

柴达木盆地腹部中央古隆起的形成演化 及油气勘探意义

朱超¹, 刘占国¹, 王波², 宫清顺¹, 王艳清¹, 唐鹏程¹,
魏学斌², 伍坤宇², 唐丽², 张娜²

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油青海油田公司勘探开发研究院

摘要 利用露头、钻井、地震及大量实验分析资料,从现今地层结构、沉降-沉积速率、古水体盐度、岩石组合及沉积相展布、烃源岩有机质类型等方面,论证了柴达木盆地腹部一里坪凹陷与柴西凹陷之间发育大型水下古隆起,并通过构造解析和古地貌恢复,分析其演化过程,最后从油气成藏角度阐述了古隆起对下一步油气勘探的意义。研究表明:①古新世早期,受早喜马拉雅挤压造山运动影响,形成了古隆起雏形,平面上呈北西—南东向展布,分隔了其东、西两侧的一里坪凹陷与柴西凹陷;始新世至渐新世,古隆起具有很好的继承性,下干柴沟组沉积时期隆起区最大面积约为3 500 km²;至中新世晚期,受柴西沉积中心向东迁移及南北向物源补给的影响,古隆起演变为宽缓斜坡。②古隆起对油气成储、成烃、成藏具有控制作用:古隆起南北两端近物源区发育规模三角洲砂体,而中心主体区远离物源,处于欠补偿咸化水体环境,发育规模湖相碳酸盐岩储层;受古隆起的分隔影响,西侧柴西凹陷下干柴沟组上段—上干柴沟组已证实发育优质咸化湖相烃源岩,东侧一里坪凹陷可能发育有效烃源岩;古隆起是油气运移有利指向区,有利于油气聚集成藏,可作为下一步有利勘探区带。

关键词 古隆起; 柴西凹陷; 一里坪凹陷; 构造演化; 油气勘探; 柴达木盆地

中图分类号: TE121.2 **文献标识码**: A

0 前言

柴达木盆地腹部一里坪凹陷及周缘勘探面积约为15 000 km²,是勘探潜力区带,但尚未获得勘探突破。古构造背景不落实是制约勘探选区的关键地质问题之一。前人将柴达木盆地划分为柴西凹陷、柴北缘隆起、一里坪凹陷和三湖凹陷等4个一级构造单元^[1-3],认为柴西凹陷和一里坪凹陷为一个整体的凹陷背景,但对二者之间是如何过渡的并未进行分析,公开的文献资料未见相关报道。笔者通过综合分析其现今地层结构、沉降-沉积速率、古水体盐度、岩石组合及沉积相展布、烃源岩有机质类型等特征,指出柴西凹陷与一里坪凹陷之间可能发育大型水下古隆起。这一观点对重新认识盆地的形成演化、沉积充填以及油气勘探方向均具有重要的理论和勘探实践意义:理论上,可以从新的视角实

现对柴达木盆地沉降与沉积历史的重建,为深化认识盆地构造格局及岩相古地理奠定基础;实践上,由于古隆起的形成与演化对油气的聚集成藏及勘探发现具有重要意义^[4-6],因此未来柴达木盆地岩性油气藏尤其是非常规油气勘探可以围绕这一新的构造单元展开。

1 区域地质背景

新生代以来受阿尔金山、东昆仑山的挤压和走滑造山运动影响,柴达木盆地腹部形成了多凹多隆的古地貌背景,凹陷区利于发育烃源岩,隆起区利于形成优质储集体。本文的研究区位于柴西凹陷的东缘(图1a蓝色虚线范围),新生代自下而上发育路乐河组(E₁₊₂)、下干柴沟组下段(E₃¹)、下干柴沟组上段(E₃²)、上干柴沟组(N₁)、下油砂山组(N₂¹)、上油砂山组(N₂²)、狮子沟组(N₂³)等7套地层(图1b);现

收稿日期:2023-07-10; 改回日期:2023-08-22

本文受中国石油科技专项“叠合盆地中下组合油气成藏与保持机制研究”(编号:2023ZZ02)、“柴达木盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(编号:2021DJ1808)、“多类型储集体发育机制与储集能力定量评价技术研究”(编号:2021DJ0402)联合资助

第一作者: 朱超, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理和油气区带综合评价方面的研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: zhuc_hz@petrochina.com.cn

今地表相对平缓,野外出露地层多为第四系。研究区周缘目前共有钻井8口,揭示的地层主要是新近系下油砂山组(N_2^1),少量井钻至古近系,钻探过程中均见不同程度的气测异常;区内仅有二维地震测

线,测线长度短、资料品质较差,难以落实古构造形态。周缘钻井及地震资料揭示, E_3^2 现今埋藏深度大于5 000 m,地层厚度为1 100~1 600 m; N_1 埋藏深度大于3 500 m,地层厚度为700~1 000 m。

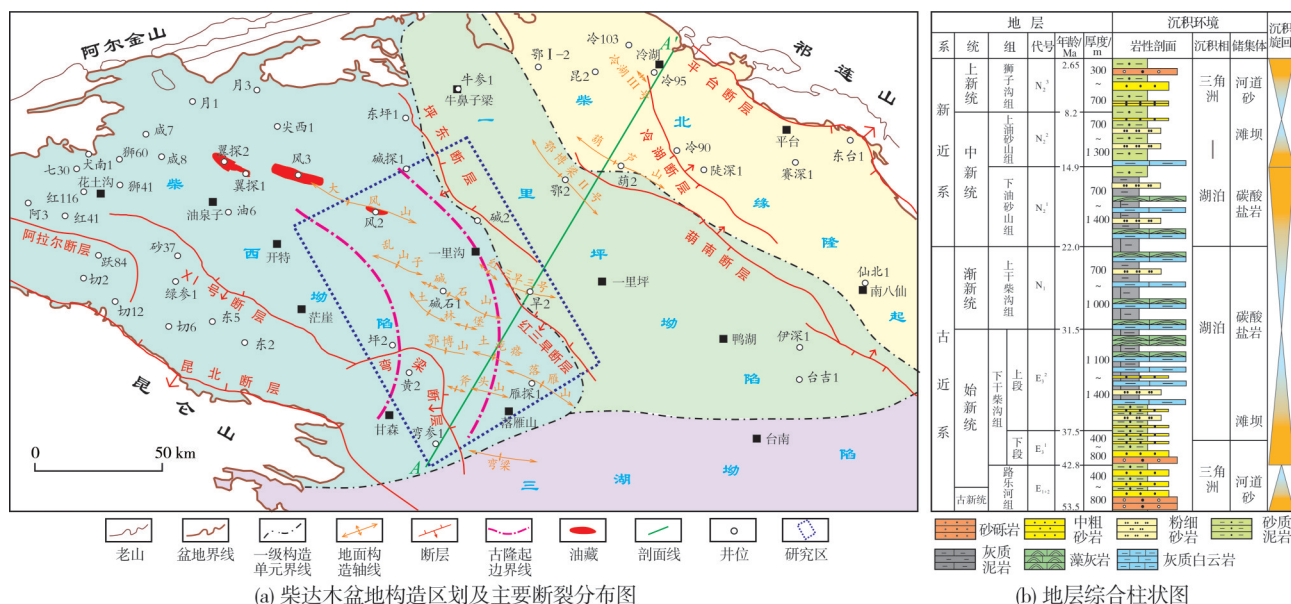


图1 柴达木盆地构造区划与地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic unit and stratigraphic column of Qaidam Basin

研究区现今构造表现为南北两端为鼻隆带(北部为大风山鼻隆,南部为黄石鼻隆),东西两侧为凹陷区。沉积环境上,从周缘钻井泥岩颜色和录井岩性来看: E_3^2 沉积早期,两端鼻隆带靠近物源区,泥岩颜色为棕褐色、褐色,反映沉积期水体较浅; E_3^2 沉积晚期以后,泥岩颜色主要为灰色,说明水体变深。在大风山鼻隆带的西北端,已经发现风西、南翼山等多个古近系一新近系湖相碳酸盐岩油藏。依据古沉积环境的类比分析,研究区 E_3^2 — N_2^1 沉积期在咸化、欠补偿湖泊背景下可发育湖相碳酸盐岩储层;同时研究区紧邻西侧柴西生烃坳陷,处于油气运移有利指向区,成藏条件好,是盆地腹部下一步勘探突破的潜在有利区。

2 古隆起发育的地质证据

利用露头、钻井、地震及大量实验分析资料,从现今地层结构、沉降-沉积速率、古水体盐度、岩石组合及沉积相展布、烃源岩有机质类型等方面,论证了柴达木盆地腹部一里坪坳陷与柴西坳陷之间发育近北西—南东方向展布的大型水下古隆

起——中央古隆起,主要由北部大风山鼻隆和南部黄石鼻隆组成,包括大风山、乱山子、碱石山、土林堡、鄂博山、土疙瘩等局部构造(图1a蓝色虚线范围内)。

2.1 现今地层结构

当地层连续沉积、未受剥蚀影响时,其现今地层结构可以间接反映沉积期的地层接触关系。图2为北东—南西向的CDM160二维地震解释剖面,剖面东北端为祁连山山前的冷湖构造带,西南端为东昆仑山山前的弯梁构造带。从现今的构造样式可以看出:祁连山山前和东昆仑山山前的压扭冲断变形强烈,发育基底卷入型厚皮构造;两端的冷湖断层及弯梁断层错断距离较大,使其断层上盘残留的 N_2^1 及以上地层较薄。从 E_{1+2} — N_2^2 的残余地层接触关系及厚度来看:西南端的弯梁构造带至土疙瘩构造带 E_{1+2} 地层直接覆盖于基岩之上,呈不整合接触,晚期自 N_2^2 开始有地层缺失,为不整合接触; E_{1+2} 至 N_2^2 之间的地层连续沉积,但整体上地层厚度均较薄。中部红三早三号与鄂博梁Ⅱ号构造带之间为

一里坪拗陷主体区,由于远离盆缘,因此受南部东昆仑山及北部祁连山挤压作用的影响小,区内构造挤压变形较弱,断层不发育,地层沉积完整,沉积厚度相对盆缘均有增大,尤其是 E_3^2 沉积期,厚度最大可达2 000 m。至东北端葫芦山及冷湖构造带,由于

祁连山山前挤压作用影响增大,因此其构造特征与南部构造带相似,自 N_2^2 开始有地层缺失,其中冷湖构造带地层抬升幅度更大,残余地层更少;葫芦山构造带从 E_{1+2} 时期开始接受沉积,早期地层连续沉积,但沉积厚度相对一里坪拗陷主体区均变小。

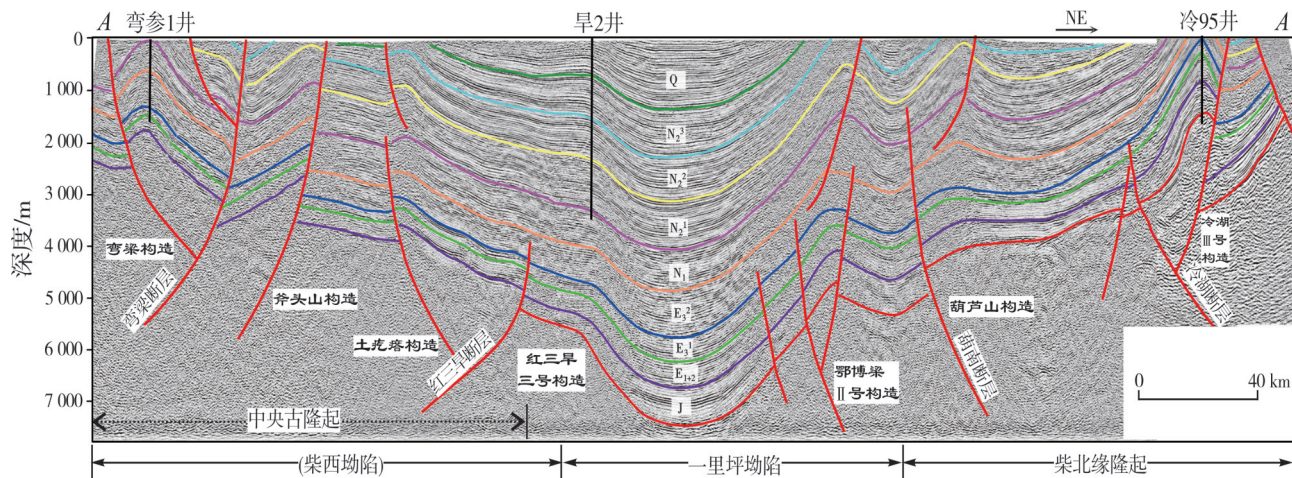


图2 柴达木盆地区域地震地质解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Regional seismic geological interpretation profile in Qaidam Basin (location is shown in Fig. 1a)

整体而言,从现今残余地层结构来看,西南端的弯梁构造至红三早三号构造的南部均处于中央低隆带,其 E_{1+2} 至 N_1 地层厚度明显比红三早三号构造北部的凹陷区厚度薄,由于该时期不存在地层剥蚀,因此推测其沉积期处于古地貌高部位。另外,在剖面的西南端可以看到一些地震同相轴的上超点,说明西南端沉积期处于高部位。

2.2 构造沉降速率与沉积速率

构造作用引起地表下降形成盆地,属于构造沉降;充填于盆地中的沉积物负荷作用进一步导致盆地下沉,属于负荷沉降;构造沉降与负荷沉降之和构成总沉降。分析盆地的沉降,可用沉降速率和沉积速率两个参数^[7]。一般而言,湖盆凹陷区的构造沉降速率和沉积速率大于同时期的斜坡及隆起区。

回剥法是计算盆地沉降量的重要手段,该方法从已知盆地的现状出发,反推各地层在不同地史阶段的原始沉积厚度,从而恢复地层原貌^[8]。通过计算不同构造单元的沉降量,结合埋藏时间,就可以计算对应的构造沉降速率、沉积速率。对于沉积地层,在正常压实下孔隙度与深度之间满足指数关系^[9]。根据沉积物的体积不变原理,回剥地层到地

表,根据厚度与孔隙度的关系来计算地层总沉降量、构造沉降量和负荷沉降量^[10]。

本次研究分别选择了柴西拗陷东侧坪2井、中央古隆起北部风2井、一里坪拗陷西侧早2井开展对比研究。其中,仅有风2井钻穿 E_3^2 地层,坪2井揭示 E_3^2 地层520 m,早2井揭示 N_1 地层63 m,对于坪2井与早2井未钻穿的地层厚度,利用地震解释层位及周缘钻穿 E_3^2 的碱探1井的地层厚度进行换算。采用BasinMod软件,通过去压实校正和古水深校正,分别计算3口井不同时期的构造沉降速率和沉积速率。去压实校正采用实钻井拟合的孔隙度-深度函数公式。古水深对计算结果影响相对较小,其校正采用不同沉积相带的经验值,即浅湖相水深为10 m,深湖相水深为25 m。计算结果如图3所示:坪2井、风2井和早2井在 E_3^2 时期的沉降速率依次为435.1 m/Ma、365.3 m/Ma、472.4 m/Ma,沉积速率依次为1 053.9 m/Ma、789.7 m/Ma、1 193.3 m/Ma,反映该沉积期均具有较大的沉降幅度和沉积物厚度; N_1 、 N_2^1 时期,沉降、沉积速率均急剧减小。对具体某一沉积期而言,从西往东,沉降速率、沉积速率均由大变小再变大,说明在东西两个拗陷之间存在一个相对缓慢沉降的沉积分隔带。

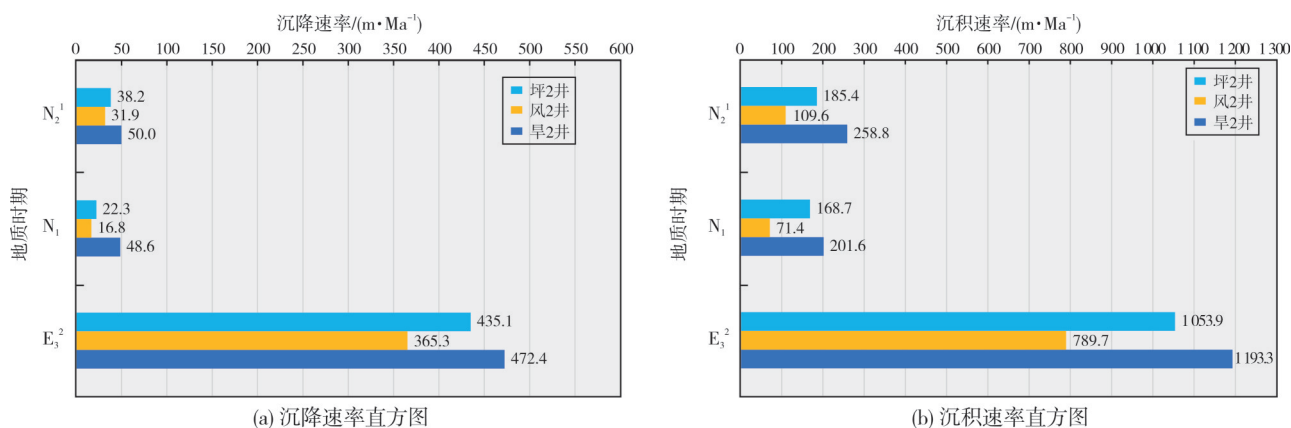


图3 中央古隆起区及周缘 $E_3^2-N_2^1$ 沉积期沉降速率、沉积速率对比

Fig. 3 Comparison of subsidence rates and deposition rates during $E_3^2-N_2^1$ in the central paleouplift and its surrounding areas

2.3 古盐度变化特征

柴达木盆地新生代整体处于干旱、强蒸发的古气候背景,古水体盐度与淡水相比偏高。对于一里坪凹陷和柴西凹陷而言,若沉积期为同一个湖盆,则两个凹陷相邻区的古水体盐度应该相似或渐变;反之,若古水体盐度相差较大,则说明两个凹陷可能不连通,或存在隆起分隔带阻隔了水体的充分流动。因此,可以通过恢复两个凹陷的古水体盐度来推测是否发育中央古隆起。

古盐度恢复分定性和定量两种,目前定量恢复法采用较多的是科奇硼元素计算法^[11-13]。通过科奇公式来定量计算古盐度,其原理是样品中的硼元素主要来自于黏土矿物吸附作用,而古盐度与硼元素含量成正比。硼元素数据来源于露头 and 钻井的泥岩样品,对盆地近200口钻井及露头采集的共960块泥岩样品进行了黏土矿物相对含量与微量元素测定。由于黏土矿物中的伊利石、蒙脱石和高岭石

含量的不同影响了硼元素的吸附量,因此在进行古盐度恢复之前,首先要对硼含量进行校正。科奇公式首先根据不同黏土矿物的含量及其对硼吸收强度的差异性进行样品硼含量校正,然后基于样品校正的硼含量进行古盐度恢复。

从 E_3^2 沉积期古水体盐度恢复的结果(图4a)可见:①盆缘物源补给区为低盐度区,古盐度小于8‰。②盆内分为东西两个古盐度差异区:东部一里坪凹陷水体盐度值为8‰~12‰,最大盐度区主要在鄂2井至早2井之间,祁连山山前带往一里坪凹陷区,古盐度增加较缓慢;西部柴西凹陷咸化湖盆中心位于狮子沟、咸水泉、油泉子、乌南、茫南等地区,盐度多在14‰以上,局部超过30‰,阿尔金山山前带、昆仑山山前带古盐度多低于8‰,往湖盆中心方向古盐度增加较快。③两个沉积中心古盐度的差异性,反映 E_3^2 沉积期一里坪凹陷和柴西凹陷之间水体并不是完全连通的,而是存在一个分隔带,位于大风山—碱石山—黄石一带(图4a中红色虚线范围内),呈近北

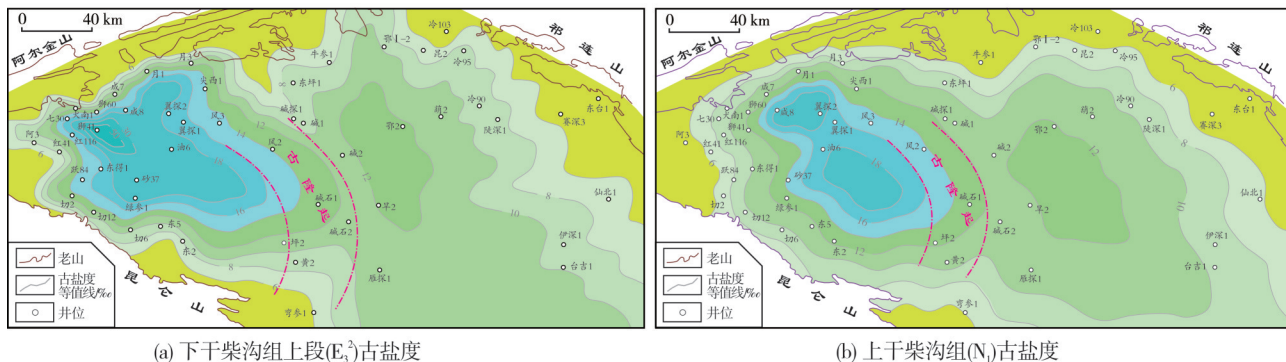


图4 柴达木盆地 E_3^2 、 N_1 古盐度恢复平面图

Fig. 4 Paleosalinity contour maps of E_3^2 and N_1 in Qaidam Basin

西—南东方向展布,盐度值在10‰~14‰之间。

从 N_1 沉积期古水体盐度恢复的结果看(图4b),古盐度具有一定继承性:东部一里坪拗陷古水体盐度值仍为8‰~12‰,最大盐度区向鄂2井东南方向有迁移;西部柴西拗陷盐度值为12‰~18‰,向东北方向有迁移。同 E_3^2 沉积期一样,东西两个拗陷古盐度的差异是由于古隆起分隔的影响。

2.4 岩石组合及相带展布

古构造控制了沉积相带的展布,反过来,沉积相带展布规律可以间接反映古构造背景。从依据钻井、露头资料建立的 E_3^2 优势岩相及岩石组合分布图(图5)可以看出:在柴西拗陷,围绕半深湖中心,湖盆区边缘优势岩相及岩石组合以碳酸盐岩为主,

藻灰岩尤其发育,而碎屑岩仅在盆缘区发育,反映了该时期水体为咸化环境,物源供应不足;而一里坪拗陷周缘在湖盆区及盆缘的优势岩相及岩石组合均以碎屑岩为主,尤其是柴北缘地区,碎屑岩更为发育,未见碳酸盐岩。处于中央古隆起的风2井在 E_3^2 岩心上见到红色泥岩和藻灰岩。红色泥岩主要发育在 E_3^2 早期,反映沉积期水体较浅,处于滨湖氧化环境;藻灰岩主要发育在 E_3^2 晚期,反映沉积期水体相对变深,但仍为浅湖环境。总体来说, E_3^2 时期中央古隆起湖平面震荡升降变化,为滨湖至浅湖环境。平面上这种岩石组合的差异性反映了沉积期两大拗陷并不是完全连通的,在中间存在一个水体分隔带,即同样印证了中央古隆起的存在。

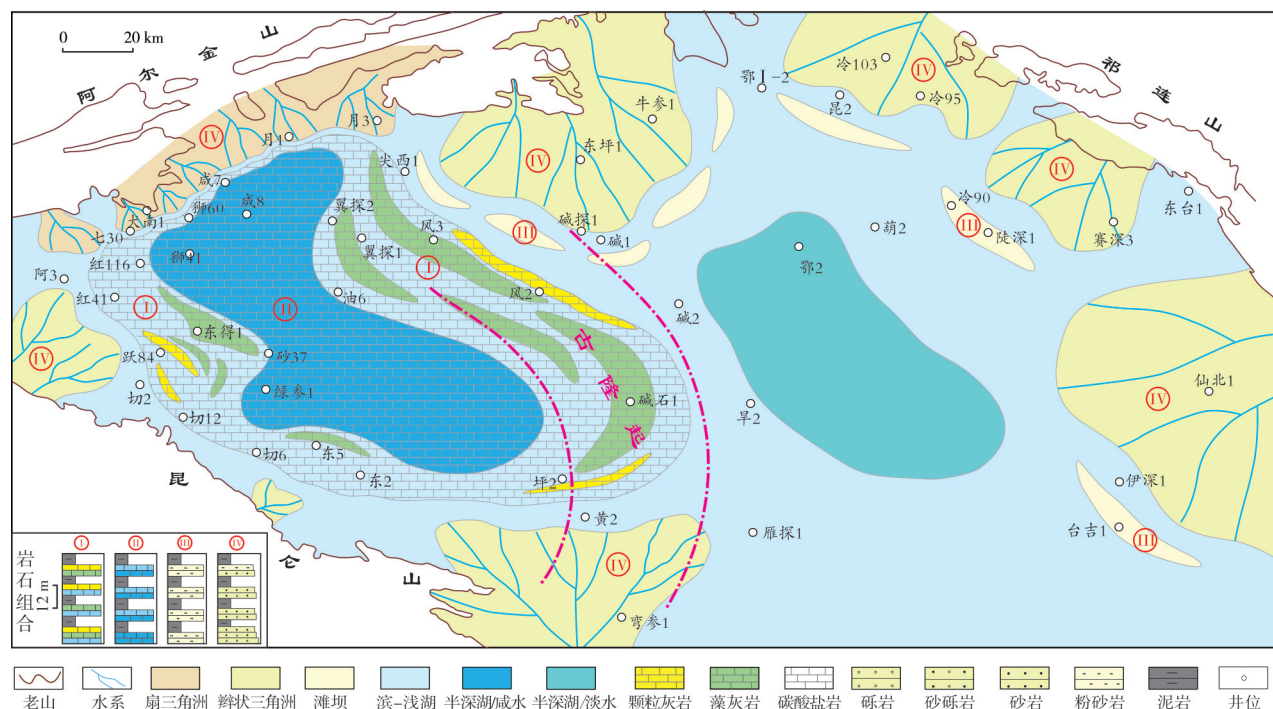


图5 柴达木盆地 E_3^2 岩相古地理与岩石组合

Fig. 5 Paleogeography and rock associations of E_3^2 in Qaidam Basin

2.5 烃源岩有机质类型

陆相湖盆优质烃源岩既可以形成于淡水湖泊环境,也可以形成于咸化的水体环境,而且烃源岩不同程度地与碳酸盐、硫酸盐或氯化盐沉积共生,或者成互层状态分布^[14]。从渐新世到中新世,柴达木盆地处于干旱—半干旱古气候环境,当物源欠补偿时,在咸化湖盆区就可以形成咸化湖相优质烃源

岩。从岩石热解参数热解最高峰温度(T_{max})与氢指数(HI)关系图版(图6)可以看出:柴西拗陷有机质类型主要为I型和II₁型,少数为II₂型,HI数值区间范围为150~900 mg/g;而一里坪拗陷有机质类型主要为III型,少量为II₂型,HI数值区间范围为50~300 mg/g,说明两个拗陷生烃母质有差异。此外,前人通过对柴西拗陷烃源岩母质类型的研究,揭示其咸化环境发育大量藻类,其低熟“可溶有机质”明显高于

淡水湖盆,而在一里坪拗陷未发现这种藻类发育,说明其沉积环境有差异^[14-15]。两大拗陷有机质类型及氢指数的不同与前面分析的水体盐度及岩石组

合的差异具有一致性,正是这种沉积环境的差异,导致了储集体和烃源岩类型的差异,也反映了两个拗陷之间应该存在古低隆分隔带。

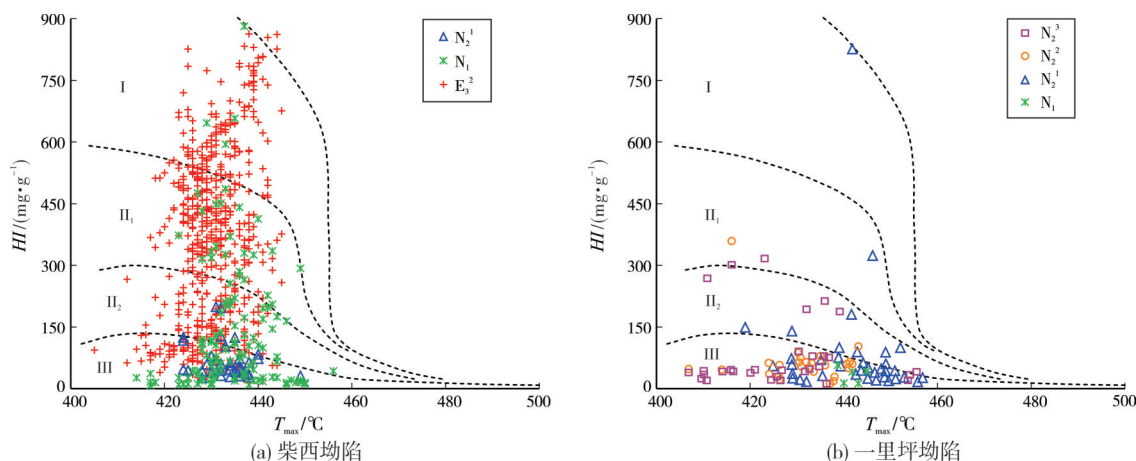


图6 柴达木盆地新生界基于热解最高峰温度(T_{\max})与氢指数(HI)的有机质类型划分

Fig. 6 Classification of the Cenozoic organic matter types based on T_{\max} and HI in Qaidam Basin

3 古隆起演化特征

3.1 新生代构造演化特征

柴达木盆地新生代构造演化复杂,众多学者从不同角度进行了探讨,主要分歧点在构造演化阶段的划分及在造山运动下盆地性质的定义:有学者认为新生代一直处于收缩变形的汇聚状态,也有学者认为新生代早期存在拉张变形阶段,晚期才开始挤压隆升^[16-18]。通过盆地二维地震大格架剖面构造演化分析(图7),结合区域沉积充填特征,认为新生代受印度板块的持续北移及陆内俯冲,青藏高原整体处于近南北向的挤压背景,柴达木盆地也整体处于挤压拗陷演化阶段,其构造演化可划分为3个阶段。

第1阶段为古新世—渐新世(53.5 Ma~22 Ma)。受早喜马拉雅挤压造山运动的影响,古新世—早渐新世盆地发生微弱的挤压变形^[17-18],南部的东昆仑山—祁漫塔格山和北部的祁连山的相向挤压,形成柴西拗陷—中央古隆起—一里坪拗陷雏形(图7h);在路乐河组和下伏中生界之间存在区域地层不整合,发育柴西和一里坪两个沉积中心。中始新世下干柴沟组沉积时期,挤压作用增强,仍发育柴西拗陷和一里坪拗陷两个沉积中心,分布面积及沉积地层厚度增大(图7f,7g)。渐新世上干柴沟组沉积时期,挤压作

用开始减弱,沉积中心仍具有继承性(图7e)。

第2阶段为中新世(22 Ma~8.2 Ma)。盆地持续处于挤压环境,上油砂山组沉积期是另一个强烈构造运动的起始时期,盆地两侧的山体发生了明显的隆升,湖盆范围进一步缩小,沉积中心向东北迁移的特征更加明显,上油砂山组底部的区域不整合面广泛分布于盆地周缘,其下伏地层遭受较强烈的剥蚀,而盆地内部为区域性假整合接触(图7c,7d)。此时中央古隆起幅度更低,近乎于宽缓平台,而东侧一里坪拗陷相对渐新世上干柴沟组沉积时期而言,其沉积中心向东有迁移,而且沉积地层厚度有所增大。

第3阶段为上新世—全新世(8.2 Ma至今)。晚喜马拉雅运动增强,青藏高原的陆内俯冲进一步加剧,盆地受到南部的挤压作用更加明显,阿尔金山表现为强烈的左行走滑,昆仑山、祁连山开始向盆地逆冲、推覆,盆地全面进入强挤压反转阶段(图7a,7b),并随时间推移构造活动强度逐渐增大^[18]。中央古隆起演化为更加宽缓的斜坡,一里坪拗陷沉积中心迁移至三湖地区。

3.2 新生代古地貌分布特征

古地貌的恢复方法较多,每种方法均有一定的适用条件和精度限制^[19]。本文的古地貌恢复主要采用压实恢复法和趋势面分析法。压实恢复法主

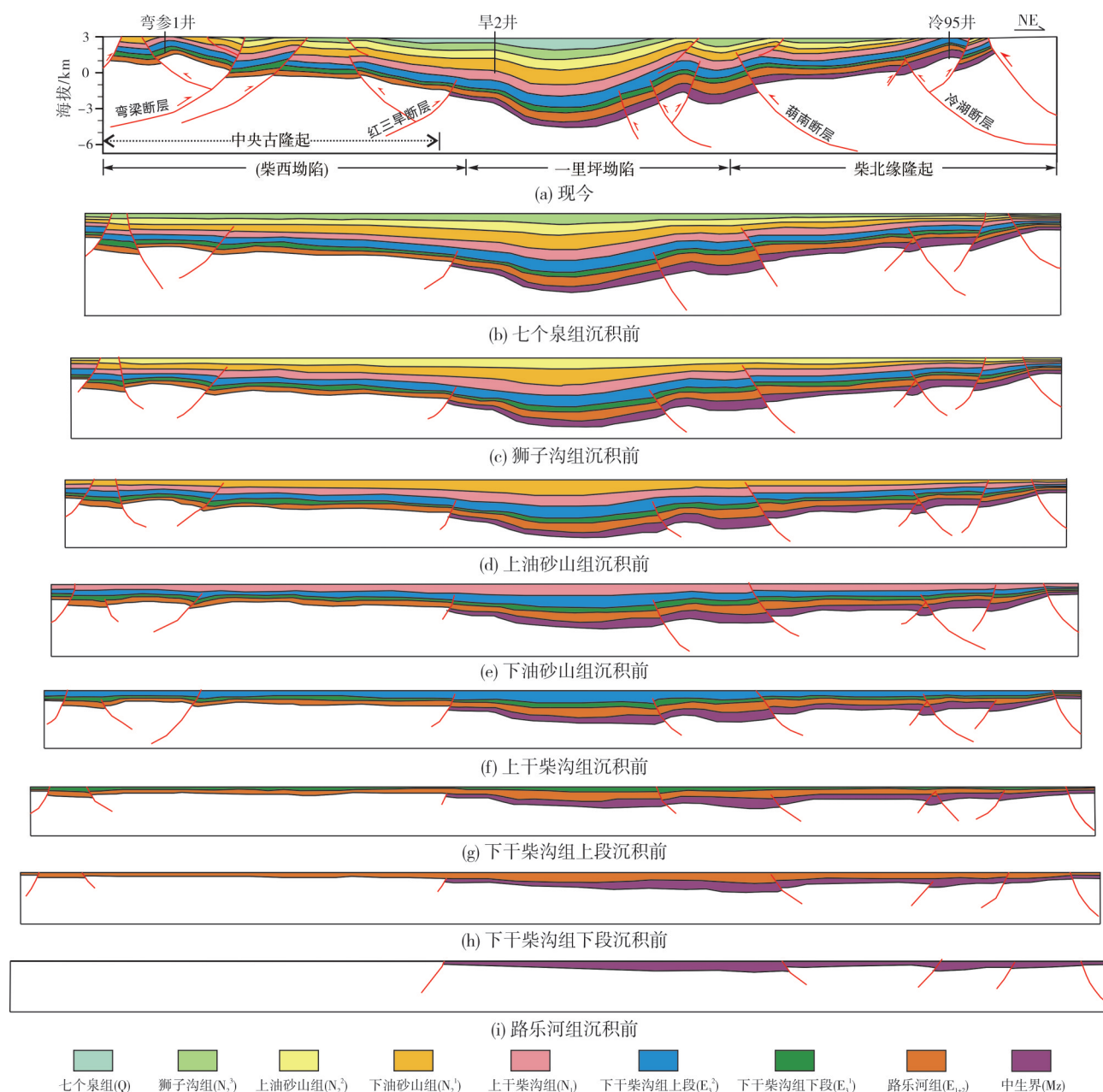


图7 柴达木盆地构造演化剖面(剖面位置见图1)

Fig. 7 Tectonic evolution profile of Qaidam Basin (location is shown in Fig. 1a)

要针对盆地内部剥蚀作用较弱的地区,在残余厚度图上进行视厚度校正,然后选择重点骨干井采用 BasinMod 软件进行单井埋藏史模拟和压实恢复,最后再次校正残余厚度得到沉积期古地貌。趋势面分析法主要针对盆缘剥蚀作用较强的地区,主要基于连续沉积的地层在纵向上沉积厚度的变化具有一定的规律性和可比性,通过相邻地层对比计算某一未知地层的沉积厚度。

古地貌恢复结果(图8)表明: E_3^2 沉积时期中央

古隆起被柴西坳陷和一里坪坳陷夹持,呈近北西—南东方向展布,东侧一里坪坳陷比西侧柴西坳陷的面积大;至 N_1 沉积时期,柴西坳陷逐渐向东迁移,坳陷范围有所减小,一里坪坳陷向东南方向迁移,其范围和沉积厚度均有减小,中央古隆起的范围相应减小。总体来说,新生代全盆地古地貌格局呈现两坳夹一隆的特征,结合前述构造演化分析,中央古隆起自古新世早期就已经存在, E_3 — N 时期具有继承性。

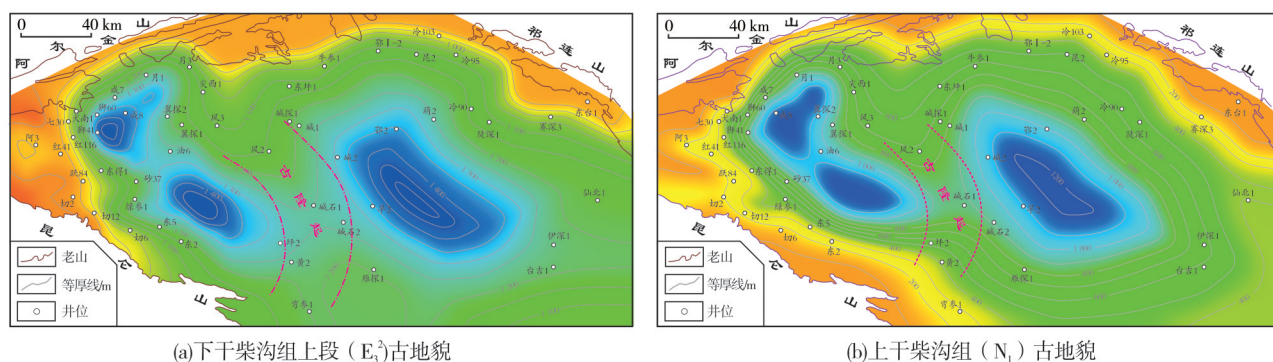


图8 柴达木盆地 E_3^2 、 N_1 古地貌恢复图
Fig. 8 Paleogeomorphic maps of E_3^2 and N_1 in Qaidam Basin

4 古隆起油气勘探意义

中央古隆起对油气成藏条件的控制作用具有多重性,一般体现在对沉积格局、生烃坳陷分布、储集条件、盖层条件、圈闭条件以及油气运聚等方面的影响^[20]。总体而言,古隆起的形成与演化对油气的聚集成藏及勘探发现具有重要意义。通过对古隆起周缘钻井、露头剖面及地震相的综合分析,认为研究区中央古隆起对成储、成烃、成藏具有控制作用,并是下一步湖相碳酸盐岩的有利勘探区带。

4.1 古隆起带发育湖相碳酸盐岩储集体

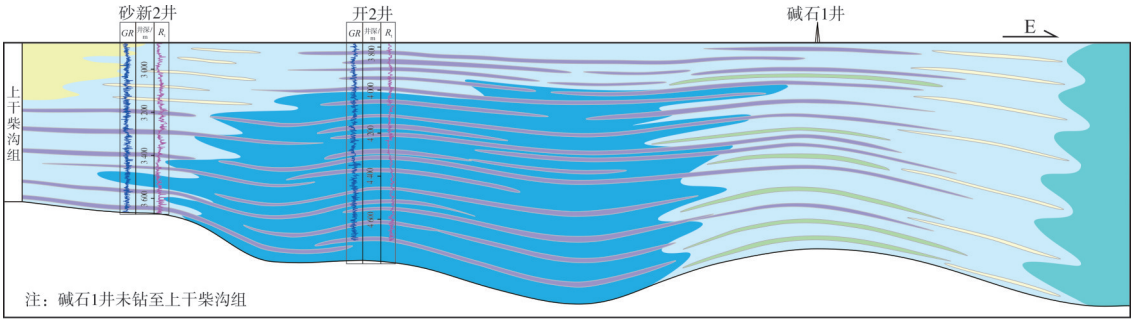
柴西 E_3^2 — N_1 长期处于咸化水体环境,在大风山鼻隆西北端已发现风西、南翼山等多个湖相碳酸盐岩油气藏,储集体单层厚度为0.2~5.0 m,平均多在2.5 m左右,累计厚度达700 m。中央古隆起具备与大风山鼻隆相似的欠补偿、咸化沉积环境,具备发育湖相碳酸盐岩规模优质储集体的地质条件。周缘钻井揭示,古近系—新近系自下而上发育 E_3^2 、 N_1 、 N_2 等3套藻灰岩、灰质白云岩复合储集体,横向分布稳定,累计厚度大,平面上围绕柴西咸化湖盆中心环带状分布。在古隆起的浅层 N_2^1 钻井证实发育优质储层:取心岩性主要为藻灰岩、灰质白云岩,藻灰岩单层厚度最大约为2 m,累计厚度达17 m;测井解释碳酸盐岩累计厚150~280 m,地层占比为18%~30%,岩心孔隙度为3%~14%,渗透率为 $(0.03\sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过类比研究认为,古隆起带 E_3^2 沉积晚期至 N_2^1 沉积时期,靠近湖盆区可发育藻灰岩、灰质白云岩储集体。结合地震相及古地貌,对上干柴沟组(N_1)藻灰岩、灰质白云岩储集体分布规律进行了预测,如图9所示,古隆起带湖相碳酸盐岩储集体具有“纵向叠置、横向连续、平面连片”的分布特征。

4.2 古隆起带两侧生烃凹陷的烃源岩类型

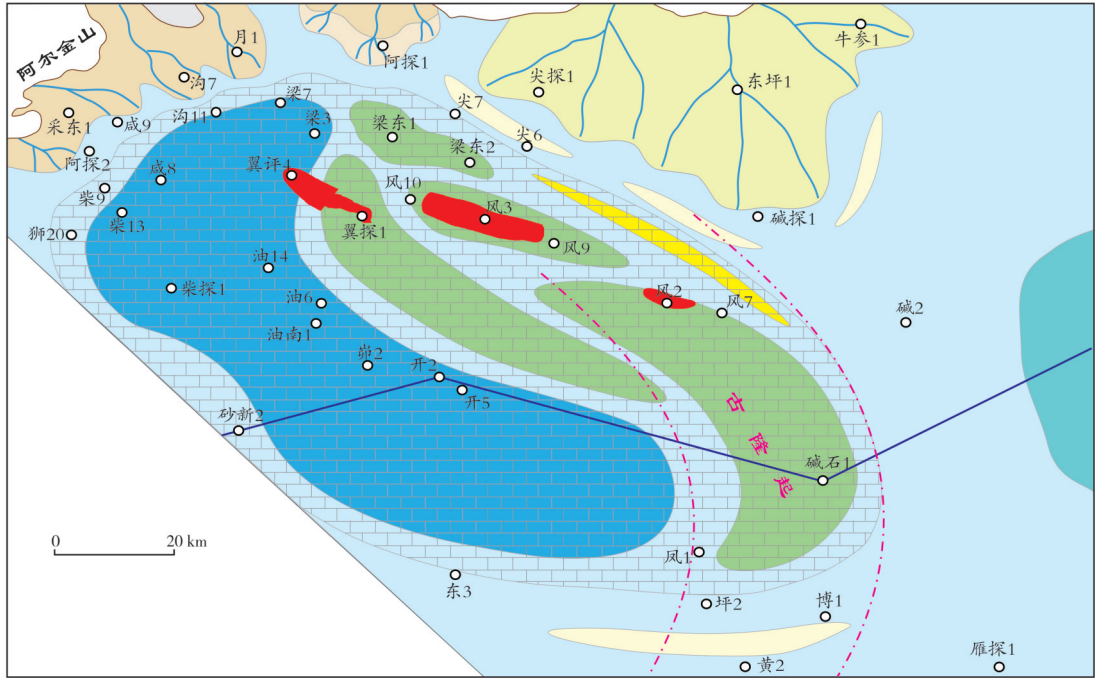
前文的沉降—沉积速率研究表明,古隆起东西两侧的柴西坳陷和一里坪坳陷均具有较大的沉积、沉降速率,反映两个坳陷在沉积期既是沉降中心也是沉积中心。柴西坳陷西侧的钻井及油气藏已经证实 E_3^2 — N_1 发育多个生烃灶,岩性以暗色泥岩为主,碳酸盐含量高,有机质类型以I—II₁型为主,烃源岩具有低TOC、低成熟门限、高转化率特征(TOC普遍小于1%;氯仿沥青“A”含量为0.05%~0.5%; S_1+S_2 为1~10 mg/g; R_o 在0.4%时干酪根即可生烃,在1.0%时达到生油高峰)。原油伴生天然气组分、气油比和原油的物理性质显示:自西向东热演化程度、气油比增大,原油密度减小,有利于油型气生成。东侧一里坪坳陷浅层钻井揭示 N_1 — N_2^1 有机质类型以II₂—III型为主,烃源岩以暗色泥岩为主,碳酸盐含量低,TOC主要分布在0.38%~1.06%之间,平均为0.58%,氯仿沥青“A”含量平均为0.068%,为中等—差烃源岩,部分样品达到较好烃源岩。基于一里坪坳陷浅层天然气甲烷碳同位素组成($\delta^{13}\text{C} < -34\text{‰}$)计算,天然气的烃源岩成熟度(R_o)大于1.5%,对应埋藏深度在5 000 m以上,层位为 E_3^2 — N_1 ,处于连续生气阶段,据此推测一里坪坳陷为潜在的生烃坳陷。

4.3 古隆起是有利的油气聚集区

我国中西部盆地油气勘探实践表明,古隆起的形成与演化对油气聚集成藏具有重要意义,古隆起是寻找大型油气藏的一个重要勘探方向(图10)。从前述构造演化分析可知,研究区中央古隆起自 E_{1+2} 沉积时期开始发育, E_3 — N 沉积时期具有继承性,有利于湖相碳酸盐岩储集体规模发育,同时西侧柴西坳陷已证实发育优质湖相烃源岩,东侧一里



(a) 连井对比剖面



(b) 沉积相平面分布



图9 柴达木盆地中央古隆起周缘上干柴沟组连井对比剖面及沉积相平面分布

Fig. 9 Inter-well correlation profile and sedimentary facies plan of Upper Ganchaigou Formation in the central paleo-uplift and its surrounding areas of Qaidam Basin

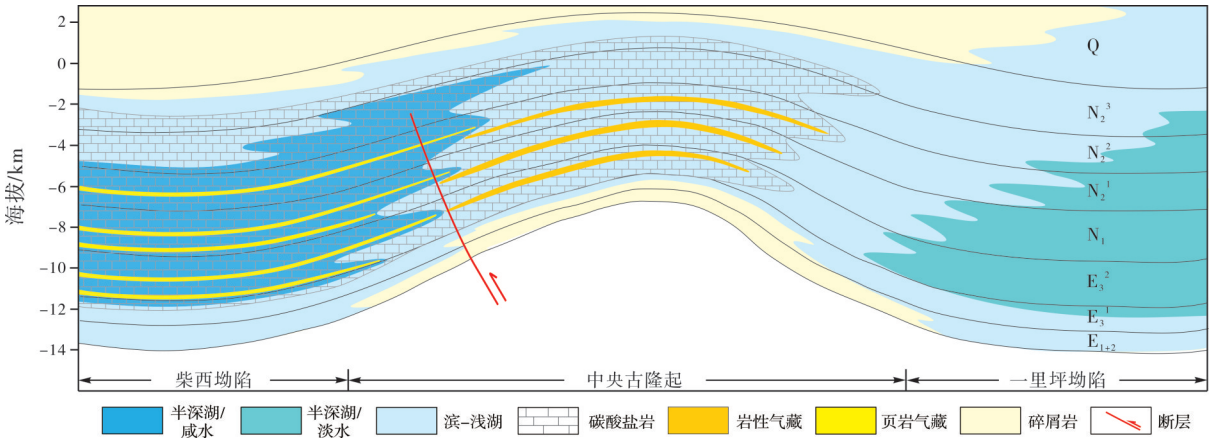


图10 柴达木盆地中央古隆起成藏模式图

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation pattern in the central paleo-uplift, Qaidam Basin

坪坳陷可能具备生烃潜力,古隆起具备油气长期运聚成藏的有利条件,是下一步勘探突破的潜在有利区,值得勘探上进一步探索。

5 结 论

(1)从现今地层结构、沉降-沉积速率、古水体盐度、岩石组合及沉积相展布、烃源岩有机质类型等方面论证了柴达木盆地腹部一里坪坳陷与柴西坳陷之间发育大型水下中央古隆起。

(2)中央古隆起的形成演化划分为3个阶段:在古新世早期形成了古隆起雏形,平面上呈北西—南东向展布;古隆起在始新世至渐新世具有很好的继承性,其中下干柴组沉积时期隆起区面积最大约为3 500 km²;至中新世晚期,受柴西沉积中心向东迁移及南北向物源补给的影响,古隆起演变为宽缓斜坡。

(3)中央古隆起的形成与演化对油气的聚集成藏及勘探发现具有重要意义。研究区水下古隆起对成储、成烃、成藏具有重要控制作用:古隆起南北两端近物源区发育规模三角洲砂体,而中心主体区远离物源,处于欠补偿咸化水体环境,可发育规模湖相碳酸盐岩储层;受古隆起的分隔影响,西侧柴西坳陷已证实发育优质咸化湖相烃源岩,东侧一里坪坳陷可能发育有效烃源岩;古隆起是油气运移有利指向区,利于油气聚集成藏,可作为下一步有利勘探区带。

参 考 文 献

- [1] 戴俊生,叶兴树,汤良杰,等.柴达木盆地构造分区及其油气远景[J].地质科学,2003,38(3):291-296.
DAI Junsheng, YE Xingshu, TANG Liangjie, et al. Tectonic units and oil-gas potential of the Qaidam Basin[J]. Chinese journal of geology, 2003, 38(3): 291-296.
- [2] 曹国强,陈世悦,徐凤银,等.柴达木盆地西部中—新生代沉积构造演化[J].中国地质,2005,32(1):33-40.
CAO Guoqiang, CHEN Shiyue, XU Fengyin, et al. Ceno-Mesozoic sedimentary and tectonic evolution in the western Qaidam Basin[J]. Geology in China, 2005, 32(1): 33-40.
- [3] 青藏油气区石油地质志编写组.中国石油地质志(卷十四 青藏油气区)[M].北京:石油工业出版社,1990,88-100.
Editorial Committee of "Petroleum Geology of Qinghai-Tibet". Petroleum geology of China: Vol. 14, Qinghai Tibet oil and gas region[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990, 88-100.
- [4] 付锁堂,马达德,汪立群,等.柴达木盆地昆北冲断带古隆起油藏特征及油气成藏条件[J].石油学报,2013,34(4):675-682.
FU Suotang, MA Dade, WANG Liqun, et al. Characteristics and accumulation conditions of paleo-uplift reservoirs in Kun-bei thrust belt, Qaidam Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2013, 34(4): 675-682.
- [5] 张朝军,贾承造,李本亮,等.塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集[J].石油勘探与开发,2010,37(3):263-269.
ZHANG Chaojun, JIA Chengzao, LI Benliang, et al. Ancient karsts and hydrocarbon accumulation in the middle and western parts of the North Tarim Uplift, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2010, 37(3): 263-269.
- [6] 魏国齐,杨威,杜金虎,等.四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J].石油勘探与开发,2015,42(3):257-265.
WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(3): 257-265.
- [7] 陆克政,朱筱敏,漆家福.含油气盆地分析[M].东营:石油大学出版社,2001:299-318.
LU Kezheng, ZHU Xiaomin, QI Jiafu. Petroliferous basin analysis [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2001: 299-318.
- [8] 周爱红,孙玥,冯宇.塔里木盆地塔中地区卡塔克古隆起演化和沉降-反转史[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):28-33.
ZHOU Aihong, SUN Yue, FENG Yu. Evolution and subsidence-tectonic inversion history of Kartake paleo-uplift in Tazhong area of Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2011, 35(1): 28-33.
- [9] BALDWIN S. Quantifying the development of a deep sedimentary basin: the Bonaparte Basin, NW Australia [M]. Cambridge: University of Cambridge, 2000: 236.
- [10] SCLATER J G, CHRISTIE P A F. Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin[J]. Journal of geophysical research, 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [11] 魏巍,THOMAS J A,陆永潮,等.古水体盐度指标与渤海湾盆地古近系海侵事件初探[J].沉积学报,2021,39(3):571-592.
WEI Wei, THOMAS J A, LU Yongchao, et al. Paleosalinity proxies and marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin lake system, northeastern China[J]. Acta sedimentologica sinica, 2021, 39(3): 571-592.
- [12] 许璟,蒲仁海,杨林,等.塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析[J].沉积学报,2010,28(3):509-517.
XU Jing, PU Renhai, YANG Lin, et al. The palaeosalinity analysis of Carboniferous mudstone, Tarim Basin [J]. Acta sedimentologica sinica, 2010, 28(3): 509-517.
- [13] 钱凯,时华星.资源评价工作中古盐度测定法的选择[J].石油勘探与开发,1982(3):32-38.
QIAN Kai, SHI Huaxing. The choice of the method of paleosalinity determination in resources evaluation [J]. Petroleum exploration and development, 1982(3): 32-38.
- [14] 张斌,何媛媛,陈琰,等.柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J].石油学报,2017,38(10):1158-1167.
ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, et al. Geochemical

- characteristics and oil accumulation significance of the high quality saline lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin, NW China [J]. *Acta petrolei sinica*, 2017, 38(10): 1158–1167.
- [15] 王艳清, 张永庶, 夏志远, 等. 柴达木盆地一里坪坳陷新生界咸化特征及生烃潜力分析[J]. *中国地质*, 2016, 43(4): 1317–1330.
- WANG Yanqing, ZHANG Yongshu, XIA Zhiyuan, et al. An analysis of Cenozoic hydrocarbon generation potential and salty characteristics of Yiliping Depression in Qaidam Basin [J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1317–1330.
- [16] 徐凤银, 尹成明, 巩庆林, 等. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制[J]. *中国石油勘探*, 2006, 11(6): 9–16, 37.
- XU Fengyin, YIN Chengming, GONG Qinglin, et al. Mesozoic–Cenozoic structural evolution in Qaidam Basin and its control over oil and gas [J]. *China petroleum exploration*, 2006, 11(6): 9–16, 37.
- [17] 金之钧, 张明利, 汤良杰, 等. 柴达木中新生代盆地演化及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(6): 603–608.
- JIN Zhijun, ZHANG Mingli, TANG Liangjie, et al. Evolution of Meso–Cenozoic Qaidam Basin and its control on oil and gas [J]. *Oil & gas geology*, 2004, 25(6): 603–608.
- [18] 楼谦谦, 肖安成, 钟南翀, 等. 大型陆相坳陷型沉积盆地原型恢复方法: 以新生代柴达木盆地为例[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 892–902.
- LOU Qianqian, XIAO Ancheng, ZHONG Nanchong, et al. A method of prototype restoration of large depressions with terrestrial sediments: a case study from the Cenozoic Qaidam Basin [J]. *Acta petrologica sinica*, 2016, 32(3): 892–902.
- [19] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 949–960.
- JIANG Qingchun, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta petrolei sinica*, 2012, 33(6): 949–960.
- [20] 邓昆, 张哨楠, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地古生代中央古隆起形成演化与油气勘探[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(2): 190–197.
- DENG Kun, ZHANG Shaonan, ZHOU Lifa, et al. Formation and tectonic evolution of the Paleozoic Central Paleouplift of Ordos Basin and its implications for oil–gas exploration [J]. *Geotectonica et metallogenia*, 2011, 35(2): 190–197.

编辑:董 庸

Formation and evolution of the central paleouplift and its significance for oil–gas exploration in Qaidam Basin

ZHU Chao, LIU Zhanguo, WANG Bo, GONG Qingshun, WANG Yanqing, TANG Pengcheng, WEI Xuebin, WU Kunyu, TANG Li, ZHANG Na

Abstract: Based on outcrop, drilling, seismic and a large number of experimental analysis data, from the aspects of current stratigraphic structure, subsidence rate, deposition rate, paleosalinity, rock assemblage and sedimentary facies distribution, organic matter types of source rocks, it is demonstrated that a large underwater paleouplift (central paleouplift) is developed between Chaixi Depression and Yiliping Depression in Qaidam Basin. The tectonic evolution of the central paleouplift is analyzed through structural analysis and paleogeomorphic restoration. Finally, the significance of hydrocarbon accumulation in the paleouplift for the next oil and gas exploration is expounded. The results show that: (1) In the early Paleocene, influenced by the early Himalayan compression orogeny, the prototype of paleouplift was formed, which is distributed in a NW–SE direction on the plane, separating the Chaixi Depression on the west side and the Yiliping Depression on the east side. The paleouplift has good inheritance from Eocene to Oligocene, and the maximum area of the uplift area in Lower Ganchaigou period is about 3 500 km². In the late Miocene, the paleouplift evolved into a wide and gentle slope due to the eastward migration of Chaixi sedimentary center and the north–south provenance supply. (2) The central paleouplift controls the formation of oil and gas reservoirs, hydrocarbons and reservoirs. Large-scale delta sand bodies are developed in the near provenance areas at the north and south ends of the central paleouplift, while the central main area far away from the provenance is in an undercompensated salinized water environment, and large-scale lacustrine carbonate reservoirs are developed there. Influenced by the separation of paleouplift, it has been confirmed that high-quality salinized lacustrine source rocks are developed in Chaixi Depression in the west during Lower Ganchaigou to Upper Ganchaigou period, and effective source rocks may be developed in Yiliping Depression in the east. As a directional area for oil and gas migration, the paleouplift is conducive to hydrocarbon accumulation and can serve as the next favorable exploration zone.

Key words: paleouplift; Chaixi Depression; Yiliping Depression; tectonic evolution; oil–gas exploration; Qaidam Basin
ZHU Chao, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in geophysics and comprehensive evaluation of oil and gas zones. Add: No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China