# 老挝他曲地区石盐流体包裹体特征、氢氧同位素 组成及成盐物质补给方式

张华1,2),刘成林1),赵艳军1),丁婷3)

中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京,100037;
2) Department of Geological Sciences, Freie Universität Berlin, Malteserstr, 74-100,

12249 Berlin, Germany; 3) 中国地质大学(北京),北京,100083

内容提要:对老挝他曲地区钻孔中石盐流体包裹体特征、类型以及氢氧同位素组成进行了研究,用以重塑盆地 成盐过程中的古环境,并在此基础上对盆地成盐物质的补给方式进行了探讨。结果显示,钻孔中塔贡组下盐段原 生石盐岩主要包括人字形和漏斗形晶体两种类型。其中人字形石盐晶体在下盐段中广泛发育,漏斗形晶体数量较 少,但通常与人字形石盐晶体产于同一层位,指示了下盐段沉积时盆地处于一种极浅水环境。石盐原生流体包裹 体氢氧同位素组成明显偏离全球大气降水线,集中分布于其右下方,反映盆地成盐过程中处于强烈蒸发条件之下。 氢氧同位素组成在纵向上的变化,可能揭示了在盐湖演化至钾盐沉积阶段大气温度具有升高趋势。白垩纪中期全 球海平面达到极大值,而在呵叻盆地内部,持续的坳陷和强烈的蒸发作用将导致湖平面快速下降。这样,外海与盐 盆之间则会产生水位差,由此产生的水力梯度将为外海海水通过障壁向盆地方向进行渗透提供潜在的动力。此 外,早白垩世呵叻高原广泛发育的沙漠沉积,则为外海海水大规模的侧向渗透进入盐盆提供了可能的通道。因此, 结合现有的资料,本文提出,除海侵补给外,外海通过障壁侧向渗透补给对老挝钾盐盆地成盐物质的供给也具有重 要作用。

关键词:流体包裹体;石盐;浅水环境;大气温度;海水渗透

呵叻高原钾盐矿床是世界上最大的钾盐沉积矿 床之一(Fan,2000),其与我国云南兰坪-思茅钾盐盆 地在白垩纪时期处于同一构造带上,在盆地构造-沉 积演化、古环境方面存在相似之处(曲懿华,1997;李 兴振等,2004;张华等,2014;Wang et al.,2014, 2015;Zhang et al.,2015)。因此,对呵叻高原钾盐 矿床成盐环境、成矿物质补给方式等方面的研究,可 以为我国兰坪-思茅盆地钾盐矿床的勘探和开发提 供重要的借鉴和指导。

前人对呵叻高原钾盐矿床的研究多集中于对盆 地成盐物质起源的探讨,如海源成因(Hite,1974; Sundharovat,1976; Thiramongkol,1978; Hite et al.,1979; El Tabakh et al.,1999; Tan et al.,2010; Zhang et al.,2013;张华等,2014)或者陆源成因 (Utha-Aroon,1993; Garrett,1996; Racey et al., 2009),而对成盐过程中古环境背景以及成盐物质补 给方式等研究较少。盐类矿物由于对环境变化极其 敏感,在重塑地质时期古环境变化中有重要作用 (Roberts et al.,1995;Benison et al.,2000)。特别 地,保存在石盐中的原生流体包裹体记录了盐湖演 化过程,因此运用石盐流体包裹体记录的地质信息 已经成为地质学家反演古环境演化的重要手段 (Roberts et al.,1995;Lowenstein et al.,1998; Zhao et al.,2014;Zhang et al.,2015)。

文章拟通过对呵叻高原北部老挝他曲地区钻孔 石盐岩原生流体包裹体特征以及氢氧同位素组成进 行分析,从而对盆地成盐成钾过程中的古环境进行 恢复,并对成盐物质补给方式进行初步探讨。

### 1 地质背景

呵叻高原位于泰国东北部和老挝中部,是一个 受周边深大断裂控制、长期稳定持续下降的坳陷带 (李善平等,2009)。高原中新生代的构造和沉积演 化与特提斯洋密切相关(Sone et al,2008;

注:本文为国家重点基础研究发展计划"973"项目(编号 2011CB403007)和"十二五"科技支撑计划(编号 2011BAB06B06)资助成果。 收稿日期:2015-07-16;改回日期;2015-08-10;责任编辑:周健。

作者简介:张华,男,1985年生。博士,主要从事含盐盆地古环境研究。通讯地址:100037,中国地质科学院矿产资源研究所; Email:zhhcdut@163.com。

Metcalfe, 2011)。晚三叠世早期, Sibumau 地体与 印支陆块西部 Sukhothai 弧发生碰撞,古特提斯洋 在东段关闭(Sone et al., 2008)。伴随构造后的松 弛或拉张背景,呵叻高原半地堑盆地形成,沉积了呵 叻群(Khorat Group)厚度达5 km 的非海相红层 (El Tabakh et al., 1999)。呵叻群之上为一套蒸发 岩序列,发育三个明显的蒸发沉积旋回,自下而上表 现为:基底硬石膏层一下盐层一下碎屑层一中盐 层一中碎屑层一上盐层(硬石膏层)一上碎屑层。该 含盐序列在泰国称之为马哈萨拉堪组 (Mahasarakham Formation),在老挝称为农波组 (Nong Bok Formation) 或者塔贡组(Tagon Formation),三者实则为同一套地层,在沉积序列及 矿物岩石组合方面均可以良好对比(El Tabakh et al.,1999)。孢粉学(Sattayarak et al.,1991;Smith et al., 1996; Racey et al., 2009) 以及同位素年代学 (Hansen et al., 2002)表明,该含盐序列形成时代为 Albian 阶至 Cenomanian(112~93 Ma)。岩石学以 及沉积学研究表明,呵叻高原含盐系可能形成于内 陆环境(Utha-Aroon, 1993; El Tabakh et al., 1999),并在成盐过程中遭受过海侵且与中国云南的 兰坪-思茅盆地曾经连通(张华等,2014; Wang et al.,2014,2015)。古新世早期,持续的碰撞导致盆 地隆升,大约 3000m 厚的呵叻群遭受剥蚀,并在盆 地中央部位形成 NW-SE 向的普潘隆起 (Cooper et al.,1989;Mouret,1994),将高原分为两个盆地,即 南部的呵叻盆地以及北部的沙空那空盆地(图1)。

## 2 样品采集及实验方法

#### 2.1 样品采集

样品采自中农矿产资源勘探有限公司在万象东 南部他曲地区新近布置的 ZK2893 钻孔(图1)。岩 芯观察显示,ZK2893 钻孔中塔贡组主要发育中、下 含盐段。本文样品选自下盐段,具体岩性及取样位 置见图2。钻孔揭示的下盐段总厚度约190 m,自下 而上主要由基底硬石膏层、石盐层、硬石膏标志层、 钾盐层以及最顶部的碎屑岩层组成(图2)。

钻孔中石盐主要由两种类型组成:一类以无色、 透明石盐晶体为特征,晶体内包裹体不发育。另一 类石盐则为烟熏色或者乳白色,见部分泥质物质浸 染,石盐晶体包裹体十分发育。原生的石盐晶体分 为漏斗形(图 3a)和人字形晶体(图 3a、3b)两种类 型。相比漏斗状石盐晶体,下盐段中人字形石盐晶 体发育更为普遍;漏斗状石盐较少,但常常与人字形



(底图据张西营等,2010)

Fig. 1 Simplified geological map of Thakhek area, Laos and location of borehole (base map after Zhang et al., 2010)

石盐共同产出。漏斗形和人字形晶体中均可见以包 裹体密集发育的包裹体条带和包裹体不发发育的空 白条带互层产出(图 3)。一些情况下,可见人字形 晶体顶部被溶蚀,从而留下垂直溶解缝或者晶体被 强烈溶蚀从而留下"鱼骨头"外形(图 3a)。这种鱼 骨头样式可能反映了淡水沿石盐晶体生长边的选择 性溶蚀作用(Lowenstein et al.,1985)。

#### 2.2 实验方法

氢氧同位素测试对象为原生石盐岩单一液相流体包裹体。实验过程中,首先挑选出原生流体包裹体保存较好的石盐,用无水乙醇进行清洗,然后晒干并粉碎至 40~120 目,放于干燥器中备用。测试工作由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试仪器为 Finnigam MAT 253 EM 型质谱。 氢同位素分析采用爆裂法取水、锌法制氢,爆裂温度为550℃。氢同位素分析精度为+2‰,实验结果均以 SMOW 为标准。氧同位素分析在 10<sup>-3</sup> Pa 真空条件下进行,不含氧矿物包裹体中的水与 BrF₅在 300℃恒温条件下反应 20min 产生 O₂,用冷冻法提纯 O₂,以铂作为催化剂,在 700℃恒温下与石墨反应获取 CO₂,用 MAT253 气体同位素质谱获取样品氧同位素组成。测试结果以 SMOW 为标准,分析



图 2 老挝他曲地区 ZK2893 钻孔塔贡组下盐段岩性、采样位置及氢氧同位素组成变化 Fig. 2 Petrology of the Lower member of Tagon Formation of core ZK2893, Thakhek area, Lao, sampling sites and variation of hydrogen-oxygen composition of halite fluid inclusions

精度优于+2‰。氧同位素参考标准为 GBW-04409、GBW-04410 石英标准,其值分别为 11.11‰+0.06‰和-1.75‰+0.08‰。

3 测试结果

石盐包裹体氢氧同位素测试结果见表1。

表 1 老挝他曲 ZK2893 钻孔塔贡组下盐段石盐流体 包裹体氢氧同位素组成

Table 1 Hydrogen-Oxygen composition of halite fluid inclusions in the Lower member of Tagon Formaition in core ZK2893, Thakhek area, Laos

编号	深度	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$	$\delta^{18}O_{V\text{-SMOW}}$	编号	深度	δD <sub>V-SMOW</sub>	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$
	(m)	(‰)	(‰)		(m)	(‰)	(‰)
S01	573.56	-107.3	9.4	S08	406.00	-114.6	2.7
S02	533.06	-140.3	4.9	S09	397.91	-136.5	3.6
S03	529.96	-139.3	5.3	S10	397.66	-117.2	4.7
S04	474.02	-137.1	5.2	S11	396.21	-123.9	5.9
S05	463.96	-106.4	5.3	S12	393.23	-97.4	4.5
S06	463.51	-130.7	4.7	S13	391.93	-99.5	4.4
S07	462.66	-127.3	2.7	S14	391.48	-82.7	9.2

数据结果显示,包裹体  $\delta^{18}$  O<sub>V-SMOW</sub> 值普遍具有正 偏的特点,并在纵向上表现出波动;样品中  $\delta^{18}$  O<sub>V-SMOW</sub>最小值为 2.7‰,最大值为 9.4‰,均值为 5.1‰。包裹体  $\delta$ D<sub>V-SMOW</sub> 值普遍表现出负偏的特点,



图 3 老挝他曲地区 ZK2893 钻孔塔贡组 下盐段原生流体包裹体

Fig. 3 Primary fluid inclusions in the Lower member of Tagon Formaition in core ZK2893, Thakhek area, Laos

(a, b)一人字形晶体,箭头指向上覆地层;(c)一漏斗形晶体

(a, b)—Chevron crystals, boxed arrow indicates stratigraphic up; (c)—cumulate crystals

最小值为-140.3‰,最大值为-82.7‰,均值为 -118.9‰。纵向上,包裹体 δD<sub>v-smow</sub> 值也具有波 动,但明显表现出两段式的特征(图 2),即从样品 S01 至 S11 $\delta$ D<sub>v-SMOW</sub>值较低,其最小值为一140.3‰, 最大值为一106.4‰,均值为一125.5‰;向上至接近 钾盐层,从样品 S12 至 S14, $\delta$ D<sub>v-SMOW</sub>值迅速增大,最 小值 为 - 99.5‰,最大值 为 - 82.7‰,均值 为 -93.2‰。从氢氧同位素组成变化图(图 4)可以看 出,测试样品  $\delta$ <sup>18</sup>O $\delta$ D 明显偏离全球大气降水线,并 集中在右下方的蒸发区,指示强烈蒸发的环境背景。





## 4 讨论

#### 4.1 古盐湖环境背景

石盐中原生流体包裹体通常赋存于两种晶体类型,即漏斗形和人字形石盐晶体。漏斗形晶体通常 形成于大气-水界面,在后期由于自身重力作用下沉 至水底(Lowenstein et al.,1985; Benison,1995; Roberts et al.,1995; Lowenstein et al.,1998)。人 字形晶体是典型的浅水环境产物,通常形成于水体底 部(Roedder,1984; Handford,1990)。当两种类型晶体 同时出现在同一石盐层时,则表明石盐形成于极浅水 环境,其水体深度通常不超过 60 cm(Roedder,1984; Handford,1990; Zambito et al.,2013)。

老挝他曲地区钻孔 ZK2893 中,人字形石盐晶体的普遍存在以及漏斗形石盐晶体与人字形晶体常产于同一盐层,指示塔贡组下盐段石盐岩形成于极浅水环境。石盐层与盐岩中泥质薄夹层之间通常存在水平溶解面,其通常削切人字形晶体的顶部或者向下进一步溶蚀石盐晶体,从而留下垂直的溶解缝(图 3a、b)。同样表面石盐形成过程中,盐湖曾阶段性处于暴露或者近干涸状态,周缘淡水的注入导致石盐表明发生部分溶解。此外,该钻孔中石膏硫同位素分析结果显示(张华等,2014),石膏形成过程中,成盐环境对硫酸盐是开放的,石膏是浅水-氧化

环境的产物。Zhang 等(2015)对该钻孔中石盐原生 流体包裹体均一温度(T<sub>h</sub>)研究显示,漏斗形和人字 形晶体内的原生流体包裹体具有相似的最大均一温 度以及均一温度范围。而在极浅水环境下,由于不 容易发生水体分层,水体底部和表面具有相似的温 度(Zambito et al.,2013)。此外,高原其他钻孔含 盐系中深水沉积物的缺乏,以及浅水沉积标志的发 现,如基底石膏层中保存有残余的石盐假晶(El Tabakh et al.,1999)。这些证据同样支持老挝他曲 地区塔贡组下盐段形成于极浅水环境。

石盐包裹体氢氧同位素组成明显偏离全球大气 降水线,处于强烈蒸发区域(图4),表明塔贡组下段 盐岩形成时,大气降水对盐湖的补给作用微弱,研究 区处于强烈蒸发的沉积环境。这与含盐系中孢粉 (钟晓勇等,2012;秦占杰等,2013)以及石盐流体包 裹体均一温度(Zhang et al., 2015)指示的高温、干 旱气候背景相一致,为古盐湖蒸发浓缩提供了有利 的气候条件。此外,包裹体明显的"氧同位素正漂 移"现象,则可能是盐湖演化过程中水-岩相互作用 不断增强(Taylor,1974)或卤水与含氧累矿物较强 同位素交换平衡的结果(郑永红等,2000)。而氢同 位素组成在纵向上的变化则可能反映了盐湖沉积时 期古气候变化存在一定波动,但同位素组成在接近 含钾层位时明显变重,表明蒸发作用加强,可能指示 了古盐湖在接近钾盐析出阶段经历了明显的增温过 程,这与 Zhang 等(2015)基于包裹体均一温度反演 出的古温度变化具有一定的相似性。

#### 4.2 古盐湖补给方式

一般而言,古盐湖成盐物质的补给方式主要分为三种:海平面升高,海水/大洋水通过海侵进入盆地,如早白垩世大西洋两侧的刚果、塞尔希培钾盐盆地;地表径流淋滤周缘地层,携带大量物质进入盆地,如第四纪死谷(Dead Valley)盆地;深部热液通过断裂系统携带物质进入盆地(刘成林,2013)。

呵叻高原上白垩统含盐系平均厚度达到 250 m,最大厚度超过 1000 m(Hite et al.,1979; El Tabakh et al.,1999)。蒸发岩沉积序列特征显示, 石盐层间代表盐湖水体淡化的薄层碎屑岩较少,表 明在盐湖演化过程中,水体始终处于较高盐度,周缘 淡水侵入盆地并不频繁。因此,地表径流补给对盆 地成盐贡献相对较小。然而,高原不同地区晚白垩 世含盐系中石盐 Br 含量及其纵向上的变化趋势 (Hite et al.,1979; El Tabakh et al.,1999)以及新 近的硼同位素组成(Tan et al.,2010; Zhang et al., 2013)、硫同位素组成(张华等,2014)、呵叻高原与中 国思茅盆地沉积-构造对比(Wang et al.,2014, 2015),皆指示呵叻高原成盐物质来源同时期古海 水。那么,这是否意味着,呵叻高原成盐物质主要是 通过海侵补给或者说成盐物质主要依靠海侵过程携 带而来?

从目前所发现的证据来看,海侵补给可能不是 唯一的主要补给方式。其一,海侵过程中盐湖淡化 阶段的早期产物,如碳酸盐岩,目前在研究区尚未发 现;(硬)石膏沉积在整个含盐系中出现的套数不多, 单套(硬)石膏最大厚度不超过3m,通常为1m左 右(El Tabakh et al., 1999),这暗示尽管盆地遭受 过海侵,且海侵时期海水已经侵入整个盆地,但海侵 并不是十分频繁, 目持续时间较短。其二, 本文以及 前人研究(El Tabakh et al., 1999; Zhang et al., 2015)表明,高原含盐系形成于浅水条件。在浅水环 境下,沉积厚度如此巨大的含盐系,往往需要盆地的 稳定沉降以及海水的反复、持续的补给。这一条件 显然与前述基于岩石学证据得出的结论有所相悖。 笔者认为,呵叻高原成盐成钾物质除了依靠海侵过 程携带而来,可能还存在另一种重要的补给方 式——海水侧向渗透补给(图 5)。





Fig. 5 Schematic model of supply of salt materials for potash basin in Khorat Plateau (base map revised from Nunn et al. ,2007)

白垩纪时期,呵叻高原盆地处于封闭/半封闭状态(El Tabakh et al.,1999),在极端干热的气候条件下,盐湖快速蒸发浓缩,盐类物质大量堆积。与此同时,在盐类沉积过程中,盆地不断沉降(Racey et al.,2009;Metcalfe,2011),为盐类物质的聚集提供了充足的可容纳空间。在没有持续海侵补给的情况下,盐类物质的快速大量堆积以及盆地持续沉降两种作用叠加的结果,将导致盆地古湖水面快速下降。而在盆地外部,广海海平面仍然维持一个较高水位

(尽管存在海平面波动,但短时间内海平面仍可看成 相对稳定),从而在盆地内部古湖水与外部广海之间 产生水力梯度,由此可以驱动广海海水向盆地进行 侧向迁移。同时,在海水侧向转移的过程中,一方 面,强烈的蒸发作用将导致侧向迁移的海水不断浓 缩;另一方面,海水迁移过程中将可能淋滤通过的地 层中的离子,从而导致最终进入盐盆的水体具有相 对于海水而言较高的浓度。这种侧向渗透的补给方 式可能对解释呵叻高原盆地连续、厚层的石盐岩,即 盐湖水体始终维持在较高浓度具有一定的指示意 义。此外,巨(大)量的外海海水要顺利通过障壁进 入盆地,通常要求障壁具有良好的的渗透性。而前 人研究表明,在呵叻高原(Hasegawa et al., 2010, 2012) 早白垩世普遍发育沙漠沉积, 这无疑为大量海 水侧向迁移至盐湖盆地提供了必要的储库和通道。 因此,基于上述认识,本文初步认为除海侵补给方式 外,海水侧向渗透补给在呵叻高原钾盐盆地成盐成 钾过程中应具有重要作用。而对比我国的兰坪-思 茅盆地,其蒸发岩沉积序列与呵叻高原的相似性,以 及早白垩世沙漠沉积同样广泛发育(夏文杰,1981, 1996;江新胜等,2000),表明渗透补给也同样存在于 兰坪-思茅盆地,而这种浅水、强蒸发、海侵及渗透补 给的环境下通常有利于钾盐的形成。

尽管海水渗透补给方式已被广泛识别,但在蒸 发作用强烈、盐湖长期处于浅水环境下,这种补给方 式在哪种类型的盆地成盐成钾过程中更为普遍,这 一问题尚未引起人们广泛的关注。裂谷作用导致的 盆地下沉,使得外海与盆地之间具有一定的水位差; 而裂谷早期和消亡期,盆地通常为孤立的封闭或者 半封闭状态,其与广海存在着一定的距离。因此,从 构造-地理格局而言,渗透补给更可能广泛存在于裂 谷成盐过程中,尤其是裂谷早期和裂谷消亡期。而 来自古代及现代不同类型盆地的模拟表明,除海侵 补给外,渗透补给也更容易存在于裂谷盆地之中。 但需要注意的是,渗透补给对于盆地的贡献,除了考 虑盆地的构造背景外,还受控于盆地的大小、形状等 多种因素。

## 5 结论

(1)老挝他曲地区塔贡组下盐段石盐中,人字形石 盐晶体的广泛以及漏斗形晶体通常与人字形晶体产于 同一层位,表明盐岩沉积时盐湖常处于极浅水环境。

(2)包裹体氢氧同位素组成明显偏离全球大气 降水线,处于强蒸发区域,指示老挝成盐成钾过程中 气候普遍干旱、炎热。

(3)除海侵补给外,海水渗透补给在呵叻高原以 及中国兰坪-思茅盆地成盐成钾过程中可能扮演着 重要的角色。这种浅水、强蒸发、海侵和侧向渗透补 给的沉积背景,有利于钾盐的形成。

**致谢:**中农矿产资源勘探有限公司提供了钻井 岩芯,采样过程中得到中国科学院青藏高原研究所 杨一博博士的帮助;审稿专家对文章提出了宝贵意 见,在此一并表示感谢。

#### 参考文献

- 江新胜,李玉文.1996. 中国中东部白垩纪沙漠的时空分布及其气候 意义. 岩相古地理,16(2):42~51.
- 江新胜,潘忠习,付清平. 2000. 白垩纪时期东亚大气环流格局初 探. 中国科学 地球科学 (中文版),30(5):526~532.
- 李善平,马海州,山发寿,高东林,王明祥,唐启亮,程怀德. 2009. 老 挝万象盆地通芒地区盐构造特征及成因机制. 盐湖研究,17 (2):5~12.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用. 地球学报, 34(5):515~527.
- 秦占杰,袁秦,魏海成,盛淑蓉,山发寿.2013.老挝甘蒙省晚白垩 世农波组孢粉组合及其对成盐环境的指示意义.地球学报,34 (5):638~642.
- 夏文杰. 1981. 云南思茅盆地扒沙河组风成沙漠沉积特征. 矿物岩石, 5:42~47.
- 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. 地质论评,60(4):851~857.
- 张西营,马海州,谭红兵,高东林,李斌凯,王明祥,唐启亮,袁小龙.2010.老挝东泰钾盐矿床地球化学及其沉积后变化初步研究.矿床地质,29(4):713~721.
- 郑永红,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京:科学出版社.
- 钟晓勇,袁秦,秦占杰,魏海成,山发寿.2012.老挝甘蒙省晚白垩世 农波组下段孢粉分析及成钾时代.地球学报,33(3):323~330.
- Benison K C. 1995. Permian surface water temperatures from Nippewalla Group halite, Kansas. Carbonates and Evaporites, 10(2):245~251.
- Cooper M A, Herbert R, Hill G S. 1989. The structural evolution of Triassic intermontane basins in northeastern Thailand. In: Thansuthipitak T, ed. Proceedings International Symposium on Intermontane Basins: Geology and Resources, Chiang Mai, 231 ~242.
- El Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber B C. 1999. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand. Sedimentary Geology, 123 (1): 31~62.
- Handford C R. 1990. Halite depositional facies in a solar salt pond: a key to interpreting physical energy and water depth in ancient deposits? Geology, 18(8): 691~694.
- Hansen B T, Wemmer K, Pawlig S, Klaus J, Assavapatchara S, Nontaso M, Putthapiban P. 2002. Isotopic evidence for a Late

Cretaceous age of the potash and rock salt deposit at Bamnet Narong, NE Thailand. In: Symposium on the Geology of Thailand, Bangkok:  $26 \sim 31$ .

- Hasegawa H, Imsamut S, Charusiri P, Tada R, Horiuchi Y, Hisada K I. 2010. 'Thailand was a desert'during the mid -Cretaceous: equatorward shift of the subtropical high pressure belt indicated by eolian deposits (Phu Thok Formation) in the Khorat Basin, northeastern Thailand. Island Arc, 19: 605~621.
- Hasegawa H, Tada R, Jiang X, Suganuma Y, Imsamut S, Charusiri P, Khand Y. 2012. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous Supergreenhouse. Climate of the Past, 8(4): 1323~1337.
- Hite R J, Japakasetr T. 1979. Potash deposits of Khorat Plateau, Thailand and Laos. Economy Geology, 74(2): 448~458.
- Lowenstein T K, Hardie L A. 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporites. Sedimentology, 32: 627~644.
- Lowenstein T K, Li J R, Brown C B. 1998. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA. Chemical Geology, 150(3): 223~245.
- Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. Gondwana Research, 19(1): 3~21.
- Mouret C. 1994. Geological history of northeastern Thailand since the Carboniferous: relations with Indochina and Carboniferous to early Cenozoic evolution model. In: Proceedings of International Symposium Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, Bangkok, 132~158.
- Nunn J A, Harris N B. 2007. Subsurface seepage of seawater across a barrier: A source of water and salt to peripheral salt basins. Geological Society of America Bulletin, 119(9~10): 1201~1217.
- Racey A, Goodall J G S. 2009. Palynology and stratigraphy of the Mesozoic Khorat Group of NE Thailand. In: Buffetaut E, Cuny G, Le Loeuff J, Suteethorn V, eds. Late Palaeozoic and Mesozoic Ecosystems in SE Asia, vol. 315. Geological Society and Special Publications, London, 67~81.
- Roberts S M, Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusion in halite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59 (19): 3929~3942.
- Roedder E. 1984. Fluid Inclusions. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 12.
- Sattayarak N, Polachan S, Charusirisawad R. 1991. Cretaceous rock salt in the northeastern part of Thailand. In: Proceedings of the 7th Regional Conference Geology and Mineral Resources Southeast Asia (GEOSEA VII).
- Smith P F L, Stokes R B, Bristow C, Carter A. 1996. Mid-Cretaceous inversion in the northern Khorat Plateau of Lao PDR and Thailand. Geological Society, London, Special Publications, 106: 233~247.
- Sone M, Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: new insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. Comptes Rendus

Geoscience, 340(2): 166~179.

- 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 Khammuane potash deposits in southeastern Laos. Chinese Science Bulletin, 55(27~28): 3181~3188.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Economic geology, 69(6): 843~883.
- Utha-Aroon C. 1993. Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, northeastern Thailand. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 8(1): 193~203.
- Wang L C, Liu C L, Gao X, Zhang, H, 2014. Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, southeastern Tibetan Plateau: Whole-rock geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic constraints. Sedimentary Geology, 304: 44~58.
- Wang L C, Liu C L, Fei M M, Shen L J, Zhang H, Zhao Y J. 2015. First SHRIMP U-Pb zircon ages of the potash-bearing

Mengyejing Formation, Simao Basin, southwestern Yunnan, China. Cretaceous Research, 52: 238~250.

- Zambito J J, Benison K C. 2013. Extremely high temperatures and paleoclimate trends recorded in Permian ephemeral lake halite. Geology, 41(5): 587~590.
- Zhang H, Liu C L, Zhao Y J, Mischke S, Fang X M, Ding T. 2015. Quantitative temperature records of mid Cretaceous hothouse: evidence from halite fluid inclusion. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Doi: 10. 1016/j. palaeo. 2015. 07. 022.
- 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: δ<sup>11</sup> B evidence from borates. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 812~818.
- Zhao Y J, Zhang H, Liu C L, Liu B K, Ma L C, Wang L C. 2014. Late Eocene to early Oligocene quantitative paleotemperature record: evidence from continental halite fluid inclusions. Scientific Reports, 4: 5776; Doi:10.1038/ srep05776.

## Characteristics and Hydrogen-Oxygen Isotopic Compositions of Halite Fluid Inclusions in the Thakhek Area, Laos, and the Way of Salt Material Supplies

ZHANG Hua<sup>1,2)</sup>, LIU Chenglin <sup>1)</sup>, ZHAO Yanjun <sup>1)</sup>, DING Ting<sup>3)</sup>

 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2) Department of Geological Sciences, FreieUniversität Berlin, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, Germany; 3) China University of Geosciences, Beijing, 100083, China

#### Abstract

Characteristics, classification and hydrogen-oxygen compositions of halite fluid inclusion of core sample were used to reconstruct paleo-environments during salt deposition of the Thakhek area, Laos, and based on which the way of supply of salt materials was explored. The results show that, primary halite in the Lower Member of the Tagon Formation mainly includes two types, the chevron halite and the cumulate halite. The chevron halite crystals largely occur in the Lower Member of the Tagon Formation, and the cumulate halite crystals is relatively few but usually coexisted with chevron halite crystals in the same layers, indicating an extremely shallow water environment during halite formation. Hydrogen-oxygen isotopic compositions of halite fluid inclusion obviously deviated from the global mean meteoric line and mainly concentrated at the bottom right of the line, suggesting a strong evaporative condition during halite deposi-tion. The vertical variability of hydrogen-oxygen isotope probably implies an increasing trend of air temperature from halite to potash salt deposition. The sea level peaked at the middle Cretaceous. However, water level of salt basin dropped significantly due to continuous subsidence of salt basin and strong evaporation concentration of salt lake, When this occurred, the difference in water level between the sea and salt basin created a horizontal hydrostatic head gradient that had the potential to drive water through the barrier. Moreover, desert sediments occurred widely in Khorat Plateau during the early Cretaceous, providing a necessary passageway for the large-scale sea water. Therefore, combining with the existing data, we proposed that, in addition to marine intrusion, seepage of seawater through barrier played a significant role in supplying of salt materials of basin in Laos.

Key words: fluid inclusion; halite; shallow water; air temperature; seepage of seawater