

塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系良里塔格组 古地貌与岩溶洞穴特征

宁超众¹, 胡素云¹, 潘文庆², 姚子修¹, 李勇¹, 袁文芳²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系良里塔格组发育典型的表生岩溶体系, 形成特征性的喀斯特地貌及地下岩溶洞穴系统。首先利用地震资料表征了良里塔格组顶部喀斯特地貌, 然后应用岩心、镜下及测井资料研究了地下岩溶洞穴系统的基本特征, 并通过RMS振幅和方差融合技术刻画了岩溶洞穴系统的展布。结合本区地质背景, 探讨了岩溶体系发育的控制因素。研究表明, 良里塔格组顶部喀斯特发育岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶槽谷和落水洞等地貌要素, 不同的地貌要素具有不同的分布特征; 其内部岩溶洞穴系统发生垮塌、充填及压实, 岩溶洞穴通道呈直线形态并交织成复杂网状。控制该区岩溶体系发育的因素有: 低水位期海平面下降、先存断裂及裂缝、地表河流体系。

关键词: 洞穴; 垮塌; 岩溶; 古地貌; 良里塔格组; 奥陶系; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Characterization of paleo-topography and karst caves in Ordovician Lianglitage Formation, Halahatang oilfield, Tarim Basin

Ning Chaozhong¹, Hu Suyun¹, Pan Wenqing², Yao Zixiu¹, Li Yong¹, Yuan Wenfang²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The typical eogenetic karsts developed in the Ordovician Lianglitage Formation of the Halahatang area, Tarim Basin, are characterized by the featured paleokarst topography and subsurface paleokarst cave systems. This study initiates from the characterization of the karst terrain on top of the Lianglitage Formation with seismic data and then turns to the analysis of basic features of collapsed karst cave systems by core and thin section observation and log interpretation. In addition, the distribution pattern of the karst cave system is depicted through RMS amplitude and variance attribute fusion; and the factors controlling the development of the karst cave systems are explored against the paleogeological background therein. This study shows that the karst landform on top of the Lianglitage Formation consists of typical elements such as karst highlands, karst ramps, karst troughs and valleys as well as dolines, each with a different distribution pattern. The internal cave systems in the Lianglitage Formation underwent distinctive collapse, filling and compaction, leading to the pathways inside the systems occurring in rectilinear pattern and interweaving into reticular structure. The factors controlling the karst system development include extensive subaerial exposure during the LST period, pre-existing faults and fractures and surficial fluvial systems.

Key words: cave, collapse, karst, paleogeomorphology, Lianglitage Formation, Ordovician, Tarim Basin

塔里木盆地经历了多旋回构造演化, 盆地地质条件和油气分布极为复杂^[1-4]。塔北隆起哈拉哈塘凹陷奥陶系碳酸盐岩作为塔里木盆地典型的多旋回构造控

制下的产物, 在沉积层序、构造演化和成岩等方面反映明显; 该区奥陶系碳酸盐岩不仅经历了局限台地-开阔海台地-镶边台地-混积台地^[5-8]的沉积演化和大

收稿日期: 2018-02-22; 修订日期: 2020-07-27。

第一作者简介: 宁超众(1988—), 男, 博士、工程师, 油田开发地质研究。E-mail: nniinnng@126.com。

基金项目: 中国石油集团专项(2019D-4410)。

台地-大斜坡-凹陷-南北构造反转为为主的构造演化,而且经历了多期准同生-表生岩溶作用^[9-12]。

表生岩溶发育在地表暴露期,大气淡水与土壤或大气中的 CO_2 接触产生侵蚀性,对地表或地下碳酸盐岩体进行溶蚀^[13],形成特征性的喀斯特地貌和伴生地下洞穴系统。随着埋藏深度的增加,岩溶洞穴系统会发生垮塌^[13-19],形成岩溶垮塌体系,这在美国二叠盆地艾伦伯格群(Ellenburger Group)及瓜达鲁普群(Guadalupe Group)的圣安德鲁斯组(San Andres Formation)最为典型。然而,尽管对地表露头及浅中埋深($<3\ 000\text{ m}$)条件下岩溶体系的研究较容易,但受限于地震资料品质和分辨率,对超深层($>6\ 000\text{ m}$)岩溶体系的表征和刻画却较困难;在研究对象方面,对洞穴垮塌特征的研究较多,而对地下洞穴系统发育形态和分布特征的研究较少,也未形成较好的刻画方法;在岩溶控制因素研究方面,前人研究更多基于露头研究,地下古实例研究却较少。

本次研究主要基于地震资料,首先识别了良里塔格组顶部喀斯特地貌要素,表征了其剖面和平面的特征,然后从岩心、镜下观察和测井解释入手,确定了岩溶垮塌体井上的基本特征,再应用地震属性融合技术,刻画了塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系良里塔格组超

深层洞穴系统的形态;最后结合区域地质背景,探讨了良里塔格组岩溶体系发育的控制因素。

1 地质概况

哈拉哈塘油田位于中国新疆库车县和沙雅县境内,东接塔河油田,西邻英买力油田,北为东河塘油田。其古生界在构造上位于塔里木盆地塔北隆起中部哈拉哈塘凹陷内,东邻轮南低凸起,西接英买力低凸起,北为轮台凸起,南邻满加尔凹陷,勘探面积约 $4\ 300\text{ km}^2$ (图1)。

哈拉哈塘地区奥陶系层序地层及相互接触关系由图2所示。寒武纪到早-中奥陶世哈拉哈塘地区处于克拉通碳酸盐被动大陆边缘^[20],为稳定碳酸盐岩台地沉积,依次沉积了蓬莱坝组(O_1p)、鹰山组(O_{1-2}y)和一间房组(O_2y)^[21];奥陶纪中期的中加里东运动使塔里木南缘由拉张转变为挤压的构造背景,塔北转为大型碳酸盐岩斜坡,依次沉积了吐木休克组(O_3t)、良里塔格组(O_3l)以及以碎屑岩为主的桑塔木组(O_3s),其中一间房组、良里塔格组和桑塔木组顶部均发育不整合,并以良里塔格组顶部不整合面岩溶地貌特征最为明显;其后的海西、燕山和喜马拉雅构造运动不仅使哈

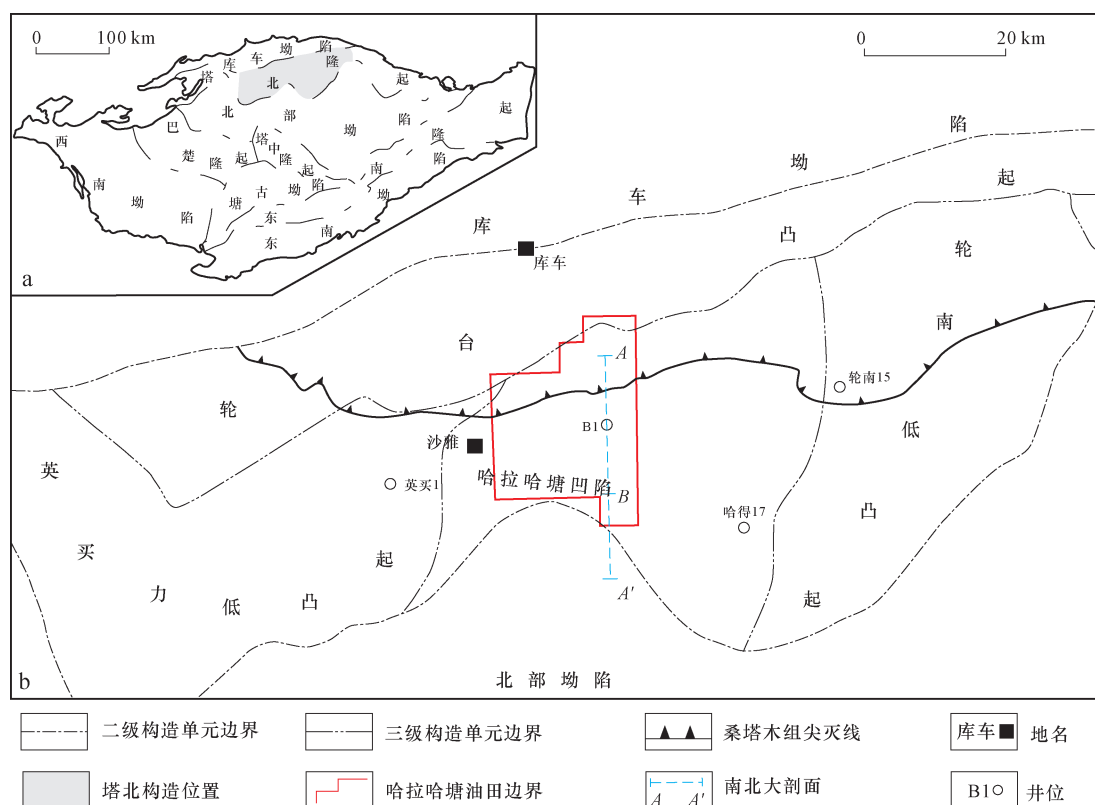


图1 塔里木盆地哈拉哈塘油田地理位置(a)及构造单元划分(b)

Fig. 1 The location(a) and structural units(b) of the Halahatang oilfield, Tarim Basin

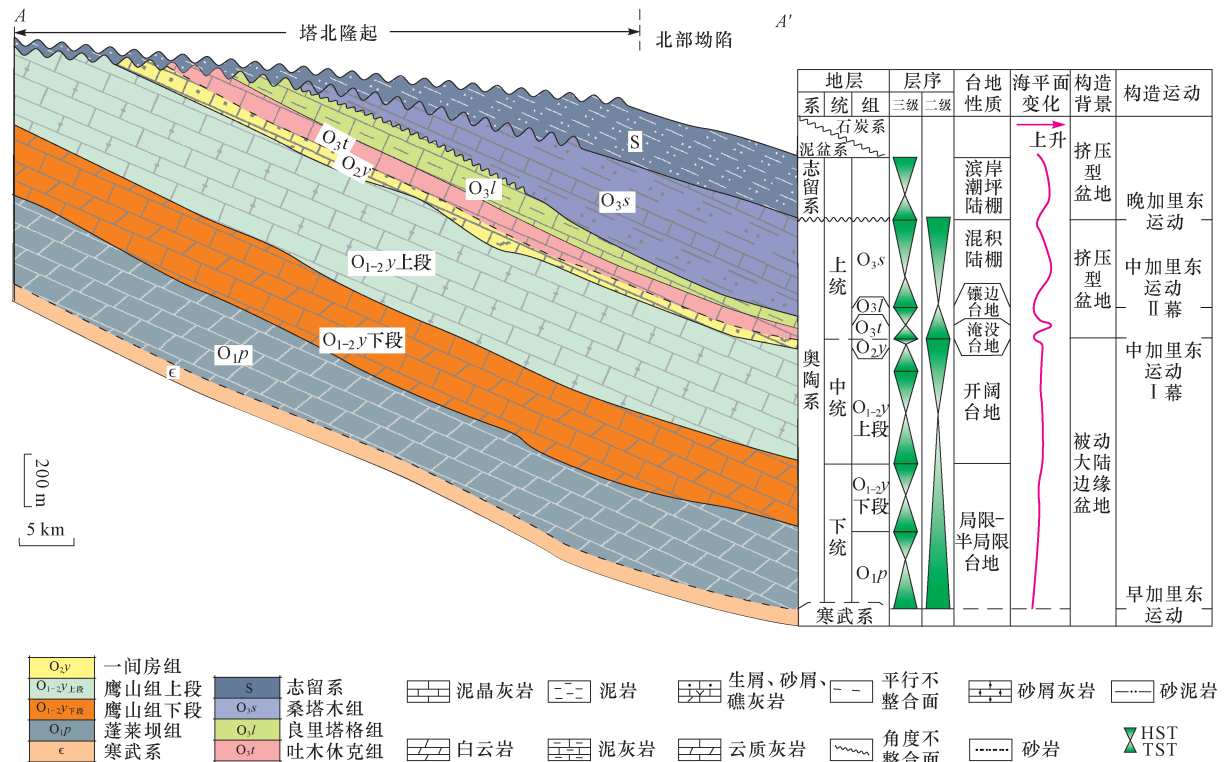


图2 塔北隆起哈拉哈塘地区志留纪末期奥陶系南北向地层结构剖面(图1中A—A'剖面,据斯春松等^[21]修改)

Fig. 2 Sequence stratigraphic framework of the Ordovician in the Halahatang area of the Tabei Uplift at the end of Silurian (see Fig. 1 for the location of profile A—A', modified from Si Chunsong et al. ^[21])

拉哈塘地区由斜坡变为凹陷(图1),而且使之发生了南北掀斜式构造反转^[22]。

目的层良里塔格组是在塔北北部抬升时于吐木休克组深水斜坡上发育起来的镶边台地^[8,23-24],并被其后的桑塔木组超覆。其台地边缘与盆地高差可达90 m,该组整体由一个向上变浅的三级层序构成(图2),可进一步划分为低位(LST)、海侵(TST)和高位(HST)3个体系域(图3),其中低位域和高位域广泛发育进积的台地边缘相,岩性较纯净,以生屑颗粒石灰岩为主;海侵域整体陆源泥质含量较高,形成特征的瘤状灰岩,在台地内部与上、下两个体系域泥质含量差异明显。

良里塔格组沉积末期,整个台地暴露地表发育广泛的岩溶,形成典型的喀斯特地貌,伴有地下岩溶洞穴系统及其垮塌产物。该岩溶体系是本次研究的主要对象。

2 大气淡水岩溶体系发育模式

岩溶地貌(喀斯特地貌)是富含CO₂的大气淡水在可溶性岩石(碳酸盐岩、石膏和岩盐等)表面流动,通过溶蚀和侵蚀作用形成的特征性地貌,主要发育在

地表暴露期,与此地貌伴生的还有地下岩溶洞穴系统,该类型溶洞占世界上近地表溶洞的90%^[25]。岩溶地貌和地下岩溶洞穴系统构成一个相互关联的三维体系^[13](图4),该三维体系由地表地貌要素(岩溶高地、岩溶洼地、落水洞和岩溶槽谷等)及地下要素(竖井、渗流带和潜流带通道等)构成。

溶蚀在近地表发育时首先形成渗流带或潜流带通道,构成初始洞穴系统^[13]。当区域性潜水面下降时,先前的潜流带通道进入到渗流带,洞穴内水流向下侵蚀使洞穴扩大^[13,26],水流也可携带地表沉积物在洞内沉积。同时,由于缺少了水体的浮力,处于渗流带的洞穴顶部开始发生垮塌,随着上覆地层的沉积负荷增大,洞穴可完全垮塌形成由垮塌角砾、洞穴沉积物及洞顶缝形成的岩溶垮塌体系(图5)。

3 岩溶地貌特征

哈拉哈塘地区良里塔格组顶面是一个三级层序边界,发育了非常明显的喀斯特地貌。该不整合面之下为良里塔格组碳酸盐岩,之上为桑塔木组泥岩为主混积岩,上、下较大的波阻抗差造成该面在地震上表现为强反射界面。通过追踪该界面地震同相轴建立解释层

面,并进一步通过井资料约束即可实现对喀斯特形态的三维刻画。由于良里塔格组在岩溶末期被桑塔木组水平上超,可将地震体按桑塔木组顶部光滑后的趋势面进行拉平来近似恢复岩溶期古地貌。

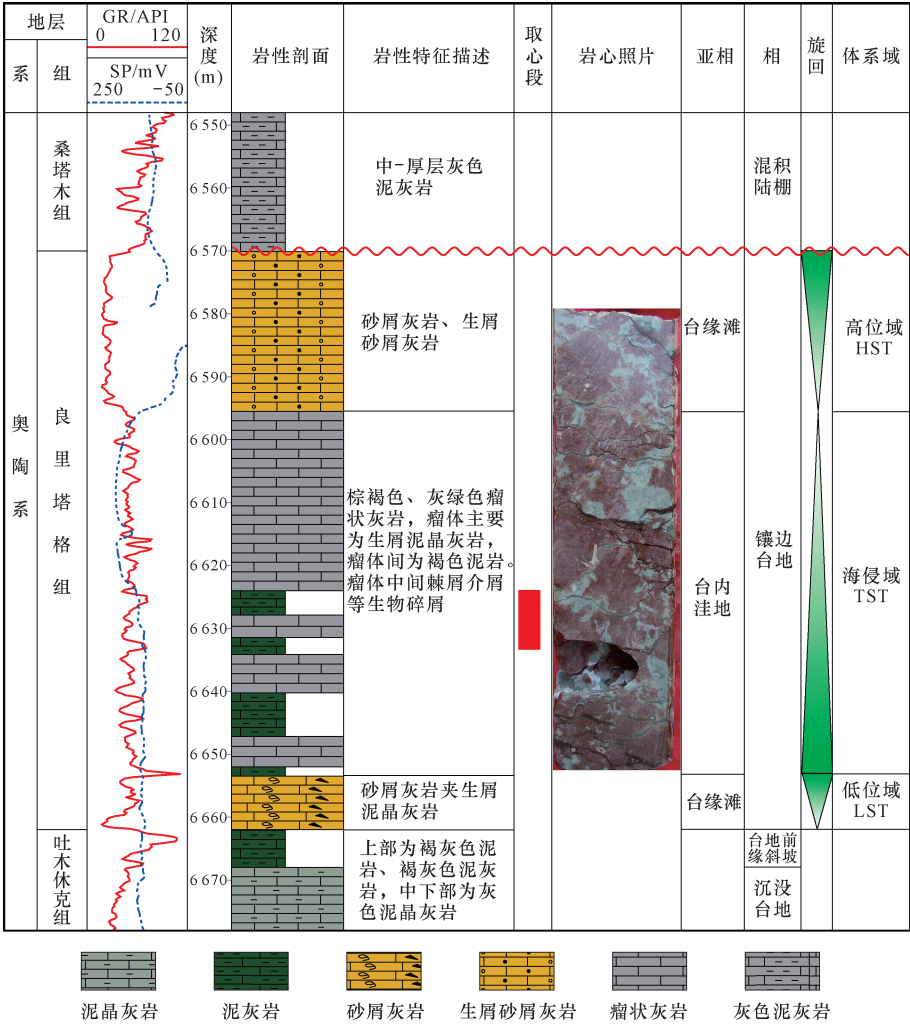


图 3 塔里木盆地哈拉哈塘油田 B1 井良里塔格组综合柱状图

Fig. 3 Composite stratigraphic column of layers in Well B1 of the Halahatang oilfield, Tarim Basin

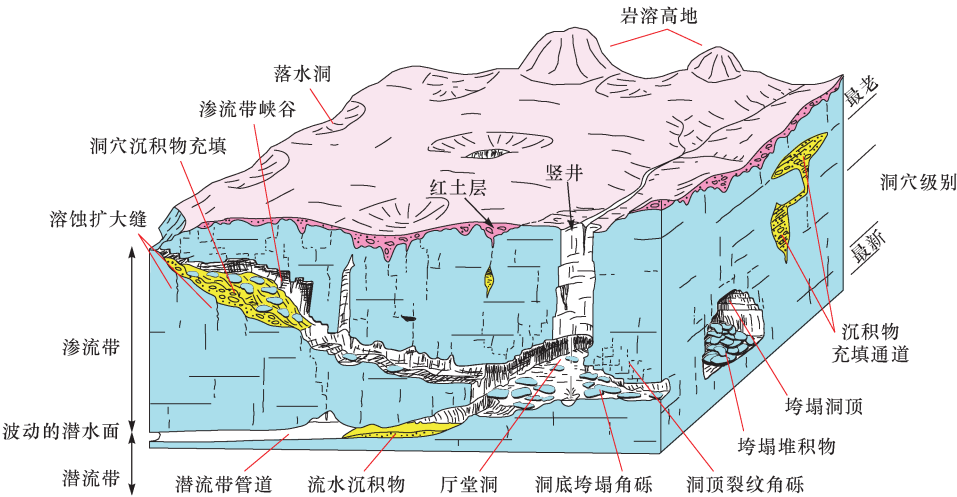


图 4 近地表大气淡水岩溶模式(据 Loucks^[13]修改)

Fig. 4 Schematic diagram showing the near-surface meteoric karstification model (modified from Loucks^[13])

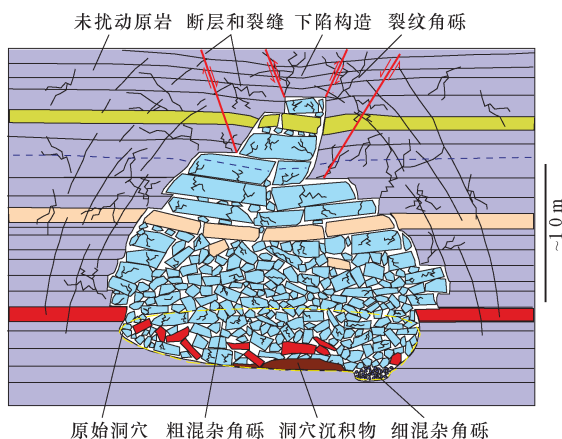


图5 单一河道洞穴垮塌充填模式(据 Loucks^[13]修改)

Fig.5 A block diagram showing the collapse and filling of a single channel cave(modified from Loucks^[13])

3.1 岩溶地貌剖面特征

在过 B1 井的南北向地震剖面上,可见岩溶期良里塔格组顶面主体为一个大型岩溶斜坡(图 6)。从岩溶改造程度来看,在北部靠近良里塔格组尖灭线的区域,高、低地貌区频繁交替变换,且良里塔格组与一间房组顶部同相轴出现合并现象,说明该区域岩溶强烈,地表河流分支较多,甚至影响至下伏一间房组;在中部良里塔格组较厚的区域,地貌变化频率减小,但出现了地形高差最大区,深切的槽谷与高地之间的高差可达 150 m,说明河流在该区河道数量减少,以深切和溶蚀作用为主;在南部台缘区,地形变化较小,台缘斜坡依稀可见,保留了镶边台地的特征形态,说明与北部地区相比该区岩溶发育并不强烈;盆地区看不到明显地形变化,说明岩溶不发育。

3.2 岩溶地貌平面特征

良里塔格组顶面可识清晰别出岩溶高地、岩溶洼

地、岩溶槽谷和落水洞等地貌要素,并反映各种地貌要素的分布(图 7)。岩溶高地是与邻近区域相比古地形较高的部位,为正地貌区,主要分布在本区北部和中部,多处于岩溶发育区之间的孤立区。岩溶槽谷是地表河流溶蚀、深切及侧向迁移形成的谷地,保留了河道及其迁移的形态,大型的岩溶槽谷深度可达 150 m。小型的岩溶槽谷在北部更为发育,但有时呈现断续特征而不易识别;大型岩溶槽谷在本区的中部最易识别也最发育,槽谷在南部可识别度降低。落水洞是地表水流入地下的入口,表现为地表近圆形的凹陷区,主要分布在河流附近,在两河流之间尤为发育。岩溶洼地位于河流下游的低地势区,具有沿构造带发育的趋势,可能代表了近海沼泽或泻湖区域。

4 岩溶洞穴系统特征

4.1 岩心、镜下及测井特征

良里塔格组岩溶洞穴均已发生垮塌,形成岩溶垮塌体系,在岩心上反映最明显。A1 井为钻遇岩溶垮塌体系的典型实例,该井在良里塔格组取心 7 筒,进尺 49.5 m,收获岩心 48.64 m,综合收获率 98.3%,钻井过程中无漏失放空。岩心显示在良里塔格组埋深 6 719.0~6 730.0 m 及 6 750.0~6 762.5 m 分别发育两段垮塌,角砾和杂基特征明显:角砾大小混杂,具有棱角,分选和磨圆差,角砾之间以线接触和凹凸接触为主;上段垮塌杂基以泥质和细小碎屑为主,下段垮塌杂基以红色泥质为主;角砾与杂基相互胶结致密(图 8a, b);镜下显示角砾来源为良里塔格组泥灰岩和颗粒灰岩,杂基以陆源物质(泥质、石英和炭质碎屑)及碳酸盐岩碎屑为主(图 8c, d),很明显受到陆源流体及其携带物质的影响。在成像测井上,垮塌角砾表现为明暗斑块杂乱分布(图 8a, b)。

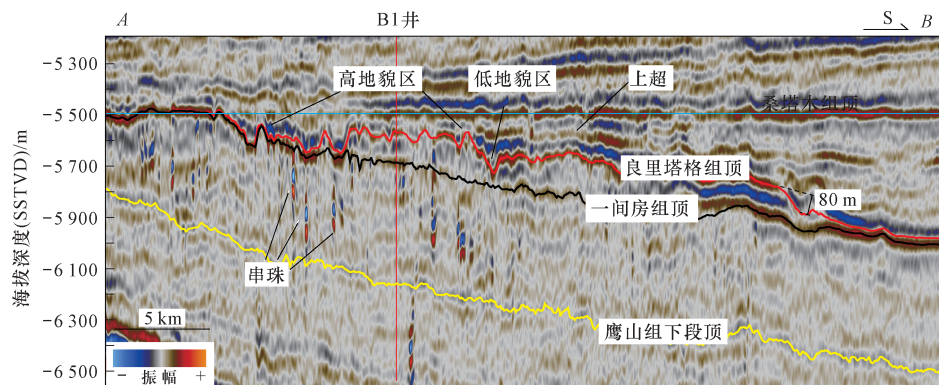


图6 塔里木盆地哈拉哈塘油田过 B1 井南北向地震剖面(按桑塔木组顶趋势面拉平,图 1 中 A—B 剖面)

Fig.6 N-S seismic section crossing Well B1 in the Halahatang oilfield, Tarim Basin
(flattened on top of the Sangtam Formation, see Fig. 1 for the location of profile A—B)

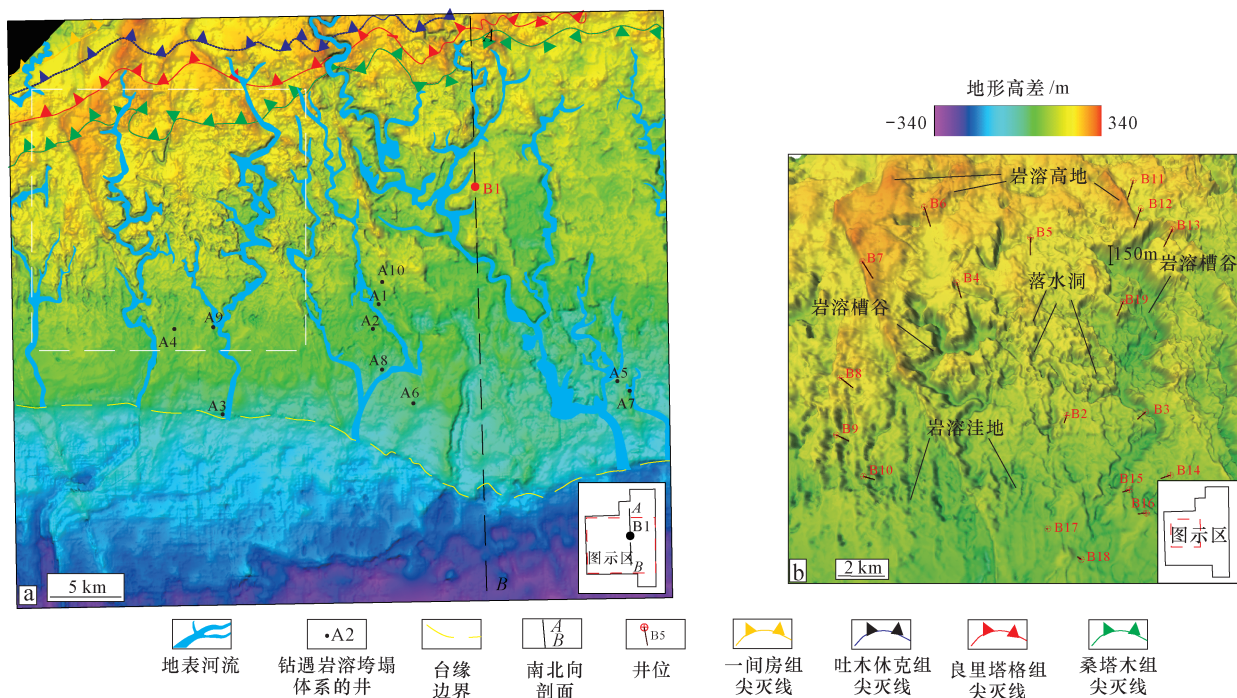


图7 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系良里塔格组顶面地貌

Fig. 7 Topography of the Ordovician Lianglitage top unconformity in the Halahatang oilfield, Tarim Basin

a. 校正后的良里塔格组古地貌(按桑塔木组顶部拉平); b. 良里塔格组顶地貌三维显示(局部,图b中红框区域)

在第一段垮塌顶部(图8g中1处),通过成像测井可识别高角度裂缝发育(图8e),在该位置密度值及电阻率值降低,检测有烃类显示(图8g),说明该处裂缝充当了油流通道,可能代表了洞穴垮塌时产生的洞顶缝。在第二段垮塌上部识别出高含泥段(图8g中3处),该处GR值升高,电阻率值、声波和密度值降低,成像测井表现为的亮层和暗层交互,亮层颗粒显示定向性排列(图8f),为典型的砂泥互层沉积。Zeng和Loucks(2011)等通过对与哈拉哈塘邻近的轮南区块的岩溶垮塌体系的岩心观察研究,将垮塌洞穴内成层状的高泥质的沉积物定为洞穴沉积物^[27];另外,西德克萨斯艾伦伯格群(Ellenburger group)典型的岩溶垮塌体系中垮塌段上部也见类似层状高泥质沉积物,Kerans(1988)也将其解释为洞穴沉积物,并将其成因解释为洞穴部分垮塌后洞穴内水流的再沉积作用^[28]。因此A1井该处沉积物有可能代表了洞穴沉积物。

另外,由成像测井识别出两垮塌段底面距良里塔格组顶不整合面距离分别为20 m和50 m。其中,下段垮塌通道代表了不整合面在被侵蚀过程中形成的最新一期洞穴系统(图4,图8g),其底部距不整合面的距离大致指示了岩溶洞穴系统形成时在地表之下发育的深度,这与Kerans(1988)得出的艾伦伯格群(Ellen-

burger Group)洞穴系统主要发育在地表不整合之下30~90 m内的结论基本一致^[28]。

4.2 地震响应特征

4.2.1 平面特征

良里塔格组岩溶垮塌体系在地震上表现为高于围岩的强振幅。均方根振幅属性为平均地震反射波振幅值平方和的算术平方根,它对地震波绝对值大的振幅反映敏感^[29],可凸显岩溶垮塌体强振幅及其连续变化;方差属性反映相邻道地震信号之间的相似性,可以突出垮塌体的边界。将均方根和方差属性进行融合,并将融合体按鹰三段顶进行拉平,在良里塔格组平面上,可显示垮塌强振幅体的平面形态及分布(图9)。

如图9所示,岩溶垮塌体强振幅在平面上具有分区性,据此可将本区岩溶垮塌体系划分为5个主要发育区。其中4区垮塌体系平面连续性最好(图9,图10a),因此将4区单独划出进一步研究。通过分别给予融合体中均方根振幅和方差截断值,去除振幅及方差低值部分,可以对岩溶垮塌体进行三维雕刻(图10b)。雕刻体显示该区岩溶体系平面形态复杂,类似网状河体系,显然垮塌体系形态即代表了原始的岩溶通道的形态,但该岩溶通道呈现出与该区地表河流体系显著不同的特征:明显分为主干和分支;大型主干较

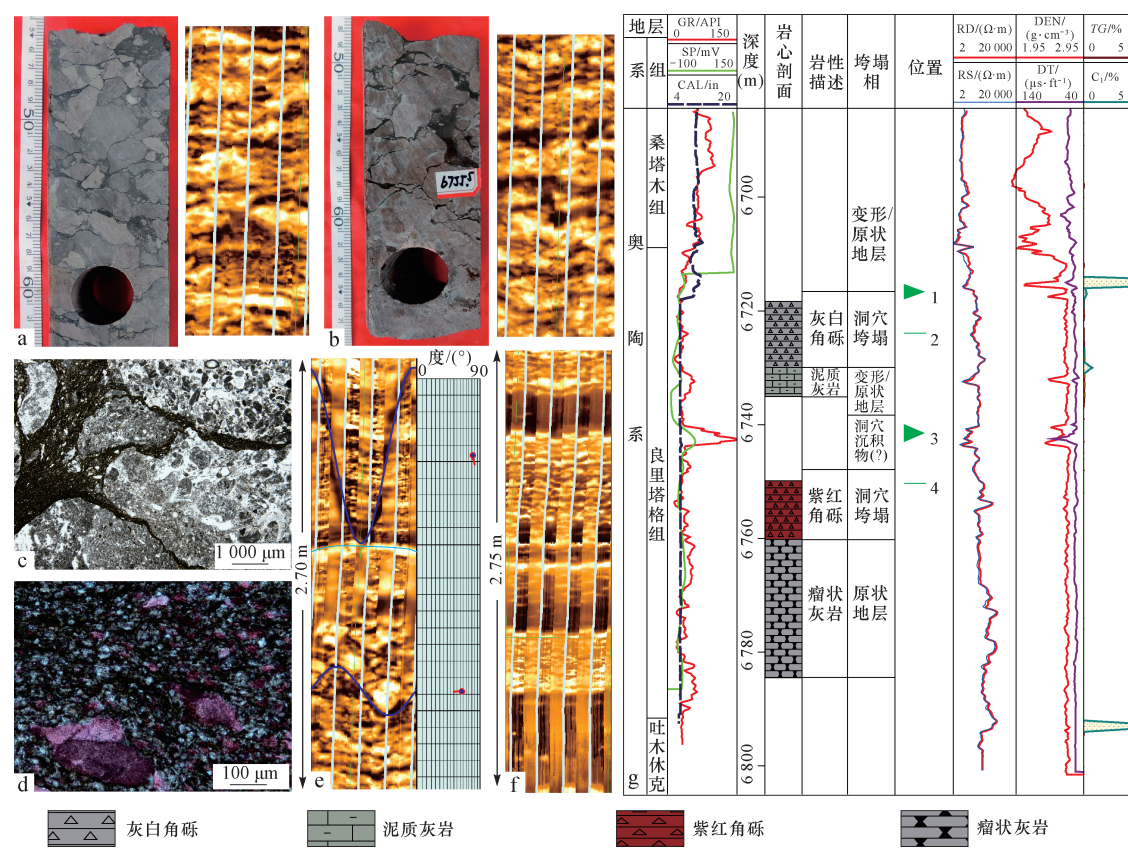


图 8 塔里木哈拉哈塘油田 A1 井岩溶垮塌体系岩心、镜下特征及测井解释

Fig. 8 Characteristics of collapsed paleo-cave section depicted by core and thin section observations and log interpretation in Well A1 of the Halahatang oilfield, Tarim Basin

a. 良里塔格组上段垮塌角砾岩,角砾为灰白色,基质为灰黑色,埋深 6 727.00 m,对应 g 中 2 处;b. 良里塔格组下段垮塌角砾岩,角砾与基质均为红色,埋深 6 755.50 m,对应 g 中 4 处;c. 角砾岩,角砾为颗粒灰岩和泥灰岩,单偏光,埋深 6 729.20 m;d. 角砾岩基质,基质由石英碎屑、碳酸盐岩碎屑和泥质组成,正交光,埋深 6 729.20 m;e. 上垮塌段顶部裂缝,成像测井,埋深 6 715.90 ~ 6 718.60 m; f. 砂泥互层,成像测井,埋深 6 740.00 ~ 6 742.75 m;g. 测井综合解释

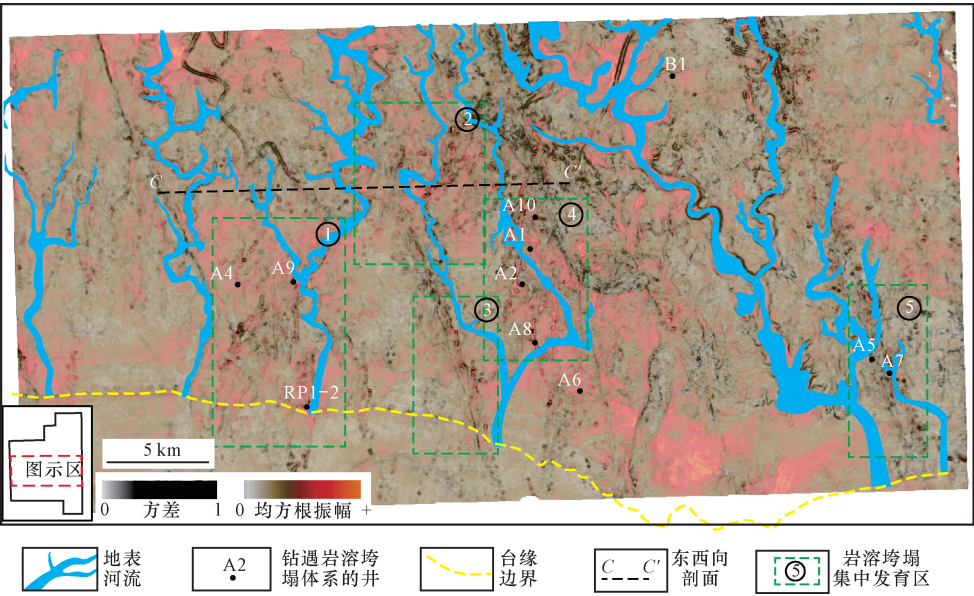


图 9 塔里木盆地哈拉哈塘油田(部分)良里塔格组均方根振幅和方差融合体平面

Fig. 9 RMS amplitude and variance fusion map of the Lianglitage Formation in part of the Halahatang oilfield, Tarim Basin (①—⑤分别为岩溶垮塌体系 5 个相对发育区)

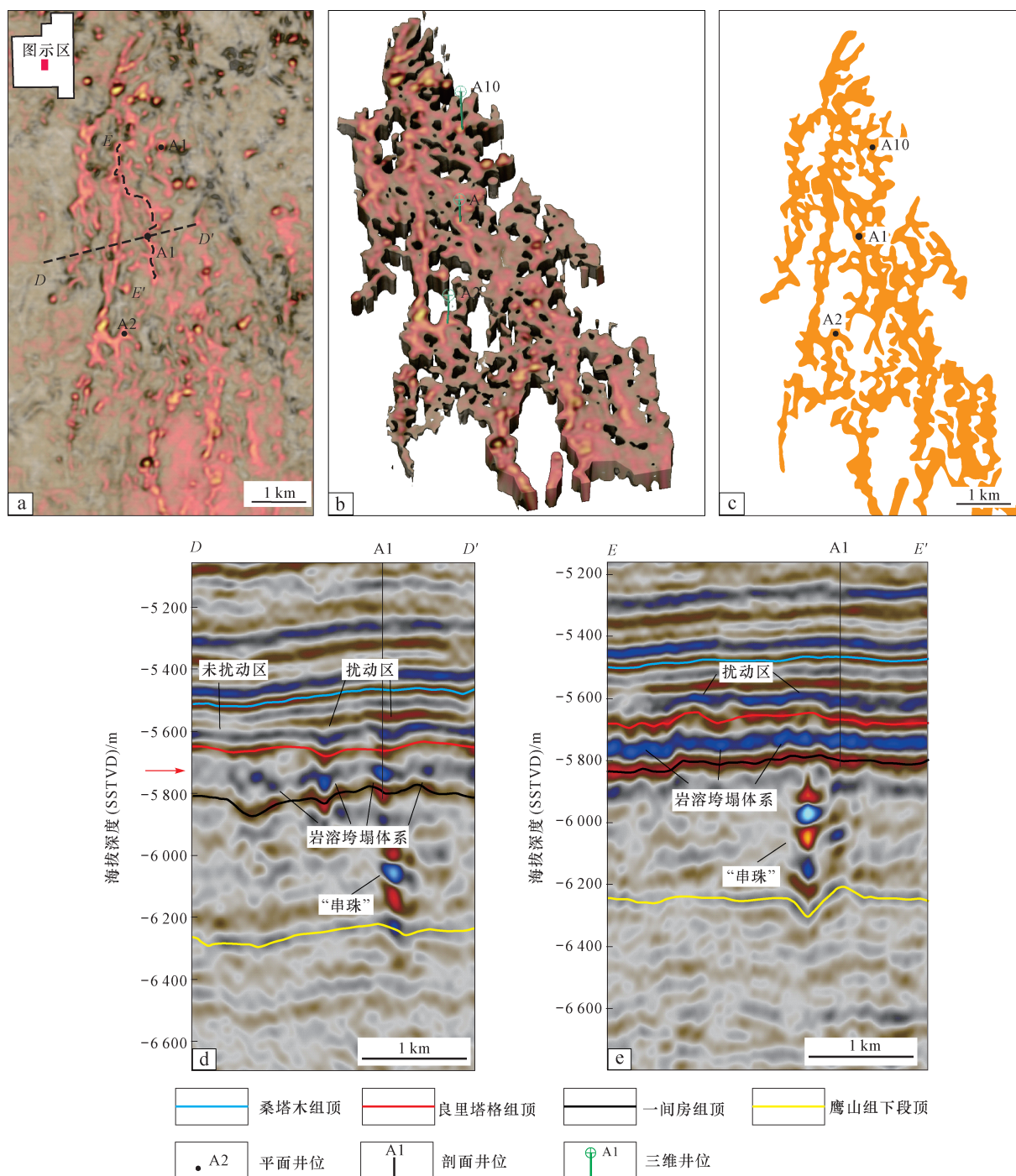


图 10 塔里木盆地哈拉哈塘油田良里塔格组岩溶垮塌体系地震平面和剖面特征

Fig. 10 Plane and section views of the seismic profiles showing the collapsed karst cave system in the Liangritage Formation in the Halahatang oilfield, Tarim Basin

a. 良里塔格组均方根振幅和方差体融合平面(窗长 40 m); b. 雕刻的三维岩溶垮塌体系三维显示; c. 岩溶垮塌体系与地表河流体系平面叠合; d, e. 地震剖面, 分别对应图 a 中 D—D' 和 E—E' 位置, 红色箭头位置指示了图 a 的剖面位置, 注意左、右两图中的串珠为同一串珠, 但左图并未穿过串珠中心

为平直; 分支小且数量多, 位于主干之间形成网状。该区岩溶洞穴系统沿流向可追踪距离达十几千米, 平面覆盖范围达三十多平方千米。

4.2.2 剖面特征

在过 A1 井并横切该岩溶通道体系的地震剖面

A—A' 上(图 10a, d), 见岩溶垮塌体系呈现出较强的振幅, 类似一间房组和鹰山组的串珠强振幅, 但振幅小于串珠强振幅; 在过 A1 井并沿岩溶通道的剖面 B—B' 上(图 10a, e), 整个良里塔格组均呈现出强振幅, 表明岩溶通道形成的洞穴系统的连续垮塌。

另外, 在垮塌体系之上紧挨良里塔格组的桑塔木

组底部同相轴下陷,并出现振幅增强,向上振幅逐渐减弱(图10d,e),说明岩溶洞穴系统的垮塌可能影响到了上覆桑塔木组。Loucks(1999,2002)^[14,16]将该现象其定义为垮塌造成的上覆地层变形(Suprastratal deformation),以地层下陷和伴生断裂为特征。该现象与A1井良里塔格组顶部的洞顶缝一起说明了岩溶垮塌对上覆地层造成的影响。

5 岩溶体系发育控制因素

岩溶体系地表地貌形态的表征和地下洞穴系统分布的精细刻画为研究其主控因素提供了更好的依据。本研究主要从层序、构造和水文等因素出发探讨了岩溶洞穴系统发育的控制因素。

5.1 低位域期持续、广泛的暴露及层序边界形成

广泛暴露是近地表发生岩溶的基本条件之一,往往发生在低位域时期的层序边界上,受构造运动、海平面变化共同控制^[30]。良里塔格组高位域末期已发育成典型的镶边台地,此时塔北北部继续抬升,海平面大幅度下降至台缘之下,良里塔格组顶面广泛暴露,形成I型层序边界及低位域。该低位域期的广泛暴露造成了良里塔格组地表及地下岩溶的形成,该过程一直持续到良里塔格组成为一个大型斜坡并被桑塔木组上超。海平面下降及I型层序边界可由以下3个特征识别:①广泛发育的地表河流及特征性喀斯特地貌(图7);②后期桑塔木沿良里塔格组顶部的上超(图6);③深入斜坡及盆地的岩溶通道(图9,图11)。

5.2 断裂及裂缝

区域性的岩溶垮塌体系通常都是直线型的,这种线型样式可能是原始洞穴系统沿先期断裂系统发育形成的^[13-14,17,27]。本区岩溶洞穴系统拥有众多主干和分支,主干多较平直,延伸方向相交为“X”型,分支在主干之间形成网状系统(图12),该主干和分支的延伸趋势与分布特征与典型的走滑断裂极为相似,说明早期的区域断裂和裂缝可能控制了岩溶通道的发育。该时期断裂和裂缝的发育与当时的构造背景密不可分:受塔里木盆地南部的昆仑洋闭合活动影响,从晚奥陶世开始,塔北由拉张开始变为挤压环境^[6,31-32],在良里塔格组岩溶期塔北更是发生剧烈抬升,并最终变为桑塔木组上超的斜坡,该构造运动一方面造成了潜流带南北高地势差,促进溶蚀流体的快速流动,另一方面也产生了众多走滑断裂及伴生裂缝,为潜流带溶蚀流体提供了运移通道。

5.3 地表河流体系

奥陶纪是全球的暖湿气候期,塔里木板块处于南纬20°赤道附近的热带-亚热带地区^[6,33-34],有利于碳酸盐岩的沉积和风化剥蚀。湿润的气候使良里塔格组在低水位期地表河流发育(图7)。地表河流体系对地表地貌和地下洞穴发育均有重要作用。

地表河流是形成喀斯特地貌的主要动力之一,地表河流发育特征控制了地貌的特征:河流在上游河道小,分支多,迁移迅速,使岩溶地貌在北部变化频繁;河流在中游水量增大,河道数量减少,大型河道增多,河道的深切作用形成大型岩溶槽谷;在下游随地势降低,河流发散,能量减弱,形成沼泽或汇入大型湖泊等水体,形成岩溶洼地。

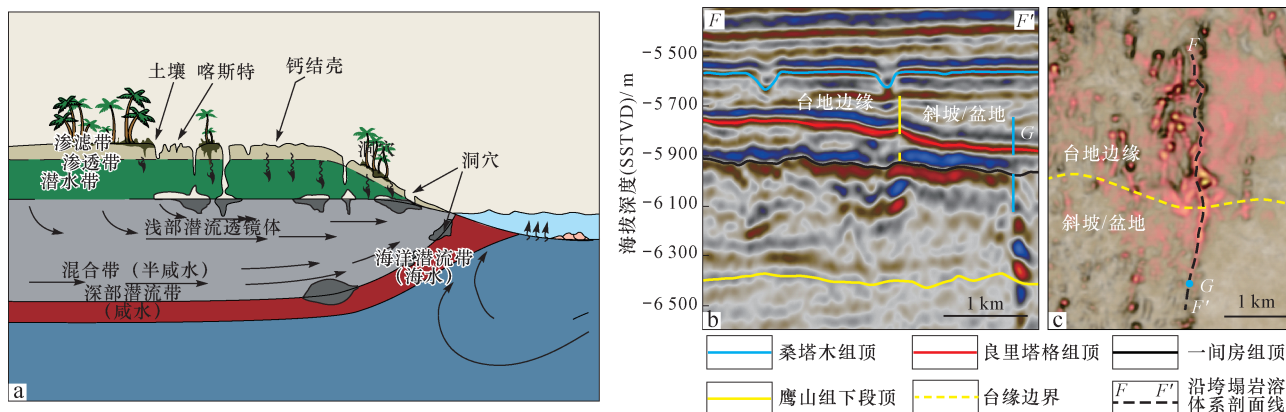


图11 伸入塔里木盆地哈拉哈塘油田良里塔格组斜坡及盆地的垮塌岩溶体系

Fig. 11 A collapsed karst cave system protruding into the slope of the Lianglitage Formation of the Halahatang oilfield, Tarim Basin
a. 近地表岩溶洞穴发育位置与水体分带关系模式(据 Choquette 和 James^[30]修改); b. 沿岩溶垮塌体系的地震剖面; c. RMS 和方差融合体上岩溶垮塌体系平面。海岸线一般代表潜流带岩溶洞穴系统向海方向发育的极限位置(图 a),深入盆地的岩溶垮塌体系说明低位域海退期海岸线曾到达 G 位置附近,该位置指示了良里塔格组末期海退最大位置的下限



图12 塔里木盆地哈拉哈塘油田区4岩溶洞穴系统与可能的先存断裂关系

Fig. 12 Plane view of the relationship between the paleo-karst cave system and previously possible regional fault systems in block 4 of the Halahatang oilfield, Tarim Basin

岩溶洞穴系统在空间上主要发育在地表河流之下或附近,在流向上与地表河流基本一致(图9,图10c,图13),说明地表河流与地下岩溶通道是一个完整的体系,地表河流为地下岩溶通道的发育提供了水源。原始洞穴系统分布的另一个重要特点是主要发育在河流的中游和下游,这可能与河流在中下游流量增大有关系。增大的水量一方面在重力作用下更易沿断裂和裂缝深入,另一方面可以保证溶解的碳酸钙能够迅速被带走,使溶蚀不断进行。

6 结论

1) 哈拉哈塘地区奥陶系良里塔格组顶部喀斯特发育岩溶高地、岩溶槽谷、岩溶洼地和落水洞等地貌要素,不同的地貌要素具有不同的分布特征:岩溶高地分布在北部,大型岩溶槽谷分布在中部,岩溶洼地分布在南部,落水洞主要分布在岩溶槽谷附近。

2) 良里塔格组内部岩溶垮塌体系在岩心、镜下和成像测井上特征明显,并表现出强压实现象;在地震上岩溶垮塌体系表现为连续的强振幅,通过 RMS 与方差融合体可以刻画其特征性的直线状形态,该垮塌体系展布同样指示了原始岩溶通道体系的展布。

3) 哈拉哈塘良里塔格组岩溶体系发育受低位域期广泛暴露、断裂及裂缝、地表河流体系等因素控制。

致谢:本研究工作得到了美国德克萨斯大学奥斯汀分校曾洪流教授和傅启龙教授的帮助,同时塔里木油田公司的同事提供相关资料,中石油勘探开发研究院的同事给予了技术指导,在此一并表示感谢。

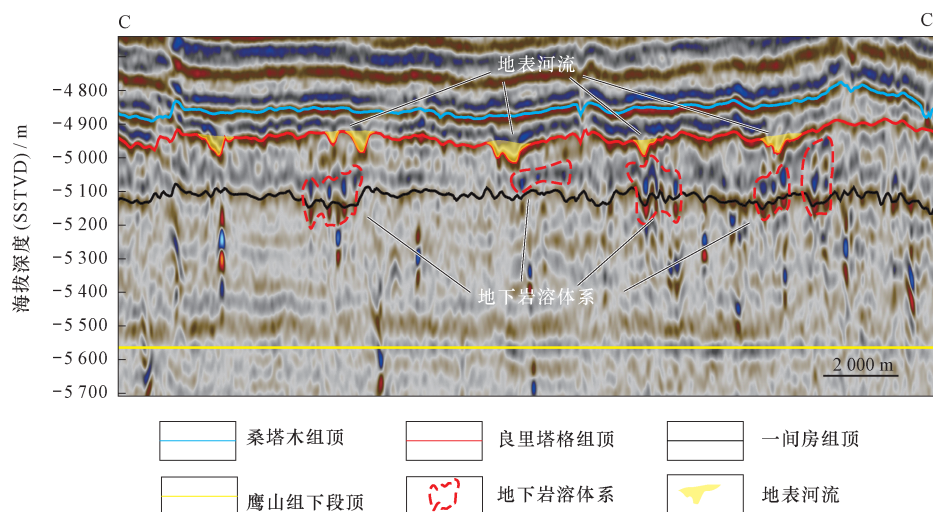


图13 塔里木盆地哈拉哈塘油田地表河流体系与地下岩溶洞穴系统分布关系(图9中C—C'剖面,按鹰山组下段顶拉平)

Fig. 13 Seismic section showing the relationship between the surficial fluvial systems and the subsurface karst cave systems in the Halahatang oilfield, Tarim Basin(see Fig. 9 for the location of profile C—C', flattened on top of the Lower Yingshan Formation)

参 考 文 献

- [1] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 15-22.
Jin Zhijun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 15-22.
- [2] 张水昌, 梁狄刚, 朱光有, 等. 中国海相油气田形成的地质基础[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 19-31.
Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhu Guangyou, et al. Fundamental geological elements for the occurrence of Chinese marine oil and gas accumulations[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 19-31.
- [3] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 9-18.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhang Shuichang et al. Analysis on forming conditions of deep marine reservoirs and their concentration belts in superimposed basins in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 9-18.
- [4] 朱光有, 赵文智, 梁英波, 等. 中国海相沉积盆地富气机理与天然气的成因探讨[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 46-57.
Zhu Guangyou, Zhao Wenzhi, Liang Yingbo, et al. Discussion of enrichment mechanism and genetic of natural gas in marine sedimentary basin of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 46-57.
- [5] 崔海峰, 郑多明, 滕团余. 塔北隆起哈拉哈塘凹陷石油地质特征与油气勘探方向[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 54-58.
Cui Haifeng, Zheng Duoming, Teng Tuanyu. Petroleum geologic characteristics and exploration orientation in Halahatang Depression of Tabei Uplift[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 54-58.
- [6] 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 塔里木地区奥陶纪原型盆地类型及其演化[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 126-135.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, et al. Types and evolution of Ordovician prototype basins of Tarim area[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 126-135.
- [7] 倪新锋, 王招明, 杨海军, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩储层岩溶作用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 11-16.
Ni Xinfeng, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Formation mechanism of Ordovician carbonate karst reservoir in the northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 11-16.
- [8] 赵宗举, 吴兴宁, 潘文庆, 等. 塔里木盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 939-955.
Zhao Zongju, Wu Xingning, Pan Wenqing, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Ordovician in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 939-955.
- [9] 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, (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.
- [10] 倪新锋, 沈安江, 潘文庆, 等. 优质碳酸盐岩缝洞型储集层地质建模——以塔中北斜坡及塔北南缘奥陶系为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 414-422.
Ni Xinfeng, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. Geological modeling of excellent fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study of the Ordovician in the northern slope of Tazhong Palaeouplift and the southern area of Tabei Slope, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 414-422.
- [11] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933-940.
Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on Karst reservoirs[J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(6): 933-940.
- [12] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力-哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶型储层特征及成因[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 465-474.
Ni Xinfeng, Zhang Lijuan, Shen Anjiang, et al. Characteristics and genesis of Ordovician carbonate karst reservoir in Yingmaili-Halahatang area, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 465-474.
- [13] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1312-1321.
Ni Xinfeng, Zhang Lijuan, Shen Anjiang, et al. Lako-karstification types, karstification periods and superimposition relationship of Ordovician carbonates in northern Tarim Basin[J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1312-1321.
- [14] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [15] Loucks R G. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation[J]. Acta Carsologica, 2007, 36(1): 121-132.
- [16] Loucks R G, Mescher P K. Paleocave facies classification and associated pore types[C]. American Association of Petroleum Geologists, Southwest Section, Annual Meeting, Dallas, Texas, 2002: 18.
- [17] Loucks R G, Mescher P K, Mcmechan G A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(5): 545-564.
- [18] McDonnell A, Loucks R G, Dooley T. Quantifying the origin and geometry of circular sag structures in northern Fort Worth Basin, Texas: Paleocave collapse, pull-apart fault systems, or hydrothermal alteration? [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1295-1318.
- [19] Mcmechan G A, Loucks R G, Mescher P, et al. Characterization of a coalesced, collapsed paleocave reservoir analog using GPR and well-core data[J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1148-1158.
- [20] Mcmechan G A, Loucks R G, Zeng X X, et al. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas[J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 39(1): 1-10.
- [21] 俞仁连, 傅恒. 构造运动对塔河油田奥陶系碳酸盐岩的影响[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(2): 1-6.
Yu Renlian, Fu Heng. Influence of tectonic movement on Ordovician carbonates of Tahe oilfield[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2006, 29(2): 1-6.

- 勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 67-76.
- Dong Dazhong, Shi Zhensheng, Guan Quanzhong, et al. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 67-76.
- [44] Yang Yi, Zhou Dehua, Wang Weihong, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1): 55-68.
- [45] 李东晖, 聂海宽. 一种考虑气藏特征的页岩含气量计算方法——以四川盆地及周缘焦页1井和彭页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1324-1332.
- Li Donghui, Nie Haikuan. A new method to calculate shale gas content based on gas reservoir characterization—A case study of Wells JY 1 and PY 1 in Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1324-1332.
- [46] 苏佳纯, 张金川, 朱伟林. 非常规天然气经济评价对策思考[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 743-753.
- Su Jiachun, Zhang Jinchuan, Zhu Weilin. Study on unconventional natural gas economic evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 743-753.
- [47] 黄旭楠, 董大忠, 王玉满, 等. 非常规油气资源经济性评价方法与案例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1651-1658.
- Huang Xunan, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Economic assessment method of unconventional oil and gas resources and case study[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1651-1658.
- [48] 郑波, 张蔓. 基于模糊层次法的页岩气开发经济评价模型[J]. 西安石油大学学报(社会科学版), 2016, 25(2): 1-5, 30.
- Zheng Bo, Zhang Man. The economic evaluation model of shale gas development based on fuzzy hierarchy method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition), 2016, 25(2): 1-5, 30.
- [49] 杨德敏, 喻元秀, 梁睿, 等. 我国页岩气开发环境影响评价现状、问题及建议[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 119-125.
- Yang Demin, Yu Yuanxiu, Liang Rui, et al. Environment impact appraisal (EIA) for shale gas development in China: Present status, existing issues and proposals[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 119-125.

(编辑 李 军)

(上接第 995 页)

- [22] 斯春松, 乔占峰, 沈安江, 等. 塔北南缘奥陶系层序地层对岩溶储层的控制作用[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 135-144.
- Si Chunsong, Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, et al. The controlling effect of sequence stratigraphy on karst reservoirs of Ordovician in the south margin of northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 135-144.
- [23] 刘嘉庆, 李忠, 黄君涛, 等. 塔里木盆地良里塔格组沉积环境差异及其对碳酸盐储层发育的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1802-1816.
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Huang Juntao, et al. Distinct sedimentary environments and their influences on carbonate reservoir evolution of the Lianglitag Formation in the Tarim Basin, Northwest China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 55: 1641-1655.
- [24] 毛雪莲, 马青, 刘伟, 等. 哈拉哈塘地区良里塔格组沉积特征分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 21-26.
- Mao Xuelian, Ma Qing, Liu Wei. Sedimentary characteristics of the Upper Ordovician Lianglitag Formation in Halahatang area[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(3): 21-26.
- [25] Palmer A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [26] Ford D C, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Springer Netherlands London: Unwin Hyman, 1989: 601.
- [27] Zeng H L, Loucks R, Janson X, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.
- [28] Kerans C. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of west Texas[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1160-1183.
- [29] 凌云. 基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 642-653.
- Ling Yun. Study on application of basic seismic attributes to interpretation of depositional environment[J]. OGP, 2003, 38(6): 642-653.
- [30] Choquette P W, James N P. Paleokarst [M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 1-24.
- [31] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 142-147.
- An Haiting, Li Haiyin, Wang Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 142-147.
- [32] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2007, (5): 653-663.
- Zhang Guangya, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, et al. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, (5): 653-663.
- [33] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, 32(1): 36-42.
- Jiang Maosheng, Zhu Jingquan, Chen Daizhao, et al. Carbon and strontium isotopic characteristics of Ordovician carbonate rocks in Tarim Basin and their response to sea level changes[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2002, 32(1): 36-42.
- [34] 李永安, 李强, 张慧, 等. 塔里木及其周边古地磁研究与盆地形成演化[J]. 新疆地质, 1995, 13(4): 293-378.
- Li Yongan, Li Qiang, Zhang Hui, et al. Palaeomagnetic study of Tarim and its adjacent areas well as the formation and evolution of Tarim Basin[J]. Xinjiang Geology, 1995, 13(4): 293-376.

(编辑 梁 慧)