

熊昱杰, 邱楠生, 李丹等. 2023. 碳酸盐团簇同位素约束下塔中隆起奥陶系热历史. 地球物理学报, 66(11): 4625-4638, doi: 10.6038/cjg2022Q0498.

Xiong Y J, Qiu N S, Li D, et al. 2023. Thermal history of the Ordovician in the Tazhong uplift under the constraint of carbonate clumped isotope. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(11): 4625-4638, doi: 10.6038/cjg2022Q0498.

碳酸盐团簇同位素约束下塔中隆起奥陶系热历史

熊昱杰^{1,2}, 邱楠生^{1,2*}, 李丹^{1,2}, 常健^{1,2}, 廖珂琰^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 碳酸盐团簇同位素是近年来兴起的一种新型古温标,其有效地解决了碳酸盐岩沉积盆地缺乏常用古温标的现状,对于沉积盆地热史恢复具有重要意义.本文采集了塔中地区奥陶系碳酸盐岩钻井取芯样品,利用一阶近似模型模拟了塔中隆起碳酸盐团簇同位素温度($T_{\Delta_{47}}$)热演化路径,并结合等效镜质体反射率约束了塔中隆起的热历史.塔中隆起大地热流自奥陶纪到现今总体呈降低趋势,自 $60\sim 70\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 降低至 $40\sim 50\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,二叠纪由于火成岩入侵造成热流短暂升高至 $60\sim 70\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$.模拟结果认为,北部斜坡带及潜山构造带受火成岩影响显著,北部斜坡带及潜山构造带在二叠纪最高温度分别达到 $160\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $180\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$;而塔中南缘未受影响,中生代或者现今为最高温度 $130\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.总的来说,碳酸盐团簇同位素在热史领域的研究目前还处于探索阶段,未来有望在重排规律、 $T_{\Delta_{47}}$ 影响因素以及模型理论方面有待进一步完善,团簇同位素也将在热史领域的研究中产生愈加重大的影响力.

关键词 团簇同位素; 古温标; 热历史; 碳酸盐岩; 塔中隆起

doi:10.6038/cjg2022Q0498

中图分类号 P314

收稿日期 2022-06-25, 2022-10-02 收修定稿

Thermal history of the Ordovician in the Tazhong uplift under the constraint of carbonate clumped isotope

XIONG YuJie^{1,2}, QIU NanSheng^{1,2*}, LI Dan^{1,2}, CHANG Jian^{1,2}, LIAO KeYan^{1,2}

1 State key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Carbonate clumped isotope is a new type of geologic thermometer that has developed in recent years. It can effectively solve the problem that the carbonate sedimentary basins lack commonly used geologic thermometer. Therefore, it takes an important part in the thermal history reconstruction of sedimentary basins. This paper collects the drill cores of Ordovician carbonate rocks in the Tazhong uplift. The thermal evolution paths of the carbonate clumped isotope temperature ($T_{\Delta_{47}}$) in the Tazhong uplift are simulated using the first order rate approximation model, and the thermal history of the Tazhong uplift is constrained by the carbonate clumped isotope as well as the equivalent vitrinite reflectance. From this study, it shows that the heat flow in the Tazhong uplift has generally decreased from $60\sim 70\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ in the Ordovician to $40\sim 50\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ in the present. During the Permian, the heat flow peaked briefly to $60\sim 70\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ due to the

基金项目 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003-02)资助.

第一作者简介 熊昱杰,男,1996年生,中国石油大学(北京)硕士研究生,主要从事沉积盆地热历史方面的研究. E-mail: 2487418448@qq.com

*** 通讯作者** 邱楠生,男,1968年生,中国石油大学(北京)教授,主要从事沉积盆地构造-热演化及油气成藏机理方面的教学和研究.

E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

intrusion of igneous rocks. According to the simulation, the Lower Ordovician in the northern slope belt and the Middle Ordovician in the buried hill structural belt reached the temperature peaks at 160~170 °C and 180~190 °C in the Permian, respectively. While the southern margin of Tazhong uplift only reached the temperature peak at 130~140 °C in the Mesozoic or the present. All of these simulation results reveal that the northern slope belt and the buried hill belt have been significantly affected by the intrusion of igneous rocks, but the southern margin of Tazhong uplift. In general, the research of carbonate clumped isotopes in the field of thermal history is still in an exploratory stage, and it is expected to be further improved in terms of carbonate clumped isotopic rearrangement laws, T_{Δ_7} influencing factors and model theory in the future. The application of carbonate clumped isotope will have an increasingly significant impact in the field of thermal history research.

Keywords Clumped isotopes; Geologic thermometer; Thermal history; Carbonate rocks; Tazhong uplift

0 引言

沉积盆地热历史研究对于油气成藏至关重要,在油气勘探以及油气资源评价领域有着举足轻重的影响.古温标法是恢复沉积盆地热历史最常用的方法,其中有机质古温标和低温热年代学古温标是最为常用的两种方法.但是在碳酸盐岩沉积地层中,有机质古温标以及磷灰石、锆石、榍石等为代表的低温热年代学古温标均相对缺乏.对于碳酸盐岩地层来说,最常用到的古温标有沥青反射率、镜状体反射率、牙行石色变指数、生物碎屑反射率等.沥青自身具有显著的非均质性以及尚未统一的经验公式标准;镜状体难以识别;牙行石颜色判断主观性太强;生物碎屑所存在的环境十分局限,这些古温标的限制因素太多,并不具备普适性,因而对于碳酸盐岩层系的沉积盆地热历史的恢复存在着极大的挑战.因此探索有效古温标来恢复海相沉积盆地的热历史是目前该领域的前沿科学问题.

塔中隆起区属于塔里木盆地中央隆起带的一部分,是近年来重要的油气勘探区块.国内不少学者对塔中隆起热演化已进行了大量的研究.从研究方法看来,大部分学者采用了基于地质温度计的古温标方法进行热史反演,所用古温标从一开始的镜质体反射率、磷灰石裂变径迹(李慧莉等, 2005; Xiang et al., 2013),发展为干酪根自由基浓度(邱楠生等, 2006; Qiu et al., 2007),磷灰石、锆石(U-Th)/He 年龄(常健等, 2010; Chang and Qiu, 2012; Xiang et al., 2013; Chang et al., 2016, 2022)等,这些古温标被应用于塔里木盆地塔中地区的热史重建.也有少数学者应用盆地演化热动力模型来研究塔里木盆地塔

中地区热流演化(李成等, 2000; 冯昌格等, 2010).尽管如此,塔中隆起早古生代的热演化特征一直存在争议,其中的重要原因在于塔中隆起奥陶系及以下地层均为碳酸盐岩层系,常用于碎屑岩地层的古温标并不适用;另外,由于适用于碳酸盐岩层系的众多有机质古温标的局限性、转化为等效镜质体反射率的模拟计算具有差异性,导致塔中隆起区模拟的早古生代热流差异较大.这从某种程度上制约了学者们对于塔中隆起下古生界烃源岩生烃演化的认识,因此塔中隆起区近年来的深层-超深层油气勘探受到了极大的限制.

对于塔中隆起早古生代以来热史的恢复关键在于获得适用于碳酸盐岩层系的具有普适性,且可靠性强的古温标.碳酸盐团簇同位素是近十年来兴起的一种新型古温标,一个方面它能够广泛地存在于碳酸盐层系当中,另一个方面它不依赖于成岩流体中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,而是通过 ^{13}C - ^{18}O 配对,将温度信息记录在化学键当中,通过其丰度变化将温度信息反映出来(Eiler, 2007).因此在缺乏传统古温标的碳酸盐岩地层中,团簇同位素作为其热历史恢复的古温标具有极大的潜力.团簇同位素是指自然出现的、包含一个以上稀有同位素原子的同位素体,这些稀有同位素相结合形成独特的化学键(Schauble et al., 2006; Eiler, 2007).在碳酸盐岩当中具有 ^{13}C - ^{18}O 键的基团称之为团簇.由于其无法直接测量得到,通常是在实验室中利用 105wt% 过饱和磷酸将其酸解为 $^{47}\text{CO}_2$ 利用质谱仪进行间接测量(Passey and Henkes, 2012; Henkes et al., 2014).碳酸盐团簇同位素的测量值一般用 Δ_{47} 表示,指的是测量碳酸盐团簇同位素的丰度与其理想状态下随机分布丰度值之间的偏差(Came et al., 2007).碳酸盐团簇同位素温度

($T_{\Delta_{47}}$)一般是指团簇同位素在地质历史过程中所记录的温度信息,研究表明该温度可能略大于成岩温度(徐秋晨等, 2019). 目前国内外已有研究学者将碳酸盐团簇同位素热演化规律应用到实际当中,来恢复沉积盆地热历史(Shenton et al., 2015; Mangenot et al., 2019; 徐秋晨等, 2019; Naylor et al., 2020; 刘雨晨等, 2020). 利用古生物化石、灰岩、白云岩中碳酸盐团簇同位素 ^{13}C - ^{18}O 键重排程度,应用合适的团簇同位素热史模型来进行 $T_{\Delta_{47}}$ 的计算并与实测值进行拟合,以此来模拟地层所经历的热演化史. 本文通过采集塔中隆起区典型井奥陶系灰岩及白云岩样品,利用碳酸盐团簇同位素进行热史模拟,并结合等效镜质体反射率针对恢复塔中隆起奥陶系早古生代以来的热历史进行双重约束,旨在对塔中隆起构造-热演化特征进行探索.

1 地质概况

塔中地区位于塔里木盆地中部,地理上处于塔克拉玛干沙漠的腹地,东临顺托果勒低凸、古城鼻凸;西接巴楚断隆;北起满加尔、阿瓦提凹陷南侧,南至塘古孜巴斯凹陷北缘,面积约 2.75 万 km^2 (贾承造, 1997). 塔中隆起区各个主要断裂构造带大致呈现北西-南东走向的帚状形态,东窄西宽,并且向西部倾斜至逐渐尖灭,见图 1. 西北部为塔中北部斜坡

构造带,由塔中 I 号断裂带及塔中 II 号断裂带两条主要大断裂所控制;中部为潜山构造带,由下古生界较小的断裂所控制;东南部边缘为塔中 5 井断裂区,衔接着古城鼻凸及塘古孜巴斯凹陷区. 在各个时期,周围的各个生烃凹陷(满加尔凹陷、阿瓦提凹陷、塘古孜巴斯凹陷)油气源源不断地向着塔中隆起区运移聚集,因此塔中隆起具备十分广阔的油气勘探前景.

塔中隆起最早形成于晚奥陶世,由于在加里东运动早期,塔中地区受区域伸展应力作用的影响,稳定下沉,接受了巨厚的寒武-奥陶纪碳酸盐岩浅海台地相的沉积,塔中隆起雏形基本形成,东西部地区差异剥蚀,形成西高东低的构造格局. 加里东运动晚期,挤压应力继续作用,塔中隆起继续拱升,形成巨型鼻隆,志留系剥蚀严重与上覆地层形成明显的角度不整合. 海西运动导致塔中地区发生构造反转,北部斜坡带抬升,志留系-泥盆系普遍剥蚀,特别是西部区域剥蚀严重,逐渐反转形成东高西低的构造格局. 燕山晚期塔中地区普遍大幅抬升,导致白垩系剥蚀. 喜山运动期,由于印度板块与欧亚板块相碰撞,导致隆起与凹陷发生分异,形成如今的构造格局.

塔里木盆地在二叠纪经历过大规模的火山喷发及岩浆侵入事件. 塔中隆起大部分井区在二叠系均发现大量凝灰岩以及以玄武岩为主的火成岩. 经过统计,塔中隆起各个单井二叠系火成岩厚度在 20~

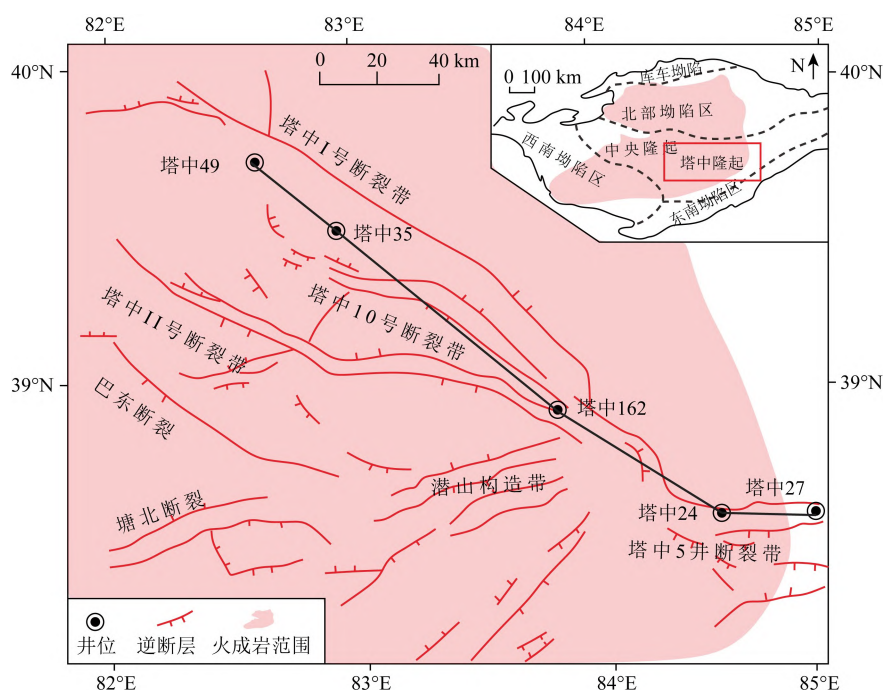


图 1 塔中隆起区构造位置及采样点分布

Fig. 1 Structural location and sampling point distribution in the Tazhong uplift

600 m,这说明塔中隆起为当时火山喷发及岩浆侵入的重要影响区域. 目前的研究表明火山喷发及岩浆侵入大致发生于 300~275 Ma,其可能为地幔柱活动的产物(Yang et al., 2013; 李佳蔚等, 2016; 余星等, 2017),关于其成因本文不做讨论,本文主要关注于二叠纪火成岩入侵事件对碳酸盐团簇同位素重排的影响,从而进一步约束塔中隆起各个构造带的热演化史.

2 样品与实验

2.1 样品预处理

本次研究采集了塔里木盆地塔中地区中下奥陶统碳酸盐岩岩芯进行碳酸盐团簇同位素实验,取样点见图 1. 为了避免碳酸盐岩中一些杂质组分的干扰,在挑选时选取较为均质的泥晶灰岩、白云岩. 挑选样品为不同深度段的取芯,利用 1 mm 的钻头对取芯进行微钻,选取均质性较好,未经历过风化淋滤作用的碳酸盐岩样品,如图 2a 所示,本次研究共采集 49 块碳酸盐岩样品.

团簇同位素测试不允许出现过多除 C、O 元素以外的其他元素杂质,因此利用 X 射线衍射仪进行碳酸盐岩组分分析,如图 2c 所示,筛选出碳酸盐矿物组分含量>90%的碳酸盐岩样品. 另外这些碳酸盐岩样品在地质历史时期可能会经过不同程度的重结晶作用,进而会部分重置碳酸盐团簇同位素记录

的热史信息(Eiler, 2011; Shenton et al., 2015; Lawson et al., 2018; Lloyd et al., 2018). 阴极发光的强度可以用来判断碳酸盐岩重结晶的强弱,如图 2d 所示,可划分为强发光(CL)、弱发光(SL)和不发光(NL). 最后用于碳酸盐团簇同位素实验的样品选用不发光(NL)和弱发光(SL),这些样品未经重结晶或者重结晶作用较弱. 综合以上预处理筛选步骤,最后得到 17 块合适的碳酸盐岩样品.

2.2 实验测试

本次碳酸盐团簇同位素实验测试是在中国科学院南京古生物研究所开展. 实验测试前需进行前处理工作,具体步骤如下:(1)去除有机杂质. 利用 3% 双氧水浸泡使样品充分反应,分离后淘洗烘干.(2)称量样品. 每个样品称量 3 次,每次称取 5~6 mg,放置在实验测试胶囊内并置于干燥箱中,防止空气中水分对其造成影响.(3)标样校正. 本次实验标样为 ETH-1、ETH-2、ETH-3、ETH-4(Wacker et al., 2013),称量标准同测试样品,每次测试随机选出 2 个不同的标样与样品一同分析测试.(4)饱和磷酸制备. 用蒸馏水溶解 $H_6P_4O_{13}$ 不断加热,直到溶液密度为 1.92 g/mL,得到 105wt% 的饱和磷酸. 要求每进行 5~10 次测试换一次磷酸溶液.

实验测试采用 ThermoFisher Scientific 公司生产的 MAT 253 plus 气体稳定同位素质谱仪来进行. 首先需利用气相色谱仪(GC)净化 CO_2 气体,将 GC 系统温度调节到 180 °C,预热 30 min 后,将气相

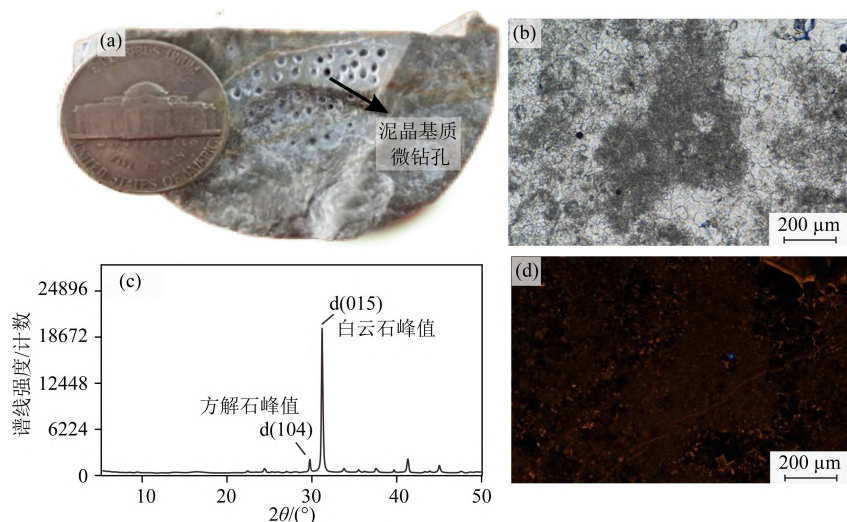


图 2 样品标本及预处理实验结果

(a) TZ162-15 白云岩样品手标本; (b) TZ162-15 单偏光镜下薄片; (c) TZ162-15 X 射线衍射谱图; (d) TZ162-15 阴极发光镜下薄片(NL).

Fig. 2 Sample specimen and experimental results of pretreatment

(a) TZ162-15 dolomite sample specimen; (b) TZ162-15 thin slice under single polarizer; (c) TZ162-15 X-ray diffraction pattern;

(d) TZ162-15 thin slice under cathodoluminescence microscope (NL).

色谱仪(GC)温度调到 100 °C(Dennis et al., 2011; Tang et al., 2014). 然后将称量好的碳酸盐岩样品放置到相应的自动进样器中,使得将要测试样品在真空条件下加热至 90 °C,进而与 105wt%磷酸充分反应约 30 min 生成 CO₂ 气体(Defliese et al., 2015). 将反应产生的 CO₂ 气体通过净化装置,去除残留在 CO₂ 中的水分以及有机杂质,以避免后续同位素测试分析产生影响(Spencer and Kim, 2015). 净化完成后 CO₂ 进入 MAT 253 plus 质谱仪,测试各个团簇同位素参数.

由于在不同实验测试设备、方法所测试的碳酸盐团簇同位素 Δ_{47} 结果有些许差异(Passey et al., 2010). Dennis 等(2011)提出了 CO₂ 绝对参考系(ARF)的概念,使得原始 Δ_{47} 数据标准化(Loyd et al., 2015). 另外不同实验室酸解温度有所差异,所测量得到的 Δ_{47} 结果会受到影响,但是在高温环境下,测试的速度更快(Guo et al., 2009; Wacker et al., 2013, 2016; Müller et al., 2017; Zhang et al., 2020). 为了保证测试效率,通常是将得到的 Δ_{47} 数值转化为常温 25 °C 下的值作为标准值. 本次实验测试结

果是在 90 °C 磷酸反应下进行,结果校正为 25 °C ARF 标准下的 Δ_{47} 值. 根据前人的校正经验公式,校正因子设置为 0.082(Henkes et al., 2013; Defliese et al., 2015; Stolper and Eiler, 2016).

3 实验结果与讨论

本次研究针对上述筛选出的 17 块碳酸盐岩样品进行了碳酸盐团簇同位素实验测试,结果如表 1 所示. 所测试 Δ_{47} 的范围为 0.468~0.594‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 范围为 -3.74~2.52‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 范围为 -9.59~-3.66‰, $T_{\Delta_{47}}$ 计算结果范围为 62~137.9 °C,所有测试结果标准差均在 0.05 误差范围之内.

3.1 样品有效性分析

对于碳酸盐团簇同位素是否经历重排,是否经历成岩蚀变,阴极发光是最为重要的判断依据. 传统碳氧同位素也从一定程度上反映了样品的成岩蚀变信息,对于碳酸盐团簇同位素的重排起到了至关重要的作用. 图 3 显示了全球奥陶纪海水的碳氧同位素的分布范围($\delta^{13}\text{C}$: -3~2‰; $\delta^{18}\text{O}$: -10~-5‰)

表 1 塔中隆起碳酸盐团簇同位素实验测试数据

Table 1 Experimental test data of carbonate clumped in the Tazhong uplift

样品号	层位	深度(m)	岩性	<i>n</i>	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ (‰)	地层温度 (°C)	$\Delta_{47}\text{-ARF}$ (‰)	$T_{\Delta_{47}}$ (°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ (‰)
TZ162-1	O ₃	4330	灰岩	3	1.52	-5.72	116	0.527	96.5	11.66
TZ162-2	O ₃	4705.1	灰岩	3	0.89	-4.77	120	0.541	88.4	12.63
TZ162-3	O ₃	5086.7	白云岩	3	-1.81	-7.83	135	0.487	123.1	9.51
TZ162-4	O ₂	5253.3	灰岩	3	-2.06	-7.3	137	0.513	105.2	10.05
TZ162-5	O ₂	5599.2	灰岩	3	-2.04	-5.35	143	0.521	100.2	12.04
TZ162-6	O ₂	5978.9	灰岩	2	-1.82	-9.59	153	0.468	137.9	7.72
TZ2-1	O ₁	4089	白云岩	3	-3.74	-7.67	102	0.533	93.0	9.68
TZ24-1	O ₃	4497.7	灰岩	3	1.66	-6.28	128	0.542	87.9	11.09
TZ24-2	O ₃	4683.7	灰岩	3	1.56	-6.23	133	0.519	101.4	11.14
TZ27-1	O ₃	3776.9	白云岩	3	2.51	-5.41	120	0.549	84.0	11.98
TZ27-2	O ₃	4108	白云岩	3	2.51	-4.46	123	0.557	79.8	12.94
TZ27-3	O ₃	4572.7	白云岩	3	2.52	-3.66	127	0.535	91.9	13.76
TZ35-1	O ₃	5619.8	灰岩	3	1.44	-4.87	114	0.562	77.2	12.53
TZ35-2	O ₁	5774	白云岩	3	2.41	-4.66	118	0.594	62.0	12.74
TZ35-3	O ₁	5997	灰岩	3	-1.79	-7.07	125	0.498	115.2	10.29
TZ49-1	O ₁	6134	白云岩	3	2.38	-6.24	135	0.51	107.1	11.13
TZ49-2	O ₁	6342	灰岩	4	0.4	-6.99	143	0.503	111.8	10.37

注: Δ_{47} 在 90 °C 磷酸反应下测量,酸解系数为 0.092‰,结果校正为常温状态 ARF 参考体系下的值; *n* 为每个样品测试次数;地层温度采用塔中隆起各个单井的试油温度数据进行拟合得到; $T_{\Delta_{47}}$ 值计算采用(Bonifacie et al., 2017)经验公式. $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 为 SMOW 标准下水的氧同位素值,由 O'Neil 等(1969)经验公式计算得到.

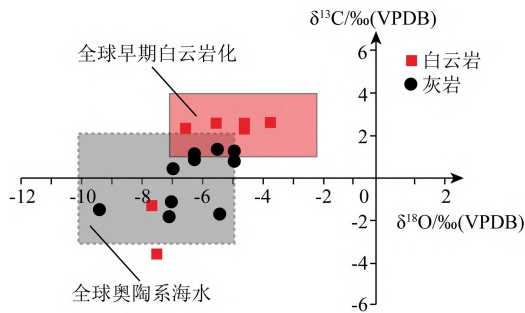
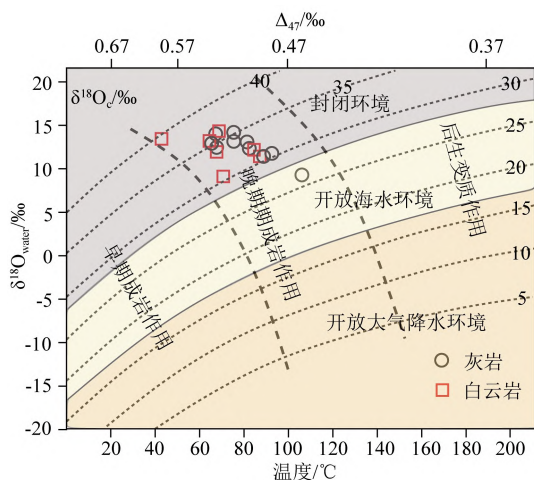


图3 塔中隆起碳氧同位素分布

Fig. 3 Distribution of carbon and oxygen isotopes in the Tazhong uplift

(Veizer et al., 1999) 及全球早期白云岩化碳氧同位素的分布范围 ($\delta^{13}\text{C}$: $1 \sim 4\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$: $-7 \sim -2\text{‰}$) (强深涛等, 2017), 落在该区间的碳酸盐岩样品说明所经历的后期变质作用不强烈, 基本保留了早期的信息. 碳酸盐团簇同位素 Δ_{47} 值与水的氧同位素具有一定的相关性 (Eiler, 2011), 水的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 是根据 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 换算得到的 (O'Neil et al., 1969). Δ_{47} 值和水氧同位素值的分布从某种意义上反映了样品的沉积环境 (封闭环境、开放海水环境、开放大气降水环境) 以及大致的成岩阶段 (早期成岩阶段、晚期成岩阶段、后生变质作用阶段). 如图 4 所示, 塔中隆起测试样品在地质历史时期处于较为封闭的环境中, 理论上原始信息保留较好. 所有样品均处于晚期成岩作用阶段, 这说明利用该样品来进行碳酸盐团簇同位素的模拟具有一定可信度, 能够用于塔中隆起热历史恢复研究.

图4 塔中地区碳酸盐团簇同位素 Δ_{47} 与水氧同位素交会图Fig. 4 Cross map of carbonate clumped isotope Δ_{47} and water oxygen isotope in Tazhong area

3.2 塔中地区热演化史模拟

3.2.1 埋藏史的确立

确定各个典型单井的埋藏史是进行热演化模拟的基础. 依据中石油塔里木油田公司提供的基础资料数据, 塔中隆起从早古生代以来主要经历了 4 期主要的构造运动, 分别为加里东中期 III 幕构造运动、海西期构造运动、印支期构造运动、燕山晚期构造运动, 在相应时期发生剥蚀, 形成了 4 个主要的不整合面.

在加里东中期 III 幕构造运动时期, 整个塔里木板块由伸展型转换为挤压型大地构造背景, 塔中地区中上奥陶统遭受不同程度的剥蚀, 北部斜坡带剥蚀厚度为 500~800 m, 潜山构造带剥蚀厚度为 100~300 m, 南缘剥蚀厚度为 400~600 m, 塔中古隆起的雏形基本形成; 海西构造时期, 在阿尔金断隆强烈隆升使得塔中地区东南部遭受强烈的剥蚀, 北部斜坡带剥蚀厚度为 800~1000 m, 潜山构造带剥蚀厚度为 600~800 m, 南缘剥蚀厚度为 1200~1400 m, 从此发生了东高西低的构造反转, 现今塔中地区的构造格局由此形成. 印支期, 羌塘板块和塔里木板块发生了强烈的碰撞作用导致三叠系以及侏罗系地层发生了剥蚀, 但是剥蚀厚度不大, 整个塔中隆起剥蚀厚度约 200~300 m, 随后中生代塔中地区构造活动趋于稳定, 没有发生较大的构造运动. 燕山晚期发生大幅度抬升, 部分白垩系地层遭受剥蚀, 北部斜坡带及潜山构造带剥蚀厚度约为 800~1000 m, 南缘剥蚀厚度约为 400~800 m; 新生代以来塔中隆起地层经历快速沉降, 未经大量剥蚀, 地层保存较为完整. 本次研究将利用 BasinMod 盆地模拟软件恢复塔中隆起区的埋藏史, 见图 5.

3.2.2 典型井热史模拟

碳酸盐团簇同位素能够用来进行热史模拟的理论基础在于 $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ 键的固态重排. 通过碳酸盐团簇同位素动力学模型来预测 $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ 键的固态重排过程能够有效地对碳酸盐矿物所经历的热史路径进行模拟. 一阶近似模型 (Passey and Henkes, 2012) 是目前通用的团簇同位素动力学模型, 它是假设团簇同位素通过改变内部微观的晶格缺陷来与外界的环境温度达到平衡, 此过程对应着 $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ 键的重新排序. 本次关于塔中隆起热演化史研究是基于—阶近似模型来开展的.

(1) THRM_s 方法

碳酸盐团簇同位素热史模拟方法称为 THRM_s 法 (Shenton et al., 2015). THRM_s 法是利用化学

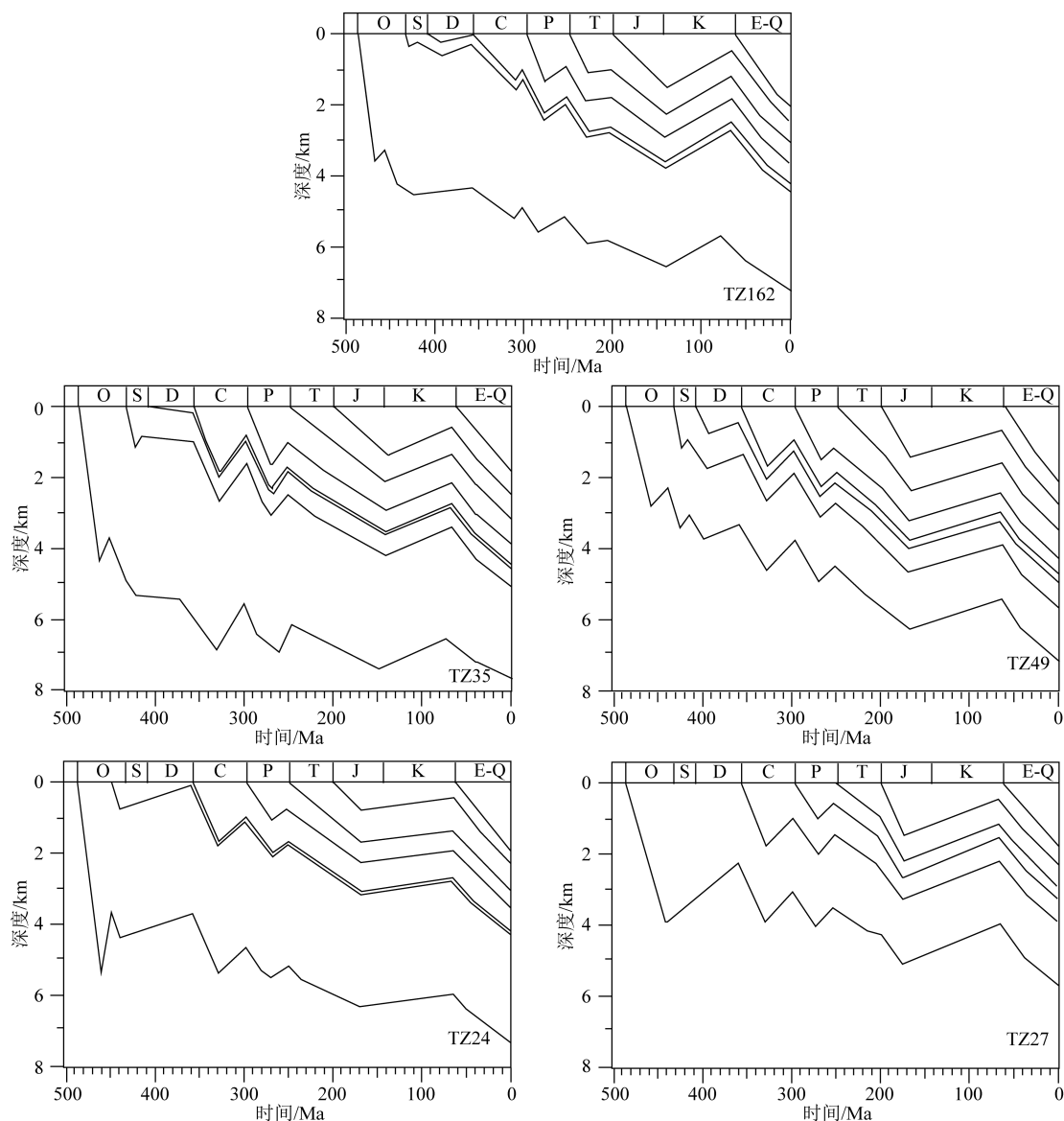


图 5 塔中隆起各个典型单井埋藏史

Fig. 5 Burial history of typical wells in the Tazhong uplift

反应动力学模型来模拟 C-O 键在地质历史时期升温及冷却过程,以此来模拟不同的热史路径.通常是将温度史离散化为一系列“温度-时间”步长,利用碳酸盐团簇同位素重排动力学模型计算每一步长的 $T_{\Delta_{47}}$ 结果,并将此结果作为下一步计算的初始 $T_{\Delta_{47}}$ 值.以此方式不断正演迭代,直到模拟出现今的 $T_{\Delta_{47}}$ 值,这样得到的一条团簇同位素 C-O 键重排温度路径称为“THRM”.通常在模拟过程中需不断改变温度条件,以此模拟出多条“THRMs”路径,并选出最为合理的模拟结果.

本次研究初始温度设置为古海水温度(0~30 °C),通常取 25 °C,时间步长设置为 1 Ma,通过一阶近似模型重排方程(公式(1)–(2))以迭代的方式模拟各

个单井碳酸盐团簇同位素 $T_{\Delta_{47}}-t$ 演化史.不断改变各个单井的温度路径,将利用碳酸盐团簇同位素的一阶近似模型计算得到的 $T_{\Delta_{47}}$ 模拟值与实测值进行比较,不断将误差控制在最小,直至完全拟合,得到的单井热演化史就是最终的在碳酸盐团簇同位素约束下的模拟结果.

$$\ln\left(\frac{\Delta_{47}^t - \Delta_{47}^{\text{eq}}}{\Delta_{47}^{\text{init}} - \Delta_{47}^{\text{eq}}}\right) = -t \times K_0 \times e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}, \quad (1)$$

$$\Delta_{47}^{\text{eq}} = \frac{-3.4 \times 10^9}{T^4} + \frac{2.4 \times 10^7}{T^3} - \frac{2.6 \times 10^3}{T^2} - \frac{5.9}{T} + 0.27, \quad (2)$$

其中, Δ_{47}^t 表示在任意时间任意温度下的 Δ_{47} 值, Δ_{47}^{eq} 表示达到热力学平衡时的 Δ_{47} 值, $\Delta_{47}^{\text{init}}$ 表示初始沉积

温度下的 Δ_{47} 值. K_0 表示频率因子, $K_0 = 4.45 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, Ea 为活化因子, $Ea = 188 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, R 表示气体常数, $R = 8.3$.

(2) 塔中北部斜坡带热史模拟

塔中北部斜坡带模拟了 TZ49 与 TZ35 两口单井. 利用碳酸盐团簇同位素一阶近似模型模拟了 TZ35 井上奥陶统(5619 m)和下奥陶统(5997 m)以及 TZ49 井上奥陶统 6342 m 的 $T_{\Delta_{47}}$ 演化路径, 见图 6a, b. 从模拟结果来看, TZ35 井中下奥陶统碳酸盐团簇同位素 $T_{\Delta_{47}}$ 在二叠纪开始发生显著变化, 对于下奥陶统尤为明显.

目前的研究认为塔里木盆地早-中二叠世大火成岩省与地幔柱存在着极大的关系(Yang et al., 2013), 根据所测得柯坪地区玄武岩 K-Ar 年龄、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄、LA-ICP-MS 法及 U-Pb 法测定开派兹雷克组及库普库兹曼组岩石序列年龄(Yang et al., 2013; Yu et al., 2011), 推算因地幔柱柱头上升而引发的大规模火成岩入侵事件时间下限大约为 275 Ma, 上限大约为 300 Ma(Xu et al., 2014; Li et al., 2014). 根据岩石学、地球化学等方法, 研究认为塔里木盆地地幔柱中心柱头可能位于北部地区(徐汉林等, 2006), 这反映了早二叠世地幔柱烘烤上覆地层以塔北为中心往南逐渐减弱的现象(李佳蔚等, 2016).

塔中隆起区距地幔柱中心柱头较远, 属于塔里木盆地早-中二叠世大火成岩省边缘区域, 但也受到了一定的火山喷发及岩浆侵入的影响. 现有的钻井资料显示中下二叠统发现有大量的玄武岩、辉绿岩以及凝灰岩, 显示出火山岩喷发相及次火山岩相特征; 根据三维地震资料显示, 中下二叠统具有大量火山锥、火山岩脉、火山通道等一系列强反射轴、反射波杂乱的地震反射波特征, 并遍布于塔中隆起各大断裂带周围; 另有测井资料显示, 中下二叠统自然伽马曲线异常变低, 密度及电阻率曲线异常增高, 这显示出明显的溢流相火山岩特征(杨江峰, 2015). 目前的研究表明该期火山喷发及火成岩入侵事件以塔中 II 号断裂带西北部斜坡及潜山构造带为中心, 向四周逐渐减薄, 在塔中南缘处尖灭, 其中西北部开始时间较早, 火山活动更强, 东南部开始时间较晚, 火山活动更弱(徐汉林等, 2006).

$T_{\Delta_{47}}$ 开始显著变化的时间与二叠纪火成岩入侵时间基本重合, 说明碳酸盐团簇同位素的大量重排是在火成岩入侵持续经历高温的影响下发生的. 下奥陶统 5997 m 处灰岩二叠纪峰值温度达到约 160~170 °C, 使得碳酸盐团簇同位素迅速进入大量重排

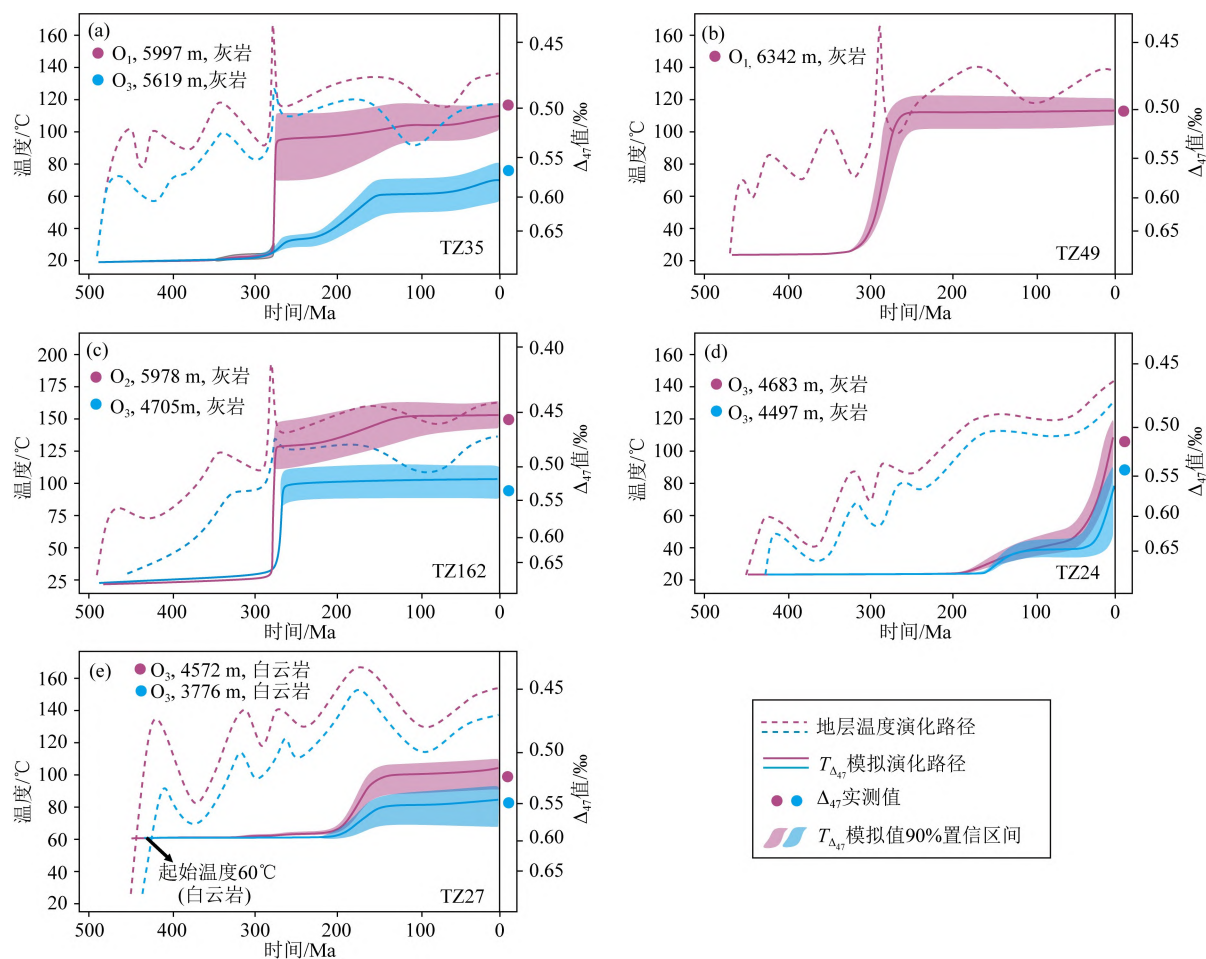
阶段, 此阶段为碳酸盐团簇同位素的温度记录, 此后的地层温度波动对 $T_{\Delta_{47}}$ 的影响变化不大. 上奥陶统 5619 m 处灰岩在二叠纪初也有细微的 $T_{\Delta_{47}}$ 变化, 可能由于埋藏更浅, 加上在燕山晚期大幅抬升背景下中上奥陶统地层遭受大量剥蚀, 二叠纪的峰值温度对碳酸盐团簇同位素重排影响不大, 中新生代以来持续经历重排门限(~120 °C)以上温度, 碳酸盐团簇同位素达到了重排阶段, 但是重排程度较低. TZ49 井下奥陶统 6342 m 处灰岩 $T_{\Delta_{47}}$ 模拟结果显示二叠纪亦存在明显热异常现象, 加上 TZ49 井处于火成岩分布较厚的地区, 二叠系火成岩厚度达到 100 m, 多为玄武岩、辉绿岩等, 另外相关层段测井曲线显示箱状低伽马曲线、锯齿状高电阻率曲线的特征, 说明该异常显示可能也是该时期火成岩入侵对下覆奥陶系碳酸盐岩层烘烤所致.

(3) 塔中潜山构造带热史模拟

塔中潜山构造带模拟了 TZ162 单井的热历史. 利用碳酸盐团簇同位素一阶近似模型模拟了 TZ162 井上奥陶统(4705 m)和中奥陶统(5979 m)的 $T_{\Delta_{47}}$ 演化路径, 见图 6c. 从模拟结果来看, TZ162 井中奥陶统 5979 m 处灰岩在二叠纪最高温达到 180~190 °C, $T_{\Delta_{47}}$ 在该时期发生显著变化. 根据 TZ162 井的完井报告, 二叠系火成岩厚度约 80 m, 以玄武岩、凝灰岩等为主. 根据前人的研究资料表明, 塔中潜山构造带火山口大致以 TZ22 井为中心(裴衡等, 2003), 二叠纪时期火山喷发, 火山灰向四周扩散, 而 TZ162 井距火山喷发中心较近, 因此也受到了影响, 说明 TZ162 井二叠纪时期的热异常现象可能是周围火山喷发造成的. 中生代持续经历 150 °C 以上高温, 致使现今 $T_{\Delta_{47}}$ 具有完全重排的特征; 上奥陶统 4705 m 处灰岩在二叠纪峰值温度约 140 °C, $T_{\Delta_{47}}$ 在该时期发生显著变化, 具备火成岩入侵影响特征, 由于浅部地层温度更低, 团簇同位素经历部分重排.

(4) 塔中南缘热史模拟

塔中南缘模拟了 TZ24 与 TZ27 两口单井. 利用碳酸盐团簇同位素一阶近似模型模拟了 TZ24 井上奥陶统(4497 m 和 4683 m)灰岩和 TZ27 井上奥陶统(3776 m 和 4572 m)白云岩的 $T_{\Delta_{47}}$ 演化路径, 见图 6d, e. 从模拟结果来看, TZ24 井上奥陶统两处采样点在二叠纪并没有出现明显热异常显示, 而碳酸盐团簇同位素 $T_{\Delta_{47}}$ 在中生代以来持续经历重排门限以上温度值, 开始发生显著变化, 中新生代以来塔中隆起经历快速沉降, 现今温度为最高温度, 目前碳酸

图6 塔中隆起典型单井碳酸盐团簇同位素 $T_{\Delta_{47}}$ 模拟演化结果Fig. 6 The simulated evolution results of the typical single well carbonate clumped isotope $T_{\Delta_{47}}$ in the Tazhong uplift

盐团簇同位素处于大量重排阶段. TZ27 井两处采样点为上奥陶统白云岩, 由于白云岩成因较为复杂, $T_{\Delta_{47}}$ 演化初始温度应大于地表温度. 本次研究共测试了 7 个白云岩样品 Δ_{47} 值, 计算得 $T_{\Delta_{47}}$ 范围为 62~123 °C. 一般 $T_{\Delta_{47}}$ 越低表明碳酸盐团簇同位素重排程度越低, 一定存在某一最低的 $T_{\Delta_{47}}$ 值表示碳酸盐团簇同位素尚未开始重排的温度, 因此不妨将此温度设置为初始温度值. 本次研究 TZ35-2 白云岩样品 $T_{\Delta_{47}}$ 值为 62 °C, 可将大约 60 °C 设置为初始温度, 即可能的白云岩开始形成时的温度. 不断改变温度路径, 使得模拟的现今 $T_{\Delta_{47}}$ 值与实测值相匹配 (在 90% 置信区间范围内), 据此认为该 $T_{\Delta_{47}}$ 热史演化路径是合理的. 模拟结果显示, 二叠纪并未发现明显的异常增温现象. 钻井资料显示的二叠系火成岩厚度大约 5~10 m, 以凝灰岩为主, 根据塔里木盆地二叠系大火成岩省范围, 塔中南缘处于火成岩边缘区域, 加上碳酸盐团簇同位素热史模拟并未产生二叠纪热异常现象, 因此塔中南缘很可能未受到火成岩入侵

的影响. 而碳酸盐团簇同位素在中生代开始大量重排, $T_{\Delta_{47}}$ 开始出现显著变化, 说明该时期也曾发生过持续时间较长的增温现象, 可能中新生代稳定沉降所导致, 使得碳酸盐团簇同位素有足够的时间发生重排.

3.2.3 塔中隆起热演化史的约束

结合以上塔中隆起碳酸盐团簇同位素的模拟研究发现, 塔中北部斜坡带及潜山构造带受二叠纪岩浆影响十分显著, 塔中北部构造带下奥陶统在二叠纪时期最高温度达到 160~170 °C, 塔中潜山构造带中奥陶统在二叠纪达到 180~190 °C; 塔中南缘上奥陶统在二叠纪无热异常显示, 现今或者在中生代为地质历史时期最高温度约 130~140 °C.

基于以上对碳酸盐团簇同位素的热史模拟分析, 并结合中石油塔里木油田公司收集到的等效镜质体反射率数据作为参考, 二者相互结合共同约束了塔中隆起典型单井的埋藏史-热史, 如图 7 所示, 以及大地热流模拟结果, 如图 8 所示. TZ162、TZ35、

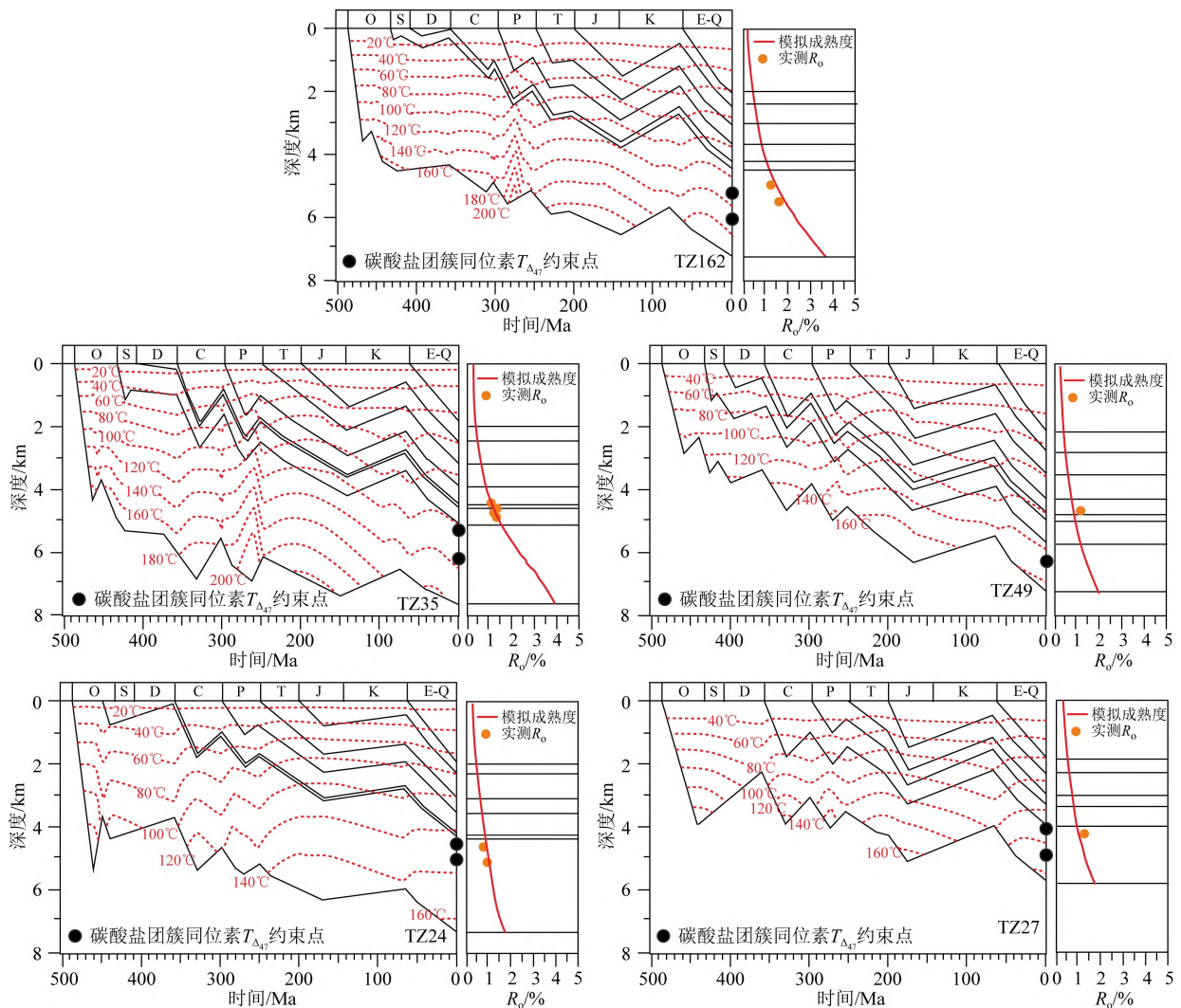


图7 塔中隆起典型井埋藏史-热史恢复

Fig. 7 Burial history and thermal history reconstruction of typical wells in the Tazhong uplift

TZ49 在二叠纪时期均出现了温度突增的现象,这是由于海西运动末期位于塔中地区巨型鼻隆的倾没端出现短期的引裂伸张作用(茆衡等, 2003). TZ35 及 TZ49 两口单井均位于塔中隆起北部塔中 I 号断裂带附近,构造活动频繁,早二叠世多次火山喷发和岩浆侵入形成大量喷发相玄武岩、凝灰岩及次火山岩相辉绿岩岩墙,致使地层迅速受到强烈的高温影响,这一过程发生在二叠纪岩浆活动初期. TZ162 井位于潜山构造带,可能是由于岩浆活动末期,深部热液活动所致,热液作用下中奥陶统常见方解石脉体发育. 而位于塔中南缘的 TZ24、TZ27 二叠纪也有微弱的增高,但是变化不明显. 一方面是由于海西运动末期南部抬升幅度较小,构造活动相对稳定;另一方面在该区域二叠系火成岩厚度薄,并不十分发育,致使后期地层可能部分受到周围岩浆烘烤的影响,但是增温不显著.

总的来说,受塔里木板块构造活动影响,塔中隆起自奥陶纪到现今大地热流呈降低趋势,见图 8,早奥陶世热流值为 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,降低至现今约

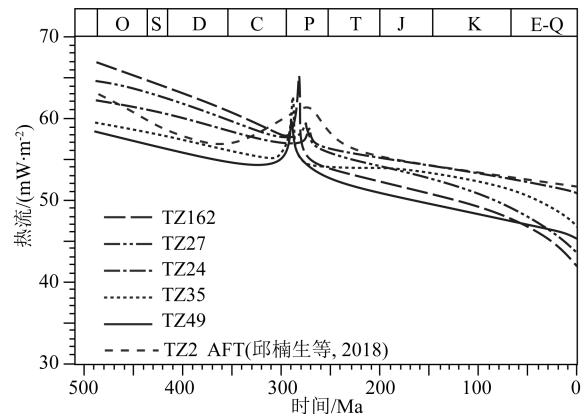


图8 塔中隆起典型井热流恢复

Fig. 8 Heat flow reconstruction of typical wells in Tazhong uplift

为 $40 \sim 50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 二叠纪受岩浆侵入和火山喷发影响,最高峰值达到 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 其中塔中北部斜坡带和潜山构造带可能受岩浆侵入影响较大,二叠纪异常热流变化幅度相对较大,约增加 $8 \sim 12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$;而南缘地区受火山活动影响较小,二叠纪异常热流变化相对较低,约增加 $0 \sim 2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,并且影响时间相对滞后.

前人利用磷灰石裂变径迹(AFT)也针对塔中隆起的热流演化做了相关研究(Qiu et al., 2012; Xiang et al., 2013; 邱楠生等, 2018; Liu et al., 2021),通过测试塔中地区志留系至三叠系多个砂岩层内磷灰石径迹年龄、径迹长度,恢复了塔中隆起早古生代以来的热历史. AFT 模拟结果表明早古生代热流略高于 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,此后总体趋势一直持续降低至现今约 $50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,这与碳酸盐团簇同位素恢复的结果大致相同,如图 8 所示. 另外, AFT 模拟结果在石炭纪-二叠纪时期也有相应的增温热异常响应,但是显示热异常变化是一个缓慢长期的过程(邱楠生等, 2018),这与本次研究碳酸盐团簇同位素显示的二叠纪短暂热流峰值产生了细微的差异. 这可能与磷灰石较低的封闭温度有关,当温度持续高于约 110°C ,磷灰石会发生完全退火,因此 AFT 更适用于温度较低的浅部地层热史模拟. 而碳酸盐团簇同位素开始重排温度约 120°C ,完全重排温度也高于 160°C ,更适用于塔中地区深部可能经历 160°C 以上高温的地层. 此外,传统的地温热年代学古温标例如磷灰石、锆石仅适用于碎屑岩地层的热史恢复;对于碳酸盐岩层系的热史恢复,碳酸盐团簇同位素可能是目前最有价值的一种古温标. 然而,碳酸盐团簇同位素的缺点也非常明显:在样品选择方面,需要挑选均质性好、杂质含量低、未经历重结晶的样品,这增添了大量样品鉴别筛选实验工作;在热事件响应方面,虽然碳酸盐团簇同位素捕捉热事件较为敏感,但是其无法识别热事件具体发生在哪个时代,这就需要结合其他方面的证据如 R. 异常变化、U-Pb 定年等作为辅助.

目前对于团簇同位素的研究尚处于起步阶段,未来将针对团簇同位素重排机制、影响因素进一步挖掘,团簇重排模型理论将进一步完善,团簇同位素在热史恢复领域当中亦将显示出举足轻重的影响力.

4 结论

碳酸盐团簇同位素作为一种新兴的古温标,对

于碳酸盐岩层系的热史恢复展现出极大的潜力. 本次研究通过碳酸盐团簇同位素实验测试,利用一阶近似模型模拟了塔中隆起各个构造带奥陶系 $T_{\Delta_{47}}$ 演化情况,并结合等效镜质体反射率约束了塔中隆起各个典型单井的热历史,主要得出以下几点认识:

(1)碳酸盐团簇同位素常以地质历史时期最大埋藏古温度作为温度标记,对于构造热事件的捕捉具备十分敏感的特性. 对于塔中隆起来说,碳酸盐团簇同位素记录了二叠纪的岩浆活动的热信息,表现为 $T_{\Delta_{47}}$ 热史模拟路径在相应时期发生显著变化. 塔中北部斜坡带下奥陶统在二叠纪时期达到最高温度 $160 \sim 170^\circ\text{C}$,塔中潜山构造带中奥陶统在二叠纪时期达到最高温度 $180 \sim 190^\circ\text{C}$;塔中南缘在二叠纪无明显热异常显示,现今或者在中生代碳酸盐团簇同位素记录为地质历史时期最高温度约 $130 \sim 140^\circ\text{C}$.

(2)塔中隆起北部斜坡带岩浆活动可能是由火山喷发及浅部岩浆侵入所导致,以大量的喷发相玄武岩、凝灰岩以及次火山岩相辉绿岩岩墙作为佐证,岩浆活动时间为最早;塔中潜山构造带岩浆活动与深部热液侵入有关,以大量方解石脉作为佐证,岩浆活动时间相对靠后;塔中南缘受二叠纪岩浆影响十分微弱,可能受到过周围岩浆烘烤的影响,对热流的影响不显著,时间为最晚.

(3)塔中隆起大地热流从奥陶纪时期到现今总体呈现降低趋势,早奥陶世热流值为 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,降低至现今约为 $40 \sim 50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 二叠纪受岩浆侵入和火山喷发影响,最高峰值达到 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 二叠纪热流变化情况与塔中隆起不同构造带岩浆活动强度以及波及范围密切相关,北部斜坡构造带及潜山构造带受岩浆活动影响显著,二叠纪热流变化大,塔中南缘受到岩浆活动影响甚小,二叠纪热流变化小甚至未有变化.

References

- Bonifacie M, Calmels D, Eiler J M, et al. 2017. Calibration of the dolomite clumped isotope thermometer from 25 to 350°C , and implications for a universal calibration for all (Ca, Mg, Fe) CO_3 carbonates. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 200; 255-279, doi: 10.1016/j.gca.2016.11.028.
- Came R E, Eiler J M, Veizer J, et al. 2007. Coupling of surface temperatures and atmospheric CO_2 concentrations during the Palaeozoic era. *J. Nature*, 449(7159): 198-201, doi: 10.1038/nature06085.
- Chang H, Gong Q, Ouyang R, et al. 2003. The characteristics of igneous rocks and their influences to petroleum exploration in the center of Tarim Basin. *J. Geophysical Prospecting for Petroleum*

- (in Chinese), 42(1): 49-53, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2003.01.011.
- Chang J, Qiu N S, Reiners P, et al. 2010. Zircon (U-Th)/He ages of borehole samples from the Tarim basin and geological significance. //The 26th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, The Thirteenth Academic Conference of the Seismological Society of China (in Chinese). Ningbo.
- Chang J, Qiu N S. 2012. Closure temperature of (U-Th)/He system in apatite obtained from natural drillhole samples in the Tarim basin and its geological significance. *J. Chinese Science Bulletin*, 57(26): 3482-3490, doi: 10.1007/s11434-012-5176-1.
- Chang J, Qiu N S, Song X Y, et al. 2016. Multiple cooling episodes in the Central Tarim (Northwest China) revealed by apatite fission track analysis and vitrinite reflectance data. *J. International Journal of Earth Sciences*, 105(4): 1257-1272, doi: 10.1007/s00531-015-1242-7.
- Chang J, Yang X, Qiu N S, et al. 2022. Zircon (U-Th)/He thermochronology and thermal evolution of the Tarim Basin, Western China. *J. Journal of Asian Earth Sciences*, 230: 105210, doi: 10.1016/j.jseaes.2022.105210.
- Defliese W F, Hren M T, Lohmann K C. 2015. Compositional and temperature effects of phosphoric acid fractionation on Δ_{47} analysis and implications for discrepant calibrations. *J. Chemical Geology*, 396: 51-60, doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.12.018.
- Dennis K J, Affek H P, Passey B H, et al. 2011. Defining an absolute reference frame for "clumped" isotope studies of CO₂. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22): 7117-7131, doi: 10.1016/j.gca.2011.09.025.
- Eiler J M. 2007. "Clumped-isotope" geochemistry—The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues. *J. Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4): 309-327, doi: 10.1016/j.epsl.2007.08.020.
- Eiler J M. 2011. Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry. *J. Quaternary Science Reviews*, 30(25-26): 3575-3588, doi: 10.1016/j.quascirev.2011.09.001.
- Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al. 2010. Present-day geotemperature field characteristics in the central uplift area of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation and preservation. *J. Earth Science*, 35(4): 645-656, doi: 10.3799/dqkx.2010.079.
- Guo W F, Mosenfelder J L, Goddard W A, et al. 2009. Isotopic fractionations associated with phosphoric acid digestion of carbonate minerals: Insights from first-principles theoretical modeling and clumped isotope measurements. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(24): 7203-7225, doi: 10.1016/j.gca.2009.05.071.
- Henkes G A, Passey B H, Wanamaker A D Jr, et al. 2013. Carbonate clumped isotope compositions of modern marine mollusk and brachiopod shells. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 106: 307-325, doi: 10.1016/j.gca.2012.12.020.
- Henkes G A, Passey B H, Grossman E L, et al. 2014. Temperature limits for preservation of primary calcite clumped isotope paleotemperatures. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139: 362-382, doi: 10.1016/j.gca.2014.04.040.
- Jia C Z. 1997. Structural Characteristics and Oil and Gas in the Tarim Basin (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.
- Lawson M, Shenton B J, Stolper D A, et al. 2018. Deciphering the diagenetic history of the El Abra Formation of eastern Mexico using reordered clumped isotope temperatures and U-Pb dating. *J. GSA Bulletin*, 130(3-4): 617-629, doi: 10.1130/b31656.1.
- Li C, Wang L S, Guo S P, et al. 2000. Thermal evolution in Tarim basin. *J. Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 21(3): 13-17, doi: 10.7623/syxb200003003.
- Li D X, Yang S F, Chen H L, et al. 2014. Late Carboniferous crustal uplift of the Tarim plate and its constraints on the evolution of the Early Permian Tarim Large Igneous Province. *J. Lithos*, 204: 36-46, doi: 10.1016/j.lithos.2014.05.023.
- Li H L, Qiu N S, Jin Z J. 2005. Thermal history of central area of the Tarim Basin by apatite fission track analysis. *J. Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 40(1): 129-132, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2005.01.014.
- Li J W, Li Z, Qiu N S, et al. 2016. Carboniferous-Permian abnormal thermal evolution of the Tarim basin and its implication for deep structure and magmatic activity. *J. Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(9): 3318-3329, doi: 10.6038/cjg20160916.
- Liu Y C, Qiu N S, Chang J, et al. 2020. Application of clumped isotope thermometry to thermal evolution of sedimentary basins: A case study of Shuntuoguole area in Tarim Basin. *J. Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(2): 597-611, doi: 10.6038/cjg2020N0152.
- Liu Y C, Dong S Y, Zhao C H. 2021. Thermal evolution and the maturation of the deeply buried lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, northwest China. *J. Arabian Journal of Geosciences*, 14(13): 1238, doi: 10.1007/s12517-021-07562-w.
- Lloyd M K, Ryb U, Eiler J M. 2018. Experimental calibration of clumped isotope reordering in dolomite. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 242: 1-20, doi: 10.1016/j.gca.2018.08.036.
- Lloyd S J, Corsetti F A, Eagle R A, et al. 2015. Evolution of Neoproterozoic Wonoka-Shuram Anomaly-aged carbonates: Evidence from clumped isotope paleothermometry. *J. Precambrian Research*, 264: 179-191, doi: 10.1016/j.precamres.2015.04.010.
- Mangenot X, Deconinck J F, Bonifacie M, et al. 2019. Thermal and exhumation histories of the northern subalpine chains (Bauges and Bornes-France): Evidence from forward thermal modeling coupling clay mineral diagenesis, organic maturity and carbonate clumped isotope (Δ_{47}) data. *J. Basin Research*, 31(2): 361-379, doi: 10.1111/bre.12324.
- Müller I A, Violay M E S, Storck J C, et al. 2017. Clumped isotope fractionation during phosphoric acid digestion of carbonates at 70 °C. *J. Chemical Geology*, 449: 1-14, doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.11.030.
- Naylor H N, Defliese W F, Grossman E L, et al. 2020. Investigation of the thermal history of the Delaware Basin (West Texas, USA) using carbonate clumped isotope thermometry. *J. Basin Research*, 32(5):

- 1140-1155, doi: 10.1111/bre.12419.
- O'NEIL J R, Clayton R N, Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *J. The Journal of Chemical Physics*, 51 (12): 5547-5558, doi: 10.1063/1.1671982.
- Passey B H, Levin N E, Cerling T E, et al. 2010. High-temperature environments of human evolution in East Africa based on bond ordering in paleosol carbonates. *J. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(25): 11245-11249, doi: 10.1073/pnas.1001824107.
- Passey B H, Henkes G A. 2012. Carbonate clumped isotope bond reordering and geospeedometry. *J. Earth and Planetary Science Letters*, 351-352: 223-236, doi: 10.1016/j.epsl.2012.07.021.
- Qiang S T, Shen P, Zhang J, et al. 2017. The evolution of carbonate sediment diagenesis and pore fluid in Dengying Formation, Central Sichuan Basin. *J. Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 35(4): 797-811, doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.014.
- Qiu N S, Li H L, Jin Z J, et al. 2006. Study on the geothermometer of free radicals in organic matter for the reconstruction of the thermal history of marine carbonate succession. *J. Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 80(3): 390-397, doi: 10.3321/j.issn:0001-5717.2006.03.011.
- Qiu N S, Li H L, Jin Z J, et al. 2007. Free radicals in organic matter for thermal history reconstruction of carbonate succession. *J. Acta Geologica Sinica*, 81(4): 605-613, doi: 10.1111/j.1755-6724.2007.tb00984.x.
- Qiu N S, Chang J, Zuo Y H, et al. 2012. Thermal evolution and maturation of lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, northwest China. *J. AAPG Bulletin*, 96(5): 789-821, doi: 10.1306/09071111029.
- Qiu N S, Liu W, Xu Q C, et al. 2018. Temperature-pressure field and hydrocarbon accumulation in deep-ancient marine strata. *J. Earth Science* (in Chinese), 43(10): 3511-3525, doi: 10.3799/dqkx.2018.286.
- Schauble E A, Ghosh P, Eiler J M. 2006. Preferential formation of ^{13}C - ^{18}O bonds in carbonate minerals, estimated using first-principles lattice dynamics. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (10): 2510-2529, doi: 10.1016/j.gca.2006.02.011.
- Shenton B J, Grossman E L, Passey B H, et al. 2015. Clumped isotope thermometry in deeply buried sedimentary carbonates: The effects of bond reordering and recrystallization. *J. Geological Society of America Bulletin*, 127(7-8): 1036-1051, doi: 10.1130/b31169.1.
- Spencer C, Kim S T. 2015. Carbonate clumped isotope paleothermometry: a review of recent advances in CO_2 gas evolution, purification, measurement and standardization techniques. *J. Geosciences Journal*, 19(2): 357-374, doi: 10.1007/s12303-015-0018-1.
- Stolper D A, Eiler J M. 2016. Constraints on the formation and diagenesis of phosphorites using carbonate clumped isotopes. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 181: 238-259, doi: 10.1016/j.gca.2016.02.030.
- Tang J W, Dietzel A, Fernandez A, et al. 2014. Evaluation of kinetic effects on clumped isotope fractionation (Δ_{17}) during inorganic calcite precipitation. *J. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 134: 120-136, doi: 10.1016/j.gca.2014.03.005.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *J. Chemical Geology*, 161 (1-3): 59-88, doi: 10.1016/S0009-2541(99)00081-9.
- Wacker U, Fiebig J, Schoene B R. 2013. Clumped isotope analysis of carbonates: comparison of two different acid digestion techniques. *J. Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 27(14): 1631-1642, doi: 10.1002/rcm.6609.
- Wacker U, Rutz T, Löffler N, et al. 2016. Clumped isotope thermometry of carbonate-bearing apatite: Revised sample pre-treatment, acid digestion, and temperature calibration. *J. Chemical Geology*, 443: 97-110, doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.09.009.
- Xiang C F, Pang X Q, Danišik M. 2013. Post-Triassic thermal history of the Tazhong Uplift Zone in the Tarim basin, Northwest China: Evidence from apatite fission-track thermochronology. *J. Geoscience Frontiers*, 4(6): 743-754, doi: 10.1016/j.gsf.2012.11.010.
- Xu H L, Fang L H, Zhang X, et al. 2006. Characteristics of Early Permian magmatic rocks and their impact on hydrocarbon accumulation in Tarim Basin. *J. Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 27(3): 235-240, doi: 10.3321/j.issn:1006-3021.2006.03.007.
- Xu Q C, Qiu N S, Liu W, et al. 2019. Reconstructing the basin thermal history with clumped isotope. *J. Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 64(5-6): 566-578, doi: 10.1360/N972018-00458.
- Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, et al. 2014. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: main characteristics and a plume incubation model. *J. Lithos*, 204: 20-35, doi: 10.1016/j.lithos.2014.02.015.
- Yang J F. 2015. Description of the Permian Magmatism and its geological significance in Tazhong area, Tarim, NW China [Ph. D. thesis] (in Chinese). Nanjing: Nanjing University.
- Yang S F, Chen H L, Li Z L, et al. 2013. Early Permian Tarim large igneous province in northwest China. *J. Science China Earth Sciences*, 56(12): 2015-2026, doi: 10.1007/s11430-013-4653-y.
- Yu X, Yang S F, Chen H L, et al. 2011. Permian flood basalts from the Tarim basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. *J. Gondwana Research*, 20(2-3): 485-497, doi: 10.1016/j.gr.2010.11.009.
- Yu X, Yang S F, Chen H L, et al. 2017. Petrogenetic model of the Permian Tarim large igneous province. *J. Science China Earth Sciences*, 60(10): 1805-1816.
- Zhang S T, Liu Q, Tang M, et al. 2020. Molecular-level mechanism of phosphoric acid digestion of carbonates and recalibration of the ^{13}C - ^{18}O clumped isotope thermometer. *J. ACS Earth and Space Chemistry*, 4 (3): 420-433, doi: 10.1021/acsearthspacechem.9b00307.

附中文参考文献

- 裴衡, 龚奇, 欧阳睿等. 2003. 塔中地区火成岩特征及其石油地质意义. 石油物探, 42(1): 49-53, doi: 10.1007/s11434-012-5176-1.
- 常健, 邱楠生, Reiners P 等. 2010. 塔里木盆地钻孔样品的锆石(U-Th)/He 年龄及其地质意义. // 中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集. 宁波.
- 冯昌格, 刘绍文, 王良书等. 2010. 塔里木盆地中央隆起区现今地

- 温场分布特征及其与油气的关系. 地球科学, 35(4): 645-656, doi: 10.3799/dqkx.2010.079.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社.
- 李成, 王良书, 郭随平等. 2000. 塔里木盆地热演化. 石油学报, 21(3): 13-17, doi: 10.7623/syxb200003003.
- 李慧莉, 邱楠生, 金之钧. 2005. 利用磷灰石裂变径迹研究塔里木盆地中部地区的热历史. 地质科学, 40(1): 129-132, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2005.01.014.
- 李佳蔚, 李忠, 邱楠生等. 2016. 塔里木盆地石炭-二叠纪异常热演化及其对深部构造-岩浆活动的指示. 地球物理学报, 59(9): 3318-3329, doi: 10.6038/cjg20160916.
- 刘雨晨, 邱楠生, 常健等. 2020. 碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用——以塔里木盆地顺托果勒地区为例. 地球物理学报, 63(2): 597-611, doi: 10.6038/cjg2020N0152.
- 强深涛, 沈平, 张健等. 2017. 四川盆地川中地区震旦系灯影组碳酸盐沉积物成岩作用与孔隙流体演化. 沉积学报, 35(4): 797-811, doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.014.
- 邱楠生, 李慧莉, 金之钧等. 2006. 碳酸盐岩层系热历史恢复的有机质自由基古温标研究. 地质学报, 80(3): 390-397, doi: 10.3321/j.issn:0001-5717.2006.03.011.
- 邱楠生, 刘雯, 徐秋晨等. 2018. 深层-古老海相层系温压场与油气成藏. 地球科学, 43(10): 3511-3525, doi: 10.3799/dqkx.2018.286.
- 徐汉林, 方乐华, 张昕等. 2006. 塔里木盆地早二叠世岩浆特征及其对油气成藏关系初探. 地球学报, 27(3): 235-240, doi: 10.3321/j.issn:1006-3021.2006.03.007.
- 徐秋晨, 邱楠生, 刘雯等. 2019. 利用团簇同位素恢复沉积盆地热历史的探索. 科学通报, 64(5-6): 566-578, doi: 10.1360/N972018-00458.
- 杨江峰. 2015. 塔中地区二叠纪岩浆活动精细描述及其地质意义探讨[博士论文]. 南京: 南京大学.
- 余星, 杨树锋, 陈汉林等. 2017. 塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1179-1190, doi: 10.1360/N072016-00246.

(本文编辑 胡素芳)