

韩立杨, 孙雨, 张克鑫, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地白垩系 Napo 组 LU 亚段沉积模式[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(5): 80-90.

HAN Liyang, SUN Yu, ZHANG Kexin, et al. The sedimentary model of the LU Sub-member of Cretaceous Napo Formation in Oriente Basin, Ecuador[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(5): 80-90.

厄瓜多尔 Oriente 盆地白垩系 Napo 组 LU 亚段沉积模式

韩立杨^{1,2}, 孙雨^{1,2}, 张克鑫³, 闫百泉^{1,2*}, 张超前³, 杨国庆^{1,2}

(1 东北石油大学地球科学学院, 大庆 163318; 2 东北石油大学三亚海洋油气研究院, 三亚 572024;

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:厄瓜多尔 Oriente 盆地北部白垩系 Napo 组 LU 亚段地层油气资源极其丰富, 具有较大的油气勘探潜力, 由于目前对 LU 亚段地层沉积模式认识不清晰, 极大程度上限制了研究区进一步勘探开发。依据 LU 亚段岩芯观察、测井、成熟度分析以及镜下薄片等资料, 通过岩芯岩性、结构等岩石学特征, 沉积构造、生物遗迹化石、沉积韵律等沉积学特征, 以及测井相标志认为, 研究区 LU 亚段地层发育于潮汐作用为主的海陆过渡环境, 并在前人研究基础上提出潮控河口湾与陆棚之间存在过渡带沉积, 形成了潮控河口湾-过渡带-陆棚沉积体系, 识别出潮汐水道、潮汐砂坝、砂坪、海绿石砂席、混合坪、陆棚泥和灰质滩共 7 种沉积微相, 其中, 优势储层相带为潮汐水道和潮汐砂坝, 砂坪次之。建立研究区潮控河口湾-过渡带-陆棚沉积模式, 以期对 Oriente 盆地白垩系 Napo 组油气勘探提供有利的科学依据。

关键词:沉积模式; 沉积微相; 潮控河口湾; Oriente 盆地

中图分类号: P736; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.030

0 前言

近年来, 潮控河口湾沉积在油气勘探中表现出巨大的潜力, 因而受到业界学者的广泛关注^[1]。在潮控河口湾沉积模式研究上, DALRYMPLE 等^[2]建立的潮控河口湾模型在学界认可度最高, 其根据沉积动力学将潮控河口湾自海向陆方向划分为潮控区、混合控制区、河控区。PRITCHARD^[3]定义河口湾是半封闭沿海河口中被陆源来水稀释的区域, 限于海侵环境。混合控制区即沉积负载汇集区 (BLC), 由于双向作用力的交汇, 使得这一区域水体

负载能力最低, 形成厚层的泥质沉积^[4]。一些学者对典型潮控河口湾内部沉积特征也进行了较详细的研究。赵霞飞等^[5]总结出潮汐砂坝、泥坪、UFR 砂坪等 6 种沉积微相; 刘慧盈等^[6]提出了潮汐水道、潮汐砂坪及潮汐砂坝等 6 种微相类型; SU 等^[7]基于对全新世长江口湾沉积的认识, 提出了河流沉积、潮控河流沉积、河口沉积、潮汐砂坝沉积、河口湾外沉积和浅海沉积 6 种微相类型。

长期以来研究区沉积模式有 3 种主流观点: 潮控河口湾-陆棚沉积模式^[8-9]、河流-三角洲-陆棚沉积模式^[10]及潮坪-陆棚沉积模式^[11]。目前对潮控河口湾-陆棚沉积模式认可度较高, 但在研究区的油气勘探开发中仍存在一定的局限, 结合研究区海绿石颗粒薄片鉴定、黄铁矿伴生以及扫描电镜下玫瑰花状特征分析, 均指示其发育在亚还原环境中, 为原地成因^[12]。因此认为, 潮控河口湾与陆棚沉积之间存在类似于滨岸与陆棚沉积之间的过渡带沉积, 与潮控河口湾经典沉积模式存在差异, 由于过渡带的存在会对潮控河口湾环境油气开发产生重要影

收稿日期: 2023-02-18

资助项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城自然科学基金联合项目 (2021JLH0077); 国家自然科学基金 (41772149, 41872158)

第一作者: 韩立杨 (1997—), 男, 在读硕士, 主要从事沉积与储层地质学方面的研究工作。E-mail: hly_squid@163.com

* 通讯作者: 闫百泉 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事油气储层沉积学与油气田开发地质学方面的研究工作。E-mail: ybqhht@163.com

响, 因此, 本研究将为国内外同沉积类型油田的精细描述和高效开发提供重要参考依据。

1 区域地质概况

研究区地处厄瓜多尔 Oriente 盆地, 发育在 Putumayo-Oriente-Maranon 富油气盆地链中部, 西陡东缓, 面积 1047 km²。位于构造运动活跃的科迪勒拉山系东部、巴西-冈瓦纳地盾西部之间的地区^[13] (图 1)。

Oriente 盆地 Mariann 油田地区自古生代以来分为 3 个构造演化阶段, 分别为古生代被动大陆边缘阶段、三叠纪—白垩纪裂陷盆地阶段及白垩纪末期—现今前陆盆地阶段^[13-14]。研究层段发育时期处于三叠纪—白垩纪裂陷盆地阶段。三叠纪时, 太平洋板块的东部边界由被动大陆边缘转换成了主动大陆边缘, 在 Oriente 盆地形成一系列 SN 向半地堑和地堑; 中侏罗世—早白垩世时期, Chaucha 地体与南美板块碰撞导致盆地的整体抬升, 致使早白垩世 Hollin 组地层与中侏罗世地层呈角度不整合接触。白垩系 Napo 组 LU 亚段为盆地主要油气产层, 由东部的巴西地盾提供物源, 发育在海陆过渡环境^[15-16]。

Oriente 盆地白垩系自下而上发育 Hollin 组和 Napo 组(图 1)。主力烃源岩为上白垩统 Napo 组海

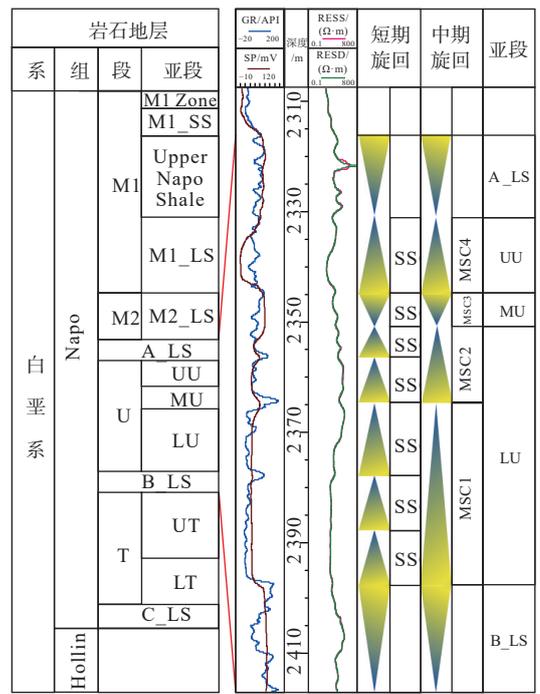
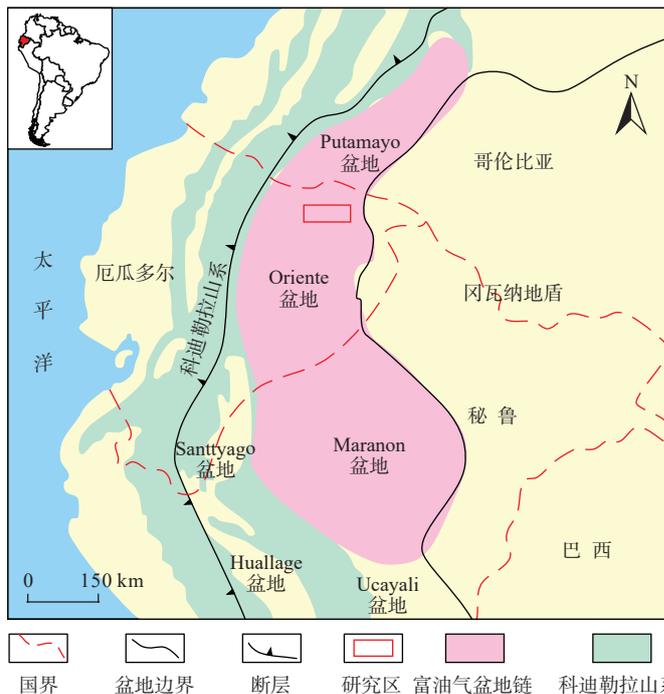
相黑色页岩和沥青质碳酸盐岩, 主力储集层为上白垩统 Napo 组的 M1-SS、U-SS 和 T-SS 砂岩段和下白垩统 Hollin 组的砂岩, 物源来自东南方向。Napo 组 U 段与下部 B_LS 和上部 A_LS 呈整合接触, 其整体可分为 3 个亚段: LU 亚段、MU 亚段和 UU 亚段, 整体厚度约 70 m。B_LS 沉积之后发生大规模海退, 随即缓慢海侵沉积 LU 亚段及 MU 亚段, 之后快速海退并海侵沉积 UU 亚段和 A_LS, 其中, LU 亚段根据岩芯层序界面识别及测井资料分析划分为 SSC1—SSC5 共 5 个短期旋回^[10,13-14,16-17]。

2 沉积特征

2.1 岩石学特征

LU 亚段岩石类型以石英砂岩为主(样本数 7)。石英(Q)含量为 92%~98%, 平均 95%; 长石(F)含量为 1%~3%, 平均 1.86%, 主要为钾长石; 岩屑(R)含量为 1%~7%, 平均 3.1%, 以变质岩岩屑为主; 杂基含量 <2%; 胶结物以石英次生加大为主。成分成熟度指数 Q/(F+R) 为 11.5~49, 平均 25.6。表明 LU 层砂岩整体上成分成熟度达到成熟, 指示高能水体环境(图 2)。

根据镜下薄片鉴定分析, Napo 组 LU 亚段砂岩



据文献 [13] 修改

图 1 Oriente 盆地研究区位置及层序地层柱状图

Fig.1 Location and stratigraphic sequence of the Oriente Basin

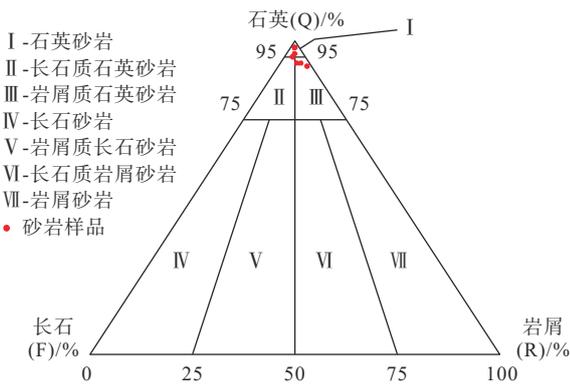
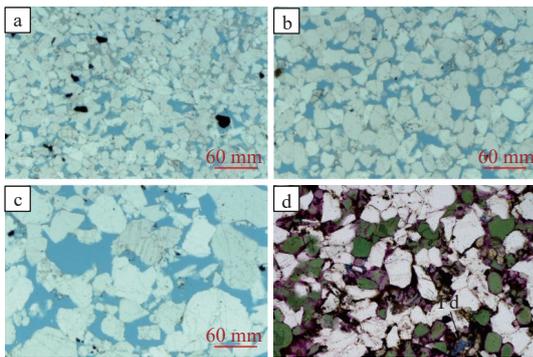


图2 FOLK^[18] (1968) 砂岩三角分类图

Fig.2 Ternary classification of sandstone by FOLK^[18] (1968)

结构成熟度普遍较高,分选性以好为主,中等、中等—好次之;石英的次生加大掩盖了碎屑颗粒的形状和圆度,整体上以次棱角状至次圆为主,但其中细小的棱角状颗粒很常见;孔隙类型以粒间孔为主;接触关系以线接触和点接触为主(图3a—c);海绿石颗粒呈现绿色,多为线接触,可见凹凸接触,主要为粪球粒状和颗粒状,比较均质,并且可见黄铁矿共生,部分可见裂纹,内部石英砂岩颗粒分选较差,且海绿石颗粒粒度较大,符合风暴携带泥沙与海绿石颗粒同时沉积的特征(图3d)。表明Napó组LU亚段沉积时期处于强水动力环境中,结合矿物结构及成分成熟度指示沉积物搬运距离较长,符合潮控河口湾沉积特征。



(a) 细石英砂岩, 2 670.7 m; (b) 中—细石英砂岩, 粒间孔发育, 2 659.4 m; (c) 中—粗石英砂岩, 可见粒间扩大孔, 2 668.9 m; (d) 海绿石细砂岩, 海绿石呈粪球粒状, 2 658.9 m

图3 FB-173井Napó组LU亚段镜下特征

Fig.3 Microscopic characteristics of LU Sub-member of the Napó Formation in Well FB-173

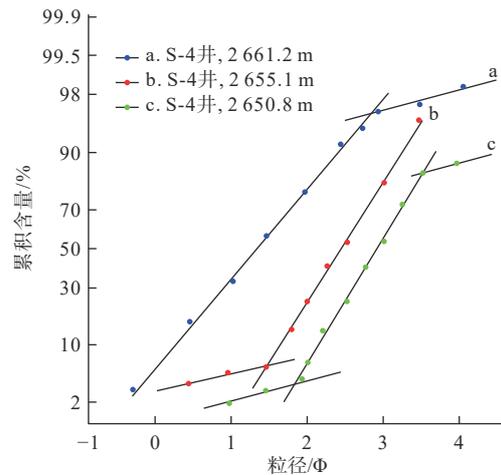
2.2 粒度分布特征

在岩芯精细观察结合测井曲线特征的基础上,对主要取芯井的粒度特征分析,包括粒度累积曲线分布区间、线斜率、含量百分比、线段数目、交切点

等特征,认为其为牵引流型特征,归纳出3种类型。

2.2.1 跳跃-悬浮两段式

发育高斜率跳跃组分和低斜率悬浮组分,以跳跃组分为主,含量约50%~70%,最高可达到96%,主要由中、粗砂组成,线段斜率约50°,分选中等至较好,与悬浮次总体截点介于 $2\Phi\sim 3\Phi$ 。悬浮组分含量较低,粒径整体 $>2\Phi$,斜率约15°。岩相表现为交错层理中—粗砂岩,底部可见侵蚀面。研究区该类曲线粒度呈现粒序特征,指示高能环境(图4a)。



据文献[8]修改

图4 Napó组LU亚段碎屑岩粒度概率累积曲线特征

Fig.4 Characteristics of the probability accumulation curve of grain size of clastic rocks in LU Sub-member of the Napó Formation

2.2.2 滚动-跳跃两段式

发育低斜率滚动组分和高斜率跳跃组分,主要为跳跃组分,含量约95%,以中—细砂岩为主,含少量粗砂组分,斜率约58°,与滚动次总体截点在 $1\Phi\sim 2\Phi$ 。滚动组分含量低,斜率约13°。岩相类型表现为脉状层理、平行层理中—细砂岩(图4b)。

2.2.3 滚动-跳跃-悬浮三段式

图4c反映了水动力的减弱,原来以跳跃形式的部分变成了滚动形式。粒度曲线主要由跳跃组分组成,含量介于60%~70%,粗交切点在 $1\Phi\sim 2\Phi$,细交切点在 $3\Phi\sim 4\Phi$,分选中等至良好,线段斜率约60°。滚动组分含量低,分选差,为少量粗砂组分,悬浮组分含量约20%,斜率约15°。此曲线主要反映水体能量较差的弱水动力沉积环境,岩相类型以脉状层理、波状层理的中—细砂岩为主。

2.3 岩相类型

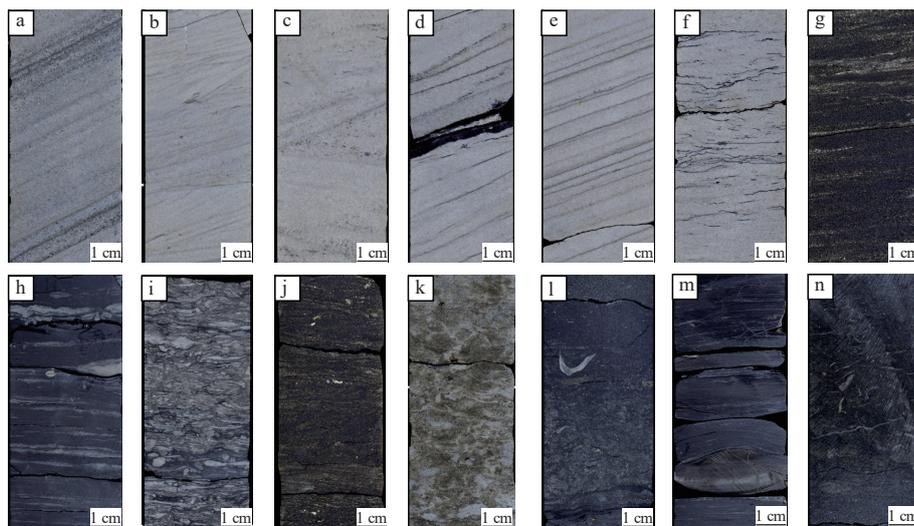
通过对研究区LU亚段取芯井岩芯精细描述,认为研究区主要发育泥披层、正向递变层理、羽状

交错层理、脉状层理、波纹层理、波状层理、软沉积物变形构造、生物扰动构造、碳质层等潮汐环境典型沉积构造, 可划分为 8 种砂岩相、2 种泥岩相以及 1 种灰岩相共 11 种岩石相类型(表 1)。

表 1 Oriente 盆地 Napo 组 LU 亚段岩相类型及成因解释

Table 1 Genetic interpretation in lithofacies types of the LU Sub-member of the Napo Formation in the Oriente Basin

岩相类型	沉积构造	生物特征	成因解释
大型交错层理中—粗砂岩(图5a—d)	以大型(板状、槽状、羽状)交错层理和泥披层为主, 其中, 羽状交错层理和泥披层是典型潮汐标志, 碳质泥披层表现为韵律发育特征, 指示具有一定陆源沉积注入	生物扰动指数0~1	由高能单向潮汐流和次要的河流逆流产生
含泥披层交错层理中—细砂岩(图5e)	高角度板状交错层理和泥披层较为常见	生物扰动指数0~1	砂质纹层为涨退潮期牵引流导致的沙丘迁移所形成, 而泥披层则是在停潮期由水体中悬浮物缓慢沉降产生
脉状层理中—细砂岩(图5f)	脉状层理发育	生物扰动指数1~2	水动力条件强弱交替下形成
平行层理中—细砂岩(图5g)	以平行层理为主, 泥披层不甚发育, 通常与等岩相互层	生物扰动指数<1	高流态砂质沉积物迁移形成
波状层理砂泥岩互层(图5h)	发育波状层理, 含有菱铁矿泥质层及黄铁矿结核, 可见收缩裂缝	生物扰动指数1~2, 发育Planolites、Lockeia、Thalassoides遗迹相	过渡带环境沉积介质的波浪振荡造成
块状泥质细—粉砂岩(图5i)	块状构造及波状交错层理, 可见部分砂质纹层受生物破坏进入泥质纹层形成收缩裂缝等软沉积变形构造	生物扰动指数2~5, 发育Planolites、Chondrites等多种遗迹相	形成于正常浪基面之下、物源供给不足的陆棚环境
波纹层理细砂岩(图5j)	为波纹层理, 含有泥质薄层	生物扰动指数<1, 可见Planolites、Thalassoides遗迹相	事件沉积
块状海绿石细砂岩(图5k)	块状构造及正向递变层理, 具有底部冲刷面	生物扰动指数为3, 含瓣鳃类钙质介壳、Planolites遗迹相	风暴浪基面与正常浪基面之间的弱氧化过渡带环境中
生物碎屑泥质细砂岩(图5l)		生物扰动指数<1, 生物碎屑主要为破碎的软体动物瓣膜, 可见Planolites、Thalassoides遗迹相	陆棚环境
块状含粉砂泥岩/页岩(图5m)	水平层理为主	可见钙质生物介壳, 如瓣鳃类	悬浮状态的泥质颗粒缓慢沉积形成
块状泥质石灰岩(图5n)		生物扰动指数为2, 含有丰富的化石遗迹, 生物碎屑、软体动物瓣膜、植物碎屑、棘皮动物、有孔虫等	正常盐度的开阔海洋陆棚环境



(a) 板状交错层理中—粗石英砂岩, 2 669.1 m; (b) 槽状交错层理中—粗石英砂岩, 2 669.7 m; (c) 羽状交错层理中—粗石英砂岩, 2 674.3 m; (d) 炭质泥披层, 2 667.2 m; (e) 含泥披层交错层理中—细石英砂岩, 2 661.9 m; (f) 脉状层理中—细砂岩, 2 670.8 m; (g) 平行层理中—细砂岩, 2 660 m; (h) 波状层理砂泥岩互层, 2 654.6 m; (i) 块状泥质细—粉砂岩, 2655.3 m; (j) 波纹层理细砂岩, 2 652.2 m; (k) 块状海绿石细砂岩, 2 650.8 m; (l) 生物碎屑泥质细砂岩, 2 650.4 m; (m) 块状含粉砂泥岩/页岩, 2 652.7 m; (n) 块状泥质石灰岩, 2 650.3 m

图 5 Oriente 盆地 Napo 组 LU 亚段沉积构造岩芯照片

Fig.5 Photos of the cores showing the sedimentary structure of the LU Sub-member of the Napo Formation in the Oriente Basin

3 沉积相类型及分布特征

在 Oriente 盆地沉积演化特征的基础上,通过对主要取芯井和开发井测井数据观察分析,结合研究区岩石学、粒度累积曲线、岩相类型等特征,认为研究区 LU 亚段地层具有以下沉积特点:①LU 亚段地层沉积时期层序边界表现为低缓连续,角度不整合几乎不可见;②发育倾斜非均质层和泥披层,大量发育脉状层理、潮汐韵律层理、羽状交错层理等典型潮汐层理;③外河口湾发育潮汐砂坝与两侧的砂坪;④层段顶部发育原地成因海绿石砂岩,其形成于风暴浪基面与正常浪基面之间的亚还原过渡带环境中,综合上述认识认为, Oriente 盆地白垩系 Napo 组 LU 亚段为潮控河口湾-过渡带-陆棚叠合沉积环境。

3.1 沉积相类型

3.1.1 潮控河口湾

根据岩相序列及组合特征将研究区划分为中河口湾和外河口湾亚相,其中,潮汐水道和潮汐砂坝微相砂体发育最好,表现为平面上连片、垂向上切叠的砂体特征,整体连通性好厚度大,为研究区油气最优储集相带,砂坪则由于其内部泥质含量升高,导致砂体连通性较差,为次一级储集相带。

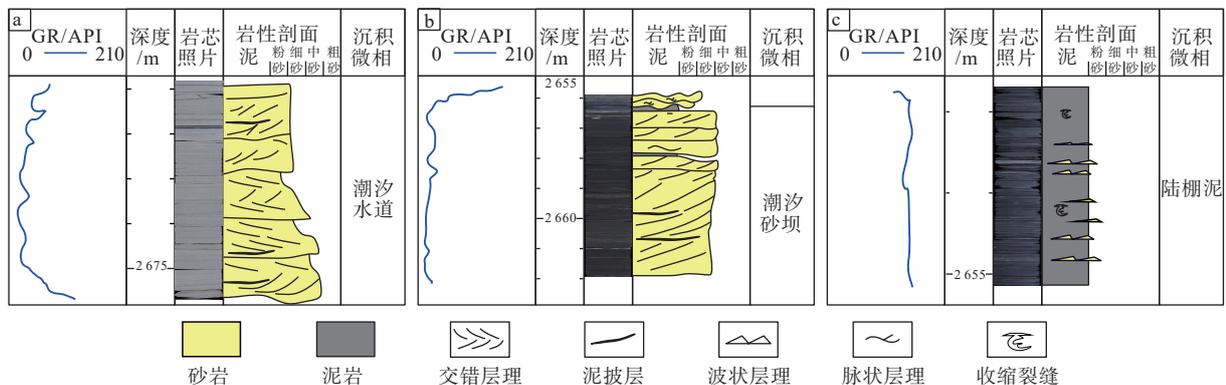
(1)潮汐水道 发育在受潮汐及河流双重影响的中河口湾。发育岩石相类型包括交错层理中一粗砂岩及块状含粉砂泥岩/页岩,砂岩颗粒分选中等—好,磨圆多为次圆状,偶见次棱角状,以石英砂岩为主,发育大型交错层理,可见典型潮汐沉积特征的羽状交错层理,并且发育大量泥披层和倾斜非均质

层(IHS)^[19]。垂向上一般表现为向上粒度变细的正旋回特征,底部通常为具有侵蚀面及少量泥质碎屑的粗砂岩,发育大型交错层理,向上粒度变细过渡为中砂,层理发育尺度变小,体现潮汐水道从发育早期水体能量强到后期能量减弱的演化特征。在中-内河口湾区域因潮汐流及河水的盐密度差异形成河口环流,当河流携带悬浮泥砂进入该区域时,其絮凝作用与密度驱动的残余环流相结合,在枯水期悬浮颗粒会沉降到河床上,并在河床附近形成浓度 $>10\text{ g/L}$ 、厚度 $<0.99\text{ cm}$ 的泥披层,称为浮泥沉积^[20-21]。测井曲线形态多表现为钟型或箱型,整体在水动力较强的环境中(图 6a)。

(2)潮汐砂坝 受限于河口湾形态特征,主潮汐砂坝位于潮汐水道的两侧,受涨潮流和落潮流双向改造的影响,砂坝通常表现为涨潮流一侧坡度陡,落潮流一侧坡度缓的不对称长条状特征。其发育岩相类型为交错层理中一粗砂岩和含泥披层中一细砂岩,砂岩颗粒分选、磨圆好,常见大型板状交错层理及泥披层,所处的水动力环境较强,整体表现为弱的正旋回特征,测井曲线形态呈箱型(图 6b)。

(3)砂坪 向陆方向涨潮趋势减弱,潮流流速变小,平缓的砂坝顶部潮流速度较高,致使发育高流态砂坪。分选及磨圆较好,测井曲线形态多为指状,泥质含量较高,岩相类型以平行层理和脉状层理中一细砂岩为主。

(4)混合坪 位于平均高潮线至平均低潮线之间,岩相类型为波纹层理细砂岩为主,单层砂岩、泥岩厚度较薄,波纹层理非常发育,砂岩成熟度较低。测井曲线特征为指状,表明其水动力强度变化频繁,泥质含量较高,物性较差。



(a) 潮汐水道微相; (b) 潮汐砂坝微相; (c) 陆棚泥微相

图 6 Oriente 盆地北部区块 LU 亚段地层主要沉积微相模版

Fig. 6 Templates of main sedimentary microfacies of the LU Sub-member in the northern block of Oriente Basin

3.1.2 过渡带

前人研究认为, 研究区海绿石发育于潮坪环境中, 提出潮坪-陆棚沉积模式, 但综合砂岩粒度、倾斜非均质层、低生物扰动指数等沉积特征, 认为研究区主体为潮控河口湾沉积而非潮坪沉积。而区内陆棚沉积主要为低能灰质及泥质沉积, 因海绿石颗粒原地成因的特点, 推测潮控河口湾及陆棚沉积之间可能存在过渡带沉积。

海绿石砂席主要为块状海绿石细砂岩和生物碎屑泥质细砂岩, 分选较差, 具有斑状特征, 整体呈正向递变层理, 具有底冲刷面, 富瓣鳃类钙质介壳, 发育 Planolites 遗迹相, 均为典型风暴改造特征。测井曲线特征呈现指状, 泥质含量高, 物性较差。

3.1.3 陆棚

根据岩芯观察分析研究区内陆棚沉积主要为陆棚泥和灰质滩微相。

(1) 陆棚泥 主要发育块状含粉砂质泥岩/页岩, 同时含有波状层理砂泥岩互层、强烈生物扰动块状泥质细—粉砂岩, 可见菱铁矿及黄铁矿结核, 可见典型波状层理砂泥岩互层及收缩裂缝, 测井曲线呈齿状平直型, 为低能特征(图 6c)。

(2) 灰质滩 发育块状泥质石灰岩, 含有泥质和钙质基质, 生物扰动指数为 2, 遗迹化石丰富。测井曲线低幅指状, 指示水体相对较深, 能量较低, 环境比较安静, 表明当前为正常盐度的广海陆棚沉积。

3.2 垂向演化特征

潮控河口湾发育在海侵体系的退积序列。根据 FB-173 井岩芯观察分析, 研究区 LU 亚段整体向上粒度变细, 泥质含量升高, 符合潮控河口湾海侵沉积特征, 与 DAHYMPLE 等^[2,4]的潮控河口湾发育在海侵体系退积序列的观点一致。自下而上分为 5 个短期旋回。SSC1 水进时期发育高能强水动力内河口环境, B_LS 段沉积之后大面积水退, 开始缓慢水进, 处于层段水位最低时期, 主要为潮汐水道及潮汐砂坝沉积, 发育交错层理中—粗砂岩及含泥披层交错层理中—细砂岩等岩相, 侵蚀面为其层序界面。SSC2 水进时期沉积高能环境潮控河口湾中河口部分, 包括潮汐砂坝、潮汐水道及砂坪沉积, 岩相类型为交错层理中—粗砂岩, 顶部发育煤层及碳质泥岩。SSC3 水进时期发育潮控河口湾中-外河口沉积, 海平面进一步升高, 持续水进, 海侵作用变强, 潮汐作用强烈, 发育含泥披层交错层理中—细砂岩和平行层理中—细砂岩等岩相, 主要为潮汐水

道、潮汐砂坝、砂坪沉积。SSC4 时期发生水退, 发育低能陆棚沉积, 层段水进达到最高, 海侵作用最强, 主要发育波状层理砂泥岩互层、块状含粉砂泥岩/页岩及块状泥质细—粉砂岩等岩相, 生物扰动强烈, 主要为陆棚泥沉积。SSC5 时期进一步水退, 发育过渡带至陆棚沉积, 较上一沉积时期海侵作用减弱, 发育过渡带波纹层理细砂岩、块状海绿石细砂岩及块状泥质细—粉砂岩等岩相, 主要为海绿石砂席沉积; 向上陆棚则为块状砂质石灰岩岩相, 含有丰富的生物碎屑及大量的软体动物瓣膜, 指示海侵改造作用, 为灰质滩沉积(图 7)。

在此基础上, 研究区 SE—NW 切物源方向连井沉积微相剖面(图 8)不难发现, MSC1 沉积时期, 为潮控河口湾中-内河口湾亚相, 以河流能量为主潮汐能量为辅, 致使沉积微相类型较少, 潮汐水道在连井剖面最为发育, 局部侧向相变为潮汐砂坝沉积。因该沉积时期基准面处于地表以下为沉积物卸载区, 潮汐水道砂体在垂向上和横向上切叠程度很高、连通性较好。MSC2 沉积时期, 属于潮控河口湾外河口湾亚相, 但因其受河流能量减弱和潮汐能量增强的影响, 砂体叠置程度减弱、连通性变差。

3.3 沉积微相平面特征

研究区整体主要为潮控河口湾沉积, 过渡带和陆棚沉积不甚发育, 但根据研究区西部取芯井 FB-173 井垂向特征识别, 潮控河口湾上部发育过渡带沉积, 之后向上发育陆棚沉积。而研究区 Mariann 油田处于潮控河口湾靠陆地一侧, 区内白垩系 Napo 组 LU 亚段主要发育潮控河口湾沉积, 靠海一侧西部取芯井区域过渡带和陆棚沉积较为发育, 平面及垂向上符合由陆向海依次为潮控河口湾、过渡带、陆棚的沉积特征。

Mariann 油田 LU 亚段主要发育潮汐水道、潮汐砂坝、砂坪和混合坪等微相类型, 在此基础上, 共绘制 5 个短期旋回沉积微相平面图。结果表明, SSC1、SSC2 和 SSC3 沉积时期发育在中-内河口环境中, 以混合能量为主, 潮汐水道整体表现出 SE—NW 向沉积展布, 呈现条带状砂体特征; 潮汐砂坝则受涨潮流和落潮流双向改造的影响呈土豆状、“U”型不对称状发育在潮汐水道两侧, 发育交错层理中—粗砂岩及含泥披层交错层理中—细砂岩等岩相; SSC4 和 SSC5 时期发育外河口潮汐砂坝、砂坪和混合坪沉积, 潮汐能量达到顶峰, 整体表现为砂坪背景上潮汐砂坝发育特征, 混合坪局部发育

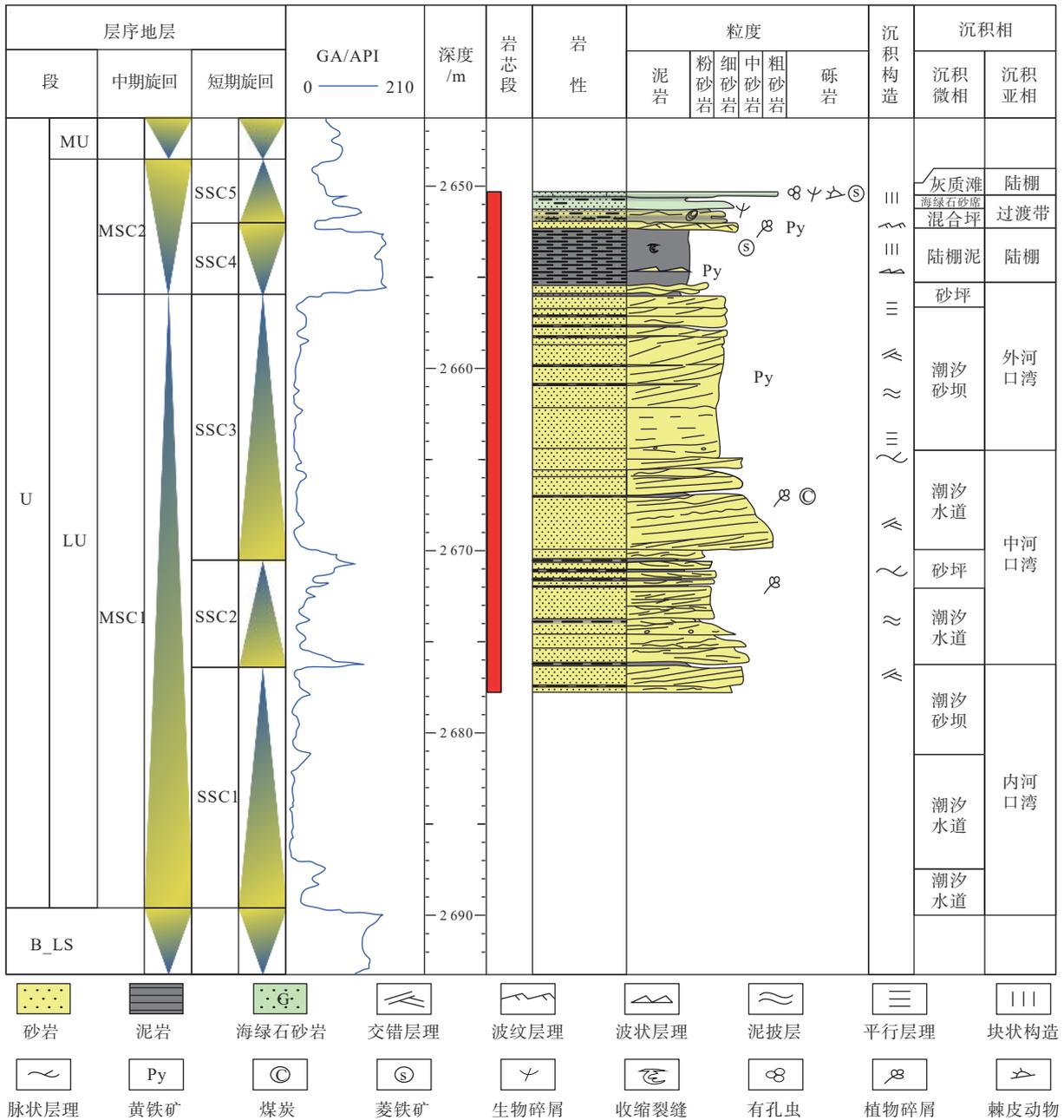


图 7 Oriente 盆地北部 FB-173 井 Napo 组 LU 亚段柱状图

Fig.7 Column diagram of the LU Sub-member of the Napo Formation of Well FB-173 in the north of Oriente Basin

(图 9), 主要为含泥披层交错层理中一细砂岩和波状层理砂泥岩互层等岩相。

4 沉积模式分析

对于潮控河口湾沉积模式的研究, 学界认可度最高的仍然是 DALRYMPLE 等^[2,4] 提出的受两侧古老地层限制的下切河谷潮控河口湾模型(图 10, 英国 Cobequid 湾)。BOYD 等^[22] 取消了这一观点中下切河谷的定义, 并强调了海侵环境是河口湾形

成的必要条件, 这一观点符合研究区潮控河口湾沉积模式。研究区海绿石颗粒镜下特征为高均质性的绿色颗粒状、粪球粒状, 部分可见裂纹、黄铁矿共生, 扫描电镜下呈弯曲的玫瑰花状^[12]; 海绿石颗粒的化学组分以及底部冲刷面、正向递变层理、富瓣鳃类钙质介壳揭示其经历了一定程度的风暴改造^[23-24], 以上均指示研究区海绿石颗粒为原地成因, 即其微观成因是层状矿物发生层间阳离子交换, 受此影响其发育在正常浪基面和风暴浪基面之间的亚还原环境中^[25]。区内的陆棚主要为灰质及泥质

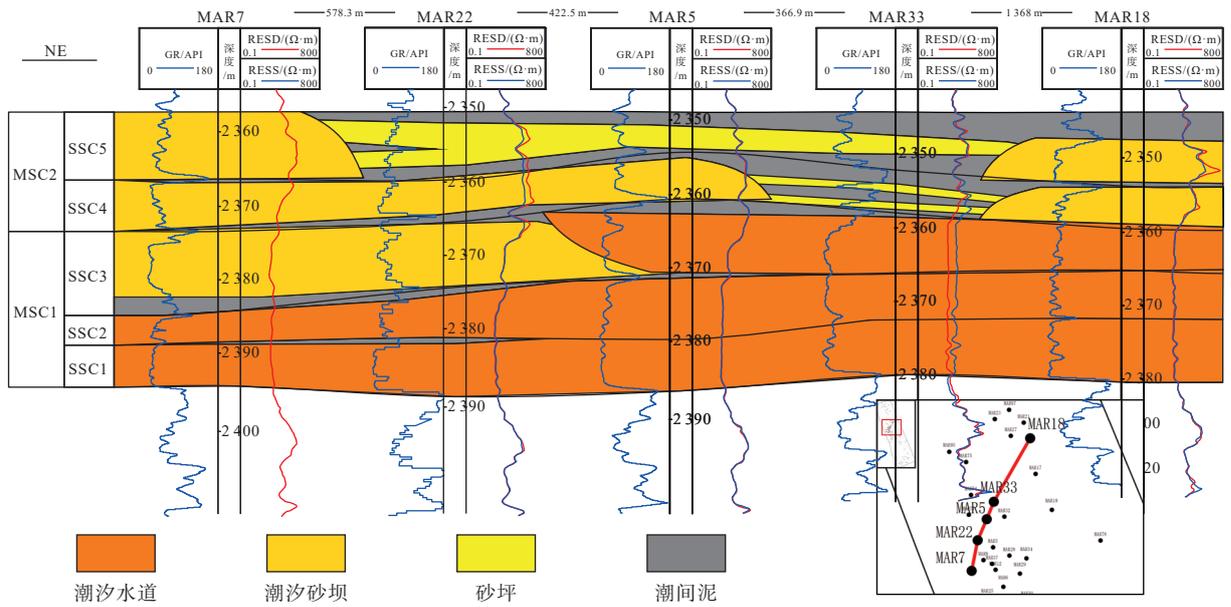


图 8 Oriente 盆地 Mariann 油田 LU 亚段物源方向连井沉积微相剖面图

Fig.8 Cross-well sedimentary microfacies profile of the direction across the sediment source transport of the LU Sub-member in the Mariann Oilfield, Orient Basin

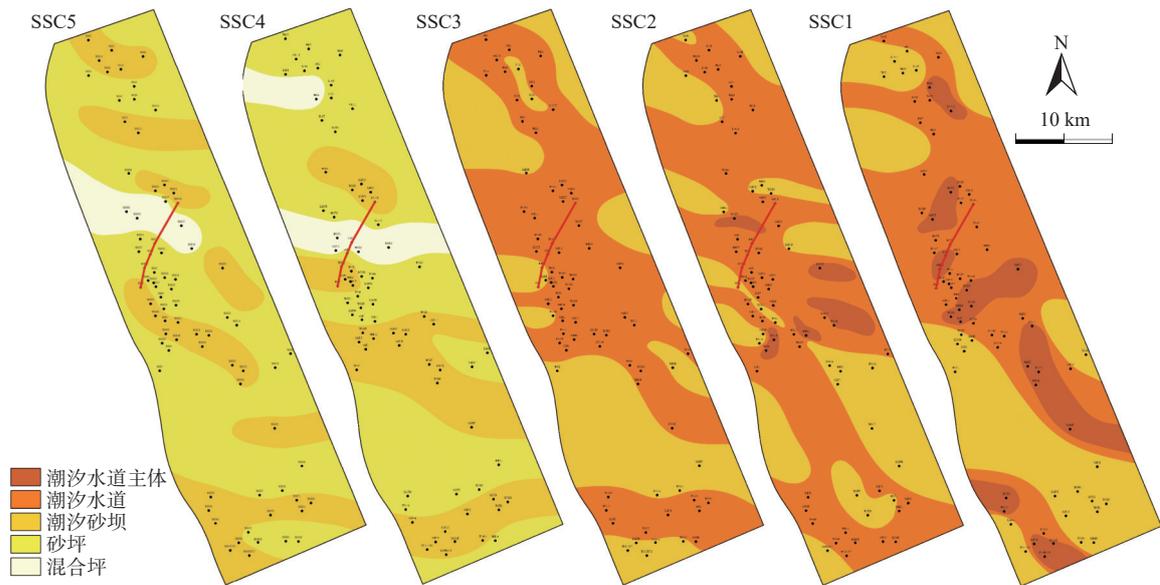


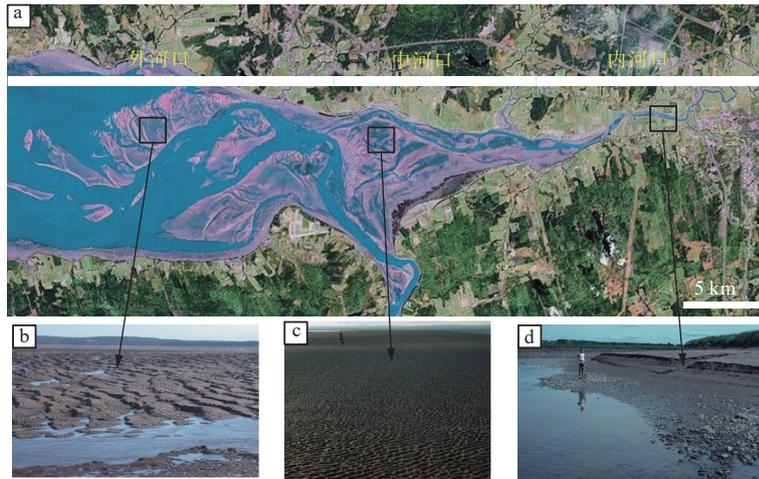
图 9 Mariann 油田白垩系 Napo 组 LU 亚段沉积微相

Fig.9 Distribution of sedimentary microfacies of the LU Sub-member of the Cretaceous Napo Formation in the Marian Oilfield

的细粒沉积,不发育粗粒的砂质沉积。黑色泥质沉积指示其为强还原环境,并且未见风暴改造特征,表现出低能、安静、物源供应不充分的水体特征。而发育在浪基面之上的潮控河口湾沉积,由于其波浪和潮汐的改造作用不符合研究区海绿石原地成因的特征,因此,将其划分为浪基面以下的陆棚环境,亦或是波浪影响微弱的潮控河口湾环境中显然是不合理的。并在 FB-173 井垂向序列识别出海绿石发育在潮控河口湾与陆棚沉积之间,符合海绿石

发育的亚还原环境的特点,离岸距离以及水体深度也符合海绿石原地成因的条件,参考滨岸沉积与陆棚沉积之间存在过渡带沉积特征,认为在持续海侵环境中潮控河口湾及陆棚之间存在缓冲区的过渡带沉积。综上认为,研究区发育海侵体系控制潮控河口湾-过渡带-陆棚叠合沉积(图 11)。

研究区内主体潮控河口湾沉积从海向陆依据潮汐相对能量强弱分为 3 部分,分别为外河口湾、中河口湾和内河口湾亚相(图 11)。其中,内河口湾



(a)CB-SR 河口卫星图; (b)外河口湾潮汐砂坝; (c)中河口湾潮汐砂坪; (d)内河口湾潮汐河道

图 10 英国 Cobequid 湾-Salmon 河 (CB-SR) 河口^[4]

Fig.10 Modern Cobeqid Bay-Salmon River estuary (CB-SR)^[4]

沉积主控水体能量为河流能量,伴有微弱的潮汐逆流,沉积微相类型以潮汐影响的潮汐水道为主,主要为陆源粗粒沉积;中河口湾沉积受河流能量与潮汐能量的混合控制,河流能量减弱,潮汐能量变强,发育潮汐水道、潮汐砂坝、砂坪微相,整体粒度为潮控河口湾内部最细,泥质含量较高,平面上以河道

弯曲度较高为特征;中河口湾向外过渡,容纳潮量和潮流变大引起的潮汐能量控制,伴随微弱的波浪能量影响,导致沉积物泥质含量较少,发育潮汐砂坝和砂坪微相。受限于地形特征的河口向海侧翼纳潮量通常很小,这使得靠近潮汐主导的河口开阔海岸的沉积物通常受波浪主导^[4]。

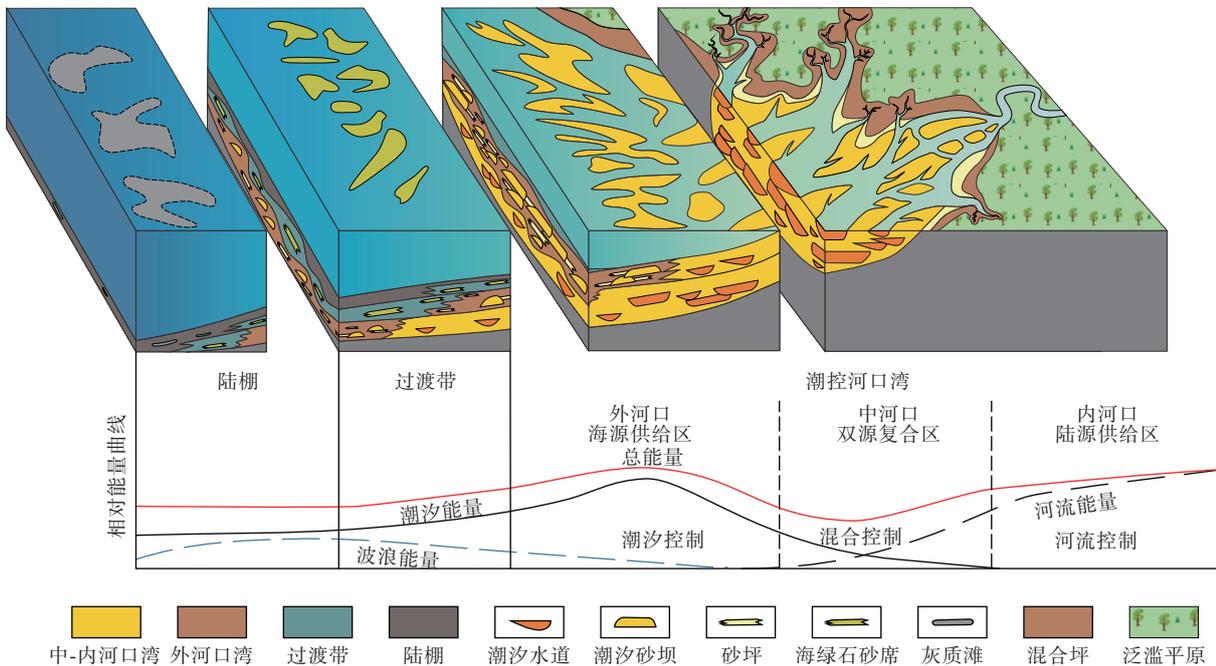


图 11 Oriente 盆地 Napo 组 LU 亚段潮控河口湾-过渡带-陆棚沉积模式

Fig.11 Tidal-dominated estuary - transitional zone - shelf sedimentation model of the LU Sub-member of the Napo Formation in Oriente Basin

5 结论

(1) 对 Oriente 盆地北部 FB-173 井 Napo 组

LU 亚段岩芯进行了精细描述,研究区主要发育泥披层、正向递变层理、羽状交错层理、脉状层理、波纹层理、波状层理、软沉积物变形构造、生物扰动构造、碳质层等潮汐环境典型沉积构造,划分为 8

种砂岩相、2 种泥岩相及 1 种灰岩相共 11 种岩相类型, 为后续沉积相及微相划分奠定了基础。

(2) 综合镜下薄片分析、粒度分布特征、沉积构造及测井相等特征认为, 厄瓜多尔 Oriente 盆地 Napo 组 LU 亚段发育潮控河口湾、过渡带和陆棚沉积, 可进一步划分为中河口湾、外河口湾、过渡带和陆棚 4 种亚相, 潮汐水道、潮汐砂坝、砂坪、混合坪、海绿石砂席、陆棚泥和灰质滩等 7 种微相, 其中, 优势储层相带为潮汐水道和潮汐砂坝, 砂坪次之。

(3) 厄瓜多尔 Oriente 盆地 Napo 组 LU 亚段地层是发育在以潮汐作用为主的海陆过渡环境, 根据海绿石形成特征, 提出潮控河口湾与陆棚之间可能存在过渡带沉积的观点, 因此, 建立该区海侵体系控制的潮控河口湾-过渡带-陆棚沉积模式, 可以更好地确定潮控河口湾沉积的相带边界, 对有利储层范围确定具有重要意义。

参考文献:

- [1] TANG M M, ZHANG K X, HUANG J X, et al. Facies and the architecture of estuarine tidal bar in the Lower Cretaceous McMurray Formation, Central Athabasca Oil Sands, Alberta, Canada[J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1-18.
- [2] DALRYMPLE R W, ZAITLIN B A, BOYD R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1992, 62(6): 1130-1146.
- [3] PRITCHARD D W. What is an estuary: physical viewpoint[J]. Lauff G H, *Estuaries: American Association for the Advancement of Sciences*, 1967, 83: 3-5.
- [4] DAVIS R A, DALRYMPLE R W. Principles of Tidal Sedimentology[M]. New York: Springer, 2012: 79-107.
- [5] 赵霞飞, 胡东风, 张闻林, 等. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组的潮控河口湾与潮控三角洲沉积 [J]. *地质学报*, 2013, 87(11): 1748-1762.
- [6] 刘慧盈, 陈和平, 张克鑫, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地北部区块 T 段地层沉积演化特征 [J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2): 53-62.
- [7] SU J F, FAN D D, LIU P J, et al. Anatomy of the transgressive depositional system in a sediment-rich tide-dominated estuary: the paleo-Yangtze estuary, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 121: 104588.
- [8] 李阳, 金振奎, 朱小二, 等. 潮控河口湾岩相类型及沉积模式: 以厄瓜多尔 Oriente 盆地北部区块上白垩统 Napo 组 LU 段为例 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(4): 826-837.
- [9] SHANMUGAM G, POFFENBERGER M, ÁLAVA J T. Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo ("T" and "U") Formations (Cretaceous), Sacha Field, Oriente Basin, Ecuador[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(5): 652-681.
- [10] TANKARD A J, SUÁREZ SORUCO R, WELSINK H J. Petroleum Basins of South America[M]//WHITE H J, SKOPEC R A, RAMIREZ F A, et al. Reservoir characterization of the Hollin and Napo Formations, Western Oriente Basin, Ecuador. *American Association of Petroleum Geologists*, 1995: 573-596.
- [11] 刘忠亮, 张成富, 张渊, 等. Oriente 盆地 L-I-Y 油田 Hollin 组与 Napo 组沉积微相研究 [J]. *石油物探*, 2017, 56(4): 581-588.
- [12] 阳孝法, 谢寅符, 张志伟, 等. 奥连特盆地白垩系海绿石成因类型及沉积地质意义 [J]. *地球科学*, 2016, 41(10): 1696-1708.
- [13] 李晨晖, 薛海涛, 卢双舫, 等. 潮控河口湾环境下的沉积相特征研究: 以 D-F 油田 M1 油藏为例 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(2): 20-28.
- [14] DASHWOOD M F, ABBOTTS I L. Aspects of the petroleum geology of the Oriente Basin, Ecuador[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1990, 50: 89-117.
- [15] VALLEJO C, TAPIA D, GAIBOR J, et al. Geology of the Campanian M1 sandstone oil reservoir of eastern Ecuador: a delta system sourced from the Amazon Craton[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1207-1223.
- [16] 刘畅, 张琴, 谢寅符, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地东北部区块白垩系层序地层格架及发育模式 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1123-1131.
- [17] 杨金秀, 张克鑫, 陈和平, 等. Oriente 盆地 D-F 油田泥岩墙成因及其对油藏分布的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1156-1164.
- [18] FOLK R L. Petrology of Sedimentary Rocks[M]. Austin Texas: Hemphill's, 1968.
- [19] JOHNSON M S, DASHTGARD E S. Inclined heterolithic stratification in a mixed tidal-fluvial channel: differentiating tidal versus fluvial controls on sedimentation[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 41-53.
- [20] ICHASO A A, DALRYMPLE R W, et al. Tide- and wave-generated fluid mud deposits in the Tilje Formation (Jurassic), offshore Norway[J]. *Geology*, 2009, 37(6): 539-542.
- [21] LONGHITANO S G, MELLERE D, STEEL R J, et al. Tidal depositional systems in the rock record: a review and new insights[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 279: 2-22.
- [22] BOYD R, DALRYMPLE R W, ZAITLIN B A. Estuarine and incised-valley facies models[J]. *Facies Models Revisited*, 2006, 84: 171-234.
- [23] 梅冥相, 杨锋杰, 高金汉, 等. 中元古代晚期浅海高能沉积环境中的海绿石: 以天津蓟县剖面铁岭组为例 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 146-158.
- [24] 许璐, 杨长清, 王海荣. 东海陆架南部海域及周边陆域白垩纪海侵标志及地质意义 [J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(4): 22-30.
- [25] SANTANU B, TATHAGATA R C, PRATUL K S, et al. The formation of authigenic deposits during Paleogene warm climatic intervals: a review[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 9(4): 4-30.

The sedimentary model of the LU Sub-member of Cretaceous Napo Formation in Oriente Basin, Ecuador

HAN Liyang^{1,2}, SUN Yu^{1,2}, ZHANG Kexin³, YAN Baiquan^{1,2*}, ZHANG Chaoqian³, YANG Guoqing^{1,2}

(1 School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2 Sanya Offshore Oil and Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya 572024, China; 3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The LU Sub-member (LUSM) of the Cretaceous Napo Formation in the northern part of Oriente Basin, Ecuador, is extremely rich in hydrocarbon resources and has a large potential for hydrocarbon exploration. However, the depositional pattern of the LUSM remains poorly understood, which had largely limited the further exploration and development of the area. Based on the core observation, logging, maturity analysis, and thin-section study, the petrological and sedimentary features were described; the biological relics and fossils, sedimentary structure and rhythm, and the logging phase signatures were analyzed. Results show that the LUSM strata were developed in a transitional environment between sea and land, in which tidal action was dominated. Referring to previous studies, we proposed that there was a transitional zone between tide-dominated estuary and a continental shelf, forming a tide-dominated estuary - transitional zone - continental shelf sedimentary system, showing seven sedimentary microfacies: tidal channel, tidal sand bar, sand flat, glauconite sand sheet, mixed flat, shelf mud, and calcareous beach. Among them, the tidal channel and tidal sand bar are sweet reservoir facies, followed by sand flat. By analyzing the depositional system, a tidal-dominated estuarine - transition zone - shelf depositional model was established for the study area. This study provided a favorable scientific basis for oil and gas exploration in the Cretaceous Napo Formation in the Oriente Basin.

Key words: sedimentary model; sedimentary microfacies; tidal-dominated estuary; Oriente Basin