

doi:10.3799/dqkx.2012.098

库车盆地中新世代构造演化:磷灰石裂变径迹证据

罗 梦,朱文斌,郑碧海,朱晓青

南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验,南京大学地球科学系,江苏南京 210093

摘要:通过对库车河剖面 14 个样品磷灰石裂变径迹的测试,研究了库车盆地及其源区的构造演化。根据表观年龄和地层年龄关系,将结果分成 8 个退火样品和 6 个碎屑样品。退火样品年龄从北向南从 136~93.7 Ma,记录了构造发育自造山带向盆地扩展的运动样式。其中 09dk-6,09dk-7,09dk-8 和 09dk-11 未通过 X^2 检验,分析认为与后期构造活动有关,分解得到最年轻的年龄组记录了库如力向斜,捷斯德里克背斜和阿合断层分别在 74.4 Ma、24.2 Ma 和 50.8 Ma 的最新一期活动。碎屑磷灰石得到了 250 Ma、160 Ma 和 100 Ma 3 个明显的静态峰。结合热模拟研究表明,研究区存在 250 Ma、160 Ma、100 Ma 和 20 Ma 四期构造隆升,是对亚洲南缘多期地体碰撞增生的响应。

关键词:库车盆地;磷灰石;裂变径迹;剥露;构造演化。

中图分类号: P546

文章编号: 1000-2383(2012)05-0893-10

收稿日期: 2012-05-19

Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of the Kuqa Basin: Evidence from Apatite Fission-Track Data

LUO Meng, ZHU Wen-bin, ZHENG Bi-hai, ZHU Xiao-qing

State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Fourteen samples were collected from the Kuqa River section for apatite fission track analysis in order to investigate the thermal history of the Kuqa Basin and its sedimentary provenance. By comparing the apparent ages of samples with the related strata ages, the samples can be divided into two groups: the annealed group and the detrital group (unreset samples). The AFT ages become younger from 136 Ma to 93.7 Ma from the Tianshan Mountain to the Kuqa Basin, probably recording a basin-ward propagation of the thrust-fold belt. Samples 09dk-6, 09dk-7, 09dk-8 and 09dk-11 failed the X^2 test likely due to the subsequent tectonic deformation. The youngest ages extracted from these samples probably record the latest activities of the Kuruli Syncline, Jiesidelike Anticline and the A'ge Fault at 74.4 Ma, 24.2 Ma and 50.8 Ma, respectively. The detrital samples have three peak ages at 250 Ma, 160 Ma and 100 Ma respectively. Thermal history modeling reveals four periods of denudation at 250 Ma, 160 Ma, 100 Ma and 20 Ma in the Kuqa basin and the Tianshan Mountains. The multi-stage denudation is linked to far-field effects resulted from the collision and accretion of terranes along the southern Asian continental margin.

Key words: the Kuqa basin; apatite; fission track; exhumation; tectonic evolution.

库车前陆冲断带以其独特的构造位置及其和油气资源的重要关系,引起了地质学家的广泛关注。前人已对库车前陆冲断带构造背景、构造单元和构造样式与构造变形特征构造有深入的研究,但对变形起始发生时间还存在分歧。沉积学研究依据粗碎屑沉积物的形成时代,推断冲断带缩短变形发生的时间在 20 Ma 左右 (Yin *et al.*, 1998; Charreau

et al., 2006; Huang *et al.*, 2006)。运用断层相关褶皱和生长地层理论得到库车前陆冲断带各构造带的形成时间从 25~1.8 Ma (刘志宏等, 1999, 2000)。Avouac *et al.* (1993)、Abdrakhmatov *et al.* (1996) 和 Reigber *et al.* (2001) 根据 GPS 观测结果结合 Avouac 的研究成果计算出来的天山地区缩短变形开始的时间应在 10 Ma 左右。相对天山及邻区

大量的低温热年代学研究,对库车前陆冲断带的磷灰石裂变径迹研究(贾承造等, 2003; 杨树锋等, 2003; 杜治利等, 2007)却为数不多,受采样位置和采样密度的限制,其研究结论也存在较大分歧. 本文试图通过对库车河剖面完整取样以获得构造带的变形起始时间.

1 地质背景与采样位置

库车前陆冲断带从北向南大体上可以划分为北部单斜带、斯的克背斜带、克一依构造带、拜城—阳霞凹陷带和南部秋立塔格背斜带(图 1)(田作基和宋建国, 1999; 卢华复等, 2000; 林畅松等, 2002). 09dk-1 和 09dk-2 样品采自天山南缘冲断带, 09dk-1 为海西期花岗岩, 09dk-2 为小铁干里克群中酸性熔岩. 北部单斜带与天山南缘冲断带相连的, 该带构成库车再生前陆逆冲带与南天山造山带的北部边界. 自北向南主要表现为由中等倾斜的二叠系、三叠系和侏罗系地层所构成的南倾单斜带. 采自该带的 09dk-6 为三叠系塔里齐克组砂砾岩. 斯的克背斜带位于北部单斜带以南, 在库车河剖面中该带由北面捷斯德里克背斜和南面的比尤勒包谷孜背斜组成, 09dk-7 砂岩采自该带灰绿色黄山街组. 克一依构造带是构造变形最复杂的一个带. 研究区由北部巴什基奇克背斜、库姆格列木背斜和南部吉迪克背斜、喀桑托开背斜构成, 样品 09dk-8、09dk-11 和 09dk-12 分别为阿合组、阳霞组和恰克马克组砂岩. 样品 09dk-22 为西域组灰褐色块状中一粗砾岩, 采自拜

城—阳霞凹陷带. 该凹陷带是克一依构造带与南部秋立塔格背斜带之间的向斜构造, 也是沉积厚度最大的构造带. 秋立塔格背斜带是库车前陆逆冲带中最长的背斜带, 也是整个逆冲带的前锋构造带, 主要由新生界地层组成, 采自该带的 09dk-15 为西域组砂砾岩, 09dk-21 吉迪克组含砾砂岩. 野外采样使用便携式 GPS 定位、标高. 采样的平面分布位置和剖面位置如图 2 所示.

2 裂变径迹原理和实验方法

2.1 原理

磷灰石是岩石中常见的副矿物, 其中的放射性元素发生裂变在矿物晶格中形成辐射损伤区, 称为裂变径迹. 裂变径迹初始长度基本一致, 在受热条件下(如深埋或地温升高)会发生退火作用而变少、变短. 当温度高于 110~125 ℃径迹将完全退火而清除. 其后, 当样品冷却到部分退火带 110~60 ℃(Naeser, 1979; Gleadow *et al.*, 1986; Green *et al.*, 1989; Dumitru, 1990), 裂变径迹重新形成. 由于部分退火带跨越了较宽的区间, 因此结合年龄和径迹长度可反映样品经历的热事件的复杂历史(Laslett *et al.*, 1987; Gallagher, 1995; Ketcham *et al.*, 1999; Ketcham *et al.*, 2007).

碎屑磷灰石裂变径迹是根据热年代学原理, 以沉积地层中未退火的颗粒为研究对象. 盆地中沉积的碎屑颗粒年龄不但记录了丰富的源区岩体抬升、剥露的信息, 而且还能制约可能的沉积物源区

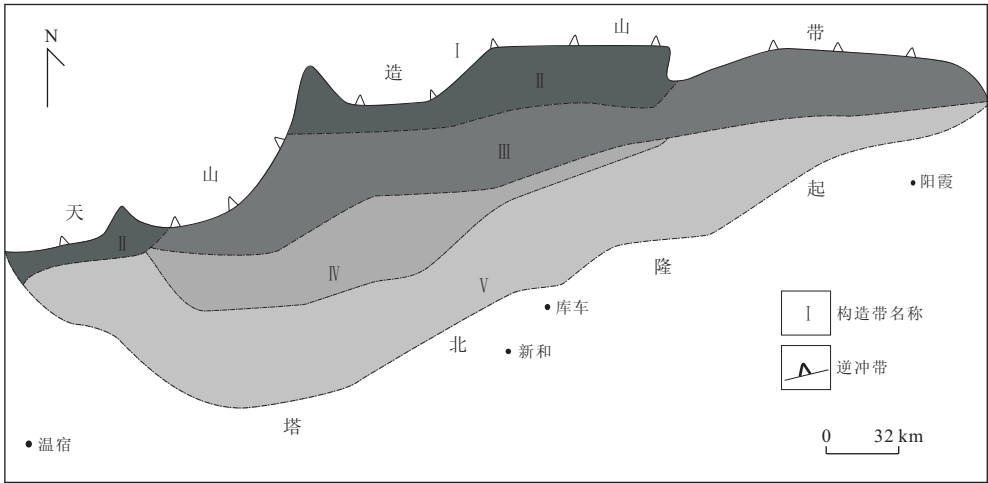


图 1 库车再生前陆盆地前陆变形带构造单元(据卢华复等, 1999 修改)

Fig. 1 Structures in the deformation belt of the Kuqa rejuvenation foreland basin

构造带: I. 北部单斜带; II. 斯的克背斜带; III. 克一依构造带; IV. 拜城—阳霞凹陷带; V. 秋里塔格构造带

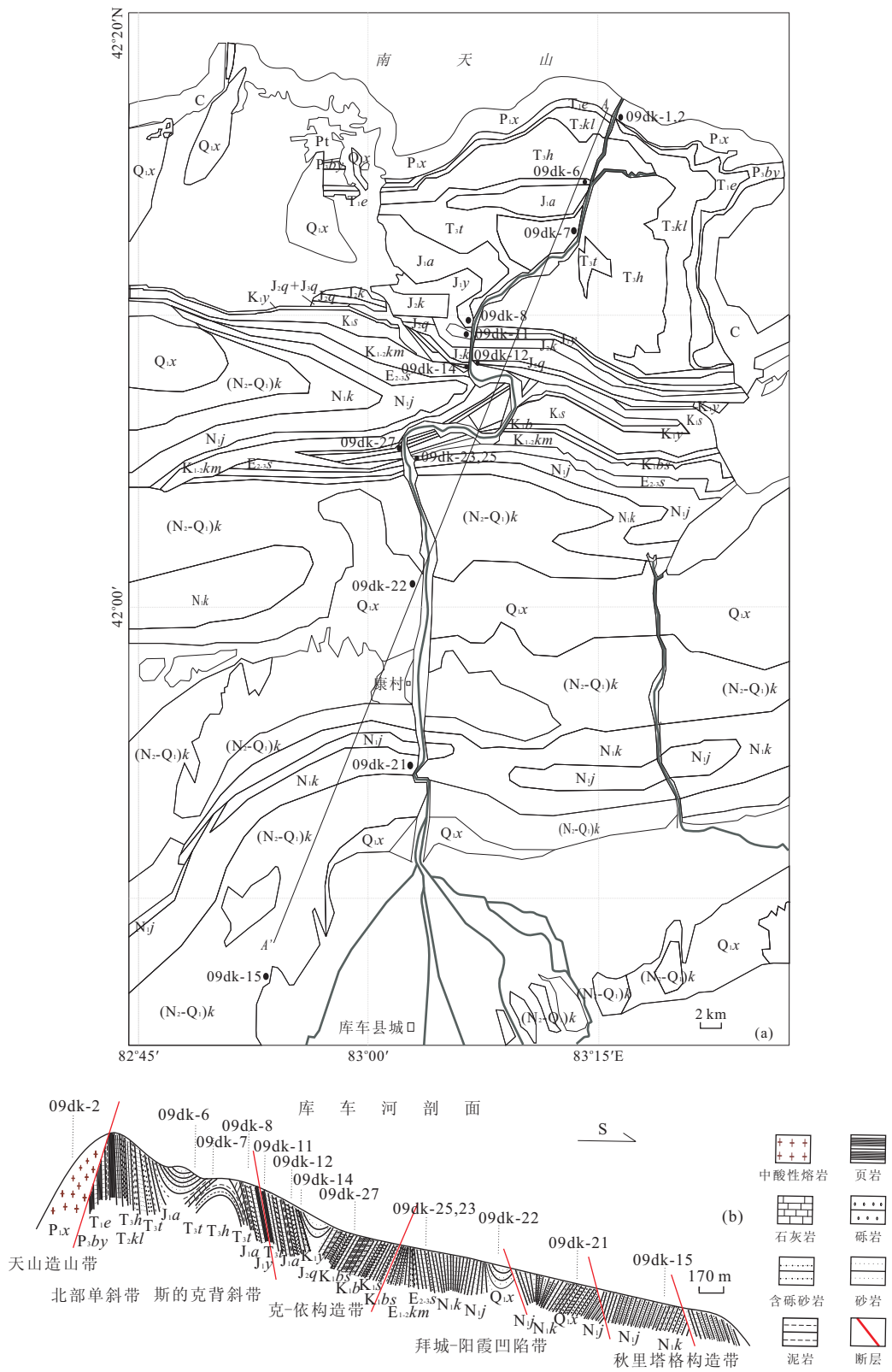


图2 库车河地质构造略图(a)和A-A'剖面图(b)

Fig. 2 Geological map of the Kuqa River area (a) and A-A' cross-section (b)

Q_{1x}. 西域组; (N₂-Q₁)_k. 库车组; N_{2k}. 库车组; N_{1k}. 康村组; N_{1j}. 吉迪克组; E_{2-3s}. 苏维依组; E_{1-2km}. 库姆格列木组; K_{1bs}. 巴什基奇克组; K_{1b}. 巴西盖组; K_{1s}. 舒善河组; K_{1y}. 亚格列木组; J_{2q}. 恰克马克组; J_{2k}. 克孜勒努尔组; J_{1y}. 阳霞组; J_{1a}. 阿合组; T_{3t}. 塔里奇克组; T_{3h}. 黄山街组; T_{2kl}. 塔里奇克组; T_{1e}. 俄霍布拉克组; P_{1x}. 小铁里干克群; P_{3by}. 比尤勒包谷孜组; 09dk-1~09dk-27 示采样位置

和沉积年龄以及进行地层对比,因此盆地中沉积物的碎屑颗粒热年代学被广泛应用于地质学研究中(Baldwin *et al.*, 1986; Kowallis *et al.*, 1986; Galbraith, 1990; Garver and Brandon, 1994). 但碎屑颗粒可能代表了不同的热历史,因此,必须要对碎屑颗粒年龄组分进行区分,找出存在几个年龄峰值及其对应的地质源区,每个源区则都拥有相应的冷却年龄.

2.2 实验方法

裂变径迹测年实验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行. 样品经破碎、筛选、磁选及重液挑选出纯净的磷灰石,将磷灰石颗粒在薄片上用环氧树脂固化后抛光,用低铀多硅白云母作外探测器进行裂变径迹分析. 相关实验条件为:磷灰石自发裂变径迹蚀刻条件为 5. 5 M HNO₃, 20 ℃, 20 s;白云母诱发裂变径迹蚀刻条件为 40% HF, 室温 20min. Zeta 标定选用国际标准样 Fish Canyon Tuff 磷灰石(27. 8±0. 7 Ma)及美国国家标准局 CN-5 标准铀玻璃, Zeta 值为 350. 7±5. 7;样品热中子辐照送中国原子能科学研究院 401# 反应堆进行. 径迹统计采用 Autoscan 裂变径迹测试系统,在 Zeiss Axioplan2 偏光显微镜放大 1 000 倍条件下完成. 本文磷灰石裂变径迹的封闭温度采用 110±10 ℃,部分退火带温度为 60~110 ℃(Green *et al.*, 1985; Hurford, 1986),根据惯例,年龄误差±1σ,地质解释时采用±2σ.

3 实验结果与热史模拟

如果样品的表观年龄值大于样品的地层年龄,表明地层沉积后沉积物中磷灰石颗粒的裂变径迹未曾经过完全退火,记录的是源区的信息. 如果样品表观年龄小于地层年龄说明埋藏的最大古地温大于封闭温度,记录的是通过封闭温度时的时间. 根据样品表观年龄与地层的关系可分为 A、B 两个大组. A 组为 8 个退火样品, B 组为 6 个碎屑样品(表 1).

3.1 退火样品结果分析

8 个退火样品的测试结果见表 1 和图 3. 年龄测试过程中,选取尽可能多的磷灰石单颗粒进行测量(一般测试数量大于 20 个单颗粒),部分样品由于颗粒数量较少或颗粒质量的原因,测试数量小于 20 个单颗粒(样品 09dk-12、09dk-27). 一般情况下,当 $P(X^2)>5\%$,说明样品通过了 X^2 检验,为统一组分,测试年龄采用池年龄(Pooled age).

本次研究样品 09dk-6、09dk-7、09dk-8、09dk-11 未通过检验,采用中值年龄(Central age),见表 1. 由图 4 可知 09dk-6、09dk-8、09dk-11 这 3 个样品长短径迹与 $Dpar$ 值没有相应的对应关系,即大 $Dpar$ 值对应的不仅有长径迹,也有短径迹;同样,小 $Dpar$ 值的颗粒也存在长径迹和短径迹. 由此推测,虽然这 3 个样品的 $Dpar$ 值比较分散但不是造成年龄分散的主要原因,未通过检验可能是由于在部分退火带里时间过长或是后期构造活动的叠加,从后

表 1 库车河剖面样品裂变径迹数据
Table 1 Apatite fission track data of the Kuqa River section

	样号	层位	N	ρ_s (10^5 cm^{-2})	N_s	ρ_i (10^5 cm^{-2})	N_i	ρ_d (10^5 cm^{-2})	N_d	$P(X^2)(\%)$	$t(\text{Ma})$	N_t	$L(\mu\text{m})$
A	09dk-1	γ_4	29	8. 91	1 647	14. 20	1 647	11. 5	2 862	74. 92	126. 2±4. 7	11	10. 873±1. 58
	09dk-2	P_{1x}	27	10. 02	1 213	16. 37	1 982	11. 4	2 840	17. 59	128. 1±7. 6	46	10. 789±1. 78
	09dk-6	T_3t	30	8. 23	1 049	13. 42	1 711	11. 3	2 818	0. 00	121. 5±8. 3	17	11. 35±2. 049
	09dk-7	T_3h	31	4. 42	925	18. 00	3 770	11. 2	2 796	0. 00	49. 7±3. 1		
	09dk-8	J_{1a}	30	6. 42	738	14. 06	1 615	11. 1	2 774	0. 00	92. 0±6. 8	11	12. 036±1. 58
	09dk-11	J_{1y}	30	5. 79	762	17. 63	2 320	11. 0	2 753	0. 06	62. 7±4. 2	8	11. 21±1. 84
	09dk-12	J_2q	11	5. 80	342	11. 59	684	10. 9	2 731	56. 62	109. 1±11. 7		
B	09dk-27	K_{1b}	9	5. 39	216	13. 39	537	12. 3	3 065	5. 58	88. 8±10. 1		
	09dk-14	K_{1y}	30	11. 51	1 664	13. 47	1 947	12. 7	3 187	0. 01	196. 3±11. 3		
	09dk-15	Q_{1x}	32	6. 67	1 228	29. 25	5 384	12. 7	3 170	0. 00	51. 8±3. 9		
	09dk-21	N_{1k}	30	7. 39	1 252	15. 65	2 650	12. 5	3 135	0. 61	104. 3±5. 2		
	09dk-22	Q_{1x}	30	7. 39	836	16. 79	1 899	12. 5	3 117	0. 00	102. 0±7. 8		
	09dk-23	E_{2-3s}	30	8. 35	1 123	11. 84	1 593	12. 4	3 100	3. 32	154. 5±8. 4		
	09dk-25	E_{2-3s}	30	16. 86	2 045	26. 29	3 189	12. 3	3 082	0. 00	140. 9±8. 5		

注: N =样品颗粒数; N_d =铀标准玻璃对应外探测器的诱发径迹条数; N_s =自发径迹条数; N_i =诱发径迹条数; $P(X^2)$ 为卡方检测的结果; N_t =所测量的围限径迹长度数; ρ_s . 自发径迹密度; ρ_i . 诱发径迹密度; ρ_d . 铀标准玻璃的诱发径迹密度; L =所测量的围限径迹长度.

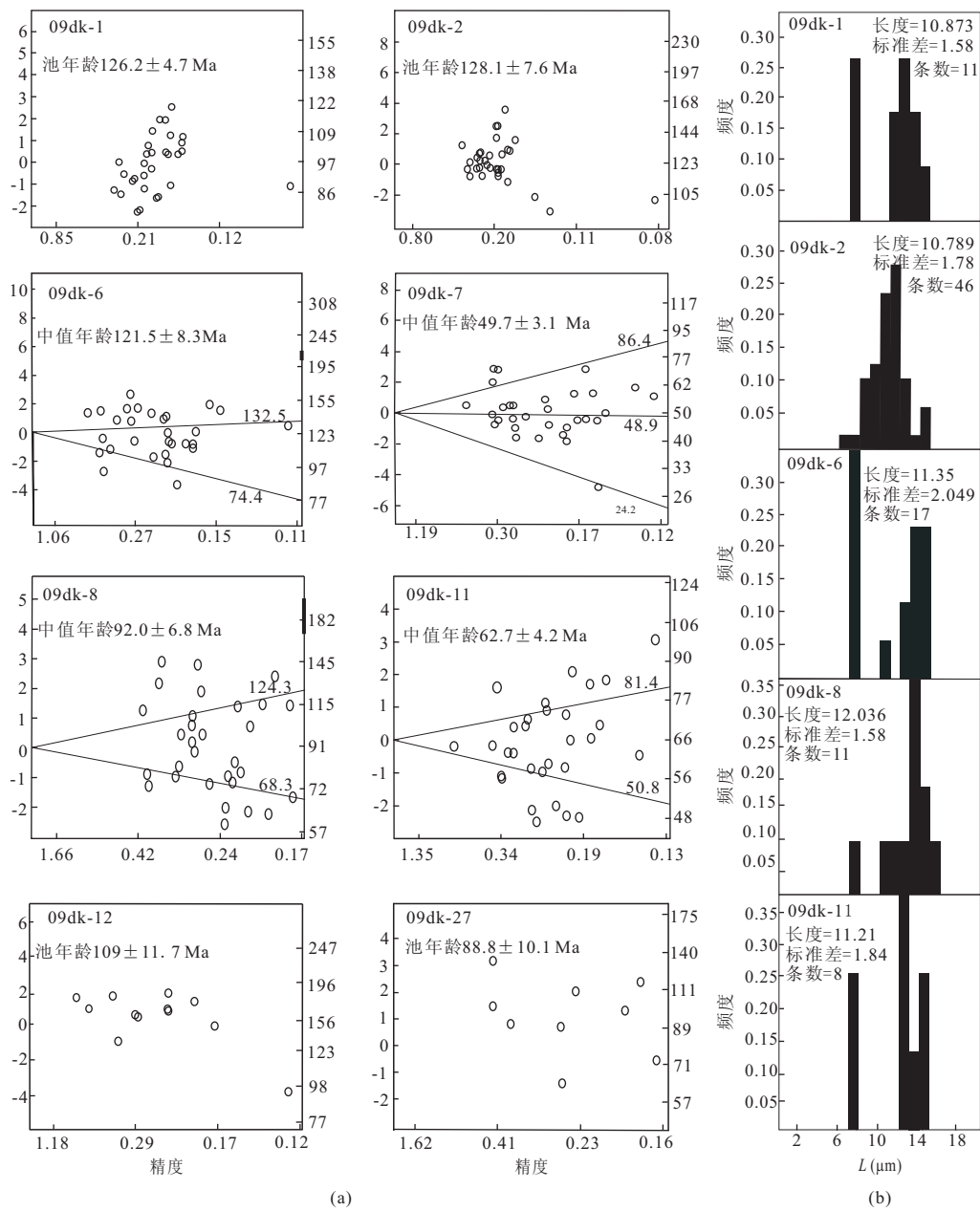


图 3 样品的单颗粒年龄雷达图(a)和径迹长度分布(b)
Fig. 3 Single-grain age distribution (a) and track length histograms (b)
a 图左侧纵坐标为标准差,右侧纵坐标为年龄(Ma)

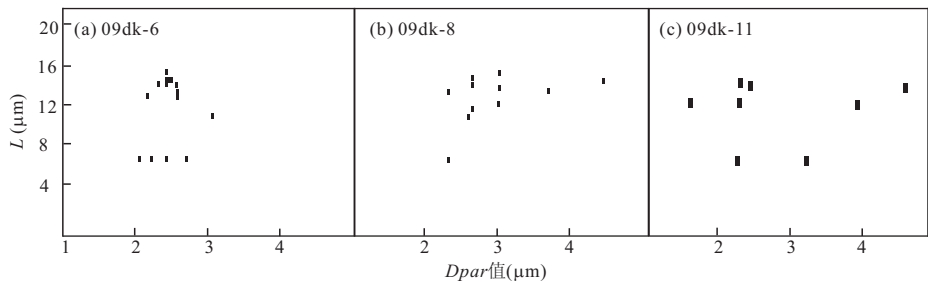


图 4 样品 09dk-6(a)、09dk-8(b)和 09dk-11(c)的 D_{par} 值分布
Fig. 4 D_{par} values of samples 09dk-6 (a), 09dk-8 (b) and 09dk-11 (c)

表 2 砂岩屑样品二项式拟合年龄峰值统计结果
Table 2 Binomial analysis results of detrital samples

样品	层位	颗粒数	$P(F)$	最佳拟合峰(Ma)及所占比例		
				P_0	P_1	P_2
09dk-15	Q_1x	32	0.01	35.3(46.6%)	58.4(33.3%)	86.1(20.4%)
09dk-22	Q_1x	30	0.02	71.8(30.7%)	107.9(65.9%)	445.2(3.4%)
09dk-21	N_1k	30	0.00	101.2(95.8%)	250.1(0.34%)	
09dk-25	E_{2-3s}	30	0.02	111.7(46.5%)	163.9(47.0%)	256(6.6%)
09dk-23	E_{2-3s}	30	0.00	145.5(88.8%)	234.7(11.2%)	
09dk-14	K_1y	30	0.02	152.5(32.1%)	216.4(64.6%)	785(3.3%)

面的热史模拟看后一种可能性更大. 09dk-7 没有相应的 $Dpar$ 值,但依据上述 3 个样品的情况,我们推测也是由于相同的情况造成年龄分散未通过检验.

从样品位置与磷灰石裂变径迹年龄情况看,退火的磷灰石样品主要分布在中古生界地层. 从 09dk-2 的 136 Ma 到 09dk-27 的 93.7 Ma,采样位置从最北部盆山结合处向盆地中心延伸,退火的磷灰石表观年龄逐渐变年轻. 这种年龄分布可能是由于天山最先开始运动而后向盆地扩展造成的.

3.2 碎屑样品结果分析

碎屑样品主要是采自秋里塔格构造带的新生界地层. 碎屑样品年龄通常是由来自不同源区或同一源区的多次构造活动颗粒年龄的混合. 因此,必须通过一定的数学方法找出最年轻年龄组或组成混合年龄的年龄组,才能得到有意义的年龄数据. 主要的数理统计方法有 X^2 年龄法、二项峰拟合法和高斯峰拟合法,本文采用二项峰拟合法. 二项峰拟合是基于最大似然估计,且经验证峰值为 2~3 个,该方法是最为有效的 (Brandon, 1992). 运用 Binom-Fit 软件 (Brandon, 2002) 进行拟合,得到碎屑磷灰石的年龄峰. 通过 $P(F)$ 检验以判定达到最佳拟合及有意义的年龄峰值的个数. 如果 $P(F) < 5\%$,拟合出来的峰值就有意义,否则没有意义,本次样品的 $P(F)$ 全部 $< 5\%$,说明数据是可信的. 最年轻的一组年龄用于研究源区的抬升、剥露过程,从沉积地层的下部向上逐渐变小,称为动态峰;而较老的峰值年龄相对比较稳定,不随沉积年龄变化,称为静态峰. 结果显示,碎屑磷灰石最年轻的动态峰的最小年龄为 35 Ma, 3 个明显的静态峰分别为 250 Ma、160 Ma 和 100 Ma (表 2 和图 5).

3.3 热史模拟

为了进一步了解样品所经历的冷却、埋藏等过程,使用 HeFTy Version 1. 6. 7 软件 (Ketcham, 软件使用说明书, 2009) 对样品进行热史模拟,选用多组分退火模型和 Monte Carlo 法. 根据测得的单颗

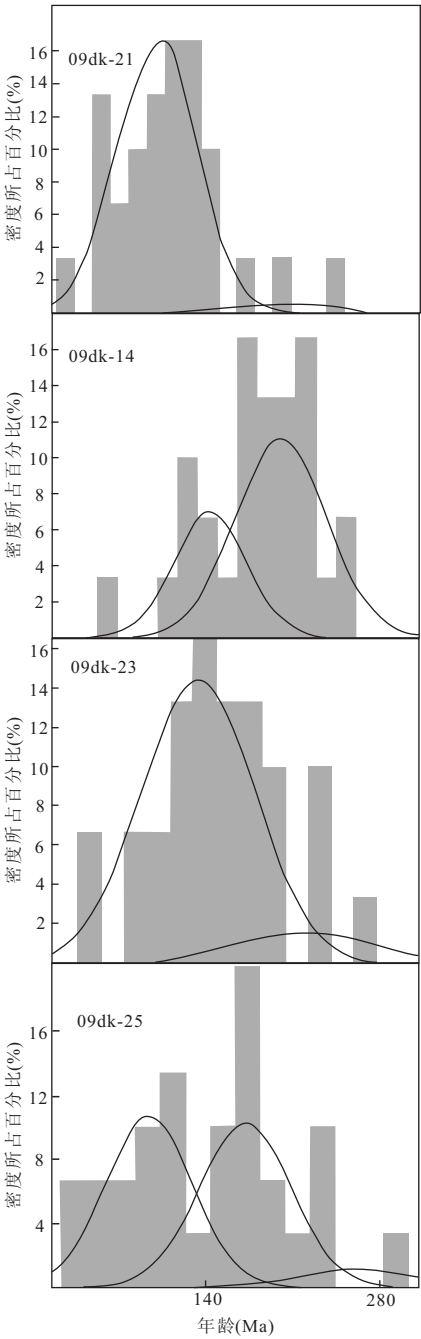


图 5 碎屑磷灰石样品年龄峰
Fig. 5 Peaks of the detrital apatite samples

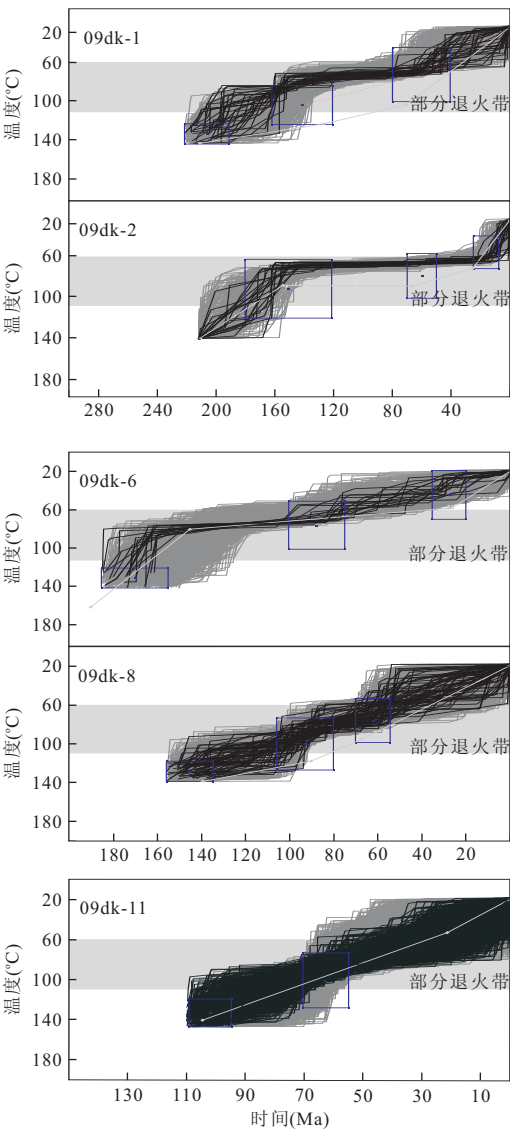


图 6 样品 09dk-1、09dk-2、09dk-6、09dk-8 和 09dk-11 的热史模拟

Fig. 6 Thermal modelling history of samples 09dk-1, 09dk-2, 09dk-6, 09dk-8 and 09dk-11

浅灰色区代表“可以接受的”热史拟合曲线集;深灰色区为“高质量的”热史曲线集;黑色曲线代表“最佳”热史拟合曲线 (Ketcham, 2005)

粒年龄和径迹长度数据,利用计算机结合地质事件进行模拟,重现该样品的时间—温度演化轨迹. D_{par} 值选取初始值 $1.5\ \mu\text{m}$,初始径迹长度根据 D_{par} 值求得.计算机模拟 10 000 次以得到最佳拟合曲线.径迹长度的测试条数一般要求大于 50 满足热模拟的要求,长度测量条数大于 100 条,则热模拟的可信度更高(Rahn and Seward, 2000).本次样品径迹长度测量数小于 50,热史模拟结果仅供参考(图 6).

在热史模拟时,要以研究区的地质模型为基础,

充分了解该地区的构造发育史、沉积埋藏史和冷却事件年龄,并在此基础上建立模拟的边界条件. 本区热模拟的制约条件:对于花岗岩和酸性熔岩地层,初始温度 $120\sim140\ ^\circ\text{C}$ 的年龄比最老的单颗粒年龄大 50% 以上,高于完全退火带温度;在实测年龄附近给定 $20\sim130\ ^\circ\text{C}$ 的约束,主要是为了获得样品通过 $110\ ^\circ\text{C}$ 时的裂变径迹年龄;对于沉积岩,以校正的起始冷却时间和对应的最大埋藏深度为起始条件. 因研究区内缺失中生代地层,表明此期间以隆升剥蚀为主,而古新世开始有沉积作用发生,表明此时开始转入埋藏升温阶段而分别作出限制;根据热史模拟曲线,该地区的初始隆升剥露作用主要发生在中生代,可以划分为三期:分别是中侏罗世(160 Ma)、早白垩—晚白垩早期(100 Ma)和新生代(20 Ma)的隆升剥露作用.

4 讨论与结论

南天山是库车盆地中生代地层的主要物源区,因此冲断带中出露的中新生代地层除了记录本身的剥露历史以外,还记录了源区南天山隆升、剥蚀的重要信息 (贾承造, 1997;李忠等, 2004;杜治利等, 2007).

碎屑磷灰石年龄 3 个主要静态峰,显示了源区即天山存在着 250 Ma、160 Ma 和 100 Ma 三期隆升. 碎屑磷灰石 250 Ma 的年龄记录了天山二叠纪强烈的造山隆升作用(舒良树等, 2004;何光玉等, 2006). 对天山中生代以来的多期隆升前人已有深入的讨论,其中 160 Ma 和 100 Ma 这两期构造隆升的记录在天山及其邻区亦有广泛的报道. Dobretsov *et al.* (1996)分析了吉尔吉斯斯坦境内西天山的磷灰石裂变径迹资料,认为西天山地区早白垩世曾经历过一次抬升作用. Marshallsea *et al.* (2000)根据磷灰石裂变径迹数据推测,祁连山东北部在 115 Ma 和 90 Ma 曾经历过抬升—冷却作用. 朱文斌等 (2006)依据磷灰石裂变径迹年龄分组和热史模拟得到博格达—哈尔里克山自白垩纪以来经历了多期冷却剥露,其中早白垩世的隆升就发生在 100 Ma 左右. 王彦斌等(2001)对天山独山子库车公路西昆仑山新疆西藏公路出露的 7 个花岗岩样品的磷灰石裂变径迹分析得到 $89\pm2.3\ \text{Ma}$ 的磷灰石测年数据,认为中晚白垩世天山曾发生过大规模的隆升. 热模拟显示的 20 Ma 的年龄记录了盆地新生代最近的一次活动;与此同时,也有大量天山在此时间活动的

记录. 杨树峰等(2003)对塔里木盆地西北缘的花岗岩和流纹岩中的磷灰石作裂变径迹测年,得到了 25~17 Ma 的快速隆升年龄. Sobel *et al.* (2006)根据磷灰石裂变径迹年龄资料,认为喀什附近的推覆构造活动和天山的隆升发生在 25~13 Ma 之间. Hendrix *et al.* (1992)指出,天山中新世代变形作用是不同陆块碰撞增生到亚洲板块南部边缘的远程效应,包括了晚三叠世羌塘地块、晚侏罗世拉萨地块、晚白垩世科希斯坦岛弧增生作用和新生代印度板块与亚洲大陆的碰撞作用. 结合前人的工作,由碎屑磷灰石年龄峰和热史模拟记录了该地区存在的 250 Ma、160 Ma、100 Ma 和 20 Ma 的四期活动,其中 160 Ma、100 Ma 和 20 Ma 的隆升是由于拉萨地块、科希斯坦和新生代印度与亚洲大陆的碰撞造成的天山和盆地的共同隆升.

样品 09dk-6、09dk-7、09dk-8 和 09dk-11 的年龄分散未通过检验,由热史模拟可知 09dk-6、09dk-8 和 09dk-11 分别在 70 Ma、60 Ma 和 50 Ma 有一期隆升,说明这 3 个样品的年龄分散是由于后期构造运动叠加造成的. 通过对这 3 个样品分解最年轻年龄组分分别得到 74.3 Ma、68.3 Ma 和 50.8 Ma,在误差范围内和热史模拟得到的结果是一致的. 从图 1 可知,09dk-6 位于库如力向斜一翼,09dk-7 位于捷斯德里克背斜一翼. 研究区的褶皱多为断层相关褶皱,因此结合区域构造,最年轻的年龄组纪录了这些断层相关褶皱的活动时间为 74 Ma 库如力向斜和 24 Ma 捷斯德里克背斜的活动. 其中,裂变径迹记录的捷斯德里克背斜活动的时间与根据生长断层相关褶皱的特征和滑移速率计算得到的 25 Ma 是一致的. 09dk-8 和 09dk-11 位于阿合断层两侧,50 Ma 的冷却事件,记录了阿合断层的一次构造运动.

References

- Abdrakhmatov, K. Y., Aldazhanov, S. A., Hager, B. H., 1996. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of presentday crustal deformation rates. *Nature*, 384(6608): 450—453. doi: 10.1038/384450a0
- Avouac, J. P., Tapponnier, P., Bai, M., et al., 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6755—6804. doi:10.1029/92JB01963
- Baldwin, S. L., Harrison, T. M., Burke, K., 1986. Fission track evidence for the source of accreted sandstones, Barbados. *Tectonics*, 5(3): 457—468. doi: 10.1029/TC005i003p00457
- Brandon, M. T., 1992. Decomposition of fission-track grain-age distributions. *American Journal of Science*, 292: 535—564. doi:10.2475/ajs.292.8.535
- Brandon, M. T., 2002. Decomposition of mixed grain age distributions using Binomfit. *On Track*, 24: 13—18.
- Charreau, J., Gilder, S., Chen, Y., et al., 2006. Magnetostratigraphy of the Yaha section, Tarim basin (China): 11 Ma acceleration in erosion and uplift of the Tian Shan mountains. *Geology*, 34(3): 181—184. doi: 10.1130/G22106.1
- Dobretsov, N. L., Buslov, M. M., Delvaux, D., et al., 1996. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes. *International Geology Review*, 38(5): 430—466. doi:10.1080/00206819709465345
- Du, Z. L., Wang, Q. C., Zhou, X. H., 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa-South Tianshan basin-Mountain system from the evidence of apatite fission track analysis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 399—408 (in Chinese with English abstract).
- Dumitru, T. A., 1990. Subnormal Cenozoic geothermal gradients in the extinct Sierra Nevada magmatic arc: consequences of Laramide and post-Laramide shallow-angle subduction. *Journal of Geophysical Research*, 95(B4): 4925—4941. doi:10.1029/JB095iB04p04925
- Galbraith, R. F., 1990. The radial plot: graphical assessment of spread in ages. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 17(3): 207—214. doi:10.1016/1359-0189(90)90036-W
- Gallagher, K., 1995. Evolving temperature histories from apatite fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3—4): 421—435. doi: 10.1016/0012-821X(95)00197-K
- Garver, J. I., Brandon, M. T., 1994. Erosional denudation of the British Columbia Coast Ranges as determined from fission-track ages of detrital zircon from the Tofino basin, Olympic Peninsula, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 106(11): 1398—1412. doi:10.1130/0016-7606(1994)106<1398:EDOTBC>2.3.CO;2
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F., et al., 1986. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405—415. doi: 10.1007/BF00376334
- Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J. W., et al., 1985.

- Fission-track annealing in apatite: track length measurements and the form of the Arrhenius plot. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* (1982), 10 (3): 323—328. doi:10.1016/0735-245X(85)90121-8
- Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., et al., 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 79(2): 155—182. doi:10.1016/0168-9622(89)90018-3
- He, G. Y., Zhao, Q., Li, S. X., et al., 2006. Analysis on Mesozoic prototypes of the Kuqa basin in Tarim, Northwest China. *Chinese Journal of Geology*, 41(1): 44—53 (in Chinese with English abstract).
- Hendrix, M. S., Graham, S. A., Carroll, A. R., et al., 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(1): 53—79. doi:10.1130/0016-7606(1992)104<0053:SRACIO>2.3.CO;2
- Huang, B. C., Piper, J. D. A., Peng, S. T., et al., 2006. Magnetostratigraphic study of the Kuche depression, Tarim basin, and Cenozoic uplift of the Tian Shan Range, western China. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3—4): 346—364. doi:10.1016/j.epsl.2008.09.020
- Hurford, A. J., 1986. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(4): 413—427. doi:10.1007/BF00374424
- Jia, C. Z., 1997. Structural and petroleum geology of the Tarim basin. Petroleum Press, Beijing (in Chinese).
- Jia, C. Z., Chen, H. L., Yang, S. F., et al., 2003. Late Cretaceous uplifting process and its geological response in Kuqa depression. *Acta Petrolei Sinica*, 24(3): 1—5, 15 (in Chinese with English abstract).
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., et al., 2007. Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *American Mineralogist*, 92(5—6): 799—810. doi:10.2138/am.2007.2281
- Ketcham, R. A., 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 275.
- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Carlson, W. D., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 84(9): 1235—1255.
- Kowallis, B. J., Heaton, J. S., Bringham, K., 1986. Fission-track dating of volcanically derived sedimentary rocks. *Geology*, 14(1): 19—22. doi:10.1130/0091-7613(1986)14<19:FDOVDS>2.0.CO;2
- Laslett, G. M., Green, P. F., Duddy, I. R., et al., 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 65(1): 1—13. doi:10.1016/0168-9622(87)90057-1
- Li, Z., Wang, D. X., Lin, W., et al., 2004. Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa depression, Northwest China; implication for provenance types and tectonic attributes. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 656—666 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Liu, J. Y., Zhang, Y. M., et al., 2002. The characteristics of Eogene tectonic sequence stratigraphy and effect on response of foreland tectonic movement of the Palaeogene Kuqa depression. *Science in China (Series D)*, 32(3): 177—183 (in Chinese).
- Liu, Z. H., Lu, H. F., Jia, C. Z., et al., 1999. The orogeny timing of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 236 (in Chinese).
- Liu, Z. H., Lu, H. F., Jia, C. Z., et al., 2000. Orogeny timing and fault-slip rate and their significance to the rejuvenated foreland thrusts belt of Kuche. *Petroleum Exploration and Development*, 27(1): 12—15 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. F., Chen, C. M., Liu, Z. H., et al., 2000. The structural features and origin of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt. *Acta Petrolei Sinica*, 21(3): 18—24 (in Chinese with English abstract).
- Marshall, S. J., George, A. D., Wyrwoll, K. H., et al., 2000. Mid-Miocene cooling in Hexi corridor-Qilian Shan region, Qinhai-Tibet plateau. In: 9th International conference on fission track dating and thermochronology, Melbourne, Australia.
- Naeser, C. W., 1979. Fission-track dating and geologic annealing of fission tracks. In: Jager, E., Hunziker, J. C., eds., *Lectures in isotope geology*. Springer-Verlag, Berlin, 154—169.
- Rahn, M., Seward, D., 2000. How many track lengths do we need? On track (unpublished Newsletter of the International Fission-Track Community), 10, 14—17.
- Reigber, C., Michel, G. W., Galas, R., et al., 2001. New space geodetic constraints on the distribution of deformation in Central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 191(1—2): 157—165. doi:10.1016/S0012-821X

(01)00414—9

- Shu, L. S., Guo, Z. J., Zhu, W. B., et al., 2004. Post-collision tectonism and basin-range evolution in the Tianshan belt. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 393—404 (in Chinese with English abstract).
- Sobel, E. R., Oskin, M., Burbank, D., et al., 2006. Exhumation of basement-cored uplifts: example of the Kyrgyz Range quantified with apatite fission track thermochronology. *Tectonics*, 25 (2): C2008. doi: 10. 1029/2005TC001809
- Tian, Z. J., Song, J. G., 1999. Tertiary structure characteristics and evolution of Kuche foreland basin. *Acta Petrolei Sinica*, 20(4): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Wang, Y., Liu, X., et al., 2001. Apatite fission-track records of Mesozoic and Cenozoic episodic reactivation of the Tianshan and West Kunlun mountains. *Regional Geology of China*, 20(1): 95—99 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Nie, S., Craig, P., et al., 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17(1): 1—27. doi:10. 1029/97TC03140
- Yang, S. F., Chen, H. L., Cheng, X. G., et al., 2003. Cenozoic uplifting and unroofing of southern Tien Shan, China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39 (1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. B., Shu, L. S., Wan, J. L., et al., 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. *Acta Geology Sinica*, 80(1): 16—22 (in Chinese with English abstract).
- 系统隆升历史的裂变径迹证据. 岩石矿物学杂志, 26 (5): 399—408.
- 何光玉, 赵庆, 李树新, 等, 2006. 塔里木库车盆地中生代原型分析. 地质科学, 41(1): 44—53.
- 贾承造, 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油出版社, 348—364.
- 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 等, 2003. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应. 石油学报, 24(3): 1—5, 15.
- 李忠, 王道轩, 林伟, 等, 2004. 库车坳陷中—新生界碎屑组分对物源类型及其构造属性的指示. 岩石学报, 20(3): 656—666.
- 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等, 2002. 库车坳陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应. 中国科学(D辑), 32(3): 177—183.
- 刘志宏, 卢华复, 贾承造, 等, 1999. 库车再生前陆逆冲带造山运动时间的厘定. 地学前缘, 6(4): 236.
- 刘志宏, 卢华复, 贾承造, 等, 2000. 库车再生前陆逆冲带造山运动时间、断层滑移速率的厘定及其意义. 石油勘探与开发, 27(1): 12—15.
- 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等, 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因. 石油学报, 21(3): 18—24.
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 等, 2004. 天山地区碰撞后构造与盆地演化. 高校地质学报, 10(3): 393—404.
- 田作基, 宋建国, 1999. 塔里木库车新生代前陆盆地构造特征及形成演化. 石油学报, 20(4): 7—13.
- 王彦斌, 王永, 刘训, 等, 2001. 天山、西昆仑山中、新生代幕式活动的磷灰石裂变径迹记录. 中国区域地质, 20(1): 95—99.
- 杨树锋, 陈汉林, 程晓敢, 等, 2003. 南天山新生代隆升和去顶作用过程. 南京大学学报(自然科学版), 39(1): 1—8.
- 朱文斌, 舒良树, 万景林, 等, 2006. 新疆博格达—哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. 地质学报, 80 (1): 16—22.

附中文参考文献

杜治利, 王清晨, 周学慧, 2007. 中新生代库车—南天山盆地