

四川盆地卧龙河储卤构造地下卤水的水化学特征及成因

曹琴^{1,2}, 周训^{1,3}, 张欢¹, 陈婷¹, 张永帅¹, 王黎栋^{1,3}, 黄熙¹, 沈晔^{1,3}
CAO Qin^{1,2}, ZHOU Xun^{1,3}, ZHANG Huan¹, CHEN Ting¹, ZHANG Yongshuai¹,
WANG Lidong¹, HUANG Xi¹, SHEN Ye^{1,3}

1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 江西省地质矿产勘查开发局教育中心, 江西 南昌 330030;

3. 中国地质大学(北京)/地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083

1. *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Education Center of Jiangxi Geological Exploration Bureau, Nanchang 330030, Jiangxi, China;*

3. *China University of Geosciences, (Beijing) /Key Laboratory of Groundwater Circulation and Evolution, Ministry of Education, Beijing 100083, China*

摘要:四川盆地东部卧龙河储卤构造在深埋地下2000m左右的碳酸盐岩中赋存海相同生沉积卤水。该储卤构造的深部断裂、背斜西翼陡断带断层及破碎带构成了卤水的主要储集空间。卤水的矿化度为105.67~129.4g/L,为Cl-Na型水。将该深层卤水各水化学组分含量与对应的黄海水蒸发浓缩曲线对比,得知其富集Br⁻、I⁻、Sr²⁺、B₂O₃等微量元素或成分,K⁺不富集。卤水δD、δ¹⁸O资料显示其起源于古海水。利用离子系数及化学组分的分析结果,表明地下卤水在高温高压、封闭的还原环境中,发生了脱硫酸作用和白云岩化作用等化学成分演化作用。

关键词:卤水;水化学;成因;沉积盆地;四川盆地

中图分类号:P641.139 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2015)05-0990-08

Cao Q, Zhou X, Zhang H, Chen T, Zhang Y S, Wang L D, Huang X, Shen Y. Hydrochemical characteristics and genesis of the subsurface brines in the Wolonghe brine-bearing structure of Sichuan Basin. *Geological Bulletin of China*, 2015,34(5): 990-997

Abstract: Marine connate sedimentary brines occur in the carbonate rocks at the depth of approximately 2000 m in the Wolonghe brine-bearing structure (anticline) of western Sichuan Basin. Faults can be found in the depth of the brine-bearing structure, and fault zones occur on the western limb of the anticline, in which subsurface brines are concentrated. The brines range in TDS from 105.67g/L to 129.4g/L and are of the Cl-Na type. The comparison of the chemical compositions of the brines with those of evaporated Yellow Sea water indicates that the brines are rich in Br⁻, I⁻, Sr²⁺ and B₂O₃, but are poor in K⁺. The δD and δ¹⁸O of the brines show that they are of paleo-marine origin. Ratios of ions and compositions of the brines indicate that such evolution of chemical composition as desulphurization and dolomitization occurred in a sealed environment of high temperature and pressure during the evolution of the subsurface brines.

Key words: brines; hydrochemistry; genesis; sedimentary basin; Sichuan Basin

收稿日期:2014-08-13;修订日期:2015-04-09

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2011CB403005)和中国地质调查局项目(编号:1212010011803)

作者简介:曹琴(1987-),女,在读硕士生,水文地质、地下水科学与工程专业。E-mail: qin_cao@126.com

通讯作者:周训(1963-),男,博士,教授,博士生导师,从事水文地质、地下水科学与工程专业教学与研究。

E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn

四川盆地卤水资源分布广泛,大部分深层卤水矿化度极高,且不同程度富集 K^+ 、 Br^- 、 I^- 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 B^- 等微量元素,具有很高的工业利用价值^[1]。近年来,中国开展国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“中国陆块海相成钾规律及预测研究”和中国地质调查局项目“钾盐资源调查评价”,需要开展沉积盆地深层富钾地下卤水资源的调查和评价。因此,对四川盆地赋存地下卤水的相关储卤构造进行调查研究显得尤为重要^[2]。

四川盆地经过 30 余年的勘探、研究,已经对盆内卤水运移、储集、成因等有了很深的认识。盆地内深层卤水主要位于三叠系海相地层中,自然条件下多处于深埋、封闭、高压的状态,不参与现代水循环^[3-4]。该层位是盆内主要找钾方向,普遍赋存高矿化度卤水,局部构造 K^+ 含量异常(平落坝、宣汉地区),成因复杂,推测其为古海水蒸发浓缩,经后期溶滤固体钾盐形成^[2,5]。将已知卤水水样各化学组分与海水蒸发曲线对比,更清晰地判断卤水的起源及后期是否发生化学成分演化作用^[6]。也有研究者利用离子系数判定卤水成因类型,将 K^+ 与 Cl^- 、 Br^- 这 2

个相对稳定的组分比较,分析得出异常水点,进一步结合水文地质和地球化学背景推测其含钾的可能性^[5]。

卧龙河构造为一个勘探程度高、开发利用早的大型气田构造,至今已开发利用 40 余年,钻探过程中发现三叠系卤水储集层,卤水显示较好的有卧 57 井及卧 16 井。 K^+ 显示较好的有卧 12 井,但已有资料不足,故不做具体分析。历史上,垫江盐厂曾利用卧 57 井、卧 16 井生产卤水。本文通过对川东卧龙河构造深层卤水的水化学特征研究,利用海水蒸发曲线对其卤水各化学组分做进一步分析,并结合地质构造及水化学因素分析卧龙河构造深层地下水的水化学特征及成因,对川东钾盐沉积研究工作具有重要意义^[7-8]。

1 地质背景

卧龙河构造位于重庆中部的垫江县境内,地处明月山脉以东,境内地貌以丘陵为主,地势北高南低。该构造沉积旋回多,从震旦系至侏罗系发育较全,仅泥盆系缺失,其后沉积的白垩系受地表风化

表 1 卧龙河储卤构造地层及储卤层简表
Table 1 Strata and brine-bearing aquifers of the Wolonghe brine-bearing structure

系	统	组	地层代号	厚度/m	岩性	储卤层/隔水层	
侏罗系	上统	遂宁组	J_{3s}	0~1900	砂岩与泥岩互层	隔水层	
		上沙溪庙组	J_{3s}				
	中统	下沙溪庙组	J_{2xs}				
		新田沟组	J_{2x}				
三叠系	下统	自流井组	J_{2z}	450	砂岩、页岩、泥岩夹介壳灰岩	储卤层/隔水层	
	上统	须家河组	T_{2xj}	400	砂岩、页岩	储卤层/隔水层	
		中统	雷口坡组	T_{2l}^2	40	灰岩	储卤层
				T_{2l}^1	270	硬石膏为主,含泥质白云岩,灰岩	储卤层/隔水层
				T_{2j}^5	150	硬石膏为主	隔水层
						灰岩	储卤层
		下统	嘉陵江组	T_{2j}^4	300	硬石膏为主,含灰岩、白云岩	隔水层
	T_{2j}^3			170	灰岩为主	储卤层	
				T_{2j}^2	150	硬石膏为主	隔水层
				T_{2j}^1	240	以灰岩为主,含白云岩、泥质灰岩	储卤层
二叠系	上统	飞仙关组	T_{2f}	450	灰岩为主,含泥质灰岩,少量泥岩	储卤层	
		长兴组	P_{2c}	180			
	下统	龙潭组	P_{2l}	120	灰岩、泥质灰岩、页岩	隔水层	
		茅口组	P_{2m}	280	灰岩为主	储卤层	
		栖霞组	P_{2q}	130			
石炭系		梁山组	P_{1l}	10	页岩	隔水层	
		黄龙组	C_{1h}	40	粒屑、隐藻及粉晶云岩	储卤层	

剥蚀(表1)^[9]。核部出露最老地层为侏罗系自流井组(J_{1z}),岩性大多为砂岩、页岩、泥岩夹介壳灰岩^①。三叠系为盆内卤水主要的储集层,除上层须家河组(T_{3xj})以内陆湖相沉积为主外,中、下层均以海相沉积为主。须家河组岩性以砂岩和页岩为主,中一下三叠统(T_{2l} 、 T_{1j})岩性以灰岩、白云岩和硬石膏为主,含有粒屑粉晶云岩、生物灰岩等,碳酸盐各储层之间有泥质含量较高的灰岩及硬石膏为隔层。

储卤层的划分与盆内基本一致,储层类型以孔隙—裂隙、裂隙为主^[10],储卤层有: T_{3xj} 、 T_{2l} 、 T_{1j} 及 P_{1m} 、 C_2h ,除 T_{3xj} 为砂岩外,其余均为灰岩及白云岩。钻孔多遇盐岩,累积厚度8~145m不等,一般为22~25m。储卤层埋深大,封闭较好,生产井多分布在轴部及西翼。见卤水的井有8个,2个较大的水量,其余均小于5m³。产水层 T_{3xj} 水显示较好,许多钻井打到此层均有水显示,且有的井既产气又产水。 T_{2l} 也见卤水显示,另据资料^②,卧12井在该产层K含量异常,KCl达13.7 g/L。而 T_{1j} 水量较为丰富,有水显示的井较多,如卧57、卧16、卧82等,产水量18~20m³/d。古生界中,二叠系下统茅口组(P_{1m})及栖霞组(P_{1q})、石炭系中统黄龙组(C_2h)也有卤水显示,且均为淡卤水。卧龙河构造地下卤水主要分布于 T_{1j}^{2-3} 段的灰岩及粉晶白云岩储卤层中,处于深埋封闭状态,储存空隙类型以孔隙裂隙为主,孔隙度为5%~5.8%。揭露该储卤层的卧57井及卧16井产卤多年,卧16井在1982年为主要产卤井,卧57井有一定的测试数据,卧82井是准备开采的井。

卧龙河构造位于四川盆地东部高陡褶皱带,为一介于明月峡与苟家场高陡背斜之间的次级短轴低缓背斜。形态复杂,轴向由南到北呈南北—北北东—北东向变化,向西凸出呈弓形。背斜顶部平缓,西北翼陡,倾角50°~70°,东南翼较缓,倾角仅25°~50°,整体展布呈不对称的箱状^[11]。背斜地表断层不发育,仅在背斜核部东侧发育2条小断层(图1)。在背斜形成过程中,由于受南东向的水平侧压力大于北西向,致使在西翼形成一逆冲并从震旦系顶部贯穿到三叠系的逆断层,平行于轴向,倾向南东,倾角40°~70°,称之为 F_1 逆断层^[12-13]。并在构造西翼形成陡断带,三叠系以下地层中,断褶发育,岩层倾角大,岩层破碎。东翼断层较少,且多发育在蒸发岩中(图2)。

2 地球化学特征

2.1 水化学组分特征

卧龙河构造卤水矿化度相对盆内其他储卤层较低,推测其与古气候蒸发环境密切相关。目前卧龙河构造有6份水化学资料可用来分析,水样钻孔均位于背斜核部附近,平行于轴向,且多出同一层位,故其卤水的水化学特征极为相似,其中以卧57井及卧16井为主要研究对象。水化学分析结果显示,该层位卤水矿化度均在105~130g/L之间,为原始海水的3~4倍,属于淡卤水^[14-15]。

由表2可知,该构造卤水大多富集于 T_{1j}^{2-2} — T_{1j}^3 层段,为碳酸盐孔隙—裂隙储卤层,该层位卤水相比盆内高矿化度(TDS)的 T_{1j}^5 — T_{2l}^1 的富集高

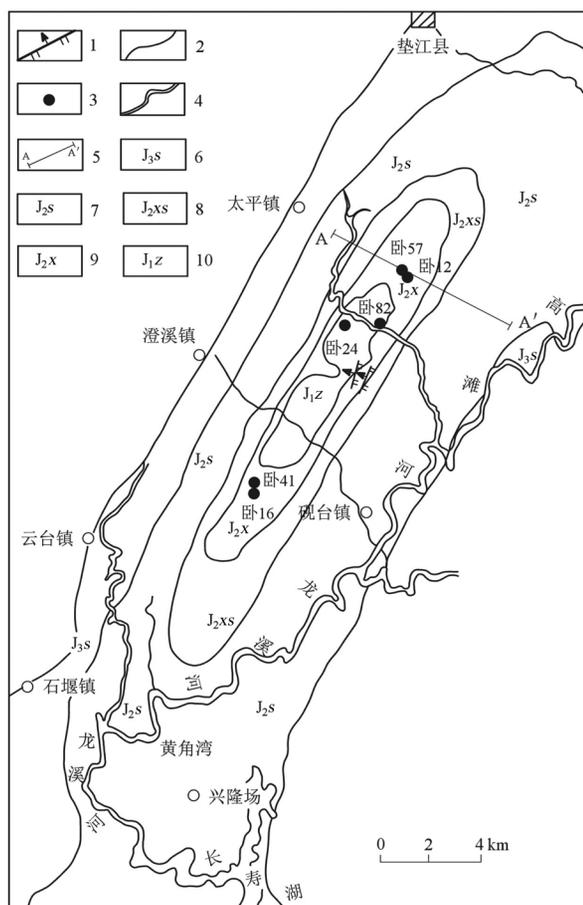


图1 卧龙河储卤构造平面(据参考文献①修改)

Fig. 1 Map showing the Wolonghe brine-bearing structure
1—断层;2—地层分界线;3—钻孔编号;4—河流;5—剖面线;6—侏罗系上统遂宁组;7—侏罗系中统上沙溪庙组;8—侏罗系中统下沙溪庙组;9—侏罗系中统新田沟组;10—侏罗系下统自流井组

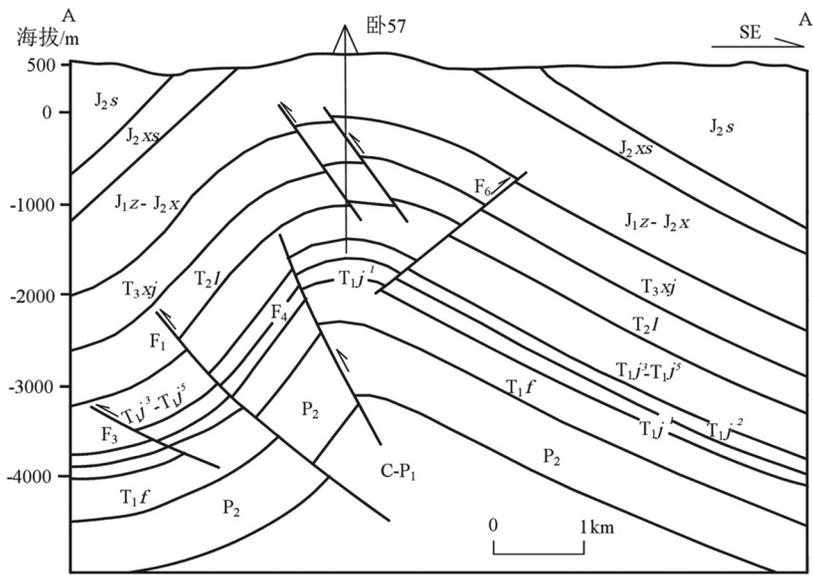


图2 卧龙湖储卤构造A-A'剖面(据参考文献①修改)

Fig. 2 Cross section along line A-A' in the Wolonghe brine-bearing structure
 J_{2s}—侏罗系中统上沙溪庙组; J_{2xs}—侏罗系中统下沙溪庙组; J_{1z}—侏罗系中统新田沟组; J_{1z}—侏罗系下统自流井组; T_{3xj}—三叠系上统须家河组; T_{2l}—三叠系中统雷口坡组; T_{1j}¹—T_{1j}⁵—三叠系下统嘉陵江组第三-第五段; T_{1j}²—三叠系下统嘉陵江组第二段; T_{1j}³—三叠系下统嘉陵江组第一段; T_{1f}—三叠系下统飞仙关组; P₂—二叠系上统; C-P₁—石炭系-二叠系上统

浓卤水的特征,矿化度均略低,且K富集不明显。阳离子以Na⁺为主,毫克当量占82.5%以上;其次为

Ca²⁺,占12%左右;Mg²⁺明显偏低,但Sr²⁺异常偏高。阴离子中Cl⁻占主导地位,毫克当量占96.7%以上,其次为SO₄²⁻。按舒卡列夫分类可将其归为Cl-Na型水^[16-17]。

表2 卧龙湖储卤构造卤水化学组分

Table 2 Chemical composition of brine in the Wolonghe brine-bearing structure

钻井编号	g/L					
	卧57*	卧57	卧16	卧82	卧24	卧41
储卤层位	T _{1j} ²⁻² -T _{1j} ³	T _{1j} ²⁻² -T _{1j} ³	T _{1j} ²⁻²	T _{1j} ² -T _{1j} ³	T _{1j} ² -T _{1j} ³	T _{1j} ² -T _{1j} ³
K ⁺	0.65	0.5968	0.7183	0.6322		
Na ⁺	35.18	41.8662	41.7129	40.9766	39.132	41.147
Ca ²⁺	4.152	4.7738	6.0066	4.9148	5.088	5.432
Mg ²⁺	0.93	0.9751	1.0033	0.9129	0.981	0.93
Sr ²⁺	0.0824			0.128		
Li ⁺	0.0326	0.0058	0.0055	0.019		
Cl ⁻	61.15	74.2155	76.2234	73.5094	70.587	73.221
SO ₄ ²⁻	1.792	2.3294	1.7821	1.9426	2.099	2.518
HCO ₃ ⁻	0.9897	0.2027	0.2841	0.0406	0.126	1.122
CO ₃ ²⁻	0.0	0.0873	0.5821			
Br ⁻		1.0074	1.0443	0.9979	1.186	
I ⁻	0.0266	0.0283	0.031	0.0283	0.036	0.021
B ₂ O ₃	0.895	0.9995	0.5934	0.2472	1.172	0.4701
矿化度/g·L ⁻¹	105.67	126.09	129.41	124.41	117.95	124.36
舒卡列夫分类	Cl-Na	Cl-Na	Cl-Na	Cl-Na	Cl-Na	Cl-Na

注:*采样时间为2012年3月31日,其余数据据参考文献①

已知Br⁻是海水中相对稳定的组分,在成盐过程中不会形成独立矿物,仅以离子交替形式少量替代Cl⁻进入固相,大量的Br⁻富集于液相,矿化度伴随海水的浓缩不断增加^[5]。故将卧龙湖储卤构造深层卤水的各化学组分与黄海水各化学组分的蒸发曲线相对比,横坐标为Br⁻含量,纵坐标为主要离子含量及矿化度(图3)^[6,14]。其矿化度达到了文石沉积阶段,但尚未到达石膏沉积阶段,各化学组分特征如下。

(1)K⁺不富集,Br⁻含量较高。在正常海水浓缩过程中,光卤石沉积阶段到达之前,K⁺、Br⁻一直保持着对应的、按比例增长的趋势^[18]。从该构造深层卤水各水样测试结果可知,K⁺含量相比文石沉积阶段时的黄海水较小,仅相当于正常海水的2倍;而与文石沉积阶段相比,Br⁻含量增高比例为5.29倍。

(2)常量组分中贫Mg²⁺、SO₄²⁻,富集Ca²⁺。在

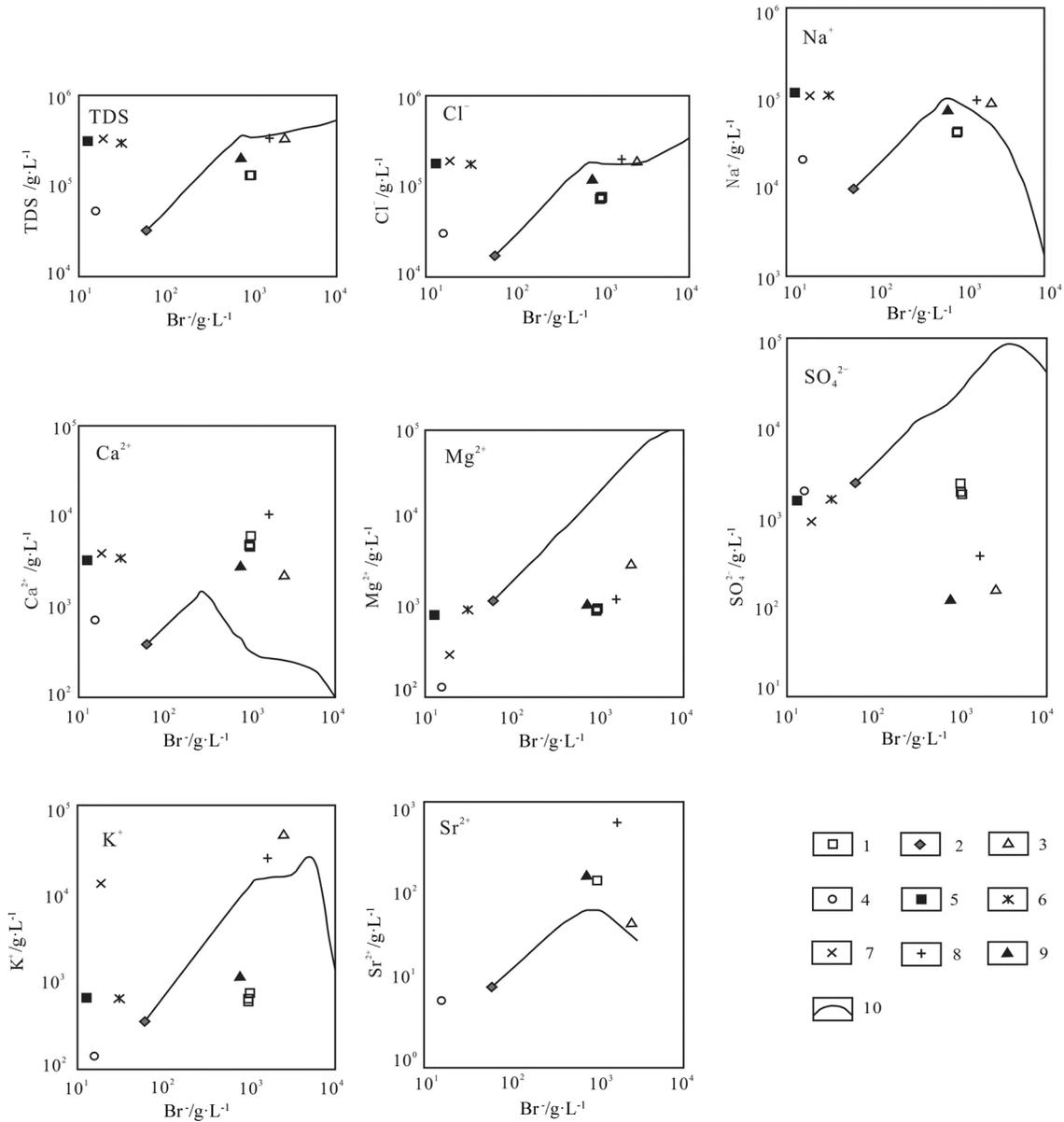


图3 卧龙湖储卤构造卤水与蒸发海水的比较(海水蒸发轨迹线据参考文献[6])

Fig. 3 Comparison of the brine in the Wulonghe brine-bearing structure with evaporated seawater

- 1—四川盆地卧龙湖卤水;2—海水;3—四川盆地PL4井黑卤;4—四川盆地东部咸泉;
- 5—柴达木盆地黄卤;6—柴达木盆地黄卤;7—江陵凹陷GK1井卤水;8—四川盆地川25井卤水;9—四川盆地邓关构造卤水;10—海水蒸发轨迹线

黄海水蒸发实验中, Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 随海水浓缩呈增大的趋势, Ca^{2+} 含量不断减少。该深层卤水的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量均低于海水各浓缩时期的含量。 Ca^{2+} 含量异常偏高, 为正常海水文石沉积时期的4~6倍。

(3) I^- 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 B_2O_3 等微量组分异常。微量组分中, I^- 、 B_2O_3 含量已达泻利盐沉积阶段, 含量较

高。 Li^+ 含量最高达32.6g/L, 相当于光卤石沉积阶段黄海水的含量, 而 Sr^{2+} 更是高于海水各个沉积阶段。

2.2 比例系数

卧龙湖储卤构造地下卤水各项地球化学比例系数值详见表3。对比其与黄海水浓缩到相应矿化度时的各系数可以看出, $Br \times 10^3 / Cl$ 、 $B_2O_3 \times 10^3 / Cl$ 明

显高于正常黄海水浓缩到相应矿化度时的各系数值。而 rNa/rCl 系数一直保持在正常海水比值 0.85~0.87 之间^[18,19],且 SO_4^{2-} 含量较低,反映该储集层卤水为海相沉积成因水,并处于埋藏条件较好的封闭还原环境中。而 $K \times 10^3/Cl$ 系数较低, K/Br 系数明显低于黄海水,且 rNa/rK 系数较高,表明该卤水 K 的富集不明显。海水中 Cl 是相对稳定的组分,因此将 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 与其比较, rSO_4/rCl 、 rMg/rCl 较低, rCa/rCl 偏高,表明该卤水明显富集 Ca^{2+} 、贫 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量甚微。

3 卤水成因浅析

3.1 卤水起源

四川沉积盆地卤水分布极为广泛,从震旦系到白垩系各层位均有卤水分布,矿化度浓淡各异,淡至 6g/L,浓至 377g/L^[20]。对比表 2 与正常海水蒸发沉积各阶段可知,该深层卤水并非简单的由海水蒸发浓缩而成,其形成过程较为复杂,通常可利用水样各化学组分子系数判断地下卤水的成因,并根据地下卤水中的 H 、 O 稳定同位素判断卤水起源。

(1) 同位素 δD 、 $\delta^{18}O$ 分析

四川盆地大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的平均值分别为 -57‰ 和 -8.7‰ ,即盆内大气降水线为 $\delta D=7.7 \delta^{18}O+10$ ^[21]。根据 H 、 O 同位素值在 $\delta^{18}O-\delta D$ 关系图上落点的位置,可将地下卤水划分为 4 种起源类型:Ⅰ 大气降水起源,Ⅱ 海相沉积水起源,Ⅲ 海相沉积-大气降水混合起源,Ⅳ 海相沉积-岩浆水混合起源^[15]。根据所得样品参数做出四川盆地 $\delta^{18}O-\delta D$ 关系图解,盆地内咸泉、淡泉等样品点均落入盆地大气降水线附近,说明其为大气降水淋滤型

泉水;而卧龙河构造卧 57 井采样分析得 δD 为 -8.5‰ , $\delta^{18}O$ 为 4.2‰ ,在 $\delta^{18}O-\delta D$ 关系图上落入 SMOW 的右下方(图 4),为古海水起源的海相同生沉积水^[22-24]。

(2) 离子系数分析

正常海水中, rNa/rCl 、 $Br \times 10^3/Cl$ 为一对相对稳定的系数,可用其判断地下水的成因。正常海水 rNa/rCl 平均值为 0.85~0.87、 $Br \times 10^3/Cl$ 约为 3.4;当 $rNa/rCl < 0.87$ 、 $Br \times 10^3/Cl > 3.4$ 时,说明卤水为海相沉积水起源;当 rNa/rCl 为 0.87~0.99 或更大、 $Br \times 10^3/Cl < 1$ 时,则为岩盐溶滤型卤水。卧龙河深层卤水 rNa/rCl 平均值为 0.865,与正常海水相近; $Br \times 10^3/Cl=13.57 \sim 16.80 > 3.4$,说明其是经过海水深层的化学成分演化而形成的。除此之外, Br/I 系数平均值为 34.4,远小于正常海水值 1300; Cl/I 系数约为 2570,小于 10^5 。这 2 组比例系数证明,卧龙河构造卤水与沉积水有关^[25]。

3.2 卤水化学成分演化作用

卧龙河储卤构造深层卤水的水化学各组分含量并不完全符合海水蒸发曲线的规律,卤水矿化度不高,部分微量元素却相对富集,超过了单独开采的工业品位。据此推测,地下卤水由古海水蒸发浓缩渐变的过程中经过了深刻的化学成分演化作用^[26]。

古气候对卤水的形成起至关重要的作用,据早、中三叠世古气候资料,当时盆内的平均气温为 $36^\circ C$,有利于古海水的蒸发浓缩作用^[27]。海水浓缩过程中,古海水矿化度不断增大, Br^- 不参与成岩反应,仅少部分以类质同像的形式进入到固体盐中取代 Cl^- 。大部分 Br^- 仍留在溶液中,含量随蒸发浓缩不断上升^[28]。在卤水化学成分演化过程中,由于 I^-

表 3 卧龙河储卤构造卤水的离子比例系数

Table 3 Ionic ratios of the brine in the Wolonghe brine-bearing structure

钻孔 编号	$Br \times 10^3$ Cl	$K \times 10^3$ Cl	K Br	rNa rCl	rNa rK	Ca Sr	$So_4 \times 102$ Cl	rCa rCl	rMg rCl	$B_2O_3 \times 10^3$ Cl
卧 57*		10.63		0.89	91.77	50.39	2.93	0.1205	0.0450	14.64
卧 57	13.57	8.04	0.59	0.87	118.95		3.14	0.1142	0.0389	13.47
卧 16	13.70	9.42	0.69	0.84	98.47		2.34	0.1399	0.0389	7.79
卧 82	13.58	8.60	0.63	0.86	109.90	38.40	2.64	0.1187	0.0367	3.36
卧 24	16.80			0.86			2.97	0.1279	0.0411	16.60
卧 41				0.87			3.44	0.1317	0.0376	6.42

注:*采样时间为 2012 年 3 月 31 日

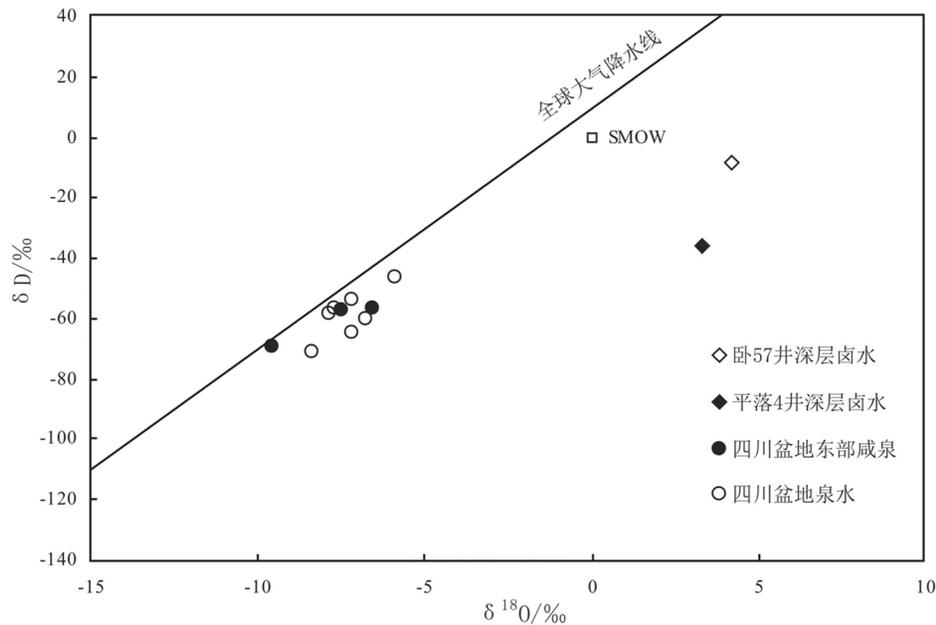
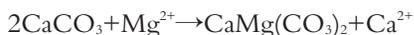


图4 地下卤水 $\delta^{18}\text{O}$ — δD 关系
(四川盆地大气降水平均值 $\delta\text{D}=-57\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-8.7\text{‰}$)
Fig. 4 Plot of $\delta^{18}\text{O}$ — δD of the subsurface brines

在海生生物体内浓集,海相淤泥沉积水中的有机残骸致使卤水中的 I^- 含量偏高^[29]。而 Li^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 的富集,则很有可能是围岩反应的结果。

受到多次海侵、海退循环影响,三叠系下统嘉陵江组岩性以灰岩与硬石膏互层为主,含白云岩,生物灰岩、泥质灰岩。在蒸发岩沉积时,受到地层压力,石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)脱出富含 CaSO_4 且矿化度低的结晶水,形成硬石膏(CaSO_4)。据德国学者博歇特^[30]研究计算,每 1m^3 的石膏脱水可释放出 0.486m^3 的结晶水,这一饱和 CaSO_4 的溶液具有极强的溶解力。释放出的结晶水储集于灰岩中,经后期的构造作用对储层发生影响,形成裂隙发育带。断层破碎带等,增加卤水在储层中的渗透性。原沉积水在渗透、运移过程中,溶滤盐层,改变古海水的化学成分,矿化度升高。与此同时,卤水处于深埋封存条件较好的还原环境中,储层压力达 380 kg/cm^2 左右,使得卤水容易发生脱硫酸作用,而贫 SO_4^{2-} 、富含 H_2S 。蒸发岩沉积阶段,石膏的沉积也会导致 SO_4^{2-} 含量的降低。白云岩的沉积导致卤水富集 Ca^{2+} 、贫 Mg^{2+} ,化学反应式如下:



古沉积水长时期的深埋腹地,封闭条件较好,

在天然条件下处于停滞状态,与大气降水入渗无直接关系。沉积卤水不易迁移,在高温、高压条件下,经历了“封存—运移—深埋—演化”这一复杂漫长的过程,使得卤水矿化度增加,水化学组分改变。

4 结 语

卧龙河构造为四川盆地东部的一个背斜储卤构造,地表断裂不发育,深部断裂复杂。背斜西翼为陡断带,构造多,裂隙发育,对气、水的赋存和储集起着控制性作用。储卤层为 T_2^{2-3} ,岩性以灰岩为主,储集空间为裂隙—孔隙型,卤水分布不均一,钻井产卤的主要是卧57井、卧16井。

地下卤水的矿化度为 $105.67\sim 129.41\text{g/L}$,水化学类型均为 Cl-Na 型, K^+ 不富集,贫 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} , Br^- 、 I^- 、 Sr^{2+} 、 B_2O_3 等微量元素富集,已达到单独开采的工业品位,说明原海相蒸发浓缩卤水在长时间的深埋封闭过程中,与围岩发生化学反应,导致卤水化学组分的改变。同时在卤水运移、渗透过程中,溶滤溶解度较高的矿物,增加卤水矿化度。导致正常海水浓缩阶段的各组分含量存在差异。

地下卤水的同位素 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据点落于正常海水的右下方,说明卤水起源于古海水;化学组分

各离子系数结果也表明,地下卤水起源于古海水的海相同生沉积变质卤水。

卧龙河构造卧57井卤水曾经被开采用来制盐,具有经济利用价值。有资料显示,卧12井卤水KCl含量为13.7g/L,如能采集水样进行水化学分析,并进一步分析该构造地下卤水的储集运移规律,可以对四川盆地东部找钾工作起到促进作用。

致谢:感谢北京市水文地质工程地质大队实验室和核工业北京地质研究院分析测试研究中心人员帮助进行样品测试工作。

参考文献

- [1]杨立中. 论四川盆地地下卤水资源开发利用的现状与对策[J]. 四川地质学报, 1992, 12(3): 227-231.
- [2]郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1523-1552.
- [3]周训. 深层地下卤水的基本特征与资源量分类[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 4-10.
- [4]周训, 姜长龙, 韩佳君, 等. 沉积盆地深层地下卤水资源量评价之若干探讨[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 610-616.
- [5]林耀庭, 姚有成, 康正华. 四川宣达盐盆富钾富矿卤水地球化学特征及资源意义研究[J]. 盐湖研究, 2004, 12(1): 8-18.
- [6]周训, 李慈君. 海水蒸发轨迹线及其应用[J]. 地球科学, 1995, 20(4): 409-414.
- [7]杨立中, 王大纯. 深层地下卤水资源量评价的研究——以四川盆地自贡凹陷邓关储卤构造为例[J]. 地质研究, 1989, (2): 1-115.
- [8]李廷伟, 谭红兵, 樊启顺, 等. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J]. 盐湖研究, 2006, 14(4): 26-32.
- [9]唐泽尧, 杨天泉. 卧龙河气田地质特征[J]. 天然气勘探与开发, 1994, 16(2): 1-12.
- [10]胡安平, 陈汉林, 杨树峰, 等. 卧龙河气田天然气成因及成藏主要控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 643-649.
- [11]童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 50-70.
- [12]陈宗清. 卧龙河气田天然气富集因素解剖[J]. 石油学报, 1990, 11(4): 1-7.
- [13]郭正吾, 邓康岭, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 147-162.
- [14]周训, 金晓媚, 梁四海, 等. 地下水科学专论[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 92-96.
- [15]Zhou X, Li C J, Ju X M, et al. Origin of subsurface brines in the Sichuan Basin [J]. Ground Water, 1997, 35(1): 53-58.
- [16]周训. 四川盆地龙女寺储卤构造深层地下卤水的水文地球化学特征及成因[J]. 现代地质, 1993, 7(1): 83-92.
- [17]Zhou X, Li C J. Hydrogeochemistry of deep formation brines in the central Sichuan Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 138(1): 1-15.
- [18]陈郁华. 黄海水 25℃ 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. 地质学报, 1983, 57(4): 379-390.
- [19]樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 601-611.
- [20]林耀庭, 潘尊仁. 四川盆地气田卤水浓度及成因分类研究[J]. 盐湖研究, 2001, 9(3): 1-6.
- [21]林耀庭, 熊淑君, 宋鹤彬. 氢氧同位素习性及其在四川盆地卤水成因分类的研究[J]. 四川地质学报, 2001, 21(3): 153-158.
- [22]Land L S, Macpherson G L. Origin of saline formation waters, Cenozoic section, Gulf of Mexico Sedimentary Basin[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(9): 1344-1362.
- [23]Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 1974, 69(6): 843-883.
- [24]周训, 胡伏生, 何江涛, 等. 地下水科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 99-100.
- [25]韩佳君, 周训, 姜长龙, 等. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及其起源演化[J]. 现代地质, 2013, 27(6): 1454-1464.
- [26]地质矿产部水文地质工程地质研究所. 深层卤水形成问题及其研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 86-126.
- [27]高小芬, 林晓, 张智勇, 等. 青藏高原第四纪钾盐矿时空分布特征及成矿控制因素[J]. 地质通报, 2013, 32(1): 186-194.
- [28]李善平, 马海州, 陈有顺, 等. 老拐万象盆地钾盐矿床微量元素地球化学特征及矿床的成因[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 760-770.
- [29]李学礼, 孙占学, 刘金辉. 水文地球化学(第三版)[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 22-23.
- [30]博歇特 H, 缪尔 R O, 著. 袁见齐, 张瑞锡, 张昌明, 译. 盐类矿床: 蒸发岩的成因、变质和变形[M]. 北京: 地质出版社, 1976: 36-95.
- ①李慈君, 杨立中, 周训, 等. 四川盆地深层地下卤水资源量评价及其方法的研究. 中国地质大学(北京)水文地质工程地质系, 1990: 82-90.
- ②徐廷谅, 徐恩孝, 舒建平, 等. 四川盆地卤水水文地球化学特征及富集规律研究. 地矿部第二地质大队, 1989: 62-64.