

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.10.012

江陵凹陷盐隆构造体系对富钾卤水储层分布特征的影响

杨飞^{1,2}, 刘雅博^{1,2}

YANG Fei^{1,2}, LIU Yabo^{1,2}

1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;

2.长江大学地球物理与石油资源学院,湖北 武汉 430100

1.Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China;

2.School of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China

摘要:江陵凹陷古新统沙市组及新沟嘴组均沉积有大量含盐岩层系,受喜马拉雅运动影响,形成各类盐隆构造。为了厘清江陵凹陷富钾卤水的分布特征,重点研究了江陵凹陷的地层、断裂、构造分布特征,探究盐隆构造体系对富钾卤水分布特征的影响。通过剖析江陵凹陷盐构造形成及演化特征,认为盐隆构造控制的次级凹陷形成于盐层沉积的不同阶段,汇集不同阶段的卤水,成为盐类聚集的关键场所。江陵凹陷卤水钾离子主要来源于与断裂相伴的火成岩。富钾卤水重点分布于新沟嘴组下段及沙市组中,其卤水储层包括砂岩储集层(李家台地区)、火山岩储集层(沙市地区、范家台地区)及破碎带储集体(南岗地区)。高矿化度富钾卤水在江陵凹陷内广泛分布,具有较大的勘探潜力。

关键词:江陵凹陷;富钾卤水;盐隆构造;分布特征

中图分类号:P619.21⁺1 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)10-1847-08

Yang F, Liu Y B. Study on the influence of salt structural system on the distribution characteristics of potassium-rich brine reservoirs in Jiangling depression. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1847-1854

Abstract: A large number of salt-bearing rock systems were deposited in the Paleocene Shashi and Xinguzui group of the Jiangling depression, and various types of salt-ridge formations were formed under the influence of the Xishan movement. To clarify the distribution characteristics of potassium-rich brine in the Jiangling depression, we focus on the stratigraphic, fracture, and tectonic distribution characteristics of the Jiangling depression, and investigate the influence of the salt-ridge tectonic system on the distribution characteristics of potassium-rich brine. By analyzing the formation and evolution of the salt structure in the Jiangling Depression, it is concluded that the secondary depressions controlled by the Salt Rise Tectonics were formed at different stages of salt deposition, and brine from different stages was collected, which became the key place for salt accumulation. The potassium ions of the brine in the Jiangling depression mainly originate from the igneous rocks associated with the fractures. Potassium-rich brines are mainly distributed in the lower part of the Xinguzui group and the strata of the Shashi group, whose brine reservoirs include: sandstone reservoirs (Lijiatai area), volcanic reservoirs (Shashi and Fanjiatai area), and fracture zone reservoirs (Nangang area). The highly mineralized potassium-rich brines are widely distributed in the Jiangling depression and have a large exploration potential.

Key words: Jiangling depression; potassium-rich brine; salt structure; distribution characteristics

收稿日期:2022-02-06;修订日期:2022-06-16

资助项目:国家自然科学基金项目《江汉盆地古近纪卤水型锂铷关键金属矿床成矿作用与找矿预测》(批准号:U20A2092)

作者简介:杨飞(1967-),男,副教授,从事地震沉积学研究。E-mail:randyang@126.com

富钾卤水中不但有丰富的 K^+ 离子,还含有 Li^+ 、 Br^- 等多种组分,是重要的无机化工原材料,也是中国相对短缺的资源。卤水不但可形成液态钾矿资源,而且是较好的化工原材料,具有相当重要的资源意义。江陵凹陷从 20 世纪 60 年代开始石油勘探,至今已经有 60 多年的历史,积累了相当丰富的钻井、测试、地球物理等资料^[1]。江陵凹陷交通便利,具备较有利的矿产开发条件,中石化江汉油田分公司做过部分油、钾兼探方面的工作^[2],但由于富钾卤水储层埋深大,其成矿因素及分布特征尚不明确,特别是江陵凹陷内发育的盐隆构造对富钾卤水分布的影响还需要进一步的分析与研究,以便更好地对江陵凹陷卤水资源进行勘探与开发。

1 地质背景

1.1 区域地质

江陵凹陷地处江汉盆地西部,北部分别与河溶凹陷及荆门凹陷相接,西部以问安寺断层为界,分别与枝江凹陷及宜都鹤峰背斜带相邻,南以白垩系—新近系剥蚀线为界与华容隆起相接,东以清水口断层为界,与丫角—新沟低凸起及陈沱口凹陷相邻^[3]。其总面积达 6500 km² (图 1),为江汉盆地内最大的次级构造单元,沉积了近万米的属河流—三

角洲—湖泊沉积体系的陆相碎屑岩,其中古近系沙市组和新沟咀组底部沉积了厚层蒸发盐^[5-6]。

1.2 地层特征

江陵凹陷的古新统包括沙市组及新沟嘴组。沙市组与新沟嘴组均沉积有含盐岩系。盐岩层十分发育,单层厚度最大为 66 m,累积厚度超过 240 m。江陵凹陷内盐湖为常年深水层状盐湖,根据其沉积环境可分为微咸水湖、咸水湖和盐湖^[7]。

新沟嘴组下段岩性为深灰色泥岩夹棕色泥岩及浅灰色、灰色粉砂岩。顶部发育 20~30 m 膏岩,中上部为主要含水层。沙市组上段岩性上层部分为白色芒膏岩及钙芒硝质泥岩和棕紫色、深灰色泥岩砂岩互层。沙市组下段岩性为大套白色膏盐岩与棕紫红色、灰色泥岩互层,中部夹一套玄武岩层(图 2)。

江陵凹陷火山岩非常发育,且火山岩面积大,分布广。古近系—新近系各组段均有火山岩分布。江陵凹陷富钾卤水的主要特征系数表明,其等同海水蒸发到石盐沉积阶段的产物,但该凹陷在古近纪—新近纪属于陆相沉积。该区沙市组卤水中 Rb、Sr、Li 等微量元素的含量较高,钾的含量也较高,由于高温卤水和玄武岩发生反应会释放出这些特殊元素,由此认为富钾卤水成因与玄武岩活动

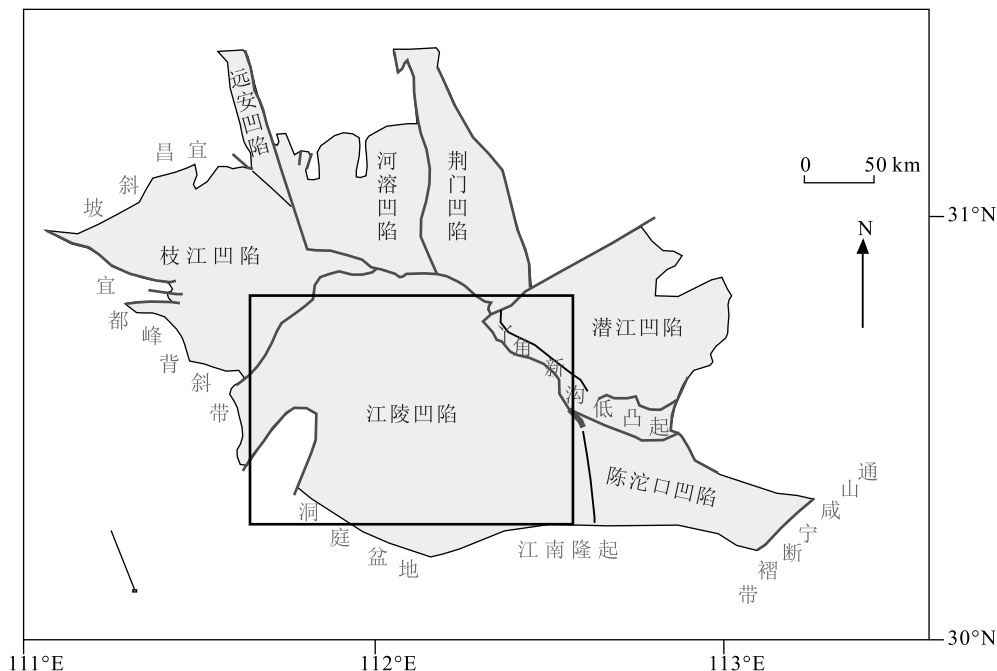


图 1 江陵凹陷区域位置^[4]

Fig. 1 Location map of Jiangling depression

相关^[7]。

由于富钾卤水中的钾来源于火成岩的供给,富钾的载体是卤水,与卤水层密切相关的地质要素则是盐岩体、断裂及火山岩。湖水的蒸发、蒸发岩的溶解、水岩反应、深部热液补给等地质作用是富钾卤水的主要成因^[8],因此对盐隆构造分析与解剖,也是寻找富钾卤水分布“甜点”区的重要途径。

2 盐隆构造类型、特点及平面分布特征

2.1 盐隆构造类型和特点

盐隆构造是由于盐源层塑性流动发生底辟作用引起的侵入或刺穿构造^[8-9]。该构造是江陵凹陷的构造样式(图 3),其形成与喜马拉雅运动形成的挤压应力场密切相关^[10-12]。在区域挤压应力场背景下,形成逆冲构造及断裂,受挤压后,顺着断裂破碎带塑性蠕动上升,形成盐隆构造。

根据盐隆构造样式的差异,将江陵凹陷的盐隆构造分为 3 种:盐枕、盐背斜、盐脊(图 4)。它们分

别代表盐构造发展的 3 个阶段,先是上隆形成盐枕,此时上部地层没有断裂发育,各地层之间处于整合接触,继而在逐渐上隆的过程中,核部应力挤压产生足够大的应力场后,上部地层产生一系列断裂,形成盐背斜构造,进一步隆升之后,形成接近于扇形的盐脊构造,为构造发育的最终阶段。

在复兴场三维 L120 线发育盐枕构造(图 4-a),盐源层底部埋藏深度约为 4800 m,盐隆构造隆起的幅度较小。沙市组下段的盐源层出现隆起,使新沟嘴组具有顶薄、翼厚的特点,荆沙组也有隆起但幅度较小。上覆潜江组无明显起伏,反映在潜江期,该盐隆构造不再生长,构造运动微弱。

沙市三维 L163 线发育盐背斜构造,盐源层底部埋藏深度约为 4800 m,其核部上隆幅度约为 400 m(图 4-b)。沙市组底界面以下地层没有大幅度的上隆,但盐岩层遭受挤压,上部岩层产生断裂,说明新沟嘴组及其以上地层形成的背斜构造与盐层隆起有一定的关联。盐岩上隆使上覆新沟嘴组和荆沙

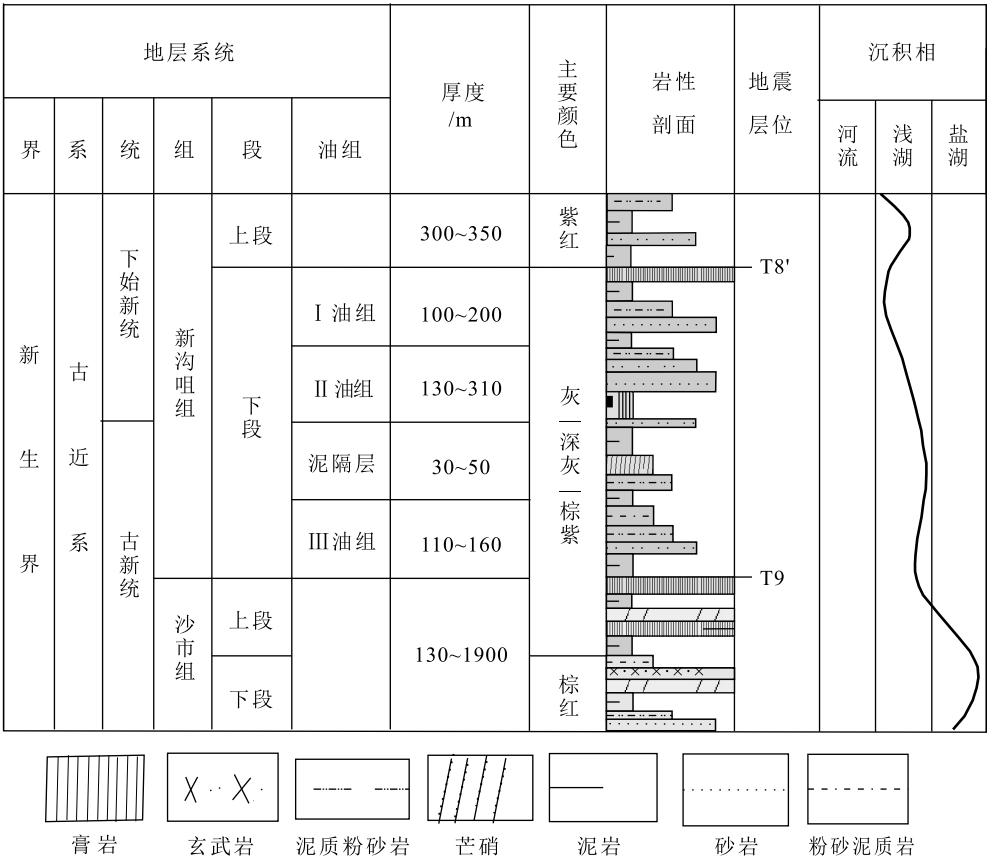


图 2 江陵凹陷地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of strata in Jiangling depression

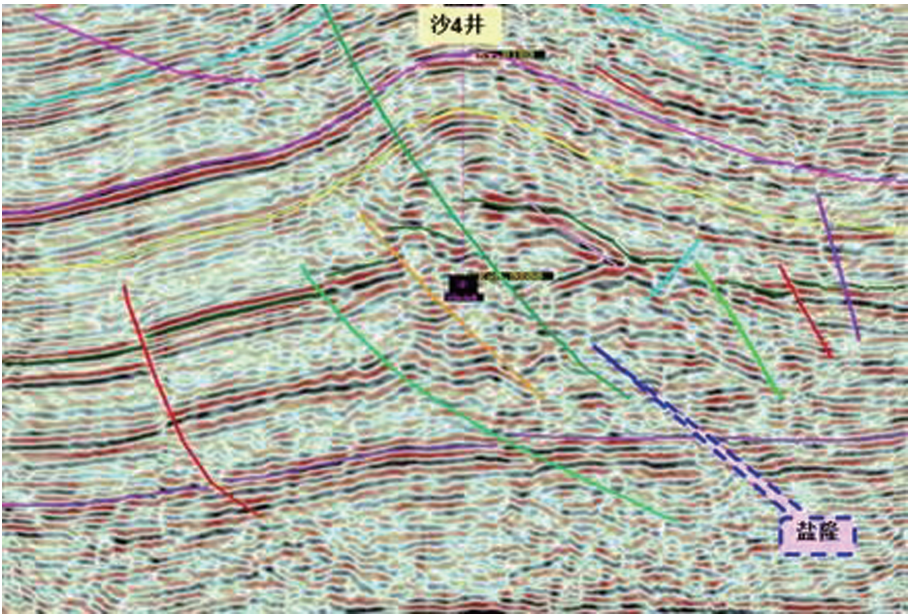


图3 江陵凹陷盐隆构造典型地震剖面图

Fig. 3 Typical seismic profile of salt structure in Jiangling depression

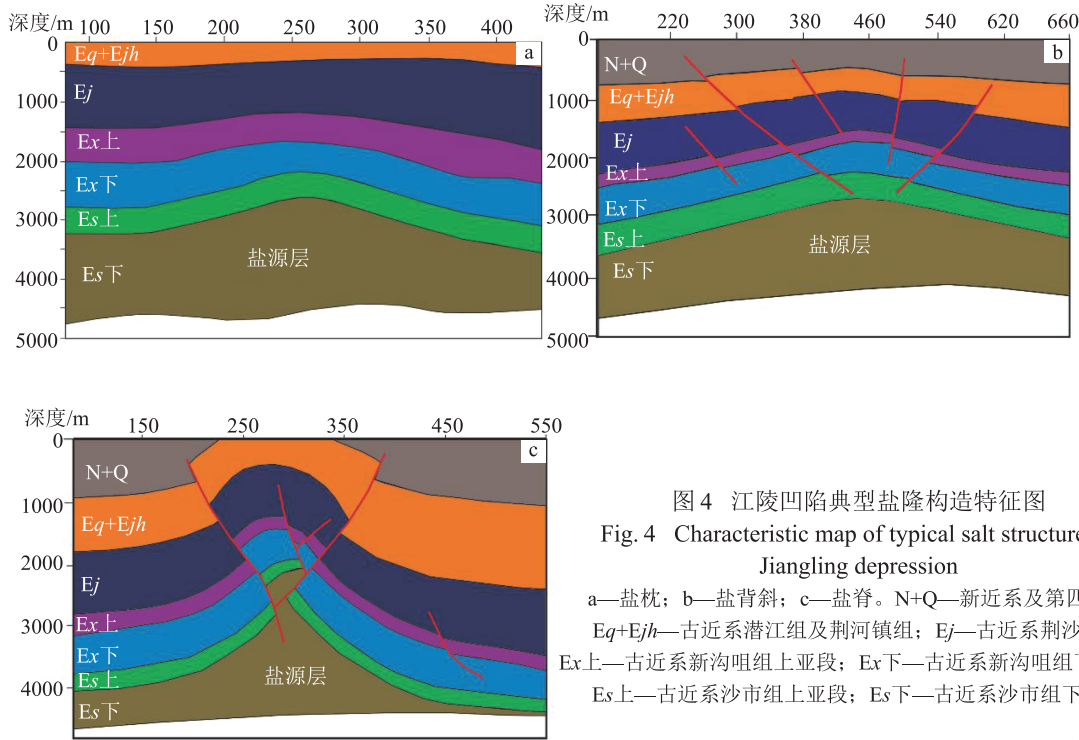


图4 江陵凹陷典型盐隆构造特征图

Fig. 4 Characteristic map of typical salt structure in Jiangling depression

a—盐枕；b—盐背斜；c—盐脊。N+Q—新近系及第四系；Eq+Ejh—古近系潜江组及荆河镇组；Ej—古近系荆沙组；Ex上—古近系新沟组上亚段；Ex下—古近系新沟组下亚段；Es上—古近系沙市组上亚段；Es下—古近系沙市组下亚段

组顶部薄、周翼厚,盐上层伴生的地堑构造在荆河镇末期受到挤压产生弱反转构造。

八岭山三维 294 测线发育盐脊构造,呈扇形。盐源层周翼底部埋藏深度约为 4800 m,被侵入的幅度较大,其核部隆起幅度为 600 m(图 4-c)。该构造是因为重力垮塌使盐岩侵入上覆地层,且盐上层

顶部薄、四周厚,伴生地堑构造在荆河镇末期受到挤压产生强反转构造。

江陵凹陷不同类型的盐隆构造形态不一,大部分表现为上部隆起、下部平缓的凸起,局部呈现顶部厚、四周薄的构造形态。盐源层则位于沙市组下段,因为盐岩隆起,大部分的盐上层出现顶部薄、周翼

厚的现象,盐岩向上隆起幅度最大可达 600 m 左右^[13]。

2.2 盐隆构造平面分布特征

根据目前的勘探成果,江陵凹陷发现的 11 个盐隆构造大部分集中于沙市组中含盐地层分布的区域(图 5)。盐构造空间展布受控于断层的走向,总体呈线性分布^[14],反映凹陷内挤压应力场活跃,盐构造以盐背斜和盐脊构造为主。

3 盐隆构造对卤水的控制作用

3.1 江陵凹陷沉积演化

沙市组早期断层较活跃,大部分为北东向,同时受地下岩浆热对流活动的影响,凹陷区域持续下沉,沉积地层约 2000 m。到后期,沙市组上段绝大多数断层转为休眠状态,此时构造运动基本停止。沉积厚度由中心向四周递减。江陵凹陷总体呈现出南升、北缓、中凹陷的构造形态^[15]。

在沙市组早期沉积阶段,全球快速升温(PETM)。古新世的高温促成了江陵凹陷湖盆大量蒸发,直至形成盐层^[16]。古新世—始新世在 56 Ma 是最显著和最广泛研究的古近纪超热事件,其以迅

速和极端的全球变暖为特征,造成强烈的环境影响。湖水大量蒸发,沉积了约 500 m 的盐层^[17],为形成盐构造提供了充足的物质条件。到沙市组后期沉积阶段,温度下降,地表水总量逐渐恢复,沉积面积逐渐变大,形成了近 500 m 的砂泥岩地层。后期由于沉积物的不断增大,下部压力增大,使得岩盐发生位移,也影响到后期盐隆构造样式不同。

新沟嘴组沉积时期,只有凹陷南部区域有断裂活动的痕迹,其他区域处于休眠阶段。断层对凹陷的控制作用微乎其微,凹陷区域逐渐变得一致。新沟嘴组沉积早期呈现为中间低、四周高的构造形态,北部区域斜坡带面积延伸,南部区域逐渐上抬。当新沟嘴组沉积之后,沙市组的盐层埋藏深度达到近 1000 m,随后受火山构造运动的影响,沙市组下段升温,岩盐层在高温及高压的作用下发生软化^[18]。新沟嘴组沉积后期,喜马拉雅运动使新沟嘴组下段发生抬升降起,沙市组的岩盐由于地层遭受挤压发生位移,此时,盐隆构造逐步形成。

3.2 K⁺的富集过程

继沙市组含盐沉积之后,上覆地层继续沉积,

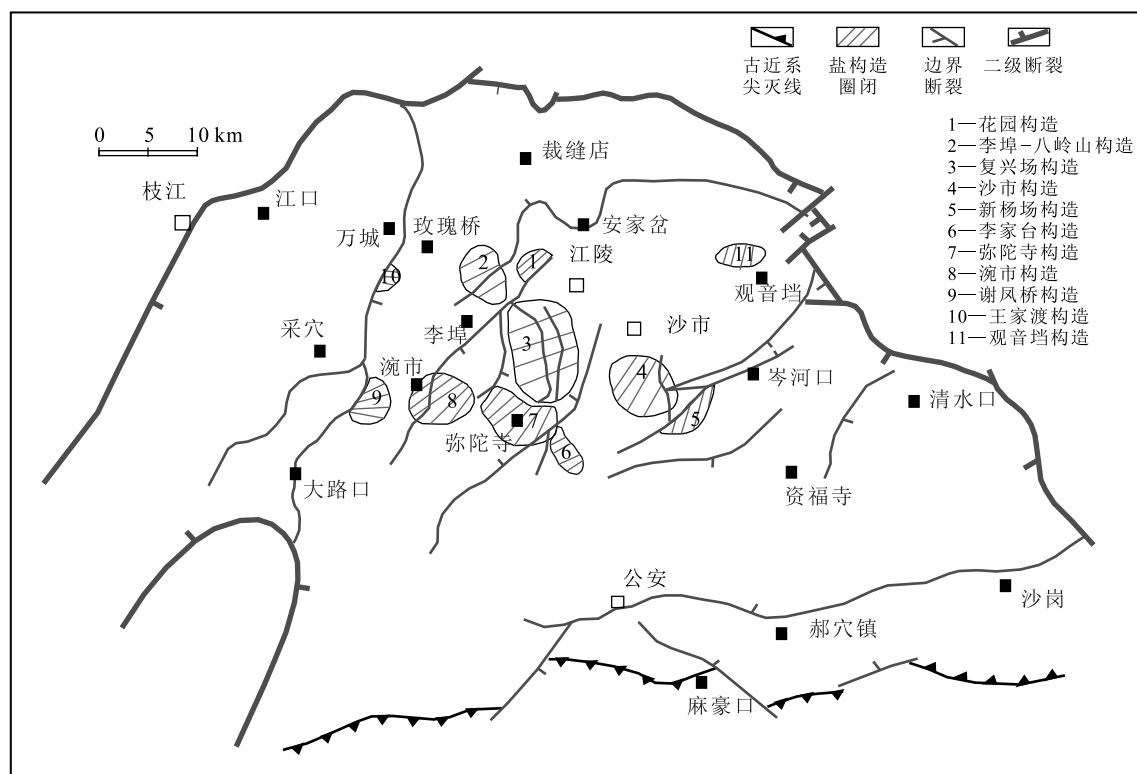


图 5 江陵凹陷现今盐隆构造分布图(据参考文献[9]修改)

Fig. 5 Distribution map of present-day salt structure in Jiangling depression

使其处于封闭状态。从江汉油田研究的古剥蚀数据看,沙市组顶面埋藏深度最大时约为 7000 m。沙市组沉积时期未受到喜山运动的影响,埋藏深度至今约有 6000 m。伴随着沙市组的沉积及上覆层的增厚,盐系所在的环境及卤水的地球化学特征也随之变化^[19]。

随着上覆地层加厚,地层压力增大,开始早期的成岩过程,岩石孔隙减小,颗粒之间逐渐胶结,附着于岩石孔隙中的流体将被挤压脱出;当温度达到 42℃左右,深度约为 600 m 时,盐类中的沉积水便排出岩体,沙市组原始沉积的石膏转变为硬石膏;沙市组盐系中有机质含量丰富,多为炭质软泥岩,处于强还原环境,卤水中溶气氧含量约为 0.51%,在一定的温压和酵素作用下,卤水中的有机质被分解。在成岩中期,白云岩化作用使卤水中的 Mg^{2+} 及 Ca^{2+} 含量增多。结合江陵凹陷沉积地质发展史,江陵凹陷主要为陆源碎屑沉积及蒸发岩化学沉积,其卤水钾含量高的主要原因为,火山活动热事件导致卤水变质和聚集钾及微量元素^[20]。

喜马拉雅的多幕运动控制了盆地的卤水运移,玄武岩、膏质云岩等硬岩石和柔性岩石相间,应力相对集中的褶皱、断裂、裂缝破坏了储层的完整性,并形成裂缝型储层。新近纪,造卤活动进入尾声,江陵凹陷富钾卤水形成后运移到孔隙发育的断裂带、碎屑岩、玄武岩等构造空间中聚集成矿^[21]。

3.3 盐隆构造对卤水的控制作用

盐隆构造在含盐盆地中分布较广泛,盆地内部的断层对其具有较强的控制作用。在盐构造体系中,水体越靠近盐岩层,水体的矿化度、氯离子浓度越高。盐体作为卤水结晶的产物,被认为是因沉积作用形成高矿化度的卤水^[22]。

盐隆构造由于受到盆地断裂带及次级断层的控制,其与盆地断裂带结合,将盆地分割为许多次级凹陷^[23]。江陵凹陷盐隆构造与次级凹陷一起形成凹凸不相间分布的盆地次级构造带,展布方向基本与盆地构造线走向一致^[24]。江陵凹陷盐类矿物在沉积过程中具有继承性特征,在沙市组沉积时期是江汉盆地的沉降、沉积及汇水中心,成为盐类聚集的关键所在。盐隆构造控制的次级凹陷形成于盐层沉积的不同阶段,等同于可汇集不同阶段的卤水,在深大断裂带附近,由于火山活动,又形成富钾卤水聚集的成矿区^[25]。

4 富钾卤水的分布特征

江陵凹陷的钾离子重点富集于卤水中,从已发现卤水的成藏赋存层位看,富钾卤水重点分布于新沟嘴组下段及沙市组中,分别为砂岩储集层(李家台地区)、火山岩储集层(沙市地区、范家台地区)及破碎带储集体(南岗地区)^[26]。

4.1 纵向分布特征

沙市组地下卤水储层较新沟嘴组埋深大,具有明显古盐湖沉积特征,且沙市组受火山活动的影响更强烈,获取的钾离子更多,因此沙市组中富钾程度更高^[27]。

4.2 平面分布特征

根据沙市组和新沟嘴组沉积时期的岩相古地理环境,物源为盆地北部单向水系注入^[28],因此江陵凹陷化学沉积区域主要集中在南部。由于受到万城断层的控制作用,万城断层上升盘沙市组及新沟嘴组较薄,且后期遭受强烈剥蚀作用,因此万城断层下降盘沙市组及新沟嘴组保存较完整,化学沉积盐类厚度大。在荆州背斜带以南,万城断层以西的地区新沟嘴组和沙市组水矿化度高,且盐岩、膏岩、钙芒硝等化学岩类在此区域内厚度大^[29]。

在荆州背斜带以南、万城断层以西的边缘,钾离子含量明显变小,而中心地带钾离子含量高。因此,富钾卤水主要分布于江陵凹陷荆州背斜带以南,万城断层以西的地区^[30](图 6)。江陵凹陷富钾卤水一方面受控于火山活动,另一方面与高矿化度的地层卤水相辅相成,高矿化度的地层卤水受控于盐隆构造间的次级凹陷。

5 结 论

江陵凹陷多口探井钻遇高温富钾卤水,如路 9 井、岗钾 1 井、岗钾 2 井等,钻遇层位主要为新沟嘴组和沙市组。卤水层的分布受控于盐隆构造间的次级凹陷和火山活动。综合分析认为:①越接近岩盐层,卤水矿化度越高。江陵凹陷沙市组及新沟嘴组下段盐膏岩分布面积大,富钾卤水与高矿化度的地层卤水相伴相生,而高矿化度的地层卤水储层多位于盐隆构造间的次级凹陷。②断裂与盐隆构造将江陵凹陷分割成不同大小的次级凹陷,盐类矿物在不同的次级凹陷中沉积,次级凹陷对不同阶段的卤水分布具有控制作用。③江陵凹陷卤水主要集

- [19] 刘卫彬,张世奇,李世臻,等.东濮凹陷沙三段储层微裂缝发育特征及意义[J].地质通报,2018,37(2/3): 496-502.
- [20] 潘源敦,刘成林,徐海明.湖北江陵凹陷深层高温富钾卤水特征及其成因探讨[J].化工矿产地质,2011,33(2): 65-72.
- [21] 马黎春,黄华,张连元,等.湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水矿床特征及成因[J].地质学报,2015,89(11): 2114-2121.
- [22] 刘亚伟,张士万,刘涛,等.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[J].矿床地质,2013,32(6): 1291-1299.
- [23] 沈均均,陈波,王春连,等.江陵凹陷古近系沙市组含膏盐岩系沉积特征研究[J].地球学报,2014,35(4): 425-433.
- [24] 徐伟,王宇,李航空.盐构造成因演化机制及其对研究钾盐矿床成因的意义[J].中国矿山工程,2015,44(2): 48-51,70.
- [25] 黄华,袁娟梅,彭伟,等.江汉盆地古近系潜江组盐湖沉积特征与成藏模式[J].岩性油气藏,2021,33(2): 9-16.
- [26] 王春连,刘成林,胡海兵,等.江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J].古地理学报,2012,14(2): 165-175.
- [27] 刘俊,卢明国,童小兰,等.江陵凹陷构造演化与含油气系统关系研究[J].地球学报,2008,(1): 89-94.
- [28] 余小灿,刘成林,王春连,等.江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J].地学前缘,2022,29(1): 107-123.
- [29] 王必金,曾芳,刘启凤,等.江汉盆地古潜山勘探前景展望[J].江汉石油学院学报,2002,(4): 13-15.
- [30] 高楠安,陈金荣.江陵凹陷油气成藏主控因素及勘探方向[J].江汉石油职工大学学报,2012,25(2): 4-7.