论文

南天山欧西达坂岩体热演化历史与隆升过程分析 ——来自 Ar-Ar 和(U-Th)/He 热年代学的证据

张斌^①, 陈文^{①*}, 孙敬博^①, 喻顺^①, 尹继元^①, 李洁^①, 张彦^①, 刘新宇^①, 杨莉^{①②}, 袁霞^①

① 中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;

② 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

* 通讯作者, E-mail: chenwenf@vip.sina.com

收稿日期: 2015-05-08; 接受日期: 2015-10-16; 网络版发表日期: 2016-02-22

国家自然科学基金项目(批准号: 41473053)、地质矿产调查评价项目(编号: 12120113015600)和公益性行业专项经费(编号: 201211074-05)资助

摘要 天山造山带晚古生代以来的隆升剥蚀过程与带内矿床形成后的保存潜力密切相关. 本文报道了新的角闪石/斜长石 Ar-Ar 年龄和锆石/磷灰石(U-Th)/He 年龄, 为重建南天山中段地区欧西达坂岩体完整的构造-热演化历史提供年代学基础, 结合前人研究成果分析了冷却速率及剥蚀速率变化特征, 对南天山中段晚古生代以来的热演化历史及隆升剥蚀历史进行了探讨. 同位素定年结果显示, 角闪石 Ar-Ar 坪年龄为 $(382.6 \pm 3.6)\text{Ma}$, 斜长石 Ar-Ar 加权平均年龄为 $(265.8 \pm 4.9)\text{Ma}$, 锆石与磷灰石(U-Th)/He 年龄分别为 (185.8 ± 4.3) 和 $(31.1 \pm 2.9)\text{Ma}$. 热演化历史及模拟结果表明, 南天山中段地区晚古生代至今的构造-热演化历史可以大致分为 5 个阶段: (1) 志留纪末至晚泥盆世岩体平均冷却速率约 $7.84^\circ\text{C}/\text{Myr}$; (2) 晚泥盆世至中二叠世末期, 岩体的平均冷却速率约 $2.07^\circ\text{C}/\text{Myr}$; (3) 中二叠世末到始新世中期岩体平均冷却速率降至 $0.68^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 此期间总体地质运动较为平缓; (4) 新生代始新世期间(约 46~35Ma)南天山中段地区发生了一期快速隆升剥蚀事件, 岩体冷却速率突升至 $5.00^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 剥蚀量达到 1.83km, 平均剥蚀速率 0.17mm/a ; (5) 始新世中期(约 35Ma)至今, 平均冷却速率约为 $1.14^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 隆升速度仍然较快, 剥蚀量约为 1.33km, 平均剥蚀速率约 0.04mm/a . 新生代以来天山的剧烈隆起抬升受控于印亚碰撞的远程效应, 远程作用在天山的响应具有一定的滞后效应.

关键词 南天山, 欧西达坂岩体, 热演化历史, 隆升剥蚀, Ar-Ar 年代学, (U-Th)/He 年代学

中文引用格式: 张斌, 陈文, 孙敬博, 喻顺, 尹继元, 李洁, 张彦, 刘新宇, 杨莉, 袁霞. 2016. 南天山欧西达坂岩体热演化历史与隆升过程分析——来自 Ar-Ar 和(U-Th)/He 热年代学的证据. 中国科学: 地球科学, 46: 392–405, doi: 10.1360/N072014-00533

英文引用格式: Zhang B, Chen W, Sun J B, Yu S, Yin J Y, Li J, Zhang Y, Liu X Y, Yang L, Yuan X. 2016. The thermal history and uplift process of the Ouxidaban pluton in the South Tianshan orogen: Evidence from Ar-Ar and (U-Th)/He. Science China Earth Sciences, 59: 349–361, doi: 10.1007/s11430-015-5218-z

1 引言

矿床形成以后常常受到各种地质作用或者事件的控制和影响,一些矿床受到破坏而消失,一些则能部分保存下来,极少数能得以完整保存,影响矿床变化与保存的主要因素包括地壳抬升、区域沉降、风化剥蚀、岩浆活动和区域变质等方面,而区域隆升与剥蚀是最为关键的因素之一;同位素热年代学方法是研究区域隆升剥蚀的有效手段,可以给出剥蚀量和剥蚀速率等的定量化信息(Meyer, 1985; 翟裕生等, 2002; 翟裕生和王建平, 2011; Groves等, 2005; Kesler和Wilkinson, 2006; 王建平等, 2008). 天山造山带作为中国一条重要的多金属成矿带,其成矿作用主要发生在古生代造山作用期间(李华芹等, 2006; 王志良等, 2006; 陈文等, 2007; 王清利, 2008; 张东阳等, 2009; 王登红等, 2010; 薛春纪等, 2011; 张作衡等, 2012; 孙敬博等, 2012; 张喜等, 2012), 因此,有必要对天山造山带一些典型地区开展同位素热年代学研究,以期揭示其古生代以来的隆升剥蚀历史,为认识金属矿床成矿规律,成矿预测和指导区域找矿等方面提供参考. 同时,中低温热年代学在隆升剥蚀史(Soderlund等, 2005; Flowers等, 2008)、区域热历史演化(Reiners和Brandon, 2006; Taylor和Fitzgerald, 2011; Hodges, 2014)、古地形演化(Ehlers和Farley, 2003)、气候变化与盆山耦合等方面的研究中能够发挥重要的作用, Ar-Ar和(U-Th)/He方法的结合已成为开展这些研究的重要支柱手段.

长期以来,前人用裂变径迹等方法对天山造山带晚中生代以来的隆升剥蚀过程作出了很好的限定,识别出了多期次快速隆升剥露事件. 但之前的研究多集中于中低温阶段,中-高温阶段和极低温阶段热演化历史研究相对缺乏(Sobel和Dumitru, 1997; Bullen等, 2001; 郭召杰等, 2006; 马前等, 2006; 陈正乐等, 2008; 朱文斌等, 2006; 杜治利和王清晨, 2007; 王宗秀等, 2008; De Grave等, 2009, 2011, 2012; Glorie等, 2010; 肖晖等, 2011; 常建等, 2012; 罗梦等, 2012; Li等, 2013; 吕红华等, 2013; Yu等, 2014), 对天山造山带完整的热演化历史,早期造山过程中山体隆升的速度、剥蚀量等还没有明确的认识. 基于上述考虑,本文综合利用U-Pb, Ar-Ar和(U-Th)/He等同位素热年代学技术,结合区域地质资料,对南天山关键

构造位置的欧西达坂地区进行研究,分析了南天山造山带中段自晚古生代以来所经历的热演化历史及抬升剥露历史,反演南天山造山带内岩浆侵位后的冷却过程及陆-陆碰撞和陆内演化阶段上覆盖层的揭顶历史,以确定南天山造山带在地质演化过程中发生的构造热事件的时代、期次及山脉的抬升剥蚀速率等.

2 研究区地质概况

横亘于中亚地区的天山山脉是亚洲规模巨大的、最主要的山系之一,它向东收敛,向西撒开,全长3000多千米,宽达300多千米,主要由古生代陆缘增生-碰撞造山作用、中生代陆内演化和新生代晚期陆内造山作用形成(图1). 天山造山带在经过石炭纪末-二叠纪初同碰撞-后碰撞构造岩浆活动、二叠纪早-中期幔源岩浆活动与壳幔相互作用后,二叠纪末期开始进入陆内演化阶段,并于中生代早期经历准平原化状态,进入新生代以后再次活跃形成陆内造山带(Yin等, 1998; Khain等, 2002; 李锦轶等, 2006; 肖文交等, 2008),并伴随发育一系列近东西走向逆冲或走滑断裂带.

南天山造山带位于塔里木地块与伊犁-中天山地块之间,北以那拉提南缘断裂、乌瓦门-拱拜子断裂和卡瓦布拉克断裂为界,南以托什干河断裂、塔里木盆地北缘断裂和兴地塔格断裂为界. 它是由南天山洋俯冲消减形成的弧前增生楔和陆陆碰撞形成的构造混杂岩组成. 代表了碰撞造山发生以前的塔里木地块北缘地区,前寒武纪塔里木基底岩石和附着其上的洋壳增生物质以及部分塔里木地块北缘的陆缘/浅海沉积物均为其组成部分(李曰俊等, 2009; Qian等, 2009; Gao等, 2009; 朱志新等, 2009; Han等, 2011; 黄河, 2013). 本文研究区位于南天山中段欧西达坂一带,是南天山和塔里木盆地交接处的关键构造位置,大地构造位置上属于库车再生前陆盆地(重要的油气资源基地)与尤路都斯盆地之间,其构造热演化过程与库车盆地的演化密切相关. 欧西达坂岩体主体呈近东西处于南天山南缘断裂带以北(图2),走向与区域构造线方向一致,主要由花岗质岩石组成,块状构造,中粗粒结构,见有较弱的韧性变形现象,岩体边缘发育少量伟晶岩脉. 岩体北侧侵入长城系阿克苏

图 1 天山地区 DEM 地貌图

图 2 欧西达坂地区地质概况图
据张斌等(2014)

杂岩群, 二叠系直接覆盖于该岩体之上, 周边地层普遍经历了低级的区域变质作用, 北部以泥盆纪萨阿尔明组灰岩、砂岩及板岩为主, 表现为一系列褶皱冲断组合的构造样式(李向东等, 2004); 以南为库车前陆盆地, 主要为三叠纪-侏罗纪砂岩和泥岩沉积。

3 样品选取与分析方法

本文样品采集地位于新疆库车县北北西方向约 70km 处(图 1 和 2), 样品 GPS 点位为: 42°17'49"N, 83°16'14"E, 2013m, 选择华力西期花岗质岩石新鲜

露头, 样品用布袋包装, 重约10kg, 采样点用便携式GPS进行定位. 岩石粉碎后, 采用人工重砂法等技术进行粗选, 对分选出的角闪石、斜长石、锆石和磷灰石单矿物颗粒再次进行提纯, 以备Ar-Ar和(U-Th)/He分析.

3.1 Ar-Ar 定年流程

角闪石和斜长石的Ar-Ar定年分析均在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室完成. 首先对提纯(纯度>99%)的角闪石、斜长石单矿物颗粒用超声波进行清洗, 清洗后的样品被封进石英瓶送核反应堆中接受中子照射. 照射工作在中国原子能科学研究院“游泳池堆”中进行, 使用H4孔道, 中子流密度约 $2.60 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 照射总时间1440min, 积分中子通量 $2.25 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$; 同期接受中子照射的ZBH-25黑云母标样标准年龄为 $(132.7 \pm 1.2) \text{ Ma}$, K含量7.6%.

样品的阶段升温过程使用石墨炉进行加热, 每阶段加热10min, 每阶段释放出的气体均净化10min后进入质谱系统进行同位素分析. 质谱分析在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行, 每个峰值均采

集20组数据, 所有的数据在回归到时间零点值后进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正及干扰元素同位素校正. 中子照射过程中产生的干扰同位素校正系数通过分析照射的 K_2SO_4 和 CaF_2 获得, 其值分别为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)\text{Ca}=0.0002389$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})\text{K}=0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)\text{Ca}=0.000806$. ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda=5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; 用ISOPLOT程序计算年龄(Ludwig, 2003), 详细实验流程见有关文章(陈文等, 2006, 2011; 张彦等, 2006).

3.2 (U-Th)/He 定年流程

首先在显微镜下挑选晶形较好、透明、无裂隙、尽量不含包裹体、颗粒直径大于 $60 \mu\text{m}$ 的锆石和磷灰石颗粒(图3), 然后对矿物颗粒的大小进行测量, 并计算 α 校正因子(F_T). 将测量好尺寸的锆石及磷灰石矿物颗粒分别放入Nb包和Pt包中, 使用970nm半导体激光加热单颗粒矿物提取 ^4He ; ^4He 量根据同位素稀释剂 ^3He 进行计算, ^3He 依据 ^4He 标准气体进行校正, He同位素分析在Alphachron四级杆质谱上完成, 总体上He测量精度(RSD)小于1%.

图3 锆石、磷灰石颗粒镜下照片

年龄表示单颗粒(U-Th)/He 年龄

3.2.1 锆石

锆石U和Th含量通过同位素稀释剂法在ICP-MS上进行测试. 向测完He的锆石样品中加入25μL的²³⁵U和²³⁰Th稀释剂溶液(包含15ppb ²³⁵U和15ppb ²³⁰Th)及350μL HF溶液, 放入高压溶样罐中240℃恒温加热40h. 同时在25μL标准溶液(包含81.3ppb ²³⁵U和82.5ppb ²³⁰Th)中加入和样品中等量的稀释剂. 从高压溶样罐中取出样品蒸干, 再加入300μL HCl 200℃恒温加热24h溶解氟化物. 最后将溶液稀释到10%, 在ICP-MS上进行分析, 单颗粒U和Th同位素比值测量精度小于2%.

3.2.2 磷灰石

磷灰石U和Th含量同样通过同位素稀释剂法在ICP-MS上进行测试. 将25μL浓度为50% HNO₃的稀释剂溶液(包含约15ppb ²³⁵U和5ppb ²³⁰Th)加入到测完He的磷灰石样品中. 磷灰石颗粒在酸性稀释剂溶液中溶解12h, 以使稀释剂与样品达到同位素平衡. 25μL标准溶液(27.6ppb U和28.4ppb Th)中加入与样品中等量的稀释剂. 然后在标准溶液和样品中加入250μL蒸馏水, 最后通过ICP-MS进行分析. U和Th同位素比值测量精度小于2%. 总体上, 磷灰石(U-Th)/He热年代学方法测量精度小于2.5%.

锆石、磷灰石(U-Th)/He年龄分析详细实验流程见Evans等(2005)和Yu等(2014).

4 分析结果

4.1 Ar-Ar 年龄

角闪石Ar-Ar年龄分析结果见表1及图4, 总气体

年龄为382.1Ma, 除最初几个释气阶段及最后一个温度阶段获得不规则年龄外, 其余1100~1340℃的4个高温阶段组成一个平坦的年龄坪, 该坪年龄为(382.6±3.6)Ma, ³⁹Ar释放量占总量的96.7%.

斜长石Ar-Ar年龄分析结果见表2及图5, 700~1400℃共14个温度阶段组成一个受扰动的“弱马鞍形”年龄谱, 总气体年龄为270.4Ma, 未形成平坦的年龄坪, 其中“马鞍形”年龄谱底部1060~1260℃共6个温度阶段视年龄接近, 构成一个近似的年龄坪, 其加权平均年龄为(265.8±4.9)Ma, 可以近似代表斜长石K-Ar体系封闭年龄(Hacker和Wang, 1995; Hacker等, 2000).

4.2 (U-Th)/He 年龄

锆石与磷灰石单颗粒(U-Th)/He年龄分析结果见图3及表3. 其中磷灰石共分析4个颗粒, *F_T*校正参数

图4 角闪石 Ar-Ar 年龄谱图

表1 K1105 角闪石 Ar-Ar 阶段升温加热分析结果^{a)}

<i>T</i> (℃)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	<i>F</i>	³⁹ Ar(Cum.)/(%)	年龄(Ma)	±2σ(Ma)
700	311.8812	0.6088	0.0000	0.1274	131.9878	0.03	491.0	221.0
800	368.7633	0.4078	4.3969	0.1078	249.4576	0.41	839.0	24.0
900	290.2985	0.4605	4.5655	0.0909	155.1142	0.74	565.0	37.0
1000	134.7018	0.1366	6.0709	0.0519	95.2154	1.39	367.4	9.8
1100	108.3055	0.0289	7.5510	0.0379	100.8970	8.66	387.1	8.4
1200	101.7913	0.0094	6.2835	0.0275	99.9617	72.70	383.9	6.9
1250	103.5327	0.0151	7.0258	0.0284	100.1349	80.18	384.4	6.9
1340	106.7298	0.0328	5.9849	0.0313	97.9145	98.09	376.8	6.7
1400	105.4871	0.1240	2.6877	0.0401	69.1938	100.00	274.2	6.1

a) 总气体年龄为382.1Ma, 样品量为135.91mg, 照射参数*J*=0.002372, 下标*m*代表样品中测定的同位素比值; *F*=⁴⁰Ar*/³⁹Ar, 表示放射成因⁴⁰Ar和³⁹Ar的比值; ³⁷Ar₀表示经过放射性衰变校正后的³⁷Ar量

表 2 K1105 斜长石 Ar-Ar 阶段升温加热分析结果^{a)}

<i>T</i> (°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _{<i>m</i>}	<i>F</i>	³⁹ Ar(Cum.)(%)	年龄(Ma)	±2σ(Ma)
700	75.2915	0.1739	0.0000	0.0038	23.9025	0.04	104.0	78.4
800	61.2344	0.0077	0.3769	0.0148	58.9846	9.76	247.0	4.5
900	73.7353	0.0081	0.6893	0.0136	71.4311	17.37	295.1	5.3
960	72.0454	0.0072	0.6600	0.0137	70.0078	21.64	289.7	5.3
1020	69.8314	0.0079	0.4248	0.0142	67.5308	35.41	280.2	5.1
1060	66.6339	0.0058	0.5249	0.0139	64.9945	42.10	270.4	4.9
1100	66.4717	0.0058	0.5794	0.0142	64.8139	48.79	269.7	4.9
1140	65.8900	0.0057	0.5092	0.0136	64.2610	59.84	267.6	4.9
1180	64.9683	0.0077	0.6288	0.0144	62.7704	71.91	261.8	4.7
1220	65.8985	0.0125	0.9438	0.0158	62.3142	81.17	260.0	4.7
1260	70.2271	0.0192	1.4032	0.0170	64.7075	88.91	269.3	4.9
1320	73.9614	0.0248	1.9130	0.0187	66.8575	96.03	277.6	5.1
1360	73.8777	0.0274	2.1106	0.0199	66.0279	98.79	274.4	5.1
1400	76.6785	0.0343	2.4623	0.0236	66.8501	100.00	277.6	5.5

a) 总气体年龄为 270.4 Ma, 样品量为 101.93 mg, 照射参数 *J*=0.002488

表 3 磷灰石和锆石(U-Th)/He 年龄分析结果

样品号	U (ppm)	Th (ppm)	He (ncc)	Th/U	未校正年龄(Ma)	<i>F_T</i>	校正年龄(Ma)	±1σ
磷灰石								
K1105-1	86.80	129.88	1.569	1.55	22.83	0.74	30.9	0.9
K1105-2	97.33	189.72	1.403	2.01	24.93	0.71	35.2	1.0
K1105-4	69.53	111.26	0.862	1.65	16.82	0.73	23.0	0.6
K1105-5	101.67	177.07	1.159	1.80	25.52	0.68	37.4	1.0
锆石								
K1105-6	308.25	159.89	23.448	0.54	142.85	0.77	186.3	7.5
K1105-7	419.69	165.44	18.640	0.41	138.47	0.72	193.7	7.6
K1105-8	278.37	180.49	16.462	0.67	133.13	0.75	177.8	7.1

图 5 斜长石 Ar-Ar 年龄谱图

在 0.68~0.74, 经 *F_T* 校正的年龄为 23.0~37.4Ma, 平均年龄为 (31.1±2.9)Ma. 锆石样品共分析 3 个颗粒, *F_T* 校正参数 0.72~0.77, *F_T* 校正后的年龄为 177.8~193.7Ma,

平均年龄 (185.8±4.3)Ma.

5 讨论

5.1 (U-Th)/He 同位素年龄解释

K1105 石英闪长岩中分选出的锆石与磷灰石颗粒, 其 (U-Th)/He 年龄分别为 177.8~193.7 和 23.0~37.4 Ma. 从年龄数据看, 相同矿物不同颗粒形成的年龄存在一定差异, 除数据测量时的系统误差和分析误差外, 原因可能如下: α 粒子的射出效应、He 的植入、晶体大小、辐射损伤和矿物中的包裹体等关键因素 (Reiners 和 Farley, 2001; Shuster 等, 2006; Shuster 和 Farley, 2009; Spielgel 等, 2009; Danišik 等, 2010).

磷灰石颗粒中常常富含 U 和 Th 的锆石及独居石包裹体. 在从磷灰石晶体中萃取 He 时, 这些包裹体也能释放出部分 He, 但在磷灰石 U 和 Th 含量分析过程中, 锆石和独居石等难溶矿物包裹体并不发生溶

解, 从而导致He的浓度过高, 使磷灰石(U-Th)/He年龄(AHe)偏老. 在挑选矿物过程中, 尽管已经尽量剔除含有包裹体的矿物, 但一些较小尺度的包裹体却很难人为发现和剔除. 锆石的情况则有所不同, 由于其本身即富含U和Th等铀系元素, 在化学处理过程中能够完全溶解, 流体包裹体中的⁴He则会造成过剩He的存在, 同样影响锆石(U-Th)/He年龄(ZHe)的大小. 包裹体对(U-Th)/He年龄的影响主要是通过改变U、Th或He的浓度, 图6显示了等效U浓度与He浓度之间的关系(表4), 可以发现二者之间基本呈线性相关, 表明包裹体并不是造成不同颗粒间年龄差异的主要因素.

若锆石和磷灰石颗粒所处的外部环境U和Th浓度很高, 则(U-Th)/He年龄将受植入He的影响而偏高(Spielgel等, 2009). K1105石英闪长岩5个样品的全岩化学分析结果显示(表5), 全岩U浓度为1.078~1.503 ppm, Th浓度为4.937~13.620ppm, 相对于锆石的U浓度278.37~419.69ppm, Th浓度159.89~180.49ppm及磷灰石U浓度69.53~101.67ppm, Th浓度111.26~189.72 ppm来说是非常低的, 因此可以基本排除植入He对

不同颗粒间年龄差异造成的影响.

矿物晶体的大小对(U-Th)/He体系封闭温度具有直接的影响, 在经历相同热历史的条件下, 一般晶体越大封闭温度越高, 记录的年龄越老(Farley, 2000). 但通过分析发现, K1105石英闪长岩中无论是锆石还是磷灰石, 其(U-Th)/He年龄与等效半径之间均不存在明显的相关性(图7), 因此3个锆石颗粒之间及4个磷灰石颗粒之间存在的年龄差异性并不能用晶体大小的差别来解释.

图 6 等效 U 浓度与 He 浓度关系图

表 4 磷灰石、锆石颗粒半径及等效 U 浓度

颗粒编号	K1105-1	K1105-2	K1105-4	K1105-5	K1105-6	K1105-7	K1105-8
矿物	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	锆石	锆石	锆石
半径(μm)	59.51	58.62	57.47	49.08	55.11	44.82	51.38
等效U浓度(ppm)	117.325	141.915	95.677	143.281	345.823	458.571	320.784

表 5 K1105 石英闪长岩全岩化学分析 U 和 Th 含量^{a)}

颗粒编号	K1105-A	K1105-B	K1105-C	K1105-D	K1105-E
Th(ppm)	9.578	11.720	4.937	13.620	5.613
U(ppm)	1.376	1.078	1.502	1.249	1.270

a) 数据引自张斌等(2014)

图 7 等效半径与(U-Th)/He 年龄关系

相对于冷却速率、化学成分和颗粒半径等因素来说, 辐射损伤造成的晶体结构变化对He的扩散影响是最大的(Shuster等, 2006), 辐射损伤引起的磷灰石晶体结构变化阻碍了He的扩散迁移, 导致He的保留性随辐射损伤程度的增加而增强(Flowers等, 2007, 2009), 图6和8中显示的等效U浓度与(U-Th)/He年龄之间及He浓度与(U-Th)/He年龄之间明显的正相关线性关系充分说明造成锆石及磷灰石颗粒间年龄差异的主要因素是辐射损伤。

5.2 欧西达坂岩体热演化历史

欧西达坂石英闪长岩源区为镁铁质岩浆对下地壳的底侵作用, 熔融压力大于1.6GPa (王超等, 2009; 张斌等, 2014), 以最大静岩校正压力系数计算(胡宝群等, 2003), 初始侵位深度应该至少在20km以上。欧西达坂岩体总体为准铝质-过铝质系列(王超等, 2009; 张斌等, 2014), 其锆石饱和温度计算表明, 欧西达坂5个石英闪长岩全岩样品的锆石平均结晶温度为730℃左右(表6), 这意味着初始岩浆的温度应该高于730℃, 锆石中U-Pb体系的封闭温度也应在730℃上下。

根据锆石U-Pb年龄((418.4±2.2)和(421.0±3.0) Ma)(王超等, 2009; 张斌等, 2014)、角闪石/斜长石Ar-Ar年龄、锆石/磷灰石(U-Th)/He年龄和磷灰石FT年龄((84.2±4.4)Ma)(王彦斌等, 2001)建立的岩体热演化轨迹见图9, 锆石U-Pb和角闪石/斜长石Ar-Ar体系封闭温度区间分别选择(730±50)℃(锆石只有开始结晶, U-Pb体系才能保持封闭)、(535±50)℃(Harrison和Fitzgerald, 1986)和(220±50)℃(Berger和York, 1981)。同时使用HeFTy软件, 采用Monte Carlo法对锆石及磷灰石(U-Th)/He年龄进行联合模拟(Ketcham等,

2005)。在综合考虑影响锆石及磷灰石(U-Th)/He体系封闭温度因素的基础上, 模拟过程中锆石选择Reiners等(2004)的热扩散模型, 磷灰石选择Flowers等(2009)的辐射损伤模型(RDAAM), 在建立模拟边界条件时, 以斜长石Ar-Ar年龄作为限制点, 随机模拟100条较好路径, 获得427条可接受路径, 选择其中“最好”的一条时间-温度曲线作为岩体所经历的热史。图9反映出欧西达坂地区自岩浆开始固结成岩以来的热历史可以大致分为五个阶段: 持续快速的冷却过程(A), 冷却速率相对减缓但仍较快(B), 冷却速率趋于平缓(C), 冷却速率陡然加快(D), 冷却速率相对减缓(E)。

根据Petford等(2000)及章邦桐等(2014)提出的花岗岩从初始岩浆产生到岩石开始结晶固结的冷却时间计算方法, 可获得欧西达坂岩体从岩浆侵位到锆石开始结晶经历了1.94Myr左右。在初始岩浆温度为950℃的情况下, 花岗质熔体为液相状态, 其降温速率可达113.4℃/Myr, 这是由于岩浆侵位后与围岩之间发生快速的热传导作用导致的, 此时岩浆仍处于液相状态。志留纪末至晚泥盆世, 欧西达坂岩体冷却速率约为5.95℃/Myr, 相比于岩浆就位时的初期冷却过程来说, 冷却速率显著降低。根据岩浆物理性质, 此时岩浆进入固液共存阶段, 冷却速率陡然降低, 并维持在一个相对稳定的状态, 同时也表明岩浆开始固结成岩时与等深围岩之间的温差并不大, 这也侧面证实了岩体侵位于中下地壳。晚泥盆世至中二叠世末期, 岩体进入完全固相降温阶段, 其冷却速率再次降低, 平均冷却速率约为2.07℃/Myr, 在此期间岩体与周围环境的热传导作用仍在进行, 同时南天山中段地区在此期间发生的构造运动也对冷却速率产生了影响; 从中二叠世末一直到始新世中期, 岩体冷

图8 等效U浓度与(U-Th)/He年龄关系

表 6 K1105 石英闪长岩全岩分析(wt%)和锆石饱和温度计算结果^{a)}

样品号	K1105-A	K1105-B	K1105-C	K1105-D	K1105-E
SiO ₂	55.681	56.27266	54.22895	55.68572	55.01347
TiO ₂	1.0688	0.920937	0.984373	1.076556	0.991484
Al ₂ O ₃	15.268	16.02723	15.48566	15.1546	15.19092
Fe ₂ O ₃	9.6344	8.294279	9.32968	9.618859	9.441657
MnO	0.1442	0.120843	0.143818	0.143216	0.144931
MgO	5.1028	4.378592	4.81303	5.113885	4.965101
CaO	6.6498	6.435839	7.563056	6.589888	7.143871
Na ₂ O	2.2982	2.624427	2.55179	2.318736	2.426401
K ₂ O	1.5257	1.505659	2.080496	1.612399	1.72574
P ₂ O ₅	0.1985	0.183213	0.202122	0.20362	0.214038
Zr (ppm)	196.9	139.0	169.6	155.8	127.1
<i>M</i>	2.1099	1.998215	2.470165	2.127048	2.307275
<i>D</i> _{Zr}	2519	3568.345	2924.528	3183.569	3902.439
Ln <i>D</i> _{Zr}	7.8316	8.179857	7.980888	8.065758	8.269357
<i>T</i> _{Zr} (°C)	752.69	732.4361	716.8329	732.7961	705.5655

a) 计算采用 Miller 等(2003)的修正公式: $T_{Zr}=12900/[295+0.85M+\ln(49600/Zr_{\text{熔体}})]$, T_{Zr} 为锆石饱和温度; M 为岩石中某些阳离子比值, $M=[(Na+K+2Ca)/(Al\times Si)]$ (数据引自张斌等, 2014)

图 9 欧西达坂岩体热演化轨迹
ZHe/AHe PRZ: 锆石/磷灰石(U-Th)He 体系部分保留区间

却速率渐趋平缓, 显示岩体和围岩在中二叠世末已经达到热平衡, 热交换冷却已经终止, 此后岩体的冷却主要由剥露作用引起. 由于此阶段岩体冷却速率十分缓慢, 平均仅为0.68℃/Myr, 按正常地温梯度计

算其平均抬升速率不到 $20\mu\text{m/a}$, 反映岩体在此期间总体上处于缓慢的剥蚀隆升演化阶段. 始新世期间(46~35Ma), 岩体冷却速率陡然加快, 达到 $5.00^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 反应了此时期一次快速抬升剥蚀事件, 导致欧西达坂岩体的快速隆升冷却; 35Ma至今, 岩体冷却速率相对于前一阶段来说有所降低, 平均为 $1.14^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 此时期岩体在经历剧烈的构造变动后, 隆升速度有所减缓, 但相对来说仍然很快.

同位素热年代学计只有在温度降低至相应的同位素体系的封闭温度以下时才开始计时, 其间在相应的部分保留区间同位素子体已开始部分积累. 影响封闭温度及部分保留区间的因素主要有: 测年矿物颗粒的大小、冷却速率、保留时间、辐射损伤等因素(Reiners和Brandon, 2006; Hodges, 2014), 根据Farley(2000)和Reiners等(2004)的热扩散模型分别对样品K1105所选取的磷灰石、锆石颗粒进行计算, 得到其有效封闭温度及部分保留区间(图10a, b). 据此对模拟结果进行检验, 发现锆石与磷灰石(U-Th)/He年龄所对应的温度区间均落在有效封闭温度及部分保留域内, 且与所计算的冷却速率相一致, 这在一定程度上证明了模拟结果是可信的.

5.3 隆升剥蚀过程

欧西达坂地区作为南天山的一部分, 其热演化历史必然反映了南天山构造-热演化的特征, 南天山的地质演化以南天山洋的俯冲为起点. 南天山洋自志留纪-泥盆纪分别向塔里木板块及伊犁-中天山地块之下俯冲消减(Yin等, 1998; Khain等, 2002; Qian等, 2009; Gao等, 2009), 其中向南俯冲至塔里木板块之下的过程导致了欧西达坂岩体的产生(王超等, 2009;

张斌等, 2014), 晚志留世-晚泥盆世由于与周边地质体的热交换作用引起岩体的持续快速冷却. 在此期间南天山尚未形成, 该地区的地质活动以俯冲为主.

晚泥盆世-早石炭世, 南天山洋盆俯冲作用引起的构造变形导致南天山南缘褶皱冲断带的形成(李向东等, 2004), 欧西达坂岩体382.6Ma的Ar-Ar年龄则是对此次构造-热事件的响应. 石炭纪末-三叠纪初主洋盆的洋壳消减完毕, 伊犁-中天山岛弧和塔里木古陆开始发生陆壳拼接, 由于古陆边缘轮廓及板块运动方向的影响, 陆-陆拼接的起始时间在整个南天山造山带具有东早西晚的特征, 晚石炭世-早二叠世伊犁-塔里木复合地体与北天山地块发生碰撞, 二叠纪末伊犁-中天山地块与塔里木地块完全拼合, 导致南天山南缘发生向南的强烈构造变形, 并持续至晚二叠世-三叠纪大规模后碰撞造山过程(Dobretsov和Buslov, 1996; Yin等, 1998; Khain等, 2002; Windley等, 2007; Qian等, 2009; Gao等, 2009). 南天山山前凹陷内沉积一套晚二叠世磨拉石建造, 表明南天山西段古洋盆在中二叠世以前已经闭合, 至少在二叠纪末-三叠纪初已进入后碰撞演化阶段. 欧西达坂岩体第二阶段(晚泥盆世-中二叠世)冷却速率相对变缓的冷却过程是岩体与周围环境热交换作用及伊犁-中天山地块与塔里木地块之间的碰撞造山作用的综合结果. 由于碰撞造山过程的发生及后碰撞演化的开始, 引起山体冷却速率的变化, 同时伴随着山体抬升速度的加快. 在此过程中, 山体平均冷却速率由晚泥盆世-早二叠世中期的约 $1.48^\circ\text{C}/\text{Myr}$ 增加至早二叠世中期-中二叠世末期的约 $3.83^\circ\text{C}/\text{Myr}$. 结合阶段升温年龄谱特征, 265.8Ma的斜长石Ar-Ar加权平均年龄纪录了南天山造山带中段碰撞造山结束暨大规模后碰撞造山

图10 冷却速率与有效封闭温度关系图(a)以及保留时间与部分保留区间温度关系图(b)

作用开始的时限。此外,通过对区域岩浆活动及构造演化的分析,发现南天山地区广泛发育二叠纪后碰撞花岗岩,同时库车干附近(259.1±3.3)Ma的Ar-Ar坪年龄,独库公路964.7km里程碑附近云母片岩中(268±10)Ma的Ar-Ar年龄及拉尔墩达坂糜棱岩中黑云母(250.5±7.9)Ma的Ar-Ar坪年龄也与南天山大规模后碰撞造山作用的时限基本吻合(肖序常等, 1992; 丁道桂等, 1996; 李向东等, 2004; 夏祖春等, 2005; 王超等, 2007)。上述Ar-Ar年代学数据表明,南天山在晚泥盆世-早二叠世期间的隆升速率是比较快的。

以南天山中段地区二叠纪和新生代期间地温梯度分别为40和30℃/km(王良书等, 2003; 李慧莉等, 2005)计算,根据模拟结果,早侏罗世期间,欧西达坂岩体已位于地表之下约3.25km,这意味着从早侏罗世至今,南天山中段地区至少被剥蚀了3.25km左右,平均剥蚀速率约为0.017mm/a。欧西达坂岩体上直接覆盖有二叠纪地层(中二叠统或下二叠统),说明在二叠纪时期欧西达坂岩体至少已抬升至近地表区域,尔后至早侏罗世期间发生沉降埋藏。在锆石(U-Th)/He冷却年龄附近,暨早侏罗世期间,冷却速率再次减缓,这可能代表了南天山地区后碰撞造山作用的结束,同时大规模的夷平作用开始。库车和喀什山前凹陷及尤路都斯和博斯腾山间凹陷所沉积的巨厚侏罗纪地层平行不整合于下伏三叠纪地层之上(乔木和袁方策, 1992),也是造山作用结束和造陆作用开始的最好例证。其中二叠纪中期至早侏罗世造山期间为南天山隆升剥蚀的主要地质时期,早侏罗世-始新世期间构造运动相对平缓,但仍然在持续缓慢的抬升,早侏罗世至始新世中期的漫长时间内,此期间南天山中段地区剥蚀量仅约0.1km。塔里木北部前陆盆地中生代陆相含煤磨拉石建造及多期韵律性砾岩砂岩和泥页岩沉积组合(汤良杰等, 2012),也反映中生代期间南天山持续隆升造山过程。至始新世早期,夷平作用结束,天山造山带重新活跃。

55Ma以来印度板块与欧亚大陆的碰撞导致始新世期间(46~35Ma)南天山地区发生剧烈的构造运动,山体快速抬升,引起岩体冷却速率的急剧增加,在此期间山体剥蚀量达到1.83km左右,平均剥蚀速率约0.17mm/a,同时也说明了南天山对印亚碰撞的远程响应至少滞后了9Ma。35Ma至今,由于喜马拉雅中晚期造山运动远程效应的持续影响,南天山地区总体

上处于快速隆升剥蚀的状态,此期间剥蚀量约为1.33km,平均剥蚀速率约0.033mm/a。

6 结论

(1) 通过多同位素体系定年分析工作,对南天山多期构造演化事件给予了初步的时间限定:约383Ma的角闪石Ar-Ar坪年龄是对南天山洋在晚泥盆世-早石炭世俯冲作用的时间响应;约266Ma的斜长石Ar-Ar年龄给出了南天山后碰撞作用开始的时限;约186Ma的锆石(U-Th)/He冷却年龄可能代表了南天山中段地区后碰撞造山作用的结束暨大规模夷平作用的开始时间;约31Ma的磷灰石(U-Th)/He年龄揭示出南天山地区在新生代处于快速隆升剥蚀状态。

(2) 欧西达坂岩体自侵位结晶以来的热演化历史可以大致分为五个阶段:志留期末至晚泥盆世,自岩浆开始结晶至完全固结成岩,冷却速率约5.95℃/Myr;晚泥盆世至中二叠世末期,平均冷却速率约2.07℃/Myr;中二叠世末到始新世中期岩体平均冷却速率降至0.68℃/Myr;始新世期间(约46~35Ma),岩体平均冷却速率突升至约5.00℃/Myr;始新世中期(约35Ma)至今,平均冷却速率约为1.14℃/Myr。

(3) 南天山中段地区早侏罗世至今总剥蚀量约为3.25km,平均剥蚀速率约0.017mm/a。不同阶段的剥蚀速率反应了地质运动不同时期的差异性:早侏罗世至始新世中期,地质运动平缓;始新世期间(46~35Ma)印亚碰撞的远程效应引起南天山中段地区的快速隆升剥蚀;约35Ma至今,受印亚碰撞的持续影响,南天山中段地区抬升剥蚀速率仍然较快。

致谢 单矿物颗粒的挑选工作在河北省区域地质矿产调查所实验室完成,锆石和磷灰石(U-Th)/He分析得到澳大利亚科廷大学Brent McInnes教授、Noreen Evans博士及Brad McDonald工程师的技术指导,郑永飞院士及审稿人对文章的修改提出了非常宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 常健, 邱楠生, 李佳蔚. 2012. 塔里木盆地与南天山的耦合关系: 来自(U-Th)/He年龄的新证据. 地学前缘, 19: 234-243
 陈文, 张彦, 秦克章, 王清利, 王义天, 刘新宇. 2007. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究. 岩石学报, 23: 2007-2016

- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的Ar-Ar热年代学证据. 岩石学报, 22: 867-872
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴樟谟, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. 地质学报, 85: 1917-1947
- 陈正乐, 李丽, 刘健, 宫红良, 蒋荣宝, 李胜祥, 郑恩玖, 韩效忠, 李细根, 王成, 王国荣, 王果, 鲁克改. 2008. 西天山隆升-剥露过程初步研究. 岩石学报, 24: 625-636
- 丁道桂, 汤良杰, 钱一新. 1996. 塔里木盆地形成与演化. 南京: 河海大学出版社
- 杜治利, 王清晨. 2007. 中生代天山地区隆升历史的裂变径迹证据. 地质学报, 81: 1081-1101
- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 80: 1-15
- 黄河. 2013. 中国南天山地区古生代花岗岩与区域地质演化. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-144
- 胡宝群, 王方正, 孙占学, 刘成东, 白丽红. 2003. 岩石圈中的地压梯度. 地学前缘, 10: 129-133
- 李华芹, 王登红, 万颢, 屈文俊, 张兵, 路远发, 梅玉萍, 邹绍利. 2006. 新疆莱历斯高尔铜铅矿床的同位素年代学研究. 岩石学报, 22: 2437-2443
- 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 何治亮. 2005. 塔里木盆地的热史. 石油与天然气地质, 26: 613-617
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 孙桂华, 褚春华, 李丽群, 朱志新. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. 地质通报, 25: 895-909
- 李向东, 肖文交, 周宗良. 2004. 南天山南缘晚泥盆世构造事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年证据及其意义. 岩石学报, 20: 691-696
- 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 罗俊成, 郑多明, 刘亚雷. 2009. 南天山区域大地构造与演化. 大地构造与成矿学, 33: 94-104
- 罗梦, 朱文斌, 郑碧海, 朱晓青. 2012. 库车盆地中生代构造演化: 磷灰石裂变径迹证据. 地球科学, 37: 893-902
- 吕红华, 常远, 王玮, 周祖翼. 2013. 天山中新世早期快速剥露: 磷灰石裂变径迹与(U-Th)/He低温热年代学证据. 中国科学: 地球科学, 43: 1964-1974
- 马前, 舒良树, 朱文斌. 2006. 天山乌-库公路剖面中、新生代埋藏、隆升及剥露史研究. 新疆地质, 24: 99-104
- 乔木, 袁方策. 1992. 新疆天山夷平面形态特征浅析. 干旱区地理, 15: 14-19
- 孙敬博, 陈文, 刘新宇, 张彦, 李洁, 纪宏伟, 张斌. 2012. 东天山红石金矿区石英钠长斑岩Ar-Ar和U-Pb年龄及构造和成矿意义讨论. 地球学报, 33: 907-917
- 汤良杰, 邱海峻, 云露, 杨勇, 黄太柱, 王鹏昊, 谢大庆, 李萌, 蒋华山. 2012. 塔里木盆地北缘-南天山造山带盆-山耦合和构造转换. 地学前缘, 19: 195-204
- 王超, 刘良, 罗金海, 车自成, 滕志宏, 曹宣铎, 张静艺. 2007. 西南天山晚古生代后碰撞岩浆作用: 以阔克萨彦岭地区巴雷公花岗岩为例. 岩石学报, 23: 1830-1840
- 王超, 罗金海, 车自成, 刘良, 张敬艺. 2009. 新疆欧西达坂花岗岩质岩体地球化学特征和锆石LA-ICP-MS定年: 西南天山古生代洋盆俯冲作用过程的启示. 地质学报, 83: 272-283
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 唐菊兴, 李建康, 应立娟, 王成辉, 刘善宝, 李立兴, 秦燕, 李华芹, 屈文俊, 王彦斌, 陈文, 张彦. 2010. 我国重要矿产成矿年代学研究新数据. 地质学报, 84: 1030-1040
- 王建平, 翟裕生, 刘家军, 柳振江, 刘俊. 2008. 矿床变化与保存研究的裂变径迹新途径. 地球科学进展, 23: 421-427
- 王良书, 李成, 刘绍文, 李华, 徐鸣杰, 王勤, 葛锐, 贾承造, 魏国齐. 2003. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征. 地球物理学报, 46: 403-407
- 王清利. 2008. 天山及邻区古生代构造-岩浆-成矿事件年代学研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院. 1-143
- 王彦斌, 王永, 刘训, 傅德荣, 王军, 王世成. 2001. 天山、西昆仑山中、新生代幕式活动的磷灰石裂变径迹记录. 中国区域地质, 20: 94-99
- 王宗秀, 李涛, 张进, 柳永清, 马宗晋. 2008. 博格达山链新生代抬升过程及意义. 中国科学 D辑: 地球科学, 38: 312-326
- 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 2006. 新疆天山斑岩铜铅矿地质特征、时空分布及其成矿地球动力学演化. 地质学报, 80: 943-955
- 夏祖春, 徐学义, 夏林圻, 李向民, 马中平, 王立社. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩质岩石地球化学研究. 西北地质, 38: 1-14
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京: 地质出版社
- 肖晖, 任战利, 赵靖舟, 王起琮, 时保宏, 宋立军. 2011. 新疆库鲁克塔格地区盆山构造-热演化史. 地学前缘, 18: 33-41
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 熊小林, 王京彬, 郭召杰, 李锦轶, 孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质, 26: 4-8
- 薛春纪, 陈波, 贾志业, 张兵, 万颢. 2011. 新疆西天山莱历斯高尔3571斑岩铜铅矿田地质地球化学和成矿年代. 地学前缘, 18: 149-165
- 翟裕生, 王建平. 2011. 矿床学研究的历史观. 地质学报, 85: 603-611
- 翟裕生, 王建平, 邓军, 彭润民. 2002. 成矿系统与矿化网络研究. 矿床地质, 21: 106-112
- 张斌, 陈文, 喻顺, 尹继元, 李洁, 孙敬博, 杨莉, 杨静. 2014. 南天山洋古生代期间俯冲作用过程探讨. 岩石学报, 30: 2351-2362
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2014. 燕山早期花岗岩基印支期侵位的岩浆动力学证据及构造意义: 基于南岭8个岩体侵位年龄计算结果. 高校地质学报, 20: 1-8
- 张东阳, 张招崇, 艾羽, 苏慧敏. 2009. 西天山莱历斯高尔带铜(铅)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义. 岩石学报, 25: 1319-1331
- 张喜, 范俊佳, 高俊, 董连慧, 江拓, 钱青. 2012. 西天山乔霍特铜矿成矿背景与矿床成因探讨. 岩石学报, 28: 2057-2073

- 张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar年龄谱型及³⁹Ar核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区P-T界线粘土岩为例. 地质论评, 52: 556–561
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 段士刚, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 赵军, 郑仁乔. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境. 矿床地质, 31: 941–964
- 朱文斌, 舒良树, 万景林, 孙岩, 王锋, 赵忠岩. 2006. 新疆博格达-哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. 地质学报, 80: 16–22
- 朱志新, 李锦轶, 董莲慧, 张晓帆, 王克卓, 王华星, 赵同阳. 2009. 新疆南天山构造格架及构造演化. 地质通报, 28: 1863–1870
- Berger G W, York D. 1981. Geothermometry from ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating experiments. *Geochim Cosmochim Acta*, 45: 795–811
- Bullen M E, Burbank D W, Garver J I, Abdrakhmatov K Y. 2001. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building. *Geol Soc Am Bull*, 113: 1544–1559
- Danišik M, Pfaff K, Evans N J, Manoloukos C, Staude S, McDonald B J, Markl G. 2010. Tectonothermal history of the Schwarzwald Ore District (Germany): An apatite triple dating approach. *Chem Geol*, 278: 58–69
- De Grave J, Buslov M M, Van D H, Metcalf J, Dehandschutter B, McWilliams M O. 2009. Multi-method chronometry of the Teletskoye graben and its basement, Siberian Altai Mountains: New insights on its thermo-tectonic evolution. *Geol Soc Lond Spec Pub*, 324: 237–259
- De Grave J, Glorie S, Buslov M M, Izmer A, Fournier-Carrie A, Batalev V, Vanhaecke F, Elburg M, Van den Haute P. 2011. The thermo-tectonic history of the Song-Kul Plateau, Kyrgyz Tien Shan: Constraints by apatite and titanite thermo-chronometry and zircon U/Pb dating. *Gondwana Res*, 20: 745–763
- De Grave J, Glorie S, Ryabinin A, Zhimulev F, Buslov M M, Izmer A, Elburg M, Vanhaecke F, Van den Haute P. 2012. Late Paleozoic and Meso-Cenozoic tectonic evolution of the southern Kyrgyz Tien Shan: Constraints from multi-method thermo-chronology in the Trans-Alai, Turkestan-Alai segment and the southeastern Fergana Basin. *J Asian Earth Sci*, 40: 149–168
- Dobretsov N L, Buslov M M. 1996. Meso-and Cenozoic tectonics of the central Asian mountain belt: Effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes. *Int Geol Rev*, 38: 430–466
- Ehlers T A, Farley K A. 2003. Apatite (U-Th)/He thermochronometry: Methods and applications to problems in tectonic and surface processes. *Earth Planet Sci Lett*, 206: 1–14
- Evans N J, Byrne J P, Keegan J T, Dotter L E. 2005. Determination of uranium and thorium in zircon, apatite, and fluorite: Application to laser (U-Th)/He thermochronology. *Chin J Anal Chem*, 60: 1159–1165
- Farley K A. 2000. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *J Geophys Res: Solid Earth*, 105: 2903–2914
- Flowers R M, Shuster D L, Wernicke B P, Farley K A. 2007. Radiation damage control on apatite (U-Th)/He dates from the Grand Canyon region, Colorado Plateau. *Geology*, 35: 447–450
- Flowers R M, Wernicke B P, Farley K A. 2008. Unroofing, incision, and uplift history of the southwestern Colorado Plateau from apatite (U-Th)/He thermochronometry. *Geol Soc Am Bull*, 120: 571–581
- Flowers R M, Ketcham R A, Shuster D L, Farley K A. 2009. Apatite (U-Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model. *Geochim Cosmochim Acta*, 73: 2347–2365
- Gao J, Long L L, Klemd R, Qin Q, Liu D Y, Xiong X M, Su W, Liu W, Wang Y T, Yang F Q. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *Int J Earth Sci*, 98: 1221–1238
- Glorie S, De Grave J, Buslov M M, Elburg M A, Stockli D F, Gerdes A, Van den Haute P. 2010. Multi-method chronometric constraints on the evolution of the Northern Kyrgyz Tien Shan granitoids (Central Asian Orogenic Belt): From emplacement to exhumation. *J Asian Earth Sci*, 38: 131–146
- Groves D I, Condie K C, Goldfarb R J, Hronsky J M A, Viellreicher R M. 2005. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. *Econ Geol*, 100: 203–224
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong S W, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *J Geophys Res: Solid Earth*, 105: 13339–13364
- Hacker B R, Wang Q C. 1995. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. *Tectonics*, 14: 994–1006
- Han B F, He G Q, Wang X C, Guo Z J. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tianshan Orogen Central Asia and implications for the North Xinjiang, western China. *Earth-Sci Rev*, 109: 74–93
- Harrison T M, Fitzgerald J D. 1986. Exsolution in hornblende and its consequences for ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra and closure temperature. *Geochim Cosmochim Acta*, 50: 247–253
- Hodges K V. 2014. Thermochronology in Orogenic Systems. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier. 281–308
- Ketcham R A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Rev Mineral Geochem*, 58: 275–314
- Kesler S E, Wilkinson B H. 2006. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits. *Econ Geol*, 101: 919–922

- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 199: 311–325
- Li G M, Cao M J, Qin K Z, Evans N J, McInnes B I A, Liu Y S. 2013. Thermal-tectonic history of the Baogutu porphyry Cu deposit, West Junggar as constrained from zircon U-Pb, biotite Ar/Ar and zircon/apatite (U-Th)/He dating. *J Asian Earth Sci*, 79: 741–758
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. California: Berkeley Geochronology Center
- Meyer C. 1985. Ore metals through geologic history. *Science*, 227: 1421–1428
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31: 529–532
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, Vigneresse J L. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408: 669–673
- Qian Q, Gao J, Klemd R, He G Q, Song B, Liu D Y, Xu R H. 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and diorite rocks from Xiata, NW China. *Int J Earth Sci*, 98: 551–569
- Reiners P W, Brandon M T. 2006. Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 34: 419–466
- Reiners P W, Farley K A. 2001. Influence of crystal size on apatite (U-Th)/He thermochronology: An example from the Bighorn Mountains, Wyoming. *Earth Planet Sci Lett*, 188: 413–420
- Reiners P W, Spell T L, Nicolescu S, Zanetti K A. 2004. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Geochim Cosmochim Acta*, 68: 1857–1887
- Shuster D L, Farley K A. 2009. The influence of artificial radiation damage and thermal annealing on helium diffusion kinetics in apatite. *Geochim Cosmochim Acta*, 73: 183–196
- Shuster D L, Flowers R M, Farley K A. 2006. The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite. *Earth Planet Sci Lett*, 249: 148–161
- Sobel E R, Dumitru T A. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision. *J Geophys Res: Solid Earth*, 102: 5043–5063
- Soderlund P, Juez-Larré J, Page L M, Dunai T J. 2005. Extending the time range of apatite (U-Th)/He thermochronometry in slowly cooled terranes: Palaeozoic to Cenozoic exhumation history of southeast Sweden. *Earth Planet Sci Lett*, 239: 266–275
- Spiegel C, Kohn B, Belton D, Berner Z, Gleadow A. 2009. Apatite (U-Th-Sm)/He thermochronology of rapidly cooled samples: The effect of He implantation. *Earth Planet Sci Lett*, 285: 105–114
- Taylor J P, Fitzgerald P G. 2011. Low-temperature thermal history and landscape development of the eastern Adirondack Mountains, New York: Constraints from apatite fission-track thermochronology and apatite (U-Th)/He dating. *Geol Soc Am Bull*, 123: 412–426
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T M, Ryerson F J, Qian X L, Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tianshan. *Tectonics*, 17: 1–27
- Yu S, Chen W, Evans N J, McInnes B I A, Yin J Y, Sun J B, Li J, Zhang B. 2014. Cenozoic uplift, exhumation and deformation in the north Kuqa Depression, China as Constrained by (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonophysics*, 630: 166–182