



中国发展油页岩产业的 可行性

ZHONGGUO FAZHAN
YOUYEFAN CHANYE DE KEXINGXING

张家强 刘志逊 钱家麟 刘招君 等著

地质出版社

中国发展油页岩产业的可行性

张家强 刘志逊 钱家麟 刘招君 李术元
朱建伟 王德杰 王剑秋 陈会军 孟庆涛
许圣传 刘 忠 温志良 张新安 张迎新
柳 蓉

著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书作者通过广泛调研和深入研究,总结了国内外油页岩资源和开发利用现状,认为世界油页岩产业发展迎来重大历史机遇;客观分析了我国油页岩资源潜力和开发利用潜力,认为全国剩余油页岩蕴藏的页岩油技术可采资源量比全国石油剩余技术可采资源量还要丰富,但全国油页岩勘查工作程度很低,现有油页岩探明储量不足以支持油页岩产业大规模发展,今后如能加强全国油页岩资源勘查与开发力度,未来20年全国页岩油产能可以发展到 $2000 \times 10^4 \text{ t/a}$,相当于再造半个大庆油田。并从资源、技术、经济、环保和政策等方面系统分析了我国油页岩开发利用的约束条件及发展油页岩产业的可行性,认为目前页岩炼油产业是非常经济的,但易受国际低油价冲击,需要国家制定合理的财税政策予以保护。从发展角度看,资源、技术、环保、政策等制约因素可以克服,我国大规模发展油页岩产业是可行的。针对我国油页岩产业发展存在的问题,从战略、政策、资源管理、勘查、开发、技术等方面提出了加快我国油页岩产业发展的建议。

本书可供从事油页岩产业规划、油页岩勘查、油页岩资源开发利用等方面的科技人员和大专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国发展油页岩产业的可行性/张家强等著. —北京:地质出版社,2010.7
ISBN 978-7-116-06721-9

I. ①中… II. ①张… III. ①油页岩—矿业经济—研究—中国 IV. ①F426.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 119300 号

责任编辑:陈 磊 何 蔓

责任校对:杜 悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324580(编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:11.25 图版:4 面

字 数:300 千字

版 次:2010 年 7 月北京第 1 版·第 1 次印刷

审 图 号:GS(2010)592 号

定 价:38.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06721-9

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前言

油页岩是一种重要的能源矿产资源，用途广泛，主要被用来干馏页岩油和燃烧发电，以及生产副产品建筑材料。页岩油加氢裂解精制后，可获得汽油、煤油、柴油、石蜡、石焦油等多种燃料油类和化工产品，是石油的理想替代资源。20 世纪 50 ~ 60 年代，我国天然石油缺乏，油页岩作为主要能源矿产资源被大量开采使用，当时页岩油产量曾占我国整个石油产量的大半，在国民经济建设和抗美援朝中发挥了十分重要的作用。随着大庆等东部油田的相继发现，我国油页岩的干馏炼油产业逐步退出历史舞台，油页岩资源的勘查工作也陷于停顿。随着石油消费量迅速增长，1993 年我国再度成为石油净进口国；尤其是进入 21 世纪初，我国石油供需缺口不断加大，目前对外依存度已经达到 50% 左右，同期全球石油价格持续高涨并大幅波动。在新形势下，油页岩资源的开发利用再次受到包括我国在内的世界许多国家的广泛关注，油页岩产业迎来重要发展机遇。

《中国发展油页岩产业的可行性》一书是中国地质调查局下达的 2008 年度地质调查项目“全国油页岩资源开发利用可行性研究”的研究成果。该项目的主要任务是分析国内外油页岩资源与开发利用现状，预测油页岩产业发展趋势；总结全国油页岩勘查与资源评价成果，分析全国油页岩资源潜力；分析油页岩开发利用约束条件，优选油页岩开发利用目标矿区，研究全国油页岩开发利用潜力，预测全国页岩油产能；研究我国油页岩开发利用的可行性；研究并提出加强我国油页岩资源勘查与开发利用的建议，为政府宏观决策提供依据。项目承担单位是中国地质调查局发展研究中心，参加单位有中国石油大学（北京）、吉林大学、吉林省地质调查院。项目开展了国内外广泛调研，在 2004 ~ 2006 年国土资源部、国家发展和改革委员会、财政部联合组织开展的《新一轮全国油页岩资源评价》中“全国油页岩资源评价”成果基础上，完成了全国油页岩开发利用潜力与发展油页岩产业可行性的研究工作。

本书系统分析了国内外油页岩资源与开发利用现状，认为世界油页岩产业发展迎来重大历史机遇；系统分析了国内外油页岩干馏工艺技术发展现状，认为包括我国在内的世界油页岩地上干馏炼油技术成熟，而油页岩地下干馏炼油技术尚处于试验阶段；我国绝大多数油页岩矿的地质条件达不到地下干馏炼油工艺的技术要求，应重点发展和应用地面干馏技术。

我国油页岩产业具备发展的雄厚资源基础，但现有油页岩探明储量不足以

支持油页岩产业大规模发展。截至 2008 年底, 全国含油率大于 3.5% 的油页岩总资源量 $7391 \times 10^8 \text{t}$, 其中查明油页岩资源储量 $1100 \times 10^8 \text{t}$, 历年来已消耗油页岩资源储量约 5 亿多吨; 如折算成页岩油, 全国剩余页岩油技术可采资源量有 $163.85 \times 10^8 \text{t}$, 比全国石油剩余技术可采资源量 $161.83 \times 10^8 \text{t}$ 还要丰富, 但全国油页岩勘查工作程度很低, 资源查明率为 15%, 探明率仅为 1%, 剩余探明储量折算成经济可采页岩油储量只有 $2.78 \times 10^8 \text{t}$, 远少于石油剩余经济可采储量 $21.29 \times 10^8 \text{t}$ 。现有油页岩探明储量至多可支撑全国页岩油产能发展到 $800 \times 10^4 \text{t/a}$ 。

全国油页岩资源开发利用潜力巨大, 发展油页岩产业是我国实施石油替代资源战略最现实的选择。在系统分析我国油页岩开发利用的资源、技术、经济、环保和政策等约束条件的基础上, 在全国优选了 28 个含矿区作为油页岩开发利用目标区, 并作出了近期、中期和远期全国页岩油产能预测。今后如能加强全国油页岩资源勘查与开发力度, 2015 年前、2025 年前在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、桐柏、羌塘、伦坡拉、柴达木、大杨树、建昌、茂名等 10 余个重点潜力盆地分别新增查明油页岩资源储量 $1200 \times 10^8 \text{t}$ 和 $3000 \times 10^8 \text{t}$ 以上, 新增探明地质储量 $150 \times 10^8 \text{t}$ 和 $380 \times 10^8 \text{t}$ 以上, 再经过 20 年的发展, 全国页岩油产能可以达到 $2000 \times 10^4 \text{t/a}$, 相当于再造半个大庆油田。我国发展油页岩产业, 不仅可以大量补充石油资源, 而且可以促进地方经济发展, 增加就业机会, 意义十分重大。

研究认为我国大规模发展油页岩产业是可行的。页岩油的生产成本远低于深海原油及油砂炼油的成本, 具有一定的竞争能力。目前页岩炼油产业是非常经济的, 但易受国际低油价冲击, 需要国家制定合理的财税政策予以保护。从发展角度来看, 资源、技术、环保、政策等制约因素可以克服。针对我国油页岩产业发展存在的问题, 从战略、政策、资源管理、科技等角度提出了加快我国油页岩资源勘查与开发利用的建议。

本书共分七章。第一章由张家强、钱家麟、李术元、柳蓉执笔; 第二章由张新安、张迎新执笔; 第三章由钱家麟、李术元、王剑秋、张家强执笔; 第四章由刘招君、朱建伟、陈会军、孟庆涛、许圣传、刘忠、温志良执笔; 第五章由钱家麟、李术元、张家强执笔; 第六章、第七章由张家强、刘志逊、王德杰执笔。最终统稿由张家强完成。

在“全国油页岩资源开发利用可行性研究”实施过程中, 得到了中国地质调查局资源评价部领导和能源处、吉林省国土资源厅的大力支持; 得到了中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院包书景, 茂名石化矿业有限公司施国泉、许杰林和邓业启, 国家发展与改革委员会能源研究所刘小丽, 吉林桦甸发展与改革局王佐和谭孟河, 抚顺矿业集团韩放和肇永辉, 抚顺矿业集团工程技术研究中心高健, 中国石油天然气股份有限公司新能源处杨能宇和丛连铸, 中国中煤能源集团公司企业发展部立相锋, 黑龙江煤气化工公司王伟东, 吉林成大弘晟能源有限公司曹庆喜和邱闯, 亚洲新能源投资有限公司刘连兴, 亚洲新能源吉林桦甸北台子油页岩开发有限公司王旭等专家的大力支持和帮助。在此表示衷心感谢!

限于笔者的水平, 欠妥之处恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 国内外油页岩资源与开发利用现状	1
一、世界油页岩资源与开发利用现状.....	2
二、我国油页岩资源与开发利用现状	15
三、世界油页岩产业发展趋势及存在问题	25
第二章 美国油页岩产业发展战略	30
一、美国油页岩战略研究报告	30
二、美国油页岩产业发展战略线路图	31
三、美国有关油页岩政策法案	35
四、美国油页岩战略及能源法落实情况	39
第三章 国内外油页岩干馏工艺技术发展现状	41
一、油页岩干馏基本原理	41
二、油页岩地下干馏工艺	42
三、油页岩地上干馏工艺	44
四、世界油页岩干馏炉的评价	56
第四章 中国油页岩资源潜力分析	60
一、资源潜力分析步骤	61
二、全国油页岩资源评价数据更新	61
三、全国油页岩资源分布特征	64
四、全国油页岩勘查工作程度	73
五、全国普查以上油页岩资源分布特征	78
六、典型（含）矿区油页岩资源潜力	84
七、全国油页岩资源潜力分析.....	113
第五章 中国油页岩开发利用潜力分析	116
一、油页岩开发利用约束因素分析.....	116

二、全国油页岩开发目标优选·····	123
三、全国油页岩开发利用潜力分析·····	131
四、典型实例分析·····	137
五、油页岩开发利用方案选择·····	147
第六章 中国油页岩开发利用可行性分析·····	149
一、发展页岩油产业的必要性·····	150
二、发展油页岩产业的可行性·····	152
第七章 中国油页岩勘查与开发利用建议·····	162
一、对油页岩产业发展战略研究的建议·····	162
二、对护持政策和税费优惠政策的建议·····	163
三、对资源管理的建议·····	164
四、对全国油页岩勘查工作的建议·····	165
五、对全国油页岩开发利用的建议·····	166
六、对油页岩勘查与开发利用技术研发的建议·····	168
参考文献·····	170
图版·····	175

第一章

国内外油页岩资源与开发利用现状

世界油页岩资源极其丰富，但并未被人类很好地开发利用。目前，世界油页岩蕴藏的页岩油总资源量有约 $4450 \times 10^8 \text{t}$ ，其中美国就有约 $3000 \times 10^8 \text{t}$ ，中国排名第二位。世界上大多数国家的油页岩地质勘探程度不够，研究程度很低，目前只有美国、澳大利亚、瑞典、爱沙尼亚、约旦、法国、德国、巴西和俄罗斯等国的部分油页岩矿床做了详细勘探和评价工作，查明的油页岩资源储量还只占整个资源量的一小部分。目前，世界年利用油页岩矿石 $2800 \times 10^4 \text{t}$ ，主要用来发电和干馏页岩油。世界从事油页岩燃烧发电的国家主要有爱沙尼亚、中国、德国等，年发电量达 2452MW，其中爱沙尼亚的油页岩发电量占本国电消费量的 95%。世界从事油页岩干馏炼油生产的国家主要有爱沙尼亚、中国、巴西等，2008 年生产页岩油 $100 \times 10^4 \text{t}$ 。

历史上，世界油页岩的生产经历了 3 个高峰期，目前世界油页岩产业发展处于又一个爬坡阶段。近年来，国际原油价格经过急剧上升后，出现大幅波动，由于页岩油生产有利可图，又是石油的理想替代资源，新世纪世界油页岩产业再次迎来重大发展机遇。美国等国家油页岩产业的发展给予厚望，并着手可行性研究，研究制定油页岩发展战略和产业发展规划，联邦政府和州政府还制定了包括油页岩在内的非常规能源法，为油页岩产业发展提供政策支持。

我国油页岩产业也进入快速发展阶段。油页岩产业曾为我国国民经济建设做出重大贡献，新中国成立初期我国石油消费的一半依赖于页岩油。1959 年抚顺页岩油产量达到最高峰 $72 \times 10^4 \text{t}$ ，1971 年茂名页岩油产量达到最高峰 $18.24 \times 10^4 \text{t}$ 。2005 年以来，全国油页岩资源勘查和开发又开始迅速热起来，2008 年页岩油产量上升到 $40 \times 10^4 \text{t}$ ；近期可以形成 $200 \times 10^4 \text{t}$ 产能。其中，目前正在建设的新建、扩建页岩油产能有 $60 \times 10^4 \text{t}$ ，近期规划新建、扩建页岩油产能有 $100 \times 10^4 \text{t}$ 。

世界油页岩产业发展前景光明。现有生产国家都做出了增产页岩油、油页岩发电的发展规划。有关国家、众多能源公司相信今后世界油页岩产业会出现较快发展，纷纷开展了油页岩干馏新工艺的研发和中试工作。目前，国际上油页岩地上干馏炼油有成熟的技术；油页岩地下干馏炼油尚在试验阶段。未来油页岩干馏技术发展趋势：简化工艺（如发展地下干馏技术），降低成本（资源综合利用），保护环境，技术综合。

影响油页岩产业发展的因素有资源、经济、环保、技术和政策等，不同的国家有不同问题。

一、世界油页岩资源与开发利用现状

油页岩 (oil shale) 是一种富含有机质、具有微细层理、可以燃烧的细粒沉积岩; 也是一种能源矿产, 属于低热值固态化石燃料。油页岩中有机质的绝大部分是不溶于普通有机溶剂的成油物质, 俗称“油母”。因此, 油页岩又称“油母页岩”(钱家麟等, 2008)。

一般地, 国际上常将每吨油页岩能产出 0.25 桶 (即 0.034t) 以上页岩油的油页岩称为“油页岩矿”, 或者将产油率高于 4% 者的油页岩称为矿。我国将含油率高于 3.5% 的油页岩称为矿 (刘招君等, 2009)。

油页岩用途广泛。油页岩主要被用来干馏页岩油和燃烧发电。页岩油加氢裂解精制后, 可获得汽油、煤油、柴油、石蜡、石焦油等多种燃料油类和化工产品。油页岩还可炼制出各种合成燃料气体, 也可以燃烧供暖。烟尘可以制喷雾炭黑。副产品半焦炭渣还可用于制造砌块、砖、水泥、陶粒等建材产品, 也可以用来制白炭黑、 Al_2O_3 、沸石、贵金属等, 还可以制造土壤增肥剂、有机化肥 (如油页岩有机复合肥), 可以铺路。

(一) 世界油页岩资源现状

1. 世界油页岩资源分布

油页岩资源在世界许多地区都有分布, 但分布并不均匀, 主要分布于美国、中国、俄罗斯、约旦、巴西、摩洛哥、澳大利亚、爱沙尼亚、加拿大等国家 (表 1-1)。其中, 美国、中国、俄罗斯三个国家的页岩油资源量就占了整个世界页岩油资源量的 90% 左右。根据目前世界油页岩总资源量的统计结果, 若将它折算成页岩油, 世界页岩油总资源量可以达到 $4452 \times 10^8 \text{t}$, 超过了世界石油资源总量 $4054.3 \times 10^8 \text{t}$ (张抗, 2009)。目前, 世界剩余探明石油储量 $1700 \times 10^8 \text{t}$ (BP, 2009)。

表 1-1 世界主要国家页岩油资源量

国家	资源量		
	亿桶 (2008 年)	10^8t (2003 年)	评估日期
美国	21180	3035.66	2003 年
中国	3280	476.44	2006 年
俄罗斯	2710	387.70	2002 年
约旦	560	52.33	1999 年
巴西	520	117.34	1994 年
摩洛哥	378	81.67	1984 年
澳大利亚	310	45.31	1999 年
爱沙尼亚	163	24.94	1998 年
加拿大	152	63.00	1997 年
扎伊尔		143.10	1958 年
意大利		14.31	2000 年
法国		10.02	1978 年
世界合计	>29253	4451.82	

注明: 国外数据引自 2003 年 Dyni 统计数据、2008 年世界油页岩大会资料, 中国数据引自 2006 年国土资源部等《全国油页岩资源评价报告》。

但从统计的油页岩资源量分布看,低含油率的油页岩占了绝大多数。目前,世界油页岩的综合开发技术普遍较低,主要开发含油率高的油页岩,而对低含油率的油页岩基本未开发。

各国油页岩形成的时代也不一致,从寒武纪、奥陶纪、泥盆纪、石炭纪、三叠纪、侏罗纪、二叠纪、白垩纪、古近纪到新近纪都有分布(表1-2)。

表1-2 国外主要油页岩分布时代及其特征

地质时代		油页岩分布	形成环境及特征
新生代	新近纪	美国加利福尼亚南部、意大利西西里岛、俄罗斯高加索	海相,与硅藻土和稠油共生
	古近纪	美国(绿河、皮申斯盆地)	湖相沉积
		巴西南部、捷克、俄罗斯南部、澳大利亚昆士兰中部	陆相,与煤共生
中生代	白垩纪	以色列、约旦、阿拉伯半岛南部、澳大利亚昆士兰西部	海相地台型、浅海沉积型
	侏罗纪	美国阿拉斯加州、法国北部巴黎盆地、东欧、南欧、亚洲东部	海、陆相湖泊沉积,与煤共生
	三叠纪	扎伊尔的斯坦利维亚盆地、东欧、南欧、美国阿拉斯加州	海相
古生代	二叠纪	澳大利亚(昆士兰东部)	浅海沉积型
		澳大利亚(南威尔士的悉尼盆地、昆士兰东部)	陆相,与煤共生
		美国(蒙大拿州)	湖相沉积
		巴西巴拉那盆地、南非卡罗(Karoo Basin)盆地	海相
		法国(奥顿、圣希拉尔、特洛特、苏尔莫林)	陆相,与煤共生
	石炭纪	美国:犹他、堪萨斯等	海相
	泥盆纪	美国(中部和东部各州)	湖相沉积
		俄罗斯(伏尔加-乌拉尔地区)	海相
	奥陶纪	波罗的盆地(爱沙尼亚中奥陶世)	与石灰岩互层
		美国(阿巴拉契亚盆地)	海相
		加拿大	海相
	寒武纪	俄罗斯(西伯利亚地台东北部安纳巴尔河和勒拿河的奥列尼尧克盆地)	富含于海相钙质、泥质、硅质沉积物中
元古宙	前寒武纪	美国(密执安、威斯康星州)	海相

• 美国

美国的油页岩主要形成于新近纪、古近纪、泥盆纪、石炭纪-二叠纪。美国评价的油页岩资源量约 $33400 \times 10^8 \text{t}$, 占世界总量的 70% 左右; 折算成页岩油 $3036 \times 10^8 \text{t}$ (Dyini, 2003), 远远超过世界石油的储量。美国主要有两个油页岩矿床: 产于科罗拉多州、怀俄明州、犹他州始新统的绿河油页岩矿床, 以及产于美国东部泥盆系-密西西比系的黑色油页岩矿(钱家麟等, 2008)。

此外, 美国东部宾夕法尼亚系还分布有与煤矿伴生的油页岩矿床, 内华达州、蒙大拿州、阿拉斯加州、堪萨斯州等地区也陆续发现了一些油页岩矿床(钱家麟等, 2008)。但目前人们研究的重点仍是绿河油页岩矿和泥盆系上统一密西西比系下统的黑色油页岩矿。

a. 绿河组油页岩

美国绿河油页岩矿是世界上最大的油页岩矿，沉积时代为早始新世到中始新世，含矿地层为绿河组。主要沉积在4个盆地内：皮申斯盆地、尤因塔盆地、绿河盆地、瓦沙基盆地（Baughman, 1978）。前两个盆地分别位于科罗拉多州和犹他州，后两个盆地位于怀俄明州。绿河油页岩矿为湖相沉积，其分布面积大约有 65000km^2 ，但最厚和最富的油页岩集中在南部盆地的中央，油页岩最深可达1200m。油页岩层一般较厚，含油率平均约11.44%，局部高达38.12%。评价页岩油资源量 $2150 \times 10^8\text{t}$ （Dyini, 2003）。

绿河油页岩最大的油页岩矿床发育在科罗拉多州的皮申斯盆地中，评价的油页岩资源储量约 $1310 \times 10^8\text{t}$ （Winchester D E, 1916; Donnell J R, 1961）。油页岩主要产于始新统，其中又分成为4个段：伊瓦夸辛克里克段（厚达450m）、帕拉丘特克里克段（厚60~600m）、加登古尔奇段（厚80~300m）、道格拉斯克里克段（厚达140m）。其中，帕拉丘特克里克段为发育油页岩的主要地层段，而马霍加尼带又为最富的油页岩带，厚25~70m，平均含油率为11.91%或稍低。这个油页岩带在南部位于地表以下25m处，中部在地表以下70m处。在 3000km^2 的分布区域内，估计页岩油的地质储量有 $250 \times 10^8\text{t}$ 。马霍加尼带以下还有两个富含油页岩层段，共计页岩油资源量约 $225 \times 10^8\text{t}$ 。

犹他州的尤因塔盆地为一个不对称向斜，盆地内发育绿河组，油页岩矿厚约180m，含油率为3.81%~18.11%。埋藏深度在地表以下300~900m。评价的油页岩资源储量：平均含油率为5.72%的资源储量约有 $30 \times 10^8\text{t}$ ；含油率为10%的资源储量约有 $40 \times 10^8\text{t}$ ；最富的含油率为11.91%的资源储量约有 $30 \times 10^8\text{t}$ 。评估的矿层包括了最小厚度为4.5m的油页岩。

怀俄明州绿河油页岩矿分布在绿河盆地和瓦沙基盆地，两个盆地评价的页岩油资源量约为 $(500 \sim 600) \times 10^8\text{t}$ 。其中，绿河盆地的油页岩资源折算为页岩油资源量有 $350 \times 10^8\text{t}$ （Culbertson W C 等, 1980）。绿河盆地主要分为三段：拉奈泥灰岩段（深度为230~260m）、维尔肯斯皮克段（深度为320m和500m）、蒂普顿段（深度大于580m）。蒂普顿段为油页岩发育段，厚度为5~14m，是范围相当大的淡水沉积物。但是，蒂普顿段油页岩的品位低，含油率仅有1.43%~4.77%。氧、氮、硫含量大约分别为1.4%~2.4%。因此，油页岩是否具有经济意义还需要进一步研究。瓦沙基盆地地层层序与绿河盆地相似，但油页岩资源量没有绿河盆地丰富。

b. 上泥盆统一密西西比统油页岩

除绿河油页岩矿外，分布在美国东部的上泥盆统一密西西比统之间的黑色油页岩的资源量也相当丰富，仅次于绿河油页岩矿。美国东部的油页岩为内陆海沉积环境，内陆海覆盖了密西西比河以东的美国中部和东部的大部分地区。泥盆系—密西西比系油页岩分布范围为 $65 \times 10^4\text{km}^2$ ，从纽约州到得克萨斯州，它们的埋深可达到3000m以上，含油率为9.53%。页岩油资源量估计高达 $1500 \times 10^8\text{t}$ ，其中只有5%的油页岩可以通过露天矿开采（Dyini, 2003）。

• 澳大利亚

澳大利亚的油页岩沉积地质时代跨越较大，从寒武纪到古近纪都有分布。根据澳大利亚国家能源咨询委员会的资料，澳大利亚评价的油页岩资源量为 $580 \times 10^8\text{t}$ ，折算为页岩油资源量 $45.31 \times 10^8\text{t}$ 。

澳大利亚的油页岩主要分布在东部 (Cook 等, 1989)。东部三分之一的领土 (昆士兰州、新南威尔士、南澳大利亚、维多利亚以及塔斯马尼亚州) 都较发育有油页岩, 其中昆士兰州油页岩最有经济开发价值。昆士兰州古近纪油页岩主要包括湖相朗德勒 (Rundle)、吐阿特 (Tuart) 和康多尔 (Condor) 油页岩, 以及 Julia Creek 海相油页岩。Julia Creek 海相油页岩分布很广, 而且埋藏很浅, 但是品位较低, 平均只有 3.53%。

昆士兰东部的油页岩主要产于二叠系, 分布在罗克汉普顿附近的朗德勒, 在沿海地区有油页岩资源 $4 \times 10^8 \text{t}$, 其中 $2/3$ 的油页岩含油率都大于 3.81%。

• 巴西

巴西评价的页岩油资源量约 $117 \times 10^8 \text{t}$ 。油页岩主要产于二叠系和古近系。

古近系的油页岩位于圣保罗东北沿帕拉伊巴河的特雷门贝 - 陶巴特盆地。古近系沉积厚度约 280m, 其中发育一层厚度为 35m、五层厚度为 0.3 ~ 0.8m、含油率为 0.31% ~ 20.97% 的湖相成因油页岩层。帕拉伊巴河流域主要有两个油页岩矿区, 面积约 86km^2 , 页岩油储量约 $3 \times 10^8 \text{t}$, 其中 50% 位于 25m 厚的覆盖层下面, 可用露天方法开采 (Dyni, 2003)。

二叠系伊拉蒂组油页岩主要分布在巴西南部地区, 油页岩出露条件好, 从圣保罗向南油页岩露头延伸 1700km, 并且一直延伸到南里奥格兰德州的南部边界, 到达乌拉圭的北部。二叠系伊拉蒂组油页岩品级高, 是巴西经济效益最好的油页岩矿。

• 加拿大

加拿大的油页岩主要产于奥陶系—白垩系, 油页岩类型分为湖相和海相。现已发现 19 个油页岩矿床 (Davies 和 Nassichuk, 1988)。其中, 最有开采价值的油页岩矿床位于 Fundy 盆地的 Moncton 次级盆地。

湖相油页岩发育于石炭系。石炭系阿尔伯特 (Albert) 组的湖相层状油页岩分布于 St. Johns 和 Moncton 之间的新不伦瑞克南部, 油页岩厚度 15 ~ 360m。下石炭统湖相油页岩主要发育于加拿大北极圈群岛的 Grinnell 半岛, 油页岩厚度最厚可达 100m。目前, 加拿大油页岩资源的探明储量还比较少。

海相油页岩发育于白垩系、泥盆系 Kettle Point 组和奥陶系 Collingswood 页岩 (安大略湖南部)。此外, 白垩系 Boyne 和 Favel 油页岩资源储量丰富, 但是油页岩的品位很低, 主要分布在马尼托巴湖、萨斯喀彻温省、阿尔伯达省的草原地区, 现已部分开采, 具有一定的经济价值。

• 爱沙尼亚

爱沙尼亚的油页岩主要为库克油页岩, 从爱沙尼亚北部及向东至俄罗斯彼得堡, 油页岩分布面积约 $5 \times 10^4 \text{km}^2$, 页岩油探明储量为 $25 \times 10^8 \text{t}$ 。库克油页岩有两个主要矿区, 一个是爱沙尼亚油页岩矿区, 另一个是较新的 Tapa 油页岩矿区。爱沙尼亚油页岩年产量经历了几次波动, 在第二次世界大战时达到了顶峰, 11 个矿点年开采油页岩就达 $3140 \times 10^4 \text{t}$ 。1980 ~ 1995 年产量递减至 $1400 \times 10^4 \text{t}$ (Kattili 和 Lokk, 1998), 随后产量又开始回升。1997 年, 产量达到 $2200 \times 10^4 \text{t}$ (Õpik, 1998)。爱沙尼亚 81% 的油页岩都用来发电, 供应全国 92% 的电力; 16% 的油页岩用于石油化工; 余下 3% 的油页岩用于水泥制造以及其他一些产品的加工利用。

• 约旦

根据约旦自然资源管理机构 (NRA) Maher Hijazin 总经理于 2008 年 7 月 7 日的讲话,

约旦拥有数量巨大的油页岩地质储量,估计在 $400 \times 10^8 \text{t}$ 左右,这个数字在今后几年里还将增加一倍。约旦油页岩资源主要分布在中部和南部地区。

• 印度尼西亚

最近,印度尼西亚发现了大量的油页岩资源。印度尼西亚地质资源中心在 2002 ~ 2007 年之间对印度尼西亚古近系油页岩 49 个区块进行了初步的勘查。据报道,印度尼西亚油页岩资源量高达 $11 \times 10^{12} \text{t}$ (油页岩含油率在 $1 \sim 124 \text{L/t}$)。其中孙甘达莱 (Sungai Dareh) 油页岩资源量达 $4.7 \times 10^{12} \text{t}$ (油页岩含油率 $18 \sim 60 \text{L/t}$), 索马特拉 (Sumatra) 和波顿 (Buton) 油页岩资源量达到 $4.6 \times 10^{12} \text{t}$ (Hadianito, 2008)。当然,这样巨额的油页岩资源只是初步的,有待进一步查明、落实储量,而且应该排除油页岩含油率在 40L/t 以下的资源。

此外,法国、德国、英国、意大利、俄罗斯的油页岩资源也较丰富,土耳其等中东国家也有一定的油页岩储量。

2. 世界油页岩资源勘查现状

世界上大多数油页岩区地质勘探程度不够,研究程度很低,也没有统一估算油页岩资源量的标准,不同国家对油页岩资源量估算所用的工业指标不同,因此不同学者估算的资源量难以对比,故也很难对全球油页岩资源量进行正确估算。目前只有美国、澳大利亚、瑞典、爱沙尼亚、约旦、法国、德国、巴西和俄罗斯等国的部分油页岩矿床做了详细勘探和评价工作,其他许多矿床的资源潜力有待进一步探明。

因此,从世界来看,很多国家的油页岩资源并未做过详细的普查,查明的油页岩储量还只占整个资源量的一小部分。随着全球能源消耗的快速增长,开展全球油页岩资源的评估工作已迫在眉睫。世界巨大的油页岩资源将对全球的能源战略起到重要的作用。从所统计的油页岩资源量分布看,低含油率的油页岩占了绝大多数。目前,油页岩综合开发利用技术普遍较低,根本不能对低含油率的油页岩进行开发,如果不断研制开发先进的科学技术手段及设备,将极大地提高油页岩的综合开发能力,对全球能源资源走可持续发展道路具有举足轻重的作用。

(二) 世界油页岩开发利用现状

油页岩的开发利用可以追溯到 17 世纪。世界上将油页岩干馏制取页岩油的工业始建于 19 世纪上半叶,至今有近 200 年历史。伴随着两次世界大战、石油工业兴起和石油危机,世界油页岩产业曾几度兴衰。2000 年以来世界原油供需关系日趋紧张,2005 年以来国际原油价格一路飙升并大幅波动,给石油进口国的社会经济发展带来较大影响,各国政府和企业重新审视页岩油作为石油替代能源的重要性和经济性,当前世界油页岩产业面临极好的发展机遇。

1. 世界油页岩开发历史

1835 年法国建成世界上第一座页岩炼油厂,将页岩干馏制取页岩油,再制取煤油、石蜡等用于照明;而后英国、德国、西班牙等也发展了页岩油的生产。油页岩的年产规模达百万吨;页岩油进一步加工成诸如煤油、灯油、石蜡、燃料油、润滑油、油脂、石脑油、照明气和化学肥料、硫酸铵等产品。

到了 20 世纪早期,由于汽车工业的发展和第一次世界大战,汽油、柴油的需求大增,西欧页岩油生产得到发展;同时油页岩作为运输燃料也被大量的开采。1921 年爱沙尼亚

建成单炉日处理油页岩 7t 的直立圆筒内热式干馏炉，1924 年建成日处理油页岩 33t 的干馏炉（Yefimov，2000）。1937 年世界页岩油产量达 $50 \times 10^4 \text{t}$ 。

20 世纪第二次世界大战后到 1966 年，由于原油的大量开采利用，页岩油生产成本无法与廉价的天然石油相竞争，油页岩作为主要矿物能源才退出历史舞台。那时，西欧的页岩油产业先后停办，只有德国保留有油页岩产业。德国道顿豪逊市鲁尔巴赫水泥厂先后于 1963 年建有两台、于 2001 年又建一台油页岩流化床燃烧产汽发电装置，电力用于本厂，页岩灰制水泥（Hilger，2003；Rohrbach Zement GmbH，2002；钱家麟，1987）。

20 世纪后半叶，世界油页岩产业并没有停止发展。尤其是二战后的两次石油危机时期，主要石油消费国家竞相研发页岩干馏炼油工程。虽然油价很快回落，这些国家还来不及建设大型页岩油厂，但油页岩的采炼技术得到了提高和发展，页岩干馏单炉处理能力更加扩大，加工技术更加先进，环保措施更加完善。现在，油页岩的利用更加广泛，爱沙尼亚、巴西、中国、以色列、澳大利亚、德国等国对油页岩的利用已经扩展到发电、取暖、提炼页岩油、制造水泥、生产化学药品、合成建筑材料以及研制土壤增肥剂等各个方面。据统计，2000 年全球开采的油页岩中有 69% 用于发电和供暖，25% 用于提炼高收益的页岩油及相关产品，6% 用于生产水泥、化工、金属提取以及其他用途（Brendow，2003）。

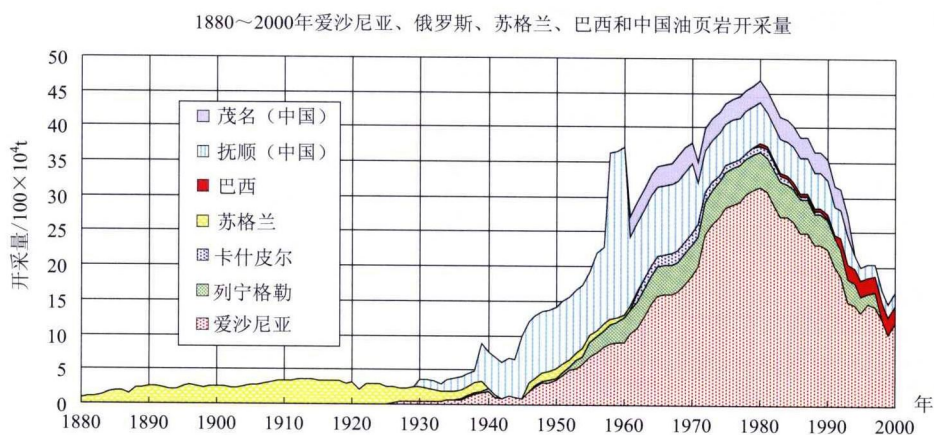


图 1-1 1880~2000 年世界主要国家和地区油页岩开采量

有数据表明，世界油页岩的生产经历了三个高峰期（图 1-1）。第一个高峰期出现在第二次世界大战前夕的 1938 年，世界油页岩开采量达到 $800 \times 10^4 \text{t}$ 的峰值；第二个高峰期出现在 1959 年，世界油页岩开采量达到 $3700 \times 10^4 \text{t}$ 的峰值；第三个高峰期是在 1980 年，油页岩的开采量达到 $4540 \times 10^4 \text{t}$ 的历史高峰。此后产量基本上一路下滑，到 2000 年油页岩开采量只有 $1600 \times 10^4 \text{t}$ 。到 2008 年，世界油页岩开采量又上升到 $2810 \times 10^4 \text{t}$ ，油页岩的产量上升到 $100 \times 10^4 \text{t}$ 。据初步统计，自 1980~2008 年，世界油页岩的开采总量达到 $20.5 \times 10^8 \text{t}$ ，油页岩年开采量高的国家主要有爱沙尼亚、俄罗斯、巴西、中国和德国。

2. 世界油页岩开发利用概况

目前世界油页岩的年开采量约 $2810 \times 10^4 \text{t}$ ，主要用于发电和干馏页岩油（表 1-3）。其中爱沙尼亚约 $1400 \times 10^4 \text{t}$ （ $1100 \times 10^4 \text{t}$ 用于燃烧发电， $300 \times 10^4 \text{t}$ 用于干馏炼油），中国

约 $1000 \times 10^4 \text{t}$ (主要用于干馏炼油), 俄罗斯 $130 \times 10^4 \text{t}$ (出口至爱沙尼亚), 巴西 $250 \times 10^4 \text{t}$ (用于干馏炼油), 德国 $30 \times 10^4 \text{t}$ (用于燃烧发电, 页岩灰制水泥)。

表 1-3 世界各国油页岩年开采量

国 家	油页岩开采量/ 10^4t	用 途
爱沙尼亚	1400	$1100 \times 10^4 \text{t}$ 用于燃烧发电, $300 \times 10^4 \text{t}$ 用于干馏炼油
中国	1000	主要用于干馏炼油
俄罗斯	130	出口至爱沙尼亚
巴西	250	用于干馏炼油
德国	30	用于燃烧发电, 页岩灰制水泥
世界总计	2810	干馏炼油、燃烧发电、页岩灰制水泥

利用油页岩生产页岩油的国家有中国、爱沙尼亚和巴西 (表 1-4)。2008 年世界页岩油产量约 $100 \times 10^4 \text{t}$ 。其中, 爱沙尼亚年产页岩油 $40 \times 10^4 \text{t}$, 有两种干馏制取页岩油的炉型, 即葛洛特 (Galoter) 颗粒页岩干馏炉和基维特 (Kiviter) 块状页岩干馏炉。巴西年产页岩油 $18 \times 10^4 \text{t}$, 有两台佩特洛瑟克斯 (Petrosix) 块状页岩干馏炉。中国年产页岩油 $40 \times 10^4 \text{t}$, 主要利用抚顺式炉干馏炼油。

表 1-4 世界生产页岩油的国家

国 家	年产页岩油/ 10^4t	干馏炼油炉型
爱沙尼亚	40	葛洛特 (Galoter) 颗粒页岩干馏炉 基维特 (Kiviter) 块状页岩干馏炉
巴西	18	佩特洛瑟克斯 (Petrosix) 块状页岩干馏炉
中国	40	抚顺干馏炉
其他	2	
世界总计	100	

利用油页岩直接燃烧产气发电的主要国家有爱沙尼亚、德国和中国 (表 1-5), 以色列的油页岩年发电量少。爱沙尼亚每年用于油页岩燃烧发电达 $1100 \times 10^4 \text{t}$, 提供了 2400MW 的电力, 占爱沙尼亚全国用电量的 95%。德国有一小规模油页岩水泥厂, 主要是利用油页岩燃烧发电, 年发电量达 22MW, 以及利用页岩灰制水泥。中国桦甸、遂溪等地建有油页岩燃烧发电的小型电厂, 年发电 30MW。

表 1-5 世界油页岩燃烧产气发电的国家

国 家	油页岩年用量/ 10^4t	生产电力/MW
爱沙尼亚	1100	2400
德国	36	22
中国	50	30
世界总计	1186	2452

油页岩加工产品综合利用的国家也主要有爱沙尼亚、德国和中国。爱沙尼亚将油页岩燃烧发电产出的页灰的一小部分制造水泥和砖块等建筑材料，一小部分页灰用于改良土壤，大部分页灰用于填埋并栽种植物。德国一个水泥厂利用油页岩燃烧发电产生的页灰制水泥，电力供本厂所需。中国也利用部分页灰用于制造水泥、砖块等建材。

油页岩产业环境保护较好的国家主要有德国、澳大利亚和爱沙尼亚。德国油页岩水泥厂排放的废气等符合欧盟的规定。澳大利亚曾开发 ATP 颗粒页岩干馏炉，其三废（废水、废渣、废气）的排放符合澳大利亚的环保规定（钱家麟等，2006）。爱沙尼亚的葛洛特（Galoter）页岩干馏炉的排放符合欧盟的规定（钱家麟等，2006）。

随着开发利用技术的进步和环保意识的增强，全球趋向于充分利用油页岩资源。目前，油页岩的利用已经更趋复合、多元化。例如，在德国一个名叫 DRZ 的工厂中，油页岩既用来发电，作为工厂的动力，又用做灰渣砖的燃料和原材料，生产水泥、土壤或岩石的稳固剂、填充剂和密封材料。多余的电能还可以卖给公众电网。

3. 各国油页岩开发利用及技术发展现状

• 美国掀起了页岩油开发研究的新高潮

美国有世界上最丰富的油页岩资源。美国自 20 世纪 20 年代开始了油页岩干馏炉试验。自 50 年代至 80 年代，很多大石油公司及研究单位开展了油页岩的地上干馏多种炉型的中试和工业试验，如联合油公司开发了利用岩石泵的块状油页岩自下而上移动的干馏炉工业试验炉型，设计日处理油页岩量高达 10000t，是世界上规模最大的干馏炉型。所生产的页岩油经加氢制成合格的喷气燃料和轻柴油（Barnet, 1982; Callahan, 1983）。在油页岩地下干馏方面，如大西洋公司的改良式地下干馏试验也曾经有不少进展，产出的页岩油收率达实验室铝甑的 60% ~ 70%（Cha 等，1982）。但至 80 年代后期，由于油价低迷，每桶自 31 美元跌至 10 美元。至 90 年代，美国各大公司，包括联合石油公司的干馏炉型试验和大西洋公司的地下干馏试验相继停顿。

进入 21 世纪，特别是 2004 年以来，国际油价高涨，促使美国政府、国会以及一些石油公司重新关注油页岩、油砂、稠油等非常规能源的开发利用。

2004 年美国能源部负责石油储备的副部长助理办公室及海军石油和油页岩储备办公室发表了题为“美国油页岩的战略意义”的两卷本研究报告。报告指出美国不但有丰富的油页岩资源，且有相当的技术基础，可以生产出各种石油产品，保证军需民用，不但带来经济效益和就业机会，还会带来无法用金钱衡量的其他战略利益和国家安全利益。研究报告还制定了雄心勃勃的油页岩开发利用规划，预计从 2011 年开始开发油页岩资源，到 2020 年使页岩油年产量达到 1×10^8 t，最终建成年产 5×10^8 t 的页岩油生产能力。

2005 年美国国会通过了发展非常规能源的法案，又掀起了油页岩干馏炼油的研究开发新高潮（Brown, 2007）。2006 年美国内政部已批准了 6 项矿产土地招租项目给埃克森美孚等石油公司，支持其开展油页岩干馏炼油试验。计有：在科罗拉多州有三项，在犹他州有两项，在怀俄明州有一项。科罗拉多州的三项由于油页岩埋藏较深，都是进行地下干馏试验；犹他州的两项和怀俄明州的一项则由于油页岩埋藏较浅，都是地上干馏（O'Connor, 2008）。

美国前总统布什于 2008 年 6 月 18 日声明，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。据美国能源部 2008 年 8 月关于油页岩开发的报告统计，当前美国

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工艺, 11 家开展地上干馏工艺的研发, 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正处于实验室、或数学模拟、或概念研究阶段, 只有壳牌公司正进行现场地下干馏中试, 还有一些公司正筹划开展现场试验, 另有几家公司则在致力于干馏新技术的开发 (Dammer, 2008; Killen, 2009; 李术元, 2009)。据了解, 2008 年下半年以来, 油价有大幅波动, 但对美国一些公司影响不大。

美国油页岩资源丰富, 品位高, 约有 7500 亿桶油当量的油页岩含油率在 25 加仑/t (或 8.12%) 以上, 适合短期利用现有技术进行开采。但美国始终没有页岩油的工业生产 (Dammer, 2007)。

世界各主要公司在美国开展油页岩开发试验的简况如下:

a. 壳牌公司的地下干馏工艺 (ICP)。目前, 壳牌 (Shell Exploration & Production Co.) 已经在皮斯河、科罗拉多州和休斯敦开展了 ICP 技术现场试验 (4 个试验区)。已经在一块面积为 10m × 13m 的地下干馏试验区内, 已产出 1300 桶轻质页岩油及干馏气。目前, 壳牌公司正在美国科罗拉多州马霍甘尼 (Mahogany) 试验基地, 对绿河油页岩进行 ICP 技术 (地下干馏) 现场中试 (Wolfgang, 2007; Beer 等, 2008; Nair 等, 2008)。壳牌公司希望在下一个 10 年内能做出工业化生产的决定。

b. 埃克森美孚公司的 Electrofrac 工艺。埃克森美孚公司 (ExxonMobil) 正在开发一种称为 Electrofrac 的工艺, 已进行了实验室试验和数学模拟, 正准备在科罗拉多州里奥勃兰克进行现场试验 (Meurer 等, 2008; Thomas 等, 2009)。

c. 雪佛龙公司的地下干馏工艺。雪佛龙公司 (Chevron) 也计划在科罗拉多州开发油页岩地下干馏工艺 (李术元等, 2009)。

d. 美国页岩油公司的地下干馏工艺。美国页岩油公司 (American Shale Oil, LLC, 简称 AMSO, 前称 EGL) 也计划在科罗拉多州里奥勃兰克对绿河页岩进行地下干馏 (Wallman 等, 2008; Burnham 等, 2008)。已进行了模拟研究, 计划在 2010 年开展现场中试, 将深入地下 600m, 进行油页岩地下干馏。并预计 7~8a 后将开始工业化生产。

e. 油页岩工艺国际公司的派拉霍干馏工艺技术。油页岩工艺国际公司 (Shale Tech International) 位于科罗拉多州, 拥有派拉霍干馏工艺技术 (Paraho Process)。该地上干馏工艺早在 20 世纪 70 年代为派拉霍公司开发, 曾建有日加工 24t 油页岩的中试和日加工 240t 的半工业试验装置。该装置为垂直圆筒形炉, 中部通入热气加热干馏页岩。当前油页岩工艺国际公司在科罗拉多州雷弗尔 (Rifle) 还拥有派拉霍中试装置, 可以进行试验 (Dammer, 2008; Killen, 2009)。

f. 油页岩开发公司的油页岩开发计划。油页岩开发公司 (Oil Shale Exploration Company, 简称 OSEC) 与巴西石油公司 (Petrobras) 和日本三井物产公司 (Mitsui 和 Co. Ltd.) 合资, 拟采用巴西石油公司的佩特洛瑟克斯工艺 (Petrosix), 对犹他州白河油页岩进行地面干馏 (白河油页岩在 20 世纪 80 年代就曾经用巴西佩特洛瑟克斯工艺进行过试验)。公司现正进行采用佩特洛瑟克斯工艺的工业化生产的可行性研究 (年产 250×10^4 t 页岩油)。油页岩开发公司最近还运了 300t 油页岩去加拿大进行加拿大 ATP 工艺的中试 (Aho, 2008)。

g. 爱恩油页岩公司的油页岩开发技术研究。爱恩油页岩公司 (EaShale, Inc.) 在怀