

塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化

李源¹,鲁新便²,王莹莹³,张恒¹,蔡忠贤¹,李达泽⁴

[1. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉430074; 2. 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;
3. 成都理工大学能源学院,四川成都610059; 4. 科罗拉多矿业大学经济商业学院,美国丹佛80401]

摘要:塔里木盆地塔河油田海西早期形成了复杂的碳酸盐岩岩溶缝洞系统,其发育规模在塔河油田东部主体区和西部外围区表现出显著的差异性。岩溶水作为岩溶发育的关键因素,在不同地质背景下表现出的水文学特征及水动力作用与岩溶缝洞系统的发育密切相关。为了深入认识和阐述东、西部岩溶储层发育机制,以现代岩溶理论为指导,基于高精度三维地震资料,利用地震属性提取技术及地震成像相关技术,对埋深5 000 m以下的古岩溶地貌和古水文网络进行了恢复。通过对东、西部水文地貌特征的精细描述,厘定了岩溶演化阶段。研究结果表明:1)东部主体区为岩溶高原区,以峰丛、溶丘等高幅差地貌为主,地表水强烈的垂向侵蚀作用形成了干谷、盲谷、伏流、峡谷、天生桥等地貌组合,同时,发育了完整的地表-地下双重水系网络。该水文地貌特征反映了东部主体区经历了一段长期稳定的岩溶作用阶段。2)西部外围区为岩溶盆地,地形较为平缓,发育低幅度溶丘;地表水以侧向溶蚀、侵蚀为主,展现出蛇曲状网络结构,尚未形成连续的地下水系网络,说明西部外围区岩溶作用时间相对有限。综合区域构造演化史,认为塔河油田东部主体区岩溶发育阶段处于壮年期,西部外围区岩溶发育阶段处于青年期。

关键词:古岩溶地貌;古水系;演化阶段;岩溶储层;海西早期;塔河油田

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe oilfield, the Tarim Basin

Li Yuan¹, Lu Xinbian², Wang Yingying³, Zhang Heng¹, Cai Zhongxian¹, Li Dazhe⁴

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

2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

4. Economics and Business, Colorado School of Mines, Denver, Colorado 80401, USA)

Abstract: Complex karst fracture-vuggy systems formed during early Hercynian of Tahe Oilfield show greatly disparities in scales and distributions in the east (blocks of interests) and west (peripheral area) parts of the oilfield. Karst water was thought to be the key factor during the karstification under varying hydrogeomorphology and hydrokinetic conditions against different geological settings. To deeper understand and interpret the mechanisms behind the development of karst reservoirs in western China, the authors restored paleokarst geomorphology and hydrology networks buried in a depth less than 5000m with modern karst theories as guidance, and high-precision 3D seismic data, seismic attribute abstraction and seismic images, as basis. A fine description of hydrogeomorphology of the east and west parts of the oilfield were also carried out to help define the evolution stages of the karstification. The results show that the east part was developed into karst plateau with high-relief peak clusters and karst mounds as the primary landform units. Typical landscape combinations consisting of dry valleys, blind valleys, swallet steams, canyons and natural bridges, were formed by strong vertical erosion from surface water. Integrated drainage systems made up of both surface and underground hydrologic networks were also formed there. These features reveal that the part had gone through a long and stable period of karstification. The results also point out that the west part is mostly a karst depression holding gentle topography gradient and karst mounds with relatively lower relief. The surface water network was observed to erode largely laterally into snaking networks in the part. However, continuous underground water networks failed to come into being, indicating a shorter period of karstification.

收稿日期:2015-09-16;修订日期:2016-09-07。

第一作者简介:李源(1987—),男,博士研究生,资源探测。E-mail:liyuan586287@126.com。

通讯作者简介:蔡忠贤(1963—),男,教授,碳酸盐岩储层地质学。E-mail:zxcai@cug.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214804)。

tion in the part. Combining these observations with regional tectonic evolution data, the authors suggests that the karst reservoirs in the east of the oilfield are still in their stage of maturity and those in the west are during their adolescence phase.

Key words: palaeo karst geomorphology, palaeo drainage system, evolutionary stage, karst reservoir, Early Hercynian, Tahe oilfield

近代岩溶地貌学研究始于19世纪末塞尔维亚学者 Jovan Cvijic。一百多年来,围绕岩溶地貌的研究主要集中在3个方面,即岩溶地貌形态学^[1-2]、成因学^[2-3]和岩溶地貌的演化^[4-9]。其中针对岩溶地貌的演化,相继提出了“循环演化论”^[4-5]、“地壳上升速度与剥蚀速度对比论”^[6]、“同时态系统演化论”^[7]和“渐进演化论”^[8-9]等观点。“循环演化论”主张岩溶地貌演化是从地壳上升开始,经长期相对稳定阶段,直到地壳的再度升起,归纳为“幼年、青年、壮年、老年”4个阶段,每个阶段有其特定的岩溶地貌组合形态,体现了地貌发育的循环式演化规律。“地壳上升速度与剥蚀速度对比论”是以新构造运动的上升或下降为主导思想,用上升速度和剥蚀速度的均衡对比关系来解释各种岩溶地貌的成因、演化,不足之处在于未能阐述岩溶地貌发育的阶段性。“同时态演化论”认为同一时期发育的岩溶地貌组合形态不是单一的,突出了地貌发育的多样性特点,即“同期异形”特征。“渐进演化论”强调了新构造运动和水文网络对地貌发育的控制作用,将新构造运动和水文网纳入 Davis 的“循环演化论”中,讨论了不同岩溶地貌演化阶段下的地貌特征以及水文特征,较前面几种观点又前进了一大步。随后,杨明德^[10]、Kaufmann^[11]、Ford^[2]等进一步强调了水文网络对地貌演化的推动作用,认为水文过程是岩溶地貌发育演化的主要控制因素。目前,以系统的观点来认识喀斯特流域,将岩溶地貌放在流域系统内进行研究,通过解剖流域的水文网络特征并结合岩溶地貌特征去理解和重建岩溶地貌发育演化规律的研究较为薄弱。对于可作为储层的后期未被充填改造的落水洞、竖井、地下洞穴网络等岩溶负地貌的发育和分布,与 Davis 的地貌循环论中所提及的岩溶演化阶段密不可分。因此,对于岩溶演化阶段的研究,其意义在于岩溶水文、地貌对储层的控制作用上。

塔里木盆地塔河油田海西早期形成了复杂的碳酸盐岩岩溶缝洞系统,其发育规模在塔河东部主体区和西部外围区表现出显著的差异性。古岩溶水文、地貌作为重要的研究对象,无论从古岩溶地貌单元的划分和描述^[12-13],还是对古水系特征的刻画描述^[14-15],都体现了前人通过现代岩溶理论体系来认识古岩溶系统的视角。然而,在塔河地区针对古岩溶地貌演化研究较少。本次对塔河油田海西早期东、西部岩溶

水文和地貌特征进行研究,进而对两个地区岩溶演化阶段进行厘定,对揭示古岩溶储层发育规律具有重要意义。

1 区域地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起南端,西邻哈拉哈塘凹陷,东靠草湖凹陷,南接阿满坳陷,面积约750 km²,是以中、下奥陶统碳酸盐岩岩溶缝洞型储层为主的大型油气田。油田资源潜力大,具有整体含油、局部富集油气的分布规律。本次研究区主体区(2区、4区、6区、7区)和西部地区(10区、12区)的上奥陶统剥蚀区(图1)。目的层段为中、下奥陶统(地震反射界面为T₄⁺),岩性以较纯灰岩为主。该区自加里东中期—海西早期主要经历了加里东中期I幕、II幕、III幕和海西早期4次重要的构造运动。其中,海西早期是最重要的一期构造运动,是岩溶作用持续时间长、岩溶强度最大的时期。在强烈的构造抬升下,上奥陶统桑塔木组、良里塔格组、恰尔巴克组地层整体由南向北依次剥蚀尖灭,中、下奥陶统灰岩直接暴露地表经历岩溶作用。加里东期发育的2组“X”型北东和北北西向走滑断裂,以及近南北向和近东西向共轭压扭性断裂组合,为海西早期的岩溶发育创造了条件^[16]。

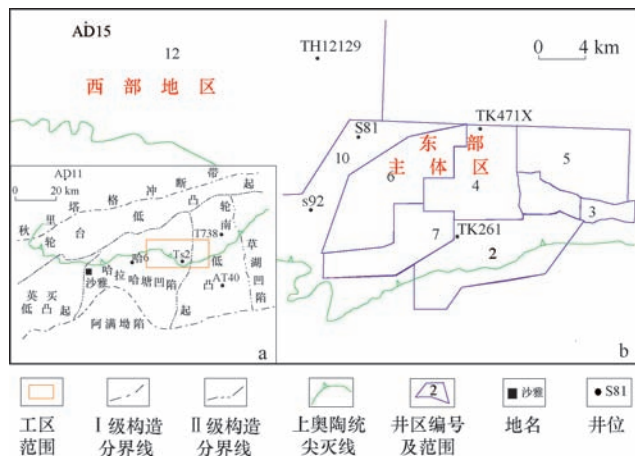


图1 研究区构造区划及井区划分

Fig.1 Simplified map showing tectonic locations and well blocks in the study area

a. 塔里木盆地塔河油田构造区划; b. 塔河油田井区划分

2 海西早期地表、地下古水系特征

2.1 地表古水系特征

根据目前的研究和认识,塔河地区有效刻画地表水系的方法主要有古地貌恢复技术、趋势面识别技术、精细相干分析、混频分色技术和曲率技术^[15,17]。

古地貌恢复技术和趋势面识别技术主要利用 landmark 软件系统,基于高精度三维地震数据精细的层位解释结果,通过印模法进行古地貌平面成图^[18],连续的负地形即构成地表水系网。趋势面识别技术是在中、下奥陶统顶面层位解释的基础上,对层位进行平滑处理(图2),形成一个平滑趋势面,再将原层位与此平滑趋势面相减,连续的负地形即为地表古水系,正地形代表岩溶残丘。该技术方法对于识别下切较深的水系效果较好。

新一代精细相干分析是从相关算法、相似算法发展而来的本征值算法,其精细程度取得了很大提高,主要利用 LandMark 及 Pardigm 中的本征值相干对三维数据体进行计算产生本征值相干体,不整合面时间切片上呈连续弱相干的属性特征清晰地展现古地表水系样式。

混频分色技术是基于不同频率数据对同一地质体的不同响应特征,将原始数据体通过谱分解成一系列窄带调谐数据体,通过混色技术来融合高、中、低3个典型频段特征,并沿不整合面进行切片来刻画地表古水系。该方法对于河道下切浅、规模小的水系具有较好的识别效果。

曲率是单位弧段上切线转过角度大小的极限(图3),背斜的曲率为正,向斜的曲率为负。基于 G & G 软件的最大负曲率模块对数据体进行属性提取,沿不整合面切片,地表水系处为最大负曲率值构成的连续网络。

塔河东部主体区和西部地区,由于处于不同的地质背景,其岩溶发育具有差异性,因此地表水系的识别技术也有所差异。东部主体区主要依据趋势面负地形进行刻画(图4a),西部地区主要用最大负曲率(图4b)、混频分色技术(图4c)和精细相干技术(图4d)综合刻画。通过上述方法对研究区海西早期地表古水系进行识别刻画(图5)。

2.1.1 东部主体区地表水系结构特征

岩溶流域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。其平面形式主要有树枝状水系、网状水系、格状水系、平行状水系和单支水系等^[19]。水系的形成是由“干流生支流、支流再生细支”^[20]。

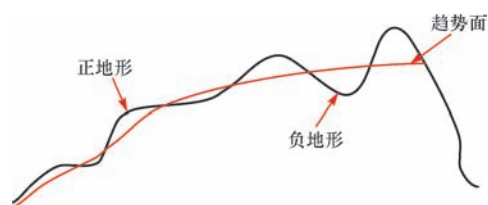


图2 趋势面原理

Fig. 2 Principle of trend surface

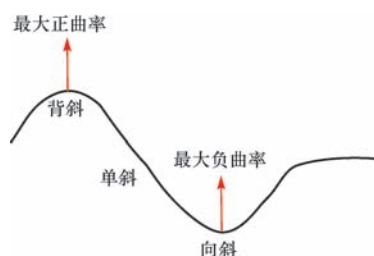


图3 曲率原理

Fig. 3 Principle of curvature

东部主体区海西早期地表发育6条主干水系(R_1-R_6),水系在平面上呈树枝状、羽状结构。 R_1-R_5 具有4级分级向南汇流特征(图5), R_6 呈南西向汇流特征。主干水系整体延伸较长,分支系统十分发育,支流与干流之间交会角一般小于 90° ,汇入干流两侧的支流数量相当,整个水系结构对称。主干河谷横剖面具有明显“下拉”特征(图6a),纵剖面从上游至下游呈梯级型下降(图6b),发育多个裂点和侵蚀阶地^[21-24]。主干河谷的横、纵剖面特征反映出该区经历了多期次强烈的构造上升运动,伴随着排泄基准面多期次幕式下降。地表水为了去适应更低的排泄基准面,从而进行强烈的垂向侵蚀作用并向地下转换。

此外,在主干水系 R_7 上游段发育具有袭夺性的倒钩式水系(图6c)。分支水系 A_1A_2 段、 B_1B_2 段和 C_1C_2 段一级水系呈由北向南汇流,与主干水系 D_3D_2 段由南向北向西向汇流的流向截然相反,构成了这种具有“倒钩式”的水系结构,表明此处岩溶发育期发生水系间的袭夺。 D_3D_2 段早期为主干水系 R_5 的上游分支水系,由北向南汇入主干水系 R_5 ,后期局部排泄基准面向北西方向迁移,北西向主干水系 R_7 兼并基准面相对较高的 R_5 上游端分支水系 D_3D_2 段,从而使主干水系 D_3D_2 段由早期的由北向南汇流变为后期的由南向北向西向汇流。水系的袭夺和倒淌现象是水系演化程度较高的产物,是后期构造运动的差异引起相邻水系侵蚀基准面之间的差异,从而导致水系发育出现不均衡^[14,24]。

2.1.2 西部地表水系结构特征

西部地区海西早期地表发育6条主干水系(R_7-R_{12}),水系在平面上呈不对称的格状水系结构特征

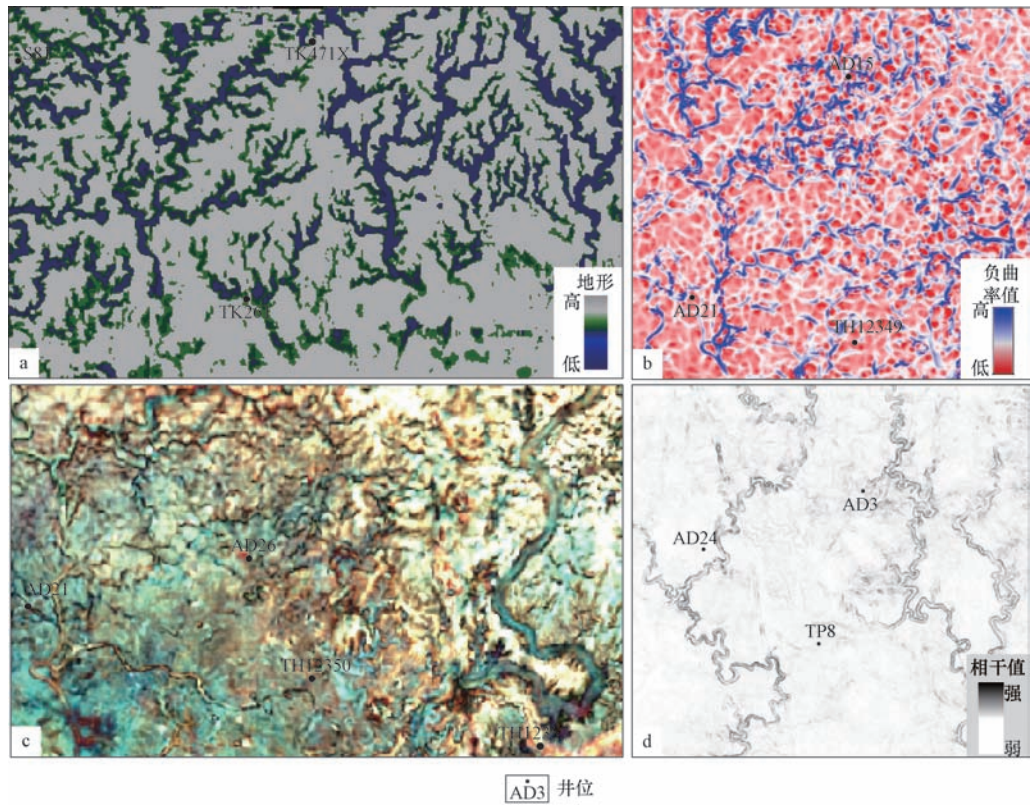


图 4 塔河油田地表水系刻画方法

Fig. 4 Methods for characterizing river systems in Tahe oilfield

a. 趋势面负地形属性;b. 最大负曲率属性;c. 混频分色属性;d. 精细相干属性

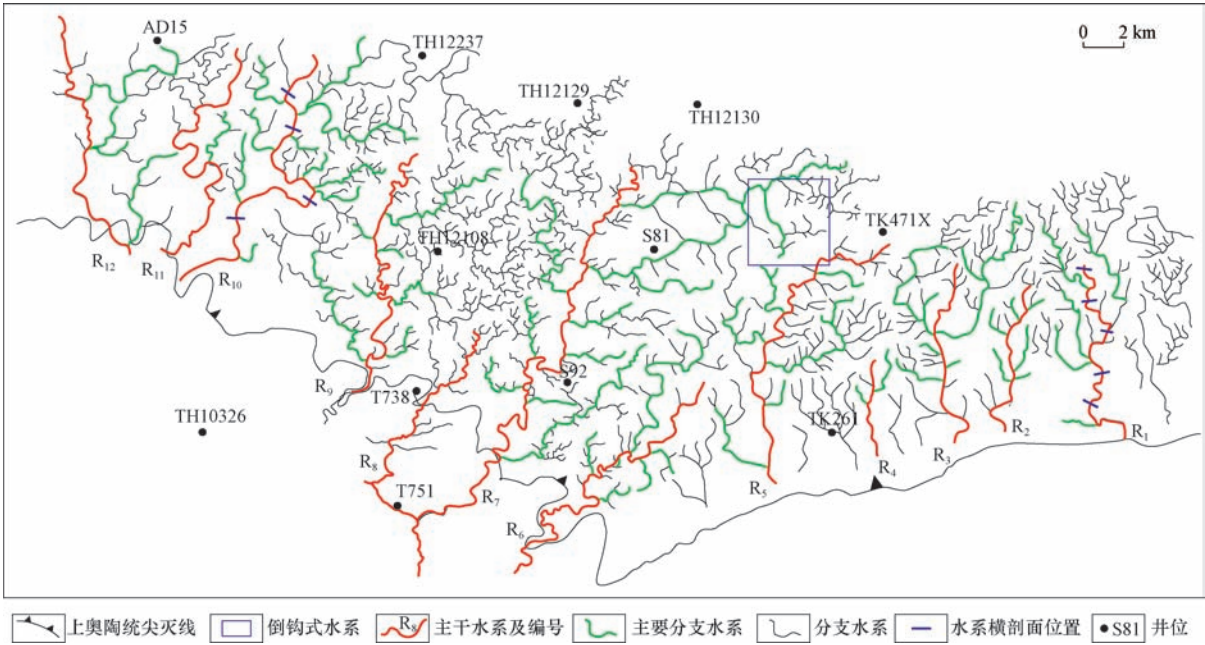


图 5 塔河油田海西早期地表主干水系及主要分支水系

Fig. 5 Distribution of the main and branch river systems of the Early Hercynian in Tahe oilfield

(图 5),具有 4 级分级南向、南西向汇流特征,水系延伸较长。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特征和岩层产状影响,分支水系明显密集分布于主干水系东侧,主要呈东西向汇入主干水系,干流与支流几乎呈直角相交,整个水系结构呈不对称。主干水系纵剖面从上游到下游较

平缓(图 7a),河谷宽而浅(图 7b),表明在水系形成后构造运动相对较为稳定,排泄基准面接近地表,地表水以侧向侵蚀溶蚀作用为主,从而形成宽而浅的河谷。主干及分支水系在平面上自由蜿蜒,有平原曲流河特征(图 7c,d)。多处可见大型废弃牛轭湖(图 7e),早期地表水从 A 经过 B 到 C 后向北西向汇流,随着水系

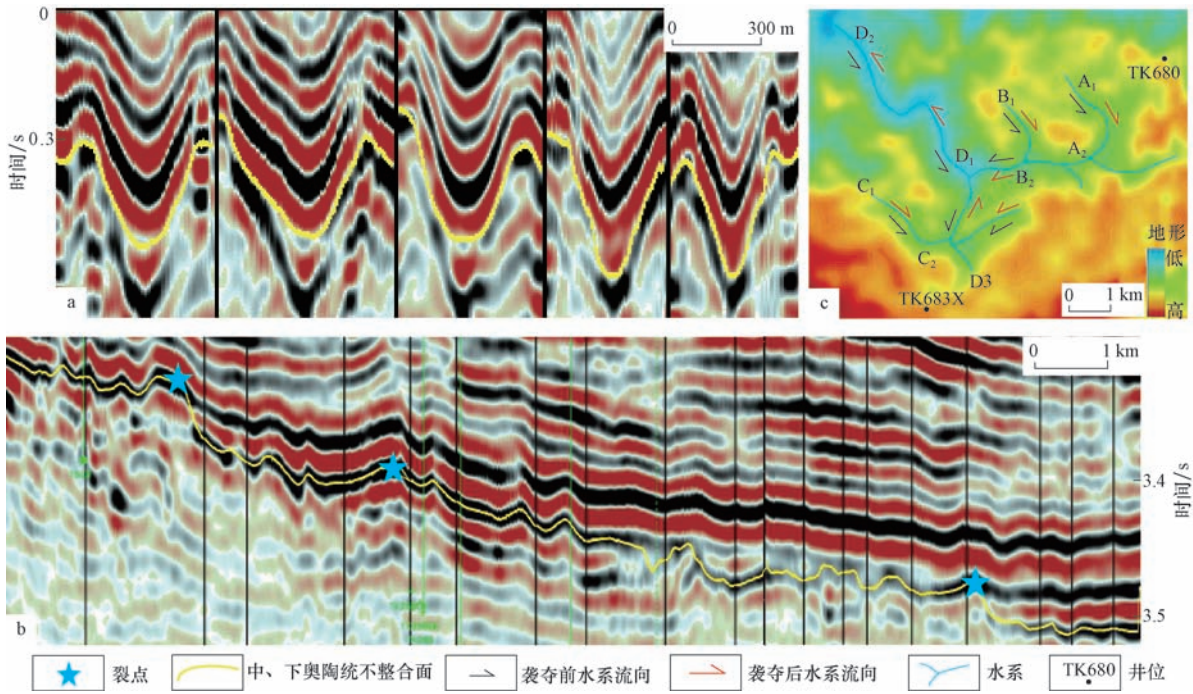


图 6 塔河油田东部地区地表水系结构特征

Fig. 6 Architecture features of river systems in the east part of Tahe oilfield

a. R_1 主干水系横剖面 (剖面位置见图 5); b. R_1 主干水系纵剖面; c. 倒钩式水系结构特征 (位置见图 5 中的小方框区)

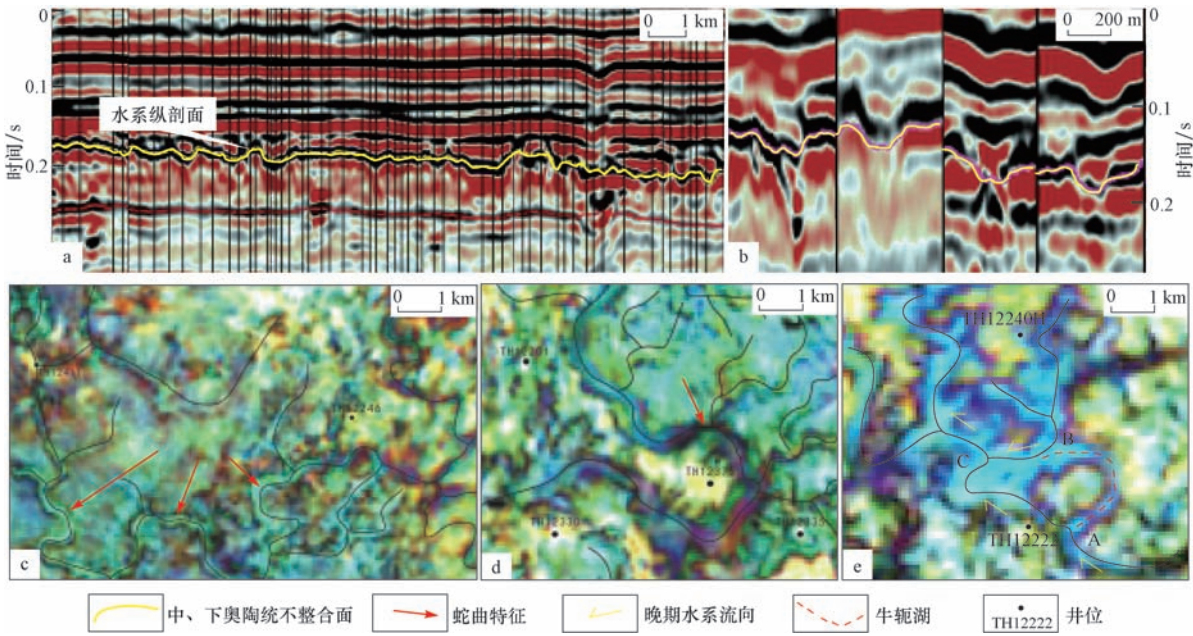


图 7 塔河油田西部地区地表水系结构特征

Fig. 7 Architecture features of river systems in the west part of Tahe oilfield

a. R_{10} 主干水系纵剖面; b. R_{10} 主干水系横剖面 (剖面位置见图 5); c. R_{11} 水系结构特征; d. R_{10} 水系结构特征; e. 大型废弃牛轭湖

AB 段愈来愈弯曲, 最后导致水系自然截弯取直, 由 A 径直流向 C, 原来弯曲的河道 AB 被废弃, 形成湖泊。西部地区特有的这种曲流、牛轭湖的发育表明, 在海西早期西部地区地貌整体较为平缓, 地形起伏较小。

2.2 地下古水系特征

目前对刻画塔河地区地下水系比较有效的方法有

大时窗平均绝对振幅属性、混频分色技术及地震反射结构特征分析^[15]。通过选取合适的平均绝对振幅属性时窗(图 8a)和混频分色切片(图 8b), 结合地震剖面上“羊排状”和“串珠状”等反射特征, 对塔河地区地下水系进行刻画(图 9)。

Loucks^[25]将地下水系的结构样式划分为线状、蛇曲状、折线状等单洞道和树枝状、网状迷宫、格字状迷

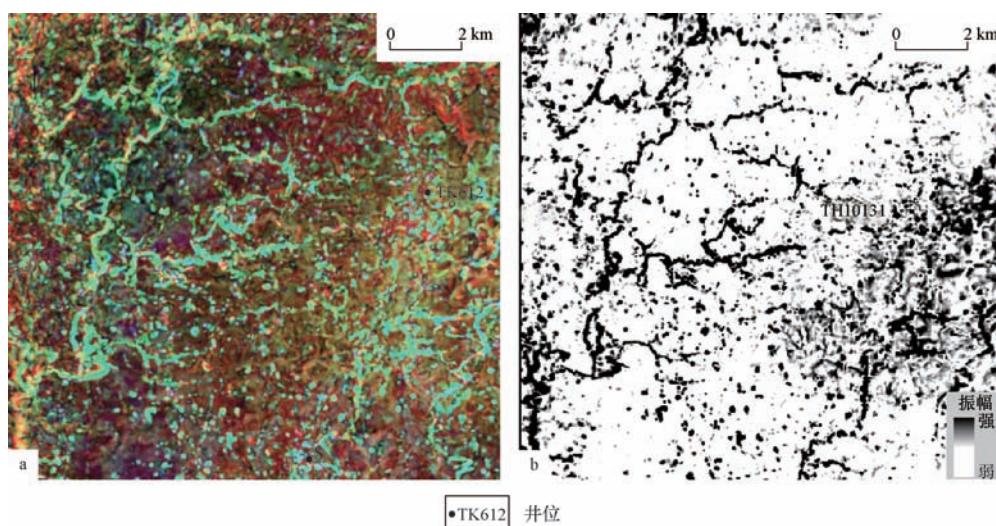


图8 塔河油田地下水系刻画方法

Fig. 8 Methods for characterizing underground water systems in Tahe oilfield

a. 大时窗混频分色属性;b. 大时窗平均绝对振幅属性

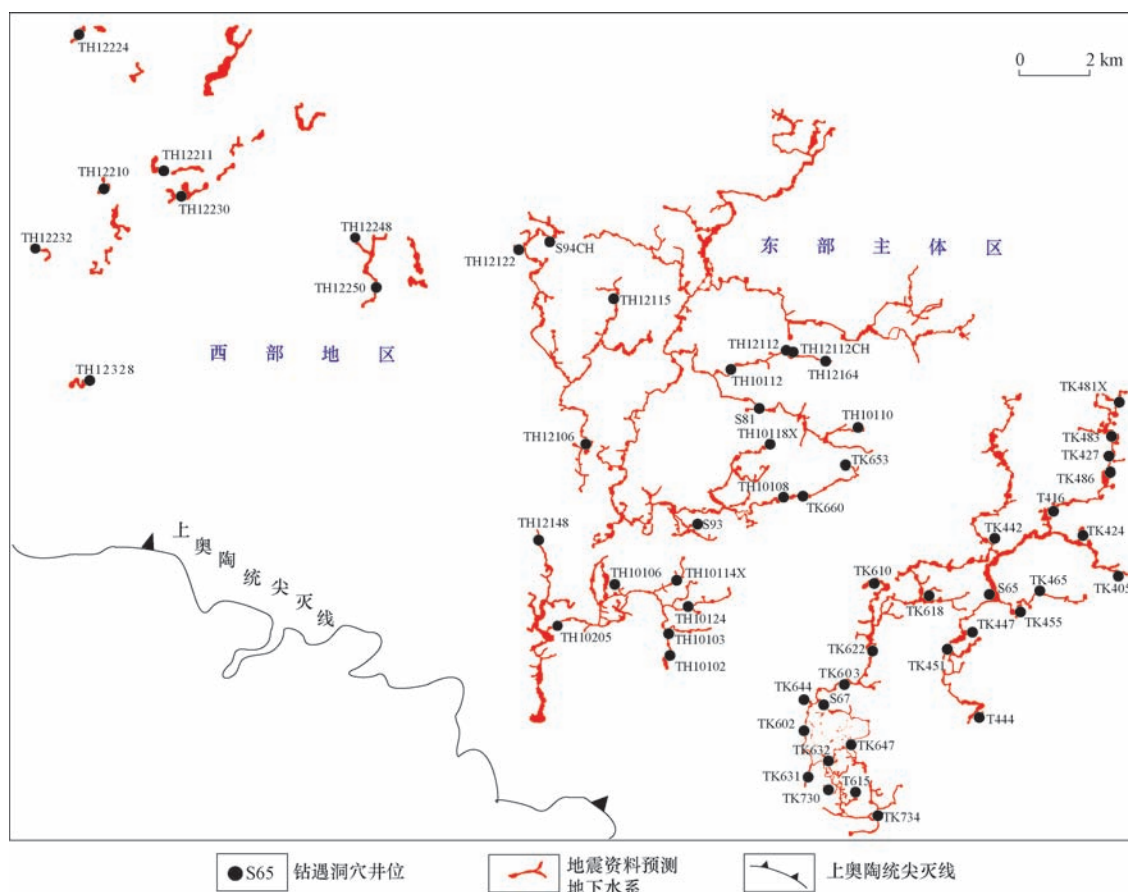


图9 塔河油田地下水系

Fig. 9 Undergroundwater systems in Tahe oilfield

宫、海绵状迷宫、分枝状迷宫等多洞道洞穴结构。按照这一分类,研究区东部主体区 4 区和 6 区地下水系平面结构样式主要表现为单支状,地下水系总体沿北东-南西方向展布,分支系统不发育。10 区地下水系平面结构样式主要表现为大型连续树枝状、网状,分支系统发育。从实钻井钻遇洞穴深度来看,东部地区地下水

系整体发育较深。西部地区地下水系平面结构样式与主体区差异较大,主要呈现为孤立状,没有形成完整的地下水系结构网络,地下水系发育深度较浅。

通过上述地下水系结构特征可知,在海西早期,东部主体区很大一部分地表水已转入地下,形成大型树枝状的具有综合性排驱功能的地下水系网络,地表大

气水顺着裂缝、洼地底部落水洞等负地形垂直向地下运动,地表、地下水系相互转换频繁。西部地区地表水尚未大规模转入地下,未形成具有综合性排驱功能的地下水系结构网络,表明西部地区整体暴露时间短,区域潜水面较高,降水主要通过坡面流迅速汇入地表沟谷系统,顺地表沟谷向南排泄。

3 海西早期古地貌特征

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采用印模法^[18]。古地貌恢复结果表明,研究区海西早期整体呈现出东高西低的构造格局,区域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(图 10a,b)。东、西部地区岩溶地貌形态具有明显的差异性。

3.1 东部地区岩溶古地貌特征

东部主体区二级地貌单元处于岩溶高原区,为古岩溶流域地表水主要补给区。大型分水岭体系主要呈东北向和东西走向(图 10a),分水岭的展布受控于加里东期发育的多组“X”型共轭断裂体系和近东西向的压扭断层构造,形成了背斜成岭的构造-地貌响应关

系。主体区整体具有地形幅度较大的特点,区域地形波状起伏,相对幅度在 20 ~ 130m,表现为很明显的具有一定高差的峰丛、溶丘地貌(图 10b)。地表岩溶发育,三级地貌单元主要为峰丛洼地、溶丘洼地和丘峰洼地。其中,4 区主要以峰丛洼地为主,山体呈锥状,洼地及小槽谷上普遍发育小型漏斗及落水洞。6 区和 7 区则以溶丘洼地和丘峰洼地为主,主要位于分水岭两侧,山体多呈缓丘状。10 区主要位于岩溶斜坡地区,地面坡降较大,三级地貌单元主要为具有一定幅度的丘丛垄脊沟谷和峰丛垄脊沟谷,地貌分异作用明显。

主体区峰丛、溶丘和丘峰等高幅差地貌背景下,水系深切、地下水位深埋,水系坡降较大,水文地质特征表现出强烈的垂向溶蚀侵蚀作用,水系从地表向地下转化,从而形成了该区特有的盲谷、伏流带、干谷和天生桥等岩溶地貌形态。如 4 区识别出盲谷(图 11a),分支水系经过 S61 井西侧流经至 TK344X 井,水系消失在河谷末端的山体前。这些盲谷的末端都可能发育地下水系。TK429 井东侧发育一段鞍形谷(图 11b),在岩溶流域内地表水系间鞍形谷的发育可能代表鞍形谷下有伏流穿过^[10]。从 TK429 井附近河谷的地震剖面上(图 11c),可以看出此段河谷底部塌陷比

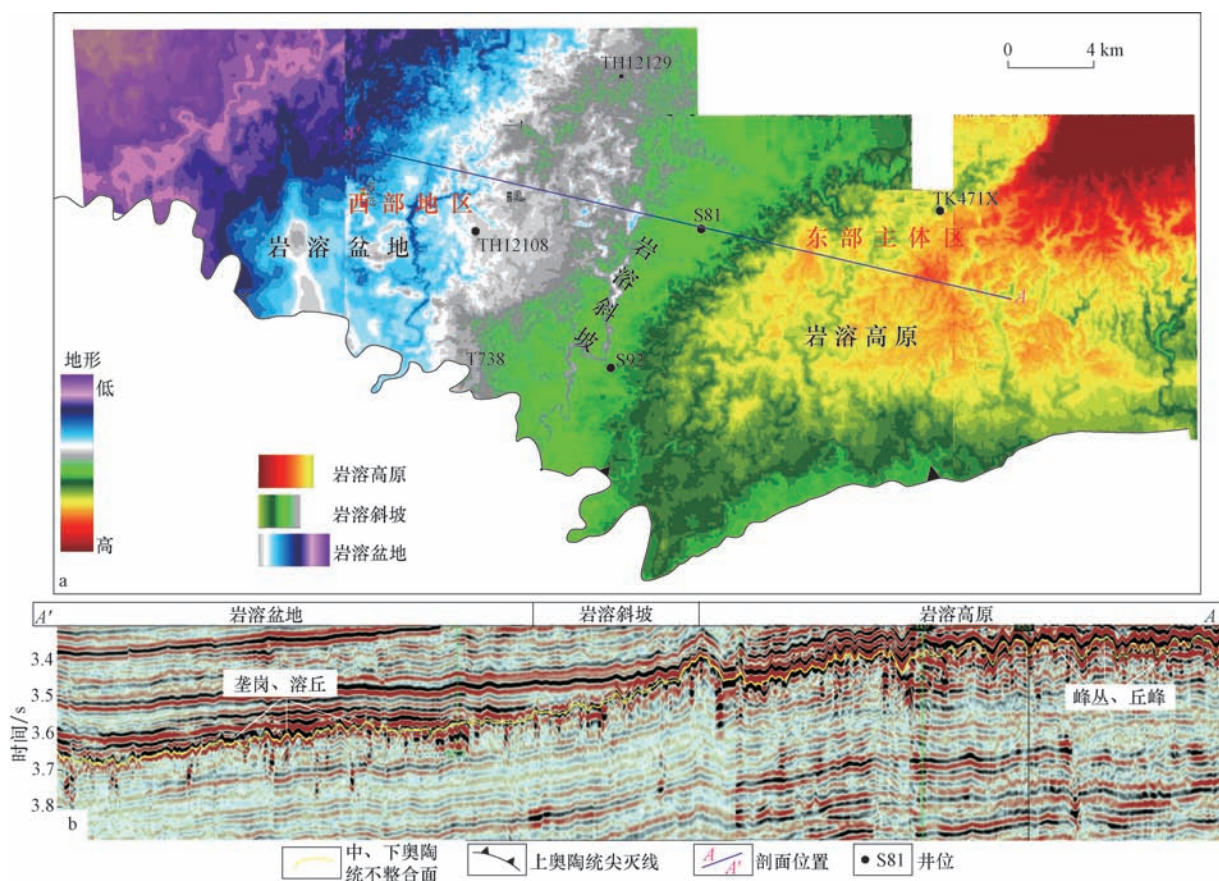


图 10 塔河油田海西早期岩溶古地貌特征

Fig. 10 Paleogeomorphic characteristics of karsts during the Early Hercynian of Tahe oilfield

a. 古地貌平面展布特征; b. 古地貌剖面特征(剖面位置见图 10a)

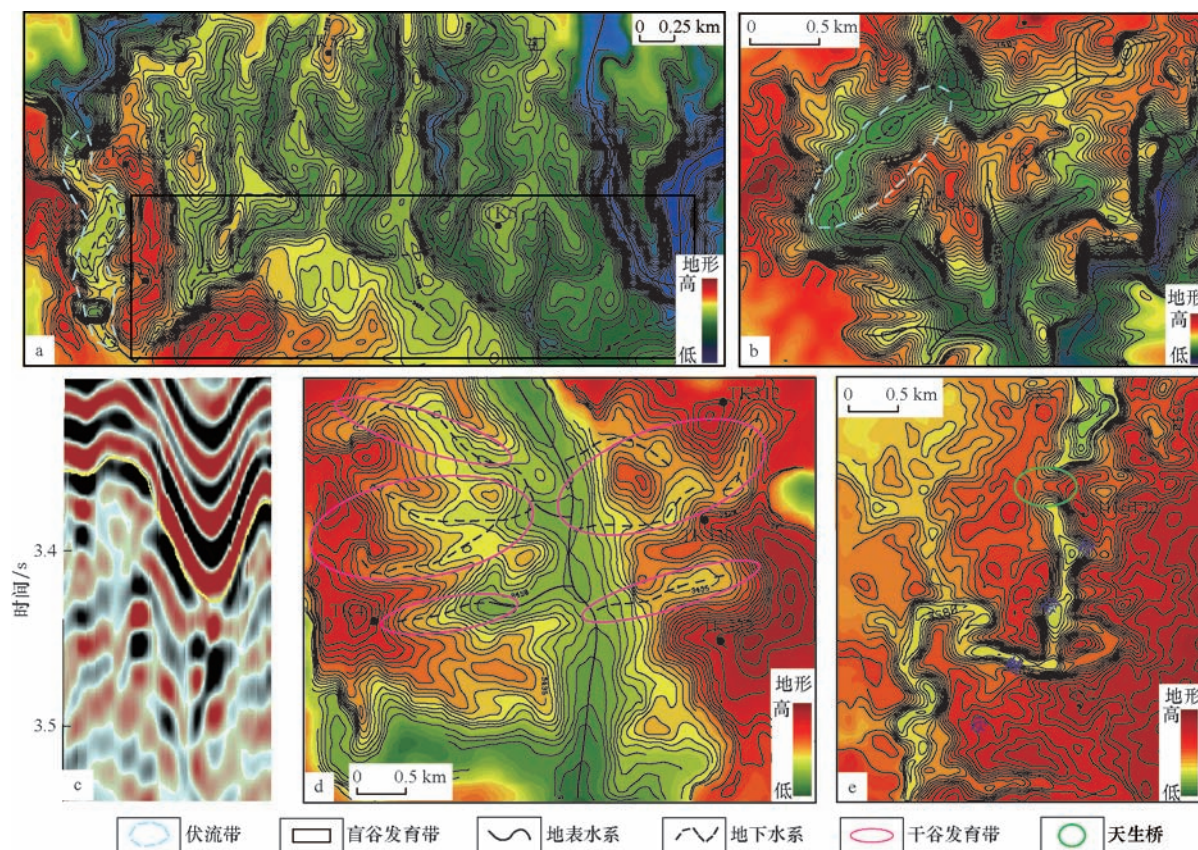


图 11 塔河油田东部地区岩溶古地貌特征

Fig. 11 Paleogeomorphic characteristics of karsts in the East part of Tahe oilfield

a. 盲谷; b. 伏流带; c. 河谷地震横剖面; d. 干谷; e. 天生桥

较严重,还有明显的“串珠状”反射特征,充分证明了此段伏流的存在。主体区除了部分主干深切水系外,几乎所有的地表支流都处于干涸状态(图 11d),在主干深切水系两侧分布着一些相对位置较高的干谷,干谷“悬挂”在沟谷两侧高点处,岩溶垂向作用强烈,向地下发展到河谷之下,水流沿干谷中的落水洞、裂缝等潜入地下,通过地下水系汇入主干水系,从而使地表支流呈现出无水干涸状态。此外,岩溶斜坡区地势较陡,有较大的水动力梯度,在地表水强烈下蚀作用和地下洞穴顶板坍塌共同的作用下,形成一大型岩溶峡谷,未垮塌洞顶的残留部分便成为天生桥(图 11e)。

3.2 西部地区岩溶古地貌特征

西部地区二级地貌单元整体处于岩溶盆地,地形较为开阔平坦,没有形成大型连续的分水岭,具有整体地形幅度较小的特点,绝大多数相对高度在 50m 以下。与主体区大型分水岭体系和丰富多样的地表、地下岩溶地貌形态相比,西部地区岩溶地貌主要表现为不连续的小型低幅度溶丘、溶峰个体(图 10b),落水洞、竖井等岩溶负地形欠发育,岩溶作用主要在地表进行,地貌分异作用不明显。

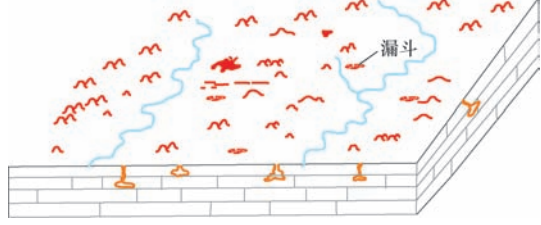
4 东部主体区、西部地区岩溶演化阶段划分

岩溶地貌的发育,是由上升的可溶性岩层组成的高地开始,经幼年期、青年期、壮年期和老年期,即完成一个喀斯特循环^[5,26]。将岩溶地貌的演化看作一个不断适应外界环境并在自身组织支配下发展演化的系统来研究,其发育演化过程中有阶段性、继承性和分带性^[27]。阶段性即在某一构造运动相适应的时期,经历岩溶作用,形成了不同的地貌类型组合。继承性是指不同时期岩溶可进行相互叠加改造。分带性主要表现在同一时期不同区域子系统随时间的进行,进入不同的演化阶段,呈现出不同的水文地貌特征组合,而在同一区域多样化地貌类型是由水系网络或地质构造等条件在空间上的差异和分布不均所引起。

由于海西早期的区域性构造抬升,使得塔河油田主体区中、下奥陶统逐渐暴露地表经历岩溶作用,此时西部地区仍处于海平面以下。主体区地表水系呈南北向汇流特征,南部地区为相对稳定的排泄基准面。后期多期次幕式构造抬升,使得东部主体区持续隆升,西部地区逐渐露出水面遭受剥蚀和岩溶作用,东、西部

表 1 塔河油田水文地貌特征及岩溶演化阶段划分

Table 1 Hydrogeomorphologic characteristics and evolution stages of Tahe oilfield

	地貌特征	水文特征	模式图	演化阶段
东部主体区	地面瓦解严重,以峰丛、溶丘等高幅差地貌为主,落水洞、竖井密集分布,干谷、盲谷、伏流、峡谷、天生桥等十分发育	地表发育树枝状水系,分支系统发育,纵剖面具有阶梯状特征,水系下切较深,垂向侵蚀作用强烈,可见袭夺、倒淌等水文地貌特征,地表水大量转入地下,形成完整的地下水系网络		壮年期
西部地区	低幅度岩溶垄岗和溶丘为主,石芽、溶沟较发育,地表刻蚀作用较弱,地貌相对平缓	地表水系发育,具有平原曲流河特征,水系下切浅,主要以侧向侵蚀溶蚀作用为主,地下水的运动为隙流,局部发育管流,尚未产生大型连续的地下水系网络		青年期

地区之间形成较大的地形幅差,岩溶排泄基准面也随之发生了变化,由早期的南向逐渐过渡到北西方向。排泄基准面的变化,打破了早期阶段流域间的相互平衡,产生了流域间、水系间的袭夺和倒淌等水文现象。同时,排泄基准面的降低加剧了水的下蚀和溯源侵蚀作用,地表水系垂向侵蚀作用强烈并不断向地下转化,地下水位骤降,地表水潜伏,形成大量伏流、盲谷,大量地表分支水系在后期逐渐演变为干谷,地下形成了大型连续树枝状水系网络,部分大型洞道后期顶板发生了垮塌而再次暴露地表。在地表水文网络和充分的水-岩相互作用下,形成了有一定高差的溶丘洼地、峰丛洼地和丘峰洼地等岩溶地貌类型,地表、地下岩溶地貌类型丰富多样。这些水文地貌特征充分说明了主体区岩溶作用经历较长一段的稳定期,建立了完整的地表岩溶流域水系网络以及具有综合性排驱功能的地下水系统,自上游到下游形成了稳定且广大的流域,地貌分异作用强烈,岩溶发育阶段处于“壮年期”(表 1)。

随着构造的不断抬升,西部地区大范围暴露地表。由于该区二级地貌单元位于岩溶盆地,排泄基准面接近地表附近,因此地表水系垂直深切侵蚀作用较弱,形成以侧蚀作用为主的宽、浅河谷,地表水系结构特征表现出平原化曲流结构特征,地形较为平缓,主要在地表发育,地下水的运动以隙流为主,局部发育管流,尚未产生大型连续的地下水系网络。地表无明显分水岭,地形幅差小,岩溶地貌类型没有主体区丰富,主要是水系侧蚀作用形成的低幅度岩溶垄岗和溶丘。西部地区水文地貌特征充分说明了该地区经历岩溶作用时间有限,地表、地下水文网络对地貌的溶蚀侵蚀作用较弱,水-岩相互作用时间短,水文地貌分异作用不明显,岩溶地貌发育演化时间较短,岩溶发育阶段处于“青年期”(表 1)。

5 结论

- 1) 塔河油田海西早期发育密集的地表水系网络,全区共识别出 12 条大型主干水系。东部主体区水系发育较成熟,西部地区水系发育较年轻。
- 2) 东部主体区发育大型连续的地下水系网络,地表水已大量转入地下。西部地区不发育大型连续地下水系,以孤立状为主。
- 3) 东部主体区位于岩溶高原地带,分水岭规模大,三级地貌单元表现为高幅差的峰丛洼地、溶丘洼地和丘峰洼地,地表水强烈的垂向侵蚀作用形成了一套以干谷、盲谷、伏流、峡谷和天生桥等为代表的特殊地貌组合,地貌分异作用明显。西部地区处于岩溶盆地,排泄基准面接近地表,地貌特征表现为地表水系侧向侵蚀溶蚀作用形成的一些低幅度岩溶垄岗和溶丘,地貌分异作用不明显。
- 4) 东部主体区岩溶发育阶段处于壮年期,西部地区岩溶发育阶段处于青年期。

参 考 文 献

[1] Ford D C. Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century[J]. Geological Society of America Special Papers, 2006, 404(3): 1-13.

[2] Ford D C, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Chichester, UK: John Wiley & Ltd, 2007: 321-395.

[3] Klimchouk A, Forti P, Cooper A. Gypsum karst of the World: A brief overview[J]. International Journal of Speleology, 1996, 25(3): 159-182.

[4] Davis W M. The geographical cycle[J]. The Geographical Journal, 1899, 14(5): 481-504.

[5] Cvijic J. Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst[J]. Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine,

- 1918,6(4):375-426.
- [6] Zhang Z J. Karst types in China[J]. *Geojournal*,1980,(4):541-570.
- [7] 朱学稳.峰林喀斯特的性质及其发育和演化的新思考(3)[J].*中国岩溶*,1991,10(3):171-182.
- Zhu Xuewen. New considerations on characteristics and evolution of fenglin karst(3)[J]. *Carsologica Sinica*,1991,10(3):171-182.
- [8] 宋林华.喀斯特地貌演化与喀斯特含水层特性[J].*地理研究*,1986,5(4):68-77.
- Song Linhua. Evolution of process of karst geomorphology and the property of karst aquifer [J]. *Geographical Research*,1986,5(4):68-77.
- [9] 邹成杰,何宇彬.喀斯特地貌发育的时空演化问题初讨[J].*中国岩溶*,1995,14(1):49-58.
- Zou Chenjie, He Yubin. Time-space evolution of karst landform development[J]. *Carsologica Sinica*,1995,14(1):49-58.
- [10] 杨明德.喀斯特流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,1988:58-75.
- Yang Mingde. Karst river basinlandform system[M]. Beijing: Geological Publishing House,1998:58-75.
- [11] Kaufmann G. Karst landscape evolution[J]. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*,2002,1(3):1-10.
- [12] 苗钱友,朱筱敏,李国斌,等.滨里海盆地M区块晚石炭世古地貌恢复与白云岩储层预测[J].*地球科学(中国地质大学学报)*,2014,39(7):871-879.
- Miao Qianyou, Zhu Xiaomin, Li Guobin, et al. Paleogeomorphology recovery and reservoir prediction of Upper Carboniferous in M Block, Pre-Caspian Basin[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*,2014,39(7):871-879.
- [13] 曹建文,夏日元,张庆玉.应用古地貌成因组合识别法恢复塔河油田主体区古岩溶地貌[J].*新疆石油地质*,2015,36(3):283-287.
- Cao Jianwen, Xia Riyuan, Zhang Qinyu. Application of paleogeomorphic genesis assembly identification method to recovery of paleokarst landform in major blocks of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*,2005,36(3):283-287.
- [14] 蔡忠贤,刘永立,段金宝.岩溶流域的水系变迁——以塔河油田6区西北部奥陶系古岩溶为例[J].*现代地质*,2009,28(1):31-34.
- Cai Zhongxian, Liu Yongli, Duan Jinbao. Transition of river system in karst basin—A case study on Ordovician palaeokarst in the northwest of Block 6, Tahe oilfield[J]. *Carsologica Sinica*,2009,28(1):31-34.
- [15] 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.
- [16] 邹亚锐,塔吉古丽,邢作云,等.塔里木新元古代—古生代沉积盆地演化[J].*地球科学(中国地质大学学报)*,2014,39(8):1200-1216.
- Zou Yarui, Tajiguli, Xin Zuoyun, et al. Evolution of sedimentary basins in Tarim during Neoproterozoic-Paleozoic [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*,2014,39(8):1200-1216.
- [17] 刘其.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层预测新进展[J].*西部探矿工程*,2011,23(6):70-72.
- Liu Qi. The new development of forecast for Ordovician carbonate reservoir in Tahe oil field[J]. *West-China Exploration Engineering*,2011,23(6):70-72.
- [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] 沈玉昌,龚国元.河流地貌学概论[M].北京:科学出版社,1986:31.
- Shen Yuchang, Gong Guoyuan. Introduction to river geomorphology [M]. Beijing: Science Press,1986:31.
- [20] Glock W S. The development of drainage systems: A synoptic view [J]. *Geographical Review*,1931,21(3):475-482.
- [21] 陆中臣,贾绍凤,黄克断,等.流域地貌系统[M].大连:大连出版社,1991:381.
- Lu Zhongzheng, Jia Shaofeng, Huang Keduan, et al. River basin landform system[M]. Dalian: Dalian Publishing House,1991:381.
- [22] Tuncer D, Ali S, Rob W, 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.
- [23] Yosuke N A, Keiji T. 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):59-75.
- [24] 刘永立,蔡忠贤.塔河油田四区奥陶系古岩溶流域的倒淌河及其成因研究[J].*现代地质*,2009,23(6):1121-1125.
- Liu Yongli, Cai Zhongxian. The inverted river and its origin in palaeokarst drainage basin of Ordovician in Block 4, Tahe oilfield[J]. *Geoscience*,2009,23(6):1121-1125.
- [25] Locks R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implication [J]. *AAPG Bulletin*,1999,83(11):1795-1834.
- [26] 任美镔,刘振中.岩溶学概论[M].北京:商务出版社,1983:181.
- Ren Meie, Liu Zhenzhong. Karst introduction[M]. Beijing: The Commercial Press,1983:181.
- [27] 王增银,沈继方,徐瑞春,等.鄂西清江流域岩溶地貌特征及演化[J].*地球科学(中国地质大学学报)*,1995,20(4):439-444.
- Wang Zhenyin, Shen Jifang, Xu Ruichun, et al. Karst landscapes and their evolution in reaches of the Qingjiang River, western Hubei[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*,1995,20(4):439-444.

(编辑 李 军)