

油砂成矿作用浅析*

马小平^{1,2}, 雷国明^{1,3†}, 肖鸿^{1,4}, 梁锋¹, 孙海怀^{1,2}

- (1. 中国地质学会 新疆关键矿产勘查开发技术创新基地, 新疆 乌鲁木齐 830091; 2. 吐鲁番金源矿冶有限责任公司, 新疆 吐鲁番 838204;
3. 新疆维吾尔自治区地质局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 新疆地矿(投资)集团有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 油砂作为常规油气资源的重要补充, 在国际能源供给结构中占有重要地位. 研究表明, 油砂成矿作用具有生成、运移、储集、破坏、保存“五位一体”的特点, 贯穿其“源-运-储-破-保”的全成矿过程, 其中储集、破坏、保存作用对于油砂成矿尤为关键. 分析认为, 发育原始油藏是油砂形成的物质基础, 储集和保存作用是油砂规模和含油性高低的关键控制因素, 同一盆地常规油气及油砂、页岩油气等非常规油气“同根同源”, 要以油气系统观念开展综合勘查工作, 注重在断裂“纵横交错”区域、不整合面附近, 及原始油藏储集砂体发育区寻找油砂矿体, 油砂成矿作用过程研究对探寻油砂矿深边部常规、非常规能源“就矿找矿”具有重要启示和借鉴意义.

关键词: 油砂; 成矿作用; 非常规能源; 页岩油气

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.04.16.0004

中图分类号: TE121 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)04-0452-07

引文格式: 马小平, 雷国明, 肖鸿, 梁锋, 孙海怀. 油砂成矿作用浅析[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(4): 452-458.

英文引文格式: MA Xiaoping, LEI Guoming, XIAO Hong, LIANG Feng, SUN Haihui. Discussion on mineralization of oil sands[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(4): 452-458.

Discussion on Mineralization of Oil Sands

MA Xiaoping^{1,2}, LEI Guoming^{1,3}, XIAO Hong^{1,4}, LIANG Feng¹, SUN Haihui^{1,2}

- (1. Xinjiang Key Mineral Exploration and Development Innovation Base of Geological Society of China, Urumqi Xinjiang 830091, China; 2. Turpan Jinyuan Mining & Metallurgy Co. Ltd., Turpan Xinjiang 838204, China; 3. Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, Urumqi Xinjiang 830000, China;
4. Xinjiang Mining Investment Group Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830000, China)

Abstract: Oil sands, as an important supplement to petroleum, occupy a high position in the international energy supply. Researches show that the mineralization is characterized by the “Five in One” process of generation, migration, storage, destruction and preservation, which throughout the entire mineralization process, and the storage, destruction and preservation are more important for the oil sands mineralization. Analysis suggests that the development of primitive oil reservoirs is the material basis for the formation of oil sands, and the role of storage and preservation is the key control factor for the scale and oil content of oil sands. Conventional oil and gas in the same basin and unconventional oil and gas such as oil sands and shale oil and gas have the same origin. Therefore, comprehensive oil and gas exploration should be carried out based on the concept of oil and gas systems, with a focus on searching for oil sand deposits in areas where faults crisscross, unconformities, and sand bodies in primitive oil reservoirs are developed. The study of the process of oil sand mineralization has important implications and reference significance for exploring the conventional and unconventional oil and gas in the deep and edge of oil sand deposits.

Key words: oil sands; mineralization; unconventional energy; shale oil and gas

* 收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金“淮南冲断带东段乌鲁木齐一带芦草沟组页岩含油气差异性研究”(QN2016YX0643).

作者简介: 马小平(1986—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事非常规能源及矿产资源勘查的研究, E-mail: xiaopingma86@163.com.

† 通讯作者: 雷国明(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事非常规能源勘查技术管理及理论的研究, E-mail: 837970051@qq.com.

0 引言

油砂是固态或半固态的砂和其岩石中包含油的混合物,是常规油气资源的重要补充^[1-2]。关于油砂成矿作用的研究既不能等同于固体矿床研究,也应区别于常规油藏分析,究其根本,油砂既具有固体矿床的成矿特征,又在成因上表现为剩余油藏特点。作为全球油砂资源最为丰富的加拿大阿尔伯达盆地,其定义时将油砂和重油统称为油砂,而我国则把重油称为稠油,所以长期以来油砂作为一种非常规资源,一定程度上被忽视^[3]。虽然近几年国家相继颁布了《油砂矿地质勘查和油砂油储量计算规范》《油砂地质勘查规范》等,但在矿权管理上,作为固体矿床来要求;在矿权设置上,往往因位于常规油田区块浅部,处于“两难管”的尴尬境地,难以得到有效开发利用。油砂成矿作用是指在地球的演化过程中,使烃类物质富集形成固态或半固态矿床的各种地质作用^[4]。目前,全国油砂勘探程度整体较低,仅对准噶尔盆地西北缘、松辽盆地西斜坡、柴达木盆地西部、鄂尔多斯盆地南部等做了一些勘查研究或开发实验工作^[5-8]。油砂作为一种非常规能源矿产,是一种特殊的破坏性油藏,受沉积、构造、成藏、破坏、保存等因素综合影响,成矿样式多,分布极不稳定,垂向上有很强的非均质性,浅地表隐伏油砂矿床识别难度大,前人对油砂成矿研究往往局限于单个矿区或单个层位,或延续对深层常规油气成因的认识^[9-12],对油砂成矿作用的研究普遍从常规油气“生-储-盖”组合的角度考虑,缺少从生成、运移、储集、破坏、保存等油气系统观念研究油砂成矿作用。因此,深入研究油砂成矿作用,有助于丰富油砂成矿理论体系,对深化区域油砂富集规律认识、预测和识别大型隐伏油砂矿床、指导油砂矿深部“就矿找矿”具有重要意义。

1 生成作用

发育原始油藏是油砂形成的物质基础,含油气盆地的边缘往往发育油砂矿(图1)。生成作用对油砂成矿的贡献可分为两种。第一种油砂成矿形成于一次油气供给的同沉积阶段,这种类型占大多数,其烃源岩有两种类型,分别为泥页岩和碳酸岩。其中泥页岩型居多,如加拿大阿萨巴斯卡下白垩统麦克默里组油砂,其油源来自泥盆系埃克肖组页岩^[13-14]。尤因塔盆地油砂油源为始新统绿河组的半深湖-深湖相的钙质页岩和泥灰岩^[15]。准噶尔盆地西北缘油砂油源主要为玛湖凹陷二叠系风城组、佳木河组和乌尔禾组泥页岩^[16]。松辽盆地西部斜坡油源主要来自中央凹陷的上白垩统青山口组半深湖-深湖相泥岩^[5]。柴达木盆地鱼卡地区油砂油源为中侏罗系晚期优质湖相泥岩^[6]。鄂尔多斯盆地南部侏罗系油砂烃源岩为上三叠统延长组深湖-半深湖相泥岩^[7]。四川盆地厚坝侏罗系大型油砂油源来自下寒武统黑色泥岩^[17]。烃源岩为碳酸岩的如委内瑞拉奥里诺科油砂,其油源为上白垩统古由塔群的奎若克组和圣安东尼奥组及蒂格组碳酸盐^[18]。伏尔加-乌拉尔盆地油砂油源为上泥盆统中弗拉斯阶-下石炭统杜内阶的碳酸盐岩^[19]。西藏羌塘盆地隆鄂尼地区油砂的烃源岩为中侏罗统布曲组碳酸盐岩和泥岩^[20]。第二种油砂的生成作用贯穿油砂形成整个过程,是轻质油砂的典型代表。如吐-哈盆地七克台油砂,其烃源岩为侏罗系发育的暗色泥岩,大部分为七克台组“自生自储”型油砂^[21]。准噶尔盆地西北缘黑油山油砂至今还在不断形成,烃源岩为玛湖凹陷二叠系风城组泥页岩^[22]。

2 运移作用

运移作用受构造和沉积演化控制,同一盆地内不同构造单元的构造沉积演化差异决定了运移通道类型,一定程度导致了油砂空间分布的差异性(图1)。前人对研究区油气运移通道做过大量研究,但运移通道匹配方式的研究结果尚存一些争议。主要观点有三种:不整合面是原油运移的主要通道^[23-24];不整合面与断层相交沟通为油气运移通道^[9,25];断裂-毯砂为油气运移提供了优势输导通道^[26]。

2.1 不整合面

不整合既是一种地层现象,也是一种构造现象,不整合的平面分布类型展现了构造运动的活动特点。不整合可划分为超覆不整合、削截不整合、褶皱不整

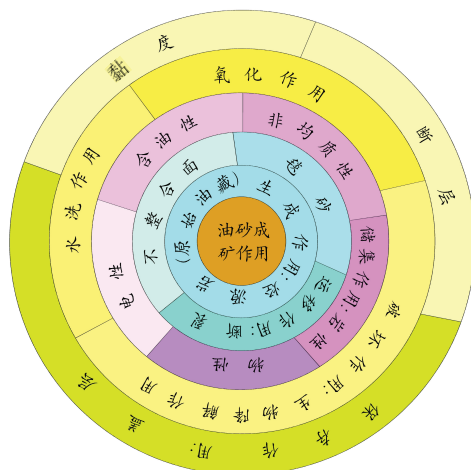


图1 油砂成矿作用要素图

合、平行不整合等^[27]. 不整合的组成包括不整合面之上底砾岩、半风化岩石和不整合面之下风化黏土层. 底砾岩分布和厚度较稳定, 碎屑颗粒较粗, 一般孔渗性较好, 可作为油气运移通道; 风化黏土层可作为隔挡层, 防止原油串层运移; 半风化岩石的孔裂隙发育, 是不整合面油气运移的主要通道. 垂向上可划分为双运移型通道和单运移型通道, 单运移型通道根据风化黏土层是否缺失分为两种^[23,28].

2.2 断裂

断裂是控制含油气盆地各类地质作用及油气生、运、聚和分布范围的关键要素^[29], 既可作为连接油源与储层的“桥梁”, 也可作为油砂聚集的“隔挡”. 纵向上, 一般“断裂通到哪里, 油砂就存到哪里”, 沿着断裂两侧形成多套油砂层; 平面上, 油砂形成和分布与断裂活动密切相关. 多次的构造活动, 促使烃源岩多次生烃, 油气多期长距离运移, 盆缘大量发育的逆断层是纵向通道, 构造活动形成的不整合面是横向通道. 断裂向上断达的层位, 是下伏原油沿断裂向上充注的最浅层位, 未能与断裂连通的孤立砂体集聚油砂的可能性较小. 研究发现, 油砂的分布还受次级断层的明显控制^[30]. 有时同一砂体中也有部分砂体不含油或含油率低, 是因为次级断层具有较好的封堵性, 高黏度、低能量的浅部原油往往无法在水平方向突破封堵性强的断层, 从而不能进入断层面上盘砂体成矿. 因此, 断裂的开启性和封闭性对油气运移和油砂聚集成矿发挥重要作用.

2.3 毯砂

地毯状发育的砂体为油气运移提供了优势输导通道. 多期沉降和抬升剥蚀的构造演化, 形成了多期叠加沉积且分布稳定的厚层毯状高效输导砂体, 其与油源断裂联通, 使深部被破坏的油藏通过断裂-不整合-毯砂“接力式”的运移. 研究表明, 原油运移通道受构造和沉积相综合控制^[30], 断裂、不整合面和连续的砂体共同构成原油运移通道, 原油运移过程中, 垂向上断层连通储层, 侧向上不整合面(深部)和孔渗性好的砂岩(浅部)成为运移通道, 运移路径多呈“Z”形. 如加拿大阿萨斯卡地区, 由于受太平洋板块向东俯冲于北美板块之下, 所产生的近东西向的挤压作用, 使早期沉积地层生成的原油自西向东、由下向上运移, 穿过长达100 km的砂体, 到达近地表麦克默里组储层形成油砂矿^[13-14]. 又如准噶尔盆地西北缘毯砂主要由水下分流河道、席状砂、辫状河道等微相组成, 形成了清水河组、齐古组、八道湾组、克拉玛依组等厚层毯状砂体, 成就了四套富含油砂层系^[30].

3 储集作用

储集作用优劣是油砂成矿含油性高低的关键因素(图1). 储集层的岩性主要为砂岩和碳酸岩, 其中砂岩型占绝大多数, 以加拿大阿萨斯卡油砂为代表, 其油砂储层为下白垩统麦克默里组河流三角洲平原和潮控河口湾沉积, 砂岩分选好, 孔隙度、渗透率高^[31]. 委内瑞拉奥里诺科油砂储层为河流三角洲相的砂体^[18]. 尤因塔盆地油砂储层主要为始新统绿河组河流相及湖泊三角洲相的碎屑岩^[15]. 柴达木盆地油砂山油砂储层主要为上新统下油砂山组三角洲前缘滨浅湖相沉积的长石岩屑砂岩^[6]. 松辽盆地图牧吉白垩纪油砂的储集单元为三角洲前缘的河口坝与水下分流河道砂体^[5]. 四川厚坝油砂储集于侏罗系沙溪庙组河湖相沉积的中粗粒岩屑石英砂岩和厚层块状岩屑砂岩中^[17]. 鄂尔多斯盆地南部庙湾油砂发育在中下侏罗统直罗组和延安组的辫状河道沉积的砂岩孔裂隙中^[7]. 碳酸岩型油砂储层, 代表性的为伏尔加-乌拉尔盆地油砂, 其储层主要为下-中石炭统的碳酸盐岩, 沉积相为深海相-浅海相-泻湖相^[19]. 羌塘盆地隆鄂尼油砂储层主要为中侏罗统布曲组中细晶白云岩^[20].

此外, 研究油砂储层应从岩性、物性、电性、含油性、非均质性等方面综合考虑, 深入分析“五性”之间的关系, 对评价油砂储集作用至关重要. 油砂储层岩性特征包括岩石的碎屑组成、粒度分布、分选磨圆、颗粒接触关系、胶结类型等, 这些特征参数不仅可以反映岩石的形成环境, 而且对油砂储层物性具有重要影响. 研究表明, 细、中砂岩有利于油砂成矿^[30], 含油率相对较高; 粗砂岩、砾岩、粉砂岩中油砂赋存较少, 含油率相对较低. 储层物性应从孔隙度、渗透率、空间类型、黏土矿物等角度论述, 研究表明, 细砂岩、中砂岩、粗砂岩孔渗性最好^[30], 粒度再变粗, 孔渗性明显降低, 是由岩石结构成熟度降低造成的; 粒度越细, 由于孔径变小, 孔渗性变差. 通过测井参数在油砂层和其它岩层的视电阻率、密度、放射性强度、声速等物性参数的对比, 发现油砂层与其它岩层在电性方面存在较明显差异, 具有独特的高电阻率、低密度、低放射性、中低声速的“一高三低”地球物理组合特征. 含油性是划分油砂层厚度和判定是否具有开采价值的重要指标, 下限标准可根据岩心含油产状法确定, 分为油迹、油斑、油浸、富含油、饱含油五个级别, 可以用露头油砂和钻孔控制油砂来定量论述.

油砂含油率和孔渗性整体呈现正相关关系,即含油率高,岩石孔渗性也相对较大;而反之未必,这与整个地层的含油性有很大关系.非均质性是储层基本性质在三维空间分布上的不均一性,储层形成过程中受沉积和成岩作用影响,其分布形态及结构属性发生变化.油砂储层非均质性可从层内、层间和平面三方面论述.不同类型的储层,因油砂物性、含油性、沉积微相的差异性,非均质程度各不相同,一般划分为三类:I类储层整体孔渗性好,砂体厚,连通性好,含油性好,一般为特高孔、特高渗型储层,非均质性低-中等;II类储层与I类相比物性稍低,非均质性中等;III类储层物性较差,隔夹层较多,含油率较低,非均质性较强^[30].

4 破坏作用

4.1 生物降解作用

作为原油稠化及油砂形成的主要因素,关于生物降解作用的研究不少,国内外类似实例也较多.有的学者发现加拿大阿尔伯达油砂是烃类长距离运移至盆地边缘时发生生物降解作用^[32],委内瑞拉奥利诺科油砂带是烃类在运移时轻组分首先被分离,到浅部时遭受细菌降解和氧化作用^[33];国内喀拉扎油砂^[34]、库车坳陷油砂^[35]、冷湖油砂^[36]、小太平山油砂^[37]、厚坝油砂^[17]的形成均与后期生物降解和次生氧化作用密切相关.生物降解作用是指在富氧或缺氧的一定温度地层环境下,好氧或厌氧型微生物选择性地消耗某些烃类化合物,致使原油相对富集非烃和沥青质,原油变得愈来愈稠,密度和黏度越来越大^[26].生物降解是广泛存在的地质过程,生物在温度小于80~100℃条件下均能存在.不同分子抗生物降解的能力不同,遭受降解时这些化合物会依次消失.前人研究成果表明^[5],原油生物降解综合表现为:(1)饱和烃气相色谱图的不溶复杂混合物(insoluble complex mixtures)呈明显“鼓包”;(2)甾萜类化合物含量高于正构烷烃和异构烷烃;(3)甾烷的碳数分布特征表现为C29>C28>C27.因此,由原油中残留化合物的组成,可知原油所遭受的生物降解程度.如准噶尔盆地西北缘克拉玛依组油砂样品饱和烃总离子流图可见“UCM”峰,质量色谱图中检测到高含量的伽马蜡烷,出现25-降藿烷,三环萜烷分布样式为山峰型,三环萜烷含量高于五环三萜烷含量,表现出典型的生物降解特点^[16].

4.2 水洗和氧化作用

水洗伴随氧化作用是造成原油稠化的重要原因.水洗作用是指原油在油水界面附近与地层水发生作用的过程,轻质组分不断溶解散失,重质组分不断增多.氧化作用是指自由氧将原油氧化成酸、醇、酚、酮,使原油非烃和沥青质增加的过程^[5].油砂层越接近地表遭受氧化和水洗蚀变作用的时间就越长.水洗、氧化作用通常选择性地破坏芳香烃和非烃,使其相对比例减少,饱和烃和金属元素比例则随水洗作用的增强而降低,从而使原油变稠、变重.一般沉积岩区地层岩性在平面上不连续,地下水位无统一油水界面,各油层层位含水性较好,能够沿着松散岩石孔隙接触到油砂层,油砂储层往往位于封闭能力较差的浅层,发育良好渗透性的砂体,存在多种不整合面,局部断层贯通,地下径流和地表补给时,会对油砂层产生冲洗溶解^[5,30],但水洗对烃类的作用有限,主要是水体携带的氧气使油砂层处于氧化环境,从而加重对油砂层的破坏作用.

整体上,生物降解是微生物消耗烃类化合物,使原油变得愈来愈稠;水洗作用是原油与地层水作用,轻质组分溶解散失,重质组分增多;氧化作用是自由氧将原油氧化,使非烃和沥青质增加.含油砂盆地边缘长期处于抬升剥蚀状态,油砂埋深甚至出露地表,油砂储层及盖层的成岩作用偏差,地表水或地下水的垂直渗漏,造成油砂的生物降解及氧化作用,使原油密度和黏度显著提高.很大程度上地层水加快了生物降解和氧化作用的发生,如缺少流动水体,生物降解及氧化作用程度也会受到限制,在此过程中生物降解占主导作用,直接对原油作用,促进了油砂矿的形成.发生生物降解的储层温度必须在微生物生存温度范围内,过高可能导致微生物死亡,生物降解失败.由深至浅沿地层倾斜方向,原油的原生性逐步遭受不同程度破坏作用,油质变差而形成高黏度,甚至在盆缘部位形成沥青.因此,破坏作用既是油砂成矿的主要原因,也是油砂和常规油藏的主要区别(图1).

5 保存作用

5.1 盖层

盖层是油砂成矿和保存的重要因素.根据油砂盖层的岩性及完整程度,可将盖层划分为四种类型,即完整泥岩型、完整砂岩型、局部泥岩型和局部砂岩型.当完整泥岩型盖层覆盖整个剖面的油砂时,可形成保存条件良好的泥岩盖层;若油砂层附近没有泥岩,直接被钙质砂岩覆盖时,形成砂岩盖层或因油砂黏度增高直接稠化

自储,局部裸露地表,保存条件一般;当局部泥岩型和局部砂岩型盖层覆盖油砂时,形成保存较好的局部盖层.如准噶尔盆地西北缘乌尔禾一带齐古组油砂以完整砂岩型和局部泥岩型盖层为主,清水河组油砂盖层以完整泥岩型居多,且规模最大^[30].松辽盆地图牧吉油砂的盖层主要为完整泥岩型和局部泥岩型^[5].研究发现,次级断层对油砂的保存有一定控制作用,高黏度、低能量的浅部原油往往无法在水平方向突破封堵性强的断层,在断层一侧聚集形成含油率较高的油砂矿(图1).

5.2 黏度

油砂具有自封闭成矿特征,有机质降解过程中分子缩合使原油改造成沥青,密度增大、烃类稠化,以大分子黏滞力和缩合力为主^[38].自封闭成矿条件主要为高黏度,黏度是原油流动时分子间的内摩擦力的量度^[4].油砂高黏度源于稠化作用(图1).因处于氧化环境,储集层中微生物繁多,原油遭受了强烈的生物降解和水洗氧化作用,使不同层段原油黏度变稠.稠化作用的发生使得轻质组分逸散,油砂油呈高黏度、高凝固点、高密度、强热敏感性的特点,这种特性有利于油砂矿的形成.由于油砂储层埋藏浅,特别是当盖层不完整或砂岩型盖层缺乏有效保护时,油砂本身的高黏度就可以起到“自我封堵”的作用,也是浅部或露头区油砂得以保存的重要原因.

6 展望

油砂的成矿作用贯穿“源-运-储-破-保”成矿全过程,具有生成、运移、储集、破坏、保存“五位一体”的特点,其中储集、破坏、保存作用对于油砂成矿尤为重要.未来油砂找矿和勘查评价,建议关注以下关键问题:(1)盆地内常规油气、油砂、页岩气、致密砂岩气“同根同源”,要以油气系统观念,加强综合找油找气;(2)注重在断裂“纵横交错”区域、不整合面附近,及原始油藏储集砂体发育区寻找油砂矿;(3)加强油砂成矿系统研究,从岩性、物性、电性、含油性、非均质性等方面综合刻画油砂储层,盖层条件可通过纵横地质剖面,结合沉积相展布、粒径统计综合分析确定,成矿过程中生物降解、水洗和氧化作用破坏程度及先后顺序应以样品测试分析判别;(4)研究油砂成矿作用过程,总结成矿规律,建立成矿模式,对探寻油砂矿深部常规、非常规油气“就矿找矿”具有重要启示和借鉴意义.

参考文献:

- [1] LIU Z D, WANG H J, BLACKBOURN G, et al. Heavy oils and oil sands: Global distribution and resource assessment[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2019, 93(1): 199-212.
- [2] 马小平, 冯京, 周继兵, 等. 新疆油砂研究进展及找矿方向[J]. *新疆地质*, 2022, 40(1): 149-154.
MA X P, FENG J, ZHOU J B, et al. Research progress and prospecting direction of oil sands in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2022, 40(1): 149-154. (in Chinese)
- [3] 黄文华, 郭瑞, 周伯玉, 等. 准噶尔盆地风城地区油砂矿勘探评价[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(2): 144-148.
HUANG W H, GUO R, ZHOU B Y, et al. Exploration and evaluation methods of Fengcheng oil sands in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(2): 144-148. (in Chinese)
- [4] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979-1007.
ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979-1007. (in Chinese)
- [5] 罗洪浩. 松辽盆地上白垩统斜坡运移型油砂成藏主控因素与分布规律[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LUO H H. The reservoir forming main control factors and distribution law of the Upper Cretaceous slope migration type oil sands in Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [6] 曹占元, 梁晓飞, 张晓宝, 等. 鱼卡地区油砂矿地质特征及其成矿模式[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 47-50+153.
CAO Z Y, LIANG X F, ZHANG X B, et al. Geological features and mineralization mode in oil sands of the Yuka area[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2015, 22(4): 47-50+153. (in Chinese)
- [7] 全立华, 郝国丽, 罗晓玲, 等. 鄂尔多斯盆地南部侏罗系油砂的发现与成藏模式[J]. *世界地质*, 2018, 37(2): 539-547+601.
TONG L H, HAO G L, LUO X L, et al. Discovery of Jurassic oil sand in southern Ordos Basin and its accumulation model[J]. *Global Geology*, 2018, 37(2): 539-547+601. (in Chinese)
- [8] 代振龙, 范旭东, 马小平, 等. 准噶尔盆地哈山南缘白垩系清水河组油砂基本地质特征[J]. *非常规油气*, 2022, 9(1): 38-47.

- DAI Z L, FAN X D, MA X P, et al. Basic geological characteristics of oil sands of Cretaceous Qingshuihe Formation in the southern margin of Hashan, Junggar Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(1): 38-47. (in Chinese)
- [9] 赵群,王红岩,刘人和,等.准噶尔盆地黑油山地区油砂成矿模式及分布[J].*天然气工业*,2008,28(12):117-120+150.
ZHAO Q, WANG H Y, LIU R H, et al. Oil sand mineralization mode and distribution features in Heiyoushan area of the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(12): 117-120+150. (in Chinese)
- [10] 金文辉,周文,张银德,等.准噶尔盆地西北缘白碱滩油砂成矿因素分析[J].*特种油气藏*,2009,16(6):19-21+95.
JIN W H, ZHOU W, ZHANG Y D, et al. Mineralization factors of Baijiantan oil sand in northwest Junggar Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2009, 16(6): 19-21+95. (in Chinese)
- [11] 梁峰,刘人和,拜文华,等.风城地区白垩系沉积特征及油砂成矿富集规律[J].*大庆石油学院学报*,2010,34(4):35-39+124-125.
LIANG F, LIU R H, BAI W H, et al. Research into sedimentary characteristics and concentration patterns of oil sand in Fengcheng[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(4): 35-39+124-125. (in Chinese)
- [12] 周伯玉,刘太勋,黄文华,等.准噶尔盆地西北缘风城地区白垩系油砂矿沉积特征及演化模式[J].*沉积与特提斯地质*,2016,36(2):11-19.
ZHOU B Y, LIU T X, HUANG W H, et al. Sedimentary characteristics and model for the Cretaceous oil sand deposits in the Fengcheng area, northwestern Junggar Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2016, 36(2): 11-19. (in Chinese)
- [13] MEYER R F, ATTANASI E D, FREEMAN P A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world[EB/OL]. (2007-10-08)[2024-01-19]. <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/OF2007-1084v1.pdf>.
- [14] 陈浩,黄继新,刘尚奇,等.阿萨巴斯卡油砂下白垩统McMurray组沉积演化特征[J].*地质科技情报*,2018,37(3):92-98.
CHEN H, HUANG J X, LIU S Q, et al. Sedimentary evolution of the Lower Cretaceous McMurray Formation, Athabasca oil sands[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(3): 92-98. (in Chinese)
- [15] 单玄龙,张俊锋,罗洪浩.尤因塔盆地P.R.泉始新统油砂成藏条件及成藏模式[J].*世界地质*,2011,30(2):224-230.
SHAN X L, ZHANG J F, LUO H H. Reservoir forming condition and model of P.R. spring of Eocene oil sand in Uinta Basin[J]. *Global Geology*, 2011, 30(2): 224-230. (in Chinese)
- [16] CAO J, ZHANG Y J, HU W X, et al. The Permian hybrid petroleum system in the northwest margin of the Junggar Basin, northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(3): 331-349.
- [17] 单玄龙,罗洪浩,孙晓猛,等.四川盆地厚坝侏罗系大型油砂矿藏的成藏主控因素[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2010,40(4):897-904.
SHAN X L, LUO H H, SUN X M, et al. Main factors of Houba Jurassic large oil sands reservoir in Sichuan Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 897-904. (in Chinese)
- [18] 马锋,张光亚,王红军,等.全球重油与油砂资源潜力、分布与勘探方向[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2015,45(4):1042-1051.
MA F, ZHANG G Y, WANG H J, et al. Potential, distribution and exploration trend of global heavy oil and oil sand resources[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015, 45(4): 1042-1051. (in Chinese)
- [19] 徐建华.伏尔加-乌拉尔盆地重油地质特征及有利区预测[D].长春:吉林大学,2016.
XU J H. Geological characteristics of heavy oil and accumulation advantage areas prediction in Volga-Ural Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [20] 赵光通,李俊武,邓翔,等.羌塘盆地隆鄂尼地区油砂矿地质特征及成藏模式[J].*特种油气藏*,2019,26(2):40-44.
ZHAO G T, LI J W, DENG X, et al. Geology characterization and hydrocarbon accumulation pattern of oil sand in Longeni of Qiangtang Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2019, 26(2): 40-44. (in Chinese)
- [21] 刘同庆.吐哈盆地某油砂矿成藏分析[J].*中国煤炭地质*,2020,32(7):14-17+45.
LIU T Q. Mineralization analysis of an oil sand deposit in Turpan-Hami Basin[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(7): 14-17+45. (in Chinese)
- [22] 单玄龙,车长波,李剑,等.国内外油砂资源研究现状[J].*世界地质*,2007,26(4):459-464.
SHAN X L, CHE C B, LI J, et al. Present status of oil sand resources at home and abroad[J]. *Global Geology*, 2007, 26(4): 459-464. (in Chinese)
- [23] 冯建伟.准噶尔盆地乌夏断裂带构造演化及控油作用研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
FENG J W. The tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon in Wuxia fault belt of Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2008. (in Chinese)

- [24] 刘兴兵, 黄文辉. 准噶尔盆地西北缘油气运移与油砂成矿分析[J]. 四川地质学报, 2011, 31(3): 297-301.
LIU X B, HUANG W H. Oil and gas migration and oil sand accumulation on the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(3): 297-301. (in Chinese)
- [25] 曲江秀, 邱贻博, 时振峰, 等. 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带断裂活动与油气运聚[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 403-405.
QU J X, QIU Y B, SHI Z F, et al. Fault activities and hydrocarbon accumulation in Wuxia fault belt in northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 403-405. (in Chinese)
- [26] 王圣柱. 哈山复杂构造带形成演化对油气成藏的控制作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
WANG S Z. The formation and evolution of Hashan structural belt and its controlling on hydrocarbon in the northern of Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2015. (in Chinese)
- [27] 陈建平, 查明. 准噶尔盆地环玛湖凹陷二叠系不整合特征及其在油气运移中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 29-31.
CHEN J P, ZHA M. Permian unconformity and its effect on petroleum migration in the circum-Mahu depression of Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 29-31. (in Chinese)
- [28] 高长海, 查明. 不整合运移通道类型及输导油气特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1113-1120.
GAO C H, ZHA M. The types of unconformity migration passages and characteristics of hydrocarbon transport[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1113-1120. (in Chinese)
- [29] 童亨茂, 李德同. 应力对流体及油气二次运移作用的几种模式[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 14-17.
TONG H M, LI D T. Models of formation stress action on fluid and oil and gas migration in reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1999, 23(2): 14-17. (in Chinese)
- [30] 马小平. 准噶尔盆地西北缘油砂储层特征及成矿主控因素研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023.
MA X P. Reservoir characteristics and main controlling factors of oil sands in northwestern margin of Junggar Basin, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2023. (in Chinese)
- [31] 殷鹏飞, 柳广弟, 刘成林, 等. 阿尔伯达盆地北极之光项目区块油砂层沉积样式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 807-814.
YIN P F, LIU G D, LIU C L, et al. Depositional patterns of oil sand layer in Northern Lights block, Alberta Basin, Canada[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 807-814. (in Chinese)
- [32] LARTER S, HUANG H P, ADAMS J, et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface: Part II—Geological controls on subsurface biodegradation fluxes and constraints on reservoir-fluid property prediction[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6): 921-938.
- [33] CASSA F, 高育文. 委内瑞拉重油的有机地球化学特征[J]. 渤海石油地质情报, 1989(2): 51-63.
CASSA F, GAO Y W. Organic geochemical characteristics of heavy oil in Venezuela[J]. Bohai Petroleum Geological Information, 1989(2): 51-63. (in Chinese)
- [34] 李锋, 全立华, 单玄龙, 等. 准噶尔盆地南部喀拉扎油砂成藏模式浅析[J]. 中国矿业, 2017, 26(8): 169-174.
LI F, TONG L H, SHAN X L, et al. Kara oil sands accumulation model analysis in southern Junggar Basin[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(8): 169-174. (in Chinese)
- [35] 张陆平, 单玄龙, 王月. 塔里木盆地油砂油地球化学特征[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2017, 18(2): 104-109.
ZHANG L P, SHAN X L, WANG Y. The geochemical characteristics of oil sand in Tarim Basin, China[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 104-109. (in Chinese)
- [36] 梁晓飞, 曹占元, 吴远东, 等. 冷湖地区油砂有机地球化学特征[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 33-37+152.
LIANG X F, CAO Z Y, WU Y D, et al. Organic geochemical evaluation of oil sand in Cold Lake[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23(1): 33-37+152. (in Chinese)
- [37] 郝国丽, 单玄龙, 全立华, 等. 小太平山油砂油地球化学及生物降解特征[J]. 世界地质, 2017, 36(3): 913-923.
HAO G L, SHAN X L, TONG L H, et al. Geochemical characteristics and biodegradation of oil in Xiaotaipingshan oil sands[J]. Global Geology, 2017, 36(3): 913-923. (in Chinese)
- [38] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
JIA C Z, PANG X Q, SONG Y. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452. (in Chinese)