

特种油气藏

Special Oil & Gas Reservoirs

ISSN 1006-6535, CN 21-1357/TE

《特种油气藏》网络首发论文

题目：塔里木盆地顺北地区超深层断控缝洞型碳酸盐岩油气成藏过程动态模拟
作者：刘亚洲，黄诚，曾溅辉，韩俊，隆辉，张胜，刘畅，廖文毫
收稿日期：2024-11-13
网络首发日期：2025-10-29
引用格式：刘亚洲，黄诚，曾溅辉，韩俊，隆辉，张胜，刘畅，廖文毫. 塔里木盆地顺北地区超深层断控缝洞型碳酸盐岩油气成藏过程动态模拟[J/OL]. 特种油气藏. <https://link.cnki.net/urlid/21.1357.TE.20251028.1919.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

塔里木盆地顺北地区超深层断控缝洞型碳酸盐岩油气成藏过程动态模拟

刘亚洲^{1,2}, 黄诚³, 曾溅辉^{1,2}, 韩俊³, 隆辉^{1,2}, 张胜³, 刘畅³, 廖文毫^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要：塔里木盆地顺北地区超深层油气资源丰富，但成藏地质条件时空匹配关系复杂认识不清，为此，通过分析测试和盆地模拟技术恢复了顺北地区油气生—运—聚成藏过程，探讨了油气性质差异性原因，揭示了深层—超深层油气运聚机理和成藏模式。研究表明：加里东中—晚期和海西晚期是油气运聚的关键时期，而喜马拉雅期存在油气藏再改造和分配；该地区烃源岩发育3种生烃模式，即油多气少双峰型、油气并举双峰型和气多油少双峰型；走滑断裂是油气运移的优势运移通道；盐下、盐间和盐上油气资源量存在此消彼长的关系，肖尔布拉克组和沙依里克组距离烃源岩近优先发生运聚，其中低隆起区是油气再运移的中转站；横向上，顺北地区油气藏受控于主干断裂带的影响，呈现出条带状分布；纵向上，主干断裂沟通烃源岩，向上“开枝散叶”，断裂活动性越强，缝洞系统越发育；同一断裂带内，多期油气充注混合是导致不同位置油气性质差异的主控因素。顺北地区油气藏整体上表现出“多元接力式供烃，断裂优势输导，多期混合充注成藏”的特征。该研究成果对顺北地区深层—超深层下一步油气勘探提供方法上的参考和借鉴。

关键词：成藏过程；动态模拟；深层—超深层；顺北地区；塔里木盆地

中图分类号：TE121 **文献标识码：**A

0 引言

近年来，中国国内油气勘探难度越来越大，油气勘探开发的主战场已经聚焦到了“两深一非一老”（深地、深水、非常规和老油田的高效开发）领域。塔里木盆地常规石油资源量高达 75.06×10^8 t，天然气资源量为 12.94×10^{12} m³，而其深层—超深层的石油资源量为 34.50×10^8 t，天然气资源量为 5.98×10^{12} m³，分别占整个塔里木盆地油气资源量的46%和51%^[1]。顺北油田油气资源量达到 17.00×10^8 t，是目前中国深层—超深层领域油气能源上产速度较快的油田。其中，在顺北油田的1号、4号和5号等多条断裂带已获得工业性油气

收稿日期：20241113；改回日期：20250913

基金项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“克拉通盆地内部走滑断裂体系成因及控藏机制研究——以塔里木盆地为例”（U21B2063）；国家资助博士后研究人员计划“基于人工智能的超深层断控缝洞型碳酸盐岩油气成藏主控因素定量研究”（GZC20242002）；中国石油大学（北京）科研基金资助项目“斜坡带原油混合作用对分子成熟度参数的影响机制及其成藏史重建指示作用”（编号：2462024XKBH005）。

作者简介：刘亚洲（1993—），男，助理研究员，2015年毕业于西南石油大学资源勘查工程专业，2023年毕业于中国石油大学（北京）地质资源与地质工程专业，获博士学位，现从事油气藏形成机理与分布规律方面的研究工作。

通讯作者：曾溅辉（1962—），男，教授，博士生导师，1984年毕业于长春地质学院水文地质与工程地质专业，1994年毕业于中国地质科学院水文地质学专业，获博士学位，现主要从事油气运移和油气成藏研究。

流, 探明油气储量超过 $2.00 \times 10^8 \text{ t}^{[2]}$ 。塔里木盆地为一古老的叠合盆地, 油气藏普遍分布于埋深超过 7500 m 的地层中, 同时发育一系列的走滑断裂, 具有小位移、平面分段、纵向分层和多期活动的特征, 这些地质要素和地质作用共同造成了深层—超深层碳酸盐岩油气成藏的复杂性^[3-4]。前人对塔里木盆地顺北地区深层—超深层油气的缝洞体发育特征、成藏期次和地球化学特征等开展了大量研究^[5-7], 但顺北地区在地质条件约束下深层—超深层油气的生—运—聚过程研究相对较少。

针对上述问题, 以塔里木盆地顺北地区超深层断控缝洞型碳酸盐岩油气藏为对象, 聚焦不同地区烃源岩生排烃史、流体—成藏的时空匹配关系以及流体物性差异性原因等关键科学问题, 基于钻录井、测井、分析化验和生产开发资料, 总结顺北地区油气成藏要素特征, 并建立数值模拟模型, 恢复典型断裂带油气的生—运—聚成藏过程, 并总结顺北地区油气的运聚机理和成藏模式, 为顺北地区深层—超深层下一步油气勘探提供方法上的借鉴。

1 研究区地质概况及石油地质条件

1.1 地质概况

塔里木盆地深层寒武纪—奥陶纪普遍发育一套埋深超过 6000 m 的海相碳酸盐岩, 是目前中国深层—超深层油气勘探的主要目标区^[1, 7]。顺北地区位于塔里木盆地中部的顺托果勒低隆起, 北靠沙雅隆起, 东与满加尔坳陷相接, 东南邻古城墟隆起, 南与卡塔克隆起相连, 西与阿瓦提坳陷相邻(图 1a)。整体上呈现出南北高东西低的构造格局, 能够接受满加尔坳陷和阿瓦提坳陷双向油气充注。结合现有的钻井资料和野外露头资料可以发现, 研究区深层—超深层海相碳酸盐岩发育多套生、储、盖组合。依据区域分布的盖层(膏岩和致密灰岩)特征, 将深层—超深层碳酸盐岩分为 4 套含油气系统(图 1b), 分别为玉尔吐斯组(生)—肖尔布拉克组(储)—吾松格尔组(盖)、玉尔吐斯组(生)—沙依里克组(储)—阿瓦塔格组(盖)、玉尔吐斯组(生)—下丘里塔格组和蓬莱坝组(储)—鹰山组(盖)、玉尔吐斯组(生)—鹰山组和一间房组(储)—桑塔木组(盖)。

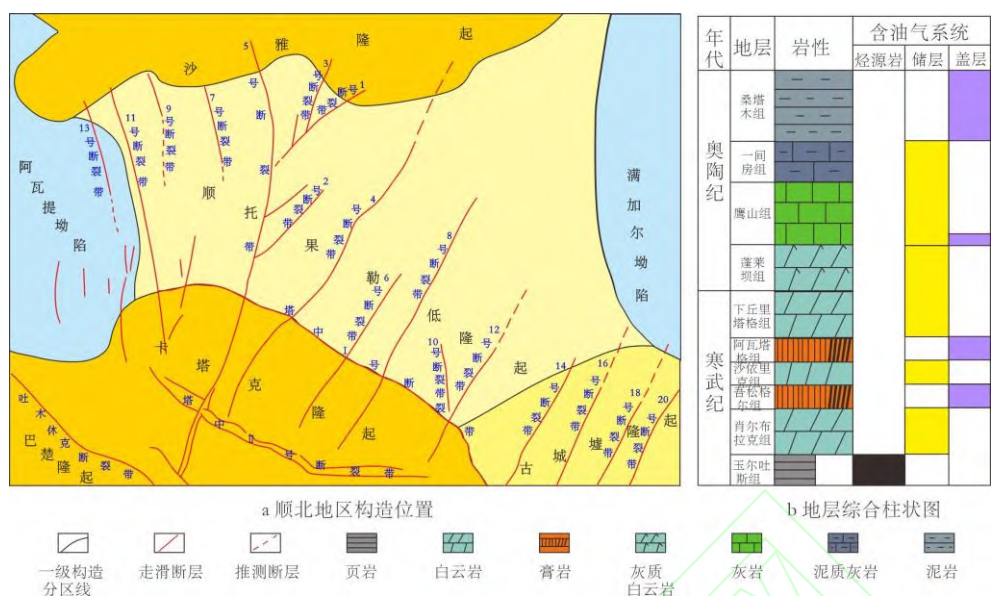


图1 顺北地区构造单元划分及深层—超深层含油气系统要素

1.2 烃源岩条件

研究区露头、钻录井和地震资料证实了塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组发育一套富含有机质的海相泥页岩地层，其厚度普遍小于 50.0 m，但在部分地区厚度可达到 200.0 m 左右^[8]。轮探 1 井钻遇玉尔吐斯组厚度为 81.0 m，黑色页岩厚度为 23.0 m， TOC 为 0.14%~29.80%（平均值为 5.65%）， R_o 为 1.4%~1.7%^[9]。新柯地 1 井揭示玉尔吐斯组厚度为 58.8 m， TOC 为 0.07%~11.30%（平均值为 3.06%）^[10]。星火 1 井发现的玉尔吐斯组烃源岩厚度接近 31.0 m， TOC 为 1.00%~9.43%（平均值为 4.31%）， R_o 为 1.5%左右^[11]。通过油源对比认为下寒武统玉尔吐斯组为塔里木盆地深层—超深层油气的主力烃源岩^[11-12]。

1.3 储集层条件

顺北地区现今发现的油气主要聚集在中奥陶统鹰山组——一间房组，钻进过程中多出现大量泥浆漏失、钻具放空等工程异常现象，岩心、测井和地震资料显示鹰山组——一间房组主要发育洞穴型、裂缝-孔洞型和裂缝型 3 种类型储层。柯坪周缘露头揭示肖尔布拉克组白云岩储层孔隙度为 1.91%~6.98%，主要发育晶间孔和溶蚀孔，晶间孔半径为 10~225 μm ，溶蚀孔半径为 8~500 μm ，微孔、中孔和宏孔均发育，占整个孔隙体积的 75%^[13]。沙依里克组白云岩储层受碳酸盐台地的影响，主要发育台缘滩和台内滩 2 类储层，孔隙度为 3.40%~5.20%，以孔洞型、裂缝-孔洞型储集层为主^[14]。下丘里塔格组和蓬莱坝组整体上以颗粒白云岩、藻纹层白云岩和晶粒结构白云岩为主，孔隙度主要为 2.00%~6.00%，最高可以达到 13.91%，具有典型的晶间孔、晶间溶孔、溶蚀孔洞和裂缝的储集空间^[15]。这一系列碳酸盐岩储层同时受到走滑断裂构造破裂作用和白云化作用双重控制，不同位置物性差异较大，且非均质强，同时具备发育优质储层的潜力。

1.4 断层和盖层条件

以顺北 5 号断裂带为界, 顺北走滑断裂体系表现出“东西分区”的差异性, 界线以东发育 NE—SW 向走滑断裂体系, 界线以西发育 NW—SE 向走滑断裂体系。这些不同走滑断裂体系演化受控于古应力场变化。中奥陶世末期, 塔里木板块向中昆仑板块俯冲, 在塔中隆起的内部和北坡形成一系列 NE 向的区域节理; 后期, 塔里木盆地北缘转化为活动大陆边缘, 北昆仑洋向南俯冲, 在塔里木盆地北缘的西侧形成一系列 NW 向的区域节理。受控于南、北不同区域应力场叠加的影响, 最大主应力方向由 NE 转变为 NW 向, 区域节理方向也发生了偏转, 其中, 顺北 5 号断裂带弧形结构可作为应力场发生转变的有利证据^[16-17]。晚奥陶世末期, 阿尔金构造带强烈隆起, 形成 NW 向区域挤压应力, 作用于早期形成的 NE 向区域节理之上^[16-17]。泥盆纪以后, 古应力场进入挤压—拉张构造旋回阶段, 塔里木盆地南缘处于被动大陆边缘时期。

顺北地区寒武系—奥陶系共发育 4 套区域性盖层: 吾松格尔组膏岩层、阿瓦塔格组膏岩层、鹰山组底部致密灰岩层、桑塔木组泥岩层。其中, 桑塔木组泥岩盖层厚度大, 可达 800.0~1500.0 m, 遍布整个研究区, 为研究区良好的区域性盖层^[18]。在古应力场和岩性能干性叠加影响下, 顺北走滑断裂体系表现出“纵向分层、平面分段”的特征。

1.5 油气藏类型与成藏时间及期次

油气的物性特征是油气地球化学特征的综合反映, 与油气的充注过程及其经历的物理化学过程紧密相关。图 2 为顺北地区油气藏类型和气油比平面分布。由图 2 可知: 顺北地区奥陶系油气藏类型多样, 由东南至西北方向呈现出干气—凝析气藏—挥发性油藏—轻质油藏—中质油藏—重质油藏差异性环状分布规律。该地区不同断裂带之间气油比差异明显, 同一断裂带间气油比差异也很大。4 号断裂带气油比具有先增大后减小再增大再减小的变化趋势, 而 8 号断裂带气油比具有先减小后增大再减小的趋势, 这与油气复杂的充注成藏过程紧密相连。

关于顺北地区油气成藏时间与期次, 不同学者开展了大量研究但未能达成统一的认识。笔者基于对前人研究成果的梳理^[3, 19], 认为顺北地区普遍存在加里东晚期—海西早期和海西晚期 2 期油气充注, 而喜山期存在油气藏的二次调整改造 (图 3), 但不同断裂带和同一断裂带不同位置具有不同的油气充注期次和充注强度。此外, 整体上由北向南、由西向东油气的充注期次由 3 期向 2 期和 1 期过渡。

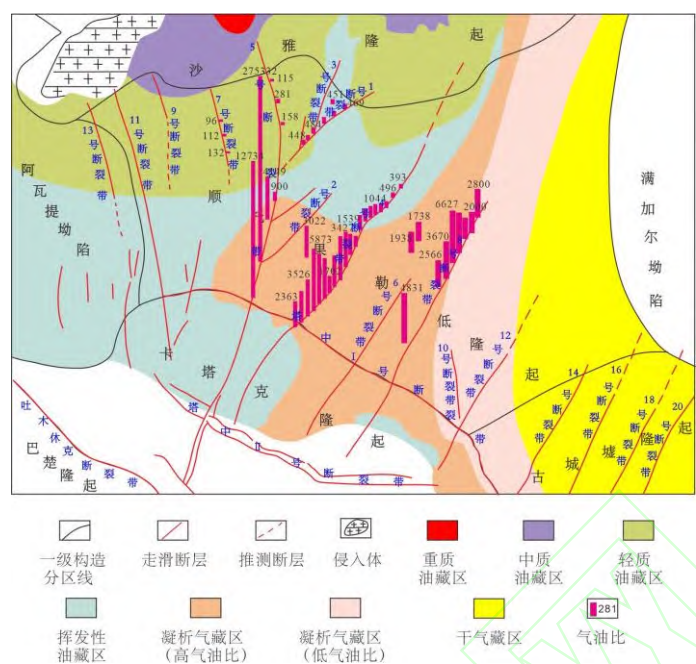


图 2 顺北地区油气藏类型和油气比平面分布

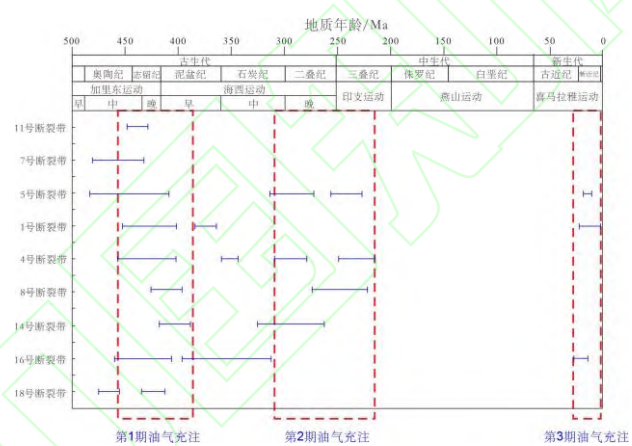


图 3 顺北地区不同断裂带油气充注时间示意图

2 油气成藏地质模型构建

盆地模拟是在盆地地质、地球化学和地球物理背景了解的基础上，通过计算机在时间和空间上反演盆地的形成和演化历史、油气的生成、运移和聚集过程，揭示油气藏形成机理与过程。此次研究采用斯伦贝谢公司研发的 PetroMod 软件对顺北地区埋藏史、热史、生烃史、排烃史和运聚史进行恢复。其中，关于地质模型构建的关键参数如下。

2.1 烃源岩条件设置

烃源岩参数的设置对于含油气系统分析至关重要。基于前人的地质、地球化学分析^[8-12]，认为寒武系玉尔吐斯组烃源岩为塔里木盆地的主力烃源岩。基于二维地震剖面来设定烃源岩的厚度；玉尔吐斯组烃源岩 TOC 设定为 8.00%，氢指数 (HI) 设定为 700 mg/g；生烃动力学模型采用 Pepper 等^[20]提出的有机相 B 模型。其中，B 相烃源岩为典型海相烃源岩，岩相为

硅质碎屑岩，主要由藻类或者细菌生物组成，含硫量中等，生成产物为海相原油。

2.2 边界条件设置

古水深、沉积物-水的界面温度和大地热流对于盆地热演化过程恢复具有重要意义，需要结合实际情况来合理设置^[21]。顺北地区经历了早寒武世大规模海侵到新生代再次成海的复杂构造-沉积背景，根据地层充填序列和沉积相变化估算各个时期古水深；沉积物-水界面温度则是根据 Wygrala^[22]建立的全球古温度标准，顺北地区位于北半球东亚北纬 41° 附近；关于顺北地区大地热流前人已经开展了大量研究^[21]，认为该地区大地热流具有持续降低的特点，早古生代热流值低，晚古生代—中生代由于火山岩侵入热流值升高，之后热流值继承性降低。整体上来看，顺北地区大地热流值从古生代到现今介于 35~45mW/m²。

2.3 运移条件设置

目前流体运移模拟的算法很多，主要包括流线算法、达西算法、混合算法和逾渗算法。此次研究采用了逾渗算法来模拟油气的运聚过程。

2.4 断层属性设置

断层的开启和封闭对于油气垂向或者侧向运移具有重要影响，其中，断裂的几何形态是基于二维地震剖面解释成果，整体上以小位移直立正花状或负花状为主。关于不同断裂体系断裂活动期次的确定，则是基于云露等^[18]的研究成果。如果断裂在某一地质历史时期在活动，那么将断裂在该时期设置成开启状态，反之则设置成封闭状态。总体上来看，顺北地区断裂带表现出长期继承性多幕式特征。

3 模拟结果分析

此研究系统搜集了顺北地区典型钻井实测井底温度、镜质体反射率数据^[21]，并将其与模拟结果进行对比，显示出很高匹配关系，说明该模拟结果真实可靠，可以用于“五史”分析（图 4）。其中，在石炭纪—二叠纪由于火山岩的侵入，部分镜质体反射率实测值有些异常。

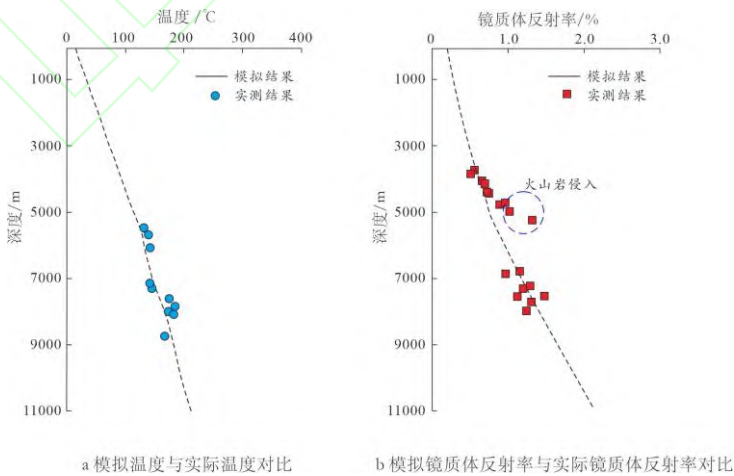


图 4 顺北地区模拟结果与实测结果对比

3.1 烃源岩生排烃史

明确主力烃源岩的生排烃史对于关键时期古构造恢复，圈定油气勘探靶区具有重要意义。

典型井盆地模拟（图 5）表明，玉尔吐斯组烃源岩生烃过程具有“先油后气”的双峰特征，不同构造位置其生排烃史存在显著差异。阿瓦提坳陷玉尔吐斯组烃源岩属于典型的油多气少双峰型，具体表现出生油强度大、生油高峰持续时间长和生气时间短等特征（图 5a）；在晚奥陶世（455 Ma）开始进入生烃阶段，在晚二叠世（260 Ma）达到生油高峰，生油高峰在晚白垩世（60 Ma）开始下降，持续时间接近 200 Ma，生油高峰强度平均值为 400mg/g；古近纪以来地层快速埋藏，烃源岩成熟度增加，生气速率和生气强度也快速增加；现今达到生气高峰阶段，这一过程仅仅用了 60 Ma，生气强度峰值为 400mg/g。顺北地区玉尔吐斯组烃源岩属于典型的油气并举双峰型，具体表现出生油生气强度大、持续时间长等特征（图 5b）；在晚奥陶世（460 Ma）开始生油，在晚泥盆世（385 Ma）达到生油高峰阶段，在石炭纪一二叠纪（300~280 Ma）出现明显的下降，生油高峰持续时间约 150 Ma，其生油高峰值为 350 mg/g；随着后期烃源岩成熟度增加，烃源岩在中一晚三叠世（210 Ma）进入生气高峰阶段，其生气高峰值接近 420mg/g 左右。满加尔坳陷玉尔吐斯组烃源岩属于典型的气多油少双峰型，具体表现出生油高峰持续时间短、生气强度大且持续时间长等特征（图 5c）；在晚奥陶世（460 Ma）开始进入生油阶段，在早志留世（430 Ma）达到短暂的生油高峰阶段，然后生油强度快速下降，而生气强度逐渐增加，在晚二叠世（260 Ma）进入生气高峰阶段，并且一直持续到现在。顺北地区奥陶系油气藏既存在满加尔坳陷和阿瓦提坳陷的二元供烃，又存在顺北地区原地烃源岩的供应，表现出接力式油气充注的特征。

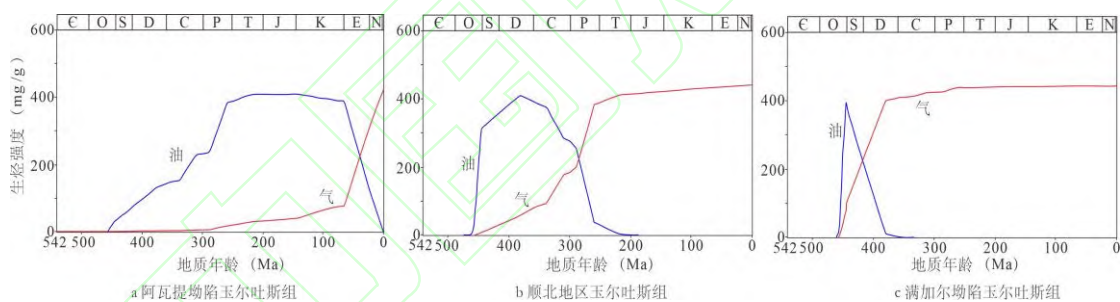


图 5 顺北地区玉尔吐斯组烃源岩生烃史

3.2 油气运聚史

钻井揭示顺北 8 号断裂带含油气柱高度超过 1000 m，日产油气当量超过 1000 t，显示出很好的勘探开发前景。因此，对其油气生—运—聚动态过程的恢复十分必要。选取沿顺北 8 号断裂带走向的二维地震剖面为盆地模拟的基础剖面，基础模拟参数的设置按照前文的标准进行设置，恢复了 4 个关键时期油气运聚过程（图 6）。

模拟结果显示：加里东中—晚期（图 6a），顺北地区原地烃源岩达到成熟阶段，液态烃优先聚集于肖尔布拉克组和沙依里克组；海西晚期（图 6b），烃源岩进入凝析油—湿气阶段，肖尔布拉克组早先形成的油藏接受天然气的充注混合，而沙依里克组和鹰山组+一间房组仍然以油藏为主；燕山晚期（图 6c），烃源岩生成的天然气继续通过走滑断裂向上运移，肖尔布拉克组和沙依里克组以气藏为主，而鹰山组+一间房组以轻质油藏为主；喜马拉雅晚期（图 6d），玉尔吐斯组烃源岩生烃能力几乎停止，早期聚集的油气藏发生再运移和聚集作用，整

体上形成气多油少的分布特征。

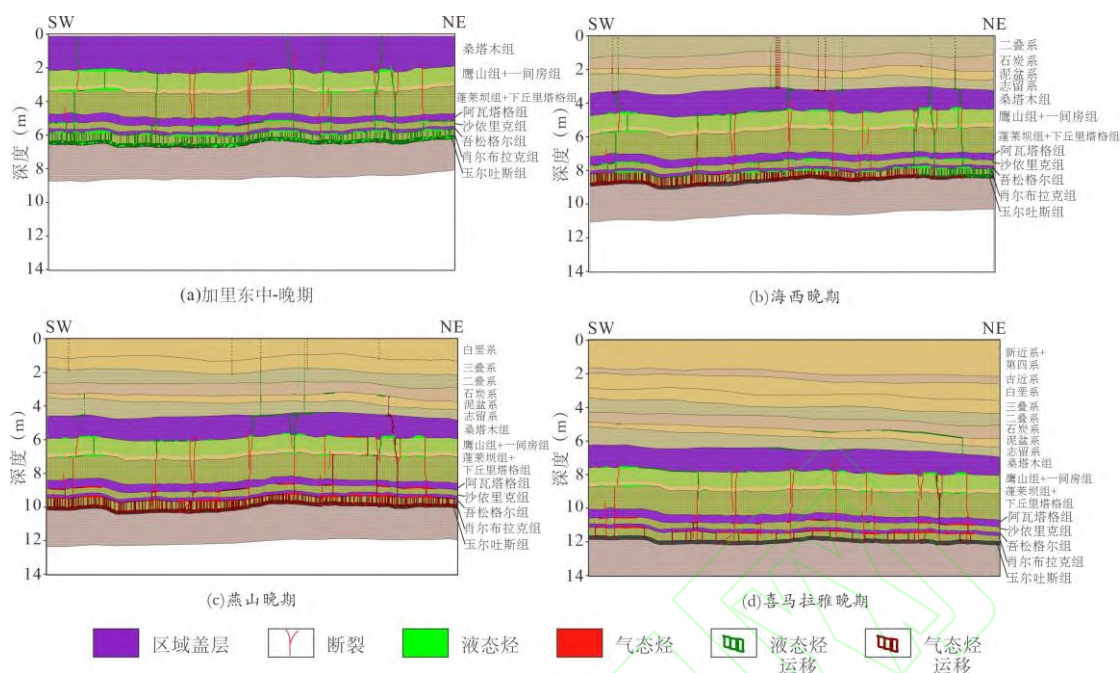


图6 顺北地区8号断裂带油气生—运—聚过程

尽管实际地质条件比数值模拟条件更为复杂,需要再深入解剖地质条件的前提下一步步逼近真实地质条件,但仍能得到一些规律性的启示:①同一断裂带烃源岩热演化程度近似,靠近烃源岩的寒武系低隆起区有利油气聚集,也是油气发生再运移的中转站;②走滑断裂是油气运移的优势运移通道,鹰山组+一间房组中的油气主要通过走滑断裂进行输导;③运聚方式存在差别,肖尔布拉克组和沙依里克组既存在垂向运移又存在侧向调整,而鹰山组+一间房组则以垂向运移为主;④盐下、盐间和盐上油气资源量存在消长关系,肖尔布拉克组和沙依里克组存在丰富的油气资源,是下一步有利的勘探方向。

3.3 油气性质差异性原因

顺北走滑断裂存在多期的活动已经形成共识,并且走滑断裂具有“控输、控储、控藏和控富”的特点^[17-18]。平面上,玉尔吐斯组烃源岩由东至西成熟度逐渐降低,导致奥陶系油气藏由东部干气藏向西北部过渡为重质油藏。对同一条断裂带而言,由于断裂带不同位置构造活动性差异,造成油气性质不一致。以顺北8号断裂带油气性质为例,F8-1井深层奥陶系原油为浅黄色,油气比较高(3021 m³/t),表现出典型凝析油气特征。通过原油色谱-质谱分析可以发现,正构烷烃完整且占绝对优势,具有“前峰型”特征;藿烷和甾烷几乎消失,表明原油已经发生了裂解且成熟度至少处于1.0%以上。

通过天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$ 成因判识图版可以发现,顺北8号断裂带天然气为高成熟油型气(图7a、表1)。同时8号断裂带奥陶系天然气 $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 和 $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 分别为2.5~3.5和0.5~1.5(图7b、表1),基于前人提出的经验图版^[23]可以发现,该断裂带天然气为干酪根裂解气和原油裂解气混合成因,与原油地球化学特征分析相一致。同时还可以看出,8号断裂带油气藏中至少存在等效镜质体反射率大于1.5%的天然气充注。无论是定年分析

还是数值模拟，均揭示出顺北地区存在多期油气充注事件。为了更好地评价原油裂解程度对油气性质的影响，此次研究选用金刚烷类化合物来定量评价原油裂解程度。金刚烷类化合物类似于金刚石碳骨架结构，化学性质稳定，具有很强的抗生物降解和热稳定性^[24]。金刚烷类化合物来自于高成熟阶段的烃源岩，在热演化过程中总量不变，但浓度随原油裂解程度增加而增加。顺北 8 号断裂带气油比和(4+3-)甲基双金刚烷含量具有很好的一致性，指示同一断裂带内高成熟油气充注可能是导致不同位置油气性质差异的主控因素（图 8）。

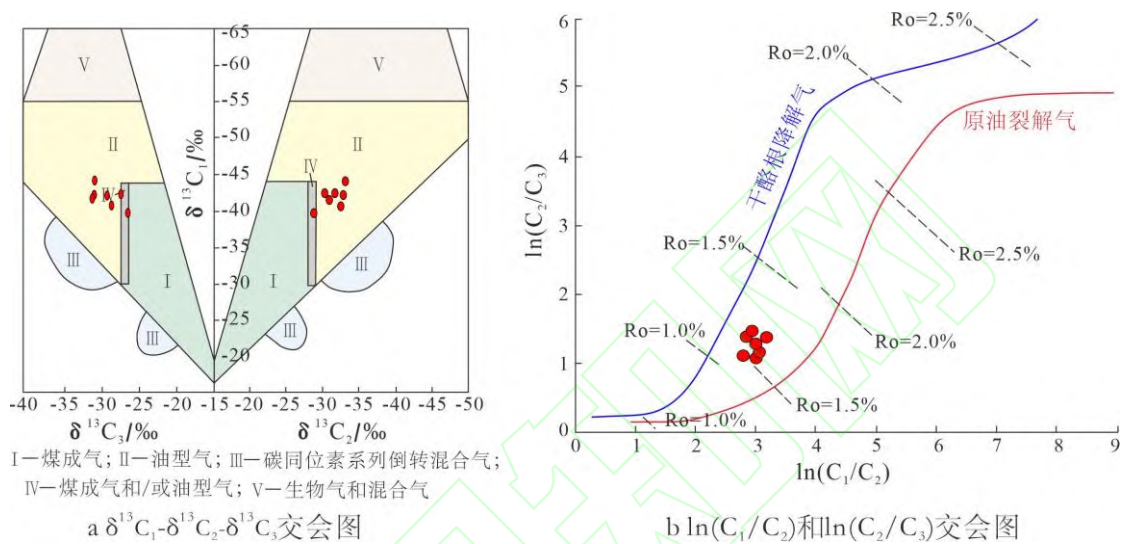


图 7 顺北地区 8 号断裂带天然气成因识别图版

表 1 顺北地区 8 号断裂带天然气地球化学特征

井号	层位	$\delta^{13}C_1/\text{‰}$	$\delta^{13}C_2/\text{‰}$	$\delta^{13}C_3/\text{‰}$	(4+3-) 甲基双金 刚烷/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	气油比 $/(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$
F81	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-42.4	-31.7	-29.1	63.6	1789
F82	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-39.6	-28.8	-26.4	155.8	13080
F803	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-41.4	-30.9	-31.0	152.9	7286
F801	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-42.4	-30.3	-30.8	78.4	1795
F8	O_2YJ	-44.2	-33.1	-30.7	65.4	3021
F83	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-40.6	-32.5	-28.5	61.1	2000
F84	$O_2YJ+O_{1-2}Y$	-42.1	-32.8	-27.3	91.1	2800

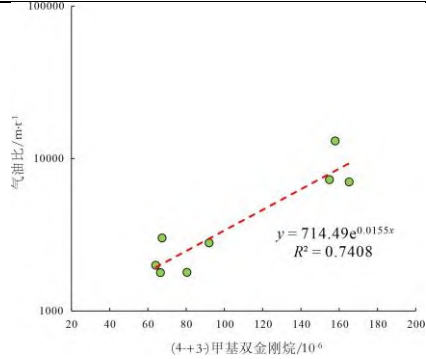


图 8 顺北地区 8 号断裂带(4+3-)甲基双金刚烷含量和气油比关系

3.4 油气成藏模式

综合顺北地区烃源岩生排烃史、油气运聚史和油气性质差异性分析结果，建立了顺北地区油气运聚成藏模式（图9）。横向上，油气藏受控于主干断裂带的分布，以断裂带结构为核心向两边扩展，呈现出条带状分布。玉尔吐斯组烃源岩成熟度控制原油物性及油气藏类型分布。原油密度自东向西逐渐增大；平面上自东南向西北，油气藏类型呈环带状分异，依次分布干气藏、凝析气藏、挥发性油藏、轻质油藏、中质油藏至重质油藏，展现出明显的成熟度阶序特征。纵向上，主干断裂沟通烃源岩，向上“开枝散叶”，断裂活动性越强，缝洞系统越发育。走滑断裂是油气运移的优势运移通道。同一断裂带内，由于断裂的多期活动存在多期的油气充注，高成熟油气混入的比例越大导致气油比越大。肖尔布拉克组和沙依里克组距离烃源岩较近，既存在垂向运移又存在侧向运移，是潜在的资源。而蓬莱坝组+下丘里塔格组和鹰山组+一间房组的油气主要以垂向运移为主。顺北地区整体上表现出“多元接力式供烃，断裂优势输导，多期混合充注成藏”的特征。

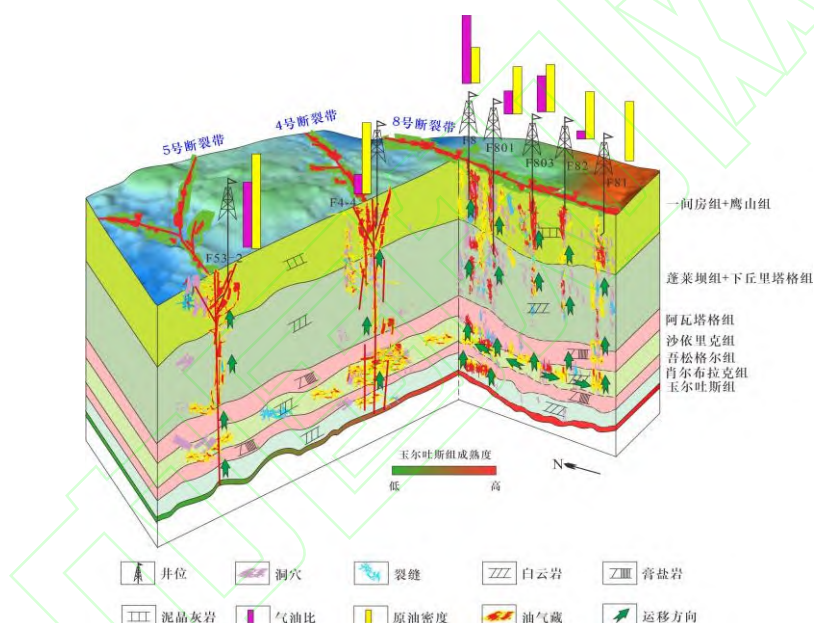


图9 顺北地区油气运移和聚集模式

5 结 论

（1）玉尔吐斯组烃源岩发育3种生烃模式。阿瓦提坳陷烃源岩发育油多气少双峰型模型，具有生油强度大、生油高峰持续时间长而生气时间短的特征；顺北地区原地烃源岩发育油气并举双峰型，具有生油生气强度大、持续时间长特征；满加尔坳陷烃源岩发育气多油少双峰型，具有生油高峰持续时间短、生气强度大且持续时间长等特征。

（2）油气运聚史模拟揭示了加里东中—晚期和海西晚期是油气运聚的关键时期，而喜马拉雅期存在油气藏再改造和分配；走滑断裂是油气运移的优势运移通道；盐下、盐间和盐上油气资源量存在此消彼长的关系，肖尔布拉克组和沙依里克组距离烃源岩近优先发生运聚，其低隆起区是油气再运移的中转站。

(3) 顺北 8 号带原油正构烷烃完整, 甾烷和藿烷类化合物接近消失, 表现出高熟油特征。该断裂带天然气为干酪根裂解气和原油裂解气混合成因, 至少存在等效镜质体反射率大于 1.5% 的天然气充注。基于金刚烷类化合物含量和气油比关系揭示了同一断裂带内高成熟油气充注可能是导致不同位置油气性质差异的主控因素。

(4) 横向上, 顺北地区油气藏受控于主干断裂带的影响, 呈现出条带状分布; 纵向上, 主干断裂沟通烃源岩, 向上“开枝散叶”, 断裂活动性越强, 缝洞系统越发育; 同一断裂带内, 断裂多期活动引起多期油气混入导致油气物性存在差异性; 整体上表现出“多元接力式供烃, 断裂优势输导, 多期混合充注成藏”的特征。

参考文献:

- [1] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15-32.
- [2] 朱秀香, 曹自成, 隆辉, 等. 塔里木盆地顺北地区走滑断裂带压扭段和张扭段油气成藏实验模拟及成藏特征研究[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 289-304.
- [3] 黄亚浩, 汪如军, 文志刚, 等. 塔里木盆地富满油田深层—超深层油气成藏过程[J]. 石油学报, 2024, 45(6): 947-960.
- [4] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北 1 号、顺北 5 号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83-95.
- [5] 马安来, 漆立新. 顺北地区四号断裂带奥陶系超深层油气地球化学特征与相态差异性成因[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 247-262.
- [6] 刘可禹, 杨鹏, 杨海军, 等. 重新审视深层油气成藏模式: 以塔里木盆地为例[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2820-2841.
- [7] 杨率, 郭光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地北部地区超深断控油藏关键成藏期[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 249-261.
- [8] 闫磊, 朱光有, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武统烃源岩分布[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(11): 1569-1578.
- [9] 朱光有, 胡剑风, 陈永权, 等. 塔里木盆地轮探 1 井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩地球化学特征与形成环境[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2116-2130.
- [10] 刘丽红, 高永进, 朱光有, 等. 塔里木盆地西北缘埃迪卡拉纪—寒武纪转折期黑色岩系中硅质岩成因及其环境指示意义[J]. 地质学报, 2024, 98(2): 511-529.
- [11] 谷茸, 云露, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油田油气来源研究[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 248-254, 262.
- [12] 李峰, 朱光有, 吕修祥, 等. 塔里木盆地古生界海相油气来源争议与寒武系主力烃源岩的确定[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1417-1436.
- [13] 柳青兵, 蔡忠贤, 薛玉芳, 等. 塔里木盆地柯坪周缘地区肖尔布拉克组白云岩孔隙结构全

- 孔径表征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13):5213-5221.
- [14] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1):52-67.
- [15] 彭军, 曹俊娇, 李斌, 等. 塔北与巴楚下丘里塔格群白云岩储层特征对比[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(2):1-14.
- [16] QIU Huabiao, DENG Shang, CAO Zicheng, et al. The evolution of the complex anticlinal belt with crosscutting strike-slip faults in the central Tarim basin, NW China[J]. Tectonics, 2019, 38(6):2087-2113.
- [17] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6):1111-1126.
- [18] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. 石油学报, 2022, 43(6):770-787.
- [19] 李慧莉, 高键, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起走滑断裂带流体时空分布及油气成藏意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(6):316-328.
- [20] PEPPER A S, CORVI P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part III: modelling an open system[J]. Marine and petroleum geology, 1995, 12(4):417-452.
- [21] LI Dan, CHANG Jian, QIU Nansheng, et al. The thermal history in sedimentary basins: a case study of the central Tarim Basin, western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 229:105149.
- [22] Wygrala B P. Integrated computer-aided basin modeling applied to analysis of hydrocarbon generation history in a Northern Italian oil field[J]. Organic Geochemistry, 1988, 13(1-3):187-197.
- [23] 彭平安, 侯读杰, 腾格尔, 等. 天然气成因鉴别指标体系与关键图版——理论内涵、科学意义与实践作用[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(03):513-525.
- [24] DAHL J E, MOLDOWAN J M, PETERS K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking[J]. Nature, 1999, 399(6731):54-57.