

文章编号:0253-9985(2010)03-0277-11

反演南方海相层系热史动态演化的新温标 ——磷灰石、锆石(U-Th)/He 年龄和封闭温度

秦建中¹, 王杰¹, 邱楠生², Brent McInnes³, 陶成¹

(1. 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, 江苏 无锡 214151;

2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. CSIRO Earth Science & Resource Engineering, P. O. Box 1130, Bentley WA 6102, Australia)

摘要:对川东北普光-毛坝地区和通江地区的11个岩心和露头样品进行锆石、磷灰石(U-Th)/He定年分析,初步建立了He年龄-深度/温度动态演化模式,该地区磷灰石He封闭温度为85℃。川东北钻井岩心和剖面样品经历相同的热演化历程。该地区第三纪至第四纪为冷却抬升剥蚀主要时期,剥蚀速率约为74.8~172.5 m/Ma,剥蚀厚度大约为2 800~3 000 m,地温逐渐降低到磷灰石He封闭温度,直至达到现今温度,与青藏高原隆升引发的新构造运动在四川盆地的响应有关。普光5井等3 200 m以上中生界样品未经历过锆石He封闭温度,可能只有3 200 m以下的样品经历锆石He封闭温度,但所有样品都经历了磷灰石He封闭温度。根据锆石(U-Th)/He年龄大致推算出,川东北地区可能在晚侏罗世开始抬升,在晚侏罗世一早白垩世期间普光-毛坝地区和通江地区都处于缓慢抬升剥蚀阶段,只是普光-毛坝地区抬升剥蚀开始时间要早于通江地区。磷灰石和锆石He封闭温度和年龄揭示了该区动态热演化历史。该区在178.0 Ma之前古地温大于170~190℃,随后地层继续抬升,古地温下降;在40.5~178.0 Ma时,古地温为85~170℃;在0~40.5 Ma时,现今地温小于85℃。

关键词:(U-Th)/He年龄;封闭温度;抬升剥蚀;热史动态演化;热史模拟;南方海相层系

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

New paleo-geothermometers for the inversion of dynamic thermal evolution history of marine sequences in South China ——(U-Th)/He age and closure temperature of apatite and zircon

Qin Jianzhong¹, Wang Jie¹, Qiu Nansheng², Brent McInnes³ and Tao Cheng¹

(1. Wuxi Branch of SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. National Laboratory for Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. CSIRO Earth Science & Resource Engineering, P. O. Box 1130, Bentley WA 6102, Australia)

Abstract: (U-Th)/He dating of apatite and zircon is performed on eleven core and outcrop samples from the Puguang-Maoba and Tongjiang areas in northeastern Sichuan Basin and the results are used to establish a dynamic evolution pattern for He age and depth/temperature. The closure temperature of the He in apatite in this area is at 85℃. The drilling core samples experienced the same thermal evolution history with the outcrop samples in the northeastern Sichuan Basin, where the Tertiary and the Quaternary were the main periods of cooling, uplifting and denudation. During these periods, the denudation rate was about 74.8–172.5 m/Ma, the maximum denudation thickness was 2 800–3 000 m, the earth temperature gradually reduced to helium closure temperature of apatite, and finally to the current temperature. All these were related to the reaction of the Sichuan

收稿日期:2010-03-31。

第一作者简介:秦建中(1957—),男,教授级高级工程师,油气地球化学与石油地质。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB422102);国家重大专项(2008ZX05005-01-02)。

Basin to a new tectonic movement caused by the uplifting of the Qinghai-Tibet plateau. Cores sampled from the Mesozoic with a depth of less than 3 200 m in Well Puguang-5 did not undergo the closure temperature of zircon, only those gathered from a depth of more than 3 200 m might experience the closure temperature of zircon, but all the samples underwent the closure temperature of apatite. (U-Th)/He ages of zircon indicate that uplifting in the northeastern Sichuan Basin began in the Late Jurassic. During the Late Jurassic-Early Cretaceous, both the Puguang-Maoba area and the Tongjiang area were in gradual uplifting and denudation, but the uplifting and denudation in the Puguang-Maoba area began earlier than that in the Tongjiang area. (U-Th)/He ages and closure temperatures of apatite and zircon reveal the dynamic evolution of thermal history in the study area. Before 178 Ma, the palaeo-geotemperature of the study area was above 170 – 190 °C, but lowered later along with the continuous uplifting. It was in the range of 85 – 170 °C during the 40.5 Ma – 178 Ma, and has lowered to less than 85 °C at present.

Keywords: (U-Th)/He age, closure temperature, uplift and denudation, dynamic evolution of thermal history, thermal history simulation, marine sequence in South China

盆地热历史研究对盆地烃源岩层有机质热演化史、生烃史、油气生排量、区带评价乃至圈闭评价都具有重要意义。目前,国际上关于盆地热历史恢复的方法总体上分为3类:1)用盆地演化的热动力学模型来恢复热历史,为正演技术,主要侧重于岩石圈尺度^[1,2];2)利用各种古温标来恢复热历史,为反演技术,利用能记录研究对象所经历温度条件的矿物、岩石、包裹体等来恢复古地温,侧重于盆地尺度,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^[3-6];3)综合法,将正演技术与反演技术、地史恢复和热史恢复结合起来,建立数学模型,利用已知的地层信息和古温标资料作为约束条件,对盆地的热演化史进行模拟^[7]。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。但由于在叠合盆地古生界碳酸盐岩地区缺乏镜质体和磷灰石矿物,导致目前单一的古温标方法在应用于下古生代高演化海相层系热历史恢复时,均有着不同程度的局限性,必须探索新的古地温恢复方法来研究我国海相层系热历史。前人在这方面进行了一些探索,如生物碎屑反射率^[8]、有机质自由基浓度^[9]、激光拉曼光谱^[10]、牙形石色变指数^[11]、镜状体反射率^[12],在叠合盆地早古生代(高、过成熟)碳酸盐岩地区热史恢复方面取得重要进展。

(U-Th)/He 定年技术基于磷灰石等矿物颗粒中 U, Th 衰变产生 He, 通过测量样品中放射性 U, Th 和 He 含量就可获得 (U-Th)/He 年龄。目前 (U-Th)/He 热定年技术作为一种低温热年代

学研究的新技术,在地质体定年、热演化、地形地貌演化和沉积物源分析等方面得到了广泛的应用^[13-16],为盆地热历史恢复提供了一条新的途径。目前应用于 (U-Th)/He 热定年测试较多的是磷灰石、锆石和榍石。依据自然样品和热模拟试验,不同矿物 (U-Th)/He 体系的封闭温度差别较大,磷灰石 He 封闭温度较低为 75 °C ± 7 °C^[17], 锆石 He 封闭温度早期认为在 140 ~ 160 °C^[18], 目前主要认为在 170 ~ 190 °C^[19]; 榍石 He 封闭温度为 191 ~ 218 °C^[20]。虽然利用 (U-Th)/He 热定年可以精细研究低温下的冷却历史,但在用于沉积盆地热历史恢复时,与其他古温标(裂变径迹、镜质组反射率等)结合起来效果更好^[21]。目前常用的古温标只能反演沉积盆地静态热演化历史,无法恢复沉积盆地动态演化历程。若同时测定磷灰石、锆石、榍石各自封闭温度所对应的 (U-Th)/He 年龄,就可粗略推断出沉积盆地随时间变化的动态演化历史。前人对川东北地区热历史做过部分研究工作^[22-25],但对于地温随时间演化历史的研究则不多见。为此通过对磷灰石和锆石 (U-Th)/He 定年分析来揭示川东北地区动态演化历史,以期为该区构造演化、油气成藏研究提供更丰富的证据。

1 样品及实验

研究样品取自川东北钻井岩心和野外露头(图1),采集5个钻井岩心样品,岩心深度数据根据钻井地质分层数据获得。在通江北面诺水河旁

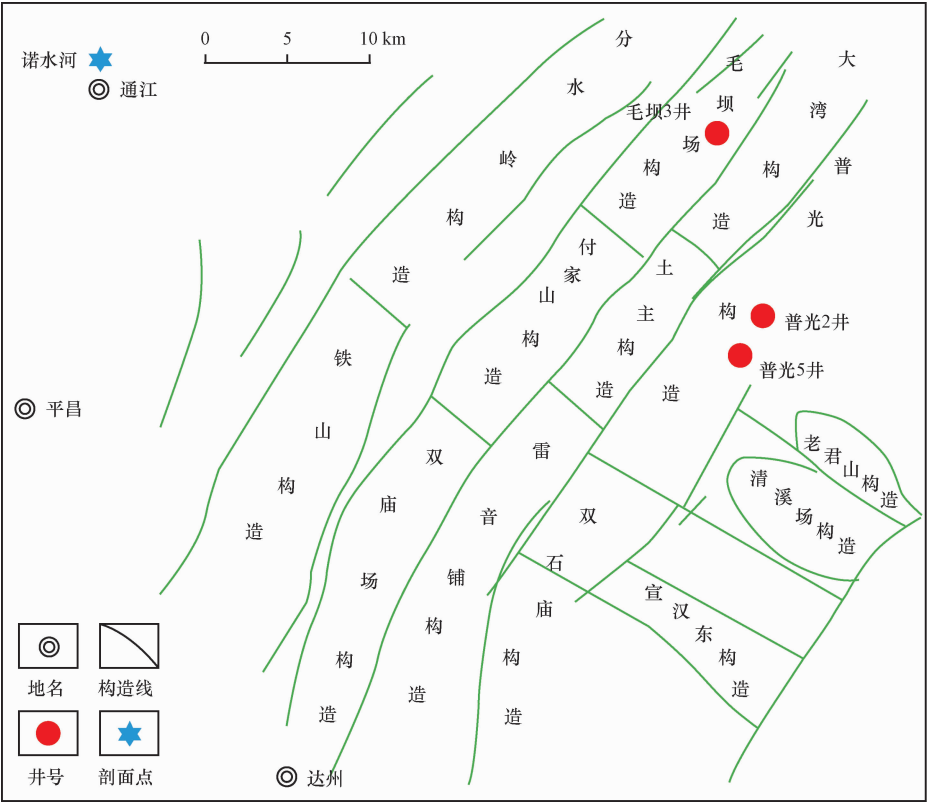


图1 川东北采样井位分布和露头剖面样品分布

Fig. 1 Locations of coring wells and outcrops in the northeastern Sichuan Basin

野外露头剖面采集 6 个寒武系-白垩系砂岩样品,采用便携式 GPS 和地形图等高线来联合测定海拔高程数据,样品均采自新鲜露头,基本可以构成一个垂向上的 He 年龄分布。

样品最好选取中、粗砂岩,样品经破碎、过筛 ($<300\text{ }\mu\text{m}$) 后进行重液和 Frantz 磁选分离得到磷灰石和锆石矿物颗粒。矿物 (U-Th)/He 年龄测试在澳大利亚联邦科学与工业研究院 (CSIRO) 进行。主要分 4 个步骤进行:1) 样品挑选和制备;2) 矿物晶体释气和 ^4He 浓度测定;3) U, Th 含量测试;4) He 年龄计算和校正。首先在 160 倍双目镜下从分选出来的重矿物精矿中挑选 1~5 颗自形磷灰石/锆石晶体,挑选时尽量确保磷灰石/锆石晶体不含包裹体或使包裹体大小在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 内,用校正过的数码相机至少在两个方向上对晶体的形状、大小尺寸进行测量,以便在计算年龄时进行 α 发射效应校正^[26]。用 1~5W 的连续 Nd-YAG 激光束或 5~15W 的 CO_2 激光束将放入真空箔中的单颗粒矿物晶体加热约 3 min (磷灰石) 或 20 min (锆石) 以提取 ^4He 。晶体释气通过连续的反复加

热实现(磷灰石晶体只需一次加热即可)。在提取出来的 ^4He 中加入约 $0.4\times 10^{-12}\text{ mol}$ 的 ^3He ,通过吸气器在 16 K 和 37 K 低温条件下对 ^4He 和 ^3He 分别进行聚集、纯化后,利用四极场质谱仪测定 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 。将测试完 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 后的样品放入经过校准的 ^{229}Th 和 ^{233}U 溶液,然后将磷灰石样品在浓度约为 30% 的 HNO_3 中溶解,将锆石置于 HF 和 HNO_3 溶液中溶解,再用 H_3BO_3 去除氟化物,最后测量 $^{238}\text{U}/^{233}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}/^{229}\text{Th}$ 比值。所有样品 He 年龄最后均进行 α 发射效应校正^[26]。本次测试 He 年龄数据见表 1。

2 热史动态演化反演

矿物颗粒 (U-Th)/He 年龄就是指岩石冷却到相应矿物从 (U-Th)/He 体系封闭到现在的时间,所以,该方法不适用于持续沉降性盆地,适用于多期抬升剥蚀沉积盆地。矿物 (U-Th)/He 年龄反映矿物所经受的最后一期封闭温度,即其记录的是矿物经历封闭温度后的构造演化历史。当

表 1 川东北地区磷灰石和锆石 (U-Th)/He 年龄原始测试数据

Fig. 1 Original testing data of (U-Th)/He ages of apatite and zircon in the northeastern Sichuan Basin										
井号和剖面 样品编号	层位	深度/m	海拔/m	磷灰石			锆石			地层温度/ ℃
				直径/μm	年龄/Ma	1σ	有效球形 直径/μm	年龄/Ma	1σ	
普光 5 井 PG5 _{yx}	J ₂ ^s	794.0	−433.9	130	40.5	1.3	132	214.5	8.2	39
				140	11.6	1.2	124	130.2	5.1	
				110	25.5	3.8	138	250.2	10.9	
毛坝 3 井 mb3 − 1 − 1	T ₃ ^x	2 135.2	−1 645.6	120	10.8	0.7	124	178.4	6.8	64
				120	11.8	0.4	220	246.3	10.5	
				100	5.6	0.6	210	251.9	10.4	
				190	10.5	0.8	142	175.0	7.5	
普光 5 井 PG5 − 1 − 2	J ₂ ^q	2 557.8	−2 197.9	110	11.8	0.6	90	191.1	9.3	75
				160	2.8	0.2	106	144.6	6.8	
				110	19.2	1.2	84	136.9	6.1	
				110	4.3	0.5	82	70.7	3.4	
普光 2 井 PG2 − 3 − 1	T ₃ ^x	3 247.1	−2 896.0	140	1.1	0.1	132	49.9	17.3	89
				90	3.4	0.5	130	167.5	8.2	
				110	4.9	0.5	126	79.2	3.4	
				130	0.4	0.1	116	150.8	6.7	
普光 5 井 PG5 − 2 − 1	T ₃ ^x	3 403.0	−3 042.9	230	0.8	0.1	146	146.4	7.1	92
				130	1.4	0.1	100	144.0	8.8	
				180	0.9	0	152	144.1	8.3	
				100	2.7	0.1	126	178.4	9.6	
通江诺水河 TJ − 07 − 02	K ₁ ^c	露头	410.0	190	28.8	1.1	108	202.0	8.9	23
				230	41.2	3.2	114	254.4	11.3	
				160	26.9	11.2		259.1	12.9	
				120	28.0	0.9	102	240.7	11.4	
通江诺水河 TJ − 07 − 05	J ₃ ^p	露头	508.3	180	30.9	10.2	90	144.1	6.5	23
				130	33.9	6.0	84	152.8	7.0	
				130	25.2	8.9	76	136.4	6.1	
				120	37.5	1.4	82	163.2	7.9	
通江诺水河 TJ − 07 − 12	J ₂ ^s	露头	523.5	250	39.6	1.3	134	137.8	5.3	23
				230	51.4	2.0	160	168.5	6.4	
				160	37.5	1.2	114	131.4	5.0	
				150	26.9	0.9	120	186.9	7.6	
通江诺水河 TJ − 07 − 97	O ₁ ^m	露头	587.7				114	151.7	6.2	23
							120	132.2	5.5	
							122	137.7	5.7	
							146	255.7	10.7	
通江诺水河 TJ − 07 − 81	Є ₁ ^c	露头	613.5	150	90.2	2.8	134	154.3	7.3	23
				170	92.6	3.2	138	153.3	6.5	
				200	72.1	2.6	120	142.9	7.5	
				110	106.2	3.2	120	147.6	6.2	
通江诺水河 TJ − 07 − 90	Є ₂ ^d	露头	648.3				87	135.1	5.5	23
							75	259.3	8.9	
				80	20.4	0.5	71	134.6	5.4	
							75	104.0	4.3	

注:实测温度数据依据地温梯度计算得到;地表温度均定为 23℃。

沉积盆地处于抬升阶段,岩石冷却到锆石封闭温度之前时,锆石和磷灰石(U-Th)/He 体系都处于开放体系;当岩石冷却进入锆石封闭温度时,锆石(U-Th)/He 体系进入封闭体系,该“时钟”效应开始启动,磷灰石(U-Th)/He 体系处于开放体系;当岩石冷却进入磷灰石封闭温度时,锆石和磷灰石(U-Th)/He 体系都处于封闭体系,磷灰石“时钟”效应也开始启动。利用双“时钟”启动的时间差、封闭温度差以及地温梯度,就可以揭示该地区时间-温度的动态演化历程以及剥蚀速率和降温速率。

2.1 磷灰石(U-Th)/He 年龄及意义

普光、毛坝地区 T_{3x}—J_{2s} 钻井砂岩以及通江诺水河Є_{2d}—K_{1c} 野外露头样品磷灰石 He 年龄均远远小于样品沉积年龄,表明磷灰石都进入了封闭温度和封闭体系。随埋藏深度或现今实测地层温度的增大,磷灰石 He 年龄逐渐减小(图2),即地层时代越新,磷灰石 He 年龄愈大,均体现了典型的磷灰石经历封闭温度之后的(U-Th)/He 年龄的演化规律。He 年龄随温度演化剖面反映出该区磷灰石(U-Th)/He 年龄的封闭温度约为 85℃左右,深度大约为 3 250 m,此时 He 年龄接近为零。

从表1中可以看出,普光、毛坝地区 T_{3x}—J_{2s} 钻井岩心样品磷灰石的 He 年龄为 0.4~40.5 Ma,平均值为 1.5~25.9 Ma,随样品时代变老,磷灰石 He 年龄逐渐变小,这与地层年代越新,抬升剥蚀时间越早是一致的。通江诺水河野外露头剖面样

品磷灰石的 He 年龄也均远小于样品沉积时代年龄(表1),总体上与样品海拔高度存在正相关,表明控制样品 He 年龄分布的因素是海拔高度。

普光5井 J_{2s} 地层样品 He 年龄平均值是 25.9 Ma,表明该地层在 25.9 Ma 左右抬升至磷灰石的 He 封闭温度;普光5井 J_{2q} 地层样品的 He 年龄平均值为 9.5 Ma,该地层在新近纪抬升至磷灰石的 He 封闭温度;而普光5井 T_{3x} 地层则在第四纪时期才抬升至磷灰石的 He 封闭温度。毛坝3井和普光2井 T_{3x} 地层 He 年龄平均值分别为 9.7、2.4 Ma。而通江诺水河剖面样品的 He 年龄分布在 20.4~51.4 Ma,平均值为 20.4~38.9 Ma,在此期间发生抬升直至地表,经历了磷灰石 He 封闭温度,说明川东北地区上述地层在第三纪—第四纪(0~40 Ma)期间发生了重大抬升剥蚀事件,使地温逐渐降低到磷灰石 He 封闭温度(85℃),直至达到现今地温,与青藏高原隆升引发的新构造运动在四川盆地的响应有关^[27]。

2.2 锆石(U-Th)/He 年龄及意义

当矿物颗粒(U-Th)/He 年龄大于样品沉积年龄时,样品最大埋藏温度没有超过锆石(U-Th)/He 封闭温度,锆石颗粒没有经历盆地最后一期热事件的重置或热重置不完全(残留有先前 U、Th 反应生成的 He),说明锆石颗粒来源于沉积区外,He 年龄指示了物源区域遭受剥蚀时间,可根据其他相关资料和古水系发育以及物源搬运情况可以判断碎屑岩的物源区域。

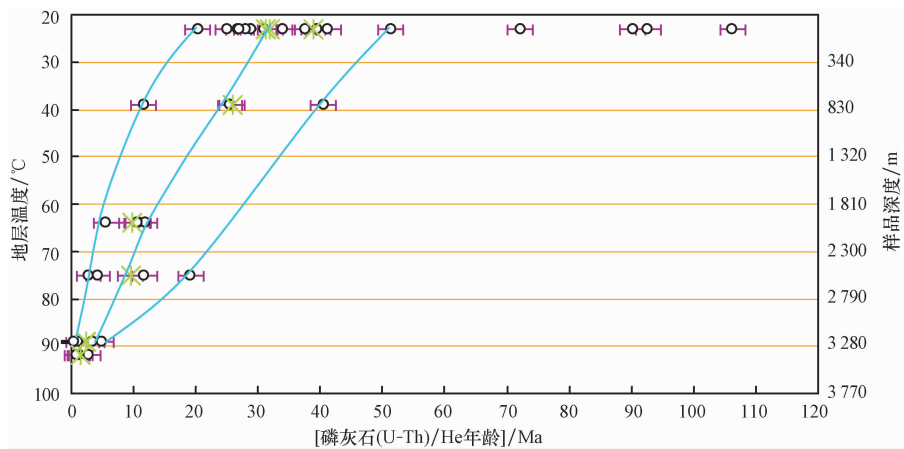


图2 川东北磷灰石(U-Th)/He 年龄与现今埋藏深度、现今地层温度的关系
Fig.2 Relationship between the (U-Th)/He age of apatite and the present burial depth and formation temperature in the northeastern Sichuan Basin
(地温梯度为每百米 2.041℃;✱为年龄平均值)

川东北地区部分锆石颗粒 (U-Th)/He 年龄大于样品沉积年龄,随埋藏深度增加,锆石 He 年龄逐渐小于地层年龄(图 3)。当样品海拔深度达到 2 900 m(埋藏深度达到 3 200 m)时,He 年龄小于地层年龄,说明只有当样品埋藏深度达到 3 200 m 左右,才能经历锆石 (U-Th)/He 封闭温度。

由钻井岩心锆石 (U-Th)/He 年龄来看,大于样品沉积年龄的 He 年龄数据分布在 214.5 ~ 251.9 Ma,由此可见这些锆石颗粒在三叠纪经历了 (U-Th)/He 封闭温度,表明物源区在三叠纪部

分锆石颗粒达到了封闭温度,这些锆石颗粒来自于更老时代的地层,与前人^[23,28]得出的川东北地区自晚二叠系大地热流值以及镜质体反射率逐渐降低的结论是一致的。

普光、毛坝地区 T_{3x}—J_{2s} 钻井砂岩样品锆石 (U-Th)/He 年龄变化范围相当宽,单颗粒年龄介于 49.9 ~ 251.9 Ma,主要分布在 50 ~ 80,130 ~ 215 和 246 ~ 252 Ma 3 个岩屑群内(图 4)。岩屑群 I 中的锆石 (U-Th)/He 年龄 50 ~ 80 Ma 小于实际地层年龄,岩屑群 II 内 130 ~ 215 Ma 则与实际地

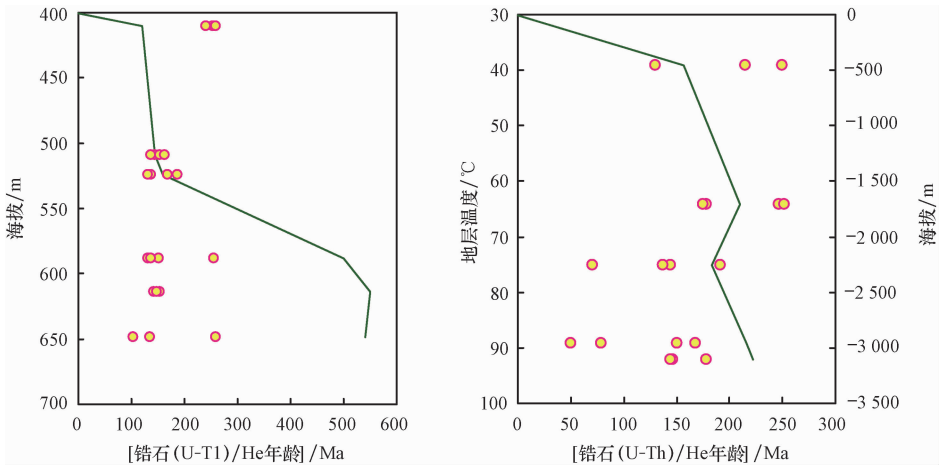


图 3 川东北地区锆石 (U-Th)/He 年龄与海拔深度和温度的关系

Fig. 3 Relationship between the (U-Th)/He age of zircon and the burial depth and temperature in the northeastern Sichuan Basin (实线为地层年龄;左图为通江诺水河剖面露头样品;右图为普光地区钻井样品。)

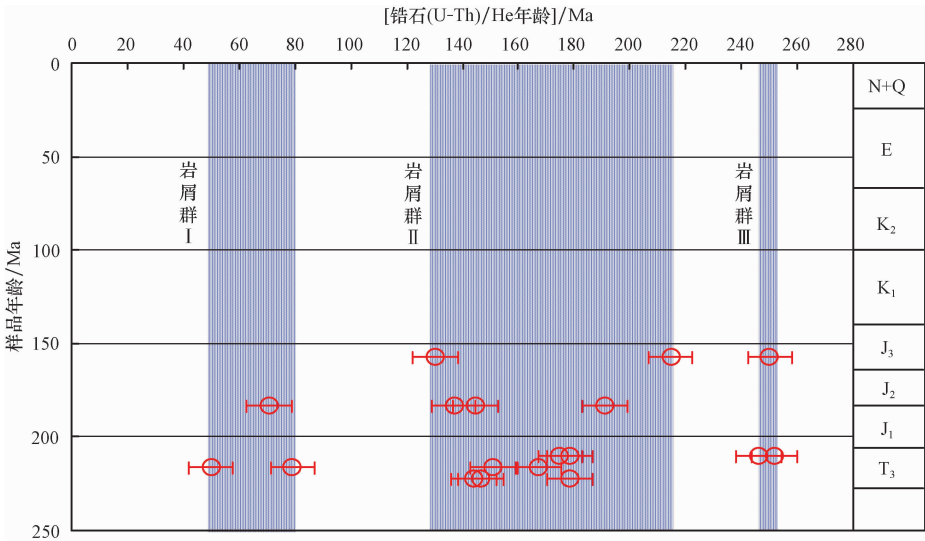


图 4 川东北普光、毛坝气田钻井样品年代与锆石 (U-Th)/He 年龄的关系

Fig. 4 Relationship between the core sample dating and the (U-Th)/He age of zircon in Puguang and Maoba gasfields in the northeastern Sichuan Basin

层沉积年龄相当,而岩屑群Ⅲ内 246 ~ 252 Ma 大于实际地层沉积年龄。岩屑群 I 和岩屑群 II 中 He 年龄小于地层年龄的部分样品现今埋藏深度为 2 500 ~ 3 400 m,现今地温为 75 ~ 89℃(图 2),包裹体最高古地温约为 150 ~ 170℃^①,正好处于锆石(U-Th)/He 封闭温度附近,因此可能经历了锆石 He 封闭温度。

通江诺水河剖面 ϵ_{1c} — O_1m 样品的锆石 He 年龄尽管远小于样品沉积年龄(表 1),但其两个主峰区年龄及变化范围与 J_2s — K_1c 层位样品基本相当,而通江诺水河野外露头剖面 J_2s — K_1c 层位单颗粒锆石 He 年龄相当于或大于样品沉积年龄(图 5)。通江诺水河剖面露头样品年龄与普光、毛坝地区 T_3x — J_2s 钻井岩心样品中的岩屑群 II 和岩屑群 III 的主峰区 He 年龄相当,这些样品都没有经历锆石 He 封闭温度。

根据川东北普光 5 井、普光 2 井、毛坝 3 井等钻井岩心和通江诺水河剖面露头样品磷灰石和锆石(U-Th)/He 年龄,普光 5 井等样品磷灰石(U-Th)/He 封闭年龄均小于地层沉积年龄,在 0 ~ 40 Ma 之间均经历过 70 ~ 85℃的磷灰石 He 封闭温度,而锆石(U-Th)/He 封闭年龄多接近或大

于地层年龄,只有近 3 200 m 左右的部分样品小于地层年龄,即 3 200 m 以上的中生界样品尚未经历过 170 ~ 190℃的锆石 He 封闭温度,可能也只有埋深 3 200 m 以下的部分样品进入锆石(U-Th)/He 封闭温度,这与根据普光、毛坝 T_3x — J_2s 岩心样品的镜质体反射率和伊利石结晶度以及包裹体的最高均一温度得出的结论是一致的(图 6)。在现今埋藏深度大于 3 200 m,伊利石结晶度小于 0.42°($\Delta\theta$)的晚成岩后期作用阶段, BR_o 或 VR_o 约大于 2%;最大埋藏温度或最高包裹体均一温度(晚期,每百米地温梯度为 2.26℃)大于 184℃,说明深度大于 3 200 m 的样品基本上都经历锆石 He 封闭温度。

根据普光、毛坝地区 T_3x — J_2s 钻井砂岩岩屑群 I 中的锆石(U-Th)/He 主峰区年龄(50 ~ 80 Ma)与通江诺水河野外露头剖面 ϵ_{1c} — O_1m 地层样品的锆石(U-Th)/He 年龄(104.0 ~ 154.3 Ma)可以大致推算出川东北地区可能在晚侏罗世就开始抬升,与杜春国(2006)^[29]通过波动分析得出宣汉—达县主要剥蚀时期为晚印支期—晚燕山期是一致的。考虑到川东北地区岩浆活动微弱,因此本区热演化地温变化应主要与构造活动(抬升剥蚀)有关。

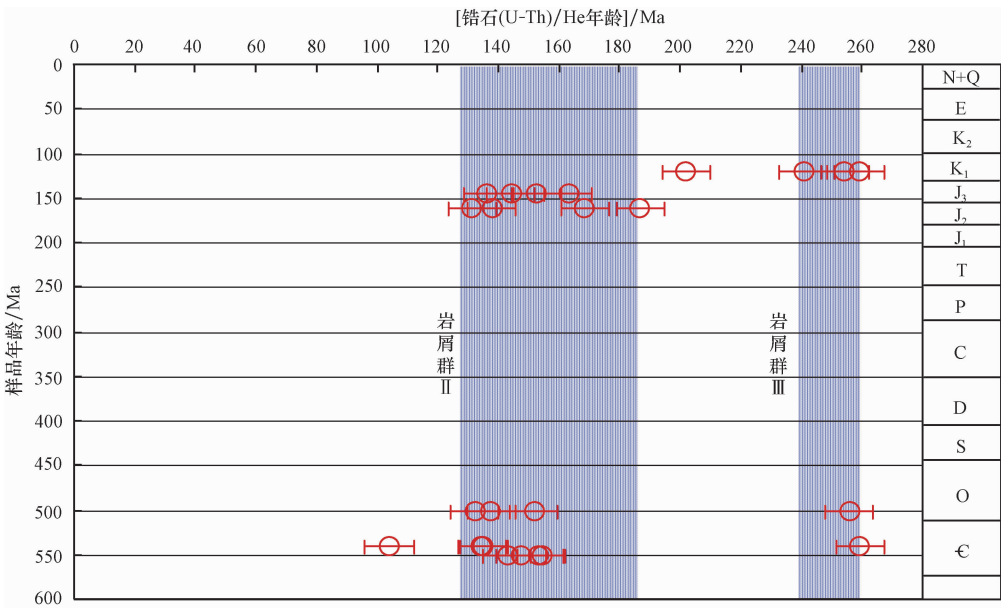


图 5 川东北通江诺水河露头剖面样品年代与锆石(U-Th)/He 年龄的关系

Fig. 5 Relationship between the outcrop sample dating and the(U-Th)/He age of zircon in Nuoshuihe of Tongjiang area in the northeastern Sichuan Basin

① 秦建中. 中国海相碳酸盐岩层系生烃条件与生烃史分析. 中国石化勘探开发研究院, 2007

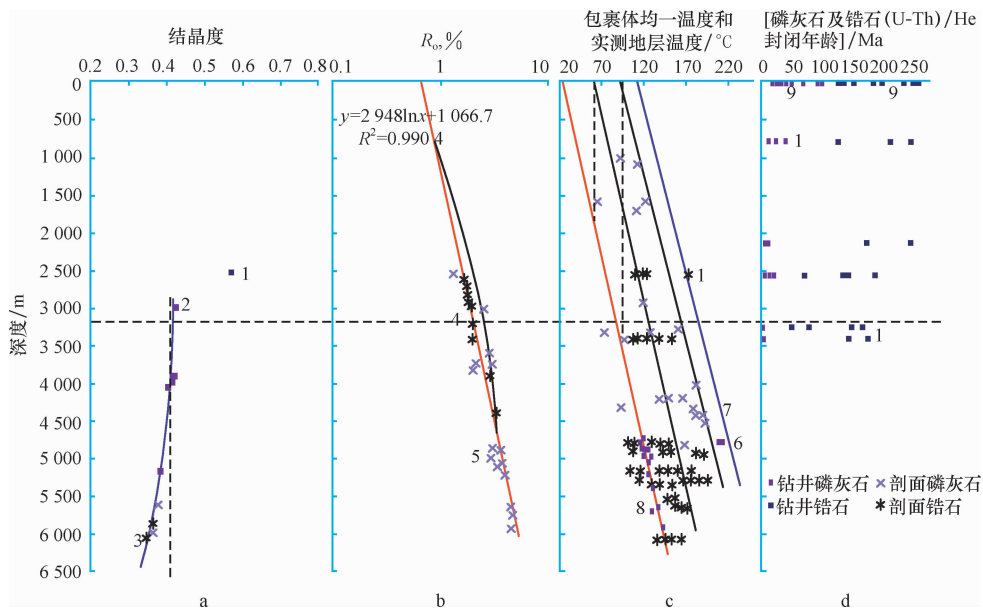


图 6 川东北地区中、古生界地层热演化剖面

Fig. 6 Profiles showing thermal evolution of the Mesozoic and Paleozoic formations in the northeastern Sichuan Basin

a. 伊利石结晶度; b. 固体沥青反射率(BR_0)及镜质体反射率(VR_0); c. 包裹体均一温度及实测地层温度;
d. 磷灰石及锆石(U-Th)/He 封闭年龄

1. 普光 5 井; 2. 毛坝 3 井; 3. 河坝 1 井; 4. 镜质体反射率(VR_0); 5. 固体沥青反射率(BR_0); 6. 普光 2 井; 7. 普光 1 井;
8. 实测地层温度(普光 5 井等); 9. 通江野外露头剖面

2.3 川东北地区剥蚀历史恢复

目前(U-Th)/He 方法主要用于造山带冷却历史的研究,用于沉积盆地热史的研究极少,这主要是由于成盆和造山的热演化历史是完全不同的过程,造山带主要是冷却历史,而沉积盆地则是以加热历史为主导,间或有部分冷却历史(抬升剥蚀),从而使得沉积盆地的热史研究相对复杂。前人利用(U-Th)/He 低温热年代学数据来推算造山带剥露速率的方法有:1)剥露速率=冷却速率/地温梯度,该方法常用来求取区域平均剥露速率,但在实际应用中古地温梯度取值和热史模拟的准确性对剥露速率的计算影响很大^[30,31];2)矿物对法,这种方法利用同一定年体系对同一岩石中两种不同的矿物进行定年分析,剥露速率=不同矿物的封闭温度所对应的深度差/不同矿物的封闭年龄差,要求在地质历史时期古地温梯度不变;3)年龄高程法,剥露速率=垂直剖面上两个样品的高差/两个样品封闭年龄差,该方法适合于垂直采样,包括钻井及地表垂直剖面采样^[32];

4)解析方法(Turcotte 法,Stiwe 法,Mancktelow 法)^[33~35];5)谱分析法^[36];6)Pecube 三维模拟法^[37]。其中前 3 种方法为传统计算方法,后 3 种方法基于计算机和数值模拟。在使用的过程中根据实际地质情况和需要选择。沉积盆地中地层剥蚀速率和剥蚀量的计算也可参照上述方法。

从上述磷灰石的 He 年龄数据可以得到普光-毛坝地区在第三纪至第四纪(1.5~38.9 Ma)处于冷却抬升剥蚀的主要时期,与热史模拟结果是一致的。假使该区在地质历史时期古地温梯度恒定,从磷灰石 He 年龄与海拔高程的关系(图 7)来看,利用年龄高程法推算出此期间的剥蚀速率约为 74.8~172.5 m/Ma,平均约为 121.8 m/Ma,大致相当于 2.48℃/Ma 平均降温速率。同时,在此期间的抬升剥蚀厚度约为 2 800~3 000 m,与秦建中^①根据镜质体反射率和包裹体均一温度所得出的剥蚀厚度在 3 000 m 以上的结论是基本吻合的。

根据锆石 He 年龄数据可以得到该区在晚侏罗世—古近纪期间(50~154.3 Ma)处于抬升剥蚀的状态。假使该区在地质历史时期古地温梯度

① 秦建中. 中国海相碳酸盐岩层系生烃条件与生烃史分析. 中国石化勘探开发研究院,2007

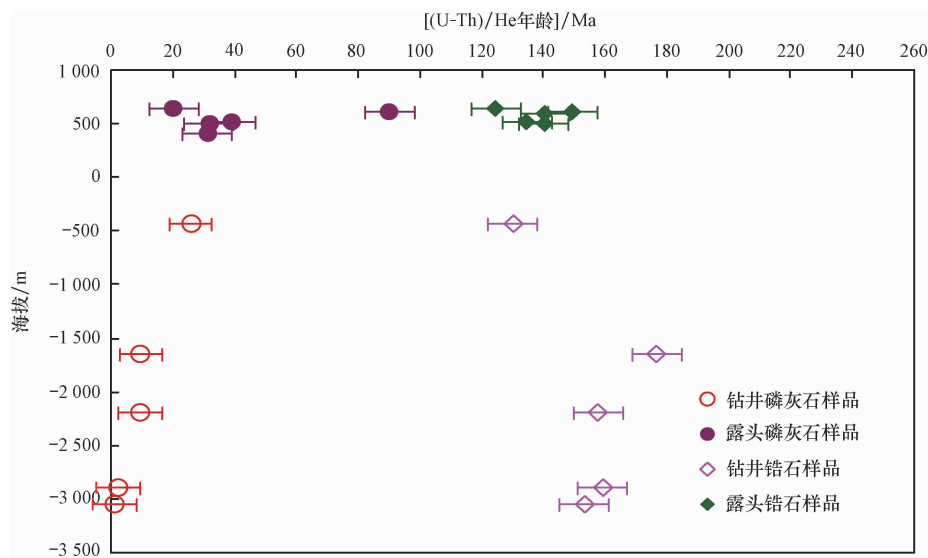


图7 川东北地区低温 He 年龄与海拔图解

Fig. 7 Diagram showing low-temperature He ages and altitude in the northeastern Sichuan Basin

恒定,从锆石 He 年龄与海拔高程的关系(图7)来看,利用年龄高程法推算出此期间的剥蚀速率约为13.5~59.5 m/Ma,平均约为33.8 m/Ma,大致相当于0.7℃/Ma平均降温速率。通江地区在晚侏罗世—早第三纪期间剥蚀速率约为1.8~11.4 m/Ma,平均约为5.6 m/Ma,大致相当于0.11℃/Ma平均降温速率,说明川东北在晚侏罗世—古近纪处于缓慢抬升剥蚀阶段。

2.4 川东北地区热史动态演化

不同热史路径的磷灰石和锆石 He 年龄的演化特征的差异性,是进行恢复热史的基础。根据磷灰石和锆石封闭温度与时间的对应关系,可以反演沉积盆地在70~200℃范围内的动态热演化历史。随埋藏深度或实测地层温度增大,川东北地区,普光5井、露头剖面等样品磷灰石 He 年龄逐渐减小,都经历了磷灰石 He 封闭温度(表2)。当埋藏深度小于3 200 m时,样品锆石 He 年龄大于地层年龄,未经历锆石封闭温度,而在埋藏深度大于3 200 m时,样品锆石 He 年龄小于或接近地层年龄,经历了锆石封闭温度。所以,当普光5井、毛坝3井等钻井岩心和通江野外露头样品在178.0 Ma之前时,古地温大于170~190℃;随后地层抬升,古地温下降,当样品在40.5~178.0 Ma之间时,古地温在85~170℃之间;当样品在0~40.5 Ma时,现今地温小于85℃。

3 认识与讨论

- 1) 初步建立了磷灰石 He 年龄-深度/温度动态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℃。普光-毛坝地区钻井岩心以及通江露头样品随埋深增大或时代变老,磷灰石 He 年龄逐渐减小。该区在第三纪—第四纪期间发生了重大抬升剥蚀,地温逐渐降低到磷灰石 He 封闭温度,直至达到现今温度。
- 2) 普光5井等3 200 m以上样品在0~40 Ma之间均经历过70~85℃的磷灰石 He 封闭温度,未经历过170~190℃的锆石 He 封闭温度,可能只有近3 200 m以下样品接近锆石 (U - Th)/He 封闭温度。大致推算出川东北地区可能在晚侏罗世就开始抬升,普光-毛坝地区在中侏罗世—早白垩世期间以及通江地区在晚侏罗世—早白垩世处于缓慢抬升剥蚀状态,普光-毛坝地区抬升剥蚀开始时间要早于通江地区。
- 3) 埋藏深度小于3 200 m,样品经历了磷灰石封闭温度,未经历锆石封闭温度,当埋藏深度大于3 200 m时,样品先后经历了锆石和磷灰石封闭温度。普光-毛坝地区在第三纪至第四纪处于冷却抬升剥蚀的主要时期,剥蚀速率约为74.8~172.5 m/Ma,平均约为121.8 m/Ma (2.48℃/Ma降温速率),剥蚀厚度约为2 800~3 000 m。

表 2 川东北普光、通江地区样品磷灰石、锆石 (U-Th)/He 年龄与所经历的温度

Table 2 (U-Th)/He ages of apatite and zircon and historical temperatures of samples from Puguang and Tongjiang areas in the northeastern Sichuan Basin

样品编号	层位	深度/m	现今地层温度/℃	磷灰石 He 年龄/Ma	磷灰石经历温度/℃	锆石 He 年龄/Ma	锆石经历温度/℃
TJ-07-02	K ₁ c	露头	23	28.8	31.2 Ma 磷灰石经历温度 >85℃	202.0	239 Ma 大于地层年龄, 未经历锆石封闭温度
				41.2		254.4	
				26.9		259.1	
				28.0		240.7	
PG5yx	J ₂ s	794	39	40.5	25.9 Ma 磷灰石经历温度 >85℃	214.5	198 Ma 大于地层年龄, 未经历锆石封闭温度
				11.6		130.2	
				25.5		250.2	
mb3-1-1	T ₃ x	2 135.2	64	10.8	9.7 Ma 磷灰石经历温度 >85℃	178.4	213 Ma 大于地层年龄, 未经历锆石封闭温度
				11.8		246.3	
				5.6		251.9	
				10.5		175.0	
PG5-1-2	J ₂ q	2 557.8	75	11.8	9.5 Ma 磷灰石经历温度 >85℃	191.1	136 Ma 相当于地层年龄, 未经历锆石封闭温度
				2.8		144.6	
				19.2		136.9	
				4.3		70.7	
PG2-3-1	T ₃ x	3 247.1	89	1.1	2.4 Ma 磷灰石经历温度 >85℃	49.9	112 Ma 接近或相当于地层年龄, 进入锆石封闭温度
				3.4		167.5	
				4.9		79.2	
				0.4		150.8	
PG5-2-1	T ₃ x	3 403.0	92	0.8	1.5 Ma 磷灰石封闭温度 >85℃	146.4	153 Ma 略小于地层年龄, 进入锆石封闭温度
				1.4		144.0	
				0.9		144.1	
				2.7		178.4	

4) 对 He 年龄定量模拟揭示了川东北动态热演化历程,川东北 T₃x—J₂s 钻井岩心、通江诺水河剖面Є₁c—O₁m 和 J₂s—K₁c 层位样品在 178 Ma 之前,古地温大于 170~190℃,部分样品经历了锆石封闭温度,随后地层继续抬升,古地温下降;当样品在 40.5~178.0 Ma 之间时,古地温在 85~170℃之间;当样品在 0~40.5 Ma 时,现今地温小于 85℃,全部样品都经历了磷灰石封闭温度。

5) (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 全部来自自身 U,Th 放射性同位素的衰变,既无继承 He 和外来 He 也无 He 的丢失。任何破坏矿物颗粒封闭性的因素均会影响 He 年龄的准确性,破坏矿物封闭体系的外因主要有构造活动、岩浆作用、热作用、变质作用等。而 α 粒子的运移距离、He 的扩散行为、粒径、矿物包裹以及矿物颗粒的来源等为主要内因。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。理论上磷灰石的包裹体在显微镜下很容易识别出来,但实际情况往往是很难以镜下挑选出完全没有包裹体的磷灰石颗粒,这可能是造成同一个样品中不同颗粒 He 年龄有时会有较大差异的主要原因。另外矿物颗粒来源和成因不同,He 扩散速率和程度不同;或经历不同的热事件造成矿物颗粒后期热重置不完全(残留有先前 U,Th 反应生成的 He),也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。因此在做 He 定年分析之前,要先对磷灰石、锆石进行分类及形态研究等。同时在实验时,尽可能地挑选无包裹体的矿物颗粒。

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,2000,15:661~665

2 Mckenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters,1978,40:25~32

3 秦建中,饶丹,蒋宏. 高演化海相碳酸盐岩层系古温标的直接指标——包裹体均一温度[J]. 石油实验地质,2008,30(5):

- 494 ~ 498
- 4 汪新伟,汪新文,韩效忠. 运用磷灰石裂变径迹分析十万山盆地的地热史[J]. 石油与天然气地质,2003,24(4):385 ~ 391
- 5 Qin Jianzhong, Wang Jie, Qiu Nansheng. Evidence of thermal evolution history of northeast Sichuan basin—(U-Th)/He low temperature thermochronometry of apatite and zircon[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(6): 591 ~ 601
- 6 徐二社,邱楠生,秦建中,等. 沉积盆地有机质自由基热演化特征及其作为古温标的探索[J]. 地质学报,2008,28(3):413 ~ 419
- 7 任战利,刘丽,崔军平. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(4):502 ~ 506
- 8 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[J]. 古生物学报,2000,39(1):151 ~ 156
- 9 邱楠生,李慧莉,金之钧. 碳酸盐岩层系热历史恢复的有机质自由基古温标研究[J]. 地质学报,2006,80(3):390 ~ 397
- 10 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[J]. 光谱学与光谱分析,2004,24(11):1 363 ~ 1 366
- 11 Orchard M J A. Conodont based temporal and spatial framework for the Triassic of North America[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(6): 1 156.
- 12 王飞宇,刘德汉. 镜质体反射率可作为下古生界高过成熟烃源岩成熟度标尺[J]. 天然气工业,1996,16(4):14 ~ 19
- 13 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[J]. American Journal of Science, 2003, 303: 489 ~ 518
- 14 Green P F, Duddy, I R, Crowhurst P V. Integrated (U-Th)/He dating, AFTA and vitrinite reflectance results in Seven Otway Basin wells confirm regional late Miocene exhumation and validate helium diffusion systematic[M]. AAPG Annual Convention, Salt Lake City, Utah, 2003
- 15 House M, Wernicke B, Farley K. Dating topography of the Sierra Nevada, California, using apatite (U-Th)/He ages[J]. Nature, 1998, 396: 66 ~ 69
- 16 Stock G M, Ehlers T A, Farley K A. Where does sediment come from? Quantifying catchment erosion with detrital apatite (U-Th)/He thermochronometry[J]. Geology, 2006, 34: 725 ~ 728
- 17 Wolf R A, Farley K A, Silver L A. Helium diffusion and low temperature thermochronometry of apatite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4 231 ~ 4 240
- 18 Reiners P W, Farley K A. Helium diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon[A]. In: Noble W P, OSullivan P B, Brown R W, eds. 9th international conference on fission track dating and thermochronology[C]. Geological Society of Australia, 2000, 58: 283 ~ 284
- 19 Reiners P W, Farley K A, Hickes H J. Helium diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon; initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte[J]. Tectonophysics, 2002, 349: 247 ~ 308
- 20 Reiners P W, Farley K A. Helium diffusion and (U-Th)/He thermochronometry titanite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(22): 3 845 ~ 3 859
- 21 Wolf R, Farley K A, Kass D. A sensitivity analysis of the apatite (U-Th)/He thermochronometer[J]. Chemical Geology, 1998, 148(1-2): 105 ~ 114
- 22 韩永辉,吴春生. 四川盆地地温梯度及几个深井的热流值[J]. 石油与天然气地质,1993,14(1):80 ~ 84
- 23 王一刚,余晓锋,杨雨,等. 流体包裹体在建立四川盆地古地温剖面研究中的应用[J]. 地球科学,1998,23(3):285 ~ 288
- 24 卢庆治,胡圣标,郭彤楼,等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1 110 ~ 1 116
- 25 沈传波,梅廉夫,郭彤楼. 川东北地区中-新生代热历史的裂变径迹分析[J]. 天然气工业,2007,27(7):24 ~ 26
- 26 Farley K A, Wolf R A, Silver L T. The effects of long alpha stopping distances on (U-Th)/He ages[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4 223 ~ 4 229
- 27 童崇光. 新构造运动与四川盆地构造演化及气藏形成[J]. 成都理工学院学报,2000,27(2):75 ~ 80
- 28 卢庆治,郭彤楼,胡圣标. 川东北地区热流史及成烃史研究[J]. 新疆石油地质,2006,27(5):449 ~ 451
- 29 杜春国,郝芳,张树林,等. 川东北宣汉-达县地区地层剥蚀厚度恢复[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(4):1 ~ 5
- 30 Kohn B P, Gleadow JW, Brown R W, et al. Shaping the Australian crust over the last 300 million years: insights from fission track thermotectonic and denudation studies of key terranes[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2002, 49: 697 ~ 717
- 31 Gunnell Y, Gallagher K, Carter A, et al. Denudation history of the continental margin of western Peninsular India since the early Mesozoic reconciling apatite fission track data with geomorphology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 215: 187 ~ 201
- 32 Gleadow, A J W, Fitzgerald P G. Uplift history and structure of the Transantarctic mountains: new evidence from fission track dating of basement apatite in the dry valleys area, southern [J]. Victoria land. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 82: 1 ~ 14
- 33 Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982. 1 ~ 45
- 34 Stiwe K, White L, Brown R. The influence of eroding topography on steady state isotherms: Application to fission track analysis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 124: 63 ~ 74
- 35 Mancktelow N S, Grasemann B. Time dependent effects of heat advection and topography on cooling histories during erosion[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 270: 167 ~ 195
- 36 Braun J. Quantitative Constraints on the rate of landform evolution derived from low temperature thermochronology[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58: 351 ~ 374
- 37 Pecube B J. A new finite element code to solve the heat transport equation in three dimensions in the earth crust including the effects of a time varying, finite amplitude surface topography[J]. Computers and Geoscience, 2003, 29: 787 ~ 794