

天然气地球化学文集

TIANRANQI DIQIU HUAXUE WENJI

中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 ● 编

地质出版社

天然气地球化学文集

中国科学院兰州地质研究所气体地球化学
国家重点实验室 编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书共收集近年来气体地球化学国家重点实验室在各类期刊上已发表的天然气地球化学研究论文 90 篇,代表了当前天然气地球化学前沿领域的研究水平。本书内容包括:油气地质地球化学综合研究,低熟油气地质、地球化学研究,烃类形成、运移、赋存及模拟研究,稀有气体地球化学理论与技术,非烃气体地球化学,稳定同位素地球化学及应用研究等。

本书可供从事石油、天然气地质学,油气地球化学,同位素地球化学等专业的生产、教学和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气地球化学文集/中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室编.

-北京:地质出版社,2002.8

ISBN 7-116-03641-5

I. 天… II. 中… III. 天然气-地球化学-文集 IV. P618.13-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 049831 号

责任编辑:王大军 王龙生 戚学祥 余宏权 沈镭

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324579(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京科技印刷厂

开 本:787×1092¹/₁₆

印 张:37.25

字 数:900 千字

印 数:1—700 册

版 次:2002 年 8 月北京第一版·第一次印刷

定 价:100.00 元

ISBN 7-116-03641-5/P·2286

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

《天然气地球化学文集》

编辑委员会

主 编:刘文汇 陈践发 陶明信

委 员(按姓氏笔划排序):

王万春 刘文汇 孙明良 陈践发 陈国俊

李立武 张同伟 张晓宝 孟自芳 徐永昌

陶明信 程 洁 薛莲花

序 言

气体地球化学是当代地球化学领域中的新兴与前沿学科。中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室的建立,是紧密结合天然气国家重点攻关任务的需求应运而生的,也符合近代地球化学发展的趋势,并成为我国地球化学的新增长点。随着天然气国家重点科技攻关任务的进展和深化,不仅促进了天然气地球化学学科的发展与完善,推动了天然气勘探实践的突破与拓展,也带动了地球化学国家重点实验室的成长与提高。

为忠实记录气体地球化学国家重点实验室成长与发展的历史步伐,气体地球化学国家重点实验室汇集了近期的研究成果:包括油气地质、地球化学综合研究,特别是低熟油气地质、地球化学和烃类的形成、运移、赋存及模拟研究;稀有气体和非烃气体地球化学研究;稳定同位素地球化学与应用研究等最新的研究论文 90 篇,第三次编辑出版了《天然气地球化学文集》。

《天然气地球化学文集》的出版,充分证明了多年来气体地球化学国家重点实验室严格遵循实验室的研究方向和目标,紧密结合国家的重大需求和学科发展趋势,取得了令人鼓舞的成就。在研究领域上有新的拓展,在理论上有新的突破,在实践上有显著效益,在技术上有新的提高,年轻人才脱颖而出。祝愿《天然气地球化学文集》的出版,将为我国天然气地球化学研究的发展增添新的推动力。

中国科学院院士

欧阳自远

2002 年 5 月 20 日

前 言

我国是一个天然气资源较为丰富的国家。第二轮资源评价的全国天然气资源量为 $38 \times 10^{12} \text{m}^3$, 最近的估算量为 $50 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{m}^3$, 但直至 1985 年, 我国天然气探明储量仅为 $3.96 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。由于国家对天然气资源的极大关注, 从“六五”开始, 天然气研究连续被列为国家重点科技攻关项目, 天然气科技攻关的理论成果极大地推动了生产勘探实践的发展, 使天然气资源量转化为探明储量的进程大大加快。到 2000 年, 全国探明的气层气储量达 $2.9 \times 10^{12} \text{m}^3$, 从而保证了西气东输的资源储备, 也为今后天然气在我国能源结构中占有更高的份额打下了基础。

天然气的科技攻关项目中, 地学研究是极为重要的内容。它是将资源量转化为探明储量的科学保证。正是国家的急迫需求, 极大地促进了天然气地学的发展, 而天然气地学理论的发展和完善, 又成为推动天然气勘探实践取得突破性进展的理论基础。我国的天然气地球化学这一分支学科正是在这种历史背景下, 获得了高速的发展。一批天然气地球化学的科技骨干成长、成熟; 一批先进的实验室相继建成; 一批天然气地质和地球化学专著先后出版; 一批高质量论文相继在国内外发表; 中国科学院兰州地质所气体地球化学国家重点实验室, 就是在参加和完成天然气国家重点科技攻关任务的同时成长和建立的。除完成了一批专著发表了一批论文外, 为了更好地进行交流, 我们先后两次汇编天然气地球化学文集。1985 年在当时的情况下, 我们还只能是以译、编为主。在气体地球化学国家重点实验室 1994 年第二次编辑出版文集时, 已完全是国家实验室科技人员发表的论著, 共计 53 篇, 其中《中国科学》、《科学通报》上发表的论文已达 16 篇, 充分体现了国家实验室科技人员在攻关任务带动下的快速成长。当这次国家重点实验室再次出版文集时, 尽管只汇编了部分论文, 但文稿量已达 90 篇, 其中 SCI 收录 19 篇。对发达地区的兄弟单位, 这不是太大的成绩, 但就我们的实际而言, 这种变化还是应予以肯定的。这次文集的另一特点是作者更多、青年作者的文章增多, 文稿内容更广、讨论的层次更深, 这些都是极为可喜的。文集可概略地分为以下几个部分。

油气地质地球化学综合研究: 收录了 14 篇论文, 如果将未熟-低熟油气和烃类的形成、运移和模拟等都包括在这一部分, 则论文数达 38 篇。这批论文包括首次将 AC-AED(等离子体发射光谱)用于油气地球化学研究, 对“过渡带气”较

全面的探讨,低演化油气的地球化学,不同赋存状态有机质烃气的研究等。由于这些论文内容较新,研究较深,不少被 SCI 收录。此外,还包括对油气形成理论的综合讨论,煤型气区的构造环境和气藏勘探方向,塔里木盆地等大气区天然气地球化学特征,油气形成新的外生营力的探索以及油气运移的地球化学等油气地学的前缘和热点进行了广泛而深入的探讨。

稳定同位素地球化学及应用:收录论文 15 篇,这是国家实验室重点研究的方向之一。这部分论文包括了如含油气盆地同位素地球化学研究概述综述类,也包括一些有创意或对某方面深入剖析的文章,如有机质芳核与侧链碳同位素组成特征,酸解烃碳同位素组成与气源对比等。文集这一部分还包括了对于酞根、原油、沉积物有机质碳和氢同位素地球化学探讨,这些文献对该领域研究很有启迪。

稀有气体研究:在文集中占有比较大的篇幅,共有各种论文 26 篇。气体地球化学国家重点实验室把稀有气体同位素研究作为一个有别于烃类地球化学的新体系,引入到油气的地学研究领域。由于稀有气体的稀少及其化学性质上的惰性,它们成为地学研究中的一种非常有效的示踪手段。又因为它们与烃类的形成和产出有着完全不同的内在制约机制,所以它们得出的信息常常可以从不同的层面来阐明天然气生、运、聚的特点,有时甚至比烃类地球化学更有说服力或成为非常有力的旁证。本文集收录的 26 篇文稿不仅讨论了天然气生、运、聚相关的地球化学,而且探讨了壳幔交换、幔源氮的工业储聚、氮同位素分布与地热场分布和构造域等问题,对研究相关领域很有意义。

非烃部分:共收录论文 8 篇,讨论了天然气中氮、硫同位素地球化学在油气地学中的应用,汞含量的影响因素和意义,幔源挥发分成藏的构造和地球化学特征及幔源包体的质谱分析等。非烃气体是天然气地球化学研究较薄弱的环节,这些文献涉及了主要的非烃气体,讨论也较为深入,对此领域研究可供借鉴。

希望本文集的出版能促进与天然气地球化学同仁的交流与合作,并为天然气地学发展做出绵薄的贡献。

徐永昌

2002 年 4 月

目 录

第一部分 油气地质地球化学综合研究

陆相生油及其衍生热点	徐永昌 (3)
成烃理论的发展及国外未熟-低熟油气的分布与研究现状	刘文汇, 黄第藩, 熊传武, 徐永昌 (14)
烃类的有机(生物)与无机(非生物)来源	
——油气成因理论思考之二	刘文汇, 王万春 (38)
试论成烃的地球化学场	刘文汇 (48)
我国凝析油的成因类型及其地球化学特征和意义	陈践发, 沈平, 文启彬 (56)
天然气成因类型及判别标志	刘文汇, 徐永昌 (64)
塔里木盆地东部地区天然气地球化学特征及成因探讨(之一)	陈践发, 徐永昌, 黄第藩 (70)
塔里木盆地东部地区天然气地球化学特征及成因探讨(之二)	陈践发, 徐永昌, 黄第藩 (77)
不同类型烃源岩气态烃的生成特征研究	
——来自差热-色谱联机热模拟实验方法的证据	史基安, 王琪, 赵欣 (83)
中国煤型气区的构造环境、典型气藏及勘探方向 I	
——上古生界煤型气	陶明信, 徐永昌, 陈践发, 沈平 (90)
中国煤型气区的构造环境、典型气藏及勘探方向 II	
——中、新生界煤型气	陶明信, 徐永昌, 陈践发, 沈平 (98)
论中国含油气区的构造环境性质、分区及其成油气专属性	陶明信 (107)
深部热流体对油气成藏的影响	高波, 陶明信, 王万春 (118)
应用原油 GC-AED 苯并噻吩类谱图判识沉积环境及成熟度	沈平, 王万春, 张晓宝, 沈润梅 (124)

第二部分 低熟油气地质、地球化学

未熟-低熟油的同位素组成特征及判识标志	徐永昌, 沈平, 刘文汇, 关平, 黄第藩 (133)
生物-热催化过渡带气形成机制及演化模式	刘文汇, 徐永昌, 史继扬, 雷怀彦, 张柏生 (141)

生物-热催化过渡带油气关系	刘文汇, 徐永昌	(149)
过渡带天然气地球化学特征	刘文汇	(158)
生物-热催化过渡带气及其综合判识标志	刘文汇, 徐永昌, 雷怀彦	(168)
过渡带成烃地球化学场分析		
——以济阳坳陷生物-热催化过渡带气为例	刘文汇	(173)
云南中、小盆地低演化天然气地球化学特征		
.....	徐永昌, 沈平, 郑建京, 刘文汇, 关平	(180)

第三部分 烃类形成、运移、赋存及模拟研究

油气形成的力化学作用

——油气地质理论思考之一	刘文汇	(187)
--------------------	-----	-------

一种新的成烃机制

——力化学作用及其实验证据

.....	刘文汇, 徐永昌, 张宇春, 廖永胜, 张林晔, 宋一涛	(194)
-------	------------------------------	-------

克拉通盆地内油气微渗漏与浅层烃异常	张同伟, 王先彬, 程学惠, 申歧祥	(200)
-------------------------	--------------------	-------

克拉通盆地内油气垂向微渗漏的烃类地球化学

——以鄂尔多斯盆地城川1井为例

.....	张同伟, 王先彬, 申歧祥, 程学惠, 王锡福, 杨晓元, 孙六一	(202)
-------	-----------------------------------	-------

天然气运移的气体组分的地球化学示踪	张同伟, 王先彬, 陈践发, 王雅丽	(211)
-------------------------	--------------------	-------

油气组分及同位素组成特征在莺琼盆地油气二次运移研究中的应用

.....	陈践发, 沈平, 黄保家, 张启明	(218)
-------	-------------------	-------

烃源岩有机质的不同赋存状态及定量估算	关平, 徐永昌, 刘文汇	(224)
--------------------------	--------------	-------

储层解析气研究的突破及其意义	徐永昌, 张晓宝, 沈平, 刘文汇	(228)
----------------------	-------------------	-------

我国不同赋存状态烃类气体的研究现状与展望	张晓宝, 徐永昌, 沈平, 刘文汇	(231)
----------------------------	-------------------	-------

煤层气

——新兴的能源资源及其灾害与环境问题	陶明信, 高波, 李晶莹	(237)
--------------------------	--------------	-------

油气生成热模拟实验研究进展	姜峰, 张友联, 杜建国	(244)
---------------------	--------------	-------

塔里木盆地石炭系烃源岩热模拟实验地球化学研究

——I. 气态和液态产物的产率及演化特征	段毅, 周世新	(251)
----------------------------	---------	-------

塔里木盆地石炭系烃源岩热模拟实验研究

——II. 生物标志化合物的组成和演化	段毅, 周世新	(256)
---------------------------	---------	-------

煤岩及煤岩加不同介质的热模拟地球化学实验

——气态和液态产物的产率以及演化特征

.....	刘全有, 刘文汇, 秦胜飞, 孟什祥, 王万春	(261)
-------	-------------------------	-------

高温超高压模拟实验研究

——I. 温压条件对有机质成熟作用的影响	姜峰, 杜建国, 王万春, 曹正林	(266)
----------------------------	-------------------	-------

高温超高压模拟实验研究

——II. 高温高压下烷烃产物的演化特征	姜峰, 杜建国, 王万春, 曹正林	(271)
----------------------------	-------------------	-------

第四部分 稀有气体地球化学理论与技术

天然气中的幔源稀有气体.....	徐永昌	(283)
中国含油气盆地天然气中氦同位素分布	徐永昌, 沈 平, 陶明信, 孙明良	(291)
东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学——I. 氦资源的新类型: 沉积壳层幔源氦的工业储集	徐永昌, 沈 平, 陶明信, 刘文汇	(296)
东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学 ——II. 幔源挥发分中的氦、氩及碳化合物	徐永昌, 沈 平, 刘文汇, 陶明信	(304)
中国大陆含油气盆地的氦同位素组成及大地热流密度	杜建国, 徐永昌, 孙明良	(310)
中国中西部盆地若干天然气藏中稀有气体同位素组成	徐 胜, 徐永昌, 沈 平, 中井俊一, 胁田 宏	(317)
中国东部盆地天然气中氦同位素组成及其地质意义	徐 胜, 徐永昌, 沈 平, 王先彬, 杜建国, 中井俊一, 胁田 宏	(322)
中国东部盆地天然气中氩同位素过剩	徐 胜, 徐永昌, 沈 平, 王先彬, 杜建国, 中井俊一, 胁田 宏	(325)
天然气中氦同位素分布及构造环境.....	徐永昌	(329)
鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪	刘文汇, 孙明良, 徐永昌	(335)
大别山榴辉岩氦同位素组成及其地质意义	杜建国, 张建珍, 孙明良, 张友联	(341)
天然气研究中的稀有气体地球化学应用模式	沈 平, 徐永昌, 刘文汇, 陶明信	(345)
中国天然气中稀有气体丰度和同位素组成	徐 胜	(355)
济阳拗陷天然气氦同位素特征及二氧化碳成因与第三纪岩浆活动的关系	孙明良, 陈践发, 廖永胜	(359)
大别山榴辉岩的单矿物中 He、Ar 同位素特征.....	孙明良, 叶先仁, 杜建国	(364)
地球岩石中稀有气体研究进展	叶先仁, 孙明良	(367)
地下水补给、循环和混合作用的氦同位素证据 ——以石羊河、黑河流域为例	史基安, 王先彬, 王 琪, 赵兴东, 李春园, 孙明良	(376)
天然气中稀有气体同位素的分析技术.....	孙明良	(382)
天然气中 Ar 同位素测量的新技术	孙明良	(389)
影响烃类天然气中稀有气体同位素准确测量的干扰因素与消除途径.....	孙明良	(395)
岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析	叶先仁, 吴茂炳, 孙明良	(401)
固体样品中 He、Ar 同位素的质谱测定	孙明良, 叶先仁	(407)
水中氦同位素的质谱分析.....	孙明良	(415)
真空电磁破碎器粉碎盐岩颗粒及稀有气体同位素组成测量的实验研究	孙明良, 陈践发	(419)

Xe _s -Xe _n 热年代学方法	叶先仁, 孙明良	(424)
氩离子注入模拟太阳风对月岩的作用	李立武, 魏宝文, 王先彬, 曾文炳	(430)

第五部分 非烃气体地球化学

中国东部幔源气藏聚集带的大地构造与地球化学特征及成藏条件	陶明信, 徐永昌, 沈平, 刘文汇	(435)
中国东部幔源流体的活动特征与成藏效应	陶明信, 徐永昌, 韩文功, 高波, 马锦龙, 王万春	(442)
天然气中氮的地球化学特征	杜建国, 刘文汇, 邵波, E. Faber	(448)
天然气中硫化氢硫同位素组成及沉积地球化学相	沈平, 徐永昌, 王晋江, 王兰生	(453)
含油气盆地中天然气汞含量的主要影响因素	陈践发, 王万春, 朱岳年	(459)
辽河拗陷天然气中汞的成因及地球化学意义	陈践发, 妥进才, 李春园, 陈振岩, 张占文, 朴明植	(463)
幔源岩流体包裹体气态物质组成质谱分析	李立武, 刘刚, 王先彬	(466)
橄榄石热解氢释放过程的分析	李立武, 王先彬, 张铭杰	(468)

第六部分 稳定同位素地球化学及应用

窑街煤田 CO ₂ 浓度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值空间变化的构造地球化学特征	陶明信, 徐永昌, 陈发源	(473)
沉积有机质芳核与侧链碳同位素组成分布特征	刘文汇, 于心科, 张柏生	(477)
鄂尔多斯盆地酸解烃碳同位素组成与气-源对比	张同伟, 王先彬, 陈践发, 邵波, 李春园, 徐雁前	(481)
有机碳和有机分子碳同位素的地球化学意义	王万春, 吉利明	(485)
不同沉积环境及成熟度干酪根的碳、氢同位素地球化学特征	王万春, 徐永昌, M. Schidlowski, E. Faber, W. Stahl	(490)
辽河盆地天然气中重烃异常富集重碳同位素的成因探讨	陈践发, 陈振岩, 季东民, 于深, 赵长虹, 王先彬	(496)
煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理	刘文汇, 徐永昌	(500)
煤型气烃类组分的稳定碳、氢同位素组成研究	陈践发, 李春园, 沈平, 应光国	(507)
高温高压模拟实验气态产物碳同位素演化特征	姜峰, 杜建国, 谢鸿森, 王万春	(517)
天然气、原油、干酪根的氢同位素地球化学特征	王万春	(522)
天然气运移的气体同位素地球化学示踪	张同伟, 陈践发, 王先彬, 邵波, 李春园	(527)
石油碳、氢同位素组成的研究	沈平, 徐永昌	(534)
含油气盆地油气同位素地球化学研究概述	徐永昌, 刘文汇, 沈平	(540)

浙江煤山长兴阶有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 层序分布特征及古气候意义	王万春, 李玉成	(551)
现代松粉热模拟产物的碳、氢同位素特征及其地质意义	王万春, 吉利明	(558)

第七部分 其 他

华北燕山地区中新元古代沉积记录及其古气候、

古环境特征	吉利明, 陈践发, 郑建京, 王 杰	(567)
超临界萃取与气相色谱-质谱联用技术在岩石样品生物标志物分析中的应用		
.....	王永莉, 王先彬, 李立武, 孙明良, 杨 辉	(578)
高真空金属样品处理系统的研制	李立武, 王先彬, 杨 辉, 王永莉	(580)

第一部分

油气地质地球化学综合研究

陆相生油及其衍生热点

徐永昌

(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

【摘要】 对陆相生油而言,关键性的问题是何种地质背景是形成优质油源层和向成油转化的环境。认识之一是古气候和古构造有利因素的叠加,如“陆相、潮湿、拗陷”的学说。20世纪70年代以来陆相生油地球化学研究在陆相油源岩的质、量,成烃转化特征,油气源对比等方面确证了陆相沉积中存在优质源岩和向成油转化的条件,并足以保证陆相大、中型油气田形成的油源供给。陆相有机质的特性衍生出近年油气地学的3个热点,即煤成气、煤成油、未熟-低熟油气,并取得了理论和实践的双丰收。笔者在文中提出了陆相生油的地质构架——环境控源、源控藏。

【关键词】 陆相生油 有机质 煤成油 未熟油

1 概述

理论源于实践又反馈于生产实践,使生产实践进入自觉的阶段。几百年来,关于石油的成因,一直有生物成因和非生物成因两种认识的分歧。由于生物成因理论更科学、更系统、更完整,特别是它对油气勘探实践有效的指导作用,可以说本世纪以来科学界的石油成因概念基本是在有机成因的基础上展开,至少可以说,目前勘探证实的大、中型油气田是与有机成因相关联的。本文的讨论当然以此理论为基础。

从20世纪初到40年代末,世界油气勘探所发现的油气田主要与海相地层相关。从有机成因的角度,海相沉积中具有丰富的有机质,而且其组成有利于转化成为石油,在这种地质实践的基础上所总结、升华形成的石油成因理论认为,石油形成于海相沉积,海相成油理论占有统治地位应当说与石油勘探史的实践相一致,是历史的必然。由于20世纪50年代以前在陆相沉积中没有发现中型以上的油气田,加之对于陆相沉积中有机质(除煤以外)的丰富程度、有机物质的特性缺乏深入的认识,认为陆相沉积贫油,客观地说也是完全可以理解的。正因为如此,在当时陆相地层中尚未展开大规模勘探,一批陆相大、中型油气田尚未发现的情况下,从陆相沉积中存在规模不大的油气田和存在较广泛的油气显示,以石油有机成因的基本论点为依据,一批先觉的地质学家如潘钟祥、黄汲清、谢家荣等先后提出陆相可以生油,陆相沉积可以找到丰富的油气是极为难能可贵的。有关史实在黄第藩^[1]、

收稿日期:1999-10-25;修改日期:1999-11-09;刊于《第四纪研究》,2000年1月第20卷第1期,56~67

第一作者简介:徐永昌,男,1932年生,研究员,博士生导师,石油地质专业,从事气体及同位素地球化学研究。该作者在本论文集中共有10篇论文

石宝珩^[2]等的有关论文中作了极为精辟详尽的总结,本文不少部分转引自他们的文章。

从狭意的石油成因角度讲(即不包括成藏),其核心是成油母质的丰度、质量及其向石油的转化,其精髓即在 20 世纪 70 年代得以完善提出的干酪根热降解成油理论。按此理论,只要在陆相地层中有足够丰富的有机质,又具有在热力作用下降解为油气的地质条件,则陆相生油和海相生油在本质上是相同的,是无原则差异的。因此,讨论陆相生油,或者更确切地说陆相能否形成大、中型油气田是陆相沉积能否蕴含足够丰富的有机质,这些有机质是否具有可以转化为油气的特性,即在陆相条件上能否形成量丰质优的油气源岩,如果可以是什么样的条件,也就是说与海相生油相比,对陆相生油问题更为尖锐、更为明确地提出了陆相生油所必需的环境条件问题。对此我国学者提出了许多重要的学术观点。以侯德封为代表强调在陆相条件下,古气候带的分布是控制陆相生油的重要条件,他提出“有无石油的关键不在于是陆相还是海相地层,而首先要确定的是古气候带和构造区”,“潮湿和干燥气候的时代转变有利于生油层的形成”^[3]。他的这种认识是把古气候和构造因素叠加起来,这无疑对中国科学院兰州地质研究所基于西北地区油气勘探成果,提出陆相生油的控制因素为“内陆、潮湿、拗陷”的学术观点,具有根本的启迪和指导作用。

有的学者较强调构造的因素如田在艺等强调“长期的深拗陷有利于生油层的形成”。以朱夏为代表非常强调构造因素,认为“唯一的条件可能只是在当时运动体制下的有利于还原作用的环境”。尽管不同学者强调的方面各有侧重,也存在有分歧的认识,但笔者认为,古气候和构造因素的复合叠加,构成一种有利生物繁衍,形成丰富的有机体的堆积,适宜的沉积条件下有利于生物有机体的埋藏、保存和向油气转化无疑是陆相油气形成的基本环境要素。可以认为干酪根降解成油强调的是油气形成的热力学和化学机制,而“陆相、潮湿、拗陷”一类理论强调了环境对陆相油源层的控制意义,也许可以将陆相大、中型油气形成的地学构架之一表述为“环境控源,源控藏”。

20 世纪 70 年代以来,陆相生油的地球化学研究在我国得到了快速的发展,以傅家谟、黄第藩为代表的一批学者,在陆相有机质特征及其分类,生物标记化合物指相,定年及成油前身生物追踪和油气-源岩对比,陆相生油的门限,陆相有机质形成的原油所具有的理化标记,陆相源岩的实验地球化学研究以及陆相盆地油气的资源量计算等做出了卓有成效的贡献,从而使我国陆相生油研究将宏观的地学背景和微观物质探索有机地结合起来,全面地论证了陆相沉积可以形成大、中型油田。我国油气资源量经严格科学的核算,石油为 800 余亿吨,天然气约 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。我国石油探明储量和产量已分别列世界的第 7 位和第 5 位。近两年我国油气储产量如表 1 所示,这些储产量也基本来自陆相沉积中有机质的转化即陆相形成的油气。

表 1 近两年中国油气产量和储量(未计台湾省)*

Table 1 The yields and reserves of petroleum in China in recent years

1997 年	1998 年
原油产量:1.6044 亿吨(海洋:0.16287 亿吨) 天然气产量: $223.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ (海洋: $40.5 \times 10^8 \text{ m}^3$) 石油探明储量:190.66 亿吨(可采储量 55 亿吨)	原油产量:1.6052 亿吨(海洋:0.16319 亿吨) 天然气产量: $222.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ (海洋: $38.63 \times 10^8 \text{ m}^3$) 石油探明储量:204.2 亿吨(海洋:17.6 亿吨) (可采储量 59 亿吨)
天然气探明储量: $1.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ (可采储量 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3$)	天然气探明储量:2.048 万亿吨(海洋: $0.395 \times 10^8 \text{ m}^3$) (可采储量 $1.27 \times 10^8 \text{ m}^3$)

* 黄第藩私人通信。

2 陆相生油的地质构架——环境控源、源控藏

就有机成油,干酪根热降解成油的石油成因理论而言,陆相生油的关键和核心问题是陆相沉积条件下,能否形成和保存丰富的有机质而且这种有机质具有成油的潜力,并在其埋藏保存后向石油转化,从而尖锐明确地提出了在陆相条件下什么样的地质背景是形成量丰质优的生油源岩的控制因素。

黄第藩在“陆相生油研究史略”^[1]一文中对此作了总结性概述,本文这一部分基本源于该文的资料。

20 世纪 50~60 年代,我国不少学者就陆相生成油气的地质背景著文予以论述。例如:

1954 年,李四光从地质力学和西北大地构造型式的观点提出中国石油勘探的远景,他把大地槽的边缘地带和较深的大陆盆地看作找油的有利地区。对于东部,在 50 年代,他也多次强调过在新华夏沉降带中找油的重要意义。

1955 年,黄汲清从构造的观点指出过鄂尔多斯西缘的找油方向。

1957 年,潘钟祥在“中国西北部陆相生油问题”^[4]一文中指出:“现代陆、海沉积物中含同样的碳氢化合物等资料证明陆相生油是完全可能的”,“当中生代及第三纪时,在我国西北有许多大小不等的内陆盆地,其中沉积了湖相、沼泽相及河流相的沉积物,产生了丰富的石油和煤的资源”。

1957 年,谢家荣指出:“大陆沉积中的有机物可能主要是由陆生植物分异出来,而三角洲、潟湖和大的内陆湖皆为沉积大规模生油层的处所。我国西北许多第三纪和中生代油田……陆相地层才是最可能的生油层”。

在此笔者不能满怀深情地提及侯德封教授,我们一代人乃至我们师辈尊称的侯老对陆相生油的贡献及其对陆相生油地质控制要素的论述。

1995 年,笔者为《石油知识文萃》^[5]撰写了缅怀侯德封教授的文章“我国石油地质事业的开拓者”,愿将该文有关叙述摘引于此。

“远在 50 年代,新中国成立不久,国民经济建设面临重重困难,能源问题迫切需要解决。侯老急国家之所急,积极组织领导了 50 年代中国科学院在西北地区的油气地质综合科研考察工作。他组织领导的酒泉西部地区的石油地质综合研究取得重大成果,荣获国家自然科学基金。侯老非常重视基础性的地学研究,并将地质历史中的理化作用及古气候环境等因素综合起来认识油气地质问题。1957 年他在柴达木盆地工作时,应用气候地层学对盆地第三纪地层作了划分和对比,成为当时统一盆地东西部地层和认识这些地层所代表古气候、古环境、沉积地球化学的重要依据。他强调古气候对石油形成,特别是对陆相生油的重要意义,指出有无石油的关键不在于是陆相还是海相地层,而首先要确定的是古气候带和构造区。他的这些学术观点在我国石油资源的勘探开发中,起了重要的作用”。

侯老是陆相生油理论的主要奠基人之一。他在 20 世纪 50 年代末领导中国科学院兰州地质研究所的一批青年科技工作者,在总结我国石油生产实践的基础上,完成了《中国西北区陆相油气田的形成及其分布规律》^[6]一书。这是我国第一部陆相生油专著,提出了“内陆、潮湿、拗陷”为代表的陆相生油的新论点,从而在理论上和实践上突破了石油主要形成于海相地层的传统观念,迎来了一个有理论指导的在我国陆相中、新生代沉积勘探开发油气的时