

塔里木盆地塔河油田奥陶系断控型大气水岩溶储层结构研究

马晓强^{1,2)}, 侯加根^{1,2)}, 胡向阳³⁾, 刘钰铭^{1,2)}, 齐得山^{1,2)}, 马晓勇⁴⁾, 邹婧芸^{1,2)}

1) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京, 102249;

3) 中国石化石油勘探开发研究院, 北京, 100191;

4) 中国石化中原油田分公司采油二厂, 河南濮阳, 457512

内容提要:古岩溶作用能够形成极具潜力的油气储层。以断控型大气水岩溶储层结构为切入点,在塔里木盆地北缘奥陶系相似露头区调查的基础上,从形态及成因角度明确了4种结构单元,并以塔河油田四区S48单元为例,开展了地下研究。研究表明,主要形成于饱水带的地下河型洞穴规模最大,纵向发育型洞穴与孤立洞厅的差别在于高度直径比是否大于1;三者有多种组合方式,控洞断裂是重要的连接途径,3类洞穴与断裂的匹配数分别达到了2.5、1.9和1.7,洞穴发育与断裂分布有良好的耦合关系;此外,古地貌也在一定程度上控制着岩溶的发育。

关键词:岩溶;洞穴;储层结构;地下河;竖井;洞厅;控洞断裂

岩溶作用一般有3种类型,包括大气水岩溶、埋藏岩溶和热液岩溶等,其中大气水岩溶最为普遍,即碳酸盐岩地层暴露地表经长期的大气水淋滤而发生的溶蚀作用,世界上很多的碳酸盐岩储层都与此作用有关(顾家裕,1996;鲍志东和朱井泉,1998;顾家裕和周兴熙,2001;Loucks, 1999; Loucks et al., 2004;夏日元等,2006;康玉柱,2008;Breesch et al., 2009)。1996年发现的塔河油田奥陶系储层就是一个典型的暴露环境下的断控型大气水岩溶储层,奥陶纪沉积的以礁滩相灰岩为主的巨厚碳酸盐岩为岩溶作用的发生提供了物质基础,早海西期由于北天山洋的逐渐关闭,塔北地区受构造挤压大幅隆起,产生了大量多级次的断裂和裂缝(冯增昭等,2005;鲍志东等,2006;安海亭等,2009),也为后来海西—加里东期岩溶作用的发生提供了有利条件。储层研究最终是要认识其非均质体系,对储层结构(骨架)的研究十分关键。目前国内针对断控暴露型大气水岩溶储层内部结构的研究还比较少,多以地震缝洞雕刻为主,笔者借鉴储层构型研究的思路(Miall, 1985),尝试探讨了该类储层的结构,以期抛砖引玉。

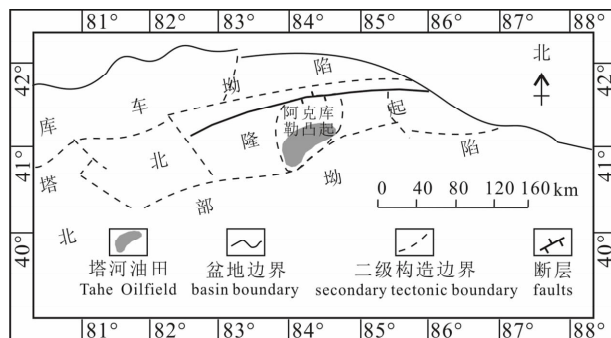


图1 塔里木盆地塔河油田构造位置

Fig. 1 Location features of the Tahe Oilfields, Tarim Basin

1 地质概况

塔河油田是我国第一个特大型古生界海相碳酸盐岩油田(康玉柱,2002),位于塔里木盆地塔北隆起西南翼的阿克库勒凸起(二级构造单元)斜坡带上,呈北东向展布、向南西倾伏(图1)。受加里东晚期、海西期以及燕山期等多期构造运动的影响,阿克库勒凸起主体部位及南部斜坡的大部分地区缺失志

注:本文为国家重点基础研究发展计划(973)课题“碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型研究”(编号2011CB201003)、国家科技重大专项课题“缝洞型碳酸盐岩油藏三维地质建模技术”(编号2011ZX05014-002)的成果。

收稿日期:2013-01-23;改回日期:2013-03-26;责任编辑:黄敏。

作者简介:马晓强,男,1982年生。博士研究生,石油地质专业。Email:xiaoqiang_ma@sina.com。

留系、中下泥盆统、上石炭统、二叠系、上侏罗统地层,并且上奥陶统与中、下奥陶统均遭受不同程度的剥蚀。奥陶系共划分为6个岩石地层单元(组),即奥陶系下统蓬莱坝组、下一中统鹰山组、中统一间房组、上统恰尔巴克组、良里塔格组和桑塔木组(表1),奥陶系岩溶型储层主要发育于一间房组和鹰山

组顶部的古风化壳,即中下奥陶统顶部,埋深达5000 m 以上。早奥陶世,该区基本处于台地内部沉积区,以台内浅滩相颗粒灰岩和开阔台地相微晶灰岩交替发育为主,二者也是下奥陶统的主要岩石类型。四区位于油田主体区,面积约 57.4km²。基质原生孔隙所剩无几,其有效储集空间表现为大洞大

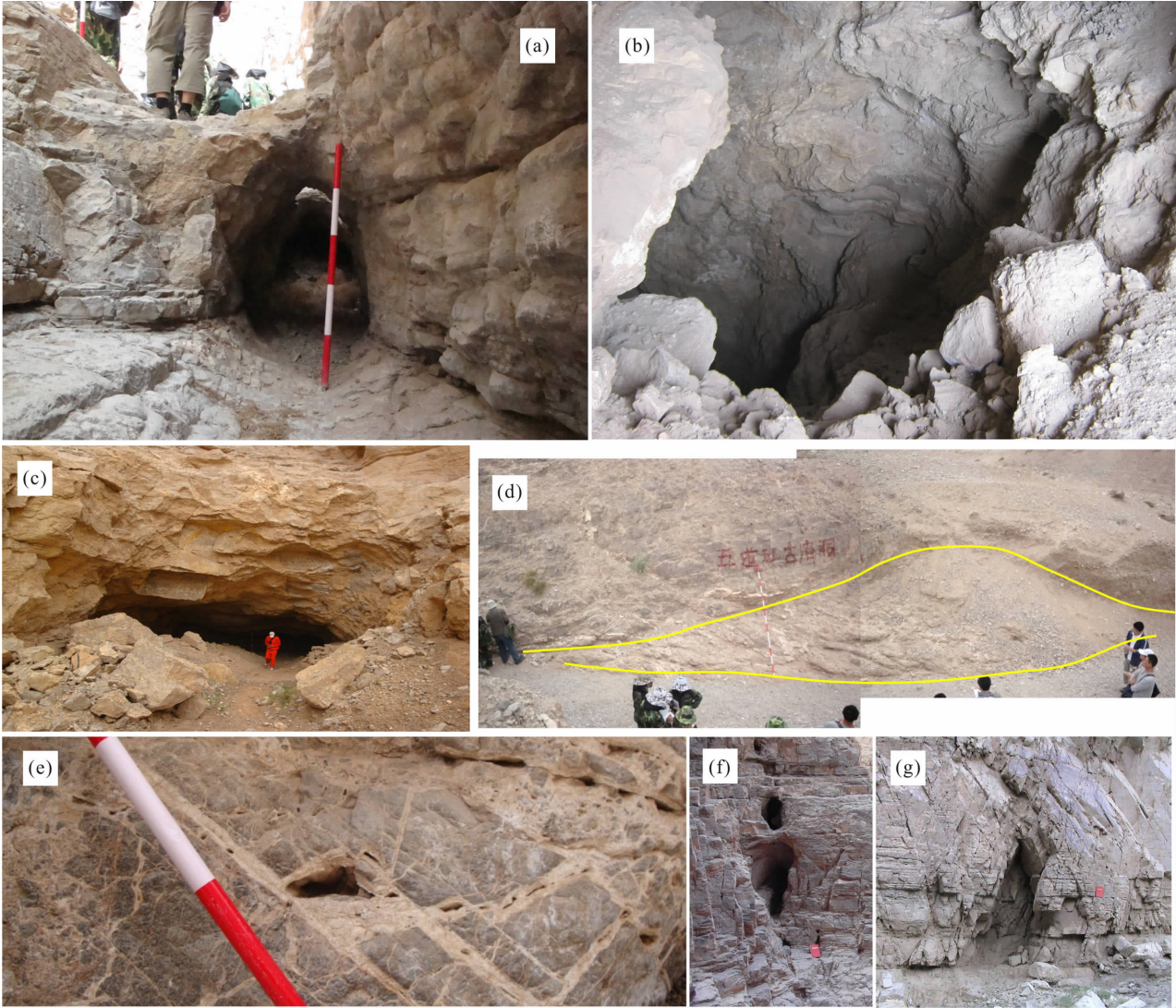


图 2 塔北巴楚地区古岩溶储层结构单元的露头特征

Fig. 2 Outcrops characteristics of palaeokarst reservoirs framework elements in the Bachu Area, northern Tarim Basin
(a)中奥陶统一间房组,位于硫磺沟 3 号沟,为水平径流形成的管道;(b)一间房组,位于硫磺沟 1 号沟,该洞穴竖向延伸达 16m;(c)一间房组,位于一间房地区 314 国道 1262km 处,为一洞穴厅堂,直径约 10m;(d)一间房组,位于五道班,横向宽 17.6m,红漆字为“五道班古溶洞”;(e)、(f)、(g)一间房组及鹰山组,位于一间房南 7.5km 处,断裂发育处发生的溶蚀扩大及断裂交汇处形成的洞穴
(a)the horizontal karst tunnel located in the Middle Ordovician Yijianfang Formation at No. 3 outcrop of Liuhuanguo;(b) the longitudinal cave extending for some 16m located in the Yijianfang Formation at No. 1 outcrop of Liuhuanguo;(c) the karst cave hall located in the Yijianfang Formation near the 1262 km kilostone of national road No. 314, which has a diameter of about 10m; (d)the karst cave hall laterally expanding for some 17.6m located in the Yijianfang Formation at Wudaoban, and the red mark is "Wudaoban palaeocave";(e), (f), (g) the caves developed from the faults and faults intersection, which located in the Yijianfang Formation and Yingshan Formation at about 7.5km south to Yijianfang aera

缝。钻井证实的溶洞最大高度可达 72m;纵向上,奥陶系风化壳之下 160m 以内均有溶洞不均匀地分布。

2 储层结构单元分析

要分析储层结构,首先应明确储层的结构单元,即构成储层的地质实体,对塔河来说,最关注的就是洞穴及断裂。合理的结构单元划分一定是能够反映成因机理的。依据岩溶地质理论,自地表向下,岩溶水作用强度是渐弱的,岩溶发育表现出明显的分带特征,如包气带和饱水带(也叫水平径流带),不同岩溶带内发育不同的岩溶形态(任美镔等,1983)。

2.1 结构单元的露头认知

塔北中央隆起西端巴楚断隆上的巴楚露头区与塔河油田奥陶系在地层、岩性、构造演化等方面均具有较好的一致性,两者的岩溶发育可对比度高。露头中发现的洞穴规模在米级至 10m 级,常因充填萤石、方解石、硫磺等矿产而被人工挖掘,导致原始状态被不同程度地破坏。通过对露头的调查,发现洞穴的空间形态是多种多样的,但主要有横向和竖向 2 种。竖向洞穴主要形成于地下水位以上的包气带,这是由于水迅速通过断层或裂隙向深部运动;横向洞穴主要形成在地下水位附近或以下的饱水带,这是由于此带几乎常年有水,而水主要沿水平方向溶蚀。断裂改善了岩石的透水性,促进了水的输入与排泄,使得溶蚀作用不仅止于地表,断裂的延伸范围也影响着岩溶体系的发育范围,断裂和洞穴形成了一个可代谢系统。

对洞穴来说,分类过细,在地下研究中较难实现,因此,从适应储层研究需要的角度出发,依据成因及发育特征等因素,重点细化洞穴,将结构单元确定为地下河型洞穴(管道型)、纵向发育型洞穴(竖井型)、孤立洞厅(厅堂型)及控洞断裂 4 种。

2.1.1 地下河型洞穴

地下河型洞穴是横向展布的、具有河流特性的地下岩溶管道(图 2a,图中所用红白标杆每色段为 20cm,后文相同),岩溶水于此汇集,可分支分叉,干流与支流可组成管道网络,通常发育规模较大,以饱水带发育为主。在发育过程中,构造运动产生的岩溶水基准面变化、压实作用等,可以形成地下河管道在空间上的多层叠置。

2.1.2 纵向发育型洞穴

纵向发育型洞穴是呈纵向展布的岩溶形态,包括竖井、落水洞、漏斗等,规模更大的可称天坑(图 2b)(任美镔等,1983),多是大气水沿先前存在的裂缝(隙)进行溶蚀扩大而形成的,与裂缝(隙)在发育上有继承性,也是岩溶水进入地下河的主要途径,以包气带中发育为主。

2.1.3 孤立洞厅

这里的孤立是相对的,因为洞穴的形成一定是一个物质、能量输入输出的持续性过程,洞穴不可能是绝对的孤立存在。溶蚀的初期洞穴彼此是孤立的,随岩溶作用的不断进行,水流不断集中,孤立洞穴会逐渐沟通或发生合并,在洞穴未沟通合并前,若局部岩溶水作用由于某些因素发生变化而终止的话,则这些区域的洞穴就会停止扩大,而孤立地保存下来。因此,孤立洞厅可以说是一种中间阶段形态

表 1 塔里木盆地塔河油田奥陶系油藏地层简况			
Table1 Stratigraphy outline of Ordovician reservoirs in the Tahe Oilfields, Tarim Basin			
奥陶系	上统	桑塔木组	O _{3s} 上段粉砂质泥岩夹白云质泥岩或白云岩;下段泥晶灰岩与粉砂质泥岩互质
		良里塔格组	O _{3l} 泥微晶灰岩,局部砾屑灰岩、鲕粒灰岩
		恰尔巴克组	O _{3q} 泥灰岩、生屑灰岩,夹泥岩
	中统	一间房组	O _{2yf} 砂屑灰岩、生物灰岩,含泥微晶灰岩及细粉晶灰岩
		鹰山组	O _{1-2y} 上段泥微晶灰岩、泥微晶砂屑灰岩互层,下段泥微晶灰岩夹白云质灰岩、灰质白云岩
	下统	蓬莱坝组	O _{1p} 白云岩、灰质白云岩夹白云质灰岩

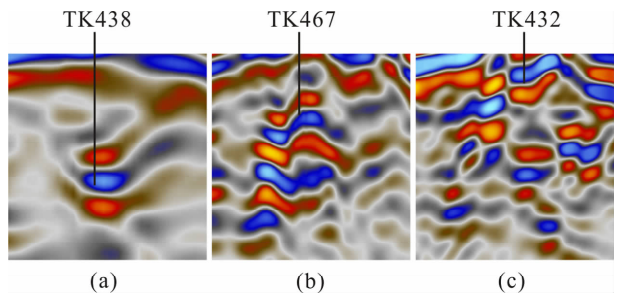


图 3 塔里木盆地塔河油田奥陶系溶洞储集体地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of Ordovician caves in the Tahe Oilfield, Tarim Basin

(a) 串珠状;(b) 变形串珠状;(c) 杂乱状

(a) bead-chain reflection;(b) variation of bead-chain reflection;(c) chaotic reflection

(图 2c,2d),它在包气带及饱水带均可发育。

实际上,所谓孤立洞厅有很多溶扩后与地下河型洞穴或纵向发育型洞穴连为一体,不同类型洞穴在同一位置套合发育,在钻井特别是地震资料中进行严格区分是非常困难的,而本文中所分析的孤立洞厅是指那些非套合发育的部分,为继续论述,希望大家对此有一个共识。

2.1.4 控洞断裂

在塔河,超过 95% 的油气产量来自于溶洞,油

田生产也是“分洞布井,逐洞开发”(焦方正和窦之林,2008),即便如此,较大尺度的断裂仍是具有一定储集能力的,但其更重要的功能是渗流通道,断裂的存在为地表水向地下渗流提供了路径,因此,断裂对岩溶的发育有着明显的控制作用(顾家裕,1999;何发岐,2002),有学者称其为控洞断裂(周文等,2011),笔者此处依旧使用此命名。断裂不仅是溶蚀作用发生的有利部位(生洞缝),还控制岩溶的个体形态,如向下溶蚀可形成落水洞,断裂交汇处易形



图 4 塔里木盆地塔河油田溶洞充填物的露头及岩芯特征

Fig. 4 Characteristics of outcrops and cores of different karst-cave fillings in the Tahe Oilfield, Tarim Basin

(a)、(b)、(c)搬运型沉积充填物:主要为流水作用的产物,以砂、砾及泥质为主,富含外来组分颗粒,有不同程度的分选及磨圆,可见到流水沉积层理如平行层理、交错层理等,此类充填物常与垮塌角砾混积;(d)、(g)垮塌型堆积充填物:溶蚀裂缝致岩石垮塌崩落,形成角砾岩,其成分与围岩一致,分选、磨圆差,角砾自身也可能是裂纹化的;(e)、(f)化学型胶结充填物:洞穴水以化学沉淀方式沿洞壁向洞中生长而形成充填物质(如石笋、石钟乳),其成分主要为方解石,具纹层状多期沉淀特征

(a),(b),(c) sedimentary fillings are mainly the exotic conglomerate, sandstone and mudstone with some sorting and rounding which is produced by fluid flow developing parallel beddings and cross beddings et al., and the sediments always blend with breccia;(d),(g) collapsed breccia fillings are actually the fragmentized matrix produced by corrosion, and itself could be cracked;(e),(f) chemical cement fillings are formed from the chemical precipitation of the karst by growing along the cave walls (e.g., stalagmites and stalactites), and its composition is mainly of calcite with characteristics of multiphase bedded

成洞穴厅堂,沿断裂带受强烈水流作用可形成沟谷,沿水平(层面)断裂可发育顺层溶蚀等(图 2e, 2f, 2g)。这类较大尺度的断裂与洞穴的形成有着直接关系,是岩溶型储层的一个有机组成单元,是结构分析的一个重要组成部分。而那些级序低、尺度较小的次生裂缝如洞穴垮塌形成的洞生缝或溶蚀缝等对岩溶发育没有明显的控制作用,本文暂不表述。

2.2 结构单元的地下识别

S48 缝洞单元是塔河油田四区乃至整个油田储、产量最大的典型单元之一,其整体处于岩溶高地区域,大气水岩溶作用十分发育。以此为实例,以露头认知为指导,笔者开展了结构单元的地下识别研究。在 4 种储层骨架结构单元中,控洞断裂的识别方法是相对成熟而有效的,但对洞穴来说,不仅要知

道“是不是洞”,还要知道“是什么洞”,即不仅要预测洞穴的存在与否,更关键的是判定洞穴的类型。

2.2.1 控洞断裂的识别

控洞断裂并无绝对尺度,在塔河,多为发育于缝洞单元内部,影响着流体系统的四级或五级断层,断距在几米至几十米,通常通过振幅类和连续性如相干等多种属性的直接人工解释即可获取(王光付,2008;温志新等,2008;黄捍东等,2009),此外,考虑到暴露型岩溶储层断裂发育的复杂性,在实际工作中,我们还利用了基于蚁群算法的蚂蚁追踪技术(Ant Tracking),对相干属性体进行再处理,自动提取断裂信息。将常规解释结果与蚂蚁追踪自动解释结果进行对比,相互补充和修正,降低了人为因素对断裂识别的影响,有效地提高了断裂识别精度,取得

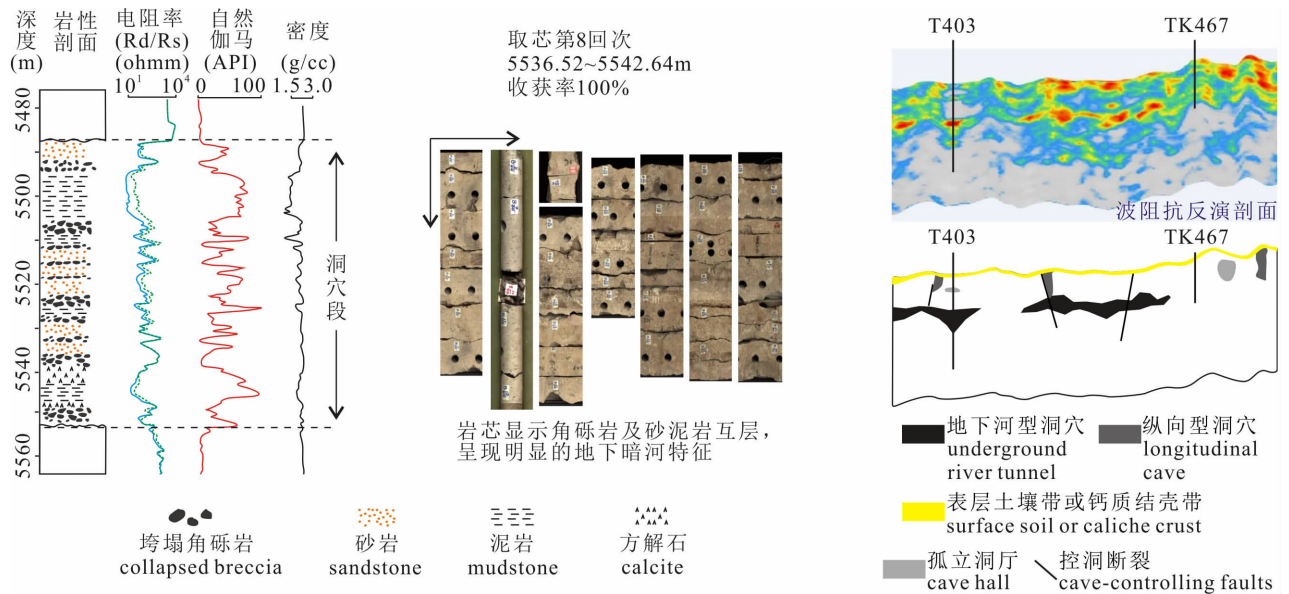


图 5 塔里木盆地塔河油田四区岩溶储层结构单元的综合识别

Fig. 5 Comprehensive identification of reservoirs framework elements of the 4th block in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

了很好的效果(侯加根等,2012)。

2.2.2 洞穴的钻测井特征

井钻遇溶洞时钻时常会降至极低,并发生放空、漏失、井涌、掉钻等现象,致使提前完钻;测井曲线上表现为低电阻率,低密度,中子、声波时差增大,有砂泥充填的洞穴自然伽玛值较无砂泥充填的洞穴偏高,曲线整体的偏移起伏幅度大,FMI 成像测井图像上呈现暗色阴影区或斑块状;产液剖面解释中的具有规模的产液段也应是洞穴发育段。

2.2.3 洞穴的地震响应特征

溶洞周缘破碎带的规模尺度远大于其腔体空间,为地震识别溶洞提供了现实依据。

(1)反射特征:在塔河,溶洞的地震反射特征以“串珠状”为主,也包括各种“变形串珠状”及杂乱状

反射(图 3)。表层溶洞(距奥陶系顶风化面 0 ~ 60m)为表层弱 + 内幕串珠状反射特征;中深部溶洞(距奥陶系顶风化面 60 ~ 240m)主要为整体串珠状反射特征。

(2)波阻抗反演特征:洞穴的存在使得储集体发育段的密度发生很大变化,进而在波阻抗反演剖面上表现异常。储层发育段的绝对波阻抗值一般小于 $1.55 \times 10^7 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$,这与钻井上的吻合程度高达 86.6%。联合振幅属性在反映溶洞异常体横向连续性 & 边界方面的优势和波阻抗反演的纵向高分辨率开展综合解释,可以较好地预测井间溶洞的位置、形态和规模,该方法在塔河油田预测的溶洞钻井吻合率达到 90% 以上。

2.2.4 洞穴类型的判定

钻、测井、地震等信息能够让我们知道“是不是洞”,但要回答“是什么洞”这个问题,除了地震响应异常形态能够提供一部分证据外,还需要岩芯录井等信息的佐证。

(1)不同洞穴发育深度不同:在单期岩溶中,地下河管道、竖井等汇水通道以及离散洞厅在发育深

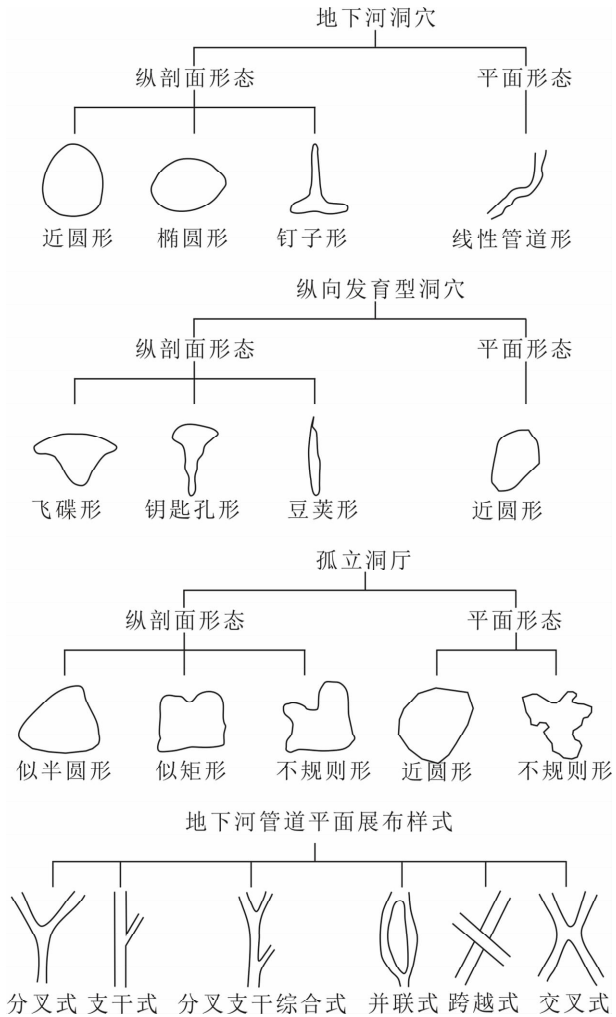


图 6 塔里木盆地塔河油田岩溶储层结构单元大形态 (据中国地质科学院岩溶地质研究所,2010, 修改)
Fig. 6 Profile of karst reservoirs framework elements in the Tahe Oilfields, Tarim Basin (after Institute of Karst Geology, CAGS, 2010)

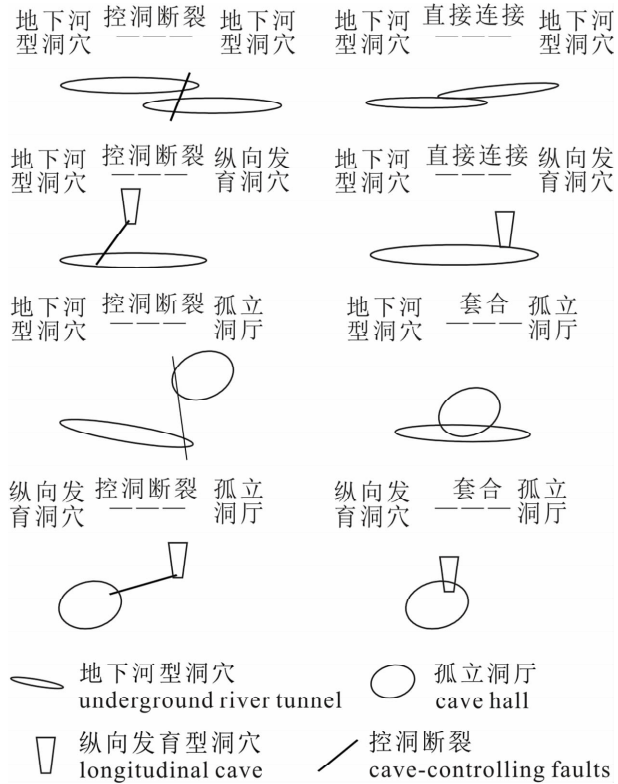


图 7 塔里木盆地塔河油田岩溶储层结构单元发育样式示意图
Fig. 7 Patterns of karst reservoirs framework elements in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

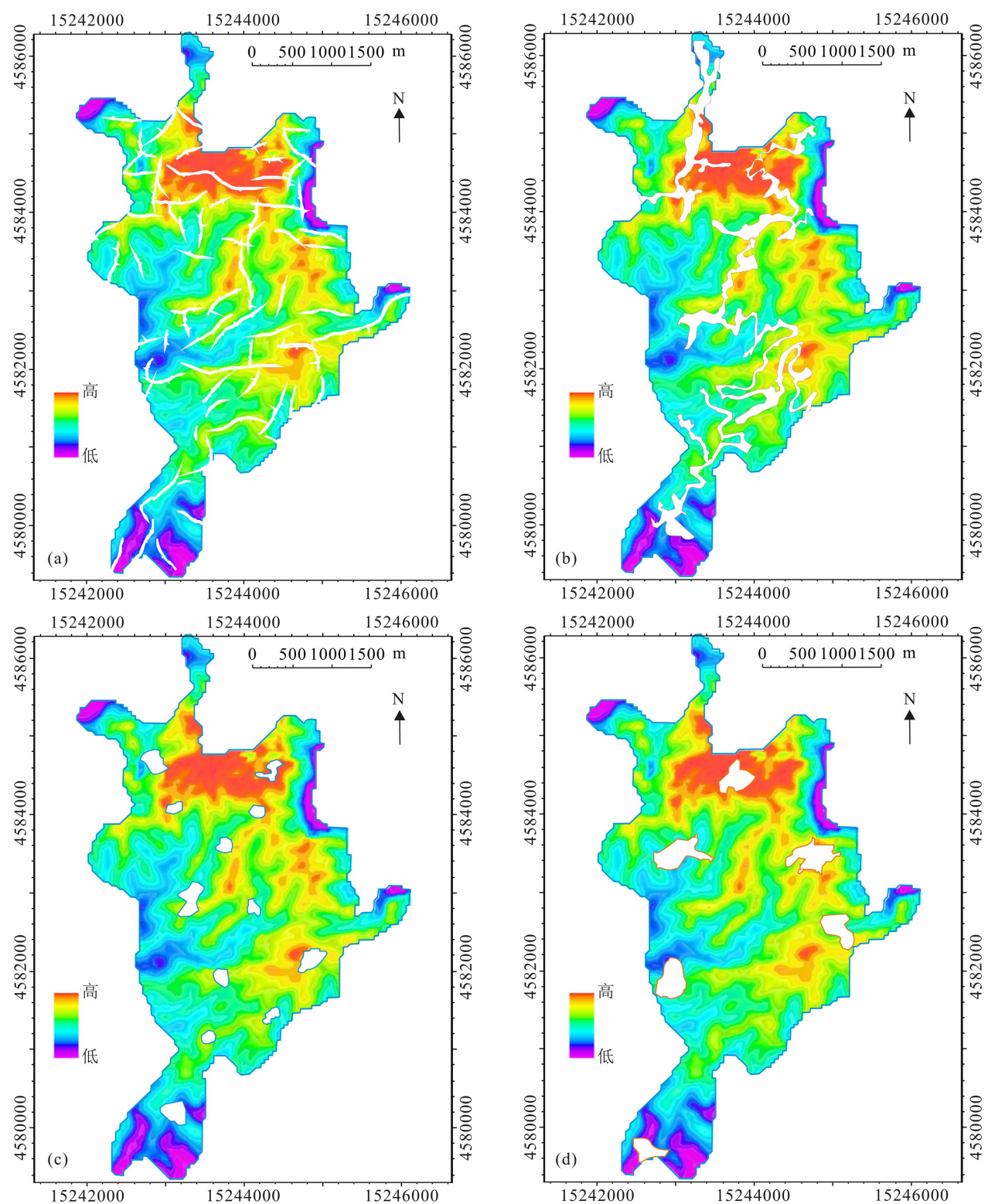


图 8 塔里木盆地塔河油田四区 S48 单元储层结构单元与古地貌平面叠合图

Fig. 8 Planar superimposition map of karst reservoirs framework elements and palaeogeomorphic of the 4th block S48 unit in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

(a) 控洞断裂与古地貌叠合; (b) 地下河型洞穴与古地貌叠合; (c) 纵向型洞穴与古地貌叠合; (d) 孤立洞厅与古地貌叠合

(a) cave-controlling faults superposed upon palaeogeomorphic map; (b) underground river tunnels superposed upon palaeogeomorphic map; (c) longitudinal caves superposed upon palaeogeomorphic map; (d) cave halls superposed upon palaeogeomorphic map

度上是有明显区别的,竖向洞穴多是由地表向下或近地表发育,位于包气带,而地下河系统多是形成于下部的饱水带,孤立洞厅则较随机。

(2)不同洞穴充填不同:洞穴充填是一个非常重要的依据。据露头及岩芯观察常见的洞穴充填物有 3 种,搬运型沉积物(图 2a、b、c),垮塌型堆积物(图 2d、g)以及化学型胶结物(图 2e、f),后两者为原地充填,没有发生搬运(肖玉茹等,2003),垮塌程度是与前期充填程度密切相关的。地下河型洞穴的显著特征就是充填有大量搬运型沉积物,孤立洞厅则多为垮塌型堆积物及化学型胶结物充填,罕有搬运型沉积物,纵向发育型洞穴与离散洞厅较为相近,但其充填程度更高。

以 S48 单元 T403 井为例,该井在钻至 5488m 时,发生漏失,泥浆只进不出,电测曲线上,5488 ~ 5554m 段密度及电阻率均为明显的低值区,区别于基岩的高密度、高电阻率,自然伽马曲线高低交替起伏,从该段的取芯中也明显见到大量砂泥沉积和垮塌角砾的互层;而从过该井的波阻抗剖面来看,横向展布呈连续条带状,故综合判定其为地下河型洞穴(图 5)。

3 储层结构特征

储层结构即是储层骨架(Framework),储层结构的表征应不仅描述出储集体在三维空间中的展布,还要用一些定量参数加以表征。依据前述思路,在 S48 单元识别出了 7 条地下河,12 个纵向洞穴,6 个孤立洞厅及 69 条控洞断裂。

3.1 结构单元几何学参数

3.1.1 结构单元形态

洞穴形态综合反映了地质条件和水动力条件的差异,本文论述的是洞穴研究中的大形态(图 6),而非发育在大形态通道表面上小形态(speleogen)(袁道先,1988)。地下河型洞穴呈管道状在空间中延伸,可有多级次的分支和分叉,受控于潜水面位置和地质构造条件;纵向发育型洞穴多沿地下河在平面上呈散点状分布;离散洞厅则较为分散;而控洞断裂多为高角度产出,断面较平直^①。

3.1.2 结构单元规模

3 类洞穴中地下河型洞穴的规模是最大的;纵向发育型洞穴与孤立洞厅的显著差别在于平均宽厚比,前者通常小于 1,而后者则大于 1;竖向洞穴在数量上、横向洞厅在规模上,分别占有优势(表 2)。控洞断裂缝宽 10 ~ 50cm,间距 80 ~ 150m,延伸长度可

达 50 至数百米。

表 2 塔里木盆地塔河油田奥陶系油藏 S48 单元洞穴规模参数
Table 2 Dimensional parameters of Ordovician reservoirs framework elements of S48 unit in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

	数量 (个)	平均 长度 (m)	平均 宽度 (m)	平均 厚度 (m)	平均 长宽 比	平均 宽厚 比
地下河管道	7	2923	79	18	36	4.5
纵向发育型洞穴	12	143	103	231	1.38	0.45
离散洞厅	6	250	139	49	1.9	3.6

3.2 结构单元空间展布

结构单元的空间展布是十分复杂的,不同类型缝、洞通过多种组合方式共同组成一个有机系统,只有综合分析才能更全面地认识缝洞单元。

3.2.1 结构单元发育样式

洞穴与断裂体系之间是基础与继承、制约和发展的关系。地下河管道、纵向发育型洞穴以及孤立洞厅三者有多种沟通方式,控洞断裂在其中扮演了重要的“桥梁”角色(图 7),沿单一断裂往往发育成单支型地下河管道,若受多组断裂控制则形成树枝型或网络型管道系统。

3.2.2 结构单元空间发育规律

(1)平面不同地貌:岩溶发育受水活动的影响,而水活动直接受地貌条件(如坡度)的影响,一定程

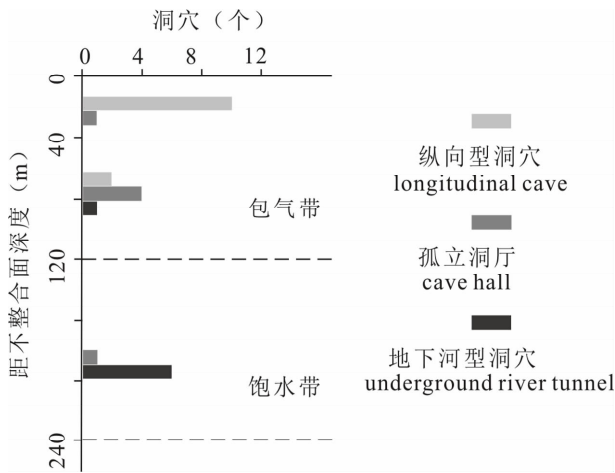


图 9 塔里木盆地塔河油田四区 S48 单元不同岩溶带内洞穴发育情况
Fig. 9 Caves development in different karst zones of the 4th block S48 unit in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

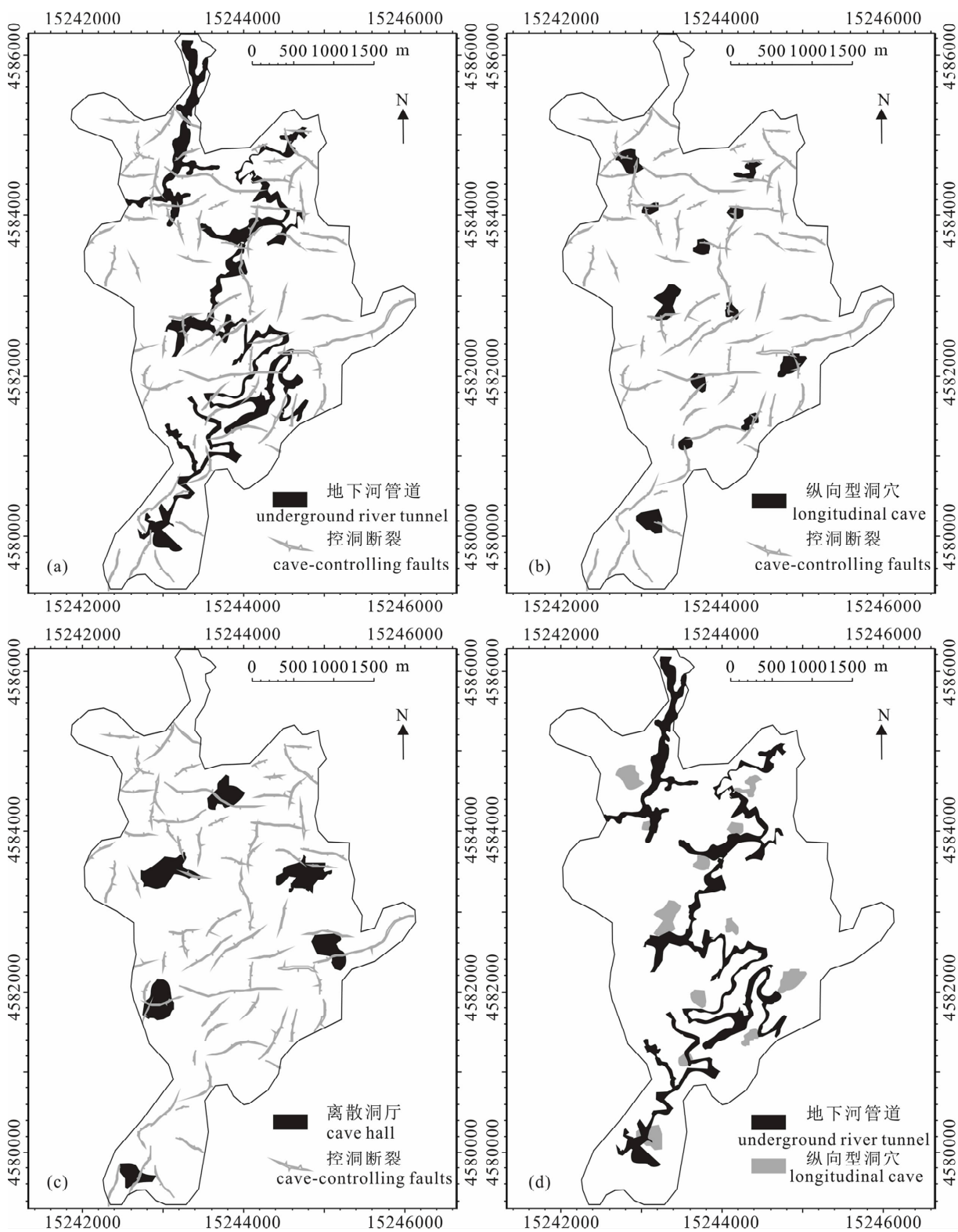


图 10 塔里木盆地塔河油田 S48 单元储层结构单元平面叠合图

Fig. 10 Planar superimposition map of reservoirs framework elements of the S48 unit in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

度上,古地貌控制着次生储集空间的形成与展布 (康志宏,2006;王萍等,2011;桑琴等,2012)。塔河地区在加里东—海西运动期,长期处于构造剥蚀状态,控洞断裂通常发育于地势剧变之处,洞穴主要发

育在岩溶高地及斜坡区域,岩溶洼地发育程度低,这是由于负地形区域是汇水区,水动力较弱(图8)。

(2)垂向不同岩溶带:构造抬升,地下水位基准面下降,可形成多层管道,新的地下河可下切直接与前期地下河相接;纵向发育型洞穴位于地下河上方,主要存在于包气带(图9),通常与控洞断裂连接或由断裂演化而来直接连接于地下河,这和它们在成因上的继承关系是一致的(李阳和范智慧,2011)。

3.2.3 结构单元配置参数

将不同结构单元进行平面叠合,可以发现一些规律性的数据,其中,地下河型洞穴与孤立洞厅之间、竖井型洞穴与孤立洞厅之间并无明显的配置规律,但可由断裂沟通,故不赘述。

(1)7条地下河总长约21km,与52条控洞断裂有叠置,平均每千米地下河匹配约2.5条断裂;地下河管道的优势发育走向为 $20^{\circ} \sim 70^{\circ}$,这与控洞断裂的优势走向保持一致,也从侧面证实了断裂对溶洞发育的控制作用(图10a)。

(2)12个纵向发育型洞穴均与23条断裂相关,平均每个洞穴匹配1.9条断裂(图10b);竖井或落水洞是沿断裂发育的,其一定与断裂连接或其前身就是断裂。

(3)6个孤立洞厅与10条控洞断裂相关,平均每个洞穴匹配1.7条断裂,其相关率最低,岩溶水运动通道局限,也是孤立洞厅“相对孤立”的一个原因(图10c)。

(4)此外,12个纵向发育型洞穴与7条地下河或叠置、或相邻,其作为汇水通道的角色不言而喻(图10d)。

3.3 储层结构三维地质模型

在储层结构定性特征及各类统计参数的基础上,基于研究目标(大洞大缝)通过目标体几何形态构建、目标体定位等步骤,确定性地建立了塔河油田S48单元的储层结构三维模型(图11),这与以往研

究者采用序贯指示等随机模拟方法建立的该类储层模型(杨辉廷等,2004;侯加根等,2012;鲁新便等,2012;马晓强等,2013;侯加根等,2013)已经有了很大的差别,其在刻画储层内部结构方面有了很大进步,可以说,通过对储层结构的表征,也在一定程度上提高了该类储层三维地质建模的精度,能够更好地再现储层的展布^{②⑤}。

4 认识与讨论

(1)在塔里木盆地北缘可对比露头调查的基础上,依据成因及发育特征等因素划分出了地下河型洞穴、纵向发育型洞穴、孤立洞厅以及控洞断裂4种成因结构单元,据此开展地下储层研究,能够有效地定性甚至半量化刻画储层骨架特征,这为该类储层的非均质表征提供了一种新的思路。

(2)在大气水岩溶型储层结构研究中,洞穴类型的判定是一个关键环节,洞穴存在与否我们能够给出肯定的答案,但要区分洞穴类型,除了依据钻、测井及地震信息外,还需要发育深度及充填特征的佐证。控洞断裂并没有一个绝对的尺度,通过常规解释方法与蚂蚁追踪方法的相互补正能够取得较好的识别效果。

(3)地下河系统是规模最大的洞穴系统,纵向发育型洞穴的高度直径比大于1,孤立洞厅的高度直径比小于1,这是二者的最显著区别。断裂和溶洞之间有多种组合方式,前者在其中扮演着重要的

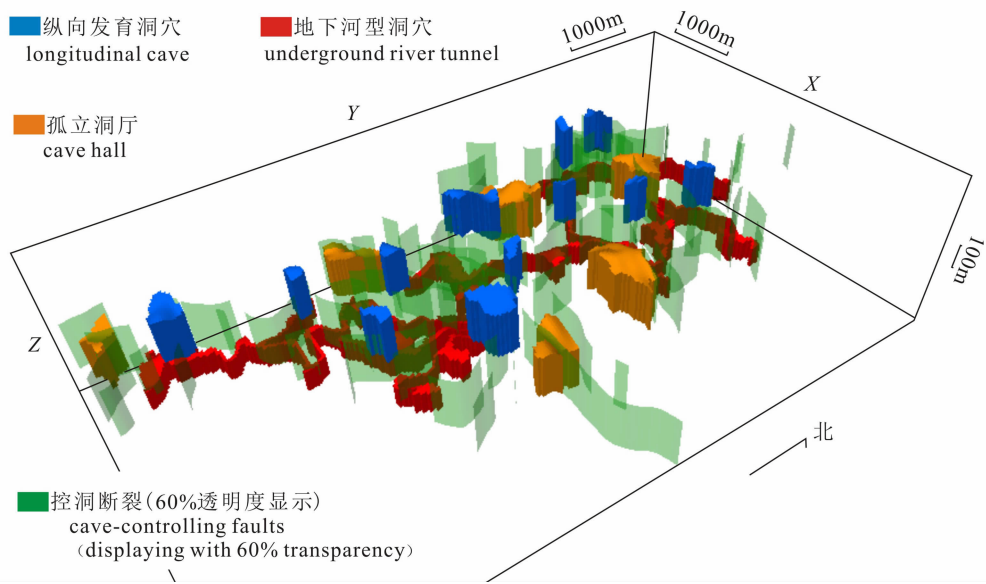


图11 塔里木盆地塔河油田四区S48单元储层结构三维模型

Fig. 11 3D reservoirs framework model of the 4th block S48 unit in the Tahe Oilfields, Tarim Basin

沟通渠道的角色,各要素叠合图表明古地貌与断裂共同控制了岩溶发育,其中 3 类洞穴与控洞断裂的匹配数均大于 1,断裂是主控因素。

断控型大气水岩溶储层结构研究更为精确地刻画出了大洞、大缝这两种核心储集空间在三维空间的展布特征,有助于该类储层非均质性研究的深入,丰富的统计数据也使得建立目标的“训练图像”,进而引入多点地质统计学建模成为可能;此外,掣肘于资料情况,小洞(溶蚀孔洞)小缝(洞生缝)的精细刻画以及发育期次等问题尚有待进一步认识。

致谢: 诸位审稿专家及编辑在论文修改过程中提出了很好的意见和建议,笔者受益匪浅,在此表示诚挚的谢意。此外,中国地质科学院岩溶地质研究所邹胜章研究员、中国石油大学(华东)金强教授、钟建华教授等在野外考察中给予了大量指导,成文过程中中国石油大学(北京)鲍志东教授和郑秀娟老师给予了建设性意见,在此一并致谢。

注 释 / Notes

① 中国地质科学院岩溶地质研究所. 2010. 973 课题“碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究”(2006CB202401)内部研究报告. 北京:中国地质科学院岩溶地质研究所,30~70.

② Ma Xiaoqiang, Hou Jiagen, Liu Yuming. 2012a. A method involved multiple-point statistics of modeling to paleokarst fractured-vuggy reservoirs. Poster Presentation of AAPG 2012 Annual Convention & Exhibition, in Long Beach, California.

③ Ma Xiaoqiang, Hou Jiagen, Liu Yuming. 2012b. 3D modeling of the paleocave reservoir in Tahe Oilfield, China. Oral Presentation of AAPG 2012 Annual Convention & Exhibition, in Long Beach, California.

参 考 文 献 / References

安海亭,李海银,王建忠,都小芳. 2009. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制. 大地构造与成矿学, 33(1): 142~147.

鲍志东,朱井泉. 1998. 塔里木盆地奥陶系层序地球化学研究. 地质科技情报, 17(4): 43~47.

鲍志东,金之钧,孙龙德,王招明,王清华,张清海,时晓章,李伟,吴茂炳,顾乔元,武新民,张宏伟. 2006. 塔里木地区早古生代海平面波动特征:来自地球化学及岩溶的证据. 地质学报, 80(3): 366~373.

冯增昭,鲍志东,吴茂炳,金振奎,时晓章. 2005. 塔里木地区寒武纪和奥陶纪岩相古地理. 北京:地质出版社.

顾家裕. 1996. 塔里木盆地沉积储层特征及其演化. 北京:石油工业出版社.

顾家裕. 1999. 塔里木盆地轮南地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层特征及形成模式. 古地理学报, 1(1): 54~60.

顾家裕,周兴熙. 2001. 塔里木盆地轮南潜山岩溶及油气分布规律. 北京:石油工业出版社.

何发岐. 2002. 碳酸盐岩地层中不整合—岩溶风化壳油气田——以塔里木盆地塔河油田为例. 地质论评, 48(4): 391~397.

侯加根,马晓强,刘钰铭,赵彬. 2012. 缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究:以塔河油田四区奥陶系油藏为例. 地学前

缘, 19(2): 59~66.

侯加根,马晓强,胡向阳,刘钰铭,齐得山. 2013. 碳酸盐岩溶洞型储集体地质建模的几个关键问题. 高校地质学报, 19(1): 64~69.

黄捍东,张如伟,赵迪,王光付. 2009. 塔河奥陶系碳酸盐岩缝洞预测. 石油地球物理勘探, 44(2): 213~218.

焦方正,窦之林. 2008. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发研究与实践. 北京:石油工业出版社, 61~70.

康玉柱. 2002. 海相成油新理论与塔河大油田的发现. 地质力学学报, 8(3): 201~206.

康玉柱. 2008. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布. 天然气工业, 28(6): 1~12.

康志宏. 2006. 塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究. 新疆石油地质, 27(5): 522~525.

李阳,范智慧. 2011. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律. 石油学报, 32(1): 101~106.

鲁新便,赵敏,胡向阳,金意志. 2012. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维建模方法技术研究——以塔河奥陶系缝洞型油藏为例. 石油实验地质, 34(2): 193~198.

马晓强,侯加根,胡向阳,刘钰铭,邹婧芸,赵彬. 2013. 论古岩溶洞穴型储层三维地质建模——以塔河油田四区奥陶系储层为例. 地质论评, 59(2): 315~324.

任美镠,刘振中,王飞燕. 1983. 岩溶学概论. 北京:商务印书馆, 3~33.

桑琴,未勇,程超,黄静,何术坤,郭贵安,吴昌龙,彭祚远. 2012. 蜀南地区二叠系茅口组古岩溶地区水系分布及岩溶地貌单元特征. 古地理学报, 14(3): 393~402.

王光付. 2008. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法. 石油学报, 29(1): 47~51.

王萍,袁向春,李江龙,胡向阳,谢丽慧. 2011. 塔河油田 4 区古地貌对储层分布的影响. 石油与天然气地质, 32(3): 382~387.

温志新,王红漫,漆立新,于兴河. 2008. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究. 地学前缘, 15(1): 94~100.

夏日元,唐健生,邹胜章,梁彬,金新峰,姚昕. 2006. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用. 地球学报, 27(5): 503~509.

肖玉茹,何峰煜,孙义梅. 2003. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例. 石油与天然气地质, 24(1): 75~80.

杨辉廷,江同文,颜其彬,李敏. 2004. 缝洞型碳酸盐岩储层三维地质建模方法初探. 大庆石油地质与开发, 23(4): 11~16.

袁道先. 1988. 岩溶学词典. 北京:地质出版社, 2~20.

周文,李秀华,金文辉,赵志超,周秋媚. 2011. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用. 岩石学报, 27(8): 2340~2348.

Breesch L, Stemmerik L, Wheeler W, et al. 2009. Fluid flow reconstruction in a complex paleocave system reservoir in Wordiekammen, Central Spitsbergen. Journal of Geochemical Exploration, 101(1): 10.

Loucks R G. 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications. AAPG Bulletin, 83(11): 1795~1834.

Loucks R G, Mescher P K, McMechan G A. 2004. Three dimensional architecture of a coalesced, collapsed paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas. AAPG Bulletin, 88(5): 545~564.

Miall A D. Architectural element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. Earth Science Reviews, 1985, 22(2): 261~308.

Framework of Fault-controlled Meteoric Palaeokarst Ordovician Reservoirs
in Tahe Oilfield, Tarim Basin

MA Xiaoqiang^{1,2)}, HOU Jiagen^{1,2)}, HU Xiangyang³⁾, LIU Yuming^{1,2)}, QI Deshan^{1,2)},
MA Xiaoyong⁴⁾, ZOU Jingyun^{1,2)}

1) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249;

2) State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249;

3) Petroleum Exploration and Production Institute, SINOPEC, Beijing, 100191;

4) Second Oil Production Factory of Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Puyang, Henan, 457512

Abstract: Palaeo-karstification can form the potential oil and gas reservoirs. Guiding by the outcrops in north Tarim Basin, the reservoirs framework elements and its identification methods are analyzed, including underground river cave, longitudinal cave, cave hall and cave-controlling faults, and taking the S48 unit of 4th block in Tahe Oilfields as example, development characteristics including geometry dimension and assembly of elements are described. Research shows that, the underground river caves have the largest scale, and difference between longitudinal cave and isolated cave hall is the height diameter ratio. Different caves have a variety of combination way, and cave-controlling faults are important connection ways. Matching number of 3 kinds of cave and fault reached to 2.5, 1.9, 1.7, and cave development and faults distribution have good coupling relationship. In addition, the paleogeography controls karst development to a certain extent too.

Key words: palaeokarst; cave; reservoirs framework; underground river; shaft; cave hall; cave-controlling faults

浅析西北地区基于3S技术野外地质工作管理与服务体系

石小亚,王佳运

中国地质调查局西安地质调查中心,西安,710054

关键词: 3S技术;地质调查;管理服务;北斗卫星导航系统

随着找矿突破战略行动的展开,中央财政对公益性地质调查工作的投入持续增加,地质调查工作不断向西北艰险地区,地质条件复杂的地区推进(中国地质调查局基础调查部^①)。大量地质调查人员进入艰险区实施国家基础性公益性地质调查任务,野外工作人员的生命安全遇到了挑战。尤其是近年来西北地区野外地质工作事故频发,加强对野外地质调查工作管理服务和安全保障亟待解决。考虑到野外地质工作特别是西部无人区、青藏高原腹地,环境艰苦、生存条件恶劣;而且工作点多,踏勘线路长,且多远离城镇,地理环境复杂,气候条件异常,交通和通讯极其不便;野外工作区广,一个项目组常分成若干队,2~3人一队流动分散作业,相互沟通不便,工作中地质人员遭遇到各种人身安全威胁时,如疾病、迷路失踪、野兽攻击、交通意外等,无法及时与驻地、项目单位取得联系,获得救援。同时,对于地质单位来讲,项目组一出野外,由于工作地偏远,交通通讯不便,无法及时获知项目进展,进行项目管理。可见急需通过高技术手段进一步加强野外地质工作的管理与服务保障。于2010年,国土资源部年启动公益性行业科研专项“基于3S技术的野外地质工作管理与服务关键技术研究与应用”,国家发展改革委启动了高技术产业化示范工程的项目“基于我国卫星的野外地质调查应用高技术产业化示范工程”,构建现代化野外地质工作管理与服务体系,实现野外工作“态势管理”。

1 基于3S技术野外地质工作管理与服务体系

1.1 体系架构

基于3S技术野外地质工作管理与服务体系是基于卫星技术、网络技术和网格技术,通过对遥感数据处理,地质信息识别,海量基础数据分发,空间信息承载与展示,北斗系统与

注:本文为国家发改委高技术产业化示范工程项目“基于我国卫星的野外地质调查应用高技术产业化示范工程”;国土资源部公益性行业科研专项“基于3S技术的野外地质工作管理与服务关键技术研究与应用”(编号201011010)的成果。
收稿日期:2012-10-15;改回日期:2012-10-26;责任编辑:章雨旭。
作者简介:石小亚,女,1980年生。工程师,主要从事地质信息研究。Email:shixiaoya_929@163.com。