

# 陕甘宁盆地中部深埋藏 古岩溶自封闭体系与气、水分布特征\*

万新南 石豫川 郑聪斌 张敏渝  
(成都理工学院环境科学与工程系) (长庆石油勘探局)

**【摘要】**本文首次从岩溶发育的反面—岩溶的垮塌破坏、岩溶的充填堵塞及再胶结、再溶蚀作用初步定性地研究了岩溶自封闭系统及该系统与气层分布、水层分布的关系。可以得出结论:岩溶自封闭系统控制了气田的整体分布与残存地下卤水的分布,使高产井与低产井具有耦合特征,即高产井周边以低产井相伴,甚至与产水井相伴,因此确定古岩溶自封闭体系的分布规律对找气、排水具有重要意义。

**关键词** 古岩溶,自封闭,气层,水层

**分类号** P642.251

古岩溶有别于现代岩溶以及现代深部岩溶。古岩溶一般定义为第四纪以前地质历史时期所产生的岩溶。

根据形成的时空关系,该区古岩溶可大体上划为三类:层间岩溶、风化壳岩溶与缝洞系岩溶。层间岩溶为准同生期形成,为当时地质时期层间溶蚀而成,主要分布在马五11、马五12、马五13层云灰岩中,最大特点是各层针孔与小溶孔均匀分布。风化壳岩溶则贯穿马五1至马五4整个层段。缝洞系岩溶是在埋藏条件下酸性水活动对前面两种类型岩溶再溶蚀、再改造的岩溶景观。层间岩溶与风化壳岩溶是缝洞系岩溶形成的基础。风化壳岩溶的形成除了受控于岩性、原始地形与古构造以外,主要取决于古气候与古水文特征。

多方证据表明该区当时古气候以湿热为主,伴以干旱环境。这点从中部地区钻孔中铝土矿普遍分布,东部较西部多,大多已转变为地开石得到佐证。正因为本地区湿热气候与干旱气候的交替出现使中部古岩溶具有高差相对较小、地形平缓的特色。根据该区构造运动特点及封闭条件,可把该区分成开放体系、半封闭体系与全封闭体系。现分别述之。

## 1 开放体系下的古地貌及古水文特征

陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳时期,马五段地层全部暴露于地表,接受长达1.5亿年的淡水淋滤、冲刷、剥蚀,形成了当时开放体系下的特有的古岩溶地貌。

为了恢复古岩溶地貌特征,首先要恢复本溪组地层沉积前的古地形条件。为此我们假定在奥陶系云岩接受沉积至煤系地层的大面积沉积止,此阶段的新沉积地层水平成层分布。因而以海拔标高计,可把滨海相地层K6煤层作为当时的水平基准,找出风化壳顶面的相对位

\* 1997-03-25 收稿。

第一作者简介:万新南,男,47岁,硕士,副教授,水文地质及工程地质学专业。

置,这些位置的等高线构成的平面起伏图即为古地形图。

从古地形图来看,地表形成了一系列的溶蚀槽沟、槽谷、洼地、落水洞及地下水集中泄流带(图1)。它们大都位于研究区的东边并呈北东东向、局部呈东西向排列,该溶蚀地貌特征反映了当时总体地势呈西高东低、北高南低状态。但中部地带则表现为南北向地背斜特征,中脊地带一般比西侧高8~10m,比东侧高15~20m,高者可达30余米,继续往西地形又变高,东西相差70~80余米。地表坡度总体起伏不大,坡降为2‰~9‰左右,地下水交替缓慢,地下水的深循环发育较差。在此阶段主要地下水通道有三,a.马五11-马五13溶孔层,其中又以马五13孔洞层为最好;b.马五14、马五3中的膏盐层,此两层为当时风化壳时期的最大泄水通道;c.马五41孔洞层及下伏部分膏云岩系。地下水主要通过这几层进行水力联系与水动力迁移。在开放体系中,整个奥陶系云灰岩层形成了统一的含水层(图2),发育了一系列垂直洞穴系统和水平洞穴系统,但总体迳流方向是由西向东泄水。

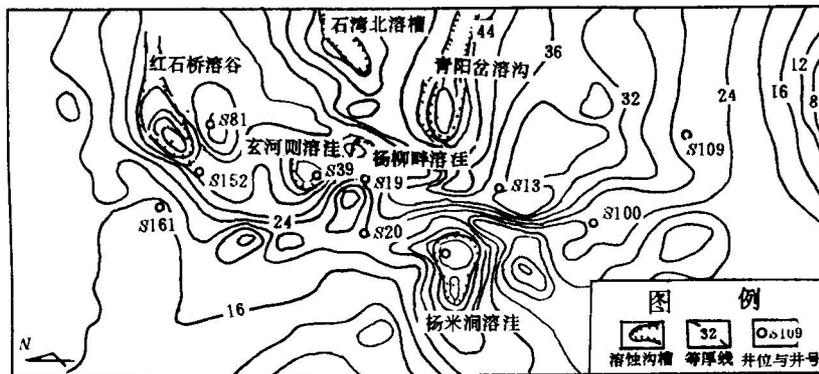


图1 奥陶系古风化壳岩溶地貌平面图

垂直洞穴系统主要发育在水流的垂直循环带,其深度可达10~30余米。

## 2 半封闭体系中的水文地质特征

中石炭世末,加里东运动期本区发生了大规模的海侵,时历近1.5亿年的陕甘宁古陆重新接受新的沉积。首先沉积了一套含煤线的本溪组砂泥岩地层,厚0~30余米,由东向西逐渐减薄,至陕50井及城川1井附近缺失,使奥陶系孔洞含水层进入了半封闭状态。使其由潜水系统进入承压系统,地下水一改过去由西向东运移的常态而反之由东向西运移;奥陶系含水层不再大面积地接受大气降水及地表水的直接补给,而是西部局部接受地表或大气降水的补给,东部大部接受上伏本溪组砂泥岩的压实水补给(图3)。地下水沿早期近东西向管道、裂隙系统以承压水的形式排向陕50井、城川1井附近。排泄带西边仍处高地的奥陶系云灰岩则保持早期原有的接受大气降水的特征,地下水及地表水均由西向东运动,部分排出地表、部分补给承压含水层。成为承压水与潜水共存的半封闭系统。

在本水文期,地下水活动有两大特点:一是水流方向发生了不可逆的变化;二是水流通道基本沿袭开放体系下的裂隙、溶隙管道系统发育,这里不排除原管道系统的局部堵塞、管道局部的拓宽以及新管道的形成。本溪世末研究区继续接受沉积。

## 3 全封闭体系中的古水文地质特征

至太原世,海侵继续扩大,使一度保持古陆地带的城川一井、陕50井等处也没入了海水之下,接受进一步沉积,形成了一套沼泽泥碳与生物碎屑灰泥互层地层。此时海侵海退交替出

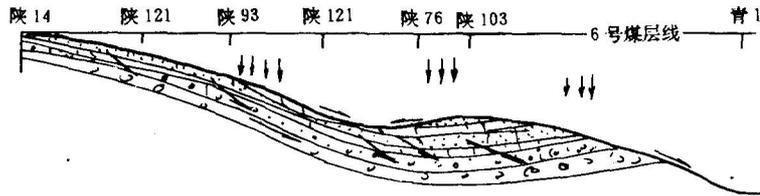


图 2 陕<sub>14</sub>井-青<sub>1</sub>井马五<sub>1</sub>地质开放体系古水文地质剖面图

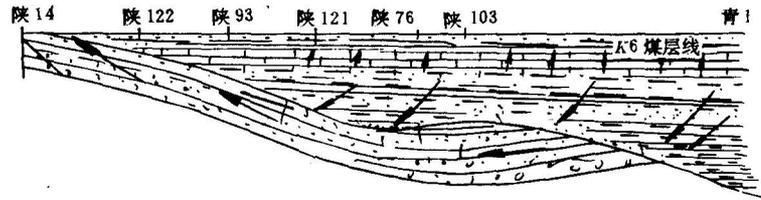


图 3 陕<sub>14</sub>井-青<sub>1</sub>井马五<sub>1</sub>地质开放体系古水文地质剖面图

现,形成了本溪到太原组的三角州相过渡沉积体系。由于海侵、海退频繁,使奥陶系含水层地下水无论古水动力特征还是水化学特征上都发生了巨大变化,顶部比重较大的富含有机质酸性水将通过渗透压力差与重力作用逐渐步入奥陶系淡水含水层,与之发生重力驱替,一方面富含有机质的酸性水与淡水混合,另一方面驱替淡水使奥陶系含水层的地下水矿化度不断提高,由重碳酸钙型水进入 NaCl 型水,形成了初期酸性水迁移,并进一步增大含水层的孔隙与溶隙空间。此阶段水的迁移主要以重力对流,侧向驱替迁移为主,形成了一种复杂水动力迁移模式,并一直维持到上山西世末,即煤沼地层全部被封存为止。此后的古水活动则是以压实补给,侧向迁移,集中排泄为主。集中排泄区仍处沉积最少处,如城川 1 井和陕 50 井附近。此时的排泄特点是以高压下的毛细作用及蒸发作用为主,排泄过程非常缓慢,最终达到相对静态平衡。此期的古水活动除上部压释水进入奥陶系岩溶含水层形成高压异常流外,它们还将积极参与成烃作用及奥陶系含水层的岩溶自封闭作用。根据黄铁矿、自生石英的分布,酸性水活动的垂向深度可推断为 30 米,与地开石发育深度一致。

#### 4 现今埋藏条件下的奥陶系风化壳地形及地质特征

根据马五 1 层分层特征及地层出露特征,按构造地质学 V 字型法则,可揭示现今条件下的奥陶系地层出露、起伏及构造特征。

从恢复的埋藏地形地质图可见,地形上表现为向南西缓缓倾斜的一系列北东东向小沟谷与小山脊相间分布,地层坡度略大于地形坡度,有的与地形坡度相同,呈波状起伏出露。构造上地层褶皱主轴方向也为北东方向。从古岩溶与构造考虑有如下关系,即早期溶蚀剥蚀强烈区为现今的褶皱低谷(或曰向斜),地层保存完好区则为褶皱高台区(或曰背斜),其形态完全受区域构造所控制。在区域地应力的挤压下,由于地层抗压性能不同,致使剥蚀强烈的软弱带被挤压下陷成向斜,而地层保存完好区则被挤压上凸表现为背斜。向斜核部区为古岩溶进一步封堵地段,而背斜核部区则为古岩溶保存完好地段。

#### 5 埋藏期古风化壳岩溶特征

石炭纪末及以后时期,本区已先后为本溪组、太原组、山西组……等地层所封盖,地下水潜水体系已被承压水体系全部代替,地表剥蚀与地下洞穴的再扩大溶蚀已基本停止。代之而起

的是上部泥、砂对洞穴的充填以及大洞穴的渐进式破坏。在风化壳封盖初期,地下水沿原洞穴通道由东往西运移,并在充填、压实破坏中重朔新的洞穴管道系统。但在上部地层压力不断增加的条件下,首先破坏的是曾一度为岩溶最发育区,特别是西部边界,因为西部的陕50、陕31、陕182一线曾一度处于潜水和承压水的交接带,即淡水与酸性水集中排泄带。如城川1井的岩芯中的地下水溶蚀冲刷面仍清晰可辨。其次破坏的是中部与东部的一些还未来得及压实的大洞穴。总之在埋藏期,早期古岩溶是以压实破坏、重胶结为主,以局部的溶蚀改造为辅。因此使古岩溶强度的分布发生了巨大变化。

## 6 岩溶自封闭体系与气藏关系

该区岩溶自封闭是在地层压力、地温变化及地下水共同作用下使岩体发生的重结晶、再胶结,最终自我封闭或封堵;由于这种封堵作用,使溶蚀管网系统非常发育的岩体在局部范围内形成一种相对封闭的条件,并对其它岩溶孔洞发育较好区起着相对隔离作用;这些岩溶发育相对较差区则称作为岩溶自圈闭障区(图4)。

综合考虑地质构造、古水流活动、以及表征古岩溶发育程度的参数,研究区整体上划分成一个大封闭体系即地层圈闭体系。在本溪组、太原组、山西组等沉积以后,上伏地层则沿马五14地层的边界形成了以砂泥岩为主的对马五13以上强岩溶孔隙及孔洞通道的圈闭。成为了陕甘宁盆地中部气田的主体边界。在边界的限制下所封存地下水、形成的天然气可在此范围内进行垂向与横向迁移;但由于上复地层压力的不断增加、地温的不断升高以及构造的不断变动,在大圈闭条件下将形成一系列的小岩溶圈闭体系,每个小岩溶圈闭体系由圈闭障区与圈闭区两部分组成。被圈闭障包围的地区,圈闭区残余岩溶强度较大,内部相互连通性较好,因圈闭障的存在使大圈闭范围内整体上相互连通的水体或气体不再有通畅的相互联系。

总体上说,研究区大致可划分5个小的岩溶自封闭体系(图4),每个体系之间均由岩溶封闭较强的岩溶圈闭障分隔。其主要证据如下:

a. 从水文地质角度来说,岩溶障区大多处于古水流最活跃区,在风化壳岩溶期这些活跃的古水流与古溶蚀槽谷密切相伴。也就是说当时古溶蚀槽谷区附近的地表、地下水活动强烈、溶蚀裂隙、溶蚀管道发育。在风化壳岩溶埋藏期,这些地区最先被后期的泥砂岩堆积充填,而地下水则在附近的畅通溶蚀管道中集中、停留、寻找新的出路。因此在压实条件下

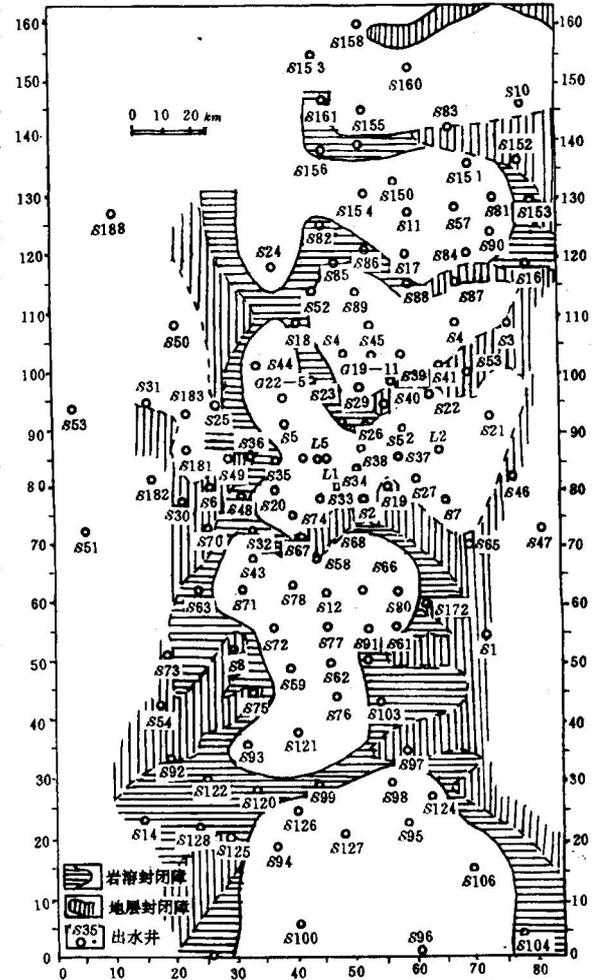


图4 陕甘宁盆地中部气田马五,岩溶自封闭体系图

地下水所携带的物质也是先在这些地段迁移、沉淀,最终在此地段长期停留并参与岩溶的自封闭作用,这部分封闭在岩溶管道中的水或者成为高矿化度酸性水保留其中,或者参与成烃活动,或者成蒸气逃逸。

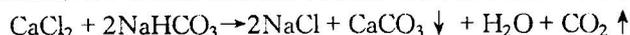
b. 所测地层压力存在分区性,南区圈闭(包括陕 78、陕 76、陕 62 等井)地层压力最大为 32 - 33mpa 左右,中区(陕 34 - 37 等井)略小,为 30 - 31mpa 左右,以 31mpa 为主;此区以北的陕 29 - 45 区为 30mpa,地层圈闭带则以 29mpa 为主,显示了一定的圈闭规律。

c. 从岩芯特点也可证实此圈闭存在,岩层的顶部封堵在大多数井均可看到,有的以黄铁矿封堵为主,如陕 42、陕 20、陕 153 井;有的以泥质封堵为主,如陕 52;岩层中的中部封堵大部分以含有机质的铁白云石、方解石及地开石等为主,如陕 156 井、陕 23 井等,与岩溶自封闭障有一定的相关性。

d. 各井的岩溶参数在岩溶的圈闭障区普遍较差,而在圈闭区则相对较好。

e. 气井产量的分片性、气井产水的突发性和相对的孤立性也体现了岩溶的封闭特征。

岩溶自封闭主要通过化学沉淀及压实重结晶完成,其化学过程可采用下式表达:



沉淀的碳酸钙则起封堵作用。

从成因来说岩溶自封闭作用主要有岩溶压实胶结圈闭、岩溶化学交代圈闭、泥质充填堵塞圈闭等。前两种圈闭不能绝然分开,有时能相互补充。一般说来每个圈闭障都同时伴有以上几种圈闭特征。

研究区的最有利开采区应为中部三大圈闭,即陕 52 - 陕 4 圈闭区,陕 5 - 陕 21 井圈闭区,陕 12 - 陕 121 圈闭区。剩下的南北两区则为开采的有利区。北区又较南区为好,这从北区酸性水活动强于南区得到证实,如北区陕 156、陕 157 井顶部黄铁矿层可达 2 米余。并且在陕 150、陕 155 获高产气流。这与古水流场及古岩溶发育特征、现今残余岩溶分布特征相一致。

## 7 岩溶自封闭体系与水层的关系

水层问题不能只涉及马五 1 层本身,它必须涉及马五 1 层的周围邻近地层,从岩溶系统的角度进行研究。根据古岩溶地貌、古水动力场、古地质构造、残余岩溶强度及古水化学特征,可找到水层分布的一般分布规律。

在开放体系中,马五段的马五 4 以上奥陶系地层都属强岩溶含水层,属于潜水系统,上部形成了以均质针孔及孔洞为主体的孔隙溶隙含水层、下部与底部形成了以洞穴、管道为主的溶洞裂隙含水层。在半封闭及全封闭体系中,由于地质环境的变迁,含水层进入了承压系统,随着上部地层压力的增大,统一的岩溶含水层将被破坏。特别是马五 3、马五 14 段的洞穴与其中残存的泥、砂类物质一道被压实成一体而成为相对隔水层,曾经一度活跃在这两个层位的地下水将被挤压排入相邻的马五 13 与马五 41 层中,形成新的含水体系。其它邻近层位的地下水也都照此进行调整。据此可见目前最大可能的水层有三, a. 马五 11 - 马五 13 本身, b. 与马五 1 顶部地层直接或间接接触的砂岩层, c. 与马五 1 底部间接接触的马五 41 与局部马五 3 地层。这三层在特殊条件下(如开采条件下)可以局部勾通,一般条件下自成独立系统。

这三层含水层中地下水活动主要受到大圈闭的制约,在局部范围内要受到小圈闭的制约。由于多次构造活动的影响,研究区的地下水至少有二次改向。一次是半封闭与全封闭条件下的改向,即由西向东改为由东向西,另一次则是中、晚侏罗纪的掀斜运动,再次使地下水运动改向,而使地下水产生由南西向北东迁移的趋势。这种构造活动不但影响地下水的富集特征,而且也影响到烃类的迁移与岩溶的自封闭特征,决定了气藏与水层的分布模式。根据古水动力场研究,东(陕 13 - 3 - 47 - 172 - 97 井)西(陕 177 - 50 - 25 - 35 - 73 - 14 井)封闭边界在构造

的几度变迁中始终交替变化于排泄边界与补给边界之间。特别是三叠纪初,地下水已停止大规模的侧向迁移,并在奥陶系云岩及二叠纪砂泥岩之间形成了主体欠压实带及异常高压流带。现今测井曲线(声波时差曲线)仍有明显的显示。

在研究区沉积史上快速沉积和缓慢沉积交替出现,如上部太原组灰岩及煤系的沉积是一个非常缓慢的过程,而砂泥岩沉积较迅速,使之煤系层形成欠压实带,其高压水流将通过孔隙裂隙向奥陶系含水层迁移,参与成烃作用,有一部分则封存于奥陶系含水层中。

仅对马五1层而言,垂向上,主要含水层段应与主要含气层段相一致,均为马五13层。其次则是马五11与马五12针孔层,但由于欠压实作用,局部马五14地层也可产生释水,如陕63、陕40-41井、陕25井等,这些层位的水量较为有限。

根据该地区构造运动特征及古水文地质特征,对水层的平面分布也可作一初步判断。水层的主体部分,应在早期地下水最活跃带,即开放体系下的溶蚀槽谷带或埋藏初期岩溶管道最发育带及其附近部位,包括早期东、西排泄与补给边界。形成一种局部“边水与底水”区,这种局部边水与底水是岩溶自封闭以后,气驱水而造成。如陕20井片区,其南边为岩溶封闭障区,东、西为地层封闭障区,即地质史上地下水最活跃的东西边界。北边是气藏富集区,是气驱水的主要动力来源,因而在以上边界的限制下,形成了中部岩溶圈闭的局部边水区。当然这里不排除封闭的孤立小水体的存在,如陕95、96井等。另一方面,虽然涌水主要发生在马五13层,但水层在垂向上并不绝然孤立,局部的“底水”补给也是有可能存在的,岩芯含盐量的变化特征似可说明一、二,如林3井马五41层含盐量剧增,在一定程度上反映了它的富水性。因而在开采条件下,由于地层压力的重新分配,在局部地段通过裂隙进行水力联系是可能的。也就是说某井点的涌水表面上是来自马五13,而实质上补给源是来自其它水层。这种不确定性主要归因于岩溶的特殊性。

## 8 结 论

1、研究区的岩溶自封闭体系较为明显,每个封闭体系由岩溶圈闭障区与岩溶圈闭区共同组成。研究区本身为一大的砂泥岩地层圈闭体系,其中又可划五个岩溶自封闭体系,以中部三个岩溶自封闭体系产能最好,南、北两个自封闭体系次之。北区又比南区强。

2、垂向上马五1层富水区为马五13小层,平面上富水区应在古岩溶的最发育带,现今的岩溶圈闭障区与障区的边缘带。

## PALEOKARST SELF-CLOSED SYSTEM AND THE DISTRIBUTION OF GAS & WATER IN MIDDLE OF SHAN-GAN-NING BASIN

Wan Xinnan Shi Yuchuan

(Chengdu University of Technology, China)

Zheng Congbin Zhang Mingyu

(Changqing Exploitation Bureau of Petroleum)

**Abstract** It is first time to deal with the paleokarst self-closed system due to the karst collapsing and re-cemented. According to the relationship among gas and brine and self-closed system, It can be concluded that the karst self-closed system controls the distribution of brine layer and gas layer in the gas field, so it is important to determine the developing characteristic of paleokarst self-closed system for oil and gas exploitation in the basin.

**Key words** paleokarst; self-closed system; gas layer; water layer