

江陵凹陷古新世地下卤水型硼矿成因研究

王春连¹, 孟令阳², 刘成林¹, 余小灿¹, 颜开¹, 刘思晗³, 游超^{1,4}, 栗克坤⁵,
滕晓华⁶

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 江西省地质矿产勘查开发局 九〇二地质大队, 江西 新余 338099; 3. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 4. 中国地质大学 地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 5. 中化地质矿山总局 河南地质局, 河南 郑州 450000; 6. 枣庄学院 旅游与资源环境学院, 山东 枣庄 277160)

摘要: 中国探明硼资源主要分布于东北和青藏等地区, 矿床品位低, 共伴生矿物多, 开发成本高, 开发利用程度低, 难以满足产业发展需求。目前, 在江汉盆地江陵凹陷勘探中发现卤水中 B_2O_3 浓度达 3 g/L, Li、K、Br、I、Rb、Cs 含量超过工业品位, 综合利用价值高。本文在前人研究的基础上, 对江陵凹陷新生代卤水型硼矿开展水化学、同位素地球化学及实验地球化学分析, 重点研究了古气候、构造和玄武岩等对卤水成矿的影响, 探究其成因机制。研究初步认为, 不同的储卤层岩性具有不同的地球化学和同位素特征, 玄武岩有强烈的蚀变, 说明地下流体对火成岩发生了交代作用, 玄武岩的水-岩反应是富硼卤水矿的重要物质来源; 一定盐度的流体有利于硼离子的活化, 高盐度流体是硼成矿元素主要的迁移载体, 表生环境下干热的古气候使含矿水体蒸发浓缩是富硼卤水富集成矿的重要形成机制。

关键词: 江陵凹陷; 古新世; 火山喷发; 水-岩反应; 富硼卤水; 成因研究

中图分类号: P611.5; P597; P599

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0001-13

A study of the genesis of Paleocene underground brine boron deposits in Jiangling Depression

WANG Chun-lian¹, MENG Ling-yang², LIU Cheng-lin¹, YU Xiao-can¹, YAN Kai¹, LIU Si-han³, YOU Chao^{1,4},
LI Ke-kun⁵ and TENG XIAO-hua⁶

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. No. 902 Geological Party, Jiangxi Bureau of Geology and Exploration and Development of Mineral Resources, Xinyu 338099, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 5. Henan Geological Bureau of CCGMB, Zhengzhou 450000, China; 6. Department of Tourism, Resources and Environment, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: The proved boron resources in China are mainly distributed in Northeast China, Qinghai, Tibet and some other regions. These deposits have low grade, many associated minerals, high development cost and low development and utilization degree, and hence it is difficult for them to meet the needs of industrial development. At present, exploration in Jiangling Depression of Jiangnan Basin shows that the B_2O_3 concentration in the brine reaches 3 g/L, and the content of lithium, potassium, bromide, rubidium and cesium exceeds the industrial

收稿日期: 2020-12-08; 接受日期: 2020-12-30; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005, KK2016); 国家自然科学基金项目(U20A2092, 42002106, 41907262, 41502089); 国家 973 计划项目(2011CB403007); 中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目(DD20190816, DD20190817, DD20190606)

作者简介: 王春连(1983-), 男, 副研究员, 主要从事矿床学方面的研究, E-mail: wangchunlian312@163.com。

grade, with high comprehensive utilization value. On the basis of previous studies, the authors studied hydrochemistry, isotopic geochemistry and experimental geochemistry of Cenozoic brine boron deposits in Jiangling Depression in this paper, with the emphasis placed on the influence of paleoclimate, structure and provenance on brine mineralization as well as the genetic mechanism. It is preliminarily concluded that different halogen lithologies have different geochemical and isotopic characteristics, and basalt has experienced strong alteration, indicating that underground fluid metasomatism of igneous rocks exists, and the water-rock reaction of basalt is an important material source of boron-rich brine deposits. The fluid with a certain salinity is more conducive to the activation of boron ions. The fluid with a high salinity is the main transport carrier of boron ore-forming elements. The evaporation and concentration of ore-bearing water in the dry and hot paleoclimate under the supergenic environment constitute an important process for the enrichment and mineralization of boron-rich brine.

Key words: Jiangling Depression; Paleocene; volcanic eruption; water-rock reaction; boron-rich brine; genesis study

Fund support: Central Welfare Basic Scientific Research Business Expenses (KK2005, KK2016,); National Natural Science Foundation of China (U20A2092, 42002106, 41907262, 41502089); Major State Basic Research Development Program (973 Program) (2011CB403007); Project of China Geological Survey (DD20190816, DD20190817, DD20190606)

我国是硼产品消费大国,表观消费量排名全球前列,约占全球产量的12.5%。自2001年以来硼矿的表观消费量(B_2O_3 ,下同)快速增长,2001年表观消费量7.13万吨,2004年增长至24.96万吨,2013年达61.61万吨,年均增长率达19.69%^①。统计预测,随着经济发展的需要,硼砂和硼酸的产量将分别以年均6.25%和6.50%的速度增长,目前可利用的硼镁石矿将无法保证需要。预计到2025年,我国硼矿的可供产量可能增加到28万吨,但我国硼需求将达到高峰的140万吨,供需缺口进一步加大,我国硼资源的综合保障程度下降到只有20%,硼矿短缺加剧(孙小虹等,2015)。

现代盐湖、地下卤水中常含有硼、钾、锂等战略性高价值元素(张西营等,2009;王春连等,2015,2018,2020;黄华等,2014;Yu *et al.*, 2015;刘成林等,2016;Wang *et al.*, 2016)。江陵凹陷地层卤水中 B_2O_3 浓度达3 g/L,是工业品位3倍,有较高的开发利用价值(李瑞琴等,2013,2014;刘成林等,2016)。开展深层卤水中成矿物质的来源和富集过程的科学研究,对于探究富硼卤水成矿作用机制有重要意义。江汉盆地周缘中生代岩浆活动频繁,岩浆岩可能是盆地卤水矿的成矿物质来源,但卤水型硼矿是地下水-岩反应直接富集,还是通过表生作用富集而形成的,这一问题目前仍未查清。本文选取

江陵凹陷钻井中含硼卤水和盆地边部玄武岩为研究对象,开展了卤水和岩石化学成分等分析,并借助玄武岩的水-岩反应实验,探究卤水型硼矿的成矿物质来源及成因。

1 江陵凹陷区域地质背景

江汉盆地处于北东向新华夏裂谷系与中扬子陆块交汇处,自侏罗纪以来,在中国东部形成强大的应力释放带,裂解形成巨型裂谷系(童崇光,1980)。江陵凹陷位于江汉盆地西南部,自晚白垩世以来经历了多幕的构造运动(Huang and Hinnov, 2014),其构造演化可划分为3个旋回阶段和7个亚期,第1阶段对应晚白垩世至中始新世早期,第2阶段对应中始新世中期至渐新世,第3阶段对应新近纪至第四纪。

江汉盆地被海拔1 000~3 000 m的高山环绕,其周缘被高度超过120 m的低山丘陵环绕,中部是大面积的平原地带(Gan *et al.*, 2014),长江从西北流向东南,后转向东北流向(图1a)。盆地内部被第四纪沉积物覆盖,下部地层只有在盆地边缘才有出露(图1b)。江汉盆地新元古代到中三叠世广泛沉积海相碳酸盐岩和大陆架碎屑岩,晚三叠世到早白垩世沉积陆相碎屑岩,晚白垩世到古新世的地层由大

① 自然资源部中国地质调查局. 2019. 中国战略性矿产论证报告.

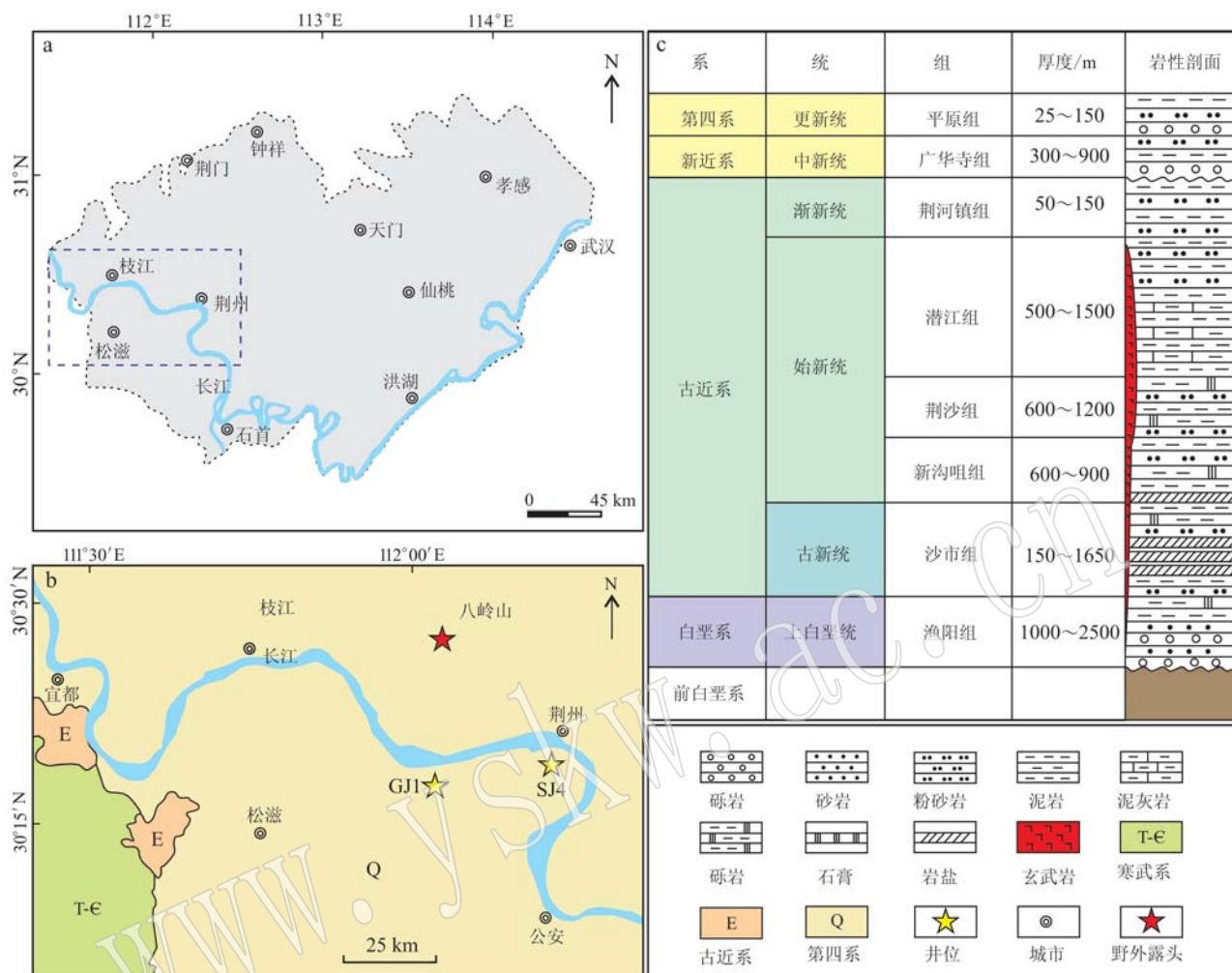


图 1 江汉盆地江陵凹陷地理位置(a)、采样位置(b)、盆地充填演化和地层柱状图(c) [据王必金等(2006)修改]

Fig. 1 Geographical location(a), sampling location (b), basin filling evolution and stratigraphic histogram (c) of Jiangling Depression in Jiangnan Basin (modified after Wang Bijin *et al.*, 2006)

量蒸发岩和夹有玄武岩的碎屑岩系组成(图 1c)。江陵凹陷东北部分布大量的玄武岩,卤水型硼矿空间上与玄武岩有交集,因此推测卤水矿的成矿作用可能受到深部物质来源的影响(Liu *et al.*, 2013; Xu, 2014)。

2 样品与方法

本次研究的 5 件卤水样品采自 2 个钻孔(GJ1 和 SJ4 井): GJ1 井卤水采自古新世泥岩裂缝储卤层,井深 3 571 m; SJ4 井卤水采自玄武岩孔隙型储卤层,井深 3 880 m(图 1b)。6 件玄武岩样品采自江陵凹陷北部的八岭山地区野外露头(图 1b),每次岩浆喷发的顶部为红色气孔杏仁状玄武岩,下部为致密

块状深灰绿色玄武岩。6 件样品中 3 件是气孔杏仁状玄武岩,3 件为致密块状深灰绿色玄武岩,选取 1 件红色气孔杏仁状玄武岩和 1 件致密块状深灰绿色玄武岩用于水-岩反应实验。

2.1 卤水样品成分分析

卤水样品的主量元素分析由国家地质测试中心完成,其中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 用硝酸银和氯化钡滴定法测试,分析精度优于 3%,其他主量元素用 ICP-OES 测试,分析精度优于 5%;微量元素用等离子质谱仪测定(X-series)。

2.2 岩石主量元素含量分析

挑选新鲜玄武岩样品,用玛瑙研钵破碎至 200 目,送至国土资源部国家地质实验测试中心进行分析测试,主量元素用熔片 X 射线荧光光谱法(XRF-

PW4400)检测,分析精度小于2%。

2.3 岩石静态浸泡水-岩反应模拟实验

选定红色气孔杏仁状玄武岩和深灰绿色玄武岩样品各1件,清洗烘干之后用玛瑙研钵将样品细碎至60~80目,从中筛取200 g,平均分成3份,充分搅拌均匀,保证每份的颗粒级配基本一致,注意保证样品清洁无污染,按份分别装入烧杯中。每个样品分3组,浸泡母液分别为蒸馏水、1 mol/L NaCl、2 mol/L NaCl的溶液,均为1 000 mL。烧杯口用表面皿盖住,室温保存。以实验开始日算起,取样时间以天为单位,分别为1、4、9、16、25、36、49天。采集的样品在中国地质科学院矿产资源研究所的ICP-AES上进行 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 B^+ 、 Br^- 、 I^- 等离子含量的分析。

2.4 卤水样品的Sr、B同位素分析

卤水样品用酸分解后转化成盐酸体系,用阳离子交换分离法分离和纯化Sr,用同位素稀释质谱法测定试样中的Sr含量和Sr同位素比值(Wei *et al.*, 2014),测试单位是昆士兰大学放射性同位素实验

室,采用的标准是NBS-987。B的分离纯化采用离子交换法(Xiao *et al.*, 1992),B同位素比值采用Thermo Fisher公司Triton热电离质谱计测定,测试单位是中国科学院青海盐湖研究所,采用的标准是NBS-951。

3 结果

3.1 深层卤水成分

根据对2个钻孔(GJ1、SJ4)观察发现,盆地内卤水矿床从地下1 500~5 000 m都有分布。卤水赋存于古新世沙市组和新沟咀组的构造破碎带、砂岩孔隙以及玄武岩的孔缝中(王春连等, 2018)。卤水具承压性,大型抽水实验结果显示,多口钻井水量稳定,单井涌水量都在1 000 m³/d以上,深层卤水中 B^+ 的含量为588.23~983.99 mg/L,是工业品位3倍,同时还含有K、Li、Br等有益组分, Sr^{2+} 含量为346.02~957.55 mg/L,变化范围较大(表1)。

表1 江陵凹陷富硼卤水的化学组成
Table 1 Chemical composition of boron-rich brine water from Jiangling Depression

序号	样品号	比重	$w_B/(g \cdot L^{-1})$						$w_B/(mg \cdot L^{-1})$			
			K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	B^+	Li^+	Sr^{2+}	Br^-
1	GJ1-1	1.20	9.68	105.87	4.64	0.62	188.48	0.97	965.66	104.73	384.73	139.92
2	GJ1-2	1.20	10.36	116.93	4.91	0.64	205.59	0.73	983.99	105.57	403.38	128.30
3	GJ1-3	1.20	10.25	109.82	5.14	0.81	193.68	0.58	927.62	970.44	346.02	130.02
4	SJ4-1	1.20	8.77	104.07	17.54	3.82	202.01	0.63	588.23	165.48	957.55	141.52
5	SJ4-2	1.20	7.54	103.35	16.33	3.59	201.30	0.59	651.40	185.62	908.57	135.01

3.2 玄武岩地质特征

3.2.1 分布特征

研究区玄武岩分布广、累计厚度大,岩体的分布层位和规模受断裂活动时期和强度的控制。从火山岩厚度等值线图(图2)中可以发现,江陵凹陷东北部的玄武岩十分发育,玄武岩厚度最大588.6 m(港4井),往南厚度逐渐变薄,厚度小于50 m,呈局部分布;玄武岩的分布受近东西向断裂的控制。在凹陷内钻遇到玄武岩的钻井有多口,纵向上分布层位有沙市组、新沟咀组、荆沙组和潜江组。

3.2.2 岩相学特征

玄武岩是江陵凹陷分布最广的溢流相火山岩,在纵向上以红色气孔杏仁状玄武岩和深灰色致密块状玄武岩交替出现为特征(图3a、3b)。红色气孔杏仁状玄武岩中杏仁体充填沸石、绿泥石、方解石和蛋白石等矿物(图3a),深灰绿色致密块状玄武岩柱状

节理发育(图3c),其中方解石和石英脉极为发育,宽1~5 cm,最常可达数米(图3d)。镜下可以识别出,玄武岩具有明显的间粒结构,橄榄石蚀变强烈,发生绿泥石化和伊丁石化(图3e)。斜长石和辉石是主要的造岩矿物,蚀变相对较弱(图3f),副矿物主要为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等。

3.2.3 岩石主量元素含量分析结果

由江陵凹陷玄武岩样品的主量元素分析结果(表2)可知,玄武岩中 SiO_2 含量为48.03%~52.55%,平均值为50.92%; Na_2O 含量变化范围为3.85%~5.56%,平均值为4.79%; K_2O 含量变化为0.36%~2.05%,平均值为1.00%; Al_2O_3 含量为12.30%~14.00%,平均值为13.45%; CaO 含量在4.23%~7.35%,平均值为5.76%。由表2可以看出,江陵凹陷玄武岩是拉斑玄武岩,属于钠质系列,可能为盆地卤水带来丰富的物质来源。

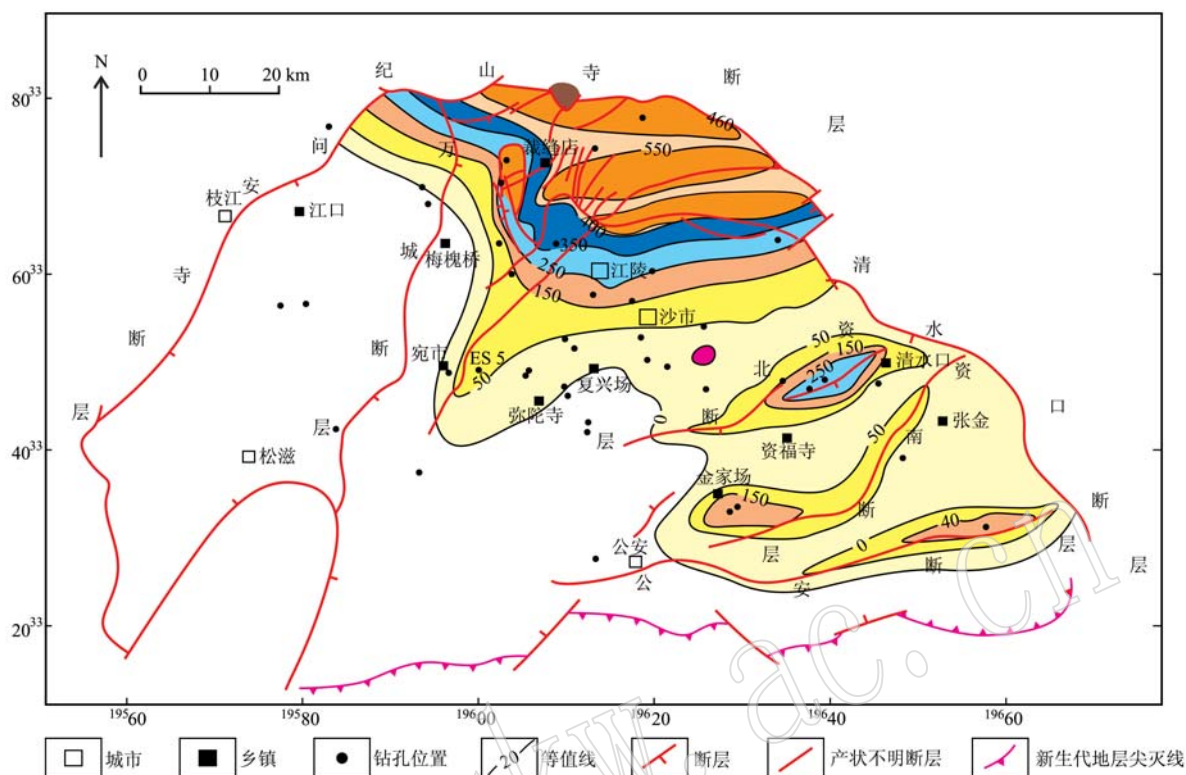


图2 江陵凹陷玄武岩分布图(王春连等, 2018)

Fig. 2 The distribution of volcanic rocks in Jiangling Depression (Wang Chunlian *et al.*, 2018)

3.3 玄武岩静态浸泡水-岩反应模拟实验结果

玄武岩静态浸泡水-岩反应模拟实验结果见表3。由表3可见, B^+ 在蒸馏水母液中基本没有检测到, 在NaCl溶液中含量也较低, 但在2 mol/L NaCl溶液中的含量比在1 mol/L NaCl溶液中高, 并且随时间延长, 含量变化不明显。 Br^- 和 I^- 与 B^+ 的含量变化规律类似。 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 在蒸馏水母液中均有一定溶出, 在NaCl溶液中的含量变化规律也与其他离子近似。

3.4 Sr、B同位素分析结果

江陵凹陷古新世卤水Sr同位素分析结果(表4)显示, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为0.706 924~0.710 334; 玄武岩储卤层(SJ4)中卤水的锶同位素比值较低, 而泥岩裂缝储卤层(GJ1)中卤水的锶同位素比值较高。江陵凹陷古新世卤水B同位素分析结果(表4)显示, $\delta^{11}B$ 值为0.12‰~13.59‰, B含量为28.8~821.0 mg/L, 不同含水层的硼同位素比值不同, 玄武岩储卤层 $\delta^{11}B$ 值为0.12‰~0.21‰, 碎屑岩储卤层 $\delta^{11}B$ 值为13.08‰~13.59‰。

4 讨论

4.1 大地构造

据关德范(1977), 我国东部地区中生代火山岩分为北北东向延伸的4个岩带。据徐义刚等(2015)的研究成果可知, 古近纪的火山活动主要分布在北东向的松辽平原、华北平原、江汉平原之下, 最厚处的玄武岩超过1 000 m, 喷出的岩浆以拉斑玄武岩为主, 地表只有零星出露。自白垩纪到古新世, 华北地区发生了以火山活动、裂陷盆地形成、大规模成矿为特征的大规模的岩石圈伸展(Gilder *et al.*, 1991; Lin and Wang, 2006; Zhai *et al.*, 2007)。同时期, 在华中-华南地区由于岩石圈的伸展, 也出现大规模的断陷盆地、火山喷发和成矿成藏作用(毛景文等, 2005)。

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%(Yu *et al.*, 2020)。江陵凹陷火山岩非常发育, 分布面积达3 527 km², 占了整个

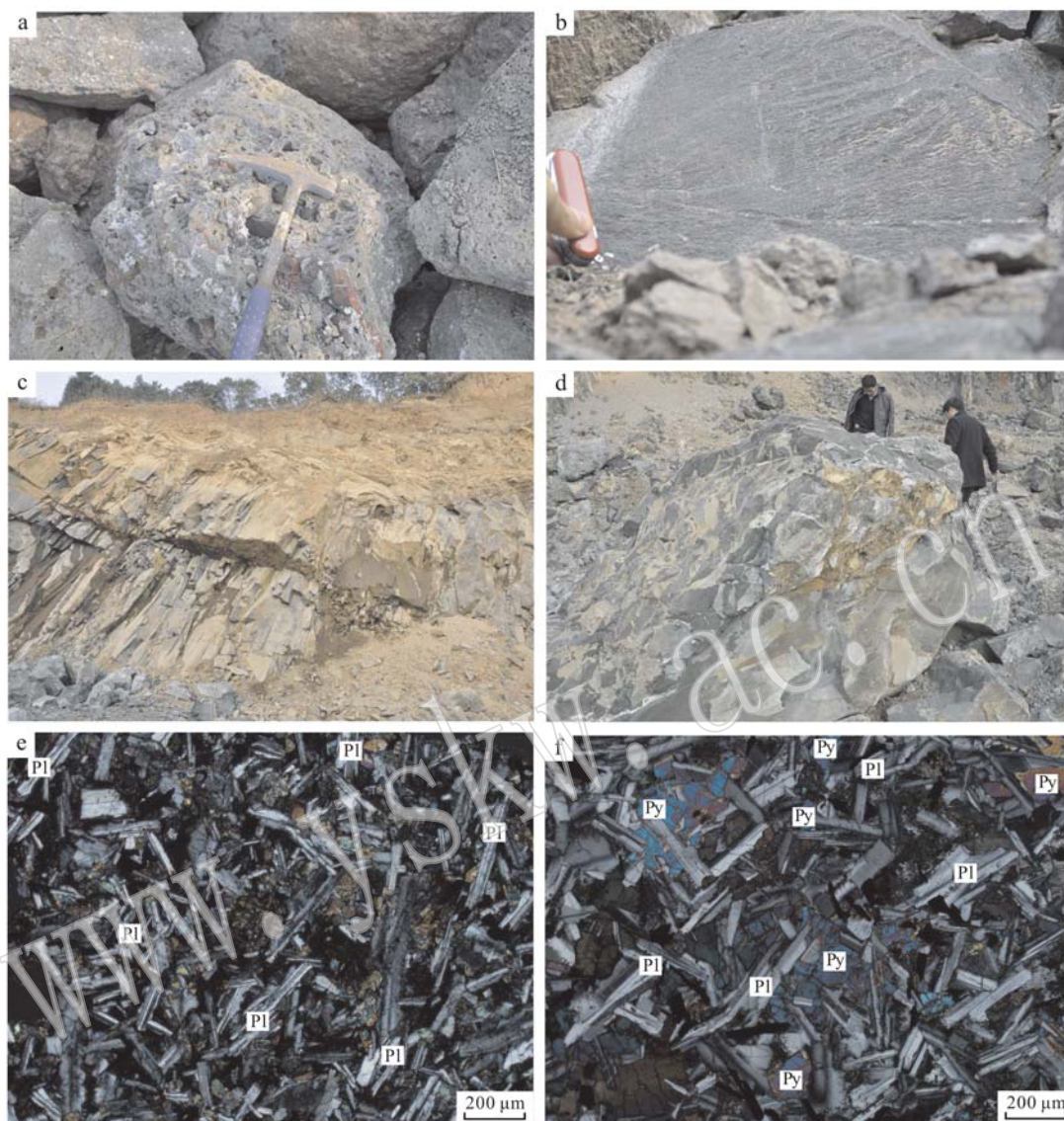


图 3 江陵凹陷玄武岩野外露头 and 镜下照片

Fig. 3 Field outcrops and microscopic photographs of basalt in Jiangling Depression

a—红色气孔杏仁状玄武岩; b—致密块状玄武岩; c—柱状节理玄武岩; d—玄武岩内方解石和石英脉发育; e—间粒结构的玄武岩, 橄榄石蚀变强烈, 发生绿泥石化和伊丁石化, 正交偏光; f—玄武岩主要由斜长石(Pl)和辉石(Py)构成, 蚀变相对较弱, 正交偏光。

a—red stomata almond-shaped basalt; b—dense massive basalt; c—columnar jointed basalt; d—calcite and quartz veins developed in basalt; e—intergranular basalt, olivine subjected to intense alteration, chloritization and idinization, crossed nicols; f—basalt mainly composed of plagioclase (Pl) and pyroxene (Py), with weak alteration pairs, crossed nicols

表 2 江陵凹陷玄武岩岩石主量元素分析表

 $w_B/\%$

Table 2 Rock content analysis of basalt in Jiangling Depression

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	总量
JL-1	52.04	2.00	14.00	4.24	0.21	6.32	6.37	4.25	0.82	0.20	0.89	100.04
JL-2	51.10	1.95	13.03	5.64	0.10	8.29	4.23	5.44	0.36	0.22	3.05	100.14
JL-3	52.55	1.94	13.86	3.23	0.23	6.73	6.84	3.85	0.64	0.19	0.44	100.23
JL-4	50.94	2.03	13.65	6.98	0.10	7.49	4.55	5.56	0.52	0.22	2.63	100.93
JL-5	50.86	2.26	13.86	2.32	0.17	5.72	5.21	5.37	1.62	0.29	2.63	100.23
JL-6	48.03	2.08	12.30	2.52	0.16	6.16	7.35	4.29	2.05	0.27	2.08	100.66

表 3 玄武岩静态浸泡实验数据结果

Table 3 The water-rock reaction simulation experiment with time variable

样品	流体	时间/d	离子浓度/(mg · L ⁻¹)						
			B ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Br ⁻	I ⁻
JL-1	蒸馏水	1	—	1.19	5.64	0.59	0.04	—	—
JL-1	蒸馏水	4	—	1.22	8.67	0.77	0.05	—	—
JL-1	蒸馏水	9	—	1.86	11.55	1.21	0.06	—	—
JL-1	蒸馏水	16	—	2.48	14.40	1.42	0.07	—	—
JL-1	蒸馏水	25	—	2.88	17.32	1.76	0.08	—	—
JL-1	蒸馏水	36	—	3.82	19.49	1.91	0.09	—	—
JL-1	蒸馏水	49	—	6.11	21.30	2.25	0.11	—	—
JL-1	1 mol/L NaCl	1	0.08	3.09	223.00	12.30	1.25	3.23	0.16
JL-1	1 mol/L NaCl	4	0.07	3.13	242.66	13.49	1.34	3.46	0.14
JL-1	1 mol/L NaCl	9	0.07	3.22	253.26	14.11	1.38	3.43	0.16
JL-1	1 mol/L NaCl	16	0.07	3.25	272.11	14.62	1.24	3.36	0.14
JL-1	1 mol/L NaCl	25	0.08	3.30	272.88	14.46	1.41	3.06	0.16
JL-1	1 mol/L NaCl	36	0.09	7.29	284.28	18.56	1.52	3.92	—
JL-1	1 mol/L NaCl	49	0.08	10.20	299.04	18.79	1.58	4.67	—
JL-1	2 mol/L NaCl	1	0.23	6.62	271.66	18.31	1.55	8.35	0.46
JL-1	2 mol/L NaCl	4	0.28	6.68	301.85	20.25	1.66	7.93	0.40
JL-1	2 mol/L NaCl	9	0.22	7.24	320.52	20.81	1.72	8.58	0.43
JL-1	2 mol/L NaCl	16	0.25	8.15	321.65	20.15	1.64	7.45	0.18
JL-1	2 mol/L NaCl	25	0.38	8.89	323.52	20.54	1.72	8.50	0.34
JL-1	2 mol/L NaCl	36	0.28	11.39	325.65	21.53	1.78	10.27	—
JL-1	2 mol/L NaCl	49	0.28	14.15	342.45	22.72	1.90	10.03	—
JL-6	蒸馏水	1	—	0.62	0.56	0.44	0.03	—	—
JL-6	蒸馏水	4	—	0.62	0.93	0.64	0.04	—	—
JL-6	蒸馏水	9	—	1.64	1.65	1.16	0.06	—	—
JL-6	蒸馏水	16	—	1.83	1.98	1.32	0.07	—	—
JL-6	蒸馏水	25	—	2.74	2.77	1.57	0.09	—	—
JL-6	蒸馏水	36	—	2.91	3.28	2.25	0.11	—	—
JL-6	蒸馏水	49	—	5.49	4.10	2.60	0.13	—	—
JL-6	1 mol/L NaCl	1	0.05	1.88	18.36	6.87	0.74	2.52	0.11
JL-6	1 mol/L NaCl	4	0.05	1.90	21.38	7.77	0.81	2.16	0.12
JL-6	1 mol/L NaCl	9	0.06	2.05	22.59	7.83	0.82	2.35	0.10
JL-6	1 mol/L NaCl	16	0.05	2.08	23.49	8.13	0.84	2.25	0.11
JL-6	1 mol/L NaCl	25	0.06	2.13	24.29	8.40	0.87	3.04	0.10
JL-6	1 mol/L NaCl	36	0.06	4.28	27.16	11.44	0.96	3.03	—
JL-6	1 mol/L NaCl	49	0.06	4.58	27.87	11.53	0.98	0.16	—
JL-6	2 mol/L NaCl	1	0.22	4.38	22.88	10.13	0.95	5.23	0.19
JL-6	2 mol/L NaCl	4	0.31	4.76	26.65	10.68	0.96	5.85	0.28
JL-6	2 mol/L NaCl	9	0.33	4.80	27.65	10.79	0.94	5.32	—
JL-6	2 mol/L NaCl	16	0.37	4.86	28.88	11.34	1.01	4.86	0.34
JL-6	2 mol/L NaCl	25	0.21	4.99	30.12	11.42	1.02	5.46	0.27
JL-6	2 mol/L NaCl	36	0.23	8.15	30.75	12.16	1.08	7.13	—
JL-6	2 mol/L NaCl	49	0.23	13.29	30.27	12.22	1.09	7.55	—

注：“—”的含义是低于检测限。

表 4 江陵凹陷富硼卤水 Sr、B 同位素分析结果

Table 4 Strontium and boron isotope analysis of boron-rich brine in Jiangling Depression

序号	样品号	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	δ ¹¹ B/‰	2σ	B/(mg · L ⁻¹)
1	GJ1-1	0.710 325	0.000 009	13.59	0.20	783.0
2	GJ1-2	0.710 334	0.000 009	13.08	0.14	821.0
3	GJ1-3	0.710 328	0.000 008	13.21	0.18	811.0
4	SJ4-1	0.706 924	0.000 010	0.21	0.13	28.8
5	SJ4-2	0.706 927	0.000 007	0.12	0.16	29.1

凹陷的近一半面积,厚度平均超过 200 m,从沙市组—潜江组均有火山岩分布(徐论勋等, 1995; Wu *et al.*, 2020)。八岭山地区前期野外踏勘采集的部分玄武岩样品为典型的大陆裂谷拉斑玄武岩,富含 K、Li、Rb、Sr、Zn、Cu 等元素(杨长清等, 2003)。

大多数学者都认为,岩浆的成分主要受源区的成分控制,而且软流圈—岩石圈的相互作用导致了源

区的不均一性,拉斑玄武岩则是岩石圈地幔或有部分软流圈地幔的加入在浅部相对高程度熔融的结果(Xu *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2007)。陆内拉斑玄武岩一般具有较高的硼含量,为 $0.48 \times 10^{-6} \sim 17.8 \times 10^{-6}$ (Palmer, 1991)。因 B 为易溶元素,可以大量释放到地表热泉水、温泉水、浓卤水和大气降水中。伴随着江陵凹陷古新世大规模的火山喷发,岩浆及期后热液携带的大量含硼元素的矿物质,可以为江陵凹陷卤水矿提供大量的成矿物质。

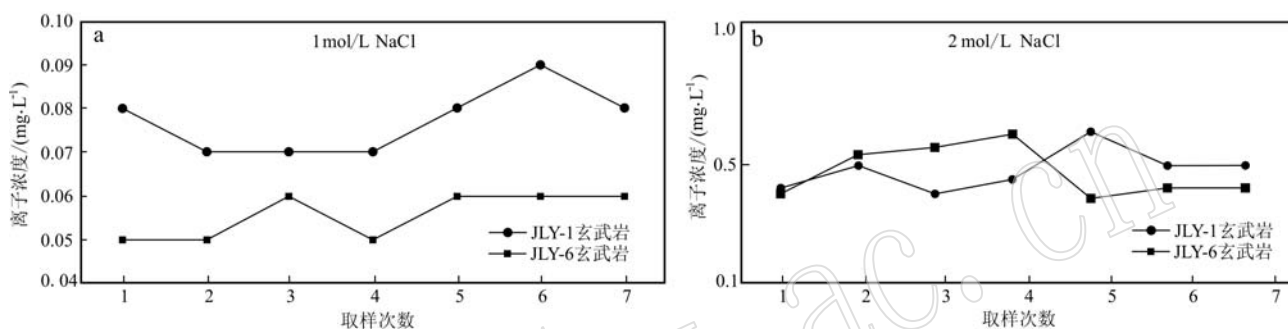


图4 玄武岩静态浸泡实验中 B⁺ 浓度变化图

Fig. 4 Variation diagram of B ion concentration in basalt static immersion experiment

4.3 古新世时期古气候

江汉盆地古新世时期气候干旱,江陵凹陷的古孢粉学研究表明,白垩纪-古近纪区域植物群中干旱气候特征的成分非常繁盛,孢粉以榆粉属、克拉梭粉属、希指蕨孢属、麻黄粉属为代表(Wang *et al.*, 2020)。本区在古新世早期为半干旱的亚热带气候,古新世中期变干,恢复到亚热带干旱气候(童国榜等,2002)。

极端干热气候事件可使全球地表温度增加 5~6℃ (Cowling, 1999; McElwain *et al.*, 1999; Veizer *et al.*, 2000; Manners *et al.*, 2013; Jones *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2016)。新生代有多次干热气候事件,其中在古新世-始新世界线附近发生了 PETM 事件、由大量甲烷注入大气圈引发的全球快速增温事件(Kennett and Stott, 1991; Dypvik *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2014)。江陵凹陷古新世的含盐系地层沉积环境是以暖旱为主的暖旱与潮湿频繁交替环境,在“高山深盆”古地貌背景下,湖盆卤水通过强蒸发作用(极端干热气候事件)达到氯化钠饱和而析出石盐,继续蒸发形成富硼卤水,并随成盐时间的长短而沉积,形成了厚度不等的石盐岩层。江陵凹陷古新世-始新世含盐系地层中的泥岩、粉-细砂岩、泥灰岩、石盐岩以无水芒硝、钙芒硝、硬石膏、钾石膏、钾

4.2 水-岩反应

玄武岩静态浸泡实验中, B⁺ 在溶液中的含量较低,变化不大,波动有一定的规律,在 2 mol/L NaCl 溶液中比在 1 mol/L NaCl 溶液中活化效果更明显,普遍高出 1~2 倍,说明一定盐度的流体更容易促进离子的活化(表 3、图 4)。蒸馏水中岩石中 B 元素完全不溶解,进一步揭示了弱碱性的盆地卤水与玄武岩发生水-岩反应可为富硼钾卤水提供成矿物质来源。

石盐、光卤石等矿物沉积为特征(王春连等, 2015; Wang *et al.*, 2016),这是气候干热的矿物学标志。

4.4 富硼卤水成因探讨

江陵凹陷卤水储集体有不同类型的岩性, GJ1 井储卤层的岩性由棕色粉砂质泥岩、灰色泥岩和一些近乎垂直的泥岩裂缝组成(图 5a)。SJ4 井储卤层岩性由玄武岩和石英砂岩组成。基于江陵凹陷钻孔矿物学研究,一些化学物质交换过程被证实,粘土矿物、白云石和黄铁矿(图 5b、5c、5d)在 GJ1 井储卤层部位十分发育。大量的钠长石和黄铁矿出现在 SJ4 井岩屑中(图 5e、5f),这可能是 SJ4 卤水中 Ca²⁺ 含量高而 SO₄²⁻ 减少的原因(表 1)。

岩石风化后,卤水中元素的浓缩主要受控于温度和矿物组合(Pogge von Strandmann *et al.*, 2014)。由于大陆地热系统岩性复杂,单一同位素示踪往往导致不能全面揭示其成因,而多同位素不但提供更广泛的源区信息,而且能评估储卤层温度和岩性的影响(Millot and Négrel, 2007; Millot *et al.*, 2007, 2011, 2012; Sanjuan *et al.*, 2016),因此多同位素示踪显得尤为重要。碎屑岩中的泥岩、砂岩有相似的 Sr-B 同位素组成,玄武岩 Sr-B 同位素组成与碎屑岩完全不同,油田水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 δ¹¹B 值较高,因此 Sr

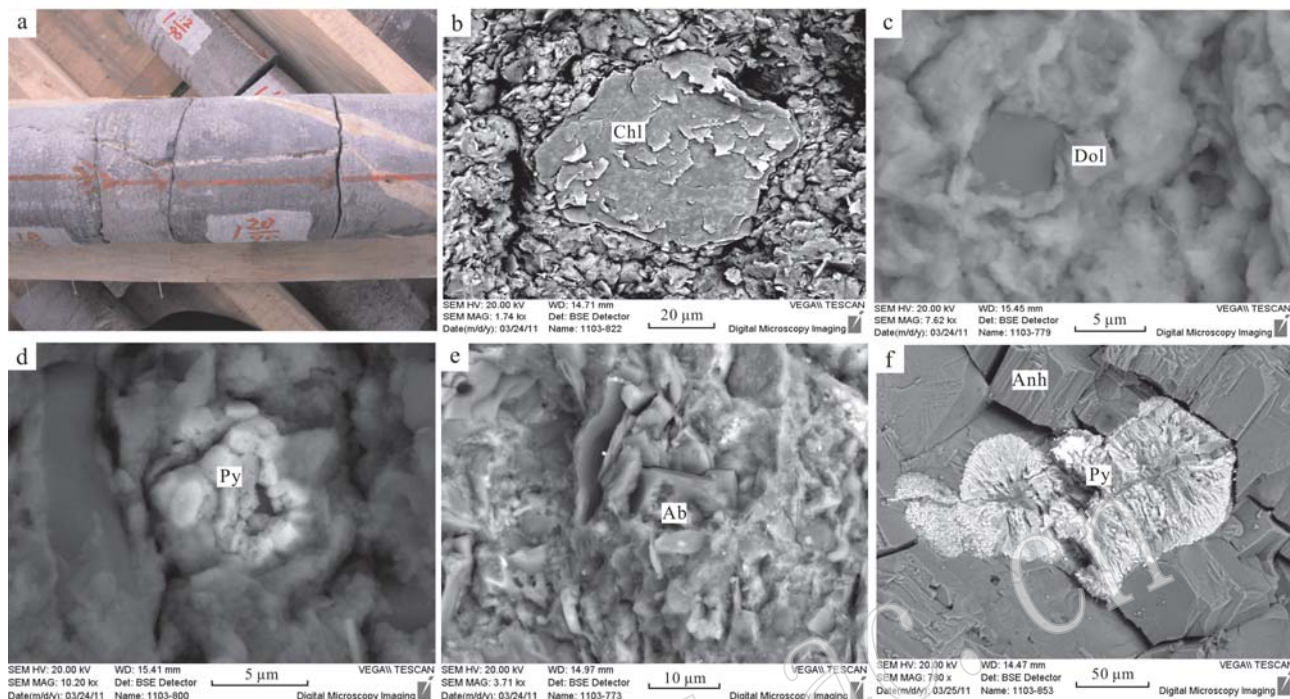


图 5 江陵凹陷不同储卤层矿物学特征

Fig. 5 Mineralogical characteristics of different brine reservoirs in Jiangling Depression

a—泥岩裂缝, GJ1 井, 3 970.66 m; b—片状绿泥石 (Chl), GJ1 井, 3 970.68 m; c—立方体状白云石 (Dol), GJ1 井, 3 970.55 m; d—黄铁矿 (Py) 颗粒, GJ1 井, 3 970.64 m; e—立方体状钠长石 (Ab), SJ4 井, 3 970 m; f—硬石膏 (Anh) 晶间放射状黄铁矿, SJ4 井, 3 970 m

a—mudstone fracture, well GJ1, 3 970.66 m; b—flaky chlorite (Chl), well GJ1, 3 970.68 m; c—cubic dolomite (Dol), well GJ1, 3 970.55 m; d—pyrite (Py) particles, well GJ1, 3 970.64 m; e—cuboid sodium feldspar (Ab), well SJ4, 3 970 m; f—anhydrite (Anh) intercrystalline radial pyrite, well SJ4, 3 970 m

和 B 同位素数据可以约束深层卤水 Sr 和 B 的起源并确定水-岩反应过程控制 Sr-B 同位素特征的机制。

由图 6 可见,江陵凹陷深层卤水 Sr-B 同位素组成与碎屑岩和玄武岩的水-岩反应有关。Sr 同位素主要来自大陆碎屑岩而非地幔,这与卤水 Sr 同位素数据(表 4)是一致的。江陵凹陷玄武岩储卤层的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.704 135~0.708 775(彭头平等, 2006),比碎屑岩储卤层的值要小,证实了玄武岩储卤层中的卤水与储层存在水-岩反应。玄武岩和岩盐的 B 同位素数据公布较多,而泥岩和砂岩数据较少。早始新世碎屑岩中的卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 值和利用 B 同位素分馏方程计算的砂岩中粘土和白云母的 $\delta^{11}\text{B}$ 值(Williams *et al.*, 2001)是一致的。

Sr 和 B 同位素组成的变化受控于储层的主要岩性和不同温度下的水-岩反应。虽然储层温度和同位素数值没有直接的相关性,但温度在控制水-岩反应进程方面扮演了重要的角色(Millot and Négrel, 2007; Millot *et al.*, 2007)。此外,水-岩反应期间,

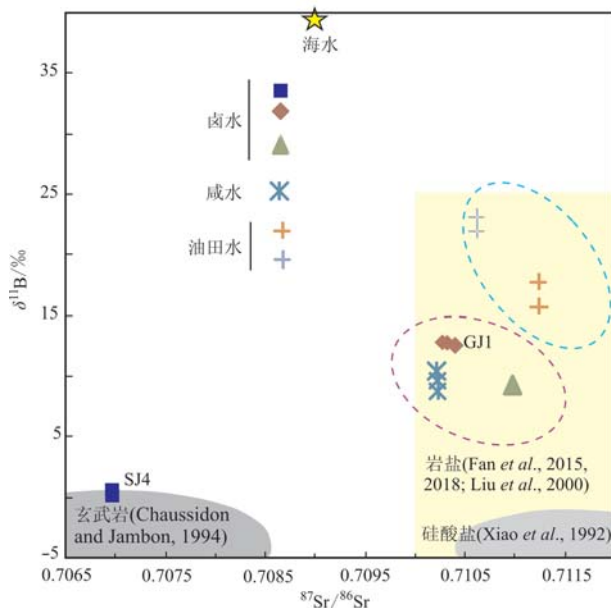


图 6 江陵凹陷古新世卤水 Sr-B 同位素特征图

Fig. 6 Sr-B isotope diagram of Paleocene brine in Jiangling Depression

水在岩石中足够长的滞留时间是至关重要的。通过Sr、B同位素研究,发现江陵凹陷古新世卤水同位素组成与玄武岩、碎屑岩是一致的。运用多同位素结合的方法,在江陵凹陷示踪水-岩反应过程是十分有效的(图6)。

江陵凹陷长期沉降,导致盆地封闭性良好。古新世时期,江陵凹陷火山活动频繁,可为凹陷内卤水成矿带来丰富的成矿物质补给。但江陵凹陷卤水中硼含量异常高,达到工业品位,单独的水-岩反应是不能使成矿流体的浓度达到这么高的,这和后期古湖泊在极端干热气候的条件下蒸发浓缩使矿物质不断富集是分不开的。江陵凹陷富硼卤水的形成是构造条件、物质条件与干旱气候相互耦合的结果。

5 结论

(1) 江陵凹陷中部钻井(GJ1和SJ4井)中的深层卤水具有高的矿化度,由于不同的储卤层岩性而具有不同的地球化学和同位素特征。

(2) 通过镜下岩相学研究,玄武岩主要矿物长石和辉石、辉石发生绿泥石化,说明地下热液对研究区火成岩的交代作用强烈,火成岩通过水-岩反应为富硼卤水矿床提供了物质来源。

(3) 室温静态浸泡实验表明,一定盐度的流体更有利于B⁺的活化,在2 mol/L NaCl溶液中表现尤为突出。在蒸馏水中岩石中B元素完全不溶解,进一步揭示了弱碱性的盆地卤水与玄武岩发生水-岩反应可为富硼钾卤水提供成矿物质来源。

(4) 古新世深层卤水Sr和B同位素组成受控于玄武岩和碎屑岩内发生的水-岩反应,B同位素和传统的用来示踪水-岩反应过程的H、O、Sr同位素研究结果是一致的。

(5) 静态水-岩反应实验结果与钻井中采集到的卤水的成分特征吻合,但水-岩反应释放出的矿物质含量与卤水里的成矿物质相差较大,说明富矿卤水的形成需要漫长的地质时间。江陵凹陷古新世发生的水-岩反应是卤水成矿的重要地质过程,而干热的古气候条件致使地表流体蒸发浓缩富集是卤水成矿最主要机理。

致谢 本文野外地质工作期间得到了锦辉(荆州)精细化工有限公司章宽、陈成工程师的大力支持,中国地质科学院矿产资源研究所沈立建助理研

究员等人在样品处理过程中给予了较大帮助,审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

References

- Chaussidon M and Jambon A. 1994. Boron content and isotopic composition of oceanic basalts: Geochemical and cosmochemical implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 277~291.
- Chen Y, Zhang Y X, Graham D, *et al.* 2007. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in north-east China [J]. *Lithos*, 96: 108~126.
- Chen Z L, Wang X, Hu J F, *et al.* 2014. Structure of the carbon isotope excursion in a high-resolution lacustrine Paleocene-Eocene Thermal Maximum record from central China [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 408(1): 331~340.
- Chen Z L, Ding Z L, Yang S L, *et al.* 2016. Increased precipitation and weathering across the Paleocene-Eocene thermal maximum in central China [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17: 2 286~2 297.
- Cowling S A. 1999. Plants and temperature: CO₂ uncoupling [J]. *Science*, 285: 1 500~1 501.
- Dypvik H, Riber L, Burca F, *et al.* 2011. The Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM) in Svalbard clay mineral and geochemical signals [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 302: 156~169.
- Fan Q S, Lowenstein T K, Wei H C, *et al.* 2018. Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan Salt Lake, western China [J]. *Chemical Geology*, 497: 128~143.
- Fan Q S, Ma Y Q, Cheng H D, *et al.* 2015. Boron occurrence in halite and boron isotope geochemistry of halite in the Qarhan Salt Lake, western China [J]. *Sedimentary Geology*, 322: 34~42.
- Gan Y Q, Wang Y X, Duan Y H, *et al.* 2014. Hydrogeochemistry and arsenic contamination of groundwater in the Jiangnan Plain, central China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 38: 81~93.
- Gilder S A, Keller G R, Luo M, *et al.* 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China [J]. *Tectonophysics*, 197: 225~243.
- Guan Defan. 1977. Geological conditions for the formation of oil and gas in the second subsidence zone of the New Cathaysia Series [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2: 7~21 (in Chinese).
- Huang C and Hinnov L. 2014. Evolution of an Eocene-Oligocene saline lake depositional system and its controlling factors, Jiangnan Basin,

- China[J]. *Journal of Earth Science*, 16(6): 959~976. doi: 10.1007/s12583-014-0499-2.
- Huang Hua, Liu Chenglin, Zhang Shiwan, *et al.* 2014. Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling depression[J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 1 101~1 107 (in Chinese with English abstract).
- Jones T D, Lunt D J, Schmidt D N, *et al.* 2013. Climate model and proxy data constraints on ocean warming across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum[J]. *Earth-Science Reviews*, 125: 123~145.
- Kennett J P and Stott L D. 1991. Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of Palaeocene [J]. *Nature*, 353: 225~229.
- Li Ruiqin, Chen Xia, Liu Chenglin, *et al.* 2014. Study on loss mechanism of rubidium during potassium crystallization from potassium-rich brine of Jiangling sunken area[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 46(2): 18~20, 26 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Chen Xia, *et al.* 2013. Salting law by cooling deep potassium-bearing brine in Jiangling depression[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 21(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Lin W and Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Block: A crustal response to subcontinental mantle removal? [J]. *Bull. Geol. Soc. France*, 117(6): 287~297.
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Zhao Yanjun, *et al.* 2016. A tentative discussion on regional metallogenic background and mineralization mechanism of subterranean brines rich in potassium and lithium in South China Block[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1 119~1 143 (in Chinese with English abstract).
- Liu J H, Zhang P Z, Lease R O, *et al.* 2013. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 584: 281~296.
- Liu W G, Xiao Y K, Peng Z C, *et al.* 2000. Boron concentration and isotopic composition of halite from experiments and salt lakes in the Qaidam Basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 2 177~2 183.
- Kennett J P and Stott L D. 1991. Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of Palaeocene [J]. *Nature*, 353: 225~229.
- Manners H R, Grimes S T, Sutton P A, *et al.* 2013. Magnitude and profile of organic carbon isotope records from the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Evidence from northern Spain[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 376: 220~230.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- McElwain J C, Beerling D J and Woodward F I. 1999. Fossil plants and global warming at the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Science*, 285: 1 386~1 390.
- Millot R, Guerrot C, Innocent C, *et al.* 2011. Chemical, multi-isotopic (Li-B-Sr-U-H-O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin[J]. *Chemical Geology*, 283: 226~241.
- Millot R, Hegan A and Négrel P. 2012. Geothermal waters from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Li, B and Sr isotopes characterization[J]. *Applied Geochemistry*, 27: 677~688.
- Millot R and Négrel P. 2007. Multi-isotopic tracing ($\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and chemical geothermometry: Evidence from hydro-geothermal systems in France[J]. *Chemical Geology*, 244: 664~678.
- Millot R, Négrel P and Petelet-Giraud E. 2007. Multi-isotopic (Li, B, Sr, Nd) approach for geothermal reservoir characterization in the Limagne Basin (Massif Central, France) [J]. *Applied Geochemistry*, 22: 2 307~2 325.
- Palmer M R. 1991. Boron-isotope systematics of Halmahera arc (Indonesia) lavas: Evidence for involvement of the subducted slab[J]. *Geology*, 19: 215~217.
- Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2006. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of the early Tertiary basaltic rocks in the Jiangnan Basin, China and its petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 617~1 626 (in Chinese with English abstract).
- Pogge von Strandmann P A E, Porcelli D, James R H, *et al.* 2014. Chemical weathering processes in the Great Artesian Basin: Evidence from lithium and silicon isotopes[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 406: 24~36.
- Sanjuan R, Millot R, Innocent Ch, *et al.* 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation[J]. *Chemical Geology*, 428: 27~47.
- Sun Xiaohong, Xiong Xianxiao, Wang Ying, *et al.* 2015. Types and spatial and temporal distribution of boron deposits in China [J]. *Geological Review*, 61(Z1): 810~811 (in Chinese with English abstract).
- Tong Chongguang. 1980. Some characteristics of petroleum geology of the rift system in eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(4): 19~26 (in Chinese with English abstract).
- Tong Guobang, Jia Xiumei, Zheng Mianping, *et al.* 2002. Palynological

- Evidence of Middle-Late Eocene Climatic Cycles in Jiangnan Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2): 159~164 (in Chinese with English abstract).
- Veizer J, Godderis Y and Franc ois L M. 2000. Evidence for decoupling of atmospheric CO₂ and global climate during the Phanerozoic eon [J]. *Nature*, 408: 698~701.
- Wang Bijin, Lin Changsong, Chen Ying, *et al.* 2006. Episodic tectonic movement and evolutionary characteristics of the Jiangnan Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 41: 226~230 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Liu Baokun, *et al.* 2015. The discovery of carnallite in Paleocene Jiangling Depression and its potash searching significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 129~136 (in Chinese with English abstract).
- Wang C L, Liu C L, Yu X C, *et al.* 2016. The extremely hot and dry climatic events and potash enrichment in salt lakes [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(2): 769~770.
- Wang Chunlian, Huang Hua, Wang Jiuyi, *et al.* 2018. Geological features and metallogenic model of K- and Li- rich brine ore field in the Jiangling depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 630~1 646 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Liu Lihong, Li Qiang, *et al.* 2020. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium-potassium ore in Jitai Basin of Jiangxi province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65~84 (in Chinese with English abstract).
- Wang C L, Liu C L, Wang J Y, *et al.* 2020. Palynology and stratigraphy of the thick evaporate-bearing Shashi Formation in Jiangling Depression, Jiangnan Basin of South China, and its paleoclimate change [J]. *China Geology*, 3(2): 283~291.
- Wei X, Xu Y G, Feng Y X, *et al.* 2014. Plume-lithosphere in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints [J]. *Am. J. Sci.*, 314: 314~356.
- Williams L B, Hervig R L, Holloway J R, *et al.* 2001. Boron isotope geochemistry during diagenesis. Part II. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 1 769~1 782.
- Wu L L, Mei L F and Paton D A. 2020. Late Cretaceous-Cenozoic intraplate extension and tectonic transitions in eastern China: Implications for intraplate geodynamic origin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 117, doi. org/10. 1016/j. marpetgeo. 2020. 104 379.
- Xiao Y K, Sun D P, Wang Y H, *et al.* 1992. Boron isotopic compositions of brine, sediments, and source water in Da Qaidam Lake, Qinghai [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 1 561~1 568.
- Xu Lunxun, Yan Chunde, Yu Huilong, *et al.* 1995. Jiangnan Basin Tertiary volcanic rocks [J]. *Oil Gas Geology*, 16(2): 132~137 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90~40 Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 143: 49~67.
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, *et al.* 2005. Role of lithosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 224: 247~271.
- Xu Yigang and Fan Qicheng. 2015. Cenozoic Volcanism in Eastern China: Review and Perspectives [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 682~689 (in Chinese with English abstract).
- Yang Changqing, Chen Kongquan, Cheng Zhiqiang, *et al.* 2003. Constituent evolution and exploration potential in Jiangling depression [J]. *Natural Gas Industry*, 23: 51~54 (in Chinese with English abstract).
- Yu X C, Wang C L, Liu C L, *et al.* 2015. Sedimentary characteristics and depositional model of a Paleocene-Eocene salt lake in the Jiangling Depression, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(6): 1 426~1 435.
- Yu X C, Liu C L, Wang C L, *et al.* 2020. Eolian deposits of the northern margin of the South China (Jiangnan Basin): Reconstruction of the Late Cretaceous East Asian landscape in central China [J]. *Marine and Petroleum Geology* 117: 104 390.
- Zhang Xiyang, Ma Haizhou, Gao Donglin, *et al.* 2009. Analysis of influencing factors causing the changes of chemical components of underground brine in mining area of West Taijinar salt lake [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 17(4): 22~26 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M, Fan Q, Zhang H, *et al.* 2007. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: underplating, replacement and delamination [J]. *Lithos*, 96(1): 36~54.

附中文参考文献

- 关德范. 1977. 新华夏系第二沉降带油、气形成的地质条件 [J]. 东北石油大学学报, 2: 7~21.
- 黄 华, 刘成林, 张士万, 等. 2014. 深层富钾卤水的地球物理探测技术及应用——以江陵凹陷为例 [J]. 矿床地质, 33(5): 1 101~1 107.
- 李瑞琴, 陈 侠, 刘成林, 等. 2014. 江陵富钾卤水析钾过程中铀流

- 失机理研究[J]. 无机盐工业, 46(2): 18~20, 26.
- 李瑞琴, 刘成林, 陈 侠, 等. 2013. 江陵凹陷深层富钾卤水井内降温析盐情况探讨[J]. 盐湖研究, 21(1): 1~6.
- 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 等. 2016. 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, 35(6): 1 119~1 143.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. 矿床地质, 24(3): 193~205.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 江汉盆地早第三纪玄武质岩石³⁹Ar/⁴⁰Ar年代学和地球化学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 22(6): 1 617~1 626.
- 孙小虹, 熊先孝, 王 莹, 等. 2015. 中国硼矿床类型及时空分布规律[J]. 地质论评, 61(Z1): 810~811.
- 童崇光. 1980. 中国东部裂谷系盆地的石油地质特征[J]. 石油学报, 1(4): 19~26.
- 童国榜, 贾秀梅, 郑绵平, 等. 2002. 江汉盆地始新世中、晚期气候变化周期性的孢粉学证据[J]. 地球学报, 23(2): 159~164.
- 王必金, 林畅松, 陈 莹, 等. 2006. 江汉盆地幕式构造运动及其演化特征[J]. 石油地球物理勘探, 41(2): 226~230.
- 王春连, 黄 华, 王九一, 等. 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究[J]. 地质学报, 92(8): 1 630~1 646.
- 王春连, 刘成林, 刘宝坤, 等. 2015. 江陵凹陷古新统光卤石的发现及其钾盐找矿意义[J]. 地质学报, 89(1): 129~136.
- 王春连, 刘丽红, 李 强, 等. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石矿物学杂志, 39(1): 65~84.
- 徐论勋, 阎春德, 俞惠隆, 等. 1995. 江汉盆地第三系火山岩年代[J]. 石油与天然气地质, 16(2): 132~137.
- 徐义刚, 樊祺诚. 2015. 中国东部新生代火山岩研究回顾与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 682~689.
- 杨长清, 陈孔全, 程志强, 等. 2003. 江陵凹陷形成演化与勘探潜力[J]. 天然气工业, 23(6): 51~54.
- 张西营, 马海州, 高东林, 等. 2009. 西台吉乃尔盐湖矿区地下卤水化学组分变化的影响因素分析[J]. 盐湖研究, 17(4): 22~26.

《岩石矿物学杂志》荣获“2020 中国国际影响力优秀学术期刊”

2020年10月,中国学术期刊(光盘版)《电子杂志社、中国学术文献国际评价研究中心和清华大学图书馆联合发布了《中国学术期刊国际引证年报》,我刊入选“2020 中国国际影响力优秀学术期刊”。

