

基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素(Δ_{47})温度 约束的构造-埋藏史重建 ——以塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组为例

沈安江^{1,2}, 胡安平^{1,2}, 郑剑锋^{1,2}, 梁峰^{1,2}, 王永生^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 构造-埋藏史恢复是成烃、成储和成藏史研究的重要内容。通过塔里木盆地震旦系奇格布拉克组露头 and 镜下多期次碳酸盐胶结物的识别和成岩序列的建立,碳酸盐矿物U-Pb同位素测年和团簇同位素(Δ_{47})测温2项技术的应用,取得2项成果认识:①建立了塔里木盆地奇格布拉克组基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史曲线,解决了前人基于地质认识的构造-埋藏史曲线不确定性的问题;②基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史曲线,建立了储层成岩作用-成岩环境-地球化学特征和演化图谱及定时定量的成岩-孔隙演化史曲线,为理解区域构造地质背景控制下孔隙改造事件、成孔效应提供了基础,并指出储集空间主要形成于沉积和早表生环境,埋藏环境通过胶结作用逐渐减孔。

关键词 U-Pb同位素测年; 团簇同位素测温; 构造-埋藏史; 奇格布拉克组; 塔里木盆地

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

0 前言

可靠的构造-埋藏史是含油气盆地烃源岩生排烃史恢复、储层成岩-孔隙演化史恢复和烃类运移前有效孔隙判识、油气成藏期次和成藏地质过程重建的重要依据,一直以来是地质学家们研究的热点问题^[1-2]。前人^[3-4]主要基于区域地质背景、地层剥蚀厚度、构造运动幕次等地质认识恢复盆地构造-埋藏史,但因构造运动幕次认识的不同和地层剥蚀厚度难以恢复,造成恢复结果存在不确定性,尤其是经历了多旋回构造运动改造的中国海相碳酸盐岩构造-埋藏史的重建更是如此。对构造运动幕次认识的不同,造成构造-埋藏史曲线侧向震荡频率的差异;对地层剥蚀厚度认识的不同,造成构造-埋藏史曲线垂向震荡幅度的差异。除包裹体均一温

度外(并非总能找到可供均一温度测试的包裹体),徐秋晨等^[5]、邱楠生等^[6]应用多种古温标法(磷灰石和锆石裂变径迹、磷灰石和锆石(U-Th)/He、镜质组反射率)重建目的层系的古地温史,结合地温梯度和构造运动幕次,重建构造-埋藏史。磷灰石和锆石裂变径迹、磷灰石和锆石(U-Th)/He等方法仅适用于碎屑岩或夹碎屑岩的碳酸盐岩地层,不适用于纯碳酸盐岩地层,而且挑选出来的磷灰石和锆石与碎屑岩地层几乎是同期的,虽然可以通过磷灰石和锆石裂变径迹温度的测定重建整个地质历史时期的古地温史,但无法通过锆石测年获得能代表整个地质历史时期的一系列同位素年龄数据,无法建立绝对年龄坐标系下的构造-埋藏史曲线。镜质组反射率(碳酸盐岩地层主要由沥青反射率换算)方法在恢复盆地热演化史、恢复剥蚀厚度等方面得到了广泛应

收稿日期: 2021-04-27; 改回日期: 2021-05-24; 网络出版日期: 2021-08-27

本文受国家科技重大专项下课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号:2016ZX05004-002)、中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目“古老海相碳酸盐岩定年、定温与微量-稀土元素面扫描技术研发及应用”(编号:2018D-5008-03)和中国石油天然气股份有限公司科技项目“深层碳酸盐岩-膏盐岩组合沉积建模、成储机理研究与储层实验技术研究”(编号:2019-5009-16)共同资助

第一作者: 沈安江, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号中国石油杭州地质研究院; E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 胡安平, 博士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩储层研究与地球化学实验技术研发工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号中国石油杭州地质研究院; E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn

用,但无论是镜质组反射率还是沥青反射率方法本身也有许多局限性,比如镜质组和沥青缺乏、沥青成因复杂等,镜质组反射率与时间-温度的关系及有机质成熟作用的反应动力学问题也一直存在争议^[7-8]。

近几年开发的碳酸盐矿物激光原位 U-Pb 同位素测年技术^[9-10]、团簇同位素测温(Δ_{47} 温度)技术^[11-12]为构造-埋藏史重建提供了解决方案。与磷灰石、锆石不同,碳酸盐胶结物胶结期次多,胶结物年龄可以比地层年龄年轻,只要能找到足够期次的胶结物,就可以建立绝对年龄坐标系下的构造-埋藏史曲线。该技术的理论基础是碳酸盐岩的每一期方解石或白云石胶结物都是在特定的地质年龄、埋藏深度和温度背景下的产物,通过多期碳酸盐胶结物 U-Pb 同位素测年和 Δ_{47} 测温,结合古地温梯度,就可求取绝对年龄坐标系下的构造-埋藏史曲线。碳酸盐胶结物的期

次越多,测得的同位素年龄和 Δ_{47} 温度的约束点就越多,建立的构造-埋藏史曲线就越符合地质实际。与前人的构造-埋藏史重建对比,该技术具有以下 3 个方面的优势:①适用于经历多旋回构造改造的海相碳酸盐岩地层;②通过同位素年龄和 Δ_{47} 温度的约束,构造-埋藏史曲线由定性走向定量,精度更高;③多期次碳酸盐胶结物样品更易获得,检测成功率高,易于推广应用。

本文以塔里木盆地震旦系奇格布拉克组为例,阐述基于 U-Pb 同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史重建方法。

1 区域地质背景

塔里木盆地夹持于天山、西昆仑山和阿尔金山构成的环形山链之间(图 1a),整体呈菱形。南华纪

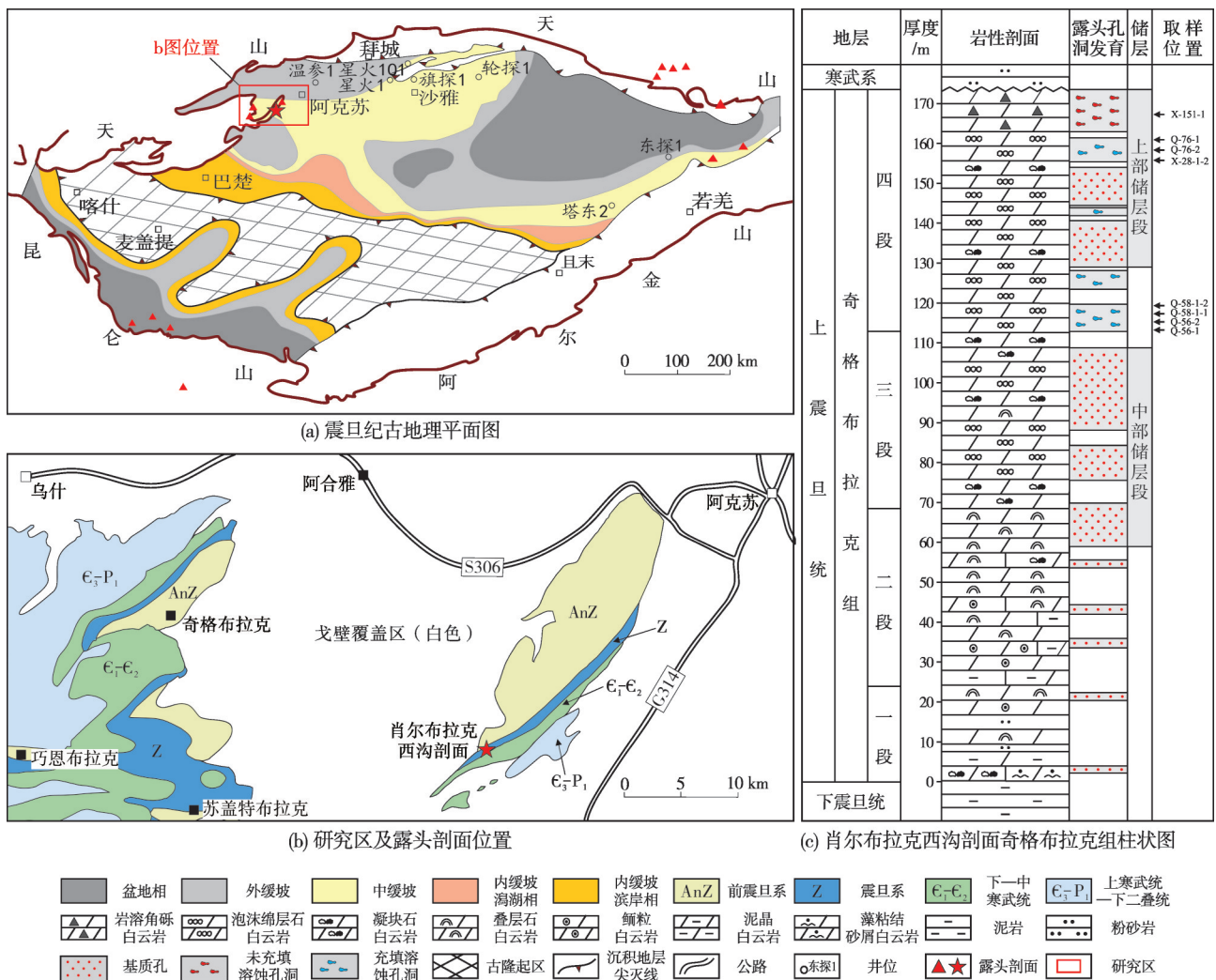


图1 塔里木盆地阿克苏地区震旦纪古地理背景和晚震旦世地层序列

Fig. 1 Stratigraphic sequence and paleogeographic setting of Late Sinian in Aksu area, Tarim Basin

时,塔里木盆地受罗迪尼亚(Rodinia)超大陆裂解的影响进入拉张裂谷演化阶段,盆地基底开始接受盖层沉积^[13]。震旦纪以来随着地幔柱活动逐渐减弱,盆地由克拉通裂陷期进入克拉通内坳陷期^[14-15]。在早震旦世填平补齐的基础上,晚震旦世在中央古隆起以北形成了广海碳酸盐缓坡^[16]。前期工作认为阿克苏地区上震旦统奇格布拉克组发育一套内缓坡一中缓坡相沉积^[17],与下伏苏盖特布拉克组碎屑岩呈平行不整合接触。震旦纪末柯坪运动引起的抬升剥蚀导致奇格布拉克组顶部发育岩溶风化壳^[18]。寒武纪初期发生快速海侵,在奇格布拉克组之上覆盖了玉尔吐斯组优质烃源岩。自震旦纪末的柯坪运动后,研究区又经历了4期主要的区域性构造事件^[19],分别为以奥陶纪末的抬升为代表的晚加里东运动、以石炭纪末的抬升为代表的晚海西运动(导致研究区志留系—泥盆系的缺失)、以三叠纪末的抬升为代表的晚印支运动和以白垩纪末的抬升为代表的晚燕山运动。

本文研究的肖尔布拉克西沟剖面(图1b)是研究区上震旦统出露较为完整的剖面^[20],前期实测工作揭示奇格布拉克组主要发育微生物白云岩和颗粒白云岩,沉积环境自下而上由内缓坡潮坪相过渡为中缓坡丘滩相^[17],由下至上可划分为4个以微生物白云岩为主的岩性段(图1c):①薄层微生物白云岩与粉砂岩、泥岩互层,厚25.45 m;②薄层水平—微波状叠层石白云岩夹颗粒白云岩及凝块石白云岩,厚44.45 m;③厚层块状泡沫绵层石白云岩、凝块石白云岩及其过渡类型构成若干旋回,中上部受顶部风化壳影响发育顺层溶缝,厚93.10 m;④岩溶角砾白云岩,厚10.50 m。奇格布拉克组发育2类储层,即微生物白云岩储层和岩溶储层。微生物白云岩储层集中发育于中部和上部2个储层段:中部储层段储集岩包括叠层石白云岩和泡沫绵层石白云岩,储集空间以叠层石纹层间格架(溶)孔和泡沫绵层窗格孔为主;上部储层段储集岩以泡沫绵层石白云岩为主,储集空间包括泡沫绵层窗格孔和少量溶蚀缝洞。储层发育受沉积微相和震旦纪末抬升剥蚀所控制^[21]。

2 样品、方法和测试结果

2.1 样品的制作和测试

本文样品均来自塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克西沟剖面上震旦统奇格布拉克组四段。选

择孔洞和裂缝发育、充填有多期碳酸盐胶结物、溶蚀和胶结特征清晰、相互交割关系明显、易于建立完整可靠成岩序列的样品(图2)。

2.1.1 薄片样品制作

薄片样品的制作过程和用途如下:

(1)将样品切成直径1.5~2.5 cm、厚约0.8 cm的圆柱体,沿切面两边做成2个平行样。切制了Q-56-1、Q-58-1-1、Q-58-1-2、Q-76-1、X-151-1、X28-1-2、X-56-2、Q-76-2共8组平行样。

(2)对每个样品的1个平行样制作薄片A(厚30 μm),另1个平行样制作薄片B(厚100 μm)。2个平行样的残留实体样均可用于制作粉末样品。

(3)对薄片A进行镜下特征观察,明确胶结物的类型、特征和期次。

(4)对薄片B进行镜下特征观察,找到与薄片A对应的沉积成岩组构类型。

通过薄片A的观察,识别出6期白云石沉积成岩组构(①围岩白云石,②纤状环边白云石,③叶片状白云石,④细粉晶白云石,⑤中晶白云石,⑥粗晶鞍状白云石)和2类方解石成岩胶结组构(裂缝中充填的方解石、孔洞中充填的方解石),成岩序列清晰(图2)。根据测年数据,充填裂缝和孔洞的方解石各可区分出两期(I、II)。

2.1.2 粉末样品的制备

对2个平行样的残留实体样品进行镜下观察,找到与薄片A或薄片B对应的区域,用微钻分别钻取不同沉积成岩组构的粉末样品各10 mg。

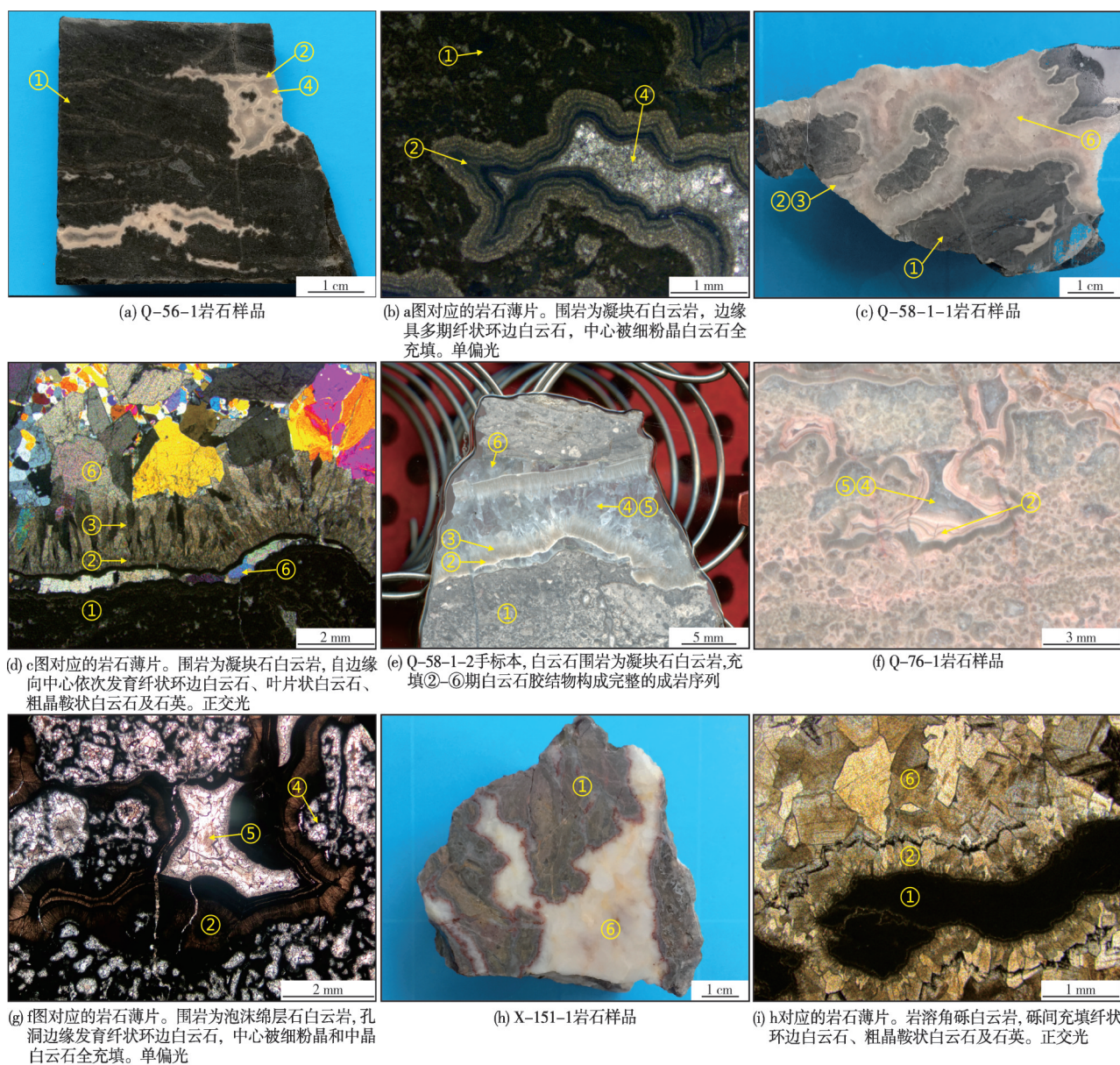
2.1.3 样品的测试

对薄片B中不同的沉积成岩组构分别开展激光原位U-Pb同位素测年。对不同沉积成岩组构的粉末样品分别开展团簇同位素(Δ_{47})测温。

2.2 技术简介

2.2.1 激光原位U-Pb同位素测年技术

碳酸盐矿物定年技术在确定地质事件发生的时间中具有广阔的应用前景^[22]。在碳酸盐矿物定年方法中,Rb-Sr、K-Ar、Re-Os和Nd-Sm定年法均无法获得碳酸盐矿物稳定可靠的绝对年龄^[23-24]。Moorbath等^[25]最早证实了铀系定年法在碳酸盐矿物定年中的可行性,随后Smith等^[26]和Dewolf等^[27]陆



注: 图中序号①—⑥为6期白云石胶结物: ①围岩白云石; ②纤状环边白云石; ③叶片状白云石; ④细粉晶白云石; ⑤中晶白云石; ⑥粗晶鞍状白云石。

图2 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克西沟剖面奇格布拉克组沉积成岩结构特征和产状

Fig. 2 Depositional-diagenetic fabric characteristics and occurrence of Qigebulak Formation in Xigou section of Xiaorbulak, Aksu area, Tarim Basin

续报道了低铀(100~500 ng/g)碳酸盐矿物U-Pb定年的实例,使得U-Pb同位素测年成为唯一适用于碳酸盐矿物绝对年龄测定的技术^[28],并在洞穴石笋^[29]、钙质结核^[30]、方解石脉^[31-32]、渗透回流白云岩^[33]以及孔洞胶结物^[28,34]定年中得到广泛应用,用于确定白云石化作用^[33]、断层滑动^[32]、区域构造及成岩流体活动^[28,34]、盆地热史和成岩-孔隙演化事件的发生时间^[9,28]。

碳酸盐矿物U-Pb同位素稀释法测年^[35]由于存在WC-1标样不稳定^[36-37]及ASH-15标样偏年轻^[27]、

超低铀含量检测难、足够粉末样钻取难、化学提纯繁琐、样品污染潜在风险大等问题,测试极为耗时,成功率低,因此难以推广应用。随着AHX-1标样(绝对年龄 209.1 ± 2.2 Ma)的开发和激光剥蚀技术的应用,同时在多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上特别安装了5个连续打拿极离子计数器(Ion Counter, IC0-IC4)和IC5,分别用于测量 ^{208}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{204}Pb 、 ^{202}Hg 和 ^{238}U ,解决了标样、取样和超低U含量检测的难题,U含量检测的极限可低至10 ng/g,中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验

室从而成功开发了碳酸盐矿物激光U-Pb同位素测年技术^[9,38]。该技术利用30~250 μm 直径的激光束斑,在单一结构组分内进行30~60次的单点剥蚀,拟合出等时线年龄。与同位素稀释法相比,激光剥蚀方法具有高分辨率($>5\ \mu\text{m}$)、高成功率、高精度、高分析速度等优势,易于推广应用。

2.2.2 团簇同位素(Δ_{47})测温技术

团簇同位素(Δ_{47})是近十年来新兴的一种同位素地球化学指标,被广泛应用于古温度重建和成岩流体示踪等研究中。其测试方法比传统稳定同位素方法复杂,主要分为 CO_2 提纯和测试两部分。 CO_2 提纯是在不锈钢提纯前处理线上进行的,主要包括以下步骤:

(1)首先团簇同位素前处理系统真空度达到 $5\times 10^{-4}\ \text{hPa}$ 后,将10 mg粉末样品溶解于3.5 mL的超浓度磷酸(浓度为105%)中30~40 min,产生的 CO_2 气体用液氮(约 -196°C)冷凝在第1个水阱中,再用 -90°C 的甲醇替换液氮,使第1个水阱中的 CO_2 气体从水中分离向第2个水阱转移,去除杂气和水,将析出的 CO_2 气体通过温度约为 -30°C 的Porapak Q冷阱去除有机物质(此处转移时间约30min),然后将

全部 CO_2 气体收集在第3个水阱,最后转移至取气瓶中,以备上机测试。

(2)对提纯后的 CO_2 气体用Thermo MAT-253质谱仪进行测试,采用双路进气法,实验室内部标样气体与待测的 CO_2 气体共交替测试14次,离子束强度为12 000 mV,质谱仪离子束背景应用PBL法(pressure baseline)进行校正。

(3)将测得的 Δ_{47} 值根据Hunting等^[39]的方法进行数据标准化,标准化后的 $\Delta_{47}\text{-raw}$ 值应用Dennis等^[40]提出的团簇同位素实验室之间的二氧化碳气体平衡转换标尺(CDES, carbon dioxide equilibrate scale)进行转换,以便于各个实验室之间的数据对比。

(4)测试和处理后的 Δ_{47} 值对应的温度用Swart等^[41]提出的公式进行计算。详细的测试和处理流程可参阅Murray等^[42]的详细介绍。

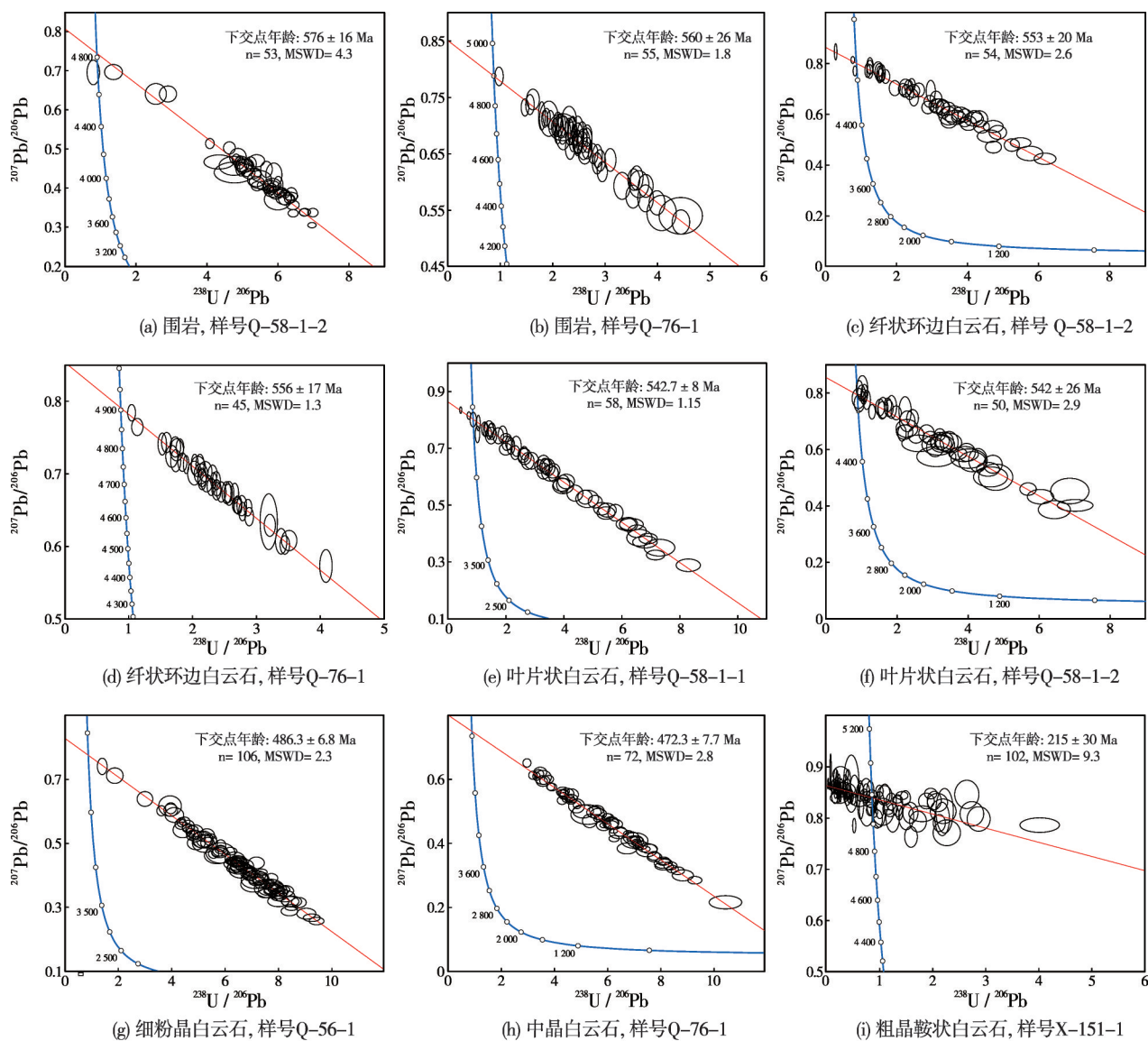
2.3 测试结果

碳酸盐矿物团簇同位素测温(Δ_{47} 温度)在迈阿密大学地球化学实验室完成,碳酸盐矿物激光原位U-Pb同位素测年在中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室完成。测试结果见表1、图3。

表1 塔里木盆地阿克苏地区沉积成岩组U-Pb同位素年龄、团簇同位素温度及其地球化学特征
Table 1 U-Pb isotopic age, cluster isotopic temperature and geochemical characteristics of depositional-diagenetic fabrics in Aksu area, Tarim Basin

序号	结构组分	样品编号	U-Pb年龄/Ma	Δ_{47} 温度/ $^\circ\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	围岩白云石(A)	Q-58-1-2	576 \pm 16	30	1.007	-5.936	0.708 7
		Q-76-1	560 \pm 26	32	2.795	-4.290	0.708 7
2	纤状环边白云石(B)	Q-58-1-2	553 \pm 20	63	2.158	-6.725	0.708 8
		Q-76-1	556 \pm 17	60	2.033	-6.566	0.708 8
3	叶片状白云石(C)	Q-58-1-1	542.7 \pm 8.0	68	1.598	-6.610	0.708 9
		Q-58-1-2	542 \pm 26	65	1.001	-7.051	0.708 9
4	细粉晶白云石(D)	Q-56-1	486.3 \pm 6.8	91	1.051~2.210	-8.253	0.709 0
5	中晶白云石(E)	Q-76-1	472.3 \pm 7.7	110	0.987~1.897	-8.766	0.709 1
6	粗晶鞍状白云石(H)	X-151-1	215 \pm 30	160	1.364~1.987	-10.390	0.709 5
7	裂缝充填方解石 I (G)	X-28-1-2	320 \pm 13	132	2.637~2.246	-9.872	0.709 5
	裂缝充填方解石 II (I)	Q-58-1-1	65 \pm 47	70	1.738~2.149	-9.301	0.709 4
8	孔洞充填方解石 I (F)	Q-56-2	380 \pm 7.8	166	1.937~2.568	-9.971	0.709 4
	孔洞充填方解石 II (J)	Q-76-2	35 \pm 91	103	1.476~2.009	-6.547	0.708 9

注: ① 结构组分栏的A—J为图4、图5中的投点编号; ② 碳、氧、锶稳定同位素数据引自参考文献[17]; ③ 由于I、J测点U含量低而且年龄偏小,造成U-Pb同位素年龄误差较大,但可以明确指示较为年轻的一期成岩产物。



注: 图中蓝色曲线为Tera-Wasserburg谱和年龄曲线; 红色直线为年龄回归线; 黑色圆(椭圆)为测点, 圆(椭圆)为剥蚀点同位素比值, 圆越大代表误差范围越小; MSWD表示平均标准权重偏差。

图3 主要沉积成岩组U-Pb同位素年龄图谱

Fig. 3 U-Pb isotopic dating of main depositional-diagenetic fabrics

3 奇格布拉克组构造-埋藏史重建

理论上,任何一期碳酸盐岩成岩矿物都是绝对年龄坐标系下特定埋藏深度和温度条件下的产物,在地质年代、埋藏深度和地层温度坐标系中的投点是唯一的。图4中的黑色曲线为依据区域地质背景、地层剥蚀厚度、构造运动幕次等地质认识建立的塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组构造-埋藏史曲线。由于没有温度的约束,导致地层剥蚀厚度和埋藏深度出现误差;因为没有年龄的约束,目的层系从埋藏到抬升的转折时间的确定是定

性的,导致曲线发生了不同程度的侧向偏移。事实上,由于对地层剥蚀厚度、构造运动幕次等认识的不同,不同学者建立的构造-埋藏史曲线会存在很大差异。对构造运动幕次认识的差异会导致构造-埋藏史曲线侧向震荡频率的差异,对地层剥蚀厚度认识的差异会导致构造-埋藏史曲线垂向震荡幅度的差异。

U-Pb同位素年龄和 Δ_{47} 温度为目的层系可靠的构造-埋藏史曲线的建立提供了约束。年龄和温度的约束主要体现在对构造-埋藏史曲线垂向震荡幅度的修正上。曲线侧向震荡频率主要基于构造运动幕次的认识来确定,因为并不能确定每一期成岩

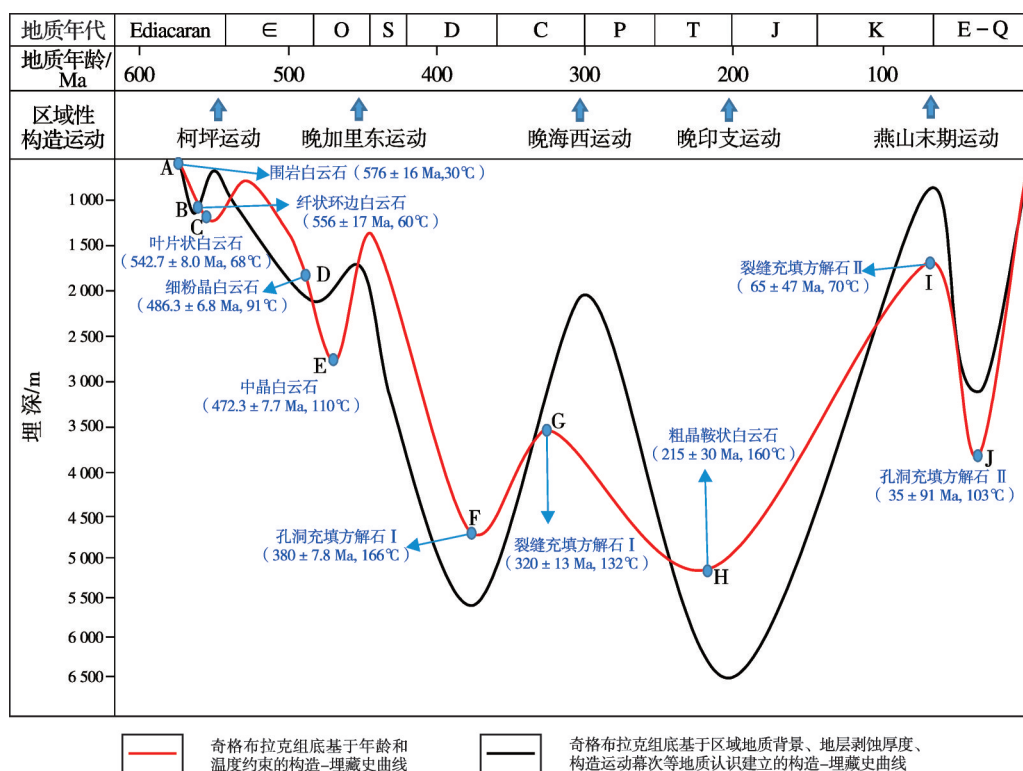


图4 塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组绝对年龄坐标系下的构造-埋藏史曲线

Fig. 4 Tectonic-burial history curve under absolute age coordinate system of the Sinian Qigebulak Formation in Aksu area, Tarim Basin

产物对应的同位素年龄和 Δ_{47} 温度值是否在埋藏与抬升的转折过程中形成。这也是基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束重建目的层系构造-埋藏史需要以基于地质认识所建立的构造-埋藏史曲线作为工作底图的原因。

图4中红色曲线是基于U-Pb同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史曲线。阿克苏地区寒武纪—奥陶纪地温梯度为 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,志留纪—二叠纪地温梯度为 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,三叠纪—白垩纪末地温梯度为 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,新生代地温梯度为 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[43],据此可换算地质历史时期不同埋藏深度的古地温。将碳酸盐矿物U-Pb同位素年龄和 Δ_{47} 温度换算的深度投到基于地质认识所建立的构造-埋藏史曲线上,如果地质年龄和埋藏深度具有一一对应关系(能投到曲线上),则构造-埋藏史曲线被视为是可靠的,否则要不断地调整地层沉积厚度和剥蚀厚度,直至测年测温点拟合到曲线上,这时所建立的构造-埋藏史曲线是地质年龄、古地温和埋藏深度归一的曲线。这种将测年测温成果应用于埋藏史曲线恢复的方法,减少了不确定性和多解性,和传统方法相比,效果更理想。

图4中红色曲线侧向上的震荡频率与黑色曲线基本一致,这是由构造运动幕次决定的,只是基于

同位素年龄的约束,对黑色曲线侧向上的偏移做了校正。但是对于黑色曲线垂向上的振幅,则基于地质年龄、古地温和埋藏深度的一致性做了较大的校正。假设地表温度为 25°C ,点A、B、C、D、E按寒武纪—奥陶纪 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的地温梯度计算的深度分别约为140 m(近地表)、1 100 m、1 130 m、1 870 m、2 833 m,点F、G按志留纪—二叠纪 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的地温梯度计算的深度分别约为4 700 m、3 566 m,点H、I按三叠纪—白垩纪 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的地温梯度计算的深度分别约为5 200 m、1 800 m,点J按新生代 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的地温梯度计算的深度约为3 900 m。以A、B、C、D、E、F、G、H、I、J点的同位素年龄和深度为坐标投点,即可得到图4中的红色曲线。

图4中黑色曲线与红色曲线垂向上震荡幅度的差异是由于对地层沉积厚度和剥蚀厚度误判的结果,如F点孔隙充填方解石I的同位素年龄为 $380 \pm 7.8\text{ Ma}$, Δ_{47} 温度为 166°C ,对应的深度为4 700 m,不应为黑色曲线所示的近5 600 m,说明对志留系—泥盆系厚度的估值偏高了。又如G点裂缝充填方解石I的同位素年龄为 $320 \pm 13\text{ Ma}$, Δ_{47} 温度为 132°C ,对应的深度为3 566 m,不应为黑色曲线所示

的近2 000 m,说明对志留系—泥盆系厚度的估值偏高。同理,点H、I、J与黑色曲线的不一致也是地层厚度误判的结果。经过一系列同位素年龄和 Δ_{47} 温度点对构造—埋藏史曲线的校正,很好地解决了地层厚度恢复的难题,构建了更为可靠的由地质年龄、古地温和埋藏深度归一的构造—埋藏史曲线。显而易见,尽可能找到更多期次的成岩矿物,才能有更多的同位素年龄和 Δ_{47} 温度点来约束,这样构建的构造—埋藏史曲线才更接近地质实际。

4 构造—埋藏史曲线的应用

目的层系构造—埋藏史曲线为成烃、成储和成藏研究提供非常重要的基础图件^[44]。本文重点讨

论构造—埋藏史曲线在塔里木盆地震旦系奇格布拉克组成储评价研究中的应用,主要体现在2个方面:①绝对年龄坐标系下储层成岩作用—成岩环境—地球化学特征和演化关系的建立,为区域构造地质背景控制下的孔隙改造事件和成孔效应的理解提供依据;②绝对年龄坐标系下定时定量成岩—孔隙演化史的重建,为烃类充注前有效孔隙的判断提供依据。

基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造—埋藏史曲线,不但为成岩产物的成岩环境判识提供证据,而且为绝对年龄坐标系下储层成岩作用—成岩环境—地球化学特征和演化图谱(图5)的建立提供了背景图件。

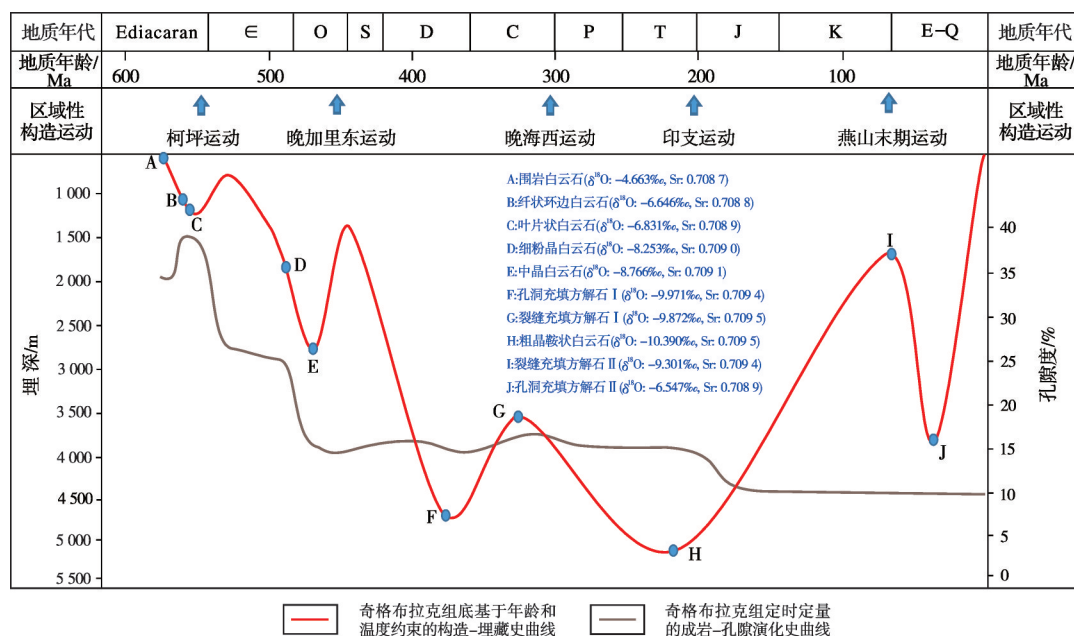


图5 塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组储层成岩作用—成岩环境—地球化学特征和演化图谱及储层成岩—孔隙演化史

Fig. 5 Diagenesis—diagenetic environment—geochemical characteristics and evolution curve and diagenesis—pore evolution history of the Sinian Qigebulak Formation in Aksu area, Tarim Basin

塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组围岩和各期成岩产物的碳同位素组成变化不大,但氧同位素和锶同位素的变化非常有规律,随埋藏深度的增加和成岩温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐向负值迁移, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 逐渐增大。目前还没有晚震旦世海水锶同位素的参考值,与早寒武世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 5~0.709 0)相比,围岩、纤状环边白云石和叶片状白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值位于该区间,说明白云石化是早期发生的。细粉晶白云石和中晶白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

值偏高(0.709 0~0.709 1),说明受到油田卤水或地下深埋藏水的影响。典型鞍状白云石是幔源流体的产物, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可以达到0.711 9~0.712 3^[7],这里的鞍状白云石属于地热白云石(geothermal dolomite), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.709 5,没有明显幔源流体的影响,而与深部高温成岩介质有关。裂缝和孔洞中的方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 9~0.709 5)明显比白云石胶结物值偏高,这可能是矿物的基质效应造成的,并不代表幔源流体的产物,主要受深部油田卤水或

埋藏水的影响。

储层成岩作用-成岩环境-地球化学特征和演化图谱(图5)为区域构造地质背景控制下孔隙改造事件、成孔效应的理解提供了基础(表2),据此建立

了定时定量的成岩-孔隙演化史曲线(图5),结合烃源岩的生排烃史,可判识烃类运移前的有效孔隙。由图5和表2可见,储集空间主要形成于沉积和早表生环境,埋藏环境通过胶结作用逐渐减孔。

表2 塔里木盆地阿克苏地区奇格布拉克组成岩环境、孔隙改造事件及成孔效应
Table 2 Diagenetic environment, pore transformation events and pore forming effect of Qigebulak Formation in Aksu area, Tarim Basin

序号	结构组分	成岩环境(地质年龄/Ma)	孔隙改造事件	成孔效应
1	纹层-波状叠层白云石	蒸发海水成岩环境(576±16)	沉积作用形成原生孔,早期白云石化	初始孔隙度设定为35%,蒸发海水白云石化有利于早期孔隙的保存
2	纤状环边白云石	淡水成岩环境与蒸发海水成岩环境交互(556±17)	柯坪运动导致半固结沉积物抬升暴露、溶蚀作用、胶结作用和早期白云石化作用	表生溶蚀形成溶蚀孔洞,与蒸发海水成岩环境的交替有利于溶蚀孔洞的形成与保存,孔隙度达到40%
3	叶片状白云石	极浅埋藏成岩环境(542.7±8.0)	胶结充填作用,仍受同期蒸发海水影响,氧化环境	减孔率达到12%,残留孔隙度28%
4	细粉晶白云石	中埋藏成岩环境(486.3±6.8)	埋藏成岩介质主导粒状白云石的沉淀,还原环境	减孔率为2%,残留孔隙度26%
5	中晶白云石	中深埋藏成岩环境(472.3±7.7)	晚加里东构造热事件导致中晶粒状和鞍状白云石沉淀,受断裂活动控制,可间歇性受到大气淡水影响,方解石充填裂缝和孔洞,氧化环境	减孔率达到10%,残留孔隙度16%
6	裂缝及沿裂缝发育的孔洞中方解石充填Ⅰ	深埋藏成岩环境(320±13和380±7.8)	印支期构造热事件导致中晶粒状和鞍状白云石沉淀,受晚燕山期和喜马拉雅期断裂活动控制,可间歇性受到大气淡水影响,方解石充填裂缝和孔洞,氧化环境	形成的裂缝和孔洞很快被亮晶方解石充填,对孔隙度影响不大,但对渗透率会有很大的贡献
7	粗晶鞍状白云石	深埋藏热液成岩环境(215±30)		减孔率达到5%,残留孔隙度11%
8	裂缝及沿裂缝发育的孔洞中方解石充填Ⅱ	浅埋藏—中深埋藏成岩环境(65±47和35±91)		形成的裂缝和孔洞很快被亮晶方解石充填,对孔隙度影响不大,但对渗透率会有很大的贡献

胶结物的出现总是对应着减孔效应,但是胶结物地球化学特征所揭示的成岩环境、氧化或还原背景(表2)却能反映构造运动和成孔作用。纤状环边白云石和叶片状白云石的出现,在减孔的同时揭示了柯坪运动和表生岩溶作用的存在,表明储集空间主要形成于沉积和表生环境。中晶粒状白云石和鞍状白云石的出现,使储层孔隙度减小的同时揭示了深层氧化环境和开放体系的存在,为认识埋藏和热液溶蚀孔洞的发育、孔隙的调整和富集提供了证据。

5 结 论

(1)建立了塔里木盆地震旦系奇格布拉克组基于年龄和温度约束的构造-埋藏史曲线,解决了前人基于地质认识的构造-埋藏史曲线不确定性的问题。

(2)基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史曲线,建立了储层成岩作用-成岩环境-地球化学特征和演化图谱和定时定量的成岩-孔隙演化史曲线,为区域构造地质背景控制下孔隙改造事件、成孔效应的理解提供了基础,指出储集空间主要形成于沉积和

早表生环境,埋藏环境通过胶结作用逐渐减孔。

该案例揭示基于同位素年龄和 Δ_{47} 温度约束的构造-埋藏史恢复方法不但适用于经历多旋回构造改造的深层碳酸盐岩构造-埋藏史重建,而且在成储和成岩年代学研究中具重要的应用价值。该技术的应用存在2个局限性:①同位素年龄和 Δ_{47} 温度的约束主要体现在对构造-埋藏史曲线垂向震荡幅度的修正上,对曲线侧向震荡频率的修正作用有限;②需要建立完整的成岩序列,找到足够多的成岩矿物期次,才能有更多的同位素年龄和 Δ_{47} 温度点来约束,这样构建的构造-埋藏史曲线才更接近地质实际。

参 考 文 献

[1] 何丽娟. 沉积盆地构造热演化模拟的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 661-665.
[2] 邱楠生. 沉积盆地热历史恢复方法及其在油气勘探中的应用[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 45-51.
[3] 朱传庆, 徐明, 单竞男, 等. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1268-1277.

- [4] 朱传庆,邱楠生,曹环宇,等.四川盆地东部构造-热演化:来自镜质体反射率和磷灰石裂变径迹的约束[J].地学前缘, 2017,24(3):94-104.
- [5] XU Qiuchen, QIU Nansheng, LIU Wen, et al. Thermal evolution and maturation of Sinian and Cambrian source rocks in the Central area of the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Journal of Asian earth sciences, 2018,164:143-158.
- [6] 邱楠生,刘雯,徐秋晨,等.深层-古老海相层系温压场与油气成藏[J].地球科学,2018,43(10): 3511-3525.
- [7] 任战利,田涛,李进步,等.沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展[J].地球科学与环境学报, 2014,36(3):1-21.
- [8] 邱楠生,李慧莉,金之钧.沉积盆地古生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索[J].地学前缘,2005,15(4):561-567.
- [9] 沈安江,胡安平,程婷,等.激光原位U-Pb同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J].石油勘探与开发,2019,46(6): 1062-1074.
- [10] 胡安平,沈安江,梁峰,等.激光铀铅同位素定年技术在塔里木盆地肖尔布拉克组储层孔隙演化研究中的应用[J].石油与天然气地质,2020,41(1): 37-49.
- [11] GHOSH P, ADKINS J, AFFEK H, et al. ^{13}C - ^{18}O bonds in carbonate minerals: a new kind of paleothermometer[J]. Geochimica et cosmochimica acta,2006,70(6): 1439-1456.
- [12] SHENTON B J, GROSSMAN E L, PASSEY B H, et al. Clumped isotope thermometry in deeply buried sedimentary carbonates: the effects of bond reordering and recrystallization [J]. GSA bulletin, 2015, 127(7/8): 1036-1051.
- [13] 李德伦,张大权.塔里木盆地北部拗陷震旦纪-奥陶纪大陆裂谷性质及其演化[J].长春科技大学学报,2001,31(2): 136-141.
- [14] XU Bei, ZOU Haibo, CHEN Yan, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic [J]. Precambrian research, 2013, 236(5): 214-226.
- [15] 杨云坤,石开波,刘波,等.塔里木盆地西北缘震旦纪构造-沉积演化特征[J].地质科学,2014,49(1): 19-29.
- [16] 石开波,刘波,田景春,等.塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理[J].石油学报,2016,37(11): 1343-1360.
- [17] 杨翰轩,胡安平,郑剑锋,等.面扫描和定年技术在古老碳酸盐岩储集层研究中的应用:以塔里木盆地西北部震旦系奇格布拉克组为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5): 935-946.
- [18] 何金有,邬光辉,徐备,等.塔里木盆地震旦系-寒武系不整合面特征及油气勘探意义[J].地质科学,2010,45(3): 698-706.
- [19] 张光亚,赵文智,王红军,等.塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J].石油与天然气地质,2007,28(5): 653-663.
- [20] 钱一雄,何治亮,李慧莉,等.塔里木盆地北部上震旦统葡萄状白云岩的发现及成因探讨[J].古地学报,2017,19(2): 197-210.
- [21] 严威,杨果,易艳,等.塔里木盆地柯坪地区上震旦统白云岩储层特征与成因[J].石油学报,2019,40(3): 295-307,321.
- [22] RASBURY E T, COLE J M. Directly dating geologic events: U-Pb dating of carbonates [J]. Reviews of geophysics, 2009, 47(3), RG3001.
- [23] SMITH P E, FARQUHAR R M, HANCOCK R G. Direct radiometric age determination of carbonate diagenesis using U-Pb in secondary calcite [J]. Earth & planetary science letters, 1991, 105(4):474-491.
- [24] SCHOENE B. U-Th-Pb geochronology [J]. Treatise on geochemistry, 2014:341-378.
- [25] MOORBATH S, TAYLOR P N, ORPEN J L, et al. First direct radiometric dating of Archaeal stromatolitic limestone [J]. Nature, 1987, 326(6116):865-867.
- [26] SMITH P E, FARQUHAR R M. Direct dating of Phanerozoic sediments by the ^{238}U - ^{206}Pb method [J]. Nature, 1989, 341(6242):518-521.
- [27] DEWOLF C P, HALLIDAY A N. U-Pb dating of a remagnetized Paleozoic limestone [J]. Geophysical research letters, 1991, 18(8):1445-1448.
- [28] GODEAU N, DESCHAMPS P, GUIHOU A, et al. U-Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: case of the Urgonian Limestone, France[J]. Geology, 2018, 46(3): 247-250.
- [29] VAKS A, WOODEAD J, BAR-MATTHEWS M, et al. Pliocene-Pleistocene climate of the northern margin of Saharan-Arabian Desert recorded in speleothems from the Negev Desert, Israel[J]. Earth & planetary sciences letters, 2013, 368(3):88-100.
- [30] ISRAELSON C, HALLIDAY A N, BUCHARDT B. U-Pb dating of calcite concretions from Cambrian black shales and the Phanerozoic time scale[J]. Earth & planetary science letters, 1996, 141(1):153-159.
- [31] COOGAN L A, PARRISH R R, ROBERTS N M W. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: insight from in situ U-Pb dating[J]. Geology, 2016, 44(2): 147-150.
- [32] ROBERTS N M W, WALKER R J. U-Pb geochronology of calcite-mineralized faults: absolute timing of rift-related fault events on the northeast Atlantic margin[J]. Geology, 2016, 44(7): 531-534.
- [33] PISAPIA C, DESCHAMPS P, BATTANI A, et al. U-Pb dating of geodic calcite: new insights on Western Europe major tectonic events and associated diagenetic fluids[J]. Journal of the Geological Society, 2018, 175(1): 60-70.
- [34] DENNISTON R F, ASMEROM Y, POLYAK V Y, et al. Caribbean chronostratigraphy refined with U-Pb dating of a Miocene coral[J]. Geology, 2008, 36(2):151-154.
- [35] BECKER M L, RASBURY E T, MEYERS W J, et al. U-Pb

- calcite age of the Late Permian Castile Formation, Delaware Basin: a constraint on the age of the Permian-Triassic boundary (?) [J]. *Earth & planetary science letters*, 2002, 203(2): 681-689.
- [36] LI Qiong, PARRISH R R, HORSTWOOD M S A, et al. U-Pb dating of cements in Mesozoic ammonites [J]. *Chemical geology*, 2014, 376(6): 76-83.
- [37] ROBERTS N M W, RASBURY E T, PARRISH R R, et al. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology [J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2017, 18(7): 2807-2814.
- [38] 胡安平, 沈安江, 王永生等. 海相碳酸盐岩储层实验分析技术进展及应用 [J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 1-11.
- [39] HUNTING K W, EILER J M, AFFEK H P, et al. Methods and limitations of 'clumped' CO_2 isotope (Δ_{47}) analysis by gas-source isotope ratio mass spectrometry [J]. *Journal of mass spectrometry*, 2009, 44(9): 1318-1329.
- [40] DENNIS K J, AFFEK H P, PASSEY B H, et al. Defining an absolute reference frame for 'clumped' isotope studies of CO_2 [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2011, 75(22): 7117-7131.
- [41] SWART K P, STAUDIGEL P T, HODELLI D A. Oxygen isotopic exchange between CO_2 and phosphoric acid: implications for the measurement of clumped isotopes in carbonates [J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2019, 20(7): 3730-3750.
- [42] MURRAY S T, ARIENZO M M, SWART P K. Determining Δ_{47} acid fractionation in dolomites [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2016, 174: 42-53.
- [43] 潘泉涌. 塔里木盆地台盆地温梯度分布特征 [J]. *内蒙古石油化工*, 2018, 44(10): 52-55.
- [44] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 476-487.

编辑: 张润合

Reconstruction of tectonic-burial evolution based on the constraints of laser in situ U-Pb date and clumped isotopic temperature: a case study from Sinian Qigebulak Formation in Akesu area, Tarim Basin

SHEN Anjiang, HU Anping, ZHENG Jianfeng, LIANG Feng, WANG Yongsheng

Abstract: Reliable tectonic-burial evolution curve is essential for the research on the source rock evolution, reservoirs origin and hydrocarbon accumulating of target strata of the basin. Previous publications reported the tectonic-burial evolution curves depending on regional geological setting, formation (denuded) thickness, and tectonic movements, which are uncertain due to the difference in these geological understandings. For the ancient marine carbonates which went through multicycle tectonic reformation, it is more difficult to reconstruct tectonic-burial evolution history. In this paper, based on the identification of carbonate cements and establishment of diagenetic sequence, by coupling carbonate laser U-Pb dating and clumped isotope (Δ_{47}) thermometer, two understandings were obtained: (1) the tectonic-burial curves of the Sinian Qigebulak Formation of the Tarim Basin are established under the constraints of absolute age and temperature, avoiding the problems of uncertainty of tectonic-burial history curves in previous studies; (2) the new tectonic-burial evolution curve provide critical reference for mapping the diagenesis-diagenetic environment-geochemical characteristics and evolution curve and the quantitative diagenesis-porosity evolution curve, allowing the quantitative analysis of pores formation and transformation, revealing that the pores in the Sinian Qigebulak Formation are mainly formed in the supergene environment and gradually decrease in the burial environment due to the cementation. The proposed method is worthy of popularization in the study of reservoir-forming and diagenetic geochronology for ancient marine carbonate strata.

Key words: laser in situ U-Pb isotopic dating; clumped isotopic thermometry; tectonic-burial evolution; Qigebulak Formation; Tarim Basin

SHEN Anjiang, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China

HU Anping, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir research and experimental technology development. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China