

蜀南地区茅口组古岩溶缝洞系统与地层水化学性质的关系

桑 琴¹ 未 勇¹ 程 超¹ 黄 静¹
吕宗刚² 吴昌龙² 彭祚远² 吴东昊³

(1. 西南石油大学资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田分公司蜀南气矿, 四川 泸州 646001;
3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要:在总结和分析 451 口井地层水测试资料的基础上,对蜀南地区茅口组地层水矿化度和水型特征进行研究,结合钻井、地震、测井等资料,系统总结了古岩溶的垂向分带模式,阐述了各岩溶带在剖面上的发育特征,并对不同化学性质的地层水的储存方式进行了分析。结果表明:该区地层水矿化度普遍较低,变化范围大,矿化度分布特征与地层水势能有关。 CaCl_2 型地层水矿化度较高,具正向浓缩、深变质、渗流缓慢等特征, NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型水矿化度较低,其出现与岩溶作用有关,所在地区的地下水性质不活跃。古岩溶带在垂向上可分为:表层岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平径流岩溶带和深部潜流岩溶带,不同岩溶带特征各异。 CaCl_2 型水的形成与大气淡水淋滤、地层压实释水和埋藏变质作用有关,以深层滞留水方式赋存于地层孔隙中,低矿化度水则以封存水方式储存于岩溶封闭体中。

关键词:蜀南;茅口组;古岩溶;垂向分带;地层水化学特征;储存方式

中图分类号:TE122 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0228-08

蜀南地区位于四川盆地南部,北起资中—大足,南抵叙永—珙县,西至仁寿—井研,东达中梁山—同福场,勘探开发面积约 $5.03 \times 10^4 \text{ km}^2$,区域构造位置属于四川盆地川东南中隆低陡构造区和川中平缓构造区南翼。该区茅口组地层为一套浅海碳酸盐岩开阔台地沉积,岩性以生物碎屑灰岩为主,厚度为 200~400 m。中二叠世末的东吴运动使茅口组地层广泛抬升,遭受长期风化剥蚀,形成古风化壳岩溶。本文从地层水测试数据及相关第一手资料入手,探讨茅口组地层水化学性质和分布特征、岩溶分带模式和不同类型地层水的储存方式,为深入研究该区储层特征和气的分布提供依据。

1 地层水化学性质与分布特征

地层水以不同形式与油气共存于地下孔隙空间

中,它和油气之间存在经常性的物质成分的交流,它的化学特征是水文地质、物理化学平衡、流体-岩石相互作用等的综合反映,而且这些过程与油气成藏密切相关^[1-3]。在统计蜀南地区 100 余个构造 1000 多口井的地层水数据的基础上,优选茅口组 451 口井的水样数据,进而对地层水的矿化度和水型(图 1)进行分析。

1.1 矿化度

该地区矿化度普遍较低,平均矿化度约 45.84 g/L。矿化度变化范围较大,为 0.2~281.67 g/L,矿化度最高的沈 24 井为 281.67 g/L,矿化度最低的威南 2 井为 0.2 g/L。形成若干分布中心,东北部的永安场、丹凤场,西北部的威远、自流井,西部的孔滩,西南部的赵场、南井,南部的长宁和高木顶,中部的圣灯山和古佛山,显示相对较高的矿化度,普遍大于

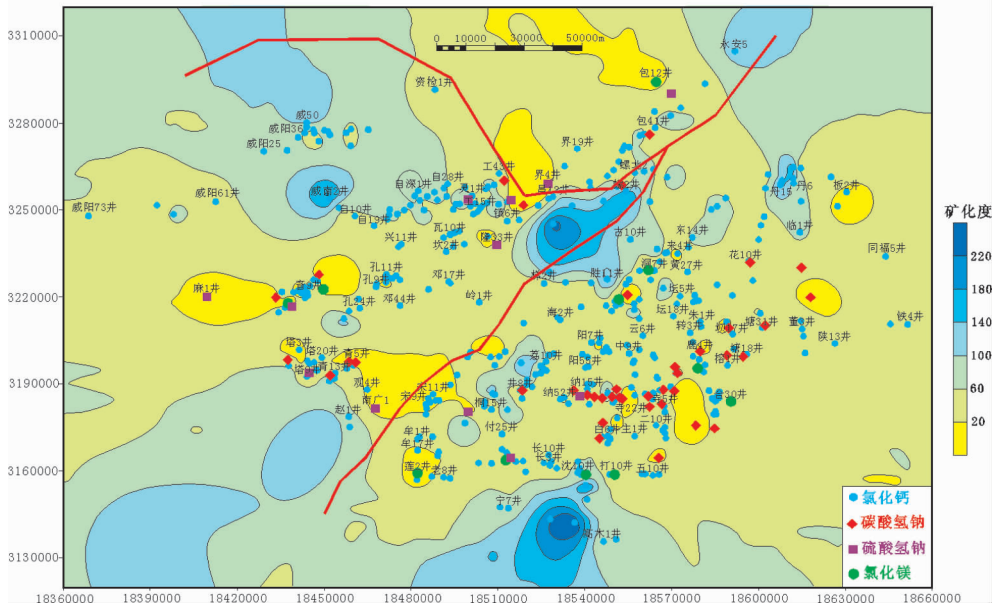


图 1 蜀南地区茅口组地层水矿化度及水型分布图

Fig.1 The distribution of the salinity and types of the formation water of Maokou Formation in Shunan area

60 g/L。与之相对,其他地区的矿化度则相对较低,普遍低于 60 g/L。

该区 Cl^- 的含量约占离子总量的 60%, 其分布与矿化度的分布显示出很好的一致性^[9]。矿化度相对高的地区, Cl^- 的含量也较高,普遍大于 3.5×10^4 mg/L,矿化度相对低的其他地区, Cl^- 的含量亦较低,普遍小于 3.5×10^4 mg/L。此外,地层水中还有: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等盐类离子。

总体而言,该区东北部的永安场、丹凤场,西北部的威远、自流井,西部的孔滩,西南部的赵场、南井,南部的长宁和高木顶,位于古隆起的四周,是地层水矿化度的高值中心,而古隆起核部(圣灯山和古佛山除外)地层水矿化度相对较低,这种特征与地层水势能分布有关。上述各分布中心位于古隆起四周的低洼处,地层水的势能高,地层水分布集中,各种离子含量多,从而矿化度较高。相对的,古隆起核部势能较低,各种离子含量较少,矿化度较低。特殊的,大断裂交界处的圣灯山和古佛山地区,虽地处古隆起的核部,但矿化度显示异常高值。这可能是由于断层的作用,使深部的地层水在上覆压力减小时上窜回灌,或其他地区的地层水沿大断裂及其附近形成的裂缝通道运移、汇聚于此所致。

在地层水的常量组分保持相对不变的情况下,

保存条件较好的地层水,其矿化度一般较高;反之,矿化度较低。由此可知,上述各高矿化的分布中心的保存条件较好。

1.2 地层水水型

该区茅口组地层水水型主要有 4 种: CaCl_2 型、 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型。其中 CaCl_2 型约占 86%, 它们分布的地区,地层水矿化度相对较高; NaHCO_3 型占 9%, Na_2SO_4 型占 2.5%, MgCl_2 型占 2.5%, 它们分布的地区,地层水矿化度较低。

CaCl_2 型地层水来源于埋藏压释水、有机质热演化成烃析出的水、粘土矿物脱出的结晶水。其分布区为区域水动力相对阻滞区,具正向浓缩、深变质、渗流缓慢等特征^[7], 地层水处于还原环境,反映了储气圈闭良好的封闭条件,有利于气藏的保存^[8]。该区绝大部分的气藏均分布于 CaCl_2 型水区。然而, CaCl_2 型水的分布仅反映水文地质封闭条件,并不意味着在 CaCl_2 型水出现的地方都能发现油气藏。

该区茅口组地层水水型除 CaCl_2 型外,还存在低矿化度的 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型。低矿化度的 NaHCO_3 型水是大陆淡水溶解碳酸盐岩矿物形成^[9,10], 对碳酸盐岩储层起着积极的改造作用。 Na_2SO_4 型水,一般被认为是在氧化开放性环境中,处于裸露和严重破坏的地质构造中的地表水或浅层

地下水^[1]。李鹏春、刘春晓等^[2]认为该水型可能与压实成岩作用下硫酸盐的溶解有关。从沉积背景上看,该区茅口组及上下邻近地层均为生屑灰岩,且层间无明显的石膏、硬石膏等硫酸盐矿物分布,因此不可能是硫酸盐溶解成因。然而,茅口组和龙潭组之间沉积不连续,出现了沉积间断和抬升剥蚀,说明地层水遭受了明显的破坏,地层水的矿化度低,更进一步证实了该水型为地表水或浅层地下水。 $MgCl_2$ 型水可以是海水在潟湖中蒸发浓缩而成,或是大陆淡水溶滤海相沉积岩所保留的成分,也可以是高矿化度的 $CaCl_2$ 型水与 $NaHCO_3$ 型或 Na_2SO_4 型低矿化度水掺和生成^[13,14]。由于该区阳新统是开阔台地浅海生屑灰岩沉积,因而此处的 $MgCl_2$ 型地层水应为大气淡水溶滤或是 $CaCl_2$ 型水与低矿化度水混合形成。总之, $NaHCO_3$ 型水、 Na_2SO_4 型、 $MgCl_2$ 型水的出现,表明气藏的形成与大气淡水淋滤和岩溶作用有关。阳新世末期的东吴运动使得茅口组顶部被抬升剥蚀,接受大气淡水淋滤水,形成溶蚀孔隙空间,部分溶蚀空间中的地层水随埋藏作用得以保存,并保留了古岩溶水的特征。

$NaHCO_3$ 型水、 Na_2SO_4 型水、 $MgCl_2$ 型水的分布表现出一定的特征,它们主要分布在两个区带。一是西北侧的大塔场、青杠坪、观音场至黄家场、河包场一带,二是东南侧的付家庙、打鼓场——纳溪、阳高寺、庙高寺——鹿角场、花果山一带。他们在漫长的地质时期保存下来,保留着原始地层水的特征,说明它们埋藏以后没有受到后期水侵等水文地质作用的改造,所在地区的地层水性质不活跃。产水量在一定程度上反映了地层水的活跃程度。一般而言,产水量越大,地层水的活跃程度越高,反之,活跃程度越低。据统计, $CaCl_2$ 水型出水量最大的二6井达2 145.6 m^3/d , $NaHCO_3$ 型、 Na_2SO_4 型、 $MgCl_2$ 型水的最大出水量分别为打10井925.7 m^3/d ,麻1井21.22 m^3/d ,合30井984 m^3/d , $CaCl_2$ 水型的出水量远大于其他水型,这进一步说明高矿化度水型地层水的活跃程度高于低矿化度水型。

2 古岩溶垂向分带特征

2.1 古岩溶垂向分带模式

James(1988)明确指出,岩溶包括所有成岩作用的特征——宏观的和微观的、地表的和地下的,这些特征在化学溶蚀过程中产生并改造了有关的碳酸盐

岩层序。因此,岩溶通常可分为地表岩溶和地下岩溶,随着深度的增加,岩溶作用的痕迹逐渐减弱直至消失^[15]。根据取心、地震、测井资料,结合地下水动力学特征的差异,将近地表岩溶体系自上而下划分为表层岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平径流岩溶带和深部潜流岩溶带^[16-20]。值得注意的是,由于岩性特征、岩相古地理以及古地貌的影响,一方面这种纵向上的岩溶发育序列可能是不完整的,如有的井的残积角砾岩由于地貌差异发育不全,或由于剥蚀而缺失;同样有的由于径流带地下水流动性差,溶蚀作用弱,水平径流带不发育。另一方面,构造运动和潜水面的升降,使得后期岩溶往往叠加在前期岩溶之上,并以其为基础进行改造,形成各岩溶带在纵向上的多次交替。此外,后期断层错断的地方还表现为各岩溶分带的重复出现。本文以自6井为例,建立了古岩溶垂向分带模式图(图2)。

2.1.1 表层岩溶带

表层岩溶带位于茅口组顶部、风化壳表层,是岩溶作用形成的各种岩溶地貌(如岩溶沟谷、岩溶残丘、岩溶洼坑等)及与其伴生的残积物、覆盖沉积物的综合特征。该带以地表水径流的下渗作用为主,形成一系列的溶缝、溶沟、溶蚀洼地、落水洞等,常被以铝土质泥岩为主的地表残积物和洞壁塌积物如角砾、硅质、砂泥质充填。属浅层地下水循环系统,缝洞

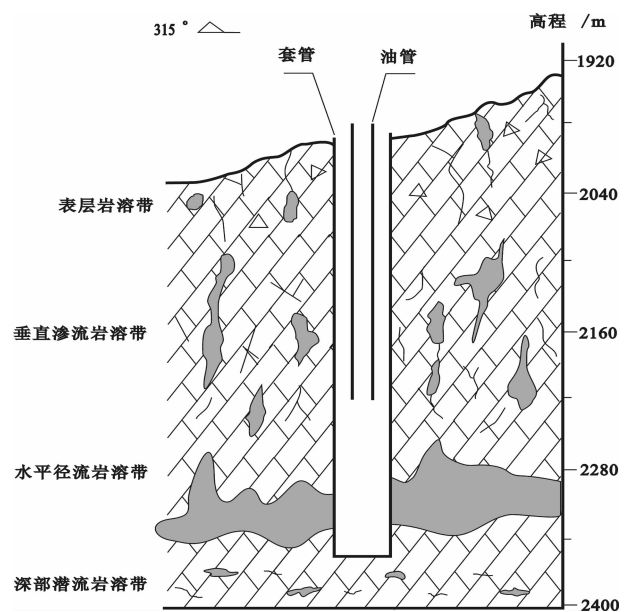


图2 古岩溶垂向分带模式图(自6井)

Fig.2 Vertical zonal mode of paleokarst (Zi-6 well)

发育规模相对较小,彼此连通性相对较强,局部发育小型岩溶管道系统。

表层岩溶带识别特征为:岩心上溶蚀缝洞较发育,以小型溶蚀孔、洞为主,溶洞中主要充填黑色及灰色铝土质泥岩,可见角砾状灰岩;测井曲线上表现为:井径扩径、自然伽马值有明显反应、呈锯齿状、其值高于致密灰岩,深浅侧向电阻率值明显降低,声波时差和中子孔隙度值明显升高等特征。

研究区内如威 28 井进入茅顶 (1 501 m) 2 m 即发生井漏,漏速 3~3.5 m³/h,至井深 1528 m 漏失泥浆 67.9 m³,放空 0.20 m。合 20 井进入茅顶 (2 873 m) 2.15 m 井漏,至 2 876 m 用水泥 6 t 堵漏成功,共漏失泥浆 56.9 m³。桐 13 井钻至茅顶 (2 396 m) 以上 0.9 m 井漏,至 2 402.5 m 共漏泥浆 125.7 m³。它们均表现出强烈的地表岩溶特征。

2.1.2 垂直渗流岩溶带

垂直渗流岩溶带位于表层岩溶带底界与潜水面之间,地下水经过表层溶蚀带后主要通过渗滤的方式继续向下运移,岩层中垂直或近垂直的裂缝和断层是岩溶水的主要渗流通道。在该带,岩溶以垂直形态为主,垂向或高角度溶蚀缝发育,沿裂缝常分布串珠状的小型溶孔。机械充填和化学充填共存,机械充填物以上覆地层物质为主。溶蚀空间连通性相对较弱,未充填或半充填的缝洞可形成较好的储集空间。

垂直渗流岩溶带的识别特征为:岩心观察以大量垂直、高角度溶缝或网状的溶缝、溶沟为主,见少量拉伸状的小型溶孔;溶蚀空间大小不一,多为泥质、炭质泥、生屑、方解石角砾岩及其他不同来源的渗流和胶结物质充填,但机械充填物较表层岩溶带要少得多,可见少量的粗晶方解石,这些充填物形态不规则,与围岩呈清晰的溶蚀接触。因此,测井曲线上表现为:井径不扩径或略扩径,自然伽马微锯齿状或近于平直,与致密灰岩接近,双侧向电阻率值较低、正差异,三孔隙度测井反应为孔隙度向下逐渐减小,说明溶蚀作用向下逐渐减弱。

2.1.3 水平径流岩溶带

水平径流岩溶带位于地下水径流带,岩溶水受压力梯度控制为强烈的水平方向流动,加之地下水中 CO₂ 不饱和,溶蚀作用强烈,多形成大型近水平溶缝、溶洞或岩溶管道系统。溶蚀空间可被流水机械成因的砂、泥质、溶塌角砾和化学成因的胶结物质充填。溶蚀空间规模相对较大,同系统岩溶空间连通性

较强,岩溶发育极不均一。

水平潜流岩溶带的识别特征为:岩心上缝洞非常发育,规模相对垂直渗流带大,以大型水平或低角度溶缝、洞为主,可见少量的高角度缝,形状极不规则,充填物由粗—巨晶方解石、泥晶—粉晶灰岩的角砾和炭质泥等组成,与围岩呈清晰的岩溶接触。测井曲线表现为:井径扩径,自然伽马较高、呈锯齿状,双侧向电阻率值较低,三孔隙度反应为孔隙度较大。钻井上显示级别较高,常出现较为严重的井漏、井喷等现象。

2.1.4 深部潜流岩溶带

深部潜流带位于水平径流岩溶带之下,其下界为古岩溶影响的最大深度。由于深度较大,岩溶水经过上部各岩溶带后,溶蚀能力大大下降,化学沉淀作用相对加强,以产出零星溶缝和小型溶蚀孔洞为特征,多为泥质、粉砂质和胶结物等充填。溶蚀空间规模相对较小,整体岩溶相对不发育,储集性能较差。

深部潜流岩溶带的识别特征为:岩心上溶蚀空间规模很小,主要为水平状小型溶蚀缝洞,横向上连续性很差,可见粒状方解石和泥质充填。测井曲线表现为:井径不扩径,自然伽马和电阻率较低、呈锯齿状。

2.2 古岩溶剖面发育特征

不同的地貌分区由于不同的水动力场条件,往往表现为不同的岩溶分带特征^[21,22]。为了更好地认识古岩溶在垂向上的发育形态及其在空间上展布的变化特征,在研究区做出南西—北东向、南东—北西向 2 条岩溶剖面(图 3~4)。

2.2.1 南西—北东向剖面

该剖面横穿古隆起,共 9 口井,自南西向北东依次为音 7 井、孔 27 井、孔 10 井、山 10 井、山 1 井、昌 8 井、界 16 井、包 41 井、包 36 井。其中山 10 井、山 1 井、昌 8 井位于岩溶台地上,其余井位于岩溶斜坡上。茅口组顶部出露地层自南西向北东为茅四—茅三—茅四变化,反映中间高部位地层剥蚀强度较大,两侧低部位地层剥蚀强度较小。从剖面上来看,表层岩溶带厚度 0~20 m,山 10 井、山 1 井、昌 8 井厚度最大,向两侧逐渐减薄,至音 7 井厚度为 0 m。垂直渗流岩溶带厚度 44~64 m,山 10、山 1、昌 8 井厚度较大,向两侧过渡至孔 10 井、孔 27 井、界 16 井、包 41 井厚度减小,到音 7 井、包 36 井以外厚度又增大。水平径流岩溶带厚度 20~36 m,孔 10 井、孔 27 井、包 41 井、包 36 井厚度最大,山 10 井、山 1 井、昌

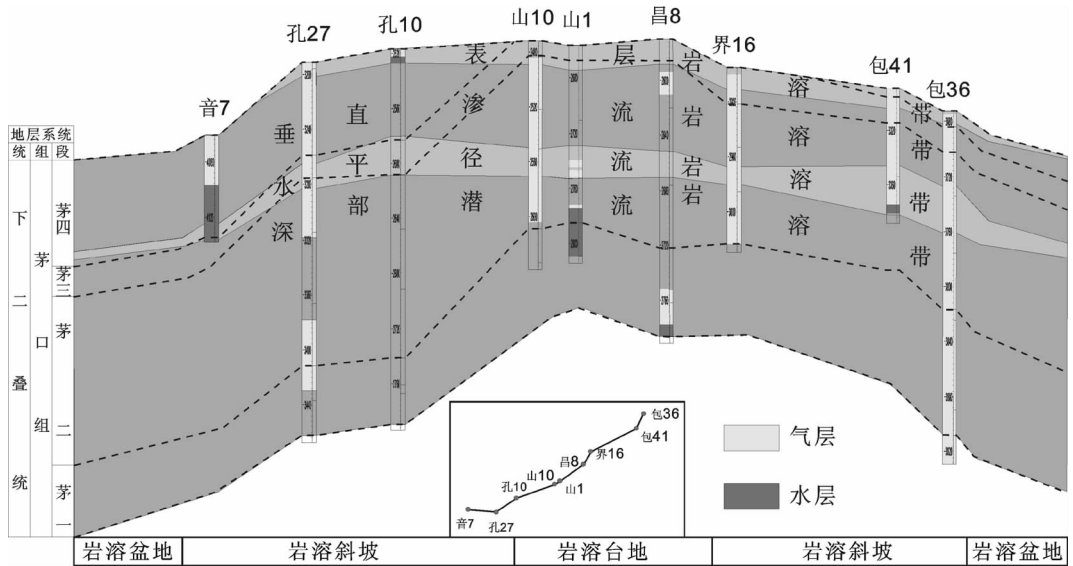


图 3 研究区音 7 井—包 36 井岩溶发育剖面

Fig.3 The profile of the karst from Yin-7 well to Bao-36 well of the study area

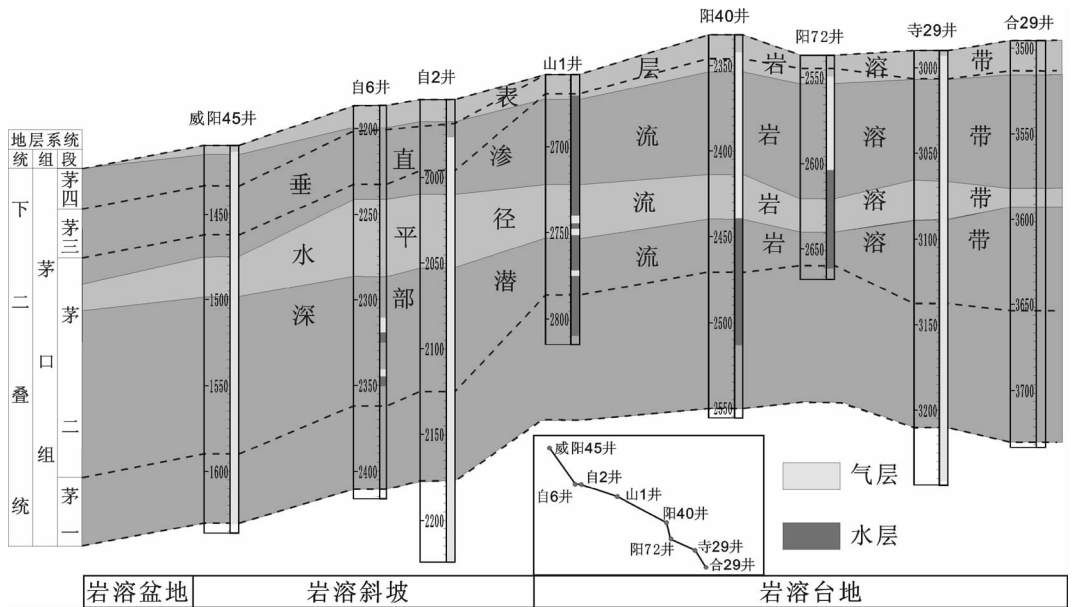


图 4 研究区合 29 井—威阳 45 井岩溶发育剖面

Fig.4 The profile of the karst from He-29 well to Weiyang-45 well of the study area

8 井厚度较小,音 7 井、包 36 井以外该带厚度最小。深部潜流岩溶带,为淡水影响的最深区域,各地区厚度变化不大。

2.2.2 南东—北西向剖面

该剖面纵切古隆起,共 8 口井,自南东向北西依次为合 29 井、寺 29 井、阳 72 井、阳 40 井、山 1 井、自 2 井、自 6 井、威阳 45 井。其中自 2 井、自 6 井、威

阳 45 井位于岩溶斜坡上,其余井位于岩溶台地上。茅口组顶部出露地层自南东向北西由茅三渐变为茅四,反映剥蚀强度逐渐减小。从剖面上来看,表层岩溶带厚度 0~22 m,合 29 井、寺 29 井、阳 72 井、阳 40 井厚度最大,向北西方向逐渐减薄。垂直渗流带厚度 42~65 m,自 6 井、自 2 井厚度最小,往南东和北西方向厚度逐渐增大。水平径流带厚度 15~45 m,合

29 井、寺 29 井、阳 72 井、阳 40 井厚度较小,向西北方向过渡为自 2 井、自 6 井厚度最大,至威阳 45 井以外厚度逐渐减小。深部潜流岩溶带位置较深,厚度较为稳定。

从横纵向古岩溶剖面分析,可以看出:岩溶台地地势较高,是大气降水的补给区,地下水以垂向渗滤为主,表层岩溶带和垂直渗流岩溶带发育,水平潜流带欠发育。岩溶斜坡位于岩溶台地和岩溶盆地的过渡地带,地表及地下水系发育,岩溶垂向序列发育完整,表层岩溶带和垂直渗流岩溶带厚度较岩溶台地变小,水平径流岩溶带极为发育。岩溶盆地是岩溶水的排泄区,水动力条件不强,加之化学溶蚀能力弱,溶蚀作用较差,表层岩溶带和水平径流岩溶带均不发育,垂直渗流厚度相对较大。

3 地层水储存方式与化学性质的关系

蜀南地区茅口组现今保存的地层水大部分为高矿化度的 CaCl_2 型水,少部分为低矿化度的 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型水。茅口组地层沉积时期,研究区为开阔海碳酸盐岩台地沉积环境,发育一套沉积稳定且巨厚的生物碎屑灰岩。由于海域广阔,水体循环良好,早期地层中的孔隙水基本为正常海水,随沉积和成岩作用出现一定经改造的残余海水的特征。茅口组沉积末期,由于东吴运动的强烈构造运动,致使该区整体抬升遭受风化剥蚀,形成古风化壳岩溶,在剖面上发育表层岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平径流岩溶带和深部潜流岩溶带。同时,大气降水和地表水源源不断地渗入补给,使沉积和同生期形成的孔隙水被渗入水流置换,逐渐递变为沉积水和渗入水混合体系,最后形成单一渗入水流体系。这一阶段,整个地层处于开放体系中,地层水为与岩石发生反应而残留的大气淋滤水,其矿化度低,水型为 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型^[23]。

中二叠世以后,该区持续下沉,又接受了晚二叠世、早一中三叠世的海相碳酸盐岩沉积和晚三叠世、侏罗纪、白垩纪和古近—新近纪的陆相沉积。茅口组地层被覆盖以后,随着沉积物逐渐的堆积,上覆、下伏地层发生机械压实作用,排出孔隙水。这些孔隙水进入茅口组地层,交替置换渗入水流,形成埋藏型承压水流体系。随含水系统演变,茅口组地层水由无压或微承压变为相对承压状态。随后,地层压力不断增大,地温逐渐增高,长时期持续的水岩作用,使地下

水逐渐浓缩,发生正向变质作用,形成高矿化度 CaCl_2 型水。尽管地层孔隙中的岩溶期的岩溶水在大面积内被替换,在局部岩溶封闭体中仍残留了部分的岩溶水,称之为岩溶封存水,他们仍保持较低矿化度特征,水型也未发生改变。这些岩溶封闭体是在地层压力、地温变化及水-岩反应等因素的共同作用下,使岩体发生的垮塌充填、重结晶、再胶结,最终自我封闭或封堵。这种封堵作用,使部分溶蚀缝洞系统发育的岩体在局部范围内形成一种相对阻隔的条件,并对其他岩溶孔洞发育区起着较好的隔离作用。因而,封闭体内部保存的古岩溶水实际上处于相对孤立的状态,没有受到外界地层水变化的影响。印支运动、燕山运动使地层广泛抬升,地层水分布也不断调整变化。喜山运动以后,研究区构造格局基本定型,地层水逐渐达到平衡,形成目前的分布状态。总之, CaCl_2 型水以深层滞留水的形式赋存于地层孔隙中,低矿化度水则以封存水形式储存于岩溶封闭体中。

纵向上, NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型水主要保存于垂直渗流岩溶带。因为垂直渗流岩溶带形成的溶蚀缝洞以垂向形态为主,横向连通性弱,所产生的缝洞极易遭受机械物质和化学物质的填充、胶结,岩溶水易被封闭其中。而其他的岩溶带封闭条件较差,如水平径流岩溶带易产生大型低角度或水平溶蚀缝洞系统,溶蚀空间连通性好,后期缝洞的充填、胶结程度较弱,难以实现自我封闭。深部潜流带仅产生零星小型溶蚀孔洞,且往往被完全充填,更不会形成封存水。横向上, NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型水主要储存于岩溶台地和异常高压地区的岩溶斜坡的溶丘或溶峰上。岩溶台地和岩溶斜坡上的溶丘、溶峰地貌较发育,它们在漫长的岩溶过程中保存下来,其岩性相对致密,渗透性相对较差,有产生岩溶封闭体的先天条件。加之地势较高,垂直渗流岩溶带极为发育,成为岩溶封存水保存最多的地貌单元。

4 结论

(1)蜀南地区地层水矿化度普遍较低,变化范围较大,形成若干分布中心。 Cl^- 分布与矿化度的分布显示出很好的一致性。水型以 CaCl_2 型为主,其分布地区矿化度较高,变质程度深,有利于气藏的保存。低矿化度 NaHCO_3 型、 Na_2SO_4 型、 MgCl_2 型地层水的出现,证实气藏的形成与岩溶作用有关。

(2)可将近地表岩溶体系自上而下分为表层岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平径流岩溶带和深部潜流岩溶带,不同岩溶带特征差异明显。不同地区,各岩溶带发育程度也各不相同,表层岩溶带和垂直渗流岩溶带在岩溶台地最厚,水平径流岩溶带在岩溶斜坡最发育,深部潜流岩溶带厚度较为稳定。

(3)CaCl₂型水的形成与大气淡水淋滤、地层压实释水和埋藏变质作用有关。低矿化度水储存于岩溶封闭体中,保留着古岩溶水的特征,纵向上主要赋存于垂直渗流带,横向上在岩溶台地、岩溶斜坡的溶峰和溶丘上保存最多。

参考文献 (References):

- [1] 孙向阳. 沉积盆地中地层水化学特征及其地质意义 [J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(4):47-52.
Sun Xiangyang. Chemical behavior and geological significance of formation water in sedimentary basins [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2001, 24(4):47-52 (in Chinese).
- [2] 乔小娟, 李国敏, 都洁, 等. 太原市西山岩溶水系统水文地球化学特征分析[J]. 中国岩溶, 2008, 27(4):353-356.
Qiao Xiaojuan, Li Guoming, Du Jie, et al. Hydrochemical features of Xishan karst groundwater system in Taiyuan [J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(4):353-356(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘文波, 高存荣, 刘滨, 等. 河套平原浅层地下水水化学成分及其相关性分析[J]. 中国地质, 2010, 37(3):816-823.
Liu Wenbo, Gao Cunrong, Liu Bin, et al. Hydro-chemical constituents and correlation analysis of shallow ground water in the Hetao Plain [J]. Geology in China, 2010, 37 (3):816-823 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王宇. 西南岩溶石山区断陷盆地岩溶水系统分类及供水意义[J]. 中国地质, 2003, 30(2):220-224.
Wang Yu. Classification of karst water systems in karst down-faulted basins of the southwestern China karst region [J]. Geology in China, 2003, 30(2):220-224(in Chinese with English abstract).
- [5] 张彦林, 李生永, 付东林, 等. 陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究[J]. 中国地质, 2006, 33(6):1393-1399.
Zhang Yanlin, Li Shengyong, Fu Donglin, et al. Formation mechanism of karst groundwater in the western Longdong basin, northwestern China [J]. Geology in China, 2006, 33(6):1393-1399 (in Chinese with English abstract).
- [6] 徐国盛, 刘树根. 川东石炭系天然气富集的水化学条件[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1):15-19.
Xu Guoshen, Liu Shugen. Hydrochemical condition of natural gas enrichment in east Sichuan carboniferous system [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1):15-19 (in Chinese with English abstract).
- [7] 龙建勋. 鄂尔多斯盆地子洲地区下二叠统山西组二段地层水成因及气水分布规律研究[D]. 成都理工大学, 2008.
Long Jianxun. Distribution Rule and Formation Mechanism of Gas and Water in the Second Member of Shanxi formation of Lower Permian in Zizhou Area in Ordos Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2008(in Chinese with English abstract).
- [8] 庞宏磊. 苏里格气田盒8气藏储层特征及地层水的地质成因研究[D]. 成都理工大学, 2007.
Pang Honglei. Reservoir Characteristics of He-8 Pool in Sulige Gas Field and Studying on the Geologic Origin of the Formation water [D]. Chengdu University of Technology, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [9] 冷济高, 庞雄奇, 张凤奇, 等. 辽河西部凹陷地层水特征及其成因分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5):58-63.
Leng Jigao, Pang Xiongqi, Zhang Fengqi, et al. Characteristics of formation water and the genesis analysis in the western Liaohe sag [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30 (5):58-63 (in Chinese with English abstract).
- [10] 赵景波, 岳应利, 袁道先. 岩溶发育的物理化学模式 [J]. 西安工程学院学报, 1999, 21(3):21-26.
Zhao Jingbo, Yue Yingli, Yuan Daoxian. Physical-chemical model in karst process [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 1999, 21(3):21-26 (in Chinese with English abstract).
- [11] 江兴福, 谷志东, 赵容容, 等. 四川盆地环开江—梁平海槽飞仙关组地层水的地质特征及成因研究 [J]. 天然气勘探与开发, 2009, 32(1):5-17.
Jiang Xingfu, Gu Zhidong, Zhao Rongrong, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water in Feixianguan Formation around Kaijiang-uangping trough, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2009, 32 (1):5-17(in Chinese with English abstract).
- [12] 李鹏春, 刘春晓, 张渊, 等. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6):802-808.
Li Pengchun, Liu Chunxiao, Zhang Yun, et al. Geochemical behaviors of the Ordovician formation water in the Tazhong area and its origin and evolution [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6):802-808(in Chinese with English abstract).
- [13] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.
Jiang Youlu, Zha Ming. Petroleum Geology and Exploration [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2006(in Chinese).
- [14] 柳广弟, 张厚福. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 2009.
Liu Guangdi, Zhang Houfu. Petroleum Geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009(in Chinese).
- [15] 洪余刚. 乐山—龙女寺古隆起奥陶系风化壳岩溶储层特征与地震预测研究[D]. 西南石油大学, 2006.
Hong Yugang. The Karst Reservoir Characteristic and Seismic Prediction to the Ordovician Stratum on the Leshan-Longnvi Paleoplift [D]. Southwest Petroleum University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈胜. 塔河油田奥陶系古岩溶及储层特征研究 [D]. 成都理工大

- 学, 2007.
- Cheng Shen. The Research on Characteristics of Ordovician Palaeokarst and Reservoir in Tahe Oil Field [D]. Chengdu University of Technology, 2007(in Chinese with English abstract).
- [17] 焦保雷. 蜀南地区中二叠统缝洞储层特征研究 [D]. 成都理工大学, 2010.
- Jiao Baolei. The Study of Fracture-cave reservoir characterization of the Middle Permian in the South of Sichuan Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2010(in Chinese with English abstract).
- [18] 韩波, 冯乔, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳岩溶特征及储层分析[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(5):24-29.
- Han Bo, Feng Qiao, Zhao Zhenyu, et al. Ordovician karst weathering crust and reservoirs in central and eastern Ordos basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27 (5):24-29 (in Chinese with English abstract).
- [19] 庞雯, 史鸿祥. 轮南地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶特征[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1):37-40.
- Pang Wen, Shi Hongxiang. The paleo-karst feature of Ordovician carbonate rocks in Lunnan area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29 (1):37-40(in Chinese with English abstract).
- [20] 刘兴礼, 张贵斌, 李多丽, 等. 塔中地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶测井特征[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2):194-196.
- Liu Xingli, Zhang Guibin, Li Duoli, et al. The karst log response of carbonate rocks of Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30 (2):194-196(in Chinese with English abstract).
- [21] 丁勇. 塔河油田奥陶系岩溶型储层特征及对开发的影响 [D]. 成都理工大学, 2009.
- Ding Yong. Character and Effect on Exploitation of Ordovician Karst Type Reservoir in Tahe oilfield [D]. Chengdu University of Technology, 2009(in Chinese with English abstract).
- [22] 苏中堂. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系马家沟组沉积相与古岩溶储层特征[D]. 成都理工大学, 2008.
- Su Zhongtang. Sedimentary Facies and Character of Palaeokarst Cust Reservoir in Majiagou Formation in Ordovician, Tabamiao area, Ordos [D]. Chengdu University of Technology, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张银德. 靖边气田马五₁气藏南区二区地层水特征及开发对策 [D]. 成都理工大学, 2008.
- Zhang Yinde. Characteristics of the Formation Water and the Corresponding Exploitation Strategy for Area II in Southern Ma5₁ reservoir in Jingbian gas field [D]. Chengdu University of Technology, 2008 (in Chinese with English abstract).

The relationship between the paleokarst fracture-cavity system and the chemical behavior of the formation water of Maokou Formation in Shunan area

SANG Qin¹, WEI Yong¹, CHENG Chao¹, HUANG Jing¹, LV Zong-gang², WU Chang-long²,
PENG Zuo-yuan², WU Dong-hao³

(1. Institute of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 2. Shunan Gas Mine of Southwest Oil and Gas Branch, PetroChina, Luzhou 646001, Sichuan, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract: Based on a summary and analysis of the analytical data of the formation water in 451 wells, the authors studied the characteristics of the salinity and types of the formation water of Maokou Formation in Shunan area. In combination with the drilling, seismic and logging data, this paper has systematically summarized the vertical zonal mode of the paleokarst, elaborated the development features of various karst zones along the profile, and analyzed the storage styles of the formation waters with different chemical properties. The result shows that the salinity of the formation water is on the whole relatively low with a large variation range and that the distribution of the salinity is connected with the potential energy. CaCl₂-type formation water is of high salinity, positive condensation, high metamorphism and slow seepage. NaHCO₃-type water, Na₂SO₄-type water and MgCl₂-type water have low salinity, their existence is related to karstification, and the place of their distribution is of negative water property. The paleokarst system can be divided into four vertical sections: surface karst zone, vertical infiltration karst zone, horizontal runoff karst zone and deep underflow karst zone, with each zone having its own features. The generation of CaCl₂-type formation water is related to such factors as the leaching of atmospheric water, the releasing of compaction water, and the burial metamorphism. Such formation water is stored in pores in the form of deep resident water while the low-salinity water is kept in the karst closed system in the form of burial water.

Key words: Shunan area; Maokou Formation; paleokarst; vertical zonation; chemical behavior of formation water; storage styles

About the first author: SANG Qin, female, born in 1976, Ph.D candidate, lecturer, engages in the study of applied geophysics and reservoir geology; E-mail: sangq269@163.com.