

加拿大西加盆地露天开采油砂资源评价方法

陶国亮¹, 腾格尔¹, 曹婷婷¹, 白森舒¹, 王保华¹,
张连华², 殷鹏飞², 肖卫权²

1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214216
2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司 加拿大分公司, 加拿大卡尔加里 T2P 0M9

摘要: 露天开采是当前油砂开采的主要类型之一, 本文从资源评价的角度, 分析了适合露天开采油砂矿的资源评价方法和关键参数获取方法, 分析解读加拿大政府制定的规范, 为加拿大露天开采油砂矿项目评价和战略投资提供决策参考, 以供国内同类项目参考。结果表明, 含油率法和含油饱和度法是露天开采油砂资源评价的较好的方法, 涉及到的含油率、含油饱和度等关键参数可通过实验测定、测井解释等方法获取; 针对露天开采过程中效率与效益的平衡问题, 加拿大政府出台了相应的规范, 从最低含油率、最小矿层厚度、最大 TV/BIP 值等方面对作业者可以/必须获取的油砂资源进行了限定, 这也从法律的角度对露天开采油砂的资源评价做出了限制。

关键词: 油砂; 资源评价; 关键参数; 政府规范; 西加盆地

中图分类号: P618.13 文章编号: 1007-2802(2016)01-0146-05 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.01.017

Resource Evaluation Method for Open-Pit Mining Oil Sands in the Western Canada Basin, Canada

TAO Guo-liang¹, Tenger¹, CAO Ting-ting¹, BAI Sen-shu¹, WANG Bao-hua¹,
ZHANG Lian-hua², YIN Peng-fei², XIAO Wei-quan²

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi Jiangsu 214126, China;
2. SinoCanada Petroleum Corporation, SIPC, Calgary, T2P 0M9, Canada

Abstract: Open-pit mining is one of key methods for mining oil sands. In order to constructive dicisional suggestions for strategic investing and evaluating projects of open pit mining oil snads in Canada or in China, methods of oil sands resource evaluation and key parameters acquisition have been analyzed and discussed, and the specification issued by the Canadian government has been especially analyzed in this paper. Results indicate that the oil sand resources can be relative properly evaluated by using oil weight content or oil saturation methods, as those relevant key parameters, including oil content and oil saturation, can be measured through experiment and well survey. For the balance of efficiency and effectiveness in the open-pit mining process, the Canadian Government issued relevant guideline to constrain the amount of oil sand resources that must be obtained by the operators in terms of the lowest oil content, the lowest thickness of oil sand beds, and the largest TV/BIP values, and also to constrain the assessment of oil sands resources for open-pit mining in terms of the law.

Key words: oil sands; resource evaluation; key parameters; government directive; Western Canada Basin

油砂是一种含有天然沥青的砂岩, 是非常规石油资源的一种, 通常是由砂岩、沥青、黏土和水组成的混合物 (Masliyah *et al.*, 2004; 单玄龙等, 2007)。加拿大拥有世界上最丰富的油砂资源 (Kramers *et*

al., 1987; 顿铁军, 1995; 张建华, 2009; National Energy Board, 2013), 据加拿大国家能源委员会 (NEB) 公布的数据, 截至 2012 年底, 加拿大石油储量达到 1713 亿桶, 其中油砂储量 1679 亿桶, 占绝对

收稿日期: 2015-05-06 收到, 2015-05-26 改回

基金项目: 中石化科技部项目 (P14051, JP11022)

第一作者简介: 陶国亮 (1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 石油地质. E-mail: taogl.syky@sinopec.com.

多数(National Energy Board, 2013),这也使得加拿大在世界十大原油储量拥有国中排名第3,仅次于委内瑞拉和沙特(排名据美国能源署2014年数据)。除了丰富的油砂资源,加拿大国内政局稳定,法制健全,历来是国际石油公司理想的投资区域(张建华,2009),中国的三大油公司在加拿大也均有投资项目。当前国际油价正处于低位,造成加拿大众多油砂项目经济效益显著下降,这可能是中国油公司进行低价战略收购,扩大国际资源市场份额的良机,对保障中国能源安全具有重要的意义。

在投资任何资源区块之前,都需要对目标区块进行专业的资源评价和经济评价,更必须对该国相关的政策法规进行细致的解读。本文从油砂资源评价的角度,提出适合露天开采油砂矿的资源评价方法和关键参数获取方法,并重点分析解读加拿大政府制定的规范,为加拿大露天开采油砂矿项目评价和战略投资提供决策依据,为国内同类项目的运行提供参考。

1 加拿大油砂矿基本概况

加拿大巨量的油砂资源主要分布在西加盆地阿萨巴斯卡(Athabasca)、冷湖(Cold Lake)和皮斯河(Peace River)3大油砂矿区(图1)(Jardine, 1974; 高杰和李文, 2006; National Energy Board, 2013), 储集层为下白垩统 McMurray 组(Vigrass, 1968; Flach, 1984; Flach and Mossop, 1985; Energy Resources Conservation Board, 2009)。根据油砂矿层埋深的不同,主要分为露天开采(埋深小于75 m)和原地开采(埋深大于75 m)2种(郑德温等, 2008)。露天开采主要采用巨型挖掘机,先铲除矿层表面植被、土壤和岩层,然后挖掘矿层,将挖掘到的油砂矿石粉碎后萃取其中的沥青油,将沥青油传输到炼厂进行改质处理。对于埋深大于75 m的矿层,露天开采的挖掘成本过高(挖掘工作量过大),宜采用原地开采技术,一般往一对水平井中的一口井注入蒸汽,使周边沥青油黏度降低,流动性增加,然后从另一口井中采出沥青油。由于西加盆地西低东高的构造格局,埋藏浅的露天开采项目都位于阿萨巴斯卡矿区东北角。

2 露天开采油砂的资源评价方法

2.1 评价方法

露天开采的目标矿层埋深浅,能够将矿层完全挖掘掉,在油砂的资源评估过程中,生油岩的研究处于次要地位,而储集层的展布、厚度、物性、开采

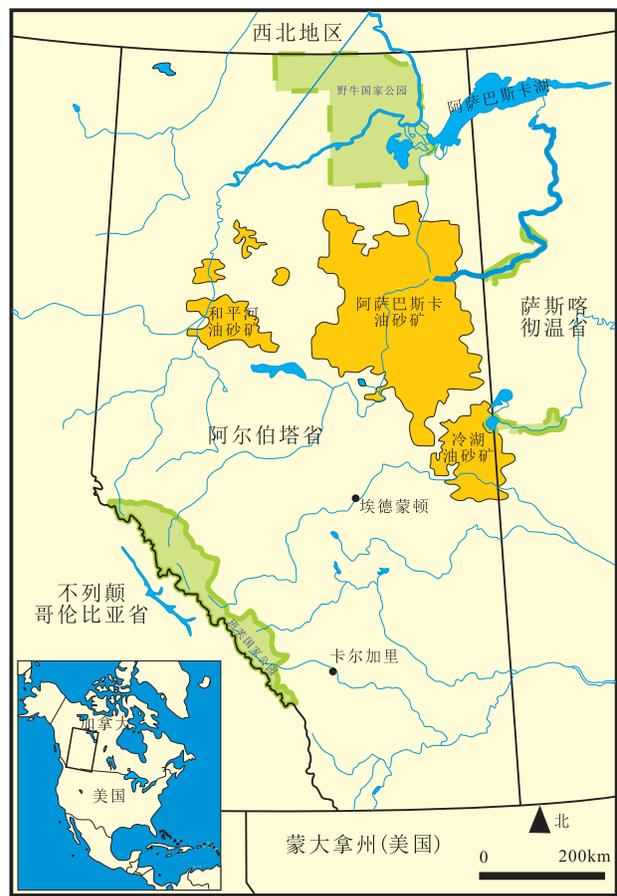


图1 加拿大三大油砂矿区地理位置图
(据 National Energy Board, 2013)

Fig.1 A sketch map showing locations of three major oil sands deposits in Canada(National Energy Board, 2013)

方式等处重要位置。西加盆地内针对油砂矿地质评价的钻井已有数万口,因此资源落实程度非常高。

目前国内外通用的油砂资源量评估方法主要有含油率法和含油饱和度法。当可测得油砂的含油率时,即可采用含油率法;当可测得孔隙度和含油饱和度时,可采用含油饱和度法。

2.1.1 含油率法 该方法是根据油砂中石油的重量百分含量进行资源量计算的方法,是露天开采油砂资源量计算最常用的方法。含油率是计算资源量的关键参数,即沥青与含沥青岩石(油砂)的重量之比(重量百分数)。资源量的计算采用下列公式:

$$N=A \cdot h \cdot \rho_r \cdot \omega$$

式中: N 为油砂沥青资源量(t); A 为油砂矿面积(m^2); h 为油砂矿厚度(m); ρ_r 为油砂岩石密度(t/m^3); ω 为油砂含油率(%)。

2.1.2 含油饱和度法 该方法通过求得油砂中沥

青体积从而进行资源量的计算,孔隙度和含油饱和度是两个关键参数,孔隙度是油砂中孔隙体积与油砂岩石体积之比值(%),含油饱和度是孔隙中沥青体积与孔隙体积之比值(%).公式为:

$$N = A \cdot h \cdot \Phi \cdot S_{oi} \cdot \rho_o$$

式中: N 为油砂沥青资源量(t); A 为油砂矿面积(m^2); h 为油砂矿厚度(m); Φ 为有效孔隙度(%); S_{oi} 为含油饱和度(%); ρ_o 为沥青油密度(t/m^3).

2.2 关键参数的获取

2.2.1 含油率 相对而言,直接测定油砂含油率更为经济快捷,主要采用 Dean-Stark 方法获取含油率数据(杨光,2012;Yin *et al.*,2013;张小雨等,2014),进行含油率法资源评价。

2.2.2 孔隙度与含油饱和度 孔隙度与含油饱和度数据可以通过测井解释获取,基本公式如下:

泥质含量:

$$SH = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$

$$V_{SH} = \frac{2^{GCCR \times SH}}{2^{GCCR} - 1}$$

式中: V_{SH} 为地层泥质含量; SH 为泥质指数; $GCCR$ 为地层指数; GR 、 GR_{max} 、 GR_{min} 分别为地层自然伽马测井值、最大值、最小值。

孔隙度:

$$\phi_D = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}} - V_{SH} \frac{\rho_{sh} - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}}$$

式中: ρ_b 、 ρ_{ma} 、 ρ_f 、 ρ_{sh} 分别为岩石、骨架、流体和泥质的密度值; V_{SH} 为地层泥质含量。

含油饱和度:

$$S_0^n = 1 - S_w^n = 1 - \frac{abRw}{\phi^m Rt}$$

式中: a 、 b 、 m 、 n 分别为岩性系数(a 、 b)、孔隙度指数、饱和度指数; Rw 、 Rt 分别为地层水电阻率、深测向电阻率测井值; ϕ 为岩石孔隙度; S_w 为含水饱和度(体积); S_0 为含油饱和度(体积);

油砂含油率:

$$S_{ob} = \frac{\rho_o \phi (1 - S_w)}{\rho_{ore}} \times 100\%$$

式中: S_{ob} 为含油率(重量); ρ_o 、 ρ_{ore} 分别为原油密度、矿石密度; S_w 为含水饱和度(体积); ϕ 为岩石孔隙度。

3 加拿大政府规范的分析

对于露天开采,一方面资源回收率非常高,另一方面对地层的破坏也是全面的,加拿大相关政府在多年来的监管实践中发现,有些油砂项目公司为

了追求高效益,只挖掘含油率高的油砂矿层,废弃含油率相对较低的矿层,这就造成了资源的浪费,也有些油砂项目公司盲目追求油砂资源量最大化,一并挖掘一些油砂含油率较低的矿层(尤其在高油价背景下),这就造成油砂效益的降低和环境的破坏。为此,加拿大政府能源和资源保护利用委员会于2011年颁布了一部临时性法规(ID2001-07)(Alberta Energy and Utilities Board,2001),在效益和效率之间确定了一个平衡点,用来限制油砂矿作业者可以/必须开采的油砂体积。该法规于2013年升级为正式规范(Directive 082)(Energy Resources Conservation Board,2013)。任何作业者都必须遵守,亦即从法律上限定了作业者能够在该矿层获取多少油砂资源量。该规范的核心包括3个方面:①油砂最低含油率必须大于7%;②油砂矿层最小的开采厚度必须大于3m;③挖掘总体积与获取的沥青油体积的比值(TV/BIP)必须小于12:1。

可见,在一般情况下,利用上述资源评价方法和公式即可计算出油砂的资源量,但在加拿大,露天油砂资源评价更关键环节是规范中要求的3点限定条件,以确保评价结果合乎政府法规的要求。

3.1 含油率下限

含油率指油砂中沥青油的重量百分含量,在评价过程中,需要按照规范的要求,筛选高于含油率下限的矿层,暂时称为“有效矿层(Ore)”,剔除低于含油率下限的矿层,暂时称为“废弃层(Waste)”。

3.2 有效矿层厚度下限

符合含油率条件的“有效矿层”厚度必须大于3m,如果满足该条件,则继续进行下一步条件的判断,如果厚度小于3m,也不可直接将其判定为“废弃层”,需考虑将其与上/下低含油率“废弃层”合并,使矿层厚度满足大于3m,并计算合并后的新矿层的平均含油率是否满足含油率下限条件,如果满足,则认为合并后的新矿层整体为“有效矿层”,如不满足,则认为整体为“废弃层”。

3.3 TV/BIP 上限

TV/BIP 条件是最关键也最难操作的条件,TV 指的是挖掘的总体积(total volume),包括露天挖掘过程中被挖掘的“有效矿层”和“废弃层”的全部体积,BIP 指最终获取的沥青油的体积(bitumen in place),也就是从“有效矿层”中提取出来的沥青油体积。该指标类似但不同于国内常用的“剥采比”指标,“剥采比”一般用在露天矿山作业中,指剥离岩土总量与采出矿石量的比例。TV/BIP 与剥采比的区别在于,BIP 指标不是采出的油砂矿石量,而是

采出的油砂矿石中的沥青油的量。BIP 指标既与采出油砂矿石量有关,又与油砂的含油率相关,而剥采比中的采出矿石量与矿石的品味无关。

TV/BIP 指标的概念模型如图 2 所示,图中“上覆层”指矿层地表覆盖的一些土壤、泥水混合物等等,“顶部废弃层”指有效矿层顶部可能存在的一套废弃层,“中段废弃层”指两层有效矿层之间存在的废弃层(夹层),这 3 者合并称为“废弃层(waste)”。另外还存在的若干套“有效矿层(ore)”。要把图中所示的“有效矿层(ore)”全部开采出,就必须把全部“废弃层”和“有效矿层”全部挖掘掉,挖掘的总体积就是 TV,从“有效矿层”中提取出的原地沥青的体积就是 BIP (bitumen in place)。TV/BIP 指标的计算公式如图 2 所示。

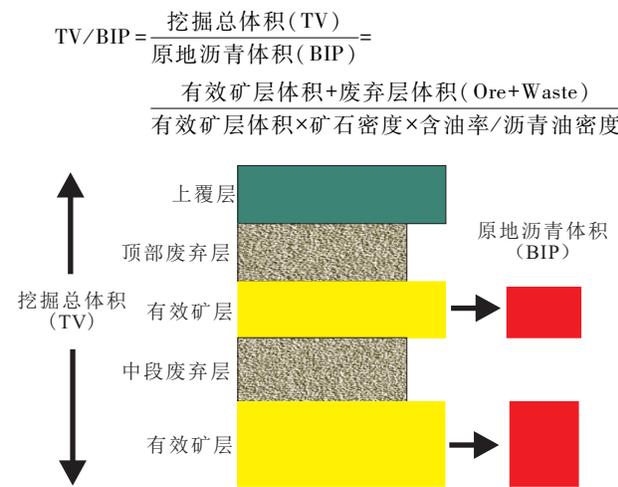


图 2 TV/BIP 指标的概念模型和计算公式
Fig.2 Conceptual models and formulas of TV/BIP parameter

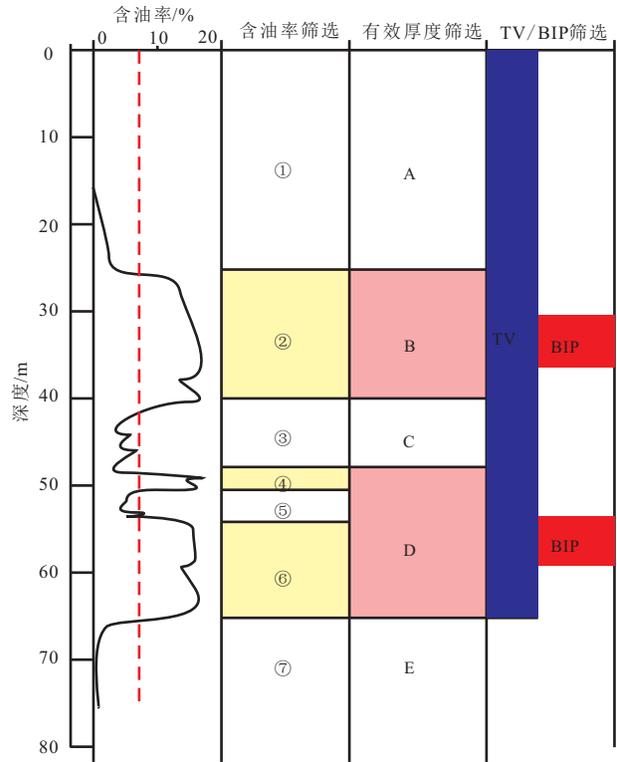
以油砂矿石密度 2.1 t/m^3 、油砂含油率 10%、沥青油密度为 1 t/m^3 为例:要得到 1 m^3 的沥青油,相当于挖掘了约 4.76 m^3 的有效油砂矿层,而挖掘的总体积最多只能是 12 m^3 ,因此可挖掘的废弃层体积最多只能是 7.24 m^3 。可见,该指标从根本上限定了开采作业量和可获取的最终资源量。

3.4 示例分析

图 3 展示了一个单井实例,用来分析展示加拿大政府规范中 3 个要点的应用过程。

对单井而言,可通过实验室测试得到含油率数据,并绘制含油率随深度的变化曲线(图 3)。

第 1 步需首先使用含油率下限指标对含油率数据进行筛选,初步划分出小层(符合条件或不符合条件),在图 3 中,按照含油率指标筛选结果表明,第①③⑤⑦小层都不满足含油率条件,而第②④⑥小层都符合(图中用浅黄色底色标出);



图中带圈数字表示通过含油率数据筛选区分出来的有效矿层或废弃层,大写英文字母代表通过有效厚度指标再次筛选/合并后得到的有效矿层或废弃层,TV 和 BIP 概念见前文图 2

图 3 单井有效矿层判别示例
Fig.3 An example for judging effective ores in a single well

第 2 步使用有效厚度下限指标再次进行筛选,发现前一步中的第④小层虽符合含油率指标,但是厚度小于 3 m,需考虑将其与上面的第③小层合并,合并后的③+④小层平均含油率仍低于下限值,此时如果坚持合并③+④小层,则③+④小层被判定为无效矿层,但如果将第④小层与第⑤小层合并,合并后的④+⑤小层平均含油率就满足了含油率指标,同时也满足了最小厚度的指标,因此,将④+⑤小层合并,并判定为有效矿层,再加上本来就达标的第⑥小层,一起合并为新的有效矿层。通过有效厚度筛选(并适当进行合并处理)这一步骤,划分出 A、B、C、D、E 共 5 套小层,其中 B、D 小层有效矿层(图中用淡紫色底色标出);

第 3 步,在小层划分完毕的基础上,进行单井 TV/BIP 指标的判别。其中 TV 指 A、B、C、D 这 4 套小层的总体积(E 小层不挖掘),BIP 指从 B、D 矿层中得到的沥青油体积。应用图 2 中的公式,将单井数据代入计算,判断 TV/BIP 是否小于 12。

只有满足全部 3 个步骤筛选的油砂矿层才是符合加拿大政府法规的有效矿层,才可以进入最终评价得到的油砂资源量中。

4 与中国油砂资源评价方法的对比

中国油砂资源分布广泛,但资源丰度不高。在2003—2007年国土资源部组织的全国新一轮油气资源评价(国土资源部油气资源战略研究中心,2009)和2012—2013年全国油气资源动态评价-新疆地区油气资源动态评价(内部报告)中,油砂的资源评价工作是重要的组成部分。从两份评价报告来看,中国采用的油砂资源评价方法与加拿大的油砂资源评价方法基本相同,都是含油率法和含油饱和度法,但中国的油砂资源评价工作中关键参数边界取值更加宽松,比如在全国新一轮油气资源评价工作报告中(国土资源部油气资源战略研究中心,2009),含油率下限取值为3%,在全国油气资源动态评价-新疆地区油气资源动态评价报告中(内部资料),含油率下限取值为6%。对于最小厚度,在全国新一轮油气资源评价(国土资源部油气资源战略研究中心,2009)工作中,按照0~100 m、100~500 m 2个深度范围进行评价,在全国油气资源动态评价新疆地区油气资源动态评价工作中(内部资料),则未涉及最小厚度取值。陶莹等(2009)在对新疆乌尔禾白垩系油砂矿进行研究时采用了油砂层厚度大于1 m,含油率大于3%的边界条件。此外,目前在国内的油砂研究工作中,从未涉及过TV/BIP等指标的研究。

对比来看,国内的油砂资源评价侧重于油砂资源本身有多少量,而加拿大的评价方法需要充分考虑油砂项目的效益,这种差别是由2国油砂矿整体含油率差异、资源规模差异、基本地质条件差异和经济社会发展水平差异等基本国情综合决定的。

5 结论

露天开采油砂的资源量可采用含油率法或含油饱和度法进行评估,涉及的重要参数可通过野外地质考察、实验室测定和测井解释获取。

加拿大政府出台的相应规范,从最低含油率、最小矿层厚度、最大TV/BIP指标等方面对作业者可以/必须获取的油砂资源进行了限定,在进行油砂资源评价之前,必须从这3个角度对油砂地质数据体进行前处理,对满足条件的有效矿层进行筛选和资源评价。中国的油砂资源评价工作在关键参数边界取值方面更加宽松。

加拿大油砂资源评价规范中的3个关键参数体现了效益和效率之间的平衡,可以为包括加拿大在

内的全球范围内油砂资源评价提供参考,同时,随着国际油价的波动,3个关键指标的取值也应动态变化,指标取值与油价的关系值得下一步进行深入的研究。

参考文献 (References):

- Alberta Energy and Utilities Board. 2001. Interim Directive 2001-07: Operating criteria; Resource recovery requirements for oil sands mine and processing plant sites, 1-5
- Energy Resources Conservation Board. 2009. Alberta's energy reserves 2008 and supply/demand outlook 2009-2018. <http://www.aer.ca/documents/sts/ST98/st98-2009.pdf>
- Energy Resources Conservation Board. 2013. Directive 082: Operating Criteria; Resource recovery requirements for oil sands mine and processing plant operations, 1-9
- Flach P D. 1984. Oil sands geology-Athabasca deposit north. http://www.ags.gov.ab.ca/publications/BUL/PDF/BUL_046.PDF
- Flach P D, Mossop G D. 1985. Depositional environments of lower Cretaceous McMurray formation, Athabasca Oil Sands, Alberta. AAPG Bulletin, 69(8): 1195-1207
- Jardine D. 1974. Fuel of the future: Cretaceous oil sands of western Canada. Canadian Society of Petroleum Geologists, 3: 50-67
- Kramers J W, Mossop G D, Karem D J. 1987. Geology and development of the Athabasca oil sand deposit. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 69(6): 92-99
- Masliyah J, Zhou Z J, Xu Z H, Czarnecki J, Hamza H. 2004. Understanding water-based bitumen extraction from athabasca oil sands. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 82(4): 628-654
- National Energy Board. 2013. Canada's energy future 2013: Energy supply and demand projections to 2035-An Energy Market Assessment. <http://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/fttr/2013/2013nrgfttr-eng.pdf>
- Vigrass L W. 1968. Geology of Canadian heavy oil sands. AAPG Bulletin, 52(10): 1984-1999
- Yin P F, Liu G D, Liu Y Q, Liu C L, Liu W P. 2013. Evaluation of oil sands resources—A case study in the Athabasca Oil Sands, NE Alberta, Canada. Petroleum Science, 10(1): 30-37
- 顿铁军. 1995. 加拿大的稠油和天然沥青资源. 西北地质, 16(3): 37-41
- 高杰, 李文. 2006. 加拿大油砂资源开发现状及前景. 中外能源, 11(4): 9-14
- 国土资源部油气资源战略研究中心. 2009. 全国油砂资源评价. 北京: 中国大地出版社
- 单玄龙, 车长波, 李剑, 范超颖, 臧春艳, 王清斌. 2007. 国内外油砂资源研究现状. 世界地质, 26(4): 459-464
- 陶莹, 于雷, 刘人和, 童凯军. 2009. 新疆乌尔禾白垩系油砂矿地质特征及资源评价. 石油地质与工程, 23(2): 37-39
- 杨光. 2012. Dean-Stark 装置的改进. 实验室科学, 15(3): 189-194
- 张建华. 2009. 加拿大石油资源现状与未来发展分析. 当代石油石化, 17(3): 13-18
- 张小雨, 马蒙蒙, 牛林彬, 庞晨梦, 关新新. 2014. 油砂矿含油率的测定. 郑州大学学报(理学版), 46(3): 76-79
- 郑德温, 方朝合, 李剑, 葛稚新, 王义凤. 2008. 油砂开采技术和方法综述. 西南石油大学学报(自然科学版), 30(6): 105-108

(本文责任编辑: 刘莹)