

doi: 10.12029/gc20230516001

陈振红, 陈建立, 王九一, 陈英男, 王春连, 杨飞. 2023. 世界天然碱矿床资源分布、成矿因素及找矿远景[J]. 中国地质, 50(5): 1399–1413.  
Chen Zhenhong, Chen Jianli, Wang Jiuyi, Chen Yingnan, Wang Chunlian, Yang Fei. 2023. Distribution and genesis of global Na-carbonate deposits and its prospecting potential[J]. Geology in China, 50(5): 1399–1413(in Chinese with English abstract).

## 世界天然碱矿床资源分布、成矿因素及找矿远景

陈振红<sup>1,2</sup>, 陈建立<sup>3</sup>, 王九一<sup>2</sup>, 陈英男<sup>4</sup>, 王春连<sup>2</sup>, 杨飞<sup>1</sup>

(1. 长江大学油气资源与勘查技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 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; 3. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 河南 郑州 450000; 4. 桂林理工大学地球科学院, 广西 桂林 541006)

**摘要:**【研究目的】天然碱矿主要用于制纯碱, 和合成碱相比, 具有绿色环保、成本低的优势。其下游产业遍布各个领域, 如玻璃、医药等。光伏等新能源产业的蓬勃发展给纯碱带来了新需求。中国是纯碱消费大国, 天然碱或成为稀缺资源。天然碱矿是一种蒸发岩矿床, 成矿过程具有重要的研究意义, 国内蒸发岩矿床研究领域对天然碱矿的关注较少。理清世界天然碱矿产资源类型、分布特征, 总结碱矿成因对深化中国天然碱矿成矿规律研究、预测找矿远景、寻找天然碱矿床具有积极意义。【研究方法】搜集已公开发表或出版的天然碱矿床资料, 对世界典型矿床区域概况、物源、成因等内容进行系统总结。【研究结果】绝大部分天然碱矿床分布于北美洲、亚洲和非洲, 主要形成于新生代。类型以现代天然碱矿床居多, 古代天然碱矿床较少, 但资源规模大。古代天然碱矿以美国绿河组、河南泌阳凹陷安棚天然碱矿最为典型, 现代天然碱矿以肯尼亚马加迪湖和内蒙古查干诺尔泡碱矿床为典型。【结论】天然碱矿需要在封闭的构造环境、干旱的气候条件、充足的碳酸钠型卤水补给等成矿因素耦合条件成矿。与其他蒸发岩不同的是, 维持碳酸钠型卤水所需的 CO<sub>2</sub> 来源具有复杂性。中国天然碱矿找矿远景应聚焦内蒙古第四纪盐湖、白垩纪封闭凹陷, 以及河南始新世白云岩、油页岩发育的封闭盆地等地。积极开展天然碱矿成矿理论研究和找矿工作具有重要意义。

**关键词:**天然碱矿床; 碳酸钠型卤水; 干旱气候; 成矿因素; 矿产勘查工程; 找矿远景

**创 新 点:** (1) 系统综述了天然碱矿资源特征、成因要素; (2) 根据天然碱矿资源分布特征和成因要素, 预测了找矿远景。

中图分类号: P612

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2023)05-1399-15

## Distribution and genesis of global Na-carbonate deposits and its prospecting potential

CHEN Zhenhong<sup>1,2</sup>, CHEN Jianli<sup>3</sup>, WANG Jiuyi<sup>2</sup>, CHEN Yingnan<sup>4</sup>, WANG Chunlian<sup>2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan

收稿日期: 2023-05-16; 改回日期: 2023-07-25

基金项目: 河南省地勘基金项目(豫国发[2014]3号、豫国土资发[2012]80号)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005、KK2110)与中国地质调查局项目(DD20190606)联合资助。

作者简介: 陈振红, 女, 2000年生, 硕士生, 从事矿产普查与勘探; E-mail: 2562578635@qq.com。

通讯作者: 王九一, 男, 1983年生, 博士, 副研究员, 主要从事非金属矿床成矿规律研究; E-mail: wjyhlx@163.com。

430100, Hubei, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No.1 Institute of Geological Exploration, Henan Provincial Bureau of Geo-Exploration and Mineral Development, Zhengzhou 450000, Henan, China; 4. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** Natural soda-ash deposits, also called sodium carbonate evaporites, are mainly used to produce soda ash. In the soda industry, compared with synthetic soda, this process has advantages for environmental protection and lower cost. The downstream industries contain various fields, including glass, medicine, and so on. The booming of new energy industries such as photovoltaic has brought new demand for soda ash. China consumes loads of soda ash annually; thus, soda may become a scarce resource in the future. Mineralization process of natural soda-ash evaporites is of great significance in evaporite community. In China however, soda-ash deposits have received little attention and have great research potential. Investigations on types and distribution characteristics of global soda-ash deposits and their genesis are helpful and useful for deepening research and prospecting of Na-carbonate deposits in China. **[Methods]** Compiling published data and systematically summarizing the regional setting, provenance, genesis of typical soda-ash deposits. **[Results]** Most deposits are Cenozoic in age and located in North America, Asia and Africa. Modern soda-ash deposits predominate in number, but resources size of ancient deposits is tremendous. Specific ancient deposits include the Green River Formation, United States and the Anpeng soda deposit in Biyang Depression in Henan, the counterparts, typical modern alkaline lake deposits formed in Lake Magadi, Kenya and Chaganor, Inner Mongolia. **[Conclusions]** The requirement for Na-carbonate deposits precipitation are (1) hydrologically-closed basins, (2) arid climate, and (3) sufficient sodium carbonate supply. Unlike other evaporites, the sources of CO<sub>2</sub> required to maintain Na-carbonate brines are complicated. Efforts for prospecting in China should focus on Quaternary saline lakes, Cretaceous restrict basins in Inner Mongolia, and tectonically-closed depression in which dolomite and oil shale develops in Henan. It is of great significance to carry out the metallogenic theory research and mine prospecting.

**Key words:** soda-ash deposits; Na-carbonate brine; arid climate; genesis factors; mineral exploration engineering; resource prospecting

**Highlights:** (1) This paper systematically summarizes the resource characteristics and genesis factors of global soda-ash deposits. (2) Prospecting targets in China are proposed based on resource characteristics, and genesis factors.

**About the first author:** CHEN Zhenhong, female, born in 2000, master candidate, engaged in mineral resource prospecting and exploration; E-mail: 2562578635@qq.com.

**About the corresponding author:** WANG Jiuyi, male, born in 1983, doctor, associate professor, engaged in mineralization of nonmetallic deposit; E-mail: wjyhlx@163.com.

**Fund support:** Supported by the projects of Henan Geological Exploration Foundation (No.[2012]80, No.[2014]3), CAGS Funds (No.KK2005, No.KK2110) and China Geological Survey (No.DD20190606).

## 1 引 言

天然碱矿是一种陆相蒸发岩矿床,主要由含Na<sup>+</sup>的碳酸盐矿物组成。常见的天然碱矿物包括天然碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·NaHCO<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O,又称晶碱石)、苏打石(NaHCO<sub>3</sub>)、钙水碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·CaCO<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O)、芒硝碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·2Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、水碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)、泡碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·10H<sub>2</sub>O)等。天然碱是制碱工业的重要原料,用于制纯碱,有“化工之母”之称(王爱云和陈文西, 2022)。对比合成法制碱,天然碱法制碱无论在成本、低碳环保或纯碱质量上都具有很大优势。一

些天然碱资源储量大的国家,如美国已抛弃了合成法制碱,而完全采用了天然碱法制碱。近年来,随着玻璃、光伏等行业的发展,纯碱的需求量也随之迅猛增长,大大增强了对天然碱矿资源的重视程度。

作为一种重要的蒸发岩矿床,天然碱矿具有重要的研究意义。国外学者针对世界主要的天然碱矿床从许多领域开展了深入研究,涉及古气候(Zachos et al., 2008; Hyland and Sheldon, 2013; Smith et al., 2014; Jagniecki et al., 2015; Lowenstein et al., 2017)、年代学(Lowenstein et al., 2016)、水文地质学(Jagniecki et al., 2021)、地球化学

(Brownfield et al., 2009<sup>①</sup>)、沉积学(Jagniecki et al., 2015; Warren, 2016)等多个方面。此外,还发现一些天然碱矿物可以用来表征大气CO<sub>2</sub>分压,因而对示踪地质历史时期大气CO<sub>2</sub>浓度具有重要的价值(Demicco et al., 2003; Lowenstein and Demicco, 2006, 2019; Olson and Lowenstein, 2021)。

中国是天然碱资源较为丰富的国家,矿床分布广、类型多样,且资源量较为可观,具有广阔的开发利用前景。虽然中国学者开展天然碱矿床成矿规律的研究较早(叶铁林, 1978; 张晨鼎, 1979),但相较于钾盐、石盐、石膏、芒硝等蒸发岩矿床,依然薄弱,也缺乏综述性的研究。本文依据公开发表和报道的世界天然碱矿已有研究成果,以综述性研究的形式总结论述天然碱矿的资源分布特征、成矿因素、典型矿床实例以及找矿远景,以期对中国天然碱矿床的成矿理论研究和找矿勘查提供一定的地质理论基础。

## 2 天然碱矿床资源特征

### 2.1 矿床分布

全球天然碱资源分布广泛,但主要分布在北美洲、亚洲、非洲等地区(图1)。2022年世界天然碱总储量为250亿t(表1; USGS, 2023)。其中美国储量

占九成以上、开发程度最高,其次是土耳其、博茨瓦纳等国家。中国天然碱总储量为2543.26万t(全国矿产资源储量统计表, 2021<sup>②</sup>), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>产量世界第一,但基本都是“合成的”。

全球天然碱矿床大多形成于新生代,近年来在中国发现内蒙古塔木素天然碱矿床赋存于白垩系中,准噶尔盆地玛湖凹陷天然碱矿赋存于下二叠统风城组,属于新生代之前的天然碱矿床。

### 2.2 矿床类型

天然碱矿床类型有许多划分方案,既可以按照赋存状态分为固体矿床、液体矿床以及固液并存矿床,也可以按照天然碱矿物化学成分分为纯碳酸钠型、碱-硝-盐型、碱-硝-盐-硼-钾多组分型等,还可以按照成矿时代分为古代天然碱矿、现代天然碱矿(叶铁林, 2013)。古代天然碱矿是指第四纪之前沉积的矿床,大多已经埋藏;现代天然碱矿是第四纪更新世以来形成的,多数地表仍保留卤水。在矿床数量和规模上,现代天然碱矿较多但资源规模较小,如中国内蒙古、非洲大裂谷地区分布有许多小型现代天然碱矿(张晨鼎, 2013; 叶铁林, 2013);古代天然碱矿数量相对少但资源规模巨大,如美国绿河盆地、中国泌阳凹陷安棚、土耳其贝帕扎里、卡赞等地的天然碱矿。



图1 世界主要天然碱矿分布图(据 Warren, 2010)

Fig.1 Distribution of major soda-ash deposit in the world (after Warren, 2010)

表1 纯碱矿物产量及碳酸钠储量(据 USGS, 2023)  
Table 1 Soda-ash mine production and reserves (after USGS, 2023)

国家	纯碱矿物产量/万t		储量/万t*
	2021年	2022年	
美国	1130	1100	2.3×10 <sup>6</sup>
博茨瓦纳	26.2	26	40000
埃塞俄比亚	1.8	2	40000
肯尼亚	25	25	700
土耳其	420	440	88000
其他国家			28000
世界(天然碱法)总量	1600	1600	2.5×10 <sup>6</sup>
世界(合成的)总量	4010	4200	
中国		2700	

注:\*来自天然碱、苏打石、碳钠铝石矿床。

为便于梳理,本文采用成矿时代划分方案,将矿床分为古代天然碱矿和现代天然碱矿两类,并综合考虑矿床规模、研究程度、成矿因素等方面的特征,列举了典型矿床(表2)。其中,典型古代天然碱矿列举了美国绿河盆地天然碱矿、河南安棚苏打石矿床、土耳其贝帕扎里天然碱矿;典型现代天然碱矿有内蒙古查干诺尔天然碱矿、肯尼亚马加迪湖天然碱矿。

### 3 天然碱矿成矿要素

蒸发岩矿床的形成一般需要封闭的构造环境、干旱的气候条件、充足的成盐物源三者耦合才可以成矿(Warren, 2016)。天然碱矿属于蒸发岩矿床,其成矿过程自然也离不开这3种成矿要素的耦合。

#### 3.1 构造条件

构造运动形成水文封闭的沉积环境是碱湖沉积的必要条件之一,只有封闭的水文条件才能确保碱湖在不断蒸发浓缩过程中,随着盐度逐渐升高而持续结晶析出天然碱矿物,最终形成天然碱矿床。

如泌阳凹陷是受到NW和NNE两组主控断裂形成的闭流盆地、封闭性较好,有利于安棚碱矿的沉积(陈建立, 2013);美国绿河盆地天然碱矿是处于四周都是山脉的封闭盆地(Dickinson et al., 1988; Cumming et al., 2014);查干诺尔天然碱矿床位于二道井—西拉木伦大断裂控制的二道井新断陷盆地,该盆地被褶皱山系和复背斜隆起包围,四周高、中间低,有利于湖水汇集储存(齐兵德等, 2011; 张晨鼎, 2013; Warren, 2016; 张天福等, 2020);贝帕扎里盆地大致呈东西向延伸,南北受生长断层的限制(Helvaci, 2010),褶皱、断层发育。天然碱矿床由北部的卡基鲁巴褶皱和南部的北东—南西向扎维耶断层所围限(Inci, 1991; 张晨鼎, 2013);马加迪湖处于东非裂谷东支,西侧是恩德卢曼边界断层,陡坡高达2500 m。东部是阶梯状断块和出露的上新世、更新世的火山岩。受构造影响而处于水文封闭状态(Eugster, 1969; McNulty, 2017)。

#### 3.2 古气候条件

在干旱气候以及强蒸发速率的条件下,封闭湖盆水体浓缩、碱度升高,易于碱性矿物沉淀析出。因此,气候和温度也是碱湖沉积的必要条件之一。

表2 世界典型天然碱矿床(据张晨鼎, 2013; 叶铁林, 2013; Warren, 2016)

Table 2 Typical Na-carbonate deposits in the world (after Zhang Chending, 2013; Ye Tielin, 2013; Warren, 2016)

类型	矿床名称	矿床位置及矿层位	时代、埋深	主要矿物(钠碳酸盐)	围岩
古代天然碱矿床	美国绿河盆地天然碱矿	大绿河盆地绿河组	始新世 51.3~49.6 Ma 120~1070 m	天然碱、碳钠钙石,少量苏打石	泥岩、粉砂岩、油页岩
		皮桑斯河盆地绿河组	始新世 51.3~49.7 Ma 120~1050 m	石盐、苏打石、片钠铝石	白云质油页岩、砂岩层、蒸发岩
	河南泌阳凹陷安棚天然碱矿	尤因塔盆地绿河组	始新世 48~46.5 Ma 730~1380 m	石盐、天然碱	盐岩、火山碎屑岩
		核桃园组核二、三段(Eh <sub>2</sub> 、Eh <sub>3</sub> )	始新世 1288~2408 m	苏打石、天然碱、芒硝、石膏	砂岩、油页岩、白云岩
	土耳其贝帕扎里盆地天然碱矿	河卡组	中新世 21.5 Ma 250~420 m	天然碱、石盐、苏打石	白云质泥岩、钙水碱质油页岩
现代天然碱矿床	内蒙古查干诺尔天然碱矿床	含碱干盐湖,地表下20 m有碱矿层及卤水	全新世至今 0~20 m	芒硝、泡碱、天然碱	黑色淤泥
	肯尼亚马加迪湖天然碱矿床	非洲东部大裂谷中的盆地	第四纪	天然碱、碳钠矾、麦羟硅钠石,少量石盐	玄武岩、粗面岩



古近系始新统绿河组天然碱矿沉积于始新世早期气候适宜期 (EECO) (Zachos et al., 2008; Hyland and Sheldon, 2013; Smith et al., 2014; Lowenstein et al., 2017); 泌阳凹陷始新统核桃园组碱湖沉积层段体现了周期性湿润与干旱气候交替变化的规律; 内蒙古现代碱湖, 如查干诺尔碱湖, 由于受到冷干-暖湿气候交替控制, 导致湖水水位及盐度发生波动, 从而形成盐碱层-碎屑层的互层沉积 (张晨鼎, 2013); 马加迪湖区年蒸发量 3500 mm, 降水量约 500 mm (Ogola and Behr, 2000), 湿润时期汇入盆地的含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  的地表径流和热泉在干旱时期的强蒸发条件下浓缩析出天然碱结晶 (McNulty, 2017)。

### 3.3 物源

除了构造和气候条件之外, 充足的物源补给也是蒸发岩矿床形成的必要因素。Hardie and Eugster (1970) 提出了不饱和水体的蒸发浓缩演化路径 (图 2)。天然碱矿床易于形成在  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量远小于  $\text{HCO}_3^-$  含量的水体中 (图 2 中的路径 ①)。在这类水体中, 随着蒸发浓缩的进行,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  在方解石、文石、白云石等矿物析出阶段即耗尽, 水体演化为

$\text{Na}-\text{CO}_3-\text{SO}_4-\text{Cl}$  型卤水, 叠加硫酸盐细菌还原作用消耗掉多余的  $\text{SO}_4^{2-}$  后, 湖水演化到  $\text{Na}-\text{CO}_3-\text{Cl}$  型卤水, 从而蒸发结晶沉积天然碱矿床。

由此可见, 形成天然碱矿需要高浓度的  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  或  $\text{CO}_3^{2-}$ 。一般认为,  $\text{Na}^+$  由封闭盆地周边富钠岩石经过物理侵蚀、化学风化作用产生, 然后通过地表或地下水汇入湖中 (Bradley and Eugster, 1969<sup>②</sup>; Eugster and Hardie, 1975; Eugster et al., 1977; Renaut and Ashley, 2002; McNulty, 2017)。

与其他蒸发岩矿床 (许虹等, 2004; 徐洋等, 2021; 王九一等, 2021; Xu et al., 2021; 颜开等, 2021; 钟逸斯, 2022) 不同的是, 天然碱矿床的形成要求水体中富含大量的  $\text{HCO}_3^-$  或  $\text{CO}_3^{2-}$ , 而维持高浓度的  $\text{HCO}_3^-$  或  $\text{CO}_3^{2-}$  则需要丰富的  $\text{CO}_2$  补给 (Jagniecki et al., 2015; Lowenstein et al., 2017)。现有研究表明, 苏打石-泡碱-天然碱三种矿物的相平衡受  $\text{CO}_2$  浓度和温度控制 (图 3)。天然碱矿物形成于较高的温度下, 泡碱形成于低温环境下, 而苏打石析出则需要较高的  $\text{CO}_2$  浓度 (Lowenstein and Demicco, 2006; Jagniecki et al., 2015)。不过, 目前的研究对  $\text{CO}_2$  的来源存在多种观点。

(1) 大气  $\text{CO}_2$  供给。如始新统绿河组皮桑斯河苏打石天然碱矿床的成矿时代得到了同位素精确定年限定 (Smith et al., 2014), 契合了早始新世气候适宜期, 该时期大气  $\text{CO}_2$  浓度高 (Zachos et al., 2008; Hyland and Sheldon, 2013), 而苏打石结晶需要较高的  $\text{CO}_2$  浓度。因此, 学界主流观点认为, 皮桑斯河苏打石天然碱矿的形成受到早始新世全球高浓度大气  $\text{CO}_2$  的控制。土耳其贝帕扎里盆地的中新世碱矿 (Garcia-Veigas et al., 2013) 以及内蒙古碱湖、美国西尔斯湖等大部分现代碱矿以天然碱、泡碱为主要矿物, 也表明中新世后  $\text{CO}_2$  浓度下降, 不足以形成苏打石沉淀 (Lowenstein et al., 2016)。

(2) 岩浆深源  $\text{CO}_2$  供给。Earman et al. (2005) 经过论证“圣贝纳迪诺盆地在与相邻盆地地理位置、年龄、物源、温度一致的条件下, 为什么只有圣贝纳迪诺盆地形成天然碱”表明来自下地壳、上地幔岩浆的深源  $\text{CO}_2$  才是天然碱形成的必备条件。地下岩浆释放的  $\text{CO}_2$  可通过断层系统排出地表, 例如马加迪湖区 (Lee et al., 2016)。

(3) 有机质分解和生物活动形成的  $\text{CO}_2$  供给。

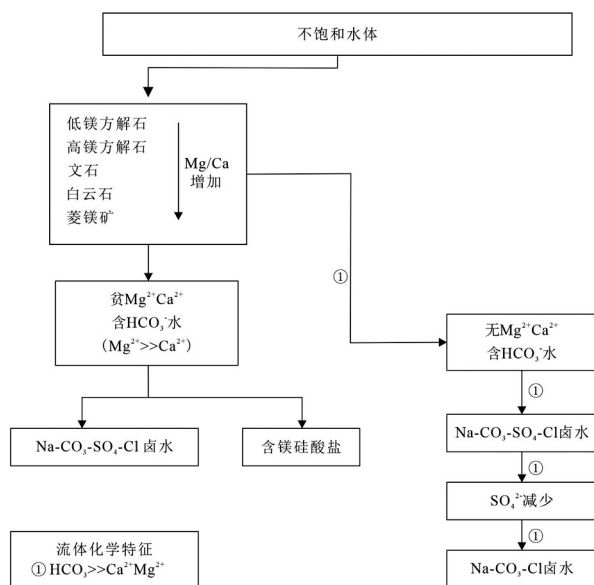


图2 形成天然碱矿的不饱和卤水演化路径 (改自 Hardie and Eugster, 1970)

Fig.2 Brine evolution pathways with different brine types for Na-carbonate evaporites formation (modified from Hardie and Eugster, 1970)

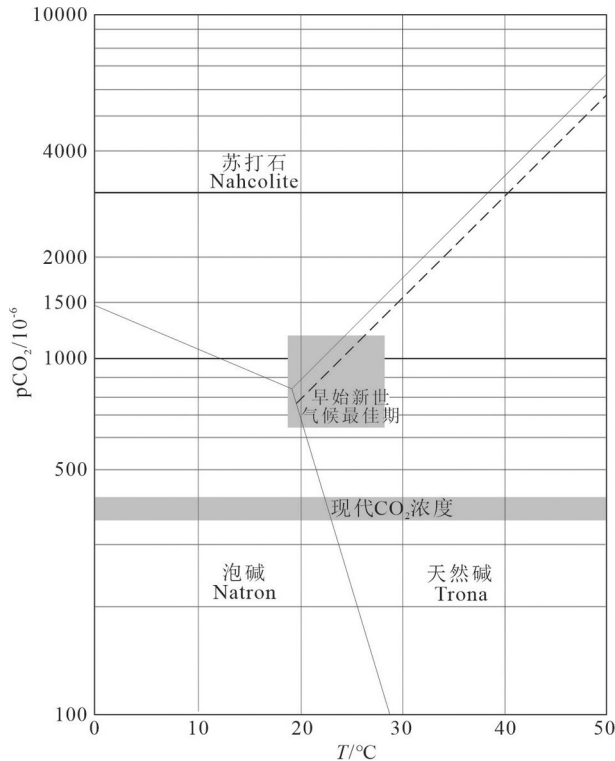


图3 苏打石-天然碱-泡碱随温度、CO<sub>2</sub>的变化的稳定图(改编自 Jagniecki et al., 2015)

Fig.3 Stability fields of nahcolite, natron, and trona as function of temperature and pCO<sub>2</sub> (modified from Jagniecki et al., 2015)

由于天然碱矿常与油页岩共伴生,因此一些研究推断,油页岩等有机质的分解、硫酸盐细菌还原作用等生物活动也能为水体提供可观的CO<sub>2</sub>(Lowenstein et al., 2017; Renaut et al., 2021),使得卤水中保持较高的CO<sub>2</sub>浓度。

## 4 典型矿床分述

### 4.1 古代天然碱矿床

#### 4.1.1 美国绿河组天然碱矿

目前,世界天然碱储量最大、种类最丰富的是美国绿河组天然碱矿床。美国是第二大纯碱和第一大天然碱生产国(徐曙光, 2015<sup>①</sup>)。

始新世绿河组沉积分布于美国怀俄明州(Wyoming)、科罗拉多州(Colorado)以及犹他州(Utah)的大绿河盆地(Great Green Basin)、尤因塔盆地(Uinta Basin)、皮桑斯河盆地(Piceance Creek Basin),以沉积巨量天然碱矿而闻名于世(Cumming et al., 2012)(图4)。这些盆地西侧为塞

维尔造山带(Sevier Orogenic Belt),中部被近东西向的基底核心隆起——尤因塔隆起分隔,其几何形态受前寒武纪和晚古生代构造控制(Dyni, 1997<sup>②</sup>)。绿河组从下至上包含提普顿页岩段(Tipton Shale)、威尔金斯峰段(Wilkins Peak Member)、兰尼页岩段(Laney Shale)三段(Eugster and Hardie, 1975)。巨量天然碱矿床赋存于威尔金斯段,岩性除了有天然碱外,还有大量油页岩、泥岩、粉砂岩、薄层凝灰岩等。1938年,美国矿产燃料公司在勘探石油时发现此矿床,已探明碱矿42层,深度分布在198~914 m,地下面积129~2007 km<sup>2</sup>(Culbertson, 1972; Dyni, 1997<sup>③</sup>)。绿河组天然碱矿石总储量为1155×10<sup>8</sup> t(Dyni, 1997<sup>④</sup>; 张晨鼎, 2013)。区内4家公司基本采用竖井、巷道为主的早采方式,少部分溶采,加工工艺为一水碱法,部分利用倍半碱法制碱。

始新世绿河组沉积的大部分时期,受构造活动影响,区内湖泊处于水文封闭环境,湖泊周围流域成为绿河组沉积的主要来源。在此期间,湖泊的大小受到干湿气候周期影响发生周期性波动。在威尔金斯峰段(Wilkins Peak)和帕拉秋特河段(Parachute Creek)沉积时期,由于始新世高温、大气CO<sub>2</sub>浓度高,化学风化增强,提高了Na<sup>+</sup>及CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度,湖水在干旱条件下不断蒸发收缩,从而沉积了巨量天然碱矿(Dyni, 1997<sup>⑤</sup>; Hyland and Sheldon, 2013; 张晨鼎, 2013; Smith et al., 2014)。

#### 4.1.2 土耳其贝帕扎里天然碱矿

贝帕扎里天然碱矿是1979年勘探褐煤矿时发现的(Garcia-Veigas et al., 2013)。贝帕扎里盆地大致呈东西向展布,北以西庞提德带为界,南为东北走向的扎维依(Zaviye)断层,受到生长断层的控制(Helvacı et al., 1989)。中新统自下而上分别是考拉克勒组(Çoraklar)、河卡组(Hırka)、阿克皮纳组(Akpınar)、卡伊尔汗组(Çayırhan)、波兹拜伦组(Bozbelen)和科米尔组(Kirmir)等(图5)。天然碱矿层赋存于河卡组,碱矿沉积主要由天然碱与沥青质页岩、白云质黏土岩形成互层,并可见凝灰岩层(Helvacı, 2010)。矿床埋深250~430 m,含矿面积8 km<sup>2</sup>。估算的天然碱总储量2.37×10<sup>8</sup> t,可采品碱石储量1.35×10<sup>8</sup> t(张晨鼎, 2013),已探明矿床共有33个天然碱矿层,围岩以黏土岩、沥青黏土岩为主。贝帕扎里碱矿的采矿权最初由Etibank公司拥有,之

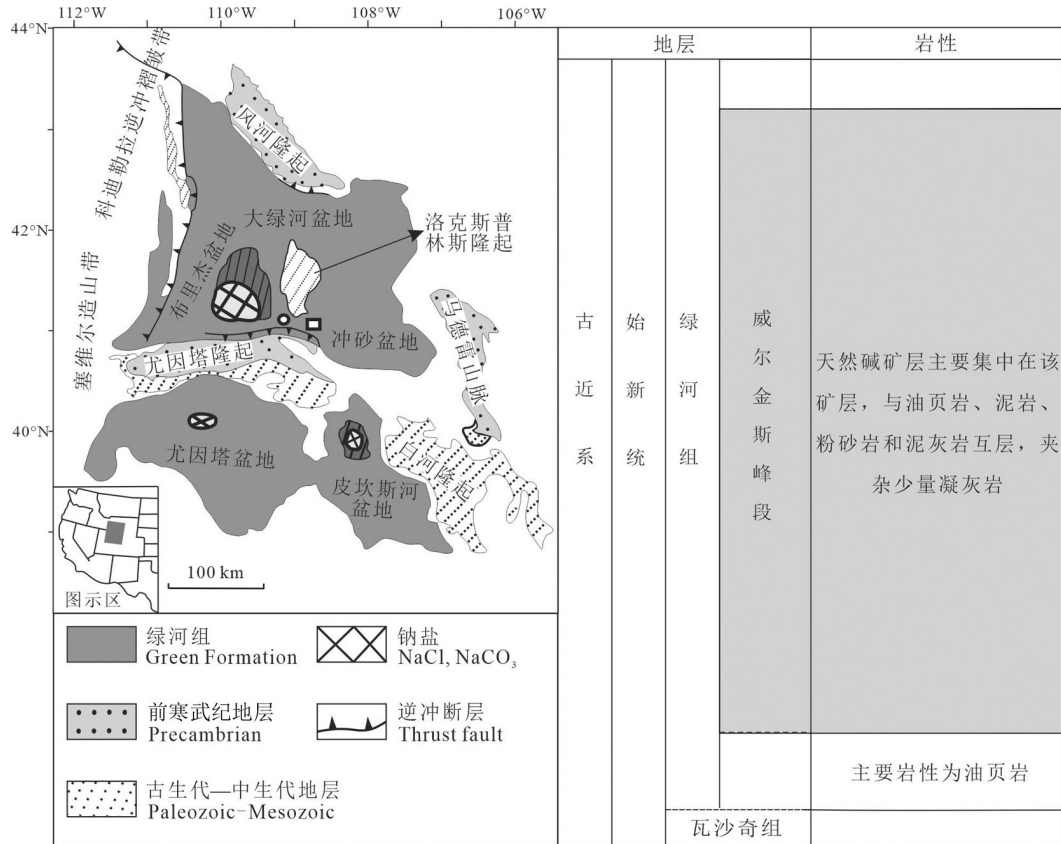


图4 绿河组沉积盆地地质简图及盐类矿床地层柱状简图(摘自 Dyni, 1997<sup>⑥</sup>)

Fig.4 Geologic map of Eocene sedimentary basins of the Green River Formation and schematic stratigraphic column of saline deposits (modified from Dyni, 1997<sup>⑥</sup>)

后归属于Eti Holding A.S公司,采用溶采法开采(张晨鼎, 2004)。

在中中新世河卡组沉积时,贝帕扎里盆地处于伸展构造的裂谷环境,构造环境类似于现今马加迪湖,火山活动频繁,凝灰岩和粗面岩发育(Helvaci, 2010)。因此,在构造封闭的水文环境下,粗面岩、凝灰岩和周边富钠岩石的风化淋滤为盆地提供了丰富的Na<sup>+</sup>,由于盆地中火山活动显著,推断成矿所需的CO<sub>2</sub>混合了深源岩浆CO<sub>2</sub>和大气CO<sub>2</sub>的贡献,但矿物序列中苏打石罕见,说明CO<sub>2</sub>浓度并不是很高。Na<sup>+</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>随地表和地下径流汇入湖泊,在局域干旱环境下,蒸发浓缩而沉积天然碱矿床(Helvaci, 1998)。

#### 4.1.3 河南安棚苏打石矿床

安棚苏打石矿床位于南襄盆地泌阳凹陷,发现于20世纪80年代。矿床形成于始新世,属于古代天然碱矿床。泌阳凹陷是南襄盆地的次级凹陷,主

控断裂分别是盆地南部的北西向唐河—栗园断裂及东部的北北东向栗园—泌阳断裂(陈建立, 2013; 易承龙, 2016)。发育地层以古近系为主,不整合于前寒武纪地层之上,厚度达8500 m,自下而上分别是:古近系玉皇顶组、大仓房组、核桃园组、廖庄组。核桃园组是苏打石存在的主要层位,也是生油、储油的主要层位。含矿岩石主要有白云岩系、油页岩及碱矿层(杨江海等, 2014)。碱矿赋存在核二段(Eh<sub>2</sub>)下部以及核三段(Eh<sub>3</sub>)上部(图6)。该矿床覆盖面积21 km<sup>2</sup>,埋深1310~2651 m。地层倾角7°~12°,无断层。总共发现17个苏打石矿层,主要矿层是5~9矿层,最厚的是第7层,面积15 km<sup>2</sup>。各矿层所含主要矿物是苏打石。总碳酸钠平均品位54.7%,NaCl为0.39%(张晨鼎, 2013)。安棚天然碱公司溶采苏打石矿层,主要工艺为倍半碱工艺和一水碱工艺。

泌阳凹陷是受NNE向和近NW向两组断裂交



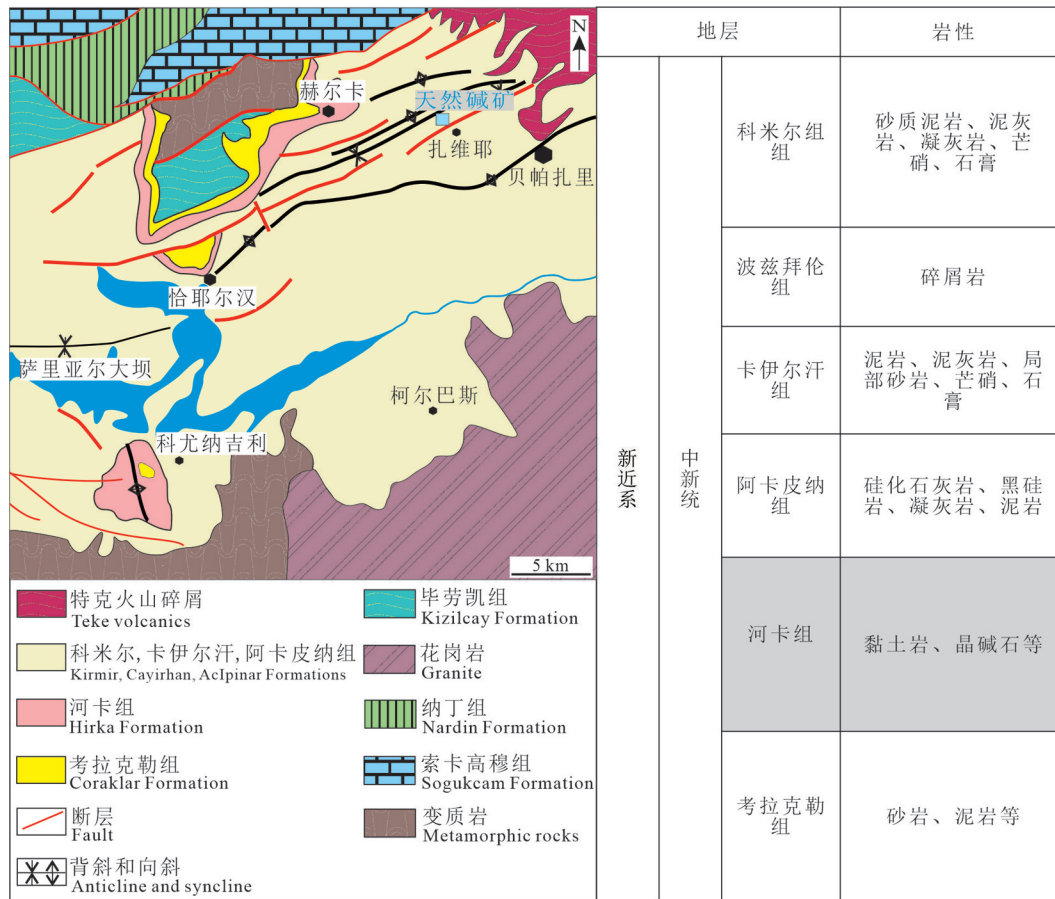


图5 贝帕扎里盆地地质简图及天然碱矿床地层柱状简图(据 Helvacı, 2010)

Fig.5 Geological profile of the Beypazari Basin and schematic stratigraphic column of soda deposits (after Helvacı, 2010)

汇形成的拉张性内陆闭流盆地,四周被桐柏山系高山或低隆起环绕,封闭情况好(陈建立, 2013)。普遍认为来自凹陷南部和东部古隆起区的大面积太古界、中元古界及下古生界岩石,以及多期岩浆岩、火山岩为安棚碱矿提供了丰富的钠离子(陈建立, 2013)。由于缺乏精确的同位素定年材料,虽然依据地层和古生物证据将碱矿成矿时代限定在始新世,但无法确定是否形成于早始新世气候适宜期,因此,安棚碱矿是否受到该时期高浓度大气CO<sub>2</sub>的影响,尚不能确定。部分学者利用地球化学手段及区域伸展构造体制的认识,推测在成矿过程中可能有深源热液流体的参与(金强等, 1998; 杨江海等, 2014)。盆地在持续的沉降中始终保持良好的封闭性,且沉积中心始终在泌阳凹陷东南部安棚一带,使盐类矿物得以长期稳定沉积,核桃园组沉积时期为亚热带干旱、半干旱气候,岩石组合特征显示以干旱为主,伴有交替出现的相对湿润的气候环境,

有利于天然碱矿物析出(陈建立, 2013)。

## 4.2 现代天然碱矿床

### 4.2.1 肯尼亚马加迪湖

非洲是世界第三个天然碱资源丰富的地区,矿床类型主要为现代天然碱矿床,集中在东非大裂谷带。裂谷带中的马加迪湖是正在沉积天然碱矿物的最为典型的现代碱湖。

马加迪湖是东非裂谷带肯尼亚南部的一个季节性、高盐碱性、封闭内陆碱湖(图7),位于赤道附近的南北向轴向裂谷中。基底是更新世火山喷发形成的粗面岩(1.4~0.7 Ma)(Baker, 1986; Crossley, 1979; Eugster, 1980; Le Gall et al., 2008; Muirhead et al., 2016; McNulty, 2017; Owen et al., 2018, 2019)。湖区西侧是由玄武岩组成的恩古鲁曼陡坡,东侧是阶梯状断块和台地,出露上新世和更新世火山岩(Renaut et al., 2021),马加迪湖展布形态受到这一系列火山单元约束而呈水文封闭状态(Baker and



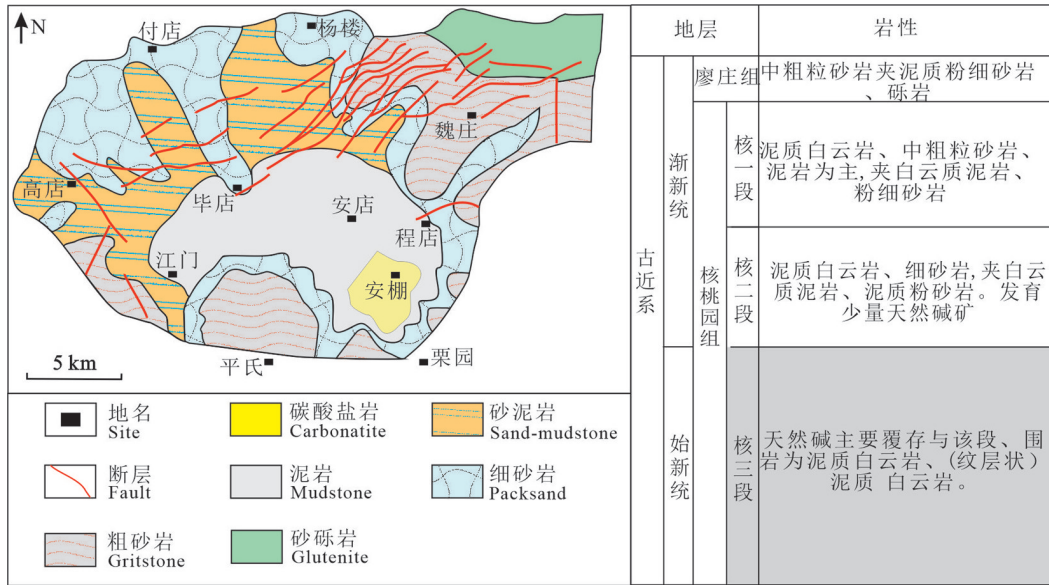


图6 泌阳凹陷地质简图及安棚天然碱矿床岩性柱状简图(据杨江海等, 2014; 易承龙, 2016)

Fig.6 Geological map of the Biyang depression and schematic stratigraphic column of soda deposits (after Yang Jianghai et al., 2014; Yi Chenglong, 2016)

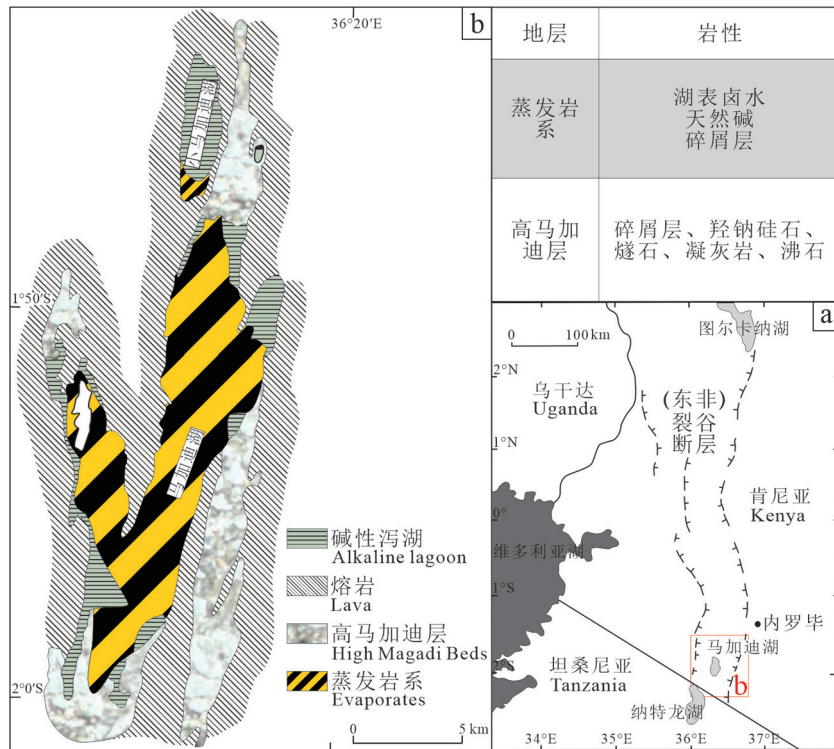


图7 东非大裂谷东支区域图(a)与马加迪湖区地质图(b)(改自 Eugster and Blair, 1968; Schubel and Simonson, 1990; Damnati et al., 1992; Owen et al., 2019)

Fig.7 The eastern branch of the East African Rift Valley (a) and geological map of Lake Magadi (b) (modified from Eugster and Blair, 1968; Schubel and Simonson, 1990; Damnati et al., 1992; Owen et al., 2019)

Mitchell, 1976)。湖区海拔 602 m, 面积约 100 km<sup>2</sup>。年降雨量约 500 mm, 而年蒸发量高达 3500 mm (Ogola and Behr, 2000)。马加迪湖以北 1.6 km 处的小马加迪湖(Little Magadi)也是高盐碱性湖。与马加迪湖不同的是, 小马加迪湖是常年性盐湖 (McNulty, 2017)。马加迪湖天然碱矿床形成于全新世, 根据湖区周缘地表露头推测, 矿床下伏更新统奥隆加层(Oloronga Bed)、绿层(Green Bed)、高马加迪层(High Magadi Bed) (Eugster, 1969; Baker and Mitchell, 1976)。矿床主要矿物为天然碱, 其次为苏打石和极少量的石盐 (Eugster, 1967; Damnati et al., 1992; Renaut and Ashley, 2002)。天然碱矿层平均厚约 20 m, 探明 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 储量 30×10<sup>8</sup> t (张晨鼎, 2013)。矿床最初由马加迪湖苏打公司开发, 之后转卖给印度塔塔化学公司(张晨鼎, 2013)。

马加迪湖天然碱矿的物源主要由沿湖岸分布的众多碱性热泉水补给。湖区火山岩和火山灰的风化作用提供了丰富的钠离子, 混合沿断层溢出的深部岩浆 CO<sub>2</sub> 补给, 形成了碱性热泉, 以地表和地下径流汇入碱湖。在入湖途中, 少量的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 以方解石、白云石等析出的方式消耗殆尽, 使得汇入碱湖的卤水演化为高 pH 的碳酸钠型。在周边山地围限的封闭水文环境 (Baker, 1958) 中, 受赤道高温的强蒸发干旱气候条件控制 (Ogola and Behr, 2000), 碱湖卤水持续蒸发浓缩, 析出天然碱矿物, 持续堆积而形成天然碱矿床 (Eugster et al., 1977; Jagniecki et al., 2015; McNulty, 2017)。

#### 4.2.2 内蒙古查干诺尔泡碱矿床

查干诺尔泡碱矿床位于内蒙古中部、二连浩特东南约 80 km, 是一个干涸的现代碱湖 (张晨鼎, 2013; 张天福等, 2020), 于 1966 年勘探时发现 (齐兵德等, 2011)。矿区海拔约 1000 m, 是一个干旱草原边缘的萎缩盆地的湖沼洼地。年蒸发量为年降雨量的 10 倍, 气候干冷 (Warren, 2016)。盆地基岩为白垩系砂岩、泥岩, 受两条南西-北东向断裂控制 (Warren, 2016)。湖盆附近出露大面积中、新生界沉积地层, 较远处出露古生界即华力西期和燕山期岩浆岩。矿体赋存于上更新统一全新统 (图 8), 表现为黑色淤泥、含碱淤泥与泡碱层互层, 面积 21 km<sup>2</sup>, 厚度 23.03 m。主要矿物是泡碱、天然碱, 伴生芒硝、石盐等盐类矿物, 以及少量氯碳钠镁石、针碳钠钙

石。估算 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 储量 11.3 Mt (齐兵德等, 2011; 张晨鼎, 2013; Warren, 2016)。苏尼特碱业公司采用露天矿的方式开采查干诺尔碱矿层, 用碳化法生产纯碱和小苏打 (张晨鼎, 2013)。

查干诺尔泡碱矿床的成矿过程具有独特性。不同于肯尼亚马加迪湖的干热气候, 查干诺尔碱矿形成于干冷的晚更新世—全新世时期。推测碱湖洼地周缘岩石的风化作用为湖区供给了成矿所需的钠离子。对于 CO<sub>2</sub> 来源, 由于盆地周缘尚未发现碱性热泉活动痕迹。因此, 推测 CO<sub>2</sub> 主要来自大气, 而非依赖深源岩浆供给。在泡碱-苏打石-天然碱矿物稳定场中, 泡碱位于左下角区域 (图 3), 表明其在低温、CO<sub>2</sub> 浓度低的环境下方可稳定析出, 对应于成矿时的晚更新世—全新世干冷气候和较低的大气 CO<sub>2</sub> 浓度。此外, 矿床伴生芒硝等冷相硫酸盐矿物, 同样表明干冷气候下, 水体硫酸盐细菌还原作用弱, 致使卤水在沉积碱矿时, 仍存在部分 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子, 属于 Na-CO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Cl 型卤水, 从而随着蒸发浓缩的持续进行, 结晶出芒硝矿物。而在夏季, 由于气温升高, 在大气 CO<sub>2</sub> 浓度不变的情况下, 泡碱停止结晶, 转而析出在温度较高下稳定的天然碱矿物 (图 3), 从而在矿床矿物沉积序列中形成了泡碱-天然碱-芒硝的矿物序列组合。

## 5 中国天然碱矿找矿远景

综合上述天然碱矿床的成矿要素和典型矿床成矿过程, 矿床成矿条件主要有: (1) 闭流洼地、断裂控制的凹陷盆地; (2) 干旱—半干旱气候; (3) 丰富的 Na<sup>+</sup> 和 CO<sub>2</sub> 供给。在这些成矿要素中, 全球大部分蒸发岩盆地均满足封闭的构造条件和干旱气候, 但只有少数盆地沉积了天然碱矿, 因此, 决定能否形成碱矿的关键在于盆地是否能够提供丰富的 Na<sup>+</sup> 和 CO<sub>2</sub>, 其中充足的 CO<sub>2</sub> 供给尤为重要。根据上述资源特征的基础上预测中国天然碱矿的找矿远景。

中国天然碱矿床资源集中程度高, 资源规模大, 是世界天然碱矿较为丰富的国家 (图 9)。勘查工作已发现的大中型矿床主要分布于内蒙古、河南。其中, 大部分内蒙古天然碱矿为形成于第四纪干冷气候下的现代天然碱矿床, 主要矿物是泡碱、天然碱等, 而苏打石沉积罕见; 近年来, 在内蒙古下白垩统巴音戈壁组中也发现了天然碱-苏打石互层

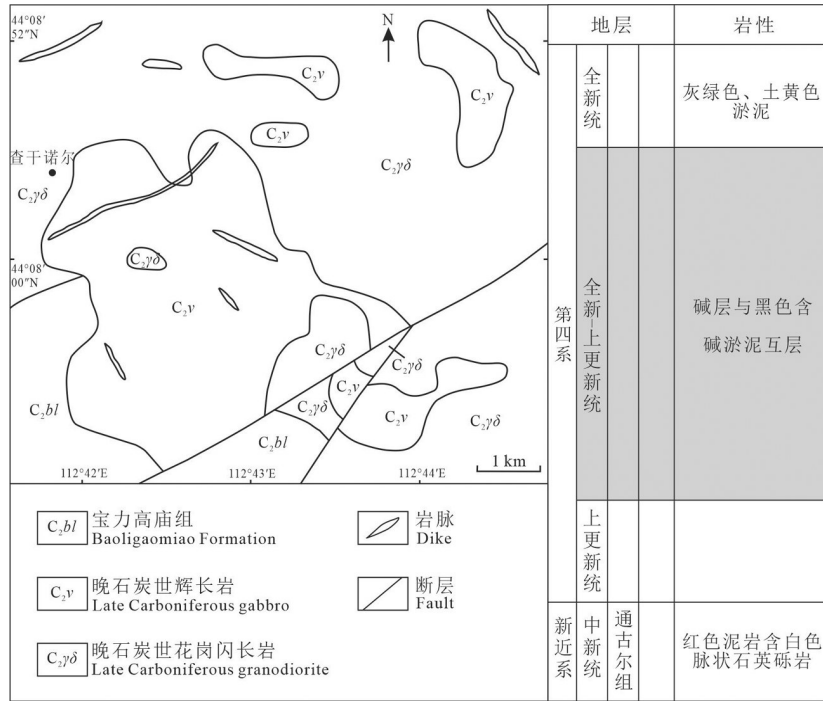


图8 查干诺尔区域地质简图和泡碱矿床岩性柱状简图(改自张晨鼎, 2013)

Fig.8 Schematic map of Chaganor lake area and stratigraphic column of soda deposits (modified from Zhang Chengding, 2013)



图9 中国天然碱矿产地(全国矿产地数据库, 2021<sup>®</sup>)

Fig.9 Natural soda-ash deposits in China (National Mineral Resources Database, 2021<sup>®</sup>)



的天然碱矿床,形成于早白垩世全球CO<sub>2</sub>浓度较高的温室气候期,资源规模巨大。因此,从成矿时代、古气候条件角度分析,在内蒙古地区,第四纪以来的盐湖是寻找现代天然碱矿床的远景区;而白垩纪构造封闭盆地是寻找大型古代天然碱矿的目标区域。

河南已发现的天然碱矿均为古代天然碱矿床,集中于泌阳凹陷和吴城盆地,成矿时代为始新世,矿体赋存于白云岩系中,常与油页岩相伴生。但是,河南境内大多数始新世蒸发岩盆地均沉积了石盐矿床,如东濮凹陷盐矿、叶舞凹陷盐矿,石盐矿床下伏碎屑岩—碳酸盐岩地层尚未发现碱矿成矿线索。在成矿规律认识方面,矿床成矿时代是否能够对比美国绿河组碱矿,CO<sub>2</sub>来源是否混合了深源岩浆CO<sub>2</sub>的贡献,仍不明确。因此,找矿目标区仍需集中在省内白云岩、油页岩发育的始新世封闭构造盆地中。

天然碱矿也可形成于断层活动强烈、火山活动频繁、岩浆CO<sub>2</sub>浓度高的裂谷中,例如马加迪现代天然碱矿。中国目前发现的内蒙古、河南现代和古代碱矿,深源CO<sub>2</sub>贡献的证据相对较少。客观上限制了形成于裂谷中的此类碱矿的找矿进展,因此,迫切需要增强中国天然碱矿成矿规律研究,指导未来碱矿的找矿工作。

## 6 结 论

(1)天然碱资源具有分布广泛、相对集中的特点。矿区主要分布于亚洲、北美洲、非洲,主要分布在美国、中国、土耳其、肯尼亚、博茨瓦纳等少数国家。广泛应用于纯碱工业、医药等行业。

(2)根据成矿地质年代分为现代天然碱矿床、古代天然碱矿床。典型现代天然碱矿床有肯尼亚马加迪湖、内蒙古查干诺尔矿床等;典型古代天然碱矿床有美国绿河组天然碱矿、河南安棚碱矿、土耳其贝帕扎里碱矿。古代天然碱矿资源规模大、资源利用程度高。

(3)天然碱矿床需要在干旱的气候条件、封闭的构造环境以及作为成矿物源的充足的碳酸盐型卤水等3种成因要素耦合下才能成矿。封闭的构造环境提供了矿床沉积的容矿场所;干旱气候、强蒸发条件促使碱湖收缩沉淀析出碳酸钠盐类矿物;矿床物源主要来自表生作用下形成的地表碳酸盐型卤水或火山作用形成富含CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的碱性热泉

水。CO<sub>2</sub>是卤水和热泉呈碱性的重要因素,其来源较为复杂,主要来自大气中的CO<sub>2</sub>或者深源岩浆,也可能混合了硫酸盐细菌还原作用或有机质分解等过程。

(4)中国天然碱矿资源丰富,具有较好的找矿远景。在找矿方向上,应聚焦在内蒙古第四纪盐湖寻找现代天然碱矿、白垩纪封闭构造寻找古代大型天然碱矿,以及在河南始新世白云岩、油页岩发育的封闭盆地中寻找古代天然碱矿。

## 注释

①Brownfield M E, Johnson R C, Self J G, Mercier T J. 2009. Nahcolite resources in the Green River Formation, Piceance Basin, northwestern Colorado[R]. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2009-3011.

②Bradley W H, Eugster H P. 1969. Geochemistry and paleolimnology of the trona deposits and associated authigenic minerals of the Green River Formation of Wyoming[R]. U.S. Geological Survey.

③徐曙光. 2015. 世界矿产资源年评价——天然碱[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部.

④Dyri J R. 1997. Sodium Carbonate Resources of the Green River Formation[R]. U.S. Geological Survey.

⑤全国矿产地数据库. 2021. 全国矿产地数据库2021版 (ngac.org.cn)[BD/OL].

⑥全国矿产资源储量统计表. 2021. 2021年全国矿产资源储量统计表 (mnr.gov.cn).

## Reference

- Baker B H, Mitchell J G. 1976. Volcanic stratigraphy and geochronology of the Kedong-Ologesailie area and the evolution of the South Kenya rift valley[J]. *Journal of the Geological Society*, 132: 467-484.
- Baker B H. 1986. Tectonics and volcanism of the southern Kenya Rift Valley and its influence on rift sedimentation[J]. *Geological Society London Special Publications*, 25(1): 45-57.
- Chen Jianli. 2013. Geological characteristics, genesis and ore prediction of natural soda deposit in Biyang depression: Taking Anpeng trona deposit as an example[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 28(3): 393-400 (in Chinese with English abstract).
- Crossley R. 1979. The Cenozoic stratigraphy and structure of the western part of the Rift Valley in southern Kenya[J]. *Journal of the Geological Society*, 136(4): 393-405.
- Culbertson W C. 1972. Trona and Halite resources in Wilkins Peak Member of Green river Formation, Green River Basin, Wyoming:

- Abstract[J]. AAPG Bulletin, 56: 612–612.
- Cumming V M, Selby D, Lillis P G. 2012. Re–Os geochronology of the lacustrine Green River Formation: Insights into direct depositional dating of lacustrine successions, Re–Os systematics and paleocontinental weathering[J]. Earth and Planetary Science Letters, 359/360: 194–205.
- Cumming V M, Selby D, Lillis P G, Lewan M D. 2014. Re–Os geochronology and Os isotope fingerprinting of petroleum sourced from a Type I lacustrine kerogen: Insights from the natural Green River petroleum system in the Uinta Basin and hydrous pyrolysis experiments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 138: 32–56.
- Damnati B, Taieb M, Williamson D. 1992. Laminated deposits from Lake Magadi (Kenya); climatic contrast effect during the maximum wet period between 12,000–10,000 yrs BP[J]. Bulletin De La Société Géologique De France, 163(4): 407–414.
- Demicco R V, Lowenstein T K, Hardie L A. 2003. Atmospheric pCO<sub>2</sub> since 60 Ma from records of seawater pH, calcium, and primary carbonate mineralogy[J]. Geology, 31(9): 793–796.
- Dickinson W R, Klut M A, Hayes M J, Janecke S U, Lundin E R, McKittrick M A, Olivares M D. 1988. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region[J]. Geological Society of America Bulletin, 100: 1023–1039.
- Earman S, Phillips F M, McPherson B J O L. 2005. The role of “excess” CO<sub>2</sub> in the formation of trona deposits[J]. Applied Geochemistry, 20(12): 2217–2232.
- Eugster H P. 1967. Hydrous sodium silicates from lake Magadi, Kenya: Precursors of bedded chert[J]. Science, 157(3793):1177–1180.
- Eugster H P, Blair F J. 1968. Gels composed of sodium–aluminum silicate, Lake Magadi, Kenya[J]. Science, 161(3837): 160–163.
- Eugster H P. 1969. Inorganic bedded cherts from the Magadi area, Kenya[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 22(1): 1–31.
- Eugster H P, Hardie L A. 1975. Sedimentation in an ancient Playa–Lake Complex: The Wilkins peak member of the Green River Formation of Wyoming[J]. Geological Society of America Bulletin, 86(3): 319–334.
- Eugster H P, Jones B F, Shirley L R. 1977. Hydrochemistry of the Lake Magadi basin, Kenya[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 41(1): 53–72.
- Eugster H P. 1980. Hypersaline Brines and Evaporitic Environments[M]. Netherland: Elsevier Science.
- García–Veigas J, Gundogan I, Helvacı C, Prats E. 2013. A genetic model for Na–carbonate mineral precipitation in the Miocene Beypazari trona deposit, Ankara province, Turkey[J]. Sedimentary Geology, 294: 315–327.
- Hardie L A, Eugster H P. 1970. The evolution of closed–basin brines[J]. Mineralogical Society of America Special Publication, 3: 253–273.
- Helvacı C, Inci U, Yılmaz H, Yağmurlu F. 1989. Geology and Neogene trona deposit of the Beypazari region, Turkey[J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 13: 245–256.
- Helvacı C. 1998. The Beypazari Trona Deposit, Ankara Province, Turkey[C]//Wyoming State Geological Survey Public Information Circular 40.
- Helvacı C. 2010. Geology of the Beypazari trona field, Ankara, Turkey. Mid–congress field excursion guide book, tectonic crossroads: Evolving orogens of Eurasia–Africa–Arabia[C]//Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia–Africa–Arabia, Ankara, Turkey.
- Hyland E G, Sheldon N. 2013. Coupled CO<sub>2</sub>–climate response during the Early Eocene climatic optimum[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 369: 125–135.
- Inci U. 1991. Miocene alluvial fan–alkaline playa lignite–trona bearing deposits from an inverted basin in Anatolia: Sedimentology and tectonic controls on deposition[J]. Sedimentary Geology, 71(1): 73–97.
- Jagniecki E A, Lowenstein T K, Jenkins D M, Demicco R V. 2015. Eocene atmospheric CO<sub>2</sub> from the nahcolite proxy[J]. Geology, 43(12): 1075–1078.
- Jagniecki E A, Lowenstein T K, Demicco R V, Baddouh M, Carroll A R, Beard B L, Johnson C M. 2021. Spring origin of Eocene carbonate mounds in the Green River Formation, Northern Bridger Basin, Wyoming, USA[J]. Sedimentology, 68(6): 2334–2364.
- Jin Qiang, Xiong Shousheng, Lu Peide. 1998. Volcanic activity in major source rocks in faulted basins of China and its significance in main source rocks of fault basins in China [J]. Geological Review, 44: 136–142 (in Chinese with English abstract).
- Lee H, Muirhead J.D, Fischer T P, Ebinger C J, Sharp Z.D, Kianji G. 2016. Massive and prolonged deep carbon emissions associated with continental rifting[J]. Nature Geoscience, 9: 145–149.
- LeGall B, Nonnotte, P, Rolet J, Benoit M, Guillou, H, Mousseau–Nonnotte M, Albaric J, Deverchère J. 2008. Rift propagation at craton margin. Distribution of faulting and volcanism in the North Tanzanian Divergence (East Africa) during Neogene times[J]. Tectonophysics, 448, 1–19.
- Lowenstein T K, Demicco R V. 2006. Elevated Eocene atmospheric CO<sub>2</sub> and its subsequent decline[J]. Science, 313(5795): 1928–1928.
- Lowenstein T K, Lauren A D, García–Veigas, J. 2016. Influence of magmatic–hydrothermal activity on brine evolution in closed basins: Searles Lake, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 128: 1555–1568.
- Lowenstein T K, Jagniecki E A, Carroll A R, Smith M E, Renaut R W, Owen R B. 2017. The Green River salt mystery: What was the source of the hyperalkaline lake waters?[J]. Earth–Science Reviews, 173: 295–306.
- Lowenstein T K, Demicco R V. 2019. When evaporites are not formed by evaporation–The role of temperature and pCO<sub>2</sub> on saline

- deposits of the Eocene Green River Formation, Colorado, USA[J]. Geological Society of America Bulletin, 132: 1365–1380.
- McNulty E. 2017. Lake Magadi and the Soda Lake Cycle: A Study of the Modern Sodium Carbonates and of Late Pleistocene and Holocene Lacustrine Core Sediments[D]. Binghamton: Binghamton University.
- Muirhead J D, Simon A K, Hyunwoo L, Sara M, Brent D T, Tobias P F, Kianji G W, Sarah S D. 2016. Evolution of upper crustal faulting assisted by magmatic volatile release during early-stage continental rift development in the East African Rift[J]. Geosphere, 12: 1670–1700.
- Ogola J S, Behr H J. 2000. Mineralogy and Trona Formation in lake Magadi, Kenya[C]//Applied Mineralogy in Research, Economy, Technology, Ecology and Culture: Proceedings of the Sixth International Congress on Applied Mineralogy. Göttingen, GER: ICAM, 383–386.
- Olson K J, Lowenstein T K. 2021. Searles Lake evaporite sequences Indicators of late Pleistocene–Holocene lake temperatures, brine evolution, and pCO<sub>2</sub>[J]. Geological Society of America Bulletin, 133(11): 2319–2334.
- Owen R B, Muiruri V M, Lowenstein T K, Renaut R W, Rabideaux N, Luo S, Deino A L, Sier M J, Dupont–Nivet G, McNulty E P, Leet K, Cohen A, Campisano C, Deocampo D, Shen C, Billingsley A, Mbuthia A. 2018. Progressive aridification in East Africa over the last half million years and implications for human evolution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(44): 11174–11179.
- Owen R B, Renaut R W, Muiruri V M, Rabideaux N M, Lowenstein T K, McNulty E P, Leet K, Deocampo, D, Luo S, Deino A L, Cohen, A, Sier M J, Campisano, C, Shen C, Billingsley A, Mbuthia A, Stockhecke M. 2019. Quaternary history of the Lake Magadi Basin, southern Kenya Rift: Tectonic and climatic controls[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 518: 97–118.
- Qi Bingde, Xie Xing, Deng Liangwu, Zeng Qingliang, Ma Lanlan. 2011. Analysis on metallogenic conditions of Chaganur natural alkali deposit in Sunite Right Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Sichuan Geology, 31(S1): 8–10 (in Chinese).
- Renaut R W, Ashley G M. 2002. Sedimentation in Continental Rifts[M]. US: SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Renaut R W, Owen R B, Lowenstein T K, De C G, McNulty E, Scott J J, Mbuthia A. 2021. The role of hydrothermal fluids in sedimentation in saline alkaline lakes: Evidence from Nasikie Engida, Kenya Rift Valley[J]. Sedimentology, 68(1): 108–134.
- Schubel K A, Simonson B M. 1990. Petrography and diagenesis of cherts from Lake Magadi, Kenya[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 60(5): 761–776.
- Smith M E, Carroll A R, Scott J J, Singer B S. 2014. Early Eocene carbon isotope excursions and landscape destabilization at eccentricity minima: Green River Formation of Wyoming[J]. Earth and Planetary Science Letters, 403: 393–406.
- USGS. 2023. Mineral Commodity Summaries[R]. United States Geological Survey.
- Wang Aiyun, Chen Wenxi. 2022. Trona: From ancient washing powder to the mother of chemical industry[J]. Earth, (1): 6–11 (in Chinese).
- Wang Jiuyi, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Yu Xiaocan, Yan Kai, Gao Chao. 2021. Tectono–paleoclimatic coupling process for mineralization of Late Cretaceous–Paleogene evaporites in South China[J]. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2041–2051 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. Earth–Science Reviews, 98(3/4): 217–268.
- Warren J K. 2016. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG.
- Xu Hong, Peng Qiming, Martin R Palmer. 2004. Origin of tourmaline–rich rocks in a Paleoproterozoic terrane (N.E. China): Evidence for evaporite–derived boron[J]. Geology in China, (3): 240–253 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yang, Cao Yangtong, Liu Chenglin. 2021. Whether the middle Eocene salt–forming brine in the Kuqa Basin reached the potash–forming stage: Quantitative evidence from halite fluid inclusions[J]. Geofluids, 2: 1–12.
- Xu Yang, Liu Chenglin, Cao Yangtong. 2021. Salt–forming evolution characteristics of Middle Eocene in the Kuqa basin, Xinjiang: A case study of borehole KL4[J]. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2183–2192 (in Chinese with English abstract).
- Yan Kai, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Fan Meiling, Xu Haiming, Wang Jiuyi. 2021. Mineral deposition and paleoenvironment of Cretaceous evaporite in Southwestern Congo[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(3): 525–534 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianghai, Yi Chenglong, Du Yuansheng, Zhang Zongheng, Yan Jiabin. 2014. Geochemical characteristics of Paleogene alkali–bearing rock series in Biyang Depression and their indicative significance for alkali–formation[J]. Scientia Sinica (Terrae), 44 (10): 2172–2184 (in Chinese).
- Ye Tielin. 1978. Trona and its genesis briefly[J]. Industrial Minerals and Processing, 6: 18–23 (in Chinese).
- Ye Tielin. 2013. Trona Resources, Geology, Mining and Processing, 3rd Edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press (in Chinese).
- Yi Chenglong. 2016. Sequence stratigraphy characteristics and its significance of alkaliferous strata of the Paleogene Hetaoyuan Formation in Anpeng area, Biyang sag in Henan Province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(1): 93–100 (in Chinese with English abstract).
- Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. 2008. An Early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon–cycle dynamics[J]. Nature, 451: 279–283.



- Zhang Chending. 1979. Soda-ash deposits[J]. Soda Industry, 3: 56-64 (in Chinese).
- Zhang Chending. 2004. Development of the Trona deposit in Beypazari, Turkey [J]. Soda ash Industry, (2): 15-18 (in Chinese).
- Zhang Chending. 2013. Development of the Trona Deposit[M]. Beijing: China Petrochemical Press (in Chinese).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Cheng Xianyu, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Zhou Xiaoxi, Wang Shaoyi, Ma Hailin, Lu Chao. 2020. Borehole databases and 3D geological model of Jurassic-Cretaceous strata in Dongsheng area, North Odors Basin[J]. China Geology, 47(S1): 220-245 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Yisi, Wang Licheng, Dong Haowei. 2022. Evaporite sedimentary characteristics and environment: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1188-1214 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈建立. 2013. 泌阳凹陷碱矿床地质特征、成因及成矿预测——以安棚碱矿床为例[J]. 地质找矿论丛, 28(3): 393-400.
- 金强, 熊寿生, 卢陪德. 1998. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义[J]. 地质论评, 44: 136-142.
- 齐兵德, 谢星, 邓良武, 曾清亮, 马兰兰. 2011. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔天然碱矿成矿条件浅析[J]. 四川地质学报, 31(S1): 8-10.
- 王爱云, 陈文西. 2022. 天然碱:从古代洗衣粉到化工之母[J]. 地球, (1): 6-11.
- 王九一, 刘成林, 王春连, 余小灿, 颜开, 高超. 2021. 晚白垩世—古近纪华南蒸发岩矿床形成的构造和气候耦合控制[J]. 地质学报, 95(7): 2041-2051.
- 许虹, 彭齐鸣, Martin R Palmer. 2004. 辽宁古元古代地体中富电气石岩石的成因: 蒸发岩硼源的证据(英文)[J]. 中国地质, (3): 240-253.
- 徐洋, 刘成林, 曹养同. 2021. 新疆库车盆地中始新世成盐演化特征——以KL4钻孔为例[J]. 地质学报, 95(7): 2183-2192.
- 颜开, 刘成林, 王春连, 范美玲, 徐海明, 王九一. 2021. 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, 40(3): 525-534.
- 杨江海, 易承龙, 杜远生, 张宗恒, 颜佳新. 2014. 泌阳凹陷古近纪含碱岩系地球化学特征对成碱作用的指示意义[J]. 中国科学:地球科学, 44(10): 2172-2184.
- 叶铁林. 1978. 天然碱及其成因简述[J]. 化工矿山技术, 6: 18-23.
- 叶铁林. 2013. 天然碱资源·地质·开采·加工第3版[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 易承龙. 2016. 河南省泌阳凹陷安棚地区古近系核桃园组含碱地层序特征及其意义[J]. 古地理学报, 18(1): 93-100.
- 张晨鼎. 1979. 天然碱矿床[J]. 纯碱工业, 3: 56-64.
- 张晨鼎. 2004. 土耳其贝帕扎里天然碱矿床的开发[J]. 纯碱工业, (2): 15-18.
- 张晨鼎. 2013. 天然碱矿床开发[M]. 北京: 中国石化出版社.
- 张天福, 张云, 程先钰, 孙立新, 程银行, 周小希, 王少轶, 马海林, 鲁超. 2020. 鄂尔多斯盆地北部东胜地区侏罗系—白垩系钻孔数据库与三维地质模型[J]. 中国地质, 47(S1): 220-245.
- 钟逸斯, 王立成, 董浩伟. 2022. 蒸发岩沉积特征及环境综述[J]. 沉积学报, 40(5): 1188-1214.