

江汉盆地潜江凹陷王场地区深层卤水 水化学特征及成因研究

薛 燕¹⁾, 王春连^{2)*}, 刘殿鹤^{2, 3)}, 王九一²⁾,
颜 开^{2, 4)}, 彭琰聪¹⁾, 高绣纺¹⁾

1) 长江大学资源与环境学院, 湖北武汉 430100;

2) 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;

3) 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4) 冰岛大学地球科学学院, 冰岛雷克雅未克 101

摘 要: 沉积盆地油田卤水中蕴藏着锂、铷、铯等战略性关键矿产资源, 其成因研究具有重要意义。本次研究采集了江汉盆地潜江凹陷王场地区地下卤水样品 18 件, 测试了其化学组成, 分析了卤水的水化学特征、元素相关性和特征系数, 探讨了该地区深层卤水成因。研究区卤水赋存于古近系潜江组砂岩中, 矿化度(TDS)平均值为 260.04 g/L, 水化学类型为 Cl-Na 型, pH 值在 7.03~8.01 之间。与往年相比, 潜江凹陷卤水矿化度呈逐年下降趋势, 可能与油田的开采注水有关。Na、Cl 含量与 TDS 呈现了明显的正相关性, Li、K、B 和 Br 含量随着 TDS 增加而升高, 而 Ca 含量随着 TDS 增加呈下降趋势, 可能揭示了原生沉积卤水蒸发浓缩的过程。高的钠氯系数(1.09~1.21)和氯溴系数(480~1547.60)以及低的钾氯系数(3.75~14.82)表明了来自石盐溶解的贡献, 波动的钙镁系数和脱硫酸系数反映了不均一的封闭性和变质程度, 从潜一段至潜四段封闭性变好、变质程度变高。研究区地下卤水为陆相盐湖原生蒸发沉积, 有明显石盐淋滤的物源补给, 储集空间整体封闭性较差, 变质程度较低。

关键词: 潜江凹陷; 地下卤水; 水化学; 特征系数; 物质来源

中图分类号: P641.12 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.022301

Hydrochemical Characteristics and Genesis of Deep Brines in Wangchang Area, Qianjiang Depression, Jianghan Basin

XUE Yan¹⁾, WANG Chun-lian^{2)*}, LIU Dian-he^{2, 3)}, WANG Jiu-yi²⁾,
YAN Kai^{2, 4)}, PENG Yan-cong¹⁾, GAO Xiu-fang¹⁾

1) College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871;

4) Faculty of Earth Science, University of Iceland, Reykjavík, Iceland 101

Abstract: There are strategic key mineral resources such as lithium, rubidium and cesium in oilfield brine of sedimentary basin. In this study, 18 underground brine samples from the Wangchang area in Qianjiang depression, Jianghan Basin were collected. Their chemical composition was tested, hydrochemical characteristics, element correlation, and characteristic coefficients were analyzed, and the genesis of deep brine in this area was discussed. The brine in the study area is found in the sandstone of the Paleogene Qianjiang Formation. The average total

本文由国家自然科学基金项目(编号: U20A2092; 42002106)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: KK2005)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190816; DD20190606)联合资助。

收稿日期: 2021-11-30; 改回日期: 2022-02-10; 网络首发日期: 2022-02-25。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 薛燕, 女, 1997 年生。硕士研究生。主要从事盐湖矿产方面的研究工作。E-mail: xy15122677013@163.com。

*通讯作者: 王春连, 男, 1983 年生。博士, 研究员。主要从事矿床学方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。
E-mail: wangchunlian312@163.com。

dissolved solid (TDS) concentration is 260.04 g/L, while the hydrochemistry type is Cl-Na, and the pH value is between 7.03 and 8.01. The TDS of brine in Qianjiang depression decreases yearly, which may be related to water injection. The contents of Na and Cl were positively correlated with TDS, and the contents of Li, K, B, and Br increased with an increase in TDS, while the content of Ca decreased with an increase in TDS, which may clarify the evaporation and concentration processes of the primary sedimentary brine. The high sodium-chloride coefficient (1.09~1.21) and chloro-bromine coefficient (480~1547.60), and the low potassium-chloride coefficient (3.75~14.82) indicate the contributions from the dissolution of stone salt. The fluctuating Ca/Mg coefficient and desulphurization coefficient reflect the uneven sealing and metamorphic degree, and the sealing and metamorphic degree increases from the first subduction to the fourth subduction. The underground brine in the study area is the primary evaporative deposit of the continental salt lake, which is supplemented by the obvious source of stone salt leaching. The overall sealing of the reservoir space is poor and the metamorphism degree is low.

Key words: Qianjiang sag; underground brine; water chemistry; characteristic coefficient; material source

卤水矿产中的锂、硼、铷、铯等物质是重要的战略新型资源(王学求等, 2020; 马厚明等, 2021; 龙鹏宇等, 2022), 我国每年对这类资源的进口量较多(刘成林等, 2010; 孙小虹, 2015; 刘成林等, 2016, 2021)。我国地下卤水资源分布在江汉盆地、新疆罗布泊地区、柴达木盆地、四川盆地和吉泰盆地等(韩积斌等, 2018; 王春连等, 2020; 袁寰宇和吴立冉, 2021; 常政等, 2022)。但随着一部分已经探明卤水资源的深度开发, 许多盆地的卤水资源面临消耗殆尽的问题(周训, 2013; 卢鋈等, 2021)。但江汉盆地目前卤水资源丰富且分布面积广泛, 晚始新世至早渐新世潜江凹陷作为江汉盆地卤水的汇集中心, 其矿化度普遍较高且富含多种微量元素, 均已达到工业开采品位, 开发利用前景广阔(陈新军和李倩文, 2021; 王九一等, 2021)。

在沉积盆地中一些地质过程, 如油气的运移, 水文地质条件的改变等, 地下卤水都起到了重要的作用(Eva et al., 1993; Yu et al., 2021), 所以研究卤水的成因具有重要的意义(Gupta, et al., 2015; Garcia, et al., 2019; Pierre et al., 2019)。于升松等(1994)研究结果表明在潜江凹陷内分布的地下卤水面积中超过75%属于高矿化度卤水, 潜江凹陷地下卤水以硫酸钠亚型为主, 并判断潜江凹陷是陆相成盐盆地, 且潜江凹陷内的深层卤水属于沉积埋藏卤水, 而不是淋滤卤水。但任福弘等(1998)研究认为潜江凹陷古盐湖具有双源补给, 该古盐湖既具有内陆盐湖的特点, 又具有海源湖盆地的印迹。马黎春等(2015)认为卤水的矿体展布具有“一洼两斜坡”的特征, 同时查明 K、B、Li、Br 等微量元素达到综合利用品位。黄华等(2015)研究得出潜江组砂岩卤水为氯化钠型, 且具有锂、溴、硼、钾大型工业卤水矿床, 从而提出对油田钻井和油田伴生卤水进行综合利用, 提取食盐、碘、溴、氨水、氯化钾、硼砂、碳酸锂、氯化铷、氯化铯等产品。近年来针对潜江凹陷的研究主要集中在卤水的水化学一些价值较高的元素, 如

锂、硼、钾、溴、碘等, 同时此类研究也集中在深层地下卤水的形成以及矿床特征, 为寻找和开发同类型卤水矿产资源提供一定的科学依据(付路路等, 2018; 牛新生等, 2021; 余小灿等, 2022a, b)。王场地区位于潜江凹陷北部的王场背斜上, 地质构造特殊, 不仅是重要的油气储藏位置, 也是高浓度卤水分布带, 研究该区域地下卤水水化学特征及其成因给面临枯竭的油田资源转型以及同类型高浓度地下卤水资源的勘探和开发提供一定科学参考。

1 区域地质背景

自侏罗纪以来, 太平洋板块向亚欧板块俯冲, 印度板块同欧亚板块聚合碰撞, 两种作用交替活动, 在中国东部形成强大的应力释放带, 裂解形成巨型裂谷系, 即中国东部裂谷系, 这个裂谷系包括松辽盆地, 华北裂谷盆地, 江汉盆地等(童崇光, 1980; 王春连等, 2018)。由于板块运动的影响, 江汉盆地内形成多期次不同性质的构造变形, 塑造了复杂的断裂系统和构造格局(杨攀新等, 2009)共包含有枝江、江陵、陈沱口、潜江、小板、云应和沔阳七个体次级凹陷(马黎春等, 2015)。卤水主要赋存于江陵凹陷沙市组和新沟嘴组以及潜江凹陷潜江组含盐系地层中(陈新军和李倩文, 2021)。

潜江凹陷位于江汉盆地中部(张永生等, 2005), 面积约 2500 m², 是双断型的菱形凹陷(图 1), 潜江凹陷卤水矿体呈现“一洼两斜坡”的空间展布特征(马黎春等, 2015), “一洼”是中部的蚌湖一周矶洼陷, “两斜坡”指的是东斜坡和西斜坡。同时潜江凹陷是江汉盆地内基底埋藏最深、沉降速度最快的凹陷, 在沉积时期是整个盆地沉降、沉积及汇水中心, 由于具有高盐度、封闭性、强蒸发的环境条件, 所以潜江凹陷也是江汉盆地的浓缩及成盐中心, 沉积了巨厚的盐系地层, 储存了大量的卤水资源, 卤水含矿面积达 1630 m²(牛新生等, 2021)。江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组是典型的内陆盐湖沉积,

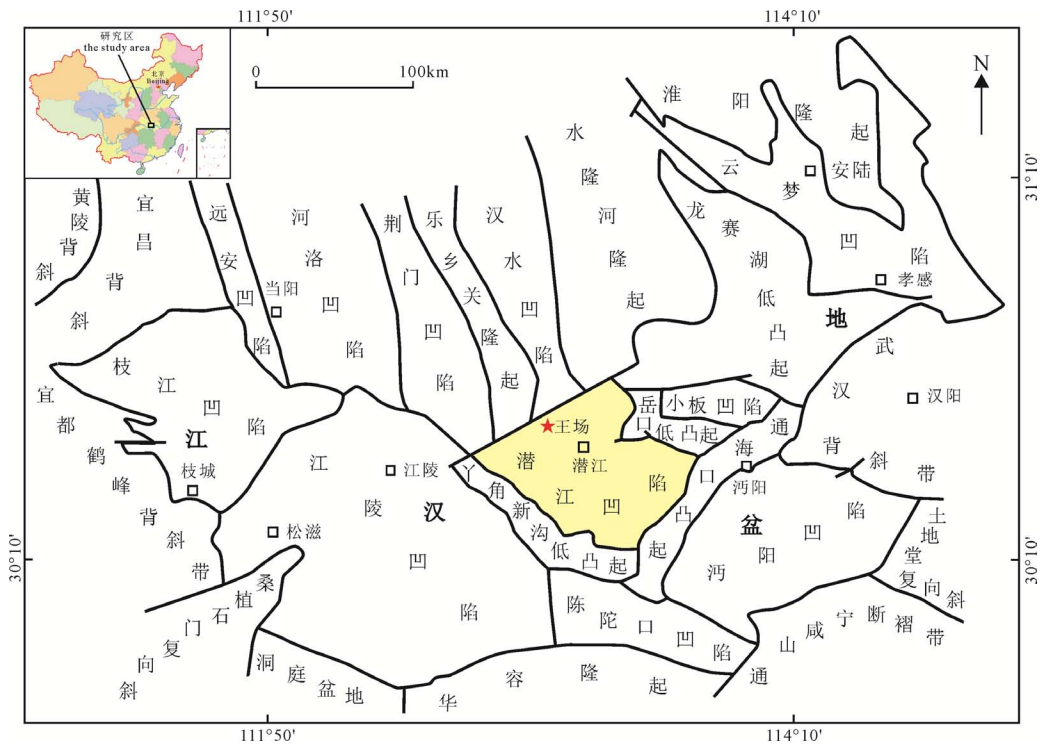


图 1 潜江凹陷构造位置图(据马黎春等, 2015 修改)
Fig. 1 Tectonic location map of Qianjiang depression (modified from MA et al., 2015)

凹陷中沉积了碎屑岩、碳酸盐岩、蒸发岩及其过渡岩性，其中碎屑岩主要以砂岩、泥岩为主，潜江凹陷潜江组地层划分为潜一段、潜二段、潜三段和潜四段(具体岩性及厚度如图 2 所示)，砂岩渗流能力好，潜江凹陷北部地区砂体厚度较大是深层卤水最主要和最利用价值的赋存体(黄华等, 2015)。

根据潜江组的地层发育特征、断裂分布和构造形态特征，将潜江凹陷划分为东部斜坡带、周矶向斜带、潜北陡坡带、蚌湖向斜带和西部斜坡带，共五个三级构造单元(鲍云杰等, 2021)。王场背斜是蚌湖向斜带的一个次级构造，位于潜江凹陷中北部(王国力等, 2004)，无明显断层发育，主体构造格局呈北西低，南东高(苏苇等, 2020)。该背斜轴向北西，西、北侧分别受到蚌湖和王场向斜的夹持，而车堵、周矶两条大断层于南端将其切割，因此王场背斜呈断背斜形态(李乐等, 2020)。王场背斜的底部潜四下段的地层厚度是两翼正常厚度的 2~3 倍，厚度在横向上也不是很稳定，盐会发生一定的塑性流动，下部的地层产状较陡，浅层的地层产状逐渐变缓(唐文旭等, 2007; 李志明等, 2020)。总体来说王场背斜构造是一个同生构造，且具有早、陡、窄、高、断的特征(应维华, 1984)。本研究王场地区位置如图 1 所示。

2 样品采集与测试

本研究共采集潜江凹陷王场地区不同深度的深层卤水样品 18 件，其中潜一段 5 件，潜三段 8 件，

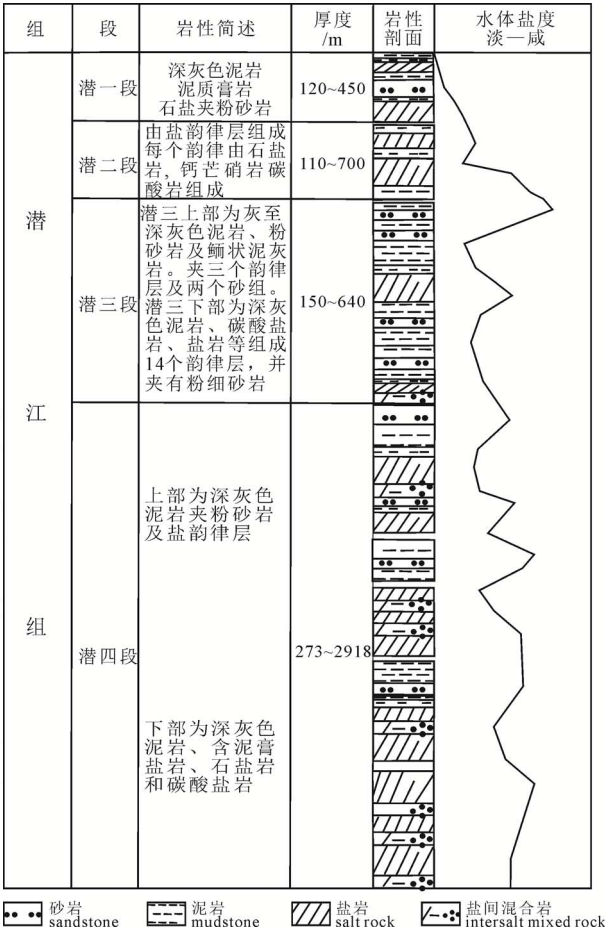


图 2 潜江凹陷地层剖面及岩性简图
(据马黎春等, 2015 修改)
Fig. 2 Stratigraphic section and lithology diagram of the Qianjiang Depression (modified from MA et al., 2015)

潜四段 5 件(如图 3 所示)。采用洗净的聚乙烯桶盛装卤水原液, 取样时记录样品的特征信息与层位信息。对原样进行多次过滤, 去除油类等杂质, 制备测试样品。测试样品中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用滴定法, 测试精度为 0.2%, 对于 K、Na、Ca、Mg、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、Li、B、Br、I、Sr 元素采用等离子光谱仪(ICP-OES)法进行测定。

3 结果

3.1 卤水总体水化学特征

分析结果表明, 王场地区卤水样品矿化度数值为 49.64~337.50 g/L, 卤水总矿化度平均值为 260.04 g/L。潜 1 段 TDS 为 165.99~337.50 g/L, 平均值为 265.45 g/L。潜 3 段为 49.64~322.16 g/L, 平均值为 256.86 g/L。潜 4 段为 188.80~303.32 g/L, 平均值为 259.74 g/L。对比盐湖和盐类矿产地质勘查规范, 王场地区卤水样品 TDS 大于 250 g/L, 属于高矿化度深层卤水。样品 pH 值范围为 7.03~8.014, 平均值为 7.23, 整体偏碱性。根据舒卡列夫分类-编号命名法, 断定王场地区卤水为 Cl-Na 型卤水。卤水中具体的各元素含量如表 1 所示。

3.2 主量元素特征

常量阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 中, Na^+ 含量为 19.67~122.5 g/L, 平均值为 97.12 g/L, 占据绝对的主导地位(如图 4 所示)。其中潜一段为 59.18~122.50 g/L, 平均值 96.71 g/L; 潜三段为 19.67~119.35 g/L, 平均值为 96.02 g/L; 潜四段为 73.34~115.64 g/L, 平均值

为 99.28 g/L。 K^+ 含量为 0.19~2.08 g/L, 平均值为 0.95 g/L。其中潜一段为 0.34~0.82 g/L, 平均值 0.65 g/L; 潜三段为 0.19~1.86 g/L, 平均值为 0.98 g/L; 潜四段为 0.69~2.08 g/L, 平均值为 1.21 g/L。 Ca^{2+} 含量为 68.08~507.40 mg/L, 平均值为 176.98 mg/L。其中潜一段为 68.08~284.34 mg/L, 平均值 154.00 mg/L; 潜三段为 81.40~269.04 mg/L, 平均值为 155.60 mg/L; 潜四段为 114.96~507.40 mg/L, 平均值为 234.16 mg/L。 Mg^{2+} 含量为 16.84~95.82 mg/L, 平均值为 40.46 mg/L。其中潜一段为 19.98~65.20 mg/L, 平均值 37.62 mg/L; 潜三段为 16.84~59.78 mg/L, 平均值为 36.51 mg/L; 潜四段为 26.34~95.82 mg/L, 平均值为 49.61 mg/L。

常量阴离子 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 中, Cl^- 的含量为 26.98~177.16 g/L, 平均值为 137.09 g/L, 占主导地位(如图 4 所示)。其中潜一段为 91.88~169.29 g/L, 平均值 130.08 g/L; 潜三段为 26.98~169.94 g/L, 平均值为 134.45 g/L; 潜四段为 111.24~177.16 g/L, 平均值为 148.33 g/L。 SO_4^{2-} 含量为 1.69~33.97 g/L, 平均值为 17.78 g/L。其中潜一段为 10.36~33.97 g/L, 平均值 27.55 g/L; 潜三段为 1.73~27.65 g/L, 平均值为 18.18 g/L; 潜四段为 1.69~13.14 g/L, 平均值为 7.36 g/L。 HCO_3^- 含量为 119.06~1216.39 mg/L, 平均值为 631.82 mg/L。其中潜一段为 351.66~1065.27 mg/L, 平均值 766.38 mg/L; 潜三段为 119.06~1216.39 mg/L, 平均值为 651.31 mg/L; 潜四段为 363.44~570.72 mg/L, 平均值为 466.06 mg/L。

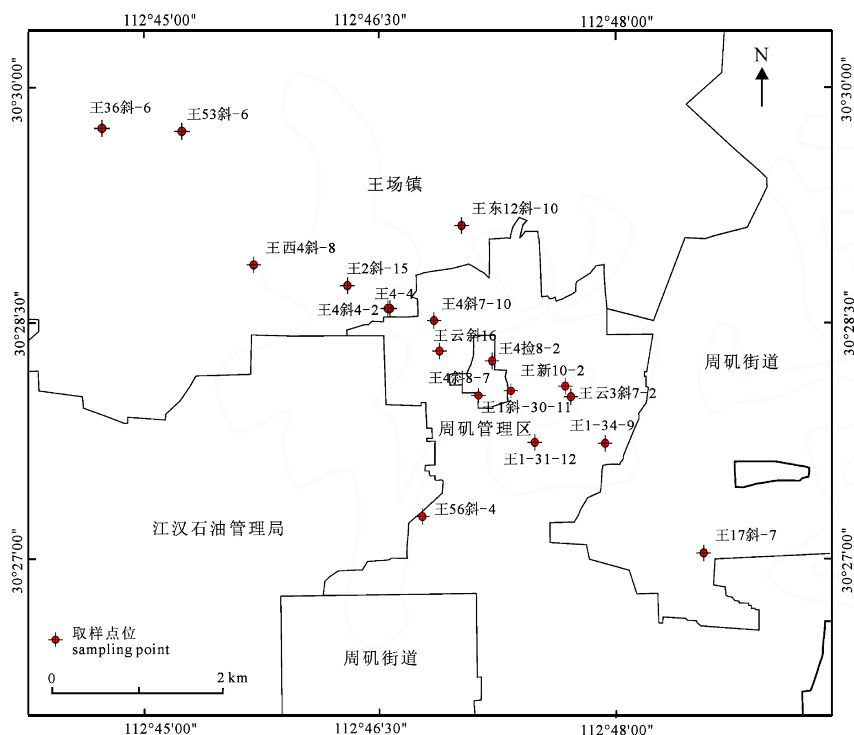


图 3 采样点位分布图

Fig. 3 Distribution diagram of sampling boreholes

表 1 潜江凹陷王场地区卤水样品水化学分析结果
Table 1 Results of hydrochemical analysis of brine samples from Wangchang area, Qianjiang Depression

序号	层位	样品名称	Na ⁺ g/L	K ⁺ g/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ g/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ g/L	Li ⁺ mg/L	Sr mg/L	B ³⁺ mg/L	Br ⁻ mg/L	I ⁻ mg/L	TDS g/L
1	潜 1	王 56 斜-4	59.18	0.34	180.46	27.04	91.88	351.66	10.36	7.56	8.36	42.26	160.70	2.42	165.99
2	潜 1	王云 3 斜 7-2	84.99	0.61	284.34	51.68	108.41	910.85	27.67	20.52	6.86	81.54	208.72	3.58	232.47
3	潜 1	王 1-34-9	108.01	0.82	102.44	19.98	137.85	789.79	33.05	28.18	4.34	74.36	280.98	4.44	292.06
4	潜 1	王 1 斜-30-11	108.87	0.82	134.68	24.22	142.97	714.36	33.97	31.52	5.52	77.64	297.86	4.60	299.25
5	潜 1	王 1-31-12	122.50	0.64	68.08	65.20	169.29	1065.27	32.68	19.04	3.94	75.16	193.06	2.96	337.50
6	潜 3	王 4 斜 4-2	93.93	0.96	224.24	37.70	128.82	563.96	16.25	28.44	7.78	95.74	198.12	4.76	246.55
7	潜 3	王 2 斜-15	95.63	1.03	269.04	41.54	134.26	576.49	17.58	31.66	9.16	102.02	209.40	5.06	255.61
8	潜 3	王 4 捡 8-2	114.63	0.76	133.14	37.76	161.96	807.08	21.52	28.06	5.56	82.14	210.32	4.48	307.36
9	潜 3	王云斜-16	118.69	0.80	133.42	53.88	169.94	119.06	18.36	23.88	5.56	82.14	204.60	4.08	314.53
10	潜 3	王 4-4	19.67	0.19	81.40	16.84	26.98	317.07	1.73	5.36	1.72	20.28	46.94	1.04	49.64
11	潜 3	王东 12 斜-10	119.35	1.46	96.42	22.80	166.93	1216.39	24.47	55.68	5.56	135.20	266.36	6.80	322.16
12	潜 3	王 17 斜-7	94.27	1.86	171.34	21.74	125.26	808.35	27.65	40.22	9.10	156.00	142.46	4.54	259.60
13	潜 3	王新 10-2	111.99	0.77	135.78	59.78	161.45	802.08	17.91	27.52	4.20	86.12	190.30	4.04	299.40
14	潜 4	王 4 斜 7-10	115.64	1.05	165.88	95.82	168.01	518.84	13.14	25.00	7.72	97.38	179.80	4.82	303.32
15	潜 4	王西 4 斜-8	73.34	0.69	507.40	47.72	111.24	570.72	1.69	11.62	27.40	49.62	71.88	3.26	188.80
16	潜 4	王 53 斜-6	99.77	1.10	114.96	26.34	147.42	444.91	10.36	19.92	5.98	87.76	165.78	3.86	262.97
17	潜 4	王 4 斜 8-7	92.94	1.12	156.12	30.30	137.80	363.44	5.39	17.54	8.52	169.60	189.80	5.66	239.98
18	潜 4	王 36 斜-6	114.74	2.08	226.46	47.88	177.16	432.37	6.24	47.04	12.78	204.40	329.92	12.32	303.60

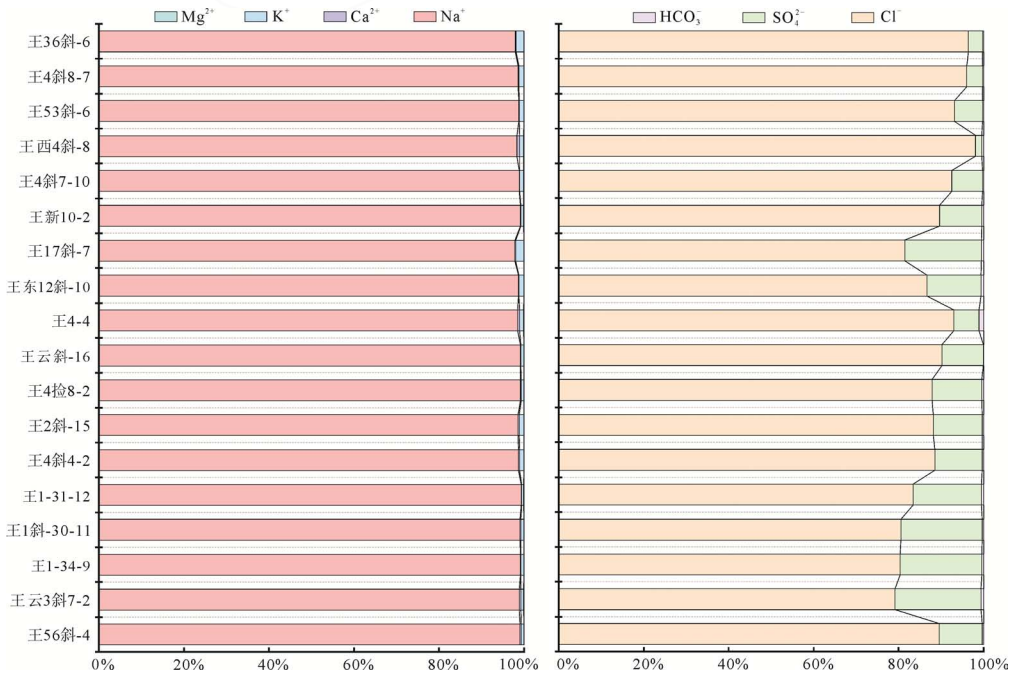


图 4 潜江凹陷王场地区卤水样品主量离子质量浓度占比关系
Fig. 4 Proportions of major ion concentration in brine samples from the Wangchang area of Qianjiang Depression

3.3 微量元素特征

Li 是世界上最轻且极其活泼的碱金属元素, 具有比热和电导率高、化学活性强等独特物理化学特性(姜贞贞等, 2021)。Li 在岩石圈的上部富集, 富集在岩浆演化的晚期阶段, 在沉积岩中, 富集在海相细粒沉积物中, 在火山喷气和热水中均有较高含量(樊启顺等, 2007)。王场地区 Li⁺ 的含量为 5.36~55.68 mg/L, 平均值为 26.04 mg/L。其中潜一段 7.56 mg/L, 平均值为 21.36 mg/L; 潜三段

5.36~55.68 mg/L, 平均值为 30.10 mg/L; 潜四段 11.62~47.04 mg/L, 平均值 24.22 mg/L。绝大多数地下卤水样品 Li⁺ 含量大于 25 mg/L, 满足锂元素的综合利用品位, 部分样品甚至达到单独开采工业品位。同时王场地区卤水样品中 Mg/Li 比值含量为 0.41~4.11, 比值较低, 有利于卤水开发利用中镁锂的化学分离, 是十分优质的锂资源(余小灿等, 2022a)。

B 是一种典型的非金属元素, B 及其化合物具有耐高温、耐磨损、高强度、质轻和催化性等特殊

物理化学性质(王春连等, 2021)。潜江凹陷王场地区 B^{3+} 含量 20.28~204.40 mg/L, 平均值为 95.52 mg/L。其中潜一段为 42.26~81.54 mg/L, 平均值为 70.19 mg/L; 潜三段 20.28~156.00 mg/L, 平均值为 94.96 mg/L; 潜四段 49.62~204.40 mg/L, 平均值 121.75 mg/L。 B^{3+} 的综合利用品位为 124 mg/L, 潜三段 3 件样品, 潜四段 2 件样品满足综合利用品位。

Br^- 含量为 46.94~329.92 mg/L, 平均值为 197.06 mg/L。其中潜一段为 160.70~297.86 mg/L, 平均值为 228.26 mg/L; 潜三段 46.94~266.36 mg/L, 平均值为 183.56 mg/L; 潜四段 71.88~329.92 mg/L, 平均值 187.44 mg/L。 Br^- 的综合利用品位为 50~60 mg/L, 仅有 1 件样品未满足综合利用品位, 其他均达到综合利用品位的 1~6.58 倍。

I^- 含量为 1.04~12.32 mg/L, 平均值为 4.60 mg/L。其中潜一段为 2.42~4.60 mg/L, 平均值为 3.60 mg/L; 潜三段为 1.04~6.80 mg/L, 平均值为 4.35 mg/L; 潜四段为 3.26~12.32 mg/L, 平均值为 5.98 mg/L。 I^- 的综合利用品位为 15 mg/L, 样品均未达到综合利用品位。

4 讨论

4.1 TDS 变化与部分元素相关性分析

据前人测试数据发现 1994 年潜江凹陷矿化度平均值为 283.25 g/L(于升松, 1994), 2015 年降到了 280.94 g/L(马黎春等, 2015), 2021 年为 238.98 g/L(牛新生等, 2021), 王场地区矿化度平均值 260.04 g/L 大于潜江凹陷整体矿化度平均值, 进一步证明了王场地区位于高浓度卤水分布带, 而潜江凹陷的矿化度随着时间的变化, 整体呈下降趋势, 这与油田的开采注水以及地下卤水的封闭性较差都有一定的关系(牛新生等, 2021)。

由图 5 可见, 主量阳离子中 Na^+ 与 TDS 呈现较

好的正相关性。同时 K^+ 、 Mg^{2+} 的含量都随着 TDS 的增加而表现出增加的趋势。但 Ca^{2+} 含量却随着 TDS 的增加而呈现减少的趋势, 证明卤水在蒸发浓缩的过程中 Ca^{2+} 浓度降低, 有可能是因为石膏, 或者钙芒硝的沉淀(余小灿等, 2022b)。主量阴离子中只有 Cl^- 与 TDS 呈现了显著的正相关性。随着 TDS 的增加, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的含量都随有升高的趋势。

如图 6 所示, 微量离子中 Li^+ 和 Br^- 的含量随着的 TDS 增加都呈上升的趋势。但 B^{3+} 和 I^- 的含量与 TDS 只呈现出很微弱的相关性。通过做卤水中元素 B, Br, I 的含量与 Li 的含量相关性图(如图 7 所示), 可以发现 B, Br, I 的含量都随着 Li 的含量增加而呈现出明显的增加趋势, 这表明它们可能具有相似的成因或物源补给。

此外, 根据表 2 所示, Li 和 Na、K、B、Cl、Br、I; Na 和 Cl、Br; K 与 B、I; Sr 与 Ca; B 与 Br; Cl 与 Br; Br 与 I; SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 都呈现很好的相关性。说明在卤水形成的过程中, 由于受到干旱的古气候影响, 随着古盐湖的蒸发浓缩, 这些元素在卤水中的含量也逐渐升高, 呈现显著相关性的元素可能是来自相同的石盐岩溶解或者其他的物源补给(王九一等, 2021)。

4.2 特征系数及卤水成因讨论

综合前人研究, 计算和分析特征系数, 令 X 离子的克当量浓度为 γX , 质量浓度为 ρX , 物质的量浓度为 nX 。通过计算地下卤水的特征系数(如表 3 所示), 从而揭示地下卤水的来源以及演化规律。

钠氯系数($\gamma Na^+/\gamma Cl^-$)能够反映地下卤水中钠盐的富集程度, 也是反映蒸发浓缩和盐岩溶滤的重要指标(樊启顺等, 2007; 牛新生等, 2021; 岳鑫等, 2021), 王场地区钠氯系数为 0.99~1.21, 平均值 1.09, 大于正常海水的系数 0.87, 且都接近于 1 或者

表 2 王场地区卤水元素含量相关系数特征
Table 2 Characteristic coefficient of brine samples in Wangchang area

	Li	Na	K	Mg	Sr	B	Cl	Br	I	Ca	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Li	1											
Na	0.646**	1										
K	0.812**	0.496*	1									
Mg	-0.060	0.410	-0.021	1								
Sr	-0.076	-0.119	0.192	0.135	1							
B	0.714**	0.494*	0.917**	0.022	0.102	1						
Cl	0.615**	0.977**	0.534*	0.463	-0.029	0.542*	1					
Br	0.700**	0.708**	0.476*	0.004	-0.242	0.530*	0.666**	1				
I	0.751**	0.516*	0.833**	0.088	0.193	0.856**	0.587*	0.713**	1			
Ca	-0.151	-0.218	0.028	0.183	0.909**	-0.028	-0.166	-0.260	0.074	1		
SO_4^{2-}	0.399	0.533*	0.043	-0.040	-0.448	-0.004	0.355	0.513*	-0.065	-0.372	1	
HCO_3^-	0.479*	0.400	0.143	0.001	-0.151	0.092	0.284	0.294	0.043	-0.130	0.687**	1

注: **-在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; *-在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

大于 1, 明显是有石盐溶解的贡献, 属于非海相沉积的卤水。

由于在卤水的蒸发过程中, 溴并不能形成独立的矿物, 仅有少部分的溴离子以替换的形式进入石盐或者氯化物晶格, 所以氯溴系数($\rho\text{Cl}^-/\rho\text{Br}^-$)是用

来区分卤水中不同物质来源的良好指标, 溶盐地下卤水此系数值大于 1000, 沉积地下卤水此系数值小于 400(樊启顺等, 2007), 王场地区此系数范围在 480.00~1547.60 之间, 仅潜四段一样品>1000, 其他地下卤水样品的此系数均在 400~1000, 初步认为是

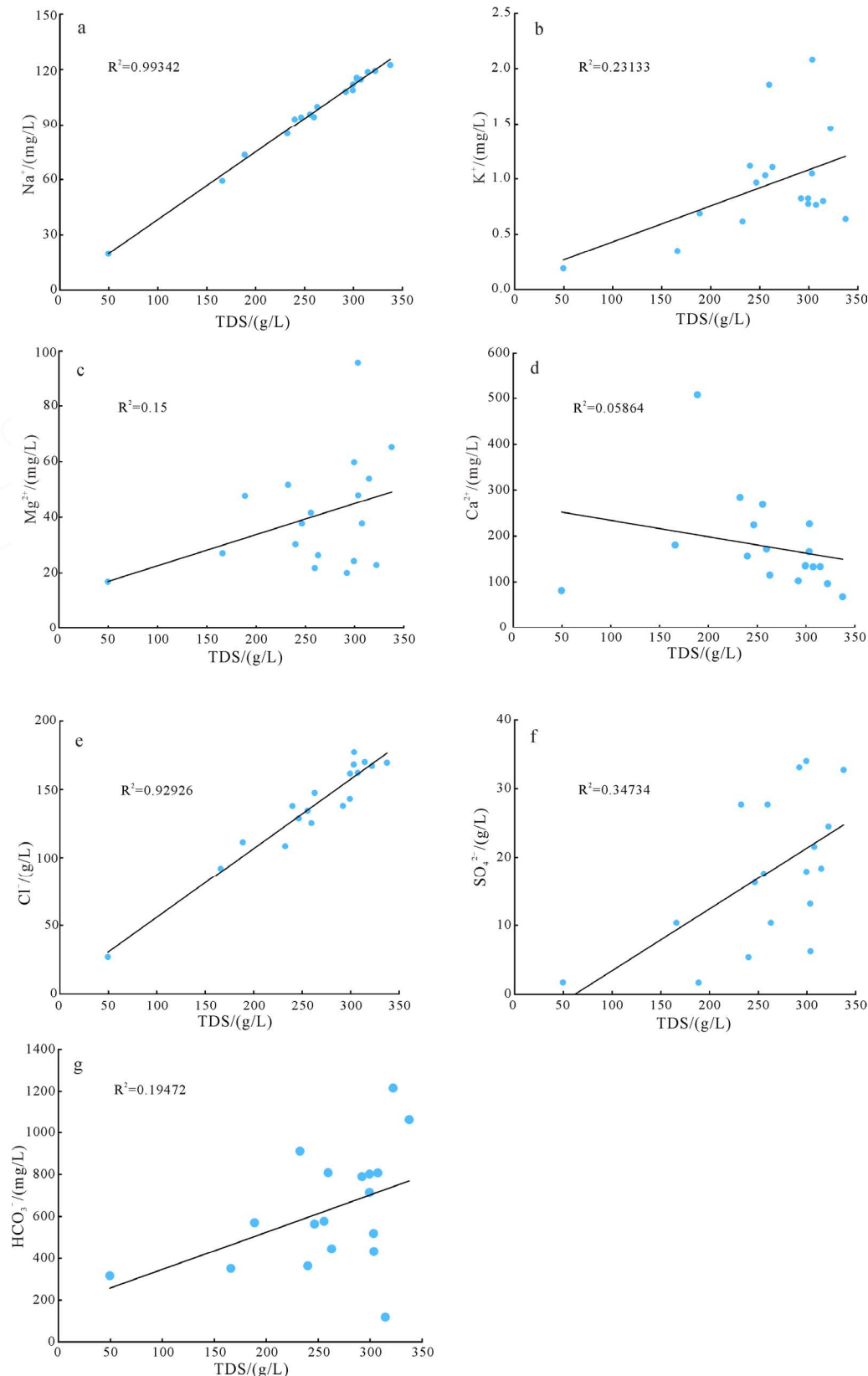


图 5 主量离子与 TDS 相关性图

Fig. 5 Correlation diagram between principal ions and TDS

沉积卤水与溶滤卤水部分混合,或者是在油田开采过程中注水的影响,这与牛新生等人的研究结论相一致(牛新生等, 2021)。

脱硫系数($100 \times n\text{SO}_4^{2-} / 2n\text{Cl}^-$)可以反映地下卤水的封闭性的好坏,越接近于 0 证明封闭性越好(李廷伟等, 2006),王场地区此系数为 0.28~4.71, 其中

表 3 王场地区卤水样品特征系数
Table 3 Correlation coefficient characteristics of brine element content in Wangchang area

序号	氯溴系数	钾氯系数	钠氯系数	钙镁系数	脱硫系数	序号	氯溴系数	钾氯系数	钠氯系数	钙镁系数	脱硫系数
1	571.73	3.75	0.99	4.05	2.08	10	574.73	7.10	1.12	2.93	1.18
2	519.40	5.66	1.21	3.34	4.71	11	626.69	8.72	1.10	2.57	2.71
3	490.62	5.97	1.21	3.11	4.42	12	879.24	14.82	1.16	4.78	4.07
4	480.00	5.75	1.17	3.37	4.38	13	848.41	4.78	1.07	1.38	2.05
5	876.87	3.76	1.12	0.63	3.56	14	934.44	6.23	1.06	1.05	1.44
6	650.22	7.49	1.12	3.61	2.33	15	1547.60	6.17	1.02	6.45	0.28
7	641.17	7.68	1.10	3.93	2.42	16	889.27	7.49	1.04	2.65	1.30
8	770.06	4.72	1.09	2.14	2.45	17	726.02	8.10	1.04	3.13	0.72
9	830.59	4.69	1.08	1.50	1.99	18	536.97	11.74	1.00	2.87	0.65

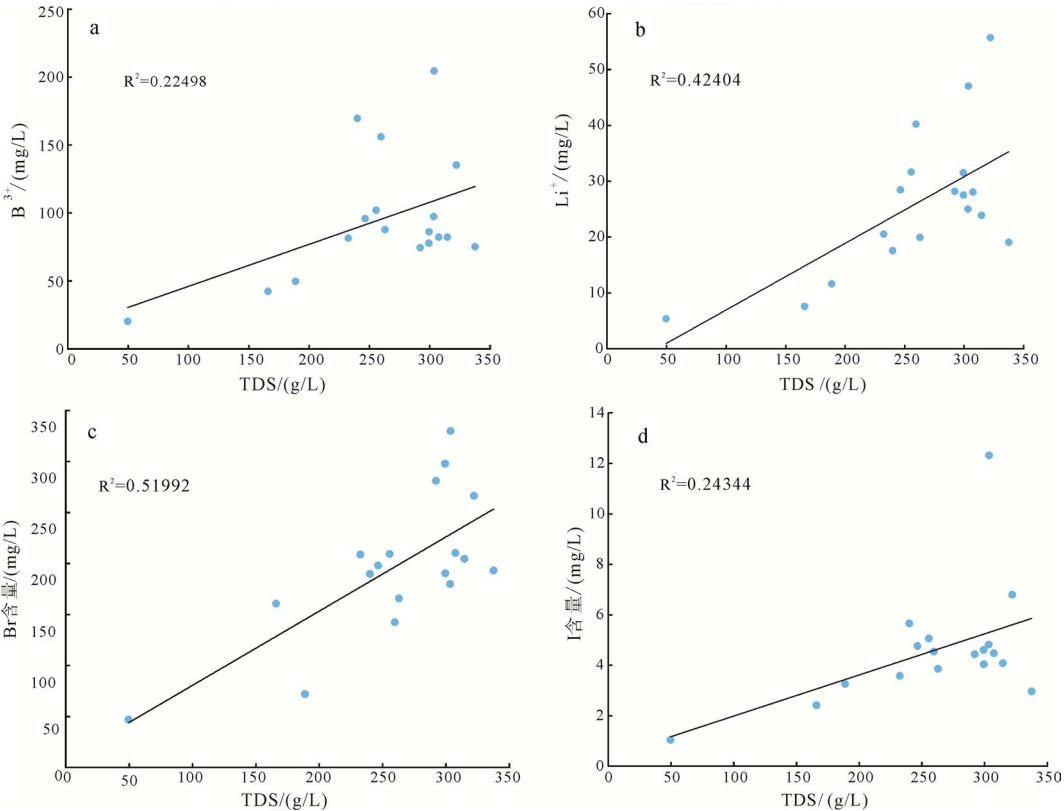


图 6 微量元素与 TDS 相关性分析图
Fig. 6 Correlation analysis diagram of trace elements and TDS

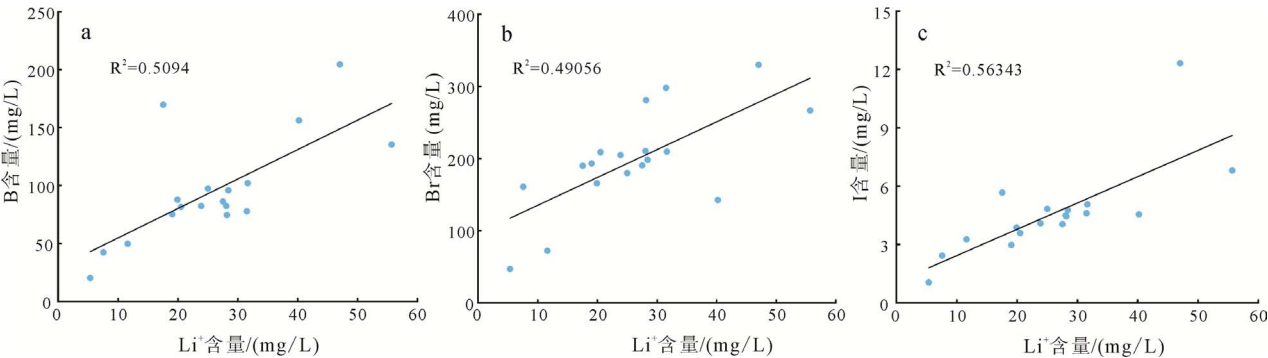


图 7 卤水中 Li 和 B、Br、I 的关系
Fig. 7 Relationship between Li and B, Br, I in brine

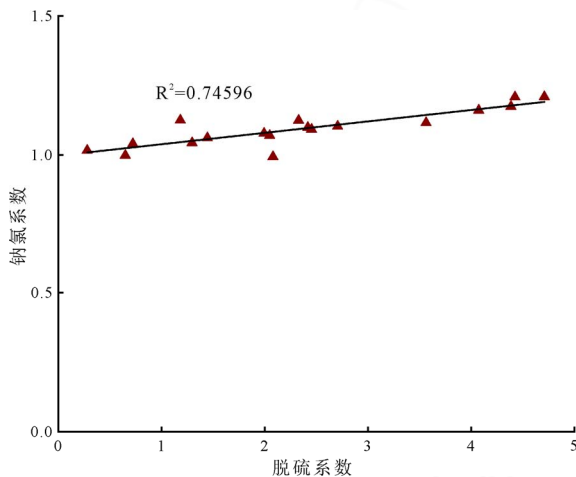


图8 钠氯系数与脱硫系数关系图

Fig. 8 Diagram of relationship between sodium-chloride coefficient and desulfurization coefficient

潜三段和潜四段脱硫系数较小, 封闭性较好, 潜一段样品脱硫系数较大, 封闭性较差。同时由图8可见钠氯系数与脱硫系数呈正相关, 这意味着封闭性差是形成淋滤卤水的重要条件。

钙镁系数($n\text{Ca}^{2+}/n\text{Mg}^{2+}$)能够反映地层的变质程度, 封闭时间越长, 封闭性越好, 则变质程度越高, 一般情况下深层水此系数值 >3 (李建森等, 2013; 邸贺等, 2016), 王场地区地下卤水样品钙镁系数为 $0.63\sim 6.45$, 其中9个样品 >3 , 9个样品 <3 。潜一段为 $0.63\sim 4.05$, 共5个样品, 4个样品的钙镁系数 >3 。潜三段为 $1.38\sim 4.78$, 共8个样品, 3个样品的钙镁系数 >3 。潜四段为 $1.05\sim 6.45$, 共5个样品, 3个样品的钙镁系数 >3 。对比来说潜三段和潜四段的封闭性相对较好, 变质程度相对较高。其中样品王西4斜-8的钙镁系数高达6.45, 考虑该样品可能受到白云石化, 钠长石化以及方解石、石膏的溶解有关(余小灿等, 2022b)。

钾氯系数($1000 \times pK^+/pCl^-$)可以反映地下卤水的浓缩程度以及钾盐的富集程度下, 也是钾盐找矿的指标之一, 一般情况下钾氯系数大于75时表明卤水富钾, 且卤水的演化时间较长(韩佳君等, 2013), 王场地区的钾氯系数为 $3.75\sim 14.82$ 。说明本研究区潜一段、潜三段和潜四段沉积时期还未达到钾盐析出阶段。

综上所述, 潜江凹陷王场地区潜江组地下卤水来自于早期的陆相盐湖沉积, 并且在形成的过程中体系较为开放, 变质程度一般, 封闭性较差, 发生水-岩反应, 有来自早期石盐的淋滤补给。

5 结论

(1)王场地区卤水为Cl-Na型卤水, pH值范围在 $7.03\sim 8.014$, 总矿化度平均值 260.04 g/L , 高于整个潜江凹陷的总矿化度平均值 238.98 g/L , 位于高浓度卤水分带, 但相较于早年间潜江凹陷总矿化度

平均值, 呈下降趋势, 这与油田开采过程中的注水以及潜江凹陷地下卤水自身封闭性较差等具有一定的关系。

(2)潜江凹陷王场地区的部分微量元素达到工业品位或综合利用品位, 具有较高的利用价值。Li达工业或综合利用品位, 且 Mg^{2+} 与 Li^+ 的含量比值较低, 是十分优质的锂资源; 部分地下卤水样品中的B达到综合利用工业品位; Br含量较高, 达到综合利用品位的 $1\sim 6.58$ 倍。B、Br、I的含量和Li的含量呈正相关, 这四种元素很有可能具有相同的物质来源。部分面临枯竭的油田井, 可以考虑通过经济合理的手段提取伴生卤水中的微量元素。

(3)综合分析特征系数认为潜江凹陷王场地区地下卤水样品可能来自于早期陆相盐湖沉积, 整体封闭性较差, 变质程度较低, 有来自淋滤卤水的物质补给。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. U20A2092 and 42002106), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. KK2005), and China Geological Survey (Nos. DD20190816 and DD20190606).

参考文献:

- 鲍云杰, 李志明, 曹婷婷, 黎茂稳, 钱门辉, 蒋启贵, 刘鹏, 徐二社, 陶国亮, 刘伟新, 吴世强. 2021. 潜江凹陷王场构造区盐间细粒沉积页岩油富集控制因素——以潜34-10韵律为例[J]. 中国矿业大学学报, 50(6): 1119-1133.
- 陈新军, 李倩文. 2021. 江汉盆地卤水锂资源特征及开发利用前景[J]. 国土资源情报, (11): 44-49.
- 常政, 袁小龙, 刘万平, 李梦玲, 苗卫良, 程怀德, 卜迪, 张昊, 张西营. 2022. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. 地球学报, 43(3): 287-294.
- 邸贺, 王黎栋, 谢奋全. 2016. 地下卤水水化学特征及成因探讨[J]. 煤炭与化工, 39(11): 26-27, 97.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 许建新, 李廷伟. 2007. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 36(6): 601-611.
- 付路路, 刘成林, 王青春, 赵艳军, 王春连, 余小灿. 2018. 湖北潜江凹陷北部古近系孔隙卤水矿床特征及成因[J]. 盐湖研究, 26(1): 15-24.
- 韩积斌, 许建新, 刘久波, 钟翼, 徐凯, 马海州. 2018. 地下卤水水文地质研究进展[J]. 盐湖研究, 26(4): 79-84, 90.
- 韩佳君, 周训, 姜长龙, 胡良君, 方斌, 孙琦. 2013. 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, 27(6): 1454-1464.
- 黄华, 张士万, 张连元. 2015. 潜江凹陷潜江组深层卤水矿产特征与资源评价[J]. 盐湖研究, 23(2): 34-43.
- 姜贞贞, 刘高令, 卓玛曲西, 李明礼. 2021. 我国锂资源供需现状下西藏盐湖锂产业现状及对策建议[J]. 盐湖研究, 29(3): 104-110.

- 李建森, 李廷伟, 马海州, 彭喜明. 2013. 柴达木盆地西部新近系和古近系油田卤水水化学特征及其地质意义[J]. 水文地质工程地质, 40(6): 28-36.
- 李乐, 刘爱武, 漆智先, 吴世强, 管文静. 2020. 潜江凹陷王场背斜潜四下段盐韵律层页岩储层孔隙结构特征[J]. 地球科学, 45(2): 602-616.
- 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.
- 李志明, 钱门辉, 黎茂稳, 蒋启贵, 吴世强, 鲍云杰, 曹婷婷, 陶国亮, 刘鹏, 徐二社, 刘伟新. 2020. 盐间页岩油形成有利条件与地质甜点评价关键参数——以潜江凹陷潜江组潜34-10韵律为例[J]. 石油实验地质, 42(4): 513-523.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009-2029.
- 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 王九一, 王立成, 徐海明, 李坚, 王春连. 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): 1119-1143.
- 卢盛, 潘彤, 李永寿, 李洪普, 韩光, 苗卫良, 张西营. 2021. 柴达木盆地中部一里坪—西台吉乃尔地区深层卤水水化学特征及成因初探[J]. 地质学报, 95(7): 2129-2137.
- 龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞, 杜江民, 何继辉, 王朝旭. 2022. 马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨[J]. 地球学报, 43(3): 338-346.
- 马厚明, 赖志坚, 鄢新华, 廖绍平, 田立明. 2021. 江西吉泰盆地卤水锂矿床地球化学特征及远景分析[J]. 地球学报, 42(5): 617-627.
- 马黎春, 黄华, 张连元, 刘成林, 孙明光, 牛磊. 2015. 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, 89(11): 2114-2121.
- 牛新生, 黄华, 郑绵平. 2021. 江汉盆地潜江凹陷地下卤水地球化学特征和分布规律[J]. 地学前缘, 28(6): 56-65.
- 任福弘, 张翠云, 刘文生. 1998. 潜江凹陷古盐湖水文化学面貌的再造[J]. 地球学报, 19(4): 395-401.
- 苏苇, 徐吉丰, 刘钰莹. 2020. 王场油田沉积相特征与相模式[J]. 中国资源综合利用, 38(3): 85-88.
- 孙小虹, 熊先孝, 王莹, 唐尧. 2015. 中国硼矿床类型及时空分布规律[J]. 地质论评, 61(S1): 810-811.
- 唐文旭, 陈凤玲, 范传军. 2007. 潜江凹陷王场盐构造的油气成藏特征[J]. 资源环境与工程, 21(4): 385-387.
- 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.
- 王学求, 刘汉粮, 王伟, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 王春连, 黄华, 王九一, 徐海明, 余小灿, 高超, 孟令阳, 蔡芃睿, 颜开, 方景玲. 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): 1630-1646.
- 王春连, 刘丽红, 李强, 孟令阳, 刘成林, 张媛媛, 王九一, 余小灿, 颜开. 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.
- 王春连, 孟令阳, 刘成林, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 游超, 栗克坤, 滕晓华. 2021. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼矿成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 1-13.
- 王国力, 杨玉卿, 张永生, 漆志先, 乔悦东, 袁赫然. 2004. 江汉盆地潜江凹陷王场地区古近系潜江组沉积微相及其演变[J]. 古地理学报, 6(2): 140-150.
- 王九一, 刘成林, 王春连, 余小灿, 颜开, 高超. 2021. 晚白垩世—古近纪华南蒸发岩矿床形成的构造和气候耦合控制[J]. 地质学报, 95(7): 2041-2051.
- 杨攀新, 高战武, 张俊. 2009. 江汉盆地构造模式和演化及其与中强地震关系研究[J]. 地震, 29(4): 123-130.
- 应维华. 1984. 王场油田油气富集规律探讨[J]. 石油勘探与开发, (3): 18-25.
- 于升松. 1994. 湖北江汉盆地潜江凹陷深层地下卤水水文地球化学研究[J]. 盐湖研究, 2(1): 6-17.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 徐海明, 赵艳军, 黄华, 李瑞琴. 2022a. 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, 29(1): 107-123.
- 余小灿, 王春连, 黄华, 王九一. 2022b. 湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水成因及演化[J]. 地球科学, 47(1): 122-135.
- 袁寰宇, 吴立冉. 2021. 我国地下卤水开采、综合利用的现状 & 进展分析[J]. 四川化工, 24(3): 18-21.
- 岳鑫, 刘溪溪, 仇新迪, 于小亮. 2021. 柴西尕斯库勒地区深部孔隙卤水水化学特征及成因分析[J]. 盐湖研究, 29(1): 69-79.
- 张永生, 王国力, 杨玉卿, 漆智先. 2005. 江汉盆地潜江凹陷古近系盐湖沉积盐韵律及其古气候意义[J]. 古地理学报, 7(4): 461-470.
- 周训. 2013. 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, 40(5): 4-10.

References:

- BAO Yun-jie, LI Zhi-ming, CAO Ting-ting, LI Mao-wen, QIAN Men-hui, JIANG Qi-gui, LIU Peng, XUE Er-she, TAO Guo-liang, LIU Wei-xin, WU Shi-qiang. 2021. The controlling factors on shale oil enrichment of inter-salt fine grained sedimentary rocks in Wangchang anticline of Qianjiang depression, Jiangnan Basin: A case of E₃⁴-10 rhythm of Qianjiang formation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 50(6): 1119-1133(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xin-jun, LI Qian-wen. 2021. The characteristics and exploitation prospect of brine lithium in Jiangnan Basin[J]. Land and Resources Information, (11): 44-49(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zheng, YUAN Xiao-long, LIU Wan-ping, LI Meng-ling, MIAO Wei-liang, CHENG Huai-de, BU Di, ZHANG Hao, ZHANG Xi-ying. 2022. A Study on the Mechanism of Influence of the Dissolution of Solid Potassium Salt in Qarhan Salt Lake to the Rate of Solvent Injection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 287-294(in Chinese with English abstract).
- DI He, WANG Li-dong, XIE Fen-quan. 2016. Discussion on hydrochemical characteristics and genesis of underground brine[J]. Coal and Chemical Industry, 39(11): 26-27, 97(in Chinese with English abstract).
- MOLDOVANYI E P, WALTER L M, LAND L S. 1993. Strontium, boron, oxygen, and hydrogen isotope geochemistry of brines from basal strata of the Gulf Coast sedimentary basin, USA[J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(9): 2083-2099.
- FAN Qi-shun, MA Hai-zhou, TAN Hong-bing, XU Jian-xin, LI Ting-wei. 2007. Characteristics and origin of brines in western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 36(6): 601-611(in Chinese with English abstract).
- FU Lu-lu, LIU Cheng-lin, WANG Qing-chun, ZHAO Yan-jun, WANG Chun-lian, YU Xiao-can. 2018. Deposit characteristics and origin of paleogene brine in the Qianjiang formation of Qianjiang depression[J]. Journal of Salt Lake Research, 26(1): 15-24(in Chinese with English abstract).
- GARCIA M G, BORDA L G, GODFREY L V, LÓPZE STEINMETZ R L, LOSADA-CALDERON A. 2019. Characterization of lithium cycling in the Salar De Olaroz, Central Andes, using a geochemical and isotopic approach[J]. Chemical Geology, 531: 119340.
- GUPTA I, WILSON A M, ROSTRON B J. 2015. Groundwater age, brine migration, and large-scale solute transport in the Alberta Basin, Canada[J]. Geofluids, 15(4): 608-620.
- HAN Ji-bin, XU Jian-xin, LIU Jiu-bo, ZHONG Yi, XU Kai, MA Hai-zhou. 2018. Advance in hydrogeological study of subsurface brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 26(4): 79-84, 90(in Chinese with English abstract).
- HAN Jia-jun, ZHOU Xun, JIANG Chang-long, HU Liang-jun, FANG Bin, SUN Qi. 2013. Hydrochemical characteristics, origin and evolution of the subsurface brines in western Qaidam Basin[J]. Geoscience, 27(6): 1454-1464(in Chinese with English abstract).
- HUANG Hua, ZHANG Shi-wan, ZHANG Lian-yuan. 2015. Mineral characteristics and resources assessment of the deep brine in Qianjiang formation, Jianghan depression[J]. Journal of Salt Lake Research, 23(2): 34-43(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhen-zhen, LIU Gao-ling, ZHUOMA Qu-xi, LI Ming-li. 2021. Present situation and suggestions of saline lake lithium resource in Tibet under the current situation of supply and demand of lithium resources in China[J]. Journal of Salt Lake Research, 29(3): 104-110(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-sen, LI Ting-wei, MA Hai-zhou, PENG Xi-ming. 2013. Investigation of the chemical characteristics and its geological significance of the Tertiary oilfield brine in the western Qaidam basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 40(6): 28-36(in Chinese with English abstract).
- LI Le, LIU Ai-wu, QI Zhi-xian, WU Shi-qiang, GUAN Wen-jing. 2020. Pore structure characteristics of shale reservoir of the lower Qian 4 member in the Wangchang anticline of the Qianjiang Sag[J]. Earth Science, 45(2): 602-616(in Chinese with English abstract).
- LI Ting-wei, TAN Hong-bing, FAN Qi-shun. 2006. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in West Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 14(4): 26-32(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-ming, QIAN Men-hui, LI Mao-wen, JIANG Qi-gui, WU Shi-qiang, BAO Yun-jie, CAO Ting-ting, TAO Guo-liang, LIU Peng, XU Er-she, LIU Wei-xin. 2020. Favorable conditions of inter-salt shale oil formation and key parameters for geological sweet spots evaluation: a case study of Eq3⁴-10 rhythm of Qianjiang Formation in Qianjiang Sag, Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42(4): 513-523(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, WANG Mi-li. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. Mineral Deposits, 29(4): 581-592(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, YU Xiao-can, YUAN Xue-yin, LI Rui-qin, YAO Fo-jun, SHEN Li-jian, LI Qiang, ZHAO Yuan-yi. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2009-2029(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, YU Xiao-can, ZHAO Yan-jun, WANG Jiu-yi, WANG Li-cheng, XU Hai-ming, LI Jian, WANG Chun-lian. 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): 1119-1143(in Chinese with English abstract).
- LU Jun, PAN Tong, LI Yong-shou, LI Hong-pu, HAN Guang, MIAO Wei-liang, ZHANG Xi-ying. 2021. A preliminary investigation of hydrochemical characteristics and genesis of deep brine in the central Qaidam basin[J]. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2129-2137(in Chinese with English abstract).
- LONG Peng-yu, ZHAO Yan-jun, HU Yu-fei, DU Jiang-min, HE Ji-hui, WANG Zhao-xu. 2022. Occurrence Characteristics and Genetic Study of Potassium Salt Minerals in Low Grade Solid Potassium Ore in the North Section of Mahai Salt Lake[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 338-346(in Chinese with English abstract).
- MA Hou-ming, LAI Zhi-jian, YAN Xin-hua, LIAO Shao-ping, TIAN Li-ming. 2021. Geochemical characteristics and prospect analysis of brine Lithium deposits in Jitai Basin, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(5): 617-627(in Chinese with English abstract).
- MA Li-chun, HUANG Hua, ZHANG Lian-yuan, LIU Cheng-lin, SUN Ming-guang, NIU Lei. 2015. Characteristics of paleogene deep potassium-rich brines in the Qianjiang depression, Hubei Province[J]. Acta Geologica Sinica, 89(11): 2114-2121(in Chinese with English abstract).
- NIU Xin-sheng, HUANG Hua, ZHENG Mian-ping. 2021. Geochemical characteristics and distribution patterns of subsurface brines in Qianjiang Depression, Jianghan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 28(6): 56-65(in Chinese with English abstract).
- MARTZ P, MERCADIER J M, CATHELINEAU M C, BOIRON M C, QUIRT D, DONEY A, GERBEAUD O, WALLY E D, LEDRU P. 2019. Formation of U-rich mineralizing fluids through basinal brine migration within basement-hosted shear zones: A large-scale study of the fluid chemistry around the unconformity-related Cigar Lake U deposit (Saskatchewan, Canada)[J]. Chemical Geology, 508: 116-143.
- REN Fu-hong, ZHANG Cui-yun, LIU Wen-sheng. 1998. Reconstruction of the hydrochemical features of paleosalt lake in

- Qianjiang dipression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 19(4): 395-401(in Chinese with English abstract).
- SU Wei, XU Ji-feng, LIU Yu-ying. 2020. Facies analysis and sedimentary model of Wangchang oil field[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 38(3): 85-88(in Chinese with English abstract).
- SUN Xiao-Hong, XIONG Xian-xiao, WANG Ying, TANG Rao. 2015. Types and temporal and spatial distribution of boron deposits in China[J]. *Geological Review*, 61(S1): 810-811(in Chinese).
- TANG Wen-xu, CHEN Feng-ling, FAN Chuan-jun. 2007. Characteristics of hydrocarbon reservoiring in Wangchang salt diapiric structure of Qianjiang Sag[J]. *Resources Environment & Engineering*, 21(4): 385-387(in Chinese with English abstract).
- TONG Chong-guang. 1980. Some characteristics of petroleum geology of the rift system in eastern China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1(4): 19-26(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, LIU Han-liang, WANG Wei, ZHOU Jian, ZHANG Bi-min, XU Shan-fa. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, HUANG Hua, WANG Jiu-yi, XU Hai-ming, YU Xiao-can, GAO Chao, MENG Ling-yang, CAI Fan-rui, YAN Kai, FANG Jing-ling. 2018. Geological features and metallogenic model of K-and Li-rich brine ore field in the Jiangling depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1630-1646(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, LIU Li-hong, LI-Qiang, MENG Ling-yang, LIU Cheng-lin, ZHANG Yuan-yuan, WANG Jiu-yi, YU Xiao-can, YAN Kai. 2020. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium-potassium ore sources area in Jitai basin of Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65-84(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, MENG Ling-yang, LIU Cheng-lin, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Si-han, YOU Chao, LI Ke-kun, TENG Xiao-hua. 2021. A study of the genesis of Paleocene underground brine boron deposits in Jiangling Depression[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- WANG Guo-li, YANG Yu-qing, ZHANG Yong-sheng, QI Zhi-xian, QIAO Yue-dong, YUAN He-ran. 2004. Sedimentary microfacies and evolution of the Qianjiang Formation of Paleogene at Wangchang area in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(2): 140-150(in Chinese with English abstract).
- WANG Jiu-yi, LIU Cheng-lin, WANG Chun-lian, YU Xiao-can, YAN Kai, GAO Chao. 2021. Tectono-paleoclimatic coupling process for mineralization of Late Cretaceous-Paleogene evaporites in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2041-2051(in Chinese with English abstract).
- YANG Pan-xin, GAO Zhan-wu, ZHANG Jun. 2009. Structure model and evolution of the Jiangnan Basin and relation with moderate to strong earthquakes[J]. *Earthquake*, 29(4): 123-130(in Chinese with English abstract).
- YING Wei-hua. 1984. Trapping of oil and gas in Wangchang oil-field[J]. *Petroleum Exploration and Development*, (3): 18-25(in Chinese with English abstract).
- YU Sheng-song. 1994. The hydrochemical characteristics of the deep brines in basin Q, Hubei Province[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2(1): 6-17(in Chinese with English abstract).
- YU X C, LIU C L, WANG C L, ZHAO J X, WANG J Y. 2021. Origin of geothermal waters from the Upper Cretaceous to Lower Eocene strata of the Jiangling Basin, South China: Constraints by multi-isotopic tracers and water-rock interactions[J]. *Applied Geochemistry*, 124: 104810.
- YU Xiao-can, LIU Cheng-lin, WANG Chun-lian, XU Hai-ming, ZHAO Yan-jun, HUANG Hua, LI Rui-qin. 2022a. Genesis of lithium brine deposits in the Jiangnan Basin and progress in resource exploration: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107-123(in Chinese with English abstract).
- YU Xiao-can, WANG Chun-lian, HUANG Hua, WANG Jiu-yi. 2022b. Origin and evolution of deep-seated K-rich brines in the Paleogene of Qianjiang Depression, Hubei Province[J]. *Earth Science*, 47(1): 122-135(in Chinese with English abstract).
- YUAN Huan-yu, WU Li-ran. 2021. Current situation and progress of exploitation and comprehensive utilization of underground brine in China[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 24(3): 18-21(in Chinese with English abstract).
- YUE Xin, LIU Xi-xi, QIU Xin-di, YU Xiao-liang. 2021. Hydrochemical characteristics and genesis of deep pore brine in Gas Hure Area, Western Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 29(1): 69-79(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yong-sheng, WANG Guo-li, YANG Yu-qing, QI Zhi-xian. 2005. Rhythms of saline lake sediments of the Paleogene and their paleoclimatic significance in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 7(4): 461-470(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xun. 2013. Basic characteristics and resource classification of subsurface brines in deep-seated aquifers[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(5): 4-10(in Chinese with English abstract).