

# 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组 地层水成因探讨

沈忠民<sup>1)</sup>, 官亚军<sup>1)</sup>, 刘四兵<sup>1)</sup>, 吕正祥<sup>2)</sup>

1) 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都, 610059;

2) 中石化西南分公司勘探开发研究院, 成都, 610081

**内容提要:** 川西新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水离子组合特征显示出海相地层水以及富溴泥页岩和煤层压释水侵入的特点, 整体表现为富溴的压释水和海相地层水混合, 原始沉积水和淡水的影响较小。由于海相地层水和富<sup>18</sup>O而贫氘的压释水对原始沉积水的侵入和替换, 地层水的氘、氧同位素值增大。须四段地层水更为强烈的水岩反应造成其相对须二段地层水更高的氧同位素值这一反常现象。尽管 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、Br<sup>-</sup> 等含量似乎只受控于地层水的混合, 但是 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、和 Fe<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等变化则明显受水岩反应的控制, 文中提出的成岩假设与须二段和须四段地层水中上述离子变化及前人的成岩研究相符, 不同的水岩体系造成两者地层水化学特征的差异性, 须四段更为开放的水岩反应体系使得其相对须二段地层水富 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup>, 但贫 K<sup>+</sup>, 这些离子差别可以很好地区分两者中的地层水。

**关键词:** 地层水成因; 地层水起源与演化; 水岩反应; 上三叠统须家河组; 川西坳陷

流体是联系各种地质要素和过程最为直接和活跃的媒介, 流体的流动为油气的运移和聚集提供动力、通道和场所(徐国盛等, 2005)。川西坳陷新场地区须家河组地层水的研究目前主要集中在水文地质系统、地球化学特征及其动力场特征等方面。工区地层水有多个含水系统, 系统内地层水发生多期次跨层运动, 从而使得上三叠统须家河组二段(T<sub>3</sub>x<sup>2</sup>)和四段(T<sub>3</sub>x<sup>4</sup>)地层水地球化学特征有一定的相似性(李巨初等, 2001; 郑荣才等, 2003; 汪珊等, 2007)。研究区关于地层水的起源和演化的研究较少, 地层水(H<sub>2</sub>O)和水中溶解物的来源, 及其类型和性质对沉积岩成岩演化起到决定性作用, 因此, 对地层水的成因及演化的研究是十分必要的(Edmunds, 1996; 李鹏春等, 2007)。工区地层水多期次跨层流动不仅掩盖了不同源地层水的原始化学特征, 而且使地层水化学特征具有一定相似性, 进而模糊了两者不同的成岩演化过程。本文试图通过须二段和须四段地层水的地球化学特征分析, 阐明地层水成因及其基本演化过程, 为研究区地层水类型及成岩过程研究提供基本依据。

## 1 地层水的来源

川西坳陷是四川盆地西部晚三叠世以来陆相盆

地的深坳陷部分, 为龙门山推覆构造带的前陆盆地(罗志立, 1979; 何登发等, 1996; 沈忠民等, 2009), 其基底为中三叠统海相灰岩, 其上依次充填上三叠统马鞍塘组海相地层, 小塘子组和须家河组海陆交互相与陆相煤系地层, 以及侏罗系至白垩系陆相红层(郑荣才等, 2008, 2009)。新场地区位于坳陷中部孝泉—新场—丰谷 NEE 向构造隆起带, 在地质历史发展过程中, 须家河组地层经历了沉积埋藏、热液侵入以及抬升剥蚀等多次水文地质事件(李巨初等, 2001; 郑荣才等, 2003; 汪珊等, 2007)。因此, 理论上, 可以清楚区分出关于地层水来源的三个主要相应端元: 原始沉积水、海相地层水和后期渗入淡水, 并建立基本的判断模型, 地层水的端元是指不同时空来源的地球化学特征上存在差别的来源水。如其地球化学特征所显示的一样, 由于地层水的混合作用和水岩反应, 很难直接区分出这三个代表端元。虽然并不能准确标定各端元的原始基准值, 但可以根据现今条件下的端元值合理地推断各个原始端元的混合作用, 因此下面主要介绍主要端元组成以及证据。

### 1.1 地层中的原始沉积水

虽然大气降水的氘、氧同位素值随气候、温度、地理环境等的不同变化很大, 但其氘、氧同位素值落

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(批准号: 40772804)和“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室(成都理工大学)基金项目的成果。

收稿日期: 2009-06-09; 改回日期: 2009-08-03; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 沈忠民, 男, 1954年生。教授, 博士生导师。主要从事石油地质教学和研究。Email: szm313@cdut.edu.cn。

点位于大气降水线附近。就地层水而言,其受大气降水影响的程度越大、时间越晚,氘、氧同位素距降水线越近。海水来源的地层水和大气降水的氘同位素特征有较大差异,可以很好区分两者,而氧同位素与围岩会发生同位素交换而变化较大,可以反映水岩反应的程度(周文斌等,1997;McIntosh et al., 2004)。川西晚三叠世煤系地层的发育说明其古气候相对温暖潮湿,因此,根据川西的古气候和地区特征,选取平均温度在 15℃ 以上的西南地区大气降水作为该地区大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的基准值,同时为判断淡水的影响程度,也给出侏罗系地层水氘、氧同位素值,侏罗系地层水更靠近大气降水线(图 1),标准海水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  (SMOW) 均为 0‰,须家河地层水的分布有以下特征:

(1) 须二段地层水  $\delta D$  值分布在  $-57‰ \sim -38‰$  之间,  $\delta^{18}O$  值分布在  $-10.6‰ \sim -1.2‰$  之间,其中两个样品(联 150、新 853 井)位于大气降水线左边,相对于区域基准值,  $\delta D$  值略有升高,  $\delta^{18}O$  值基本无变化,但在区域大气降水的范围内,其它样品点位于大气降水线右边,  $\delta D$  值相对前两个样品基

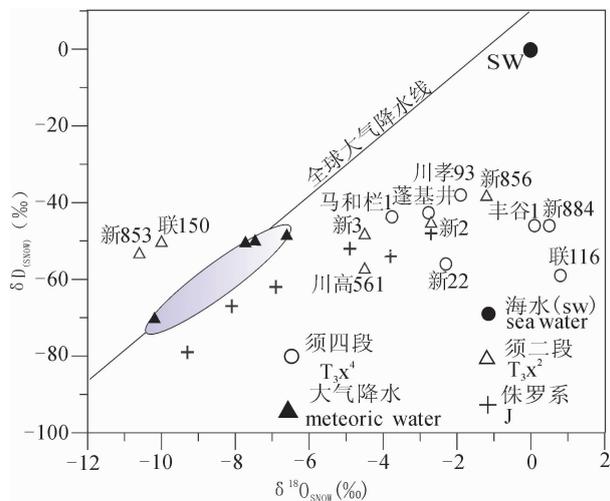


图 1 川西拗陷新场地区上三叠统须家河组地层水的氘、氧同位素关系图。图中分别给出区域大气降水、海水 (SW) 及上覆侏罗系地层水的氘、氧同位素值。数据分别引自张琳等 (2008), Mccaffrey 等 (1987), 李巨初等 (2001)

Fig. 1 Relation of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of the Upper Triassic Xujiahe Formation water, in Xinchang Area, Western Sichuan Depression. The local meteoric water, sea water and the formation water from Jurassic Formation overlying Xujiahe Formation are shown, the data from Zhang Lin et al. (2008), Mccaffrey et al. (1987), Li Juchu et al. (2001)

本不变,  $\delta^{18}O$  值增大, 表明联 150、新 853 井保持了原始大气淡水的同位素特征, 其它井则表现出混合特征和不同程度的水岩反应。

(2) 相对于须二段, 须四段地层水  $\delta D$  值略有升高, 在  $-38‰ \sim -46‰$  之间, 须四段地层水的  $\delta^{18}O$  值偏高, 且有两个样品  $\delta^{18}O$  值为正 (丰谷 1, 新 884) (图 1), 反映了地层水的混合特征和强烈的水岩反应。一般而言, 地层水埋藏时间越长, 其氧同位素的值越大, 但就本次研究所取得的数据而言, 埋藏较深的须二地层水淡化程度反要比须四的大。

须二段、须四段及侏罗系地层水基本的线性关系反映了地层水 ( $H_2O$ ) 的原始大气淡水起源 (图 1), 这和工区基本沉积背景吻合。须二段两个水样 (联 150、新 853 井) 保持原始的大气降水的同位素特征, 其原因可能有两种: ① 其为后期渗入的淡水, 由于渗入时间很晚, 来不及发生水岩反应; ② 其为未发生水岩反应或混合作用的原始沉积赋存水, 由于某种因素阻止了水岩反应的发生。考虑到其伴随天然气一起产出, 认为天然气稳定的化学性质阻止了水岩反应的进行, 从而保存了初始同位素值, 因此代表原始沉积赋存水的端元。另外, 这两个低矿化度 ( $<10g/L$ ) 地层水中  $Br^-$  和  $HCO_3^-$  含量相对高,  $Ca^{2+}$  的含量很低 (图 2, 3), 离子的组合又区别于淡水, 即有含  $Br^-$ 、 $HCO_3^-$  ( $CO_2$ ) 流体的进入, 这种气、水关系正好与天然气的充注相符, 天然气中二氧化碳的溶解可提供大量  $HCO_3^-$ , 而  $Br^-$  的富集与煤层或泥页成岩压释水有关 (见 1.3 小节), 这表明天然气进入气藏的时间很早, 至少在发生明显水岩反应之前, 成藏后次生水的冲刷影响也很小, 该气藏很可能代表未被构造运动破坏的原生气藏。

## 1.2 海相地层水的侵入

须家河二段地层水总的溶解物 (TDS) 在  $0.12 \sim 119g/L$  之间, 盐度变化很大, 同层段相同井的不同生产阶段, 产出水的地球化学特征也存在很大差别。在派伯 (PIPER) 分类图上, 低产水阶段产出的低矿化度地层水属于  $HCO_3^- - Na^+$  或  $HCO_3^- - Na^+ - Ca^{2+}$  (新 851) 型水, 高产水阶段产出水的矿化度明显增高 ( $>10g/L$ ), 主要为  $Cl^- - Na^+$  型水, 和海水点相距很近, 具有海水 (SW) 的离子组合特征, 少数属于  $Cl^- - Na^+ - Ca^{2+}$  (川高 561) 型水; 须四段地层水的 TDS 值在  $50 \sim 92g/L$  之间, 平均  $59.9g/L$ , 各阶段产出水的化学特征接近, 如图 2 所示, 须二和须四段高矿化度地层水的主要离子组合具有一定的相似性, 例如, 须四段的川孝 93、丰谷 1、

新 882 和须二段的新 2、新 3、川孝 565、川孝 560、新 856、新 884,说明其同样具有海水的特点,但相对须二段高矿化度地层水,须四段地层水  $\text{Ca}^{2+}$  相对富集,主要为  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  型地层水,两者地层水的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量都十分低。

海水的蒸发实验证实,在  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Br}^-$  体系中,随盐类的析出, $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  进入矿物晶格中,而  $\text{Br}^-$  残存在海水中,即使进入埋藏阶段后,成岩作用也不对  $\text{Br}^-$  产生影响,因此, $\text{Br}^-$  可以作为示踪元素,区分地层水的来源、混合及成岩作用(Mccaffrey et al., 1987; Birkle et al., 2002)。须二段和须四段共 13 个水样的  $\text{Na}^+ - \text{Br}^-$  和  $\text{Cl}^- - \text{Br}^-$  关系有以下特点(图 3):

(1) 须四段地层水矿化度最大等于海水的 4.05 倍,但  $\text{Br}^-$  平均含量是海水的 15.4 倍;须二段地层水也具有这一特点,低矿化度的凝析水除外,须二段地层水  $\text{Br}^-$  的平均含量是海水的 17.6 倍;

(2)  $\text{Br}^- / \text{Cl}^-$  和  $\text{Br}^- / \text{Na}^+$  值都位于海水蒸发曲线的下方,与海水的蒸发曲线基本平行,表明无论地层水矿化度大小,地层水中  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Br}^-$  离子组合具有海水的组合特征,溴离子异常富集;

(3) 数据呈高、低矿化度区两组分布,高矿化度

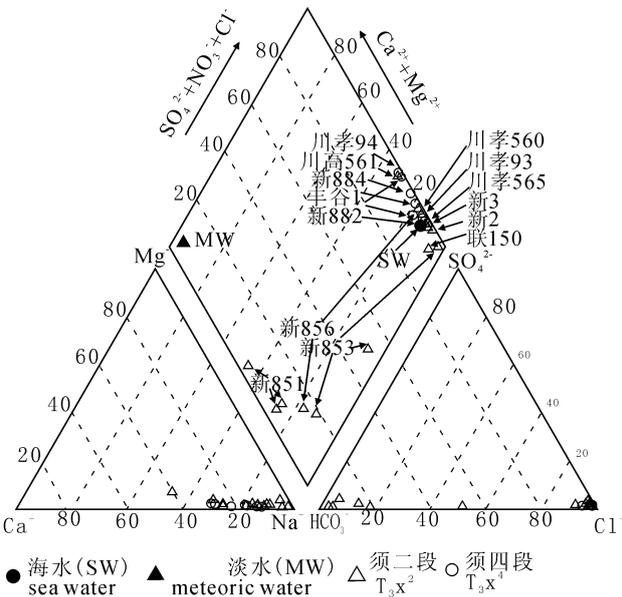


图 2 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水的派伯化学分类。图中淡水(MW)和海水(SW)组分数据引自雍自权等,2006

Fig. 2 Piper plot: chemical classification of the members 2 and 3 of the Upper Triassic Xujiahe Formation, in Xinchang Area, Western Sichuan Depression. Meteoric water and sea water are shown for reference, the data from Yong Ziquan et al., 2006

点位于近平行的析出线下方,虽然  $\text{Br}^-$  含量已过氯化钠析出点,但  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  含量并未达到析出点;低矿化度地层水的  $\text{Br}^- / \text{Na}^+$  和  $\text{Br}^- / \text{Cl}^-$  值分别沿 2% 和 3% 等值线左右分布,两者的  $\text{Br}^-$  相对含量 ( $\text{Br}^- / \text{Cl}^-$ ) 都很高,表明有富  $\text{Br}^-$  流体的侵入。

在派伯图上和  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Br}^-$  体系中,地层水的离子组合特征都显示出海水的特点,尤其在  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Br}^-$  体系中,如果忽略其它来源溴的影响,则与海水的蒸发曲线相吻合。须二段和须四段以河流、湖泊和沼泽为主,缺少海相环境,说明  $\text{Br}^-$  来源于下伏海相地层的可能性很大。

### 1.3 泥页岩及煤层压释水

泥页岩或煤层压释水虽然与原始的沉积水属于同源,但由于泥页岩及煤层的影响巨大,故单独考虑。须二段和须四段地层水有富  $\text{Br}^-$  流体混合,且高、低矿化度明显具有一定的继承性,这说明淡水进入使得氯和钠离子浓度降低,但伴随溴的富集。要说明上述现象必须解决淡水中溴来源问题和富集机制。据 Edmunds(1996)的研究发现,高溴离子含量除了与浓缩的海水有关外,大气降水的  $\text{Br}^- / \text{Cl}^-$  相对海水较高,同时某些植物对溴也有富集作用,这些溴元素可以在有机质成岩演化阶段进入地层水,从而造成高于海水的  $\text{Br}^- / \text{Cl}^-$ 。早在 1982, Graf D. L. 说明当流体处于异常高压状态的具有半渗透膜作用的泥页岩时,泥页岩的反渗透作用(hyperfiltration)可使地层水富集离子(Graf, 1982)。因此,溴的富集不仅与海水有关,其更为重要的来源是须家河组的煤系地层或泥岩层压释水,这预示地层水与泥页岩层和煤层压释水的混合。水中富集  $^{18}\text{O}$  被认为是水岩反应平衡的结果,特别是方解石溶解后发生氧同位素交换(McIntosh et al., 2004);也有作者认为是富  $^{18}\text{O}$  而贫 D 的粘土矿物溶蚀或转化所排出水的混合作用(Jean et al., 2002);此外,海水的加入也会增高  $\delta^{18}\text{O}$  值,但  $\delta\text{D}$  值同时明显升高。根据上述观点,地层水同位素值的变化是上述三个原因共同作用的结果,特别是前两者,可以很好地解释在  $\delta\text{D}$  值基本不变的情况下,  $\delta^{18}\text{O}$  值明显增高这一现象,地层水的离子组合特征说明有海相地层水的侵入,但海相地层水对同位素影响并不明显,这可能由于: ① 工区须家河组整体的淡水沉积背景; ② 泥页岩压释水对地层水贡献巨大,从而对海水的 D 值产生稀释,可以认为泥页岩及煤层压释水对须家河组地层水有广泛的影响。须家河组水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 的淡水特征和离子组合的海水特征似乎表明

海水的影响仅限于提供水中的溶解物,而富 Br 的泥页岩排出水对海相地层水产生了广泛稀释,后经浓缩和成岩作用达到目前状态,从而使海水中稳定元素的相对比值不受影响,而易受成岩演化影响的  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等发生变化。

### 1.4 后期大气淡水渗入

据前人研究,如果  $Br^- / Na^+$  和  $Br^- / Cl^-$  的值高于海水的值则表明地层水源于蒸发海水,低于正常海水的值则说明有溶解盐岩的淡水渗入(Birkle et al., 2009),即对须二段和须四段地层水而言,如果有溶解盐岩的淡水渗入,随着  $Na^+$  和  $Cl^-$  的增加,将抵消  $Br^-$  增高的影响,使得其与海水的蒸发线重合,须二段和须四段地层水  $Br^- / Cl^-$  和  $Br^- / Na^+$  的值都位于海水蒸发线下方,因此可以排除盐岩溶解水影响。须家河组原始沉积水淡水背景,使后期渗入的纯淡水的淋滤作用难以区分,相对侏罗系地层水,须二段和须四段的氧同位素值增大,表明发生了不同程度的水岩反应,据此可以推断工区淡水的影响时间很早,即使后期有淡水的渗入,其影响也是有限的。

## 2 水岩反应特征

研究表明,须四段溶蚀相发育,孔隙为方解石、含铁方解石(白云石)、白云石、石英等胶结物和伊利石、绿泥石、高岭石等粘土矿物充填;须二段主要成

岩作用为方解石、含铁方解石(白云石)、白云石、石英等胶结,伊利石、绿泥石等粘土矿物充填(吕正祥, 2005;孙治雷等,2008;徐樟有等,2008)。成岩过程中,由于  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、和  $Fe^{2+}$  等易受成岩演化影响,因此它们可以反映水岩反应变化,其结果是水中和相应的矿物中物质含量出现相反的变化趋势。 $K^+$  的主要来源为钾长石的溶解,伊利石化和钾长石化则导致  $K^+$  的消耗; $Ca^{2+}$  的变化主要与方解石、石膏等的溶解和沉淀有关; $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  转化主要与含  $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  矿物溶解、绿泥石化、铁方解石化(白云石化)以及白云石化等有关(Birkle et al., 2009)。

从本次研究的须家河组地层水的地球化学特征来看,须二段地层水的  $K^+ - Cl^-$  变化和海水的蒸发线基本吻合,高矿化点与海水的浓缩方向一致,部分点  $K^+$  相对富集,低矿化度点和海水的稀释方向一致,高、低矿化度地层水对海相地层水的继承性说明须二段的  $K^+$  受海相地层水的控制,其含量与来源水基本一致。说明该段长石溶解产生的  $K^+$  与伊利石化消耗的  $K^+$  数量基本相当;须四段地层水中  $K^+$  含量随着  $Cl^-$  含量的增加,基本不变且都小于正常海水组分(图 4)。但从地层水来源来看,有理由认为须四段  $K^+$  含量也应与海水蒸发曲线一致。地层水中  $K^+$  的理论含量与实际的差别反映出地层水中  $K^+$  的丢失,而  $K^+$  的丢失与须四段伊利石的发育和

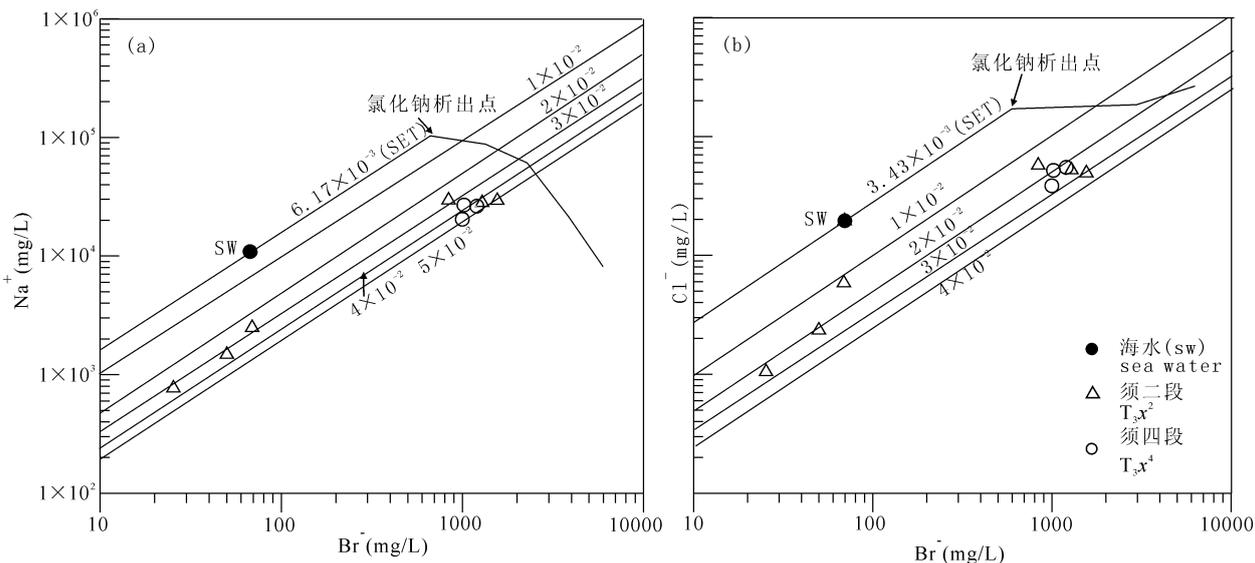


图 3 川西拗陷新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水  $Na^+ - Br^-$  (a)与  $Cl^- - Br^-$  (b)关系图  
Fig. 3 Sodium vs. bromide(a)and chloride vs. bromide(b)in formation waters of the members 2 and 3 of the Upper Triassic Xujiahe formation, in Xinchang Area, Western Sichuan Depression

图中  $Br^- / Cl^-$  等值线及海水蒸发曲线(SET)数据引自 Mccaffrey et al., 1987

Lines of equal  $Br^- / Cl^-$  ratio and sea water evaporation are shown for reference, the data of sea water evaporation from Mccaffrey et al., 1987

溶蚀作用有很好的对应关系:一方面,该段粘土矿物中相对丰富的伊利石含量说明伊利石化消耗了大量 $K^+$ ;另一方面,须四段溶蚀作用产生 $K^+$ 被溶蚀水本身带走,从而造成须四段很低的 $K^+$ 含量。地层水中 $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ 的变化与海水浓缩方向完全相反, $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ 的增高由于白云岩化作用、含铁方解石(白云石)化及绿泥石化。须二段地层水的 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ 和 $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 沿含铁方解石方向和白云石化方向增大;须四段地层水的 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ 和 $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 位于铁白云石化和白云石化方向上(图5), $Ca^{2+}$ 的富集,而 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 的消耗说明白云岩化、含铁方解石(白云石)化及绿泥石化消耗了 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ ,须四段 $Fe^{2+}$ 相对变化较小与该段自生绿泥石含量小,而须二段绿泥石含量相对较高,且绿泥石含铁量高有关(孙治雷,2008),以上成岩假设与须二和须四段成岩矿物有很好的对应关系。

水岩反应是成岩矿物演化和地层水离子变化之间对应关系的关键环节,后两者之间通过水岩反应达到成岩体系的平衡,图4、5所提出的成岩假设与前人的成岩研究及地层水离子变化的对应关系一致,这证明文中提出的成岩假设的正确性。另外,前面说到, $\delta^{18}O$ 增大是水岩反应的结果,其中重要的一点就是地层水与方解石溶解产生的富 $^{18}O$ 的碳酸根或重碳酸根之间的同位素交换,须四段地层水的 $\delta D$ 值与须二段地层水的变化一致情况下, $\delta^{18}O$ 反

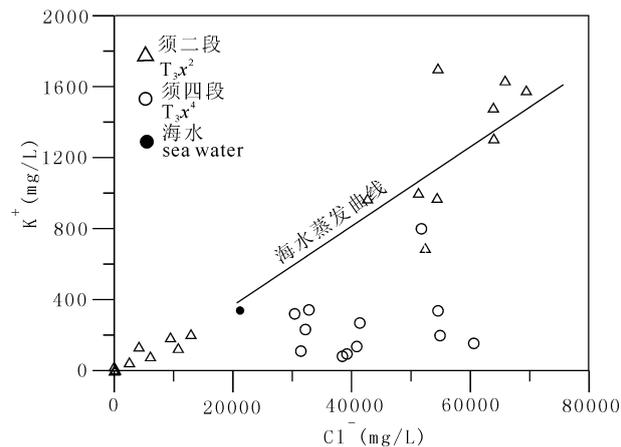


图4 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水 $K^+$ — $Cl^-$ 关系图。图中海水蒸发曲线(SET)数据引自 Mccaffrey et al., 1987

Fig. 4  $K^+$  vs.  $Cl^-$  in formation waters of the  $T_3x^2$  and  $T_3x^4$ , in Xinchang Area, Western Sichuan Depression. The sea water evaporation data from Mccaffrey et al., 1987

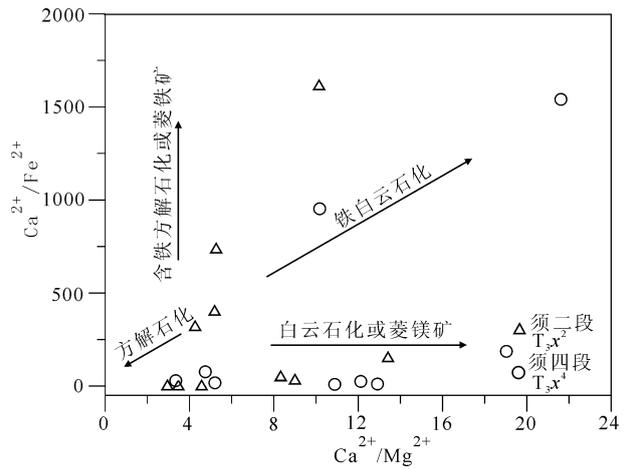


图5 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ — $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 关系图。图中箭头线为成岩反应方向。

Fig. 5  $Ca^{2+}/Fe^{2+}$  vs.  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  in formation waters of the  $T_1x^2$  and  $T_1x^4$ , in Xinchang Area, Western Sichuan Depression. Also general trends for the diagenesis are shown

而比须二段地层水高,这一反常现象与其较强的方解石溶解有很好的对应关系,即须四段方解石等碳酸盐岩溶解产生的 $CO_3^{2-}$  ( $HCO_3^-$ )为地层水提供了 $^{18}O$ ,须四段地层水相对高的 $Ca^{2+}$ 含量也支持这一推断(图2)。水岩反应、成岩矿物和地层水这三者之间关系表明水岩反应对地层水的重大影响,虽然须二段和须四段有共同地层水来源背景,但同位素和离子变化所反映出的地层水特征说明两者具有不同的成岩演化背景。

上述分析表明,须二段和须四段具有不同的水岩反应体系,即使同一水岩反应体系,针对不同的离子其相对的开封或封闭程度也是不同的。须二段 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、和 $Fe^{2+}$ 表现为输入,但 $K^+$ 与来源水基本保持一致,说明该体系中 $K^+$ 是相对封闭的,而 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、和 $Fe^{2+}$ 则相对开放;须四段地层水中 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 和 $Fe^{2+}$ 同样表现为输入,但 $K^+$ 丢失,表明须四段成岩体系对这些离子都相对开放,其成岩体系相对开放,两者地层水的 $Ca^{2+}/Fe^{2+}$ 和 $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ 的变化则是成岩体系内部平衡反应的结果。

### 3 结论

(1)川西坳陷新场地区上三叠统须家河组二段和四段地层水的派伯化学分类和 $Cl^-$ — $Na^+$ — $Br^-$ 组合特征有一定的相似,其它离子及同位素特征则有较明显的差别。须二段地层水矿化度变化大, $K^+$

含量变化与海水蒸发方向基本一致,相对须二段,须四段地层水矿化度变化小,地层水富  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$ , 但贫  $\text{K}^+$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值偏高。

(2) 须家河组原始沉积水几乎被完全替代,地层水( $\text{H}_2\text{O}$ )主要来源为泥页岩和煤层的压释水及下伏海相地层水,水中的溶质主要通过上述两种方式及地层矿物的溶解得到,异常丰富的溴离子可作为压释水标志,整个地层水显示出富  $\text{Br}^-$  的泥页岩压释水和海相地层水混合,淡水和原始沉积水影响较小。

(3) 须家河组须二段和须四段地层水地球化学特征相似性不仅是由于跨层流动造成的,共同来源的海相地层水和泥页岩压释水是根本原因,两者地层水地球化学特征的差异性主要是由两者不同的水岩体系造成的,须四段相对须二段具有更为开放的水岩反应体系。

### 参 考 文 献 / References

何登发,吕修养,林永汉,等. 1996. 前陆盆地分析. 北京:石油工业出版社.

李巨初,刘树根,徐国盛,李国蓉,孙书勤. 2001. 川西前陆盆地流体的跨层流动. 地质地球化学,29(4):72~81.

吕正祥. 2005. 川西孝泉构造上三叠统超致密储层演化特征. 成都理工大学学报(自然科学版),32(1):22~26.

李鹏春,刘春晓,张潮. 2007. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化. 石油与天然气地质,28(6):802~808.

罗志立. 1979. 子古板块的形成及其对中国南方地球发展的影响. 地质科学,4(2):127~138

汪珊,张宏达,孙继朝,荆继红. 2007. 川西含油气拗陷上三叠统含水系统和水文地质期的划分和定位. 地球学报,28(6):591~596.

徐国盛,刘树根,等. 2005. 四川盆地天然气成藏动力学. 北京:地质出版社.

孙治雷,黄思静,张玉修,王庆东,包申旭. 2008. 四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化. 沉积学报,26(3):459~468.

沈忠民,潘中亮,吕正祥,刘四兵,王玲辉. 2009. 川西拗陷中段须家河组天然气地球化学特征与气源追踪. 成都理工大学学报(自然科学版),36(3):225~230.

徐樟有,吴胜和,张小青,赵艳,曾小英. 2008. 川西拗陷新场气田上

三叠统须家河组须四段和须二段储集层成岩—储集相及其成岩演化序列. 古地志学报,10(5):447~458.

雍自权,李俊良,周仲礼,翟中华,龚昌明,赵异华,宋焕荣,王威. 2006. 川中地区上三叠统香溪群四段地层水化学特征及其油气意义. 物探化探计算技术,28(1):41~45.

周文斌,饶冰. 1997. 相山铀矿田水—岩氢、氧同位素交换的实验研究. 地质评论,43(3):322~226.

郑荣才,朱如凯,翟文亮,高红灿,戴朝成. 2008. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河组构造演化及层序充填样式. 中国地质,35(2):246~255.

郑荣才,彭军,高红灿,柯光明. 2003. 川西拗陷断裂活动期次、热流体性质和油气成藏过程分析. 成都理工大学学报(自然科学版),30(6):551~558.

郑荣才,戴朝成,朱如凯,翟文亮,高红灿,耿威. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征. 地质论评,55(4):484~495.

张琳,陈宗宇,聂振龙,刘福亮,贾艳坤,张向阳. 2008. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析. 核技术,31(9):715~720.

Graf D L. 1982. Chemical osmosis, reverse chemical osmosis, and the origin of subsurface brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,46:1431~1448.

Jean P G, Ingrid A M, Harald J. 2002. Diagenesis of the Hild Brent sandstones, Northern North Sea: Isotopic evidence for the prevailing influence of deep basinal water. *Journal of Sedimentary Research*,72(6):746~759.

Jennifer C M, Lynn M W, Anna M M. 2004. Extensive microbial modification of formation water geochemistry: case study from a midcontinent sedimentary basin, United States. *GSA Bulletin*, 116(5~6):743~759.

Mccaffrey M A, Lazar B, Holland H D. 1987. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br and K with halite. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57(5):928~937.

Birkle P, Bernardo M G, Carlos M M. 2009. Origin and evolution of formation water at the Jujo Tecminoac n oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water - rock interaction. *Applied Geochemistry*,24(4):543~554.

Birkle P, Rosillo Aragón J J, Portugal E, Fong Aguilar J L. 2002. Evolution and origin of deep reservoir water at the Activo Luna oil field, Gulf of Mexico, Mexico. *AAPG Bulletin*, 86(3):457~484.

Edmunds W M. 1996. Bromine geochemistry of British ground waters. *Mineralogical Magazine*, 60:275~284.

## A Discussion on Genesis of the Upper Triassic Xujiahe Formation Water in Xinchang Area, Western Sichuan Depression

SHEN Zhongmin<sup>1)</sup>, GONG Yajun<sup>1)</sup>, LIU Sibing<sup>1)</sup>, LÜ Zhengxiang<sup>2)</sup>

1) State Key Lab of Oil—Gas Reservoirs Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology), Chengdu, 610059;

2) Exploration and Production Research Institute of Southwest Branch Company, Chengdu, 610081

**Abstract:** The combination of ions of formation water from the Members 2 and 4 of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan depression, show the characteristics of water from marine strata, especially in the  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Br}^-$  system, the water also show the mixture by bromine-rich compacting fluids from the adjacent shale and coal beds, and the enrichment of bromine can be used as a

symbol of ballast water discharged, the modern formation water have been resulted from mixture of bromine-rich compacting fluids and water of marine. Because the connate water was flushed out of the sediments by compaction processes and replaced subsequently by younger compacting fluids and sea water, the values of the most samples significantly increased, especially for the water of the Member 4, the higher  $\delta^{18}\text{O}$  value indicate the more intensive water—rock reactions compared to the Member 2. Although  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Br}^-$  concentration appears to be controlled by simple mixing rather than by diagenetic reaction, variation in  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  suggest diagenetic modification of both formation waters. The diagenetic reaction assumptions that is proposed for the variation above are in line with previous researches about the diagenesis. More open water—rock reaction system results in formation water of the Members 2 of the Xujiahe Formation being riched in  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , but poor in  $\text{K}^+$  compared to that of the Members 4 of the Xujiahe Formation water, by which both formation water can be distinguished from each other.

**Key words:** genesis of formation water; origin and evolution; water—rock reaction; Upper Triassic Xujiahe Formation; Western Sichuan depression

## 中国地质学会旅游地学与地质公园研究分会 第 24 届年会在福建省屏南县召开

2009年10月12日至15日,中国地质学会旅游地学与地质公园研究分会第24届年会暨白水洋国家地质公园建设与旅游发展研讨会在福建省屏南县隆重举行。会议得到了福建省国土资源厅、福建省旅游局、宁德市人民政府、屏南县人民政府、白水洋国家地质公园等的大力支持。会议共收到论文110余篇,有近200位代表参加会议,系来自大陆20多个省区和台湾的国土资源部门、各级地质公园管理机构、地质博物馆、国内知名旅游规划单位的专家、学者。

大会开幕式由中国科学院院士刘嘉麒主持,福建省宁德市副市长周秋琦代表东道主致辞,对会议在屏南县召开表示热烈欢迎和衷心祝贺。陈安泽教授在开幕式上代表旅游地学与地质公园研究分会及全体与会代表向给予本次会议大力支持的福建省国土资源厅、福建省旅游局、宁德市人民政府以及屏南县人民政府、白水洋国家地质公园等有关单位表示衷心感谢。国土资源部地质环境司副司长陈小宁、福建省国土资源厅副巡视员陈声建、福建省旅游局副局长李毅强等在开幕式上讲话。

会议期间,除主题报告会外,还举行了分组讨论会、野外考察和专题研讨会等,旨在总结旅游地学研究与工作成果,交流地质公园建设、管理、科学研究、科学普及等方面取得的成果和经验。

大会主题报告包括陈安泽教授的“地质公园建设工作改革”、刘嘉麒院士的“火山地质景观是重要的旅游资源”、文斐成教授的“拟建宁德世界地质公园资源特色与科学意义”、李明德教授的“中国旅游业现状与宁德旅游业发展战略”。

分组学术交流分4个小组,交流了旅游地学研究成果、分析了旅游地学的发展前景、总结了地质公园建设与管理经验。此外,会议还在晚上专门组织了一场青年旅游地学讨论会,邀请与会者中45岁以下的代表参会,就青年旅游地学工作者如何推动和发展旅游地学这门新兴学科展开了热烈的讨论。发言者踊跃异常,纷纷表达了对旅游地学的关注与期盼,同时表达了对旅游地学先驱者的敬意与钦佩。青年旅游

地学工作者希望能在该领域继续奋斗,以将该学科不断发展和壮大。

会间还考察了屏南县及周边的古火山地质遗迹,对白水洋国家地质公园和屏南县旅游业进行了专题考察。

白水洋国家地质公园地处鹭峰山脉中段,福建省宁德市西部屏南县境内。公园包括白水洋、宜洋、水竹洋、双溪和棋盘顶等五个景区,总面积77.34 km<sup>2</sup>,属中型地质公园,由中生代火山岩地质地貌景观组成,除典型的破火山构造外,白水洋景区由潜火山岩构成的“平底”河谷地貌极为独特和罕见,具有重要的观赏价值和成因研究价值。

屏南县是著名的侨乡、水电之乡,集老区、林区、旅游区于一体。这里有南方独有的3万亩中山稀林草场和罕见的73株连片水松等,还有古廊桥、古戏曲、古镇古村古民居等充分体现了屏南县悠久的历史 and 深厚的文化底蕴;清代著名将领甘国宝的传奇故事在闽南两岸广为传颂;四平戏、平讲戏、双溪铁枝传统表演技艺、木拱廊桥传统营造技艺等4个项目被列入国家级非物质文化遗产名录;万安桥、千乘桥等被列为全国重点文物保护单位;际下村被列为中国历史文化名村。

近年来由于屏南县对旅游开发的重视和对景区宣传力度的加大,使屏南县的旅游热迅速升温,国内外游客不断增加,仅2009年前9个月来屏南的游客量就是2003年全年的24倍。白水洋国家地质公园的建立对于屏南县旅游业的发展起了积极的推动作用,而旅游业的兴旺则使当地的老百姓成了最大的受益人,从而拉动了屏南县的经济发展。代表们通过实地考察,针对白水洋国家地质公园的建设和申报世界地质公园工作及当地旅游事业的发展战略提出了具体的意见与建议并整理出书面意见交屏南县人民政府,希望对屏南县今后的旅游发展有些借鉴作用。屏南县县长吴毅荣代表全县人民对专家们的意见和建议表示衷心感谢。

(王艳君 供稿 章雨旭 编辑)