

doi:10.3799/dqkx.2010.088

东昆仑造山带新生代早期构造事件的碎屑裂变径迹年代学证据

王 岸^{1,2}, 王国灿^{1,2}, 张克信^{1,3}, Garver I. John⁴

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

4. Geologic Department of Union College, Schenectady NY 12308, USA

摘要: 东昆仑造山带作为青藏高原北部地貌向北衰减的第一条构造地貌边界, 其新生代构造过程是检验和揭示板块碰撞远程变形效应、机制及空间拓展过程的关键。基于东昆仑造山带系统的碎屑锆石裂变径迹测试分析, 揭示东昆仑造山带新生代早期构造演化过程, 为板块作用远程效应过程提供年代学证据。碎屑裂变径迹分析表明东昆仑造山带前新生代地层在埋藏后经历了古新世—始新世以前的差异性退火作用(约 300~200 °C), 峰值年龄解析获得最年轻峰值年龄(P1)主体集中在 42~59 Ma, 代表了东昆仑造山带锆石裂变径迹差异性退火作用的结束年龄。区域性热历史重建及区域资料一致表明, 古新世—始新世阶段, 东昆仑造山带发生了区域性构造隆升作用, 表明东昆仑造山带在印度欧亚板块碰撞后随即成为青藏高原岩石圈(地壳)变形的前缘, 这进一步暗示了青藏高原岩石圈地壳变形具有明显的刚性块体特征, 而现今地壳流动变形特征可能是地壳分层加厚、多圈层多机制共同作用的结果。

关键词: 裂变径迹; 构造隆升; 新生代; 东昆仑。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2010)05-0737-10

收稿日期: 2010-05-31

An Early Cenozoic Tectonic Event in Eastern Kunlun Orogen, Evidence from Detrital Fission Track Geochronology

WANG An^{1,2}, WANG Guo-can^{1,2}, ZHANG Ke-xin^{1,3}, GARVER I. John⁴

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Geologic Department of Union College, Schenectady NY 12308, USA

Abstract: The eastern Kunlun Orogen, as a southernmost morphotectonic transition belt of northward attenuation in topographic relief across the northern Tibetan plateau, is a key area in examining and recovering the processing and mechanisms of the far-field lithospheric deformation. In this paper, we try to illustrate the Early Cenozoic tectonic processing in the eastern Kunlun Orogen based on a systematic detrital zircon fission track (ZFT) study. It is indicated that widely distributed pre-Cenozoic strata in the study area experienced a ZFT differential resetting (~300–200 °C) at around Paleocene-Eocene postdating their burying. Binomial fitting for the single grain ages yielded youngest peak ages (P1) that mainly fall between 42–59 Ma, which corresponds to a ceasing timing for the differential resetting of detrital. Regional thermal history. Relevant data concordantly suggest that the eastern Kunlun Orogen experienced a regional tectonic uplift in Paleocene-Eocene, which coincides with the timing of the Indian-Asian collision, which implies that the Kunlun Orogen occurred as a deformation frontier instantly as the Indian plate collided with Asian plate. Our study provides an evidence that the Tibetan lithosphere (or crust) deformation at early stage is essentially of rigid plate, rather than the present day of significant continuous deformation, which might be a

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 1212010610103, 200313000005); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40902060, 40921062)。

作者简介: 王岸 (1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事活动构造、构造地貌及构造热年代学研究。E-mail: anwang@hotmail.com

combined result by several mechanisms of lithospheric layers thickened respectively.

Key words: fission track; tectonic uplift; Cenozoic; eastern Kunlun Orogen.

0 引言

青藏高原的崛起源于始新世以来印度板块与欧亚板块的碰撞、持续挤压和岩石圈俯冲作用(Rowley, 1998; Lin *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2005; 许志琴等, 2006). 双倍于正常地壳厚度的硕大高原形成演化过程及其变形机制是青藏高原基础地质科学的问题之一,也是当前大陆动力变形过程研究的核心问题(李德威和庄育勋, 2006). 长期以来围绕青藏高原的构造变形存在两种端元机制: 第一种是刚性块体不连续变形方式(Tapponnier and Molnar, 1976; Tapponnier *et al.*, 2001); 第二种是粘性体连续变形方式(England *et al.*, 1988; Jade *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004). 刚性块体将青藏高原地壳或岩石圈视为内部稳定的刚性体, 变形集中在块体边界. 因其较好地解释和预言了高原南北系列大型走滑断裂构造, 故得到了学界广泛认可. 然而, 大型断裂构造走滑速率、高原内部构造变形等定量化结果与刚性块体变形的预期相差较远(张培震等, 2002; Wang *et al.*, 2009a); 连续变形方式则认为青藏高原的构造变形是由南向的北的渐进拓展过程. 近期 GPS 观测数据表明青藏高原地壳物质运动表现为连续变形特征(Wang *et al.*, 2001; Jade *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004), 中下地壳塑性流动变形的提出使广大学者意识到粘性体变形机制对青藏高原构造演化的控制作用(李德威, 2003; 余绍立等, 2006; 王椿镛等, 2008). 两种变形机制的形成演化及彼此对青藏高原岩石圈变形的贡献有待更多、更广泛的研究予以揭示.

东昆仑造山带位于青藏高原北部边缘, 是青藏高原构造域高地势向北衰减的第一条构造地貌边界. 其新生代构造被认为是印度与欧亚板块碰撞挤压作用的远程效应(戴霜等, 2005; Dayem *et al.*, 2009). 东昆仑造山带是认识新生代青藏高原岩石圈远程变形过程和机制的重要窗口之一. 然而目前东昆仑造山带何时以及如何隆升仍然莫衷一是. 李海兵和杨经绥(2004)认为青藏高原北部在白垩纪阶段就开始了隆升作用; 而依据阿尔金断裂走滑转换, Wang(1997)认为青藏高原北部隆升主要发生在中新世以来; 地貌学研究则认为青藏高原北缘造山带隆升主要发生在新世以来(李吉均等, 2001; 向树元等, 2003). 尽管青藏高原东北部地区已有不同程度的低温热年代学研

究(柏道远等, 2003; 王国灿等, 2003; 郑德文等, 2003; 袁万明等, 2004; 王岸等, 2007; 王国灿等, 2007), 然而新生代以来的热冷却过程仍然缺乏系统论述, 新生代早期的构造演化过程知之甚少. 本文旨在通过碎屑锆石裂变径迹年代学方法, 揭示东昆仑造山带新生代早期的冷却剥露过程, 为新生代早期青藏高原岩石圈地壳远程变形的过程和方式提供年代学依据.

1 地质背景

1.1 地质概况

东昆仑造山带近东西向横亘于青藏高原北部, 划分了北部柴达木盆地和南侧的高原腹地, 是高原北部边缘一条重要的构造地貌边界. 东昆仑造山带是一条复合造山带, 经历了加里东、印支期缝合构造和新生代活化造山(殷鸿福和张克信, 1997). 在构造上由两条造山带走向的大型断裂构造带(昆中构造带和阿尼玛卿构造带)划分为 3 个构造单元, 由北向南依次是: 昆北构造单元、昆中构造单元和巴颜喀拉构造单元(图 1). 新生代东昆仑造山带更多受控于东昆仑断裂等大型走滑断裂控制的左行走滑挤压作用. 研究区内东昆仑断裂沿昆仑山前近东西向延伸, 西大滩断裂构成东昆仑断裂的分支, 近东西向沿西大滩谷地延伸. 两条断裂均为左行活动走滑断裂, 曾发生多期强震事件(Lin *et al.*, 2002). 研究区活动断裂构造与谷地、断块相间排列的地貌格局匹配良好, 体现出大型断裂构造对现今东昆仑造山带的控制(Wang *et al.*, 2009b).

1.2 样品采集

野外在穿越造山带的近 NS 向的剖面上, 以 5~10 km 为水平间距, 100~200 m 高差间距, 共采集 16 件样品. 样品分布从柴达木盆地边缘延伸至高原腹地, 高程分布范围为 3 100~4 900 m. 上述样品覆盖了东昆仑造山带主要构造地层单元, 由北向南依次包括昆北、昆南、巴颜喀拉构造单元以及划分三者界限的昆中和阿尼玛卿构造带(图 1).

如图 1 所示, 南侧巴颜喀拉构造单元包括 3 件样品, 其中 YK4900 与 YK4665 位于东昆仑活动断裂以南, YK4815 位于东昆仑断裂以北的昆仑主脊中部. 阿尼玛卿构造带的 2 件样品(YK4515、YK4405)位于西大滩南侧山前不同高程. 昆南构造单元包括 7 件样品, 其中 2 件样品(YK4203、YK-3)

表 1 锆石裂变径迹样品及年龄测试结果
Table 1 ZFT samples and dating results

样号	经度	纬度	高程(m)	峰值年龄(Ma)	年龄(Ma)	岩性
YK4900	35°38. 71′	94°4. 21′	4 900	69. 8±4. 2(28)/152. 9±19. 2(5)	76. 3±6. 1(33)	变砂岩
YK4815	35°38. 50′	94°4. 25′	4 815	54. 6±3. 5(12)/74. 9±4. 5(20)/116. 7±7. 6(10)	74. 9±5. 1(42)	变砂岩
YK4665	35°41. 03′	94°2. 91′	4 665	46. 9±3. 0(13)/87. 5±4. 8(17)	64. 8±5. 6(31)	变砂岩
YK4515	35°41. 91′	94°16. 68′	4 515	21. 6±1. 9(5)/51. 5±2. 8(23)/95. 9±6. 3(8)	55. 5±5. 4(37)	变砂岩
YK4405	35°42. 28′	94°16. 96′	4 405	26. 7±3. 7(6)/37. 1±5. 3(12)/69. 8±4. 2(23)	50. 4±4. 1(41)	变砂岩
YK-3*	35°44. 20′	94°10. 76′	4 352	—	67. 8±7. 7(16)	二长花岗岩
YK4203	35°44. 38′	94°16. 38′	4 203	42. 0±4. 2(8)/85. 2±5. 4(11)	62. 4±6. 4(19)	变砂岩
YK4000	35°47. 77′	94°20. 40′	4 000	47. 9±4. 5(11)/89. 4±6. 3(12)	62. 3±5. 7(25)	变砂岩
YK3693	35°52. 25′	94°27. 14′	3 693	—	63. 1±4. 0(9)	花岗岩闪长岩
YK3501	35°54. 12′	94°37. 79′	3 501	35. 0±3. 4(6)/52. 1±3. 4(10)/72. 8±4. 4(13)/102. 4±7. 4(11)	65. 6±5. 2(40)	变砂岩
YK3418	35°54. 71′	94°46. 32′	3 418	58. 9±3. 8(12)/93. 6±5. 7(14)	71. 2±6. 2(27)	变砂岩
YK3335	35°58. 27′	94°49. 04′	3 335	53. 5±3. 8(5)/90. 3±6. 2(3)	64. 1±7. 5(8)	变砂岩
YK-4*	36°1. 89′	94°48. 78′	3 260	—	207. 6±11. 0(15)	闪长岩
YK3225	36°8. 70′	94°46. 97′	3 225			
YK3137	36°7. 99′	94°47. 39′	3 137	—	76. 2±8. 2(6/5/5)	二长花岗岩
YK-5*	36°8. 02′	94°47. 32′	3 140			

注:峰值年龄列由小到大列出了各峰值年龄,相应颗粒数列于年龄右侧,小于 3 个颗粒峰值未列入;年龄列中给出了碎屑类样品的中值年龄或侵入岩样品的池年龄及颗粒总数;侵入岩样品年龄计算方法依据卡方概率检验分别取池年龄($P(\chi^2)\geq 1\%$)或者中值年龄($P(\chi^2)<1\%$),年龄误差均为 1 σ ;YK3225、YK3137 和 YK-5 为同一岩体不同高程样品,因可分析颗粒较少而合并。

<1%),则进一步对实际颗粒年龄分布进行二项式拟合分析,解析出系列峰值年龄.峰值年龄较之于单一的中值年龄或均值年龄往往具有明确地质意义.

现有的研究表明裂变径迹退火作用的影响因素众多,例如时间、温度、压力、矿物成分以及辐射损伤等,其中温度无疑是最重要因素(Gleadow and Duddy, 1981; Green *et al.*, 1986; Garver and Kamp, 2002; Spiegel *et al.*, 2007).例如磷灰石裂变径迹一般超过 110±10 ℃即可认为发生完全退火,尽管裂变径迹退火作用在一定温度区间(部分退火带)都存在,但是对于碎屑锆石颗粒而言,颗粒之间各种物理、化学特征差异性使得颗粒之间产生差异性退火行为.最近的研究表明,锆石 α 辐射损伤是影响其退火作用的一个重要因素(Kasuya and Naeser, 1988; Garver and Kamp, 2002; Garver *et al.*, 2005).裂变径迹的热稳定性随辐射损伤的增加而降低,即伴随矿物辐射积累,锆石裂变径迹越发易于退火,从而有效降低了锆石裂变径迹的退火温度(Rahn *et al.*, 2004; Garver *et al.*, 2005).高辐射损伤的锆石裂变径迹退火温度可低至 180~200 ℃,而低辐射损伤的锆石可高达 280~300 ℃(Bernet and Garver, 2005; Garver *et al.*, 2005).因此对于碎屑锆石样品而言,由于碎屑锆石来源复杂,颗粒之间放射性元素(U、Th 等)含量差异,使得累计辐射损伤也不尽相同,因而在部分退火带温度区间内,颗粒之间将不

可避免地发生差异性退火行为,即高辐射损伤且低退火温度的颗粒发生退火,而低辐射损伤高退火温度的颗粒不发生退火或者仅发生部分退火,从而使得碎屑样品形成特殊的颗粒年龄分布.

3 结果

如上所述,碎屑锆石样品由于颗粒来源复杂,裂变径迹年龄往往为多组分特征.本文获得的碎屑类样品锆石裂变径迹年龄卡方检验值均小于 1%,表明上述样品的裂变径迹年龄具有多组分特征.通过 BinomFit 软件对上述碎屑类样品进行峰值年龄拟合解析(拟合解析方法详见 Galbraith and Green (1990); Brandon (1992)),获得了一系列峰值年龄(表 1、图 2).花岗岩类样品作为单一年龄结构处理,依据卡方值给出池年龄或中值年龄.

锆石裂变径迹年龄结果表明(表 1),昆北构造单元二叠纪侵入岩体(二长花岗岩)的锆石裂变径迹年龄为 76. 2±8. 2 Ma,昆中构造带内闪长岩脉体(YK-4)的锆石裂变径迹年龄为 207. 6±11. 0 Ma,昆南构造单元小南川侏罗纪二长花岗岩体(YK3693)裂变径迹年龄为 63. 1±4. 0 Ma,西大滩北侧三叠纪二长花岗岩体(YK-3)锆石裂变径迹年龄为 67. 8±7. 7 Ma.碎屑类样品的锆石裂变径迹中值龄介于 50. 4~76. 3 Ma.

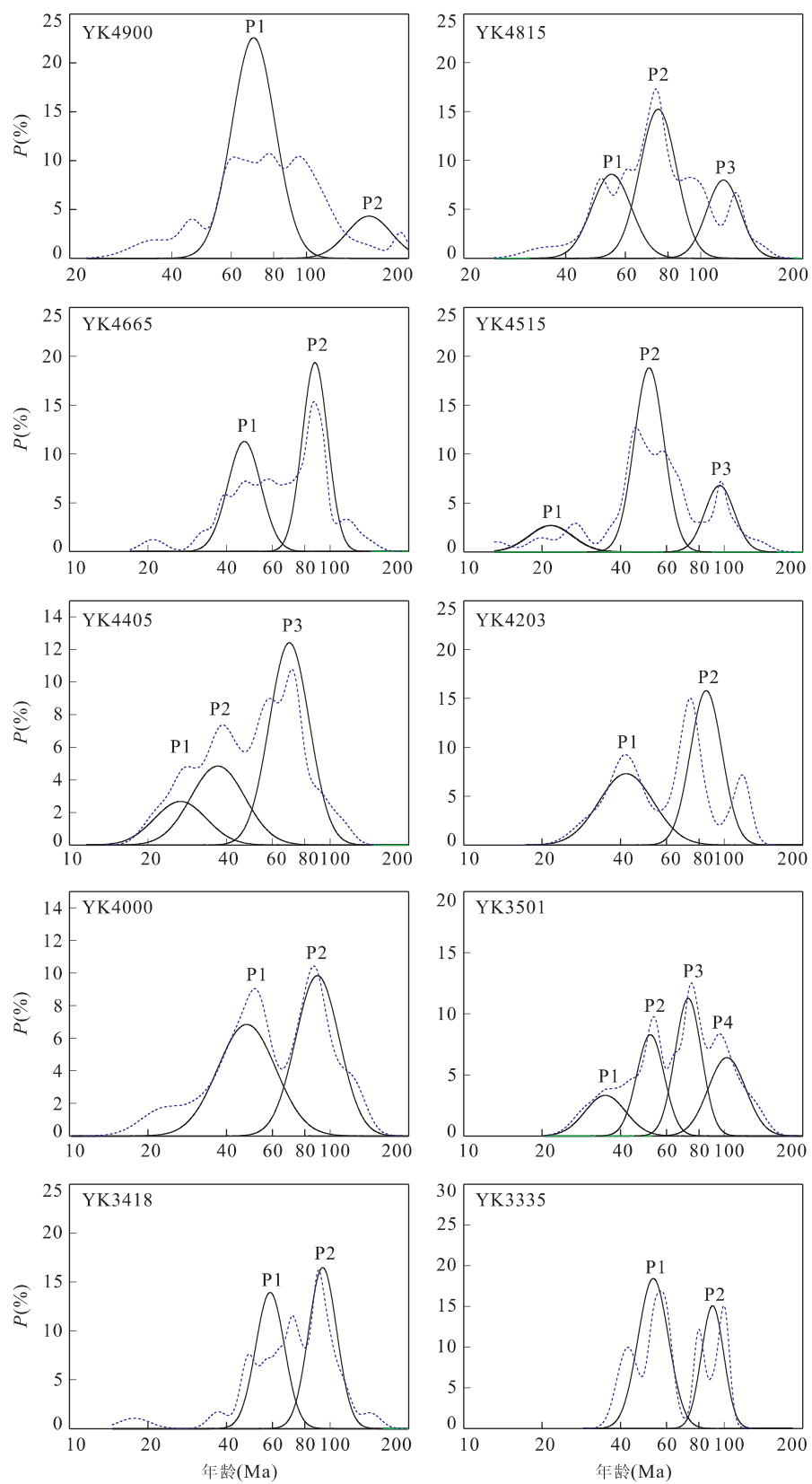


图 2 碎屑岩样品锆石裂变径迹年龄分布及峰值拟合

Fig. 2 Single-grain-age distributions and peak fitting of detrital ZFT

虚线为实际年龄分布, 实线为二项式拟合峰值年龄分布; 峰值年龄从小到大依次标识为 P1、P2、P3、P4. 仅给出大于 3 个颗粒的峰值年龄

4 讨论

4.1 差异性退火作用

实际上的裂变径迹封闭温度并非一个特定温度值或狭窄的温度区间,而是与矿物物理、化学性质及冷却速率相关的一个温度区间。碎屑锆石颗粒之间的各种差异使得碎屑锆石颗粒退火温度参差不齐。笔者把不同颗粒发生退火作用的温度区间称为差异性退火带。如果碎屑样品经历的最高温度超过该差异性退火温度的最高值(例如 $>300^{\circ}\text{C}$),所有原始裂变径迹将发生完全退火作用,裂变径迹年龄作为热重置年龄记录该热事件。如果温度在差异退火温度范围内,裂变径迹将发生差异性退火行为,即较低退火温度的颗粒组分将发生完全退火,形成热重置年龄从而记录该热事件,而较高退火温度的颗粒组分不发生退火或发生部分退火,从而保留或部分保留原始源区的年龄信息。对于碎屑锆石样品而言,一般温度达到或超过 200°C 时,都会发生低退火温度的颗粒组分的退火作用,因而差异性退火的碎屑样品,其最年轻的峰值年龄一般代表了低退火温度颗粒组分所记录的热事件年龄(Brandon and Vance, 1992)。

年龄结果显示,碎屑类样品颗粒年龄分布非常分散,分布范围一般从早白垩世至中新世,部分样品存在侏罗纪以前的年龄,所有碎屑样品单颗粒年龄的卡方检验值均小于 1% ,这说明样品年龄为非单一组分,因此样品沉积后经历的最高温度不超过差异性退火带的最高温度。另一方面,上述碎屑样品的单颗粒年龄均显著小于相应地层沉积年龄(图 1, 2),这又说明样品沉积后经历了热退火作用,使得部分原始裂变径迹发生了退火作用。因此裂变径迹中值年龄为受后期热事件影响的混合年龄,并不具备明确的地质意义。上述年龄结构及特征表明样品经历的最高温度介于锆石裂变径迹差异性退火带,使得锆石颗粒发生了差异性退火作用,理论上 P1 年龄代表了差异性退火作用结束的年龄。

4.2 差异性构造隆升

裂变径迹年龄数据显示东昆仑造山带岩石的冷却剥露与主要断裂构造之间存在显著的相关性,总体表现为位于东昆仑断裂和西大滩断裂之间的现代主脊具有明显的差异性抬升。

裂变径迹样品分布由南向北跨越研究区,总体高程逐渐降低,但是裂变径迹的 P1 年龄与高程并非正相关(图 3),最年轻的 P1 年龄并非属于高程最低的样品,而是位于东昆仑断裂与西大滩断裂之间

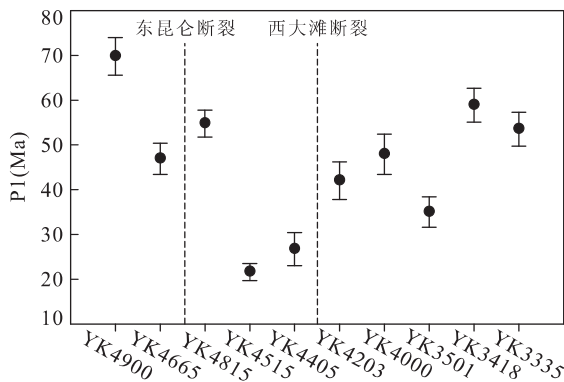


图 3 碎屑类样品锆石裂变径迹 P1 峰值年龄分布

Fig. 3 P1 age distribution of detrital ZFT samples

的昆仑主脊一带较低高程的 2 件样品(YK4515、YK4405),其 P1 峰值年龄为 $21.6 \pm 1.9 \text{ Ma}$ 、 $26.7 \pm 3.7 \text{ Ma}$ 。而西大滩以北的昆南、昆北构造单元的 P1 年龄相对一致,介于 $35.0 \sim 59.0 \text{ Ma}$,并未显示特殊的空间分布规律。这说明东昆仑断裂与西大滩断裂之间的现代昆仑主脊块体具有明显的差异性隆升剥露作用,构成现今昆仑造山带地区的隆升中心,这与现今的地质地貌(王岸等, 2007; Wang *et al.*, 2009b)和地表水准测量结果(王庆良等, 2004)不谋而合。尽管昆中构造带在地质上特征显著,但本文获得的锆石裂变径迹年代数据表明新生代以来昆中断裂不存在明显的活动性。昆中断裂带内的变形闪长岩脉体(YK-4)具有明显较老的锆石裂变径迹年龄,为 207.6 Ma ,至少表明新生代断裂带内锆石裂变径迹没有发生热重置,同时断裂两盘之间的裂变径迹年龄格局也不存在明显的差异性,而构造地貌分析也表明昆中断裂明显缺乏活动性(Wang *et al.*, 2009b)。因此昆中断裂带新生代以来可能逐渐趋于稳定。

4.3 古新世—始新世区域性冷却剥露与构造隆升

从碎屑锆石裂变径迹颗粒年龄分布(表 1)来看,中生代晚期东昆仑区域上处于缓慢的剥露状态。碎屑样品普遍保存有侏罗纪—白垩纪的锆石裂变径迹年龄,昆中构造带内裂变径迹年龄甚至为晚三叠纪($207.6 \pm 11.0 \text{ Ma}$, YK-4),这说明研究区造山带物质新生代以前长期处于锆石裂变径迹差异性退火温度区间以内(约 $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$),因而不存在明显的构造隆升剥露作用。昆北二叠纪花岗岩侵入体锆石裂变径迹年龄为 $76.2 \pm 8.2 \text{ Ma}$,而其钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为约 219 Ma (Mock *et al.*, 1999),鉴于钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 封闭温度仅略高于锆石裂变径迹,因此白垩纪阶段的岩石冷却幅度非常有限。昆南构造单元具有类似的特征,西大滩谷地一带侵入岩多

个黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代为131~135 Ma(Mock *et al.*, 1999; 吴珍汉等, 2005), 钾长石⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为102~146 Ma(Mock *et al.*, 1999), 在西大滩北侧和小南川岩体获得的锆石裂变径迹年龄分别为 67.8 ± 7.7 Ma、 63.1 ± 4.0 Ma. 其冷却速率为约 $1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (以黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar封闭温度 300°C , 锆石裂变径迹封闭温度 240°C 计算). 由此可见研究区白垩纪冷却剥露作用异常缓慢, 推测地表剥蚀作用也十分微弱, 东昆仑造山带地势比较缓和, 构造稳定, 缓慢的剥蚀作用主要由区域性气候控制.

如前所述, 介于东昆仑断裂和西大滩断裂之间昆仑主脊差异性构造隆升作用, 使得昆仑主脊单元样品的P1年龄异常年轻, 为 21.6 ± 1.9 Ma、 26.7 ± 3.7 Ma. 其他碎屑类锆石裂变径迹P1峰值年龄主体位于42~59 Ma之间(表1, 图2). 考虑昆仑主脊一带的差异性构造隆升, P1峰值年龄分布应当覆盖整个东昆仑造山带, 从东昆仑断裂以南一直延续到昆北单元. P1峰值年龄的区域性分布特征本身也说明, 东昆仑造山带在该阶段发生了区域性的冷却剥露作用. 如前所述, P1年龄代表锆石颗粒最后发生差异性退火行为的年代, 如果认为锆石裂变径迹发生差异性退火行为的最低温度约为 $200 \pm 20^{\circ}\text{C}$, 那么上述P1年龄代表了东昆仑区域性岩石冷却至该温度以来的时间.

研究区区域性岩石冷却曲线表明(图4), 中生代大部分时间研究区构造稳定, 区域地层处于埋藏加热阶段, 区域最高埋藏温度不超过约 300°C , 处于锆石裂变径迹差异性退火区间, 新生代早期阶段开始折返, 古新世—始新世阶段研究区区域性冷却脱离锆石裂变径迹差异性退火温度区间. 该冷却事件在时间上与印度欧亚板块碰撞时间基本一致, 表明东昆仑造山带在印度欧亚板块碰撞后随即成为远程变形前缘. Yuan *et al.* (2006)在东昆仑东段都兰一带南北向剖面上获得众多磷灰石裂变径迹年龄也都集中在这个阶段, 王国灿等(2007)在东昆仑巴隆一带的磷灰石裂变径迹分析也印证了56~45 Ma阶段的构造隆升作用. 柴达木盆地同期开始堆积路乐河组(~ 50.5 Ma)地层, 岩性主体为紫红色、暗红色砾岩、砂砾岩, 且与下伏白垩系地层角度不整合(Fang *et al.*, 2007; 尹安等, 2007). 张克信等(2007)和Zhang *et al.* (2010)基于青藏高原北缘系列盆地沉积时空演化, 认为古新世—始新世青藏高原北部昆仑山一带形成隆起带, 并逐渐向东扩展. 由此可见, 造山带岩石冷却与盆地沉积均一致表明, 东昆仑造山带与印度欧亚板块碰撞作用同期发生了区

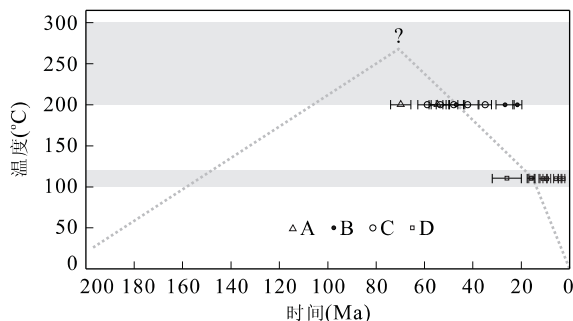


图4 东昆仑造山带区域地层构造热历史

Fig. 4 Regional thermal history of eastern Kunlun orogen
A. 东昆仑断裂南侧巴颜喀拉构造单元P1年龄; B. 东昆仑断裂与西大滩断裂之间的巴颜喀拉与阿尼玛卿构造单元(昆仑主脊)P1年龄; C. 西大滩断裂以北昆南、昆北构造单元P1年龄; D. 磷灰石裂变径迹年龄(据Wang *et al.*, 2004; 吴珍汉等, 2005; 王岸等, 2007). 图中以约200 Ma作为样品沉积年代, 阴影条带分别代表碎屑锆石差异性退火温度与磷灰石裂变径迹封闭温度区间, 虚线表示区域性构造热历史

域性的构造隆升. 河西走廊盆地底部地层年代学研究也表明祁连山最晚在40.2 Ma成为印度欧亚板块变形的前沿(戴霜等, 2005).

作为印度欧亚板块碰撞作用的实时远程效应, 古新世—始新世阶段的构造隆升表明东昆仑造山带成山作用过程耦合于印度欧亚板块碰撞挤压作用, 青藏高原岩石圈地壳的变形具有明显的刚性特征, 而不类似于粘性体的连续变形. 而现今青藏高原的连续变形特征则可能是地壳分层加厚到一定程度, 地壳不同圈层相互作用的结果.

5 结论

对东昆仑造山带地区主要沉积地层及侵入体的锆石裂变径迹测试分析表明, 广泛出露的中生界地层锆石裂变径迹普遍发生差异性退火作用, 使其年龄小于其地层沉积年代. 峰值年龄解析获得的最小峰值年龄(P1, 主体约为42~59 Ma)代表区域地层发生差异性退火的最晚年龄. P1年龄区域性特征及大量区域资料均表明古新世—始新世阶段东昆仑造山带地区存在区域性的构造隆升, 使得研究区地层冷却至锆石裂变径迹差异性退火温度区间以下($< 200 \pm 20^{\circ}\text{C}$). 尽管该阶段冷却剥露幅度的定量信息仍不清楚, 但这次构造隆升作用与印度欧亚板块碰撞作用时间基本一致, 表明东昆仑造山带在印度欧亚板块碰撞作用后随即成为青藏高原岩石圈变形的前缘, 这同时也暗示青藏高原岩石圈构造变形具有明显刚性块体特征.

此外, 裂变径迹年龄格局与现今的活动断裂及

构造地貌空间上匹配良好,P1 年龄结构表明东昆仑断裂与西大滩断裂之间的昆仑主脊至少在中新世以来具有显著的差异隆升。

致谢:本研究野外工作得到了向树元、郑雷雷等同行鼎力协助,样品测试工作得到了中国原子能科学研究院、中国地震局地质所地震动力学国家重点实验室支持,在此表示衷心感谢。

References

- Bai, D. Y., Meng, D. B., Liu, Y. R., et al., 2003. Apatite fission-track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet plateau. *Chinese Geology*, 30 (3): 240—246 (in Chinese with English abstract).
- Bernet, M., Garver, J. I., 2005. Fission-track analysis of detrital zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 205—237. doi:10.2138/rmg.2005.58.8
- Brandon, M. T., 1992. Decomposition of fission-track grain-age distributions. *American Journal of Science*, 292: 535—564.
- Brandon, M. T., Vance, J. A., 1992. Tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex, Washington State, as deduced from fission track ages for detrital zircons. *American Journal of Science*, 292: 565—636.
- Dai, S., Fang, X. M., Song, C. H., et al., 2005. Early stage tectonic uplift of the northern Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 50(7): 673—683 (in Chinese).
- Dayem, K. E., Molnar, P., Clark, M. K., et al., 2009. Far-field lithospheric deformation in Tibet during continental collision. *Tectonics*, 28, TC6005. doi: 10.1029/2008TC002344
- England, P. C., Houseman, G. A., Osmaston, M. F., et al., 1988. The mechanics of the Tibetan plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series A)*, 326(1589): 301—320.
- Fang, X. M., Zhang, W. L., Meng, Q. Q., et al., 2007. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala Section in the eastern Qaidam basin on the NE Tibetan plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1—2): 293—306. doi:10.1016/j.epsl.2007.03.042
- Galbraith, R. F., Green, P. F., 1990. Estimating the component ages in a finite mixture. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation (Part D)*, 17(3): 197—206.
- Garver, J. I., Kamp, P. J. J., 2002. Integration of zircon color and zircon fission-track zonation patterns in orogenic belts: application to the southern Alps, New Zealand. *Tectonophysics*, 349 (1—4): 203—219. doi: 10.1016/S0040-195(02)00054-9
- Garver, J. I., Reiners, P. W., Walker, L. J., et al., 2005. Implications for timing of Andean uplift from thermal resetting of radiation-damaged zircon in the Cordillera Huayhuash, northern Peru. *Journal of Geology*, 113: 117—138. doi:10.1086/427664
- Gleadow, A. J., Duddy, I. R., 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks*, 5(1—2): 169—174.
- Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J., et al., 1986. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. A qualitative description. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 59 (4): 237—253. doi: 10.1016/0168-9622(86)90074-6
- Jade, S., Bhatt, B. C., Yang, Z., et al., 2004. GPS measurements from the Ladakh Himalaya, India: preliminary tests of plate-like or continuous deformation in Tibet. *GSA Bulletin*, 116(11—12): 1385—1391.
- Kasuya, M., Naeser, C. W., 1988. The effect of alpha-damage on fission-track annealing in zircon. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 14(4): 477—480.
- Li, D. W., 2003. A new model for uplifting mechanism of Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 593—600 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Zhuang, Y. X., 2006. Scientific problems of continental dynamics in the Qinghai-Tibet plateau. *Geological Science and Technology Information*, 25 (2): 1—10, 18 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Yang, J. S., 2004. Evidence for Cretaceous uplift of the northern Qinghai-Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 345—359 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., Fang, X. M., Pan, B. T., et al., 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 21 (5): 381—391 (in Chinese with English abstract).
- Lin, A. M., Fu, B. H., Guo, J. M., et al., 2002. Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 M_s 8.1 Central Kunlun earthquake. *Science*, 296 (5575): 2015—2017. doi:10.1126/science.1070879
- Lin, D., Kapp, P., Xiao, Q. W., 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, South Central Tibet. *Tectonics*, 24 (3). doi: 10.1029/2004TC001729
- Mock, C., Arnaud, N. O., Cantagrel, J. M., 1999. An early

- unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qianghai, NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, 171(1): 107–122. doi: 10.1016/S0012-821X(99)00133-8
- Rahn, M. K., Brandon, M. T., Batt, G. E., et al., 2004. A zero-damage model for fission-track annealing in zircon. *American Mineralogist*, 89(4): 473–484.
- Rowley, D. B., 1998. Minimum age of initiation of collision between India and Asia north of Everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain Section. *Journal of Geology*, 106: 229–235.
- Spiegel, C., Kohn, B., Raza, A., et al., 2007. The effect of long-term low-temperature exposure on apatite fission track stability: a natural annealing experiment in the deep ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(18): 4512–4537. doi: 10.1016/j.gca.2007.06.060
- Tapponnier, P., Molnar, P., 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264 (5584): 319–324. doi: 10.1038/264319a0
- Tapponnier, P., Xu, Z. Q., Roger, F., et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294(5547): 1671–1677. doi: 10.1126/science.105978
- Wang, A., Wang, G. C., Xie, D. F., et al., 2007. Fission track geochronology of Xiaonanchuan pluton and the morphotectonic evolution of eastern Kunlun since Late Miocene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A., Wang, G. C., Li, D. W., et al., 2009a. Tectonic landform of Quaternary lakes and its implications for deformation in the northern Qinghai-Tibet plateau. *Acta Geologica Sinica*, 83 (1): 121–129. doi: 10.1111/j.1755-6724.2009.00014.x
- Wang, A., Wang, G. C., Zhang, K. X., et al., 2009b. Late Neogene mountain building of eastern Kunlun orogen; constrained by DEM analysis. *Journal of Earth Science*, 20 (2): 391–400. doi: 10.1007/s12583-009-0032-1
- Wang, C. Y., Lou, H., Lü, Z. Y., et al., 2008. S-wave crustal and upper mantle's velocity structure in the eastern Tibetan plateau—deep environment of lower crustal flow. *Science in China (Ser. D)*, 38(1): 22–32 (in Chinese).
- Wang, E. Q., 1997. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(1–2): 55–64. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00085-X
- Wang, F., Lo, C. H., Li, Q., et al., 2004. Onset timing of significant unroofing around Qaidam basin, northern Tibet, China; constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and FT thermochronology on granitoids. *Journal of Asian Earth Science*, 24(1): 59–69. doi: 10.1016/j.jseas.2003.07.004
- Wang, G. C., Xiang, S. Y., Garver, J. I., et al., 2003. Uplift and exhumation during Mesozoic in Halaguole-Hatu area, east segment of eastern Kunlun Mountains: evidence from zircon and apatite fission-track ages. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28 (6): 645–652 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Xiang, S. Y., Wang, A., et al., 2007. Thermochronological constraint to the processes of the East Kunlun and adjacent areas in Mesozoic-Early Cenozoic. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 605–614, 680 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. L., Wang, J. H., Zhu, G. Z., et al., 2004. Vertical deformations of the eastern Kunlun fault zone and west of Kunlun Mountain pass M_8 1 earthquake. *Seismology and Geology*, 26(2): 273–280 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhang, P. Z., Freymueller, J. T., et al., 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294 (5542): 574–577. doi: 10.1126/science.1063647
- Wu, Z. H., Hu, D. G., Song, B., et al., 2005. Ages and thermochronological evolution of the North Xidatan granite in the South Kunlun Mts. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 628–635 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, S. Y., Wang, G. C., Deng, Z. L., 2003. Deposit response to important tectonic events of Cenozoic plateau uplift, east segment of eastern Kunlun Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 615–620 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Qi, X. X., et al., 2006. India-Asia collision: a further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas. *Geological Bulletin of China*, 25(1–2): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Dang, Y. Q., Chen, X. H., et al., 2007. Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam basin: evidence from seismic profiles. *Journal of Geomechanics*, 13(3): 193–211 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1997. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 339–342 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. L., Ji, J. Q., Chen, J. J., et al., 2006. Lower crust flow and large-scale geomorphology of Qinghai-Tibet plateau. *Geological Science and Technology Information*, 25 (5): 1–7, 20 (in Chinese with English abstract).

- Yuan, W. M., Zhang, X. T., Dong, J. Q., et al., 2004. Apatite fission track evidence on the uplifting of eastern Kunlun Mountains. *Atomic Energy Science and Technology*, 38(2): 166—168 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Dong, J. Q., Wang, S. C., et al., 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(6): 847—856. doi:10.1016/j.jseaes.2005.09.002
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Chen, F. N., et al., 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 583—597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji, J. L., et al., 2010. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau. *Science in China (Earth Sciences)*, 53(9): 1271—1294. doi:10.1007/s11430-010-4048-2.
- Zhang, P. Z., Wang, Q., Ma, Z. J., 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 442—450 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Shen, Z., Wang, M., et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809—812.
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2003. Late Cenozoic deformation subsequence in northeastern margin of Tibet—detrital AFT records from Linxia basin. *Science in China (Ser. D)*, 33(Suppl.): 190—198 (in Chinese).
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its mechanism. *Science in China (Ser. D)*, 26(4): 289—295 (in Chinese).
- Zhu, B., Kidd, W. S. F., Rowley, D. B., et al., 2005. Age of initiation of the India-Asia collision in the East-Central Himalaya. *Journal of Geology*, 113(3): 265—285.

附中文参考文献

- 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 等, 2003. 青藏高原北缘昆仑山中段构造隆升的磷灰石裂变径迹记录. *中国地质*, 30(3): 240—246.
- 戴霜, 方小敏, 宋春晖, 等, 2005. 青藏高原北部的早期隆升. *科学通报*, 50(7): 673—683.
- 李德威, 2003. 青藏高原隆升机制新模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 593—600.
- 李德威, 庄育勋, 2006. 青藏高原大陆动力学的科学问题. *地质科技情报*, 25(2): 1—10, 18.
- 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.

- 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等, 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 21(5): 381—391.
- 王岸, 王国灿, 谢德凡, 等, 2007. 东昆仑山小南川岩体裂变径迹年代与中新世晚期以来的构造地貌演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 51—58.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 等, 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构——下地壳流的深部环境. *中国科学(D 辑)*, 38(1): 22—32.
- 王国灿, 向树元, Garver, J. I., 等, 2003. 东昆仑东段哈拉郭勒—哈图一带中生代的岩石隆升剥露——锆石和磷灰石裂变径迹年代学证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 645—652.
- 王国灿, 向树元, 王岸, 等, 2007. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(5): 605—614, 680.
- 王庆良, 王建华, 朱桂芝, 等, 2004. 东昆仑山断裂带及昆仑山口西 8.1 级地震垂直形变研究. *地震地质*, 26(2): 273—280.
- 吴珍玘, 胡道功, 宋彪, 等, 2005. 昆仑山南部西大滩盆北花岗岩的年龄与热历史. *地质学报*, 79(5): 628—635.
- 向树元, 王国灿, 邓中林, 2003. 东昆仑东段新生代高原隆升重大事件的沉积响应. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 615—620.
- 许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 等, 2006. 印度/亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论. *地质通报*, 25(1—2): 1—14.
- 尹安, 党玉琪, 陈宣华, 等, 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释. *地质力学学报*, 13(3): 193—211.
- 殷鸿福, 张克信, 1997. 东昆仑造山带的一些特点. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(4): 339—342.
- 余绍立, 季建清, 陈建军, 等, 2006. 下地壳流变层对青藏高原及其周边大尺度地貌的制约. *地质科技情报*, 25(5): 1—7, 20.
- 袁万明, 张雪亭, 董金泉, 等, 2004. 东昆仑隆升作用的裂变径迹研究. *原子能科学技术*, 38(2): 166—168.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等, 2007. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(5): 583—597.
- 张培震, 王琪, 马宗晋, 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. *地学前缘*, 9(2): 442—450.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2003. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. *中国科学(D 辑)*, 33(增刊): 190—198.
- 钟大赉, 丁林, 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D 辑)*, 26(4): 289—295.