

老挝万象盆地钾盐矿床微量元素地球化学特征及矿床的成因

李善平^{1,2}, 马海州³, 陈有顺⁴, 王生祖⁵, 李五福², 王钦元¹

LI Shan-ping^{1,2}, MA Hai-zhou³, CHEN You-shun⁴,

WANG Sheng-zu⁵, LI Wu-fu², WANG Qin-yuan¹

1. 青海省地质矿产研究所, 青海 西宁 810012;
2. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;
3. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008;
4. 青海省地震局, 青海 西宁 810001;
5. 青海省公路科研勘测设计院, 青海 西宁 810007

1. *Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810012, Qinghai, China;*
2. *Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China;*
3. *Qinghai Institute of Salt Lakes of Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China;*
4. *Qinghai Seismological Bureau, Xining 810001, Qinghai, China;*
5. *Qinghai Highway Survey and Design Institute Research, Xining 810007, Qinghai, China*

摘要:老挝万象盆地钾镁盐矿主要富集在塔贡组下段膏盐中, 主要由石盐岩、光卤石、钾石盐、含光卤石钾石盐及少量溢晶石等组成, 属单层结构类型。钾镁盐矿中的微量元素 Br、Rb 和氯化物有直接的关系, 是在万象盆地内找钾的直接标志, 可在不同程度上反映原始盐溶液的浓缩发展过程。而 Sr、B 地球化学性质稳定, 随卤水浓度的增高而富集在卤液中, 可间接指示含钾的层位。证实了万象盆地的卤水来源于南部呵叻盆地, 并有地表水体及深部卤水补给的可能性。研究万象盆地元素的地球化学特征, 对丰富古代固体钾盐成矿理论、指导兰坪-思茅盆地蒸发岩研究及找钾工作具有重要的指示意义。

关键词: 万象盆地; 钾盐矿床; 元素地球化学; 兰坪-思茅盆地; 矿床成因

中图分类号: P619.21¹; P595

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2010)05-0760-11

Li S P, Ma H Z, Chen Y S, Wang S Z, Li W F, Wang Q Y. Geochemical characteristics of trace elements and ore genesis from potash deposit in Vientiane basin, Laos. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):760-770

Abstract: Potassium and magnesium salt deposit mainly enriches in the lower gypsum rock salt segment of Tagong Formation in Vientiane basin, Laos. The deposit is mainly composed of salt rock, carnallite, potassium salt, carnallite bearing potassium and a small amount of spar etc, and it belongs to single-layer structure. Trace elements of potassium and magnesium salt deposit such as Br and Rb are directly related to chloride, and therefore work as sign of potassium deposit prospecting in the Vientiane basin. These elements can reflected the development process of the original concentration of salt solution in certain degree. Sr and B with stable geochemical nature concentrate in the brine solution with the increase of brine concentration, so they may be indicative for potassium layer. It is confirm that the Vientiane basin brine comes from the southern Khorat basin by the analysis of trace elements, and it's possible that there is also surface water from deep fracture brine supply. This conclusion can be quite helpful to enrich the ancient solid potassium salt mineralization theory and to guide the research of Lanping-Simao basin evaporite salt and other potash deposits prospecting.

Key words: Vientiane basin; potassium salt deposit; element geochemistry; Lanping-Simao basin; genesis of deposit

收稿日期: 2009-09-27; 修订日期: 2009-11-11

科技项目: 云南中寮矿业开发投资有限公司《老挝万象钾盐矿床补充勘探》项目资助

作者简介: 李善平(1974-), 男, 硕士, 工程师, 地球化学专业, 从事区域地质及矿产研究工作。E-mail: lishanping1952@163.com

中国的钾盐,尤其是大型可溶性固体钾盐找矿工作一直未取得重大突破,钾盐已成为国家大宗紧缺的矿产资源。中国众多成盐盆地中已发现有固体钾盐成矿的线索^[1-5],其中兰坪-思茅盆地是具有大型钾盐成矿条件和最有找矿前景的重点成钾盆地。兰坪-思茅盆地与沙空那空盆地、呵叻盆地同处于一个成矿带,盆地基底、盆地的形成及构造演化均有相似之处^[6-8],但多年来兰坪-思茅找钾工作一直未取得重大突破。笔者等在沙空那空盆地西北缘的万象盆地对石盐、光卤石等岩心进行了系统研究,获取了翔实的地球化学资料。这对钾盐矿床的赋存规律具有一定的指示意义,对在中国兰坪-思茅盆地寻找钾盐矿床亦具有实际指导意义。

1 区域地质概况

东南亚板块起源于早古生代冈瓦纳大陆的北缘向北漂移的过程中^[9-11]。在大地构造背景中,呵叻高原处于东印度支那板块邻近印度板块和欧亚板块的边缘。万象平原位于中国南方-东印支板块之东印

板块内,属呵叻高原的一部分(图 1)。特定的大地构造背景,决定了盆地的形成、演化与新特提斯海构造演化有密切的关系,总体上属于近海大盆地。

呵叻高原中部为普潘隆起,将呵叻高原分割成南北 2 个相辅的盆地,北面称沙空那空盆地,南面称呵叻盆地^①,万象盆地位于沙空那空盆地的西北缘。呵叻高原北为湄公河断裂、西为南乌江断裂、南为北柬埔寨断裂、东为边和断裂,受周边深大断裂的控制,呵叻高原构成一个独特的长期稳定持续下降的拗陷带。万象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,钻探证实基底最大埋深大于 750.33m,重力推断 1400m^①。可能受近东西向的挤压或引张作用较强,在晚白垩世、古近纪及第四纪相继发育有北北西向的褶皱、断裂和近东西向的断层、盐构造。

2 钾盐矿床的地质矿产特征

万象盆地钾盐矿床有 3 个矿段钾盐较为富集,分别为通芒、农刀、塔贡矿段,其中通芒、农刀矿段是

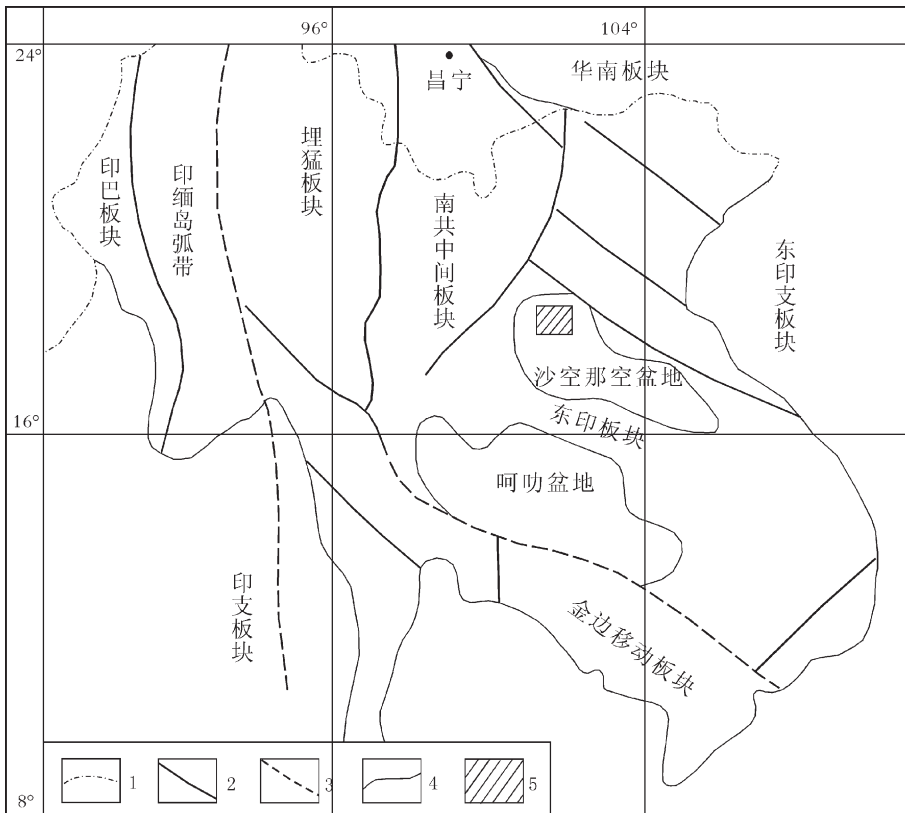


图 1 万象盆地大地构造图^①

Fig. 1 Tectonic map of Vientiane basin

1—国界;2—断层;3—推测断层;4—构造界线;5—万象盆地位置

矿体的主体,本文对通芒矿段施工的 T1~T4 四个钻孔钾镁盐矿进行重点研究。

2.1 地层

通芒矿段内钻孔所揭露地层自上而下为:第四系河流相堆积(Q)、古近系古新统一始新统班塔博组(E₁₋₂bt)、古新统塔贡组(E₁tg)和白垩系下统班塔拉组(K₁bt)。含盐系为古近系古新统塔贡组(E₁tg),为紫红色陆源碎屑岩和膏盐岩不等厚互层沉积,碎屑岩以泥质粉砂岩、泥岩、粉砂岩等细碎屑岩为主;膏盐岩则主要为石膏、石盐、钾镁盐等,总厚 200~

582m。根据岩性及沉积组合特征,可分为 3 个岩性段 6 个亚段(图 2)。白垩系下统班塔拉组(K₁bt)为万象盆地盐岩的基底。

2.2 钾镁盐矿的特征

矿体的厚度受成盐时盆地基底的形态和成盐后盐构造作用的控制。成盐盆地基底的形态为西部隆起,东部为北西向基底凹陷,由盆地边缘向盆地中心凹陷变深,在空间上矿体的埋深由南西塔贡矿段向北东通芒、农刀矿段逐渐增加,埋深一般 78.8~528.3m,平均 272.57m^①。成盐期后在构造应力的作

地层					柱状图 1:2000	厚度 /m	岩心描述	
系	统	组	段	代号				
第四系				Q		1.2~50	粉砂质含砾粘土,粘土质细砂、砂砾石,含铁锰质砂砾石层,与下伏地层角度不整合接触	
古近系	始新统	班塔博组	上段	E ₁₋₂ bt		>65	岩性为灰白、棕红、紫红色厚一中层状含粉砂泥岩,局部为含少量白云质泥岩,含少量石膏细脉,底部为灰、灰紫色含石盐泥岩,具纹层状构造,含灰绿色白云质团粒	
				E ₁ tg ³⁻²		35~68	棕红、紫红色中一厚层状、块状含粉砂泥岩,局部为含少量白云质泥岩,含少量石膏细脉,底部为灰、灰紫色含石盐泥岩,具纹层状构造,含灰绿色白云质团粒	
				E ₁ tg ³⁻¹		1~26	灰白、无色石盐岩,含少量纹层状、条带状、薄层状硬石膏	
				中段	E ₁ tg ²⁻²		11~213	紫红、暗紫红色中一厚层状粉砂质泥岩,含粉砂泥岩,局部夹粉砂岩,含灰绿色白云质团粒、石膏团块及石盐细脉,见水平层理,底部为灰黑色、灰紫色、灰色含石盐泥岩、含石膏泥岩
					E ₁ tg ²⁻¹		1.5~66	灰白、无色石盐岩,含少量纹层状、条带状硬石膏,中上部夹1.70~6.07m厚的钾盐矿,中下部偶夹薄层状或纹层状含白云质硬石膏岩,含深灰色有机质条带,硬石膏中夹有少量细粒赤铁矿、菱铁矿、石英等
					E ₁ tg ¹⁻²		2~36	灰绿色、灰褐色白云质泥岩,裂隙发育,裂隙中充填桔红色或蜜黄色次生光卤石细脉
	下段	E ₁ tg ¹⁻¹		17~407	浅灰白色中一细粒块状石盐岩,见浅灰色硬石膏细脉,底部夹蜜黄色溢晶石			
					无色、白色、浅红色细粒块状钾盐矿,矿物成分以光卤石、石盐为主,少量溢晶石、水氯镁石、钾石盐,部分钻孔底部见厚4m左右的钾石盐			
					灰色、灰白色中一粗粒块状石盐岩,部分钻孔顶部见含光卤石石盐岩,下部见深灰色有机质和灰色硬石膏网脉			
					深灰色、灰白色中一厚层状硬石膏,含深灰色有机质纹层			
					0.3~1.5			
					0.3~1.5			
白垩系	下统	班塔拉组		K ₁ bt		>17	浅灰色、灰白色细粒中一厚层状长石石英砂岩,石英砂岩具水平层理、微波状层理	

图 2 万象钾盐矿区综合地层柱状图^[12]

Fig. 2 Integrated stratigraphic column map of potash mines in Vientiane basin

用下,盐膏层普遍发育盐构造,矿体形态受盐构造的作用显著^[13]。

盐类矿物共计 4 类 10 种。其中氯化物 5 种,硫酸盐 2 种,碳酸盐 1 种,硼矿物 2 种(表 1)。

塔贡组下段最底部为薄层石膏或硬石膏层,其上为厚度较大的石盐、光卤石(钾石盐)、石盐,其中光卤石中含溢晶石及水氯镁石,与海相正常蒸发浓缩沉积序列相似,而与罗布泊盐湖地层层序下部为钙芒硝岩,中部为芒硝岩和上部为石膏、粘土岩等^[14]有区别;与察尔汗陆相沉积序列中含多层芒硝和砾石层有显著差别^[14-15],表明钾盐矿床成矿物质来源主要为海水。

3 钾盐矿床微量元素地球化学特征

Br、Rb、Sr、B 等元素在成盐过程中以各种方式混入到盐类沉积物中,对阐明矿床成因、古地理环境及盐类成矿、矿床的物质来源等具有重要意义。

3.1 溴(Br)

海水中 Br 含量大约为 0.07g/L^[6],当海水蒸发时,Br 的含量随着海水的浓缩和盐类结晶的过程不断增高,对阐明盐盆卤水盐度的变化、沉积条件等均有良好的指导效果。

(1) 石盐中的 Br

在石盐沉积阶段,卤水浓缩主要集中在残留液中,其中一部分 Br⁻以类质同像置换氯化物盐类矿物中的 Cl⁻,且置换量与共沉淀的溶液中 Br⁻的含量成正比例关系^[17]。因此,残留液中或盐类矿物中 Br⁻的含量越高,表明卤水浓缩的程度越高、形成盐类矿

物的沉积阶段越晚,越有利于最后沉积阶段钾盐类矿物的浓缩析出。

塔贡组下盐段石盐可划分为 2 段(图 2),即位于光卤石底部的石盐相对较厚,顶部的石盐相对较薄。

光卤石底部的石盐:T3 孔孔深 550.02m, 147.89~550.02m 均为石盐层,石盐中 Br 含量最高为 0.039%,最低为 0.0092%,平均为 0.017%,Br×10³/Cl 系数平均为 0.2837(表 2),与海水正常蒸发浓缩石盐阶段 Br 的含量 0.0066%^[18]相近似。通芒钾镁盐矿床塔贡组底部石盐中 Br 平均含量为 0.026%,Br×10³/Cl 系数平均 0.399,与云南勐野井石盐中 Br 含量最高 0.0288%、最低 0.0030%、平均 0.0127%相比稍高,比呵叻高原石盐中 Br 含量 0.0380%~0.0040%相对较低^[18]。表明兰坪-思茅盆地、万象盆地与呵叻盆地由北西至南东 Br 含量逐渐升高,符合海水蒸发浓缩退却时 Br 含量逐步升高,并伴随钾镁盐矿体厚度逐渐增加的趋势。

光卤石顶部的石盐:T3 孔仅见矿化现象,未取样,T1、T2、T4 三孔 Br 含量、Br×10³/Cl 系数相对较为接近(表 3),反映在卤水浓缩至顶部石盐沉积阶段时气候变化、卤水浓缩程度、沉积环境等作用相对较为稳定,有利于石盐岩析出。

(2) 钾石盐中的 Br

钻孔揭露钾石盐厚度较薄,一般在 2.00~5.04m 之间,ZK3、3ZK0-3、3ZK0-12、3ZK4-0 孔 Br 平均含量分别为 0.063%、0.216%、0.038%、0.0525%^①,T4 孔钾石盐中 Br 平均含量为 0.0875%。ZK3、3ZK0-3、3ZK0-12 孔出现的钾石盐层位基本一致,均位于塔

表 1 通芒矿段矿物成分

Table 1 Mineral composition of Tongmang mine

类别	名称	分子式	分布情况
氯化物	溢晶石	CaCl ₂ ·2MgCl ₂ ·12H ₂ O	与光卤石共生
	水氯镁石		与光卤石共生
	光卤石	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	钾盐岩的主要矿物
	钾石盐	KCl	钾盐岩的次要矿物
	石盐	NaCl	盐岩的主要矿物
硫酸盐	石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	分布于裂隙、石盐或光卤石中
	硬石膏	CaSO ₄	分布于塔贡组各旋回碎屑岩层中
碳酸盐	菱镁矿	MgCO ₃	分布于石膏中
硼酸盐	方硼石	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	分布于光卤石粒间,含量极少
	白硼钙石	Ca ₄ B ₁₀ O ₉ ·7H ₂ O	偶见包裹在石盐、钾石盐、光卤石中

注:矿物鉴定由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成

表2 塔贡组下段底部石盐中 Br 的含量

Table 2 Br contents at the bottom of rock salt in Lower Member of Tagong Formation

孔号	Br 的 含 量 /%			Br × 10 ³ /Cl 系数			样品 数量
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
T1	0.1726	0.0335	0.0665	3.5165	0.5578	1.223	8
T2	0.031	0.018	0.022	0.5226	0.2997	0.3687	15
T3	0.039	0.009	0.017	0.6594	0.1580	0.2837	98
T4	0.023	0.015	0.018	0.3767	0.2543	0.3061	10
云南勐野井	0.0288	0.0030	0.0127				
呵叻高原	0.0380	0.0040					
巴西	0.0643	0.0093	0.0360				

注: T1~T4 数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成, 其余数据据参考文献[18]

贡组下盐段石盐岩的顶部, 据海相蒸发岩沉积序列, 可能为原生钾石盐。而 3ZK4-0 孔钾石盐出现于下盐段光卤石的顶部, 可能为次生钾石盐。通芒矿段钾石盐中 Br 含量最高 0.233%, 最低 0.052%, 平均 0.0914%, 相比云南勐野井钾石盐中 Br 的含量 0.0722%~0.2880%、平均含量 0.1739%^[18] 相对较低, 而与泰国呵叻盆地钾石盐中 Br 的含量 0.0260%~0.0980% 相近^[18]。反映卤水在钾石盐沉积阶段万象盆地与泰国呵叻盆地具一致的浓缩沉积趋势。

(3) 光卤石中的 Br

通芒矿段钾盐矿床 11 孔光卤石中 Br 含量平均为 0.1844%, Br × 10³/Cl 系数平均值为 4.0719 (表 4), 与云南勐野井光卤石中 Br 平均含量 0.1399% 相比稍高, 与泰国呵叻高原光卤石中 Br 平均含量 0.4700% 相比较低^[18]。可能的原因是: 海水在蒸发浓缩咸化阶段, 一部分 Br⁻ 以类质同像置换氯化物盐类矿物中的 Cl⁻, 且置换量与共沉淀的溶液中 Br⁻ 的含量成正比例关系。另外, 兰坪-思茅盆地与万象盆地、呵叻盆地同处在一个大地构造带上, 成矿时代和层位相同, 析盐矿物组合类似, 海水经蒸发浓缩向南退缩, 含盐系地层也从兰坪-思茅盆地、万象盆地至呵叻盆地逐渐增厚, Br 平均含量 (0.1399%、0.1844%、0.4700%) 由北向南逐渐增加, 其含量变化符合卤水从北向南逐渐浓缩退却的趋势。其次, 根据对成盐盆地、区域构造运动等的分析, 兰坪-思茅盆地受晚燕山运动的影响较大, 构造运动相对较强, 析盐过程中可能受陆相改造作用显著, 而南部万象盆地和呵叻

表3 塔贡组下段顶部石盐中 Br 的含量

Table 3 Br contents at the top of rock salt in Lower Member of Tagong Formation

孔号	Br 的 含 量 /%			Br × 10 ³ /Cl 系数			样品 数量
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
T1	0.035	0.011	0.022	0.6093	0.1962	0.3747	29
T2	0.035	0.006	0.018	0.9714	0.1888	0.3674	17
T4	0.028	0.015	0.021	0.4635	0.2646	0.3551	7

注: T1、T2、T4 数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成

盆地在析盐阶段受外动力地质作用影响相对较小。

(4) Br 的地球化学趋势

塔贡组下段底部石盐岩中 Br、Br × 10³/Cl 的变化趋势: T1 孔 Br 含量出现明显的锯齿状 (图 3), 在 T1HX104~101 (344.84~346.83m) 之间 Br 含量相对 T2、T3、T4 三孔明显较高, 在局部可能呈光卤石或钾石盐矿化现象, 矿物鉴定结果显示, 岩性为光卤石或光卤石石盐岩, 与 Na、Br × 10³/Cl 趋势曲线反映的结果一致 (图 3)。T2、T3、T4 三孔 Br 含量变化曲线趋势相似, 均呈现由底向上 Br、Br × 10³/Cl 逐渐增加, 反映在万象盆地卤水浓缩结晶由底至上缓慢而连续的旋回式上升, 蒸发浓缩趋势逐渐增强, 表明晚白垩世—古新世早期气候炎热干燥, 有利于盐岩的析出。

塔贡组下段顶部石盐岩 Br、Br × 10³/Cl 的变化特征: T1、T2、T4 孔 Br 含量 0.01%~0.035%, 变化不甚明显。T1 孔 Br、Br × 10³/Cl 曲线呈明显的 2 次“双峰”状 (图 3), 反映万象盆地在光卤石浓缩沉积阶段结束后开始进入石盐岩沉积阶段, 明显有 2 次石盐岩的强烈浓缩蒸发期, 其后伴随有 2 次渐变的淡化

期,曲线平滑(图 3),可能系气候突变或陆源地表水体的侵入而使原卤水稀释淡化。

塔贡组下段光卤石中 Br 的演化趋势:ZK1、ZK3、T1、T4 孔光卤石中 Br、Br×10³/Cl 曲线较为相

似,具有一致的变化趋势。据 T1 孔,光卤石中 Rb、Br、Br×10³/Cl 曲线可划分为 6 次蒸发浓缩沉积阶段(图 4),Rb、Br、Br×10³/Cl 变化范围较大,曲线呈锯齿状,“峰”或“谷”变化趋势明显,反映盆地内卤水浓缩

表 4 光卤石中 Br 的含量
Table 4 Br contents in carnallite

孔号	Br 的含量 /%			Br × 10 ³ /Cl 系数			样品数量
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
T1	0.331	0.033	0.179	8.647	0.558	4.039	105
T2	0.382	0.011	0.161	9.680	0.192	3.557	198
T4	0.314	0.034	0.174	8.232	0.573	3.792	138
3ZK0-3	0.820	0.010	0.210	13.99	0.35	4.09	64
3ZK0-4	0.319	0.039	0.232	7.80	0.69	5.35	53
3ZK0-11	0.343	0.044	0.220	8.54	0.89	4.95	25
3ZK0-12	0.340	0.040	0.22	8.17	0.64	4.84	29
3ZK3-0	0.266	0.057	0.202	6.04	1.04	4.45	20
3ZK4-0	0.330	0.030	0.189	8.24	0.51	4.18	36
3ZK12-0	0.282	0.057	0.157	6.64	1.01	3.42	13
ZK3	0.276	0.056	0.185	6.69	0.99	4.16	47
云南勐野井	0.1833	0.1140	0.1399				
呵叻高原			0.4700				

注:T1、T2、T4 数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成;
3ZK0-3~ZK3 数据引自参考文献①;其余数据据参考文献[18]

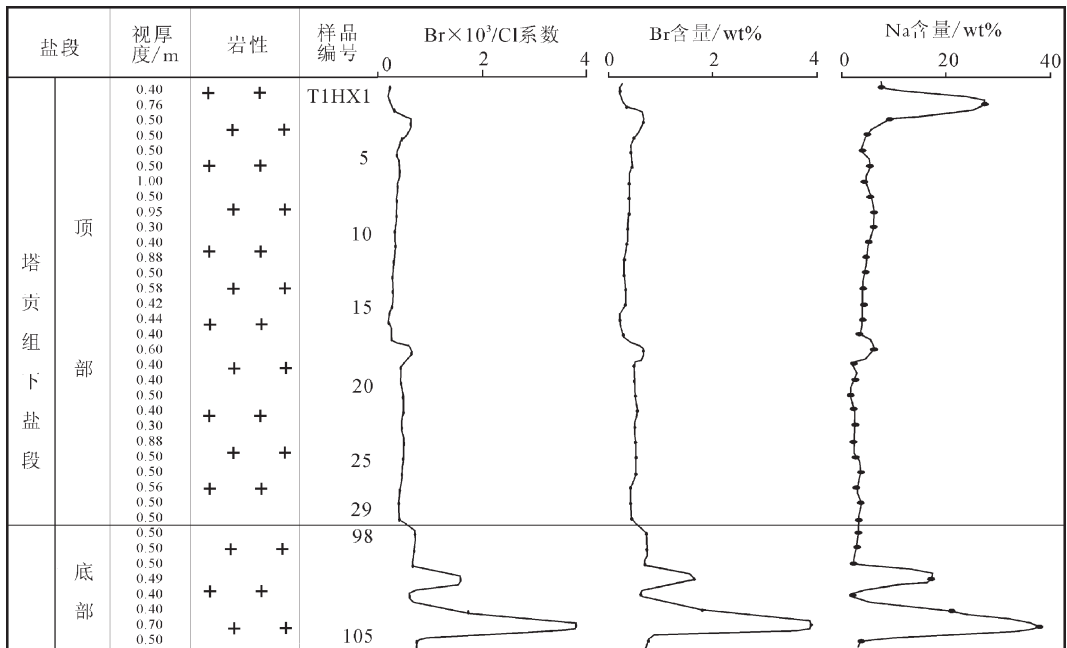


图 3 T1 孔 Br、Br×10³/Cl、Na 变化趋势图

Fig. 3 Trend diagram of Br, Br×10³/Cl and Na in T1 drill hole

T1 孔数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成;岩性为光卤石或光卤石盐岩(图中的++号)

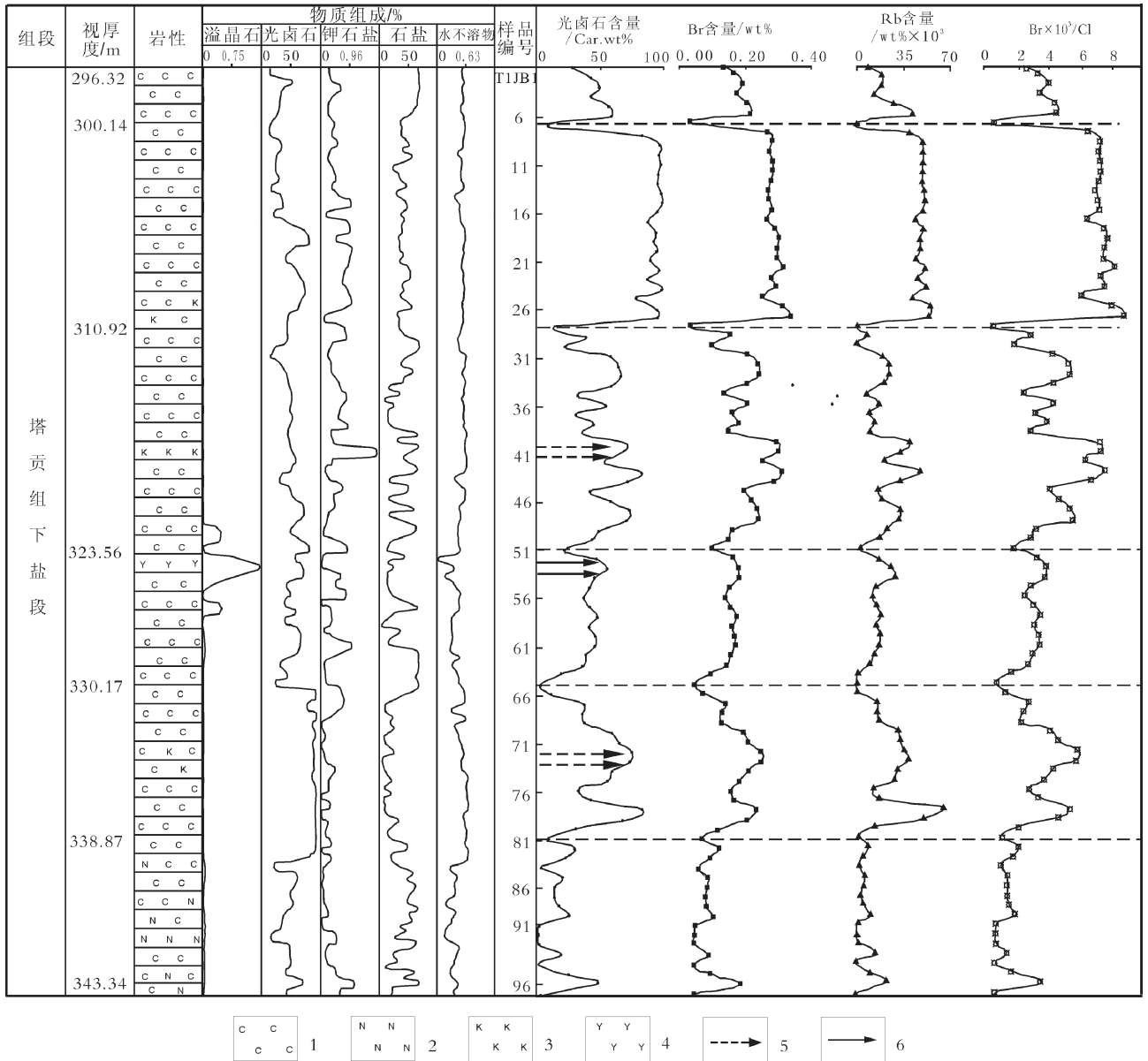


图4 T1孔光卤石、Br、Rb、溴氯系数变化趋势图

Fig.4 Trend diagram of carnallite, bromine, rubidium, bromo-chloro coefficient in T1 drill hole

T1孔数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成

1—光卤石;2—石盐岩;3—钾石盐;4—溢晶石;5—钾石盐层;6—溢晶石光卤石层

光卤石沉积阶段时具间断性地表水体或深部卤水补给的特征,也可能在成盐期后受盆地古地理、区域构造运动、矿物变质作用等影响强烈。而局部层位 Br×10³/Cl 系数相对较低,表明钾镁盐并非单纯的海相成因,可能伴随有陆源地表水体汇入盆地而降低了原始卤水中 Br 的含量。

另外,光卤石层中夹有极易溶解的溢晶石,溢晶石含量曲线呈单峰状隆起(图4),在 18.75℃时 100g

水中能溶解 160.3g 溢晶石,而富含 CaCl₂ 的溢晶石(CaCl₂·2MgCl₂·12H₂O)是正常海水或陆源水系蒸发岩所不会含有的组分^[7],且在蒸发浓缩沉积过程中很难保存,反映具有深部卤液补给的可能性。

(5)利用 Br 建立找矿标志

通芒矿段光卤石直接浓缩沉积在石盐岩之上,钾石盐呈透镜状或薄层状产出于光卤石中,局部产在石盐顶部,石盐中 Br、Br×10³/Cl 系数平均值大于

表 5 氯化物溶液各咸化阶段 Br、Br×10³/Cl 值的理论值^[18]Table 5 Theoretical data of Br and Br×10³/Cl of the various salinization stages in chloride salt solution

咸化阶段	固相石盐			固相钾石盐			固相光卤石		
	D 值	Br/10 ⁻⁶	Br×10 ³ /Cl	D 值	Br/10 ⁻⁶	Br×10 ³ /Cl	D 值	Br/10 ⁻⁶	Br×10 ³ /Cl
石盐阶段	0.13	66	0.11						
钾石盐阶段	0.073	172	0.28	0.73	1720	3.62			
光卤石阶段	0.073	249	0.41	0.73	2490	5.24	0.52	1778	4.6
共结阶段	0.073	379	0.63						

注:D 值是 Br 和 Cl 在固液间的分配系数

0.028%、0.47 时出现钾盐矿化,标志着钾镁盐矿开始浓缩沉积。与光卤石咸化阶段石盐中 Br、Br×10³/Cl 系数理论值 249×10⁻⁶、0.41 相近(表 5),与云南勐野井钾盐矿床中与光卤石共生的石盐中 Br 含量平均值(150±20)×10⁻⁶、溴氯系数值 0.27±0.04 相比稍高^[18]。通芒矿段光卤石中 Br 含量平均为 0.1844%,Br×10³/Cl 系数平均 4.0719,与光卤石咸化阶段光卤石中 Br、Br×10³/Cl 系数理论值分别为 1778×10⁻⁶、4.6 相接近(表 5)。许建新^[19]研究勐野井钾盐矿床时认为当石盐岩中的 Br 含量为 170×10⁻⁶~200×10⁻⁶,Br×10³/Cl 系数为 0.30 时石盐沉积过程中就已经出现了钾盐矿化,而 Br≥270×10⁻⁶、Br×10³/Cl≥0.49 时指示着钾盐层的形成。由此显示,兰坪-思茅盆地与万象盆地在蒸发浓缩石盐析出后,出现钾盐矿化的 Br、Br×10³/Cl 值具有相似性,对在兰坪-思茅盆地找钾具有一定的实际意义。

3.2 铷(Rb)

Rb 在大洋水中的含量为 1.2×10⁻⁵%^[16]。在早期钾镁盐沉积阶段,Rb 和 Br 一样主要集中在液相中,少量进入固相钾盐矿物中,随着蒸发作用而渐趋富集于溶液中且与钾离子置换,因 K⁺和 Rb⁺的离子半径相近,地球化学学习性相似,Rb⁺主要以类质同像方式置换 K⁺,形成铷光卤石与钾光卤石的类质同像。从光卤石结晶开始,Rb 主要富集在固相矿物中,当经受重结晶作用时,固相光卤石中的 Rb 含量还将继续升高。

通芒矿段光卤石中 Rb⁺含量最高 0.0144%,最低 0.00003%,平均 0.0026%(表 6),与氯化物溶液在光卤石沉积阶段 Rb⁺在 25℃时值 0.0017%~0.0200%^[18]接近。Rb⁺和 K⁺含量曲线变化趋势具有同步性(图 4),因此,Rb⁺的含量可指示含 K 的位置。勐野井钾

表 6 塔贡组下段光卤石中 Rb 的含量

Table 6 Rb contents in carnallite in Lower Member of Tagong Formation

孔号	最高含量/%	最低含量/%	平均含量/%	样品数量
T1	0.00640	0.00003	0.00261	69
T2	0.0144	0.00005	0.0028	198
T4	0.0054	0.0003	0.0024	138
平均	0.0087	0.0001	0.0026	
云南勐野井 泰国呵叻盆地	0.0087	0.0039	0.0060	
			0.0060	

注:T1、T2、T4 孔数据由中科院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室完成,其余据参考文献[18]

盐矿床光卤石的 Rb 平均含量为 0.0060%,与光卤石共生的钾石盐具 Rb 高 Br 低的特征,可能系光卤石经后期溶蚀变质的产物^[18],导致 Rb 含量升高。

3.3 锶(Sr)

海水中 Sr 的含量为 8×10⁻⁴%^[16]。Sr 在海洋中的分布是均一的,不受纬度、海洋盆地和水体深度的影响,在化学和生物化学过程中 Sr 不会产生同位素分馏^[20]。由于 Sr 与 Ca 发生置换作用,因此在盐类矿物中含量很低。许效松等^[18]在研究勐野井矿床时认为 Sr 与 Ca 的置换作用主要发生在硫酸盐咸化阶段,在相同 Sr 浓度的溶液中 Mg、K 被 Sr 置换的数量比 Na 少得多。

万象盆地基底普遍较少硫酸盐或缺失硫酸盐,Sr 可能混入盐类沉积的各个阶段。T1 孔光卤石中 Sr 含量最高为 0.00073%,最低为 0.0003%,平均为 0.000493%,而含溢晶石光卤石中 Sr 的含量高达 0.012%;T2 孔光卤石中 Sr 含量在 0.00062%~0.0085%之间,含溢晶石光卤石中 Sr 含量在 0.012%~

0.026%之间,比 T1 孔高。T4 孔光卤石中 Sr 含量在 0.00039%~0.0014%之间,比 T1、T2 钻孔中含溢晶石光卤石低。由此,含溢晶石光卤石中含 Sr 较高,在 0.012%~0.026%之间,光卤石或含石盐光卤石中含 Sr 较低,在 0.0003%~0.00073%之间。反映 Sr 含量较高时可间接指示有成钾的可能性,在分析成盐过程中具有浓缩和稀释双重指示意义。

3.4 硼(B)

现代海水中 B 的含量为 4.7×10^{-6} ,淡水中则一般不含 B,海相沉积物中的 B 含量为 100×10^{-6} 。在盐沉积过程中 B 可能有 3 种赋存状态:由吸附作用富集在含盐粘土中、以 BO_4 络合物混入硬石膏的晶格中和硼酸盐矿物。盐湖 B 主要以 B_2O_3 固态存在^[21-22],高世扬等^[23]在研究盐湖硫酸镁饱和卤水蒸发实验时认为,卤水浓缩到氯化镁析出时硼($\text{MgO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$)的含量为 5.57%。硼矿物出现在富 MgCl_2 的溶液中,而且与相邻的矿物相有依赖关系,在盐湖发展的晚期浓的过饱和卤水溶液中生成硼矿物,如勐野井光卤石岩中均含有较多方硼石^[18]。

T1、T2、T4 三孔含溢晶石光卤石中 B 含量一般在 0.0122%~0.0194%之间,与勐野井钾盐矿床中 B 一般含量 0.005%~0.0270%、平均含量 0.0116%相近^[18]。在光卤石或含石盐光卤石中 B 含量一般在 0.000514%~0.005143%之间,相比含溢晶石光卤石中 B 含量较低。说明 B 随着卤水浓度增高而富集,同时各岩段中 B 的含量变化可作为盐层对比和划分的辅助依据。许效松等^[18]在研究勐野井钾盐矿床中发现粘土矿物吸附大量的 B,在含钾盐岩中 B 含量相对较高,且在盐层中 B 的含量显然与盐矿石类型密切相关,B 含量以钾石盐矿明显高于石盐岩为特征。

由此,B 在早期卤水浓缩沉积石盐岩阶段含量较低,随卤水浓度不断增高,B 含量也随卤水浓度增高而富集,与之相应的 Br 含量也相应增加,说明 B 出现高值时卤水蒸发浓缩程度亦相对较高,可间接地反映钾盐成矿的层位。

4 钾盐矿床的成因

万象盆地隶属沙空那空盆地西北缘,沙空那空盆地的形成、演化与新特提斯海构造演化关系密切,属近海大盆地。沙空那空盆地受深断裂的控制,构造

封闭条件良好,经历了漫长的中生代红色碎屑岩沉积之后,逐步演变成大面积的滨海浅水盐湖—干盐湖环境,在晚白垩世后期持续干旱气候条件下逐渐演化形成了巨厚的蒸发岩矿床,是一套典型的古近系红色碎屑岩类型矿床。缺少基底碳酸盐沉积,硫酸盐很少,仅在下盐组及下伏碎屑岩之间出露薄层硬石膏。钾镁盐矿主要赋存在塔贡组下段,中、上段盐岩直接覆于碎屑岩层之上,膏盐岩与陆源细碎屑岩组成 3 个明显的沉积旋回(图 2)。关于万象盆地钾盐矿床的成因一直以来存在不同的认识,郭远生等^[8]认为成钾物质具海源陆生的特点,曲懿华^[7]认为云南勐野井地区的含钾卤水主要来自南部的呵叻盆地,万象盆地成钾物质应以海源为主。笔者根据对通芒矿段资料数据的分析,认为万象盆地钾盐矿床具有多物源性特征。

膏盐岩矿物组合与海相正常蒸发浓缩沉积序列基本相似,而与察尔汗陆相沉积序列中含多层芒硝和砾石层有显著的差别^[15],与光卤石共生的石盐中 $\text{Br} \cdot \text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 值分别为 0.0280%、0.4765,与海相沉积光卤石咸化阶段石盐中 $\text{Br} \cdot \text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 理论值 0.0249%、0.41 相近,表明钾盐矿床成矿物质来源主要为海水。光卤石中 $\text{Br} \cdot \text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 曲线可划分为 6 次淡化—浓缩沉积趋势,可能有部分地表水体参与使卤水趋于淡化,直接影响到 Br 含量和 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数降低;也可能具深部卤水补给而使曲线呈“峰”状,且光卤石中含极易溶解的溢晶石,曲懿华^[24]认为这是正常海水或陆源水系蒸发岩所不会含有的组分,系深部卤水补给而形成的溢晶石,在巴西溢晶石层高达 100m 以上。由此,万象钾盐盆地母液来源除海水主要补给外,还有地表水体及深卤共同参与的可能性。

塔贡组底部石盐中 $\text{Br} \cdot \text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 平均值分别为 0.0308%、0.5453,与云南勐野井石盐中 Br 含量 0.0288%~0.0030%、平均含量 0.0127%相比较,与呵叻高原石盐中 Br 含量 0.0380%~0.0040%^[18]相比较低。反映海水在早期浓缩沉积石盐岩阶段呵叻盆地浓缩程度较高,而兰坪—思茅盆地相对较低。光卤石中 Br 平均含量(0.1399%、0.1844%、0.4700%) 在兰坪—思茅盆地、万象盆地、呵叻盆地逐渐增加,且 Br 含量的变化符合退缩卤水从北向南逐渐浓缩增加的趋势,表明海水来源于南部呵叻盆地,经由万象盆地后流入兰坪—思茅盆地(图 5)。3 个盆地的钾盐矿床处于

6 结 语

万象盆地钾盐矿床为大型钾盐矿床,晚白垩世初盆地雏形基本出现,古近纪是红色含陆源碎屑膏盐沉积盆地的形成与演化阶段,钾镁盐体严格受盆地形态、沉积旋回及盐构造的控制。

(1)钾镁盐矿主要赋存于塔贡组下段,底部为厚厚的石盐岩,其上为块状光卤石(钾石盐),钾石盐呈透镜状或薄层状产于光卤石中,局部钾石盐产在石盐岩之上,顶部溢晶石、水氯镁石与光卤石共生。含盐地层与海相正常蒸发浓缩沉积序列相似,具明显的3次膏盐沉积,伴随有3次大的海侵,卤水主要来自南部呵叻盆地,可能有部分深部卤水及陆源地表水体的共同参与,在海水持续补给条件下,经自身浓缩蒸发沉积形成巨大的钾盐矿床。

(2)据光卤石中 $\text{Br}/\text{Br}\times 10^3/\text{Cl}$ 、 Rb 的数值和曲线变化,将塔贡组下段钾镁盐矿划分为6次淡化—浓缩沉积阶段,曲线变化波动强烈,反映在卤水蒸发浓缩析盐过程中,可能受气候波动、陆源地表水体的侵入、成盐期后盐构造、矿物变质等作用的影响较大。

(3)兰坪—思茅盆地与万象盆地在成矿构造、成矿时代、地层层序等方面均具相似性,塔贡组钾镁盐出现于下盐段,而勐野井组含盐层位处于上盐段,与光卤石共生的钾石盐具 Rb 高 Br 低的特征,2个盆地钾镁盐的 $\text{Br}/\text{Br}\times 10^3/\text{Cl}$ 具有一致性, Br 、 Rb 含量可作为找钾的直接标志, Sr 、 B 的含量可间接地指示含钾的层位,这对在兰坪—思茅盆地找钾具有一定的实际意义。

致谢:本文是《万象通芒矿段钾盐矿床补充勘探地质总结报告》的一部分,参加野外工作的还有山发寿、高东林、唐启亮、程怀德、曾金波、徐黎明、王相明、王明祥、李海军和云南中寮矿业开发投资有限公司何勇、黄昆林、高松、闫广文等,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1]张嘉澍,李官贤.云南江城勐野井钾盐矿床地质特征[C]//云南省地质局钾盐地质科学研究队.云南思茅地区钾盐地质研究论文集.昆明:云南省地质局出版社,1980:38-44.
- [2]刘群,杜之岳,陈郁华,等.陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远

- 景[M].北京:原子能出版社,1997:30-37.
- [3]刘群,陈郁华,李银彩,等.中国中生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积[M].北京:北京科学技术出版社,1987:22-24.
- [4]林传律.四川盆地三叠系含钾岩系变质演化特点及找矿意义[J].四川地质学报,1994,14(2):122-129.
- [5]李文亚,蔡克勤,韩蔚田.四川盆地三叠系蒸发岩的变质作用与富钾卤水的成因[J].现代地质,1998,12(2):222-228.
- [6]李兴振,刘朝基,丁俊.大湄公河次地区主要结合带的对比与连接[J].沉积与特提斯地质,2004,24(4):1-12.
- [7]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.
- [8]郭远生,吴军,朱延浙,等.老挝万象钾盐地质[M].昆明:云南科技出版社,2005:17-40.
- [9]李方夏.东南亚地质矿产与矿业经济[M].云南省地质矿产局,1995:123-143.
- [10]Pow—foong Fan.Accreted terranes and mineral deposits of Indochina[J].Journal of Asian Earth Sciences,2000,(18):343-350.
- [11]Metcalf I.Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J].Journal of Asian Earth Sciences,2002,(20):551-566.
- [12]李善平.老挝万象通芒矿段钾盐矿床地球化学特征及成因[D].西宁:中国科学院青海盐湖研究所硕士学位论文,2008:4-38.
- [13]李善平,马海州,山发寿,等.老挝万象盆地通芒地区盐构造特征及成因机制[J].盐湖研究,2009,17(2):5-12.
- [14]刘成林,焦鹏程,陈永志,等.罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝及其古气候意义[J].地球学报,2008,29(4):397-404.
- [15]张彭熹.柴达木盆地盐湖[M].北京:科学出版社,1987:164-167.
- [16]钱自强,曲一华,刘群.钾盐矿床[M].北京:地质出版社,1994:19-50.
- [17]M.F.瓦里亚什科.钾盐矿床形成的地球化学规律[M].北京:中国工业出版社,1965:104-196.
- [18]许效松,吴嘉陵.云南勐野井钾盐矿床特征、微量元素地球化学及成因探讨[J].中国地质科学院院报,1992,5:17-39.
- [19]许建新.云南勐野井钾盐矿床地球化学与成因研究[D].西宁:中国科学院青海盐湖研究所博士学位论文,2008:28-56.
- [20]张西营,马海州,谭红兵. Sr 的地球化学指示意义及其应用[J].盐湖研究,2002,10(3):38-45.
- [21]肖荣阁,大井隆夫,蔡克勤,等.硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J].地学前缘,1999,6(2):361-368.
- [22]郑绵平,项仁杰,葛振华.我国钾、镁、锂、硼矿产资源的可持续发展[J].国土资源情报,2004,3:27-32.
- [23]高世扬,王建中,夏树屏.盐卤硼酸盐化学——盐卤中硼酸盐的存在形式和表示方式[J].海洋与湖沼,1989,20(5):429-438.
- [24]曲懿华.钾盐矿床母液来源的新途径——深卤补给[J].矿物岩石,1982,(1):7-14.
- ① 云南省地质调查院.老挝人民民主共和国万象平原钾镁盐矿勘查地质报告.昆明:云南省地质调查院,2003:15-60.