

# 川东北寒武纪盐盆成盐环境及其找钾意义

王淑丽, 郑绵平

中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

**摘要** 四川盆地东北部寒武系蒸发盐发育, 该区钻孔见有高矿化度卤水, 建南地区中寒武统覃家庙组沉积厚层石膏及石盐(建深1井), 钻遇石盐累计厚度达120 m, 各盐层之间仅夹有薄层石膏, 石盐单层最厚达80 m(可能存在挤压增厚), 结束了对于本区未达到石盐沉积的认识。对建深1井岩盐沉积段岩屑样品(石盐岩屑尚难识别其是原生石盐还是次生石盐)的溴氯系数进行分析得出, 其溴氯系数值相对较低, 一般为0.05~0.22。将水溶与酸溶的钾离子百分含量进行对比, 酸溶的钾离子含量明显高于水溶钾离子含量, 约为水溶的1.3~2.0倍, 可能与石盐岩屑中存在较难溶于水的含钾矿物有关。川东北现有多口井钻遇寒武系高矿化度含(富)钾、溴、锂卤水, 其含量最高可分别达4.6 g/L、886 mg/L和148 mg/L, 可进行综合利用。研究认为该区卤水的较高 $\text{Li}^+$ 含量既不是完全由海水浓缩而成的沉积卤水, 更不是溶滤盐类的结果, 推测与该地区的水-岩作用、火山活动与深部来源的热水有关。综合分析本区的成钾条件和亚洲寒武系成盐成钾的广泛性, 认为应关注及加强研究该区成盐找钾。

**关键词** 川东北; 寒武系; 溴氯系数; 成盐环境; 成钾条件

**中图分类号** P612

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.35.005

## Cambrian Salt-forming Environment in Northeastern Sichuan Basin and Its Significance for Finding Potash

WANG Shuli, ZHENG Mianping

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract** Cambrian evaporites are in a wide distribution and the brine with high salinity was found in northeastern Sichuan basin. The thick layer of halite and gypsum in Qinjiamiao formation of Middle Cambrian was found in Jiannan area. Well Jianshen 1 encounters the thick halite layer, with accumulative thickness of up to 120 m, with thin-bedded gypsum, and with the single - layer thickness of halite reaching a maximum of 80 m (might be thickened by squeezing), which overturns the previous conclusion that this area has not reached the halite deposition stage. The bromine to chlorine ratio is analyzed for halite debris (it is not easy to determine whether the halite debris is primary or secondary) and the  $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$  value ranges mostly from 0.05 to 0.22, indicating that the seawater has not reached the stage of sylvite deposition. Comparing the percentages of the water-soluble and acid-soluble potassium ions, the potassium ion content of acid-soluble is found to be about 1.3~2.0 times higher than that of the water-soluble, and this may because the rock salt debris contains water insoluble potassium-bearing minerals. There are several wells that encounter the high salinity brine in northeastern Sichuan basin, with the  $\text{K}^+$ ,  $\text{Br}^-$ , and  $\text{Li}^+$  concentrations up to 4.6 g/L, 886 mg/L and 148 mg/L, respectively for well Tian 2 in Wuxi. In addition, this study reveals that the high  $\text{Li}^+$  content in the brine is neither from the concentration of sea water, nor from the leaching of salts. It may be related to the water/rock interaction, the volcanic activity or other hot water of deep

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41403019); 国家自然科学基金重点项目(U0833601); 中国地质调查局地质调查项目(1212010011810)

作者简介: 王淑丽, 博士后, 研究方向为盐类矿床学, 电子信箱: wangshuli77@126.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学与盐类地质矿床学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 王淑丽, 郑绵平. 川东北寒武纪盐盆成盐环境及其找钾意义[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 41-49.

sources. A comprehensive evaluation of sylvinite forming conditions in this area and the wide distribution of Cambrian salt-bearing basins in Asia indicate that the exploration in this area should be strengthened in the future.

**Keywords** northeastern Sichuan; Cambrian; bromine chloride coefficient; salt-forming environment; potassium-bearing salt forming condition

寒武系含盐盆地分布广泛,在世界范围内都有分布。尤其在亚洲,具有厚大的石盐沉积,甚至是钾盐沉积,与其他大陆成盐强度相比,亚洲寒武系成盐强度大,并有大规模的岩盐及巨型钾盐聚集,故称之为“亚洲现象”。寒武纪含盐岩系主要分布在俄罗斯东西伯利亚、伊朗、阿曼、印度、巴基斯坦和中国。中国寒武系含盐盆地主要分布于扬子陆块、华北陆块和塔里木陆块<sup>[1]</sup>。四川盆地东北部寒武系蒸发盐沉积广泛,多口钻井发现有高矿化度含(富)钾卤水。直至建深1井寒武系石盐发现之前,川东北盐盆地仅发现薄层石膏,未发现石盐沉积。建深1井位于上扬子川东褶皱带石柱复向斜中部,是建南地区第一口钻遇石盐钻井,对认识川东北盐盆地的寒武系沉积环境及四川盆地蒸发盐的沉积演化等具有启示意义。

川东北盐盆地共钻遇膏盐岩钻井8口,分别为建深1井、利1井、鱼1井、池7井、五科1井、天1井、天2井与猫1井。建深1井钻遇膏盐岩厚度最大,并发现中寒武统覃家庙组厚层石盐<sup>[2]</sup>。周边现已有多口井(巫溪田坝天1井、天2井,巫溪中坝中1井、中2井,城口ZK<sub>1</sub>—ZK<sub>7</sub>井与忠县池7井)发现寒武系

高矿化度(富)钾、溴、锂卤水,其含量最高可分别达4.6 g/L、886 mg/L和148 mg/L,可综合利用。

## 1 地质背景

### 1.1 地层

川东北盐盆地寒武纪初期,地壳下降,至沧浪铺早期,海侵范围逐渐扩大,沧浪铺晚期,盆地西北部及西部边缘开始缓慢上升,一直延续到晚寒武世。从沉积序列分析:早寒武世早期以陆源碎屑沉积为主,经中晚期陆源碎屑—碳酸盐混合沉积过渡为中晚寒武世的碳酸盐沉积。本区蒸发盐发育层位主要为中寒武统覃家庙组。从空间分布分析:由西向东,沉积厚度有所增加,沉积物中的页岩、砂岩相对减少,碳酸盐沉积相对增加。蒸发盐发育厚度以利川—恩施地区最大。区内寒武系地层发育齐全,为一套碎屑岩及碳酸盐岩沉积建造,沉积厚度在1600~2800 m,划分为上中下3个统共6个组。上统三游洞组,中统覃家庙组,下统石龙洞组、天河板组、石碑组和水井沱组(表1)。

表1 川东北寒武系地层

Table 1 Stratum of Cambrian system of northeastern Sichuan Basin

| 系           | 统    | 组                       | 岩 性                                                                                         | 备注         |
|-------------|------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 寒<br>武<br>系 | 上覆地层 | 南津关组(O <sub>1n</sub> )  | 上部灰色、深灰色灰质白云岩与灰色白云质灰岩、灰岩不等厚互层;下部深灰色泥岩、含灰质泥岩                                                 |            |
|             | 上统   | 三游洞群(C <sub>3s</sub> )  | 灰色白云岩、灰质白云岩、含灰质白云岩呈不等厚互层                                                                    | 含钾卤水       |
|             | 中统   | 覃家庙组(C <sub>2q</sub> )  | 上部浅灰色含白云质灰岩、白云质灰岩与灰色灰质白云岩、白云岩不等厚互层;下部夹深灰色砂屑灰岩、白云质砂屑灰岩,局部地区具厚层石膏及石盐沉积                        | 富钾卤水,石膏,石盐 |
|             | 下统   | 石龙洞组(C <sub>1sl</sub> ) | 自上而下由浅灰色薄—中层状泥粉晶云岩、溶孔白云岩、云质灰岩、泥砂质条带灰岩、深灰—浅灰色薄—厚层状泥粉晶灰岩夹泥粉晶云岩、泥粉晶或亮晶砂、砾屑灰岩、深灰色块状豹斑状云化灰岩及鲕粒灰岩 |            |
|             |      | 天河板组(C <sub>1t</sub> )  | 上部以灰岩夹泥岩,顶部为泥灰岩;中部为灰岩、生屑灰岩;下部以云母质页岩为主,底部为细—中粒砂岩及细砾岩                                         |            |
|             |      | 石碑组(C <sub>1sp</sub> )  | 上部为浅色—深灰色块状泥粉晶—亮晶灰岩夹少量云岩;下部为灰—深灰色薄层状泥质粉砂岩、灰质粉砂岩夹砂质灰岩扁豆体                                     |            |
|             |      | 水井沱组(C <sub>1sh</sub> ) | 灰黑色、黑色页岩、碳质页岩                                                                               |            |
|             | 下覆地层 | 灯影组(Z <sub>2dy</sub> )  | 深灰色、灰色泥晶、粉晶云岩夹深灰色藻云岩                                                                        |            |

## 1.2 构造基底背景

构造基底性质对钾盐盆地形成具有关键性控制作用。钾盐矿床多形成于地壳相对稳定地区,又有一定程度的局部拗陷地段。稳定构造区在准稳定区有利聚钾;准稳定区在局部稳定构造区利于迁聚成钾<sup>[3]</sup>。如前乌拉尔二叠纪钾盐矿床<sup>[4]</sup>、加拿大著名的萨斯喀彻温中泥盆统钾盐盆地,发育于克拉通(地盾)和造山带之间的地轴向,是稳定克拉通南侧的亚稳定构造区。中国主要的古代蒸发盐盆地多产于“准克拉通(陆块)”,特别是海相盐盆地均发育于以前寒武系为基底的陆块中,规模较大的可溶盐沉积多发育于较稳定的陆核及其附近区域。

根据川东北蒸发盐盆地分布特点,结合构造地质背景分析<sup>[5,6]</sup>,川东北寒武纪蒸发盐位于上扬子陆块之上,18~16亿年前固结地台与10~8亿年前固结地台的接合带处(图1<sup>[6]</sup>),是稳定构造区上的相对活动的区域。上扬子陆块在寒武纪时期地势西高东低,川东北处于上扬子陆块东北缘的斜坡地带,以升降构造运动为主,沉积、沉降中心均位于建南—恩施一带,是成盐找钾有利构造区。

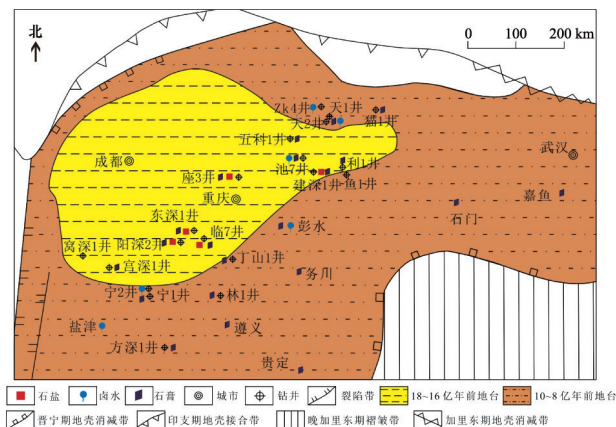


图1 四川盆地前寒武纪构造基底与蒸发盐分布

Fig. 1 Tectonic of the Precambrian basement and evaporites' distribution of Sichuan Basin

## 2 成盐环境分析

钾盐是海水或湖水蒸发到末期的沉积矿产。在蒸发沉积过程中,首先析出溶解度较低的碳酸岩类矿物(灰岩、白云岩等),其次是硫酸盐岩(石膏、硬石膏等),最后是高溶解度的氯化物,如石盐、钾镁盐等,钾盐是氯化物沉积阶段的后期产物。以海相蒸发沉积矿床为例,在海水蒸发至12%~13%盐度时开始沉积石膏,当海水蒸发至27.5%后开始大量沉积石盐,最后在海水蒸发到33%后才沉积高溶解度的钾盐<sup>[7]</sup>。所以钾盐沉积必须有持续蒸发的干旱气候条件。在有利构造条件下,如大陆被动边缘、地槽带、裂谷—坳沟、克拉通内的台地拗陷等,在盐盆地的局部洼地中富集成钾<sup>[8,9]</sup>。

## 2.1 川东北膏盐岩分布

川东北寒武纪地层发育,沉积厚度较大,岩性则以白云岩为主夹膏盐岩、局部见砂岩夹膏质白云岩,膏岩层位主要是中寒武统覃家庙组。本区共钻遇膏岩钻井8口,分别为建深1井、利1井、鱼1井、池7井、五科1井、天1井、天2井与猫1井(图2)。本区寒武系膏岩发育,以建深1井所在地区膏岩发育最厚,达150 m以上(图3)。除建深1井外,其他钻井均未见石盐,仅见石膏,但据测井资料解释,利1井覃家庙组地层也存在超高电阻率且对应处并径扩径段,解释为石盐层,分析认为是由于使用淡水钻井液以致录井时未见盐层。

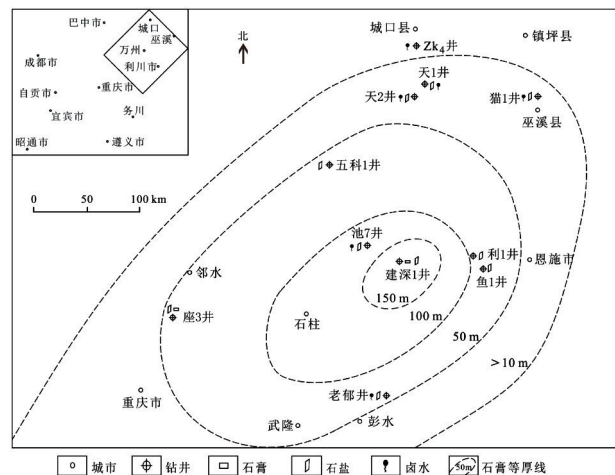


图2 川东北寒武系石膏等厚图

Fig. 2 Thickness of Cambrian gypsum in northeastern Sichuan Basin

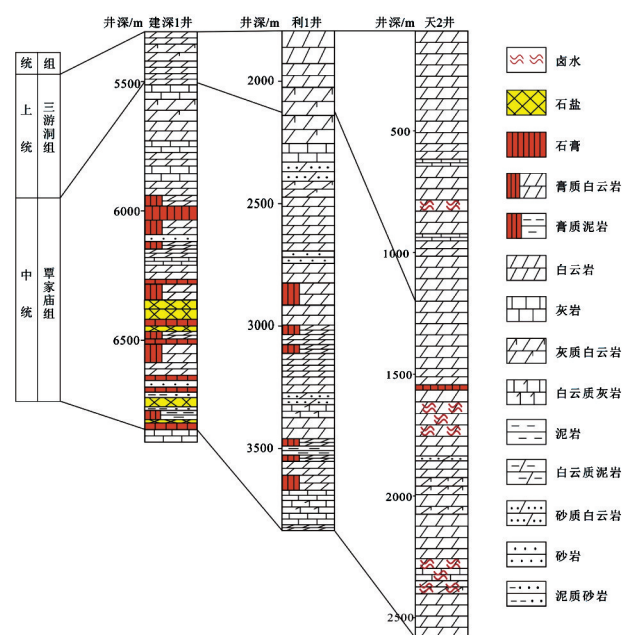


图3 川东北寒武系膏盐岩地层对比

Fig. 3 Stratigraphic correlation of Cambrian evaporite in northeastern Sichuan Basin



## 2.2 建深1井膏盐岩沉积特征

建深1井位于上扬子川东褶皱带石柱复向斜中部建南深层构造主高点,构造呈北北东向延展。揭露寒武系中上统地层,岩层厚达1486.35 m(未完),岩盐层位以中统覃家庙组中下部为主。因钻遇岩性复杂的厚层岩盐,钻至井深6820.35 m完钻,完钻层位中寒武统覃家庙组,未进入下统石龙洞组。

1) 三游洞组( $C_{3s}$ )。井深5334.00~5539.00 m,钻遇地层厚度205.00 m,顶部黄色灰岩;上部灰色云岩夹灰色灰质云岩;中部深灰色云质灰岩、灰质云岩;下部灰色云岩夹云质灰岩、灰质云岩,为局限台地云坪相沉积。

2) 覃家庙组( $C_{2q}$ )。井深5539~6820.35 m,共揭露深度1281.35 m,该组中下部地层为主要含盐层位。上部以灰色、浅灰色(含)白云质灰岩、灰质白云岩及白云岩为主,夹灰色粒屑灰岩、白云质砂(粒)屑灰岩;中部为灰色白云岩、含膏质白云岩、石膏质白云岩、砂质白云岩及灰白色粉砂岩。自上而下膏质含量逐渐增加;下部以灰色石膏质白云岩与含膏质云岩为主,间夹含膏砂质白云岩、含盐云岩、泥质膏盐及膏盐岩(图4)。

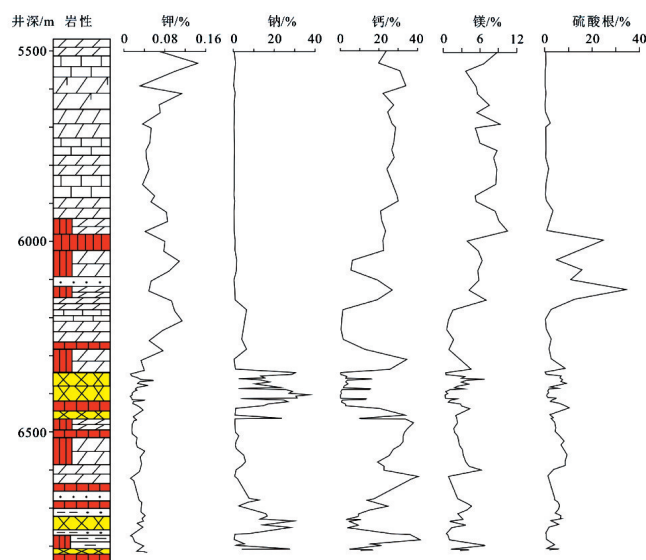


图4 建深1井寒武系中统酸溶(盐酸)主要离子含量

Fig. 4 Chemical composition for acid-soluble (hydrochloric acid) of Middle Cambrian of Well Jianshen 1

建深1井自覃家庙组中下部见有巨厚含膏、含盐致密白云岩与膏盐岩互层,膏盐岩累计厚达622.50 m,其中含膏岩盐、膏质岩盐和岩盐累计厚度达120 m。根据测井资料及取芯记录,认为建深1井含盐层位始于井深6300 m左右,岩性以褐灰色含膏含云泥质岩盐为主。如井段6317.72~6326.10 m,进尺8.38 m,由于淡水钻井泥浆的影响,导致盐类矿物溶解,取芯长仅1.00 m,采出的岩芯为泥膏混杂的岩盐(图5)。

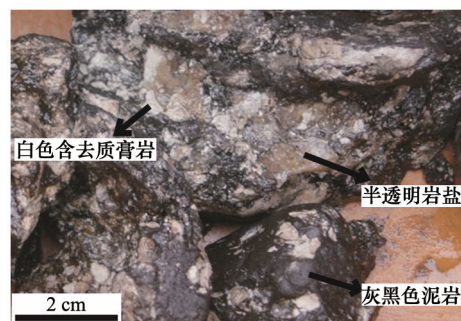
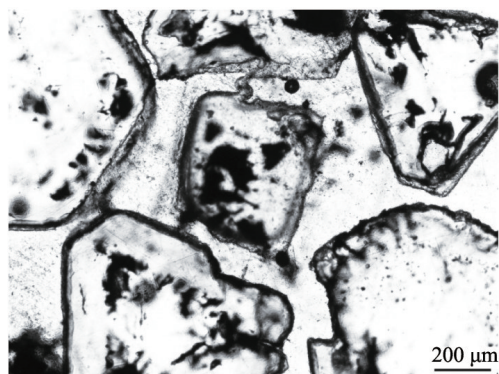


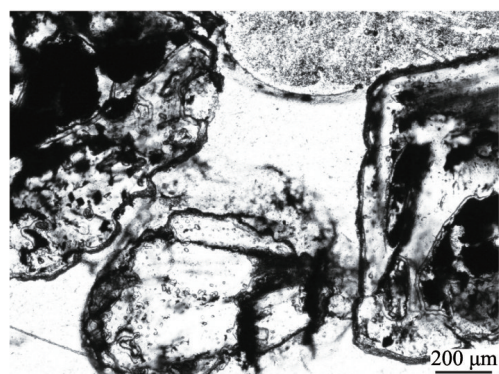
图5 含膏含云泥质岩盐(淡水钻井泥浆导致部分岩盐溶解)

Fig. 5 Halite with gypsum and dolomite (freshwater drilling mud led to some rock salt dissolved)

地球化学分析测试结合岩屑的复查结果,井深6350~6433 m为约83 m石盐段,石盐含量均在80%~95%(图6);6443~6579 m段岩性主要为含膏含盐钙质岩屑中一粗砂岩,含盐量为5%~8%;6638~6761 m段的石盐含量约为85%,含有少量的膏质、钙质岩屑物质。多数样品含有少量泥质物质及部分样品含膏含钙质岩屑物质,分析是由于钻井泥浆的混入物质而使石盐纯度降低。



(a) 6355 m



(b) 6418 m

图6 不同井深单偏光镜下石盐颗粒

Fig. 6 Salt granules in plane-polarized light

对石盐样品进行扫描电镜分析,其化学成分为NaCl(图7、表2)。

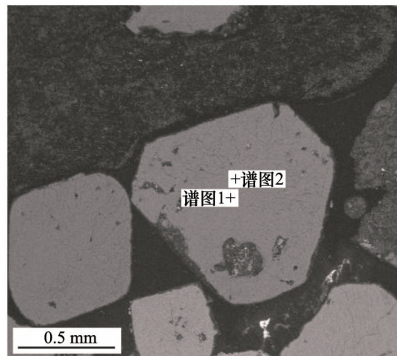


图7 井深6350 m岩屑样品谱图  
Fig. 7 Spectrogram of salt in 6350

表2 井深6350 m岩屑样品成分

Table 2 Chemical compositions of salt in 6350 m %

| 谱图  | Na    | Cl    | 总和     |
|-----|-------|-------|--------|
| 谱图1 | 37.79 | 62.21 | 100.00 |
| 谱图2 | 38.73 | 61.27 | 100.00 |
| 平均  | 38.26 | 61.74 | 100.00 |

表3 盐类沉积物各咸化阶段Br、Br×10<sup>3</sup>/Cl理论值

Table 3 Br、Br×10<sup>3</sup>/Cl theoretical value in various salt sediment stages

| 咸化阶段 | 石盐       |                     |                        | 钾石盐      |                     |                        | 光卤石      |                     |                        |
|------|----------|---------------------|------------------------|----------|---------------------|------------------------|----------|---------------------|------------------------|
|      | <i>b</i> | Br×10 <sup>-6</sup> | Br×10 <sup>3</sup> /Cl | <i>b</i> | Br×10 <sup>-6</sup> | Br×10 <sup>3</sup> /Cl | <i>b</i> | Br×10 <sup>-6</sup> | Br×10 <sup>3</sup> /Cl |
| 石盐   | 0.13     | 66                  | 0.11                   |          |                     |                        |          |                     |                        |
| 钾石盐  | 0.073    | 172                 | 0.28                   | 0.73     | 1720                | 3.62                   |          |                     |                        |
| 光卤石  | 0.073    | 249                 | 0.41                   | 0.73     | 2490                | 5.24                   | 0.52     | 1778                | 4.6                    |

注:*b*(分配系数)=固相中溴含量/液相中溴含量<sup>[18]</sup>。

### 3.1 岩盐地球化学分析

对建深1井含盐段地层每隔约5 m取1个样品,分别进行水溶及酸溶处理,对常量元素及微量元素进行分析。根据建深1井含盐层段岩屑地球化学数据显示(表4),该井样品为石盐岩屑,所以很难判断其样品是原生石盐还是次生石盐,溴氯系数值均较低,一般在0.05~0.22之间(图8(a)),在井深6350~6433 m厚层石盐段的溴氯系数值较为稳定,主要为0.13~0.20,自下而上呈现增长趋势,说明该地区的海水咸化程度随着时间变化逐渐增加。本井石盐层的溴氯系数与含钾石盐沉积阶段的Br及Br×10<sup>3</sup>/Cl系数理论值相对比,本井溴氯系数值偏低;钾氯系数为0.2~0.5(图8(b))。由于在钻井过程中使用淡水泥浆及欠饱和泥浆钻井<sup>[26]</sup>,所以也可能在石盐岩屑中有少量易溶的钾盐类矿物溶解。

### 3 找钾潜力探讨

钾氯系数与溴氯系数常用来评价一个地区的成钾条件。溴在钾盐矿物中的富集是由于溴离子半径(1.96 Å)和氯离子半径(1.81 Å)很相近,以类质同像的形式交代矿物中的氯离子,溴常与钾盐等矿物密切共生,是找钾的重要指标<sup>[10~14]</sup>。在氯化物结晶时,溴的分配系数均小于1,也就是进入固相矿物中的溴量总是低于遗留在溶液中的溴量。所以在海水蒸发、浓缩、盐类矿物结晶时,水溶液中溴的浓度也将逐渐增加,沉积石盐层中的溴含量也逐渐增加(表3)。因此,石盐矿物中的溴氯系数可用于代表盐湖卤水浓缩淡化的程度<sup>[15~18]</sup>。在纵向上根据溴氯系数增高或降低的周期性变化,就可用一个定量的标准去划分含盐系地层的沉积韵律,并使人们更好地认识古盐盆发展历史,找出对沉积钾盐矿物的有利层段<sup>[19~24]</sup>。

溴氯系数(Br×10<sup>3</sup>/Cl)与钾氯系数(K×10<sup>3</sup>/Cl)是判别卤水蒸发沉积阶段的重要的地球化学标志,可作为钾盐找矿的标志。Heinrich<sup>[25]</sup>也曾指出:显生宙海相岩盐的溶滤卤水Br×10<sup>3</sup>/Cl系数为0.06~0.76;晚前寒武纪时Amadeus盆地溶滤石盐的Br×10<sup>3</sup>/Cl系数为0.20~0.35;绿河建造的溶滤石盐的Br×10<sup>3</sup>/Cl系数为0.022~0.30。Francisco<sup>[19]</sup>2008年指出了溶滤石盐、光卤石与钾石盐的Br×10<sup>3</sup>/Cl分别为0.34~0.64、3.98~5.31与6.37~7.96。

对水溶与酸溶的钾离子含量进行对比,酸溶的钾离子含量明显高于水溶钾离子含量,约是水溶钾离子含量的1.3~2.0倍(图9);将水溶K×10<sup>3</sup>/Cl系数与酸溶K×10<sup>3</sup>/Cl系数进行对比,酸溶K×10<sup>3</sup>/Cl系数也高于水溶K×10<sup>3</sup>/Cl系数,推测可能由于石盐岩屑中存在部分水较难溶含钾矿物(如杂卤石),即使在钻井过程中使用淡水泥浆,难溶的钾盐矿物仍可能部分保存。

### 3.2 卤水化学分析

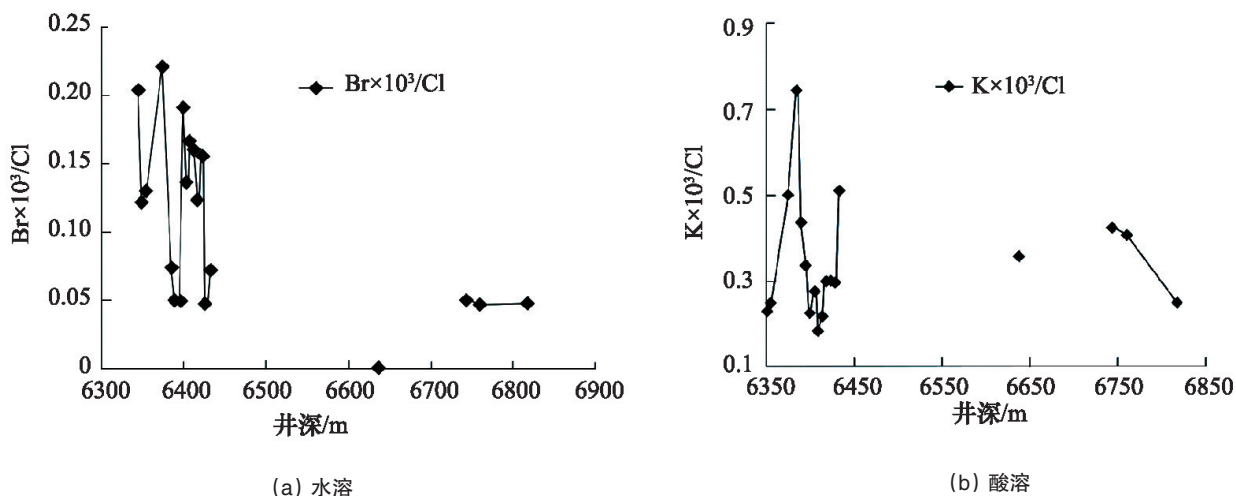
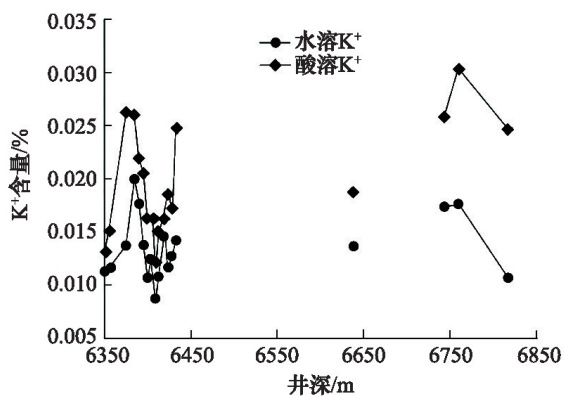
该区钻井主要揭露中上寒武统地层,岩性主要为大套的白云岩,具有一定的储集空间。区内先后共钻井10口,发现石膏、硬石膏及富钾卤水。以东北边缘区城口明通一带盐井(泉)较为集中,盐泉均出露于河流或溪沟深切处,本处共施工钻孔7口,井深100~400 m,见石膏及盐卤水。

表4 建深1井覃家庙组盐岩屑水溶化学分析  
Table 4 Rock salt debris chemical composition of Qinjiamiao formation of Well Jianshen1

| 样品深度/m | 岩性      | 水溶/%            |                |                  |                  |                 |                 | 酸溶/%                          |                                             |       |                 |                |                  | 水溶               |                               | 酸溶    |                        |                       |
|--------|---------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|------------------------|-----------------------|
|        |         | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Br <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> | 不溶物   | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 不溶物   | Br×10 <sup>3</sup> /Cl | K×10 <sup>3</sup> /Cl |
| 6345   | 含砂质岩盐   | 18.79           | 0.01           | 0.25             | 0.01             | 0.01            | 29.56           | 2.09                          | 0.09                                        | 39.84 | 18.15           | 0.02           | 2.27             | 2.27             | 2.96                          | 13.20 | 0.20                   | 0.30                  |
| 6350   | 岩盐      | 30.51           | 0.01           | 0.00             | 0.01             | 0.01            | 49.55           | 0.10                          | 0.14                                        | 7.27  | 30.12           | 0.01           | 0.42             | 0.42             | 0.20                          | 2.75  | 0.12                   | 0.23                  |
| 6355   | 岩盐      | 28.57           | 0.01           | 0.00             | 0.01             | 0.01            | 46.37           | 0.63                          | 0.08                                        | 12.54 | 28.39           | 0.02           | 0.44             | 0.44             | 0.69                          | 3.86  | 0.13                   | 0.25                  |
| 6375   | 岩盐      | 17.63           | 0.01           | 0.78             | 0.02             | 0.01            | 27.31           | 3.66                          | 0.04                                        | 46.25 | 17.98           | 0.03           | 2.91             | 2.91             | 6.75                          | 10.34 | 0.22                   | 0.50                  |
| 6385   | 含钙质砂质岩盐 | 17.91           | 0.06           | 1.73             | 0.02             | 0.00            | 26.81           | 3.31                          | 0.08                                        | 47.32 | 16.67           | 0.03           | 2.31             | 2.31             | 5.76                          | 10.65 | 0.07                   | 2.07                  |
| 6390   | 含膏含钙质岩盐 | 25.32           | 0.02           | 0.37             | 0.02             | 0.00            | 40.46           | 1.79                          | 0.04                                        | 26.06 | 23.45           | 0.02           | 1.82             | 1.82             | 2.09                          | 5.17  | 0.05                   | 0.44                  |
| 6395   | 岩盐      | 26.32           | 0.01           | 0.17             | 0.01             | 0.00            | 40.91           | 1.70                          | 0.08                                        | 26.19 | 25.00           | 0.02           | 1.12             | 1.12             | 1.76                          | 8.38  | 0.05                   | 0.34                  |
| 6400   | 岩盐      | 29.37           | 0.01           | 0.05             | 0.00             | 0.01            | 47.26           | 1.14                          | 0.08                                        | 12.72 | 28.64           | 0.02           | 0.39             | 0.39             | 1.32                          | 4.11  | 0.19                   | 0.23                  |
| 6405   | 岩盐      | 27.29           | 0.01           | 0.00             | 0.01             | 0.01            | 44.05           | 0.74                          | 0.06                                        | 10.68 | 26.80           | 0.02           | 0.77             | 0.77             | 1.71                          | 5.96  | 0.14                   | 0.28                  |
| 6409   | 岩盐      | 30.88           | 0.01           | 0.13             | 0.01             | 0.01            | 48.15           | 1.46                          | 0.05                                        | 11.96 | 37.27           | 0.01           | 0.31             | 0.31             | 1.02                          | 3.87  | 0.17                   | 0.18                  |
| 6413   | 岩盐      | 30.50           | 0.01           | 0.90             | 0.01             | 0.01            | 49.80           | 0.92                          | 0.08                                        | 10.73 | 30.13           | 0.01           | 0.36             | 0.36             | 0.86                          | 3.56  | 0.16                   | 0.22                  |
| 6418   | 岩盐      | 30.35           | 0.01           | 0.17             | 0.01             | 0.01            | 48.60           | 1.37                          | 0.04                                        | 12.12 | 30.96           | 0.02           | 0.39             | 0.39             | 1.37                          | 4.08  | 0.12                   | 0.30                  |
| 6423   | 岩盐      | 24.62           | 0.01           | 0.38             | 0.02             | 0.01            | 38.89           | 3.08                          | 0.08                                        | 26.68 | 24.33           | 0.02           | 1.18             | 1.18             | 3.34                          | 7.69  | 0.16                   | 0.30                  |
| 6428   | 岩盐      | 26.99           | 0.01           | 0.39             | 0.01             | 0.00            | 42.70           | 2.37                          | 0.08                                        | 18.12 | 26.58           | 0.02           | 0.79             | 0.79             | 2.35                          | 5.77  | 0.05                   | 0.30                  |
| 6433   | 岩盐      | 16.97           | 0.01           | 1.16             | 0.03             | 0.00            | 27.72           | 3.13                          | 0.12                                        | 43.41 | 16.93           | 0.02           | 2.87             | 2.87             | 6.06                          | 11.24 | 0.07                   | 0.51                  |
| 6638   | 岩盐      | 24.79           | 0.01           | 0.52             | 0.01             | 0.00            | 38.15           | 1.21                          | 0.27                                        | 32.82 | 25.75           | 0.02           | 7.29             | 0.66             | 1.73                          | 4.69  | 0.00                   | 0.36                  |
| 6744   | 岩盐      | 27.62           | 0.02           | 0.50             | 0.01             | 0.00            | 40.58           | 1.41                          | 0.19                                        | 28.05 | 29.51           | 0.03           | 4.66             | 1.08             | 2.51                          | 9.11  | 0.05                   | 0.43                  |
| 6761   | 岩盐      | 28.12           | 0.02           | 0.47             | 0.01             | 0.00            | 43.16           | 1.37                          | 0.08                                        | 23.84 | 28.21           | 0.03           | 3.84             | 1.40             | 1.88                          | 7.35  | 0.05                   | 0.41                  |
| 6818   | 含钙质岩盐   | 29.17           | 0.01           | 0.34             | 0.01             | 0.00            | 42.52           | 0.75                          | 0.39                                        | 26.20 | 28.39           | 0.02           | 4.36             | 1.17             | 0.83                          | 6.38  | 0.05                   | 0.25                  |
|        |         |                 |                |                  |                  |                 |                 |                               |                                             |       |                 |                |                  |                  |                               |       |                        | 0.58                  |

注:为保证数据的代表性,表中只选取了水不溶物小于50%的数据,数据为四舍五入的结果(数据由国土资源部盐湖资源与环境重点实验室司东新分析)。



图8 建深1井部分样品Br $\times 10^3$ /Cl系数Fig. 8 Ratio of Br $\times 10^3$ /Cl in drill Jianshen 1图9 建深1井岩屑水溶与酸溶K<sup>+</sup>含量对比Fig. 9 Contents of K<sup>+</sup> in water soluble and acid soluble

后来因水浓度降低,盐厂停止生产,对所有盐井进行了封口。但由于剥蚀作用,现今还有一口卤水井(ZK<sub>4</sub>井)卤水在向外溢。以中南部巫溪天星桥构造的天1井与天2井为代表,该构造似穹窿状,构造复杂,轴部被河流切割,上寒武统毛田组碳酸盐岩出露于峡谷深处。钻井深度2538~3092 m,基本上为碳酸盐剖面,夹少量硬石膏,钻遇富钾卤水。天1井中寒武统含膏岩类共15 m。其中膏盐岩10 m,膏质白云岩和含膏质白云岩共5 m。东部以中1井为代表,井深1111 m,在上寒武统碳酸盐岩中钻进,构造复杂,见低矿化度盐水。邻区石油钻井池7井均发育含钾卤水,猫1井也有盐浸显示,测井解释含有6层含水层。综合上述12口见卤水井分析,认为该地区三游洞组及覃家庙组夹有盐土层。

根据本研究组在2012年3月与2012年8月不同的季节2

次对城口—巫溪地区进行卤水的取样,认为在城口地区卤水的矿化度的高低主要受淡水补给的影响。3月于ZK<sub>4</sub>井井口取得的卤水的矿化度为170 g/L,而在8月所取的卤水矿化度则为77 g/L,矿化度相差很大,认为是由于城口地区的卤水为岩盐溶滤卤水。在8月的丰水季节里,淡水补给量大,从而造成了该区的卤水浓度差。对于巫溪天星桥构造卤水,季节变化对其矿化度的影响较小,主要取决于取样深度的不同,天1井与天2井的卤水矿化度随着钻井深度的加深而加大,500 m以上的表层水的矿化度相对较低,仅有140~180 g/L,对于2000~2500 m的深层卤水,矿化度高达260~310 g/L,且钾离子含量也有随着卤水的不断加深而加大的趋势。

天1井与天2井的水化学显示较好,矿化度一般在200~300 g/L,最大可达317 g/L;溴氯系数最大可达4.68;钾氯系数值相对也较高(表5<sup>[27]</sup>)。该区卤水样品溴氯系数与钾氯系数值大多已达到溶解(含)钾盐的标准。ZK<sub>4</sub>井卤水矿化度较低,溴氯系数与钾氯系数相对较高,有溶解含钾盐层的可能性。天星桥构造卤水的钾、溴离子来源于海水,但其锂离子含量已远远超出海水浓缩卤水应有的含量。在盐类沉积过程中,锂主要聚集在卤水中,直到共饱点为止。一般盐类矿物中锂的数量极小,主要与母液包裹体或黏土质吸附剂结合在一起。如英纳加岛海相卤水最后蒸发阶段的锂离子含量为16.4 mg/L<sup>[28]</sup>、海水蒸发浓缩到水氯镁石沉积阶段的锂离子含量为20.0 mg/L<sup>[21]</sup>、黄海水浓缩蒸发实验的水氯镁石沉积阶段锂离子含量为45.24 mg/L<sup>[29]</sup>。所以根据分析,该区卤水中的锂既不是完全由海水浓缩而成的沉积卤水,更不是溶滤岩盐等的结果,卤水中高含量锂可能与该地区水—岩作用、火山活动与深部来源的热水有关,有待深入研究。

表5 川东北卤水化学分析

Table 5 Chemical compositions of the brine in northeastern Sichuan Basin

| 地点  | 井名              | 矿化度/<br>(g·L <sup>-1</sup> ) | 离子含量/(mg·L <sup>-1</sup> ) |                 |                  |                  |                 |                 |                 |                               | Br×10 <sup>3</sup><br>/Cl | K×10 <sup>3</sup><br>/Cl | K×10 <sup>3</sup><br>/总盐 |
|-----|-----------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
|     |                 |                              | K <sup>+</sup>             | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> | Li <sup>+</sup> | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                           |                          |                          |
| 巫溪县 | 天1井             | 286                          | 3550                       | 97700           | 8310             | 1360             | 171200          | 465             | 85.40           | 424.00                        | 2.72                      | 20.74                    | 12.43                    |
|     |                 | 119                          | 636                        | 43371           | 2044             | 481              | 72109           | 66              | 17.50           | 95.73                         | 0.91                      | 8.83                     | 5.34                     |
|     |                 | 266                          | 3480                       | 91691           | 6610             | 1160             | 160600          | 390             | 76.70           | 310.00                        | 2.43                      | 21.67                    | 13.07                    |
|     | 天2井             | 234                          | 1850                       | 83748           | 4658             | 863              | 140261          | 251             | 68.75           | 139.65                        | 1.79                      | 13.19                    | 7.90                     |
|     |                 | 262                          | 2375                       | 92826           | 5678             | 1175             | 157970          | 315             | —               | 285.00                        | 1.99                      | 15.03                    | 9.07                     |
| 城口县 |                 | 317                          | 4578                       | 105210          | 10655            | 1847             | 189215          | 886             | 148.00          | 226.26                        | 4.68                      | 24.19                    | 14.43                    |
|     | ZK <sub>1</sub> | 133                          | 130                        | 49620           | —                | —                | 77070           | 42              | —               | 16                            | 0.54                      | 1.69                     | 0.98                     |
|     | ZK <sub>2</sub> | 92                           | 125                        | 33852           | 1248             | 317              | 52762           | 30              | 11.00           | —                             | 0.58                      | 2.37                     | 1.36                     |
|     | ZK <sub>4</sub> | 170                          | 609                        | 61560           | 2798             | 494              | 98284           | 152             | 1.92            | 174.44                        | 1.55                      | 6.19                     | 3.58                     |
|     |                 | 77                           | 170                        | 28260           | 1440             | 230              | 44120           | 17              | 1.00            | —                             | 0.38                      | 3.83                     | 0.53                     |
|     | ZK <sub>6</sub> | 87                           | 118                        | 32187           | 988              | 271              | 50037           | 28              | 0               | —                             | 0.56                      | 2.36                     | 1.36                     |
|     | ZK <sub>7</sub> | 72                           | 71                         | 26930           | 810              | —                | 41510           | —               | —               | 16                            | —                         | 1.71                     | 0.98                     |

#### 4 结论

1) 结合川东北盐盆地构造地质背景分析,该区寒武系蒸发盐位于上扬子陆块东北部,是稳定构造区上的相对活动的区域。上扬子陆块在寒武纪时期地势西高东低,以升降构造运动为主,沉积、沉降中心均位于建南—恩施一带,是成盐找钾有利构造区。

2) 根据建深1井的含盐地层石盐岩屑水溶地球化学分析,认为本井石盐溴氯系数与钾氯系数值均较低(本井石盐岩屑尚难识别其是原生石盐还是次生石盐)。溴氯系数自下而上呈现增长趋势,表明该地区的海水咸化程度逐渐增强,为该区探讨蒸发盐分布及成盐环境研究提供了新线索。

3) 对比分析建深1井水溶与酸溶钾离子含量,酸溶钾离子含量明显高于水溶钾离子含量,约是水溶钾离子含量的1.3~2.0倍,认为该井岩盐样品存在部分较难溶于水的含钾矿物。本区高矿化度的含(富)钾、溴、锂卤水,其组分可进行综合开发利用,需综合分析本区成钾条件和亚洲寒武系成盐成钾的广泛性。卤水中的锂离子含量甚高,其成因应引起关注。

#### 参考文献(References)

- [1] Wang S L, Zheng M P, Liu X F, et al. Distribution of Cambrian salt-bearing basins in China and its significance for halite and potash finding[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(2): 212-233.
- [2] 王淑丽, 郑绵平, 焦建. 上扬子区寒武系蒸发岩沉积相及成钾潜力分析[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 947-958.  
Wang Shuli, Zheng Mianping, Jiao Jian. Sedimentary facies of the Cambrian evaporites in the upper Yangtze region and their potash-forming potential[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(5): 947-958.
- [3] Zheng M P, Yuan H R, Zhang Y S, et al. Regional distribution and prospects of potash in China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2011, 85(1): 17-50.
- [4] 钱自强, 曲一华, 刘群. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 273.

Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. Potash deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 273.

- [5] 王鸿祯. 从活动论观点论中国大地构造分区[J]. 地球科学, 1981(1): 42-66.  
Wang Hongzhen. Geotectonic units of China from the view-point of mobilism[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1981(1): 42-66.
- [6] 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培. 中国及邻区构造古地理和生物古地理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 347.  
Wang Hongzhen, Yang Sennan, Liu Benpei. China and adjacent areas tectonic paleogeographic and paleobiogeographic[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989: 347.
- [7] Valyashk M G. Basic chemical types of natural waters and the conditions producing them (in Russian)[J]. Record of Academy, 1955 (102): 315-318.
- [8] 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 盐类矿床成因理论的新发展及其在矿床学上的地位[J]. 矿床地质, 1982, 1(1): 15-24.  
Yuan Jianqi, Huo Chengyu, Cai Keqin. The advances in the theory of the origin of salt deposits and their influence on the study of mineral deposits[J]. Mineral Deposits, 1982, 1(1): 15-24.
- [9] 郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1239-1246.  
Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. Present situation of potash resources and direction of potash search in China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1239-1246.
- [10] García-Veigas J, Cerdón D I, Rosell L, et al. Salt deposition and brine evolution in the Granada Basin (Late Tortonian, SE Spain)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 369: 452-465.
- [11] Skrzypek G, Dogramaci S, Grierson P F. Geochemical and hydrological processes controlling groundwater salinity of a large inland wetland of northwest Australia[J]. Chemical Geology, 2013, 357: 164-177.
- [12] Richard A, Banks D A, Mercadier J, et al. An evaporated seawater origin for the ore-forming brines in unconformity-related uranium deposits (Athabasca Basin, Canada): Cl/Br and  $\delta^{37}\text{Cl}$  analysis of fluid



- inclusions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(10): 2792–2810.
- [13] Shouakar-Stash O, Alexeev S V, Frape S K, et al. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(3): 589–605.
- [14] 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(3/4): 295–320.
- [15] 程怀德, 马海州, 谭红兵, 等. 钾盐矿床中Br的地球化学特征及研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(4): 399–408.  
Cheng Huaide, Ma Haizhou, Tan Hongbing, et al. Geochemical characteristics of bromide in potassium deposits: review and research perspectives[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(4): 399–408.
- [16] 许效松, 吴嘉陵. 云南勐野井钾盐矿床特征, 微量元素地球化学及成因探讨[J]. *中国地质科学院院报*. 1983(1): 17–36.  
Xu Xiaosong, Wu Jialing. Potash deposits in Mengyejing, Yunnan: A study of certain characteristics, geochemistry of trace elements and genesis of the deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1983(1): 17–36.
- [17] 林耀庭. 溴的地球化学学习性及其在四川找钾工作中的应用[J]. *化工矿产地质*, 1995, 17(3): 175–181.  
Lin Yaoting. Geochemical behaviour of bromine and its application to prospecting for potash resource in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 1995, 17(3): 175–181.
- [18] Braitsch O. Salt deposits, their origin and composition[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1971.
- [19] Alcal A F J, Custodio E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 359(1): 189–207.
- [20] Cartwright I, Weaver T R, Fifield L K. Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: An example from the southeast Murray Basin, Australia[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(1): 38–56.
- [21] Fontes J C, Matray J M. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts [J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1–4): 149–175.
- [22] Goncharenko O P. Potassic Salts in Phanerozoic evaporite basins and specific features of salt deposition at the final stage of Halogenesis[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2006, 41(4): 378–388.
- [23] Gupta I, Wilson A M, Rostron B J. Cl/Br compositions as indicators of the origin of brines: Hydrogeologic simulations of the Alberta Basin, Canada[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 124(1/2): 200–212.
- [24] Walter L M, Stueber A M, Huston T J. Br–Cl–Na systematics in Illinois basin fluids: Constraints on fluid origin and evolution[J]. *Geology*, 1990, 18(4): 315–318.
- [25] Heinrich C A, Bain J H C, Fardy J J, et al. Br/Cl geochemistry of hydrothermal brines associated with Proterozoic metasediment-hosted copper mineralization at Mount Isa, northern Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(13): 2991–3000.
- [26] 张正禄, 杨海平. 建深1井小井眼钻井技术[J]. *江汉石油科技*, 2010, 20(1): 26–29.  
Zhang Zhenglu, Yang Haiping. The slim hole drilling technology of well jianshen 1[J]. *Jiangnan Shiyu Keji*, 2010, 20(1): 26–29.
- [27] 王淑丽, 郑绵平. 寒武系盐盆地的分布特征及其对中国成盐找钾的意义[J]. *科技导报*, 2013, 31(4): 17–27.  
Wang Shuli, Zheng Mianping. Distribution of Cambrian salt basin and its significance for halite and potash explorations in China[J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(4): 17–27.
- [28] McCaffrey M A, Lazar B, Holland H D. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br (super-) and K (super+) with halite[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(5): 928–937.
- [29] 陈郁华. 黄海水25℃恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. *地质学报*, 1983(4): 379–390.  
Chen Yuhua. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25℃) of the Yellow sea[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 1983(4): 379–390.

(责任编辑 王媛媛)

## ·学术动态·



中国科学技术协会

## 首届中国大地测量和地球物理学学术大会在北京召开

2014年10月25—26日,第一届中国大地测量和地球物理学学术大会在北京召开,来自国内高校、科研单位的2000余名专家和研究生参加。

本次大会主题为从全球变化到未来地球,议题涉及冰冻圈科学、大地测量学、地磁学与高空物理学、水文科学、气象学与大气科学、海洋物理科学、地震学与地球内部物理学、火山学与地球内部化学。

大地测量与导航专业委员会委员会议、IAG综合学术论坛暨大地测量与导航专委会年会开幕式、国际水文科学协会中国国家委员会学术大会、国际水文科学协会中国国家委员会工作会议同期召开。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16062188.html>。