

# 准噶尔盆地示踪石油运移的无机地球化学 新指标研究

曹 剑<sup>①\*</sup> 胡文瑄<sup>①</sup> 姚素平<sup>①</sup> 张义杰<sup>②</sup> 王绪龙<sup>③</sup> 张越迁<sup>③</sup>  
唐 勇<sup>③</sup> 石新璞<sup>③</sup>

(① 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093; ② 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; ③ 中国石油新疆油田公司, 克拉玛依 834000)

**摘要** 以准噶尔盆地为例, 探索了石油运移示踪研究的新思路和新方法. 基于对储层中典型流体—岩石反应产物(方解石胶结物)的元素地球化学分析, 结合样品的地质产状, 提出方解石胶结物的 MnO 含量是示踪含油气流体活动的良好指标. Mn 是典型与火山物质相关的元素, 胶结物中富集的 Mn 主要来自于油源流体对本区烃源层系中火山岩物质的溶蚀. 同一世代方解石胶结物中 MnO 含量降低的方向指示石油运移方向. 据此, 结合石油运移过程中的有机地球化学分析, 研究了多源充注地区的石油运移通道和方向, 取得良好效果.

**关键词** 油气运移 无机地球化学 水岩反应 方解石 准噶尔盆地

石油运移是其生成和聚集的纽带, 对其进行示踪研究不仅涉及到含油气流体活动过程中的种种地球化学行为, 而且可为预测烃源灶和未知油藏提供科学依据, 因而具有重要的理论意义和应用价值<sup>[1-3]</sup>. 长期以来, 油气的有机成因学说使得国内外学者通常从有机地球化学角度研究石油运移<sup>[4]</sup>, 如通过原油(或储层沥青)的生物标志物<sup>[5-7]</sup>、同位素<sup>[8,9]</sup>和含氮化合物<sup>[10,11]</sup>组成等特征进行油源对比、油油对比, 据此研究石油运移体系, 取得了一系列重要成果. 然而, 在复杂构造盆地, 受原油运移的“多源多期”混合效应和次生变化的影响, 有机地球化学指标参数变化紊乱<sup>[12-14]</sup>, 很难将“综合”的信息逐层还原, 确定每一期原油运移的有机地球化学记录, 所以, 单凭有机地球化学参数示踪石油运移受到了一定限制.

鉴于此, 各国学者一直致力于拓宽石油运移的研究思路和方法<sup>[10,15]</sup>. 近年来, 石油生成、运移和

成藏演化过程中的无机地球化学记录引起了人们的广泛兴趣<sup>[16-18]</sup>. 烃类流体在运移途中会与地层中的岩石和水发生流体—岩石相互作用和物质交换, 流体和岩石中几乎所有的元素和同位素组成都受到了影响<sup>[19]</sup>. 因此, 通过对流体和岩石元素/同位素组成的分析, 可以反演石油运移过程, 如Cai等<sup>[20]</sup>通过研究塔里木盆地塔中地区的油田水的矿化度、各种离子和氢氧同位素变化规律, 认为研究区的油田水运移方向与油气运移方向一致, 展示了地层水无机地球化学在油气运移中的应用. 然而, 现今地层水和原油一样, 实际上也是经历过多期复杂演化后形成的最终面貌, 仍属于一种“综合”信息, 并且在复杂构造盆地, 储层压力体系复杂多变, 当油气在同一压力体系内部, 或不同压力体系间运移时, 水与油气的运动并不一定同时同向, 从而限制了利用地层水的特征来示踪油气运移(Boles, 2007, 私人通信)<sup>[21,22]</sup>.

从理论上讲,若储层存在多期含油气流体注入,则可能在微区尺度上存在相应的水岩反应产物,因此,成岩记录分析在研究复杂构造盆地油气运移时具有潜在优势。但迄今为止,储层胶结物研究仍集中在成岩作用与储层物性之间的关系<sup>[18,23]</sup>。只有为数不多的一些资料涉及到了胶结物微量元素与油气运移之间可能的联系。如Gregg和Shelton<sup>[24]</sup>研究了美国密苏里州东南Bonnetterre组底部白云岩Fe和Mn含量的变化,认为Fe和Mn高含量区是流体活动的中心地带,其含量降低的方向指示流体流动和油气运移方向。陈景山<sup>[25]</sup>分析了塔里木盆地塔中 I 号断裂带中晚海西期埋藏成因的缝洞方解石胶结物的元素组成,得出了相似的结论。Varti-Mataranga和Pe-Piper<sup>[26]</sup>通过希腊Peloponnese东南部Molai附近一口科学探井的研究,认为从含油气流体中沉淀的白云石相对富集Fe, Mn, Sr, Zn和Pb等微量元素。Rossi等<sup>[27]</sup>对西班牙东部Maestrat盆地Kimmeridgian Ascla地层中的灰岩展开了研究,认为富Fe的裂缝方解石与油气充注有关。Hood等<sup>[28]</sup>通过在新西兰Taranaki盆地的研究,提出Tikorangi组油气储层中发生过八次成岩事件,其中与油气运移相关的流体以富Mg为特征。作者前期在准噶尔盆地西北缘冲断带地区发现了一些含有烃类的环带状方解石胶结物,反映了断裂控制下的幕式流体活动特点<sup>[29]</sup>,胶结物的电子探针元素成分分析结果表明,凡是显示荧光的烃类环带基本都对应对应着MnO含量的增高(参见文献<sup>[29]</sup>中的图 8),这可能说明,在准噶尔盆地,方解石胶结物中的Mn含量与含油气流体的充注有着密切关系。

因此,碳酸盐胶结物的微量元素(特别是 Mn, Fe, Mg 和 Sr 等)组合及其含量变化与古流体的来源与性质密切相关,是反应古流体活动的有效记录。但是,这方面的研究近几年还处于起步阶段,不仅不同学者提出的指标存在差异,而且很少在油气运移实例研究中进行验证或应用,因此,必须结合具体地质环境,加强元素富集机理的探讨,针对含油气盆地的勘探实践开展工作。本文以准噶尔盆地现已发现的主要油气聚集区(西北缘和腹部地区)为例,报道了该区石油运移无机地球化学示踪研究的初步成果,并提出示踪准噶尔盆地石油运移的新指标,试图发展和完善油气运移研究的新思路和新方法。

## 1 样品与方法

准噶尔盆地位于新疆北部,南、北夹持于天山与阿尔泰山之间,东、西分别为扎伊尔山和青格里底—克拉美丽山,平面形态呈南宽北窄的三角形,总面积约为  $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是在准噶尔地块基础上发展起来的晚石炭世—第四纪沉积盆地(图 1(a))。其西北缘和腹部地区的油气主要源于二叠系风城组( $P_1f$ )和下乌尔禾组( $P_2w$ ),也有来自石炭系(C)和二叠系佳木河组( $P_1j$ )的贡献<sup>[30]</sup>(图 1(b))。石炭—二叠系烃源岩是一套以陆相暗色泥岩为主的烃源岩,与火山岩/火山碎屑岩夹层共生,西北缘和腹部地区的生烃中心分别在玛湖凹陷和盆 1 井西凹陷(图 1(a)),目前已演化至成熟—高成熟阶段<sup>[30]</sup>。从纵向上看,本区发育了多套生储盖组合<sup>[31]</sup>,广泛发育的断裂体系是油气运移的主要通道,形成了多套含油气层系<sup>[32]</sup>,现已在石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系都发现了油气流聚集(图 1(b))。

含油气流体在沿以断裂为主的运聚体系运移过程中,随着温度、压力、pH值等的变化,流体和岩石发生相互作用,往往会导致新矿物的形成和早期矿物的溶解,从而留下反映油气流体作用的矿物学记录。根据显微镜观测和电子探针分析,本区储层中水岩反应的矿物学记录以充填裂隙的碳酸盐脉体,以及孔隙胶结物为主,镜下发现的胶结物包括碳酸盐矿物、钠长石、钾长石、绿泥石、沸石和天青石等<sup>[33,34]</sup>。

其中,方解石胶结物对流体介质环境反应相当敏感<sup>[33-35]</sup>,既可以很早在地层建造水中形成,也可能随后期油气流体进入储层而遭受溶蚀(图 2(a)),流体岩石之间的相互作用使得含油气流体所带有的地球化学特征反映到呈溶蚀残余状的方解石胶结物中。若存在多期油气充注,则可能原位微区尺度上存在相应的多期次的成岩记录(图 2(b))<sup>[29,33,34]</sup>。如图 2 展示的碳酸盐胶结物见有多期的烃染现象,不仅说明其形成时的孔隙流体受到过含油气流体的影响,而且化学成分显著变化,这为分析含油气流体—矿物相互作用提供了极佳的有机—无机地球化学记录。

据此,本次工作的研究对象主要是储层碳酸盐胶结物。所采样品纵向上从石炭系—白垩系的各套主要储层都有分布,平面上包括了腹部地区盆 1 井西凹陷含油气系统的三个油气聚集带,即图 1(a)中所示陆西地区的夏盐、石南和陆梁(表 1)。为了分析方解

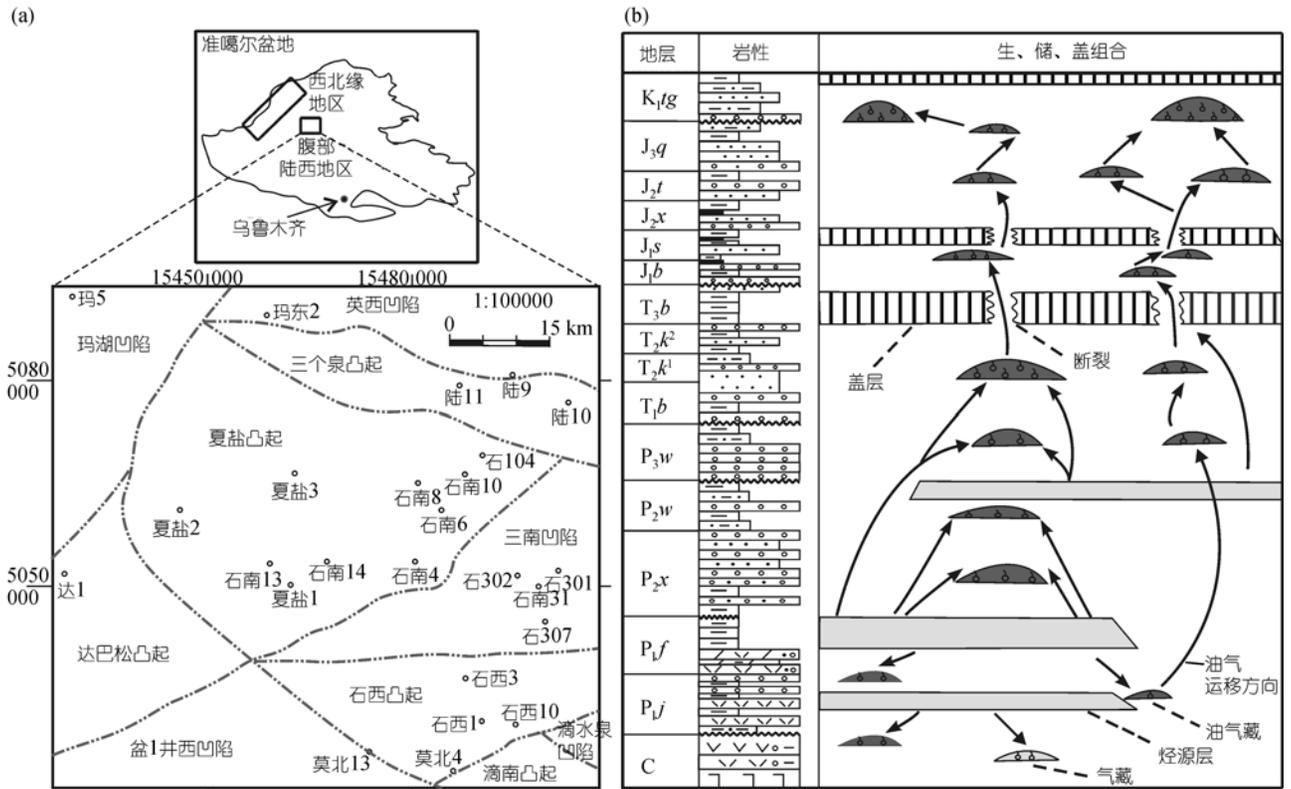


图 1 准噶尔盆地研究区构造单元分区(a)以及地层和生储盖组合特征示意图(b)

据文献[31,36]资料编绘

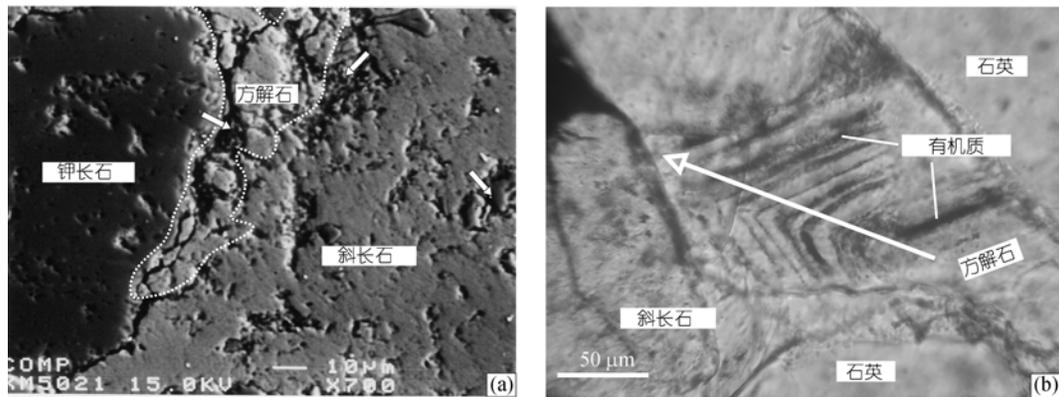


图 2 准噶尔盆地典型储层胶结物发育的矿物岩石学特征

(a) 长石遭受溶蚀, 粒间见方解石胶结物, 箭头所指为溶蚀孔隙, 孔隙中见沥青, 电子探针背散射图像; (b) 含油环带方解石, 图中箭头所指为方解石的结晶生长方向, 正交偏光. 样品来自西北缘地区车 61 井, 2670.5 m, P<sub>2w</sub>

石胶结物中某(几)种微量元素富集的成因, 区别方解石的微量元素含量分别受注入水和原岩的影响, 我们所采样品的岩性包括火山岩和碎屑岩两大类型, 碎屑岩中又包含了不同粒度(物性)的样品; 从油气显示级别看, 为了与油气充注强度进行对比, 样品从油层、气层、水层和干层都有分布.

胶结物的元素分析在内生金属矿床成矿机制国

家重点实验室(南京大学)进行, 仪器型号为 JXA-8800M(JEOL), 测试条件: 加速电压 15 kV, 束流 10 nA, 束斑直径最低可至 1 μm.

## 2 结果

目前文献中认为与油气流体活动相关的微量元素主要是金属元素 Mn, Fe, Mg 和 Sr 等 [24~29], 因此,

表 1 准噶尔盆地储层胶结物化学成分分析典型样品基本特征

样号	井号	深度/m	层位	基本特征
F1-1-3	夏盐 1	2379.0	K <sub>1</sub> tg	灰色细砂岩. 荧光
F1-1-5	夏盐 1	4493.0	T <sub>1</sub> b	杂色砾砂岩. 荧光
F-xy1-1	夏盐 1	4990.0	C	灰色含砾细砂岩. 干层
F-xy2-9	夏盐 2	5251.5	C	绿灰色安山岩, 方解石脉. 干层
F1-4-1	石南 4	2588.0	J <sub>2</sub> t	灰褐色细砂岩. 油浸
F1-4-2	石南 4	2893.0	J <sub>1</sub> s	灰色中—细砂岩. 干层
F1-4-3	石南 4	4298.0	P <sub>2</sub> w	杂色火山角砾岩. 荧光
F1-5-1	石南 6	2331.0	K <sub>1</sub> tg	灰色含砾中粗砂岩. 水层(荧光)
F1-5-2	石南 6	2451.0	J <sub>2</sub> t	灰色中砂岩. 水层(荧光)
FB4-1	石南 8	2580.0	J <sub>2</sub> x	灰色中砂岩. 干层
F1-11-1	陆 9	1795.0	K <sub>1</sub> tg	灰色细砂岩. 干层
F1-11-2	陆 9	2137.0	J <sub>2</sub> x	灰色粉砂岩. 荧光
F1-11-3	陆 9	2230.0	J <sub>2</sub> x	灰色中砂岩. 水层(荧光)
F1-11-4	陆 9	2397.0	J <sub>1</sub> s	灰色砾砂岩. 荧光

本次实验主要针对这些元素进行了分析。

表 2 给出了实验样品的胶结物元素分析结果, 共包括 51 组数据. 其中, Na 含量有 26 个分析点低于检测限, 剩下的 25 个数据中, 从 0.01wt%~0.21 wt%<sup>1)</sup>; K 含量有 24 个低于元素检测限, 剩下的 27 个数据中在 0.01wt%~0.15 wt%间; Mn 含量最高可达 4.14 wt%, 只有 4 个分析点低于检测限, 其余的 47 个数据变化非常显著, 最高与最低值之间差约 4 wt%; Mg 含量有 7 个低于检测限, 其余波动较小, 最高值为 0.72 wt%; Fe 含量有 6 个低于检测限, 其余变化较大, 最高可达 2.24wt%; Sr 含量均高于检测限, 最高值 0.64 wt%. 因此, 从微量元素组成特点来看, 不均一性显著, 反映了不同性质的流体在储层中的不均一活动特点. 其中, Mn, Fe 和 Mg 变化相对明显, 而 Sr、Na 和 K 变化不显著. 由此看来, 分析变化相对最显著的三种元素 (Mn, Fe 和 Mg), 进而判断流体来源, 比其他元素更为可行(Boles, 2005, 私人通信).

从 Mn, Fe 和 Mg 元素含量与岩性、油气显示之间的关系看(表 3, 图 3), 方解石胶结物的元素含量与岩性之间相关关系不显著, 表明储层(物理)性质并不是决定元素含量的主要因素. 有意义的是, Mn 含量与油气显示之间存在密切联系: 从干层、水层、荧光到油浸等 4 个油气显示级别, 方解石胶结物的 MnO 含量的最高值和平均值都依次升高. 这在一定程度上表明, Mn 含量变化与含油气流体的充注强度有着密切关系, 并且从干层样品中 MnO 含量数据最高值 (0.97 wt%) 来看, MnO=1.0wt% 也许可作为判断本区

油源流体影响与否的标准。

### 3 讨论

#### 3.1 富 Mn 方解石的形成机理

前文实验结果的分析表明, 准噶尔盆地富 Mn 方解石的形成与含油气流体有着密切关系. 因此, 为深入剖析两者之间的联系, 必须首先查明含油气流体的基本特征, 进而揭示富 Mn 方解石的成因.

(i) 油源流体基本特征. 同位素是目前示踪和确定流体来源与特征的最常用的有效技术之一<sup>[16,37]</sup>. 本区油源来自石炭—二叠系<sup>[30]</sup>, 因此, 本次工作力图通过对石炭—二叠系烃源层方解石胶结物的同位素组成分析油源流体特征. 鉴于腹部地区石炭系—二叠系地层的埋深通常在 5000 m 以下, 直接钻揭深部地层的钻孔很少. 因此, 我们从西北缘地区(图 1(a)) 挑选了 16 块典型样品, 分别进行了氧和锶同位素分析. 分析结果表明, 岩石的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  在  $-8.1\text{‰} \sim -23.3\text{‰}$  之间, 变化较大;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  在 0.703896 ~ 0.706423 之间(图 4), 远低于现代海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  平均值(0.709073), 甚至低于显生宙以来海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的最低值(0.707).

湖相原生碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值通常位于  $-2\text{‰} \sim 6\text{‰}$  之间<sup>[38]</sup>, 本区检出的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值明显偏负, 这说明胶结物沉淀时的孔隙水不同于原生地层水. 造成这种现象的可能原因包括五种: (1) 大气水介入及其促发的水岩相互作用<sup>[39-41]</sup>, (2) 孔隙水温度升高<sup>[42]</sup>, (3) 火山玻璃屑的低温蚀变<sup>[43]</sup>, (4) 有机质降解<sup>[44]</sup>, (5) 沉积水体的盐度<sup>[45]</sup>.

1) wt% 为质量分数, 下同

表 2 准噶尔盆地储层典型方解石胶结物的电子探针元素化学成分分析结果(wt%)

样号	点号	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	MgO	CaO	FeO	SrO	总量
F1-1-3	1	bdl <sup>a)</sup>	0.03	bdl	0.54	55.07	0.21	0.49	56.34
	2	0.06	0.04	1.82	0.15	52.2	0.13	0.26	54.66
	3	bdl	0.01	bdl	0.11	54.09	0.03	0.35	54.59
	4	bdl	0.02	2.59	0.42	50.58	0.22	0.31	54.14
F1-1-5	1	bdl	0	bdl	0.17	55.4	bdl	0.41	55.98
	2	0.05	bdl	1	bdl	53.89	bdl	0.26	55.20
	3	0.2	bdl	1.76	0.31	54.43	bdl	0.29	56.99
F-xy1-1	1	0.14	0.01	0.15	0.29	55.52	0.32	0.37	56.80
F-xy2-9	1	0.01	0	0.1	0.13	55.31	bdl	0.15	55.70
	2	bdl	bdl	bdl	0.1	53.34	0.43	0.35	54.22
	3	0.21	bdl	0.81	0.52	53.86	0.41	0.37	56.18
F1-4-1	1	0.13	0.01	4.14	0.09	52.42	0.05	0.33	57.17
	2	bdl	bdl	3.77	0.08	53.17	0.07	0.24	57.33
F1-4-2	1	0.04	bdl	0.45	bdl	55.10	bdl	0.34	55.93
	2	bdl	bdl	0.20	0.06	55.34	0.01	0.30	55.91
F1-4-3	1	0.07	bdl	2.14	bdl	53.19	0.05	0.45	55.90
	2	bdl	0.01	0.21	bdl	54.56	0.04	0.35	55.17
	3	0.05	0.01	0.25	bdl	54.14	0.01	0.32	54.78
	4	0.04	bdl	0.45	0	55.1	bdl	0.34	55.93
	5	0.13	0.01	2.26	0.09	54.42	0.05	0.33	57.29
	6	bdl	bdl	2.45	0.08	53.17	0.07	0.24	56.01
F1-5-1	1	bdl	0.05	1.21	0.08	54.23	0.06	0.15	55.78
F1-5-2	1	0.08	0.01	3.46	0.13	51.81	0.88	0.29	56.66
	2	bdl	0	2.72	0.18	51.05	1.6	0.38	55.93
	3	0.06	0.01	2.59	0.13	53.59	0.68	0.26	57.32
FB4-1	1	bdl	bdl	0.31	0.05	55.78	0.45	0.57	57.16
	2	bdl	bdl	0.66	0.01	54.87	0.79	0.37	56.70
	3	bdl	0.01	0.42	0.21	53.12	1.36	0.51	55.63
	4	bdl	bdl	0.42	0.12	55.12	0.74	0.45	56.85
	5	bdl	bdl	0.71	0.23	54.53	1.13	0.31	56.91
	6	bdl	bdl	0.35	0.21	55.23	1.37	0.38	57.54
	7	bdl	bdl	0.57	0.2	54.41	1.13	0.35	56.66
	8	0.05	bdl	0.52	0.16	53.54	1.12	0.44	55.83
F1-11-1	1	0.09	0.03	0.97	0.3	53.31	0.85	0.23	55.78
F1-11-2	1	bdl	0.03	2.93	0.35	51.92	2.24	0.24	57.71
	2	bdl	0.05	2.77	0.22	50.76	1.85	0.13	55.78
	3	bdl	0.02	3.84	0.21	52.05	0.49	0.49	57.10
	4	0.06	0.08	1.53	0.19	52.78	1.84	0.22	56.70
	5	0.19	0.04	3.05	bdl	51.89	0.45	0.36	55.98
	6	0.2	0.15	2.09	0.41	51.49	0.25	0.36	54.95
F1-11-3	1	bdl	0.05	0.21	0.11	55.27	0.52	0.40	56.56
	2	0.03	0	0.64	0.31	54.84	1.1	0.64	57.56
	3	bdl	bdl	0.15	0.18	53.68	0.75	0.42	55.18
	4	0.19	0.03	0.59	0.3	54.49	1.32	0.03	56.95
F1-11-4	1	bdl	0.02	0.71	0.63	51.88	1.62	0.32	55.18
	2	bdl	0.02	1.09	0.72	53.19	1.94	0.41	57.37
	3	0.08	0.04	0.63	0.7	53.46	1.43	0.48	56.82
	4	bdl	bdl	0.55	0.32	54.29	1.19	0.48	56.83
	5	0.08	bdl	1.42	0.19	53.54	0.61	0.48	56.32
	6	0.05	0.02	1.68	0.32	53.79	1.32	0.42	57.60
	7	0.15	0.04	0.85	0.5	52.36	1.57	0.36	55.83

a) “bdl”表示测试数据低于元素检测限

表 3 准噶尔盆地储层典型方解石胶结物的 Mn, Fe 和 Mg 元素分布特征(据表 2 中数据统计)

		微量元素含量(wt%)			
		MnO	FeO	MgO	
不同岩性	安山岩	0.30(3) <sup>a)</sup> 0~0.81	0.28(3) 0~0.43	0.25(3) 0.1~0.52	
	角砾岩	1.29(6) 0.21~2.45	0.37(6) 0~0.07	0.28(6) 0~0.09	
	砂砾岩	0.97(10) 0~1.76	0.97(10) 0~1.94	0.39(10) 0~0.72	
	中粗砂岩	1.21(1) 0.95(15)	0.06(1) 1.0(15)	0.08(1) 0.17(15)	
	中砂岩	0.15~3.46 0.33(2)	0.45~1.6 0.005(2)	0.01~0.31 0.03(2)	
	中-细砂岩	0.2~0.45 1.68(8)	0~0.01 0.24(8)	0~0.06 0.25(8)	
	细砂岩	0~4.14 2.70(6)	0.03~0.85 0.67(6)	0.08~0.54 0.23(6)	
	粉砂岩	1.53~3.84	0.25~2.24	0~0.41	
	不同油气显示	干层	0.44(15) 0~0.97	0.30(15) 0~1.37	0.17(15) 0~0.52
		水层	1.45(8) 0~3.46	0.86(8) 0.06~1.6	0.18(8) 0.08~0.31
荧光		1.46(26) 0~3.84	0.68(26) 0~2.24	0.26(26) 0~0.72	
油浸		3.96(2) 3.77~4.14	0.06(2) 0.05~0.07	0.09(2) 0.08~0.09	

a)  $\frac{\text{平均值(样品数)}}{\text{最小值} \sim \text{最大值}}$ , 最低值中的 0 代表“bdl”

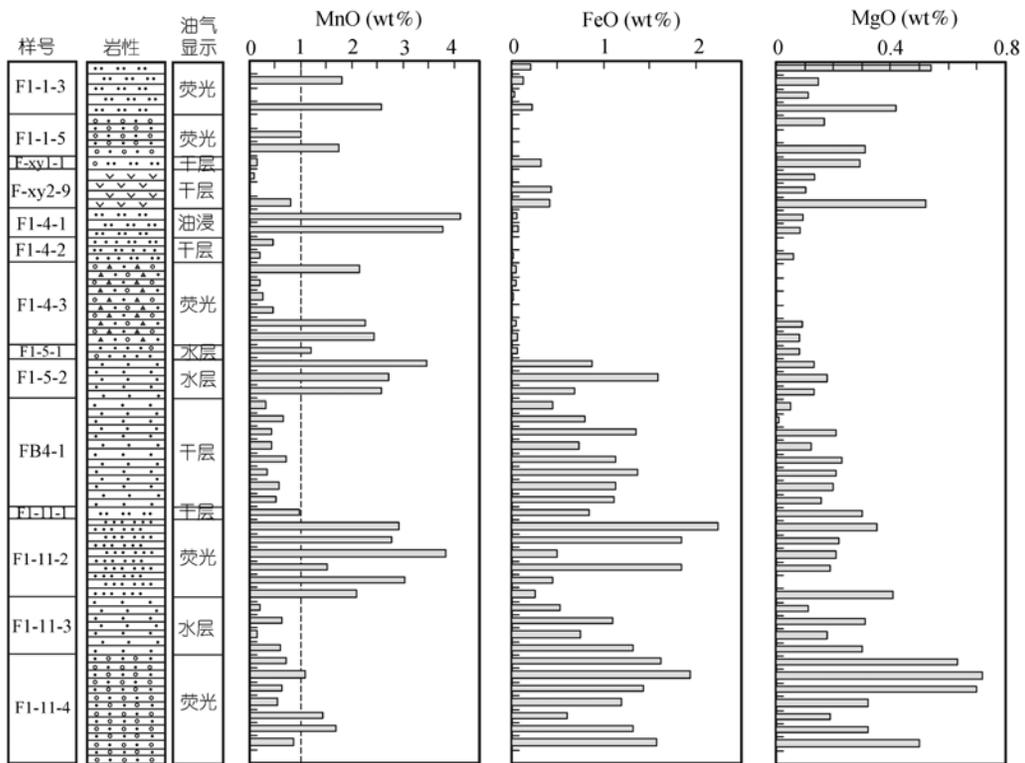


图 3 准噶尔盆地储层典型方解石胶结物的 MnO, FeO 和 MgO 含量

据表 2 中数据绘制

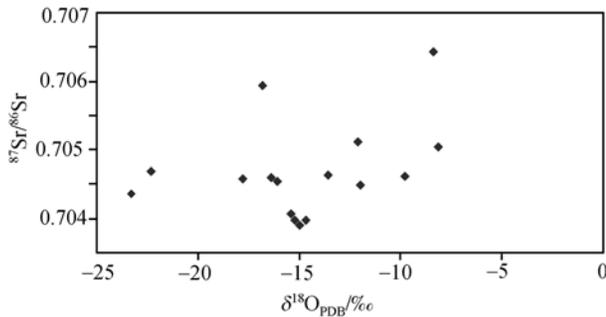


图4 准噶尔盆地典型烃源层系方解石脉的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  数据关系图

这些分析样品都取自断裂带附近,所以大气水有可能自盆缘沿断裂下渗,深部热流体也可以沿断裂带向上运动,一方面使孔隙水快速升温,另一方面又可沿途溶蚀石炭—二叠系的火山岩物质<sup>[46]</sup>。此外,储层有机质显然也会因为大气水的作用而遭受降解<sup>[32]</sup>。但总的来说,大气降水和/或成岩温度是控制氧同位素组成的主要因素,其它因素对氧同位素组成的影响比较有限,一般不超过5‰<sup>[42]</sup>。

为了进一步确定大气水和成岩温度这两种因素的影响效应,分析了方解石脉中赋存的原生流体包裹体,发现其均一温度和盐度分布范围宽,存在一期高温( $T_h > 150^\circ\text{C}$ )和高盐度(15wt%~18wt%)的热流体记录,反映了成岩流体演变的复杂性,这与表2中所展示的元素分析结果一致。据此综合判断,我们认为造成本区烃源层  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负的主要原因在于高温热流体的“冲刷”,高温影响下,水中的  $^{18}\text{O}$  大量消耗,导致岩石  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负。这种因高温影响而造成碳酸盐岩  $\delta^{18}\text{O}$  值明显偏负的现象在渤海湾地区的研究中也有报道,其  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  位于  $-17.1\text{‰} \sim -12.5\text{‰}$  之间<sup>[43]</sup>。

方解石胶结物的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变化也较明显,但皆位于幔源锶( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7035$ <sup>[47]</sup>)和石炭—二叠纪海洋锶( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  在 0.707 和 0.709 之间<sup>[48]</sup>)同位素组成之间,且更偏向幔源。这进一步说明了成岩过程中流体混合程度的多变性和活动的复杂性,验证和补充了前文对氧同位素组成的分析,即深部沿断裂带上来的热流体是推动油源流体运移的重要动力,高温孔隙水使  $\delta^{18}\text{O}$  负漂移。热流体本身具有深源性质,流经石炭—二叠系的火山岩(含Rb极低<sup>[43]</sup>)使其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值降低,并检出了两个典型的具幔源特征的  $\delta^{18}\text{O}$  数据( $-25\text{‰} \sim -20\text{‰}$ <sup>[49]</sup>,图4)。

综上所述,本区烃源层系的油源流体在深部热

流体的驱动下,对石炭—二叠系火山岩层的溶蚀使得油源流体呈现火山岩地层的烙印,这是本区油源流体的重要特征。

(ii) Mn, Fe 和 Mg 的地球化学属性。对于 Mn, Fe 和 Mg 这三种在储层胶结物中丰度相对较高、含量变化明显的元素(表2,图3),由于油源流体对火山岩层的溶蚀作用,因此 Mn, Fe 和 Mg 中与火山物质最具相关性的元素能够反映本区油源流体的活动特征。

刘英俊等<sup>[50]</sup>通过对前人报道数据的统计归纳,指出河水和海水(黏土和碳酸盐岩等沉积岩的常见发育环境)中Mn的平均含量分别只有0.1和0.002  $\mu\text{g/g}$ ,而Mn在酸性、中性和基性火山岩中的含量分别可达600~800, 1200~1500和1500~2500  $\mu\text{g/g}$ ,可见Mn是典型的与火山物质相关的元素组分。Fe在各类沉积岩中的丰度高低不一,黏土和页岩中较高,平均含量分别为6.5%和4.72%,砂岩次之(3.33%),而碳酸盐岩中铁的含量只有黏土岩含量的1/17(0.38%),铁在酸性、中性和基性火山岩中的含量分别可达1.42%~2.96%,3.61%~5.85%和8.56%。因此,Fe含量的变化比较复杂,但并不是与火山物质相关的典型元素。Mg元素与Fe元素一样,来源也比较复杂,在火山岩中的含量多变,据Boles等<sup>[22]</sup>的归纳,其最有可能指示着原生的地层水环境。

综上所述,就 Mn, Fe 和 Mg 三种元素来说, Mn 是最典型的与火山物质相关的元素。

(iii) 富Mn方解石的形成机理。由于与火山物质的长期作用,成烃高峰期的油源流体会富集Mn等与火山物质相关的组分。这些微量元素大多以离子形式存在,易于与原油中的有机大分子结合,主要结合形式包括金属卟啉螯合物,以及混杂的四配位基向心配合体的过渡金属络合物等<sup>[51,52]</sup>。富含Mn元素的酸性油源流体在运移途中,会与围岩以及地层水发生水岩反应。除流经断裂体系外,水岩相互作用主要发生在碎屑岩输导层中,因此最终影响新生方解石特征的介质还应可能包括原生地层水和储层围岩碎屑矿物。根据前面对Mn, Fe和Mg地球化学属性的分析,原生地层水应以富Mg为典型特征<sup>[50]</sup>,而围岩碎屑矿物(石英、长石等)的微量元素组成分析表明,在Mn, Fe和Mg三种组分中,Mn的相对含量最低<sup>[53]</sup>。由此可见,富Mn方解石的形成只可能与富Mn的油源流体相关,在油源流体-储层反应时,形成了与油气

充注同期的富Mn的方解石胶结物。

### 3.2 应用储层方解石胶结物的 Mn 含量示踪石油运移

(i) 示踪原理. 油气运移是一个十分复杂的“层析”过程<sup>[12,14,15]</sup>, 在此过程中, 从理论上讲, 所有含微量元素的化合物都有可能被吸收到原油中, 成为继油源流体形成过程中富集微量元素之后的其它来源<sup>[54-56]</sup>. 不过, 前述分析表明, 在准噶尔盆地, Mn 是油源流体的特征元素, 明显区别于围岩与水介质中的元素, 所以其他来源的微量元素对胶结物中Mn的含量不会造成大的影响, 也正因为此, 才会展示出胶结物的Mn含量与油气显示级别基本呈正相关关系的特征(表 2 和图 3)。

研究表明, 沥青质是原油中金属元素的主要载体<sup>[54]</sup>. 考虑到沥青质大分子在运移过程中很容易被围岩矿物吸附<sup>[12,14,15]</sup>, 所以赋存其中的金属元素丰度必然随之下降<sup>[54]</sup>. 可见, 胶结物中特征元素的浓度变化能够指示流体运移的方向, 因此通过分析Mn含量的高低和相对变化可以追踪油气运移. 例如, 包裹体的均一温度和盐度特征表明: 在准噶尔盆地西北缘地区的红-车断裂带主断裂的流体活动最为强烈, 并与断裂上盘记录的流体事件基本一致, 而断裂下盘的流体活动较弱, 说明石油是沿主断裂优先向上盘运移<sup>[34]</sup>. 对比储层方解石胶结物元素含量的分布情况, 发现上盘岩石胶结物的MnO含量高于下盘岩石, 所记录的流体活动、原油运移的规律与通过包裹体地球化学研究所得出的认识一致, 表明了利用胶结物MnO含量示踪油气运移的可信性。

需要指出的是, 沉积盆地流体-岩石相互作用非常复杂<sup>[18]</sup>, 有时可能存在多期不同成因的方解石胶结物, 如早成岩期(成岩温度一般小于 80℃)和晚成岩期(成岩温度一般大于 80℃)的方解石, 以及烃类充注时形成的方解石胶结物<sup>[57]</sup>, 它们通常以粒状、块状、溶蚀交代, 以及溶蚀残余等多种形态产出<sup>[53]</sup>. 在利用胶结物的元素地球化学特征进行油气运移示踪时, 应注意区分不同世代的方解石, 尽量选择测试同一世代并与油气充注有关, 镜下通常呈溶蚀残余状的方解石胶结物(图 2), 以确保获得能够反映烃-水-岩相互作用的“化石”记录. 这与应用有机地球化学参数示踪油气运移与油藏充注过程的研究类似, 即必须首先确认所研究的原油是同油源的, 不应将不

同族群的原油放在一起进行对比<sup>[58]</sup>.

由于一些含油气盆地的烃源层通常与火山岩共生, 如在苏格兰Bearreraig湾侏罗系Dun Caan组页岩中发育有辉绿岩岩席<sup>[59]</sup>, 中国东部中生代裂谷盆地主力生油层中亦有火山岩夹层<sup>[60]</sup>, 因此, 本文提出的示踪技术在这些盆地中可望有良好的应用前景. 至于生油层中火山岩不甚发育的油气盆地, 则需要视具体地质情况具体分析, 可能是方解石之外的其它胶结物, 或Mn之外的其它元素更为敏感。

(ii) 应用实例 1: 石油运移通道. 以准噶尔盆地腹部陆西地区为例, 该区目前发现的油气聚集层位主要包括白垩系吐谷鲁群(K<sub>1tg</sub>)清水河组(K<sub>1q</sub>)、侏罗系头屯河组(J<sub>2t</sub>)、西山窑组(J<sub>2x</sub>)和三工河组(J<sub>1s</sub>). 我们首先通过显微镜观察和地球化学分析确定合适的研究对象(图 5), 在此基础上, 根据测试结果(表 2), 分析不同层位、不同构造部位胶结物 MnO 含量的变化(图 6), 研究油气运移。

首先, 确定典型的分析和研究对象. 以陆梁油田的两块样品为例, 样品中长石矿物的溶蚀现象发育, 表明可能有酸性流体参与的成岩作用. 其中, 西山窑组(J<sub>2x</sub>)油层岩石中自生高岭石发育, 溶蚀孔隙一般未充填, 储层物性提高(图 5(a)), 鉴于成岩高岭石是酸性流体与长石相互作用的典型产物, 所以认为此特征为油气充注的记录<sup>[33]</sup>; 电子探针点分析显示, 方解石胶结物的MnO含量达 1.94 wt%, 反映了二叠系油源流体的影响. 与图 5(a)所示的J<sub>2x</sub>样品不同, J<sub>1s</sub>的储层岩石中则存在不同性质流体叠加作用的记录(图 5(b)), 2 个不同灰度方解石胶结物的MnO含量分别为 0.55 wt% 和 1.42 wt%, 富MnO者可能是与含油流体活动同期次所形成, 并包围已被溶蚀呈残余的早期成岩方解石(MnO=0.55 wt%).

对于白垩系清水河组(K<sub>1q</sub>)(图 6(a)), 共测得 6 个 MnO 的值, 既有高于 1.0 wt% 的, 也有低于 1.0 wt% 的, 反映了两种不同性质流体的活动. 从平面展布看, 沿夏盐-石南-陆梁, MnO 含量逐步降低, 说明油源流体的影响越来越弱, 表明晚期在白垩系输导层中存在着由南西(生烃凹陷)向北东(构造隆起)的油气运移, 可能受控于第三纪以来盆地整体由南向北大掀斜的构造运动<sup>[61,62]</sup>.

对于侏罗系头屯河组(J<sub>2t</sub>), 共测得 5 组数据(图 6(b)), 均来自石南油田, MnO 含量异常高, 分布在

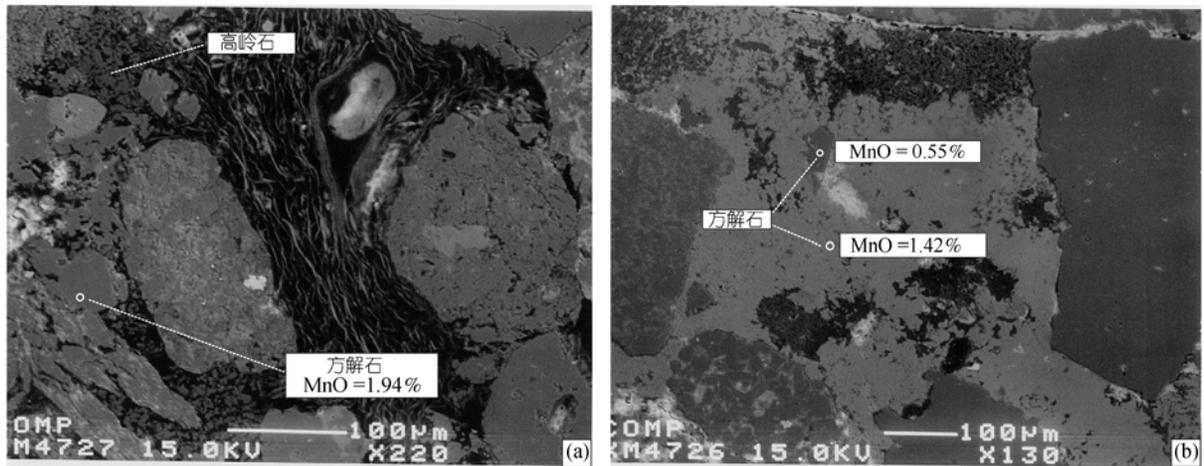


图 5 准噶尔盆陆梁油田陆 9 井典型水-岩反应产物电子探针背散射图像  
(a) 2137 m, J<sub>2x</sub>; (b) 2397 m, J<sub>1s</sub>

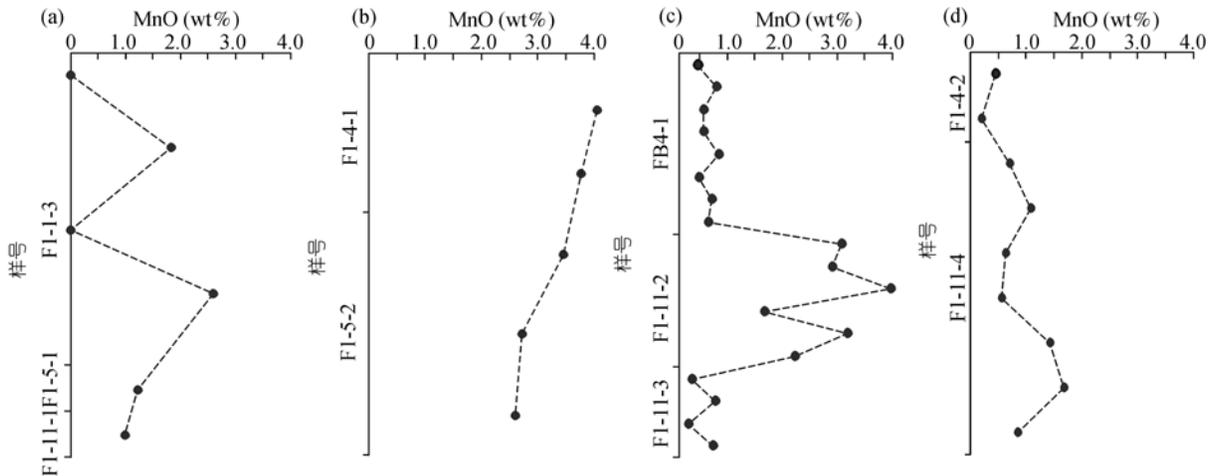


图 6 准噶尔盆地腹部陆西地区白垩系吐谷鲁群清水河组(a)、侏罗系头屯河组(b)、西山窑组(c)和三工河组(d)储层典型方解石胶结物的 MnO 含量分布图

据表 2 中数据绘制

2.59wt%~4.14 wt%之间,说明该储层的油气充注强度较大.其中,石南 4 井样品 F1-4-1 的胶结物 MnO 含量为 4.14wt%和 3.77wt%,而石南 6 井样品 F1-5-2 的 MnO 含量则处于 2.59wt%~3.46 wt%之间,反映在头屯河组储层中存在着从石南 4 井向石南 6 井的油气运移,这与白垩系清水河组地层中的油气运移特征类似.

对于侏罗系西山窑组(J<sub>2x</sub>),样品 FB4-1 和 F1-11-3 的方解石 MnO 含量皆小于 1.0 wt%(图 6(c));而 F1-11-2 样品方解石胶结物 MnO 含量皆大于 1.0wt%.结合样品的地质产状来看,这与油源流体的充注强度有关:F1-11-2 样品取自荧光的油水同层储层中,所以表现出油源流体影响为主的特征,而

F1-11-3 样品所在层位为水层,FB4-1 样品来自于干层.

对于侏罗系三工河组(J<sub>1s</sub>),共测得 9 个 MnO 含量数据(图 6(d)),以 MnO 含量 1.0 wt% 为界,可分为油源流体与地层流体两种不同性质流体影响的特点.陆梁油田样品(F1-11-4)数值要比石南油田样品(F1-4-2)的高,说明油气可能并不是沿三工河组输导层自石南油田向陆梁油田充注的,否则随油气运移距离增大,胶结物 MnO 含量应与距生烃凹陷的距离成反比.也许是断裂输导性的差异造成了三工河组储层中的这种分布特点<sup>[53]</sup>.

综上所述,在准噶尔盆地腹部陆西地区,断裂是



化学变化,研究了准噶尔盆地多源多期油气充注地区的运移通道和方向,取得良好效果,如在腹部陆西地区查明了断裂,以及白垩系吐谷鲁群清水河组和侏罗系头屯河组储层是油气运移的重要通道,而在莫索湾地区,东西两端的油源区有所不同,这为区域油气深入勘探提供了重要的基础信息。

**致谢** 匿名审稿专家悉心点评文稿,并提出的宝贵意见,陆现彩对修改稿进行了润色,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *AAPG Bull*, 1953, 37(8): 1954—2026
- Schowaltr T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bull*, 1979, 63(5): 723—760
- England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *J Geol Soc London*, 1987, 144: 327—347
- Kvenvolden K A. Organic geochemistry—A retrospective of its first 70 years. *Org Geochem*, 2006, 37(1): 1—11 [\[DOI\]](#)
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments, second edition*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2005. 1155
- 王铁冠. 生物标志物地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990
- 王培荣. 生物标志化合物质量色谱图集. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 徐永昌, 刘文汇, 沈平. 含油气盆地油气同位素地球化学研究概述. *沉积学报*, 2001, 19(2): 161—168
- 周世新, 王先彬, 孟自芳, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩中气体包裹体组成及其碳同位素特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(7): 665—672
- Larter S R, Bowler B, Li M, et al. Molecular indicators of secondary oil migration distances. *Nature*, 1996, 383: 593—597 [\[DOI\]](#)
- Li M W, Larter S R, Stoddart D, et al. Practical liquid chromatographic separation schemes for pyrrolic and pyridinic nitrogen aromatic heterocycle fractions from crude oils suitable for rapid characterization of geochemical samples. *Anal Chem*, 1992, 64: 1337—1344 [\[DOI\]](#)
- England W A. Secondary migration and accumulation of hydrocarbons. In: Magoon L B, Dow W G, eds. *The Petroleum System—From Source to Trap*. AAPG Mem, 60, Tulsa, 1994, 211—217
- Karlsen D A, Skeie J E, Backer-owe K, et al. Petroleum migration, faults and overpressure. Part II. Case history: The Hltenbanken Petroleum Province, offshore Norway. In: Cubitt J M, England W A, Larter S R, eds. *Understanding petroleum reservoirs: towards an integrated reservoir engineering and geochemical approach*. *J Geol Soc London Special Publications*, 2004, 237: 305—372
- 黄海平, 张水昌, 苏爱国. 油气运聚过程中的地球化学作用. *石油实验地质*, 2001, 23(3): 278—283
- 黎茂稳. 油气二次运移研究的基本思路 and 几个应用实例. *石油勘探与开发*, 2000, 27(4): 11—19
- Emery D, Robinson A. *Inorganic geochemistry: application to petroleum geology*. London: Blackwell Scientific Publications, 1993
- Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bull*, 1989, 73(1): 1—23 [\[DOI\]](#)
- 张枝焕, 常象春, 曾澹辉. 水-岩相互作用研究及其在石油地质中的应用. *地质科技情报*, 1998, 17(3): 69—74
- Land L S. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. *Soc Econ Planet Miner Special Publication*, 1980
- Cai C F, Franks S G, Aagaard P. Origin and migration of brines from Paleozoic strata in Central Tarim, China: constraints from  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and water chemistry. *Appl Geochem*, 2001, 16: 1269—1284 [\[DOI\]](#)
- Losh S, Walter L, Meulbroek P, et al. Reservoir fluids and their migration into the South Eugene Island Block 330 reservoirs, offshore Louisiana. *AAPG Bull*, 2002, 86(8): 1463—1488
- Boles J R, Eichhubl P, Garven G, et al. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: Evidence from fault cement. *AAPG Bull*, 2004, 88(7): 947—970 [\[DOI\]](#)
- Salmon B, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *AAPG Bull*, 2002, 86(2): 301—328
- Gregg J M, Shelton K L. Minor- and trace-element distributions in the Bonnetterre dolomite (Cambrian), southeast Missouri: Evidence for possible multiple basin fluid sources and pathways during lead-zinc mineralization. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101: 221—230 [\[DOI\]](#)
- 陈景山. 塔中地区碳酸盐岩储层评价和有利储集空间预测. 科研技术报告. 新疆库尔勒: 塔里木油田公司, 2000
- Varti-Mataranga M, Pe-Piper G. Geochemistry of upper Triassic black dolomites of the SE Peloponnese (Greece), and their relationship to the volcanic activity of the area. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Monatshefte*, 1998, 7: 305—327
- Rossi C, Goldstein R H, Marfil R, et al. Diagenetic and oil migration history of the Kimmeridgian Ascla Formation, Maestrat Basin, Spain. *Mar Petrol Geol*, 2001, 18: 287—306 [\[DOI\]](#)
- Hood S D, Nelson C S, Kamp P J J. Modification of fracture porosity by multiphase vein mineralization in an Oligocene non-tropical carbonate reservoir, Taranaki Basin, New Zealand. *AAPG Bull*, 2003, 87(10): 1575—1597 [\[DOI\]](#)
- 胡文瑄, 金之钧, 张义杰, 等. 油气幕式成藏的矿物学和地球化学记录——以准噶尔盆地西北缘油藏为例. *石油与天然气地质*, 2006, 27(4): 442—450
- 王绪龙, 康素芳. 准噶尔盆地腹部及西北缘斜坡区原油成因分析. *新疆石油地质*, 1999, 20(2): 108—112
- Cao J, Zhang Y J, Hu W X, et al. The Permian hybrid petroleum system in the northwest margin of the Junggar Basin. *Mar Petrol Geol*, 2005, 22(3): 331—349 [\[DOI\]](#)
- Cao J, Yao S P, Jin Z J, et al. Petroleum migration and mixing in NW Junggar Basin (NW China): constraints from oil-bearing fluid inclusion analyses. *Org Geochem*, 2006, 37(7): 827—846 [\[DOI\]](#)
- 曹剑, 张义杰, 胡文瑄, 等. 油气储层自生高岭石发育特点及其对物性的影响. *矿物学报*, 2005, 25(4): 367—373

- 34 曹剑, 胡文瑄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地西北缘红山嘴-车排子断裂带含油气流体活动特点地球化学研究. 地质论评, 2005, 51(5): 591—599
- 35 Morrow D W. Diagenesis: Dolomite-part I, the chemistry of dolomitization and dolomite precipitation. *Geosci Can*, 1982, 9: 5—13
- 36 张越迁, 张年富. 准噶尔大型叠合盆地油气富集规律. 中国石油勘探, 2006, 1: 59—64
- 37 王大锐. 油气稳定同位素地球化学. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 38 Kelts K, Talbot M R. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In: Tilzer M M, Serruya C, eds. *Ecological structure and Function in Large Lakes-Madison, Wis. Science Tech*, 1990. 290—317
- 39 Hudson J D. Stable isotopes and limestone lithification. *J Geol Soc London*, 1977, 133: 637—660
- 40 Emery D, Hudson J D, Marshall J D, et al. The origin of late spar cements in the Lincolnshire limestone, Jurassic of central England. *J Geol Soc London*, 1988, 145: 621—633
- 41 Morad S, DeRos L F. Geochemistry and diagenesis of stratabound calcite cement layers within the Rannoch Formation of Brent Group, Murchison Field, North Viking Graben (north North Sea)—discussion. *Sediment Geol*, 1994, 93: 135—141 [DOI]
- 42 Al-Aasm I S, Coniglio M, Desrochers A. Formation of complex fibrous calcite veins in Upper Triassic strata of Wrangellian terrain, British Columbia, Canada. *Sediment Geol*, 1995, 100: 83—95 [DOI]
- 43 王大锐, 张映红. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 40—42
- 44 Sass E, Bein A, Almogi-Labin A. Oxygen isotope composition of diagenetic calcite in organic-rich rocks: evidence for  $^{18}\text{O}$  depletion in marine anaerobic pore water. *Geology*, 1991, 19: 839—842 [DOI]
- 45 Lloyd R M. Oxygen isotope enrichment of sea water by evaporation. *Geochim Cosmochim Acta*, 1966, 30: 801—814
- 46 潘长春, 周中毅. 流体包裹体在准噶尔盆地油气资源评价中的应用. 石油实验地质, 1990, 12(4): 412—420
- 47 Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr. *Nature*, 1985, 314: 526—528 [DOI]
- 48 Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Mississippian, Pennsylvanian and Permian seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve. *Chem Geol*, 1994, 112: 145—167 [DOI]
- 49 Peter D. On the oxygen isotope distribution among mineral triplets in igneous and metamorphic rocks. *Geochim Cosmochim Acta*, 1977, 41: 1709—1730
- 50 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984, 50—124
- 51 Hitchon B, Filby R H. Use of trace elements for classification of crude oils into families-example from Alberta, Canada. *AAPG Bull*, 1984, 68: 838—849
- 52 Lewan M D, Maynard J B. Factors controlling enrichment of vanadium and nickel in the bitumen of organic sedimentary rocks. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 2547—2560 [DOI]
- 53 胡文瑄, 张义杰, 姚素平, 等. 准噶尔盆地重点地区断控运聚体系与流体成藏机理研究. 科研技术报告. 新疆克拉玛依: 新疆油田公司, 2004
- 54 刘小微, 程克明. 微量元素在煤成烃研究中的应用. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 40—44
- 55 徐正球, 邓平. 干酪根和原油中的微量元素研究及其在油气勘探中的应用. 见: 中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室研究年报(1990—1992). 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 186—198
- 56 赵孟军, 黄第藩, 廖志勤, 等. 原油中微量元素地球化学特征. 石油勘探与开发, 1996, 23(3): 19—23
- 57 薛莲花, 史基安, 晋慧娟. 辽河盆地沙河街组砂岩中碳酸盐胶结作用对孔隙演化控制机理研究. 沉积学报, 1996, 14(2): 102—109
- 58 王铁冠, 何发岐, 李英俊, 等. 烷基二苯并噻吩类: 示踪油藏充注途径的分子标志物. 科学通报, 2005, 50(2): 176—182
- 59 Farrimond P. Hopanoid hydrocarbon maturation by an igneous intrusion. *Org Geochem*, 1996, 25(3-4): 149—164
- 60 金强, 熊寿生, 卢培德. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义. 地质论评, 1998, 44(2): 136—142
- 61 王绪龙. 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷区油气源与成藏研究. 博士学位论文. 四川南充: 西南石油学院, 2001
- 62 张义杰. 新疆准噶尔盆地断裂控制油气规律研究. 博士学位论文. 北京: 石油大学(北京), 2002
- 63 胡文瑄, 张义杰, 姚素平, 等. 盆 1 井西凹陷油气系统成藏序列与油气分布研究. 科研技术报告. 新疆克拉玛依: 新疆油田公司, 2006