

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.006>



用接触变质作用标志初步判别北京 房山岩体的岩浆侵位机制

陈能松, 陈冰寒, Roger Mason, 杨婷婷, 夏 彬, 刘 嵘, 王国庆, 徐 冉

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 近同心状房山岩体接触变质晕中变斑晶—基质关系与变质作用 $P-T$ 轨迹样式的结合可以区分岩浆底劈式侵位与气球膨胀式侵位机制。例如, 该房山岩体南侧接触变质晕中的下马岭组泥质变质岩的变斑晶—基质关系显示强烈的面状压扁应变变形, 其变质作用 $P-T$ 轨迹具等压加热趋势, 综合前人成果估算该岩体 4 个依次侵位的岩石单元的最终就位岩浆结晶深度彼此近于一致, 倾向于认为该岩体的岩浆侵位机制为气球膨胀式。

关键词: 岩浆侵位机制; 接触变质作用; $P-T$ 轨迹; 变斑晶—基质关系; 房山岩体; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)01-0099-10

收稿日期: 2017-10-13

Using Contact Metamorphic Criteria in Contact Aureole to Preliminarily Discriminate Magma Emplacement Mechanisms of Fangshan Pluton, Beijing

Chen Nengsong, Chen Binghan, Roger Mason, Yang Tingting, Xia Bin, Liu Rong, Wang Guoqing, Xu Ran

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Relationship between metamorphic porphyroblasts and their matrices in the contact aureole of the concentric zoned Fangshan pluton, Beijing, combined with $P-T$ patterns can be used as criteria to distinguish between magmatic diapirism and balloon expansion mechanisms for pluton emplacement in this study. It is found that, pelitic metamorphic rocks in the Xiamaling Formation in the southern part of the aureole display porphyroblast-matrix relationships reflecting intense plane-strain deformation combined with a nearly isobaric heating $P-T$ trajectory towards the contact. Incorporating previously published estimates of final crystallization depths of four successively emplaced magmatic units, the results favor the balloon-inflation intrusion mechanism.

Key words: magma emplacement mechanism; contact metamorphism; $P-T$ path; porphyroblast-matrix relationship; Fangshan pluton; petrology.

0 引言

中酸性岩浆的侵位机制是花岗岩岩体构造的重要研究内容之一(Paterson and Vernon, 1995)。在诸多的中酸性岩体中, 有一类岩体的矿物组成、结构和构造以及包体产状等在现今剥蚀面上显示近同心带状分布, 被称为近同心带状侵入体(concentrically

zoned plutons; Paterson and Vernon, 1995)。此类岩体的侵位机制有气球膨胀说(Sylvester *et al.*, 1978; Bateman, 1984; Ramsay, 1989)和底劈说(Marsh, 1982; Cruden, 1988, 1990; Mahon *et al.*, 1988; Schmeling *et al.*, 1988; Weinberg and Podladchikov, 1994; Paterson and Vernon, 1995)。Paterson and Vernon(1995)严格定义了典型气球膨

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41672060); 中国地质大学(武汉)本科教学工程项目(No.ZL201610)。

作者简介: 陈能松(1956—), 男, 教授, 主要从事岩石学教学和变质作用地球动力学研究。E-mail: chennengsong@163.com

引用格式: 陈能松, 陈冰寒, Roger Mason, 等, 2018. 用接触变质作用标志初步判别北京房山岩体的岩浆侵位机制. 地球科学, 43(1): 99-108.

胀机制和底劈机制岩体:前者为相对对称的、辐射状向四周扩张的岩浆房,其岩浆房中心相对于远场参考体无重大变动的侵位;后者为岩浆体呈非穿刺性进入围岩或穿刺性穿过围岩而上升的侵位.近年研究表明,我国的房山岩体可能是岩浆底劈侵位岩体的一个好实例(He *et al.*, 2009).

由于气球膨胀式与底劈式侵位机制的岩体在平面形状、岩体内部的面理构造和包体分布等方面都相似,仅依据岩体内部标志难以将两者分开来.因此,国外学者将研究重点放到围岩接触变质晕中,并提出了底劈式侵位的若干鉴别标志,主要有:发育高温韧性剪切变形晕、应变类型以剪切应变为主、向岩体外倾斜并相对向下运动的拉伸线理、超过近十千米深度差的岩石地质体与垂向构造上移、岩体围岩发育不对称的边缘向斜构造等(Bateman, 1984; Castro, 1987; England, 1990; Brown, 1994; Clemens, 1998; He *et al.*, 2009).显然,这些标志总体上侧重于变形作用而轻于变质作用过程.本文拟基于底劈侵位模式,解读岩浆底劈侵位过程中接触变质晕的变质-变形关系和变质作用过程,提出岩浆底劈侵位和气球膨胀侵位机制的变质作用判别标志,然后据近期对房山岩体接触变质晕初步开展的岩相学观察获得的显微构造资料和 P - T 轨迹趋势信息,结合前人新近估算的岩浆侵位最终结晶深度资料,提出房山岩体的岩浆侵位机制的初步意见.

1 岩浆侵位机制在围岩变质晕中的判别标志

1.1 构造变形判别标志

He *et al.* (2009) 对前人先后提出的围岩接触变质晕中的岩浆侵位机制构造判别标志(England, 1990; Clemens, 1998; Miller and Paterson, 1999) 进行了归纳综合,包括:矿物拉伸线理、面理构造产状、应变类型、高温剪切晕有无、围岩垂向上移和边缘向斜等(表 1).

(1) 矿物拉伸线理.底劈侵位岩浆相对围岩的上升运动(pluton-side-up)产生强烈的剪切变形作用.由于此类岩浆体通常呈蘑菇状或倒水滴状,其产状通常较陡,其强力的上冲作用将类似于推覆构造那样在围岩中产生矿物拉伸线理或鞘褶皱等,其中矿物线理的产状是呈辐射状向外陡倾的.

(2) 面理构造产状.底劈侵位岩浆对围岩的剪切

作用将产生相应的剪切面理,这些面理的产状将与岩体的边界相平行,呈近同心的圆或椭圆状围绕岩体边界展布.注意这些面理的产状也是呈辐射状向外陡倾的.

(3) 应变类型.底劈侵位岩浆上升使围岩发生的应变类型主要为剪切应变,局部为压扁应变变形.

(4) 高温剪切晕.底劈侵位岩浆对围岩的加热与剪切变形的双重作用,将在紧靠岩体的围岩产生一个围绕岩体的高温变质和高强度剪切应变的变质-构造晕,称高温剪切晕(HTSA).

(5) 围岩垂向上移.底劈侵位岩浆的上升对围岩的拖曳作用可驮背部分围岩上升至若干千米的浅部位置.

(6) 边缘向斜.底劈侵位的岩浆上升对围岩的拖曳作用将使靠近岩体的地层部分向上提,产状变得越来越陡,而远离岩体的地层部分向下流动,从而形成环绕岩体周缘的不对称向斜.

高温剪切晕、围岩垂向上移和边缘向斜等宏观特征在 He *et al.* (2009) 构筑的房山岩体底劈侵位模式剖面图上的分布见图 1. 气球膨胀型侵位岩体与岩浆底劈侵位岩体的接触变质晕发育相同的面理构造产状,但其他特征均不相同,如不发育反映上、下运动的矿物拉伸线理、应变类型主要为压扁变形型、高温剪切晕以水平剪切和压扁为主、围岩发育水平位移为主垂直上升位移不明显、边缘向斜为对称向斜型等(表 1).

1.2 变质作用判别标志

接触变质作用标志主要有变斑晶-基质关系和变质作用 P - T 轨迹.

1.2.1 变斑晶-基质关系 这里的变斑晶-基质关系指变斑晶包裹体矿物构成的晶内面理与基质矿物定向排列构成的晶外面理之间的关系.一般说来,变斑晶晶内面理可以保存岩浆体侵位前、同侵位和侵位后围岩岩石的应变特征和运动学标志(Vernon, 1989; Vernon and Paterson, 1993).然而,由于接触变质作用的加热时间和退变质时间都较短,接触成因的变斑晶通常都是在前进变质过程中形成的,因此其晶内面理记录的变质变形痕迹既可能是变斑晶生长前围岩就已存在的区域构造面理,也可能是岩体侵入加热期间形成的构造面理(Pitcher and Read, 1960; Fyson, 1975; Meneilly, 1983; Vernon, 1989),但难以记录到侵位后冷却期间围岩发生构造变形痕迹,除非退变温度足够高而冷却速率足够低.为此,在实际工作中通常要正确鉴别接触成因变斑

表 1 岩浆气球膨胀与底劈侵位机制在围岩接触变质晕中的判别标志

Table 1 Criteria in contact aureole for discrimination of ballooning from diapiric intrusive mechanisms

	岩浆底劈机制	气球膨胀机制	房山岩体	
			He <i>et al.</i> (2009)	本文和前人观察资料
前进变质阶段拉伸线理	向岩体外辐射和陡倾	不发育	向外辐射和陡倾	另有不同的线理产状测量结果,可能是峰期后退变质作用相关的线理?
变质峰期的面理构造	同心状	同心状	同心状	同心状
前进变质阶段高温剪切晕	发育	不发育	发育	剪切明显,但可能不属前进变质阶段的同剪切构造变晶,强烈剪切面理发育在峰期变质之后变质峰期
垂向位移	明显	不明显	明显	有岩体侵入前拆离断层剥露的不同意见
边缘向斜	发育,为不对称型	可能发育,对称型或不对称	发育,为不对称型	发育,为不对称型
前进变质阶段应变类型	剪切为主,压扁次之	压扁为主,剪切次之	剪切	前进变质以压扁为主,峰期变质后强烈剪切
前进变质阶段变斑晶—基质关系	变斑晶主体发育同岩体侵位的上、下剪切相关的旋转型晶内面理,次之为平直的晶内面理	变斑晶主体发育同岩体侵位的平直的晶内面理,或与水平剪切相关的旋转型晶内面理	?	主体为平直晶内面理,少量为微弱的 S 型或 Z 型剪切面理变质作用
<i>P-T</i> 轨迹	具体视岩石所处部位而定,顶部为减压幅度较大的升温轨迹,边缘向斜内为明显增压的升温轨迹	总体为近等压升温或压力变化幅度较小,升温明显的 <i>P-T</i> 轨迹	未研究	近等压升温轨迹

注: 表据 He *et al.* (2009) 修改.

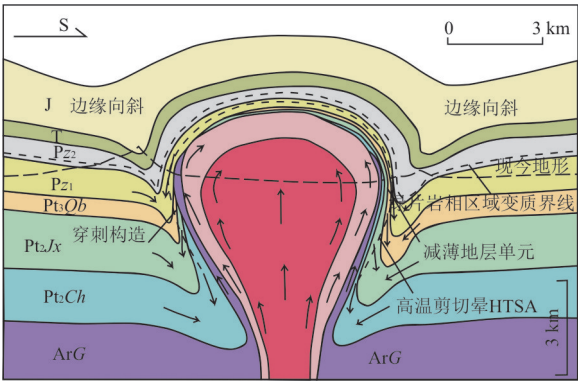


图 1 房山岩体岩浆底劈侵位模式

Fig.1 Magmatic diapir intrusive model for Fangshan pluton
图据 He *et al.* (2009) 重绘并略作修改;图中展示了位于接触变质晕内环的高温剪切晕 (HTSA)、由岩体中心向外辐射的陡倾面理构造、显著垂直上升的太古代岩片、边缘向斜构造和向斜压缩程度与深度的关系

晶的晶内面理是早期区域变质事件的抑或是同岩浆体侵入的产物.

假定变斑晶生长期间受到剪切作用时基质矿物确定的面理发生了旋转,那么变斑晶中记录的同岩浆体侵位的晶内面理相对于晶外面理也应发生明显的相对旋转.因此,若变斑晶主体发育 S-或 Z-型旋转构造,尤其是雪球构造的晶内面理,表明其应变类型属剪切变形;反之,若晶内面理以平直型为主,则是

压扁变形.对于剪切变形,要结合矿物拉伸线理的相对运动方向是垂向的还是近水平走滑运动以便区分底劈型还是气球膨胀型岩浆侵位.对压扁变形,可以通过统计来确定,如主体为压扁变形,可能为气球膨胀型岩浆侵位.

1.2.2 *P-T* 轨迹 气球膨胀型和底劈型岩浆侵位岩体的高温变质晕因其应变类型和剪切类型的差异而分别产生不同样式的 *P-T* 轨迹.

底劈型岩浆侵位岩体变质晕的 *P-T* 轨迹样式可以很复杂,具体随该岩石在不对称边缘向斜位置的不同而不同(图 2).底劈岩浆柱头上方的变质地层随岩浆上升被从地壳的较深处顶托至较浅处并减薄(图 2a, A-A'段),其岩石一边加热一边上升,产生减压升温 *P-T* 轨迹,相对较高的或较低的底劈侵位速率将分别产生上凸的或下凹的轨迹段(图 2b, A-A').边缘向斜地层顶面以下的地层岩石随向斜的形成向向斜转折端运动,从相对较浅的位置移动到较深的位置.靠近岩浆柱的地层加热较快而产生凸向温度轴的上凸型增压升温 *P-T* 轨迹(图 2b, B-C),远离岩浆柱的地层初始温度较低,加温速率也较低,因而产生凸向压力轴的下凹型增压升温 *P-T* 轨迹(图 2b, B'-C).气球膨胀侵位在变质晕中产生的 *P-T* 轨迹相对简单:整体上,位于气球岩浆房四周的地

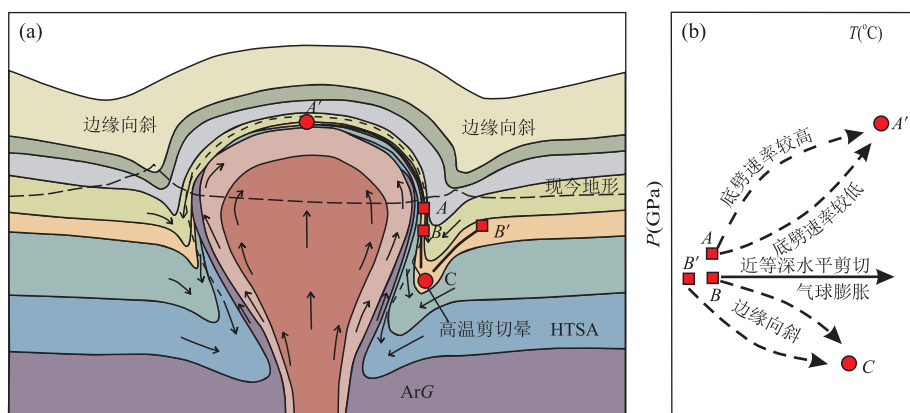


图 2 底劈型岩浆侵位岩体变质晕(a)和相应的变质 P - T 轨迹示意(b)

Fig.2 Diapiric magma pluton (a) aureole and corresponding metamorphic P - T path (b)

图据 He *et al.* (2009) 简化

层岩石因水平的剪切运动未造成所处深度的明显变化,持续的加热使其产生近等压升温 P - T 轨迹(图 2b);岩房上方岩石的轨迹也以减压升温为特征,但其减压幅度因岩体向水平方向扩张为主而比底劈侵位型小得多,从而显示增温趋势明显大于减压幅度时 P - T 轨迹.边缘向斜地层对应部位也发育类似于底劈侵位型的 P - T 轨迹,但该轨迹也因减压幅度不大而显示近等压升温特征.综上所述,气球膨胀型侵位岩体围岩接触变质晕发育近等压升温 P - T 轨迹,而底劈型发育减压或增压明显的升温 P - T 轨迹.

表 1 分别列出了前人总结的(He *et al.*, 2009)和本文在其基础上修改的和新增加的气球膨胀型和底劈型岩浆侵位岩体接触变质晕中的构造变质判别标志.与前人的总结相比,本文除增加了变质作用相关的“变斑晶—基质关系”和“ P - T 轨迹判别项”,还将各项标志限定为“前进变质阶段”或“变质峰期”的属性.之所以做这一限定,是因为与底劈型或气球膨胀型岩浆侵位岩体相关的接触变质作用和构造变形记录会因峰期后的构造叠加发生部分改变或完全消失,而使用峰期后产生的各种要素来判别岩浆侵位机制类型将得出不合理的判别结果.另外,对于在两种侵位机制中均可以产生的标志,如压扁应变和相应的压扁面理,则通过其出现的主、次来强调其在判别中作用.在实际应用中应当收集尽可能多的判别标志,进行综合分析,以使判别结果更为合理.

必须指出,本文建立的 P - T 轨迹判别标志仅适用于与单纯岩浆侵位相关的变质作用.如果在岩体侵位过程中伴随发生区域构造作用,如大规模的推覆加厚或伸展减薄,势必会引起突变性的增压或减压 P - T 演化趋势,注意这些现象存在与否,将为认

识在岩浆侵位和接触变质作用进行期间是否发生大规模的区域构造变动和构造性质甄别提供重要线索.对于叠加在区域变质作用之上的接触变质作用,要注意特征变质矿物,尤其是石榴子石是否存在与区域变质作用相关的继承核,以便为揭示与区域变质作用相关的构造运动性质提供物质依据.例如, Dorfler *et al.* (2014) 在北美阿巴拉契亚山脉识别出叠加于区域变质作用之上的接触变质晕中的泥质变质岩石石榴子石生长环带,区分出石榴子石核来自于早期区域变质作用产物,变质条件为 0.5 Ga 和 ~ 620 °C,石榴子石边部为接触变质产物,变质条件为 0.8 Ga 和 ~ 790 °C,从而揭示早期的区域变质峰期后可能发生了 Taconic 外来推覆体就位的变质作用响应.为此,必须扎扎实实地开展石榴子石等固溶体矿物的成分剖面填图(Chen *et al.*, 1998; Viete *et al.*, 2013)和成分剖面测定,为发现可能隐藏的区域构造过程,有时能起到事半功倍的效果.此外,在发育区域性花岗岩基侵入的地段,如岛弧地区,变质作用过程主要受区域岩浆作用控制.所有这些是基于接触变质作用 P - T 轨迹解释岩浆侵位机制时需要注意的.

2 房山岩体岩浆侵位机制的初步探讨

房山岩体的岩浆侵位机制存在气球膨胀(王人镜和马昌前, 1989; 张吉顺和李志忠, 1990; Ma *et al.*, 1996)和岩浆底劈(He *et al.*, 2009; 刘小丽, 2015)两种观点.

房山岩体位于北京西部的房山县城北部(图 3).该岩体平面形态近椭圆形,长轴北西—南东向,约

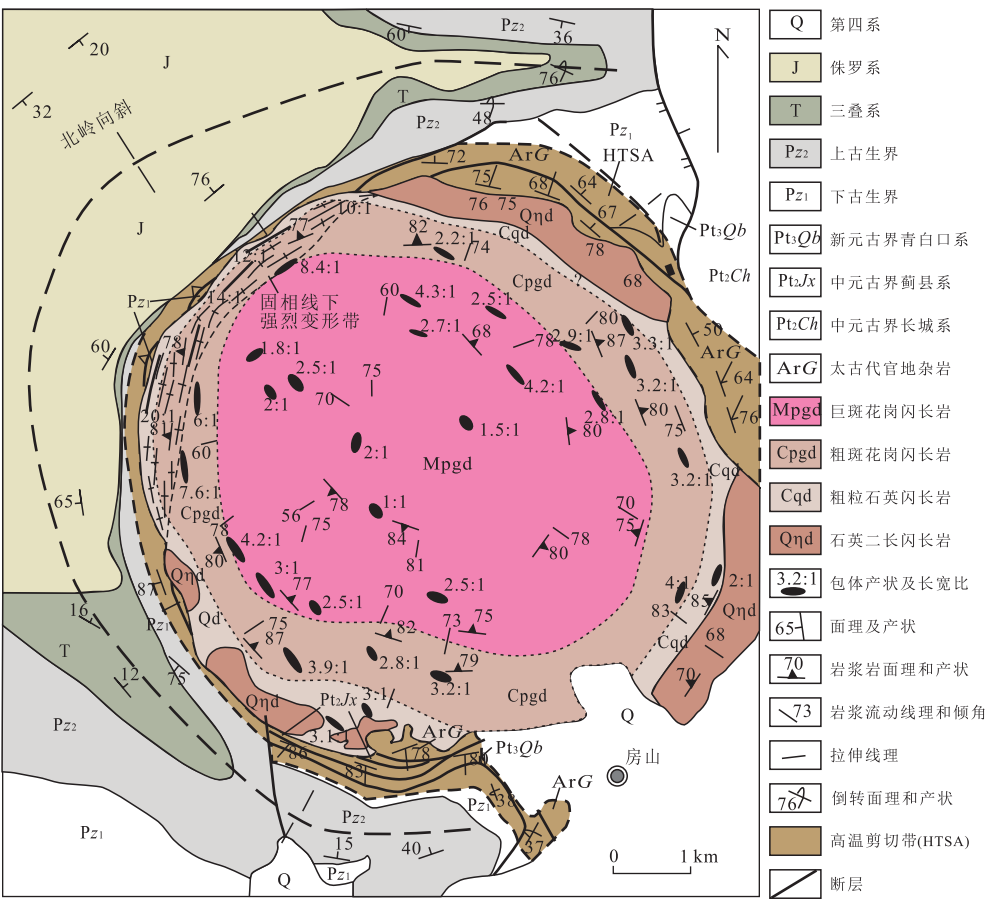


图 3 房山岩体和围岩构造地质简略

Fig.3 Brief geological map of Fangshan pluton and country rock tectonics

第一次侵入体:Qnd.细粒闪长岩—斑状石英二长闪长岩单元;第二次侵入体:Cqd.粗粒石英闪长岩,Cpgd.粗斑花岗闪长岩,Mpgd.巨斑花岗闪长岩;虚线示房山岩体内部高温剪切带大致边界,点线示岩体西北缘内部固相线下变形带界线;产状和倾角单位为度

9 km,短轴南西—北东向,约 7 km,面积约为 54 km².岩体围岩包括新太古代官地杂岩和中元古界、新元古界和古生代地层.中元古界下马岭组以来的地层在燕山运动早期遭受过低级区域变质作用,发育硬绿泥石、红柱石、绿泥石和白云母等变质矿物(王嘉荫,1951).

房山岩体为两次脉动多次涌动侵入的复式侵入体(王人镜,1987;马昌前,1988;王人镜和马昌前,1989;Ma *et al.*, 1996).第一次侵入的主体岩石为斑状石英二长闪长岩,局部为中—细粒闪长岩的中性侵入岩.第二次脉动侵入的为中—酸性岩株,以花岗闪长岩为主体,与第一次侵入岩呈脉动侵入关系.花岗闪长岩岩株由涌动侵入的早、中、晚 3 个岩石单元组成(张吉顺和李志中,1990;周正国等,1992;Ma *et al.*, 1996),其岩性分别为粗粒石英闪长岩、粗斑状花岗闪长岩和巨斑状花岗闪长岩,三者在平面上呈由外向里的近同心带状分布,而第一次侵入的细粒等粒闪长岩—斑状石英二长闪长岩呈巨型捕虏体

或残块产于粗粒石英闪长岩单元内部或边缘上.原位高精度锆石 U-Pb 定年测得 4 个单元的结晶侵位年龄在误差范围内一致,为 130~133 Ma(蔡剑辉等,2005;Sun *et al.*, 2010;张金阳等,2013).基于岩浆变压结晶原理重新测定获得细粒等粒闪长岩—斑状石英二长闪长岩和花岗闪长岩岩株的粗粒石英闪长岩、粗斑斑状花岗闪长岩和巨斑斑状花岗闪长岩原岩浆体的起始结晶深度分别为 16.4、16.4、14.6 和 13.5 km,最终的结晶深度分别为 8.75、8.23、8.02 和 9.11 km(刘小丽等,2015).

房山岩体围岩的接触变质晕早期被划分出黑云母带、红柱石带、石榴石—十字石带和夕线石—白云母带(刘国惠和伍家善,1987).Wang and Chen (1996)在房山岩体南缘下马岭组划分出红柱石带、石榴子石带和红柱石—钾长石带;刘小丽(2015)则将其划分为红柱石带、石榴石—十字石带和夕线石带.最近研究人员观察注意到夕线石带可进一步划分出夕线石—白云母带和夕线石—钾长石带,在夕

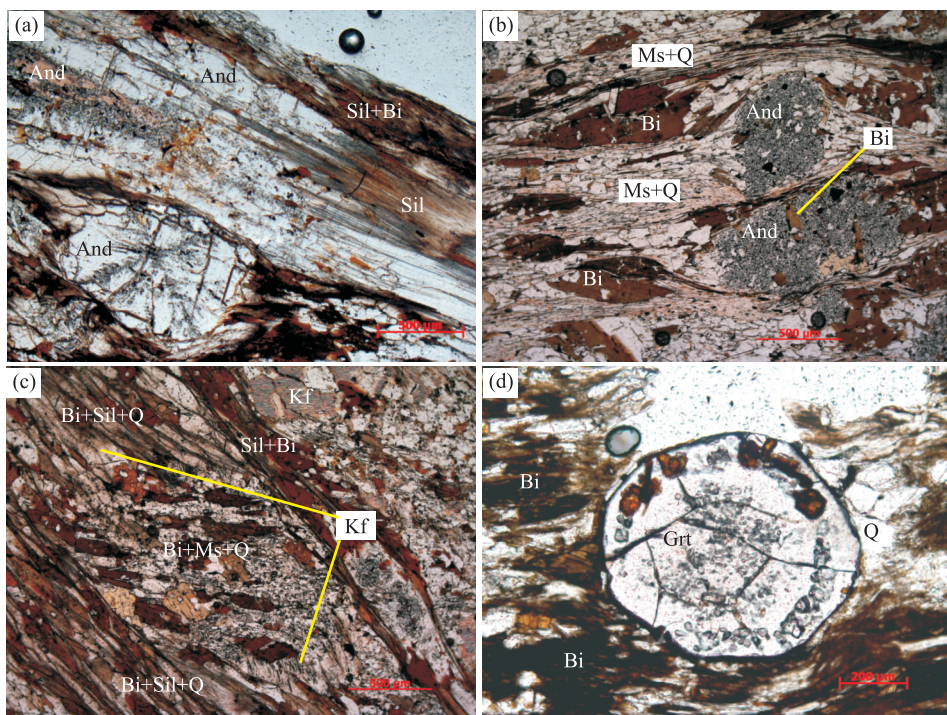


图 4 接触变质晕代表性显微构造照片

Fig.4 Representative microtectonic photos of contact aureole

a.夕线石—白云母带柱状红柱石核部为玫瑰红色的低温晶体相,边部为无色的中—高温晶体相,中—高温相红柱石末端多型转变为纤维状夕线石集合体,另一红柱石晶体的横断面显示十字包裹物迹线,由其分割的 4 个扇形区内可见断续排列的管状石英包体垂直于晶面;b.夕线石—白云母带的红柱石云母片岩中的红柱石变斑晶和黑云母呈眼球状或鱼状,晶内面理呈平直状被晶外面理交切,显示变质结晶早于剪切面理;c.夕线石—钾长石带的眼球状钾长石变斑晶与夕线石共生,其核部由黑云母、石英和白云母组成的平直的面理与由纤维状夕线石、黑云母等组成的晶外面理呈 $\sim 45^\circ$ 相交;d.石榴子石呈自形一半自形晶,显示弱的溶蚀特征,核部的石英包裹体呈不定向或弱的直线状排列,近边部由一环状石英包裹体为界划分出两个带

线石—白云母带的高温部分出现花岗质浅色体(陈冰寒,待发表数据)。夕线石—白云母带中白云母与石英呈平衡共生;夕线石多呈纤维状集合体,它们或经循环反应转变与黑云母交生,或由部分红柱石多型转变而来(图 4a)。笔者在横切面上可观察到红柱石内的石英包裹体呈管状垂直于晶面生长,显示无剪切变形迹象。然而,在夕线石—白云母带的局部地段可观察到透镜化的红柱石变斑晶和鱼状黑云母,它们的晶内面理均呈平直状,与晶外剪切面理高角度相交(图 4b),显示红柱石和黑云母为相对于晶外面理的构造前变晶。夕线石—钾长石带的基质中无原生白云母,由此笔者推测钾长石和夕线石由原生白云母与石英反应而成。钾长石大多呈变斑晶,含石英、黑云母和白云母包裹体,偶尔可见少量纤维状夕线石。这些包裹体矿物构成平直状晶内面理,但被晶外面理高角度相切(图 4c),同样显示钾长石为相对早于晶外面理的构造前变晶。此外,该带中的石榴子石呈自形或半自形晶,其切面显示核部发育不定向排列的石英微粒包裹体,在靠近边部发育一圈石英

包裹体,显示简单的光性环带(图 4d),未见石榴子石发育相对于晶外面理的旋转型晶内面理。

红柱石在中低温变质带中一直稳定存在,到夕线石—白云母带多型转变为纤维夕线石集合体(图 4b),表明其变质压力条件在温度条件未超越三相点温度之前一直稳定在夕线石、蓝晶石和红柱石三相点的压力条件之下。据刘小丽(2015)资料,下马岭组十字石的 $X_{Fe} = 0.95 \sim 0.92$,为铁十字石。据 Richardson(1968)的实验资料,在 550 至 750 $^\circ\text{C}$ 之间,铁十字石+铁黑云母稳定于 ~ 0.35 GPa 之上,而铁堇青石+白云母组合稳定于 ~ 0.35 GPa 之下的压力条件(图 5)。笔者迄今为止的观察均未在下马岭组泥质变质岩中发现堇青石。然而,十字石与黑云母的共生组合不仅普遍见于石榴子石—十字石带,而且稳定地存在于夕线石—白云母带的低温部分,直到在花岗质浅色体附近才完全消失。如果假设接触变质作用仅简单地受控于热传导,那么围岩中形成的由远向岩体的前进变质带序列可以近似看成夕线石—钾长石带由早期的低级变质经中级变质再到高级变

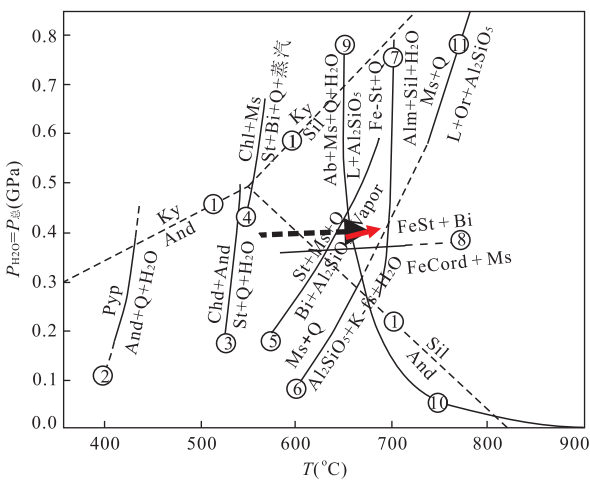


图 5 房山岩体接触变质晕夕线石—钾长石带的初步限定的 P - T 轨迹

Fig.5 P - T path preliminarily constrained for the sillimanite-K-feldspar zone in Fangshan pluton contact aureole

图中黑色轨迹由本文约束,红色轨迹据刘小丽(2015)。底图据 Mueller and Saxena(1977)。反应资料:①And,Ky 和 Sil 的相平衡是 Mueller and Saxena(1977)据 Richardson(1968)和 Holdaway(1971)的实验成果和 Ganguly 的论据推断;② $\text{Pyp}=\text{And}+3\text{Q}+\text{H}_2\text{O}$,据 Kerrick (1968);③ $\text{Chd}+\text{Al}_2\text{SiO}_5=\text{St}+\text{Q}+\text{H}_2\text{O}$,据 Richardson(1968);④ $(\text{Fe-Mg})\text{Chl}+\text{Ms}=(\text{Fe-Mg})\text{St}+(\text{Fe-Mg})\text{Bi}+\text{Q}+\text{H}_2\text{O}$,据 Hoschek (1969);⑤ $(\text{Fe-Mg})\text{St}+\text{Ms}+\text{Q}=\text{Al}_2\text{SiO}_5+(\text{Fe-Mg})\text{Bi}+\text{H}_2\text{O}$,据 Hoschek(1969);⑥ $\text{Ma}+\text{Q}=\text{Al}_2\text{SiO}_5+\text{K-fs}+\text{H}_2\text{O}$,据 Day(1973);⑦ $\text{Fe-St}+\text{Q}=\text{Alm}+\text{Al}_2\text{SiO}_5+\text{H}_2\text{O}$;⑧ $\text{Fe-St}+\text{Fe-Bi}=\text{Fe-Cord}+\text{Ms}$,据 Richardson(1968);⑨ $\text{Ab}+\text{Ms}+\text{Q}+\text{H}_2\text{O}=\text{L}$ (熔体),据 Storre and Karotke(1971);⑩Ar-Or-Q-H₂O 体系熔融开始,据 Merrill *et al.*(1970);⑪ $\text{Ma}+\text{Q}=\text{L}$ (熔体)+ $\text{Al}_2\text{SiO}_5+\text{K-fs}$,据 Storre (1972)。矿物代号:Q,石英;Ab,钠长石;Or,正长石;Ms,白云母;Bi,黑云母;Chl,绿泥石;Chd,硬绿泥石;Alm,铁铝榴石;St,十字石;Cord,堇 青石;K-fs,钾长石;And,红柱石;Ky,蓝晶石;Sil,夕线石

质的温度条件演化,该演化的压力条件变化范围可约束在 ~ 0.45 Ga 与 ~ 0.35 GPa 之间(图 5)。从变质带自身矿物世代更替相关的变质反应也可以初步约束夕线石—钾长石带的 P - T 轨迹。该带红柱石变斑晶中玫瑰色的红柱石核与分布在灰白色红柱石边的边界处的黑云母、白云母、石英和细粒石墨(刘小丽, 2015;本文结果)代表低温变质条件的共生组合,其中,不包括石墨在内的矿物组合类似于 Mason *et al.*(2010)提出的那样,是变质反应: Muscovite(白云母)+chlorite(绿泥石)=Andalusite(红柱石)+biotite(黑云母)+quartz(石英)+vapor(挥发份 H₂O)的结果(Pattison and Tracy, 1991; Spear, 1993)。钾长石变斑晶晶内面理的构成矿物为黑云母+白云母+石英±纤维状夕线石(图 4c),该组合的温度条件与夕线石—白云母带温度条件相当。钾

长石变斑晶与夕线石的共生指示变质条件超越了白云母与石英反应为钾长石+夕线石单变线,进入了高级变质岩的温度条件范围。基于夕线石—白云母带中的十字石在花岗质浅色体出现之前就消失,因此其压力条件可被约束在 Ar-Or-Q-H₂O 体系熔融开始(Merrill *et al.*, 1970)与脱水反应 $(\text{Fe-Mg})\text{St}+\text{Ms}+\text{Q}=\text{Al}_2\text{SiO}_5+(\text{Fe-Mg})\text{Bi}+\text{H}_2\text{O}$ (Hoschek, 1969)两条反应单变线交点的压力条件(~ 0.45 GPa)之下。由此 3 个组合约束的 P - T 轨迹亦呈近等压升温型(图 5)。刘小丽(2015)曾用 KMnFMASH ($\text{K}_2\text{O}-\text{MnO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$)体系对该接触变质晕中的石榴夕线钾长片麻岩(该文称石榴钾长夕线黑云母片岩)相平衡模拟约束的 P - T 轨迹为从 $\sim 630^\circ\text{C}$ 和 0.39 GPa 变化到 $\sim 690^\circ\text{C}$ 和 0.41 GPa,具压力条件轻微上升的近等压升温特征,与本文基于变质反应初步限定的近等压 P - T 轨迹(图 5)相一致。

房山岩体南缘接触变质作用的初步观察和研究表明:(1)“高温剪切晕”中一些变斑晶的晶内面理以平直型为主,显示围岩在前进变质作用过程中并无强烈剪切应变相伴,岩石发育的剪切面理可能发生在变质峰期之后(图 4b~4d),不宜视为高温剪切变形的证据(参见表 1);(2)初步重建的 P - T 轨迹总体呈近于等压升温型,这与气球膨胀侵位岩体的接触变质过程的 P - T 轨迹类型相一致(表 1)。另外,刘小丽等(2015)基于变压结晶原理计算的结果表明,房山岩体中依次侵入的细粒等粒闪长岩—斑状石英二长闪长岩、粗粒石英闪长岩、粗斑花岗闪长岩和巨斑花岗长岩的最后结晶深度都在 8.0~9.1 km 之间,在估算的误差范围内相一致,这显示岩浆房中心相对于远场参考体无重大变动的岩浆体侵位,与 Paterson and Vernon(1995)定义的气球膨胀型岩浆侵位机制的特征一致。

3 初步结论

(1)接触变质晕岩石的显微构造和变质作用 P - T 轨迹可能是判别岩体侵位机制的重要潜在标志。与底劈侵位型相关的接触变质晕将主要发育与纵向剪切相关的同前进变质的旋转型晶内面理。其变质作用的 P - T 轨迹视岩石具体的构造位置而定:位于底劈岩浆体顶部和位于岩浆体周缘原地层顶面以上的岩石将发育减压升温型 P - T 轨迹;位于岩浆体周缘原地层顶面以下的边缘向斜内、外翼岩石分

别发育下凹型和上凸型增压升温轨迹. 气球膨胀型侵位型的接触变质晕将主要发育与水平剪切或压扁应变型相关的同前进变质晶内面理, 变质作用 P - T 轨迹为等压或压力变化幅度小于底劈侵位型的近等压升温轨迹.

(2) 房山岩体南缘下马岭组接触变质晕高温岩石变斑晶主体发育压扁应变型晶内面理, 罕见旋转型晶内面理, 其 P - T 轨迹为近等压升温型, 指示其岩浆侵位机制可能为气球膨胀型.

致谢: 两位匿名专家仔细地审阅了本论文手稿, 并提出了若干建设性修改意见, 特表谢忱. 受变质地质学的精髓——变质作用是一个动态过程的一再启示, 本文第一次提出基于接触变质岩记录的显微构造特征和接触变质作用 P - T 轨迹作为近同心带状岩体的岩浆侵位机制的判别标志, 同时应用这两个标志初步判断了房山岩体的岩浆侵位机制, 期待同行斧正. 笔者相信, 不断加深的观察和研究必将更新基于初步研究而得出的现有认识. 谨以此文敬贺我国变质地质学的开拓者——董申保先生 100 周年华诞!

References

- Bateman, R., 1984. On the Role of Diapirism in the Segregation, Ascent and Final Emplacement of Granitoid Magmas. *Tectonophysics*, 110(3-4): 211-231. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90262-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90262-2)
- Brown, M., 1994. The Generation, Segregation, Ascent and Emplacement of Granite Magma: The Migmatite-to-Crustally-Derived Granite Connection in Thickened Orogens. *Earth-Science Reviews*, 36(1-2): 83-130. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90009-4)
- Cai, J. H., Yan, G. H., Mu, 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).
- Castro, A., 1987. On Granitoid Emplacement and Related Structures. A Review. *Geologische Rundschau*, 76(1): 101-124. <https://doi.org/10.1007/bf01820576>
- Chen, N. S., Sun, M., You, Z. D., et al., 1998. Well-Preserved Garnet Growth Zoning in Granulite from the Dabie Mountains, Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(2): 213-222. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00074.x>
- Clemens, J. D., 1998. Observations on the Origins and Ascent Mechanisms of Granitic Magmas. *Journal of the Geological Society*, 155(5): 843-851. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.155.5.0843>
- Cruden, A. R., 1988. Deformation around a Rising Diapir Modeled by Creeping Flow Past a Sphere. *Tectonics*, 7(5): 1091-1101. <https://doi.org/10.1029/tc007i005p01091>
- Cruden, A. R., 1990. Flow and Fabric Development during the Diapiric Rise of Magma. *Journal of Geology*, 98(5): 681-698. <https://doi.org/10.1086/629433>
- Day, H. W., 1973. The High Temperature Stability of Muscovite Plus Quartz. *American Mineralogists*, 58: 255-262.
- Dorfler, K. M., Tracy, R. J., Caddick, M. J., 2014. Late-Stage Orogenic Loading Revealed by Contact Metamorphism in the Northern Appalachians, New York. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(1): 113-132. <https://doi.org/10.1111/jmg.12061>
- England, R. W., 1990. The Identification of Granitic Diapirs. *Journal of the Geological Society*, 147(6): 931-933. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.147.6.0931>
- Fyson, W. K., 1975. Fabrics and Deformation of Archean Metasedimentary Rocks, Ross Lake-Gordon Lake Area, Slave Province, Northwest Territories. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12(5): 765-776. <https://doi.org/10.1139/e75-067>
- 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>
- Holdaway, M. J., 1971. Stability of Andalusite and the Aluminum Silicate Phase Diagram. *American Journal of Science*, 271(2): 97-131. <https://doi.org/10.2475/ajs.271.2.97>
- Hoschek, G., 1969. The Stability of Staurolite and Chloritoid and Their Significance in Metamorphism of Pelitic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 22(3): 208-232. <https://doi.org/10.1007/bf00387954>
- Kerrick, D. M., 1968. Experiments on the Upper Stability Limit of Pyrophyllite at 1.8 Kilobars and 3.9 Kilobars Water Pressure. *American Journal of Science*, 266(3): 204-214. <https://doi.org/10.2475/ajs.266.3.204>
- Liu, G. H., Wu, J. S., 1987. Metamorphic Zones of the Fangshan Area in Beijing. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 16: 113-137 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. L., 2015. Study of Phase Equilibrium Modeling on KFMASH System about Mica-Schists of the Contact Metamorphic Zones in Fangshan, Beijing (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).

- nese with English abstract).
- 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*, 62 (4): 329 — 341, 373 — 374 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., Yang, K. G., 1996. Magmatic Thermodynamic Structures of the Zhoukoudian Granodioritic Intrusion in the Western Hills of Beijing. Field Trip Guide of 30th International Geological Congress, Beijing.
- Mahon, K. I., Harrison, T. M., Drew, D. A., 1988. Ascent of a Granitoid Diapir in a Temperature Varying Medium. *Journal of Geophysical Research*, 93 (B2): 1174 — 1188. <https://doi.org/10.1029/jb093ib02p01174>
- Marsh, B. D., 1982. On the Mechanics of Igneous Diapirism, Stopping, and Zone Melting. *American Journal of Science*, 282 (6): 808 — 855. <https://doi.org/10.2475/ajs.282.6.808>
- Mason, R., Burton, K. W., Yuan, Y. M., et al., 2010. Chistolithite. *Gondwana Research*, 18 (1): 222 — 229. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.03.005>
- Meneilly, A. W., 1983. Development of Early Composite Cleavage in Pelites from West Donegal. *Journal of Structural Geology*, 5 (1): 83 — 97. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90010-x](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90010-x)
- Merrill, R. B., Robertson, J. K., Wyllie P. J., 1970. Melting Reactions in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ to 20 Kilobars Compared with Results for Other Feldspar-Quartz- H_2O and H_2O Systems. *Journal of Geology*, 78 (5): 558 — 569. <https://doi.org/10.1086/627553>
- Miller, R. B., Paterson, S. R., 1999. In Defense of Magmatic Diapirs. *Journal of Structural Geology*, 21 (8): 1161 — 1173. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00033-4)
- Muller, R. F., Saxena, S. K., 1977. Chemical Petrology. Translated by Cong, B. L., Li, J. L., Geological Publishing House, Beijing, 193 (in Chinese with English abstract).
- Paterson, S. R., Vernon, R. H., 1995. Bursting the Bubble of Ballooning Plutons: A Return to Nested Diapirs Emplaced by Multiple Processes. *Geological Society of America Bulletin*, 107 (11): 1356 — 1380. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<1356:btbobb>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<1356:btbobb>2.3.co;2)
- Pattison, D. R. M., Tracy, R. J., 1991. Phase Equilibria and Thermobarometry of Metapelites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 26 (1): 105 — 206.
- Pitcher, W. S., Read, H. H., 1960. The Aureole of the Main Donegal Granite. *Geological Society of London Quarterly Journal*, 116: 1 — 36. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.116.1.0001>
- Ramsay, J. G., 1989. Emplacement Kinematics of a Granite Diapir: The Chindamora Batholith, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 11 (1 — 2): 191 — 209. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90043-6)
- Richardson, S. W., 1968. Staurolite Stability in a Part of the System Fe-Al-Si-O-H. *Journal of Petrology*, 9 (3): 467 — 488. <https://doi.org/10.1093/petrology/9.3.467>
- Schmeling, H., Cruden, A. R., Marquart, G., 1988. Finite Deformation in and around a Fluid Sphere Moving through a Viscous Medium; Implications for Diapiric Ascent. *Tectonophysics*, 149 (1 — 2): 17 — 34. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90116-3)
- Spear, F. S., 1993. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths. Mineralogical Society of America Monograph, Washington DC.
- Storre, B., 1972. Dry Melting of Muscovite + Quartz in the Range $P_s = 7$ kb to $P_s = 20$ kb. *Contributions of Mineralogy and Petrology*, 37 (1): 87 — 89. <https://doi.org/10.1007/BF00377309>
- Storre, B., Karotke, E., 1971. An Experimental Determination of the Upper Stability Limit of Muscovite + Quartz in the Range 7 — 20 kb Water Pressure. *Neues Jahrb. Mineral. Monasch*, 237 — 240.
- 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>
- Sylvester, A. G., Ortel, G., Nelson, C. A., et al., 1978. Papoose Flat Pluton: A Granitic Blister in the Inyo Mountains, California. *Geological Society of America Bulletin*, 89 (8): 1205 — 1219. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<1205:pfpagb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<1205:pfpagb>2.0.co;2)
- Vernon, R. H., 1989. Porphyroblast-Matrix Microstructural Relationships: Recent Approaches and Problems. *Geological Society, London, Special Publications*, 43 (1): 83 — 102. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.043.01.05>
- Vernon, R. H., Paterson, S. R., 1993. The Ardara Pluton, Ireland: Deflating an Expanded Intrusion. *Lithos*, 31 (1 — 2): 17 — 32. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90030-g](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90030-g)
- Viete, D. R., Oliver, G. J. H., Fraser, G. L., et al., 2013. Timing and Heat Sources for the Barrovian Metamorphism, Scotland. *Lithos*, 177: 148 — 163. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.009>

- Wang, F. Z., Chen, N. S., 1996. Regional and Thermodynamic Metamorphism of the Western Hills of Beijing. Field Trip Guide of 30th International Geological Congress, Beijing.
- Wang, J. Y., 1951. On the Chloritoid Belt in Western Hills of Peking. *Bulletin of the Geological Society of China*, 31: 23—30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., 1987. Intrusive Rocks. In: Tan, Y. J., Ye, J. L., eds., *The Geology of Zhoukoudian Area*, Beijing and Geological Practice Teaching Guide Book, Press of Wuhan College of Geology, Wuhan, 36—53 (in Chinese).
- Wang, R. J., Ma, C. Q., 1989. Features and Emplacement of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Earth Science*, 14(4): 399—406 (in Chinese with English abstract).
- Weinberg, R. F., Podladchikov, Y., 1994. Diapiric Ascent of Magmas through Power Law Crust and Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B5): 9543—9559. <https://doi.org/10.1029/93jb03461>
- Zhang, J. S., Li, Z. Z., 1990. Emplacement Deformations and Ballooning Mechanism about Fangshan Granodiorite Pluton, Beijing. In: Zhang, J. S., Shan, W. L., eds., *The Geological Study of Xishan*, Beijing, China University of Geosciences Press, Wuhan, 48—63 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.007>
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Wang, R. J., et al., 2013. Mineralogical, Geochronological and Geochemical Characteristics of Zhoukoudian Intrusion and Their Magmatic Source and Evolution. *Earth Science*, 38(1): 68—86 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.007>
- Zhou, Z. G., Luo, Z. H., He, M. Y., 1992. On the Mapping Units of the Fangshan Intrusion of Beijing. *Regional Geology of China*, (2): 156—160 (in Chinese with

English abstract).

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.
- 刘国惠, 伍家善, 1987. 北京房山地区的变质带. *中国地质科学院院报*, 16: 113—137.
- 刘小丽, 2015. 北京房山接触变质带云母片岩 KMnFMASH 体系相平衡研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 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*, 62(4): 329—341, 373—374.
- Muller, R. F., Saxena, S. K., 1977. 化学岩石学. 从柏林, 李继亮译. 北京: 地质出版社, 193.
- 王嘉荫, 1951. 北京西山硬绿泥石带. *中国地质学会志*, 31: 23—30.
- 王人镜, 1987. 侵入体. 见: 谭应家, 叶俊林主编, 北京周口店地质及地质教学实习指导书. 武汉: 武汉地质学院出版社, 36—53.
- 王人镜, 马昌前, 1989. 北京周口店侵入体特征及其侵位机制. *地球科学*, 14(4): 399—406.
- 张吉顺, 李志忠, 1990. 北京房山花岗闪长岩体的侵位变形构造及气球膨胀式侵位机制. 见: 张吉顺, 单文琅编, 北京西山地质研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 48—63.
- 张金阳, 马昌前, 王人镜, 等, 2013. 周口店岩体矿物学、年代学、地球化学特征及其岩浆起源与演化. *地球科学*, 38(1): 68—86.
- 周正国, 罗照华, 何明跃, 1992. 对北京房山岩体填图单位的初步探讨. *中国区域地质*, (2): 156—160.