准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩品质差异性分析

孙中良[1,2,3*]，张奎华[4]，宋振响[1,2,3]，于洪洲[5]，王斌[1,2,3]，宋梅远[5]，李志明[1,2,3]，曹婷婷[1,2,3]

1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室，江苏 无锡 214126；
2. 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 214126；
3. 中国石化油气成藏重点实验室，江苏 无锡 214126；
4. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院，山东 东营 257015；
5. 中国石化胜利油田分公司，山东 东营 257015

* 通信作者，E-mail：sunzhl8188.syky@sinopec.com

2024-04-09 收稿；2024-07-09 修回；2024-07-16 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42090020)；国家重点实验室项目(KLP24017)

中图分类号：TE122.3　　文章编号：2096-8523(2026)01-0038-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240153

摘　要：哈山地区二叠系风城组页岩油勘探势头良好，多口页岩油探井取得突破。哈山地区风城组主要沉积陆源碎屑岩相、白云质混积岩相、含火山碎屑混积岩相和含碱性矿物混积岩相 4 类岩相，并发育多类型烃源岩。为进一步评价哈山地区风城组烃源岩品质及影响因素，以沉积背景入手，分岩相对风城组烃源岩进行精细评价，明确优质烃源岩的发育岩相，并在此基础上对烃源岩品质的影响因素进行分析，明确勘探方向。结果表明，哈山地区风城组含火山碎屑混积岩相泥页岩有机质丰度最好，白云质混积岩相泥页岩的生烃潜量最优，哈山地区风城组泥页岩干酪根主体为Ⅰ型-Ⅱ型，哈山西段泥页岩成熟度范围在 0.79%～0.97%，哈山中段成熟度主要在 1.2%～1.37%。哈山地区风城组烃源岩品质主要受沉积环境、生烃母质、成熟度、碱性矿物以及火山作用控制。白云质混积岩相、含碱性矿物混积岩相有机质在深水、还原环境、中-高盐度以及干燥条件下更为富集，陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相在相对浅水、贫氧、低盐度、干旱-半干旱环境下有机质更为富集。沉积中心区高盐度区发育的绿藻(类杜氏藻)具有更高的油气转化率，使白云质混积岩相泥页岩在低丰度的有机质下具有较高的生烃潜量。成熟度以及碱性矿物的增加均会导致 TOC、生烃潜量的测试值降低，适量的火山碎屑为有机质富集的有利条件。

关键词：哈山地区；风城组；烃源岩；生烃母质；碱性矿物；火山作用；准噶尔盆地

准噶尔盆地西北缘是重要的油气聚集区，玛湖凹陷多类型油气勘探均取得较大突破，形成克拉玛依、乌尔禾、风城等多个油气田，研究表明均以二叠系风城组泥页岩为烃源岩[1-3]。哈拉阿拉特山地区(简称哈山地区)位于玛湖凹陷西北缘逆掩构造带，与玛湖凹陷具有相似的沉积背景，风城组沉积时期整体为火山背景下的碱湖多源混合细粒沉积建造，哈山地区风二段典型碱性矿物的大量出现，揭示该地区发育除玛湖凹陷外的另一湖盆中心，发育古老的碱湖烃源岩[3]。哈山地区目前主要在超剥带侏罗系和石炭系-二叠系火山岩领域取得 2 个规模发现，油气均主要来源于二叠系风城组烃源岩[4-6]；近年以页岩油视角对风城组烃源岩进行探索，也在多口页岩油探井见到了良好的油气显示[7-9]，HS5 井的页岩油勘探取得重大突破，最高日产油 95.8 m^3，揭示哈山地区风城组具备页岩油的勘探前景。研究[10-11]表明，风城组烃源岩分布广，厚度大，有机质丰度普遍在 1% 左右，生烃潜量普遍大于 2 mg/g，具备较好的生烃能力。

由于哈山地区位于复杂构造带内，二叠系风城

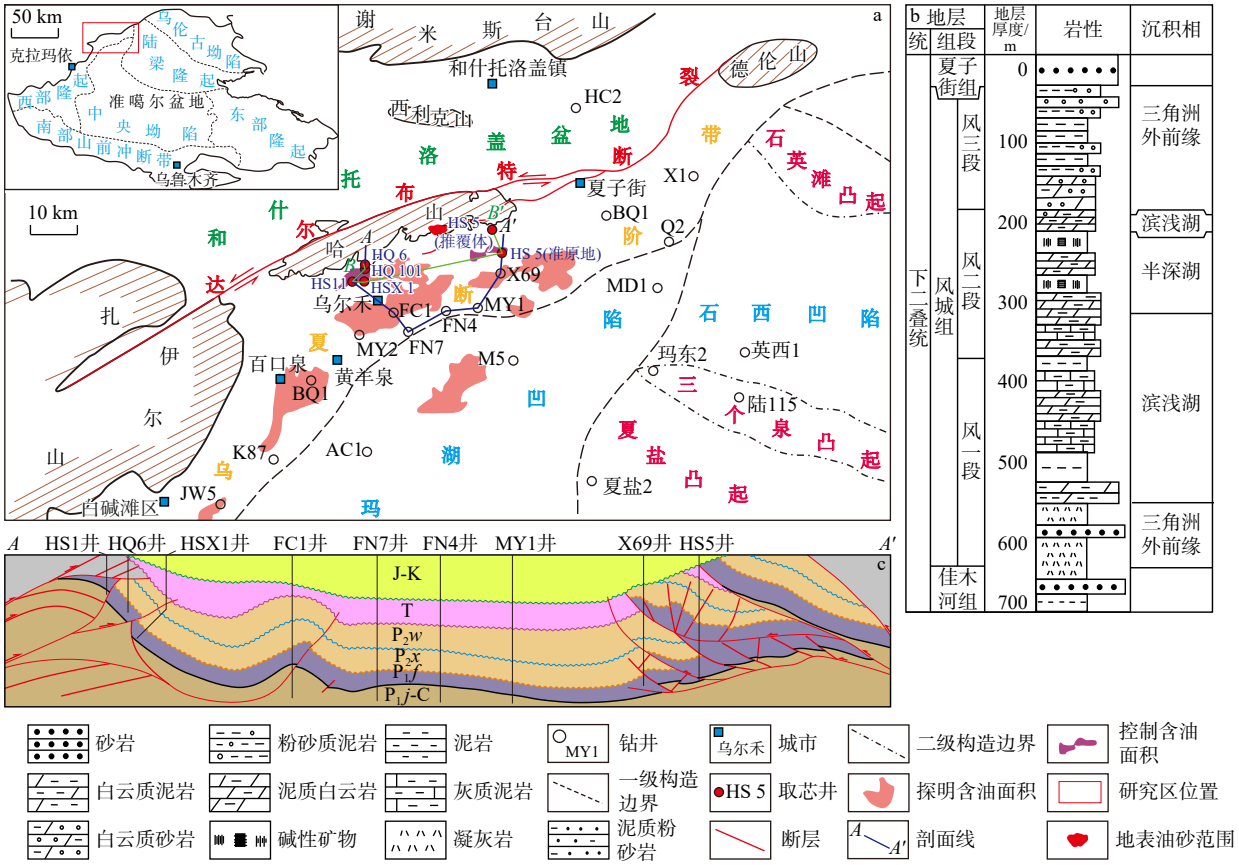
著录信息：孙中良，张奎华，宋振响，等. 准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩品质差异性分析 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：38-52.
SUN Zhongliang, ZHANG Kuihua, SONG Zhenxiang, et al. Quality difference analysis of source rocks in the Fengcheng Formation, Hashan area, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 38-52.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

组地层存在叠置现象，其中非原地沉积的地层为推覆体地层，原地沉积的地层为准原地地层。前期研究[12]表明，哈山地区风城组发育多类型烃源岩，但有机质丰度普遍不高，主要发育中等丰度烃源岩，其中风二段有机质丰度最高，w(TOC)在 1.0%～1.75% 之间，风一段 w(TOC)多分布在 0.5%～1.5%，风三段有机质丰度总体较低，w(TOC)<1.0%。有机质类型以Ⅰ型和Ⅱ型为主，也存在部分Ⅲ型。通过对比分析发现，哈山地区风城组不同地区的烃源岩品质差异较大，且存在有机质丰度普遍偏低的特点，相同的问题在玛湖凹陷亦十分突出[13]。针对玛湖凹陷风城组烃源岩有机质丰度偏低，王小军等[14]、曹剑等[3]、支东明等[15]研究认为，有机质丰度偏低却形成大油区的原因在于生烃转化率高，独特的碱湖环境也使得风成组烃源岩在高成熟度时仍处于生油高峰期，较传统湖相优质烃源岩生油期大大延长；但刘得光等[10]、白雨等[16]通过生烃模拟研究证实风城组碱性湖泊相烃源岩的生油潜力与一般湖相(淡水、微咸水–咸水、硫酸盐湖)差别不大。针对玛湖凹陷风城组烃源岩有机质类型的差异，孟颖等[17]研究认为有机质类型差异主要由不同的有机质来源导致，各沉积相均沉积了不同类型的有机质，但总体来说风城组烃源岩中有机质以藻类体为主。可以看出，目前对哈山–玛湖地区二叠系风城组烃源岩品质差异性与影响因素的解释仍有争议。笔者在前人研究的基础上，以哈山风城组泥页岩样品为基础，对哈山地区的烃源岩进行分类评价并详细分析影响因素，以期为风城组页岩油勘探提供支撑。

1　区域地质背景

哈山地区位于新疆维吾尔自治区境内的塔城地区和阿勒泰地区，构造上处于准噶尔盆地西北缘隆起乌夏断裂带的西北端山前冲断带，南邻玛湖凹陷，北接和什托洛盖盆地(图 1a)，勘探面积 5 794.8 km^2。地区构造线总体呈 NEE 向展布，主体为逆冲推覆叠加构造(图 1c)，发育超剥带、冲断–推覆体及准原地以及中深层冲断–推覆体及准原地[19]。风城组自下而上可分为风城组一段(风一段)、风城组二段(风二段)和风城组三段(风三段)，沉积时期自风一段至风



P$_1j$-C. 二叠系佳木河组至石岩系；P$_1f_1$. 二叠系风城组；P_2x. 二叠系夏子街组；P$_2w$. 二叠系乌尔禾组；T. 三叠系；J-K. 侏罗系克拉玛依组

图 1　准噶尔盆地哈山地区区域位置 (a)、综合柱状图 (b) 以及构造特征 (c)（据文献 [18] 改动）

Fig. 1　Regional location (a), comprehensive histogram (b) and structural characteristics (c) of the Hashan area, Junggar Basin

三段经历了先咸化后淡化的过程，风二段中上部为碱性矿物发育最强的层段[20]。干旱炎热蒸发环境产生的内源化学沉积、周缘火山活动提供的火山物质、西缘推覆体被剥蚀形成的近源陆源碎屑与内源碳酸盐等多物源的混合沉积，共同构成了该层位复杂的矿物沉积类型以及烃源岩发育条件，形成了不同类型的烃源岩。风一段底部为三角洲外前缘，至风一上段演化为滨浅湖，风二段以湖相沉积为主，区内主要为半深湖–滨浅湖，局部受火山作用影响；风三段沉积时期，哈山地区主要为三角洲外前缘（图 1b）[20-21]。

2　样品信息与实验方法

2.1　样品信息

本研究选取的样品主要包括哈山中段的 HS5 井以及哈山西段的 HS11 井、HS1 井、HQ6 井、HQ101 井、HSX1 井，位置如图 1a，其中 HS5 井取样点主要包括推覆体风二段地层以及准原地风二段和风一段地层，推覆体风二段下部为滨浅湖沉积、上部为三角洲外前缘沉积，准原地风二段为半深湖–深湖沉积，风一段为滨浅湖沉积；HS1 井、HQ6 井以及 HQ101 主要为推覆体地层，其中 HS1 井取样点包括风一段和风二段地层，分别为三角洲外前缘沉积以及滨浅湖沉积，HQ6 井取样点包括风三段和风二段地层，分别为三角洲外前缘沉积以及滨浅湖沉积；HQ101 井取样点为风三段地层，为三角洲外前缘沉积。HS11 井取样点包括推覆体风三段地层以及准原地风二段地层，分别为三角洲外前缘沉积以及滨浅湖沉积；HSX1 井岩心为准原地地层，包括风二段和风三段地层，分别为滨浅湖沉积及三角洲外前缘沉积（图 2，HS1 井以及 HS11 井推覆体地层未显示）。

由于受陆源碎屑、内源沉积以及火山作用多重因素的影响，哈山地区岩性呈现混积的特征，岩相划分存在困难，前期研究[12] 以沉积背景入手，结合主控因素以及特征矿物对哈山地区的主要岩性进行岩相分类，将三角洲外前缘沉积的泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩等岩性组合归纳为陆源碎屑岩相，将滨浅湖沉积的白云质泥岩、泥质白云岩、白云质砂岩等内源沉积为主的岩性归纳为白云质混积岩相，将深湖–半深湖沉积的碱性矿物泥岩、含碱性矿物云质泥岩等归纳为含碱性矿物混积岩相，受火山作用影响的沉积相发育含火山碎屑混积岩相，主要沉积含凝灰质泥岩、含凝灰质云质泥岩等（图 3），并在此基础上探究哈山地区的页岩油富集模式，取得较好的效果。因此笔者沿用前期的研究方案，以与沉积相对应的岩相发育规律为基础，分岩相对烃源岩进行分类评价。

2.2　实验方法

本研究采用包括热解、残余有机碳（TOC）、手持式元素扫描仪（XRF）等实验。其中热解实验流程为将样品碎至约 100 目（颗粒粒径 0.15 mm），遵循国家标准《岩石热解分析》（GB/T 18602–2012），并根据标准中制定的程序升温方法进行测试，由氢火焰离子化检测器检测岩石在载气热流热解过程中游离烃

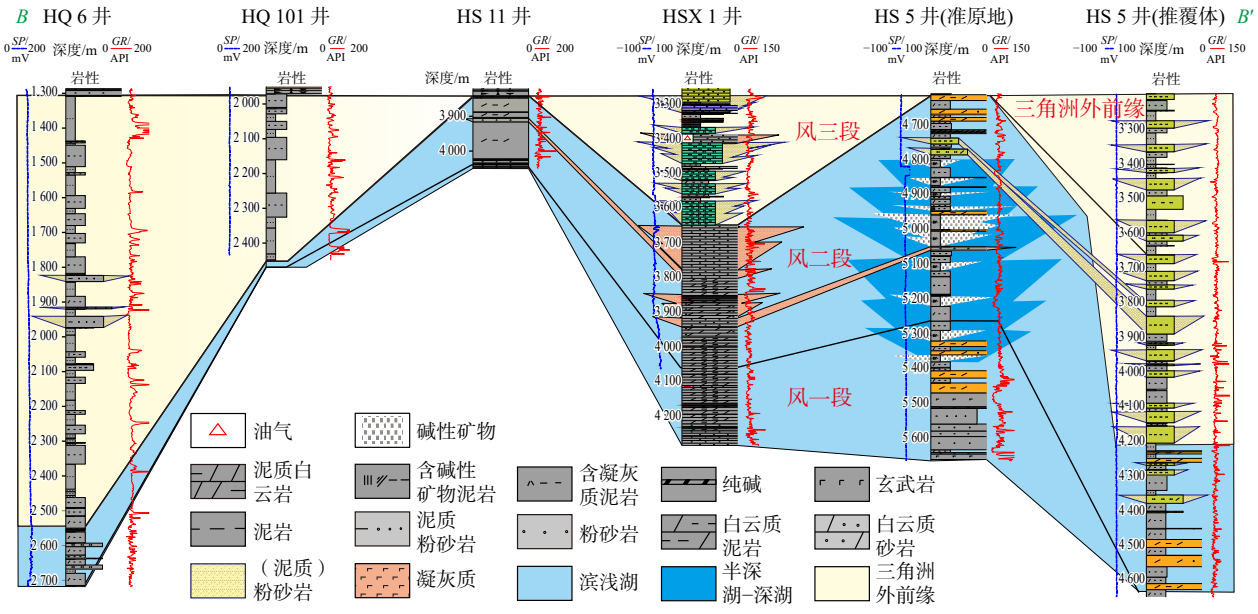


图 2　准噶尔盆地哈山地区各井位沉积相展布（剖面线 *B*-*B*′位置见图 1a）

Fig. 2　Distribution of sedimentary facies at each well location in the Hashan area, Junggar Basin

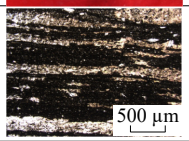
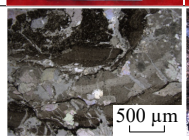
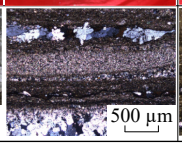
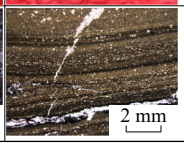
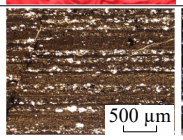
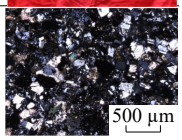
岩相组合类型	含火山碎屑混积岩相	含碱性矿物混积岩相	白云质混积岩相		陆源碎屑岩相	
			云质砂岩	云质泥岩	（含砂）泥岩	（含泥）砂岩
发育层位	风一段、风二段	风一段上部、风二段	风二段		风三段、风二段上部	
沉积相带	滨浅湖–半深湖	半深湖–深湖	滨浅湖		三角洲外前缘	
主要岩性	含凝灰质泥岩、含凝灰质云质泥岩	含碱性矿物质泥岩、含碱性矿物云质泥岩	白云质泥岩、泥质白云岩、白云质砂岩		泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	
岩心特征						
镜下特征						

图 3　准噶尔盆地哈山地区岩相组合特征与发育层位

Fig. 3　Lithofacies association characteristics and developmental horizon in the Hashan area, Junggar Basin

(S_1)、吸附烃(S_2)和热解峰温 T_{max} 值。残余有机碳(TOC)测试流程为选取 0.2 g 左右样品碎至小于 100 目，加入稀盐酸(1∶7)在 70℃ 水浴加热去除无机碳，用蒸馏水去除盐酸后进行测试。XRF 测试时将样品碎至 100 目，并压实为平整面以确保测试结果精确，由于 XRF 测试结果受元素分子量及含量的影响较大，此次实验采用多次实验取平均值的方法，所有实验均在无锡石油地质研究所完成。

3　烃源岩评价

3.1　有机质丰度

有机质丰度为烃源岩生烃的基础，常见的有机质丰度判别指标包括有机碳含量(TOC)、生烃潜量(S_1+S_2)等[22]。对哈山地区 6 口井 290 余个数据分岩相统计分析可知(图 4)，哈山地区风城组的 w(TOC)整体偏低，均值在 1% 左右。不同岩相的有机质丰度存在差异，含火山碎屑混积岩相的有机质丰度普遍较高，不同井位的 w(TOC)均值均超过了 1%，其中哈山西段 HSX1 井的有机质丰度最好，均值在 1.74%，其次是哈山西段 HS11 井，w(TOC)均值在 1.62%，哈山西段 HS1 井以及哈山中段 HS5 井的有机质丰度均值分别为 1.36% 以及 1.05%(图 4c)，有机质丰度稍差。有机质丰度最高的样品出现在陆源碎屑岩相中，为哈山西段 HSX1 井的纹层状泥岩，w(TOC)为 3.54%，w(TOC)最低的样品亦出现在陆

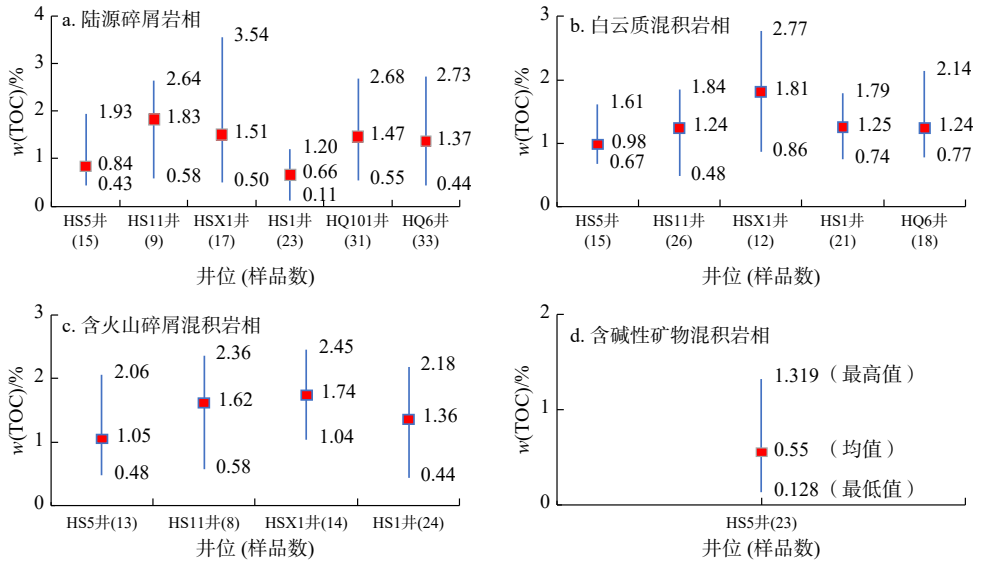


图 4　准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩有机质丰度特征

Fig. 4　Organic matter abundance of source rocks in the Fengcheng Formation in the Hashan area, Junggar Basin

源碎屑岩相中，为哈山西段 HS1 井的块状泥质砂岩，w(TOC)仅为 0.11%，可以看出，陆源碎屑岩相不同样品的 TOC 差异明显，大部分井位的 w(TOC)均值超过了 1%(图 4a)。白云质混积岩相的 TOC 较为均衡，不同井位的 w(TOC)均值普遍高于 1%，哈山西段的 HSX1 井有机质丰度最高，w(TOC)最高值为 2.77%，均值为 1.81%，哈山中段 HS5 井的有机质丰度最低，均值为 0.98%(图 4b)。含碱性矿物混积岩相的有机质丰度最差，均值仅为 0.55%(图 4d)。

哈山地区风城组泥页岩不同岩相的生烃潜量与有机质丰度差异明显，虽然陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相中泥页岩的有机质丰度略好于白云质混积岩相，但两者的生烃潜量明显低于白云质混积岩相。由图 5 可以看出，不同井位的白云质混积岩相生烃潜量均优于同井位的其他岩相(HSX1 井除外，其陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相中部分样品含煤，具有异常高 S_2 值)，为生烃潜量最高的岩相。

(1)在白云质混积岩相中，哈山中段 HS5 井的烃潜量最低为 0.83 mg/g，最高为 12.42 mg/g，均值为 2.37 mg/g，同岩相中生烃潜量最差；哈山西段 HSX1 井的生烃潜量最低为 5.9 mg/g，最高为 15.84 mg/g，均值为 10.69 mg/g，为白云质混积岩相中生烃潜量最高的井位。

(2)在陆源碎屑岩相中，哈山中段 HS5 井生烃潜量最低仅为 0.1 mg/g，最高为 5.08 mg/g，均值为 1.9 mg/g，为同岩相中生烃潜量最差的井位；哈山西段 HSX1 井生烃潜量最低为 1.03 mg/g，最高为 55.1 mg/g，均值为 15.32 mg/g，在同岩相中生烃潜量最大。

(3)在含火山碎屑混积岩相中，生烃潜量最差的依然为哈山中段的 HS5 井，生烃潜量最低为 0.62 mg/g，最高为 3.38 mg/g，均值为 1.88 mg/g；生烃潜量最好的为 HSX1 井，生烃潜量最低为 0.63 mg/g，最高为 17.03 mg/g，均值为 10.71 mg/g。含火山碎屑混积岩相的生烃潜量整体优于陆源碎屑岩相。

(4)含碱性矿物混积岩相的生烃潜量最差，哈山中段 HS5 井生烃潜量最低为 0.09 mg/g，最高为 1.58 mg/g，均值为 0.97 mg/g。

3.2　有机质类型

从不同岩相的有机质类型对比可以看出(图 6)，哈山地区风城组页岩有机质类型主要为Ⅱ型，其次为Ⅰ型，部分Ⅲ型。在陆源碎屑岩相中，Ⅱ$_1$ 型有机质为该岩相中占主导地位，其次为Ⅱ$_2$ 型和Ⅰ型有机质。不同井位有机质类型存在差异，在哈山西段准原地地层的 HS11 井、HSX1 井以及哈山西段推覆体地层的 HQ101 井、HQ6 井有机质类型以Ⅱ$_1$ 型和Ⅰ型为主，哈山中段推覆体地层的 HS5 井以及哈山西段推覆体地层的 HS1 井有机质类型主要为Ⅱ$_2$ 型。在白云质混积岩相中，有机质类型也以Ⅱ型为主，不同井位的有机质类型存在差异，哈山西段推覆体地层的 HQ6 井、HS1 井以及准原地地层的 HSX1 井有机质主要为Ⅱ$_1$ 型以及Ⅰ型，哈山西段的 HS11 井为Ⅱ$_2$ 型，哈山中段的 HS5 井主要为Ⅲ型。含火山碎屑混积岩相中，哈山西段的有机质类型主要集中在Ⅱ$_1$ 型和Ⅰ型，哈山中段的 HS5 井有机质类型主要为Ⅱ$_2$ 型。哈山中段的 HS5 井准原地地层发育大

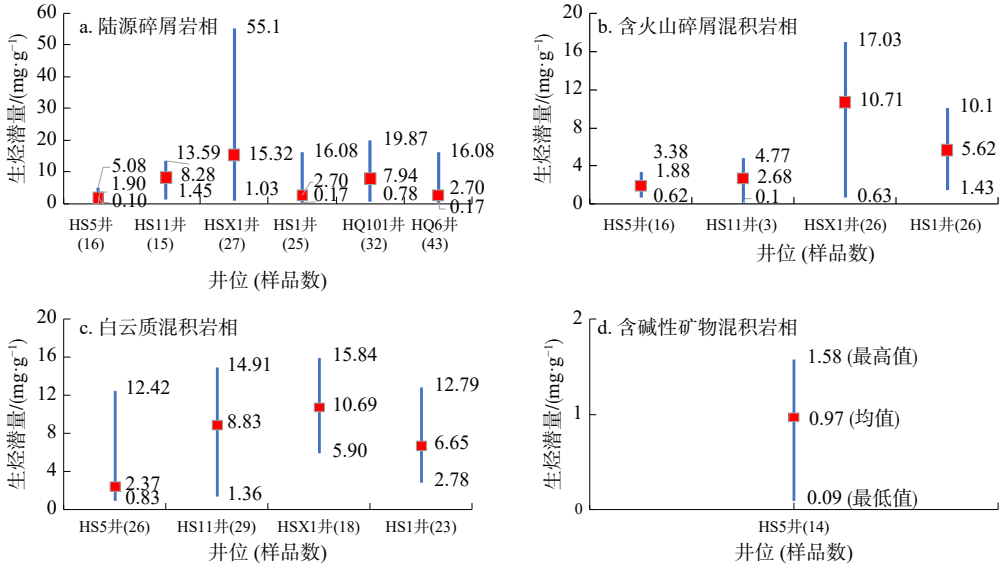


图 5　准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩生烃潜量特征

Fig. 5　Hydrocarbon generation potential in source rocks in the Fengcheng Formation of the Hashan area, Junggar Basin

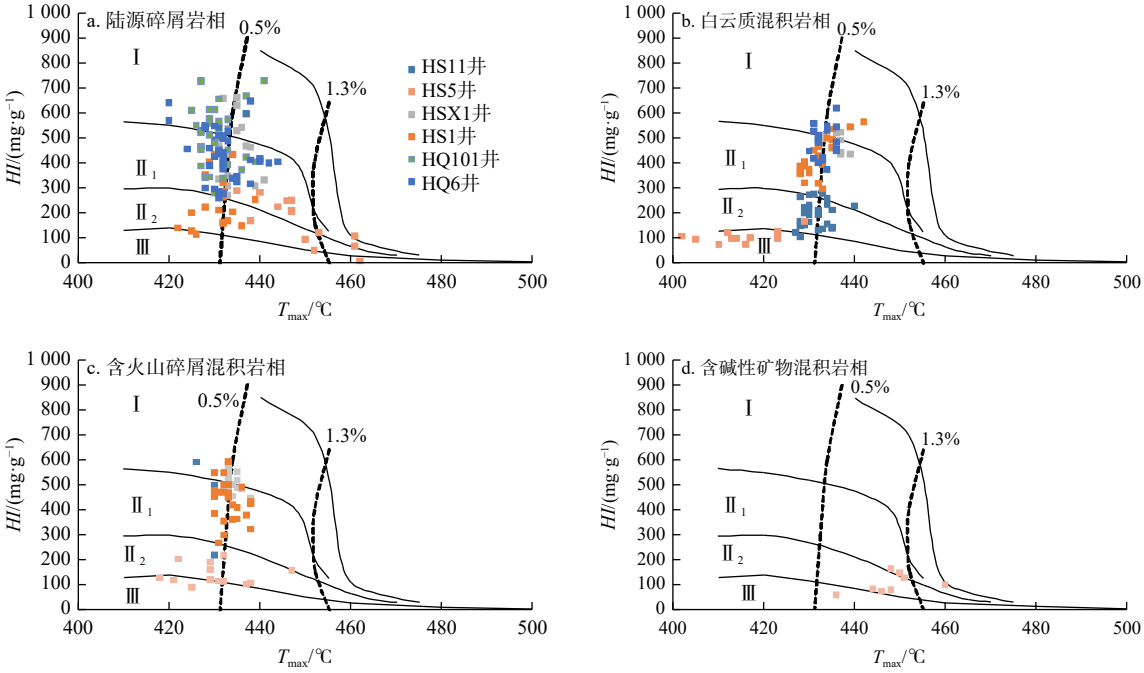


图 6　准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩有机质类型特征

Fig. 6　Organic matter type of source rocks in the Fengcheng Formation of the Hashan area, Junggar Basin

量含碱性矿物混积岩相，有机质类型主要为Ⅱ$_2$型和Ⅲ型。

与有机质类型判别结果相吻合，有机岩石学显微组分揭示(表 1)，陆源碎屑混积岩相中泥岩的腐泥组占有较高比重，超过 45%，其次为镜质体，占比超 28%，部分泥质粉砂岩的镜质组体积分数超过 80%，惰质组与壳质组体积分数较低，普遍低于 20%；部分陆源碎屑岩相中泥质粉砂岩固态沥青体积分数较高，可能受油气运移的影响。白云质混积岩相中以镜质组为主，镜质组体积分数普遍高于 60%，其次为惰质组，壳质组与腐泥组体积分数较低，普遍低于 10%。含碱性矿物混积岩相中的镜质组和惰质组所占比重较大，固体沥青体积分数普遍高于 15%，说明在含碱性矿物混积岩相中存在油气运移过程。含火山碎屑混积岩相中各组分体积分数与白云质混积岩相中类似，以镜质组为主，普遍高于 60%，其次为惰质组，体积分数普遍高于 20%，含少量壳质组。

3.3　有机质成熟度

受地层推覆叠加以及构造抬升等多因素的影响，哈山中段和西段的有机质成熟度存在较大差异，从镜质体反射率(R_o)结果可以看出(图 7)，哈山西段的整体埋深分布在 2 000 ~ 4 000 m，R_o 值变化不大，

表 1　准噶尔盆地哈山地区不同岩相泥页岩有机岩石学特征

Table 1　Organic petrological characteristics of shale with different lithofacies in the Hashan area, Junggar Basin

沉积相	岩相	岩性	深度/m	腐泥组	镜质组	惰质组	壳质组	固体沥青
				φ_B/%				
三角洲外前缘	陆源碎屑岩相	泥质粉砂岩	3 924.90	0	18.4	6.1	–	75.5
		粉砂质泥岩	3 927.31	0	81.4	10.7	–	7.9
		泥岩	3 929.28	47.6	28.7	10.8	6.7	–
		泥岩	3 930.24	46.3	28.3	14.1	3.8	7.5
滨浅湖	白云质混积岩相	白云质泥岩	4 455.95	5.0	61.1	30.2	8.7	–
			4 470.15	0	74.5	17.6	0	7.9
滨浅湖–半深湖	含火山碎屑混积岩相	含凝灰质泥岩	5 130.75	0	67.5	20.0	5.6	–
		含凝灰质白云质泥岩	5 131.69	0	61.7	24.4	3.5	10.4
半深湖–深湖	含碱性矿物混积岩相	含碱性矿物云质泥岩	4 642.80	0	66.3	16.9	0	16.8
			4 645.00	0	48.5	27.3	0	24.2

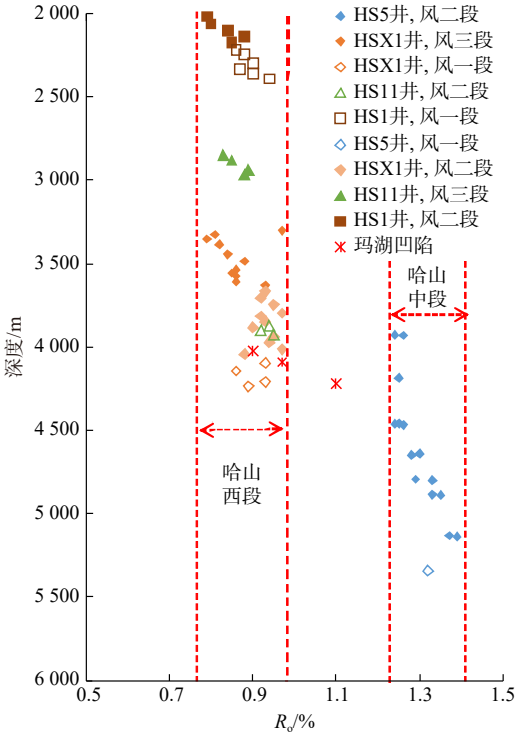


图 7　准噶尔盆地哈山地区风城组泥页岩成熟度特征

Fig. 7　Maturity characteristics of mud shale of the Fengcheng Formation in the Hasan area, Junggar Basin

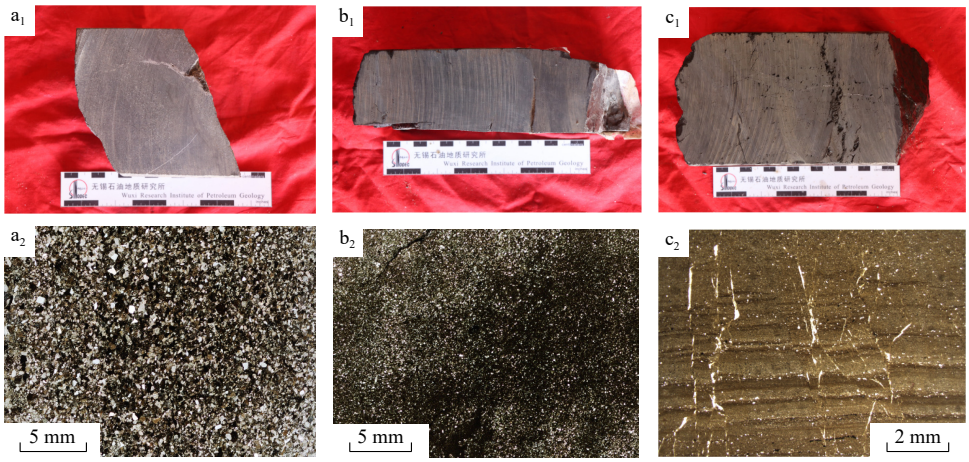
主要在 0.79% ~ 0.97%, 略低于玛湖凹陷(0.85% ~ 1.1%)。哈山中段埋深为 3 900 ~ 5 500 m, R_o 主要在 1.2% ~ 1.37%, 高于玛湖凹陷与哈山西段, 随深度增加, 成熟度增高。从热解峰温(T_{max})可以看出, 哈山西段主体的 T_{max} 值在 430℃ 左右, 对应的 R_o 约为 0.6%, 较镜质体反射率结果整体偏低, 可能由于岩石样品中有较多的沥青质有关[10, 23]。哈山中段的 HS5 井热解峰温主体介于 430 ~ 470 ℃ 之间, 部分样品存在左偏移的特征, 可能受油气运移导致的外来油气富集的影响。

4　烃源岩品质差异影响因素分析

4.1　沉积环境

对比有机质丰度及类型可以发现, 不同岩相的有机质丰度和类型存在较大的不同(图 4 ~ 6), 即使相同岩相, 有机质丰度和类型也存在较大的差异, 如 HS5 井的陆源碎屑岩相中, 有机质丰度最高为 1.93%, 最低仅为 0.43%(图 4), 有机质类型也存在Ⅱ型和Ⅲ型的差异(图 6)。统计陆源碎屑岩相中不同样品有机质丰度和类型发现(图 8), 高有机质丰度和类型较好的样品主要为纹层状泥岩(图 8c), 其次为块状泥岩、(粉砂质)泥岩(图 8b), 块状(泥质)粉砂岩有机质丰度和类型均较差(图 8a)。而纹层状泥岩主要发育在间湾微相(图 9), 对应这低能、安静的水体环境, 而(泥质)粉砂岩主要发育在远砂坝微相, 对应着高能环境。因此可以看出, 沉积环境影响着有机质的富集。

从不同岩相的古环境特征可以看出(图 10), 不同岩相的古环境特征存在显著差异。由 TOC 与古水深指数((Al+Fe)/(Ca+Mg))[24] 的相关性分析可以看出(图 10a), 有机质丰度随水深变浅而降低, 说明深水环境有利于有机质的富集。不同岩相所处的水深和有机质丰度最优水深存在差异, 与沉积相相对应, 含碱性矿物混积岩相发育在最深的水体, 其次为



a. 灰色块状泥质粉砂岩, 远砂坝沉积, 3 925 m, Ⅲ型 w(TOC)=0.46%; b. 深灰色块状粉砂质泥岩, 远砂坝沉积, 3 928.2 m, $Ⅱ_2$ 型 w(TOC)=1.15%; c. 深灰色纹层状泥岩, 间湾沉积, 3 930.3 m, $Ⅱ_1$ 型 w(TOC)=1.62%

图 8　准噶尔盆地哈山地区风城组 HS5 井中三角洲外前缘陆源碎屑岩相主要岩性及有机质丰度特征

Fig. 8　Sedimentary lithology and organic matter abundance characteristics of the outer delta front of Well HS5 in Fengcheng Formation of the Hashan area, Junggar Basin

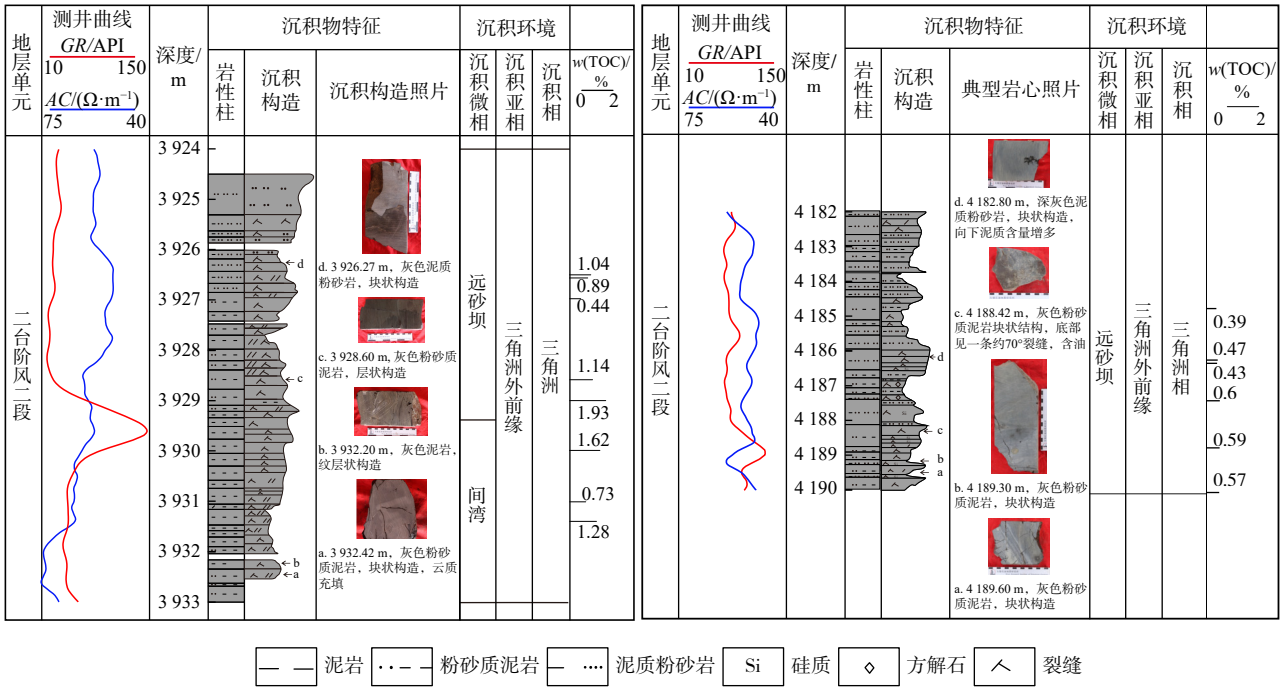


图 9　准噶尔盆地哈山地区风城组三角洲外前缘沉积微相特征

Fig. 9　Sedimentary microfacies characteristics of the outer delta front of the Fengcheng Formation in the Hasan area, Junggar Basin

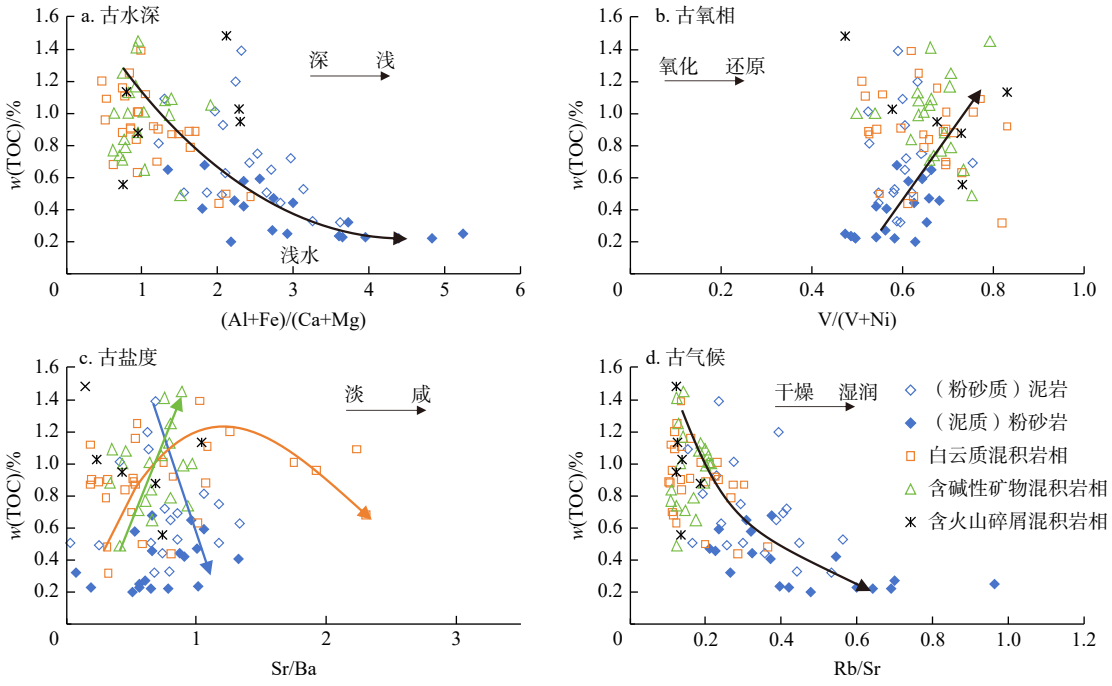


图 10　准噶尔盆地哈山地区风城组不同岩相古环境特征

Fig. 10　Different lithofacies paleoenvironmental characteristics of the Fengcheng Formation in the Hashan area, Junggar Basin

白云质混积岩相，陆源碎屑岩相((粉砂质)泥岩、(泥质)粉砂岩)发育在相对较浅的水深，含火山碎屑岩相深水、浅水均有发育。含碱性矿物混积岩相和白云质混积岩相的 TOC 峰值出现在相对深水的环境中，而含火山碎屑混积岩相以及陆源碎屑岩相在相对浅水中出现了 TOC 峰值，可能由不同岩相的生烃母质差异或有机质富集主控因素不同导致。相对于(泥质)粉砂岩，(粉砂质)泥岩所处水体更深，陆源碎屑输入少，水体安静，有机质也更为富集。

由不同岩相 TOC 与古氧相指数(V/(V+Ni))[25]相关性分析可以看出(图 10b)，随着水体含氧量降低，有机质丰度增加，说明保存条件为有机质富集的重

要因素。不同岩相的有机质丰度峰值均处在还原环境中，说明保存条件不是造成不同岩相有机质丰度差异的主要原因。

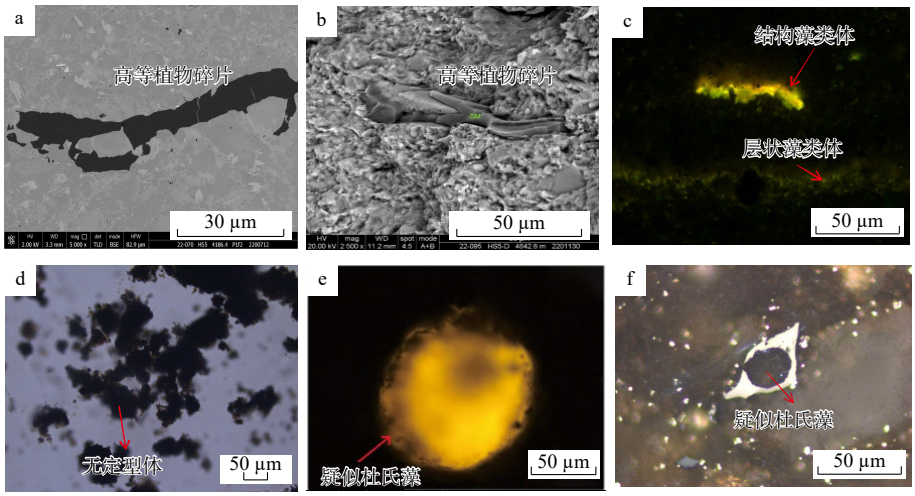
对比不同岩相随古盐度指数(Sr/Ba)[25-26]的有机质丰度变化发现(图 10c)，研究区样品的主体 Sr/Ba＞0.5，处于半咸水–咸水环境，不同岩相的发育受古盐度影响较小，有机质丰度也与古盐度呈弱的相关性。其中，陆源碎屑岩相有机质丰度与古盐度指数呈弱的负相关性，随古盐度增加，陆源碎屑岩相中的有机质丰度降低，而白云质混积岩相的有机质丰度随古盐度增加先增加后降低，说明水体盐度对不同岩相有机质的富集有轻微的影响。由于水体盐度主要影响了生物群落以及保存条件，研究区样品的主体 Sr/Ba＞0.5，保存条件较好，不同岩相有机质丰度随古盐度的变化可能由生物群落不同影响。含碱性矿物混积岩相和白云质混积岩相的生烃母质具有相对更高的耐盐性。

对比不同岩相的古气候指数(Rb/Sr)[27]特征可以看出(图 10d)，随气候由干燥转为湿润，有机质丰度降低，含碱性矿物混积岩相、白云质混积岩相、含火山碎屑混积岩相均在较为干旱的气候下沉积，且 TOC 峰值均出现在较为干旱的古环境中，陆源碎屑岩相在相对湿润的古环境下沉积，TOC 峰值出现在较为潮湿的古环境，也说明不同岩相的成烃生物存在差异。

从不同岩相的古环境特征可以看出，白云质混积岩相和含碱性矿物混积岩相的古环境相对稳定，而陆源碎屑岩相所处古环境特征变化明显，这也导致了白云质混积岩相和含碱性矿物混积岩相的有机质丰度和类型差异较小，而陆源碎屑岩相有机质丰度和类型差异较大。

4.2　母质来源

由前文对比可以看出，哈山地区不同岩相的有机质丰度和生烃潜量没有严格的对应关系，相反的，有机质丰度相对较低的白云质混积岩相生烃潜量却好于陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相(图 5)，也说明其成烃生物可能存在不同。依据扫描电镜、有机岩石学等观察发现，哈山地区风城组的主要成烃生物为浮游藻类(图 11c ~ f)，高等植物碎屑也较为常见(图 11a, b)。与玛湖凹陷的研究稍有不同[14]，除在盐度相对较低的陆源碎屑混积岩相中发现了高等植物碎屑，在碱性矿物最高的含碱性矿物混积岩相也有发现，可能受突发洪水的影响。陆源碎屑岩相藻类植物多为层状发育，具有较强的黄绿色荧光，通过有机岩石学统计腐泥组占主要成分(表 1)，这也是陆源碎屑岩相部分泥岩有机质丰度高、类型好的主要原因。而白云质混积岩相以及含碱性矿物混积岩相则以镜质体为主(表 1)，通过干酪根镜检可观察到大量无定型体，部分无定形体还残留有一些藻类的结构(图 11 d)可能为微生物的活动改造结构藻类体形成[11]，致使白云质混积岩相以及含碱性矿物混积岩相有机质丰度相对较低(图 4)。唐勇等[25]研究表明，哈山–玛湖地区风城组烃源岩的母质来源主要为菌、藻类。CAO 等[28-29]通过扫描电镜观察也得出生物来源主要为菌、藻类的化石证据。夏刘文等[30]通过生标特征揭示，风城组页岩主要的成烃生物为杜氏藻和蓝细菌，沉积中心区的碳酸盐岩区高碱性环境主要发育杜氏藻，由沉积中心区至沉积边缘区



a. HS5 井，4 186.4 m，陆源碎屑岩相；b. HS5 井，4 642.8 m，含碱性矿物混积岩相；c. HS5 井，3 929.28 m，陆源碎屑岩相；d. HS5 井，4 458.45 m，白云质混积岩相；e. FN7 井，4 340 m，白云质混积岩相[27]；f. HS5 井，4 455.95 m，白云质混积岩相

图 11　准噶尔盆地哈山地区风城组成烃生物

Fig. 11　Hydrocarbon organisms of the Fengcheng Formation in the Hasan area, Junggar Basin

水体盐度减小，杜氏藻所占比例降低，蓝细菌含量增加。结合沉积相特征以及对应的沉积岩性，笔者总结了不同沉积相带的生物–环境协同演化模式（图 12），在三角洲外前缘以蓝细菌等微生物为主导，耐盐绿藻（杜氏藻）含量较低，至滨浅湖，蓝细菌等微生物含量降低，类杜氏藻含量增加，在半深湖–深湖则以类杜氏藻为主要生物来源。通过扫描电镜以及有机岩石学方法，在陆源碎屑岩相可见大量层状藻类体以及结构藻类体（图 11c），且白云质混积岩相以及含碱性矿物混积岩相中均发现了疑似杜氏藻的存在（图 11e, f），验证了古环境分析中陆源碎屑岩相与白云质混积岩相和含碱性矿物混积岩相中成烃生物存在差异的结论。研究表明，杜氏藻为油脂含量极高的绿藻，快速热解可产生最高 45% 的生物油[31]，具有高效生烃的特征，这可能是导致白云质混积岩相有机碳测试值低却生烃潜量高的主要原因。

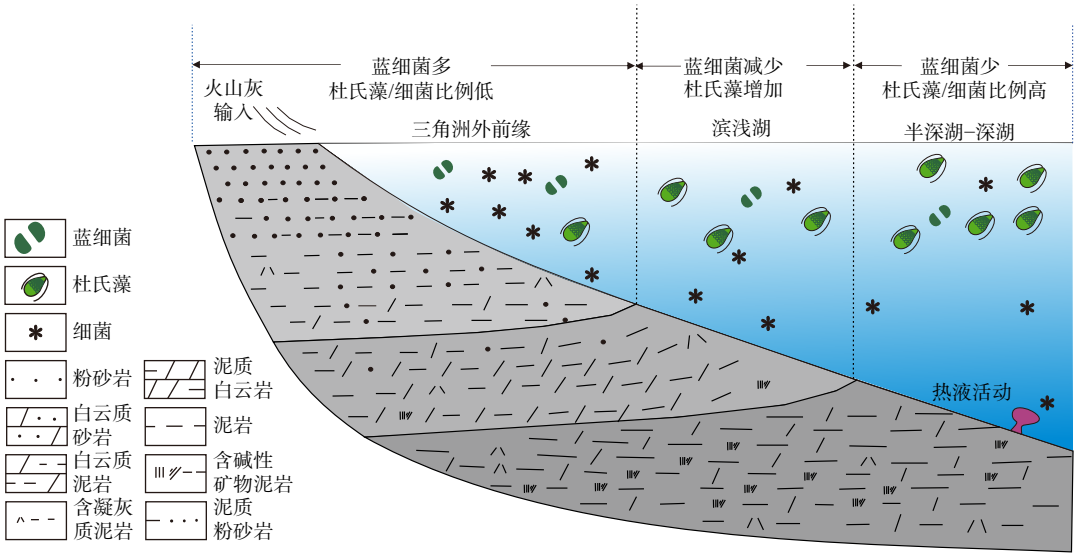


图 12　准噶尔盆地哈山地区风城组生物–环境协同演化模式（据文献 [30] 修改）

Fig. 12　Bioenvironmental co-evolution model of the Fengcheng Formation in the Hashan area, Junggar Basin

4.3　碱性矿物与火山作用

对比沉积位置相近的 HS11 井以及 HSX1 井，同为白云质混积岩相，HSX1 井的有机质丰度和类型均好于 HS11 井，两者的差异主要在于 HSX1 井受火山作用的影响较大（图 2），而从古环境分析（图 10）可看出，含火山碎屑混积岩相在相对浅水、贫氧和低盐等不利于有机质富集的环境中仍有较高的有机质丰度，表明火山作用可能促进了有机质的富集。哈山地区凝灰质物质主要包括角闪石和辉石[11]，因此笔者以凝灰质（角闪石+辉石）含量来表征火山作用对有机质富集的影响，如图 13a 所示，w(TOC)值随凝灰质的增加先增加后减小，凝灰质质量分数在 10% 左右时，w(TOC)值最高，证明少量的火山碎屑有利于有机质富集，而过强的火山作用不利于有机质富集。火山作用影响有机质富集主要体现在 2 个方面，首先火山灰表面伴随着吸附着大量水溶性金属盐，遇水溶解时会释放大量 Fe、Mg、Ca、Zn 等营养元素，从而提高水体的初级生产力。此外，过量的火山喷发会释放大量酸性物质使水体酸化，不利于生物的生长繁殖。王书荣等[32]、KAMO 等[33] 认为酸性物质

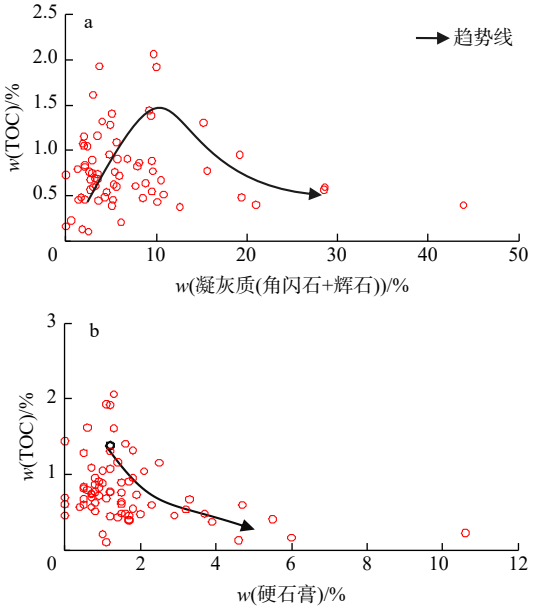


图 13　准噶尔盆地哈山地区风城组特殊环境对有机质丰度的影响

Fig. 13　Influence of special environment of Fengcheng Formation on organic matter abundance in Hashan area, Junggar Basin

会使生物大规模死亡导致大量生烃母质快速埋藏，有利于发育优质烃源岩，而研究区强火山作用主要发生在风一段底部(图 2)，原始生产力匮乏，因此有机质丰度较低。

此外，对比 HS5 井的白云质混积岩相以及含碱性矿物混积岩相，白云质混积岩相的有机质丰度和类型均好于含碱性矿物混积岩相(图 4)。因此可以看出碱性环境对有机质的富集也有很大的影响。哈山地区风城组碱性矿物包括碳钠镁石、碳钠钙石、天然碱等[12]，由于 X-衍射实验不能对 Na^+离子定量表征，以至于难以定量碱性矿物含量。根据碱性矿物的沉积序列，随着盐度增加，会相继沉积碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩[34]，因此笔者以与古盐度正相关的硬石膏($CaSO_4$)含量表征碱性矿物含量。可以看出(图 13b)，随着硬质量分数的增加 w(TOC)值减小，说明碱性矿物对有机质富集有抑制作用。王小军等[14]研究发现，随着碱性矿物的增加，微生物对藻类的改造作用会增强，无定形体增加。这可能是碱性矿物富集致使有机质丰度降低的重要原因。ZHANG 等[35]通过对含氮化合物的研究发现，高盐度可抑制有机质的分子聚合，使碱湖相烃源岩具有更长的生油窗，使烃源岩具有更强的生油潜力，也可能导致最终 TOC 测试结果的低值。此外，碱性矿物的沉淀会降低有机碳的测试结果，由于传统的 TOC 测试时，会将碱性矿物混入，导致 TOC 测试值偏低，通过将含碱性矿物混积岩中伴生的碱性矿物与泥岩简单分离(图 14a)，使样品的碱性矿物含量大量降低后重新测试有机碳含量，结果得出泥岩的有机碳含量要好于未分离前的有机碳测试值(图 14b)，这也导致了含碱性矿物岩相中岩屑的有机碳测试结果要普遍好于岩心测试结果(图 4, 10)。

4.4　成熟度

成熟度不是影响烃源岩品质的直接原因，但会影响对烃源岩品质的判断。对比哈山中段和哈山西段的同岩相可以看出，相较于哈山西段，哈山中段(HS5 井)的有机质丰度偏低且有机质类型偏差(图 4 ~ 6)，而 2 个地区主要为成熟度的不同，对比 2 个地区的成熟度可以看出，哈山西段的烃源岩成熟度 R_o 均值在 0.89%，为低熟–成熟油，而哈山中段的烃源岩成熟度 R_o 均值为 1.3%，为高熟油(图 15a)，由图 15b 可以看出，烃源岩 R_o 均值由 0.89% 至 1.3% 的演化过程中，随着成熟度的增加，烃源岩的生烃潜量(S_1+S_2)会大幅减少。对玛湖凹陷的生排烃过程研究可知，玛湖凹陷烃源岩的生烃高峰 R_o 为 1.0% 左右[36]，

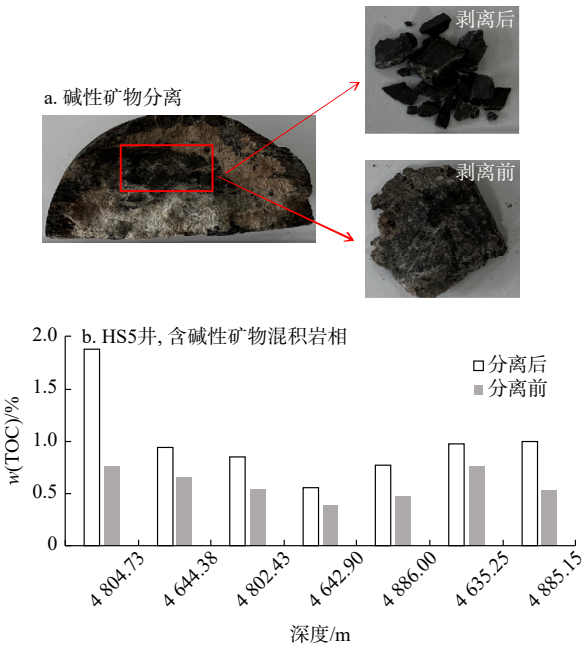


图 14　准噶尔盆地哈山地区风城组含碱性矿物混积岩相泥页岩分离碱性矿物前后 TOC 对比

Fig. 14　TOC comparison before and after stripping of alkaline minerals from the mixed lithofacies mudshale of the Fengcheng Formation in the Hashan area, Junggar Basin

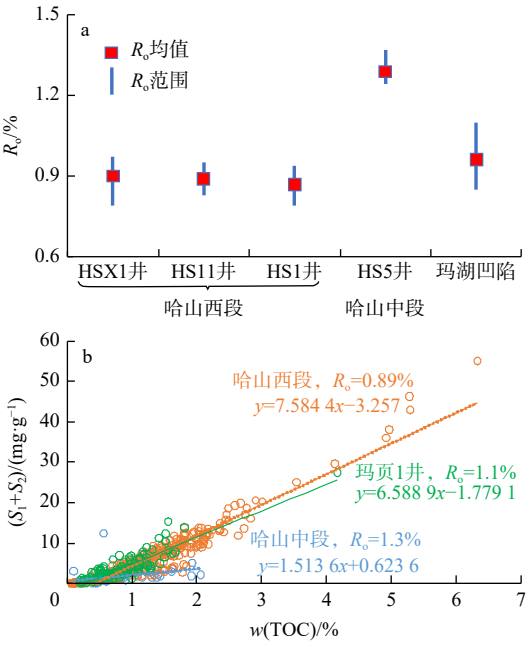


图 15　准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩有机质成熟度 (a) 以及不同成熟度下生烃潜力特征 (b)

Fig. 15　Maturity of organic matter (a) and hydrocarbon generation potential characteristics of source rocks (b) of the Fengcheng Formation in the Hasan area, Junggar Basin

整个生烃高峰持续范围为 0.8% ~ 1.2%[37-38]，而哈山西段的成熟度为刚进入生烃高峰期，哈山中段已经处于生烃高峰尾端，这也导致了哈山中段的烃源岩有机碳测试值低、有机质类型判别结果变差，因此在判别有机质丰度和类型时，需要充分考虑成熟度带来的影响。长期勘探表明，在低成熟度时，产出油的密度较大[39-40]，随着成熟度增加，油质变轻，加上在较高成熟度时经历了大量的生烃阶段，高成熟度区可能更有利于油气的勘探。

研究可知，三角洲外前缘、滨浅湖、半深湖–深湖虽然有沉积环境、成烃生物等方面的差异，但均能发育优质烃源岩，三角洲外前缘相的间湾微相、滨浅湖以及碱矿不发育的深水区域，均为高品质烃源岩发育的有利场所。此外，火山作用影响的地区，发育优质烃源岩的可能性较大。

5 结 论

（1）哈山地区风城组泥页岩主要沉积在三角洲外前缘相，滨浅湖相以及半深湖–深湖相，分别主要沉积了陆源碎屑岩相、白云质混积岩相、含碱性矿物混积岩相，受火山作用影响的层段发育含火山碎屑混积岩相。不同岩相烃源岩品质存在差异，含火山碎屑混积岩相泥页岩有机质丰度最好，*w*(TOC)均值普遍超过了 1.36%，其次为陆源碎屑岩相以及白云质混积岩相，陆源碎屑岩相不同沉积位置有机质丰度差异较大，间湾沉积的纹层状泥岩有机质丰度最高，可达 3.54%，远砂坝沉积的(泥质)粉砂岩有机质丰度普遍较低。白云质混积岩相的有机质丰度较为均等，普遍在 1.2% 左右。含碱性矿物混积岩相的有机质丰度整体较低，部分泥质纹层有机质丰度较高。与有机质丰度相对含量不同，白云质混积岩相泥页岩的生烃潜量优于陆源碎屑岩相以及含火山碎屑岩相。哈山地区风城组泥页岩有机质主体为Ⅰ型–Ⅱ型干酪根，其中陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相有机质类型主要为Ⅰ型–$Ⅱ_1$型，白云质混积岩相泥页岩有机质类型主要为Ⅱ型，哈山中段的 HS5 井有机质类型主要为Ⅱ型–Ⅲ型。哈山西段泥页岩成熟度范围在 0.79% ~ 0.97%，哈山中段成熟度主要在 1.2% ~ 1.37%。

（2）哈山地区风城组烃源岩品质主要受沉积环境、成烃生物、碱性矿物以及火山作用控制。白云质混积岩相、含碱性矿物混积岩相有机质在深水、还原环境、中–高盐度以及干燥条件下更为富集，陆源碎屑岩相以及含火山碎屑混积岩相在相对浅水、贫氧、低盐度、干旱–半干旱环境下有机质更为富集。不同沉积相带成烃生物存在差别，沉积中心区高盐度区发育的杜氏藻具有更高的油气转化率，使白云质混积岩相泥页岩在低有机质丰度下具有较高的生烃潜量。低盐度区绿藻(类杜氏藻)比重减少，蓝细菌增多，生烃转化率降低。高碱性矿物含量会稀释有机碳，降低有机碳测试结果，但碱性环境会抑制有机质的分子聚合，使碱湖相烃源岩具有更长的生油窗，使烃源岩具有更强的生油潜力。适量的火山碎屑为优质烃源岩发育的有利条件。成熟度影响着烃源岩品质的判断，随着成熟度增加，干酪根会逐渐转化形成烃类，进而导致源岩的原始地化参数(包括 *w*(TOC)、*HI* 等)降低。但伴随着大量油气的生成以及油质密度降低，相对高成熟度区域更有利于开发，为下一步页岩油探寻的重点区域。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 何登发，李德生，童晓光. 中国多旋回叠合盆地立体勘探论 [J]. 石油学报，2010，31(5)：695-709.
HE D F, LI D S, TONG X G. Stereoscopic exploration model for multi-cycle superimposed basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 695-709. (in Chinese with English abstract)

[2] 雷德文，阿布力米提·依明，文晓涛，等. 地震方法识别乌夏断裂带风城组白云质灰岩裂缝 [J]. 新疆石油地质，2011，32(5)：525-527.
LEI D W, ABULIMITI Y M, WEN X T, et al. Seismic detection method for identification of fractures in Fengcheng dolomitic limestone in Wuerhe-Xiazijie fault belt, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(5): 525-527.(in Chinese with English abstract)

[3] 曹剑，雷德文，李玉文，等. 古老碱湖优质烃源岩：准噶尔盆地下二叠统风城组 [J]. 石油学报，2015，36(7)：781-790.
CAO J, LEI D W, LI Y W, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790. (in Chinese with English abstract)

[4] 李广龙. 哈山地区石炭系火成岩油气成藏特征及控制因素分析 [D]. 山东 东营：中国石油大学(华东)，2013.
LI G L. Analysis of hydrocarbon accumulation characteristics and controlling factors of Carboniferous igneous rocks in Hashan area[D]. Dongying Shandong: China University of Petroleum (Huadong), 2013. (in Chinese with English abstract)

[5] 韩祥磊，吴倩倩，林会喜，等. 准噶尔盆地北缘哈拉阿拉特山构造带油气输导系统类型及运聚模式 [J]. 天然气地球科学，2016，27(4)：609-618.
HAN X L, WU Q Q, LIN H X, et al. Types of carrier system and models of hydrocarbon migration and accumulation of Hala'alat Mountain structural belt in the northern margin of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 609-618. (in Chinese with English abstract)

[6] 唐勇, 王智强, 庞燕青, 等. 准噶尔盆地西部坳陷二叠系下乌尔禾组烃源岩生烃潜力评价 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(4): 16-28.
TANG Y, WANG Z Q, PANG Y Q, et al. Hydrocarbon-generating potential of source rocks of Permian Lower Urho Formation in western Depression, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(4): 16-28. (in Chinese with English abstract)

[7] 张关龙, 张奎华, 王圣柱, 等. 哈拉阿拉特山石炭系裂缝发育特征及成藏意义 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 9-18.
ZHANG G L, ZHANG K H, WANG S Z, et al. Characteristics of the Carboniferous volcanic fractures and its hydrocarbon accumulation significance in Hala'alat mountains[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(3): 9-18. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘勇, 袁海锋, 高耀, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系-二叠系裂缝充填方解石的成因机制及石油地质意义 [J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2573-2583.
LIU Y, YUAN H F, GAO Y, et al. Genetic mechanism of calcite veins in Carboniferous-Permian volcanic reservoirs in the Hashan area, Junggar Basin and its petroleum geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(11): 2573-2583. (in Chinese with English abstract)

[9] 宋梅远. 准北哈山地区二叠系风城组云质岩储层特征及成因分析 [J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2019, 33(1): 14-18.
SONG M Y. Characteristics and genetic analysis for dolomite rocks reservoir of Permian Fengcheng Formation in Hassan block, the northern Junggar Basin[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2019, 33(1): 14-18. (in Chinese with English abstract)

[10] 刘得光, 周路, 李世宏, 等. 玛湖凹陷风城组烃源岩特征与生烃模式 [J]. 沉积学报, 2020, 38(5): 946-955.
LIU D G, ZHOU L, LI S H, et al. Characteristics of source rocks and hydrocarbon generation models of Fengcheng Formation in Mahu Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(5): 946-955. (in Chinese with English abstract)

[11] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.
ZHI D M, TANG Y, HE W J, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 38-51. (in Chinese with English abstract)

[12] 张奎华, 孙中良, 张关龙, 等. 准噶尔盆地哈山地区下二叠统风城组泥页岩优势岩相与页岩油富集模式 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 593-605.
ZHANG K H, SUN Z L, ZHANG G L, et al. Shale dominant lithofacies and shale oil enrichment model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 593-605. (in Chinese with English abstract)

[13] 姜福杰, 黄任达, 胡涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油地质特征与分级评价 [J]. 石油学报, 2022, 43(7): 899-911.
JIANG F J, HUANG R D, HU T, et al. Geological characteristics and classification evaluation of shale oil in Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 899-911. (in Chinese with English abstract)

[14] 王小军, 王婷婷, 曹剑. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩基本特征及其高效生烃 [J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 9-15.
WANG X J, WANG T T, CAO J. Basic characteristics and highly efficient hydrocarbon generation of alkaline-lacustrine source rocks in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 9-15. (in Chinese with English abstract)

[15] 支东明, 曹剑, 向宝力, 等. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩生烃机理及资源量新认识 [J]. 新疆石油地质, 2016, 37(5): 499-506.
ZHI D M, CAO J, XIANG B L, et al. Fengcheng alkaline lacustrine source rocks of Lower Permian in Mahu Sag in Junggar Basin: Hydrocarbon generation mechanism and petroleum resources reestimation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 499-506. (in Chinese with English abstract)

[16] 白雨, 汪飞, 牛志杰, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩生烃动力学特征 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 116-127.
BAI Y, WANG F, NIU Z J, et al. Hydrocarbon generation kinetics of source rocks of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 116-127. (in Chinese with English abstract)

[17] 孟颖, 王剑, 马万云, 等. 基于细粒岩石类型对玛湖凹陷下二叠统风城组烃源岩分类评价 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1735-1746.
MENG Y, WANG J, MA W Y, et al. Evaluation of hydrocarbon source rock characteristics of Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag based on fine grained sedimentary rock type[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1735-1746. (in Chinese with English abstract)

[18] 李振明, 熊伟, 王斌, 等. 准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 693-704.
LI Z M, XIONG W, WANG B, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 693-704. (in Chinese with English abstract)

[19] 张善文. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区风城组烃源岩的发现及石油地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 145-152.
ZHANG S W. Identification and its petroleum geologic significance of the Fengcheng Formation source rocks in Hala'alat area, the northern margin of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 145-152. (in Chinese with English abstract)

[20] 于洪洲, 王越, 周健, 等. 准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组沉积体系 [J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 396-403.
YU H Z, WANG Y, ZHOU J, et al. Sedimentary system of Permian Fengcheng Formation in Hashan area in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(4): 396-403. (in Chinese with English abstract)

[21] 曾治平, 柳忠泉, 赵乐强, 等. 准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组页岩油储层特征及其控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(1): 25-35.
ZENG Z P, LIU Z Q, ZHAO L Q, et al. Shale oil reservoir characteristics and controlling factors of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, northwestern margin of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 25-35. (in Chinese with English abstract)

[22] 曹强, 周可佳, 王昌丽, 等. 陆相断陷湖盆深层页岩沉积特征及勘探潜力评价: 以板桥凹陷沙三段为例 [J]. 地质科技通报, 2025,

44(5)：106-122.
CAO Q, ZHOU K J, WANG C L, et al. Sedimentary characteristics and exploration potential evaluation of deep shale in continental rift lake: A case study of the Third Member of the Shahejie Formation in the Banqiao Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 106-122. (in Chinese with English abstract)

[23] 宋泽章, 葛冰飞, 王文之, 等. 超深层古油藏的定量表征及其对气藏形成的指示意义：以川中古隆起北斜坡灯影组为例 [J]. 地球科学, 2023, 48(2)：517-532.
SONG Z Z, GE B F, WANG W Z, et al. Quantitative characterization of ultra-deep paleo-oil reservoirs and its indication for deep gas accumulation: A case study on the Dengying Formation, the north slope of central Sichuan Paleo-Uplift[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 517-532. (in Chinese with English abstract)

[24] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境 [J]. 古地理学报, 2003, 5(1)：29-35.
ZHANG Y S, YANG Y Q, QI Z X, et al. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jianghan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1): 29-35. (in Chinese with English abstract)

[25] 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5)：677-692.
TANG Y, ZHENG M L, WANG X T, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 677-692. (in Chinese with English abstract)

[26] 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 等. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式 [J]. 地球科学, 2020, 45(4)：1375-1387.
SUN Z L, WANG F R, HOU Y G, et al. Main controlling factors and modes of organic matter enrichment in Salt Lake shale[J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1375-1387. (in Chinese with English abstract)

[27] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6)：936-946.
FU J H, LI S X, XU L M, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946. (in Chinese with English abstract)

[28] CAO J, XIA L, WANG T. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and hydrocarbon potential[J]. Earth-Science Reviews, 2020(202): 103091.

[29] 曹剑, 张瑞杰, 支东明, 等. 碱湖烃源岩有机−无机相互作用与控烃机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(5)：1619-1641.
CAO J, ZHANG R J, ZHI D M. et al. Unique bimodal oil generation of alkaline-saline lacustrine source rock: Evidences, model and mechanism of organic-inorganic interactions[J]. Scientia Sinica Terrae, 2025, 55(5): 1619-1641. (in Chinese with English abstract)

[30] 夏刘文, 曹剑, 边立曾, 等. 准噶尔盆地玛湖大油区二叠纪碱湖生物−环境协同演化及油源差异性 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(4)：732-746.
XIA L W, CAO J, BIAN L C, et al. Co-evolution of paleo-environment and bio-precursors in a Permian alkaline lake, Mahu Mega-oil Province, Junggar Basin: Implications for oil sources[J]. Scientia Sinica Terrae, 2022, 52(4): 732-746. (in Chinese with English abstract)

[31] FRANCAVILLA M, KAMATEROU P, INTINI S, et al. Cascading microalgae biorefinery: Fast pyrolysis of Dunaliella tertiolecta lipid extracted-residue[J]. Algal Research, 2015, 11: 184-193.

[32] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式 [J]. 石油学报, 2013, 34(6)：1077-1087.
WANG S R, SONG D F, HE D F. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and the evolutionary pattern of tuffaceous source rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1077-1087. (in Chinese with English abstract)

[33] KAMO S L, CZAMANSKE G K, AMELIN Y, et al. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 214(1/2): 75-91.

[34] 黄华, 袁娟梅, 彭伟, 等. 江汉盆地古近系潜江组盐湖沉积特征与成藏模式 [J]. 岩性油气藏, 2021, 33(2)：9-16.
HUANG H, YUAN J M, PENG W, et al. Sedimentary characteristics and reservoir accumulation model of salt lake of Paleogene Qianjiang Formation in Jianghan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(2): 9-16. (in Chinese with English abstract)

[35] ZHANG J K, CAO J, XIANG B L, et al. Constraining multi-stage and protracted oil generation of alkaline lacustrine source rocks by heteroatomic compounds[J]. Organic Geochemistry, 2023, 184: 104668.

[36] TANG Y, HE W J, BAI Y B, et al. Source rock evaluation and hydrocarbon generation model of a Permian alkaline lakes: A case study of the Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Minerals, 2021, 11(6): 644.

[37] 王伟, 王振林, 刘财广, 等. 页岩油甜点评价关键技术及甜点类型划分：以玛湖凹陷二叠系风城组为例 [J]. 地球科学, 2023, 48(1)：223-234.
WANG W, WANG Z L, LIU C G, et al. Key technology of shale oil sweet spot evaluation and sweet spot type division in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 223-234. (in Chinese with English abstract)

[38] 张宇, 周妮, 李际, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩生烃特征 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(32)：13695-13707.
ZHANG Y, ZHOU N, LI J, et al. Hydrocarbon generation characteristics of Permian Fengcheng Formation source rocks in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(32): 13695-13707. (in Chinese with English abstract)

[39] 李守军, 刘晓, 王延章, 等. 哈山地区稠油特征及成因分析 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(4)：29-32.
LI S J, LIU X, WANG Y Z, et al. Heavy-oil properties and genesis in Hashan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4): 29-32. (in Chinese with English abstract)

[40] 蒋俊, 平宏伟, 吴少军, 等. 塔里木盆地库车坳陷南斜坡海陆相来源油识别与混源油贡献定量评价：以牙哈构造带为例 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4)：201-216.
JIANG J, PING H W, WU S J, et al. Identification of oil sources from marine-continental faces source rooks and quantitative evalu-

ation of mixed-source oil contributions in the southern slope of Kuqa Depression, Tarim Basin: A case study of the Yaha structure zone[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 201-216. (in Chinese with English abstract)

Summary for "准噶尔盆地哈山地区风城组烃源岩品质差异性分析"

Quality difference analysis of source rocks in the Fengcheng Formation, Hashan area, Junggar Basin

SUN Zhongliang[1,2,3*], ZHANG Kuihua[4], SONG Zhenxiang[1,2,3], YU Hongzhou[5], WANG Bin[1,2,3], SONG Meiyuan[5], LI Zhiming[1,2,3], CAO Tingting[1,2,3]

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi Jiangsu 214126, China;
2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, RIPEP, SINOPEC, Wuxi Jiangsu 214126, China;
3. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi Jiangsu 214126, China;
4. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong 257015, China;
5. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong 257015, China

* Corresponding author, E-mail: sunzhl8188.syky@sinopec.com

Abstract: Shale oil in the Permian Fengcheng Formation of the Hashan area shows promising momentum, with breakthroughs achieved in multiple wells. Previous research indicates that the Fengcheng Formation in the Hashan area is mainly composed of four lithofacies: terrigenous clastic lithofacies, dolomitic mixed lithofacies, volcanic clastic-bearing mixed lithofacies, and alkaline mineral-bearing mixed lithofacies, within which various types of source rocks have developed. [**Objective**] To further evaluate the quality of these source rocks and the factors controlling it, [**Methods**] this study investigates the sedimentary background and conducts a lithofacies-based evaluation. The aim is to identify lithofacies containing high-quality source rocks and to analyze the controlling factors of source rock quality, thereby clarifying the further exploration directions. [**Results**] The results show that, among the mudstones in the Fengcheng Formation of the Hashan area, the volcanic clastic-bearing mixed lithofacies has the highest total organic matter content, whereas the dolomitic mixed lithofacies has the greatest hydrocarbon generation potential. The kerogen of the mudstones in the Fengcheng Formation of the Hashan area is mainly Type Ⅰ-Ⅱ. The mudstone maturity in the western section of Hashan area ranges from 0.79% to 0.97% R_o, while in the middle section, R_o is mainly between 1.2% and 1.37%. [**Conclusion**] The source rock quality in the Fengcheng Formation of the Hashan area is mainly controlled by sedimentary environment, hydrocarbon-generating parent material, maturity, alkaline minerals, and volcanic activity. Organic matter in dolomitic mixed lithofacies and alkaline mineral-bearing mixed lithofacies is more enriched in deep-water, reducing, medium-to-high salinity, and arid environments. In contrast, organic matter in terrigenous clastic lithofacies and volcanic clastic-bearing mixed lithofacies is more enriched in relatively shallow-water, oxygen-poor, low-salinity, and arid-semi-arid environments. Green algae (dunaliella-like) developed in high-salinity areas of the sedimentary center exhibit higher oil and gas conversion rates, enabling dolomitic mixed-lithofacies mudstones to have high hydrocarbon generation potential even with low organic matter abundance. Increased maturity and alkaline minerals reduce the measured TOC (total organic carbon) content and hydrocarbon generation potential, while an appropriate amount of volcanic clastics provides favorable conditions for the organic matter enrichment.

Key words: Hashan area; Fengcheng Formation; source rock; hydrocarbon generation parent material; alkaline minerals; volcanism; Junggar Basin

Received: 2024-04-09; Revised: 2024-07-09; Accepted: 2024-07-16

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240153