

现代岩溶地下河成因研究 对塔北奥陶系大型岩溶缝洞体储层勘探的启示 ——以桂林寨底岩溶地下河系统的剖析为例

谈永^{1,2}, 梁彬^{1,3}, 易连兴^{1,3}, 曹建文^{1,3}, 张庆玉^{1,3}, 王喆^{1,3}

(1 中国地质科学院岩溶地质研究所; 2 成都理工大学沉积地质研究院)

(3 国土资源部广西岩溶动力学重点实验室)

摘要 研究现代岩溶地下河内大型缝洞空间的形成机理,可成为揭示古岩溶缝洞体储层发育的“钥匙”,并指导油气勘探。根据对桂林寨底地下河系统的野外地质调查、示踪试验、物探及钻孔资料研究,基本确定了寨底地下河系统内大型岩溶缝洞发育的展布特征。认为地貌、水系、岩性、断裂等是寨底地下河管道发育的主控因素。结合三维地震技术,对塔里木盆地北部哈拉哈塘某井区晚奥陶世岩溶期岩溶进行了地质背景、古地貌、古水系及古水动力条件分析,刻画了哈拉哈塘晚奥陶世岩溶期的一条古岩溶地下河及其大型缝洞储集空间的分布。勘探结果表明在地下河管道上的钻井均获得高产。

关键词 岩溶暗河; 岩溶成因; 岩溶储层; 缝洞型储层; 塔里木盆地; 油气勘探

中图分类号: TE122.2*3

文献标识码: A

碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏一直是全球油气勘探开发的重点^[1],已发现的该类超大型油田(可采储量大于10亿桶油)包括墨西哥的白垩系黄金巷(Golden Lane)油田、阿联酋迪拜的白垩系法塔赫(Fateh)油田、美国德克萨斯州西部的二叠系叶茨(Yates)油田等^[2]。20世纪90年代以来,我国在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地均发现了高产的碳酸盐岩缝洞型油气储层^[3-4]。研究发现,这些缝洞体(尤其是大型的地下洞穴)的形成多与碳酸盐岩同期或表生期所遭受的淡水淋滤溶蚀作用有关^[5-8]。

塔里木盆地碳酸盐岩单一溶洞的储层,其地震反射常呈“串珠状”^[9],这类储层在塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩油气勘探中已有很多成功经验。随着油气勘探的深入,还发现一些地震反射的多个“串珠”具有连片性,它们被识别为多溶洞连通的缝洞系统^[5-6],由于这类缝洞型储层空间大,连通性好,成为了下一阶段的油气勘探方向,但对于这种类型缝洞系统的成因认识及其展布预测方面还存在不足。

众所周知,中国西南的岩溶地区是现代岩溶发育的典型地区,现代地表或近地表的岩溶缝洞空间极其发育,由地下河形成的大型管道系统就是其中一类。因此,研究现代大型缝洞系统的形成与分布,或许是打开塔里木盆地深部奥陶系大型岩溶缝洞系统成因的“钥匙”。已知在广西桂林市郊的寨底地区,地下河系统由于前期研究较细、资料丰富,地下水又具多级排泄及明暗河交替发育的特征,在地下河研究中具有很好的代表性^[10-13]。本文选择桂林寨底现代岩溶地下河系统的发育特征为研究的切入点,期望以此为基础,“将今论古”,用于分析塔里木盆地北部某井区奥陶系大型缝洞的成因及其展布规律,从而指导油气勘探。

1 岩溶地下河的基本特征

地下河,是指碳酸盐岩地区地下水沿裂隙发生溶蚀而形成的地下水汇集和排泄的通道。地下河具有各自独立的补给、径流和排泄系统,有明确的汇水

收稿日期: 2014-06-04; 改回日期: 2015-03-05

本文为国土资源部行业专项“塔里木盆地古潜山奥陶系风化壳油藏岩溶储层预测”(编号:201211082)和中国地质调查局工作项目“西南典型地下河调查与动态研究”(编号:1212011220959)的部分成果

谈永: 1986年生,助理研究员。现为成都理工大学在读博士生。从事沉积学及古岩溶油气地质研究。通讯地址: 541004 广西壮族自治区桂林市七星路50号 中国地质科学院岩溶地质研究所; E-mail: danyong@karst.ac.cn

边界,因而地下河具有完整独立的水文地质单元的特性。在中国西南地区,现代岩溶地下河广泛发育,较为著名的有云南六郎洞、贵州大小井、广西地苏、广西冠岩、广西坡月等地的地下河^[10-13]。

大型岩溶洞穴的形成常常与地下河密切相关。朱学稳等^[14]把地下河作为一个整体系统(或流域)考虑,他以物质能量的输入—输出方式,将地下河岩溶洞穴分为三类:(1)流入型洞穴,(2)流出型洞穴,(3)含水层洞穴。现世界上已知的探测长度最长的洞穴——美国猛犸洞(探测总长度超过660 km),就属于流出型洞穴,它是由四层流出型洞穴构成的复杂洞穴系统^[14]。

岩溶地下河系统的发育一般分为三个阶段。不同的阶段,地下河的洞穴发育类型和大小会有不同^[14]:

阶段Ⅰ 岩溶水文输入—输出系统形成的早期阶段。含水层水文过程的初步有序化以及相对稳定的输入—输出位置形成,流入型洞穴初步形成并加速发展,而流出型洞穴处于岩溶泉状态。

阶段Ⅱ 输入—输出水文系统有序化发展的最佳阶段。流入型洞穴加速发展,流出型洞穴初步形成,含水层洞穴强烈地选择性发展。

阶段Ⅲ 地下河的地下洞穴水流系统形成的成熟期。流入型和流出型的洞穴连接一起,成为含水层中的畅排通道。大部分含水层洞穴被遗弃。至成熟后期,沿地下主通道的行迹可出现地表天窗以及较多的塌陷现象,以致部分地下河道出露地表。

在地下河的形成发育过程中,外部因素如气候条件、降雨量、气温、水动力条件,内部因素如地层的岩性、厚度、产状、断裂、基准面升降等,均起着重要作用。

2 寨底地下河的发育特征与控制因素

桂林寨底地下河系统位于广西桂林市东部灵川县潮田乡与海洋乡之间,距桂林市区31 km,汇水面积达33 km²(图1)^[10]。系统内明流与暗流相间,地下水具有多级排泄和多次循环的特点,在西南岩溶区具有很好的代表性。

寨底地下河系统自2008年定为中国地质科学院岩溶地质研究所的岩溶水文地质野外试验基地以来,已开展了多项地质、水文地质调查研究及勘探工作,其中包括地下河示踪试验、物探、钻探等^[10],积累了丰富的资料,为本文综合分析地下河管道发育分布特征提供了良好的基础。

2.1 地下河发育的地质背景

寨底地下河系统位于云贵高原东南部,为一级岩溶斜坡到岩溶平原过渡处。地下河系统内的含水岩组岩性为中上泥盆统和下石炭统的石灰岩和白云质灰岩。由于上述地层中的石灰岩、白云质灰岩或白云岩质纯,总体厚度大,其间未发现相对隔水层,因此岩溶极为发育,形成了峰丛洼地、峰丛谷地地形,洼地或谷地下分布多个地下河子系统。地下河系统的北部为海洋乡岩溶台地,东部是中下泥盆统碎屑岩组成的海洋山山体,南部为潮田河岩溶河谷,西部为石炭系白云岩、硅质岩、页岩等组成的丘地。总体上,东、西部为非碳酸盐岩隔水边界,北部为地下分水岭,南部为地下河集中排泄边界。系统内发育有北东、北西和近东西三组断裂(地层倾角14°~25°)。地势上,东北部高于西南部。受此地形、地势控制,本系统地下河整体从北往南流,即从北部海洋乡一带流到南部寨底村总出口排泄(图1)。

2.2 地下河的分布特征

寨底地下河系统经地质调查、物探以及水流连通试验等工作^[10],已基本查明了该系统地下河发育特征(图1,图2)。

寨底地下河系统由多个次级子系统构成,已查明地下河管道长10.6 km。寨底地下河系统的补给区为北部的海洋岩溶谷地,由于被第四系覆盖,其地下水接近地表,为次级地下河的汇流地区。例如,钓岩次级地下河(位置见图1)的水流入谷地。海洋谷地的地下水经地下河径流在水牛厄处以岩溶大泉形式流出地表(图1,图2a),至东究附近与另一条次级地下河——豪珠岩地下河流出的水流汇合。汇合的所有水流均汇入国清—响水岩谷地,成为地表河,到达响水岩落水洞(天窗)处,水流再次流入地下,最后在寨底以岩溶大泉的形式排泄,汇入潮田河(图1,图2a)。

地下河可分为流出型和流入型两类。例如在钓岩,地下河出口为一小型溶洞,洞高2 m,属于流出型地下河。又如,豪珠岩地下河的水来自上甘野碎屑岩区的侧向补给(图1,图2b),由于碎屑岩区水化学呈弱酸性,侵蚀性强,在上甘野地下河入口处发育岩溶大洞,洞高50~60 m(图1),因此豪珠岩地下河属于典型的流入型地下河。总体上,寨底地下河属于流入型地下河,发育处于地下河幼年—中年期。

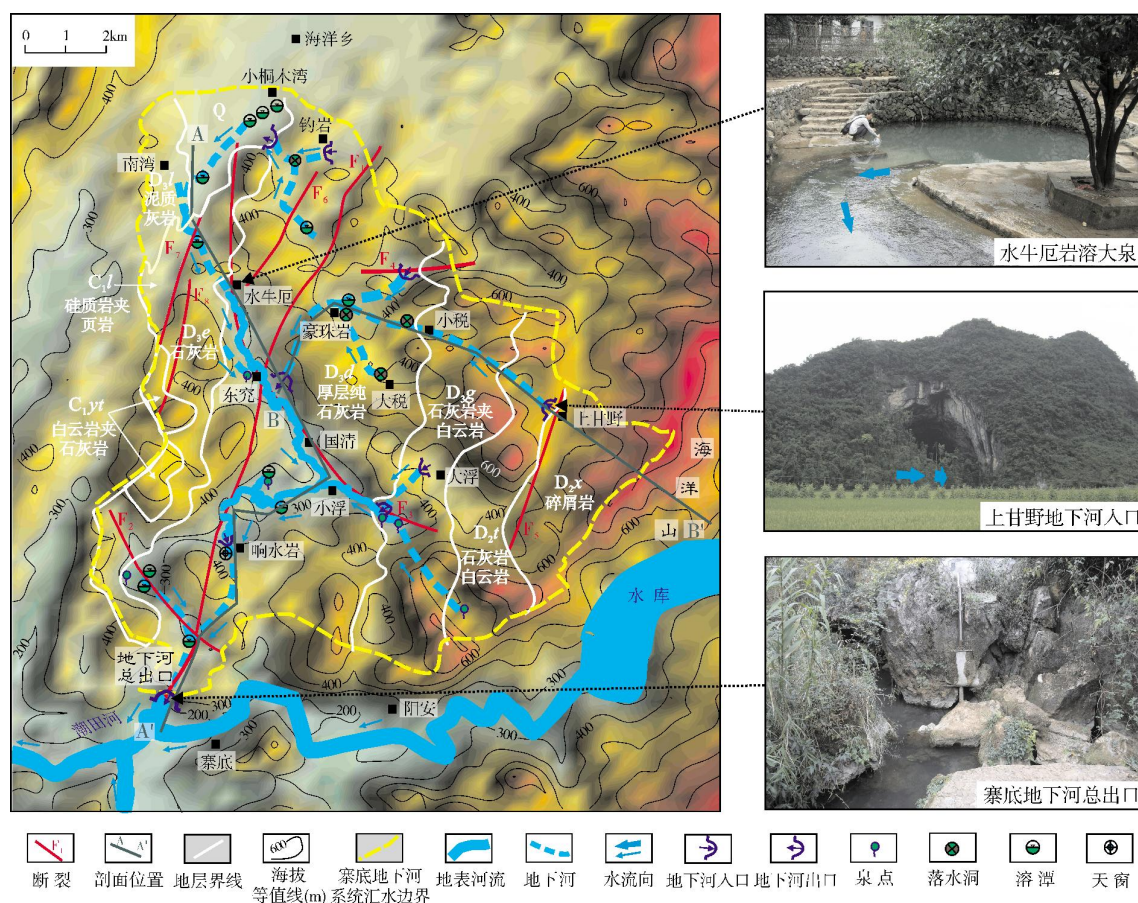


图1 桂林寨底地下河系统地貌水系分布综合图

D_{2t} 唐家湾组; D_{2x} 信都组; D_{3d} 东村组; D_{3e} 额头村组; D_{3g} 桂林组; C_{1l} 鹿寨组; C_{1yt} 英唐组; C_{2l} 榴江组; Q 第四系松散土层

寨底地下河系统的介质空间,由岩溶管道、岩溶洞穴、岩溶裂隙、岩溶裂缝和岩溶孔隙等组成。岩溶管道贯穿于整个地下河段,岩溶洞穴发育于上甘野地下河入口、钓岩地下河出口及响水岩地下河入口等处。岩溶裂隙、岩溶裂缝和岩溶孔隙发育于整个地下河段。

2.3 地下河发育的控制因素

地形地貌 寨底地下河系发源于海洋山的东麓,向西迂回曲折,出口于潮田河。海洋山标高在900m以上,向西山势逐渐降低,至海洋—东究—国清谷地,标高降至280m左右,其间发育峰丛洼地(图1,图2b)。响水岩至寨底,地势复又上升,地貌上成为典型的岩溶峰丛洼地。峰丛石山由标高400~500m的石灰岩山组成,中间分布着封闭型的洼地。峰洼相对高差达100~200m。寨底地下河从峰丛洼地地下潜伏而过,洼地中常有竖井或落水洞与地下河系相通。

岩性 寨底地下河流域出露的地层主要为中泥

盆统信都组(D_{2x})海相红色碎屑岩和唐家湾组(D_{2t})碳酸盐岩,上泥盆统桂林组(D_{3g})和东村组(D_{3d})石灰岩,以及下石炭统鹿寨组(C_{1l})碎屑岩和英唐组(C_{1yt})碳酸盐岩(图1)。其中,唐家湾组、桂林组和东村组的碳酸盐岩累积厚度约达2000m,是寨底地下河流域的主要岩溶化地层,同时也是寨底地下河系发育的三个主要层位。寨底地下河系统的边界,西部为石炭系泥质灰岩,岩溶欠发育,无地下河发育;东部为碎屑岩,地表河发育。因此,地下河的发育与纯石灰岩的发育息息相关。

地质构造 构造上主要发育有北东向和北西向两组断裂(图1)。北西向断裂规模相对较大,主要形成于印支期构造运动,多属压扭性断裂;北东向断裂规模较小,形成于燕山期的新华夏构造运动,属压扭性断裂。断裂对本区岩溶作用的控制作用明显,海洋—国清—响水岩谷地的形成是水流长期沿F₃断层流动侵蚀所致。谷地两侧地势高,为峰丛洼地地形,

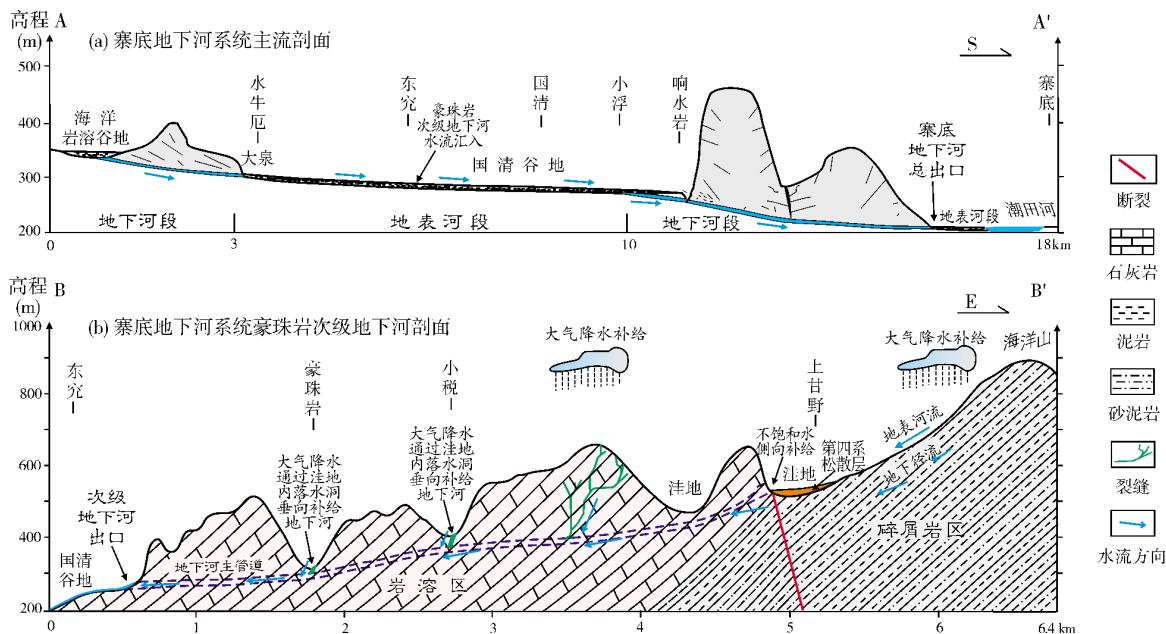


图2 桂林寨底地下河系统剖面图

A—A'剖面 and B—B'剖面位置见图1

其下水流东西向流入低部位谷地,形成了次级地下河管道系统,出水点以大泉或溶洞的形式存在。水流汇入岩溶谷地中,谷地所有的水在响水岩落水洞处流入地下,最后沿F₁断裂在寨底总出口流出。因此局部地段的断裂控制了地下河流向(图2)。

水动力条件 本区属亚热带季风湿润气候,降雨充沛,岩溶作用强烈。流域内地表落水洞、洼地及溶潭比较发育,为典型的峰丛谷地或洼地岩溶地貌区。岩溶水赋存、运移于岩溶管道和溶蚀裂隙中,主要以不规则的缝隙、管道、暗河等形成径流和排泄。地下水力的坡度大,据调查资料,地下河进出口总落差为130m,水道平均坡降为18.5‰。

3 塔北大型古岩溶缝洞体储层勘探实践

在塔里木盆地北部奥陶系碳酸盐岩的油气勘探中,主要是以地震剖面上表现为单一“串珠”状的洞穴型储层为对象。近年来,随着勘探深入,塔北陆续发现一些地震剖面上呈连续或集中分布的“串珠”或“片状”的反射结构(图3),钻井结果表明为大型缝洞体,但对其地质成因未很好解释。桂林寨底地下河系统的分析表明,岩溶地下河的发育可以形成大型岩溶管道或缝洞体,这也许可成为古岩溶大型缝洞体的解释成因之一。在此,试以塔北哈拉哈塘地区某井区为例,对古岩溶大型缝洞体的成因进行分析。

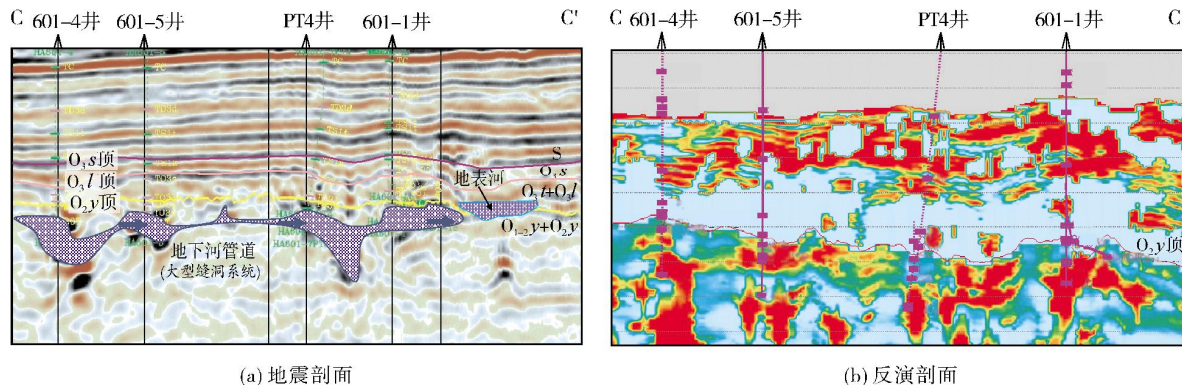


图3 塔北哈拉哈塘某井区奥陶系碳酸盐岩大型缝洞体剖面特征

O₁₋₂ 鹰山组; O₂y 一间房组; O₃t 吐木休克组; O₃l 良里塔格组; O₅s 桑塔木组; S 志留系。C—C'剖面的位置见图4

3.1 古岩溶储层中缝洞体展布分析

在哈拉哈塘某井区的勘探实践中,通过地震相干技术对中下奥陶统一间房组和鹰山组的属性分析,提取连续的异常体;结合地震反演技术等,确定了一个大型的缝洞体,然后利用现代岩溶理

论对其展布和成因作出了解释(图4)。主要步骤及方法如下。

(1)古岩溶地质背景分析

桂林寨底地下河系统的分析表明,地下河沿岩性较纯的中上泥盆统碳酸盐岩地层发育,旅游胜地桂林的奇峰洞穴也都是该套地层。此外,研究还发

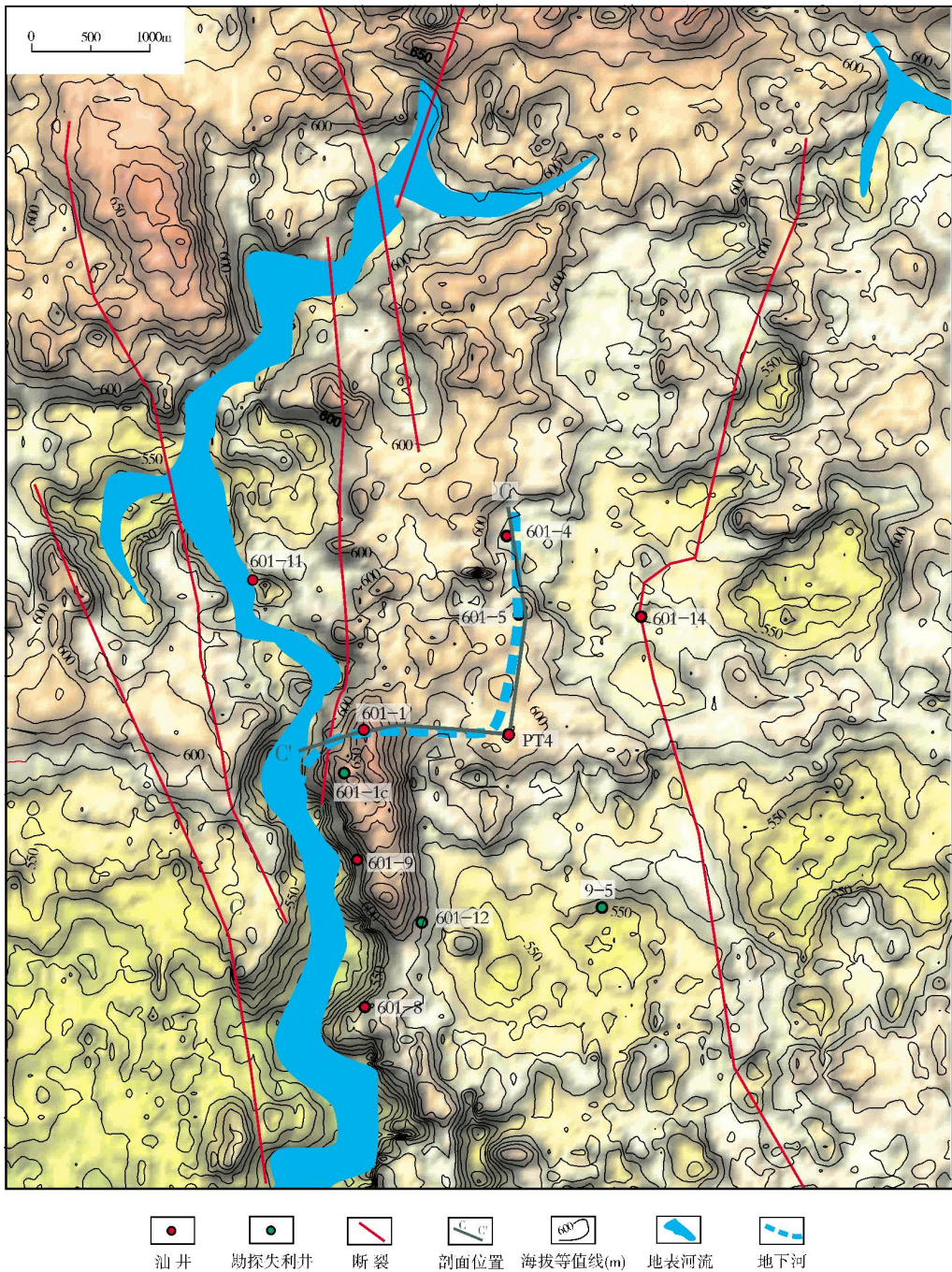


图4 塔北哈拉哈塘某井区良里塔格期古地貌及古水系图

现, 现今中国西南地区岩溶极为发育的原因与该地区第三纪以来碳酸盐岩地层的长期暴露以及构造抬升有关。

淡水等^[15]的研究表明, 塔北中下奥陶统一间房组和鹰山组的石灰岩层岩性纯; 勘探表明其中的岩溶缝洞发育, 与桂林地区泥盆系纯石灰岩类似。塔北奥陶系碳酸盐岩在加里东期多次暴露, 经历了多期岩溶作用^[5-7], 位于塔北的哈拉哈塘某井区奥陶系碳酸盐岩主要受中奥陶世一间房期沉积暴露岩溶作用以及晚奥陶世良里塔格期沉积暴露岩溶作用的控制, 但一间房期的沉积后暴露时间较短, 故岩溶作用主要发生在良里塔格期^[15]。

(2) 古地貌恢复及古水系刻画

桂林寨底地下河系统的分析表明, 地貌控制着地下河发育, 如岩溶洼地常有竖井或落水洞与洼地之下的地下河系相通。

利用古地貌恢复技术, 结合现代岩溶地貌水系发育规律, 对哈拉哈塘某井区良里塔格暴露期进行了地貌恢复以及地表水系刻画(图4)。地貌特征显示, 该井区总体上北高南低, 发育有一条地表河流, 河流的水流向总体上是由北向南。河流两侧的主要岩溶地貌类型为峰丛洼地, 峰洼距离为50~80 m。地表河流为区域最低点, 即区域水系排泄点, 河流两侧高地水系, 向河流径流排泄。如图4: 601-4井至601-1井井区的大型缝洞体就发育在地表河东侧的高地。

(3) 古水动力条件分析

寨底地下河系统的分析表明, 水流的补给、径流和排泄是地下河发育的前提, 只有在水的持续流动条件下才能形成大型缝洞体。

哈拉哈塘某井区的地震剖面(图3a)显示, 601-4井至601-1井连续“串珠”的末端与反映河流的“U”型地震反射相连, 剖面上河流已下切至一间房组。这说明, 在良里塔格期, 地表河流可以控制 601-4井至 601-1井井区一间房组中大型缝洞体的形成。与桂林现代岩溶寨底地下河总出口为潮田河类似, 601-1井区为地下河径流排泄区。

此外, 地势上601-4井至601-1井整体由高至低, 到地表河的落差可达100~200 m, 这与桂林寨底地下河类似, 具有一定的水力坡度。而601-4井至601-1井的缝洞为水的径流通道; 关于补给, 除少量

来自垂向裂隙外(由于中奥陶统一间房组的上覆地层为上奥陶统吐木休克组泥灰岩, 岩溶作用弱), 多数是来自北部良里塔格组尖灭线附近的侧向补给。至此, 在良里塔格岩溶期, 601-4井至601-1井区水流的补给、径流和排泄等条件均已具备。可以推测, 601-4井至601-1井大型缝洞体为地下河成因。依据朱学稳等^[14]对地下河成因洞穴的划分, 可以将其划为流出型洞穴。

3.2 古岩溶地下河刻画对储层分析的意义

勘探实践表明, 沿601-4井至601-1井井区地下河管道上所钻的各井均获得成功, 取得了较好效果, 部分井获得高产, 这一结果说明, 对古岩溶地下河展布的刻画也是预测大型缝洞型储层的一种重要方法。

总之, 对地下河的刻画, 尽管受资料条件和技术限制, 在古岩溶中不能如现代岩溶中那样精细, 但依照现代岩溶地下河发育特征及其控制因素来讨论古岩溶地下河主管道可能发育的位置以及补给、径流、排泄系统, 对指导碳酸盐岩大型缝洞型储层的油气勘探具有重要意义, 值得作进一步深入研究。

4 结 论

(1) 地下河与岩溶洞穴发育息息相关, 地下河发育可分为早期、中期和晚期。早期地下河发育流入型洞穴, 中期发育流入型和流出型洞穴, 晚期地下河为洞穴连通体。

(2) 桂林寨底地下河系统的发育与地形、地貌、岩性、断裂及水动力条件相关。

(3) 现代岩溶的分析方法及地下河发育特征, 为古岩溶地下河的刻画提供了可能。

(4) 依据现代岩溶地下河分析方法和对塔北某井区古地貌的恢复, 进行了古水系及暗河的刻画。勘探实践表明, 在地下河管道上的钻井均获成功。

参考文献

- [1] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250.
- [2] Moore C H. Carbonate Reservoirs Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2001.

- [3] 罗平,张静,刘伟,等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘,2008,15(1):36-50.
- [4] 金之钧,庞雄奇,吕修祥. 中国海相碳酸盐岩油气勘探[J]. 勘探家,1998,3(4):66-68.
- [5] 徐微,陈冬梅,赵文光,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞发育规律[J]. 海相油气地质,2011,16(2):34-41.
- [6] 徐微,蔡忠贤,林忠民,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏岩溶成因类型[J]. 海相油气地质,2012,17(1):66-72.
- [7] 张学丰,李明,陈志勇,等. 塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次 [J]. 岩石学报,2012,28(3):815-826.
- [8] 张希明,朱建国,李宗宇,等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分 [J]. 海相油气地质,2007,12(1):21-24.
- [9] 张进铎. 轮南古潜山碳酸盐岩储层地震属性雕刻研究[D]. 长春:吉林大学,2005.
- [10] 王喆,夏日元,易连兴,等. 西南典型地下河含水介质结构特征分析——以寨底地下河塘子厄至东究段示踪试验为例[J]. 西部资源,2012,7(3):70-72.
- [11] 吉汝安. 云贵高原岩溶地下河的研究[J]. 贵州地质,1990,7(2):105-112.
- [12] 覃小群,蒋忠诚,李庆松,等. 广西岩溶区地下河分布特征与开发利用[J]. 水文地质工程地质,2007,34(6):10-13.
- [13] 郭纯青. 中国岩溶地下河系及其水资源[J]. 水文地质工程地质,2001,28(5):43-45.
- [14] 朱学稳,张元海,张任,等. 地下河洞穴发育的系统演化[J]. 中国岩溶,1996,15(1):158-166.
- [15] 淡永,梁彬,张庆玉,等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩浅覆盖区岩溶储层特征与形成机理[J]. 石油物探,2015,54(1):90-98.

编辑:赵国宪

Revelation of Research of Modern Karst Subterranean Streams to Exploration of Paleokarst Fractured-Caved Reservoirs: An Example of Zhaidi Underground River in Guilin Applied in Ordovician Fractured-Caved Reservoirs in Northern Tarim Basin

Dan Yong, Liang Bin, Yi Lianxing, Cao Jianwen, Zhang Qingyu, Wang Zhe

Abstract: The research to the formation mechanisms of modern karst subterranean streams can be a "key" to reveal the genesis of space distribution of reservoirs full of large paleokarstic fractures and caves, which is useful to guide oil and gas exploration. There is an underground river at Zhaidi in Guilin, Guangxi province. Based on studies of field geological survey, tracer tests, geophysical and drilling data, it has been clear how the large karstic fracture-cave space distributes within the underground network of Zhaidi River with total 10.6km length of subterranean stream pipelines. It is proved that geomorphology, stream network, lithology and faults are the factors affecting development of the underground river network. In light of the research of Zhaidi Underground River, the case is applied to analysis of a paleokarst underground river that distributes within Ordovician karst fractured-caved reservoirs in Halahatang Field, Northern Tarim Basin. The network of the paleokarst underground river and the space distribution of large karstic fracture-cave system in it are depicted according to the comprehensive analysis of karst geological background, the palaeogeomorphology, ancient water system, and ancient hydrodynamic conditions, combined with 3-D seismic technology. Exploration result has indicated the fact that economical productions are obtained in all of wells drilled in the underground river pipelines.

Key words: Karst underground river; Karst genesis; Karst reservoir; Fractured-caved reservoir; Tarim Basin; Oil or gas exploration

Dan Yong: Assistant Researcher, Dsc. degree in progress at Chengdu University of Technology. Add: Institute of Karst Geology, CAGS, 50 Qixing Rd., Guilin, Guangxi, 541004, China