

文章编号: 1671-1505(2024)06-1467-16 DOI: 10.7605/gdxb.2024.04.057

塔河油田西北部奥陶系古水系结构特征及演化*

汪彦^{1,2} 王诺宇^{3,4} 杨德彬^{1,2} 张恒^{3,4}
张娟^{1,2} 张长建^{1,2} 张晓^{1,2}

1 中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011

2 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011

3 油气勘探开发理论与技术湖北省重点实验室(中国地质大学(武汉)), 湖北武汉 430074

4 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要 塔里木盆地塔河油田西北部中下奥陶统发育深切的地表水系结构, 对水系两侧岩溶缝洞的发育影响显著, 因此, 对水系结构的定量描述及其演化模式的研究至关重要。基于三维地震资料, 通过地震属性提取技术, 对古岩溶台面和古岩溶地表水系进行了识别。同时, 对水系的平面和垂向形态学结构参数进行了量化表征, 据此探讨了古岩溶地表水系的形成与演化模式, 剖析了水系演化与古岩溶缝洞发育的关系。研究结果表明: (1) 塔河油田西北部自东向西发育 3 个岩溶台面和一个深切曲峡型地表流域结构。该流域的主干水系南北向汇流、分支水系东西向汇流, 呈不对称分布。(2) 水系单河曲弯曲率均大于 1.5, 超过了定义蛇曲的弯曲率临界值, 具有典型的蛇曲特征。东西向河曲带弯曲率为 2.42, 南北向河曲带弯曲率为 1.78。(3) 东西向水系形态以单一“V”字形为主, 南北向水系具有复合“V”字形, 水系下切深度可达 100~200 m。自东向西 3 个岩溶台面中水系的下切深度逐渐加大, 水系宽深比平均值分别为 4.06、3.52、3.03。(4) 研究区古岩溶地表水系经历了自由曲流和深切曲流 2 个阶段, 分别反映了水系的侧向侵蚀和垂向侵蚀作用过程。其中, 水系的垂向侵蚀是逐步发生的, 与 3 个岩溶台面的逐级抬升相适应。(5) 深切曲流是区域性的最低排泄基准面, 控制了河流两侧大型岩溶暗河的发育。每个岩溶台面具备独立的水循环结构, 岩溶台面的逐级抬升促进了水系的差异演化, 进而控制了岩溶暗河的规模和类型的差异性。对研究区古水系结构及其演化的认识对于古岩溶缝洞储集空间发育特征与分布规律的研究提供了重要的参考依据。

关键词 古水系 自由曲流 深切曲流 缝洞型储集层 中下奥陶统 塔河油田

第一作者简介 汪彦, 男, 1976 年生, 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司高级工程师, 主要从事碳酸盐岩缝洞型油藏描述和岩溶地质研究。E-mail: wangyan19760902@163.com。

通讯作者简介 张恒, 男, 1988 年生, 中国地质大学(武汉)副教授, 主要从事岩溶地质、碳酸盐岩储层地质学教学与科研。E-mail: cughzhang@163.com。

中图分类号: P534.42 文献标志码: A

Characteristics and evolution mode of the Ordovician paleodrainage system architecture in northwestern Tahe oilfield, Tarim Basin, China

WANG Yan^{1,2} WANG Nuoyu^{3,4} YANG Debin^{1,2} ZHANG Heng^{3,4}

* 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(No. XDA14010302)和中国石化西北油田分公司科研项目(编号: P23034, KY2021-S-094)联合资助。[Co-funded by the Chinese Academy of Sciences Strategic Leading Science and Technology Project (Class A) (No. XDA14010302) and Sinopec Northwest Oilfield Company Scientific Research Project (Nos. P23034, KY2021-S-094)]

收稿日期: 2023-08-10 改回日期: 2023-11-27

ZHANG Juan^{1,2} ZHANG Changjian^{1,2} ZHANG Xiao^{1,2}

1 Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-Vuggy Reservoirs, CNPC, Urumqi 830011, China

2 SINOPEC Northwest Company of China Petroleum and Chemical Corporation, Urumqi 830011, China

3 Hubei Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Exploration and Development Theory and Technology
(China University of Geosciences (Wuhan)), Wuhan 430074, China

4 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences (Wuhan),
Ministry of Education, Wuhan 430074, China

Abstract The deep surface water system structure developed in the Middle and Lower Ordovician in the northwest of Tahe Oilfield has a significant impact on the development of karst fractures and caves on both sides of the water system. Therefore, it is crucial to quantitatively describe the water system structure and conduct researches on its evolution mode. Based on three-dimensional seismic data, seismic attribute extraction technology was utilized to identify paleokarst platform and paleokarst surface water systems. In addition, the planar and vertical morphologic structure parameters of the surface drainage system were quantitatively characterized. Consequently, the formation and evolution patterns of paleokarst surface water systems was explored, and the relationship between surface water system evolution and paleokarst cave-fissure development was analyzed as well. The research results indicate that: (1) Three paleokarst platform and a deep meandering gorge type surface watershed structure are developed from east to west in the northwest of Tahe Oilfield. The main water system in this basin flows in a north-south direction, while the branch water system flows in an east-west direction, exhibiting an asymmetric distribution pattern. (2) The curvature rate of a single river bend in the water system is greater than 1.5, exceeding the critical value for defining the curvature rate of a meander bend, and featuring typical meander characteristics. The curvature rate of the east-west meander belt is 2.42, and the curvature rate of the north-south meander belt is 1.78. (3) The east-west water system mainly has a single V shape, while the north-south water system has a composite V shape. The incision depth of the water system in the three paleokarst platform gradually deepens from east to west, and the average width to depth ratios of the water system are 4.06, 3.52, and 3.03, respectively. (4) The paleokarst surface water system in the study area experienced two stages: free meandering and entrenched meandering, reflecting the lateral and vertical erosion processes of the water system, respectively. Among them, vertical erosion of the water system occurs gradually, adapting to the gradual uplift of the three paleokarst platform. (5) Deep meandering is the lowest drainage reference level in a region, controlling the development of large karst underground rivers on both sides of the river. Each karst platform has an independent water circulation structure, and the gradual uplift of the karst platform promotes the differential evolution of the water system, thereby controlling the differences in the scale and type of karst underground rivers. The understanding of the paleokarst water system structure and its evolution in the research area provides important reference basis for the study of the development characteristics and distribution patterns of paleokarst fracture cave storage space.

Key words paleodrainage system, free meander, entrenched meander, fractured-vuggy reservoirs, Middle-Lower Ordovician, Tahe oilfield

About the first author WANG Yan, born in 1976, a senior engineer at Sinopec Northwest Oilfield Company, is mainly engaged in the characterization of fractured and vuggy carbonate reservoirs and the research on karst geology. E-mail: wangyan19760902@163.com.

About the corresponding author ZHANG Heng, born in 1988, an associate professor at China University of Geosciences (Wuhan), is mainly engaged in teaching and research on karst geology and carbonate reservoir geology. E-mail: cughzhang@163.com.

1 概述

迄今为止，国内外已经发现了许多与古岩溶有关的大型碳酸盐岩油气田（张陈，2017；张宇等，2022）。新一轮油气资源评价指出中国陆上海相碳酸盐岩中石油储量大约为 340×10^8 t，天然气储量大约为 24.3×10^{12} m³（马永生等，2017）。截至 2020 年底，已探明的石油地质储量超过了 30×10^8 t，大约 80% 的石油储量储存在塔里木盆地奥陶系古岩溶缝洞型碳酸盐岩储集层中（郑松青等，2022）。然而，古岩溶缝洞型储集层种类多（鲁新便，2004；邹明倬，2020），缝洞型储集空间的结构描述一直是公认的难题。岩溶地区的水系条件对于储集体的发育会造成显著影响，因此，从岩溶水文学的角度开展岩溶地质条件的研究，对于理解和认识缝洞型岩溶储集层具有重要的理论意义（杨明德，1998；李正民等，2022）。

现代岩溶研究领域往往基于 DEM 高程数据开展对水系结构的识别与刻画工作（王金凤等，2015；范威等，2021；许睿等，2021）。然而将 DEM 高程数据运用到古岩溶水系的刻画当中还较为困难（吕艳萍等，2021），但是目前在古岩溶水系结构的研究方面依然取得了重要的进展，主要体现在：（1）建立起了相对有效的古岩溶地表、地下水系结构的刻画与识别方法（张庆玉，2018；夏永涛等，2019；聂国权等，2020）；（2）初步构建起了古喀斯特流域的基本汇流结构，包括对称性、不对称性等类型（李源，2016）；（3）阐述了不同水系结构控制下的岩溶缝洞发育模式，包括岩溶台原区一岩溶斜坡区地表—地下双重水系型、岩溶盆地地表水系型、以及特殊岩溶地貌演化时期的无地表水系型等（李源等，2016a；蔡忠贤等，2020）。

塔河油田奥陶系是中国最为典型的古喀斯特发育地区，也因此成为古岩溶地表水系结构研究的天然实验室。前期围绕塔河油田东部、西部地区的水系开展了广泛的研究（刘永立和蔡忠贤，2009；蔡忠贤等，2009；李源等，2016b；张长建等，2022a），初步取得了以下认识：（1）东部水系结构整体呈现出对称树枝状，主干水系与分支水系以锐角相交南北向汇流，部分主干水系呈倒淌河特征、伴生倒钩式水系。（2）西部地表主干水系自北向南汇流，蛇曲特征明显，水系横剖面形态呈现出

“V”字形且向西下切深度逐渐减小，宽深比逐渐增大，分支水系自东向西流动、水系不对称，东侧水系明显多于西侧。然而前人往往只注重于古水系的刻画与定性描述，缺乏对水系的定量化表征以及对水系形成与演化的系统认识。

本研究基于该区最新采集的三维地震数据，通过地震属性提取等手段，在水系结构重建的基础上，定量地描述了水系的几何形态特征，并建立了水系结构发育与演化的过程，剖析了水系演化与古岩溶缝洞发育关系，从而为岩溶缝洞型储集层的研究奠定了基础。

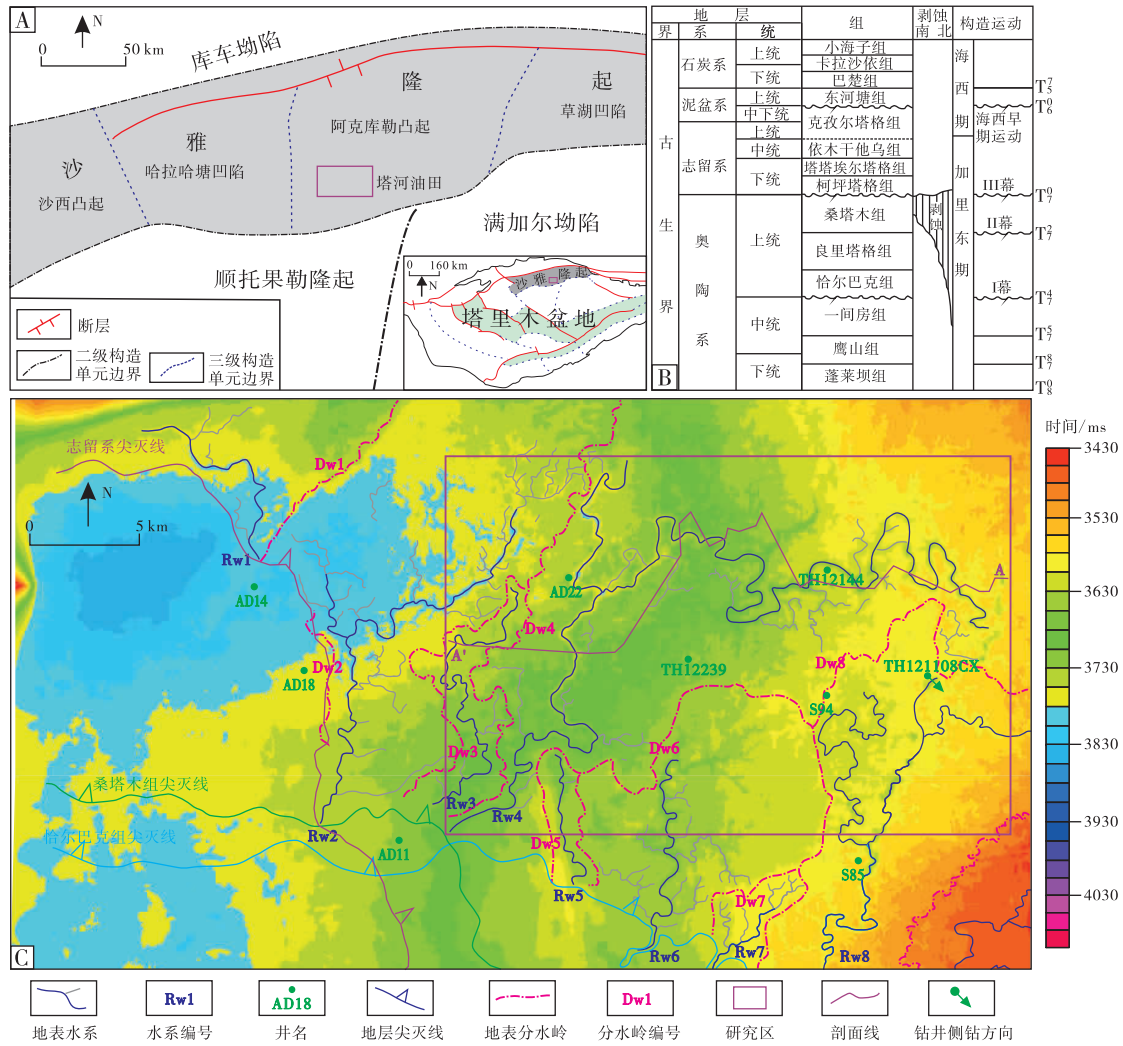
2 地质概况

塔里木盆地是中国最大的沉积盆地，塔河油田位于沙雅隆起阿克库勒凸起的偏西南方向，塔河油田东西向分别为草湖凹陷和哈拉哈塘凹陷，南部紧靠顺托果勒隆起和满加尔凹陷（图 1-A）。

研究区位于塔河西北部斜坡区，该区奥陶系为碳酸盐岩台地相，沉积了厚层碳酸盐岩地层（Ruan *et al.*, 2013），自下而上包括蓬莱坝组、鹰山组、一间房组、恰尔巴克组、良里塔格组和桑塔木组（图 1-B）。现今构造呈现东高西低的格局（图 1-C）。

研究区经历了加里东期和海西期等多次构造运动。加里东中期构造运动可以分为 3 期（Wang, 2014）。第 1 期构造运动导致一间房组和恰尔巴克组之间广泛形成了不整合面。第 2 期和第 3 期构造运动导致桑塔木组和良里塔格组岩溶风化壳的形成（Zhang *et al.*, 2023）。海西早期塔河地区挤压应力强烈，奥陶系持续隆升。区域性大规模的构造抬升形成了长期暴露的环境，奥陶系、志留系、泥盆系以及石炭系均遭受了不同程度的剥蚀作用（夏永涛等，2019）。同时，塔河油田中下奥陶统一间房组和鹰山组形成了大型岩溶缝洞型储集层（张希明等，2007；刘红岐等，2011；李源等，2016a）。

本研究收集并处理了研究区 425 km^2 三维地震数据。通过地震属性提取技术恢复出研究区岩溶古水系，利用 TH121108CX 侧钻井资料对水系恢复的正确性进行验证，进而对水系的长度、深度、弯曲率和封闭率等形态学参数进行计算。使用 Image J 软件，开展了主干水系分形维数的定量计算。通过地层上超终止法和水系侵蚀阶地法对岩溶台面进行



A—塔河油田地理位置；B—塔河油田研究区地层简表；C—塔河油田西北部位置及构造图

图 1 塔河油田西北部位置及地层简表

Fig. 1 Location of northwestern Tahe oilfield and stratigraphic table

识别。水系的定量化表征结果、不同期次的构造古地貌演化和发育的多级岩溶台面证实了研究区水系演化的多阶段性。

3 岩溶台面与岩溶古水系的识别

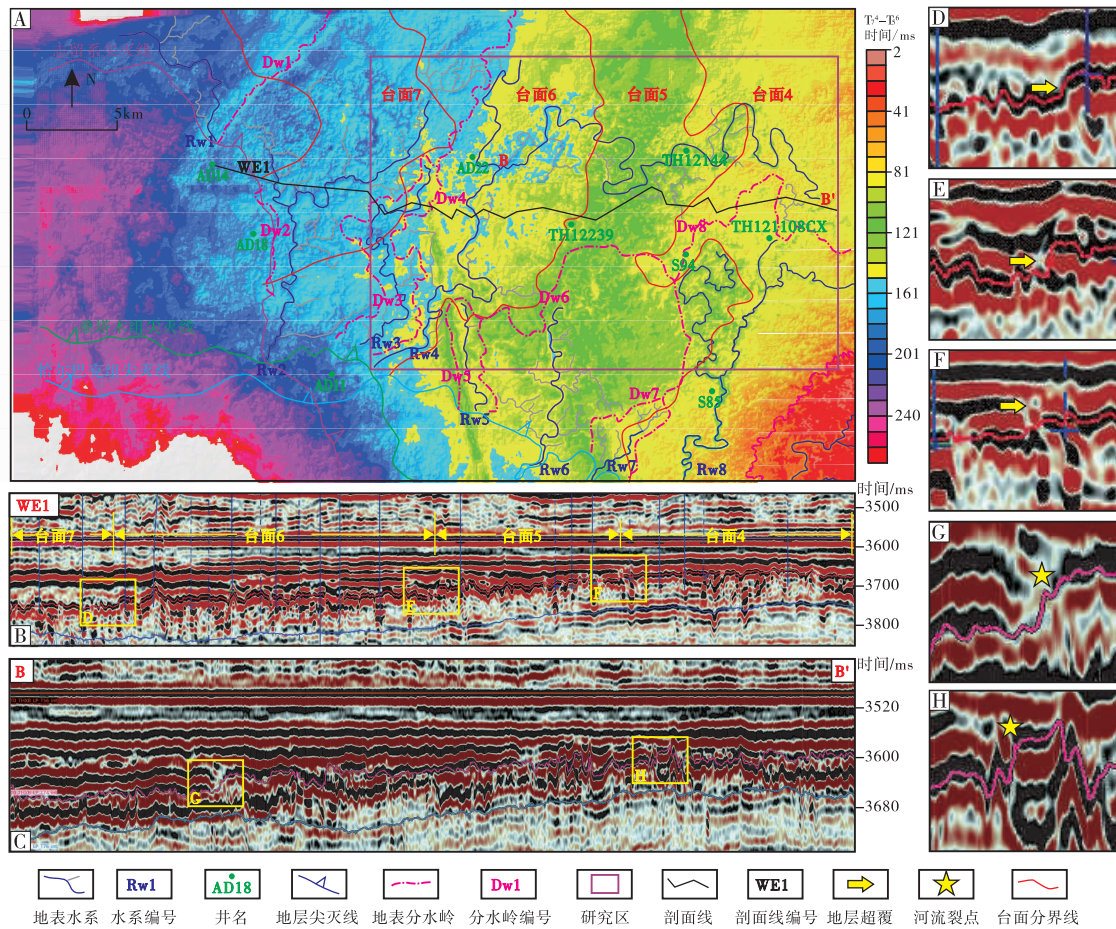
3.1 岩溶台面识别

海西早期的古地貌图显示，塔河西部地区地貌东高西低且呈现出阶梯状(图 2-A)。李源和蔡忠贤(2016)观察到这一现象并首次在塔河东部主体区识别出了 4 个岩溶台面。岩溶台面的识别方法包括水系汇流点法、地层上超终止法和水系侵蚀阶地法(李源和蔡忠贤, 2016)。地层超覆现象与河床陡降段(裂点)可以作为台面划分的显著标志。基

于塔河油田西北部东西向骨架对比剖面，通过上超终止点标定，以岩溶地貌为约束，在研究区共识别出了 3 个岩溶台面(图 2-A)。以 WE1 剖面为例(图 2-B)，石炭系有 3 处发生超覆(图 2-D, 2-E, 2-F)。东西向水系纵剖面上河床有 2 处明显陡降段(图 2-C, 2-G, 2-H)，说明研究区东西向水系跨越了 3 个岩溶台面，分别为台面 4、台面 5 和台面 6。

3.2 水系刻画方法

目前对于古岩溶地表水系的识别方法已经多有文献报道，主要包括趋势面分析、RGB 混频分色技术、精细相干属性、振幅属性以及倾角曲率属性等(鲁新便等, 2014; 郭川等, 2016; 李源等,



A—海西早期古地貌图；B—WE1 原始地震剖面；C—东西向水系原始地震剖面；D—WE1 第 1 处地层超覆；E—WE1 第 2 处地层超覆；F—WE1 第 3 处地层超覆；G—东西向水系第 1 处河流裂点；H—东西向水系第 2 处河流裂点

图 2 塔河油田海西早期古地貌图、东西向地震剖面与东西向河流纵剖面

Fig. 2 Early Hercynian paleogeomorphic map, east-west seismic profile, and east-west river longitudinal profile of Tahe oilfield

2016b)。不同方法对于不同背景下形成的水系所识别出的结果具有一定差异性。

本次研究通过提取塔河油田中下奥陶统风化壳趋势面图(图 3-A)、中下奥陶统顶部倾角曲率属性(图 3-B)、精细相干属性(图 3-C)和岩溶古地貌(图 3-D)对研究区岩溶古水系进行了重建。趋势面是在层位数据解释的基础之上对层位进行平滑处理,得到一个平滑趋势面,将原层位与平滑趋势面层位相减,连续的负地形代表岩溶古水系。曲率属性对于构造变化较为敏感,可以识别出较小的褶皱、凸起特征。向斜核部为最大负曲率处,沿不整合面做瞬时切片,最大负曲率值所构成的连续网络即是地表水系。精细相干属性是通过不整合面上的差异点对水系进行刻画。当不整合面上存在河道时,在相邻地震道之间会产生差异性。精细相干属

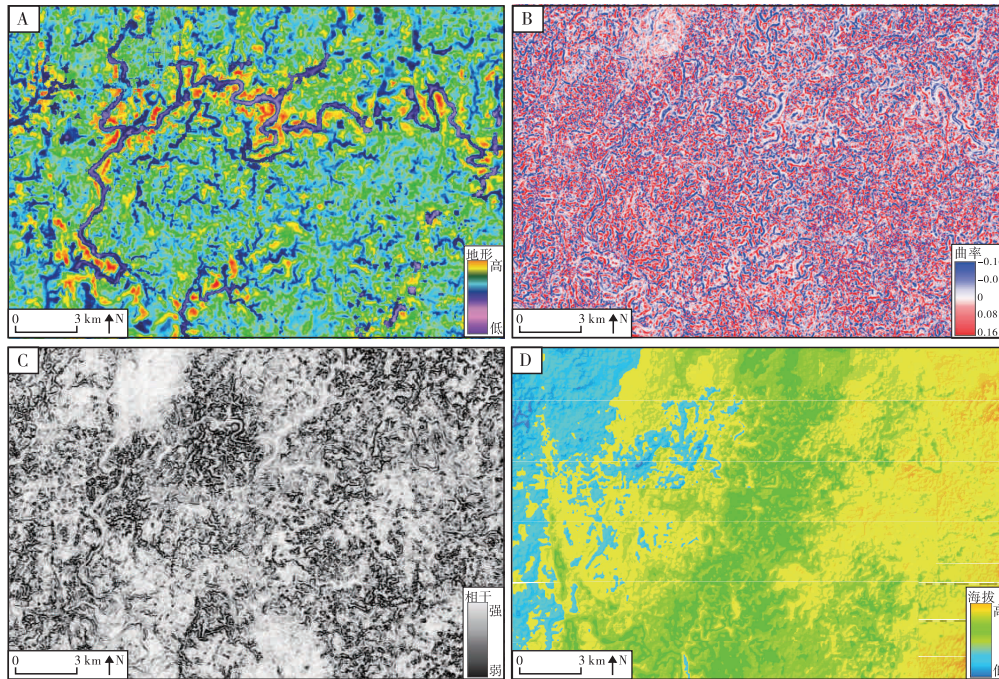
性可以追踪出这些差异点的平面几何形态,从而将河道刻画出来。古地貌控制着水系的展布格局。地层构造抬升、挤压变形对于河道这种微地貌影响很小,因此地表河道在地貌上保存较为完整(刘伟方等, 2013; 李源, 2016)。

主干水系在趋势面中呈现出紫色或深蓝色,分支水系呈现出浅蓝色。其中主干水系在所有属性图中均较为清楚,分支水系主要是依据趋势面和倾角曲率属性进行刻画。

3.3 水系刻画的钻井验证

TH121108CX 井是位于主干水系旁的一口侧钻井,侧钻方向为东南向,水平侧钻距离为 532 m(图 1-C),为水系结构的验证提供了重要的参考资料。

TH121108CX 井资料显示该井出现了地层重



A—塔河油田西北部趋势面图；B—塔河油田西北部倾角曲率属性；C—塔河油田西北部精细相干属性；D—塔河油田西北部古地貌图

图 3 塔河油田西北部古岩溶地表水系刻画方法

Fig. 3 Characterization method of paleokarst surface water system in northwestern Tahe oilfield

复现象(图 4-A)。T₄ 在该处的垂直深度为 5847 m, 钻井侧钻点为 5780 m。地层重复的原因是因为钻井在侧钻过程中首先从上覆巴楚组进入鹰山组, 然后穿过其地表 V 型河道, 最终再次进入鹰山组(图 4-B)。V 型河道中的沉积物主要是奥陶系上覆地层的泥岩和含砾泥岩(图 4-A)。该井地层重复现象与沉积物特征说明通过上述方法所刻画出的地表水系较为准确。

3.4 水系刻画结果

研究区发育 3 个大型地表流域结构, 自西向东分别为 Rw4、Rw6 和 Rw8。Rw4 呈北东—南西向汇流, Rw6 和 Rw8 呈南北向汇流。

其中, Rw4 地表流域面积最大、汇水量最多, 主干水系南北向汇流为主, 汇聚了来自东西向分支水系的全部汇水量, 分支水系东西向汇流为主, 控制了南北向汇流的三级分支系统。主干水系东侧分支水系明显较为密集, 因此, Rw4 地表流域呈现出不对称网络结构, 且无论是东西向分支水系还是南北向主干水系都展现出了明显的蛇曲特征(图 5)。

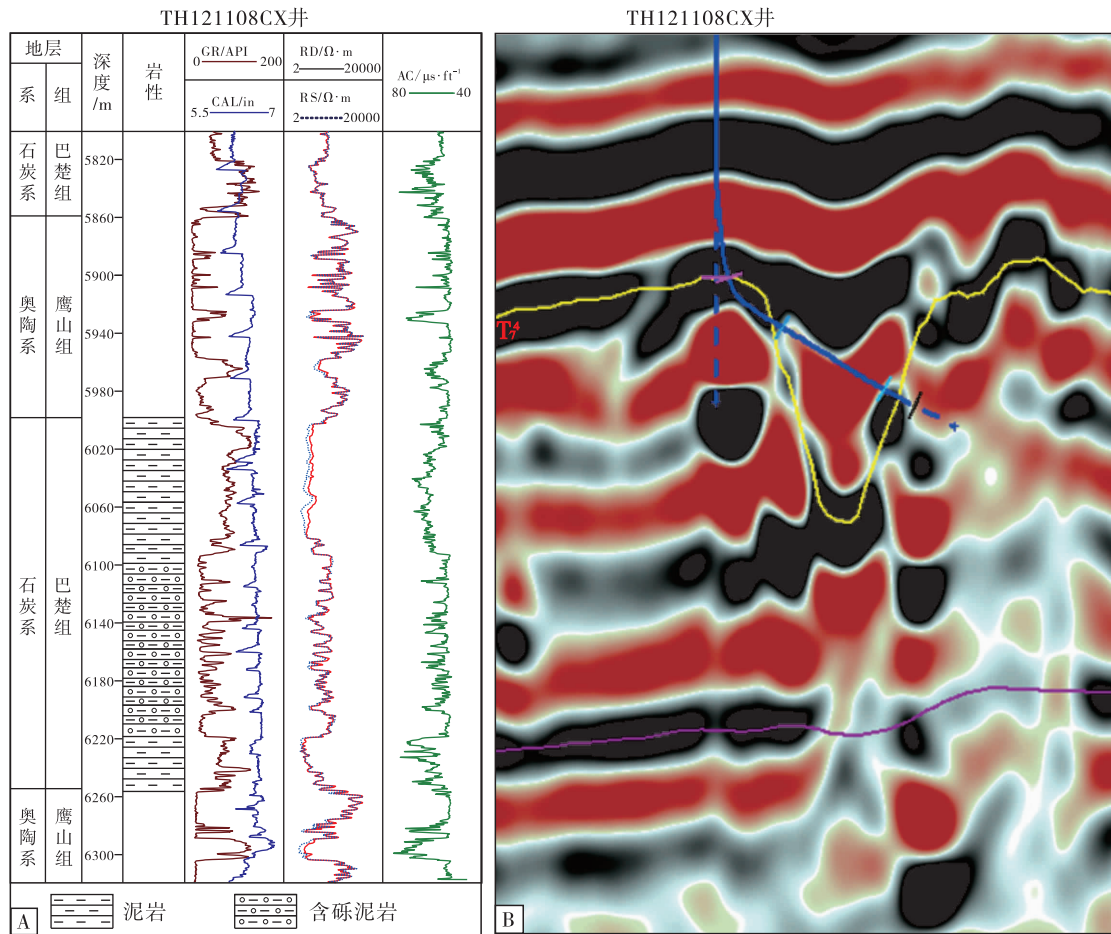
4 岩溶古水系结构定量化表征

4.1 水系的蛇曲特征

4.1.1 蛇曲形态学特征

本次研究从 Rw4 东西向分支水系中划分出 15 个单一河曲, 编号为 D1-D15, 南北向主干水系中划分出 12 个单一河曲, 编号为 N1-N12(图 5)。从平面几何形态学角度可以将单一河曲分为 U 型、V 型和 Ω 型, 其定义是作一条垂直于河曲轴长的线段, 从曲流顶部沿着河曲轴长向曲流颈方向移动, 若该线段一直增大则为 V 型河曲, 若线段先增大后变小则为 Ω 型河曲, 若线段先增大后不变则为 U 型河曲(赵鑫, 2019)。

在 Rw4 东西向分支水系中, D2、D7、D10、D11、D12 与 D13 属于 Ω 型河曲, D1、D6、D8 属于 U 型河曲, 其余可以归结为 V 型河曲(图 6-A)。其中在 V 型河曲中, D9 属于较为宽缓的 V 型河曲, 其形态介于 V 型与 U 型之间。此外, 南北向主干水系所划分出的 12 个河曲同样具有这 3 种形态特征, N2、N7、N10 属于 U 型河曲, N6、N11、N12 属于 Ω 型河曲, 其余为 V 型河曲(图 6-B)。



A—TH121108CX 井测井曲线；B—TH121108CX 井轨迹

图 4 塔河油田西北部 TH121108CX 井测井曲线与井轨迹

Fig. 4 Logging curves and well trajectory of Well TH121108CX in northwestern Tahe oilfield

4.1.2 蛇曲表征参数

河曲表征参数包括单一河曲参数和河曲带参数 (张斌等, 2007)。单一河曲参数包括 L (曲流颈长)、 S (水系长)、 C (弯曲率)、 e (封闭率)、 M (河曲轴长) 等。水系长 S 代表单一河曲的长度, 曲流颈长 L 为单个河曲颈部两侧间的宽度, 弯曲率可以表示河曲的弯曲程度, 在数值上等于水系长 S 与曲流颈长 L 的比值。河曲轴长 M 为曲流颈中点到河曲顶点的距离, 能够反映河曲侧向摆动的幅度。封闭率 e 同样也可以表示河曲的弯曲程度, 封闭率越接近于 1, 则河曲的弯曲程度越大, 封闭率等于 1 时, 说明曲流颈被切穿, 河曲已经发生了截弯取直。弯曲率与封闭率的计算公式如下:

$$C = \frac{S}{L}$$

$$e = \frac{S}{(S + L)} = \frac{C}{(C + 1)}$$

河曲带参数包括水系长 S 、河曲带轴长 L 、弯曲率 C 、振幅 W 、波长 λ 以及分形维数 D 。振幅 W 也可以将其称之为河曲带宽度, 波长 λ 表示河曲带中 2 个曲流波峰之间的距离。通常用河曲带振幅与波长 2 个参数的组合来表示河曲带弯曲程度, 若波长 λ 为定值, 振幅 W 越大或者振幅 W 为定值, 波长越小则表示河曲带越弯曲。分形维数 D 是河流弯曲度的另一种参数表征。曲流带弯曲度越高, 形态越复杂, 则分形维数值就越大 (范勇, 2013)。

本研究基于盒维数法对 2 条曲流带的分形维数进行计算。盒维数法基本原理是用正方形网格覆盖河曲带时, 会得到包含河曲带片段的正方形数目。当正方形边长 e 不断的变化时 ($e_1, e_2, e_3 \dots$), 会得到一组包含河流片段的网格数目 ($N(e_1), N(e_2), N(e_3) \dots$)。以点 ($\lg e, \lg N(e)$) 为坐

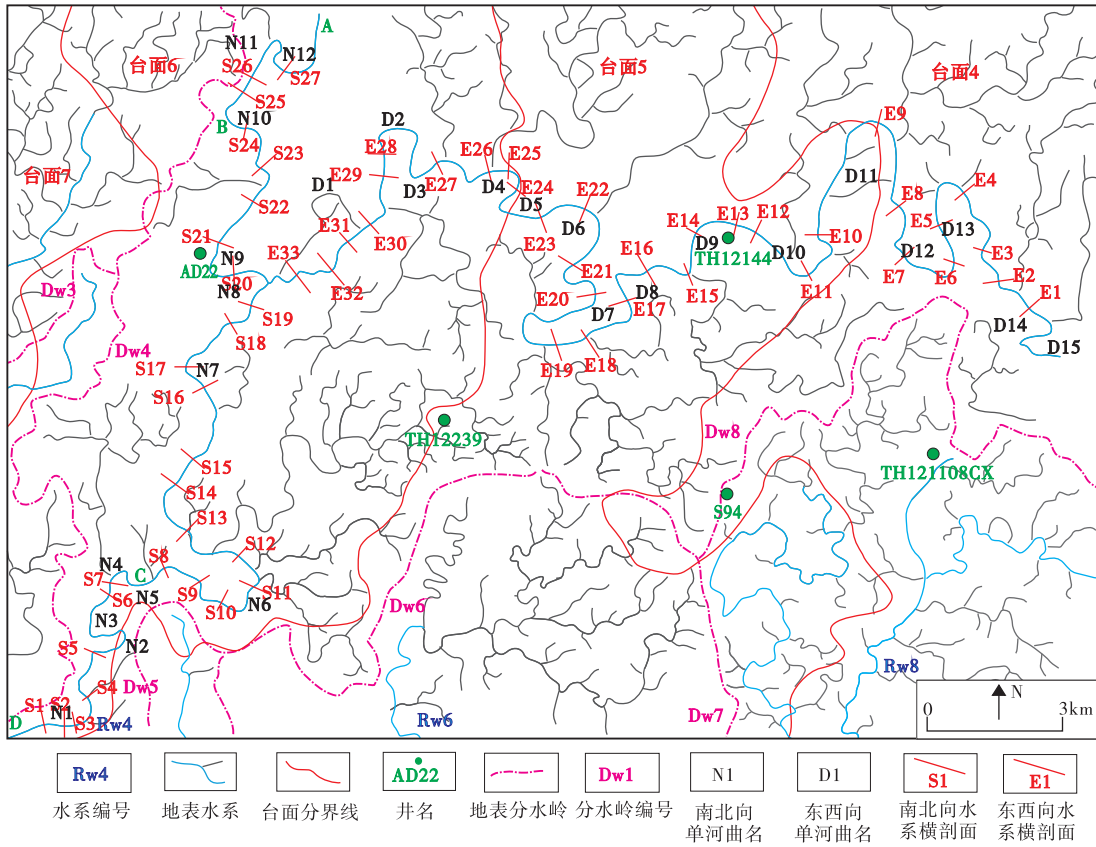
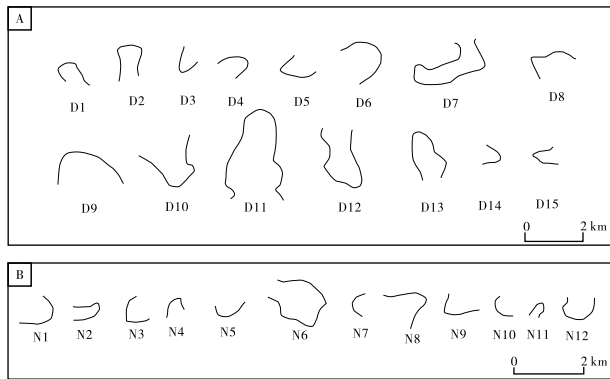


图 5 塔河油田西北部古岩溶地表水系平面分布

Fig. 5 Plane distribution of paleokarst surface water system in northwestern Tahe oilfield



A—Rw4 东西向水系单河曲形态；B—Rw4 南北向水系单河曲形态

图 6 塔河油田西北部 Rw4 水系单河曲形态

Fig. 6 Single meander pattern of Rw4 river system in northwestern Tahe oilfield

标作双对数图，用最小二乘法可以拟合一条直线：

$$\lg N(e) = A - D \lg e$$

斜率 D 即为河曲带的分形维数。

4.1.3 曲流河表征结果

选用水系长 S 、曲流颈长 L 、弯曲率 C 和封闭

率 e 对 Rw4 水系单河曲参数进行计算(表 1)，其中东西向水系的单河曲弯曲率最小值为 1.65，最大值为 13.91，平均值为 4.14，南北向主干水系的单河曲弯曲率最小值为 1.79，最大值为 9.74，平均值为 3.87。沈玉昌和龚国元(1986) 根据弯曲率大小，将弯曲率大于 1.5 的河曲称之为蛇曲，小于 1.5 的河曲称之为一般弯曲。从 Rw4 水系所划分出的单一河曲中，其弯曲率的最小值均超过了定义蛇曲的弯曲率临界值。且东西向与南北向个别河曲封闭率已经超过了 0.9，几乎处于完全封闭的状态，因此可以认为 Rw4 水系中的单一河曲具有典型的蛇曲特征。

对 Rw4 水系长、河曲轴长、弯曲率、振幅、波长(表 2) 等河曲带参数进行计算，东西向河曲带弯曲率为 2.42，波长为 1.69 km，振幅为 0.76~3.24 km，南北向河曲带弯曲率为 1.78，波长为 2.68 km，振幅为 0.53~2.70 km。在张斌等(2007) 统计的国内外典型的蜿蜒性河曲带参数中，嘉陵江苍溪河曲带弯曲率为 2.40，Seine 河

表 1 塔河油田西北部 Rw4 东西向与南北向单河曲参数

Table 1 Rw4 east-west and north-south single meander parameters in northwestern Tahe oilfield

河曲编号	水系长 S/km	曲流颈轴长 L/km	弯曲率 <i>C</i>	封闭率 <i>e</i>
D1	2.09	0.73	2.86	0.74
D2	2.99	0.59	5.07	0.84
D3	1.67	0.57	2.93	0.75
D4	1.68	0.71	2.79	0.74
D5	1.96	0.86	2.28	0.70
D6	2.81	1.18	2.38	0.70
D7	6.12	0.44	13.91	0.93
D8	3.05	1.32	2.31	0.70
D9	3.61	2.19	1.65	0.62
D10	3.32	1.45	2.29	0.70
D11	7.18	1.74	4.13	0.80
D12	4.66	0.93	5.01	0.83
D13	4.12	0.50	8.24	0.89
D14	1.36	0.53	2.57	0.72
D15	1.49	0.40	3.73	0.79
N1	1.70	0.86	1.97	0.66
N2	1.78	0.22	8.09	0.88
N3	1.51	0.61	2.48	0.71
N4	1.10	0.40	2.75	0.73
N5	1.20	0.67	1.79	0.64
N6	4.19	0.43	9.74	0.91
N7	0.99	0.52	1.90	0.66
N8	2.40	1.03	2.33	0.70
N9	1.58	0.82	1.93	0.66
N10	0.98	0.48	2.04	0.67
N11	1.03	0.12	8.58	0.90
N12	1.86	0.64	2.91	0.74

表 2 塔河油田西北部 Rw4 东西向与南北向河曲带参数

Table 2 Rw4 east-west and north-south meandering belt parameters in northwestern Tahe oilfield

名称	水系长 S/km	河曲轴长 L/km	弯曲率 <i>C</i>	振幅 W/km	波长 λ /km
东西向河曲带	43.09	17.78	2.42	0.76~3.24	1.69
南北向河曲带	33.48	18.8	1.78	0.53~2.70	2.68

Rouen 河曲带弯曲率为 2.19, Shenandoah 河南支河曲带弯曲率为 1.98。Rw4 河曲带弯曲率与国内外典型的蜿蜒性河曲带弯曲率差距较小,甚至东西向河曲带弯曲率超过了国内外部分典型的蜿蜒性河曲带,因此 Rw4 水系完全符合蜿蜒性河曲带标准。

表 3 塔河油田西北部 Rw4 东西向与南北向河曲带分形维数

Table 3 Rw4 east-west and north-south meandering belt fractal dimension in northwestern Tahe oilfield

名称	分形维数 <i>D</i>	相关系数
直线	1	
东西向河曲带	1.340	0.9960
南北向河曲带	1.324	0.9958

除上述参数外,分形维数 *D* 是河流弯曲度的另一种参数表征,一般认为直线的分形维数是 1,河曲带分形维数越大表明河曲带越复杂。根据盒维数法计算得到东西向河曲带分形维数为 1.340,南北向河曲带分形维数为 1.324 (表 3)。通过 2 条河曲带参数对比,东西向水系的弯曲率与分形维数均高于南北向水系,东西向水系相较于南北向水系蜿蜒性河曲特征更加显著。

4.2 水系的下切特征

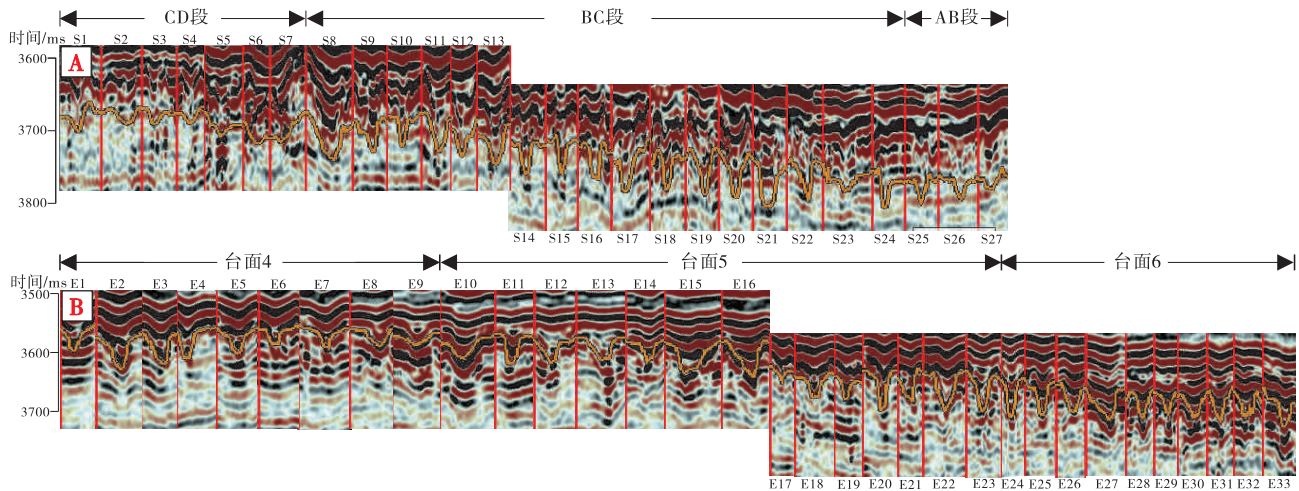
4.2.1 水系下切的形态学特征

为了研究 Rw4 水系的下切特征,分别对其东西向分支水系和南北向主干水系的横剖面进行追踪与对比。其中东西向分支水系共构建了 33 条横剖面,并按照台面界线将其划分为 3 个区段,南北向主干水系构建 27 条横剖面,并根据下切形态和程度划分为 3 个区段,自北向南分别为 AB 段、BC 段和 CD 段(图 7)。

如图 7 所示,自东向西,台面 4 到台面 6 的水系下切形态整体上以 V 型为主。其中,台面 6 的水系下切深度较为稳定,变化不大,整体下切较深。台面 5 水系下切深度不均匀,变化较大,但是最大与最小的水系下切深度均位于台面 5 中。台面 4 从 E1 到 E9 水系下切深度逐渐减小,且相较于其他台面,其下切深度最小。南北向 AB 与 CD 段水系呈现出单一 V 字型并且 CD 段的水系形态相对较为宽缓,而 BC 段水系形态则呈现出复合 V 字型。从下切深度来看,BC 段水系下切深度最大,明显高于 AB 段和 CD 段,CD 段水系下切深度最小。

4.2.2 水系下切的表征参数

通过垂直水系方向切取了横剖面从而对水系的宽度和深度进行统计,其中 E1-E9 号水系横剖面位于台面 4 中,其最大深度为 169.46 m,最小深度仅为 54.82 m。台面 5 中,由于水系较为曲折且台面相对较宽,因此切取的横剖面数量较多,包含



A—Rw4 南北向水系形态；B—Rw4 东西向水系形态

图 7 塔河油田西北部 Rw4 南北向与东西向水系横剖面所对应的水系形态

Fig. 7 Water system morphology corresponding to the north-south and east-west water systems cross sections of Rw4 in northwestern Tahe oilfield

E10—E23 共 14 条横剖面，其水系最大深度为 209.89 m，最小深度为 34.95 m。台面 6 包含 E24—E33 共 10 条横剖面，该台面水系最大深度为 193.82 m，最小深度为 114.47 m（表 4）。

在南北向 3 段水系中，S1—S7 号水系横剖面位于 CD 段，该段水系最大下切深度为 67.66 m，最小下切深度为 20.90 m。BC 段中包含了 S8—S24 共 17 条横剖面，该段水系深度基本上全部超过 100 m，最大值达到了 202.44 m。AB 段仅含有 3 个水系横剖面，最大水系深度为 93.52 m（表 4）。南北向水系中，无论是从水系剖面形态上或是从统计的水系深度参数上来看，BC 段水系下切深度最大，CD 段水系下切深度最小。

4.2.3 水系下切的表征结果

为了探明东西向不同台台下所对应的水系下切深度的差异性，进一步统计了东西向的水系宽深比（表 5）并绘制了水系宽深比折线图（图 8）。南北向水系的下切深度差异性明显，这里便不再进一步阐述。在东西向水系中，台面 4、5、6 水系宽度平均值分别为 444.04 m、429.61 m、420.83 m，在水系宽度差距较小的情况下，水系宽深比能够较好地反映出水系下切深度的差异性。

其中台面 4 水系宽深比介于 2.32~6.52 之间，平均值为 4.06。台面 5 水系宽深比介于 2.12~6.62 之间，平均值为 3.52。台面 6 水系宽深比介于 1.63~4.56 之间，平均值为 3.03。台面 5 水系

宽深比数值变化较大，在台面 6 与台面 5 交界处水系宽深比较小，随着向台面 4 方向延伸，水系宽深比整体上有逐渐增大的趋势（图 8）。这说明台面 5 中水系下切深度极不均匀，在靠近台面 6 一侧的水系下切较深，靠近台面 4 一侧的水系下切较浅。宽深比反映出台面 6 水系整体下切最深，台面 5 次之，台面 4 最小。

5 岩溶古水系结构形成与演化

5.1 自由蛇曲阶段

自由蛇曲一般发育在冲积平原或者河漫滩上，河谷对于河床约束较小，水系能够自由摆动。自由蛇曲的形成要求地形相对平缓、有一定坡度但不能太大，流量充足，河流以侧向侵蚀为主。Rw4 流域水系极为发育，流量充足，研究区位于西北部缓斜坡区，未遭受剥蚀前上覆志留系松散的碎屑岩沉积序列，完全符合自由河曲发育的条件。

通过整理国内外典型河曲参数（表 6）发现，由于国内外典型河曲都属于 Ω 型河曲，因此其弯曲率与封闭率值都普遍较大。将 Rw4 南北向主干水系与东西向分支水系河曲参数与国内外典型曲流的河曲参数进行对比，Rw4 的水系长、曲流颈长这 2 个参数上与世界上典型的河曲仍然存在着一定的差距，但是对于用来衡量河流弯曲度的弯曲率与封闭率这 2 个参数，Rw4 的东西向与南北向水系均存

表 4 塔河油田西北部 Rw4 东西向与南北向水系
宽深参数统计

Table 4 Statistics of width and depth parameters of
east-west and north-south water systems of Rw4 in
northwestern Tahe oilfield

横剖面 编号	水系宽度 / m	水系深度 / m	横剖面 编号	水系宽度 / m	水系深度 / m
E1	393.41	117.88	E31	419.78	157.05
E2	547.72	169.46	E32	415.83	127.72
E3	551.17	168.65	E33	249.76	130.54
E4	346.57	149.09	S1	388.64	63.51
E5	593.57	133.40	S2	667.10	67.66
E6	298.75	76.65	S3	382.56	55.33
E7	546.73	101.71	S4	411.19	42.07
E8	360.87	86.35	S5	498.81	42.47
E9	357.50	54.82	S6	360.88	33.63
E10	455.53	76.32	S7	250.70	20.90
E11	314.04	148.28	S8	746.05	144.70
E12	344.61	107.69	S9	530.04	123.80
E13	499.90	122.08	S10	307.96	118.71
E14	254.39	92.01	S11	550.86	139.74
E15	830.71	169.14	S12	595.10	109.86
E16	563.50	189.35	S13	498.81	122.73
E17	231.31	34.95	S14	361.74	127.28
E18	458.01	115.80	S15	390.37	131.17
E19	249.76	99.23	S16	444.16	152.74
E20	523.25	209.89	S17	329.65	140.01
E21	309.07	114.47	S18	195.18	134.92
E22	519.29	198.96	S19	608.11	202.44
E23	461.30	193.99	S20	719.15	191.19
E24	315.00	193.82	S21	719.15	173.37
E25	501.50	141.64	S22	579.49	143.89
E26	398.70	136.34	S23	771.20	68.20
E27	628.69	160.52	S24	359.14	119.24
E28	377.61	141.64	S25	330.51	93.52
E29	377.61	114.47	S26	442.42	80.79
E30	523.91	114.97	S27	333.12	41.94

在接近世界上典型河曲的曲流，甚至有些曲流的弯曲率超过了世界上典型曲流的弯曲率。同样 Rw4 东西向的个别曲流的封闭率也达到甚至超过了世界上典型曲流的封闭率，南北向主干水系的封闭率相对与东西向分支水系较差一些，但是依然存在封闭率达到 0.9 的曲流存在，因此可以认为 Rw4 的东西向分支水系与南北向主干水系的曲流带中，个别曲流段可以和世界上典型的曲流相媲美。

表 5 塔河油田西北部 Rw4 东西向水系宽深比统计

Table 5 Statistics of breadth depth ratio of east-west water
system of Rw4 in northwestern Tahe oilfield

横剖面编号	宽深比	横剖面编号	宽深比
E1	3.34	E18	3.96
E2	3.23	E19	2.52
E3	3.27	E20	2.49
E4	2.32	E21	2.70
E5	4.45	E22	2.61
E6	3.90	E23	2.38
E7	5.38	E24	1.63
E8	4.18	E25	3.54
E9	6.52	E26	2.92
E10	5.97	E27	3.92
E11	2.12	E28	2.67
E12	3.20	E29	3.30
E13	4.09	E30	4.56
E14	2.76	E31	2.67
E15	4.91	E32	3.26
E16	2.98	E33	1.91
E17	6.62		

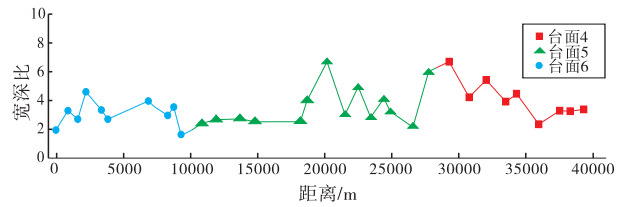


图 8 塔河油田西北部 Rw4 东西向水系宽深比折线图

Fig. 8 Rw4 line chart of width to depth ratio of east-west
water system of Rw4 in northwestern Tahe oilfield

表 6 国内外典型曲流及其参数

Table 6 Typical meanders at home and abroad and their parameters

河曲名称	水系长 S/ km	曲流颈轴长 L/ km	弯曲率 C	封闭率 e
嘉陵江马回曲流	14.4	0.9	16.00	0.94
嘉陵江青居曲流	17.1	0.4	42.75	0.98
黄河辖曼河曲	10.7	0.9	11.89	0.92
渠龙锡溪曲流	9.4	0.5	18.80	0.95
黑龙江红旗渠曲流	15.6	1.2	13.00	0.93
黑龙江红旗岭曲流	32.5	1.3	25.00	0.96
黑龙江江湾曲流	17.0	0.8	21.25	0.96
德涅斯特河奥柏町曲流	28.2	1.6	17.63	0.95
摩泽尔河采耳曲流	9.7	0.9	10.78	0.92
巴西茹鲁瓦河	14.3	0.3	47.67	0.98
帕特罗波斯曲流				
马恩河 Saint 曲流	13.7	1.2	11.42	0.92
尼罗河 Biltan 曲流	7.5	0.8	9.38	0.90

注：表中数据来自张斌等(2007)。

5.2 深切曲流阶段

深切曲流是在自由曲流已经形成的基础之上，由于地壳构造抬升或其他因素导致基准面下降、水系发生下蚀作用使得河谷加深所形成。

加里东中期，塔里木盆地性质由被动大陆边缘盆地向挤压型盆地转变，阿克库勒凸起的最大主应力方向为南北向（张小兵等，2011）。姜应兵（2021）恢复的塔河油田西北部加里东中期Ⅲ幕岩溶古地貌，整体上呈现北高、南低的特点。加里东晚期，该区古地貌格局为北东高、南西低（云露等，2001）。到了海西早期，古地貌图显示该区岩溶古地貌呈现为东高、西低（图 2-A）。由此可知，自加里东中期到海西早期，塔河西北部地区古构造格局发生了转变。

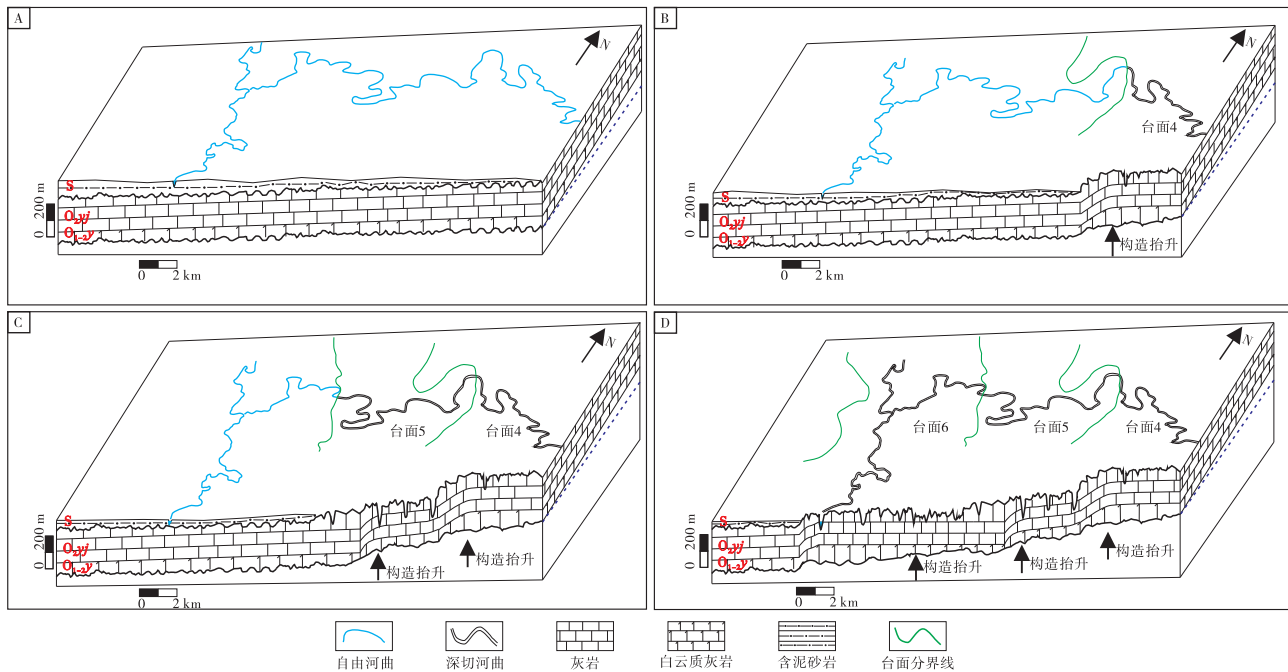
通过塔河西北部东西向骨架对比剖面所识别出的研究区 3 个岩溶台面来看，加里东晚期—海西早期的构造抬升是逐步发生的。王增银等（1995）在湖北恩施地区岩溶台面的研究中指出，每个岩溶台面的形成代表了 1 期稳定的构造抬升运动。因此，研究区在加里东晚期—海西早期至少经历了 3 期构造抬升运动。这构成了研究区 Rw4 流域地表

水系逐步发生深切作用的源动力。

5.3 古水系的形成与演化模式

通过以上定性与定量分析，可以认为 Rw4 是一条典型的深切曲流河，这种深切曲流与中国南方嘉陵江的深切曲流具有非常类似的特征。江华军等（2014）将嘉陵江的深切河谷称为叠置河谷，这种河谷是指一开始在松散沉积地层形成的自由河曲，因地壳快速抬升、基准面下降，河曲保持原有的形状发生下切，其下切深度达到了不同地质构造的碳酸盐岩地层之中。因此，参考现代岩溶深切曲流的形成与演化模式，本研究提出塔河油田西北部 Rw4 深切河曲的演化过程可以划分为自由曲流与深切曲流 2 个阶段。

自由曲流阶段主要发生在加里东中期—加里东晚期，塔河地区的古构造格局由北高、南低逐渐转变为北东高、南西低，此时水系发育在奥陶系上覆志留系碎屑岩地层之上，河流以侧向侵蚀为主，从而形成自由曲流（图 9-A）。深切曲流阶段主要发生在加里东晚期—海西早期，塔河地区的古构造格局逐步演变为东高、西低，研究区自东向西奥陶系先后经历了 3 期构造抬升运动，形成了 3 期岩溶台



A—加里东中期—加里东晚期，自由曲流阶段；B—加里东晚期—海西早期第 1 期抬升，台面 4 水系深切；C—加里东晚期—海西早期第 2 期抬升，台面 5 水系深切；D—加里东晚期—海西早期第 3 期抬升，台面 6 水系深切

图 9 塔河油田西北部中下奥陶统加里东中期—海西早期古水系发育模式

Fig. 9 Development model of the middle Caledonian–Early Hercynian paleowater system in the Middle to Lower Ordovician in northwestern Tahe oilfield

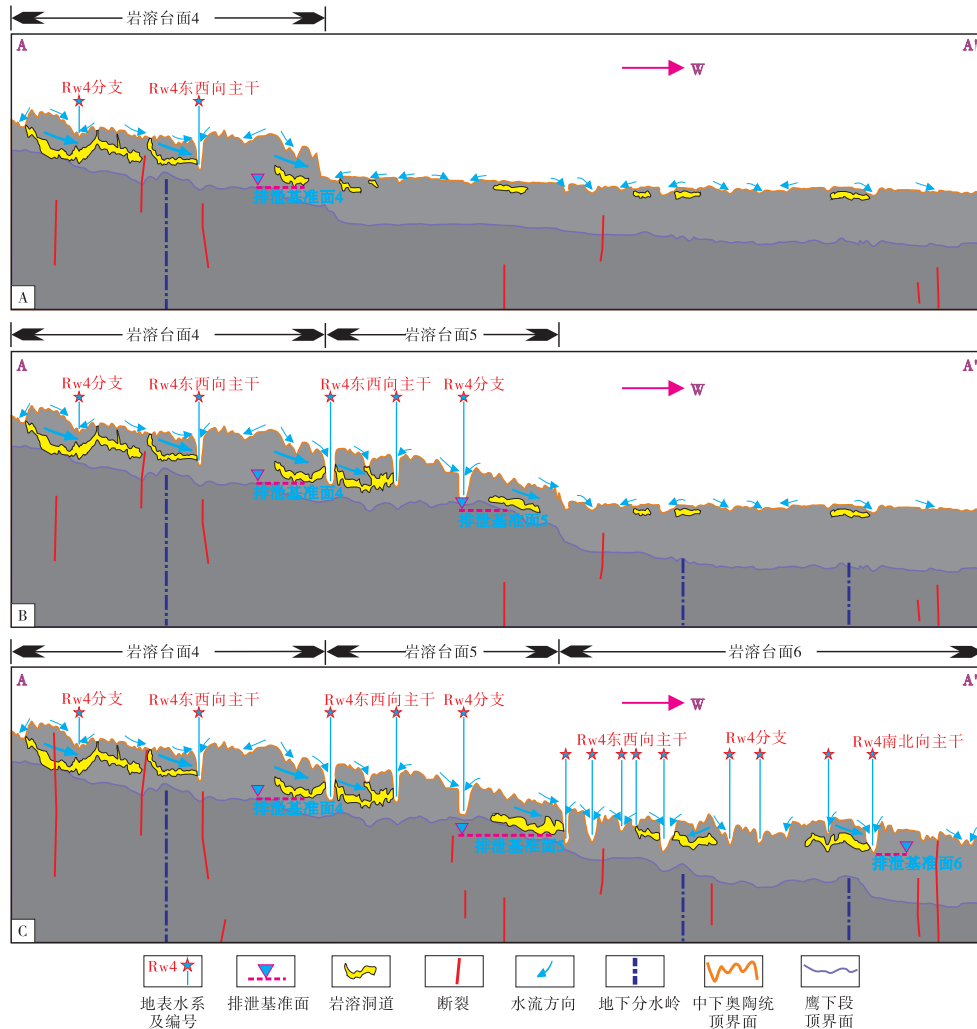
面和 3 个阶段地表河流的下切作用。因此，Rw4 的深切过程并非一蹴而就的，而是分阶段演化形成的。多阶段的构造抬升作用导致基准面对应发生多期的下降，河流的主导性地质营力由侧向侵蚀作用转变为强烈的下蚀作用，河流的快速下切使其依然能够保持原有的蛇曲形态(图 9-B 至 9-D)。

5.4 古水系演化对缝洞发育的控制效应

在岩溶演化的稳定时期，深切水系往往成为区域范围内岩溶水的最低排泄基准面，因此这类水系不仅仅控制了地表流场的汇聚，同时也控制了地下流场的排泄，水系两侧具有极其活跃的岩溶水动力场(李源等, 2017)。塔河地区西北部 Rw4 地表流域的东西向分支水系下切作用显著，其 V 字型的

深切河谷两侧的岩溶缝洞储集层异常发育，且以大型的岩溶暗河为主，包括了暗河型、伏流型、穿洞型、顺河潜流型、渗流入流型等 5 种类型(张长建等, 2022b)。这些大型岩溶暗河总体上均呈现出自深切河谷两侧向河谷中心延伸的特点。

值得指出的是，自东向西，Rw4 地表流域东西向深切曲流两侧的岩溶暗河的类型和规模呈现出显著的差异性。这与岩溶台面的逐级发育、水系结构的差异演化是密切相关的。台面 4 发育时期，该台面内水系的下切作用最先发生，与该下切水系相适应的岩溶暗河开始形成，并逐步构成了台面 4 控制下的独立的岩溶水循环系统(图 10-A，剖面位置见图 1)。台面 5 发育时期，台面 4 控制的地区岩溶暗河已经成型，由于基准面的下降，台面 4 深切



A—台面 4 水系演化与缝洞发育；B—台面 5 水系演化与缝洞发育；C—台面 6 水系演化与缝洞发育

图 10 塔河油田西北部中下奥陶统古水系演化与岩溶缝洞发育模式

Fig. 10 Paleodrainage system evolution and development pattern of karst caves in the Middle to Lower Ordovician in northwestern Tahe oilfield

河谷中的地表水快速向台面 5 汇聚,使得台面 5 内水系下切作用随之发生,从而促进了台面 5 控制下的岩溶暗河和第 2 套独立的岩溶水循环系统的发育(图 10-B)。台面 6 发育时期,台面 4 和台面 5 中的岩溶暗河基本定型,为了适应新的排泄基准面的变化,台面 4 和台面 5 深切河谷中的地表水均向台面 6 聚集,台面 6 内的水系出现强烈的下切作用,并控制了水系两侧岩溶暗河和第 3 套独立的岩溶水循环系统的形成(图 10-C)。由于在台面 4 到台面 6 的形成与演化过程中,不同台面内部水系的深切深度逐渐加大,加之水系两侧的导水断裂分布的差异性,因此,岩溶暗河的类型和规模完全不同。

很显然,这与“欧洲褶皱山区”4 种不同岩溶地貌条件下岩溶强度差异性发育模式完全不同。“欧洲褶皱山区”发育统一的岩溶排泄基准面,因而不同岩溶地貌中岩溶垂向分带结构不同(Lewin and Woodward, 2009),而塔河地区西北部东西向深切曲流区发育 3 级岩溶台面,每个岩溶台面具有统一的岩溶排泄基准面,尽管深切曲流贯穿了不同岩溶台面,然而,不同岩溶台面中形成了完全不同的岩溶水循环系统和岩溶暗河结构。

6 结论

1) 在塔里木盆地塔河油田西北部下奥陶统识别出 3 个岩溶台面和一个深切曲流型地表流域结构。深切曲流地表流域的主干水系南北向汇流,分支水系东西向汇流,二者几乎垂直相交,主干水系东侧分支水系较为密集,呈不对称网络结构。

2) 塔河油田西北部地表流域 Rw4 水系蛇曲特征明显,单河曲弯曲率最小值大于 1.5,东西向与南北向河曲带参数与国内外典型河曲带参数较为接近。东西向水系形态以单一 V 型为主,南北向水系具有复合形态,下切深度主要在 100~200 m 之间。自东向西 3 个岩溶台面中水系的下切深度逐渐加大,水系的宽深比平均值分别为 4.06、3.52、3.03。

3) 塔河油田西北部地表流域 Rw4 水系经历了自由曲流与深切曲流 2 个阶段,其中,深切曲流阶段可进一步划分为 3 个时期,与岩溶台面形成的 3 个构造抬升期相对应。

4) 塔河油田西北部发育的深切曲流是区域性的最低排泄基准面,它控制了河流两侧地下流场的

分布和大型岩溶暗河的发育。岩溶台面的逐级抬升促进了深切水系的差异演化,导致了岩溶暗河的模式和类型的差异性分布。

参考文献 (References)

- 蔡忠贤,刘永立,段金宝. 2009. 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. 中国岩溶, 28(1): 30-34. [Cai Z X, Liu Y L, Duan J B. 2009. Transition of river system in Karst Basin: a case study on Ordovician palaeo-karst in the northwest of Block 6, Tahe Oilfield. *Carsologica Sinica*, 28(1): 30-34]
- 蔡忠贤,张恒,漆立新,云露,曹自成,沙旭光. 2020. 塔里木盆地中一下奥陶统岩溶水文地貌结构类型及特征. 石油学报, 41(1): 43-58. [Cai Z X, Zhang H, Qi L X, Yun L, Cao Z C, Sha X G. 2020. Types and characteristics of karst hydrogeomorphologic architecture in the Middle-Lower Ordovician, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(1): 43-58]
- 范威,陈植华,牛俊强,李伟,王亮,黄荷. 2021. 香溪河岩溶流域水系结构与洪峰特征关系. 中国岩溶, 40(3): 430-438. [Fan W, Chen Z H, Niu J Q, Li W, Wang L, Huang H. 2021. Relationship between the surface water system structure and the flood peak in the Xiangxi River Karst Basin. *Carsologica Sinica*, 40(3): 430-438]
- 范勇. 2013. 基于分形理论和 GIS 的沱江曲流分形研究. 西南大学硕士学位论文. [Fan Y. 2013. Fractal research on the incised meanders of the Tuojiang River based on fractal theory and GIS. Masteral dissertation of Southwest University]
- 郭川,田亮,鲍典. 2016. 塔河油田 12 区奥陶系油藏东部区域岩溶古河道识别及其意义. 石油地质与工程, 30(1): 26-31, 147. [Guo C, Tian L, Bao D. 2016. Regional karst old channel identification and its significance of eastern Ordovician reservoir of block-12 in Tahe oilfield. *Petroleum Geology and Engineering*, 30(1): 26-31, 147]
- 江华军,李长安,张玉芬,姜端午. 2014. 嘉陵江曲流型叠置河谷成因对区域地质环境的响应. 地球科学, 39(11): 1666-1674. [Jiang H J, Li C A, Zhang Y F, Jiang D W. 2014. Origin of meander shape-superimposed valleys in the middle Jialing River: Responses to regional geological environment. *Earth Science*, 39(11): 1666-1674]
- 姜应兵,李兴娟. 2021. 塔里木盆地塔河油田 TH12402 井区中下奥陶统古岩溶洞穴发育模式. 古地理论, 23(4): 824-836. [Jiang Y B, Li X J. 2021. Development model of paleokarst caves in the Middle-Lower Ordovician of TH12402 well area in Tahe oilfield, Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(4): 824-836]
- 李源. 2016. 塔河油田奥陶系岩溶储层发育与海西早期水文地貌响应关系研究. 中国地质大学博士学位论文. [Li Y. 2016. Relationship between the development of Ordovician Karst Reservoir and hydrogeomorphologic in hercynian, Tahe oilfield. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 李源,蔡忠贤. 2016. 塔里木盆地塔河油田主体区海西早期岩溶台面

- 划分及洞穴层对比. 古地学报, 18(4): 560-568. [Li Y, Cai Z X. 2016. Division of karst platform architecture and cave levels correlation in the early Hercynian, Tahe Oilfield, Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 560-568]
- 李源, 鲁新便, 王莹莹, 张恒, 蔡忠贤, 李达泽. 2016a. 塔河油田海西早期岩溶水文地貌特征及其演化. 石油与天然气地质, 37(5): 674-683. [Li Y, Lu X B, Wang Y Y, Zhang H, Cai Z X, Li D Z. 2016a. Hydrogeomorphologic characterization and evolution of the Early Hercynian karstification in Tahe oilfield, the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 674-683]
- 李源, 蔡忠贤, 张恒, 鲁新便, 刘永立. 2016b. 塔河油田海西早期岩溶古水系识别方法及其特征. 地质科技情报, 35(4): 184-191. [Li Y, Cai Z X, Zhang H, Lu X B, Liu Y L. 2016b. Recognition methods and characteristics of karst drainage system in Hercynian, Tahe oilfield. *Geological Science and Technology Information*, 35(4): 184-191]
- 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 张恒, 刘显凤. 2017. 塔里木盆地塔河油田岩溶峡谷区海西早期洞穴系统发育模式. 古地学报, 19(2): 364-372. [Li Y, Lu X B, Cai Z X, Zhang H, Liu X F. 2017. Development model of Hercynian cave system in karst canyon area of Tahe Oilfield, Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(2): 364-372]
- 李正民, 李兴娟, 王虹. 2022. 塔河油田五区碳酸盐岩缝洞型储层发育特征及主控因素. 石化技术, 29(1): 163-164. [Li Z M, Li X J, Wang H. 2022. Development characteristics and main controlling factors of carbonate fractured vuggy reservoir in 5 area of Tahe Oilfield. *Petrochemical Industry Technology*, 29(1): 163-164]
- 刘红岐, 邱春宁, 唐洪, 司马立强, 赵军. 2011. 塔河油田12区块奥陶系裂缝分布规律研究. 沉积学报, 29(6): 1079-1085. [Liu H Q, Qiu C N, Tang H, Sima L Q, Zhao J. 2011. Study on the fracture distribution and numerical simulation of Ordovician carbonate reservoir in block 12 of Tahe oilfield. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(6): 1079-1085]
- 刘伟方, 郑多明, 王洪求, 董瑞霞, 张喜梅, 苗青. 2013. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山古水系研究方法及其意义. 海相油气地质, 18(4): 75-81. [Liu W F, Zheng D M, Wang H Q, Dong R X, Zhang X M, Miao Q. 2013. Research methods and the significance of palaeodrainage patterns in Ordovician buried-hill carbonate reservoirs, Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(4): 75-81]
- 刘永立, 蔡忠贤. 2009. 塔河油田四区奥陶系古岩溶流域的倒淌河及其成因研究. 现代地质, 23(6): 1121-1125. [Liu Y L, Cai Z X. 2009. The inverted river and its origin in palaeo-karst drainage basin of Ordovician in block 4, Tahe oilfield. *Geoscience*, 23(6): 1121-1125]
- 鲁新便. 2004. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发描述及评价: 以塔河油田奥陶系油藏为例. 成都理工大学博士论文. [Lu X B. 2004. Description and evaluation of fracture-cave carbonate reservoir development: taking Ordovician reservoir in Tahe oilfield as an example. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 鲁新便, 何成江, 邓光校, 鲍典. 2014. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述. 石油实验地质, 36(3): 268-274. [Lu X B, He C J, Deng G X, Bao D. 2014. Development features of karst ancient river system in Ordovician Reservoirs, Tahe Oil Field. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(3): 268-274]
- 吕艳萍, 姜应兵, 高济元, 蔡忠贤. 2021. 塔河西部奥陶系古岩溶小流域的划分及其地质意义. 断块油气田, 28(4): 440-445. [Lü Y P, Jiang Y B, Gao J Y, Cai Z X. 2021. The division of the Ordovician paleokarst small watershed in the west of Tahe and its geological significance. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28(4): 440-445]
- 马永生, 何登发, 蔡勋育, 刘波. 2017. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题. 岩石学报, 33(4): 1007-1020. [Ma Y S, He D F, Cai X Y, Liu B. 2017. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1007-1020]
- 聂国权, 淡永, 徐亮, 梁彬, 李景瑞. 2020. 蜀南 Z 工区茅口组顶岩溶古地貌、古水系特征与刻画. 中国岩溶, 39(6): 911-917. [Nie G Q, Dan Y, Xu L, Liang B, Li J R. 2020. Characteristics and characterization of karst paleo-geomorphology and paleo-water system on the top of the Maokou formation in the Z area in southern Sichuan Basin. *Carsologica Sinica*, 39(6): 911-917]
- 沈玉昌, 龚国元. 1986. 河流地貌学概论. 北京: 科学出版社, 155-176. [Shen Y C, Gong G Y. 1986. Introduction to River Geomorphology. Beijing: Science Press, 155-176]
- 王金凤, 周德全, 代稳. 2015. 基于岩溶地质背景的河网水系特征分析. 六盘水师范学院学报, 27(4): 15-18. [Wang J F, Zhou D Q, Dai W. 2015. Analysis of the characteristics of river water system based on the geological background of Karst. *Journal of Liupanshui Normal University*, 27(4): 15-18]
- 王增银, 沈继方, 徐瑞春, 石伯勋. 1995. 鄂西清江流域岩溶地貌特征及演化. 地球科学, 20(4): 439-444. [Wang Z Y, Shen J F, Xu R C, Shi B X. 1995. Karst landscapes and their evolution in reaches of the Qingjiang River, western Hubei. *Earth Science*, 20(4): 439-444]
- 夏永涛, 刘永立, 刘存革, 罗鹏, 谢腾飞, 徐珊. 2019. 塔河油田西北部加里东中期古水系特征及其地质意义. 中国岩溶, 38(3): 438-443. [Xia Y T, Liu Y L, Liu C G, Luo P, Xie C F, Xu S. 2019. Characteristics and geological significance of middle Caledonian palaeodrainage pattern in the northwest of Tahe oilfield. *Carsologica Sinica*, 38(3): 438-443]
- 许睿, 李建, 文建辉. 2021. 基于 GIS 的区域集水指数分析: 以潮田河流域为例. 中国岩溶, 40(2): 319-324. [Xu R, Li J, Wen J H. 2021. Analysis of regional catchment index based on GIS: An example of the Chaotian River Basin. *Carsologica Sinica*, 40(2): 319-324]
- 杨明德. 1998. 岩溶峡谷区溶洞发育特征及水动力条件. 中国岩溶, 17(3): 187-195. [Yang M D. 1998. Characteristics and hydrodynamic conditions of cave development in Karst gorge districts. *Carsologica Sinica*, 17(3): 187-195]
- 云露, 闫文新, 赵江. 2001. 阿克库勒凸起成藏地质条件及控油规律.

- 新疆地质, 19(4): 305-308, 314. [Yun L, Yan W X, Zhao J. 2001. Geological condition and ore-controlling regularity of oil-pool formation in akekule uplift. *Xinjiang Geology*, 19(4): 305-308, 314]
- 张长建, 吕艳萍, 文欢, 王震, 马海陇. 2022a. 塔河油田西部斜坡区加里东运动中期 II 幕水文地貌特征及其对洞穴发育的控制. *新疆石油地质*, 43(2): 135-144. [Zhang C J, Lü Y P, Wen H, Wang Z, Ma H L. 2022a. Paleohydrogeomorphic characteristics of episode II of middle Caledonian movement and their controls on Karst cave development in western slope area of Tahe oilfield. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(2): 135-144]
- 张长建, 吕艳萍, 张振哲. 2022b. 塔里木盆地塔河油田西部斜坡区中下奥陶统古岩溶洞穴发育特征. *石油实验地质*, 44(6): 1008-1017, 1047. [Zhang C J, Lü Y P, Zhang Z Z. 2022b. Features of Middle-Lower Ordovician paleo-karst caves in western slope area, Tahe Oil Field, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(6): 1008-1017, 1047]
- 张陈. 2017. 塔河二区奥陶系缝洞储集体特征描述. 西南石油大学硕士学位论文. [Zhang C. 2017. Description of Ordovician fracture-cave reservoir characteristics in Tahe area 2. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 张斌, 艾南山, 黄正文, 易成波, 覃发超. 2007. 中国嘉陵江河曲的形态与成因. *科学通报*, 52(22): 2671-2682. [Zhang B, Ai N S, Huang Z W, Yi C B, Qin F C. 2007. The morphology and genesis of the Jialing River in China. *Chinese Science Bulletin*, 52(22): 2671-2682]
- 张庆玉. 2018. 塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶发育机理. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Zhang Q Y. 2018. Development mechanism of Ordovician carbonate paleokarst in the halahatang area of the Tarim Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan)]
- 张希明, 朱建国, 李宗宇, 杨坚. 2007. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分. *海相油气地质*, 12(1): 21-24. [Zhang X M, Zhu J G, Li Z Y, Yang J. 2007. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe oilfield, Tarim Basin: characteristics and subdivision of fracture-vug units. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(1): 21-24]
- 张小兵, 吕海涛, 赵锡奎, 李坤, 何建军. 2011. 塔河油田中下奥陶统顶面古构造演化及油气关系. *石油实验地质*, 33(3): 233-238. [Zhang X B, Lü H T, Zhao X K, Li K, He J J. 2011. Paleostuctural evolution of Lower-Middle Ordovician top and its relationship with hydrocarbon in Tahe Oil Field. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(3): 233-238]
- 张宇, 赵伦, 李长海, 张祥忠. 2022. 古岩溶油气储层研究进展. *中国岩溶*, 41(5): 808-824. [Zhang Y, Zhao L, Li C H, Zhang X Z. 2022. Research progress of paleokarst oil and gas reservoirs. *Carso-logica Sinica*, 41(5): 808-824]
- 赵鑫. 2019. 洮河上游深切曲流与现代河谷发育研究. 兰州大学硕士学位论文. [Zhao X. 2019. Incised meandering and modern valley development of the upper Taohe River. Masteral dissertation of Lanzhou University]
- 郑松青, 康志江, 程晓军, 李小波, 张世亮, 崔书岳, 蒋林. 2022. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水驱开发特征及改善对策. *油气地质与采收率*, 29(6): 95-104. [Zheng S Q, Kang Z J, Cheng X J, Li X B, Zhang S L, Cui S Y, Jiang L. 2022. Waterflooding characteristics and improvement measures of fracture-cavity carbonate reservoirs in Tahe Oilfield. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 29(6): 95-104]
- 邹明倬. 2020. 塔河油田六七区典型地下河型岩溶缝洞储集体建模研究. 中国石油大学(北京)硕士学位论文. [Zou M Z. 2020. The study on geological modeling of the typical underground river type fracture-cave karst reservoirs in the 6th and 7th block, Tahe oilfield. Masteral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)]
- Lewin J, Woodward J C. 2009. *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford: Oxford University Press, 301-303.
- Ruan Z A, Yu B S, Wang L D, Pan Y L, Tan G H. 2013. Prediction of buried calcite dissolution in the Ordovician carbonate reservoir of the Tahe Oilfield, NW China: evidence from formation water. *Geochemistry*, 73: 469-479.
- Wang Z M, Cai C F, Li H X, Yang H J, Wang T K, Zhang K, Jia L Q, Chen K. 2014. Origin of late charged gas and its effect on property of oils in the Ordovician in Tazhong area. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122: 83-93.
- Zhang H, Cai Z X, Hao F, Hu W G, Lu X B, Wang Y. 2023. Hypogenic origin of paleocaves in the Ordovician carbonates of the southern Tahe oilfield, Tarim Basin, northwest China. *Geoenergy Science and Engineering*, 225: 211669.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)