

川西拗陷上三叠统气田水化学形成演化的重溯

汪 珊, 张宏达, 孙继朝, 荆继红

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061

摘 要: 本文在研究区沉积演化、构造演化和上三叠统含水系统、水文地质期定位的基础上, 论证了 T_3x^2 水起源于 35 g/kg 的海相同生沉积盐水, 经历了沉积、沉压埋藏、构造热液 3 个“期”的浓缩盐化正向变质, 演化成为最高浓度 160 g/kg 的海相后生沉积孔隙裂隙卤水、浓卤水; T_3x^4 、 T_3x^6 水均起源于陆相同生沉积淡水, T_3x^4 经历了沉积、沉压埋藏—淋滤、沉压埋藏、构造热液 4 个“期”, 主要是高度浓缩盐化正向深变质, 演化成为最高浓度 100 g/kg 的后生沉积孔隙裂隙盐卤水; T_3x^6 与 T_3x^2 经历的期相同, 经高度浓缩盐化正向深变质, 演化成为最高浓度 84 g/kg 的后生沉积孔隙裂隙盐卤水。

关键词: 水化学; 形成演化; 上三叠统; 川西拗陷

中图分类号: P641.462 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)05-665-08

Restoration of the Formation and Evolution of Upper Triassic Gas Field Water in Chuanxi Depression

WANG Shan, ZHANG Hong-da, SUN Ji-chao, JING Ji-hong

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061

Abstract: Based on studies of deposition, tectonic evolution, Upper Triassic aquifer system and hydrogeological age, this paper holds that T_3x^2 groundwater came from marine syndepositional brine of 35 g/kg, and experienced three “periods” of inspissation salt positive metamorphism, namely sedimentation, compaction and tectonic hydrothermal activity. Afterwards, they turned into deuterogenous sedimentary salt brine and strong salt brine of 1160 g/kg. Both T_3x^4 and T_3x^6 groundwater came from terrestrial facies syndepositional freshwater. T_3x^4 experienced four “periods”, i.e., sedimentation, compaction-leaching, compaction and tectonic hydrothermal activity. The major part was characterized by strongly concentrated salification and forward metamorphic process, and the later evolution into deuterogenous sedimentary pore and fissure salt brine of 100 g/kg. T_3x^6 and T_3x^2 experienced the same periods, resulting in strongly concentrated salification and forward metamorphic process and forming deuterogenous sedimentary pore and fissure salt brine groundwater of 84 g/kg.

Key words: hydrochemistry; formation and evolution; upper Triassic; Chuanxi Depression

川西拗陷上三叠统历来是四川盆地油气资源勘查的重要目的层, 其间赋存的高盐度气田水与最早凿井取卤采气一样闻名于世, 备受国内外研究者的关注, 但诠释气田水形成原因的研究至今仍停留在气田水现代化学研究水平上。笔者论证了上三叠统划分为须家河组须二段(T_3x^2)、四段(T_3x^4)和六段

(T_3x^6)3 个主要含水系统; T_3x^4 在地史过程中依次经历了沉积作用、沉压埋藏—淋滤作用、沉压埋藏作用和构造热液作用 4 个水文地质期, T_3x^2 和 T_3x^6 均经历了沉积作用、沉压埋藏作用和构造热液作用 3 个水文地质期(汪珊等, 2007)。川西拗陷上三叠统气田水化学及其成因的形成演化是我国中、新生代海相、

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40572143)资助。

收稿日期: 2009-03-10; 改回日期: 2009-05-15。

第一作者简介: 汪珊, 女, 1969 年生。硕士, 研究员。从事水文地质、环境地质研究。E-mail: wshan69@163.com。

通讯作者: 孙继朝, 男, 1957 年生。研究员。通讯地址: 050061, 石家庄市石岗大街 406 号。电话: 0311-87700056。E-mail: gwwsun@263.net.cn。

陆相不含盐含煤的砂泥岩沉积体系的一个特殊类型, 本文从动态的、历史的、发展的古水文地质理念论述气田水化学形成演化的进程, 突破了砂泥岩含煤沉积体系水的最高浓度通常不会超越 35 g/kg 的界限。本研究对水文地球化学的基本理论增添了新颖的研究内容、思路和理念, 对综合分析、评价预测该区聚气成藏的有利地段、择定勘探布井的位置和油气资源量计算等, 具有重大的理论意义和应用价值。

川西拗陷是川盆西部的一个中、新生代继承性拗陷。中生代印支早期运动, 海水侵入川盆, 沉积了中、中三叠统浅海碳酸盐岩。中三叠世末印支晚期运动导致川盆中、东部上升为陆, 中三叠统遭受剥蚀, 中三叠世浅海向西萎缩, 在川盆西侧龙门山前山带与盆内川中前隆之间形成了川西晚三叠世残留海盆。晚三叠世龙门山后山带及其以西的松潘—甘孜地区大规模的拉张裂隙, 沉积了巨厚的海相层和大陆斜坡浊流沉积。特提斯海通过康滇古陆与龙门山半岛或新生的乐山—龙女寺陆地之间的海峡与川西残留海盆连通, 形成了以川西为沉降中心西断东超的箕状拗陷, 沉积了上三叠统须家河组须一段至须三段的海湾泥岩相、三角洲砂岩相和泥岩沼泽相, 其后龙门山前山带强烈活动和隆升, 残留盆地转化为须四段至须六段的陆相砂泥岩含煤沉积。上三叠世沉积厚度 2000~4000 m, 后又沉积了侏罗系、白垩系 (2000~5000 m) 陆相红层, 晚三叠世箕状拗陷发展成为沉降的大型拗陷盆地; 白垩纪末规模巨大的燕山运动结束了川盆中、东部的沉积历史。川盆周边地层褶皱隆升为高山, 西缘伴随着岩浆喷发和形成花岗岩等深成岩类, 盆内中生代地层发生断褶, 川盆现代轮廓基本定型。第三纪主要沉积于川西拗陷; 晚第三纪喜山运动, 川盆又遭受挤压和断褶, 现代轮廓最终定型。拗陷内堆积了厚度甚薄的第四系 (李国玉等, 1988; 张仲武, 1989; 吴崇筠等, 1992)。

1 气田水现代化学及其初始化学

1.1 气田水现代化学场

笔者筛选了川西拗陷 55 个水样 1155 个水化学成分测试资料并统计计算了溶解固体量(TDS)、 Ba^{2+} 、 $\sqrt{c(SO_4) \cdot c(Ca)}$ 、 $SO_4 \cdot 10^2/Cl$ 、 $c(Na)/c(Cl)$ 、 $c(Ca)/c(Cl)$ 、 $c(Mg)/c(Cl)$ 、 $c(Na)/c(Ca)$ 、 $c(Ca)/c(Mg)$ 、 $\sqrt[3]{c(HCO_3 + CO_3)^2 \cdot c(Ca)}$ 等 10 个化学参数, 并相应地绘制了各含水系统气田水化学场图(汪珊, 2003)。

T_{3x^2} 气田水 TDS 浓度变幅 40~160 g/kg, 为卤水和浓卤水, 最高浓度分布在拗陷北段的梓潼凹陷的东南侧, 由此向四周呈降值变化分布, 拗陷西、北边界为低值分布区(图 1)。

T_{3x^4} 气田水 TDS 浓度变幅 20~100 g/kg, 为盐水和卤水, 在拗陷北段梓潼和南段彭山一带分布规模不大的高浓度区。北段大面积分布的主要是盐水, 而南段分布的均是卤水(图 2)。

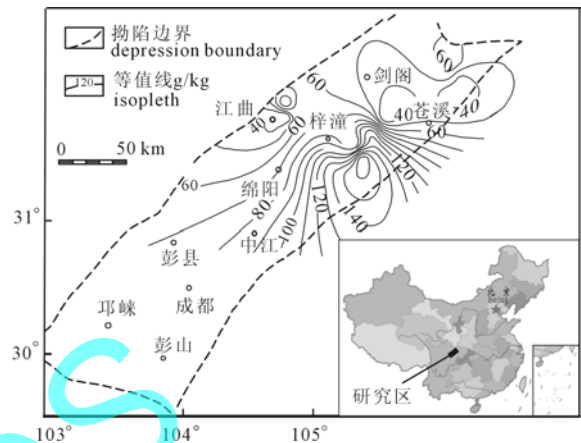


图 1 川西拗陷上三叠统须二段气田水 TDS 等值线图
Fig. 1 TDS contour map of gas field water of Chuankxi Depression in T_{3x^2}

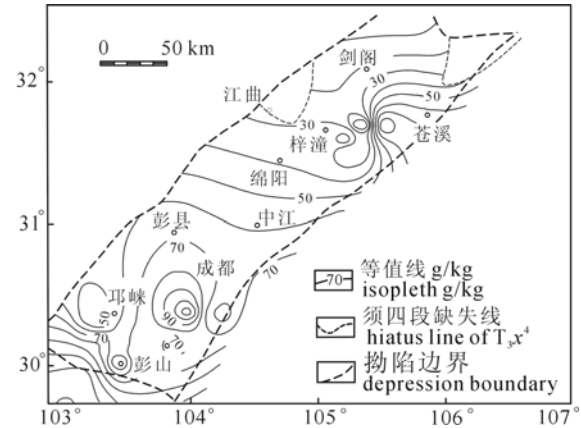


图 2 川西拗陷上三叠统须四段气田水 TDS 等值线图
Fig. 2 TDS contour map of gas field water of Chuankxi Depression in T_{3x^4}

1.2 气田水初始化学

川西拗陷上三叠统气田水现代化学景观是其在地质过程中经历了各种自然因素综合作用形成的产物。追踪各研究层水的初始化学(即同生沉积水化学), 将其与现代化学对比, 可确定两者化学平衡的差异, 从宏观上界定初始化学演化成为现代化学结果的尺度和依据。

1.2.1 气田水初始化学的重溯

沉积体系中最早赋存的同生沉积水化学属性与其沉积时蓄水盆地的水化学是一致的。陆相盆地沉积体系中的水源于大陆水,海相盆地的水源于海水。进而可按上三叠统各研究层的岩性岩相、生物生态、指相矿物等,再造其同生沉积水化学属性(表1)。

1.2.2 气田水初始化学与现代化学的平衡差异

须家河组须二段海湾相和须四、六段陆相沉积层中水的现代化学与其初始化学存在本质的差别,这种差别意味着各层水的初始化学在地史进程中均经历了浓缩盐化正向变质作用。TDS 的增高浓度证明须四、六段沉积层的淡水远比须二段的盐水发生的浓缩盐化正向变质作用强度大,陆相沉积淡水化学特征已不存在,高度变质作用使其具有海相成因的盐卤水化学特征;而须二段海相沉积层的盐水变质成为卤水(表2)。

2 气田水化学形成演化

现代化学与初始化学之间的平衡差异只是确定了初始化学演化结果的尺度和依据,那么上三叠统气田水在地史进程中究竟怎样变化?按笔者划分的

各含水系统在地史过程中经历的水文地质期分别论述气田水化学的形成演化进程。

2.1 T₃x²水化学形成演化

2.1.1 沉积作用水文地质期

该期系指 T₃x² 沉积开始至沉积结束的持续时间。该期是 T₃x² 在地史中经历最短暂的一个时期;沉积结束后其上覆盖着海水,层内水与海水仍可发生循环交替;沉积层自身的岩静压力和上覆海水重量叠加造成的累加压力很低,沉积层压实作用强度很小;沉积层成岩作用处在初始阶段,保持了疏松状态,层内水循环交替滞缓。

改变水化学成分的主导作用主要有脱硫酸盐生物化学还原作用和溶滤作用。脱硫酸盐生物化学还原作用普遍存在,由于水中 SO₄²⁻中的氧与硫结合能量大,在低温(<100)低压条件下,硫酸盐的化学还原作用不可能进行,但当存在脱硫细菌时化学还原作用才能发生,其作用反应式是: SO₄²⁻+2C+H₂O → H₂S+HCO₃⁻,作用结果使水中 SO₄²⁻贫化, HCO₃⁻增高,形成 H₂S;水与储层构成的系统内溶滤作用亦普遍存在,它总是力图使固相中的化学成分转入水中。根据溶滤作用法则, T₃x² 砂泥岩中溶解度大、

表1 须家河组同生沉积水化学

Table 1 Hydrochemistry of syndepositional water in Xujiache Formation

层位	岩性	岩相	生物生态	指相矿物	气候	同生沉积水化学
T ₃ x ²	浅灰、灰色厚块状中细粒砂岩、含砾砂岩,成分石英占60%~80%,次为长石占5%~20%,夹有灰黑色泥岩、页岩,局部夹薄煤层	海相 海湾相	咸水双壳类,如 <i>Unionites</i> sp., <i>Yunanoporus</i> sp. 等有孔虫和海相凝源类等化石	自生海绿石和磷灰石,常见硼含量大于 130 × 10 ⁻⁶	孢粉组合以蕨类和裸子植物为主,蕨类植物孢粉主要有 <i>Lycopodiacidotes mdis</i> , <i>Duplesisporites</i> sp. <i>Kraeuselisporites papollatus</i> K. <i>punctatus</i> 等出现频率高或较高裸子植物孢粉主要有 <i>Taxniaesporites</i> sp. <i>T. novisulensis</i> <i>Cycadopitise</i> sp. <i>R. tuberculatus</i> 等,常见和出现频率较高。上三叠统各类岩石颜色都较深,并夹煤线煤层,不含蒸发岩温暖潮湿亚热带	孔隙盐水 TDS=35 g/kg Cl-Na 型
T ₃ x ⁴	浅灰、褐灰色块状细粒石英砂岩,长石岩屑石英砂岩夹有薄层黑色泥岩页岩和煤线砂岩分选性好,普含底砾岩	陆相河流 漫滩湖沼相	介形虫、腹足类叶肢介、鱼类等化石			孔隙淡水 TDS>1 g/kg HCO ₃ -Ca 型
T ₃ x ⁶	中厚层石英砂岩和岩屑粉砂岩	陆相辫状 河湖沼相				孔隙淡水 TDS<1 g/kg HCO ₃ -Ca 型

表2 须家河组气田水与初始化学的对比

Table 2 Initial and modern hydrochemical characteristics of gas field water in Xujiache Formation

层段	初始化学	现代化学	演化结果和方向
T ₃ x ²	TDS=35g/kg; Cl-Na 型盐水; Na/Cl=0.87, Ca/Cl=0.03, Mg/Cl=0.18; 微量痕量组分含量低; 有机组分含量低; 大气成因气体 O ₂ 、N ₂	TDS 最高 160g/kg; Cl-Na-Ca 型浓卤水; Na/Cl=0.64-0.75, Ca/Cl=0.07-0.77; 微量痕量组分含量增高; 有机组分浓度显著增高; 生物成因气体种类众多, 变质成因气体	浓缩盐化正向变质作用; TDS 增高 4.5 倍; 组分浓度显著增高; 各类比值升降变化显著
T ₃ x ⁴ (含 T ₃ x ⁶)	TDS<1 g/kg; HCO ₃ -Ca 型淡水; Ca>Na, HCO ₃ >Cl, Na/Cl>1; 微量痕量组分浓度低; 有机组分浓度甚低; 大气成因气体	TDS 最高为 100 g/kg(84 g/kg); Cl-Na-Ca、Cl-Na 型盐卤水; Na>Ca, Cl>HCO ₃ , Na/Cl<0.87; 微量痕量组分浓度显著增高; 有机组分浓度显著增高; 生物成因气体种类众多, 浓度显著增高	高度浓缩盐化正向深变质; TDS 增高近 100(80)多倍; 水型改变; 组分浓度显著增高; 离子比值发生本质变化

呈分散状的氯化钠盐首先进入水中；砂泥岩的矿物主要是层状硅酸盐类的高岭石、绿泥石、蒙脱石、伊利石等，以及架状硅酸盐类的钠长石、钾长石、钙长石等，这类矿物的不全等溶解也是水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等增高的原因。

该期水化学成分中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 、 HCO_3^- 浓度均增高， SO_4^{2-} 贫化，产出 H_2S 。但钙、镁碳酸盐、硫酸盐的溶度积均很低，很易形成沉淀进入固相，引起 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度降低。该期持续时间较短，且处在低温低压的还原环境，砂泥层主要呈疏松状态，改变水化学组分增降变化的效应较弱，TDS 增高浓度甚小，保持了同生沉积水化学的主体特征。

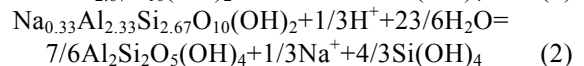
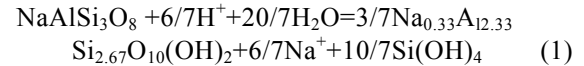
2.1.2 沉压埋藏作用水文地质期

该期系指 T_3x^2 沉积结束至白垩纪沉积结束的持续时间。 T_3x^2 被累加厚度约 6000 m 的沉积层超覆深埋，是其在地质史中经历最漫长的一个时期；处在高温高压、围压封闭状态的强还原环境；疏松的砂泥层进入晚期成岩作用阶段，均已固结成岩；须家河组生烃母岩中油气业已成熟，并已发生初次、二次运移和聚气成藏作用；砂泥沉积层在固结成岩过程中伴随着油气运移和压实水的释放朝向储集层中运聚，相伴发生内循环型压挤式水交替，导致储层中水的更新和朝向低压方向运移。

在上述背景下， T_3x^2 水经历了一场深刻的本质的改造，改变水化学成分的主要作用有：

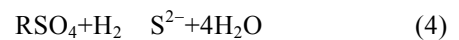
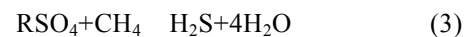
(1) 溶滤作用：在漫长的地质时期高温高压、强还原环境的封闭型水文地质构造系统中的溶滤作用（包括其他 SO_4^{2-} 作用），远比前期发生的作用规模大，持续时间长。完成了沉积层氯化物溶滤阶段，导致

Cl^- 、 Na^+ 稳定性组分浓度显著增高。硫酸盐、碳酸盐溶滤作用使进入水中的 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度增高，由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 的溶度积很小，很易结合进入固相而降低，在 CO_2 存在条件下， CO_3^{2-} 转化为 HCO_3^- 增高浓度，使水溶液呈弱碱性。而铝硅酸盐矿物不全等溶解后形成新的矿物，其溶解度低于原始矿物，且水对原始矿物的溶解是不饱和的，在水与原始矿物相处的地质时期内可持续地发生溶解。钠长石、钠蒙脱石不全等溶解作用反应式是：



钾长石、钙长石、钙蒙脱石、伊利石、黑云母等的不全等溶解是水中 K、Na、Ca、Mg 浓度增高的原因。该期是 T_3x^2 水的一次主要聚盐期，但对固体而言是一次主要洗盐期。

(2) 有机物变质作用：该期上三叠统生烃母岩热降解生成了大量气态烃、 CO_2 和液态烃，生成时代主要在侏罗纪（表 3）。有机物是生物残骸通过不同分解阶段和途径生成的，有机物经改造后分解为简单化合物，诸如烃类、 CO_2 、 H_2 、硫化物、盐类和水。有机物变质作用不仅加强了前期发生的低温低压脱硫酸盐生物化学作用的进程，而且在高温高压环境里甲烷、氢气与硫酸盐的作用进行得异常活跃，其作用反应式是：



脱硫酸盐生物化学作用结果，导致水中 SO_4^{2-} 贫化，反应生成物 CO_3^{2-} 、 H_2S 等聚集，由于 CO_2 的存

表 3 川西拗陷 T_3x 生烃母岩气态烃、二氧化碳和液态烃的产出强度

Table 3 Yielding Intensity of Chuanxi Depression in T_3x for gas hydrocarbon, CO_2 and liquid hydrocarbon

生烃强度		南 部				北 部			
		侏罗系沙溪 庙沉积前	侏罗系遂宁 组沉积前	白垩系 沉积前	第三系 沉积前	侏罗系沙溪 庙沉积前	侏罗系遂宁 组沉积前	白垩系 沉积前	第三系 沉积前
气态烃	N	100	130	140	159	4	25	53	62
	ΔNa	100	30	10	19	4	21	28	9
	$\Delta\text{N}/\Delta\text{N}$	62.9	18.9	6.3	11.9	6.45	33.87	45.16	14.52
二 氧 化 碳	N	15.2	16.5	17	17	0.1	3.1	5.9	5.9
	ΔNa	15.2	1.3	0.5	0	0.1	3.0	2.8	0
	$\Delta\text{N}/\Delta\text{N}$	89.4	7.6	3.0	0	1.7	50.8	47.5	0
液 态 烃	N	1.2	0.8	0.4	0.1	0.1	0.4	0.13	0.11
	ΔNa	1.2	-0.4	-0.4	-0.1	0.1	0.3	-0.27	-0.22
	$\Delta\text{N}/\Delta\text{N}$	100	66.7	33.3	8.3	33.3	133.3	43.5	36.7

注：N—地质阶段累计的生气强度（气态的 $10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ ，液态的 t/km^2 ）；Na—地质阶段累计的生气强度增量；N/ N—地质阶段累计的生气强度占生气总量的百分数。

在,使碳酸盐平衡体系移动, HCO_3^- 生成 CO_3^{2-} , CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 结合生成碳酸盐进入固相(在储层中常见碳酸盐胶结物)。水中稳定性组分 Na^+ 、 Cl^- 高度浓集,不稳定性组分 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 贫化。上述作用导致水中主要盐分分异纯化,但微量、痕量、无机、有机组分的浓度以及生物和变质成因气体的浓度均呈不同程度的增高。

(3) 水解作用: 须家河组铝硅酸盐自生成直至成岩期后的改造,导致粘土矿物转型的过程均需要有一定数量的水参与作用,对水而言,即发生了水解作用。水解作用始于水分子离解为 H^+ 和 OH^- 。离解生成的 OH^- ,一部分被固结在铝硅酸盐水解反应生成的粘土矿物中,另一部分 OH^- 与 CO_2 作用生成 HCO_3^- , H^+ 则进入生成物 H_4SiO_4 和 HCO_3^- 中。当碳酸饱和时, HCO_3^- 离解成的 H^+ 和 CO_3^{2-} ,使原与 CO_2 结合的 OH^- 分离为氢与氧,氧被碳酸盐固定。因此,水离解成为 H^+ 和 OH^- 均进入反应生成的新物质中。作用结果破坏了水的离解平衡,又促使水分子再离解,离解平衡不断破坏,水分子离解可持续地进行。水分子的离解作用是巨大的,其规模取决于水解作用的强度和持续时间。铝硅酸盐经改造破坏导致粘土矿物的转变使水大量损耗,是导致水盐化的原因之一。在表生作用带,随着埋深的增大蒙脱石明显减少,甚至消失,转变为伊利石和绿泥石是普遍的现象。如我国东海陆架盆地西湖凹陷、渤海湾的冀中及黄骅裂谷盆地等第三系砂泥岩沉积体系埋深在 2100 m 以下,出现蒙-伊混合层,在 3100 m 以下为伊利石。喀麦隆杜阿拉盆地上白垩统埋深在 3658 m,蒙脱石、蒙-伊混合层中蒙脱石均减少。经卡尔采夫计算蒙脱石转变为伊利石,相当于蒙脱石重量 5% 的水分解为离子结合在伊利石里;蒙脱石转变为绿泥石,相当于蒙脱石重量 3.5% 的水结合在绿泥石里。

(4) 热地球化学作用: 地温增高加强了溶滤作用,促使围岩中的可溶盐进入水中,导致围岩生烃母岩热降解生成大量不同形式的有机物,化学组分之间相互作用产生的生成物进入水中或发生沉淀,水溶液中化学组成发生变化。此外,地下蒸发作用普遍存在,可直接导致水的浓缩盐化正向变质作用,是提高水盐化程度的重要效应。

(5) 介面化学作用: 该作用包括两方面: 一是离子固相吸附;二是液固相中离子交换,这种作用是可逆的。须家河组 T_3x^2 及其下伏、上覆的 T_3x^1 、 T_3x^3 为海相砂泥岩,在海水环境里形成的是阳离子

Na^+ 的吸附综合体,由于沉积层富含有机质,吸附容量很大。水中的其他 SO_4^{2-} 阳离子与固相吸附离子 Na^+ 发生吸附交换作用,影响离子交换的因素主要是水溶液的浓度、酸碱度、化学组分及其浓度、离子半径和化合价等。二价阳离子的吸附亲和力通常比一价的强,选择次序是 $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$, $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。由于水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度最高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均可与 Na^+ 发生交换作用,作用结果使水中 Na^+ 增高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 则降低。

(6) 水中化学成分的聚集与贫化的分异纯化作用: 在水溶液系统中 TDS 的增高过程,伴随着分量组分浓度的聚集或贫化的分异作用是改变水化学成分的又一重要作用。为探讨它们之间的相关性,择定了 22 个化学组分(含 TDS)进行 R 型聚类分析,结果表明: 当相关系数为 0.6980, 22 个组分变量中 TDS、 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 构成一类, Sr 、 Ba^{2+} 、 Li^+ 、 K^+ 、 I^- 、 Mn 、 Fe 构成二类,其他 SO_4^{2-} 10 个变量各自构成独立的一类。当相关系数为 0.7839, TDS 与 Na^+ 、 Cl^- 、 Sr^{2+} 与 Ba^{2+} 、 Li^+ 与 K^+ 各自构成一类,其他 SO_4^{2-} 15 个变量各自构成独立的一类。当相关系数为 0.9881, TDS 与 Na^+ 、 Cl^- 构成一类,其他 SO_4^{2-} 19 个变量各自构成独立的一类。由此可见: 水的 TDS 增高,主要取决于宏量组分 Na^+ 、 Cl^- , 其次是 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} , 然后依次是微量、痕量等组分。各类组分对水盐化程度的贡献存在显著差别。宏量组分 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} , 微量组分 Li^+ 、 K^+ 、 I^- 、 Sr^{2+} 与 Ba^{2+} , 痕量组分 Fe 与 Mn 等聚集共生,其中以 Na^+ 与 Cl^- 、 Li^+ 与 K^+ 、 Sr^{2+} 与 Ba^{2+} 、 Mn 和 Fe 共生聚集尤为显著。水的 TDS 增高与 Rb^+ 、 Br^- 、 HCO_3^- 、 Si 、 Al 、 Cu 、 Zn 、 Pb 相关性很低,各组分之间亦无明显的共生聚集关系。由于水中 Cl^- 既不被氧化又不被吸附,当水的浓度达到 360 g/kg 时, Cl^- 与 Na^+ 结合才能发生沉淀生成盐岩,是水中的稳定性组分。 HCO_3^- 在 CO_2 饱和时转变为 CO_3^{2-} , 由于碳酸盐溶度积很小,极易生成 Ca 、 Mg 碳酸盐; SO_4^{2-} 与 Ca 、 Mg 结合生成硫酸盐进入固相,水中存在 Ba^{2+} 很易生成 BaSO_4 进入固相,在还原环境中脱硫酸盐生物化学作用均导致水中 SO_4^{2-} 的贫化。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 这 4 个组分是水中的不稳定性组分。最终导致水中宏量组分分异纯化,形成 Cl-Na 型或 Cl-Na-Ca 型水。

该期上述 6 个方面作用的论述表明, T_3x^2 沉积盐水从固相中夺取了大量可溶盐,其主体浓度增高至 100 g/kg 左右,演化成为宏量组分分异纯化、微量

痕量组分浓度增高、富含有机组分的 Cl-Na 或 Cl-Na·Ca 型的后生沉积卤水。必须指出, T_3x^2 在该期进入晚期成岩阶段和出现异常压实(即超压实阶段), 导致砂岩具有高密、低孔、低渗的 3 大特点; 在压实过程中, 泥质岩持续地释放压实水, 朝向其上覆和下伏的砂岩中排放, 可阻缓卤水浓度的增高。

2.1.3 构造热液作用水文地质期

该期系指白垩纪末燕山运动至第三纪末喜山运动的持续时间。 T_3x^2 在这两期构造幕面之间经历了强烈的热变质作用的改造。

(1) 构造热液作用的证据: 规模巨大的燕山运动使中生代大型沉降盆地整体不均一抬升, 中、东部结束了沉积历史。盆周地层褶皱断升为高山, 盆地西缘岩浆喷发, 形成花岗岩等深成岩类。盆内东部华蓥山与七曜山的断裂之间形成川东拗褶带, 三叠系裸露地表; 中部龙泉山与华蓥山的断裂之间形成川中隆起带, 三叠系埋于地下; 西部龙门山与龙泉山的断裂之间形成川西拗陷带, 三叠系深埋于地下。燕山运动塑造了盆内断裂、褶皱异常发育, 形成由西往东上升的 3 个阶梯状平台, 川盆现代轮廓已成初型, 后经喜山运动强烈挤压和褶断而定型。巨大的地动压力破坏了大型川盆原有的地静压力场和地下盐卤水的动力场、化学场和温度场的分布格局。根据川西拗陷钻井和地表地质剖面 68 件 T_3x 砂岩裂缝充填物石英、方解石晶体气液包裹体均一温度资料表明: T_3x^1 埋深 2485~2667 m 的均一温度 102~108, 3576~3724 m 的 138~142.9; T_3x^2 1906 m 的 82.9, 2191~2572 m 的 92.3~104.9, 2958~3473 m 的 117.6~134.6, 3727~4285 m 的 143~161.4, 4491 m 的 168.2~186, 5303 m 的 197.2~201; T_3x^4 1797 m 的 79.3, 2121~2736 m 的 90~100.3, 2900~3455 m 的 115.7~134, 4085~4242 m 的 154.8~160, 4849 m 的 180。上三叠统 T_3x 岩石薄片在显微镜上普见砂岩石英溶蚀和重结晶现象, 如石英加大边、加大锥, 港湾型溶蚀石英、蠕石英、微斜长石硅化等现象。矿物切割和拉开后形成的裂隙, 如长石受张力断开后形成的裂隙和麻花形裂隙, 石英拉开后形成的裂隙和后期裂隙切穿前期裂隙等。中三叠统(T_2l)岩层顶板附近普见薄层透镜体天青石夹层, 底部硬石膏层中有灰黑色泥质天青石条带和天青石交代硬石膏现象。下三叠统(T_1j^{4+5})合川锶矿矿石包裹体(2~20 μ)均一温度为 150~155。油气晚期有机成因论认为, 沉积物中有机物质开始转化为石油需要达到一定的温度, 当温度

高于 130~148.9 时, 液态烃被破坏裂解为天然气。川盆三叠系分布的几乎均是天然气; 川西拗陷 T_3x 油气生成、运移和圈闭均发生在侏罗纪前, 其后发生的燕山—喜山期运动对剩余液态烃转化为气态烃定能作出贡献。

(2) 热变质作用四川盆地及盆周发生剧烈的断褶、岩浆喷发和侵入的造山运动, 地壳深部的炽热岩浆和幔液水沿着断裂或脆弱部位上涌。由于川西拗陷距岩浆喷发地带最近, 上三叠统埋深最大, 经受热液烘烤作用最强, 幔液水上升携带的物质对盐卤水金属组分的增高浓度最多, 强烈改变 T_3x^2 (T_3x^4 、 T_3x^6)卤水化学的是热变质作用以及流动场的变化。

上三叠统盐卤水处在 150 以上炽热沸腾的热地球化学环境中, 再次对围岩进行强烈的溶滤作用, 使水中积聚了更多的物质成分, 高温又加快了水自身的蒸发作用, 是卤水浓缩盐化程度达到最高的时期, 成为 T_3x^2 卤水二次成矿期。热变质作用沉积物中有机物质以化学和能量形式向四周排放活性化合物、碳氢化合物、 H_2S 等, 伴随着发生一系列的化学作用。根据沉积层裂隙中未见蒸发岩, 仅见难溶的钙、镁碳酸盐充填于裂缝中。据此合乎逻辑地判断, T_3x^2 卤水最高浓度达到 160 g/kg, 水中宏量组分 Na^+ 、 Cl^- 高度富集, Ca^{2+} 相对聚集, 而 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 浓度较低, SO_4^{2-} 很低或消失, 微量、痕量组分浓度增高, 生物成因气体以 CH_4 为主的碳氢化合物、 CO_2 、 H_2S 、 N_2 等聚集的 Cl-Na·Ca 型的后生沉积孔隙裂隙卤水、浓卤水。三叠系古盐卤水由川西拗陷带的地静压力高压带越过川中隆起带朝向川东拗陷带的低压带方向运移。在流经泸州一带沙河街组(T_3x)砂岩中形成了含铜砂岩矿和菱铁矿, 在雷口坡组(T_2l)普见薄层透镜体天青石夹层, 硬石膏层夹有灰黑色泥质天青石条带和天青石交代硬石膏现象, 在嘉陵江组(T_1j)形成了合川锶矿。随着燕山、喜山运动的消亡过程, 地能散逸, 地压重新调整, 逐步建立流体新的动态平衡体系。

2.2 T_3x^4 水化学形成演化

T_3x^4 水依次经历了沉积作用、沉压埋藏—淋滤作用并存、沉压埋藏作用和构造热液作用 4 个水文地质期。鉴于 T_3x^4 (T_3x^6)在地史过程中与 T_3x^2 水化学发生剧烈变化的主要阶段是相同的, 不再赘论, 仅阐述形成演化过程的结论。

T_3x^4 水起源于 $TDS < 1$ g/kg 的陆相沉积淡水。在沉积作用水文地质期, 水中各种组分浓度增降变化和 TDS 增高浓度均较小, 基本上保持了初始化学的

特点。在沉压埋藏—淋滤作用并存水文地质期, T_3x^4 被 T_3x^5 、 T_3x^6 覆盖埋于地下, 处在早期成岩作用阶段和温度、压力比前期有所增高的还原环境中, 主要是溶滤作用和脱硫酸盐作用的叠加导致不同化学组分浓度的增降变化, 成为 TDS 增高至 4 g/kg 的咸水; 拗陷北部的北、西边界内侧分布面积不大的 T_3x^4 裸露地表, 区内无泄水区, 淋滤水在裸露区入渗侵入, 受变质咸水的阻挡, 形成咸淡水交接锋面, 变质咸水的还原性组分浓度和 TDS 朝向锋面方向渐呈降低变化, 而淋滤淡水氧化性组分浓度和 TDS 朝向锋面方向呈增值变化, 在锋面一带形成化学平衡过渡带。在沉压埋藏作用水文地质期, T_3x^4 除介面化学作用与 T_3x^2 的相悖外, 其他 SO_4^{2-} 种作用均相同, 但作用强度不同, T_3x^4 咸、淡水在此漫长的地质时期持续地从围岩中吮吸大量可溶盐; 以及由于沉积体系持续下沉发生压实作用, 其下伏的 T_3x^2 高盐度水沿着断裂、裂缝和透水性较好的相接部位的上升通道进入 T_3x^4 , 产生混合作用, 提高了 T_3x^4 水的盐度, 发生首次聚盐期, 宏量组分 Na^+ 、 Cl^- 浓集, 微量、痕量组分浓度增高, 富含有机组分, TDS 增高至 20~80 g/kg, 演化成为高度浓缩盐化正向深变质的 $Cl-Na$ 和 $Cl-HCO_3-Na$ 型后生沉积孔隙盐水, 具有海相沉积水化学的主体特征。在构造热液作用水文地质期, T_3x^4 盐水经历了强烈的热变质作用, 再度发生聚盐期, 各种组分浓度比前期显著增高, 宏量组分分异纯化, Na^+ 、 Cl^- 高度富集, TDS 增高至 30~100 g/kg, 演化成为高度浓缩盐化正向变质的 $Cl-Na-Ca$ 和 $Cl-Na$ 型后生沉积孔隙裂隙盐水、卤水。

2.3 T_3x^6 水化学形成演化

T_3x^6 经历的水文地质期与 T_3x^2 的相同, 其形成演化过程和结论如下: T_3x^6 水起源与 T_3x^4 的相同。在沉压作用水文地质期, 基本上保持了初始化学的特点。在沉压埋藏作用水文地质期, 与 T_3x^4 发生相同的各类作用, 各类组分浓度增降变化类似, 经历了第一次聚盐期, 演化成为 TDS 增高至 60 g/kg 的后生沉积孔隙盐水。在构造热液作用水文地质期, 再度发生聚盐期, 演化成为高度浓缩盐化正向深变质、TDS 最高浓度达到 84 g/kg 的 $Cl-Na \cdot Ca$ 、 $Cl-Na$ 型的后生沉积孔隙裂隙盐水、卤水。

3 结语

本文是笔者在川西拗陷上三叠统水压系统类型和渗流场(2001)、气田水化学场及其分带(2003)、含水系统和水文地质期的划分和定位(2007)、气田水及其聚气成藏的评价(2007)等研究之后, 转而从动态

的、历史的、发展的古水文地质理念, 重溯气田水化学形成演化进程, 首次提出 T_3x^2 水起源于海相同生沉积成因盐水, 在地史过程中经历了沉积作用、沉压埋藏作用和构造热液作用 3 个水文地质期, 朝向浓缩盐化、正向变质地球化学方向发展, 最终演化成为海相后生沉积成因孔隙裂隙卤水、浓卤水。 T_3x^4 、 T_3x^6 水均起源于陆相同生沉积淡水。 T_3x^4 水经历了沉积作用、沉压埋藏—淋滤作用、沉压埋藏作用和构造热液作用 4 个水文地质期, 最终演化成为高度浓缩盐化、正向深变质的后生沉积成因孔隙裂隙盐水、卤水。 T_3x^6 经历了与 T_3x^2 相同性质的 3 个水文地质期, 最终演化成为高度浓缩盐化、正向深变质的后生沉积成因孔隙裂隙盐水、卤水。

参考文献:

- 巴斯科夫 E.A. 1981. (沈照理译) 成矿规律中的古水文地质分析 [M]. 北京: 科学出版社.
- 李国玉, 吕鸣岗. 1988. 中国含油气盆地图集 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 沈照理. 1999. 水文地球化学基础 [M]. 北京: 地质出版社.
- 汪蕴璞, 赵宝忠, 张金来. 1987. 油田古水文地质与水文地球化学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 汪蕴璞. 1990. 论四川盆地威远气田震旦系深层水成因 [J], 中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊, 第 6 号: 99-125.
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1992. 中国含油气盆地沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 王大纯, 张人权, 史毅虹. 1995. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社.
- 汪蕴璞, 汪珊, 林锦璇, 王翠霞, 梁国玲, 叶思源. 1997. 西湖凹陷油气运聚成藏的水文地质论证 [J]. 中国海上油气(地质), 11(5): 305-312.
- 汪珊. 2001. 沉积盆地渗流场形成演化的研究方法 [J]. 地球学报, 22(5): 471-476.
- 汪珊. 2003. 川西拗陷上三叠统气田水化学场及其分带 [J]. 地球学报, 24(1): 67-72.
- 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 [J]. 地球学报, 28(6): 591-596.
- 张仲武. 1989. 四川盆地含油气构造及评价 [M]//中国含油气区构造特征编委会编. 中国含油气区构造特征. 北京: 石油工业出版社, 211-229.
- 张宏达, 汪珊, 郭贵平, 荆继红. 2003. 黄骅裂谷盆地第三系深层水成因 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 28(4): 155-160.

References:

- E.A. . 1981. [M]. Beijing: Science Press (translated by SHEN

- Zhao-li from Russia into Chinese).
- LI Guo-yu, LV Ming-gang. 1988. The atlas of oil and gas basin in China[M]. Beijing: The petroleum industry press (in Chinese).
- SHEN Zhao-li. 1999. Foundation of hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological publishing house (in Chinese).
- WANG Yun-pu, ZHAO Bao-zhong, ZHANG Jin-lai, et al. 1987. Paleohydrogeology and hydrogeochemistry of oil field[M]. Beijing: Science publishing house (in Chinese).
- WANG Yun-pu. 1990. Sinian Deep Water Genesis of the Weiyuan Gas Field in Sichuan Basin [J]. Bulletin of the institute of the hydrogeology and engineering geology Chinese academy of geological science, 6:99-125 (in chinese).
- WU Chong-jun, XUE Shu-hao. 1992. Sedimentology of oil-gas-bearing basins in China[M]. Beijing: The petroleum industry press (in Chinese).
- WANG Da-chun, ZHANG Ren-quan, SHI Yi-hong. 1995. Foundation of hydrogeology[M]. Beijing: Geological publishing house (in Chinese).
- WANG Yun-pu, WANG Shan, LIN Jin-xuan, WANG Cui-xia, LING Guo-ling, YE Si-yuan. 1997. Hydrogeological demonstration of oil/gas migration and accumulation in xihu sag[J], China Offshore Oil and Gas (Geology), 11(5): 305-312 (in Chinese with English abstract).
- WANG Shan. 2001. Study Method on the Formation-evolution of Vadose Field in Sedimentary Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(5): 471-476(in Chinese with English abstract).
- WANG Shan. 2003. Upper Triassic Hydrochemical Field and its zonation of the Gas Field Water in Chuanxi Depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(1): 67-72 (in Chinese with English abstract).
- WANG Shan, ZHANG Hong-da, SUN Ji-chao, JING Ji-hong. 2007. The Division and Positioning of Upper Triassic aquifer system and hydrogeological periods in the western Sichuan Petroleum depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(6): 591-596 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhong-wu. 1989. The Structural Features And Evaluation Of Si Chuan Basin[M].// The Editorial Committee of "Tectonic Characteristics Of Chinese Oil Gas Bearing Areas". Tectonic Characteristics Of Chinese Oil Gas Bearing Areas. Beijing: The petroleum industry press, 211-119(in Chinese).
- ZHANG Hong-da, WANG Shan, GUO Gui-ping, JING Ji-hong. 2003. Tertiary Deep Water Genesis in Huanghua Rift Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 28(4): 155-160 (in Chinese with English abstract).