

新疆博格达山晚中生代以来的差异剥露史

汪新伟¹⁾, 汪新文²⁾, 马永生³⁾

1) 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 2) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083; 3) 中国石油化工股份有限公司南方勘探开发分公司, 昆明, 650200

内容提要:博格达山山前不同构造带内9个砂岩样品的裂变径迹分析与热史模拟表明, 博格达山浅部造山过程以前展式(盖层滑脱带内)与后展式(基底卷入带内)同时发育的逆冲构造扩展模式为特征; 博格达山晚中生代以来的多期构造抬升作用主要发生在155~135Ma、90~70Ma、约40Ma和约10Ma等4期, 其隆升剥蚀史主要经历了燕山早期的初始整体隆升(剥蚀量为0.83~1.2 km)、燕山晚期的缓慢抬升(剥蚀量为0.68~0.83 km)和喜马拉雅晚期的急剧差异隆升-剥露(逆冲推覆带的剥蚀量约为5.0 km、基底卷入带的剥蚀量为1.82~3.18 km、盖层滑脱带的剥蚀量为~2.73 km)等3个阶段, 其中盖层滑脱带因剥露作用启动的时间较晚而表现为冷却速率快、剥蚀速率高。博格达山晚中生代以来的变形作用与亚洲南缘多期地体的碰撞增生有关。

关键词: 磷灰石; 裂变径迹分析; 差异剥露; 晚中生代以来; 博格达山

近年来, 处于北天山东、西两段转换部位的博格达山成为研究大陆板内造山作用的热点之一(蔡立国, 2000; 王宗秀等, 2004; 李涛等, 2004)。愈来愈多的裂变径迹年龄证据表明, 现今的博格达山及其邻区强烈的隆升剥蚀作用主要发生于晚中生代以来, 且具有阶段性, 尽管对博格达山初始隆升发生的时间还存在着较大争议(王宗秀等, 2003; Hendrix et al., 1992; 张传恒等, 2005)。如Hendrix等(1994)通过磷灰石裂变径迹分析表明, 北天山中部玛纳斯地区的中生代地层约24Ma以来至少经历了4~5km的去顶作用, 并认为是印支碰撞远程效应的最初影响; 柳永清等(2004)根据磷灰石裂变径迹年龄出现的频率确定了中—东天山白垩纪末期—始新世(65.6Ma~45.22Ma~32.60Ma)的初始隆升以及24.74~15.98Ma、6.7~0.73Ma和小于0.73Ma等4个隆升时期; 沈传波等(2005)以锆石和磷灰石裂变径迹年龄数据推断博格达山初始隆升始于152.3~106.3Ma; 采用同样方法, 朱文斌等(2006)得出博格达山自白垩纪以来经历了多期冷却剥露史, 分别是早白垩世(119~105Ma)、晚白垩世(67~65Ma)、新生代早中期(47~31Ma)和新生代晚期(12~7Ma); 郭召杰等(2006)则认为天山陆内造山带中—新生代主

要经历了晚侏罗世—早白垩世和中新世以来(25~0Ma)两次明显的隆升事件。总的来说, 这些研究成果均把博格达山作为一个整体来分析其隆升剥露史, 从而缺乏对造山带内各构造区带的差异剥露及浅部造山过程的探讨。再者, 这些裂变径迹年龄值虽然均集中于晚侏罗世以来, 但差别较大, 且缺乏盆地沉积响应的限制。笔者认为, 在一个晚期遭受强烈剥露的地区, 其裂变径迹年龄值所反映的应当是发生隆升剥蚀作用的最小年龄, 即裂变径迹年龄的“滞后效应”, 故在进行裂变径迹分析及模拟时, 不能只以径迹年龄数据为依据, 应更多地结合实际的地质状况; 同一地区裂变径迹年龄存在较大差异的原因除因不同实验室所采用的测试方法与测试手段相异外, 主要与取样地点所处构造带的隆升次序(即通过裂变径迹封闭温度的先后)及其隆升速率有关。为此, 本文在总结前人研究成果的基础上, 结合区域地质状况, 以磷灰石裂变径迹分析与热史模拟为主要手段, 分析了博格达山山前褶皱冲断带内不同构造区带的差异剥露史, 同时也讨论了博格达山浅部的造山过程及其对盆地发育的控制。这对于理解陆内造山作用的浅部过程及其与盆地耦合的关系以及准噶尔盆地南缘的油气勘探均有重要意义。

注: 本文为中国石油化工股份有限公司科研项目(编号 XBKT2004KY03003)资助的成果。

收稿日期: 2007-07-28; 改回日期: 2007-10-02; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 汪新伟, 男, 1968年生。博士后, 主要研究方向为盆地构造分析。电话: 010-82282491; Email: wangxinwei@pepris.com。

1 地质概况与样品分布

博格达山总体上呈一向北凸出的弧形复背斜、穿插在准噶尔盆地、柴窝堡凹陷与吐哈盆地之间(图1)。博格达山复背斜核部主要出露中—上石炭统,为一套海相火山岩-碎屑岩-碳酸盐建造,以大面积出露中—基性侵入岩-火山岩为特征(Allen et al., 1992; 芮宗瑶等, 2002; 李锦轶, 2004);二叠纪—新生代的地层在南、北两翼均有发育,为一套陆相火山岩-陆相碎屑岩建造(舒良树等, 2005; 方世虎等, 2006)。北天山巴音沟蛇绿岩中辉长岩的同位素年龄为 $344.0 \pm 3.4\text{Ma}$, 表明巴音沟蛇绿岩所代表的北天山小洋盆发育时间为早石炭世(徐学义等,

2006), 石炭纪末的构造运动, 海盆闭合, 构成了本区的褶皱基底, 从二叠纪至第四纪进入陆内裂陷-坳陷-前陆盆地发育阶段(陈发景等, 2005)。主要受燕山期-喜马拉雅期构造运动的影响, 博格达山遭受强烈隆升剥蚀, 同时在其北侧与准噶尔盆地的交结部位形成多排褶皱-逆冲断层带(图1)。

山前褶皱-冲断带的构造样式可以从不同的角度来分析其展布规律与成因联系(Harding et al., 1979; Boyer et al., 1982; Thorbjorms et al., 1997)。本文根据褶皱-逆冲断层系位移纵向传递的观点以及褶皱-冲断带的基底卷入型和滑脱型, 将博格达山山前的褶皱-冲断带按逆冲方向由南至北划分为3个构造带, 即逆冲推覆构造带、基底卷入型褶

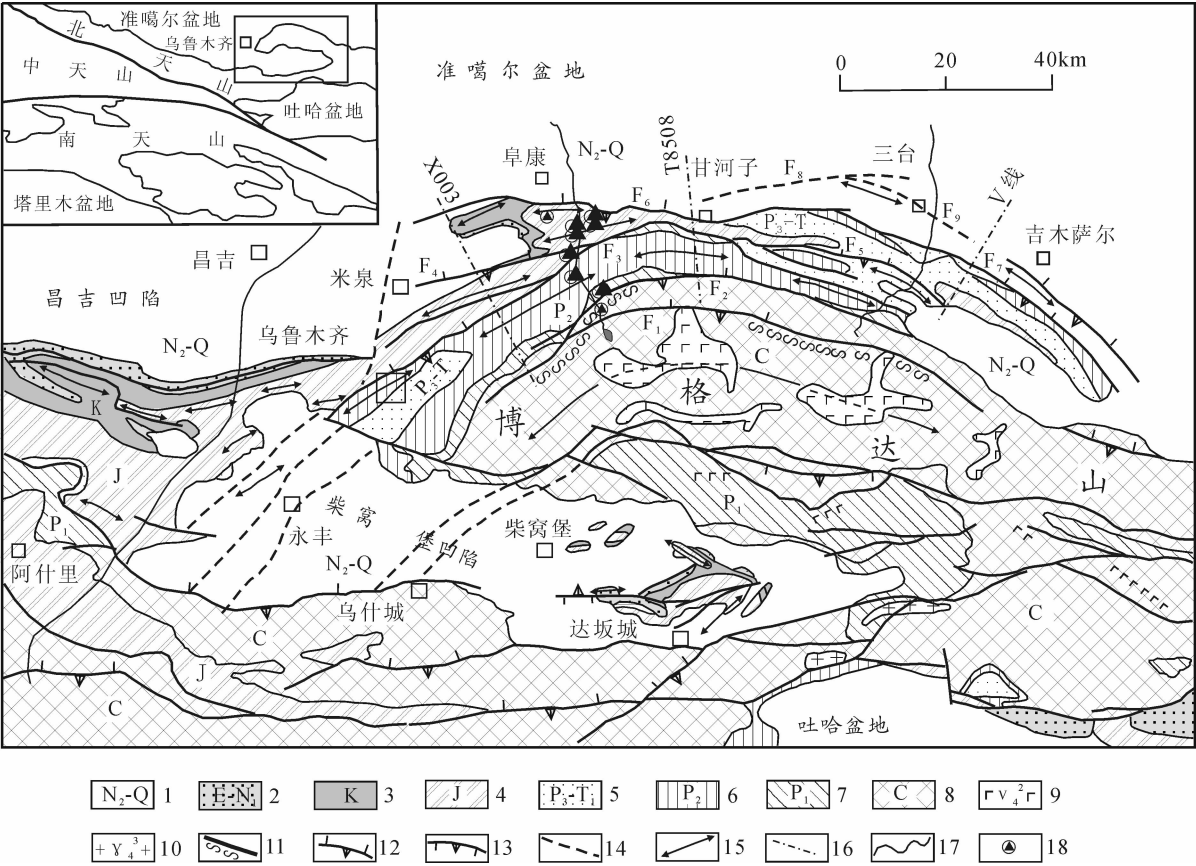


图 1 博格达地区构造地质略图与取样分布

Fig. 1 Simplified geologic map of Bogda region and sample locatons

1—上新统一第四系;2—古近系—中新统;3—白垩系;4—侏罗系;5—上二叠统—三叠系;6—中二叠统;7—下二叠统;8—石炭系;9—中—基性岩浆岩;10—花岗岩;11—韧性剪切带;12—逆断层;13—正断层;14—隐伏断层;15—背斜;16—地震测线;17—河流;18—取样位置;断裂: F₁—冰草台断裂; F₂—三工河断裂; F₃—妖魔山断裂; F₄—魏家泉断裂; F₅—泉子街断裂; F₆—阜康断裂; F₇—韭菜园子断裂; F₈—甘河子断裂; F₉—孚远断裂

1—Pliocene—Quaternary; 2—Palaeocene—Miocene; 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Upper Permian—Triassic; 6—Middle Permian; 7—Lower Permian; 8—Carboniferous; 9—intermediate—basic magmatic rock; 10—granite; 11—tenacious shear belt; 12—inverse fault; 13—normal fault; 14—hidden fault; 15—anticline; 16—seismic line; 17—river; 18—sample location. Faults: F₁—Bingcaotai thrust fault; F₂—Shangonghe thrust fault; F₃—Yaomoshan thrust fault; F₄—Weijiaquan thrust fault; F₅—Quanzijie thrust fault; F₆—Fukang thrust fault; F₇—Jiucaiyuanzi thrust fault; F₈—Ganghezi thrust fault; F₉—Fuyuan thrust fault

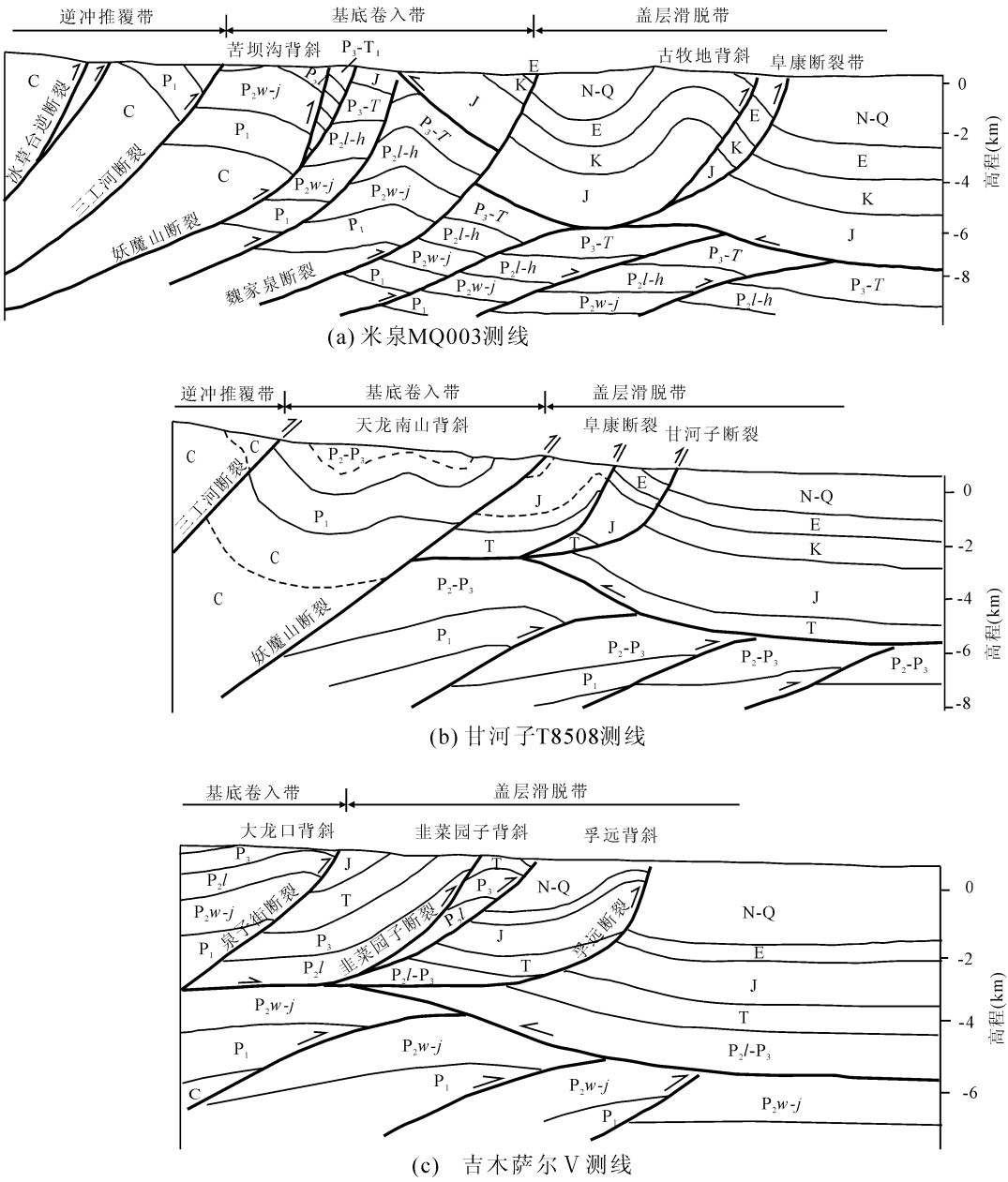
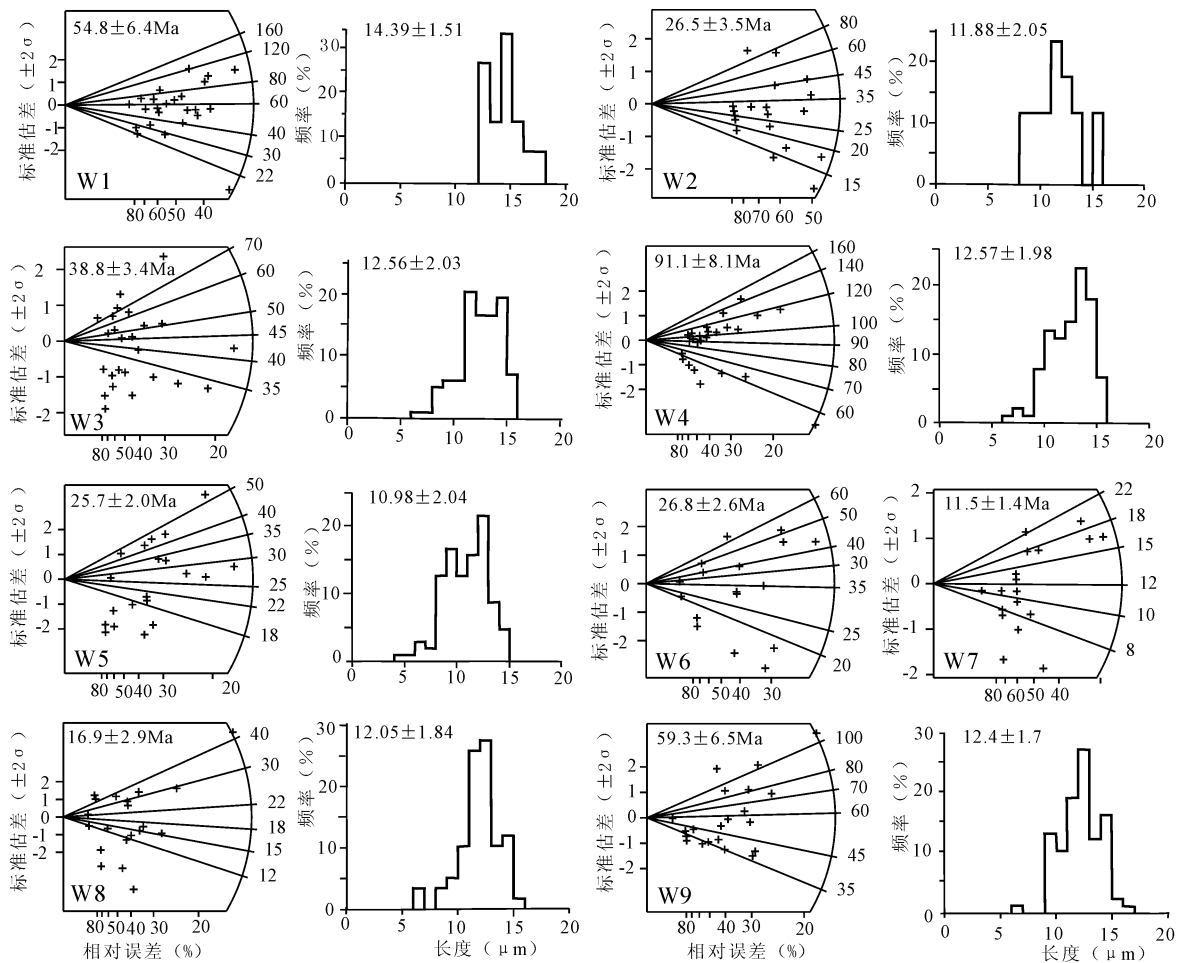


图 2 博格达地区地震地质解释剖面

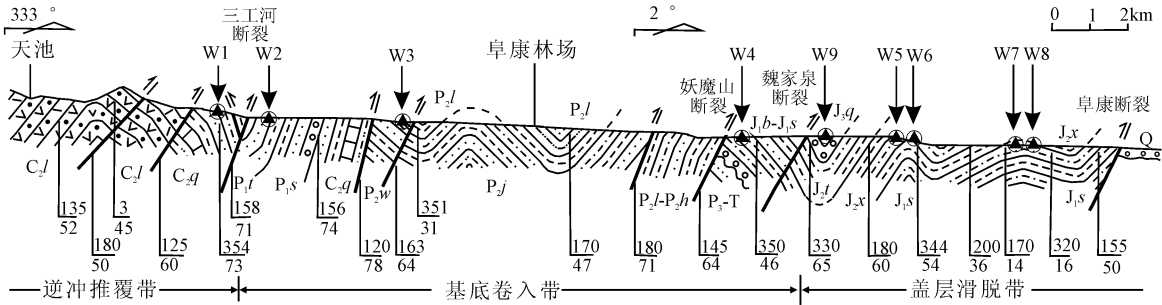
Fig. 2 Geological explanation of the seismic reflection profiles in Bogda region
Q—第四系；N—新近系；E—古近系；K—白垩系；J—侏罗系；T—三叠系；C—石炭系；P₃—上二叠统；P₂l—中二叠统芦草沟组；P₂h—中二叠统红雁池组；P₂w-j—中二叠统井井子沟组-乌拉泊组；P₂—中二叠统；P₁—下二叠统
Q—Quaternary；N—Neogene；E—Paleogene；K—Cretaceous；J—Jurassic；T—Triassic；C—Carboniferous；P₃—Upper Permian；P₂l—Middle Permian Lucaogou Fm.；P₂h—Middle Permian Hongyangchi Fm.；P₂w-j—Middle Permian Jinjizigou Fm.-Wulapo Fm.；P₂—Middle Permian；P₁—Lower Permian

皱-冲断带和盖层滑脱型褶皱-冲断带(简称逆冲推覆带、基底卷入带和盖层滑脱带,下同),其分布边界分别为三工河断裂和魏家泉-妖魔山-泉子街断裂(图 1、图 2)。其中,逆冲推覆带表现为组成基底的石炭系逆冲或推覆在中二叠系与中-新生代地层之上;基底卷入带则以组成基底的石炭系被逆断层抬升且被卷入冲断-褶皱为特征;盖层滑脱带表现为盖层在变形过程中受泥岩层、煤层等塑性滑脱层的影

响,垂向上多呈现双层结构,基底变形微弱(图 2)。
为获取博格达山的差异剥露信息,本次研究分别对博格达山山前褶皱-冲断带的 3 个构造带进行采样分析。在野外沿天池剖面高层由高至低、层位由老至新依次选取石炭系—侏罗系的砂岩露头标本,共 9 块,其中逆冲推覆带 1 块、基底卷入带 3 块、盖层滑脱型带 5 块(图 1、图 3)。



(a) 单颗粒年龄辐射图与径迹长度分布直方图



(b) 地质剖面与样品分布

图 3 博格达地区样品分布与裂变径迹测试结果

Fig. 3 Strata of AFTA samples and its analysis result in Bogda region

C_{2l} —中石炭统柳树沟组; C_{2q} —中石炭统祁家沟组; P_3-T —下二叠统-三叠系; P_{2w} —中二叠统乌拉泊组; P_{2l} —中二叠统芦草沟组; P_{2h} —中二叠统红雁池组; P_{2j} —中二叠统井井子沟组; P_{1t} —下二叠统塔代库拉组; P_{1s} —下二叠统石人子沟组; J_{3q} —上侏罗统齐古组; J_{2t} —中侏罗统头屯河组; J_{2x} —中侏罗统西山窑组; J_{1b} —下侏罗统八道湾组; J_{1s} —下侏罗统三工河组; Q —第四系
 C_{2l} —Middle Carboniferous Liushugou Fm.; C_{2q} —Middle Carboniferous Qijiaogou Fm.; P_3-T —Late Permian-Trassic; P_{2w} —Middle Permian Wulapo Fm.; P_{2l} —Middle Permian Lucaogou Fm.; P_{2h} —Middle Permian Hongyanchi Fm.; P_{2j} —Middle Permian Jinjizigou Fm.; P_{1t} —Lower Permian Tadakula Fm.; P_{1s} —Lower Permian Shirenziwen Fm.; J_{3q} —Upper Juassic Qiqu Fm.; J_{2t} —Middle Juassic Toutunhe Fm.; J_{2x} —Middle Juassic Sishanyao Fm.; J_{1b} —Lower Juassic Badaowan Fm.; J_{1s} —Lower Juassic Sangonghe Fm.; Q —Quaternary

2 实验方法与结果

裂变径迹测试实验在中国科学院高能物理研究

所实验室进行。所采集的每个样品经粉碎研磨后,应用常规重液分离法和磁选法分选出足够测试需要的磷灰石单矿物。将若干磷灰石颗粒放在聚四氟乙

烯板上,滴加调配好的环氧树脂,并盖一干净玻片,在 70℃下烘 18h 使之固化;然后将制好的样片进行研磨、抛光为光薄片,在恒温 25℃下用 6.6% HNO₃ 蚀刻 30s 揭示自发径迹。采用外探测器法定年,将低铀白云母紧贴在光薄片上,与 CN5 标准铀玻璃一起构成定年组件。样品置于反应堆内辐照,照射的中子注量为 1×10¹⁶ cm⁻²。反应堆照射后将云母外探测器置于 25℃的 HF 酸中蚀刻 35 min,揭示诱发裂变径迹。应用澳洲进口的裂变径迹自动测量装置测量径迹密度和径迹长度,径迹长度为矿物内部完全的封闭径迹长度。年龄计算采用 Zeta 常数法(Hurford et al.,1983),本文获得的 Zeta 常数为 359.2±10.8 (1σ)。

测试结果如表 1、图 3 所示。其中绝大部分样品的径迹年龄检验几率 $\rho(\chi^2)$ 均大于 5%,说明其单颗粒年龄属同一组(Galbraith et al.,1993),是近期构造-热事件的反映,故进行径迹年龄分析时取中值年龄;而 W5、W6、W7 等 3 个样品的检验几率 $\rho(\chi^2)$ 均小于 5%,说明它们的磷灰石源自不同蚀源区,其单颗粒年龄属不同的年龄组分,因而在进行径迹年龄分析时使用组合年龄。此外,磷灰石裂变径迹封闭温度取 125℃,部分退火带为 60~125℃(Green et al.,1989),在正常地温梯度 2.5~3.0℃/100m 下,径迹年龄反映了地壳深度在 0~4.5 km 内的埋

藏-剥蚀信息。

3 数据分析与热史模拟

3.1 裂变径迹年龄分析

磷灰石裂变径迹分析(AFTA)作为一种解决低温热年代学最有效的方法,目前被国内外学者应用于造山带隆升剥露过程及其形成机制的研究(如 Fugenschuh et al.,2003; Foeken et al.,2003; Bruijne et al.,2002)。当区域等温面保持水平时,热年代越老的样品越先通过等温封闭温度面而上升到上地壳浅部,因此,样品的径迹年龄值代表了样品被剥蚀到上地壳浅部的时间,即径迹年龄值越大,被剥蚀到上地壳浅部(古地温<退火温度)的时间越早;径迹年龄值越小,样品被剥蚀到地壳浅部的时间越晚。它记录了构造运动使样品构造高程改变的期次以及样品被剥露到地表的先后次序。

通过对博格达地区系列的裂变径迹年龄在取样剖面上的分析、对比(图 3),可得到如下认识:

(1)所有样品的径迹年龄均远小于其地层时代,表明均经历了后期热事件的强烈退火作用,裂变径迹年龄记录了样品隆升过程中经过退火带时的年龄,代表了区域岩石剥露去顶的冷却时限。

(2)样品的径迹年龄主要分布在约 91Ma、55~60Ma、25~39Ma、12~17Ma 等 4 个区段内,反映了

表 1 博格达地区样品磷灰石裂变径迹分析结果
Table 1 Fission track analysis results of apatite samples from Bogda region

样品号	层位	颗粒数	$\rho_d(10^5\text{cm})$ (N_d)	$\rho_s(10^5\text{cm})$ (N_s)	$\rho_t(10^5\text{cm})$ (N_t)	$\rho(\chi^2)$ (%)	中心年龄 ±1σ(Ma)	组合年龄 ±1σ(Ma)	平均年龄 ±1σ(Ma)	径迹长度 ±SD(μm)(径迹数)
W1	C ₂ q	26	6.810 (8080)	1.716 (164)	4.008 (383)	18.5	54.8±6.4	52.2±5.1	58.4±7.1	14.4±1.5 (115)
W2	P ₁ t	19	6.984 (8080)	0.977 (87)	4.817 (429)	25.6	26.5±3.5	25.4±3.1	33.2±4.9	11.9±2.0 (17)
W3	P ₂ tw	26	6.636 (8080)	2.045 (227)	6.271 (696)	27.0	38.8±3.4	38.8±3.2	43.8±4.4	12.6±2.0 (97)
W4	J ₁ b	26	7.071 (8080)	3.270 (425)	4.686 (609)	10.6	91.1±8.1	88.0±6.2	92.5±5.5	12.6±2.0 (89)
W5	J ₂ x	20	6.549 (8080)	2.603 (249)	11.898 (1138)	0.01	24.9±3.1	25.7±2.0	26.2±3.3	11.0±2.0 (102)
W6	J ₂ x	19	7.419 (8080)	2.375 (148)	11.794 (735)	0.3	28.4±4.1	26.8±2.6	30.9±3.7	—
W7	J ₁ s	19	6.897 (8080)	1.328 (83)	14.236 (890)	0.3	11.6±1.5	11.5±1.4	12.1±1.2	—
W8	J ₁ s	22	6.462 (8080)	2.089 (177)	14.563 (1234)	56.7	16.9±2.9	16.6±1.4	19.9±3.4	12.1±1.8 (58)
W9	J ₃ q	22	6.375 (8080)	2.973 (263)	5.392 (477)	5.2	59.3±6.5	62.8±5.2	58.2±6.3	12.4±1.7 (101)

注:ρ_d、ρ_s和 ρ_t分别为标准径迹密度、自发径迹密度和诱发径迹密度;N_d、N_s和 N_t分别为标准径迹数、自发径迹数和诱发径迹数;ρ(χ²)为 χ² 概率;SD 为标准差。

晚燕山运动与喜马拉雅运动等多期构造幕所造成的隆升剥蚀事件的影响,尽管隆升事件发生的时间并不与样品的裂变径迹年龄完全同步。

(3)样品的裂变径迹年龄同采样高程之间不存在正相关关系(即采样高程较大的样品较早期通过径迹等温封闭温度面而上升到不退火的上地壳浅部,致使其裂变径迹年龄较大),这与朱文斌等(2006)的认识相一致;同时,样品的裂变径迹年龄与其地层年龄亦不呈“反序”规律分布(即地层年龄越老的样品越先沉积而后剥蚀,致使其裂变径迹年龄越小)。因此可推断,样品的裂变径迹年龄主要受山前褶皱-冲断带内逆断层的逆冲或推覆作用所控制,是后期的逆冲抬升或推覆作用改变了样品的裂变径迹年龄与地层沉积层序和采样高程之间的对应关系。所以,样品的裂变径迹年龄在褶皱-冲断带内各构造带(即逆冲推覆带、基底卷入带和盖层滑脱带)的差异反映了各构造带内样品遭受强烈隆升-剥露的先后性,从而反映了各构造带的控制断裂构造活动的次序性。从图 3 可知,它们的强烈抬升剥蚀的次序依次为:首先为基底卷入带前缘断裂(W4,91.1 Ma)、其次为逆冲推覆带前缘断裂(W1,54.8 Ma),尔后再在各纵向构造带内发育次一级的断裂及其所控制的褶皱,其中,基底卷入带内断裂的发育模式为后展式,即 $W2(26.5\text{Ma}) < W3(38.8\text{Ma}) < W4$;盖层滑脱带内断裂的发育模式为前展式,即 $W9(59.3\text{Ma}) > W5(25.7\text{Ma})$ 和 $W6(26.8\text{Ma}) > W7(11.5\text{Ma})$ 和 $W8(16.9\text{Ma})$ 。这种前展式与后展式同时发育的逆冲构造扩展模式是博格达山浅部造山过程的重要特征。

至于基底卷入带前缘断裂最先发育、逆冲出地表的原因,应与研究区早二叠世发育的裂谷系分布有关。准噶尔盆地早二叠世盆地发育的动力学背景为大陆裂谷环境(舒良树等,2005;陈发景等,2005),而不是石炭纪末造山运动之后所形成的前陆盆地(赖世新等,1999;吴晓智等,1996)。笔者在地质剖面解释的基础上,综合相关资料,恢复出博格达地区早二叠世裂谷盆地的原型(图 4)。从图 4 中可以看出,基底卷入带的前缘断裂处于早二叠世伸展断陷的斜坡地带,断陷同期沉积的及其期后坳陷沉积的二叠系地层比北侧厚,当后期受到挤压应力时,首先沿其构造软弱面的斜坡地带发育向北逆冲的逆断层,尔后逆断构造系分别在逆冲前缘和后缘依次发育。钻井资料证实,以魏家泉断裂和泉子街断裂(基底卷入带的前缘断层)为界的北侧二叠系薄而南

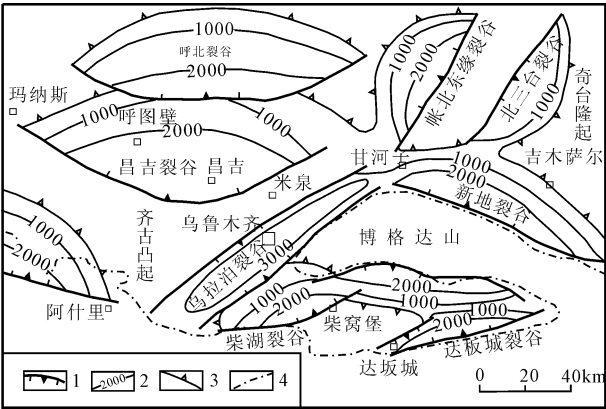


图 4 博格达地区早二叠世原型盆地分布
Fig. 4 Distribution of Early Permian prototype basin in Bogda region

- 1—同生断层;2—下二叠统等厚线;3—地层尖灭线;
- 4—现今盆地边界
- 1—Contemporaneous fault; 2—Lower permian isopach;
- 3—Stratigraphic overlap line; 4—Nowdays' basin boundary

侧二叠系厚,致使厚的二叠系逆冲在薄的二叠系之上。

3.2 封闭径迹长度分布特征

一个磷灰石样品在其热历史演化过程中,新径迹是不断产生的,其标准径迹长度为 $16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$ (Gleadow et al., 1986),随着温度的升高、退火,径迹长度逐渐变短。不同的径迹长度组经历了整个热史的不同部分,代表着该径迹组所经历的最高古地温及退火持续的时间。本文所获得的 7 个径迹长度分布直方图中(图 3),绝大部分具 2~3 个峰值,表明了多期构造热事件的存在;众多短径迹的分布($< 7 \mu\text{m}$),说明早期生成的裂变径迹经历了长时间的强烈退火作用,但未超过径迹封闭温度;长径迹的峰值($14 \sim 15 \mu\text{m}$)反映了后期快速的隆升剥露作用。从平均封闭径迹长度上分析,处于逆冲推覆带的样品 W1,取样层位最老(C_2q , 中石炭统祁家沟组)而平均径迹长度最大($14.39 \mu\text{m}$),与标准径迹长度相差不大且短径迹分布少,表明该样品晚期强烈的快速剥蚀作用是从径迹封闭温度线附近开始的,造成了早期径迹的近完全退火和后期径迹的弱退火作用;其余 6 个样品的平均径迹长度约为 $11 \sim 12.5 \mu\text{m}$,反映它们所经历的最高古地温在 $90 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

3.3 热史模拟

对裂变径迹封闭径迹长度分布进行模拟,可以重建样品的热历史,从而反映其埋藏-剥蚀史(如 Sullivan, 1999; Gibson et al., 2000)。对于山体隆

升剥蚀的热史模拟,应结合盆地沉积物的响应及其所反映的构造背景相一致,即要建立一个可靠的地质模型。研究区在燕山早期,早—中侏罗世表现为伸展凹陷沉积,博格达山南、北两侧发育的厚层湖沼相煤系地层、博格达山腹部残留的中—下侏罗统以及早—中侏罗世的古流向与沉积物扩散样式指向博格达山均说明此时博格达山被水淹没,整体接受沉积(汪新伟等,2007);上侏罗统齐古组—喀拉扎组(J_3q-J_3k)是一个向上变粗的碎屑沉积,沿玛纳斯河可见喀拉扎组具小型磨拉石堆积,且博南柴窝堡凹陷及博北甘河子以东地区缺失上侏罗统喀拉扎组的沉积,表明晚侏罗世末早燕山运动已使整个博格达山隆起,分隔了准噶尔盆地南缘的昌吉凹陷与柴窝堡凹陷。前人的裂变径迹年龄数据中有一组为155~110Ma,也证明了该期构造运动的存在(沈传波等,2005;郭召杰等,2006)。燕山晚期,准噶尔盆地南缘的米泉—吉木萨尔地区下白垩统发育厚层泥岩、泥砂岩,是一个由河流湖泊相沉积组成的正旋回,晚白垩世发育由砂泥岩、砂砾岩等河流相沉积组成的反旋回(谷云飞等,2003),且柴窝堡凹陷缺失上白垩统,表明博格达山在经过早白垩世稳定的剥蚀—夷平后,晚白垩世受晚燕山运动的影响又开始缓慢抬升。喜马拉雅期,准噶尔盆地南缘昌吉凹陷的古近系为河湖相泥岩和砂岩组成的正旋回沉积,而在新近纪至早更新世,发育大型陆内前陆盆地(陈发景等,2005),由河流冲积扇相组成的磨拉石堆积最大厚度达5 500m,这表明了博格达山在经历了古近纪的较稳定调整后,新近纪以来发生了急剧的隆升作用。总的来说,博格达地区晚中生代以来的剥蚀史主要经历了晚侏罗世—早白垩世初的初始隆升、晚白垩世—古近纪早期的缓慢抬升以及新近纪以来的急剧隆升等3个阶段。裂变径迹年龄数据基本与此相吻合。

在进行地质热历史模拟时,以研究区的地质模型为基础,结合前述的裂变径迹参数分析结果以及本区的不整合与地层发育史,采用 Ketcham(1999)多组分退火模型和蒙特卡罗法来模拟样品的封闭径迹长度分布。模拟的边界条件为:①样品古地温的增、减主要与样品的埋藏深度变化相关。因研究区中二叠世以来不发育岩浆岩,故无岩浆活动等异常古热流对径迹退火的影响。②热历史的起始时间与样品的地层年龄一致。因所模拟的样品的裂变径迹年龄远小于其母岩地层的年龄,获得的热历史相对较年轻,所以砂岩样品源区的裂变径迹均已遭受过

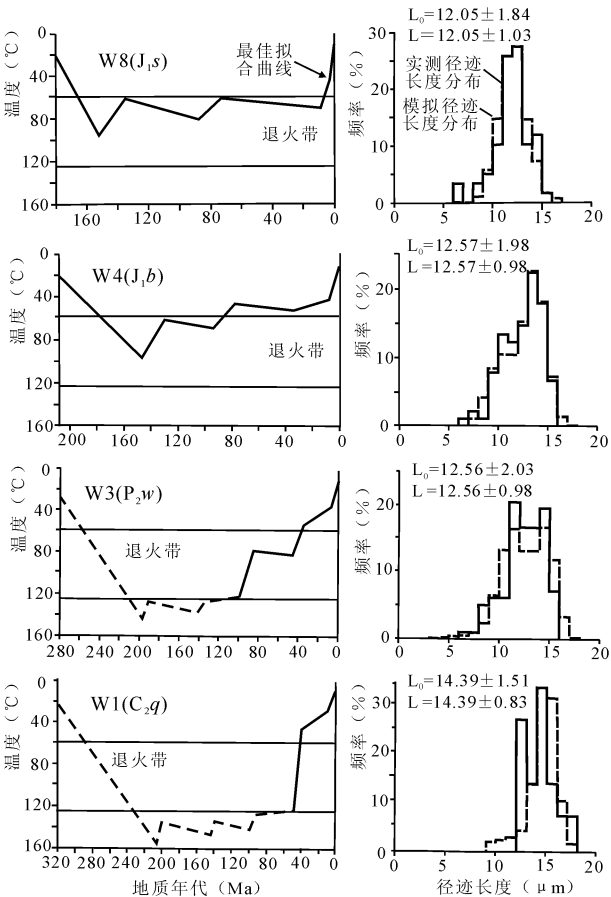


图 5 博格达地区磷灰石封闭径迹长度分布模拟图

Fig. 5 Modeling of distribution of apatite fission-track lengths in Bogda region

L₀—实测平均封闭径迹长度; L—模拟平均封闭径迹长度;
样品的模拟结合了本区的沉积充填史与不整合分析

L₀—measured lengths of confined fission-track; L—predicted lengths of confined fission-track. In addition, the samples' thermal history modeling referred to the analysis results of subsidence-burial history and unconformity

严重或完全退火。③古地表温度取 20~25℃,现今地表温度取 10℃,代表着岩石热史演化的起始值与终止值。④古地温梯度燕山期取 30℃/km、喜马拉雅期取 22℃/km(据 Hendrix,1994)。⑤退火带的温度为 60~125℃(Green et al., 1989)。本文选取了 4 个样品进行模拟,分别代表了博格达山山前褶皱—冲断带内不同构造带的热演化史,其最佳拟合的温度-时间曲线如图 5 所示。其中,样品 W1 与 W3 在完全退火状态下的热史(即图 5 左虚线部分)是根据本区的沉积充填史与不整合分析以及样品 W4 与 W8 的模拟结果相比较而得出,因它们在大幅度抬升前古地温均超过径迹封闭温度,对后期径迹的累积贡献不大,故不影响以热史为基础的晚期

差异剥蚀史分析。此 5 个样品热史模拟的 K-S 检验值与年龄 GOF 值均在 0.63~0.87 之间,表明模拟的结果是高质量的。

从模拟出的 4 个样品的时间-温度曲线上可以看出:

(1) 博格达山晚中生代以来的隆升-剥露史主要经历了 3 个阶段,即:①晚侏罗世末—早白垩世初(155~135Ma)的初始整体隆升阶段,该时期的早燕山运动使样品的古地温下降了 25~35℃,以地温梯度 30℃/km 推算,相当于剥蚀量为 0.83~1.2 km,冷却速率与剥蚀速率分别为 1.25~1.75℃/Ma、41.7~58.3m/Ma。②晚白垩世—古近纪初(90~70Ma)的缓慢抬升阶段,晚燕山运动使样品的古地温减小约 20~25℃,剥蚀量大约为 0.68~0.83 km,冷却速率与剥蚀速率分别为 1.0~1.25℃/Ma、33.3~41.7m/Ma。③古近纪末以来(约 40Ma 以来)的急剧差异隆升-剥露阶段,以地温梯度 22℃/km 推算,沿逆冲方向,逆冲推覆带(博格达山腹部)的剥蚀量最大,达到约 5.0 km,平均冷却速率约为 2.75℃/Ma、平均剥蚀速率约 125m/Ma;基底卷入带后缘次之,剥蚀量约为 3.18 km,平均冷却速率约为 1.75℃/Ma、平均剥蚀速率约 79.5m/Ma;基底卷入带前缘最小,剥蚀量约为 1.82 km,平均冷却速率约为 1.0℃/Ma、平均剥蚀速率约 45.5m/Ma;盖层滑脱带的剥蚀量介于基底卷入带的前缘带与后缘带之间,约为 2.73 km,但因启动时间较晚(约 10Ma)而表现为冷却速率快(约 6.0℃/Ma)、剥蚀速率高(约 273m/Ma)。剥蚀量分布的规律为,基底卷入带的前缘带最小,按逆冲方向依次向逆冲前方和逆冲后变大,与前述由裂变径迹年龄分析出的逆断层系扩展模式相一致。

(2) 逆冲-推覆带与基底卷入带从晚侏罗世末(约 155Ma)开始初始隆升后,一直处于剥蚀状态,而盖层滑脱带则在白垩纪接受沉积,其物源来自于邻近的基底卷入带和逆冲推覆带;盖层滑脱带在晚白垩世末期(90~70Ma)经缓慢抬升(晚燕山运动)后,至古近纪末期一至接受沉积;又于约 10Ma 以来一直遭受剥蚀,给前方的盆地沉积提供物源;而前陆准噶尔盆地的沉积作用除发育与构造运动相应的不整合面外,侏罗纪以来的地层均有发育,这说明了造山带逐步向北推进、盆地边界亦相应向北退却,反映了褶皱-冲断构造的发育对盆地沉积的控制作用。

(3) 逆冲推覆带与基底卷入带的 3 个样品的模拟图上,在约 10Ma 以来存在一个加速隆升、剥蚀的

时段,与盖层滑脱带开始强烈隆升、剥蚀的时间相一致,表明了该期存在一次强烈的隆升作用。同时,博格达山喜马拉雅晚期以来的急剧隆升、剥蚀(逆冲推覆带的剥蚀量约 5.0 km),致使褶皱-冲断带前方因岩石圈挠曲而发育大型陆内前陆盆地,接受巨厚的磨拉石堆积(N-Q₁ 最大沉积厚度约 5.5 km),反映了山脉隆升与盆地发育之间的耦合关系。从布格重力异常图上看,海拔约 5 km 的博格达山并没有显示出负异常,甚至相对于吐鲁番—哈密盆地表现出正异常,说明在高山之下没有上地幔坳陷,即所谓“无根”山脉(王宗秀等,2004),这也从侧面说明了博格达山晚期急剧隆升的存在,致使它与上地幔之间尚未达到重力均衡状态。

4 结论与讨论

样品的裂变径迹年龄分析表明,博格达山浅部造山过程为前展式与后展式同时发育的逆冲构造扩展模式,即首先发育基底卷入带前缘断裂、其次为逆冲推覆带前缘断裂,尔后再在基底卷入带内发育后展式逆冲断层系,而在盖层滑脱带内断裂的发育模式为前展式。Dahlstrom(1970)把逆冲构造扩展的方式划分为两类,一类是自后陆向前陆扩展,称为前展式或背驮式(piggyback propagation),另外一类为自前陆向后陆扩展,称为后展式或上叠式(overstep propagation),并认为绝大多数逆冲构造均以前展式扩展,称之为有序方式(in-sequence mode),而那些切割早期构造的逆冲断层则被称为违序或无序(out-of-sequence)逆冲断层。本文的研究表明,在一个由早期裂谷盆地反转而发生陆内造山作用的地方,逆冲构造的扩展方式表现为前展式与后展式同时存在。

热史模拟表明,博格达山晚中生代以来主要发生了 4 个时期的构造抬升作用,即晚侏罗世末—早白垩世初(155~135Ma)、晚白垩世—古近纪初(90~70Ma)、古近纪末(约 40Ma)和新近纪末(约 10Ma)。其隆升剥蚀史主要归纳为 3 个阶段,即①燕山早期的初始整体隆升阶段,剥蚀量为 0.83~1.2 km,冷却速率与剥蚀速率分别为 1.25~1.75℃/Ma、41.7~58.3m/Ma;②燕山晚期的缓慢抬升阶段,剥蚀量为 0.68~0.83 km,冷却速率与剥蚀速率分别为 1.0~1.25℃/Ma、33.3~41.7m/Ma;③喜马拉雅晚期的急剧差异隆升-剥露阶段,剥蚀量以基底卷入带前缘带为最小,依次向逆冲前方和逆冲后方变大。其中,基底卷入带的剥蚀量为

1.82~3.18 km、平均冷却速率为 1.0~1.75℃/Ma、平均剥蚀速率为 45.5~79.5m/Ma；逆冲推覆带剥蚀量约 5.0 km，平均冷却速率约为 2.75℃/Ma、平均剥蚀速率约 125m/Ma；盖层滑脱带的剥蚀量约为 2.73 km，但因启动时间较晚(约 10Ma)而表现为冷却速率快(约 6.0℃/Ma)、剥蚀速率高(约 273m/Ma)，反映了褶皱-逆冲构造逐渐向前陆扩展及其对盆地沉积的控制作用。

Hendrix 等(1992)在研究天山中新生代的变形作用时指出，其变形作用发生的期次与欧亚板块南部边缘不同陆块的碰撞、增生有关，它们分别为晚三叠世(230~200Ma)的羌塘碰撞、晚侏罗世(140~125Ma)的拉萨碰撞、晚白垩世(80~70Ma)的科希斯坦碰撞和晚古近纪以来(45Ma 至今)的喜马拉雅碰撞。同时，印度板块与欧亚板块碰撞对青藏高原及其北缘与天山地区的影响是一个长期的持续过程，如青藏高原的隆升主要经历了 45~30Ma、30~5 Ma 和 5 Ma 以来的 3 个构造期(陈发景等，2004)；阿尔金山北部地区新生代以来至少经历了 45~25Ma、20~15Ma 和 9~7Ma 等 3 次构造抬升(王瑜等，2002)等。博格达山晚中生代以来的多期冷却剥露事件，反映了拉萨地块、科希斯坦岛弧和印度板块与欧亚大陆碰撞对天山地区的远程影响。

参 考 文 献

蔡立国. 2000. 天山陆内俯冲造山带转换带的基本特征. 石油实验地质, 22(3): 206~209.

陈发景, 汪新文, 陈昭年, 杨杰. 2004. 伸展断陷盆地分析. 北京: 地质出版社, 169~178.

陈发景, 汪新文, 汪新伟. 2005. 准噶尔盆地的原型和构造演化. 地学前缘, 12(3): 77~89.

方世虎, 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 王美娜, 袁庆东. 2006. 准噶尔盆地南缘侏罗系碎屑成分特征及其对构造属性、盆格局的指示意义. 地质学报, 80(2): 196~208.

谷云飞, 马明福, 苏世龙. 2003. 准噶尔盆地白垩系岩相古地理. 石油实验地质, 25(4): 337~347.

郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 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.

赖世新, 黄凯, 陈景亮. 1999. 准噶尔晚石炭世、二叠纪前陆盆地演化与油气聚集. 新疆石油地质, 20(4): 293~297.

李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 50(3): 304~322.

李涛, 王宗秀, 周高志. 2004. 新疆博格达山分段及深浅构造转换关系. 地学前缘, 11(3): 103~114.

柳永清, 王宗秀, 金小赤, 李涛, 李寅. 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): 319

~331.

芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩型铜矿带及其大地构造格局. 地质学报, 76(1): 83~94.

沈传波, 梅廉夫, 刘麟, 汤济广, 周峰. 2005. 新疆博格达山裂变径迹年龄特征及其构造意义. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 27(2): 273~277.

舒良树, 朱文斌, 王博, Faure M, Charvet J, Cluzel D. 2005. 新疆博格达山南缘后碰撞期陆内裂谷和下水滑塌构造. 岩石学报, 21(1): 25~36.

汪新伟, 汪新文, 马永生. 2007. 新疆博格达山的构造演化及其与油气关系. 现代地质, 21(1): 116~124.

王瑜, 万景林, 李奇, 王非, 王二七. 2002. 阿尔金山北段阿克塞-当金口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据. 地质学报, 76(2): 191~198.

王宗秀, 李涛. 2004. 新疆博格达山链新生代再生造山机理. 地质通报, 23(3): 286~294.

王宗秀, 李涛, 周高志, 卢苗安, 柳永清, 李寅. 2003. 博格达山晚石炭纪造山活动的变形地质记录. 地学前缘, 10(1): 63~69.

吴晓智, 赵永德, 李策. 1996. 准噶尔东北缘前陆盆地构造演化与油气关系. 新疆地质, 14(4): 297~305.

徐学义, 李向民, 马中平, 夏林圻, 夏祖春, 彭素霞. 2006. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质学报, 80(8): 1 168~1 176.

张传恒, 刘典波, 张传林, 王自强, 余琪祥. 2005. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定. 地学前缘, 12(1): 294~302.

朱文斌, 舒良树, 万景林, 孙岩, 王峰, 赵忠岩. 2006. 新疆博格达山-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.

Allen M B, Windly B F, Zhang C. 1993. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese TienShan, central Asia. Tectonophysics, 220: 89~115.

Boyer S E, Elliot D. 1982. Thrust system. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 68(9): 1 196~1 230.

Bruijne C H, Andriessen P A M. 2002. Far field effects of Alpine plate tectonism in the Iberian micro-plate recorded by fault-related denudation in the Spanish Central System. Tectonophysics, 349(1~4): 161~184.

Cai Ligu. 2000. The transfer zone within intra-continent subduction orogenic belt in the Tiansha, northwest China. Experimental Petroleum Geology, 22(3): 206~209(in Chinese with English abstract).

Chen Fajing, Wang Xinwen, Chen Zhaonian, Yang Jie. 2004. Analysis of Extensional Rift-valley Basin. Beijing: Geological Publishing House, 169~178(in Chinese).

Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. 2005. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China. Earth Science Frontiers, 12(3): 77~89 (in Chinese with English abstract).

Dahlstrom C D A. 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canada Rocky mountain. Bull of Canadian Petroleum Geology, 187: 332~406.

- Fang Shihu, Guo Zhaojie, Wu Chaodong, Zhang Zhicheng, Wang Meina, Yuan Qingdong. 2006. Jurassic clastic composition in the southern Junggar Basin, northwest China: implications for basin-range pattern and tectonic attributes. *Acta Geological Sinica*, 80(2): 196~208 (in Chinese with English abstract).
- Foeken J P T, Duna T J, Bertotti G. 2003. Late Miocene to present exhumation in the Ligurian Alps with evidence for accelerated denudation during the Messinian Salinity Crisis. *Geology*, 31(9): 797~800.
- Fugenschuh B, Schmid S M. 2003. Late stages of deformation and exhumation of an Orogen constrained by fission-track data: A case study in the western Alps. *Bulletin of the Geological Society of America*, 115(11): 1 425~1 440.
- Galbraith R F, Laslett G M. Statistical models for mixed fission track ages. 1993. *Nuclear Tracks and Radiation Measurement*, 21(4): 459~470.
- Gibson H J, Stuwe K. 2000. Multiphase cooling and exhumation of the southern Adelaide fold belt: constraints from apatite fission track data. *Basin Research*, 12: 31~45.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, Lovering J F. 1986. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94: 405~415.
- Green P F, Duddy I R, Laslett G M, Hegarty K A, Gleadow A J W, Lovering J F. 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 4. Quantitative modeling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology*, 79: 155~182.
- Gu Yunfei, Ma Mingfu, Su Shilong. 2003. Lithofacies paleogeography of the Cretaceous in the Junggar basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(4): 337~347 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong, Fang Shihu, Zhang Rui. 2006. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai mountains. *Acta Geological Sinica*, 80(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Harding T P, Lowell J D. 1979. Structural styles: their plate habitats and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 63: 1 016~1 058.
- Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. 1994. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese TianShan: An early effect to the India-Asia collision. *Geology*, 22: 487~490.
- Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, Sobel E R, McKnight C L, Schulein B J, Wang Z X. 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.
- Hurford A J, Green P F. 1983. The Zeta age calibration of fission track dating. *Isotope Geosci.*, 1: 285~317.
- 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): 1 235~1 255.
- Lai Shixin, Huang Kai, Chen Jingliang. 1999. Evolution and oil-gas accumulation of Late Carboniferous and Permian foreland basin in Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(4): 293~297 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50(3): 304~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Tao, Wang Zongxiu, Zhou Gaozhi. 2004. The segmentation and the relationship between shallow and deep structures of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwest China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 103~114 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Wang Zongxiu, Jin Xiaochi, Li Tao, Li Yin. 2004. Evolution, chronology and depositional effect of uplifting in the eastern sector of the Tianshan mountains. *Acta Geological Sinica*, 78(3): 319~331 (in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao, Liu Yuling, Wang Longsheng, Wang Yitian. 2002. The eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework. *Acta Geological Sinica*, 76(1): 83~94 (in Chinese with English abstract).
- Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Liu Ling, Tang Jiguang, Zhou Feng. 2005. Characteristics of fission track age of Bogdashan in Xinjiang and Its structural significance. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 27(2): 273~277 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, Faure M, Charvet J, Cluzel D. 2005. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 25~36 (in Chinese with English abstract).
- Sullivan P B. 1999. Therochronology, denudation and variations in palaeosurface temperature: a case study from the north slope foreland basin, Alaska. *Basin Research*, 11: 191~204.
- Thorbjormsom K L, William M D. 1997. Origin of a thrust-related fold: genetic vs. kinematics test. *Journal of Structural Geology*, 19(3): 303~319.
- Wang Xinwei, Wang Xinwen, Ma Yongsheng. 2007. The tectonic evolution of Bogda Mountain, Xinjiang, northwest China and its relationship to oil and gas accumulation. *Geoscience*, 21(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu, Wan Jinglin, Li Qi, Wang Fei, Wang Erqi. 2002. Fission-track evidence for the Cenozoic uplift and erosion of the norther segment of the Altyn Tagh fault zone at the Aksay-Gangjin Pass. *Acta Geological Sinica*, 76(2): 191~198 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zongxiu, Li Tao. 2004. Mechanism of Cenozoic revival orogeny in the Bogda mountain chain, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 286~294 (in Chinese with English abstract).

Wang Zongxiu, Li Tao, Zhou Gaozhi, Lu Miaoan, Liu Yongqing, Li Ying. 2003. Geological record of the Late Carboniferous orogeny in BogdaShan, northern Tianshan Mountains, northwest China. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 63~69 (in Chinese with English abstract).

Wu Xiaozhi, Zhao Yongde, Li Che. 1996. Tectonic evolution of foreland basin at northeastern margin of Junggar and its relation with oil-gas. *Xinjiang Geology*, 14(4): 297~305 (in Chinese with English abstract).

Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Xia Linqi, Xia Zuchun, Peng Suxia. 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou ophiolite in the northern Tianshan mountains. *Acta Geological Sinica*, 80(8): 1 168~1 176 (in Chinese with English abstract).

Zhang Chuanheng, Liu Dianbo, Zhang Chuanlin, Wang Ziqiang, Yu Qixiang. 2005. Stratigraphic constraints on the initial uplift age of Bogda Shan, Xinjiang, northwest China. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 294~302.

Zhu Wenbin, Shu Liangshu, Wan Jinglin, Shun Yan, Wang Feng, Zhao Zhongyan. 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. *Acta Geological Sinica*, 80(1): 16~22 (in Chinese with English abstract).

Differential Exhumation History of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwestern China Since the Late Mesozoic

WANG Xinwei¹⁾, WANG Xinwen²⁾, MA Yongsheng³⁾

1) *Research Institute of Petroleum & Production, SINOPEC, Beijing*, 100083;

2) *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing*, 100083;

3) *Southern Exploration and Development Division Company, SINOPEC, Kunming, Yunnan*, 650200

Abstract

Apatite fission track analysis and thermal history modeling of nine sandstone samples collected from diverse structure belts of the Bogda Mountain reveal an orogenic process of upper crust and a differential exhumation history of the Bogda Mountain since Late Mesozoic. The orogenic process of upper crust of the Bogda Mountain is characterized by that the propagation sequences of thrust structures are piggyback within the detached belt and overstep within the basement-involved belt. Main tectonic uplifts of the Bogda Mountain since Late Mesozoic occurred at 155~135Ma, 90~70Ma, ~40Ma and ~10Ma, respectively. Correspondingly, uplift and exhumation history of the Bogda Mountain experienced three main stages, e. g. an initially integral uplift stage at the Early Yanshan epoch (with 0.83~1.2 km of amount denuded), a slow elevation stage at the Late Yanshan epoch (with 0.68~0.83 km of amount denuded) and a tremendously differential exhumation at the Late Himalayan epoch (with ~5.0 km of amount denuded in the overthrust belt, 1.82~3.18 km in the basement involved belt, and ~2.73 km in the detachment belt, respectively. The detachment belt presents characters of rapider cooling and higher denudation ratio due to a later starting exhumation time. Regional deformation was closely related to collision and accretion of the terrains in the south Asian continental margin since Late Mesozoic.

Key words: apatite; fission track analysis; differential exhumation; since Late Mesozoic; Bogda Mountain