

昌都—兰坪—呵叻成盐带白垩纪成盐成钾过程

马海州^{1,2}, 李永寿^{1,2}, 程怀德^{1,2}, 秦西伟^{1,2}, 张西营^{1,2}, 苗卫良^{1,2},
许建新^{1,2}, 李斌凯^{1,2}, 海擎宇^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008)



作者简介: 马海州(1963-), 男, 研究员, 博导, 专业研究方向: 盐类矿床及地球化学。Email: haizhou@isl.ac.cn。

摘要:以昌都—兰坪—思茅盆地及呵叻盆地含盐带盐类沉积为研究对象, 在分析总结前人研究成果的基础上, 通过系统的大地构造学、矿床学、地球化学等研究方法, 总结和研究了该区含钾蒸发岩矿床的矿床特征, 提出了新的成矿模式。研究表明, 兰坪—思茅盆地和呵叻盆地的含钾蒸发岩矿床为“海源陆相”成因, 即在陆相环境下与海水的变异有关。该矿床缺失正常海水蒸发浓缩而形成的硫酸盐沉积, 同时, 矿床中少量菱镁矿等自生矿物的出现无法用正常海水蒸发理论解释。矿床中少量溢晶石等矿物的出现预示着该矿床富钙。兰坪—思茅盆地内广泛发育了白垩纪蒸发岩系(勐野井组或云龙组), 江城地区甚至沉积了小型钾盐矿床。同位素和微量元素的研究表明, 该区蒸发岩矿床为海相成因, Rb 和 Br 的含量变化指示海水从北部兰坪侵入到呵叻。昌都及兰坪地区的白垩纪石膏硫、锶同位素研究表明, 该区大套的硫酸盐沉积为海相成因, 物源研究成果揭示思茅盆地的物源可能来自东羌塘地区, 预示着昌都地区的硫酸盐沉积跟兰坪—思茅盆地的蒸发岩沉积具有同源性。通过上述研究, 提出了多级盆地海水迁移变质成盐成钾模式。

关键词:昌都—兰坪—思茅—呵叻成盐带; 含钾蒸发岩矿床; 成矿模式; 变质海水

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2019)01-0001-11

兰坪—思茅盆地云南勐野井钾盐矿床是我国目前唯一开采利用的古代钾盐矿床。自 1962 年云南省地质局十六地质队首次在勐野井老矿硐发现了钾盐矿石以来, 相继在该区做了大量地质勘探和研究工作, 积累了十分丰富的地质资料。“六五”计划开始, 一直把探查钾盐资源作为一项重点计划。由云南省地质矿产局主持, 多家生产和科研单位参与组成的“钾盐科研队”开展了思茅盆地钾盐地质科研工作, 并公开出版了《云南思茅地区钾盐地质研究论文集》和《云南思茅盐矿地质》等专著。1990 年, 国家科委设立了 85-901-06 钾盐成矿规律及远景预测研究项目, 该项目由中国地质科学院负责, 其中一个专题为“云南兰坪—思茅盆地第三系钾盐成矿规律及

成矿预测研究”, 由中国地质大学(北京)曲懿华和云南 814 地质队袁品泉负责。该研究在充分总结吸收前人研究成果的基础上发表研究成果《兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测》。该项研究较系统地阐述了兰坪—思茅盆地钾盐矿床的成矿规律, 是一部当前最为系统阐述了兰坪—思茅盆地乃至呵叻盆地成矿规律的总结性专著, 该研究提出: 1) 兰坪—思茅盆地与呵叻盆地同处一个构造带, 其蒸发岩矿床在成矿时代、矿床特征、物质组分等方面均有相似之处或一致性; 2) 兰坪—思茅盆地盐类的物质来源为“海源陆相”; 曲懿华^[1]进一步认为主要为海源和深源补给, 卤水来自南部的呵叻盆地; 3) 兰坪—思茅盆地中成盐成矿条件中部好于北部, 南部好于中部, 南部地区的勐

收稿日期: 2019-02-27

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)项目(2011CB403004)和西部青年学者 B 类项目(Y710081014)联合资助

腊、勐伴等地成盐保存条件较好,可能找到较好的钾盐矿床。实际上,目前有关该矿床的成矿物质来源具有多种认识,综合起来有以下几种:①“陆源成钾理论”^[2];②“海源成钾理论”^[3-6];③“海源陆相”^[7];④“深卤补给理论”^[8-9];⑤“火成成盐理论”^[10];⑥“多源补给理论”(如陆源、海源、风化盐、深卤水及古再溶盐和残余湖水等其中几个或多个的补给)^[11-14];⑦深部侏罗系盐底辟浅部贯入的“二层楼成矿模式”^[15]等。不过,至今尚未形成定论,许多基础性的科学问题认识还未达成一致,仍有一些悬而未决的科学问题尚需解决,如该矿床的卤水来源及迁移方向问题、成矿卤水的性质问题、缺失碳酸盐和硫酸盐的问题等。

2011 年,国家 973 计划项目“中国陆块海相成钾规律及预测研究”开始实施,兰坪—思茅盆地是该项目的研究重点。随着研究的不断深入,迫切需要一些重大的科学问题得以解决。例如,该盆地蒸发岩矿床成矿卤水迁移、成矿过程等重大科学问题,需从新的视角去加以研究、探讨。本研究以昌都—兰坪—思茅盆地及呵叻盆地含盐类沉积为研究对象,在分析总结前人研究成果的基

础上,通过系统的大地构造学、矿床学、地球化学等研究方法,总结和研究该地区含钾蒸发岩矿床的矿床特征,提出新的成矿模式。

1 含盐系地层年代学

1.1 兰坪—思茅盆地

对于兰坪—思茅盆地蒸发岩矿床赋存地层勐野井组的时代研究,由于缺少可靠证据,仍存在诸多疑问,由于成盐氧化环境不利于化石的保存,研究区含盐系地层缺少有力的古生物证据,导致在其时代划分及区域地层对比上争论颇多^[16]。云南省地质矿产局等^[17]研究认为,云南江城地区勐野井组的孢粉时代分析结果为早白垩世晚期至晚白垩世早期,而其它门类化石(轮藻、介形虫、叶肢介等)分析时代为古新世。袁秦等^[18]通过对兰坪—思茅盆地江城勐野井钾盐矿区含盐系地层中泥岩样品的孢粉分析,研究了其沉积时代,发现该区含盐系地层中的孢粉组合为 *Psophophaera-Exesipollenites-Classopollis*, 时代为早白垩世的阿普第期—阿尔必期,与通过高精度古地磁研究得到的待发表结论相似。Wang 等^[19]对勐野井组沉积时代进行研究,通过对该地层中凝灰岩夹层进行离子探针 U-Pb 锆石(SHRIMP)定年,获得 100~110Ma 年代数据。故将该套含盐系地层的时代重新厘定为早白垩世晚期。

1.2 呵叻盆地

呵叻盆地岩系地层的命名在不同地区有不同名称。在泰国境内多称为马哈萨拉堪组(Maha Sarakham Formation),在老挝甘蒙及沙湾拿吉地区称为农波组,而老挝万象地区则称为塔贡组,这些不同名称的岩系地层实际上指的是同一套地层的相同沉积类型。

Gardner 等^[20]通过研究其下伏地层 KhokKruat 组中的斧足动物将该套含盐系地层年龄定为晚白垩世—始新世; Hansen 等^[21]通过对比研究泰国马哈萨拉堪组岩中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、K/Ar 及 K/Ca 等指标,指出马哈萨拉堪组的时代为赛诺曼期。近年来,国内学者通过对该套地层下盐段碎屑岩中的大量介形类 *Candond Lectus*, *Mandestam* 和

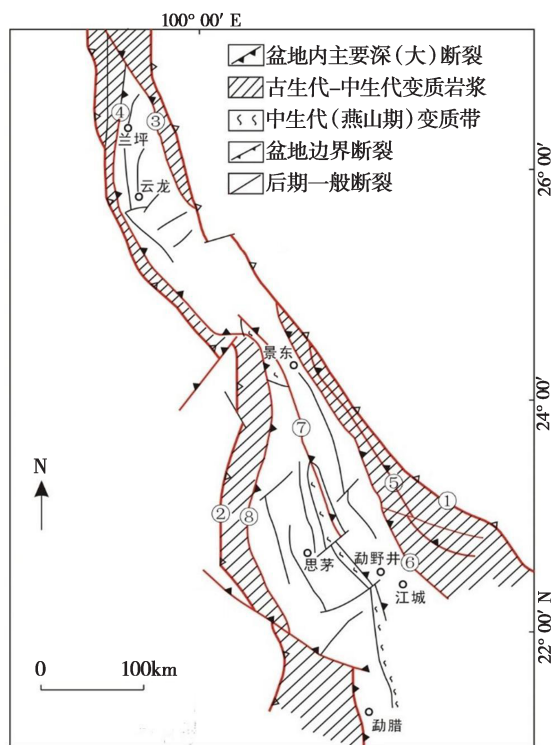


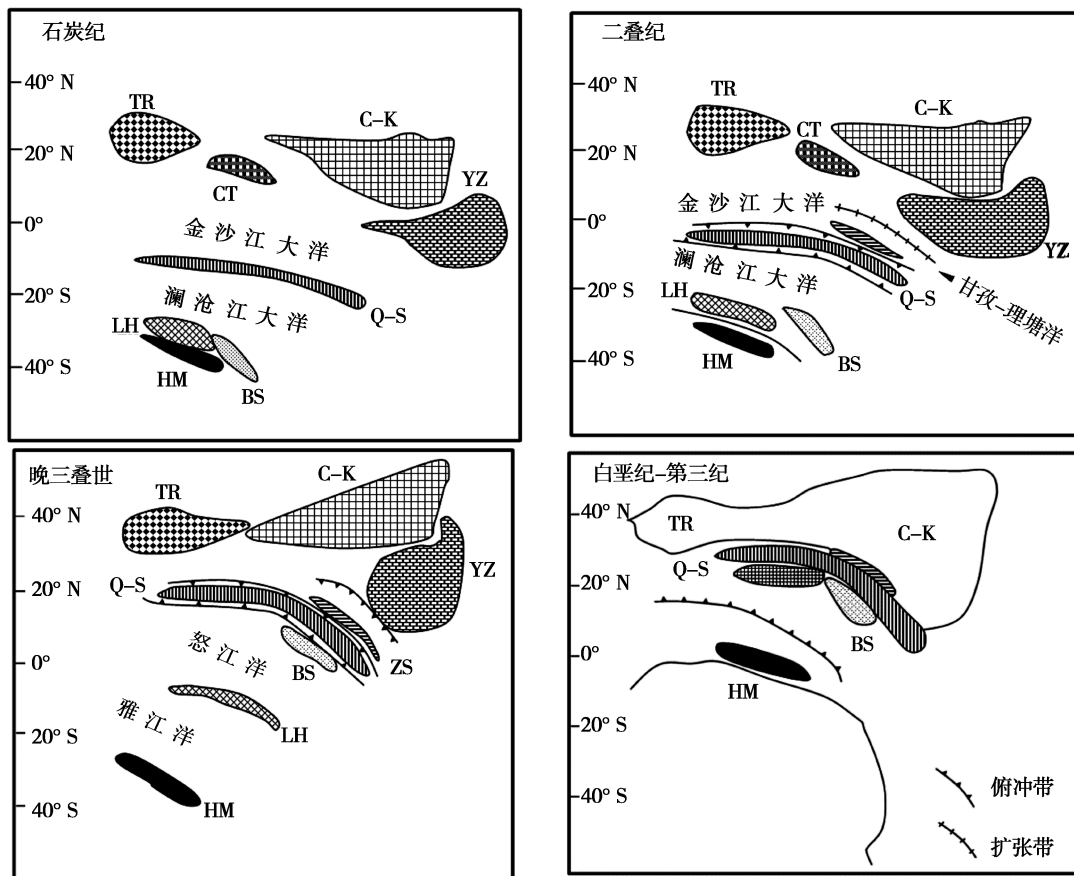
图 1 兰坪—思茅盆地构造分布略图^[1]

Fig. 1 Tectonic distribution in Lanping-Simao Basin

轮藻 *O. brevicornis* Z. Wang, *Olanpingensis* Z. Wang 的组合分子,将该套地层厘定为古新世^[22-23]。此外,国内很多学者把该套地层与国内兰坪—思茅盆地勐野井组岩系地层的时代进行对比,认为该套地层与国内勐野井组地层可以对比,其时代与国内勐野井组时代定位一致,统一为古近纪^[24-25]。

本次研究中,对呵叻盆地岩系地层的时代进行了大量研究。钟晓勇^[26]对老挝甘蒙省农波组下段孢粉进行了研究,结果发现了孢粉组合 *Clas-*

sopolis-Ephedripites-Exesipollenites,结合 *Callistopollenites*、*Normapolles*、*Cicatricosisporites*、*Clavatipollenites*、*Asteropollis* 等特征成分的发现,将该孢粉组合时代定为晚白垩世的土伦期—桑顿期。秦占杰^[27]对老挝甘蒙省农波组孢粉组合进行了研究,发现该套地层含 *Psophosphaera-Classopollis-Exesipollenites* 组合,通过类比分析后认为,甘蒙省农波组的该孢粉组合代表晚白垩世土伦—桑顿期孢粉组合特征。综合上述结果,本研究统一将呵叻盆地岩系地层的时代定为白垩纪晚期。



YZ—扬子地块; C-K—中朝地块; CT—柴达木地块; TR—塔里木地块; Q-S—昌都—思茅地块; LH—拉萨地块; BS—保山地块; HM—喜马拉雅地块; ZS—中咱地块

图2 根据古地磁资料和古地理重建恢复的特提斯构造带演化略图^[40]

Fig. 2 Reconstructed schematic tectonic map of Tethys by palaeomagnetism and palaeogeography data

2 含盐带地质背景

2.1 兰坪—思茅及呵叻盆地大地构造位置及特征

兰坪—思茅盆地处欧亚板块、印度板块和特

提斯三大构造域的交汇部位,属特提斯—三江构造带。该盆地是在欧亚板块、印度板块及两者间的特提斯洋长期相互作用的过程中形成的^[28-30]。盆地东邻金沙江—哀牢山深大断裂,西接澜沧江深大断裂^[31],北起维西,南抵国界,形成北西收敛,南东撒开的帚状构造(图1),并延出国境进入

老挝、泰国,与万象、呵叻盆地相接。根据相关地质与地球物理资料,该盆地构造环境前身总体上是在造山前相对稳定的地块与其间的小洋盆的多岛洋格局背景下演化形成的^[32-33]。其形成演化与特提斯演化密切相关,相关问题一直被中外学者关注^[34-38]。

2.2 含盐带大地构造演化特征

早古生代,龙木错—双湖—昌宁—孟连洋为代表的原特提斯洋板片向南俯冲到冈瓦纳大陆之下;早—中泥盆世,以北部龙木错—双湖洋、金沙

江洋和甘孜—理塘洋及南部以昌宁—孟连洋、哀牢山洋为代表的古特提斯洋开启;晚石炭世末期,古特提斯洋开始消减,同时中特提斯洋开启并持续扩张;晚二叠世,古特提斯洋继续消减,中特提斯洋(怒江洋)继续扩张;中三叠世,古特提斯洋闭合,甘孜—理塘洋与中特提斯洋开始俯冲;晚三叠世末期,甘孜—理塘洋闭合,中特提斯洋持续俯冲;早白垩世,中特提斯洋闭合,新特提斯洋俯冲开始;至晚白垩世,新特提斯洋持续俯冲^[39](图 2)。

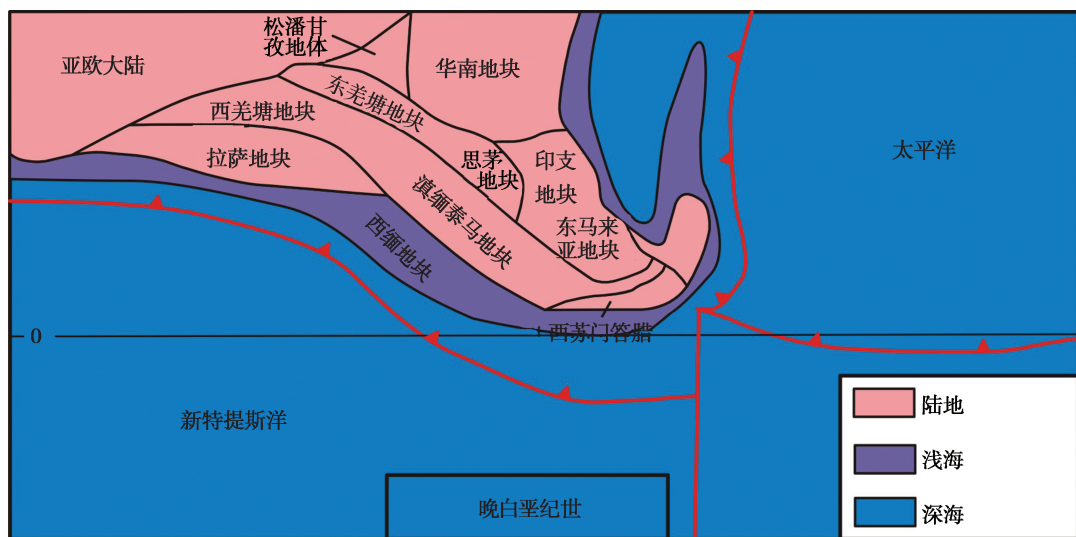


图 3 晚白垩世东新特提斯古地理图^[42]

Fig. 3 Palaeogeographic map of the eastern Tethys in the Late Cretaceous

古特提斯洋自中泥盆世打开,石炭纪时洋盆规模达到顶峰,晚石炭—早二叠世开始明显俯冲消减。古特提斯从早二叠世开始俯冲的时间与中特提斯开启时间基本一致。古特提斯洋在中三叠世闭合碰撞造山作用与中特提斯俯冲开始时间以及新特提斯洋的开启时间也是基本一致的。中特提斯洋闭合于晚白垩世,与新特提斯洋俯冲高峰期的时代基本一致(图 2)。

3 成盐期古地理特征

白垩纪是含盐带最重要的成盐期。含盐系上下地层均为陆相环境,前人研究普遍认为研究区这套含盐系地层是“海源陆相”成因^[41],即成矿环

境为陆相,成盐物质来自海水。从古地理面貌来看,滇西以及南延的泰国西部最迟在中三叠世就已经碰撞缝合成陆,缝合构造带的形成使得海水很难从其西部补给到成盐盆地。对羌塘盆地成盐期的岩相古地理进行分析,其古地理恢复和古地磁研究成果表明^[42-43],在晚白垩时期,整个昌都—思茅—呵叻地块呈近东西向分布,而新特提斯大洋位于该其西南部(图 3)。中白垩世羌塘盆地及其昌都地区广泛分布浅海及滨海沉积^[44](图 4),海水(变质卤水)可以通过狭窄的水道侵入兰坪—思茅乃至呵叻盆地,从而在这些地区沉积大量蒸发岩和钾盐。所以,北羌塘在早白垩世末或晚白垩世初广泛存在的海水是补给研究区成盐盆地的最重要的物源。

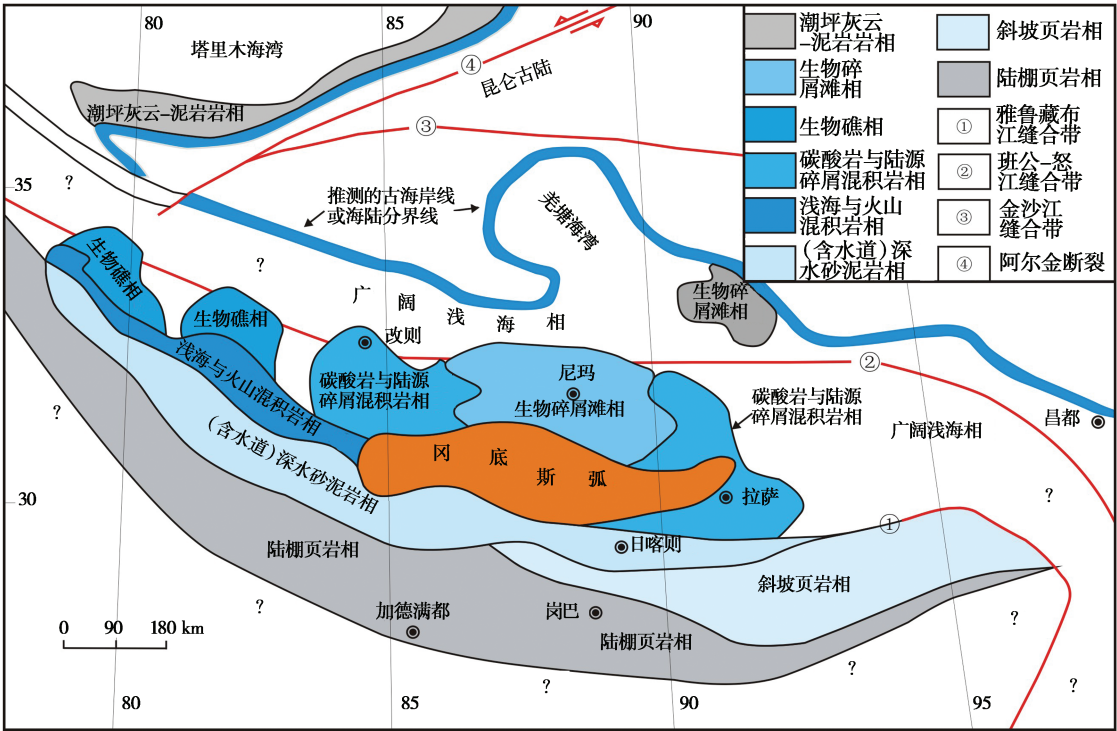


图 4 青藏地区中白垩世阿尔布—赛诺曼期岩相古地理概略图^[44]

Fig. 4 Sketch map showing the Middle Cretaceous Albian-Cenomanian lithofacies and paleogeography in Qinghai-Tibet area

4 含盐系地层矿物学特征

在沉积分异过程中,机械沉积物—碎屑岩、粘土岩形成以后出现化学岩,化学岩遵循碳酸盐—硫酸盐—卤化物沉积系列规律。这一系列沉积均为盐类沉积,都是在表生条件下形成的,但形成环境是有差异的。所谓成盐期是指在一定的地质环境中,大量地形成硫酸盐和氯化物的时期。大多数硫酸盐、含水硫酸盐和氯化物的形成,在表生作用条件下具有类似的地质环境。对于兰坪—思茅盆地(包括呵叻盆地)而言,其含盐系地层主要以碎屑岩与卤化物为主,仅含少量硫酸盐并缺少碳酸盐相沉积,这与正常海水蒸发沉积过程中的结晶分异过程是显著不同的;此外,思茅盆地勐野井矿区,尤其是呵叻盆地的卤化物沉积相中,相对于现存的钾石盐及光卤石沉积量,按正常海水蒸发沉积过程,其石盐沉积所占的比例远远不足。对兰坪—思茅盆地白垩纪蒸发岩矿床矿物进行总结,其结果见表 1。

表 1 兰坪—思茅盆地白垩纪蒸发岩矿床矿物一览表^[1]

Table 1 Minerals of Cretaceous evaporite deposit in Lan-ping-Simao basin

类 别	矿物名称
氯化物	石盐
	钾石盐
	光卤石
	钾铁盐
	氯氧镁铝石
硫酸盐	石膏
	硬石膏
	半水石膏
	钾石膏(?)
	无水芒硝
	硫锶钾石
硼酸盐	α 方硼石
	副水氯硼钙石
碳酸盐	方解石
	白云石
	菱镁矿

值得提出的是,思茅盆地和呵叻盆地蒸发岩矿床中出现菱镁矿矿物,且在呵叻盆地钾盐矿床钻孔中,曾发现大量溢晶石^[1]。溢晶石为一种易溶的盐类矿物,海水正常蒸发过程中不可能形成^[45-46];在存在富钙、镁的现代卤水环境中,经干旱蒸发,溢晶石也不会沉淀^[46-47]。溢晶石的形成仍存在争论^[46,48-51]。一些学者认为溢晶石形成于非海相的富 CaCl_2 的卤水热液中^[46-47,52,54-55],并认为这些溢晶石都是原始沉积的产物,而非沉积后成岩转化所致^[46,49,53]。基于这些钾盐矿床石盐包裹体成分分析,程怀德^[56]作了相应卤水蒸发实验,结果表明卤水在蒸发的最终阶段也能够析出溢晶石。尚不明确呵叻盆地有富 CaCl_2 的卤水热液补给,且呵叻盆地尚缺乏这种补给的有利条件,也没有发现深大断裂存在^[46]。但值得肯定的是,呵叻盆地蒸发岩形成是一种富钙流体条件下

的产物。

碳酸盐矿物组合和 MgCO_3 指数 $\{[\text{MgCO}_3/(\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)] \times 100\%$ 会随着盆地卤水的浓缩程度的变化而呈有规律的变化,即随着浓缩程度增高,三种碳酸盐矿物含量由方解石→白云石→菱镁矿逐渐增高,当 MgCO_3 指数大于 50% 时,一般该盐层中有可能出现钾矿化或钾盐层。碳酸盐矿物组合和 MgCO_3 指数在盐层出露地表的泥砾岩剖面上,仍有较好的反映^[41]。从兰坪—思茅及呵叻盆地碳酸岩矿物分布的情况来看,该区的碳酸盐由北至南(即从兰坪盆地→思茅盆地→呵叻盆地),从方解石、白云石为主→白云石、菱镁矿为主→菱镁矿为主逐渐过渡,也显示了卤水从北至南逐渐浓缩的趋势(表 2)。这些证据均表明,卤水从北至南是逐渐浓缩的。

表 2 兰坪—思茅—呵叻白垩纪蒸发岩矿床碳酸盐组合由北向南分布趋势
Table 2 Distribution trend from north to south of carbonate combination of Cretaceous evaporite deposit in Lanping-Simao-Khorat

兰坪盆地	思茅盆地	呵叻盆地
方解石、白云石为主	白云石、菱镁矿为主	菱镁矿为主
北  南		

5 元素地球化学特征

通过对兰坪—思茅盆地、老挝及呵叻盆地白垩纪蒸发岩矿床溴分布特征进行对比研究(表 3)发现,石盐、钾石盐及光卤石中的溴含量分别从北部兰坪—思茅盆地至南部呵叻盆地有逐渐增大的趋势,反映了成盐卤水由北至南逐渐浓缩的特征。

铷至今尚未发现独立矿物,常分散在含钾矿物中,以类质同象置换含钾矿物中的钾。铷的离子半径较大,离子静电键力较弱,因而常富集于晚期析出的含钾矿物中。卤水中的 Rb 随着蒸发作用的进行而趋向富集在溶液里,并与钾矿物中的钾离子进行置换,以 RbCl 、 $\text{RbMgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在,分别与 KCl 、 $\text{KMgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 形成固溶体。铷在含钾矿物中的含量多少决定于溶液中铷离子

浓度、载体矿物的晶构类型(类质同象能力差异)及其形成时间;除了与含钾矿物进行类质同象置换外,铷还常被泥质物质吸附,其在含盐粘土矿物中的含量可达 0.01%,而在石盐中的含量一般都比较低,只在钾盐镁矾、钾石盐、无水钾镁矾、光卤石等矿物中的含量才较高。在蒸发岩矿床中,原生沉积的光卤石中的铷含量一般介于 0.005% ~ 0.016%,并且沉积的光卤石中的 Rb 含量越向上部层位越高,经过重结晶作用或再沉积作用形成的光卤石中的含量可达 0.036% ~ 0.18%,因而常用来判断光卤石的成因。

本项研究仅收集到部分铷含量的数据(表 4),从北部兰坪—思茅盆地至南部呵叻盆地,光卤石中铷含量逐渐变小,同样表明了卤水自北向南逐渐浓缩的过程。

表 3 兰坪—思茅、老挝、呵叻盆地白垩纪蒸发岩矿床矿物溴含量对比表

Table 3 Bromine concentrations of Cretaceous evaporites in Lanping-Simao, Laos and Khorat Basin

矿 物	盆 地	溴平均值	参考文献
石 盐	兰坪—思茅盆地	$168 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$	[57]
	老挝蒸发岩矿床	$314 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$	[56]
	呵叻盆地	$80 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$	[58]
钾石盐	兰坪—思茅盆地	$260 \times 10^{-6} \sim 1629 \times 10^{-6}$	[57]
	老挝蒸发岩矿床	$560 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$	[22]
	呵叻盆地	2400×10^{-6}	[56]
光卤石	兰坪—思茅盆地	1399×10^{-6}	[65]
	老挝蒸发岩矿床	2892×10^{-6}	[56]
	呵叻盆地	4700×10^{-6}	[41]

表 4 兰坪—思茅、老挝、呵叻盆地白垩纪蒸发岩矿床矿物铷含量对比表

Table 4 Rubidium concentrations of Cretaceous evaporites in Lanping-Simao, Laos and Khorat Basin

矿 物	盆 地	铷平均值	参考文献
光卤石	兰坪—思茅盆地	60×10^{-6}	[65]
	老挝蒸发岩矿床	50×10^{-6}	[56]
	呵叻盆地	15×10^{-6}	[41]

6 讨 论

兰坪—思茅及呵叻盆地白垩纪蒸发岩矿床的上述特征,能使我们进一步思考兰坪—思茅及呵叻盆地含钾蒸发岩的成矿过程。该区蒸发岩是海相还是陆相成因?物源从哪里来?石膏哪去了?该区溢晶石及菱镁矿如何生成?

综合现有研究成果,Hite 等^[58]认为呵叻盆地含钾蒸发岩矿床成盐物质来源于海水,同时硬石膏硫同位素组成以及硼同位素研究^[47,59-61]证据均表明该区成盐物质来自海水。同样地,思茅盆地勐野井组含钾盐蒸发岩的 Br 地球化学表明,该区蒸发岩显示典型的海相特征^[57],同时硬石膏硫同位素特征也指示了其海相来源^[62]。兰坪盆地云龙组石膏的硫同位素组成也表明其为海相来源^[63]。本项研究获得的羌塘盆地东部、部分兰坪盆地及思茅盆地石膏硫和锶同位素值同样指示了其海相成因。因此,确定兰坪—思茅及呵叻盆地含钾蒸发岩矿床的成因应该是海相成因无疑。

至于硫酸盐的去向,跟羌塘盆地巨量硫酸盐沉积有关。从沉积时代上看,兰坪—思茅及呵叻

盆地蒸发岩矿床均形成于中白垩(约 100Ma 左右),而羌塘盆地东部(昌都盆地)也有大量硫酸盐矿床,由于该区对蒸发岩研究程度低,其成矿时代尚不明确,以现有区域地质资料来看,其沉积时代为侏罗、白垩纪,虽未见具体绝对年龄控制,但这与整个昌都—思茅—兰坪—呵叻成矿带白垩纪晚期变质海水宏观成矿过程并不冲突。前已述及,这些硫酸盐矿床均已证实为海相成因^[64]。同时,从区域大地构造演化背景来看,兰坪—思茅盆地和羌塘盆地东部构造演化特征具有相似性,它们同属于一个构造单元,有着相似的构造演化背景。物源研究成果揭示,思茅盆地的物源可能来自东羌塘地区^[64]。诸多一致性都暗示,兰坪—思茅乃至呵叻盆地含钾蒸发岩矿床的硫酸盐很可能大部分沉积于羌塘盆地东部地区。

当正常海水蒸发至石盐阶段结束时,海水 Mg/Ca 比值较高,过程中必然有陆相含 Ca、HCO₃⁻ 水的掺杂;随着蒸发的进行,陆相水体中 Ca 与浓缩海水中 SO₄²⁻ 会反应生成石膏,石膏的沉积促使混合水体 HCO₃⁻ 的进一步富集和 SO₄²⁻ 的减少;此时参与蒸发的陆相水体 Ca 被消耗,HCO₃⁻ 仍在混合水体中,继续加入陆相含钙水体,含镁碳酸盐

(菱镁矿)沉淀析出。这种陆相含 Ca 、 HCO_3^- 水的参与也是导致卤水中 Mg/Ca 比值和 SO_4^{2-} 降低、溢晶石形成所需的高钙卤水条件之一。蒸发实验的结果可以很好地和兰坪—思茅—呵叻白垩纪蒸发岩矿床成矿特征相吻合^[64]。

白垩纪是含盐带最重要的成盐期。白垩纪中期(阿尔必—赛诺曼期),变质卤水从羌塘盆地西部进入该地区,并经由德钦海峡进入兰坪—思茅盆地,再经过老挝北部和那空泰盆地进入呵叻高原地区(图 5)。由于呵叻盆地海侵期沉降速率较高,与蒸发岩的沉积速率相似或更大,因而在海侵期沉积了巨厚的蒸发岩地层。其他地区由于沉降速率较小,沉积的蒸发岩厚度远小于呵叻盆地。同时,由于呵叻盆地位于稳定的印支地块之上,且

面积广大,发育的蒸发岩沉积巨厚,其他地区则由于面积较小而更多地受到陆相作用的影响,蒸发岩往往含有较多的陆相碎屑甚至泥盐混杂。

构造运动使得白垩纪海水(变质卤水)只能从羌塘地区向南(目前的位置)进入一系列的成盐盆地,这个过程中避免不了有大量含钙陆相水的参与,使得海水逐渐变质,从而形成了兰坪—思茅—呵叻白垩纪蒸发岩矿床(图 6),呈现多级盆地海水迁移变质成盐成钾模式。蒸发岩沉积旋回的变化、成盐成钾作用的强弱是含盐区域构造运动和海水共同作用的结果,但构造因素无疑是主要因素。区域碰撞隆升及德钦海峡的关闭迫使海水退出含盐带地区,从而结束了这些含盐盆地的蒸发岩沉积历史。

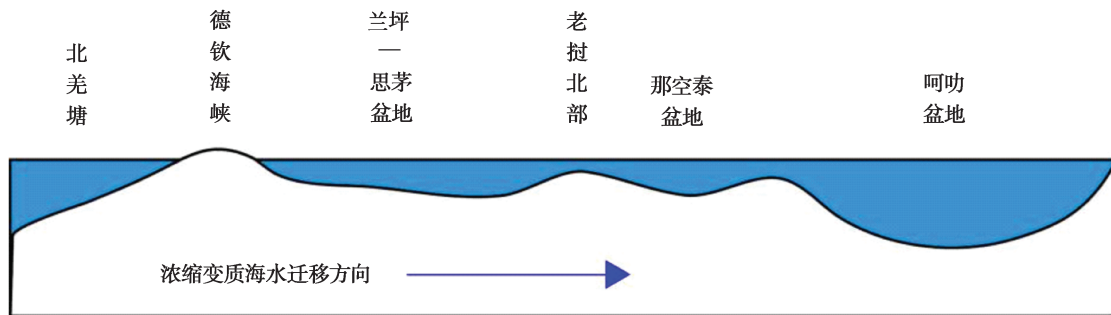


图 5 白垩纪中期海侵方向及各成盐盆地示意图

Fig. 5 The marine incursion orientation and salt forming basins in Cretaceous

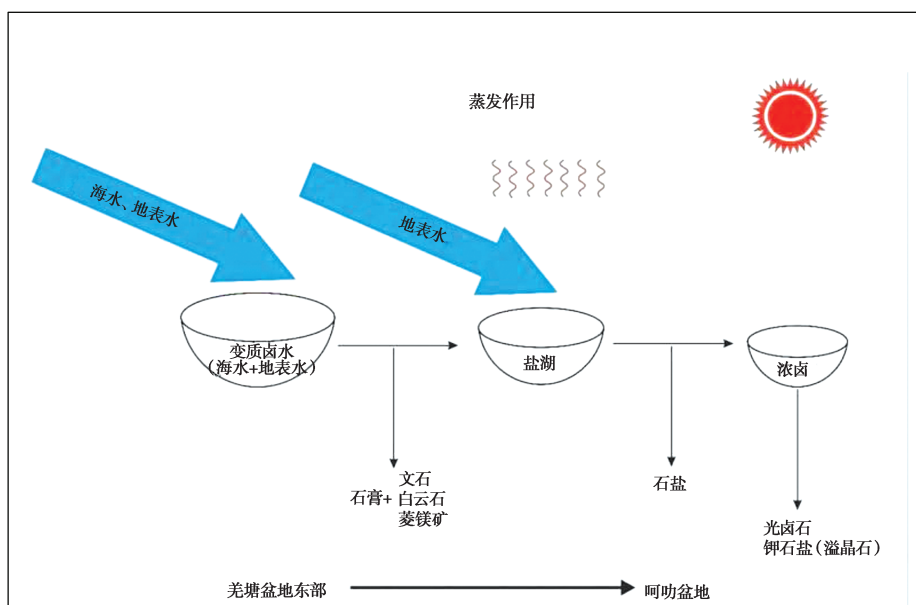


图 6 兰坪—思茅—呵叻盆地白垩纪蒸发岩矿床成矿模式示意图

Fig. 6 Metallogenic model of Cretaceous evaporite deposit in Lanping-Simao-Khorat basin

7 结 论

成盐物质主要来自海水,含钙陆相水对其影响深刻,昌都—兰坪—思茅—呵叻成盐带各次级盆地在成盐期(晚白垩世早期或白垩纪中期)是一个串珠状连通的统一盆地系统。新特提斯洋海水经过北羌塘局限海之后,以浓缩变质海水的形式进入成盐带各盆地,并在不同的沉积环境下发育了厚度及规模不等的岩盐和钾盐沉积,呈现多级盆地海水迁移变质成盐成钾模式。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 钾盐地质科学研究队. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集[C]. 昆明:云南省地质局,1980.
- [3] 邓尔新. 云南省江城、勐腊一带钾矿床和盐溶岩类的特征、形成条件以及找矿问题[J]. 地球化学,1982,(2):143-154.
- [4] 云南省地质矿产局. 云南思茅盐矿地质[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [5] 张从伟,高东林,张西营,等. 兰坪—思茅盆地与楚雄盆地古新统含盐系地球化学特征对比[J]. 盐湖研究,2011,19(3):8-14.
- [6] 杨尖絮,尹宏伟,张震,等. 滇西兰坪—思茅盆地成钾地质条件分析[J]. 大地构造与成矿学,2013,37(4):633-640.
- [7] 帅开业. 云南中、新生代地质构造演化与蒸发岩建造[J]. 现代地质,1987,1(2):207-229.
- [8] 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.
- [9] 夏文杰,李秀华. 蒸发岩成因理论研究中的几个问题—以云南勐野井钾盐石盐矿床为例[J]. 矿物岩石,1983,(3):1-11.
- [10] 吴天柱. 云南勐野井钾盐矿床的成因[J]. 化工地质,1981,(1):1-8.
- [11] 颜仰基,袁敬阁,康承林,等. 云南思茅拗陷勐野井组盐类矿床的成钾条件[J]. 中国地质科学院院报(成都地质矿产研究所分刊),1981,2(1):29-47.
- [12] 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,1983,5(1):17-38.
- [13] 肖章程,黄和旺. 云南省思茅盆地固体钾盐矿成矿物质来源[J]. 中国西部科技,2009,8(23):9-11.
- [14] 张从伟,高东林,马海州,等. 兰坪—思茅盆地钾盐矿床的物质来源探讨[J]. 盐湖研究,2010,18(4):12-18.
- [15] 郑绵平,张震尹,尹宏伟,等. 云南江城勐野井钾盐成矿新认识[J]. 地球学报,2014,35(1):11-24.
- [16] 龙瑞华. 云南墨江丙曼石膏箐勐野井组孢粉组合特征及其时代探讨. 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[C]. 昆明:云南省地质局,1980:203-208.
- [17] 云南省地质矿产局,成都地质矿产研究所,成都地质学院. 云南思茅盐矿地质[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [18] 袁秦,秦占杰,魏海成,等. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究[J]. 地球学报,2013,34(5):631-637.
- [19] Wang L, Liu C, Fei M, et al. First SHRIMP U-Pb zircon ages of the potash-bearing Mengyejing Formation, Simao Basin, southwestern Yunnan, China[J]. Cretaceous Research, 2015, 52:238-250.
- [20] Gardner L S, Haworth H F, Na Chiengmai P. Salt Resources of Thailand[R]//DMR Report of Investigation, 1967, (11):22-30.
- [21] Hansen B T, Wemmer K, Pawlig S, et al. Isotopic Evidence for a Late Cretaceous Age of the Potash and Rock Salt Deposit at Bamnet Narong, NE Thailand[C]. The Symposium on Geology of Thailand, 2002, 26-31.
- [22] 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.
- [23] 严城民,朱延浙,吴军,等. 老挝万象地区基础地质调研的主要进展[J]. 地球学报,2006,27(1):81-84.
- [24] 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.
- [25] 雷爱全,路耀祖. 以龙湖钾镁盐矿床为例,简述农波盆地盐类矿产形成的地质环境[J]. 价值工程,2010,(36):162.
- [26] 钟晓勇,袁秦,秦占杰,等. 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,2012,33(3):323-330.
- [27] 秦占杰,袁秦,魏海成,等. 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[J]. 地球学报,2013,34(5):638-642.
- [28] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision[J]. Science, 1989, 189:417-426.
- [29] Schärer U, Tapponnier P. Intraplate tectonics of Asia: a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailaoshan-Red-River shear zone, China[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1990, 97:65-77.
- [30] 廖宗庭,陈跃昆. 兰坪—思茅盆地原型的性质及演化[J]. 同济大学学报,2005,33(11):
- [31] 刘登忠,陶晓风,朱利东. 滇西兰坪盆地盆山耦合[M]. 成都:西南交通大学出版社,1999.
- [32] 殷鸿祥,吴顺宝,杜运生. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学,1999,24(1):1-7.
- [33] 廖宗庭,陈跃昆,魏志红. 滇西晚古生代以来的构造演化[J]. 同济大学学报,2003,31(9):1029-1033.
- [34] Sengor A M C. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia[J]. The Geological Society Special Paper, 1984,

- 195;1-82.
- [35] Tapponnier P. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt, Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343:431-437.
- [36] 钟大赉, 季建清, 胡世玲. 新特提斯洋俯冲时间: 变质洋壳残片⁴⁰Ar/³⁹Ar 微区年龄[J]. *科学通报*, 1999, 44(16):1782-1785.
- [37] 刘汇川, 王岳军, 蔡永丰, 等. 哀牢山构造带新安寨晚二叠世末期过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(1):87-98.
- [38] 蔡永丰, 王岳军, 刘汇川, 等. 哀牢山新元古代斜长角闪岩的形成时代、地球化学特征及其大地构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(1):168-180.
- [39] 李龚健. 三江特提斯复合造山带构造演化与典型矿床成矿过程研究. 博士论文. 2014.
- [40] 侯增谦, 卢记仁, 李红阳, 等. 中国西南特提斯构造演化—幔柱构造控制[J]. *地球学报*, 1996, 17(4):439-451.
- [41] 曲懿华. 泰国呵叻高原钾盐矿床沉积特征及成因探讨[J]. *化工矿产地质*, 1980, 2(1):13-22.
- [42] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66:1-33.
- [43] Tong, Y B, Yang Z, Zheng L D, *et al.* Internal crustal deformation in the northern part of Shan-Thai Block: new evidence from paleomagnetic results of Cretaceous and Palaeogene red beds[J]. *Tectonophysics*, 2013, 608, 1138-1158.
- [44] 李祥辉, 王成善, 伊海生, 等. 西藏中白垩世和始新世岩相古地理[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(1):82-89.
- [45] Herrmann A G, Knake D, Schneider J, *et al.* Geochemistry of modern seawater and brines from salt pans - main component and bromide distribution[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 40:1-24.
- [46] Hardie L A. The roles of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites: An hypothesis[J]. *American Journal of Science*, 1990, 290:43-106.
- [47] Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber B C. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporates in the Khorat Plateau of northeastern Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 123:31-62.
- [48] Braitsch O. Salt Deposits, their origin and composition[M]. New York: Springer-Verlag, 1971.
- [49] Wardlaw N C. Unusual marine evaporates with salts of calcium and magnesium chloride in Cretaceous basins of Sergipe, Brazil [J]. *Economic Geology*, 1972, 67:156-168.
- [50] Borchert H. On the formation of lower Cretaceous potassium salts and tachhydrite in the Sergipe Basin (Brazil) with some remarks on similar occurrences in west Africa (Gabon, Angola *etc.*). // Klemm, D D and Schneider H J, Time-and strata-bound ore deposits [M]. New York: Springer-Verlag, 1977. 94-111.
- [51] Garrett D E. Potash deposits - processing, properties and uses [M]. London: Chapman and Hall, 1996.
- [52] Lowenstein T K, Spencer R J, Zhang P X. Origin of ancient potash evaporites: clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of western China[J]. *Science*, 1989, 245:1090-1092.
- [53] Szatmari P, Carvalho R S, Simões I A. A comparison of evaporite facies in the Late Paleozoic Amazon and the middle Cretaceous south Atlantic salt basins[J]. *Economic Geology*, 1979, 74:432-447.
- [54] Timofeeff M N, Lowenstein T K, Martins da Silva M A, *et al.* Secular variation in the major-ion chemistry of seawater: evidence from fluid inclusions in Cretaceous halites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70:1977-1994.
- [55] Lowenstein T K, Timofeeff M N. Secular variations in seawater chemistry as a control on the chemistry of basinal brines: test of the hypothesis[J]. *Geofluids*, 2008, 8(2):77-92.
- [56] 程怀德. 基于相化学模拟蒸发和淋滤实验的老挝钾盐成矿地球化学过程与机制研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2011.
- [57] 高翔, 方勤方, 姚薇, 等. 云南兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床物质组分对成因的指示[J]. *地球学报*, 2013, 34(5):529-536.
- [58] Hite R J and Japakasetr T. Potash deposits of Khorat Plateau, Thailand and Laos[J]. *Economic Geology*, 1979, 74:448-458.
- [59] 张华, 刘成林, 王立成, 等. 老挝他曲盆地钾盐矿床蒸发岩硫酸同位素特征及成钾指示意义[J]. *地质论评*, 2014, 60(4):851-857.
- [60] Tan H B, Ma H Z, Li B K, *et al.* Strontium and boron isotopic constraint on the marine origin of the Khammuane potash deposits in southeastern Laos [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(3):1-8.
- [61] Zhang X Y, Ma H Z, Ma Y Q, *et al.* Origin of the late Cretaceous potash-bearing evaporates in the Vientiane Basin of Laos: ⁸¹¹B evidence from borates[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62:812-818.
- [62] 王立成, 刘成林, 费明明, 等. 云南兰坪盆地云龙组硫酸盐硫酸同位素特征及其地质意义[J]. *中国矿业*, 2014, 23(12):57-63.
- [63] 刘群, 陈郁华, 李银彩, 等. 中国中、新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积[M]. 北京: 科学技术出版社, 1987:1-240.
- [64] 李永寿. 昌都—兰坪—思茅—呵叻成盐带白垩纪含钾蒸发岩矿床成矿模式[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2015.
- [65] 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*, 1983, 5(1):17-38.

Metallogenic Model and Processes of the Cretaceous Potassium-Bearing Evaporites Involving Changdu, Lanping-Simao and Khorat Basin

MA Hai-zhou^{1,2}, LI Yong-shou^{1,2}, CHENG Huai-de^{1,2}, QING Xi-wei^{1,2}, ZHANG Xi-ying^{1,2},
MIAO Wei-liang^{1,2}, XU Jian-xin^{1,2}, LI Bin-kai^{1,2}, HAI Qing-yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,
Qinghai Institute of Salt Lake, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment, Xining 810008, China)

Abstract: In the salt-bearing zones of Changdu, Lanping-Simao and Khorat basin, evaporites are widely distributed. In this paper, we focus on these deposits to develop a new metallogenic model and processes of the Cretaceous potassium-bearing evaporites, based on the previous research results, tectonics, ore deposits and geochemistry. The results showed that the Cretaceous potassium-bearing evaporites involving Changdu, Lanping-Simao and Khorat basins are the genesis of “Marine source continental facies”. This indicated that the formation of those evaporites is related to the intrusion and recharge of seawater in the continental environment. These deposits are lacking in the corresponding sulfate minerals formed by evaporation of normal sea water. Meanwhile, the occurrence of a small amount of authigenic minerals such as magnetite in those deposits cannot be explained by normal sea water evaporation theory. The occurrence of a small amount of tachyhydrite in the deposits indicates that the brine is rich in Ca. The Cretaceous evaporites (Mengyejing Formation or Yunlong Formation) were widely distributed in Lanping-Simao basin, especially small potash deposits have even been deposited in the Jiangcheng area. Studies of isotopes and trace elements indicate that the evaporite deposits in this area are marine origin, and the changes of Rb and Br contents indicate that the seawater intruded into Khorat from the north of Lanping. The S and Sr isotopes in gypsum from Changdu and Lanping-Simao basins indicate that the sulfate deposits in this area are marine origin, studies on provenance reveal that the source of sulfates in Simao basin may come from the east of Qiangtang area, indicating that the sulfates in Changdu area have the same origin with evaporite in Lanping-Simao basin. A new metallogenic model of seawater migration and metamorphism in multistage basins is developed.

Key words: Changdu-Lanping-Simao-Khorat salt belt; Potassium evaporite deposit; Metallogenic model; Metamorphic sea water