



地球化学
Geochimica
ISSN 0379-1726,CN 44-1398/P

《地球化学》网络首发论文

- 题目：顺北地区古生界超深层辉绿岩侵入体的有机地球化学响应及指示意义
作者：乔荣臻，李美俊，张冬琳，肖洪
DOI：10.19700/j.0379-1726.2025.01.128
收稿日期：2025-03-30
网络首发日期：2025-07-24
引用格式：乔荣臻，李美俊，张冬琳，肖洪. 顺北地区古生界超深层辉绿岩侵入体的有机地球化学响应及指示意义[J/OL]. 地球化学.
<https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2025.01.128>



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。

顺北地区古生界超深层辉绿岩侵入体的有机地球化学响应及指示意义

乔荣臻，李美俊^{*}，张冬琳，肖 洪

(中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249)

摘要：塔里木盆地古生界超深层地层中发育多套辉绿岩侵入体。为了进一步明确辉绿岩侵入体对该地区油气成藏过程的地球化学响应及指示意义, 本文对顺北地区单井录井资料、二维地震资料、岩石抽提物色谱-质谱分析以及单井埋藏史-热史进行细致分析。结果显示, 在二叠纪塔里木大火成岩省影响下顺北地区古生界地层中发生了多期次的辉绿岩侵入事件。辉绿岩侵入体在地震剖面上呈蝶形分布, 具有强轴反射特征。岩浆沿断裂上涌的过程中对周缘岩石进行蚀变作用。岩石抽提物含有较高浓度的大于五环的多环芳烃和较高的荧蒽/(荧蒽+芘)、苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+䓛)和茚并[1,2,3-cd]芘/(茚并[1,2,3-cd]芘+䓛+苯并[g,h,i]芘)比值。二维地震资料显示岩浆在侵入过程中未大规模顺层侵入寒武系玉尔吐斯组烃源岩和奥陶系储层。这可能是顺北地区奥陶系储层中仍保留大规模原油的主要因素。辉绿岩侵入时间(292.1~272.0 Ma)与该地区第二期油气充注时间(272.0~219.9 Ma)的耦合指示岩浆上涌的过程中为原油充注开辟了通道。岩浆侵入过程中引发地层褶皱变形所形成的裂缝和低幅度的构造圈闭为油气聚集提供了场所。辉绿岩侵入体的识别对进一步油气勘探具有重要的指示意义。

关键词：辉绿岩侵入体；多环芳烃；超深层；顺北地区；塔里木盆地

中图分类号：P591 **文献标志码：**A

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2025.01.128

Organic geochemical response and indicative significance of Paleozoic ultra-deep diabase intrusion in the Shunbei area

QIAO Rongzhen, LI Meijun^{*}, ZHANG Donglin, XIAO Hong

(National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The Ordovician reservoirs in the Shunbei area of the Tarim Basin are rich in petroleum resources, with multiple diabase intrusions present in the Paleozoic strata. In order to clarify the impact of diabase intrusions on the petroleum system in the Shunbei area, this paper analyzes the internal relationship between the distribution of diabase intrusions and petroleum accumulation using mud logging data, 2D seismic data, gas chromatography-mass spectrometry of rock extract, and single well buried-thermal history. The results indicate that multi-stage diabase intrusion events were triggered by the Permian Tarim large igneous province. Magma upwells along faults, altering the surrounding rocks. This led to a higher concentration of >5-ring polycyclic aromatic hydrocarbons and elevated ratios of fluoranthene/ (fluoranthene + pyrene), benz[a]anthracene/(benz[a]anthracene + chrysene), and indeno[1,2,3-cd]pyrene/ (indeno[1,2,3-cd]pyrene + benzo[g,h,i]perylene). This indicates that during the magma upwelling process, the surrounding rock along the way undergoes significant thermal alteration. 2D seismic data show that magma did not intrude into the Cambrian Yuertusi Formation source rocks and Ordovician reservoirs on a large scale. Therefore, under the influence of such large-scale intrusion, there is still a considerable amount of oil in the Ordovician reservoir of the Shunbei area. The coupling of diabase intrusions (292.1–272.0 Ma) with the second

收稿日期：2025-03-30；改回日期：2025-05-15

项目资助：国家自然科学基金项目(42173054)资助。

第一作者简介：乔荣臻(1996-)，男，博士研究生，地质学专业。E-mail: qiaorongzhen123@163.com

通信作者：李美俊(1972-)，男，教授，博士生导师，主要从事有机地球化学研究。E-mail: meijunli@cup.edu.cn

petroleum filling timings (272.0–219.9 Ma) suggests that these intrusions open up a channel for the oil filling. Fractures and low-amplitude structural traps, resulting from formation folding and deformation during magma intrusion, provided high-quality reservoirs for petroleum accumulation. The identification of diabase intrusions offers key insights for further petroleum exploration.

Key words: diabase intrusion; polycyclic aromatic hydrocarbons; ultra-deep; Shunbei area; Tarim Basin

0 引言

岩浆活动作为地质历史中的标志性地质事件，同时也是内动力地质作用研究中的重要组成部分(余星等, 2017; 厉子龙等, 2017; 程小鑫等, 2022)。而火成岩侵入作为岩浆活动中的重要表现形式，其在侵入过程中对周围的构造变形、地层温度以及含油气系统等均产生深远的影响(Spacapan et al., 2018; Yang et al., 2022; Qiao et al., 2025)。

塔里木盆地作为中国西部最大的含油气盆地，自古生代以来岩浆活动频繁。其中，二叠纪塔里木大火成岩省期间的岩浆活动最为剧烈(朱毅秀等, 2005)。二叠纪塔里木大火成岩省期间，除了大规模的玄武质和酸性喷出岩喷发外，还存在广泛的、多期次的侵入岩侵入(厉子龙等, 2017; 刘雨晴等, 2022; 牛月萌等, 2024)。其中，辉绿岩为塔里木大火成岩省侵入岩的典型代表。早期学者通过锆石 U-Pb 定年发现塔里木盆地古生界的辉绿岩侵入时间在 292.1~272.0 Ma(李勇等, 2007; 马中远等, 2013; Dong et al., 2013; 李行等, 2017; 吴鸿翔等, 2020; 程小鑫等, 2022)。前人通过地震刻画认为顺北地区古生界辉绿岩侵入体同 S2 井古生界辉绿岩侵入体为同一期次岩浆活动的结果(图 1b; 刘雨晴等, 2022; 牛月萌等, 2024)。后者经 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法测年结果为 274.6~276.3 Ma，整体处于二叠纪塔里木大火成岩省活动期(马中远等, 2013)。先前研究表明岩浆侵入会对途经的含油气系统产生显著的影响，如：促使烃源岩快速热演化(齐振国等, 2024)、拓展储层的储集空间(杨宁等, 2005)、引发原油大规模裂解(Yang et al., 2022)以及增加盖层的封闭性(刘雨晴等, 2022)。顺北地区辉绿岩沿走滑断裂向上侵入，途经古生界含油气系统，最终在古生界的盖层形成辉绿岩侵入体。这为进一步评价岩浆侵入对含油气系统的影响提供了理想的实验室。

本次研究运用单井钻井资料、地震剖面刻画以及岩石有机地化，明确顺北地区古生界地层中辉绿岩侵入体分布特征。结合烃源岩热演化和油气充注期次及时间，系统分析了岩浆侵入和油气成藏之间的耦合关系。基于此，综合研究岩浆侵入对含油气系统的影响。为进一步的超深层油气勘探明确方向以及提供理论支撑。

1 地质概况

塔里木盆地作为中国最大的叠合盆地，其先后经历多期岩浆活动。二叠纪的塔里木大火成岩省为其地质演化历史上规模最大、影响范围最广的一次板内地幔岩浆事件(图 1a; 厉子龙等, 2017)。年代学资料显示塔里木大火成岩省的岩浆活动主要集中在 290~270 Ma，覆盖面积达 50 万平方千米，主要分布于塔里木盆地的中西部地区(陈军和徐义刚, 2017)。伴随着油气勘探发现塔里木盆地古生界储层中含有丰富的油气资源，尤其是油藏和凝析气藏(Qiao et al., 2024a)。

顺北地区位于塔里木盆地北部坳陷的顺托果勒低隆起，其东接满加尔坳陷，西邻阿瓦提坳陷，北、南分别为塔北隆起和卡塔克隆起(图 1a、b)。顺托果勒低隆起的构造单元相对稳定，自古生代以来先后经历了 4 次主要的构造演化阶段：加里东早期稳定沉降阶段、加里东中晚期–海西早期的古隆起成型阶段、海西晚期–印支期的调整改造阶段以及燕山期–喜马拉雅期的深埋定型阶段(邓倩等, 2023)。总体而言，其古生代地层发育较为完整，自下而上发育寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系以及二叠系(Qiao et al., 2024a)。

早期针对塔里木盆地早古生代海相主力烃源岩引起广泛的讨论(李峰等, 2021)。而伴随着野外露头、单井勘探(星火 1 井、轮探 1 井和塔深 5 井)以及地震资料等深入研究发现，玉尔吐斯组暗色泥岩为其主力烃源岩逐步达成共识(朱光有等, 2022; 王清华等, 2024)。目前，顺北地区油气勘探的主要储层层位集中在奥陶系的一间房组(O₂yj)和鹰山组(O₁₋₂y)，储层深度超过 7000 m(图 1c; Qiao et al., 2024a)。奥陶系地层在顺托果勒低隆起发育较为齐全，自下而上依次发育有蓬莱坝组(O₄p)、鹰山组(O₁₋₂y)、一间房组(O₂yj)、恰尔巴克组(O₃q)、良里塔格组(O₃l)桑塔木组(O₃s)(图 1c)。其储集空间主要为走滑断裂控制下的裂缝、洞穴以及破碎带(云露和邓尚, 2022)。其桑塔木组(O₃s)的厚层泥岩可作为良好的区域盖层(图 1c)。

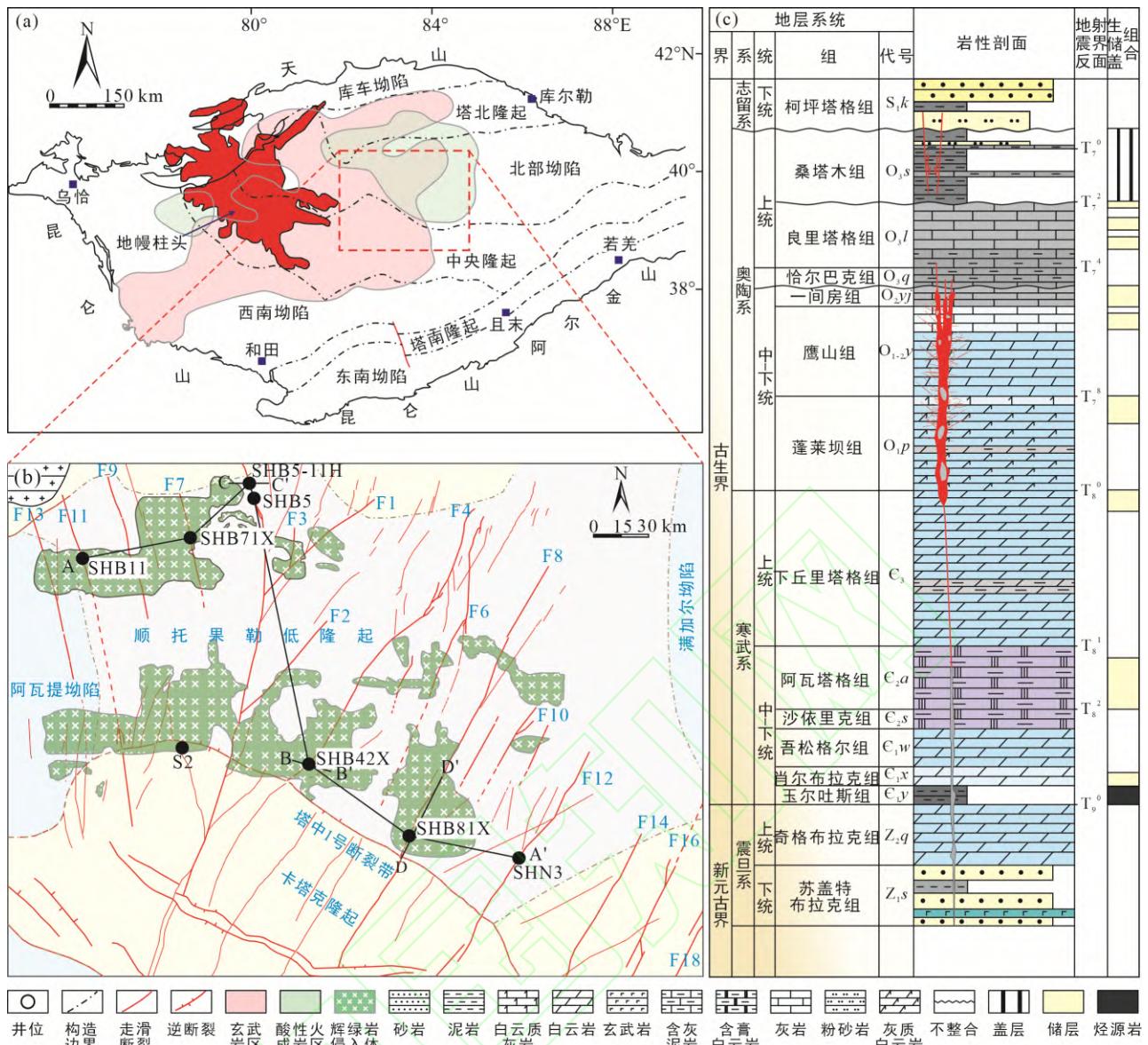


图1 塔里木盆地构造单元划分及火成岩分布范围(a; 据 Qiao et al., 2025 修改)、顺北地区构造位置、井位分布及古生界辉绿岩体分布范围(b; 据 Qiao et al., 2025 修改)和综合地层柱状图(c)

Fig.1 Tectonic sketch map and igneous rock distribution of the Tarim Basin (a), tectonic location, well location distribution and distribution range of the Palaeozoic diabase in the Shunbei area (b), and simplified stratigraphic column(c)

2 实验样品与方法

2.1 实验样品

本次研究分别取自塔里木盆地顺北地区 SHB5、SHB5-11H、SHB11、SHB42X、SHB71X、SHB81X 以及 SHN3 井，共计 9 块岩心样品。岩心样品取自奥陶系一间房组(O_{1-2y})，岩性以灰岩和泥晶灰岩为主。井位位置信息可见图 1b，每口井具体的采样位置可见图 2。其中，在 SHB42X、SHB41X、SHB71X、SHB81X 和 SHB11 等井的储层上覆地层中发现辉绿岩侵入体，在 SHB5、SHB5-11H 和 SHN3 等井的储层上覆地层中未发现辉绿岩侵入体。

岩心样品的 T_{max} 分布范围为 432~489 °C, 整体处于成熟–未成熟阶段(表 1)。岩心样品 TOC 分布范围为 0.09%~0.13%, S_1 的分布范围为 0.01~0.22 mg/g, S_2 的分布范围为 0.02~0.33 mg/g(表 1)。且岩心样品中氯仿沥青“ A ”的含量较低, 分布范围为 0.01%~0.35%。

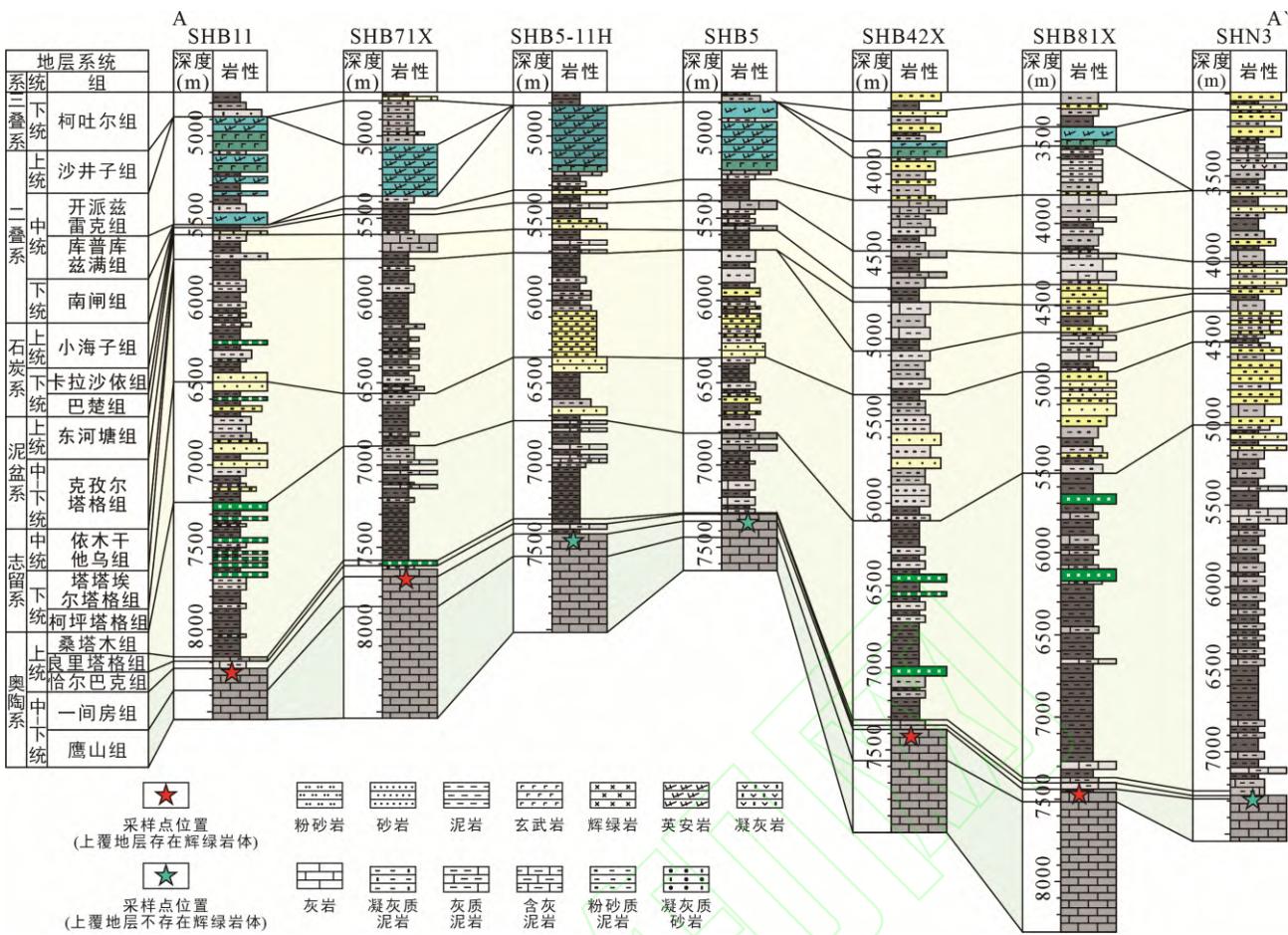


图 2 塔里木盆地顺北地区典型井的连井剖面(剖面位置见图 1b, 单井资料来自西北油田分公司)

Fig.2 Well-tie profile of typical wells in the Shunbei area, Tarim Basin

表 1 塔里木盆地顺北地区古生界岩心样品信息及基础地化特征

Table 1 The core sample information and basic geochemical characteristics from Paleozoic in the Shunbei area, Tarim Basin

井位	层位	深度(m)	岩性	上覆地层有 无辉绿岩侵 入体	辉绿岩侵入体 累计厚度(m)	TOC(%)	S ₁ (mg/g)	S ₂ (mg/g)	T _{max} (°C)
SHB42X	O ₂ yj	7395.00~7407.00	泥晶灰岩	有	119.45	0.10	0.09	0.09	467
		7402.00~7410.50	泥晶灰岩			0.10	0.02	0.03	489
SHB5	O ₂ yj	7331.27~7331.68	泥晶灰岩	无	0	0.11	0.06	0.33	444
SHB5-11H	O ₂ yj	7416.00~7416.40	灰岩	无	0	0.09	0.03	0.07	447
SHB71X	O ₂ yj	7690.75~7690.89	灰岩	有	32.73	0.09	0.01	0.04	435
SHB81X	O ₂ yj	7424.00~7430.00	泥晶灰岩	有	124.91	0.13	0.14	0.10	454
SHB11	O ₂ yj	8280.00~8280.75	灰岩	有	327.36	0.10	0.02	0.02	468
		8290.02~8290.67	灰岩			0.11	0.04	0.03	465
SHN3	O ₂ yj	7296.28~7296.73	灰岩	无	0	0.11	0.22	0.15	457

2.2 实验方法

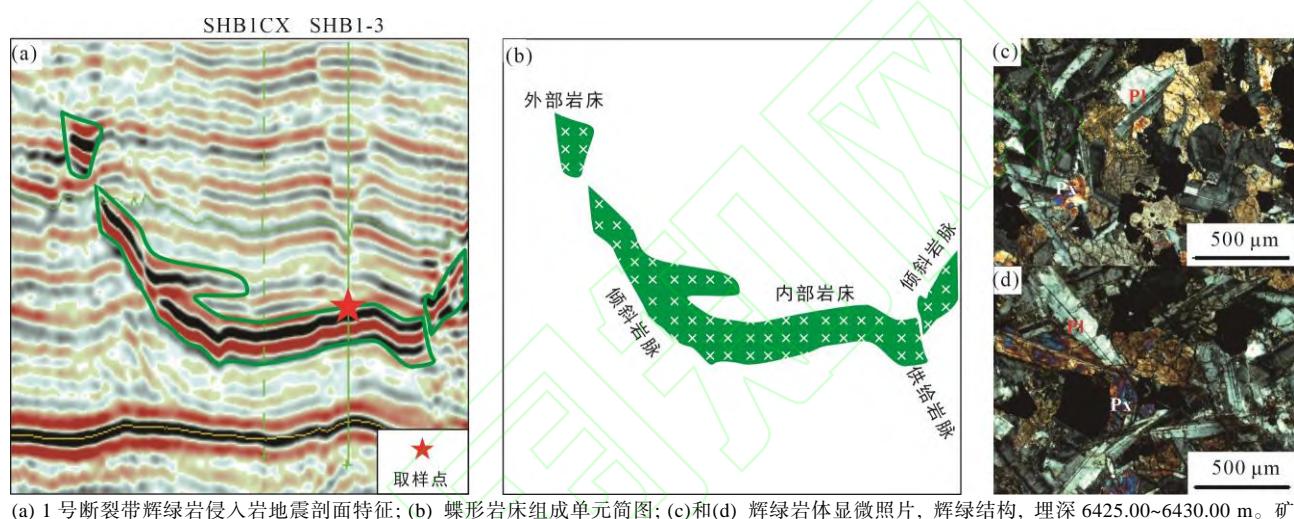
本次实验分析于中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成。所有采集的岩心样品在清洗、晾干后粉碎至 80 目。称取 50~100 g 粉末样品, 采用二氯甲烷索式抽提 48 h。采用 20~30 mL 石油醚(沸程范围: 30~60 °C, 以下同)溶解 20~50 mg 抽提物, 静置 12 h 使沥青质沉淀。后将收集好的滤液进行旋转蒸发后经硅胶/氧化铝(3 : 2)的固相层析柱进行组分分离。依次用石油醚、二氯甲烷+石油醚(体积比 2 : 1)、二氯甲烷+甲醇(体积比 9 : 1)进行冲洗, 以获得饱和烃、芳烃及非烃馏分。

采用 Agilent 6980 GC-5975i MS 气相色谱-质谱连用对芳烃馏分进行分析。色谱柱为 HP-PONA 柱($60\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)。色谱条件: 以 99.99% 的氦气为载气, 流速为 1.00 mL/min , 进样口温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不分流进样。升温程序如下: 初始温度设置为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持 1 min , 再以 $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速率升至 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$, 随后保持 25 min 。质谱仪选择 EI 电离源, 电子能量为 70 eV , 进行全扫描和多离子的数据采集方式。加入 $2\text{ }\mu\text{L } 0.1\text{ }\mu\text{g}/\mu\text{L D}_8$ -二苯并噻吩作为内标, 根据相应的峰面积计算各化合物的绝对含量。

3 结 果

3.1 辉绿岩侵入体的分布

钻井资料显示, 顺北地区在上石炭统、志留系和上奥陶统中均钻遇辉绿岩, 最大累计厚度可达 327.36 m (图 2, 表 1)。先前学者对 S2 井古生界辉绿岩侵入体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法测年结果为 $274.6\text{--}276.3\text{ Ma}$ (马中远等, 2013)。这均指示顺北地区辉绿岩侵入体同二叠纪塔里木大火成岩省之间密切相关(刘雨晴等, 2022)。除此之外, 通过地震剖面观测同样可识别火成岩侵入体(Rateau et al., 2013)。



(a) 1 号断裂带辉绿岩侵入岩地震剖面特征; (b) 蝶形岩床组成单元简图; (c) 和(d) 辉绿岩体显微照片, 辉绿结构, 埋深 $6425.00\text{--}6430.00\text{ m}$ 。矿物代号: Pl. 斜长石; Px. 辉石。

图 3 塔里木盆地顺北地区典型蝶形岩床的组成单元和显微观测(地震资料来自西北油田分公司)

Fig.3 Basic units of typical saucer-shaped sills and microscopic observation in the Shunbei area, Tarim Basin

地震剖面中火成岩侵入体与周缘的围岩呈强波阻抗差异。地震剖面上火成岩侵入体与沉积地层近平行, 侧向连续性较差, 两端呈倾斜岩脉与地层斜切(图 3a; 刘雨晴等, 2022)。火成岩体在空间上整体呈蝶形形态分布, 具有强轴反射特征。蝶形岩床可进一步划分为供给岩脉、内部岩床、倾斜岩脉和外部岩床 4 个基本的组成单元(图 3b)。对应的镜下显微观测显示这种火成岩体具有明显的辉绿结构, 其应为辉绿岩侵入体(图 3c)。此外, 综合分析表明辉绿岩体在地震剖面识别的结果和钻井结果一致(图 2、4)。这一结果表明地震剖面可有效的识别辉绿岩体的分布。

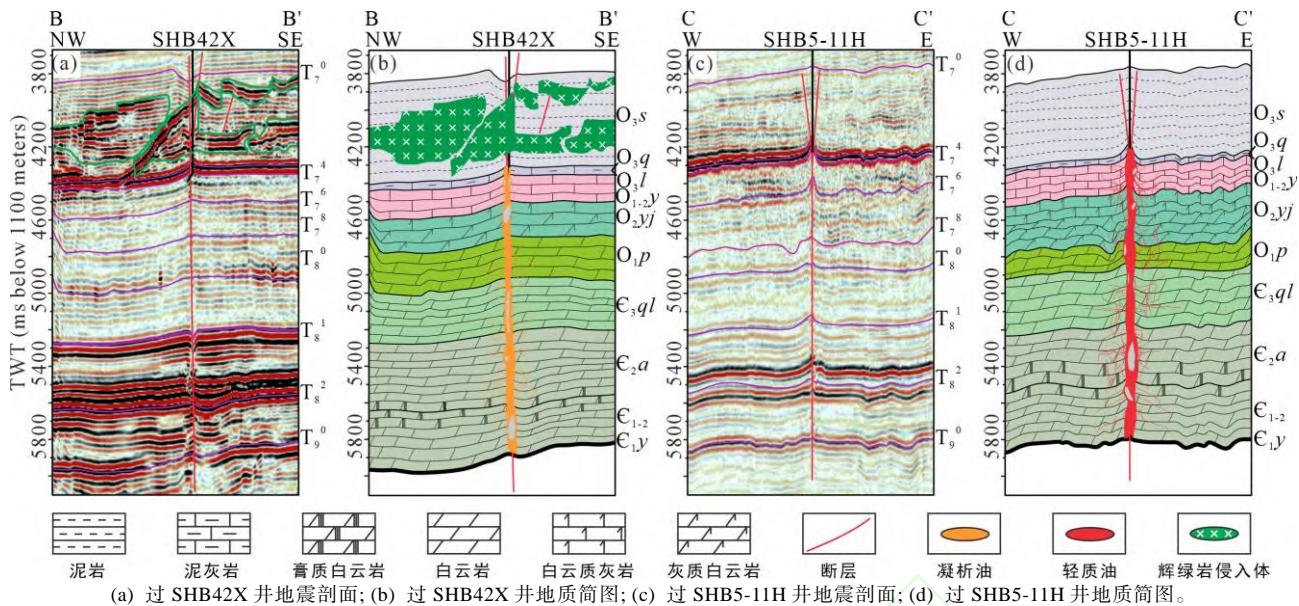


图 4 塔里木盆地顺北地区典型过单井地震剖面及地质简图(剖面位置见图 1b, 地震资料来自西北油田分公司)

Fig.4 Typical Cross-well seismic section and relevant geological schematic section in the Shunbei area, Tarim Basin

3.2 多环芳烃分布特征

顺北地区岩心抽提物的芳烃色谱-质谱的 TIC 中未检测到明显的“驼峰”(图 5)。但其抽提物的芳烃质量色谱图中检测到丰富的芳烃类化合物。其中,除了常见的萘、苊、芴、菲和蒽等常见的多环芳烃外,还检测到一系列 >3 环的多环芳烃(图 5)。TIC 谱图中较高丰度的几个化合物是对称的直链酮类化合物,这主要与岩心样品保存和运输过程中接触的微塑料(样品密封袋、标签纸等)有关,并不影响具体离子峰的检测。

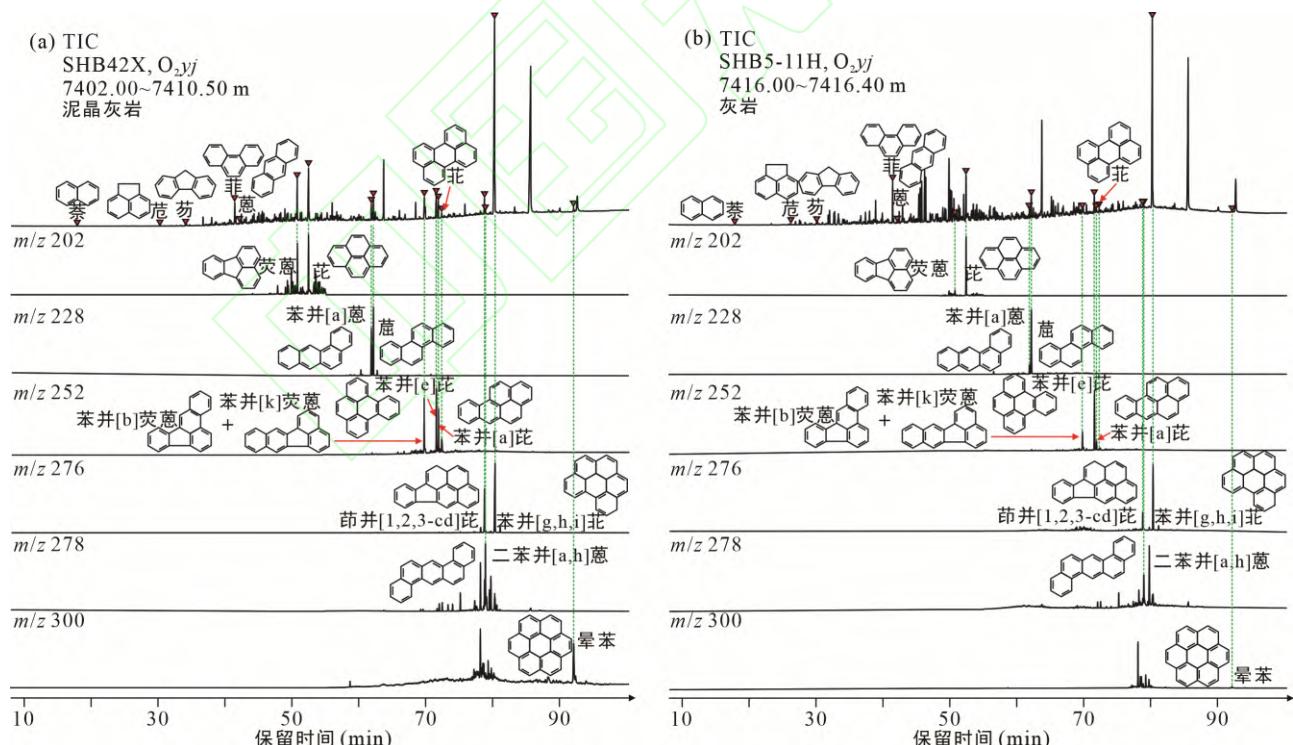


图 5 塔里木盆地顺北地区典型岩心样品芳烃 TIC 和多环芳烃质量色谱图

Fig.5 TIC of aromatic hydrocarbon fraction and mass chromatograms of polycyclic aromatic hydrocarbon for representative rocks in the Shunbei area, Tarim Basin

表 2 多环芳烃的鉴定结果
Table 2 Identification results of polycyclic aromatic hydrocarbons

名称	缩写	分子式	分子离子[M ⁺]	名称	缩写	分子式	分子离子[M ⁺]
萘	Nap	C ₁₀ H ₈	128	苯并[b]荧蒽	BbF	C ₂₀ H ₁₂	252
苊	Ace	C ₁₂ H ₁₀	154	苯并[k]荧蒽	BkF	C ₂₀ H ₁₂	252
芴	Flu	C ₁₃ H ₁₀	166	苯并[a]芘	BaP	C ₂₀ H ₁₂	252
菲	Phe	C ₁₄ H ₁₀	178	苯并[e]芘	BeP	C ₂₀ H ₁₂	252
蒽	Ant	C ₁₄ H ₁₀	178	苊	Pery	C ₂₀ H ₁₂	252
荧蒽	Fla	C ₁₆ H ₁₀	202	茚苯[1,2,3-cd]芘	INP	C ₂₂ H ₁₂	276
芘	Pyr	C ₁₆ H ₁₀	202	苯并[g,h,i]芘	BghiP	C ₂₂ H ₁₂	276
苯并[a]蒽	BaA	C ₁₈ H ₁₂	228	二苯并[a,h]蒽	DBA	C ₂₂ H ₁₄	278
䓛	Chr	C ₁₈ H ₁₂	228	䓛	Cor	C ₂₄ H ₁₂	300

表 3 岩心样品中多环芳烃浓度
Table 3 Concentration of PAHs in core samples

井位	上覆地层有无辉绿岩侵入体	多环芳烃浓度(μg/g)				
		2 环	3 环	4 环	5 环	6+7 环
SHB42X	有	0.43	98.48	110.50	32.23	28.47
SHB71X	有	0.32	153.08	171.01	21.86	40.24
SHB81X	有	0.33	151.00	176.04	46.91	39.16
SHB11	有	14.63	189.97	266.82	161.49	83.76
SHB5	无	0.10	170.98	67.19	0.57	1.34
SHB5-11H	无	0.12	165.39	67.65	0.73	1.03
SHN3	无	0.11	166.09	63.85	0.38	1.05

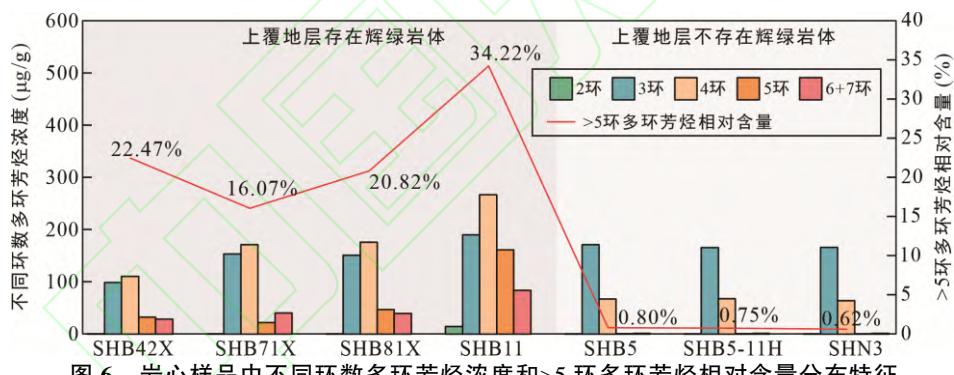


图 6 岩心样品中不同环数多环芳烃浓度和>5 环多环芳烃相对含量分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of the concentration of PAHs with different rings and the relative content of >5 ring PAHs in core samples

表 2 中详细记录了本次研究涉及的多环芳烃的命名、缩写、分子式和基峰信息。岩石抽提物芳烃 m/z 202 和 m/z 228 质量色谱图检测显示样品中四环多环芳烃以荧蒽、芘、䓛和苯并[a]蒽为主(图 5)。芳烃 m/z 252 和 m/z 278 质量色谱图检测显示样品中五环多环芳烃以苊、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[e]芘、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽为主。芳烃 m/z 276 质量色谱图检测显示样品中六环多环芳烃以茚并[1,2,3-cd]芘和苯并[g,h,i]芘为主。除此之外，芳烃 m/z 300 质量色谱图中环检测到丰度不等的七环䓛(图 5)。荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[a]蒽和䓛等多环芳烃的形成通常与热异常事件相关(野火或岩浆事件)，与成熟度相关性较弱(Yunker et al., 2002; Qiao et al., 2025)。通过定量分析表明上覆地层存在辉绿岩体的岩心中含有更高含量的>5 环的多环芳烃浓度(图 6)。相关岩心样品中>5 环的多环芳烃浓度分布范围为 62.11~245.25 μg/g，占多环芳烃总量的 16.07%~34.22%(图 6, 表 3)。上覆地层不存在辉绿岩体的岩心中大于五环的多环芳烃浓度分布范围为 1.43~1.91 μg/g，占多环芳烃总量的 0.62%~0.80%(图 6 和表 3)。

4 讨 论

4.1 绿岩侵入体的分布

顺北地区发育多条基底走滑断裂，由南东向北西依次发育 NNE 向走滑断裂、NNW-NNE 向共轭的走滑断裂体系以及 NNW 向走滑断裂(图 1a; 王来源等, 2024)。顺北地区的基底走滑断裂不仅控制储集空间类型，还是油气充注的重要通道(刘雨晴等, 2022)。除此之外，顺北地区的基底走滑断裂也可作为岩浆侵入的主要通道，尤其是走滑断裂的拉分段(刘雨晴等, 2022)。岩浆侵入通道在地震剖面上呈混乱的低振幅分布特征(图 7a)。岩浆自深部沿断裂上涌，运移至上奥陶统时，岩浆遭遇桑塔木组的厚层细粒泥岩，由此发生顺层的侧向流动，进而形成辉绿岩侵入体(图 7b; Rateau et al., 2013)。

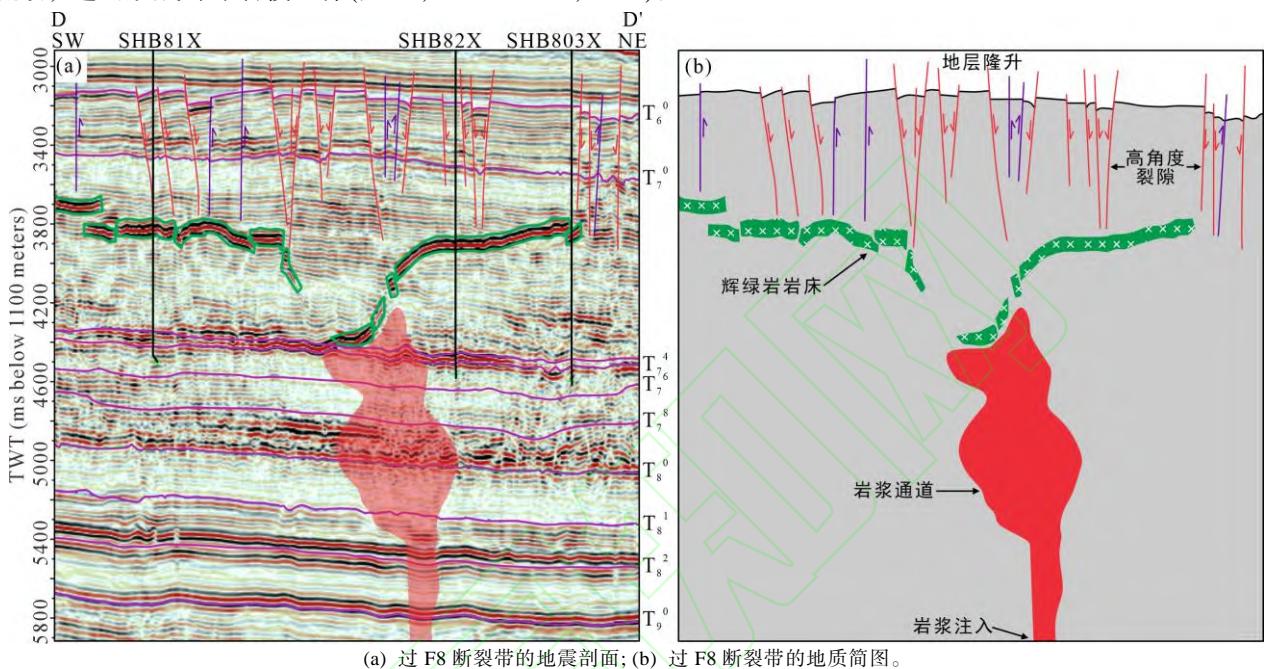


图 7 塔里木盆地顺北地区辉绿岩侵入岩地震剖面及简图(剖面位置见图 1b, 地震资料来自西北油田分公司)

Fig.7 Seismic profile and schematic of diabase intrusion in the Shunbei area, Tarim Basin

除地震观测外，岩浆侵入过程中对侵入路径的岩石同样产生影响。色谱-质谱分析结果表明古生界存在辉绿岩体分布的岩心抽提物中含有更高丰度的多环芳烃(图 5)。多环芳烃作为由两个或两个以上苯环组成的芳烃类化合物，广泛分布于土壤、沉积岩以及石油中(Xu et al., 2021)。在沉积盆地正常地温梯度下有机质通过脱氢、裂化和环化所产生的多环芳烃与热异常影响下通过快速升温过程中产生的多环芳烃存在明显的不同(Xu et al., 2021)。后者加速烷基裂化，降低了多环芳烃的烷基化程度而拥有更独特的芳香分子组成(Ventura et al., 2012)。以往研究证明 >5 环的多环芳烃通常与区域热异常息息相关，与成熟度相关性较弱(Yunker et al., 2002)。除此之外，荧蒽/(荧蒽+芘)、苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+䓛)和茚并[1,2,3-cd]芘/(茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[g,h,i]芘)等热异常衍生的多环芳烃比率也可有效的评估岩石中成岩和热异常衍生的多环芳烃的贡献(Yunker et al., 2002)。古生界存在辉绿岩侵入体和不存在辉绿岩侵入体的样品存在明显差异(图 8)。其中，古生界不存在辉绿岩侵入体的样品中的多环芳烃应为成岩衍生。而古生界存在辉绿岩侵入体的样品更多是受热异常衍生的。

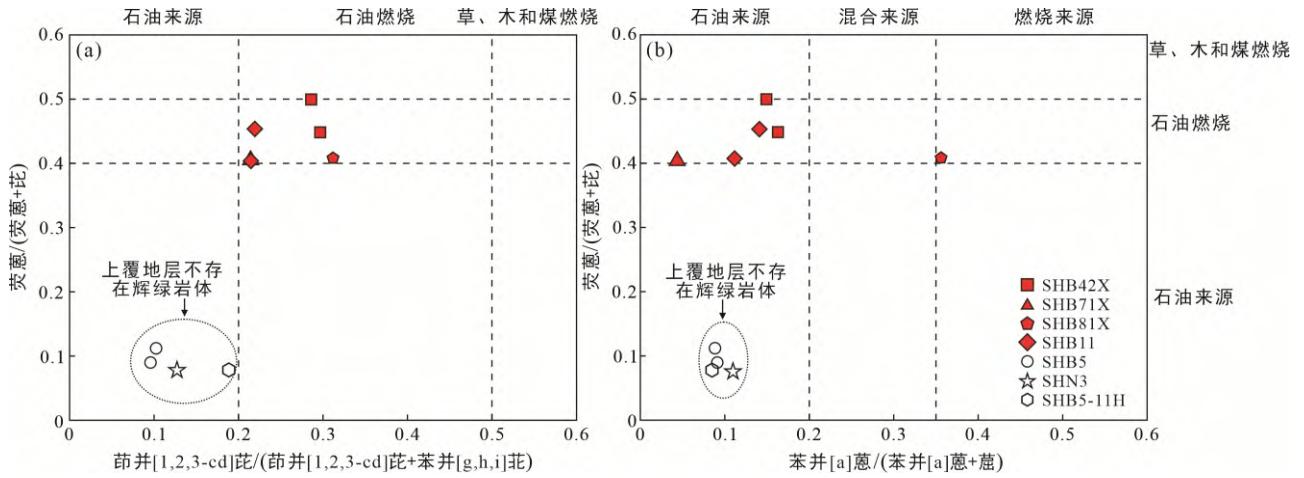


图 8 热异常衍生的荧蒽/(荧蒽+芘)-苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+芘)(a)和荧蒽/(荧蒽+芘)-茚并[1,2,3-cd]芘/(茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[g,h,i]芘)(b)交会图(据 Yunker et al., 2002 修改)

Fig.8 Cross-plots of fluoranthene/(fluoranthene + pyrene) - benzo[a]anthracene/(benzo[a]anthracene + chrysene) (a) and fluoranthene/(fluoranthene + pyrene) - indeno[1,2,3-cd]pyrene/(indeno[1,2,3-cd]pyrene + benzo[g,h,i]perylene) (b) derived from thermal anomalies

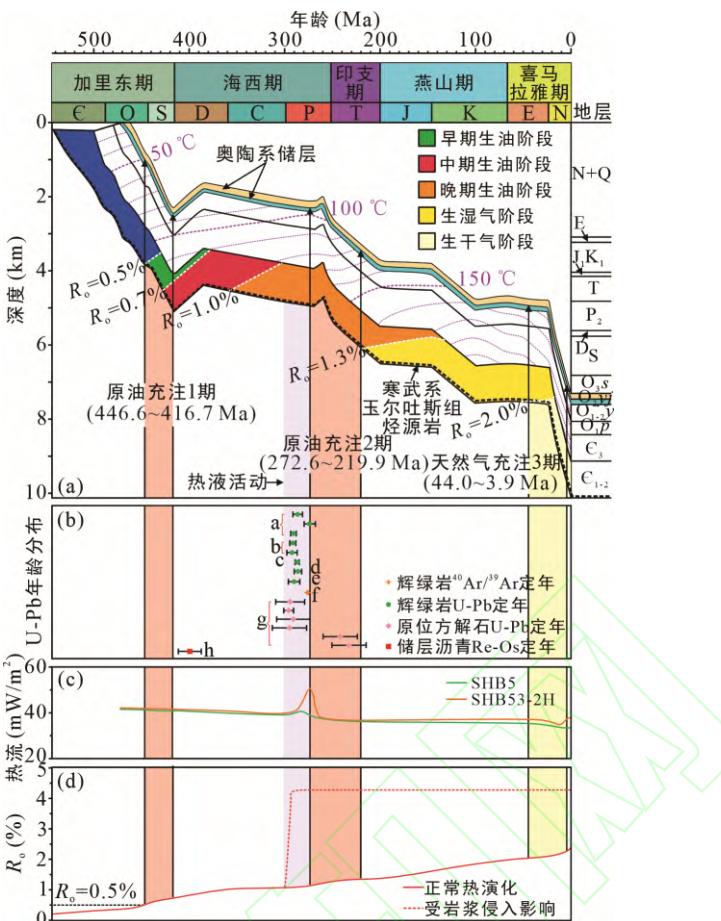
Qiao et al. (2025)研究表明,3环和4环燃烧衍生的多环芳烃通常由低温燃烧(300~600 °C)产生,且随着炭化温度的升高,>5环的多环芳烃含量逐步上升。岩浆的温度范围通常为900~1200 °C,这似乎可以解释上覆的层中存在辉绿岩体的岩心样品中>5环的多环芳烃含量高的原因。

火成岩侵入体产生的局部热异常范围为自身岩体的1~2倍(Simoneit et al., 1978; Othman et al., 2001)。结合取样点和辉绿岩侵入体分布位置分析认为,顺北岩心中的多环芳烃并非由辉绿岩侵入体形成后导致的热异常所衍生的(图2)。应该是在岩浆沿断裂上涌过程中对沿途岩石进行蚀变而衍生的热异常成因多环芳烃。此外,超深层地层通常处于缺氧的状态,很难发生燃烧。岩浆在流经岩石时更多的是对周围岩石进行烘烤。因此,岩心样品抽提物中异常含量的多环芳烃以及热异常衍生的多环芳烃比率可有效的记录岩浆的活动路径和上涌通道。

4.2 油气成藏过程

前人通过流体包裹体均一温度、埋藏史-热史、储层沥青 Re-Os 定年以及方解石原位 U-Pb 定年分析表明,顺北地区普遍存在两到三期的油气充注,即,加里东晚期和海西晚期-印支期的原油充注和喜马拉雅晚期的天然气充注(王斌等, 2020; Wu et al., 2021; 宋刚等, 2022; 李慧莉等, 2023)。

二叠纪塔里木大火成岩省形成于 300.0~262.0 Ma(李勇等, 2007; 李行等, 2017; Qiao et al., 2025)。辉绿岩锆石定年结果显示,塔里木大火成岩省期间伴随着断层再活化发生了一期辉绿岩侵入事件(292.1~272.0 Ma)(李勇等, 2007; Dong et al., 2013; 李行等, 2017; 吴鸿翔等, 2020; 程小鑫等, 2022)。方解石原位 U-Pb 定年、稀土元素和 Sr 同位素结果显示,受大火成岩省影响,二叠纪还形成了一期热液活动(295.9~273.0 Ma)(王斌等, 2020; 宋刚等, 2022; 李慧莉等, 2023)。研究表明,热液成因方解石脉的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布区间为 0.709634~0.711004, 明显高于围岩和中-晚寒武世正常海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.709000~0.709400), 接近全球平均壳源锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.709000~0.709400; Palmer and Elderfield, 1985; 李慧莉等, 2023), 指示热液流体存在壳源物质贡献,导致热液成因方解石脉富含放射性 ^{87}Sr 同位素。



(a) 顺北地区 5 号断裂带广义埋藏史—热史图; (b) 辉绿岩、储层方解石脉以及储层沥青的定年结果。a. 什艾日克剖面辉绿岩岩床、格勒克阔坦剖面辉绿岩岩床和尤尔美那克剖面辉绿岩岩墙, 来自程小鑫等, 2022; b. 水泥厂剖面下震旦统辉绿岩岩床, 来自吴鸿翔等, 2020; c. 巴楚三叉鹰山组辉绿岩床, 来自 Dong et al., 2013; d. 巴楚麻扎尔塔格 S-D 辉绿岩岩墙, 来自李勇等, 2007; e. 中 16 井鹰山组辉绿岩, 来自李行等, 2017; f. S2 井良里塔格组辉绿岩, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年数据来自马中远等, 2013; g. 顺北 4 号和 5 号断裂带一间房组方解石脉, 方解石原位 U-Pb 定年数据来自李慧莉等, 2023; h. SHB1-3H 一间房组沥青, 储层沥青 Re-Os 定年数据来自 Wu et al., 2021。(c) SHB5 和 SHB53-2H 井古热流史恢复来自 Qiao et al., 2024a; (d) 存在辉绿岩侵入和不存在辉绿岩侵入的烃源岩 R_o 模拟结果。

图 9 塔里木盆地顺北地区埋藏史—热史及油气成藏综合图

Fig.9 Comprehensive of burial-thermal evolution history and petroleum accumulation in the Shunbei area, Tarim

以顺北地区 5 号断裂带南部为例, 其油气成藏过程可概述为: 在加里东晚期-海西早期(446.6~416.7 Ma)寒武系烃源岩进入生烃门限开始生烃, 并伴随着发生了第一期原油充注(图 9)。随后在二叠纪进入大火成岩省时期(300.0~262.0 Ma)伴随着二叠纪断层再活化事件, 顺北地区发生了多期次的辉绿岩侵入(292.1~272.0 Ma)。与此同时, 二叠纪的塔里木大火成岩省造成的持续热异常为后续的热液活动创造了有利条件。岩浆活动岩浆自深部沿走滑断裂向上侵入的过程中, 因携带了地壳深部的酸性热液流体, 会对碳酸盐岩储层产生萤石化作用、溶蚀作用、热液白云岩化作用和大理岩化作用, 这为后续的热液(295.9~273.0 Ma)和原油(272.6~219.9 Ma)充注拓展了通道。值得注意的是, 岩浆作为一种高温、粘稠的熔融物质, 受断裂性质的控制在烃源岩和储层部位未能大规模的顺层侵入(图 4、7)。但其对途经的岩石和油藏进行蚀变(蚀变范围为侵入体的 1~2 倍), 导致岩石抽提物和原油中 >5 环多环芳烃浓度显著升高。辉绿岩体在烃源岩和储层部位未大规模的顺层侵入可能是在如此规模火成岩侵入影响下顺北地区奥陶系储层中仍保留相当储量原油的主要原因(图 1b)。但辉绿岩体的侵入可能是局部油气相态及性质差异的主要诱因。

区别于岩浆侵入, 同时期的热液活动(295.9~272.0 Ma)可与油藏中的原油进行更广泛的接触。且在热液条件下, 水和矿物质等无机化合物存在, 会促使有机化合物具有更高活性, 从而促使原油进行蚀变(Xu et al., 2021)。先前研究表明在二叠纪热液活动的影响下促进原油中“联苯-菲-二苯并噻吩”系列化合物的转化(Xu et al., 2022)以及导致原油中高聚金刚烷的形成(Qiao et al., 2024b)。除此之外, 热液活动也为顺北地区局部 TSR 提供了必要的水环境。早期研究表明原油中“联苯-菲-二苯并噻吩”系列化合物的转化过程对应的热液系统温度通常低于 350 °C(Xu et al., 2022)。而顺北地区北部的燧石伴生方解石中流体包裹体的均一温度的分布范围为 154~172 °C, 其明显高于对应储层的埋藏温度(Xu et al., 2022)。而此前通过对碳酸盐的团簇同位素研究表明 SHT1 井在二叠纪约 280 Ma 时储层温度可高达 200 °C(刘雨晨等, 2020)。这可能是热液活动的一个大致

温度范围，可以很好的解释顺北地区在热液活动影响下其奥陶系储层仍保留工业级的挥发性油藏和凝析气藏。此外，热液流体上涌过程中会携带一定量的有机酸和二氧化碳。这会促使流体呈弱酸性，对碳酸盐储层进行溶蚀(余敏等, 2016; 丁茜等, 2017)。这为随后的原油充注拓展储层的储集空间。伴随着岩浆和热液活动的结束，开始了第二期的原油充注(272.0~219.9 Ma; 图 9)。此后，在喜马拉雅晚期又发生了一期天然气充注(44.0~3.9 Ma)，对油气相态进行了进一步的调整(图 9; Qiao et al., 2024a)。

4.3 岩浆侵入对石油地质意义

顺北地区受走滑断裂控藏影响的奥陶系碳酸盐储层为超深层油气勘探的主要靶点区(云露和邓尚, 2022)。而受二叠纪大火成岩省引发的辉绿岩侵入事件似乎在油气成藏过程中扮演着重要的角色。早期研究认为岩浆侵入对烃源岩的热演化(齐振国等, 2024)、储层的储集空间(杨宁等, 2005)、油气输导层(刘雨晴等, 2022)、油气的保存和成藏(朱毅秀等, 2005)等多个方面均产生较为显著的影响。对顺北地区而言，岩浆侵入会导致局部热异常。局部高温会促进玉尔吐斯组烃源岩快速热演化(图 9; 朱传庆等, 2010)。地震剖面显示侵入体在烃源岩层位上(T_0^0)并未大规模的顺层侵入(图 4、7)。侵入岩在 T_0^0 界面上呈“多点式”侵入，在横向的影响范围较小。由此推断，岩浆侵入对区域烃源岩的热演化影响程度较小，不会导致烃源岩大规模失效而停止生烃(朱传庆等, 2010)。

在二叠纪大塔里木大火成岩省期间，岩浆活动产生的热可为油气运移提供动力(朱传庆等, 2010)。配合着二叠纪的断层再活化促使了岩浆侵入事件。岩浆在上涌的过程中促使围岩产生裂缝和断裂，为后续来自盆地深部的流体和油气提供向上迁移的通道(图 10a)。伴随的热液活动对碳酸盐储层产生的热液白云岩化作用、溶蚀作用以及萤石化作用可进一步改善储层的储集空间(吕修祥等, 2019)。此外，辉绿岩侵入岩体在形成过程中会导致其上方地层隆起(图 7a)。受接触烘烤影响侵入体周缘围岩发生脆性蚀变。侵入岩体可导致的地层隆起上方会形成大量的高陡裂隙(图 7a)。且受侵入体影响上覆地层发生褶皱变形也可形成低幅度的构造圈闭(图 10b)。这可为油气成藏提供优质储集空间。

综上所述，二叠纪的岩浆侵入及伴随的热液活动不仅改善了储层的储集性能，还为后续的原油充注开辟了通道。因此，顺北地区古生界的辉绿岩侵入体在油气成藏中扮演着重要的角色。其对进一步推进顺北地区超深层油气勘探具有重要的指示意义。

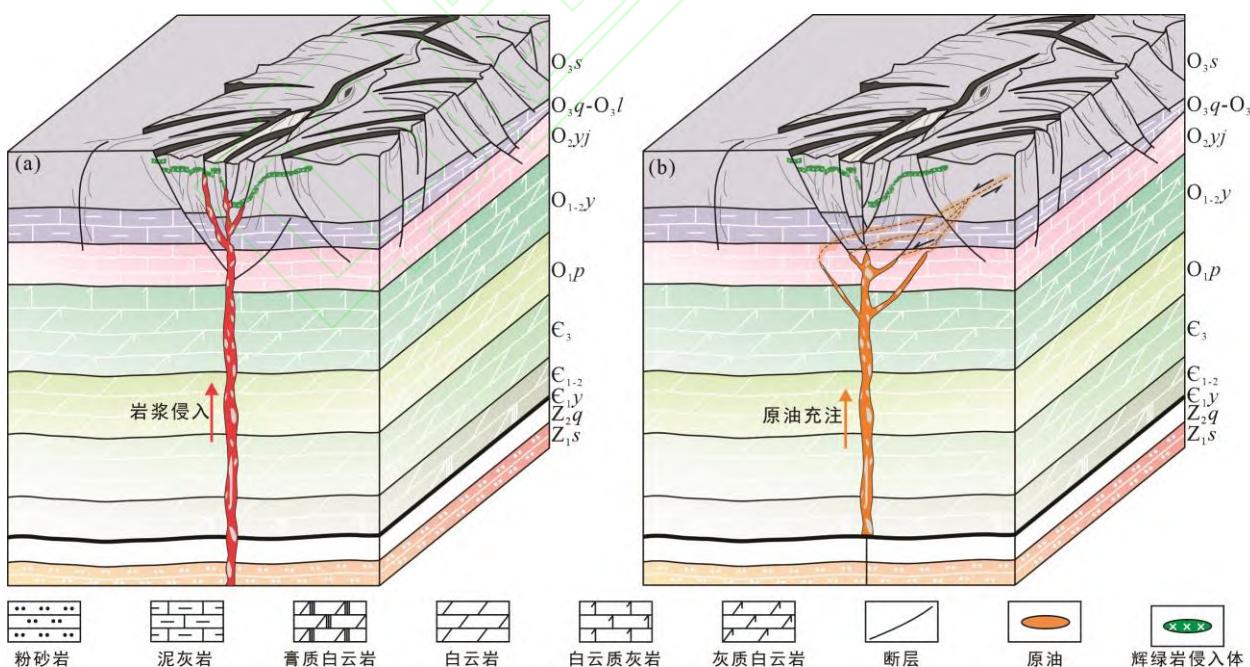


图 10 塔里木盆地顺北地区岩浆侵入和原油充注模式图

Fig.10 Magmatic intrusion and oil filling pattern in the Shunbei area, Tarim Basin

5 结 论

(1) 受二叠纪大火成岩省影响, 顺北地区古生界地层发育多套辉绿岩侵入体。地震剖面上辉绿岩体与周缘的围岩呈强波阻抗差异, 空间上呈碟形分布。

(2) 岩浆自深部运移至古生界, 沿途对周缘岩石进行蚀变。对应的岩石样品中检测到较高浓度的 >5 环的多环芳烃。荧蒽/(荧蒽+芘)、苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+䓛)和茚并[1,2,3-cd]芘/(茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[g,h,i]芘)等多环芳烃指标可有效的记录岩浆侵入的路径。

(3) 岩浆侵入对含油气系统产生显著的影响。二维地质资料显示岩浆未大规模的顺层侵入寒武系玉尔吐斯组烃源岩和奥陶系储层。因此, 在如此规模侵入岩体的影响下顺北地区奥陶系储层中仍保留相当规模的原油。岩浆侵入同海西-印支期原油充注的耦合指示二叠纪岩浆侵入事件为顺北地区第二期原油充注拓展了通道。同时期的热液上涌是造成局部油气藏相态差异的主要原因。岩浆侵入过程中引发地层褶皱变形而形成的裂缝和低幅度的构造圈闭为油气聚集提供了优质储层。辉绿岩侵入体的识别为进一步油气勘探提供了重要的指示意义。

致谢: 感谢两位匿名审稿专家提的建设性意见和建议。

参考文献(References):

- 陈军, 徐义刚. 2017. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻. 矿物岩石地球化学通报, 36(3): 374–393.
- 程小鑫, 吴鸿翔, 孙大亥, 黄伟康, 陈汉林, 林秀斌, 朱孔阳, 章凤奇. 2022. 塔里木盆地西北缘二叠纪基性岩浆侵入事件及其构造意义. 岩石学报, 38(3): 743–772.
- 邓倩, 张海祖, 王浩哲, 于双, 邓哈宇, 韦志伟, 李诗达, 王云鹏, 程斌, 廖泽文. 2023. 塔里木盆地轮探1井寒武系轻质油成藏地球化学特征. 地球化学, 52(1): 20–28.
- 丁茜, 何治亮, 沃玉进, 张军涛, 范明, 岳小娟. 2017. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素. 石油与天然气地质, 38(4): 784–791.
- 李峰, 朱光有, 吕修祥, 张志遥, 吴郑辉, 薛楠, 贺涛, 汪瑞. 2021. 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. 石油学报, 42(11): 1417–1436.
- 李慧莉, 高键, 曹自成, 朱秀香, 郭小文, 曾帅. 2023. 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. 地学前缘, 30(6): 316–328.
- 李行, 吕海涛, 蒲仁海. 2017. 塔里木盆地中部辉绿岩脉LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质通报, 36(6): 1010–1021.
- 李勇, 苏文, 孔屏, 钱一雄, 张克银, 张明利, 陈跃, 蔡习尧, 尤东华. 2007. 塔里木盆地塔中-巴楚地区早二叠世岩浆岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄. 岩石学报, 23(5): 1097–1107.
- 厉子龙, 励音骐, 邹思远, 孙浩伟, 李东旭. 2017. 塔里木早二叠世大火成岩省的时空特征和岩浆动力学. 矿物岩石地球化学通报, 36(3): 418–431.
- 刘雨晨, 邱楠生, 常健, 贾京坤, 李慧莉, 马安来. 2020. 碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用——以塔里木盆地顺托果勒地区为例. 地球物理学报, 63(2): 597–611.
- 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 刘军, 黄诚, 高天. 2022. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义——以塔里木盆地顺北地区为例. 石油与天然气地质, 43(1): 105–117.
- 吕修祥, 陈佩佩, 陈坤, 张杰, 钱文文. 2019. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例. 石油与天然气地质, 40(5): 957–971.
- 马中远, 任丽丹, 黄苇, 岳信东. 2013. 塔里木盆地塔中地区火成岩的基本特征. 特种油气藏, 20(3): 64–67.
- 牛月萌, 韩俊, 余一欣, 黄诚, 林波, 杨帆, 余浪, 陈俊宇. 2024. 塔里木盆地顺北西部地区火成岩侵入体发育特征及其与断裂耦合关系. 石油与天然气地质, 45(1): 231–242.
- 齐振国, 卢政环, 姜福杰, 宋泽章, 陈迪, 张宇琦, 郭婧, 房舟, 王夕榕, 刘一琳. 2024. 福山凹陷油气分布主控因素与源汇聚成藏模式. 中国矿业大学学报, 53(4): 777–792.
- 余敏, 寿建峰, 沈安江, 潘立银, 胡安平, 胡圆圆. 2016. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究. 石油勘探与开发, 43(4): 564–572.
- 宋刚, 李海英, 叶宁, 韩俊, 肖重阳, 鲁子野, 李映涛. 2022. 塔里木盆地顺托果勒低隆起顺北4号走滑断裂带成岩流体类型及活动特征. 石油实验地质, 44(4): 603–612.
- 王斌, 赵永强, 何生, 郭小文, 曹自成, 邓尚, 吴鲜, 杨毅. 2020. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及

- 其控制因素. 石油与天然气地质, 41(5): 965–974.
- 王来源, 黄诚, 龚伟, 丁文龙, 赵展. 2024. 塔中顺北地区志留系断裂特征与应力场扰动分析及井位优选. 石油实验地质, 46(4): 674–682.
- 王清华, 徐振平, 张荣虎, 杨海军, 杨宪彰. 2024. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 45(1): 15–32.
- 吴鸿翔, 伟康, 音骐, 林秀斌, 陈汉林, 程晓敢, 章凤奇. 2020. 缘震旦系发现二叠纪基性岩床侵入事件. 地质学报, 94(6): 1869–1882.
- 杨宁, 吕修祥, 郑多明. 2005. 塔里木盆地火成岩对碳酸盐岩储层的改造作用. 西安石油大学学报(自然科学版), 20(4): 1–4.
- 余星, 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 励音骐. 2017. 塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1179–1190.
- 云露, 邓尚. 2022. 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. 石油学报, 43(6): 770–787.
- 朱传庆, 田云涛, 徐明, 饶松, 袁玉松, 赵永庆, 胡圣标. 2010. 峨眉山超级地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响. 地球物理学报, 53(1): 119–127.
- 朱光有, 胡剑风, 陈永权, 薛楠, 赵坤, 张志遥, 李婷婷, 陈志勇. 2022. 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. 地质学报, 96(6): 2116–2130.
- 朱毅秀, 金之钧, 林畅松, 吕修祥, 解启来. 2005. 塔里木盆地塔中地区早二叠世岩浆岩及油气成藏关系. 石油实验地质, 27(1): 50–54.
- Dong S F, Chen D Z, Qing H R, Zhou X Q, Wang D, Guo Z H, Jiang M S, Qian Y X. 2013. Hydrothermal alteration of dolostones in the Lower Ordovician, Tarim Basin, NW China: Multiple constraints from petrology, isotope geochemistry and fluid inclusion microthermometry. *Marine and Petroleum Geology*, 46: 270–286.
- Othman R, Arouri K R, Ward C R, McKirdy D M. 2001. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia. *Organic Geochemistry*, 32(10): 1219–1232.
- Palmer M R, Elderfield H. 1985. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr. *Nature*, 314(6011): 526–528.
- Qiao R Z, Li M J, Zhang D L, Xiao H. 2024a. Geochemistry and accumulation of the ultra-deep Ordovician oils in the Shunbei oilfield, Tarim Basin: Coupling of reservoir secondary processes and filling events. *Marine and Petroleum Geology*, 167, 106959.
- Qiao R Z, Li M J, Zhang D L, Xiao H. 2024b. Distribution and origin of higher diamondoids in the ultra-deep Paleozoic condensates of the Shunbei oilfield in the Tarim Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 197, 104883.
- Qiao R Z, Li M J, Zhang D L, Xiao H, Wang W Q. 2025. Polycyclic aromatic compounds in crude oil as proxies for Permian Tarim large igneous province activities. *Geoscience Frontiers*, 16(2), 102000.
- Rateau R, Schofield N, Smith M. 2013. The potential role of igneous intrusions on hydrocarbon migration, West of Shetland. *Petroleum Geoscience*, 19(3): 259–272.
- Simoneit B R T, Brenner S, Peters K E, Kaplan I R. 1978. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the Eastern Atlantic. *Nature*, 273(5663): 501–504.
- Spacapan J B, Palma J O, Galland O, Manceda R, Rocha E, D'Odorico A, Leanza H A. 2018. Thermal impact of igneous sill-complexes on organic-rich formations and implications for petroleum systems: A case study in the northern Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 91: 519–531.
- Ventura G T, Simoneit B R T, Nelson R K, Reddy C M. 2012. The composition, origin and fate of complex mixtures in the maltene fractions of hydrothermal petroleum assessed by comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Organic Geochemistry*, 45: 48–65.
- Wu L Y, Jin Z J, Liu K Y, Chu Z Y, Yang P. 2021. Evolution of a deeply-buried oil reservoir in the north Shuntuogoule Low Uplift, Tarim Basin, western China: Insights from molecular geochemistry and Re-Os geochronology. *Marine and Petroleum Geology*, 134, 105365.
- Xu H Y, Liu Q Y, Zhu D Y, Meng Q Q, Jin Z J, Fu Q, George S C. 2021. Hydrothermal catalytic conversion and metastable equilibrium of organic compounds in the Jinding Zn/Pb ore deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 307: 133–150.
- Xu H Y, Liu Q Y, Zhu D Y, Peng W L, Meng Q Q, Wang J B, Shi J Y, Jin Z J. 2022. Molecular evidence reveals the presence of hydrothermal effect on ultra-deep-preserved organic compounds. *Chemical Geology*, 608, 121045.
- Yang C Y, Li M J, Ni Z Y, Wang T G, Qiu N S, Fang R H, Wen L. 2022. Paleo-oil reservoir pyrolysis and gas release in the

Yangtze Block imply an alternative mechanism for the Late Permian Crisis. *Geoscience Frontiers*, 13(2), 101324.
Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, Mitchelld R H, Goyette D, Sylvestre S. 2002. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 33: 489–515.

