

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.562



# 房山岩体构造—热演化：来自(U-Th)/He年龄的约束

冯乾乾<sup>1,2</sup>, 邱楠生<sup>1,2\*</sup>, 常健<sup>1,2</sup>, 刘念<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249  
2. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

**摘要:**房山岩体位于华北克拉通北缘,明确其中—新生代的隆升剥露过程及构造演化史可以为华北克拉通的构造演化提供有力证据。运用锆石裂变径迹、磷灰石(U-Th)/He及锆石(U-Th)/He等构造热年代学研究方法,综合房山岩体高、中、低温热年代学资料,重建了房山岩体的构造—热演化历史,并根据不同矿物的封闭温度差( $\Delta T$ )和与之对应冷却年龄差( $\Delta t$ )的关系,计算侵入岩体在不同构造热演化阶段的抬升冷却速率,分析了岩体隆升速率的变化特征,结合前人研究成果进一步探讨了房山岩体隆升过程的基本特点。研究表明,房山侵入岩体构造热演化分为4个阶段:(1)130.0~123.5 Ma,侵位岩浆结晶—固结阶段,岩体平均冷却速率高达88.46 °C/Ma;(2)123.5~56.0 Ma,岩体相对缓慢冷却阶段,平均冷却速率为0.74 °C/Ma,平均隆升速率为29.6 m/Ma;(3)56~35 Ma,岩体相对快速冷却阶段,平均冷却速率为6.90 °C/Ma,隆升速率为276.0 m/Ma;(4)35 Ma以来,岩体相对缓慢冷却阶段,平均冷却速率为1.0 °C/Ma,隆升速率为40.0 m/Ma,构造趋于稳定。结合区域构造动力学环境的研究,分析了房山岩体构造热演化可能的动力学成因,认为房山岩体阶段性抬升冷却可能与华北克拉通东部太平洋板块的俯冲作用、南北两侧陆内俯冲造山作用和西南部印度—欧亚大陆碰撞、青藏高原隆升等远程构造挤压有关。房山岩体的形成及相对快速抬升冷却阶段分别对应于华北克拉通两期重要的破坏高峰。

**关键词:**房山岩体;构造热演化;(U-Th)/He;锆石裂变径迹;华北克拉通;石油地质;构造。

中图分类号: P542;P597

文章编号: 1000-2383(2018)06-1972-11

收稿日期: 2018-01-05

## Tectonothermal Evolution of Fangshan Pluton: Constraints from (U-Th)/He Ages

Feng Qianqian<sup>1,2</sup>, Qiu Nansheng<sup>1,2\*</sup>, Chang Jian<sup>1,2</sup>, Liu Nian<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China  
2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** The Fangshan pluton is located on the northern margin of the North China craton, and its uplift-exhumation and tectonothermal evolution in Mesozoic and Cenozoic can provide evidence for tectonic evolution of the North China craton. The tectonothermal history of the Fangshan pluton is reconstructed by the zircon fission track, apatite (U-Th)/He and zircon (U-Th)/He structural thermochronology based on the high-, middle- and low-temperature geochronological data in this paper. According to the relationship between the temperature difference ( $\Delta T$ ) and the cooling age difference ( $\Delta t$ ) of different minerals, in this paper it calculates the cooling rate at different stages of thermal history and analyzes the characteristics of the cooling rate changes and the characteristics of uplift process of the Fangshan pluton based on previous research results. The results reveal four phases of tectonothermal history of the Fangshan pluton: (1) the crystallization and consolidation stage of emplaced magma during 130.0–123.5 Ma at the average cooling rate of 88.46 °C/Ma; (2) the first slow cooling stage of the Fangshan pluton during 123.5–56.0 Ma at the average cooling rate of 0.74 °C/Ma and the average uplift rate of 29.6 m/Ma; (3) the fast cooling stage of the Fangshan pluton during 56–35 Ma at the average cooling rate of 6.90 °C/Ma and the average uplift rate of

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.41402112,41125010)。

**作者简介:**冯乾乾(1994—),男,博士研究生,研究方向为含油气盆地分析与资源评价。ORCID: 0000-0002-9071-5397。E-mail: fengqianqian607@163.com

\* **通讯作者:**邱楠生, E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

**引用格式:**冯乾乾,邱楠生,常健,等,2018.房山岩体构造—热演化:来自(U-Th)/He年龄的约束.地球科学,43(6):1972–1982.

276.0 m/Ma; (4) the second slow cooling stage of the Fangshan pluton since 35 Ma at the average cooling rate of 1.0 °C/Ma and the average uplift rate of 40.0 m/Ma. The tectonic activity tends to be stable. The possible dynamic causes of thermal history of the Fangshan pluton were analyzed considering regional tectonic dynamics. The differential uplift-cooling may be associated with the subduction of the eastern Pacific plate of the North China craton, the intracontinental subduction orogeny on both sides of the south and the north, India-Eurasia collision in the southwestern China and the tectonic uplift of the Qinghai-Tibet plateau. The formation and the fast cooling stage of the Fangshan pluton respectively correspond to two important uplift erosion processes in the North China craton.

**Key words:** Fangshan pluton; tectonothermal evolution; (U-Th)/He; zircon fission track; North China craton; petroleum geology; tectonics.

## 0 引言

晚中生代以来,华北克拉通经历了强烈的岩石圈减薄与伸展,发生了大规模的构造变形和岩浆活动,形成多种类型的盆地,伴随产生了大量的金属矿产和油气资源(Yang *et al.*, 2003; 朱日祥等, 2011). 深入认识这种克拉通破坏现象对于了解大陆动力学过程及其机制具有十分重要的意义,也是板块构造理论深入发展的趋势(朱光等, 2008). 房山岩体位于华北克拉通东部地块,其中一新生代剥露过程与构造演化历史可以为华北克拉通构造演化提供有力证据,一直是国内外地学界关注的热点. 根据岩浆中矿物结晶特点,寻找记录岩体信息的矿物组合,通过矿物组合分析,计算岩浆形成时的压力和温度,结合区域构造背景,可以评估研究区的隆升及剥蚀程度(杨可, 2014). 因此计算房山花岗质岩浆侵位结晶的温压条件对估算岩体隆升剥露历史和研究华北地区演化史有重要意义. 多年来,学者们对房山岩体的侵入时代、矿物组成、岩石地球化学和物源的研究,都已取得重要进展(蔡剑辉等, 2005; 覃锋等, 2006; 陶继东等, 2009); 关于岩体形成后的隆升剥露史,前人也取得了一定的认识(Wu *et al.*, 2000; 翟鹏济等, 2003; Wu *et al.*, 2014; 杨可, 2014; 刘小丽等, 2015), 基本认为房山岩体形成后表现出 3 个阶段的冷却过程,即早白垩世快速冷却、早白垩世末至古近纪末缓慢抬升冷却和古近纪以来快速抬升冷却. 但对于新生代以来的隆升剥露史研究一直缺少更精确的低温热年代学数据,需要更低温度的热年代学方法来揭示房山侵入岩体的地质演化史. 锆石(U-Th)/He 年龄的部分保留区温度为 130~210 °C (Reiners *et al.*, 2002), 磷灰石(U-Th)/He 年龄的部分保留区温度为 40~75 °C (Wolf *et al.*, 1998), 可以揭示更低温度的演化历史. 锆石裂变径迹的部分保留区温度为 210~240 °C, 与花岗岩体结晶固结

温度相近,可以结合锆石 U-Pb 等热年代学资料确定花岗岩体冷却固结后构造演化的起始温度. 本文首次将(U-Th)/He 低温热年代学参数用于房山岩体构造抬升事件的研究,综合房山岩体高、中、低温热年代学资料,重建了房山岩体的构造—热演化历史,分析了岩体剥露速率的变化特征,结合前人研究成果进一步探讨了房山岩体剥露作用过程的基本特点及其大地构造意义,并细致刻画了中—新生代以来房山岩体的构造热演化过程.

## 1 地质概况

北京房山岩体位于北京西山南部,属于华北克拉通北缘燕山构造岩浆岩带的一部分,研究区地层发育十分齐全且较连续,主要地层为太古界官地杂岩(ArG)、中元古界长城组(Pt<sub>2</sub>Ch)和蓟县组(Pt<sub>2</sub>Jx)、新元古代青白口组(Pt<sub>3</sub>Qb)、古生界、中生界及少量新生界出露(杨可, 2014). 西山地区处在NNE向太行山隆起和近EW向燕山板内造山带的交接部位(图1),多期构造相互叠加,地质构造复杂,并且构造演化与华北克拉通东部构造动力学环境的变化息息相关. 按照构造演化史可划分为4个阶段(杨可, 2014): (1) 基底形成阶段,形成太古界和早元古界官地杂岩; (2) 盖层形成阶段,吕梁运动以后房山地区进入了从中元古界—晚古生界相对稳定的盖层发展阶段,岩浆活动及区域变质作用微弱; (3) 盖层活化阶段,印支运动之后进入了构造活动期,发生了两期大的构造事件——燕山运动和喜山运动,岩浆活动频繁,房山侵入岩体就是在该阶段形成的; (4) 新构造阶段,喜山运动后,地壳逐渐上升,形成三级阶地及河流.

房山岩体是一个以花岗闪长岩为主体的燕山期复式侵入体(马昌前, 1988),岩体平面形态近似于椭圆形,长轴呈NW-SE向,约9 km,短轴呈NE-SW

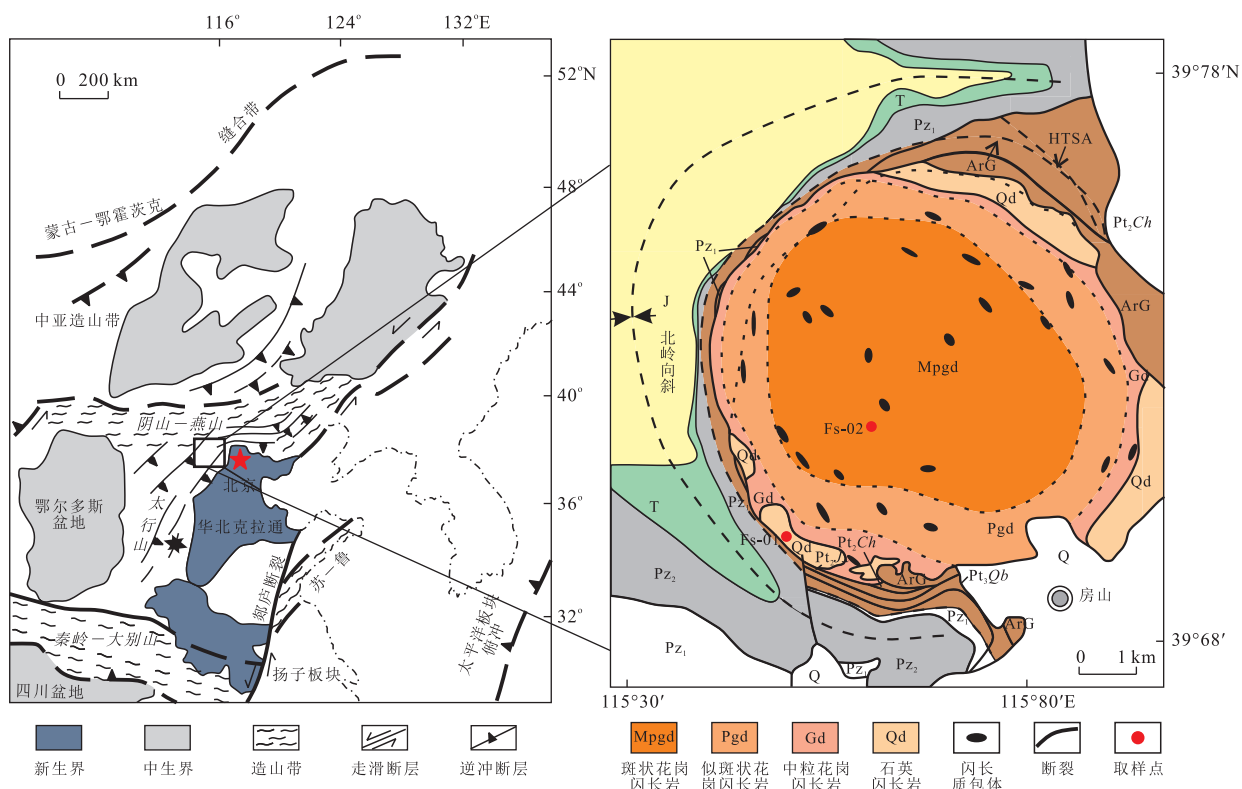


图 1 房山地区区域地质特征

Fig.1 Geological characteristics of Fangshan area

据 He *et al.* (2009) 修改

向,约 7.5 km, 出露面积约为 54 km<sup>2</sup> (何斌等, 2005). 岩体在成分和结构上具不完全对称的同心环状, 为二次侵入多次脉动的复式岩体 (图 1). 岩体边缘零星出露的细粒石英闪长岩是第一次侵入的产物, 主体为第二次侵入的花岗闪长岩, 二者之间具有清晰的侵入接触关系, 岩体主体从边缘向中央依次划分为边缘相 (中粒花岗闪长岩)、过渡相 (似斑状花岗闪长岩) 和中央相 (斑状花岗闪长岩), 其间为渐变关系 (何斌等, 2005). 岩体整体上与围岩呈侵入接触关系, 内部普遍发育闪长质包体 (杨可, 2014).

## 2 样品和分析方法

锆石裂变径迹 (zircon fission track, ZFT) 热年代学是建立在 <sup>238</sup>U 裂变辐射损伤效应基础上的一种低温热定年技术 (Malusà *et al.*, 2013). 由于矿物中的裂变径迹存在退火现象, 在地质历史时期随着矿物所在地层温度的增加, 矿物中的裂变径迹密度会逐渐减少, 同时裂变径迹长度也会逐渐缩短, 当地层温度超过裂变径迹的完全退火温度时, 矿物中的径迹会完全消失 (Yamada *et al.*, 1995, 2007). 根据

表 1 房山岩体锆石裂变径迹年龄测试结果

Table 1 Measured fission track age of zircon of the Fangshan pluton

样品号	N (颗)	$\rho_s$ (10 <sup>5</sup> cm <sup>2</sup> )	$N_s$ (条)	U (10 <sup>-6</sup> )	$P(\chi^2)$ (%)	年龄 (Ma)	$\pm 1\sigma$ (Ma)
FS-02	30	5.9	594	57.3	>39	110.5	10.3

注: N, 锆石颗粒数;  $\rho_s$ , 自发裂变径迹密度;  $N_s$ , 自发裂变径迹总数;  $P(\chi^2)$ , 裂变径迹年龄的检测值; 锆石筛选单位: 河北省廊坊区域地质调查所; 测试单位: 巴西 Chronus Camp Research 热年代学实验室.

裂变径迹密度、径迹长度与温度以及时间之间复杂的动力学关系, 建立相对应的退火模型, 可以模拟出实际的地质热历史演化过程. 具体的实验流程主要包括以下步骤: (1) 样品粉碎、筛选、磁选和重液分选获得锆石颗粒; (2) 使用 PFT Teflon 安装、固定锆石颗粒, 形成 ZFT 靶; (3) 对锆石颗粒进行抛光; (4) 选用体积比 KOH : NaOH (1 : 1) 共融混合液, 在 220 °C 温度下蚀刻 28 h 揭示裂变径迹; (5) 显微镜下分析锆石裂变径迹密度和长度、封闭径迹长度; (6) 选用 FCT (fish canyon tuff) 标准锆石样品, 利用 LA-ICP-MS 校正标样的年龄; (7) 利用 Agilent 7700 电感耦合等离子四极质谱仪和 UP193 分辨率的激光剥蚀系统计量样品的 U 含量; (8) 根据公式

表 2 房山岩体磷灰石(U-Th)/He 年龄测试结果

Table 2 Measured (U-Th)/He ages of apatite of the Fangshan pluton

样品号	Th/U	质量( $\mu\text{g}$ )	U( $10^{-6}$ )	$F_t$	年龄(Ma)	$\pm 1\sigma$ (Ma)	eU( $10^{-6}$ )	$^4\text{He}$ (nmol/g)	半径( $\mu\text{m}$ )
FS-01-1	2.5	13.1	7.9	0.8	30.6	1.9	12.6	0.5	50.9
FS-01-2	4.6	7.2	8.7	0.8	35.6	2.2	18.1	0.4	39.0
FS-01-3	4.2	21.1	5.5	0.8	34.4	2.1	11.0	0.8	56.8

注: $F_t$ ,  $^4\text{He}$  的总保存率,即  $\alpha$  射出效应的校正参数;eU=U+0.235Th,有效铀浓度;测试单位:美国德克萨斯大学奥斯汀分校(U-Th)/He 实验室。

表 3 房山岩体锆石(U-Th)/He 年龄测试结果

Table 3 Measured (U-Th)/He ages of zircon of the Fangshan pluton

样品号	Th/U	质量( $\mu\text{g}$ )	U( $10^{-6}$ )	$F_t$	年龄(Ma)	$\pm 8\%$ (Ma)	eU( $10^{-6}$ )	$^4\text{He}$ (nmol/g)	半径( $\mu\text{m}$ )
zFS-01-1	0.40	3.1	211.3	0.70	55.3	4.40	232.2	50.2	41.3
zFS-01-2	0.70	2.9	123.2	0.70	60.6	4.80	141.8	33.2	40.4
zFS-01-3	0.70	7.1	61.7	0.80	54.0	4.30	71.2	16.4	55.6
zFS-02-1	0.87	4.32	94.1	0.74	64.2	5.13	113.0	29.3	46.22
zFS-02-2	0.67	6.53	56.3	0.78	73.7	5.90	65.1	20.2	53.15
zFS-02-3	0.78	6.00	94.7	0.76	73.1	5.85	111.7	33.9	50.09
zFS-02-4	0.79	8.47	79.3	0.79	69.4	5.55	93.7	28.0	57.89

注: $F_t$ ,  $^4\text{He}$  的总保存率,即  $\alpha$  射出效应的校正参数;eU=U+0.235Th,有效铀浓度;测试单位:澳大利亚墨尔本大学低温热年代学实验室。

求得锆石裂变径迹年龄。

(U-Th)/He 热定年技术是根据磷灰石和锆石等矿物中铀和钍发生  $\alpha$  衰变产生 He 发展而来,通过测量样品中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^4\text{He}$  的含量,就可以计算获得 (U-Th)/He 年龄 (Farley, 2002)。目前, (U-Th)/He 热定年方法已经广泛应用于造山带定年及隆升、地形地貌演化、盆地热史和沉积物源等方面的研究,同时为盆地—沉积—构造耦合研究提供了一条新途径。锆石 (U-Th)/He 年龄实验主要包括以下步骤: (1) 利用双目显微镜挑选锆石颗粒, 观察并测量颗粒的长度和宽度, 并相应做好编号; (2) 将锆石颗粒加热用以提取  $^4\text{He}$ , 加热温度为  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ , 加热时间为  $10\ \text{min}$ , 利用四极质谱仪测定  $^4\text{He}$  的含量; (3) 矿物晶体溶解后测试溶液中 U、Th 及 Sm 含量; (4) 根据测试的  $^4\text{He}$ 、 $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  的含量计算锆石 (U-Th)/He 年龄, He 年龄的标准误差为  $2\delta$ 。实验室选用的标准样品来自美国科罗拉多鱼峡谷凝灰岩锆石, 其标准年龄为  $27.8\pm 0.7\ \text{Ma}$ 。磷灰石 (U-Th)/He 年龄实验测试流程与锆石相似, 具体实验过程可以参考相关文献 (Reiners, 2005; 李天义等, 2014)。全部测试结果如表 1~3 所示。

### 3 构造热演化模拟

北京西山白垩纪以来为相对稳定的隆起—剥蚀区域, 后期未受热事件扰动, 随着区域的上升—剥

蚀, 岩体温度相应下降 (杨可, 2014)。本文通过收集不同矿物对房山岩体花岗闪长岩的年龄记录, 采用多矿物耦合对比分析并联合磷灰石 (U-Th)/He 与锆石 (U-Th)/He 两种年龄作为古温标, 模拟了房山岩体自形成后的构造热演化过程, 计算了侵入岩体在不同构造热演化阶段的抬升冷却速率, 结合现今地温梯度  $2.5\ ^\circ\text{C}/100\ \text{m}$  (陈祥高等, 1986), 分析了岩体隆升速率的变化特征。房山岩体利用磷灰石 (U-Th)/He 热定年方法对 FS-01 样品测试了 3 个颗粒, 其中 FS-01-2 的年龄与 FS-01-3 的年龄相近, 均可以代表该样品的磷灰石 (U-Th)/He 年龄, 本文选取 FS-01-3 的年龄作为岩体的磷灰石 (U-Th)/He 年龄。利用锆石 (U-Th)/He 热定年方法对 FS-01、FS-02 两个样品测试了 7 个颗粒; 同样, 本文选取 zFS-01-1 的年龄作为 FS-01 样品的锆石 (U-Th)/He 年龄, 选取 zFS-02-3 的年龄作为 FS-03 样品的锆石 (U-Th)/He 年龄。

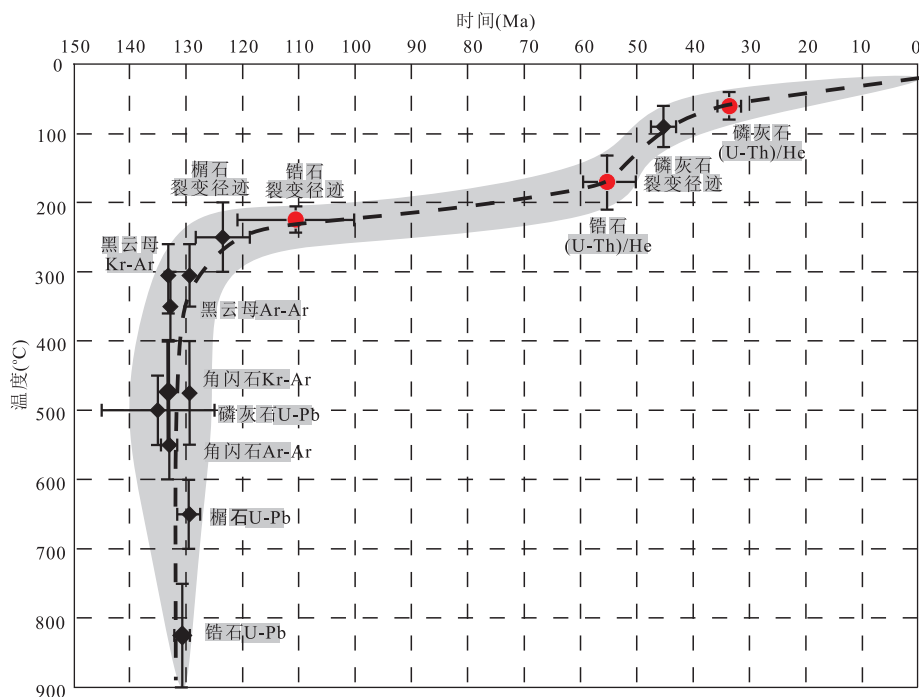
#### 3.1 多矿物耦合分析

综合房山岩体高、中、低温热年代学资料 (表 4), 根据矿物的封闭温度和与之对应冷却年龄的关系, 重建了房山岩体的构造—热演化历史 (图 2), 研究表明, 房山岩体自白垩纪以来隆升剥蚀是不均匀的, 在  $130.0\sim 123.5\ \text{Ma}$ , 岩体快速冷却至  $250\ ^\circ\text{C}$ , 平均降温速率约为  $88.46\ ^\circ\text{C}/\text{Ma}$ , 指示房山侵位岩浆的快速冷却结晶—固结过程。房山岩体在  $123.5\ \text{Ma}$  左右冷却速率发生明显改变, 由快速冷却转为缓慢

表 4 房山岩体热年代学分析结果

Table 4 Thermochronological analysis of the Fangshan pluton

测年方法	年龄(Ma)	封闭温度(°C)	数据来源
锆石 U-Pb	130.7±1.4	750~900	蔡剑辉等(2005)
榍石 U-Pb	129.5±2.0	600~700	Wu <i>et al.</i> (2014)
角闪石 Ar-Ar	132.8±0.1	500~600	桑海清等(2007);Sun <i>et al.</i> (2010)
角闪石 Kr-Ar	129.4±0.12 133.3±1.5	400~550	翟鹏济等(2003);桑海清等(2006);Sun <i>et al.</i> (2010)
磷灰石 U-Pb	135.0±10.0	450~550	Wu <i>et al.</i> (2014)
黑云母 Ar-Ar	132.7±0.1	300~400	桑海清等(2006);Sun <i>et al.</i> (2010)
黑云母 Kr-Ar	129.4±0.12 132.8±1.3	260~350	翟鹏济等(2003);桑海清等(2006);Sun <i>et al.</i> (2010)
磷灰石裂变径迹	45.2±2.2	65~120	翟鹏济等(2003)
榍石裂变径迹	123.5±4.8	200~300	翟鹏济等(2003)
磷灰石(U-Th)/He	34.4±2.1	40~75	—
锆石裂变径迹	110.5±10.3	210~240	—
锆石(U-Th)/He	55.3±4.4	130~210	—

图 2 房山岩体热演化  $T-t$  曲线Fig.2 Thermochronological  $T-t$  curve of the Fangshan pluton

冷却,冷却速率突然减小,表明侵入体与围岩达到热平衡.之后房山岩体成岩后经历了缓慢复杂的隆升剥蚀作用,总体可分为 3 个阶段:(1) 123.5 ~ 55.3 Ma,房山岩体温度由 250 °C 降至 170 °C,平均降温速率约为 1.17 °C/Ma,平均隆升速率为 46.8 m/Ma;(2) 55.3 ~ 34.4 Ma,房山岩体温度由 170 °C 降至 60 °C,平均降温速率约为 5.26 °C/Ma,平均隆升速率为 210.4 m/Ma;(3) 34.4 Ma 以来,温度降至现今地表温度,平均降温速率约为 1.19 °C/

Ma,隆升速率为 47.6 m/Ma.

### 3.2 磷灰石(U-Th)/He 和锆石(U-Th)/He 模拟

利用磷灰石(U-Th)/He 和锆石(U-Th)/He 年龄作为古温标,结合锆石裂变径迹年龄,通过 HeFTy 软件对房山岩体中 FS-01 的磷灰石样品进行了热史路径模拟.由于 FS-01 样品没有测得锆石裂变径迹年龄,因此参考 FS-02 样品的锆石裂变径迹年龄,采用 110.5±10.3 Ma 作为锆石裂变径迹年龄进行热史模拟.在模拟过程中,磷灰石 He 年龄利用的是 Farley 模

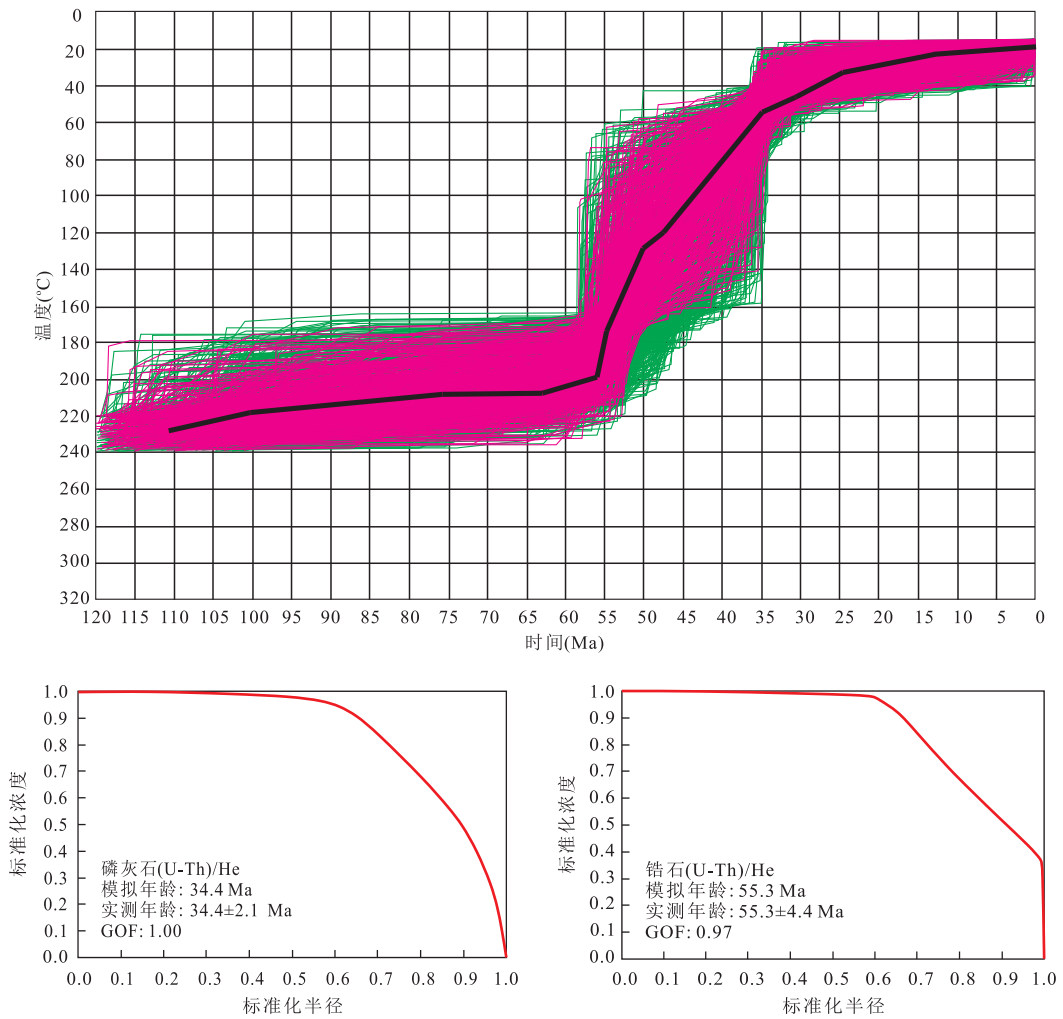


图 3 房山岩体磷灰石、锆石(U-Th)/He 热史模拟路径

Fig.3 Apatite and zircon (U-Th)/He modeling thermal paths of the Fangshan pluton

型, 锆石 He 年龄利用的是 Rerners 模型, 模拟时间从样品在形成后被快速抬升进入磷灰石、锆石 He 部分保留区内到现今, 模拟的现今温度为样品的地表温度. 模拟所需的参数有磷灰石 He 年龄、锆石 He 年龄、颗粒半径、U 的含量、Th 的含量及 Sm 的含量. 在模拟过程中, 利用蒙特卡罗逼近法对每一个样品随机模拟了 3 000 条温度路径, 其中“最好”的温度路径代表该样品的热史. 由磷灰石 (U-Th)/He、锆石 (U-Th)/He 模拟热史路径 (图 3) 可知: 在 110~56 Ma, 房山岩体由 230 °C 降至 200 °C, 平均降温速率约为 0.56 °C/Ma, 房山岩体平均隆升速率为 22.4 m/Ma; 在 56~35 Ma, 房山岩体温度由 200 °C 降至 55 °C, 平均降温速率约为 6.90 °C/Ma, 平均隆升速率为 276.0 m/Ma; 35 Ma 之后, 房山岩体缓慢冷却直至地表温度, 平均降温速率约为 1.0 °C/Ma, 隆升速率为 40.0 m/Ma, 房山地区构造趋于稳定.

## 4 讨论

### 4.1 构造热演化历史

陈祥高等(1986)利用磷灰石和锆石裂变径迹年龄和封闭温度恢复了房山岩体的热历史, 利用外探测器法进行锆石裂变径迹测试, 采取的锆石裂变径迹封闭温度为 180 °C; 翟鹏济等(2003)利用磷灰石和榍石裂变径迹年龄和封闭温度探讨了房山岩体的热演化历史. 两位学者均认为房山岩体形成后表现出 3 个阶段的冷却过程, 即早白垩世快速冷却固结、早白垩世末至古近纪末缓慢抬升冷却和古近纪以来快速抬升冷却. 杨可(2014)收集了不同矿物(锆石 U-Pb、黑云母 Kr-Ar、角闪石 Kr-Ar、磷灰石裂变径迹、榍石裂变径迹和锆石裂变径迹)对房山岩体花岗岩的年龄纪录, 根据这些矿物相应的封闭温度建立了房山岩体的演化模式, 认为房山花岗岩体形

成后表现为 4 个阶段的冷却过程:早白垩世快速冷却固结、早白垩世末至晚白垩世快速冷却、晚白垩世—古近纪末缓慢抬升冷却和古近纪以来相对快速抬升冷却。但对于新生代以来的隆升剥露史研究一直缺少更精确的低温热年代学数据,并且锆石裂变径迹退火温度目前仍存在争议,但多数学者认为在 210~240 °C。

本文锆石裂变径迹是在巴西 Chronus Camp Research 热年代学实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)技术测试,采取的退火温度为 210~240 °C。磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 年龄可以揭示更低温度的演化历史。因此本文利用磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 年龄,结合锆石裂变径迹更加准确揭示了房山岩体形成以来的热历史。综合房山岩体热年代学  $T-t$  曲线(图 2)与磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 模拟的热史路径(图 3)对比分析可知,房山岩体自早白垩世末期以来总体处于阶段性抬升状态,构造热演化分为 4 个阶段:(1)130.0~123.5 Ma 侵位岩浆结晶—固结阶段,岩体快速冷却至 250 °C,平均冷却速率高达 88.46 °C/Ma;(2)123.5~56.0 Ma 岩体相对缓慢冷却阶段,房山岩体由 250 °C 降至 200 °C,平均冷却速率为 0.74 °C/Ma,隆升速率为 29.6 m/Ma。在 123.5~110.0 Ma,房山岩体冷却速率相对较快,由 250 °C 降至 230 °C 左右,平均降温速率达到 1.48 °C/Ma,可能指示房山岩体冷却固结之后与围岩达到热平衡时的过渡阶段;(3)56.0~35.0 Ma 岩体相对快速冷却阶段,房山岩体温度由 200 °C 降至 55 °C,平均降温速率约为 6.90 °C/Ma,平均隆升速率为 276.0 m/Ma;(4)35.0 Ma 之后,房山岩体缓慢冷却直至地表温度,平均降温速率约为 1.0 °C/Ma,隆升速率为 40.0 m/Ma,房山地区构造趋于稳定。

#### 4.2 构造热演化的动力学成因

房山岩体位于太行山隆起和燕山山脉交汇处,多期构造相互叠加,地质构造复杂。区域构造动力学环境分析表明,房山岩体中、新生代以来不仅受到华北克拉通东部太平洋板块俯冲系统的控制,同时还受到南北两侧陆内俯冲造山作用和其西南部印度—欧亚大陆碰撞、青藏高原隆升等远程构造挤压效应的影响,经历了不同时期、不同方向、不同性质的复杂构造作用(陈刚等,2012)。

中生代以来,华北克拉通遭受破坏,岩石圈发生巨大的减薄。晚中生代,古太平洋板块俯冲作用以及蒙古—鄂霍次海的闭合导致华北克拉通动力学体制

发生重大转折,由早中生代的 NS 向收缩或挤压转变为与古太平洋板块俯冲相关的近 EW 向(NWW-SEE向)板内变形与伸展(赵越等,2010)。早白垩世末期至晚白垩世,华北克拉通东部的古太平洋板块以较快的速率向 NWW 向俯冲(Northrup *et al.*, 1995; Ren *et al.*, 2002; Wang and Zhou, 2009),WS 方向的特提斯洋也已开始向北俯冲消减(Wang and Zhou, 2009; 黄宝春等, 2010; 许志琴等, 2010)。华北克拉通普遍处于沉积缺失的挤压隆升状态,呈现为区域构造挤压应力场环境下的隆升剥蚀和对早白垩世岩石圈拆离伸展状态的重大调整与转换,华北克拉通在早白垩世(~125 Ma)达到破坏峰期。古近纪,受太平洋板块 NW 向俯冲角度增大、俯冲速率减小与印度—亚洲大陆俯冲碰撞过程的相互作用(Northrup *et al.*, 1995; Ren *et al.*, 2002; Wang and Zhou, 2009; 黄宝春等, 2010; 许志琴等, 2010),华北克拉通东部发生了较大规模的伸展裂陷。新近纪以来,伴随着太平洋板块 NW 向俯冲速率的增大和印度陆块向北深俯冲作用下青藏高原的快速隆升(Northrup *et al.*, 1995; Ren *et al.*, 2002; Wang and Zhou, 2009; 黄宝春等, 2010; 许志琴等, 2010),华北克拉通地区处于多向汇聚的区域挤压构造应力环境,造成华北克拉通东部古近纪断陷向新近纪拗陷的构造转换和反转(陈刚等, 2012),华北克拉通东部地区构造活动趋于平缓。渤海湾盆地位于华北克拉通破坏的中心区域,通过对其热历史及热岩石圈厚度进行分析,学者们发现渤海湾盆地在早白垩世末期—晚白垩世初期、始新世末期—渐新世中期发育两期热流高峰及岩石圈强度减弱高峰(Qiu *et al.*, 2014, 2015; Li *et al.*, 2017),指示了华北克拉通自中生代以来经历的两期破坏高峰。

房山侵入岩体是华北克拉通东部典型的燕山期中酸性钙碱性侵入岩体之一(刘小丽等, 2015),它的形成与早白垩世华北克拉通中东部地区大规模的岩石圈拆离减薄、软流圈上涌和巨量的岩浆活动等有关(Morency *et al.*, 2002; 邓晋福等, 2006; 陈刚等, 2012)。同期,渤海湾盆地经历了第一期热流高峰及岩石圈强度减弱高峰,时间上的一致性表明房山岩体是早白垩世华北克拉通破坏同期的大规模岩浆热液活动的产物。房山岩体热年代学  $T-t$  曲线(图 2)显示,房山地区自早白垩世末期以来总体处于阶段性抬升状态。在 123.5~56.0 Ma,岩体呈现出相对平稳的缓慢抬升冷却过程,指示房山岩体及其所在华北克拉通东部地区在早白垩世晚期—古近纪总体处

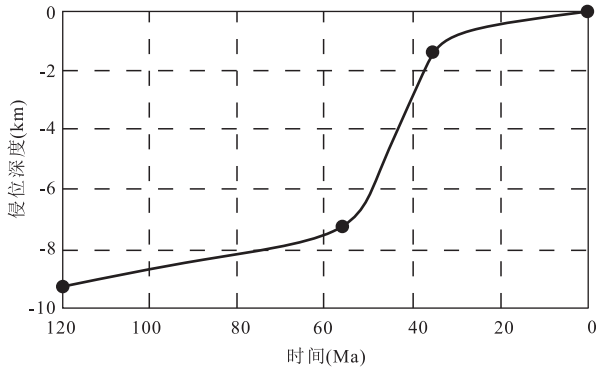


图 4 房山岩体侵位深度变化曲线

Fig.4 Invaded depth curve of the Fangshan pluton

于构造活动较为平稳的相对缓慢抬升冷却状态,在该阶段,渤海湾盆地热流值减小,趋于平缓,岩石圈厚度增大(Qiu *et al.*, 2014, 2015; Li *et al.*, 2017),可能与古太平洋板块 NW 向俯冲与特提斯洋北向俯冲的区域构造挤压作用有关;在 56~35 Ma,房山岩体表现出相对快速的抬升冷却过程,对应于渤海湾盆地的第二期热流高峰及岩石圈减弱高峰,在该阶段华北克拉通东部地区断陷沉降,裂谷普遍发育,可能是太平洋板块 NW 向俯冲角度增大、俯冲速率减小并与印度—亚洲大陆俯冲碰撞相互作用的结果,与同时期华北克拉通的东部断陷沉降、西部均衡翘升过程协同发展;自 35 Ma 以来,岩体缓慢抬升冷却至地表,可能是太平洋板块向 NW 向俯冲与印度大陆向北的俯冲和青藏高原隆升的远程构造

挤压效应共同作用的结果,该阶段华北克拉通东部地区由断陷转化为拗陷,构造活动趋于平缓.另外,华北克拉通出现了多例同时期的地质事件(陈刚等, 2012; Wu *et al.*, 2014).房山岩体的形成及相对快速抬升冷却阶段与渤海湾盆地在早白垩世末期—晚白垩世初期、始新世末期—渐新世中期发育两期热流高峰及岩石圈强度减弱高峰近于同步,分别对应了华北克拉通两期重要的破坏高峰.

### 4.3 房山岩体侵位深度

目前,学者们对于房山岩体初始侵位深度的研究也取得了较多认识,国内不同学者利用角闪石全铝压力计、角闪石—斜长石矿物对等方法恢复了房山岩体的初始侵位深度,认为房山岩体的初始侵位深度为 8.02~12.90 km(杨可, 2014; 刘小丽等, 2015).由房山岩体热演化史(图 2)可知,锆石 U-Pb、角闪石和黑云母 Ar-Ar 等年龄组合构成了房山侵入岩体热演化  $T-t$  曲线陡峭阶段,指示房山侵位岩浆的快速冷却结晶—固结过程.房山岩体在 ~123.5 Ma 冷却速率发生明显改变,房山岩体由快速冷却转为缓慢冷却,冷却速率突然减小,表明侵入体与围岩达到热平衡.根据榴石裂变径迹、锆石裂变径迹的封闭温度可知,房山岩体与围岩达到热平衡的温度约为 250 °C,指示其原始侵位温度为 250 °C,结合地温梯度,其初始侵位深度在 9.2 km 左右.结合构造热演化史,构建出房山岩体的侵位、隆升过程,如图 4 和图 5 所示.

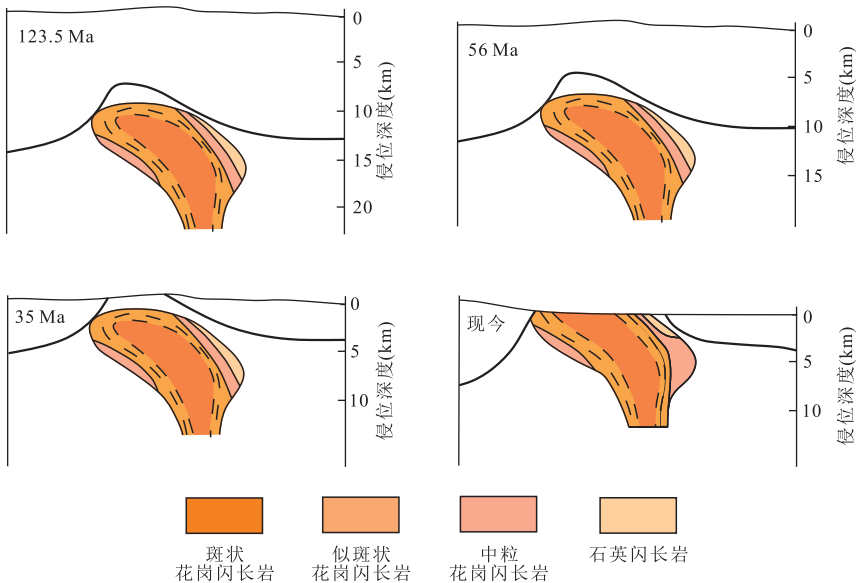


图 5 房山岩体隆升过程示意

Fig.5 Sketching map of uplift process of the Fangshan pluton

房山岩体侵位模式据马昌前(1988)修改



本文通过矿物对比法大致确定出房山岩体的侵位温度,结合现今地温梯度,估算了其原始侵位深度,但由于地温梯度在地质历史中是不断变化的,因此所估算的侵位深度及隆升过程存在偏差,仍需进一步研究。同时,对于房山岩体何时抬升至地表仍存在争议,多数学者认为是现今(Wu *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2014; 杨可, 2014; 刘小丽等, 2015)。因此在此基础上进行构造演化分析,对于房山岩体何时抬升至地表仍需做进一步地探讨。房山岩体为二次侵入多次脉动的复式岩体,FS-01 和 FS-02 分别位于岩体的边部和中部,对应于不同的侵入期次,具有不同的冷却和剥露历史。本文主要针对房山岩体 FS-01 样品,利用磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 年龄作为古温标,参考 FS-02 样品的锆石裂变径迹年龄进行热史模拟,其构造热演化史主要对应于初次侵入的房山岩体。对于第二次侵入岩体,其冷却抬升历史可能略有不同,但根据房山岩体热演化  $T-t$  曲线可知(图 2),房山岩体总体的构造热演化特征是基本相同的。

## 5 结论

房山侵入岩体的锆石裂变径迹年龄为 110.5 Ma, 磷灰石(U-Th)/He 年龄为  $34.4 \pm 2.1$  Ma, 锆石(U-Th)/He 年龄为  $55.3 \pm 4.4$  Ma。房山侵入岩体  $T-t$  轨迹与磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 模拟热史路径表明,房山地区自早白垩世末期以来总体处于构造阶段性抬升状态,构造热演化分为 4 个阶段:(1)130.0~123.5 Ma 侵位岩浆结晶—固结阶段,岩体平均冷却速率高达  $88.46 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ;(2)123.5~56.0 Ma 岩体相对缓慢冷却阶段,平均冷却速率为  $0.74 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ,隆升速率为  $29.6 \text{ m}/\text{Ma}$ ;(3)56.0~35.0 Ma 岩体相对快速冷却阶段,平均冷却速率为  $6.90 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ,隆升速率为  $276.0 \text{ m}/\text{Ma}$ ;(4)35.0 Ma 以来岩体相对缓慢冷却阶段,平均冷却速率为  $1.0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ,隆升速率为  $40.0 \text{ m}/\text{Ma}$ ,构造趋于稳定。由房山岩体热演化史可知,房山侵入岩体在 123.5 Ma 与围岩之间达到热平衡,初始侵位温度为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,结合地温梯度,计算其初始侵位深度约为 9.2 km。结合区域构造动力学环境,认为早白垩世末—古近纪的缓慢抬升可能与古太平洋板块 NWW 向俯冲与特提斯洋北向俯冲的区域构造挤压作用有关,指示华北克拉通东部地区在早白垩世晚期—古近纪总体处于构造活动相对平

稳;古近纪以来的相对缓慢抬升可能是由于太平洋板块向 NWW 向俯冲与印度大陆向北的俯冲和青藏高原隆升的远程构造挤压效应共同作用下,华北克拉通东部地区由断陷转化为坳陷,构造活动趋于平缓;古近纪的相对快速抬升可能与太平洋板块 NWW 向俯冲和印度—亚洲大陆俯冲碰撞的相互作用有关。房山岩体的形成及相对快速抬升冷却阶段与渤海湾盆地在早白垩世末期—晚白垩世初期、始新世末期—渐新世中期发育两期热流高峰及岩石圈强度减弱高峰近于同步,分别对应了华北克拉通两期重要的破坏高峰。

致谢:感谢审稿人对文章的指导与建议;感谢蔡长城博士、徐秋晨博士、吴航博士等在成文过程中的帮助与建议。

## References

- Cai, J. H., Yan, G. H., Mou, B. L., et al., 2005. Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions and Trace Element of Fangshan Complex in Beijing and Their Petrogenesis Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776–788(in Chinese with English abstract).
- Chen, G., Ding, C., Xu, L. M., et al., 2012. Analysis on the Thermal History and Uplift Process of Zijinshan Intrusive Complex in the Eastern Ordos Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(11): 3731–3741 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. G., Zhang, Z. K., Zang, W. X., 1986. Study on Fission Track Dating of Zircon and Thermal History of the Fangshan Granodiorite in Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 40–44(in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Su, S. G., Liu, C., et al., 2006. Discussion on the Lithospheric Thinning of the North China Craton: Delamination? or Thermal Erosion and Chemical Metasomatism? *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105–119(in Chinese with English abstract).
- Farley, K. A., 2002. (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 47(1): 819–844. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.18>
- He, B., Xu, Y. G., Paterson, S., 2009. Magmatic Diapirism of the Fangshan Pluton, Southwest of Beijing, China. *Journal of Structural Geology*, 31(6): 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.04.007>
- He, B., Xu, Y. G., Wang, Y. M., et al., 2005. Magmatic Diapir of Fangshan Pluton in the Western Hills, Beijing and Its Geological Significance. *Earth Science*, 30(3): 298–308 (in Chinese with English abstract).

- Huang, B. C., Chen, J. S., Yi, Z. Y., 2010. Paleomagnetic Discussion of When and Where India and Asia Initially Collided. *Chinese Journal of Geophysics*, 53 (9): 2045 — 2058 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. Y., He, Z. L., He, S., et al., 2014. Tectonic and Thermal History during the Mesozoic and Cenozoic Era in Paizhouwan Region, Jiangnan Plain, Mid Yangtze Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (6): 1868 — 1882 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Zuo, Y. H., Qiu, N. S., et al., 2017. Meso-Cenozoic Lithospheric Thermal Structure in the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 8 (5): 977 — 987. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Liu, X. L., Cheng, S. H., Zhang, H. Y., 2015. Polybaric Crystallization of Granitic Magmas and Its Dynamic Significance: A Case from the Fangshan Pluton of Beijing. *Geoscience*, 29 (3): 514 — 528 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., 1988. The Magma-Dynamic Mechanism of Emplacement and Compositional Zonation of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 23 (4): 329 — 341, 373 (in Chinese with English abstract).
- Malusà, M. G., Carter, A., Limoncelli, M., et al., 2013. Bias in Detrital Zircon Geochronology and Thermochronometry. *Chemical Geology*, 359 (6): 90 — 107.
- Morency, C., Doin, M. P., Dumoulin, C., 2002. Convective Destabilization of a Thickened Continental Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 202 (2): 303 — 320. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00753-7](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00753-7)
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Margin of Eurasia. *Geology*, 23 (8): 719 — 722. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0719: motppr>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0719: motppr>2.3.co;2)
- Qin, F., Xu, X. X., Luo, Z. H., 2006. Mixing and Mingling in Petrogenesis of the Fangshan Intrusion, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (12): 2957 — 2970 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Xu, W., Zuo, Y. H., et al., 2015. Meso-Cenozoic Thermal Regime in the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *International Geology Review*, 57 (3): 271 — 289. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.1002818>
- Qiu, N. S., Zuo, Y. H., Chang, J., et al., 2014. Geothermal Evidence of Meso-Cenozoic Lithosphere Thinning in the Jiyang Sub-Basin, Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26 (3 — 4): 1079 — 1092. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.011>
- Reiners, P. W., 2005. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58 (1): 151 — 179. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58>
- Reiners, P. W., Farley, K. A., Hickes, H. J., 2002. He Diffusion and (U-Th)/He Thermochronometry of Zircon: Initial Results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte. *Tectonophysics*, 349 (1 — 4): 297 — 308. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00058-6](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00058-6)
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344 (3 — 4): 175 — 205. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00271-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00271-2)
- Sang, H. Q., Wang, F., He, H. Y., et al., 2006. Intercalibration of the ZBH-15 Biotite Reference Material Utilized for K-Ar and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Isotopic Dating in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25 (3): 201 — 217 (in Chinese with English abstract).
- Sang, H. Q., Wang, F., He, H. Y., et al., 2007. Certified Results of the ZBJ Hornblende Reference Materials for K-Ar and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Datings. *Chinese Journal of Geology*, 42 (3): 532 — 557 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. F., Yang, J. H., Wu, F. Y., et al., 2010. Magma Mixing Controlling the Origin of the Early Cretaceous Fangshan Granitic Pluton, North China Craton: In Situ U-Pb Age and Sr-, Nd-, Hf- and O-Isotope Evidence. *Lithos*, 120 (3 — 4): 421 — 438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.002>
- Tao, J. D., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2009. Evolution of Enclaves in Beijing Fangshan Granodiorite and Genesis of Dioritic Microgranular Enclaves. *Geological Science and Technology Information*, 28 (2): 33 — 41 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Zhou, L. Y., Li, J. Y., 2010. Intracontinental Superimposed Tectonics—A Case Study in the Western Hills of Beijing, Eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 123 (5 — 6): 1033 — 1055. <https://doi.org/10.1130/b30257.1>
- Wang, Y., Zhou, S., 2009.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating Constraints on the High-Angle Normal Faulting along the Southern Segment of the Tan-Lu Fault System: An Implication for the Onset of Eastern China Rift-Systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (1): 51 — 60. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.04.003>
- Wolf, R. A., Farley, K. A., Kass, D. M., 1998. Modeling of the Temperature Sensitivity of the Apatite (U-Th)/He Thermochronometer. *Chemical Geology*, 148 (1 — 2): 105 — 114. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00024-2)
- Wu, L., Wang, F., Lin, W., et al., 2014. Rapid Cooling of the Yanshan Belt, Northern China: Constraints from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Thermochronology and Implications for Cra-

- tonic Lithospheric Thinning. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 107 – 126. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Wu, Z. H., Cui, S. Q., Zhu, D. G., et al., 2000. Thermal Evolution of Plutons and Uplift Process of the Yanshan Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74 (1): 7 – 13. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2000.tb00426.x>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Ji, S. C., et al., 2010. On the Continental Tectonics and Dynamics of China. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 1 – 29 (in Chinese with English abstract).
- Yamada, R., Murakami, M., Tagami, T., 2007. Statistical Modeling of Annealing Kinetics of Fission Tracks in Zircon; Reassessment of Laboratory Experiments. *Chemical Geology*, 236 (1 – 2): 75 – 91. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.09.002>
- Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S., et al., 1995. Annealing Kinetics of Fission Tracks in Zircon: An Experimental Study. *Chemical Geology*, 122(1–4): 249 – 258. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00006-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00006-8)
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., 2003. A Review of the Geodynamic Setting of Large-Scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton; An Association with Lithospheric Thinning. *Ore Geology Reviews*, 23 (3 – 4): 125 – 152. [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(03)00033-7)
- Yang, K., 2014. The Depth and Rock Erosion of Fangshan Pluton in Beijing and Its Tectonic Significance (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 12 – 38 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, P. J., Zhang, F., Zhao, Y. L., 2003. Thermal History of the Fangshan Granodiorite Intrusion, Beijing: Evidence from Fission Tracks of Apatites and Sphenes. *Geochimica*, 32(2): 188 – 192 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Chen, B., Zhang, S. H., et al., 2010. Pre-Yanshanian Geological Events in the Northern Margin of the North China Craton and Its Adjacent Areas. *Geology in China*, 37(4): 900 – 915 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Hu, Z. Q., Chen, Y., et al., 2008. Evolution of Early Cretaceous Extensional Basins in the Eastern North China Craton and Its Implication for the Craton Destruction. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1594 – 1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Chen, L., Wu, F. Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science China: Earth Science*, 41(5): 583 – 592 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等, 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr, Nd, Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. *岩石学报*, 21(3): 776 – 788.
- 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析. *地球物理学报*, 55(11): 3731 – 3741.
- 陈详高, 张忠奎, 臧文秀, 1986. 北京房山花岗闪长岩中锆石的裂变径迹年龄测定和热历史的研究. *岩石学报*, 2 (1): 40 – 44.
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等, 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? *地学前缘*, 13(2): 105 – 119.
- 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等, 2005. 北京西山房山岩体岩浆底辟构造及其地质意义. *地球科学*, 30(3): 298 – 308.
- 黄宝春, 陈军山, 易治宇, 2010. 再论印度与亚洲大陆何时何地发生初始碰撞. *地球物理学报*, 53(9): 2045 – 2058.
- 李天义, 何治亮, 何生, 等, 2014. 中扬子江汉平原江汉湾地区中、新生代构造 – 热演化史. *地球物理学报*, 57(6): 1868 – 1882.
- 刘小丽, 程素华, 张宏远, 2015. 花岗质岩浆的变压结晶作用及其动力学意义: 以北京房山岩体为例. *现代地质*, 29 (3): 514 – 528.
- 马昌前, 1988. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理. *地质学报*, 23(4): 329 – 341, 373.
- 覃锋, 徐晓霞, 罗照华, 2006. 北京房山岩体形成过程中的岩浆混合作用证据. *岩石学报*, 22(12): 2957 – 2970.
- 桑海清, 王非, 贺怀宇, 等, 2006. 中国 K-Ar 法地质年龄标准物质 ZBH-15 黑云母的研制. *矿物岩石地球化学通报*, 25(3): 201 – 217.
- 桑海清, 王非, 贺怀宇, 等, 2007. K-Ar 法地质年龄标准物质 ZBJ 角闪石的定值结果. *地质科学*, 42(3): 532 – 557.
- 陶继东, 马昌前, 张金阳, 等, 2009. 北京房山花岗闪长岩体中包体的演化及闪长质微粒包体的成因. *地质科技情报*, 28(2): 33 – 41.
- 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 等, 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. *地质学报*, 84(1): 1 – 29.
- 杨可, 2014. 北京房山岩体剥蚀深度及其大地构造意义 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 12 – 38.
- 翟鹏济, 张峰, 赵云龙, 2003. 从裂变径迹分析探讨房山岩体地质热历史. *地球化学*, 32(2): 188 – 192.
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等, 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. *中国地质*, 37(4): 900 – 915.
- 朱光, 胡召齐, 陈印, 等, 2008. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地的发育过程及其对克拉通破坏的指示. *地质通报*, 27(10): 1594 – 1604.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41(5): 583 – 592.