

思茅盆地 MK-3 井上盐段成盐期前后微量元素地球化学特征及其古环境指示意义

宋 高¹⁾, 苗忠英¹⁾, 杜少荣¹⁾, 李新民²⁾

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) 云南省地质调查院, 云南昆明 650051

摘 要: 本文通过对比分析思茅盆地 MK-3 钻孔上盐段成盐期前后碎屑沉积物微量元素及稀土元素的地球化学特征, 探讨了思茅盆地中生代盐层形成前后的气候环境变化规律。结果表明, 主要微量元素中除 Mn 元素之外, 其余元素在成盐期之前的平均含量均大于成盐期之后, 指示微量元素富集有利于盐矿床的形成。以球粒陨石标准化样品稀土元素的相对含量, 结果显示轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损, 标准化曲线呈现左高右低的“L”型, 表明其物质来源主体为陆源。MK-3 钻孔 29 个岩心样品的 δCe 值均大于 0.9, 均值约为 1.0, 结合岩芯样品主体呈现棕红色, 应指示一种弱氧化的沉积环境。综合沉积物的 Rb/K 和 Sr/Cu 比值分析, 我们认为在成盐期之前, 该区气候炎热干旱、蒸发强烈, 水体盐度为半咸水, 具备析盐、成钾的古气候和古环境条件。成盐期之后, 该区古盐度处于淡水-咸水交替的状态, 伴有三段温暖湿润期和三段极端炎热干旱期。后期淡水补给持续增强, 导致沉积盆地内在上盐段蒸发析盐之后只发育碎屑岩。

关键词: 思茅盆地; 碎屑岩; 微量元素; 地球化学; 古环境

中图分类号: P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.011201

Geochemical Characteristics of Trace Elements before and after the Upper Salt Forming Period of the MK-3 Core, Simao Basin and Their Paleoenvironmental Implications

SONG Gao¹⁾, MIAO Zhong-ying¹⁾, DU Shao-rong¹⁾, LI Xin-min²⁾

1) MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051

Abstract: We discuss the paleoenvironment changes before and after the Mesozoic salt forming period in the Simao Basin by comparing the geochemical characteristics of trace elements in clasticite along the upper salt section of the MK-3 core. The average contents of major trace elements, except Mn, were higher before the salt forming period than after it, indicating that the enrichment of trace elements is beneficial for the formation of salt deposits. The chondrite normalized relative content of rare earth elements show a pattern of light rare earth element enrichment with an incline to the right, suggesting that the main material source is terrigenous. δCe values of all 29 samples in MK-3 are greater than 0.9, with an average value of 1.0. Considering the brownish red core lithology, this possibly indicates a weak oxidative sedimentary environment. On the basis of the ratios of Rb/K and Sr/Cu, we believe that before the salt forming period, a brackish water environment with hot climate and high evaporation existed, which provided necessary conditions for salt and potash deposition. After the salt forming period, fresh and saline water conditions alternated, characterized by three warm and humid stages and three extreme hot and drought stages. The continuous freshwater supply resulted in well-developed clasticite after

本文由中国地质调查局地质大调查项目“思茅盆地中生代海相钾盐资源调查评价”(编号: DD20201115)资助。

收稿日期: 2021-10-25; 改回日期: 2022-01-07; 网络首发日期: 2022-01-13。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 宋高, 女, 1986 年生。助理研究员。主要从事微体古生物与全球变化研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999548。E-mail: songgao1985128@126.com。

the upper salt layer in the basin.

Key words: Simao Basin; clasolite; trace elements; geochemical; paleoenvironment

思茅盆地发育了中国唯一的具有工业开发价值的古代氯化物型固体钾盐矿床。钾盐是生产钾肥的基础原料, 全球约有 90% 的钾盐产量用于生产钾肥(郑绵平等, 2015)。中国对钾肥的需求量非常大(郑绵平等, 2010), 但中国的钾盐资源却严重匮乏。目前在思茅盆地发现的勐野井钾盐矿资源量仅 0.17 亿 t(李文光, 1994; 曲一华等, 1998; 郑绵平等, 2012), 远不能满足国家对钾盐资源的需求。而与思茅盆地相近的呵叻盆地却发育了世界大型钾盐矿床, 钾盐资源量达到 420 亿 t(颜茂都等, 2021)。诸多研究证明两个盆地含钾盐建造具有类似的沉积特征、成盐层位、盐矿物组合以及母液卤水来源等(曲懿华, 1997; 陈跃昆等, 2004; 钟晓勇等, 2012; 秦占杰等, 2013; 苗忠英等, 2019a, b, 2020), 指示两个盆地的钾盐矿可能存在密切的构造和物源关系, 这对思茅盆地开展钾盐勘探工作具有良好的借鉴作用。但巨型钾盐矿的形成是特定构造、气候和物源条件三种要素耦合的结果, 需要有大型封闭盆地、持续平衡的海水补给和长期干旱的气候(颜茂都等, 2021), 而

目前对思茅盆地成盐成钾阶段及其前后的精细古气候研究尚不完善, 亟需建立精细的古气候演化序列, 用以支撑盐类矿床成因机理的解析。本文对思茅盆地 MK-3 钻孔成盐期前后的 29 件碎屑沉积物样品进行了微量元素测试, 通过研究样品的微量元素和稀土元素地球化学特征, 结合前人的研究成果, 探讨了思茅盆地中生代成盐期前后的气候环境演化特征。

1 地质背景

思茅盆地位于特提斯构造域的东南端, 青藏高原的东南缘, 是印支地块北延的部分(曲一华等, 1998; Metcalfe, 2013), 构造背景复杂。石炭纪之前其可能是扬子地块的一部分(李朋武等, 2005), 石炭纪之后由于古特提斯洋的俯冲作用, 导致印支地块从扬子地块上分离(从柏林等, 1993; 王冬兵等, 2012)。到晚三叠世, 思茅地块东西两侧的古特提斯洋完全闭合, 进入了以陆内沉积环境为主的演化阶段(李朋武等, 2005; 范蔚茗等, 2009)。而新生代以

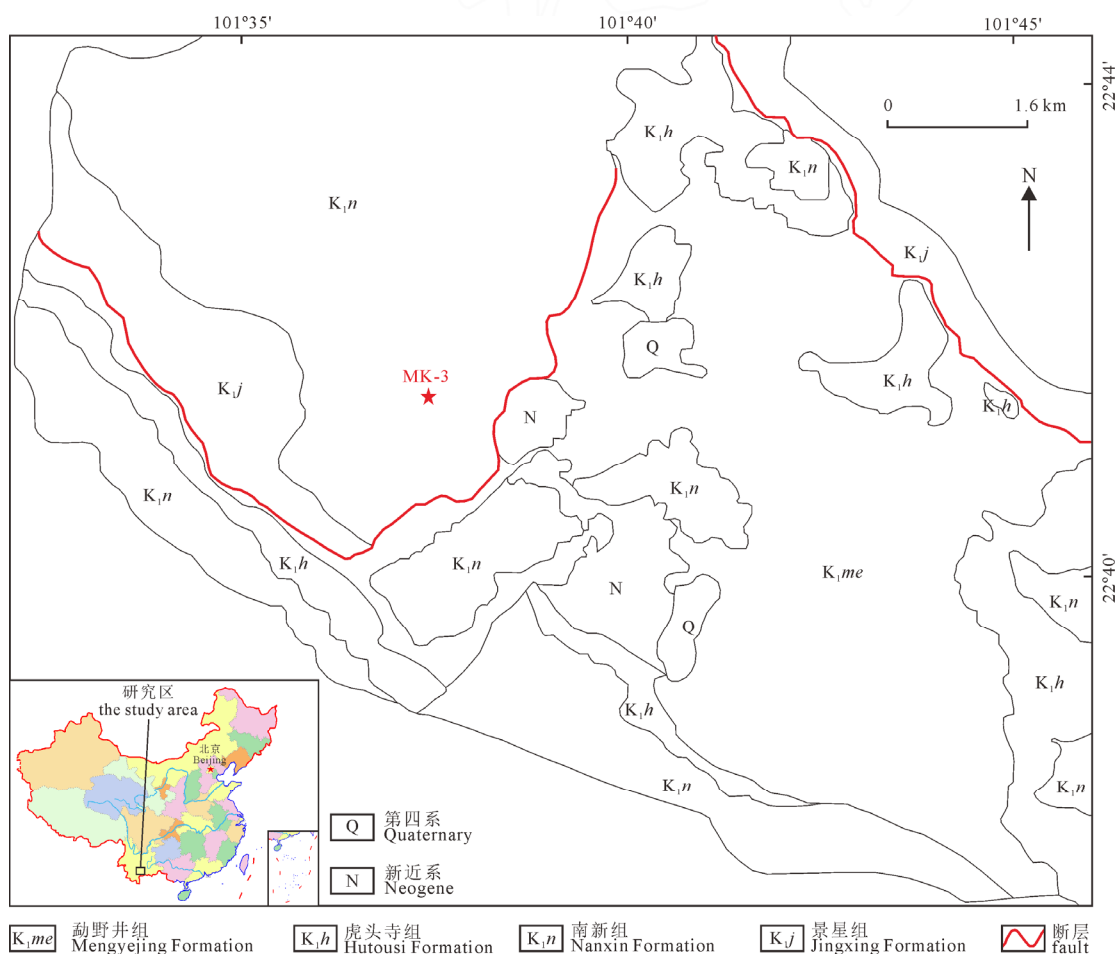


图 1 MK-3 钻孔地理位置图(地质简图据郑智杰等, 2012 修改)

Fig. 1 Geographical position of MK-3 (modified from ZHENG et al., 2012)

表 1 MK-3 钻孔样品编号、岩性及深度表
Table 1 Sample number, lithology, and depth in MK-3

样品编号	深度/m	岩性	样品编号	深度/m	岩性
MK-3-22	2 458.4	棕红色泥岩	MK-3-37	2 360.8	灰色膏质泥岩
MK-3-23	2 456.9	紫红色泥质粉砂岩	MK-3-38	2 359.5	紫红色泥岩
MK-3-24	2 453.8	棕红色泥岩	MK-3-39	2 358.5	紫红色泥岩
MK-3-25	2 450.9	棕红色泥岩	MK-3-40	2 354.8	暗紫红色粉砂质泥岩
MK-3-26	2 448.5	棕红色石膏砾岩	MK-3-41	2 350.4	暗紫红色泥岩
MK-3-27	2 391.2	棕红色泥质粉砂岩	MK-3-42	2 347.1	灰色膏质泥岩
MK-3-28	2 389.4	灰色膏质泥岩	MK-3-43	2 345.3	棕红色泥岩
MK-3-29	2 386.4	灰色膏质泥岩	MK-3-44	2 342.4	棕红色泥岩
MK-3-30	2 381.2	灰绿色膏质泥岩	MK-3-45	2 338.3	紫红色泥质粉砂岩
MK-3-31	2 377.4	灰绿色膏质泥岩	MK-3-46	2 335.9	紫红色泥质粉砂岩
MK-3-32	2 373.6	灰绿色膏质泥岩	MK-3-47	2 330.2	紫红色泥质粉砂岩
MK-3-33	2 370.6	灰绿色膏质泥岩	MK-3-48	2 326.5	紫红色泥岩
MK-3-34	2 369.1	灰绿色膏质泥岩	MK-3-49	2 324.6	紫红色泥岩
MK-3-35	2 364.6	紫红色粉砂质泥岩	MK-3-50	2 318.5	紫红色泥岩
MK-3-36	2 363.3	紫红色粉砂质泥岩			

来,受印度板块俯冲的影响,兰坪—思茅盆地发生了一系列走滑和逆冲推覆构造(陈海泓等,1993;从柏林等,1993;李兴振等,1998),使得盆地从近东西走向顺时针旋转成现今的北北西走向。区内主要发育一套中生代沉积地层。其中,下三叠统缺失,中上三叠统主要为碎屑岩、碳酸盐岩沉积(尹福光等,2006);侏罗系发育一套典型红层,主要岩性为碎屑岩(曲一华等,1998;廖宗廷和陈跃昆,2005;郑绵平等,2014);白垩系为一套典型河湖相砂岩、页岩和砾岩,且普遍缺失上统(陈跃昆等,2004)。

2 材料与方法

MK-3 钻孔(101°6'2"E, 24°2'47"N)位于思茅盆地东南部宝藏乡境内,距普洱市江城约 26 km(图 1)。钻孔周边出露下白垩统南新组灰紫色细-中砂岩,与下伏景星组整合接触,与上覆虎头寺组整合接触,与上覆勐野井组和新近系断层接触。该区平均海拔约 800 m,降水充沛,每年 6—10 月为雨季,年降水量约 2200 mm,气候温暖,年均气温约 24℃。

MK-3 钻孔共钻遇两段盐层,本文主要研究上段盐层成盐期前、后的气候环境变化特征。上段盐层产出层位为 2396.9—2442.5 m,为一套巨厚层灰黑色、浅灰色夹浅灰红色粗-细晶盐岩,夹薄层棕红色含盐泥条带。成盐期之前 2449.2—2460 m,主要为棕红色泥岩与紫红色粉砂岩互层,临近盐层底部 2442.5—2449.2 m 为一层浅棕红色石膏砾岩,夹薄层灰黑色石膏层和泥岩层。成盐期之后 2318.5—2392.5 m,主要为灰紫色、浅灰紫色粉砂岩与棕红色、紫红色泥岩互层,夹两层粉砂质泥岩和两层泥质粉砂岩,厚度为 2~5 m 不等,其中,2346.1—2349.9 m、2360.1—2361.4 m、2366.5—2383.7 m 和 2384.7—

2390.3 m 四段为灰色、灰绿色膏质泥岩;临近盐层顶部 2392.5—2396.9 m 为灰白色石膏砾岩,含少量砂砾和泥砾,泥质胶结。本文采集了盐层上部 2318.5—2391.2 m 和盐层下部 2448.5—2458.4 m 的碎屑岩岩心样品 29 件,取样间距 1~5 m,具体样品编号及采样深度见表 1。

全岩化学前处理与微量元素测定在南京聚谱检测科技有限公司完成。样品消解流程如下:(1)称取 40 mg 全岩粉末置于聚四氟乙烯溶样弹中,加入 0.5 mL 浓硝酸与 1.0 mL 浓氢氟酸,溶样弹经钢套密封后放入 195℃烘箱加热 3 天,确保彻底消解。盛放消解液的溶样弹在电热板上蒸至湿盐状,加入 1 mL 内标 Rh,再加入 5 mL 15wt%硝酸,重新密闭溶样弹,放入 195℃烘箱过夜。(2)约 6 mL 消解液转移至离心管中,经天平称重,取一部分适当稀释(相对于固体重量,稀释因子 2000 倍),以溶液雾化形式送入 Agilent 7700x ICP-MS 测定微量元素。美国地质调查局(USGS)岩石类标物(玄武岩 BHVO-2、BCR-2、安山岩 AGV-2、流纹岩 RGM-2、花岗闪长岩 GSP-2)作为微量元素的质控盲样。这些地质标物的实测值与德国马普学会地质与环境标物数据库 GeoReM 进行对比(Jochum and Nohl, 2008)。

3 结果与讨论

3.1 微量元素分布特征

微量元素中 Ti 含量最高,平均为 3693×10^{-6} ,其次为 Mn,平均含量为 831×10^{-6} ,V、Rb、Sr、Zr、Ba 等微量元素的平均含量也较高,分别为 103×10^{-6} 、 131×10^{-6} 、 120×10^{-6} 、 146×10^{-6} 和 307×10^{-6} ,其他微量元素含量均低于 70×10^{-6} 。图 2 为 MK-3 钻孔上盐段成盐期前、后沉积物主要微量元素含量

的变化特征图。从图中可以看出,除 Mn 元素之外,各主要微量元素在成盐期之前的含量均高于成盐期之后,元素富集为盐矿及钾盐矿的形成奠定了必要的基础。Mn 是一种喜湿型元素(程涌等, 2019),其在成盐期之前的含量小于成盐期之后应指示成盐期之前的气候较成盐期之后更加干旱,满足盐矿形成的必要的气候条件。

利用上地壳微量元素平均值(鄢明才等, 1997)对测试结果进行标准化处理,得到各微量元素的富集系数。图 3 显示了 MK-3 钻孔沉积物各微量元素富集系数的变化趋势,从图中可以看出, B、Cr、Ni 和 Cs 元素相对富集,富集系数分别为 2、2.05、1.75 和 1.71。Cu、Sr、Nb、Ba、Hf 和 Ta 元素富集系数在 0.35~0.62,呈现较明显的亏损状态,其他微量元素接近上地壳元素丰度。

3.2 古盐度

古盐度是分析古沉积环境的一项重要研究内容,通常作为地质历史时期海陆变迁的一个重要参数。判别古盐度的指标有很多(刘刚和周东升, 2007; 范玉海等, 2012; 彭雪峰等, 2012),本文主要采用 Rb/K 比值来进行判断。一般认为, $Rb/K > 0.006$ 时指示咸水环境, $Rb/K < 0.004$ 时指示淡水环境, $0.004 < Rb/K < 0.006$ 时为半咸水环境(王益友等, 1979)。图 4 显示了 MK-3 钻孔沉积物的 Rb/K 比值变化趋势。从图中可以看出,在成盐期之前, Rb/K 比值变化于 0.004 6~0.005 1,表明此时该区主要为半咸水相沉积。成盐期之后,古盐度变化较大,以 Rb/K 比值在 2 389.4 m、2 377.4 m 和 2 326.5 m 处的三个峰值(0.007 8、0.009 和 0.009)以及在 2 381.2 m、2 350.4 m 和 2 318.5 m 处的三个谷值(0.002 1、0.000 7 和

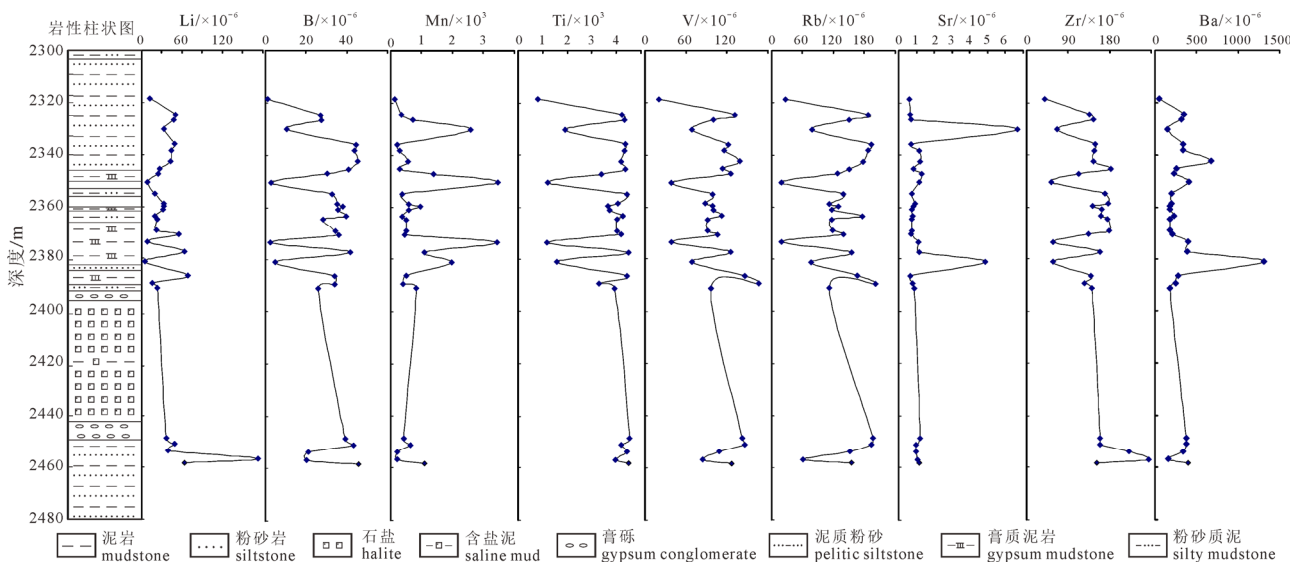


图 2 MK-3 钻孔沉积物主要微量元素含量分布图
Fig. 2 Distribution of the main trace elements in MK-3

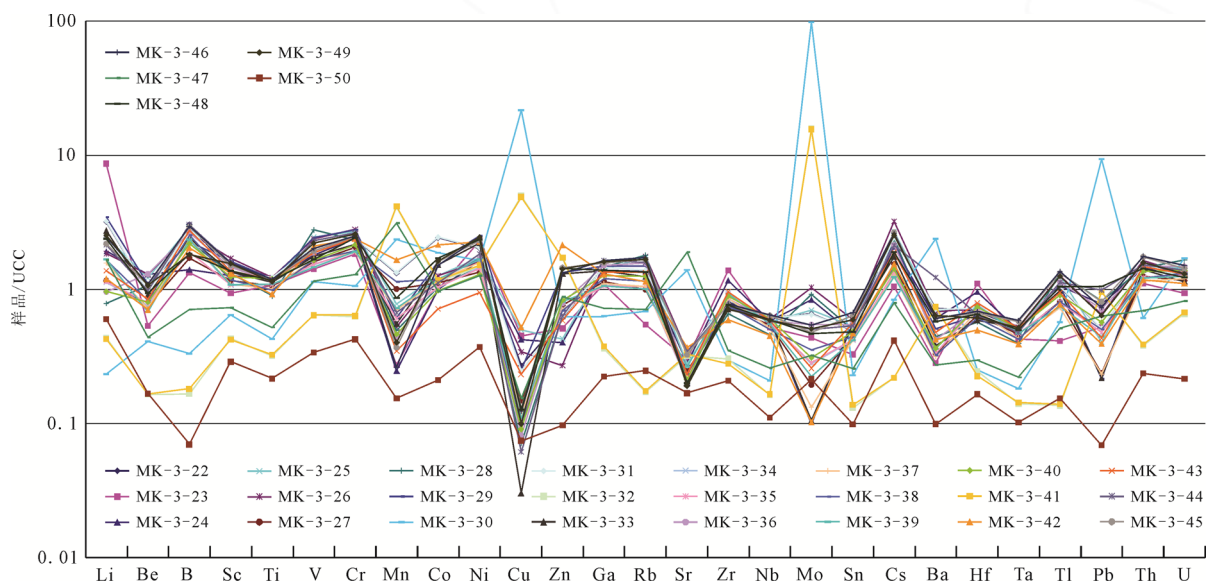


图 3 微量元素 UCC 标准化蛛网图(数据引自鄢明才等, 1997)
Fig. 3 Spider diagram of UCC-normalized trace elements of samples (after YAN et al., 1997)

0.000 7)可将沉积环境分为六个阶段。第一阶段从 2 391.2–2 389.4 m, Rb/K 比值呈明显上升趋势, 最高达到 0.007 8, 高于边界值 0.006, 指示咸水相沉积, 表明成盐期之后较短的一段时间内古水体的盐度仍然较高。第二阶段从 2 389.4–2 381.2 m, Rb/K 比值迅速下降, 低于 0.004, 指示此阶段古盐度逐渐下降, 古水体由咸水转变为淡水环境; 第三阶段从 2 381.2–2 377.4 m, Rb/K 比值从谷值迅速上升至峰值, 指示了极端的气候变化, 表明沉积环境由淡水相迅速转变为咸水相; 第四阶段从 2 377.4–2 350.4 m, Rb/K 比值再次下降, 指示古盐度再次下降, 但中间经历了较长时间的半咸水相沉积环境, 最后达到淡水相沉积; 第五阶段从 2 350.4–2 326.5 m, 平稳上升的 Rb/K 比值指示古水体盐度逐渐上升, 经过一段较平稳的半咸水环境后最终变为咸水环境; 第六阶段从 2 326.5–2 318.5 m, Rb/K 比值直线下降直到 0.000 7, 远小于边界值 0.004, 指示大量淡水汇入, 古水体再次由咸水环境转变为淡水环境。

3.3 古气候

Sr 是典型的喜干型元素, 低含量指示潮湿气候, 高含量代表干旱气候(张天福等, 2016)。而 Cu 是喜湿型元素, 其对环境的指示意义与 Sr 元素相反, 因此 Sr/Cu 比值对古气候具有灵敏的指示(王峰等, 2017)。当 Sr/Cu 比值分布于 1.3~5.0 时表明具有温暖潮湿的古气候, 当其比值分布于 5.0~10.0 时指示半潮湿-半干旱的古气候, 而当其比值大于 10.0 时则代表相当炎热干旱的古气候(Lerman and Baccini, 1978)。图 5 展示了 MK-3 钻孔沉积物 Sr/Cu 比值的变化趋势。从图中可以看出, 成盐期之前, 2 458.4 m 深度处 Sr/Cu 比值大于 10, 指示气候炎热干旱, 而在 2 450.9–2 456.9 m 阶段 Sr/Cu 比值均大于 5 而小于 10, 表明此阶段气候处于半潮湿-半干旱状态, 到 2 448.5 m 深处 Sr/Cu 比值再次大于 10, 表明气候逐渐向干热化发展, 而后形成盐类沉积。这与 Rb/K 指示的此阶段处于半咸水相沉积环境相一致。成盐期之后, 除 2 350.4 m、2 373.6 m 和 2 381.2 m 三点之外, 所有深度样品的 Sr/Cu 比值均大于 10, 表明

该区在相当长一段时间内气候一直处于炎热干旱阶段, 与 Rb/K 指示的古盐度变化具有良好的对应关系。2 391.2–2 389.4 m, Sr/Cu 比值显著增加, 指示气候炎热并逐渐干旱化, 与 Rb/K 指示的咸水相沉积环境相一致; 2 389.4–2 381.2 m, Sr/Cu 比值下降至 5 以下, 表明古气候由炎热干旱逐渐转变为温暖湿润, 与 Rb/K 指示的淡水相沉积环境相对应; 2 381.2–2 377.4 m, Sr/Cu 比值从谷值迅速到达峰值, 与 Rb/K 比值变化趋势一致, 再次证明气候由温暖湿润向炎热干旱转变, 古水体盐度上升; 从 2 377.4–2 350.4 m, Sr/Cu 比值变化趋势与 Rb/K 略有差异。Sr/Cu 比值变化特征指示气候从 2 377.4 m 开始向温暖潮湿方向发展直到 2 373.6 m, 从 2 373.6–2 370.6 m, Sr/Cu 比值增加, 气候再次转向炎热干旱直到 2 354.8 m, 从 2 354.8–2 350.4 m, Sr/Cu 比值降低, 指示气候由炎热干旱转向温暖潮湿, 该阶段的古气候变化特征与 Rb/K 指示的古盐度变化特征基本吻合, 只是 Rb/K 比值在此阶段除指示古水体在 2 373.6 m 处呈现淡水环境外, 其在 2 360.8 m 处也为淡水环境。从图 5 中可以看出, 2 360.8 m 处 Sr/Cu 比值虽大于 10.0, 但相较于该阶段的其他样品仍处于低值, 表明该点气候干旱程度应有所下降, 可能是造成 Rb/K 比值较低的原因。从 2 350.4–2 342.4 m, Sr/Cu 比值逐渐增加, 气候炎热干旱, Rb/K 比值曲线变化规律指示古水体也由淡水环境逐渐过渡至半咸水环境; 从 2 342.4–2 335.9 m, Sr/Cu 比值虽大于 10, 但呈显著下降趋势, 表明干旱程度有所下降, Rb/K 指示的古水体盐度也随之下降并出现短期的淡水沉积阶段; 从 2 335.9–2 330.2 m, Sr/Cu 比值迅速增加并达到最大值, Rb/K 比值紧随其后迅速上升也达到了最大值, 表明此阶段经历了较长时期的极端干旱气候, 古水体盐度显著上升; 从 2 330.2–2 318.5 m, Sr/Cu 和 Rb/K 比值均呈显著下降趋势, 表明气候逐渐由热干向暖湿转变, 古水体由咸变淡, 最终呈现淡水沉积环境。

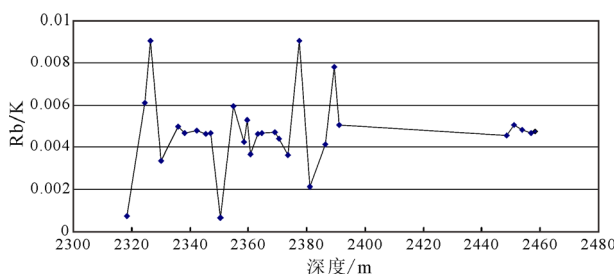


图 4 MK-3 钻孔沉积物 Rb/K 比值分布
Fig. 4 Rb/K ratios of sediments in MK-3

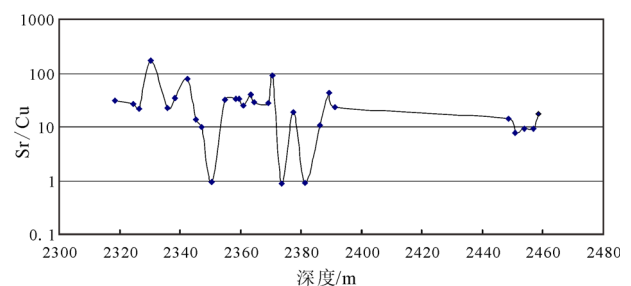


图 5 MK-3 钻孔沉积物 Sr/Cu 比值分布
Fig. 5 Sr/Cu ratios of sediments in MK-3

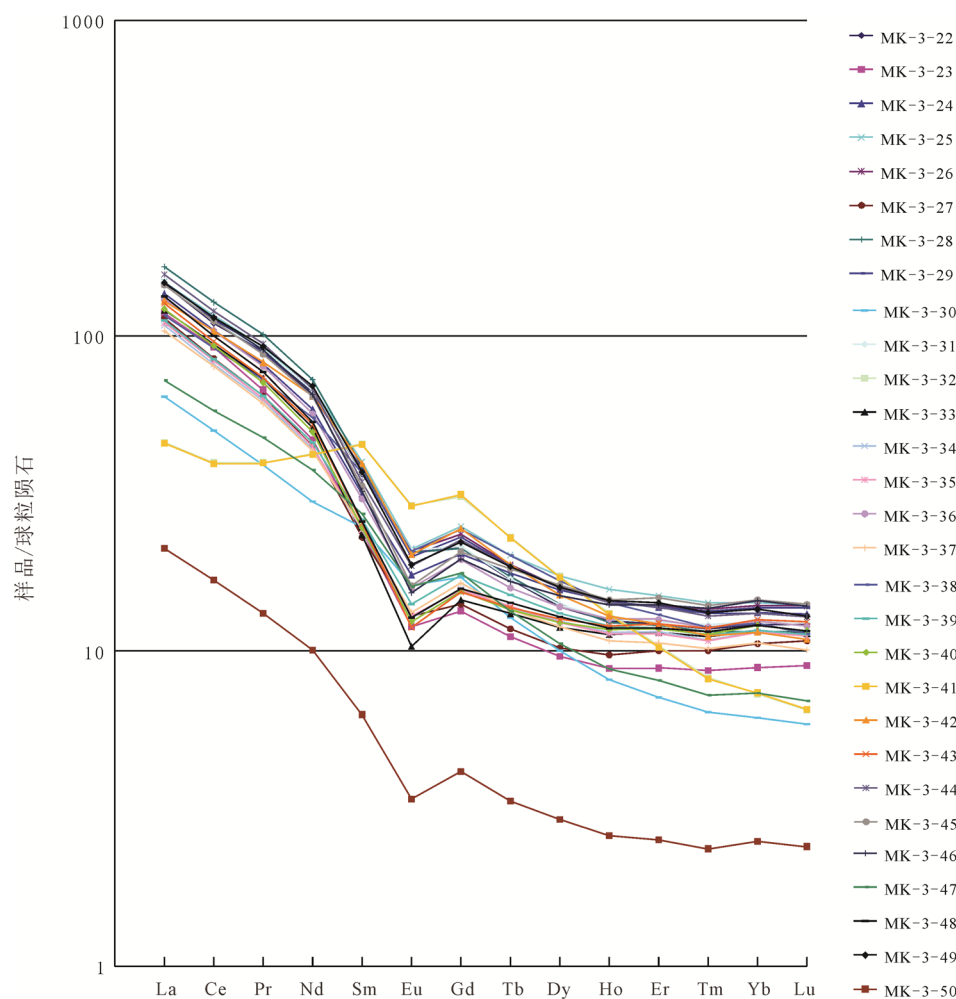


图 6 MK-3 沉积物稀土元素球粒陨石标准化曲线(据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution pattern of sediments in MK-3 (after Boynton, 1984)

3.4 稀土元素分布特征

本文所分析样品的稀土元素总量变化于 32.8~237.0 $\mu\text{g/g}$ 之间, 平均 175.0 $\mu\text{g/g}$, 在全球沉积物稀土元素含量平均值(150~300 $\mu\text{g/g}$)范围内, 高于上地壳(146.4 $\mu\text{g/g}$)和北美页岩(164 $\mu\text{g/g}$)稀土元素平均值。轻稀土元素总量变化于 $(29.3\sim219.6)\times10^{-6}$, 平均 158.4×10^{-6} , 相对富集, 约占总稀土含量的 90.5%。重稀土元素含量较低, 为 $(3.6\sim21.2)\times10^{-6}$, 平均 16.6×10^{-6} , 约占稀土元素总量的 9.5%。LREE/HREE 比值变化于 4.4~12.7 之间, 平均 9.6, 高于北美页岩平均值(7.44)。(La/Yb)_N 的值为 9.3~14.7, 说明样品的轻重稀土分馏程度高, 而 (La/Sm)_N 的值为 3.3~5.3, (Gd/Yb)_N 的值为 1.2~2.2, 显示了样品轻稀土元素明显富集, 重稀土元素亏损的模式。以球粒陨石标准值(Boynton, 1984)对 MK-3 钻孔沉积物稀土元素进行标准化(图 6), 可以看出除 MK-3-30、MK-3-40、MK-3-41、MK-3-47 和 MK-3-50 五个样品外, 其余样品的稀土元素配分模式基本一致, 均表现为左高右低的 L 型曲线, 表明其物质来源主体为陆源。而 MK-3-30 等 5 个层位稀

土元素丰度的分异可能与物源的差别有关。

从图 6 可以看出, 各样品 Eu 亏损明显。 δEu 变化范围为 0.5~0.8, 平均 0.7, 呈现明显的负异常。而 δCe 均大于 0.9, 平均约为 1.0。虽然在一般情况下, Eu^{3+} 会在缺氧环境中还原成 Eu^{2+} , 造成 Eu 亏损(孔凡翠等, 2011), 但 Eu 对氧化还原环境的指示意义更易受物源的影响。MK-3 钻孔岩心样品 δEu 呈现负异常更有可能与物源补给为酸性岩类有关。 δCe 可以作为湖泊及流域的风化强度、氧化-还原状态和气候变化情况的指示(谢周清等, 2002), REE 在自然界中主要以 +3 价存在, 但 Ce 元素具有不稳定的 4d 亚层结构, 在强碱性条件下, 含 Ce^{3+} 的化合物会被氧化成溶解性较弱的 CeO_2 而沉淀, 因此 Ce 元素正异常通常指示氧化环境。MK-3 钻孔上盐段成盐期前后样品的 δCe 均值约为 1.0, 结合岩芯样品主体呈现棕红色, 指示本阶段应处于一种弱氧化的环境中。

4 结论

通过对 MK-3 钻孔上盐段成盐期前后沉积物微量元素分析可以看出, 盐类沉积阶段之前, 该区主

要处于半咸水沉积环境,微量元素相对富集,气候炎热干旱,蒸发强烈,为盐类沉积提供了必要的古气候、物源、环境条件。成盐期之后,古气候条件波动较大,Rb/K和Sr/Cu比值共同指示的三个温暖湿润期分别出现在2 350.4 m、2 373.6 m和2 381.2 m,三个阶段的古水体盐度呈现明显的淡水环境特征。三个明显的咸水环境沉积阶段分别出现在2 326.5 m、2 377.4 m和2 389.4 m,对应的三个时期的Sr/Cu比值也相对较高,表明气候炎热干旱,其中2 377.4 m处古盐度及古气候的迅速转变应指示此阶段发生过一次极端气候事件。综合分析,MK-3钻孔周缘在成盐期之后可能处于淡水-咸水交替变化的弱氧化沉积环境,且后期淡水补给持续增强,导致沉积盆地内在析盐阶段之后只发育碎屑岩。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20201115).

参考文献:

- 陈海泓,郝杰,DOBSON J P,HELLER F,HSÜ K J. 1993. 云南思茅地区新生代的持续旋转[J]. 科学通报, 38(24): 2269-2272.
- 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, 228.
- 程涌,胡煜昭,李丕仇,卢萍. 2019. 滇东会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系微量元素地球化学特征及其古环境演化[J]. 地质找矿论丛, 34(3): 416-422.
- 从柏林,吴根耀,张旗,张儒媛,瞿明国,赵大升,张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J]. 中国科学(B辑): 23(11): 1201-1207.
- 范蔚茗,彭头平,王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录[J]. 地学前缘, 16(6): 291-302.
- 范玉海,屈红军,王辉,杨县超,冯杨伟. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用——以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 39(2): 382-389.
- 孔凡翠,杨瑞东,魏怀瑞,文雪峰,韩晓彤,高军波. 2011. 贵州威宁草海第四系窑上组沉积物微量元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 31(5): 117-126.
- 李朋武,高锐,崔军文,管焯. 2005. 西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析[J]. 地球学报, 26(5): 387-404.
- 李文光. 1994. 我国重晶石矿床成因类型及找矿方向初探[J]. 河南地质, 12(3): 177-181.
- 李兴振,杜德勋,王义昭. 1998. 盆地转换及其成矿作用——以昌都-思茅盆地和金沙江-哀牢山带为例[J]. 特提斯地质, (22): 1-16.
- 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): 1527-1531.
- 刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 29(3): 307-310, 314.
- 苗忠英,郑绵平,娄鹏程,张雪飞,孙海涛,张震,徐其辉,杜雪苗. 2020. 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. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201207.1635.006.html>.
- 苗忠英,郑绵平,张雪飞,张震,高运志. 2019b. 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. 2019a. 思茅盆地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.
- 彭雪峰,汪立今,姜丽萍. 2012. 准噶尔盆地东南缘芦苇沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(2): 121-127, 151.
- 秦占杰,袁秦,魏海成,盛淑蓉,山发寿. 2013. 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, 34(5): 638-642.
- 曲一华,袁品泉,帅开业,张瑛,蔡克勤,贾疏源,陈朝德. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京:地质出版社.
- 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]. 化工矿地质, 19(2): 81-84.
- 王冬兵,王立全,尹福光,孙志明,王保弟,张万平. 2012. 滇西北金沙江古特提斯洋早期演化时限及其性质: 东竹林层状辉长岩锆石U-Pb年龄及Hf同位素约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1542-1550.
- 王峰,刘玄春,邓秀芹,李元昊,田景春,李士祥,尤靖茜. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 35(6): 1265-1273.
- 王益友,郭文莹,张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), (2): 51-60.
- 谢周清,孙立广,刘晓东,赵俊琳. 2002. 近2000年来南极菲尔德斯半岛西湖沉积物中稀土元素 $1/\delta\text{Eu}$ 特征与气候演变[J]. 沉积学报, 20(2): 303-306.
- 颜茂都,张大文,李明慧. 2021. 思茅和呵叻盆地钾盐矿研究新进展和新认识[J]. 地学前缘, 28(6): 10-28.
- 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.
- 鄯明才,迟清华,顾铁新,王春书. 1997. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 21(6): 451-459.
- 张天福,孙立新,张云,程银行,李艳锋,马海林,鲁超,杨才,郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. 地质学报, 90(12): 3454-3472.
- 郑绵平,侯献华,于常青,李洪普,尹宏伟,张震,邓小林,张永生,郭廷峰,韦钊,王绪本,安莲英,乜贞,谭筱虹,张雪飞,牛新生. 2015. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展[J]. 地球学报, 36(12): 129-139.

- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84(11): 1523-1553.
- 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.
- 钟晓勇, 袁秦, 秦占杰, 魏海成, 山发寿. 2012. 老挝甘蒙省晚白垩世农波组下段孢粉分析及成钾时代[J]. 地球学报, 33(3): 323-330.

References:

- BOYNTON W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]/HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier: 63-114.
- CHEN Hai-hong, HAO Jie, DOBSON J P, HELLER F, HSÜ K J. 1993. Continuous rotation of Simao area in Cenozoic, Yunnan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 38(24): 2269-2272(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yao-kun, LIAO Zong-ting, WEI Zhi-hong, LI Ming-hui. 2004. Characteristics and tectonic evolution of the Lanping-Simao Mesozoic Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 26(3): 219-222, 228(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yong, HU Yu-zhao, LI Pi-you, LU Ping. 2019. The geochemical characteristics of trace elements and paleoenvironmental evolution of black rock series in the lower Cambrian Qiongzhusi Formation from Huize area, eastern Yunnan province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 34(3): 416-422(in Chinese with English abstract).
- CONG Bo-lin, WU Gen-yao, ZHANG Qi, ZHANG Ru-yuan, ZHAI Ming-guo, ZHAO Da-sheng, ZHANG Wen-hua. 1993. Litho-tectonic evolution of Paleo-Tethys tectonic belt in western Yunnan, China[J]. Science in China (Series B), 23(11): 1201-1207(in Chinese).
- FAN Wei-ming, PENG Tou-ping, WANG Yue-jun. 2009. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys[J]. Earth Science Frontiers, 16(6): 291-302(in Chinese with English abstract).
- FAN Yu-hai, QU Hong-jun, WANG Hui, YANG Xian-chao, FENG Yang-wei. 2012. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: a case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin[J]. Geology in China, 39(2): 382-389(in Chinese with English abstract).
- JOCHUM K P, NOHL U. 2008. Reference materials in geochemistry and environmental research and the GeoReM database[J]. Chemical Geology, 253: 50-53.
- JONES B, MANNING D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 111(1-4): 111-129.
- KONG Fan-cui, YANG Rui-dong, WEI Huai-rui, WEN Xue-feng, HAN Xiao-tong, GAO Jun-bo. 2011. Geochemistry of trace elements of the Quaternary sediments of Yaoshang formation in Weining Country, Guizhou Province and its paleoenvironmental implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 31(5): 117-126(in Chinese with English abstract).
- LERMAN A, BACCINI P. 1978. Lakes—chemistry, geology, physics[J]. Journal of Geology, 88(2): 249-250.
- LI Peng-wu, GAO Rui, CUI Jun-wen, GUAN Ye. 2005. Paleomagnetic results from the Three Rivers regions, SW China: Implications for the collisional and accretionary history[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(5): 387-404(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-guang. 1994. The genetic types of barite deposits of China and prospecting direction[J]. Henan Geology, 12(3): 177-181(in Chinese with English abstract).
- LI Xing-zhen, DU De-xun, WANG Yi-zhao. 1998. The basin-rang transition and mineralization examples from the Qamdo-Simao Basin and Jinshajiang-Ailaoshan orogenic belt in southwestern China[J]. Tethyan Geology, (22): 1-16(in Chinese with English abstract).
- LIAO Zong-ting, CHEN Yao-kun. 2005. Nature and evolution of Lanping-Simao Basin prototype[J]. Journal of Tongji University (Nature Science): 33(11): 1527-1531(in Chinese with English abstract).
- LIU Gang, ZHOU Dong-sheng. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment[J]. Petroleum Geology & Experiment, 29(3): 307-310, 314(in Chinese with English abstract).
- METCALFE I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 66: 1-33.
- MIAO Zhong-ying, ZHENG Mian-ping, LOU Peng-cheng, ZHANG Xue-fei, SUN Hai-tao, ZHANG Zhen, XU Qi-hui, DU Xue-miao. 2020. A new genetic model for potash deposits of the Simao basin, Yunnan: Evidence from Sr isotope[J]. Geology in China. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201207.1635.006.html>(in Chinese with English abstract).
- MIAO Zhong-ying, ZHENG Mian-ping, ZHANG Xue-fei, ZHANG Zhen, GAO Yun-zhi. 2019. Geochemistry of sulfur isotope in evaporate and its sedimentology significance: a case study from the well MZK-3 in the Simao basin, southwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 93(5): 1166-1179(in Chinese with English abstract).
- MIAO Zhong-ying, ZHENG Mian-ping, ZHANG Xue-fei, ZHANG Zhen, LIU Jian-hua, GAO Yun-zhi, ZHAI Xue-feng. 2019. Sulfur isotope geochemistry of the Lower Cretaceous evaporate 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).

- PENG Xue-feng, WANG Li-jin, JIANG Li-ping. 2012. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(2): 121-127, 151(in Chinese with English abstract).
- QIN Zhan-jie, YUAN Qin, WEI Hai-cheng, SHENG Shu-rong, SHAN Fa-shou. 2013. Sporo-pollen assemblages of the Late Cretaceous Nong Bok Formation in Khammouane, Laos, and their environmental significance for salt formation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 638-642(in Chinese with English abstract).
- QU Yi-hua, YUAN Pin-quan, SHUAI Kai-ye, ZHANG Ying, CAI Ke-qin, JIA Shu-yuan, CHEN Zhao-de. 1998. Metallogenic regularity and prediction of potash in Lanping-Simao Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QU Yi-hua. 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).
- WANG Dong-bing, WANG Li-quan, YIN Fu-guang, SUN Zhi-ming, WANG Bao-di, ZHANG Wan-ping. 2012. Timing and nature of the Jinshajiang Paleo-Tethys: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotope of the Dongzhulin layered gabbro from Jinshajiang ophiolite belt, northwestern Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1542-1550(in Chinese with English abstract).
- WANG Feng, LIU Xuan-chun, DENG Xiu-qin, LI Yuan-hao, TIAN Jing-chun, LI Shi-xiang, YOU Jing-qian. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265-1273(in Chinese with English abstract).
- WANG Yi-you, GUO Wen-ying, ZHANG Guo-dong. 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu depression, Kiangsu Province[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, (2): 51-60(in Chinese with English abstract).
- XIE Zhou-qing, SUN Li-guang, LIU Xiao-dong, ZHAO Jun-lin. 2002. The characteristic of $1/\delta\text{Eu}$ in the sediments of west lake with respect to climate change during the past 2000 years, Fildes Peninsula, Antarctica[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 303-306(in Chinese with English abstract).
- YAN Mao-du, ZHANG Da-wen, LI Ming-hui. 2021. New progresses on the potash deposits in the Simao and Khorat Basins: A synthesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 10-28(in Chinese with English abstract).
- YIN Fu-guang, PAN Gui-tang, WAN Fang, LI Xing-zhen, WANG Fang-guo. 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).
- YAN Ming-cai, CHI Qing-hua, GU Tie-xin, WANG Chun-shu. 1997. Chemical compositions of continental crust and rocks in eastern China[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 21(6): 451-459(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Tian-fu, SUN Li-xin, ZHANG Yun, CHENG Yin-hang, LI Yan-feng, MA Hai-lin, LU Chao, YANG Cai, GUO Gen-wan. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454-3472(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, HOU Xian-hua, YU Chang-qing, LI Hong-pu, YIN Hong-wei, ZHANG Zhen, DENG Xiao-lin, ZHANG Yong-sheng, GUO Ting-feng, WEI Zhao, WANG Xu-ben, AN Lian-ying, NIE Zhen, TAN Xiao-hong, ZHANG Xue-fei, NIU Xin-sheng. 2015. The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 129-139(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, YUAN He-ran, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, CHEN Wen-xi, LI Jin-suo. 2010. Regional distribution and prospects of potash in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523-1553(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Zhen, YIN Hong-wei, TAN Xiao-hong, YU Chang-qing, SHI Lin-feng, ZHANG Xue-fei, YANG Jian-xu, JIAO Jian, WU Guo-peng. 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 Mian-ping, ZHANG Zhen, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, YIN Hong-wei. 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 Zhi-jie, YIN Hong-wei, ZHANG Zhen, ZHENG Mian-ping, YANG Jian-xu. 2012. Strontium isotope characteristics and the origin of salt deposits in Mengyejing, Yunnan province, SW China[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 48(6): 719-727(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Xiao-yong, YUAN Qin, QIN Zhan-jie, WEI Hai-cheng, SHAN Fa-shou. 2012. The spore-pollen analyses and ore-forming age of Nong Bok Formation in Khammouane, Laos[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 323-330(in Chinese with English abstract).