

引用格式:张亮,刘文,吕奇奇,等. 2026. 塔西南山前二叠系普斯格组烃源岩钙质成因及对有机质富集的影响[J]. 沉积学报, 44(5): 1652-1669.
ZHANG Liang, LIU Wen, LÜ QiQi, et al. 2026. Calcite Genesis of Hydrocarbon Source Rocks from the Permian Pusige Formation and Its Impact on Organic Matter Enrichment in the Piedmont of Southwestern Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(5): 1652-1669.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.027 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.027

塔西南山前二叠系普斯格组烃源岩钙质成因及对有机质富集的影响

张亮^{1,2,4,5}, 刘文^{1,2,5}, 吕奇奇³, 李勇^{1,2,4,5}, 孙春燕^{1,2,5}

1. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心塔西南分中心, 新疆库尔勒 841000
3. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100
4. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000
5. 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000

摘要 【目的】塔里木盆地西南坳陷二叠系普斯格组烃源岩钙质含量高, 钙质与有机质关系不清, 影响了烃源岩生烃潜力评价。【方法】通过岩心、薄片、扫描电镜、全岩衍射和地球化学资料等分析, 对塔里木盆地西南坳陷柯克亚周缘二叠系普斯格组烃源岩中钙质赋存状态及成因、有机质分布规律、钙质与有机质的关系进行研究。【结果】二叠系普斯格组烃源岩主要发育砂—泥、灰—泥、砂—灰—泥3种岩相组合类型, 烃源岩中钙质主要以胶结物、颗粒形式存在, 含量上表现出“砂—灰—泥”旋回自下而上先增多再减少的多尺度旋回特征, 具有古老陆源碎屑钙质颗粒、沉积期内碎屑或钙质纹层、成岩期胶结或交代三种成因类型。通过多尺度旋回精细分析, 有机质主要富集在多尺度“砂—灰—泥”沉积旋回顶部, 真正主力生烃物质可能是旋回顶部层状有机质。结合烃源岩地球化学指标分析, 方解石等碳酸盐矿物含量与总有机碳(TOC)、生烃潜量(PG)、氢指数(HI)等岩石热解参数具有负相关性, 表现出高钙质、低热解参数的特征, 内在原因是钙质主要赋存在旋回底部和中部的砂质层和钙质层, 沉积水动力条件较强, 不利于有机质的富集和保存。【结论】多尺度“砂—灰—泥”沉积旋回下的高钙质烃源岩在生烃条件、排烃效率、油气运移等方面具有特殊的优势, 暗示柯克亚周缘二叠系普斯格组烃源岩可能具备巨大的生烃潜力。

关键词 塔里木盆地; 西南坳陷; 二叠系; 普斯格组; 钙质成因; 生烃潜力

第一作者 张亮, 男, 1982年出生, 硕士, 高级工程师, 油气地质勘探, E-mail: zhliang-tlm@petrochina.com.cn

通信作者 刘文, 男, 博士, 工程师, 油气地球化学与成藏, E-mail: liuwen-tlm@petrochina.com.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)05-1652-18

0 引言

西南坳陷是塔里木盆地最为重要的含油气地区之一, 面积大、资源量丰富, 其十分复杂的构造及沉积条件导致该地区油气勘探程度低(杜金虎等, 2011; 杨学文等, 2021; 王清华等, 2023, 2024)。自1977年柯克亚气田发现之后, 经过系统的成藏研究, 认为柯克亚气田存在深部二叠系烃源岩贡献(杜金虎等, 2011; 莫午零等, 2013; 王强等, 2014; 胡健等, 2015; 韩文学等, 2017; 黄文宇等, 2022)。

2024年, 柯东构造带叶探1井、皮山1井在二叠系棋盘组碎屑岩获工业油气流, 甫探1井在石炭系—二叠系碳酸盐岩获工业油流, 再次证实了二叠系烃源岩的巨大潜力(王清华等, 2023, 2024)。柯克亚周缘二叠系普斯格组为该地区主力烃源岩(何登发等, 2013; 王静彬等, 2017; 王清华等, 2024), 相较于传统的海相或湖相泥质烃源岩, 普斯格组烃源岩中钙质含量普遍较高, CaO含量介于6.3%~16.3%, 平均为12.3%, 碳酸盐矿物含量介于19.0%~49.3%, 平均为37.0%。

收稿日期: 2025-04-08; 修回日期: 2025-07-24; 录用日期: 2025-10-21; 网络出版日期: 2025-10-21

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项课题(2025ZD1400505); 中国石油天然气集团有限公司科技项目(2023ZZ14YJ02); 新疆维吾尔自治区科技创新团队项目(2024TSYCTD0008)

这种特殊的高钙质细粒沉积岩在国内外均有发现(秦建中等,2010;陈方举,2015;吴安彬等,2020;孔祥晔,2023),并对钙质的赋存状态及成因、钙质对储层物性的影响、钙质与油气富集关系等进行了相关研究。细粒沉积岩中钙质具有微生物成因、成岩成因、综合成因等类型(Schulz *et al.*, 2015; 王勇等, 2017; Cotton *et al.*, 2020; 熊周海, 2021; 卢龙飞等, 2024),对应的具有沉积、生物、成岩等3种成因(Zhang *et al.*, 2014; Kaźmierczak *et al.*, 2015; Tlili *et al.*, 2021; 卢龙飞等, 2024)。钙质泥岩多形成于水体分层明显、藻类生长丰富、微生物发育、沉积缓慢且水体开阔的微咸水湖相环境(陈方举, 2015),对钙质成因研究可反推优质泥质烃源岩的形成演化环境(樊婷婷等, 2023)。另外,细粒沉积岩中的钙质尤其是方解石会对其储集物性、油气的赋存和分布产生一定的影响(熊周海, 2021)。碳酸盐晶间孔是富碳酸盐的湖相细粒沉积岩储层中最重要的孔隙之一(Wang and Wang, 2020),同时方解石含量不同的页岩,其物性差异会造成含油性的差异(宁方兴等, 2017)。然而,目前对于这种烃源岩中钙质分布规律、有机质分布规律,以及钙质与有机质关系的研究较少(谢寅符和李洪奇, 2005; 韩如冰等, 2014),深入研究二叠系普斯格组烃源岩中钙质特征及与有机质的关系,明确高钙烃源岩有机质富集规律,对寻找优质烃源岩和确定有利勘探区十分重要。

因此,本文将对二叠系普斯格组烃源岩的岩石学特征、钙质赋存特征、成因及与有机质的关系进行系统研究,利用浅钻井宏观岩心观察,分析厘米级以上钙质组分宏观赋存状态和旋回发育特征,通过普通薄片观察毫米—微米级钙质分布状态,结合扫描电镜等资料进一步明确微米级钙质的赋存方式和结晶习性,厘清钙质与泥质、有机质之间的耦合关系,明确高钙烃源岩中有机质分布规律和富集特征,为研究钙质对烃源岩生排烃影响提供地质依据,为塔西南山前地区高钙烃源岩评价及生烃潜力评价提供指导。

1 地质背景

塔里木盆地西南缘位于小克拉通微地块边缘,表现为多旋回构造演化的特征。从罗迪尼亚超大陆裂解到盘古大陆汇聚,先后经历了四期从伸展—挤压的旋回,表现为轻开合—软碰撞特点,包括第

一期青白口—震旦纪裂陷和早奥陶世挤压冲断构造旋回、第二期中奥陶世—早泥盆世弱伸展和中泥盆世挤压冲断旋回、第三期晚泥盆世—中二叠世伸展和晚二叠世—三叠纪挤压冲断旋回、第四期侏罗纪—古新世伸展和始新世以来的大规模挤压冲断旋回,每个构造旋回都经历了早期伸展到后期挤压的继承性发育过程,均发育独立的烃储盖组合,现今塔里木西南边缘为南塔里木主地块南部边缘与奥依塔格—铁克里克一线微地块碰撞形成的复合古冲断带。其中,第三期伸展—挤压旋回控制了石炭系—二叠系烃源岩和规模储层的发育,泥盆纪末—二叠纪古特提斯洋开启,塔西南山前形成了海相—海陆过渡相—陆相的沉积体系,自上而下整体发育一个一级“砂—灰—泥”旋回,沉积厚度超过4 000 m(图1)。海西期,塔里木盆地位于古特提斯洋北部,处于被动大陆边缘,在泥盆系古地貌之上,沉积了厚层石炭系—二叠系碳酸盐岩。棋盘组沉积期,古特提斯洋向北俯冲,昆仑山构造抬升,由北西向东南逐渐转为陆相沉积,东段柯克亚周缘地区主要发育扇三角洲前缘优质砂岩储层,西段齐美干—喀什凹陷地区为残余海湾,发育海湾潟湖相烃源岩;普斯格组沉积期,受频繁海侵影响,发育厚层暗色钙质泥岩,为一套规模海陆交互相烃源岩。二叠系棋盘组—普斯格组为一个二级“砂—灰—泥”旋回,其中普斯格组内部至少发育2个三级(百米级)“砂—灰—泥”旋回组合(图1)。杜瓦组沉积期,全面转为陆相沉积,主要发育陆内滨浅湖亚相。印支期,塔里木板块的西昆仑山和西天山山前受构造挤压整体抬升,缺失三叠系,山前普遍发育多排古生界逆冲断裂带,构造逆掩叠置,形成一系列叠瓦冲断构造。

塔西南山前二叠系普斯格组岩性主要为深灰色钙质泥岩夹灰色泥灰岩、浅灰色钙质粉砂岩,总面积约 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$,成熟度(R_o)大于0.5%的有效烃源岩面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图2),从山前向盆地内逐渐减薄。柯克亚周缘地区为普斯格组烃源岩生烃中心,面积约 $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度普遍大于200 m,叶探1井区烃源岩厚度超过800 m。柯克亚周缘二叠系普斯格组烃源岩有机碳(TOC)含量介于0.50%~4.39%,生烃潜能(PG)介于2.0~22.6 mg/g,为中等—好烃源岩;烃源岩成熟度介于0.5%~1.8%,处于成熟—高成熟阶段,以生凝析油气和湿气为主。

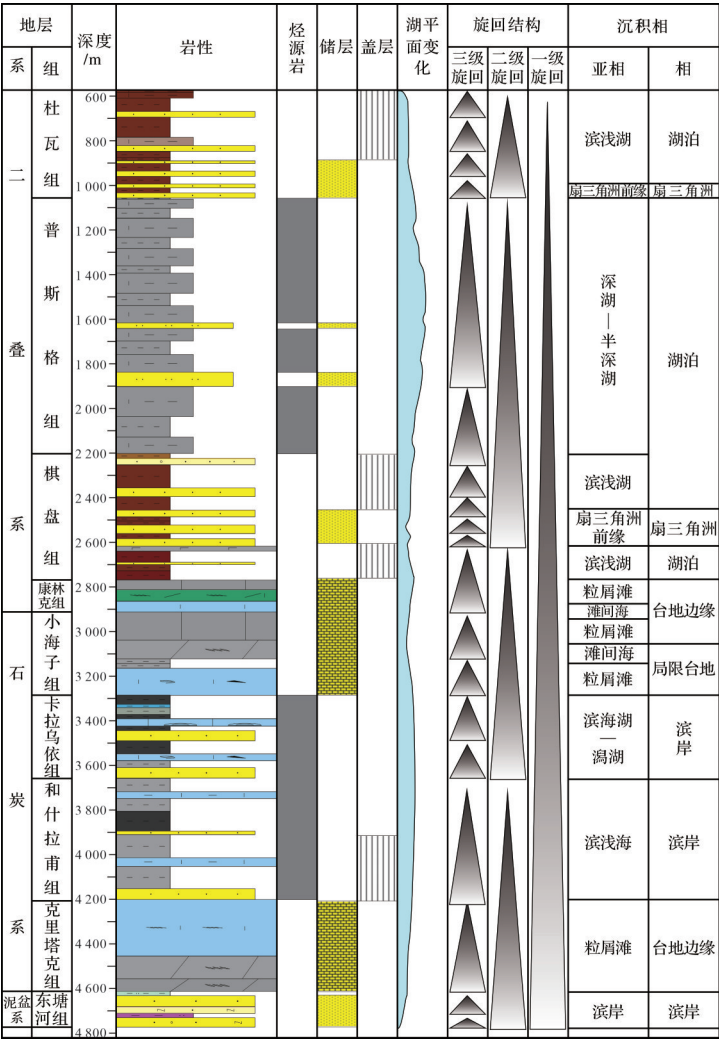


图1 塔里木盆地西南坳陷泥盆系一二叠系沉积旋回特征

Fig. 1 Depositional cycle characteristics of the Devonian to Permian strata in the southwestern depression of Tarim Basin

2 实验样品和测试方法

本次研究共采集塔西南山前柯克亚周缘二叠系普斯格组岩心样品约87块,来自1口全井段取心的浅钻井叶浅1井(27.3~539.4 m)和3口普斯格组取心的井甫沙2井(5 349.2~5 358.3 m、5 500~5 508 m)、甫探1井(4 379~4 395 m)和阳1井(1 914.3~1 916.8 m、2 140.7~2 148.4 m、2 547.3~2 552.3 m、2 642.9~2 646.4 m)(图2b),对岩心样品进行了岩石薄片鉴定、扫描电镜观察及能谱扫描、全岩X射线衍射分析、岩石热解分析和主微量元素分析,并选取了乌鲁木齐塘、杜瓦剖面普斯格组样品进行U-Pb定年,以上所有实验测试均严格按照国家行业实验规范操作完成。全岩X射线衍射和岩石热解分析在中国石油塔里木油田实验检测院进行,岩石热解分析由OGE-V

岩石热解仪完成,全岩X射线衍射分析由Ultima IV-X射线衍射仪完成,测量误差低于5%。扫描电镜及主微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心进行,扫描电镜观察及能谱扫描由Phenom Pharios场发射扫描电镜完成;主量元素分析由Agilent Technologies 7850电感耦合等离子体质谱仪完成,微量元素分析由iCAP TQ等离子体质谱仪完成,测量误差低于5%。针对岩石中纹层频繁变化的特点,以叶浅1井499.6~500.1 m岩心为代表,采用线切割的方法尽可能将纹层逐层分开、单独分析。

用于U-Pb定年的岩石样品由广州市拓岩检测技术有限公司进行锆石挑选、制靶和阴极发光照相。锆石按常规方法分选后在双目镜下挑选,将分选锆石用双面胶粘在玻璃片上,罩上一英寸的PVC环,环内侧涂上凡士林,然后将环氧树脂和固化剂进行充

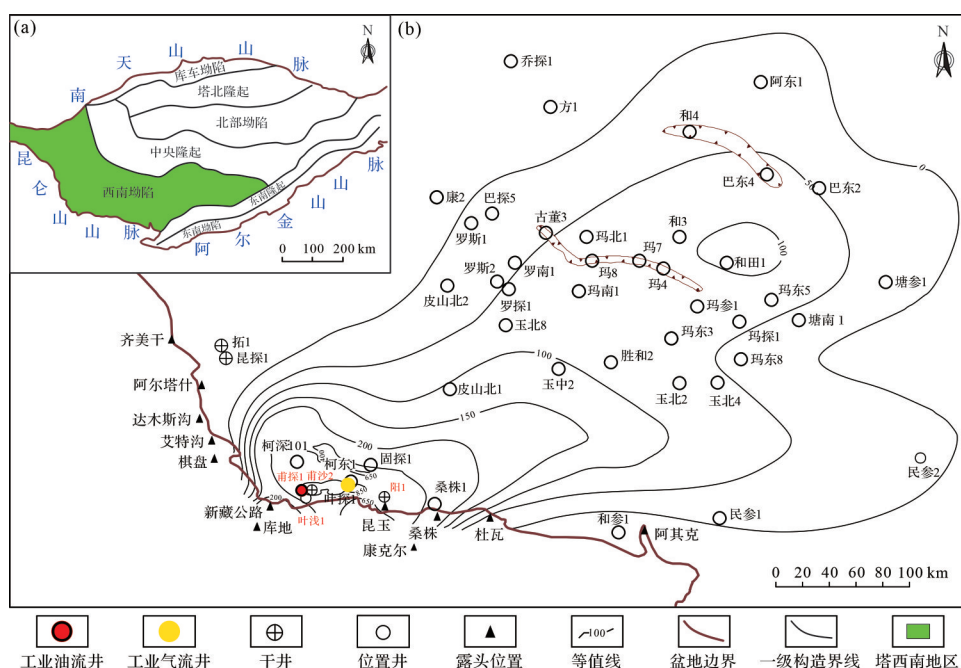


图2 塔里木盆地西南坳陷区域构造位置(a)及二叠系普斯格组烃源岩厚度分布图(b)

Fig. 2 Structural map of the study area (a) and thickness map of the hydrocarbon source rocks of the Permian Pusige Formation (b) in the southwestern depression of Tarim Basin

分混合后注入PVC环中,待树脂充分固化后将样品靶从玻璃片上剥离并对其进行打磨和抛光,最后对靶上样品进行显微镜下的反射光、透射光以及阴极发光(CL)照相。锆石阴极发光照相使用的是TESCAN MIRA3场发射扫描电镜,工作电压10 kV。锆石U-Pb同位素定年在浙江大学地球科学学院LA-ICP-MS实验室由激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成,加权平均年龄结果置信度为95%,使用的激光剥蚀系统(LA)是美国Teledyne CETAC technologies公司生产的Analyte HE,配有工作波长为193 nm的Compex102ArF准分子激光器,与之联用的是美国ThermoFisher公司生产的iCAP RQ电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),将激光微束聚焦于样品表面使之熔蚀气化,由载气将样品微粒送入等离子体中电离,再经质谱系统进行质量过滤,最后用接收器分别检测不同质荷比的离子。

3 二叠系普斯格组烃源岩岩石学特征

通过岩心样品全岩X射线衍射分析,普斯格组烃源岩矿物组成以碳酸盐矿物和长英质矿物为主,黏土矿物次之(图3),整体表现出钙质含量高的特征。碳酸盐矿物含量介于23%~57%,平均含量为

46%,其中方解石含量介于4%~41%,平均值为24%(图4),白云石含量占比较低,约12%;长英质矿物组分含量介于20%~56%,平均含量为33%,石英含量介于12%~36%,平均含量为18%,斜长石平均含量约占15%,钾长石含量较低;黏土矿物含量介于5%~30%,平均含量为15%。

二叠系普斯格组钙质泥岩主要发育在静水环境,纹层状和块状构造发育。纹层状层理在研究区最为发育,纹层厚度通常小于1 cm,岩心上表现为明显的明暗相间的纹层,形状多表现为平直状以及微波状,纹层间相互紧密排列,可见纹层被微裂缝和微断层错断或弯曲变形。镜下纹层界限清晰,成分较复杂,纹层类型主要包括方解石、粉砂质及泥质纹层,纹层状层理在镜下多由两种或两种以上的矿物纹层组合而成。

3.1 岩相组合特征

岩相是在一定环境中形成的岩石类型及组合,能在一定程度上反映沉积环境,但由于构造背景与沉积环境的差异,泥页岩岩性较复杂,不同盆地的岩相划分方案难以通用。本文主要基于岩性、岩石矿物组成和沉积构造进行岩相划分(段宏亮和杨保良,2024;张洪等,2024),通过岩心精细描述、镜下薄片鉴定和全岩X射线衍射分析,识别出粉砂岩、泥质粉砂岩、泥

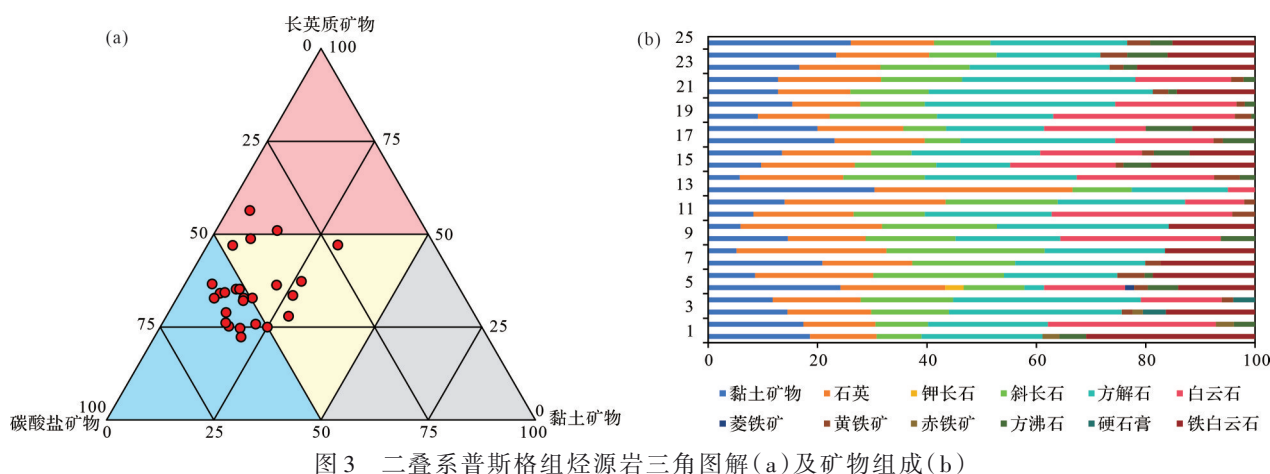


图3 二叠系普斯格组烃源岩三角图解(a)及矿物组成(b)

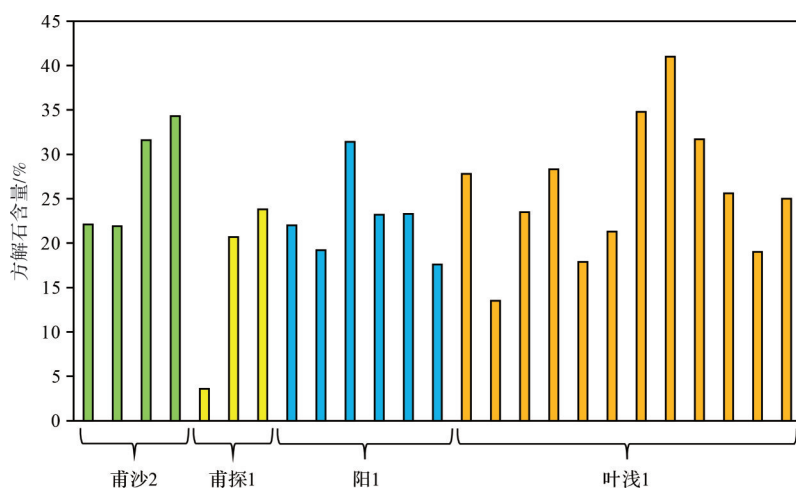


图4 二叠系普斯格组烃源岩钙质含量统计图

Fig. 4 Calcium content statistics chart of the hydrocarbon source rocks in the Permian Pusige Formation

岩、灰质泥岩和泥晶灰岩等5种岩性,发育纹层状、块状2种沉积构造,共划分出纹层状粉砂岩相、纹层状含粉砂泥岩相、纹层状泥晶灰岩相、纹层状灰质泥岩相、纹层状泥岩相及块状泥岩相6种岩相类型(图5),最后结合垂向叠置关系划分出3种岩相组合类型。

3.1.1 砂—泥组合

该组合主要由纹层状粉砂岩相、纹层状含粉砂泥岩相与纹层状泥岩相组成,垂向上自下而上可见纹层状粉砂岩相—纹层状含粉砂泥岩相—纹层状泥岩相、纹层状含粉砂泥岩相—纹层状泥岩相组成的2种韵律层,整体呈现出向上粒度变细、厚度变薄的趋势;该组合下部发育砂纹层理,上部以水平层理为主,岩心上表现为毫米级至厘米级的泥岩层与粉砂质层互层,粉砂质层以浅灰色为主,泥岩层颜色更深且质地均一(图5a),为弱水动力至静水环境的产物。

镜下观察该组合由粉砂质纹层与泥质纹层构成,各纹层间界面清晰,暗色纹层为富黏土矿物纹层,呈致密块状或絮状结构,含少量微晶碳酸盐矿物;浅色层为粉砂质纹层,其碎屑颗粒平行纹层定向排列,连续性较好,可见由于差异压实作用使粉砂条带变形(图5b),此类组合内构造缝较为发育,缝内主要被方解石全充填(图5c)。

3.1.2 灰—泥组合

该组合主要由纹层状泥晶灰岩相、纹层状灰质泥岩相与纹层状或块状泥岩相组成,其下部以纹层状泥晶灰岩相或纹层状灰质泥岩相为主,向上过渡为纹层状泥岩相或块状泥岩相。该组合岩石颜色整体相对较深,以灰色—深灰色为主,灰质成分多以透镜状或纹层状产出,明暗纹层界限较清晰(图5d),为水体相对较深的静水沉积产物。

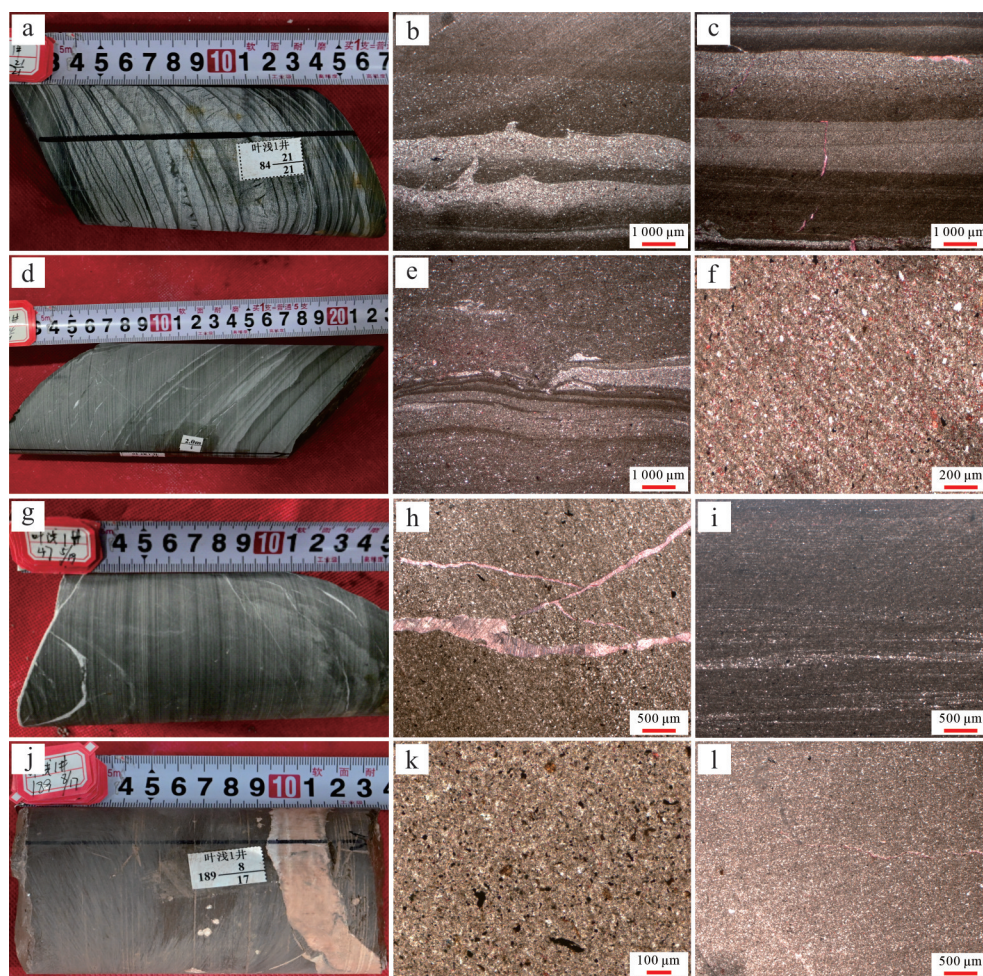


图5 研究区二叠系普斯格组烃源岩岩相类型及特征

(a)灰色含灰粉砂质泥岩相,具水平层理,叶浅1井,244.66 m;(b)纹层状含粉砂泥岩,差异压实作用使粉砂条带变形,叶浅1井,307.28 m,单偏光;(c)纹层状含粉砂泥岩,构造缝和收缩缝内方解石全充填,叶浅1井,442.82 m,单偏光;(d)灰色水平层理含灰泥岩,可见裂缝,被方解石全充填,叶浅1井,189.99 m;(e)纹层状灰质泥岩,粉砂纹层中粒间充填钙质胶结物,泥质纹层中钙质与泥质混杂在一起同时沉积,甫沙2井,5 504.80 m,单偏光;(f)纹层状灰质泥岩,泥质与钙质均匀混合同时沉积,叶浅1井,157.83 m,单偏光;(g)灰黑色水平层理含灰泥岩,见构造缝发育,被方解石全充填,叶浅1井,74.09 m;(h)纹层状泥岩,构造缝内方解石全充填,叶浅1井,425.48 m,单偏光;(i)纹层状泥岩,粉砂纹层内分布少量钙质颗粒,叶浅1井,294.5 m,单偏光;(j)褐色块状泥岩相,见斑点状石膏及被石膏全充填的构造缝,叶浅1井,557.46 m;(k)块状泥岩相,炭屑碎片,偶见钙质颗粒,叶浅1井,430.3 m,单偏光;(l)块状泥岩,构造缝内方解石全充填,单偏光,叶浅1井,279.74 m

Fig. 5 Facies types and characteristics of the hydrocarbon source rocks in the Permian Pusige Formation at the study area

镜下观察该组合主要由两种纹层组成(图5e,f),构成常见明暗交替的韵律层,纹层主要呈平直状,少见微波状,界面清晰,无生物扰动破坏,暗色层为富有机质黏土纹层,亮色层主要为亮晶或泥晶级别的方解石纹层。相较于方解石纹层,泥质纹层较薄,更加平直稳定,其间夹少量陆源粉砂质纹层。

3.1.3 砂—灰—泥组合

该组合自下而上由纹层状粉砂岩相(纹层状含粉砂泥岩相)、纹层状灰质泥岩相与纹层状泥岩相(块状泥岩相)构成的韵律层组成,颜色以浅灰色—深灰色为主,砂纹层理、透镜状层理、水平层理较为发育,岩心上表现为毫米级至厘米级的粉砂质层、钙

质层与泥岩层互层,纹层连续且平直,偶见波状或透镜状纹层(图5g),该组合为弱水动力至静水环境频繁变化形成的产物。

镜下观察纹层连续且平直(图5h),偶见波状或透镜状纹层,主要由暗色泥质纹层和亮色粉砂质及方解石纹层构成(图5i),以泥质纹层为主,三类纹层交替发育,形成明暗韵律(图5i)。

3.2 沉积旋回特征

结合前人研究,山前二叠系普斯格组纵向上发育2个百米级(三级)沉积旋回,可细分为上百个米级旋回(图6)。岩心上,普斯格组钙质泥岩具有砂—泥、灰—泥、砂—灰—泥3种岩相组合,每一种

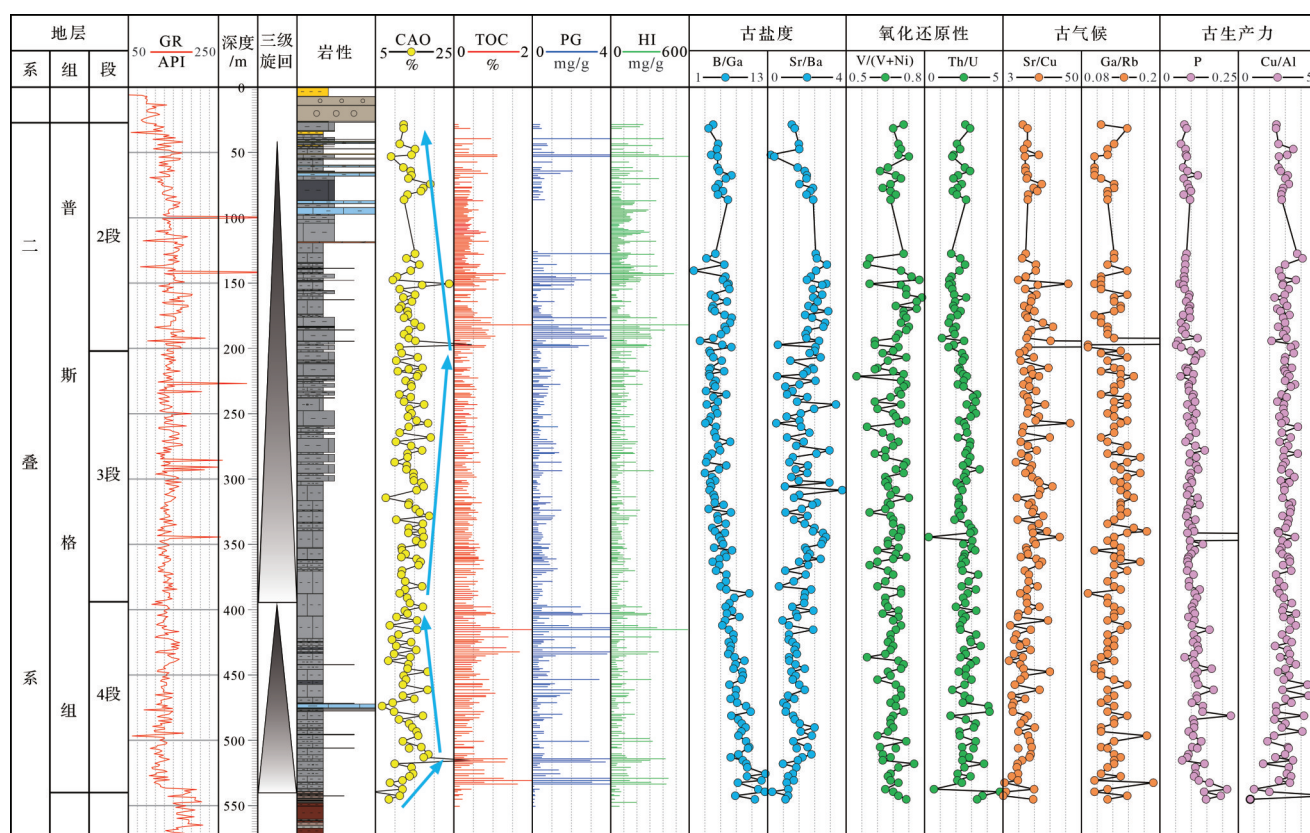


图6 叶浅1井二叠系普斯格组烃源岩有机质—古环境综合柱状图

Fig. 6 Integrated stratigraphic section of organic matter and paleoenvironment in the Permian Pusige Formation at well Yeqian 1

组合均代表一个厘米级沉积旋回,多组合叠加构成米级沉积旋回,这些共同构成普斯格组多尺度“砂—灰—泥”沉积旋回的特征。以叶浅1井499.6~500.1 m岩心为例,整体表现为砂质纹层、钙质纹层先增多后减少,而泥质纹层先减少后增多的“砂—灰—泥”米级沉积旋回特征(图7),多期“砂—灰—泥”米级旋回表明普斯格组沉积期湖平面呈现周期性频繁变化的特点。进一步观察,该段岩心可大致识别出6个“砂—灰—泥”厘米级沉积旋回(图7),下部以发育砂—灰—泥组合、砂—泥组合为主,由下至上纹层状粉砂岩相(纹层状含粉砂泥岩相)沉积厚度逐渐减薄,粉砂质含量降低;上部主要发育灰—泥组合,往上纹层状泥晶灰岩相(纹层状灰质泥岩相)和纹层状泥岩相(块状泥岩相)沉积厚度逐渐变多(图7)。在更小尺度下,同样表现为“砂—灰—泥”组合频繁变化特征(图5b,c),旋回下部以砂质或钙质纹层为主,向上泥质含量增加,以泥质纹层或纯泥岩为主,表现为毫米—微米级沉积旋回变化。

4 普斯格组烃源岩钙质赋存类型及成因

4.1 普斯格组烃源岩钙质赋存类型及分布

通过对叶浅1井、甫沙2井、甫探1井、阳1井普斯格组岩心进行观察,烃源岩中钙质主要存在两种赋存类型:胶结物/交代物形式、颗粒形式,以颗粒形式存在的钙质又可细分为钙质微粒、内碎屑及陆源钙质颗粒组成的纹层等类型。

4.1.1 以胶结物/交代物形式存在的钙质

普斯格组烃源岩中普遍发育水平层理及生物潜穴(图8a,c),镜下钙质均以方解石胶结物形式存在。其中,粒间孔中充填的方解石均呈微晶—粉晶、半自形状,晶径介于23~40 μm (图8b,d);但部分方解石颗粒晶体粗大、具交代残余结构,可见明显的聚片双晶结构(图8d,e),推测主要为后期交代长石颗粒形成,呈粉—细晶、他形—半自形状组成浑圆状的斑团,阴极发光下呈橘红色浑圆斑团状分布(图8f),整体含量介于2%~10%。

此外,普斯格组岩心上至少发育两期裂缝,裂缝

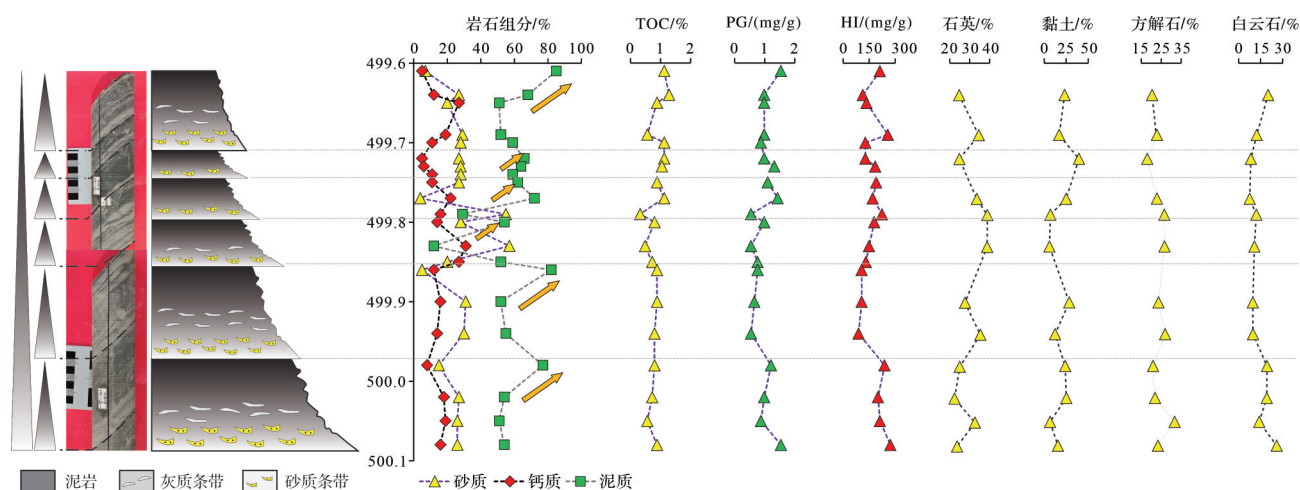


图7 叶浅1井二叠系普斯格组烃源岩米级沉积旋回特征

Fig. 7 Permian Pusige Formation hydrocarbon source rock meter-scale depositional cycle characteristics of well Yeqian1

密度多在1~10条/m,且普遍被方解石脉充填(图8a, g)。第一期为水平—网状的微缝,缝宽0.1~0.3 cm,被方解石全充填,局部具扩容现象;第二期裂缝为高角度的斜交微缝,截穿第一期裂缝,缝宽介于0.05~0.1 cm(图8g)。镜下可见多期次的微裂缝被晶粒方解石充填(红色)(图8h),微裂缝密度可达7条/cm,缝宽0.1~0.5 mm;扫描电镜下裂缝方解石呈条带状分布,以自形一半自形晶体为主(图8i)。

4.1.2 以颗粒形式存在的钙质

1) 钙质微粒

钙质微粒整体以细小微晶方解石组成的斑团均匀分布于泥质杂基中(图8j),方解石矿物颗粒较小,以微米级为主,阴极发光下呈暗橘红色(图8k, l),含量介于5%~10%;扫描电镜下斑团中的单个微米级方解石被黏土基质包围,呈微晶、他形一半自形形状,晶径介于13~50 μm (图8m)。这种钙质微粒多为早期沉积形成,也可能是成岩胶结作用形成,由此推测二叠系普斯格组沉积水体可能为半咸水—咸水,但需要进一步分析。

2) 内碎屑及陆源钙质颗粒组成的纹层

内碎屑纹层主要由盆内碳酸盐内碎屑(白云质)组成(图8n~p),常与陆源泥砂(薄片为红色)混合堆积,单个堆积的纹层厚度多介于0.5~5.0 mm,少数介于10~20 mm,密度为0~20条/m。内碎屑颗粒类型包括砂屑、鲕粒,粒径介于0.2~0.4 mm,在纹层中的含量介于20%~40%。

4.1.3 钙质分布规律

二叠系普斯格组烃源岩中钙质分布具有明显的

规律性。从钙质赋存类型上看,以胶结物/交代物形式存在的钙质多发育在旋回底部砂岩之中,或构造破碎强烈、裂缝发育的位置;钙质微粒多以散点式零星分布于旋回顶部泥岩中;内碎屑及陆源钙质颗粒组成的纹层多见于旋回中部钙质纹层/条带中。从岩相组合上看,砂—泥或灰—泥组合,钙质主要分布于旋回下部的砂岩或灰岩;砂—灰—泥组合,钙质主要分布于旋回中部的灰岩,在旋回顶部泥岩中含量最低。从沉积旋回上看,百米级旋回整体表现为含量先增多再减少的特征(图6),米级旋回钙质含量同样表现出先增多再减少的特征,整体上由旋回底部的16%(500.08 m)增至中部的31%(499.83 m),到旋回顶部降至5%(499.61 m)(图7);在6个厘米级旋回上,旋回的下部(砂质条带段)钙质含量多介于15%~20%,中部(含灰质泥岩段)钙质含量多介于20%~35%,上部(块状泥岩段)钙质含量多介于5%~15%,也就是说普斯格组烃源岩钙质分布同样具有多尺度旋回的特征。

4.2 普斯格组烃源岩钙质成因

研究发现,塔西南山前二叠系普斯格组烃源岩钙质包括陆源碎屑钙质颗粒、内碎屑或钙质纹层、胶结或交代钙质三种成因类型(图9),以内碎屑或钙质纹层成因为主,次为胶结或交代成因,陆源碎屑来源较少。

4.2.1 陆源碎屑钙质颗粒

由于普斯格组岩性偏细,砂质条带以石英粉砂为主,镜下未发现确切的陆源碎屑钙质颗粒来源证据。但在晚古生代,塔里木陆块西南缘地处古特提

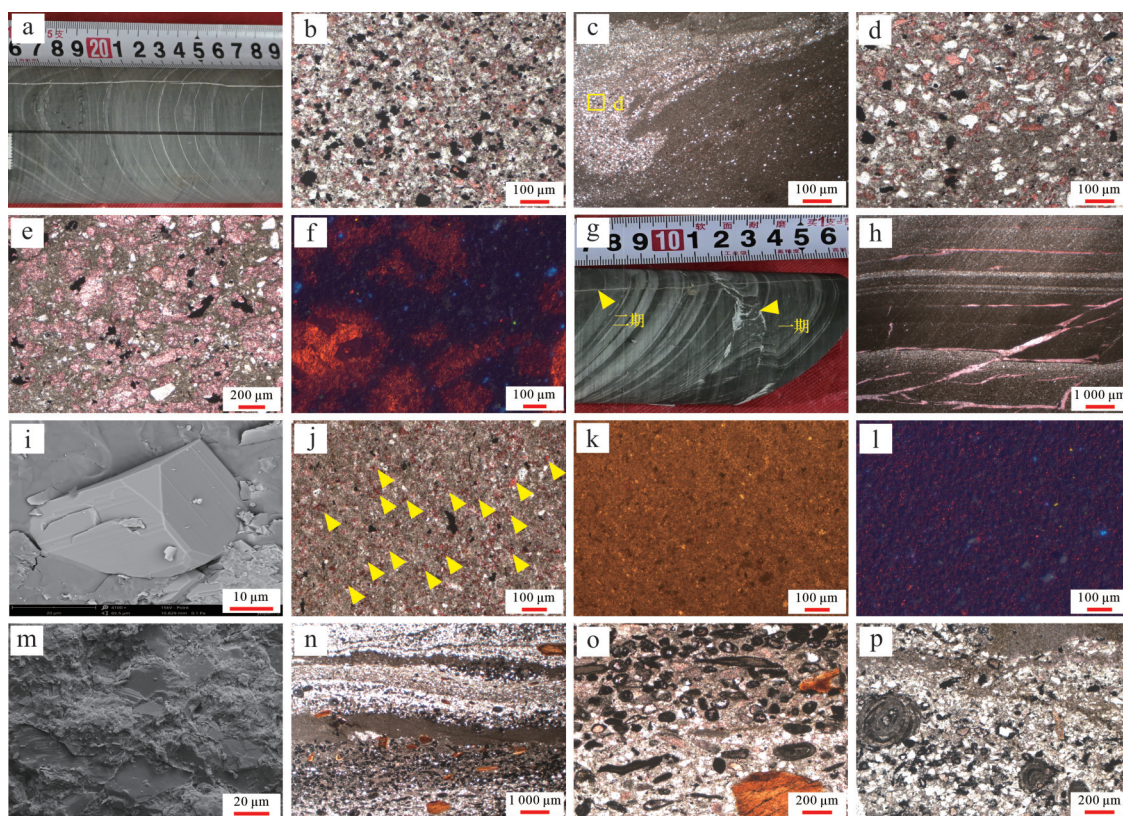


图8 研究区二叠系普斯格组烃源岩中钙质赋存特征

(a)深灰色含钙质泥岩,夹泥质粉砂纹层,叶浅1井,395.12~395.43 m; (b)水平层理微观特征,由泥质粉砂岩组成,红色为经染色后的方解石,呈微晶—粉晶、半自形状充填于砂质颗粒的粒间孔中,黑色为黄铁矿,叶浅1井,297.62 m,单偏光; (c)含钙质粉砂质泥岩,生物潜穴中粉砂集中,粒间孔见方解石胶结物(红色),叶浅1井,168.58 m,单偏光; (d)潜穴粉砂充填物,图c局部放大特征,方解石以半自形状充填于颗粒间,叶浅1井,168.58 m,单偏光; (e)钙质泥岩,钙质斑块呈中细晶斑团结构(红色),钙质交代成因,叶浅1井,134.25 m,单偏光; (f)钙质泥岩,方解石呈斑团状分布,发橘红色光,叶浅1井,134.25 m,阴极发光; (g)灰黑色水平层理含灰泥岩,可见两期裂缝,被方解石全充填,叶浅1井,80.38~80.53 m; (h)纹层状含粉砂泥岩,构造缝和收缩缝内方解石全充填,叶浅1井,305.45 m,单偏光; (i)裂缝方解石呈条带状分布,以自形—半自形晶体为主,成岩期充填,叶浅1井,80.38 m,扫描电镜; (j)钙质泥岩,泥质与钙质均匀混合同时沉积,叶浅1井,157.83 m,单偏光; (k)钙质泥岩,细小的钙质斑点分散在泥质杂基中,叶浅1井,126.97 m,单偏光; (l)图k的阴极发光,钙质斑点呈暗橘红色,叶浅1井,126.97 m,阴极发光; (m)微米级方解石被黏土基质包围,呈微晶、他形—半自形状,甫探1井,4 391.26 m,扫描电镜; (n)泥晶颗粒含黄铁矿含灰云岩,颗粒有陆源砂质、砂屑、生屑、鲕粒等,甫探1井,4 386.01 m,单偏光; (o)泥晶颗粒含黄铁矿含灰云岩,颗粒有陆源砂质、砂屑、生屑、鲕粒等,部分颗粒被黄铁矿交代,呈黑色,甫探1井,4 386.01 m,单偏光; (p)泥晶颗粒含黄铁矿含灰云岩,陆源砂质、砂屑、鲕粒,甫探1井,4 386.01 m,单偏光

Fig. 8 Calcium occurrence in Permian Pusige Formation hydrocarbon source rock of study area

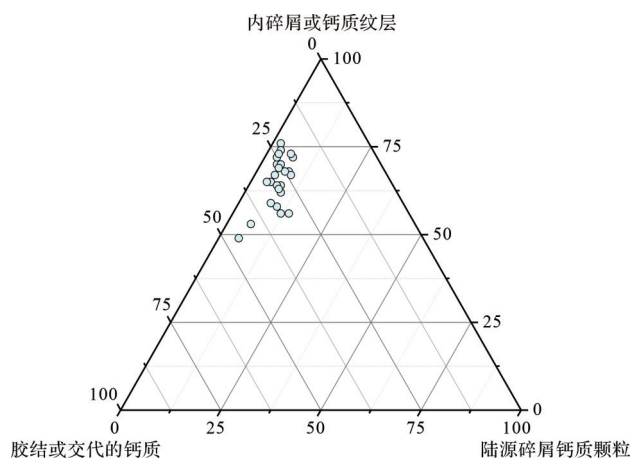


图9 二叠系普斯格组烃源岩钙质的三种成因类型

Fig. 9 Three genetic types of the calcareous hydrocarbon-source rocks in the Permian Pusige Formation

斯洋的北岸(李江海等,2014;李文渊,2018),西昆仑山在二叠纪随着古特提斯洋向北俯冲,隆升逐渐剧烈(计文化,2005;何治亮等,2024),石炭系—二叠系以及更古老的碳酸盐地层遭受抬升剥蚀,势必会造成普斯格组物源多样化。塔西南山前普斯格组陆相细砂岩、粉砂岩的锆石 U-Pb 测年结果显示,在进入中二叠世晚期后,碎屑岩锆石年龄段开始呈现多峰特征,在 200~3 000 Ma 均有分布(图 10),因此普斯格组烃源岩中的陆源碎屑颗粒可能来自更古老的碳酸盐地层(如震旦系)。

4.2.2 内碎屑或钙质纹层

通过对二叠系普斯格组钙质赋存类型的研究,沉积期钙质主要有两种成因:一种是湖盆内源碳酸盐的

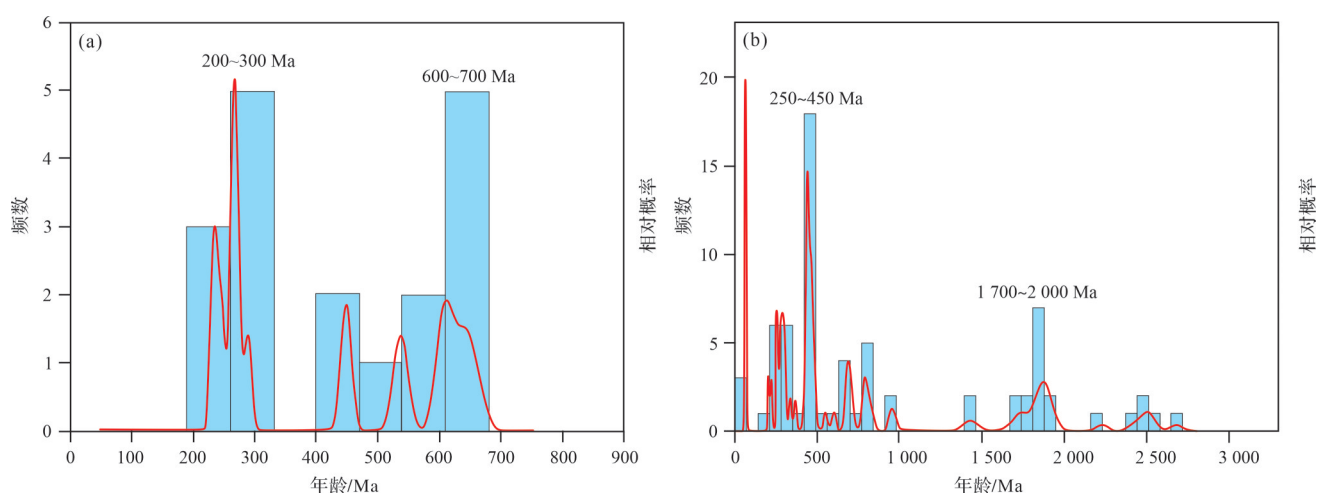


图10 研究区普斯格组碎屑岩锆石U-Pb测年年龄分布概率图

(a)细砂岩碎屑锆石U-Pb测年年龄分布概率图,普斯格组,乌鲁乌斯塘剖面;(b)细砂岩碎屑锆石U-Pb测年年龄分布概率图,普斯格组,杜瓦剖面

Fig. 10 Probability distribution diagram of zircon U-Pb dating ages in the Pusige Formation clastic rocks from the study area

生物化学沉积作用,研究区普斯格组鲕粒、砂屑、藻屑等内碎屑颗粒的存在(图8n~p)是其直接证据。另一种是钙质颗粒与黏土杂基混合沉淀,研究区普斯格组垂向上钙质含量均在15%左右浮动,局部钙质含量增高部位(如叶浅1井底部可达26%)以及高钙含量段,均对应岩心上密集发育的粉砂质条带,推断是富含粉砂纹层中的方解石胶结物使得其钙质含量增加。因此,微晶方解石组成的斑团是普斯格组中最主要的钙质产出状态,现今泥岩中的分散状钙质微晶和方解

石斑团已经历了地层埋藏时期的方解石重结晶作用以及方解石微晶的进一步聚集生长,原始的沉淀、沉积的钙质微粒状态已难以恢复。但在微观及阴极发光观察下,显示该类钙质斑团在泥岩中杂乱且密集分布(图8j,k,i、图11a,b),泥质杂基基本不具备粉砂质条带中供钙质流体流通的粒间孔隙,扫描电镜下见钙质斑团中的方解石与黏土杂基平滑接触(图8m、图11c),判断该类钙质斑团为化学沉淀物与黏土杂基混合沉淀形成。

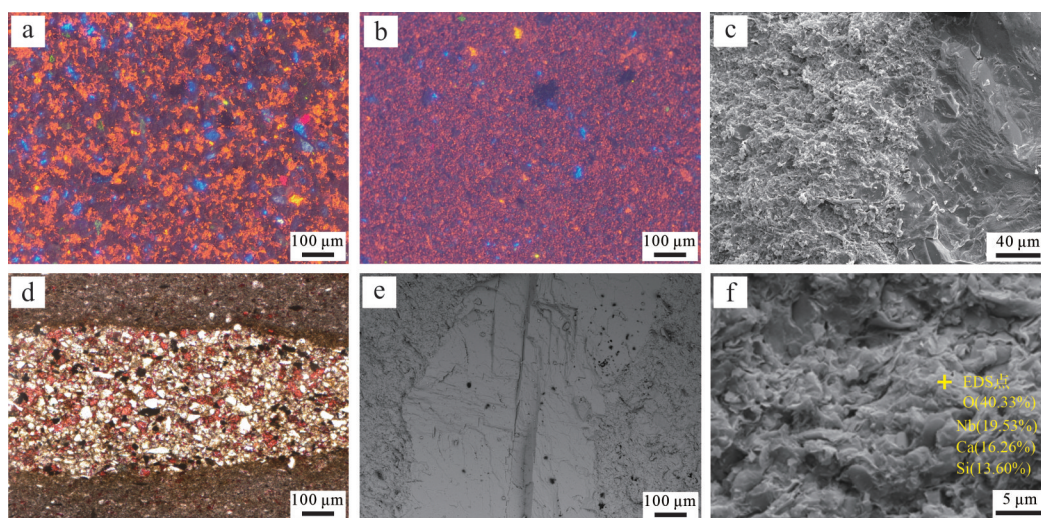


图11 普斯格组烃源岩钙质成因及来源岩相证据

(a)泥质杂基中分散状钙质微晶和方解石斑团,叶浅1井,140.64 m,阴极发光;(b)泥质杂基中分散状钙质微晶和方解石斑团,叶浅1井,140.64 m,阴极发光;(c)泥岩中的方解石斑块,在泥质杂基中呈斑块状产出,晶体粗大与杂基边界清晰,甫沙2井,扫描电镜;(d)粉砂质泥岩,粉砂富集处,方解石充填粉砂粒间,粒状褐铁矿富集在粉砂条带内,甫沙2井,5353 m,单偏光;(e)粉砂质条带中的黏土杂基,EDS显示富含钙(16.26%),叶浅1井,扫描电镜;(f)裂缝中的方解石胶结物,扫描电镜

Fig. 11 Petrographic evidence of calcium-rich material genesis and sources in the Pusige Formation hydrocarbon source rocks

4.2.3 胶结或交代成因的钙质

1) 富钙质流体胶结成因

粉砂质条带以及生物潜穴被粉砂质、泥质粉砂颗粒充填,该类沉积相较于泥质杂基具有更高的孔渗(秦建中等,2010),使得钙质流体能够在其内部的粒间孔隙中广泛充填胶结成他形一半自形方解石(图11d),扫描电镜下呈连晶胶结状态(图11e)。同时,针对粉砂质条带中的黏土杂基进行EDS测试,显示其相对钙质含量高达16.26%(图11f),证明了黏土杂基中亦富含钙质,随着地层的埋深,压实作用也可能造成黏土中的钙质流失,在粒间孔隙或裂缝中重新胶结充填。裂缝中的方解石胶结物更趋近于半自形及自形晶体(图11i),显示出其胶结的期次及程度不同。

2) 准同生期交代成因

研究区甫探1井(4 386.01 m)发育湖盆内碳酸盐内碎屑纹层,微观下鉴定纹层岩性为泥晶颗粒含黄铁矿含灰云岩(图8n~p),X射线衍射全岩分析结果显示纹层的平均白云石含量达24%(介于10.8%~33.0%),粒间大多以泥晶白云石充填,同时鲕粒以及部分砂屑亦已被云化(染色后未变为红色),整体未见埋藏白云岩化的中粗晶方解石。垂向上,Sr/Ba及B/Ga盐度指标以及Sr/Ga、Ga/Rb氧化还原指标指示高水体盐度和缺氧还原的沉积环境(图6),高盐度的卤水以及封闭的水体为准同生白云岩化的流体提供了基础,整体显示出准同生白云岩化的特点。

5 烃源岩中钙质与有机质的耦合关系

5.1 烃源岩中有机质的分布规律

通过烃源岩系统岩石热解数据分析,普斯格组烃源岩中有机质在纵向上具旋回变化特征。整体来看,在普斯格组的2个百米级沉积旋回中,从旋回底部到顶部,烃源岩TOC、PG、HI等值逐渐变大,在旋回顶部泥岩较纯部位,岩石热解参数表现最好,表明烃源岩中有机质主要分布于砂灰泥旋回的顶部(图6)。在米级或厘米级旋回下,叶浅1井499.6~500.1 m的6个旋回中,同样在旋回顶部泥质含量较高的部位,TOC、PG、HI等值相对较大(图7)。镜下观察发现(微米级旋回),有机质在泥质纹层中相对富集,在砂质纹层或灰质纹层中则相对贫乏(图12)。在砂—灰—泥组合的频繁交互变化下,无论是百米级旋回,还是小到微米级旋回,有机质主要

集中于泥质纹层或较纯的泥岩段中,以层状形式分布在多尺度旋回顶部,具备发育优质烃源岩的物质基础。

对于普斯格组烃源岩,由于频繁的水体变化,岩相上多表现为砂灰泥频繁互层,而在岩石组成上则是砂质、灰质、泥质成分的组合,且呈现出砂质/钙质含量增加而泥质含量降低的规律性变化(图7)。由于有机质主要赋存于泥质之中,较高的钙质无疑会影响烃源岩中有机质的富集。通常在烃源岩评价取样时并未将这一规律充分考虑,从而出现高钙质烃源岩测得的TOC含量整体偏低的现象,无法反映较纯泥质纹层中有机质的真实情况。尽管在厘米级旋回中,我们将砂质纹层、泥质纹层、砂泥互层等单独分析,但泥质纹层的TOC等值较随机取样没有显著提高(图6,7)。究其原因,现有取样尺度与随机取样基本一致,而在更小尺度下,仍存在着砂灰泥频繁互层,而有机质主要集中于这种极薄的泥质纹层中(图12),这是常规取样分析方法无法实现的。

5.2 烃源岩中钙质与有机质的关系

柯克亚周缘二叠系普斯格组烃源岩钙质含量普遍较高,而测得的TOC等岩石热解参数偏低。从TOC与碳酸盐矿物含量关系中,可以看到TOC与碳酸盐矿物含量具有一定的负相关性($R^2=0.21$),即烃源岩中有机质分布可能受到钙质的影响(图13)。孟仟祥等(2005)发现钙质泥岩经三元抽提后岩渣未经酸解抽提出的干酪根脂肪酸和脂肪酸含量与烃源岩中的泥岩含量成正比,与其碳酸盐含量成反比,这与此次的发现相一致。具体来看,方解石与烃源岩热解参数TOC、HI、PG均具有一定的负相关性,表明碳酸盐矿物中方解石矿物与有机质的关系更为密切,进一步说明钙质尤其是方解石的高含量会影响烃源岩中有机质的分布,进而影响烃源岩的生烃潜力。

由于普斯格组烃源岩具多旋回沉积特征,在矿物组成、钙质赋存状态及分布、有机质分布上都表现出很强的非均质性。基于叶浅1井499.59~500.05 m米级旋回中发育的多个“砂—灰—泥”的厘米级沉积旋回(图7),对其进行了更为细致的分析。首先,在岩石组分与深度关系图中,钙质组分与砂质组分旋回变化特征基本一致,而与泥质组分变化相反(图7),由于有机质主要赋存在泥质之中,暗示

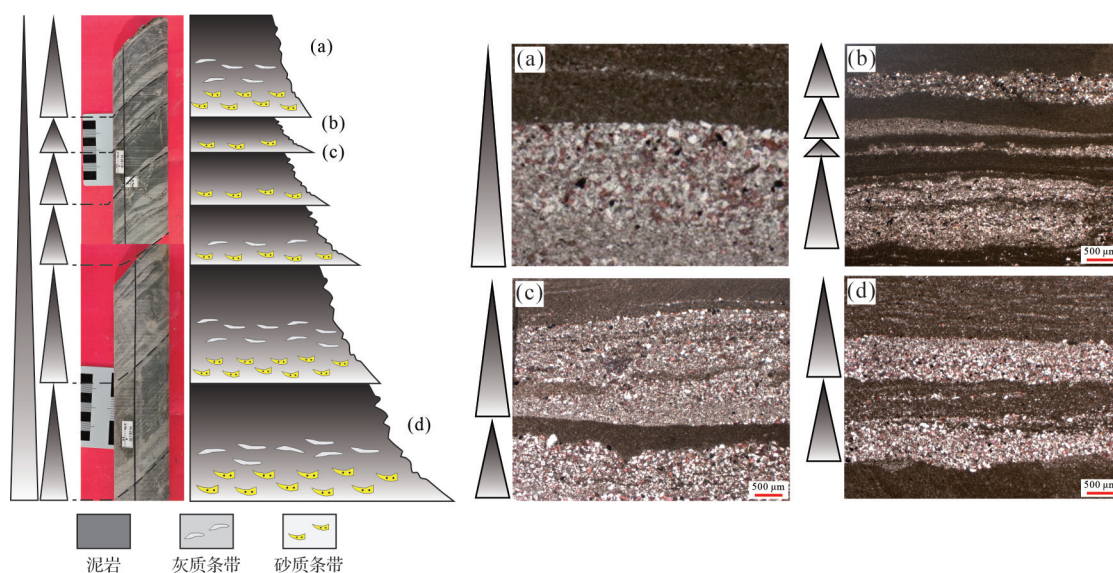


图12 叶浅1井二叠系普斯格组烃源岩微米级旋回特征

(a)纹层状含灰粉砂质泥岩,粒间充填钙质胶结物,叶浅1井,499.64 m,单偏光;(b)纹层状含灰粉砂质泥岩,粒间充填方解石胶结物、黄铁矿,叶浅1井,499.70 m,单偏光;(c)纹层状含灰砂质泥岩,钙质碎屑颗粒较多,叶浅1井,499.74 m,单偏光;(d)纹层状含灰粉砂质泥岩,粒间充填含铁钙质胶结物,叶浅1井,500.02 m,单偏光

Fig. 12 Micrometer-scale cyclic characteristics of hydrocarbon-source rocks in the Permian Pusige Formation at well Yeqian 1

钙质与有机质仍具有负相关性。在厘米级旋回尺度下的TOC、PG与方解石含量关系图中,发现这种厘米级,甚至是更小尺度旋回中,钙质和有机质的分布仍保持着这种稳定的负相关性(图14, $R^2 > 0.43$)。总体上,钙质含量较低的泥岩、砂泥纹层中,TOC含量相对较高,而砂质/灰质薄层中钙质含量普遍较高,相应的TOC则较低,这与大尺度旋回下的认识是一致的,从而表现出高钙质、低热解参数的特征。

基于多尺度旋回观察和简单的线性拟合,发现钙质含量相对较高的地方,烃源岩中TOC含量相对较低,从而推断钙质会对有机质的分布、富集产生不利影响。根据普斯格组烃源岩中钙质赋存特征及分布规律,发现旋回底部砂岩之中的钙质胶结物/交代物、陆源碎屑钙质颗粒与石英、长石等陆源碎屑颗粒共生,其代表的水动力条件整体较强,多处于氧化条件(图6),镜下极少发现有机质(图11d、图12),再因陆源碎屑输入增加会导致有机质的稀释以及生产力的降低(王剑等,2023),整体环境不利于有机质的富集和保存,从而表现出钙质成分增加导致烃源岩评价参数偏低的特征。旋回中部钙质纹层中的内碎屑颗粒所赋存的岩石沉积水动力条件同样较强(图8n~p),也不利于有机质的富集和保存。古环境参数显示,CaO/MgO与氧化还原条件指

标 $V/(V+Ni)$ 、古生产力指标 Cu_{xs} 均具有较好的负相关性(图15a,b),而TOC值与氧化还原条件指标 $V/(V+Ni)$ 、与古生产力指标 Cu/Al 呈正相关性(图15c,d)。换言之,在偏缺氧一还原条件、古生产力较高的情况下钙质相对不发育,但这一环境更有利于有机质的富集,这也从侧面印证钙质胶结物、陆源碎屑钙质颗粒、内碎屑等大量发育的环境整体不利于有机质富集。另外,泥质杂基中的钙质微粒多为沉积早期与黏土杂基混合沉淀形成(图8j、图11a,b),其与有机质的富集没有直接关联,有机质呈零散状或层状分布其中(图5i、图12),主要受沉积期氧化还原条件、古生产力等因素的影响,在盐度较高、缺氧还原的环境下可能会出现有机质相对富集且钙质含量较高的情况(图6)。裂缝中充填的钙质胶结物与构造活动、成岩流体活动关系更为密切,对有机质的富集和保存不会造成直接影响,对烃源岩生排烃效率的影响还需进一步研究。

6 钙质对烃源岩生烃潜力评价的启示

前人研究表明钙质烃源岩作为一类较特殊的烃源岩,在油气生成与运移过程中具有重要意义(秦建中等,2010;孟元林等,2012;陈方举,2015;熊周海,2021;孔祥晔,2023)。首先,钙质泥岩的HI、降解潜

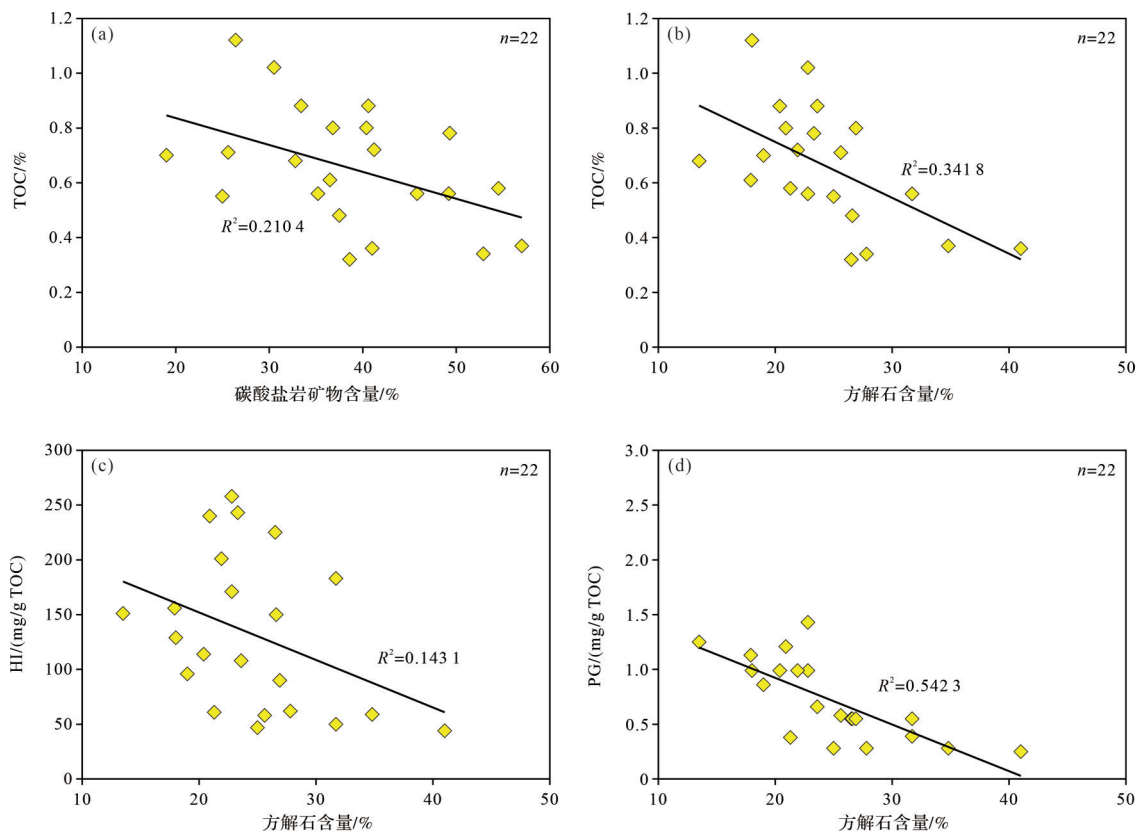


图 13 叶浅 1 井二叠系普斯格组烃源岩有机质含量与碳酸盐矿物含量关系图

碳酸盐岩矿物含量与 TOC、方解石含量与 TOC/PG/HI 之间显著性检验 p 值均小于 0.01, 表明具有极显著差异性

Fig. 13 Relationships of organic matter and carbonate mineral contents in Permian Pusige Formation hydrocarbon-source rocks from well Yeqian 1

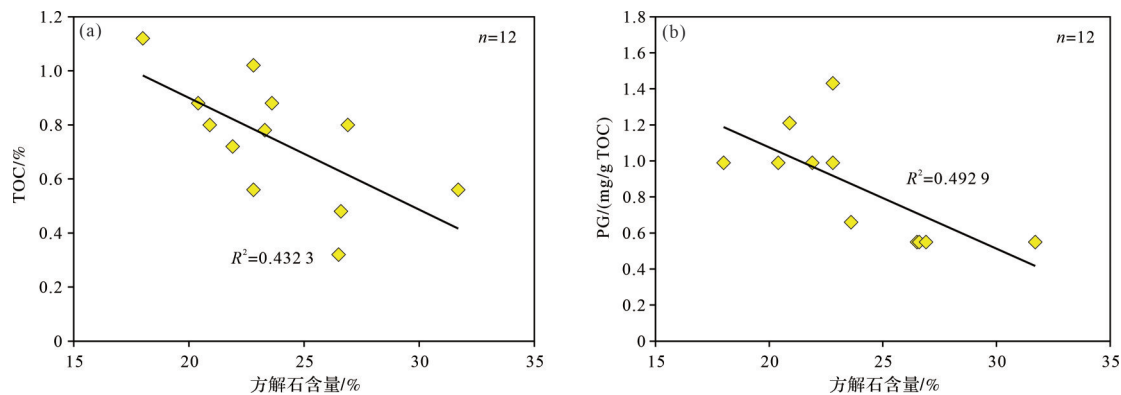


图 14 叶浅 1 井 499.59~500.05 m 烃源岩 TOC、PG 与方解石含量关系图

方解石含量与 TOC、方解石含量与 PG 之间显著性检验 p 值均小于 0.01, 表明具有极显著差异性

Fig. 14 Relationships of total organic carbon (TOC) and pyrolytic hydrocarbon generation potential (PG) vs. calcite content in hydrocarbon-source rocks from well Yeqian 1 at 499.59-500.05 m

力、排烃因数和聚集因数可能是普通泥岩的 1.5 倍以上, 综合生烃潜力达到普通泥岩的 6 倍以上(陈方举, 2015)。半开放生烃模拟实验显示, 普斯格组钙质烃源岩最大生油量为 380 mg/g TOC, 最大生气量为 450 mg/g TOC, 与库车坳陷侏罗系恰克马克组湖相泥岩产率接近(最大生油量为 430 mg/g TOC、最大生气

量为 500 mg/g TOC), 展现出较好的生烃能力。其次, 钙质烃源岩常具有自生自储的特点(熊周海, 2021), 有机质生成的油气通常以吸附或游离状态滞留其中(孟元林等, 2012), 这种含有机质钙质泥页岩往往是游离油含量最高的烃源岩岩相之一(孔祥晔, 2023)。相较于纯泥质烃源岩, 钙质烃源岩由于砂质、钙质组

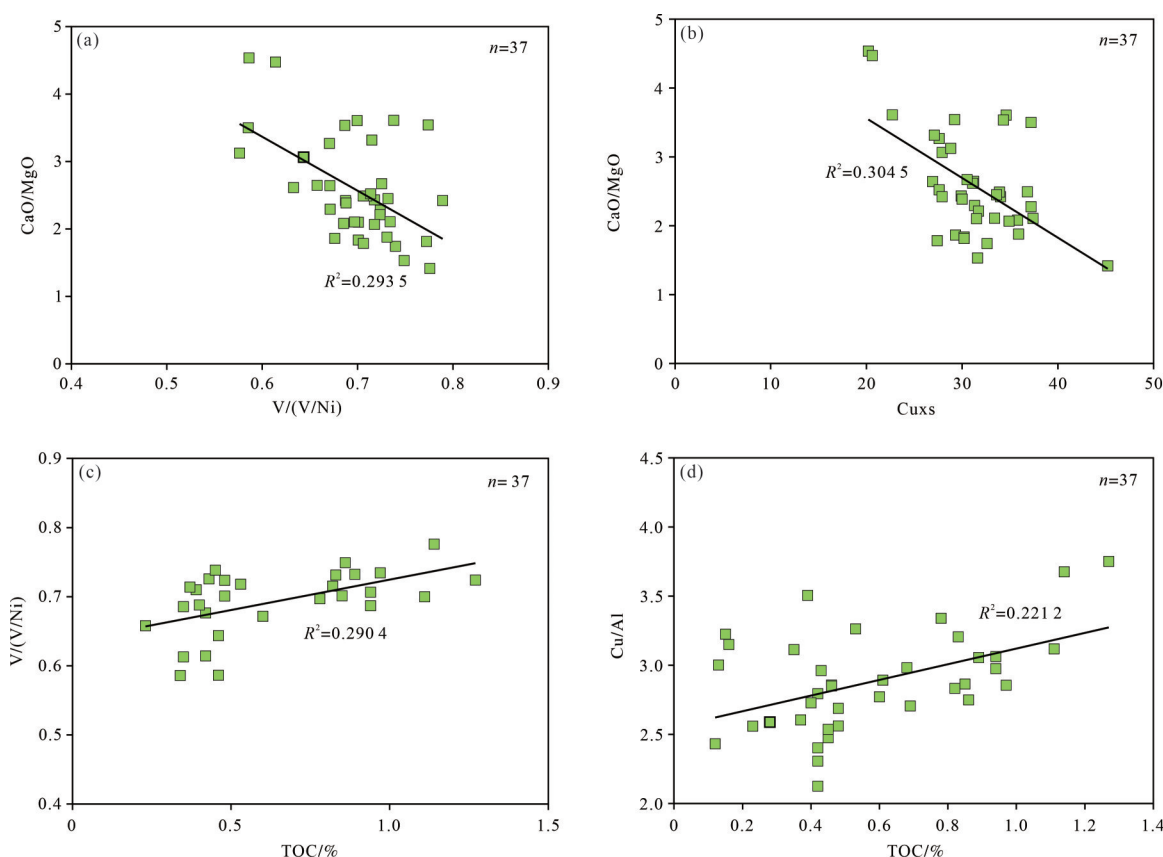


图15 叶浅1井烃源岩钙质含量、TOC与古环境参数交会图

CaO/MgO与V/(V+Ni)、CaO/MgO与Cuxs、TOC与V/(V+Ni)、TOC与Cu/Al之间显著性检验p值均小于0.01,表明具有极显著差异性

Fig. 15 Relationships of calcite content or TOC vs. paleoenvironmental parameters in hydrocarbon-source rocks from well Yeqian1

分的增加、泥质组分相对降低,其对生成油气的吸附能力随之降低(马睿等,2019),可能在一定程度上降低了烃源岩中油气初次运聚的难度,因此富有机质钙质超微薄层容易使早期重质油排出,形成巨型重质油藏(秦建中等,2010)。在砂灰泥薄互层情况下,具备多尺度生储盖组合配置,泥岩中有机质生成的油气似乎更容易向两侧的砂质/钙质纹层中运移、排出,可能会提高烃源岩的生排烃效率(秦建中等,2010;陈方举,2015;孔祥晔,2023)。再者,塔西南山前柯克亚周缘构造活动强烈(何登发等,2013;王强等,2014;王清华等,2024),揉皱、挤压、破裂等对巨厚普斯格组烃源岩的改造作用使得微裂缝十分发育(图5g,h、图6a,g,h),改善了源内油气疏导条件,可能会加速泥质纹层中生成的油气向两侧砂质、钙质纹层中运移。最后,砂岩和碳酸盐岩相较于泥岩导热、传热效率更高(郭平业等,2020;朱传庆等,2022;李潇等,2023),对于普斯格组烃源岩,由于砂灰泥频繁互层以及泥岩中砂质、钙质组分的增加,相比于传统的海相/

湖相泥质烃源岩,其热成熟速度可能更快、成熟更早,钙质烃源岩生烃门限可能会提前。烃源岩中钙质组分可能也会对有机质的生烃产生一定的催化作用,但具体效果如何有待进一步的研究。基于上述推断,烃源岩中高的钙质在改善烃源岩的生烃条件、提高排烃效率方面可能具有更加重要的意义,这也暗示普斯格组高钙质烃源岩巨大生烃潜力的可能。未来,钙质对烃源岩生排烃效率的具体影响机制及其定量评价是重点研究的方向,可通过排烃模拟实验、精细孔隙结构与渗流能力分析等手段深入探索。

此外,普斯格组烃源岩中有机质主要赋存在多尺度“砂—灰—泥”旋回顶部的泥岩中。基于岩心详细观察发现,1 m岩心中泥质纹层/纯泥岩厚度可达43 cm,折算柯克亚周缘普斯格组有机质富集的泥岩厚度介于86~344 m;基于叶浅1井二叠系普斯格组全段岩石热解数据(图6),烃源岩中TOC>0.8%的样品数占比约0.32,由此折算柯克亚周缘二叠系普斯格组较好烃源岩厚度介于28~112 m,具备作为主力

烃源岩的物质基础。但是,基于现有的烃源岩评价标准,普斯格组极少发育好—优质烃源岩,从而对普斯格组烃源岩生烃潜力产生误判,对于这类比较特殊的烃源岩,后续研究可以考虑建立一个新的评价标准,来更准确地判断其生烃潜力。

7 结论

(1) 普斯格组烃源岩矿物组成以碳酸盐矿物和长英质矿物为主,划分出纹层状粉砂岩相、纹层状含粉砂泥岩相、纹层状泥晶灰岩相、纹层状灰质泥岩相、纹层状泥岩相及块状泥岩相6种岩相类型,发育砂—泥、灰—泥、砂—灰—泥3种岩相组合类型,不同级别/尺度岩相组合垂向叠置构成多尺度沉积旋回特征。

(2) 普斯格组烃源岩中钙质主要以胶结物、颗粒形式存在,含量表现出“砂—灰—泥”旋回自下而上先增多再减少的多尺度旋回变化规律,具有古老陆源碎屑钙质颗粒、沉积期内碎屑或钙质纹层、成岩期胶结或交代三种成因类型。

(3) 普斯格组烃源岩中有机质具多尺度旋回分布特征,主要富集在多尺度“砂—灰—泥”旋回顶部,以多旋回特征—间歇形式存在,真正主力生烃物质可能是旋回顶部层状有机质。烃源岩中方解石等碳酸盐矿物含量与TOC、PG、HI等参数具有很好的负相关性,表现出高钙质、低热解参数的特征,主要原因是钙质多见于旋回底部的砂岩和中部的钙质纹层中,沉积水动力条件较强,不利于有机质的富集和保存。

致谢 感谢评审专家及编辑部老师对本文提出的宝贵意见!

参考文献 (References)

陈方举. 2015. 贝尔凹陷南屯组钙质泥岩地质成因及其石油地质意义[J]. 东北石油大学学报, 39(2): 42-50, 93. [Chen Fangju. 2015. Genesis and petroleum geology significance of calcareous mudstone strata of Nantun Group in Bei'er Sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 39(2): 42-50, 93.]

杜金虎, 王招明, 雷刚林, 等. 2011. 柯东1风险探井的突破及其战略意义[J]. 中国石油勘探, 16(2): 1-5, 11. [Du Jinhu, Wang Zhao-ming, Lei Ganglin, et al. 2011. A discovery in well Kedong-1 and its exploration significance[J]. China Petroleum Exploration, 16(2): 1-5, 11.]

段宏亮, 杨保良. 2024. 陆相细粒沉积岩岩相组合类型划分研究现状及其油气地质意义[J]. 复杂油气藏, 17(1): 1-10. [Duan Hong-

liang, Yang Baoliang. 2024. Research status of lithofacies assemblage types classification of continental fine-grained sedimentary rocks and their hydrocarbon geological significance[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 17(1): 1-10.]

樊婷婷, 柳益群, 周鼎武, 等. 2023. 鄂尔多斯南缘7油页岩中钙质结核成因探讨[J]. 沉积学报, 41(3): 932-944. [Fan Tingting, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. 2023. Genesis of calcareous concretions in chang 7 oil shale, southern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 932-944.]

郭平业, 卜墨华, 李清波, 等. 2020. 岩石有效热导率精准测量及表征模型研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 39(10): 1983-2013. [Guo Pingye, Bu Mohua, Li Qingbo, et al. 2020. Research progress of accurate measurement and characterization model of effective thermal conductivity of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(10): 1983-2013.]

韩如冰, 刘强, 江同文, 等. 2014. 钙质隔夹层特征、成因及分布: 以塔里木盆地哈得油田东河砂岩为例[J]. 石油勘探与开发, 41(4): 428-437. [Han Rubing, Liu Qiang, Jiang Tongwen, et al. 2014. Feature, origin and distribution of calcareous interlayers: A case of Carboniferous Donghe sandstone in Hade oil field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(4): 428-437.]

韩文学, 陶士振, 胡国艺, 等. 2017. 塔西南坳陷山前带天然气地球化学特征和成因[J]. 中国矿业大学学报, 46(1): 121-130. [Han Wenxue, Tao Shizhen, Hu Guoyi, et al. 2017. Geochemical characteristics of natural gas and its genesis in piedmont zone of southwest Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 46(1): 121-130.]

何登发, 李德生, 何金有, 等. 2013. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. 石油学报, 34(2): 201-218. [He Dengfa, Li Desheng, He Jinyou, et al. 2013. Comparison in petroleum geology between Kuqa Depression and southwest depression in Tarim Basin and its exploration significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(2): 201-218.]

何治亮, 杨鑫, 高键, 等. 2024. 提提斯洋与古亚洲洋协同演化控制下的塔里木盆地油气富集效应[J]. 石油与天然气地质, 45(3): 637-657. [He Zhiliang, Yang Xin, Gao Jian, et al. 2024. Hydrocarbon enrichment effects in the non-foreland area of the Tarim Basin under the coevolution control of the Tethys and Paleo-Asian Oceans[J]. Oil Gas Geology, 45(3): 637-657.]

胡健, 王铁冠, 陈建平, 等. 2015. 塔西南坳陷周缘原油地球化学特征与成因类型[J]. 石油学报, 36(10): 1221-1233. [Hu Jian, Wang Tieguan, Chen Jianping, et al. 2015. Geochemical characteristics and origin patterns of oils in periphery of southwestern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 36(10): 1221-1233.]

黄文宇, 潘长春, 于双, 等. 2022. 塔里木盆地塔西南坳陷柯东构造带甫沙4井原油来源及充注过程[J]. 天然气地球科学, 33(11): 1836-1847. [Huang Wenyu, Pan Changchun, Yu Shuang, et al. 2022. Oil source and charging process of well FS4 in the Kedong structural belt, southwest Tarim Depression, Tarim Basin[J]. Natu-

- ral Gas Geoscience, 33(11): 1836-1847.]
- 计文化. 2005. 西昆仑—喀喇昆仑晚古生代—早中生代构造格局[D]. 北京:中国地质大学(北京). [Ji Wenhua. 2005. The Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic frame in the western Kunlun-Karakorum area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 孔祥晔. 2023. 川中侏罗系大安寨段页岩孔隙结构及对页岩油赋存的控制[D]. 北京:中国石油大学(北京). [Kong Xiangye. 2023. Shale pore structure and its control on shale oil occurrence in Jurassic Da'anzhai member, central Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum.]
- 李江海,王洪浩,李维波,等. 2014. 显生宙全球古板块再造及构造演化[J]. 石油学报, 35(2): 207-218. [Li Jianghai, Wang Honghao, Li Weibo, et al. 2014. Discussion on global tectonics evolution from plate reconstruction in Phanerozoic[J]. Acta Petrolei Sinica, 35(2): 207-218.]
- 李文渊. 2018. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 34(8): 2201-2210. [Li Wenyuan. 2018. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(8): 2201-2210.]
- 李潇,朱传庆,邱楠生,等. 2023. 松辽盆地北部岩石热导率及其影响因素[J]. 地球学报, 44(1): 70-78. [Li Xiao, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, et al. 2023. Thermal conductivity of rocks and its influencing factors in northern Songliao Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 44(1): 70-78.]
- 卢龙飞,陶国亮,万俊雨,等. 2024. 海相优质烃源岩中硅钙质来源:生物骨壁壳及其碎屑[J]. 石油实验地质, 46(6): 1157-1165. [Lu Longfei, Tao Guoliang, Wan Junyu, et al. 2024. Siliceous and calcareous sources in marine high-quality hydrocarbon source rocks: Skeleton-wall-shell of organism and their debris[J]. Petroleum Geology & Experiment, 46(6): 1157-1165.]
- 马睿,王民,李进步,等. 2019. 热释法在页岩吸附油定量评价中的实验探讨[J]. 石油地质与工程, 33(6): 9-14. [Ma Rui, Wang Min, Li Jinbu, et al. 2019. Experimental discussion of heating release method in quantitative evaluation of adsorbed shale oil[J]. Petroleum Geology and Engineering, 33(6): 9-14.]
- 孟仟祥,郑建京,房玄,等. 2005. 低熟泥灰岩、钙质泥岩干酪根脂肪酸的分布特征及赋存形式[J]. 石油与天然气地质, 26(6): 736-741. [Meng Qianxiang, Zheng Jianjing, Fang Xuan, et al. 2005. Distribution and occurrence of kerogen fatty acids in low mature marl and calcareous mudstone[J]. Oil & Gas Geology, 26(6): 736-741.]
- 孟元林,赵紫桐,焦金鹤,等. 2012. 共和盆地页岩油气地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(5): 32-37, 44. [Meng Yuanlin, Zhao Zitong, Jiao Jinhe, et al. 2012. Geochemical characteristics of the shale hydrocarbon in Gonghe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 36(5): 32-37, 44.]
- 莫午零,林潼,张英,等. 2013. 西昆仑山前柯东—柯克亚构造带油气来源及成藏模式[J]. 石油实验地质, 35(4): 364-371. [Mo Wuling, Lin Tong, Zhang Ying, et al. 2013. Hydrocarbon origin and accumulation model of Kedong-Kekeya tectonic belt in piedmont of West Kunlun Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 35(4): 364-371.]
- 宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 2017. 济阳坳陷不同岩相页岩油赋存机理[J]. 石油学报, 38(2): 185-195. [Ning Fangxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. 2017. Occurrence mechanism of shale oil with different lithofacies in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 38(2): 185-195.]
- 秦建中,申宝剑,付小东,等. 2010. 中国南方海相优质烃源岩超显微有机岩石学与生排烃潜力[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 826-837. [Qin Jianzhong, Shen Baojian, Fu Xiaodong, et al. 2010. ultramicroscopic organic petrology and potential of hydrocarbon generation and expulsion of quality marine source rocks in South China[J]. Oil & Gas Geology, 31(6): 826-837.]
- 王剑,肖洒,杜秋定,等. 2023. 四川盆地东北部地区陡山沱组黑色页岩古海洋环境与有机质富集机制[J]. 天然气工业, 43(4): 76-92. [Wang Jian, Xiao Sa, Du Qiuding, et al. 2023. Paleomarine environment and organic matter enrichment mechanism of Doushantuo black shale in the northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 43(4): 76-92.]
- 王静彬,高志前,康志宏,等. 2017. 塔里木盆地塔西南坳陷和田凹陷普司格组烃源岩沉积环境及有机地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 28(11): 1723-1734. [Wang Jingbin, Gao Zhiqian, Kang Zhihong, et al. 2017. The sedimentary environment and geochemical characteristics of the source rocks in the Pusige Formation in Hetian Sag, southwestern Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 28(11): 1723-1734.]
- 王强,彭平安,曾建,等. 2014. 叶城凹陷柯东1井凝析油及柯克亚原油的油源分析[J]. 地球化学, 43(5): 469-476. [Wang Qiang, Peng Ping'an, Zeng Jian, et al. 2014. Oil source of condensates from well Kedong 1 and crude oil from Kekeya in Yecheng Depression[J]. Geochimica, 43(5): 469-476.]
- 王清华,杨海军,李勇,等. 2023. 塔西南山前地区恰探1井石炭系:二叠系重大突破与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 28(4): 34-45. [Wang Qinghua, Yang Haijun, Li Yong, et al. 2023. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 28(4): 34-45.]
- 王清华,杨海军,李勇,等. 2024. 塔西南山前地区柯克亚周缘叶探1井油气勘探重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 29(4): 1-16. [Wang Qinghua, Yang Haijun, Li Yong, et al. 2024. Significant discovery and significance of oil and gas exploration well Yetan1 of Kekeya peripheral in the front mountain of southwest area of Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 29(4): 1-16.]
- 王勇,刘惠民,宋国奇,等. 2017. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义:以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. 石油学报, 38(12): 1390-1400. [Wang Yong, Liu Huimin, Song Guoqi, et al. 2017. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: A case study of source rocks in the upper sub-

- member of member 4 and lower submember of member 3 of Shahejie Formation, Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 38(12): 1390-1400.]
- 吴安彬, 张景坤, 王井伶, 等. 2020. 富有机质页岩方解石脉成因、成岩模式与地质意义: 以四川盆地南部龙马溪组为例[J]. *地质论评*, 66(1): 88-100. [Wu Anbin, Zhang Jingkun, Wang Jingling, et al. 2020. Genesis, diagenetic model and geological significance of calcite veins in organic-rich shale: A case study of the Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, China[J]. *Geological Journal Comments*, 66(1): 88-100.]
- 谢寅符, 李洪奇. 2005. 准噶尔盆地钙质夹层成因及层序地层学意义[J]. *石油学报*, 26(5): 24-27. [Xie Yinfu, Li Hongqi. 2005. Origin of calcareous interbeds and its significance of sequence stratigraphy in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 26(5): 24-27.]
- 熊周海. 2021. 济阳坳陷古近系深水细粒沉积岩方解石成因机制[D]. 青岛: 中国石油大学(华东). [Xiong Zhouhai. 2021. Origin mechanism of calcite in Paleogene deep-water fine-grained sedimentary rocks, Jiyang Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum.]
- 杨学文, 田军, 王清华, 等. 2021. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 26(4): 17-28. [Yang Xuewen, Tian Jun, Wang Qinghua, et al. 2021. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 17-28.]
- 张洪, 冯有良, 刘畅, 等. 2024. 柴达木盆地干柴沟地区古近系下干柴沟组上段页岩层系优势岩相及其控储因素[J]. *石油与天然气地质*, 45(5): 1305-1320. [Zhang Hong, Feng Youliang, Liu Chang, et al. 2024. Dominant lithofacies and factors controlling reservoir formation of the shale sequence in the upper member of the Paleogene Lower Ganchaigou Formation, Ganchaigou area, Qaidam Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1305-1320.]
- 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 等. 2022. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示[J]. *石油科学通报*, 7(3): 321-333. [Zhu Chuanqing, Chen Chi, Yang Yabo, et al. 2022. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 7(3): 321-333.]
- Cotton L J, Evans D, Beavington-Penney S J. 2020. The high-magnesium calcite origin of nummulitid foraminifera and implications for the identification of calcite diagenesis[J]. *Palaaios*, 35(10): 421-431.
- Kaźmierczak J, Fenchel T, Kühl M, et al. 2015. CaCO_3 precipitation in multilayered cyanobacterial mats: Clues to explain the alternation of micrite and sparite layers in calcareous stromatolites[J]. *Life*, 5(1): 744-769.
- Schulz H M, Biermann S, van Berk W, et al. 2015. From shale oil to biogenic shale gas: Retracing organic-inorganic interactions in the Alum Shale (Furongian-Lower Ordovician) in southern Sweden [J]. *AAPG Bulletin*, 99(5): 927-956.
- Tlili F, Ayari A, Regaya K. 2021. Bio-mineral needle fiber calcite (NFC) in Tunisian Pleistocene calcretes (topology and crystallization)[J]. *Journal of Earth System Science*, 130(1): 28.
- Wang Q T, Wang T L. 2020. Detection of dissolution pores in the marginally mature calcareous Lucaogou Shale: New insights in nanopore development in terrestrial shale oil reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 1321-1322.
- Zhang H W, Cai Y J, Tan L C, et al. 2014. Stable isotope composition alteration produced by the aragonite-to-calcite transformation in speleothems and implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Sedimentary Geology*, 309: 1-14.

Calcite Genesis of Hydrocarbon Source Rocks from the Permian Pusige Formation and Its Impact on Organic Matter Enrichment in the Piedmont of Southwestern Tarim Basin

ZHANG Liang^{1,2,4,5}, LIU Wen^{1,2,5}, LÜ QiQi³, LI Yong^{1,2,4,5}, SUN ChunYan^{1,2,5}

1. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China

2. Southwestern Tarim Branch of R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China

3. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000, China

5. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: [Objective] The carbonate content in the source rocks of the Permian Pusige Formation in the southwestern depression of Tarim Basin is high, and the relationship between carbonate and organic matter remains unclear. This has hindered the evaluation of their potential for hydrocarbon generation. [Methods] Using techniques such as core examination, thin section analysis, scanning electron microscopy (SEM), whole-rock X-ray diffraction (XRD), and geochemical studies, this research investigated the storage state and origin of carbonates, distribution patterns of organic matter, and relationship between carbonates and organic matter in the source rocks of the Permian Pusige Formation located at the peripheral areas of Kekeya in the southwestern depression of Tarim Basin. [Results] The source rocks of the Permian Pusige Formation primarily exhibit three lithofacies associations: sand-mud, gray-mud, and sand-gray-mud. Calcite in the source rock mainly exists as cement and particles, displaying a multiscale cycloidal feature of increasing and then decreasing from bottom to top within each "sand-gray-mud" cycle. The sources of carbonate include: (1) detrital particles derived from ancient continental sediments; (2) intra-depositional detritus or carbonate laminae; and (3) cementation or replacement products formed during the diagenetic phase. By conducting detailed analysis of the multi-scale cyclothem sequences, organic matter was found to accumulate at the tops of these sequences. The main hydrocarbon-bearing intervals could be the laminites at the top of each cyclothem. Geochemical analysis revealed a strong negative correlation between carbonate minerals such as calcite and Rock-Eval parameters such as total organic carbon (TOC), pyrolytic hydrocarbon generation potential (PG), and hydrogen index (HI), reflecting a pattern of high calcium and low Rock-Eval parameters. The underlying cause is that calcium primarily resides in sandstone and calcitic layers at the base and middle sections of the cycle, where stronger hydrodynamic conditions during deposition were unfavorable for organic accumulation and preservation. [Conclusions] The high-calcium source rocks within multi-scale "sand-gray-mud" cycles may possess unique characteristics pertaining to hydrocarbon generation conditions, expulsion efficiency, and oil/gas migration processes, indicating a substantial potential for hydrocarbon generation in the source rocks of Permian Pusige Formation in the Kekeya.

Key words: Tarim Basin; southwestern depression; Permian; Pusige Formation; calcite genesis; hydrocarbon generation potential

Foundation: National Key Research and Development Program on New Oil and Gas Exploration and Development, No. 2025ZD1400505; Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation, No. 2023ZZ14YJ02; Innovation Team Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2024TSYCTD0008

Corresponding author: LIU Wen, E-mail: liuwen-tlm@petrochina.com.cn