

湖北潜江凹陷北部古近系孔隙卤水矿床特征及成因

付路路¹, 刘成林², 王青春¹, 赵艳军², 王春连², 余小灿³

(1. 河北地质大学,河北石家庄 050031;2. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037;3. 中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:深层卤水是我国重要的液体矿产资源,其中含有钾、锂、铷、铯、溴、碘、硼等高价值元素,具有广阔的综合利用开发前景。通过研究江汉盆地潜江凹陷北部地区潜江组卤水矿床的储层以及水化学特征,对该地区卤水成因及其成藏条件进行了分析。深层卤水赋存于潜江凹陷古近系潜江组砂岩中,水化学类型以硫酸钠亚型为主,其次为碳酸盐型、氯化钙型和硫酸镁亚型。总矿化度在221.3~323.5 g/L之间,平均值为274.08 g/L,酸碱度为4.5~6.5。潜江组卤水浓缩程度不高,变质程度低,体系较为开放。结合卤水矿床的水化学和储层特征,盆地卤水来源主要有火山—地热水的补给、基性火山岩的水—岩反应和蒸发岩的地下溶解。位于潜江凹陷北缘的钟西地区砂岩厚度大,具有巨大的储集空间,在构造—岩相作用下可能储藏了来自潜江凹陷南部古盐湖的卤水,因此潜江凹陷北部钟西地区砂岩具有较好的成藏条件。

关键词:潜江组;卤水;矿床特征;成因

中图分类号:P641.5

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2018)01-0015-10

引言

深层卤水作为重要的液体矿产资源,因同时富含钾、锂、铷、铯、溴、碘、硼及重金属铅锌铜等多种有用元素,具有重要的综合利用开发价值,而受到关注和重视。江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组地层蕴藏着丰富的卤水资源,是中国东部裂谷系中典型的富“钾锂铷铯溴碘硼”复合卤水矿床^[1-2]。黄华等^[3]对潜江组卤水矿床进行了综合利用评价,卤水中溴、锂等达到了单独开采的工业品位,溴、碘、硼等达到了综合利用价值,展示了良好的经济效益。潜江凹陷卤水矿床主要位于其南部地区,而北部地区发育有厚层的砂岩,是否具有卤水储藏条件尚不清楚。因此,本文通过重点研究潜江凹陷北部地区卤水矿床水化学和储层展布等特征,讨论了其成因,并对其资源成藏条件行了分析,期望为该区卤水资源综合开发利用提供科学依据。

1 区域地质概况

潜江凹陷是一个受北东向正断层控制的双断箕状凹陷,位于江汉盆地中部,是江汉盆地内基底埋藏最深、沉降速度最快的凹陷。潜江组沉积时期是盆地的沉降及汇水中心,在封闭、强蒸发环境下,成为了盆地的浓缩及成盐中心,沉积了巨厚的盐系地层,形成了具有独特沉积充填特征的潜江组蒸发岩系,总体表现为一长轴西向,北深南浅,中间厚东西两侧薄的展布特征,是目前江汉盆地发现油气最多的层系,也是江汉盆地最重要的含油气层系。构造上总体表现为“一洼两斜坡”的基本格局,具有明显的断拗构造特征,根据构造位置可分为4个次级构造单元:潜北断裂带(钟市—潭口—代河)、西部斜坡带(习家口)、东部斜坡带(泽口)、蚌湖洼陷及南部区域(浩口—高场—周矶—熊口)^[4-5]。潜江组含盐层系厚4 500 m,以油、盐、卤等多种矿产共生为特征。根据地层岩性分布特征从上到下可划分为潜一段、

收稿日期:2017-05-25;修回日期:2017-06-10

基金项目:中国地质科学院基本科研业务费项目(YYWF201607);中国地质大调查项目(12120114051901)

作者简介:付路路(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。Email:flulu108@163.com。

潜二段、潜三段、潜四段，盐系地层以岩盐、泥膏岩、暗色泥岩及砂岩为主，盐韵律异常发育。纵向上砂岩、泥岩和岩盐频繁互层，平面上受北部单向物源影响，砂岩成半环状偏于凹陷西北部，南部则以蒸发岩为主^[6]。

研究区位于潜江凹陷北部（图 1），包括长湖和习家口块段及钟西块段两个地区。习家口块段位于潜江凹陷西斜坡，蚌湖生油深洼陷以西，含习一、习二两个区块，具断层封闭的鼻状构造^[7]。钟西地区位于钟市西部，地处潜江凹陷潜北断裂带中段，乐乡关地垒前缘，是由单一潜北主断层所控制而形成的高陡构造带，最大断距大于

8 000 m，具有单条犁型深大断裂的特点，整体上表现为一继承性鼻状构造^[8]。该地区东、南、西方向分别为潭口、蚌湖、借粮湖，处于盐湖陡坡近岸浅水地带，主要发育盐湖陡坡三角洲和沿岸滩坝沉积^[5,9]。潜江组主要为一套含盐系地层，由蒸发岩和碎屑岩组成。潜四段沉积时期，钟市地区受到来自乐乡关地垒的物源补给，形成了小型的朵状盐湖陡坡三角洲，砂岩厚度薄，分布面积小。潜三段和潜二段沉积时期，有多个方向的物源补给，发育盐湖陡坡三角洲和沿岸滩坝沉积，砂体厚度大，分布面积广（图 1）。

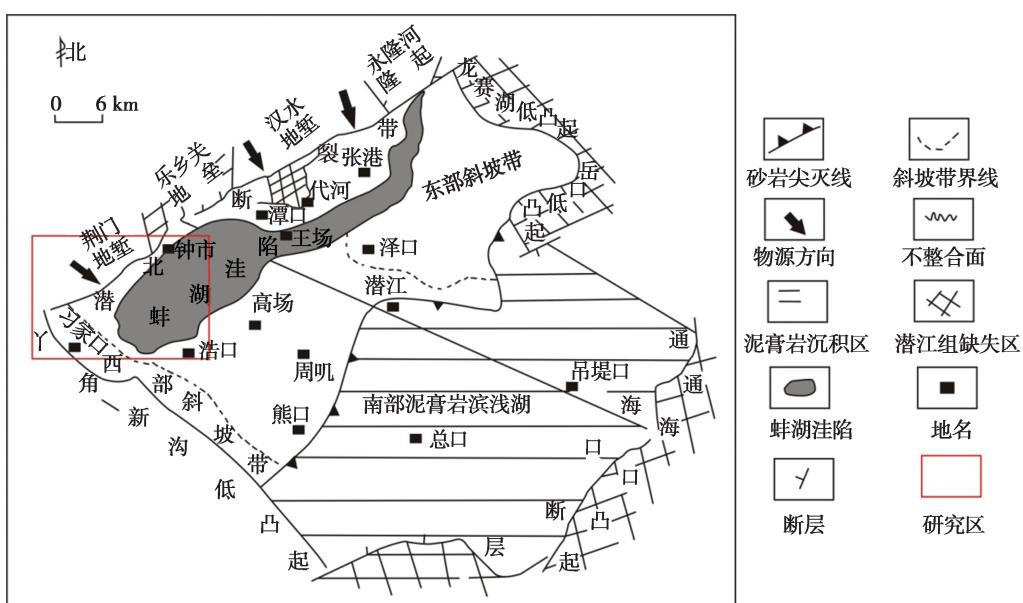


图 1 潜江凹陷构造单元^[4]
Fig. 1 Structural unit of Qianjiang depression

2 卤水储层特征

2.1 卤水储层的类型

钟西地区位于潜江凹陷北部，盐湖陡坡浅水地带，在物源、古气候、构造等因素控制下，发育冲积扇、三角洲和滨浅湖沉积体系，沉积了碎屑岩和碳酸盐岩。碳酸盐岩中的卤水矿化度高，但是其渗流能力差，水量低，无开采价值。砂岩由于其储集物性好，是该区卤水的赋存体。钟西地区卤水矿床主要岩性为细砂岩，储层类型为孔隙型。通

过研究区内少量钻孔数据及油气田勘探开发中相邻区块储层物性资料的分析，对钟西、长湖和习家口块段潜一段～潜四段储层的孔隙度进行了统计。长湖和习家口块段储层孔隙度平均值分别为 24.69%（潜一段）、21.60%（潜二段）、22.09%（潜三段）、20.04%（潜四段）；钟西块段储层孔隙度平均值分别为 23.75%（潜一段）、20.85%（潜二段）、18.75%（潜三段）、15.88%（潜四段）。

2.2 储层的空间分布特征

潜江凹陷在经过荆沙组抬升遭受剥蚀以后整体下沉，沉积了潜四下段地层，这是一个大的构造

旋回以及沉积旋回的开始,从潜四下段沉积早期—荆河镇组沉积末期为一个完整的旋回。其中,潜四下段在其沉积早期为断陷期,由于潜北断层、蚌湖断层和通海口断层的强烈活动,控制了地层的沉积,其前缘地层明显加厚,剖面上在断层前缘形成明显的楔形,平面上则在潜北断层和通海口断层前缘形成局部深洼。潜四下段晚期进入断拗期,在荆河镇组沉积末期,盆地整体隆升,遭受剥蚀。处于中段的钟市地区为单一潜北主断层所控制形成的高陡构造带,区带位于潜北断裂带前缘,为一向北抬升的断鼻,发育有断层—岩性、构—岩性、物性变化等类型的岩性圈闭,以断层—

岩性、构造—岩性圈闭为主,各个层组岩性圈闭都极为发育^[10]。潜四上段~潜三段沉积时期,断裂活动明显减弱或停滞,潜江凹陷从强烈断陷转入稳定的拗陷期,随着蚌湖沉积中心的持续沉降,钟市斜坡持续隆升;至潜二段末期,受区域拉张活动的影响,潜江组巨厚岩盐及软泥地层塑性流动加强,使得钟市斜坡进一步隆升;荆河镇组沉积末期,受区域构造挤压运动影响,鼻状构造整体抬升,在广华寺组沉积时期定型^[11]。整体上表现为一继承性鼻状构造,潜四下段到广华寺组,钟市地区持续隆升,且构造由西向东、由南向北逐渐抬升^[6](图2)。

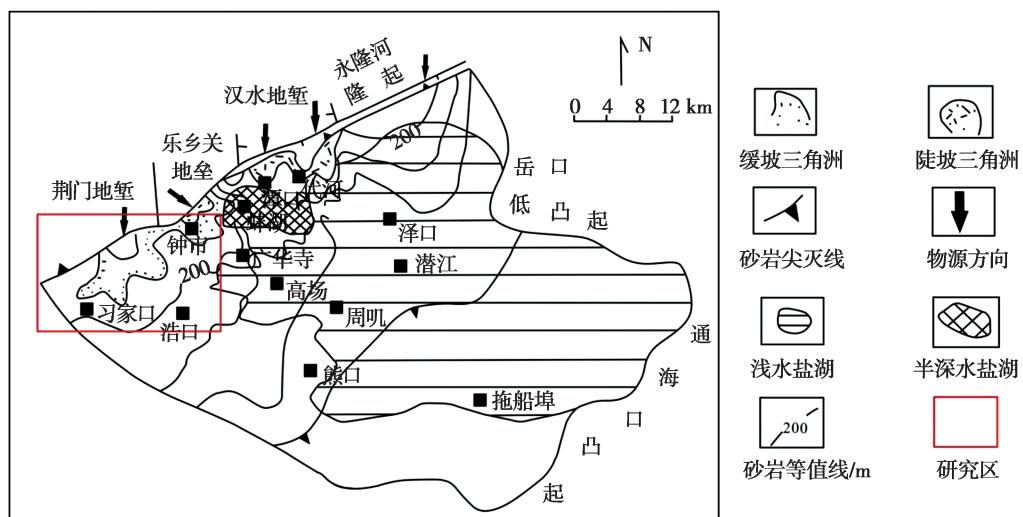


图2 潜江凹陷潜江组沉积相图^[6]

Fig. 2 Sedimentary facies map of Qianjiang formation in Qianjiang depression

砂体的空间展布特征直接决定了卤水矿的分布。潜江凹陷潜江组在干湿频繁交替的古气候条件下,受北部单向物源的控制以及北低南高的古地形的影响,在盐湖背景下,砂岩自北而南减薄,至凹陷中南部全部尖灭,呈现出“半盆砂”的特点^[8]。其卤水储集砂体平面分布表现为,北区的长湖区、钟西区、习家口区、浩口区、钟潭区,东区的渔薪区矿体最发育,分布的卤水层组最多;周矶区、潜江区和王黄区矿体发育程度最差,分布的卤水层组最少,包括了蚌湖、王场和周矶等继承性向斜的区块,以及远离物源的南部区块,矿体的发育程度都较差。因此,储集砂体发育好是潜江凹陷北部的重要特征^[8]。从潜北断层南部16口钻井潜江组砂岩储层的统计情况来看,长湖和习家

口区域潜江组储层埋深623.6~1 414.6 m,平均厚度约650 m;钟西区域潜江组储层埋深803~2 077.2 m,平均厚度911.8 m。钟西区域储层的单层厚度优于长湖和习家口,其0~2 m厚的储层所占比例为57%,2~5 m为32%。储卤层砂体的总厚度和单层厚度,以钟西区域最佳(图3)。

3 卤水化学特征

3.1 水化学总体特征

潜江凹陷潜江组从浅部到深部共划分了4个层组,江汉油田测试中心分析了潜江凹陷北部习家口、钟市、潭口、代河及张港地区多口井样品各

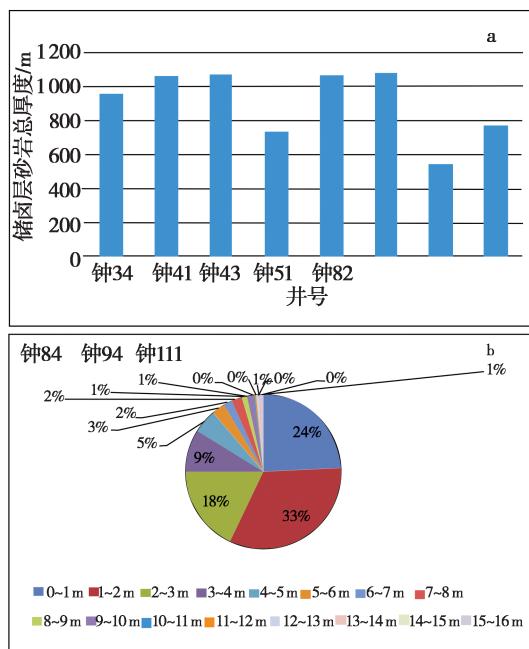


图 3 钟西地区储卤层砂体总厚(a)及单层厚度(b)统计图

Fig. 3 Statistic diagrams of total thickness (a) and single layer thickness (b) of the reservoir sandstone in Zhongxi area

亚层卤水的化学成分。卤水中常量元素分析了钾、钠、钙、镁、氯根、硫酸根、碳酸根以及重碳酸根,微量元素分析了锂、溴、硼和碘共 4 种元素(表 1)。卤水矿化度普遍较高,总矿化度在 221.3 ~ 323.5 g/L 之间,平均值为 274.08 g/L; pH 为 4.5 ~ 6.5。

3.2 水化学特征类型

从水化学分析结果看,潜江凹陷潜江组卤水常量离子中,Na⁺、Cl⁻占据了绝对优势,SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻含量较低。根据瓦里亚什科的化学分类^[12],水化学类型大部分属于硫酸钠亚型,其次是碳酸盐型和氯化物型,含少量硫酸镁亚型。

3.3 元素地球化学特征

盐类矿床指以钠、钾、镁的氯化物、硫酸盐、碳酸盐、硼酸和硝酸盐为主要成分的单元或复合盐集合体所构成的工业矿体^[13],因此分析测试常量离子成分 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻和微量元素 Li⁺、I⁻、Br⁻、B³⁺。

就 K⁺ 的绝对含量而言,潜江组浅部卤水 K⁺ 浓度降低,在 0.77 ~ 1.73 g/L;随着深度的增加,K⁺ 浓度增大,达到了 1.51 ~ 3.60 g/L。根据《中华人民共和国地质矿产行业标准盐湖和盐类矿产地质勘查规范》(DZ/T0212 - 2002),并参考《矿产资源工业要求手册》(2014 年修订版)的相关内容,开采卤水的 KCl 边界品位为 0.3% ~ 0.5%,最低工业品位为 0.5% ~ 1.0%。浅部卤水 K⁺ 浓度折合成 KCl 在 0.15% ~ 0.35% 之间,接近或达到了边界品位;深部卤水 K⁺ 浓度折合成 KCl 达到了 0.29% ~ 0.69%,达到了边界品位,高者已经达到了最低工业品位。

Li 元素为中等不相容元素,具有较强的流体活动性^[14],对于沉积环境和各种地质作用具有明显的指示意义。Li⁺ 的综合利用工业品位为 24.6 mg/L,单独开采工业品位为 49.1 mg/L,潜江凹陷 Li⁺ 浓度为 22.5 ~ 92.1 mg/L,平均含量 61.46 mg/L,与矿化度成正相关。

B 是易溶元素,广泛存在于与岩石相互作用的流体中。B³⁺ 的综合利用工业品位为 124 mg/L,单独开采工业品位为 310 mg/L,潜江凹陷 B³⁺ 浓度为 42.61 ~ 930 mg/L,平均含量 196.67 mg/L。

据曾昭华等^[15],Br 元素以分散的形式存在于自然界中,一般不单独成矿,易于与金属和碱土金属形成稳定的络合物。随着卤水的不断浓缩,主要富集在残留液中,一部分 Br⁻ 置换氯化物盐类矿物中的 Cl⁻,并且置换量与残留液中的 Br⁻ 含量成正比。卤水中 Br⁻ 含量越高,说明卤水浓缩程度越高^[12]。Br⁻ 的综合利用工业品位为 60 mg/L,单独开采工业品位为 200 mg/L,潜江凹陷 Br⁻ 浓度为 141.8 ~ 536.5 mg/L,平均含量 329.61 mg/L。

总体上看,潜江凹陷卤水具有成矿元素多,含量高的特点。卤水中 Li⁺、Br⁻、B³⁺ 含量较高,I⁻ 含量较低,且随着深度的增加其含量相对增加,Li⁺、B³⁺、I⁻ 的变化趋势整体上与 Br⁻ 的变化相当。Li、B、Br、I 有益组分的富集不仅与裂谷盆地中深部补给有关^[2],而且还经历了漫长地质演化过程中的沉积、深埋、变质等阶段,使水化学组成朝着高矿化度方向发展,各离子含量增高(图 4)。

表1 潜江凹陷潜江组卤水化学成分特征
Table 1 Chemical compositions of Qianjiang formation in Qianjiang depression

层组	卤水 亚层	K ⁺ $/(g \cdot L^{-1})$	Na ⁺ $/(g \cdot L^{-1})$	Ca ²⁺ $/(g \cdot L^{-1})$	Mg ²⁺ $/(g \cdot L^{-1})$	Cl ⁻ $/(g \cdot L^{-1})$	SO ₄ ²⁻ $/(g \cdot L^{-1})$	CO ₃ ²⁻ $/(g \cdot L^{-1})$	HCO ₃ ⁻ $/(g \cdot L^{-1})$	Li ⁺ $/(mg \cdot L^{-1})$	I ⁻ $/(mg \cdot L^{-1})$	Br ⁻ $/(mg \cdot L^{-1})$	B ³⁺ $/(mg \cdot L^{-1})$	pH 值 $/(g \cdot L^{-1})$	总矿化度 $/(g \cdot L^{-1})$	卤水类型 (瓦里亚什科)
一	1	1.04	116.76	0.15	0.06	161.02	27.12	0.12	0.64	4.61	216.3	5.8	306.13	碳酸盐型		
—	2	0.92	110.5	0.43	0.09	166.18	9.38	0.43	47.5	11.8	536.5	73.8	5.8	288.5	硫酸钠亚型	
—	3	0.82	108	0.37	0.06	159.32	12.87	0.67	60	10.38	268.7	85	5	281.1	硫酸钠亚型	
—	4	0.84	85.4	0.13	0.04	125.72	8.76	0.11	0.95	49	6.85	256.6	136.7	6.5	221.3	碳酸盐型
—	5	1.54	102.92	0.7	0.16	154.86	8.79	0.03	0.65	48.03	9.5	378.1	124.3	5.6	269.7	硫酸钠亚型
—	6	0.77	95.37	0.35	0.17	141.74	9.65	0.77	59.8	11.02	258.5	104.7	5.8	249.33	硫酸钠亚型	
—	7	1.67	110.68	0.55	0.14	163.12	12.23	0.17	1.16	61	10.18	394.5	168.63	6	289.73	硫酸钠亚型
—	8	1.73	113.31	0.53	0.12	167.87	12.54	1.1	61.15	11.78	369.8	144.13	5.5	297.16	硫酸钠亚型	
—	9	1.91	106.46	1.03	0.22	164.6	4.47	0.7	79.79	13.64	443.8	203.39	5.3	279.36	硫酸钠亚型	
—	10	1.99	112.66	2.74	0.48	177.25	4.3	1.26	77.9	13.99	408.4	163	5.9	300.68	氯化物型	
—	11	1.53	118.75	0.22	0.09	167.15	22.48	2.44	54	6.95	141.8	84.2	6	212.67	碳酸盐型	
—	12	2.71	121.83	2.62	0.39	194.16	1.91	0.94	66.7	16	354.8	253.48	4.5	323.5	硫酸镁亚型	
—	13	0.66	88.99	0.51	0.16	133.39	7.92	0.44	60.88	11.21	265.88	111.83	5	232.23	硫酸钠亚型	
四	14	0.4	92.07	0.4	0.1	139.85	4.69	0.45	22.5	10.48	261.87	42.61	6.5	237.96	硫酸钠亚型	
四	15	2.34	110.26	0.75	0.09	170.78	11.71	0.09	0.51	81.6	12.43	300.1	203	5.9	300.93	硫酸钠亚型
四	16	2.18	108.09	0.2	0.06	166.4	3.33	0.11	1.58	92.1	13.46	413.1	930	6.4	281.93	碳酸盐型
—	17	3.6	107.12	1.87	0.37	171	2.64	0.03	0.46	61.36	14.36	334.7	317.8	5.3	287.11	硫酸镁亚型

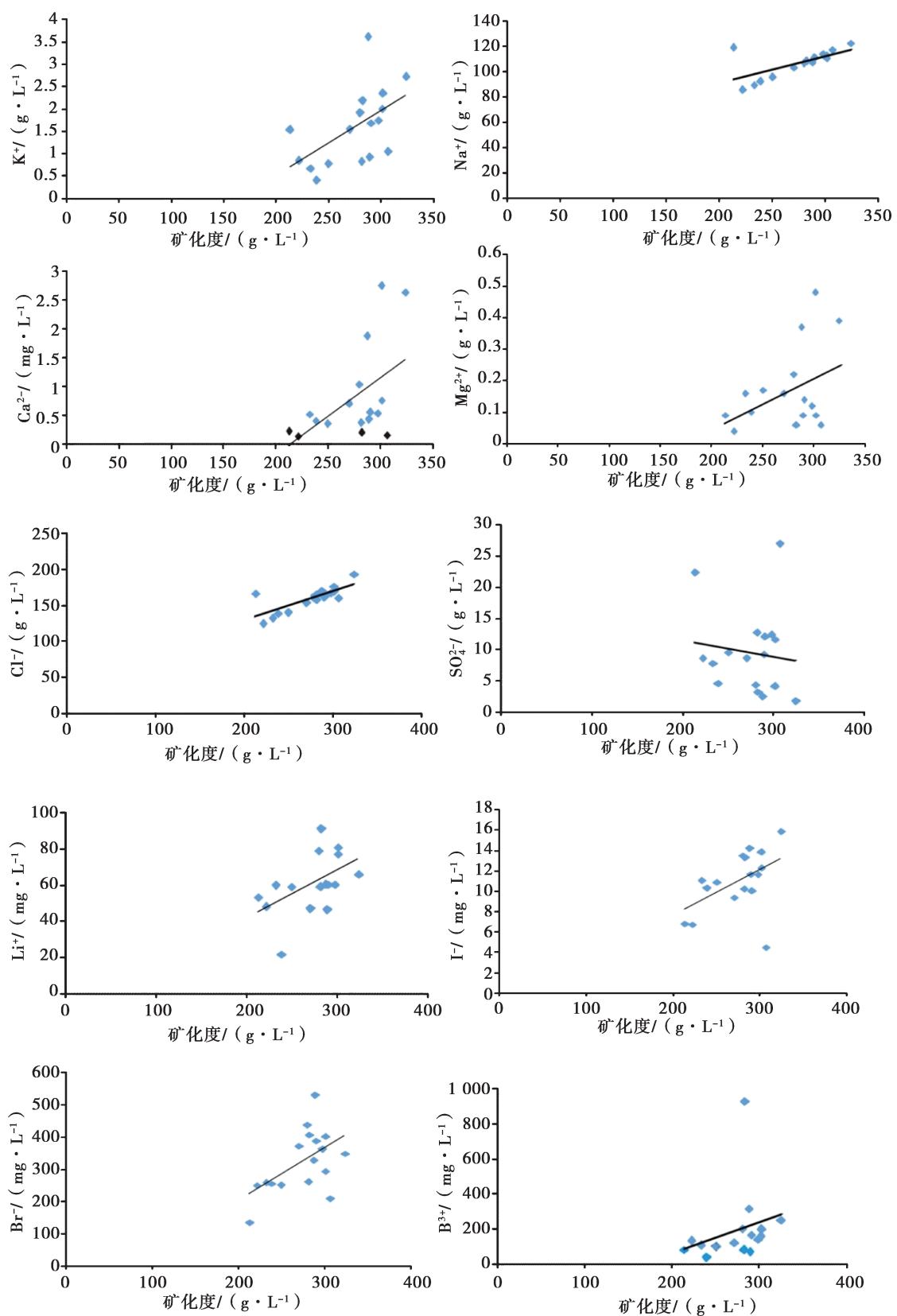


图 4 潜江凹陷卤水矿化度与离子含量相关性分析图

Fig. 4 Correlation analysis of total salinity and ion content of brine in Qianjiang depression

3.4 特征系数

在卤水水化学特征研究中,常用到钠氯系数、

溴氯系数、脱硫系数和钙镁系数等,本文研究了潜江组卤水的特征系数,分析结果见表2。

表2 潜江凹陷潜江组卤水特征系数

Table 2 Ion ratios of Qianjiang formation in Qianjiang depression

卤水层组	卤水亚层	钠氯系数	Br/Cl 系数	K/Br 系数	钾氯系数	脱硫系数	钙镁系数
一	1	1.12	1.34	4.81	6.46	3.11	1.50
	2	1.03	3.23	1.71	5.54	1.04	2.87
	3	1.05	1.69	3.05	5.15	1.49	3.70
	4	1.05	2.04	3.27	6.68	1.29	1.95
二	5	1.03	2.44	4.07	9.94	1.05	2.63
	6	1.04	1.82	2.98	5.43	1.26	1.24
	7	1.05	2.42	4.23	10.24	1.39	2.36
	8	1.04	2.20	4.68	10.31	1.38	2.65
三	9	1.00	2.70	4.30	11.60	0.50	2.81
	10	0.98	2.30	4.87	11.23	0.45	3.43
	11	1.10	0.85	10.79	9.15	2.49	1.47
	12	0.97	1.83	7.64	13.96	0.18	4.03
四	13	1.03	1.99	2.48	4.95	1.10	1.91
	14	1.02	1.87	1.53	2.86	0.62	2.40
	15	1.00	1.76	7.80	13.70	1.27	5.00
	16	1.00	2.48	5.28	13.10	0.37	2.00
	17	0.97	1.96	10.76	21.05	0.29	3.03

钠氯系数表示地下卤水中钠盐的富集程度,正常海水的钠氯系数为0.87,正常地下卤水该值应小于0.87,溶滤卤水此系数大于或接近于1。潜江凹陷潜江组卤水钠氯系数绝大多数接近于1,少数低于0.87。

在盐类矿物蒸发结晶时,溴进入固体矿物的量相当少,遗留在溶液中的量较多,且越浓缩越多。正常海水溴氯系数为3.4左右,而溶滤卤水的溴氯系数通常较低。潜江组卤水此系数为0.85~3.23,集中在2左右,低于3.4。

钙镁系数和脱硫系数反映了地层水的变质程度和封闭性。变质程度越高,钙镁系数越高,而脱硫系数越低。深层水的钙镁系数一般大于3,潜江组卤水钙镁系数大多数小于3,个别大于3;而脱硫系数较大,大多接近1。

钾氯系数和钾溴系数可以反映钾的富集和地下卤水的浓缩程度。据陈郁华^[16]黄海蒸发实验,石盐沉积阶段钾氯系数和钾溴系数分别为47.90和12.02。潜江组卤水钾氯系数和钾溴系数值均较低。

从上述卤水的钠氯、溴氯和钾氯等系数特征可以看出,潜江凹陷潜江组卤水形成时体系较为开放,浓缩和变质程度低,可能有来自早期岩盐地层溶滤的补给。

4 北部砂岩卤水起源与成藏

4.1 卤水成因分析

对沉积盆地中的卤水的来源通常认为主要有

两种机制,其一是表层水的蒸发作用产生的埋藏卤水或蒸发卤水(原生卤水);其二是盐类矿物的地下溶解和原生卤水的稀释(次生卤水)^[1,17~21]。另外,深源卤水补给也是来源之一^[1,22]。水—岩反应与深层卤水成因有密切联系^[23~26]。

在研究区构造和岩相的研究基础上,综合卤水矿床的水化学和储层特征研究,推测研究区沉积卤水的物质来源主要有以下几方面。

1) 火山—地热水的补给

潜江凹陷是一个中新生代的断陷盆地,由洼陷、斜坡带、底凸起和断裂构造带组成,断裂极为发育。受潜北断裂的控制,由南向北盆地基底沉降变大,地层厚度越来越大。在盆地西北缘发育大量的火山活动,而火山活动形成的地热水中富含丰富的 Li、B、Rb、Cs 等元素。潜江组沉积时期盆地北部地势低,而火山—地热水中的 K、B、Li 等均可汇集到盆地北缘,进入砂岩中储存,例如青藏高原的西藏盐湖就是深部火山—热液的补给而富集成矿的^[27]。潜江组卤水中丰富的 Li 和 B 元素可能就有这种方式的补给。

2) 基性火山岩的水—岩反应

江汉盆地火山岩分布广泛,其总面积为 5 049 km²,占盆地面积的 18%,岩石中含有较丰富的钾、锂、硼、锶等元素^[1]。岩石经过风化、淋滤等作用,溶于地表水、地下水而汇入盆地,有用组分得以富集^[28]。从水化学特征分析,潜江凹陷潜江组的卤水多富 Ca²⁺ 而贫 Mg²⁺,主要是由于地下深部发生的石膏溶解、长石酸性淋滤和白云石化等水—岩反应的影响。

3) 蒸发岩的地下溶解

盐湖沉积环境中卤水具有高的矿化度,早期岩盐的溶解是其主要的原因^[29]。江汉盆地沙市组和潜江组为盐湖沉积,分布有大量的蒸发岩,可以通过地下水的垂向运移至砂岩地层中。潜江组深部卤水中大于或接近于 1 的钠氯系数就是岩盐溶解的结果。

潜江凹陷潜江含盐系盐类矿物组合以钙芒硝、钠镁钒、白钠镁钒、钾芒硝、钾石膏、杂卤石、石盐等为主^[30],可以看出原始古湖水应为硫酸钠亚型,这与卤水的水化学类型以硫酸钠亚型为主相一致。而碳酸盐型卤水中明显的 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 含量,为典型的大气降水特征,应来自凹陷北部大

气降水补给把原始卤水改造为碳酸盐型。而氯化钙型卤水呈现出富 Ca²⁺、贫 SO₄²⁻ 及富含多种微量元素的特点,这与深埋变质作用有关。该类型的卤水通常来自深部的补给,沿着断裂带向上运移^[1,22]。

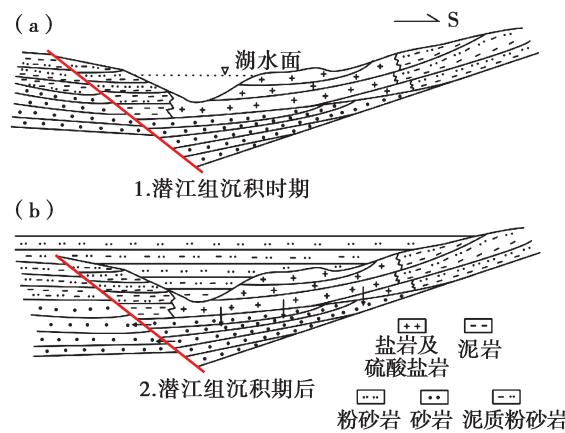


图 5 潜江凹陷北部卤水成藏模式图

Fig. 5 Reservoir model of brine formation in the north of Qianjiang depression

4.2 卤水成藏条件分析

据刘成林^[1]研究成果,裂谷成钾过程可分解为“两个阶段”以及“三个成钾作用”过程。“两个阶段”:第一阶段,地表盐湖太阳能作用阶段;第二阶段,埋藏—岩浆热能作用阶段。“三个成钾作用过程”:第一是蒸发沉积,第二是沉积淋滤,第三是变质—改造。在上述构造—物源—气候耦合作用下,未蒸发浓缩演化至钾盐矿物析出的盐湖富钾卤水,在沉积晚期及埋藏时期,沉积环境从地表太阳能驱动转为岩浆热能驱动,带来了丰富的地下深部补给源,从而使深部卤水富集各种微量元素。

潜江凹陷潜江组沉积时期,盐湖卤水不断蒸发浓缩,形成富钾卤水(图 5a)。沉积晚期在构造作用下盆地下沉被埋藏,同时岩浆作用活跃,为其带来了大量成矿物质,使其富集各种微量元素。在上覆地层压实作用下,卤水沿张性断裂向下运移至砂岩中储藏(图 5b)。在埋藏后期,随着埋深的不断增加,压实作用不断增强,卤水沿断裂侧向运移至盆地北部厚层的砂岩中储存(图 5b)。

5 结 论

1) 潜江凹陷卤水资源丰富,潜江组从上到下划分了4个卤水层组,矿化度较高,富集Li、B、Br元素,I和K也达到了综合利用品位,有很大的开发利用前景。

2) 潜江凹陷潜江组卤水溴氯系数、钾氯系数和钾溴系数较低,反映了其浓缩程度较低。钙镁系数低而脱硫系数大,说明当时体系较为开放,变质程度较低。

3) 在盆地构造条件等研究的基础上,结合卤水矿床的水化学和储层特征分析得出,盆地卤水主要来自火山—地热水的补给、基性火山岩的水—岩反应和蒸发岩的地下溶解。

4) 潜江凹陷潜江组沉积时期,卤水不断蒸发形成富钾卤水,在后期埋藏阶段向下运移至底部砂岩中储存,随着压实作用增强,会在断裂系统耦合作用下侧向运移至北部砂岩中,凹陷北部具有很好的成藏条件。

参考文献:

- [1] 刘成林. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. 地球学报, 2013, 34(5):515–527.
- [2] 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 等. 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探[J]. 矿床地质, 2016, 35(6): 1119–1143.
- [3] 黄华, 张士万, 张连元. 潜江凹陷潜江组深层卤水矿床特征与资源评价[J]. 盐湖研究, 2015, 23(2):34–43.
- [4] 詹治萍, 杨香华, 潘知峰, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜三段古地貌与砂体成因分析[J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 405–412.
- [5] 卢林. 潜江凹陷古近纪沉积构造发育演化及其对潜江期沉积体系的控制[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2005.
- [6] 胡辉. 江汉盆地潜江凹陷岩性油藏形成条件及分布规律研究[J]. 地质力学学报, 2005, 11(1):67–73.
- [7] 张建荣, 秦雪辉. 习家口复杂断块油藏高含水期剩余油挖潜技术[J]. 江汉石油职工大学学报, 2007, 20(4):11–13.
- [8] 钱会. 潜江凹陷潜江组沉积体系与岩性圈闭预测[D]. 荆州:长江大学, 2010.
- [9] 贺其川, 姚凤英. 钟市地区潜江组沉积微相研究[J]. 江汉石油科技, 1996, 6(1):8–22.
- [10] 郑有恒. 江汉盆地潜江凹陷潜江组岩性油藏勘探方向及对策[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4):330–333.
- [11] 张亮. 潜江凹陷钟市地区油气成藏特征及成藏模式[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4):69–72.
- [12] 瓦里亚什科. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 范立, 译. 北京:中国工业出版社, 1965, 30–57.
- [13] 韩有松, 孟广兰, 王少青, 等. 中国北方第四级沿海地下水卤水[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [14] 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 锂同位素分馏机制讨论[J]. 地球科学, 2009, 34(1):43–55.
- [15] 曾昭华, 曾雪萍. 地下水中溴的形成及其与人群健康的关系[J]. 吉林地质, 2001, 20(1):57–60.
- [16] Hardie L A. On the significance of evaporites[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 1991, 19:131–168.
- [17] Matray J M, Fontes J C. Origin of the oil-field brines in the Paris basin[J]. Geology, 1990, 18: 501–504.
- [18] Hanor J S. Origin of saline fluids in sedimentary basins[J]. Geological Society London Special Publications, 1994, 78: 151–174.
- [19] Kloppmann W, Négrel P, Casanova J, et al. Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German Basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(22): 4087–4101.
- [20] Birkle P, García B M, Padrón C M M. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24:543–554.
- [21] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 796–802.
- [22] 曲懿华. 钾盐矿床母液来源的新途径—深卤补给[J]. 矿物岩石, 1982, 1: 7–14.
- [23] Frape S K, Fritz P, McNutt R H. The role of water-rock interaction in the chemical evolution of groundwaters from the Canadian Shield[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48: 1617–1627.
- [24] Bottomley D J, Katz A, Chan L H, et al. The origin and evolution of Canadian Shield brines: Evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave craton[J]. Chemical Geology, 1999, 155: 295–320.
- [25] Bottomley D J, Chan L H, Katz A, et al. Lithium isotope geochemistry and origin of Canadian Shield brines[J]. Groundwater, 2003, 41:847–856.
- [26] Khaska M, Salle C L G L, Videau G, et al. Deep water circulation at the northern Pyrenean thrust: Implication of high temperature water-rock interaction process on the mineralization of major spring water in an overthrust area[J]. Chemical Geology, 2015, 419:114–131.
- [27] 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1709–1715.
- [28] 杨谦. 柴达木盆地钾盐形成条件及盐类聚集过程, 青海柴达木盆地晚生代地质环境演化[M]. 北京:科学出版社,

- 1986.
- [29] 李武,程向锦,吴传芝,等.油田水地球化学技术综合应用研究进展[J].物探与化探,2003,27(6):416-422.
- [30] 吴必豪,祁左明,王彌力,等.1980.湖北 Q 盆地含盐系地球化学的研究[J].地质学报,1980,(4):324-334.

Deposit Characteristics and Origin of Paleogene Brine in the Qianjiang Formation of Qianjiang Depression

FU Lu-lu¹, LIU Cheng-lin², WANG Qing-chun¹, ZHAO Yan-jun², WANG Chun-lian², YU Xiao-can³

(1. Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083)

Abstract: Deep brine, containing high value elements such as potassium, lithium, rubidium, cesium, bromine, iodine and boron, is an important liquid mineral resource in China. It has broad prospects for comprehensive utilization. In this paper, the origin and reservoir forming condition of the brine are analyzed by studying the distributing feature of the reservoir and hydrochemical characteristics of the brine in the Qianjiang formation in the north of Qianjiang depression. Deep brine deposits in the sandstone in the Qianjiang formation of Qianjiang depression. The water chemistry type is dominated by sodium sulfate subtype, followed by calcium chloride, carbonate and magnesium sulfate. The total salinity is from 221.3 to 323.50 g/L, averaging at 274.08 g/L, and the pH is from 4.5 to 6.5. Concentration degree of Qianjiang formation brine is not high with low degree of metamorphism, and the system is more open. Combined with the hydrochemical and reservoir characteristics of the brine deposits, the basin brine sources should be from magmatic hydrothermal water recharge, basic-volcanic water-rock reaction and underground dissolution of the evaporite. The sandstone thickness in the Zhongxi area of the Qianjiang depression is large and has a huge reservoir space, and the brine deposits from the ancient salt lakes in the southern part of the Qianjiang depression are stored under the tectonic-facies action. Therefore, there is a good reservoir-forming condition in the sandstone of the Zhongxi area, northern Qianjiang depression.

Key words: Qianjiang formation; Brine; Deposit characteristics; Origin

封面图片:茶卡盐湖

茶卡盐湖位于柴达木盆地乌兰县境内,地理坐标 N 36°18' ~ 36°45', E 99°02' ~ 99°12',湖面海拔 3 059 m,面积 154 km²;气候干旱、温凉,交通便利。

湖盆属新生代断陷盆地,南有鄂拉山,北有青海南山,与青海湖相隔;盆内全新统风积、湖积粉细砂、粉砂粘土和盐类化学沉积覆盖,边缘晚更新统一全新统洪积、冲积砂砾石、粉细砂沉积形成湖堤;茶卡河、小察汗乌苏河等河水直接入湖,并有泉水以潜流形式补给。

茶卡盐湖矿化度 322.4 g/L,比重 1.218 g/m³,pH 值 7.8,水化学类型为硫酸镁亚型。盐类矿物由石盐、石膏、芒硝、无水芒硝等组成;为固液并存的石盐盐湖矿床,盐层厚 1.2 ~ 9.68 m,储量巨大。早在西汉时期,当地羌族人就采盐食用;20 世纪 50 年代建立了茶卡盐厂,是盐业生产大型企业,现已成为国内知名旅游景区。

(中国科学院青海盐湖研究所 郭跃明)