

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.011

非洲钾盐矿床地质特征及资源潜力

孙宏伟^{1,2,3}, 任军平^{2,3}, 许康康^{2,3}, 吴兴源^{2,3}, 唐文龙^{2,3}, 贺福清^{2,3}
SUN Hongwei^{1,2,3}, REN Junping^{2,3}, XU Kangkang^{2,3}, WU Xingyuan^{2,3},
TANG Wenlong^{2,3}, HE Fuqing^{2,3}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

3. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要:全球钾盐资源分布不均, 储量及产量均过于集中。中国钾资源十分紧缺, 寻找新的钾盐资源供应地是重要的任务。非洲地区钾盐资源较丰富, 主要分布在刚果(布)、埃塞俄比亚、厄立特里亚、埃及、摩洛哥等国家, 成钾时代主要为白垩纪、新近纪及第四纪。非洲钾盐成矿地质条件优越, 干旱炎热环境加速海水蒸发、伸展构造背景下形成大量断陷凹地及多期次的海侵事件, 为非洲地区钾盐的最终形成提供了良好的条件。通过对非洲典型钾盐矿床(点)地质特征、矿床类型、成矿潜力等进行分析, 综合认为西非加蓬-刚果盆地北侧次级盆地、东非达纳基尔盆地中心区及西北非干盐湖区为有利的找钾区。

关键词:钾盐; 矿床特征; 时空分布; 资源潜力; 非洲

中图分类号: P619.21⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)08-1390-12

Sun H W, Ren J P, Xu K K, Wu X Y, Tang W L, He F Q. Geological characteristics and resource potential analysis of potash deposits in Africa. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1390-1401

Abstract: Potash resources are distributed unevenly on a global scale, and their reserves and output are mainly concentrated in a few countries and companies. Finding new supply sites for potash resources is an important task for China's geological exploration workers due to scarcity of potash resources in China. Africa, rich in potash reserves, predominantly harbours them in countries such as Congo (Brazzaville), Ethiopia, Eritrea, Egypt, Morocco, among others. Potassium formations are mainly from the Cretaceous, Neogene, and Quaternary periods. The geological conditions of potash mineralization in Africa are excellent. For instance, the arid and hot environment induced seawater evaporation, and extensional tectonics led to the formation of numerous fault depressions, and multi-stage transgression events provided good conditions for the eventual formation of potash reserves in Africa. Based on the analysis of the geological characteristics, deposit types and metallogenetic potential of typical potash deposits(occurrences) in Africa, it is considered that the North sub-Basin of the Gabon-Congo Basin in West Africa, the central area of the Danakil Basin in East Africa and the dry salt lake area in Northwest Africa are favorable areas for potassium exploration.

Key words: potash; deposit characteristics; temporal and spatial distribution; resource potential; Africa

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2023-02-24

资助项目: 商务部技术援外项目《赞比亚东北地区航空物探与地质地球化学填图》(编号: [2015] 352)、中国地质调查局项目《南部非洲国际合作地质调查》(编号: DD20230125)

作者简介: 孙宏伟(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产勘查研究工作。E-mail: shwcub@163.com

钾是农作物生长的必需营养元素,全球 90% 的钾盐产量用于制造肥料 (Rawashdeh et al., 2014; USGS, 2021), 其余 10% 应用于纺织染色、食品工业、皮革工业、化学制药、电器、玻璃陶瓷、冶金等工业领域 (白佳鑫等, 2017; 毛翔等, 2017)。中国是农业大国, 也是钾盐消费和进口大国, 钾盐的合理开采与利用直接关系国家粮食安全 (郑绵平等, 2015)。长期以来, 中国十分重视钾盐资源的勘探与开发, 钾盐也是最早被列入战略性矿产目录的矿种之一 (白佳鑫等, 2017)。

全球钾盐资源主要分布在北美及欧洲地区, 且多被跨国巨头肥业公司掌控, 其他企业参与开发的难度很大 (唐尧, 2016; 牟思宇等, 2018)。非洲地区成钾条件优越且勘探开发程度较低, 具有较好的找钾潜力。因此, 系统分析非洲钾盐资源的时空分布特征及成矿规律, 对指导中国地勘单位在该地区开展钾盐找矿工作具有重要意义, 也有助于保障中国钾盐资源战略安全, 服务于中国资源“走出去”及“一带一路”倡议。

1 全球钾资源分布特征

1.1 全球钾资源概况

全球钾资源 (以 K_2O 计) 总量超过 37×10^8 t, 主要分布在加拿大、白俄罗斯和俄罗斯, 三者拥有全球近 70% 的钾资源 (USGS, 2021)。此外, 在中国、

德国、以色列、约旦、西班牙、智利、美国、刚果 (布) 等都有钾资源分布 (王春宁等, 2007; 杨卉芃等, 2015; USGS, 2021)。自然界中的钾资源可分为固体钾资源 (包括可溶性的固体钾盐、不可溶性的含钾岩石) 和液体钾资源 (包括地下卤水和第四纪盐湖卤水), 世界主要的钾资源多以固体钾资源为主 (郑绵平等, 2006; 杨卉芃等, 2015)。

中国是全球上钾资源较丰富的国家之一, 钾资源总量约为 3.5×10^8 t, 占全球钾资源储量的 9.5% (表 1), 主要分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊, 少量分布在云南、山东、四川等地区 (郑绵平等, 2006)。从矿床类型看, 中国已探明的钾盐资源以现代盐湖钾盐矿为主, 青海柴达木盆地、新疆等地区的钾盐矿均属此类型, 仅在云南存在少量的固体钾盐矿 (郑绵平等, 2006; 李萌等, 2016)。中国钾资源开采成本高 (以盐湖钾盐为主)、规模有限且品位较低, 而中国作为农业大国钾盐消耗巨大 (乜贞等, 2010; 李萌等, 2016), 因此钾资源一直是中国的紧缺矿种之一。

1.2 全球钾资源时空分布特征

全球钾盐资源分布极不平衡, 主要分布在北纬 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间 (图 1)。从钾盐矿床的时空分布特征看 (图 2), 寒武纪产出的钾盐矿床主要集中在亚洲, 其钾盐资源量占全球钾盐总资源量的 6%; 奥陶纪仅在中国陕北发现少量薄层钾盐矿体, 未发现较大

表 1 2016—2020 年全球钾资源产量及储量
Table 1 Output and reserves of global potash from 2016 to 2020

国家	产量/ 10^4 t					储量/ 10^4 t	储量占比
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年		
加拿大	1080	1200	1380	1380	1400	110000	29.87%
白俄罗斯	618	640	720	700	730	75000	20.37%
俄罗斯	648	720	717	680	760	60000	16.30%
中国	620	620	500	500	500	35000	9.50%
德国	280	290	320	300	300	15000	4.07%
以色列	205	220	220	200	200	—	—
约旦	120	130	148	150	150	—	—
智利	120	120	120	95	90	10000	2.72%
西班牙	67	68	70	60	47	6800	1.85%
其他国家	173	173	127	118	142	56400	15.32%
合计	3930	4200	4330	4100	4300	>370000	100%

注: 数据 (均以 K_2O 计) 据 USGS, 2021

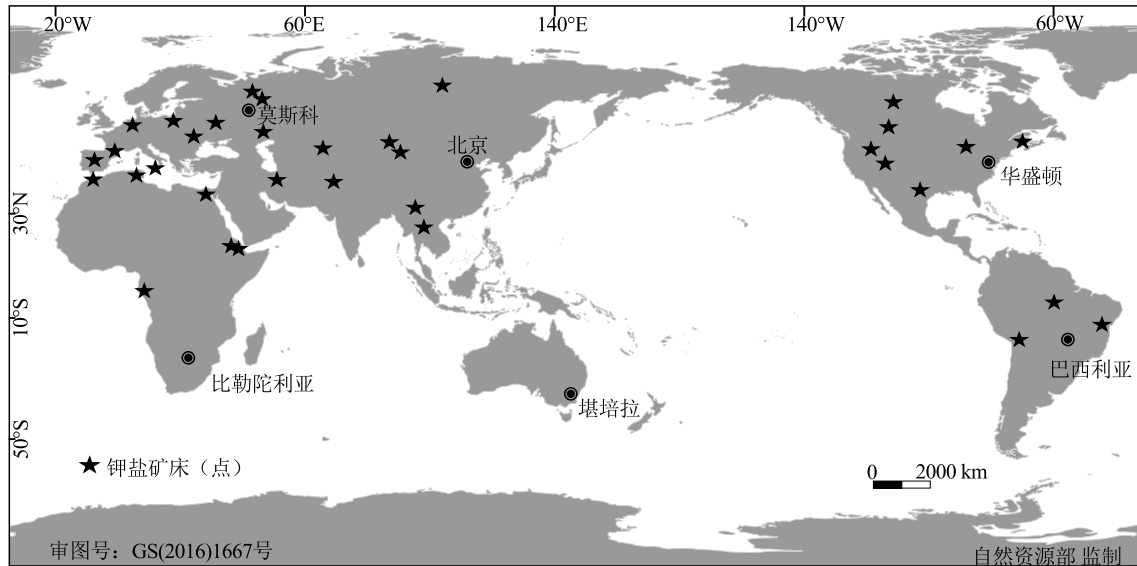


图1 全球主要钾资源分布(据 Zientek et al.,2010;刘成林等,2015 修改)

Fig. 1 Distribution characteristics of potash resources in the world

规模的钾盐矿床;志留纪、泥盆纪和石炭纪钾盐矿床主要分布在北欧和北美洲,其中泥盆纪为全球最重要的钾盐成矿期,占全球钾盐总资源量的60%,志留系和石炭系蕴藏的钾资源量较少;二叠纪钾盐矿床广泛分布于欧洲、南美洲和北美洲,占全球钾盐总资源量的7%;三叠纪钾盐矿床仅出露在地中海沿岸国家,钾资源量相对较少;白垩纪钾盐矿床主要分布在南美洲、非洲和亚洲,占钾盐总资源量

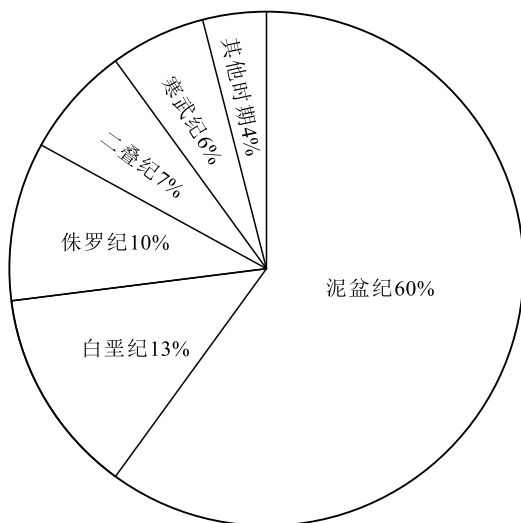


图2 地质历史时期钾资源分布特征(据王春宁等,2007 修改)

Fig. 2 Chart showing percentage of potash resource in geological era

的13%;侏罗纪产出的钾盐矿床只发现于亚洲,占全球钾盐总资源量的10%;新生代钾盐矿床分布较广泛,在北美洲、欧洲、亚洲和非洲均有分布,但规模相对较小,多为液体钾资源(魏东岩,1999;刘成林等,2006;王春宁等,2007)。

1.3 成矿背景

钾盐成矿是地球表生环境中“气候-物源-构造”三要素耦合作用(Warren, 2010; 孙宏伟等, 2014; 2022; 刘成林等, 2015)的结果。极端干旱气候是成钾的前提,钾盐矿床是蒸发岩演化的最终阶段,因此干旱炎热的环境有利于其形成。统计资料显示(袁见齐, 1977; Hite et al., 1979; Schlöder et al., 2008; Warren, 2010),地质历史上各时代的钾盐矿床主要分布于南北纬 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 带内,该区域钾盐矿床所属板块多处于干旱炎热气候带。海水等富钾物质来源和构造凹地是成钾的必要条件。在造山活动初期或造山后,全球构造比较平静的时期与地区容易形成钾盐沉积,在造山事件频繁发生的时期钾盐形成较少(袁见齐, 1977; Warren, 2010; 白仟等, 2014; 孙宏伟, 2014)。

2 非洲钾盐资源时空分布特征

非洲钾资源主要分布在刚果(布)、埃塞俄比亚、厄立特里亚、埃及、摩洛哥等国家(图3),主要成钾时代为三叠纪、白垩纪、新近纪、第四纪(Ruiter,

1979; Warren, 2005; 曹焱等, 2015; 范美玲等, 2016; Zhao et al., 2018)。根据成钾盆地地理位置和成钾时代的不同, 将非洲大陆划分为以下 3 个钾盐成矿区。

西非加蓬-下刚果盆地钾盐成矿区: 从北部的加蓬往南延伸, 穿过刚果(布)进入南部的安哥拉, 该成矿区钾盐资源丰富, 成钾时代为白垩纪, 含钾矿物主要为光卤石, 钾石盐较少, 分布不稳定 (Warren, 2005; 张帆等, 2016; Zhao et al., 2018)。典型矿床有 Mengo 钾盐矿床、Dougou 钾盐矿床、Kola 钾盐矿床等(表 2)。

东非埃塞俄比亚-厄立特里亚达纳基尔 (Danakil) 盆地钾盐成矿区: 跨越埃塞俄比亚和厄立特里亚 2 个国家, 是非洲东海岸主要的钾盐产区, 成钾时代为第四纪, 含钾矿物以光卤石和钾石盐为主 (Holwerda et al., 1968; 张大权等, 2015)。该成矿区钾盐资源较丰富, 具有较大的勘查和开发潜力。

北非赫米赛特 (Hermiset)-苏伊士盆地钾盐成矿区: 摩洛哥赫米赛特盆地位于非洲西北部, 面积约 500 km², 成钾时代为三叠纪, 含钾矿物以光卤石和钾石盐为主 (Garrett, 1996)。埃及苏伊士盆地位于非洲大陆和西奈半岛之间的海湾内, 分布面积约 350 km², 成钾时代为新近纪, 含钾矿物主要为杂卤石、光卤石及少量钾石盐 (Alsharhan, 2003)。

3 非洲主要钾盐矿床特征

3.1 下刚果盆地钾盐矿床

下刚果盆地的钾盐开发最早始于 20 世纪 (1948 年), 在加蓬盆地内的油气勘探中发现了富钾层位, 且该层位一直延伸到下刚果盆地 (Ruiter, 1979)。随后法国矿山勘探公司进一步开展勘探工作, 并于 1969—1977 年开采钾盐用于氯化钾的生产 (MDPA, 1982)。2005 年, Mag Industries 公司开始在 Mengo 地区从事光卤石开发活动。2009 年, 澳大利亚 Elemental 资源有限公司在 Kola 和 Dougou 矿床开展钾资源勘探工作, 并于 2012 年正式投产 (Pedley, 2016)。

加蓬-下刚果盆地钾资源潜力巨大, 尤以下刚果盆地内的 Mengo、Kola 和 Dougou 矿床最著名, 其钾资源量都超过 10×10^8 t (Pedley, 2016), 且具有品位高 (KCl 含量最高达 60%)、伴生组分少 (主要为钾石盐和光卤石)、埋藏较浅 (程鹏等, 2021)、不

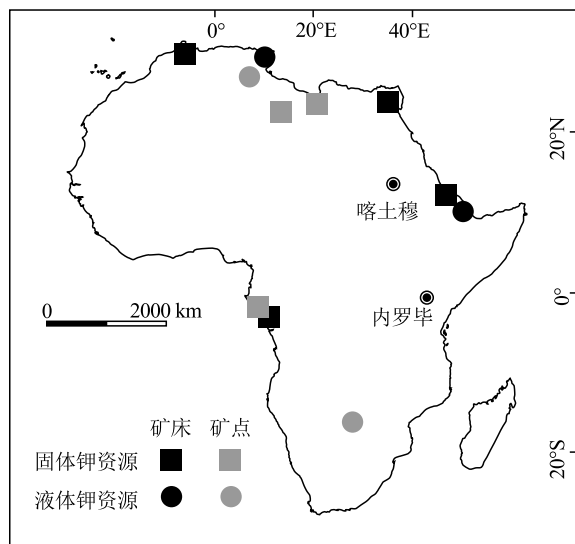


图 3 非洲钾资源分布示意图

Fig. 3 Distribution of potash resources in Africa

溶性物质含量极低等优势。

3.1.1 矿床地质特征

晚侏罗世非洲和南美洲大陆开始分离, 在西非边缘形成了一系列裂谷盆地 (图 4), 自北向南分别为喀麦隆盆地、加蓬盆地、下刚果盆地、宽扎 (Cuanza) 盆地等 (Lehner et al., 1977; Ruiter, 1979; Marton et al., 2000; Harris, 2008; Sun et al., 2021; 孙宏伟等, 2021)。下刚果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 (Ruiter, 1979; Harris, 2008)。盆地内岩浆活动不发育, 仅在东部的马约比山 (Mayombe) 出露脉状辉绿岩, 构造活动主要受裂谷时期的拉张作用影响, 断层多为北西—南东走向, 局部发育次级断陷盆地 (李一赫等, 2020; 程鹏等, 2021)。

盆地底部及边缘由元古宙变质结晶基底构成, 盆地内部由白垩系、新近系和第四系沉积地层组成, 缺失寒武系—侏罗系 (李一赫等, 2020; 程鹏等, 2021) (图 5-a)。据推测盆地内盐层最大厚度可达 1000 m 以上, 钾盐矿赋存于下白垩统阿普特阶 (Aptian) 塞寇尤斯 (Cirques) 盐岩岩系中, 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 (Ruiter, 1979; Séranne et al., 2005; 黄兴等, 2017)。

表 2 非洲主要钾盐矿床分布特征(据 Pedley,2016 修改)

Table 2 Distribution characteristics of main potash deposits in Africa

矿床	国家	所属公司	资源量/10 ⁴ t	储量/10 ⁴ t
Dallol	埃塞俄比亚	Allana 钾盐公司	356300 (KCl 含量 15.9%~18.0%)	9380 (KCl 含量 28.0%~28.8%)
Danakil	埃塞俄比亚	Circum 钾盐公司	493300 (KCl 含量 17.5%~18.8%)	—
Colluli	厄立特里亚	South Boulder 钾盐公司	108000 (KCl 含量 17.9%~18.0%)	—
Mengo	刚果(布)	Mag Industries 公司	209300 (KCl 含量 17.3%~17.6%)	19290 (KCl 含量 17.4%~17.6%)
Kola	刚果(布)	Elemental Minerals 公司	104800 (KCl 含量 32.3%~33.7%)	15170 (KCl 含量 31.7%)
Dougou	刚果(布)	Elemental Minerals 公司	305600 (KCl 含量 20.1%~20.8%)	—

根据区域盐类沉积特征,将全区盐类沉积划分为 4 个沉积旋回,每个旋回的底部均为石盐岩,向上光卤石层逐渐增多,石盐层减少,并有一定的钾石盐出现,水氯镁石及溢晶石的出现则意味着该沉积旋回结束(Ruiter, 1979; Brownfield et al., 2006; 张帆等,2016)(图 5-b)。矿石矿物主要为光卤石、钾石

盐及少量水氯镁石和溢晶石(图 5-b)。脉石矿物为石盐、石膏、泥灰岩等。矿石结构以致密块状为主,少量粒状及纤维状。矿石构造以中厚层状—巨厚层状构造为主,少量中薄层状和条带状构造(范美玲等,2016;颜开等,2021)。

3.1.2 矿床成因

早期研究认为,下刚果盆地的钾盐资源主要赋存于下白垩统阿普特阶地层,成矿时代为 120~110 Ma(Ruiter, 1979; Harris, 2008)。Zhao et al. (2018)通过对盆地内钾盐层中富有机质蒸发岩的 Re-Os 同位素分析,认为其成钾时代为 100~80 Ma,进一步扩展了区内成钾时代的范围。

下刚果盆地的钾盐矿属于非典型海相钾盐矿床,正常状态下海水在蒸发作用下应依次沉积碳酸盐、硫酸盐、石盐、钾盐等,但下刚果盆地内未发现大规模的碳酸盐和硫酸盐析出,而是直接进入后期的石盐及钾石盐沉积阶段(Ruiter, 1979; Séranne, 2005; 张帆等,2016),说明进入盆地的海水,是析出碳酸盐和硫酸盐后的高浓度卤水。区域地质资料显示,西非陆缘盆地(纳米比亚盆地、宽扎盆地、下刚果盆地、加蓬盆地)之间有高地或隆起彼此阻隔(Séranne, 2005; Anka et al., 2013),海水在进入局限环境的迁移过程中经受了沉积分异,导致不同的盆地或次级盆地海水成分均不同。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。南部纳米比亚盆地和宽扎盆地只析出蒸发阶段早期矿物,而北部下刚果盆地直接析出蒸发阶

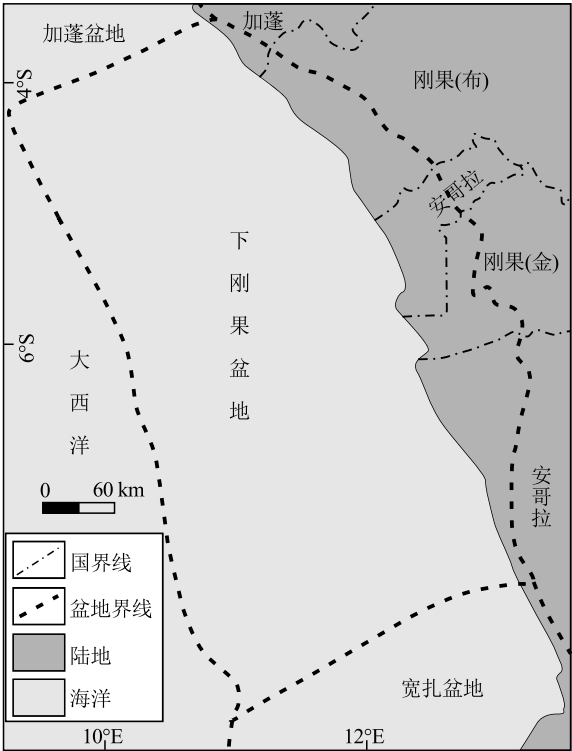


图 4 下刚果盆地位置图(据 Marton et al.,2000 修改)

Fig. 4 Map of location of Lower Congo Basin

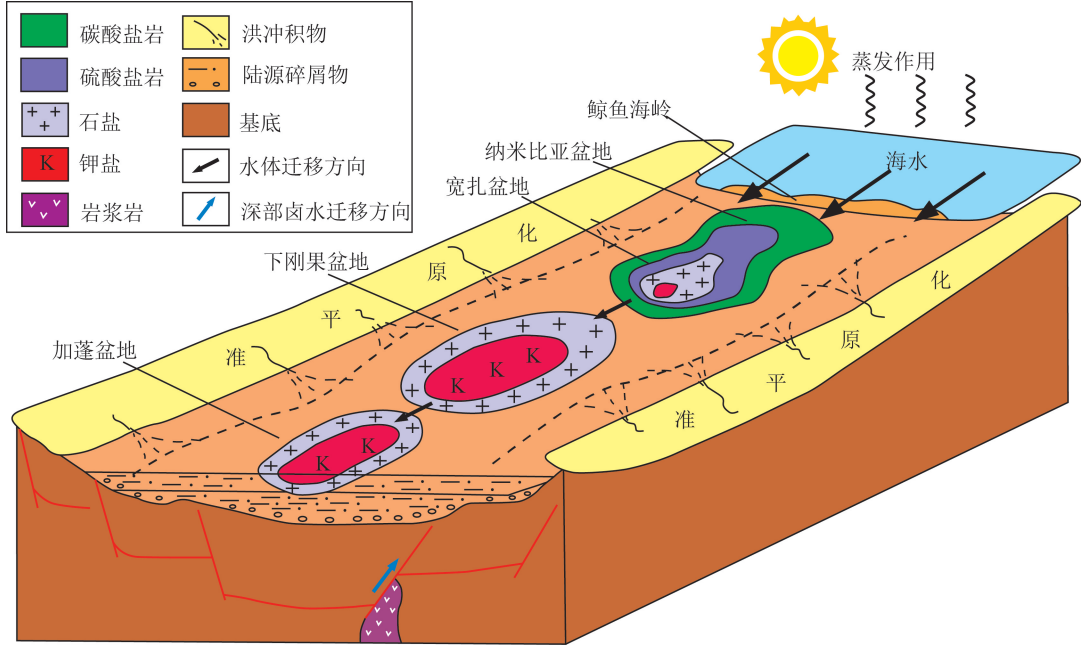


图 6 下刚果盆地钾盐沉积模式图(据刘成林,2013 修改)

Fig. 6 Schematic diagram showing the formation of the Lower Congo Basin potash salts

生产。

3.2.1 矿床地质特征

达纳基尔坳陷呈狭长型,长轴长约 350 km,属于东非大裂谷的东支裂谷带。地表为第四系河流相沉积,含钾层位为新近纪末期—第四纪的休斯顿(Houston)组(Holwerda et al.,1968),组内含多层含钾建造(图 7)。达纳基尔坳陷钾盐资源丰富,成矿条件优越,是世界上典型的海相钾盐矿床之一,其钾盐矿形成与东非大裂谷的形成密切相关。矿石矿物主要为钾石盐和光卤石,脉石矿物为石岩和少量石膏。矿体呈层状产出,其分布受裂谷背景下形成的断陷盆地控制,具有结构复杂、南厚北薄、西浅东深等特征(Bekele et al.,2020)。区内构造主要为北西—南东向断裂及少量褶皱。

3.2.2 矿床成因

达纳基尔地区具有地势低洼、地温梯度高、气候炎热干燥等特征,钾盐的形成与伸展构造体制下的裂谷岩浆作用、海侵和深部卤水循环有关(Wright et al.,2006;Bekele et al.,2020)。新近纪末期及第四纪早期,东非大裂谷进一步扩张,并伴随着一系列的火山热液活动,形成了深部富钾卤水。更新世发生了自北向南的海侵活动,将富钾卤水带至南部盆地沉积中心(坳陷最深处),形成了早期最主要的含

钾层位(图 8)。随后周期性频繁海侵导致多层含(钾)盐系形成。在更新世中后期,火山喷发使盆地封闭,海水被阻隔并开始接受第四系河流相沉积。目前,达纳基尔地区钾矿化的确切年龄尚不确定。

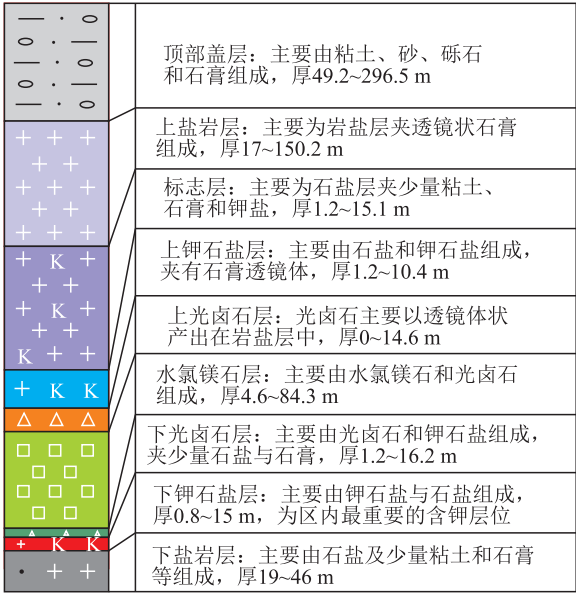


图 7 达纳基尔坳陷含钾岩系层序特征(据 Bekele et al.,2020 修改)

Fig. 7 The generalized stratigraphic section of potash deposit in Danakil Depression

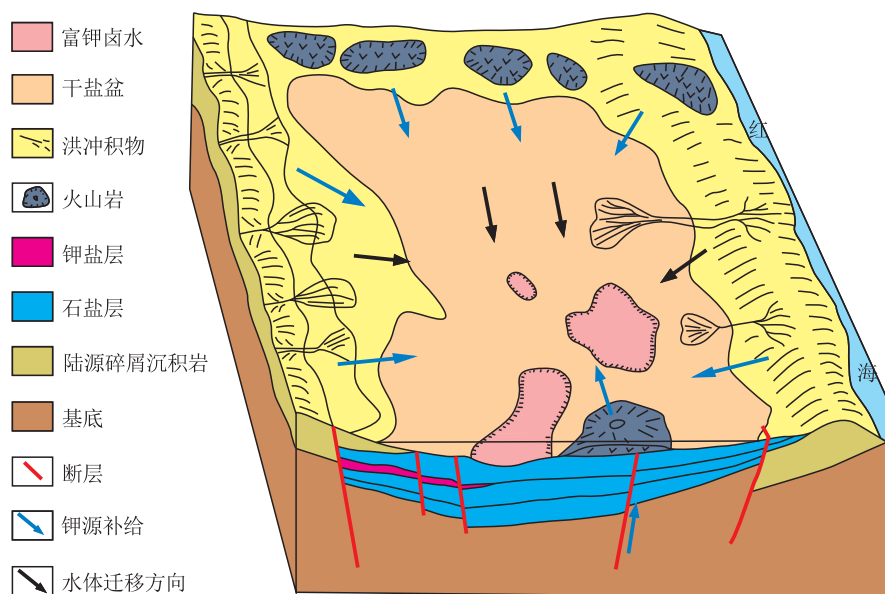


图 8 达纳基尔坳陷钾盐沉积模式图(据 Bekele et al., 2020 修改)

Fig. 8 Schematic diagram showing the formation of potash salts in the Danakil Depression

3.3 博茨瓦纳苏阿干盐湖

马卡迪卡迪 (Makgadikgadi) 盐湖区位于博茨瓦纳东北部(图 9-a), 为一宽阔的内陆盆地, 长 160 km, 宽 48~80 km, 面积约 7500 km², 是世界上最大的盐碱滩之一, 属于卡拉哈里沙漠中的坳陷洼地(单慧媚等, 2013)。该盐湖区由西部的马卡迪卡迪盐湖和东部的苏阿干 (Suagan) 盐湖组成, 其中苏阿干盐湖为马卡迪卡迪盐湖的次级盆地, 呈近南北向长条状展布, 面积约 3000 km², 地势低洼, 是盐湖区卤水的最后汇集部位, 卤水浓缩程度也最高(单慧媚等, 2013; 栾永大等, 2019)。浅井勘探显示(栾永大等, 2019), 苏阿干盐湖卤水矿化度高, 卤水中 KCl 的含量在 0.39%~0.99% 之间, 全区 KCl 平均含量为

0.65%, 已超过最低工业品位, 其富集区位于西北部, 面积约 690 km²。

自白垩纪开始, 非洲大陆内部出现大规模的断裂, 先后形成中西非裂谷和东非裂谷, 是 2 条世界上最大的裂谷带(赵玉海等, 2015; Sun et al., 2021; 许康康等, 2021; 王杰等, 2022)。该时期形成的裂谷带具有典型的大陆裂谷特征, 沿裂谷形成一系列狭长而深陷的峡谷、湖泊和盆地, 边缘为相互平行的阶梯状断层群, 并伴有火山和地震活动。矿区地处东非裂谷系西南扩展部分, 为一大构造断陷。在新近纪和更新世, 该地区断裂及半地堑发育, 在裂谷南部的马卡迪卡迪地区形成了较深的次级断陷盆地, 并就地形成湖泊沉积。盐湖区盆地内次级凹

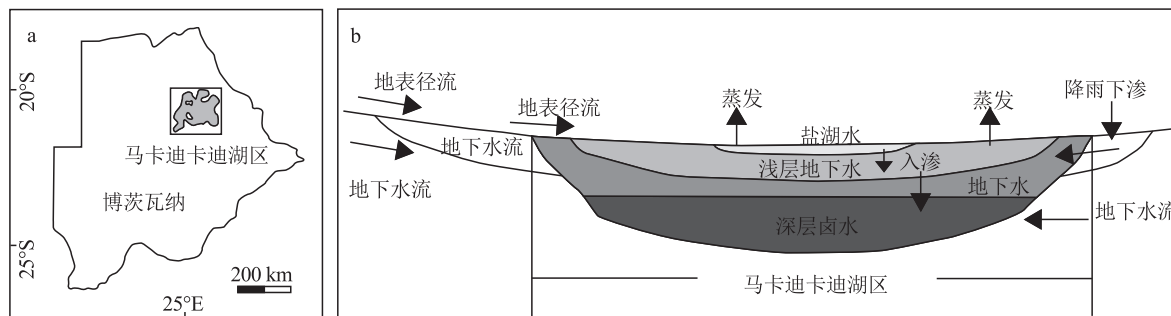


图 9 马卡迪卡迪湖区位置及水文特征(据单慧媚等, 2013 修改)

Fig. 9 Location and hydrological characteristics of Makgadikgadi Lake area

陷发育,形成封闭的构造盆地。这主要是湖区断裂构造的不均匀沉降运动所致,近东西向的低矮隆起带将盐湖区分隔为西侧马卡迪卡迪盐湖和东部苏阿干盐湖。苏阿干盐湖地势最低洼,为盐类的富集提供了有利的构造条件和赋存空间。区域内广泛发育花岗岩、片麻岩等富钾岩类,在长期风化作用及地表水流对岩石的淋滤和溶解作用下,将钾、钠等离子带入水中并最终汇入盐湖,为钾盐矿形成提供了重要的物质来源(图 9-b)。氢、氧同位素分析结果显示,盐湖地下卤水是地表水强烈蒸发及地表水与硅酸盐岩之间水岩作用的结果(单慧媚等,2013)。晚更新世—全新世,矿区气候总体向干旱炎热方向转变,长期处于封闭的蒸发环境,湖水逐渐咸化,最后演化成干盐湖(Ringrose et al.,2005)。地下水 ^{14}C 年龄约为 21459 a,属于第四纪晚更新世(单慧媚等,2013)。

马卡迪卡迪盐湖规模较大,具有较好的成矿条件及矿化显示,东部的苏阿干盐湖浅部卤水中 KCl 含量已达到最低工业品位,由于盐湖区没有深部工程控制,其深部的卤水矿化情况尚不清楚。但根据现代盐湖卤水的一般富集规律,在没有钾盐矿物析出的情况下,在一个蒸发期内,深部卤水 KCl 的含量随着深度的增加具有增高的趋势(徐少康,1996;王新民等,2003)。因此,马卡迪卡迪盐湖的找钾潜力较大。

3.4 吉布提阿萨勒盐湖

阿萨勒(Assal)盐湖位于非洲大陆东北部的吉布提境内(图 10),是世界上含盐度最高的盐湖之一,也是非洲大陆的最低点,海拔高度为-152 m(王磊等,2015;赵玉海等,2015)。盐湖呈不规则椭圆形,面积约 120 km²。盐湖区为新生代盆地,是东非

裂谷背景下的产物,位于阿萨勒活动裂谷带中部(谭志敏,2000),受北西向区域构造影响,盆地边缘近平行的褶皱和断层十分发育。该盐湖目前以开采盐岩资源为主(王磊,2015),还未达到钾盐矿物析出阶段,但其湖表及晶间卤水中 KCl 品位均已超过卤水矿最低工业品位(赵玉海等,2015)。

阿萨勒盐湖区卤水钾盐矿床规模较大,根据赋存状态,可分为湖表卤水矿和晶间卤水矿两部分(王磊,2015)。其中,湖表卤水矿分布于盐湖东南部,晶间卤水矿床分布于盐湖西北部石盐沉积区。湖表卤水中 KCl 含量为 0.80%~0.91%,平均品位为 0.84%。晶间卤水赋存于全新统石盐层中,储卤层呈层状、似层状,分布稳定,产状较平缓,平均厚度为 35.90 m(赵玉海等,2015)。石盐层晶间卤水 KCl 含量为 0.83%~1.60%,平均品位为 1.09%,超过卤水矿最低工业品位。晶间卤水略具水平分异,KCl 含量呈西北部略高而东南部靠近湖表卤水区较低的变化趋势(赵玉海等,2015)。

阿萨勒盐湖区的构造洼地为盐类物质的沉积提供了有利场所,区域内大量富钾泉水和淋滤富钾岩石形成的地表径流为盐湖区钾盐物质的主要来源,盐湖区热带沙漠气候则使湖水不断蒸发浓缩,最终导致富钾卤水的形成。

3.5 其他钾盐矿床

3.5.1 北非钾盐资源

北部非洲钾盐资源主要分布在大型盐湖及萨布哈中。阿尔及利亚、突尼斯、摩洛哥、利比亚等国的一些盐湖中均发现富钾卤水,少数可见薄层状光卤石层(Warren,2005)。突尼斯吉瑞达(Djerid)干盐湖推断 KCl 储量可达 $3000 \times 10^4 \text{ t}$ (Northolt,1983)。摩洛哥赫米赛特钾盐矿床推断储量超过 $3 \times 10^8 \text{ t}$,含钾矿物为光卤石和钾石盐,成钾时代为三叠纪。此外,在摩洛哥都卡拉(Doukkala)盆地蒸发岩地层中,探获 KCl 含量达 9.5%的钾盐层,含钾矿物主要为钾石盐和光卤石,成钾时代为古近纪,资源量不详(Goudarzi,1970)。综合看,北非地区钾盐成因主要为蒸发岩演化到晚期阶段自然富集结晶所致,区域内干旱炎热的气候及构造洼地为成矿提供了有利条件。

3.5.2 苏伊士湾钾盐资源

苏伊士湾位于红海山和西奈地台之间,南部与红海相连,整体上呈北西—南东向长条状展布,长

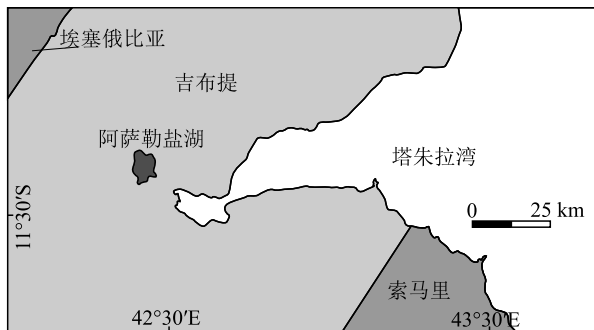


图 10 阿萨勒盐湖位置图(据 Ringrose et al.,2005 修改)

Fig. 10 Location map of Assal salt lake

度约为 320 km, 宽度为 30 ~ 80 km (Alsharhan, 2003)。苏伊士湾基底由前寒武系变质岩组成, 其上为第四系全新统沉积物。其中南加利普 (South Gharib) 组在苏伊士湾地区广泛分布, 厚度可达 2000 m 以上 (Alsharhan, 2003), 岩石类型以蒸发岩为主, 勘探信息显示其内部赋存多种含钾矿物, 主要为杂卤石、光卤石及少量的钾石盐 (田雨等, 2021), 具备一定的成钾资源潜力。

4 找矿远景区

非洲钾盐资源勘查程度较低, 成矿前景优越, 是未来钾资源的有利增长区。非洲固体钾资源的分布主要与早期断陷盆地或裂谷盆地有关, 主要包括西非加蓬-刚果断陷盆地和东非裂谷盆地 2 个资源聚集区。其中, 西非加蓬-刚果盆地钾盐成矿区除已发现的刚果 (布) 钾盐资源外, 仍有很大的勘探潜力。区域沉积地层显示, 南侧的安哥拉、纳米比亚盆地均有碳酸盐岩和硫酸盐岩出现, 而北侧直接接受石盐及钾石盐沉积, 即富钾卤水迁移方向为自南向北, 因此北侧加蓬盆地等次级盆地也具有较大的找钾潜力。东非裂谷盆地已有钾资源主要分布在埃塞俄比亚-厄立特里亚达纳基尔盆地, 勘探资料显示, 盆地内以发育海相沉积地层为主, 且蒸发岩沉积序列发育较完整, 具有典型的盐湖相沉积特征, 坳陷中心盐类沉积最厚, 成钾潜力最大, 因此未来勘探重点应放在断陷盆地的中心位置。

非洲液体钾资源主要集中于干盐湖及断陷洼地, 埃及苏伊士湾周边、北非沙漠区等降水稀少和气候炎热地区为寻找液体钾资源的有利地区。

5 结论

(1) 非洲钾盐资源主要分布在刚果 (布)、埃塞俄比亚、厄立特里亚、埃及、摩洛哥等国家, 成钾时代主要为白垩纪、新近纪、第四纪, 其中白垩纪为全球主要的成钾时代之一。

(2) 非洲地区钾盐资源禀赋好, 成矿地质条件优越, 具备干旱炎热的环境、富钾物质来源 (多期次的海侵事件)、构造凹地 (大西洋裂谷期和东非大裂谷时期在非洲形成了一系列的构造凹地) 等一系列成钾必要条件, 并在西非加蓬-刚果盆地、东非达纳基尔盆地、埃及苏伊士湾盆地、摩洛哥赫米赛特盆地等地区形成了大量钾资源。

(3) 非洲钾资源类型主要包括固体钾资源和液体钾资源 2 种, 前者主要集中在西非加蓬-刚果断陷盆地和东非裂谷盆地, 后者主要分布于北非沙漠区。根据成钾规律综合分析认为, 加蓬-刚果断陷盆地北侧次级盆地、东非达纳基尔盆地中心区及西北非干盐湖区为未来有利的找钾区。

致谢: 在成文过程中, 中国地质调查局天津地质调查中心张航博士提供了支持, 审稿专家提供了宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- Anka Z, Ondrak R, Kowitz A, et al. Identification and numerical modelling of hydrocarbon leakage in the Lower Congo Basin: implications on the genesis of km-wide seafloor mounded structures [J]. *Tectonophysics*, 2013, 604: 153-171.
- Alsharhan A S. Petroleum geology and potential hydrocarbon plays in the Gulf of Suez rift basin, Egypt [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(1): 143-180.
- Brownfield M E, Charpentier R R. Geology and total petroleum systems of the West-Central Coastal province (7203), West Africa [J]. *World Energy Project*, 2006, 2207B: 52.
- Bekele A, Schmerold R. Characterization of brines and evaporite deposits for their lithium contents in the northern part of the Danakil Depression and in some selected areas of the Main Ethiopian Rift lakes [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 170: 1-17.
- Evans R. Origin and significance of evaporites in basins around the Atlantic margin [J]. *AAPG Bulletin*, 1977, 61(2): 223-234.
- 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.
- Goudarzi G H. Geology and mineral resources of Libya—a reconnaissance [R]. *USGS Professional Paper*, 1970, 660: 104.
- Garrett D E. Potash: Deposits, processing, properties and uses [M]. Chapman and Hall, 1996: 153-201.
- Hite R J, Japakeset T. Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos [J]. *Economic Geology*, 1979, 74: 448-458.
- Holwerda U G, Hutchinson R W. Potash-bearing evaporites in the Danakil region, Ethiopia [J]. *Economic Geology*, 1968, 63(2): 124-150.
- Harris N B. Evolution of the Congo rift basin, West Africa: An inorganic geochemical record in lacustrine shales [J]. *Basin Research*, 2008, 12(3/4): 425-445.
- Lehner P, Ruiter P A C D. Structural history of the Atlantic margin of Africa [J]. *AAPG Bulletin*, 1977, 61(7): 961-981.
- MDPA. Mines despotasse d'alsace company communications [R]. Unpublished Company Report, 1982.
- Marton L G, Tari G C, Lehmann C T. Evolution of the Angolan passive margin, West Africa, with emphasis on postsalt structural styles [M]. Washington D C: American Geophysical Union, 2000: 129-149.
- Northolt A J G. Potash in developing countries [C] // McKercher R M.

- Potash 83 - potash technology - mining, processing, maintenance, transportation, occupational health and safety, environment: Toronto, Canada, Pergamon Press, 1983: 29-40.
- Pedley A. Potash deposits in Africa [C] // Wilson M G C. Special Issue for the 35 IGC, Cape Town, South Africa, 2016: 447-457.
- Rawashdeh R, Maxwell P. Analysing the World Potash Industry [J]. Resources Policy, 2014, 41: 143-151.
- Ruiter P A C D. The Gabon and Congo basins salt deposits [J]. Economic Geology, 1979, 74: 419-431.
- Ringrose S, Huntsman M P, Kampunzu A B, et al. Sedimentological and geochemical evidence for palaeo - environmental change in the Makgadikgadi subbasin, in relation to the MOZ rift depression, Botswana [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 217(3/4): 265-287.
- Séranne M, Anka Z. South Atlantic continental margins of Africa: a comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial west Africa and SW Africa margins [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43(1/2/3): 283-300.
- Schlöder Z, János L, Urai S, et al. Solution - precipitation creep and fluid flow in halite: a case study of Zechstein (Z1) rock salt from Neuhof salt mine (Germany) [J]. International Journal of Earth Sciences, 2008, 97: 1045-1056.
- Sun H W, Ren J P, Wang J, et al. Age and geochemistry of the granitoids from the Lunte area, Northeastern Zambia: implications for magmatism of the Columbia supercontinent [J]. China Geology, 2021, 4 (4): 658-672.
- Scotese C R, Boucot A J, Mckerrow W S. Gondwanan paleogeography and paleoclimatology [J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 128 (1): 99-114.
- USGS. Mineral Commodity Summaries 2021 [EB/OL]. [2021-02-01]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>.
- Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. Earth Science Reviews, 2010, 98(3/4): 217-268.
- Warren J K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons [M]. Springer, 2005.
- Wright T J, Ebinger C, Biggs J, et al. Magma-maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking Episode [J]. Nature, 2006, 442: 291-294.
- Zhao X F, Wang Z Q, Liu C L, 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.
- Zientek M L, Hammarstrom J M, Johnson K M. Potash—A global overview of evaporite - related potash resources, including spatial databases of deposits, occurrences, and permissive tracts [R]. Scientific Investigations Report 2010-5090-S, U.S. Department of the Interior, USGS, 2010.
- 白仟, 张寿庭, 袁俊宏, 等. 钾盐矿物与矿床 [J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(7): 20-26.
- 白佳鑫, 余延双. 全球钾矿资源的生产勘探与开发分析 [J]. 中国矿业, 2017, 26(s1): 1-4.
- 程鹏, 李江海, 刘志强. 下刚果盆地中段挤压带盐底辟构造形成演化分析——基于物理及离散元模拟 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 470-480.
- 曹烨, 郑厚义, 要梅娟, 等. 世界钾盐资源成矿区带划分初步研究 [J]. 矿产勘查, 2015, 6(6): 775-780.
- 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.
- 黄兴, 杨香华, 朱红涛, 等. 下刚果盆地 Madingo 组海相烃源岩岩相特征和沉积模式 [J]. 石油学报, 2017, 38(10): 74-88.
- 李萌, 刘正阳, 王建平, 等. 我国钾盐资源现状分析及可持续发展建议 [J]. 中国矿业, 2016, 25(9): 1-7.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 等. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策 [J]. 化工矿产地质, 2006, 28(1): 1-8.
- 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.
- 刘成林, 赵艳军, 方小敏, 等. 板块构造对海相钾盐矿床分布与成矿模式控制 [J]. 地质学报, 2015, 89(11): 1893-1907.
- 李一赫, 王殿举, 于法浩, 等. 下刚果盆地白垩系盐构造的形成演化 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1628-1638.
- 栾永大, 李博昀, 谭登华, 等. 博茨瓦纳马卡迪卡迪盐湖卤水特征及找钾前景分析 [J]. 化工矿产地质, 2019, 41(2): 8.
- 毛翔, 李江海, 刘金侠. 全球钾盐资源分布规律及其构造成因 [J]. 高校地质学报, 2017, 23(1): 63-71.
- 牟思宇, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国钾盐供应安全的主成分——灰色关联分析 [J]. 中国矿业, 2018, 27(3): 27-31.
- 乜贞, 卜令忠, 刘建华, 等. 我国盐湖钾盐资源现状及提钾工艺技术的发展 [J]. 地球学报, 2010, 31(6): 869-874.
- 孙宏伟, 曹养同, 张华. 蒸发岩盆地杂卤石成因及找钾意义 [J]. 化工矿产地质, 2014, 36(1): 113-123.
- 孙宏伟. 新疆莎车盆地上白垩统一古近系蒸发岩沉积特征及其找钾指示意义 [D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 班韦乌卢地块中部变质表壳岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素研究及其构造意义 [J]. 地质学报, 2021, 95 (4): 1245-1259.
- 孙宏伟, 任军平, 王杰, 等. 南部非洲锰矿成矿规律与资源潜力 [J]. 地质通报, 2022, 41(1): 60-71.
- 单慧娟, 马腾, 谭婷, 等. 博茨瓦纳 Sua 盐湖地下卤水来源及成因 [J]. 地球科学, 2013, 3: 607-615.
- 谭志敏. 吉布提共和国地质及地下水资源浅析 [J]. 河北地质矿产信息, 2000, 2: 5.
- 田雨, 瞿建华, 何巍, 等. 苏伊士湾中新统蒸发岩储层特征及有利区预测 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(4): 72-78.
- 唐尧. 中国钾盐资源需求预测及发展远景分析 [J]. 盐湖研究, 2016, 24 (1): 66-72.
- 王杰, 刘晓阳, 任军平, 等. 坦桑尼亚前寒武纪成矿作用 [J]. 华北地质, 2022, 45(1): 101-110.
- 王新民, 袁崇清, 陈建中. 罗北凹地钾盐矿区潜卤水组分分布及动态特征 [J]. 西部探矿工程, 2003, 15(11): 37-40.

- 王磊,张旭.吉布提阿萨勒盐湖形成条件分析[J].化工矿产地质,2015,37(3):157-162.
- 王春宁,余俊清,陈良,等.钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J].盐湖研究,2007,9(3):56-72.
- 魏东岩.试论钾盐矿床的成矿条件[J].化工矿产地质,1999,21(1):1-6.
- 许康康,孙凯,何胜飞,等.赞比亚西北省 Solwezi 地区石榴云母片岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].华北地质,2021,44(3):1-3.
- 徐少康.现代盐湖晶间卤水分异成因的新观点阶段性淡化说——以中国查尔汗为例[J].化工矿产地质,1996,18(2):113-123.
- 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.
- 杨卉芑,曹飞.世界钾资源研究系列之一——资源概况及供需分析[J].矿产保护与利用,2015,1:75-78.
- 袁见齐.钾肥与钾盐矿床[M].北京:石油化学工业出版社,1977:45-47.
- 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.
- 郑绵平,张震,侯献华,等.中国钾资源远景与矿业发展战略[J].国土资源情报,2015,10:3-9.
- 赵玉海,商朋强,李博昀,等.吉布提阿萨勒(ASSAL)盐湖的卤水钾盐矿床赋存特征[J].化工矿产地质,2015,37(3):163-167.
- 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.
- 张大权,曹洁,王利,等.东非达纳基尔坳陷区钾盐矿开发潜力分析[J].国土资源情报,2015,10:35-39.