羌塘地块白垩纪剥蚀—冷却事件

郑波[1,2],陈文彬[3],王增振[4],冯丽霞[5],张艳雄[1,2],万友利[3],吴林[6]

1)西南石油大学羌塘盆地研究院,成都,610500; 2)西南石油大学地球科学与技术学院,成都,610500; 3)中国地质调查局成都地质调查中心,成都,610081; 4)中国地质科学院地球深部探测中心,北京,100037; 5)西华大学应急学院,成都,610039; 6)中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029

内容提要:本文报导了青藏高原内部羌塘地块三个钻孔岩芯中9件样品的锆石(U—Th)/He年龄,除始新统两件样品的锆石(U—Th)/He热史信息尚未重置外,其余样品年龄均集中在白垩纪,且年龄值随高程变化较小,指示存在白垩纪剥蚀—冷却。羌塘地块西部QD-17井记录了早白垩世(约127~114 Ma)的剥蚀—冷却,东部QZ-16井记录了晚白垩世(约92~64 Ma)的剥蚀—冷却。白垩纪剥蚀—冷却得到区域上低温热年代学数据统计和构造—沉积事件的响应。羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块的低温热年代学数据统计结果显示,拉萨地块北部和羌塘地块(高原内部)广泛分布白垩纪—早始新世的低温热年代学年龄,拉萨地块南部至喜马拉雅地块(高原南缘)则广泛分布晚中新世以来的低温热年代学年龄,这种年龄分布格局暗示高原内部和南缘经历了明显不同的剥蚀—冷却历史。参考高原南缘晚中新世以来的快速剥蚀—冷却过程,推测高原内部也存在白垩纪快速剥蚀—冷却事件。拉萨地块北部、羌塘地块及其以北区域广泛出现早白垩世沉积间断及沉积不整合,也指示白垩纪期间的快速剥蚀。结合区域构造演化分析,该白垩纪剥蚀—冷却可能是早白垩世班公湖—怒江洋关闭后拉萨地块与羌塘地块碰撞的结果,指示在新生代印度—欧亚大陆碰撞之前,高原内部的地壳可能已经存在明显的缩短、加厚变形以及相应的剥蚀—冷却。

关键词:剥蚀—冷却;白垩纪;拉萨地块北部;羌塘地块

青藏高原隆起以及与之相关的剥蚀—冷却过程是当前地球科学领域研究的热点问题之一(Tapponnier et al., 2001; 张克信等,2013;王二七等,2013;Song Bowen et al., 2020)。单就高原隆起时间而言,尽管不同学者使用不同方法得出的结论有所不同,但通常都认为在印度—欧亚大陆发生碰撞的新生代以来开始隆升的(张克信等,2013),如中始新世至早中新世(Chung Sunlin et al., 1998)、始新世到第四纪(Tapponnier et al., 2001)、中新世到上新世(Deng Tao et al., 2019)、上新世到第四纪初(Li Jijun et al., 1979)等等。隆升方式包括从南至北阶梯式隆升(Tapponnier et al., 2001)、从东向西两阶段穿时隆升(Chung Sunlin et al., 1998)、整体大致同时隆升(Yin An et al., 2000)和在原始高原的基础上向周边扩张生长(Wang Chengshan et al., 2008, 2014)等代表性观点。这些关于隆升时间及方式的观点主要基于印度—欧亚大陆碰撞的大陆动力学背景,Wang Chengshan 等(2014)认为新特提斯洋关闭以及印度—欧亚大陆碰撞是过去100 Ma以来最重要的地质事件,它直接导致了青藏高原形成。

然而,在此之前,中特提斯洋(或班公湖—怒江洋)关闭及随后的拉萨地块与羌塘地块碰撞在青藏高原演化过程中的影响可能被低估或忽视。一些证据表明高原内部的羌塘地块和拉萨地块北部在印度—欧亚大陆碰撞之前可能发生过明显地壳变形或地表隆升,比如,中特提斯洋于早白垩世关闭,拉萨地块和羌塘地块碰撞(潘桂棠等,2006;Zhu Dicheng et al., 2016),在此背景下,至白垩纪中期,青藏高原中、西部地区已存在明显地壳缩短加厚(Murphy et al., 2003);白垩纪中期(120~82 Ma)阿尔金断裂发生过大规模左行走滑,与此同时祁连山地区幔源火山开始喷发(李海兵等,2004);拉萨地块和羌塘地块部分区域现今地表在晚白垩世—始新世(85~45 Ma)之间就已经被抬升至小于3 km的深度(Rohrmann et al., 2012);若尔盖地区在印度—欧亚

注:本文为国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(编号:91955204)的成果。
收稿日期:2020-07-20;改回日期:2020-08-24;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.005
作者简介:郑波,男,1986年生,博士,主要从事区域构造演化方面的研究工作;Email:cambrianzb@sina.cn。

大陆碰撞之前可能已形成古高原并向西延伸至羌塘地区(刘树根等,2019)。这些认识似乎暗示在印度—欧亚大陆碰撞之前,高原内部广大区域可能已经经历过明显的剥蚀—冷却过程。

为此,本研究分析了羌塘地块 3 个钻孔中 9 件样品的锆石(U—Th)/He 年龄,结合羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块已经发表的部分低温热年代学数据和区域地质演化事件,尝试探讨高原内部是否存在白垩纪印度—欧亚大陆碰撞之前的明显剥蚀—冷却这一问题。

1 地质背景

青藏高原位于塔里木板块、华北板块、扬子板块和印度板块之间,由一系列地块及其之间大洋关闭之后形成的缝合带组成(Yin An et al., 2000;潘桂棠等,2006;许志琴等,2011),被东昆仑—阿尼玛卿缝合带、可可西里—金沙江缝合带、班公湖—怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带划分为东昆仑—柴达木—祁连地块、松潘—甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块(图 1)。这些主缝合带所代表的古大洋关闭及随后的陆—陆碰撞过程造就了青藏高原,尤其是中生代以来的中特提斯洋和新特提斯洋的关闭以及随后的拉萨地块与羌塘地块、印度板块与欧亚板块(拉萨地块)之间的碰撞。其中,中特提斯洋关闭及拉萨地块和羌塘地块碰撞的时限被约束在早白垩世(潘桂棠等,2006; Kapp et al., 2007; Zhu Dicheng et al., 2016);新特提斯洋关闭及印度—欧亚大陆碰撞的具体时间尽管还存在争议,但主要集中在古新世—早始新世,如约 59 Ma(胡修棉等,2017)、约 53 Ma(朱弟成等,2017)、约 50 Ma(Lee Haoyang et al., 2012)和约 45 Ma(Ji Weiqiang et al., 2016),综合考虑拉萨地块林子宗火山岩时代,新特提斯洋关闭及印度—欧亚大陆碰撞的时间应发生在古新世—始新世之交(55 ± 10 Ma; Wang Chengshan et al., 2014)。

早白垩世和古始新—始新世之交的最近两次大洋关闭和陆—陆碰撞及相应的地壳缩短加厚、隆升和剥蚀最终形成了高原现今的地貌格局,从羌塘地块到高原南缘的喜马拉雅地块呈现截然不同地貌特征。拉萨地块北部和羌塘地块(图 2a 蓝色虚线所示区域)平均海拔 5000 m 以上,自然条件恶劣,整体地势相对平坦(图 2b),高差足够大的低温热年代学样品难以获取,因此研究程度较低,目前相关研究样品大多数取自大区域范围内平坦的高原地表。与此形成鲜明对比的是拉萨地块南部和喜马拉雅地块(图 2a 蓝色虚线框以南区域)地形切割强烈(图

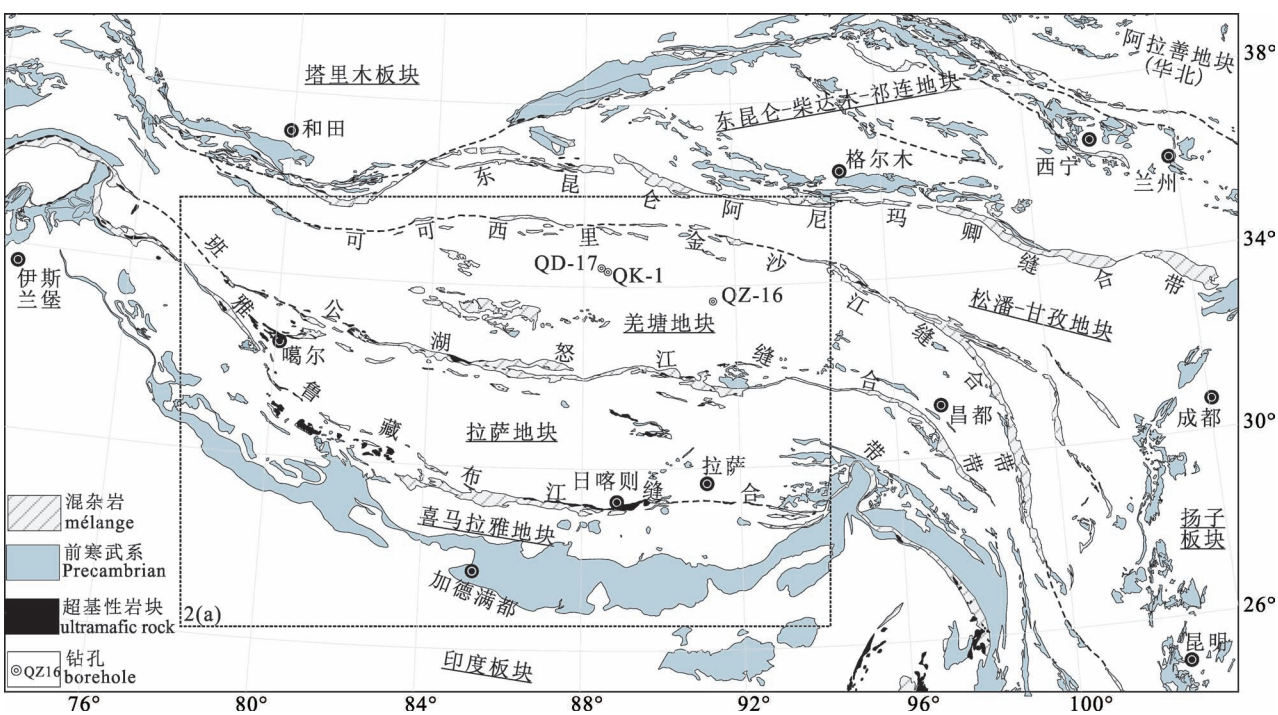


图 1 青藏高原构造单元划分简图(据 1∶150 万青藏高原及邻区地质图改编)

Fig. 1 The basic tectonic framework of the Xizang (Tibetan) Plateau [modified after the Geological Map of the Xizang (Tibetan) Plateau and Adjacent Areas(1∶1500 000)]

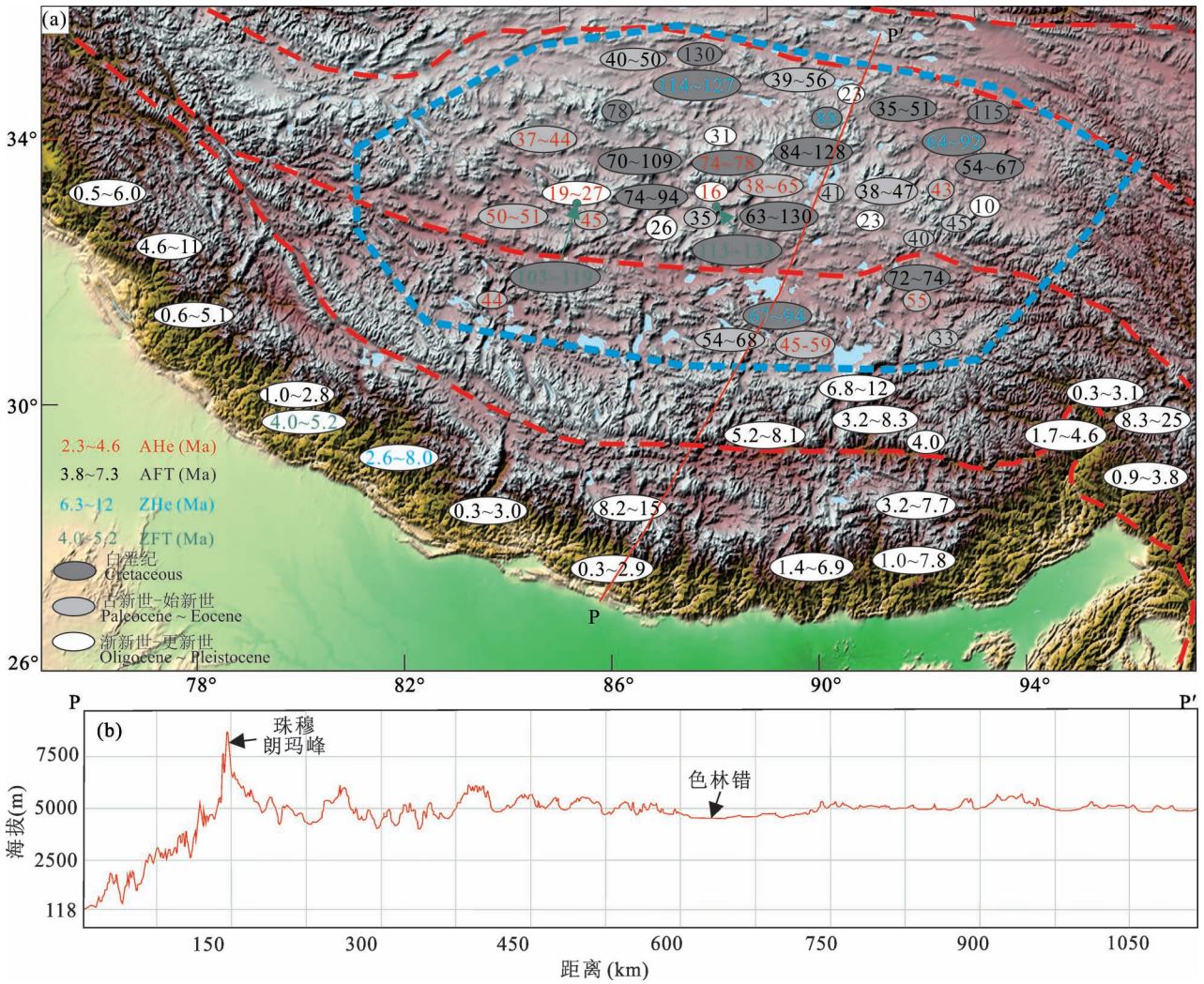


图 2(a) 羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块地形地貌及低温热年代学年龄分布图;
(b) 横跨羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块的地表海拔高度图

Fig. 2 (a) Geomorphology and low temperature thermochronological data of the Qiangtang, Lhasa, and Himalaya blocks; (b) Topographic cross-section across the Qiangtang, Lhasa, and Himalaya blocks

构造单元名称同图 1;蓝色虚线范围为图 5 数据区域;年龄引自:丁林等,1995;赵志丹等,2003;Grujic et al., 2006; 袁万明等,2007;Blythe et al., 2007; Wang Yu et al., 2007; Wang Chengshan et al., 2008; 段志明等,2009;Thiede et al., 2009; 于祥江等,2011;Nadin et al., 2012; Rohrmann et al., 2012; Adlakha et al., 2013; 王立成等,2013;MaCallister et al., 2014; Ren Zhanli et al., 2015; 郑勇等,2014;赵珍等,2019;AHe:磷灰石(U—Th)/He 年龄,AFT:磷灰石裂变径迹年龄,ZHe:锆石(U—Th)/He 年龄,ZFT:锆石裂变径迹年龄

The names of tectonic units can be seen from Fig. 1; the dashed blue line outlines the area of data used in Fig. 5; age sources: Ding Lin et al., 1995#; Zhao Zhidan et al., 2003#; Grujic et al., 2006; Yuan Wanming et al., 2007&; Blythe et al., 2007; Wang Yu et al., 2007; Wang Chengshan et al., 2008; Duan Zhiming et al., 2009&; Thiede et al., 2009; Yu Xiangjiang et al., 2011#; Nadin et al., 2012; Rohrmann et al., 2012; Adlakha et al., 2013; Wang Licheng et al., 2013&; MaCallister et al., 2014; Ren Zhanli et al., 2015; Zheng Yong et al., 2014#; Zhao Zhen et al., 2019&. AHe—apatite (U—Th)/He age; AFT—apatite fission track age; ZHe—zircon (U—Th)/He age; ZFT—zircon fission track age

2b),数千米的地形落差和相对温和的自然条件为相关研究提供了便利条件,低温热年代学或剥蚀—冷却相关的研究程度非常高。

2　样品及分析结果

本研究以青藏高原中部的羌塘地块 QK-1 井、QD-17 井和 QZ-16 井(井位见图 1)岩芯为研究对

象。QK-1 井位于羌塘地块北部、万安湖南岸约 5 km 处,井深 4696 m,揭露地层为中侏罗统夏里组(J_2x)至上三叠统那底岗日组(T_3n),岩性以碳酸盐岩、(粉砂质)泥岩、火山—火山碎屑岩和膏盐为主,本次仅获取 1 件布曲组(J_2b)粉砂岩样品(QC1-2455)用于锆石(U—Th)/He 测年。QD-17 井位于 QK-1 井西北约 6 km 处的万安湖边,井深 2002 m,揭露地层为始新统唢呐湖组(E_2s)、中侏罗统夏里组(J_2x)和布曲组,岩性以砂岩、细—粉砂岩和碳酸盐岩为主,本次获取 5 件样品开展锆石(U—Th)/He 测年,分别为唢呐湖组砂岩 QD-17-234 和 QD-17-368、夏里组细砂岩 QD-17-869、布曲组细砂岩 QD-17-1793 和 QD-17-1903。QZ-16 井位于羌塘地块东部格拉丹东北部,井深 1593 m,揭露地层为中下侏罗统雀莫错组($J_{1-2}q$)至上三叠统甲丕拉组(T_3j),岩性以膏盐、泥岩和粉砂岩为主,本次获取 3 件样品开展锆石(U—Th)/He 测年,分别为雀莫错组细砂岩 QZ-16-141 和 QZ-16-825、甲丕拉组细砂岩 QZ-16-1512。分析测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所氩氩、铀—钍—氦年代学实验室完成,测试方

表 1 羌塘地块钻孔岩芯样品锆石(U—Th)/He 测年结果

Table 1 Zircon (U—Th)/He results of samples from boreholes in the Qiangtang Block

样号	地层	$n(^4He)$ (10^{-13}mol)	矿物质量(μg)	半径* (μm)	F_T	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	[eU] ($\times10^{-6}$)	年龄(Ma)		校正年龄(Ma)	
										测值	±σ	测值	±σ
QD-17-234Z1	E_2s	2.1140	2.24	42.0	0.734	132.4	38.4	0.3	141.4	123	3	168	9
QD-17-234Z2		5.6472	1.42	36.8	0.692	602.8	268.9	0.5	665.9	110	2	160	8
QD-17-234Z3		3.9256	2.57	44.5	0.743	260.5	66.1	0.3	276.0	102	2	138	7
QD-17-368Z1	E_2s	6.5549	2.86	46.8	0.756	502.8	168.6	0.3	542.4	78	1	104	5
QD-17-368Z2		3.5531	2.98	46.2	0.749	97.6	82.7	0.9	117.0	187	3	250	13
QD-17-869Z1	J_2x	0.9467	1.08	33.1	0.655	155.0	145.6	1.0	189.2	86	1	131	7
QD-17-869Z2		1.5171	1.06	32.4	0.653	223.8	333.4	1.5	302.2	88	3	134	8
QD-17-869Z3		4.6665	1.76	38.4	0.709	508.8	235.2	0.5	564.1	87	2	123	6
QD-17-869Z4		2.4395	1.30	33.2	0.666	378.5	213.8	0.6	428.7	81	2	122	6
QD-17-1793Z1	J_2b	3.0823	1.48	34.0	0.674	398.0	112.4	0.3	424.4	91	2	135	7
QD-17-1793Z2		0.5295	1.28	36.0	0.679	73.2	109.7	1.5	98.9	77	1	114	6
QD-17-1793Z3		1.8170	1.54	35.3	0.682	260.0	143.9	0.6	293.8	74	1	109	6
QD-17-1793Z4		2.2613	1.31	33.4	0.670	323.8	238.0	0.8	379.7	84	2	126	7
QK-1-2455Z1	J_2b	4.7294	2.11	40.0	0.719	666.4	390.2	0.6	758.1	55	1	76	4
QK-1-2455Z2		3.2343	1.35	36.5	0.688	668.2	396.0	0.6	761.2	58	1	85	5
QK-1-2455Z3		4.9172	1.67	40.5	0.719	711.1	378.1	0.5	799.9	68	1	95	5
QK-1-2455Z4		7.1689	2.66	40.2	0.723	666.9	185.4	0.3	710.4	70	1	97	5
QZ-16-141Z1	$J_{1-2}q$	5.8570	2.46	40.5	0.723	528.8	165.4	0.3	567.6	78	1	108	6
QZ-16-141Z2		9.4693	4.07	46.2	0.757	419.5	118.5	0.3	447.3	96	2	127	7
QZ-16-141Z3		4.1887	2.57	41.8	0.729	402.0	308.3	0.8	474.4	64	1	87	5
QZ-16-141Z4		2.2924	2.13	40.1	0.719	312.4	222.6	0.7	364.7	55	1	76	4
QD-17-1903Z1	$J_{1-2}q$	0.6550	2.83	45.3	0.75	52.1	24.1	0.5	57.7	74	1	99	5
QD-17-1903Z2		4.5174	1.86	41.6	0.724	407.0	285.0	0.7	474.0	95	2	131	7
QD-17-1903Z3		6.3499	2.27	37.4	0.703	556.8	244.0	0.5	614.1	84	2	120	6
QD-17-1903Z4 *		13.486	2.61	41.6	0.733	738.9	392.4	0.5	831.1	115	21	157	8
QZ-16-825Z1	$J_{1-2}q$	1.7089	2.18	39.1	0.709	194.1	161.5	0.9	232.0	63	11	88	5
QZ-16-825Z2		4.3897	2.52	44.4	0.744	398.6	105.8	0.3	423.5	76	1	103	6
QZ-16-825Z3		1.0511	1.71	39.0	0.708	226.2	127.8	0.6	256.3	45	1	63	3
QZ-16-825Z4		3.4850	1.43	35.8	0.687	690.9	160.5	0.2	728.6	62	1	90	5
QZ-16-1512Z1 *	T_3j	2.4913	1.20	34.3	0.67	503.3	296.5	0.6	573.0	67	11	100	5
QZ-16-1512Z2		1.3762	1.10	35.3	0.679	474.7	274.6	0.6	539.2	43	1	64	3
QZ-16-1512Z3		0.8864	1.21	33.5	0.67	283.0	123.8	0.5	312.1	44	1	65	3

注:① 测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所氩氩、铀—钍—氦年代学实验室完成。② 带 * 号样品因与其它颗粒结果差别较大而不参与平均年龄计算。③ 半径* 指等效球体半径;F_T 为校正参数;[eU]为有效 U 浓度。

法见吴林等(2016),结果见表 1。总体上,唢纳湖组两件样品的单颗粒锆石(U—Th)/He 年龄(250 ~ 104 Ma)老于地层时代,尚未发生热史信息重置,代表源区信息,其余年龄在 157 ~ 63 Ma 之间,均小于地层沉积年龄,锆石(U—Th)/He 热史信息已经重置。

QD-17 井中除两件样品热史信息未重置外,3 件样品采样位置海拔分别为 4061 m、3137 m 和 3027 m,单颗粒年龄 157 ~ 99 Ma,不同深度样品单颗粒锆石年龄主要集中在 120 Ma 左右,平均年龄分别为 127 ± 7 Ma、119 ± 18 Ma 和 114 ± 41 Ma(图 3)。QK-1 井 1 件样品 4 颗锆石的(U—Th)/He 年龄在 97 ~ 76Ma 之间,平均年龄 88 ± 5 Ma。该样品采样深度 2455 m(海拔 2596 m),为本次测试的埋深最大的样品,按一般情况计算(35℃/km · 2.5 km + 10℃ = 97.5 ℃),样品已脱离锆石(U—Th)/He 部分保留带,该年龄可代表正常冷却年龄。QZ-16 井 3 件样品采样位置海拔分别为 5003 m、4319 m 和 3632 m,11 个锆石颗粒的年龄比较分散(127 ~ 63Ma),样品内部颗粒间差别也较大,平均年龄分别为 92 ± 33 Ma、80 ± 29 Ma 和 64 ± 5 Ma,总体比西部同一高程的 QK-1 井和 QD-17 井的年龄年轻(图 3)。

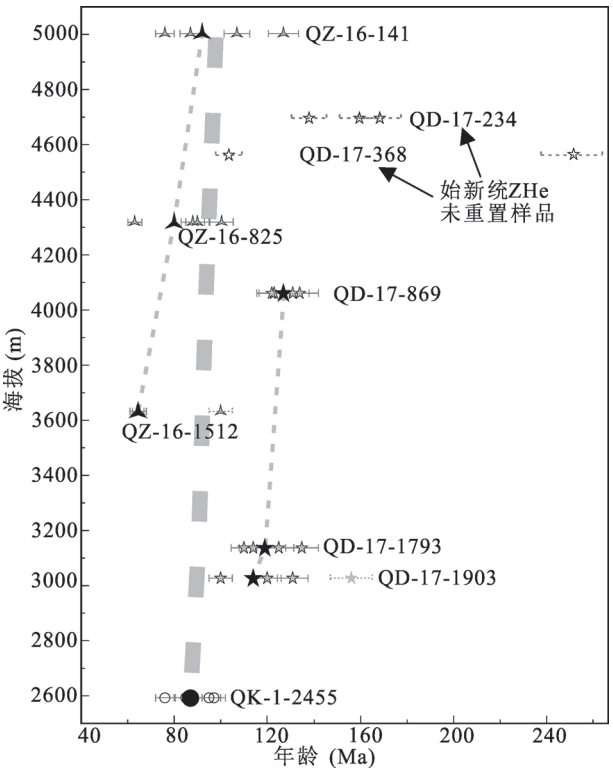


图 3 羌塘地块钻井岩芯锆石(U—Th)/He 年龄结果与海拔高程关系图

Fig. 3 The zircon (U—Th)/He ages of core samples from the Qiangtang block and their relation with elevations

其中粗虚线表示所有样品年龄随高程的变化趋势,细虚线表示单个钻孔年龄随高程的变化趋势

well locations are shown in Fig. 1; the thick dashed line represents the trend of all samples while the thin ones represent single well

3　低温热年代学数据统计

本文统计了羌塘地块现有的低温热年代学年龄,包括锆石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄、磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄(图 2a);为对比分析,还统计了拉萨地块和喜马拉雅地块的相关数据。地势相对平坦的羌塘地块与拉萨地块北部(以下简称高原内部)低温热年代学年龄集中在白垩纪—始新世,而地形切割明显的拉萨地块南部和喜马拉雅地块(以下简称高原南缘)年龄较新,主要集中在晚中新世—更新世。

拉萨地块北部锆石(U—Th)/He 年龄集中在晚白垩世(94 ~ 67 Ma),磷灰石裂变径迹年龄集中在晚白垩世—始新世(74 ~ 54 Ma),磷灰石(U—Th)/He 年龄集中在古新世—始新世(59 ~ 44 Ma)(Hetzel et al., 2011;Rohrmann et al., 2012)。羌塘地块锆石裂变径迹年龄均为早白垩世(133 ~ 103 Ma,赵珍等,2019),锆石(U—Th)/He 年龄集中在白垩纪(130 ~ 64 Ma),磷灰石裂变径迹年龄以白垩纪居多,磷灰石(U—Th)/He 年龄集中在始新世,仅少数磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄分布在渐新世—中新世(图 2a,Wang Chengshan et al., 2008; Rohrmann et al., 2012; 王立成等,2013;Ren Zhanli et al., 2015)。另有三件样品给出更老的磷灰石裂变径迹年龄,分别是羌塘地块北缘上三叠统砂岩的 161 ± 14 Ma 和上白垩统砂岩的 152 ± 14 Ma[1],后者年龄大于地层年龄,磷灰石裂变径迹热史信息未重置;另有一件砂岩磷灰石裂变径迹年龄 160 ± 11 Ma,误差范围内与地层时代相当(王立成等,2013),可能代表更早期的冷却年龄,未计入本次讨论。总体上,年龄分布特征(图 2a)揭示拉萨地块北部和羌塘地块大部分区域可能在始新世之前就已经抬升至磷灰石裂变径迹部分退火带之上,随后进入相对稳定阶段;仅在盆地边缘及内部断裂带受印度—欧亚大陆碰撞影响,这些构造薄弱区的地表岩石经历后期的剥蚀—冷却,于渐新世—中新世才抬升至磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He 部分保留带之上。

高原南缘的磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He、锆石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄都非常年轻,绝大部分集中在中新世末期以来(图 2a)。拉萨地块南部磷灰石裂变径迹年龄集中在中新世到上新世(12~ 3.2 Ma;赵志丹等,2003;Wang Yu et al.,2007);喜马拉雅山西北段磷灰石和锆石裂变径迹年龄均为中新世至晚更新世(11~ 0.6 Ma,多小于 5.0 Ma,Thiede et al., 2009; McCallister et al., 2014),中段磷灰石裂变径迹年龄为中新世至晚更新世(15~ 0.30 Ma,多小于 3.0 Ma,Blythe et al., 2007; 郑勇等,2014),磷灰石(U—Th)/He 年龄在晚更新世以来(0.94~ 0.45 Ma,Nadin et al., 2012),东段磷灰石裂变径迹年龄为中新世末期至晚更新世(7.5~ 0.31 Ma,丁林等,1995; 于祥江等,2011;Adlakha et al., 2013);等。即便不考虑综合热史反演或年龄—高程法等揭示的详细剥蚀—冷却过程,这些数据显示高原南缘现今地表岩石在最近不足 10 Ma 以来快速脱离锆石裂变径迹和(U—Th)/He、磷灰石裂变径迹和磷灰石(U—Th)/He 年龄部分退火带或部分保留带,揭示高原南缘一致的、非常快速的剥蚀—冷却过程(图 2)。

4 讨论

4.1 低温热年代学数据揭示的白垩纪剥蚀—冷却事件

羌塘地块三个钻孔岩芯的锆石(U—Th)/He 年龄集中在白垩纪,且年龄随样品深度/海拔关系变化不大。始新统唢呐湖组砂岩(QD-17-234 和 QD-17-368)部分锆石也具有白垩纪(U—Th)/He 年龄,反映始新统的部分源区也于白垩纪脱离锆石(U—Th)/He 部分保留带,总体揭示白垩纪的剥蚀—冷却(图 3)。QK-1 井 2455 m 深处样品晚白垩世的(U—Th)/He 年龄(88 ± 5 Ma)表明现今羌塘地块西部至少有大约 2.5 km 厚的地壳在晚白垩世之前就已经剥蚀抬升至锆石(U—Th)/He 部分保留带之上,结合地表大量分布的白垩纪锆石(U—Th)/He 年龄(图 2a)和始新统陆相沉积岩的源区已于白垩纪被抬升至锆石(U—Th)/He 部分保留带之上,指示高原内部可能有数公里厚的地壳于白垩纪期间抬升穿过锆石(U—Th)/He 部分保留带。此外,位于西部的 QD-17 中锆石(U—Th)/He 年龄介于 127~ 114 Ma,位于东部的 QZ-16 中锆石(U—Th)/He 年龄介于 92~ 64 Ma,指示羌塘地块西部的白垩纪剥蚀—冷却可能早于东部(图 3)。如果将这些锆石(U—Th)/He 年龄仅按采样高程排列分析,而不考虑东西向的空间距离,也较清晰的揭示了白垩纪的剥蚀—冷却(如图 3 中粗虚线所示)。

大范围低温热年代学数据统计也指示羌塘地块可能存在白垩纪剥蚀—冷却(图 2),因为区域上一次快速剥蚀—冷却在垂向和横向上应有大量相近的低温热年代学年龄记录。以磷灰石裂变径迹为例,可简单理解为当某区域现今地表岩石因快速剥蚀—冷却而穿过磷灰石裂变径迹部分退火带时(图 4①实线所示),即便在后期存在不均匀的剥蚀或抬升,这种区域性的抬升—冷却事件的裂变径迹信息依然能在地表岩石中记录下来。相反,同样规模的岩石缓慢的穿过部分退火带(图 4②实线所示),在后期抬升—冷却中,除极端的均匀抬升—冷却外,无论是平面上大范围取样还是垂向剖面取样,磷灰石裂变径迹年龄都比较分散。

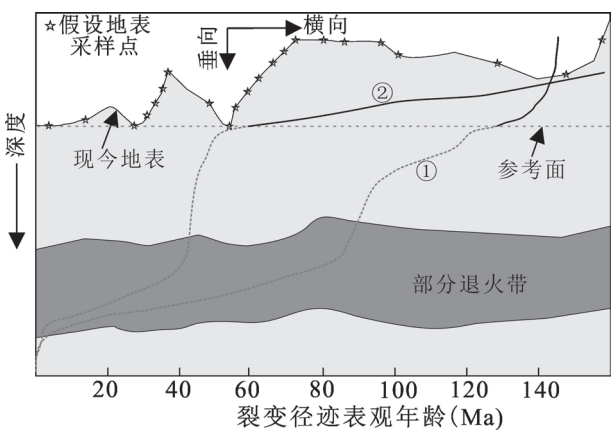


图 4 区域地表磷灰石裂变径迹年龄分布与冷却过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relations between AFT age data and cooling process in a large area

一定规模岩石于早白垩世剥蚀—冷却穿过磷灰石裂变径迹退火带(路径①),剥露后地表磷灰石裂变径迹年龄集中在早白垩世;一定规模岩石从早白垩世至始新世缓慢剥蚀—冷却穿过磷灰石裂变径迹部分退火带(路径②),剥露后地表磷灰石裂变径迹年龄分布在早白垩世至始新世

Rocks that pass through the apatite partial annealing zone rapidly (①) possibly have similar AFT ages, while those pass through the apatite partial annealing zone slowly (②) may give variable apatite fission track ages, when they are exhumed to the surface

青藏高原内部存在大量白垩纪低温热年代学信息,总体上具有内部老、南缘新、局部沿断裂带附近也有年轻年龄出现的特征(图 2a),这些南北向横跨羌塘地块和拉萨地块约 600 km 范围内的白垩纪年

龄可能指示印度—欧亚大陆碰撞之前的一次区域性剥蚀—冷却事件,导致现今地表岩石快速穿过锆石(U—Th)/He 部分保留带和磷灰石裂变径迹部分退火带,尽管后期可能存在差异性剥蚀或抬升,但数据总体反应了白垩纪的剥蚀—冷却。以磷灰石裂变径迹年龄为例,在理想的岩石快速抬升—剥蚀的情况下(即不考虑部分岩石可能有复杂的冷却过程),现今出露于地表的岩石从埋深约 3 km 至剥露到地表的时间,从羌塘地块到喜马拉雅地块地区的跨度非常大,高原内部大部分区域自白垩纪—始新世以来的剥蚀厚度大约在 3 km 以内,而南缘地区中新世以来就被剥蚀了约 3 km,总体上高原南缘的剥蚀速率大约比内部的高出一至两个数量级。

对高原内部特定区域的锆石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄、磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄统计分析显示,更多的数据集中在新生代以来(图 5),这可能与新生代印度—欧亚大陆碰撞有关,其远程效应促使高原内部构造薄弱区快速响应。尽管如此,统计结果中仍存在两个比较明显的白垩纪年龄峰(图 5)。除本次在 QZ-16 井 1512 m 深度一件样品的锆石(U—Th)/He 年龄为 64 ± 5 Ma 外,高原内部尚未见新生代锆石(U—Th)/He 年龄报道,也即高原内部新生代以来的最大剥蚀深度也不超过锆石(U—Th)/He 的部分保留带深度。

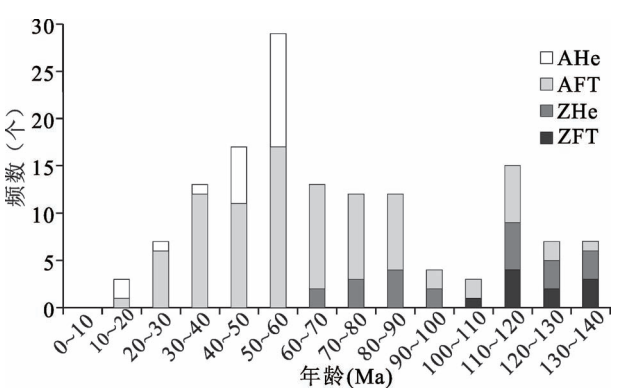


图 5 青藏高原内部低温热年代学数据统计结果,统计区域范围见图 2

Fig. 5 Statistical results of thermochronological data from inner part of the Xizang (Tibetan) Plateau, and the area where these data quoted from could be seen in Fig. 2

总体上,钻孔数据和低温热年代学区域统计揭示拉萨地块北部和羌塘地块存在白垩纪的剥蚀—冷却。在地质记录上,羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块都具有前寒武纪基底(图 1),但是这些基底在高原内部仅在安多县城东南和纳木错西部零星出露,而在高原南缘的喜马拉雅地块则广泛出露在海拔 6000 m 以上区域;高原内部的羌塘地块和拉萨地块北部被海相中生界覆盖,QK-1 井钻进至约 4700 m 仍为中生界,也说明高原内部新生代以来的剥蚀程度明显弱于南缘。高原内部可能于白垩纪中期以后就趋于相对稳定,新生代以来的剥蚀量有限,而南缘以及内部的构造薄弱带于新生代以来发生了显著剥蚀。这一特征在一定程度上可与高原中部率先隆起随后向周边扩展的模式匹配(Wang Chengshan et al., 2008;刘树根等,2019),而与青藏高原始新世以来的整体缩短隆升(Yin An et al., 2000)、始新世至第四纪的阶梯式向北逐步抬升(Tapponnier et al., 2001)和从东向西穿时抬升(Chung Sunlin et al., 1998)模式则有所不同。

4.2　构造—沉积响应揭示的白垩纪剥蚀—冷却事件

羌塘中生代海相盆地的沉积始于晚三叠世诺利期,一直延续至早白垩世贝里阿斯期,期间没有明显的沉积间断,最高海相层位为下白垩统雪山组、扎窝茸组、白龙冰河组和索瓦组上段(王剑和付修根,2018)。班公湖—怒江缝合带北侧的这套最高海相层位之上角度不整合沉积了上白垩统阿布山组陆相碎屑岩和火山岩,其角度不整合间断时间跨度大致在 125~ 75Ma 之间(Li Yalin et al., 2010);缝合带南侧拉萨地块北部的上白垩统竟柱山组陆相磨拉石建造和火山岩也角度不整合沉积在更老地层之上(潘桂棠等,2006;Li Yalin et al., 2010),这一沉积间断是中特提斯洋开启以来沉积作用记录的第一次大规模隆升和剥蚀—沉积事件。与此同时,班公湖—怒江缝合带构造沉积记录揭示海相—非海相地层转变的时间大约在 125 至 118 Ma 之间(Kapp et al., 2007);羌塘地块南缘早白垩世之后缺乏弧岩浆活动,拉萨地块北部出现约 114 Ma 非造山 A_2 型花岗岩(Zhu Dicheng et al., 2016)。这些均表明中特提斯洋关闭及拉萨地块与羌塘地块之间的碰撞发生在早白垩世,并导致了海相沉积地层大规模缩短隆起为陆,并遭受快速剥蚀和再沉积。

早白垩世沉积间断除发生在拉萨地块北部和羌塘地块外,还广泛发生在羌塘地块以北的东昆仑—柴达木—祁连地区,甚至高原北缘盆地。如柴达木盆地缺失上白垩统,仅零星出露下白垩统山麓洪积相、河湖相,与下伏地层平行不整合或小角度不整合接触,盆地性质可能于早白垩世由弱伸展变为挤压

型(Wu Lei et al., 2011);高原北缘的昌马盆地白垩系中部为巨厚紫红色砂砾岩,不整合覆盖前白垩系,祁连山山前酒西盆地也分布一套不整合沉积的白垩系紫红色砾岩层(李海兵等,2004);酒泉盆地早白垩世之后出现重大沉积间断,古近系不整合覆盖下白垩统(章诚诚,2018)。此外,白垩纪中期(约 120 ~ 80 Ma),阿尔金断裂发生活化、祁连山地区幔源火山活动频发也指示高原北部在白垩纪期间可能就已发生过大规模的隆升(李海兵等,2004)。总体上,早白垩世的重大构造—沉积事件广泛分布于拉萨地块北部和羌塘地块及其以北区域,指示早白垩世青藏高原发生了重大构造转换事件。

4.3 高原内部是否存在白垩纪区域隆升?

低温热年代学、沉积学、稳定同位素地球化学和构造地质学研究揭示至少在 40 Ma 之前,高原内部可能就已经隆起形成高原(Murphy et al., 1997; Wang Chengshan et al., 2008, 2014; Rohrmann et al., 2012; Xu Qiang et al., 2013; 刘树根等, 2019)。高原内部区域性分布的白垩纪低温热年代学年龄也指示这一时期的剥蚀—冷却(图 2a、图 4、图 5)。羌塘地块至今仍被巨厚的中生界海相地层覆盖,钻孔岩芯锆石(U—Th)/He 分析揭示它们在白垩纪期间经历了明显剥蚀—冷却(图 3),基于磷灰石裂变径迹和(U—Th)/He 年龄的热史模拟也揭示白垩纪期间的快速剥蚀—冷却(Rohrmann et al., 2012; 赵珍等,2019)。从拉萨地块北部一直至青藏高原北缘的广大区域出现早白垩世沉积间断,上白垩统或更新的陆相地层不整合覆盖下白垩统或更老的地层(李海兵等,2004;潘桂棠等,2006;Li Yalin et al., 2010; 章诚诚,2018)。作为青藏高原西北边界的阿尔金断裂在白垩纪中期大规模活动,祁连山地区幔源岩浆活动也在这一时期启动(李海兵等,2004)。这些都指示高原内部在早白垩世发生过大规模地壳运动,包括垂向抬升—剥蚀和水平走滑。

这一时间节点与中特提斯洋在早白垩世关闭以及随后拉萨地块与羌塘地块发生碰撞契合(潘桂棠等,2006;Zhu Dicheng et al., 2016)。有研究认为全球板块在早白垩世晚期的重组和板块运动减速也可能与中特提斯洋关闭和随后的碰撞有关(Olierook et al., 2020)。此外,全球海水锶同位素组成 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 在最近 100 Ma 以来发生过两次快速上升,最近一次是 40 ~ 35 Ma 开始从 0.7077 快速升至 0.7092,第二次是 90 Ma 左右开始从 0.7073 升至 0.7078(Howarth et al., 1997),前者滞后于印度—欧亚大陆碰撞约 20 Ma,后者滞后于拉萨地块与羌塘地块碰撞也约 20 Ma,可能是大规模碰撞后,地壳隆升—剥蚀加快,^{87}Sr 同位素富集的陆源碎屑骤增在海洋沉积物中的响应。因此,不管是高原内部局部的低温热年代学研究及构造—沉积不整合,还是全球板块构造尺度的碰撞响应都指示青藏高原很可能存在白垩纪的隆升或剥蚀—冷却事件。

然而,除了前已述及的青藏高原隆升主要发生在新生代印度—欧亚大陆碰撞以来的构造地质学、沉积学、低温热年代学和古气候学等证据(张克信等,2013;Wang Chengshan et al., 2014),最新的古生物学研究似乎并不支持存在“早期高原”的观点。如古生物化石证据表明,青藏高原腹地至渐新世(~26 Ma)仍处于温暖潮湿的低海拔环境,印度洋暖湿气流仍深刻影响现今高原腹地区域(Deng Tao et al., 2019; Su Tao et al., 2019);至渐新世末(~23 Ma)拉萨地块海拔才抬升至 1500 ~ 2900 m(Ai Keke et al., 2019);柴达木盆地早渐新世(30.8 Ma)具有与现今相似的海拔,但气候相对温和湿润(Song Bowen et al., 2020);羌塘地块东南至始新世初期(~54 Ma)还处于不足 1000 m 的低海拔沙漠气候环境,至始新世中期(~44 Ma)才抬升至约 3800 m 的海拔(Xiong Zhongyu et al., 2020);等等。

总的来说,是否存在早新生代“原始高原”(Wang Chengshan et al., 2008)或新生代之前的“古高原”(Murphy et al., 1997; 刘树根等,2019),还是一个尚待进一步探索的科学问题。但是新生代印度—欧亚大陆碰撞之前,拉萨地块北部和羌塘地块存在白垩纪剥蚀—冷却事件的证据已经比较丰富,可以基本确认这一事件的存在,而且很可能是中特提斯洋关闭之后拉萨地块与羌塘地块碰撞的构造响应。古生物学和古气候研究揭示的新生代低海拔环境与低温热年代学和构造—沉积作用揭示的白垩纪剥蚀—冷却之间的不一致性,以及剥蚀—冷却与隆升之间的关系(田朋飞等,2020),还需要从岩石抬升和海拔抬升、地表剥蚀或剥露和沉积响应等方面开展更深入的研究。

5 结论

(1)钻孔岩芯锆石(U—Th)/He 年龄揭示羌塘地块经历过白垩纪的剥蚀—冷却事件,其中 QD-17 井和 QK-1 井锆石(U—Th)/He 年龄揭示羌塘地块西部早白垩世的剥蚀—冷却,QZ-16 井锆石(U—Th)/He 年龄揭示羌塘地块东部晚白垩世的剥蚀—

冷却。

(2)羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块低温热年代学年龄分析显示,它们在空间上呈现高原内部老(白垩纪—早始新世)、南缘新(晚中新世—更新世)的格局,内部沿断裂带附近也有年轻年龄出现。现今高原内部地表岩石抬升穿过磷灰石裂变径迹部分退火带的时间跨度在羌塘地块至喜马拉雅地块之间的差别非常大,指示截然不同的剥蚀—冷却历史。

(3)钻孔岩芯锆石(U—Th)/He 年龄、区域低温热年代学数据统计以及构造—沉积事件指示现今高原内部大部分区域可能都经历过白垩纪的剥蚀—冷却事件,进入新生代以后,高原内部大部分区域可能处于比较稳定的环境,剥蚀作用相对较弱。早白垩世中特提斯洋关闭、拉萨地块与羌塘地块碰撞可能是白垩纪剥蚀—冷却事件的主导因素。

致谢:西南石油大学王剑教授、付修根教授和中山大学王洋副教授提出了建设性的意见和建议;野外调查和采样工作得到中国地质调查局成都地质调查中心谭富文、李忠雄、陈明、曾胜强和申华梁等老师的帮助;审稿专家和编辑提供了宝贵的修改意见和建议;在此一并表示衷心感谢!

注　释　/　Note

❶ 中国地质大学(北京). 2016. 羌塘盆地鄂斯玛地区构造—热年代学填图.

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

丁林, 钟大赉, 潘裕生, 黄宣, 王庆隆. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. 科学通报, 40(16): 1497~1500.

段志明, 李勇, 祝向平, 沈战武, 钟成全. 2009. 藏北唐古拉山木乃花岗岩地壳隆升的裂变径迹证据. 矿物岩石, 26(2): 61~65.

胡修棉, 王建刚, 安慰, Garzanti E, 李娟. 2017. 利用沉积记录精确约束印度—亚洲大陆碰撞时间与过程. 中国科学: 地球科学, 47(3): 261~283.

李海兵, 杨经绥. 2004. 青藏高原北部白垩纪隆升的证据. 地学前缘, 11(4): 345~359.

刘树根, 李智武, Peter J J, 冉波, 李金玺, 邓宾, 王国芝, Xu Ganqing, Danišík M, 杨迪, 王自剑, 李祥辉, 刘顺, 李巨初. 2019. 青藏高原东缘中生代若尔盖古高原的发现及其地质意义. 成都理工大学学报, 46(1): 1~28.

潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521~533.

田朋飞,袁万明,杨晓勇. 2020. 热年代学基本原理、重要概念及地质应用. 地质论评,66(4): 975~1003.

王二七. 2013. 青藏高原大地构造演化——主要构造—热事件的制约及其成因探讨. 地质科学, 48(2): 334~353.

王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化. 中国地质, 45(2): 237~259.

王立成, 魏玉帅. 2013. 西藏羌塘盆地白垩纪中期构造事件的磷灰石裂变径迹证据. 岩石学报, 29(3): 1039~1047.

吴林, 王非, 单竞男, 张炜斌, 师文贝, 冯慧乐. 2016. 国际标样 Durango 磷灰石(U—Th)/He 年龄测定. 岩石学报, 32(6): 1891~1900.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度—亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1~33.

于祥江, 季建清, 龚俊峰, 孙东霞, 庆建春, 王丽宁, 钟大赉, 张志诚. 2011. 雅鲁藏布大峡谷气候因素引起地壳剥蚀冷却的证据. 科学通报, 56(10): 765~773.

袁万明, 杜杨松, 杨立强, 李胜荣, 董金泉. 2007. 西藏冈底斯带南木林地区构造活动的磷灰石裂变径迹分析. 岩石学报, 23(11): 2911~2917.

章诚诚. 2018. 酒泉盆地青南次凹下沟组沉积充填演化及其控制因素研究. 导师: 王华. 武汉: 中国地质大学博士学位论文: 1~160.

张克信, 王国灿, 洪汉烈, 徐亚东, 王岸, 曹凯, 骆满生, 季军良, 肖国桥, 林晓. 2013. 青藏高原新生代隆升研究现状. 地质通报, 32(1): 1~18.

赵珍, 陆露, 吴珍汉. 2019. 羌塘盆地中央隆起带的抬升演化:构造—热年代学约束. 地学前缘, 26(2): 249~263.

赵志丹, 莫宣学, 郭铁鹰, 周肃, 董国臣, 王亮亮, 张风芹, 万景林. 2003. 西藏南部岩体裂变径迹年龄与高原隆升. 自然科学进展, 13(8): 877~890.

郑勇, 张进江, 王佳敏, 王晓先, 王盟. 2014. 聂拉木地区喜马拉雅造山带上新世以来快速剥蚀事件及其构造—气候耦合意义. 科学通报, 59(11): 987~998.

朱弟成, 王青, 赵志丹. 2017. 岩浆岩定量限定陆—陆碰撞时间和过程的方法和实例. 中国科学: 地球科学, 47(6): 657~673.

Adlakha V, Lang K A, Patel R C, Lal N, Huntington K W. 2013. Rapid long-term erosion in the rain shadow of the Shillong Plateau, Eastern Himalaya. Tectonphysics, 582: 76~83.

Ai Keke, Shi Gongle, Zhang Kexin, Ji Junliang, Song Bowen, Shen Tianyi, Guo Shuangxing. 2019. The uppermost Oligocene Kailas flora from southern Tibetan Plateau and its implications for the uplift history of the southern Lhasa terrane. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 515: 143~151.

Blythe A E, Burbank D W, Carter A, Schmidt K, Putkonen J. 2007. Plio-Quaternary exhumation history of the central Nepalese Himalaya: 1. Apatite and zircon fission track and apatite (U—Th)/He analyses. Tectonics, 26(3): doi: 10.1029/2006TC001990.

Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, Wang Kuolung, Wang Peiling. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago. Nature, 394(6695): 769~773.

Deng Tao, Wang Xiaoming, Wu Feixiang, Wang Yang, Li Qiang, Wang Shiqi, Hou Sukuan. 2019. Review: Implications of vertebrate fossils for paleo-elevations of the Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 174: 58~69.

Ding Lin, Zhong Dalai, Pan Yusheng, Huang Xuan, Wang Qinglong. 1995#. The eastern Himalayan tectonic since Pliocene rapid uplift of the fission track evidence. Chinese Science Bulletin, 40(16): 1497~1500.

Duan Zhiming, Li Yong, Zhu Xiangping, Shen Zhanwu, Zhong Chengquan. 2009&. Fission track age evidence of granite crustal uplift in the Munai, Tanggula Range, Qiangtang, Northen Tibet. Journal of Mineralogy and Petrology, 26(2): 61~65.

Grujic D, Coutand I, Bookhagen, Bonnet S, Blythe A, Duncan C. 2006. Climatic forcing of erosion, landscape, and tectonics in the Bhutan Himalayas. Geology, 34(10): 801~804.

Hetzel R, Dunkl I, Haider V, Strobl M, Eynatten H, Lin Ding, Frei D. 2011. Peneplain formation in southern Tibet predates the India—Asia collision and plateau uplift. Geology, 39(10): 983~986.

Howarth R J, McArthur J M. 1997. Statistics for Strontium Isotope Stratigraphy: A Robust LOWESS Fit to the Marine Sr-Isotope Curve for 0 to 206 Ma, with Look-up Table for Derivation of Numeric Age. The Journal of Geology, 105: 441~456.

Hu Xiumian, Wang Jiangang, An Wei, Garzanti E, Li Juan. 2017&. Constraining the timing of the India—Asia continental collision by the sedimentary record. Science China Earth Sciences, 47(3): 261~283.

Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Wang Xuance, Liu Chuanzhou, Li Qiuli, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Wang Jiangang. 2016. Eocene Neo-Tethyan slab breakoff constrained by 45 Ma oceanic island basalt-type magmatism in southern Tibet. Geology, 44(4): 283~286.

Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Matthew H, Liu Ding. 2007. Geological records of the Lhasa—Qiangtang and Indo—Asian collisions in the Nima area of central Tibet. Geological Society of America Bulletin, 119(7~8): 917~933.

Lee Haoyang, Chung Sunlin, Ji Jianqing, Qian Qing, Gallet S, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Zhang Qi. 2012. Geochemical and Sr—Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet. Journal of Asian Earth Sciences, 53: 96~114.

Li Haibing , Yang Jingsu. 2004&. Evidence for Cretaceous uplift of the northern Qinghai—Tibetan plateau. Earth Science Frontiers, 11(4): 345~359.

Li Yalin, Wang Chengshan, Li Yongtie, Ma Chao, Wang Licheng, Peng Shaonan. 2010. The Cretaceous tectonic event in the Qiangtang Basin and its implications for hydrocarbon accumulation. Petroleum Science, 7(4): 466~471.

Liu Shugen, Li Zhiwu, Peter J J, Ran Bo, Li Jinxi, Deng Bin, Wang Guozhi, Xu Ganqing, Danišík M, Yang Di, Wang Zijian, Li Xianghui, Liu Shun, Li Juchu. 2019&. Discovery of Mesozoic Zoige paleo-plateau in easten Tibetan Plateau its geological significance. Journal of Chengdu University of Technology, 46(1): 1~28.

McCallister A T, Taylor M H, Murphy M A, Styron R H, Stockli D F. 2014. Thermochronologic constraints on the late Cenozoic exhumation history of the Gurla Mandhata metamorphic core complex, southwestern Tibet. Tectonics, 33(2): 27~52.

Murphy M A, Yin An, Harrison T M, Dürr S B, Chen Zhiliang, Ryerson F J, Kidd W S F, Wang X, Zhou X. 1997. Significant crustal shortening in south—central Tibet prior to the Indo—Asian collision. Geology, 25: 719~722.

Murphy M A, Yin An. 2003. Structural evolution and sequence of thrusting in the Tethyan fold—thrust belt and Indus—Yalu suture zone, southwest Tibet. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115(1): 21~34.

Nadin E S, Martin A J. 2012. Apatite thermochronometry within a knickzone near the Higher Himalaya front, central Nepal: No resolvable fault motion in the past one million years. Tectonics, 31(2): doi:10.1029/2011TC003000.

Olierook H K H, Jourdan F, Whittaker J M, Merle R E, Jiang Qiang, Pourteau A, Doucet L S. 2020. Timing and causes of the mid-Cretaceous global plate reorganization event. Earth and Planetary Science Letters, 534: doi: 10.1016/j.epsl.2020.116071.

Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqina, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Li Guangmimg, Zhao Zhidan, Geng Quanliang, Liao Zhongli. 2006&. Spatial—temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521~533.

Ren Zhanli, Cui Junping, Liu Chiyang, Li Tiejun, Chen Gang, Dou Shuang, Tian Tao, Luo Yating. 2015. Apatite fission track evidence of uplift cooling in the Qiangtang Basin and constrains on the Tibetan Plateau uplift. Acta Geologica Sinica, 89(2): 467~484.

Rohrmann A, Kapp P, Carrapa B, Reiners P W, Guynn J, Ding Lin, Heizler M. 2012. Thermochronologic evidence for plateau formation in central Tibet by 45 Ma. Geology, 40(2): 187~190.

Song Bowen, Spicer R A, Zhang Kexin, Ji Junliang, Farnsworth A, Hughes A C, Yang Yibo, Han Fang, Xu Yadong, Spicer T, Shen Tianyi, Lunt D J, Shi Gongle. 2020. Qaidam Basin leaf fossils show northeastern Tibet was high, wet and cool in the early Oligocene. Earth and Planetary Science Letters, 537: doi: 10.1016/j.epsl.2020.116175.

Su Tao, Spicer R A, Li Shihu, Xu He, Huang Jian, Sherlock S, Huang Yongjiang, Li Shufeng, Wang Li, Jia Linbo, Deng Weiyudong, Liu Jia, Deng Chenglong, Zhang Shitao, Valdes P J, Zhou Zhekun. 2019. Uplift, climate and biotic changes at the Eocene—Oligocene transition in south-eastern Tibet. National Science Review, 6(3): 495~504.

Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang Jingshi. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. Science, 294(5547): 1671~1677.

Thiede R C, Ehlers T A, Bookhagen B, Strecker M R. 2009. Erosional variability along the northwest Himalaya. Jounal of Geophysical Research, 114(F1): doi: 10.1029/2008JF001010.

Tian Pengfei, Yuan Wanming, Yang Xiaoyong. 2020&. The basics, essential concepts and geological applications of thermochronology. Geological Review,66(4):975~1003.

Wang Chengshan, Zhao Xixi, Liu Zhifei, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi Haisheng, Zhu Lidong, Liu Shun, Li Yalin. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105 (13): 4987~4992.

Wang Chengshan, Dai Jingen, Zhao Xixi, Li Yalin, Graham S A, He Dengfa, Ran Bo, Meng Jun. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. Tectonophysics, 621: 1~43.

Wang Erchie. 2013&. Evolution of the Tibetan Plateau:As constrained by major tectonic—thermo events and a discussion on their origin. Chinese Journal of Geology, 48(2): 334~353.

Wang Jian, Fu Xiugen. 2018&. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin. Chinese Geology, 45(2): 237~259.

Wang Licheng, Wei Yushuai. 2013&. Apatite fission track thermochronology evidence for the Mid-Cretaceous tectonic event in the Qiangtang Basin, Tibet. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 1039~1047.

Wang Yu, Zhang Xuemin, Sun Lixin, Wan Jinglin. 2007. Cooling history and tectonic exhumation stages of the south—central Tibetan Plateau (China): Constrained by $^{40}Ar/^{39}Ar$ and apatite fission track thermochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 29(2~3): 266~282.

Wu Lei, Xiao Ancheng, Wang Liqun, Shen Zhongyan, Chen Yuanzhong, Wang Liang, Liu Dong, Guan Junya. 2011. Late Jurassic—Early Cretaceous Northern Qaidam Basin, NW China: Implications for the earliest Cretaceous intracontinental tectonism. Cretaceous Research, 32(4): 552~564.

Wu Lin, Wang Fei, Shan Jingnan, Zhang Weibin, Shi Wenbei, Feng Huile. 2016&. (U—Th)/He dating of international standard Durango apatite. Acta Petrologica Sinica, 32(6): 1891~1900.

Xiong Zhongyu, Ding Lin, Spicer R A, Farnsworth A, Wang Xu, Valdes P, Su Tao, Zhang Qinghai, Zhang Liyun, Cai Fulong, Wang Houqi, Li Zhenyu, Song Peiping, Guo Xudong, Yue Yahui. 2020. The early Eocene rise of the Gonjo Basin, SE Tibet: From low desert to high forest. Earth and Planetary Science Letters. 543, 116312.

Xu Qiang, Ding Lin, Zhang Liyun, Cai Fulong, Lai Qingzhou, Yang Di, Jing Liuzeng. 2013. Paleogene high elevations in the Qiangtang Terrane, central Tibetan Plateau. Earth and Planetary Science Letters, 362: 31~42.

Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Liu Yan. 2011&. On the Tectonics of the India—Asia Collision. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1~33.

Yin An, Harrison T. M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211~280.

Yu Xiangjiang, Ji Jianqing, Gong Junfeng, Sun Dongxia, Qing Jianchun, Wang Lining, Zhong Dalai, Zhang Zhicheng. 2011#. Evidences of rapid erosion driven by climate in the Yarlung Zangbo (Tsangpo) Great Canyon, the eastern Himalayan syntaxis. Chinese Science Bull, 56(10): 765~773.

Yuan Wanming, Du Yangsong, Yang Liqiang, Li Shengrong, Dong Jinquan. 2007&. Apatite fission track studies on the tectonics in Nanmulin area of Gangdese terrane, Tibet plateau. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2911~2917

Zhang Chengcheng. 2018&. Evolution of the basin fill and its control factors of the Lower Cretaceous Xiagou Formation in the Qinghai Subsag, Jiuquan Basin, Northweastern China. Supervisor: Wang Hua. Doctor's Dissertation. China University of Geosciences.

Zhang Kexin, Wang Guocan, Hanlie, Xu Yadong, Wang An, Cao Kai, Luo Mansheng, Ji Junliang, Xiao Guoqiao, Lin Xiao. 2013&. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau: A review. Geologcal Bulletin of China, 32(1): 1~18.

Zhao Zhen, Lu Lu, Wu Zhenhan. 2019&. Uplifting evolution of the central uplift belt, Qiangtang: constraints from tectono—thermochronology. Earth Science Frontiers, 26(2):249~263.

Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Guo Tieying, Zhou Su, Dong Guocheng, Wang Liangliang, Zhang Fengqin, Wan Jinglin. 2003#. Fission track age of granite batholith from southern tibet: implications for the plateau uplift. Progress in Natural Science, 13(8): 877~890.

Zheng Yong, Zhang Jinjiang, Wang Jiamin, Wang Xiaoxian, Wang Meng. 2014#. Rapid denudation of the Himalayan orogen in the Nyalam area, southern Tibet, since the Pliocene and implications for tectonics—climate coupling. Chinese Science Bulletin, 59(11): 987~998.

Zhu Dicheng, Li Shimin, Cawood P A, Wang Qing, Zhao Zhidan, Liu Shengao, Wang Liquan. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction. Lithos, 245, 7~17.

Zhu Dicheng, Wang Qing, Zhao Zhidang. 2017&. Constraining quantitatively the timing and process of continent—continent collision using magmatic record: Method and examples. Science China Earth Sciences, 47(6): 657~673.

Cretaceous denudation—cooling in Qiangtang Block

ZHENG Bo[1, 2), CHEN Wenbin[3), WANG Zengzhen[4), FENG Lixia[5),
ZHANG Yanxiong[1,2), WAN Youli[3), WU Lin[6)

1) *Qiangtang Institute of Sedimentary Basin*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu* 610500;
2) *School of Geoscience and Technology*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu*, 610500;
3) *Chengdu Centre*, *China Geological Survey*, *Chengdu*, 610081;
4) *China Deep Exploration Center*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037;
5) *School of Emergency Science*, *Xihua University*, *Chengdu*, 610039;
6) *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*, 100029

Objectives: This work aims to investigate a probable Cretaceous denudation—cooling process in the inner part of Xizang(Tibetan) Plateau before the Cenozoic India—Eurasia collision.

Methods: We carried out a preliminary zircon (U—Th)/He study based on samples from 3 boreholes in the central Xizang Plateau and compiled a number of low temperature thermochronological age data, including zircon (U—Th)/He, apatite fission track and (U—Th)/He ages, throughout the Qiangtang Block, Lhasa Block, and Himalaya Block, by analyzing their temporospatial distributions and potential links with some specific geological

events and tectonic background, to discuss an early denudation—cooling process in the Qiangtang Block.

Results: Zircons of 9 samples from 3 boreholes in the Qiangtang Block give (U—Th)/He ages of from 127 to 114 Ma in the well QD-17 , from 92 to 64 Ma in the well QZ-16, and 88±5 Ma in the well QK-1, respectively. These ages are weakly correlated with their altitudes and show a trend of decreasing from the top down and from west to east.

Conclusions: The zircon (U—Th)/He age pattern from boreholes indicates an obvious denudation—cooling process during Cretaceous in the Qiangtang Block. The statistical result of thermochronological ages show a distribution pattern that the inner part of Xizang Plateau holds older ages from Cretaceous to Early Eocene, while the marginal part of Xizang Plateau has much younger ages from Late Miocene to Pleistocene. They together indicate an early denudation—cooling process during Cretaceous in the inner part of Xizang Plateau. This earlier cooling before the widely known Cenozoic one triggered by India—Eurasia collision can be linked to an Early Cretaceous tectonic unconformity from the northern Lhasa Block to the north front of Xizang Plateau and is quite probably the consequence of the closure of the Meso-Tethys Ocean and following collision of the Lhasa Block and the Qiangtang Block.

Keywords: Denudation—cooling; Cretaceous; northern Lhasa Block; Qiangtang Block

Acknowledgements: This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 91955204). We thank Prof. WANG Jian and Prof. FU Xiugen (Southwest Petroleum University), and associate Prof. WANG Yang (Sun Yat-Sen University) for their generous help during the preparation of the manuscript. Thanks are also given to TAN Fuwen, LI Zhongxiong, CHEN Ming, ZENG Shengqiang, and SHEN Huanliang (Chengdu Geological Survey Center) for their assistance in field work. Constructive reviews from an anonymous reviewer and the editor are of great help to improve this work.

First author: ZHENG Bo, male, born in 1986, doctor, mainly engaged in research of regional tectonics; Email: cambrianzb@ sina. cn

Manuscript received on:2020-07-20;Accepted on: 2020-08-24; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2020. 05. 005