

童鑫,秦占杰,李敬波,等.西非下刚果盆地钾盐矿床成矿系统研究进展[J].盐湖研究,2025,33(6):119-130.

Tong X, Qin Z J, Li J B, et al. Research progress on metallogenic system of potash deposits in Lower Congo Basin, West Africa[J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(6): 119-130.

DOI:10.3724/j.ahj.2025007

CSTR:32273.14.j.ahj.2025007

西非下刚果盆地钾盐矿床成矿系统研究进展

童鑫^{1,2,3}, 秦占杰^{1,2*}, 李敬波⁴, 山俊杰⁵, 张福学⁵, 郎朋林⁶

- (1. 中国科学院青海盐湖研究所, 盐湖资源绿色高值利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 山东省核工业二四八地质大队, 山东 青岛 266041; 5. 青海盐湖工业股份有限公司,
青海 格尔木 816099; 6. 包头市昶泰矿业有限责任公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015500)

摘要:钾盐是我国急缺的大宗矿产之一,积极建立海外钾肥生产基地是我国钾肥安全保供的重要举措。下刚果盆地钾盐资源储量丰富,品质优良,系统梳理该钾盐矿的成矿条件研究进展有助于充分认识其成矿规律和研判其成矿潜力,进而为我国开发该地钾盐提供重要理论指导和占得先机的条件。文章基于时空维度下“源、运、储、变、保”的钾盐成矿系统理论架构,对下刚果盆地钾盐矿床的区域构造、成矿时代、物质来源、迁移搬运、储藏富集、气候条件及成矿模式等进行了总结分析,阐明了各子系统的研究进展与存在争议,提出应加强成矿物质源与富集过程的量化研究,多指标约束成矿时代与迁移演化路径;同时,进行了下刚果盆地与南美同时代钾盐矿成矿条件的对比分析,强调开展区域综合研究的重要性。文章对全面构建下刚果盆地钾盐成矿系统及其后续综合开发利用具有重要战略意义。

关键词:下刚果盆地;钾盐矿床;成矿系统;控矿因素

中图分类号:P619.211

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2025)06-0119-12

钾盐作为钾肥生产的主要原料,是我国大宗紧缺战略性矿产之一,对保障国家粮食安全具有重要的战略意义。我国是世界上最大的钾盐消费国,因钾盐资源禀赋差和资源保有量不足等原因导致钾盐对外依存度常年高于50%^[1]。近年来海陆相找钾在理论和技术层面上取得了较大突破,但自主供应压力仍较大。在国内保护性开发以及国际形势动荡的背景下,积极布局 and 开发海外钾盐资源已成为我国钾肥长期安全保供的关键之举。东南亚老挝和泰国呵叻高原超大型固体钾盐矿床是我国建立海外钾肥生产基地的首选战略靶区,目前老挝钾盐勘探与开发成效显著,泰国钾盐已完成多个矿区资源勘查与储量核算。与此同时,与老泰钾盐矿床同属白垩纪的西非下刚果盆地钾盐矿近年也得到了国内各界的广泛重视,作为裂谷型钾盐成矿的典型代表,该区域已探明钾盐储量超数十亿吨^[2],积极布局该区域钾盐资源的勘探与开发利用,多点支撑我国海外钾肥生

产基地建设已成为国内钾肥行业的共识。

国内外学者已从地质构造^[3-5]、物源补给^[6,7]、成盐年代^[8-10]、气候演化^[11-13]以及成矿模式^[14,15]等方面对下刚果盆地钾盐矿床展开了诸多研究,为全面认识该区域钾盐成矿规律提供了重要基础。及时梳理下刚果盆地钾盐矿床形成规律的研究进展,提出尚存争议的关键科学问题,明确后续研究方向,服务于“一带一路”海外钾盐开发已刻不容缓。因此,本文拟从钾盐成矿系统的视角出发,详细探讨钾盐成矿作用过程及控矿因素,为该区钾盐矿成矿规律的深入研究 with 合理开发起到一定启发作用。

1 区域地质构造

下刚果盆地位于西非被动大陆边缘,与北部的加蓬盆地、喀麦隆盆地、南部的宽扎盆地、纳米比亚盆地组成了规模巨大的白垩纪被动陆缘盆地群,南

收稿日期:2025-01-21;修回日期:2025-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(42072097);中国科学院青年创新促进会人才项目(2021431)

作者简介:童鑫(2001—),男,硕士研究生,研究方向:盐类矿床成因与演化研究。Email:xintong036@163.com。

通信作者:秦占杰(1987—),男,博士,副研究员,主要从事盐类矿床成因与演化研究。Email:qinzhantie@isl.ac.cn。

北横跨近 2 500 km^[6,16](图 1)。下刚果盆地总面积为 68 698 km²,盆地形态整体上呈北西-南东走向,长度约为 300 km,盆地自北东向南西方向倾斜,宽度约为 50 km,盆地内自上而下发育盐上阿尔必阶—上新统海相沉积地层、阿普特阶蒸发岩地层及盐下尼欧克

姆—巴雷姆阶湖相地层^[17,18](图 2)。整个盆地群内,目前仅在加蓬盆地、下刚果盆地以及卡宾达地区(安哥拉)发育钾盐沉积,其中下刚果盆地钾盐主要赋存于阿普第阶洛埃梅组(Loémé Fm.)^[19],为钾盐与石盐共生矿床。

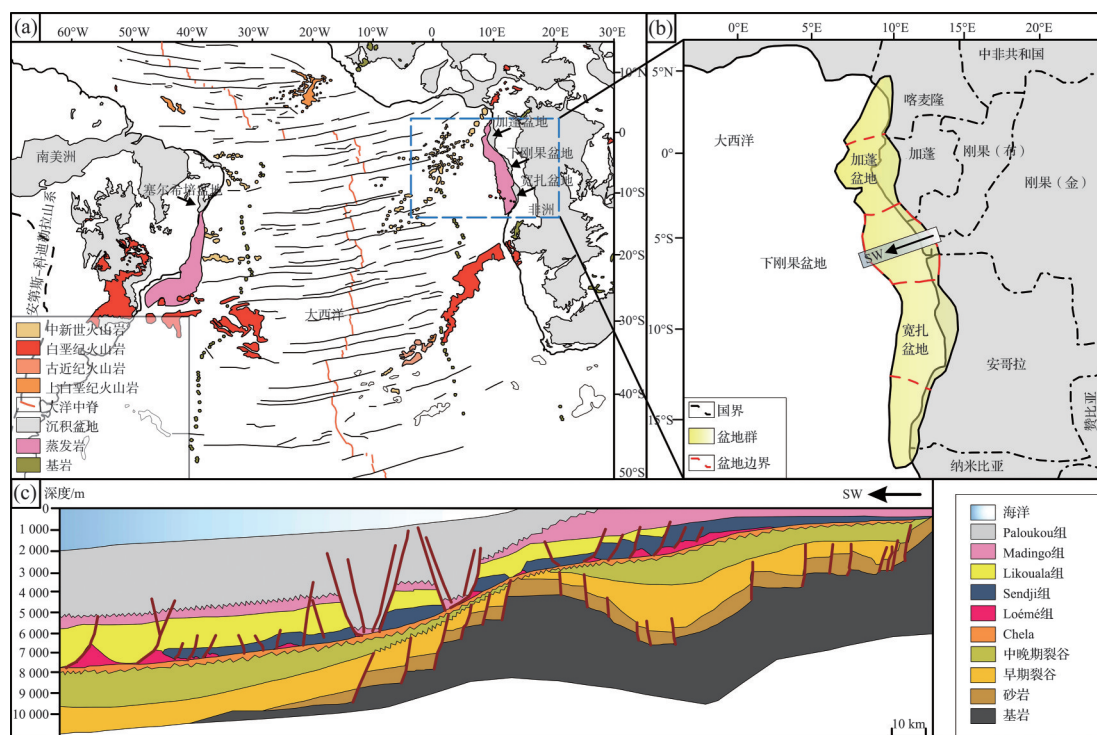


图 1 (a) 南大西洋区域地质简图; (b) 下刚果盆地及西非大陆边缘裂谷盆地群; (c) 下刚果盆地区域地层剖面图(修改自[20~22])

Fig. 1 (a) Geological sketch map of the South Atlantic region; (b) Lower Congo Basin and Rift Basin Complex of the West African continental margin; (c) Stratigraphic section of the Lower Congo Basin region(modified from[20~22])

下刚果盆地自下而上发育白垩系到全新统的沉积地层(图 2),下刚果盆地以及卡宾达地区钾盐赋存于下白垩统阿普第阶的洛埃梅组内[图 1(c)]、阿普第阶上覆地层包括上白垩统的 Sendji 组、Likouala 组和 Madingo 组、古新统-渐新统的 Paloukou 组以及第四系地层^[20]。根据沉积环境的不同,该区白垩系地层可进一步分为三个演化阶段:(1) 下部是晚侏罗世到早白垩世的湖相页岩和湖相砂岩;(2) 中部是阿普第期的潟湖-滨海相蒸发岩沉积,即阿普第阶蒸发岩;(3) 上部是阿尔必期到全新世的海相碎屑-碳酸盐-页岩泥灰岩沉积。在过渡时期盐层形成拆离面,后裂谷时期,盐层沿着拆离面受到重力作用向大洋一侧运移,发育大量的盐筏构造^[23,24]。新近系覆盖在白垩系之上,呈平行整合接触,上更新统地层分布在地势较高区域,与新近系呈角度不整合接触^[25,26]。

下刚果盆地、加蓬盆地以及巴西塞尔希培盆地

钾盐矿床同属于裂谷盆地成钾。晚三叠世到早侏罗世时期,冈瓦纳大陆在地幔柱的作用下开始发生伸展、减薄,形成地堑和半地堑,地壳发生进一步的裂解、分离。晚侏罗世到早白垩世时期,裂谷进一步发育,形成加蓬盆地以及下刚果盆地在内的裂谷盆地群的雏形,早白垩世贝里阿斯期至巴雷姆期间,在地幔热柱的作用下,冈瓦纳大陆发生伸展、变薄,形成一系列的地堑和裂谷,这些区域内沉积了体量巨大的陆相碎屑岩,以及深水至三角洲碎屑岩、湖相页岩等,这些沉积物被称之为“Cocobeach”群,是裂谷阶段沉积环境发生巨大变化的产物^[16]。Reyment^[27]和 Reyre^[28]在 Cocobeach 群内发现了淡水介虫和鱼类残骸,进一步说明沉积环境逐渐过渡为湖相(图 2)。在此之前,有学者在加蓬盆地东北部发现有三叠纪到中侏罗世的陆相碎屑岩沉积,认为是冈瓦纳大陆裂解之前的沉积,同时这也是裂谷盆地形成的坚实证据^[16,29]。

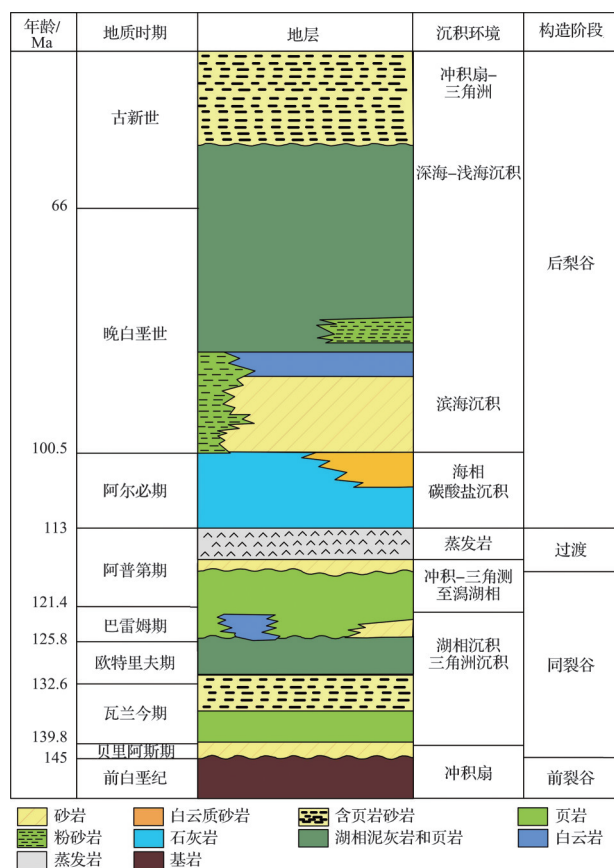


图2 下刚果盆地地层柱状图(修改自[19,26])

Fig. 2 Stratigraphic histogram of the Lower Congo basin(modified from[19,26])

早白垩世时期在西非大陆一侧,下刚果盆地及北部的加蓬盆地和南部的宽扎盆地等一系列边缘裂谷盆地逐渐形成^[5][图1(a,b)]。由于构造回返作用,相互分离的南美洲大陆和非洲大陆发生聚合碰撞,进而使得大陆边缘地层发生抬升、倒转和风化侵蚀,随后在地幔活动的持续作用下,两者又发生分离。阿普第期时,西非大陆边缘裂谷盆地群处于相对稳定的沉降背景下,在大陆边缘的破裂带内逐渐沉积了蒸发岩,阿普第期晚期至阿尔必期早期,南大西洋裂谷作用不断向北发育,原沉积在同一沉积地层中的蒸发岩开始分裂。

在南大西洋中段,Tristan地幔柱在板块运动过程中留在洋底的一系列热点,形成了Walvis Ridge。连接安哥拉和巴西的Walvis Ridge与相互分离的南美大陆、非洲大陆形成了一个半封闭的凹陷区域,使得南大西洋海水越过Walvis Ridge或者通过地下渗流进入凹陷区域,在南美洲的塞尔希培-阿拉戈斯盆地、桑托斯盆地等以及非洲的加蓬盆地、下刚果盆地等区域形成巨厚蒸发岩^[3,4,30,31]。其中下刚果盆地

远洋沉积处,阿普第阶盐层厚度最高达2 km,而在刚果(布)及周边陆地区域内盐层厚度经推测最厚在1 000 m左右^[18,19,32]。

与此同时,也有学者通过冈瓦纳大陆裂谷的古地理恢复,提出北部中大西洋补给的观点^[33-35],鉴于支持性证据较少,目前仅在有关巴西塞尔希培盆地钾盐矿床的研究中有所提及,考虑到加蓬和下刚果盆地钾盐矿床与巴西塞尔希培盆地钾盐矿床密切关系,来自北方的海水补给对于下刚果盆地盐类沉积的影响需要进一步的研究。在蒸发岩沉积与裂谷作用发生的时间前后问题上也存在争论,有学者认为阿普第阶盐盆地是在大陆裂解之后才形成的,远端的盐层沉积在原始的洋壳上面,即南美大陆的盐矿床如巴西塞尔希培盆地钾盐矿床与西非大陆的加蓬和下刚果盆地钾盐矿床从一开始就是分开的,但是目前支持该观点的证据尚薄弱^[36-38]。

下刚果盆地钾盐矿床的形成受控于裂谷地张开、被动陆缘断裂带自南向北的移动、Walvis Ridge的屏障作用等因素,这些地质活动或者地质体塑造了合适的沉积环境并促进了盐类矿物的汇聚富集。纳米比亚盆地、宽扎盆地等一系列次级盆地更是对下刚果盆地钾盐矿床成矿发挥了关键作用。但是目前对于包括下刚果盆地在内的西非被动陆缘裂谷盆地群的古地理演化模式对该区域钾盐成矿的具体影响尚缺乏深入研究,后续应加强相关研究工作。

2 成盐时代

对于该区域蒸发岩成盐时代,目前鲜有较精确的定年结果,主要是蒸发岩自生矿物中缺乏锆石、磁性物质等适用于定年的良好材料,成盐年代研究较薄弱。Pautot等^[10]认为非洲中西部蒸发岩的沉积与南大西洋的逐步张开有关,其蒸发岩的年龄应该在中生代。Evans^[7]通过判断菊石组合、岩性组合讨论加蓬和下刚果地区蒸发岩上覆与下伏地层的年代,得出该下刚果钾盐的年代为阿普第期。De Ruiter^[6]依据南大西洋的演化历史,认为加蓬和下刚果盆地的蒸发岩年龄应该在晚侏罗世到早白垩世之间,Karner等^[39]对南大西洋两侧盐下同裂谷沉积物中的介形类生物研究发现,西非边缘盆地盐下地层主要为巴雷姆期至早阿普第期的沉积物,结合中晚阿尔必期整个区域为开阔的海洋环境,推测下刚果盆地蒸发岩

成盐时代应该在晚阿普第期至早阿尔必期。Davison^[40]研究得出西非盐层最下部的石盐岩和硬石膏沉积年龄为 121 ~ 124.5 Ma, 而钾镁盐则在距今 114.5 Ma 时就在加蓬和下刚果盆地沉积, 成盐时代同样集中在早白垩世中晚期。

近期, 有学者基于对加蓬地区 Ezangz 组和卡宾达地区洛埃梅组盐层上部的花粉和介形虫研究, 判定其成盐年代在晚阿普第期到早阿尔必期^[41-43], 这与 Poropat 等^[44]在研究巴西东部和非洲西部近海盆地早白垩世介形类时得出的结果相近。随着对刚果(布)近海处洛埃梅组盐下地层 Chela 组页岩以及加蓬 madiela 组德斯菊石的进一步发现和深入研究, Delhaye-Prat 等^[9]认为洛埃梅组的成盐时代在中晚阿普第期。Zhao 等^[8]首次利用 Re-Os 同位素对下刚果盆地 Mboukoumassi 钾盐矿床中的黑色页岩进行了测年, 得到年龄在 (78.7 ± 1.1 ~ 96 ± 7 Ma) 之间, 相较于阿普第期 (113 ~ 121.4 Ma) 年轻 25 ~ 35 Ma, 可能是由于黑色页岩经过了熟化过程, 此时 Re-Os 同位素的年龄代表的是烃源岩发生熟化的年龄, 并非黑色页岩沉积时的年龄, 从而相对年轻。

由此可见, 下刚果盆地洛埃梅组蒸发岩年龄大致位于早阿普第期到早阿尔必期(图 3), 即 ~ 121 Ma 至 ~ 110 Ma。由于下刚果盆地蒸发岩矿物鲜有适合于定年的物质, 单一盐类矿物、单一同位素方法在蒸发岩测年方面仍有不足, 未来需要开展多维放射性

同位素定年工作, 同时结合盐上、盐下地层古生物学进一步约束成盐时代。

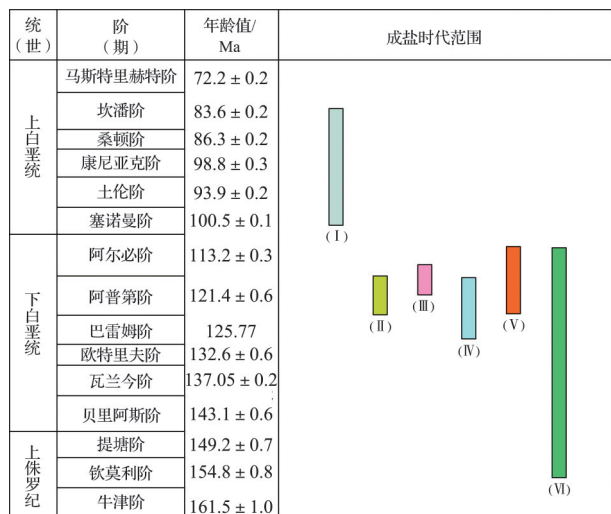
3 钾盐成矿系统

成矿系统理论的提出与应用对于深入认识某种矿床的成因具有提纲挈领的指导作用, 对学习和掌握某种矿床的基本成矿条件或控矿因素具有重要意义^[45]。钾盐属于一种化学沉积矿床, 时空维度下的“源、运、储、变、保”钾盐成矿系统从矿床成因及后期改造等动态演化过程对钾盐成矿作用进行整体剖析, 进而可对某一钾盐矿床成矿规律进行全局把握^[46]。不同地质时代不同区域钾盐矿床的地质构造背景差异较大, 物质来源存在多源性, 成矿流体迁移路径因地质记录不全而难辨识, 成矿过程因流体改造作用而复杂化, 变形过程与保存条件的仿真模拟需细化等, 因此, 不同钾盐矿床的成矿系统各异, 开展各子系统的详细研究与各钾盐成矿系统的综合对比研究是揭示钾盐成矿规律的核心工作。

3.1 物质来源

成盐物质来源决定钾盐矿床的属性及其规模, 大型的钾盐矿床物质来源通常包括海相、陆相、深部补给或者多种水体的掺杂混合, 不同水体占主导形成的钾盐矿床则发育迥异的蒸发岩类矿物序列, 如以“文石海”为主形成的硫酸盐型钾盐矿床赋存大量的杂卤石和泻利盐矿物, 而以“方解石海”为主形成的氯化物型钾盐矿床则赋存大量的光卤石和溢晶石矿物^[47,48], 陆相盐湖依据其水化学类型则进一步分为碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型等^[49]。

下刚果盆地的蒸发岩的厚度在海洋远端可达 2 km, 陆上盐层厚度也达 1 000 m, 如此庞大的蒸发岩体量让诸多学者把成矿物源锁定为海相补给^[6,7], 且必须是多次海侵的结果^[18, 32]。早期 Walvis Ridge 作为裂谷盆地群浅层屏障的存在, 与逐渐分离的南美大陆和非洲大陆之间形成了一个半封闭的局限海沉积环境, 为蒸发岩的多次沉积成盐提供了良好的保障。赵宪福^[25]对下刚果盆地钾盐矿硬石膏进行了硫同位素分析, 结果显示硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 14.3‰ ~ 15.2‰, 位于海相蒸发岩硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围内 (14‰ ~ 21‰)^[50]。同时对研究区内石盐和光卤石的溴、锶展开了相关工作, 结果显示石盐和光卤石溴含量分别为 $340 \times 10^{-6} \sim 680 \times 10^{-6}$ 、 $2\,400 \times 10^{-6} \sim$



(I) 同位素定年数据引自[8]; (II) 介形虫数据引自[7]; (III) 地层对比数据引自[39]; (IV) 硬石膏、石盐、钾镁盐数据引自[40]; (VI) 地层对比数据引自[10]; (VII) 地层对比数据引自[6]

图3 下刚果盆地钾盐矿床成矿时代

Fig. 3 Age of mineralisation of potash deposits in the Bas-Congo Basin

4.340×10^{-6} , 而锶含量分别为 $4 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$ 、 $31 \times 10^{-6} \sim 227 \times 10^{-6}$, 下刚果盆地布谷马西钾盐矿区石盐和光卤石溴、锶含量以及溴氯系数范围分别为 $958 \times 10^{-6} \sim 4.097 \times 10^{-6}$ 、 $4 \times 10^{-6} \sim 227 \times 10^{-6}$ 、 $2 \sim 10.1$, 均高于海水模拟蒸发实验中溴 ($110 \times 10^{-6} \sim 2.080 \times 10^{-6}$)、锶 ($3 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$)、溴氯范围 ($0.11 \sim 0.6$), 且显著高于陆相水体成因的石盐溴含量 ($20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$) 和溴氯系数 (<0.1 , 最高 $0.14 \sim 0.17$), 暗示其海源属性可能占主导地位^[51,52]。世界其他同时期海相钾盐矿床中石盐和光卤石的溴和锶也表现出相同的特点, 如泰国呵叻盆地马哈萨拉堪组蒸发岩第一旋回下部石盐溴含量为 $70 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, 底部石盐溴的含量 ($70 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$) 表明其最初是由海水蒸发形成的, 且溴的含量自下而上逐渐增加; 在巴西塞尔希培盆地的相关研究中, 下部 Ibura 段石盐溴的含量变化范围由初始沉积时的 $50 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 逐渐增加到与光卤石、钾石盐交替沉积时的 $200 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$, 表现出与泰国呵叻盆地马哈萨拉堪组等钾盐矿床近乎相同的演化特征, 均指示出其主要是由白垩纪海水形成的^[53,54]。

此外, 下刚果盆地钾盐矿床中发育大量的溢晶石以及盐类矿物中 B、F、Cu、Zn、Mn 等元素含量远高出世界同类矿床, 这也暗示了深部物质对成盐卤水的补给。裂谷活动域轴向区域是热卤水循环对流的场所^[55], 深部热液、变质水等通过被动陆缘的断裂带上涌, 以热泉等形式到达地表, 与原始的海水混合进而逐渐演化成为富 CaCl_2 卤水^[15,56]。Pichat 等^[19]根据该区域 256 口钻孔对下刚果盆地以及卡宾达地区等地展开了古地理演化模式重建研究, 提出“溢晶石沉积中心的北移与断层带的自南向北移动有着密切关系”, 这可能是由于壳源热液沿剪切带上升的结果。因此, 深部热液流体在该钾盐矿中扮演着不可或缺的角色。

下刚果盆地钾盐矿床的盐类沉积旋回主要以有机质埋藏之后形成的黑色页岩为划分依据, 学者通过研究区域内 Mboukoumassi 钾盐矿床中黑色页岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值发现, 在蒸发岩建造演化的初期, 盐类沉积下部旋回的黑色页岩显示更多的陆源补给 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值: 2.02 ± 0.21), 至中上部旋回逐渐降低 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值: 0.982 ± 0.031)^[8], 这表明陆相补给在下刚果盆地蒸发岩矿床成矿作用过程中也有一定的贡献。

由此可见, 下刚果盆地钾盐矿床存在多源补给的可能, 该钾盐矿床的成矿流体在运移至成钾盆地之前经历了多个预备盆地的蒸发浓缩与迁移演化, 多源补给的时空组合方式至今仍缺乏系统研究, 古卤水成盐成钾的不同物源示踪量化工作将是破解物源之谜的重中之重。

3.2 成盐物质迁移

成盐物质迁移路径判别是重构蒸发岩矿床时空演化的关键环节。下刚果盆地钾盐矿床成盐物质目前存在南北迁移两种观点(图4)。学者通常认为西非边缘盆地阿普第阶蒸发岩是南大西洋海水越过 Walvis Ridge 发生沉积分异的结果, 这也从侧面肯定了成盐流体自南向北迁移的观点^[6,25,57]。析盐序列和沉积相方面, 下刚果盆地和加蓬盆地氯化物型盐类矿物(石盐、钾镁盐)十分富集, 而南部的纳米比亚盆地和宽扎盆地却沉积较丰富的硫酸盐(硬石膏)和碳酸盐(白云石), 这种蒸发岩矿物因预备盆地发生化学沉积分异同样表明成盐物质经历了由南向北的迁移演化过程^[6,7,14]。



图4 南大西洋阿普第阶蒸发岩成盐流体迁移路径(修改自[19])

Fig. 4 Salt-Forming fluid migration paths of Apudian-order evaporites in the South Atlantic Ocean(modified from[19])

然而,古生物学者研究发现,直至晚白垩世赛诺曼期-土伦期南非介形虫才广泛出现在不断演化的南大西洋中段两侧,侧面表明此时期南大西洋海水才完全突破 Walvis Ridge 的限制^[39,58]。显然,加蓬和下刚果盆地钾盐矿的物质来源不仅是南大西洋海水, Arai^[35]通过古生物研究表明在阿普第阶蒸发岩沉积之前,就存在中大西洋(特提斯海)补给巴西东北部以及西非边缘盆地的现象,且阿拉里皮(Araripe)和塞尔希培盆地等地的沉积物中的软体动物、菊石等古生物也很好地记录了这一证据^[59]。同时,安哥拉 Pinda 和加蓬 Madiela 地层中海相阿尔必期介形虫与欧洲同时期介形虫的遗传亲缘关系也很好地支持了这一观点^[41]。

综上所述,下刚果盆地钾盐矿床成盐物质的迁移路径判识仍存在一定争议,从南大西洋的构造演化历史的角度出发,至少从阿根廷到巴西东北部帕拉伊巴州的地质证据支持由南向北的迁移路径^[35],然而成盐中后期北大西洋海水的补给可能也是重要的成盐物质来源。因此,结合区域地质构造、钾盐矿床盐类矿物析盐序列及沉积相,尤其是碎屑岩 U-Pb 年代学可较好约束该区域成盐物质的时空迁移关系。

3.3 钾盐富集演化

下刚果盆地阿普第阶盐层总体上呈石盐 and 光卤石互层,局部出现溢晶石和水氯镁石,以黑色页岩为界可分为多个沉积旋回(图 5),盐层旋回结束后以硬石膏与上覆海相页岩互层^[6,14,60-62]。盆地内的硬石膏岩分布较少,厚度不等(0~100 m),平均 20 m,主要是以盖层出现在盐层的顶板或者少量散布在黑色页岩之中。

学者进一步基于布谷马西矿区多个钻孔岩芯及其盐类矿物组合特征将该区盐岩沉积演化划分为三个阶段,第一阶段:卤水多次进入裂谷盆地,受到干旱气候的控制,不断蒸发浓缩,并且发生沉积分异,在加蓬和下刚果盆地出现石盐岩-光卤石岩-溢晶石岩和水氯镁石岩的沉积旋回;第二阶段,北大西洋的开放使得成矿流体成分发生变化,光卤石岩与石盐岩交替出现,阶段后期干旱气候进一步加剧,出现溢晶石岩和次生钾石盐岩;第三阶段:南北大西洋贯通,开阔海洋环境建立,出现硬石膏岩、白云岩、海相页岩等沉积^[14,63]。

下刚果盆地缺失碳酸盐岩和硫酸盐岩,被认为

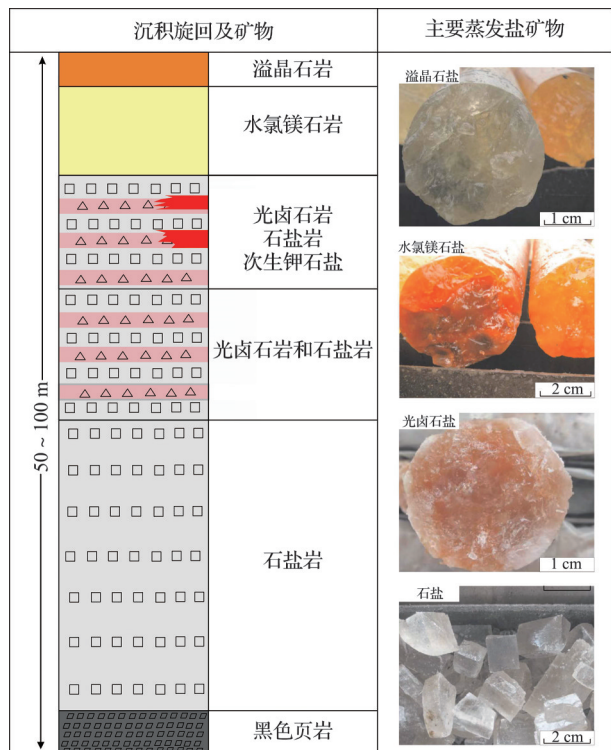


图 5 单个盐类矿物沉积旋回(修改自[6,57])

Fig. 5 Individual salt mineral deposition cyclones (modified from[6,57])

是阿普第期下刚果盆地发生区域沉降,高浓度卤水经纳米比亚盆地、宽扎盆地发生沉积分异后进入下刚果盆地的结果,此种环境下,外来流体的掺杂影响不可避免^[64,65]。一般情况下,光卤石岩和溢晶石岩被认为是原生矿物,而钾石盐岩则被认为是由于差异负载作用而上升至盐背斜轴部的光卤石岩淋滤分解而形成的次生矿物^[2,6,56,65]。范美玲等^[63]对该区域内盐类矿物进行了矿物学以及地球化学的分析,发现钾石盐多以透明粗晶颗粒镶嵌在溶蚀状态下的光卤石中,并且通过与标准光卤石波谱的对比发现光卤石有向钾石盐过渡的趋势,因此断定钾石盐是由光卤石岩分解淋滤而来的。下刚果盆地 Holle 矿区盐背斜顶部硬石膏岩的截断同样证实了这种改造作用^[66],这与呵叻高原钾盐矿中光卤石淋滤分解成钾石盐的“不均匀交代”模式较为相似^[67]。

针对下刚果盆地钾盐沉积演化研究仍较薄弱,缺乏不同区域原始古卤水成盐作用过程的系统量化研究,此外,区域构造及盐构造对盐岩原始沉积状态的改变亦会对水成盐沉积记录与过程重建产生一定影响。因此,笔者认为需要精细化研究盐岩的矿物组合关系,加强加蓬盆地、下刚果盆地和宽扎盆地之间蒸发岩以及古卤水成盐成矿过程的横向对比研

究,系统开展下刚果盆地蒸发岩的富集机制研究。

3.4 气候条件

气候条件是影响蒸发岩发育的关键因素之一,

白垩纪通常被认为是一个温暖干旱的时期,南大西洋两侧的凹陷盆地以及东南亚呵叻盆地等地的蒸发岩形成均与白垩纪时期的干旱气候存在密切关系^[11,12](图6)。

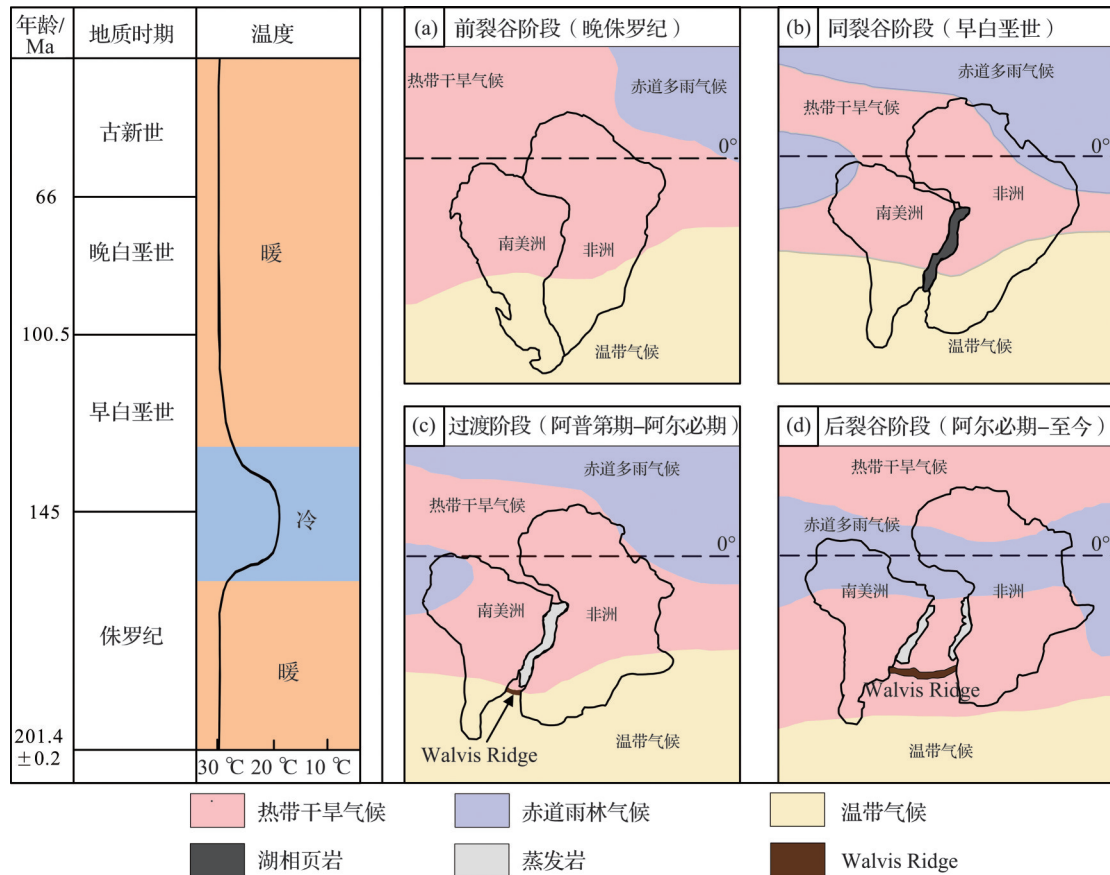


图6 全球温度变化及白垩纪南美大陆与非洲大陆演化图(修改自[68,69])

Fig. 6 Global temperature change and evolution of the Cretaceous South American and African continents (modified from[68,69])

首先,气候条件可影响海平面的波动,Jenkyns等^[70]利用TEX₈₆古温度计分析了来自北极阿尔法脊上白垩统沉积物中黑色页岩的海相浮游生物 Crenarchaeota 的膜脂质组成,将其转化为古海洋表面温度值。结果显示中晚白垩世时北冰洋海洋温度为 15~20 °C,极地相对温暖的气候条件使得常年冰雪融化,阿普第期海平面升高(+150 m)^[71],进而使得下刚果盆地蒸发岩发育得到充足的物源补充。其次,长期干旱-极端干旱的气候控制极大地促进了蒸发岩建造的发育速率,古地磁数据显示,非洲大陆和南美洲大陆蒸发岩建造的纬度位置在中生代早期位于南纬 20°~30°,这使得蒸发岩在演化过程中始终受到副热带高压带的控制^[72];在早中白垩世至古新世期间,全球处于一个温暖的气候背景下,平均温度比今天高约 10 °C^[13,69,73]。Zhang 等^[74]利用下刚果盆地布谷

马西钾盐矿区钻孔岩芯的原生石盐流体包裹体研究发现,其所记录的晚阿普第期海面均一化温度为 25~35 °C,最大均一化温度为 46.5 °C,这一极端高温的情况也促进了溢晶石矿物的形成。因此,在下刚果盆地蒸发岩形成过程中,长期稳定的干旱气候起到了至关重要的作用。

4 成矿模式

钾盐矿床是由构造、物源和气候三者耦合作用形成的,其中构造是基础,物源是根本,气候是保障^[75]。已有研究提出了下刚果盆地裂谷型钾盐沉积模式的观点,下刚果盆地与西非大陆北东边缘的其他盆地有相同的发展特征,为“多级裂谷盆地”成矿模式^[14,15](图7)。

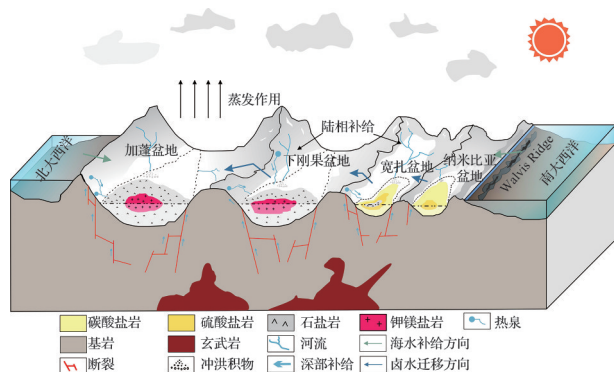


图7 下刚果盆地钾盐成矿模式示意图(修改自[14])

Fig. 7 Schematic diagram of the potash mineralization pattern in the Bas-Congo Basin(modified from[14])

晚侏罗世冈瓦纳大陆在地幔柱的作用下开始裂解,形成一系列克拉通内裂谷盆地,在不断分离过程中接受陆相及河流相沉积;在早白垩世时期,裂谷进一步发育,形成了深地堑湖并沉积了大量的湖相页岩^[76]。在构造回返作用之后,下刚果盆地及周边地区出现了准平原化。在阿普第期干旱-极干旱的气候控制下,海水越过 Walvis Ridge 大量多次进入裂谷盆地群,在纳米比亚盆地和宽扎盆地开始发生蒸发浓缩,形成碳酸盐岩和硫酸盐岩沉积,掺杂少量的石盐沉积。因加蓬和下刚果盆地的沉降以及盆地间的隆起的阻隔等^[5],经沉积分异之后的成矿流体进入加蓬和下刚果盆地,由于碳酸盐岩和硫酸盐岩早期的析出,使得加蓬和下刚果盆地的蒸发岩序列以石盐与钾镁岩为主。多级次级盆地的存在对于下刚果盆地钾盐的形成具有至关重要的作用。

在白垩纪多级预备盆地成矿过程中,南大西洋中脊热液较为明显地影响了海水成分,使得白垩纪海水演化为高 Ca^{2+} 、低 SO_4^{2-} 的“方解石海”,进而对下刚果盆地钾盐矿床的蒸发岩矿物序列产生了重要影响,如溢晶石矿物的发育^[48,77]。同时长期的大陆风化剥蚀作用与盆地内河流输送补给,致使下刚果盆地蒸发岩也沉积了一定的陆相物质。不同时空条件下,基于构造、物源、气候耦合作用下的多源成矿流体混合掺杂最终形成了下刚果盆地大型的氯化物钾盐矿床。

然而,钾盐矿床形成是一个长期动态演化的过程,该过程中,多源混合成矿及后期改造是钾盐矿床研究的重要内容。受区域地质构造变化影响,古卤水在多级预备盆地间的沉积分异如何接受陆源、深部补给的方式以及程度需要进一步量化研究。此外,包括下刚果盆地钾盐矿床在内的西非阿普第阶

蒸发岩南北跨度较大,特别是北大西洋开启之后,由于沉积中心的北移,该区域的成盐成矿作用过程较为复杂,需要紧密联系南大西洋及西非被动大陆边缘的构造演化历史开展重建工作。因此,目前下刚果盆地钾盐矿床的成矿机制仍处在探索阶段,需要结合加蓬盆地、宽扎盆地的研究和该区域内大量的钻孔资料恢复古地理演化的全过程,不断丰富下刚果盆地钾盐成矿模式研究。

5 巴西塞尔希培盆地与下刚果盆地钾盐对比

塞尔希培盆地位于巴西东北部沿海,东北部是阿拉戈斯盆地,西南部是巴黑苏尔盆地,盆地面积为 $1\,200\text{ km}^2$ 。塞尔希培盆地与下刚果盆地构造演化历史具有一定的相似性,同属于晚侏罗世至早白垩世冈瓦纳大陆裂谷作用的产物,两者盐下地层具有极高的相似性,Krommelbein 等^[78]对两个边缘裂谷盆地的动物群以及岩性进行了研究,发现其存在近乎相同的盐下湖相沉积序列。阿普第期早期,在稳定沉降的背景下裂谷进一步发育,此时海水进入,南大西洋两侧的一系列裂谷盆地成为一个近似封闭的海湾,其间卤水高度浓缩,在裂谷盆地内以及大陆边缘破裂带内沉积了一套较厚蒸发岩,并发育溢晶石。至阿尔必期南大西洋大洋中脊发育,南美洲大陆与非洲大陆逐渐分离导致海湾进一步扩大,沉积环境从局限海逐渐变得开放,完整的盐盆也一分为二,塞尔希培盆地钾盐主要赋存在阿普第阶,阿普第阶含盐系地层被称为 Muribeca 组,其亚组 Ibura 是主要含盐层^[16,56,79]。南美洲东部与非洲西部两侧的盐层分布范围、盐构造存在明显的差异,这可能与南大西洋裂解时其所处的位置有关^[80]。

巴西塞尔希培盆地与下刚果盆地钾盐矿床成盐时代基本吻合,均处于阿普第期,仅在成盐先后顺序上有些许差别,根据 Davison 对南大西洋两侧孢粉研究,阿普第阶最古老的盐应该是塞尔希培-阿拉戈斯盆地的帕里普埃拉盐,距今约为 124.8 Ma ,然后是宽扎盆地至下刚果盆地洛埃梅组蒸发岩,最大年龄在 $121\sim 124.5\text{ Ma}$,可能是中大西洋(特提斯海)不断演化沿着巴西东北部特提斯海道补给的结果,成盐流体在迁移的过程中发生了沉积分异。

一般来说,塞尔希培盆地与下刚果盆地成钾物质来源以海水为主,且在成盐成矿过程均受到了地

下热液的影响,因而两者的矿物组合以及微量元素组成具有极高的相似性,其盐类矿物均以氯化物为主,硫酸盐和碳酸盐含量少;塞尔希培盆地与下刚果盆地钾盐矿床光卤石中的 Br 含量分别为 $4\,000 \times 10^{-6}$ 和 $7\,000 \times 10^{-6}$ 、Rb 含量分别为 80×10^{-6} 和 100×10^{-6} ,光卤石中的 B、F、Mn、Cu、Zn 等含量高出同类矿床数十倍至数百倍^[16,79],与世界其他类型矿床差异较大。塞尔希培盆地的钾石盐为次生成因,同下刚果盆地一般,均是由光卤石淋滤分解产生的。溢晶石的特殊存在,普遍被认为在沉积阶段的后期由于裂谷活动,含 CaCl_2 的地下卤水热液沿着深大破裂带上涌改

变成盐流体成分,在原有沉积之上叠加沉积了溢晶石^[6,7]。巴西塞尔希培盆地盐类矿物的沉积旋回相较于下刚果盆地更为复杂,塞尔希培阿普第阶盐层共有 10 个沉积旋回,每个旋回之间差异较大,整体上呈现石盐和光卤石交替的规律,且随着沉积旋回厚度的增加,石盐、光卤石、溢晶石和钾石盐的交替逐渐明显,溢晶石出现在盐层的中下部,除盐层底部和顶部硬石膏与灰岩、页岩混层外,均有光卤石和钾石盐发育,而下刚果盆地钾盐矿床平均 5~6 个沉积旋回,旋回之间具有较高的相似性^[56]。后期的盐构造变形以及矿床保存方面,两者存在较大差异(表 1)。

表 1 下刚果盆地钾盐矿床与塞尔希培盆地钾盐矿床综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of potash deposits in the Bas-Congo Basin with potash deposits in the Sergipe Basin

	下刚果盆地钾盐矿床	塞尔希培盆地钾盐矿床
沉积相	海相	海相
成矿时代 ^a	阿普第期	阿普第期
盐系地层 ^b	下白垩统阿普特阶洛埃梅组	下白垩统阿普特阶
矿区面积 ^c	8 450 km ²	1 200 km ²
成盐物源 ^d	海水(热液影响)	海水(热液影响)
卤水类型 ^e	氯化物型	氯化物型
钾盐盆地规模 ^f	巨型	大型
盆地构造类型 ^g	裂谷内的海岸盆地	裂谷内的海湾盆地
矿物组合(含%) ^h	石盐(56)、光卤石(24)、溢晶石和水氯镁石(17) 硬石膏(8)	石盐(57)、光卤石(15)、溢晶石和水氯镁石(14) 硬石膏(8)、钾石盐(6)
矿物分布特征 ⁱ	石盐与光卤石交替出现,局部发育水氯镁石和次生钾石盐,缺乏碳酸盐和硫酸盐以及厚层溢晶石	石盐与光卤石大量出现,常见水氯镁石和溢晶石 少见硬石膏
盐构造 ^j	逆冲盐席上发育大量正断层,盐刺穿作用较强,上覆脆性盖层多破裂	发育厚层盐层,滑动构造不发育,盐上盐下地层协调变形,盐层以原地构造变形加厚为特征,盐岩盖层具有极强的连续性

注:a、b、d 引自[6,7,19,56];c 引自[81];e、h、i 引自[16];f、g 引自[15];j 引自[80]

目前国内外学者对于两者的对比研究工作仍较少,加强两者成盐时代与成盐期次的进一步研究有助于了解南大西洋阿普第阶蒸发岩沉积演化历史,两者构造运动以及盐层自身的塑性变形过程对于矿层分布有何影响也需要深化研究。综合对比研究南大西洋两侧其他盐盆地的具体情况,有利于加深对该区域阿普第阶蒸发岩成矿系统的全面理解。

6 展 望

关于下刚果盆地钾盐成矿规律目前已取得了诸多有益成果,通过全面梳理下刚果盆地钾盐成矿系统研究进展及存在的些许科学争议,后续应加强以下几方面的研究工作。

(1) 成盐时代。成盐时代是研究矿床形成和发展的重要标尺,是同类型矿床对比研究的基础工作之一,下刚果盆地成盐时代应该为早阿普第期至早阿尔必期,即 ~121 Ma 至 ~110 Ma。但是研究区比

较缺乏蒸发岩的精细定年,应在下刚果盆地、安哥拉盆地等地的含盐系地层(洛埃梅组)寻找可用于定年的孢粉、化石、锆石、磁性物质等材料,同时引入新方法和新技术以及加强不同定年方式之间的综合运用,多维约束下刚果盆地钾盐成盐时代。

(2) 成矿物源。下刚果盆地主要是海相来源,其次是深部来源和陆相来源,深部补给与裂谷活动息息相关,沿着断裂带以热泉等多种形式到达地表;陆相来源多集中在成盐阶段的早期。非海相流体的补给在下刚果盆地成钾过程中具有举足轻重的作用,揭示非海相流体的水化学特征、掺杂机制和方式,对于下刚果盆地钾盐矿床系统研究具有重要意义。

(3) 成矿流体迁移。明确成盐成矿过程中物源补给的方向以及成矿流体迁移路径是建立成矿系统的必要条件,在下刚果盆地钾盐成矿过程中,南大西洋的补给是盐盆地成盐物质的主要来源,卤水经多级预备盆地沉积分异后到达盐盆地参与成盐成矿作用。北大西洋的补给在成盐阶段的末期,正是由于

北大西洋的补给,改变了盐盆地的卤水成分,形成了大量石盐岩和部分硬石膏岩,最终致使盐盆地的成盐过程结束。当前工作应当结合南大西洋构造域的构造历史以及地层学,寻找相关证据,进而系统建立下刚果成盐过程中完整的碳酸盐岩-硫酸盐岩-石盐-钾镁盐的沉积序列和沉积相带。

(4) 成矿作用过程。目前对于下刚果盆地钾盐矿床的水盐作用多侧重于成矿后期的流体改造,对于成盐成矿过程中的研究相对薄弱,需要开展钾盐成矿作用过程的量化研究,此外,对于溢晶石的物质来源和形成机制需要进一步探讨。

(5) 成矿模式。加蓬和下刚果盆地钾盐矿床以及巴西塞尔希培盆地钾盐矿床具有相似的成盐成矿过程,加强盐类矿物、矿物组合的精细化研究,以及矿床之间的横向对比对于丰富裂谷盆地成钾模式意义重大。

参考文献

- [1] 郑绵平. 钾盐成矿规律、勘查技术与找矿进展[J]. 地质学报, 2024, 98(10): 2821-2822.
- [2] Pedley A, Neubert J, van der Klauw S. Potash deposits in Africa [J]. Episodes, 2016, 39(2): 447-457.
- [3] Warren J K. Evaporites: A geological compendium [M]. Springer, 2016.
- [4] Fort X, Brun J P, Chauvel F. Salt tectonics on the Angolan margin, synsedimentary deformation processes [J]. Aapg Bulletin, 2004, 88(11): 1523-1544.
- [5] Harris N. Evolution of the Congo rift basin, West Africa: An inorganic geochemical record in lacustrine shales [J]. Basin Research, 2000, 12(3/4): 425-445.
- [6] De Ruiter P. The Gabon and Congo basins salt deposits [J]. Economic Geology, 1979, 74(2): 419-431.
- [7] Evans R. Origin and significance of evaporites in basins around Atlantic margin [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(2): 223-234.
- [8] Zhao X, Wang Z, Liu C, et al. Characteristics and geological significance of Re-Os isotopic system of evaporites in Mboukoumassi deposit, the Republic of Congo [J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, 138: 14-21.
- [9] Delhaye-Prat V, Dupont G, Buratti N, et al. The Vembo Shales (Republic of the Congo), new insights on the transition from lacustrine to marine settings in the South Atlantic: Proceedings of the 35th International Geological Congress, F. [C]. Le Cap, 2016.
- [10] Pautot G, Renard V, Daniel J, et al. Morphology, limits, origin, and age of salt layer along South Atlantic African margin [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(9): 1658-1671.
- [11] Dupré S, Bertotti G, Cloetingh S. Tectonic history along the South Gabon Basin: Anomalous early post-rift subsidence [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(3): 151-172.
- [12] Steuber T, Rauch M, Masse J-P, et al. Low-Latitude seasonality of cretaceous temperatures in warm and cold episodes [J]. Nature, 2005, 437(7063): 1341-1344.
- [13] Frakes L A, Francis J E, Syktus J I. Climate modes of the Phanerozoic [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [14] 张帆, 徐海明, 刘成林, 等. 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, 2016, 35(6): 1230-1242.
- [15] 刘成林. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用 [J]. 地球学报, 2013, 34(5): 515-527.
- [16] 钱自强, 曲一华, 刘群. 钾盐矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [17] 张云飞. 下刚果盆地构造演化与热史模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [18] 宫述林. 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, 2012, 41(10): 39-42.
- [19] Pichat A, Delhaye-Prat V, Guiraud M, et al. Palaeogeography and tectono-stratigraphic evolution of the Aptian Ezanga-Loémé evaporites along the proximal domain of the south Gabon-Congo-Cabinda margin [J]. Basin Research, 2024, 36(4): e12893.
- [20] Wang L, Wang Z, Yu S, et al. Seismic responses and controlling factors of Miocene deepwater gravity-flow deposits in Block A, Lower Congo Basin [J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 120: 31-43.
- [21] Brownfield M E, Charpentier R R. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea Province of West Africa [R]: US Geological Survey, 2006.
- [22] Moulin M, Aslanian D, Olivet J L, et al. Geological constraints on the evolution of the Angolan margin based on reflection and refraction seismic data (ZaiAngo project) [J]. Geophysical Journal International, 2005, 62(3): 793-810.
- [23] Valle P J, Gjølberg J G, Helland-Hansen W. Tectonostratigraphic development in the eastern Lower Congo Basin, offshore Angola, west Africa [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(8): 909-927.
- [24] Ala M, Selley R. The west African coastal basins [M]. Sedimentary Basins of the World. Elsevier, 1997: 173-186.
- [25] 赵宪福. 下刚果盆地构造活动对钾盐成矿及后期改造的约束 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [26] Bidiet J, Kinga P, Loemba A, et al. Aperçu Géologique et pétrolier des Bassins du Congo [J]. Mémoire de l'Association des Producteurs de Pétrole Africains (APPA), Ministère des Mines et de l'Energie de la République du Congo Brazzaville, 1988.
- [27] Reyment R. Brief review of the stratigraphic sequences of West Africa (Angola to Senegal): proceedings of the Proceedings West African Micropalaeontological Colloquium [C]. Leiden, 1966.
- [28] Reyre D. Sedimentary Basins of the African Coast, Part I, Atlantic Coast, Assoc [J]. African Geo Surveys, Paris, 1966, 187.
- [29] Karner G D, Driscoll N W, McGinnis J P, et al. Tectonic significance of syn-rift sediment packages across the Gabon-Cabinda continental margin [J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 973-1000.
- [30] 章雨, 李江海, 程鹏. 南大西洋中段共轭盐盆盐构造变形期次对比及意义 [J]. 地球科学, 2021, 46(6): 2218-2229.
- [31] Nunn J A, Harris N B. Subsurface seepage of seawater across a barrier: A source of water and salt to peripheral salt basins [J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(9/10): 1201-1217.
- [32] Jackson M P, Cramez C, Fonck J M. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: Implications for salt tectonics and source rocks [J]. Marine and

- Petroleum Geology, 2000, 17(4): 477-498.
- [33] de Matos R M D, Krueger A, Norton I, *et al.* The fundamental role of the Borborema and Benin-Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 127: 104872.
- [34] Lúcio T, Neto J A S, Selby D. Late Barremian/early Aptian Re-Os age of the Ipubi Formation black shales: Stratigraphic and paleoenvironmental implications for Araripe Basin, northeastern Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2020, 102: 102699.
- [35] Arai M. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: A paleontological perspective [J]. *Brazilian Journal of Geology*, 2014, 44(2): 339-350.
- [36] Abreu V. Geologic evolution of conjugate volcanic passive margins: Walvis (Africa) and Pelotas (South America) Basins [J]. PhD dissertation, 1998: 355.
- [37] Guiraud R, Maurin J C. Early Cretaceous rifts of Western and Central Africa: an overview [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 153-168.
- [38] Nürnberg D, Müller R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present [J]. *Tectonophysics*, 1991, 191(1/2): 27-53.
- [39] Karner G, Gambôa L. Timing and origin of the South Atlantic pre-salt sag basins and their capping evaporites [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 285(1): 15-35.
- [40] Davison I. Geology and tectonics of the South Atlantic Brazilian salt basins [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 272(1): 345-359.
- [41] Bate R H. Non-marine ostracod assemblages of the Pre-Salt rift basins of West Africa and their role in sequence stratigraphy [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, 153(1): 283-292.
- [42] Braccini E, Denison C N, Scheevel R, *et al.* A revised chrono-litho-stratigraphic framework for the pre-salt (lower Cretaceous) in Cabinda, Angola; Revision du canevas chrono-lithostratigraphique de l'anté-salifère (Cretace inférieur) du Cabinda, Angola [J]. *Bulletin des Centres de Recherches, Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 1997, 21.
- [43] Grosdidier E, Braccini E, Dupont G, *et al.* Biozonation du Crétacé Inférieur non marin des bassins du Gabon et du Congo [J]. *Bulletin des Centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine Mémoire*, 1996, (16): 67-82.
- [44] Poropat S F, Colin J P. Early Cretaceous ostracod biostratigraphy of eastern Brazil and western Africa: An overview [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(3-4): 772-798.
- [45] 翟裕生. 论成矿系统 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(1): 13-27.
- [46] 秦占杰, 李庆宽, 袁秦, 等. 成矿系统理论视角下的呵叻高原钾盐矿床研究现状及展望 [J]. *地质学报*, 2023, 97(2): 596-612.
- [47] 程怀德, 马海州. 显生宙以来海水组分变化对海相钾盐蒸发岩的制约作用 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, (5): 609-618.
- [48] Hardie L A. Secular variation in seawater chemistry: An explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 my [J]. *Geology*, 1996, 24(3): 279-283.
- [49] 樊启顺, 李建森, 秦占杰, 等. 氯化钙型卤水成因的研究进展及其科学问题 [J]. *盐湖研究*, 2021, 29(1): 1-9.
- [50] Strauss H. Geological evolution from isotope proxy signals-sulfur [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 89-101.
- [51] 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.
- [52] 陈郁华. 黄海水 25 °C 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.
- [53] Timofeeff M N, Lowenstein T K, Da Silva M A M, *et al.* Secular variation in the major-ion chemistry of seawater: Evidence from fluid inclusions in Cretaceous halites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(8): 1977-1994.
- [54] Holser W T. Trace elements and isotopes in evaporites [M]. *Marine Minerals. Mineral. Soc. Amer.* 1979: 295-346.
- [55] Hardie L A. The roles of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites: an hypothesis [J]. *American Journal of Science*, 1990, 290(1): 43-106.
- [56] Wardlaw N. Unusual marine evaporites with salts of calcium and magnesium chloride in Cretaceous basins of Sergipe, Brazil [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(2): 156-168.
- [57] 颜开, 刘成林, 王春连, 等. 刚果盆地西南部白垩纪蒸发岩矿物与古环境特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(3): 525-534.
- [58] Dingle R. Cretaceous Ostracoda of the SE Atlantic and SW Indian Ocean: a stratigraphical review and atlas [J]. *Bulletin des Centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine Mémoire*, 1996, (16): 2-17.
- [59] Davison I, Bate R, Reeves C. Early opening of the South Atlantic: Berriasian rifting to Aptian salt deposition; proceedings of the PESGB/HGS 3rd International Joint Meeting-Africa: the Continent of Challenge and Opportunity, London, F, 2004 [C].
- [60] 栾元滇, 卢建湘, 马文震, 等. 刚果(布)马卡拉钾盐矿区白垩系盐系地层沉积旋回划分及沉积环境分析 [J]. *化工矿产地质*, 2023, 45(1): 10-16.
- [61] 岳伟佳, 栾元滇, 周兴涛. 刚果布谷马西矿区钾盐矿北部矿段盐类沉积缺失浅析 [J]. *山东国土资源*, 2020, 36(10): 9-15.
- [62] Hirleman G, Jaillard L. Paléogéographie et diagraphies. Reconstitution de la série salifère de la Loémé, Congo à partir des diagraphies disponibles [J]. *Géologues (Paris)*, 1993, (100/101): 55-58.
- [63] 范美玲, 刘成林, 焦鹏程, 等. 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*, 2016, 35(6): 1257-1268.
- [64] Lambert R. Esquisse géologique du bassin potassique congolais: proceedings of the Annales des mines [M]. Paris, 1947.
- [65] Belmonte Y, Hirtz P, Wenger R. The salt basins of the Gabon and the Congo (Brazzaville), in Salt basins around Africa [J]. London, Inst Petroleum, 1965: 55-74.
- [66] Milandou D S G N, Elenga H, Nganga M D M, *et al.* Influence of climate and tectonics on the crystallization of carnallite and related salts in the congolese atlantic basin during the lower cretaceous, republic of congo [J]. *Open Journal of Geology*, 2023, 13(1): 51-71.
- [67] Hite R J, Japakesetr T. Potash deposits of the Khorat plateau, Thailand and Laos [J]. *Economic Geology*, 1979, 74(2): 448-458.
- [68] 刘祚冬, 李江海. 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*, 2009, 14(3): 46-52.
- [69] Scotese C, Boucot A, McKerrow W. Gondwanan palaeogeography and pal1 oclimatology [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1999, 28(1): 99-114.
- [70] Jenkyns H C, Forster A, Schouten S, *et al.* High temperatures in

- the late Cretaceous Arctic Ocean[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 888-892.
- [71] Fluteau F, Ramstein G, Besse J, *et al.* Impacts of palaeogeography and sea level changes on Mid-Cretaceous climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 247(3/4): 357-381.
- [72] Creer K. Palaeomagnetic data from the Gondwanic continents[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1965, 258(1088): 27-40.
- [73] Huber B T, Norris R D, MacLeod K G. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 123-126.
- [74] Zhang H, Lü F, Mischke S, *et al.* Halite fluid inclusions and the late Aptian sea surface temperatures of the Congo Basin, northern South Atlantic Ocean[J]. *Cretaceous Research*, 2017, 71: 85-95.
- [75] 秦占杰. 呵叻高原钾盐矿床物源及其沉积演化的地球化学研究[D]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2019.
- [76] 刘曦. 刚果(布)奎卢盆地钾盐矿床地质特征及成因浅析[J]. *中国井矿盐*, 2016, 47(3): 15-17.
- [77] Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions[J]. *Science*, 2001, 294(5544): 1086-1088.
- [78] Krömmelbein K, Wenger R. Sur quelques analogies remarquables dans les microfaunes crétacées du Gabon et du Brésil oriental (Bahia et Sergipe); proceedings of the IUGS Symposium on sedimentary basins of the African coasts Atlantic Coast [C]. Cabon, 1966.
- [79] Borchert H. 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.); proceedings of the Time-and Strata-bound Ore Deposits, F, 1977[C]. Springer.
- [80] 王迎, 李江海, 章雨, 等. 南大西洋中段被动陆缘盆地下白垩统盐构造成因模式[J]. *地质学报*, 2022, 96(4): 1182-1196.
- [81] 唐敏. 世界海相钾盐矿床特征定量分析及意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 326-333.

Research Progress on Metallogenic System of Potash Deposits in Lower Congo Basin, West Africa

TONG Xin^{1,2,3}, QIN Zhanjie^{1,2*}, LI Jingbo⁴, SHAN Junjie⁵, ZHANG Fuxue⁵, LANG Penglin⁶

(1. Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Shandong Nuclear Industry 248 Geological Brigade, Qingdao, 266041, China; 5. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Geemu, 816099, China; 6. Baotou Changtai Mining Limited Liability Company, Bayannur, 015500, China)

Abstract: Potassium salts are one of the critically needed bulk minerals in China, and actively establishing overseas potassium fertilizer production bases is an important measure for ensuring the security and supply of potassium fertilizers in the country. The Congo Basin is rich in potassium salt resources with high quality. A systematic review of the research progress on the mineralization conditions of these potassium deposits will enhance our understanding of their mineralization patterns and potential, thereby providing essential theoretical guidance and advantageous conditions for the development of potassium salts in this region. This paper presents a theoretical framework for the potassium mineralization system based on the spatiotemporal dimensions of “source, transport, storage, transformation, and preservation.” It summarizes and analyzes the regional tectonics, mineralization age, material sources, transport mechanisms, accumulation processes, climatic conditions, and mineralization models of the potassium deposits in the Congo Basin. The research progress and existing controversies within each subsystem are elucidated, and it is suggested that quantitative studies on the sources of mineralization and accumulation processes should be strengthened, along with multi-criteria constraints on mineralization ages and transport evolution pathways. Additionally, a comparative analysis of the mineralization conditions of potassium deposits in the Congo Basin and those in South America from the same geological era is conducted, emphasizing the importance of regional comprehensive studies. This paper holds significant foresight for the comprehensive construction of the potassium mineralization system in the Congo Basin and its subsequent integrated development and utilization.

Key words: Lower Congo Basin; Potash deposit; Metallogenic system; Ore-controlling factors