



中国石油天然气集团公司 油气地球化学重点实验室文集

第二集 ● 2000—2002 年

油气地球化学重点实验室学术委员会 主编

石油工业出版社

中国石油天然气集团公司

油气地球化学重点实验室文集

第二集·2000—2002年

油气地球化学重点实验室学术委员会 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集共收入中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室在 2000—2002 年期间发表的油气地球化学论文 27 篇, 内容包括中国海相生油、煤成烃、油藏地球化学、生物分子及同位素地球化学、西部盆地油气勘探地球化学等方面的研究成果。

本书可供油气勘探科研单位研究人员及石油院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室文集. 第 2 集, 2000—2002/油气地球化学重点实验室学术委员会主编.
—北京: 石油工业出版社, 2006. 3

ISBN 7-5021-5291-1

I. 中…

II. 油…

III. 油气勘探: 地球化学勘探—文集

IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 130462 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 16.75

字数: 422 千字 印数: 1—1000 册

定价: 60.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

中国石油天然气集团公司
油气地球化学重点实验室
学术委员会

主 任：梁狄刚

副 主 任：黄第藩 戴金星 王铁冠 梅博文 张大江

委 员：高瑞祺 程克明 张水昌 蒋助生 秦匡宗

 钟宁宁 王培荣 包建平 侯读杰 孔庆云

 冉隆辉 卢双舫 彭平安 史继扬 金奎励

 张林晔 周光甲 贝 丰 王廷斌 王昌桂

 王绪龙 林壬子 冯子辉

前 言

中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室自 1999 年 7 月正式成立以來，已经 6 年。2001 年 9 月，出版了重点实验室文集第一集，主要收录了学术委员会各位委员在成立大会上的论文，以及实验室部分资助项目的中间成果，我们当时把它叫做重点实验室的“开场白”。现在出版的第二集，收录了实验室 2000 年 10 月至 2002 年底在国内外公开发表过的论文 27 篇，在一定程度上反映了重点实验室成立前 3 年的主要成果。

重点实验室的任务是：追踪学科前缘，从事应用基础研究，为中国石油天然气集团公司提前做好技术储备，保持发展后劲，在当今激烈的国内外竞争中立于不败之地。油气地球化学重点实验室自成立之日起，就明确了中、近期的 5 个研究方向：（1）油气勘探地球化学，包括非常规油气和中国海相油气地球化学；（2）油藏地球化学；（3）生物分子及同位素地球化学；（4）有机岩石学；（5）实验新技术、新方法。本文集的 27 篇论文，涵盖了各个方向的研究成果。

与陆相生油研究相比，中国海相生油的研究还很不成熟，从烃源岩有机质丰度下限值、有效烃源岩判识标准、烃源岩发育的有利相带、油源对比有效指标的选择到成熟期的确定等一系列问题，都有不同的认识。本文集中有关这方面的论文，反映了实验室主要在塔里木盆地的研究成果和认识，代表了实验室的“一家之言”。更加全面系统的成果，集中在《塔里木盆地海相油气的生成》一书中（石油工业出版社，2004 年 12 月）。

油藏地球化学是近年来的研究热点之一。从油气运移到成藏，从油气注入期次、方向、油藏流体非均一性到油气次生变化，从勘探到开发，都有不少成果。本论文集收录的相关文章，主要反映出重点实验室在油气成藏期的确定和运移分馏作用两方面的成果。其中，蒸发分馏和气流作用形成凝析油和蜡质油的机理，已为越来越多凝析油气藏的发现所证实。

有关生物分子和同位素地球化学研究的论文，探讨了甲藻甾烷分子化石在寒武纪—前寒武纪地层中的异常分布及其生物学意义，还探讨了中国晚泥盆世古海水温度的变化。这些追踪学科前缘的成果，对认识我国海相古生界烃源岩发育的古生物、古海洋环境，有着重要意义。

本论文集集中分别展示了吐哈盆地、酒西盆地、银根—额济纳旗盆地、云南景谷盆地的油气地球化学研究成果，其中涉及煤成烃、低熟油、天然气以及新区勘探地球化学等方面内容，对这些盆地的油气勘探有重要的参考价值。

应当说明，油气地球化学重点实验室 2000 年 12 月召开“第八届全国有机地球化学学术会议”以及 2001 年 8 月的“油藏地球化学研究与技术进展学术会议”上，都有多篇论文发表，因为已有会议论文专辑，本文集不再收入。另外，油气地球化学重点实验室在我国南海相生烃研究成藏研究中也出了不少成果，但因成果归属的缘故，本论文集集中也未收入。

我们衷心希望，通过第一、二、三集文集的正式出版，能够记录下油气地球化学重点实验室成长的历史和脚步，并为我国油气地球化学和油气勘探的发展做出贡献！

中国石油天然气集团公司

油气地球化学重点实验室

学术委员会

2005 年 9 月，北京

目 录

从塔里木盆地看中国海相生油问题	梁狄刚 张水昌 张保民 王飞宇 (1)
库车坳陷的油气成藏期	梁狄刚 张水昌 赵孟军 王飞宇 (15)
孔西潜山奥陶系原生油藏成藏时期探讨	程克明 熊 英 张晓宝 (26)
吐哈盆地煤成烃研究	程克明 熊 英 曾晓明 J. M. Moldowan J. Greene. Todd (35)
吐哈盆地煤成烃研究新进展	程克明 熊 英 J. M. Moldowan J. Greene. Todd (41)
分子化石与塔里木盆地油源对比	张水昌 梁狄刚 黎茂稳 肖中尧 何忠华 (49)
分子化石在寒武—前寒武纪地层中的异常分布及其生物学意义	张水昌 J. M. Moldowan Li Maowen 边立曾 张保民 王飞宇 何忠华 王大锐 (60)
关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准	张水昌 梁狄刚 张大江 (67)
塔里木盆地两套海相有效烃源层 ——有机质性质、发育环境及控制因素	张水昌 张保民 王飞宇 梁狄刚 何忠华 赵孟军 边立曾 (75)
塔里木盆地中、上奥陶统油源层地球化学研究	张水昌 王飞宇 张保民 梁狄刚 赵孟军 (83)
运移分馏作用:凝析油和蜡质油形成的一种重要机制	张水昌 (92)
Paleozoic Oil-source Rock Correlations in the Tarim Basin, NW China	S. C. Zhang A. D. Eanson J. M. Moldowan S. A. Graham D. G. Liang E. Chang F. Fago (96)
Biological and Molecular Geochemical Evidence for Dinoflagellate Ancestors in the Upper Sinian-Cambrian	Zhang Shuichang J. Mike Moldowan Bian Lizeng Zhang Baomin Zhang Liping (117)
酒西盆地油气形成与勘探方向新认识 (一) ——基本石油地质条件及生油潜力	陈建平 陈建军 张立平 钟宁宁 王智诒 (127)
酒西盆地油气形成与勘探方向新认识 (二) ——烃源岩成烃演化与主力油源确认	陈建平 陈建军 张立平 钟宁宁 (134)
酒西盆地油气形成与勘探方向新认识 (三) ——油气运移、成藏规律与勘探方向	陈建平 陈建军 张立平 钟宁宁 (141)
银根—额济纳旗盆地原油的发现及其主要地球化学特征	陈建平 王东良 秦建中 黄第藩 韩德馨 (149)
银根—额济纳旗盆地查干凹陷原油地球化学特征及油源对比	陈建平 何忠华 魏志彬 王东良 秦建中 国建英 (158)

银根—额济纳旗盆地查干凹陷基本生油条件研究	陈建平 何忠华 魏志彬 王东良 秦建中 国建英 (167)
Geochemical Evidence for Mudstone as the Possible Major Oil Source Rock	
in the Jurassic Turpan Basin, Northwest China	Chen Jianping Qin Yong
	Bryan G. Huff Wang Darui Han Dexin Huang Difan (175)
相控和气洗分馏作用对油气组分及碳同位素组成的影响	苏爱国 张水昌 向龙斌 王小强 (205)
Phase-Controlled and Gas-Washing Fractionations During the Formation of	
Petroleum Reservoirs	Su Aiguo Zhang Shuichang Xiang Longbin Zeng Fangang (213)
酒西盆地石油非均质性的控制因素	熊英 程克明 杨志明 (227)
塔里木盆地油区石炭系海相碳酸盐岩同位素地球化学研究	王大锐 白玉雷 贾承造 (235)
晚泥盆世弗拉斯期—法门期之交海水温度变化的同位素证据	王大锐 马学平 董爱正 朱德升 (241)
云南景谷盆地低熟石油地球化学特征与意义	王大锐 高建昆 罗怀章 温景萍 (246)
云南陆良盆地天然气及烃源岩地球化学特征	
——兼论滇黔桂地区寻找生物气田的可能性	王大锐 罗怀章 (252)

从塔里木盆地看中国海相生油问题^①

梁狄刚¹ 张水昌¹ 张保民¹ 王飞宇²

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油大学(北京))

摘 要 塔里木盆地厚达 5~7km 的海相寒武、奥陶系,可划分出下、中寒武统和中、上奥陶统两套工业性烃源岩。油源对比证实:盆地目前保存下来的海相成因工业性油藏,主要来源于中、上奥陶统泥灰岩。正是因为塔里木盆地比四川、鄂尔多斯盆地多了一套中等成熟的中、上奥陶统油源岩,所以能够找到海相油田。笔者认为:海相工业性烃源岩不必很厚,但 $w(TOC)$ 应大于等于 0.5%,碳酸盐岩要含泥质;海相烃源岩往往并不发育在凹陷中心,而发育在 4 种有利沉积相带上;碳酸盐岩具有“双重母质”的特点,浮游藻类偏油,底栖藻类偏气。海相烃源岩的形成模式有“保存模式”和“生产力模式”两种,分别对应于塔里木寒武系和中、上奥陶统烃源岩。塔里木古生代克拉通早期活动、晚期稳定、持续降温的演化史,有利于海相油气得多期成藏和晚期保存。

中国古、中生代海相地层分布面积在 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,其中不乏好的烃源层,油气显示广泛分布。海相成因天然气的勘探已在四川、鄂尔多斯盆地取得了丰硕成果,但是迄今为止,全中国只在塔里木盆地找到了海相成因的工业性油藏。目前塔里木盆地每年生产的 $410 \times 10^4 \text{ t}$ 原油,全部是海相石油。研究中国海相生油,离开了塔里木盆地这个典型,就是不完整的;而解剖好这个典型,对中国海相油气生成一定会有重要启发。

1 问题的提出

塔里木盆地的海相油气田分布在古生代克拉通的三大古隆起上(图 1)。以往的油源对比证实:寒武—奥陶系是海相油田的主力油源层^②;盆地东北部的满加尔凹陷是主力生油凹陷。但是随着勘探实践的深入,提出了新的问题:

(1) 寒武—奥陶系在塔里木盆地东部厚达 7000m,在西部厚 3500m 以上,各分上、中、下统,有碳酸盐岩也有泥岩,它们全都是烃源岩吗?真正有效的工业性烃源岩分布在哪些层段?厚度有多大?

(2) 寒武—奥陶系 70% 以上的层段(包括碳酸盐岩和泥岩)残余有机碳质量分数低到只有 0.1%~0.2%,它们能否作为工业性烃源岩?如果把烃源岩的标准降得这么低,那岂不是满盆分布的寒武—奥陶系,绝大部分都成了烃源岩?若如此,则盆地任何部分只要有好的圈闭,又有断层或不整合面与寒武—奥陶系沟通,是否就可打井而不必考虑油源问题?

① 原载《地学前缘》,2000,7(4):534~547。

② 基金项目:国家“九五”重点科技攻关资助项目(962111201203),国家“八五”重点科技攻关项目(852101201204)生油岩研究专题报告。

(3) 盆地东北部沉积最厚的满加尔凹陷，是哪个时期的凹陷？充填了什么类型的沉积物？其中有无好的生油层发育？满加尔凹陷是不是寒武—奥陶系、特别是巨厚的中、上奥陶统的生油凹陷？

(4) 进一步把视野扩大，同属陆壳基底之上的大型叠合、复合盆地，同样经历了古生代大体相似的陆表海碳酸盐岩碎屑岩沉积阶段，为什么四川（扬子）盆地和鄂尔多斯（华北）盆地的海相古生界只有天然气，而塔里木盆地却生成和保存了海相工业性原油？可见其盆地演化与海相油气生成总有点什么特殊的东西。

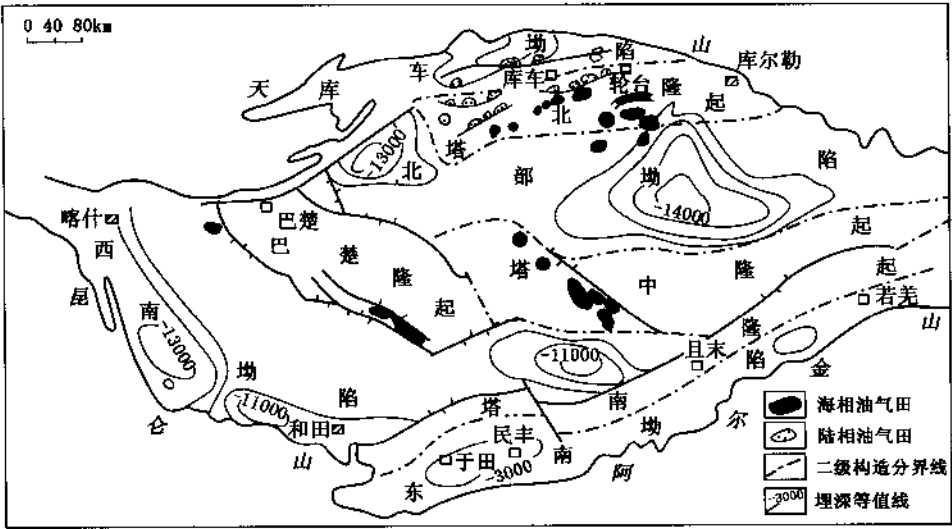


图 1 塔里木盆地海、陆相油气田分布图

2 塔里木早古生代盆地演化的一大特点——中、晚奥陶世剧烈沉降

塔里木盆地的地层剖面，在泥盆系以下很像扬子地台，二叠系以上则很像华北地台（图 2）。例如，塔里木和扬子地台都有震旦系，又有冰碛层，寒武系底部都有含磷层，中、上奥陶统的瘤状灰岩和黑色页岩相当于宝塔灰岩和五峰页岩，志留系是一套灰、绿色砂泥岩，泥盆系是一套红层夹石英砂岩；与此相反，华北地台则缺失震旦系、上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统。但是，从晚二叠世起，塔里木和华北地台的海水就已全部退出，进入内陆湖盆发展时期；相反，二叠、三叠纪时的扬子地台仍然浅海广布，发育了一套海相碳酸盐岩。

从图 2 中可以看出，塔里木盆地的下古生界剖面有一个既不同于鄂尔多斯（华北）盆地、又不同于四川（扬子）盆地的鲜明特点——发育了一套厚达 5000~7000m 的中、上奥陶统黑色砂泥岩。

塔里木盆地东北部的满加尔凹陷中心，沉积岩最厚达 14000m，其中寒武—奥陶系厚达 7000m，占 1/2。这里并不是寒武系和下奥陶统的沉降中心，其厚度分别只有 500m 和 800m（图 3a、b）；而中、上奥陶统则厚达 5600m，最厚为 8500m（图 3c、d），占寒武—奥陶系的 80%。可见，满加尔凹陷实际上是 O_2+3 的深凹陷，贾承造（1990）称之为“库满坳拉槽”^[1]。

满加尔凹陷南、北两侧的钻井和地面露头揭示,这套巨厚的中、上奥陶统黑色砂泥岩,是一套深海槽盆相复理式浊流沉积,其中的泥岩化石门类单调,以放射虫、笔石等几种浮游生物为主,少量三叶虫也是深海环境的变种。有机碳含量很低。砂岩中80%以上是火山岩屑,十分致密,砂泥比约为40:60。两口钻井揭露的这套 O_{2+3} 复理式砂泥岩,总厚度超过3500m(不全,图4),在满加尔凹陷中心大于5000m,属超补偿盆地沉积。

实际上,这套 O_{2+3} 黑色砂泥岩,全盆地都有分布。只是从满加尔凹陷向西、向南,厚度减薄,相变为上部黑色泥岩、下部石灰岩的台地相沉积,泥岩中石灰岩夹层也增多。在塔中北斜坡,上部泥岩厚220~380m(图4,塔中12井);在塔中隆起以南的塘古孜巴斯凹陷,泥岩夹砂岩厚1050m(塘参1井);在塔北隆起南坡及西段厚500~660m,夹泥灰岩和石灰岩(轮南46井、英买2井);在西部巴楚隆起上厚200~250m(和4井、方1井);到了盆地西缘柯坪露头区, O_2 和 O_3 两套黑色泥岩共厚110m(大湾沟),之间是瘤状灰岩和泥质灰岩。

塔里木盆地这套 O_{2+3} 暗色碎屑岩夹碳酸盐岩,分布如此广泛,厚度如此巨大,特别是在满加尔凹陷中,这套复理式碎屑岩竟厚达5000~8500m,这在中国三大板块中绝无仅有,的确是它的一大特点。与塔里木盆地相比,四川盆地中、上奥陶统厚不过100m左右,其中 O_3 五峰页岩不过几十米;鄂尔多斯盆地则主体部位完全缺失 O_{2+3} 地层,西缘的贺兰坳拉槽沉积了 O_2 的平凉组泥、砂岩,最厚不过2000m,分布范围有限,与塔里木盆地不能比。 O_{2+3} 巨厚的复理式碎屑沉积,代表着中、晚奥陶世塔里木盆地东部的剧烈沉降,速度可达250m/Ma(金之钧,1995)。如果注意到在这段约40Ma的时间内,塔里木板块突然以极大的速度,从南纬20°C的古特提斯洋中向北纬20°C大幅度漂移(方大钧,1995),而漂移的前

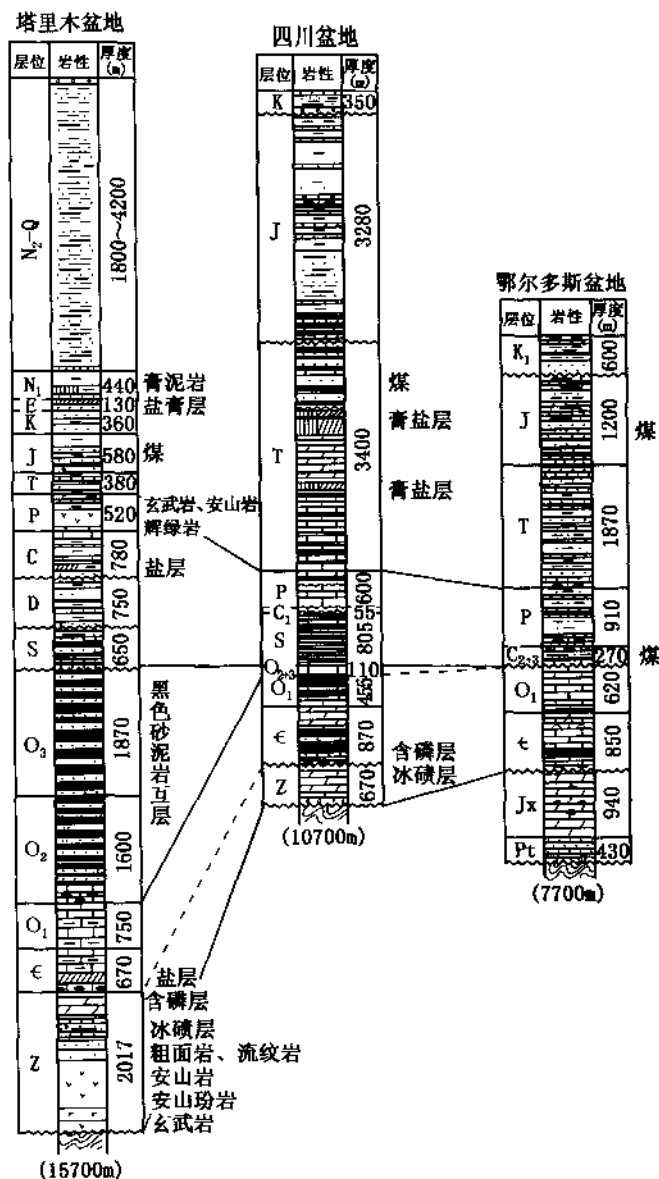


图2 塔里木、四川、鄂尔多斯三个盆地地层剖面对比图

锋正是盆地东北部的“库满坳拉槽”，那么这次剧烈沉降，就不是偶然的了。

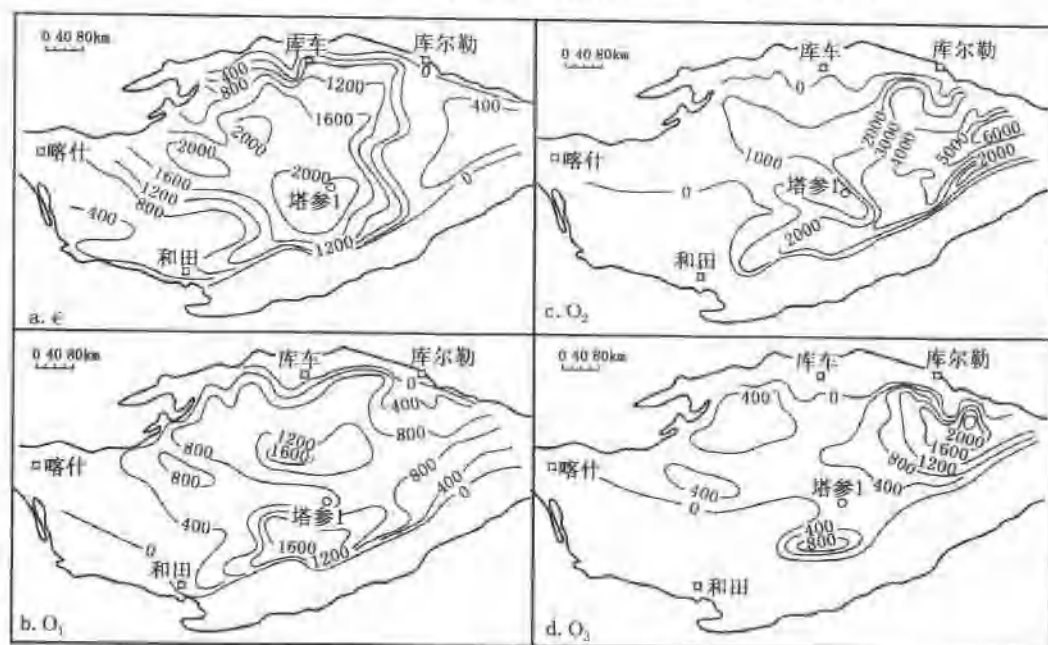


图3 塔里木盆地寒武系和下、中、上奥陶统残余厚度图(单位: m, 据贾承造图修改)

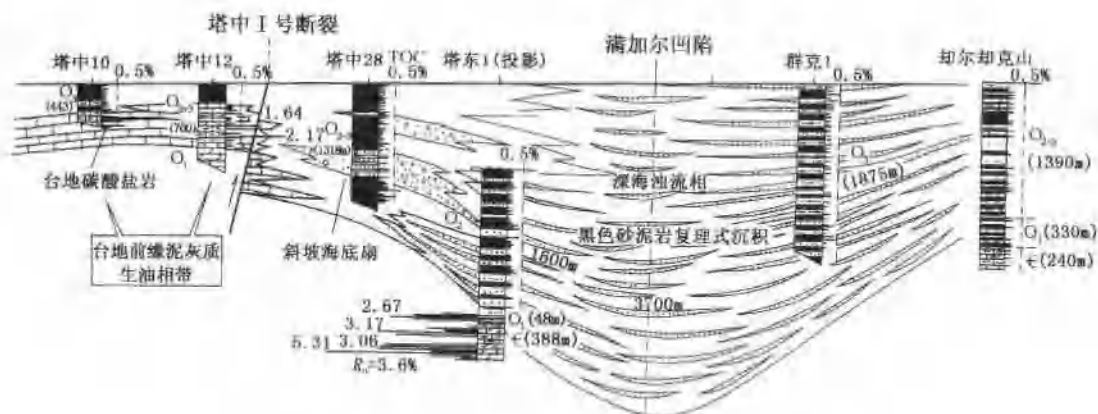


图4 满加尔凹陷南北向中, 上奥陶统沉积相横剖面图

正是这次沉降,使塔里木盆地比四川盆地和鄂尔多斯盆地多出了一套巨厚的 O_2-3 地层。从下文中可见,尽管它在满加尔凹陷之中是一套深海浊流相砂泥岩,不生油,但在有利的相带上就相变为一套正处于生油高峰期的工业性烃源岩。

3 海相工业性烃源岩的有机质丰度标准

20 世纪 70 年代以来, 中国地学工作者针对我国古生代陆表海碳酸盐岩有机质丰度低

($w(\text{TOC}) = 0.1\% \sim 0.2\%$)^①、成熟度高 ($R_o > 1.5\%$) 的特点, 提出碳酸盐岩烃源岩的有机质丰度标准(或下限值)为 $w(\text{TOC}) > 0.1\%$ ^[2,3], 并且为石油勘探部门沿用至今。采用这样的低标准, 结果是: 碳酸盐岩烃源岩无处不在, 有的地区厚度在千米以上, 但勘探效果却很不理想。

我们想阐明几个观点:

(1) 中国海相烃源岩主要不是碳酸盐岩, 还有多套高有机质丰度的泥岩^[4], 而海相泥岩烃源岩的丰度标准分歧不大, 一般取 $w(\text{TOC}) > 0.4\%$; 也有少数学者对高成熟度泥岩提出过 $w(\text{TOC}) > 0.3\%$ (或 0.2%) 的标准^[5,6], 但并未被普遍采用。

(2) 我们不反对 $w(\text{TOC}) > 0.1\%$ (甚至更低) 的岩石作为一般意义上的“烃源岩”, 因为“绝大多数岩石都含有机质, 总能生成一些烃”(J. M. 亨特, 1995), 但这只有理论意义。作为勘探家, 关心的不是生成一点点晶洞油、裂缝油的“烃源岩”, 而是那些能够生成和排出烃类、其数量足以保证经过运移、散失后仍能聚集成工业性油气藏的“工业性烃源岩”, 亨特把它叫做“有效烃源岩”^[3]。这就决定了工业性烃源岩的有机质丰度标准不能太低。

(3) 碳酸盐烃源岩 $w(\text{TOC}) > 0.1\%$ 的下限值是怎样提出的? 1973、1974 年, 傅家谟、周中毅教授等根据 Gehman J. r. H. M. 的资料 (1962): 现代钙质淤泥和泥质淤泥的 TOC 平均含量相当 (分别为 1.2% 和 1.0%); 但石化为岩石后, 泥岩的 TOC 平均质量分数 (1.14%) 则是碳酸盐岩 (0.24%) 的 5 倍^[6]。这说明泥岩在成岩过程中并无大量有机质损失, 而古代碳酸盐岩的损失量则超过 80% 。他们认为: 既然国外泥岩生油岩的标准是 $w(\text{TOC}) > 0.5\%$, 则可“将碳酸盐岩生油岩的有机碳含量标准降低约 5 倍, 定为 0.1% ”^[2]。这就是 $w(\text{TOC}) > 0.1\%$ 下限值的由来。

从以上表述中可以看出:

(1) 碳酸盐岩有机碳含量低, 并不是“中国特色”, 而是世界普遍现象。

(2) 碳酸盐岩中 80% 的有机碳, 是从含水钙质淤泥到石化碳酸盐岩的早期成岩过程中, 经特有的、不同于泥岩的晶析、溶解、胶结、交代等反复作用就丢失了^[7,8], 而并非热演化损耗的结果。换句话说, 碳酸盐岩中的有机碳含量原来就低, 还未等到进入“成烃门限温度”之前, 就大量丢失掉了; 因此, 使用各种热模拟实验或理论推导来求取碳酸盐岩的“原始有机碳恢复系数”(有的恢复到 3 倍以上), 就失去了理论前提。

(3) 不少人根据 Gehman 的资料, 认为碳酸盐岩的 TOC 质量分数虽然比泥岩低 4 倍, 但烃的平均质量分数却同泥岩一样, 都是 100×10^{-6} (对碳酸盐岩来说, 其中一部分是运移烃、次生烃), 由此得出: 碳酸盐岩的烃转化率 (烃/有机碳) 比泥岩高 4 倍, 不需要像泥岩那样多的 TOC 质量分数 (0.5%) 就可成为烃源岩, 所以要降低标准。但是, R. W. Jones 对前苏联 297 块碳酸盐岩和钙质泥岩的研究证明^[9]: 碳酸盐岩含量与烃转化率之间没有明显关系。碳酸盐质量分数高达 $96\% \sim 98\%$ 和低到 $9.7\% \sim 51.7\%$ 的两组岩石, 烃转化率是一样的。可见, 所谓“碳酸盐岩母质好, 烃转化率高, 可以降低 TOC 标准”的说法, 根据不足。

(4) 不少作者通过热模拟实验或数学模型来求取碳酸盐岩和泥岩开始排烃时的 TOC 下限值——“排烃下限”。且不论这类实验或推导与地质条件相差多远, 就从工业性烃源岩的

① $w(\text{TOC})$ 即岩石中的“总有机碳”或“残余有机碳”的质量分数。

要求来说, 刚刚能够排出的烃类数量, 远不能满足二次运移中的散失量, 也难以形成油气藏; 由此得出的有机碳“排烃下限”, 自然就远小于工业性烃源岩的有机碳下限^[10]。郝石生教授曾经指出: 碳酸盐烃源岩主要靠热增压作用形成的微裂缝排烃, 而 $w(\text{TOC})$ 低到 $0.1\% \sim 0.2\%$, 热增压作用就很微弱, 难以形成微裂缝排烃过程^[11]。

(5) 我们认为: 工业性烃源岩的有机质丰度标准(下限值) 很难用模拟实验或数学推导来求取(因为碳酸盐岩的生、排烃机理并不完全清楚, 排烃量、运移量、散失量、“排聚系数”也很难求准), 而应当由勘探实践来确定。

表 1 世界碳酸盐岩烃源岩的 TOC 平均含量

实 例	平均的 $w(\text{TOC})$ (%)	资 料 来 源
寒武系—三叠系 436 个碳酸盐岩 (包括非烃源岩)	0.20	Gehman, 1962
18 个沉积盆地碳酸盐岩烃源岩	0.67	法国石油研究院, 1987
19 个世界重要碳酸盐岩烃源岩实例	3.10	Palacas, 1983
美国、澳大利亚、加拿大、沙特阿拉伯等 4 个重要碳酸盐岩烃源岩	3.4~4	Palacas, 1983

表 2 世界元古宇、古生界某些碳酸盐岩大中型油气田海相源岩的 TOC 含量

盆 地	油 气 田	产 层	烃 源 岩	$w(\text{TOC})$ (%)		资 料 来 源
				平均	最大	
东西伯利亚	尤罗勃金	Z	Z ₂ 泥灰岩、泥云岩, 泥岩	0.7~4	8.7	邱中建等, 1997
滨里海	田吉兹	C	D ₃ 黑色泥页岩 C ₃ P ₁ 泥灰岩	2 1.2	4	邱中建等, 1997
蒂曼-伯朝拉	乌克蒂尔(气田)	P	D ₃ 页岩	0.75~1.0		CFD
西加拿大	天鹅丘、红水等	D ₃	D ₃ 钙质泥页岩	5~1017		CFD
二叠	戈梅茨(气田)	O ₁	C ₁ 黑页岩	15~20		
	耶 茨	P	P ₁ 钙质页岩	1~1.5	2.0	CFD
	斯劳夫塔	P	P ₁ 页岩	2.8	4.4	
	帕克特(气田)	O ₁	O ₂ 页岩	2~8		
密执安	利马—印第安纳	O ₂	O ₂ 页岩、灰岩	1.3	4.23	
	奥尼安—斯西皮奥	O ₂	O ₂ 灰岩、泥岩	0.5~1.5		CFD
安纳达柯	俄克拉何马城	O, C	C ₂ 页岩	7.9	18.6	CFD
威利斯顿	卡滨溪	O ₃ , S	D ₃ 页岩、泥灰岩	3.8	10.3	Meissner, 1978
四川	威远(气田)	Z	Є ₁ 黑色页岩	1~1.5		CFD
	五百梯(气田)	C	S 黑色页岩	1.97~2.67		CFD
塔里木	和田河(气田)	C, O	Є ₁₋₂ 泥质云岩	0.8~0.9	2.43	塔指, 1997
鄂尔多斯	中部大气田	O ₂	C 泥岩、灰岩 O ₂ 灰岩 (?)	泥岩 2~4	10	夏新宇, 1999
				灰岩 1.0	5	
				0.20	0.90	

注: CFD = Carbonate Fields Database (Carbonate International)。

从表 1 和表 2 的资料中可以看出：①世界碳酸盐岩油气田的烃源岩主要是泥页岩，其次是泥灰岩；碳酸盐岩仅占 13%。②碳酸盐岩烃源岩的 $w(\text{TOC})$ 平均值 (0.67%) 大大高于一般碳酸盐岩 (0.20%)；大油气田的碳酸盐岩烃源岩则更高 (3.10%)。③碳酸盐岩大中型油气田海相烃源岩 (包括泥页岩) 的 $w(\text{TOC})$ 平均值绝大多数 $>0.5\%$ ，在 122 个油气田的烃源岩中占 98.4%；其中已证实的 18 个碳酸盐岩烃源岩， $w(\text{TOC})$ 平均为 2.3%，只有 1 个油气田的碳酸盐岩烃源岩 $w(\text{TOC})$ 平均为 0.28%，且被怀疑是取平均值把高的拉低，以及在隆起上取样无代表性所造成的。④工业性气源岩的 $w(\text{TOC})$ 质量分数并不比油源岩低^[10]。这是因为：气比油虽然更易从烃源岩中排出，但在二次运移和成藏中散失得也更多，“排聚系数”比油要小得多；两者一抵消，工业性气源岩与油源岩的 TOC 标准应当相近。

东西伯利亚尤罗勃钦大油气田——这是一个里费 (震旦) 系碳酸盐岩大油气田。过去中国代表团的多次考察报告说：东西伯利亚里费系碳酸盐岩的有机碳含量只有 0.11% 左右，也能生油。1997 年，我们亲自考察了这个油田^[12]，俄罗斯人认为：这套厚达 3200m 以上的低丰度碳酸盐岩，大部分并不生油，其抽提物碳同位素 ($-27\text{‰} \sim -31\text{‰}$) 与原油也不可比；真正的工业性烃源岩是里费系下部厚 300 左右的玛德林组黑色泥岩、泥灰岩和泥质白云岩， $w(\text{TOC})$ 平均为 0.17%，最高 2.11%，在凹陷中为 2.14%~7.14%，最高 8.17%。成熟度高， $R_o = 1.16\% \sim >2\%$ ；抽提物碳同位素与原油 (34‰) 可以对比。我们的观点是：海相工业性烃源岩，包括泥岩和碳酸盐岩， $w(\text{TOC})$ 应 $\geq 0.15\%$ ；在高、过成熟区可略为降低到 0.14%。那些不含泥质、 $w(\text{TOC})$ 低到 0.11%~0.12% 的纯碳酸盐岩和泥岩，不能成为工业性烃源岩。

4 塔里木寒武—奥陶系两套工业性烃源岩

塔里木盆地有 7 口区域探井打穿或揭开较厚的寒武系，最厚 2363m (和 4 井)；下奥陶统则有 64 口探井揭露，最厚 1405m (塔中 1 井)。

上寒武统和下奥陶统各是一套浅海台地相碳酸盐岩，总厚达 2500~3000m。经反复测定，各井 $w(\text{TOC})$ 只有 0.1%~0.2%，按上节的标准，不能成为工业性烃源岩。目前全盆地只有东端的塔东 1 井发现下奥陶统烃源岩，但不是碳酸盐岩，而是只有 48m 厚的黑土凹页岩， $w(\text{TOC}) = 0.86\% \sim 2.67\%$ ， $R_o = 2.13\%$ ，属过成熟烃源岩，分布范围不大。

盆地中巨厚的寒武—奥陶系，可识别出两套工业性烃源岩：

4.1 下、中寒武统高—过成熟烃源岩

分布在塔里木东部欠补偿盆地相和西部蒸发潟湖相带，共有 4 口探井钻遇 (图 5)。东部的塔东 1 和库南 1 井，寒武系上、中、下统钻厚 220~706m，是一套欠补偿盆地相黑色泥灰岩、泥质灰岩夹灰质、硅质泥岩，富含浮游奥氏藻、放射虫、海绵骨针等。TOC 含量为 0.5%~5.52%，两口井平均值分别为 1.24% 和 2.28%； $w(\text{TOC}) \geq 0.5\%$ 的层段厚 200~490m，平均厚 350m。实测 R_o 值为 1.74%~2.45%，属高—过成熟优质烃源岩。

西部巴楚隆起上的方 1 井及和 4 井，下、中寒武统钻厚 780~870m，是一套蒸发潟湖相泥质白云岩，出现在 400m 厚的盐层之下，含盐藻、球状甲藻等。 $w(\text{TOC})$ 为 0.5%~2.43%，两口井平均值分别为 0.81% 和 0.91%； $w(\text{TOC}) \geq 0.5\%$ 的层段厚 173~195m，平均 184m；实测 R_o 值为 1.65%~1.85%，属高成熟烃源岩。在盆地西缘柯坪露头区， ϵ_1

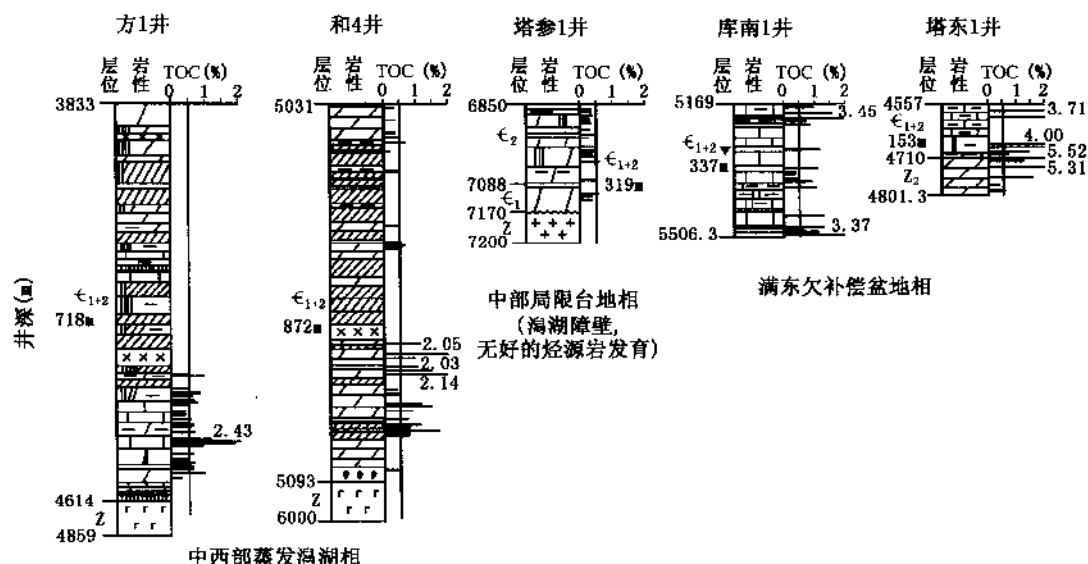


图5 塔里木盆地下、中寒武统欠补偿盆地和蒸发潟湖相烃源岩的 TOC 含量

底部还有 32.7m 厚的磷质、硅质岩和黑色页岩， $w(\text{TOC})$ 高达 7%~14%， $R_o = 1.88\%$ ，也属于高成熟烃源岩。

中部塔中隆起上的塔参 1 井， ϵ_{1+2} 钻厚只有 320m，是一套局限台地相白云岩， $w(\text{TOC}) = 0.2\% \sim 0.8\%$ ，大于 0.5% 的层段只有 38m， $R_o = 2.25\%$ ，已经过成熟，生烃能力很差。

寒武系工业性烃源岩的分布及现今成熟度分区见图 6a、图 8a。烃源区明显受沉积相带控制：盆地中部厚达 2000m 以上的浅海台地相碳酸盐岩，烃源岩不发育；而在东部的欠补偿盆地相（厚 200~700m）发育了优质烃源岩，在西部的蒸发潟湖相发育了中等烃源岩。寒武系烃源岩 R_o 普遍大于 2%，凹陷中部 $R_o > 4\%$ ，过成熟，只是在西部巴楚隆起上保留了一块高成熟区， $R_o = 1.65\% \sim 1.85\%$ 。

4.2 中、上奥陶统中等成熟烃源岩

如前所述，充填在满加尔凹陷之中、厚达 5000m 以上的 O_{2+3} 超补偿盆地相黑色复理式泥岩和砂岩， $w(\text{TOC})$ 只有 0.1%~0.2%（图 4），不是工业性烃源岩。但是，当它向台地相过渡时，就形成了两类工业性烃源岩：一类是盆地中部台缘斜坡泥灰质烃源岩，另一类是盆地西部半闭塞陆源海湾泥质烃源岩。

第一类是 O_{2+3} 台缘斜坡灰泥丘相烃源岩。在塔中北斜坡已有 26 口井揭露，在塔北南坡的轮南 46 井、48 井等井也有分布（图 7）。岩性为暗色泥灰岩、泥质泥晶灰岩、泥质条带、纹层状泥灰岩及灰质泥岩。其特点是：①岩性及 TOC 含量在纵向上很不均一，泥质条带、纹层、薄层泥岩在泥灰岩、泥质灰岩中频繁出现；②碳酸盐岩的泥质含量为 22.5%~58%；③ $w(\text{TOC})$ 值为 0.5%~5.4%。用岩心刻度测井确定： $w(\text{TOC}) \geq 0.5\%$ 的烃源岩厚度在塔中为 80~300m；④烃源岩的层位稳定，与 *Belodina*, *Plectodina*, *Yaoxianognathus* 化石带相对应；⑤富含各类底栖宏观藻、隐孢子和浮游的塔斯马尼亚藻、粘球形藻、丛粒藻，以及串管海绵、层孔虫、古苔藓和动物残片，宏观藻碎片不发荧光，浮游藻类发荧光；⑥实

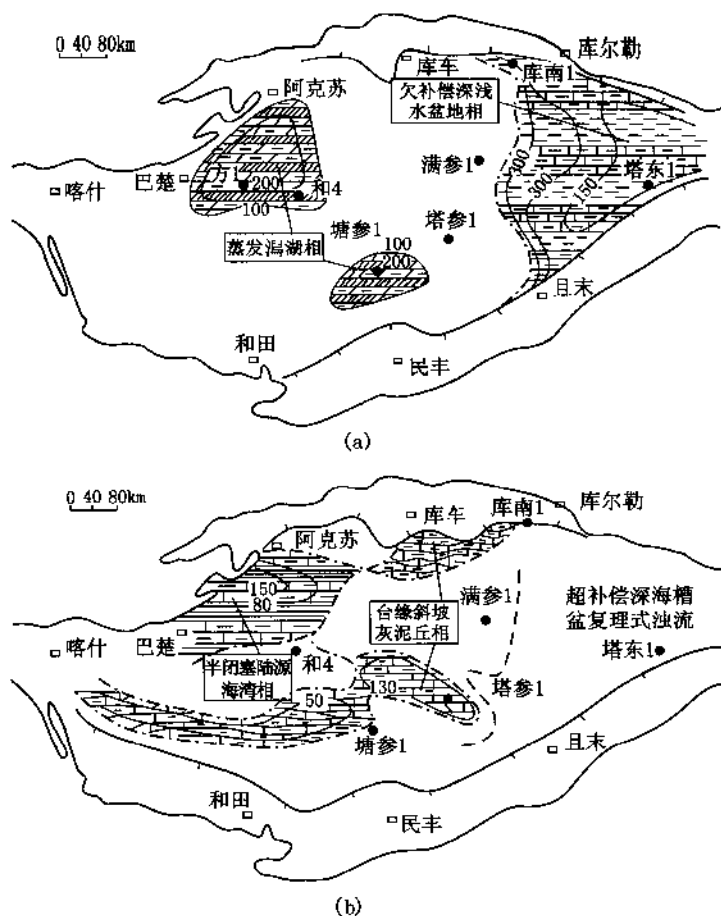


图6 塔里木盆地下、中寒武统 (a) 及中、上奥陶统 (b) 工业性烃源岩有利相带与分布区

测 R_o 变化于 $0.81\% \sim 1.30\%$ ，正处在生油高峰期。

第二类是 O_2+3 半闭塞陆源海湾相烃源岩。仅见于盆地西部柯坪大湾沟剖面 (图 7)，预计在阿瓦提凹陷中也有分布。岩性为两套 (O_2 萨尔干组和 O_3 因干组) 黑色页岩，富含始球藻、波罗的球藻等浮游藻类，与笔石、薄壳腕足类共生。稳定硫同位素分析证明属半闭塞环境。 w (TOC) 值为 $0.5\% \sim 2.87\%$ ，平均 1.56% ， w (TOC) $\geq 0.5\%$ 的页岩厚 53m，实测 $R_o = 1.1\% \sim 1.3\%$ 。

中、上奥陶统工业性烃源岩的分布及现今成熟度分区见图 6b、8b。烃源区同样受沉积相带控制：在厚达 5000m 以上的满加尔凹陷中，烃源岩不发育；而在南、北两侧的台缘斜坡和西北部半闭塞海湾中则有好的烃源岩。烃源区 $R_o = 0.8\% \sim 1.3\%$ ，正处在生油高峰；在西部阿瓦提凹陷已过成熟， $R_o > 2\%$ 。

我们认为：并非所有的生物标志物都可作为油/岩对比的可靠指标；它应当满足三个条件：一是确能反映某一源岩特殊生物先质的“指纹”化合物；二是不受成熟度影响（或变化方向相反）；三是不受排烃和运移的影响（或变化方向相反）。显然，甾烷系列比藿烷、三萜烷及更低碳数的萜类更好。我们选择了①甲藻甾烷和三芳甲藻甾烷（与甲藻及海相疑源类有