

莫东地区白垩系清水河组一段叠瓦状前积地震反射特征的地质意义

周路*^① 关旭^① 雷德文^② 沈金龙^③ 李先艳^① 吴勇^①

(^①西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都 610500; ^②新疆油田公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000; ^③中国石油杭州地质研究院,浙江杭州 310023)

周路,关旭,雷德文,沈金龙,李先艳,吴勇. 莫东地区白垩系清水河组一段叠瓦状前积地震反射特征的地质意义. 石油地球物理勘探, 2013, 48(4): 625~633

摘要 莫索湾凸起白垩系清水河组一段(K_1q_1)从上至下可分为薄砂层($K_1q_1^1$)、高伽马泥岩($K_1q_1^2$)、底砂岩($K_1q_1^3$)三个岩性段。其中莫东地区的 $K_1q_1^1$ 为辫状河三角洲前缘叠瓦状前积和侧向迁移叠置型砂体,是由多个砂体前积、叠置和迁移形成的,代表了多个薄砂体顺斜坡方向的前积、叠置和侧向迁移,具有明显的两波谷夹一中一强振幅、连续宽相位波峰地震反射特征,反映了多个薄砂层组合所形成的复波反射,复波的宽度和振幅与薄砂层组所在位置砂层的总厚度及单砂层厚度有关。根据沉积相、古地形和正演模型特征分析了前积体的成因,认为该前积反射反映了间歇型辫状河三角洲前缘席状砂顺斜坡方向的前积作用。在三维地震剖面上对各前积反射体进行追踪和对比,共识别出 12 个前积朵叶体,前积朵叶体总面积达 642.44 km²,主要分布于莫东地区的斜坡和低洼地带,易于形成岩性圈闭,具有十分有利的油气成藏条件。

关键词 准噶尔盆地 莫东地区 清水河组 地震响应 前积砂体 岩性圈闭

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 概况

莫索湾凸起位于准噶尔盆地中央拗陷腹部地

区,紧邻多个生油凹陷(图 1),十分有利于油气聚集,油气产层主要为侏罗系三工河组砂岩。在该区已经发现了莫索湾油气田和莫 10 井等多个油气藏^[1,2]。目前,白垩系清水河组一段(清一段)的油气勘探进

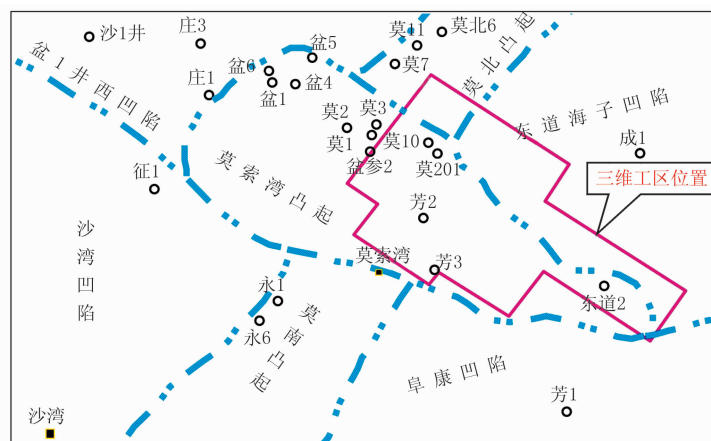


图 1 研究区位置图

莫东地区指莫 10—莫 201—芳 2—芳 3 井以东、东道 2 井以西地区

* 四川省成都市新都区新都大道 8 号西南石油大学资源与环境学院,610500。Email: zhoulou9@126.com
 本文于 2012 年 10 月 15 日收到,最终修改稿于 2013 年 5 月 21 日收到。
 本研究受国家科技重大专项课题(2011ZX050001-006)资助。

展不大,虽多处发现岩屑荧光显示,但仅盆参2井为油水同层。在与莫索湾凸起相邻的其他探区均发现了清一段油气藏^[3],特别是在位于莫索湾凸起南部斜坡带上的永6井见到了工业油流,表明莫索湾凸起清一段具有较大油气勘探潜力。通过对莫索湾凸起以东地区(莫东地区)三维地震资料的岩性解释,发现了清一段上部前积砂体,具有十分有利的油气成藏条件。

2 清一段岩性及电性特征

莫索湾凸起白垩系清水河组(K_1q)分为下部清一段(K_1q_1)和上部清二段(K_1q_2)^[3],其中 K_1q_1 油气显示丰富。据岩性、电性和沉积旋回等特征, K_1q_1 又可细分为上($K_1q_1^1$)、中($K_1q_1^2$)、下($K_1q_1^3$)三个岩性段(图2),其中 $K_1q_1^3$ 为巨厚层状灰色细砂岩

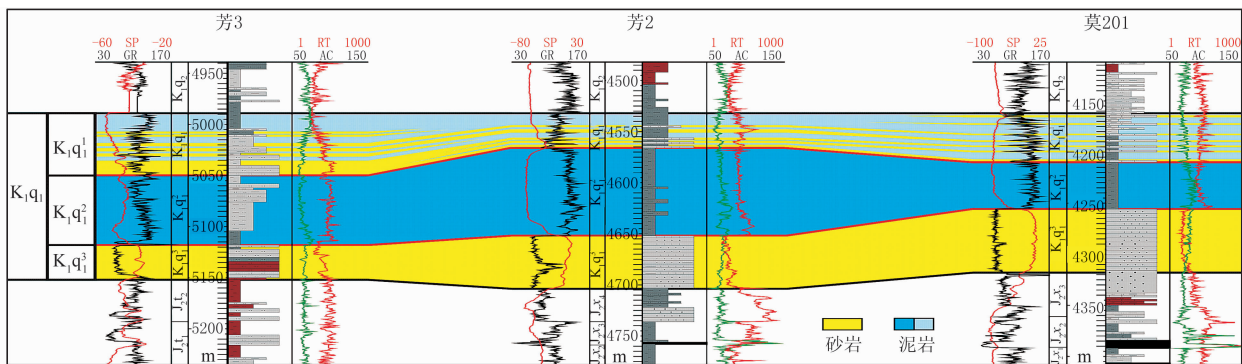


图2 莫东地区 K_1q_1 连井地层对比图

SP曲线的量纲为mV, GR曲线的量纲为GAPI, RT曲线的量纲为 $\Omega \cdot m$, AC曲线的量纲为 $\mu s \cdot m^{-1}$

及薄层粉—细砂岩,砂岩单层厚度约为50m,砂层连通性好,可对比性强,该岩性段位于白垩系底部,通常称之为底砂岩段。 $K_1q_1^2$ 以厚约100m的灰色泥岩为主,该岩性段的伽马曲线总体异常高值特征突出,通常称之为高伽马泥岩段^[4]。 $K_1q_1^1$ 以不等厚灰色薄层粉砂岩、细砂岩与泥岩呈等厚互层为主要特征,称为薄砂层段,砂岩单层厚度为4~10m,薄砂层组厚度横向变化较大,薄砂层主要分布在该岩性段的中部和下部。

3 叠瓦状前积反射特征分析

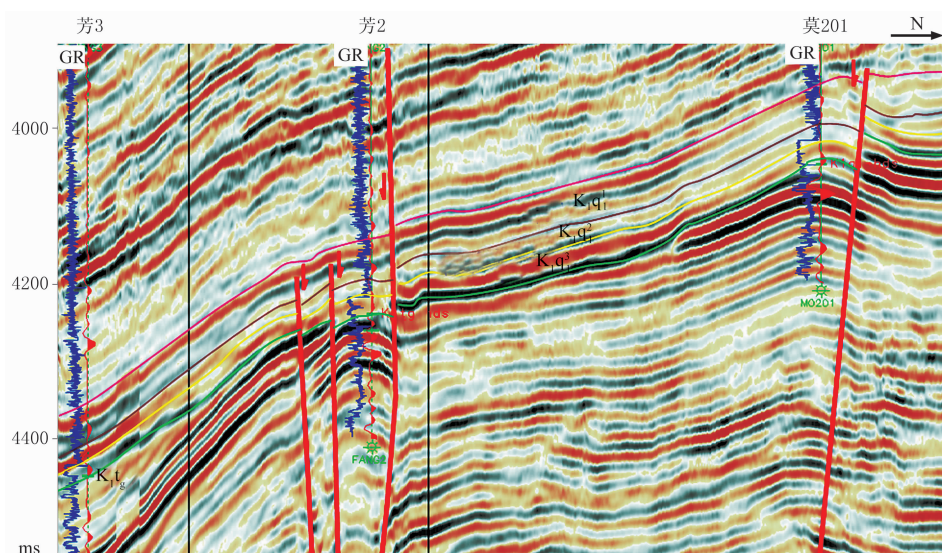
3.1 层位标定

利用合成地震记录对莫东地区 K_1q_1 岩性进行地震地质层位标定,以建立该岩性段井震特征对应关系。地震频谱分析表明,莫东地区地震资料分辨率较低,主频约为30Hz。图3为L1测线 K_1q_1 地震地质层位标定图,由图中可见: K_1q_1 底界面与下伏J呈削蚀不整合接触, $K_1q_1^3$ 对应强振幅、宽相位波谷反射; $K_1q_1^2$ 对应较弱振幅、宽相位波谷反射; $K_1q_1^1$ 为两波谷夹一中一强振幅、连续宽相位波峰反射,该波峰反射反映了多个薄砂层组合所形成的复波反

射,复波的宽度和振幅与薄砂层组所在位置砂层的总厚度及单砂层厚度有关。如芳3井处 $K_1q_1^1$ 单砂层厚度和砂层总厚度较大,对应的反射波振幅相对较弱,复波的宽度较大,频率明显较低;相邻的芳2井 $K_1q_1^1$ 单砂层厚度和砂层总厚度较小,对应的反射波振幅相对较强,复波特征不明显,波形宽度较小,频率明显较高。上述地震响应特征在砂、泥岩薄互层模型地震正演剖面(图4)中得到了验证,即低频率(30Hz)地震响应无法分辨薄层砂体,多个薄砂层的叠合体对应一个复合波形,复合波形的振幅和频率与单砂层的厚度有密切关系。如单层薄砂层厚度为2~5m时(图4a),薄砂层组对应一个低频、强振幅单波反射,而单层薄砂层厚度增大到5~10m时(图4b),薄砂层组对应一个振幅较弱、波形宽缓的复波反射。上述特征与研究区井震关系基本吻合,但莫201井处 $K_1q_1^1$ 单砂层厚度进一步减薄,且单砂层层数相对增多,泥岩夹层厚度增大时,对应的单波振幅也会下降(图3)。如薄砂层段($K_1q_1^1$)中部薄砂层连续分布,且由芳3井向莫201井方向砂层总厚度逐渐减薄,导致单波振幅下降(图3)。

3.2 叠瓦状前积反射特征

通过对莫东地区的该套薄砂层组($K_1q_1^1$)的

图 3 L1 测线 K_1q_1 地震地质层位标定图(位置见图 10)

合成记录频率为 30Hz

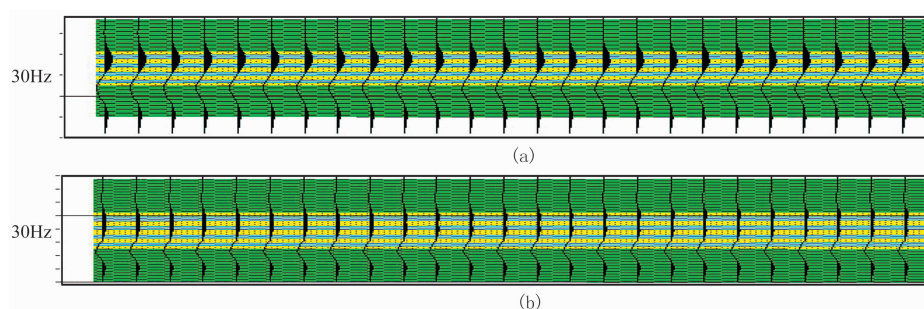


图 4 砂、泥岩薄互层模型地震正演剖面

(a)单层薄砂层厚度为 2~5m; (b)单层薄砂层厚度为 5~10m

射特征进行平面追踪与对比,发现在莫东地区 K_1q_1 具有明显的叠瓦状前积地震反射特征^[5~7](图 5~图 7); K_1q_1 由北西—南东向顺斜坡呈叠瓦状前积、叠置反射特征,各前积朵叶体首、尾具有明显台阶状反射特征,且上、下呈部分叠置关系(图 5);垂直斜坡方向前积朵叶体发生侧向迁移,呈块状和叠置反射特征(图 6);莫 201 井钻遇了第 K 个前积朵叶体的西侧尾部(图 7、图 2),其前积反射与井下 K_1q_1 底部 4 个薄砂层的纵向叠置复合体相对应,单个薄砂层厚度约为 2m,由于单层砂层较薄,且泥岩层多厚度大,其对应的前积反射振幅较弱。

3.3 正演模型分析

为了解释前积反射特征的成因,根据莫 201 井 K_1q_1 各层段的波阻抗和厚度特征,依据 L2 测线地震反射剖面(图 5)的反射特征设计了地质模型及地震正演剖面(图 8),由正演结果可见:当无前积砂体时,不存在前积反射特征(图 8a);当 K_1q_1 前积砂体

倾角接近前积反射倾角时(28°),出现与图 5 相似的叠瓦状前积反射特征(图 8b);当 K_1q_1 前积砂体倾角较大时(35°),叠瓦状前积反射特征更加明显(图 8c);当 K_1q_1 前积砂体倾角较小时(20°),前积反射特征不明显(图 8d)。因此前积反射特征的成因为:前积型砂体叠置是在湖退型三角洲沉积环境,且具有一定物源供给、斜坡地形和较强水动力条件下,在顺古水流方向地震剖面上可见前积砂体的叠瓦状前积反射特征;相邻砂体首、尾叠置处振幅减弱,并具有波形拐点和台阶状反射特征,前积方向代表古水流方向;前积砂体发育处反射振幅较强,随着前积砂体厚度逐渐减薄,反射振幅也随之减弱。根据薄砂层参数特征所设计的前积砂体地质模型及地震正演剖面验证了 K_1q_1 前积反射是由多个砂体前积、叠置和迁移形成的^[6,7](图 8),即研究区前积反射代表了多个薄砂体顺斜坡方向的前积、叠置和侧向迁移。

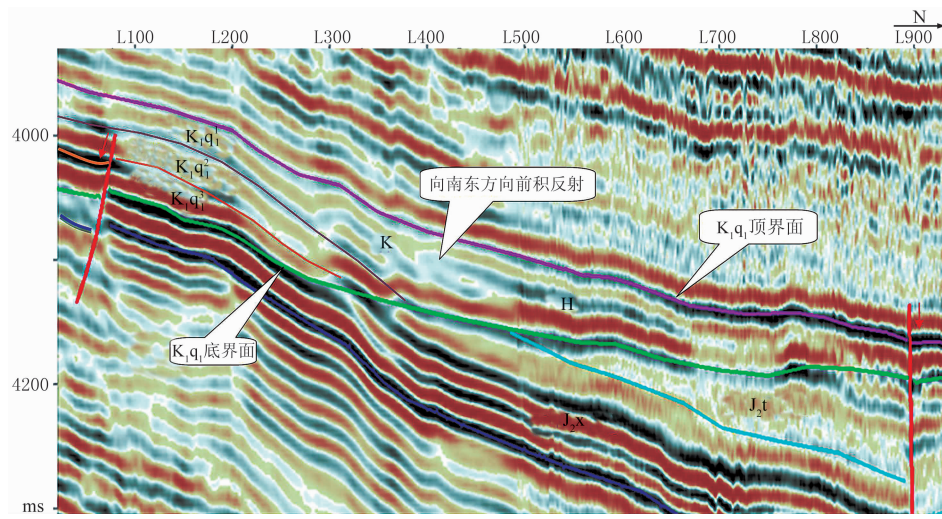


图5 L2测线地震反射剖面(位置见图10)
D、J、K、L、H为前积杂叶体编号,下同

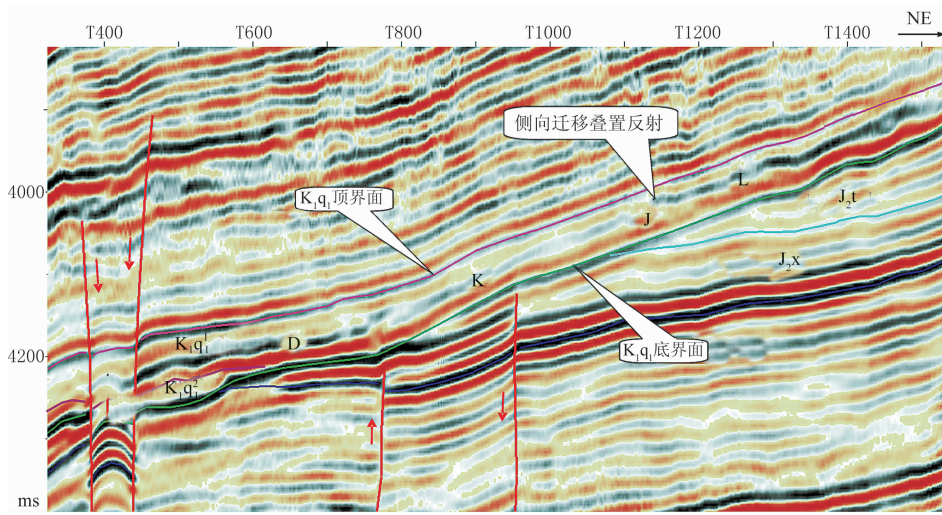


图6 L3测线地震反射剖面(位置见图10)

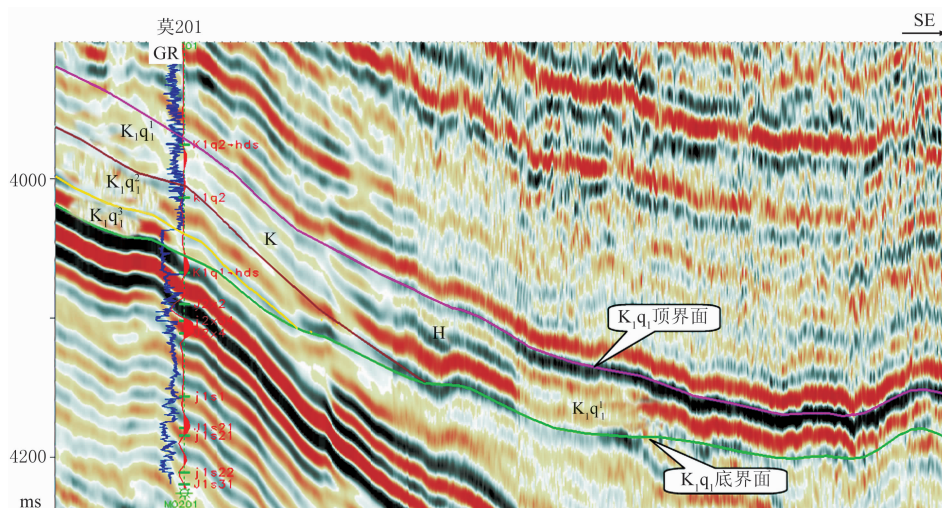


图7 L4测线地震反射剖面(位置见图10)

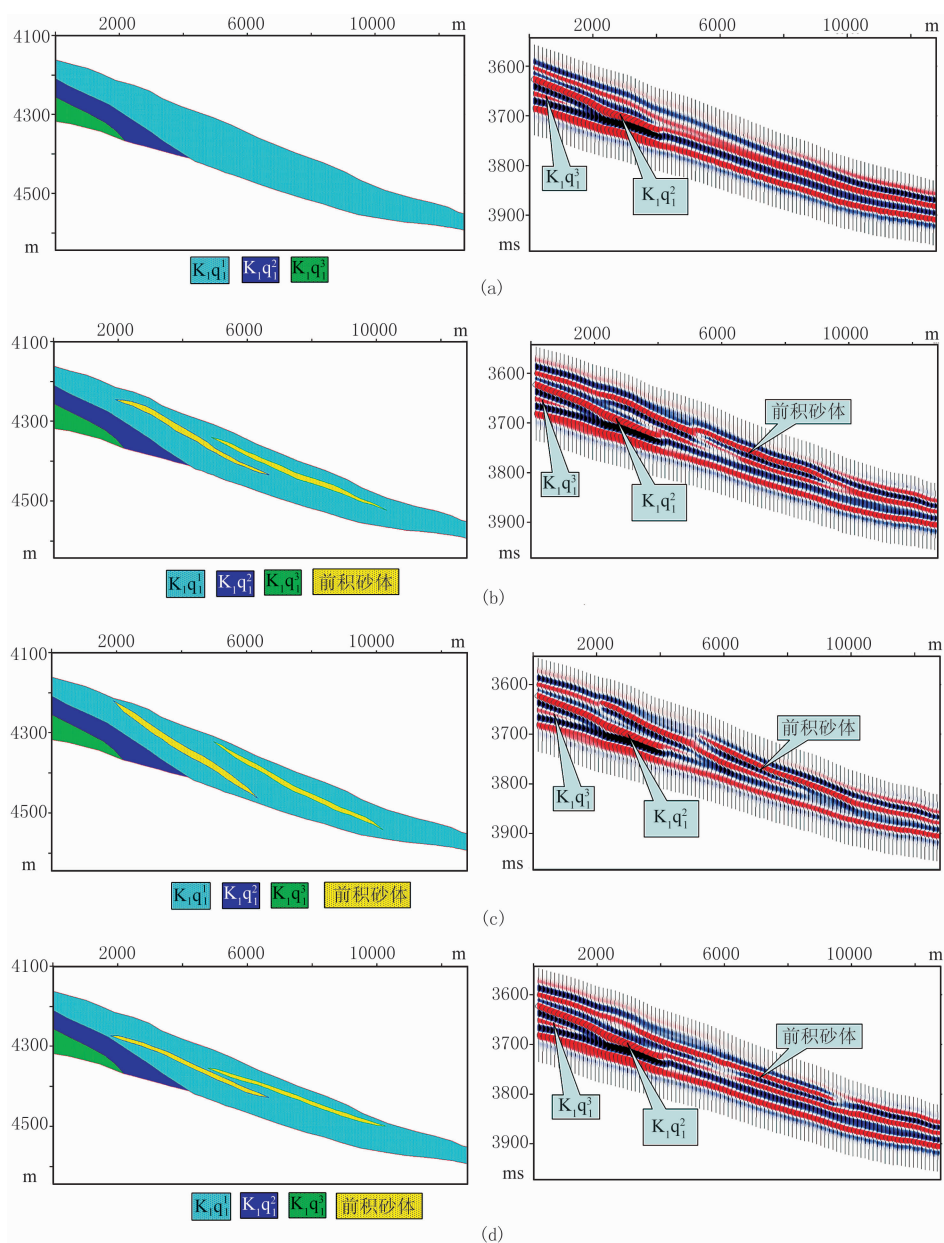


图 8 地质模型及地震正演剖面(前积砂体厚为 0~15m, 主频 $f=30\text{Hz}$)

(a) 无前积砂体地质模型(左)及其地震响应(右); (b)~(d) 倾角分别为 28° , 35° , 20° 的前积砂体地质模型(左)及其地震响应(右)
 $K_1q_1^1$ 、 $K_1q_1^2$ 、 $K_1q_1^3$ 及前积砂体的速度分别为 4000, 3850, 4100, 4200m/s

4 前积砂体发育成因

准噶尔盆地在经历了晚侏罗世剧烈构造活动后,在早白垩世开始稳定沉降,湖盆范围扩大,基准面旋回的升降变化控制了沉积体系演化^[8]。在 K_1q 沉积早期,相当于基准面初始上升期,底部沉积了厚层低位域底砾岩层(底砂岩段 $K_1q_1^3$) (图 9),该阶段湖泊范围较小,受来自北部德伦山辫状河三角洲物

源体系的影响,底砂岩广泛分布于莫索湾地区,主要发育水下分流河道砂体,单砂层厚度大,总厚度由北向南减薄,莫东地区底砂岩厚度较薄,并向东道 2 井方向超覆尖灭。随着基准面逐渐上升,三角洲沉积不发育,湖泊范围扩大,此时水体较深,沉积物沉积速率较低,在莫南地区沉积了一套滨浅湖相泥岩(高伽马泥岩段 $K_1q_1^2$)^[4]。随着北部德伦山物源体系间歇性供给,导致辫状河三角洲再次发育,但三角洲规模较小,在莫东地区沉积了间歇型辫状河三角洲前

缘席状砂(薄砂岩段 K_1q_1'),其单砂层厚度较小、连续性差,平面分布不稳定,砂体与泥岩以薄互层的形式出现。沉积相研究表明,莫索湾地区 K_1q_1 底部和顶部主要受北部德伦山物源体系影响,发育远源辫状河三角洲沉积,以辫状河三角洲前缘沉积为主,由多个分支组成(图 9),主要发育水下分流河道、河口坝和席状砂等沉积微相类型^[4,8], K_1q_1 上部主要发育滨浅湖相泥岩沉积^[4]。

在研究区岩心和地震剖面上 K_1q_1 显示为未曾遭受剥蚀的迹象,且 K_1q_1 底部表现为向东道 2 井区

超覆的特征,莫 10 井以北邻近莫北凸起区,因此东道 2 井区和莫 10 井以北地区在白垩纪初期都为古地形相对高地区。 K_1q_1 厚度图特征也大致反映了 K_1q_1 沉积时研究区的古地貌背景(图 10),其中莫东地区沉积厚度较大,应为相对低洼的地形,而其北部和东部沉积厚度较小,为地势相对较高的古地形。上述古地貌背景为来自北部德伦山辫状河三角洲前缘砂体在地形坡度变化区发生前积和侧向迁移叠置创造了条件,研究区地震剖面上的前积和侧向迁移叠置反射特征反映了这种沉积现象。

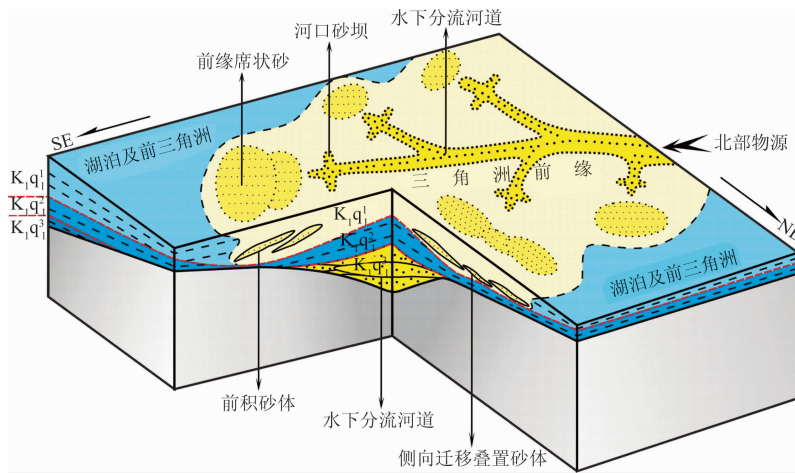


图 9 莫东地区 K_1q_1 沉积模式图

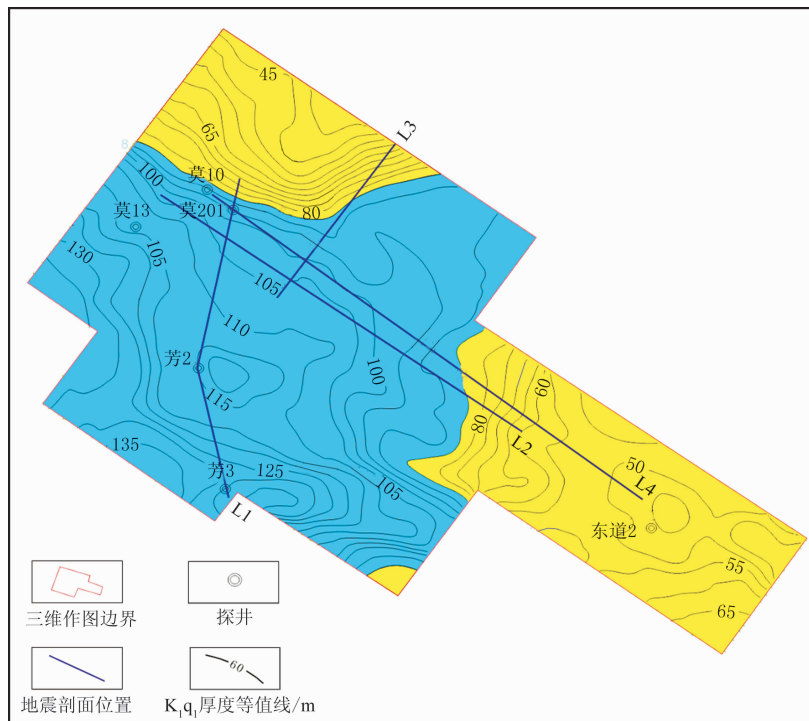


图 10 莫东地区 K_1q_1 地层厚度图

5 前积体分布与岩性圈闭形成可能性探讨

5.1 前积体平面分布特征

以白垩系底界面反射层为时窗基准面,向上分别开取时窗,并提取时窗内薄砂岩段($K_1q_1^1$)反射波地震属性,以分析 $K_1q_1^1$ 不同时窗范围内砂体的发育与分布特征。通过对比、分析 20~30ms 和 30~40ms 时窗内反射强度平均值平面分布特征表明(图 11):①莫 10—莫 201—芳 2 井以西强振幅反射区对应清水河组底砂岩($K_1q_1^3$)发育区,该强振幅发育区向东尖灭线位置与地震剖面上底砂层由西向东尖灭点所圈位置一致(图 11、图 5、图 7)。②莫东地区缺失 $K_1q_1^3$,主要发育 $K_1q_1^1$,在 20~30ms 时窗反射强度平均值平面图中发育多个团块状相对较强振幅区(图 11a),莫 201 井标定结果表明,相对强振幅

反映了 $K_1q_1^1$ 内砂层相对较发育;随着时窗向 $K_1q_1^1$ 顶部移动,相对强振幅团块的面积和数量相对减少(图 11b),表明该区砂体主要分布于 $K_1q_1^1$ 底部,岩性对比剖面也反映了这种特征(图 2)。此外,莫东地区所发育的多个呈块状分布的相对较强振幅区与地震剖面上所识别出的各前积朵叶体位置基本对应,基本反映了 $K_1q_1^1$ 前积砂层的发育与叠置特征,这些前积砂体与西北部 K_1q_1 底部厚层砂体不连通,四周被弱振幅的泥质岩所分隔,这些特征在波阻抗反演剖面上也有清晰反映(图 12):莫 201 井与莫 10 井之间的清水河组底砂岩($K_1q_1^3$,高波阻抗)发育, $K_1q_1^3$ 向南东方向厚度逐渐减薄而尖灭,因此由莫 201 井向南东方向主要发育底部高伽马泥岩段($K_1q_1^2$,低波阻抗)和上部薄砂层段($K_1q_1^1$,低阻抗夹高阻抗),其中薄砂层主要发育于 $K_1q_1^1$ 底部,砂层组横向不连通,分布范围有限,多套薄砂层在纵向上具有叠置关系。

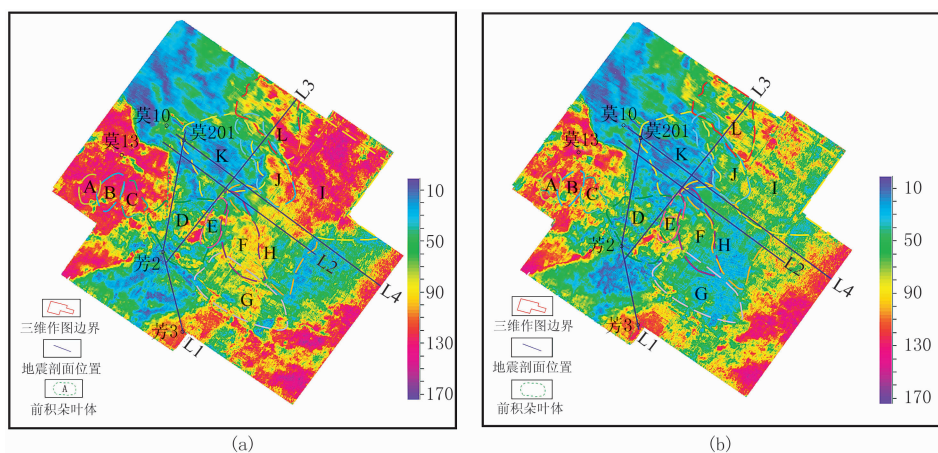


图 11 莫东地区 K_1q_1 反射强度平均值平面图

(a)20~30ms 时窗; (b)30~40ms 时窗

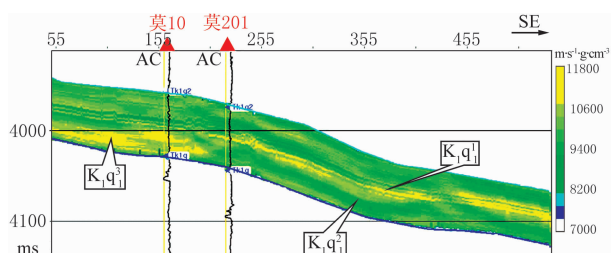


图 12 莫东地区 K_1q_1 波阻抗反演剖面

在三维地震剖面上对各前积反射体进行追踪和对比,共识别出 12 个前积朵叶体(图 13、表 1),前积朵叶体总面积达 642.44km²,主要分布于莫东地区的斜坡与低洼地带(图 10、图 11)。

表 1 前积体数据表

前积朵叶体编号	前积朵叶体面积/km ²
A	8.95
B	12.77
C	11.64
D	56.09
E	14.04
F	44.97
G	69.87
H	75.69
I	151.55
J	48.43
K	88.01
L	60.43

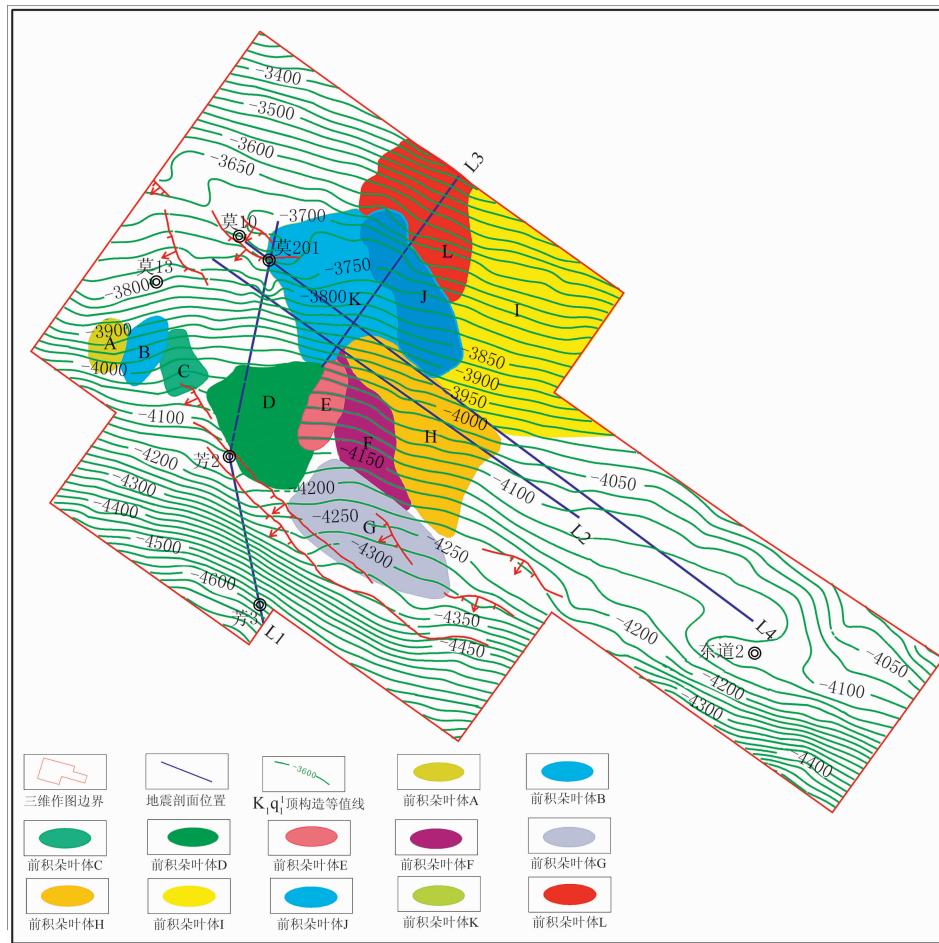


图 13 莫东地区 K_1q_1 前积砂体平面分布预测图(单位:m)

5.2 岩性圈闭形成条件分析

上述前积朵叶体所反映的前积砂体与滨浅湖泥岩交互沉积,具有良好的侧向和顶、底板封堵条件,各前积朵叶体沿上倾方向发生尖灭(图 13),并被泥岩封堵,因此每个前积朵叶体都可能形成单个砂岩体岩性圈闭。莫索湾凸起东翼深、浅层均发育北西—南东向断裂^[1],深部逆断裂体系和浅层正断裂相互配置构成一个良好油气垂向输导体系^[9],这些油源断裂的存在有利于深层油气向前积砂体圈闭发生垂向运移^[8,10]。前积砂体所在位置紧邻白垩系底的不整合面,这有利于前积砂体圈闭捕获沿不整合面进行侧向运移的油气。对莫索湾凸起东翼油气显示井(盆参 2、莫 10、莫 201、东道 2、董 1 井)进行的油气运移分析表明,油气主要来自盆地南部阜康凹陷和东部东道海子凹陷^[10~12],二叠系高成熟—过成熟的天然气与源自侏罗系成熟阶段的大量油气在异常高压作用下沿断层和不整合面向上运移^[11~13],可

在前积砂体内聚集成藏,处于阜康凹陷和东部东道海子凹陷前锋部位的莫东地区是油气运移的指向区。前积砂体沉积初期与现今的地貌特征总体都表现为北西翼高、南东翼低,新近纪盆地所发生的大规模区域性向南掀斜构造运动对前积砂体圈闭的油气成藏和调整影响较小^[14]。因此莫索湾凸起东翼 K_1q_1 前积砂体岩性圈闭成藏条件相对优越,沉积相带十分有利,且前积朵叶体分布面积大,目前勘探程度较低,是一个十分有利的油气勘探领域。

6 结论

(1)据岩性、电性和沉积旋回等特征,莫索湾凸起白垩系清水河组一段(K_1q_1)从上至下可分为薄砂层($K_1q_1^1$)、高伽马泥岩($K_1q_1^2$)、底砂岩($K_1q_1^3$)三个岩性段。其中莫东地区的 K_1q_1 为辫状河三角洲前缘叠瓦状前积和侧向迁移叠置型砂体,是由多个

砂体前积、叠置和迁移形成的,代表了多个薄砂体顺斜坡方向的前积、叠置和侧向迁移,具有明显的两波谷夹一中一强振幅、连续宽相位波峰地震反射特征,反映了多个薄砂层组合所形成的复波反射,复波的宽度和振幅与薄砂层组所在位置砂层的总厚度及单砂层厚度有关。

(2) K_1q_1 前积反射特征的成因为:前积型砂体叠置是在湖退型三角洲沉积环境,且具有一定物源供给、斜坡地形和较强水动力条件下,在顺古水流方向地震剖面上可见前积砂体的叠瓦状前积反射特征;相邻砂体首、尾叠置处振幅减弱,并具有波形拐点和台阶状反射特征,前积方向代表古水流方向;前积砂体发育处反射振幅较强,随着前积砂体厚度逐渐减薄,反射振幅也随之减弱。

(3)在远源辫状河三角洲沉积体系中,在斜坡和低洼古地形过渡位置往往易形成辫状河三角洲前缘前积和侧向迁移叠置型砂体,这类砂体单层厚度小,砂体个数多,平面分布总面积较大,砂体侧向和顶、底板封堵条件好,有利于形成岩性圈闭。在莫东地区具有形成辫状河三角洲前缘前积型砂岩岩性油气藏的有利条件,该地区具有很大的油气勘探潜力。

参考文献

- [1] 周路,张义杰,雷德文等.准噶尔盆地莫索湾凸起构造特征.中国石油勘探,2005,1:16~17
Zhou Lu, Zhang Yijie, Lei Dewen et al. Structural characteristics of Mosuowan uplift in Junggar basin. *China Petroleum Exploration*, 2005, 1: 16~17
- [2] 周路.莫索湾地区石炭系古隆起构造演化分析.博士后研究成果论文集.北京:石油工业出版社,2005,176~182
- [3] 周路,付立,瞿建华等.车排子地区清水河组分布特征及有利勘探区.西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(6):170~178
Zhou Lu, Fu Li, Qu Jianhua et al. The distribution of the Cretaceous Qingshuihe formation in Chepaizi area and the favorable exploration areas. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2011, 33(6): 170~178
- [4] 斯春松,王海东,唐勇等.准噶尔盆地腹部白垩系清水河组清一段高分辨率层序地层特征及岩性油气藏预测.东华理工学院学报,2005,28(4):567~57
Si Chunsong, Wang Haidong, Tang Yong et al. High-resolution sequence stratigraphic characteristic and lithological reservoir prediction of section of Qingshuihe formation in the central of Junggar basin. *Journal of East China Institute of Technology*, 2005, 28(4): 567~57
- [5] 蒲仁海.前积反射的地质解释.石油地球物理勘探,1994,29(4):490~497
Pu Renhai. Geological interpretation of progradational reflections. *OGP*, 1994, 29(4): 490~497
- [6] 蒲仁海,苏江玉,俞仁连.泥岩形成的前积反射.石油地球物理勘探,2012,47(4):624~628
Pu Renhai, Su Jiangyu and Yu Renlian. Progradational reflections caused by shale. *OGP*, 2012, 47(4): 624~628
- [7] 刘朋波,蒲仁海,刘娟霞.松辽盆地十屋断陷前积反射特征及意义.石油地球物理勘探,2010,45(1):115~121
Liu Pengbo, Pu Renhai and Liu Juanxia. Progradation reflection characteristics and significance in Shiwu fault depression, Songliao Basin. *OGP*, 2010, 45(1): 115~121
- [8] 唐勇,孔玉华,盛建红等.准噶尔盆地腹部缓坡型岩性地层油气藏成藏控制因素分析.沉积学报,2009,27(3):567~572
Tang Yong, Kong Yuhua, Sheng Jianhong et al. Controlling factors of reservoir formation in ramp-type lithostratigraphic reservoir in hinterland of Junggar basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 567~572
- [9] 衣怀峰,吴孔友,曲江秀.准噶尔盆地莫索湾地区构造特征及其演化.油气地质与采收率,2005,12(4):1~3
Yi Huaifeng, Wu Kongyou, Qu Jiangxiu. Tectonic characteristics and its evolution of Mosuowan area in Junggar basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(4): 1~3
- [10] 吴孔友,查明,王绪龙等.准噶尔盆地莫索湾地区断层控油作用.地质力学学报,2005,11(1):61~64
Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong et al. Fault controls on oil and gas in the Mosuowan area, Junggar basin. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(1): 61~64
- [11] 薄冬梅,姜林,曲江秀.准噶尔盆地莫索湾地区原油运移研究.中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(4):18~23
Bo Dongmei, Jiang Lin, Qu Jiangxiu. Study on oil migration in Mosuowan area of Junggar basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(4): 18~23
- [12] 姜林,吴孔友,曲江秀.准噶尔盆地莫索湾地区油源分析.西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(2):25~30
Jiang Lin, Wu Kongyou, Qu Jiangxiu. Analysis of the oil source in Mosuowan area of Zhungeer basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2005, 20(2): 25~30
- [13] 况军,何登发,张年富等.准噶尔盆地莫索湾凸起油气成藏模式.中国石油勘探,2005,1:40~45
Kuang Jun, He Dengfa, Zhang Nianfu et al. Oil and gas migration and accumulation pattern of Mosuowan uplift in Junggar basin. *China Petroleum Exploration*, 2005, 1: 40~45
- [14] 吴晓智,张年富,周路等.准噶尔盆地车莫古隆起构造特征与成藏模式.中国石油勘探,2006,1:65~69
Wu Xiaozhi, Zhang Nianfu, Zhou Lu et al. Characteristics and reservoiring mode of Chepaizi-Mosuowan paleo-uplift in Junggar basin. *China Petroleum Exploration*, 2006, 1: 65~69

(本文编辑:刘勇)