

西昆仑山古近纪隆升变形:时间、证据和争论

张世杰^{1,2,3)},胡修棉³⁾,郜周全⁴⁾,赵永强²⁾,马安林⁵⁾,许艺炜³⁾



www.
geojournals.cn/georev

- 1)河南师范大学旅游学院,河南新乡,453007;
2)中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,江苏无锡,214126;
3)南京大学地球科学与工程学院,南京,210023; 4)云南省地质矿产勘查院,昆明,650051;
5)成都理工大学沉积地质研究院,成都,610059

内容提要:西昆仑山新生代隆升变形过程对于中亚的地貌与水系演化、资源和能源矿产分布、气候及环境变迁等都具有重要的影响,然而至今尚没有形成统一的认识。西昆仑山新生代初始隆升与变形的时间存在三种不同观点,分别为古新世、中—晚始新世、渐新世末期—中新世早期。本文通过对塔西南地区地层学、沉积学、物源分析和热年代学的研究综述,详细讨论了西昆仑山古新世、中—晚始新世隆升变形的时间、证据、解释和争议。在此基础上,确定了西昆仑山在古新世发生了隆升变形,中—晚始新世是新生代变形中的一个加速节点。这两期隆升变形分别对应于印度—亚洲大陆初始碰撞、新特提斯洋俯冲板片断离的远程响应,反映了印度板块向北的碰撞拼贴与持续挤压的过程。

关键词:西昆仑山;塔西南坳陷;古近纪构造隆升;沉积盆地分析

西昆仑山位于青藏高原的西北缘,塔里木盆地南部,整体上呈西北—东南走向,平均海拔4000~6000 m,是中国西部最重要的地质地理分界线之一(图1)。西昆仑山新生代的隆升不仅塑造了青藏高原西北缘的地貌形态与河流系统(Blayne et al., 2016; Zhang Shijie et al., 2019),剥露出大量重要的矿产资源(毛景文等, 2019; 张传林等, 2019),对塔里木盆地前新生代油气藏进行了破坏与重组(贾承造, 2009),还对整个中亚的气候产生了深远的影响(Ramstein et al., 1997),并直接关系到塔里木盆地的海退(郝治纯和曾学鲁, 1984; 唐天福等, 1992; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018; 席党鹏等, 2020)、中亚的干旱化(Ramstein et al., 1997; Sun Jimin et al., 2017)、以及塔克拉玛干沙漠的形成(Sun Jimin and Liu Tungsheng, 2006; Zheng Hongbo et al., 2015)等。因此刻画西昆仑山新生代隆升的时间与过程,不仅可以验证青藏高原的隆升模式,探究大陆碰撞与造山作用,还有助于能源矿产的勘查,理解中亚的气候环境变迁过程等,具有重要

的研究意义(Molnar and Tapponnier, 1975; Dewey et al., 1988; Ramstein et al., 1997; Tapponnier et al., 2001; 吴福元等, 2008; 贾承造, 2009; Wang Chengshan et al., 2014; 张传林等, 2019)。

从动力学机制上来说,现今学界通常认为西昆仑山新生代的隆升过程受控于青藏高原南缘印度—亚洲大陆板块的碰撞拼贴过程(Molnar and Tapponnier, 1975; Hendrix et al., 1992; Graham et al., 1993; 许志琴等, 2011a; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019)。但是目前主流的用于解释青藏高原隆升与变形的终端模型中,无论将青藏高原视为夹在刚性板块之间的黏性板片,随着印度大陆向北的逐渐楔入而逐步向北的地壳加厚、高原隆升(England and Houseman, 1988);还是将青藏高原视为夹在刚性板块之间的塑性板片,随着印度大陆向北的逐渐楔入,岩石圈沿着复活的大型走滑断裂向东挤出(Tapponnier et al., 2001; 许志琴等, 2011b),都在强调青藏高原地壳结构的非均质性,以及与此相关的应力不均匀传播、应变差异分配。

注:本文为国家杰出青年科学基金资助项目(编号:41525007)和国家自然科学基金特提斯地球动力系统重点支持项目(编号:91755209)的成果。

收稿日期:2020-11-18;改回日期:2021-04-30;网络首发:2021-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.300

作者简介:张世杰,男,1986年生,博士,研究方向为沉积学与含油气盆地分析;Email: zhangshijiex@foxmail.com。通讯作者:胡修棉,男,1974年生,教授,博士生导师,主要从事沉积地质学科研和教学;Email: huxm@nju.edu.cn。

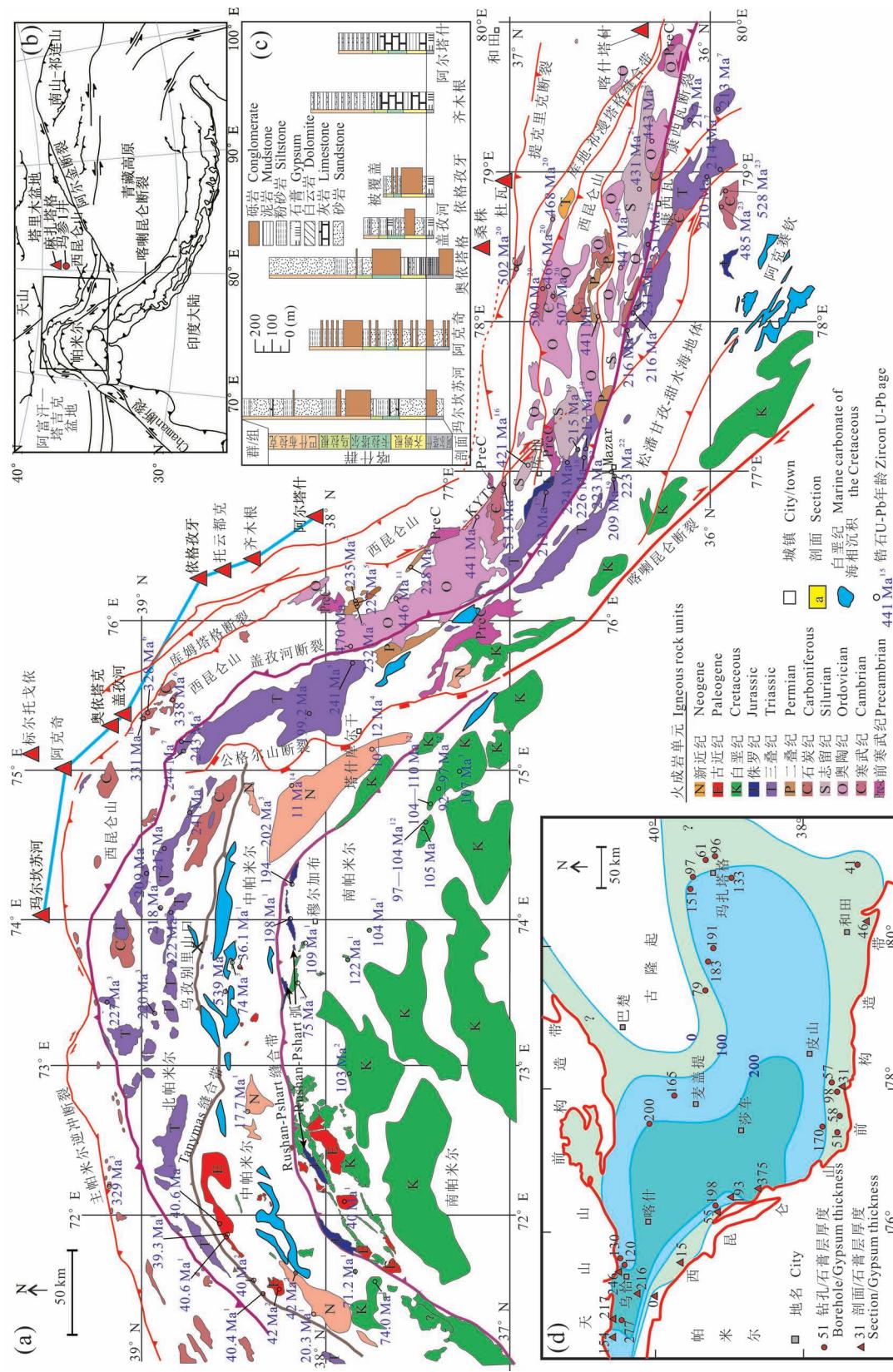


图1 帕米尔—西昆仑区域地质图 (修改自文蔚Zhang Shijie et al., 2018, 2019) : (a) 西昆仑—帕米尔古近系海相地层展布图;

(b) 简化的青藏高原—帕米尔构造单元图; (c) 帕米尔U-Pb年龄对比图; (d) 帕米尔古近系阿克赛钦—中帕米尔白垩系海相地层展布图;

Fig. 1 Geological map of the Pamir and West Kunlun orogens (modified after Zhang Shijie et al., 2018, 2019): (a) The zircon U-Pb ages of the igneous rock in the West Kunlun—Pamir orogens, and the distribution of Upper Cretaceous shallow marine carbonates from Central Pamir to the Tianshuihai terrane; (b) Simplified tectonic map of the Pamir—Tibetan region; (c) The sections comparison of Paleogene conglomerates on the northeastern margin of Pamir; (d) Thickness and distribution of gypsum deposits of Aertashi Formation in the western Tarim Basin

而这些都将强化高原变形的不连续性(Tapponnier et al., 2001; 许志琴等, 2011b), 可能使青藏高原西北缘的西昆仑山, 亦或更远的天山等, 新生代隆升的时空过程明显差异于高原内部或者其南部、东部边缘(Dumitru et al., 2001; Tapponnier et al., 2001; Wang Erchie et al., 2003; 吴福元等, 2008; 王成善等, 2009; 许志琴等, 2011b)。因此, 这些模型都没有预测西昆仑山新生代早期的隆升变形(Tapponnier et al., 2001; Wang Chengshan et al., 2014)。

从青藏高原隆升的时空过程模型来看, 无论是利用大陆岩石圈斜向俯冲机制提出的高原逐渐自南向北生长的隆升模式(Tapponnier et al., 2001; 许志琴等, 2011a, 2011b), 还是在继承中生代古地貌的基础上自中部向南北两侧逐渐扩展的隆升模式(Wang Chengshan et al., 2008; Wang Chengshan et al., 2014), 都认为位于青藏高原西北缘的西昆仑山隆升主要发生于新生代晚期。岩石圈横向均匀缩短模型认为地壳与岩石圈地幔的连续变形行为, 可以使大陆碰撞在高原不同地区均发生增厚(Dewey et al., 1988), 高原北缘也可以存在新生代早期的构造变形事件。但是西昆仑山新生代构造演化的研究中该模式却鲜有提及。

然而, 随着研究的深入, 西昆仑山新生代隆升变形的起始时间不断被提前。越来越多的证据表明西昆仑山存在新生代早期的隆升变形, 且可能与印度—亚洲大陆初始碰撞相关(Amidon and Hynek, 2010; Chen Xinwei et al., 2018; Li Guangwei et al., 2019; Zhang Shijie et al., 2019)。如果这种观点被证实的话, 就意味着印度—亚洲大陆初始碰撞在高原西北缘具有近乎等时的变形响应。虽然青藏高原内部存在多条深大断裂, 且地壳的性质也存在明显的不均一性(Tapponnier et al., 2001; 许志琴等, 2011b), 但并没有影响到大陆初始碰撞产生的应力快速地传递到西昆仑山。这明显是与现今流行的青藏高原的隆升模式是不一致的。因此, 基于西昆仑山隆升过程研究所获得的结论, 既可以作为一个独立的区域地质证据验证青藏高原的隆升模式, 又有助于评估塔里木盆地的资源和能源效应, 揭示中亚干旱化等古环境变化过程。

位于西昆仑山北部的塔西南坳陷(图1), 保留了侏罗纪以来的巨厚沉积记录(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 周志毅, 2001; 席党鹏等, 2020), 完整记录了西昆仑山晚中生代以来的隆

升过程。为解决上述提及的科学问题提供了特殊的机遇。基于塔西南地区大量新生代沉积剖面的研究, 目前对西昆仑山新生代初始隆升与变形的时间约束主要存在三种不同观点, 分别为古新世(Amidon and Hynek, 2010; Chen Xinwei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018, 2019; Li Guangwei et al., 2019)、中—晚始新世(Yin An et al., 2002; Sun Jimin and Jiang Maosheng, 2013; Carrapa et al., 2015; Sun Jimin et al., 2016b; Kaya et al., 2018; Blayney et al., 2019)、渐新世末期—中新世早期(Sobel and Dumitru, 1997; Sobel et al., 2006; Bershad et al., 2012; Jiang Xiaodian and Li Zhengxiang, 2014; Zheng Hongbo et al., 2015; Blayney et al., 2016; Cheng Xiaogan et al., 2017)。

目前国内外对西昆仑山新生代的隆升变形时间研究已经有了较多的成果积累, 渐新世末期—中新世早期的构造隆升已经得到了大多数学者们的认可(Sobel and Dumitru, 1997; Sobel et al., 2006; Bershad et al., 2012; Jiang Xiaodian and Li Zhengxiang, 2014; Zheng Hongbo et al., 2015; Blayney et al., 2016; Cheng Xiaogan et al., 2017)。但古新世和中—晚始新世西昆仑山已经开始隆升变形的观点则存在诸多的争议(Yin An et al., 2002; Carrapa et al., 2015; Sun Jimin et al., 2016b; Chen Xinwei et al., 2018; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018, 2019; Blayney et al., 2019), 至今没有相关的文章对其地质证据进行回顾梳理。

因此, 本文聚焦于古新世、中—晚始新世西昆仑山是否已经开始隆升变形这个问题, 对塔西南地区古近纪相关的地层学、沉积学、物源分析和热年代学等证据进行了系统综述。通过回顾与评述西昆仑山古近纪隆升变形的时间、证据、解释与争议, 抛砖引玉, 为以后相关研究提供参考。

1 地层学的证据、解释和争议

塔里木盆地西南坳陷古近系的沉积地层由喀什群海陆过渡相灰岩—碎屑岩组成(图2)(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 唐天福等, 1989, 1992; 周志毅, 2001; Zhang Shijie et al., 2018; 席党鹏等, 2020), 涉及到西昆仑山新生代早期构造变形的证据, 主要就是来自于对喀什群的研究和解释(Yin An et al., 2002; Carrapa et al., 2015; Sun Jimin et al., 2016a, 2016b; Chen Xinwei et al., 2018; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al.,

2018, 2019; Blayney et al., 2019)。故先对其主要地层单元和时代约束证据自下而上进行简要介绍:

1.1 塔西南坳陷古近系的地层框架

喀什群自下而上由阿尔塔什组、齐姆根组、卡拉塔尔组、乌拉根组和巴什布拉克组构成(图2)(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 唐天福等, 1989, 1992; 周志毅, 2001; 席党鹏等, 2020)。在塔西南坳陷西部出露好, 沉积单元易于识别。底部为白色巨厚层石膏/硬石膏, 向上是三段灰绿色灰岩和三段紫红色(含石膏)泥岩/细—粉砂岩互层。至东部的皮山、和田、麻扎塔格等区域, 喀什群则主要由底部的厚层石膏夹灰岩和白云岩、以及其上的紫红色(含石膏)泥岩与细—粉砂岩互层组成。除底部之外, 整体沉积特征相似, 缺乏化石, 难以细分(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 周志毅, 2001)。

地层时代的确定:由于缺乏古生物化石, 阿尔塔

什组的地层时代一直缺乏精确约束。Kaya 等(2019)在康苏剖面一个石膏的夹层灰岩中, 报道了钙质超微化石 *Fasciculithus* spp. 和 *F. magnicordis*, 指示其时代为古新统 Danian 阶。结合其下吐依洛克组最可能的时代为 Maastrichtian 阶晚期—Danian 阶(Mao Shaozhi and Norris Geoffrey, 1988; 郝治纯等, 2001), 阿尔塔什组沉积可能起始于 Danian 阶晚期(席党鹏等, 2020)。齐姆根组下段化石丰富, 颗石藻 *Heliolithus kleinpellii* 组合带, *Heliolithus riedelii* 组合带, *Descoaster multiradiatus* 组合带(钟石兰, 1992), 沟鞭藻 *Ceratiopsis diebelii*—*Deflandrea dissoluta*—*Phelodinium spinocapitatum* 组合带, *Apectodinium homomorphum* 组合带(何承全, 1991)和有孔虫 *Spiroplectammina*—*Globigerina*—*Noninoellina* 动物群(郝治纯等, 2001), 一致限定的时代为古新世中—晚期(Kaya et al., 2018; 席党鹏等, 2020)。另外, 在齐木根剖面的齐姆根组底界之

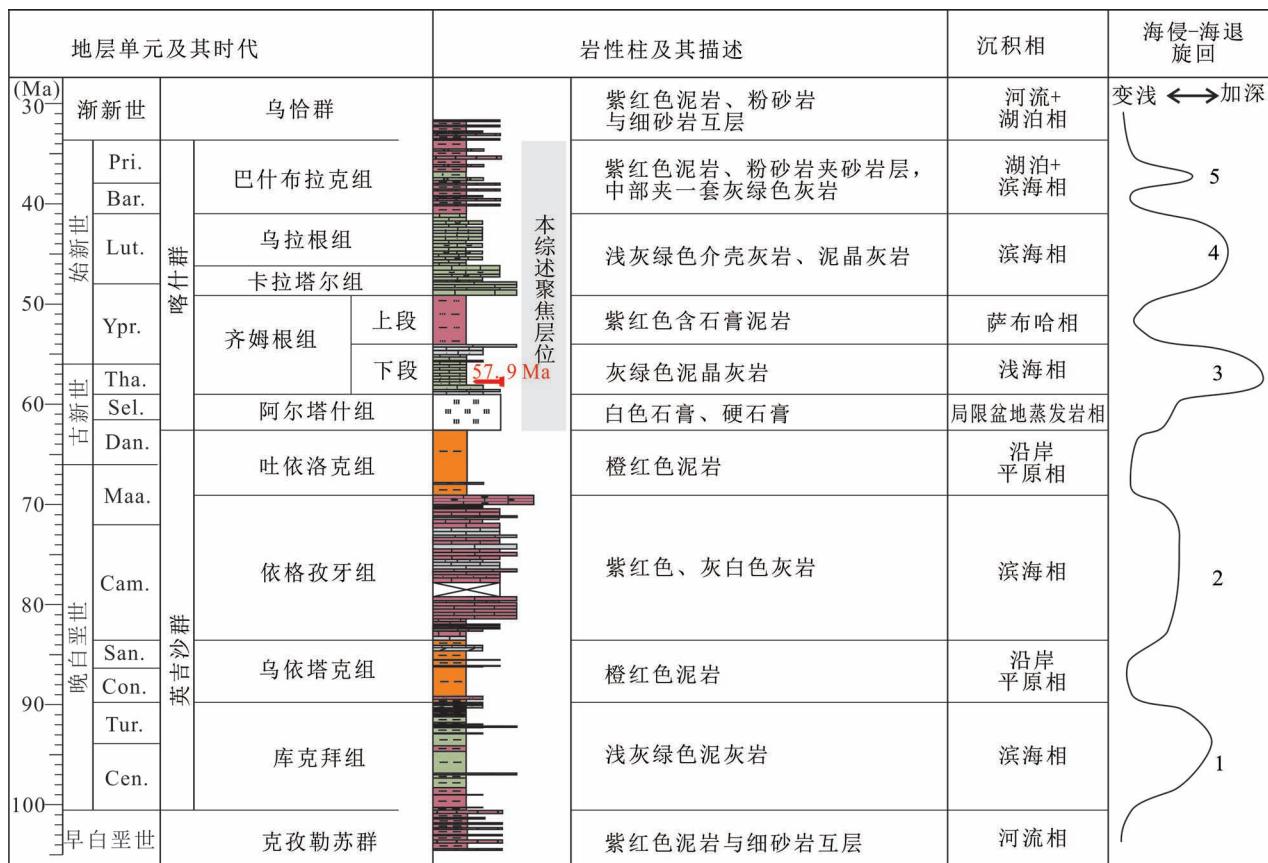


图 2 塔西南地区白垩纪—古近纪地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive Cretaceous—Paleogene stratigraphic column in southwestern Tarim Basin

修改自文献新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 唐天福等, 1992; 周志毅, 2001; Zhang Shijie et al., 2018; 席党鹏等, 2020

modified from Compiling Group for Xinjiang Regional Stratigraphic Chart, 1981#; Tang Tianfu et al., 1992&;

Zhou Zhiyi, 2001#; Zhang Shijie et al., 2018; Xi Dangpeng et al., 2020&

上 19 m 处还发现了年龄为 57.9 Ma 的凝灰岩层, 结合喀什群海相地层的沉积速率, 约束齐姆根组底界时代为 59 Ma (Zhang Shijie et al., 2018; 李伟等, 2021)。齐姆根组上段缺乏生物化石。结合 Kaya 等 (2018) 对 Laghman 剖面进行的磁性地层学研究结果与 Zhang Shijie 等 (2019) 在标尔托戈依剖面齐姆根组上段顶部获得的最年轻碎屑锆石年龄 (49.8 Ma, n=4), 推断齐姆根组顶部的时代最可能为 49 Ma。卡拉塔尔组中的双壳 *Ostrea* (*Turkostrea*) 和 *Sokolowia* 是始新世中期阿莱依地层的常见属 (蓝琇和魏景明, 1995), 其中 *Sokolowia* 广泛地分布于整个原副特提斯海 Lutetian 期至 Priabonian 期的地层中 (Bosboom et al., 2011), 地层时代可宽泛限定在 Ypresian 晚期至 Lutetian 早期。乌拉根组, 双壳 *Sokolowia* 依然是重要的分子。钙质超微 *Reticulofenestra umbilicus*, *Ericsonia formosa*, *Neococcolithes* spp. 和沟鞭藻 *Areosphaeridium diktyoplakum*, *Rhombodinium draco*, *Melitasphaeridium pseudorecurvatum* 一致限定地层时代为 Lutetian 晚期至 Bartonian 期 (Bosboom et al., 2011, 2014a, 2014b)。结合磁性地层学的研究结果, 可以约束其顶部年龄为 41 Ma。综上, 乌拉根组地层时代为 Lutetian 中晚期 (Bosboom et al., 2014a, b; Kaya et al., 2018)。巴什布拉克组中部的钙质超微化石 *Cribrocentrum reticulatum*, *Ismolithus recurvus* 和沟鞭藻 *Cordosphaeridium funiculatum*, *Lentinia serrata* 可约束其时代为 Bartonian 末期至 Priabonian 早期 (Bosboom et al., 2014b; Kaya et al., 2018), 结合磁性地层学的时代约束 (Zheng Hongbo et al., 2015; Blayney et al., 2019), 巴什布拉克组顶部的时代为约 35 Ma。

1.2 主要的不整合面

虽然塔西南坳陷喀什群内部在局部可见明显的沉积间断标志 (如齐木根剖面齐姆根组上段和下段之间的间断面, 巴什布拉克剖面卡拉塔尔组和乌拉根组之间的间断面, 标尔托戈依剖面乌拉根组和巴什布拉克组之间的间断面), 但是整体来看, 喀什群内部地层仍是连续沉积为主导, 不存在长期的大面积的不整合 (图 3a) (唐天福等, 1989, 1992; 周志毅, 2001; Zhang Shijie et al., 2018; 席党鹏等, 2020)。但是在喀什群的底部和顶部, 区域地质研究则通常认为是存在不整合的。

喀什群底部不整合:该不整合主要见于杜瓦以东的区域, 如阿其克、喀什塔什、麻扎塔格等区域

(位置见图 1) (新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981)。在杜瓦以西, 喀什群与其下的英吉沙群呈整合接触。在杜瓦以东, 喀什塔什乡附近的向斜构造带野外剖面上, 可以看到喀什群紫红色含石膏泥岩不整合的覆盖在灰色侏罗系叶尔羌群之上 (山西省地质调查院, 2006)。在阿其克地区, 喀什群则不整合的覆盖在二叠系普司格组之上 (山西省地质调查院, 2006)。在麻扎塔格附近的钻孔玛参 1 井中, 也可以看到喀什群底部巨厚层石膏不整合的覆盖在二叠系地层之上。根据阿其克剖面、玛参 1 井不整合之上的厚层白色块状石膏、白云岩等, 结合阿尔塔什组巨厚层石膏在区域地层的相关性, 可以确定该不整合之上地层的时代为古新世中期。

喀什群顶部不整合:野外地质填图和区域地质志的调查结果认为, 在塔西南区域, 喀什群与其上的乌恰群之间以平行不整合接触为主, 局部可见到低角度的不整合 (刘万祥, 1990; 新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981)。如在齐木根剖面, 就可见到乌恰群以低角度的不整合覆盖在喀什群之上 (陈锐明等, 2011; Cao Kai et al., 2014)。在标尔托戈依、阿尔塔什、柯克亚等剖面, 二者之间则不存在角度不整合。对阿尔塔什剖面、柯克亚剖面和 Tierekkesazi 剖面精细的磁性地层学研究表明, 喀什群和乌恰群之间可能存在 2~12 Ma 不等的沉积间断 (Bosboom et al., 2014a; Chen Xinwei et al., 2015; Zheng Hongbo et al., 2015; Blayney et al., 2019)。但值得注意的是, 磁性地层学解释的不整合或沉积间断, 在剖面上的地层学或沉积学标志却并不明显。

大地构造意义的解释:现今中亚中新世大地构造演化研究通常认为, 亚洲南缘板块碰撞拼贴产生的挤压应力传递到中亚, 引起造山带复活并开始隆升变形, 盆地因此开始加速沉降 (Molnar and Tapponnier, 1975)。而当亚洲南缘的板块碰撞拼贴完成以后, 中亚区域造山带开始松弛坍塌, 盆地也开始逐渐均衡回弹, 产生区域的不整合 (Hendrix et al., 1992)。因此塔里木盆地大范围的隆升剥蚀和沉降沉积的相互转化, 很可能指示了南部板块碰撞拼贴的过程, 是大陆碰撞远程效应的直接响应 (Hendrix et al., 1992; Graham et al., 1993; Sobel, 1999; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019)。

从上述的青藏高原西北缘古近系地层学研究来看, 杜瓦河以东区域的喀什群底部不整合结束于古

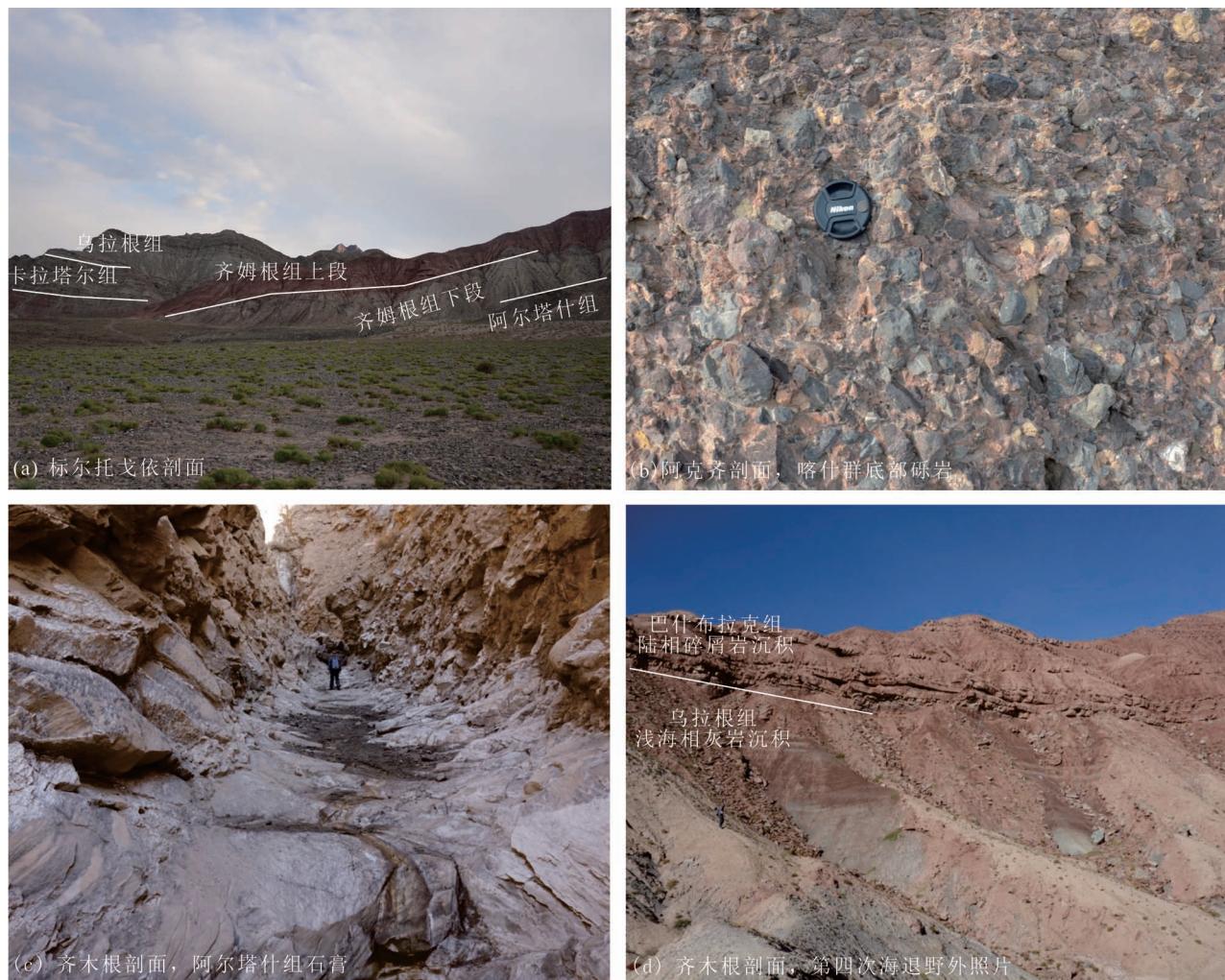


图3 塔西南地区古近纪地层典型野外照片：(a) 标尔托戈依剖面喀什群野外照片；(b) 喀什群底部砾岩，阿克齐剖面；(c) 喀什群底部阿尔塔什组石膏，齐木根剖面；(d) 齐木根剖面乌拉根组和巴什布拉克组野外照片，展示了塔里木盆地第四次海退时由乌拉根组浅海相灰岩沉积向巴什布拉克组陆相碎屑岩沉积的变化

Fig. 3 Representative field photographs showing stratigraphic contacts and lithology of Paleogene strata in southwestern Tarim Basin: (a) Kashi Group field photograph in the Bora Tokay Section; (b) Conglomerate at the bottom of Kashi Group, Akqi Section; (c) Aertashi Formation gypsum at the bottom of Kashi Group, Qimugen Section; (d) The stratigraphic contact field photos of the Wulagen and Bashibulake Formations in the Qimugen Section show the change from the neritic limestone deposits (Wulagen Formation) to the continental clastic rocks (Bashibulake Formation) during the fourth regression in the Tarim Basin

新世中期。在青藏高原的东北缘，新生代地层与下伏地层也普遍呈不整合接触关系，并且多数新生代早期地层以明显的角度不整合覆盖在白垩纪和更老的基岩之上（如柴达木盆地、西宁盆地、兰州盆地等）（刘善品，2015）。它们可能反映了青藏高原北缘在新生代早期已经开始受盆缘造山带隆升变形的影响而普遍开始沉降。而喀什群顶部可能存在的起始于36~34 Ma的不整合，则可能反映的是塔西南地区在始新世末期发生了短暂的应力松弛和均衡回弹。

1.3 构造沉降分析

利用沉积地层的剥蚀分析，恢复盆地基底挠曲沉降过程，进而讨论造山带逆冲推覆过程的相关研究，是盆山耦合分析中非常重要又较为常用的方法（Xie Xiangyang and Heller, 2009）。虽然现今不同的学者对塔西南区域不同的剖面都进行过沉降分析，但整体的沉降趋势与沉降特征一致（Yin An et al., 2002; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018; Blayne et al., 2019）。以 Zhang Shijie 等（2018）恢复的沉降曲线为例（图4），整个白垩纪塔

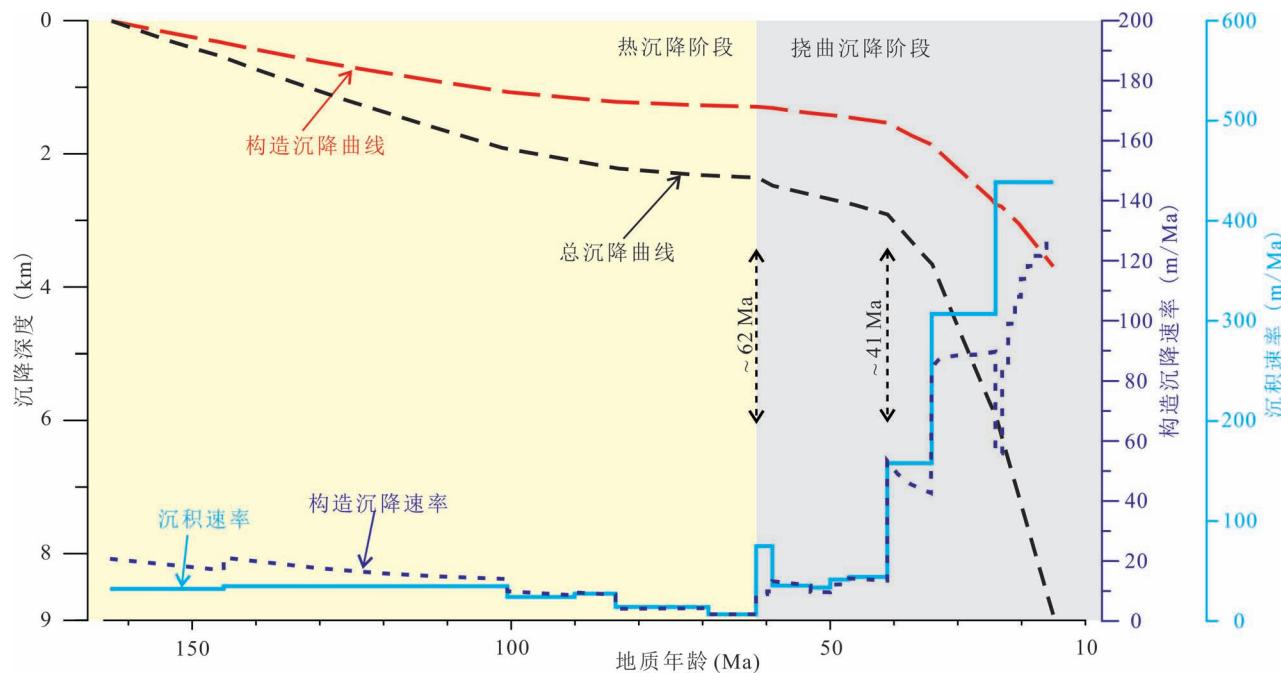


图4 塔西南地区沉降分析曲线,地层数据来自托云都克剖面和齐木根剖面(据文献 Zhang Shijie et al. , 2018)

Fig. 4 Subsidence analysis curve in southwestern Tarim Basin, with stratigraphic data from Tuoyunduke and Qimugen sections (modified after Zhang Shijie et al. , 2018)

西南地区都以低构造沉降量和低构造沉降速率为主要特征,且二者皆呈逐渐降低的趋势。整体上看,这个时期的构造沉降曲线斜率小且平直,呈较缓的上凹型。进入新生代,在阿尔塔什组—乌拉根组(62~41 Ma)沉积时期,构造沉降速率开始小幅度增加,基本上恢复到了早白垩世的水平。自巴什布拉克组沉积开始(41 Ma),构造沉降速率快速增加。在经历了喀什群和乌恰群之间短暂的沉积间歇之后,塔西南区域的构造沉降速率持续快速地增长。这种加速的趋势一直持续到中新世沉积时期。从新生代的总沉降量曲线和构造沉降曲线来看,总体呈现斜率逐步增大,逐渐向下陡倾,前缓后陡的上凸型。

解释与争议:长期以来前陆区域沉降分析的研究表明,整体呈上凸形的构造沉降曲线是前陆盆地沉降的典型特征(Xie Xiangyang and Heller, 2009)。构造沉降速率的快速增加以及构造沉降曲线的快速下倾,反映了造山带逆冲推覆与盆地基底挠曲沉降过程。目前对于沉降曲线中41 Ma(巴什布拉克组底部)开始的构造沉降速率明显增加的解释较为一致,认为其反映了造山带隆升变形与前陆挠曲沉降的加速(Yin An et al. , 2002; Carrapa et al. , 2015; Kaya et al. , 2018; Blayne et al. , 2019)。但对于62~41 Ma期间(阿尔塔什组—乌拉根组)的构造沉

降速率初始缓慢增加阶段是否反映了前陆盆地形成的初始阶段,则仍存在争议。Sobel (1995) 和 Zhang Shijie 等 (2018) 认为古新世开始的构造沉降速率初始缓慢增加阶段是前陆盆地开始形成的标志,符合前陆盆地发育初期沉降速率和沉积速率通常较低,之后逐渐快速增加的演化过程(DeCelles and Giles, 1995)。

2 沉积学的证据、解释和争议

2.1 新生代早期阿克赛钦地区的海退

现今西昆仑山的南侧,从东部的阿克赛钦湖,经洛克宗山、乌孜别里山口,穆尔加布北部,巴塘,直到塔吉克盆地,呈条带状散布了一套晚白垩世的浅海相灰岩沉积(图1a)(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; Burtman and Molnar, 1993; 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000; 罗宇鹏, 2010; Rutte et al. , 2017; Zhang Shijie et al. , 2019)。位于中国的部分被称为铁隆滩群,含有丰富的生物化石。其中固着蛤确定其沉积时代为晚白垩世 Turonian 期到 Campanian 期是无疑的,向上很可能还延续到了 Maastrichtian 早期(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000)。浮游有孔虫也指示沉积时代大致在 Turonian—Campanian(罗宇鹏,

2010)。在部分地层中还发现大量的 *Orbitolina*, 指示该套灰岩地层的最早沉积时间向下至少延续到了 Cenomanian 末期(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000)。位于塔吉克盆地巴塘和穆尔加布区域的浅海相灰岩通常被苏联的地质工作者认为可能是晚白垩世 Campanian 至 Maastrichtian 的沉积(Burtman and Molnar, 1993; Rutte et al., 2017)。Rutte 等(2017)在穆尔加布附近晚白垩世灰岩层顶部的砂岩层中, 获得了 75 Ma($n=2$)的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄, 暗示了顶部砂层的沉积时代小于 75 Ma, 与化石所限定的地层时代结果一致。综合以上化石所提供的地层时代信息, 这套灰岩地层的时代主要为晚白垩世 Turonian 期到 Campanian 期应当是无疑的, 向下应至少延续到了 Cenomanian 晚期, 向上可能延续到了 Maastrichtian。

在阿克赛钦地区, 晚白垩世的浅海相沉积之上覆盖了一套紫红色的砂砾岩和砾岩(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000)。在乌孜别里山口, 灰岩层之上也沉积了一套红色含砾砂岩、砾岩与角砾岩(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981)。中帕米尔的穆尔加布盆地, 时代可能为古近系的砾岩不整合的覆盖在含化石的晚白垩世碳酸盐沉积之上(Rutte et al., 2017)。

解释与存在问题:以上的总结表明, 晚白垩世中帕米尔至阿克赛钦区域存在一片狭长的陆表浅海, 自塔吉克盆地向东延伸至青藏高原北部的阿克赛钦地区, 一直持续到白垩纪末期的 Maastrichtian 期才结束。海退之后大面积的区域不整合与砾岩沉积, 说明了该时期的海退明显是区域构造隆升的结果。这些区域的山间盆地以粗碎屑沉积和剥蚀作用为主, 反映了青藏高原西北缘在白垩纪末期或新生代初期整体为构造隆升的大地构造背景。但是, 一个明显存在的问题是, 阿克赛钦和中帕米尔区域海拔高, 自然条件恶劣, 很多区域访问受限, 目前对这套晚白垩世灰岩的认识还很粗浅。海退时间与其上的不整合以及砾岩沉积都缺乏精细的时代约束, 使得其难以与高原南缘同时的重大地质事件(如印度—亚洲大陆初始碰撞等)进行精细对比研究。

2.2 古新世阿尔塔什组石膏沉积

塔西南坳陷古新世沉积的阿尔塔什组巨厚层石膏、硬石膏是塔里木盆地新生代早期分布面积最广泛的岩性标志层(唐天福等, 1992; 周志毅, 2001; Zhang Shijie et al., 2018)。它的沉积厚度自几十米到 200 m 以上, 自喀什以西至和田以东均可见到, 向

东北方向最远可以延伸至库车坳陷西部(图 1d, 图 3c)(唐天福等, 1992; 张华等, 2013; 张亮等, 2015; 高超等, 2016; Zhang Shijie et al., 2018)。

解释与争议:大陆架或者克拉通之上大范围沉积的巨厚层(明显大于 50 m)的蒸发岩, 通常形成于炎热干燥的副热带高压带附近, 与正常大洋海水隔绝并受海水渗流补给的沉积盆地, 是地质历史时期的特殊产物(Warren, 2016)。盆地与正常大洋海水隔绝或者是由于区域构造作用引起的, 或者是由于温室气候时期海平面波动引起的(Warren, 2016)。Zhang Shijie 等(2018, 2019)提出由于帕米尔在古新世开始隆升并向北楔入, 导致了帕米尔和天山之间出现了低海拔的地貌屏障, 隔绝了塔里木海与西部原副特提斯海的地表水文通道, 使塔里木盆地成为巨大的盐池, 从而形成了阿尔塔什组石膏, 因此它是区域构造事件的产物。但是, Kaya 等(2018)则认为阿尔塔什组石膏的形成主要受海平面变化控制, 认为温室气候条件下海平面上升引起了塔吉克盆地陆缘海的厚壳蛤类原地生长加积, 随后全球海平面下降, 加积的生物层便暴露为地貌屏障, 屏障后方的塔吉克盆地与塔里木盆地则成为了巨大的盐池, 沉积了阿尔塔什组。

2.3 乌拉根组末期海退(约 41 Ma)

塔里木盆地大规模海退)

中亚的古地理研究表明, 由于晚白垩世—始新世期间的原副特提斯海的海平面变化, 位于欧亚大陆内部的塔里木盆地经历了 5 期主要的海侵与海退旋回(郝诒纯和曾学鲁, 1984; 雍天寿和单金榜, 1986; 唐天福等, 1989, 1992; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018; 席党鹏等, 2020)(图 2)。从塔里木盆地海相沉积的古水深和海域展布面积研究来看, 第三次(齐姆根组下段)和第四次海侵(卡拉塔尔组—乌拉根组)是塔里木盆地海侵的最高峰(郝诒纯和曾学鲁, 1984; 雍天寿和单金榜, 1986; 唐天福等, 1989, 1992; 张华等, 2013)。而第四次海退也是整个中亚的重大地质事件, 向西海退距离可达上千千米, 海岸线一直退到了塔吉克盆地西部(Carrapa et al., 2015; Wang Xin et al., 2019; Sun Jimin et al., 2020)。虽然第五次海侵再次向东达到了塔里木盆地, 但是仅仅局限在喀什以西的区域(唐天福等, 1992; Bosboom et al., 2014b; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018)。这就意味着喀什以东的广大区域最终的海退(也就是海陆转换)为第四次海退的时间, 发生在乌拉根组末期(约

41 Ma)。在塔西南地区野外露头剖面上,可见灰绿色含生物碎屑灰岩向紫红色陆源碎屑岩的转变,就是这次海退最直观的表达(图3d)。

解释与争议:由于塔里木盆地海水水深较浅,对于区域大地构造和全球海平面变化响应敏感,因此其大规模的海退可以很直观地归因于青藏高原西北缘的构造事件,亦或者重要的全球海平面下降事件(唐天福等,1992; Bosboom et al., 2011; Bosboom et al., 2014a, 2014b; Carrapa et al., 2015; Sun Jimin et al., 2016a; Kaya et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2018)。基于对这次海退时间的精确约束,以及古水深变化的约束,Bosboom等(2014a, 2014b)和Zhang Shijie等(2018)指出塔里木盆地在卡拉塔尔组—乌拉根组沉积时期古水深的变化与同时期全球海平面的变化特征是一致的,乌拉根组末期海退和41 Ma全球海平面的快速下降事件也是一致的。因此,乌拉根组末期的大规模海退可能是由全球海平面快速下降事件主导的。但是,通过对帕米尔周缘塔吉克—塔里木盆地不同剖面最终海退时间的精细约束,Carrapa等(2015)、Sun Jimin等(2016a)和Kaya等(2018)则指出,乌拉根组末期自东向西海退的同时,也存在自南向北逐步海退的特征,暗示了此时帕米尔已经开始向北楔入并影响海退过程,所以乌拉根组末期的大规模海退可能主要是受青藏高原西北缘(尤其是帕米尔向北的楔入)构造作用控制的。

3 物源分析的证据、解释与争议

3.1 砾石统计

塔西南区域古近系的砾岩主要发育在喀什群底部,帕米尔的东北缘,自玛尔坎苏河至依格孜牙之间($74^{\circ}\sim76^{\circ}\text{E}$),明显缺乏向东的延续(Chen Xinwei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2019)(图1,图3b)。砾岩沉积起始的时间与阿尔塔什组同时,但是结束的时间却持续到始新世。阿克奇剖面砾石成分统计表明皆为沉积岩砾石,由砂岩和灰岩组成(图3b),缺乏现今西昆仑广泛出露的变质岩和花岗岩的砾石。其中部分灰岩砾石,在薄片下可见到古生代碳酸盐台地的生物碎屑(Zhang Shijie et al., 2019)。

解释与争议:喀什群底部砾岩成分皆为沉积岩砾石,缺乏变质岩和花岗岩砾石,反映了近缘物源区的较浅剥蚀深度,可能是源区断裂活动早期的产物(Zhang Shijie et al., 2019)。现今阿克齐剖面物源区广泛出露的变质岩和花岗岩,并未出现在砾石中,

反映了当时它们尚未被剥蚀出露。

盆地边缘出现大面积的砾岩沉积既可能指示相邻造山带构造的活跃,也可能仅仅成因于气候的变化与水循环的加强(Allen and Heller, 2012)。Chen Xinwei等(2018)和Zhang Shijie等(2018, 2019)根据古新世砾岩主要分布在帕米尔的东北缘,明显缺乏向东的延续,认为这些砾岩反映了帕米尔的隆升与向北楔入。但是Kaya等(2019)认为该阶段的砾岩是海平面下降之后辫状河沉积体系向盆内扩张所致,是区域海平面下降的产物。

3.2 砂岩碎屑组分统计

喀什群海陆过渡相的沉积环境以灰岩段与泥岩、细—粉砂岩段交替沉积为主导,相对缺乏适合进行砂岩碎屑组分统计的样品。因此古近系的研究数据有限。从来自标尔托戈依剖面、奥依塔格剖面和齐木根剖面的定量统计结果来看(图5),白垩系至古近系的样品特征较为近似,主要差异表现在古近系的样品岩屑含量相对较高(Sun Jimin et al., 2016b; Zhang Shijie et al., 2019)。从岩屑组分的含量来看,白垩系和古近系的样品都以火山岩岩屑为绝对主导,其他岩屑含量较少,但是可以看到火山岩岩屑自下向上逐渐增多和受变质作用影响逐渐加强的特征(Sun Jimin et al., 2016b; Zhang Shijie et al., 2019)。

解释:Dickinson碎屑组分判别法是区分大地构造背景常用的参考方法之一(Dickinson, 1985; 胡修棉等,2021)。白垩系至古近系的砂岩碎屑组分转变(Sun Jimin et al., 2016b; Zhang Shijie et al., 2019),说明白垩纪整体以相对稳定的内陆构造背景为主导,至古近纪开始进入前陆盆地阶段(Zhang Shijie et al., 2019)。古近系地层火山岩岩屑开始增多且自下向上受变质作用影响逐渐加强,则反映了物源区剥蚀深度在这个时期逐渐增大。

3.3 碎屑锆石

塔西南地区新生代的碎屑锆石数据已经有了一定的积累,但是针对古近系喀什群的碎屑锆石定年则相对缺乏。区域的基岩锆石U-Pb定年研究表明(图1a),寒武纪—泥盆纪(518~363 Ma)和石炭纪—二叠纪(333~242 Ma)的岩浆岩体主要出露于西昆仑山;晚三叠世(236~212 Ma)的岩浆岩体主要出露于西昆仑以南的卡拉库—麻扎花岗岩带(Karakul—Mazar granitoid belt);白垩纪中期(130~95 Ma)的岩浆岩体主要出露于南帕米尔和羌塘地体;古新世—始新世(63~41 Ma)的岩浆岩体则零星

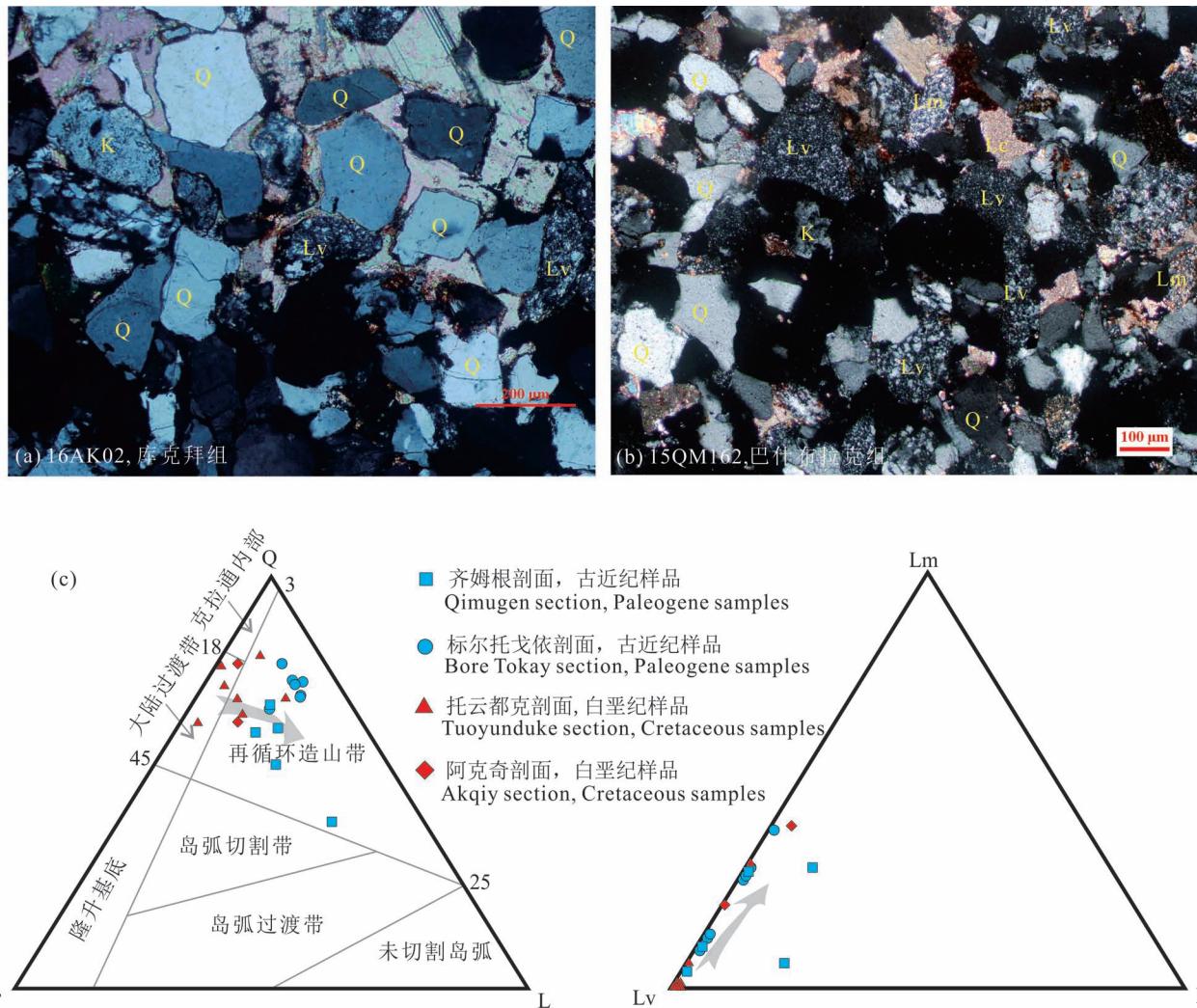


图 5 塔西南地区砂岩碎屑组分特征(据 Zhang Shijie et al., 2019)

Fig. 5 Sandstone petrography in southwestern Tarim Basin (modified from Zhang Shijie et al., 2019)

(a) 典型的晚白垩世砂岩薄片; (b) 典型的始新世砂岩薄片; (c) 塔西南地区白垩—古近纪砂岩碎屑统计的 QFL 图解, 可见古近纪的砂岩比白垩纪的砂岩更富集岩屑。Q = 石英; K = 钾长石; P = 斜长石; L = 岩屑 (Lv = 火山岩岩屑, Ls = 碎屑岩岩屑, Lc = 灰岩岩屑, Lm = 变质岩岩屑)

(a) Typical petrography in Cretaceous sandstone thin section; (b) Typical petrography in Eocene sandstone thin section; (c) the QFL plot and lithic plot of Cretaceous—Paleogene sandstones in southwestern Tarim Basin shows that Paleogene sandstone is more lithic-rich than Cretaceous sandstone. Q = quartz; K = K-feldspar; P = plagioclase; L = lithic fragments (Lv = volcanic, Ls = terrigenous clastic, Lc = carbonate, Lm = metamorphic)

地出露于中帕米尔、阿克赛钦南部和羌塘地体 (Blayney et al., 2016; Sun Jimin et al., 2016b; Yang Wei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2019)。

从目前已有的塔西南区域白垩系和古近系地层的碎屑锆石数据来看(图 6), 白垩系的样品主要以 500~400 Ma 和 300~200 Ma 双峰为主要特征, 明显的缺乏 <200 Ma 的碎屑锆石年龄, 表明其物源区为西昆仑及其以南的卡拉库—麻扎花岗岩带。而古近系的样品中, 500~400 Ma 和 300~200 Ma 特征性双

峰都被明显的削弱, 且自下向上越来越不明显, 并开始出现古新世—始新世(63~41 Ma)的年龄峰和零星的白垩纪中期(97 Ma)的碎屑锆石(Bershaw et al., 2012; Sun Jimin et al., 2016b; Yang Wei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2019)。

解释: 从塔西南地区白垩系—古近系样品的碎屑锆石数据来看(图 6), 一个非常明显的物源区变化出现在古新世。这个变化表现为, 白垩系的样品中普遍不含有中帕米尔、南帕米尔、阿克赛钦南部或

者羌塘地体的碎屑锆石(<200 Ma),但是古近系的样品中则皆有出现(Bershaw et al., 2012; Sun Jimin et al., 2016b; Yang Wei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2019)。结合中帕米尔—阿克赛钦区域晚白垩世的海相沉积(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; Burtman and Molnar, 1993; 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 2000; 罗宇鹏, 2010; Rutte et al., 2017; Zhang Shijie et al., 2019),说明了白垩纪西昆仑作为长期存在的造山带持续地分割两侧塔里木盆地与阿克赛钦—帕米尔的低地。但是这种分割状态在古新世开始被打破,塔里木盆地开始出现中帕米尔、南帕米尔、阿克赛钦南部或者羌塘地体的碎屑锆石。这一物源变化表明,西昆仑山的南部发生了明显的隆升变形,海拔可能已经接近当时的古昆仑山的海拔,使其南部的碎屑矿物可以通过这些区域及其以北的昆仑山,被搬运至塔里木盆地西南部(Sun Jimin et al., 2016b; Zhang Shijie et al., 2019)。

4 热年代学的证据、解释与争议

使用热年代学的方法(如云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,锆石和磷灰石的裂变径迹定年、(U—Th)/He定年等)来约束造山带岩石中矿物的时间—温度演化历史,从而揭示造山带的隆升与剥蚀过程,已经是较为成熟的技术(田朋飞等,2020)。目前针对青藏高原西北缘基岩和碎屑岩的热年代学研究已经有了较多的数据积累。通过获得的不同封闭温度矿物的热年代学年龄以及相关的时间—温度演化路径模拟研究,前人认为中生代以来的青藏高原西北缘的隆升变冷阶段主要集中在三叠纪—早侏罗世(225~170 Ma)、中—晚侏罗世(170~150 Ma)、早白垩世(130~100 Ma)、古新世—始新世(65~40 Ma)、中新世—现今(25 Ma~现今)(Wang Erchie et al., 2003; Robinson et al., 2004, 2007; 黎敦朋, 2008; 刘函等, 2010; Sobel et al., 2011, 2013; Thiede et al., 2013; Cao Kai et al., 2013, 2015; 王聪, 2015; Cheng Xiaogan et al., 2017; Li Guangwei et al., 2019)。

本次笔者等对这些已经发表的来自青藏高原西北缘北帕米尔—西昆仑(西起 72°E ,东至 82°E ,康西瓦断裂以北,塔里木盆地以南)的热年代学年龄进行了汇总,试图在更大的数据量、更广阔的地质背景之下,重新审视中生代以来青藏高原西北缘的隆升变冷阶段。从汇总的数据图中可以看出(图7),

三叠纪—早侏罗世(225~170 Ma)的变冷年龄主要为锆石的裂变径迹年龄,其他热年代学方法对这期隆升变冷事件记录较少。中—晚侏罗世(170~150 Ma)的变冷年龄主要为白云母和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,其他热年代学方法对这期隆升变冷事件也缺乏明显的记录。早白垩世(130~100 Ma)的变冷年龄虽然分散,但是却在黑云母Ar-Ar、锆石裂变径迹、锆石(U—Th)/He、磷灰石裂变径迹四种热年代学方法的研究结果中都有记录。晚白垩世的变冷年龄仅在白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄中有所显示。古新世—始新世的隆升变冷事件同时在锆石裂变径迹、锆石(U—Th)/He、磷灰石裂变径迹三种热年代学方法中都有所记录,但是该变冷事件的延续明显比前人认为的更长(Sobel et al., 2011, 2013; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019),为古新世—中新世早期(~65~15 Ma)。前人所提出的中新世—现今(约25 Ma~现今)的隆升变冷事件在本次的作图中(Wang Erchie et al., 2003; Sobel et al., 2011, 2013; Cheng Xiaogan et al., 2017),主要集中在中新世以来(约15 Ma~现今),并且这期隆升变冷事件在所有的中—低温热年代学方法中都有所记录。

解释与争议:现今普遍认为,西昆仑山的隆升变冷阶段,可能是大陆碰撞远程效应的记录,它们反映了中生代以来亚洲南缘长期的板块碰撞拼贴过程(Dumitru et al., 2001; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019)。三叠纪—早侏罗世(225~170 Ma)、中—晚侏罗世(170~150 Ma)、早白垩世(130~100 Ma)、古新世—始新世(65~40 Ma)的隆升变冷事件分别对应了西昆仑地体与松潘—甘孜地体的碰撞拼贴、羌塘地体与拉萨地体的碰撞拼贴、科西斯坦—拉达克弧与拉萨地体的碰撞拼贴,以及印度与亚洲大陆的碰撞拼贴((Dumitru et al., 2001; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019))。

虽然三叠纪—早侏罗世、中—晚侏罗世、早白垩世的隆升变冷阶段仅在部分热年代学方法中有所记录,但是对其解释的争论目前并不多(Dumitru et al., 2001; Robinson et al., 2004, 2007; Cao Kai et al., 2015; Li Guangwei et al., 2019)。而古新世—中新世早期(65~15 Ma)的变冷年龄,尤其是古新世—始新世(65~45 Ma)的部分,虽然在锆石裂变径迹、锆石(U—Th)/He、磷灰石裂变径迹年龄中都有较好的记录,对其的解释却存在较大的争议。一种观点认为这些年龄反映的是矿物长期存在于部分退

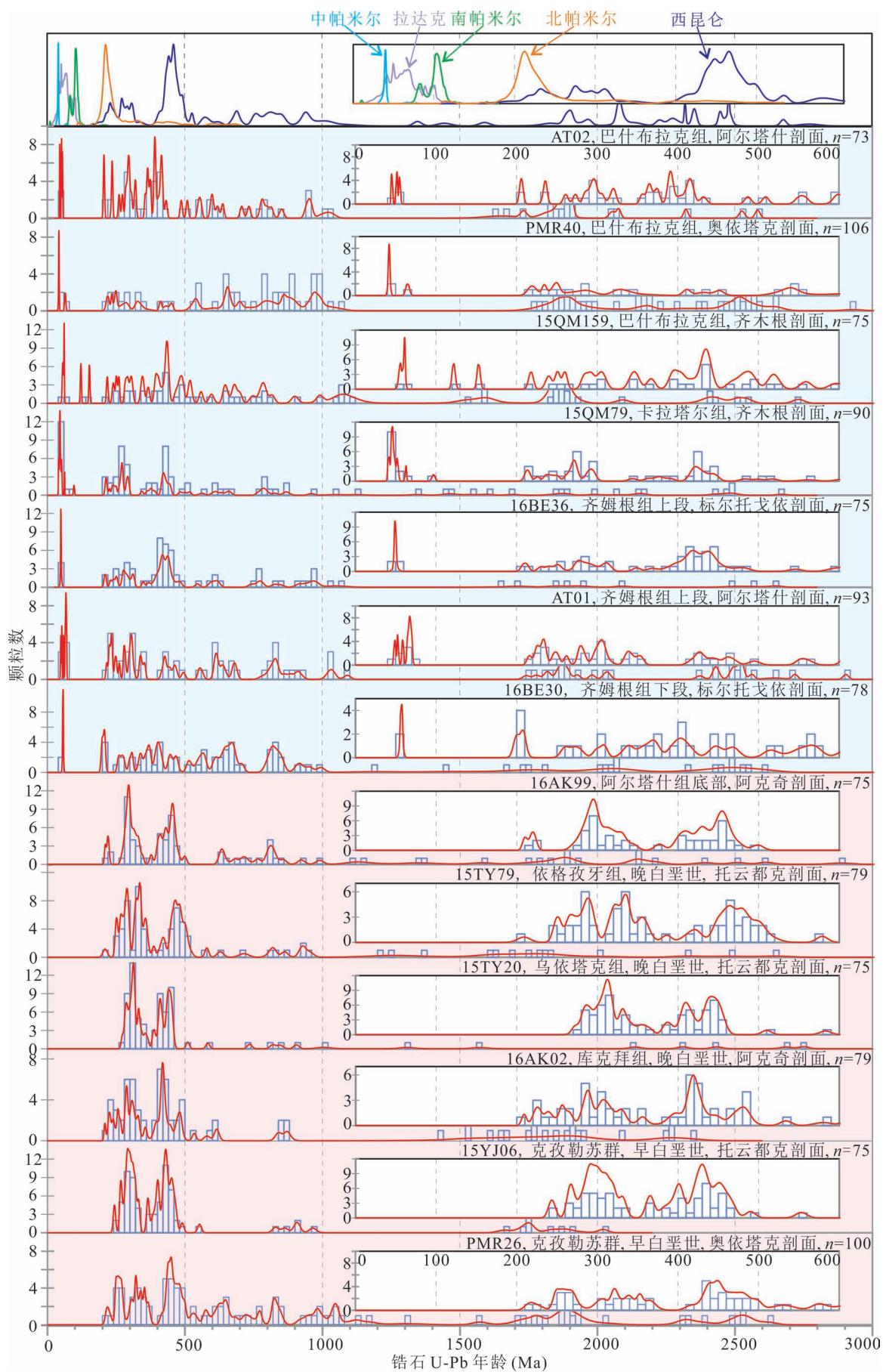


图6 塔里木盆地西南地区白垩系—古近系样品碎屑锆石年龄分布与概率密度曲线图

(据文献 Bershaw et al. , 2012; Yang Wei et al. , 2018; Zhang Shijie et al. , 2019)

Fig. 6 Normalized probability density plots (PDP) for detrital zircon U-Pb ages from Cretaceous—Paleogene sandstones in southwestern Tarim Basin (compiled from Bershaw et al. , 2012; Yang Wei et al. , 2018; Zhang Shijie et al. , 2019)

火区带而产生的部分重置年龄,与快速的隆升剥蚀事件无关(Sobel and Dumitru, 1997; Sobel et al. , 2013; Cao Kai et al. , 2015)。相反的观点则认为这些变冷年龄代表了古近纪早期青藏高原西北缘经历了快速的隆升剥蚀,反映了印度—亚洲大陆初始碰撞在高原西北缘的远程响应(Li Guangwei et al. , 2019; Zhang Shijie et al. , 2019)。

5 西昆仑山新生代早期的隆升 变形时间观点评述

5.1 古新世

从以上对于塔里木盆地西南坳陷及其周缘新生代的地层学、沉积学、物源分析和热年代学综述来看,白垩纪末期或者新生代早期,西昆仑山南部的阿克赛钦—中帕米尔地区发生了海退(中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000;罗宇鹏,2010;Zhang Shijie et al. , 2019)。这些区域在海退之后发

育广泛的不整合与砾岩沉积(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组,1981;中国科学院青藏高原综合科学考察队,2000),并且在海退之后,塔里木盆地就开始接收到甜水海地体、中帕米尔、及其以南的羌塘地体、南帕米尔的碎屑锆石(Sun Jimin et al. , 2016b; Zhang Shijie et al. , 2019)。这些证据指示了晚白垩世阿克赛钦至中帕米尔的地貌低地,在新生代早期经历了快速隆升(可能已经隆升到了接近当时的古昆仑山的海拔),从而使高原内部的碎屑矿物可以通过这些区域及其以北的西昆仑山,被搬运至塔西南地区。

同时,在塔西南坳陷,杜瓦以东的区域开始由剥蚀区(或沉积间歇期)转变为沉积区(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组,1981);而在杜瓦以西,构造沉降速率开始由白垩纪持续地减弱,转变为古新世逐渐增加(Sobel, 1995; Zhang Shijie et al. , 2018)。古新世开始的构造沉降加速,很可能反映

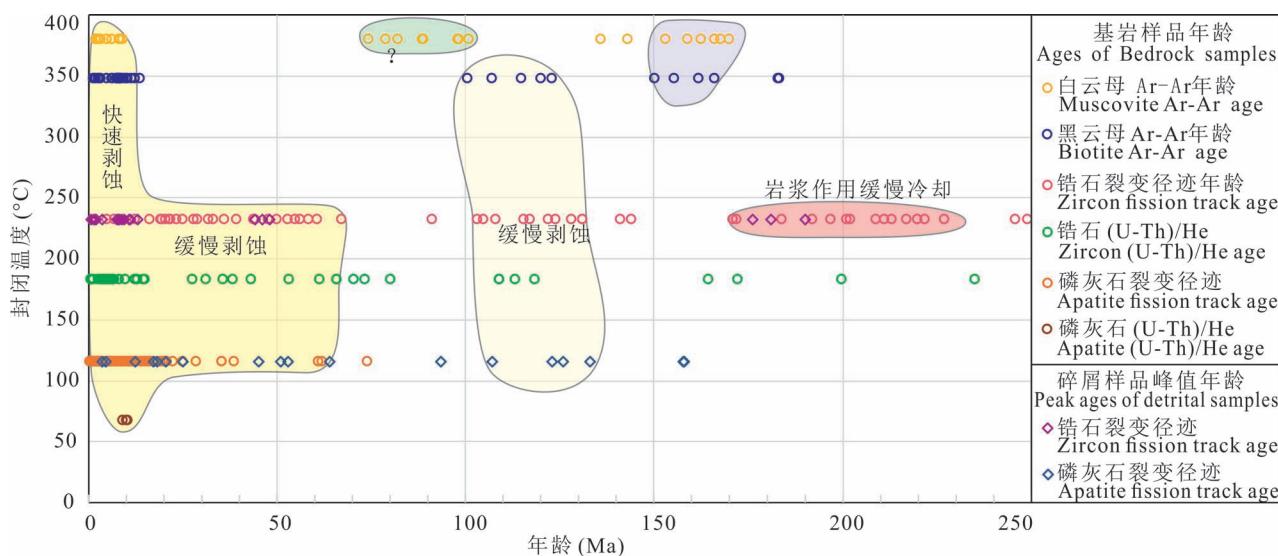


图7 汇总的西昆仑山热年代学年龄—封闭温度图(热年代学数据汇总自参考文献 Wang Erchie et al. , 2003; Robinson et al. , 2004, 2007; 黎敦朋, 2008; 刘函等, 2010; Sobel et al. , 2011, 2013; Thiede et al. , 2013; Cao Kai et al. , 2013, 2015; 王聪, 2015; Cheng Xiaogan et al. , 2017; Li Guangwei et al. , 2019)

Fig. 7 A summarized thermochronological age—closed temperature plot of West Kunlun Mountains (thermochronological data compiled from Wang Erchie et al. , 2003; Robinson et al. , 2004, 2007; Li Dunpeng, 2008&; Liu Han et al. , 2010&; Sobel et al. , 2011, 2013; Thiede et al. , 2013; Cao Kai et al. , 2013, 2015; Wang Cong, 2015&; Cheng Xiaogan et al. , 2017; Li Guangwei et al. , 2019)

了西昆仑山此时已经开始复活，并在前陆区域产生了构造压陷沉降。砂岩的碎屑统计也倾向于支持这种解释。喀什群的砂岩在 QFL 图解中，大多都位于再循环造山带区域，这可以被解释为前陆盆地的构造背景此时已经建立 (Sun Jimin et al., 2016b; Zhang Shijie et al., 2019)。

从沉积环境上来看，此时塔西南坳陷西部(帕米尔的东北缘)开始出现砾岩沉积 (Chen Xinwei et al., 2018; Zhang Shijie et al., 2019)，坳陷内部则开始了大范围、巨厚层的石膏沉积(唐天福等, 1992; 张华等, 2013; 张亮等, 2015; 高超等, 2016; Zhang Shijie et al., 2019)。这可以很直观的解释为古新世帕米尔也开始隆升并向北楔入，在帕米尔和天山之间形成了低海拔的地貌屏障，隔绝了塔里木海与西部原副特提斯海的地表水文通道，从而形成了巨大的盐池，沉积了阿尔塔什组石膏 (Warren, 2016; Zhang Shijie et al., 2019)。

从热年代学上看，无论是基于不同的研究方法 ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年、裂变径迹定年、($\text{U}-\text{Th}$)/He 定年)，不同的样品(基岩、碎屑岩)，不同封闭温度的矿物(白云母、黑云母、锆石、磷灰石)研究，还是基于时间—温度演化路径模拟的研究，都可以识别出古新世—始新世(65~55 Ma)的变冷年龄(Sobel and Dumitru, 1997; Amidon and Hynek, 2010; Cao Kai

et al., 2013; Sobel et al., 2013; Li Guangwei et al., 2019)。一种非常直观的解释就是，这些变冷年龄代表了古近纪早期西昆仑山普遍经历的隆升剥蚀事件 (Amidon and Hynek, 2010; Li Guangwei et al., 2019; Zhang Shijie et al., 2019)。

从综述的地层、沉积、沉降、物源与热年代学相关的地质信息，以及以上相关的地质现象解释，笔者等认为西昆仑山在古新世发生了普遍的隆升变形的观点应该是较为可靠的(图 8)。此时整个亚洲大陆南缘发生的最重大地质事件就是印度—亚洲大陆的初始碰撞(Hu Xiumian et al., 2016; 丁林等, 2017; 胡修棉等, 2017; Kapp and Decelles, 2019; An Wei et al., 2021)，因此，笔者等认为青藏高原西北缘在古新世发生的构造变形事件是印度—亚洲大陆初始碰撞远程效应的响应。

5.2 中—晚始新世

从塔西南地区新生代的地层学、沉积学、物源分析和热年代学综述来看，西昆仑山在中—晚始新世(约 41 Ma)发生了普遍的隆升变形的观点，主要的证据有 4 个。它们分别为来自塔里木盆地的证据：① 解释乌拉根组末期海退(约 41 Ma 塔里木盆地大规模海退)是由于区域构造作用引起的(Carrapa et al., 2015; Kaya et al., 2018; Sun Jimin et al., 2016a, 2020)；② 巴什布拉克组构造沉降速率明显

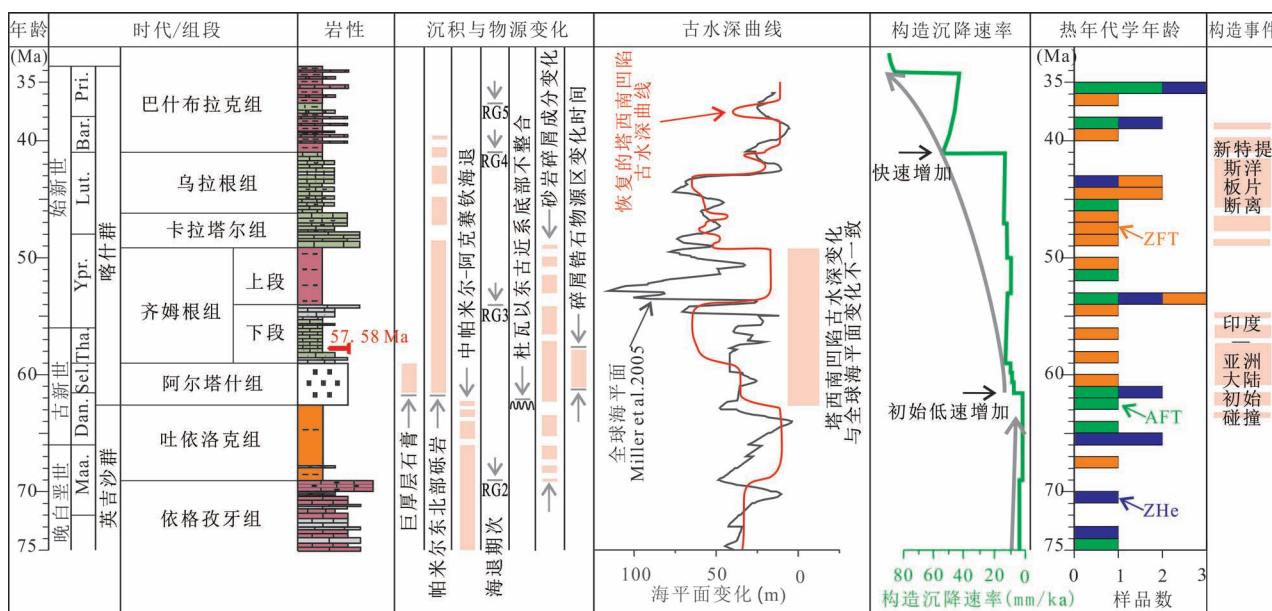


图 8 塔西南地区白垩纪晚期—古近纪的地层、沉积、古水深变化、盆地沉降与热年代学年龄对比图
(修改自文献 Zhang Shijie et al., 2019)

Fig. 8 Comparison of stratigraphy, sedimentation, paleo-water depth, tectonic subsidence and thermochronological ages in the Late Cretaceous—Paleogene southwestern Tarim Basin (modified after Zhang Shijie et al., 2019)

的快速增加(Yin An et al., 2002; Carrapa et al., 2015; Kaya et al., 2018; Blayne et al., 2019)。以及来自塔吉克盆地的证据:③原副特提斯海自东向西的海退,在帕米尔北缘还同时呈现出自南向北逐渐退却的特征,可能指示了此时帕米尔已经开始隆升并向北楔入(Carrapa et al., 2015; Sun Jimin et al., 2016b; Kaya et al., 2018);④塔吉克盆地约41 Ma至渐新统的地层中的砂岩碎屑统计结果在QFL图解中位于再循环造山带区域,指示此时前陆盆地的构造背景已经建立(Carrapa et al., 2015)。

乌拉根组向巴什布拉克组转换时期,构造沉降速率快速增加,但是却发生了塔里木盆地大规模海退(Yin An et al., 2002; Carrapa et al., 2015; Kaya et al., 2018; Blayne et al., 2019)。全球海平面变化恢复曲线表明约41 Ma是全球海平面快速下降的时期(Miller et al., 2005)。因此,比较合理的解释应该为构造沉降加速指示青藏高原西北缘构造变形持续加强,这导致了盆缘加速隆升和沉积物剥蚀供给加速。沉积物供给增加叠合海平面下降使碎屑沉积物快速充填构造沉降所增加的可容纳空间,加剧了区域的海退(Kaya et al., 2018)。

乌拉根组末期(约41 Ma)塔里木—塔吉克盆地虽然发生了大规模海退,但是这并非塔里木—塔吉克盆地最终的海退,在随后的38~36 Ma,塔里木盆地还发生了第五次海侵,最终的海退发生在36 Ma(Bosboom et al., 2014b; Kaya et al., 2018; Wang Xin et al., 2019)。乌拉根组向巴什布拉克组转换时期,虽然在塔西南坳陷局部也出现了沉积间歇,但是并没有区域上的不整合出现。物源分析也并没有发现在此转换时期存在明显的物源区变化。这些证据更倾向于说明41 Ma并没有发生剧烈的构造隆升变形。

关于自南向北的海退与碎屑统计两个证据,Carrapa等(2015)研究剖面的起始时代为始新世中—晚期,因此其研究只能说明前陆盆地的构造背景,至少在此时或之前就已经建立。塔里木盆地喀什群的碎屑统计结果显示前陆盆地的构造背景在白垩纪末期至古近纪早期已经建立(Zhang Shijie et al., 2019),也支持这样的解释结果(图5、图8)。

热年代学的变冷年龄中虽然存在大量的始新世中晚期的锆石裂变径迹、锆石(U—Th)/He和磷灰石裂变径迹年龄,但是它们整体上看明显是古新世—始新世(65~45 Ma)持续剥蚀变冷的延续(图7)。结合塔里木盆地古新世前陆盆地的构造背景

已经建立,本次研究认为西昆仑—帕米尔北缘41 Ma的隆升剥蚀只是青藏高原西北缘古近纪构造变形中的一个加速节点(图8)。此时青藏高原—帕米尔发生的最重要地质事件就是新特提斯洋洋壳的板片断离(Negredo et al., 2007; Smit et al., 2014; Ji Weiqiang et al., 2016),因此本文认为这个时期的构造变形记录可能是亚洲大陆南缘新特提斯洋板片断离在西昆仑山引起的远程响应。

6 结论

(1)西昆仑山是中生代以来长期存在,经历多阶段构造演化的造山带。其新生代的隆升变形始于古新世,中—晚始新世(约41 Ma)的变形只是古近纪构造隆升过程中的一个加速节点。它们引起了区域上地层学、沉积学、物源与热年代学等一系列的地质响应。

(2)通过对比青藏高原南缘印度—亚洲大陆碰撞与北缘西昆仑山构造变形事件之间的时间相关性,本文认为西昆仑山在古新世和中—晚始新世的隆升变形事件,分别是青藏高原南缘印度—亚洲大陆初始碰撞和新特提斯洋的板片断离的远程响应,反映了印度板块向北的碰撞拼贴与持续挤压的过程。

(3)虽然青藏高原内部存在多条深大断裂,且地壳的性质也存在明显的不均一性,但应力不均匀传播、应变差异分配并没有影响到大陆碰撞产生的应力近乎等时的传递到青藏高原的北缘。亚洲大陆南缘的重大构造事件在青藏高原西北缘具有等时的构造变形响应,证实了青藏高原响应印度—亚洲大陆碰撞的构造变形整体上呈连续性的观点。

致谢:感谢孙高远副教授、李伟同志和马合木提·外力同志在野外工作时的帮助。感谢Yani Najman高级讲师对本文富有启发性的讨论与建议。感谢张传林教授和另一位审稿专家的宝贵意见。

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)
- 陈锐明,张克信,陈奋宁,徐亚东,叶荷,陈林. 2011. 新疆其木干剖面新近纪沉积序列与西昆仑隆升的耦合. 地质科技情报, 30 (4): 55~64.
- 丁林, Maksatbek S, 蔡福龙, 王厚起, 宋培平, 纪伟强, 许强, 张利云, Muhammad Q, Upendra B. 2017. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程. 中国科学: 地球科学, 47 (3): 293~309.

- 高超, 曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 徐海明. 2016. 塔里木盆地西南凹陷古新统巨厚海相石膏岩沉积特征及环境意义. 矿床地质, 35 (6): 1217~1229.
- 郝治纯, 曾学鲁. 1984. 从有孔虫的特征探讨中新生代西塔里木古海湾的演变. 微体古生物学报, 1 (1): 1~18.
- 郝治纯, 郭宪璞, 叶留生. 2001. 塔里木盆地西南地区海相白垩系—第三系界线. 北京: 地质出版社.
- 何承全. 1991. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪沟鞭藻及其他藻类. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 胡修棉, 薛伟伟, 赖文, 王建刚, 安慰, 李娟. 2021. 造山带沉积盆地与大陆动力学. 地质学报, 95 (1): 139~158.
- 贾承造. 2009. 环青藏高原巨型盆山体系构造与塔里木盆地油气分布规律. 大地构造与成矿学, 33 (1): 1~9.
- 蓝琇, 魏景明. 1995. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪双壳类动物群. 北京: 科学出版社.
- 黎敦朋. 2008. 青藏高原西北缘上新世—早更新世构造变形与高原隆升. 导师: 胡健民, 赵越. 中国地质科学院博士学位论文.
- 李伟, 胡修棉, Melinte-Dobrinescu M C, BouDagher-Fadel M, 李娟, 张世杰, 许艺炜. 2021. 塔里木海齐姆根剖面早古近纪极热事件及其环境效应. 科学通报, 66 (09): 1067~1082.
- 刘函, 王国灿, 曹凯, 孟艳宁, 王岸, 张克信. 2010. 西昆仑及邻区区域构造演化的碎屑锆石裂变径迹年龄记录. 地学前缘, 17 (3): 64~78.
- 刘善品. 2015. 青藏高原东北缘新生代隆升的时空演化: 贵德、兰州、武山—天水盆地的综合物源研究. 导师: 李吉均. 兰州大学博士学位论文.
- 刘万祥. 1990. 塔里木盆地西南地区上、下第三系的接触关系与乌恰群的时代归属. 新疆石油地质, 11 (1): 23~27.
- 罗宇鹏. 2010. 西藏阿克赛钦地区铁隆滩群(K_2)碳酸盐岩旋回层特征及意义. 导师: 王训练. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展. 矿床地质, 38 (5): 935~969.
- 山西省地质调查院. 2006. 中华人民共和国地质图恰哈幅(1:250000). 北京: 地质出版社.
- 唐天福, 薛耀松, 俞从流. 1992. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪海相沉积特征及沉积环境. 北京: 科学出版社.
- 唐天福, 杨恒仁, 蓝琇, 俞从流, 薛耀松, 张一勇, 魏景明, 胡兰英, 钟石兰. 1989. 新疆塔里木盆地西部白垩纪至早第三纪海相地层及含油性. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 王成善, 戴紧根, 刘志飞, 朱利东, 李亚林, 贾国东. 2009. 西藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展. 地学前缘, 16 (3): 1~30.
- 王聪. 2015. 西昆仑山铁克里克地区新生代构造隆升及沉积响应. 导师: 陈汉林, 程晓敢, 林秀斌. 浙江大学博士学位论文.
- 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. 岩石学报, 24 (1): 1~30.
- 席党鹏, 唐自华, 王雪娇, 覃祚焕, 曹文心, 江滔, 吴宝旭, 栗源浩, 张羸月, 姜文彬, Muhammad K M, 方小敏, 万晓樵. 2020. 塔里木盆地西部白垩纪—古近纪海相地层框架及对重大地质事件的记录. 地学前缘, 27 (06): 165~198.
- 新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表: 新疆维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 稔少丞, 张泽明, 刘焰. 2011a. 印度—亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85 (1): 1~33.
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 戚学祥, 李化启, 蔡志慧. 2011b. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. 岩石学报, 27 (11): 3157~3170.
- 雍天寿, 单金榜. 1986. 白垩纪及早第三纪塔里木海湾的形成与发展. 沉积学报, 4 (3): 67~76.
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓姝. 2019. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应. 地质论评, 65 (5): 1077~1102.
- 张华, 刘成林, 曹养同, 孙宏伟, 王立成. 2013. 塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨. 地球学报, 34 (5): 577~584.
- 张亮, 韩二斌, 朱礼春, 曾昌民, 范秋海, 吴坤, 曹养同, 焦鹏程. 2015. 塔西南坳陷古新统阿尔塔什组蒸发岩沉积旋回特征及控制因素探讨. 地质学报, 89 (11): 2161~2170.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 2000. 喀喇昆仑山—昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社.
- 钟石兰. 1992. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪钙质超微化石. 北京: 科学出版社.
- 周志毅. 2001. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社.
- Allen P A, Heller P L. 2012. Dispersal and preservation of tectonically generated alluvial gravels in sedimentary basins. In: Busby C and Azor A, eds. Tectonics of Sedimentary Basins: 111~130.
- Amidon W H, Hynek S A. 2010. Exhumational history of the north central Pamir. Tectonics, 29.
- An Wei, Hu Xiumian, Garzanti E, Wang Jiangang, Liu Qun. 2021. New precise dating of the India—Asia collision in the Tibetan Himalaya at 61 Ma. Geophysical Research Letters, 48: e2020GL090641.
- Bershaw J, Garzione C N, Schoenbohm L, Gehrels G, Li Tao. 2012. Cenozoic evolution of the Pamir plateau based on stratigraphy, zircon provenance, and stable isotopes of foreland basin sediments at Oytak (Wuyitake) in the Tarim Basin (west China). Journal of Asian Earth Sciences, 44: 136~148.
- Blayne T, Dupont-Nivet G, Najman Y, Proust J N, Meijer N, Roperch P, Sobel E R, Millar I, Guo Zhaojie. 2019. Tectonic evolution of the Pamir recorded in the western Tarim Basin (China): sedimentologic and magnetostratigraphic analyses of the Aertashi section. Tectonics, 38 (2): 492~515.
- Blayne T, Najman Y, Dupont-Nivet G, Carter A, Millar I, Garzanti E, Sobel E R, Rittner M, Andò S, Guo Zhaojie. 2016. Indentation of the Pamirs with respect to the northern margin of Tibet: Constraints from the Tarim basin sedimentary record. Tectonics, 35: 2345~2369.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Huang Wentao, Yang Wei, Guo Zhaojie, Krijgsman W. 2014a. Linking Tarim Basin sea retreat (west China) and Asian aridification in the late Eocene. Basin Research, 26: 621~640.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Kouwenhoven T, Huang Wentao, Yang Wei, Guo Zhaojie. 2014b. Timing, cause and impact of the late Eocene stepwise sea retreat from the Tarim Basin (west China). Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 403: 101~118.
- Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Houben A J P, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Zachariasse W J, Guo Zhaojie, Li Chuanxin, Krijgsman W. 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin

- (west China) and concomitant Asian paleoenvironmental change. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 299: 385~398.
- Burtman V S, Molnar P H. 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. *Geological Society of America Special Paper*, 281:1~76.
- Cao Kai, Wang Guocan, Beek P V D, Bernet M, Zhang Kexin. 2013. Cenozoic thermo-tectonic evolution of the northeastern Pamir revealed by zircon and apatite fission-track thermochronology. *Tectonophysics*, 589: 17~32.
- Cao Kai, Xu Yadong, Wang Guocan, Zhang Kexin, Beek P V D, Wang Chaowen, Jiang Shansong, John Bor-ming. 2014. Neogene source-to-sink relations between the Pamir and Tarim Basin: Insights from stratigraphy, detrital zircon geochronology, and whole-rock geochemistry. *The Journal of Geology*, 122 (4): 433~454.
- Cao Kai, Wang Guocan, Bernet M, Beek P V D, Zhang Kexin. 2015. Exhumation history of the West Kunlun Mountains, northwestern Tibet: Evidence for a long-lived, rejuvenated orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 432: 391~403.
- Carrapa B, DeCelles P G, Wang Xin, Clementz M T, Mancin N, Stoica M, Kraatz B, Meng Jin, Abdulov S, Chen Fahu. 2015. Tectono-climatic implications of Eocene Paratethys regression in the Tajik basin of central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 168~178.
- Chen Ruiming, Zhang Kexin, Chen Fenning, Xu Yadong, Ye He, Chen Lin. 2011 &. Neogene uplift of west Kunlun coupled to the sedimentary succession from Qimugan section, Xinjiang, NW China. *Geological Science and Technology Information*, 30 (4): 55~64.
- Chen Xinwei, Chen Hanlin, Cheng Xiaogan, Shen Zhongyue, Lin Xiubin. 2015. Sedimentology and magnetostratigraphy of the Tierekesazi Cenozoic section in the foreland region of south West Tian Shan in Western China. *Tectonophysics*, 654: 156~172.
- Chen Xinwei, Chen Hanlin, Lin Xiubin, Cheng Xiaogan, Yang Rong, Ding Weiwei, Gong Junfeng, Wu Lei, Zhang Fengqi, Chen Shenqiang, Zhang Yao, Yan Jiakai. 2018. Arcuate Pamir in the Paleogene? Insights from a review of stratigraphy and sedimentology of the basin fills in the foreland of NE Chinese Pamir, western Tarim Basin. *Earth-Science Reviews*, 180: 1~16.
- Cheng Xiaogan, Chen Hanlin, Lin Xiubin, Wu Lei, Gong Jjunfeng. 2017. Geometry and kinematic evolution of the Hotan-Tiklik segment of the western Kunlun thrust belt: Constrained by structural analyses and apatite fission track thermochronology. *The Journal of Geology*, 125: 65~82.
- Chinese Academy of Sciences Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Scientific Expedition Team. 2000 #. *The Geological Formation and Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains*. Beijing: Science Press.
- Compiling Group for Xinjiang Regional Stratigraphic Chart. 1981 #. *Regional Stratigraphic Chart of Northwestern China*, Branch of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House.
- DeCelles P G, Giles K A. 2015. Foreland basin systems. *Basin Research*, 8(2): 105~123.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang Chengfa, Sun Yiyin. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 327: 379~413.
- Dickinson W R. 1985. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones. Netherlands: Springer.
- Ding Lin, Maksatbek S, Cai Fulong, Wang Houqi, Song Peiping, Ji Weiqiang, Xu Qiang, Zhang Liyun, Muhammad Q, Upendra B. 2017 #. Processes of initial collision and suturing between India and Asia. *Science China Earth Sciences*, 47 (3): 293~309.
- Dumitru T A, Zhou Da, Chang E Z, Graham S A, Hendrix M S, Sobel E R, Carroll A R. 2001. Uplift, exhumation, and deformation in the Chinese Tian Shan. *Memoir of the Geological Society of America*, 194: 71~99.
- England P C, Houseman G A. 1988. The Mechanics of the Tibetan Plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 326: 301~320.
- Gao Chao, Cao Yangtong, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Xu Haiming. 2016 &. Sedimentary characteristics of Paleocene huge marine gypsum rock in southwestern depression of Tarim Basin and its environmental significance. *Mineral Deposits*, 35 (6): 1217~1229.
- Graham S, Hendrix M, Wang L, Carroll A. 1993. Collisional successor basins of western China: Impact of tectonic inheritance on sand composition. *Geological Society of America Bulletin*, 105: 323~344.
- Hao Yichun, Guo Xianpu, Ye Liusheng. 2001 #. *The Boundary between the Marine Cretaceous and Tertiary in the Southwest Tarim Basin*. Beijing: Geological Publishing House.
- Hao Yichun, Zeng Xuelu. 1984 &. On the evolution of the west Tarim gulf from Mesozoic to Cenozoic in terms of characteristics of foraminiferal fauna. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1 (1): 1~18.
- He Chengquan. 1991 &. Late Cretaceous-Early Tertiary Microphytoplankton from the Western Tarim Basin in Southern Xinjiang, China. Beijing: Chinese Science Publishing House.
- Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, Sobel E R, McKnight C L, Schulein B J, Wang Zuoxun. 1992. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan Basins, northwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 53~79.
- Hu Xiumian, Garzanti E, Wang Jiangang, Huang Wentao, An Wei, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset—facts, theories, controversies. *Earth-Science Reviews*, 160: 264~299.
- 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.
- Hu Xiumian, Xue Weiwei, Lai Wen, Wang Jiangang, An Wei, Li Juan. 2021 &. Sedimentary basins in orogenic belt and continental geodynamics. *Acta Geologica Sinica*, 95 (1): 139~158.
- 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.
- Jia Chengzao. 2009 &. The structures of basin and range system around the Tibetan Plateau and the distribution of oil and gas in the Tarim Basin. *Geotectonic et Metallogenesis*, 33 (1): 1~9.

- Jiang Xiaodian, Li Zhengxiang. 2014. Seismic reflection data support episodic and simultaneous growth of the Tibetan Plateau since 25 Myr. *Nature Communications*, 5; 5453.
- Kapp P, Decelles P G. 2019. Mesozoic—Cenozoic geological evolution of the Himalayan—Tibetan orogen and working tectonic hypotheses. *American Journal of Science*, 319; 159~254.
- Kaya M Y, Dupont-Nivet G, Proust J N, Roperch P, Bougeois L, Meijer N, Frielings J, Fioroni C, Özkan Altiner S, Vardar E, Barholini N, Stoica M, Aminov J, Mamtimin M, Guo Zhaojie. 2018. Paleogene evolution and demise of the proto-Paratethys Sea in Central Asia (Tarim and Tajik basins): Role of intensified tectonic activity at ca. 41 Ma. *Basin Research*, 31(3); 461~486.
- Lan Xiu, Wei Jingming. 1995 &. Late Cretaceous—Early Tertiary Marine Bivalve Fauna from the Western Tarim Basin. Beijing: Chinese Science Publishing House.
- Li Guangwei, Sandiford M, Fang Aimin, Kohn B, Sandiford D, Fu Bihong, Zhang Tongliang, Cao Yuanyuan, Chen Fei. 2019. Multi-stage exhumation history of the West Kunlun orogen and the amalgamation of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 528; 115833.
- Li Dunpeng. 2008 &. Tectonic deformation on northwestern margin of Tibetan Plateau during Pliocene—Pleistocene and uplift of the Tibetan Plateau. Supervisor: Hu Jianmin, Zhao Yue. Ph. D. Thesis of China University of Geosciences (Beijing).
- Li Wei, Hu Xiumian, Melinte-Dobrescu M C, BouDagher-Fadel M, Li Juan, Zhang Shijie, Xu Yiwei. 2021 &. Early Paleogene hyperthermals and their environmental impacts of Qimugen Section, Tarim Sea. *Chinese Science Bulletin*, 66 (9); 1067~1082.
- Liu Han, Wang Guocan, Cao Kai, Meng Yanning, Wang An, Zhang Kexin. 2010 &. The detrital zircon fission-track ages constraint to tectonic processes in west Kunlun and adjacent regions. *Earth Science Frontiers*, 17 (3); 64~78.
- Liu Shapin. 2015 &. Spatio-temporal evolution of Northeastern Tibetan Plateau: integrated provenance study of the Guide, Lanzhou and Wushan—Tianshui basins. Supervisor: Li Jijun. Ph. D. Thesis of Lanzhou University.
- Liu Wanxiang. 1990 &. Contact relationship between Upper and Lower Tertiary and age ownership of Wuqia Group in the southwest depression of Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 11 (1); 23~27.
- Luo Yupeng. 2010 &. An Preliminary Study of Origins of Red—White Limestone of Late Cretaceous’ Tielongtan Group, Aksai Chin Lake Areas, Northwest Tibet. Supervisor: Wang Xunlian. M. A. Thesis of China University of Geosciences (Beijing).
- Mao Shaozhi, Norris, G. 1988. Late Cretaceous—Early Tertiary dinoflagellates and acritarchs from the Kashi area, Tarim Basin, Xinjiang Province, China. Royal Ontario Museum.
- Mao Wenjing, Yuan Shunda, Xie Guiqing, Song Shiwei, Zhou Qi, Gao Yongbao, Liu Xiang, Fu Xiaofang, Cao Jing, Zeng Zailin, Li Tongguo, Fan Xiyin. 2019 &. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century. *Mineral Deposits*, 38 (5); 935~969.
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, Wright J D, Mountain G S, Katz M E, Sugarman P J, Cramer B S, Christie-Blick N, Pekar S F. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310; 1293~1298.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189; 419~426.
- Negredo A M, Replumaz A, Villaseñor A, Guillot S. 2007. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir—Hindu Kush region. *Earth and Planetary Science Letters*, 259; 212~225.
- Ramstein G, Fluteau F, Besse J, Joussaume S. 1997. Effect of orogeny, plate motion and land—sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature*, 386; 788~795.
- Robinson A C, Yin An, Manning C E, Harrison T M, Zhang Shuanhong, Wang Xiaofeng. 2004. Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 116; 953~973.
- Robinson A C, Yin An, Manning C E, Harrison T M, Zhang Shuanhong, Wang Xiaofeng. 2007. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain—accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan—Tibetan orogen. *Geological Society of America Bulletin*, 119; 882~896.
- Rutte D, Ratschbacher L, Schneider S, Stübner K, Stearns M A, Gulzar M A, Hacker B R. 2017. Building the Pamir—Tibetan Plateau—Crustal stacking, extensional collapse, and lateral extrusion in the Central Pamir: 1. Geometry and kinematics. *Tectonics*, 36; 342~384.
- Shaanxi Geological Bureau. 2006 #. Geological map of the Qiaha area (scale 1 : 250,000). Beijing: Geological Press.
- Smit M A, Ratschbacher L, Kooijman E, Stearns M A. 2014. Early evolution of the Pamir deep crust from Lu-Hf and U-Pb geochronology and garnet thermometry. *Geology*, 42; 1047~1050.
- Sobel E, Chen Jie, Heermance R. 2006. Late Oligocene—Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: Implications for Neogene shortening rate variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 247; 70~81.
- Sobel E R. 1995. Basin analysis and apatite fission-track thermochronology of the Jurassic—Paleogene southwest Tarim Basin. Supervisor: Graham S A. Ph. D. Thesis of Stanford University.
- Sobel E R. 1999. Basin analysis of the Jurassic—Lower Cretaceous southwest Tarim basin, northwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 111; 709~724.
- Sobel E R, Chen Jie, Schoenbohm L M, Thiede R, Stockli D F, Sudo M, Strecker M R. 2013. Oceanic-style subduction controls late Cenozoic deformation of the Northern Pamir orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 363; 204~218.
- Sobel E R, Dumitru T A. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India—Asia collision. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 102; 5043~5063.
- Sobel E R, Schoenbohm L M, Chen Jie, Thiede R, Stockli D F, Sudo M, Strecker M R. 2011. Late Miocene—Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: Implications for Pamir orogenesis. *Earth & Planetary Science Letters*, 304; 369~378.
- Sun Jimin, Windley B F, Zhang Zhiliang, Fu Bihong, Li Shihu. 2016a. Diachronous seawater retreat from the southwestern margin of the Tarim Basin in the late Eocene. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116; 222~231.
- Sun Jimin, Xiao Wenjiao, Windley B F, Ji Weiqiang, Fu Bihong, Wang Jiangang, Jin Chunsheng. 2016b. Provenance change of sediment

- input in the northeastern foreland of Pamir related to collision of the Indian Plate with the Kohistan—Ladakh arc at around 47 Ma. *Tectonics*, 35: 315~338.
- Sun Jimin, Zhang Zhiliang, Cao Mengmeng, Windley B F, Tian Shengchen, Sha Jingeng, Abdulov S, Gadoev M, Oimahmadov I. 2020. Timing of seawater retreat from proto-Paratethys, sedimentary provenance, and tectonic rotations in the late Eocene—early Oligocene in the Tajik Basin, Central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 545: 109657.
- Sun Jimin, Jiang Maosheng. 2013. Eocene seawater retreat from the southwest Tarim Basin and implications for early Cenozoic tectonic evolution in the Pamir Plateau. *Tectonophysics*, 588: 27~38.
- Sun Jimin, Liu Weiguo, Liu Zhonghui, Deng Tao, Windley B F, Fu Bihong. 2017. Extreme aridification since the beginning of the Pliocene in the Tarim Basin, western China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 116: 222~231.
- Sun Jimin, Liu Tungsheng. 2006. The age of the Taklimakan Desert. *Science*, 312: 1621~1621.
- Tang Tianfu, Xue Yaosong, Yu Congliu. 1992 &. *Marine Sedimentary Characteristics and Environments from Late Cretaceous to Early Tertiary in the West Part of Tarim Basin of Xinjiang*. Beijing: Chinese Science Publishing House.
- Tang Tianfu, Yang Hengren, Lan Xiu, Yu Congliu, Xue Yaosong, Zhang Yiyong, Wei Jingming, Hu Lanying, Zhong Shilan. 1989 &. *Marine Late Cretaceous and Early Tertiary Stratigraphy and Petroleum Geology in Western Tarim Basin, China*. Beijing: Chinese Science Publishing House.
- Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang Jingsui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Thiede R C, Sobel E R, Chen Jie, Schoenbohm L M, Stockli D F, Sudo M, Strecker M R. 2013. Late Cenozoic extension and crustal doming in the India—Eurasia collision zone: New thermochronologic constraints from the NE Chinese Pamir. *Tectonics*, 32: 763~779.
- Tian Pengfei, Yuan Wanming, Yang Xiaoyong. 2020 &. The basics, essential concepts and geological applications of thermochronology. *Geological Review*, 66(4): 975~1003.
- Wang Cong. 2015 &. Cenozoic tectonic uplift and sedimentary evolution of the Tiklik area, Western Kunlun orogen. Supervisor: Chen Hanlin, Cheng Xiaogan, Lin Xiubin. Ph. D. Thesis of Zhejiang University.
- 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*, 105: 4987~4992.
- Wang Chengshan, Dai Jingen, Liu Zhifei, Zhu Lidong, Li Yalin, Jia Guodong. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review. 2009 &. *Earth Science Frontiers*, 16 (3): 001~030.
- 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, Wan Jinglin, Liu Jiaqi. 2003. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: Constraints on timing of uplift of northern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B8).
- Wang Xin, Carrappa B, Chapman J B, Henriquez S, Wang Mi, DeCelles P G, Li Zaijun, Wang Fei, Oimuhammadzoda I, Gadoev M, Chen Fahu. 2019. Parathethys last gasp in Central Asia and Late Oligocene accelerated uplift of the Pamirs. *Geophysical Research Letters*, 46 (1): 11773~11781.
- Warren J K. 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Wu Fuyuan, Huang Baochun, Ye Kai, Fang Aimin. 2008 &. Collapsed Himalayan—Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (1): 1~30.
- Xi Dangpeng, Tang Zihua, Wang Xuejiao, Tan Zuohuan, Cao Wenxin, Jiang Tian, Wu Baoxu, Li Yuanhao, Zhang Yingyue, Jiang Wenbin, Muhammad, K. M., Fang Xiaomin, Wan Xiaoqiao. 2020 &. Cretaceous—Paleogene marine stratigraphy framework and its records of significant geologic events in the western Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 27 (06): 165~198.
- Xie Xiangyang, Heller, P. L. 2009. Plate tectonics and basin subsidence history. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 55~64.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Liu Yan. 2011a &. On the Tectonics of the India—Asia Collision. *Acta Geologica Sinica*, 85 (1): 1~33.
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Tang Zhemin, Qi Xuexiang, Li Huaqi, Cai Zhihui. 2011b &. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (11): 3157~3170.
- Yang Wei, Fu Ling, Wu Chaodong, Song Yan, Jiang Zhenxue, Luo Qun, Zhang Ziya, Zhang Chen, Zhu Bei. 2018. U-Pb ages of detrital zircon from Cenozoic sediments in the southwestern Tarim Basin, NW China: Implications for Eocene—Pliocene source-to-sink relations and new insights into Cretaceous—Paleogene magmatic sources. *Journal of Asian Earth Sciences*, 156: 26~40.
- Yin An, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Qing, Zhou Xianqiang, Wang Xiaofeng, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114: 1257~1295.
- Yong Tianshou, Shan Jinbang, 1986 &. The development and formation in the Tarim bay in Cretaceous—Paleogene ages. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4 (3): 67~76.
- Zhang Chuanlin, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Ye Xiantao, Qiu Lin, Zhao Haixiang, Liu Xiaoqiang, Ding Teng, Wang Qian, Hao Xiaoshu. 2019 &. Tectonic evolution of the Western Kunlun—Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect. *Geological Review*, 65 (5): 1077~1102.
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Cao Yangtong, Sun Hongwei, Wang Licheng, 2013 &. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim Bay during the Cenozoic. *Acta Geoscientica Sinica*, 34 (5): 577~584..
- Zhang Liang, Han Erbin, Zhu Lichun, Zeng Changmin, Fan Qiuhan, Wu Kun, Cao Yangtong, Jiao Pengcheng, 2015 &. Characteristics of evaporites sedimentary circles and its controlling factors of paleocene Aertashi formation in the southwestern Tarim depression.

- Acta Geologica Sinica, 89 (11) : 2161~2170.
- Zhang Shijie, Hu Xiumian, Han Zhong, Li Juan, Garzanti E. 2018. Climatic and tectonic controls on Cretaceous—Palaeogene sea-level changes recorded in the Tarim epicontinental sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 501: 92~110.
- Zhang Shijie, Hu Xiumian, Garzanti E. 2019. Paleocene initial indentation and early growth of the Pamir as recorded in the western Tarim Basin. *Tectonophysics*, 772.
- Zheng Hongbo, Wei Xiaochun, Tada R, Clift P D, Wang Bin, Jourdan F, Wang Ping, He Mengying. 2015. Late Oligocene—early Miocene birth of the Taklimakan desert. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112: 7662~7667.
- Zhong Shilan. 1992&. *Calcareous Nannofossils from the Upper Cretaceous and Lower Tertiary in the Western Tarim Basin, South Xinjiang, China*. Beijing: Science Press.
- Zhou Zhiyi. 2001 #. *Stratigraphy of the Tarim Basin*. Beijing: Science Press.

Palaeogene uplift and deformation in West Kunlun Mountains: timing, evidence and controversy

ZHANG Shijie^{1,2,3)}, HU Xiumian³⁾, GAO Zhouquan⁴⁾, ZHAO Yongqiang²⁾, MA Anlin⁵⁾, XU Yiwei³⁾

1) College of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang, Henan, 453007;

2) Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Petroleum Exploration & Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu, 214126;

3) School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023;

4) Yunnan Institute of Geology & Mineral Resources Exploration, Kunming, 650051;

5) Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Abstract: The Cenozoic uplift and deformation process of the West Kunlun Mountains has an important impact on many aspects, including the geomorphology and hydrography evolutions, the distribution of ore deposit and hydrocarbon reservoir, and the climate and environment change in Central Asia. However, there still lack a common understanding on the timing of the initial uplift and deformation in the Cenozoic West Kunlun Mountains, which were proposed to be the Paleocene, the Middle—Late Eocene and the late Oligocene—early Miocene, respectively. This article summarizes the studies of stratigraphy, sedimentology, provenance analysis and thermochronology in the Southwestern Depression in Tarim Basin, and discusses the timing, evidence, explanation and controversy of the Paleocene and Middle—Late Eocene uplift and deformation of the West Kunlun Mountains. On this basis, we determined that the West Kunlun was uplifted in the Paleocene and proposed the Middle—Late Eocene was an accelerated node in the Cenozoic deformation process. These two uplifts and deformations correspond to the remote response of the initial collision of the Indian—Asian continent and the slab breakoff of the Neo-Tethyan subduction respectively, which reflects the process of India—Asia collision and continuous compression of the Indian plate to the north.

Keywords: West Kunlun Mountains; southwestern depression in Tarim Basin; Palaeogene tectonic uplift; sedimentary basins analysis

Acknowledgements: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) for Distinguished Young Scholar (No. 41525007) and Tethys Major Project (No. 91755209)

First author: ZHANG Shijie, male, Ph. D., research area: sedimentology and petrolierous basin analysis; Email: zhangshijie@foxmail.com

Corresponding author: HU Xiumian, male, professor, mainly working on teaching and research of sedimentary geology; Email: huxm@nju.edu.cn

Manuscript received on: 2020-11-18; **Accepted on:** 2021-04-30; **Network published on:** 2021-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.300

Edited by: ZHANG Yuxu