

内蒙古大青山晚中生代以来的隆升-剥露过程

徐芹芹^{1,2,†} 季建清² 赵文韬² 于祥江²

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; † E-mail: qinqin2002dz1@163.com

摘要 对大青山东段4件基岩样品进行磷灰石裂变径迹研究, 获得该区晚中生代以来的隆升-剥露历史, 并探讨大青山现代地貌的形成。样品的磷灰石裂变径迹年龄为 $57.7\pm 3.8\sim 50.4\pm 3.3$ Ma, 封闭径迹长度分布在 $10.7\pm 0.4\sim 9.9\pm 0.1$ μm 之间。热历史模拟结果表明, 大青山地区存在晚白垩世(约100~90 Ma)和中-晚中新世(13.5~7 Ma)以来两个快速抬升冷却阶段, 13.5~7 Ma以来是本区剥露最快的时期, 这一阶段的隆升造就现今大青山的地貌格局。

关键词 磷灰石裂变径迹; 隆升-剥露; 中-晚中新世; 大青山

中图分类号 P542

Uplift-Exhumation History of Daqing Mountain, Inner Mongolia Since Late Mesozoic

XU Qinqin^{1,2,†}, JI Jianqing², ZHAO Wentao², YU Xiangjiang²

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 2. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; † E-mail: qinqin2002dz1@163.com

Abstract Four bedrock samples, collected from the eastern segment of Daqing Mountain, were analyzed using apatite fission-track (AFT) method. This elucidates the uplift-exhumation history of this area since the Late Cretaceous — in particular, when the present geomorphology of Daqing Mountain was shaped. The AFT ages range from 57.7 ± 3.8 Ma to 50.4 ± 3.3 Ma and the track length is between 10.7 ± 0.4 μm and 9.9 ± 0.1 μm . Modeling of the fission track data suggests two stages of rapid uplift and cooling, 100–90 Ma and since 13.5–7 Ma. The second cooling stage (since 13.5–7 Ma) was characterized by the fast uplift-exhumation in this area, resulting in the present geomorphology of Daqing Mountain.

Key words apatite fission track; uplift-exhumation; Middle-Late Miocene; Daqing Mountain

大青山位于华北板块北缘、天山-阴山纬向构造带中段^[1-2], 南与新生代河套断陷盆地相邻, 北与古生代天山-兴蒙造山带相接, 东西绵延近 200 km, 是阴山-燕山板内造山带的重要组成部分^[3-5]。因处于板块内部, 且构造变形强烈、复杂, 所以大青山地区是研究板内造山过程的理想区域^[6], 一直备受国内外地质学家的关注^[5-20]。许多学者对区内中生代板内构造变形进行了系统研究^[4,6,9-12,15-18,20], 取得许多新的认识。但是, 前人对大青山地区的研究

工作多偏重于构造运动及相关地质事件, 而对大青山的隆升过程研究不多, 尤其是对区内现代地貌的形成过程研究更少。

本文利用采于大青山东段的4个基岩样品, 采取磷灰石裂变径迹方法, 对该区热历史演化进行初步研究, 探讨大青山的隆升历史及现代地貌的形成。

1 区域地质概况

研究区内出露的地层以新太古代深变质岩系、

元古代变质岩系和中新生代沉积岩系为主, 另有少量古生界零星出露(图 1)。其中, 前寒武纪变质岩与中生代沉积地层组成大青山的主体(图 1)。

新太古代深变质岩系主要由变粒岩、片麻岩、片岩和大理岩组成, 整体上呈近东西向展布, 由于遭受较强烈的变质变形作用, 构造样式复杂。在石拐中生代沉积盆地南侧, 推覆构造作用将太古代变质岩推覆到古生代和中生代地层之上^[10,22-23]。元古界为浅变质岩类, 主要由片岩、大理岩、板岩、石英岩和变质石英砂岩等组成。

古生界零星出露于研究区中部, 包括寒武系-奥陶系、上石炭统和二叠系。寒武系-奥陶系为厚层结晶灰岩和白云岩夹中薄层石英砂岩。上石炭统拴马桩组为一套煤系地层, 主要岩性为石英砂岩、细砾岩和粉砂质页岩, 夹煤层、煤线和粉砂岩^[22]。二叠系主要由下二叠统大红山组、杂怀沟组、中二叠统石叶湾组和上二叠统脑包沟组组成, 岩性为砾岩、砂岩、泥岩和页岩, 主要分布在大青山中部。

中生代地层主要由三叠系、侏罗系和白垩系组成。三叠系只发育下三叠统老窝铺组, 由一套紫色含钙质结核的碎屑岩组成。侏罗系由下-中侏罗统石拐群和上侏罗统大青山组组成。石拐群下部岩组为砾岩、砂岩、页岩夹煤层, 上部为一套基性、中性至酸性火山岩^[24], 主要分布在大青山西段。大青山组为杂色碎屑岩夹煤线, 分布在大青山中东部。白垩系主要出露下白垩统李三沟组、固阳组和白女羊盘组, 李三沟组与固阳组为杂色碎屑岩夹煤层^[25], 白女羊盘组为陆相火山喷发-沉积地层^[26]。

区内新生界以新近系碎屑岩、玄武岩以及第四系松散堆积物为主。中新统为汉诺坝组玄武岩夹砖红色泥岩, 上新统为杂色碎屑岩, 含钙质结核和石膏层。第四系以冲洪积物、坡积物、黄土和砂质黏土为主。

区内岩浆活动频繁, 从太古代到燕山期均有岩浆活动(图 1)。从基性岩体到酸性岩体均有出露, 以酸性为主。太古代以花岗岩为主; 元古代以花岗岩、闪长岩为主, 其次为斜长花岗岩; 加里东期以闪长岩为主; 华力西期以闪长岩和花岗闪长岩为主; 印支期至燕山期以花岗岩为主。

2 实验方法与样品采集

磷灰石裂变径迹分析技术比较成熟, 已经广泛应用于造山带隆升-剥露、地表剥蚀、地质体热历

史等相关地质问题的研究中^[27-46]。磷灰石矿物中自发径迹(spontaneous track)的形成是一个不可逆的连续过程, 矿物的每一条裂变径迹记录了样品经历的低于封闭温度的整个热历史的某一阶段信息^[28]。根据磷灰石裂变径迹的年龄以及长度特征, 应用各种程序进行模拟, 可反演地质体的热历史, 探讨造山带的隆升与剥露过程。

本研究从呼和浩特市北部大青山东段采集 4 件基岩样品, 采样位置见图 2。采样过程中利用 GPS 定位系统记录采样点的位置和高程, 样品详细信息见表 1。其中, DQS-3 与 DQS-4 为平行样, 用于监测年龄测试精度。

样品经粉碎、研磨后, 应用常规重液分离法和磁选法分选出磷灰石单矿物。将磷灰石颗粒置于玻璃片上, 用环氧树脂黏合制片, 然后进行打磨、抛光, 磨制出观察面。在室温下(约 25℃)用 5 mol/L 的 HNO₃ 蚀刻 20 秒, 揭示磷灰石自发径迹。将低铀白云母外探测片与样品打包置于 ²³⁵U 中子活化反应堆辐照, 之后取下云母片在室温下 40% (体积比)的 HF 溶液中蚀刻 20 分钟, 揭示诱发径迹^[47]。裂变径迹年龄采用国际地质科学联合会(IUGS)推荐的 Zeta 常数法^[48-49]进行计算:

$$T = \lambda_d^{-1} \ln[1 + \lambda_d \xi g \rho_d (\rho_s / \rho_i)],$$

式中, $\lambda_d = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, 为 ²³⁸U 的衰变常数; $\xi = 393.5 \pm 27.5$, 是采用 Durango 和 Fish Canyon 磷灰石标样标定的个人 Zeta 常数; g 为几何参数; ρ_d 为中子注量监测器标准玻璃组件的诱发裂变径迹密度; ρ_s 为矿物中 ²³⁸U 自发裂变径迹密度; ρ_i 为云母片外探测器记录的矿物中诱发径迹密度。

裂变径迹年代学实验分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室所属的裂变径迹实验室完成, 径迹的测量在裂变径迹实验室 AUTOSCAN 测量定位装置中完成, 选取平行磷灰石结晶 c 轴最大抛光面的颗粒, 并在 ZEISS 偏光显微镜下统计。

3 磷灰石裂变径迹(AFT)分析结果与热历史模拟

3.1 AFT 分析结果

4 件样品的分析结果见表 1 和图 3。

测试结果显示, 所有样品单颗粒磷灰石裂变径迹年龄均通过 $P\chi^2$ 检验^[50]。 $P\chi^2$ 值用来检验样品中的磷灰石颗粒是否属于同一年龄组分。如果通过

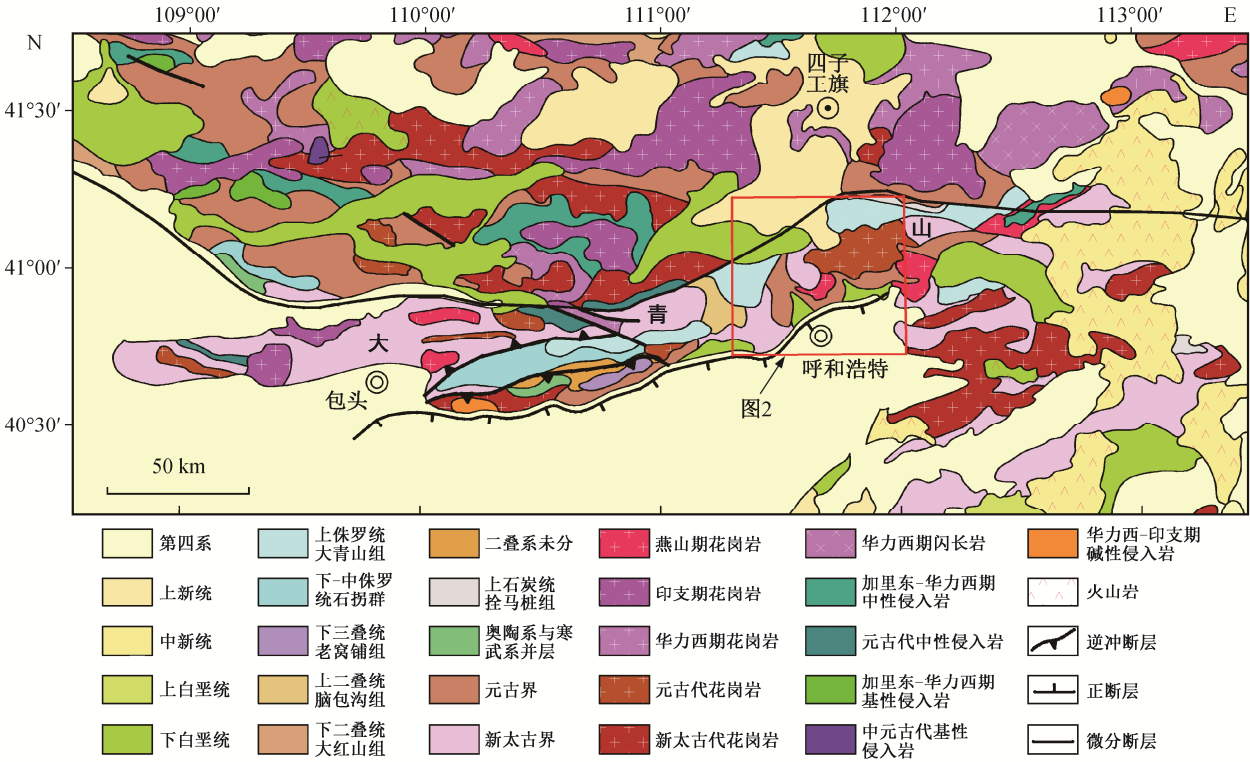


图 1 大青山及邻区地质图(据参考文献[21]修改)
Fig. 1 Geological map of Daqing Mountain and adjacent area (after Ref. [21])

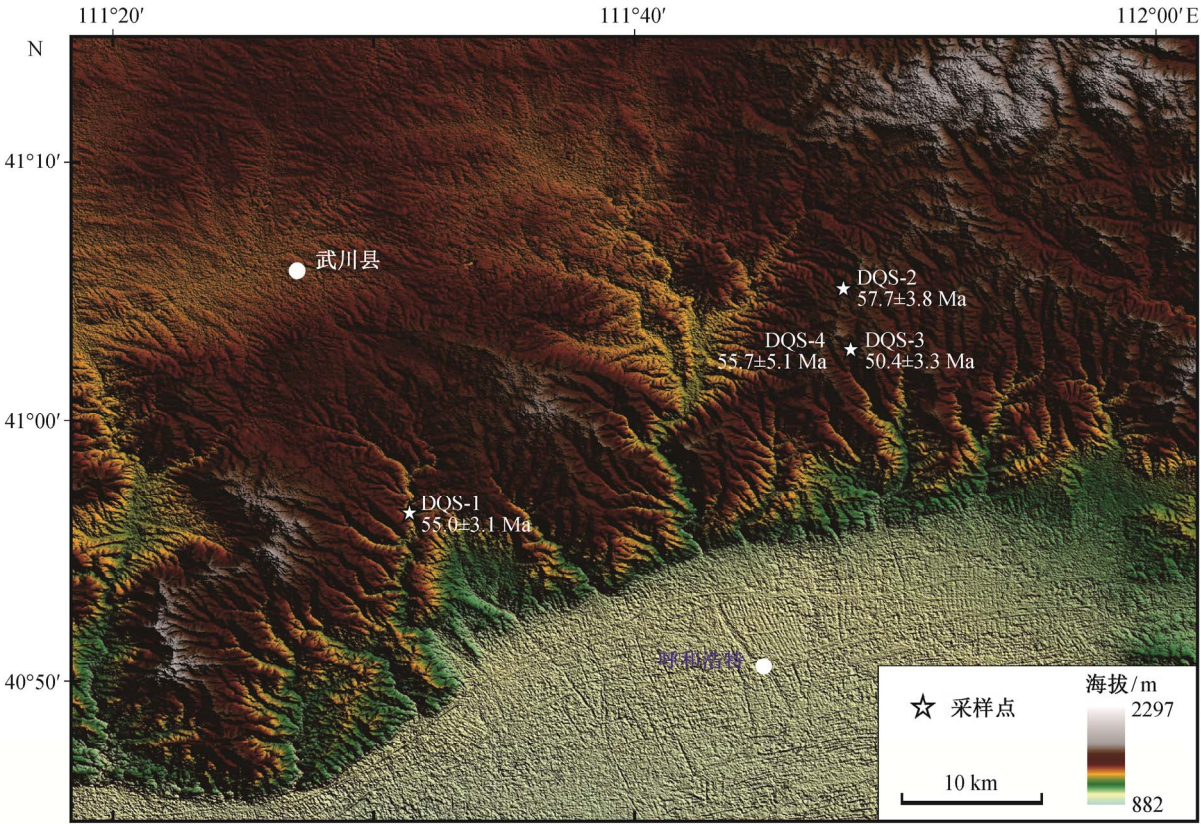


图 2 大青山数字地貌图及采样位置
Fig. 2 Digital geomorphological map of Daqing Mountain showing the sampling localities

表 1 大青山样品磷灰石裂变径迹分析结果
Table 1 AFT analysis of samples from Daqing Mountain

样品号	岩性	采样位置	高程/m	N_c	N_s	$\rho_s/10^5\text{cm}^2$	N_i	$\rho_i/10^5\text{cm}^2$
DQS-1	片麻岩	40°56'30"N, 111°31'23"E	1511	32	710	4.685	2356	15.545
DQS-2	花岗岩	41°05'07"N, 111°48'02"E	1796	32	451	3.838	1398	11.898
DQS-3	片岩	41°02'46"N, 111°48'19"E	1638	30	438	5.267	1522	18.302
DQS-4	片岩	41°02'46"N, 111°48'19"E	1638	12	191	3.727	574	11.200
样品号	N_d	$\rho_d/10^5\text{cm}^2$	$P\chi^2/\%$	中值年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)	池年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)	$L/\mu\text{m}$ ($\pm 1\sigma$)	N_j	标准偏差/ μm
DQS-1	8875	9.7534	88.60	55.0 \pm 3.1	55.0 \pm 3.1	10.7 \pm 0.4	106	2.1
DQS-2	4798	9.5498	99.84	57.7 \pm 3.8	57.7 \pm 3.8	9.9 \pm 0.3	82	1.1
DQS-3	8875	9.3462	98.86	50.4 \pm 3.3	50.4 \pm 3.3	10.3 \pm 0.1	59	1.3
DQS-4	8875	8.9389	59.50	56.7 \pm 5.6	55.7 \pm 5.1	—		

说明: N_c 表示颗粒数, N_s 表示自发径迹数, ρ_s 表示自发径迹密度, N_i 表示诱发径迹数, ρ_i 表示外部探测器中的诱发径迹密度, N_d 表示标准玻璃径迹数, ρ_d 表示标准玻璃径迹密度, $P\chi^2$ 表示概率, L 表示平均封闭径迹长度, N_j 表示测量封闭径迹长度的径迹条数。样品 DQS-4 未测试到有效数目的封闭径迹长度。

$P\chi^2$ 检验($P\chi^2 > 5\%$), 认为测试的磷灰石颗粒来源于同一年龄组分; 如果没有通过 $P\chi^2$ 检验($P\chi^2 \leq 5\%$), 则认为测试的磷灰石颗粒不是来源于同一年龄组分, 而是来自不同的物源区^[51]。本文全部样品的 $P\chi^2$ 都大于 5%, 即每个样品的全部颗粒都源于同一年龄组分。

测试得到的磷灰石裂变径迹中值年龄分布在 57.7 \pm 3.8~50.4 \pm 3.3 Ma 之间, 总体上变化幅度不大。封闭径迹长度分布在 9.9~10.7 μm 之间, 标准偏差分布在 1.1~2.1 μm 之间(表 1)。

另外, 由于样品 DQS-4 磷灰石颗粒质量差, 颗粒小, 表面污浊, 导致这一样品可供选择的磷灰石颗粒很少, 测试结果可能不准确, 因此没有起到平行样的效果, 但其年龄值可供参考, 故列入文中。

3.2 热历史模拟

由于磷灰石裂变径迹的产生和退火缩短是时间和温度的函数, 样品的封闭径迹长度记录了其经历的温度。利用 Ketcham 等^[52]给出的裂变径迹退火模型在地质时间尺度外推的方法, 可以预测样品在低温(低于 110 \pm 10 $^{\circ}\text{C}$)条件下的温度-时间演化曲线。本文利用 AFTsolve 程序^[53]反演该地区的低温热历史演化过程。

根据获得的裂变径迹参数和样品所处的地质背景, 确定反演模拟的初始条件, 包括: 1) 地表温度, 本文取 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右作为现今地表温度; 2) 研究区及邻区获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄^[4,6,9,11,17]、锆石裂变径迹年龄峰值^[14]反映该地区所经历低温热历史演化的时间为 138~119 Ma 以来, 本文简化处理, 设定 130

Ma 为样品进行模拟的起始年龄; 3) 在所研究的时间范围内, 假定样品处于由剥蚀引起的单边冷却的热历史演化过程中。

除样品 DQS-4 外, 对获得较多封闭径迹长度的其他 3 个样品(DQS-1, DQS-2, DQS-3)进行热历史模拟。每个样品均计算 10000 次随机产生的温度-时间条件下的裂变径迹年龄和长度, 模拟结果如图 4 所示, 每个样品都获得最佳的热历史路径。

热历史模拟结果(图 4)表明, 大青山地区总体上经历了三阶段的热演化模式。1) 约 100~90 Ma, 快速冷却阶段, 温度从 110 $^{\circ}\text{C}$ 降至 85 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 冷却速率约为 2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 。若以平均地温梯度 28 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 计算, 其隆升速率约为 89 m/Ma。2) 90~13.5 Ma, 该区基本上处于较稳定阶段。3) 13.5~7 Ma 至今, 又有一次快速的冷却过程, 温度从 90 $^{\circ}\text{C}$ 降至现今的地表温度 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 冷却速率为 5.9~11.4 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 隆升速率为 211.8~408.2 m/Ma。

4 讨论

大青山是阴山-燕山板内造山带西段的重要组成部分, 其隆升历史对研究阴山-燕山造山带的造山过程具有重要意义。前人围绕大青山及燕山山脉的隆升进行了一系列研究^[14,54-61]。

程绍平等^[58]根据大青山新生代等高峰顶面和晚第四纪河流阶地拱曲变形的证据, 并依据呼和浩特盆地中的地震探测获得的沉积厚度, 计算出大青山的剥蚀和地壳均衡隆起量, 提出地壳均衡隆起是大青山晚第三纪以来主要的区域变形机制。吴中海

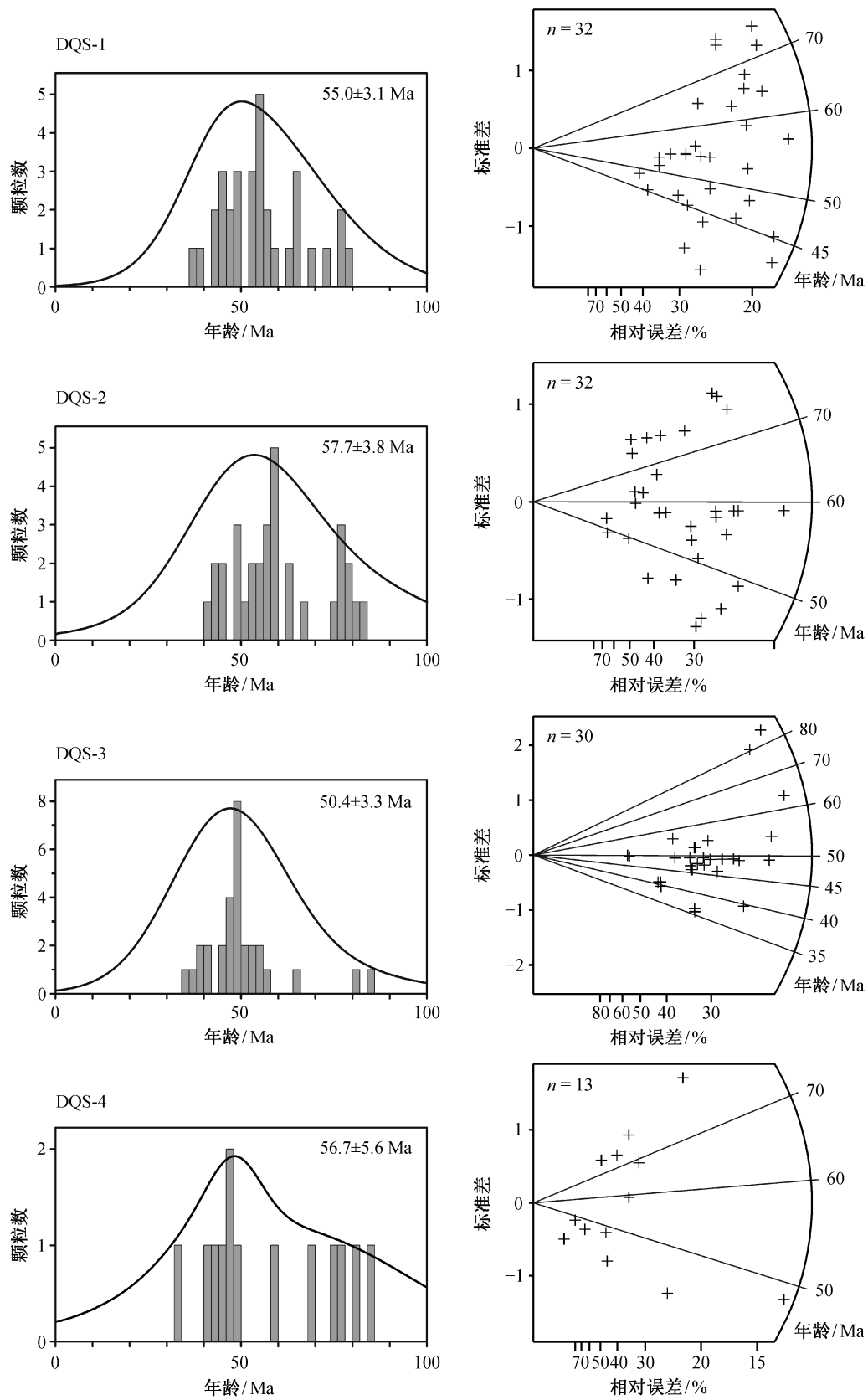


图 3 大青山样品单颗粒磷灰石年龄直方图(左)与放射图(右)
Fig. 3 Single grain AFT age distributions of the samples presented in age spectra (left) and radial plots (right)

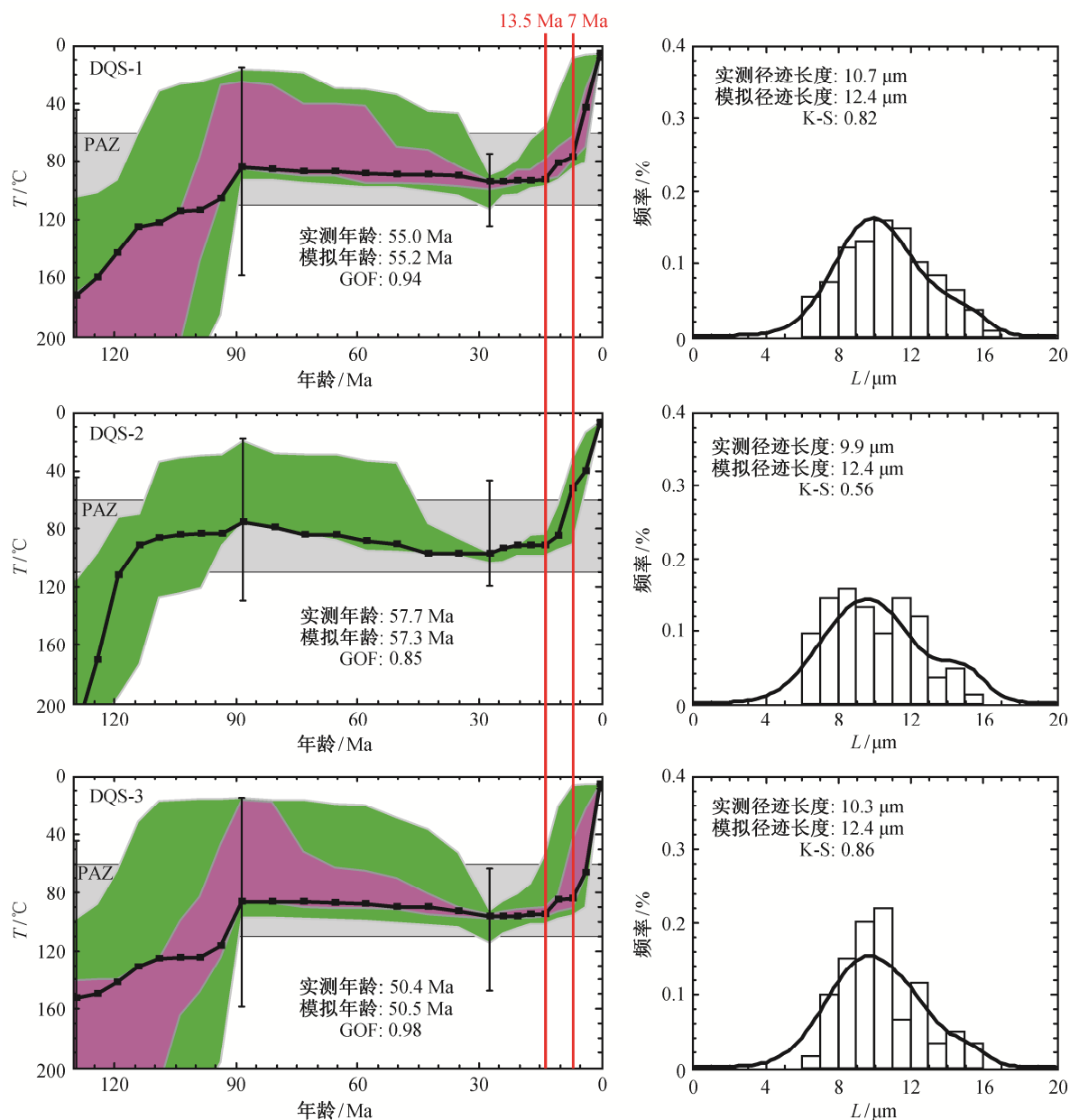


图 4 样品 DQS-1, DQS-2 和 DQS-3 的热历史模拟温度(T)–时间(t)曲线
Fig. 4 Modeling sketches of time-temperature paths for DQS-1, DQS-2 and DQS-3

等^[14]获得大青山地区磷灰石裂变径迹年龄为 50 Ma 和 90 Ma, 认为该区发生了两期重要的隆升事件。首先是约 100~90 Ma 间的快速隆升, 这次隆升范围较大, 涉及大青山和河套盆地区; 随后的快速隆升事件发生在 50 Ma 以来, 表明大青山山前正断层开始活动, 与河套盆地始新世以来的快速裂陷过程相一致; 始新世以来, 由大青山之山前正断层控制的

山、盆差异升降运动形成大青山地区现今的盆–山构造地貌格局。

Wu 等^[54]以及吴珍汉等^[55–57]根据磷灰石与锆石裂变径迹研究, 认为燕山山脉的快速隆升主要发生在 96~35 Ma、20~13 Ma 以及 6 Ma 以来, 3 次不同的隆升分别形成燕山中段的盘山与雾灵山、西段的云蒙山以及西南缘的八达岭山脉。马寅生等^[59]根

据裂变径迹年代学方法,并结合 K-Ar 同位素年代学资料,认为辽宁医巫闾山的隆升历史经历了118~81 Ma 和 14 Ma 两个快速隆升阶段。吴中海等^[60]根据燕山及邻区的低温热年代学数据,认为燕山及邻区晚白垩世以来经历了 6 次快速隆升事件,发生时代分别是 120~105 Ma、95~85 Ma、60~50 Ma、38 Ma 左右、25~20 Ma 和 10~5 Ma 以来,燕山与邻区盆地之间晚中新世以来的快速差异升降运动导致燕山及邻区现今盆-山构造地貌格局。李越等^[61]根据磷灰石裂变径迹研究,认为燕山东段响山岩体的隆升时间为白垩世末至古新世,响山岩体的隆起是北北东向断裂系活动所致。

前人对大青山以及燕山地区山脉隆升与热历史的研究结果显示,阴山-燕山东西向造山带可能经历了晚白垩世的整体隆升^[14],并且燕山地区还经历了中-晚中新世以来的快速隆升^[54-57,59-60]。

本文得到的大青山东段磷灰石裂变径迹年龄为 58~50 Ma,与吴中海等^[14]得到的年龄基本上一致。3 件样品的热历史模拟结果具有相似的特征(图 4),显示大青山地区存在约 100~90 Ma 和 13.5~7 Ma 以来两期主要的快速抬升和冷却过程。其中,约 100~90 Ma 的快速抬升对应于前人揭示的阴山-燕山造山带晚白垩世的隆升事件^[54-57,59-60]。13.5~7 Ma 以来是本区剥露最快时期,并且这一阶段的快速隆升造就了现今大青山的地貌格局。另外,最近的研究结果表明,太行山是晚中新世以来快速隆升剥露的产物^[62],贺兰山也存在晚新生代(12~10 Ma)的快速隆升剥露作用^[63]。

5 结论

1) 大青山地区 4 件样品的磷灰石裂变径迹年龄在 57.7±3.8~50.4±3.3 Ma 之间,总体上变化不大;封闭径迹长度分布在 10.7±0.4~9.9±0.1 μm 之间。

2) 热历史模拟显示,大青山地区存在晚白垩世(约 100~90 Ma)与中-晚中新世(13.5~7 Ma)以来两个快速抬升冷却阶段。

3) 13.5~7 Ma 以来是本区剥露最快的时期,且这一阶段的快速抬升最终造就了现今大青山的地貌格局。

致谢 成文过程中得到孙东霞博士的帮助,样品测试过程中得到北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室张志诚老师的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 李四光. 地质力学概论. 北京: 地质出版社, 1973
- [2] 王建平, 杨玉东. 内蒙大青山地区的冲断和推覆构造. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1983(4): 43-58
- [3] 王建平, 杨玉东. 大青山及邻区冲断推覆构造形成机制的讨论 // 构造地质论丛编辑部. 构造地质论丛(六). 北京: 地质出版社, 1986: 1-16
- [4] Zheng Y D, Davis G A, Wang C. Major thrust sheet in the Daqing Shan Mountains, Inner Mongolia, China. *Science in China: Ser D*, 1998, 41(5): 553-560
- [5] 朱绅玉, 杨继贤. 阴山带燕山运动特征. 内蒙古地质, 1998(2): 29-38
- [6] Darby B J, Davis G A, Zheng Y D. Structural evolution of the southwestern Daqing Shan, Yinshan belt, Inner Mongolia, China // Hendrix M S, Davis G A. Paleozoic and mesozoic tectonic evolution of central asia: from continental assembly to intracontinental deformation. Boulder: Geological Society of America Memoir, 2001, 194: 199-214
- [7] 葛肖虹. 华北板内造山带的形成史. 地质论评, 1989, 35(3): 254-261
- [8] Davis G A, Wang C, Zheng Y D, et al. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: new views on its intraplate contractional styles. *Geology*, 1998, 26(1): 43-46
- [9] Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, et al. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 2002, 30(11): 1003-1006
- [10] 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 论内蒙古大青山地区逆冲推覆构造. 中国区域地质, 1999, 18(4): 366-372
- [11] 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 内蒙古大青山逆冲推覆构造带中泥质板岩激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 中国地质, 2003, 30(3): 293-296
- [12] Ritts B D, Darby B J, Cope T. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia. *Tectonophysics*, 2001, 339: 239-258
- [13] 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 内蒙古大青山地区中生代造山运动及构造演化. 长春科技大学学报, 2001, 31(4): 317-322
- [14] 吴中海, 吴珍汉. 大青山晚白垩世以来的隆升历史. 地球学报, 2003, 24(3): 205-210
- [15] 戚国伟, 张进江, 王新社, 等. 内蒙古大青山中生

- 代逆冲-伸展构造格局及空间关系. 自然科学进展, 2007, 17(3): 329-338
- [16] 杜菊民, 张庆龙, 徐士银, 等. 阴山晚中生代板内造山特征及其动力机制: 以内蒙古大青山为例. 地质学报, 2009, 83(7): 910-922
- [17] 张进江, 戚国伟, 郭磊, 等. 内蒙古大青山逆冲推覆体系中中生代逆冲构造活动的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年. 岩石学报, 2009, 25(3): 609-620
- [18] Davis G A, Darby B J. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geoscience Frontiers*, 2010, 1(1): 1-20
- [19] Guo L, Wang T, Castro A, et al. Petrogenesis and evolution of late Mesozoic granitic magmatism in the Hohhot metamorphic core complex, Daqing Shan, North China. *International Geology Review*, 2012, 54(16): 1885-1905
- [20] 刘群. 内蒙古大青山山前断裂带构造变形特征. 世界地质, 2012, 31(1): 113-119
- [21] 任纪舜, 牛宝贵, 王军, 等. 1:5000000 国际亚洲地质图. 北京: 地质出版社, 2013
- [22] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- [23] 王兴安, 刘正宏, 王挽琼, 等. 内蒙古大青山逆冲推覆构造带中同构造方解石脉. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增刊 3): 111-118
- [24] 何峰, 杨丽. 乌拉山-大青山地区区域地质及成矿特征. 西部资源, 2012, (6): 116-117
- [25] 曹生儒, 郭喜珠, 吴之理, 等. 内蒙古自治区地质 // 马丽芳. 中国地质图集. 北京: 地质出版社, 2002: 141-148
- [26] 封书凯. 内蒙古白女羊盘地区白女羊盘组火山岩地层层序及时代. 内蒙古地质, 1998(4): 20-26
- [27] Laslett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology*, 1987, 65(1): 1-13
- [28] 康铁笙, 王世成. 地质热历史研究的裂变径迹法. 北京: 科学出版社, 1991
- [29] Fitzgerald P G, Sorkhabi R B, Redfield T F, et al. Uplift and denudation of the central Alaska Range: a case study in the use of apatite fission track thermochronology to determine absolute uplift parameters. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B10): 20175-20191
- [30] Johnson C. Resolving denudational histories in orogenic belts with apatite fission track thermochronology and structural data: an example from southern Spain. *Geology*, 1997, 25(7): 623-626
- [31] Ketcham R A, Donelick R A, Balestrieri M, et al. Reproducibility of apatite fission-track length data and thermal history reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284: 504-515
- [32] Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous-Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China). *Tectonophysics*, 2002, 359: 225-253
- [33] 郭召杰, 张志诚, 廖国辉, 等. 天山东段隆升过程的裂变径迹年龄证据及构造意义. 新疆地质, 2002, 20(4): 331-334
- [34] 王瑜, 万景林, 李齐, 等. 阿尔金山北段阿克塞-当今山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据. 地质学报, 2002, 76(2): 191-198
- [35] 袁万明, 董金泉, 保增宽. 新疆阿尔泰造山带构造活动的磷灰石裂变径迹证据. 地学前缘, 2004, 11(4): 461-468
- [36] Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin?. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(5/6): 651-671
- [37] Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupanshan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(122): 198-208
- [38] 陈正乐, 李丽, 刘健, 等. 西天山隆升-剥露过程初步研究. 岩石学报, 2008, 24(4): 625-636
- [39] 孙东霞, 季建清, 张志诚, 等. 雅鲁藏布江中下游流域地貌差异演化的岩屑磷灰石裂变径迹证据. 科学通报, 2009, 54(23): 3738-3747
- [40] Dörr N, Lisker F, Clift P D, et al. Late Mesozoic-Cenozoic exhumation history of northern Svalbard and its regional significance: constraints from apatite fission track analysis. *Tectonophysics*, 2002, 514/517: 81-92
- [41] 张志诚, 郭召杰, 李建锋, 等. 阿尔金断裂带中段中生代隆升历史分析: 裂变径迹年龄制约. 第四纪研究, 2012, 32(3): 499-509
- [42] 刘海青, 李荣西, 张艳妮, 等. 磷灰石裂变径迹在确定造山带隆升速率中的应用. 西北地质, 2014, 47(2): 119-125
- [43] Yang W, Jolivet M, Dupont-Nivet G, et al. Mesozoic-

- Cenozoic tectonic evolution of southwestern Tian Shan: evidence from detrital zircon U/Pb and apatite fission track ages of the Ulugqat area, Northwest China. *Gondwana Research*, 2014, 26: 986–1008
- [44] Tang W H, Zhang Z C, Li J F, et al. Mesozoic and Cenozoic uplift and exhumation of the Bogda Mountain, NW China: evidence from apatite fission track analysis. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(4): 617–625
- [45] 徐芹芹, 季建清, 孙东霞, 等. 新疆阿尔泰青河-富蕴地区晚新生代隆升-剥露过程: 来自磷灰石裂变径迹的证据. *地质通报*, 2015, 34(5): 834–845
- [46] Zhang J, Wang Y N, Zhang B H, et al. Evolution of the NE Qinghai-Tibetan Plateau, constrained by the apatite fission track ages of the mountain ranges around the Xining Basin in NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 10–23
- [47] Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Nuclear tracks in solids: principles and techniques. Berkeley, University of California Press, 1975
- [48] Hurford A J, Green P F. The zeta age calibration of fission-track dating. *Chemical Geology*, 1983, 41: 285–317
- [49] Hurford A J. Standardization of fission-track dating calibration: recommendation by the Fission Track Working Group of the IUGS Subcommission on Geochronology. *Chemical Geology*, 1990, 80(2): 171–178
- [50] Green P F, Duddy I R, Laslett G M, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite. 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1989, 79(2): 155–182
- [51] 张志诚, 王雪松. 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*, 2004, 40(6): 898–905
- [52] Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III, Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 1999, 84(9): 1235–1255
- [53] Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFTSolve: a program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. *Geological Materials Research*, 2000, 2(1): 1–32
- [54] Wu Z H, Cui S Q. Thermal tectonic evolution and uplift history of Badaling Mountain. *Journal of Geomechanics*, 1996, 2: 75–78
- [55] 吴珍汉, 崔盛芹, 朱大岗, 等. 燕山南缘盘山岩体的热历史与构造-地貌演化过程. *地质力学学报*, 1999, 5(3): 28–32
- [56] 吴珍汉, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 燕山山脉隆升过程的热年代学分析. *地质论评*, 2000, 46(1): 49–56
- [57] 吴珍汉, 吴中海, 江万, 等. 中国大陆及邻区新生代构造-地貌演化过程与机理. 北京: 地质出版社, 2001
- [58] 程绍平, 邓起东, 杨桂枝, 等. 内蒙古大青山的新生代剥蚀和隆起. *地震地质*, 2000, 22(1): 27–36
- [59] 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 辽西医巫闾山的隆升历史. *地球学报*, 2000, 21(3): 245–253
- [60] 吴中海, 吴珍汉. 燕山及邻区晚白垩世以来山脉隆升历史的低温热年代学证据. *地质学报*, 2003, 77(3): 399–406
- [61] 李越, 季建清, 涂继耀, 等. 燕山东部柳江地区构造属性新解与郯庐断裂系活动. *岩石学报*, 2009, 25(3): 675–681
- [62] 李萍萍. 太行山北段晚中生代—新生代隆升的热年代学研究[D]. 北京: 北京大学, 2014
- [63] 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式. *中国科学: D辑*, 2010, 40(1): 50–60