

邱楠生, Peter Reiners, 梅庆华等. (U-Th)/He 年龄在沉积盆地构造—热演化研究中的应用——以塔里木盆地 KQ1 井为例. 地球物理学报, 2009, **52**(7): 1825~1835, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.017

Qiu N S, Peter Reiners, Mei Q H, et al. Application of the (U-Th)/He thermochronometry to the tectono-thermal evolution of sedimentary basin—A case history of Well KQ1 in the Tarim Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(7): 1825~1835, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.017

(U-Th)/He 年龄在沉积盆地构造—热演化研究中的应用——以塔里木盆地 KQ1 井为例

邱楠生^{1,2}, Peter Reiners³, 梅庆华^{1,2}, 姜光^{1,2}, Nicolesco Stefan³, 陶成⁴

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)盆地与油藏研究中心, 北京 102249

3 Department of Geology, University of Arizona, Tucson, USA

4 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 无锡 214151

摘 要 (U-Th)/He 热定年技术是近年来用于沉积盆地热史研究的新技术, 目前主要是利用磷灰石和锆石的 He 年龄来揭示地层的构造抬升和热历史. 本文依据塔里木盆地钻井样品的实测磷灰石和锆石 (U-Th)/He 年龄数据, 初步得出了该地区磷灰石 (U-Th)/He 年龄的封闭温度为 85℃, 并建立了深度/温度—年龄演化模式; 锆石则未达到其较高的封闭温度. 综合利用本次实测的 He 年龄数据结合磷灰石裂变径迹和等效镜质组反射率等古温标, 模拟计算了塔里木盆地孔雀 1 井(KQ1)自奥陶纪末期以来的热历史. 模拟结果表明, 孔雀 1 井区奥陶纪末期的地温梯度可达 35.5℃/km, 志留纪—泥盆纪时期的地温梯度为 33.3~34.5℃/km, 白垩纪末期地温梯度 27.6℃/km 左右. 因此, (U-Th)/He 年龄结合其他古温标综合模拟的方法可以很好地揭示沉积盆地的热历史. 特别是该技术为缺乏常规古温标的塔里木盆地中生界碳酸盐岩层系所经受热史的恢复提供了新的方法.

关键词 (U-Th)/He 年龄, 磷灰石, 锆石, 裂变径迹, 孔雀河地区

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.017

中图分类号 P318

收稿日期 2008-12-24, 2009-06-24 收修定稿

Application of the (U-Th)/He thermochronometry to the tectono-thermal evolution of sedimentary basin—A case history of Well KQ1 in the Tarim Basin

QIU Nan-Sheng^{1,2}, Peter Reiners³, MEI Qing-Hua^{1,2}, JIANG Guang^{1,2},
Nicolesco Stefan³, TAO Cheng⁴

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Department of Geology, University of Arizona, Tucson, USA

4 Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214151, China

Abstract The (U-Th)/He thermochronometry of apatite or zircon has been used as a new technique to study the structural uplift and thermal history of sedimentary basins in recent years. Based on the tested apatite and zircon He ages data from drilling wells samples, an evolution model of apatite He ages with depth and/or temperature is built, which illustrates that the He

基金项目 教育部重大项目(308005)、国家“973”项目(2005CB422102)、中石化股份有限公司重点项目联合资助.

作者简介 邱楠生, 男, 1968年生, 教授. 1994年毕业于中国科学院地质所获构造地质学博士学位, 主要从事沉积盆地构造—热演化和油气成藏机理方面的教学和科研工作. E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

closure temperature in apatite is about 85°C in the Tarim basin. However, the zircon He ages reveals that these samples hadn't undergone its higher closure temperature. The thermal history since Ordovician in Well KQ1 has been modeled by using the He ages, AFT and R_0 data. The modeling result shows that the thermal gradient was about 35.5°C/km in the end of Ordovician, and 33.3~34.5°C/km during the period of Silurian to Devonian, and it decreased to 27.6°C/km in the end of Cretaceous. Therefore, the (U-Th)/He ages may provide a newly tool to rebuilt the thermal history of sedimentary basins, especially to the Low Paleozoic carbonate stratum in Tarim basin which is lack of normal thermal indicators.

Keywords (U-Th)/He thermochronometry, Apatite, Zircon, Fission track, Kongquehe Area

1 引言

热历史是一个地区在地质演化过程中的热动力学反映,控制了盆地内烃源岩生排油气的时间.目前,国际上关于盆地热历史恢复的方法的研究总体上可以分为两类:一类是利用各种古温标来恢复热历史,这主要包括有机质成熟度指标、流体包裹体、粘土矿物转化、矿物的裂变径迹等;另一类是用盆地演化的热动力学模型来恢复热历史.由于古温标方法可以通过实测数据来检验模拟结果,因而被认为是研究精度较高且切实可行的方法.但是,目前单一的古温标方法在应用于叠合盆地早古生代(高、过成熟)碳酸盐岩地区热历史恢复时,均有着不同程度的缺陷.已有不少学者利用各种有机质古温标来进行研究海相碳酸盐岩层系热历史和烃源岩有机质成熟度,如:沥青反射率^[1~3]、牙形石色变指数^[4~7]、镜状体反射率^[8,9]、生物碎屑反射率^[10~12]、有机质自由基浓度^[13~16]、激光拉曼光谱^[17,18]等.但上述各类古温标有的还只是一个半定量的指标,有些指标目前远未达到实用阶段.探索适合于古生界海相层系热史恢复的方法是当前沉积盆地热史研究的热点问题之一.

(U-Th)/He 定年技术的原理是根据磷灰石等矿物颗粒中 U、Th 衰变产生 He 发展而来的.通过测量样品中放射性 He、U 和 Th 的含量就可以获得 (U-Th)/He 的年龄.目前该技术已经广泛应用于地质体定年^[19~21]、热演化^[22~25]、地形地貌演化和沉积物源研究^[26~34]等方面.这也为盆地热历史恢复提供了一条新途径.可用于 (U-Th)/He 热定年测试的矿物有橄榄石、辉石、角闪石、石榴子石、磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿、赤铁矿等,目前应用较多的是磷灰石、锆石和榍石.依据自然样品和热模拟试验,不同矿物其 (U-Th)/He 体系的封闭温度差别较大,磷灰石的 He 封闭温度较低为 75°C^[35],锆石的 He 封闭温度

在 170~190°C 之间^[36],榍石则为 191~218°C^[37].虽然利用磷灰石的 (U-Th)/He 热定年可以精细研究低温下的冷却历史,但在用于沉积盆地的热历史恢复时,必须与其他古温标(磷灰石裂变径迹、镜质组反射率等)相结合才能奏效.磷灰石裂变径迹和 He 热定年技术的结合可以揭示 45~110°C 温度范围的精细冷却历史.但是,针对塔里木盆地地下古生界地层所经受的较高温(目前的烃源岩均处于高-过成熟状态),仅仅依据磷灰石的 He 年龄或裂变径迹不足以解决问题.本文分别测试了磷灰石和锆石的 (U-Th)/He 年龄,同时结合其他古温标对典型井区的热史进行模拟计算.

2 样品和实验

2.1 样品情况

在塔里木盆地采集了 5 口井的样品.所采集的样品包括钻孔岩芯和岩屑砂岩样品,进行重矿物分离获取磷灰石和锆石晶体.样品采集区依据前人的重矿物分析表明,磷灰石和锆石的含量是较高的^[38,39],能够得到所需的磷灰石和锆石晶体.为了获取系列样品分析磷灰石和锆石 He 年龄的封闭温度,我们本次分别在塔里木盆地中部中生代连续沉积的井中采集了 3 口井(Sh1, Z2 和 Z11 井)系列磷灰石样品和 2 口井(Sh1 和 Sh8 井)的系列锆石样品.采样井位分布见图 1,样品的基本情况与随后的测试结果一并列于表 1 和表 2 中.

2.2 He 年龄测试

样品测试在美国 Arizona 大学的 ARHDL 实验室(Arizona Radiogenic Helium Dating Laboratory)进行.实验主要分 4 个步骤进行:①样品制备,②矿物晶体的释气和 He 浓度测试,③ U-Th(Sm) 含量测试和④(U-Th)/He 年龄计算.首先从分选出来的重矿物精矿中挑选 5 颗自形磷灰石/锆石晶体,挑

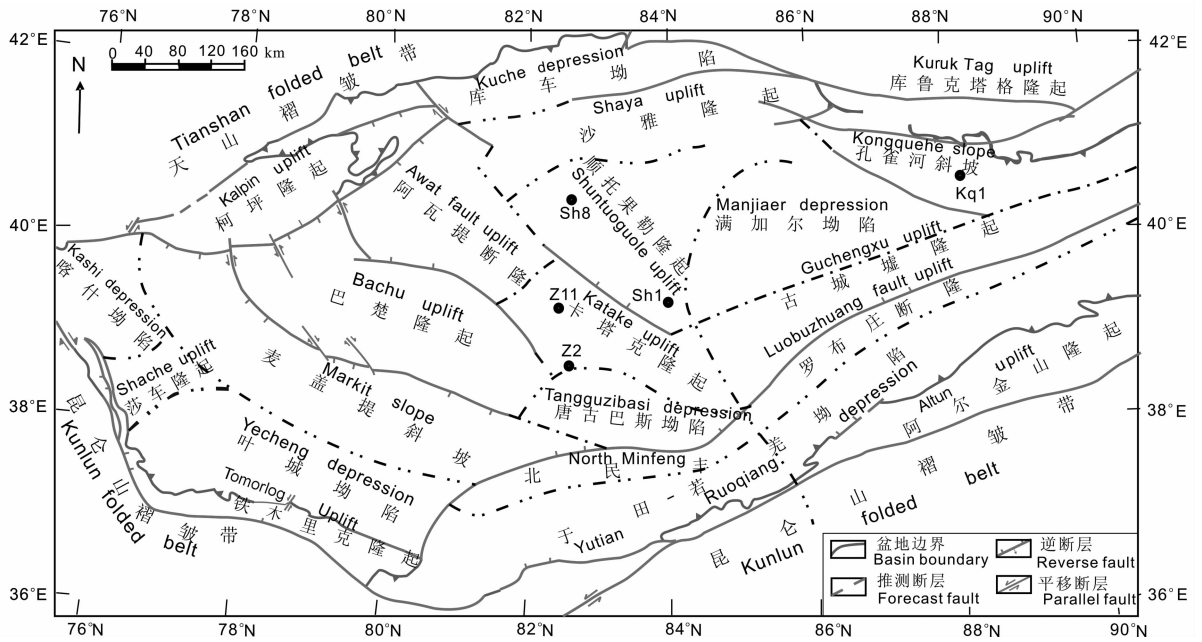


图 1 塔里木盆地主要构造单元及样品分布图

Fig. 1 Sketch map of structural units in the Tarim Basin and sampling well locations

表 1 塔里木盆地磷灰石(U-Th)/He 年龄测试结果

Table 1 The tested (U-Th)/He ages of apatite samples in the Tarim Basin

样号	层位	Z(m)	Th/U (atomic)	mass (μg)	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	Sm($\times 10^{-6}$)	校正年龄 (Ma)
Sh1-1	E	1825	0.31	3.49	28.88	8.83	117.22	32.32 \pm 0.62*
Sh1-3	T	2946	0.59	4.50	23.76	13.60	207.80	99.69 \pm 1.79
Sh1-4	T	3311	4.15	2.15	22.62	91.45	185.74	42.11 \pm 0.62
Sh1-9	C	4563.5	0.98	1.94	71.44	67.94	105.03	1.06 \pm 0.06
Sh1-10	S	4583.5	1.62	2.16	24.01	37.83	106.73	10.83 \pm 0.26
Sh1-12	S	4961	1.43	1.39	7.21	10.07	138.03	0.19 \pm 0.41
Sh1-14	S	5331.1	6.32	6.98	5.11	31.51	182.48	0.53 \pm 0.06
Z2-1	K	2085	0.54	4.82	11.23	5.87	149.82	21.08 \pm 0.42*
Z2-2	T	2553	0.37	4.15	73.54	26.72	2.65	213.56 \pm 6.17
Z2-3	T	2963	0.51	3.37	100.02	49.26	153.42	106.37 \pm 2.1
Z2-6	P	3972	1.12	1.39	249.44	272.51	354.03	4.52 \pm 0.09
Z2-8	D	4804	4.00	4.68	8.16	31.85	34.17	0.75 \pm 0.16
Z2-9	S	4962	2.10	2.45	21.55	44.04	51.78	0.39 \pm 0.17
Z2-10	S	5138	3.16	1.55	27.20	83.82	225.85	0.92 \pm 0.20
Z2-12	O	5462	20.45	3.67	9.03	180.09	253.33	0.33 \pm 0.07
Z11-4	C	4181.56	0.90	1.28	134.40	117.31	587.72	0.10 \pm 0.03
Z11-5	D	4351.5	0.92	6.80	26.03	23.45	77.76	0.08 \pm 0.03
Z11-7	S	4701.2	1.24	0.96	62.47	75.36	1006.12	0.77 \pm 0.11
Z11-8	S	4922	5.10	1.30	20.99	104.34	154.06	0.41 \pm 0.25
Z11-10	S	5091	18.35	1.97	14.08	251.84	439.02	0.23 \pm 0.10
KQ1-1	S	2402.1	3.59	20.38	11.61	40.66	97.38	94.60 \pm 1.43
KQ1-2	S	2593.8	8.26	3.40	2.86	23.03	108.86	23.74 \pm 0.62
KQ1-5	S	3201.5	3.91	5.29	9.96	37.95	274.19	46.57 \pm 0.73
KQ1-7	O	4554.5	0.87	2.11	28.09	23.76	967.54	2.64 \pm 0.09

注：* 的样品可能样品本身有问题，其年龄值异常，在图 2 的分析中未考虑该值。

表 2 塔里木盆地锆石(U-Th)/He 年龄测试结果

Table 2 The tested (U-Th)/He ages of zircon samples in the Tarim Basin

样号	层位	Z(m)	Th/U (atomic)	mass (μg)	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	校正年龄(Ma)
Sh1-1	E	1825	0.51	8.05	307.12	153.72	132.79 \pm 2.72
Sh1-2	K	2642	0.60	2.93	560.10	329.42	223.07 \pm 5.51
Sh1-3	T	2946	0.48	7.53	194.70	91.99	253.71 \pm 6.29
Sh1-4	T	3311.5	0.25	2.07	998.82	242.20	10.16 \pm 0.27
Sh1-6	P	3509.5	0.52	5.96	194.09	97.49	304.55 \pm 7.57
Sh1-7	C	4104.4	0.37	8.36	610.67	218.89	274.79 \pm 6.97
Sh1-9	C	4563.5	1.56	5.59	154.34	234.12	423.71 \pm 9.99
Sh1-11	S	4773.1	0.84	6.67	102.52	84.40	394.02 \pm 7.48
Sh1-12	S	4961	0.95	7.35	73.17	67.95	417.06 \pm 7.52
Sh1-13	S	5261.5	1.01	2.60	217.34	214.64	380.83 \pm 6.73
Sh1-15	S	5410	0.59	7.54	304.37	175.74	420.81 \pm 7.70
Sh8-1	N	2877.1	0.52	9.25	69.61	35.60	261.71 \pm 9.11
Sh8-3	T	4313	0.95	5.86	163.89	152.38	261.98 \pm 6.21
Sh8-4	P	4501	0.64	12.22	106.86	66.70	284.23 \pm 6.94
Sh8-6	P	5210	0.53	5.21	262.76	134.65	305.36 \pm 7.62
Sh8-7	C	5480	1.37	11.74	136.90	183.11	423.98 \pm 10.03
Sh8-9	D	5701	0.52	1.76	326.53	165.15	403.23 \pm 9.76
Sh8-10	S	6060	1.06	4.30	709.35	734.68	95.31 \pm 2.05
Sh8-11	S	6130	0.69	2.76	445.77	299.03	216.33 \pm 5.08
Sh8-13	S	6404	0.86	3.47	329.37	275.02	335.41 \pm 7.64
Sh8-14	O	6452	1.10	7.75	60.09	64.69	469.86 \pm 13.51
KQ1-1	S	2402.1	0.73	1.91	281.19	200.51	398.05 \pm 11.58
KQ1-2	S	2593.8	2.95	7.93	34.12	98.01	408.93 \pm 7.25
KQ1-3	S	2799	0.68	4.59	74.32	49.42	547.48 \pm 12.18
KQ1-4	S	2956.5	0.69	2.17	189.44	127.59	529.94 \pm 12.89
KQ1-5	S	3201.5	0.57	2.40	160.10	89.36	422.53 \pm 10.33
KQ1-6	O	4133.5	0.69	2.84	295.73	198.37	403.72 \pm 9.79
KQ1-7	O	4554.5	0.69	2.05	284.05	191.68	378.99 \pm 9.14

选时尽量确保磷灰石/锆石晶体不含包裹体. 用激光束将单颗粒矿物晶体样品加热以提取 He(将颗粒样品放入金属铌容器中在 1200 $^{\circ}\text{C}$ 加热, 磷灰石 2~3 min, 锆石 15 min). 提取出来的 He 通过吸气器在低温条件下对 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 分别进行聚集、纯化后, 利用四极质谱仪测定 $^4\text{He}/^3\text{He}$. 将一般情况下, 测试完 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 后的样品放入经过校准的 ^{229}Th 和 ^{233}U 溶液, 然后将磷灰石/锆石样品在浓度约为 30% 的 HNO_3 中溶解, 将锆石先置于 HF 和 HNO_3 的溶液中溶解, 再用 H_3BO_3 去除氟化物. 由于本次实验的磷灰石样品几乎都不同程度含有小的包裹体, 因此在酸的溶解这个步骤中采用了与锆石相同的方法.

最后得到的溶液用同位素稀释法通过 ICP-MS 来测量 $^{238}\text{U}/^{233}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}/^{229}\text{Th}$ 比值, 从而得到磷灰石和锆石晶体中 U、Th 的含量. 本次分别测定了 24 个磷灰石和 28 个锆石的 (U-Th)/He 年龄, 测试结果列于表 1 和表 2.

3 (U-Th)/He 年龄的封闭温度

一些学者的研究工作证实了磷灰石中 He 部分保留区 (Helium Partial Retention Zone, PRZ) 一般位于 40~80 $^{\circ}\text{C}$ [22,35,40]. 当高于封闭温度时, He 年龄为零. 理论上, 样品经受的温度越接近封闭温度, 则

He 年龄与地层年龄差别越小,因而可以用于确定构造热事件的年龄.依据 3 口井系列样品的数据,表明磷灰石均不同程度进入 He 部分保留区(实测的 He 年龄均小于地层年龄),由此得到 He 年龄随深度/温度的演化模式(图 2).总体上 He 年龄随深度逐渐减小,大约在 3800 m 深度处 He 年龄为零.依据研究区实测地温梯度($20^{\circ}\text{C}/\text{km}$)得到该深度处的相应温度值为 85°C ,即塔里木盆地磷灰石 He 年龄的封闭温度约在 85°C 左右,略高于 Wolf 等(1998)的结果^[41].尽管这三口井不在同一构造单元,但这些井后期均具有巨大的沉积埋藏作用,导致了在这些井中目前的温度就是其经历的最高温度.因而可以将其视为连续沉积的井区.通过这些样品可以得到的磷灰石(U-Th)/He 年龄随深度/温度演化的模式与 Wolf 等(1998)建立的模式几乎是一致的.事实上,塔里木盆地磷灰石这一部分保留带的深度/温度与四川盆地川东北地区的磷灰石 He 年龄封闭温度大致相当^[42].

锆石的 He 年龄与样品方面,Sh1 井的锆石 He 年龄在浅部均大于地层的年龄,反映了物源区的信息;在约 4000 m 深度(或 90°C ,该井现今地温梯度为 $19.1^{\circ}\text{C}/\text{km}$)以下的 He 年龄开始小于地层年龄(图 3a).Sh8 井的锆石 He 年龄随深度/温度的演化与此相似,在浅部均大于地层的年龄,而在约 5000 m 深度(或 100°C)以下的 He 年龄开始小于地层年龄(图 3b).说明样品均不同程度受封闭温度的影响.但直到 6400 m 深度(或 135°C)以下,样品的 He 年龄依旧较大(仅略小于地层年龄).推测样品仍未达

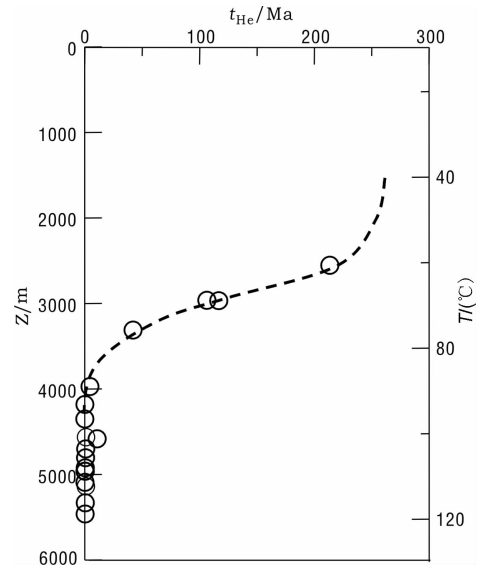


图 2 塔里木盆地磷灰石(U-Th)/He 年龄与样品深度和温度的关系(不包括异常点的样品)

Fig. 2 The relationship between apatite He ages and depth and temperature in the Tarim Basin

到锆石的(U-Th)/He 封闭温度($170\sim 190^{\circ}\text{C}$),也说明了塔里木盆地较低的地温梯度.同时,也揭示了塔里木盆地的锆石 He 年龄封闭温度可能要大于文献值的 $170\sim 190^{\circ}\text{C}$.

4 典型样品的热史模拟

选取塔里木盆地东北缘孔雀河斜坡孔雀 1 井(KQ1)的样品进行热史模拟.孔雀河斜坡地处塔里木盆地东北缘,北倚库鲁克山,西接库尔勒鼻凸,南

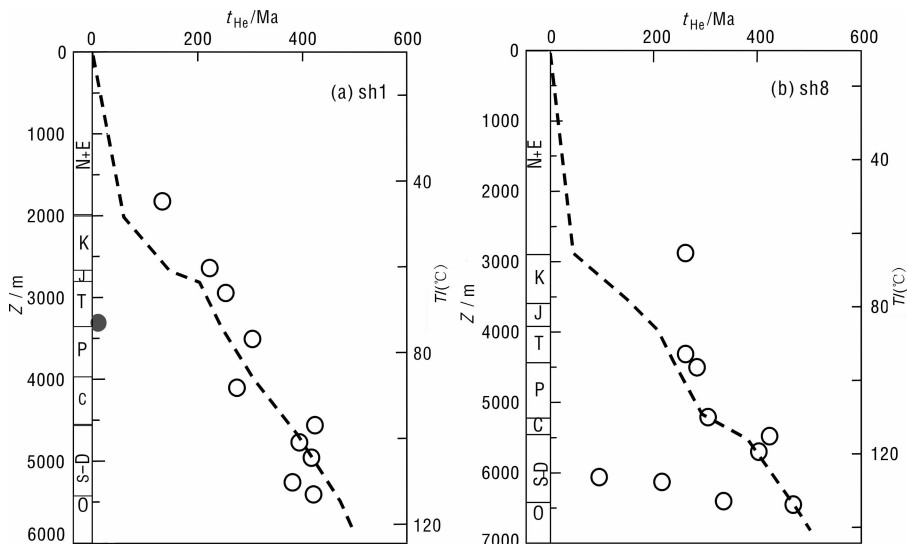


图 3 塔里木盆地锆石(U-Th)/He 年龄与样品埋藏深度和温度的关系(虚线为地层年龄线)

Fig. 3 The relationship between zircon He ages and depth and temperature in the Tarim Basin
The dashed lines are stratigraphic ages of samples

接满加尔坳陷和英吉苏凹陷,是库鲁克塔格断隆与北部坳陷的过渡单元.孔雀河地区在海西早期随着库鲁克塔格的隆起而长期处于升隆状态.本区的构造演化主要经历了震旦-中奥陶世拉张、中晚奥陶世末期隆升、志留末-三叠纪隆升剥蚀、中生代末期的再次抬升和新生代稳定沉降等几个阶段^[43,44].钻证实本井区缺失部分志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、部分侏罗系、部分白垩系及新生界部分层位.该井区钻遇的奥陶系地层现今埋藏深度在3745 m以下,与盆地其他地区相比其埋藏深度是较小的.这源于其海西期遭受的强烈剥蚀,后期埋藏深度较小.如此,本井古生界层系中的古温标可以保留原始信息,反映古生代时期的温度状况.

本井除了此次测试了磷灰石和锆石的 He 年龄外,还收集了前人测试的磷灰石裂变径迹长度与年龄、镜质组反射率数据等古温标.结合这些古温标,可以研究该井的热历史(图4).实测磷灰石 He 年龄大约在 2500 m 深度左右已达到了完全封闭的温度.该深度目前的温度仅为 62℃(依据试油温度得

到的本井地温梯度为 21.0℃/km,地表温度按 10℃计算).而依据前述塔里木盆地磷灰石 He 年龄的封闭温度大致在 85℃左右,说明样品曾经历了较大的埋深或高温状况.本井 S_{2y} 地层磷灰石的 He 年龄(94.60 Ma)代表了该时期的构造-热事件年龄(与随后分析的磷灰石裂变径迹年龄是一致的),也表明该地层在白垩纪末期经历了抬升(冷却)运动,在新生代沉降过程中该地层温度并未超过该封闭温度; S_{1t} 、 S_{1k} 和 O_{2-3} 地层样品的平均年龄分别为 23.74 Ma、46.57 Ma和 2.64 Ma,依据现今地温梯度得到这三个样品现今温度分别为 66℃,75℃和 102℃.而该井在新生代为持续沉降的过程,说明地层温度在第三纪到现今已接近或超过磷灰石的 He 封闭温度.锆石的(U-Th)/He 年龄随样品埋藏深度的加大而减小,志留系样品的 He 年龄均大于地层的年龄,仅奥陶系样品的 He 小于地层年龄.反映出奥陶系在演化过程中尽管未进入锆石的 He 封闭温度(170℃),但也经历了较高的温度.

同样,磷灰石裂变径迹长度和年龄数据也反映

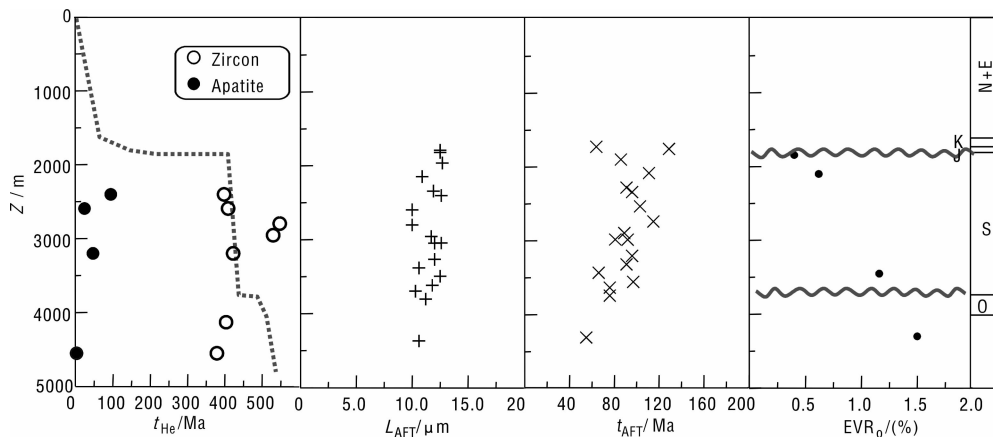


图4 塔里木盆地孔雀1井各种古温标参数的演化关系(虚线为地层年龄)

Fig. 4 The evolution relation of different thermal indicators in the Well KQ1 of Tarim Basin
(The dashed lines are stratigraphic ages of samples)

了经历较高的温度.磷灰石裂变径迹表观年龄随埋深的增加而逐渐减小,且均小于地层年龄,表明样品普遍经历过退火作用影响.侏罗系样品表观年龄分别为 64 Ma 和 130 Ma,小于地层年龄,表明发生了退火.志留系样品年龄为 80~107 Ma 也远小于地层年龄.该年龄可近似反映抬升冷却年龄,表明孔雀河斜坡在白垩纪有抬升冷却事件.其径迹长度分布范围增加,短径迹比例加大,说明志留系地层经历了比侏罗纪强的退火过程,古温度大约在 70~90℃之间.中上奥陶统样品表观年龄进一步降低(55~65 Ma),径迹长度减小、分布宽度变窄,综合表明该段地层经历

了更高的古地温,估算古地温大约在 90~100℃,但仍处于部分退火带范围.而在不整合面上下的等效镜质组反射率(EVR₀)数据则揭示了该时期的巨大抬升剥蚀量.

由以上分析可知 KQ1 井地区在晚白垩世处于冷却抬升剥蚀的时期.根据前人的研究^[44],该井地层在奥陶纪末期剥蚀量达 1290 m;泥盆纪末期的海西早期运动至侏罗纪长期处于抬升剥蚀状态,剥蚀量达 3126 m;侏罗纪末期剥蚀量相对较少,为 512 m;白垩纪末期前人的研究很少涉及,但根据此次的热历史分析,剥蚀量在 2000 m 左右.由此得到 KQ1 井的

沉积埋藏史(图 5)。

在上述定性分析的基础上,综合利用上述古温标对该井的热史进行了定量模拟.其中,磷灰石裂变径迹采用扇形模型^[45],镜质组反射率采样 Easy% R_o 模型^[46],He 年龄则依据 Wolf 等(1996)的磷灰石模型^[35]和 Reiners(2004)的锆石模型^[47],利用 HeFTy(2008 年版本)模拟软件采用 Monte Carlo 方法随机模拟 100 条温度路径,其中“最好”的温度路径代表该样品的热史.这样,结合样品的沉积埋藏史就可以研究其古地温梯度。

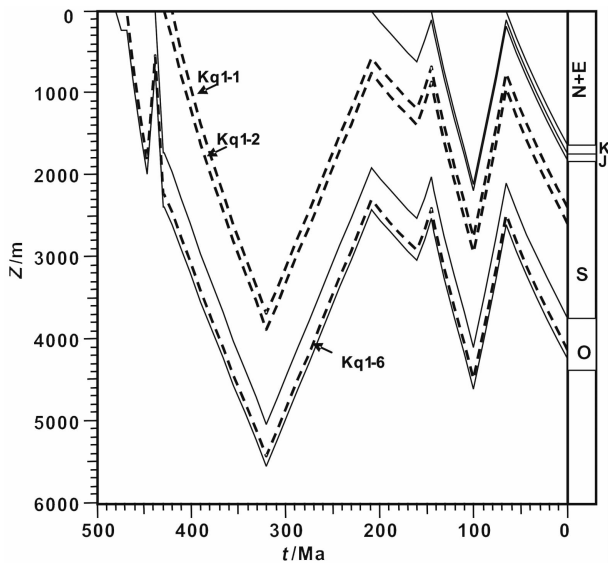


图 5 孔雀 1 井地层埋藏史(虚线为样品的埋藏史)

Fig. 5 The burial history of Well KQ1 and samples
(The dashed lines are burial history of samples)

(1)样品 KQ1-1(2402.1m,S)的热史:利用磷灰石和锆石 He 年龄数据结合裂变径迹数据 ($T = 64 \pm 4$ Ma, $L = 12.5 \pm 1.6 \mu\text{m}$) 和该井构造演化史,可以得到该样品的温度演化路径(图 6).磷灰石的 He 年龄和磷灰石裂变径迹参数记录的温度较低,反映了最后一次构造热事件(白垩纪时期的构造抬升).锆石的 He 年龄则能反映较高的温度,这正是利用锆石 He 年龄研究较早时期热历史的优点.本井区海西期的构造-热事件正是依据锆石 He 年龄的数据来模拟计算的.该样品在泥盆纪末期样品温度在 $95 \sim 105^\circ\text{C}$ 之间,此时埋藏深度在 2400 m 左右,因此平均地温梯度在 $33.3^\circ\text{C}/\text{km}$ 左右(当时的地表温度按 20°C 计算);在样品埋藏深度最大时(大致在石炭纪晚期),样品温度在 $130 \sim 140^\circ\text{C}$ 之间.此时样品埋藏深度近 3700 m,则其时的地温梯度为 $32.4^\circ\text{C}/\text{km}$.同样可以得到白垩纪末期平均地温梯度在 $27.6^\circ\text{C}/\text{km}$ 左右.本井区现今地温梯度为

$20^\circ\text{C}/\text{km}$.

(2)样品 KQ1-6(4133 m,O)的热史:采用锆石 He 年龄数据(403.72Ma)和等效镜质组反射率数据进行了模拟(图 7).本井在奥陶系和志留系均有实测镜质组反射率(VR_o),因而可以同时利用锆石 He 年龄和 VR_o 数据进行约束.同样品 Kq1-1 相似,结合样品的沉积埋藏史,可以得到奥陶纪末期的古地温梯度可达 $35.5^\circ\text{C}/\text{km}$,志留纪-泥盆纪时期仍达 $33.5 \sim 34.5^\circ\text{C}/\text{km}$.

5 结论和讨论

(U-Th)/He 热定年技术目前主要用于造山带热史的研究,用于沉积盆地的热史研究较少^[22~25],在国内对于沉积盆地则还没有开展这方面的研究.本文依据塔里木盆地钻井样品的实测磷灰石和锆石 (U-Th)/He 年龄数据结合其他古温标数据对塔里木盆地古生代时期的热史恢复进行这方面的尝试,取得了成功.初步建立了磷灰石 He 年龄-深度/温度演化模式并得出了该地区磷灰石 (U-Th)/He 年龄的封闭温度为 85°C ;而由于塔里木盆地较低的地温,锆石则未达到其封闭温度.综合利用实测 He 年龄、磷灰石裂变径迹和镜质组反射率等古温标模拟计算的塔里木盆地 KQ1 井区自奥陶纪末期以来的热历史.模拟结果表明,奥陶纪末期的地温梯度可达 $35.5^\circ\text{C}/\text{km}$,志留纪-泥盆纪末期地温梯度为 $33.3 \sim 34.5^\circ\text{C}/\text{km}$,白垩纪末期地温梯度在 $27.6^\circ\text{C}/\text{km}$ 左右.而本井区前人利用镜质组反射率数据估算的奥陶纪时期的地温梯度仅为 $30.2^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[48].

塔里木盆地早古生代时期的热史研究由于缺乏有效的古温标,一直以来是困扰该地区烃源岩成熟演化的难题.这主要是由于塔里木盆地的下古生界以巨厚的碳酸盐岩层系为主,传统的镜质组反射率古温标在这些层系中缺乏.但在盆地的中上奥陶统和个别地区的寒武系底部存在有海相碎屑岩沉积.这为磷灰石/锆石的裂变径迹、(U-Th)/He 年龄等低温热年代指标的测试提供了可能.但在塔里木盆地的广大坳陷区,由于中新生界的巨厚沉积,一些古生界层系中的古温标所记录的古生代时期的热信息被后期的深埋藏和高温所覆盖,无法揭示古生代时期的热历史.而孔雀河地区在海西早期随着库鲁克塔格的隆起而长期处于升降状态,缺失了泥盆系—三叠系的巨厚地层,使得下古生界埋藏深度较小,其古温标可以保留原始信息,反映古生代时期的温度

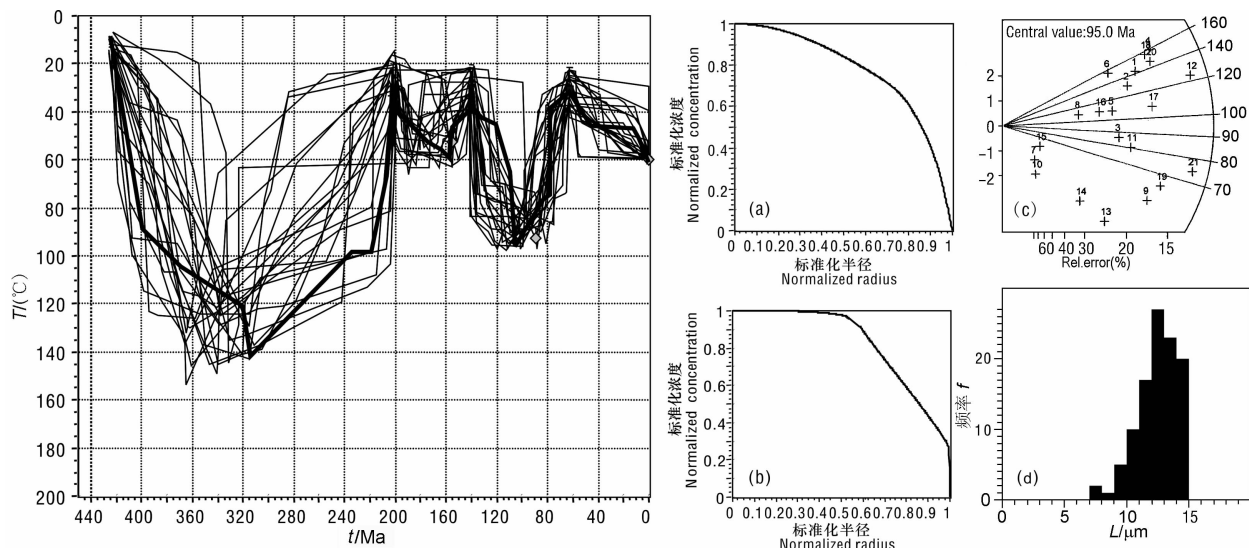


图 6 孔雀 1 井 KQ1-1 样品(2402.1m,S)的热史模拟结果

采用 Monte Carlo 方法随机模拟 100 条路径,粗线代表"最好"的温度路径.

(a)磷灰石 He 扩散剖面;(b)锆石 He 扩散剖面;(c)磷灰石裂变径迹年龄;(d)磷灰石裂变径迹长度.

Fig. 6 The thermal history of sample KQ1-1(2402.1m, S) in the Well KQ1

100 thermal paths were tried by using the Monte Carlo inverse modeling method and the thick line is the "best" temperature path.

(a) Apatite Helium Diffusion Profile; (b) Zircon Helium Diffusion Profile; (c) Apatite fission track ages;

(d) Apatite fission track length distribution.

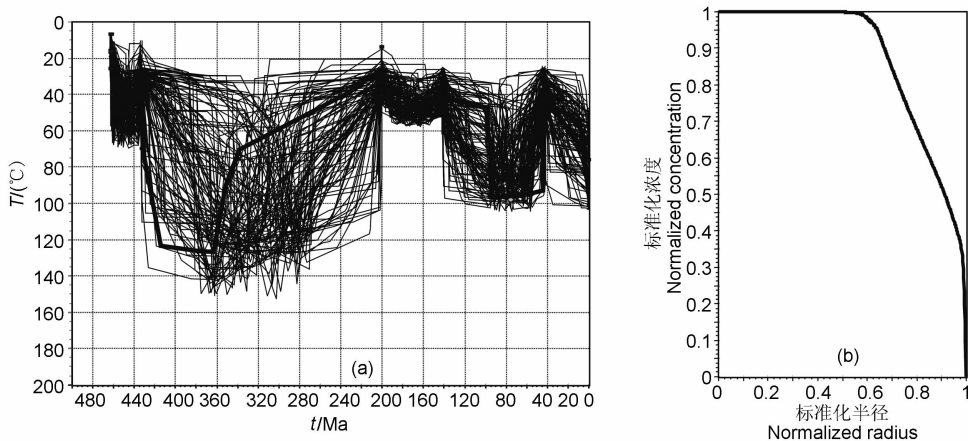


图 7 孔雀 1 井 KQ1-6 样品(4133m,O)的热史模拟结果

(a)采用 Monte Carlo 方法随机模拟 100 条路径.粗线代表"最好"的温度路径;(b)锆石 He 年龄扩散剖面.

Fig. 7 The thermal history of sample KQ1-6(4133m, O) in the Well KQ1

(a) 100 Thermal paths were tried by using the Monte Carlo inverse modeling method and the thick line is the "best" temperature path; (b) Zircon Helium Diffusion Profile.

状况. 因而 KQ1 井奥陶系样品的古温标可以理想地记录当时的热信息. 由此可见类似于 KQ1 井的热史,通过(U-Th)/He 年龄、磷灰石裂变径迹和镜质组反射率等多种古温标的综合运用,是可以模拟出古生代时期的热演化历史的. 特别是该技术为缺乏常规古温标的塔里木盆地下古生界碳酸盐岩层系所经受热史的恢复提供了新的方法. 由于磷灰石和锆石 He 年龄不同的封闭温度,利用磷灰石较低的 He 年龄封闭温度可以反映后期(如本文中白垩纪以来

的热史),而利用锆石较高的 He 年龄封闭温度则可以反映早期的热历史.

此外,(U-Th)/He 定年体系是一个封闭体系,理想情况下矿物晶体中的 He 全部来自 U、Th 放射性同位素的衰变,既无继承 He 也无 He 的丢失. 任何破坏(U-Th)/He 定年封闭体系的因素均会影响该年龄值的准确性. 破坏(U-Th)/He 定年封闭体系的外因主要有构造活动、岩浆作用、热作用等,而 α 粒子的运移距离、He 的扩散行为、粒径和矿物包体

等为其主要内因。这里,特别要注意矿物中包裹体对 He 年龄的影响(尤其是对磷灰石样品的影响)。磷灰石矿物中往往有许多 U、Th 含量很高的小包体,造成颗粒中 He 过剩从而使年龄值偏大^[49]。虽然理论上磷灰石的包裹体在显微镜下很容易识别出来,但实际情况往往是难以在镜下挑选出完全没有包裹体的磷灰石颗粒!在本次实验过程中只能尽量挑选包裹体含量少且包裹体个体小的磷灰石晶体,这可能是造成同一个样品中不同颗粒的 He 年龄有时会有较大差异的原因。

致谢 磷灰石和锆石晶体的分离与富集在河北省区域地质矿产调查所实验室进行,He 年龄的测试在 Arizona 大学的 ARHDL 实验室进行。中石化西北分公司提供了大量样品和基础地质资料,中石化西部新区勘探指挥部提供裂变径迹数据。在此一并表示感谢!

参考文献(References)

[1] Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid bitumen. *International J. of Coal Geology*, 1985, **11**(1): 65~79

[2] 丰国秀,陈盛吉. 岩层中沥青反射率与镜质组反射率的关系. *天然气工业*, 1988, **8**(3): 20~25
Feng G X, Chen S J. The relationship between bitumen reflectance and vitrinite reflectance in the strata. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 1988, **8**(3): 20~25

[3] 刘德汉,史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨. *石油勘探与开发*, 1994, **21**(3): 113~115
Liu D H, Shi J Y. Evaluation methods studies on the highly matured carbonate resource rock. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 1994, **21**(3): 113~115

[4] Epstein A G., Epstein J B, Harris C D. Conodont colour alteration—an index to organic metamorphism. *Geo. Survey Professional Paper*, United State Government Printing Office, Washington, 1977. 995~998

[5] Harris R, Kaiser J, Hurford T. Thermal history of Australian passive margin cover sequences accreted to Timor during late Neogene arc-continent collision, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 2000, **84**(9): 1434

[6] Orchard M J A. conodont-based temporal and spatial framework for the Triassic of North America. *AAPG Bulletin*, 2002, **86**(6): 1156

[7] 周希云. 上杨子区二叠系至下三叠统牙形石颜色变化指标及其油气评价. *海相沉积区油气地质*, 1987, **1**(2): 83~90
Zhou X Y. The conodont CAI and its application to oil and gas evaluation in Permian to Lower Triassic of Lower Yangzi River Area. *Marine Basin Petroleum Geology* (in Chinese), 1987, **1**(2): 83~90

[8] Buchardt B J, Lewan M D. Reflectance of vitrinite-like

macerals as a thermal maturity index for Cambrian Ordovician Alum shale, Southern Scandinavia. *AAPG Bulletin*, 1990, **74**: 394~406

[9] 程顶胜,郝石生,王飞宇. 高过成熟烃源岩成熟度指标——镜状体反射率. *石油勘探与开发*, 1995, **22**(1): 25~28.
Cheng D S, Hao S S, Wang F Y. Reflectance of vitrinite-like macerals, a possible thermal maturity index for highly/over-matured source rocks of the lower Paleozoic. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 1995, **22**(1): 25~28

[10] Goodarzi F, Norford B S. Variation of graptolite with depth of burial. *Internat. J. of Coal Geology*, 1989, **11**: 127~141

[11] 曹长群,尚庆华,方一亭. 探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用. *古生物学报*, 2000, **39**(1): 151~156
Cao C Q, Shang Q H, Fang Y T. The study of graptolite reflectance as the indicator of source rock maturation in Ordovician and Silurian. *Acta Palaeontologica Sinica* (in Chinese), 2000, **39**(1): 151~156

[12] 汪啸风,陈孝红. 几丁虫的反射率——早古生代有机岩石学的新前缘. *地质前缘*, 1997, **4**(3~4): 139~145
Wang X F, Chen X H. Chitinozoan reflectance: a frontier in Early Paleozoic organic petrology. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 1997, **4**(3~4): 139~145

[13] Pusey W C. Paleotemperatures in the Gulf Coast using the ESR-kerogen method. *Trans. Gulf Coast. Assoc. Geol. Soc.* 1973, XXIII: 195~202

[14] Qiu N S, Wang J Y, Zhou L C, et al. Thermal evolution of source rocks in sedimentary basin by using Electron Paramagnetic Resonance (EPR) techniques. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(19): 1625~1628

[15] Qiu N S, Wang J Y. The use of free radicals of organic matter to determine paleo-temperature gradient. *Organic Geochemistry*, 1998, **28**(1/2): 77~86

[16] Qiu N S, Li H L, Jin Z J, et al. Free Radicals in Organic Matter for Thermal History Reconstruction of Carbonate Succession. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(4): 605~613

[17] 胡凯,刘英俊, Wilkins R W T. 激光喇曼光谱碳质温度计及其地质应用. *地质科学*, 1993, **28**(5): 235~245
Hu K, Liu Y J, Wilkins R W T. Laser raman carbon geothermometer and its application to mineral exploration. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), 1993, **28**(5): 235~245

[18] 何谋春,吕新彪,刘艳荣. 激光拉曼光谱在油气勘探中的应用研究初探. *光谱学与光谱分析*, 2004, **24**(11): 1363~1366
He C M, Lu X B, Liu Y R. Study on the application of laser-Raman spectrum to petroleum exploration. *Spectroscopy and Spectrometry* (in Chinese), 2004, **24**(11): 1363~1366

[19] Kohn B P, Farley K A, Pillans B. (U-Th)/He and fission track dating of the Pleistocene Rangitawa Tephra, north island, New Zealand: a comparative study. In: Geological Society of Australia ed. 9th International Conference on

- Fission track dating and thermochronometry. Geological society of Australia, Victoria Australia, 2000, 207~208
- [20] Reiners P W, Zhou Z Y, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, Eastern China, from (U-Th)/He and fission track thermochronology. *American Journal of Science*, 2003, **303**:489~518
- [21] Hansen K, Reiners P W. Low temperature thermochronology of the southern East Greenland continental margin: evidence from apatite (U-Th)/He and fission track analysis and implications for intermethod calibration. *Lithos*, 2006, **92**:117~136
- [22] House M A, Farley K A, Kohn B P. An empirical test of helium diffusion in apatite: borehole data from the Otway Basin, Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, **170**:463~474
- [23] House M A, Kohn B P, Farley K A, et al. Evaluating thermal history models for the Otway Basin, southeastern Australia, using (U-Th)/He and fission track data from borehole apatites. *Tectonophysics*, 2002, **349**(1~4):277~295
- [24] Reed J S, Spotila J A, Bodnar R J, et al. Paleothermometry and thermochronology of Carboniferous strata, central Appalachian Basin, southern West Virginia; burial and geomorphic evolution of the Appalachian Plateau. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 2002, **34**(6):133
- [25] Lorencak M, Kohn B P, Osadetz K G, et al. Combined apatite fission track and (U-Th)/He thermochronometry in a slowly cooled terrane: results from a 3440m deep drill hole in the southern Canadian Shield. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, **227**:87~104
- [26] House M A, Wernicke B P, Farley K A. Dating topography of the Sierra Nevada, California, using apatite (U-Th)/He ages. *Nature*, 1998, **396**(5):66~69
- [27] Ehlers T A, Farley K A. Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, **206**:1~14
- [28] Ehlers T A, Farley K A, Rusmore M E, Woodsworth G J. Apatite (U-Th)/He signal of large magnitude and accelerated glacial erosion; southwest British Columbia. *Geology*, 2006, **34**:765~768
- [29] Larre J J, Andriessen P A M. Tectonothermal evolution of the northeastern margin of Iberia since the break-up of Pangea to present, revealed by low-temperature fission track and (U-Th)/He thermochronology: A case history of the Catalan Coastal Ranges. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2006, **243**:159~180
- [30] Barnes J B, Ehlers T A, McQuarrie N, et al. Eocene to recent variations in erosion across the central Andean fold-thrust-belt, northern Bolivia; Implications for plateau evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, **248**:118~133
- [31] Blondes M B, Reiners P W, Edwards B R, et al. Dating young basalts by (U-Th)/He on xenolithic zircons. *Geology*, 2007, **35**:17~20
- [32] Boyce J W, Hodges K V. U and Th zoning in Cerro de Mercado (Durango, Mexico) fluorapatite: Insights regarding the impact of recoil redistribution of radiogenic ^4He on (U-Th)/He thermochronology. *Chem. Geol.*, 2005, **219**:261~274
- [33] Rahl J M, Ehlers T A, Van der Pluijm B A. Quantifying transient erosion of orogens with detrital thermochronology from syntectonic basin deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, **256**:147~161
- [34] Stock G M, Ehlers T A, Farley K A. Where does sediment come from? Quantifying catchment erosion with detrital apatite (U-Th)/He thermochronometry. *Geology*, 2006, **34**:725~728
- [35] Wolf R A, Farley K A, Silver L T. Helium diffusion and low temperature thermochronometry of apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(21):4231~4240
- [36] Reiners P W, Farley K A, Hickey H J. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon: initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte. *Tectonophysics*, 2002, **349**(1~4):297~308
- [37] Reiners P W, Farley K A. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of titanite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(22):3845~3859
- [38] 钱一雄,何治亮,蔡习尧等.塔中西北部上泥盆统东河砂岩与志留系砂岩中重矿物特征与地质意义.岩石矿物学杂志, 2007, **26**(2):147~154
- Qian Y X, He Z L, Cai X Y, et al. Characteristics of heavy minerals from Upper Devonian Donghe sandstone and Silurian sandstone in western Tazhong area, Tarim basin, and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica* (in Chinese), 2007, **26**(2):147~154
- [39] 张克银.孔雀河斜坡重矿物特征分析及地质意义.西部研究动态, 2003, **5**:1~6
- Zhang K Y. The characteristics of heavy minerals in Kongquehe Area and its geological implications. *Petroleum exploration Research in Western China* (in Chinese), 2003, **5**:1~6
- [40] Warnock A C, Zeitler P K, Wolf R A, et al. An evaluation of low-temperature apatite (U-Th)/He thermochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**:5371~5377
- [41] Wolf R, Farley K A, Kass D M. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U-Th)/He thermochronometer. *Chemical Geology*, 1998, **148**:105~114
- [42] 邱楠生,秦建中, Brent I A McInnes等.川东北地区构造-热演化探讨—来自(U-Th)/He年龄和Ro的约束.高校地质学报, 2008, **14**(2):223~230
- Qiu N S, Qin J Z, Brent I A McInnes, et al. Tectonothermal evolution in the northeastern Sichuan Basin: constraint from apatite and Zircon (U-Th)/He and vitrinite reflectance data.

- Geological J. of China Universities*, 2008, **14**(2):223~230
- [43] 代寒松,赵锡奎.塔里木孔雀河斜坡构造演化与油气成藏的关系. *新疆地质*, 2006,**24**(3):287~291
Dai H S, Zhao X K. The relationship between structural evolution and hydrocarbon accumulation in Kongquehe Area. *Xinjiang Geology*, 2006,**24**(3):287~291
- [44] 杨 亮.新疆塔里木盆地孔雀河地区主要不整合面剥蚀量恢复及应用[硕士论文].长春:吉林大学, 2005.
Yang L. Study on the denudation and main unconformities in the area of Kongquehe, Tarim basin, Xinjiang. [Master thesis]. Changchun: Jilin University, 2005
- [45] Lastett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite, 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology*, 1987, **65**:1~13
- [46] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG*, 1990, **74**(10):1559~1571
- [47] Reiners P W, Spell T L, Nicolescu S, et al. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(8):1857~1887
- [48] 肖 晖,任战利,崔军平等.孔雀河地区热演化史与油气关系研究. *西北大学学报*, 2008,**38**(4):631~636
Xiao H, Ren Z L, Cui J, et al. Relations between geothermal history and hydrocarbon generation in Kongquehe Area. *J. of Northwest University (in Chinese)*, 2008, **38**(4):631~636
- [49] House M A, Wernicke B P, Farley K A. et al. Cenozoic thermal evolution of the central Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He thermochronometry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, **151**:167~179

(本文编辑 汪海英)