

低熟气 及我国的低熟气区

——吐哈油气区

袁明生 梁世君 徐永昌 王晓锋 等著
梁 浩 王作栋 王志勇 史宝光



科学出版社

低熟气及我国的低熟气区

——吐哈油气区

袁明生 梁世君 徐永昌 王晓锋 等著
梁 浩 王作栋 王志勇 史宝光

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

低熟气,即生物-热催化过渡带气,是一种有重要资源潜力而又长期未受到应有重视的气藏。本书对低熟气的科学理念进行了系统梳理和厘定,简述了国内外研究现状和国外低熟气大气田实例。以我国低熟气探明储量近千亿立方米的吐哈油气区为例,在较深层次上论述了低熟气的成气机制、判识标志、生烃动力学等问题。探讨了该区煤系烃源岩有机质特有属性及区域构造、沉积史与盆地低熟气规模性生成、储聚的联系;对该区典型低熟气田进行了实例解剖。

本书可供油气地质科技人员和高等院校相关专业教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低熟气及我国的低熟气区:吐哈油气区 / 袁明生等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-029391-6

I. ①低… II. ①袁… III. ①含油气区-石油天然气地质-新疆
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 220348 号

责任编辑:胡晓春 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年1月第一次印刷 印张:13

印数:1—1 500 字数:308 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

吐哈油气区以在侏罗系发现大型油气田而闻名遐迩，也令国人以新的理念重新审视侏罗系煤系地层油气资源的潜势。上世纪末由吐哈油田王昌桂等撰写的《吐哈盆地侏罗系煤成烃地球化学》一书，系统地总结了侏罗系煤系地层油气勘探的理论和实践，是首次出版的一本侏罗系煤成烃的书，这部专著对于侏罗系煤系地层油气的勘探开发，无论在理论上还是实践上都具有极大的促进作用，至今仍是一部引用很广的学术著作。

吐哈油田近年来在吐哈盆地和新区的油气勘探中，探明了一批储量近一千亿立方米的天然气，经研究证实它们是天然气资源的一种新类型——低熟气，这是油气地学的新理念。

经典的油气地学理论认为：工业规模的天然气形成和聚集主要是烃源岩热演化较晚期的产物，通常是烃源岩埋深应大于 2500m 乃至 4000m 形成的。对于浅部，如埋深小于 2500m 的气藏，常认为是深部热成因天然气运移到浅部或是深部热成因气和浅表层生物气混合的结果。基于天然气勘探实践的发展，上世纪 80 年代末中国科学院兰州地质研究所的徐永昌和俄罗斯的 Galimov 提出了生物-热催化过渡带气和早期热成因气（early-thermogenic）的科学理念，即认为在烃源岩演化到镜质组反射率 $R^0 = 0.4\% \sim 0.6\%、0.7\%$ 的阶段烃源岩即可以形成工业气藏。但当时我国只发现了一些低熟气的小型的气田，其规模仅几十亿立方米。在我国这种类型的天然气是否能形成大、中型气田尚不明确。吐哈油气区近一千亿立方米低熟气的发现证实低熟气这一新的油气地学理念的正确性和它作为天然气的一种新的资源类型的重要意义。按我国对于大气田的界定，它已经相当于三个大型气田，因而对于其形成特征、成藏机制的研究和总结就不仅对于吐哈盆地和其新区的勘探开发具有指导意义，而且对于从较深层次认识低熟气规模性的形成、聚集以及对我国这一新型资源的勘探开发都具有重要的理论和实践意义。

《低熟气及我国的低熟气区——吐哈油气区》是一部关于低熟气的油气地学专著，本书对低熟气的科学理念进行了梳理和厘定，并以吐哈盆地的实际资料为基础，在较深层次上论述和探索了低熟气的形成机理、判识标志、生烃动力学问题，吐哈盆地烃源岩有机质特有属性和规模性低温成烃，低熟气成藏，进行了典型低熟气田的剖析。

通过本书的论述，我们不仅坚定了对于低熟气能够形成像吐哈油气区这样大型低熟气田的信念，而且认识到了何种条件有利于规模性低熟气的形成、集聚。特别值得指出的是，通过吐哈油气区低熟气的总结使我们坚信我国一大批以侏罗系为主的聚煤盆地（其成熟度主要在 $R^0 \leq 0.9\%$ 的范围）具有巨大的资源潜力，但是由于它们的成熟度较低，在考虑天然气潜在资源时未予充分关注，而这批侏罗系盆地是值得予以极大重视的低熟气潜在资源区。希望本书的问世，能为这一新的科学理念、这一新的天然

气资源类型的研究和实践做出应有的贡献。

本书由中国石油吐哈分公司和中国科学院兰州地质研究所共同完成。全书共分八章，其主要内容为：

第一章：低熟气及其研究现状，讨论了低熟气的科学理念，阐述了低熟气概念的提出及概念的厘定；建立了低熟气的判识体系，并以较多的篇幅讨论了生物气与低熟气的判识。以乌连戈依气田为例对低熟气田进行了论证，证明了新西伯利亚以乌连戈依为代表的一批超大型气田是该区低演化的白垩纪的波库尔组形成的，其热演化程度 R^o 在0.4%~0.6%，可以说是相当典型的低演化成烃的实例。

第二章和第三章：吐哈盆地低熟气藏形成的构造地质条件和吐哈盆地低熟气藏形成的沉积学条件，较详细地阐述了吐哈盆地的地质背景，为了解吐哈盆地油气形成，特别是低熟气形成和成藏作了非常重要的基础性铺垫。

第四章：吐哈盆地烃源岩地球化学特征，阐述了近年来吐哈盆地烃源岩研究中取得的许多新的进展，这些成果表明吐哈盆地低熟气的规模性形成和成藏是有其内在原因的。

第五章：吐哈盆地低熟气特征及其气源对比，以翔实的资料为基础讨论了吐哈盆地目前探明的天然气特征，以该区碳同位素资料为主，结合轻烃和氢同位素的资料论证了吐哈盆地探明储量近一千亿立方米的天然气其特性为低熟气，其可能的源岩主要与吐哈盆地中、下侏罗统煤系相关。

第六章：吐哈盆地低熟气生烃动力学研究，详细阐述了以盆地侏罗系源岩进行生烃动力学的研究结果以及台北凹陷不同区块生烃动力学结果的异同。研究表明，吐哈盆地烃源岩具有较低的成烃活化能，为低熟气的研究提供了有意义的信息。

第七章：低熟气形成机制，在前人研究总结的基础上，提出了一些低熟气在吐哈盆地形成的新的机制，认为对于低熟气的规模性的形成和集聚成气，有机质的质和量可能具有极为重要的意义。

第八章：低熟气动态成藏过程分析与典型实例，以吐哈盆地现有气田的实例进行剖析，阐述了低熟气成藏的具体条件，为低熟气形成聚集和有利地区的预测提供了科学信息。

本书编写分工：前 言 徐永昌、袁明生

第一章 徐永昌、袁明生、梁世君

第二章 袁明生、梁世君、梁浩、郑建京

第三章 梁世君、梁浩、袁明生、郑建京

第四章 王作栋、孟仟祥、王志勇

第五章 徐永昌、王晓锋、史宝光、沈平

第六章 王晓锋、徐永昌、史宝光、王志勇

第七章 徐永昌、孟仟祥、王晓锋、王作栋

第八章 袁明生、梁世君、梁浩、王志勇

结 语 袁明生、徐永昌

参加本书编写的人员还有杜宏宇、金颖、孙敏卓、房嫒、苏龙、刘兴旺、杨鑫、刘玉虎、徐莹等。

目 录

前言

第一章 低熟气及其研究现状	1
第一节 低熟气的科学理念	1
第二节 低熟气的判识体系	4
第三节 世界低熟气田实例——乌连戈依气田解剖	16
第二章 吐哈盆地低熟气藏形成的构造地质条件	25
第一节 吐哈盆地构造演化及盆地类型	25
第二节 吐哈盆地构造单元划分	29
第三节 吐哈盆地构造圈闭形成的主控因素	31
第三章 吐哈盆地低熟气藏形成的沉积学条件	40
第一节 吐哈盆地沉积层系及主要生烃层系沉积相特征	40
第二节 吐哈盆地盖层层系特征及封盖条件	44
第三节 储盖组合特征及含油气系统	44
第四章 吐哈盆地烃源岩地球化学特征	50
第一节 吐哈盆地烃源岩生烃评价标准	50
第二节 吐哈盆地中下侏罗统烃源岩有机质丰度	52
第三节 吐哈盆地中下侏罗统烃源岩有机质类型	56
第四节 烃源岩有机质演化程度	60
第五节 吐哈盆地中下侏罗统烃源岩生物标志物特征	64
第五章 吐哈盆地低熟气特征及其气源对比	96
第一节 吐哈盆地低熟气组分特征	97
第二节 吐哈盆地低熟气碳、氢、稀有气体同位素组成特征	101
第三节 吐哈盆地低熟气轻烃地球化学特征	109
第四节 吐哈盆地天然气成因分析	113
第六章 吐哈盆地低熟气生烃动力学研究	119
第一节 生烃动力学的研究现状和意义	119

第二节 吐哈盆地低熟气的生烃动力学参数的获取	121
第三节 吐哈盆地低熟气的生烃动力学计算	128
第七章 低熟气形成机制	146
第一节 目前的基本认识	146
第二节 吐哈盆地研究进展	152
第三节 生烃动力学研究	162
第八章 低熟气动态成藏过程分析与典型实例	164
第一节 吐哈盆地低熟气成藏规律	164
第二节 吐哈盆地低熟气典型气藏成藏分析	167
结语	191
参考文献	194

第一章 低熟气及其研究现状

天然气是重要的化工资源和理想清洁的能源，从上世纪 80 年代以来，我国天然气资源探明储量有了长足的进展，但是需求和供给的矛盾仍然非常突出，因而，探索可能的接替资源就成为天然气地学的重要任务。在这样的背景下，低熟气、生物气的研究和勘探成为油气地学的热点之一。生物气已是大家熟知的天然气类型，但对于低熟气的概念则有待梳理厘定并需要以地质实例予以说明。根据前人的研究，俄罗斯西西伯利亚以乌连戈依为代表的一批超大型气田属于低熟气类型的气田（Galimov, 1988, 1995; Cramer *et al.*, 1998; Schaefer *et al.*, 1999; 王晓锋等, 2006），由此，一个重要的问题呈现在我们面前：我国有无这种类型天然气田？其规模和潜力如何？本章将结合我国吐哈油气区天然气的地质和地球化学特征对此做简要的叙述和探讨。

第一节 低熟气的科学理念

一、低熟气概念的提出

长期以来，天然气成因理论一直以石油成因理论体系为基础，即沉积有机质在地温为主的热力作用下，温度达到一定阶段形成液态石油，这个阶段也伴生天然气。随着地温的进一步升高，将形成凝析油气和高温裂解气。对天然气而言，在成岩作用阶段，生物化学作用可以形成有商业价值的气藏乃至大、中型气田，现已为勘探实践所证实，理论依据也很充分，从而使天然气形成领域包括了成岩作用初期、埋深小于 1000m 的层段。但是在超过生物成气阶段后，一般认为源岩需要在较深的埋藏条件下才可能形成天然气。而把浅层的 1500~2500m 视为烃类生成或天然气形成的盲区，在这个层段的源岩被称为非有效烃源岩。根据干酪根晚期降解成油的理论，这个层段生成的烃类气体不具有成为工业气藏的能力。

在生产实践中，这个层段是存在天然气的，过去认为这是从深部形成的气体运移到这个层段，或是深部气体与浅部生物气的混合，特别是当这种气体的特征介于热成因气和生物气之间时。

“七五”期间，徐永昌等在研究辽河、苏北盆地浅层天然气时发现分布于 1000~2500m 的一组气体，其 $\delta^{13}\text{C}_1$ （甲烷碳同位素组成）为 $-55\text{‰} \sim -48\text{‰}$ ，含一定的 C_2+ 组分，该组气体在盆地内有相应的低演化的气源岩，与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值的分布存在相应规律，即它们不是简单的生物气和热成因气随机的混合，它们是具有成生联系的。基于对辽河、苏北等盆地地质实际的研究，徐永昌等 1988 年提出了在埋深小于 2500m 的浅层同样有工业价值的天然气形成和储聚，并用生物-热催化过渡带气来命名这种成因的天然

气(王万春等, 1988; 徐永昌等, 1990, 1994; 刘文汇等, 1998)。它强调了在浅层, 过去认为不能形成天然气的地段可以有规模性的天然气形成和储聚。

在互无联系的情况下, Galimov (1988) 分析研究了西西伯利亚以乌连戈依为代表, 分布在浅层的一批大气田, 根据其同位素组成特征 ($\delta^{13}\text{C}_1 = -50\text{‰} \sim -46\text{‰}$), 纠正了因早期资料误传 ($\delta^{13}\text{C}_1 \approx -60\text{‰}$) 导致西方将该类气田厘定为生物气的认识, 同时提出了这批气田是腐殖型有机质在低演化阶段形成的天然气, 称之为早期热成因气 (early thermogenic gas)。从目前具有的资料看, 我们是同意这种认识的。由于乌连戈依为代表的这批气田具有着低熟气形成很典型的地质和地球化学特征, 它们又拥有很大的探明天然气地质储量, 对于这批气田的解剖就具有非常重要的意义。因而, 我们将专列一节予以叙述。

我国在“七五”期间提出“过渡带气”的认识后, 为深化研究, “八五”期间在天然气攻关项目中列了“生物-热催化过渡带气”的专题, 在有限投入的情况下, 刘文汇等 (1998) 完成了《生物-热催化过渡带气》的专著, 提出了这种气体的形成机制和有潜力的分布地区等。

与常规天然气相比, 低熟气属于非常规天然气, 但是, 这类气藏由于埋藏浅, 勘探较易, 投入和产出比高, 加之在世界天然气已探明储量中占有 20% 的份额, 在当前急需天然气后备资源补充的情况下, 从科学上详尽地研究其形成分布规律, 在勘探上将之作为重要的目的层系是完全正确的。

随着国民经济建设和社会发展对能源特别是天然气的迫切需求, 对具有巨大潜力, 而又具投资少、见效快的浅层天然气, 产业部门给予了极大的重视, 要求在更深层面上认识这种低演化气体的形成机制和成藏条件。这就要求更好地从天然气形成的“多阶连续, 主阶定名”的机理去探索生物气演化到低熟气形成的地质、地球化学条件及相应的判识标准; 从浅层成藏的特点去研究盖层特征; 探索低熟天然气形成的动力学、构造沉积动力学与低熟气的成藏条件等, 并在结合具体盆地深化研究的基础上提出所研究盆地低熟气的形成机制、判识指标、成气深度、成气量、资源潜力、成藏规律和有利地区等。

当前, 我国西气东输的工程已建成, 为天然气的开发利用创造了光明的前景, 天然气已从下游套配成为瓶颈的状况变成急待大量资源补充的局面, 柴达木生物气已成为浅层气为能源建设做出重要贡献的范例, 市场迫切要求这种投入产出比极高的浅层天然气资源有更多的发现、更大的补给。

二、低熟气概念的厘定

从以上讨论可以看出, 低熟气的概念是从天然气勘探的实际提出的, 相对于常规的天然气而言, 这种有机质在热演化程度较低的阶段形成的天然气被称为低熟气, 它们属于非常规天然气的范畴。对于低熟气的概念如何较为科学的予以厘定, 其成熟度标尺 R° 应在何范围? 与过去提出的一些低演化天然气的概念相关性如何? 在提出低熟气的概念时必须予以回答。

Galimov 在 1988 年提出的早期热成因 (early-thermogenic) 天然气, 就定名而言和低熟气较为相似, 他强调的是腐殖型有机质在热演化程度不高的情况, 由于芳环化合物的缩合作用形成了西西伯利亚乌连戈依等超大型气田。基于该区地质实际, 他提出了早期热成因气的 R^o 为 $0.4\% \sim 0.7\%$ 。

徐永昌等于 1990 年提出的生物-热催化过渡带气, 强调的是腐殖型有机质在生物化学成气作用的主成气期之后, 热催化主成气期之前, 被经典油气形成理论认为不能形成工业性天然气藏的 $1000 \sim 2500\text{m}$ 的层段可以有规模性天然气的形成和集聚, 它们的甲烷同位素组成和该区的气源岩的成熟度间有内在的规律性联系, 而不是一些学者提出的生物气和热成因气的混合形成的。显然, 混合是随机的, 它不会在天然气的甲烷碳同位素和源岩的热成熟度之间有规律性的联系。由于强调的是生物化学和热催化两种主要天然气形成作用之间的过渡带的概念, 因而把热演化标尺 R^o 定在 $0.4\% \sim 0.6\%$ 。

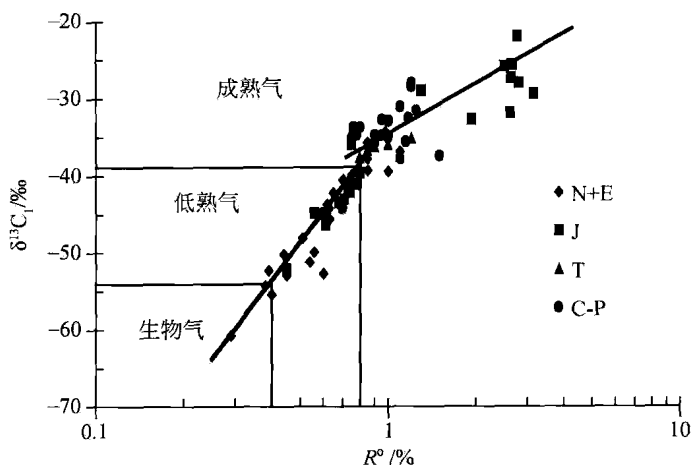


图 1.1 我国煤型气甲烷碳同位素组成二阶段模式图 (据刘文汇、徐永昌, 1999)

在过渡带气研究的基础上, 刘文汇和徐永昌 (1999) 提出了腐殖型有机质 $R^o - \delta^{13}C_1$ 的二阶模式 (图 1.1)。即低演化阶段和正常成熟的天然气其甲烷的碳同位素分馏存在不同的规律, 二者的数学表达式为:

$$\delta^{13}C_1 = 48.77 \lg R^o - 34.1 \quad (\text{低演化阶段}) \quad (1.1)$$

$$\delta^{13}C_1 = 22.42 \lg R^o - 34.8 \quad (\text{正常成熟阶段}) \quad (1.2)$$

基于构成二阶模式的基础资料, 当时提出的式 (1.1) 的应用范围是 $R^o \leq 0.8\%$, 式 (1.2) 则用于 $R^o > 0.8\%$ 。即两种成因天然气甲烷碳同位素分馏特征已将 $R^o \leq 0.8\%$ 和 $R^o > 0.8\%$ 作为二者的界定值。这意味着按二阶模式的客观规律, 过渡带气上限值应为 $R^o \leq 0.8\%$, 在一定的地质背景下也可以到 $R^o = 1\%$ (图 1.1 中二阶模式两个线性方程的交点)。在不强调生物-热催化过渡带的情况下, 提出有机质低演化阶段成气、成藏的低熟气概念, 将其上限定在 $R^o = 0.8\%$, 无疑是可以将这些研究成果作为划分界限的基础。可以这样说, 当过渡带气研究达到明确提出二阶模式的阶段, 腐殖质热演化产物, 甲烷碳同位素所描绘的轨迹已将过渡带气客观的推延到低熟气的范畴,

而且把低熟气的热成熟度上限厘定在 $R^o \leq 0.8\%$ 的范围。基于目前的实际资料我们暂将低熟气的热成熟度上限定为 $R^o = 0.8\%$ ，下限值定为 $R^o = 0.4\%$ ，即微生物活动已不是很活跃的阶段。

将低熟气上限暂定为 $R^o = 0.8\%$ 除根据两种成因天然气碳同位素分馏特征外，目前探明的天然气田实际地质情况也是重要的因素。如西西伯利亚的乌连戈依等超大型气田，其源岩成熟度 $R^o \approx 0.4\% \sim 0.7\%$ ，我国的低熟气区吐哈盆地其相应源岩的成熟度大体为 $R^o \approx 0.4\% \sim 0.9\%$ ，而我国主要煤型气大气田的资料，（我国探明储量 > 300 亿立方米煤成气田）天然气甲烷的碳同位素组成主体分布在 $\delta^{13}C_1$ 为 -36% 与 -31% 之间（图 1.2），大体相当于成熟度标尺 $R^o \approx 0.8\% \sim 1.5\%$ 。其中 $\delta^{13}C_1 > -36\%$ 者占 87% ，即煤型气大气田源岩的成熟度主要在 $R^o = 0.9\%$ 以上。当然，由于各气田的样品数量不等，这是一种概略的估算，但将主体的成熟煤型气热标尺定为 $R^o \geq 0.9\%$ 是可供参考的。

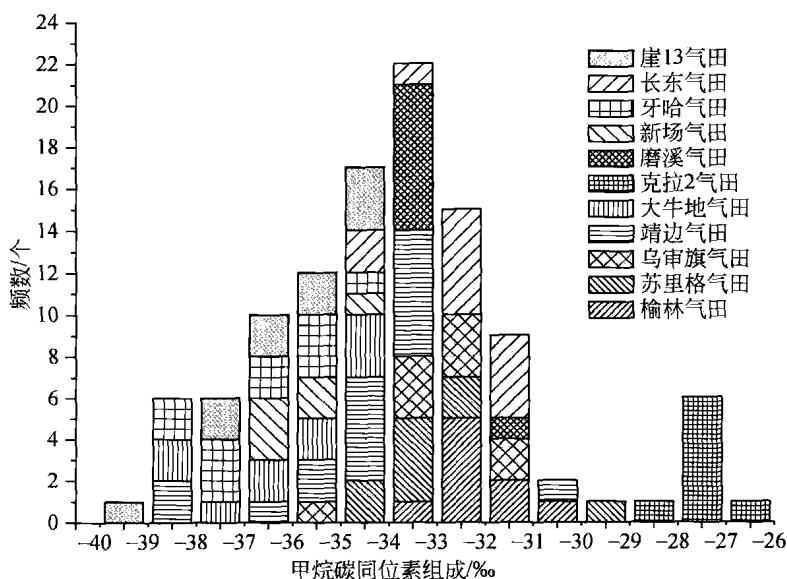


图 1.2 我国大型煤成气田天然气甲烷的碳同位素组成分布（数据据戴金星等，2002，2003，2005a，2005b；戚厚发、戴金星，1989；秦胜飞等，2005，2007a，2007b）

第二节 低熟气的判识体系

前文已对低熟气的概念作了必要的厘定，基于低熟气的概念，一个盆地要形成低熟气，重要的地质基础是盆地的地层垂向剖面上应当存在一套有较高的有机质相对丰度（TOC%）和绝对丰度（TOC的总数量）的气源岩，其成熟度一般小于 $R^o \approx 0.9\%$ 。这是形成低熟气的地质基础。西西伯利亚乌连戈依等超大型气田的主要气源岩波库尔组 $R^o \approx 0.4\% \sim 0.7\%$ ，吐哈盆地台北凹陷天然气的主要气源岩中侏罗统的西山窑组， $R^o \approx 0.4\% \sim 0.8\%$ 。关于源岩的母质类型从目前的研究看，无论是乌连戈依还是吐哈台北凹陷，天然气母质类型都是以Ⅲ型为主。实际上，在母质类型以Ⅰ～Ⅱ型为主时，有机质在低演化阶段将主要形成低熟油。当然低熟油中也存在伴生气，它们也属于低

熟气的范畴,但它们是油型低熟气,其甲烷同位素值在 -50‰ 左右,在过去低熟油的研究中,虽然计算的资源量达到 54 亿吨,但基本未发现工业性油型低熟气藏。

一、低熟气碳同位素组成特征

碳、氢同位素组成分析是研究有机质成烃过程、成烃后历程以及进行油、气源对比最重要的手段,特别是对于元素组成相对单一的气态烃更是如此。上世纪 70 年代以 Stahal 为代表的地球化学家提出了天然气甲烷碳同位素值与形成天然气的有机质类型和热演化程度相关的模式,该模式对于气-气对比、气-源对比发挥了重要作用,直接指导了油气勘探的进程。上世纪 80 年代,我们在对辽河、苏北等盆地天然气的研究中,提出了生物-热催化过渡带气的概念,指出这个层段的天然气不是生物气与热催化气的混合,它们与该区域发育的源岩存在有规律的相关性,但是用 Stahal 等的模式(主要基于正常的、成熟的天然气数据回归的方程)无法拟合这种相关性,在此情况下,根据过渡带气甲烷碳同位素值和相关源岩的 R^o 的关系回归出了过渡带 $\delta^{13}\text{C}_1 - R^o$ 的模式,这个模式与 Stahal 等的模式主要差别体现在线性斜率大,即和 Stahal 等的模式相比,过渡带模式 R^o 较小变化可引起较大的碳同位素分馏。在此基础上,刘文汇和徐永昌(1999)提出了煤型气演化 R^o 与甲烷碳同位素组成相关性的二阶段模式(图 1.1)。说明在源岩 R^o 小于 0.8% 和 R^o 大于 0.8% 阶段,煤型气的碳同位素存在二阶段模式,低熟气其相应的甲烷碳同位素组成按 $R^o = 0.4\% \sim 0.8\%$ 计算, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大致在 $-54\text{‰} \sim -39\text{‰}$ 的区间。与生物(细菌)成因气甲烷碳同位素组成 $< -55\text{‰}$ 有较好的衔接和区分。应当说明的是,二阶模式有机质低演化和正常演化的回归方程 $\delta^{13}\text{C}_1 - R^o$ 的交汇点大致在 $R^o = 1\%$ 的位置,这一方面说明把 $R^o > 1\%$ 作为成熟气的端元值是恰当的,有一定科学依据;另一方面也说明把低熟气二阶模式上限值定在 0.9% 是可行的。我们暂时将上限值定在 R^o 为 0.8% 的原因,首先是过去收集的与过渡带气相关的资料成熟度标尺主要在 $\leq 0.8\%$ 范围。从现有实例资料看,国外的低熟气田乌连戈依,国内的吐哈气田相关源岩的 R^o 也在 $\leq 0.8\%$ 的范围。但是各种指标都应结合地质背景恰当应用,不应当是绝对的,以吐哈为例,这个上限值在有的区域就可能达到 0.9% 。但总体而言我们认为定在 0.8% 是恰当的。

二、低熟气氢同位素组成特征

天然气氢同位素研究起步相对较晚,同时,氢同位素分析技术存在的一些问题,在一定程度上制约了天然气氢同位素研究的发展。1998 年,Finigan MAT 公司研制成功了可用于氢同位素在线分析的技术 GC-TC-IRMS,给沉寂已久的氢同位素研究注入了新的活力,从而在国内外掀起了氢同位素组成研究新的热潮。目前,天然气碳同位素组成在解决油气勘探实践问题时仍然存在多解性,但氢同位素组成所反映的信息和碳同位素资料相结合常常具有特定的意义。因此氢同位素研究仍然是不可或缺的重要方法。

在对我国低熟气氢同位素组成研究的基础上,我们发现,和碳同位素相似,低熟

气的氢同位素组成演化与成熟天然气相比,同样存在着明显的差别。在此基础上,我们探讨了我国的吐哈、三塘湖、辽河、塔里木(库车拗陷)、准噶尔和鄂尔多斯(苏里格气田)等盆地煤型气的氢同位素组成与源岩热演化程度 R^0 之间的关系。其中吐哈、三塘湖和辽河盆地代表我国典型低熟气的特征,准噶尔、鄂尔多斯(苏里格气田)、塔里木(库车拗陷)盆地代表我国成熟—高成熟阶段的煤型气的特征。对于辽河盆地,我们只选取了其甲烷碳同位素组成重于 -50‰ 的样品,因为 $\delta^{13}\text{C}_1 < -50\text{‰}$ 的样品对于煤成气而言很可能有一定量生物成因气的混入。

$$\delta\text{D}_{\text{CH}_4} = 289.99\lg R^0 - 183.58 \quad R^2 = 0.7371 \quad (R^0 < 1.0\%) \quad n = 43 \quad (1.3)$$

$$\delta\text{D}_{\text{CH}_4} = 55.71\lg R^0 - 182.22 \quad R^2 = 0.5027 \quad (R^0 > 1.0\%) \quad n = 20 \quad (1.4)$$

上述盆地有机母质的生长环境、沉积成岩条件均为陆相淡水,在此背景下,源岩的热演化程度对于氢同位素的分馏的影响可能是主要的,过去的研究也显示氢的同位素的分馏作用在低演化阶段较显著。从氢同位素的二阶模式的回归方程也可看出,对于低演化方程,样品数量为 43 个,但 $R^2 = 0.7371$ 。而成熟阶段的回归方程样品数仅为 20 个, $R^2 = 0.5027$,即 R^0 与 $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ (甲烷氢同位素组成)的相关性远不如低演化阶段好。

从上述盆地现有的数据看,煤型气甲烷的氢同位素组成分布在一 280‰ ~ 一 160‰ ,相差 120‰ ,分布范围较广。其中同位素组成最轻的样品为吐哈盆地的样品,最重的是库车拗陷克拉 2 和大北气田的样品。

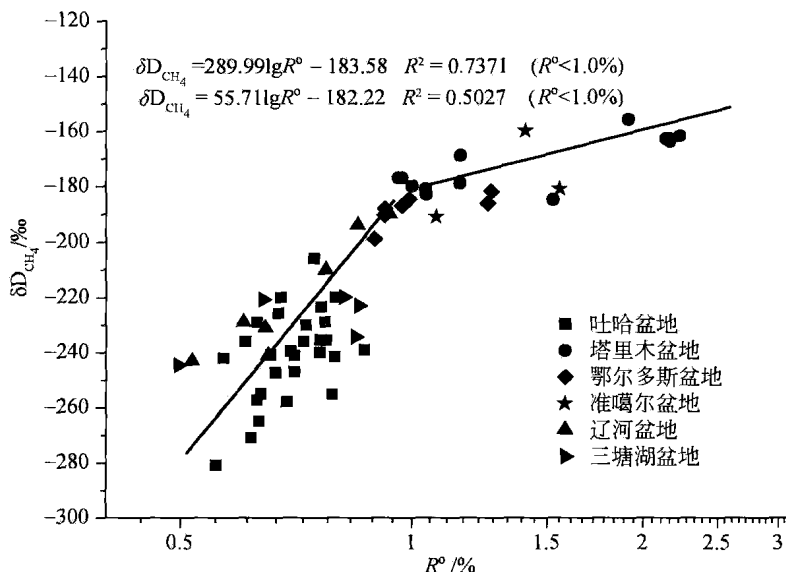


图 1.3 我国煤型气甲烷氢同位素组成与源岩 R^0 相关关系图

图 1.3 中,吐哈盆地源岩的 R^0 值为实测值和根据王昌桂等(1998)提出的模式($\delta^{13}\text{C}_1 = 39.2\lg R^0 - 35.2\text{‰}$, $R = 0.946$, $n = 37$)计算而来。塔里木、鄂尔多斯和辽河盆地等源岩 R^0 值同样部分为实测,部分根据刘文汇和徐永昌(1999)提出的煤型气甲烷碳同位素组成二阶模式计算而来。图中,低演化阶段($R^0 < 1\%$)与高演化阶段($R^0 > 1\%$)甲烷氢同位素组成的演化体现出二阶段的特征。每一阶段甲烷氢同位素组成

与热演化程度的对数 ($\lg R^0$) 呈线性关系。

其中, 低演化阶段 ($R^0 < 1.0\%$), 甲烷氢同位素组成随 R^0 增加的变化较快, 在高演化阶段 ($R^0 > 1.0\%$), 甲烷氢同位素组成随 R^0 增加变化幅度较缓。同时, 两个方程的衔接较好, 在 $R^0 = 1\%$ 时分别为 -183% 和 -182% 。这一特征与刘文汇、徐永昌 (1999) 提出的我国煤型气甲烷碳同位素组成具有二阶模式的特征吻合极好, 其两阶的转折点同样在 $R^0 = 1\%$ 左右 (图 1.1)。从图 1.3 中可以看出, 天然气甲烷氢同位素组成演化的二阶段特征应该是非常明显的, 在天然气形成的低演化阶段, 甲烷碳、氢同位素组成的演化规律与成熟天然气都存在明显的差别, 这进一步说明低熟气和成熟天然气的形成在机制上存在差异。

图 1.4 统计了我国煤型气甲烷碳氢同位素组成相关关系, 图中显示, 甲烷的碳、氢同位素组成具有较好的线性关系, 甲烷氢同位素组成越重的样品, 其碳同位素组成也相应较重, 数学回归的线性关系为

$$\delta D_{CH_4} = 5.6247\delta^{13}C_1 + 3.013\% \quad R^2 = 0.8216 \quad n = 45 \quad (1.5)$$

由于煤型气甲烷碳、氢同位素组成与源岩热演化程度对数 ($\lg R^0$) 之间均存在线性关系, 而且显示出二阶段的特征, 因此我们可以根据计算得出煤型气甲烷碳氢同位素组成之间的线性关系, 计算结果同样显示两阶段的特征:

$$\delta D_{CH_4} = 5.946\delta^{13}C_1 + 19.18\% \quad (R^0 < 1\%) \quad (1.6)$$

$$\delta D_{CH_4} = 2.485\delta^{13}C_1 - 95.75\% \quad (R^0 > 1\%) \quad (1.7)$$

图 1.4 中, 实线表示数学回归的线性关系, 虚线表示通过数学计算得来的两阶段线性关系。总体而言, 它们在低演化阶段几乎没有差别, 在高演化阶段, 当甲烷碳同位素组成大于 -25% 时存在一定的差别。但是, 从目前我国煤型气碳同位素特征来看, 甲烷碳同位素组成重于 -25% 情况不常见, 因此通过数学回归所得的线性关系 (实线) 在设定甲烷碳同位素组成小于 -25% 的前提下, 应该完全可以适用。

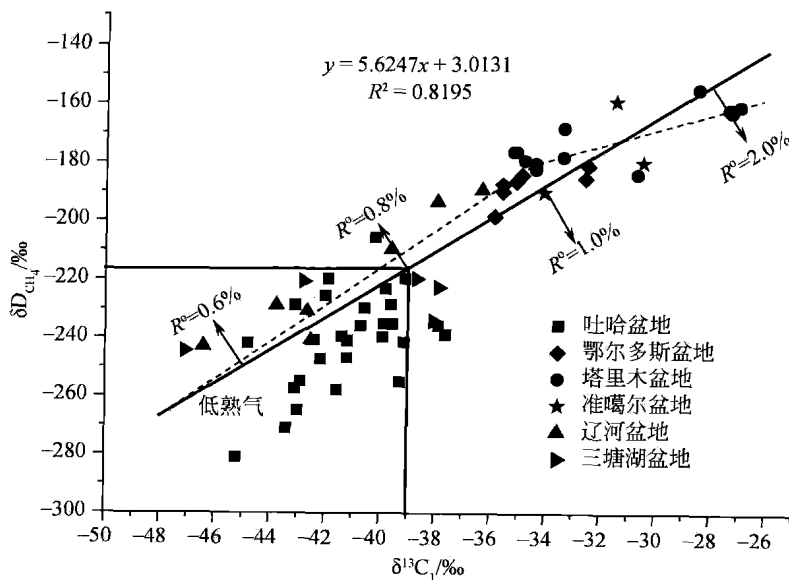


图 1.4 我国煤型气甲烷碳氢同位素组成相关关系

如果我们把低熟气的形成阶段定义为 R^o 在 $0.4\% \sim 0.8\%$ ，相对应的煤型低熟气的碳同位素组成为 $-54\% \sim -39\%$ ，氢同位素组成则为 $-300\% \sim -212\%$ 。

综上所述，天然气甲烷的碳、氢同位素特征是判识低熟气的重要标志，特别是将碳、氢同位素联合运用更能显示其优势。

三、低熟气轻烃组合特征

(一) 异庚烷值与庚烷值

轻烃组分中烷烃、环烷烃和芳烃对成熟度演化具不同程度的敏感度，因此可将其作为成熟度判识参数的选择对象，国内外许多学者常用正庚烷指数和异庚烷指数来判识油气的成熟度，并划分出未熟、成熟和高熟三个阶段。近年来，由于不断发现低演化阶段形成的石油天然气，因而加强了对低演化阶段油气形成的研究，传统的成油门限、油气演化的概念都随之产生了一定的变化，对未熟、低熟油气形成过程成熟度的确定给予了较大的重视。吐哈盆地油气形成的演化程度较低，因此，我们曾对庚烷值、异庚烷值划分成熟度作过一些修改。由于对天然气中轻烃的分析、测试技术的进步，天然气中 $C_3 \sim C_8$ 烃类能够准确的鉴别，促进了对天然气轻烃地球化学的研究。特别应提出徐永昌等（2005）、肖芝华等（2006）在云南保山盆地生物气（ $\delta^{13}C_1$ 在 $-63.6\% \sim -62.5\%$ ）中测定出 $C_3 \sim C_8$ 的轻烃化合物。它的庚烷值和异庚烷值分别为 16 和 0.8 单位左右，这为我们尝试确定未熟和低熟之间的界限提供了新的线索。

据此，我们将吐哈盆地天然气以及其他地区作为对比应用的天然气轻烃数据换算为庚烷值和异庚烷值，绘制成图 1.5。

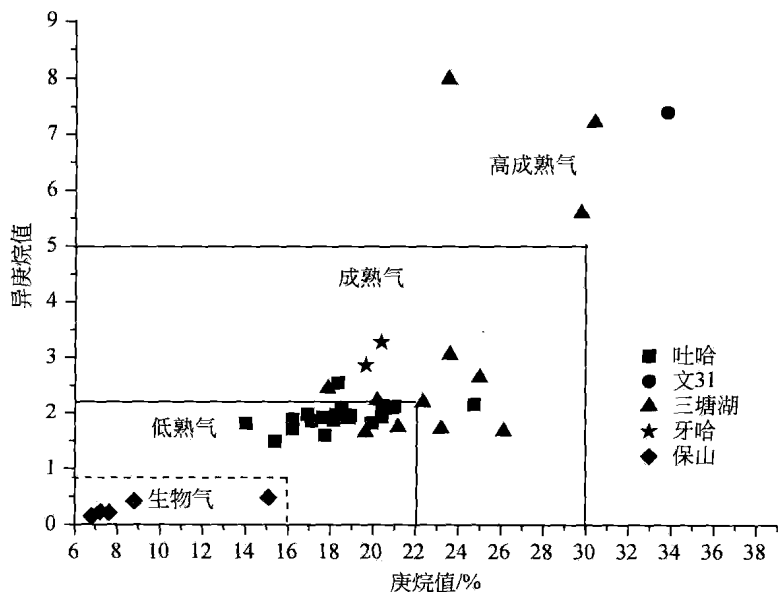


图 1.5 吐哈盆地天然气庚烷值和异庚烷值相关关系图

参照有关样品地质背景和已知的热成熟度参数, 图 1.5 中将异庚烷值和庚烷值分别以 0.8 和 16 单位确定为未熟和低熟的初步划分界限, 2.2 和 22 为低熟和成熟的界限, 5 和 30 为成熟和高熟的界限。云南保山的天然气处于生物成气阶段, 其轻烃判识在未熟范围显然是恰当的。吐哈盆地的天然气绝大多数样品分布在低熟阶段, 这与该区油气形成的地质背景和已知地球化学资料吻合, 按照这样的划分少部分样品落在成熟阶段。塔里木盆地牙哈的天然气在成熟阶段, 中原油田的文 31 井天然气成熟度最高, 为高演化阶段形成的天然气, 同时, 它们也是这个划分方案的参考值。

为验证上述划分方案的可行性, 我们应用 Herbert 等 (2002) 提出的判识油气成熟度的指标, 即庚烷值 ($n-C_7/\sum Cy-C_6 \sim M-Cy-C_6 \times 100\%$) 与 $n-C_7/M-Cy-C_6$ 之间的关系, 将天然气的轻烃数据经换算后绘入图 1.6 中。

如图 1.6 中所示, 所划分的降解区, 正是云南保山盆地天然气样分布的区域以及个别吐哈天然气的样品。而低成熟区主要分布着吐哈盆地的天然气, 中原文 31 井天然气为高成熟阶段的天然气。

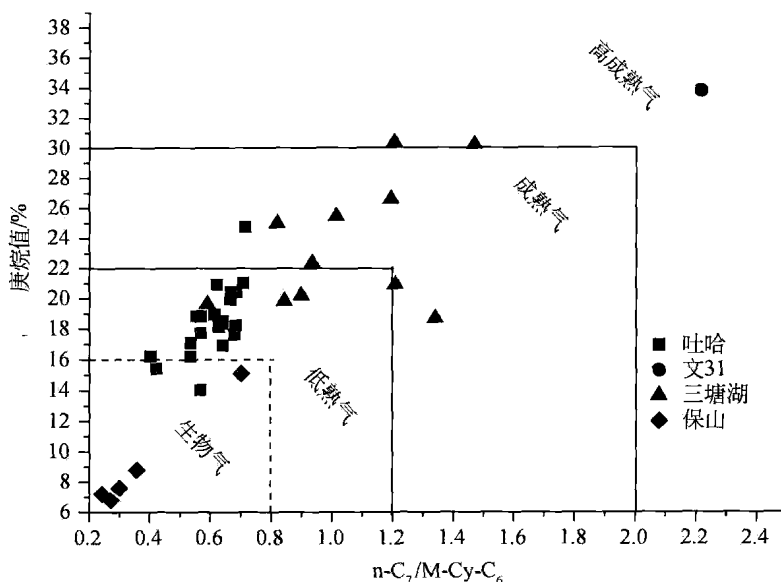


图 1.6 吐哈盆地天然气庚烷值 ($n-C_7/\sum Cy-C_6 \sim M-Cy-C_6 \times 100\%$) 与 $n-C_7/M-Cy-C_6$ 关系图
 $n-C_7$ 为正庚烷, $\sum Cy-C_6 \sim M-Cy-C_6$ 为环己烷至甲基环己烷所有组分之和

(二) 异庚烷值和庚烷值与甲烷碳同位素关系

在成烃母质相同的条件下, 天然气甲烷碳同位素组成可以作为判识成熟度的指标。为进一步确定天然气的成熟度, 将异庚烷值、庚烷值与天然气中甲烷碳同位素分别作图如下:

(1) 图 1.7 为庚烷值与 $\delta^{13}C_1$ 关系图, 现将庚烷值 22% 与 $\delta^{13}C_1 = -39\%$ 作为低熟与成熟之间的界限, 吐哈盆地天然气大多数样品落在低熟阶段, 部分气样和牙哈地区天然气位于成熟范围, 高成熟阶段天然气除中原油田文 31 井外, 三塘湖的马 17 井和牛

14-14 井其甲烷碳同位素组成明显富集单位 ^{13}C ，表明它们的成熟度高，这与三塘湖的地质背景相吻合。

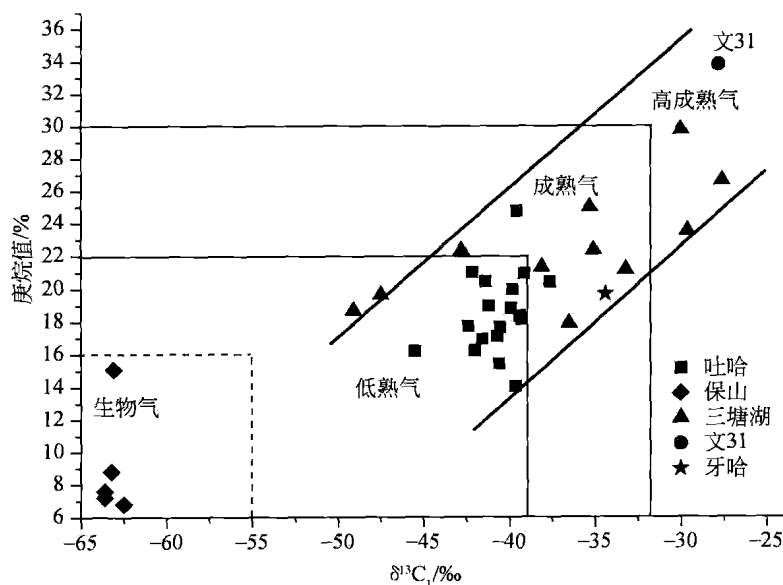


图 1.7 吐哈盆地天然气庚烷值与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 关系图

(2) 图 1.8 为异庚烷值与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 关系图，这一组参数将轻烃和常用的成熟度判识指标甲烷碳同位素组合在一起，给人感觉更为直观，其判识结果与上述研究的认识达到了异曲同工的效果，有力的说明这一组轻烃指标的综合运用对于天然气成熟度的判识是很有成效的。

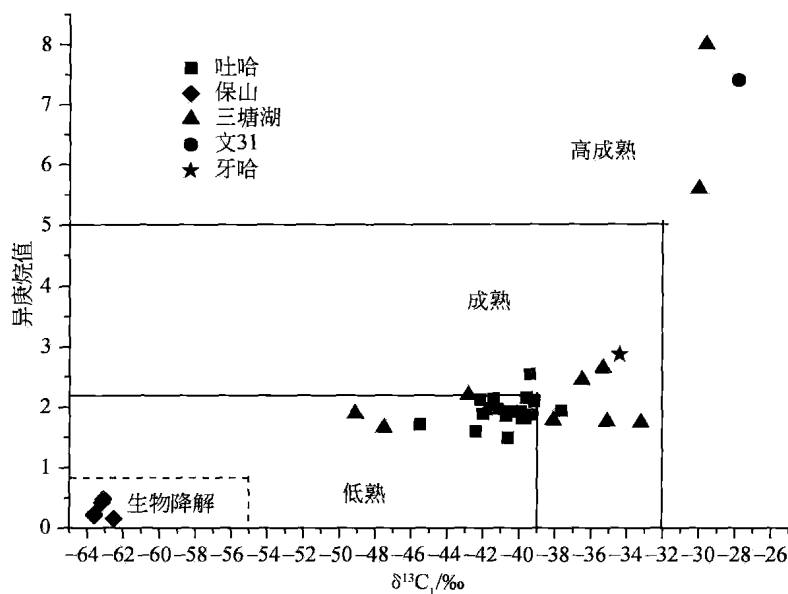


图 1.8 吐哈盆地天然气异庚烷值与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值之间的关系