

塔里木盆地中部深层-超深层地震波组特征及其地质意义

田方磊^{1,2}, 彭妙³, 韩俊⁴, 陈赅俊^{1,2}, 马德波⁵, 毛丹凤^{1,2}

[1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石油新疆油田分公司, 克拉玛依 834000; 4. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830011; 5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:塔里木盆地中部深层、超深层是目前油气勘探的重要领域。随着油气勘探向超深层推进,早期建立的对波组特征及其地质意义的认识已经不能满足需要,迫切需要进行系统性的重新认识。基于最新的超深井实钻资料和高精度三维地震资料,通过合成地震记录井-震标定及连井地震大剖面追踪解释,对深层、超深层地震反射波组进行了准确标定,明确其地层含义并厘定了关键标志层。同时重点对中寒武统含膏岩系盖层、中、下寒武统生-储-盖组合及顺托果勒地区“串珠”反射等关乎超深层油气勘探的重点问题展开了进一步探讨,表明:①盆地中部以下古生界为主的深层、超深层整体上具有“六强、七弱、三中等、一杂乱”的地震反射波组特征,与地层岩性、地层速度的纵向分层特征一致。②中寒武统膏盐岩增强了地层波速的垂向非均一性,膏盐岩含量越高,地震反射波组振幅越强。中寒武统膏盐岩含量存在区域分布差异:塔中膏盐岩含量最高;轮南低凸起轮探1井区不发育纯膏盐岩;顺托果勒及顺南地区,中寒武统膏盐岩主要发育在沙依里克组,以强振幅反射波组和“云雾状”反射波组的局部增厚、褶皱变形或断层错断处显著减薄等现象为识别标志。③中、下寒武统生-储-盖组合广泛分布于塔北南斜坡、顺托果勒低隆及顺南地区,塔中局部地区烃源岩和储层条件较差。④在顺托果勒地区存在3种类型的“串珠”反射。

关键词:“串珠”反射波组;含膏岩系;盐下“生-储-盖”组合;深层-超深层;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Characteristics and geological implications of seismic reflections of deep and ultra-deep layers in central Tarim Basin

Tian Fanglei^{1,2}, Peng Miao³, Han Jun⁴, Chen Jiajun^{1,2}, Ma Debo⁵, Mao Danfeng^{1,2}

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism (Ministry of Education), Beijing 100083, China; 3. Petrochina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: The deep and ultra-deep layers of central Tarim Basin are currently important targets for hydrocarbon exploration in the area. The understanding of seismic traits of shallower strata and their geological implications established decades ago can no longer meet the needs of the present time. To deal with the problem, the characteristics and stratigraphic significances of seismic reflections of deep and ultra-deep layers were accurately calibrated and analyzed through synthetic seismogram, seismic-well tie calibration, and well-tie cross-section interpretation in line with the latest drilling data of ultra-high and high-precision 3D seismic data, from which mark layers were identified. The focus was on the exploration issues concerning the Middle Cambrian gypsum-bearing caprocks, the Middle-Lower Cambrian source rock-reservoir-caprock combinations, and the “bead-like” reflections in the Shuntuoguole area. The results show that: 1) The Paleozoic deep and ultra-deep layers dominating the basin downward from the middle can be summarized as six layers with strong reflection, seven layers with weak reflection, three layers with normal reflection, and one layer with confusing reflection, which are in consistency with the vertical stratification features of stratigraphic lithology and velocity

收稿日期:2020-04-10;修订日期:2021-02-18。

第一作者简介:田方磊(1994—),男,博士研究生,矿产普查与勘探专业。E-mail:tianfanglei1994@126.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003-01);国家重点研发计划项目(2017YFC0601405-03);中国石油化工股份有限公司科技部项目(P18047-2)。

of the layers. 2) The existence of the Middle Cambrian gypsum-bearing rocks results in higher vertical heterogeneity of wave velocity. More gypsum means higher amplitude of seismic reflections. The Tazhong area has most of the rock while areas around Well Luntan1 contain the least or no such rock at all. As for the Shuntuoguole and Shunnan areas, the rock mainly exists in the Shayilike Formation featuring high-amplitude or cloud-like reflections with parts thickening, folding or remarkably thinning along dislocated faults. 3) The Middle-Lower Cambrian source rock-reservoir-caprock combinations are distributed in the south slope of Tabei, the Shuntuoguole Lower Uplift and the Shunnan area. However, the source rock and reservoir quality are comparatively poorer in some parts of Tazhong Uplift. 4) Three types of “bead-like” reflections occur in the Shuntuoguole area.

Key words: “bead-like” reflection, gypsum-bearing sequence, pre-salt source rock-reservoir-caprock combination, deep and ultra-deep layers, Tarim Basin

地震反射波组是地层、构造、储层、流体等地质信息的综合响应。合成地震记录井-震标定则是将各类深度域的实钻地质信息标定到时间域地震剖面上的重要桥梁^[1]。

近年来,全球油气勘探向深层、超深层的探索取得了许多重大突破。塔里木盆地作为全球超深层领域油气资源禀赋最好的6个盆地之一^[2],在近几十年的油气勘探中,连续在盆地中部的塔北隆起、塔中低凸起、顺托果勒低隆及顺南等地区获得重大发现,建立了轮古-塔河特大大油田、塔中油气田、哈拉哈塘油田、英买力油田、跃进油田、顺北油田、顺南气田等一大批资源潜力巨大的油气田^[2-8]。由于塔北、塔中地区现有目的层勘探开发程度已经到了较高水平,致使油气勘探正向埋深更深、地层压力和温度更高的寒武系盐下超深层及顺托果勒中、下奥陶统超深层推进^[6-13]。与此同时,盆地中部超深井和高精度地震资料日益丰富,但是对超深层地震反射波组认识的局限性仍然制约着对超深层的勘探。早期基于深井、超深井及二维、三维地震资料建立起来的对波组特征及其地质意义的认识也已经不能满足当下需要。在此背景下,迫切需要对深层、超深层地震波组特征及其地质意义进行系统性的重新认识。

本文基于最新的超深井实钻资料和高精度三维地震资料,通过合成地震记录井-震标定和连井地震剖面,由点到面,由局部到区域,对深层、超深层地震反射波组进行了准确标定,明确其地层含义并厘定了关键标志层。此外,重点对关乎超深层油气勘探的中寒武统含膏岩系盖层、盐下“生-储-盖”组合及奥陶统-寒武系碳酸盐岩层系“串珠”反射的波组特征、地质意义及区域对比等展开了深入讨论。

1 区域地质背景

塔里木盆地是一个从新元古代罗迪尼亚超大陆裂

解出来,具有古老克拉通结晶基底,经历多旋回构造运动叠加改造形成的大型叠合复合含油气沉积盆地^[14-19]。盆地震旦系到第四系均有发育,但受控于多期构造运动隆升剥蚀,地层缺失导致的不整合面普遍存在于盆地的各个构造单元,记录了盆地中部及周缘多期、复杂的构造-沉积演化历史^[20-21]。

震旦纪:据盆缘露头地层剖面,下震旦统为碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积,以碎屑岩为主,上震旦统下部为碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积,上部为碳酸盐岩沉积。新元古界沉积地层的纵向变化记录了塔里木盆地构造体制由南华纪强烈拉张、裂陷向震旦纪弱拉张、拗陷转变^[22]。寒武纪-早奥陶世:塔里木盆地整体仍处于拉张背景,具有东台西盆的分异特征。早寒武世早期,盆内广泛沉积了以泥岩为主的下寒武统玉尔吐斯组,随后碳酸盐岩台地逐渐建立,在稳定碳酸盐岩台地、蒸发台地背景上,沉积了下寒武统-中、上奥陶统巨厚的碳酸盐岩地层及中寒武统含膏岩系。中奥陶世:受南部昆仑洋向其南部的中昆仑地块俯冲、北部古大洋开始向其南部的中天山俯冲影响,塔里木盆地由构造伸展转为构造挤压,塔中-塔西南隆起、塔北隆起初具雏形。晚奥陶世:构造挤压、隆升强度增大,塔北、塔中-塔西南隆起区发生暴露剥蚀,导致中、上奥陶统碳酸盐岩层系大面积缺失,良里塔格组礁滩在该剥蚀面上逐渐建立。随着晚奥陶世海平面上升及南北缘强烈碰撞挤压,盆地中部尤其是满加尔坳拉槽接受来自周缘的补偿-超补偿物源供给,沉积了巨厚的桑塔木组或却尔却克组,导致库满坳拉槽消亡。志留纪到中泥盆世末,发生了两期重要的构造事件,一期为加里东晚期构造运动(志留纪末),导致盆地南部(中央隆起及其南部)强烈褶皱变形,同时导致中、下泥盆统与志留系、奥陶系之间广泛发育不整合;二期为中泥盆世末构造事件,即海西早期构造运动,导致大部分地区强烈抬升,引起上泥盆统东河塘组与下伏地层

间广泛分布的不整合面。海西早期构造运动之后,盆地性质发生反转,结束了挤压挠曲盆地演化,进入拉张作用为主的阶段,沉积了东河塘组海相砂岩,以及由台地相灰岩与潮坪相碎屑岩互层组成的石炭系。早-中二叠世,克拉通边缘及内部在拉张背景下发育基性、超基性火山岩;中二叠世末,盆地周缘造山带十分活跃,盆地整体抬升。此后基本结束海相沉积,进入中-新生代以陆相沉积为主的周缘前陆盆地演化阶段^[18-19](图1)。

盆地中部,不同构造单元经历的构造升降历史不同,导致同一层系在不同地区的埋深存在较大差异。总体而言,顺托果勒低隆相对于塔北隆起、塔中隆起及顺南地区,各套地层的埋深更大,其中,下三叠统、二叠系、石炭系等均达到了深层划分标准(4 500 ~

6 000 m),志留系、奥陶系及下伏沉积盖层则属于超深层(6 000 m 以深)^[23-24]。塔北、塔中等构造高部位,埋深大于6 000 m 的主要是中、下奥陶统、寒武系及震旦系和前震旦系沉积盖层。盆地中部深层-超深层经历多期构造-沉积演化历史,遭受多期构造作用及叠加改造,形成了中国3大海相克拉通盆地中十分特殊的深层、超深层构造变形,并在极端油气地质条件下聚集了丰富的油气资源^[29]。

2 地层速度与地震波组特征

2.1 合成地震记录井-震标定

合成地震记录井-震标定充分发挥单井纵向分辨

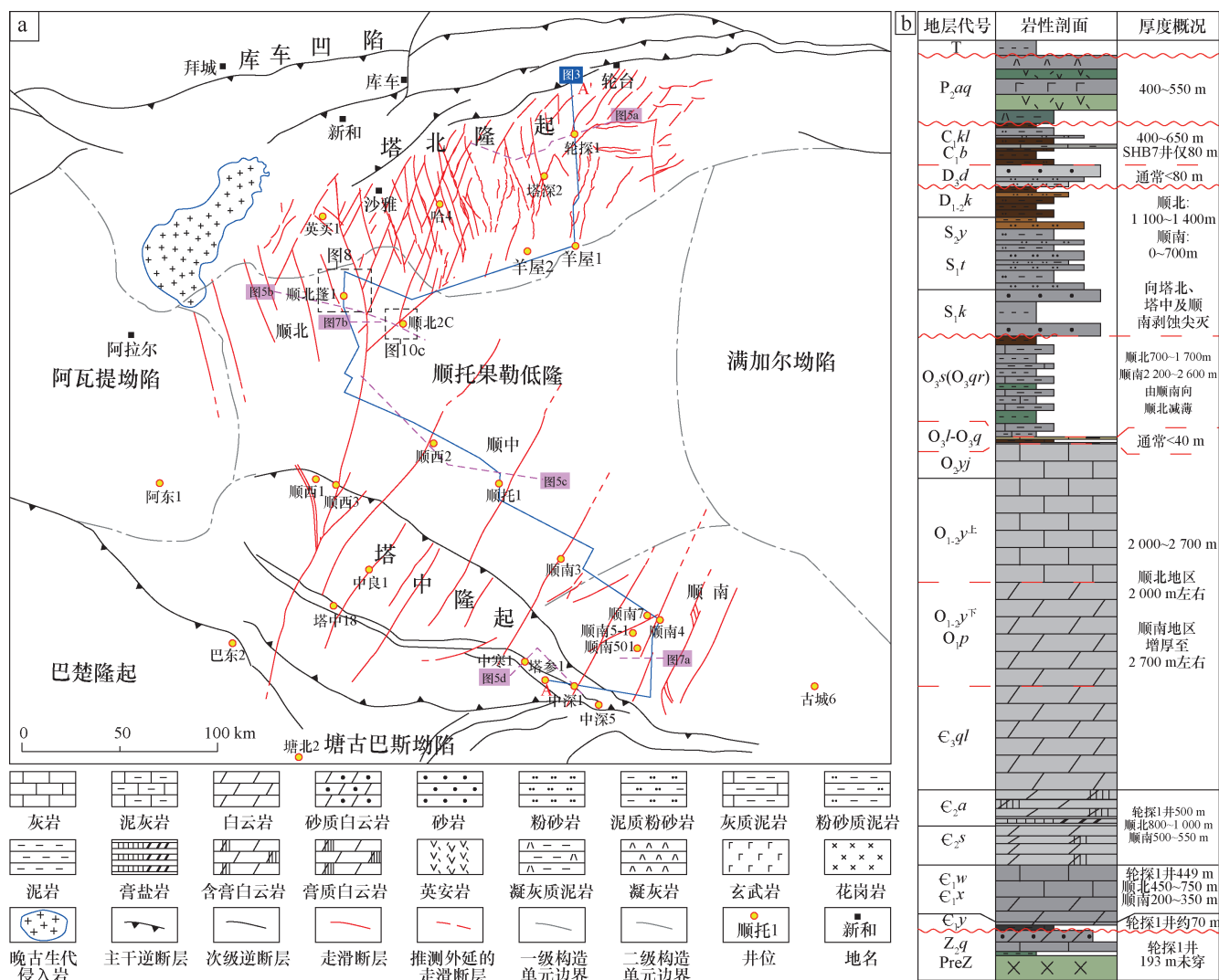


图1 塔里木盆地中部构造纲要图(a)及地层综合柱状图(b)(图1a据文献[25-28]编改)

Fig. 1 Structural outline (a) and stratigraphic column (b) of the central Tarim Basin (Fig. 1a was modified from references [25-28])

PreZ. 前震旦系; Z₂q. 奇格布拉克组; Є₁y. 玉尔吐斯组; Є₁x. 肖尔布拉克组; Є₁w. 吾松格组; Є₂s. 沙依里组; Є₂a. 阿瓦塔格组; Є₃ql. 下秋里塔格组; O₁p. 蓬莱坝组; O₁₋₂y. 鹰山组; O₂yj. 一间房组; O₃q. 恰尔巴克组; O₃l. 良里塔格组; O₃s(或 O₃qr). 桑塔木组(或却尔却克组); S₁k. 柯坪塔格组; S₁t. 塔塔埃尔塔格组; S₂y. 依木干他乌组; D₁₋₂k. 克孜尔塔格组; D₃d. 东河塘组; C₁b. 巴楚组; C₁kl. 卡拉沙依组; P₂₋₃aq. 阿合群; T. 三叠系

率优势,将单井的岩性地层、流体、沉积相、钻井事件等深度域的地质信息标定到时间域地震剖面上,对地震剖面的层位、构造、沉积相的解释起到质控的作用。通过发挥地震剖面的横向分辨率优势,则可以实现地质信息由井点到面、到体,由局部到区域,由已知到未知的扩展。合成地震记录标定也是创建时深尺和速度模型,并据此进行地震剖面时深转换的重要手段。井-震标定的准确性直接关系到地震地质层位厘定的准确性,同时还关系到不整合面、断层、裂缝、流体、洞穴等重要地质信息标定和识别的准确性。合成地震记录井-震标定是地震解释中最重要的基础工作。

利用 Landmark 软件系统中的 Openworks 模块下的 Syntool 工具制作了位于塔北隆起、顺托果勒低隆、塔中及其北坡 40 余口井的合成地震记录,对塔里木盆地中部由浅至深的地层结构、地层分布以及关键界面进行了准确约束。对钻揭层位最全、最能代表所在区域的超深井给予重点关注,如位于塔北地区的轮探 1、塔深 2、塔深 1、羊屋 1 井,位于顺北-顺南地区的顺北蓬 1、顺托 1、顺南 5-1、顺南 7 井,以及位于塔中隆起的塔参 1、中深 1、中寒 1、中深 5 井等。通过合成地震记录井-震标定和连井地震剖面解释,对盆地中部二叠系、石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系、寒武系、震旦系等的地震波组特征进行了总结,准确厘定了各关键反射界面。

2.2 盆地中部顺北、塔北地区古生界深层-超深层速度特征

基于顺北蓬 1 井、轮探 1 井、塔深 2 井合成地震记录井-震精确标定产生的时深关系及速度计算结果,明确了盆地中部顺北、塔北地区以古生界为主的深层、超深层速度特征。

顺北地区:二叠系因发育火成岩,为一套高速层,层速度可达 4 900 m/s,较上覆三叠系和下伏石炭系分别高约 1 100 和 750 m/s;石炭系卡拉沙依组至上奥陶统桑塔木组,层速度介于 4 150~4 500 m/s,其中桑塔木组泥岩显著偏低,较上覆志留系砂泥岩低 40~100 m/s,较下伏上奥陶统含泥灰岩低 1 000 m/s;上奥陶统良里塔格组和哈尔巴克组为一套含泥灰岩组成的中高速层,层速度 5 400 m/s 左右,较下伏中、下奥陶统碳酸盐岩低 600 m/s。塔北轮南低凸起地区:中、下奥陶统-寒武系碳酸盐岩整体为一套高速层,层速度介于 5 800~6 400 m/s,其中,寒武系沙依里克组和吾松格尔组显示为(超)高速层,层速度较上下地层高 250~400 m/s。玉尔吐斯组显示为一套高速层,但层速度比上覆肖尔

布拉克组白云岩低 550 m/s。总体而言,地层层速度具有显著的纵向非均匀性。

2.3 地层与地震波组特征

2.3.1 二叠系

二叠系通常由顶、底碎屑岩段夹中部火山岩段组成,称为阿恰群($P_{2-3}aq$)。顺托果勒及邻区普遍钻遇。火山岩段主要由火山碎屑岩(主要为凝灰岩)、玄武岩、英安岩等组成,成分多样。其中,顺托果勒低隆地区火山岩较厚,可达 450~600 m;顺南地区较薄,通常 10~50 m,且主要是玄武岩。测井显示火山岩段最典型的特征是高 GR,声波时差则与岩性有关,通常凝灰岩 AC 值比英安岩、玄武岩高。总体上,火山岩地层速度要比上下碎屑岩高,因此,地震剖面中,二叠系火山岩顶、底一般为一套高频、连续的强反射波组,火山岩段中部则呈透镜状杂乱反射(图 2a,图 3)。

二叠系底地震反射界面称为 T_5^4 (或 T_g^2),为一连续、强振幅的波峰反射,区域上易追踪(图 2a)。连井剖面显示二叠系在羊屋 1 井以北约 10 km 处减薄尖灭(图 3)。

2.3.2 石炭系

盆地中部石炭系主要钻遇下统卡拉沙依组(C_1kl)和巴楚组(C_1b),仅少数井钻遇小海子组(C_2x)。卡拉沙依组总体为厚层泥岩与砂泥岩的不等厚互层,泥岩具有较高的声波时差($>300 \mu s/m$),而砂岩则较低。巴楚组剖面则由“三灰两泥”构成,自下而上分别是含灰岩段、下泥岩段、生屑灰岩段、中泥岩段、标准灰岩段,灰岩段厚度通常 10~30 m 不等。测井显示灰岩段 AC 值显著偏低,介于 175~200 $\mu s/m$,泥岩段 AC 值则显著偏高,介于 225~250 $\mu s/m$ 。卡拉沙依组、巴楚组地层速度在纵向上频繁变化,与之相对应,石炭系地震反射剖面为一套高频、强振幅、连续性很好的反射波组(图 2a,b)。

卡拉沙依组底界,即 $T_5^6(T_g^2)$ 反射界面为一高频、强振幅、连续的波峰反射,区域上易追踪。巴楚组底界,即 $T_5^7(T_g^2)$ 反射界面则为一个区域性的不整合面,塔北-顺北地区为一连续性很好的强振幅波峰,至顺南地区相变为连续性很好的强振幅波谷(图 2a,b,图 3)。

2.3.3 上泥盆统东河塘组

上泥盆统东河塘组(D_3d)为一套海相石英砂岩,

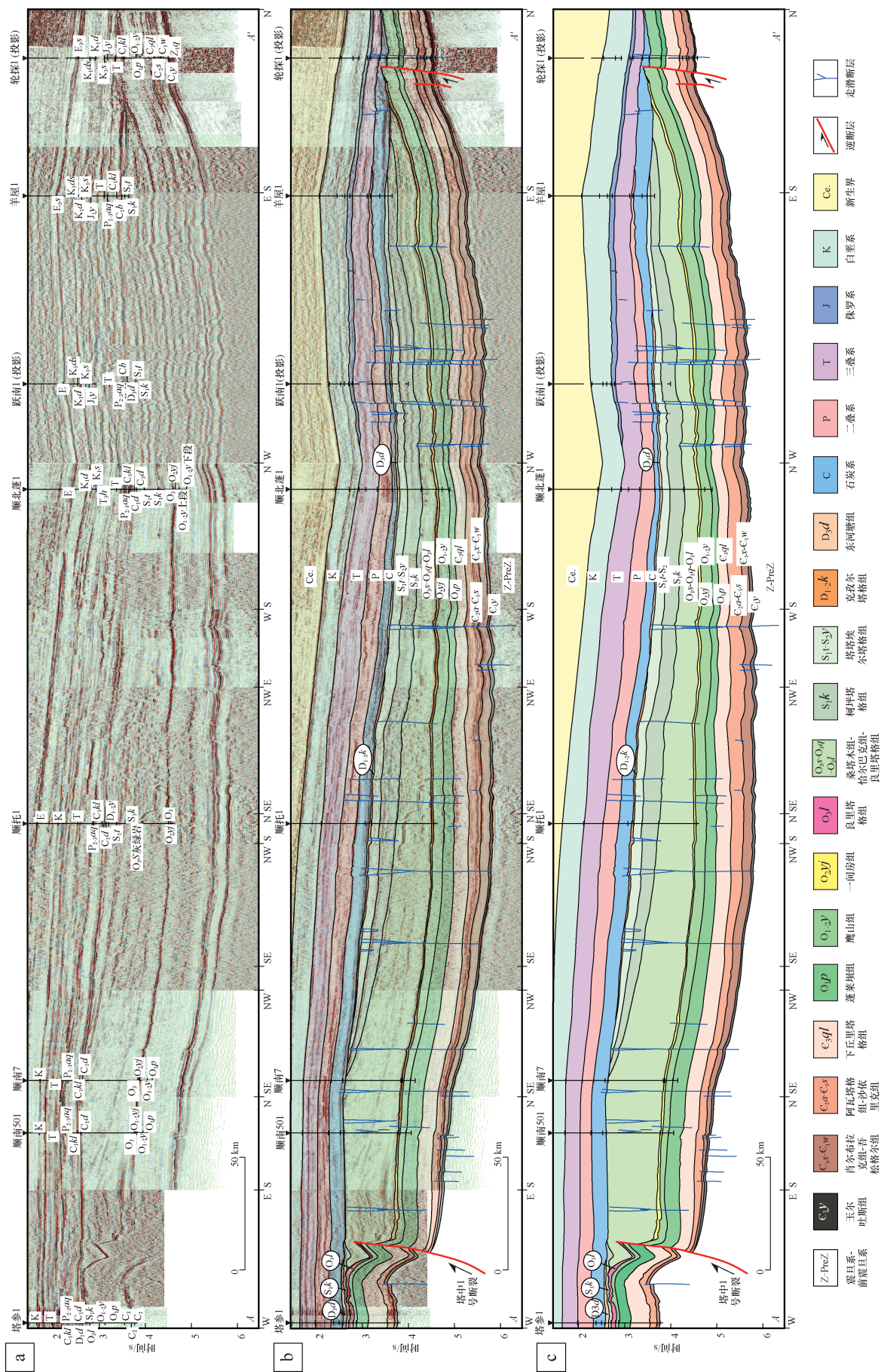


图3 塔北(南斜坡)-顺北-顺中-塔中低凸起连井地震剖面 (A-A') (剖面位置见图1a)
 Fig.3 Well-tie seismic sections (A-A') across the south slope of Tabai-Shunbei-Shunzhong-Shunnan-Tazhong Lower Uplift (see Fig.1a for the section location)
 a.由钻井-震标定的未解释剖面; b.剖面解释结果; c.剖面解释结果; 注: 地层代号解释见图1

塔北跃进地区较厚, 钻厚约 120 ~ 180 m, 顺北地区较薄, 钻厚 40 ~ 90 m 不等, 顺南地区缺失。塔中地区仅少数井钻遇, 厚度 20 ~ 200 m 不等。顺北蓬 1 井合成地震记录标定显示东河塘组为一低频、弱振幅的波谷反射, 其底界对应 $T_6^0(T_g^3)$ 地震反射界面(图 2a)。

2.3.4 志留系 - 中、下泥盆统

志留系 - 中、下泥盆统自下而上包括柯坪塔格组(S_1k)、塔塔埃尔塔格组(S_1t)、依木干他乌组(S_2y)、克孜尔塔格组($S_3 - D_{1-2}k$), 整体上为一套厚层的陆棚、滨岸、浅滩或潮坪相的陆缘碎屑, 主要由大段泥岩、砂岩、粉砂岩、砂泥岩不等厚互层组成(图 1b, 图 2a)。该套地层在塔北、顺南、塔中地区大面积缺失, 不同组的区域分布则又存在一些差异(图 3)。顺北蓬 1 井的测井显示该套地层的砂岩、泥岩 GR 值存在较大差别, 但 AC 值差别很小, 基本介于 220 ~ 240 $\mu s/m$, 仅塔塔埃尔塔格组底部和柯坪塔格组局部存在 AC 值低幅跳跃。相应的, 合成地震记录和地震剖面均显示该套地层为一套弱振幅, 低频、连续性较差的反射波组(图 2a)。

该套地层中, 塔塔埃尔塔格组底界, 即 T_6^3 反射界面为一低频、中等振幅、连续性好的波谷反射, 而 $T_7^0(T_g^{5-0})$ 反射界面, 即柯坪塔格组底界则为一低频、强振幅、连续性很好的波峰反射。

2.3.5 上奥陶统

盆地中部, 上奥陶统自下而上发育恰尔巴克组(O_3q , 塔北为吐木休克组, O_3t)、良里塔格组(O_3l)和桑塔木组(O_3s , 顺南地区也称却尔却克组, O_3qr)。其中恰尔巴克组、良里塔格组通常为黄灰色泥质灰岩、灰质泥岩, 塔北地区吐木休克组为瘤状灰岩, 厚度较薄, 通常仅数十米。桑塔木组为一套夹薄层灰岩条带的、由泥岩、粉砂质泥岩、灰质泥岩组成的巨厚泥岩层。顺北蓬 1 井测井显示桑塔木组上部 AC 和 GR 的变化均较大, 相应的, 地震剖面呈强振幅、低频反射, 而下部 AC 和 GR 变化均较小, 显示桑塔木组下部岩相变化不大, 相应的, 地震剖面呈弱振幅、中 - 高频、弱连续反射(图 2a)。

单井标定显示, 桑塔木组底界, 即 $T_7^2(T_g^{5'})$ 反射界面处于强振幅、连续性很好的波峰反射的中上部, 而上奥陶统底界, 即 $T_7^4(T_g^{5''})$ 反射界面则位于强振幅、连续性很好的波峰、波谷转换的位置, 即相当于零相位。具体实践中, 为了便于追踪解释, T_7^4 界面也常沿着波峰振幅最大的位置追踪。实际上, T_7^4 是盆地中部, 乃至

塔里木盆地全盆最容易识别的标志层。

2.3.6 上寒武统 - 中奥陶统

上寒武统 - 中、下奥陶统自下而上包括上寒武统下秋里塔格组(ϵ_3ql)、下奥陶统蓬莱坝组(O_1p)、中、下奥陶统鹰山组($O_{1-2}y$)、中奥陶统一间房组(O_2yj), 为一套巨厚的碳酸盐岩层。

其中下秋里塔格组、蓬莱坝组、鹰山组下段通常为白云岩, 而鹰山组上段、一间房组则通常为灰岩。该层系灰岩、白云岩中还常见泥质、砂屑、沥青等。测井显示该套碳酸盐岩整体具有低 GR 值, 低 AC 值的“双低特征”, GR 值通常介于 15 ~ 25 API, AC 值则通常介于 150 ~ 170 $\mu s/m$, 在含泥白云岩、含泥灰岩、泥质白云岩及泥质灰岩层段, AC 值和 GR 值均显著变大, 呈指状跳跃。由于该套地层为整体均一、高速的碳酸盐岩层, 因此, 地震反射整体上具有与之相对应的弱振幅、中 - 低频、连续性一般的特征。由于中、下奥陶统内发育低速的缝洞体, 因此在剖面中还常见强振幅、短轴状或板状的“串珠”反射(图 2a, b, 图 3)。

尽管该层系各组的岩石组成和地层速度整体上差别不大, 但在组与组的界面处仍存在一定程度的速度、岩石组成变化。在地震反射剖面中, 这些变化的位置往往是中 - 强振幅、连续性较好或一般的反射, 如 T_7^6 、 T_7^8 、 $T_8^0(T_g^6)$ 反射界面。 T_7^5 反射界面通常是弱振幅、连续性差、低频的反射(图 2a, b)。

由上寒武统到中寒武统, 岩石组成发生显著变化: 上寒武统为白云岩, 而中寒武统则为一套含膏岩系, 地层速度偏低, 因此, 地震反射显示上寒武统底界为一强振幅、连续性很好的低频波峰反射, 即 $T_8^1(T_g^{6'})$ 反射界面(图 2, 图 3)。

2.3.7 中寒武统

中寒武统自下而上由沙依里克组(ϵ_2s)、阿瓦塔格组(ϵ_2a)构成。轮探 1 井、中深 1 井、中寒 1 井钻厚分别为 497.0, 489.6, 437.0 m。塔中、塔北地区钻穿中寒武统的超深井录井岩性剖面显示中寒武统发育膏质、含膏白云岩或灰岩, 塔中地区还发育纯膏(盐)岩。由于膏质、膏岩通常为低速, 其与高速白云岩互层, 导致中寒武统速度变化频繁, GR、波阻抗、反射系数等也相应呈现出显著变化。地震反射波组清晰记录了这一地质现象, 剖面显示中寒武统由多根强振幅、连续性很好、低频 - 高频的波峰和波谷构成, 在区域上是一套厚层的强反射波组, 可区域追踪对比(图 3, 图 4)。

塔北地区轮探 1 井井 - 震标定显示中寒武统阿瓦

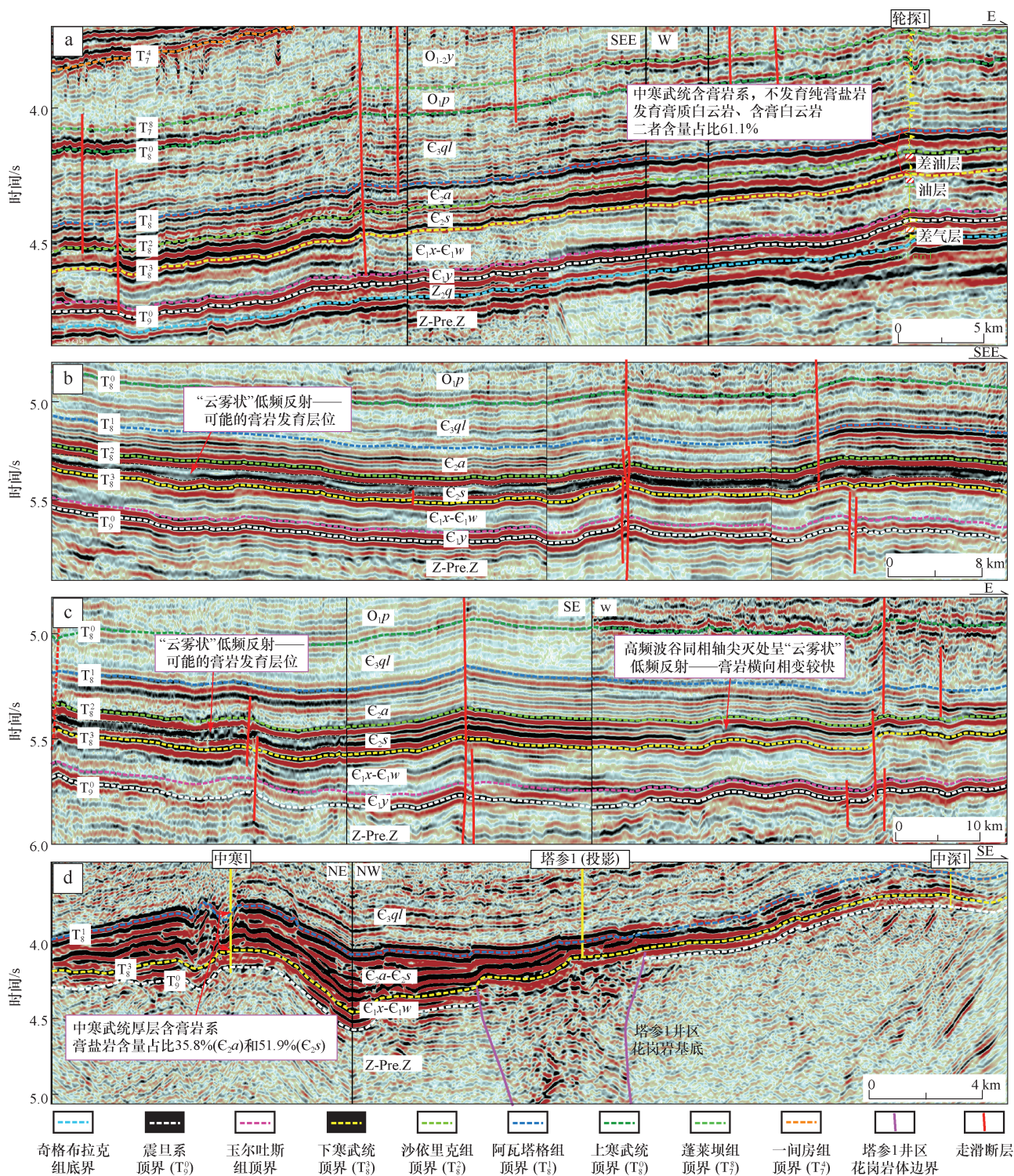


图4 塔北、顺北、顺中、塔中地区寒武系地震反射波组特征与区域对比(剖面位置见图1a)

Fig. 4 Characteristics and regional comparison of seismic reflections of the Cambrian in Tabei, Shunbei, Shunzhong, and Tazhong areas (see Fig. 1a for the section location)

a. 塔北(南坡)过轮探1井寒武系地震剖面及解释; b. 顺北地区寒武系地震剖面及解释; c. 顺中地区寒武系地震剖面及解释;

d. 塔中地区中、下寒武统超深层连井地震剖面及解释

(地层代号释义见图1。)

塔格组底界,即 T_8^2 反射界面,以及中寒武统底界,即 T_8^3 反射界面均为强振幅、连续性很好的波谷反射。由连井地震剖面将这两个反射层引至顺北地区的过程中,

中寒武统明显增厚,同相轴增多,意味着由塔北到顺北地区存在显著相变,而 T_8^2 、 T_8^3 反射界面也相应的由波谷渐变为波峰(图2a,c,图3)。由顺北到顺南地区,中

寒武统显著减薄,但是这两个关键反射界面仍然保持波峰不变(图3)。

2.3.8 下寒武统

盆地中部下寒武统自下而上由玉尔吐斯组(ϵ_{1y})、肖尔布拉克组(ϵ_{1x})、吾松格尔组(ϵ_{1w})组成。塔北地区轮探1井完整钻遇下寒武统,该井揭示:玉尔吐斯组由3套3~18 m不等的黑灰色、灰黑色泥岩与含泥灰岩、云灰岩不等厚互层组成,总厚度74.9 m;肖尔布拉克组为一套厚287 m的含泥云灰岩;吾松格尔组则为一套厚162 m的含泥云灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩、含灰白云岩等组成。总体上,肖尔布拉克组和吾松格尔组为一套具有“双低”(低GR,低AC)特征的高速地层,而玉尔吐斯组泥岩层则显示出GR和AC值的高幅波动,具有“双高”(高GR,高AC)特征(图2c),显示玉尔吐斯组地层速度整体偏低。

受下寒武统底部玉尔吐斯组低速地层的影响,地震反射在下寒武统底呈现出两个强振幅波谷夹一强振幅波峰的特征,玉尔吐斯组底界面,即 T_0^0 界面标定到强振幅波峰的中部。与玉尔吐斯组反射特征存在显著区别,下寒武统肖尔布拉克组、吾松格尔组为一套厚层、弱振幅、低频、连续性较差的反射波组(图2a,c,图3),反映岩石组成较均一。

2.3.9 前寒武系

目前,塔里木盆地主要在塔中隆起、巴楚隆起、塔北隆起等隆起区有井钻至震旦系或前震旦系。塔中地区中寒1井、中深1井、中深5井、塔参1井等钻至前寒武系变质岩、花岗岩基底。与塔中地区不同,塔北轮探1井钻遇的前寒武系为一套沉积岩,属于上震旦统奇格布拉克组,由白云岩、白云质砂岩、砂质白云岩、灰岩以及各色泥岩组成,厚183 m,井底钻遇10.5 m厚的辉绿岩(图2c)。该井合成地震记录标定奇格布拉克组由2~3根同相轴组成,具有中-强振幅、连续、中-高频的波组特征,可追踪到顺北、顺南地区。自奇格布拉克组以下,地震反射波组振幅显著减弱,连续性显著变差。

综上,盆地中部以下古生界为主的深层、超深层地震反射波组具有如下特征:①碳酸盐岩与砂、泥岩岩性突变界面、含膏岩系及火成岩顶底界面振幅最强,连续性最好;②大套碳酸盐岩、泥岩、砂岩振幅最弱、连续性较差,地层组或系的界面可能存在振幅中等到强的标志性反射层;③火成岩体呈弱振幅的杂乱反射。总体上,深层、超深层反射波组具有“六强、七弱、三中等、一

杂乱”的纵向分层特征,与地层岩石及层速度的纵向分层特征一致。具体表现为:①“六强”:二叠系火山岩顶、底,石炭系巴楚组碳酸盐岩与碎屑岩互层层系,上奥陶统与中、下奥陶统岩性突变界面,中寒武统含膏岩系,下寒武统玉尔吐斯组等6个界面或层系振幅最强、连续性最好,可全区追踪对比;②“七弱”:震旦系,上寒武统、下寒武统厚层白云岩,中、下奥陶统厚层灰岩、白云岩,上奥陶统泥岩,志留系大套砂、泥岩,石炭系卡拉沙依组碎屑岩,二叠系上部、下部的砂泥岩等岩石组成较均一的7个层系,振幅最弱,同相轴连续性较差;③“三中等”:奥陶系底部、志留系柯坪塔格组、塔塔埃尔塔格组底部等3个组、系界面连续性好到中等,振幅中等-强;④“一杂乱”:二叠系英安岩、凝灰岩等火成岩呈杂乱反射,多期岩体呈透镜状垂向、侧向叠置。

3 中、下寒武统地震反射波组的地质意义与区域对比

塔里木盆地隆起区钻穿寒武系的超深井已经表明中、下寒武统发育膏盐岩,下寒武统玉尔吐斯组则发育获得广泛共识的一套烃源岩。然而,钻井同时也表明中寒武统膏盐岩存在区域分布差异,包括岩石组成、膏盐岩厚度等。

对于下寒武统烃源岩,目前盆地中部钻穿寒武系的为数不多的超深井,就笔者所掌握的信息,除塔北地区轮探1井钻遇下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,累计厚度26 m;星火1井钻遇下寒武统一套厚度3.5 m的黑灰色炭质页岩;塔中地区中寒1井在下寒武统肖尔布拉克组底部钻遇两层厚度均为3 m的黑色泥岩(可能相当于玉尔吐斯组),大部分井均未揭示下寒武统烃源岩。但是单井资料只是“一孔之见”,不具有普遍性,因此只有通过地震波组的准确识别、标定和追踪,才能实现单井实钻地质信息由点到面,由一个区域向相邻区域的延伸和扩展。

在对塔北轮探1井合成地震记录井-震精确标定、区域波组追踪对比及前人研究的基础上,结合盆地中部钻穿寒武系的超深井钻探结果,对塔北、顺托果勒、顺南及塔中等地区的中寒武统含膏(盐)层系及寒武系生-储-盖组合层系地震波组的地质意义与区域对比展开讨论。

3.1 中寒武统含膏(盐)层系地震反射波组的地质意义与区域对比

塔北、顺托果勒、顺南及塔中寒武系地震剖面显示

中寒武统地震波组整体为一套强振幅、低频到高频、连续性很好的反射,但不同区域仍然存在细微差别(图3)。

3.1.1 塔北(南坡)地区

塔北(南坡)地区过轮探1井的地震剖面显示中寒武统时间厚度约150~180 ms,整体为一套强振幅、连续性很好的反射波组,但东部和西部仍存在同相轴振幅、连续性等的细微差异。轮探1井区附近的中寒武统中部,即 T_8^2 界面上下,可见连续性很差的弱振幅波谷断续“飘浮”在弱-中等振幅的波峰反射轴中;而西部地区,中寒武统内部波峰、波谷对比显著, T_8^2 界面上下高频波谷振幅较强,连续性比东部地区好(图4a)。

轮探1井实钻表明阿瓦塔格组整套地层以膏质白云岩、含膏白云岩为主(累计厚度占比61.1%),夹有泥质、灰质白云岩或含灰、含泥白云岩(图5e)尽管沙依里克组膏质含量较低,仅占10.4%(图5f),且集中发育在该组中部(图2c),但地震剖面仍然显示其由强振幅的1.5个波峰和1.5个波谷组成(图4a),精细标定表明强振幅波峰基本在膏质对应的位置起跳(图2c)。

综合阿瓦塔格组和沙依里克组实钻岩性剖面与地震反射特征的对比关系,笔者认为中寒武统强振幅反射波组与膏质发育密切相关。膏质的加入增强了地层密度和速度的垂向非均一性,导致了中寒武统强振幅反射波组的形成。

3.1.2 顺托果勒与塔北地区的对比

顺北、顺中与塔北轮探1井区地震剖面的中寒武统地震波组特征存在一定的共性:阿瓦塔格组和沙依里克组的振幅均存在显著的横向变化,表明中寒武统含膏地层存在显著的横向非均一性(图4a—c)。然而,顺北、顺中与塔北地区中寒武统尤其是沙依里克组地震波组特征仍然存在诸多显著差异。

第一,顺北、顺中地区中寒武统反射波组时间厚度270~300 ms,远大于塔北轮探1井区的厚度。第二, T_8^1 、 T_8^3 界面由塔北到顺北地区逐渐由波谷渐变为波峰,该波峰可追溯到顺中、顺南地区。第三,顺北、顺中地区沙依里克组剖面常见由 T_8^2 和 T_8^3 界面之间的两个波谷和一个低频波峰组成,其中,波峰厚度可达75 ms,横向变化较大,振幅中等-强,波峰中部“飘浮”有断续分布、振幅很弱的波谷反射,整体形同飘浮的云雾;与顺北、顺中地区相比,塔北地区沙依里克组缺乏这套“云雾状”的低频波峰反射(图4a—c),表明顺北、顺中与塔北地区的沙依里克组岩石组成存在显著差异,由

塔北到顺北、顺中地区,岩相存在显著变化。

对中寒武统地震反射波组的进一步追踪研究发现:顺北、顺中、顺南地区中寒武统(主要是沙依里克组)均存在不同程度的塑性变形,具体表现为强振幅反射波组和“云雾状”反射波组局部增厚、断层错断减薄和褶皱变形(图6)。而造成这种变形的则应是塑性较强的含膏岩系,其膏质含量很可能较高,白云岩含量很可能较低。基于以上推断,笔者认为顺北、顺中、顺南地区,中寒武统膏盐岩主要发育在沙依里克组,与该组所发育的强振幅反射波组、“云雾状”反射波组相对应,地层局部增厚和褶皱变形是最关键的识别标志(图6)。

3.1.3 塔中与顺托果勒、顺南及塔北地区的对比

塔中地区中寒武统地震反射波组特征与塔北、顺北、顺中及顺南地区存在显著差异。塔中地区中寒武统整体为一套强振幅、连续性较好的反射波组,横向厚度变化较大,中寒1井区约300 ms,中深1井区约150 ms。由西向东、由厚减薄的过程中,强振幅反射轴存在尖灭、合并现象。此外,由中寒1井向中深1井追溯的过程中,中寒武统反射波组的振幅存在明显衰减(图4d),表明中寒武统岩石组成同样存在横向变化。中寒1井、中深1井等钻穿寒武系的超深井录井岩性剖面进一步表明:中寒1井区以较纯的膏盐岩为主的含膏岩系是中寒武统最主要的岩石组成,含膏岩类累计厚度占阿瓦塔格组和沙依里克组总厚度的81.8%和78.3%,其中纯膏盐岩累计厚度占比也分别高达37.9%(108 m)和51.9%(79 m)(图5c,d);中深1井区,含膏岩类、膏盐岩、泥岩等软弱、低速层的累计厚度占阿瓦塔格组、沙依里克组的比例显著偏低,分别为35.6%和29.8%,其中膏岩(包括小部分泥岩)的含量则更低,累计厚度占比分别仅为10.6%(30.04 m)和4.8%(9.88 m)(图5a,b)。

以上分析表明,塔中地区中寒武统膏盐岩的横向分布存在显著的含量、厚度非均一性,是导致地震反射波组的振幅由中寒1井区向中深1井区衰减的关键因素。由塔中地震反射剖面得出的结论与塔北轮探1井区得出的结论一致:膏盐岩的加入增强了地层密度及波速的垂向非均一性,是形成强振幅反射波组的关键因素,且膏盐岩含量越高,地震反射波组振幅越强。

3.2 中、下寒武统生-储-盖组合特征及区域对比

3.2.1 中、下寒武统生-储-盖组合特征

前人通过野外及地球化学分析表明塔里木盆地

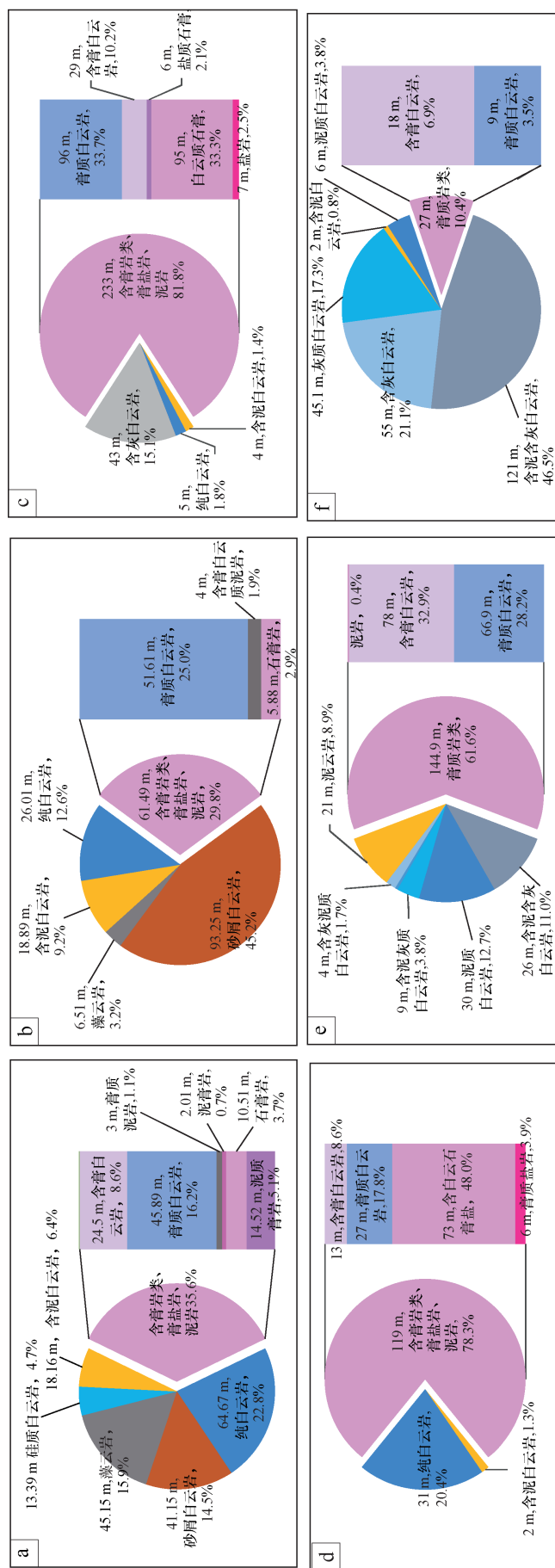


图5 塔中、塔北地区超深井阿瓦塔格组、沙依里克组录井岩性剖面各岩石成分累计厚度和含量统计饼图
the Tazhong and Tabei areas
a. 中深1井阿瓦塔格组 (厚283.45m) 岩石组成; b. 中深1井沙依里克组 (厚206.15m) 岩石组成; c. 中深1井阿瓦塔格组 (厚256.1m) 岩石组成; d. 中深1井沙依里克组 (厚236.9m) 岩石组成; e. 中深1井阿瓦塔格组 (厚256.1m) 岩石组成; f. 中深1井沙依里克组 (厚256.1m) 岩石组成

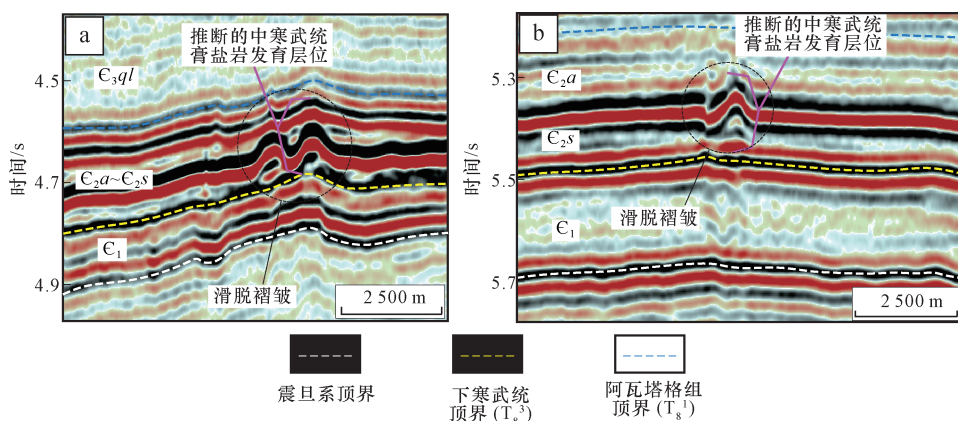


图6 顺北(a)、顺南(b)地区地震剖面典型的含膏岩系塑性变形特征(位置见图1a)

Fig. 6 Plastic deformation characteristics of gypsum-bearing strata in Shunbei (a) and Shunnan (b) areas (see Fig. 1a for the locations)

注:地层代号释义见图1

中、下寒武统发育一套良好的生-储-盖组合,由下寒武统玉尔吐斯组烃源岩、下寒武统肖尔布拉克组白云岩礁滩储层和中寒武统膏泥岩盖层构成。其中玉尔吐斯组灰色页岩野外样品的油气地球化学分析表明其TOC含量高达4%~16%,是一套高有机质丰度的优质烃源岩^[30]。2013年前后,中石油在塔中地区部署了以寒武系盐下白云岩为目标的中深1、中深1C井,虽然未揭示玉尔吐斯组烃源岩,但仍获得战略性突破^[9,31],揭开了塔中地区寒武系盐下白云岩储层勘探序幕。2020年,中石油再次在塔北轮南低凸起轮探1井寒武系盐下白云岩获得工业油流,进一步展现了塔里木盆地隆起区寒武系盐下勘探领域的广阔前景,并证实了中、下寒武统发育一套完整的生-储-盖组合^[10]。

轮探1井完整钻揭寒武系各组及上震旦统奇格布拉克组,在中、下寒武统揭示的生-储-盖组合具有如下特征:中寒武统阿瓦塔格组、沙依里克组分别发育一套含膏地层(图5a,f),为良好盖层;中寒武统沙依里克组中上部、下寒武统吾松格尔组中下部及上震旦统奇格布拉克组分别发育一套储层,试油结果分别为差油层、油层、出天然气但未定性;下寒武统玉尔吐斯组则揭示3层厚度分别为4(上段)、3和18 m(下段)的黑色泥岩、灰质泥岩(图2c),其中18 m厚的这套黑色泥岩TOC达2.43%~18.48%,为优质烃源岩^[10]。

3.2.2 中、下寒武统生-储-盖组合反射波组的区域对比与油气地质意义

通过轮探1井这套寒武系生-储-盖组合地震波组的准确标定(图2c)并向顺北、顺中、顺南及塔中地区延伸和追踪,可以发现:玉尔吐斯组烃源岩层系、中、下寒武统白云岩储层层系及中寒武统含膏层系地震反

射波组可由轮探1井区向顺北、顺中及顺南地区连续追踪(图4b,c),而由顺南向塔中追溯的过程中,该套反射波组厚度减薄,玉尔吐斯组烃源岩反射波组的振幅同时还出现显著衰减(图3)。

以上情况表明中、下寒武统生-储-盖组合广泛分布在塔北、顺北、顺中及顺南地区。而塔中地区,该组合厚度变化较大,局部不完整。如中深1、中深5、塔参1井区缺失玉尔吐斯组烃源岩,仅中寒1井于肖尔布拉克组中下部钻遇厚度均为3m的两层黑色泥岩;同时中寒1实钻结果还表明中寒武统80%左右的地层由纯膏(盐)岩、膏质白云岩、含膏白云岩组成(图5c,d),储层和烃源条件及其匹配均较差。

由顺北、顺中地区玉尔吐斯组烃源岩与走滑断裂带的匹配关系(图4b,c),及近年来油气勘探成果主要集中在大型走滑断裂带上的实际情况,可以总结出顺托果勒及顺南地区具备良好的原地生油、沿剪切断裂带垂向、短距运移、聚集的基本特点。显然,中寒武统含膏岩系作为盐下组合良好盖层的同时,必然也对油气向盐上储层的运移起到相当程度的封挡作用。因此,盐上碳酸盐岩层系在远离大型剪切断裂带、同时也缺乏水平运移通道(如暴露溶蚀不整合面)的地区可能不具备较大的资源潜力。

4 中、下奥陶统“串珠”反射波组的地质意义

“串珠”反射最初在塔河油田岩溶缝洞型储层的勘探实践中得以发现^[3,33]。随着油气勘探由隆起区向构造低洼区扩展,断控岩溶缝洞型储集体形成的“串珠”反射在顺托果勒地区进一步被发现,基于这一储层形成机制建立了“断溶体圈闭”这一全新的圈闭概

念^[32],拓展了盆地中部超深层碳酸盐岩油气勘探新领域^[6-7]。对于断溶体“串珠反射”的波组特征及地质意义与成因,前人已经展开了广泛研究^[33-39]。然而,顺托果勒地区还发育与这类“串珠”在产状、分布规律方面存在较大差异的另外两种“串珠”:①层状、准层状或零星分布的“串珠”;②发育层位较深,由多个“串珠”纵向叠置形成的复合“串珠”。针对这两类“串珠”反射,目前基本缺乏报道。

4.1 断溶体“串珠”反射

通过对高精度三维地震资料沿层提取的均方根振幅属性,可以清晰的观察到顺托果勒地区沿剪切(走滑)断裂带的主剪切或次级剪切断裂带上广泛分布有强振幅的“串珠”反射(图7a)。这些“串珠”反射明显区别于其围岩,具有极高的均方根振幅值,显示为图7a中的红点。这一类“串珠”反射,为剪切断裂破碎带叠加岩溶作用产生的断控岩溶缝洞型储集体,即断溶体的响应,是油气勘探的重点目标。

4.2 层状或准层状“串珠”反射

层状或准层状分布的“串珠”反射,主要发育在鹰山组下部—蓬莱坝组顶部(图7b),具有相同的顶界(图7b中黑色虚线),而串珠下部断层不发育,缺少沟通深源流体的垂向通道。同时,顺北蓬1井在“串珠”反射的位置取的岩心中除了发育有未充填的溶蚀孔洞、棱角状的破碎角砾,同时还见到硅质团块(图7c)、燧石及蜂窝状溶蚀现象,表明经历过较强的热液改造历史。然而仅以热液改造观点似乎不能解释串珠反射呈准层状展布这一现象。对此,笔者认为可能存在一期准同生岩溶作用,导致准层状岩溶洞穴的发育,该过程提高了“串珠”所在层系的渗透性,深埋藏之后才叠加较强的热液改造,破坏了早期淡水岩溶的基本面貌,致使现今看到的溶蚀似乎主要是热液溶蚀,但实际上仍存在早期准同生岩溶的可能。

4.3 层位深、纵向叠置的孤立“串珠”反射

对于由多个“串珠”纵向叠置形成的复合“串珠”体,其孤立发育(图8c),与主走滑断裂缺乏联系,出现在鹰山组至中寒武统顶部,层位深,纵向高度大。该类“串珠”下方通常还发育沟通深层甚至基底的断层(图8a,b)。这类“串珠”的产出状态明显区别于沿断裂带分布的断溶体“串珠”和层状、准层状分布的“串珠”。笔者认为这类“串珠”反射可能主要是深部热液点状上行,在局部发生强烈溶蚀的结果。在顺托果勒地区,

此类“串珠”反射除顺北一号断裂带右侧发育(图8),还见于顺北四号断裂带旁侧,尽管较为稀少,但由于其产出状态最为特殊,仍值得进一步深入探讨。

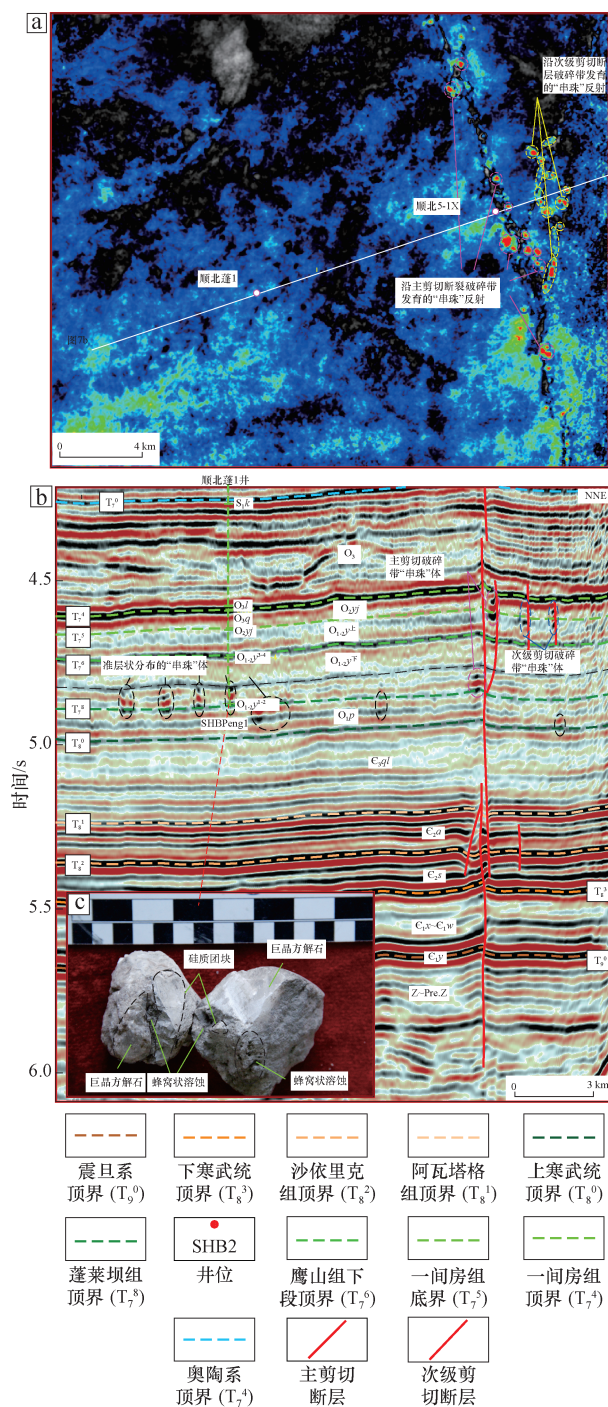


图7 顺北地区顺8井北三维区断溶体“串珠”与层状、准层状“串珠”反射的平面属性特征(a)及剖面特征(b)(位置见图1a)
Fig. 7 Features of “bead-like”, bedded, pseudo-bedded “bead-like” reflections in 3D seismic attribute map (a) and cross-section (b) of Well Sh8 in Shunbei area (see Fig. 1a for the location)
a. 顺8井北三维区断溶体“串珠” T_7^4 至 T_7^6 界面均方根振幅(RMS Amplitude)属性特征; b. 顺8井北三维区断溶体“串珠”与层状、准层状“串珠”反射剖面特征。注:地层代号见图1

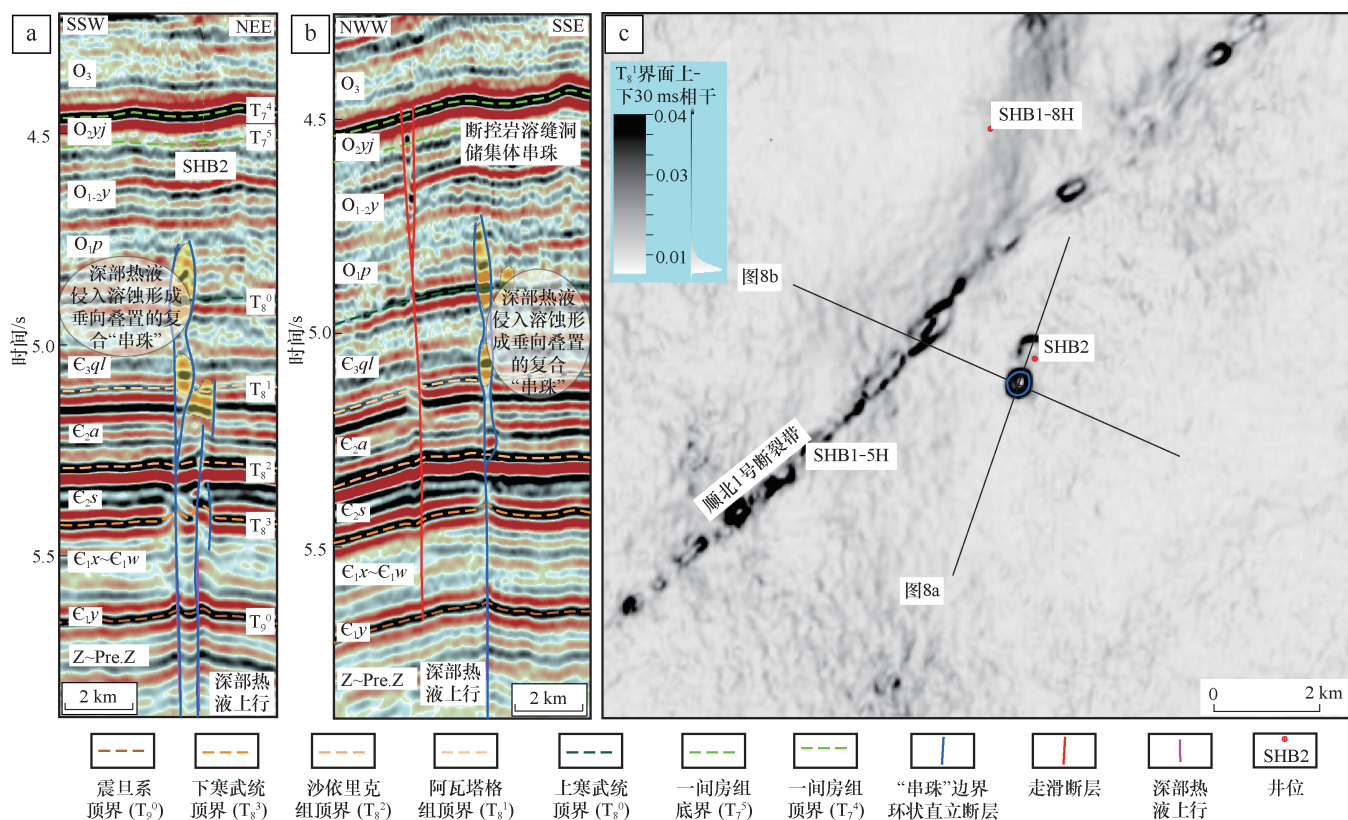


图8 顺北地区孤立发育的“串珠”反射剖面、平面相干属性特征(位置见图1a)

Fig. 8 Characteristics of isolated “bead-like” reflections in 3D seismic sections and attribute map of Shunbei area

(see Fig. 1a for the location)

a, b. “串珠”反射剖面特征; c. 顺北三维区 T_8^1 界面(上寒武统底)相干属性图(局部)

(地层代号释义见图1。)

5 结论

1) 盆地中部以下古生界为主的深层、超深层地震反射波组整体上具有“六强、七弱、三中等、一杂乱”的纵向分层特征,与地层岩性、地层速度的纵向分层特征相对应。

2) 中寒武统强振幅反射波组与膏质发育密切相关。膏盐岩增强了地层波速的垂向非均一性,是形成强振幅反射波组的关键因素,且膏盐岩含量越高,地震反射波组振幅越强。中寒武统膏盐岩含量存在区域差异和横向变化:塔中膏盐岩含量最高,但横向变化较大;塔北轮南低凸起轮探1井区基本不发育纯膏盐岩;顺托果勒及顺南地区,中寒武统膏盐岩可能主要发育在沙依里克组,以强振幅反射波组和“云雾状”反射波组发生局部增厚、褶皱变形或断层错断处显著减薄为识别标志。

3) 中、下寒武统生-储-盖组合广泛分布于塔北南斜坡、顺托果勒低隆及顺南地区,塔中地区该组合往

往不全,常见烃源岩缺失、中寒武统储层条件较差等情况。

4) 在顺托果勒地区发育3种分布规律各不相同的“串珠”反射:第一种为断控岩溶缝洞型储集体的响应,分布在主剪切或次级剪切断裂带上;第二种为准层状,发育于鹰山组下段的下部和蓬莱坝组上部之间,经历过较强的热液改造历史,但也存在早期淡水岩溶的可能;第三种发育在蓬莱坝组到中寒武统顶部之间,是由多个“串珠”体垂向叠置而成的复合“串珠”。

致谢: 特别感谢中国石化西北油田分公司勘探开发研究院、中国石油勘探开发研究院提供宝贵的基础资料。审稿专家和编辑部老师为本文的刊出提出了许多建设性意见,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 张磊,何登发,李涤,等. 准噶尔盆地东地区石炭系地震波组及构造-地层层序特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 918-931.
Zhang Lei, He Dengfa, Li Di, et al. Characteristics of seismic wave groups and tectono-stratigraphic sequences of the Carboniferous,

- eastern Luliang uplift, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 918–931.
- [2] Guo X, Hu D, Li Y, et al. Theoretical progress and key technologies of onshore ultra-deep oil/gas exploration [J]. Engineering, 2019, 5(3): 458–470.
- [3] 康玉柱, 康志宏. 塔河油田勘探实践与技术创新 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2013: 1–250.
- Kang Yuzhu, Kang Zhihong. Tahe oilfield: exploration practice and technological innovation [M]. Beijing: Sinopec Press, 2013: 1–250.
- [4] 翟光明, 王建君. 对塔中地区石油地质条件的认识 [J]. 石油学报, 1999, 20(4): 1–6.
- Zhai Guangming, Wang Jianjun. Analysis of petroleum geology in tazhong region [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 1–6.
- [5] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究 [J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827–844.
- Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 827–844.
- [6] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义 [J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38–51.
- Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38–51.
- [7] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207–216.
- Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207–216.
- [8] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83–95.
- Liu Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin-taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83–95.
- [9] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 1–13.
- Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and Exploration of Cambrian Subsalt Dolomite Original Hydrocarbon Reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1–13.
- [10] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62–72.
- Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62–72.
- [11] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 13–23.
- Yang Haijun, Deng Xingliang, Zhang Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 13–23.
- [12] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45–57.
- Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45–57.
- [13] 滕吉文, 杨辉. 第二深度空间(5000~10000m)油、气形成与聚集的深层物理与动力学响应 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4164–4188.
- Teng Jiwen, Yang Hui. Deep physical and dynamical process for the formation and accumulation of oil and gas resources in the second deep space (5000~10000 m) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4164–4188.
- [14] 李德生. 中国多旋回叠合含油气盆地构造学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1–386.
- Li Desheng. Tectonics of multi-cycle superimposed basins in China [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1–386.
- [15] 何登发, 李德生. 塔里木盆地构造演化与油气聚集 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1–167.
- He Dengfa, Li Desheng. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1–167.
- [16] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64–77.
- He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64–77.
- [17] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1–438.
- Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum, Tarim Basin, China. [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1–438.
- [18] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性 [J]. 科学通报, 2002, 47(Z1): 1–8.
- Jia Chengzao, Wei Guoqi. Tectonic characteristics and petroleum-bearing properties of the Tarim Basin [J]. Science Bulletin, 2002, 47(Z1): 1–8.
- [19] 刘家铎, 漆立新, 田景春, 等. 塔里木盆地构造演化与沉积格架 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–364.
- Liu Jiaduo, Qi Lixin, Tian Jingchun, et al. Tectonic evolution and sedimentary framework of the Tarim Basin [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1–364.
- [20] 何碧竹, 许志琴, 焦存礼, 等. 塔里木盆地构造不整合成因及对油气成藏的影响 [J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 253–265.
- He Bizhu, Xu Zhiqin, Jiao Cunli, et al. Tectonic unconformities and their forming: Implication for hydrocarbon accumulations in Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 253–265.
- [21] 何登发. 塔里木盆地的地层不整合面与油气聚集 [J]. 石油学报, 1995, 16(3): 14–21.
- He Dengfa. Unconformities and oil and gas accumulation in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 14–21.
- [22] 石开波, 刘波, 姜伟民, 等. 塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 862–877.

- Shi Kaibo, Liu Bo, Jiang Weimin, et al. Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin, NW China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 862–877.
- [23] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 52–67.
- Li Jianzhong, Tao Xiaowan, Bai Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 52–67.
- [24] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 655–672 + 683.
- Ma Yongsheng, Li Maowen, Cai Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 655–672 + 683.
- [25] 马德波, 郭光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例 [J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 225–237.
- Ma Debo, Wu Guanghui, Zhu Yongfeng, et al. Segmentation characteristics of deep strike slip faults in the Tarim Basin and its control on hydrocarbon enrichment: taking the Ordovician strike slip fault in the Halahatang Oilfield in the Tabei area as an example [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 225–237.
- [26] 陈赅俊, 何登发, 孙方源, 等. 塔北古隆起的三维地质结构及相关问题探讨 [J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 121–133.
- Chen Jiajun, He Dengfa, Sun Fangyuan, et al. Three-dimensional geological modeling of the Tabei paleo-uplift and discussion on related issues [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 121–133.
- [27] Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 103(1): 109–137.
- [28] Han Xiaoying, Tang Liangjie, Deng Shang, et al. Spatial characteristics and controlling factors of the strike-slip fault zones in the northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin: insight from 3d seismic data [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2020, 94(2): 516–529.
- [29] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题 [J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 1–12.
- He Dengfa, Ma Yongsheng, Liu Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 1–12.
- [30] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8–21.
- Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuer-tusi Formation in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 8–21.
- [31] 张纪智, 王招明, 杨海军, 等. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集 [J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 40–47.
- Zhang Jizhi, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 40–47.
- [32] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 347–355.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 347–355.
- [33] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 1–380.
- Dou Zhilin. Development technology of carbonate fracture-cavity reservoirs in Tahe Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1–380.
- [34] 邱华标, 印婷, 曹自成, 等. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂特征与奥陶系油气勘探 [J]. *海相油气地质*, 2017, 22(4): 44–52.
- Qiu Huabiao, Yin Ting, Cao Zicheng, et al. Strike-slip Fault and Ordovician petroleum exploration in Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(4): 44–52.
- [35] 杨德彬. 塔河油田断溶体油藏地震反射特征类型及规律 [J]. *石化技术*, 2018, 25(4): 121–122.
- Yang Debin. Type and regularity of the seismic reflection characteristic of fault-karst carbonate reservoirs in the Tahe oilfield [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2018, 25(4): 121–122.
- [36] 杨晓兰. 基于正演模型的地震相识别溶洞充填技术——以塔河油田 12 区东奥陶系储层为例 [J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 17–21.
- Yang Xiaolan. Cavern filling identification technique of seismic facies based on forward modeling: a case study on the Ordovician reservoirs in eastern block 12 of Tahe Oilfield [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(2): 17–21.
- [37] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向 [J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 1–10.
- Hu Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1–10.
- [38] 闫亮, 季苗, 贾宝迁, 等. 塔里木盆地顺北断溶体油气藏微生物特征及有利区预测 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 576–585.
- Yan Liang, Ji Miao, Jia Baoqian, et al. Microbial characteristics of Shunbei faulted-karst reservoirs and prediction of play fairways, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 576–585.
- [39] 程洪, 张杰, 张文彪. 断溶体储层类型识别、预测及发育模式探讨——以塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 996–1003.
- Cheng Hong, Zhang Jie, Zhang Wenbiao. Discussion on identification, prediction and development pattern of faulted-karst carbonate reservoirs: A case study of TH10421 fracture-cavity unit in block 10 of Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 996–1003.