的形成机理并评价其潜势时,应以 5000m 以下的烃源岩为主。因此,考虑天然气易运移的特征和便于天然气形成机制的研究,我们认为,深层气是指储于 4500m 之下的天然气和源岩在 5000m 深度之下生成的天然气。另外,研究深部气时应注意无机成因气。

第二节 国内外研究现状

一、关于天然气形成的垂向分带性理论

(一) 天然气形成的垂向分带性传统和现代理论

油气形成分带性的现代理论由苏联学者于 20 世纪 60 年代末提出并得到全世界普遍承认, 这就是生油主带(主相)理论, 即所谓的“生油窗”理论。该理论认为, 生油主带的位置由 $70\sim 120^{\circ}\text{C}$ 温度段决定, 生油主带的深度取决于沉积层沉降速率和地温环境, 生油主带的结束与深成作用中期第 II 阶段到第 III 阶段的演化程度 (R° 为 $1.10\%\sim 1.15\%$) 相吻合, 随着深度的增加, 生油主带变成凝析油气生成带, 再往下则成为干气生成带 (Меленевский, 1997)。

在所有盆地都可以观察到烃类相态随深度有规律的变化, 这种规律最普遍的情况就是油气的垂向分带性: 在相对浅部形成分散有机质演化的初始产物, 主要是天然气藏; 往下, 由于分散有机质深变质程度高, 出现了液态烃、气相凝析物及油环; 再往下, 则以纯油藏为主; 继续向深部则出现天然气、凝析气藏, 在这一深度, 气态烃中的重烃含量逐渐减少; 在该深部最下面的层段完全是以甲烷为主的纯气藏 (Самвелов, 1995)。

按照上述演化规律, 地层中呈现出液态烃随温度升高最终出现甲烷化过程。

既然地球物理方法查明了一些含油气盆地的沉积盖层厚达 $20\sim 25\text{km}$, 那么, 这类盆地的含油气性是否一直到达基底或者其中一部分沉积层会不会没有油气前景 (Лодженвская, 1990)? Лодженвская 的回答是: 根据油气形成的沉积-运移说 (其核心是油气形成的分带性), 油气生成分为几个不同的成因带 (深成作用早期带、深成作用中期带和深成作用晚期带)。在这些带上, 依据分散有机质的成因类型, 形成了不同相态关系的油气藏。为了区分这些成因带, 通常使用地球化学指标及镜质组反射率 (R°)。 R° 通常变化在 0.4% 至 4% 之间, R° 为 1.34% 时被认为是油相存在的临界值 (这一临界值对应于深成作用中期第 IV~V 阶段和 200°C 的古温度), 如果平均地温梯度为 $2.5\sim 3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、深度为 $4000\sim 5000\text{m}$ 时, 大量液态烃的生成趋于结束而转变为气态烃的生成。

Tissot 和 Weltz (1984) 于 20 世纪 70 年代建立了“干酪根晚期热降解生烃说”。按照这一学说, 油气形成的分带性是: 当 $R^{\circ} > 0.5\%$ (温度为 60°C) 时, 分散有机质开始生成石油; 当 $R^{\circ} > 0.9\%$ (温度为 125°C) 时, 石油发生裂解; $R^{\circ} = 1.35\%$ (温度为 200°C) 时, 石油完全裂解形成凝析油和湿气藏; $R^{\circ} = 2.0\%\sim 4.0\%$ 时, 形成以甲烷为主的干气藏; $R^{\circ} > 4.0\%$ 时, 进入变质作用阶段。

徐永昌等 (1994) 针对天然气的生成演化, 提出了腐泥型有机质的 5 个成气带和腐殖型有机质的 4 个成气带。“腐泥五带”是: ①生物化学作用带 ($R^{\circ} < 0.3\%$, 温度 45°C 左右); ②生物-热催化过渡带 (深度 $1000\sim 2500\text{m}$, 温度 $50\sim 85^{\circ}\text{C}$, $R^{\circ} = 0.3\%\sim 0.6\%$); ③热催化作用带 ($R^{\circ} = 0.6\%\sim 1.3\%$, 温度 $85\sim 180^{\circ}\text{C}$); ④热催化-裂解带 ($R^{\circ} = 1.3\%\sim 2.0\%$, 温度 $180\sim 250^{\circ}\text{C}$); ⑤高温裂解带 ($R^{\circ} > 2.0\%$, 温度 $> 250^{\circ}\text{C}$)。

“腐殖四带”是：①生物化学作用带 ($R^o < 0.3\%$ ，温度 $< 50^\circ\text{C}$)；②生物-热催化过渡带 ($R^o = 0.3\% \sim 0.6\%$)；③热解作用带 ($R^o = 0.6\% \sim 1.7\%$ 或 $R^o = 0.6\% \sim 2.0\%$)；④高温裂解带 ($R^o > 1.7\%$ 或 $R^o > 2.0\%$)。徐永昌等的天然气形成带的理论是中国天然气垂直分带性的典型现代理论。

在一定的历史时期和一定的沉积盆地，上述油气形成分带性理论对勘探实践发挥了一定的指导作用，同时也丰富和发展了油气地质学理论，特别是徐永昌等的天然气形成分带性理论，完善了天然气成因分类体系和综合判识模式，不仅对目前勘探深度的天然气资源和远景评价有指导意义，而且对深层天然气潜势评价也不无裨益。随着油气地质科研和勘探实践的发展，人们逐渐发现了原苏联学者和 Tissot 的油气形成分带性理论中油相消失和气相生成带开始门限指标的局限性。表 1.1 列举了在深度、 R^o 和温度方面超过传统理论门限值的勘探与实验数据。

表 1.1 油相消失主要门限指标的钻井和实验实例及结论

盆地、油田或井号，样品或实验及其他	深度/m	$R^o/\%$	温度/ $^\circ\text{C}$	结 论
传统的生油主带即“生油窗”理论	4000~5000	1.34	200	油相消失门限
传统的干酪根晚期热降解生烃说		1.35	> 200	石油完全裂解
渤海湾盆地深层烃源岩	3940~4300			轻质油和湿气带上限
渤海湾盆地深层烃源岩	4600~5300			甲烷生成带上限
东西伯利亚中维柳依 27 井岩样 I 型干酪根高温裂解	4700			生油带下限
西西伯利亚秋明 SG-6 井岩样 II 型干酪根高温裂解	5500		165~175	生油带下限
提马诺-伯朝拉含油气省科瓦耳井	5500~6000		150	油藏破坏
塔里木盆地巴楚地区源岩（寒武系）		1.45~1.75		凝析油-湿气阶段
塔里木铁岭灰岩高温高压模拟		1.5	450	生油窗下限
塔里木盆地塔中 45 井日产原油 34.35m ³	6020~6150			油相消失深度比此大
俄罗斯布拉海油田	6000~7000			油藏破坏不严重
墨西哥湾开卢油田产油层	6593			油相消失深度比此大
俄罗斯下库林和西库班年轻盆地	6000~8000			油相下限。地球动力环境不同，主油带下界不同
美国内索列诺斯盆地马克内尔井油气源岩层	6905	2.74	220	未丧失生油能力
数口超深井岩心模拟实验	> 7000	> 3.00	7.0~8.0	C ₁₅₊ 烃类消亡线
德国阿基普斯-加诺尼克油页岩干酪根	7100		> 200	藻类组、壳质组演化需更大温度、深度
美国墨西哥湾 Jacobs-1 井油源岩	7544	4.4~4.8	296	未丧失生油能力
美国安大略拗陷 No-1 井油气源岩	8470	4.45	230	未丧失生油能力
匈牙利、德国含藻类体腐泥型有机质 X 射线照相及物化研究			> 350	有生油潜势。相转换需考虑分散有机质类型
提马诺-伯朝拉和滨里海含油气省			350~400	存在临界油藏
富含壳质组和藻类组泥岩	6000~12000		200~500	石油仍可以生成
综合其他学者的意见	10000~12000		400~500	石油充分裂解门限值

(二) 油相消失的主要门限指标和主要控制因素

1. 油相消失的主要门限指标

从表 1.1 所列的勘探与实验数据 (Меленевский, 1997; Лодженвская, 1990; Tissot and Welte, 1984; 康竹林, 1996; 杨池银, 2003b; Велоконь, 1998; Мехатиев, 1991; 赵孟军等, 1999; 贾承造, 1999; Еременко, 1998; Price *et al.*, 1981; Mango, 1992; McNeil, 1996) 可以看出, 对不同盆地来说, 各自的生油、生气主带的深度范围有很大不同, 有的盆地是符合苏联学者和 Tissot 的传统理论的, 但大部分是超过传统理论深度的, 并且不仅是深度指标有所增大, 温度和 R° 值等也相应增大。

究竟何种数据是油相消失的门限指标, 目前未见统一的意见, 笔者估计也不会有统一的意见, 因为尽管所有含油气盆地的油气形成都遵守分带性这一原则, 但不同盆地有不同的生油、生气主带的深度、地温梯度和 R° 范围, 而且不同盆地这三个指标的匹配也不尽相同, 何况还有其他指标如压力 (异常高压) 和地球动力条件的制约。所以, 研究油相消失的具体指标, 只能具体盆地具体分析。然而, 无论如何, 油气形成分带性理论的本质无疑是正确的, 本质就是“分带性”。也就是说, “分带性”是普遍规律, 各盆地是具体实际。各盆地油气形成都存在分带性, 但每个盆地的油气分带指标不一定相同。勘探实践证明 (表 1.1), 许多盆地的油相消失门限远远大于传统理论值, 而生气主带的位置大大延伸, 这就是为什么深层油气引起了广泛注意的原因。

2. 油相消失的主控因素

对不同盆地来说, 生油主带及其下部的凝析气和干气生成带的深度范围是有很大变化的, 其变大或变小取决于多种因素, 诸如有机质类型、沉积盖层岩石包括源岩在内的物质组成、沉降动力学和热流强度等 (Меленевский, 1997)。

Лодженвская (1990) 重点研究了有机质类型这一因素。其对含藻类体的腐泥型有机质的研究表明, 该类有机质中的主要生物为蓝藻门 (占分散有机质的 60%)。从后寒武纪到现在, 蓝藻大量繁殖, 陆源湖盆相和油页岩均富含蓝藻。蓝藻保持荧光性可达深成作用晚期。将富含蓝藻的俄罗斯鲍尔得什油田始新统页岩加热至 400°C 时, 仍为透明, 未失去荧光性 (表 1.1)。油气形成条件模拟研究表明, 腐泥型有机质受温度破坏发生大的变化出现在 $275\sim 340^{\circ}\text{C}$, 在高于 350°C 时, 这类有机质仍有生油潜势。可见, 评价一个地区的油气垂向分带性, 使用镜质组反射率外推法并不处处适用, 应当考虑分散有机质的成因类型。例如藻类组 (而油源首先是藻类组和壳质组) 的镜质组反射率达到深成作用晚期的演化程度需要高于其他类型有机质 3~5 倍的温度。富含藻类组和壳质组泥岩可以在 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 温度和 $6000\sim 12000\text{m}$ 深度条件下生成石油。可以看出, 这种成因类型分散有机质的成烃演化及其相转化首先取决于温度和深度这两个因素。

一般来说, 深度越大, 温度越高。深层是腐泥型分散有机质生烃的场所, 温度是其演化的驱动力, 所以, 有机质类型、深度和温度等三个因素的合理匹配就能控制腐泥型有机质的生烃及其垂向分带性。然而, 造成温度升高的条件不仅仅有深度, 还有其他条件。例如, 由板块碰撞所产生的特殊的地球应力可使板块结合部即碰撞带温度大大升高

并可相对快地形成油气（史斗、刘文汇，1996），也就是说构造挤压（水平挤压）和拉伸时沉降速度急剧增大所产生的机械能可转化成热能，在强烈挤压带，这种热能特别大，可以提高地层的温度几十度或更高，特别是构造挤压的伴生效应——力化学作用（相当于几十至几百度的机械力作用）更是加快了烃的演化速度。板块碰撞带的强烈构造作用还可以对油气的运聚和油气资源的垂向分布产生重要影响，对各种地球动力环境下世界含油气盆地初步探明地质储量分配的分析表明，在深层，63%的油、53%的气、86%的凝析油气赋存于古老大陆边缘，其中大部分形成于活动大陆边缘岛弧的碰撞期，油对气的优势还保持在三角洲组合、晚造山成因裂谷和台向斜广泛发育的现代被动缘。而气对油的优势则表现在晚成裂谷台向斜，例如东欧板块边缘的下逆掩断层的挤压力对乌拉尔山前拗陷成烃的影响说明，与逆掩断层有关的隆起，其异地岩体通常含气，含气层的位置通常取决于地层受挤压的范围（Гаврилов，1998；Велоконь，1998）。

此外，深部热流也可以为有机质演化提供所需温度。从地幔软流圈突出部和岩石圈基底来的高温流体强烈地加热着沉积层的沉积物，激发着深层分散有机质向烃类转化，热流体同时也加热了沉积物中的孔隙水和结晶水，这种被重新加热的高温高压热液于是从沉积物中挤出烃类并将其运移到储集层（Мехатиев，1991）。

地质年代也就是时间也是油相消失的一个重要因素。Самвелов（1995）认为，该因素弥补了地层温度不够高（未达门限值）的不足。在古老盆地中，古油藏石油的裂解以及石油裂解速度与时间、温度之间的关系，尤其是温度，可能受地质发育特性（如伸缩作用）的控制，这就是为什么古地台上不同沉积盆地内大致一样的温度和同样5000~6000m深度处，烃类相态各异的原因。例如在第涅伯-顿涅茨及其他一些盆地4000~6000m深度古生代含气层岩样中，常常发现烃类的固体残留物。第涅伯-顿涅茨盆地的下石炭统和上泥盆统古油藏，因为经过长达200~250Ma的高温作用和保持相对稳定的裂解反应速度，烃类的相转化作用超过了烃藏的保存作用，故而，在5000m以下主要发育着高温甲烷气藏。而在滨里海盆地内缘边缘带，由于中生代末—新生代初发生过使石油裂解反应速度减缓的强烈伸缩作用，预测在8000m深度还发育有古油藏改造初期阶段的烃藏，即凝析气藏和轻质油藏。另外，对于由古生界充填的盆地与较年轻岩层充填的盆地来说，深层油气藏的垂向分带位置显然不同。在古老地台内，油气分界线在剖面上的位置比年轻地台盆地和中、新生代褶皱区及其过渡区明显要浅得多，而在后者，甚至在6000~7000m深度，尽管有极大的温压条件，油藏的破坏并不严重，油藏的深度可达7000m（如布拉海油田）。这种油藏还可能发现于快速沉降的、而沉降持续时间不超过10~15Ma的年轻盆地和一些古老盆地。目前在年轻地台尚未钻遇纯粹的甲烷气藏，推测其可能发育于9000~10000m深度（Еременко，1998）。

二、关于深层气的形成、聚集和保存条件

（一）深层气的气源条件

Самвелов（1995）认为，深层气的气源有两种：一是由深层液态烃裂解作用生成的天然气，二是由深层分散有机质深成作用生成的新的天然气。勘探实践表明，在高温高