

文章编号:1000-0550(2011)03-0495-08

川西坳陷中段陆相地层水纵向变化特征 及水—岩相互作用初探^①

沈忠民¹ 刘四兵¹ 吕正祥² 罗小平¹ 宫亚军¹

(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. 中国石油化工股份有限公司西南分公司勘探开发研究院 成都 610081)

摘要 地层水是孔隙流体的重要组成部分,在空间变化上受控于流体动力场,时间演化上主要受控于流体—岩石相互作用过程。通过川西坳陷300余个地层水化学数据的系统分析,对研究区地层水化学特征及其所反映的成岩作用过程进行了初步探讨:川西坳陷上侏罗统到须家河组可分为地层水交替阻滞带和地层水交替停滞带2个水化学作用带,大气水作用的范围在530 m以上地层;黏土矿物大规模脱水的淡化作用是地层水交替阻滞带离子浓度随深度变大而变小的主要因素,而该带中 HCO_3^- 随埋藏深度的增加而不断增加的原因则可能主要与有机质成熟过程中 CO_2 的加入有关;盐岩溶解可能是交替阻滞带地层水 Na^+ 富集的主要因素, Ca^{2+} 的富集则可能主要由蒙皂石的伊利石化和少量碳酸盐岩的溶解造成;钙长石的钠长石化是研究区地层水交替停滞带的一项重要的水—岩作用过程,同时存在的成岩作用类型还包括绿泥石化、碳酸盐矿物的溶解以及钠长石的溶解。

关键词 地层水 交替阻滞带 交替停滞带 水—岩相互作用 川西坳陷

第一作者简介 沈忠民 男 1954年出生 教授 博士研究生导师 石油地质 E-mail: shenzhongmin@cdu.cn

中图分类号 P641.12 **文献标识码** A

0 研究现状

沉积盆地地质流体(对水、油和气、成矿溶液的统称)研究是当代地学研究的前沿命题^[1]。地层水作为地质流体的重要组成部分存在于任何一个油气藏的流体系统中,它以不同的形式与油气共存于地下岩石孔隙空间中。地层水不仅是油气运移的驱动力,而且还是油气运移、聚集的载体,它和油气之间存在着经常性的物质成分交换,其形成及其运动规律与油气的生成、运聚及油气藏的形成、保存和破坏有着十分密切的联系^[2,3]。

在含油气盆地中,地层水作为盆地流体的一个主要组成部分,其活动与循环样式直接涉及油气与成矿物质运移的方向。地层水的活动及其性质直接或间接指示盆地流体系统的开放性和封闭性^[4]。从水文地质的观点看,水总是与生烃母岩和油气相伴生的,它们在地史过程中互相依存、相伴演化:油气运聚成藏是水在地史进程中循环活动的结果;水也是油气现代分布和保存条件评价预测的重要内容^[1]。地层水

化学组成特征及其同位素构成是沉积盆地地层水研究的重要内容。它是盆地演化过程中水文地质、流体—岩石相互作用、流体流动及其混合作用等的综合反映,而这些作用过程与矿床的形成和油气聚集紧密相关^[5]。地层水的地球化学特征主要受一定地质条件下的流体—岩石相互作用所制约^[6],因此,一定地球化学特征的地层水具有特定的地质意义。

川西坳陷上三叠统纵向上发育多套生储盖组合,形成了多套含气层系^[7,8]。目前的勘探开发现状表明,各套含气层系均不同程度的见水,是研究地层水特征的典型地区。前人研究表明,研究区地层水有多个含水系统,这些系统内地层水发生了多期次跨层运动,从而使得地层水地球化学特征有一定的相似性^[9-11],但这些研究基本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,而有关地层水的成因及其水—岩相互作用方面则研究较少。本文通过系统分析涉及研究区各产气层的大量气田水数据,分析了其纵向变化特征、初步探讨了水化学特征所反映的水—岩作用过程。

^①国家自然科学基金项目(批准号:40772084)和“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金项目共同资助。
收稿日期:2010-02-26;收修改稿日期:2010-05-23

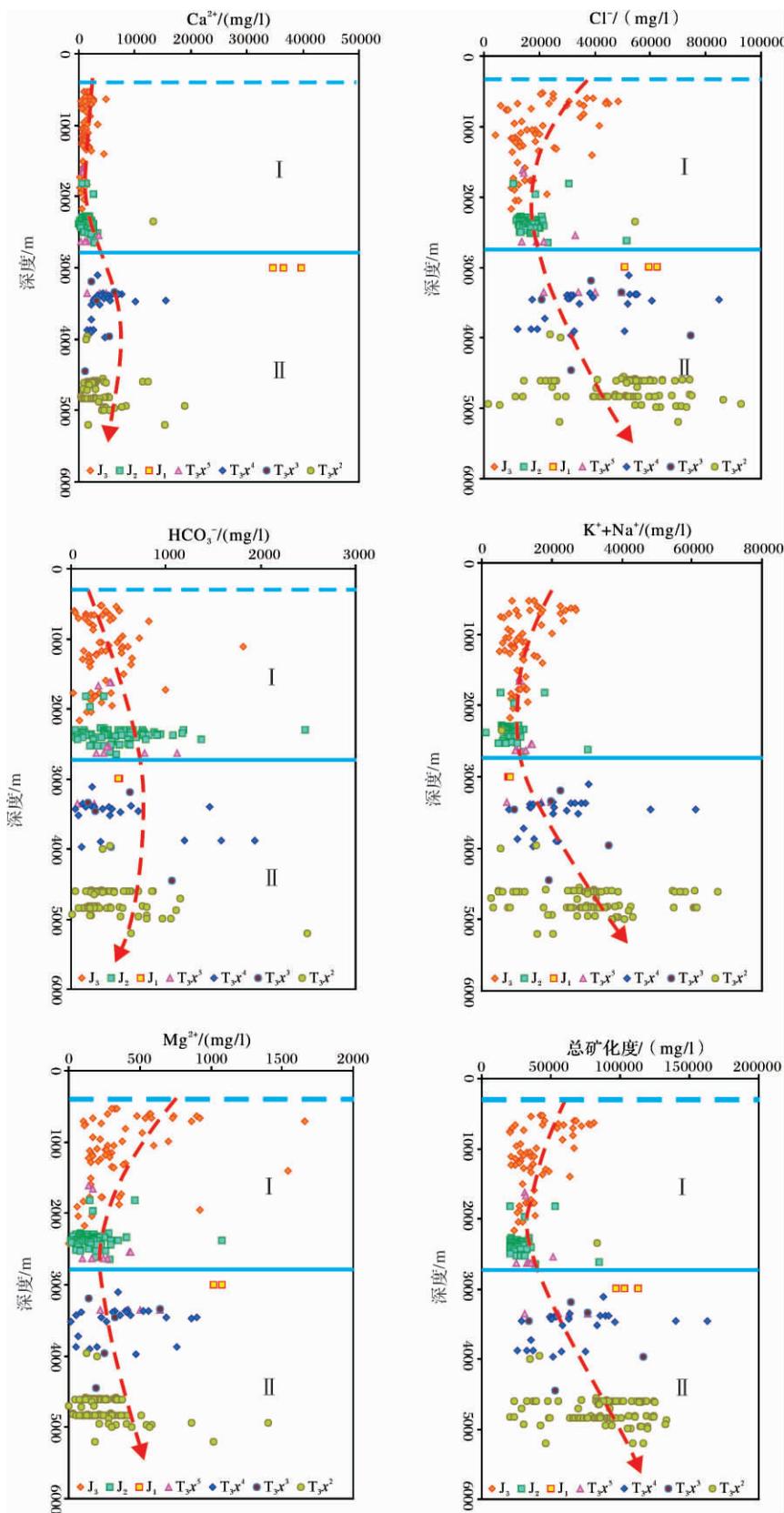


图 2 川西坳陷地层水纵向变化特征

Fig. 2 Vertical changes in the characteristics of formation water , in Western Sichuan Depression

与2 800 m以上地层水的离子变化特征刚好相反,总体呈现随深度增大逐渐变大的趋势(图2)。

水文地质研究表明,地层水在纵向上由浅至深一般可划分为3个带:地层水自由交替带、地层水交替阻滞带和地层水交替停滞带,各带均表现为特有的离子纵向变化特征^[13,14]。根据各带的水化学特征,结合川西坳陷中段地层水的纵向变化情况,I带与地层水交替阻滞带对应、II带与地层水交替停滞带对应,缺少地层水自由交替带,可能与本次研究涉及的样品中缺乏更浅地层(530 m以上)中的样品有关(图2)。一般来说,地层水自由交替带主要受大气降水的影响,地层水活动较强,而地层水交替阻滞带和地层水交替停滞带则基本不受大气降水的影响,地层水活动较弱^[13,14],因此,对于研究区来说,大气降水并未影响到530 m以下的上侏罗统及其以下地层,反映了上侏罗统及其以下地层具有良好的天然气保存条件。

2 水—岩相互作用特征

水—岩相互作用对地层水的性质具有重大的影响,因此地层水离子及离子组合等特征也为可能的成岩作用提供了重要的信息。成岩过程中, 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+} 矿物如绿泥石、含铁方解石、含铁白云石、白云石、菱镁矿及菱铁矿等的溶解沉淀有关;沉积盆地中 Na^+ 的转化主要与斜长石和钾长石的钠长石化、盐岩的溶解等有关^[15]。研究表明,川西坳陷中段侏罗系和上三叠统须家河组储层成岩自生矿物较多,主要为方解石、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^[16-18]。

从川西坳陷地层水纵向变化特征来看(图2),交替阻滞带地层水总矿化度、阳离子和 Cl^- 浓度均随深度变大而变小。已有的研究表明,研究区上侏罗统到下侏罗统与蒙皂石向伊(绿)蒙混层和伊利石(绿泥石)的转换基本对应^[17],在这一过程中黏土矿物大规模脱水,从而导致地层水的淡化;相反,交替阻滞带地层水中 HCO_3^- 浓度随深度增加而变大(图2)。一般来说,地层水中 HCO_3^- 的来源主要有大气水来源、碳酸盐矿物的溶解和有机质成熟过程中 CO_2 的加入^[20],前文分析表明大气降水并未影响到研究区530 m以下的上侏罗统地层,因此 HCO_3^- 的第一种来源基本可以排除,而从实际的地质背景来看,研究区

侏罗系基本不发育烃源岩,有效烃源岩基本集中在下部须家河组地层中,在有机质成熟过程中所生产的 CO_2 更易进入与其相对更接近的中下侏罗统地层水中。因此,有机质成熟过程中 CO_2 的加入可能是该带地层水往下 HCO_3^- 变大的主要原因,碳酸盐矿物的溶解可能也有一定的影响。

交替停滞带地层水的变化特征基本体现了正常的地层水浓缩过程,随深度变大,水—岩反应越趋强烈,从而总矿化度和各离子浓度越大(图2)。相对于交替阻滞带地层水,该带地层水具有含量明显较高的 Ca^{2+} 含量(图2,图3),说明下部储层中存在有更多的 Ca^{2+} 来源,钙长石的钠长石化可能是造成这一现象的重要原因,这一推论在后文中将进行详细论述,碳酸盐矿物的溶解对其可能有一定的影响。同时须家河组地层水表现出比较明显的 Mg^{2+} 丢失现象(图3),应与绿泥石化过程中大量消耗 Mg^{2+} 有关。 HCO_3^- 则由须四段到须二段逐渐变小,结合前文中有关 HCO_3^- 来源的分析,认为 HCO_3^- 的第一种来源基本可以排除;而须二段和须四段均有相似的巨厚烃源岩发育,有机质成熟过程中 CO_2 的加入难以形成这一差异;因此须四段地层水中 HCO_3^- 含量相对较高应主要是由于该地层中存在有更多的碳酸盐矿物的溶解,这一解释在 Ca^{2+} 的浓度上得到了证实(须四段地层水具有相对更高的 Ca^{2+} 浓度)。

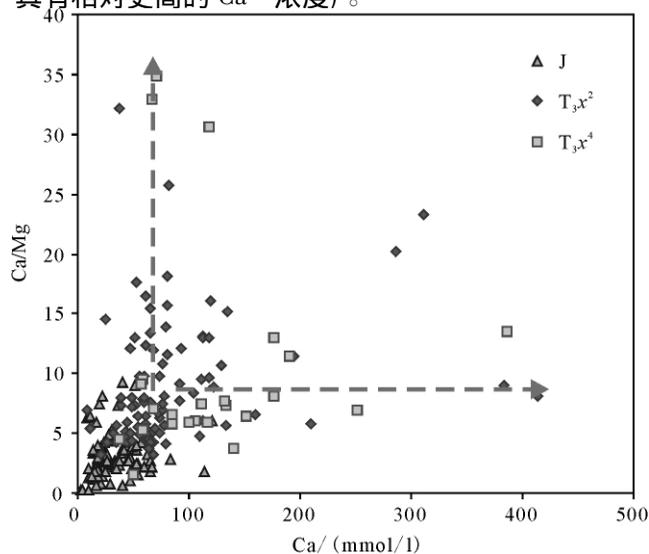


图3 川西坳陷地层水Ca—Ca/Mg关系图
(图中标出了可能的成岩作用方向)

Fig. 3 Ca vs. Ca/Mg in formation water of the Western Sichuan Depression (probable trends for the diagenesis are also shown)

Davisson 和 Criss 研究了全球范围沉积盆地地层水的 Na—Ca—Cl 组合特征, 提出 $Ca_{excess} - Na_{deficit}$ 近 1 : 1 的斜率关系线: BFL(Basinal Fluid Line) [21], 并提出了用 Ca 相对海水富集 (Ca_{excess}) 和 Na 相对海水亏损 ($Na_{deficit}$) 反映阳离子相互关系的方法 [14, 15]。其计算方法是:

$$Ca_{excess} = [Ca_{means} - (Ca/Cl)_{SW} Cl_{means}] \times 2/40.08$$

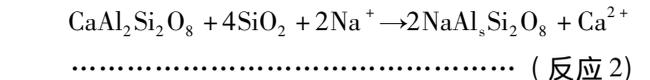
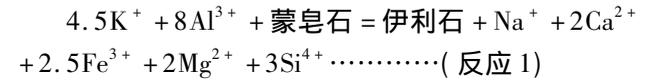
$$Na_{deficit} = [(Na/Cl)_{SW} Cl_{means} - Na_{means}] / 22.99$$

其中, 下标 “SW” 和 “means” 分别表示海水和测量的溶液中离子的浓度 (mg/L), $(Ca/Cl)_{SW}$ 和 $(Na/Cl)_{SW}$ 是海水中相应离子的浓度比。

该关系式将分析结果变换为离子的当量浓度, 其地质意义是通过分析溶液中阳离子相对于海水的富集与亏损关系来反映总的流体-岩石相互作用过程 [21~23]。

从川西拗陷地层水 Na^+ 亏损和 Ca^{2+} 富集关系图来看 (图 4), 研究区侏罗系地层水多数样品表现为 Na^+ 富集, 说明地层水有含钠矿物的溶解来源, 推测其可能主要来源于 NaCl 的溶解。同时, 侏罗系地层水绝大部分都存在有 Ca^{2+} 的富集, 结合前文的研究, 认为蒙皂石的伊利石化 (反应 1) 和少量碳酸盐岩的溶解可能是造成这一现象的主要原因; 研究区须二段和须四段地层水与侏罗系地层水有比较明显的差别 (图 4)。须二段地层水部分样品与海水蒸发线趋于一致, 显示了其更趋近于海相来源水的特点, 这与研究区的实际地质背景是相符的。至于是由后期海相水的入侵造成或是其原始组分即具有这一特点还需进一步的研究; 须四段地层水则基本沿 BFL (Basinal

Fluid Line) 线平行分布 (图 4), 除个别样品外, 绝大部分样品具有 Na^+ 亏损和 Ca^{2+} 富集的特征, 且基本平行于 1Ca 和 2Na 交换线, 须二段部分样品也呈现出类似的特征, 显示研究区须家河组中钙长石的钠长石化是一项重要的水-岩作用过程 (反应 2):



另外, 须四段和须二段部分样品表现为 Na^+ 和 Ca^{2+} 均富集的特征, 推测碳酸盐岩和钠长石的溶解可能是造成这一现象的主要因素。

图中的成岩假设与前人的成岩研究成果基本一致 [16~18], 同时, 电镜扫描也发现, 须家河组中存在有一定量的钠长石, 这也进一步证明了文中提出的成岩假设的正确性。

3 讨论与结论

矿物与孔隙流体之间的相互作用条件、方式及随之发生的迁移方向、途径、沉淀位置与流体流动是影响成岩作用的关键因素 [24]。地层水作为孔隙流体的重要组成部分, 除了空间上受控于流体动力场外, 时间演化上主要受控于流体-岩石相互作用过程 [23]。因此, 在地层水离子可能存在的化学反应基本清楚的条件, 通过地层水中离子变化及组合特征等对可能存在的水-岩作用进行反演是可行的。本次研究基于这一点, 通过川西拗陷地层水化学特征的系统分析和水-岩作用过程的初步探讨, 得到如下结论:

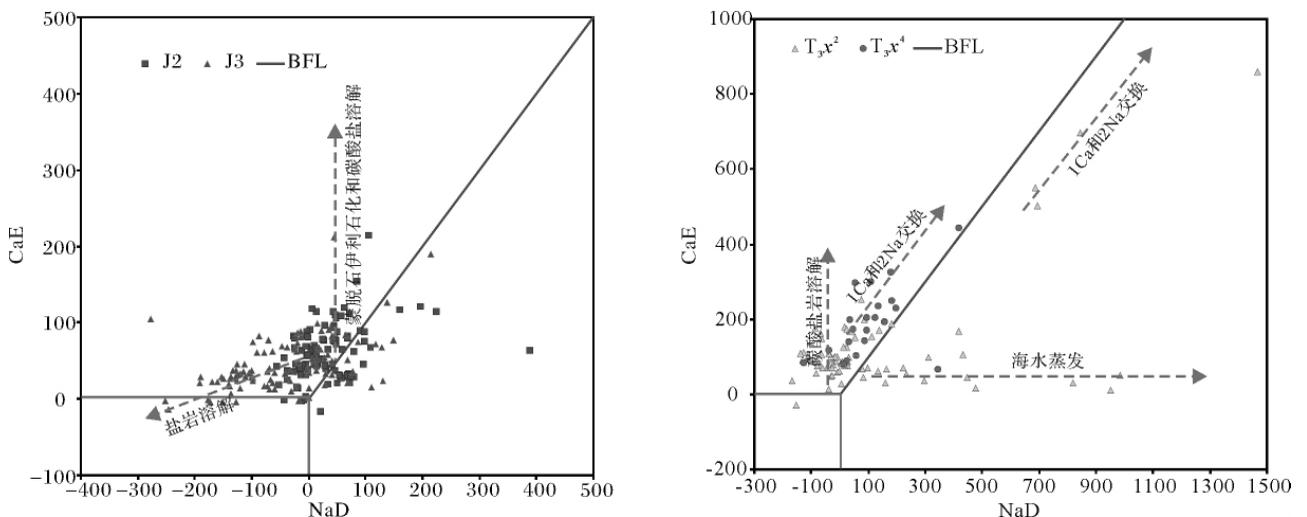


图 4 川西拗陷地层水 Na^+ 亏损和 Ca^{2+} 富集关系图 (图中标出了可能的成岩作用方向)

Fig. 4 Na-excess vs. Ca-deficit in formation water of the Western Sichuan Depression (probable trends for the diagenesis are also shown)

(1) 纵向上,川西坳陷上侏罗统到须家河组可分为2个水化学作用带:地层水交替阻滞带和地层水交替停滞带,大气水作用范围在530 m以上地层;相对于交替阻滞带,交替停滞带中地层水经历了更长时间和更高演化程度的水-岩作用;

(2) 黏土矿物大规模脱水的淡化作用是地层水交替阻滞带离子浓度随深度变大而变小的主要因素,而该带中 HCO_3^- 随埋藏深度的增加而不断增加的原因则可能主要与下部地层有机质成熟过程中 CO_2 的加入有关;

(3) 盐岩溶解可能是交替阻滞带地层水 Na^+ 富集的主要因素,蒙皂石的伊利石化和少量碳酸盐岩的溶解则可能是该带 Ca^{2+} 富集的主要因素;

(4) 钙长石的钠长石化是研究区交替停滞带地层水的一项重要的水-岩作用过程,同时存在的成岩作用类型还包括绿泥石化、碳酸盐矿物的溶解以及钠长石的溶解。

参考文献(References)

- 汪泽成,李晓清,赵献文. 川西地区上三叠统气田水化学场特征[J]. 天然气工业,2001,21(5): 31-34 [Wang Zecheng, Li Xiaoqing, Zhao Xianwen. Gas field hydrochemical characteristics of the upper Triassic in west Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(5): 31-34]
- 贾霍甫,徐思煌. 川东北地区二叠-侏罗系地层水化学特征及其与油气聚集的关系[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2005,7(2): 12-15 [Jia Huofu, Xu Sihuang. The hydrogeochemical characteristic of Permian Period-the Jurassic System layer and its relationship with oil-gas accumulation in the northeast of Sichuan Province[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 7(2): 12-15]
- 张善文. 成岩过程中的“耗水作用”及其石油地质意义[J]. 沉积学报,2007,25(5): 701-707 [Zhang Shanwen. "Water consumption" in diagenetic stage and its petroleum geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 701-707]
- 孙向阳,解习农. 东营凹陷地层水化学特征与油气聚集关系[J]. 石油实验地质,2001,23(3): 291-296 [Sun Xiangyang, Xie Xiong. Relationship between the chemical characteristics of formation water and hydrocarbon accumulation in the dongying sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 291-296]
- 孙向阳,刘方槐. 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): 47-53 [Sun Xiangyang, Liu Fanghuai. The formation water chemistry and geological significance of Sedimentary basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2001, 24(4): 47-53]
- 官秀梅,曾溅辉,金之钧. 渤南洼陷深层(沙三/沙四段)原油-水-岩石相互作用模拟实验研究[J]. 沉积学报,2005,23(3): 420-428 [Gong Xiumei, Zeng Jianhui, Jin Zhijun. Experimental simulation on oil-water-rock interaction in the deep Bonan Sub-sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 420-428]
- 沈忠民,刘涛,吕正祥,等. 川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究[J]. 高校地质学报,2008,14(3): 577-582 [Shen Zhongmin, Liu Tao, Lü Zhengxiang, et al. A comparison study on the gas source of Jurassic natural gas in the western Sichuan depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 577-582]
- 鲍典,沈忠民,罗小平,等. 川西坳陷天然气 $\text{C}_4 \sim \text{C}_7$ 烃类“指纹”特征及在成藏研究中的意义[J]. 物探化探计算技术,2008,30(2): 113-116 [Bao Dian, Shen Zhongmin, Luo Xiaoping, et al. The characteristics of natural gas $\text{C}_4 \sim \text{C}_7$ fingerprint in the western Sichuan Depression and its implications for gas reservoir formation[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 30(2): 113-116]
- 李巨初,刘树根,徐国盛,等. 川西前陆盆地流体的跨层流动[J]. 地质地球化学,2001,29(4): 72-81 [Li Juchu, Liu Shugen, Xu Guosheng, et al. Cross-formational migration of fluids in the compact sandstone-type gas field, west Sichuan foreland basin[J]. Geology-Geochemistry, 2001, 29(4): 72-81]
- 郑荣才,彭军,高红灿,等. 川西坳陷断裂活动期次、热流体性质和油气成藏过程分析[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2003,30(6): 551-558 [Zhen Rongcai, Peng Jun, Gao Hongcan, et al. Analysis of fracture active stages, heat fluid nature and the process of reservoir formation in western Sichuan sag[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(6): 551-558]
- 汪珊,张宏达,孙继朝,等. 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[J]. 地球学报,2007,28(6): 591-596 [Wang Shan, Zhang Hongda, Sun Jichao, et al. The division and positioning of Upper Triassic aquifer systems and hydrogeological periods in western Sichuan petroleum depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 591-596]
- 秦胜飞,陶士振,涂涛,等. 川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J]. 石油勘探与开发,2007,34(1): 34-38 [Qin Shengfei, Tao Shizhen, Tu Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in Western Sichuan depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 34-38]
- 楼章华,李梅,金爱民,等. 中国海相地层水文地质地球化学与油气保存条件研究[J]. 地质学报,2008,82(3): 387-396 [Lou Zhanghua, Li Mei, Jin Aimin, et al. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions for marine strata in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 387-396]
- 刘方槐,颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京:石油工业出版社,1991: 55-95, 153, 234-237 [Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principles of Oil and Gas Field Hydrogeology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-95, 153, 234-237]
- Peter Birkle, Bernardo Martínez García, Carlos M Milland Padrón. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecminoacán oil reservoir, gulf of Mexico. Part 1: Chemical Evolution and Water-rock

- Interaction [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(4): 543-554
- 16 吕正祥. 川西孝泉构造上三叠统超致密储层演化特征 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2005, 32(1): 22-26 [Lü Zhengxiang. Evolutionary characteristics of Upper Triassic reservoir in Xiaoquan structure in West Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2005, 32(1): 22-26]
- 17 孙治雷, 黄思静, 张玉修, 等. 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 [J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 459-468 [Sun Zhilei, Huang Sijing, Zhang Yuxiu, et al. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 459-468]
- 18 徐樟有, 吴胜和, 张小青, 等. 川西坳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 [J]. 古地理学报, 2008, 10(5): 447-458 [Xu Zhangyou, Wu Shenghe, Zhang Xiaoqing, et al. Diagenetic-reservoir facies and their evolutionary sequences of the Members 4 and 2 of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang Gasfield, western Sichuan Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 447-458]
- 19 康毅力, 罗平亚, 焦棣, 等. 川西致密含气砂岩的黏土矿物与潜在地层损害 [J]. 西南石油学院学报, 1998, 60(15): 1-5 [Kang Yili, Luo Pingya, Jiao Di, et al. Clay minerals and potential formation damage of tight gas-bearing sandstone in western Sichuan basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998, 60(15): 1-5]
- 20 谢继容, 孔金祥. 砂岩次生孔隙形成机制 [J]. 天然气勘探与开发, 2000, 23(1): 52-55 [Xie Jirong, Kong Jinxiang. Mechanism of secondary pore of the sandstones [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2000, 23(1): 52-55]
- 21 Davissou M L, Criss R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluid [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 20(4): 2743-2752
- 22 Davissou M L, Criss R E. Geochemistry of tectonically expelled fluids from the northern coastal ranges, Rumsey hills, California, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(7): 1687-1699
- 23 向才富, 夏斌, 解习农. 松辽盆地十屋断陷流体-岩石相互作用 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 51-55 [Xiang Caifu, Xia Bin, Xie Xinong. Water-rock interaction in the Shiwu Depression, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 51-55]
- 24 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 碎屑岩储层成岩流体演化与储集性及油气运移关系探讨—以塔里木盆地满西地区上奥陶统—石炭系海相碎屑岩储层为例 [J]. 地质学报, 2008, 28(6): 835-843 [Zhu Rukai, Guo Hongli, Gao Zhiyong, et al. Relationship of diagenetic fluid evolution, reservoir physical properties and migration of oil and gas: A case of marine elastic reservoirs from upper Ordovician to Carboniferous in West Manjiaer sag, Tarim basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 28(6): 835-843]

Vertical Geochemical Characteristics of Continental Formation Water and Its Water-Rock Interaction in the Middle Area of Western Sichuan Depression

SHEN Zhong-min¹ LIU Si-bing¹ LÜ Zheng-xiang² LUO Xiao-ping¹ GONG Ya-jun¹

(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 Formation water is an important component of pore fluid. The space and time evolution of formation water is controlled by the hydrodynamic field and by fluid-rock interaction, respectively, therefore, it is feasible to invert water-rock interaction with the geochemical changes in ions and the combination relationships of different ions. In this paper, by systematical analysis of more than 300 formation water data from Upper Triassic Xujiahe Formation and Jurassic Formation in the middle area of West Sichuan Depression, the vertical geochemical variation characteristics of formation water and the corresponding water-rock interaction processes recorded by chemical characteristic was discussed preliminarily

The geochemical characteristics show that the cations of formation water are mainly K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , and the anions are mainly Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- in the study area. Main type of formation water with supplement of Na_2SO_4 and $NaHCO_3$ type is $CaCl_2$ type.

From Jurassic to Xujiahe Formation in West Sichuan Depression, the formation water can be divided into 2 chemical zones: Obstructive replacing zone and Lagged zone. The zone affected by atmospheric water was only above 530 m. The formation water concentration decreased with depth as a result of large-scale dehydration of clay minerals in ob-

structive replacing zone, but the main reasons for HCO_3^- incensement with depth in this zone is addition of CO_2 related to maturation of organic matter. The formation water in lagged zone has a significantly higher Ca^{2+} content than in obstructive replacing zone, which may be caused by albitization of feldspar. In addition, the dissolution of carbonate minerals may also have supplied some Ca^{2+} to lagged zone. From T_3x^4 to T_3x^2 HCO_3^- concentration in formation water gradually become smaller, there may be two main reasons for the phenomenon above: First, T_3x^2 hydrocarbon source rocks had a relatively earlier hydrocarbon generation peak, the amount of CO_2 injected into reservoir fluid was relatively smaller compared to T_3x^4 ; The other more likely reason was that stronger carbonate mineral dissolution in T_3x^4 than in T_3x^2 lead to major changes in HCO_3^- concentration which was proved by relatively higher Ca^{2+} concentration in T_3x^4 .

Na^- deficit \sim Ca^{2+} excess relationship showed that most of the Jurassic formation water samples were Na^+ excess, indicating that Na^+ was from dissolution of sodium-bearing minerals, and Ca^{2+} excess in formation water was caused by illitization of smectite and carbonate dissolution. Albitization of anorthite in Xujiahe Formation was an important water-rock interaction process, the other diagenetic types occurred in Xujiahe Formation included chloritization, dissolution of carbonate mineral and albite.

Key words formation water; obstructive replaeing zone; Lagged zone; water-rock interaction; western Sichuan Depression