

文章编号: 0253-2697(2016)08-1011-10 DOI:10.7623/syxb201608007

# 塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制

李 源<sup>1</sup> 鲁新便<sup>2</sup> 蔡忠贤<sup>1</sup> 张 恒<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学资源学院 湖北武汉 430074; 2. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院 新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:**塔河油田奥陶系岩溶洞穴系统内具有较大的油气资源。基于三维地震资料、地震属性提取、岩心资料及钻井资料,对地下岩溶洞穴系统、古地貌和古水文系统进行精细刻画,探讨水文地貌对洞穴发育的控制作用,研究结果表明:①东部主体区古地貌处于岩溶高原、岩溶斜坡区,以峰丛等高幅差地貌为主,地表水系垂向侵蚀作用强烈,大部分转入地下;西部区位于岩溶盆地,以低幅度溶丘为主,地形平缓,水系展现出大量蛇曲特征,以水平溶蚀为主。②东部主体区洞穴网络主要表现为单支状、树枝状,局部发育网络状洞穴,洞穴具有发育规模大、埋藏深、连通性较好的特征;西部地区洞穴主要表现为孤立状,未形成连续的洞穴网络,洞穴具有发育规模小、埋藏浅、连通性较差的特征。③综合水文地貌发育特征,提出塔河地区水文地貌控制下的岩溶洞穴发育模式,为下一步储层预测和勘探实践提供理论借鉴。

**关键词:**古岩溶地貌;古水系;洞穴系统;岩溶作用;塔河油田

**中图分类号:**TE122.2 **文献标识码:**A

## Hydrogeomorphologic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield

Li Yuan<sup>1,2</sup> Lu Xinbian<sup>3</sup> Cai Zhongxian<sup>1</sup> Zhang Heng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China;

2. Exploration and Production Research Institute, Sinopec Northwest Oil Field Company, Xinjiang Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Giant oil and gas resources have been found in the Ordovician karst cave system of Tahe Oilfield. Based on 3D seismic data, seismic attribute extraction, core and drilling data, the underground karst cave system, ancient landform and paleo-hydrology system were finely described to explore the control effect of hydrogeomorphology on the development of cave development. The results show that in the east major area, ancient landform is located on karst plateau and karst slope, and dominated by the geomorphology with high amplitude difference, such as peak cluster. Surface water has strong vertical erosion effect, most of which flows to the underground. In the west area, ancient landform is located in the karst basin, dominated by low-amplitude karst hill, where the terrain is flat and water system mostly presents meandering characteristics, dominated by lateral erosion. In the east major area, the caves network is mainly shown as single-branch shape and dendritic shape; network caves are detected in local areas, characterized by large-scale development, great buried depth and good connectivity. In the west area, the caves are separated without forming a connected cave network, characterized by small development scale, shallow buried depth and poor connectivity. In combination with hydrogeomorphologic characteristics, the karst cave development model is proposed under the control of hydrogeomorphology in Tahe Oilfield, providing a theoretical reference for further reservoir prediction and exploration practice.

**Key words:** paleo-karst geomorphology; paleo-water system; cave system; karstification; Tahe Oilfield

**引用:**李源,鲁新便,蔡忠贤,张恒.塔河油田海西早期古水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J].石油学报,2016,37(8):1011-1020.

**Cite:** Li Yuan, Lu Xinbian, Cai Zhongxian, Zhang Heng. Hydrogeomorphologic characteristics and its controlling caves in Hercynian, Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8):1011-1020.

碳酸盐岩古岩溶洞穴是十分重要的油气储集空间,日益丰富的国内外现代岩溶地质理论,为深入认识埋深超 5 000 m 的古溶洞系统提供了很好的借鉴。岩溶水作为洞穴成因机理中重要的研究内容之一<sup>[1,2]</sup>,

其运动和分布样式对洞穴的形成和展布尤为重要。现代岩溶理论中针对岩溶水结构样式、水动力特征、产汇流机制等方面已开展广泛研究,建立了各类水文地质结构以及岩溶水的排泄形式在空间上的组合样式<sup>[3-6]</sup>,

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973)项目“塔里木盆地构造差异演化与下古生界油气成藏过程”(2012CB214804)资助。

**第一作者:**李 源,男,1987 年 3 月生,2009 年获中国地质大学学士学位,2016 年获中国地质大学博士学位,主要从事资源勘查方向研究。Email: liyuan586287@126.com

**通信作者:**蔡忠贤,男,1963 年 8 月生,1985 年获中国地质大学学士学位,1999 年获中国地质大学博士学位,现为中国地质大学资源学院石油工程系主任、教授,主要从事碳酸盐岩储层地质学研究。Email: zxc@cg. edu. cn

并总结了不同地貌背景下水流的产汇流特征<sup>[7-11]</sup>,强调了地貌对水文特征的控制。随后,水文地貌系统的首次提出<sup>[12-15]</sup>,受到国内外许多学者的关注,强调了水文地貌之间的相互作用、互为制约的关系。例如,贵州普定后寨河流域水系的不断下切,导致了侵蚀基准面的下降,进而对地貌的发育演化特征产生重要影响,并反作用于水系结构。因此,不同水文地貌背景下发育不同的水动力特征、产汇流机制,从而控制了洞穴在空间的发育样式,并使得洞穴的分布存在较大的差异性和复杂性。

塔河油田海西早期形成了复杂的碳酸盐岩洞穴系统,其发育特征在东部地区和西部地区体现出明显的差异性。前人虽然对其古水文、古地貌特征进行了初步研究<sup>[16,17]</sup>,却尚未从水文地貌系统的角度去认识岩溶洞穴的发育规律。本研究基于现代岩溶理论,以“系

统论”观点,阐述“水文地貌系统与洞穴发育”这一“结构-功能”关系,建立不同水文地貌背景下洞穴发育模式,对揭示古岩溶洞穴的发育规律具有重要意义。

## 1 地质背景

塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起南端,东靠草湖凹陷,西邻哈拉哈塘拗陷,南接满加尔拗陷(图1)。研究区中下奥陶统鹰山组、一间房组岩性为较纯灰岩,是主要洞穴发育段。加里东中期—海西早期,经历了多期构造运动。其中,海西早期运动是最重要的一期构造运动。受区域挤压应力的影响,形成了NE—SW 倾伏的大型鼻状构造。上奥陶统恰尔巴克组、桑塔木组整体由南向北依次剥蚀尖灭。本研究范围主要为东部主体区(图1中2、4、6、7、10)和西部地区(图1中12)的上奥陶统裸露区,是塔河地区的主力产油区带(图1)。

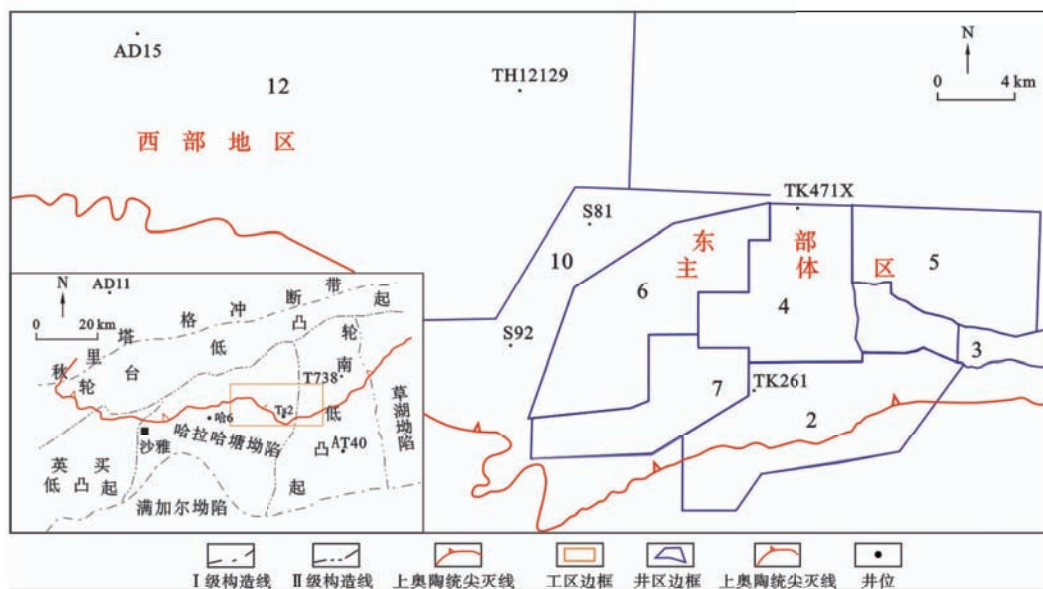


图1 塔河油田构造位置及井区划分

Fig. 1 Structure location and division of well field of Tahe oilfield

## 2 海西早期水文、地貌特征

### 2.1 海西早期古地貌、古水系恢复方法

目前,塔河油田北部上奥陶统剥蚀区海西早期古地貌的恢复主要利用石炭系巴楚组双峰灰岩段至中下奥陶系顶面的厚度进行印模法恢复<sup>[18]</sup>。巴楚组下泥岩段直接覆盖在古风化壳上,起到填平补齐的作用,下泥岩段上部双峰灰岩段全区分布均匀,其顶面可代表最大海泛面,亦是一个等时界面,因此可将其作为恢复海西早期古地貌的标志层。利用三维地震资料,将双峰灰岩段顶拉平,此时奥陶系古风化壳顶的地形,便代表了海西早期奥陶系岩溶古地貌形态。地表水系的刻画方法主要有精细相干分析、古地貌恢复技术、趋势面识别技术、混频分色技术

和曲率技术<sup>[16]</sup>。通过趋势面属性[图2(a)]、精细相干属性[图2(b)]和混频分色属性[图2(c)]的提取,对研究区海西早期地表古水系进行识别刻画(图3)。

### 2.2 海西早期古地貌、古水系发育特征

现代岩溶研究表明,古地貌决定古水汇流方向、水运动特征和水动力条件<sup>[1]</sup>。水的溶蚀作用和侵蚀作用是岩溶洞穴发育的主要动力。可溶岩暴露时间越长、水力梯度越大,进入可溶岩系统内的水量越大,岩溶洞穴越发育<sup>[19]</sup>。水系的形成是“干流生支流、支流再生细支”<sup>[20]</sup>,地表水在径流过程中,随着时间和地质结构的不同而表现出不同的水文特性。此外,侵蚀阶地在一定程度上可以反映地貌特征、地质构造运动等重要信息<sup>[21,22]</sup>。研究区海西早期整体呈现东高西低的构



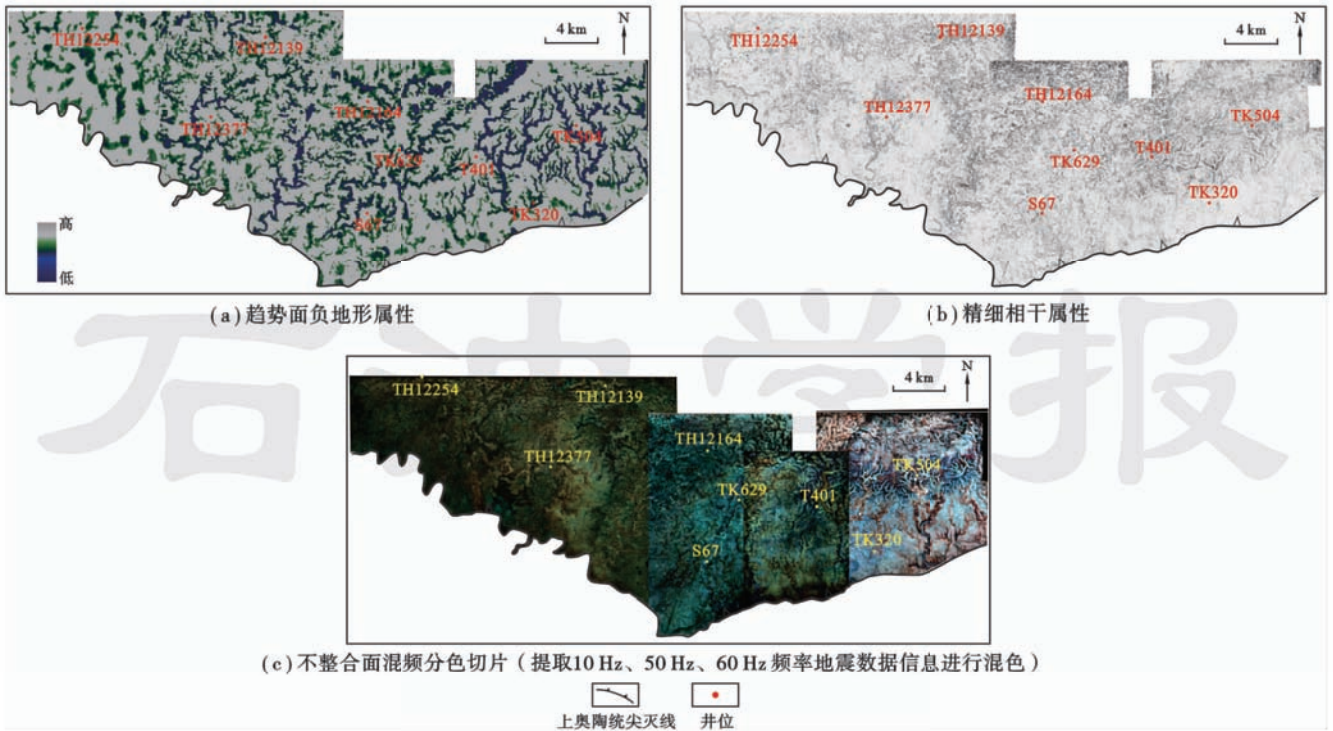


图 2 地表水系刻画方法

Fig. 2 Characterization methods of drainag system

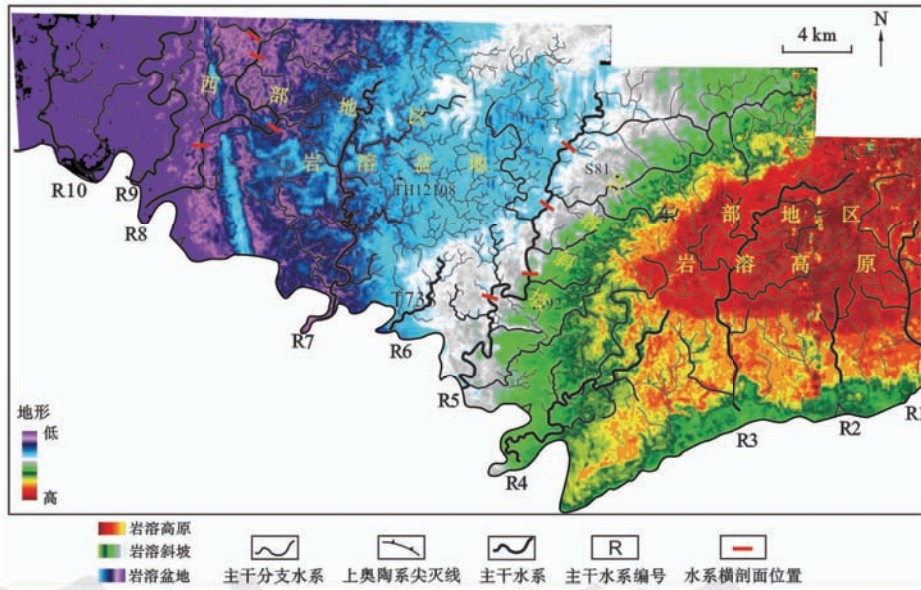


图 3 塔河地区古地貌及古地表水系分布

Fig. 3 Distribution of palaeo karst geomorphology and palaeo drainag system in Tahe area

造格局(图 3),具有明显地势坡降。二级地貌单元从东部主体区岩溶高原经岩溶斜坡逐渐过渡到西部岩溶盆地,岩溶地貌形态、水系特征表现出明显差异性。

2.2.1 东部地区古地貌、古水系特征

东部区位于岩溶高原、岩溶斜坡带(图 3),区域面积较大,为古岩溶流域岩溶水的主要补给区。地表岩溶发育,地貌组合形态表现为具有一定高差的峰丛、溶丘地貌,地形相对幅度为 20~130 m。地表发育 6 条主

干水系(R1—R6),主要特点如下:①水系在平面上呈树枝状结构,R1—R3 向南汇流,R4—R6 向南西汇流。主干水系延伸较长,分支水系十分发育,且干流两侧分支水系结构对称。②主干水系横剖面具有明显“下拉”特征[图 4(a)],纵剖面从上游至下游呈梯级型下降[图 4(b)],反映出该区经历了多期次构造上升运动,伴随着排泄基面多期次幕式下降。为适应更低的排泄基面,地表水表现出强烈的垂向侵蚀作用。



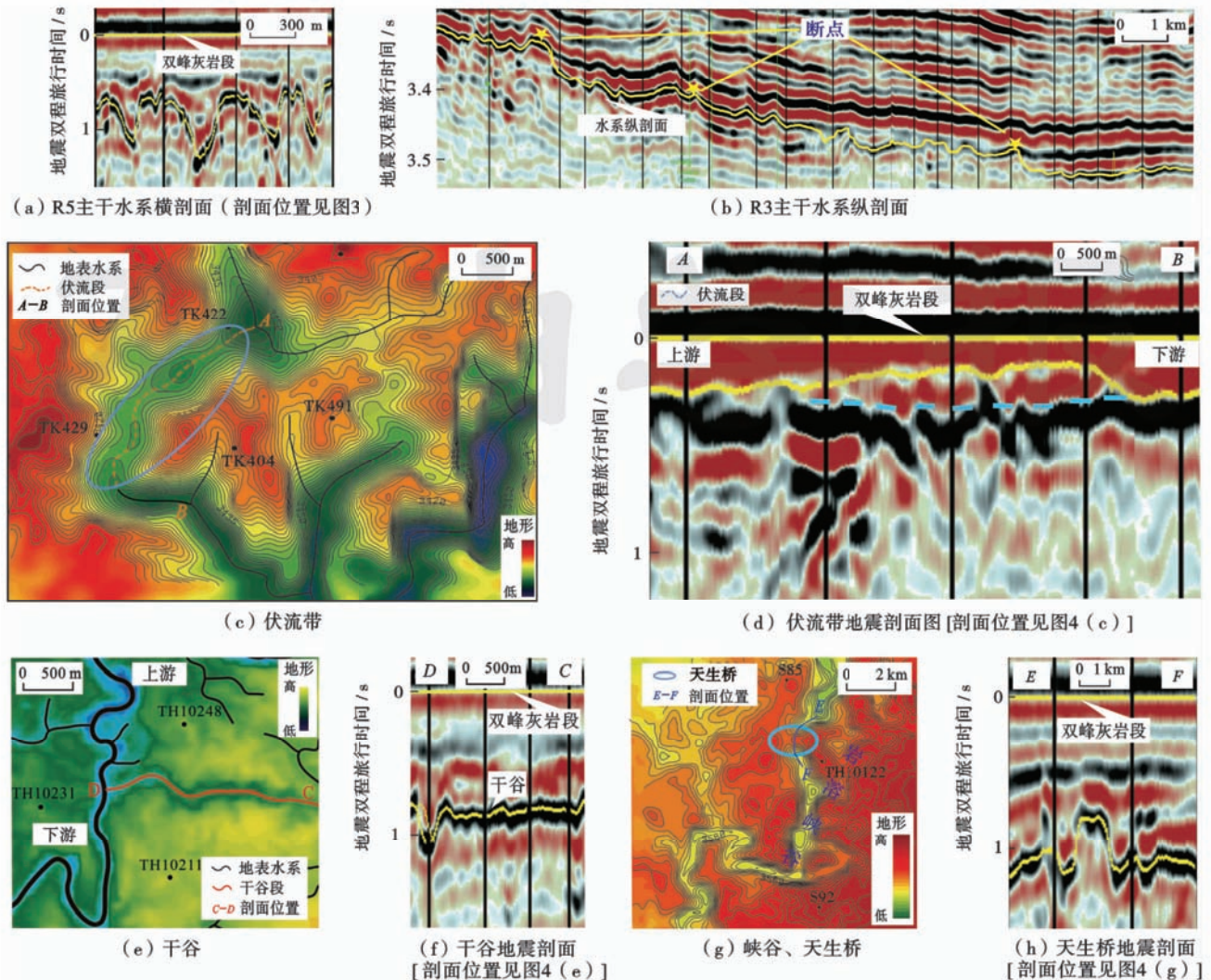


图4 塔河油田东部地区地表水系结构特征

Fig. 4 Architecture feature of drainage system in east area

另外,值得注意的是,受到垂向溶蚀侵蚀作用的影响,东部主体区大量的地表水从地表向地下转化,从而形成了伏流、干谷、天生桥等水文地貌现象。如TK429井东侧发育一段鞍形谷[图4(c)],从水系的纵剖面上[图4(d)],可以看出此段河谷底部塌陷比较严重,有明显的“串珠状”反射特征。在岩溶流域内,地表水系间鞍形谷的发育,代表鞍形谷下有伏流穿过<sup>[23]</sup>;在主干深切水系两侧分布着一些相对位置较高的干谷[图4(e)],干谷“悬挂”在沟谷两侧高点处[图4(f)],水流沿干谷中的落水洞、裂缝等潜入地下,通过地下汇入深切水系,从而使地表支流呈现出无水干涸状态;岩溶斜坡区发育一大型岩溶峡谷[图4(g)],为地表水强烈下蚀和地下洞穴垮塌的综合作用结果,未垮塌的残余洞道形成天生桥[图4(h)]。

### 2.2.2 西部地区古地貌、古水系特征

西部地区处于岩溶盆地,地形幅度较为平缓,相

对高差在50 m以下(图3)。与东部区丰富多样的地表岩溶地貌形态相比,西部外围区岩溶地貌主要表现为低幅度溶丘、溶峰,地貌分异作用不明显。地表发育4条主干水系(R7—R10),主要特点如下:①水系向南和南西2个方向汇流,延伸较长,主干水系流向与构造走向一致,分支系统较发育,受海西早期东高西低的地形影响,分支水系明显密集分布于主干水系东侧,主要呈东西向汇流,干流与支流几乎呈直角相交,水系结构不对称;②主干水系纵剖面呈梯级型下降[图5(a)],河谷宽而浅[图5(b)],表明水系形成且经历了一定的岩溶作用时期,但由于排泄基面接近地表,地表水以侧向侵蚀溶蚀作用为主;③主干及分支水系在平面上自由蜿蜒,有平原曲流河特征[图5(c)],多处可见大型废弃牛轭湖[图5(d)],表明在海西早期西部地区地貌整体较为平缓的特征。



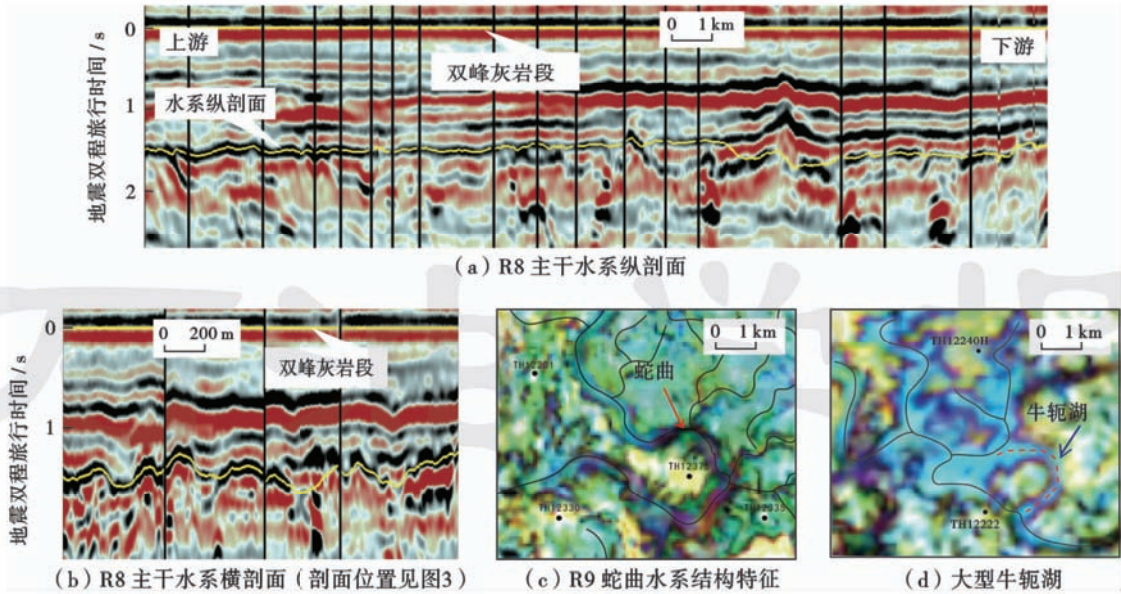


图 5 塔河油田西部地区地表水系结构特征

Fig. 5 Architecture feature of drainag system in western area of Tahe Oilfield

### 3 古水文地貌对洞穴发育的控制作用

#### 3.1 洞穴发育特征

Ford 提出了非承压循环条件下洞穴发育的 3 种理论,即渗流带、潜流带和潜水面理论<sup>[5]</sup>,本文主要针对潜水面控制下的暗河型洞穴进行研究。目前对刻画塔河地区洞穴网络比较有效的方法有大时窗平均绝对振幅属性、混频分色技术、地震反射结构特征分析<sup>[16]</sup>。当碳酸盐岩地层中有洞穴发育时,洞与围岩存在较大的波阻抗差异,形成相对强地震反射特征。混频分色技术中,洞穴主要呈现“亮点”特征。地震剖面上顺洞道方向呈连续“羊排状”强反射特征,横剖面呈串珠状反射特征。因此,通过选取合适的混频分色切片[图 6(a)],平均绝对振幅属性时窗[图 6(b)],结合地震剖面上“羊排状”[图 6(c)]和“串珠状”[图 6(d)]反射特征等方法,对塔河地区较连续的暗河型洞穴网络进行刻画(图 7)。从洞穴的刻画结果来看,东部主体区和西部地区洞穴形态、规模具有明显差异性。

岩溶高原区主要发育两大暗河型洞穴总体沿 NE 向展布,平面结构样式上主要表现为单支状(图 7),分支系统不发育。洞穴发育深度距不整合面约 80~150 m(图 8),主干洞穴纵向上起伏较大。局部发育网络状洞道,如:T615 井发育高 19 m 的砂泥质充填洞穴(图 9)。洞穴发育深度距不整合面约 80~120 m(图 10),主干洞穴纵向上起伏较为平缓;岩溶斜坡区洞穴总体沿 NE 向展布(图 7),平面结构样式上呈不对称的大型树枝状结构,主干洞穴发育深度距不整

合面约 80~120 m,洞穴发育高度约 10~30 m。3 大分支系统分布于主干洞穴东侧,分支洞道纵向坡降较大(图 11)。如:S81 井发育高 8 m 的砂泥质充填洞穴(图 12);西部岩溶盆地区洞穴主要呈孤立状,没有形成大型连续的洞穴网络系统,且洞穴主要发育在表层带,具有连通性较差、发育规模较小的特征。如:TH12224 在距不整合面 2 m 发育一个全充填洞穴。东部地区与西部区洞穴发育规模和洞穴样式的差异反映了其形成机理的不同。

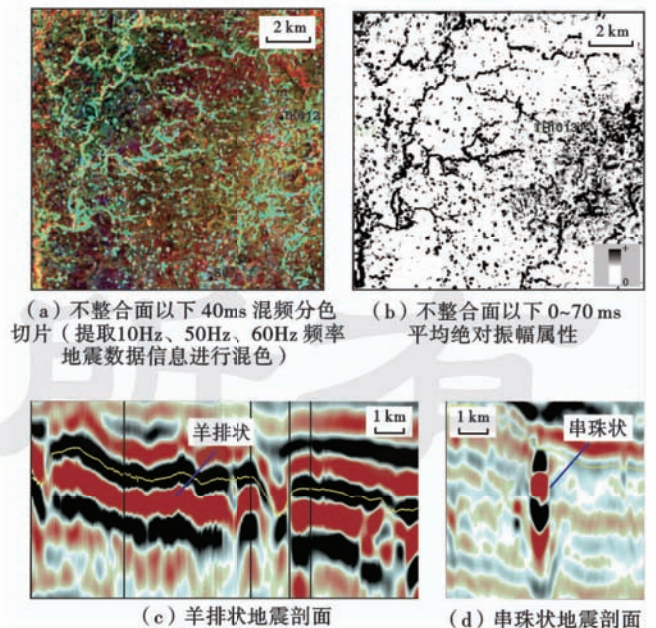


图 6 洞穴系统刻画方法

Fig. 6 Characterization methods of cave system



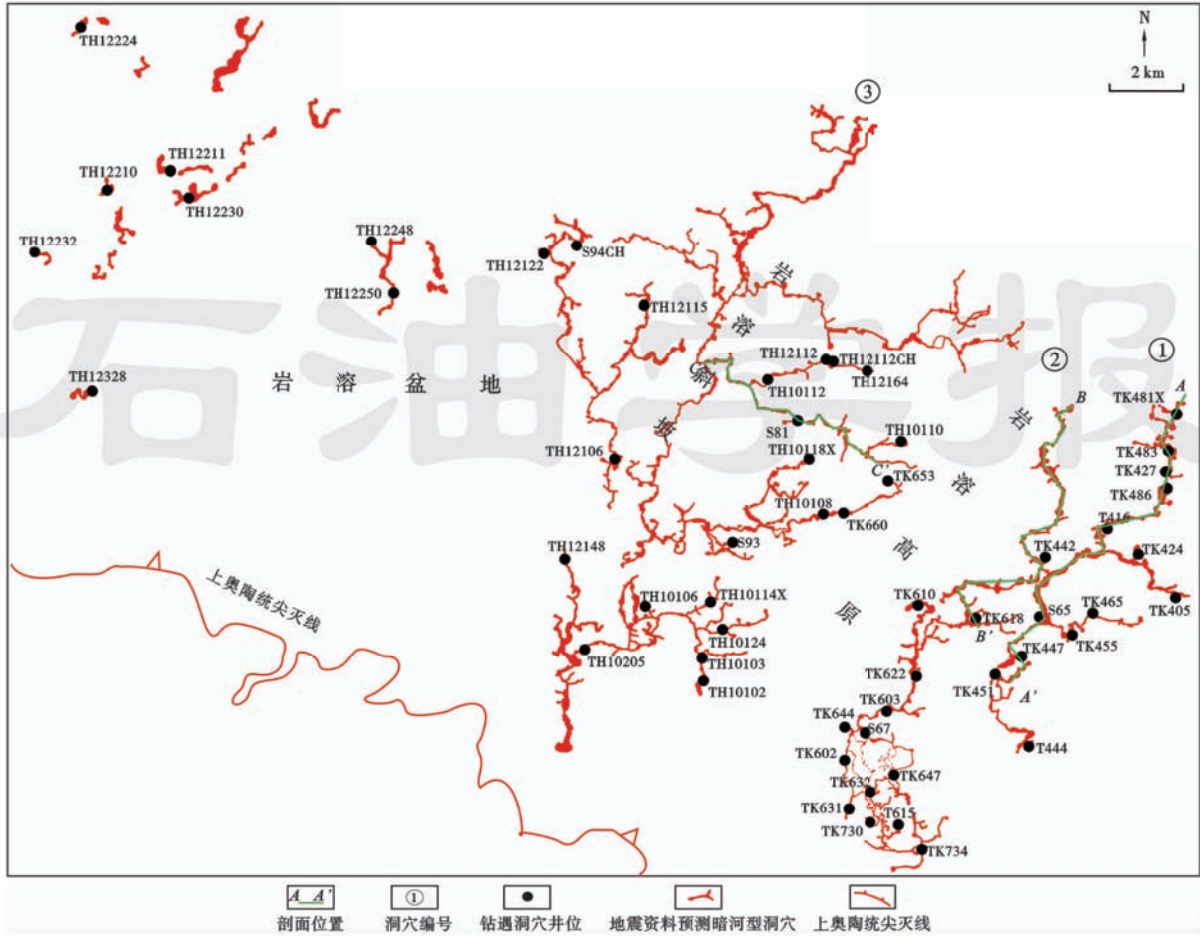


图7 塔河地区暗河型洞穴分布特征

Fig. 7 Characteristics of cave system in Tahe area

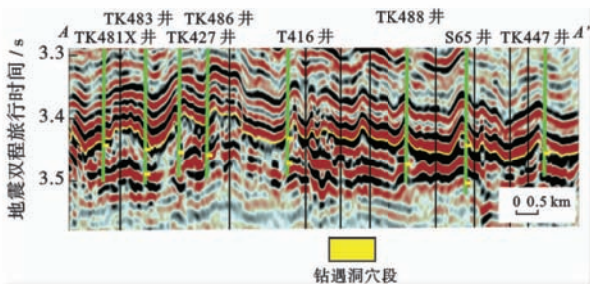


图8 塔河地区①号主干洞穴地震响应特征(剖面位置见图7)

Fig. 8 Seismic characteristics of main cave system in Tahe area

### 3.2 古水文地貌对洞穴发育控制作用

岩溶地貌宏观制约着不同的水文过程<sup>[24]</sup>,岩溶水结构样式、水动力特征、产汇流机制控制着储层的分布,水文地貌与储层之间表现出明显的过程—响应关系。研究区在海西早期构造抬升幅度大,在岩溶高原、斜坡带形成稳定的岩溶水动力系统;在岩溶作用持续时间方面,岩溶高原、斜坡区明显长于西部岩溶盆地区,水岩作用较为充分。这种水文地貌组合在空间上的分带性及岩溶作用时间的不同是导致不同地区洞穴发育规模差异的主导因素。

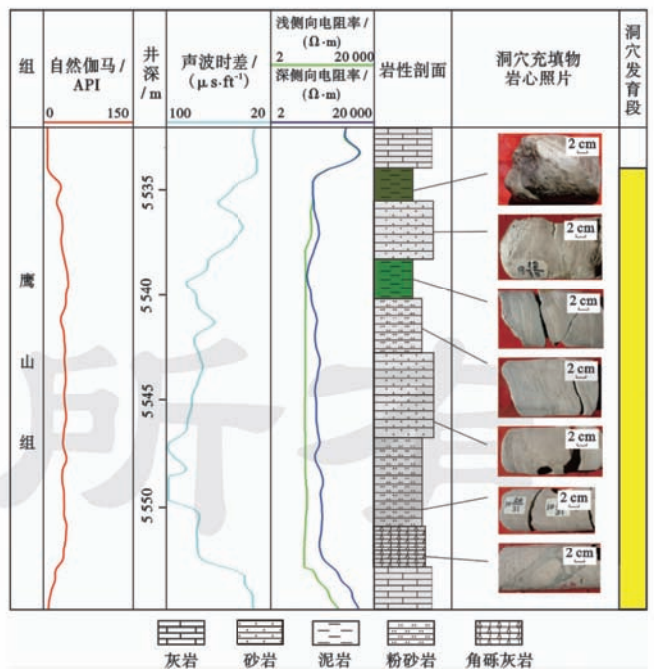


图9 塔河油田 T615 井洞穴岩心剖面

Fig. 9 Core section with cave in Well T615, Tahe Oilfield



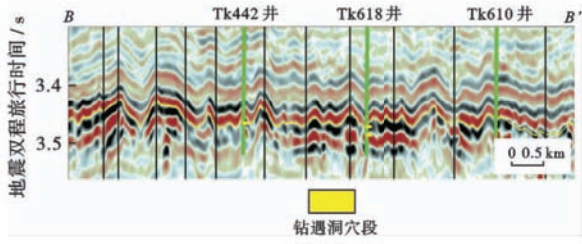


图 10 塔河地区②号主干洞穴地震响应特征(剖面位置见图 7)  
Fig. 10 Seismic characteristics of main cave system in Tahe area

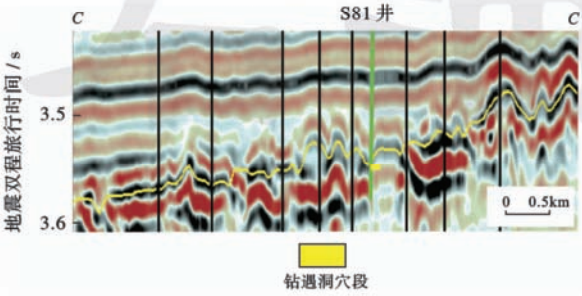


图 11 岩溶斜坡区分支洞穴地震响应特征(剖面位置见图 7)  
Fig. 11 Seismic characteristics of branch cave system in karst slope

岩溶高原区①号洞穴系统发育在大型分水岭 2 的翼部,②号洞穴系统发育于 2 个大型分水岭之间向斜构造核部(图 13)。在岩溶水的补给条件上,岩溶高原流域面积广大,为岩溶水补给区,拥有较充足的水源,为地下洞穴的发育提供较好的先决条件。2 个大型分

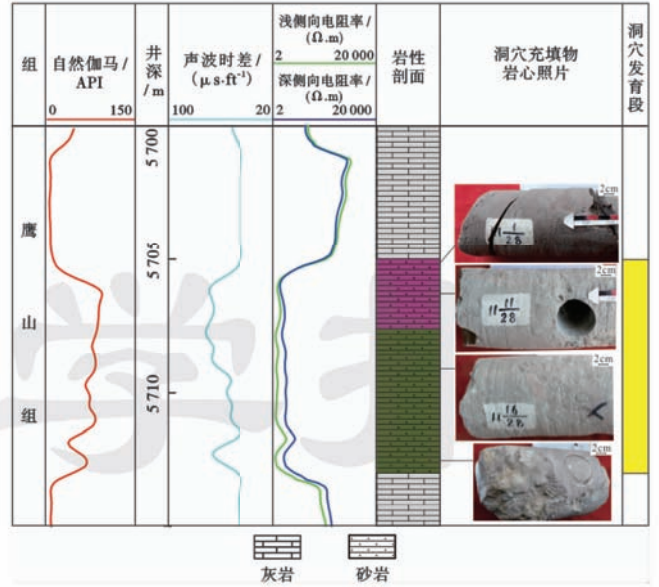


图 12 塔河油田 S81 井洞穴岩心剖面  
Fig. 12 Core section with cave in Well S81, Tahe Oilfield

水岭之间的向斜构造控制着岩溶水的富水区域,呈现出向斜汇流型的地表水运动样式,使两侧分水岭间的岩溶水向向斜核部汇聚。一般而言,在褶皱构造的核部和转折端岩体破碎,断裂较发育<sup>[25]</sup>,由于分水岭区域地层挤压褶皱变形强烈,多期构造运动形成的复杂的裂缝网络相互沟通,极大地增加了断裂的发育程度

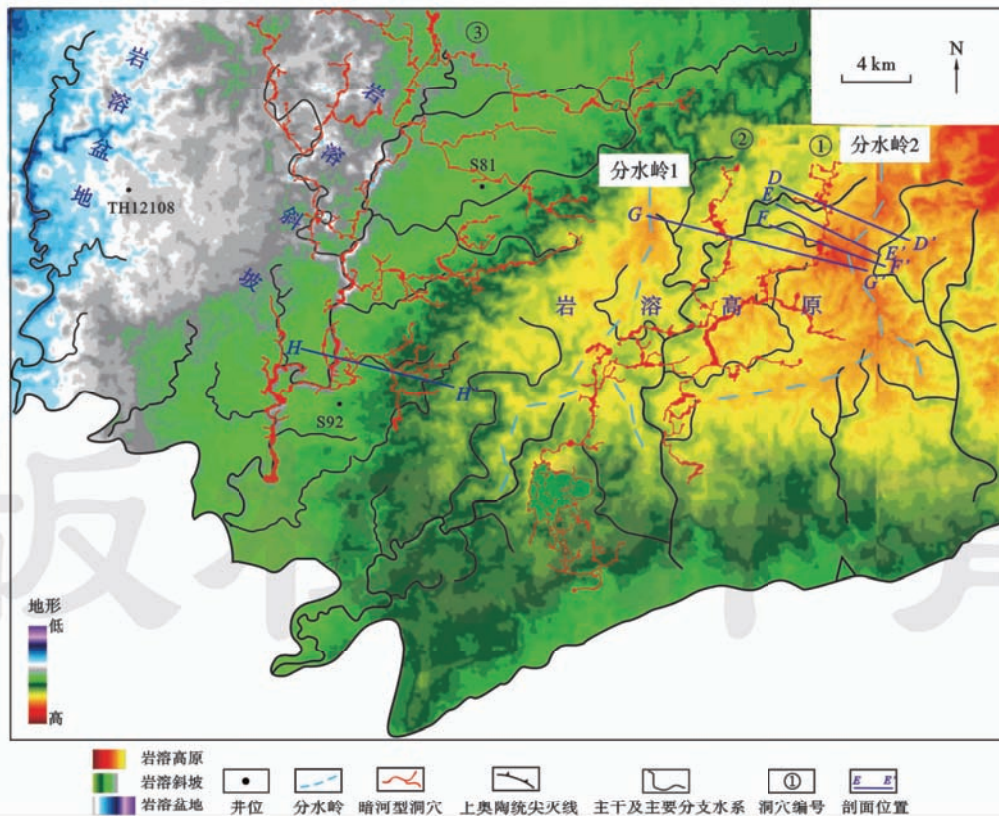


图 13 塔河地区水文地貌与洞穴系统展布特征  
Fig. 13 Distribution of hydrogeomorphologic and cave system



和延伸范围。一部分岩溶水在分水岭翼部顺大型断裂垂直下渗,形成大型连续的洞穴系统(图 14);一部分岩溶水向向斜核部运动,在地表水系强烈的垂向侵蚀作用下,使得地表沟谷系统退化为干谷、伏流,发育大量落水洞、竖井,地表水文网不断解体并逐渐向地下转化。此外,向斜构造核部断裂裂缝发育,也为岩溶水的渗透提供了通道,形成了顺向斜轴部发育的洞穴系统(图 15)。

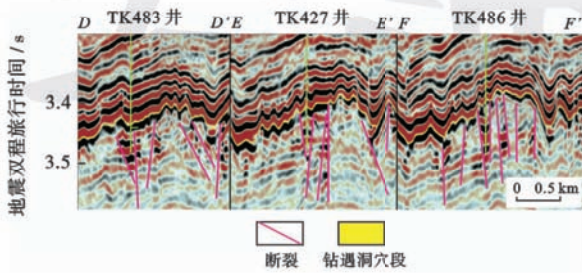


图 14 分水岭翼部暗河型洞穴发育特征(剖面位置见图 13)

Fig. 14 Characteristics of cave system in wing of watershed

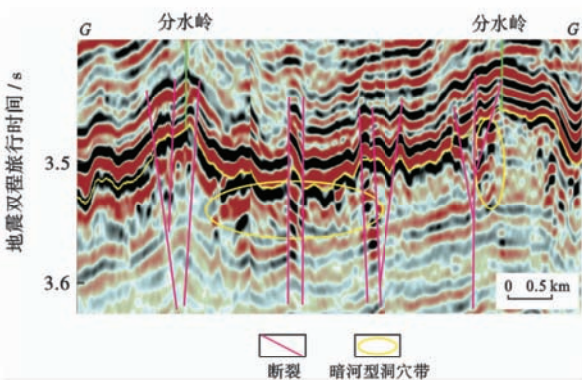


图 15 向斜核部暗河型洞穴发育特征(剖面位置见图 13)

Fig. 15 Characteristics of cave system in core of syncline

斜坡带控制岩溶水的流向和富水单元,在 NE 向主干地表水系、近 EW 向分支地表水系下方分别对应一套暗河型洞穴系统,两者呈“相互缠绕”关系,具有典型的地表-地下双重结构特征(图 13)。充足的汇水量为洞穴的发育提供较充足的水源,EW 向较大的地形梯度为地表水的运动提供较大的水动力条件(图 16);由于岩溶斜坡带是受排泄基面控制的地表、地下水汇流集中排泄区,是地表水文网不断解体向地下水文网快速转换界面带,水系在塑造河谷纵剖面 and 地下通道时,力图不断降低其势能,以最佳的水力通道和最高效率达到能量转化,斜坡带的地下通道也正是在这一能量转化过程中的必然产物。多期次构造运动伴随排泄基面多次下降,流域地表水为了适应变化的排泄基面而做出相应调整,有效的将水系侧向侵蚀变缓过程转化为垂向溶蚀侵蚀过程,在河谷形态上的深“V”字型以及峰从洼地这种高幅差地貌特征,正是岩溶发育过

程中水文的地貌效应映射,即地表水作用功能的衰退、下渗或漏陷化而潜入地下,以侵蚀溶蚀作用在地下开拓新道,从而在斜坡带形成复杂的地表-地下双重结构网络。

西部岩溶盆地地表水系统十分发育,汇水量较大,有充足水源。区域排泄基面接近地表,岩溶古地貌平缓、地形起伏小,水力梯度较小,地表水向地下转换的能力较弱。因此,岩溶水的垂向侵蚀和溶解能力受到了极大制约,主要以水平溶蚀作用为主。这是该区洞穴系统发育规模较小、呈孤立状分布的本质原因。

通过对岩溶洞穴成因机理的剖析,以岩溶地貌学、岩溶水动力学、水文地质学为理论基础<sup>[4,5,26]</sup>,将岩溶洞穴发育放在水文地貌系统内去理解和重建其发育过程,探讨水文地貌与岩溶洞穴发育关系。在岩溶高原区建立了“向斜汇流型”洞穴发育模式(图 17),两个大型分水岭之间的向斜构造控制着岩溶水向向斜核部汇聚。一部分岩溶水在分水岭翼部顺大型断裂垂直下渗并进行溶蚀作用,形成大型连续的洞穴系统。另一部分岩溶水在向斜核部的断裂、落水洞、竖井等负地形共同控制的水文地貌背景下,形成了顺向斜轴部发育的大型暗河型洞穴系统;在岩溶斜坡区建立了“地表-地下双重结构”洞穴发育模式(图 18),充足的汇水量以及东高西低较大的地形梯度为地表水运动提供较大的水动力条件,在多期次构造运动伴随排泄基面多次下降的背景下,地表水全部下渗或漏陷化而潜入地下,从而在斜坡区形成复杂的“地表-地下双重结构”洞穴网络;在岩溶盆地地区建立了“孤立型”洞穴发育模式(图 19),岩溶水的垂向侵蚀和溶解能力作用较弱,主要在地表运动,少部分转入地下,因此形成了“孤立型”洞穴。

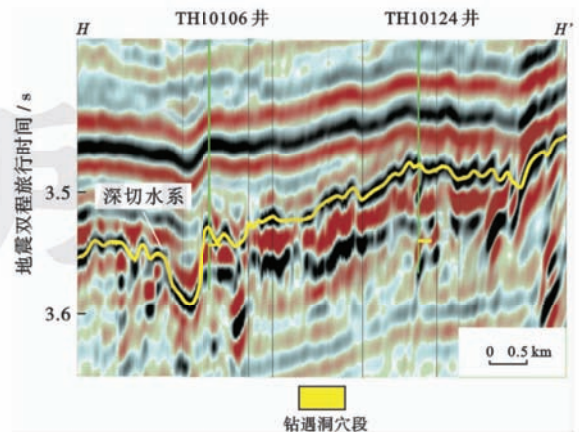


图 16 岩溶斜坡区分支洞穴地震响应特征(剖面位置见图 13)

Fig. 16 Seismic characteristics of branch cave system in karst slope



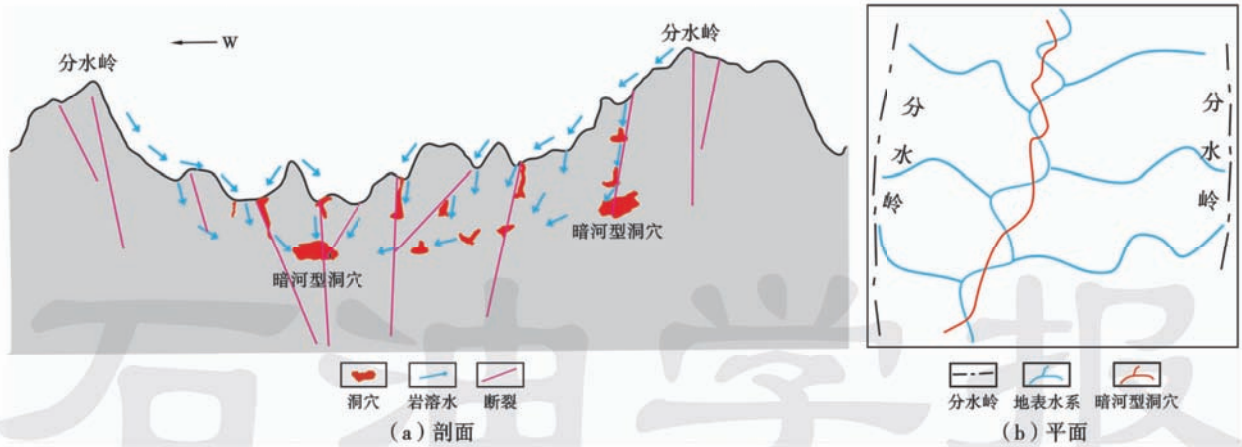


图 17 岩溶高原区“向斜汇流型”洞穴发育模式

Fig. 17 Development model of “confluence of syncline pattern” karst cave in karst plateau

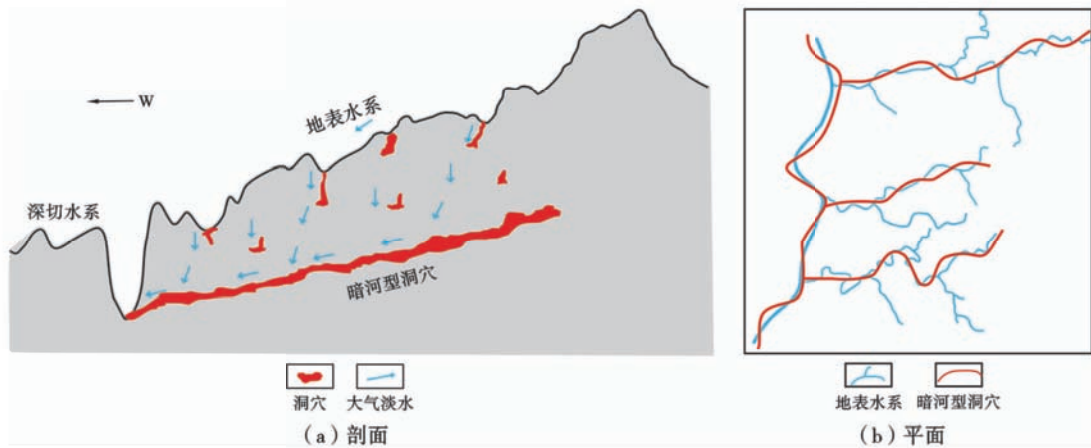


图 18 岩溶斜坡区“地表-地下双重结构”洞穴发育模式

Fig. 18 Development model of “surface and underground drainage system pattern” karst cave in karst slope

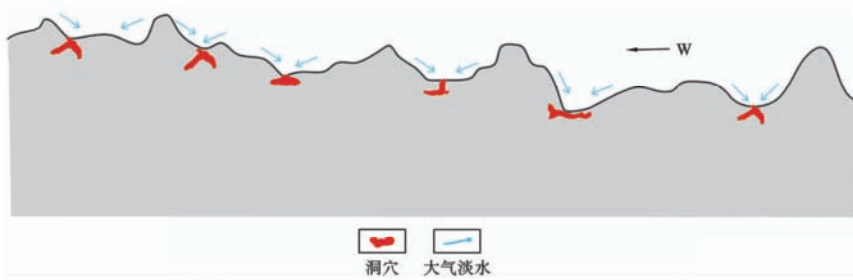


图 19 岩溶盆地区“孤立型”洞穴发育模式

Fig. 19 Development model of “isolated pattern” karst cave in karst basin

### 4 结 论

(1) 塔河地区东部主体区海西早期岩溶古地貌以高幅度峰丛、溶丘为主,发育多条深切水系,地表水强烈的垂向侵蚀作用形成了一套以干谷、伏流、峡谷、天生桥等为代表的地貌组合。西部地区处于岩溶盆地,排泄基面接近地表,地貌特征表现为地表水系侧向侵蚀溶蚀作用形成的低幅度岩溶垄岗和溶丘。

(2) 在古地貌古水系控制下,东部主体区发育大型连续的洞穴网络,西部地区以“孤立状”洞穴为主。

(3) 针对塔河地区古地貌古水系特征、创新性地提出了岩溶高原向斜构造控制下的“向斜汇流型”洞穴发育模式、岩溶斜坡带“地表-地下双重结构”洞穴发育模式和岩溶盆地地区平缓地貌背景下的“孤立型”洞穴发育模式。洞穴发育模式的提出为进一步深化缝洞型储层预测和勘探实践提供借鉴。



## 参 考 文 献

- [1] James N P, Choquette P W. Paleokarst[M]. New York: Springer-Verlag, 1988.
- [2] Palmer A N. Cave geology[M]. Ohil, USA: Cave Books, 2007.
- [3] 何宇彬. 试论均匀状厚层灰岩水动力剖面及实际意义[J]. 中国岩溶, 1991, 10(1): 1-12.  
He Yubin. Hydrodynamic section of thick homogeneous limestone and its practical significance[J]. Carsologica Sinica, 1991, 10(1): 1-12.
- [4] 何宇彬. 试论喀斯特水动力剖面模式[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(1): 119-126.  
He Yubin. Comment on Karst Hydrodynamical section[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(1): 119-126.
- [5] Ford D, Williams P D. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [6] White W B. Conceptual models for carbonate aquifers[J]. Groundwater, 2012, 50(2): 180-186.
- [7] 梁虹, 杨明德. 喀斯特峰丛洼地(谷地)流域产汇流特性分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 1992, 10(1): 10-17.  
Liang Hong, Yang Mingde. Analysis of the characteristics of runoff-yield and flow-concentration in the drainage basin of the karst Fengcong-depression district[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science, 1992, 10(1): 10-17.
- [8] 梁虹, 杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统汇流分析: 以喀斯特峰丛洼地谷地流域为例[J]. 中国岩溶, 1995, 14(2): 186-193.  
Liang Hong, Yang Mingde. Flow gathering analysis of hydrogeomorphologic system in karst drainage basin[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14(2): 186-193.
- [9] 杨明德. 岩溶峡谷区溶洞发育特征及水动力条件[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 187-195.  
Yang Mingde. Characteristics and hydrodynamic conditions of cave development in karst gorge districts[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(3): 187-195.
- [10] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44-51.  
Yang Mingde, Liang Hong. The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(1): 44-51.
- [11] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 塔北哈拉哈塘油田奥陶系岩溶储层发育模式[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1380-1391.  
Liao Tao, Hou Jiagen, Chen Lixin, et al. Evolutionary model of the Ordovician karst reservoir in Halahatang oilfield, northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1380-1391.
- [12] 杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京: 地质出版社, 1988.  
Yang Mingde. Karst river basin landform system[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [13] 彭建, 梁虹, 王剑. 贵州普定后寨河流域喀斯特水文地貌空间耦合分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2000, 18(2): 1-5.  
Peng Jian, Liang Hong, Wang Jian. Karst hydromorphological spatial coupling analysis of the Houzhaihe drainage area in Puding county Guizhou province[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science, 2000, 18(2): 1-5.
- [14] 王在高, 徐萍莉. 浅析喀斯特流域水文地貌过程—响应系统[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2002, 20(1): 36-39.  
Wang Zaigao, Xu Pingli. An elementary analysis of hydrogeomorphological process-response system[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science, 2002, 20(1): 36-39.
- [15] Klimchok A. Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective[M]. Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute, 2007.
- [16] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268-274.  
Lu Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [17] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289-298.  
Li Yang, Jin Qiang, Zhong Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289-298.
- [18] 康志宏. 塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 522-525.  
Kang Zhihong. The karst palaeogeomorphology of carbonate reservoir in Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 522-525.
- [19] Bosák P. Karst processes from the beginning to the end: how can they be dated? [J]. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2002, 1(3): 1-24.
- [20] 陆中臣, 贾绍凤, 黄克断, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991: 22-29.  
Lu Zhongchen, Jia Shaofeng, Huang Keduan, et al. River basin landform system[M]. Dalian: Dalian University Press, 1991: 22-29.
- [21] Demir T, Seyrek A, Westaway R, et al. Late Cenozoic surface uplift revealed by incision by the River Euphrates at Birecik, southeast Turkey[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 132-163.
- [22] Nakamura Y, Okada A, Takemura K. Late Quaternary activity of faults and recurrence interval of earthquakes in the eastern Hokuriku region, northern central Japan, on the basis of precise cryptotephra analysis of fluvial terrace sequences[J]. Geomorphology, 2008, 99(1/4): 59-75.
- [23] 沈继方, 李焰云, 徐瑞春, 等. 清江流域岩溶研究[M]. 北京: 地质出版社, 1996.  
Shen Jifang, Li Yanyun, Xu Ruichun, et al. Research on the karst in Qingjiang River Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [24] White W B, Culver D C. Encyclopedia of caves[M]. New York: Academic Press, 2012.
- [25] 王宇, 彭淑惠. 云南省岩溶水赋存特征[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 253-259.  
Wang Yu, Peng Shuhui. Distribution features of karst water in Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 253-259.
- [26] 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.  
Ren Mei'e, Liu Zhenzhong. Karst introduction[M]. Beijing: The Commercial Press, 1983.