

塔河油田八区奥陶系古地貌恢复及其对岩溶的控制作用

靳永红¹, 唐博超¹, 李成刚¹, 张子游^{2*}, 李文瑞¹, 郭晨¹, 宋利红¹

¹中国石油化工股份有限公司西北油田分公司采油三厂, 新疆 阿克苏

²中国地质大学(北京)能源学院, 北京

收稿日期: 2026年6月30日; 录用日期: 2026年8月7日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

岩溶古地貌是控制碳酸盐岩岩溶改造强度、储集空间发育及分布的重要因素, 准确恢复其空间格局对岩溶储层预测与油气开发具有重要意义。基于钻井、测井与地震资料, 采用地层厚度对比法和地层结构趋势外推与相关变形法, 对塔里木盆地塔河油田八区中奥陶统一间房组顶界面剥蚀厚度进行定量恢复, 并结合剥蚀厚度空间展布、古水系发育及岩溶水动力条件划分岩溶古地貌单元。结果表明: 一间房组顶界面以平行不整合为主, 局部发育削蚀不整合; 顶界面平均剥蚀厚度为0~80 m, 整体呈多隆起、多洼陷相间分布的古地貌格局。根据平均剥蚀厚度和古地貌特征, 可将研究区划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地3类二级古地貌单元, 以及岩溶峰丘、斜坡溶丘、丘丛洼地、丘丛谷地、盆内洼地和盆内谷地6类三级古地貌单元。其中, 岩溶斜坡水动力条件较好, 溶蚀孔洞和裂缝发育, 缝洞型储集空间连通性相对较好, 是研究区一间房组岩溶储层发育的有利部位。

关键词

地层厚度对比法, 地层结构趋势外推与相关变形法, 岩溶古地貌, 岩溶储层, 剥蚀厚度

Ordovician Paleogeomorphologic Restoration and Its Control on Karst Development in Block 8, Tahe Oilfield

Yonghong Jin¹, Bochao Tang¹, Chenggang Li¹, Ziyu Zhang^{2*}, Wenrui Li¹, Chen Guo¹, Lihong Song¹

¹No. 3 Oil Production Plant, Northwest Oilfield Branch, China Petroleum & Chemical Corporation, Aksu Xinjiang

²School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 靳永红, 唐博超, 李成刚, 张子游, 李文瑞, 郭晨, 宋利红. 塔河油田八区奥陶系古地貌恢复及其对岩溶的控制作用[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1186-1200. DOI: 10.12677/ag.2026.168106

Received: June 30, 2026; accepted: August 7, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

Karst paleogeomorphology is an important factor controlling the intensity of carbonate karstification, as well as the development and distribution of reservoir spaces. Accurate restoration of its spatial pattern is therefore of great significance for karst reservoir prediction and oil and gas development. Based on drilling, logging, and seismic data, this study quantitatively restored the erosion thickness of the top boundary of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8 of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, using the stratigraphic thickness comparison method and the stratigraphic structural trend extrapolation and associated deformation method. Karst paleogeomorphic units were further classified by integrating the spatial distribution of erosion thickness, paleodrainage development, and karst hydrodynamic conditions. The results show that the top boundary of the Yijianfang Formation is dominated by parallel unconformity, with local development of truncation unconformity. The average erosion thickness of the top boundary ranges from 0 to 80 m, and the paleogeomorphology is characterized by multiple alternating uplifts and depressions. According to the average erosion thickness and paleogeomorphic characteristics, the study area can be divided into three second-order paleogeomorphic units, namely karst highland, karst slope, and karst basin, and six third-order paleogeomorphic units, including karst peak hill, slope karst hill, peak-cluster depression, peak-cluster valley, intra-basin depression, and intra-basin valley. Among these units, the karst slope has relatively favorable hydrodynamic conditions, well-developed dissolution pores, cavities, and fractures, and relatively good connectivity of fracture-cavity reservoir spaces. Therefore, it represents a favorable zone for the development of karst reservoirs in the Yijianfang Formation of the study area.

Keywords

Stratigraphic Thickness Comparison Method, Stratigraphic Structural Trend Extrapolation and Associated Deformation Method, Karst Paleogeomorphology, Karst Reservoir, Erosion Thickness

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔里木盆地中-下奥陶统碳酸盐岩在加里东中期经历了广泛的抬升、暴露和岩溶改造,形成了规模较大的表生岩溶储层,是全盆地重要的勘探与开发对象之一[1]。塔河油田目前已进入精细开发阶段,岩溶古地貌的精细重建对揭示缝洞型储集层成因、分布规律及有利储集区预测具有重要意义。以往针对塔河地区一间房组顶面古地貌的恢复,多采用残余厚度法或印模法,方法体系相对单一,对剥蚀厚度的定量约束相对不足,通常只能判别古地貌相对高低或剥蚀强弱的分布区段。此外,已有研究多以整个塔河油田为对象开展盆地或油田尺度的古地貌恢复,研究尺度相对较大;当聚焦到单一生产区块时,受网格分辨率、井震资料约束程度及插值假设等因素影响,其精度和适用性仍存在一定局限。基于研究区丰富的钻井、测井与地震资料,本文采用地层厚度对比法,并结合地层结构趋势外推与相关变形法,对塔河油田八区一间房组顶面岩溶古地貌进行定量化、精细化恢复;在此基础上,综合剥蚀厚度空间展布、古地貌形态特征及古水系发育特征,进一步划分岩溶古地貌单元,探讨其对岩溶储层发育的控制作用。

2. 地质概况

塔里木盆地是中国西部最大的含油气盆地，面积约为 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，已在奥陶系、泥盆系、石炭系和三叠系等层系发现油气资源[2]-[5]。塔河油田八区位于塔里木盆地北部沙雅隆起中段的阿克库勒凸起，毗邻盆地寒武系-奥陶系主力生烃区。塔河油田八区位于塔河油田上奥陶统地层剥蚀区及其邻近区域(图 1)。

塔河油田八区奥陶系自下而上依次发育蓬莱坝组(O_{1p})、鹰山组(O_{1-2y})、一间房组(O_{2yj})、恰尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s}) [6]。在塔里木盆地范围内，中-下奥陶统一间房组-鹰山组碳酸盐岩岩溶型储集体是重要的油气储层单元之一。从构造演化来看，早-中奥陶世塔里木盆地处于拉张背景；至中奥陶世末，区域应力体制由伸展转为挤压，加里东中期 I 幕运动导致中-下奥陶统地层整体抬升，并发生不同程度的剥蚀。多期构造活动叠加，使塔里木盆地不同区块地层发育与保存状况呈现显著差异[7]。对塔河油田八区而言，加里东中期 I 幕构造活动是中奥陶统一间房组顶部 T_4 不整合面形成的主要构造背景。区域性抬升控制了一间房组顶部的整体暴露和剥蚀，而局部差异升降及断裂活动进一步改变了不同部位的暴露时间和剥蚀强度，为研究区多个局部隆起和洼陷的形成奠定了构造基础。

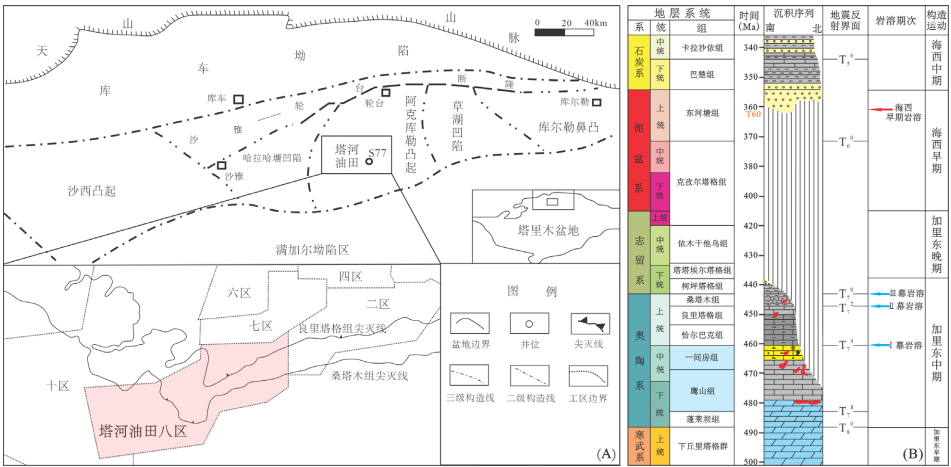
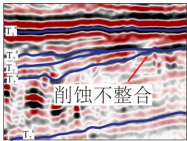


Figure 1. Structural location of Block 8 in Tahe Oilfield (A) and comprehensive stratigraphic column of the study area (B)
图 1. 塔河油田八区构造位置图(A)及研究区综合地层柱状图(B)

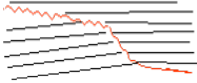
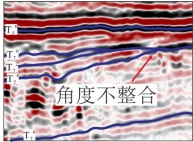
3. 不整合面特征

自震旦纪以来，塔河油田八区经历了多期构造活动改造，发育了不同尺度的不整合界面。其中受奥陶纪加里东中期 I 幕构造活动控制，中奥陶统一间房组顶部形成了较为明显的不整合界面。以 T_4 地震反射界面为主要识别标志，综合界面上下地层接触关系及不整合面的几何形态，可将研究区一间房组顶部不整合划分为平行不整合和角度不整合两类(表 1)。

Table 1. Classification of unconformity types at the top of the Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield
表 1. 塔河油田八区一间房组顶部不整合类型划分表

上、下层结构	不整合类型	不整合结构	实例
整合/整合	平行不整合		

续表

削蚀/上超	角度不整合		
-------	-------	---	---

研究区在加里东中期处于汇聚 - 挤压构造背景。至中奥陶世末，在 SE-NW 向挤压应力作用下，NE 向展布的阿克库勒古鼻凸逐渐形成，并整体向 SW 方向倾伏，导致一间房组顶界面发生不同程度的剥蚀 [8]。总体来看，研究区一间房组顶部以平行不整合为主，局部发育削蚀不整合，表明该界面整体抬升 - 剥蚀幅度相对有限，局部古地貌高部位剥蚀作用较强(图 2)。

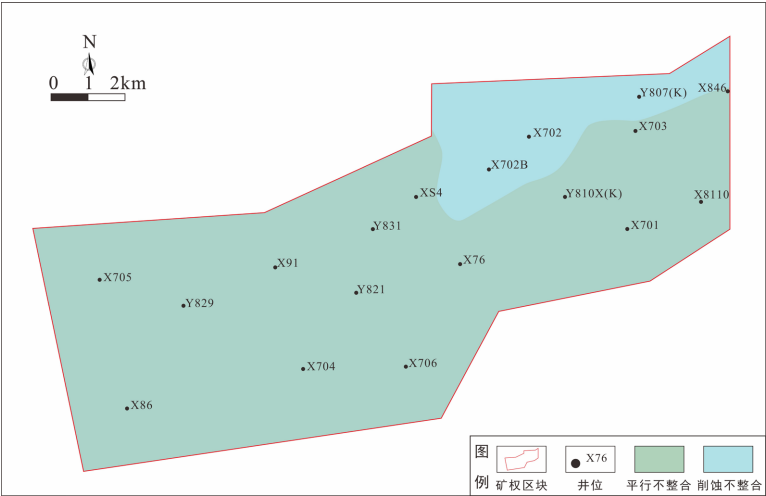


Figure 2. Distribution of unconformity types at the T₇⁴ seismic reflection interface of the Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield
图 2. 塔河油田八区中 - 下奥陶统顶 T₇⁴ 界面不整合类型分布图

4. 岩溶古地貌恢复方法

古地貌是指地质历史时期形成并保存下来的地表形态格局，一般可分为剥蚀古地貌、构造古地貌和沉积古地貌三类[9]。其中，剥蚀古地貌主要反映地层经历剥蚀改造后的地貌残貌，构造古地貌反映构造活动形成或改造后的地貌形态，沉积古地貌则指某一套地层开始沉积之前的地貌特征。本文以塔河油田八区一间房组顶界面为研究对象，重点开展剥蚀古地貌恢复。相较于沉积古地貌恢复，剥蚀古地貌恢复所依据的剥蚀厚度并不等同于真实沉积厚度，但通过对剥蚀量的定量恢复，可以有效表征不整合面形成时期的地层起伏与相对高低。同时，该方法可减少了对古水深、压实校正等参数的依赖，降低恢复过程中的不确定性，使恢复结果更接近剥蚀期末的相对地貌起伏格局。

4.1. 地层厚度对比法

地层厚度对比法是将研究区目的层位与邻近保存较完整或剥蚀较弱区的同层位进行对比，先恢复目的层位的原始沉积厚度，再与现今残余厚度相减，以获得剥蚀量。由于同一构造层系内地层沉积通常具有一定的继承性与连续性，可利用保存完整层系的厚度比例关系，并结合下伏地层厚度变化趋势，推算目的层位的原始沉积厚度。若推算得到的原始沉积厚度大于现今残余厚度，二者之差即为剥蚀厚度；若推算值不大于现今残余厚度，则认为该层基本未发生明显剥蚀。

鹰山组—一间房组沉积期, 研究区总体处于相对稳定的碳酸盐岩台地沉积背景, 区域构造格局及沉积中心位置变化相对较小, 地层厚度的横向变化具有一定继承性。在断裂改造较弱、地层保存较完整且地震反射连续的区域, 鹰山组厚度变化能够在一定程度上反映区域古构造起伏及沉积可容纳空间的变化趋势。因此, 本文选取地层保存较完整、无明显断裂切割和局部沉积异常的井区作为约束区, 将鹰山组区域厚度变化率作为一间房组原始沉积厚度变化率的一阶近似。但是该近似关系并非在全区严格成立; 在断裂发育、局部沉积厚度突变或一间房组剥蚀强烈的区域, 仅依据鹰山组厚度变化进行恢复可能产生一定误差。因此本文进一步采用地层结构趋势外推与相关变形法对恢复结果进行交叉约束, 以降低单一方法假设造成的不确定性。

在恢复目的层位剥蚀量时, 首先结合地震与钻井资料, 分析地层原始沉积厚度的变化趋势, 选取符合原始沉积厚度变化规律且未受明显剥蚀或仅遭受轻微剥蚀的两口以上井作为约束井。随后, 利用目的层位保存较好井的现今厚度计算地层减薄率 K , 并据此推算其他井点目的层位的原始沉积厚度, 最终通过原始沉积厚度与现今残余厚度之差恢复剥蚀量[10] (图 3)。

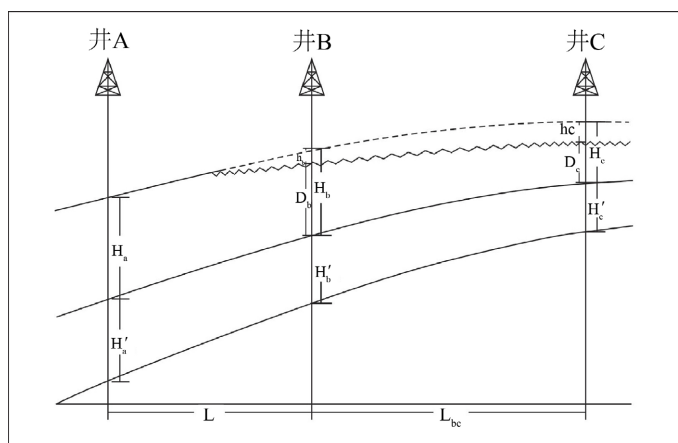


Figure 3. Schematic diagram of erosion-thickness restoration using the stratigraphic thickness comparison method

图 3. 地层厚度对比法恢复剥蚀量示意图

选取目的层位之下邻近地层保存较好的两口井 A、B, 其下伏邻近地层厚度分别为 H'_a 和 H'_b , 两井间距离为 L 。根据下伏邻近地层厚度变化关系, 可计算地层厚度变化率 K :

$$K = (H'_b - H'_a) / L$$

假定目的层位原始沉积厚度的横向变化趋势与下伏邻近地层基本一致, 则目的层位厚度变化率可近似等于 K 。选取与 A、B 两井近似位于同一直线上的待恢复井 C, 井 B 与井 C 之间的距离为 L_{bc} , 则 B 井和 C 井目的层位的原始沉积厚度可分别表示为:

$$H_b = H_a + L \times K$$

$$H_c = H_a + (L + L_{bc}) \times K$$

式中, H_a 、 H_b 和 H_c 分别为 A、B、C 井目的层位的原始沉积厚度; H'_a 、 H'_b 分别为 A、B 井下伏邻近地层厚度; L 为 A、B 两井间距离; L_{bc} 为 B、C 两井间距离; K 为地层厚度变化率。

B 井和 C 井目的层位的剥蚀厚度分别为原始沉积厚度与现今残余厚度之差, 可表示为:

$$hb = H_b - Db$$

$$hc = H_c - Dc$$

式中, h_b 和 h_c 分别为 B、C 井目的层位剥蚀厚度; D_b 和 D_c 分别为 B、C 井目的层位现今残余厚度。

结果表明, 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部剥蚀厚度为 0~80 m (图 4), 平面上表现出明显的非均匀性。高值区主要分布于 X706、X705 及 X801(K)-X702B 井区附近; 低值区主要发育于研究区中部至北中部局部区域, 如 XS4-Y822-Y741 井区及 Y821-X814(K)井区附近。整体来看, 研究区一间房组顶部剥蚀厚度呈多个局部高值区与低值区相间分布的特征。

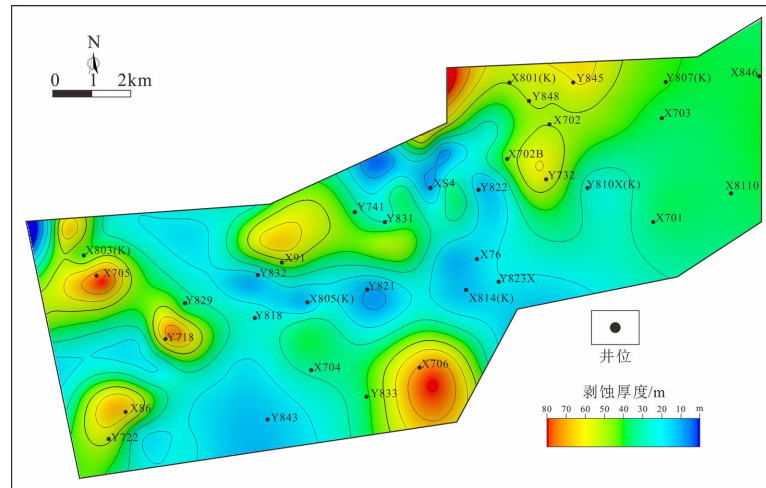


Figure 4. Erosion-thickness contour map of the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield, obtained using the stratigraphic thickness comparison method

图 4. 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部剥蚀厚度等值线图——地层厚度对比法

4.2. 地层结构趋势外推与相关变形法

地层结构趋势外推与相关变形法是基于地震剖面解释结果, 识别不整合面及其下伏被剥蚀地层的现今残余顶界面, 并利用地层结构的延伸趋势恢复剥蚀前原始顶界面形态的一种方法。恢复的原始顶界面与现今残余顶界面之间的垂向差值, 即为该处地层的剥蚀厚度(图 5)。

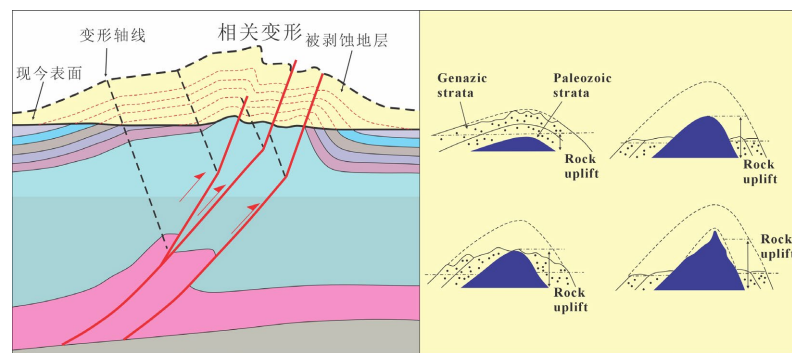


Figure 5. Schematic diagram of erosion-thickness restoration based on stratigraphic structural trend extrapolation and associated deformation

图 5. 地层结构趋势外推与相关变形法恢复地层剥蚀厚度原理示意图

本次研究按照 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的网格间距设置 600 个虚拟井点, 并结合实际钻井资料, 对 T_7^4 不整合面进行剥蚀厚度恢复(图 6)。

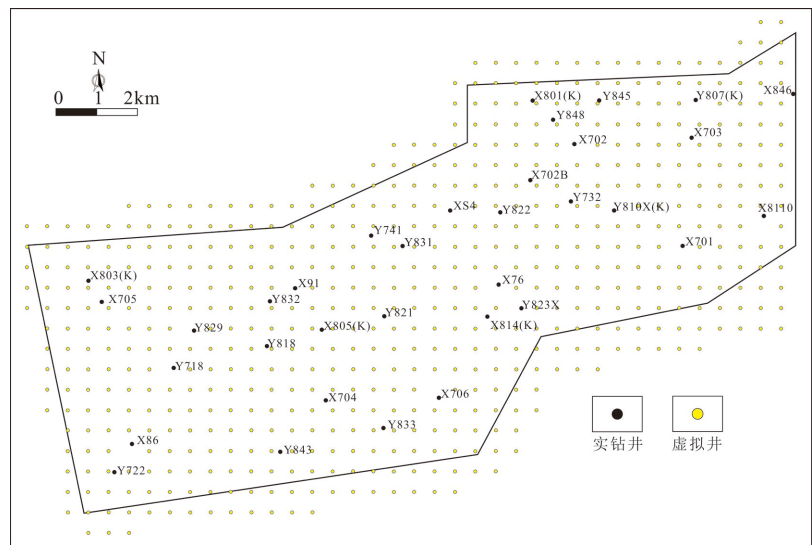


Figure 6. Distribution of virtual well points for erosion-thickness restoration of the T_7^4 unconformity surface in Block 8, Tahe Oilfield

图 6. 塔河油田八区地层结构趋势外推与相关变形法虚拟井点布置图

根据地震剖面解释结果, 研究区南部一间房组保存相对较完整、厚度较大。因此, 本文在塔河油田八区南部选取一间房组厚度相对较大的位置作为剥蚀恢复基准点, 并沿南北向地震测线向北进行地层结构趋势外推。通过追踪地层延伸趋势及相关变形特征, 读取各虚拟井点和实钻井点处恢复顶界面与现今残余顶界面之间的双程旅行时差, 获得时间域剥蚀量(图 7)。

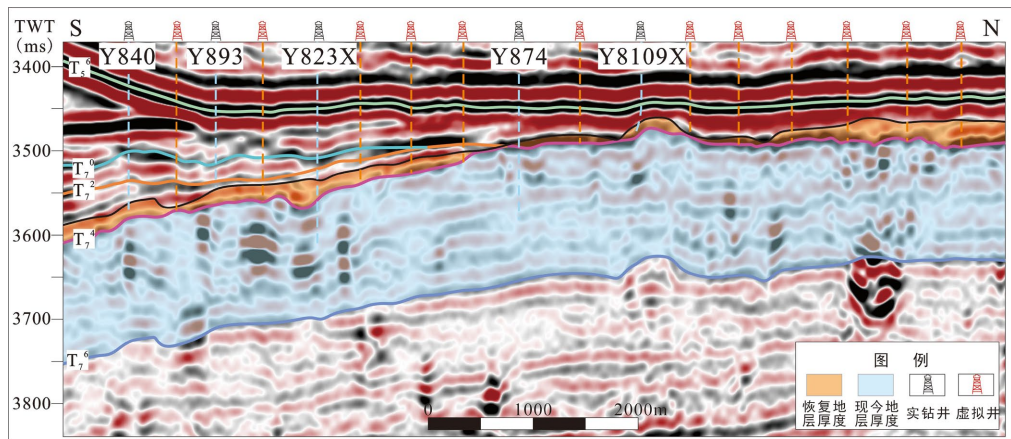


Figure 7. Erosion-thickness restoration based on stratigraphic structural trend extrapolation and associated deformation along a typical seismic profile in Block 8, Tahe Oilfield

图 7. 塔河油田八区南北向地震剖面地层结构趋势外推与剥蚀厚度恢复示意图

基于已钻井井旁地震资料读取桑塔木组顶、底界面的双程旅行时差, 并结合钻井分层厚度计算各井桑塔木组平均层速度(表 2)。由于一间房组底界在地震剖面上缺乏清晰、稳定的反射轴, 难以直接获取一间房组速度参数, 本文近似采用桑塔木组平均层速度替代一间房组速度, 用于时间域剥蚀量的时 - 深转换。

时间域剥蚀量向深度域剥蚀厚度的转换公式为: $h = \frac{v\Delta t}{2}$ 。

式中， h 为深度域剥蚀厚度， v 为时 - 深转换采用的平均层速度， Δt 为恢复顶界面与现今残余顶界面之间的双程旅行时差。考虑到以桑塔木组平均层速度近似替代一间房组速度可能引入一定误差，本文进一步选取实测桑塔木组层速度的最小值、平均值和最大值开展速度参数敏感性分析。

Table 2. Calculated interval velocities of the Sangtamu Formation from drilled wells in Block 8, Tahe Oilfield
表 2. 塔河油田八区已钻井桑塔木组地层速度对比表

井名	桑塔木组厚度/m	双程旅行时间/ms	速度 m/s
Y843	161	53.89	5975.13
X1155	275	104.69	5253.61
Y136X	325	126.04	5157.09
Y1106	129	45.3	5695.36
Y1133X	158.62	59.38	5342.54
Y1028	306	121.24	5047.84
X105-6	175	67.61	5176.75
Y857	318	108.78	5846.66
Y1110X	235	95.86	4902.98
平均速度(m/s)			5377.55

采用地层结构趋势外推与相关变形法对塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部剥蚀厚度进行恢复。结果表明，一间房组原始沉积厚度在研究区内横向差异相对较小，顶界面剥蚀厚度为 0~80 m (图 8)。平面上，剥蚀厚度表现出明显的非均一性，高值区主要分布于研究区东北部 X801(K)-Y845-X846 一带、西部 X705 井附近、西南部 X86-Y722 一带以及南部 X706-Y833 一带，指示这些部位在不整合面形成时期处于相对古地貌高部位，剥蚀作用较强；低值区主要发育于研究区中部 X76-X814(K)一带、北中部 XS4-Y822 一带及南部 Y843 附近，表明这些部位剥蚀作用相对较弱，古地貌位置相对较低。总体来看，该方法恢复结果显示研究区一间房组顶部剥蚀厚度呈多个局部高值区与低值区相间分布的特征。

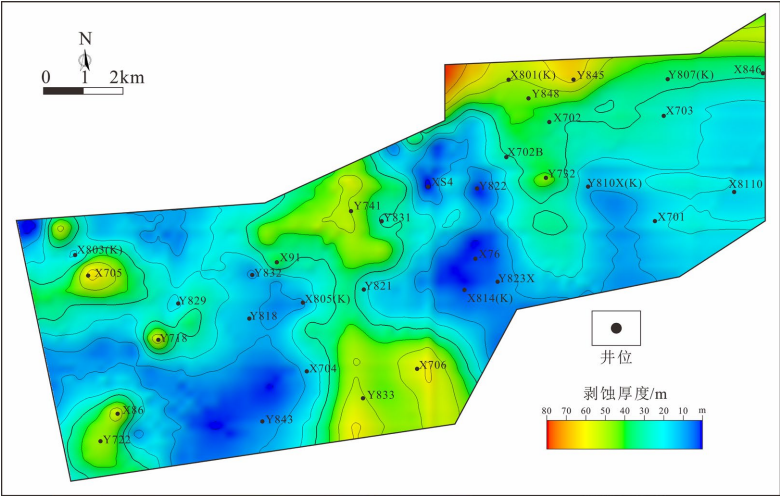


Figure 8. Erosion-thickness contour map of the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield, obtained using the stratigraphic structural trend extrapolation and associated deformation method
图 8. 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部剥蚀厚度等值线图——地层结构趋势外推与相关变形法

4.3. 速度参数敏感性分析

为定量评价时-深转换速度参数选取对剥蚀厚度恢复结果的影响,依据表2中9口井桑塔木组层速度统计结果,分别选取最小层速度4902.98 m/s、平均层速度5377.55 m/s和最大层速度5975.13 m/s,设置低速、基准和高速3种计算情景。在地震剖面读取的双程旅行时差保持不变的条件下,分别进行时-深转换。

时-深转换关系及不同速度情景下的剥蚀厚度换算公式为:

$$h_v = \frac{v\Delta t}{2} = h_0 \frac{v}{v_0}$$

式中, h_v 为速度 v 条件下的剥蚀厚度, m; h_0 为基准速度条件下的剥蚀厚度, m; v 为不同计算情景下采用的层速度, m/s; v_0 为基准层速度, 取 5377.55 m/s; Δt 为恢复顶界面与现今残余顶界面之间的双程旅行时差, s。

结果表明, 低速、基准和高速情景下, 一间房组顶部剥蚀厚度范围分别为 0~72.94 m、0~80.00 m 和 0~88.89 m。与基准情景相比, 低速和高速情景下的剥蚀厚度分别变化-8.83%和+11.11% (表3)。由此可见, 速度参数选取对剥蚀厚度绝对值具有一定影响, 但在统一速度假设下, 不改变研究区多隆起、多洼陷相间分布的宏观古地貌格局。需要指出的是, 对于采用固定剥蚀厚度阈值划分的古地貌单元, 位于分区界线附近的部分网格可能随速度变化发生类别调整。因此, 速度参数变化虽然不会改变古地貌的相对高低格局, 但会对局部地貌单元边界产生一定影响。此外, 该敏感性分析主要评价统一速度参数选取引起的数值不确定性, 尚未完全反映一间房组速度横向非均质性造成的局部误差。

Table 3. Sensitivity analysis of erosion thickness under different time-depth conversion velocities

表3. 不同时-深转换速度下剥蚀厚度敏感性分析

速度情景	层速度/(m·s ⁻¹)	相对基准速度变化/%	剥蚀厚度范围/m
低速情景	4902.98	-8.83	0~72.94
基准情景	5377.55	0	0~80.00
高速情景	5975.13	+11.11	0~88.89

4.4. 两种古地貌恢复方法定量比较及综合结果分析

为定量比较两种古地貌恢复方法的结果,对地层厚度对比法和地层结构趋势外推与相关变形法所得剥蚀厚度进行同网格点配对分析,并绘制散点图和绝对差值频率分布图(图9)。两种方法的恢复结果呈较明显的正相关关系, Pearson 相关系数 r 为 0.767, 决定系数 R^2 为 0.589, 线性回归关系为 $y = 0.777x - 2.094$ (图9(A)), 表明二者对剥蚀厚度总体变化趋势的刻画具有一定一致性, 但具体数值并非高度吻合。两种方法恢复的平均剥蚀厚度分别为 34.42 m 和 24.65 m, 前者较后者平均高 9.77 m, 表现出一定的系统性偏高。

两种方法剥蚀厚度的平均绝对差值为 12.27 m, 均方根差为 13.97 m。绝对差值主要集中于 5~20 m, 其中 65.82%的网格点差值不超过 15 m, 88.3%的网格点不超过 20 m(图9(B))。两种方法的差异主要源于其基本假设和资料约束不同: 地层厚度对比法受地层厚度继承性及井点分布影响, 地层结构趋势外推与相关变形法则受地震层位解释、原始顶界面外推及时-深转换速度影响。鉴于目前缺乏判定两种方法相对精度的独立依据, 本文对两种结果进行等权平均, 以降低单一方法假设造成的局部偏差。该综合结果主要用于表征宏观古地貌格局, 不视为剥蚀厚度的唯一真实值。

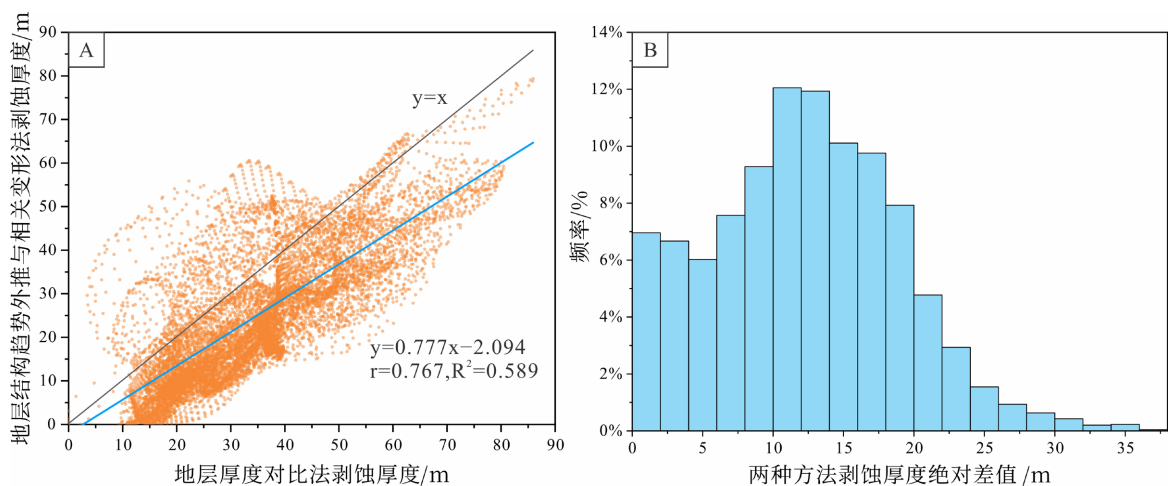


Figure 9. Quantitative comparison of erosion thickness obtained using two paleogeomorphological restoration methods: (A) correlation of erosion thickness at paired grid points; (B) frequency distribution of absolute erosion-thickness differences
图 9. 两种古地貌恢复方法剥蚀厚度的定量对比: (A) 剥蚀厚度相关性; (B) 剥蚀厚度绝对差值分布

等权综合结果显示,一间房组顶部平均剥蚀厚度为0~80 m(图 10)。高值区主要分布于东北部 X801(K)-Y845 井区、西部 X705 井和 Y718 井附近、西南部 X86-Y722 井区、南部 X706-Y833 井区以及 X9-Y741-Y831 井区;低值区主要位于 XS4-Y822-X76-X814(K)一带、Y821 井及 Y843 井附近。整体上,研究区呈多隆起、多洼陷相间分布的古地貌格局。该格局是在加里东中期 I 幕区域抬升背景下,由局部差异升降控制暴露和剥蚀程度,并经后期地表水汇流与溶蚀进一步改造形成的。

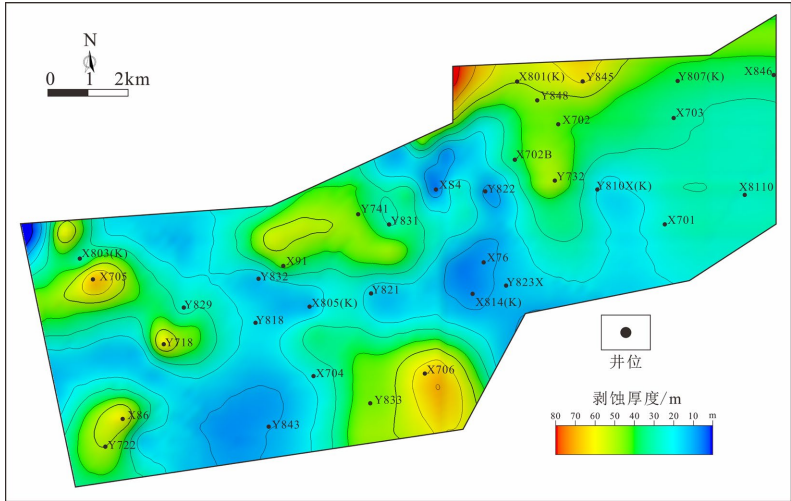


Figure 10. Average erosion-thickness contour map of the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield
图 10. 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部平均剥蚀厚度等值线图

5. 岩溶古地貌特征分析

在平均剥蚀厚度恢复结果的基础上,结合加里东中期 I 幕地表水系展布特征,对塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部岩溶古地貌进行综合分析。本文古水系展布主要依据中国石化西北油田分公司已有内部研究资料进行刻画。结果表明,研究区主要发育中部、西部和东北部三组古水系,其中中部和西部水

系较为发育，展布范围较大，汇流路径相对较长；东北部水系在研究区内局部发育。古水系主要沿相对低势区及高低地貌转换带展布，与平均剥蚀厚度所指示的相对古地貌格局基本吻合(图 11)。

综合平均剥蚀厚度的数值范围、等值线形态及空间展布特征，并结合已有古水系解释成果和相对古地貌高低转换关系，对研究区中奥陶统一间房组顶部岩溶古地貌进行分级划分。需要说明的是，本文恢复结果为基于剥蚀厚度构建的相对古地貌，其网格间距为 500 m，坡度、曲率和粗糙度等形态参数对网格分辨率及插值方法较为敏感，难以准确反映局部微地貌。因此，本文未将上述参数作为独立定量指标，而以剥蚀厚度为主要定量依据，以等值线形态、相对高低转换关系及古水系展布作为辅助约束。首先，将研究区岩溶古地貌划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地 3 类二级古地貌单元(图 12)；在此基础上进一步开展三级单元精细刻画，识别出岩溶峰丘、斜坡溶丘、丘丛洼地、丘丛谷地、盆内洼地和盆内谷地 6 类三级岩溶古地貌单元(表 4)。

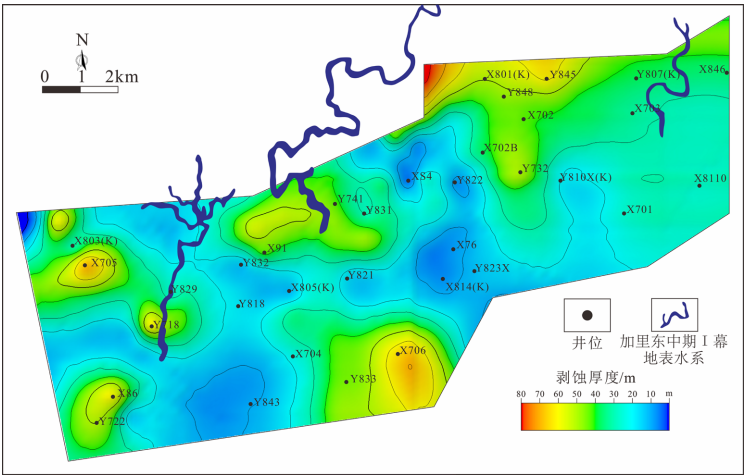


Figure 11. Paleohydrological geomorphology of the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield (modified from unpublished internal data of Northwest Oilfield Branch, SINOPEC)

图 11. 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部古水文地貌图(据中国石化西北油田分公司内部资料修编)

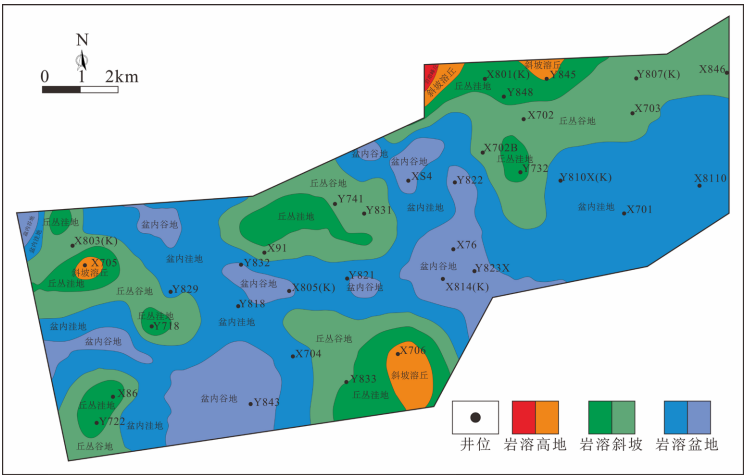


Figure 12. Classification map of karst paleogeomorphic units at the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield

图 12. 塔河油田八区中奥陶统一间房组顶部岩溶古地貌单元划分图

Table 4. Classification criteria for karst paleogeomorphic units at the top of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield

表 4. 塔河油田八区中奥陶统一间房组岩溶古地貌划分标准

二级古地貌单元	三级古地貌单元	地貌作用	一间房组顶部剥蚀厚度/m
岩溶高地	岩溶峰丘	以溶蚀 - 侵蚀作用为主	>75
	斜坡溶丘		60~75
岩溶斜坡	丘丛洼地		45~60
	丘丛谷地		30~45
岩溶盆地	盆内洼地		15~30
	盆内谷地		<15

5.1. 岩溶古地貌单元特征

(1) 岩溶高地

岩溶高地为研究区古地势相对最高的地貌单元，在剥蚀厚度图上表现为局部闭合高值区，多呈峰丘状或斑块状展布，可进一步划分为岩溶峰丘和斜坡溶丘两个三级古地貌单元。其中，岩溶峰丘平均剥蚀厚度大于 75 m，地貌形态以溶峰 - 洼地组合为主；斜坡溶丘平均剥蚀厚度为 60~75 m，常见溶丘、洼地及小型谷地，并在洼地和小型谷地内发育落水洞、漏斗等岩溶形态[11]-[15]。岩溶高地多位于古岩溶流域补给区，大气降水主要沿洼地、落水洞和裂缝垂向入渗，易形成溶孔、溶洞和垂向裂缝；但受长期暴露、充填作用和空间非均质性影响，有效连通储集体发育程度相对有限(图 13)。

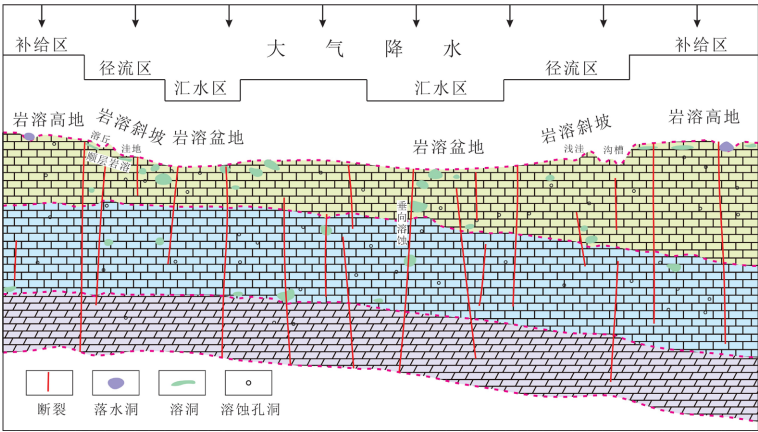


Figure 13. Conceptual model of karst paleogeomorphology and reservoir development of the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Block 8, Tahe Oilfield

图 13. 塔河油田八区中奥陶统一间房组岩溶古地貌与储层发育模式示意图

(2) 岩溶斜坡

岩溶斜坡为由岩溶高地向岩溶盆地过渡的带状地貌单元，位于剥蚀厚度高值区向低值区的过渡部位，等值线相对密集，多呈带状展布，局部可见残丘发育。岩溶斜坡多处于古岩溶径流区或补给 - 径流转换带，水动力条件较好，垂向渗流与侧向径流共同促进溶蚀孔洞和裂缝形成；同时，坡面残积物易被搬运、孔洞充填程度较低，因而有利于形成连通性较好的缝洞型储层[16]-[18]。

(3) 岩溶盆地

与岩溶高地和岩溶斜坡相比，岩溶盆地处于研究区相对低势部位，在剥蚀厚度图上表现为区域性低

值区,等值线相对稀疏。其三级古地貌单元主要包括盆内洼地和盆内谷地,常见微地貌形态包括平原、洼地、孤立溶丘或残丘等。受古地势和水动力条件控制,岩溶盆地内水流速度相对较慢,水动力条件较弱,岩溶作用强度低于岩溶高地和岩溶斜坡,以水平径流岩溶和局部滞流水体溶蚀为主[19]-[22]。由于该类地貌区地势低缓,沉积物和不溶残余物易于滞留,早期形成的孔洞和裂缝也易被泥质、钙质或其他胶结物充填,地层保存相对完整。因此,岩溶盆地内储集空间规模相对有限,孔洞-裂缝连通性较差,有效储集体发育相对受限[23]-[26]。

5.2. 不同古地貌单元储层发育差异及典型井验证

为验证古地貌分区与岩溶储层发育的关系,分别选取岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地内的 X705、X702B 和 X814(K)井作为典型井,以一间房组顶界为 0 m,对比其测井解释储层厚度、I~II 类储层比例、孔隙度、裂缝概率以及钻井、录井和动态资料(图 14)。

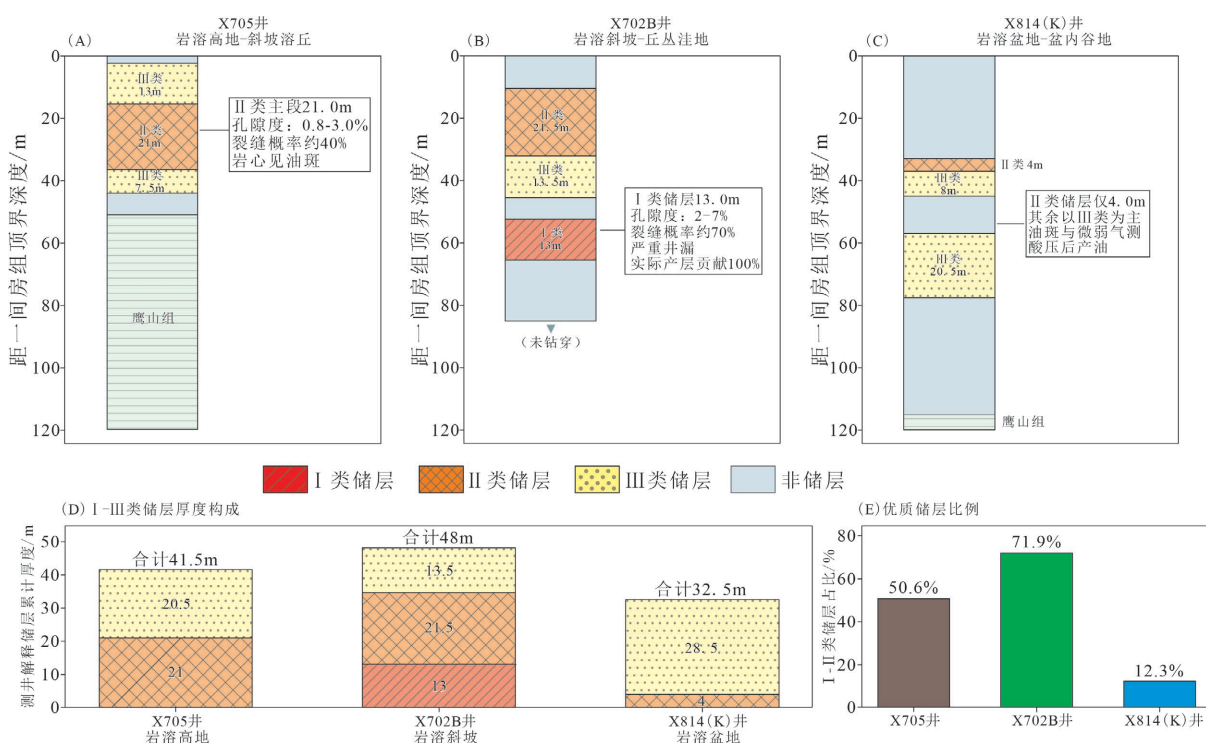


Figure 14. Comparison of reservoir development characteristics of typical wells in different karst paleogeomorphic units
图 14. 不同岩溶古地貌单元典型井储层发育特征对比

岩溶高地斜坡溶丘内的 X705 井, I~III 类解释储层累计厚度为 41.5 m, 其中 II 类储层厚 21.0 m, I~II 类储层占 50.6%; II 类储层主段孔隙度为 0.8%~3.0%, 裂缝概率约 40%, 岩心可见油斑。岩溶斜坡丘丛洼地内的 X702B 井, 在已钻遇的一间房组井段内, I~III 类储层累计厚度为 48.0 m, 其中 I 类和 II 类储层分别为 13.0 m 和 21.5 m, I~II 类储层占 71.9%; I 类储层孔隙度为 2%~7%, 裂缝概率约 70%, 并发生严重井漏。产液剖面显示, 5555.0~5561.5 m 井段贡献率为 100%, 表明其裂缝-孔洞系统连通性较好。需要说明的是, 该井未钻穿一间房组, 储层厚度仅代表已钻遇井段。岩溶盆地盆内谷地内的 X814(K)井, I~III 类储层累计厚度为 32.5 m, 其中 II 类储层仅 4.0 m, 未解释出 I 类储层, I~II 类储层占 12.3%; 该井仅见少量油斑和微弱气测异常, 酸压后获得产油, 表明改造能够改善井段导流能力。由于三口井的测试与改

造条件不同,其产能不作直接定量比较。

典型井对比表明,岩溶斜坡 I~II 类储层最为发育,岩溶高地次之,岩溶盆地相对较差。岩溶斜坡位于古地貌高、低势区的转换部位,垂向渗流与侧向径流共同作用,有利于溶蚀孔洞和裂缝的形成与连通;岩溶盆地水动力较弱且易受充填,优质储层发育受限。加里东中期区域抬升和局部差异升降塑造了研究区多隆多洼的古地貌格局,古地貌控制岩溶水汇流与水动力分带,断裂及伴生裂缝则可能为垂向渗流和缝洞连通提供通道。

6. 结论

(1) 塔河油田八区中奥陶统一间房组处于长期继承性抬升与多期构造活动叠加改造背景下,碳酸盐岩地层厚度较大,剥蚀改造特征明显。地层厚度对比法能够从钻井厚度差异角度约束剥蚀量,地层结构趋势外推与相关变形法能够从地震剖面地层结构恢复角度刻画剥蚀厚度。两种方法联合应用,可相互验证和补充,较好地适用于塔河油田八区岩溶古地貌的定量恢复。

(2) 综合两种方法的恢复结果,研究区中奥陶统一间房组顶部平均剥蚀厚度为 0~80 m,平面上呈多个局部高值区与低值区相间分布的特征。高值区主要分布于 X801(K)-Y845 井区、X705 井附近、Y718 井附近、X86-Y722 井区、X706-Y833 井区以及 X9-Y741-Y831 井区,指示这些部位在暴露剥蚀期处于相对古地貌高部位;低值区主要分布于 Y843 井附近及研究区中部局部区域,代表剥蚀作用相对较弱、地势相对较低的古地貌部位。整体来看,研究区一间房组顶部古地貌呈现多隆起、多洼陷相间分布的格局,并形成多个相对独立的岩溶古地貌单元。

(3) 在岩溶古地貌恢复结果基础上,研究区可划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地 3 类二级古地貌单元,并进一步划分出岩溶峰丘、斜坡溶丘、丘丛洼地、丘丛谷地、盆内洼地和盆内谷地 6 类三级古地貌单元。其中,岩溶斜坡处于岩溶高地向岩溶盆地过渡部位,水动力条件较好,顺层岩溶、垂向溶蚀、水平径流溶蚀和潜流溶蚀作用较为发育,常见溶蚀孔洞、溶蚀裂缝和高角度裂缝,局部溶洞规模较大。该类地貌区充填作用相对较弱,易形成连通性较好的缝洞型储集空间,是塔河油田八区一间房组岩溶储层发育的有利部位。加里东中期区域抬升和局部差异升降共同塑造了研究区多隆多洼的古地貌格局,古地貌控制岩溶水的区域运移与分带,断裂-裂缝系统则对局部溶蚀和缝洞连通具有强化作用。

参考文献

- [1] 冯磊,刘宏,谭磊,等. 岩溶古地貌恢复及油气地质意义——以四川盆地泸州地区中二叠统茅口组为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 60-69.
- [2] 康玉柱. 中国海相油气田勘探实例之四塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005(4): 31-38.
- [3] 蔡忠贤,张恒,漆立新,等. 塔里木盆地中-下奥陶统岩溶水文地貌结构类型及特征[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 43-58.
- [4] 竇之林. 碳酸盐岩缝洞型油藏描述与储量计算[J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 9-15.
- [5] 韩剑发,苏洲,陈利新,等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1296-1310.
- [6] 王阳洋,陈践发,庞雄奇,等. 塔中地区奥陶系油气充注特征及运移方向[J]. 石油学报, 2018, 39(1): 54-68.
- [7] 宋刚,李海英,叶宁,等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起顺北 4 号走滑断裂带成岩流体类型及活动特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 603-612.
- [8] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [9] 张涛. 塔里木盆地阿克库勒凸起奥陶系岩溶型储层形成与保持研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [10] 叶蕾,朱筱敏,谢爽慧,等. 沉积古地貌基本恢复方法及实例研究: 以饶阳凹陷沙一段为例[J]. 古地理学报,

- 2023, 25(5): 1139-1155.
- [11] 蔡俊杰. 塔里木盆地巴楚地区中下奥陶统鹰山组顶面构造演化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [12] 张长建, 杨德彬, 吕艳萍, 等. 塔河油田海西运动早期岩溶水系统划分及特征[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(6): 646-656.
- [13] 高泽. 塔河油田四、六区鹰山组暗河岩溶储层发育特征及控制因素[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [14] 张长建, 蒋林, 文欢, 等. 塔里木盆地塔河油田逆冲背斜区奥陶系古暗河系统发育特征[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 333-341.
- [15] 谭鑫. 塔河油田奥陶系古河道空间结构研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2020.
- [16] 李凤磊, 林承焰, 张国印, 等. 塔北地区多期走滑断裂地球物理响应特征及精细识别[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 1-14.
- [17] 张三, 金强, 赵深圳, 等. 塔河油田海西运动早期奥陶系岩溶地貌[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(5): 527-534.
- [18] 杨德彬, 何新明, 张恒, 等. 塔河油田主体区奥陶系表层岩溶带智能识别及缝洞发育规律[J]. 石油学报, 2024, 45(2): 374-389+411.
- [19] 张君龙, 胡明毅, 冯子辉, 等. 塔里木盆地古城地区寒武系台缘丘滩体类型及与古地貌的关系[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 94-105.
- [20] 余源琦, 鲜本忠, 李君. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐古地貌恢复研究[C]//中国石油学会石油地质专业委员会, 北京石油学会. 第八届中国含油气系统与油气藏学术会议论文摘要汇编. 杭州: 中国石油学会石油地质专业委员会, 北京石油学会, 2015: 53-54.
- [21] 李九梅. 塔里木盆地玉北及邻区构造演化及寒武-奥陶系构造古地貌重建[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [22] 宁超众, 胡素云, 潘文庆, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 985-995+1047.
- [23] 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(5): 522-525.
- [24] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 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.
- [25] 张长建, 杨德彬, 蒋林, 等. 塔里木盆地塔河北部“过溶蚀残留型”断溶体发育特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 367-383.
- [26] 姜应兵, 李兴娟. 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[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 824-836.