

文章编号: 0258-7106(2013)06-1291-09

深层天然卤水特征及成因探讨 ——以江陵凹陷深层天然卤水研究为例*

刘亚伟 张士万 刘涛 黄华 陈金荣

(江汉油田勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223)

摘要 首次对江陵凹陷深层天然卤水成因进行研究, 初步明确江陵凹陷的天然卤水为沉积成因, 具有分布广、矿化度高等特点。其中砂岩中天然卤水高矿化度分布具有明显的规律性, 即越靠近洼陷或盐岩地层, 天然卤水的矿化度越高; 并通过化学成分分析, 表明了江陵凹陷存在大量富含微量元素卤水的流体矿床, 且矿化度越高所含的微量元素含量越高, 部分元素为国家紧缺矿产资源, 如钾、铷、铯等。

关键词 地质学; 天然卤水; 微量元素; 沉积成因; 江陵凹陷

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Tentative discussion on features and genesis of deep natural brine: A case study of deep natural brine in Jiangling depression

LIU YaWei, ZHANG ShiWan, LIU Tao, HUANG Hua and CHEN JinRong

(Research Institute of Exploration and Development of Jianghan Oilfield Company, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract

The origin of deep natural brine in Jiangling depression was studied for the first time. The authors detected that the natural brine is of the sedimentary origin and characterized by wide distribution and high salinity. In the sandstone, the distribution of high-salinity natural brine shows obvious regularity: the closer the natural brine to the sag or salt strata, the higher the salinity of the natural brine. The chemical composition analysis shows that the Jiangling depression is rich in brine fluid deposits which contain lots of trace elements and have higher salinity. The higher the mineralization intensity, the higher the trace elements content, and some elements are national badly-needed mineral resources, such as K, Rb and Cs.

Key words: geology, natural brine, trace element, sedimentary origin, Jiangling depression

早在20世纪70年代, 国内外学者就对深层天然卤水进行了研究。苏联学者提出了构造圈闭水文地质学, 使水文地质学应用的领域由地表浅部延深到地下33~410 km的上地幔范围, 同时还提出了深层地下水运动的流体力学特征和构造水动力特征,

为该领域的研究奠定了理论基础。欧美国家对深层地下水的研究侧重于实际应用, 注重解决工业发展所造成的各种环境问题; 而中国则主要研究卤水的综合利用(杨立中, 1990)。在研究的现状上, 我国与国外相比, 无论是研究的深度, 还是广度, 差距甚大。

* 本文得到国家高技术研究发展计划(国家“863”计划)项目“深井盐卤资源综合利用技术研究”课题“深井卤水资源勘探与评价(编号: 2012AA061701)”资助

第一作者简介 刘亚伟, 男, 1980年生, 硕士, 工程师, 主要从事矿产普查与勘探工作。Email: zuoshandiao12@163.com

收稿日期 2012-11-15; 改回日期 2013-11-11。张绮玲编辑。

截止到目前,深层地下水的研究尚无一套系统完整的理论和方法(汪蕴璞,1982),尤其是对深层卤水的成因研究少之又少。

江陵凹陷是江汉盆地一个次级凹陷,根据油田水的水质分析情况(周少国,1970),卤水中含有丰富的微量元素和稀少元素,例如国家紧缺的“钾”等元素,具有储量大等特点,因此,本文选取江陵凹陷中的卤水作为研究对象,对富含微量元素的卤水成因进行探讨性研究。

1 区域地质背景

(1) 构造特征

江陵凹陷是江汉盆地最大的次级构造单元之一,是发育于扬子陆块上的中生代断陷湖盆(刘云生,2006;汤积正,2010)。其北以纪山寺断层为界,分别与河溶凹陷、荆门凹陷相接(图1);西以问安寺断层为界,分别与枝江凹陷、宜都鹤峰复背斜及洞庭

湖盆地相邻,南以白垩系剥蚀线为界,与华容隆起相接;东以清水口断层为界,分别与丫角-新沟低凸起及陈沱口凹陷相邻,面积6500 km²。江陵凹陷是白垩期末至第三纪发育形成的断陷盆地,经历了一抬两断三拗的构造演化。燕山运动晚期,以断裂为主,先期的逆断层反转,形成南抬、中拗、北缓坡的构造格局,盆地初见雏形;到喜马拉雅运动早期,断裂活动具有先弱后增强的特征,先表现为拗陷,后以断裂为主,在该幕区域构造格局清晰,隆坳格局逐渐分明;到喜马拉雅运动中期,断裂活动先弱后增强,先表现为拗陷,后以抬升为主,上升盘及周缘遭受剥蚀;到喜马拉雅运动晚期至今,受先前断裂活动及新的构造运动的影响,以拗陷为主,可容空间增加。江陵凹陷内发育9个构造带,即拾桥单斜带、清水口向斜带、荆州背斜带、资福寺向斜带、公安单斜带、江口向斜带、万城断裂带、梅槐桥向斜带和 市断裂带,其中荆州背斜带和清水口向斜带为荆沙组沉积时期形成。

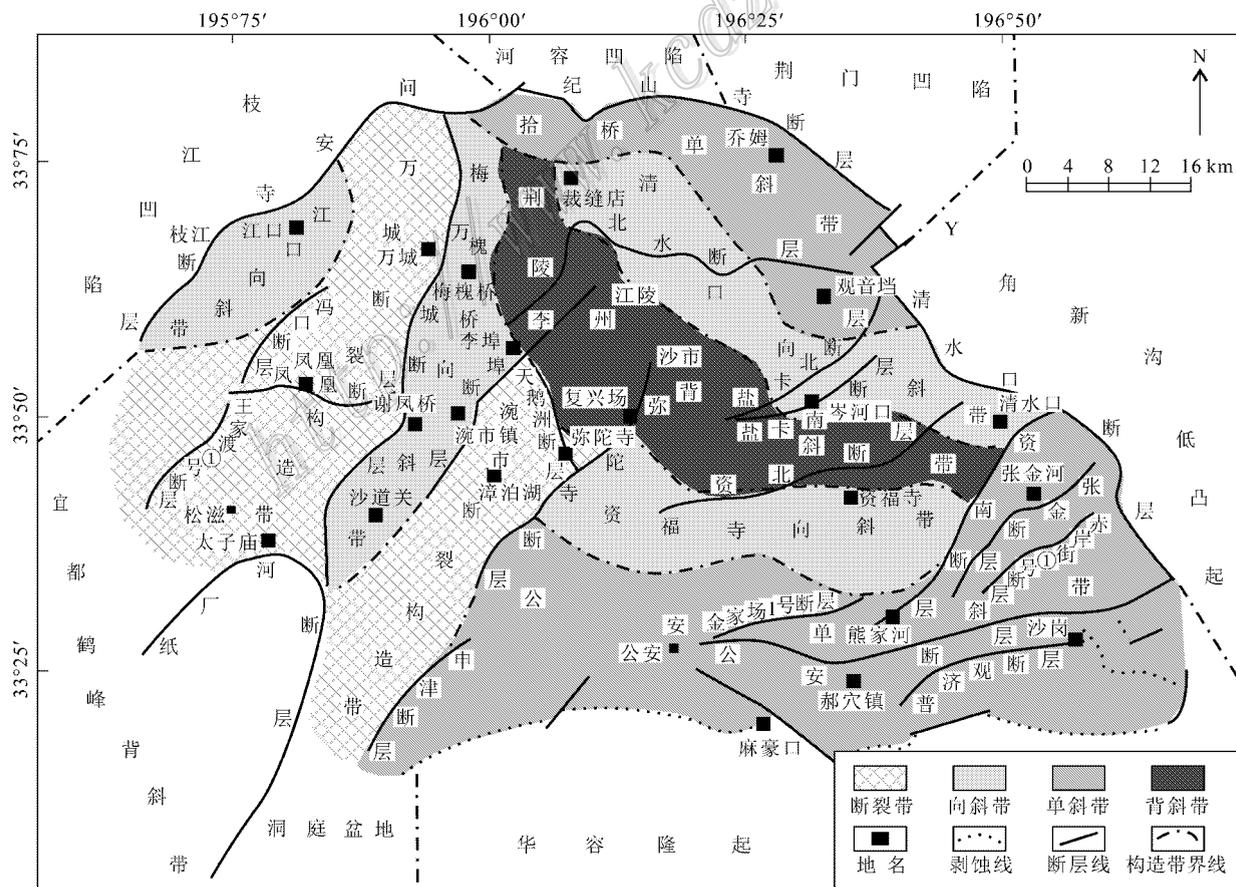


图1 江陵凹陷构造位置及构造单元划分图

Fig. 1 Structural position and tectonic units in Jiangling sag

(2) 地层特征

江陵凹陷内白垩系至第三系最大厚度近万米(王永军, 2008), 自下而上分别为白垩系渔洋组, 古近系沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组, 新近系广华寺组及第四系(图 2)。

白垩系(K): 仅发育上白垩统渔洋组, 具有断陷盆地充填沉积特征, 与下伏地层呈不整合接触。其岩性下粗上细, 变化较大, 为一套棕红色、紫红色泥岩为主的砂、泥岩互层, 夹含膏泥岩和薄层暗色泥岩。底部为厚层块状砾岩, 顶部夹薄层玄武岩。推测最大厚度达 2500 m。

古近系沙市组(E_s): 厚度及岩性变化大。按岩性等差异分上、下 2 段。下段(E_s 下): 主要为盐岩、棕红色及灰色含膏泥岩、钙芒硝泥岩夹砂岩, 最大厚度大于 1000 m。上段(E_s 上): 为暗色泥岩发育集中段, 下部红色地层增多, 一般厚 300 m, 为凹陷内生油层段之一。

新沟嘴组(E_x): 沉积较稳定, 岩性、厚度变化小。按岩性等差异也可分为上、下 2 段。下段(E_x 下): 是凹陷内主要生油层段和主要勘探目的层, 厚度一般为 500 m, 最大厚度达 700 m。局部如陵西等地受新沟嘴末期或荆沙早期构造运动的影响缺失上部地层。新沟嘴组下段自下而上可划分为 3 个油组:

Ⅲ油组: 为一套红色为主, 红灰间互的泥岩夹砂岩及少量含膏泥岩, 局部地区下部存在暗色泥岩发育段, 厚 100~150 m。

泥隔层: 发育一套稳定的泥质沉积, 全区可追踪对比, 主要由灰-深灰色泥岩、间夹红色泥岩及含膏泥岩、泥膏岩等组成, 厚度约 35 m。

Ⅱ油组: 灰-深灰色泥岩夹砂岩、含膏泥岩、白云岩、盐岩, 上部以红灰间互为主, 厚 150~300 m, 油层主要发育于中上部。

Ⅰ油组: 以红色泥岩及砂岩、含膏泥岩为主, 夹泥膏岩, 局部地区底部为红灰间互, 厚度为 120 m 左右。顶部发育有凹陷内可追踪对比的大膏层, 油层主要发育于中上部。

上段(E_x 上): 为一套棕色、紫红色泥岩夹薄、中厚层粉砂岩、含膏泥岩、泥膏岩, 局部见玄武岩, 厚 200~300 m, 在凹陷带厚度加大。

Ⅰ油组顶部发育大膏层与新沟嘴组上段地层构成了江陵凹陷新沟嘴组主要区域性盖层。

荆沙组(E_j): 厚度及岩性变化大, 为一套棕红色、紫红色泥岩夹薄层浅灰色、浅棕色粉砂岩、含膏泥岩, 下部砂岩及玄武岩较发育。含膏地层从上往

下呈增加趋势。地层厚度一般为 600~1200 m。江口、梅槐桥、弥陀寺、资福寺等地厚度可达 1600 m。局部地区, 如陵西、南斜坡等地, 缺失中下部地层。

潜江组(E_q): 厚度变化较大, 周缘及古隆起高部位剥蚀严重, 主要以灰绿色、灰色泥岩为主, 夹含膏泥岩、泥膏岩、油页岩, 局部火成岩发育。厚度一般为 500~1500 m, 最厚达 3000 m。

荆河镇组(E_{jh}): 凹陷内仅江口、梅槐桥、资福寺向斜等各构造带内分布有荆河镇组, 其余地区均遭剥蚀。上部为灰绿色泥岩与灰色泥岩不等厚互层。中下部为灰绿色泥岩与黑褐色油页岩不等厚互层, 厚度一般为 50~150 m。

新近系广华寺组(N_g): 绿灰色、蓝灰色黏土岩和浅灰白色粉砂岩, 含砾砂岩、砾岩组成韵律层, 厚 300~600 m, 与下伏地层呈不整合接触。

第四系平原组(Q): 为灰色黏土、杂色砾石夹未成岩松砂层组成, 厚 50~100 m。与新近系呈平行不整合接触。

2 天然卤水水化学特征分析

2.1 样品采集要求

采集油田水样品主要通过油井抽汲地层水至地表, 采集 1 升水样并封闭送至江汉油田分公司勘探开发研究院试验室(国家计量认证)。试验室检测依据: SY/T 5523-2006《油田水分析方法》, 检测主要设备及编号: ICS-2000 离子色谱仪(04080002); ICS-90 离子色谱仪(06090443); DL50 自动电位滴定仪(5126341947)。检测环境: 温度 25℃, 确保化验数据的科学性和准确性。

在收集整理现有资料的基础上, 课题组从古近系荆沙组(深度为 500~4000 m)中, 在火山岩发育区、不发育区及盐岩发育区、不发育区采集了 50 个卤水样品。

2.2 样品的物理特征

在密闭的透明玻璃器皿中, 天然卤水呈现淡黄色, 温度约为 $\pm 95^\circ\text{C}$ (出井口), 水质相对浑浊, 具有咸涩味道。沉淀一段时间后, 器皿周围有挂壁现象, 有大量的盐岩方晶体、微晶体附着在器皿底部和壁上, 以堆积、平铺和生长等方式赋存, 其中样品 1 最为典型。

2.3 水化学分析特征

通过对江汉盆地江陵凹陷中典型井的天然卤

表 1 江陵凹陷典型井天然卤水化学分析表

Table 1 Natural brine chemical analyses of typical wells in Jiangling sag

采样位置及样品号	地层	$\rho(\text{阳离子})/(\text{mg/L})$				$\rho(\text{阴离子})/(\text{mg/L})$					矿化度/ (mg/L)	
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	I ⁻	Br ⁻		
岩盐发育区	样品 1	新沟嘴组	116720	9625	7.87	4429	195671	996	273	31.8	231.5	327724.25
岩盐发育区	样品 2	新沟嘴组	82690	5406	161	2800	137700	661.6	244			229900
砂岩发育区	样品 3	新沟嘴组	50980	4776	123	2003	86030	983.6	288.4			145300
砂岩发育区	样品 4	白垩系			806		56720	1021				94517.06
火山岩发育区	样品 5	沙市组	103660	9053	2.5	16400	198800	9666	310	42	230	330000
火山岩发育区	样品 6	荆沙组			2048	9856	103747	692	204			168911

采样位置及样品号	地层	$\rho(\text{B})/(\text{mg/L})$										
		Li	Rb	Cs	Sr	Cr	Fe ²⁺	Ni	Cu	Mn	Pb	
岩盐发育区	样品 1	新沟嘴组	61.6	73.6	26.5	400	2.8	14	1	0.5	9	0.4
岩盐发育区	样品 2	新沟嘴组				206.9						
砂岩发育区	样品 3	新沟嘴组				105.6						
砂岩发育区	样品 4	白垩系										
火山岩发育区	样品 5	沙市组	65	56.1	16.8	1340	0.006		0.002			

注：空白表格为未检测区。苏林分类：油田水为氯化钙型， $(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Mg}>1$ ， $\text{Na}^+/\text{Cl}^-<1$ ， $\text{Na}^+<\text{Cl}^-$ ， Mg^{2+} 少。矿化度：通常以 1 升水中含有各种盐分的总克数来表示。

水水样进行化验分析，得到以下结果：天然卤水中富含常规元素及化合物，阳离子为 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，阴离子为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等，同时含有丰富的微量元素 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 I^- 、 Br^- 、 B_2O_3^+ 、 Fe^{2+} 、 Ni 、 Mn 等，及富含稀散元素 Rb^+ 、 Cs^+ 等，具体含量见表 1。油田水一般采用苏林分类，计算得出 $(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Mg}>50$ 、 $\text{Na}^+/\text{Cl}^-<0.7$ 、 $\text{Na}^+<\text{Cl}^-$ 、 Mg^{2+} 少，水型为氯化钙型。

以上化学成分分析结果表明，该区带具有密闭的成岩背景，不受浅层水的影响，具有典型的深层地下水特征；并且该凹陷的天然卤水具有含矿物质种类多、含量高等特点，其最高矿化度达 32.7×10^4 mg/L；阴离子中的氯离子浓度最高达 19.88×10^4 mg/L，阳离子中的钾离子浓度最高可达 9.625×10^4 mg/L (图 3)；砂岩中天然卤水矿化度总体在 $9.0 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$ mg/L。氯离子浓度小于 20×10^4 mg/L，钾离子浓度主要在 4000~6000 mg/L。

3 天然卤水分布规律

3.1 纵向变化规律

矿化度通常是指每升水中含有的盐分，以矿化度 5×10^4 mg/L 作为卤水及天然卤水的划分界限 (中华人民共和国国土资源部, 2003; 冷莹莹等, 2009)。根据江陵凹陷天然卤水化学分析资料，江陵凹陷 1000 m 以下的天然水均已达到卤水级别 (图 4)，矿化度主要集中在 $10 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ mg/L，

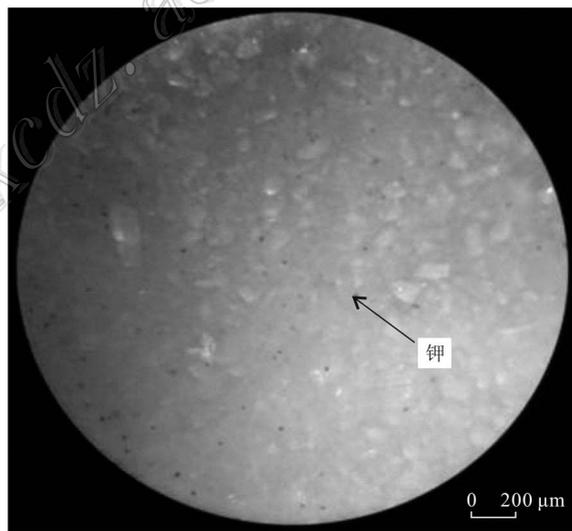


图 3 天然卤水加入钾试剂照片(样品 1)
Fig. 3 Photo of natural brine with the addition of potassium (sample 1)

部分天然卤水已经达到浓卤水级别，在相对较浅的深度时，矿化度具有随深度的增加而增加的变化规律，拟合公式的相关系数达 0.92，具有较好的相关性；在达到一定深度时，矿化度随深度的增加变化较小。卤水矿化度与沉积地层也有较好的相关性，越靠近盐岩层系，天然卤水的矿化度越高，反之亦然 (图 5)。因此，高矿化度的天然卤水主要分布在江陵凹陷的沙市组和新沟嘴组地层，而其他地层中，高矿化度天然卤水所占的比例相对较小。

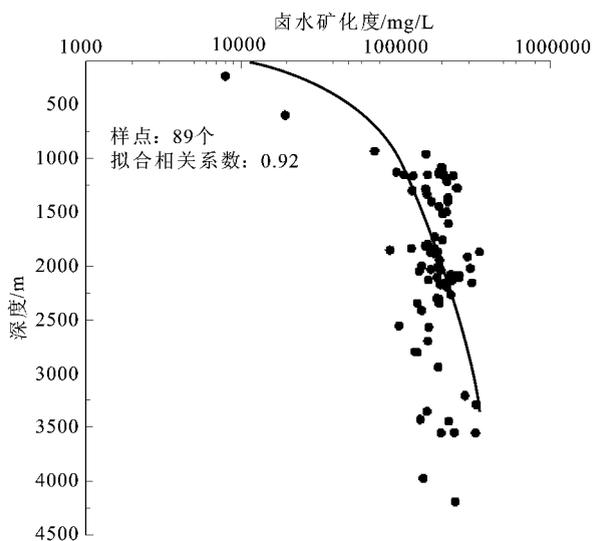


图4 江陵凹陷地层水矿化度随深度变化图

Fig. 4 Formation water salinity with depth variation in Jiangling sag

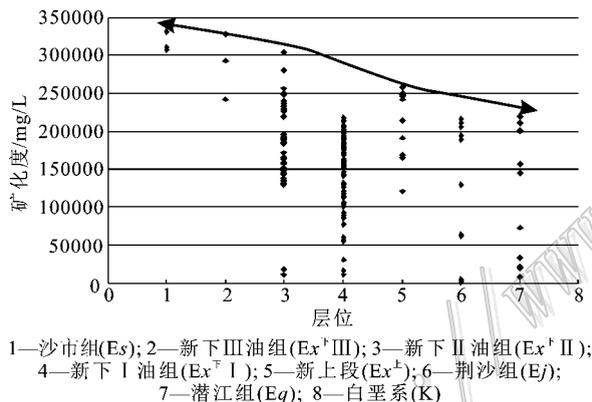


图5 江陵凹陷天然卤水矿化度与层位相关性分析图

Fig. 5 Correlation analysis between natural brine mineralization and layer chart of Jiangling sag

3.2 平面变化规律

江陵凹陷以砂岩储集类型为主,具有分布广、类型典型、样品多等特点,依据上述的水化学分析特点,结合储层发育情况,下面重点剖析新沟嘴组地层的天然卤水。

根据采集砂岩中天然卤水化学分析的数据,结合储层展布特征,认为平面上天然卤水矿化度变化趋势具有向凹陷中心逐渐升高的趋势,最高达 320 g/L 以上,边界矿化度位于 100~200 g/L,由于物源为单向的,主要呈现南北展布,因此矿化度变化整体趋势呈现半封闭的弧形(图6),局部呈现指状或弓形展布,平均浓度最高的为南北展布的梅槐桥向斜,次

之为东西展布的资福寺向斜,因此深层卤水分布在砂岩中具有较好的规律性。

4 天然卤水成因探讨

根据全国科学技术名词审定委员会公布的资料,一般区分浅层和深层地下水的深度在 150 m 左右,150 m 以内为浅层地下水,如湖泊、浅表地层水等,150 m 以上为深层地下水。油田水主要来自油井所采集到的水,一般井深均在 1000 m 以上,以矿化度大于 5×10^4 mg/L 的卤水叫深层天然卤水。

依据结晶试验可知(陈泉水,2009),水体随着温度升高,水分子蒸发量增加,水中各种离子的浓度相对增加,其矿化度也在增加,变化规律主要是从淡水—微咸水—咸水—卤水—浓卤水—有晶体结晶析出卤水的正向演变过程,在这演化过程中包括 2 种变化,一是物理演化过程——从淡水到卤水的演变过程,另一是化学演化过程——从卤水到有晶体析出的过程,其中所富含的微量元素也在悄然的变化,这主要取决于各元素的溶解度,但可以确定的是某一微量元素含量会随着矿化度的升高而增高,当达到结晶点或某一临界值时,就会随着矿化度的升高而减少。

(1)从沉积相序角度分析,江陵凹陷沙市组富含大量的盐岩地层,局部地区盐岩累计厚度达上千米,到新沟嘴组沉积时期,盐岩层系大量减少,以膏泥岩为主,到荆沙组沉积时期,膏泥岩大量减少,以泥岩为主,再到潜江组、荆河镇组等沉积期,水体浓度逐渐淡化,直到第四纪,地层水体为淡水,从这一变化特点可以看出,是水体浓度变化的反演化过程,从图7可以看出,越靠近盐岩层系,矿化度、氯离子浓度越高,远离盐系地层水体矿化度越低,盐体作为卤水结晶的产物,可以认为是因沉积作用形成高矿化度的卤水。

(2)从化学成分角度分析,通过 Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B 等喜干微量元素分析(金明等,2003),锶、镁元素越靠近盐系地层含量越高(图8),越高越能反映当时的气候呈现干旱环境,进一步证明水体处于浓缩阶段,形成高浓度天然卤水,而锶、镁元素赋存于整个江陵凹陷新沟嘴组地层中,不具有局部性,是裂缝型和火山型储集体不能具备的,要想形成这样的规模,只有具有相似的沉积背景才能做的到。

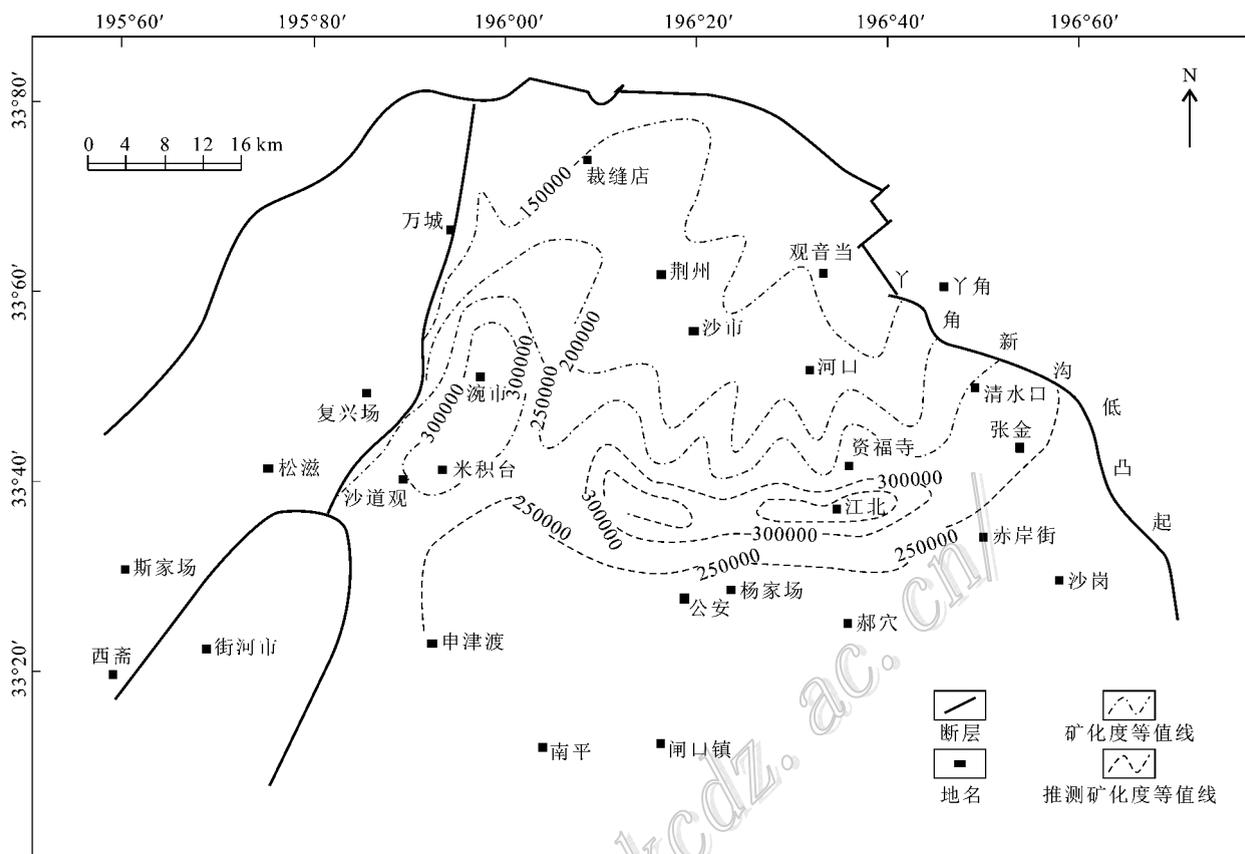


图 6 江陵凹陷新沟咀卤水矿化度等值线图

Fig. 6 Contour map of Xingou Formation brine salinity in Jiangling sag

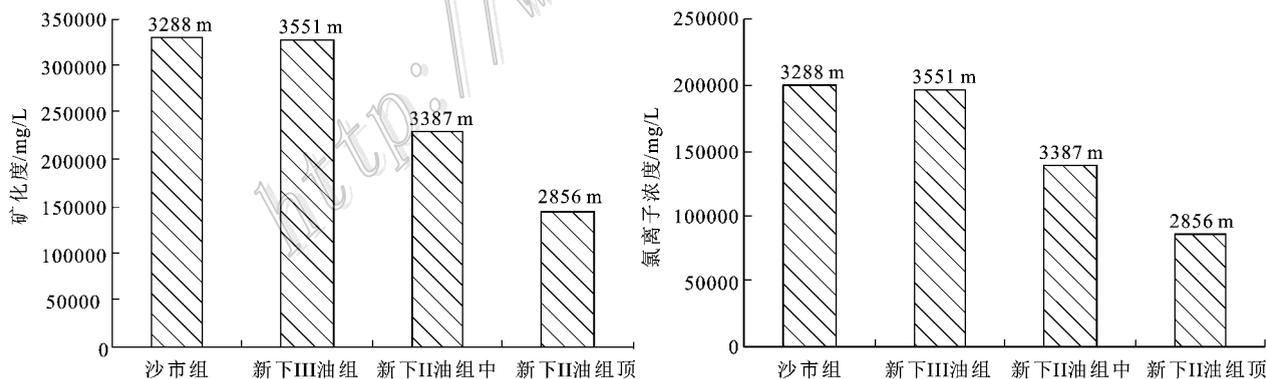


图 7 江陵凹陷天然卤水氯离子和矿化度变化趋势图

Fig. 7 Change trends of chloride ions and salinity of natural brine in Jiangling sag

(3) 从深层卤水分布角度分析,通过参考国内专家对卤水成因的认识(刘成林等,2010;李延伟等,2006;林耀庭,2009),并结合江陵凹陷高矿化度卤水分布的特点,它们主要分布在盐岩体发育区范围内(图9),因此无论是层位上还是平面上,卤水都与盐

岩的分布具有较好的相关性和稳和性,这种天然卤水的形成与盐岩的形成具有相似性,即在干旱气候条件下,在水分大量蒸发的条件下沉积形成的。从卤水矿化度分布特征看,越向沉积中心方向,矿化度越高,规律性越明显,同样也表明是由沉积作用形成。

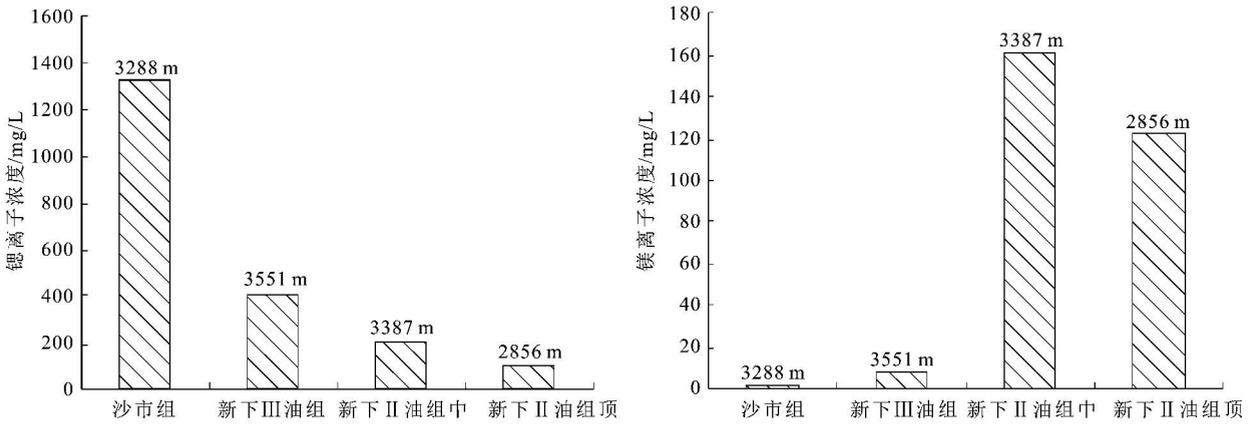


图8 江陵凹陷天然卤水锶和镁离子变化趋势图

Fig. 8 Change trends of natural brine strontium and magnesium ions in Jiangling sag

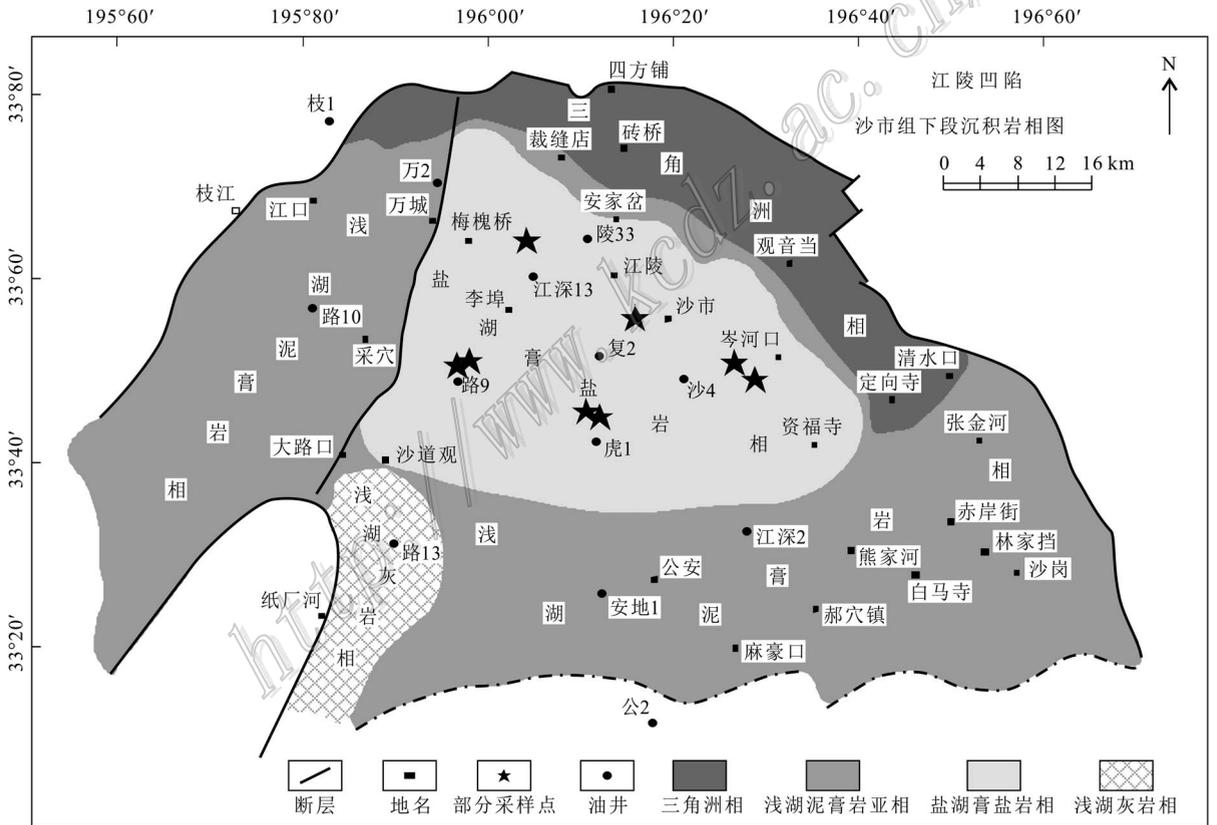


图9 江陵凹陷天然卤水矿点与盐岩分布相关位置图

Fig. 9 Natural brine ore and rock salt distribution, Jiangling sag

5 结论

(1) 通过上述分析,认为江陵凹陷砂体中高矿化度卤水是沉积作用形成的,具有分布广、矿化度高

等特点。

(2) 江陵凹陷砂岩中天然卤水的矿化度分布具有规律性,越靠近凹陷或盐岩地层,矿化度越高。

(3) 研究表明,江陵凹陷存在富含微量元素的卤水流体矿床,矿化度越高,所富含的微量元素含量

越高,部分元素为国家紧缺的矿产资源,例如钾、铷、铯等。

参考文献/References

陈泉水. 2009. 材料科学基础实验[M]. 北京: 化学工业出版社. 1-183.

金明, 李婉巍. 2003. 乌兰花地区下白垩统-上新统岩石地球化学特征及其古气候演变[J]. 铀矿地质, 19(6): 349-354.

冷莹莹, 李祥虎, 刘蕾. 2009. 潍坊市北部天然卤水矿床特征及成因分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(2): 188-194.

李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 2006. 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, 14(4): 26-32.

林耀庭. 2009. 四川盆地寒武系盐卤沉积特征及找钾前景[J]. 盐湖研究, 17(2): 13-20.

刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力. 2010. 罗布泊断陷带内形成富钾卤水机理研究[J]. 矿床地质, 29(4): 602-608.

刘云生. 2006. 江汉盆地分析及勘探方向[R]. 内部资料.

王永军. 2008. 江陵凹陷勘探潜力评价[R]. 内部资料.

汪蕴璞. 1982. 深层卤水形成问题及其研究方法[M]. 北京地质出版社. 1-239.

杨立中. 1990. 国外深层地下水研究的发展及我国在该领域研究现状[J]. 中国地质, 12: 21-23.

易积正. 2010. 江陵凹陷构造运动与油气富集规律研究[R]. 内部资料.

中华人民共和国国土资源部. 2003-03-01. 盐湖和盐类矿产地质勘查规范[M]. 北京: 地质出版社. 1-67.

周少国. 1970. 江汉地区卤水及盐岩资源概论[R]. 内部资料.

<http://www.kcdz.ac.cn/>