

天然气地质学科丛书

生物-热催化 过渡带气

刘文汇 徐永昌 著
史继扬 雷怀彦 张柏生

科学出版社

天然气地学学科丛书

生物-热催化过渡带气

刘文汇 徐永昌 史继扬 等著
雷怀彦 张柏生

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书是首次对生-热催化过渡带气理论进行系统论述的专著。该理论是对油气成因理论的重要补充和完善。书中介绍了过渡带气理论的提出、发展和研究现状,从盆地构造背景、沉积成岩特征及过渡带有机质组成、早期演化、成烃过程诸方面,结合宏观、微观成烃模拟实验,探讨了有机质在粘土矿物催化作用和构造运动引起的力化学作用下经脱基团和缩聚作用等化学反应的成烃机制,建立了过渡带成烃模式,阐述了过渡带气的地球化学特征及其与液态烃之间的关系,确立了判识过渡带气的地质和地球化学标志;并在典型盆地解剖的基础上,提出了我国不同类型含油气盆地过渡带气的资源潜势。

本书观点新颖,内容丰富,资料翔实,依据充分,对从事石油天然气地质学、地球化学的科研、教学和生产人员具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

生物-热催化过渡带气/刘文汇等著.-北京:科学出版社

(天然气地学科丛书/徐永昌,傅家谟主编)

ISBN 7-03-006388-0

I. 生… II. 刘… III. 生物气-油气藏-矿床成因论 IV. P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25287 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1998 年 8 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—800 字数: 344 000

定价: 36.00 元

序

生物-热催化过渡带气是 80 年代末由本书作者徐永昌、刘文汇等结合我国地质实际提出的一种新的天然气类型。这类天然气是沉积有机质在低演化阶段形成的以甲烷为主的气体,常于浅层聚集成藏。过渡带气理论的确立是对天然气成因理论的补充和完善,同时也开拓了一个在浅层勘探自生自储天然气藏的新领域,对我国乃至世界天然气资源的扩大和天然气勘探意义重大。

过渡带气是作者在长期从事天然气地质学和地球化学研究和大量实践基础上提出的,要使其有效地指导生产实践就必须对其进行专门、系统的研究。而要把其作为一种资源加以利用,就必须对其形成机制、判识标志、资源估算方法、资源潜势、成藏条件和分布规律等进行深入的探索。《生物-热催化过渡带气》不仅是上述研究、探索的结晶,而且是一部多学科交叉综合研究的天然气科学专著,值得从事油气勘探者和研究者、院校的有关读者一读,因为从中可获得有关过渡带气的新资料、新认识和新观点,丰富和提高天然气地球化学和天然气地质学的知识。本书是在我国天然气勘探形势大好情况下出版的,必将为我国天然气工业加速发展和天然气理论提高作出贡献。

本书的主要作者之一刘文汇是位年轻的研究员,他从学刻苦,精力充沛,有创新和开拓潜力,在天然气地球化学和天然气地质学上有相当的造诣。当然,刘文汇的学术成长是与他的导师、本书的另一主要作者、我国天然气学科的带头人之一徐永昌研究员的熏陶分不开的。新著《生物-热催化过渡带气》的出版,从一个侧面标志着年轻一代已步入天然气学科的骨干行列。我相信天然气学科的一代年轻人,将是在 21 世纪上叶把我国建成为天然气生产和研究大国的推动者、实现者。

戴金星

1997.10.25.

前言

天然气作为优质能源和良好的化工原料是国民经济建设中不可缺少的物质基础,也是世界性的战略资源。而近年来日益引起人们重视的生物-热催化过渡带气在其中占有相当重要的地位。生物-热催化过渡带气是在系统研究我国陆相沉积含油气盆地成烃演化、天然气成因体系及其地球化学特征基础上提出的一种新天然气成因类型。它从理论上突破了传统的干酪根晚期成烃的概念,把位于生物作用带和热解作用带之间(即生物-热催化过渡带)、过去曾视为的非有效源岩产生的烃类气体纳入了天然气资源之中。由于过渡带气具有分布广、埋藏浅、投资少、见效快等特点,对其勘探开发具有重要的意义。过渡带气作为一种新的天然气成因类型,至今还未有系统的著作专门论述。本书旨在系统全面地介绍生物-热催化过渡带气的概念、研究现状和发展趋势,论述过渡带气形成的构造背景、沉积特征、成岩演化、有机母质特征,揭示过渡带气的地球化学特征,油气组合关系和地质及地球化学判识标志,探讨过渡带气的形成机制和演化模式,并结合地质背景,指出我国过渡带气的成藏条件、分布特征和远景分布区。具体如下:

(一) **地质条件对过渡带气的控制** 总体而言,中、新生代陆相沉积盆地是过渡带气分布的主要区域。东部活动区以中、新生代断陷盆地陆相湖泊沉积为主,构造运动的机械能参与成烃演化、地温梯度高、演化时间相对短,源岩层以白垩系和下第三系,特别是下第三系湖相沉积为主。中西部稳定、次稳定区,源岩以中生界含煤沉积为主。部分地区由于地温梯度低,上覆沉积相对薄,上古生界仍处于过渡带演化范围。因此,温度、构造作用和时间等因素的综合配套,决定着过渡带气形成的时空位置,从而控制着过渡带气的形成演化和分布。

(二) **沉积与成岩特征** 陆相断陷盆地沉积特征决定了源岩类型横向上的环带状分布和纵向上的多旋回分布,为过渡带气形成和聚集提供了配套的生储盖组合。大型盆地和中小型盆地的含煤沉积,为过渡带气提供了良好的母质来源。过渡带气形成过程不只是简单的有机质的转化,而是在沉积成岩过程中,在流体介质的参与下,无机矿物与有机质两大系统相互影响、相互作用的产物。如蒙脱石向混层矿物的转化不仅加速了有机质在催化作用下的成烃作用,而且也为流体运移创造了条件;砂岩与泥岩的相互作用,提供了更有利于有机质转化的催化作用。这些作用主要发生在 1400~2800m 的过渡带。

(三) **源岩分布与地球化学特征** 过渡带气源岩的研究表明,我国过渡带气源岩区域分布与八种类型沉积盆地有关,其层位主要为三叠系、侏罗系、白垩系和下第三系,局部为上第三系。这些源岩的有机质主要为腐殖型和腐泥-腐殖型,也有少量的腐泥型。尽管各种有机质在过渡带均可形成烃类,但腐泥型有利于形成液态烃,而偏腐殖型母质更利于形成气态烃。不同母质的气源岩其有机质丰度下限有所不同,一般 C_{org} 在 0.2%~0.4% 范围。此外,作者还系统分析了过渡带源岩中的脂肪酸和氨基酸分布,揭示了不同类型有机质和同类有机质中可溶和不溶组分脂肪酸的分布特征,并确定两种酸为过渡带气形成的直接来源之一。这些新资料、新观点,为完善科学的油气成因理论做出了贡献。

(四) 成烃实验地质学研究 烃源岩、泥炭有机质及其可溶有机质、脂肪酸成烃和粘土矿物催化有机质生气作用的实验地质学研究证明:

1. 自然条件下相当过渡带层段可形成大量烃类气体,腐殖型有机质是过渡带气主要母质。

2. 原始可溶有机质(沥青)及非烃在过渡带具最大生气潜能。

3. 岩石有机质演化过程中,脂肪酸含量可达 0.03%~4.1%。沥青中脂肪酸以一元酸为主,干酪根中二元酸占优势,在演化过程中,脂肪酸数量减少,一元酸直接成烃,二元酸先转化为一元酸再转化为烃类,反映脂肪酸为过渡带成烃的直接母源。

4. 不溶有机质中加入不同的粘土矿物,其烃类形成量均明显增加,证明粘土矿物对形成过渡带气有重要催化作用,而且能够降低有机质成烃温度。在过渡带演化的低温阶段,蒙脱石催化作用最为明显,其次是伊利石。

(五) 气体地球化学 过渡带气以烃类气体为主,其中甲烷占优势,但含有一定量重烃,明显区别于生物成因气。过渡带气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布在 $-60\text{‰} \sim -45\text{‰}$ 之间,并具有 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的正常序列同位素分布特征; $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 分布在 $-310\text{‰} \sim -180\text{‰}$ 范围,表明母质沉积环境为陆相淡水至微咸水。根据过渡带气分布的地质背景和地球化学特征,将过渡带气分为正常(自生自储)型、运移型、残留型和复合型四种类型。作者首次将过渡带油和气进行了地球化学研究,提出腐泥型过渡带油气、腐泥-腐殖型过渡带油气和非同源同阶过渡带复合油气型。同时确认,气体中稀有气体同位素组成并非判识过渡带气的指标,但可以反映沉积盆地的构造活动强度,从而可以提供过渡带气形成的区域构造条件和可能的源岩层位分布。

(六) 过渡带成烃机制 通过地质背景、实验地质学和其他综合研究,从理论和实践上确定了过渡带气的主要成烃机制:

1. 有机质力化学作用成烃。在沉积盆地中,构造作用不仅控制盆地沉积相带分布、沉积成岩演化和油气的运移,而且是有机质演化的能量来源和直接断键成烃营力,因而也控制着有机质的成烃演化。而沉积剖面中力化学作用最活跃的层段是过渡带。

2. 粘土矿物催化作用成烃。过渡带处于成岩作用活跃阶段,粘土矿物频繁转化,特别是蒙脱石向伊-蒙混层矿物转化, Al^{3+} 取代 Si^{4+} 导致粘土表面电荷不平衡而以路易斯酸和布朗酸形式使有机质在催化作用下形成过渡带气。这种粘土矿物的催化作用,降低了反应活化能,并提供有机碳链断裂后成烃的 H^+ ,降低了有机质成烃演化温度,加速了气态烃的形成。

3. 有机酸脱基团作用成烃。埋藏有机质经生物降解产生的不溶和可溶有机质中含有大量氮、氧、硫等杂原子的氨基和羧基等。这些基团易在早期演化阶段通过脱羧、脱氨等脱基团作用和酯化作用形成烃类。首先是氨基酸脱氨形成烃,尔后可溶有机质中一元酸脱羧和不溶有机质中二元酸先从不溶有机质中脱出成为一元酸,再脱羧形成烃类。

4. 有机质缩聚作用成烃。不同化学结构有机质成烃演化过程中所需活化能不同。一般情况下,富芳环有机质缩聚作用成烃所需活化能低于脂肪链有机质断键所需活化能。因此,不溶有机质中富含芳环的腐殖型有机质更利于在低温演化阶段通过缩聚作用形成烃类气体。我们首次对同一有机质中芳环和侧链进行分离,测定其同位素组成,结果表明侧链碳同位素组成轻于芳环,从而证明了早期演化阶段芳环化合物的缩聚作用形成碳同位

素组成较轻的过渡带气。

(七) 成烃演化模式 过渡带处于沉积成岩演化的特定阶段,成烃机制具有与干酪根晚期成烃不同的地球化学过程。不仅化学反应机制不同,能量来源各异,就其成烃直接母质也有差别。这些特征构成了过渡带多因素复合成烃演化模式,即过渡带烃类是在温度不高、压力相对小、而构造应力和粘土矿物催化作用极其活跃的条件下,可溶有机质和极性组分通过正碳离子方式脱羧、脱基团作用和富芳环不溶有机质的缩聚作用形成的。因此,过渡带气是上述诸因素综合叠加、相互作用的结果。

(八) 过渡带气判识标志 包括地质背景标志和地球化学标志:

1. 地质背景分析是判识过渡带气存在与否的重要手段。沉积盆地过渡带的源岩存在与否、源岩类型、演化程度,所处的大地构造单元和地质活动程度直接控制着过渡带气的分布。构造稳定区过渡带气源岩较老,以中生界为主,而构造活动区源岩时代新,以新生界为主。过渡带气源岩主要为泥质和煤系有机质,其有机碳丰度下限分别为 0.25% 和 0.4%,各种有机质均可形成过渡带气,但偏腐殖型更为有利。在演化特征上,过渡带气形成于有机质明显脱酸、脱基团作用范围, R^o 为 0.3%~0.6%,沉积成岩演化处在大量蒙脱石向混层矿物转化阶段,相应深度一般为 1400~2800m。

2. 过渡带气判识的地球化学指标主要由 $\delta^{13}C_1$ 、 δD_{CH_4} 、 $\delta^{13}C_2$ 系列, $\Delta^{13}C_1$ 、 $\Delta^{13}C_2$ 、 $C_1/C_{1\sim5}$ 、 C_2/C_3 、非烃丰度和伴生液态烃同位素组成。过渡带气 $\delta^{13}C_1$ 在 -60‰~-45‰ 范围,一般 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$, $C_1/C_{1\sim5}$ 在 0.4~1.0 范围,并随运移程度增加而变大。 δD_{CH_4} 主要反映母质沉积环境。正常型、运移型、残留型和复合型过渡带气有各自的地球化学特征。油气同位素组成关系可以判识过渡带油气的同源同阶和多源多阶复合。过渡带油的同位素类型曲线具有 $\delta^{13}C_{\text{饱}} < \delta^{13}C_{\text{芳}} < \delta^{13}C_{\text{非}} > \delta^{13}C_{\text{沥}}$ 的特征。

(九) 典型盆地解剖 根据构造演化、沉积特征、有机质成烃机制研究,重点解剖了辽河盆地、苏北盆地和吐-哈盆地典型过渡带气形成演化和成藏特征。辽河盆地是位于构造活动带的中、新生代断陷盆地,具有多源岩层、多产层、多母质类型成烃特征。盆地的沉积类型、构造活动和多旋回匹配的生储盖组合为过渡带气的形成和聚集提供了有利场所,目前已发现了成片连带的过渡带气藏(田)。苏北盆地亦属活动区中、新生代断陷盆地,大面积沉积源岩处于过渡带演化阶段,而成岩次生孔隙正发育于过渡带,亦为天然气形成和聚集提供了十分有利的场所。吐-哈盆地属于次稳定区以中生界为主的沉积盆地,源岩为煤系有机质,是中生界有气又有煤成油的沉积盆地。其气体成熟度 R^o 为 0.5%~0.7%,但主体演化程度 R^o 在 0.6% 左右,按天然气形成的多阶连续、主阶定名模式,将其归于“过渡带气”是恰当合理的。

(十) 过渡带气远景分布 下述地质单元有利于过渡带气分布。

1. 东部活动区是已证实有过渡带气存在的延伸区。该区构造演化、沉积特征、有机质丰度、类型、演化和生储盖组合,均有利于过渡带气的形成和聚集,可望在勘探开发上有新的突破。

2. 广阔的大陆架海域盆地。这些盆地有与陆上东部裂谷带盆地有相似的构造背景、沉积环境、地温分布,成烃有机质以陆源有机质为主,第三系是其主要源岩,绝大部分处于过渡带演化阶段,是我国最主要的有利过渡带气分布区,可望寻找到大中型气(油)田。

3. 中、新生代中小型陆相沉积盆地。我国具有众多的中、新生代陆相沉积盆地,这些

盆地由于母质类型差、演化程度低而一度被忽视,但它们非常有利于过渡带气的形成和分布,且自然条件好、投资小、见效快,具有重要的开发意义。

4. 大型稳定沉积盆地浅部及外围。我国中西部大型稳定沉积盆地由于地温梯度低、构造活动相对弱,源岩主要以中生界含煤沉积为主,盆地相对稳定,沉积面积大,盆地外围或盆地中浅部处于过渡带演化阶段,已在部分区块发现过渡带气,因此是陆上寻找大中型过渡带气最有利的地区。

本书是在国家“八五”科技攻关课题研究基础上编写而成。各章节编写人员为:

前言:刘文汇,第一章:徐永昌,第二章:刘文汇,第三章:史继扬、张柏生、刘文汇、向明菊,第四章:雷怀彦、关平,第五章:张柏生、雷怀彦、史继扬、应光国,第六章:刘文汇,第七章:刘文汇、沈平,第八章:刘文汇、史继扬、雷怀彦、徐永昌,第九章:刘文汇、徐永昌、张柏生、史继扬、雷怀彦,第十章:刘文汇、徐永昌、费富安,第十一章:徐永昌、刘文汇。

各章节初稿完成后主要由刘文汇负责审阅和修改,徐永昌、雷怀彦参加了此项工作,刘欣莲高级工程师负责清绘了部分图件。

参加本书有关研究工作的人员(按姓氏笔划序)为:丁万仁 于心科 方国英 文启彬 王万春 史继扬 关平 刘文汇 孙明良 向明菊 师育新 沈平 应光国 杜丽 陈应泰 邵波 张中宁 张柏生 张晓宝 杨辉 罗继坤 屈定创 周友平 周泽 费富安 陶明信 徐永昌 雷怀彦 潘旭

本书有关研究工作还得到了 85-102 项目办公室、中国科学院资源环境科学与技术局的支持,中国石油天然气总公司及下属各油田的大力协助,戴金星院士在百忙中抽暇为本书作序。在此一并表示感谢。

刘文汇

1996 年 6 月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 生物-热催化过渡带气的概念	1
第二节 研究现状.....	2
第三节 勘探现状及趋势.....	3
第二章 过渡带气形成的基本地质条件	6
第一节 构造背景.....	6
第二节 盆地沉积特征.....	8
第三节 营力条件	13
第三章 过渡带气源岩分布及地球化学	17
第一节 源岩的分布	17
第二节 成气母质类型	23
第三节 有机质丰度	30
第四节 热演化程度	34
第五节 生物有机组成及源岩中的脂肪酸、氨基酸.....	37
第四章 成岩作用与过渡带气	42
第一节 砂岩成岩作用与过渡带气	42
第二节 泥岩成岩作用与过渡带气	46
第五章 过渡带气地球化学特征	57
第一节 气体组分分布	57
第二节 同位素组成分布	67
第三节 气体组分与同位素特征	73
第四节 碳同位素组成演化	84
第六章 过渡带油气	87
第一节 液态烃与甲烷碳同位素组成	87
第二节 液态烃与乙烷碳同位素组成	90
第三节 液态烃与甲烷氢同位素组成	92
第四节 过渡带油的同位素组成特征	94
第七章 过渡带气形成的实验地质学研究	100
第一节 实验样品及实验方法.....	100
第二节 泥炭的成气模拟.....	104
第三节 源岩产气与产脂肪酸的模拟.....	112
第四节 干酪根的成气模拟.....	118

第五节	可溶有机质热模拟·····	122
第六节	粘土矿物催化作用成气模拟·····	125
第八章	过渡带气形成机制·····	132
第一节	过渡带源岩有机质的沉积演化·····	132
第二节	催化作用·····	137
第三节	力化学作用·····	147
第四节	脱羧基、脱氨基与脂肪酸、氨基酸生烃·····	154
第五节	缩聚作用·····	163
第九章	过渡带气形成模式及综合判识标志·····	167
第一节	过渡带烃类形成演化·····	167
第二节	过渡带成烃的地质判识·····	170
第三节	过渡带气地球化学判识标志·····	178
第十章	典型盆地解剖·····	181
第一节	辽河盆地·····	181
第二节	苏北盆地·····	192
第三节	吐-哈盆地·····	204
第十一章	过渡带气的分布及资源潜势·····	211
第一节	过渡带气的分布·····	211
第二节	过渡带气的资源远景·····	215
参考文献	·····	227
图版	·····	232

第一章 绪 论

第一节 生物-热催化过渡带气的概念

生物-热催化过渡带气(简称“过渡带气”)是“七五”期间在天然气国家科技攻关研究中提出的一种新的天然气成因类型。它是指生物(细菌)成气带和热催化气带之间的过渡层段所形成的天然气。在传统的天然气成因理论体系中,这个层段无天然气形成作用。

长期以来,天然气的成因理论以石油成因理论为主导,认为有机质沉积埋藏后,主要在地温的作用下,当温度达到一定的阶段形成液态石油并伴生天然气,即热催化成因天然气。随地温进一步升高形成凝析油气和高温裂解气。对于天然气而言,在成岩作用阶段,生物化学作用可以形成有工业价值的气藏乃至大、中型气田已为勘探实践所证实,理论阐述论据也充分,从而使天然气形成的领域包括了成岩作用初期沉积埋深小于 1000m 的层段。但是,对于生物作用已基本结束,又未达到石油窗的层段,人们大多认为是油气生成的空白区,处于该层段的源岩被称为非有效源岩,并且不计算其资源量,因此也就不视为勘探对象,不取芯、不测试。我们所提出的生物-热催化过渡带气即指这个层段有机质在各种外生营力作用下所形成的以甲烷为主的烃类气体。

“七五”期间,我们在辽河、苏北盆地发现一组特殊的天然气,其埋深较浅,一般分布于 1000~2500m,气体中甲烷碳同位素较轻, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-55\text{‰} \sim -48\text{‰}$,组分中含有一定量的乙烷以上的气态烃, $\text{C}_1/\text{C}_{1\sim 5}$ 为 0.7~0.9。这组气体的特征介于生物气和热催化气之间,其埋藏深度一般也介于这两个层系之间。但传统的生油理论认为这个层段是不生成天然气的。国外将这组气体划为生物气和热催化气的混合气。经对辽河、苏北盆地地质特征进行深入研究(王万春等,1988;徐永昌等,1990),提出了这组气体应为该层段自生自储的天然气。其依据是:① 在该组气体产出的相应层段存在热演化程度较低的气源岩,其 R° 值大致处于 0.3%~0.6% 之间;② 该层段有机质的热演化程度与产出甲烷的碳同位素分馏之间存在着较好的对应规律,经归纳获得了过渡带 R° - $\delta^{13}\text{C}_1$ 的关系式 $\delta^{13}\text{C}_1 = 40.5\lg R^\circ - 34$ (‰);③ 在国内外均发现了 $R^\circ < 0.6\%$ 层段内有机质降解形成的油气田,相比之下有机质成气所需能量小于成油,因此未熟和低熟油的存在是过渡带可以成气的间接证据;④ 理论上,有机酸脱羧、粘土矿物低温阶段的催化作用、芳环的缩合形成甲烷的作用可以在 R° 为 0.4%~0.55% 时大量进行,即在过渡带层段具有天然气形成的理论依据。因此,生物-热催化过渡带气是沉积盆地中介于生物化学作用带与热解作用带之间、生物化学作用趋于结束、热解作用还未达大规模成烃作用的特定层段,有机质在温度不高、压力相对小、而构造应力引起的力化学作用和粘土矿物催化作用极其活跃的条件下,通过脱羧、脱基团和缩聚作用形成的烃类。相应深度在 1500~2500m 乃至 3000m 所形成的天然气, $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-60\text{‰} \sim -45\text{‰}$ 之间, R° 在 0.3%~0.6% 范围。

第二节 研究现状

如前所述,受传统石油成因理论的影响,对于沉积剖面上 1000~2500m 这个层段被视为非有效烃源岩段,其主要原因是传统的有机成烃理论认为在这个层段的热动力学效应不足以形成有工业价值的天然气。因此,这个层段的天然气被认为主要是其它层段形成的气体运移储聚的结果。应当说这种情况是存在的,特别是由深部层位形成的气体运移至浅部储聚是很正常的。这种气体可以从地质背景和气体的地球化学特征予以判识。就地球化学特征而言,从深部运移来的气体,其甲烷碳同位素组成应具有等于或大于热催化气的特征。在辽河、苏北盆地 1000~2500m 所发现的一组气体,它们并不具有这样的特点,而是具有相对较干的组分和较轻甲烷碳同位素组成(比生物气重而比热催化气轻)。在过去的研究中,Schoell(1983)等将之划为生物气和热催化气的混合气。

Galimov(1988)对西西伯利亚北部乌连戈依为代表的一批超大型气田成因提出了有重要意义的新认识。乌连戈依是世界探明的最大气田,其储层为白垩系的赛诺曼阶,埋深在 1000~1200m 之间,气体成分主要为甲烷,乙烷以上重烃约为 0.15%, $\delta^{13}\text{C}_1$ 约为 $-50\text{‰} \sim -46\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-29.5\text{‰} \pm 0.4\text{‰}$ 。

关于乌连戈依气田的成因,以前有三种意见:① 深部 4000~5000m 源岩形成的气体运移至浅部储集;② 浅部的生物(细菌)成因气;③ 以上两种来源气体的混合气。Galimov 研究后提出了新的成因模式。他认为,储聚于白垩系赛诺曼阶的气体源岩为白垩系陆相沉积的波库尔组煤系,其埋深可达 2500m。该组沉积有机质的热演化程度为 R° 为 0.4%~0.55%。以乌连戈依为代表的一批超大型气田正是波库尔组的腐殖型有机质低温演化的产物。

Galimov 指出,腐殖型有机质和腐泥型有机质的成烃作用有所差异,富含脂肪结构的腐泥型有机质主要是在脂族的 C—C 键的分解作用变得有效的情况下才具有明显的成烃能力,甲烷将随着其它烃类的形成而形成。这一过程所要求的活化能较高,发生在有机质演化的较晚阶段。以富芳环和杂原子为特征的腐殖型有机质在地质演化过程中发生芳环的缩合作用,同时形成 CO_2 和 CH_4 。而该过程所要求的活化能较低,可以在有机质热演化的早期阶段,即 R° 为 0.4%~0.55% 或 R° 为 0.5%~0.7% 阶段形成规模性的甲烷。Galimov 认为西西伯利亚以乌连戈依为代表的超大型气田正是这种作用所形成。Galimov 所提出的新模式,与生物-热催化过渡带气的理论在主要方面是相似的。我们试用在辽河盆地所获的过渡带 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R° 回归方程代入 R° 为 0.4% 和 0.55% 的值,相应获得 -50.1‰ 和 -44.5‰ 的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值,这一结果与 Galimov 报道的乌连戈依气田的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-50\text{‰} \sim -46\text{‰}$ 极为吻合。

此外,阿尔卑斯山周边一些盆地,如意大利的波河盆地天然气储层时代主要为新第三纪,埋深除个别井外为 1300~2500m, C_1 为 92%~99%, C_2 为 0.08%~6.19%, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-44.3\text{‰} \sim -76.3\text{‰}$ 。其中 $\delta^{13}\text{C}_1 < -60\text{‰}$ 的部分为细菌气, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-60\text{‰} \sim -50\text{‰}$ 的部分,重烃含量明显增加,在 0.1%~5% 之间,Mattavelli 等(1983,1988)将之列为混合气或成岩气。

国内关于过渡带成气问题类似的认识有张义纲、郭迪孝等提出的低熟气和黄汝昌提

出的陆源有机气的概念,其意义大致与我们提出的生物-热催化过渡带气相当。“八五”天然气国家重点攻关课题中,安排了专题研究过渡带气的形成机制和资源潜势。辽河石油勘探开发研究院为深入此项研究也给予了经济上、工作上的大力支持。通过“八五”的研究表明,过渡带层段形成天然气的作用是明显的、多种多样的,如脂肪酸可以经脱羧形成气态烃,且在岩石中存在数量可观的脂肪酸。同时,在低温演化阶段,脂肪酸又在不断地形成。氨基酸的脱氨也形成气态烃。不同种类的氨基酸,可形成不同的烃类。粘土矿物低温阶段的催化作用也是过渡带形成天然气的重要机制。研究表明在过渡带的温度条件下蒙脱石有很强的催化成烃能力。由于蒙脱石的存在,可使同种同数量的有机母质比不存在蒙脱石时低 50℃ 获得相同的成烃率。岩石中成烃的有机质分为可溶和不溶两部分,可溶有机质是较易转化成气态烃的有机母质。研究表明,在 R^o 为 0.6% 以前,岩石中可形成较大数量的原始可溶有机质,它们是过渡带气形成的重要母质。此外,综合近年有机岩石学研究的结果,煤系有机质的成烃具有双峰模式,即存在 R^o 为 0.3%~0.6% 低演化阶段的成烃第一峰值和 R^o 为 0.8%~1.3% 煤系有机质成烃的第二峰值。煤系有机质中树脂、木栓质和富氢基质大体都在过渡带的温度区间完成生烃和排烃过程。此外,研究表明,地质历史中地质应力的力化学作用对过渡带气的形成有重要意义。

因此,过渡带这个曾被视为油气形成空白区的层段,其重要性无论在生产勘探方面或在有机质的成气机制方面都得到了验证,即从地质实践到理论都证明了生物-热催化过渡带气演化是天然气形成的一个特定阶段,相应层段在天然气垂向成因分带上客观存在,是天然气勘探应予重视的一个新靶区。

第三节 勘探现状及趋势

陆相成油理论促进了陆相石油勘探的大发展。煤型气开发研究的成果,促进了天然气勘探事业高速发展,使天然气储量“六五”以来翻了数番。生物-热催化过渡带气理论的提出,开拓了勘探 1000~2500m 浅层自生自储天然气的领域,并已在生产实践中初见成效。

过渡带气理论是以辽河、苏北盆地的地质实践为基础提出的。辽河油田以此理论认识为出发点进行了专项的找气勘探部署,结果获得了生产实践的验证。辽河石油勘探开发研究院在“七五”期间提供的《效益证明》说,“天然气成因类型的划分,特别是生物-热催化过渡带气成因类型的提出,不仅有理论意义,更有重要的实用价值。开拓了辽河盆地 1000~2500m 层段寻找浅层气的新领域。按此新认识,我们在贫油区(欧利坨子构造)部署欧 6、欧 8 井,均获工业性气流,初步控制地质储量 $1 \times 10^9 \text{m}^3$,收到明显的经济效益;更重要的是为我们开阔了视野。按这类气的形成条件,不仅构造带是勘探方向,并有充分理由向洼陷进军,寻找这一类型的层间构造或断块-岩性气藏”。近年来,辽河油田进一步为开发生物-热催化过渡带气作了勘探部署,在东部凹陷、西部凹陷和大民屯凹陷均取得可喜的收获。

中国东部是我国主要油区,天然气也在储量平衡表中占有一定份额。对已探明的天然气地质背景和地球化学特征进行分析,可以发现不少地区存在生物-热催化过渡带气,如对济阳拗陷天然气的研究,张林晔(1991)根据其埋深划分为浅层(<1800m);中层(1800~3800m)和深层(3800~5200m)三种气体,并基于油区实际资料回归出 R^o 在 0.3%~

0.7%时 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R° 之间的关系:

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 22.99\lg R^\circ - 43.76(\text{‰})$$
$$r = 0.9657$$

张文讨论的中层气体相关的地球化学特征是:储层为下第三系沙河街组,埋深 1800~3800m、 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布在 $-46\text{‰} \sim -52\text{‰}$ 之间,张林晔还研究了相应层段源岩吸附气的甲烷碳同位素,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值域为 $-49\text{‰} \sim -51\text{‰}$,认为中层气与该段源岩具有极好的可对比性。根据这些资料计算,则天然气相当的成熟度 R° 为 $0.4\% \sim 0.75\%$,该层段源岩的 R° 相当于 $0.45\% \sim 0.6\%$,二者确有很好的可比性。从这些资料看,中层气应与生物-热催化过渡带气相当,而中层气体是济阳拗陷分布最广泛的天然气资源。

关于松辽盆地,许运新等(1995)报道了盆地浅层气藏的特征并讨论了其勘探前景。松辽盆地浅层气储层为白垩系的嫩江组二、三、四段和明水组一段,埋深 380~1400m,气体组分中甲烷占 $86.8\% \sim 98\%$,甲烷的碳同位素除杏树岗油田的杏 135 井为 -42.6‰ 外,其余各井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分布在 $-48.6\text{‰} \sim -55.9\text{‰}$ 之间。松辽盆地白垩系烃源岩主要为湖相沉积,应按油型气考虑。用济阳拗陷的关系式计算,则该组甲烷源岩的成熟度 R° 应在 $0.3\% \sim 0.6\%$ 之间。因此,松辽盆地分布广泛的浅层气应属生物-热催化过渡带气的范畴。许运新等认为该盆地浅层气主要为已知油田的气顶气和油田伴生气,沿断裂运移至浅层,而油田伴生气仅在大庆长垣其储量即达 $2 \times 10^{11} \text{m}^3$,因而提出应充分重视浅层气的勘探。

除我国东部油气区发现储量可观的过渡带气资源外,近年我国西部侏罗系煤盆地的勘探,特别是吐-哈盆地的勘探发现了大中型气田规模的天然气,从吐-哈盆地天然气储集的地质条件和地球化学特征,我们认为吐-哈盆地目前已探明的数百亿立方米的天然气为煤系有机质热成熟度处于 R° 为 $0.5\% \sim 0.7\%$ 的产物,基本属过渡带气的范畴,后文将有较详细的讨论。

我国东部海域大陆架天然气主要为煤系有机质热演化成熟阶段产物,但莺歌海盆地乐东 1411 井高 N_2 天然气储层埋深 830~1058m,主要为上第三系莺黄组,天然气中甲烷含量 $37\% \sim 68\%$ 、 C_2^+ 为 $0.8\% \sim 1.8\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-42.5\text{‰} \sim -48\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 -24‰ 、莺-琼盆地属Ⅲ型有机母质,可用我们提出的过渡带公式 $\delta^{13}\text{C} = 40.5\lg R^\circ - 34(\text{‰})$ 计算源岩成熟度,相应的 R° 为 $0.45\% \sim 0.6\%$ 。因此,莺歌海乐东 1411 富 N_2 天然气为煤系有机质过渡带的产物。

我国中部地区鄂尔多斯马岭、李庄子等一批油气井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-46.5\text{‰} \sim -50.9\text{‰}$,储层以三叠系为主,气体特征和源岩成熟度均与过渡带气相关。

近年的勘探实践,揭示了生物-热催化过渡带气工业气流、气藏的广泛分布;过渡带气既可形成于煤系有机质,也可产于湖相Ⅰ或Ⅱ型有机质,这是与 Galimov(1988)模式的差异之处。

从以上生物-热催化过渡带气的简要介绍可以看出,其分布有一定规律,这种规律与我们根据天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 所划分的三个构造区带有较好的对应关系。这三个区是我国东部高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布区: $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$,构造环境较活跃,有与地幔连通的郯庐大断裂带;区内地温梯度较高,过渡带气主要与白垩-第三系有关,东部地区北部的松辽等盆地过渡带气主要与上白垩统有关,该地区中、南部盆地过渡带气主要与第三系有关。

中部低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布区： $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 10^{-8} ，是我国构造环境最稳定的区域，过渡带气的产出层位较老，为侏罗-三叠系，以三叠系为主，部分石炭-二叠系产出的天然气也具有过渡带气的特征；西部为 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的中等值分布区域，盆地边缘为 10^{-7} ，盆地腹地为 10^{-8} ，属次稳定的构造环境；古地温梯度正常，现地温梯度偏低，过渡带气产出层位较东部地区老，如吐-哈盆地主要与中、下侏罗统有关。从现有资料看，三叠系在西部地区也是有前景的过渡带气层位，如塔里木盆地满加尔凹陷，三叠系陆相碎屑岩系具有厚层的黑色泥岩，有机质丰度较高，成熟度在 R^o 为0.5%~0.7%范围，是极有希望的过渡带气的远景区。

此外，我国东南海域大陆架上第三系已揭示过渡带气工业气井(藏)的存在，特别莺-琼盆地温压异常区，上第三系过渡带气潜力是巨大的。

第二章 过渡带气形成的基本地质条件

过渡带是沉积盆地成岩演化过程中,构造动力参与下有机质与无机矿物相互作用、位于生物作用带和热解作用带之间的有机质转化的特定层段。沉积盆地发育受控于区域大地构造背景,而沉积演化控制着有机质的转化,在温度、压力较低(但动力作用不一定低)的条件下,有机质在粘土矿物等催化作用下,通过脱基团和缩聚作用等形成烃类气体。因此,过渡带气形成具有特定的构造背景、沉积特征及成岩演化温度、压力和埋深等条件。

第一节 构造背景

根据现有资料,过渡带气主要分布于中、新生代沉积盆地。如果地温梯度较低,或上覆沉积较薄,则可在较老的沉积层局部地区形成过渡带气。目前已发现过渡带气的盆地主要有松辽盆地、渤海湾盆地(包括辽河、济阳、黄骅、冀中拗陷)、苏北盆地、南襄盆地、江汉盆地、百色盆地和三水盆地。其他诸如准噶尔盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等亦有零星分布。徐永昌等(1994)利用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的研究,将我国含油气盆地划分为三个构造单元,即东部张性裂谷活动区、中部克拉通稳定区和西北压扭性次稳定区。由于构造运动的性质、强度等不同,这三个构造区沉积演化和成烃演化均有差异。

一、东部活动区

东部活动区包括大兴安岭-太行山-武陵山构造地球物理梯度带以东诸含油气盆地。中生代以来由于受太平洋板块俯冲作用,发育成北-北东向巨型裂谷活动区和巨型大断裂带——郯庐大断裂带,直接控制了该区含油气盆地的形成演化和油气藏分布。该区盆地构造前中生代由各不相同的大地构造单元所组成,自北而南包括东北褶皱系、华北地台、秦岭褶皱系和扬子地台,经过漫长的地质演化,逐渐硬化,印支运动后合并成为一个较为统一的大陆地块(胡见义等,1984a)。

自燕山运动起,在太平洋板块向大陆俯冲作用下,全区经历了强烈的块断运动,刚统一起来的陆块又在不同地区,不同程度地被肢解,形成一系列互相分割、不同时期的近海内陆盆地,由于前中生代地质构造的差异和它们与太平洋相对位置的不同,各地区块断运动时代、性质及沉积盆地构造特征也有差别。

中国东部大体经历了晚侏罗-早白垩世、晚白垩-始新世和渐新世等三期块断活动。松辽盆地处于东北褶皱系东部,除晚侏罗世断块活动外,其他各期块断活动不发育,从早白垩世转变为大型拗陷盆地。华北地台上的渤海湾盆地是这三期块断活动的叠合发育区,大规模差异沉降和水平拉张,形成了一系列下第三系同生断陷,晚第三纪成为统一盆地。叠

置在秦岭褶皱带上的南襄盆地,块断活动主要发生在晚白垩世或古新世—始新世,持续到渐新世而形成同生断陷。扬子地台上的江汉盆地,断块活动始于晚白垩世,主要活动时期为始新世,形成了相应的断陷。扬子地台上的苏北盆地,经晚侏罗—早白垩世的各期块断活动及渐新世的强烈块断运动,早期拗陷被改造成后生断陷。

东部活动区强烈的构造运动,伴随深大断裂发育的岩浆作用,为深部挥发分的运移提供了有利条件。同时,构造断陷活动所发育的裂隙为天然气运移提供了良好的通道。构造活动不仅控制了盆地沉积类型、母质特征、也影响到天然气的形成。强烈而频繁的构造动力(水平挤压力、剪切力等)参与了过渡带有机母质的力化学作用,使大量过渡带气得以先成。

二、中部稳定区

中部稳定区介于大兴安岭-太行山-武陵山和贺兰山-龙门山两大构造地球物理带之间,自北至南分布鄂尔多斯、四川及百色三个含油气盆地。该区远离太平洋、喜马拉雅和古亚洲三大构造活动带而具有稳定的地球动力学环境。其中鄂尔多斯和四川盆地具有稳定而长期的沉积历史,特别是古生代末到中生代初,先后演变为内陆沉降盆地;结构与构造稳定、断裂与岩浆活动均不发育而以褶皱为主,为我国构造最稳定的地区。这些盆地在印支期成为中国中部南北向延展的沉降带。印支运动使盆地西缘隆起,而盆地中部演化为一大型拗陷沉降区,广泛沉积侏罗系,东薄西厚。燕山运动全区普遍发生褶皱断裂,鄂尔多斯盆地解体,周缘产生断陷,四川盆地褶皱强烈,形成大量背斜构造带;晚燕山运动使中部稳定区大部隆起、遭受剥蚀,缺失白垩系。因此,中生界埋深相对浅,成岩作用相对弱。总体上,中部稳定区的鄂尔多斯和四川盆地是在稳定陆块基底上发展起来的拗陷,具有宽平的基底,广阔的水域和统一的沉积条件。由于气候潮湿,构造活动弱,其沉积以面积宽广的冲积平原及湖泊相为主要类型。鄂尔多斯盆地上三叠统和下侏罗统的湖沼相沉积,由于其上覆地层的缺失,演化程度相对低,大部分处于未成熟—低成熟阶段,成为过渡带气形成的有利区域。

该区南部,印支期由于太平洋板块和特提斯洋板块联合作用而发生强烈运动,遭受剪切;三叠纪后处于上隆阶段,活动性比北部强烈,形成一些断陷盆地。百色盆地就是在南盘江中生代拗陷的基础上,早第三纪初期由右江断裂活动张裂沉陷而形成的陆相湖泊沉积盆地。中三叠世以后,桂西上升为陆,结束了海相沉积历史而受剥蚀;早始新世起开始断陷;中、晚始新世随北西向断陷的全面张陷,盆地全面断陷下沉;渐新世早期,盆地进入拗陷期,一直延续到上新世。其后盆地受喜马拉雅运动主幕的影响回返而结束沉积,成为目前剥蚀残留盆地的构造格局。在整个第三纪地质发展过程中,盆地断陷较为活跃,尤其是贯穿盆地北西西向主干张性断裂具有发展的长期性和继承性,与北东向断裂构成了盆地的构造骨架。因此,中部地区南部是在中生代以前稳定区基础上,中、新生代活化发展起来的断陷盆地,其构造活动和沉积特征可以与东部活动区相比,具有共同的时代、沉积和演化特征,是过渡带气形成的有利区块。