

文章编号: 1000-0747(2023)03-0541-12 DOI: 10.11698/PED.20220788

湖相细粒沉积岩中晶粒方解石成因及其对火山-热液活动的指示——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例

李克, 蒯克来, 操应长, 王有成, 林敕若

(中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072161); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22CX07008A)

摘要: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石为研究对象, 综合运用岩心观察、薄片观察、阴极发光分析、流体包裹体测试、扫描电镜、同位素组成分析等手段, 对湖相细粒沉积岩中自生矿物的成因开展研究。结果表明: 晶粒方解石呈层状分布于沉凝灰岩发育层段或沉凝灰岩与泥晶白云岩过渡层段的细粒沉积物中, 方解石具有明显的阴极发光环带, 可分为3期: I期方解石不发光, 含有较高的Sr元素, 包裹体中包含羰基硫成分, 均一温度超过170℃, 由火山-热液喷流物质沉积形成; II期方解石呈亮黄色光, 含有较高的Fe、Mn、Mg元素, 轻稀土元素富集, 包裹体均一温度高, 为热液喷流的钙质环带重结晶形成; III期方解石呈暗橙色发光的环带, 含有较高的Mg、P、V等元素, 稀土元素无明显分异, 包裹体均一温度低, 为埋藏过程中成岩转化形成。晶粒方解石在垂向上规律性出现, 并且其形成温度由颗粒中心向边缘降低, 为芦草沟组沉积时期的火山-热液活动提供了直接证据。沉积期火山-热液活动有利于芦草沟组细粒沉积岩中的有机质富集, 对优质烃源岩发育有正面效应, 并且火山-热液喷流物质在演化过程中易形成晶间孔缝, 为页岩油自生自储创造了条件。

关键词: 细粒沉积岩; 方解石成因; 火山-热液活动; 事件沉积; 二叠系芦草沟组; 吉木萨尔凹陷; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Genesis of granular calcite in lacustrine fine-grained sedimentary rocks and its indication to volcanic-hydrothermal events: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China

LI Ke, XI Kelai, CAO Yingchang, WANG Youcheng, LIN Miruo

(Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Granular calcite is an authigenic mineral in fine-grained sedimentary rocks. Core observation, thin section observation, cathodoluminescence analysis, fluid inclusion analysis, scanning electron microscope (SEM), and isotopic composition analysis were combined to clarify the genesis of granular calcite in the lacustrine fine-grained sedimentary rocks of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Sag, Junggar Basin. It is found that the granular calcite is distributed with laminated characteristics in fine-grained sedimentary rocks in tuffite zones (or the transitional zone between tuffite and micritic dolomite). Granular calcite has obvious cathodoluminescence band, and it can be divided into three stages. Stage-I calcite, with non-luminescence, high content of Sr element, inclusions containing COS, and homogenization temperature higher than 170 °C, was directly formed from the volcanic-hydrothermal deposition. Stage-II calcite, with bright yellow luminescence, high contents of Fe, Mn and Mg, enrichment of light rare earth elements (LREEs), and high homogenization temperature, was formed by recrystallization of calcareous edges from exhalative hydrothermal deposition. Stage-III calcite, with dark orange luminescence band, high contents of Mg, P, V and other elements, no obvious fractionation among LREEs, and low homogenization temperature, was originated from diagenetic transformation during burial. The granular calcite appears regularly in the vertical direction and its formation temperature decreases from the center to the margin of particles, providing direct evidences for volcanic-hydrothermal events during the deposition of the Lucaogou Formation. The volcanic-hydrothermal event was conducive to the enrichment of organic matters in fine-grained sedimentary rocks of the Lucaogou Formation, and positive to the development of high-quality source rocks. The volcanic-hydrothermal sediments might generate intergranular pores/fractures during the evolution, creating conditions for the self-generation and self-storage of shale oil.

Key words: fine-grained sedimentary rocks; calcite origin; volcanic-hydrothermal event; event deposition; Permian Lucaogou Formation; Jimusar Sag; Junggar Basin

引用: 李克, 蒯克来, 操应长, 等. 湖相细粒沉积岩中晶粒方解石成因及其对火山-热液活动的指示: 以吉木萨尔凹陷

二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 541-552.

LI Ke, XI Kelai, CAO Yingchang, et al. Genesis of granular calcite in lacustrine fine-grained sedimentary rocks and its indication to volcanic-hydrothermal events: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 541-552.

0 引言

受物源、气候、水动力条件、构造-沉积背景、事件作用等多种因素影响, 细粒沉积岩往往岩石组分和沉积过程极其复杂^[1-3]。尤其是, 细粒沉积物沉积时期事件作用的发生会对其中油气、金属等矿产资源的形成与富集产生重要影响^[4-5]。火山-热液活动为影响细粒沉积岩形成的重要事件性作用类型, 其产生的物质不仅会引发地质环境突变, 影响细粒沉积岩形成过程和物质组成^[2], 而且会造成生物灭绝、水体缺氧等事件, 影响有机质生成、保存和演化, 对优质烃源岩发育有重要控制作用^[2, 6], 还可能直接影响地质成矿作用, 对优质储集层的发育和油气聚集等产生正面效应^[6-7]。火山-热液活动在地层中会形成多种沉积记录, 如 Sr、Ba、V、Eu 等元素含量的异常变化, C、O、S 同位素组成异常, 磁化率异常, 萤石、黄铁矿、方解石、方沸石等特殊矿物记录, 凝灰岩等火山来源沉积岩, 球枕状构造等, 为该类事件沉积研究提供了理论支撑^[6, 8-9]。火山-热液来源的细粒沉积岩沉积机制主要有火山灰空落型和水下火山-热液喷发沉积型^[2], 火山灰空落型沉积受控于盆地周围火山喷发的烈度和持续周期, 在地层中形成大面积分布的火山凝灰物质^[1-2]。水下火山-热液喷发沉积受喷出作用和高水压影响, 以脉动式喷爆或溢流方式为主^[9], 大部分产物经强烈破碎, 与湖底沉积物不同程度混合, 形成粒度细且薄纹层极为发育的沉积物^[9-10]。

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中广泛分布火山物质, 但凹陷内并未发现明显的火山口, 因此在多数研究中认为该套沉积岩中火山物质来自火山空落沉积, 凹陷内部构造稳定并未发生大规模火山-热液活动^[1, 8]。但也有学者指出芦草沟组发育火山喷发的深源碳酸质凝灰物质和热液喷流的深源物质^[9], 认为芦草沟组沉积期湖盆中存在多期次火山-热液喷流活动, 丰富的深源物质参与细粒沉积岩沉积^[10]。吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒沉积岩中发育一类晶粒方解石, 目前主要被解释为蒸发作用或成岩作用的产物^[1, 8], 也有学者提出该类方解石可能与湖底热液喷流作用有关^[9-10], 但已有的研究多通过全岩样品的地球化学数据进行分析, 涉及直接的岩相学及微区原位地球化学信息较少, 尚未解决吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积

时期是否发生火山-热液活动的争议, 制约了对该区页岩油形成和发育机制的认识。本文综合岩相学和地球化学分析方法, 利用高精度观察结合微区原位实验手段, 分析晶粒方解石物质来源与形成机理, 为进一步认识研究区火山-热液事件沉积作用提供直接证据, 对研究芦草沟组烃源岩发育和页岩油成储有一定借鉴意义。

1 地质概况

吉木萨尔凹陷是位于准噶尔盆地东部隆起西南缘的一个次级凹陷, 其北部、南部和西部分别以吉木萨尔断裂、三台断裂、西地断裂和老庄湾断裂 4 个逆冲断裂为边界(见图 1a), 东部以逐渐抬升的斜坡过渡到古西凸起。整体上, 吉木萨尔凹陷是一个在石炭系褶皱基底上发育的“西断东超”的箕状凹陷, 构造较为平缓, 地层倾角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ^[1, 8]。吉木萨尔凹陷的形成先后经历了海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等多期构造运动^[11]。海西运动期是吉木萨尔凹陷发育的主要阶段, 早二叠世晚期由于强烈构造沉降, 吉木萨尔凹陷开始成为相对独立单元接受沉积。随着凹陷周围断裂活动持续增强, 凹陷南部阜康断裂带、北部沙奇凸起和东部古西凸起均出现不同程度抬升, 至中二叠世晚期吉木萨尔凹陷初具雏形。后受印支—燕山运动影响, 吉木萨尔凹陷及周边构造单元经受不同程度改造, 至古近纪, 凹陷东段抬升幅度整体大于西段, 形成东高西低的斜坡格局。喜马拉雅期, 凹陷南部博格达山继续俯冲, 阜康断裂带剧烈抬升造成凹陷整体上升, 形成了现今的构造格局^[11]。芦草沟组沉积于海西期, 该阶段由于准噶尔盆地及其邻区处于拉张伸展裂谷背景下, 吉木萨尔湖盆和周缘的火山在较长时间内持续频发大规模活动^[12]。强烈的火山活动为地层沉积提供了丰富的火山物质, 形成了一套火山物质、陆源碎屑和内源碳酸盐沉积物相混合(见图 1b)、垂向上复杂多变的多组份来源的细粒沉积物^[1, 11]。

2 研究方法

样品均取自吉木萨尔凹陷芦草沟组岩心。使用 Zeiss 研究级偏光显微镜和 Cambridge CL8200 MK5 阴极发光检测器对方解石进行阴极发光分析, 根据发光颜色划分了方解石形成期次。结合 THMS Linkam-600

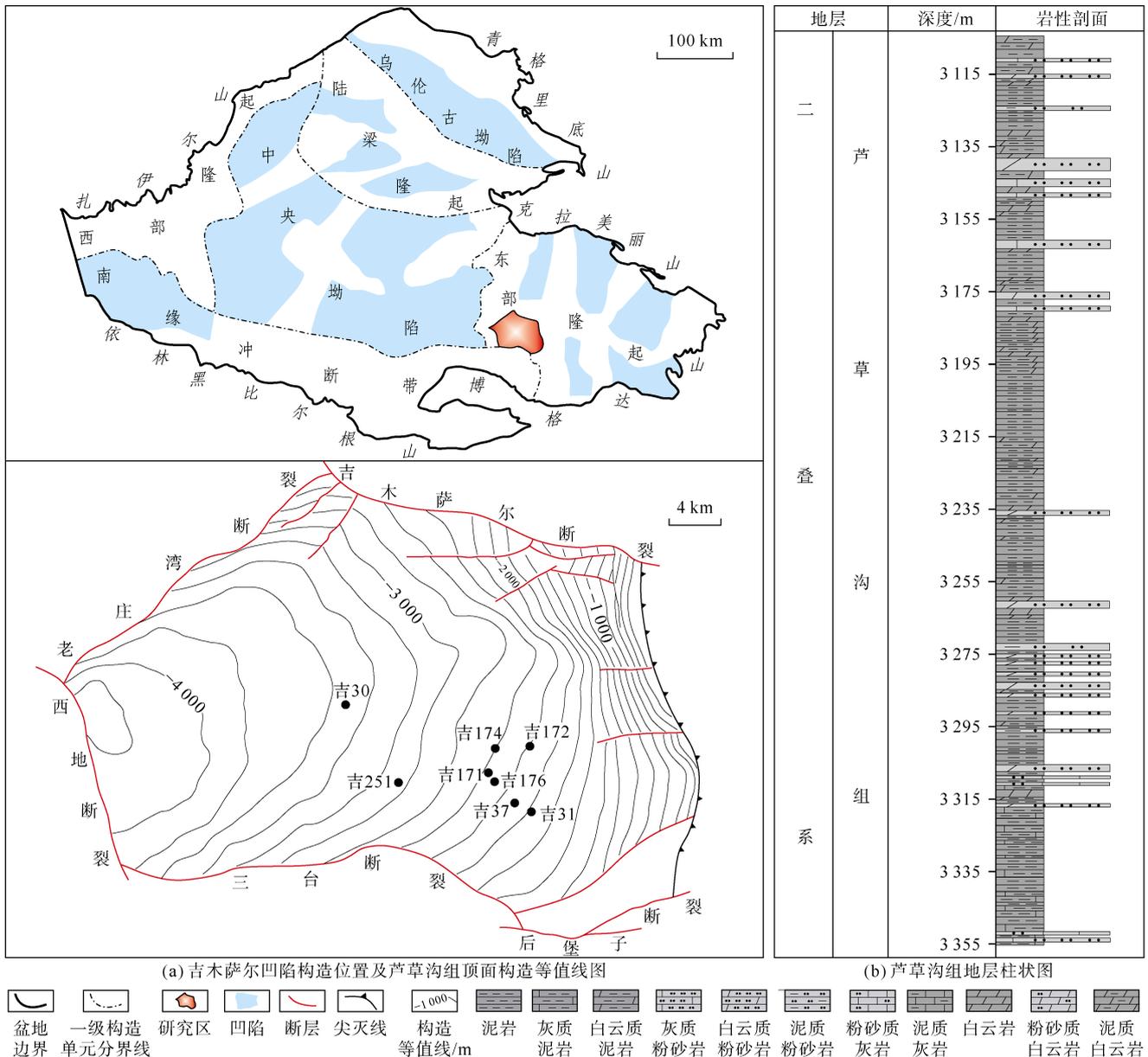


图1 吉木萨尔凹陷构造位置与地层柱状图

冷热台进行包裹体测温，确认了不同期次方解石的形成温度。对方解石中较大(粒径大于8 μm)的包裹体，利用配备532 nm激发光源的Renishaw in Via显微激光拉曼光谱仪获取了其内物质组成，激光束光栅设置为5 μm，采集区间为100~4 000 nm。同时利用配备自动矿物参数定量分析系统(AMICS)的Zeiss Crossbeam 550 FIB-SEM双束电镜进行矿物识别，结合Bruker M4 Tornado高性能微区X射线荧光光谱仪进行元素分析(XRF)，确定了方解石周围元素和矿物分布特征。在此基础上对晶形发育较好的方解石，针对不同期次进行了原位元素和同位素组成分析以确定其成因。利用电子探针和激光剥蚀-微量元素分析(LA-ICP-MS)获取了方解石及伴生矿物的主、微量和稀土元素特征。

电子探针使用仪器型号为JEOLJXA-8230，束斑为1 μm，LA-ICP-MS使用GeoLasPro 193 nm ArF准分子激光器和Agilent 7900电感耦合等离子体质谱，束斑设置为32 μm。利用Bright MS-p120wh微钻(钻头2 μm)对方解石核心取样，使用Thermal-Finnigan MAT 253同位素质谱仪进行同位素分析。最后利用多阶热解技术，使用VINCI Rock-Eval7岩石热解仪对有机质和含油性进行分析。

阴极发光、包裹体测温、XRF、扫描电镜及AMICS、微钻、拉曼光谱、热解系列等实验在中国石油大学(华东)深层油气重点实验室完成。电子探针在中国海洋大学完成，微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成，同位素测试在

成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成。

3 结果分析

3.1 细粒沉积岩中晶粒方解石赋存特征

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩由火山碎屑、陆源碎屑和内源碳酸盐组分等来源的物质混积组成,在垂向上形成多种岩石类型,主要包含云质泥岩/凝灰岩、灰质泥岩、凝灰质泥岩、泥晶白云岩、粉砂质白云岩、凝灰质(泥质)白云岩和沉凝灰岩等(见图1b)。该套细粒沉积岩中存在旋回性发育的晶粒方解石(见图2),岩心上呈层状分布,单层厚度为1~15 mm

(见图3a),顶底围岩成分主要为黏土矿物和泥晶白云石,内部普遍发育尖棱角状、鸡骨状和含港湾状溶蚀边的石英、长石颗粒(见图2)。从纵向分布上看,含晶粒方解石的细粒沉积岩主要发育在芦草沟组一段(P_{2l_1}),集中在下甜点段的黑色泥页岩中,在芦草沟组二段(P_{2l_2})发育较少。在下甜点段主要发育沉凝灰岩、云质凝灰岩、泥晶白云岩、凝灰质白云岩和粉砂岩等岩相(见图2)。晶粒方解石分布与火山物质富集沉积段密切相关,普遍出现在沉凝灰岩发育层段,或沉凝灰岩和泥晶白云岩两者的过渡层段,且该类细粒沉积岩大量发育的位置,Sr、Ba、S、V等多种与火山-热液相关的元素含量出现异常高值(见图2)。

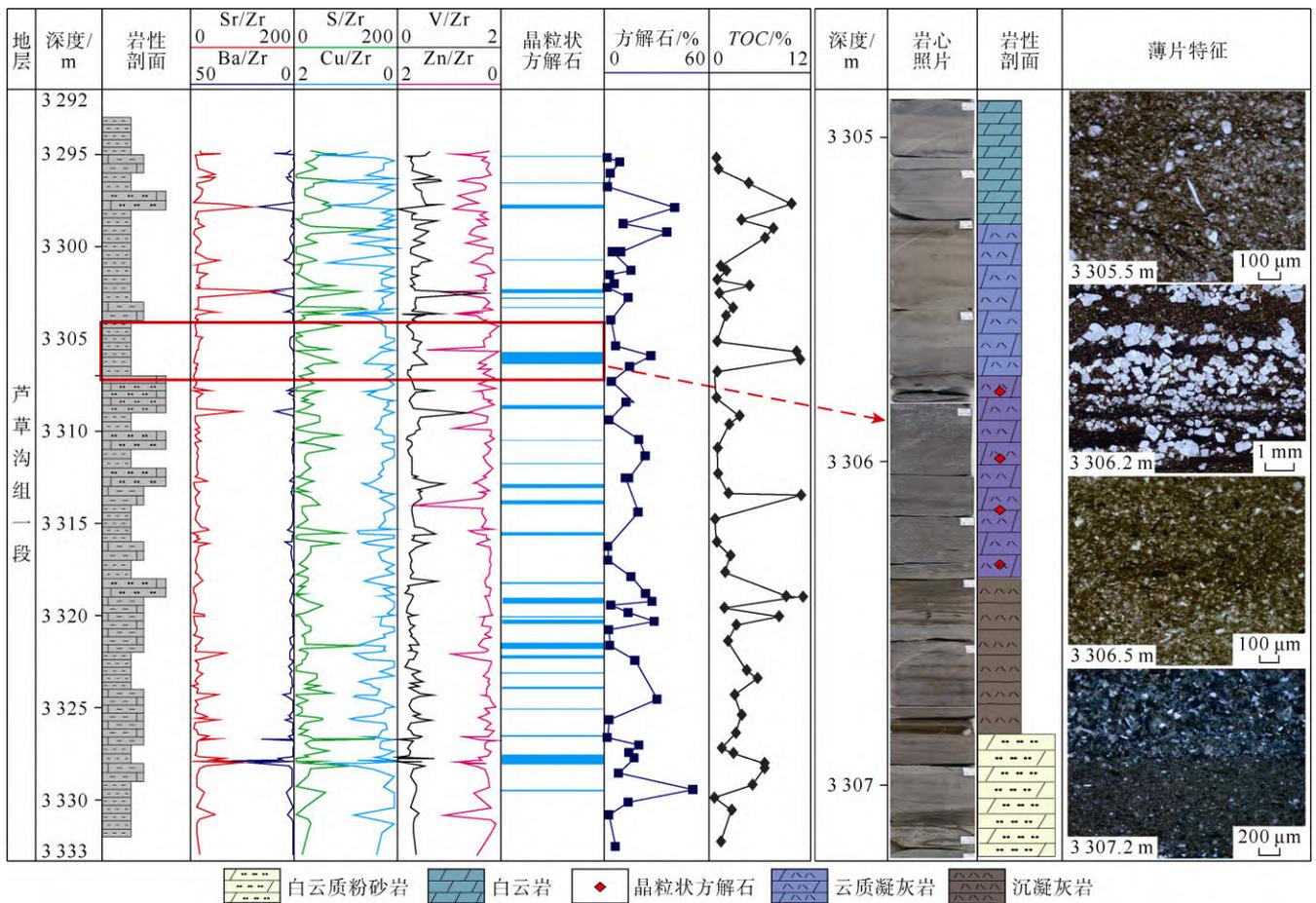


图2 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组一段细粒沉积岩中晶粒方解石分布特征

微观上,方解石晶粒呈半自形菱形—他形粒状,晶体粒径较大,分布于0.2~1.0 mm(见图3a—图3c),多个方解石晶粒还可构成马鞍状集合体(见图3d)。AMICS分析显示,方解石颗粒周围主要为层状分布的伊利石、伊蒙混层和有机质,还发育他形石英、钠长石、泥晶镁方解石、铁白云石和部分富铁、硅、镁的矿物如透辉石、云母等(见图3e—图3f)。部分样品中方解石与黄铁矿伴生,其外侧见碳酸硅和含氟矿物发

育(见图3f—图3g)。

3.2 细粒沉积岩中晶粒方解石发育期次

阴极发光下,方解石颗粒见清晰的环带发育,根据发光特征、元素特征和包裹体均一温度,至少可划分为3期(见图4a—图4d)。方解石核心(I期)呈亮白色,阴极发光为不发光或极暗红色光,核心形态各异,呈菱形、不规则多边形等,边界明显且较为平直(见图4b、图4d)。其组成中 CaCO_3 含量超过99.2%,

几乎不含 Al、Si 等元素。微量元素中，Sr 元素含量最高，平均含量为 2.578 4 mg/g，Fe、Mg、Mn 元素含量极低，总含量小于 0.35 mg/g。稀土元素总量低，平均含量 0.030 3 mg/g，*LREE/HREE*（轻、重稀土元素含量之比）平均值为 0.9， $(La/Sm)_n$ （镧系元素与钐系元素标准化后比值）平均值为 1.11，轻稀土轻微富集（见

图 5）。方解石核心的 $^{86}Sr/^{87}Sr$ 同位素值分布为 0.705 6~0.705 9， $\delta^{13}C$ 同位素组成分布为 2.73‰~7.10‰，平均为 4.76‰， $\delta^{18}O$ 同位素组成分布为 -16.14‰~-11.40‰，平均值为 -14.00‰。包裹体测试结果显示，方解石核心中包裹体均一温度均超过 170 °C，显示出与正常地层温度差异较大的异常高温（见图 6a—图 6b）。

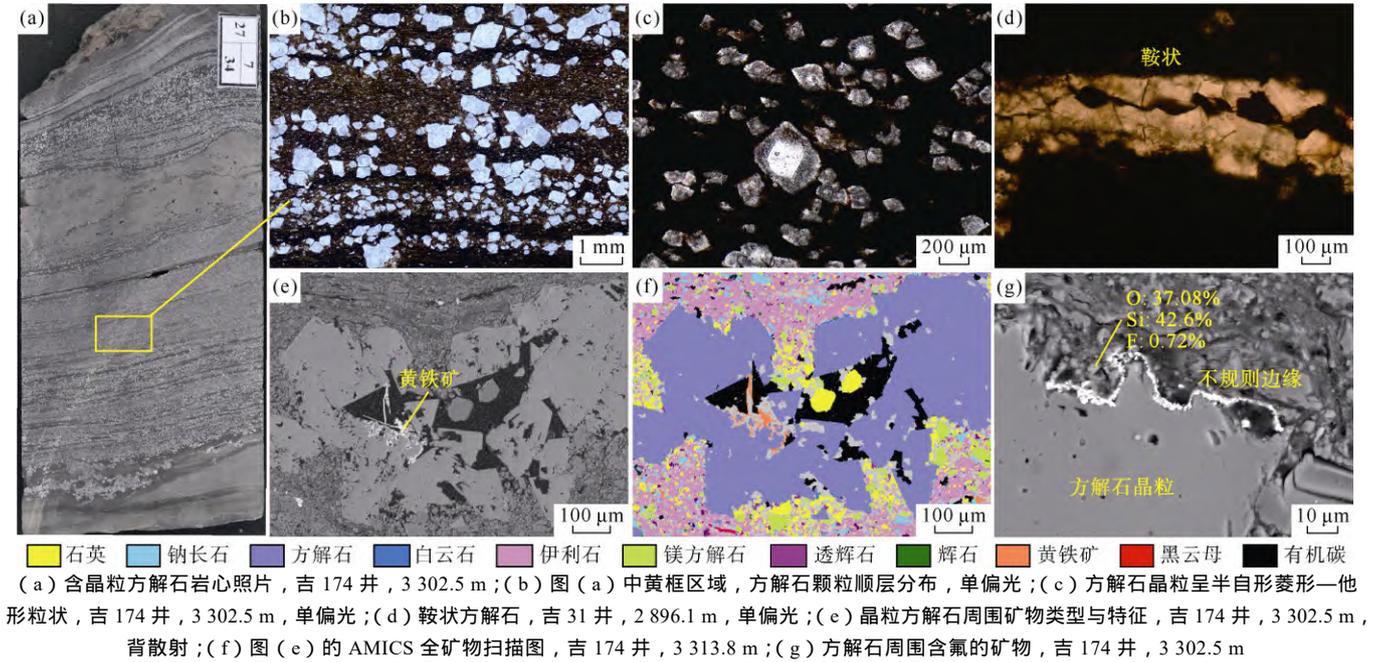


图 3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石发育特征

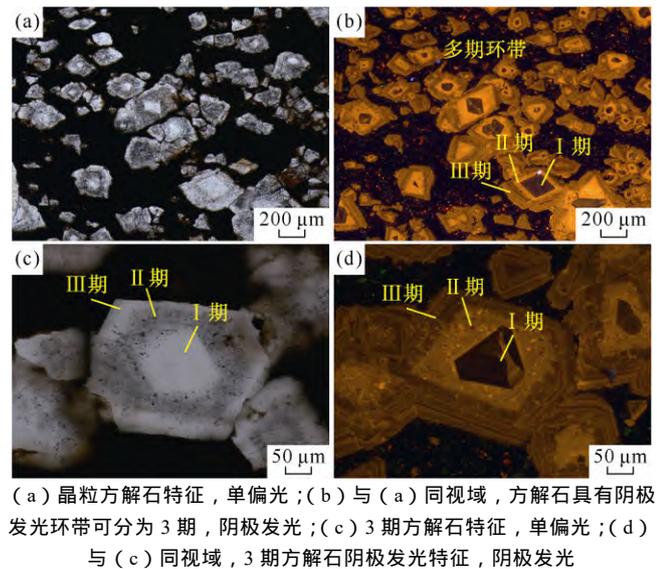


图 4 吉木萨尔凹陷吉 174 井 3 302.5 m 二叠系芦草沟组细粒沉积岩中不同期次晶粒方解石特征

方解石内环（II 期）呈灰白色，边缘较为模糊，发育大量包裹体，阴极发光下呈明亮的黄色光（见图 4a—图 4d）。方解石内环中 Mg、Fe 和 Mn 含量明显增加，平

均含量为 6.348 7 mg/g，Cu、Zn、As、Ni、Mo 等元素含量也相对较高，稀土元素总量平均值为 0.133 8 mg/g，*LREE/HREE* 平均值为 2.7， $(La/Sm)_n$ 平均值为 3.6，轻稀土富集（见图 5、图 7a）。方解石内环包裹体温度整体低于核心，分布在 110~170 °C，集中分布在 140~170 °C，也表现为明显的异常高温（见图 6a—图 6b）。

方解石边缘外环（III 期）在单偏光下较为干净，阴极发光呈暗橙色（见图 4c—图 4d）。其边缘多不平整，部分甚至呈锯齿或港湾状（见图 3g）。方解石外环也含有较高的 Mg、Fe 和 Mn 元素（平均值为 4.476 mg/g），但总含量略低于内环，Mg、P、V 等元素含量较高（见图 5）。稀土元素总量平均值为 0.137 5 mg/g，*LREE/HREE* 平均值为 0.75， $(La/Sm)_n$ 平均值为 1.03，轻稀土轻微富集。方解石外环包裹体均一温度较低，集中分布在 54~85 °C（见图 6b）。

4 讨论

4.1 晶粒方解石形成机理

4.1.1 热液喷流钙质团块沉积形成方解石核心

方解石核心（I 期）形状各异，边缘规则，Al、

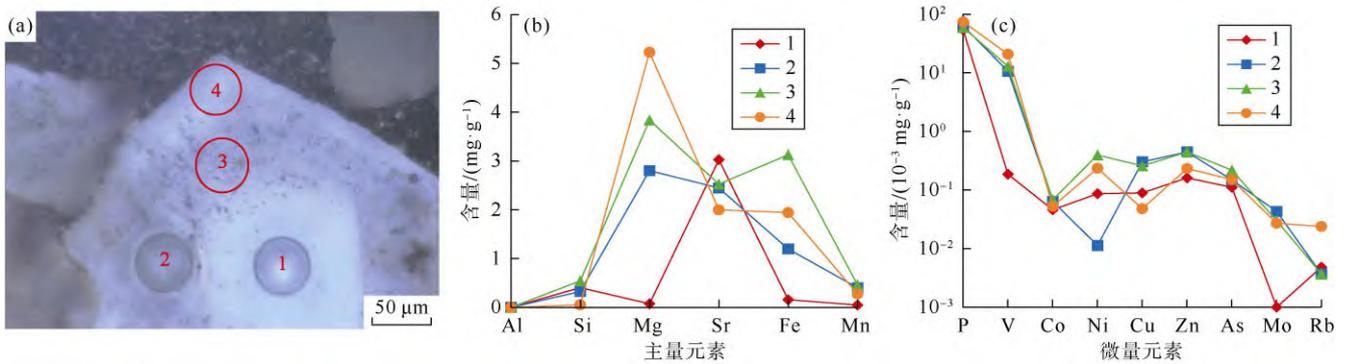


图5 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中方解石的主量与微量元素组成特征

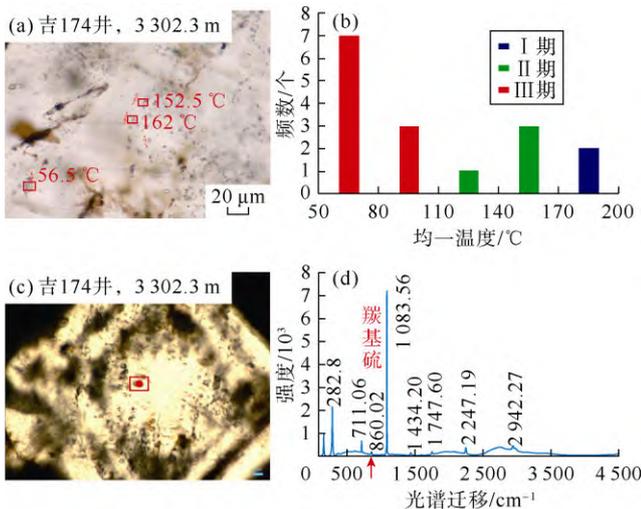


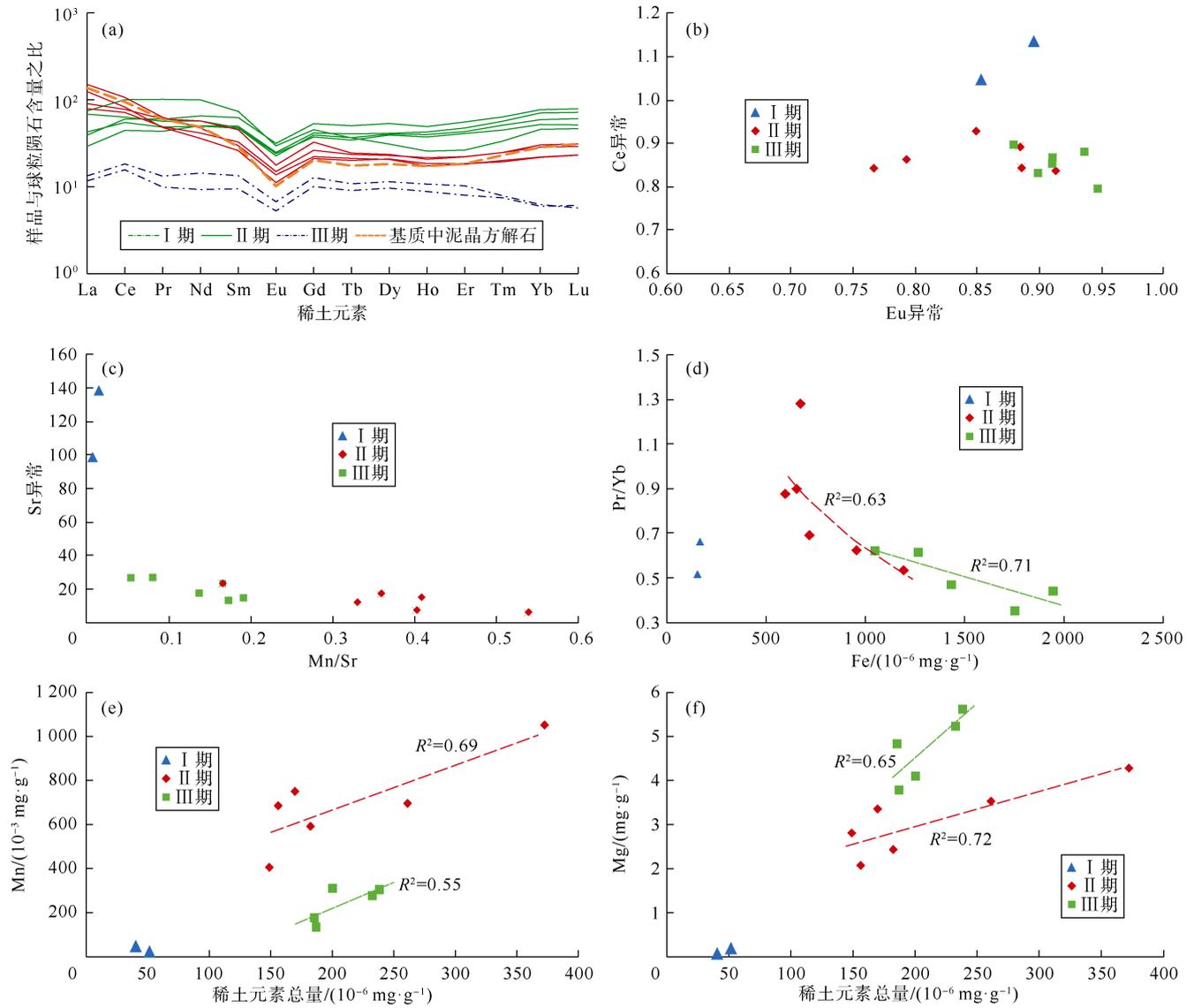
图6 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中方解石晶粒中包裹体特征

Si、Fe、Mg、Mn 等元素含量极低，并且 Mn/Sr 的值小于 2，表明其形成于较纯的饱和碳酸盐流体中，受成岩改造作用微弱^[13]。稀土元素分配模式显示，轻稀土元素略微富集，Eu 微负异常，Ce 微正异常（见图 7a—图 7b），具有低温热液方解石的特征^[14-15]。该期方解石中 Sr 高正异常（见图 7c），平均值为 2 636.1 mg/g，远大于蒸发环境形成的碳酸盐（Sr 含量为 500~700 mg/g）^[16]、海相碳酸盐（Sr 含量为 470~550 mg/g）^[17]、生物灰岩（Sr 平均含量为 800 mg/g）及埋藏成岩过程中形成的碳酸盐（Sr 含量一般小于 1 000 mg/g）^[10, 18]。同时，⁸⁶Sr/⁸⁷Sr 同位素组成分布为 0.705 6~0.705 9，整体接近下伏石炭系火山岩中火山-深部热液影响的方解石和幔源热液影响的白云岩（见图 8a），指示富 Sr 流体来自深部热液^[19-21]。微钻碳氧同位素组成结果显示，方解石核心的 $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍大于 2‰， $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍小于 -10‰（见图 8b），来自地幔或上地壳岩浆热液的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般为 -3‰~9‰，热液环境下形成的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$

值通常小于 -10.0‰，这也表明方解石形成流体来自地幔或上地壳岩浆热液^[22]。特别是，方解石核心中包裹体均一温度普遍高于 170 °C，远高于前人恢复的吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组所经历的最高温度^[12]。同时，在方解石核心的包裹体中，激光拉曼光谱检测出羰基硫（COS）成分，拉曼特征峰为 860 nm（见图 6c—图 6d），羰基硫已知是通过火山喷出气体被输送到地表环境^[23]，进一步证实方解石核心是通过火山-热液喷流作用带出的碳酸盐块体物质在湖底沉积形成。

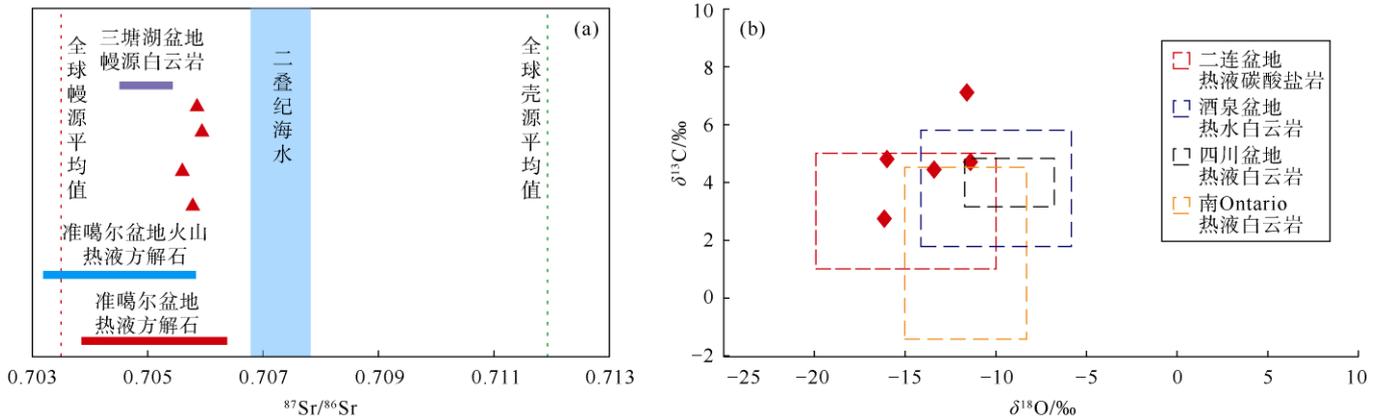
4.1.2 热液喷流泥晶钙质重结晶形成方解石内环

方解石内环（II 期）包裹体均一温度集中分布在 140~170 °C，虽低于核心的形成温度，但仍普遍高于正常地层温度，说明方解石内环的形成也受异常高温影响（见图 6a—图 6b）。薄片观察显示，方解石核心（I 期）外往往存在泥晶方解石环边，粒度细，表面污浊（见图 9a—图 9b），应为热液喷流过程中带出的钙质物质黏附于碳酸盐块体周围。沉积于湖底之后，该部分泥晶碳酸盐矿物在火山-热液影响的持续高温条件下容易发生重结晶作用^[24-25]。在部分未完全结晶的晶粒方解石晶间孔和周围基质中，确实观察到了泥晶方解石的存在（见图 9c—图 9f），指示该类泥晶方解石发生了重结晶作用。Sr 元素在碳酸盐矿物重结晶过程中很容易从碳酸盐中排出^[26]，方解石内环中 Sr 异常明显降低，Mn/Sr 值增大，也说明泥晶方解石发生了重结晶作用。与方解石核心不同的是，内环中的 Fe、Mn、Mg、Si、Cu、Zn、V、As 等元素含量整体增高（见图 5、图 7e—图 7f）。微区 XRF 扫描结果发现，方解石颗粒周围暗色基质中富含相应元素（见图 10），说明方解石内环的形成受周围基质影响。阴极发光显示，该期方解石重结晶之后显示暗橙色（见图 9b），与方解石周围基质中 Fe、Mn 等元素的混入有关。同时，Fe 元素与 Pr/Yb、Mg 元素与稀土元素总量、Mn 元素与稀土元素总量存在较好相关性（见图 7d—图 7e），说明方解石内环中稀土元素



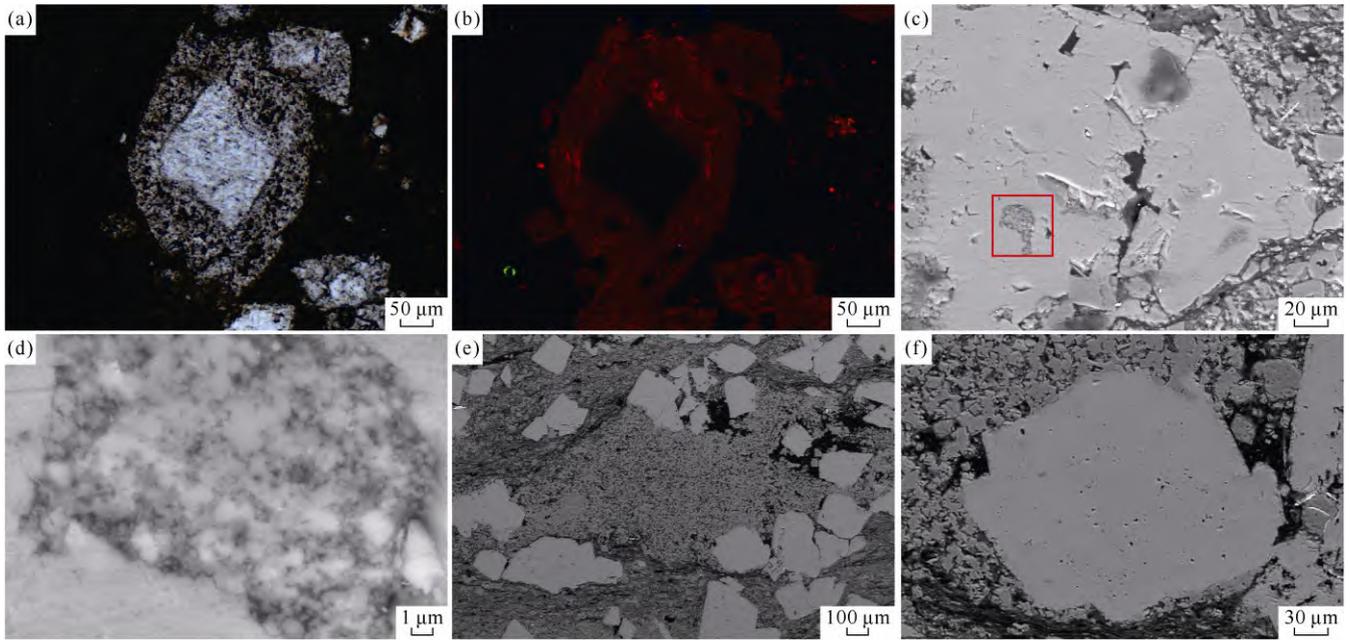
(a) 晶粒方解石稀土元素分布特征，球粒陨石数据据文献[27]；(b) 晶粒方解石 Ce 异常与 Eu 异常特征；(c) 晶粒方解石 Sr 异常与 Mn/Sr 特征；(d) 晶粒方解石 Pr/Yb 与 Fe 关系图；(e) 晶粒方解石 Mn 与稀土元素总量关系图；(f) 晶粒方解石 Mg 与稀土元素总量关系图

图 7 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石元素特征



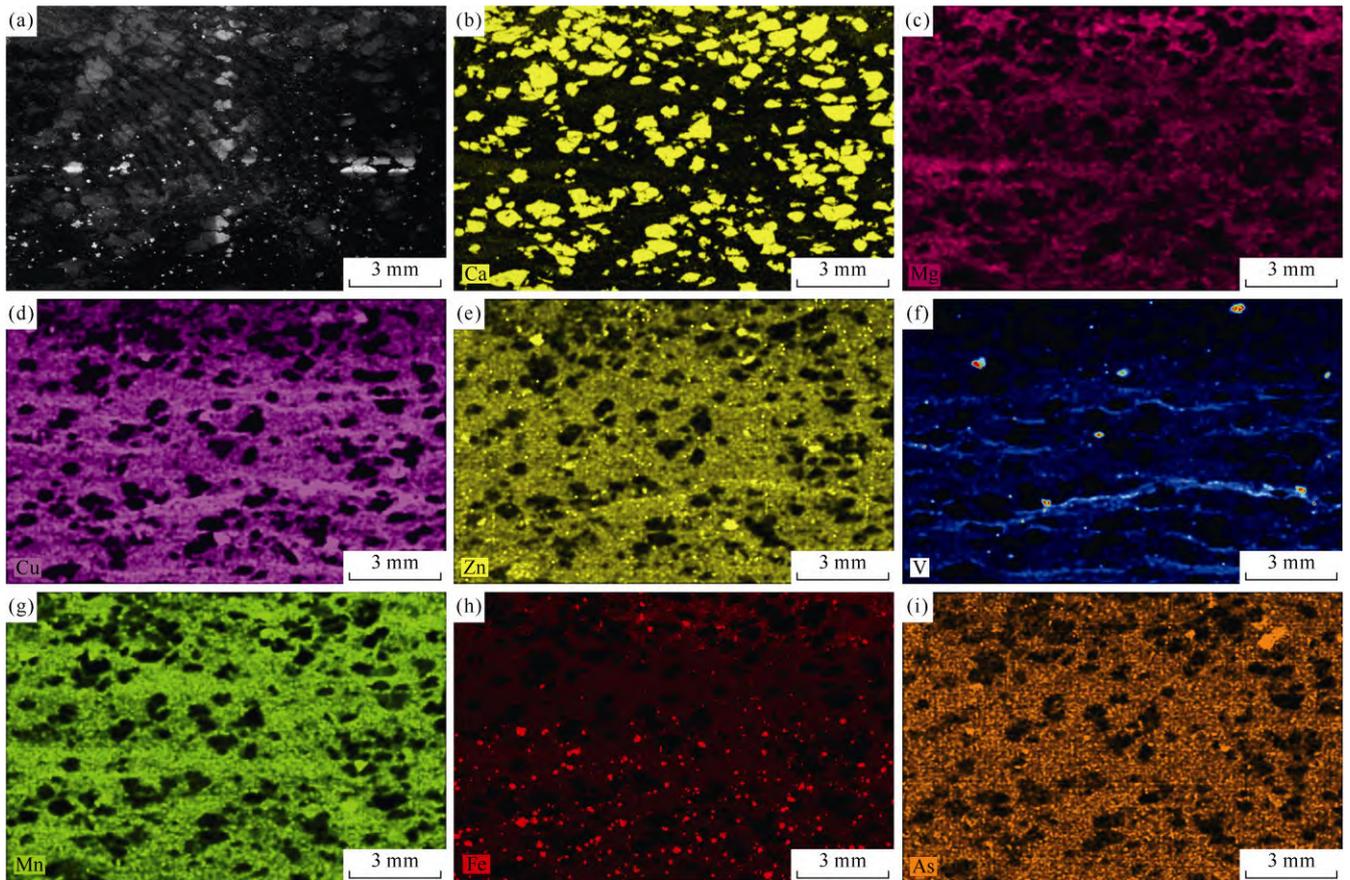
(a) 晶粒方解石锶同位素组成分布特征，图中数据据文献[19-21]；(b) 晶粒方解石碳和氧同位素组成分布特征，底图修改自文献[22]

图 8 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石同位素组成分布特征



(a) 团块状方解石, 吉 31 井, 2 896.1 m, 单偏光; (b) 与 (a) 同视域, 方解石团块由不发光核心和暗红色光外边组成, 重结晶部分呈亮黄色光, 吉 31 井, 2 896.1 m, 阴极发光; (c) 未完全结晶的方解石团块中泥晶方解石, 吉 174 井, 3 302.5 m, 背散射; (d) 为 (c) 红框区域放大图, 背散射, 吉 174 井, 3 302.5 m; (e) 基质中泥晶方解石, 吉 174 井, 3 302.5 m, 背散射; (f) 泥晶方解石构成晶粒方解石边缘, 吉 174 井, 3 302.5 m, 背散射

图 9 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组含方解石沉积岩特征



(a) 吉 251 井, 3 768.8 m, 岩心样品扫描照片; (b) — (i) 分别为图 (a) 的 Ca、Mg、Cu、Zn、V、Mn、Fe、As 元素分布图, 方解石周围暗色基质中富含相应元素

图 10 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组含晶粒方解石沉积岩元素分布特征

总量随 Fe 含量增加而增加。尤其是，轻稀土元素增加幅度明显（见图 7a），与流体中的 Fe、Mg、Mn 等元素增加而导致的方解石重结晶过程中稀土元素再分配作用有关^[28]。

4.1.3 沉积后埋藏成岩作用形成方解石外环

方解石外环（III期）包裹体均一温度分布范围为 54~85 °C，明显区别于核心和内环（见图 6a—图 6b），为细粒沉积物进入埋藏过程中的成岩产物。AMICS 分析显示，晶粒方解石周围普遍存在富 Mg 的泥晶方解石（见图 3e—图 3f、图 9e）。在埋藏过程中，该部分泥晶方解石在有机酸作用下容易发生重结晶作用^[29]，往晶型更好的方解石转化，并且观察到泥晶方解石以晶粒方解石为核心生长，形成外环的不规则边缘（见图 9f）。此外方解石外环相对富含 Mg 元素（见图 5），也指示方解石外环形成也与泥晶方解石重结晶作用相关。外环中 Mn/Sr 值较大，Sr 异常较小，Fe、Mn、Mg 等元素含量和稀土元素总含量较高（见图 7c—图 7f），也表明该类方解石发生了重结晶作用。方解石外环同样富含基质中相应元素，Fe 元素含量与 Pr/Yb 值、Mg 元素含量与 REE 总量、Mn 元素含量与 REE 总量也存在极好的相关关系（见图 7d—图 7f），说明其形成过程中也受周围基质的影响。方解石晶粒周围发育大量的伊蒙混层和伊利石（见图 3），蒙脱石向伊利石的转变过程中会产生 Mg²⁺、Fe²⁺等离子，同时吸附的大量阳离子也会释放到孔隙流体中^[29]，可混入方解石外环。前人实验表明，方解石在适宜的环境中生长，往往会产生类似的生长环带^[30]。

4.2 晶粒方解石对火山-热液活动的指示意义

晶粒方解石在研究区芦草沟组下段细粒沉积岩频繁发育，与沉凝灰岩和泥晶白云岩构成多套旋回（见图 2），并且不同于埋藏过程结晶的碳酸盐，其形成温度从核心到边缘由高温向低温变化，指示了沉积期发生了火山-热液活动。晚石炭世末期至早、中二叠世，受区域拉张伸展裂谷背景影响，准噶尔盆地及邻区火山-岩浆活动剧烈^[12]，吉木萨尔凹陷在盆地挤压应力和凹陷中部拉张应力的共同作用下，芦草沟组下伏地层断裂系统发育^[31]。芦草沟组沉积期，下伏地层断裂沟通深部岩浆热源，热液和湖水沿湖盆基底断裂对流循环^[9]，当热水中碳酸钙达到饱和时就会析出方解石块体。碳酸盐块体物质（I期）随热液沿断裂上涌至地表（见图 11a—图 11b），由喷流作用散落于湖底沉积物中^[9]，该过程中大量泥晶碳酸盐物质黏附于碳酸盐块体周围，沉积于湖底之后在残余高温影响下发生重结

晶作用（见图 11c），捕获周围沉积物中 Si、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、V、As 等元素形成方解石内环（II期）。方解石外环（III期）则是埋藏过程中，在有机酸和伊利石化作用下，周围泥晶方解石以内环为核心重结晶再成长形成（见图 11d）。晶粒方解石的存在，为吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积期存在火山-热液事件沉积提供了直接证据。同时，热液活动也影响该类沉积岩中矿物组成，形成黄铁矿、含氟的矿物和碳酸硅等低温热液矿物（见图 3e—图 3f）。该类含晶粒方解石沉积岩旋回性出现，说明芦草沟组细粒沉积岩沉积时期火山-热液活动周期性发生，能对页岩油形成产生重要影响。

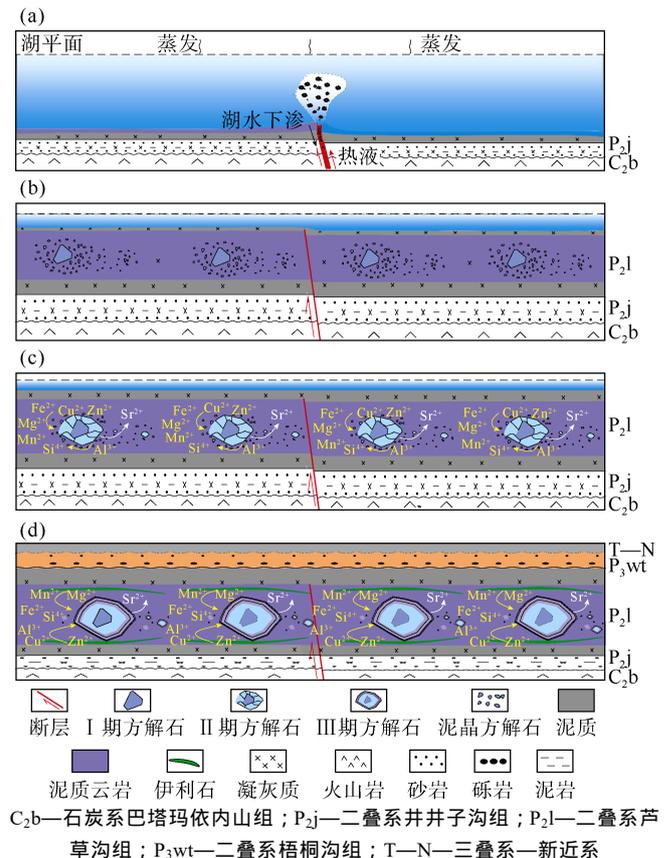


图 11 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组晶粒方解石形成过程

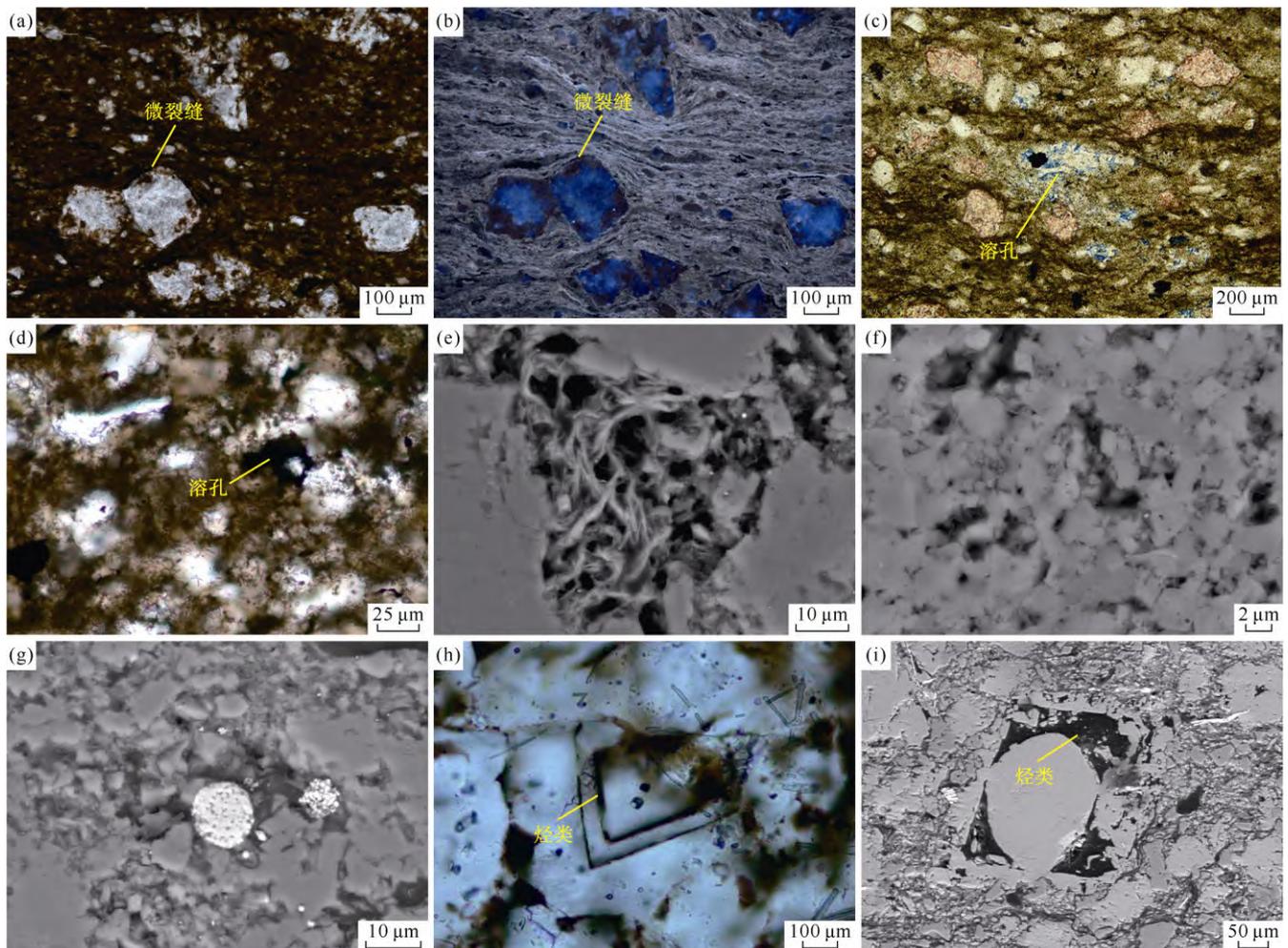
4.3 火山-热液活动对页岩油成储的意义

吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积期火山-热液活动在地层中形成多段晶粒方解石和火山物质组成的沉积岩，该类沉积岩主要发育在芦草沟组一段，集中在下甜点段的黑色泥页岩中发育（见图 2）。统计分析了吉 174 井中细粒沉积岩的 TOC 值，其在纵向分布上表现出较强的非均质性，分布范围为 0.53%~11.63%。在晶粒方解石发育段，TOC 普遍出现异常高值，且与方解石含量呈现相同的变化趋势（见图 2），说明芦草

沟组火山-热液喷流物质对有机质富集有明显影响。研究表明,湖底热液携带丰富的营养元素和热能,能通过底层与上层水体对流循环,创造出适宜藻类等水生生物繁盛的环境,从而提高原始生产力,同时热液活动引起的缺氧环境也利于有机质保存^[2,6,8]。在该类沉积岩中,有机质呈连续层状分布(见图 12a—图 12b),主要为黄白色荧光的藻纹层,有机质类型以 I 型为主,为研究区良好的烃源岩。因此研究区芦草沟组火山-热液活动对有机质富集有积极影响,有利于优质烃源岩发育。

芦草沟组下甜点段细粒沉积岩主要由沉凝灰岩、云质凝灰岩、泥晶白云岩和凝灰质云岩在垂向上叠置组成(见图 2),储集空间主要为微裂缝、硅铝酸盐溶孔、黏土矿物、黄铁矿、白云石及方解石晶间孔等(见图 12)。在晶粒方解石不发育段,细粒沉积岩中储集空间不发育,仅见少量溶孔和矿物晶间孔(见图 12c—图

12g),整体以纳—微米级孔隙为主。而在方解石晶粒发育的岩石中,普遍发育方解石晶间孔隙和微裂缝。方解石晶间孔整体较大,介于微米、纳米级,普遍被烃类充填(见图 12h—图 12i),微米级裂缝多出现在方解石颗粒与塑性矿物之间,其中也见原油赋存(见图 12b),为芦草沟组页岩中有效储集空间。芦草沟组沉积期火山-热液作用形成的晶粒方解石存在晶格缺陷极不稳定^[32],在重结晶过程中容易在缺陷处产生晶间孔隙(见图 12i),且方解石的存在增加了储集层脆性,与塑性矿物间容易产生裂缝,有利于形成有效储集层。在该类岩石中,页岩油含量为 13.0~25.9 mg/g,均值为 14.21 mg/g,为研究区页岩油含量较高的岩石类型。因此,吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积期火山-热液活动不仅有利于细粒沉积岩中有机质富集,而且火山-热液喷流物质在埋藏演化过程中易产生晶间孔和微裂缝,为



(a) 含晶粒方解石沉积岩中有机质与微裂缝特征,吉 174 井,3 305.9 m,单偏光;(b)与(a)同视域,有机质呈黄白色荧光,吉 174 井,3 305.9 m,荧光;(c) 沉凝灰岩中长石溶孔,吉 174 井,3 306.9 m,单偏光;(d) 云质沉凝灰岩中长石溶孔,吉 174 井,3 305.6 m,单偏光;(e) 沉凝灰岩中黏土矿物晶间孔,吉 174 井,3 313.8 m,背散射;(f) 泥晶白云岩中晶间孔,吉 174 井,3 296.5 m,背散射;(g) 沉凝灰岩中黄铁矿晶间孔,吉 174 井,3 313.8 m,背散射;(h) 方解石晶间孔隙被烃类充填,吉 174 井,3 313.8 m,单偏光;(i) 方解石晶间孔隙被烃类充填,吉 174 井,3 313.8 m,背散射

图 12 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中储集空间发育特征

页岩油自生自储创造条件，芦草沟组下甜点段黑色泥页岩中晶粒方解石发育段是页岩油富集有利层段。

5 结论

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石是芦草沟组沉积时期火山-热液活动和埋藏过程中成岩转化共同作用形成，I期方解石核心直接由火山-热液喷流作用带出的方解石块体在湖底沉积形成，II期方解石内环为热液喷流带出的泥晶钙质物质在持续高温影响下重结晶形成，III期方解石外环为沉积后在埋藏过程中由成岩转化作用形成。

晶粒方解石分期发育过程为吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积时期火山-热液活动提供了直接的岩石学证据，其在垂向上旋回性出现，指示芦草沟组沉积期火山-热液频繁活动，细粒沉积岩形成经历多期次火山-热液活动影响。

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积期火山-热液活动不仅有利于细粒沉积岩中有机质富集，对优质烃源岩发育有正面效应，而且火山-热液喷流物质在演化过程中易形成晶间孔和微裂缝，为页岩油自生自储创造了条件，芦草沟组下甜点段黑色泥页岩中晶粒方解石发育段是页岩油富集有利层段。

参考文献：

- [1] 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芑, 等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 26-37.
JIANG Zaixing, KONG Xiangxin, YANG Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26-37.
- [2] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224-237.
HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237.
- [3] 彭军, 曾垚, 杨一茗, 等. 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 106-115.
PENG Jun, ZENG Yao, YANG Yiming, et al. Discussion on classification and naming scheme of fine-grained sedimentary rocks[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 106-115.
- [4] 王鹏万, 邹辰, 李娴静, 等. 滇黔北地区筇竹寺组元素地球化学特征及古环境意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 51-62.
WANG Pengwan, ZOU Chen, LI Xianjing, et al. Geochemical characteristics of element Qiongzhusi Group in Dianqianbei area and paleoenvironmental significance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 51-62.
- [5] OHKOUCHI N, KURODA J, TAIRA A. The origin of Cretaceous black shales: A change in the surface ocean ecosystem and its triggers[J]. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 2015, 91(7): 273-291.
- [6] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.
- [7] LI T J, HUANG Z L, CHEN X, et al. Paleoenvironment and organic matter enrichment of the Carboniferous volcanic-related source rocks in the Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Science, 2021, 18(1): 29-53.
- [8] WU H G, HU W X, TANG Y, et al. The impact of organic fluids on the carbon isotopic compositions of carbonate-rich reservoirs: Case study of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 85: 136-150.
- [9] 柳益群, 周鼎武, 南云, 等. 新疆北部地区二叠系幔源碳酸岩质喷积岩研究[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 49-63.
LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, NAN Yun, et al. Permian mantle-derived carbonatite originated exhalative sedimentary rocks in North Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(1): 49-63.
- [10] LI H, LIU Y Q, YANG K, et al. Hydrothermal mineral assemblages of calcite and dolomite-analcime-pyrite in Permian lacustrine Lucaogou mudstones, eastern Junggar Basin, Northwest China[J]. Mineralogy and Petrology, 2021, 115(1): 63-85.
- [11] CAO Z, LIU G D, XIANG B L, et al. Geochemical characteristics of crude oil from a tight oil reservoir in the Lucaogou Formation, Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(1): 39-72.
- [12] 毛翔, 李江海, 张华添, 等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2381-2391.
MAO Xiang, LI Jianghai, ZHANG Huatian, et al. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2381-2391.
- [13] KUZNETSOV A B, KRUPENIN M T, OVCHINNIKOVA G V, et al. Diagenesis of carbonate and siderite deposits of the Lower Riphean Bakal Formation, the southern Urals: Sr isotopic characteristics and Pb-Pb age[J]. Lithology and Mineral Resources, 2005, 40(3): 195-215.
- [14] 刘锦康, 邓明国, 毛政利, 等. 滇西勐兴铅锌矿床热液方解石碳氧同位素、稀土元素特征及其指示意义[J]. 地质与勘探, 2021, 57(4): 852-864.
LIU Jinkang, DENG Mingguo, MAO Zhengli, et al. Characteristics and indication of carbon-oxygen isotopes and rare earth elements of hydrothermal calcite from the Mengxing Pb-Zn deposit, western Yunnan[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(4): 852-864.
- [15] ABEDINI A, CALAGARI A A, NASERI H. Mineralization and REE geochemistry of hydrothermal quartz and calcite of the Helmesi vein-type copper deposit, NW Iran[J]. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen, 2016, 281(2): 123-134.
- [16] ALIPOUR S, MOSAVI ONLAGHI K. Mineralogy and geochemistry of major, trace and rare earth elements in sediments of the

- Hypersaline Urmia Salt Lake, Iran[J]. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 2018, 92(4): 1384-1395.
- [17] 黄思静, QING Hairuo, 黄培培, 等. 晚二叠世—早三叠世海水的锶同位素组成与演化: 基于重庆中梁山相碳酸盐的研究结果[J]. *中国科学: 地球科学*, 2008, 38(3): 273-283.
HUANG Sijing, QING Hairuo, HUANG Peipei, et al. Evolution of strontium isotopic composition of seawater from Late Permian to Early Triassic based on study of marine carbonates, Zhongliang Mountain, Chongqing, China[J]. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2008, 51(4): 528-539.
- [18] CORROCHANO D, ARMENTEROS I. Diagenesis of Pennsylvanian phylloid algal mounds from the southern Cantabrian Zone (Spain)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(1): 20.
- [19] JIAO X, LIU Y Q, YANG W, et al. Microcrystalline dolomite in a Middle Permian volcanic lake: Insights on primary dolomite formation in a non-evaporitic environment[J]. *Sedimentology*, 2023, 70(1): 48-77.
- [20] 刘勇, 袁海锋, 高耀, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系—二叠系裂缝充填方解石的成因机制及石油地质意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(11): 2573-2583.
LIU Yong, YUAN Haifeng, GAO Yao, et al. Genetic mechanism of calcite veins in Carboniferous-Permian volcanic reservoirs in the Hashan area, Junggar Basin and its petroleum geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(11): 2573-2583.
- [21] 曹剑, 胡文璋, 姚素平, 等. 准噶尔盆地石炭—二叠系方解石脉的碳、氧、锶同位素组成与含油气流体运移[J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 722-729.
CAO Jian, HU Wenxuan, YAO Suping, et al. Carbon, oxygen and strontium isotope composition of calcite veins in the carboniferous to Permian source sequences of the Junggar Basin: Implications on petroleum fluid migration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 722-729.
- [22] YANG Z, ZHONG D K, WHITAKER F, et al. Syn-sedimentary hydrothermal dolomites in a lacustrine rift basin: Petrographic and geochemical evidence from the Lower Cretaceous Erlian Basin, northern China[J]. *Sedimentology*, 2020, 67(1): 305-329.
- [23] MIBBACH H, DUDA J P, VAN DEN KERKHOF A M, et al. Ingredients for microbial life preserved in 3.5 billion-year-old fluid inclusions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1101.
- [24] 张成勇, 聂逢君, 侯树仁, 等. 内蒙古塔木素地区砂岩型铀矿床热活动与铀矿化之间关系[J]. *矿物学报*, 2015, 35(1): 79-86.
ZHANG Chengyong, NIE Fengjun, HOU Shuren, et al. Study on hydrothermal alteration and relation with uranium mineralization of the Tamusu exogenous uranium deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(1): 79-86.
- [25] MALONE M J, BAKER P A, BURNS S J. Recrystallization of dolomite: An experimental study from[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(12): 2189-2207.
- [26] FANTLE M S. Calcium isotopic evidence for rapid recrystallization of bulk marine carbonates and implications for geochemical proxies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 148: 378-401.
- [27] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [28] 邓义楠, 任江波, 郭庆军, 等. 太平洋西部富稀土深海沉积物的地球化学特征及其指示意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(3): 733-747.
DENG Yi'nan, REN Jiangbo, GUO Qingjun, et al. Geochemistry characteristics of REY-rich sediment from deep sea in Western Pacific, and their indicative significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(3): 733-747.
- [29] LIANG C, CAO Y C, LIU K Y, et al. Diagenetic variation at the lamina scale in lacustrine organic-rich shales: Implications for hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 229: 112-128.
- [30] SHAUN L L, BARKER, COX S F. Oscillatory zoning and trace element incorporation in hydrothermal minerals: Insights from calcite growth experiments[J]. *Geofluids*, 2011, 11(1): 48-56.
- [31] 支东明, 李建忠, 张伟, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷双吉构造带井井子沟组勘探突破及意义[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1383-1394.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHANG Wei, et al. Exploration breakthrough and its significance of Jingjingzigou Formation in Shuangji tectonic zone of Jimsar sag in Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 43(10): 1383-1394.
- [32] NADER F H, SWENNEN R, KEPPENS E. Calcitization/dedolomitization of Jurassic dolostones (Lebanon): Results from petrographic and sequential geochemical analyses[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(5): 1467-1485.
- 第一作者简介: 李克(1996-), 男, 安徽宿州人, 现为中国石油大学(华东)在读博士研究生, 主要从事非常规油气储集层地质学方向研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 邮政编码: 266580。E-mail: likea0619@163.com
- 联系作者简介: 葱克来(1988-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院教授, 主要从事常规与非常规油气储集层地质学方面的教学和科研工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 邮政编码: 266580。E-mail: xikelai@upc.edu.cn
- 收稿日期: 2022-11-22 修回日期: 2023-03-30

(编辑 黄昌武)