

doi: 10.12029/gc20200227001

赵雪, 陈忠, 石国成, 唐启亮, 李雯霞, 张西营. 2023. 老挝万象海夏峰钾盐矿床水不溶矿物及其对沉积环境的约束[J]. 中国地质, 50(1): 170-180.
Zhao Xue, Chen Zhong, Shi Guocheng, Tang Qiliang, Li Wenxia, Zhang Xiyong. 2023. Insoluble minerals of potash deposits in Haixiafeng mining area of Vientiane, Laos: Constraints on their sedimentary environment[J]. Geology in China, 50(1): 170-180 (in Chinese with English abstract).

老挝万象海夏峰钾盐矿床水不溶矿物 及其对沉积环境的约束

赵雪^{1,2}, 陈忠¹, 石国成³, 唐启亮², 李雯霞², 张西营²

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国科学院青海盐湖研究所 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海省核工业地质局, 青海 西宁 810008)

摘要:【研究目的】老挝钾盐矿床是世界上重要的钾盐矿床之一, 开展该矿床钾盐析出阶段沉积环境研究对于深入理解钾盐成矿作用具有重要意义。【研究方法】钾盐矿层中的水不溶矿物比可溶盐类矿物保存了更多的原始信息, 是研究成矿卤水演化的重要载体。本文以老挝万象盆地海夏峰矿区 ZK16 钻孔为研究对象, 利用镜下鉴定、XRD 及 SEM 等方法对该钻孔钾盐矿层的水不溶矿物开展了系统研究。【研究结果】分析结果表明, 水不溶物中的主要矿物为硬石膏、方硼石、水氯硼钙石、石英、白云石、菱镁矿、方解石、白云母等, 其中以硬石膏、方硼石是主要的水不溶矿物。自生石英及碎屑白云母的存在及其分布特征指示了钾盐在沉积过程中不同程度地受到陆相水体的影响。【结论】综合研究揭示, 研究区钾盐沉积可以分为波动沉积、浅水沉积、稳定沉积和改造作用等 4 个不同阶段。

关键词: 钾盐; 水不溶矿物; 沉积环境; 卤水演化; 钾盐矿床勘查工程; 海夏峰矿区; 老挝

创 新 点: 利用水不溶物比易溶盐类能保存更多原始信息的优势, 对钾盐矿层沉积阶段的沉积环境变化信息进行了较为精细的刻画。

中图分类号: P612 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0170-11

Insoluble minerals of potash deposits in Haixiafeng mining area of Vientiane, Laos: Constraints on their sedimentary environment

ZHAO Xue^{1,2}, CHEN Zhong¹, SHI Guocheng³, TANG Qiliang², LI Wenxia², ZHANG Xiyong²

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Qinghai Nuclear Geology, Xining 810008, Qinghai, China)

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

[Objective] The potash deposit in Laos is one of the most important potash deposits in the world. To carry out studies of the

收稿日期: 2020-02-27; 改回日期: 2020-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602086)资助。

作者简介: 赵雪, 女, 1993年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 809304141@qq.com。

通讯作者: 张西营, 男, 1977年生, 研究员, 从事钾盐矿产研究工作; E-mail: xyzhchina@isl.ac.cn。

sedimentary environment during the precipitation of potassium minerals is very significant for a deep understanding of the mineralization of potash deposits here. **[Methods]**The insoluble minerals in the potash seams, which can retain more original information than soluble salts, is an important carrier for studying the evolution of ore-forming brine. Systematic studies on insoluble minerals in borehole ZK16 from the Haixiafeng mining area of the Vientiane Basin of Laos were conducted through microscopic identification, XRD, and SEM. **[Results]**Analysis results show that the insoluble materials mainly include anhydrite, boracite, hilgardite, quartz, dolomite, magnesite, calcite, and muscovite, in which anhydrite and boracite are dominant minerals. The existence and distribution characteristics of authigenic quartz and clastic muscovite reveal that continental waters have affected potash deposits to different degrees during deposition. **[Conclusions]**Comprehensive studies show that the process of potassium salt deposition in the study area can be divided into four distinct stages: fluctuation deposition stage, shallow water deposition stage, stable deposition stage, and reworking stage.

Key words: potash deposits; insoluble minerals; sedimentary environment; evolution of brine; potash exploration engineering; Haixiafeng mining area; Laos

Highlights: The detailed sedimentary environment information at the deposition stage of potassium salts was finely described using the advantage of retaining more original information about the water-insoluble minerals than soluble salt minerals.

About the first author: ZHAO Xue, female, born in 1993, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: 809304141@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Xiyang, male, born in 1977, senior researcher, engaged in studies on potash deposits; E-mail: xyzhchina@isl.ac.cn.

Fund support: Supported by the project of National Natural Science Foundation of China (No.41602086).

1 引言

呵叻高原(Khorat Plateau)是世界上最大的钾盐沉积矿床之一(Hite and Japakasetr, 1979),国外学者率先开展研究且争议主要集中在成盐物源和沉积环境方面。早期,根据Br含量等地球化学指标,一些学者认为蒸发岩来源于海水(Hite and Japakasetr, 1979; Tabakh et al., 1999; 唐启亮等, 2016; Liu et al., 2018);另外一些学者则根据沉积特征及碳酸盐和硫酸盐矿物的缺失,认为钾盐矿床形成于内陆超咸水湖(或潟湖)环境或者干旱沙漠环境(Utha-Aroon, 1993; Meesook, 2000)。近年来,国内学者对该钾盐矿床开展了较多研究并取得了丰硕成果。Tan et al.(2010)和Li et al.(2018)分析了老挝钾盐矿床硼、锶和氢氧等同位素的组成,认为成盐物质主要来自于海水,但陆相水和热液对于蒸发岩的形成具有重要作用。Zhang et al.(2013)通过盐岩层中的硼酸盐矿物硼同位素组成及其变化特征,揭示了该钾盐矿床在成盐晚期可能受到陆相水输入的影响。通过老挝沙湾那吉盆地与中国思茅盆地钾盐矿床中的硫同位素组成对比分析,张华等(2014)初步认为两盆地在硫同位素组成上具有相近的海源特征,推断它们在海侵期可能曾连通。张

西营等(2015)对沙湾那吉盆地典型钾盐钻孔剖面的元素变化特征研究表明,非海相输入对成矿卤水演化具有重要作用。近期,李彦强(2018)对老挝万象海夏峰地区进行了矿床特征研究,初步认为成钾盆地及钾盐矿床的形成与宏观构造作用密切相关。

一般对于钾盐矿床的研究侧重于宏观和整体沉积环境的探讨,对于钾盐本身沉积环境及过程涉及较少(王春连等, 2013),利用水不溶矿物来分析沉积环境或后期成盐环境的更少。Grice et al.(2005)利用加拿大New Brunswick地区钾盐矿床中的硼酸盐矿物分析了区域水文环境。张西营(2012)利用老挝万象盆地北部钾盐矿床中的水不溶矿物的形貌及分布特征对该地区卤水演化过程进行了详细探讨,认为该地区罕见的溢晶石矿物的形成与太阳池效应关系密切,这一结论也得到了石盐流体包裹体均一温度研究结果的支持(Wang and Lowenstein, 2017)。总之,由于蒸发岩的易溶易变特性,一些沉积环境信息在后期的改造变化过程中被丢失,而盐岩中的水不溶矿物则可以从一定程度上还原这些信息,为探讨古卤水详细演化过程提供独特的证据。本文以老挝万象地区海夏峰矿区ZK16钻孔岩心为研究材料,开展钻孔岩心中水不溶矿物的成分、组成及分布特征研究,通过与万象

盆地北部的通芒、农刀等矿区前人研究对比,尝试刻画万象盆地成矿卤水晚期演化过程,从而为阐释和深刻理解该地区古钾盐矿床成矿机制提供重要证据。

2 区域地质背景

呵叻高原位于印支地块之上,包括泰国东北部大部分以及老挝东部和北部的边缘地区,近东西走向的普潘隆起将高原分为北部的沙空那空盆地和南部的呵叻盆地两个次级盆地(钱自强等,1994)。印支地块中部(包括呵叻高原)相对刚性较强(梁光河,2018),并且经过顺时针约 15° 旋转(Yang and Besse,1993;Yang et al.,1995),呵叻高原是在印度板块顺时针旋转并向南发生碰撞过程中形成的(Sato et al.,2007)。呵叻高原形成于晚三叠世,与该区的构造松弛或伸展同时发生(Metcalf,1988)。白垩纪晚期,燕山运动导致了一系列的洼陷和水下隆起,制约了该地区中—新生代宽而厚的红色碎屑岩向含盐盆地的延伸分布(高翔等,2012)。两个次级盆地相继在晚白垩世、古近纪和第四纪发育了一系列北—西北向褶皱,近东西向断裂,并且在中生代发育了巨厚的蒸发岩,蒸发岩位于中生代呵叻群的非海相沉积之上(Tabakh et al.,1999)。

研究区海夏峰矿区位于呵叻高原北部沙空那空盆地北西缘的老挝万象地区(图1)。钻孔资料揭示,万象地区出露二叠系至第四系,主要为侏罗系、白垩系、古近系及第四系,缺失三叠系、侏罗系上统、白垩系下统,其中钾镁盐矿层赋存于上白垩统的塔贡组。塔贡组是万象地区唯一的一套含盐地层,假整合于班塔拉组,被班塔博组整合覆盖(郭远生等,2005),岩性为紫红色陆源碎屑和蒸发岩不等厚互层沉积,蒸发岩和碎屑岩构成明显的三个沉积旋回。在海夏峰矿区实施的钻孔中,ZK16孔岩心钾盐矿层厚度较大且成矿序列比较完整,钾盐主矿体赋存于塔贡组下盐段膏盐岩亚段的顶部。

3 材料与方法

3.1 样品采集和前处理

样品采自沙空那空盆地北部老挝万象海夏峰矿区的ZK16钻孔,该孔终孔深度166.46 m,其中下盐层埋深93.00~166.46 m。前期已对该钻孔钾盐矿层进行了取样分析,取样间距一般为1.0 m。采集

ZK16基本样73件,其中石盐10件,钾石盐11件,光卤石52件。为了获取水不溶物样品,对已经粗磨的化学分析样进行采样,样品量几十至上百克不等,将这些样品在1 L的烧杯中进行溶解以获取其中的水不溶成分。为防止水不溶物的溶解,要不断搅拌以便易溶盐类尽快溶解。待可溶盐分溶解完毕,用蒸馏水冲洗2~3次,最后用无水乙醇冲洗并在烘箱中低温烘干($\leq 40^\circ\text{C}$)。样品烘干后盛到自封袋中并放入干燥器中备用。

3.2 样品分析

3.2.1 镜下鉴定分析

前人已对该万象盆地通芒和农刀钾盐矿区的水不溶物进行了研究(张西营,2012),主要在借鉴前人研究的基础上利用偏光显微镜对矿物进行鉴定。首先在双目镜下对矿物的物理性质、形貌特征及含量等进行观察、描述和拍照;对于不确定的矿物,在偏光显微镜下利用油浸法进一步鉴定分析。

3.2.2 XRD物相分析

取水不溶物样品少量约3~5 g,在玛瑙研钵中研磨至200目,利用荷兰帕纳科公司的X'Pert Pro型粉晶X射线衍射仪对矿物种类及含量进行测定。

实验条件为:电压为40 kV,电流为30 mA,铜靶Ka辐射($\lambda=1.5406$),扫描角度(2θ)为 $5^\circ\sim 80^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。各矿物种类的检出及相对百分含量的确定由该仪器自带的软件X'Pert Highscore Plus完成。

3.2.3 SEM-EDS分析

选取ZK16-25到ZK16-36等12个样品进行了水不溶物的单矿物扫描电镜分析,由于方硼石是水不溶物的主要和典型矿物,因此本次对该矿物进行了形貌观察和能谱分析。首先将每袋样品挑5~8颗方硼石粘在样品台上,然后用液体导电胶将其包裹,并在表面进行喷碳处理,最后放在样品室进行主要元素成分分析。扫描电镜型号为JSM5610/X-MAX,电流为20 mA,电压为40 kV。

上述分析测试工作均在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成。

4 结 果

4.1 主要水不溶物矿物组成

XRD分析结果显示(表1),水不溶矿物主要包

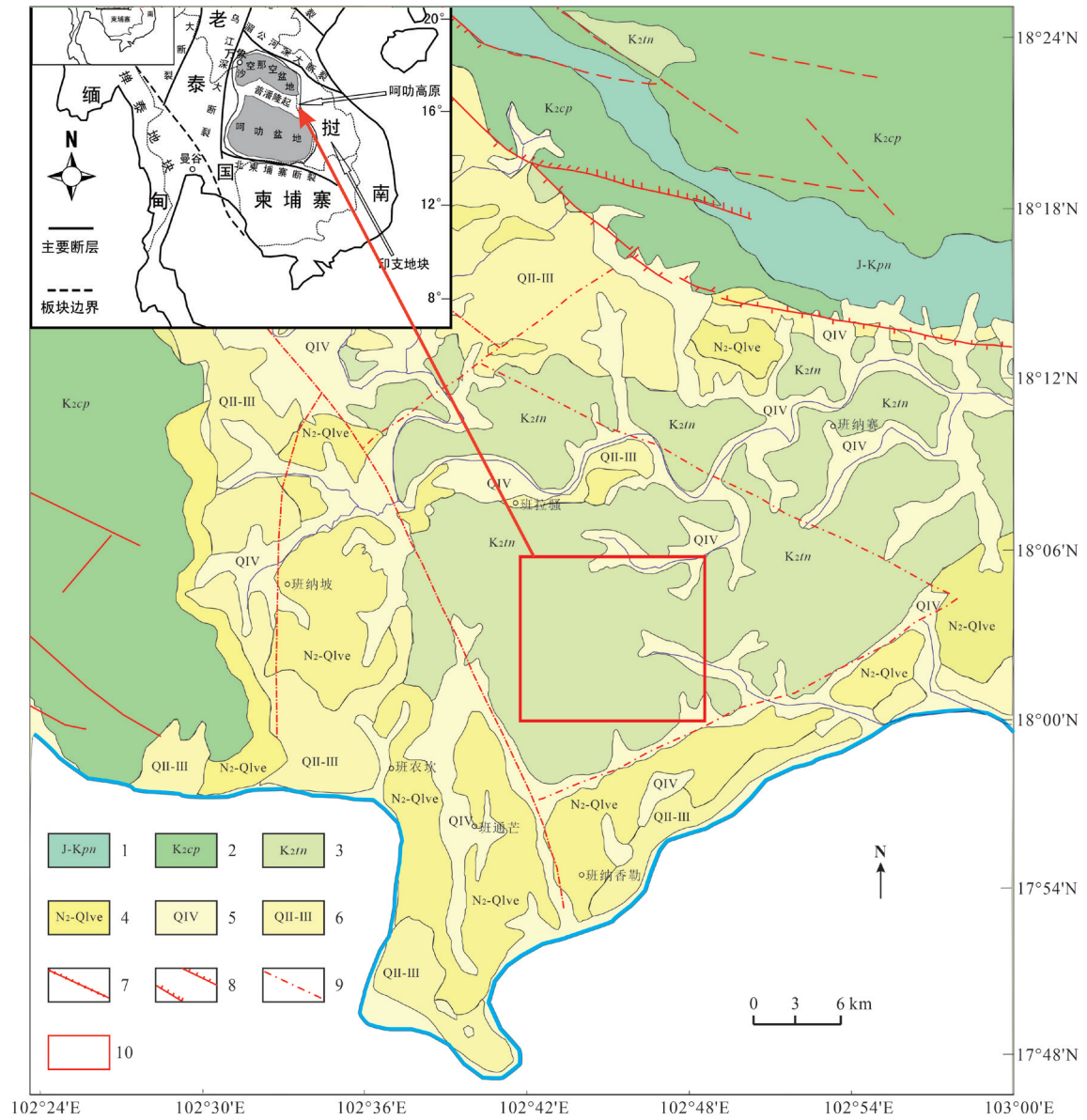


图1 研究区位置及其构造图(据郭远生等,2005)

1—侏罗—白垩系 Phu Pha Nang 组;2—上白垩统 Champa 组;3—上白垩统 Tha Ngon 组;4—新近系中新统;5—上新统—第四系;6—第四系中—晚更新统;7—正断层;8—逆断层;9—推测断层;10—海夏峰矿区位置

Fig.1 Location and tectonic diagram of Khorat Plateau(after Guo Yuansheng et al., 2005)

1—Jurassic—Cretaceous Phu Pha Nang Formation; 2—Late Cretaceous Champa Formation; 3—Late Cretaceous Tha Ngon Formation; 4—Neogene Miocene sediments; 5—Pliocene—Quaternary sediments; 6—Quaternary Middle—Late Pleistocene System; 7—Normal fault; 8—Reverse fault; 9—Speculate fault; 10—Location of Haixiafeng mining area

括硬石膏、方硼石、白云母、石英、水氯硼钙石、碳酸盐矿物以及零散分布的黄铁矿等。其中,以方硼石和硬石膏是最主要的水不溶矿物,石英的含量也较多,其他矿物含量一般较少。

方硼石是水不溶物中含量最多的矿物,钾盐矿层中普遍存在该矿物方硼石一般为无色透明一半

透明,晶体单形常见四面体(图2a)和立方体(图2b),并且在双目镜下发现立方体方硼石具有乳白色内核(图2c),可见穿插双晶(图2d)。一些层位的方硼石以鲕粒为主,具有明显的同心环状—放射状结构(图2e~h),一般包壳很少或不具有包壳,部分颗粒有3~4层包壳(图2f,g)(图)。这些鲕粒一般分

表1 海夏峰矿区ZK16主要的矿物组分
Table 1 The main mineral components of ZK16 in Haixiafeng mining area

	主要矿物组分/%							
	方硼石	石英	硬石膏	钠长石	石膏	水氯硼钙石	白云母	白云石
最大值	89	69	34	7	4	7	7	1
最小值	3	4	0	0	0	0	0	0
平均值	61.65	21.12	10.59	2	0.47	1.76	0.71	0.06

布在钾盐矿层上部,一些鲕粒的表面包裹一层无色透明的方硼石晶体(图2e)。蒋志斌等(2008)对鲕粒(主要是碳酸盐鲕)的形成要素、沉积环境意义等方面进行了详细阐述,一般而言鲕粒形成于受扰动(或强或弱)和细菌作用下的浅水环境。对于非鲕粒方硼石,考虑到其含量较少且分散在主要盐类矿物中,很可能是在富硼晶间卤水环境中形成的。

硬石膏是样品中水不溶物中含量仅次于方硼石的矿物,几乎所有样品中都多少含有该矿物。硬石膏是一种硫酸盐矿物,属于斜方晶系。在镜下观察矿层中一般为无色透明的长条状(图3a)、短柱状(图3b)、板片状(图3d)晶体。而岩盐中的硬石膏多以灰白色隐晶质团粒集合体出现(图3c),大小不一。石膏和硬石膏是卤水沉积过程中常见的盐类

矿物,一般而言,对于古蒸发岩,其中的硬石膏是成岩阶段石膏因失水而形成的。

除了上述主要的盐类矿物之外,还有一定数量的石英和少量的白云母等其他矿物。石英几乎在所有样品中都存在,但一般含量较少且晶体较小,一般为玻璃光泽,呈无色透明、浅黄色、浅粉色单晶颗粒,多数石英晶体自形程度较好(图3f),推测是自生矿物;同时,较多的石英也表明钾盐沉积阶段有陆源碎屑物质(硅酸盐矿物)输入到成盐盆地中,在合适的卤水介质条件下形成了这些自生的石英晶体。白云母含量很少且仅在少数样品中存在,多为扇形楔状集合体,无色透明,解理清晰,边缘有磨蚀痕迹(图3e)。白云母显然不是卤水中自生的,考虑其尺寸超过1 mm和明显缺乏风蚀痕迹,应该不

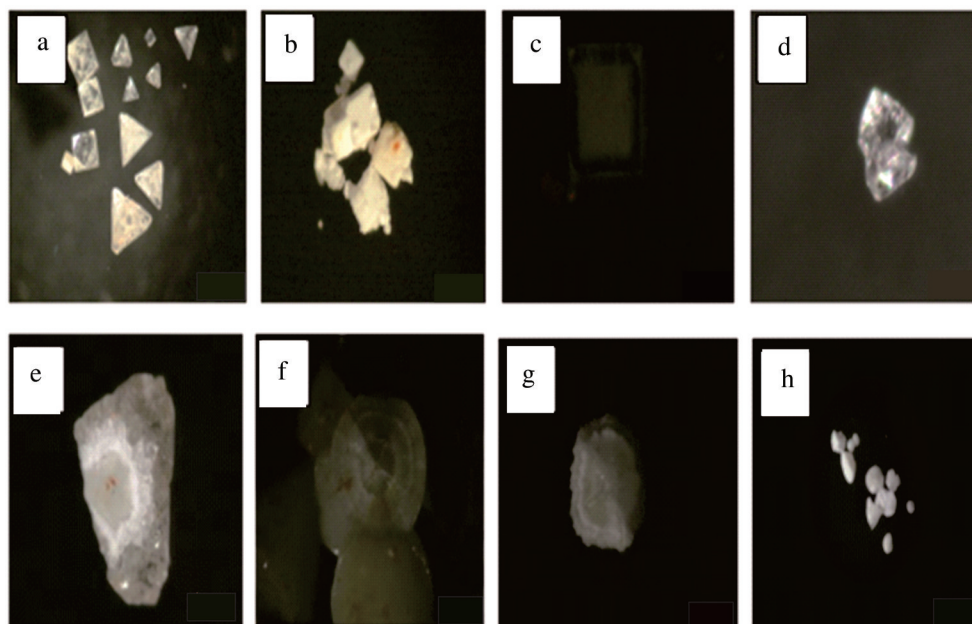


图2 方硼石形貌特征(体视镜,×50)

a—四面体方硼石;b—立方体方硼石;c—含乳白色内核方硼石;d—双晶状方硼石;e, f—同心环状鲕粒方硼石

Fig.2 Morphologic characteristics of boracites (stereoscope, ×50)

a—Tetrahedral cubic borborite; b—Cubic borborite; c—Opalescent core-bearing cubic borborite; d—Bicarbonite; e, f—Concentric annular oolite borborite; g, h—Radial oolite borborite

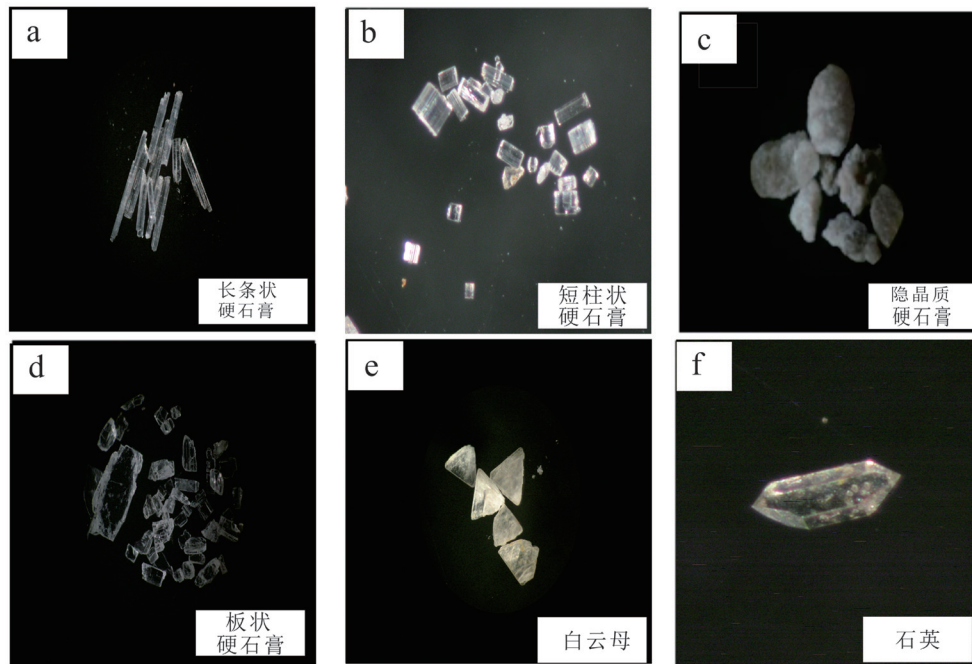


图3 其他水不溶矿物的形貌特征(体视镜,×50)

a—长条状硬石膏;b—短柱状硬石膏;c—隐晶质硬石膏;d—板状硬石膏;e—白云母;f—石英

Fig.3 Morphologic characteristics of other insoluble minerals (stereoscope, ×50)

a—Long strip anhydrite; b—Short column anhydrite; c—Cryptocrystalline anhydrite; d—Plate anhydrite; e—Muscovite; f—Quartz

可能是风成沉积的产物,因此可以确定这些白云母是河流携带而来的。

4.2 方硼石主要化学成分

方硼石是钾盐矿层最主要的水不溶矿物,选择部分层位样品中的方硼石开展了扫描电镜分析(图4),观察其微观形貌特征并分析其化学组成。

扫描电镜分析结果显示(表2),方硼石颗粒中的主要元素为O、Mg、Cl及B(属于轻元素,未显示),但这些颗粒(无论是单晶体还是鲕粒)中基本都含有少量的Ca,大部分颗粒还含有一定Si和Al,有些颗粒中的Si、Al含量还特别高(图4)。这表明方硼石颗粒的成分是复杂的,里面可能存在一些硼的硅酸盐矿物(张西营,2012)。而在ZK16中只含有少量的Fe或者根本不存在,且Si、Al的含量也很少说明ZK16沉积环境较为简单。

5 讨论

5.1 主要水不溶矿物剖面分布特征

根据图5可知,主要水不溶矿物在剖面上呈现明显的阶段性变化,根据这些矿物组合及形貌特征,大致可以把剖面分为4个阶段(图5)。

(1)166~135 m:下部岩性为含光卤石和钾石盐的岩盐,上部岩性为含石盐夹层的光卤石岩,主要岩性特征表明卤水进入了钾盐析出阶段。主要水不溶物方硼石、硬石膏和石英。硬石膏和石英的含量呈逐渐递减趋势,而方硼石含量自下而上逐渐增加,这表明卤水逐渐浓缩,硫酸盐矿物逐渐减少而硼酸盐矿物逐渐浓缩析出。该阶段后期还发现了少量水氯硼钙石,表明在卤水蒸发浓缩到一定程度后,开始形成Ca的硼酸盐矿物。该阶段发现局部层位偶见黄铁矿产出,可能代表了卤水在某些时候为还原环境。该阶段还发现陆源碎屑白云母,白云母分布比较零散和广泛,但含量较少,石英和白云母的出现表明蒸发岩沉积时受到陆地水的重要影响。

(2)135~120 m:主要岩性为光卤石岩。该阶段,方硼石是最主要的水不溶矿物,石英含量持续降低但普遍存在,硬石膏在该段下部仍存在但上部已经很少(XRD中未检出),水氯硼钙石持续形成。值得注意的是,该阶段一部分方硼石以鲕粒的形式普遍存在,这指示了成矿卤水为浅水环境且水动力条件较强。

(3)120~105 m:主要岩性为光卤石岩。该阶段

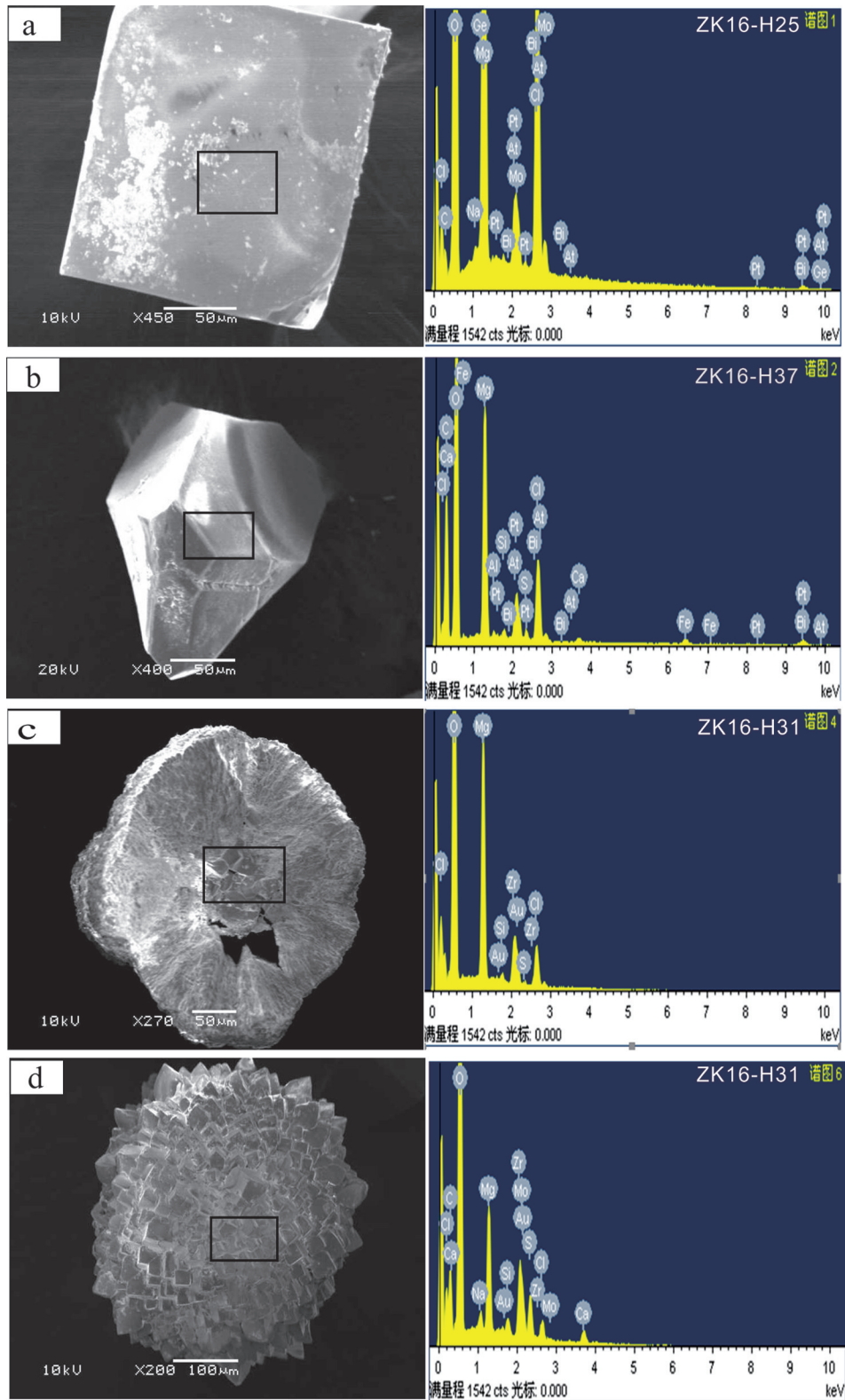


图4 ZK16方硼石颗粒形貌以及SEM-EDS分析结果(图片中黑框为分析区域)

a—四面体立方硼石;b—立方体方硼石;c—鲕粒方硼石中心;d—鲕粒方硼石外壳

Fig.4 The morphology of ZK16 boron particles and SEM-EDS analysis results (the black box in the picture is the analyzed area)

a-Tetrahedral cubic boronite; b-Cubic boronite; c-Oolitic boronite center; d-Oolitic boronite shell

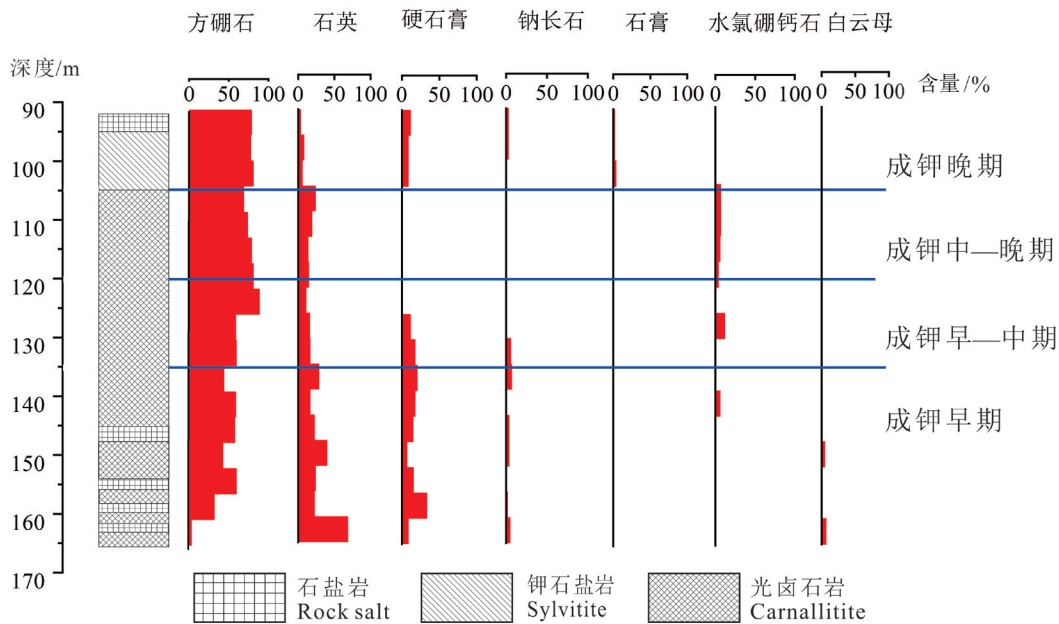


图5 ZK16孔主要水不溶矿物组成随深度变化关系

Fig.5 The variation of main insoluble minerals in ZK16 with the depth

主要的水不溶物为方硼石晶体,镜下观察未见鲕粒方硼石;石英含量相对较少但普遍存在。该阶段硬石膏在XRD中未检出,镜下观察也仅仅是发现了很少的硬石膏晶体,取而代之的含Ca矿物是持续形成的少量水氯硼钙石。

(4)105~93 m:主要岩性为钾石盐岩,顶部为岩盐。该阶段方硼石仍然是主要的水不溶矿物且以晶体形式存在;石英含量持续减少,是整个剖面中含量最低的;硬石膏含量较低但普遍存在,同时还发现了石膏;个别层位还发现了黄铁矿。该阶段钾盐矿物为次生钾石盐,这些次生钾石盐的形成是后期地表水进入矿层顶部发生水岩作用的结果(Hite, 1974;张西营等,2015),因此,该阶段的石膏应该是硬石膏水化作用的结果,为次生成因。

综上所述,ZK16孔主要水不溶矿物中,方硼石的含量自下而上呈现逐渐增加趋势,硬石膏和石英的含量呈现逐渐递减的趋势,这反映了卤水逐渐浓缩的趋势。同时,一些矿物的产出层位和形貌特征指示了特定的沉积环境,根据这些水不溶矿物的组合、分布及其形貌特征,结合主要岩性,可以为精细重建卤水演化晚期的沉积环境提供重要依据。钾盐矿床中的水不溶矿物虽然含量比较少,但由于其不易溶解且与卤水的演化密切相关,对于揭示成盐

晚期的沉积环境及重建古卤水演化过程具有独特的重要作用。

5.2 研究区沉积环境和钾盐沉积阶段划分

根据目标钻孔钾盐沉积阶段的主要岩性及水不溶物的矿物学及地球化学特征,研究区沉积环境可划分为以下4个演化阶段,这些演化阶段不同程度地受到陆相输入物质的影响。

5.2.1 成钾早期:波动沉积阶段

在大量石盐结晶析出后,卤水更加浓缩而进入钾盐析出阶段,此时不仅出现钾石盐矿化层,同时光卤石也逐渐析出。从硬石膏含量逐渐减少和方硼石含量逐渐增加以及光卤石含量在后期大量析出等证据来看,卤水总体上是逐渐浓缩的。成钾早期钾盐层与石盐层往往交替出现,甚至在光卤石大量析出时期也出现石盐夹层,则表明卤水环境并不太稳定。从水不溶物中石英含量较高及陆源碎屑白云母的出现和广泛存在可以看出,这种不稳定性很可能与成钾初期陆相水的输入有很大关系,当然也可能此时仍存在一定的海水进入成盐盆地。

5.2.2 成钾早—中期:浅水沉积阶段

该阶段光卤石大量析出且没有发现明显的石盐夹层,表明成矿卤水进持续蒸发浓缩。此时虽然仍存在陆相水的输入,但相对已经减弱。该阶段发

表2 ZK16方硼石颗粒SEM-EDS元素分析结果
Table 2 SEM-EDS element analyzed results of ZK16 boron particles

颗粒编号	方硼石颗粒形态	主要元素含量/%							寄主岩性	
		O	Mg	Cl	Ca	Si	Al	Na		Fe
A	立方体	63.95	10.14	3.19		6.2		0.18		光卤石
B	双晶	57.26	5.42	1.18		0.24	0.16		0.11	光卤石
C	鲕粒(中心)	67.97	7.5	1.27	0.22	2.36	0.75			光卤石
D	鲕粒	67.9	0.91	0.90	0.07	0.47		0.29		光卤石

现了鲕粒方硼石的存在,表明在强烈蒸发作用下,成盐盆地进一步萎缩和水体进一步变浅,鲕粒方硼石的含量很少则指示了该区域成矿卤水水动力条件较弱。根据万象北部通芒矿区(图1)多个钻孔的分析(张西营,2012),该地区鲕粒方硼石主要出现在矿层的上部或顶部且大量存在,此后很快就进入碎屑沉积阶段。但夏海峰ZK16孔剖面中方硼石主要出现在矿层的中部且含量很少。这些证据表明研究区应该处于靠近区域沉积中心的位置,鲕粒方硼石形成时水体相对较深,因此此后仍然继续有钾盐沉积而非很快进入碎屑沉积阶段。

5.2.3 成钾中—晚期:稳定沉积阶段

该阶段主要岩性仍为光卤石岩,代表了卤水仍在持续蒸发阶段。方硼石是主要的水不溶物且含量比较稳定,水氯硼钙石持续析出,但未发现硬石膏,这表明卤水进入后期演化阶段。该阶段没有检测到外源碎屑矿物(白云母、钠长石等),表明陆相输入物质大大减少。但鲕粒方硼石的基本缺失应该是该阶段水动力条件较弱的缘故。

5.2.4 成钾晚期:改造作用阶段

该阶段主要岩性为次生钾石盐岩,顶部为石盐层。该阶段水不溶物主要为方硼石,硬石膏也再次出现;同时,次生钾石盐之上为石盐层,而后就很快进入碎屑沉积阶段。上述现象指示了卤水逐渐淡化和逆向演化的趋势,钾盐沉积进入尾声阶段,即将结束。该层位石英和钠长石等碎屑矿物很少,表明钾盐沉积时陆相碎屑输入很少,蒸发岩的沉积主要受蒸发浓缩作用的影响。

蒸发岩是在以太阳蒸发作用为驱动的水文环境下,饱和地表或近地表卤水发生沉淀所形成的(Warren, 1999)。法国Mullhouse和西班牙Granada钾盐盆地沉积剖面不同层位中石盐包体水化学成

分、石盐和石膏中Sr同位素等分析表明,由于非海相物质(陆地水、深部热液及循环的古卤水等)的输入,古卤水在早期演化过程中具有明显的海相特征,但后期则逐渐向陆相转变(Cendón et al., 2003; García et al., 2013)。现代盐系统水文地质过程研究表明,水文开放系统会产生复杂的矿物系列(Yechieli and Wood, 2002)。Grice et al.(2005)对加拿大New Brunswick地区Millsteam和Penobsquis钾盐矿床中的主要盐类沉积及硼酸盐矿物进行对比研究发现:前者钾盐沉积为光卤石+钾石盐组合,硼酸盐矿物为简单的Mg-Ca硼酸盐,表明该盆地是一个孤立封闭的内盆地;而后者钾盐矿物仅为钾石盐,硼酸盐矿物则为复杂的Ca-K-Fe-Mg硼酸盐,这指示了该盆地处于相对开放的水文环境且受到了陆源物质的影响。喀尔巴阡山地区钾盐矿床中明显偏正的石盐Cl同位素组成(Eastoe et al., 2007)及老挝一些钾盐矿床中水不溶硼酸盐矿物 $\delta^{11}\text{B}$ 值在剖面上的变化(Zhang et al., 2013)也指示了非海相输入物源的影响。因此,蒸发岩形成的后期,随着水体的萎缩,陆相水的作用和影响也越来越显著。

实际上,通芒矿区一些钻孔的个别层位中还发现了较多的镁铁方硼石(Trembathite)和铁方硼石(刚果石,Ericaite)(张西营,2012),相对于研究区简单的硼酸盐矿物(镁方硼石和水氯硼钙石);从方硼石的化学成分来看(张西营,2012),通芒矿区钾盐层中的方硼石比海夏峰钾盐矿区含有更多的Fe、Sr等元素。上述证据表明,通芒矿区(沉积盆地边缘地区)的水文环境更为复杂,受陆相水的影响更为强烈。总之,通过ZK16孔水不溶矿物的研究,可以更为精细地识别不同的沉积环境,而仅仅通过主要岩性的分析是很难做到的。因此,水不溶物有可能成为精细刻画短时间尺度沉积环境和过程的重要

指标,对于研究蒸发岩矿床具有重要意义。

6 结 论

(1)镜下观察及XRD分析表明,老挝万象海夏峰地区水不溶物矿物主要有方硼石、硬石膏、石英、白云母、水氯硼钙石等,其中最主要的是方硼石和硬石膏;方硼石以鲕粒和晶体颗粒两种方式存在。

(2)石英及白云母等水不溶物的存在及其分布特征表明,钾盐沉积之初就受到陆相水体影响,但整体上影响逐渐减弱。

(3)根据主要岩性变化、水不溶矿物的组合及分布特征,研究区整个演化过程大致可以分为成钾早期的波动沉积、成钾早—中期的浅水沉积、成钾中—晚期的稳定沉积和成钾晚期的改造作用等4个阶段。

致谢:中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心的戈桦、韩丽、丁秀萍等老师在样品分析中给予的大力帮助,主编和评审人提出了宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

References

- Cendón D I, Ayora C, Pueyo J J, Taberner C. 2003. The geochemical evolution of the Catalan potash subbasin, South Pyrenean foreland basin (Spain)[J]. *Chemical Geology*, 200(3/4): 339–357.
- Eastoe C J, Peryt T M, Petrychenko O Y, Geisler-Cussey. 2007. Stable chlorine isotopes in Phanerozoic evaporites[J]. *Applied Geochemistry*, 22(3): 575–588.
- Gao Xiang, Cai Keqin, Li Dairong, Peng Qiang, Fang Qinfang, Qin Hong. 2012. Mineralogical and geochemical characteristics and genesis of the potassium–magnesium salt deposit in Khammouan Province, Laos[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 578–588 (in Chinese with English abstract).
- García V J, Cendón D I, Rosell L, Ortelí F, Ruiz J T, Martín J M, Sanz E. 2013. Salt deposition and brine evolution in the Granada Basin (Late Tortonian, SE Spain) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 369: 452–465.
- Grice J D, Gault R A, Velthuisen J V. 2005. Borate minerals of the Penobsquis and Millstream Deposits, southern New Brunswick, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(5): 1496–1487.
- Guo Yuansheng, Wu Jun, Zhu Yanzhe, Yan Chengwen, Zhao Jin, Chen Wen. 2005. Potash Geology in Vientiane of Laos[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1–219 (in Chinese with English abstract).
- Hite R J. 1974. Evaporite deposits of the Khorat Plateau, northeastern Thailand[C]//Coogan A H (ed.). Fourth Symposium on Salt. Cleveland: Northern Ohio Geological Society Inc: 135–146.
- Hite R J, Japakasetr T. 1979. Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos[J]. *Economic Geology*, 74(2): 448–458.
- Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zhang Fan, Zeng Deming, Zhang Jinyou, Lu Tiemei. 2008. Distribution and controlling factors of reefs and oolitic beaches for the Changxing to Feixianguan formations in the northern Sichuan basin[J]. *Geology in China*, 35(5): 940–950 (in Chinese with English abstract).
- Li M H, Yan M D, Fang X M, Zhang Z J, Wang Z R, Sun S R, Li J, Liu X M. 2018. Origins of the Mid–Cretaceous evaporate deposits of the Sakhon Nakhon Basin in Laos: Evidence from the stable isotopes of halite[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 209–222.
- Li Yanqiang. 2018. Geological Characteristics and Genesis of Potash Deposits in Haixiafeng, Laos[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 3–54 (in Chinese with English abstract).
- Liang Guanghe. 2018. A study of the genesis of Hainan Island[J]. *Geology in China*, 45(4): 693–705 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhao Yanjun, Cao Yangtong, Fang Xiaomin, Shen Lijian, Wu Chihua, Lü Fenglin, Ding Ting. 2018. The Mesozoic–Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: Implications for potash formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 102: 406–425.
- Meesook A. 2000. Cretaceous environments of northeastern Thailand[J]. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 17: 207–223.
- Metcalfe I. 1988. Origin and assembly of south–east Asian continental terranes[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 37 (1): 101–118.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. 1994. Potash Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 216–243 (in Chinese).
- Sato K, Liu Y, Wang Y, Yokoyama M, Yoshioka S Y, Yang Z, Otofui Y I. 2007. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China: Evidence of internal deformation of the Indochina block[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1): 1–15.
- Tabakh M E, Utha–Aroon C, Schreiber B C. 1999. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 123(1): 31–62.
- Tan H B, Ma H Z, Li B K, Zhang X Y, Xiao Y K. 2010. Strontium and boron isotopic constraint on the marine origin of the Khammouan potash deposits in southeastern Laos[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(27/28): 3181–3188.
- Tang Qiliang, Zhang Xiyi, Li Wenxia, Han Yuanhong. 2016. Boron isotope geochemical study of mudstone in Longhu mining area of Laos: A case study of ZK309[J]. *Mineral Deposits*, 35(1): 196–202 (in Chinese with English abstract).
- Utha–Aroon C. 1993. Continental origin of the Maha Sarakham

- evaporites, northeastern Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 8(1/4): 193–203.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Wang Licheng, Zhang Linbing. 2013. Reviews on potash deposit metallogenic conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 28(9): 976–987 (in Chinese with English abstract).
- Wang J Y, Lowenstein T K. 2017. Anomalously high Cretaceous paleobrine temperatures: Hothouse, hydrothermal or solar heating?[J]. *Minerals*, 7(12): 245.
- Warren J K. 1999. *Evaporites: Their Evolution and Economics*[M]. Oxford: Blackwell Science, 249–250.
- Yang Z, Besse J. 1993. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3/4): 525–552.
- Yang Z, Besse J, Suteethorn V, Bassoulet J P, Fontaine H, Buffetaut E. 1995. Lower–Middle Jurassic paleomagnetic data from the Mae Sot area (Thailand): Paleogeographic evolution and deformation history of Southeastern Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3/4): 325–341.
- Yechieli Y, Wood W W. 2002. Hydrogeologic processes in saline systems: Playas, sabkhas, and saline lakes[J]. *Earth–Science Reviews*, 58(3): 343–365.
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Wang Licheng, Fang Xiaomin. 2014. Characteristics of sulfur isotopes in evaporative rocks of potash deposit in Taqu basin, Laos and its indicative significance of potassium formation[J]. *Geological Review*, 60(4): 851–857 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiyong. 2012. Constraints of the Insoluble Minerals on Formation of Tachyhydrite and Evolution of Brine in Potash Deposits of Vientiane Basin, Laos[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 59–173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiyong, Cheng Huaide, Tan Hongbing, Yuan Xiaolong, Li Yongshou, Miao Weiliang, Li Tingwei, Ma Haizhou. 2015. Late Cretaceous potash evaporites in Savannakhet Basin of middle Laos: Geochemical evidences of non–marine inputs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2783–2793 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X Y, Ma H Z, Ma Y Q, Tang Q L, Yuan X L. 2013. Origin of the late Cretaceous potash–bearing evaporites in the Vientiane Basin of Laos: $\delta^{11}\text{B}$ evidence from borates[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 812–818.

附中文参考文献

- 高翔, 蔡克勤, 李代荣, 彭强, 方勤方, 秦红. 2012. 老挝甘蒙省钾镁盐矿床含矿段的矿物学和地球化学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 578–588.
- 郭远生, 吴军, 朱延浙, 严城文, 赵劲, 陈文. 2005. 老挝万象钾盐地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1–219.
- 蒋志斌, 王兴志, 张帆, 曾德铭, 张金友, 鲁铁梅. 2008. 四川盆地北部长兴组—飞仙关组礁、滩分布及其控制因素[J]. *中国地质*, 35(5): 940–950.
- 李彦强. 2018. 老挝海夏峰钾盐矿床地质特征及成因[D]. 北京: 中国地质大学, 66.
- 梁光河. 2018. 海南岛的成因机制研究[J]. *中国地质*, 45(4): 693–705.
- 钱自强, 曲一华, 刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 216–243.
- 唐启亮, 张西营, 李雯霞, 韩元红. 2016. 老挝龙湖矿区泥岩层B同位素地球化学初步研究——以ZK309为例[J]. *矿床地质*, 35(1): 196–202.
- 王春连, 刘成林, 王立成, 张林兵. 2013. 钾盐矿床成矿条件研究若干进展[J]. *地球科学进展*, 28(9): 976–987.
- 张华, 刘成林, 王立成, 方小敏. 2014. 老挝他曲盆地钾盐矿床蒸发岩硫同位素特征及成钾指示意义[J]. *地质论评*, 60(4): 851–857.
- 张西营. 2012. 老挝万象盆地钾盐矿床水不溶物对溢晶石形成和卤水演化的制约[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 59–173.
- 张西营, 程怀德, 谭红兵, 袁小龙, 李永寿, 苗卫良, 李廷伟, 马海州. 2015. 老挝中部沙湾拿吉盆地晚白垩世钾盐蒸发岩: 非海相输入的地球化学证据[J]. *岩石学报*, 31(9): 2783–2793.