编号:0258-7106(2016)06-1230-13

非洲下刚果盆地钾盐矿床特征、沉积旋回与沉积模式

张 M^1 徐海明^{2 * *} 刘成林² 赵艳军² 范美玲³

(1 中国地质科学院,北京 100037;2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;3 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要 下刚果盆地位于西非大陆边缘,形成于南美大陆与非洲大陆裂开初期,大西洋打开之时,在早白垩世 形成了巨型钾盐矿床。文章在盆地内布谷马西矿区钻孔的岩芯编录的基础上,结合岩相学、地球化学和沉积韵律等 研究,探究钾盐矿床沉积特征和盆地内蒸发岩沉积旋回,并总结了矿床沉积模式。下刚果盆地总体较平缓,西南低, 北东高,自盆地边缘向中部,沉积厚度逐渐增大,钾盐矿床赋存于下白垩统Aptian 阶蒸发岩系中。蒸发岩系主要由 石盐岩与光卤石岩互层构成,局部夹(含水氯镁石,溢晶石岩、石膏岩和黑色碳质页岩夹层。矿床由多层水平-近水平 层状矿体组成,单层矿体厚度几米至几十米,矿层比较稳定,延续范围广,主要矿层——光卤石层累计厚度超过100 m。主要矿石类型为光卤石型,仅局部为钾石盐型。矿石品位高,KCI平均品位为16.49%。成盐盆地在早白垩世只 有一个成盐期,含盐系即为 I 级韵律,根据沉积特征,又可划分为8个 II 级盐韵律和若干个III级盐韵律。整个成盐期 总体沉积环境较稳定,未出现蒸发岩序列中断,但受地面的沉降变化和海水周期性灌入的影响,出现了石盐与光卤 石的韵律互层沉积。下刚果盆地内蒸发岩沉积序列与正常的海相蒸发岩不同,底部缺乏碳酸盐和硫酸盐地层,指示 其成钾物质来源于经过一定程度蒸发浓缩的古海水。在上述研究的基础上,结合成盐期盆地岩相古地理与构造条 件,总结出下刚果盆地裂谷型钾盐矿床沉积模式。

关键词 地质学 ;下刚果盆地 蒸发岩 ;钾盐矿床 ;沉积韵律 ;沉积模式 中图分类号 : P619.211 文献标志码 :A

Mineral characteristics, salt rhythm and depositional model of potash deposit in Lower Congo Basin, Africa

ZHANG Fan¹, XU HaiMing², LIU ChengLin², ZHAO YanJun² and FAN MeiLing³

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Located on the continental margin of West Africa and formed at the beginning of the opening of the Atlantic Ocean in the Early Cretaceous period, the Lower Congo Basin deposited a huge amount of potash resources. Based on the results of the core catalogs in the Cuckoo marcy district of the basin, the authors tried to make out the sedimentary characteristics of the potash deposit and the sedimentary cycle of the evaporites, and to summarize the depositional model of the deposit. The basin is relatively flat; the thickness of evaporites is increasing from the edge to the center of the basin gradually. The deposit is hosted in the Early Cretaceous Aptian strata.

^{*} 本文得到"刚果(布)布谷马西钾盐矿南矿段综合技术支撑项目 '和'973 '项目(编号:2011CB403007)联合资助 第一作者简介 张 帆,男,1990 年生,博士研究生,地球化学专业。Email zhangfan2294@163.com

^{**}通讯作者 徐海明,男,1962年生,工程师,主要从事矿床勘查与研究工作。Email:xhm2000@hotmail.com 收稿日期 2016-09-10;改回日期 2016-10-14。秦思婷编辑。

The evaporites are mainly halite interbedded with carnallite, locally with banded tachydrite, bischofite and black shale. Orebodies are horizontal or nearly horizontal, and the thickness of a single-layer orebody is a few meters to tens of meters. In total, the thickness of carnallite layers are accumulated over 100 m. The potash deposit is mainly composed of brownish red carnallite, and the main ore type is carnallite type, with partially sylvite type. The ore grade is high, and the average KCl grade is about 16.49%. In the Early Cretaceous Aptian stage, there was only one salt-genetic period, and the salt-bearing strata constituted the first-order salt rhythm, which could be subdivided into eight second-order salt rhythms and several third-order salt rhythms. The sedimentary environment of the whole salt-genetic period was stable, and evaporite sequences had no interruption. Nevertheless, with the continual subsidence of the basin and the injection of seawater, there occurred rhythmic deposition of rock salt and potassium-magnesium salts. The salts are characterized by high percentage of potassium-magnesium and a scarcity of sulfates and carbonates, suggesting that it was already enriched before entering the basin. Based on the above studies, combined with Aptian lithofacies and paleogeographic distribution of the basin as well as the tectonic-paleoclimate condition, the authors summarized and exhibited the schematic diagram showing how the potash deposit was formed.

Key words: geology, Lower Congo Basin, evaporites, potash deposit, salt rhythm, depositional model

下刚果盆地位于非洲西部,在白垩纪沉积了巨量的优质钾盐资源,而且该处滨临大西洋,海运便利,具有重要的开采利用价值。已有中国公司在位于下刚果盆地边缘的刚果共和国奎卢省布谷马西地区取得探矿权,并实施了数十口钻孔,获得了大量钻孔地层资料和矿床地质资料。此外,笔者通过野外工作和室内研究,基本查明了蒸发岩地层中盐类矿物的岩相学及其矿物组合、沉积韵律等特征,对盆地沉积环境和成盐作用的研究提供了非常有用的信息。据此,本文对下刚果盆地钾盐矿床及其沉积地层进行详细的研究,以期掌握钾盐矿床特征和蒸发岩沉积特征,并总结出其矿床沉积模式。

1 地质背景

刚果(布)滨海盆地(下称下刚果盆地)地处非洲 大陆西缘、加蓬-安哥拉滨海盆地的中段(图1),与南 美洲巴西塞尔希培盆地隔海相对(Harris 2008)。大 西洋东岸自北向南由喀麦隆(Douala)盆地、加蓬 (Gabon)盆地、下刚果(Congo)盆地和宽扎(Cuanza) 盆地等构成了一个巨型盆地系统(Lehner et al., 1977 Ruiter,1979),同属西非被动大陆边缘盆地。 下刚果盆地自东向西,由元古宙基底边缘平缓延伸 至海底大陆架的盆地中心。盆地形态总体为北西-南东走向的长方形,北西向长约300 km,南西向宽 约100 km。盆地北界为马永巴(Mayumba)隆起,南 界为安布里什(Ambrizete)隆起,东界为前寒武系基

底 西界为大陆架边缘。

盆地底部及边缘由元古宙的变质结晶基底构 成,盆地内部由白垩系、新近系和第四系组成。含盐 系赋存于白垩系中部,盆地内盐层最大厚度据推测 可达1000 m 以上(Ruiter,1979),其下部为陆相碎屑 岩沉积,上部为海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积。

本文所研究的布谷马西矿区位于下刚果盆地东 部边缘,海岸线以内。

2 矿床特征

盆地内钾盐资源储量丰富,据栾元滇等(2015), 仅布谷马西矿区,氯化钾 333+334 资源量就达 85.2 亿吨,332+333 资源量 11.5 亿吨,KCI 平均品位 16.49%。

2.1 矿层特征

矿床赋存于下白垩统 Aptian 阶蒸发岩地层中, 矿体呈水平—近水平层状,多为单层结构类型,单层 厚度在几米至几十米,光卤石层累计厚度超过100 m。矿层与顶底板围岩颜色差异很大,易于识别。矿 层稳定,延续范围广。

对钻孔岩芯系统取样分析,依据工业指标,确定 单层矿体范围并圈定矿层,共圈出钾盐矿层23层, 其中,工业矿层21层,低品位矿层2层,从中确定了 6个主矿层(栾元滇等,2015)。主矿层分布范围大、 矿层连续、厚度较大,次要矿层分布范围不大、矿层 连续性相对较差、厚度相对较小。



图 1 下刚果盆地位置图(据李军等,2014 修改) Fig. 1 Map of location of Lower Congo Basin (modified after Li et al., 2014)

根据研究区内多个钻孔(位置见图 2)的钻井剖 面对比图(图 3)显示,矿区地层总体平缓,连续性较 好,主要岩性地层都能很好的进行对比。也可看到 矿区内东北方向高、西南方向低,说明盆地沉积中心 在研究区的西南方向。同时,盆地不同位置由于受 地形的高差、距离海水灌入位置的远近等因素影响,



图 2 布谷马西矿区钻孔位置分布图及剖面对比线 栾元滇等 2015)

Fig. 2 Location of drill holes and correlating lines of Cuckoo marcy mining area (after Luan et al., 2015)

岩层厚度呈现出一些局部的变化,如 ZK182 处由于 相对地形较高,相比临近的地层出现一定的隆起,岩 层厚度相对较小。

2.2 矿石类型和矿石矿物

矿石类型简单,主要为光卤石型,局部为钾石盐 型,属氯化物型钾盐矿。主要矿石包括光卤石岩:光 卤石质量分数95%~99%,石盐质量分数1%~ 3%;含石盐光卤石岩:光卤石质量分数84%~ 92%,石盐质量分数6%~15%;石盐质光卤石岩: 光卤石质量分数59%~73%,石盐质量分数26%~ 40%;光卤石质石盐岩:光卤石质量分数44%,石盐 质量分数55%;含钾石盐石盐岩:钾石盐质量分数 达17.39%~19.16%,石盐质量分数达74.58%~ 77.79%,见少量光卤石、硬石膏(据栾元滇等, 2015)。矿石品位较高,最高的KCl品位可达 24.61%,矿床平均的KCl品位为16.05%,主矿层 的KCl品位在20%左右(宫述林2012)。

钾盐矿以棕红色光卤石岩为主,局部夹含钾石 盐石盐岩透镜体。光卤石岩类占矿层总厚度95%以 上,已施工钻孔中,仅矿区西南边缘的ZK201孔含盐 系顶部发育一层4m厚的后生淋滤而成的含钾石盐 石盐岩(原岩光卤石质石盐岩),分布不稳定,呈透镜 体状产出。

蒸发岩矿物主要为光卤石,极少量钾石盐,其他 共生、伴生蒸发岩矿物还有硬石膏/石膏、石盐、水氯 镁石、溢晶石等。夹层或沉积旋回早期还能见到一 些泥质、黑色有机质等,含量较低。

石盐(NaCl) 主要以厚的石盐层出现,厚度最 大。石盐层常见的包括无色、白色、灰白色、浅灰色 至灰黑色等。重结晶的石盐常为无色,晶体粗大,通 常可达巨晶(2~5 cm);白色、灰白色石盐一般为细 晶-中晶,半自形-他形;浅灰色-灰黑色石盐中常含有 机质或碳质页岩夹层。局部石盐呈稳定的薄层状, 薄层厚度一般在1~5 cm,薄层间可见灰黄色-灰白 色硬石膏/石膏微层。

光卤石(KCl·MgCl₂·6H₂O) 主要形成厚的光 卤石层 ,少量作为石盐岩的夹层出现。光卤石层因 含有针状赤铁矿 ,颜色一般为浅粉红色、浅棕红色、 棕红色和深棕红色 ,为主要的矿石矿物。

溢晶石(CaCl₂·MgCl₂·12H₂O) 在部分层位中



出现,颜色为橘黄色、黄色、淡黄色、淡黄绿色,部分 层段含量可达80%以上,极易潮解。镜下为粒状,粒 度1~4 mm,解理发育,平行消光,干涉色为一级灰。

水氯镁石(MgCl₂·6H₂O) 淡黄色,呈粒状,粒 度为0.5~1.0 mm。主要与溢晶石共生,镜下观察 呈针状晶体,粒径为0.01 mm 左右,分布在溢晶石 颗粒边缘及颗粒之间。

钾石盐 仅在部分钻孔的局部层位可见,与石盐 共生,一般认为是光卤石经淋滤而成的(Ruiter,1979)。

硬石膏/石膏 主要出现在蒸发岩的顶部,作为 盖层,极少量为薄层或夹层出现在含盐系地层中。 硬石膏多为灰白色、浅灰色,微晶,局部细晶,整体呈 块状,局部为结节状,与有机质、泥质混杂。

2.3 矿石化学成分

矿石化学成分主要包括 NaCl、KCl、MgCl₂、Ca-Cl₂、水不溶物。

u(KCl)为 16.05% ~ 26.08%, u(NaCl)为
3.10% ~ 46.24%, u(MgCl₂)为 19.00% ~
33.92%。CaCl₂、CaSO₄、水以及水不溶物为少量,几
乎不含 Na₂SO₄、MgSO₄。石盐岩中 u(Br)一般为
0.03% ~ 0.10%,光卤石岩中 u(Br)为 0.15% ~
0.65%(栾元滇等 2015)。

2.4 围岩特征

矿床的直接围岩(顶、底板)是整合接触的石盐 岩层或不足工业品位的含光卤石石盐岩岩层,与矿 体界线清晰或逐渐过渡。

整个含盐岩系顶部盖层为一层稳定的硬石膏 岩 底板岩性为含碳质砂岩、粉砂岩、碳质页岩和石 膏岩夹层。

硬石膏盖层使得下伏蒸发岩系(包括钾盐矿 床)得以较好的保存下来。

3 蒸发岩地层沉积韵律

根据对矿区内数口打穿含盐系的钻孔(如 ZK121、ZK181、ZK201等)详细岩芯编录可知,Aptian 阶盐类几乎直接沉积在陆相裂谷期碎屑岩之上。 盆地内蒸发岩段总体呈石盐岩和光卤石岩互层,其 间夹多层碳质页岩,局部发育(含水氯镁石)溢晶石 岩和次生钾石盐岩。

岩芯编录所获得的钻孔资料,从宏观范围上看,整个蒸发岩系只有一个成盐期,作为 [级韵律(沉积旋回)。根据次一级的淡化—浓缩—淡化的变化,进

一步划分 II 级韵律。以各韵素之间的不同咸化、淡 化组合 ,划分出Ⅲ级韵律。

3.1 【级盐韵律

下刚果盆地内早白垩世 Aptian 阶只有一个成盐 期,含盐系即为 1 级韵律,属一套蒸发岩沉积序列, 整个含盐建造作为 1 级旋回。与正常的海相蒸发岩 沉积层序相比,沉积序列缺乏稳定厚大的碳酸盐岩 和硫酸盐岩地层。

Ⅰ级韵律厚度一般在几百米。其组成由上至下 为:

碳酸盐岩段 海相地层,主要为浅灰色-灰白色 (含生物碎屑)(鲕粒)白云质灰岩,部分白云岩,厚度 在25~60 m。

膏盐段 厚度 10~25 m,主要由硬石膏岩组成, 中间夹一层粉砂岩-泥岩。上部局部石膏化。硬石 膏岩为块状,多为微晶,局部细晶,镜下呈放射状和 纤维状。

盐岩段《主要由石盐岩、光卤石岩、溢晶石岩、 钾石盐岩等组成。厚度 250~900 m。

3.2 1级盐韵律

0 ///

根据钻孔揭露的岩性特征、盐类矿物沉积特征、 岩石组合特征,以碳质页岩(底),溢晶石岩(顶)为标 志层,每一个Ⅱ级沉积旋回底部均为碳质页岩(图 4a)向上依次为厚层石盐岩(图 4b)—石盐岩与光卤 石岩互层(图 4c)—厚层光卤石岩(图 4d、e),部分沉 积旋回顶部发育溢晶石岩(图 4f)或含钾石盐,将区 内盐类沉积划分为 8 个Ⅱ级沉积旋回(图 5),部分旋 回不完整,正如 Ruiter(1979)所总结的单个旋回的 岩盐沉积序列(图 6)。

II1厚度约 50 m,旋回底部为碳质页岩夹石膏岩,向上为厚层石盐岩,再往上为厚层光卤石岩,缺乏其他部分。II2厚度约 30 m,旋回底部为碳质页岩夹薄层石盐岩,向上为薄层状石盐岩,再往上为光卤石岩与石盐岩互层,缺乏其他部分。II3厚度约 30 m,旋回底部为碳质页岩夹薄层石盐岩,向上为石盐岩与光卤石岩互层沉积,缺乏其他部分。II4厚度约 40 m,旋回底部为碳质页岩,向上为薄层状石盐岩与薄层状光卤石岩互层沉积,但光卤石层厚度相对较大,在顶部发育一层溢晶石岩(2K201缺失)。II6



图 4 布谷马西矿区岩芯照片(岩芯箱长为 80 cm)

a. 薄层碳质页岩(夹薄层石盐和石膏); b. 厚层粗粒石盐岩; c. 薄层光卤石岩与薄层石盐岩韵律沉积,整体为水平状; d. 厚层光卤石岩,颜 色呈暗红色; e. 光卤石岩,夹多层不规则石盐薄层; f. 溢晶石岩(包括含溢晶石光卤石岩)颜色为橘黄色、橙黄色

Fig. 4 Core photographs of the Cuckoo marcy deposit (Individual core segment is 80 cm long)

a. Carbonaceous shale (with thin-bedded rock salt and gypsum); b. Thick layer of halite; c. Horizontal, bedded carnallite and halite; d. Thick layer of carnallite, the color is dark red; e. Carnallite, defined by thin and irregular halite stringers; f. Tachydrite (including tachydrite-bearing carnallite), the color is saffron yellow and orange yellow



Fig. 5 Correlation of rock salt rhythm division of drilling holes in Cuckoo marcy deposit a. North part ; b. Central part ; c. South part of the deposit





厚度约 100 m 旋回底部为碳质页岩,向上为厚层石 盐岩,再往上为厚度较大的两层厚的光卤石岩夹一 层石盐岩,在顶部为一层较厚的石盐岩。II7 厚度约 70 m 旋回底部为碳质页岩夹薄层石盐岩,向上为厚 层石盐岩夹薄层光卤石岩,再往上为一层厚度较大 的光卤石岩,最上部为石盐岩与光卤石岩互层沉积。 II8 厚度变化较大,旋回底部为碳质页岩,向上为厚 层石盐岩(夹薄层光卤石岩),最后过渡到硬石膏岩 沉积。

在矿区北部、中部和南部各选取1个钻孔(北部 ZK101(图 5a),中部 ZK03(图 5b),南部 ZK201(图 5c))进行沉积韵律对比,详细研究岩盐沉积韵律的 变化。从图5中可以看出,北部岩盐埋深较浅,南部 岩盐埋深较深,说明岩盐开始沉积时,盆地底部有较 小倾角的坡度。3个钻孔岩盐韵律均显示以下特征, Ⅱ1、Ⅱ6和Ⅲ7比较相似,底部均为碳质页岩(夹石 盐岩或石膏岩),向上为厚层石盐岩,再到光卤石厚 层,最上部为薄层光卤石岩与石盐岩互层。Ⅲ4和Ⅲ 5比较相似,都是底部为碳质页岩,向上为石盐岩,再 过渡到石盐岩与光卤石岩互层,最顶部沉积(含水氯 镁石)溢晶石岩。不同的是Ⅲ5比Ⅲ4厚,且上部沉

积有厚层的光卤石岩。Ⅱ2 和Ⅱ3 比较相似 底部为 碳质页岩(夹光卤石岩或石盐岩),上面为薄层石盐 岩与光卤石岩互层。3 个钻孔岩盐韵律的差别在于, ZK201 钻孔 ||4 旋回顶部缺乏(含水氯镁石)溢晶石 岩(图 5c),与 ZK101(图 5a)和 ZK03(图 5b)相异,可 能是因为 ||4 旋回沉积时,ZK201 钻孔位置靠近盆 地中心或海水灌入通道,致使水体蒸发浓缩析出,且 蒸发岩程度不及矿区中部和北部。对出现的韵律和 厚度进行分析 ,各 || 级韵律均表现为不对称式 ,即淡 化期短 向上迅速咸化浓缩。析钾期水体的浓—淡 变化 体现在石盐岩和光卤石岩的交互沉积 而且各 Ⅱ级韵律间光卤石单层及累积厚度均有所不同。主 矿层主要分布在 [[1、][2、][5、][6 和][7(图 5)。其 中,Ⅲ1、Ⅲ6和Ⅲ7韵律段矿层较厚且稳定,厚度约 10~20 m ; [[2 和]] 5 的主矿层较薄 ,厚度约 5 m ,且 部分边部钻孔缺失(如 ZK101 ,图 5a) 据栾元滇等 , 2015).

3.3 Ⅲ级韵律

将最小的单层岩性作为一个韵素,研究层段的 主要韵素有硬石膏岩、石盐岩、光卤石岩、(含水氯镁 石)溢晶石岩、钾石盐岩等。在Ⅱ级沉积旋回划分的 基础上,根据单个或数个岩性相近的韵素在剖面上 的不同组合划分出不同的Ⅲ级韵律。具体划分出以 下淡化类(a类)和咸化类(b类)盐韵律。图7分别 列出了各盐韵律,每个盐韵律相当于1个Ⅲ级韵律。

a 类(咸化段中的盐韵律) 在咸化段中出现,包 括 4 种类型,即 a1、a2、a3、a4(图 7)。a1 为碳质页岩 (夹石膏岩或与石膏岩互层)石盐岩-光卤石岩,一般 出现在蒸发岩地层的底部,是岩盐沉积的最开始阶 段 a2 为石盐岩-光卤石岩互层沉积,本韵律在整个 盐类沉积过程中均可见,单个薄层的厚度从 0.1 m 至几 m 不等;a3 为石盐岩-光卤石岩(含水氯镁石) 溢晶石岩,一般出现在每个二级旋回的顶部,代表该 旋回的后期沉积特征;a4 为碳质页岩-硬石膏岩-石 盐岩,代表一个正常速率的咸化沉积,属于某沉积旋 回的开始阶段。与 a1 相比,出现了硬石膏岩这一韵 素,反映较缓慢蒸发浓缩的盐韵律类型。而a1由碳 质页岩直接过渡到石盐岩,反映快速蒸发浓缩的盐 韵律类型。

b 类(淡化段中的盐韵律) 在淡化段中出现,包 括 5 种类型,即 b1、b2、b3、b4、b5(图 7)。b1 为(含水 氯镁石)溢晶石岩-光卤石岩-石盐岩,为较缓慢蒸 发浓缩的盐韵律类型,在盐类沉积中较少见;b2为光







卤石岩-石盐岩-硬石膏岩,一般出现在蒸发岩地层的 顶部,是岩盐沉积的最后阶段,反映水体淡化至正常 海相沉积阶段;b3为光卤石岩-钾石盐岩(或含钾石 盐石盐岩)-石盐岩,仅在局部钻孔出现,钾石盐为光 卤石淋滤而成;b4为石盐岩-碳质页岩-石盐岩;b5为 石盐岩-石膏岩-石盐岩,都反映了快速的淡化再咸化 的过程,较少见。

a 类咸化的 4 种盐韵律代表了正常的水体浓缩、 依次析出盐类的特征,总体即碳质页岩—石盐岩— 光卤石岩—(含水氯镁石)溢晶石岩。而 b 类淡化的 5 种盐韵律,即钾镁盐在下,石盐在上的逆向沉积,说 明该阶段为海侵期。淡化段中碳质页岩夹石盐岩、 硬石膏岩均为原层交互沉积,且碳质页岩中细密的 水平纹层,不仅代表淡化过程,而且说明水体较深、 环境稳定,进一步说明补充的不是新鲜较淡的海水, 而是经过初步浓缩相邻盆地灌入的水体,可迅速浓 缩析盐。整体来看,大部分Ⅲ级韵律呈对称式分布, 即浓—淡—浓的变化,咸化淡化依次交替,指示水体 蒸发浓缩程度不断变化的过程。

4 矿床沉积模式

刘成林等(2015)将加蓬-刚果-塞尔希培盆地系的的钾盐矿床划分为离散型板块盆地钾盐矿床大类中的大西洋裂谷型,即裂谷最终打开形成大洋的裂谷盆地,由陆相转变为海相早期,沉积了广泛的蒸发岩地层(图8)和'刚果型'海相钾盐矿。

海水在蒸发作用下,因溶解度不同,按溶解度由 小到大依次沉积,首先沉积碳酸盐、其次为硫酸、 盐再次为卤化物。碳酸盐、石膏或硬石膏通常出现



图 8 西非裂谷盆地早白垩世 Aptian 期岩相分布图 (据 Torsvik et al., 2009 修改) Fig. 8 Aptian Lithofacies distribution and paleogeographic map of West African rift basin (modified after Torsvik et al., 2009)

在海相蒸发岩序列的下部,但在下刚果盆地缺失了 这些地层(Ruiter,1979)。结合区域地质资料,西非 陆缘盆地,包括纳米比亚盆地、宽扎盆地、下刚果盆 地、加蓬盆地等(图9),这些盆地之间有高地或隆起 彼此阻隔,如本格拉高地,安布里什隆起等(Harris,



Fig. 9 Schematic diagram showing the formation of the Lower Congo basin potash salts in the rift basin (modified after Liu, 2013)

2008)。海水进入局限环境,成盐物质在迁移过程中 经受了沉积分异,在不同的盆地或次级盆地海水成 分均不同,因为在相邻盆地海水已经经历了蒸发浓 缩和沉积。因此,纳米比亚盆地和宽扎盆地析出蒸 发阶段早期矿物,而下刚果盆地析出蒸发阶段晚期 矿物,这与下刚果盆地蒸发岩序列中缺乏碳酸盐和 硫酸盐地层的事实相一致(Ruiter,1979; Evans, 1977)。多个次级盆地的存在,对下刚果盆地形成超 大型钾盐矿床具有重要意义。

盆地蒸发岩沉积面积广大,且盆地中心推测厚 度可达1000 m,形成这么大规模的盐类矿床,需要巨 量的海水补给,而单次海水入侵很难形成巨厚的盐 类矿床(马黎春等,2014)。因此,要形成如此规模的 蒸发岩矿床,需要在相当长的地质时间内,有周期性 的或持续的海水供给,才可能形成超大规模的钾盐 矿床。水体进入下刚果盆地后,随着地面不断沉降, 高浓度海水不断补给,周而复始,形成了前述石盐— 光卤石的韵律性沉积,每一个韵律表示一次水体的 变化。若沉积韵律变化少,岩层厚度较大,反映盐类 沉积沉积环境较稳定;若水体补给不稳定,水体动荡 变化,则出现薄层光卤石岩与薄层石盐岩互层,反映 沉积环境波动频繁,海水补给的快速周期性变化。 晚 Aptian 期—早 Albian 期,西非结束裂谷阶 段,初始洋壳开始形成,海水灌入盆地。南侧鲸鱼海 岭(Walvis Ridge)呈岛或浅礁(Evans,1977),对海水 起到阻挡作用(图8),导致西非裂谷盆地海水易进难 出。经过多次海侵,加之气候干旱,盆地内水体强烈 蒸发,在西非、南美边缘广泛沉积了厚层蒸发岩 (Jackson et al. 2000),也称"阿普特盐盆地"(Aptian Salt Basin)(图8)。鲸鱼海岭(Walvis Ridge)作为隔 挡,形成封闭-半封闭环境,对下刚果盆地岩盐的沉 积也具有重要的作用。白垩纪中期,西非地区气候 炎热干燥(Fluteau et al., 2007; Scotese et al., 1999),有利于蒸发作用的进行。

Liu 等(2015)系统总结研究世界钾盐成矿理论, 认为成钾作用是"物源、气候及构造"三要素的精确 耦合,三要素之间并非简单重叠,而且是在干旱期内 的某一时段内的同时作用,三者缺一不可。

白垩纪时期,大西洋裂谷开始形成、打开,形成 了包括下刚果盆地在内的一系列裂谷盆地;同时,伴 随强烈火山活动,以及海水灌入,大量钾、钠等盐类 组分进入盆地,此时,正值白垩纪温室气候的高温气 候期,海水经强烈蒸发析出石膏后,形成富钾卤水, 迁移至裂谷中最深的次级盆地即下刚果盆地,进一 步浓缩形成光卤石矿层。综合下刚果裂谷盆地钾盐 矿床特征及其各方面成矿要素,总结归纳出其钾盐 沉积模型(图9)。

5 结 论

(1)矿床赋存于下白垩统 Aptian 阶蒸发岩地层 中。蒸发岩系主要为石盐岩与光卤石岩互层沉积, 并有多层溢晶石、水氯镁石和黑色碳质页岩夹层。 矿体总体呈水平-近水平层状,单层厚度在几米至几 十米,矿层稳定,延续范围广,矿层累计厚度超过100 m。钾盐矿主要为棕红色光卤石岩,主要矿石类型是 光卤石型,仅局部为钾石盐型。矿石品位高,KCI平 均品位为16.49%。

(2)下刚果盆地内早白垩世 Aptian 阶只有一个 成盐期,含盐系即为 [级韵律,又可细分为 8 个 []级 盐韵律和若干个 []级盐韵律。盆地总体沉积环境较 稳定,未出现蒸发岩序列中断。

(3)盆地内蒸发岩段总体上呈石盐岩和光卤石 岩互层构成,其间夹多层碳质页岩,局部发育(含水 氯镁石)溢晶石岩。由于受地面的沉降变化和海水 周期性灌入的影响,出现了石盐-光卤石的韵律性沉积。当环境很稳定时,沉积厚层石盐岩或光卤石岩, 沉积环境波动时则石盐岩和光卤石岩的韵律性互层 沉积。

(4)综合矿床特征、沉积特征、构造气候、物源 等条件,总结出下刚果裂谷盆地型钾盐矿床的沉积 模式。即:大陆拉张形成裂谷凹陷,海水持续或间断 灌入,有障碍半阻挡,加之持续干旱的气候环境,共 同作用形成裂谷型盆地钾盐矿床。

志 谢 野外工作过程中得到了深圳中航资源 有限公司和山东鲁源矿业有限公司的热情帮助和大 力支持,在此表示感谢!

References

Evans R. 1977. Origin and significance of evaporites in basins around the Atlantic margin [J]. AAPG Bulletin , 61(2):223-234.

Fluteau F, Ramstein G, Besse J, Guiraud R and Masse J P. 2007. Impacts of palaeogeography and sea level changes on Mid-Cretaceous climate[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 247(3-4): 357-381.

- Gong S L. 2012. Approach to depositional feature of potash deposits in Congo and its origin [J]. Industrial Minerals & Processing ,(10): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B. 2008. Evolution of the Congo rift basin , West Africa : An inorganic geochemical record in lacustrine shales[J]. Basin Research , 12(3-4):425-445.
- Jackson M P A , Cramez C and Fonck J M. 2000. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins : Implications for salt tectonics and source rocks[J]. Marine & Petroleum Geology , 17(4):477-498.
- Lehner P and Ruiter P A C D. 1977. Structural history of the Atlantic margin of Afric J J. AAPG Bulletin , 61(7):961-981.
- Li J , Liu Z P , Xiong L P , Shen B K , Wang Y G and Huo H. 2014. Reservoir prediction of salt induced traps in Lower Congo Basir[J]. Progress in Geophysics , 29(2):761-766 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L. 2013. Characteristics and formation of potash deposits in continental rift basins : A review [J]. Acta Geoscientica Sinica , 34(5): 515-527 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L , Zhao Y J , Fang X M , Lü F L , Wang L C , Yan M D , Zhang

H and Ding T. 2015. Plate tectonics control on the distribution and formation of the marine potash deposits J]. Acta Geologica Sinica , 89(11):1893-1907 in Chinese with English abstract).

- Liu C L , Jiao P C , Lü F L , Wang Y Z , Sun X H , Zhang H , Wang L C and Yao F J. 2015. The impact of the linked factors of provenance , tectonics and climate on potash formation : An example from the potash deposits of Lop Nur depression in Tarim Basin , Xinjiang , western China J]. Acta Geologica Sinica , 89 (6) 2030-2047.
- Luan Y D, Zhou X T, You Q J, Ma Q W, Yue J J, Kou Y W, Li Y, Yang S, Su Q W, Wang H J, Cao G M, Pang W and Guo J. 2015. Exploration report of Cuckoo Marcy potash deposit of south ore mining segment, Kouilou Province, Republic of the Congo[R]. Shandong: Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (in Chinese).
- Ma L C , Ma J Q , Han J Q , Liu C L , Niu L and Zhang Q. 2014. Characteristics and genesis of Southey potash deposit , Saskatchewan , Canada J]. Mineral Deposits , 33 (5): 964-976 (in Chinese with English abstract).
- Ruiter P A C D. 1979. The Gabon and Congo basins salt deposits J J. Econ. Geol. , 74(2):419-431.
- Scotese C R , Boucot A J and Mckerrow W S. 1999. Gondwanan paleogeography and paleoclimatology[J] Journal of African Earth Sciences , 128(1) 99-114.

Torsvik T H , Rousse S , Labails C and Smethurst M A. 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin [J]. Geophysical Journal International , 177(3):1315-1333.

附中文参考文献

- 宫述林. 2012. 刚果盆地钾盐矿床沉积特征及成因探讨[J]. 化工矿 物与加工(10)39-42.
- 李军,刘志鹏,熊利平,申本科,王雁刚,霍红. 2014. 下刚果盆地盐相 关圈闭储层预测[_]. 地球物理学进展 29(2):761-766.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. 地球学报 34(5) 515-527.
- 刘成林,赵艳军,方小敏,吕凤琳,王立成,颜茂都.2015. 板块构造对 海相钾盐矿床分布与成矿模式的控制[J]. 地质学报,89(11): 1893-1907.
- 栾元滇,周兴涛,游其军,马庆伟,岳伟佳,寇雅威,李越,杨硕,宿庆 伟,王海焦,曹光明,逄伟,郭建. 2015. 刚果共和国奎卢省布谷 马西矿区南部矿段钾盐矿勘探报告[R].
- 马黎春,马建强,韩继秋,刘成林,牛磊.2014.加拿大萨斯喀彻温省 索西(SOUTHEY)押盐矿床特征及成因[J].矿床地质,33(5): 964-976.