

油砂勘探开采技术 及其应用

单玄龙等 编著

YOUSHA KANTAN KACAI JISHU
JIQI YINGYONG

東華大學出版社

油砂勘探开采技术 及其应用

单玄龙 等 编著

东华大学出版社

· 上海 ·

内 容 提 要

本书在全球油砂资源分布特征及油砂勘探开发技术分析的基础上,根据我国油砂矿藏的实际地质条件,提出了适合我国油砂勘探的技术方法系列,包括油砂野外地质调查方法、油砂化探技术、油砂物探技术、油砂钻井勘探技术、油砂分析测技术及油砂资源评价方法。本书总结了油砂开采的技术方法系列,包括露天开采、巷道开采、携砂冷采、蒸汽吞吐、火烧油层、蒸汽辅助重力驱(SAGD)及蒸汽浸提法(VAPEX),并通过典型案例分析,分析这些技术方法在我国松辽盆地、准噶尔盆地以及加拿大艾伯塔盆地进行勘探开采实践中的应用。

本书可用作高等院校矿产普查与勘探专业研究生教材,同时也可供从事能源相关研究和生产的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油砂勘探开采技术及其应用/单玄龙 等 编著. —上海:东华大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5669-0824-7

I. ①油… II. ①单… III. ①油砂—勘探 IV. ①TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 158309 号

责任编辑:曹晓虹

文字编辑:库东方

封面设计:姚大斌

油砂勘探开采技术及其应用

单玄龙 等 编著

出版发行:东华大学出版社(上海市延安西路 1882 号邮政编码:200051)

联系电话:编辑部 021-62379902

发行部 021-62193056 62373056

网 址: <http://www.dhupress.net>

天猫旗舰店: <http://dhdx.tmall.com>

经 销:新华书店上海发行所发行

印 刷:深圳市彩之欣印刷有限公司

开 本:710 mm×1 000 mm 1/16

印 张:13

字 数:357 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5669-0824-7/TE·001

定价:57.90 元

非常规油气资源已经成为全球能源的重要组成部分,其包括油砂、重油、油页岩、煤层气、页岩气和致密气。本书针对油砂资源,其定义目前没有统一的标准,不同机构或国家的定义标准差别很大。鉴于此,本书重新厘定了油砂的定义。

油砂又称沥青砂,是一种含有天然沥青的砂岩或其他岩石,通常是由砂、沥青、矿物质、黏土和水组成的混合物。不同地区油砂矿的组成不同,一般沥青含量为 3%~20%,砂和黏土含量占 80%~85%,水占 3%~6%。油砂油比一般原油的黏度高,由于流动性差,需经稀释后,才能通过输油管线输送。油砂沥青是指从油砂矿中开采出来的或直接从油砂中初次提炼出的尚未加工处理的石油。

不同的国家对油砂资源有不同的分类标准。美国等西方国家把油藏条件下黏度大于 $10\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的石油称之为焦油砂或天然沥青。当无黏度参数值可参照时,把比重大于 1.00 作为划分焦油砂的指标。前苏联对稠油和天然沥青的定义和研究则自成体系,把黏度为 $50\sim 2\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、比重为 $0.935\sim 0.965$ 、油质含量大于 65% 的原油称之为高粘油。高于上述界限值的均称之为各类沥青(软沥青、地沥青、硫沥青等)。美国定义的重质油应包含前苏联定义的高粘油和部分软沥青;联合国训练研究署推荐的统一定义是:油层温度条件下,粘度大于 $1.0\times 10^4\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的称之为沥青。比重小于 10°API (相对密度大于 1.0)的称

之为超重油。本书以黏度值作为分类的第一指标,把比重作为划分的第二指标,即油藏条件下,黏度大于 $10\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的石油称之为油砂,当没有黏度数据时,比重小于 10°API 为油砂。

油砂矿藏与常规油气藏存在相似之处,同时差异明显,比如埋藏深度浅,甚至露出地表;原油黏度高,流动性差,是指不能流动;部分储层疏松。这反映油砂成藏与常规油气成藏存在较大差异。因此,油砂的勘探与开采不能完全按照常规油气的方法。本书针对这一特点,在全球油砂资源分布特征及油砂勘探开发技术分析的基础上,根据我国油砂矿藏的实际地质条件,提出了适合我国油砂勘探的技术方法系列,包括油砂野外地质调查方法、油砂化探技术、油砂物探技术、油砂钻井勘探技术、油砂分析测技术及油砂资源评价方法。总结了油砂开采的技术方法系列,包括露天开采、巷道开采、携砂冷采、蒸汽吞吐、火烧油层、蒸汽辅助重力驱(SAGD)及蒸汽浸提法(VAPEX),并通过典型案例分析,分析这些技术方法在我国松辽盆地、准噶尔盆地以及加拿大艾伯塔盆地进行勘探开采实践中的应用。

本书的研究工作得到了《全国油砂成矿远景与选区研究》(1212011220794)项目、《我国西北地区油砂资源成藏潜力研究》(1211302108025-4、1211302108025-6)项目、国家科技重大专项《大型油气田及煤层气开发》子课题《全球重点地区非常规油气资源潜力分析与未来》(2011ZX05028-002)以及《油气资源评价—全球油气资源评价与利用研究》项目子课题《全球非常规油气资源评价技术与有利区优选》(2013E-050102)资助,并得到了中国地质调查局油气中心、中国石油和吉林中财石油开发有限公司的大力支持。在此对上述单位及相关人员表示衷心的感谢!

作者

2015年3月

CONTENTS

目 录

第一章 全球油砂资源分布	1
第一节 全球油砂资源总体分布特征	1
第二节 全球不同地区油砂资源分布	3
一、北美地区油砂资源分布	3
二、欧亚地区	5
三、南美地区	6
四、非洲地区	7
五、不同地区资源量对比	7
第三节 全球油砂成矿带分布特征	10
一、全球油砂层系分布	10
二、全球油砂有利含矿带	10
第四节 油砂形成的地质特征	12
一、构造条件	13
二、沉积条件	14
三、烃源岩条件	15
四、圈闭条件	15
五、资源形成与分布的主控因素	16
六、资源分布规律	16
第二章 油砂勘探方法与技术	22
第一节 油砂野外调查方法	22
一、准备工作阶段	23
二、野外工作阶段	24
三、室内整理阶段	30

第二节	油砂化探技术	30
一、油砂化探的阶段划分		30
二、地球化学指标的选择及其依据		31
三、背景与异常下限的确定		31
四、油气化探异常指标对油砂矿藏的指示作用		32
第三节	油砂物探技术	33
一、主要岩石、矿物的电性特征		33
二、激电法勘探		34
三、瞬变电磁法勘探		36
第四节	油砂钻井技术与规范	38
一、施工工艺		38
二、钻探施工		39
三、井身质量要求		41
四、封孔		41
第五节	油砂分析测试技术与规范	43
一、含油率的检测		43
二、孔隙度测试		45
三、渗透率的检测		46
四、粒度和矿物成分分析		46
五、油砂油的测试分析		46
六、水质分析		47
第六节	油砂资源评价方法	48
一、油砂资源计算方法		48
二、评价内容与评价流程		51
第七节	油砂勘探基本规范	52
一、野外地质调查规范		52
二、地质调查提交的成果		54
第三章	油砂开采技术	58
第一节	油砂露天开采技术	58
一、油砂露天开采的条件		58
二、油砂露天开采的流程		59
第二节	油砂原位开采技术	63
一、蒸汽吞吐		64

二、蒸汽辅助重力泄油	65
三、溶剂提取技术	68
四、火烧油层技术	69
五、热水驱技术	70
六、电磁加热技术	70
七、出砂冷采技术	71
八、注 CO ₂ 开采技术	72
九、微生物开采技术	72
第四章 松辽盆地油砂勘探与开发	74
第一节 松辽盆地油砂地质特征	74
一、松辽盆地概况及其油砂含矿区分布	74
二、典型含矿区油砂地质特征	75
第二节 松辽盆地油砂勘探	79
一、松辽盆地西斜坡油砂勘探历程	79
二、镇赉油砂矿勘探方法	79
三、镇赉油砂矿勘探成果	89
第三节 松辽盆地油砂成藏理论探索	94
一、油砂成藏的关键因素分析	94
二、镇赉油砂的成藏模式	100
第四节 松辽盆地西斜坡镇赉油砂矿试采	101
一、地质条件对原位开采的影响	101
二、开采方法选择与优化	102
三、试采区块的地质特征	102
四、试采工作进展	103
五、试采阶段认识	108
第五章 准噶尔盆地油砂勘探与开发	110
第一节 准噶尔盆地及油砂含矿区概述	110
一、准噶尔盆地地质概况	110
二、主要油砂含矿区分布	111
三、资源量情况	112
第二节 准噶尔盆地油砂含矿区勘探	113
一、油砂勘探程度	113
二、不同含矿区油砂分布和地质特征	114

第三节	准噶尔盆地油砂成藏理论探索	120
一、油砂成藏规律	120	
二、油砂分布及成藏控制因素	121	
第四节	准噶尔盆地吐孜阿克内沟油砂矿勘探	121
一、吐孜阿克内沟油砂矿藏地层及分布	121	
二、吐孜阿克内沟油砂层沉积相	136	
三、油砂储层特征	148	
四、成藏条件和成矿要素	156	
五、油砂资源量计算	162	
第六章	阿尔伯达盆地油砂勘探与开发	168
第一节	油砂地质特征概述	168
一、盆地概况	168	
二、主要油砂含矿区分布及资源量	171	
第二节	阿尔伯达盆地油砂勘探	172
一、油砂勘探历程	172	
二、目前的主要勘探成果	173	
第三节	阿尔伯达盆地油砂成藏理论探索	178
一、油砂分布与圈闭的关系	178	
二、成藏条件和成矿模式	182	
第四节	阿尔伯达盆地油砂开发现状	185
一、加拿大油砂露头开采技术全球领先	185	
二、开展了更先进的原位开采技术试验	185	
三、油砂的冷提取	187	
参考文献	188	

全球油砂资源分布

狭义油砂定义至少有两种:一是油和砂的混合物;二是特指该种混合物中的原油,当表示这种含义时,油砂和天然沥青是等同的。国外也有把其称作为焦油砂或者沥青砂。国际上也有按照物理特性定义的,比如美国地质调查局(USGS)和美国石油地质学家学会(AAPG)定义为 API(15.6℃条件下)小于 10°的原油,油层条件下黏度大于 10 000 mPa·s。本书的定义为油砂是一种存在于地表或近地表的,由砂、沥青及富含黏土和水的矿物及少量杂质组成的天然有机矿产;其中沥青含量大于 3.5%,且沥青黏度大于 1.0×10^4 mPa·s(或相对密度大于 1.00),在油层温度条件下不能流动。目前,对油砂资源的研究和开发,世界各地均在加速进行,其占全球烃类能源的比重也在不断增大。根据美国地质调查局(USGS)的研究,世界上油砂可采资源量约为 6 510(103.51×10^9 m³)亿桶,约占世界石油资源可采总量的 32%。本章通过大量数据统计,说明全球油砂的资源分布特征和油砂的资源量。

第一节 全球油砂资源总体分布特征

全球油砂资源分布很不均衡,油砂主要分布在北美洲、前苏联、拉丁美洲和加勒比海地区(图 1.1)。西半球油砂技术可采资源量占全球 82%(表 1.1)。世界上油砂丰富的国家有:加拿大、前苏联、委内瑞拉、尼日利亚和美国。其中加拿大居首位,地质资源量为 $2\,592 \times 10^8$ m³,占总量的 84%,前苏联地区位居第二,约 301×10^8 m³,占总量的 10%,接下来就是美国、委内瑞拉和尼日利亚,分别为 80×10^8 m³、 68×10^8 m³和 44×10^8 m³(图 1.2),分别占总量的 3%、2%和 1%。

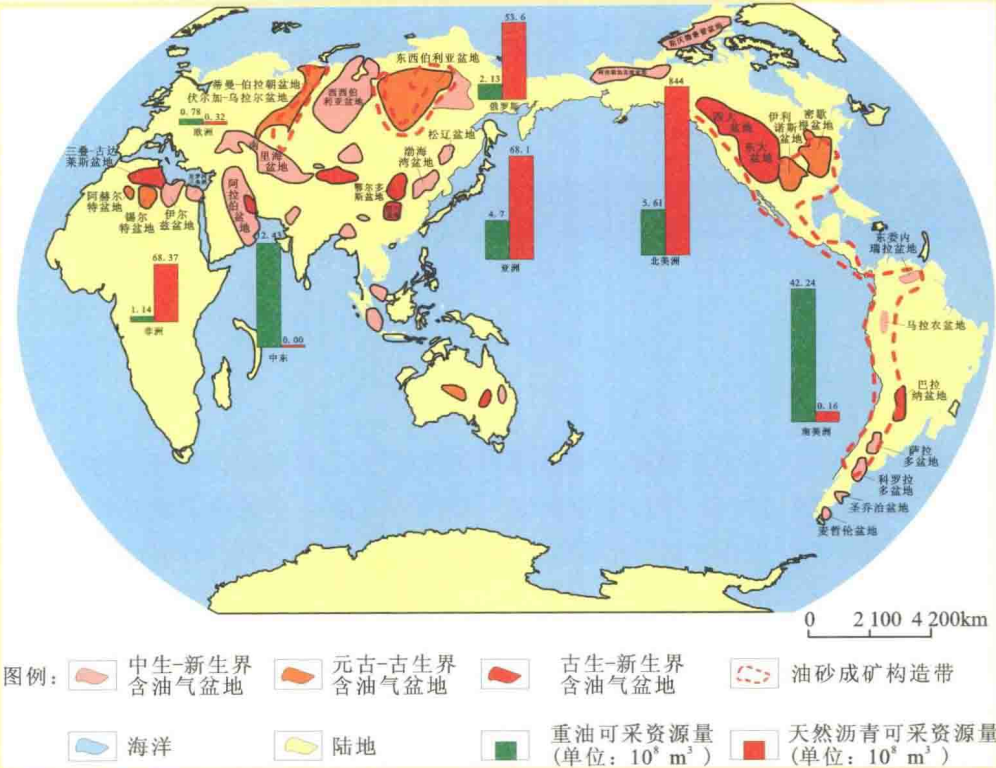


图 1.1 全球油砂资源分布图(未查到具体引用)

表 1.1 世界油砂资源分布表

地区	重油		天然沥青	
	可采系数	可采资源量(BBO)	可采系数	可采资源量(10^9 m^3)
北美洲	0.19	35.3	0.32	84.4
南美洲	0.13	265.7	0.09	0.015 9
西半球	0.13	301.0	0.32	84.42
非 洲	0.18	7.2	0.10	6.837
欧 洲	0.15	4.9	0.14	0.031 8
中 东	0.12	78.2	0.10	
亚 洲	0.14	29.6	0.16	6.81
俄罗斯	0.13	13.4	0.13	5.36
东半球	0.13	133.3	0.13	19.09
全世界		434.3		103.51

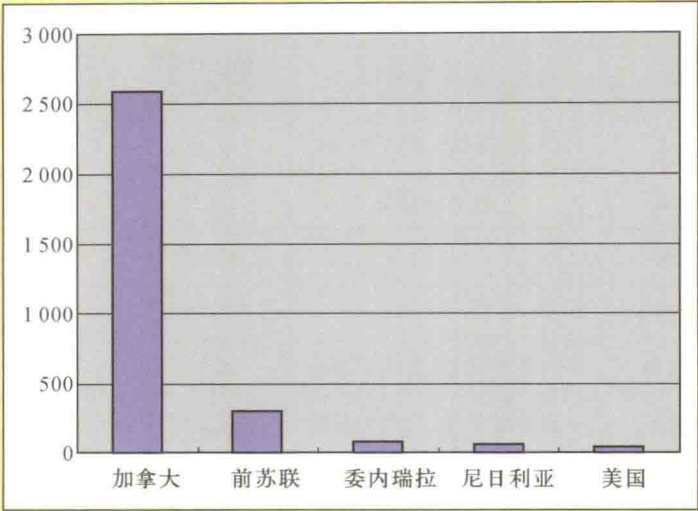


图 1.2 世界油砂地质资源分布直方图(储量单位:10⁸ m³)

第二节 全球不同地区油砂资源分布

一、北美地区油砂资源分布

北美地区目前据统计有 41 个油砂盆地(表 1.2),油砂地质资源量为 3 916×10⁸ t,可采资源量为 394×10⁸ t。油砂资源分布极其不均,主要分布在阿尔伯达盆地、北坡盆地、尤因塔盆地、帕拉多盆地、黑勇士盆地、南得克萨斯盐丘和阿纳达科盆地,这七个盆地油砂地质资源量占北美地区的 99.7%,可采资源量占北美地区的 99.7%。其油砂盆地类型多样,以克拉通边缘盆地、封闭式聚敛板块边缘盆地和聚敛边缘裂谷盆地为主。油砂成矿模式与盆地类型密切相关,盆地类型多样导致油砂成矿模式也多样化,其中斜坡降解型成矿模式为该地区油砂成矿主导模式,其他成矿模式形成的油砂矿仅局部发育。

表 1.2 北美地区油砂盆地资源量统计表

盆地名称	成矿模式	地质资源量 (×10 ⁸ t)	可采资源量 (×10 ⁸ t)	可采系数(%)
阿尔伯达盆地	斜坡降解型	3 825	383	10
北坡盆地	古油藏破坏型	30.21	3.93	13

(续表)

盆地名称	成矿模式	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)	可采系数(%)
尤因塔盆地	斜坡降解型、构造抬升型	18.60	1.86	10
帕拉多盆地	斜坡降解型	10.52	1.39	13.2
黑勇士盆地		10.11	1.01	10
南得克萨斯盐丘		7.76	1.01	13
阿纳达科盆地	斜坡降解型、构造抬升型	6.10	0.61	10
圣玛利亚盆地	断裂疏导型、斜坡降解型	3.23	0.65	20
伊利诺伊盆地	古油藏破坏型	1.41	0.14	10
文图拉盆地	断裂疏导型	0.802 869	0.160 574	20
佛罗里达-巴哈马盆地		0.758 354	0.043 226	5.7
斯沃德鲁普盆地		0.500 800	0.065 104	13
粉河盆地	古油藏破坏型	0.230 527	0.023 053	10
中央海岸盆地		0.151 194	0.030 239	20
坎佩切盆地		0.095 072	0.012 359	13
风河盆地	斜坡降解型、构造抬升型	0.071 543	0.007 154	10
密西西比盐丘		0.039 428	0.005 126	13
沃斯堡盆地	古油藏破坏型	0.017 488	0.001 749	10
西部逆冲带		0.005 564	0.000 556	10
东德克萨斯		0.000 874	0.000 114	13
圣华金盆地	斜坡降解型	0.000 351	0.000 070	20
洛杉矶盆地	断裂疏导型、斜坡降解型	0.000 227	0.000 045	20
二叠盆地		0.000 183	0.000 018	10
墨西哥湾盆地	斜坡降解型			
阿巴拉契亚盆地	斜坡降解型、构造抬升型			
总计		3 916	394	

二、欧亚地区

欧亚地区共有 32 个含油砂盆地(表 1.3),其油砂总地质资源量为 $4\,890\times 10^8$ t,可采资源量为 523×10^8 t。可细划分为俄罗斯、高加索地区、中东、亚洲其他地区 and 欧洲其他地区。俄罗斯地区包含 13 个含油砂盆地:东西伯利亚盆地、伏尔加-乌拉尔盆地、蒂曼-伯朝拉盆地、阿纳德尔盆地、北萨哈林盆地、上扬斯克盆地、贝加尔盆地、伊尔库茨克盆地、库兹涅茨盆地、米努辛斯克盆地、坎斯克盆地、拉普捷夫海盆地、阿摩尔(卡拉库姆)盆地和费尔干纳盆地,油砂地质资源量为 $4\,156\times 10^8$ t,可采资源量为 417×10^8 t。高加索地区包含 4 个含油砂盆地:北里海盆地、南里海盆地、北高加索-曼格什拉克盆地和阿摩尔盆地,油砂地质资源量为 683×10^8 t,可采资源量为 90×10^8 t。欧洲其他地区包含 9 个油砂盆地:北北海盆地、卡尔塔尼塞塔盆地、西设得兰盆地、南亚得里亚盆地、波盆地、喀尔巴阡盆地、磨拉石盆地、塔兰托盆地和德国西北部,油砂地质资源量为 26.57×10^8 t,可采资源量为 8.02×10^8 t。亚洲其他地区包含 4 个油砂盆地:渤海湾盆地、波尼盆地、准噶尔盆地和塔里木盆地,油砂地质资源量为 23.74×10^8 t,可采资源量为 8.08×10^8 t。

由此可见,欧亚地区油砂资源集中分布在俄罗斯和高加索地区,其中俄罗斯油砂资源主要聚集在东西伯利亚盆地(西伯利亚地台周缘山系成矿构造带)和伏尔加-乌拉尔盆地(乌拉尔山前成矿构造带),这两个地区所蕴含的油砂资源占整个欧亚地区的 93.2%。

表 1.3 欧亚地区油砂盆地资源量统计表

盆地名称	成矿模式	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)	可采系数 (%)
东西伯利亚盆地	古油藏破坏型、斜坡降解型	3 669	367	10
滨里海盆地	构造抬升型、古油藏破坏型	669	87	13
伏尔加-乌拉尔盆地	斜坡降解型	452	45	10
蒂曼-伯朝拉盆地	斜坡降解型	34.98	4.62	13.2
北北海盆地		17.33	6.93	40
南里海盆地	断裂疏导型、古油藏破坏型	14.05	2.81	20
渤海湾盆地		12.13	4.85	40
波尼盆地	断裂疏导型	7.09	1.42	20
卡尔塔尼塞塔盆地		6.41	0.83	13

(续表)

盆地名称	成矿模式	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)	可采系数(%)
准噶尔盆地		2.53	1.01	40
塔里木盆地		1.99	0.79	40
西设得兰盆地		1.59	0.09	5.7
南亚得里亚盆地		0.810 818	0.105 406	13
波盆地		0.402 230	0.052 290	13
北高加索-曼格什拉克盆地		0.095 390	0.012 401	13
阿穆尔盆地		0.048 808	0.009 762	20
阿纳德尔盆地	断裂疏导型	0.033 387	0.006 677	20
喀尔巴阡盆地		0.019 078	0.002 480	13
磨拉石盆地		0.015 898	0.002 067	13
北萨哈林盆地	断裂疏导型	0.004 006	0.000 801	20
总计		4 890	523	

三、南美地区

南美地区共有 4 个含油砂盆地:马拉开波盆地、纳波/普图马约盆地、巴里纳斯-阿普雷盆地和中马格达莱纳盆地,油砂地质资源量为 271×10^8 t,可采资源量为 54.1×10^8 t(表 1.4)。油砂资源分布极其不均,集中分布在马拉开波盆地,该盆地油砂地质资源量占整个南美洲地区的 99.3%。

表 1.4 南美地区油砂盆地资源量统计表

盆地名称	成矿模式	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)	可采系数(%)
马拉开波盆地	断裂疏导型	269	54	20
纳波/普图马约盆地	斜坡降解型、构造抬升型	1.86	0.19	10
巴里纳斯-阿普雷盆地		0.604 139	0.060 414	10
中马格达莱纳盆地	断裂疏导型			
总计		271	54	

四、非洲地区

非洲地区共含 7 个含油砂盆地:加纳盆地、宽扎盆地、木论达瓦盆地、苏伊士湾盆地、卡宾达盆地、死海地堑和毛里求斯-塞舌尔盆地,油砂地质资源量 73.16×10^8 t,可采资源量 4.44×10^8 t(表 1.5),油砂资源有限,这与该地区区域背景相关。该地区大部分盆地都为裂谷盆地,断裂发育,油砂矿在断裂带浅部位局部发育。

表 1.5 非洲地区油砂盆地资源量统计表

盆地名称	成矿模式	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)	可采系数(%)
加纳盆地		60.89	3.47	5.7
宽扎盆地		7.39	0.42	5.7
木论达瓦盆地	古油藏破坏型	3.51	0.20	5.7
苏伊士湾盆地	断裂疏导型	0.794 920	0.317 968	40
卡宾达盆地		0.577 112	0.032 895	5.7
死海地堑		0.002 385	0.000 310	13
总计		73.16	4.44	

五、不同地区资源量对比

全球油砂资源评价项目共估算了 52 个盆地的油砂地质资源量和可采资源量,其中阿尔伯达盆地、东西伯利亚盆地、滨里海盆地、伏尔加-乌拉尔盆地、马拉开波盆地等 14 个油砂地质资源量大于 10×10^8 t。这 14 个盆地油砂地质资源量合计 $9\,093 \times 10^8$ t,占全球的 99.4%;可采资源量合计为 967×10^8 t,占全球的 99.2%(表1.6)。其中,地质资源量大于 1×10^8 t 而小于 10×10^8 t 的油砂盆地共有 12 个,地质资源量合计为 50.87×10^8 t,可采资源量 6.35×10^8 t。油砂资源小于 1×10^8 t 的盆地共有 26 个,地质资源量合计为 6.08×10^8 t,可采资源量 0.95×10^8 t。

表 1.6 全球油砂盆地资源分布数据表

序列	国家	盆地名称	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)
1	加拿大	阿尔伯达盆地	3 825	383
2	俄罗斯	东西伯利亚盆地	3 669	367

(续表)

序列	国家	盆地名称	地质资源量 ($\times 10^8$ t)	可采资源量 ($\times 10^8$ t)
3	俄罗斯、哈萨克斯坦	滨里海盆地	669	87.0
4	俄罗斯	伏尔加-乌拉尔盆地	452	45.2
5	委内瑞拉、哥伦比亚	马拉开波盆地	269	53.8
6	加纳、尼日利亚	加纳盆地	60.89	3.47
7	俄罗斯	蒂曼-伯朝拉盆地	34.98	4.62
8	美国	北坡盆地	30.21	3.93
9	美国	尤因塔盆地	18.60	1.86
10	挪威、英国	北北海盆地	17.33	6.93
11	阿塞拜疆	南里海盆地	14.05	2.81
12	中国	渤海湾盆地	12.13	4.85
13	美国	帕拉多盆地	10.52	1.39
14	美国	黑勇士盆地	10.11	1.01
15	美国	南德克萨斯盐丘	7.76	1.01
16	安哥拉	宽扎盆地	7.39	0.42
17	印度尼西亚	波尼盆地	7.09	1.42
18	意大利、马耳他	卡尔塔尼塞塔盆地	6.41	0.83
19	美国	阿纳达科盆地	6.10	0.61
20	马达加斯加	木论达瓦盆地	3.51	0.20
21	美国	圣玛利亚盆地	3.23	0.65
22	中国	准噶尔盆地	2.53	1.01
23	中国	塔里木盆地	1.99	0.79
24	哥伦比亚、厄瓜多尔	纳波/普图马约盆地	1.86	0.19
25	英国	西设得兰盆地	1.59	0.09
26	美国	伊利诺伊盆地	1.41	0.14
27	意大利	南亚得里亚盆地	0.810 818	0.105 406
28	美国	文图拉盆地	0.802 869	0.160 574