



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*

唐启亮¹, 张西营^{1**}, 李雯霞¹, 韩元红²

(1 中国科学院青海盐湖研究所 盐湖地质与环境实验室, 青海 西宁 810008; 2 中国科学院地质与地球物理研究所
油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要 硼在自然界中分布较集中, 平均丰度低, 而且¹¹B和¹⁰B之间质量差大, 分馏效应显著, 故 B 同位素的组成可以作为判定硼来源及沉积环境的有效指示剂和指相标志。文章对老挝龙湖钾盐矿区 ZK309 钻孔盐岩上覆泥岩层的 B 同位素地球化学及矿物学进行分析总结得出, 其 $\delta^{11}\text{B}$ 范围为 7.44‰~11.62‰, 均值 8.96‰, 明显介于海水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值(39.5‰)与陆相地下水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$)之间。钻孔的矿物组成保存了一定的母岩特性, 石英明显来自于陆源输入物, 而石盐、硬石膏、石膏与残余卤水有关, 推测在下盐段后期出现陆源淡水输入事件, 使得后期盐岩层被淋滤, 而泥岩层的 $\delta^{11}\text{B}$ 值就是受淋滤后的残余卤水影响的结果, 这也解释了蒸发岩沉积层序异常(钾石盐覆盖于光卤石之上)的沉积特征。

关键词 地质学 B 同位素 泥岩 陆源淡水 老挝龙湖钾盐矿区

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

Boron isotope geochemical study of mudstone in Longhu mining area of Laos: A case study of ZK309

TANG QiLiang¹, ZHANG XiYing¹, LI WenXia¹ and HAN YuanHong²

(1 CAS Key Laboratory of Salt Lake Resources and Chemistry, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 2 Gansu Provincial Key Laboratory of Petroleum Resources, CAS Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Because boron exhibits relatively concentrated distribution in nature, has low average abundance, and the quality is different between ¹¹B and ¹⁰B, the fractionation effect is significant. Therefore, the boron isotopic composition may be used to determine the effective boron source indicator and facies. The Longhu potash mining area is one of the main potash mines in Khorat plateau of Laos, and drill hole ZK309 is the representative in the Longhu mining area. The boron isotope geochemical and mineralogical analyses of the salt rock overlying mudstone layers in this drill hole indicate that the $\delta^{11}\text{B}$ values range from 7.44‰ to 11.62‰, 8.96‰ on average, obviously between $\delta^{11}\text{B}$ value of seawater (39.5‰) and the terrestrial groundwater value ($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$), mineral composition in the drill hole preserved some characteristics of parent rocks, and quartz is sourced obvi-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:40903014)和中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金联合资助

第一作者简介 唐启亮,男,1981年生,硕士,助理研究员,主要从事盐湖地球化学研究。Email: tangql@isl.ac.cn

** 通讯作者 张西营,男,1977年生,博士,副研究员,主要从事盐湖地质研究。Email: xyzhchina@isl.ac.cn

收稿日期 2015-01-06; 改回日期 2015-12-25。秦思婷编辑。

ously from terrigenous materials. In addition, halite, anhydrite and gypsum are related to residual brine. It is inferred that the rock salt deposition was impacted by terrigenous water at the late stage, and the mudstones were reformed by brine after deposition. The brine might have been generated from dissolution of the underlying salt rocks by meteoric water. This could explain the abnormal sequence of salt rock deposition (sylvite overlies carnallite).

Key words: geology, boron isotope, mudstone, terrigenous water, Longhu potash mining area

呵叻高原钾盐资源丰富,它是世界上最大的钾盐沉积矿床之一(Hite et al., 1979; Fan, 2000)。虽然呵叻高原盐岩研究历史可追溯到 20 世纪初,但对于它的成因、沉积环境、物源等问题却一直存在较大争议(Sundharovat, 1976; Thiramongkol, 1978; Sat-tayarak et al., 1990; Utha-Aroon, 1993; Donald, 1996; 曲懿华, 1997; Warren, 1999; 钟维敷等, 2003)。

20 世纪 60 年代采用 NaBO_2^+ 方法测定了一些海相和盐湖硼酸盐的 B 同位素组成,但研究者们发表的数据相互抵触(Shima, 1963);80 年代以来,由于 B 同位素测量技术的进一步建立和改进(Spivack et al., 1986; Xiao et al., 1988; Aggarwal et al., 1995)。微量 B 的同位素检测技术取得明显突破,人们开始尝试把 B 同位素分析引入到一些重要的地质研究中,并在示踪古海洋和古环境方面取得初步成果(Spivack et al., 1993; Gaillardet et al., 1995; 刘卫国等, 1999; Xiao et al., 2001; 赵志琦等, 2002)。研究表明, B 同位素是良好的示踪物源特征的地球化学指标。Schwarcz 等(1969)首次研究了海水中的硼被伊利石吸附时的 B 同位素分馏,发现硼被黏土矿物吸附时, ^{10}B 富集在黏土矿物中,其同位素分馏大约为 30%~40%,这是海水具有高 $\delta^{11}\text{B}$ 值的原因。盐湖黏土沉积物对硼同样有着强烈的吸附。Shirodkar 等(1997)对青海柴达木盆地盐湖黏土沉积物的 B 同位素组成进行了研究,发现柴达木盆地盐湖黏土沉积物的 $\delta^{11}\text{B}$ 值变化范围为 -25.2‰~26.1‰,这种较宽的变化范围与卤水中 B 同位素组成有关。总之, B 同位素研究的应用领域正在不断扩展,并且能很好的指示沉积环境及物源。

对老挝甘蒙地区石盐中的 B 同位素进行研究,发现其物质来源为海水(Tan et al., 2010);而老挝万象地区硼酸盐中的 B 同位素组成则指示了呵叻高原钾盐矿床为属海相成因(Zhang et al., 2013)。过去盐岩层是沉积环境和成矿特征研究的主要对象,单独对上覆泥岩 B 同位素的研究未见报道,因此, 2011 年笔者在老挝甘蒙省龙湖矿区获取到 ZK309

含盐系上覆泥岩层样品,并着手对青灰色泥岩层中黏土矿物的 B 同位素及矿物学研究,讨论盐岩上覆泥岩沉积的 B 同位素组成变化特征,并尝试初步反映其地质成因、沉积环境、物源及探讨水流体对钾盐沉积后的改造作用。

1 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。由于高原中部普潘隆起的阻隔,呵叻高原分为南、北 2 个次级盆地:南部的呵叻盆地和北部的沙空那空盆地(图 1)。老挝农波盆地大地构造位置处于藏滇印支地槽褶皱系南段印支中间地块沙空那空凹陷的东南缘,地块基底为晚元古代,出露二叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。其南、西及北东三面分别以北柬埔寨、南乌江、湄公河深大断裂控制,构成一个独特的长期持续下降的拗陷带,其中沉积了广泛厚大的中-新生代红色碎屑岩建造,特别是早白垩世晚期的燕山运动,使拗陷内沿大断裂方向形成一系列的凹陷和水上隆起,控制了本区晚白垩纪—古近纪成盐盆地的展布。此后,虽然经历了多期构造运动影响,而高原内部的构造仍较简单,形态总体上为边缘向上翘,周边地层向盆地中心倾斜,盆地内多以平缓波状褶皱为主,断裂较少;矿产以钾镁盐矿为主,次为石膏矿(Tran van Ban, 2000)。

研究区位于呵叻高原沙空那空次级盆地东南缘,老挝中南部他曲县附近,其南部与沙湾拿吉盆地相邻,该地区 2009 年开始实施了数以百计的钾盐勘探钻孔。钻孔资料揭示,研究区的含盐系地层一般含有 2~3 个蒸发岩-碎屑沉积旋回,亦即 3 个成盐段,个别只有一个旋回(成盐段),钾镁盐主要赋存在第一沉积旋回(下盐层)的上部。在实施的众多钻孔中,位于勘探区东北部成盐盆地边缘的 ZK309 是少数穿透含盐系的钻孔之一,该钻孔仅发现了 2 个明显的沉积旋回或成盐段,缺失上盐段(图 2)。从剖面岩性特征来看,剖面最上部 5 m 岩芯严重风化,为砂和

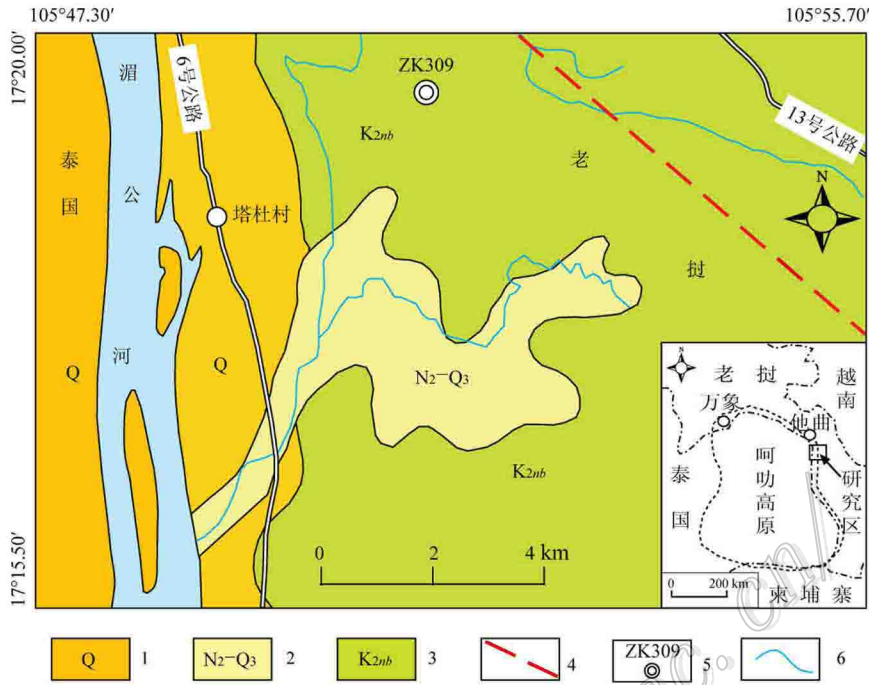


图 1 研究区区域地质略图(据张西营等,2010)

1—现代河流相沉积物; 2—新近系—第四系沉积物; 3—晚白垩统农波组; 4—湄公河断裂; 5—目标钻孔; 6—河流
(小图中虚线为呵叻高原的范围; 大图中上新统与更新统未分异, N_2-Q_3 代表了上新世至更新世的沉积物)

Fig. 1 Geological sketch map of Khorat Plateau(modified after Zhang et al., 2010)

1—Modern fluvial sediments; 2—Neogene-Quaternary sediments; 3—Late Cretaceous Nongbok Formation; 4—Mekong River Fault;
5—Objective drill hole; 6—River

(In Fig. 1, Pliocene and Pleistocene are undifferentiated and the geological symbol N_2-Q_3 represents sediments from Pliocene to Pleistocene; in the inserted map, the dotted line represents the range of Korat Plateau area)

泥的杂色混合物且无明显层理,推测最上部的成盐旋回可能已经被淋失并严重风化。第二旋回的蒸发岩为硬石膏岩,中部夹有杂色泥质沉积,第一旋回是钾镁盐沉积的最主要阶段,钾盐矿层厚达 24 m。钾盐层上部为厚约 7 m 的青灰色钾石盐,下部是厚约 17 m 的光卤石岩,而下盐段的下碎屑层又可分为上部的棕红色泥岩和下部的青灰色泥岩,此次主要针对青灰色泥岩展开工作。

2 样品采集、分析及数据

样品采自 ZK309 钻孔下盐段下碎屑层下部的青灰色泥岩,青灰色泥岩取样间隔为 1 m,共计 13 个。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;

取 101~113 m 处的青灰色泥岩样品进行 B 同位素测定。

酸分解质谱测定法测定泥岩 B 同位素前处理:
① 称样,保证样品中硼含量不低于 50 μg ; ② 将样品在玛瑙研钵中研磨,为保证不出现不必要的分馏,必须至全过 200 目的粉末; ③ 溶样,采用超纯水溶解样品,加入少量盐酸,搅拌,静置 2 h,如不溶,重复以上操作,至样品溶完,供下步使用。采用酸分解法提取 B: 用 HClO_4 、 HF 和 HNO_3 混合酸溶液溶解提取岩样中 B 元素。B 同位素的测试是在中国科学院青海盐湖研究所采用固体稳定热同位素质谱仪 (Triton) 进行的,以 NBSSRM951 标准的 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 比值 ($4.056\ 62 \pm 0.000\ 78$) 计算样品的千分比偏差,即 $\delta^{11}\text{B} = [(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{[样品]}} / (^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{[标准样]}} - 1] \times 1000$ 。

组	段	层	柱状图	厚度/m	岩性描述
第四系				0~5	棕红、土黄、青灰色含泥和泥质中细砂，风化严重，顶部有砾石
农波组	中盐段	中碎屑层		5.00~37.42	中-上部为棕红色、灰紫色泥岩和泥质粉砂岩，下部为青灰色泥岩，夹少量有机质薄层
		中膏盐层		37.42~38.64	灰黑色硬石膏，中部夹棕红色、青灰色泥岩
	下盐段	下碎屑层		38.64~100.73	中-上部为棕红色、灰紫色泥岩和泥质粉砂岩，局部含较多白云质斑点
				100.73~113.04	青灰色泥岩(此次研究目标层)
		下膏盐层		113.04~127.82	无色透明、灰白色、灰黑色石盐岩，部分层位见硬石膏夹层
				127.82~134.57	青色钾石盐
				134.57~151.97	灰白色、无色、浅红色光卤石岩
				151.97~258.12	无色透明、灰白色、灰黑色石盐岩，部分层位见硬石膏夹层

图 2 龙湖矿区 ZK309 钻孔岩性柱状图
Fig. 2 Lithology and stratigraphic characteristics of drill hole ZK309

3 测试结果与讨论

3.1 龙湖矿区泥岩层的 B 同位素组成特征

对 ZK309 孔青灰色泥岩 13 个样品进行了酸溶处理,之后测定各部分 B 同位素的组成(表 1)。分析结果表明,硼含量与 $\delta^{11}\text{B}$ 值相关性较差,硼含量无太大变化,但 B 同位素组成变化显著,说明 B 同位素在青灰色泥岩形成演化过程中具有分馏作用,酸溶相硼主要赋存于碳酸盐相和吸附相中,而酸溶部分为泥岩中吸附相的硼, $\delta^{11}\text{B}$ 范围为 7.44‰~11.62‰,均值 8.96‰,随着深度的增加,该值略有增加, $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 比值变化不大,说明沉积环境较为稳定。

将 ZK309 孔中青灰色泥岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 值与前人 (Schwarcz et al., 1969; Kakihana et al., 1977; Xiao et al., 1992; 李俊周等, 1996; Shirodkar et al., 1997) 数据进行比较(图3)后发现:老挝甘蒙地区灰

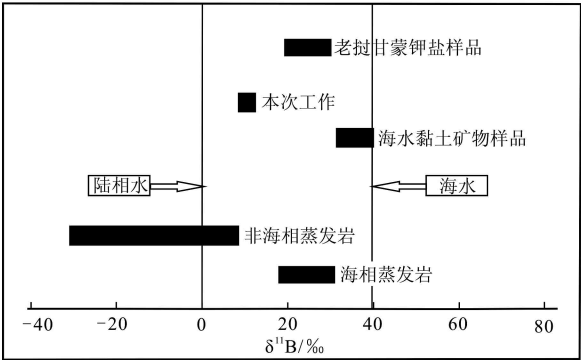


图 3 不同硼源的 $\delta^{11}\text{B}$ 值(部分数据引自 Oi et al., 1986; Swihart et al., 1986; Xiao et al., 2001)
Fig. 3 Range of $\delta^{11}\text{B}$ values from different boron sources (data after Oi et al., 1986; Swihart et al., 1986; Xiao et al., 2001)

色泥岩层下覆地层的钾镁盐层,其 $\delta^{11}\text{B}$ 值范围为 19.91‰~31.01‰,属海相成因。由于此次研究的

表 1 ZK309 泥岩层硼的含量及 B 同位素值

Table 1 Boron isotopes in the mudstone of drill hole 309

钻孔号	深度/m	$w(B_2O_3)/\%$	$\delta^{11}B/\text{‰}$	$^{11}B/^{10}B$	误差(±)/‰
ZK309-56	101	0.027	8.13	4.08960	0.16
ZK309-57	102	0.027	7.48	4.08696	0.34
ZK309-58	103	0.026	7.6	4.08745	0.09
ZK309-59	104	0.020	7.92	4.08875	0.21
ZK309-60	105	0.021	10.59	4.09958	0.10
ZK309-61	106	0.014	8.17	4.08976	0.21
ZK309-62	107	0.016	9.65	4.09577	0.07
ZK309-63	108	0.020	8.75	4.09212	0.21
ZK309-64	109	0.019	9.73	4.09609	0.08
ZK309-65	110	0.017	11.61	4.10372	0.13
ZK309-66	111	0.022	7.44	4.08680	0.15
ZK309-67	112	0.031	7.73	4.08798	0.39
ZK309-68	113	0.021	11.62	4.10376	0.16

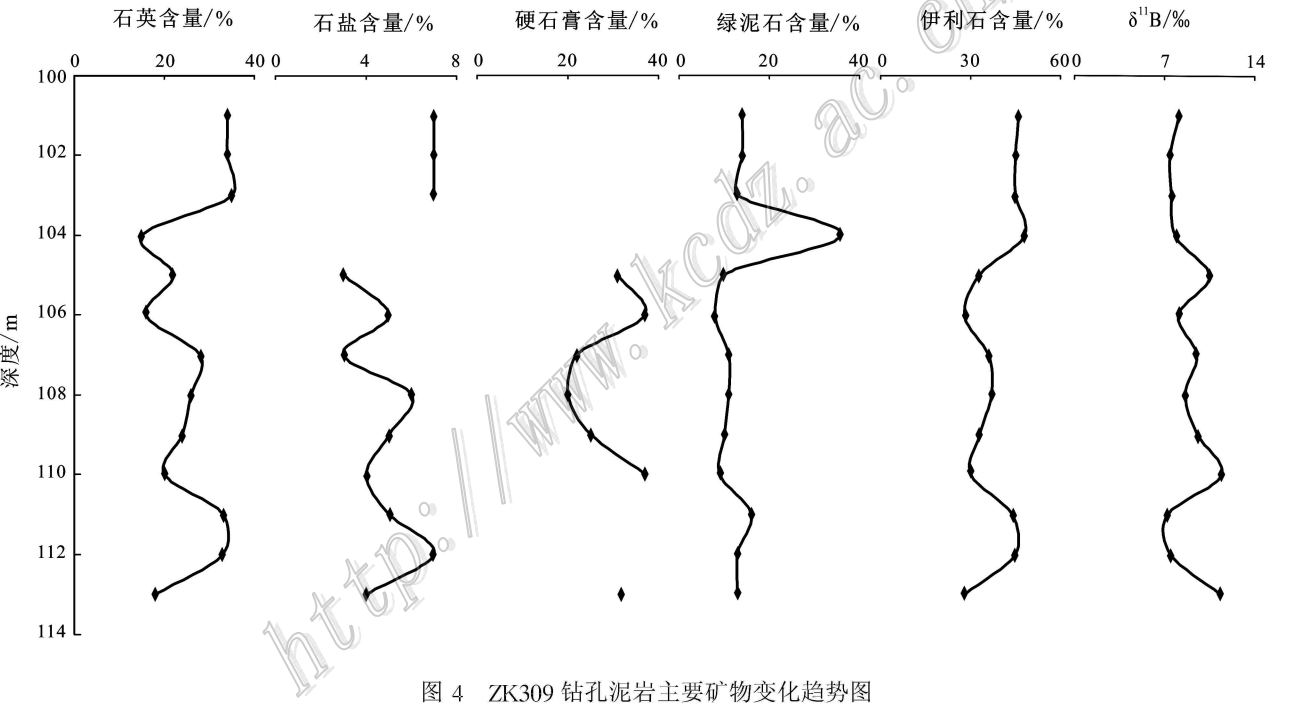


图 4 ZK309 钻孔泥岩主要矿物变化趋势图

Fig. 4 The composition and variation tendency of essential minerals of mudstone in drill hole ZK309

青灰色泥岩 $\delta^{11}B$ 值范围为 $7.44\text{‰} \sim 11.62\text{‰}$ ，均值 8.96‰ ，明显低于海水的 $\delta^{11}B$ 值(39.5‰)、高于陆相地下水的 $\delta^{11}B$ 值($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$)，且比该地区的钾镁盐层 $\delta^{11}B$ 值要低。

据此，笔者认为下盐段海相盐岩沉积后有陆源水流体的活动，水流体的水体较淡，对下覆钾镁盐有改造作用，而泥岩层 $\delta^{11}B$ 值就是受淋滤后残余卤水影响的结果，所以 $\delta^{11}B$ 值介于海水与陆相地下水值之间，说明当时为半咸水还原干燥环境，沉积环境较为稳定，接受陆源淡水淋滤作用影响较大。

3.2 B 同位素和矿物组合的关系

ZK309 钻孔青灰色泥岩层矿物主要有石英、绿泥石、伊利石、硬石膏、石盐，主要矿物在钻孔垂向上的变化见图 4。其中，黏土矿物为伊利石 + 绿泥石组合，伊利石含量很高，最高可达 63%，最低 12%，平均 37.66%。泥岩中富集硼的是黏土矿物，主要成分是绿泥石、伊利石，而 B 同位素与伊利石关系最为密切，且呈相反趋势变化，这是因为大多数伊利石都优先吸附 ^{10}B ， ^{10}B 富集而导致 $\delta^{11}B$ 降低，说明黏土矿物中伊利石对硼有很强的吸附力，这种吸附作用是 B

同位素在青灰色泥岩形成演化过程中主要的分馏作用,而泥岩中的石盐出现在105~113 m处,说明外部水流体的补给了引发与下覆石盐的水-岩作用,这些石盐应该是重结晶作用形成的,与B同位素也呈相反趋势变化,这是因为 ^{10}B 优先进入固体石盐晶格中,而使 $\delta^{11}\text{B}$ 降低的结果。综上所述,泥岩中B同位素与伊利石、石盐有密切关系。而对于其他矿物与B同位素的关系来说,无规律可寻。

ZK309 钻孔的矿物组成保存了一定的母岩特性,石英明显来自于陆源输入物,而石盐、硬石膏、石膏与残余卤水有关,黏土矿物的 $\delta^{11}\text{B}$ 值与古水体 $\delta^{11}\text{B}$ 值有关,结合上述研究表明黏土矿物的 $\delta^{11}\text{B}$ 均值为8.96‰,明显介于海水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值(39.5‰)及陆相地下水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$)之间,也说明与残余卤水有关。

3.3 影响龙湖矿区B同位素分馏的因素

影响硼同位素分馏的因素包括:① 硼源作用,盐岩沉积后有水流体的活动,水流体水体较淡,对下覆钾镁盐有改造作用,外部水流体的补给引发与固体钾镁盐的水-岩作用,使钾镁盐溶解,外部水流体及海水的混杂导致 $\delta^{11}\text{B}$ 值变化。② 黏土矿物的吸附作用,形成钾镁盐的卤水与上覆泥岩层存在着明显的硼同位素分馏,在卤水中硼主要以 $\text{B}(\text{OH})_3$ 和 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 形成存在,而轻同位素 ^{10}B 将优先进入 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 被黏土矿物吸附。

4 结 论

(1) 通过对ZK309 钻孔青灰色泥岩B同位素分析,发现B位素值明显介于海水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值(39.5‰)及陆相地下水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$)之间,青灰色泥岩矿物组成保存了一定的母岩的特性,石英明显来自于陆源输入物,石盐、硬石膏、石膏与残余卤水有关。

(2) ZK309 钻孔在下盐段中有大量的钾镁盐沉积,而下盐段以上由于沉积环境的改变,未再发现钾镁盐,说明沉积环境已经从海相变为陆相,B同位素地化指标及泥岩矿物组成都说明钻孔下盐段青灰色泥岩层沉积环境为混合水过渡环境,盐岩沉积后有陆相淡水进入盆地,使盐岩层经受了淋滤作用,泥岩层受淋滤后的残余卤水影响,这也解释了蒸发岩沉积层序异常(钾盐盐覆盖于光卤石之上)问题,为呵叻高原钾盐矿交代和截顶钾盐成矿模式提供了证

据。

总之,研究盐岩上覆青灰色泥岩对盐岩成矿环境、成矿特征有一定的指示意义,后续需要对不同沉积旋回中不同岩性的B同位素组成和分布特征进行系统对比,以期对研究区沉积环境及物源有更为深入的理解。同时,也可以利用B同位素特征指标为寻找钾镁盐矿提供指导意义。

志 谢 高章洪研究员对文章的撰写给予了建议及修改,谨志谢意。

References

- Aggarwal J K and Palmer M R. 1995. Boron isotope analysis[J]. Analyst, 20: 1301-1307.
- Donald E G. 1996. Potash deposits, proceeding, properties and uses [M]. Great Britain: Chapman and Hall. 159-164.
- Fan P F. 2000. Accreted terranes and mineral deposits of Indochina[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18(3): 343-350.
- Gaillardet J and Allegre C J. 1995. Boron isotopic compositions of coral: Seawater or diagenesis record[J]. Earth & Planetary Science Letters, 136(3-4): 665-676.
- Hite R J and Japakeset T. 1979. Potash deposits of Khorat Plateau, Thailand and Laos[J]. Econ. Geol., 74(2): 448-458.
- Kakihana H, Kotaka M, Satoh S, Nomura M and Okamoto M. 1977. Fundamental studies on the ion-exchange separation of boron isotopes[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 50(50): 158-163.
- Li J Z and Sun D P. 1996. Boron isotopic geochemistry of Da Qaidam salt lake, Qaidam Basin, China[J]. Geochimica, 25(3): 277-285 (in Chinese with English abstract).
- Liu W G, Peng Z C, Xiao Y K, Wang Z R, Nie B F and An Z S. 1999. Boron isotopic composition of corals from South China Sea and their environmental significance [J]. Geochimica, 28(6): 534-541 (in Chinese with English abstract).
- Oi T, Nomura M, Musashi M, Osaka T and Okamoto M. 1988. Boron isotopic compositions of some boron minerals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(12): 3189-3195.
- Qu Y H. 1997. On affinity of potassium bearing brine in Lanping Simao Basin, China to that in Ale Basin, Thailand, and location of target areas for potassium hunting in former Basin[J]. Geology of Chemical Minerals, 19(2): 81-84 (in Chinese with English abstract).
- Sattayarak N and Polachan S. 1990. Rock salt in the Khorat Plateau

- [A]. Proceedings of the 3rd conference on geologic resource management[C]. Bangkok : Department of Mineral Resources. 1-13(in Thai) .
- Schwarz H P, Agyei E K and McMullen C C. 1969. Boron isotopic fractionation during clay adsorption from sea-water[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 6(69) : 3-5.
- Shima M. 1963. Geochemical study of boron isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(63) : 911-913.
- Shirodkar P V and Xiao Y K. 1997. Isotopic Compositions of boron in sediments and their implications[J]. *Current Science*, 72(1) : 74-77.
- Spivack A J and Edmond J M. 1986. Determination of boron isotope ratios by thermal ionization mass spectrometry of the dicesium metaborate cation[J]. *Analytical Chemistry*, 58(1) : 31-35.
- Spivack A J, You C F and Smith J. 1993. Foraminiferal boron isotopic ratios as a proxy for surface ocean pH over the past 21 Myr[J]. *Nature*, 363(6425) : 149-151.
- Sundharavat S. 1976. Potash in E-Sarn[J]. *Mineral Resources Gazette*, 21(11) : 1-8 (in Thai).
- Swihart G H and Moore P B. 1986. Boron isotopic composition of marine and nonmarine evaporite borate [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(6) : 1297-1301.
- Tan H B, Ma H Z, Li B K, Zhang X Y and Xiao X Y. 2010. Strontium and boron isotopic constraint on the marine origin of the Khammune potash deposits in southeastern Laos[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(27-28) : 3181-3188.
- Thiramongkol V. 1978. Some suggestions of potash and rock salt genesis in NE region[J]. *Mineral Resources Gazette*, 21(8) : 24-40 (in Thai).
- Tran van Ban. 2000. Report geology and minerals of Mid-Central Laos Region[R]. Laos : Department of Geology and Mines.
- Utha-Aroon C. 1993. Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, northeastern Thailand[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 8(1-4) : 193-203.
- Warren K. 1999. *Evaporites : Their evolution and economics*[M]. Oxford : Blackwell Science. 235-239.
- Xiao Y K, Beary E S and Fassett J D. 1988. An improved method for the high precision isotopic measurement of boron by thermal ionization mass spectrometry [J]. *International Journal of Mass Spectrometry & Ion Processes*, 85(2) : 203-213.
- Xiao Y K, Sun D P and Wang Y H. 1992. Boron isotopic compositions of brine, sediments and source water in Da Qadam Lake, Qinghai, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 : 1561-1568.
- Xiao Y K, Yin D Z, Liu W G and Wei H. 2001. Boron isotope method for study of seawater intrusion[J]. *Science in China*, 44(1) : 62-71.
- Zhang X Y, Ma H Z, Tan H B, Gao D L, Li B K, Wang M X, Tang Q L and Yuan X L. 2010. Preliminary studies of on geochemistry and post-depositional change of Dong Tai potash deposit in Laos[J]. *Mineral Deposits*, 29(4) : 713-721 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X Y, Ma H Z, Ma Y Q, Tang Q L and Yuan X L. 2013. Origin of the Late Cretaceous potash-bearing evaporates in the Vientiane Basin of Laos : $\delta^{11}\text{B}$ evidence from borates [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 62 : 812-818.
- Zhao Z Q, Liu C Q and Xiao Y K. 2002. The geochemical characteristics of Boron isotope in Loess during weathering process[J]. *Science in China (Series D)*, 32(6) : 507-513 (in Chinese with English abstract).
- Zhong W F, Li Z W and Shan W G. 2003. A study on the sedimentary characteristics and origin of K-Mg salt in Khorat Basin [J]. *Yunnan Geology*, 22(2) : 142-150 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李俊周, 孙大鹏. 1996. 大柴达木盐湖硼同位素地球化学特征[J]. *地球化学*, 25(3) : 277-285.
- 刘卫国, 彭子成, 肖应凯, 王兆荣, 聂宝符, 安芷生. 1999. 南海珊瑚礁硼同位素组成及地球化学意义[J]. *地球化学*, 28(6) : 534-541.
- 曲懿华. 1997. 兰坪-思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究-兼论该区找钾有利层位和地区[J]. *化工矿产地质*, 19(2) : 81-84.
- 张西营, 马海州, 谭红兵, 高东林, 李斌凯, 王明祥, 唐后亮, 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[J]. *矿床地质*, 29(4) : 713-721.
- 赵志琦, 刘丛强, 肖应凯. 2002. 黄土风化过程的硼同位素地球化学研究[J]. *中国科学(D辑)*, 32(6) : 507-513.
- 钟维敏, 李志伟, 单卫国. 2003. 呵叻盆地钾镁盐矿沉积特征及成因探讨[J]. *云南地质*, 22(2) : 142-150.