

文章编号:1672-9854(2008)-04-0037-07

## 千米桥古潜山岩溶地貌演化及 古岩溶洞穴发育特征

齐振琴<sup>1</sup>,程昌茹<sup>1</sup>,孙秀会<sup>1</sup>,李泽敏<sup>2</sup>,卢清静<sup>1</sup>,郭秀丽<sup>1</sup>

(1 大港油田地质录井公司; 2 西安地研石油科技开发有限公司)



齐振琴

**摘要** 运用印模法和残厚法以及地震相位追踪对比等古地貌分析法研究揭示,千米桥古潜山岩溶地貌的演化形成先后经历了加里东—海西暴露发育期、印支—燕山暴露改造期、喜马拉雅埋藏定形期等演化阶段。古岩溶洞穴的发育和分布不仅受地貌形态及潜水面的控制,而且与岩性组合、古水文环境及断裂构造密切相关。加里东—海西暴露期地壳的持续抬升和区域潜水面的不断下移,造成古岩溶洞穴的多旋回层状分布,孔洞多被砂泥质充填,有效孔洞保存较少;印支—燕山暴露期发育的古岩溶洞穴受断裂体系影响,分布具有一定随机性,并且多被埋藏期化学半充填,成为目前古潜山油气储层的主要储集空间。利用钻井和测井信息及洞穴充填物,可在生产现场识别古岩溶洞穴的存在及分布,为古潜山油气储层的综合评价提供依据。

**关键词** 千米桥油气田; 奥陶纪; 古潜山储层; 古岩溶特征; 古岩溶地貌; 地貌恢复

**中图分类号**: TE112.23 **文献标识码**: A

**齐振琴** 1967年生,高级工程师。主要从事地质录井及综合研究工作。通讯地址: 300280 天津市大港区; 电话: (022)25924379

### 1 概述

黄骅坳陷千米桥奥陶系古潜山处于北大港构造带大张坨断层与向北倾斜的港西断层的上升盘,东以港8井断层为界,向西南至千米桥西边界断层。总体呈北东走向,长约45 km,宽约13~18 km,面积约61 km<sup>2</sup> (图1)。奥陶系厚度600~800 m,主要由石灰岩与白云岩组成。上世纪90年代末发现了千米桥奥陶系古潜山油气藏,取得了历史性突破。由于古潜山油气藏的储集空间主要由古岩溶成因的孔洞缝组成<sup>[1]</sup>,因此研究古潜山地貌形态及其演化与古岩溶洞穴发育特征,对于扩大古潜山油气藏的勘探开发领域具有十分重要的意义。

据以往研究,渤海湾盆地是在华北地台的基础上发展起来的张性断块盆地。该盆地在印支运动后结束了相对稳定的构造发展历史,频繁的构造断裂活动导致奥陶纪碳酸盐岩地层在区内产生了强烈的

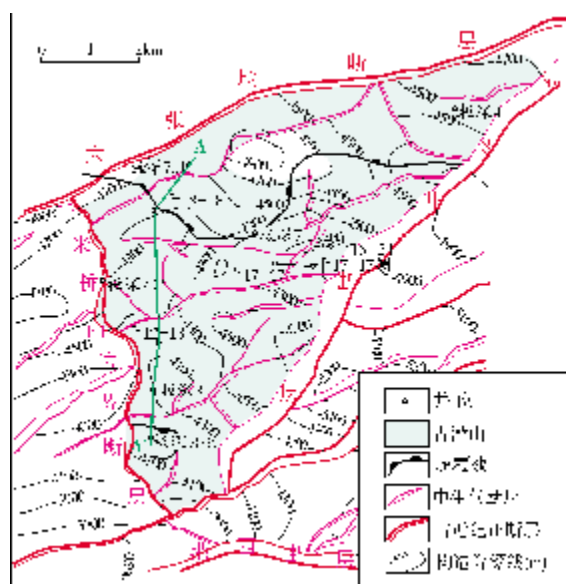


图1 千米桥构造轮廓图

收稿日期:2008-05-31; 改回日期:2008-08-13

形变和位移,并且在中生代进一步形成一系列裂隙及断块隆起;新生代拉张沉降,最终形成古近纪“基岩”山峦起伏的形态和被第三系所包围的“古潜山”<sup>[2]</sup>。黄骅坳陷千米桥古潜山的发育,同样经历了上述构造演化过程。

古潜山奥陶系与华北地区基本类似,自下而上主要由下奥陶统冶里组、亮甲山组,中奥陶统下马家沟组、上马家沟组及峰峰组构成。其中,上马家沟组与峰峰组多分布于古潜山的上部,是古岩溶洞穴型储层发育的主要部位。由于多期抬升剥蚀,峰峰组在区内的分布较为局限。

## 2 古潜山岩溶地貌及其演化

### 2.1 古潜山岩溶地貌恢复方法

古潜山岩溶地貌的恢复是古岩溶发育特征和古岩溶储层研究的关键。古地貌恢复的方法是在查清古构造格局及地层分布特征的基础上,采用“印模法”和“残厚法”来完成<sup>[3-4]</sup>。根据区内古风化壳上下地层厚度变化关系,结合构造断裂和古岩溶分带特征,可基本确定古潜山暴露期古地貌形态(图2)。

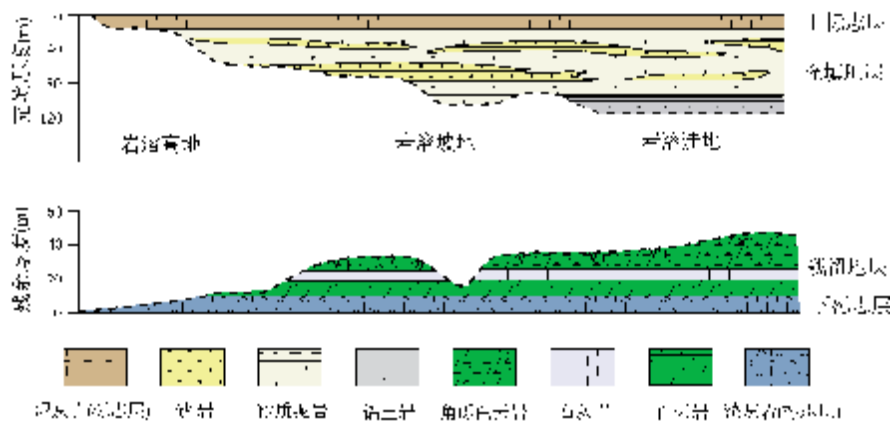


图2 印模法(上图)与残厚法(下图)岩溶古地貌恢复示意图

(1)假设是在地层分布稳定且构造形变微弱的条件下,通过地层对比,分别在古风化壳上下地层中选择一个分布稳定、在沉积成岩过程中未明显变形、在电性上特征清楚并具有等时性的标志层(如凝灰岩层、煤层、泥灰岩层等),然后分析上标志层至古风化壳顶面的厚度变化以及下标志层之上碳酸盐岩残余地层厚度变化的对应关系,即可镜像反映古风化壳顶面起伏变化的形态。

(2)如果古风化壳碳酸盐岩残余地层在标志层之上缺失明显,且较局限(非区域剥蚀),而上覆充填地层厚度较周围地层厚度大,表明其为岩溶水侵蚀(断裂)所致,应属于古地貌斜坡或古溶洼分布区;如果古风化壳碳酸盐岩残余地层缺失较多,而上覆充填地层厚度比周围地层厚度减薄,则表明古地形相对较高,应属于古地貌岩溶高地或岩溶台地分布区。

(3)如果古风化壳碳酸盐岩残余地层在标志层之上保存较全,而上覆充填地层厚度在标志层之下比周围地层明显增厚,则表明古地形相对较低,应属

于岩溶谷(凹)地或古构造低部位,这类古地形往往与古沟槽有着密切的联系。

(4)在钻井较少的地区,通过地震剖面的地质标定,即可利用地震剖面上的“下凹”、“上超”和“削截”以及相位充填增宽等波形特征确定古地貌的形态。

(5)利用古风化壳岩溶发育特征可分析古地貌形态的变化与有利岩溶区的分布。一般在岩溶高地或岩溶台地分布区,垂直岩溶带厚度相对较大,水平岩溶带厚度相对较薄;而在岩溶斜坡分布区,岩溶的分带性明显,且水平岩溶带较为发育。相反,岩溶洼地(谷地)分布区,岩溶分带性不明显,而淀积充填及交代形迹普遍。岩溶的地下管道,由于侵蚀、塌陷作用的改造,在发育后期往往演变为沟槽<sup>[5-6]</sup>。根据地下岩溶管道及岩溶洼地(管道明河段)的发育特征可追踪洼地或古沟槽的延伸方向。

需要指出的是,上述方法主要用于形变微弱的稳定构造区,而对地层褶皱强烈的古潜山而言,在基

岩上覆填平补齐面选择标志层,并结合地震相位的追踪,即可通过充填厚度及地震相位加宽样式分析潜山地貌形态的变化。

## 2.2 古潜山岩溶地貌形态及其演化

加里东晚期 千米桥奥陶纪碳酸盐岩地层伴随华北地台整体抬升,经历了长达 1.4 亿年的风化剥蚀和区域夷平,直到晚石炭世才重新接受了海陆交互相煤系碎屑岩沉积。这套沉积广覆于形变微弱的奥陶系碳酸盐岩之上,其填平补齐特征是分析奥陶系顶面形态的重要依据,但由于这套地层在千米桥地区后期受到程度不同的剥蚀,因此该区加里东—海西暴露期岩溶地貌的恢复主要依据大港油田恢复的石炭系本溪组剥蚀厚度<sup>[2]</sup>与下伏古风化壳标志层之上厚度的对应关系,所反映的古地貌形态总体上表现为由北向南平缓延伸的斜坡面貌(图 3)。其中,板深 701 井—板深 703 井之间为一平缓倾斜的“V”字型岩溶台地,台地根部由窄变宽并向北部岩溶高地过渡,其前沿则向南部岩溶洼地倾没;东西两侧形成岩溶斜坡。从北部岩溶高地供水区渗流的岩溶水在本区径流活跃,导致水平岩溶管道广泛发育。根据钻井资料,区内峰峰组可对比的水平充填洞穴沿斜坡多旋回发育,而南部岩溶洼地为汇水区。

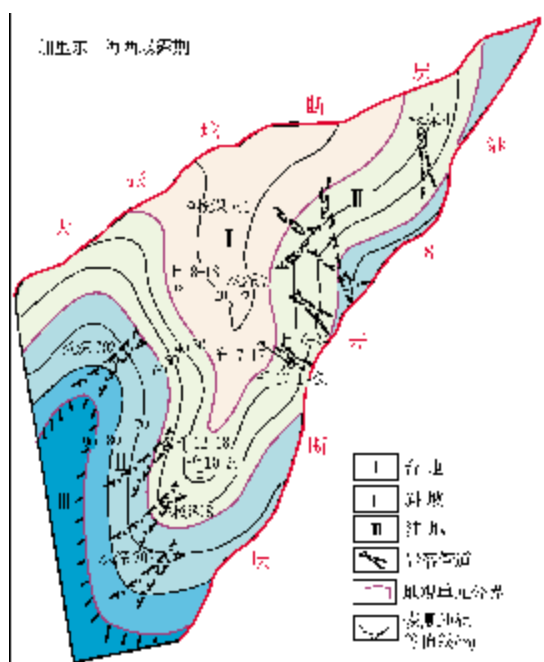


图 3 千米桥古潜山加里东—海西暴露期岩溶地貌

印支—燕山期 随着地壳的再次抬升,结束了华北地台的统一格局。在燕山运动的作用下,逆冲褶皱成为区内主要构造特征<sup>[7]</sup>,导致古地貌形态由先期的台地—斜坡型演变为坳垒型。中生界中部低声速钙质泥岩标志层以下地层厚度与古风化壳标志层之上地层厚度及地震剖面所恢复的印支—燕山暴露期岩溶古地貌图(图 4)表明,本区在印支—燕山期的古地貌形态受断层的性质和走向、断块的规模及其升降幅度控制。岩溶古地貌景观以高差悬殊的岩溶残丘、谷地和岩溶斜坡为主,台地之间以狭长的溶梁连接。其中岩溶残丘高耸于研究区中部板深 701 井—板深 7 井—千 16-24 井及板深 4 井一带;岩溶谷地分布于溶梁两侧,并有溶坑、落水洞、竖井等伴生,相对高差达 300 余米。

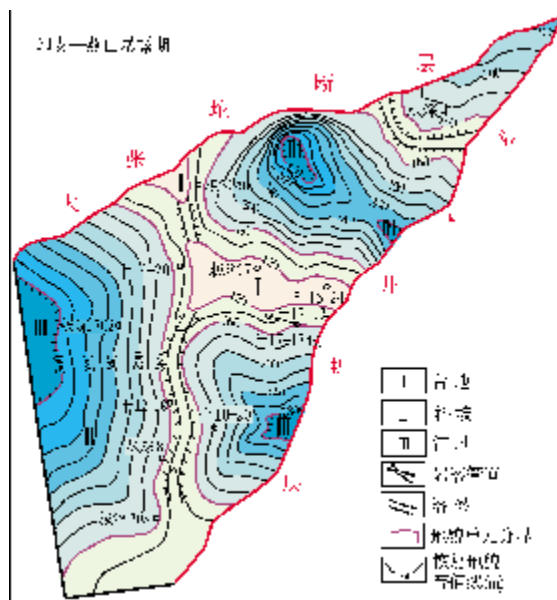


图 4 千米桥古潜山印支—燕山暴露期岩溶地貌

喜马拉雅早期 黄骅坳陷经历了晚白垩世—古新世抬升剥蚀之后,伴随区域拉张和断块沉陷活动,在前期的褶皱断裂的基础上,裂堑与断垒进一步发育。受大张坨与港 8 井断层夹持,千米桥古潜山岩溶地貌自加里东—海西暴露期形成以来,经过印支—燕山暴露期的强烈改造,最终在喜马拉雅早期因新生界的沉积覆盖而趋于定型。古地貌单元在继承印支—燕山暴露期特征的基础上,正地形凹凸多变,溶峰、溶坑相继发育;负地形因裂堑而形成坡度较陡的深溶谷,相对高差达 3 800 m。古地貌的总体形态与现今构造面貌大体吻合(图 5)。

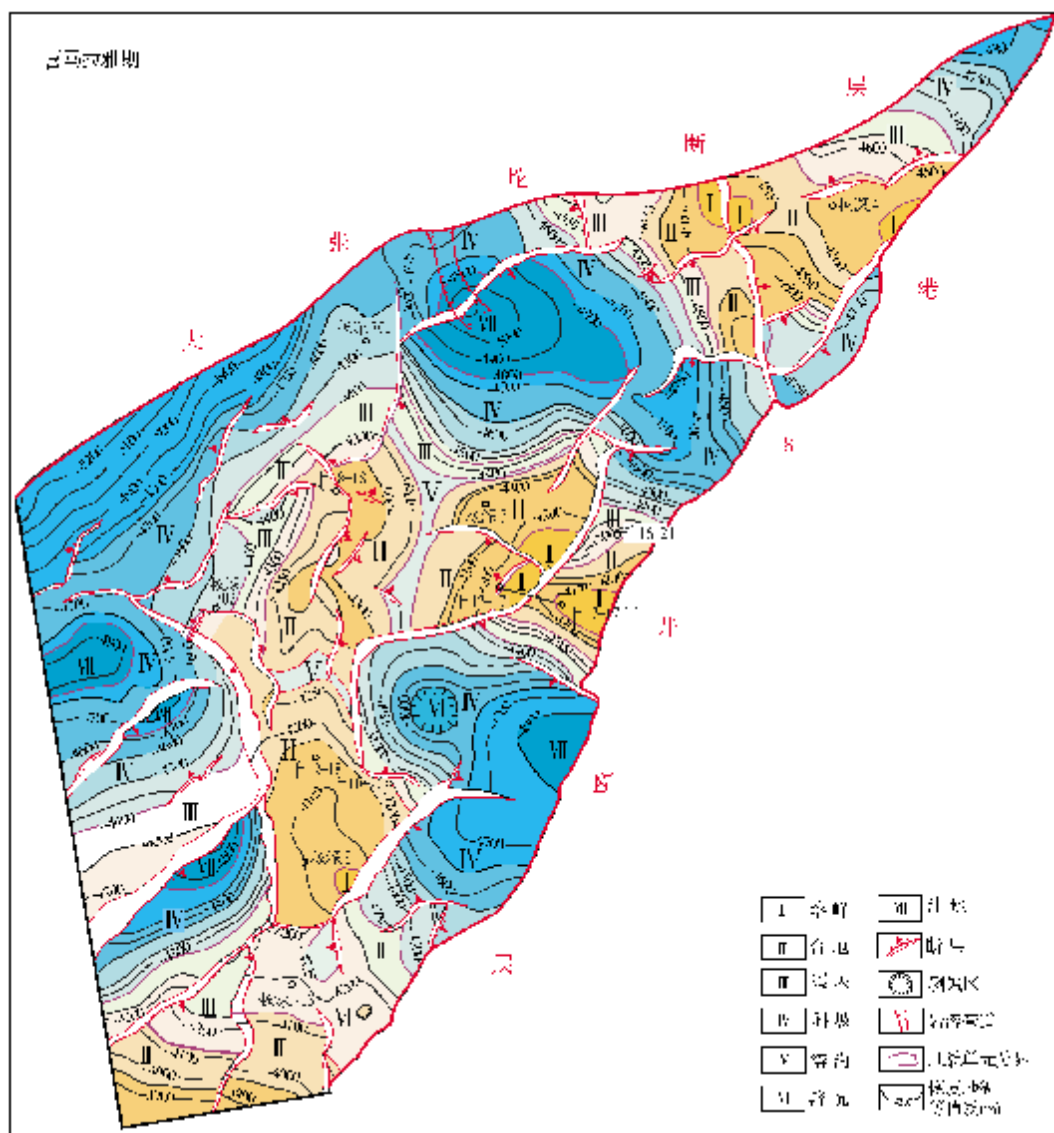


图5 千米桥古潜山喜马拉雅埋藏期岩溶地貌

### 3 古潜山岩溶洞穴的发育及分布

#### 3.1 古岩溶洞穴形成条件

岩性是影响古岩溶洞穴发育的基本因素。通常,在近地表的条件下,质较纯的各类石灰岩及硫酸盐岩易于遭受溶蚀,是大型古岩溶洞穴形成的主要宿主岩;各类白云岩则是发育小型溶蚀孔洞的主要宿主岩。而含泥或泥质碳酸盐岩和灰质泥岩类抗溶蚀作用相对较强,不仅常难形成古岩溶洞穴,而且具有一定阻水作用,因此古岩溶发育过程中的岩性组合

是溶蚀洞穴形成和发育的重要基础。岩相古地理研究表明,千米桥古潜山的奥陶系风化壳地层主要为上马家沟组和峰峰组局限海沉积的含硬石膏白云岩与白云质石灰岩,是成洞的主要岩石组合。

长期的沉积间断,构成了古岩溶洞穴发育的重要背景。加里东晚期,千米桥古潜山奥陶系碳酸盐岩伴随华北地台整体抬升后,暴露地表长达1.4亿年之久,直到晚石炭世才重新接受海陆交互相煤系碎屑岩沉积。尔后又在印支—燕山早期再次暴露地表,导致该区奥陶系碳酸盐岩地层经历了多期风化淋滤,为古岩溶洞穴形成创造了条件<sup>[8]</sup>。



古水文环境是古岩溶洞穴发育的主要营力条件<sup>[7]</sup>。而古水文环境受控于地壳表面的气候因素,不同气候区带的古水文环境差异较大,因此气候条件对古岩溶洞穴的发育起着主导作用。华北地区从震旦纪—二叠纪一直处于热带气候,三叠纪至侏罗纪则处于亚热带—温带过渡性气候。这样的气候带,大气淡水充沛,对古岩溶洞穴的发育是有利的。国家地震局 1991 年古地磁研究成果揭示,华北板块在中奥陶世至侏罗纪早期处于古赤道及其以北中—低纬度之间,属于炎热、潮湿、温暖的气候区<sup>[9]</sup>。

构造断裂的多期发育,有利于大气淡水的入侵淋滤。印支晚期至燕山早期,由于构造活动强烈,研究区形成一系列雁行排列的北北东向褶皱断裂构造,奠定了古潜山的雏形。在其发育过程中,因受不同方向应力的作用而产生一系列压扭性逆冲断裂。这些断裂,密度大,分布广,导致奥陶系碳酸盐岩的

破碎与裂缝化,从而为地表流体的入侵及古岩溶洞穴的发育提供了有利途径。

3.2 古岩溶洞穴现场识别

古潜山埋藏较深,断裂构造复杂,古岩溶洞穴的确定,目前主要通过钻井和测井资料来识别。由于洞穴充填程度及发育规模不同,现场钻井和测井资料上的识别也存在一定差异。

(1)根据现场地质录井显示,当钻遇较大洞穴时,有钻井放空或钻时加快、泥浆漏失等异常现象(表 1),岩屑中常有结晶方解石、白云石及上覆地层的充填物;在测井曲线上反映为井径扩大,声波时差值增高并呈尖峰状跳跃,具有明显的低密度、低电阻特征,自然伽马曲线随洞穴中泥质充填程度高低而变化<sup>[8]</sup>。这类洞穴易于发现,易于识别,区内以板深 7 井 4 266~4 272 m 井段测井曲线最为典型(图 6)。

表 1 千米桥潜山钻探中泥浆漏失情况统计表

井 号	漏失层段 (m)	漏失量 (m <sup>3</sup> )	放空井段 (m)	放空厚度 (m)	距奥陶系顶面 (m)	备 注
板深 4	4580.25~4584.63	少量	—	—	84.00	钻时加快
板深 7	4266.38~4271.75	103.00	4266.38~4266.98	0.60	15.38	钻时加快
板深 701	4904.00~4906.00	少量	—	—	348.00	钻时加快
板深 8	4111.60~4409.09	83.50	—	—	1.60	试油结束压井发生漏失
千 17-17 侧	4182.00~4185.00	13.00	4182.00~4185.00	1.00	5.50	放空后漏失

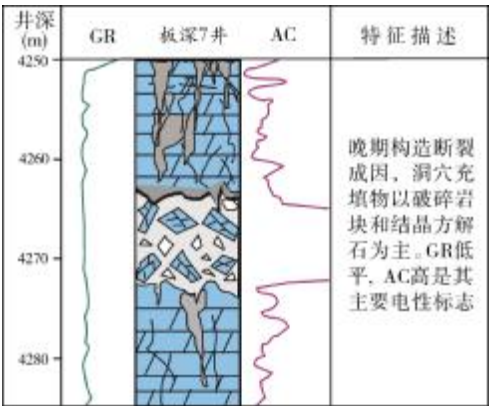


图 6 千米桥潜山板深 7 井构造拉裂扩溶洞穴模式

(2)根据现场取心观察,加里东—海西暴露期形成的较大洞穴多被上覆地层沉积物充填或因塌积角砾岩化,与泥质碳酸盐岩电性特征差异不大,如果没有取心资料,很难确定为充填洞穴;唯有自然伽马能谱所测的铀、钍、钾含量的变化及 FM<sub>1</sub> 成像测井可

以显示充填洞穴的信息。千米桥奥陶系峰峰组中,被解释为泥质碳酸盐岩的高伽马带,经取心观察和对自然伽马能谱测井的重新解释,大都为水平充填洞穴(图 7a,7b)。这些充填洞穴,由于坍塌及充填,导致洞穴本身物性变差。相反,洞穴坍塌又使其上顶板拉裂角砾化,形成新的溶缝及孔洞,并被方解石及它形白云石半充填(图 7c,7d,7e)。

3.3 古岩溶洞穴发育及分布特征

受古潜山岩溶地貌形态的制约,地貌形态不同,其古岩溶洞穴的发育及分布规律也有所不同。

加里东—海西暴露期 千米桥古潜山岩溶地貌形态,在北高南低的背景下呈现出平缓斜坡面貌,构成了岩溶水的径流活跃区。岩溶水以水平运动为主,岩溶洞穴的发育具有层状分布特征。随着地壳运动的不均衡性及古气候的变化,潜水面也随之而变,导致古岩溶洞穴多旋回发育。地壳升降运动的速度

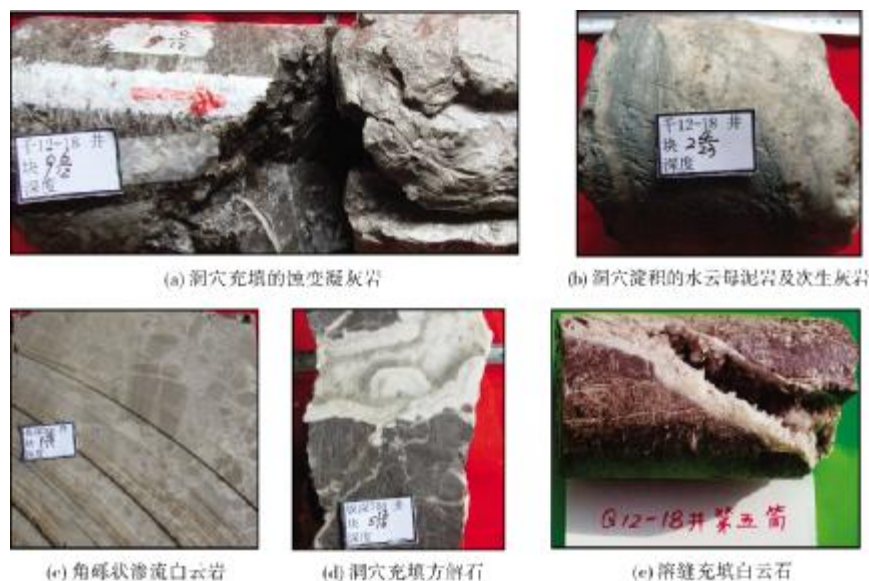
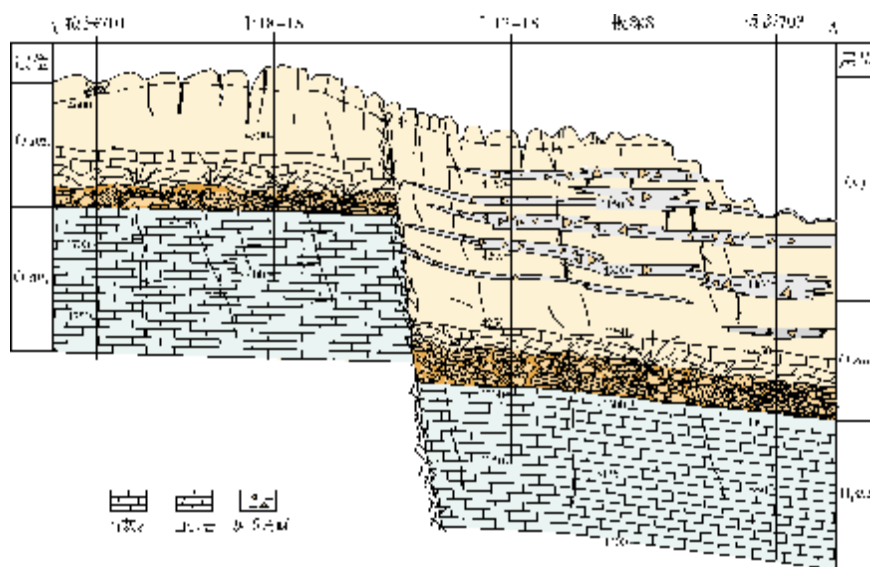


图7 千米桥潜山岩溶洞穴的岩心特征

和活动持续时间控制着水平洞穴发育的程度及规模。地壳升降速度较缓慢,持续时间较长,且气候潮湿时,溶蚀作用进行得比较彻底,水平洞穴带的厚度大,横向延伸距离远,溶蚀洞缝发育。反之,如果升降速度快,持续时间短,则洞穴带的厚度和延伸范围小<sup>[10]</sup>。根据岩心及测井资料,区内可识别出5期较大的水平充填洞穴带。这些水平充填洞穴带,主要分布在风化壳上部的峰峰组含硬石膏白云岩段(因后期抬升,大部分井区已被剥蚀,残存井区相应层段均可对

比)(图8)。

印支—燕山暴露期 随着古潜山岩溶地貌形态的演变及构造断裂的发育,碳酸盐岩的破碎与裂隙化更加普遍。这使得古岩溶洞穴在前期岩溶形迹的基础上,重点沿断裂破碎体系广泛发育,洞穴中的充填物以方解石、白云石为主。这些充填矿物的包裹体均一温度在122~160℃和160~215℃两个温度段,说明它们形成于埋藏期<sup>[11-12]</sup>。而在印支—燕山暴露阶段,砂泥质充填相对较少,物性普遍较好,孔隙度

图8 千米桥古潜山水平洞穴特征对比  
O<sub>2</sub>f 峰峰组; O<sub>3</sub>sm 上马家沟组

一般在 0.2%~16.3% (平均 5.24%), 渗透率介于  $0.213 \times 10^{-3} \sim 18.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (平均  $5.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 是目前古潜山油气储层的主要储集空间。由于岩溶洞穴的发育受断块地貌高差及断裂空间的分布控制, 具有一定的随机性, 并且大都变化在风化壳之下 15~150 m 范围(最大可达 300 m)。

## 4 结 论

(1) 在古岩溶研究中, “印模法”和“残厚法”以及地震相追踪对比法恢复岩溶古地貌形态是既简单又实用的方法。运用这些方法, 对千米桥奥陶系古风化壳上下地层厚度变化关系作系统分析, 结合古岩溶发育特征, 确定了古潜山岩溶地貌在不同暴露阶段的发育形态。

(2) 古潜山岩溶地貌演化特征研究表明, 千米桥古潜山岩溶地貌的形成先后经历了加里东—海西暴露发育期、印支—燕山暴露改造期、喜马拉雅埋藏定形期等演化阶段, 最终因新生界的沉积覆盖而成为现今面貌。

(3) 古潜山岩溶地貌形态的不同演化阶段、古洞穴的发育和分布, 也具有明显的差异。利用钻井及测井信息, 可在生产现场识别古洞穴的大小及分布。对充填物特征的分析表明, 加里东—海西暴露期发育的古岩溶洞穴受地壳升降周期控制, 多旋回成层分布, 并且多被砂泥质充填, 有效孔洞保存较少; 印

支—燕山暴露期发育的古岩溶洞穴受断裂体系影响, 分布具有一定的随机性, 并且多被埋藏期充填物半充填, 是目前古潜山油气储层的主要储集空间。

## 参 考 文 献

- [1] 华北石油勘探开发研究院. 渤海湾地区古潜山油气田[M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1978: 23-34.
- [2] 吴永平, 杨池银. 渤海湾盆地北部奥陶系潜山[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 24-155.
- [3] 郑聪斌, 冀小林, 贾疏源, 等. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳古岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3): 280-288.
- [4] 夏日元, 唐健生, 罗伟权, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 133-135.
- [5] 何自新, 郑聪斌, 陈安宁, 等. 长庆气田奥陶系古沟槽展布及其对气藏的控制[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 35-38.
- [6] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986, 105-115.
- [7] 李洪革, 杜旭东, 陆克政, 等. 渤海湾地区中西部中生代构造特征及演化[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(3): 1-5.
- [8] 付立新, 杨池银, 肖敦清, 等. 大港千米桥潜山储层形成对油气分布的控制[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 33-38.
- [9] 郑聪斌, 张军, 李正宏, 等. 鄂尔多斯盆地西缘古岩溶洞穴特征[J]. 2005, 25(4): 27-30.
- [10] 刘传虎. 潜山油气藏概念[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 49-54.
- [11] 刘德良, 谈迎, 孙先如, 等. 鄂尔多斯古生界流体包裹体特征及其与油气演化关系[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 696-704.
- [12] 郑聪斌, 章贵松, 王飞雁, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系热水岩溶特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 524-529.

编辑: 赵国宪

## Evolution of Karst Paleogeomorphology and Development Features of Paleokarstic caves in the Qianmiqiao Buried Hill in Huabei Oil Fields

Qi Zhenqin, Sun Xiuhui, Li Zhejing, Lu Qingjin, Guo Xiuli

**Abstract:** By the "moldic" and "residual thickness" methods and the seismic phase tracing and contrasting, the karst paleogeomorphology is analyzed to the Qianmiqiao Buried Hill in Huanghua Depression, Bohaiwan Basin. It is revealed that karst geomorphic of Qianmiqiao buried hill had successively experienced three evolution stages including the exposure and development during Caledonian-Hercynian period, the exposure and reformation during Indosinian-Yanshan period and the sinking, burial and formation during Himalayan period. The development and distribution of palaeokarst caves are not only under control of the geomorphic form and ground water surface, but also are closely related with the lithologic combination, palaeohydrologic environment and fractures. Accompanied with the continuous uplifting of the crust and the unceasingly descending down of regional water table during Caledonian-Hercynian period, palaeokarst caves evolved into multicycle bedded distribution with arenaceous fulling in pores and little available pores preserved. Influenced by fracture system, the palaeokarst caves were distributed with certain randomness and most of pores were partly filled with chemical matters during the Indosinian-Yanshan period. These caves and pores are the present significant reserving spaces for oil and gas in the buried hill. By using drilling and well logging information and cave fillers, the existence and the distribution of the palaeokarst caves may be distinguished, which can provide some information for the comprehensive reservoir evaluation to buried hill reservoirs in oil and gas fields.

**Key words:** Ordovician; Buried hill reservoir; Paleokarst feature; Restoration of paleokarst geomorphology; Qianmiqiao Field  
Qi Zhengqing: female, Senior Engineer. Add: Geologging Company, Bohai Drilling and Exploration Engineering Company, PetroChina Co., East Tuanjie Rd., Dagang District, Tianjin, 300280 China