

doi: 10.12029/gc20220616

苗忠英, 郑绵平, 娄鹏程, 张雪飞, 孙海涛, 张震, 徐其辉, 杜雪苗. 2022. 云南思茅盆地钾盐矿床的深源浅储成因模式——来自于 Sr 同位素的证据[J]. 中国地质, 49(6): 1923–1935.

Miao Zhongying, Zheng Mianping, Lou Pengcheng, Zhang Xuefei, Sun Haitao, Zhang Zhen, Xu Qihui, Du Xuemiao. 2022. The deep source and shallow mineralization model of potash deposits in the Simao Basin: Evidence from Sr isotope[J]. Geology in China, 49(6): 1923–1935(in Chinese with English abstract).

云南思茅盆地钾盐矿床的深源浅储成因模式 ——来自于 Sr 同位素的证据

苗忠英¹, 郑绵平¹, 娄鹏程², 张雪飞¹, 孙海涛³, 张震¹, 徐其辉², 杜雪苗⁴

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:【研究目的】思茅盆地赋存有中国唯一的前第四纪固体钾盐矿床, 该矿床的成因一直存在争议。客观地认识矿床成因、合理地构建矿床成因模式, 不仅是钾盐矿床学研究中亟需解决的基础科学问题, 而且关乎盆地内钾盐资源勘查方向的选择。【研究方法】本研究以思茅盆地 L-2 井和 MZK-3 井的盐岩、盐岩上覆和下伏碎屑岩、盐岩中的碎屑岩为主要研究对象, 重点分析其锶同位素地球化学特征。【研究结果】结果表明: (1) L-2 井全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.708220~0.727458, 平均值为 0.712776; 盐岩水不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.711342~0.741999, 平均值为 0.716574; (2) MZK-3 井盐岩上覆碎屑岩层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.713318~0.723147, 平均值为 0.717255; 盐岩下伏碎屑岩层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.712470~0.738988, 平均值为 0.719307; (3) 碎屑岩样品经过 ^{87}Rb 校正恢复至初始沉积状态的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710880~0.727678, 平均值为 0.712828; (4) 盐岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值全部明显小于大陆地表风化系统的平均值, 有个别样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于现代海水。【结论】基于思茅盆地基础地质和钾盐矿床地质已有的研究成果, 结合盐岩和碎屑岩锶同位素地球化学特征, 可以得出: 思茅盆地含钾盐岩与碎屑岩处于不同的锶同位素平衡体系; 含钾盐岩的物源主体为海水, 成盐过程中陆源淡水的补给可使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增大; 碎屑岩沉积于陆相环境, 在与固态盐岩或盐岩水溶液接触之前已处于早成岩阶段 A 亚期; 钾盐的成矿模式为勐野井组沉积期深层源盐通过走滑拉分形成的断层迁移至地表, 在由高处向汇水盆地迁移过程中捕获了处于早成岩阶段 A 亚期的碎屑颗粒, 形成了现今的含泥砾盐岩; 部分含泥砾盐岩在迁移进入汇水盆地之后, 经历了溶解-重结晶的过程, 形成了盆地内成分较纯的盐岩; 后续沉积的碎屑颗粒形成了防止盐岩溶蚀破坏的保护层; 新生代的喜山运动使早期形成的钾盐矿床发生调整改造。

关键词: 钾盐矿床; 物源; 成矿模式; 锶同位素; 地质调查工程; 思茅盆地

创新点: 根据盐系地层中 Sr 同位素地球化学特征的差异, 提出了思茅盆地内“深源浅储”的钾盐矿床成因模式。

中图分类号: P611.4; P619.211 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1923-13

The deep source and shallow mineralization model of potash deposits in the Simao Basin: Evidence from Sr isotope

收稿日期: 2020-09-20; 改回日期: 2022-09-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20201115, DD20221913)和国家重点研发计划子课题(2017YFC0602801)联合资助。

作者简介: 苗忠英, 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为油气和钾盐等沉积型矿产资源的成因机理和分布规律;

E-mail: zhymiao@foxmail.com。

MIAO Zhongying¹, ZHENG Mianping¹, LOU Pengcheng², ZHANG Xuefei¹,
SUN Haitao³, ZHANG Zhen¹, XU Qihui⁴, DU Xuemiao⁴

(1. MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum—Beijing, Beijing 102249, China; 4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of the geological survey engineering.

[Objective] The Simao Basin hosts the only pre-Quaternary solid potash deposit in China, but the genesis of this deposit has been still controversial. An objective understanding of deposit genesis as well as rational construction of a metallogenic model is not only fundamental scientific issues that need to be addressed urgently in the study of potash mineral deposits, but also have a bearing on the choice of the direction for potash resource exploration in the basin. **[Methods]** This study focuses on Sr isotope geochemical characteristics of the samples from salt rocks, overlying and underlying clastic rocks and clastic rocks within the salt rocks in Wells L-2 and MZK-3 of the Simao Basin. **[Results]** The results show that: (1) The bulk-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values from the Well L-2 samples are 0.708220–0.727458, with an average of 0.712776; the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of water-insoluble matter within the salt rock are 0.711342–0.741999, with an average of 0.716574; (2) The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of the clastic rock overlying and underlying the salt layer in Well MZK-3 range from 0.713318–0.723147 and 0.712470–0.738988, with an average of 0.717255 and 0.719307, respectively; (3) The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of the clastic rock corrected by ^{87}Rb to cover their initial sedimentary state are 0.710880–0.727678, with an average of 0.712828; (4) The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of salt rock are all significantly lower than the average value of the continental weathering system, with some individual samples having $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values larger than modern seawater. **[Conclusions]** Based on the existing research results of the basic geology and potash deposit geology in the Simao Basin, combined with the Sr isotope geochemical characteristics of salt rocks and clastic rocks, it can be concluded that: The potash-bearing salt rocks and clastic rocks are in different Sr isotope equilibrium systems; the matter source of potash-bearing salt rock is mainly seawater, and the recharge of terrestrial freshwater into the evaporation basin during the salinization process would increase $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of the samples. The clastic rocks were deposited in the terrestrial environment and were in the eodiagenesis substage A before contacting with solid salt rock or brine; a more rational potash metallogenic model is that the deep source salt migrated to the surface through faults formed by strike-slip pull-apart process during the deposition period of the Mengyejing Formation, capturing the unconsolidated clastic rocks in the eodiagenesis substage As they migrated from the height to the catchment basin, and forming the present-day clastic-bearing salt rocks. After migrating into the catchment basin, parts of the clastic-bearing salt rocks underwent dissolution and recrystallization, resulting in the formation of salt rock with relatively purer composition. The subsequent deposition of the clastic rocks formed a protective layer against rock salt dissolution. Early-formed potash deposits were influenced by the Cenozoic Himalayan movement, leading to the modification not only in physical structure but also in mineral component.

Key words: potash deposit; material source; metallogenic model; Sr isotope; geological survey engineering; Simao Basin

Highlights: According to the difference of Sr isotope geochemical characteristics in the salt layer, a “deep source and shallow mineralization” genetic model of potash deposits is proposed in the Simao Basin.

About the first author: MIAO Zhongying, male, born in 1982, Ph.D., associate researcher, the main research direction is the genetic mechanism and distribution law of sedimentary mineral resources such as oil and gas and potash; E-mail: zhymiao@foxmail.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20201115; No.DD20221913), sub-project of National Key Research and Development Program (No.2017YFC0602801).

1 引 言

思茅盆地位于云南省西南部,行政区划主体属普洱市和景洪市,是中国氯化物型固体钾盐资源勘

查最有利的目标区。目前,盆地内已经发现中国唯一的前第四纪固体钾盐矿床——勐野井钾盐矿。该矿体面积 3.5 km², 预测 KCl 资源量 1676.04 万 t (郑绵平等, 2014), 盐岩分布在深度 26~1251 m。

目前关于勐野井钾盐矿床成因的认识主要有4种:(1)火成盐体(吴天柱,1981);(2)陆相沉积盆地原始沉积成因;(3)海侵陆相盆地后原始沉积成因(帅开业,1987;曲懿华,1997;王立成等,2018;马海州等,2019);(4)深层底辟成因(郑绵平等,2012,2014;杨尖絮等,2013;刘璿等,2017)。

火成盐体成因说主要是根据钾盐矿体的构造特征、形态产状和蚀变带等特征提出,是一种假说,后续相关研究工作未见报道。陆相沉积盆地原始沉积成因说主要依据钾盐矿床产层无典型海相化石、缺乏正常海相蒸发的碳酸盐岩和硫酸盐岩沉积、盐层多旋回性反映了陆相气候的干湿交替等特征,提出钾盐矿床的成矿物质为陆源、沉积环境为陆相,但是矿床的矿物组合、化学成分、同位素等特征不支持这种观点。

海侵成因和深层底辟成因是目前对勐野井钾盐矿床成因认识的两种主流观点,不同的观点对钾盐矿床成因机理这一基本科学问题的理解差异较大,因此对盆地内钾盐资源勘查的指导也是完全不同的两个方向。

本项研究基于海相和陆相环境锶同位素的差异性,以及一定地质时期海相环境锶同位素的稳定性,探索思茅盆地内含泥砾盐岩中水不溶物、盐岩上覆和下伏碎屑岩与盐岩锶同位素地球化学特征之间的关系。通过对比分析盆地内已公开发表的锶同位素数据,进一步科学严谨地论证钾盐矿床物源、沉积环境和成矿模式。

2 地质背景

大地构造上,思茅陆块位于印支陆块北部。它东界为金沙江—哀牢山缝合带,西界为景洪缝合带(Metcalf, 2002; Sone and Metcalfe, 2008; 许志琴等,2013)(图1a)。思茅盆地是思茅陆块上主要的地质单元,其东、西边界分别为金沙江—哀牢山断裂带和澜沧江断裂带(吴南平等,2003)(图1b)。

新生代以来,受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,思茅陆块与印支陆块相对于现代磁场发生了顺时针方向的旋转,走向从近东西向顺时针旋转成现今的北西—南东向(尹济云等,1999),陆块内部发生了走滑和逆冲推覆构造,断裂系统发育。

受成盆动力机制的控制,不同地质时期思茅盆地的性质是有差异的。例如,受古特提斯闭合的影响,三叠纪属弧后前陆盆地(谭富文,2002);受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,新生代属走滑拉分盆地(陈跃昆等,2004;廖宗廷和陈跃昆,2005);侏罗纪—白垩纪属陆缘裂谷盆地(吴南平等,2003;陈跃昆等,2004;杨鑫等,2011),动力机制为古特提斯闭合后陆陆碰撞引起的走滑拉分。

思茅盆地的沉积基底为前寒武系—下古生界绿片岩相变质杂岩(殷鸿福等,1999),沉积盖层主要为中—新生界(谭富文,2002;尹福光等,2006)。其中,中—上三叠统主要发育海相碎屑岩和碳酸盐岩;下侏罗统主要发育湖坪—泻湖相细碎屑岩;中侏罗统在盆地西部发育海相生物灰岩、盆地东部发

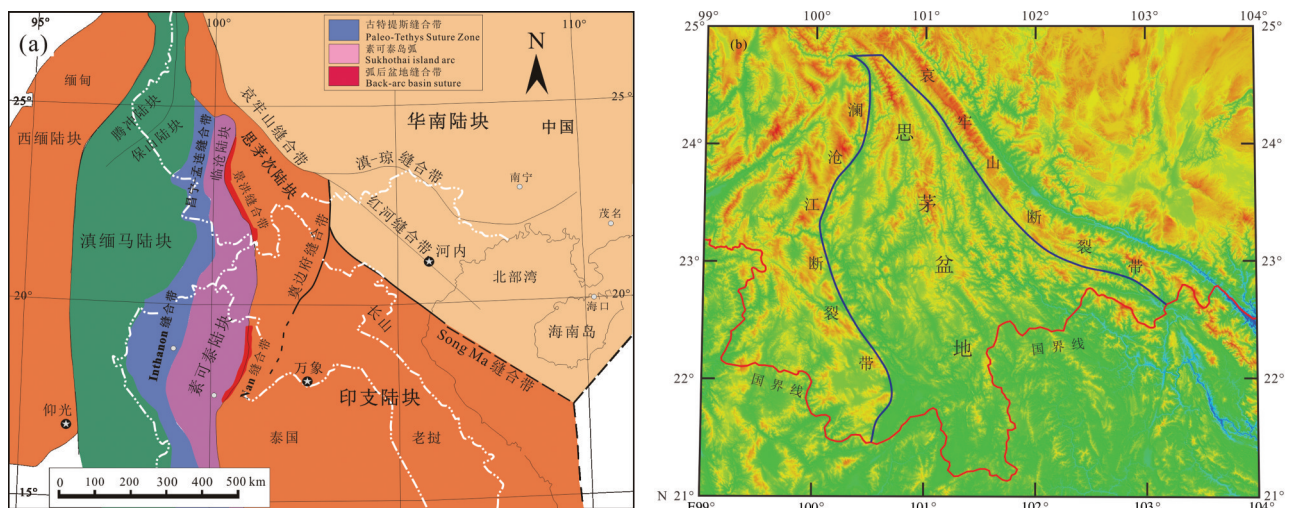


图1 思茅盆地的构造(a)和地理位置(b)

Fig.1 Structure (a) and geographical location (b) of the Simao basin

育海相灰绿色泥灰岩;上侏罗统主岩性为陆相红色细碎屑岩;白垩系为一套典型河湖相砂岩、页岩、砾岩(陈跃昆等,2004;廖宗廷和陈跃昆,2005;郑绵平等,2014)。

思茅盆地内的盐岩主要出现在下白垩统勐野井组,平面上自西向东可分为景谷含盐带、整董—勐腊含盐带、江城含盐带。盐岩的围岩主体是泥砾岩,缺失正常蒸发沉积序列相应规模的碳酸盐岩和硫酸盐岩,盐岩中也经常出现泥砾。钾盐矿出现在江城含盐带,景谷和勐腊含盐带发现钾矿化层。

3 样品来源和实验方法

3.1 样品来源

本项研究选取的含泥砾盐岩样品来自整董含盐带的L-2井,其地理坐标为23°9'1.5"N、101°9'

28.7"E(图2)。井口周围出露的地层为勐野井组,周边还有下白垩统南新组、景星组和侏罗系坝注路组、和平乡组以及上三叠统路马组出露。钻孔周缘主体发育北西—南东向逆断层,倾角40~60°。笔者在31.5~631.8 m深度段挑选了37件样品,主岩性为盐岩和硬石膏岩。其中盐岩样品中含有较多泥砾,质纯的盐岩段很少(图3)。

本文选取的质纯盐岩上覆和下伏碎屑岩样品来自于江城含盐带的MZK-3井,其地理坐标为22°40'12.0"N、101°37'23.8"E,井口周围的地质条件见苗忠英等(2019a)。其中,盐上样品的深度范围为167.93~175.17 m,共采集5件;盐下样品的深度范围为267.35~305.20 m,共采集7件。样品的主岩性为含砾灰质泥岩,其中的灰质存在形式主体为同沉积的微—粉晶碳酸盐,个别晶体粒度可达到细晶级

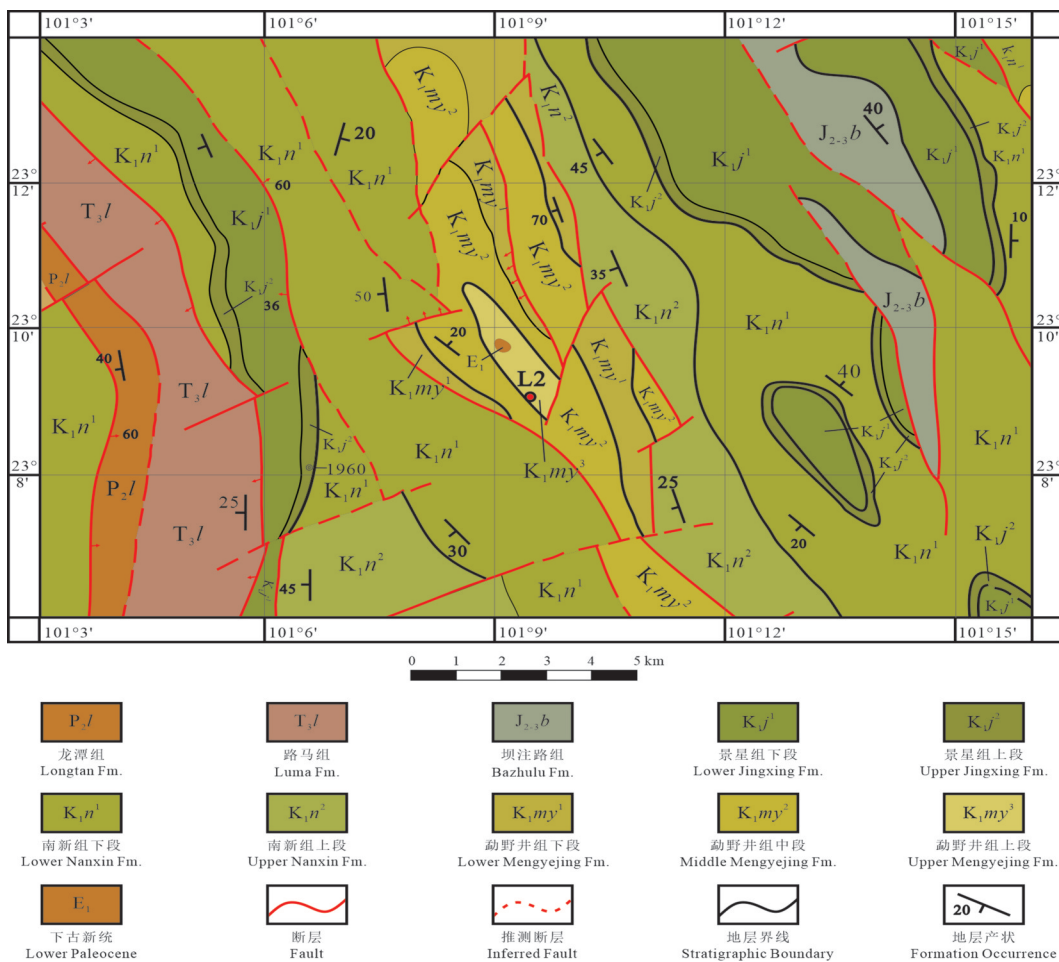


图2 L-2井地理位置及周围地质简图(据苗忠英等,2019a,b)
Fig.2 Location of the L-2 well and the surrounding geology sketch (after Miao Zhongying et al., 2019a,b)

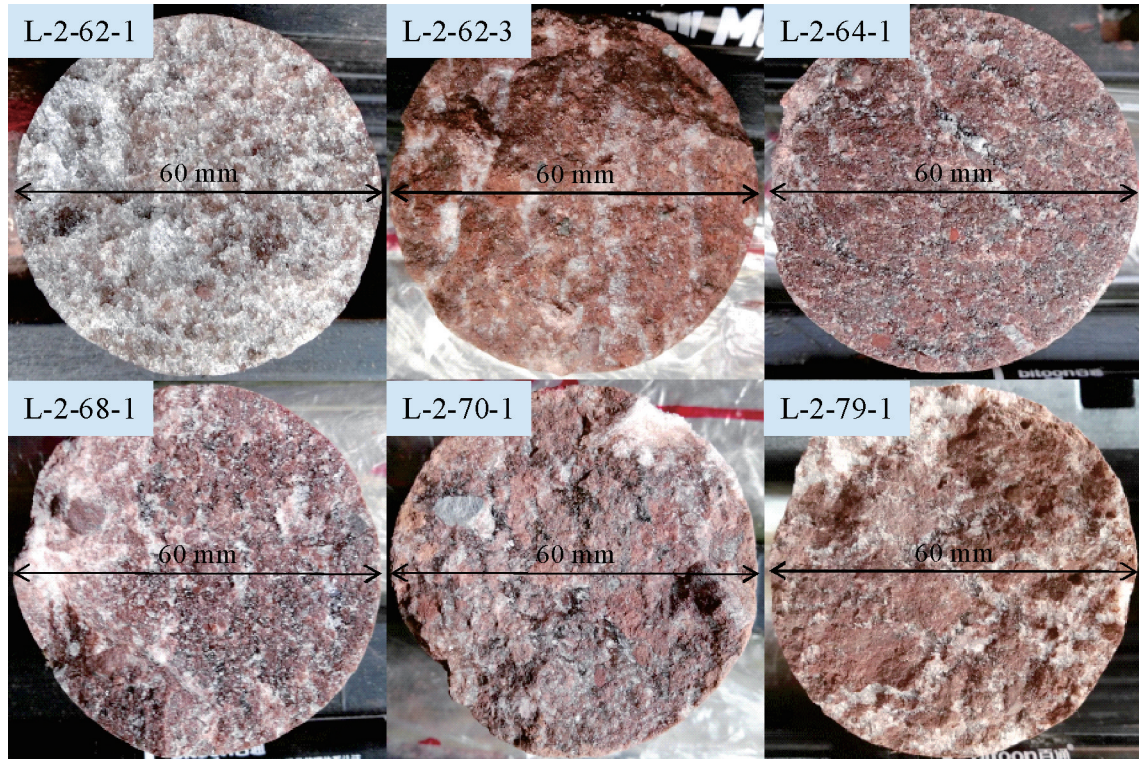


图3 L-2井盐岩的岩心样品

Fig.3 Drill core sample of salt rock in the L-2 well

别,少数为裂隙充填,偶见磨圆较好、粒度0.3~0.6 mm的灰质碎屑。

3.2 Sr同位素测试

本项研究将L-2井含泥砾盐岩样品分为2份,一份用去离子水溶解后取不溶物烘干备全岩锶同位素测试;另一份直接粉碎后备全岩锶同位素测试。MZK-3井质纯盐岩上覆和下伏碎屑岩样品直接粉碎后备全岩锶同位素测试。将所有待测样品粉碎至200目,然后使用氢氟酸和高氯酸提取全岩粉末样品中的锶元素进行同位素测试。

3.3 微量元素测试

样品的微量元素分析采用了等离子体质谱法,具体操作参考《硅酸盐岩石化学分析方法第30部分:44个元素量测定》(GB/T 14506.30-2010)。测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心,仪器型号为NexION300D等离子体质谱仪,环境温度为21℃,环境相对湿度为35%。

4 结果

L-2井样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.708220~0.741999,

主体分布在0.710~0.715(表1)。其中,全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.708220~0.727458,平均值为0.712776;盐岩水不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.711342~0.741999,平均值为0.716574。全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主体小于0.713;盐岩水不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值几乎全部大于0.713(图4)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的最小值为0.708220,出现在青灰色盐岩样品中;5件硬石膏样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值小于0.710的有3件。

全岩样品和盐岩水不溶物样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于方礼桦等(2019)报道的同一探井盐岩去离子水溶解液中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(图5),也明显大于Miao(2018)报道的江城含盐带MZK-3井蒸发岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。

全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与水不溶物含量之间呈现出很好的正相关性,相关系数 R^2 可达0.8155(图6)。这说明水不溶物含量的增加是造成全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值升高的主要原因。水不溶物与全岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的差分布在0.0006~0.0145,平均值为0.0028。在深度500 m以下的样品,这种差异更明显(图5)。

MZK-3井盐岩上覆碎屑岩层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为

表1 思茅盆地L-2井蒸发岩及其水不溶物锶同位素地球化学特征

Table 1 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of the evaporite and its water-insoluble matter of the L-2 well cores in the Simao basin

序号	样品编号	深度/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	序号	样品编号	深度/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	L2-2-1	31.5	硬石膏	0.709827	20	L2-68-3	517.5	泥砾质盐岩	0.711889
2	L2-6-2	64.6	硬石膏	0.720061	21	L2-68-3-R	517.5	泥砾质盐岩	0.713502
3	L2-9-2	103.8	硬石膏	0.710026	22	L2-70-1	523.2	含泥砾盐岩	0.714913
4	L2-12-1	145.1	含砾含泥盐岩	0.710483	23	L2-70-1-R	523.2	含泥砾盐岩	0.717212
5	L2-12-1-R	145.1	含砾含泥盐岩	0.711342	24	L2-70-3	532.3	含泥砾盐岩	0.712150
6	L2-14-1	155.2	含泥含砾盐岩	0.713867	25	L2-70-3-R	532.3	含泥砾盐岩	0.713709
7	L2-14-1-R	155.2	含泥含砾盐岩	0.718996	26	L2-72-2	544.0	泥砾质盐岩	0.711888
8	L2-28-1	231.8	膏质盐岩	0.727458	27	L2-72-2-R	544.0	泥砾质盐岩	0.713326
9	L2-28-1-R	231.8	膏质盐岩	0.741999	28	L2-79-1	571.5	泥砾质盐岩	0.713883
10	L2-38-2	296.5	硬石膏	0.709664	29	L2-79-1-R	571.5	泥砾质盐岩	0.714516
11	L2-X-2	470.2	硬石膏	0.708415	30	L2-89-1	613.4	含泥砾盐岩	0.712377
12	L2-62-1	471.1	含砾盐岩	0.709669	31	L2-89-1-R	613.4	含泥砾盐岩	0.713092
13	L2-64-2-2	495.8	含泥砾盐岩	0.712229	32	L2-89-2	615.8	含泥砾盐岩	0.713866
14	L2-64-3	499.2	含泥砾盐岩	0.711128	33	L2-89-2-R	615.8	含泥砾盐岩	0.714594
15	L2-66-1-1	503.3	青灰色盐岩	0.716567	34	L2-91-1	628.6	含泥砾盐岩	0.712150
16	L2-66-1-2	503.5	青灰色盐岩	0.708220	35	L2-91-1-R	628.6	含泥砾盐岩	0.714243
17	L2-66-2-2	505.7	青灰色盐岩	0.711174	36	L2-91-2	631.8	含泥砾盐岩	0.712176
18	L2-68-2	514.2	泥砾质盐岩	0.712549	37	L2-91-2-R	631.8	含泥砾盐岩	0.713502
19	L2-68-2-R	514.2	泥砾质盐岩	0.715425					

注:样品编号中“R”代表水不溶物。

0.713318~0.723147,平均值为0.717255;盐岩下伏碎屑岩层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.712470~0.738988,平均值为0.719307(表2)。所有碎屑岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于同一钻孔的盐岩样品(图7)。

5 讨论

5.1 锶同位素对钾盐矿床物源和沉积环境的指示

海水中的锶主要有壳源和幔源两种来源:壳源

锶主要来源于大陆地表风化系统($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.7119),幔源锶主要来源于大洋中脊热液循环系统($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.7035)(Dessert et al., 2001; Butterfield et al., 2011; 谢涛等, 2019)。海水中锶同位素的组成特征是这两种来源混合后的综合反映。中生代开始至今,海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值整体呈升高趋势,现今达到最高值0.7093(Veizer and Compston, 1974)。这一值明显低于大陆地表风化系

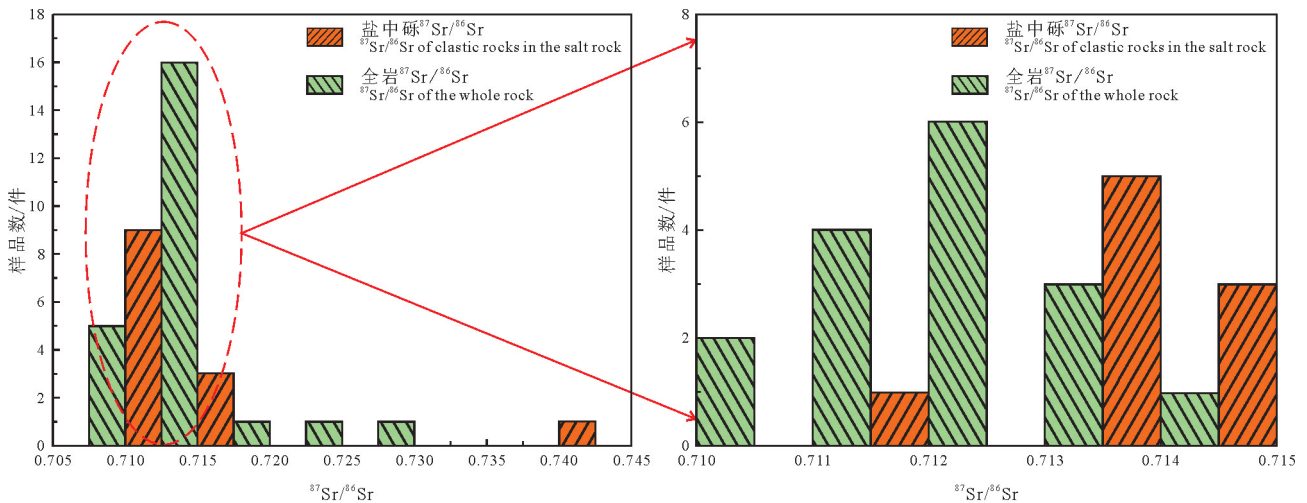


图4 L-2井样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数值分布特征

Fig. 4 Statistical characteristics of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of samples in the L-2 well

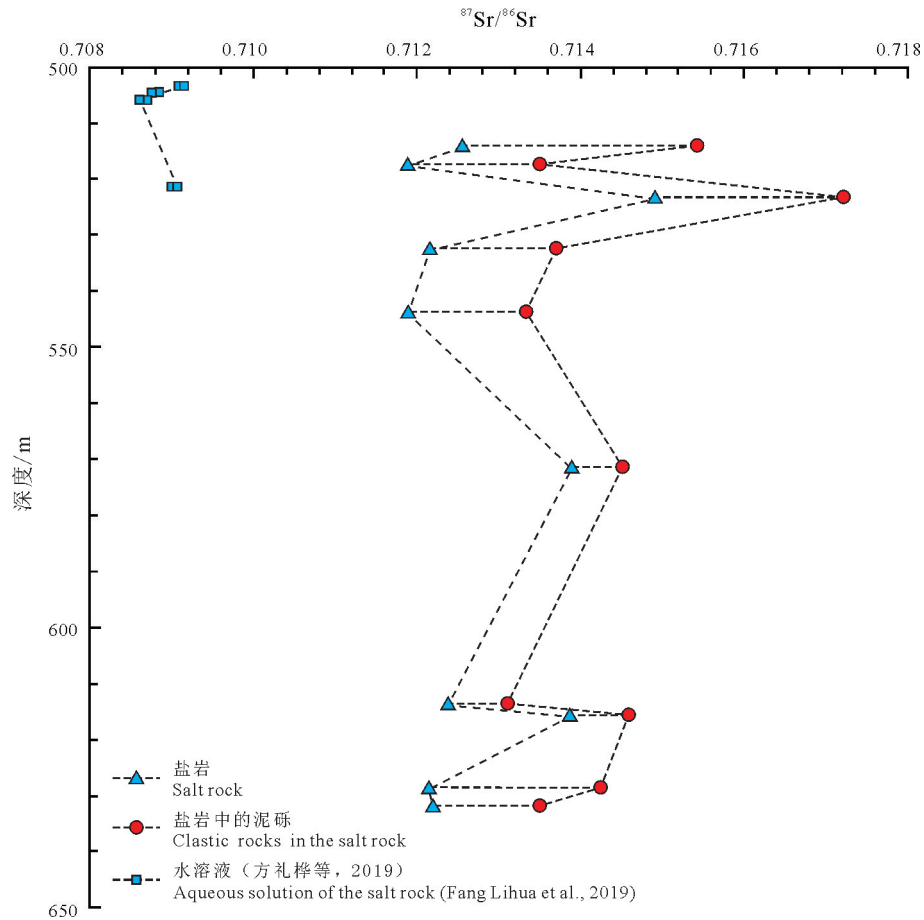


图5 L-2井含泥砾盐岩中锶同位素地球化学特征

Fig. 5 Geochemical characteristics of Sr isotopes of the salt rock containing clastic rocks in the L-2 well

统平均值,因此沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值是区分海相与陆相环境的重要指标,针对蒸发盐岩这一比值还是区分物源的重要指标。

已公开报道的资料显示思茅盆地盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显小于大陆地表风化系统的平均值,成盐成钾物源主体为海水已无争议(郑智杰等,2012;杨尖絮等,2013;Miao,2018)。个别样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于现代海水,例如勐野井钾盐矿红钾 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.7094~0.7111,青钾 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值0.7095~0.7101,绿钾 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的最高值可达0.7094,石盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的最高值可达0.7097(郑智杰等,2012;杨尖絮等,2013),可能是受陆源淡水的影响。这种认识还得到了盐岩中硬石膏硫同位素地球化学特征的佐证(苗忠英等,2019a)。

本文所研究的L2井盐岩水溶液 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.708598~0.709333,平均值为0.708946(方礼桦等,

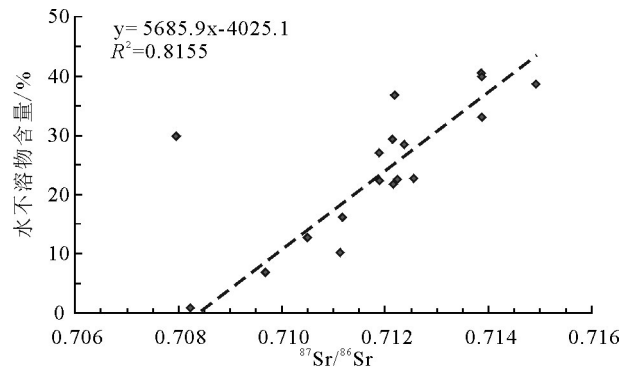


图6 L-2井含泥砾盐岩水不溶物含量与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值之间关系
Fig. 6 The relationship between the content of water insoluble matter and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of the salt rocks containing clastic rocks in the L-2 well

2019),也明显小于大陆地表风化系统的平均值,说明成盐物源主体为海水。

如果L2井盐岩中的泥砾沉积于海洋环境,由于

表2 MZK-3井盐岩上覆和下伏碎屑岩锶同位素地球化学特征
Table 2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of clastic rocks being upon and beneath salt rock layer, in the MZK-3 well

序号	样品编号	深度/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	MZK-3-盐上-1	167.93	含砾灰质泥岩	0.718773
2	MZK-3-盐上-2	168.95	含砾灰质泥岩	0.714730
3	MZK-3-盐上-3	169.87	含砾泥质灰岩	0.713318
4	MZK-3-盐上-4	173.05	含砾泥质灰岩	0.723147
5	MZK-3-盐上-5	175.17	含砾泥质灰岩	0.716305
6	MZK-3-盐下-1	267.35	含砾泥岩	0.738988
7	MZK-3-盐下-2	270.5	含砾灰质泥岩	0.715602
8	MZK-3-盐下-3	273.45	含砾灰质泥岩	0.716897
9	MZK-3-盐下-4	295.6	含砾灰泥岩	0.714399
10	MZK-3-盐下-5	298	含砾灰泥岩	0.712470
11	MZK-3-盐下-6	298.05	灰质泥岩	0.721593
12	MZK-3-盐下-7	305.2	含砾灰泥岩	0.715197

锶在海水中的残留时间(≈ 2.5 Ma)远远长于在海水中混合均匀需要的时间(≈ 1.6 ka)(Eglington et al., 2003; Dickin, 2005),那么保存在碎屑岩中的锶同位素应与海水一致。L2井盐岩中水不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主体为0.713092~0.741999,平均值为0.717010(表3)。这些碎屑沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于大陆地表风化系统的平均值,也明显大于盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,指示盐岩与碎屑岩处于完全不同的锶同位素平

衡体系。MZK-3井盐岩与其上覆和下伏的碎屑岩之间也具有类似的锶同位素地球化学特征差异,同样说明两类岩石形成于不同的锶同位素平衡体系之中。

有学者研究指出,海相碎屑岩受成岩作用的影响, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值随着成岩作用的增加而逐渐增大(黄思静等,2002)。这主要是由于碎屑岩中的 ^{87}Rb 可经 β 衰变转化为稳定的 ^{87}Sr ,所以随着时间的积累沉积岩中放射性成因的 ^{87}Sr 相对含量增加,从而导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的增加。为了消除 ^{87}Rb 衰变对碎屑岩和盐岩水不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的影响,本研究根据公式(1)和(2)恢复了它们原始沉积期的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值:

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}_{\text{现今}} = \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}_{\text{初始}} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}(e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

$$\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} = \frac{Rb_{\text{ppm}}}{Sr_{\text{ppm}}} \times \left(2.690939 + 0.285308 \times \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right) \quad (2)$$

式中 λ 是 ^{87}Rb 的衰变常数,等于 1.42×10^{-11} ; t 是时间,单位为年,根据Wang et al. (2015)凝灰岩锆石测年数据,本文设定其值等于 110×10^6 ; Rb_{ppm} 和 Sr_{ppm} 分别为样品中Rb和Sr的相对含量,单位为 10^{-6} 。

恢复至初始沉积状态的碎屑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.710880~0.727678,平均值为0.712828。这一数值

表3 样品的Rb-Sr含量及校正后的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值
Table 3 Rb and Sr content and adjusted $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values

样品编号	岩性	深度/m	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (实测)	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (校正后)
MZK-3-盐上-2	含砾灰质泥岩	169.0	0.714730	106.91	144.80	0.74	2.14	0.711389
MZK-3-盐下-2	含砾灰质泥岩	270.5	0.715602	61.70	91.40	0.68	1.95	0.712547
MZK-3-盐下-4	含砾灰泥岩	295.6	0.714399	85.08	284.00	0.30	0.87	0.713043
MZK-3-盐下-6	灰质泥岩	298.1	0.721593	71.79	61.70	1.16	3.37	0.716324
MZK-3-盐下-7	含砾灰泥岩	305.2	0.715197	105.78	240.30	0.44	1.27	0.713205
L2-14-1	含泥含砾盐岩	155.2	0.718996	106.00	60.50	1.75	5.07	0.711064
L2-28-1	膏质盐岩	231.8	0.741999	54.60	17.30	3.16	9.16	0.727678
L2-68-2	泥砾质盐岩	514.2	0.715425	92.50	111.00	0.83	2.41	0.711654
L2-68-3	泥砾质盐岩	517.5	0.713502	84.10	158.00	0.53	1.54	0.711094
L2-70-1	含泥砾盐岩	523.2	0.717212	110.00	95.30	1.15	3.34	0.711987
L2-70-3	含泥砾盐岩	532.3	0.713709	91.90	147.00	0.63	1.81	0.710880
L2-72-2	泥砾质盐岩	544.0	0.713326	93.00	173.00	0.54	1.56	0.710894
L2-79-1	泥砾质盐岩	571.5	0.714516	108.00	153.00	0.71	2.04	0.711322
L2-89-1	含泥砾盐岩	613.4	0.713092	92.20	197.00	0.47	1.35	0.710974
L2-89-2	含泥砾盐岩	615.8	0.714594	86.40	128.00	0.68	1.95	0.711539
L2-91-1	含泥砾盐岩	628.6	0.714243	89.10	139.00	0.64	1.86	0.711342
L2-91-2	含泥砾盐岩	631.8	0.713502	111.00	212.00	0.52	1.52	0.711133

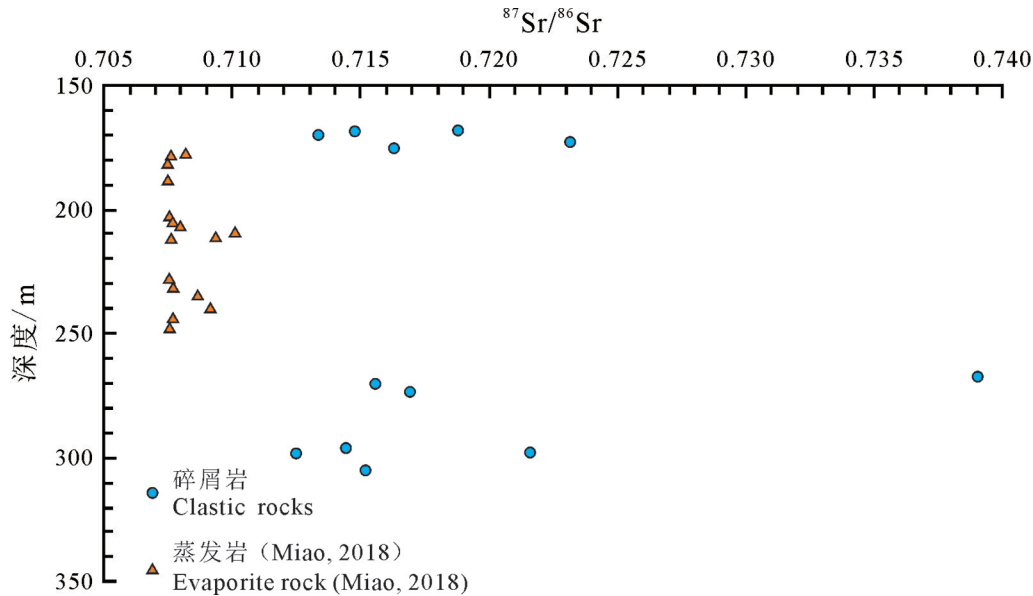


图7 MZK-3井碎屑岩和盐岩锶同位素地球化学特征的差异

Fig.7 Differences $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values between clastic rocks and salt rocks from cores of the MZK-3 well

虽然明显小于现今实测值,但是依然明显大于现今海水的值。而且,距今110 Ma左右的海水, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比现代海水低很多,仅为0.707360。所以,即使考虑 ^{87}Rb 对碎屑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的影响而对其进行初始值恢复,恢复后的数值也明显大于同沉积期的海水,而且也明显大于未经恢复的盐岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。

锶同位素的上述特征说明碎屑岩沉积期的环境与盐源海水无相关性,它是在陆相环境沉积、固结、成岩,形成于本身特有的锶同位素平衡体系之中。前人通过分析钾盐赋矿层位碎屑岩的古生物和沉积学特征,同样认为矿床的上覆和下伏碎屑岩形成于陆相环境(廖宗廷和陈跃昆,2005)。这种认识与碎屑岩锶同位素地球化学特征的表现吻合。

5.2 锶同位素对钾盐成矿模式的指示

通过上文对钾盐成矿物源和沉积背景的分析,似乎可以得出这样一条结论:思茅盆地的钾盐矿床是在陆相沉积盆地背景下,由海侵提供成钾物质来源,在干旱炎热的气候背景下蒸发析盐而成(帅开业,1987;曲懿华,1997;王立成等,2018),此即海源陆相沉积成因说观点的核心内容。这种认识不能合理解释盆地内缺失相应规模的碳酸盐岩和硫酸盐岩这一“缺相”现象。

作为海源陆相沉积成因说的完善和发展,有学者提出盆地内的海水是经过北羌塘局限海浓缩之

后侧向迁移至此,在干旱炎热的气候背景下蒸发析盐而成(马海州等,2019),此即多级盆地海水迁移变质成盐成钾模式观点的核心内容。然而,这种观点很难解释如此大规模、长距离的海水迁移居然没有在地层中留下痕迹,也很难解释盐岩的围岩和盐岩中的碎屑颗粒锶同位素居然没受海水的影响,完全保持陆相环境的特征。

本文基于对盐岩和盐相关碎屑岩锶同位素地球化学特征的分析,结合前人在古生物学、沉积学方面的研究成果认为,思茅盆地钾盐矿床非海侵成因,成盐物源来自于深层,成矿模式为深源浅储。

深源浅储的成矿模式不仅符合盐岩的构造形态特征,而且还很好地解释了海源盐岩与陆相碎屑岩共存、混生的矛盾。此外,深层中侏罗统和平乡组具有明显的海相沉积背景、相应规模的碳酸盐岩和硫酸盐岩、出露地层中发育盐泉,因此具备提供源盐的基本条件。刘璿等(2017)构建了在先拉张、后挤压综合构造应力的作用下和平乡组盐体沿断层底辟至地表的成矿过程。然而,底辟发生的动力机制和成矿过程的刻画等工作还需要进一步完善。

深源浅储的钾盐成矿模式可以概括如图8所示。

首先,深源盐岩流动至地表发生在拉张构造背景之下。这种环境容易形成构造应力薄弱面,可为盐岩底辟至地表提供运移通道。拉张动力的形成

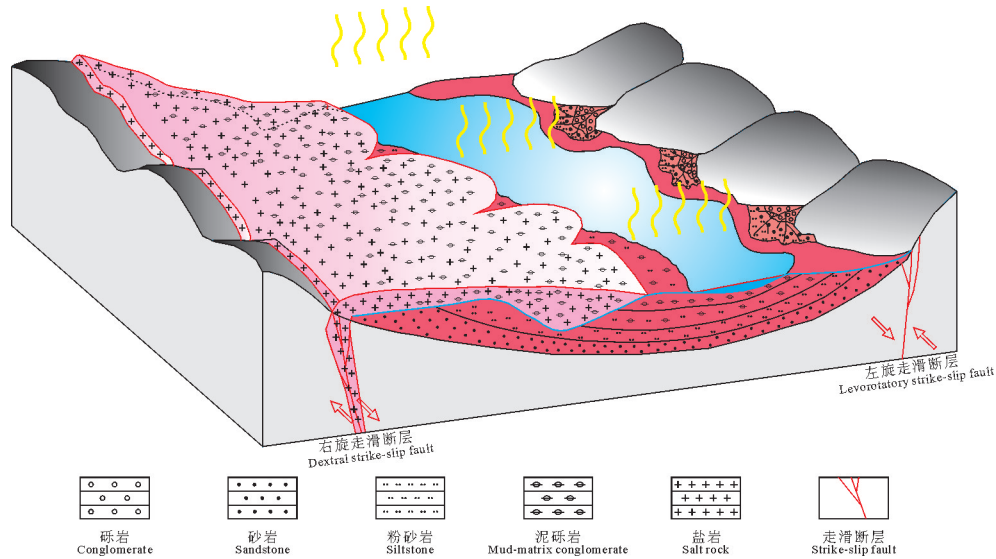


图8 思茅盆地勐野井组沉积期深源盐岩底辟至地表模式图

Fig.8 Pattern of deep salt rock uprise to surface by diapir during sedimentation of the Mengyejing Formation, in the Simao basin

机制是由中特提斯闭合过程中陆块碰撞、挤压引起的走滑拉分所引起的。

其次,深源盐岩塑性流动至地表的时间为勐野井组沉积期。勐野井组沉积于相对封闭的陆相盆地,干旱炎热的古气候背景使沉积环境的水体较浅、盐度较高,但是尚未达到析盐阶段,输入盆地的碎屑颗粒粒度也较细,主岩性为粉砂质泥岩、钙质泥岩、膏质泥岩。这些碎屑沉积物进入早成岩阶段A期之后,受构造和水动力双重作用的破坏形成砾状沉积物。山前塑性流动至地表的盐岩在重力作用下由高处往低处流动,在此过程中裹挟了勐野井组砾状沉积物,使其成为现今盐体组成的一部分(图3)。流至汇水盆地的盐岩被溶解重新结晶,形成了纯度较高的盐岩(图9)。勐野井组碎屑沉积物继续汇入沉积盆地,在相同的沉积环境和古气候条件下逐渐覆盖在盐岩之上,形成了保护盐岩免受淋滤的上覆保护层。

第三,受新生代印度板块与欧亚大陆碰撞引起更大规模、更高强度走滑拉分构造活动的影响,就位于现今产层的钾盐矿床发生了调整改造。这种调整改造具有引起盐体发生物理和化学变化的双重属性。物理变化表现在盐体的揉皱变形;化学变化表现在盐层中存在重溶—迁移—再结晶形成的脉状红钾和绿钾。

6 结 论

(1)思茅盆地盐岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值具有大于侏罗纪—白垩纪海水而小于大陆地表风化系统平均值的特征。这说明盐岩物源主体为海水,但是在成盐过程中有陆源淡水混入母源海水。

(2)思茅盆地盐相关碎屑岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于大陆地表风化系的平均值。即使考虑 ^{87}Rb 对碎屑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的影响而对其进行初始值恢复,恢复后的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也明显大于沉积期的海水,而且也明显大于未经恢复的盐岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。这说明碎屑岩沉积于陆相环境,没有与盐体形成统一的锶同位素平衡体系。

(3)盐体与盐相关碎屑岩各自独立的锶同位素平衡体系指示盐相关碎屑岩在沉积、成岩过程中未受盐源海水的影响,它形成于相对封闭的陆相盆地、干旱炎热的古气候背景,在演化至早成岩阶段A期后受构造和水动力双重作用的破坏形成了砾状沉积物。

(4)深源浅储的钾盐矿床成因模式可以较合理地解释盐体与盐相关碎屑岩之间相互独立的锶同位素平衡体系,也可以合理地解释盐体现今的构造形态、分布模式以及矿物、化学和同位素组成特征。这种模式认为成钾物质来源为中侏罗统海相

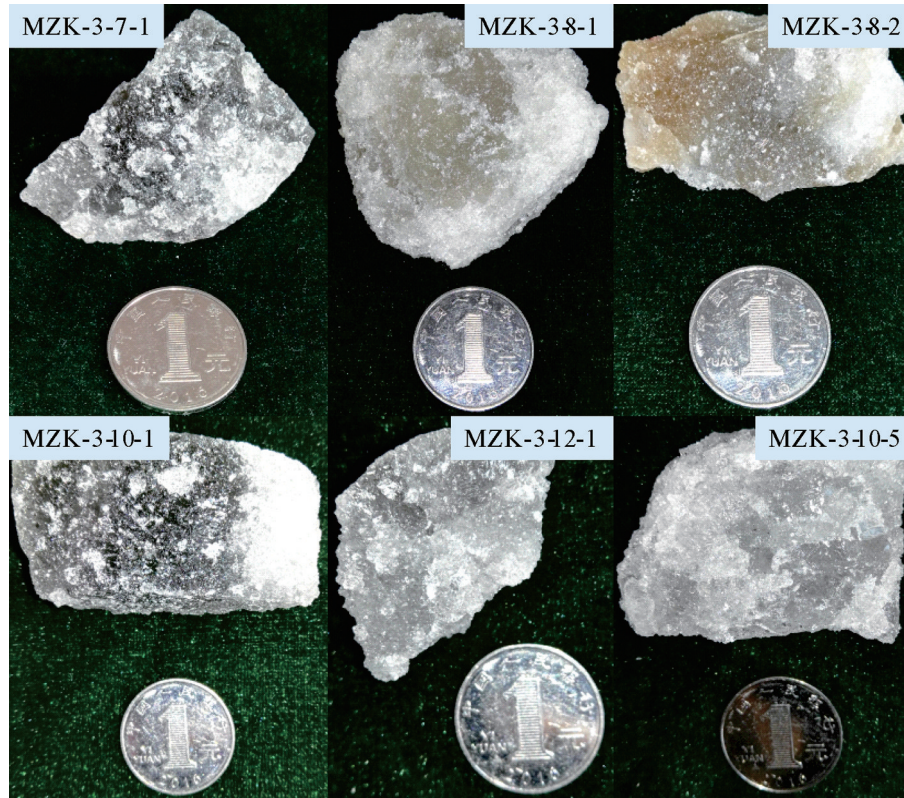


图9 思茅盆地 MZK-3 井纯度较高的盐岩样品

Fig.9 High purity salt rock samples of MZK-3 well, in the Simao basin

地层,成钾物质由深至浅运移的通道为走滑拉分形成的断层,成钾物源出露至地表的时间为勐野井组沉积期。

References

- Butterfield D A, Nelson B K, Wheat C G, Mottl M J, Roe K K. 2011. Evidence for basaltic Sr in midocean ridge-flank hydrothermal systems and implications for the global oceanic Sr isotope balance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(22): 4141-4153.
- Chen Yaokun, Liao Zongting, Wei Zhihong, Li Minghui. 2004. Characteristics and tectonic evolution of the Lanping-Simao mesozoic basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(3): 219-222(in Chinese with English abstract).
- Dessert C, Dupr B, Franois L M, Schott J, Gaillardet J, Chakrapani G, Bajpai S. 2001. Erosion of deccan traps determined by river geochemistry: Impact on the global climate and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3): 459-474.
- Dickin A P. 2005. *Radiogenic Isotope Geology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Eglington B M, Talma A S, Marais S, Matthews P E, Dixon J G P. 2003. Isotopic composition of pongola supergroup limestones from the buffalo river gorge, south Africa: Constraints on their regional depositional setting[J]. *South African Journal of Geology*, 106(1): 1-10.
- Fang Lihua, Xia Zhiguang, Li Weiqiang, Yin Hongwei, Miao Zhongying, Liu Bin, Shao Chunjing. 2019. Sr isotope characteristics of salt rocks in Simao Basin, southwestern Yunnan and its implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(5): 679-685(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, Shen Licheng, Wu Wenhui. 2002. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 359-366(in Chinese with English abstract).
- Liao Zongting, Chen Yaokun. 2005. Nature and evolution of Lanping-Simao basin prototype [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33(11): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ying, Zheng Mianping, Zhang Zhen, Yu Changqing, Miao Zhongying, Zhang Kai, Gao Lei. 2017. Salt tectonic and prospecting potassium research in Simao Basin [J]. *Geological Review*, 63(3): 568-580 (in Chinese with English abstract).
- Ma Haizhou, Li Yongshou, Cheng Huaide, Qin Xiwei, Zhang Xiyi, Miao Weiliang, Xu Jianxin, Li Binkai, Hai Qingyu. 2019. Metallogenic model and processes of the cretaceous potassium-bearing evaporites involving Changdu, Lanping-Simao and Khorat Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 27(1): 1-11 (in Chinese

- with English abstract).
- Metcalf I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 551–566.
- Miao Z Y. 2018. New Sr isotope evidence to support the material source of the mengyejing potash deposit in the Simao Basin from ancient marine halite or residual sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(2): 866–867.
- Miao Zhongying, Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Zhang Zhen, Gao Yunzhi. 2019a. Geochemistry and sedimentology significance of sulfur isotope in the evaporite: A case from the MZK–3 well in the Simao Basin, southwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(5): 1166–1179 (in Chinese with English abstract).
- Miao Zhongying, Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Zhang Zhen, Liu Jianhua, Gao Yunzhi, Zhai Xuefeng. 2019b. Sulfur isotope geochemistry of the Lower Cretaceous evaporite and its significance for potash mineralization in the Simao basin, southwest China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(2): 279–290 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yihua. 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): 10–13 (in Chinese with English abstract).
- Shuai Kaiye. 1987. Geologic– tectonic evolution and evaporite formation of Mesozoic–Cenozoic era in Yunnan[J]. *Geoscience*, 1(2): 207–229 (in Chinese with English abstract).
- Sone M, Metcalf I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo– Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 340: 166–179.
- Tan Fuwen. 2002. The sedimentary characteristics of Simao triassic rear arc foreland basin, Yunnan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 560–567 (in Chinese with English abstract).
- Veizer J, Compston W. 1974. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of seawater during the Phanerozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38: 1461–1484.
- 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[J]. *Cretaceous Research*, 52: 238–250.
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Shen Lijian, Bo Ying. 2018. Research advances in potash forming of the Simao Basin, Eastern Tethyan Realm[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1707–1723 (in Chinese with English abstract).
- Wu Nanping, Jiang Shaoyong, Liao Qilin, Pan Jiayong, Dai Baozhang. 2003. Lead and sulfur isotope geochemistry and the ore sources of the vein– type copper deposits in Lanping– Simao Basin, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 799–807 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tianzhu. 1981. Origin of the Mengyejing potash deposit in Yunnan[J]. *Chemical Geology*, (1): 1–8 (in Chinese).
- Xie Tao, Hu Shixue, Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Huang Jinyuan, Wen Wen. 2019. Composition and evolution of strontium isotope from the fossiliferous layers of the Luoping biota, Yunnan[J]. *Geology in China*, 46(3): 642–650 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, Li Huaqi, Cai Zhihui, Yan Zhen, Ma Changqian. 2013. Paleo–Tethys system and accretionary orogen in the Tibet plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianxu, Yin Hongwei, Zhang Zhen, Zheng Mianping. 2013. Geologic setting of the potassium in the Lanping– Simao Basin, Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 633–640 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xin, Zheng Jianjing, Liu Xingwang, Su Long, Liu Yuhu, Liu Yanhong. 2011. Dynamic basin– orogen coupling and sequence response process: Taking Lanping– Simao Basin, western Yunnan as a case[J]. *Geoscience*, 25(3): 447–455 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Pan Guitang, Wan Fang, Li Xingzhen, Wang Fangguo. 2006. Tectonic facies along the Nujiang– Lancangjiang– Jinshajiang orogenic belt in southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, Peng Yuanqiao. 1999. South China defined as part of tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyun, Sun Zhiming, Yang Zhenyu, Liang Qizhong. 1999. Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic results from the Lanping Basin and its geological implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(5): 648–659 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Zhang Zhen, Yin Hongwei, Tan Xiaohong, Yu Changqing, Shi Linfeng, Zhang Xuefei, Yang Jianxu, Jiao Jian, Wu Guopeng. 2014. A new viewpoint concerning the formation of the Mengyejing potash deposit in Jiangcheng, Yunnan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 11–24 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Zhang Zhen, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Yin Hongwei. 2012. Potash exploration characteristics in China: New understanding and research progress[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 280–294 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhijie, Yin Hongwei, Zhang Zhen, Zheng Mianping, Yang Jianxu. 2012. Strontium isotope characteristics and the origin of salt deposits in Mengyejing, Yunnan Province, SW China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(6): 719–727

(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈跃昆, 廖宗廷, 魏志红, 李明辉. 2004. 兰坪—思茅中生代盆地的特征及构造演化[J]. 石油实验地质, 26(3): 219–222.
- 方礼桦, 夏芝广, 李伟强, 尹宏伟, 苗忠英, 刘斌, 邵春景. 2019. 滇西南思茅盆地盐岩 Sr 同位素特征及其对区域成盐作用的启示[J]. 高校地质学报, 25(5): 679–685.
- 黄思静, 石和, 张萌, 沈立成, 武文慧. 2002. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用[J]. 沉积学报, 20(3): 359–366.
- 廖宗廷, 陈跃昆. 2005. 兰坪—思茅盆地原型的性质及演化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(11): 109–113.
- 刘瓔, 郑绵平, 张震, 于常青, 苗忠英, 张凯, 高磊. 2017. 滇西南思茅盆地盐构造研究及找钾初探[J]. 地质论评, 63(3): 568–580.
- 马海州, 李永寿, 程怀德, 秦西伟, 张西营, 苗卫良, 许建新, 李斌凯, 海擎宇. 2019. 昌都—兰坪—呵叻成盐带白垩纪成盐成钾过程[J]. 盐湖研究, 27(1): 1–11.
- 苗忠英, 郑绵平, 张雪飞, 张震, 高运志. 2019a. 蒸发岩中硫同位素的地球化学特征及其沉积学意义——以思茅盆地 MZK-3 井为例[J]. 地质学报, 93(5): 1166–1179.
- 苗忠英, 郑绵平, 张雪飞, 张震, 刘建华, 高运志, 翟雪峰. 2019b. 思茅盆地下白垩统蒸发岩硫同位素地球化学特征及其钾盐成矿意义[J]. 地球学报, 40(2): 279–290.
- 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): 10–13.
- 帅开业. 1987. 云南中、新生代地质构造演化与蒸发岩建造[J]. 现代地质, 1(2): 207–229.
- 谭富文. 2002. 云南思茅三叠纪弧后前陆盆地的沉积特征[J]. 沉积学报, 20(4): 560–567.
- 王立成, 刘成林, 沈立建, 伯英. 2018. 东特提斯域思茅盆地钾盐成矿研究进展[J]. 地质学报, 92(8): 1707–1723.
- 吴南平, 蒋少涌, 廖启林, 潘家永, 戴宝章. 2003. 云南兰坪—思茅盆地脉状铜矿床铅、硫同位素地球化学与成矿物质来源研究[J]. 岩石学报, 19(4): 799–807.
- 吴天柱. 1981. 云南勐野井钾盐矿床的成因[J]. 化工地质, (1): 1–8.
- 谢韬, 胡世学, 周长勇, 张启跃, 黄金元, 文芝. 2019. 云南含罗平生物群层位锶同位素组成与演化[J]. 中国地质, 46(3): 642–650.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 李化启, 蔡志慧, 闫臻, 马昌前. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 29(6): 1847–1860.
- 杨尖絮, 尹宏伟, 张震, 郑绵平. 2013. 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, 37(4): 633–640.
- 杨鑫, 郑建京, 刘兴旺, 苏龙, 刘玉虎, 刘燕红. 2011. 动态“盆山”耦合关系及其层序响应过程: 以滇西兰坪—思茅盆地为例[J]. 现代地质, 25(3): 447–455.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 24(1): 1–12.
- 尹福光, 潘桂棠, 万方, 李兴振, 王方国. 2006. 西南“三江”造山带大地构造相[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 33–39.
- 尹济云, 孙志明, 杨振宇, 梁其中. 1999. 滇西兰坪盆地白垩纪—早第三纪古地磁结果及其地质意义[J]. 地球物理学报, 42(5): 648–659.
- 郑绵平, 张震, 尹宏伟, 谭筱虹, 于常青, 施林峰, 张雪飞, 杨尖絮, 焦建, 武国朋. 2014. 云南江城勐野井钾盐成矿新认识[J]. 地球学报, 35(1): 11–24.
- 郑绵平, 张震, 张永生, 刘喜方, 尹宏伟. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280–294.
- 郑智杰, 尹宏伟, 张震, 郑绵平, 杨尖絮. 2012. 云南江城勐野井盐类矿床 Sr 同位素特征及成盐物质来源分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 48(6): 719–727.