

天山北缘侏罗系地层热历史演化及其地质意义： 磷灰石裂变径迹和镜质体反射率证据*

张志诚¹ 郭召杰¹ 吴朝东¹ 方世虎²

ZHANG ZhiCheng¹, GUO ZhaoJie¹, WU ChaoDong¹ and FANG ShiHu²

1. 北京大学地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

1. Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, SESS, Peking University, Beijing 100871, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2007-03-12 收稿, 2007-05-22 改回.

Zhang ZC, Guo ZJ, Wu CD and Fang SH. 2007. Thermal history of the Jurassic Strata in the Northern Tianshan and its geological significance, revealed by apatite fission-track and vitrinite-reflectance analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1683 – 1695

Abstract Apatite fission track (AFT) dating is carried on 18 samples collected from Shichang-Manas, Anjihai river and Sikesu area of the Northern margin of Tianshan. Vitrinite reflectance (R_o) data of 10 samples from the Triassic to Jurassic coal seam were obtained to provide maximum paleotemperatures for the stratigraphic strata experiencing. The AFT and R_o data shown that the value of R_o gradually is increased and the AFT central age decreased, along with the strata growing younger. In the section of Shichang-Manas, the R_o of Triassic is about 0.56%, and the AFT central ages is 125.3 ± 9.1 Ma at the bottom of section; the R_o of Lower Jurassic is about 0.53% ~ 0.64%, and the AFT central ages are between 81.3 ± 4.7 and 87.8 ± 5.9 Ma at the middle of the section; R_o of Middle Jurassic is about 0.81%, and the AFT central age is at range of 44.0 ± 5.4 and 11.8 ± 1.8 Ma at the topside of section. The R_o of Shichang-Manas, which is located in the eastern part of the study area, is bigger than that of Sikesu, which is located in the western of the area, at the same strata. The AFT central age is reversed. Modeled best-fit paleothermal histories for the Mesozoic samples, showing a Jurassic period of burial and heating. The burial depth of Triassic and the lower Jurassic strata is shallower than that of the middle Jurassic. The data suggest that maximum burial and thermal maturity of the Triassic and lower Jurassic rocks occurred at Late Jurassic to Early Cretaceous, and then retained at the same depth till Miocene. This history is consistent with the AFT modeling result of the underlying granite. The cooling of Late Jurassic to Early Cretaceous can be typically interpreted as the result of decreasing of paleothermal gradient at the Cretaceous. The burial and heating of the Middle Jurassic rocks preserved for a long time until late Oligocene. All AFT samples show evidence for Miocene rapid cooling, beginning at about 10 Ma. This cooling is typically interpreted as the result of uplift and erosion of overlying strata. The Mesozoic strata exposed on the southwestern Junggar basin margin underwent 4 ~ 5 km of late Miocene to present, and the exhumation rate is about 400 ~ 500 m/Ma. This process was corresponding with the re uplift of Tianshan and propagation of thrusting northeast of the Tianshan boundary thrust. Miocene cooling of Mesozoic and Paleozoic granite suggests that uplift of the northern Tianshan occurred significantly later than previously proposed and is consistent with timing of intense deformation in the southwestern Junggar basin.

Key words Junggar Basin, Apatite fission track dating; Vitrinite reflectance, Cooling, Exhumation

摘要 对天山北缘石场-玛纳斯、安集海河和四棵树河地区 18 个样品进行了磷灰石裂变径迹年龄测定,同时测定了中生界地层 10 件裂变径迹样品相应煤层的镜质体反射率。结果表明地层由老到新镜质体反射率逐渐增加,磷灰石裂变径迹中值年龄逐渐降低。石场-玛纳斯地区,下部三叠系煤层镜质体反射率 R_o 值较低,为 0.56%,磷灰石裂变径迹中值年龄较大,为 125.3 ± 9.1 Ma; 八道湾组煤层 R_o 为 0.53% ~ 0.64%,磷灰石裂变径迹中值年龄介于 81.3 ± 4.7 ~ 87.8 ± 5.9 Ma; 上部西山窑

* 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411305 和 2001CB409804),国土资源大调查项目(1212010611806)资助。

第一作者简介: 张志诚,男,1963 年生,博士,副教授,构造地质学专业, E-mail: zczhang@pku.edu.cn

组煤层 R_0 最高, 达到 0.81%, 磷灰石裂变径迹中年龄较低, 为 $44.0 \pm 5.4 \sim 11.8 \pm 1.8$ Ma; 相同层位, 东部石场-玛纳斯一带 R_0 比西部四棵树地区高, 磷灰石裂变径迹年龄刚好相反。磷灰石裂变径迹模拟结果表明中生界三叠系、下侏罗统地层的埋藏深度相对较浅, 上覆沉积持续的时间到晚侏罗世到早白垩世基本上已经结束, 然后保持在基本不变的深度, 直至中新世, 不整合在三叠系之下的花岗岩的模拟结果也支持这样的认识。晚侏罗世—早白垩世的冷却降温事件可能是地温梯度变化和隆升作用的结果; 中侏罗统地层埋藏增温过程持续时间较长, 在玛纳斯地区直至渐新世末期。所有样品中磷灰石裂变径迹模拟都记录了 10 Ma 左右的快速冷却过程, 近 4~5 km 的地壳表层物质被剥蚀, 平均剥蚀速率 400~500 m/Ma。这一剥蚀过程应该与天山地区的快速隆升, 以及向北的冲断推覆作用相对应。天山地区山前带的变形应不早于 10 Ma, 这一认识与野外地质证据一致。

关键词 准噶尔盆地; 磷灰石裂变径迹; 镜质体反射率; 冷却; 剥露

中图法分类号 P597.3

1 引言

受到印-藏碰撞的远程效应影响, 新生代天山造山带再次活跃形成陆内造山带 (Monlar and Tapponnier, 1975; Tappinnier and Monlar, 1979; Avouac *et al.*, 1993; Yin *et al.*, 1998; Burchfiel *et al.*, 1999)。对天山地区的隆升作用过程, 已有大量的研究工作, 获得了一系列成果 (Zhou *et al.*, 1995; 杨庚等, 1995; 王彦斌等, 2001; Dumitru *et al.*, 2001; 杨树锋等, 2003; 郭召杰等, 2006; 马前等, 2006)。在天山南北缘几个典型前陆冲断带地区, 精细的构造分析和年代学确定, 为研究天山陆内造山过程提供了可靠资料 (Sobel and Dumitru, 1997; Bullen *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2002; 舒良树等, 2004; 方世虎等, 2007)。然而对于准噶尔南缘中生代盆地演化及其热历史的分析欠缺系统的资料。作为联系古生代造山到新生代再造山的关键阶段, 中生代盆地演化的分析不仅对整个区域演化具有重要意义, 而且对于准噶尔盆地南缘油气勘探也具有重要的指导意义。本文对准噶尔盆地西南缘石河子到奎屯之间出露的中生界侏罗系地层进行了系统的磷灰石裂变径迹和煤层镜质体反射率的测试, 在此基础上进行了时间-温度历史的模拟分析, 确定了准噶尔盆地南缘西段侏罗系地层的热演化历史和对天山新生代演化的响应。

2 地质背景

由于强烈的构造作用使得准噶尔盆地南缘中生界地层形成规模宏伟的前陆冲断带, 发育三排逆冲断层相关的褶皱构造带, 自南向北可分为山麓冲断褶皱带、霍尔果斯-玛纳斯-吐鲁番冲断褶皱带、独山子-安集海冲断褶皱带等。其中山麓冲断带位于依林哈比尔尕山前缘, 基底断块的隆升和逆冲使断层上盘相对较老的地层出露, 以基底卷入的厚皮构造为特征。主要由喀拉扎背斜、昌吉背斜、齐古背斜、清水河构造等组成 (邓起东等, 1999)。

研究区位于准噶尔盆地南缘 (图 1), 山麓冲断构造带的西段, 以单斜岩层发育为特征, 中生界地层发育齐全, 从三

叠系到新近系上新统以整合或假整合接触。侏罗系自下而上划分 6 个组: 下侏罗统的八道湾组、三工河组, 中侏罗统的西山窑组、头屯河组, 上侏罗统的齐古组、喀拉扎组。八道湾组发育上、下两套含煤地层, 中部为湖相或湖泊—三角洲相暗色泥岩夹薄层砂岩。三工河组以湖泊—三角洲相沉积为主体, 无工业煤层。西山窑组为一套湖沼相的煤系地层, 煤层比较发育, 厚煤层普遍集中在中下部, 上部为多层薄煤层或煤线。头屯河组为紫红、褐红色泥岩, 粉砂岩条带逐渐增多, 反映气候较为干旱、水体变浅的沉积环境。齐古组主要为一套河湖相褐红、紫红色泥岩、砂质泥岩夹紫红、灰绿色砂质泥岩、砂岩及凝灰岩, 岩相、岩性比较稳定, 厚度以玛纳斯河地区最大, 向东、西减薄。喀拉扎组的岩性为山麓河流相的灰褐色砾岩夹褐色泥岩及砾状砂岩, 俗称喀拉扎红色“岩墙”。

本文对天山北缘石场-玛纳斯河地区、安集海河以及四棵树河剖面中生界三叠系、侏罗系地层砂岩进行了系统的磷灰石裂变径迹定年分析, 分析样品多数有相应的煤层 (线) 的 R_0 测定来约束其经历的最高温度。同时对四棵树河上游的花岗岩以及安集海河上游的石炭系岩石进行了对比性研究。采样位置见图 1。

3 磷灰石裂变径迹定年方法

裂变径迹定年 (Fission Track Dating, 简称 FTD) 是确定岩石低温 ($< 110 \pm 10^\circ\text{C}$) 热历史的一项技术。裂变径迹定年方法遵从同位素定年方法的原理, 利用 ^{238}U 的自发裂变的现象, 但它测量的是放射性衰变对矿物晶体的物理损伤, 而不是另一种同位素 (张志诚和王雪松, 2004)。随着对裂变径迹退火规律的深化, 裂变径迹年龄分析从单一的年龄发展到以长度分布为主的多个参量, 从而在地质热历史和构造史研究方面得到越来越广泛的应用。

磷灰石裂变径迹定年, 除可以简单给出年龄外, 更为重要的是径迹退火作用的研究, 或多或少地可以给出地质地体热历史信息, 从而也使裂变径迹年龄本身更具有解释意义。前人曾经根据钻井资料 (Green *et al.*, 1989) 得出磷灰石裂变径迹长度和年龄随着深度的增加逐渐降低。依据沉积物的埋藏深度的不同, 可以获得磷灰石裂变径迹年龄和封闭程

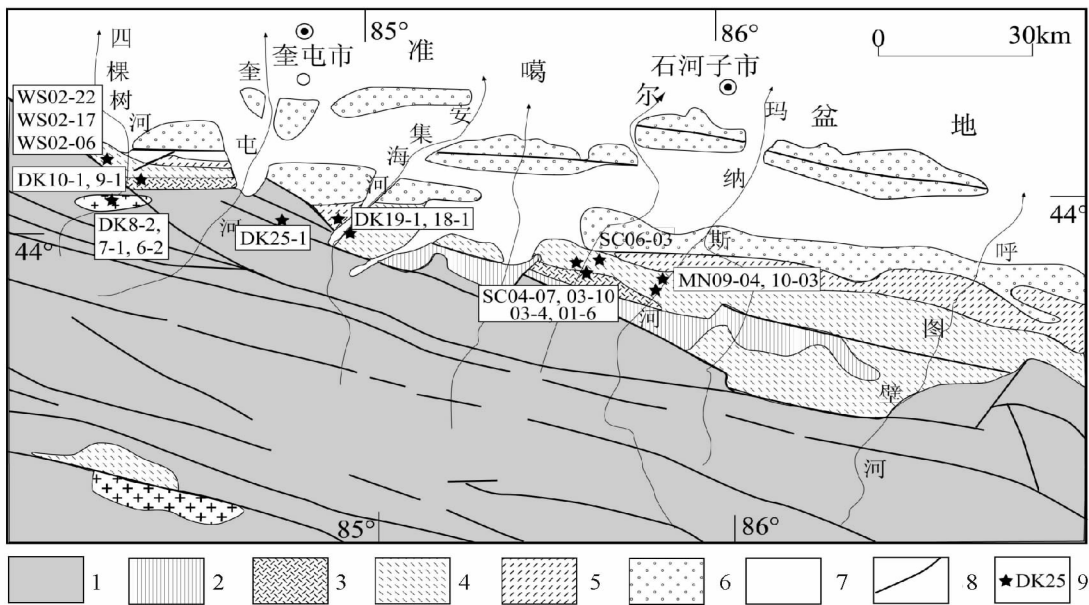


图1 准噶尔盆地南缘磷灰石裂变径迹年龄分析样品分布图

1-前二叠系地层; 2-二叠系; 3-三叠系; 4-侏罗系; 5-白垩系; 6-第三系; 7-第四系; 8-断层; 9-采样点

Fig.1 Geological map showing the sample positions of Apatite fission-track analyses

1-Pre-Permian; 2-Permian; 3-Trassic; 4-Jurassic; 5-Cretaceous; 6-Tertiary; 7-Quaternary; 8-Fault; 9-Sample site

迹长度分布的理想模式 (Sobel and Dumitru, 1997)。由于样品经历的最大古地温不同, 会获得沉积物的源区年龄、混合年龄和热事件的年龄, 相应地裂变径迹封闭长度会有不同的分布型式。

磷灰石裂变径迹年龄的测试是在中国科学院高能物理研究所完成。将采集的样品利用传统方法分离出磷灰石单矿物, 用环氧树脂粘在光薄片上, 研磨抛光出矿物最大内表面。在室温 20℃ 下, 用 7% 的 HNO₃ 蚀刻 30s (± 1s), 揭示自发径迹; 将低铀白云母外探测器与磷灰石一并送入反应堆辐照, 之后在 20℃ 下 40% HF 蚀刻 18min (± 15s) 揭示诱发径迹, 中子注量利用 CN5 铀玻璃标定 (Bellemans *et al.*, 1994)。测定年龄时每个样品任意选取 20 个左右质量好、平行 c 轴的颗粒进行测年 (假设有足够的颗粒)。根据 IUGS 推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程 (Hurford and Green, 1982, 1983) 计算年龄值。径迹长度分析中, 每个样品中测量 100 条水平、狭窄的封闭径迹 (Gleadow *et al.*, 1986) (如果有 100 条的话)。按照惯例, 年龄及平均径迹长度的统计误差为 ± 1σ, 但在进行地质解释时考虑 ± 2σ 的误差。

4 磷灰石裂变径迹和镜质体反射率结果

4.1 煤岩镜质体反射率分析

本次研究分别在四棵树和石场-玛纳斯河采集了八道湾组和西山窑组的煤层, 在北京中国矿业大学重点实验室进行了镜质体反射率 (R_o) 的测定, 并同时为煤层顶板或者底板砂

岩进行裂变径迹分析, 结果见表 1。从表 1 可以看出四棵树一带煤层的 R_o 较小, 为 0.46% ~ 0.55%, 参照 R_o 与 T_{max} 的关系 (Burman and Sweeney, 1989), 计算得到 T_{max} 为 70℃ ~ 85℃, 表明该区的煤层的热演化程度不是很高。石场-玛纳斯地区, R_o 比四棵树地区高, 且变化较大, 有一定的规律。其中三叠系煤层 R_o 值较低, 为 0.56%, 计算得到的 T_{max} 为 85℃ ~ 90℃, 八道湾组煤层 R_o 为 0.53% ~ 0.64%, 相应的 T_{max} 为 80℃ ~ 100℃, 西山窑组煤层镜质体反射率最高, 达到 0.81%, 计算得到 T_{max} 为 120℃ ~ 125℃, 表明煤层的演化程度较高。

4.2 裂变径迹年代学分析结果

4.2.1 石场-玛纳斯河地区

对石场-玛纳斯河地区的中生界砂岩进行了取样和裂变径迹年龄分析, 主要取样位置见图 2, 取样地层主要是三叠系上部 (样品 SC01-06)、下侏罗统八道湾组 (样品 SC03-04, 03-10, 04-07) 和中侏罗统西山窑组 (样品 SC06-03, MN09-04, MN10-03)。分析结果见表 1 和图 3。

石场地区三叠系上部的一个样品裂变径迹分析中值年龄为早白垩世年龄 (125.3 ± 9.1) Ma, 裂变径迹长度 11.6 ± 1.8 μm, 其对应煤层 R_o 为 0.56, 参照 Burman and Sweeney (1989) 关于 R_o 与 T_{max} 的关系计算得到 T_{max} 为 85℃ ~ 90℃ (表 1)。石场地区侏罗系有 4 个样品, 其中八道湾组三个样品, 裂变径迹分析中值年龄均为晚白垩世年龄 (81.3 ± 4.7 ~ 87.8 ± 5.9 Ma) (表 2), 对应煤层 (线) 的 R_o 测试平均值为 0.57 左右 (表 1), 和三叠系上部的煤线热演化程度相近, 表

表1 镜质体反射率(R_o)分析与对应的部分磷灰石裂变径迹分析数据Table 1 Vitrinite reflectance (R_o) data and corresponding apatite fission-track data

剖面	样品号	层位	岩性	R_{omin} (%)	R_{omax} (%)	标准差	测点数	R_o (%) 平均值	T_{max} (°C)	对应 AFD 样品	AFD 年龄 t (Ma) $\pm 1\sigma$
四棵 树	WS01-02	J1b	煤	0.43	0.52	0.03	37	0.46	70~75	WS01-06	87.2 \pm 6.5
	WS02-02	J2x	煤	0.42	0.52	0.03	23	0.46	70~75	WS02-17	78.4 \pm 7.6
	WS02-24	J2x	煤	0.5	0.61	0.03	44	0.55	85	WS02-22	103.1 \pm 7.6
石场, 玛纳斯 河	SC01-07	T2-3	煤	0.52	0.60	0.03	45	0.56	85~90	SC01-06	125.3 \pm 9.1
	SC03-02	J1b	煤	0.53	0.59	0.02	52	0.56	85~90	SC03-04	85.4 \pm 5.7
	SC03-08	J1b	煤	0.58	0.69	0.02	60	0.64	100	SC03-10	87.8 \pm 5.9
	SC04-06	J1b	煤	0.49	0.56	0.03	36	0.53	80~85	SC04-07	81.3 \pm 4.7
	SC06-02	J2x	煤	0.78	0.85	0.02	52	0.81	120~125	SC06-03	44.0 \pm 5.4
	MN09-05	J2x	煤	0.76	0.85	0.03	43	0.80	120~125	MN09-04	11.8 \pm 1.1
										MN10-03	22.5 \pm 3.2

注: R_o -温度转换计算参照 Burmhan and Sweeney (1989).

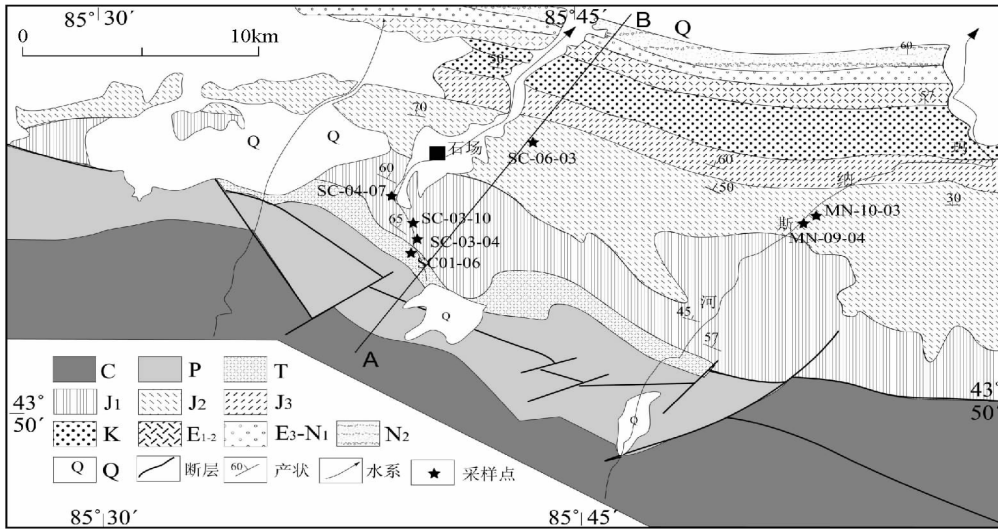


图2 石场-玛纳斯河地区地质图(据新疆地质局(1978)修改)

Fig.2 Geological map of Shichang-Manas river area

表2 石场-玛纳斯河剖面磷灰石裂变径迹分析数据表

Table 2 Apatite fission-track data of Shichang-Manas River section

样品号	层位 岩性	海拔 (m)	样品位置	数量 (n)	ρ_d ($10^5/cm$) (N_d)	ρ_s ($10^5/cm$) (N_s)	ρ_i ($10^5/cm$) (N_i)	P (%)	t(Ma) ($\pm 1\sigma$)	L(μm) (N)
SC-01-06	T2-3 砂岩	1553	43°54'0.5 85°39'50	30	9.3(3496)	2.922(384)	3.842(505)	46.9	125.3 \pm 9.1	11.6 \pm 1.8(67)
SC-03-04	J1b 砂岩	1503	43°54'11 85°39'57	18	8.847(3496)	5.226(411)	9.625(757)	41.1	85.4 \pm 5.7	11.5 \pm 2.0(100)
SC-03-10	J1b 砂岩	1428	43°54'16 85°39'39	21	9.451(3496)	3.233(394)	6.186(754)	97.9	87.8 \pm 5.9	11.7 \pm 1.7(101)
SC-04-07	J1b 砂岩	1428	43°54'56 85°39'32	21	9.375(3496)	3.329(559)	6.825(1146)	9.8	81.3 \pm 4.7	11.5 \pm 1.5(102)
SC-06-03	J2x 砂岩	1350	43°55'49 85°44'01	22	9.3(3496)	0.897(88)	3.434(337)	99.9	44.0 \pm 5.4	10.9 \pm 1.9(53)
MN-09-04	J2x 砂岩	1120	43°54'32 85°51'35	27	9.3(3496)	0.982(137)	13.803(1926)	0	11.8 \pm 1.1	11.5 \pm 2.2(99)
MN-10-03	J2x 砂岩	1115	43°54'33 85°52'21	10	9.224(3496)	1.912(57)	14.018(418)	63.2	22.5 \pm 3.2	11.3 \pm 1.5(13)

注:(n)-测量的磷灰石颗粒数; ρ_s -自发径迹密度($\times 10^5/cm$); N_s -自发径迹数; ρ_i -外部探测器中的诱发径迹密度($\times 10^5/cm$); N_i -诱发径迹数;P(%)为 χ^2 概率(Green, 1981); $t \pm 1\sigma$ 为样品中值裂变径迹年龄(Galbraith and Laslett, 1993),由zeta法(Hurford *et al.*, 1982, 1983; Hurford, 1990)计算得出, $\xi_{CNS} = 357.8 \pm 6.9$ 。

(n)-number of individual crystals (grains); ρ_s -spontaneous track density ($\times 10^5/cm$); N_s -number of spontaneous tracks counted; ρ_i -induced track density in external detector ($\times 10^5/cm$); N_i -number of induced tracks counted;P(%) χ^2 probability(Green, 1981); $t \pm 1\sigma$ -sample center fission-track age(Galbraith *et al.*, 1993), calculated using zeta calibration method (Hurford *et al.*, 1982, 1983, 1990).

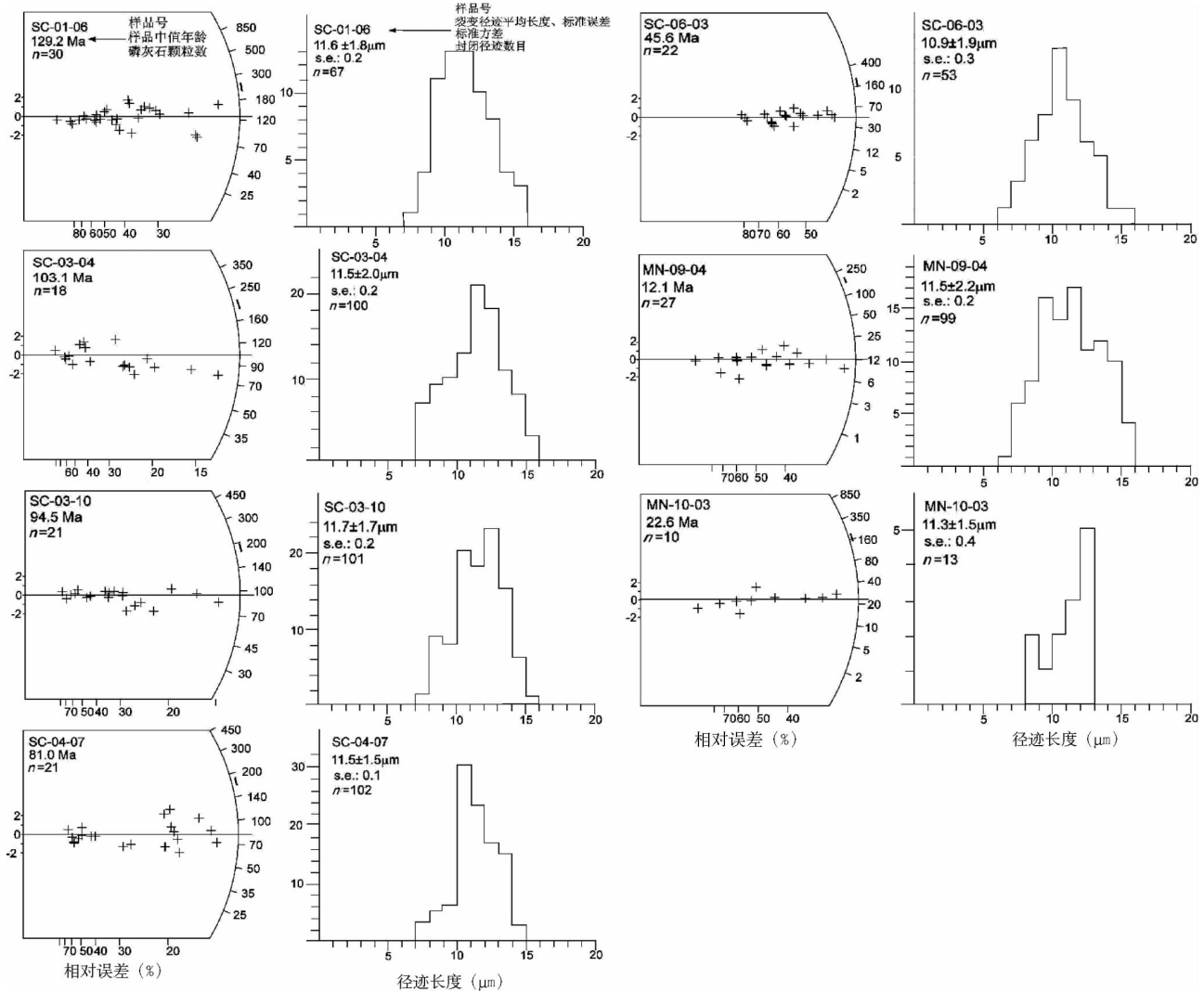


图3 石场-玛纳斯河地区单颗粒年龄放射图(Dunkl, 2002)和裂变径迹长度分布图。放射图中标示出了中值年龄和样品沉积年龄

Fig.3 Radial plots and track length histograms of apatite in the Shichang-Manas area(after Dunkl, 2002)

明可能具有相似的演化历史。西山窑组一个样品裂变径迹年龄为 $44.0 \pm 5.4\text{Ma}$, 对应煤层的 R_0 测试平均值为 0.81, 最大古地温达到 $120^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 。

玛纳斯河谷地区西山窑组 2 个样品(MN09-04, MN10-03)裂变径迹中值年龄均为中新世 ($22.5 \pm 3.2 \sim 11.8 \pm 1.8\text{Ma}$) (表 2), 对应煤层的 R_0 测试平均值为 0.80, 最大古地温达到 $120^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$, 表明该区侏罗系磷灰石裂变径迹已经完全退火。

4.2.2 四棵地区

沿四棵河进行了系统的样品采集, 对花岗岩和山中前中生界三叠系和侏罗系样品开展了裂变径迹定年工作, 部分样品(WS01-06, 02-17, 02-22)进行对应煤层的 R_0 分析。裂变径迹测试结果见表 3 和图 4。

三个花岗岩样品裂变径迹年龄为 $176 \sim 236\text{Ma}$, 记录了中生代晚期冷却事件的年龄, 裂变径迹封闭长度为 $11.4 \pm$

$1.3\mu\text{m}$ 到 $12.7 \pm 1.5\mu\text{m}$, 显示为较窄的单峰特点(图 4)。三叠系样品获得的裂变径迹年龄为 $153.4 \pm 11.9\text{Ma}$, 小于其沉积年龄。侏罗系四个样品, 其中八道湾组两个样品, DK10-1 中值年龄为 $173.4 \pm 13.5\text{Ma}$, 略小于其沉积年龄, 表明退火程度比较低。WS-01-06 中值年龄为 $87.2 \pm 6.5\text{Ma}$, 明显小于其沉积年龄, 封闭径迹长度为 $12.4 \pm 1.5\mu\text{m}$, 显示较窄的单峰特点(图 4), 相应的煤层的 R_0 值为 0.46, 表明岩石曾经经历了部分退火作用。西山窑组两个样品, 年龄分别为 78.4Ma 和 103.1Ma , 均小于其沉积年龄, 封闭径迹长度 $11.9 \sim 12.5 \pm 1.8\mu\text{m}$, 显示为较宽的单一峰态(图 4), 其相应的煤层的 R_0 为 $0.46 \sim 0.55$, 表明该地层曾经经历了部分退火作用。

4.2.3 安集海地区

安集海地区共测定裂变径迹三件, 测试结果见表 4 和图 5。其中石炭系砂岩一件, 裂变径迹中值年龄为 $186.9 \pm 19.1\text{Ma}$, 记录了中生代初期的冷却事件。侏罗系八道湾组的

表3 四棵树河剖面磷灰石裂变径迹分析数据表

Table 3 Apatite fission-track data of Sikeshu River section

样品号	层位 岩性	海拔 (m)	样品位置	数量 (n)	$\rho_d (10^5/cm)$ (N_d)	$\rho_s (10^5/cm)$ (N_s)	$\rho_i (10^5/cm)$ (N_i)	P (%)	t (Ma) ($\pm 1\sigma$)	L (μm) (N)
DK6-2	花岗岩	1408	44°05'53 84°23'37	15	10.934(5911)	8.286(451)	10.418(567)	22.4	175.9 \pm 12.8	11.6 \pm 1.4(100)
DK7-1	花岗岩	1303	44°06'40 84°23'50	11	10.934(5911)	16.930(794)	15.309(718)	0.1	236.2 \pm 21.6	12.7 \pm 1.5(100)
DK8-2	花岗岩	1274	44°07'30 84°23'50	19	10.934(5911)	20.665(1717)	20.846(1732)	0	209.0 \pm 14.2	11.4 \pm 1.3(53)
DK9-1	T3 砂岩	1223	44°08'02 84°24'18	17	10.934(5911)	6.238(670)	8.938(960)	1.3	153.4 \pm 11.9	11.6 \pm 1.4(6)
DK10-1	J1b 砂岩	1206	44°09'03 84°24'32	19	10.934(5911)	6.334(338)	8.077(431)	58.5	173.4 \pm 13.5	12.9 \pm 1.0(10)
WS-01-06	J1b 砂岩	1560	44°09'33 84°21'05	24	9.073(3496)	3.418(312)	6.321(577)	23.8	87.2 \pm 6.5	12.4 \pm 1.5(99)
WS-02-17	J2x 砂岩	1420	44°10'26 84°20'03	26	8.771(3496)	2.525(172)	5.020(342)	95.2	78.4 \pm 7.6	11.9 \pm 1.8(84)
WS-02-22	J2x 砂岩	1340	44°10'26 84°20'03	18	8.847(3496)	3.484(348)	5.307(530)	27.6	103.1 \pm 7.6	12.5 \pm 1.8(77)

注:同表1。DK样品 $\xi_{CNS} = 410 \pm 10$,其它样品 $\xi_{CNS} = 357.8 \pm 6.9$

表4 安集海河剖面磷灰石裂变径迹分析数据表

Table 4 Apatite fission-track data of Anjihai River section

原样号	层位 岩性	海拔 (m)	样品位置	数量 (n)	$\rho_d (10^5/cm)$ (N_d)	$\rho_s (10^5/cm)$ (N_s)	$\rho_i (10^5/cm)$ (N_i)	P (%)	t (Ma) ($\pm 1\sigma$)	L (μm) (N)
DK18-1	J1b 砂岩	1634	44°01'34 84°58'00	23	10.934(5911)	6.974(607)	10.730(934)	62.3	144.0 \pm 8.8	11.7 \pm 1.5(109)
DK19-1	J1b 砂岩	1751	44°02'29 84°57'04	16	10.934(5911)	9.155(561)	10.869(666)	25.2	178.1 \pm 14.0	11.3 \pm 1.9(146)
DK25-1	C 砂岩	1733	44°06'17 84°48'29	20	10.934(5911)	2.516(193)	2.972(228)	89.0	186.9 \pm 19.1	13.1 \pm 1.4(19)

注:同表1。样品 $\xi_{CNS} = 410 \pm 10$

两件样品获得了 178.1Ma 和 144.0Ma 的中值年龄,其中 DK19-1 样品接近其沉积年龄,可能反映源区的特征;DK18-1 小于其沉积年龄,表明经历了部分的退火作用过程,两件样品封闭径迹长度分布均具有单峰态特点(图5)。

5 讨论和结论

5.1 热史模拟

天然自发径迹的形成是一个不可逆的连续过程,矿物上的每一条径迹记录了样品所经历的低于封闭温度的整个热历史某一阶段的信息。裂变径迹分析的一个重要特征是其基础数据(径迹年龄、长度等)反映的不仅仅是样品在达到最大古地温(封闭温度)的时间,而且还记录了样品所经历的温度历史。因此,根据样品的单颗粒年龄和径迹长度数据就有可能恢复该样品的详细的温度历史(张志诚和王雪松,2004)。

本次模拟采用软件 AFTSolve (Ketcham *et al.*, 2000),该程序要求进行热史模拟的样品封闭径迹数量要达到 100 条

左右。在样品热历史模拟中,制约条件综合考量了沉积年龄、相应煤层的 T_{max} ,以及不整合、生长地层、砾岩等。本区热模拟的边界条件包括:(1)地温梯度和地表温度的选取:研究区侏罗纪末期地温梯度为 25°C ~ 26°C/km 左右,晚侏罗世地温梯度为 25°C/km 左右,白垩纪末期地温梯度为 20°C/km,现今地温梯度为 20°C/km(邱楠生等,2002),地表温度根据前人资料设定为 10°C(Hendix *et al.*, 1994);(2)热史起始时间的设定:多数样品为沉积岩,因此其沉积年龄为一重要的约束条件,根据前人对天山基岩的磷灰石裂变径迹研究结果(Dumitru, *et al.*, 2001),设定初始年龄为 300Ma;(3)样品古地温增减因素:研究区自三叠纪以来无岩浆侵入事件发生,因此增温过程主要是由于沉积埋藏作用造成的,而冷却降温过程主要由隆升剥蚀引起的。本次研究中,对每一模拟样品均计算了 10000 次随机产生的温度历史条件下的裂变径迹年龄和长度,多数样品进行了不只一次的模拟,所获结果基本相近。实际测量的结果与模拟的裂变径迹年龄和长度在 0.05(或者更大)的置信水平可以比较时,认为该温度历史是可以接受的。若模拟的裂变径迹年龄和长度在 0.5(或更大)

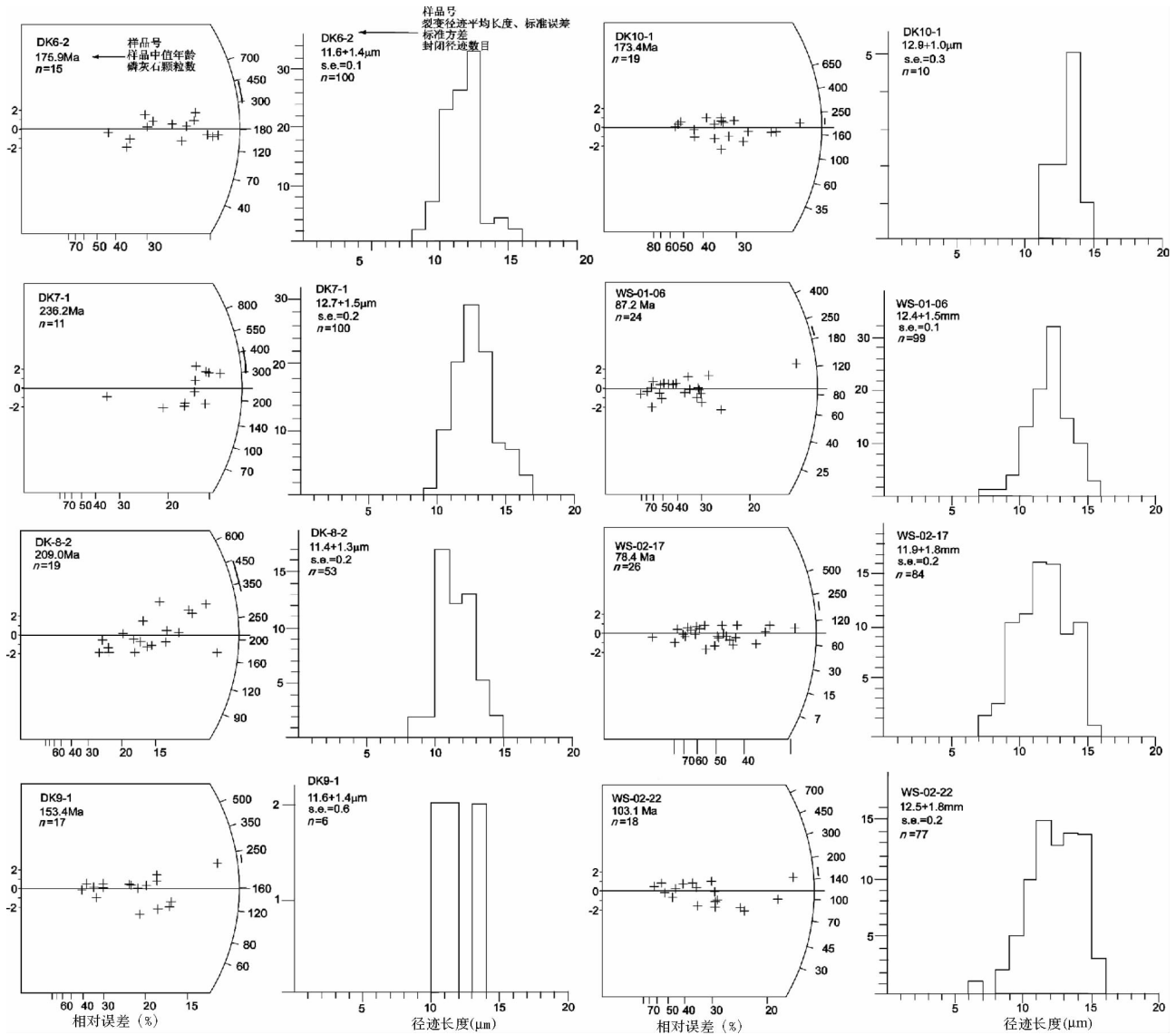


图4 四棵树河地区单颗粒年龄放射图和裂变径迹长度分布图(Dunkl, 2002)。放射图中标示出了中值年龄和沉积岩样品的沉积年龄

Fig.4 Radial plots and track length histograms of apatite in the Sikeshu area(after Dunkl, 2002)

的置信水平可以比较时,则认为该温度历史是符合良好的(Ketcham *et al.*, 2000)。本文对于测量封闭径迹数量大于50条的样品,都尝试进行了温度-年龄($T-t$)曲线模拟,结果见图6和图7。

石场-玛纳斯地区三叠系上部的一个样品和侏罗系的五个样品,都得到了较好的模拟 $T-t$ 曲线结果(图6)。模拟结果表明:该区样品达到的最大古地温各不相同,具有一定规律,沉积岩形成的时间越老,其最高古地温越低,这与由煤层镜质体反射率得到的结果一致;达到最大古地温的时间具有明显规律性变化,三叠系样品在中晚侏罗世,而玛纳斯河谷西山窑组样品则在中新世左右;多数样品经历了两次降温过程,一为晚侏罗世一早白垩世开始,降温幅度较小,约为20℃左右,另一次为中新世(主要是10Ma以来)发生快速冷

却作用,降温幅度达到60℃~70℃,白垩纪到渐新世为相对平静时期。玛纳斯河谷剖面的西山窑组样品(MN09-04), $T-t$ 曲线模拟结果表明该地层主要是自晚渐新世一早中新世(24Ma左右)开始发生快速冷却,中新世以来(主要是5Ma以来)冷却速度进一步加快,并剥露至地表。

安集海河侏罗系的两件样品,模拟结果仅仅达到了可以接受的程度(图7)。反映了样品在晚侏罗世达到其最大古地温,温度在60℃~70℃左右,中新世晚期(10Ma左右)发生快速冷却作用,剥露至地表,这与其样品年龄接近沉积年龄的结果一致。石炭系的样品,由于封闭径迹条数较少,未能开展热史模拟的工作,但其磷灰石裂变径迹中值年龄较侏罗系样品大,说明可能经历了相似的热演化历史。

四棵树河地区侏罗系三件样品进行了热历史模拟,其中

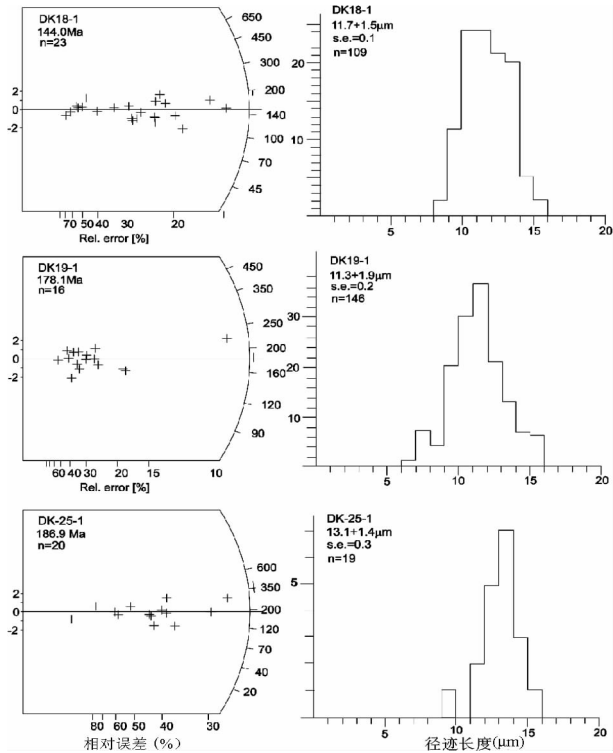


图5 安集海河地区单颗粒年龄放射图和裂变径迹长度分布图(Dunkl, 2002)。放射图中标示出了中值年龄和沉积岩样品的沉积年龄

Fig. 5 Radial plots and track length histograms of apatite in the Anjihai area(after Dunkl, 2002)

两件获得较好的结果,反映样品在晚侏罗世到早白垩世达到最大古地温,其后略有降温冷却,早第三纪时期相对平静,中新世以后(10Ma左右)发生快速冷却作用。达到的最大古地温约为 $80^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$,略大于由 R_0 获得的最大温度。三件花岗岩样品都做了模拟,其中DK7-1获得了较好的模拟曲线(图7)。结果表明花岗岩经历了晚古生代末期到中生代早期的快速降温过程,剥露至接近地表,这与三叠系地层不整合在花岗岩之上相一致,其后古地温略有增加,早白垩世早期达到最大值,中新世(10Ma左右)快速冷却,剥露至地表。其热史演化与其上侏罗系地层具有相似的特征。

总之,准噶尔盆地南缘晚三叠系到下侏罗统地层,经历了相似的热演化历史,从其沉积开始即快速升温,至晚侏罗纪到早白垩纪,达到最大温度,其后略有降温,至中新世发生快速冷却过程,直至剥露至地表。向盆地内部,中侏罗统地层埋深进一步加大,使得磷灰石达到了完全退火,埋藏升温持续的时间更长,直至晚白垩世到渐新世,其后经历了与盆地边缘相似快速降温过程。

5.2 热历史与沉积盆地演化

野外地质调查结合1:20万地质图(图2)(新疆地质局,1978),石场-玛纳斯河地区从三叠系到中新统地层呈现

单斜构造特征,表现为连续的沉积作用过程(图8)。三叠系、侏罗系地层的快速升温过程应该是上覆地层持续快速沉积的结果。侏罗系地层层较厚,八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组的累计厚度达到3000m以上(方世虎等,2005;王敏芳等,2007),且其沉降速率一般为 $40 \sim 100 \text{ m/Ma}$,在盆地南缘达到 120 m/Ma (王敏芳等,2007)。根据邱楠生等(2002)及新疆油田资料,研究区侏罗纪末期地温梯度为 $25^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右,按此计算,三叠系样品之上侏罗系的厚度基本满足 R_0 演化程度所需的3000m左右埋深。

砂岩的磷灰石模拟结果和相应层位煤层的 R_0 分析表明,位于剖面下部的三叠系和下侏罗统地层达到的最高古地温为 90°C 左右,低于上部中侏罗统地层的 120°C 左右;而且三叠系达到最大古地温的时间为中侏罗世,下侏罗统八道湾组地层达到最大古地温的时间为晚侏罗世晚期到早白垩世,中侏罗统地层达到最大古地温的时间为晚白垩世到渐新世,具有非常规律的变化特征(图6)。其原因可能有1)由于晚侏罗世的构造剥蚀和抬升作用,靠近山前地区自头屯河组沉积时期就已经不再接受沉积,而北部地区继续接受沉积;2)自山前地区向盆地地区侏罗系的沉积厚度逐渐变大。根据前人侏罗系岩相资料(方世虎等,2005)分析,侏罗纪的沉降中心逐渐向北迁移,前一种原因造成了地层由老到新镜质体反射率逐渐增加,磷灰石裂变径迹中值年龄逐渐降低。

晚侏罗世—早白垩世早期,岩石成分成熟度降低、不稳定重矿物及其组合稍有增加,可能指示天山山脉构造活动(方世虎等,2006)。模拟结果也表明,三叠系和早侏罗统的样品记录了晚侏罗世到早白垩世的降温过程,降温幅度约有 20°C 。可能指示了该时期的隆升降温冷却,也可能是由于地温梯度变化导致的结果。晚侏罗世地温梯度为 25°C 左右,白垩纪末期地温梯度为 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 现今地温梯度为 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (邱楠生等,2002),若上部地层厚度为3000m,则由于地温梯度的变化将产生 15°C 左右的降温。

5.3 热历史与区域地质演化

准噶尔盆地南缘的变形应该是印度板块与欧亚板块碰撞持续影响的结果。Hendrix *et al.* (1994)利用磷灰石碎屑颗粒年龄测定了玛纳斯河中生界地层裂变径迹年龄为24Ma左右,并认为这一年龄记录了天山新生代初始变形时间;Sobel *et al.* (1997)也利用同样的原理研究了西天山构造活动,测得西天山两期构造冷却事件,一次约20Ma,另一次13Ma;Bullen *et al.* (2001)通过研究境外的西天山及其相邻盆地,认为隆升变形作用开始于11Ma左右;De Grave *et al.* (2007)通过对中亚天山地区的花岗岩研究,获得了晚侏罗世到白垩纪的裂变径迹年龄,模拟结果表明中中新世至今发生了 60°C 左右的快速冷却作用;朱文斌等(2004)通过对吐哈盆地侏罗-白垩系地层的裂变径迹研究,确认其记录了 $10 \sim 8 \text{ Ma}$ 冷却事件;郭召杰等(2005)对后峡盆地侏罗系的系统研究,认为10Ma以来天山发生快速隆升。

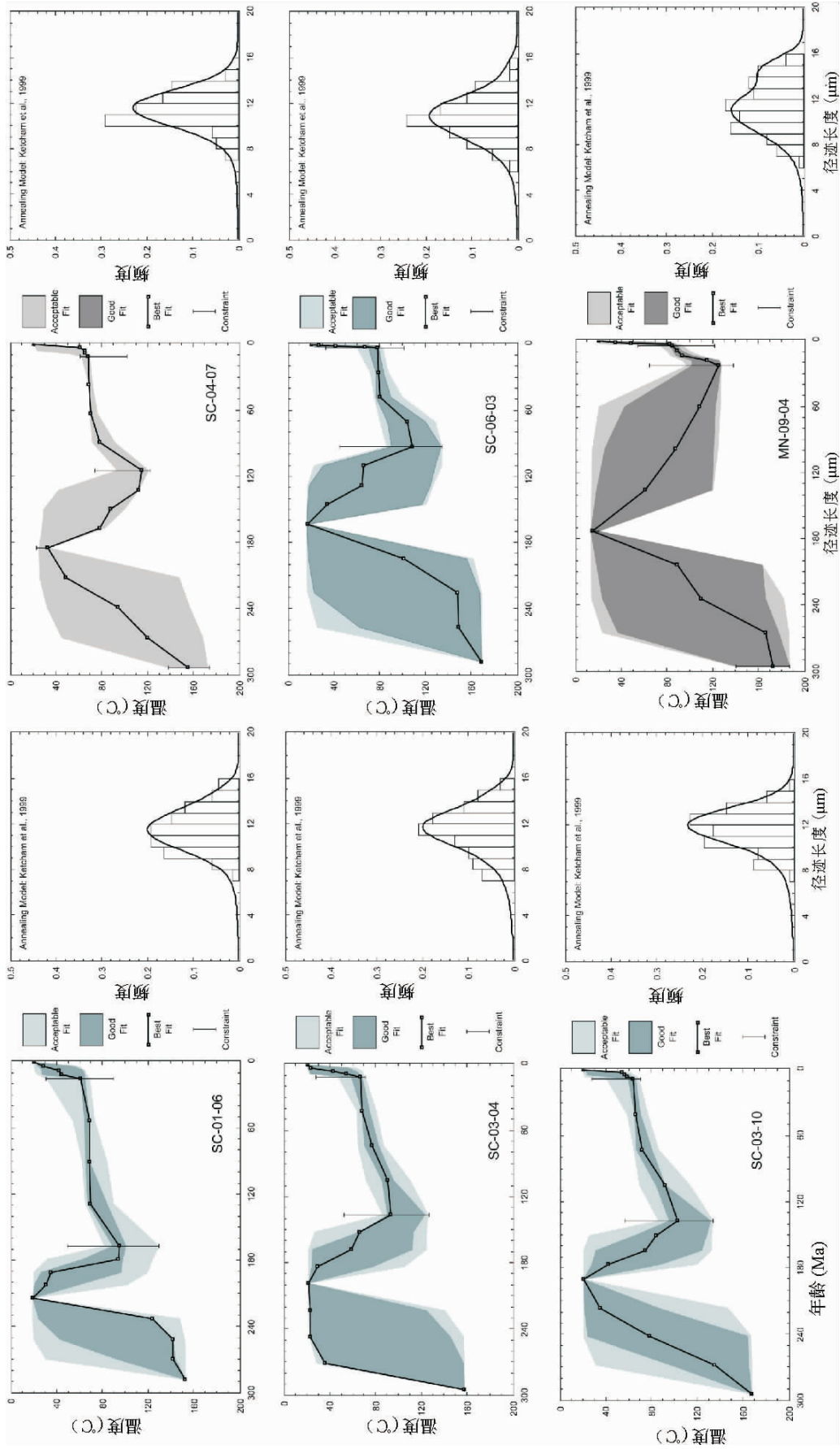


图6 石场-玛纳斯剖面部分样品的模拟温度(T)-年龄(t)曲线图(采用 Ketcham *et al.* (1999) 退火模型)

Acceptable fit-可接受的模拟结果; Good fit-符合良好的模拟结果; Best fit-符合最好的模拟结果; Constraint-限制条件; 裂变径迹长度图中的曲线是与模拟结果相符的理想裂变径迹长度分布曲线
 Fig. 6 Genetic algorithm modeling for Shichang-Manas samples with sufficient track length data (after Ketcham *et al.* , 1999)

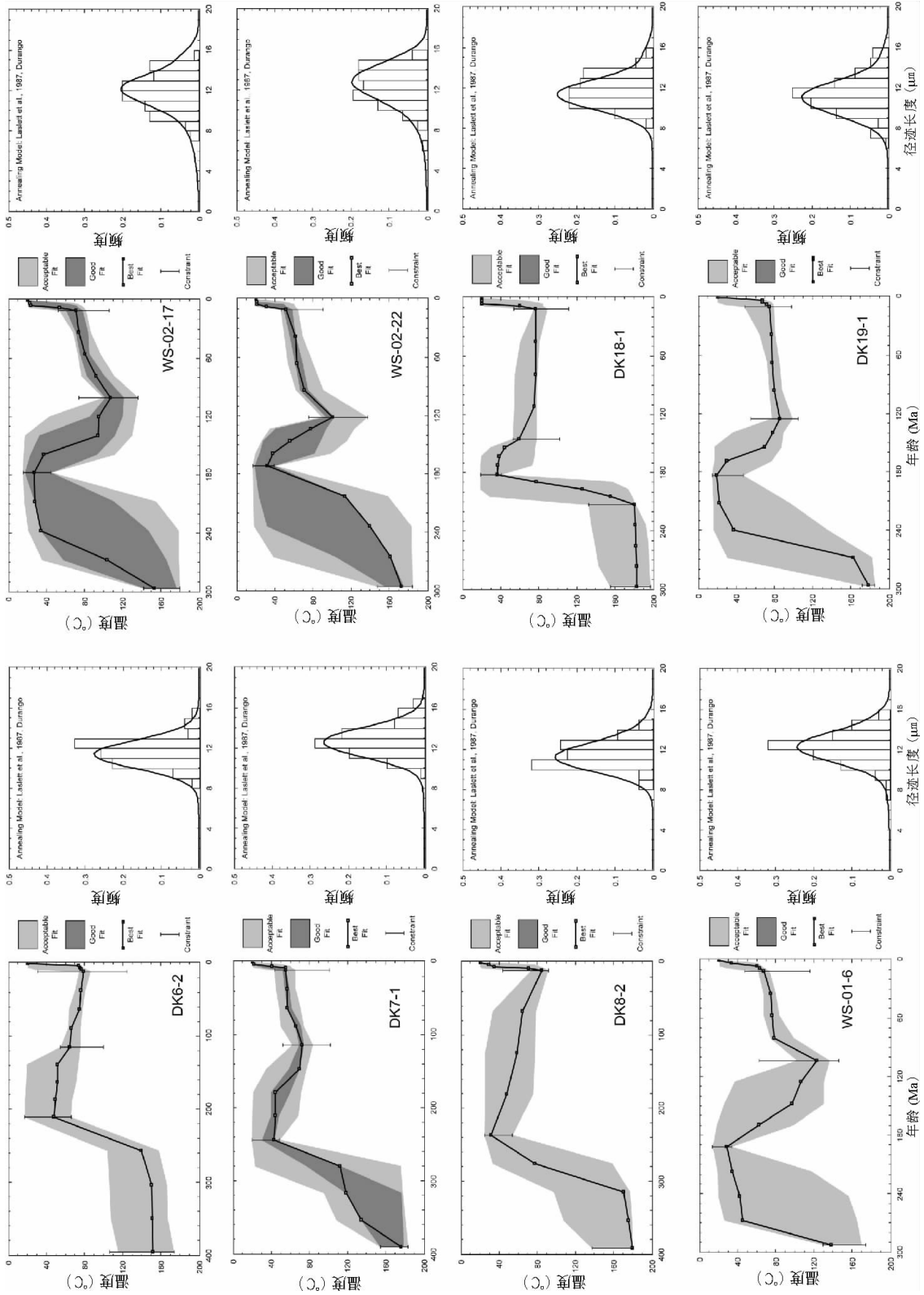


图7 安集海-四棵地区部分样品的模拟 $t-T$ 曲线图(采用 Lassel 等(1987)退火模型)说明见图6
 Fig.7 Genetic algorithm modeling for Anjihai-Sikeshu samples with sufficient track length data(after Lassel et al., 1987)

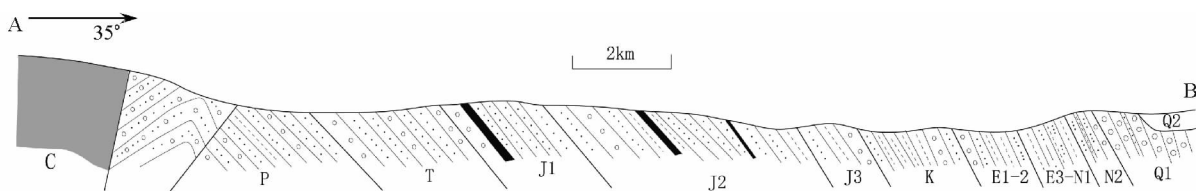


图8 石场地区南北向剖面图(剖面位置见图2)

Fig. 8 N-S geological section of Shichang-Manas area

所有样品中磷灰石裂变径迹模拟都记录了10Ma左右的快速冷却过程,表明盆地南缘的剥蚀隆升主要发生在晚渐新世以来。准噶尔盆地南缘中生界主要是在中新世以后被剥露至地表的,在近10Ma的时间里发生了4~5km的剥蚀,平均剥蚀速率400~500m/Ma。这一剥蚀过程应该与天山地区的快速隆升,以及向北的冲断推覆作用相对应。天山地区北缘隆升作用开始时间应为10Ma左右,山前带的变形应不早于这一时间,这一认识与野外地质证据一致(郭召杰等,2006;方世虎等,2007)。

总之,裂变径迹分析和镜质体反射率结果表明中生界地层的埋藏深度在安集海河、四棵树河以及石场地区相对较浅,沉积持续时间到晚侏罗世基本上已经结束,然后保持在基本不变的深度,不整合在三叠系之下的花岗岩的模拟结果也支持这样的认识。玛纳斯地区沉积持续的时间相对较长,直至渐新世。说明盆地的沉积由南向北逐渐迁移,在玛纳斯河形成了新生代的沉积中心。晚侏罗世一早白垩世的冷却降温事件可能与地温梯度变化和隆升作用的共同结果;中新世以来的冷却降温则是印-藏碰撞远距离效应的记录,其中上新世一更新世冷却年龄是晚新生代以来天山快速抬升的响应,与天山北麓巨厚的磨拉石沉积相对应。

5.4 结论

中生界地层的磷灰石裂变径迹年龄和相应煤层的镜质体反射率研究表明地层由老到新镜质体反射率逐渐增加,磷灰石裂变径迹中值年龄逐渐降低,具有明显的变化规律。石场-玛纳斯地区,下部三叠系煤层 R_o 值较低,为0.56%,磷灰石裂变径迹中值年龄较大,为 125.3 ± 9.1 Ma;八道湾组煤层 R_o 为0.53~0.64%,磷灰石裂变径迹中值年龄介于 $81.3 \pm 4.7 \sim 87.8 \pm 5.9$ Ma;上部西山窑组煤层 R_o 最高,达到0.81%,磷灰石裂变径迹中年龄较低, $44.0 \pm 5.4 \sim 11.8 \pm 1.8$ Ma。相同层位,东部石场-玛纳斯一带 R_o 比西部四棵树地区高,磷灰石裂变径迹年龄东北较西部低。造成这种规律性变化的原因主要是埋藏深度不同造成。

磷灰石裂变径迹模拟结果表明:三叠系达到最大古地温的时间为中侏罗世,下侏罗统八道湾组地层达到最大古地温的时间为晚侏罗世晚期到早白垩世,中侏罗统地层达到最大古地温的时间为晚白垩世到渐新世,具有非常规律的变化特征;中生界三叠系、下侏罗统地层的埋藏深度在安集海河、

四棵树河以及石场地区相对较浅,上覆沉积持续的时间到晚侏罗世到早白垩世基本上已经结束,然后保持在基本不变的深度,直至中新世,不整合在三叠系之下的花岗岩的模拟结果也支持这样的认识。晚侏罗世一早白垩世的冷却降温事件可能与地温梯度变化和隆升作用的共同结果;中侏罗统地层埋藏增温过程持续时间较长,在玛纳斯地区直至渐新世末期,说明盆地中新世代的沉积中心由南向北逐渐迁移,在玛纳斯河形成了沉积的中心(方世虎等,2005)。

所有样品中磷灰石裂变径迹模拟都记录了10Ma左右的快速冷却过程,表明盆地南缘的剥蚀隆升主要发生在中新世以来。在近10Ma的时间里,近4~5km的地壳表层物质被剥蚀,平均剥蚀速率400~500m/Ma。这一剥蚀过程应该与天山地区的快速隆升,以及向北的冲断推覆作用相对应。天山地区山前带的变形应不早于10Ma,这一认识与野外地质证据一致(郭召杰等,2006;方世虎等,2007)。

致谢 胡圣标研究员(中国科学院地质与地球物理研究所)和王国灿教授(中国地质大学)详细审阅了全文,提出了宝贵修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Avouac JP, Tapponnier P, Bai M *et al.* 1993. Active thrusting and folding along the northern Tianshan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J. Geophys. Res.*, 98: 6755 - 6804
- Bellemans F, De Corte F, Van Den and Haute P. 1994. Composition of SRM and CN U-doped glasses: Significance for their use as thermal neutron fluence monitors in fission track dating. *Radiation Measurements*, 24(2): 153 - 160
- Bullen ME, Burbank DW, Garver JI *et al.* 2001. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building. *GSA Bulletin*, 113(12): 1544 - 1559
- Burchfiel BC, Brown ET, Deng QD *et al.* 1999. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *Int. Geol. Rev.*, 41: 665 - 700
- Burnham AK and Sweeney JJ. 1989. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 2649 - 2657
- Chen J, Burbank DW, Scharer KM *et al.* 2002. Magnetostratigraphy of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tien Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth and Planetary Science Letters*, 195: 113 - 130
- De Grave J, Buslov MM, Peter Van den haute. 2007. Distant effects of

- India Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 188–204
- Deng QD, Feng XY, Zhang PZ *et al.* 1999. Reverse fault and fold zone in the Urumqi range front depression of the northern Tianshan and its genetic mechanism. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 191–201
- Dumitru TA, Zhou D, Chang EZ *et al.* 2001. Uplift exhumation, and deformation in Chinese Tian Shan. In: Hendrix (ed). *Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation*. Geological Society of America Memoir, 194: 71–99
- Dunkl I. 2002. Trackkey: A Windows program for calculation and graphical presentation of fission track data. *Computer and Geoscience*, 28(1): 3–12
- Fang SH, Guo ZJ, Song Y *et al.* 2005. Sedimentary facies evolution and basin pattern of the Jurassic in southern margin area of Junggar Basin. *Journal of Paleogeography*, 7(3): 347–356 (in Chinese with English abstract)
- Fang SH, Guo ZJ, Wu CD *et al.* 2006. Jurassic Clastic Composition in the Southern Junggar Basin, Northwest China: Implications for Basin-Range Pattern and Tectonic Attributes. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 196–209 (in Chinese with English abstract)
- Fang SH, Song Y, Jia CZ *et al.* 2007. Time of Cenozoic intense deformation at the north margin of Tianshan and its implications for petroleum accumulation. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 205–214 (in Chinese with English abstract)
- Galbraith RF and Laslett GM. 1993. Statistical models for mixed fission track ages. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 21: 459–470
- Gleadow AJW, Duddy IR, Green PF and Lovering JF. 1986. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94: 405–415
- Green PF. 1981. A new look at statistics in fission track dating. *Nucl. Tracks*, 5: 77–86
- Green PF, Duddy IR, Laslett GM *et al.* 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite, 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chem Geol*, 79: 155–182
- Guo ZJ, Fang SH, Zhang R *et al.* 2006. Growth strata and their application in timing deformation of foreland thrust-fold belts in the north margin of Tianshan. *Oil & Gas Geology*, 27(4): 47–481 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Wu CD, Zhang ZC *et al.* 2005. Mesozoic-Cenozoic Relationships between Tianshan Mountain and Peripheral Basins: Evidences from Sedimentology and Exhumation of Jurassic in Houxia Area, Urumchi. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 558–567 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Zhang ZC, Wu CD *et al.* 2006. The Mesozoic and Cenozoic Exhumation History of Tianshan and Comparative Studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1–15 (in Chinese with English abstract)
- Hendrix MS, Dumitru TA and Graham SA. 1994. Late Oligocene—early Miocene unroofing in the Chinese Tianshan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22: 487–490
- Hurfurd, AJ. 1990. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommission on Geochronology. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 80: 171–178
- Hurfurd AJ and Green PF. 1982. A users' guide to fission-track dating calibration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59: 343–354
- Hurfurd AJ and Green PF. 1983. The zeta age calibration of fission-track dating. *Isotope Geoscience*, 1: 285–317
- Ketcham RA, Donelick RA and Donelick MB. 2000. AFTSolve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. *Geological Materials Research*, 2(1): 1–32
- Laslett GM, Green PF, Duddy IR *et al.* 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite. 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology Isotopes Geoscience Section*, 65: 1–13
- Liu YQ, Wang ZX, Jin XC *et al.* 2004. Evolution, Chronology and Depositional Effect of Uplifting in the Eastern Sector of the Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 320–331 (in Chinese with English abstract)
- Ma Q, Shu LS and Zhu WB. 2006. Mesozoic Cenozoic burial, uplift and exhumation: A profile along the Urumqi-Korla Highway in the Tianshan Mountains. *Xinjiang Geology*, 24(2): 99–104 (in Chinese with English abstract)
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects on a continental collision. *Science*, 189: 419–426
- Qiu NS, Yang HB, Wang XL. 2002. Tectono-thermal evolution in the Junggar Basin. *Chinese Journal of Geology*, 37(4): 423–429 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Guo ZJ, Zhu WB *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 ER and Dumitru TA. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), 5043–5063
- Tapponnier P and Molnar P. 1979. Active Faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions. *J. Geophys. Res.*, 84: 3425–3459
- Wang MF, Jiao YQ, Ren JY *et al.* 2007. Characteristics of Jurassic subsidence and its relation with tectonic evolution in Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 27–32
- Wang YB, Wang Y, Liu X *et al.*, 2001. Apatite fission-track records of Mesozoic and Cenozoic episode reactivation of Tian Shan and West Kunlun Mountains. *Regional Geology of China*, 20(1): 94–99 (in Chinese with English abstract)
- Yang G and Qian XL. 1995. Mesozoic-Cenozoic uplift of the Tian Shan Intraplate Orogenic Belt: Evidence from zircon and apatite fission-track dating. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 31(4): 473–478 (in Chinese with English abstract)
- Yang SF, Chen HL, Cheng XG *et al.* 2003. Cenozoic uplifting and unroofing of Southern Tien Shan. China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39: 1–8 (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: 1–27
- Zhang ZC and Wang XS. 2004. The issues of application for the fission track dating and its geological significance. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 40(6): 898–905 (in Chinese with English abstract)
- Zhou D, Dumitru TA, Graham SA *et al.* 1995. Apatite fission track record of Mesozoic and Cenozoic episodic reactivation of the Chinese Tian Shan. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 27: 456
- Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite m lange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833–2842 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu WB, Shu LS, Wan JL *et al.* 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang Since the Cretaceous. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 16–22 (in Chinese with English abstract)
- Zhu WB, Wan JL, Shu LS *et al.* 2005. Mesozoic-Cenozoic thermal history of Turpan-Hami Basin: Apatite fission track constraints. *Progress in Natural Science*, 15(4): 331–336 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 邓起东, 冯先岳, 张培震等. 1999. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂-褶皱带及其形成机制. *地学前缘*, 6(4): 191–201
- 方世虎, 郭召杰, 宋岩等. 2005. 准噶尔盆地南缘侏罗纪沉积相演化与盆地格局. *古地理学报*, 7(3): 347–356
- 方世虎, 郭召杰, 吴朝东等. 2006. 准噶尔盆地南缘侏罗系碎屑成分特征及其对构造属性、盆地格局的指示意义. *地质学报*, 80(2): 196–209

- 方世虎, 宋岩, 贾承造等. 2007. 天山北缘晚新生代快速变形时间的确定及其成藏意义. 地学前缘, 14(2): 205-214
- 郭召杰, 方世虎, 张锐等. 2006. 生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用. 石油天然气地质, 27(4): 475-481
- 郭召杰, 吴朝东, 张志诚等. 2005. 乌鲁木齐后峡地区侏罗系沉积特征、剥露过程及中生代盆山关系讨论. 高校地质学报, 11(4): 558-567
- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东等. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 80(1): 1-15
- 柳永清, 王宗秀, 金小赤等. 2004. 天山东段晚中生代—新生代隆升沉积响应、年代学与演化研究. 地质学报, 78(3): 320-331
- 马前, 舒良树, 朱文斌. 2006. 天山乌—库公路剖面中、新生代埋藏、隆升及剥露史研究. 新疆地质, 24(2): 99-104
- 邱楠生, 杨海波, 王绪龙. 2002. 准噶尔盆地构造-热演化特征. 地质科学, 37(4): 423-429
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌等. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化. 高校地质学报, 10(3): 393-404
- 王敏芳, 焦养泉, 任建业等. 2007. 准噶尔盆地侏罗纪沉降特征及其与构造演化的关系. 石油学报, 28(1): 27-32
- 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): 94-99
- 杨庚, 钱祥麟. 1995. 中生代天山板内造山带隆升证据: 锆石、磷灰石裂变径迹年龄测定. 北京大学学报, 31(4): 473-478
- 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
- 张志诚, 王雪松. 2004. 裂变径迹定年资料应用中的问题及其地质意义. 北京大学学报(自然科学版), 40(6): 898-905
- 朱文斌, 万景林, 舒良树等. 2004. 吐鲁番-哈密盆地中生代热历史: 磷灰石裂变径迹证据. 自然科学进展, 14(10): 1194-1198
- 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