

刚果盆地西南部白垩纪蒸发岩矿物与古环境特征

颜开¹, 刘成林¹, 王春连¹, 范美玲², 徐海明¹, 王九一¹

(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. 中国地质大学地球科学与资源学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 刚果(布)西南部布谷马西地区属于热带雨林气候, 拥有非洲大陆西部边缘重要的白垩纪钾盐矿床, 属于典型的裂谷成钾盆地。经矿物学研究表明, 主要的蒸发岩矿物类型为石盐、光卤石、钾石盐、水氯镁石、溢晶石、石膏、硬石膏等。蒸发岩矿物沉积序列为石膏、硬石膏(多数旋回缺失)→石盐→光卤石→钾石盐(次生)→溢晶石或水氯镁石。通过蒸发岩矿物沉积特征和微量元素的分析认为, 在白垩纪时期布谷马西地区处于长期的高温干旱环境, 有利于卤水蒸发、浓缩而形成盐类矿物沉积。

关键词: 布谷马西地区; 蒸发岩矿物; 沉积序列; 高温干旱

中图分类号: P588.24⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0525-10

Mineral deposition and paleoenvironment of Cretaceous evaporite in Southwestern Congo

YAN Kai¹, LIU Cheng-lin¹, WANG Chun-lian¹, FAN Mei-ling², XU Hai-ming¹ and WANG Jiu-yi¹

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Mboukoumassi region of Congo has tropical rain forest climate, possesses important Cretaceous potash deposits at the western edge of the African continent, and hence belongs to the typical rift potassium basin. Mineralogical studies show that the main types of evaporite minerals are chloride minerals comprising halite, carnallite, kalitite, brucite and spillite, sulfate minerals comprising gypsum, anhydrite and some other minerals. The sequence of evaporite mineral deposition is in order of gypsum, anhydrite (most cycles are missing) → stone salt → carnallite → potassium salt (secondary) → spillstone or magnesite. According to the characteristics of evaporite mineral deposition and the analysis of trace elements, it is shown that, in the Cretaceous period, the Mboukoumassi area was in a long-term high temperature and dry environment, which was conducive to the evaporation and concentration of brine and the formation of salt mineral deposition.

Key words: Mboukoumassi; evaporite minerals; depositional sequence; hot and dry

Fund support: Central Welfare Basic Scientific Research Business Expenses (KK2005, KK2016); Major State Basic Research Development Program ("973 Program", 2011CB403007); Project of China Geological Survey (DD20190437, DD20190606)

收稿日期: 2020-11-19; 接受日期: 2021-03-30; 编辑: 尹淑苹

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“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(DD20190437, DD20190606)

作者简介: 颜开(1992-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yankai_ytq@sina.com; 通讯作者: 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。

钾盐主要用作钾肥的生产原料,在我国属于紧缺的矿物资源。随着我国经济快速发展,钾肥消费量快速增长,我国肥料使用量世界第一,钾肥进口量世界第二。目前,国内探明的钾盐资源储量为100 534.51万吨(KCl),主要分布于西北柴达木、罗布泊等盐湖卤水中,可采资源服务年限为20年(王春连等,2013;董娟等,2015;徐洋等,2017)。中国复杂的大地构造背景使得找钾工作十分困难,而我国对钾盐资源的消费量日益增加,钾肥消费量约占全球20%~25%,为了满足每年巨大的钾盐需求量,走出国门找钾已成为趋势(刘成林等,2010;王春连等,2020)。

刚果(布)盆地位于非洲西部,滨临大西洋,沉积了巨厚的白垩纪钾盐资源,海运便利,有利于钾盐资源的开采利用。早在20世纪40年代,刚果(布)便开始对刚果盆地西南的布谷马西地区钾盐矿床展开勘查开发等工作。1940年至1980年,加蓬和刚果(布)政府先后成立找钾勘探公司,在刚果海含盐沉积盆地内展开多次钾盐勘察工作。在此期间,对刚果盆地西南部布谷马西地区盐矿的分布范围、埋藏深度、矿层特征及矿石质量进行了系统研究,但由于战乱原因,大多资料已丢失。21世纪以来,加拿大麦戈工业集团在工作区东南部进行了一系列钾盐勘查,并对矿层分布特征、地层岩性划分作了大量研究。山东省地矿工程勘察院通过在该地区的钾盐普查工作,估算普查区范围内钾盐矿石量5 297 836.2万吨,KCl平均品位16.09%。通过普查工作,大致探明了钾盐矿层的形态、产状、规模、分布范围及矿化特征(范美玲等,2016;赵宪福,2017)。

虽然国内外众多家勘探公司早在多年前已对布谷马西地区钾盐矿做过大量的勘探普查工作,但是有的因为年代久远,资料保存不完整;有的因为技术手段不够成熟,对于盆地特征和构造研究不够。目前,在和国内山东省地矿工程勘察院的合作下,对布谷马西地区钾盐资源进行了细致的调查研究,基本查明了研究区地层的层序、构造特征,含矿层段的岩性变化、沉积特征,矿产的空间赋存情况,矿床内部结构。本文通过收集前人对该地区地质背景、构造特征的研究资料,结合本次详细、全面的矿产勘探合作成果,对布谷马西地区钾盐的物质来源和白垩纪时期的古气候特征进行深入探究,以期阐明研究区内钾盐矿的成因,总结出矿规律,精确钾盐矿化程度,为刚果盆地钾盐矿床的成因提供科学依据,便于

今后钾盐资源的合理开发利用。

1 区域地质背景

刚果(布)共和国刚果盆地位于非洲中西部,盆地北起喀麦隆,南至安哥拉,西侧沿加蓬、刚果(布)、刚果(金)和安哥拉等国的海岸线分布,盆地东侧自北向南与喀麦隆盆地、加蓬盆地、下刚果盆地和宽扎盆地等一系列西非被动大陆边缘盆地构成了一个巨型的盆地系统(Lehner and Ruiter, 1977; Ruiter, 1979; 范美玲等, 2016)。刚果盆地北部以马永巴高原为界,南部以安布里什高原为界,东部与前寒武系基地相邻,西部与伸展的大西洋相邻接。盆地基地及边缘由元古宙地层构成,盆地内部的地层主要为白垩系、新近系和第四系沉积。蒸发岩矿产赋存于盆地内的白垩系中部,含盐层段将上覆的海相地层和下伏的陆相地层分隔开来。蒸发岩矿层与下部陆相碎屑岩沉积地层呈整合接触,下部陆相碎屑沉积地层含有丰富的有机质,其深部为含油岩系;其上部地层以海相碎屑岩和碳酸盐岩交互沉积为主,该层段与上覆新近系呈平行不整合接触,与下伏蒸发岩矿层呈整合接触。

盆地的形成与演化大致经历了3个阶段:①前裂谷沉积时期:这一时期盆地内构造运动不活跃,主要以隆升剥蚀作用为主,盆地内部以三叠系-中侏罗统(T-J₂)的陆相碎屑岩沉积地层为主;②裂谷沉积时期:盆地内构造运动加剧,形成以北西向为主的断裂和断陷构造,此时盆地内的沉积类型由河流相沉积逐渐过渡到湖相三角洲,在沉积后期过渡到滨湖相或浅湖相沉积;③后裂谷沉积时期:盆地沉积类型向准平原化方向发展,从大陆边缘开始逐渐下沉,最终与海水联通。此时,海相蒸发岩沉积构造开始在海陆相过渡地层上发育,最终形成现今的刚果(布)盆地地貌(曲懿华等,1994;刘剑平等,2007;刘祚东等,2009;范美玲等,2016)。

2 样品与方法

蒸发岩样品来自刚果盆地西南布谷马西地区的ZK101、ZK121、ZK142、ZK143、ZK181、ZK182、BS-3、BS-5、BS-7、BS-8、BS-9钻孔。为了确保盐类矿物鉴定结果的准确度,样品的测定与研究主要利用X射线衍射、能谱扫描电镜、薄片鉴定3种方法相互验

证,通过室内鉴定,重点分析盐类矿物的类型及特征。薄片鉴定样品一共 139 件,X 射线衍射样品 29 件,能谱扫描电镜样品 29 件,微量元素测试样品 97 件。

蒸发岩矿物类型主要通过 X 射线衍射分析鉴别,由北达燕园微构分析测试中心实验室完成。所用仪器的型号为日本理学 G/max/RA12KW 旋转阳极 X 射线衍射仪,采用连续扫描的方式,扫描角度 2θ 为 $3^\circ \sim 70^\circ$,扫描步长 $8^\circ/\text{min}$,采样步宽 0.02° 。仪器运转参数为:电压 40 kV,电流 100 mA,转靶 Cu 靶。

通过盐类矿物薄片镜下鉴定和扫描电镜测试,开展蒸发岩岩相学研究,全部的实验分析过程在中国地质科学院地质研究所完成。所用仪器型号为日本电子公司(JEOL)JSM-5610LV 型,仪器运转参数为:电子束电压 20 kV,焦距 20 mm,束斑大小 41 nm;EDS 能谱采用的是英国牛津公司(OXFORD)INCA 软件包,版本 4.4。

微量元素分析样品来自刚果(布)布谷马西地区南部的 5 个钻孔(BS-3、BS-10、ZK122、ZK141 和 ZK142),共采集 97 件,主要测出的微量元素有溴、锶、硼和铷。测试分析由中国地质科学院矿产资源研究所地球化学分析实验室完成。在进行化学分析前,需要对样品作预处理。首先将样品于研钵中研磨至约 200 目,采用酸溶法和水溶法两种方法。稀酸溶法:称取 1 g 样品放入烧杯并加入 5%稀盐酸,加热至沸腾,随后放置在加热板上以 120°C 保温 2 h,然后定容;水溶法:称取 1 g 样品放入烧杯中定容。样品经过预处理之后,利用离子体发射光谱仪(ICP-OES)仪器对样品中的溴、锶和硼进行实验,利用原子吸收仪(国产瑞利 WFX-130)分析测试铷。

3 结果与讨论

3.1 蒸发岩矿物类型

根据野外的岩心编录、X 射线衍射、扫描电镜及薄片鉴定分析,鉴定出该研究区的矿物共有 10 种。根据野外岩心编录鉴定出的蒸发岩矿物有 6 种:硫酸盐类蒸发岩为石膏、硬石膏,卤化物蒸发岩为石盐、光卤石,钾镁盐和镁盐类矿物为溢晶石以及水氯镁石;根据 X 射线衍射鉴定出的蒸发岩矿物有 4 种:硫酸盐类蒸发岩为硬石膏,卤化物蒸发岩为石盐、光卤石和钾石盐(表1);根据扫描电镜和能谱分析鉴定

表 1 刚果盆地西南部分岩心样品 X 射线衍射分析结果
Table 1 XRD analytical results of some core samples in southwest Congo Basin

样品名称	深度/m	物相	半定量
BS-3-1	410	石盐、光卤石	石盐 40%,光卤石 60%
BS-3-2	451	石盐、光卤石	石盐 35%,光卤石 65%
BS-3-3	502	石盐、光卤石、 钾石盐	石盐 35%,光卤石 60%, 钾石盐 5%
BS-10-1	324	光卤石	光卤石 100%
BS-10-2	360	光卤石、石盐、 硬石膏	光卤石 70%,石盐 20%, 硬石膏 10%
BS-10-3	371	石盐、光卤石	石盐 40%,光卤石 60%
ZK122-1	611	石盐、硬石膏	石盐 70%,硬石膏 30%
ZK122-2	647	石盐、光卤石、 硬石膏	石盐 60%,光卤石 30%, 硬石膏 10%
ZK122-3	660	石盐、光卤石、 硬石膏	石盐 50%,光卤石 45%, 硬石膏 5%
ZK141-1	695	石盐、光卤石	石盐 50%,光卤石 50%
ZK142-2	702	石盐、光卤石、 钾石盐	石盐 40%,光卤石 55%, 钾石盐 5%
ZK142-1	711	石盐、光卤石、 钾石盐	石盐 35%,光卤石 55%, 钾石盐 10%

出的蒸发岩矿物有 6 种:硫酸盐类蒸发岩为硬石膏,卤化物蒸发岩为石盐、光卤石、钾石盐,钾镁盐和镁盐类矿物为溢晶石、水氯镁石;根据薄片鉴定出的蒸发岩矿物有 7 种:硫酸盐类蒸发岩为石膏、硬石膏,卤化物蒸发岩为石盐、光卤石、钾石盐,钾镁盐和镁盐类矿物为溢晶石和水氯镁石。

主要的蒸发岩矿物特征:①石膏:主要为灰白色,粒状结构,块状构造,呈半自形至他形,柱状和不规则细粒状,局部石膏晶体呈纤维状聚晶, $d=0.1 \sim 1 \text{ mm}$,最高干涉色为灰白色或一级黄。②硬石膏:以灰白色、绿灰色为主,呈粒状结构,致密块状或层状构造,具有半自形-他形晶体,柱状或粒状,研究区硬石膏多为针状,呈束状排列, $d < 1 \text{ mm}$,最高干涉色为二级紫红和三级蓝绿(图 1b)。③石盐:大多为无色透明,有的为白色、灰白色,颗粒较大,断面有玻璃光泽。粒状结构,块状构造。晶体呈自形-他形粒状,大小为 $0.05 \sim 15 \text{ mm}$ (图 1a、2b),全消光。④光卤石:呈现棕红色和深棕红色,新鲜断口具有玻璃光泽,置于空气中很快变为油脂光泽。味辛辣且苦咸,在空气中极易潮解,表面形成粘稠状的盐液。多呈集合体形态,粒径为 $5 \sim 30 \text{ mm}$,粒状结构,块状构造,多处光卤石具有聚片双晶。最高干涉色为二级红和黄绿(图 1c、1e、2a)。⑤钾石盐:透明粗晶,大多存在于光卤石岩中。晶体呈自形立方体粒状,局

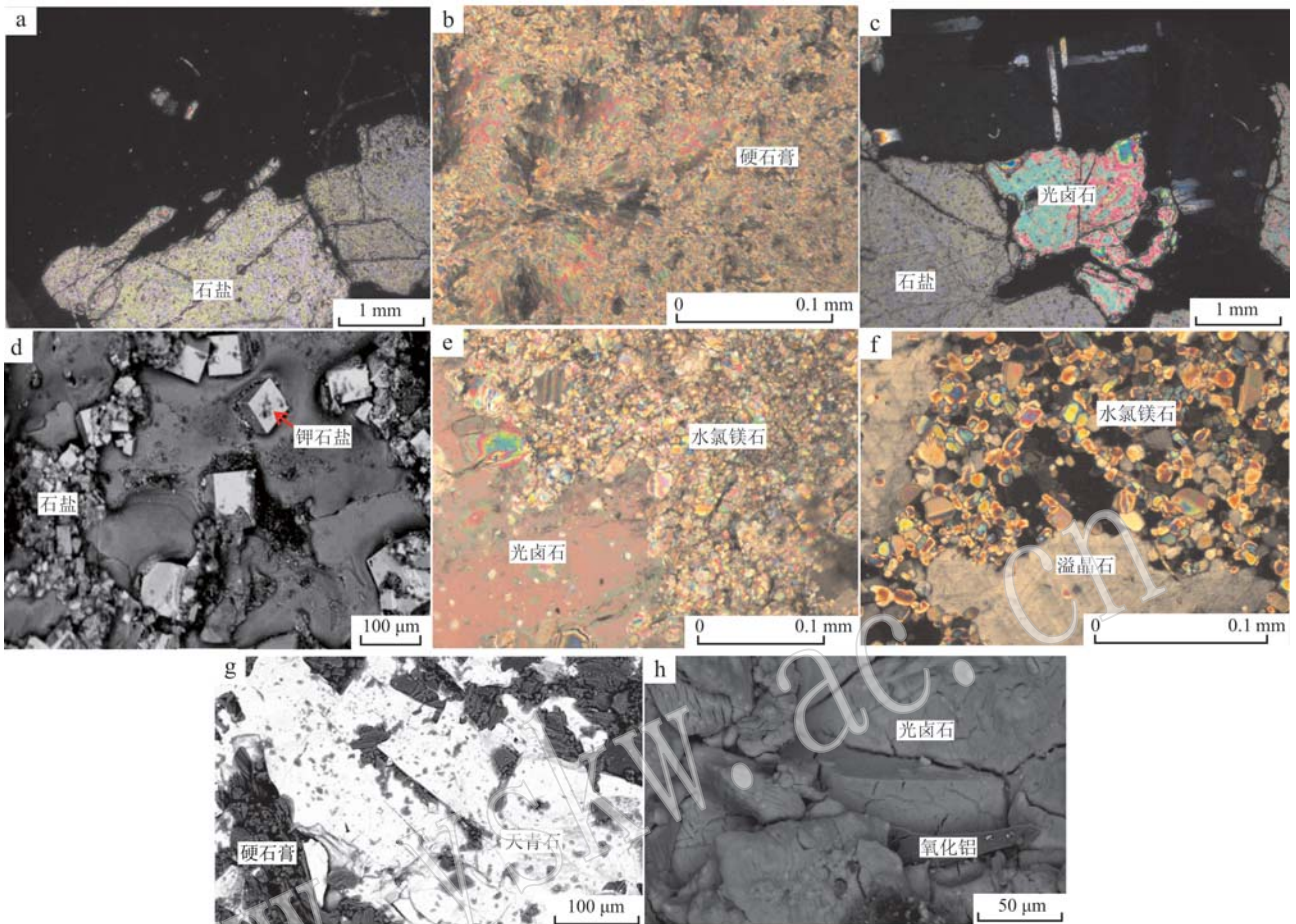


图1 布谷马西钾盐矿盐类矿物镜下特征

Fig. 1 Characteristics of mineral salt in the Mboukoumassi potash salt deposit

部光卤石中可见生成的钾石盐,大小为0.05~0.4 mm,全消光(图1d)。⑥水氯镁石:无色或浅黄色透明颗粒,具有玻璃光泽。粒状结构,块状构造。 $d=0.2\sim0.8$ mm,最高干涉色为三级灰白(图1e、1f、2c)。⑦溢晶石:浅黄绿色透明粗大颗粒,玻璃光泽,解理清晰,在裂隙中发育有光卤石颗粒。极易潮解,在潮湿的空气中崩解,有辛辣苦味。多为粒状结构,块状构造。呈他形粒状, $d=5\sim15$ mm,最高干涉色为一级灰(图1f、2d)。

3.2 蒸发岩沉积特征

前人的研究表明,所有沉积环境的蒸发岩的沉积层序完全按照溶解度从低到高依次出现(Borchert, 1977; Hite and Japakaseter, 1979; 陈郁华, 1983; Lowenstein *et al.*, 1989, 2001; 刘成林等, 2010),即碳酸盐岩-硫酸盐岩-氯化物-钾镁盐。

范美玲等(2016)、张帆等(2016)对研究区地层沉积旋回的划分,认为研究区发生了3次大的环境

演变,在总体干旱气候背景下,短时间偶尔穿插出现湿润气候。总体演化过程为:第1阶段,成矿流体进入盆地,在干旱气候条件下,不断蒸发浓缩,根据溶解度由低到高,盐化程度不断增高,形成石盐→光卤石→溢晶石、水氯镁石的蒸发岩沉积旋回;第2阶段,在第1阶段后,沉积环境发生变化导致卤水淡化,光卤石和石盐开始交互沉积,气候条件依然是干旱,并且干旱程度有进一步加强的趋势,出现大量的极干旱气候条件下才出现的溢晶石、水氯镁石的沉积;第3阶段,由于盆地与大西洋联通,盆内蒸发水体发生淡化,出现石膏、硬石膏和白云岩的沉积。至此,大西洋裂谷形成的滨海盆地蒸发岩沉积演化基本结束。

根据研究区内钻井岩心柱状图(图3)发现,该区盐类沉积地层下部仅发育薄层硬石膏层,没有发现碳酸盐和硫酸盐沉积。正常的海相沉积中,在蒸发作用的影响下,碳酸盐、硫酸盐以及卤化物根据其

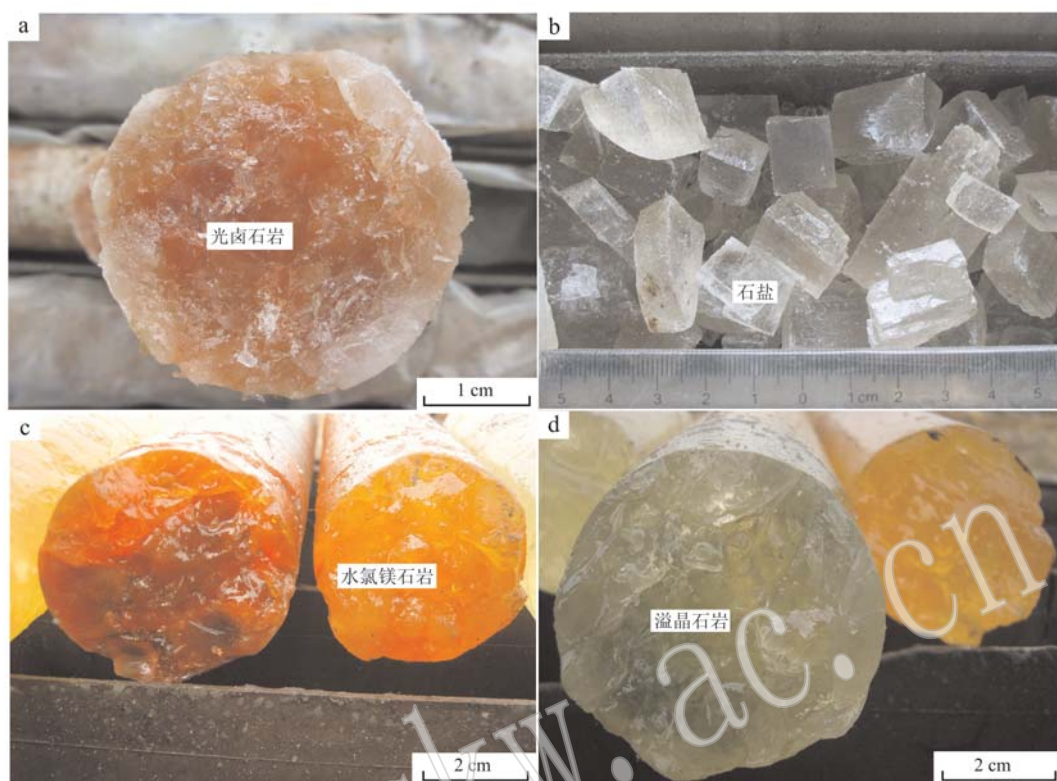


图2 主要蒸发岩类矿物

Fig. 2 Main evaporite minerals

溶解度的变化依次蒸发结晶析出(张帆等, 2016; 赵宪福, 2017)。但是研究区内并没有发现碳酸盐和硫酸盐的大量析出,这说明在该沉积时期,进入盆地的海水,是经过沉积分离出碳酸盐和硫酸盐后的高浓度卤水。在南部的安哥拉一带发现的盐类沉积剖面中则发育大量的岩盐、硬石膏,并沉积大套的白云岩。

这一盐岩剖面反映,在盐类沉积时期,大西洋与盆地的接合部位应处于安哥拉一带,海水通过此处流入盆地,随后开始持续蒸发。在海水进入这一地区后不断蒸发浓缩,其蒸发量远大于补给量,经过不断蒸发,流体中各组分的浓度持续升高,当达到饱和便开始盐岩沉积。沉积序列根据各盐类组分的溶解度,从小到大依次结晶析出。首先沉积溶解度小的碳酸盐类矿物,接下来为硫酸盐,最后沉积溶解度最大的卤化物矿物。安哥拉一带主要的盐岩沉积为溶解度较小的白云岩和硬石膏,是盐类沉积的初始阶段。由于构造运动,地面发生沉降,海水跟随蒸发浓缩中心运移,最后迁移至北部的刚果(布)布谷马西地区沿海一带(栾元滇等, 2014; 范美玲等, 2016;

赵宪福, 2017)。此时食盐、光卤石开始结晶析出,并伴生钾食盐,最后溶解度最大的钾镁盐和镁盐类矿物,如溢晶石和水氯镁石,开始结晶析出(图4)。

综上所述,布谷马西地区盐类矿物沉积顺序应为:首先沉积硫酸盐类(硬石膏),其后沉积卤化物类(食盐、光卤石、次生钾食盐),最后沉积钾镁盐和镁盐类(溢晶石或水氯镁石)。

研究区蒸发岩矿物中出现的溢晶石是罕见的盐类矿物,相邻的南加蓬、安哥拉等盆地均没有发现或较少发现溢晶石。溢晶石只有当温度大于 35°C 时,溢晶石才能从卤水中结晶析出(Wardlaw, 1972)。而且,正常蒸发过程中,大量钙离子在蒸发过程的前期便以石膏和硬石膏的形式沉积下来,在蒸发过程后期不会有大量的钙离子出现并形成溢晶石。因此,溢晶石的出现说明研究区在溢晶石沉积阶段,气候干旱炎热,蒸发量远大于补给量,蒸发沉积时期水体温度较高,且高温持续时间很长,波动不大。

3.3 微量元素地球化学特征

3.3.1 溴元素

溴在自然界中主要以离子的形式聚集在海水

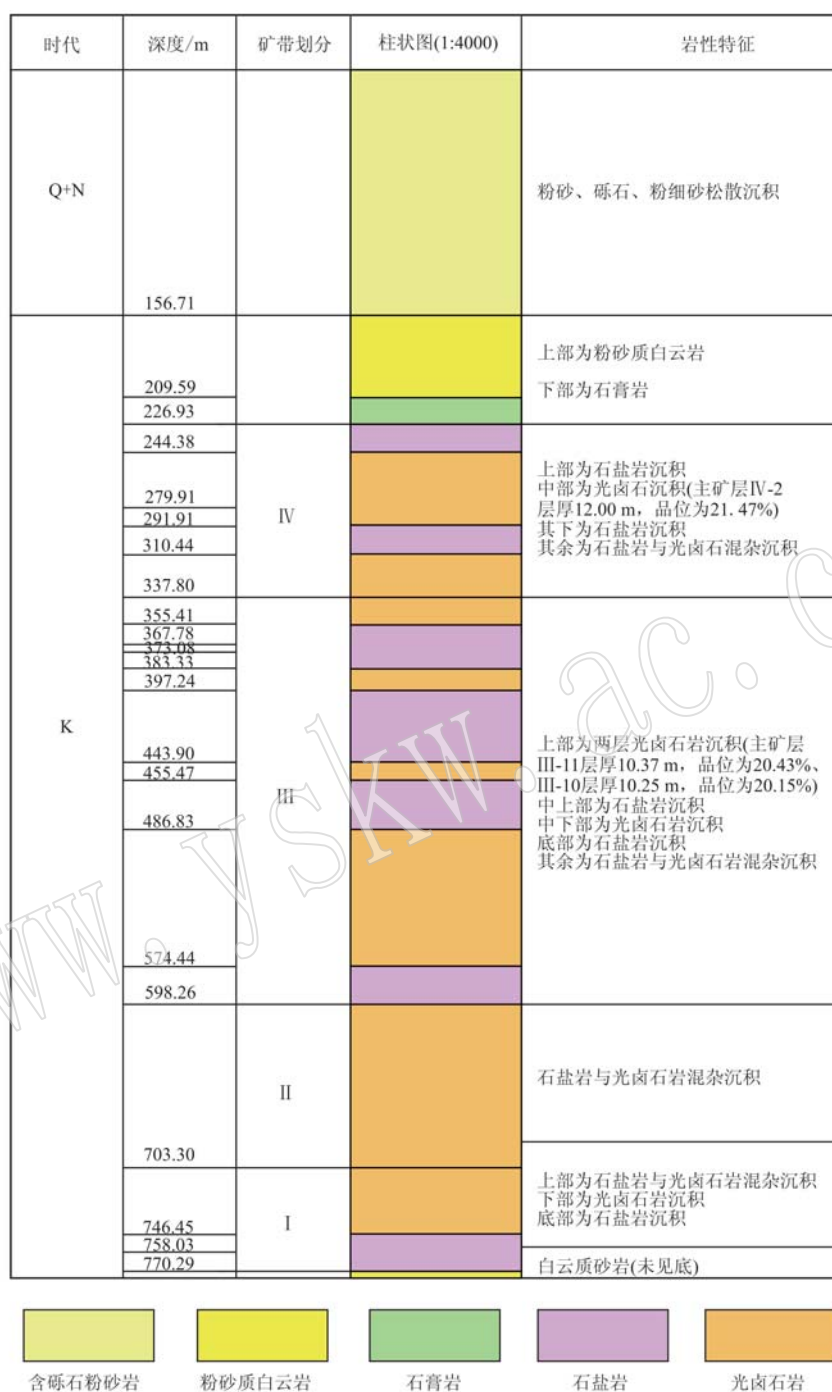


图3 ZK101 钻孔柱状图

Fig. 3 Columnar section of ZK101 core

中,一般溴在海水中的含量为 $65.0 \times 10^{-6} \sim 65.5 \times 10^{-6}$, 而河水中的含量仅为 0.006×10^{-6} (林耀庭, 1995)。溴在卤水的蒸发过程中不能形成独立的矿物,而是以氯的类质同像混入氯化型矿物中。随着卤水不断蒸发、浓缩,溴以类质同像置换盐类矿物中的氯,且置换量与共沉淀的溶液中的溴含量呈正比。

因此,溴是很重要的找钾直接标志。由表2分析,溴在石盐岩中含量最高值为19.440%,最小为3.368%。溴在光卤石岩中含量最高值为48.803%,最小为16.482%。

3.3.2 锶元素

锶在海洋中分布均一,不受纬度、海洋盆地和水

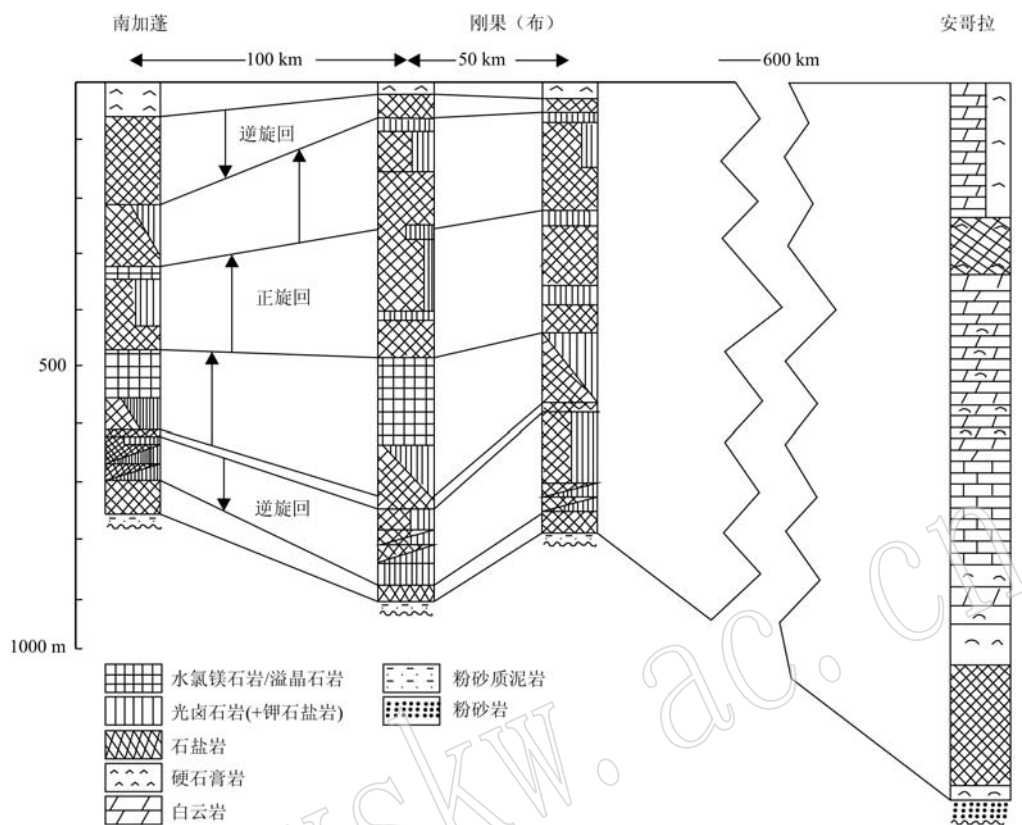


图4 南加蓬、刚果、安哥拉盐岩剖面对比图(引自 Ruiter, 1979)

Fig. 4 Comparison of salt profiles in Gabon, Congo and Angola (after Ruiter, 1979)

深的影响,而且在化学、生物化学过程中不会发生同位素分馏(张西营等,2002)。在盐类矿床沉积的过程中,锶在硫酸盐的咸化阶段会以类质同像的形式代替钙,因此锶元素常富存于石膏和硬石膏中,同样锶也很有可能会进入盐类矿物沉积的各个阶段。所以随着盐类矿床沉积的时间增加,卤水浓缩程度也不断增高,而锶的含量也会随之升高。因此,可以利用锶的含量间接指示成钾的可能性。由表2可知,锶在石盐岩中含量最高值为0.460%,最小为0.053%;锶在光卤石岩中含量最高值为2.268%,最小为0.001%。

3.3.3 硼元素

现代海水中硼的含量为 4.7×10^{-6} ,淡水中一般不含硼元素,海相沉积物中硼含量为 100×10^{-6} (钱自强等,1994)。在盐沉积过程中硼以3种形式赋存:以吸附态富集在含盐粘土中,以络合物的形式混入硬石膏晶格,以硼酸盐形式出现(李善平等,2010)。海水中硼含量与海水盐度呈正比,具有线性关系。因此,硼含量可以作为分析古盐度的一个重要指标(李国胜等,1992)。硼在卤水浓缩初期阶段含量较

低,随卤水不断蒸发、浓缩,硼含量逐渐增高,所以硼也可以指示成钾的可能性。由表2分析,硼在石盐岩中含量最高值为0.302%,最小为0.019%。硼在光卤石岩中含量最高值为3.601%,最小为0.016%。

3.3.4 铷元素

在钾镁盐沉积初期,铷主要存在于液相中,随着卤水浓度不断增高,铷在卤水中逐渐富集,以类质同像的形式替换钾从而进入盐类矿物的晶格中;铷还会以吸附的形式存在于碳酸盐和粘土矿物中(张彭熹等,1993)。根据高度浓缩卤水中铷与钾的替代关系,盐类沉积物中铷的含量会随着卤水的浓度变高而增高。铷含量的增加表明卤水蒸发浓缩已经到了晚期阶段,另一方面也说明卤水中钾含量的增加,因此,铷的含量变化可以预测成钾前景(谭红兵,2005)。由表2分析,铷在石盐岩中含量最高值为15.722%,最小为0.064%。铷在光卤石岩中含量最高值为35.948%,最小为1.112%。

在盐类矿物蒸发析出过程中,根据陈郁华(1983)在25℃恒温条件下模拟海水蒸发的实验结果,表明从石盐沉积到光卤石沉积阶段,Br的含量范

表2 石盐和光卤石中微量元素一览表

 $w_B/\%$

Table 2 Trace elements in stone salt and carnallite

微量元素	岩性		BS-3	BS-10	ZK122	ZK141	ZK142
Br	石盐岩	最大值	6.826	4.450	19.440	18.628	9.6
		最小值	3.368	4.295	3.767	18.628	9.6
		平均值	5.187	4.371	6.701	18.628	9.6
	光卤石岩	最大值	43.412	48.803	45.159	36.299	40.973
		最小值	24.020	42.352	20.193	36.299	16.482
		平均值	35.048	45.166	33.241	36.299	25.887
Sr	石盐岩	最大值	0.460	0.249	0.228	0.078	0.314
		最小值	0.154	0.112	0.053	0.078	0.314
		平均值	0.211	0.181	0.144	0.078	0.314
	光卤石岩	最大值	0.107	0.145	0.115	0.049	2.268
		最小值	0.006	0.005	0.001	0.049	0.044
		平均值	0.048	0.031	0.029	0.049	0.234
B	石盐岩	最大值	0.288	0.134	0.291	-	0.302
		最小值	0.043	0.134	0.019	-	0.302
		平均值	0.134	0.134	0.098	-	0.302
	光卤石岩	最大值	0.042	0.044	0.016	-	3.601
		最小值	0.021	0.038	0.016	-	0.038
		平均值	0.036	0.039	0.016	-	0.337
Rb	石盐岩	最大值	1.424	0.892	15.722	7.844	-
		最小值	0.064	0.164	0.123	7.844	-
		平均值	0.524	0.528	2.639	7.844	-
	光卤石岩	最大值	35.948	27.534	22.522	14.342	-
		最小值	2.454	2.303	1.112	14.342	-
		平均值	15.669	14.893	11.335	14.342	-

围为 $110 \times 10^{-6} \sim 2\,080 \times 10^{-6}$, Sr 的含量范围为 $3 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$, Rb 的含量范围为 $0.32 \times 10^{-6} \sim 3.60 \times 10^{-6}$ 。从表 2 可看出,研究区内光卤石岩和石盐岩的岩石中 Br、Sr、Rb 的含量范围符合海水蒸发过程中 Br、Sr 和 Rb 在石盐和光卤石中的分布规律。而且正常海水石盐-光卤石析出于两个阶段之间,溴氯系数的变化范围为 0.11~0.60(林耀庭, 1995),而研究区溴氯系数的平均值为 5.9,高于海水析出光卤石时的溴氯系数,说明该矿区盐类矿物沉积时卤水处于高度浓缩的状态。

盐类矿物样品的矿物成分和岩相学分析均没有发现粘土矿物,微量元素含量不会受到粘土的影响,说明盐类矿物中的微量元素是以类质同像的方式进入其中的。岩心样品中溴、锶和铷的含量及溴氯系数符合海水蒸发过程的分布规律,因此可以确定该钾盐矿的成盐物质主要来源于海水。同时较高的溴氯系数和罕见盐类矿物溢晶石的发现,说明该矿区盐类矿物沉积时卤水已经达到高度浓缩的状态。盐类沉积时的气候条件应该为干旱、高热,有利于卤水蒸发、浓缩而形成盐类矿物沉积。

4 结论

(1) 刚果盆地西南部地区白垩系蒸发岩矿物主要为:硫酸盐类矿物(硬石膏)、卤化物(石盐、光卤石、次生钾石盐)、钾镁盐和镁盐类矿物(溢晶石或水氯镁石)。

(2) 蒸发岩沉积阶段气候极为干旱炎热,蒸发量大于补给量,沉积水体温度较高,高温环境持续时间长且波动较小。

(3) 研究区溴氯系数的平均值为 5.9,高于海水析出光卤石时的溴氯系数,说明该矿区盐类矿物沉积时卤水浓缩程度已经很高,盐类沉积时的气候条件应该为干旱、高热,有利于卤水蒸发、浓缩而形成盐类矿物沉积。

References

- Borchert H. 1977. On the formation of Lower Cretaceous potassium salts and tachhydrite in the Sergipe Basin (Brazil) with some remarks on similar occurrences in West Africa (Gabon, Angola etc.) [A].

- Klemm D D and Schneider H J. Time and Stratabound Ore Deposits [C]. Berlin: Springer-Verlag, 94~111.
- Chen Yuhua. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25°C) of the Huanghai sea water[J]. *Acta Geological Sinica*, 57(4): 379~390(in Chinese with English abstract).
- Dong Juan, Gao Xiang, Fang Qinfang, *et al.* 2015. The characteristics of halite inclusions in the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province, and their palaeo environmental significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(2): 227~236(in Chinese with English abstract).
- Fan Meiling, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2016. Salt mineral characteristics and genesis of Mboukoumassi potash deposit in the Republic of Congo[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1 257~1 268(in Chinese with English abstract).
- Hite R J and Japakasetr T. 1979. Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos[J]. *Econ. Geol.*, 74(2): 448~458.
- Lehner P and Ruiter P A C D. 1977. Structural history of the Atlantic margin of Africa; Am. Assoc[J]. *Petroleum Geologists Bull.*, 61: 961~981.
- Li Guosheng and Yang Rui. 1992. Objections to boron as a facies indicator[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 4: 41~45(in Chinese with English abstract).
- Li Shanping, Ma Haizhou, Chen Youshun, *et al.* 2010. Geochemical characteristics of trace elements and ore genesis from potash deposit in Vientiane basin, Laos [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 760~770(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 1995. Geochemical behaviour of bromine and its application to prospection for potash resource in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 17(3): 175~181(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng and Wang Mili. 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 Jianping, Pan Xiaohua and Ma Jun. 2007. Geological characteristics and oil-gas significance of Namibia Basin, south of Walvis Ridge on passive continental margin of west Africa as compared with basins in the north[J]. *China Petroleum Exploration*, 12(4): 67~74(in Chinese with English abstract).
- Liu Zuodong and Li Jianghai. 2009. Tectonic evolution and petroleum geology characteristics of petroliferous salt basins area along passive continental margin, west Africa[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(3): 46~52(in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Spencer R J and Zhang P X. 1989. Origin of ancient potash evaporites; Clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of Western China[J]. *Science*, 245: 1 090~1 092.
- Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* 2001. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry; Evidence from fluid inclusions [J]. *Science*, 294: 1 086~1 088.
- Luan Yuandian, Yue Weijia and Meng Lingyuan. 2014. Characteristics and cycle division of lower Cretaceous salt deposition in Mboukoumassi region[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 36(4): 208~214(in Chinese with English abstract).
- Qian Ziqiang, Qu Yihua and Liu Qun. 1994. Potash Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 19~50(in Chinese with English abstract).
- Qu Yihua, Qian Ziqiang and Han Weitian. 1994. Potassium Salt Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ruiter P A C D. 1979. The Gabon and Congo basins salt deposits[J]. *Econ. Geol.*, 74: 419~431.
- Tan Hongbing, Ma Haizhou, Xu Jianxin, *et al.* 2005. Isotope geochemistry of ancient salt rocks and prognosis of sylvinitic deposits in Western Tarim Basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 26(s1): 174~179(in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, *et al.* 2013. Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of Shashi Formation in Jiangling depression [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 383~392(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 sources area in Jitai basin of Jiangxi Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65~84(in Chinese with English abstract).
- Wardlaw N C. 1972. Unusual marine evaporites with salts of calcium and magnesium chloride in Cretaceous basins of Sergipe Brazil[J]. *Economic Geology*, 67: 156~168.
- Xu Yang, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and potash formation analysis of Paleocene-Eocene evaporites in Kuqa depression of Xinjiang: A case study of borehole KL4 [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 755~764(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fan, Xu Haiming, Liu Chenglin, *et al.* 2016. Mineral characteristics, salt rhythm and depositional model of potash deposit in lower Congo Basin, Africa[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1 230~1 242(in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Lowenstein T K, *et al.* 1993. On the Origin of Ancient Anomalous Evaporites[M]. Beijing: Science Press(in

Chinese).

Zhang Xiyang, Ma Haizhou and Tan Hongbing. 2002. The indicative significance and application of strontium in geochemistry[J]. Journal of Salt Lake Research, 10(3): 38~44 (in Chinese with English abstract).

Zhao Xianfu. 2017. The Constraint of Tectonic Activity on Potash Mineralization and Late Transformation in Lower Congo Basin[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈郁华. 1983. 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, 57(4): 379~390.
- 董娟, 高翔, 方勤方, 等. 2015. 云南勐野井钾盐矿床石盐包裹体特征及古环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(2): 227~236.
- 范美玲, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2016. 刚果(布)布谷马西钾盐矿床盐类矿物特征与成因研究[J]. 矿床地质, 35(6): 1 257~1 268.
- 李国胜, 杨锐. 1992. 对硼作为相标志的异议[J]. 岩相古地理, 4: 41~45.
- 李善平, 马海州, 陈有顺, 等. 2010. 老挝万象盆地钾盐矿床微量元素地球化学特征及矿床的成因[J]. 地质通报, 29(5): 760~770.
- 林耀庭. 1995. 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, 17(3): 175~181.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581~592.
- 刘剑平, 潘校华, 马君. 2007. 西非被动大陆边缘 Walvis Ridge 以南纳米比亚盆地的地质特征及油气意义——兼与 Walvis Ridge 以北盆地比较[J]. 中国石油勘探, 12(4): 67~74.
- 刘祚冬, 李江海. 2009. 西非被动大陆边缘含油气盐盆地构造背景及油气地质特征分析[J]. 海相油气地质, 14(3): 46~52.
- 栾元滇, 岳伟佳, 孟令远. 2014. 布谷马西地区白垩系下统盐类沉积特征及沉积旋回划分[J]. 化工矿产地质, 36(4): 208~214.
- 钱自强, 曲一华, 刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 19~50.
- 曲懿华, 钱自强, 韩蔚田. 1994. 盐矿物鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 谭红兵, 马海州, 许建新, 等. 2005. 塔里木盆地西部古盐岩同位素地球化学与成钾预测研究[J]. 地球学报, 26(s1): 174~179.
- 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 2013. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 32(3): 383~392.
- 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.
- 徐洋, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2017. 塔里木盆地库车凹陷古新统-始新统蒸发岩地球化学特征及成钾分析[J]. 岩石矿物学杂志, 36(5): 755~764.
- 张帆, 徐海明, 刘成林, 等. 2016. 非洲下刚果盆地钾盐矿床特征、沉积旋回与沉积模式[J]. 矿床地质, 36(6): 1 230~1 242.
- 张彭熹, 张保珍, 洛温斯坦 T K, 等. 1993. 古代异常钾盐蒸发岩的成因[M]. 北京: 科学出版社.
- 张西营, 马海州, 谭红兵. 2002. Sr 的地球化学指示意义及其应用[J]. 盐湖研究, 10(3): 38~44.
- 赵宪福. 2017. 下刚果盆地构造活动对钾盐成矿及后期改造的约束[D]. 中国地质大学(北京).