

老挝龙湖矿区 ZK309 孔泥岩层矿物学与地球化学特征

韩元红^{1,2}, 马海州¹, 张西营^{1,2}, 袁小龙^{1,2}, 范惠萍³, 杜仲谋⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 青海盐湖工业股份有限公司, 青海 格尔木 816000;

4. 青海盐湖三元钾肥股份有限公司, 青海 格尔木 816000)

摘要: 老挝龙湖钾盐矿区是呵叻高原钾盐矿在老挝境内最主要的钾盐矿区之一, ZK309 钻孔是龙湖矿区打穿最好、取样最完整和最典型的钻孔之一。通过对该钻孔盐岩上覆碎屑层的地层、矿物、元素的分析, 得出泥岩层作为成盐沉积旋回中的一部分, 其矿物元素变化和与其接触的下伏盐层的类型、特征等密切相关。同一旋回中自下而上泥岩颜色由青灰色变为红色, 明显表现出沉积环境由还原性转变为氧化性。盐类矿物在垂向上表现出自下而上的淡化序列。矿物和元素在 103 ~ 107 m 处的突变显示盐岩沉积后期曾明显有水流体的淋滤作用。通过微量元素含量等的分析, 该水流体表现为偏向淡水的淡水、海水混合水。碳酸盐矿物组合及含量显示当时可能有高 Mg 流体的活动。将粘土矿物组合与中国其它海相和陆相盆地粘土矿物组合相比较, 得出粘土矿物组合与海相更相似, 加上绿泥石含量较高, 初步推测粘土矿物可能来源于海相沉积环境。

关键词: 老挝龙湖; 钾盐矿区; 泥岩; 矿物学; 地球化学; 沉积相

中图分类号: P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2012)01-0001-08

引言

位于泰国东北部和老挝中部的呵叻高原钾盐资源丰富, 是世界上最大的钾盐矿床之一^[1]。早期主要是基于其经济价值而进行的地质勘探和经济评价, 大量的科学研究则是从 20 世纪 90 年代以后才展开的, 包括含盐系地层的年代问题^[2-3]、含盐系的起源和成因问题^[4-11]、成盐卤水的流向和迁移问题^[12-14]、矿物学和地球化学研究^[15-16]等。但工作大多是在泰国境内展开的, 老挝的相关研究很少, 只是 20 世纪 90 年代之后在这里有一些钻孔研究。近几年来, 我国在老挝境内的万象和甘蒙地区进行了大量的钾盐矿床地质勘探和一些相关研

究工作^[16-21]。到目前为止, 甘蒙—沙湾那吉地区已成为呵叻高原钻孔布局最密集的地区之一, 这为系统研究钾盐矿床奠定了良好的基础。

同时, 前期的研究对象主要是盐类沉积, 而对于含盐系的碎屑沉积研究很少, 对盐层与碎屑层之间的内在联系性和相关性研究更少。不同深湖相泥岩组合的演化与盆地构造发育史、气候及湖泊演化史是一致的^[15], 通过对盐岩上覆碎屑岩层矿物学和地球化学等方面的深入研究, 加上盐岩层和泥岩层之间的联系研究, 可以系统判断盐湖沉积过程和环境演化, 更重要的是对于钾盐沉积后的改造作用以及水—岩(盐)相互作用关系有重要意义。本文通过对老挝甘蒙地区钾盐矿床碎屑沉积的研究, 初步揭示其矿物学和地球化学特征, 并尝试探讨该

收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40903014); 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403004)

作者简介: 韩元红(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地球化学。

地区成盐后的水—岩(盐)作用过程。

1 研究区域地质概况

呵叻高原位于藏滇印支地槽褶皱系南段的印支地块之上。在大地构造背景中,呵叻高原处于东印支地块和欧亚板块的边缘,其基底为晚元古代^[22]。其南、西及东北三面分别被北柬埔寨、南乌江、湄公河深大断裂控制(图1),构成一个独特的长期持续下降的凹陷带,此凹陷带中沉积了大量的中—新生代红色碎屑岩建造。特别在早白垩世晚期的燕山运动,使拗陷沿大断裂方向形成一系列的小拗陷和水下隆起,控制了本区晚白垩—古近纪的成盐盆地展布。盆地中部被普潘隆起所隔,将大盆地分割为两个相对独立的次级盆地,即北部的沙空那空盆地和南部的呵叻盆地^[17]。沙空那空盆地经晚燕山运动出现雏形,并逐渐演化为由南西向北东逐渐倾斜的不对称盆地。

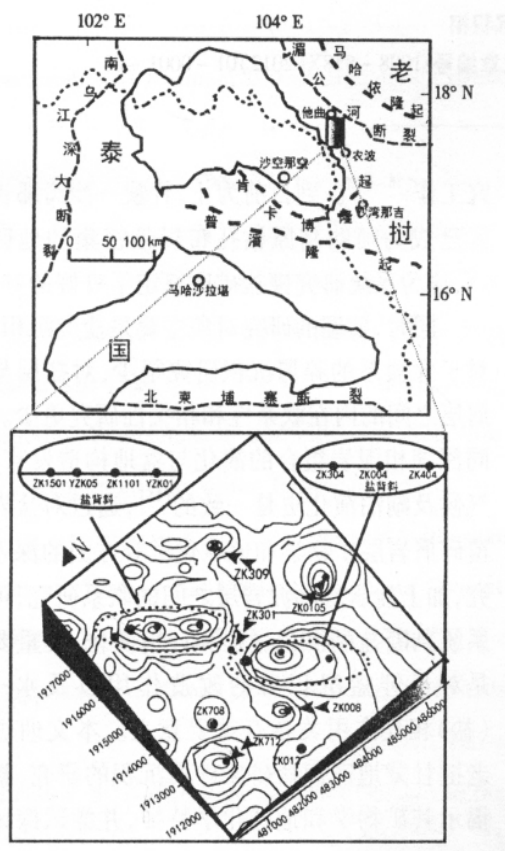


图1 研究区域地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Khorat Plateau

含盐地层由蒸发岩与碎屑岩组成(图2),在农波拗陷其厚度可达500~550 m,与呵叻盆地、沙空那空盆地的马哈沙拉堪(Maha Sarakham)组、万象的塔贡(Tha Ngon)组一致。一般地,将本含盐岩系地层划分为3个蒸发岩—碎屑岩旋回,其中钾盐主要赋存于第一旋回的上部。碎屑层一般由两部分组成,下部为厚度较小的青灰色泥岩,上部为厚度较大的棕红色泥岩或泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。

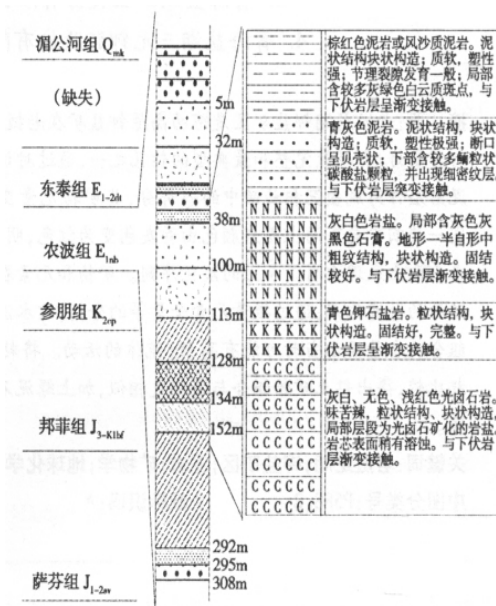


图2 龙湖矿区 ZK309 钻孔农波组中盐段地层及岩性

Fig. 2 Lithological and stratum character of the middle salt formation in ZK309

研究区位于呵叻高原沙空那空次级盆地东南缘的老挝中南部他曲县附近,其南部与沙湾拿吉盆地相邻(图1)。在他曲到沙湾拿吉地区,盆地的基底总的表现为一个东高西低的单斜构造,该区共有4个含膏盐的拗陷:农波拗陷(Nongbok Depression)、那特尤拗陷(Nateuy Depression)、肯可克拗陷(Kengkok Depression)和朋茶特拗陷(Phonthat Depression)。肯卡博隆起是沙空那空盆地和沙湾拿吉盆地的界线,将他曲地区和沙湾拿吉地区分开,同时也是那特尤拗陷和农波拗陷的分界线。

ZK309 钻孔位于农波拗陷内,是沙空那空盆地东端的深拗部分,蒸发岩沉积的分布面积约为860 km²,含盐层的底板埋深估计为400~

500 m。ZK309 钻孔孔深 307.92 m,是研究区为数不多的 8 个打穿下盐组的钻孔之一,下碎屑层可能缺失,本文所测主要为上碎屑层和中碎屑层。

2 方 法

本次研究样品采自 ZK 309 钻孔中盐段中碎屑层和上盐段上碎屑层,共 64 个样品。自下而上,上盐段上碎屑层共 20 个样品,其中红色泥岩 14 个,青灰色泥岩 6 个;中盐段中碎屑层 44 个样品,其中红色泥岩 31 个,青灰色泥岩 13 个;红色泥岩层取样间隔为 2 m,青灰色泥岩取样间隔为 1 m。

取新鲜样品 10~20 g,压碎烘干并研磨至 200 目以上,待分析。取部分样品在 XRD 上进行矿物分析;其余样品进行浸取溶液实验。具体方法:称取烘干、研磨至 200 目以上并混合均匀的样品 10 g,放入 100 mL 的烧杯中,加入 50 mL 蒸馏水加塞,放在振荡机上振荡 30 min,

后静置 12 h 使其充分溶解。离心分离,水不溶物用蒸馏水清洗 3 次,清洗液一并加入到待测液中,用 ICP-OES 测量元素及其含量。在 ICP-OES 上进行常、微量元素分析,各元素检测下限依次为, K 40 ng/mL, Na 10 ng/mL, Mg 0.2 ng/mL, Ca 5.2 ng/mL, Sr 0.1 ng/mL, B 5.0 ng/mL, Fe 0.8 ng/mL, Mn 0.3 ng/mL。此外, Br 采用酚红分光光度法测试。

3 结 果

3.1 矿物组成

ZK309 钻孔泥岩层矿物主要有石英、绿泥石、伊利石、白云石、铁白云石、方解石、石膏、硬石膏、石盐。另外,上部青灰色泥岩和上部红色泥岩有少量的长石,红色泥岩层还有少量的赤铁矿,因而呈现出红色。主要矿物在钻孔垂向上的变化见图 3。

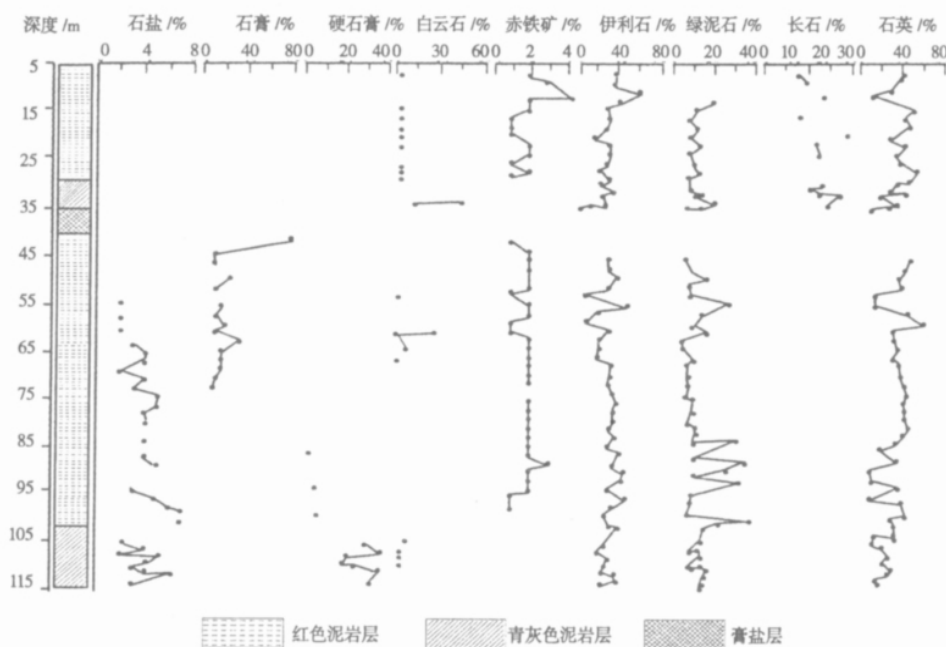


图 3 ZK309 钻孔泥岩主要矿物变化趋势图

Fig. 3 The composition and variation tendency of essential minerals of mudstone in ZK309 Hole

在中碎屑层,自下而上,石盐含量逐渐变小直至检测不到,而上碎屑层则未见该矿物,石盐含量最大值为 7%,平均值为 4.32%。石盐的

含量变化主要受残余卤水的影响,同时大气水的淋滤作用也导致其在碎屑层的含量很低甚至消失。

硬石膏只在中碎屑层的下部出现,且自下而上呈递减趋势直至消失;在中碎屑层上部(红色泥岩部分)仅见石膏且含量自下而上增加;上碎屑层均未发现石膏和硬石膏,表明曾受到过大气水的淋滤作用。

碳酸盐矿物较少,主要是白云石、铁白云石和方解石,后两者都只有个别样品有。白云石在不同样品中含量差别很大,最高为 55%,最低为 1%,平均含量 7%。在垂向上的变化不太明显。下层青灰色泥岩和上层红色泥岩中有少量铁白云石的发现,含量很低,大多是 1%。与以往沉积碎屑泥岩不同的是 ZK309 钻孔方解石含量极少,只有 5 个样品发现有方解石的存在,并都出现在上部层位,青灰色泥岩 1 个,红色泥岩 4 个,平均含量 5.6%。目前流行的白云石形成机制,一是交代作用,是由对前期存在的灰岩矿物在高盐度、高 pH、低钙镁离子比和高温条件下的交代作用所形成的^[23];二是溶液中直接沉淀,自然条件下,白云石也是能从溶液中直接沉淀形成的,特别是从蒸发盐湖环境^[24-27]和含甲烷沉积物及气体水合物的大洋环境沉积^[28-32]中,可以在一定程度上指示当时泥岩及其周围沉积环境特征。

粘土矿物为伊利石 + 绿泥石组合,两者在垂向上的变化也很一致(图 3)。伊利石含量很高,最高可达 63%,最低 12%,平均 37.66%。绿泥石也是主要组成部分,ZK309 钻孔中所测得的绿泥石最高 37%,最低 7%,平均含量为 13.6%。绿泥石的形成过程,是一个由水—岩反应控制的动力学过程,受温度、压力、水/岩比、流体和岩石化学成分等因素的控制^[33]。有人认为,在脉状矿床的热液蚀变中,在低氧化、低 pH 值的条件下,有利于形成富镁绿泥石;而还原环境则有利于形成富铁绿泥石^[34]。矿物组构特征显示,绿泥石的形成与热液流体密切相关^[35]。其形成机制为溶蚀—结晶,即流体溶蚀矿物并原地重结晶形成绿泥石,这种机制往往表现出绿泥石交代其他矿物的特征,形成于干燥气候条件下^[36],在富 Mg^{2+} 的孔隙水中最容易沉淀出来^[37],绿泥石的含量越高代表越干旱的气候条件^[38]。更有人认为绿泥石的形成与沉积水动力强弱关系更紧密,属于强水

动力沉积条件的一种标志^[39]。

除伊利石之外,矿物组成以石英最多,最大值为 59%,最小为 9%,平均 33.4%。上层青灰色泥岩和上层红色泥岩均有长石出现,只是青灰色泥岩中的都是正长石,而红色泥岩层中的都是微斜长石,红色泥岩层较下部的长石多含较多 Na_2O 。长石最高值为 29%,最低值为 11%,平均值为 15.8%。红色泥岩层有少量的赤铁矿存在,平均值为 1.86%,大多数样品值为 2%,这也指示了红色碎屑沉积时处于氧化环境。

3.2 元素地球化学分析

主要对 ZK309 中碎屑层青灰色泥岩样品水浸溶液做了 K、Na、Ca、Mg、Br、Sr、B 等元素的分析,其含量变化如图 4 所示。

K、Na、Mg 大多来自于盐类矿物,Ca 大多来自于硫酸盐矿物,均表现出在下部青灰色泥岩层中自下而上逐渐降低的趋势,这显然与残余卤水有密切关系。K、Mg 变化表现出很强的一致性,但含量较 Na 明显偏低,最高在 0.1% 左右,这与该青灰色泥岩层下伏的盐层为较厚的石盐岩层(12 m)有密切关联,残余卤水中可能 K、Mg 的含量较低。因此,泥岩中吸附的 K、Mg 含量也较低。由物相分析也可以看出,没有发现明显的钾镁盐矿物成分。

Sr、Ba、Fe 值变化趋势基本相似,自下而上也呈现增加的趋势。Sr、Ba 在垂向上的变化很一致,水浸溶液中的 Sr、Ba 值都很低。Sr 最大值为 140×10^{-6} ,最小值为 4×10^{-6} ,平均 42×10^{-6} ; Ba 最大值为 2.4×10^{-6} ,最小为 0.2×10^{-6} ,平均 0.8×10^{-6} ; Ca 最高值为 1.93%,最低值为 0.041%,平均 0.88%。Fe 值也极低,最高为 14×10^{-6} ,最低为 1×10^{-6} 。Sr 与 Ca 具有很好的相关性和较一致的变化趋势,这可能与 Sr 能置换硬石膏中的 Ca 有关系。

ZK309 泥岩层 Br 值变化范围为 $10 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$,平均 23×10^{-6} ,其下伏石盐层 Br 的变化范围 $5 \times 10^{-6} \sim 197 \times 10^{-6}$,平均值为 86×10^{-6} ;泥岩层明显低于盐岩层,Br 值变化较波动,与石盐在下青灰色泥岩中的变化较一致,充分说明泥岩层中 Br 也是来自于残余卤

水。B 在垂向上没有明显的趋势变化,其含量 $56 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$,平均值为 73×10^{-6} ,虽然较高,但较下伏石盐层的 B 值($5.1 \times 10^{-6} \sim$

122×10^{-6} ,平均 42×10^{-6})高,加上未发现硼矿物,因此,该泥岩层中 B 大多来源于粘土矿物表面的吸附,少部分来自残余卤水。

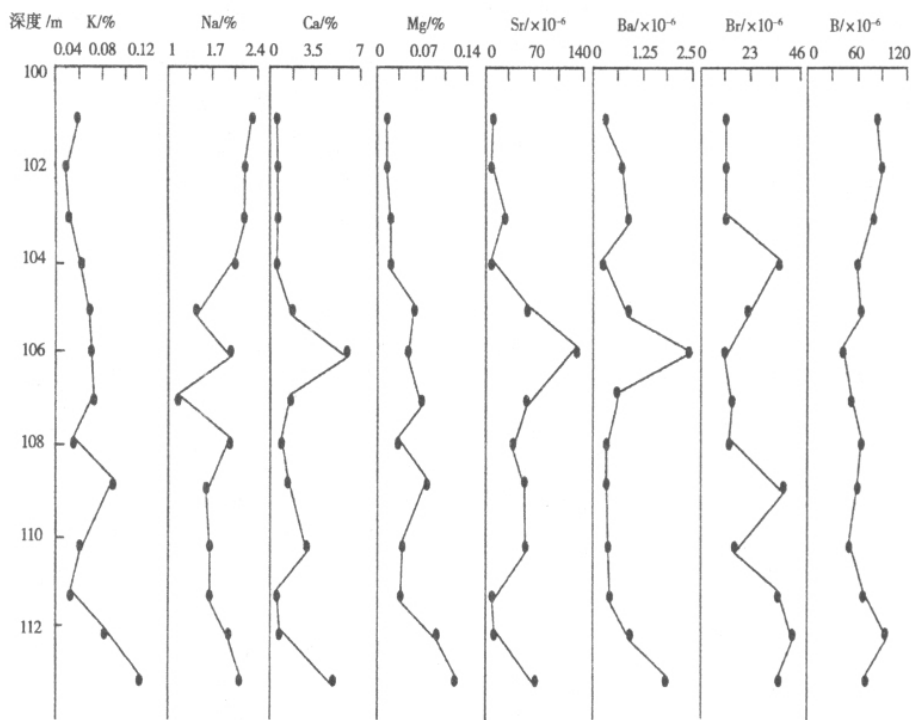


图 4 ZK309 钻孔中泥层各元素变化趋势图

Fig. 4 The variation tendency of elements of mudstone stratum in ZK309 Hole

4 讨 论

矿物和元素垂向上的变化可以在一定程度上反应沉积环境垂向上的变化。沉积盆地中泥岩矿物的形成受物源、风化侵蚀作用和后生成岩作用等的控制。从矿物组成来看,ZK309 钻孔的矿物组成保存了一定的母岩特性,石英、长石明显来自于陆源输入物,石盐、硬石膏、石膏与残余卤水有关,伊利石、绿泥石含量较高,说明大部分来自于陆源输入,少部分有可能形成于后生成岩作用。碳酸盐矿物很少见方解石、却有少量的白云石和铁白云石,可见白云石大多形成于后生成岩作用,赤铁矿大部分来自于陆源,也有部分可能是经过后来的成岩作用生成的。

盐类矿物垂向上的变化可以明显看出自下

向上浓度逐渐变小的淡化序列。中盐层下部为硬石膏,上部又全部变为石膏,反映出该旋回泥岩较上部位曾明显有水流体的侵入稀释过程。少量自生绿泥石和白云石的生成都指示当时有富镁流体的活动。盐岩层多以石盐岩(NaCl)为主,再加上泥岩层下伏为石盐层,故 Na 离子多,Mg、K 没有发现明显的矿物,多以粘土吸附等形式存在,主要来自于残余卤水,可能还和流体交代原始沉积的钾镁盐矿物有关。

粘土矿物为伊利石 + 绿泥石组合,且伊利石占主要比例。与其它海陆相沉积盆地不同地层粘土组合相对比^[40-48](表 1),得出与海相沉积盆地砂岩和泥岩中粘土矿物伊利石 + 绿泥石组合、较少或不含高岭石的这种粘土矿物组合较相似,青藏高原陆相盐盆粘土矿物也为伊利石 + 绿泥石组合,但是其他陆相沉积盆地相对含较多蒙脱石和高岭石。经对比初步推测粘土矿物可能是海源。伊利石的形成为富钾离子的

碱性介质,表明当时沉积环境为超碱性干旱环境,气候很干燥,风化作用和淋滤作用很强,沉积特征与大多数海相盆地类似。从绿泥石的形成条件,可得当时的周围沉积环境为低氧化—还原环境,高温干旱,pH 较高,流体溶液富 Mg,水动力条件较动荡。

元素和矿物在下青灰色泥岩层中部都有突变,伊利石和绿泥石在 103 ~ 107 m 处的沉积突然减少,可见当时水流体变淡,加上元素 Sr、

Ba、Ca、Br 在 103 ~ 107 m 处都有明显的变化,表明当时明显有水流体的侵入,并从各微量元素的含量上看,水流体盐度偏小。B 含量为 $56 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$,平均 73×10^{-6} ,显示当时水流体偏淡。Br 值随着深度变小而变小,和石盐在垂向上的变化很一致,这说明 Br 主要来自于残余卤水,表现水流体浓度变小,在青灰色泥岩和盐岩接触部位有淡水的注入。

表 1 海相、陆相盆地中粘土矿物沉积类型

Table 1 Sedimentation type of clay minerals in marine and continental basin

	盆地名称	代表地层	粘土矿物组合类型	数据来源
海相盆地	四川盆地	四川盆地须家河组	I + C + K	金惠等 ^[43]
	塔里木盆地	第三系	I + C	王行信等 ^[40]
	鄂尔多斯盆地	太原组;白垩系	I、I + K、K; I + C + I/S、I + C	冯文立 ^[44] ; 谢渊 ^[45]
	江汉盆地	潜江凹陷	I + C	夏文斌 ^[42]
陆相盆地	苏北盆地	/	S + S/I + I + K + C	雷怀彦 ^[46]
	松辽盆地	白垩系	S + I + L + C、S/K、S/C	王行信 ^[47]
	渤海湾盆地	/	S + I/S + I + K + C	雷怀彦 ^[46]
	青藏盐湖盆地	现在盐湖沉积地层	I + C, 部分样品含 S + K, I/S	徐昶 ^[41]
	吐哈盆地	侏罗系	S、I、S/I、I/S, K、C、C/S	张小青等 ^[48]

海陆相盆地划分据许效松^[49]、贾承造^[50]; I. 伊利石; S. 蒙脱石; K. 高岭石; C. 绿泥石

碳酸盐类矿物均较少,发现有少量白云石和极少量的方解石和铁白云石。方解石和铁白云石只有个别样品发现含量极低。ZK309 白云石大部分为后期交代方解石而沉积,则当时的环境为高盐度、高 pH、低钙镁离子比、高温较高,并再次证实高 Mg 流体活动。长石只有上红色泥岩层才有,故下层部位均有水流体的活动,且相对较湿润。

泥岩层矿物元素组成及其在垂向上的变化和下伏盐岩层的类型和特征非常相关。从 ZK309 钻孔的成盐序列来看,石盐—光卤石—钾石盐—石盐,钾石盐上覆光卤石,为非正常的成盐序列。这种非正常的沉积有可能在盐岩沉积时就这样,但这种解释缺乏证据。也有人提出这是由于盐岩沉积后受到各种改造作用,如 Hite^[1] 和 Warren^[9] 提出的不均匀模式和截顶模式都提到盐岩沉积后有水流体的作用,但是未能回答光卤石被钾石盐交代之高 Mg 流体的去向问题。泥岩矿物和元素组成充分证明盐岩

沉积后有水流体的活动,且水流体浓度较低。白云石和绿泥石的形成都可能与水流体交代光卤石后高 Mg 流体的活动相关。

5 结 论

1) 龙湖矿区 ZK309 孔泥岩矿物由石英、绿泥石、伊利石、白云石、铁白云石、方解石、石膏、硬石膏、石盐组成。矿物和元素在垂向上的变化序列很明显。盐类矿物在垂向上表现出自下而上的淡化序列。同一旋回中自下而上泥岩颜色由青灰色变为红色,明显表现出沉积环境由还原性转变为氧化性;另外,矿物和元素在下青灰色泥岩层表现出的突变性,说明盐岩沉积后期曾明显有水流体的活动,Sr、Ba、B、Br 微量元素地球化学分析可得这种水流体表现出了偏向于淡水的淡水、咸水混合水的特征。盐类矿物元素在垂向上的变化和含盐系的埋藏深度及泥岩层与盐岩层的接触关系密切相关。

2) 碳酸盐矿物白云石较多,方解石和铁白云石很少,加上大量绿泥石的存在,表明盐岩沉积后期有高 Mg 流体的活动,这可能与钾石盐交代光卤石后形成的高 Mg 流体有关。具体两者相关性的确定,还需要更进一步做详细的研究。

3) 粘土矿物组合及含量指示粘土矿物可能来自于海源。少量自生绿泥石的生成指示当时周围气候较干,淋滤作用较强,沉积环境较稳定,高温、高盐度、高 pH、低钙镁离子比。

4) 泥岩层作为成盐旋回中的一部分,其矿物和元素的变化与成盐序列、下伏盐岩的类型、特征等密切相关。

致谢: 中科院青海盐湖研究所杨波副研究员、冉广芬副研究员、王波老师、薛园老师、李园老师在矿物物相鉴定和样品测试分析方面给予很大帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Hite R J. Potash Deposits of the Korat Plateau, Thailand and Laos [J]. *Economic Geology*, 1979, 74(2): 48–458.
- [2] Gardner L S, Haworth H F, Na Chiangmai P. Salt resources of Thailand [J]. *Thailand Dept. Mineral Resources*, 1967: 23–30.
- [3] 冯明刚, 吴军, 韩润生, 等. 老挝万象地区含盐系地层 [J]. *云南地质*, 2005, 24(4): 407–413.
- [4] Sundharavat S. Potash in E-Sarn, Min [J]. *Resour. Gazette*, 1976, 21(11): 1–8.
- [5] Thiramongkol N. Some suggestions of potash and rock salt geneses in NE Region, Min [J]. *Resour. Gazette*, 1978, 21(8): 25–40.
- [6] Sattayarak N. Northeast Geology [C]. *Proceedings of Conference on Geology and Minerals Resources Development of the Northeast, Thailand*. Khon Kaew: Department of Geology, Khon Kaen University, 1985: 23–30.
- [7] Utha-Aroon C. Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, Northeastern Thailand [J]. *Journal Southeast Asian Earth Sciences*, 1993, 8(1–4): 193–203.
- [8] Donald E G. Potash deposits, processing, properties and uses [M]. London: Chapman and Hall, 1996.
- [9] Warren K. Evaporites: their evolution and economics [M]. Blackwell Science [M]. Oxford, 1999: 235–239.
- [10] 曲懿华. 兰坪—思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究 [J]. *化工矿产地质*, 1997, 19(2): 82–98.
- [11] 曲懿华, 袁品泉, 帅开业, 等. 兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–50.
- [12] Sattayarak N, Polachan S. Rock salt in the Khorat Plateau [C]. *Proceedings of the 3rd Conference on Geologic Resource Management*, Department of Mineral Resources, August 16–17, Bangkok, 1990: 1–13.
- [13] Suwanich P. Potash and rock salt in Thailand [C]. *Proceedings of the Conference on Geology and Mineral Resources of Thailand*, 1983: 10.
- [14] El Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber B C. Sedimentology of the Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 123: 31–62.
- [15] El Tabakh M, Schreiber B C, Utha-Aroon C, et al. Diagenetic origin of basal anhydrite in the Cretaceous Maha Sarakham salt, Khorat Plateau, NE Thailand [J]. *Sedimentology*, 1998, 45: 579–594.
- [16] El Tabakh M, Schreiber B C, Utha-Aroon C, et al. Origin of dolomites in the Cretaceous Maha Sarakham evaporites of the Khorat Plateau, northeast Thailand [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 57: 235–252.
- [17] 钟维敷, 李志伟, 单卫国. 呵叻盆地钾镁盐矿沉积特征及成因探讨 [J]. *云南地质*, 2003, 23(2): 142–150.
- [18] 郭远生, 徐世光, 吴军, 等. 老挝万象平原钾盐资源 [J]. *无机化工信息*, 2004(3): 5–9.
- [19] 郭远生, 吴军, 朱延湘, 等. 老挝万象钾盐地质 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2005.
- [20] 张建林. 中国—老挝古近纪钾盐矿对比 [J]. *云南地质*, 2006, 25(3): 309–316.
- [21] 张西营, 马海州, 谭红兵, 等. 沙空那空盆地东缘钾盐矿床构造和地球化学特征 [C]. *第九届全国矿床学会议论文集*. 北京: 地质出版社, 2008.
- [22] 中国地质科学院. 亚洲大地构造图 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 225–226.
- [23] Krauskopf K B, Bird D K. Introduction to geochemistry [J]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [24] Vasconcelos C, McKenzie J A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67: 378–390.
- [25] Wright D. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126: 147–157.
- [26] Wright D T, Oren A. Nonphotosynthetic bacteria and the formation of carbonates and evaporites through time [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2005, 22(1–2): 27–53.
- [27] Wright D T, Wacey D. Precipitation of dolomite using sulphate-reducing bacteria from the Coorong Region, South Australia: significance and implications [J]. *Sedimentology*, 2005, 52: 987–1008.

- [28] Baken P A , Burns S J. The occurrence and formation of dolomite in organic-rich continental margin sediments[J]. AAPG Bulletin ,1985 69: 1917 – 1930.
- [29] Cavagna S ,Clari P ,Martire L. The role of bacteria in the formation of cold seep carbonates: geological evidence from Monferrato(Tertiary ,NW Italy) [J]. Sedimentary Geology , 1999 ,126: 253 – 270.
- [30] Pierre C ,Rouchy J M. Isotopic compositions of diagenetic dolomites in the Tortonian marls of the western Mediterranean margins: evidence of the past gas hydrate formation and dissociation[J]. Chemical Geology 2004 205: 469 – 484.
- [31] Rodriguez N M ,Paull C K , Borowski W S. Zonation of authigenic carbonates within gas-hydrate bearing sedimentary sections on the Blake Ridge: offshore southeastern North America [J]// Paull C K ,Matsumoto R ,Wallace P J , et al. eds. Proceedings of Ocean Drilling Program ,Scientific Research 2000: 301 – 312.
- [32] Sassen R ,Roberts H H ,Carney R et al. Free hydrocarbon gas ,gas hydrate and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: relation to microbial processes [J]. Chemical Geology 2004 205(3 – 4) : 195 – 217.
- [33] 李玉梅 ,赵澄林. 盐湖盆地斜坡带碎屑岩成岩作用特征初探[J]. 沉积学报 ,1998 ,16(1) : 127 – 131.
- [34] Inoue A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [M]. Veide: Origin and Mineralogy of Clays , 1995.
- [35] 廖震 ,刘玉平 ,李朝阳 ,等. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. 矿床地质 2010 29(1) : 169 – 176.
- [36] 隆浩 ,王晨华 ,刘勇平 ,等. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究 2007 15(2) : 21 – 25.
- [37] 刘钦甫 ,彭苏萍 ,曹代勇 ,等. 郑州超化煤矿山西组泥质岩中粘土矿物及地化研究[J]. 煤田地质与勘探 , 1999 27(6) : 9 – 13.
- [38] Gingele F X ,De Deckker P ,Hillenbrand C D. Late Quaternary fluctuations of the Leenwin Current and palaeoclimates on the adjacent land masses: clay mineral evidence [J]. Aust. J. Earth Sci 2001 48(6) : 867 – 874.
- [39] 姚泾利 ,王琪 ,张瑞 ,等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长6 砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J]. 沉积学报 2011 29(1) : 72 – 79.
- [40] 王行信 ,王少依. 塔里木盆地第三系伊利石结晶度纵向变化的地质意义[J]. 新疆石油地质 ,1998 ,19(3) : 213 – 217.
- [41] 徐昶. 中国一些盐湖粘土矿物的初步研究[J]. 海洋与湖沼 ,1988 ,19(3) : 278 – 285.
- [42] 夏文斌. 江汉盐湖盆地潜江凹陷粘土矿物分布规律及成因探讨[J]. 江汉石油科技 ,1992 2(3) : 13 – 19.
- [43] 金惠 ,杨威 ,谢武仁 ,等. 粘土矿物在四川盆地须家河组沉积环境研究中的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报) 2010 32(6) : 14 – 21.
- [44] 冯文立. 鄂尔多斯盆地东北部太原组储层砂岩中粘土矿物特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学 2009.
- [45] 谢渊 ,王剑 ,李令喜 ,等. 鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的分布特征及其沉积成岩环境意义[J]. 地质通报 , 2011 29(1) : 93 – 104.
- [46] 雷怀彦. 粘土矿物对形成过渡带气作用的研究[J]. 天然气地球科学 ,1993 6: 69 – 79.
- [47] 王行信. 松辽盆地白垩系砂岩储层的粘土矿物特征及其对油层产能的影响[J]. 石油勘探与开发 ,1991 ,1: 48 – 65.
- [48] 张小青 ,黄天雪 ,刘军 ,等. 吐哈盆地侏罗系砂岩储层中粘土矿物组成和分布的控制因素[J]. 沉积与特提斯地质 2001 21(4) : 66 – 69.
- [49] 许效松 ,汪正江. 对中国海相盆地油气资源战略选区的思路[J]. 海相油气地质 2003 8(1 – 2) : 1 – 10.
- [50] 贾承造 ,李本亮 ,张兴阳 ,等. 中国海相盆地的形成与演化[J]. 科学通报 2007 52(增1) : 1 – 8.

The Mineralogy and Geochemistry Characters of Mudstone Strata in ZK309 Hole , Longhu Diggings , Laos

HAN Yuan-hong^{1 2} , MA Hai-zhou¹ , ZHANG Xi-ying^{1 2} , YUAN Xiao-long^{1 2} ,
FAN Hui-Ping³ , DU Zhong-Mou⁴

- (1. Qinghai Institute of Salt Lakes , Chinese Academy of Sciences , Xining , 810008 , China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing , 100039 , China;
3. Qinghai Saline Lake Industrial Limited Company , Golmud , 816000 , China;
4. Qinghai Sanyuan Saline Lake Potash Industrial Limited Company , Golmud , 816000 , China)

(下转第15 页)

Salt-related Basin Hydrocarbon Geology Characteristics and Exploration Recognition——A Case Study of Red Sea Basin

ZHANG Yong-gang ,LÜ Fu-liang , FAN Guo-zhang , WANG Bin ,LI Li ,

LI Dong ,SHAO Da-li , YANG Jiao

(Petrochina Hangzhou Research Institute of Geology , Hangzhou 310023 ,China)

Abstract: The hydrocarbon discoveries in relation with salt bed account for approximate 58% . Salt basin's hydrocarbon geological characteristics and exploration experience are very important for hydrocarbon discovery. Directed by Red Sea basin's salt bed existence and distribution regular study , source-reservoir-seal characteristics analysis and exploration activities , salt basin was considered to have following several features: salt layers are abundant in salt basin , forming various salt structures for salt deformation and hydrocarbon exploration give first place to seeking salt tectonics reservoirs; the pre-salt reservoirs dominated by carbonate and sandstone usually have high temperature and high pressure which is benefit for reservoir's properties and reservoir types and traps identification are crucial for the pre-salt exploration; it is necessary to strengthen drilling engineering study due to complicated geology and great difficulty in engineering; the seismic imaging quality is general weak in the pre-salt , which is the breakthrough key for enhancing seismic process technology study and distinguish “false structural” under the salt layer.

Key words: Red Sea Basin; Saliferous Basin; Salt tectonics; Structural deformation; High temperature and high pressure; Reaming; Pipe-sticking

(上接第 8 页)

Abstract: Longhu Diggings is one of the most important potash deposits in Khorat Plateau ,Laos , ZK309 hole is one of the most representative holes in this area , it is a perfect penetrated drilling where we have got complete mud rock samples. In light of analysing the upper clasolite strata , minerals and elements , mudstone as one of the cycle of sedimentation of diagenesis , we concluded that minerals and elements in mudstone are bound up with the type and character of below salt stratum. The changing regularity of saline minerals in vertical direction accord with the depositional environment that change from low salinity to high salinity. The saltation of minerals and elements located in 103 ~ 107 metres indicates that the fluid e-luviation had taken place during the late consolidation stage of rock salt sedimentation. It is easy to conclude that the fluids were water with low salt content and mixture of little seawater and much freshwater by analysing the minerals and elements. In terms of distributions and contents of and carbonate minerals , we concluded that there were high magnesian fluids ,we had the composition of clay minerals of mudstone compared with other facies and land facies basin of China , and concluded it leaning towards sea facies. Additionally , it has more chlorite , we speculated that it may be from ocean environment.

Key words: Laos; Longhu Diggings; Mudstone; Mineral and geochemistry character; Sedimentary facies