



中国油页岩资源分布 及技术进展



王红岩 赵 群 刘洪林 刘人和 熊 波 编著

ZHONGGUO
YOUYEYAN
ZIYUAN FENBU
JI JISHU JINZHAN



石油工业出版社

中国油页岩资源分布及技术进展

王红岩 赵 群 刘洪林 刘人和 熊 波 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书通过对中国油页岩资源特点进行分析,总结了不同类型油页岩成矿富集规律,以地球遥感识别技术、地震勘探技术和测井识别技术为手段,获取相关参数数据,建立了适合我国地质条件的油页岩资源评价和有利目标优选评价方法,对全国油页岩进行了详细评价,并以鄂尔多斯盆地和松辽盆地为重点优选了油页岩有利目标区。

本书资料丰富、翔实,研究思路新颖,观点、见解多有新意,具有较高的学术价值和较强的实用性,适合于油页岩勘探开发和利用领域的研究人员、工程技术人员和决策管理人员阅读参考,也可作为能源地质领域研究生及本科高年级学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国油页岩资源分布及技术进展/王红岩等编著.
北京:石油工业出版社,2013.12

ISBN 978-7-5021-9871-8

I. 中…

II. 王…

III. 油页岩资源-资源分布-中国

IV. TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 263884 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.pip.cnpc.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.25

字数: 288 千字

定价: 55.00 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

《中国油页岩资源分布及技术进展》

编 委 会

主 任 王红岩 赵 群 刘洪林 刘人和 熊 波

副主任 郑德温 刘德勋 吴晓智 王佰长 薛华庆

孙莎莎

委 员 林英姬 文守亮 董 雷 张庆春 拜文华

吝 文 梁 峰 徐朝辉 李晓军 李红兵

臧焕荣 昌 燕 武 瑾 张 琴 王 波

方朝合 姚建军 葛稚新 李小龙 魏 伟

张承琦 张金华 王 莉 张晓伟 王 南

于荣泽 雷丹凤 曾 博 闫 刚 申卫兵

李晓波 郭 伟

前 言

随着我国经济持续快速发展，能源需求大幅增长，能源供应已成为制约社会经济发展的重要因素。预计至 2020 年，我国石油的对外依存度将达到 60% ~ 70%，过高的对外依存度可能引发风险。我国油页岩资源丰富，勘探潜力大，是我国油气资源发展的必然方向。因此，大力组织开发油页岩等非常规能源，以解决石油短缺的“瓶颈”，实施石油替代和燃料多样化战略十分必要。

我国油页岩勘查工作主要是在 20 世纪五六十年代进行的，之后长期处于停顿状态，油页岩资源储量仅少部分可作为油页岩开发设计依据外，大部分只能作为进一步地质勘查的资料依据。我国东北地区和中西部地区地域广阔，分布着众多规模大小不等的沉积盆地，大部分盆地均有油页岩分布，含油率较高，资源储量巨大。我国还未开展过系统的油页岩成矿理论和勘探评价技术的研究，主要借鉴煤炭勘查模式，这在很大程度上制约了油页岩潜在区资源的预测和勘查。有关油页岩成矿理论、矿床地质特征、控矿作用以及勘探评价技术都少有研究，研究水平相当薄弱。目前我国尚没有统一的油页岩勘查开发利用规范，油页岩矿体的边界品位、最小厚度等基本参数也不统一，严重制约着油页岩的评价、勘探和开发。

“十一五”期间，国家通过油气重大专项项目 18 “页岩油有效开采关键技术”项目，开展油页岩成矿理论与富集规律研究，提高对油页岩资源成因、分布规律、成矿模式的认识；通过总结我国油页岩勘查和评价经验，借鉴国外先进勘查和评价技术、国内相近矿产的勘查评价方法手段，对典型油页岩地区开展相关技术的试验，形成油页岩勘探评价技术系列；根据我国油页岩资源特点，建立油页岩资源评价参数体系和评价流程，开展油页岩技术可采系数、页岩油可回收系数等重点参数的研究和利用，对我国主要含油页岩盆地进行了资源评价；通过分析油页岩的大区、深度、层系和地理环境，优选出近期勘查目标和远景目标。

全书汇集了国内油页岩勘探的大量实践资料，并利用大量常规油气钻井中的录井、地震和测井等资料对油页岩资源进行了详细评价。本书既是“页岩油有效开采关键技术”项目组全体研究人员的研究成果总结，也饱含着全国油页岩地质工作者的辛勤劳动，是集体智慧的结晶。本书编写过程中，得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院的大力支持和帮助，在此表示真挚的感谢。

编者

2013 年 7 月 4 日

目 录

第一章 国内外油页岩勘探开发综述	(1)
第一节 国内外油页岩勘探开发进展	(1)
第二节 国内外油页岩工艺技术进展	(6)
第三节 国内外油页岩综合利用技术进展	(6)
第四节 我国油页岩勘探开发发展趋势	(7)
第二章 中国油页岩资源分布及成矿特征	(8)
第一节 中国油页岩资源分布	(8)
第二节 中国油页岩资源成矿特征	(9)
第三节 中国油页岩富集规律	(18)
第三章 油页岩资源勘查地球物理技术	(21)
第一节 油页岩资源勘查遥感识别技术	(21)
第二节 油页岩资源勘查地震与测井识别技术	(26)
第三节 油气井油页岩特征参数提取与标定	(28)
第四节 油气井油页岩地球物理识别技术评价与应用	(35)
第四章 油页岩资源评价	(40)
第一节 油页岩资源评价方法研究	(40)
第二节 东部重点盆地油页岩资源勘查与评价	(50)
第三节 中西部重点盆地油页岩资源勘查与评价	(62)
第四节 南部重点盆地油页岩资源勘查与评价	(79)
第五节 西藏重点盆地油页岩资源勘查与评价	(83)
第六节 资源评价结果汇总	(88)
第五章 油页岩有利目标区优选	(107)
第一节 有利目标区优选方法与标准	(107)
第二节 鄂尔多斯盆地油页岩有利目标优选与评价	(128)
第三节 松辽盆地有利目标区优选与评价	(141)
参考文献	(164)

第一章 国内外油页岩勘探开发综述

第一节 国内外油页岩勘探开发进展

一、国外油页岩勘探开发进展

(一) 国外油页岩开发历史

从 1835 年法国建成世界上第一座油页岩炼油厂至今,油页岩的开发和应用已有近 200 年历史。伴随着第二次世界大战的爆发、能源危机的出现和石油工业的兴起,油页岩工业曾几度兴衰,期间出现过三个高峰期。第二次世界大战期间,石油需求量剧增,油价猛涨,不少国家兴起了油页岩开发热潮。20 世纪 50 年代,中国大力发展油页岩,页岩油产量占全国油产量的 60% 以上;60 年代初,随着中国大庆油田的发现,中国油页岩产业陷入低谷。20 世纪 70 年代出现世界能源危机,各国都在为寻求新的能源而努力,油页岩的开发与利用又重新得到了重视。美国、日本、德国、巴西、苏联等国家研究了各种油页岩干馏炼制页岩油的方法,部分国家形成工业化生产规模,页岩油产量快速增长,1980 年出现第三个高峰期,产量达到历史上的最高水平 ($4540 \times 10^4 \text{t}$)。1980 年以后,由于石油被大量发现和开发,油价大幅下降,相对油页岩来说,天然石油质优价廉,页岩油的产量也一路下滑,到 2000 年,只有 $1600 \times 10^4 \text{t}$ 。预计随着国际油价的不断上涨,以及剩余油、低渗透油气藏开发难度的增加,天然气水合物开发的瓶颈技术暂时无重大突破等原因,对油页岩的重视会不断加强。

美国主要是利用露天开采和干馏方法提取页岩油。德国每年利用 $50 \times 10^4 \text{t}$ 油页岩作为燃料,灰分用于生产水泥。巴西从 1935 年就开始生产页岩油,1999 年页岩油的产量为 $19.52 \times 10^4 \text{t}$,并在油页岩中提取硫和放射性铀。俄罗斯、匈牙利、乌克兰、奥地利、保加利亚等国将大量油页岩加工成肥料及土壤稳定剂,用于酸性土壤的中性化。

研究表明,全球油页岩资源量巨大,但利用率却很低。随着世界石油资源需求的增加和石油资源存量的相对不足,油页岩的开发和利用将会出现大幅度的增长。新技术的出现,不但使油页岩炼油或发电效率提高,污染减少,而且用途增加,从而大大提高了油页岩的经济效益。

(二) 国外油页岩开发现状

全世界油页岩资源折合成页岩油约 $3536 \times 10^8 \text{t}$,而美国拥有世界上最丰富的油页岩资源。根据美国能源部 2008 年 8 月的报告,美国油页岩换算成页岩油约 $2448 \times 10^8 \text{t}$,约占全球油页岩资源量的 77%,远远超过中东石油的储量。近几年,美国、爱沙尼亚、约旦等国家油页岩开发取得了较大进展。

自从美国国会于 2005 年通过了发展非常规能源的法案,随即又掀起了油页岩干馏炼油的研究开发新高潮。2007 年 9 月,美国以能源部为主公布了发展油页岩、油砂、稠油、煤

制液体燃料的发展规划的研究报告,报告还提出了今后美国页岩油生产规模的设想:至2014年页岩油达到 $1250 \times 10^4 \text{t}$ 。美国有学者建议美国减少石油战略储备量,将节省下来的1000亿美元用于建立页岩油工业。

2008年6月18日时任美国总统布什声明,支持发展油页岩,鼓励国会放开对批准页岩油试验用地的限制。目前美国内政部批准了6项给予石油公司的土地矿产租赁项目,支持开展油页岩干馏炼油试验。其中,在科罗拉多州有3项,犹他州有2项,怀俄明州有1项。科罗拉多州的3项都是进行地下干馏试验,其余均为地上干馏。据统计,目前美国有29家公司正开展油页岩加工利用的研究,其中14家公司开展地下干馏,11家开展地上干馏的研发,2家公司开展页岩油加氢制取轻质油品研究。上述这些公司大多数处于实验室、数学模拟或概念研究阶段,只有壳牌公司正进行地下干馏的现场试验。

英国雷神公司宣布,已将其微波提取页岩油技术出售给油田服务公司斯伦贝谢公司,用于开采美国的油页岩。这项技术利用无线射频能量与临界流体相结合,就像用微波炉加热食物一样,利用微波在地下产生热能,以融化页岩中被称为干酪根的蜡状物,进而转化成石油。二氧化碳受热增压后变为液态,可用于从岩层中采出石油并运送到井筒中。

爱沙尼亚每年开采 $1400 \times 10^4 \text{t}$ 油页岩(露天开采和地下开采约各占50%),其中 $1100 \times 10^4 \text{t}$ 用于燃烧发电,其余的 $300 \times 10^4 \text{t}$ 用于干馏炼油。由于爱沙尼亚页岩油富含二元酚等,故部分页岩油用于生产精细化工产品,提高了产品附加值。爱沙尼亚共有2座页岩油厂。爱沙尼亚能源集团公司(Eesti Energia)是国营企业,该公司年耗用 $1100 \times 10^4 \text{t}$ 油页岩用于火力发电,提供电力 $9500 \text{GW} \cdot \text{h}$,占爱沙尼亚所需电力的90%以上。该公司还与美国嘉科勃公司等合作,开展爱沙尼亚页岩油的加氢中试,以制取石脑油、低硫柴油及低硫瓦斯油。

爱沙尼亚的2个民营企业,油页岩化学集团公司(VKG)和基维利页岩油厂(Kivioli),共有51台基维特炉(气燃式块状页岩干馏炉),每台日处理200~1000t油页岩。VKG年加工波罗的海Kukersite油页岩约 $170 \times 10^4 \text{t}$,年产页岩油约 $21 \times 10^4 \text{t}$,2009年底已新建1台葛洛特固体热载体干馏炉(每台每天处理页岩3000t),用于处理小颗粒页岩。

约旦缺乏天然油气资源,但有丰富的油页岩矿藏。根据约旦自然资源管理局发布的数据,约旦油页岩储量为 $400 \times 10^8 \text{t}$,集中在雅尔穆克河、Buweida、Beit Ras、Rweished和克拉克、玛达巴和马安等地区。在西部和南部地区,油页岩距地表距离40m左右;在东部和北部地区,油页岩埋藏较深,埋深在900m以上。

目前约旦已探明的油页岩储量达 $1000 \times 10^8 \text{t}$,可露天开采,剥采比约为1:1,其中拉琼油页岩层厚30~60m。约旦自然资源局近10年与很多外国公司和研究单位合作,开展油页岩干馏炼油和燃烧发电的试验和预可行性研究,并签订了备忘录。2008年,约旦与荷兰等国公司签署油页岩开采协议。根据协议,壳牌公司将在约旦中部和南部地区约 $2.2 \times 10^4 \text{km}^2$ 范围内(相当于约旦国土面积四分之一)勘探和开发油页岩,期限为15~20年。

另外,约旦西部和南部地区的油页岩开发利用工作也取得了新进展。爱沙尼亚能源集团公司、巴西国家石油公司(Petrobras)、约旦与英国合资的约旦能源和矿产有限公司(JEML)及一家沙特阿拉伯的公司正在Attarat和Lajoun地区进行油页岩开发勘探工作。爱沙尼亚能源公司与约旦能源矿产部签署协议,利用油页岩建立一个600MW的发电厂,费用预计为180万美元/MW,共计10亿美元。

目前,国外油页岩勘探与开发现状可归纳如下:

一是美国,其油页岩资源约占全世界资源总量的70%以上。美国能源部预计油页岩储

量换算成页岩油约 $3000 \times 10^8 \text{t}$ ，远远超过世界石油的储量，但美国多数公司处于实验室阶段，只有壳牌公司正进行现场地下干馏试验，还有一些公司正筹划开展现场试验，另有几家公司则致力于干馏新技术的开发。

二是爱沙尼亚，每年开采 $1400 \times 10^4 \text{t}$ 油页岩（露天和地下开采各占一半），其中 $1100 \times 10^4 \text{t}$ 用于火力发电， $300 \times 10^4 \text{t}$ 用于干馏炼油。爱沙尼亚电力生产所需燃料的 94% 来自油页岩，共有两家公司生产，年产页岩油约 $30 \times 10^4 \text{t}$ 。

三是俄罗斯，具有丰富的油页岩资源，曾经有两座页岩油厂，但由于俄罗斯具有极其丰富的天然油气资源，近年来页岩油的勘探与生产基本处于停顿状态。

四是巴西，20 世纪 80—90 年代，先后建有两台块状页岩干馏炉，一台日加工 1500t 油页岩（5.5m 直径），另一台日加工 6000t 油页岩（11m 直径）。该炉型生产工艺成熟，页岩油回收率为 90% 以上，年产页岩油约 $20 \times 10^4 \text{t}$ 。

五是约旦，先后送油页岩试样至德国、中国、爱沙尼亚和巴西进行试验，效果都比较好，但其页岩油含硫达 9%，必须采用加氢脱硫对页岩油进行改质才能得到合格的燃料油。最近，约旦分别与国外五家公司签订了协议，如壳牌公司、巴西国家石油公司等，对约旦油页岩进行干馏炼油的可行性研究。

此外，摩洛哥、泰国、蒙古、印度、印度尼西亚等国也都不同程度地正在进行或者准备开发利用油页岩。

二、国内油页岩勘探开发进展

我国是最早利用和开发油页岩的国家，早在 800 ~ 1000 多年前，在辽宁抚顺就已经开始采掘，用于制作陶器的燃料。

规模化的开发利用也有 70 多年的历史。20 世纪 50 年代，油页岩对当时国民经济的发展作出重要贡献，页岩油曾占我国石油产量的一半，抚顺油页岩矿曾经为当时世界上最大的页岩油生产基地之一；进入 60 年代，随着大庆油田等石油资源的发现和开采，油页岩工业逐渐萎缩，勘探工作基本处于停滞状态。近几年来，随着全球对能源的不断需求、石油资源的不断减少，油价飞涨，各国都在寻找替代石油、煤炭等的新型、洁净、经济能源，以缓解能源供需矛盾，给油页岩工业的发展迎来了新的春天。目前，全国各地竞相开展油页岩开发。

中国油页岩的开发利用主要在吉林桦甸、辽宁抚顺和广东茂名等地，在页岩油的提炼方面积累了较丰富的技术经验。

辽宁抚顺于 1928 年开始兴建油页岩制油厂，年生产页岩油 $7.5 \times 10^4 \text{t}$ 。新中国成立初期，中国油页岩开发利用得到突飞猛进的发展，页岩油产量曾占全国石油产量的一半，对国民经济建设发挥了十分重要的作用。抚顺页岩油的产量从 1952 年的 $22.61 \times 10^4 \text{t}$ 快速上升到 1959 年的 $72 \times 10^4 \text{t}$ ，占当年全国石油产量的 21%，成为中国第一大人造石油生产基地，也是当时世界上最大的页岩油生产基地。

20 世纪 60 年代以后，大庆、胜利等油田相继发现，并投入大规模开发。而页岩油生产成本较高，油页岩的开发规模逐渐萎缩，勘查工作基本停滞。

20 世纪 50 年代中期起，国家为解决石油紧缺困难，投资开发茂名油页岩，形成了年产 $300 \times 10^4 \text{t}$ 页岩矿山和年产 $20 \times 10^4 \text{t}$ 页岩油干馏生产能力。由于成本较高，至 1993 年停产，累计生产页岩油 $292 \times 10^4 \text{t}$ 。

近年来,随着国际原油价格走高和油页岩开发利用技术的进步,中国油页岩行业的发展又迎来转机。抚顺、茂名、桦甸等油页岩矿又纷纷加大投资力度,大力开发油页岩资源。同时,一些新兴的油页岩项目也像雨后春笋一样发展起来。

我国油页岩资源十分丰富,据新一轮全国油页岩资源评价结果,我国油页岩资源储量为 $7199.37 \times 10^8 \text{t}$,页岩油资源储量为 $476.44 \times 10^8 \text{t}$,仅次于美国,位居世界第二。探明的油页岩资源主要集中在我国东部区、中部区和青藏区,主要矿区有吉林农安、桦甸、罗子沟,辽宁抚顺,内蒙古固阳、杨树沟,广东茂名,湖南长坡,山东黄县,青海民和盆地炭山岭、窑街,新疆准噶尔盆地妖魔山等。

我国油页岩的勘探研究工作在 20 世纪五六十年代为一高潮期,取得一些基础资料和数据。由于之后油气田的大量发现,油页岩中提炼油气的成本相对较高,勘探研究进入低谷。目前所拥有资料与数据基本来自 20 世纪五六十年代。

我国分别在 20 世纪 50 年代末期、60 年代初期、90 年代和 21 世纪初进行过油页岩预测工作:煤炭工业部在 1959 年《中国分省煤田预测图》预测油页岩资源量为 $20484.8 \times 10^8 \text{t}$;抚顺石油研究所在 1962 年《中国油页岩资源调查报告》中估算远景储量大于 $4000 \times 10^8 \text{t}$;据王慎言等《矿产资源战略分析——单矿种分析系列课题成果》(1999)预测,油页岩资源量达 $13697.7 \times 10^8 \text{t}$ 。通过对比,几次数据的差别较大。近年来,随着我国油气资源供需形势日趋严峻,国家亟须尽快摸清油气资源家底,加强油气资源的战略研究。根据国土资源部、国家发改委联合组织的全国油气资源评价工作的安排,吉林大学地球科学学院于 2003 年开始油页岩资源评价工作,先后在我国东部、中部、西部、南部和青藏 5 大区的 80 个含矿区展开工作,获得了大量基础资料和评价依据。评价结果显示,我国的油页岩是一种蕴藏量十分丰富却几乎未被很好利用的矿产资源,勘探程度较低,大部分矿区都没有达到勘探阶段。辽宁抚顺油页岩矿是目前国内最大的油页岩生产基地。广东省是我国较早利用油页岩提炼页岩油的省份。

“十一五”以来,中国石油天然气集团公司(以下简称中国石油)积极推进新能源战略布局,不断提升油页岩资源勘查和中试实验基地建设。2009 年 8 月 12 日,作为中国石油批准的首个油页岩示范项目,大庆油田牡丹江 $3 \times 10^4 \text{t}$ 页岩油中试先导基地项目开工建设,主要是通过露天开采油页岩矿石,经粉碎后干馏提取页岩油。该油页岩示范项目利用国内领先工艺,炼厂主体设施设计年处理油页岩矿石能力 $60 \times 10^4 \text{t}$,年产页岩油 $3 \times 10^4 \text{t}$ 、页岩半焦 $26 \times 10^4 \text{t}$ 。该基地的建设将为中国石油开拓和发展油页岩业务提供可靠的技术支持。项目总投资 4.45 亿元,建设期约两年。整体工作包括矿山、炼厂两个部分。其中矿山建设部分位于五林镇,炼厂建设部分位于阳明区桦林镇。

在此基础上,国家科技重大专项“大庆探区页岩油开采技术示范工程”建设项目也同步实施,取得了阶段进展。

中国石油化工集团公司(以下简称中国石化)也将油页岩开发利用提上了议事日程,建立了以华东分公司为主体的科研与技术支持队伍。

此外,2010 年初,茂名油页岩综合利用项目已获中华人民共和国环境保护部的批复,即将开工建设。工程建成后,茂名有望成为广东新兴电力供应基地。该项目由广东省粤电集团有限公司投资建设,首期工程建设两台 $21 \times 10^4 \text{kW}$ 循环流化床页岩发电机组,项目最终规模为建设 6 台 $21 \times 10^4 \text{kW}$ 发电机组,装机容量达到 $126 \times 10^4 \text{kW}$ 。

目前,我国油页岩勘探与开发开始正式起步,其现状可归纳如下:

国内油页岩的开发较前几年有了很大发展，主要集中在辽宁抚顺、吉林桦甸、山东龙口等地。作为国内油页岩开发利用的代表性企业，抚顺矿业集团公司一直把油页岩综合利用作为企业转产转型的主攻方向，超前筹划，稳步推进，大力发展循环经济，已基本形成了特点鲜明的产业体系架构：

龙头项目——恢复停采的东露天矿，在生产优质煤炭的同时，长期稳定地为油页岩综合利用产业链提供优质廉价的原料。

核心项目——新建页岩油化工深加工示范厂，使油页岩综合利用成为企业新的主要经济支柱。

综合利用项目——以油页岩干馏剩余瓦斯为燃料，建设发电、供热项目。已建剩余瓦斯发电机组 82 台，装机总容量 $4.1 \times 10^4 \text{ kW}$ ，全年发电 $7500 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。同时，建设油页岩烧结砖厂，利用干馏后的油页岩废渣生产承重多孔砖和空心砖，拉动和壮大建筑产业。

在这个整体产业体系架构中，有的项目已经建成投产，有的正在陆续组织实施。目前，正在建设中的主要项目包括：（1）油页岩炼油厂 ATP 工程。引进加拿大 UMATAC 公司开发的 ATP 干馏技术，2010 年抚顺矿业集团日处理小颗粒油页岩 6000t。

（2）页岩油化工深加工示范项目。将页岩油进行深加工，生产高附加值的化工产品和清洁油品，建设规模为 $40 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。该项目主要设备已订货，正在进行基础施工。

目前，抚顺矿业集团有限责任公司申报“中国资源综合利用（油页岩）示范基地”工作已经进入审批阶段，公司将以“示范基地”为招牌，把油页岩综合利用产业链建设成为经济效益、生态效益、社会效益与员工利益齐头并进国际领先的产业园区，引领国内同行共同为国家能源产业做出更大的贡献。

与此同时，国内其他地方和单位在油页岩开发与利用方面也取得了长足发展，主要有：

（1）辽宁成大股份有限公司正在建设 12 台改良式干馏炉，每台每天处理油页岩 300t，年生产页岩油约 $15 \times 10^4 \text{ t}$ 。

（2）甘肃窑街煤电集团有限公司利用神木三江方型干馏技术，正在建设 8 台油页岩干馏炉，每台每天处理油页岩 500t，年产页岩油 $15 \times 10^4 \text{ t}$ ，2010 年 7 月已投产。

（3）大庆油田正在柳树河建设油页岩干馏炼油示范厂，利用固体热载体干馏技术，已建成年产页岩油 $5 \times 10^4 \text{ t}$ 的生产能力。

（4）桦甸建有三台小颗粒油页岩循环流化床燃烧锅炉，年加工 $48 \times 10^4 \text{ t}$ 油页岩。桦甸和汪清等地有多家民营企业采用抚顺式炉干馏油页岩，年产页岩油约 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 。

（5）山东龙口矿务局利用采煤副产的油页岩进行干馏炼油，现有抚顺炉 20 台，计划增建 20 台，年产页岩油 $6 \times 10^4 \text{ t}$ ，并积极寻找其他地区的油页岩资源，进一步扩大生产规模。

（6）内蒙古敖汉旗北票煤炭有限责任公司建有 40 台抚顺炉，年产页岩油约 $5 \times 10^4 \text{ t}$ 。

（7）辽宁朝阳凌源地区建有 10 台抚顺炉，年产页岩油约 $1 \times 10^4 \text{ t}$ 。

（8）黑龙江东宁地区建有 4 台抚顺炉，年产页岩油约 $1 \times 10^4 \text{ t}$ 。

（9）中煤集团哈尔滨煤气厂利用固体热载体流化干馏技术，已完成 50 t/d 的中试试验，计划建设 2000 t/d 示范工程。

截至 2010 年底，全国范围内共建有抚顺炉约 350 台，基本集中于东北三省地区。各个油页岩生产与开发利用企业，在利用油页岩渣生产水泥、烧结砖、陶粒以及剩余瓦斯发电等综合利用方面，均开展了大量试验研究，已取得初步成果，但整体综合利用与环境保护方面较为滞后。

第二节 国内外油页岩工艺技术进展

目前,就全球油页岩开发利用来看,地面干馏技术是油页岩开发利用的主体,该工艺经过几十年的发展,现在主要分为气体热载体和固体热载体两种干馏工艺。目前世界成熟的气体热载体干馏工艺主要有巴西 Petrosix、爱沙尼亚 Kiviter 和国内块状干馏技术;固体热载体干馏工艺主要有俄罗斯 Galoter 工艺和澳大利亚 ATP 工艺,都进行了工业化试验。

与国外干馏工艺相比,国内块状干馏技术和德国 LR 干馏技术处理能力均较低,油收率低,适用于小规模油页岩炼油厂;巴西 Petrosix、加拿大 ATP、爱沙尼亚 Galoter 干馏技术处理能力大,油收率高,适用于大中型油页岩炼油厂,但对于小颗粒油页岩利用效率不高。固体热载体干馏工艺由于具有出油率高、综合利用率高、节能环保等优点而成为目前和未来国际研发的主流技术。

目前我国油页岩干馏技术理论与工艺试验工作已取得新进展,理论研究包括油页岩热解机理、燃烧特性、动力学参数和燃烧模型等,工艺研究包括流化床干馏和脱碳工艺等研究,但工业化生产的地面干馏技术仍然采用落后的气体热载体块状干馏工艺技术。

传统干馏工艺技术在在中深层油页岩的开发上由于开采成本过高而造成经济效益较低。自 20 世纪 80 年代开始,许多世界大型石油公司都在积极开发更为经济、环保的页岩油制取技术,油页岩原位开采技术就是其中一种。原位开采技术就是通过直接给地下油页岩加温,使其在地下进行裂解,生成油气通过生产井采出。该工艺对于中深层油页岩(300m 以下)开发具有优势,并且由于不需要露天和矿井开采,没有大量的油页岩废料堆积,副产物非常少,水资源的用量也非常少。

目前,油页岩原位开采技术达十余种,按照油页岩层加热方式可分为电加热、流体加热、辐射加热三类工艺。

(1) 电加热技术的特点:技术成熟,容易控制,但加热速度较慢,容易造成热量大量损失,成本较高,产生的油气压力较低,难以开采。

(2) 流体加热技术的特点:该技术加热速度较快,并且由于流体压力的作用,产生的裂缝一般不会闭合,产出的油气易于开采;加热过程中流体流速过快,易形成流体短路,仅与油页岩进行少量热交换就流出地层。

(3) 射频加热技术的特点:该技术产生的热量穿透力强,加热速度较快,但技术难度较大,成本较高。

目前在原位开采技术研究方面,壳牌公司、埃克森—美孚公司和 EGL 公司走在了世界前列。其中,壳牌公司 ICP 技术相对成熟,并且已经进行了现场试验,2004 年初,在 35ft 长、20ft 宽的试验区内进行电加热试验,2005 年 8 月产出轻质油 1500bbl,同时还有伴生气产出。目前,壳牌公司 ICP 技术已经研发到了第二代 E-ICP 技术,2006 年编制 E-ICP 试验计划,并申请获得美国科罗拉多州 3 个油页岩开发、试验和示范区块。

我国油页岩原位开采研究刚刚起步,基础理论研究和工艺技术研究非常缺乏。

第三节 国内外油页岩综合利用技术进展

20 世纪 90 年代以来,世界油页岩综合利用呈现增长的趋势。其中,以油页岩燃烧发电

应用最为广泛，如前苏联将油页岩作为燃料大规模用于电站锅炉。20 世纪 20 年代开始，爱沙尼亚就开始研究粉末燃烧技术。以色列和美国也利用油页岩流化床燃烧技术进行发电。我国在 60 年代以后开始利用流化床燃烧技术，然而，传统的流化床燃烧技术由于燃烧强度低、占用空间大、热效率低和环境指标差等存在一定局限性。页岩灰为油页岩和半焦燃烧副产品，易造成环境污染，处理成本昂贵，在 600 ~ 800℃ 形成的页岩灰具有一定的熔结强度，可在建筑方面得到良好的应用。水泥工业使用页岩灰，不仅可以降低水泥生产成本，而且可以提高它的硬度；页岩灰替换 10% 的水泥或沙子或两者总量的 10%，将提高耐压强度；页岩灰若作为沥青混凝土的掺和剂，会给混合料带来很好的机械和耐久特性，也可以在玻璃和玻璃陶瓷的产品上得到应用。

第四节 我国油页岩勘探开发发展趋势

随着油页岩资源的勘探开发步伐逐步加快，资源勘查评价工作将逐步深入，促进油页岩一些有利目标区发现，页岩油资源探明率将进一步提高。油页岩干馏工艺技术不断更新换代，油页岩原位开采技术不断创新，干馏效率将显著提高。

随着油页岩地质理论研究和勘查评价工作量投入的加大，特别是大型石油公司的介入，大量石油勘探技术应用到油页岩资源勘探工作之中，大大促进了油页岩地质理论的发展和油页岩资源勘探评价步伐。总体上，我国油页岩成矿地质理论和勘探评价研究向以下方向发展。

(1) 页岩油成矿富集规律逐步总结出来，油页岩成矿地质理论趋于成熟。

(2) 先进的测井评价技术及油页岩储层地震勘探识别技术应用到油页岩地质勘探之中，有效指导油页岩富集区的勘探发现，大量油页岩资源富集新区被发现。

(3) 页岩油勘探由老区向新区发展，页岩油资源勘探领域向中深层拓展。

(4) 页岩油资源评价技术不断完善，逐步建立适合我国油页岩地质特点的勘探评价相关技术规范，页岩油资源储量评价向规范化、标准化发展。

(5) 随着中西部油页岩富集新区的大量发现，页岩油资源探明率不断提高，页岩油资源勘探重心由东部向中西部发展。

(6) 研发油页岩地球物理勘探解释技术，油页岩与常规油气勘探一体化。

随着油页岩资源开发利用研究的不断深入，油页岩开发利用将朝以下几个方向发展：

(1) 钻井、压裂、探测等开发技术应用到油页岩原位开采研究中，促进油页岩原位开采工艺技术的发展，高效开发中深部油页岩资源，页岩油资源开发向中深层发展。

(2) 适合开发小颗粒、低品位油页岩的固体热载体干馏技术逐步改进创新，油页岩资源利用率和油页岩干馏油收率显著提高。

(3) 油页岩干馏工艺技术不断成熟，高效、环保、大处理量的块状油页岩干馏工艺向规模化、大型化和低成本化方向发展。

(4) 油页岩综合利用技术逐步成熟，综合利用方案更加科学合理。油页岩资源开发走炼油、发电和综合利用等一体化技术路线，并且油页岩干馏产物深加工技术有效发展，大量高附加值产品价值得到充分体现，大幅度提高经济效益。

第二章 中国油页岩资源分布及成矿特征

第一节 中国油页岩资源分布

大型含油气盆地主要分布于我国北方,油气主要集中分布于北方,油页岩资源也主要分布于北方,均表现为北富南贫。本次计算我国油页岩总资源为 $11602 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $8278 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量),查明资源储量为 $678 \times 10^8 \text{t}$;潜在资源量 $10924 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $7600 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量)。页岩油总资源为 $626 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $471 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量),查明资源储量为 $39.4 \times 10^8 \text{t}$;潜在资源量 $587 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $432 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量)。可回收页岩油总资源为 $160 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $122 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量),查明可回收资源储量为 $13.8 \times 10^8 \text{t}$;潜在可回收资源量 $146.6 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源量)、 $107.8 \times 10^8 \text{t}$ (不含 1000 ~ 1500m 资源量)。

中国油页岩资源总量达 $11602 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源 $3324 \times 10^8 \text{t}$),集中于松辽、鄂尔多斯、准噶尔、伦坡拉四大盆地。松辽盆地油页岩资源 $5266 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源 $1928 \times 10^8 \text{t}$),占全国的 45.4%;鄂尔多斯盆地油页岩资源 $4224 \times 10^8 \text{t}$ (含 1000 ~ 1500m 资源 $1397 \times 10^8 \text{t}$),占全国的 36.4%;准噶尔盆地油页岩资源 $652 \times 10^8 \text{t}$ (为 0 ~ 1000m 资源量),占全国的 5.6%;伦坡拉盆地油页岩资源 $414 \times 10^8 \text{t}$ (为 0 ~ 1000m 资源量),占全国的 3.57%。

东部地区油页岩资源总量达 $5469 \times 10^8 \text{t}$,集中于松辽盆地。松辽盆地油页岩资源 $5266 \times 10^8 \text{t}$,占东部的 96.3%;页岩油资源为 $250 \times 10^8 \text{t}$,占东部的 95%;可回收页岩油资源为 $60.3 \times 10^8 \text{t}$,占东部的 90.6%。

中部地区油页岩资源总量达 $4265 \times 10^8 \text{t}$,集中于鄂尔多斯盆地。鄂尔多斯盆地油页岩资源 $4224 \times 10^8 \text{t}$,占中部的 99%;页岩油资源为 $225.4 \times 10^8 \text{t}$,占中部的 99%;可回收页岩油资源为 $58.3 \times 10^8 \text{t}$,占中部的 99%。

西部地区油页岩资源总量达 $990 \times 10^8 \text{t}$,集中于准噶尔盆地。准噶尔盆地油页岩资源 $652 \times 10^8 \text{t}$,占西部的 65.9%;页岩油资源为 $54 \times 10^8 \text{t}$,占西部的 66.5%;可回收页岩油资源为 $14.1 \times 10^8 \text{t}$,占西部的 66.5%。

南方地区油页岩资源总量达 $264 \times 10^8 \text{t}$,集中于茂名盆地。茂名盆地油页岩资源 $234 \times 10^8 \text{t}$,占南方地区的 88.6%;页岩油资源为 $14.3 \times 10^8 \text{t}$,占南方地区的 91%;可回收页岩油资源为 $4.8 \times 10^8 \text{t}$,占南方地区的 83.2%。

西藏地区油页岩资源总量达 $614.5 \times 10^8 \text{t}$,集中于伦坡拉盆地。伦坡拉盆地油页岩资源 $414 \times 10^8 \text{t}$,占西藏地区的 67.4%;页岩油资源为 $41.4 \times 10^8 \text{t}$,占西藏地区的 67.4%;可回收页岩油资源为 $9.32 \times 10^8 \text{t}$,占西藏地区的 67.4%。

根据油页岩资源储量规模，可将 49 个含油页岩盆地划分为四类：Ⅰ类盆地是指有一定油页岩查明资源储量规模并且已开发的盆地；Ⅱ类盆地是指有一定油页岩查明资源储量规模但未开发的盆地；Ⅲ类盆地是指已有少量油页岩查明资源储量未开发的盆地；Ⅳ类盆地是指没有油页岩查明资源储量只有潜在资源量的盆地（表 2-1）。

表 2-1 我国各含油页岩盆地分类表

盆地分类	个 数	盆 地 名 称
Ⅰ类盆地	7	抚顺、茂名、民和、敦密、胶莱、罗子沟、柳树河
Ⅱ类盆地	12	松辽、鄂尔多斯、杨树沟、黑山、四岔口、朝阳、建昌、渤海湾、海南儋州、桐柏、银额、阜新
Ⅲ类盆地	23	准噶尔、依兰—伊通、大杨树、老黑山、鱼卡等 23 个盆地
Ⅳ类盆地	7	林口、四川、阿坝、新宁、吉安、伦坡拉、羌塘

第二节 中国油页岩资源成矿特征

中国油页岩资源总体分布与我国构造大区构造演化、沉积盆地形成密切相关；东部属于太平洋构造域作用区，中部为太平洋与古亚洲洋构造作用区，西部为古亚洲洋与古特提斯构造作用区，南方为特提斯与太平洋构造作用区，西藏为新特提斯与古亚洲洋构造作用区。我国油页岩矿床总体分布与沉积盆地发育一样表现为北富南贫。北部主要分布于大型拗陷型沉积盆地与古近—新近系小型断陷中；中西部主要分布于大型继承性拗陷与前陆盆地、山间断陷盆地中；南方主要分布于残留断陷盆地与古近—新近系新生断陷中；西藏地区主要分布于特提斯构造域影响下的残留海相前陆盆地与古近—新近系新生断陷中。相应地，我国油页岩资源总体也呈现东部、中西部、南方、西藏四大构造区域格局分布特征（图 2-1）。

一、东部地区

东部含油页岩盆地众多，主要分布有松辽、抚顺、桦甸、罗子沟、渤海湾、胶莱等 21 个。东部含油页岩盆地的形成、演化及其成矿规律主要受环太平洋构造域的控制。其中，东部北部地区分布有大杨树盆地、松辽盆地。松辽盆地为大型的陆内裂谷盆地，油页岩发育于盆地的断拗转换期，油页岩形成时代为白垩纪。新生代含油页岩盆地主要是发育于古近纪的一系列断陷型盆地，形成夹持于太行山东断裂和郯城—庐江断裂之间以渤海湾盆地为主体的盆地群，北延到东北的依兰—伊通盆地，南延至潭头盆地、桐柏盆地，构成一个北北东向的经向裂谷盆地带。此盆地群的特点是盆地数量多，油页岩资源量小，含油率高。

（一）成矿条件

1. 古气候条件

1) 气候对湖泊初始生产力的控制

气候变化是影响有机质生产力的主要因素。温湿的气候有利于植物的生长，而干燥少雨的气候使植物生长受到限制。干燥少雨的气候条件下，入湖径流量小，陆源有机质输入减少，湖水营养矿物质含量降低，使水生浮游生物生长受限制，原始有机质生产力低下。而在潮湿多雨气候条件下，入湖径流量大，带来丰富的陆生植物和营养物质，使水生浮游生物得以繁荣，从而使有机质生产力提高（刘春莲等，2001）。

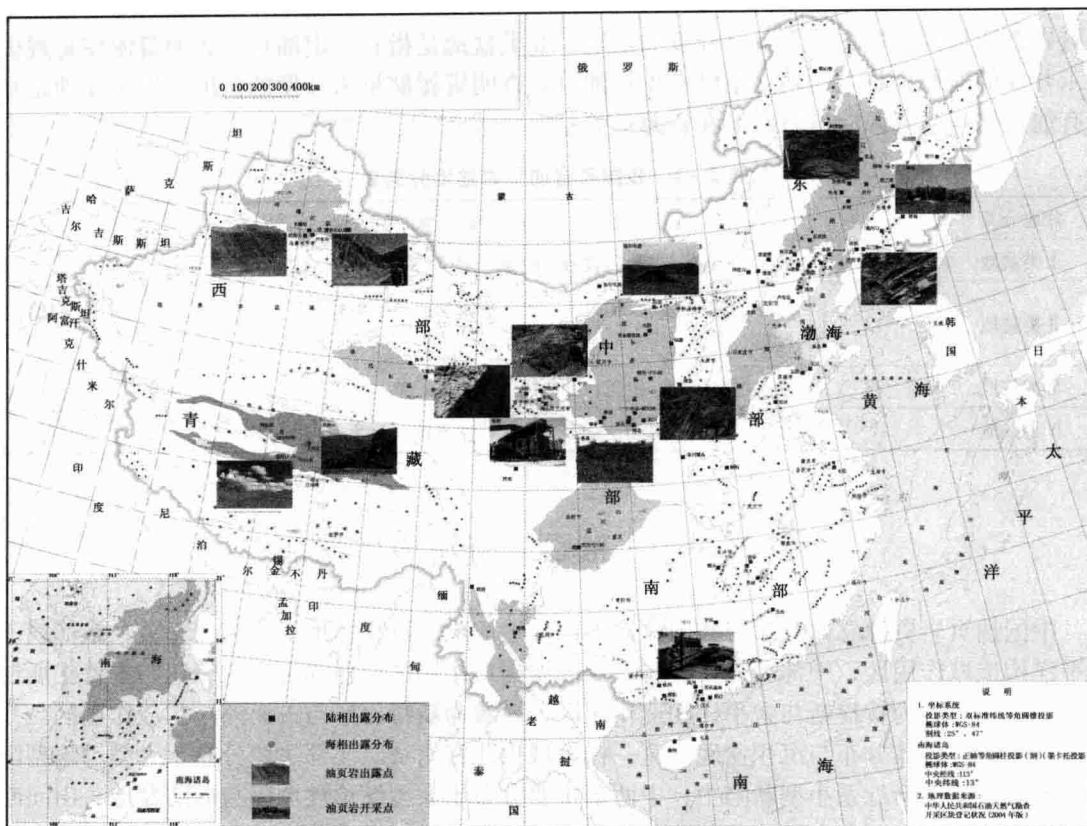


图 2-1 中国油页岩野外出露分布图

研究表明，抚顺盆地始新世油页岩形成时期，气候为稳定的温暖湿润气候，丰富的降雨量使湖泊水体中营养物质繁盛，从而形成了厚层（单层厚度可达 190m）的油页岩沉积（柳蓉等，2007）。而桦甸盆地油页岩段沉积时期干湿交替的气候环境导致多层油页岩的发育，油页岩沉积时期与上下泥岩沉积时期相比较而言，气候较温暖湿润，大的入湖径流量带来充足的营养物质，使水体中水生生物繁盛，大大增加了湖泊初始生产力，为油页岩的形成提供大量的物质来源；而当气候转为干旱时，湖泊径流量减小，湖水中营养物质含量较少，使湖泊生产力降低，不利于有机质的形成。

2) 气候对有机质保存的控制

湖水分层是油页岩形成的一个重要条件。水体分层保证了水体底部的安静、缺氧，有利于有机质的保存。温暖潮湿的气候条件，有利于生物的繁盛，并且降水量充足，容易形成深湖。在上述气候条件下，深湖具有长年分层的特点，对有机质的保存很有利。通过对抚顺盆地的垂直剖面分析，Ni/Co 和 Ni/V 值在富矿油页岩段表现了还原的条件，并且其稳定性更表明了在此时期的湖水分层的稳定性。

3) 气候对油页岩层数、厚度的控制

气候通过影响湖泊水体蒸发量与补给量的平衡而控制着湖平面的变化，从而控制了油页岩的层数和厚度。桦甸盆地油页岩段沉积时期，气候表现为干湿交替的波动变化，反映了此时湖平面也存在波动性变化。当气候温暖湿润时，降雨量大于蒸发量，湖泛作用使湖平面上

升, 导致湖水中营养物质含量升高, 使湖泊生产力提高, 有利于油页岩的形成; 当气候转为干旱时, 降雨量小于蒸发量, 导致湖平面下降, 湖泊水体咸化, 有利于有机质的保存。

2. 古沉积条件

研究区主要发育了冲积扇、扇三角洲、湖沼、湖泊相、水下重力流。其中, 滨浅湖、湖沼、半深湖、深湖相是油页岩发育的理想场所。

1) 沉积相展布控制了油页岩的平面展布特征

沉积物供给与构造沉降通过影响可容纳空间大小共同控制了沉积相的叠加和沉积体系展布, 从而间接控制了油页岩的平面展布特征。当沉积物供给速率较小且发生湖侵条件下, 即为水进体系域时期。

2) 沉积体系组合控制了油页岩成因类型

从研究区揭示的各个盆地的沉积体系组合类型分析, 抚顺盆地以湖沼和湖相为主, 桦甸盆地以湖相和扇三角洲为主, 农安盆地以半深湖和深湖为主, 依兰盆地以冲积扇、扇三角洲、湖相为主。抚顺盆地形成了浅湖和深湖油页岩, 桦甸盆地形成了浅湖、半深湖油页岩, 而依兰盆地则形成了湖沼相油页岩。上述不同成因油页岩的形成主要与沉积演化有关。

3. 古构造条件

构造对于油页岩矿的控制作用体现在两个方面, 一个是同沉积时期的控制作用, 另一个是沉积之后的改造作用。

同沉积时期的古构造特征在盆地演化过程中的活动体现着不同的同沉积构造运动形式。它们或者同期发展, 对盆地沉积和油页岩的聚集产生复合作用, 或者在某个阶段单独表现明显。这些不同形式的同沉积构造运动既具有成因联系, 又具有各自的特点。因此, 断陷盆地和坳陷型盆地的古构造控制作用也有一定的不同。

1) 断陷盆地古构造条件的控制作用

古构造条件对断陷盆地油页岩的形成起到至关重要的作用。研究区抚顺盆地、建昌盆地和围场盆地主要表现为地堑和半地堑构造样式。以抚顺盆地为例, 盆地主要构造为控盆断裂和同沉积构造。其中, 控盆断裂主要控制了油页岩的沉积位置、沉积厚度和含油率; 同沉积构造主要控制了盆地内部油页岩的展布形式以及油页岩的块段分布。

(1) 控盆断裂控制了油页岩厚度和含油率。

对于抚顺盆地, 通过对比分析计军屯组贫/富矿油页岩等厚图以及古城子组地层等厚图、计军屯组地层等厚图、西露天组地层等厚图以及 A—A' 剖面、E400 至 E11300 勘探线剖面, 发现沿着控盆断裂 F_1 油页岩厚度明显加厚。此外, 盆地内部的同沉积断层控制了油页岩矿带整体展布及较厚油页岩的块段分布。例如, F_6 断裂和 F_7 断裂在平面上形成了西露天矿区、老虎台矿区等较厚块段的分布。

通过对比抚顺盆地计军屯组贫/富矿油页岩含油率分布情况, 盆地内靠近断裂处油页岩含油率也有增高的趋势。

(2) 同沉积构造的控制作用。

①纵向同沉积正断层控制了油页岩矿带整体的东西向展布形式。从油页岩厚度等值线和含油率等值线都可以看出, 正是纵向同沉积正断层控制了盆地的轴向, 因此控制了油页岩矿带整体的东西向展布形式。

②横向同沉积正断层控制了较厚油页岩的块段分布。从油页岩厚度等值线和含油率等值线都可以看出, 正是横向同沉积正断层切割了纵向同沉积正断层形成的次级断陷及断隆, 因