

北京西山房山岩体岩浆底辟构造及其地质意义

何 斌^{1,2}, 徐义刚¹, 王雅玫³, 韦必则²

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学珠宝学院, 湖北武汉 430074

摘要: 运用底辟构造的理论和模型, 通过对北京西山房山岩体边缘围岩构造、变形和应变的研究, 厘定出岩体边缘的高温剪切带、周缘向斜、呈穹状分布陡倾的线理和面理, 并结合对西山区域构造事件分析后提出房山岩体为典型的岩浆底辟构造 (Hot-Stokes Diapir)。这项研究成果不仅在世界上首次证实了岩浆底辟的存在, 而且对理清北京西山地区的地质构造格架和演化序列具有十分重要的意义。研究认为房山地区可能不存在变质核杂岩; 房山岩体边缘的关坻太古宙杂岩是基底岩石随岩体底辟流动上升带到地壳上部的; 原先确定的一些印支期“剥离断层”是房山岩体岩浆底辟的刺穿构造或围岩高温剪切作用造成的地层缺失; 太平山和凤凰山等向斜是岩体底辟过程中在围岩拖曳下形成的周缘向斜。

关键词: 北京西山; 房山岩体; 岩浆底辟; 岩体侵位机制; 关坻杂岩; 变质核杂岩。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2005)03-0298-11

收稿日期: 2005-01-11

Magmatic Diapir of Fangshan Pluton in the Western Hills, Beijing and Its Geological Significance

HE Bin^{1,2}, XU Yi-gang¹, WANG Ya-mei³, WEI Bi-ze²

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Gemology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: A study of structures, deformation and strain of country rocks around Fangshan pluton in the western Hills, Beijing, reveals a high-temperature shear aureole, domal distribution of steep lineations and foliations in the thermodynamic aureole, and ring synclines around the pluton. Combining with the analysis of the regional tectonic events, it is concluded that Fangshan pluton is a real magmatic diapir (hot-stokes diapir). To our knowledge, this is the first reported magmatic diapir in the world. As such, this research result argues for a reconsideration of the structural frame and deformational series of the Zhoukoudian area. It is suggested that the Fangshan metamorphic core complex did not exist; the Guandi Archean complex in the margins of the pluton was outcropped by ductile flow of the diapiric ascent; previously proposed Indosinian denudational faults were piercing structures and/or the absence of the strata in the high temperature shear aureole; Taipingshan and Fenghuangshan synclines are ring synclines around the pluton formed by drag of country rocks due to the diapiric ascent.

Key words: the western hills; Fangshan pluton; magmatic diapir; emplacement of pluton; Guandi complex; metamorphic core complex.

底辟构造是指高塑性岩石在差异重力作用下向上拱起, 刺穿上覆岩层而形成的一种构造。作为重力

构造的一种,底辟广泛发育于各种地质背景中。如沉积盆地中的石盐、石膏、泥等由于密度较小易于流动,极易形成各种形态的底辟构造(Jackson and Talbot, 1986);世界上还报道有由蛇纹岩形成的底辟(Carlson, 1984)。底辟构造的形成机制和过程得到了大量的物理模拟和数值模拟的证实(Grout, 1945; Berner *et al.*, 1972; Dixon, 1975; Ramberg, 1981; Schmeling *et al.*, 1988; Whitehead and Helfrich, 1991; Weinberg and Podladchikov, 1994)。岩浆底辟的概念可追溯到20世纪初,当时一些地质学家根据盐底辟特征,建立了岩浆底辟的初步模型,并指出岩浆底辟动力来源于岩浆的浮力(Mrazec, 1915)。Grout (1945)系统地提出了岩浆底辟的理论,并成为花岗岩构造学的研究基础,在20世纪70年代被广泛应用(Castro, 1987; Brown, 1994; 王涛等, 1999)。然而20世纪80年代以来,国际地质学界对岩浆底辟侵位机制的认识存在着许多争议,有些学者基于岩体形态和内部变形的研究认为大多数原先确定为岩浆底辟的岩体实际上为气球膨胀(Bateman, 1984),部分学者甚至认为地球上可能不存在岩浆底辟(Petford, 1996; Clemens, 1998)。尽管以Weinberg和Paterson为代表的一批地质学家仍然坚持自己的观点(Weinberg, 1994; Paterson and Vernon, 1995; Miller and Paterson, 1999),但到目前为止世界上还没有一个让地质学界公认的花岗岩底辟上升侵位的实例(Bateman, 1984; Clemens, 1998; Miller and Paterson, 1999)。

北京西山房山岩体具有悠久的历史,研究程度较高。前人在岩体成分、年代学、包体成因和热接触变质作用等方面取得了一系列研究成果(Ma *et al.*, 1996; Wang and Chen, 1996)。在岩体的侵位机制上也有较为深入的研究。特别是20世纪80年代中期中国地质大学(武汉)北京西山队在1:5万周口店幅地质调查中对房山岩体进行了系统研究并提出气球膨胀的定位模式,张吉顺和李志忠(1990)对其作了系统的总结;马昌前(1988)根据岩浆动力学原理,定量地研究了岩体的成分分带与岩浆侵位的关系,进一步提出岩体的侵位机制为底辟膨胀式。然而这些研究多以岩体为主要研究对象,忽视了对岩体边缘围岩构造和变形的研究,再加上周口店地区复杂的地质构造背景,难以将岩体构造与区域构造区分开,阻碍了人们对岩体构造全面深入的认识。本文主要通过对房山岩体边缘围岩构造、变形和应

变的研究,提出房山岩体是典型的岩浆底辟,并讨论了底辟式上升侵位的确定对认识和理清北京西山地区复杂多变的构造面貌的重要意义。

1 地质背景

房山岩体位于北京城西南约50 km的房山区城北、北京西山的南端,东邻华北平原(图1)。因岩体南部1 km处为著名的周口店猿人遗址,有些学者将其称之为周口店岩体(马昌前, 1988)。研究区大地构造位置处于华北板块中部,在NNE向太行山隆起和近EW向燕山板内造山带的交接部位。该区岩石变形强烈,地质构造现象十分复杂,历来为中外学者所关注,被称为“中国地质工作者的摇篮”。区内地层属华北地台型,发育较全,地层标志清楚,易于对比,为研究地层的减薄和缺失提供了有利的地质条件。然而不同于华北地台其他地区的是本区前中生代地层经历了不同程度的变质和变形作用。在区域构造演化上存在2种不同的观点:传统观点认为本区与华北地台广大地区一样,自吕梁运动以后到中生代初,一直处于稳定的地台升降状态,只是燕山运动造就了本区复杂的构造变形和变质作用(北京市地质矿产局, 1991);另一种认识来自20世纪80年代中期中国地质大学(武汉)北京西山队的研究,他们运用现代构造解析方法,重新厘定了周口店地区的地质和构造演化序列,强调在印支期就奠定了本区的基本构造格局,主要构造行迹为韧性伸展构造(顺层固态流变构造、变质核杂岩和剥离断层)和东西向褶皱,在燕山期为房山岩体的侵入和脆性逆冲断层的活动(宋鸿林, 1987)。

2 房山岩体的基本特征

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)。岩体的平面形态近于椭圆,长轴呈北西—南东向,约9 km,短轴呈北东—南西向,约7.5 km(图1和图2)。出露面积约为54 km²。岩体中黑云母和角闪石的K-Ar年龄约为132 Ma(马昌前, 1988)或128 Ma(Davis *et al.*, 2001)。岩体接触面产状较陡,一般倾向围岩。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。岩体边缘零星出露的细粒

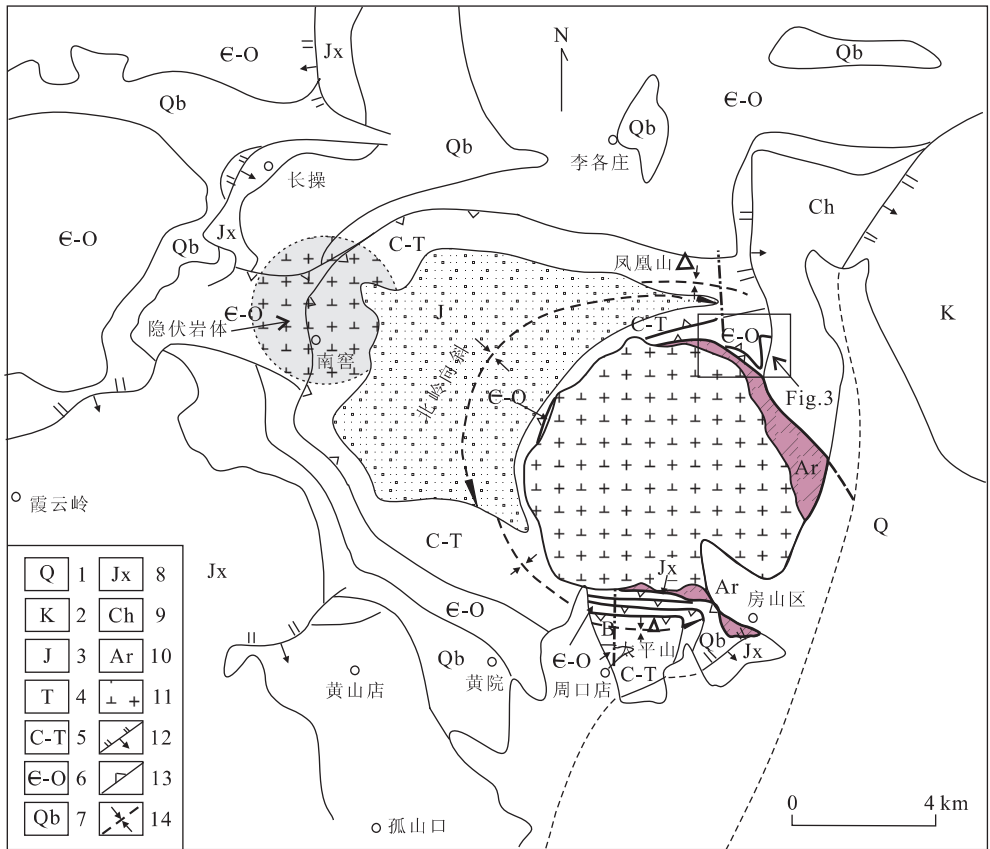


图 1 北京西山房山岩体区域地质构造

Fig. 1 Regional geological sketch map of Fangshan pluton in the western hills, Beijing

1. 第四系; 2. 白垩系; 3. 侏罗系; 4. 三叠系; 5. 石炭—三叠系; 6. 寒武系—奥陶系; 7. 青白口系; 8. 蓟县系; 9. 长城系; 10. 太古宙; 11. 花岗岩; 12. 逆断层; 13. 剥离断层; 14. 向斜

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:斑状花岗闪长岩和中央相:巨斑状花岗闪长岩,其间为渐变关系(图 2)(Ma *et al.*, 1996)。岩体整体上与围岩呈侵入接触关系,但在北缘和南缘的部分地段为交代式侵入接触关系,并出现一套片麻状混合岩。围岩接触热动力变质带的宽度为 1~2 km (Wang and Chen, 1996)。在岩体内部变形方面,前人做了大量系统的研究工作(马昌前, 1988; 张吉顺和李志忠, 1990),总结出气球膨胀式的侵位机制。岩体中的面理和线理产状一般平行于岩体接触面,总体上依岩体的边界呈同心环状分布,在岩体边缘明显,向中央逐渐消失(图 2)。岩体面理多数倾向围岩,西北部倾角较陡,为 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$,东南部较缓,为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。线理总体向南东倾伏,倾角为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,在岩体边部与面理的走向一致。房山岩体内部,尤其是边部发育大量的闪长质微粒包体,

包体在岩体侵位过程中遭受了不同程度的变形(图 2)(马昌前, 1988; 张吉顺和李志忠, 1990)。在房山岩体西北缘发育一条弧形的强变形带(图 2),它是在原生面理的基础上形成的一条剪切带,带内发育具 S-C 组构的糜棱岩及次一级小型韧性剪切带,总体反映了岩体的不断膨胀侵位的特征,而且具有由东南向西北斜冲的特点(张吉顺和李志忠, 1990)。

3 岩浆底辟构造的基本特征

岩浆底辟是指岩浆上拱并发展成刺穿性强力挤入围岩的一种作用。根据实验和数值模拟以及盐底辟的特征,典型的岩浆底辟应具有以下基本特征(Castro, 1987; England, 1990; Paterson and Vernon, 1995; Clemens, 1998; Miller and Paterson, 1999)(表 1): (1)在岩体边缘发育高温剪切带,剪切方向为岩体向上,围岩向下; (2)岩体周围发育周缘向斜(ring synclines),这是由于上升的底辟岩浆对

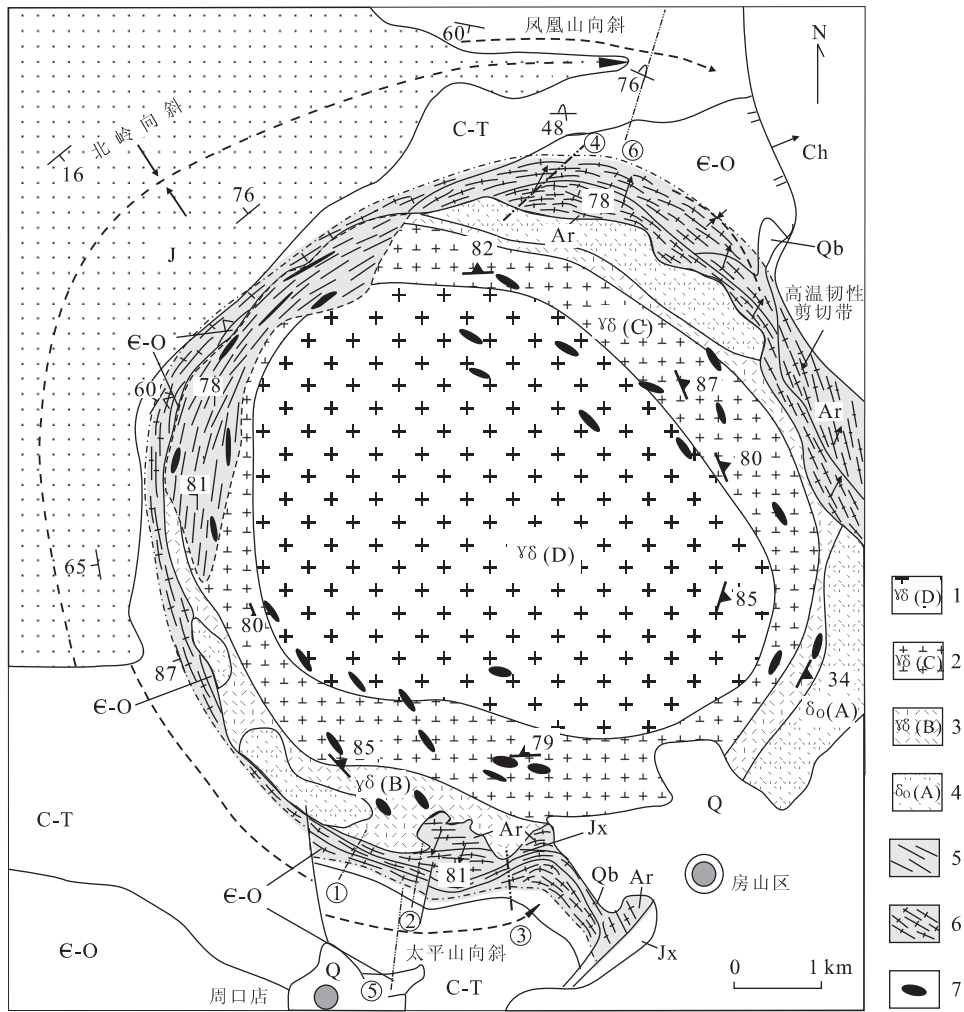


图 2 北京西山房山岩体地质构造(据马昌前(1988)和张吉顺和李志忠(1990)修改)

Fig. 2 Geological and structural sketch map of Fangshan pluton in the western hills, Beijing

1. 石英闪长岩; 2. 中粒花岗闪长岩; 3. 斑状花岗闪长岩; 4. 巨斑状花岗闪长岩; 5. 强变形带; 6. 高温剪切带; 7. 应变椭球体

围岩的拖拉作用的结果; (3) 岩体边缘接触带处围岩粘度很低, 甚至发生部分熔融, 这样才易于发生流动, 以保证底辟的形成和发展 (Marsh, 1982); (4) 岩体边缘带内围岩发育穹状分布陡立的面理和线理; (5) 岩体在平面呈现近圆形, 剖面上为水滴状、蘑菇状。从上述特征不难看出岩浆底辟的主要鉴定特征来自围岩的变形, 因为岩体边缘的围岩主要记录了岩体上升运移 (ascent) 的特征 (Bateman, 1984; Castro, 1987)。

气球膨胀是指岩体如同不断增大的气球上升并向四周扩展、膨胀, 通过压缩围岩扩大空间。气球膨胀的证据主要来自岩体内部变形特征的研究, 岩体主要记录了就位 (emplacement) 的特征 (Bateman, 1984)。气球膨胀强调岩体对围岩的挤压作用, 岩体和围岩的运动方向为自内向外, 以压扁变形作用为

主, 其主要特征见表 1。

岩浆底辟与气球膨胀相互并不排斥, 甚至可能是岩浆上升侵位过程中不同阶段的产物, 即气球膨胀是岩浆底辟晚期的产物。Paterson and Vernon (1995) 甚至认为气球膨胀的这些现象完全可以用岩浆底辟上来解释, 气球膨胀不是原因而可能是岩浆底辟的结果。王涛等 (1996) 指出既然承认气球膨胀, 就不能否认岩浆底辟。路风香和桑龙康 (2002) 也认为岩浆发生底辟上升后, 常常以气球膨胀的方式连续侵位。可能由于上述原因许多著名的岩体如 Ardara, Cannibal Creek 和 Papoose Flat 岩体, 就存在岩浆底辟与气球膨胀 2 种不同的认识 (Paterson and Vernon, 1995)。然而这二者之间是否存在必然的联系还需要大量的科学试验和实际地质的研究。

表 1 岩浆底辟、气球膨胀的鉴定特征及与房山岩体侵位特征的对比

Table 1 Characteristics of magmatic diapir and ballooning, and their comparison with the Fangshan pluton

	岩浆底辟	气球膨胀	房山岩体
岩体形态(长宽比)	近似等于 1	近似等于 1	近似等于 1
高温剪切带	高温剪切带	可有可无,但通常有一个压缩热接触变形变质带	宽 0.5 km 的高温剪切带
围岩面理	发育,从边缘往外系统变化	较发育,从边缘往外系统变化	发育,从边缘往外系统变化
围岩线理	直立或陡倾	不发育	发育,直立或陡倾
剪切带运动学方向	垂直运动,岩体向上,围岩向下	水平运动,水平挤压	主要为岩体向上,围岩向下的垂向运动
应变方式	剪切应变	压扁应变	剪切应变
围岩是否发生部分熔融	部分熔融	无	部分熔融,但时代未定
周缘向斜	有	无	有
岩体分带性	有	有	有
岩体内部变形	有	强烈	有,局部强烈

根据 Castro (1987)、England (1990)、Paterson and Vernon (1995)、Clemens (1998)和 Miller and Paterson (1999)的资料综合。

4 房山岩体岩浆底辟构造的证据

4.1 岩体边缘围岩高温剪切带

房山岩体边缘发育一宽 1~2 km 的热接触变质带,自外向内分为 3 个变质带:红柱石—黑云母带、红柱石—十字石带和红柱石—钾长石带,其变质温度分别为 450~575 °C、575~690 °C 和 690~730 °C (Wang and Chen, 1996)。更有意义的是岩体边缘的围岩还发生了强烈的高温变形作用,形成一条宽 200~800 m 沿岩体呈环状分布高温剪切带,现将其变形和应变特征总结如下。

4.1.1 面理和线理 岩石的面理和线理记录了物质运动的形式和方向,在研究花岗岩体的侵位构造中具有重要作用(Johnson *et al.*, 2003),尤其是对岩体边缘围岩的面理和线理研究是确定岩体侵位方式的关键证据(Miller and Paterson, 1999)。房山岩体边缘围岩的面理较为发育,产状与岩体边界完全一致,表现为协调整合岩体(图 2)。接触带边缘围岩面理近于直立,多数倾向围岩(图 3)。面理的性质为透入性片理和片麻理,总体同原始层理近于平行(图 3)。远离岩体面理的产状逐渐变缓,反映了房山岩体对围岩面理产状的控制作用。房山岩体热动力变质带中的线理呈穹状分布,产状陡倾(图 2)。通过对岩体北缘南观地区的面理和线理的解析发现:宽 500 m 左右热动力变质带内的线理走向 NE,倾角陡 50°~80°;而带外岩石中线理的走向为 NW-SE,倾角较缓(图 3),同区域上广泛分布的拉伸线理的走向完全一致(宋鸿林,1996)。带内外拉伸线理走向相差近 90°,反映了不同的形成时期和机制。而在岩体

南部边缘的太平山北麓一带的线理方向为 SW 向(图 2),因此,高温剪切带中拉伸线理总体呈穹状分布特征。线理反映了物质的运动方向,穹状分布陡倾的线理说明房山岩体边缘的围岩在岩体上升过程中遭受了高温剪切作用,发生了物质再造和重组,是岩体边缘垂向运动的标志。

4.1.2 地层的减薄和缺失(或称刺穿构造) 房山岩体边缘高温剪切带中的地层普遍发生减薄。如太平山北麓、南观(房山岩体南缘和北缘)和南窖(南窖隐伏岩体上部)等地的上元古界和下古生界的地层厚度与岩体外围未变形区相比,仅为原来厚度的 1/10 到 1/5(图 4)。本区元古界到下古生界地层的总厚度大于 2 km(北京市地质矿产局,1991),因此,在岩体南北缘的太平山北麓和南观一带最大减薄厚度近 2 km(图 4 剖面①、④)。个别地层单元减薄更为明显,如在未发生变质变形的下苇店一带,原厚约 60 m 的府君山组灰岩,在太平山北麓一条龙南坡和南观火车站附近的实测厚度仅有 4~12 m;而离岩体不到 10 km 的东岭子和陈家台采石场,府君山组的厚度变为 100 m。

岩体北部和南部边缘高温剪切带中的地层还发生缺失现象。在岩体北缘,从南大寨断层附近太古宙同青白口系接触,向北西沿岩体边缘太古宙或岩体分别与寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系接触,其中缺失了大套的地层(图 3 和图 4 剖面④)(宋鸿林,1996)。这种缺失用底辟的刺穿构造能很好地解释。通常底辟的刺穿构造难以在平面上观察到,由于房山岩体岩浆侵位具有由东南向西北斜冲的特点(张吉顺和李志忠,1990),加上地势上东低西高,房山岩

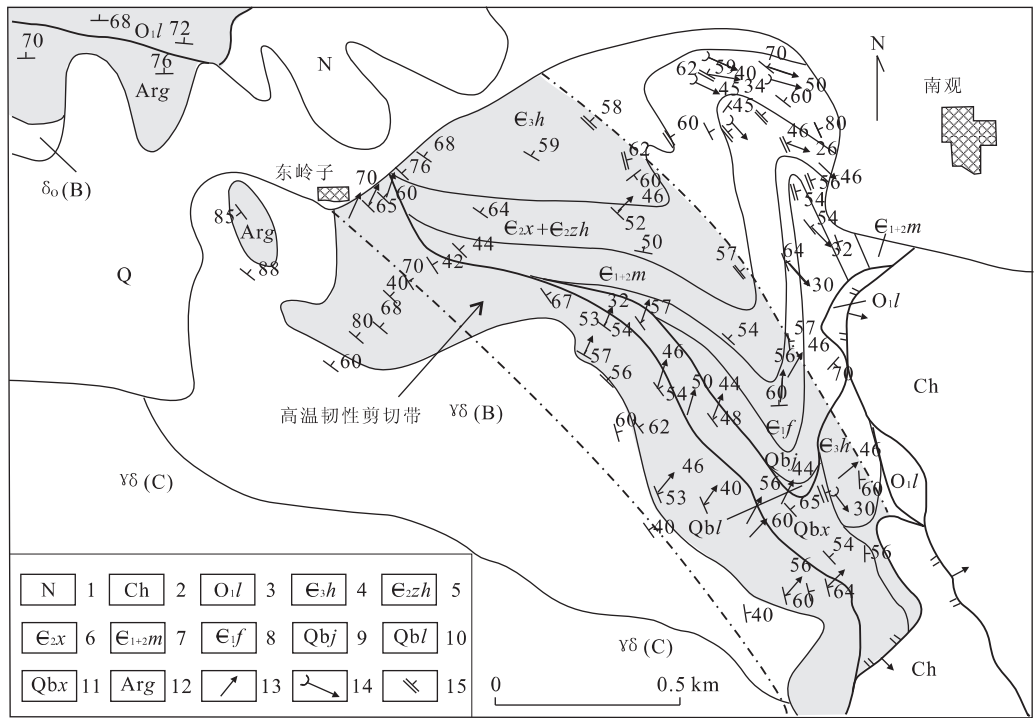


图 3 房山岩体北缘南观地区地质简图

Fig. 3 Simplified geological map of the Nanguan area in the north of Fangshan pluton

1. 上第三系; 2. 长城系; 3. 亮甲山组; 4. 黄院组; 5. 张夏组; 6. 徐庄组; 7. 馒头组; 8. 府君山组; 9. 景儿峪组; 10. 龙山组; 11. 下马岭组; 12. 关坨杂岩; 13. 拉伸线理; 14. 小褶皱枢纽; 15. 劈理产状

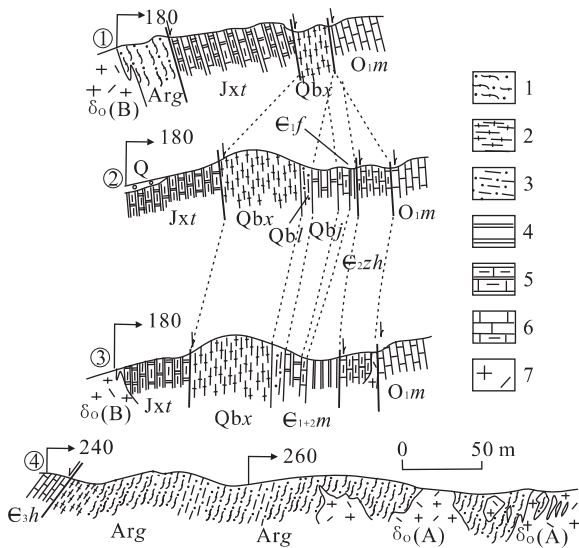


图 4 房山岩体围岩热动力变质带的联合构造剖面(据 1:5 万周口店幅区域地质调查报告修改)

Fig. 4 Structural sections of thermodynamic aureole around the Fangshan pluton

1. 构造片麻岩; 2. 构造片岩; 3. 变余糜棱岩; 4. 干枚岩或板岩; 5. 条带状大理岩; 6. 灰岩或泥灰岩; 7. 花岗闪长岩

南缘一条龙一带,边缘剪切带的地层也有缺失现象(图 4 剖面①、②、③),这种缺失是岩浆底辟过程中高温剪切作用下强烈变形的结果。

4.1.3 岩石变形变质特征 高温剪切带主要由变余糜棱岩、构造片麻岩、构造片岩和条带状大理岩组成。在岩体北缘东岭子一带,岩体边缘关坨杂岩以透入性的糜棱岩化为特点,主要为条带状构造片麻岩、角闪斜长质变余糜棱岩、长英质变余糜棱岩和角闪构造片岩等(图 4),具清晰的糜棱岩所特有的流状构造和拉伸线理,形成典型的 S-L 构造岩(韦必则和宋鸿林,1990)。显微镜下观察,岩石中石英呈丝带构造,且因受到后期的静态重结晶,形成不同粒度的多晶条带。从长石的变形和石英的静态重结晶判断,它反映了角闪岩相条件下(即高温条件下)的糜棱岩。岩石的剪切流变特征十分突出,条带发生揉皱,并能看到呈不规则的封闭图像,显示鞘褶皱的变形特征。在岩体南缘官地一带,原岩为泥质岩的下马岭组发生强烈的高温剪切变形,形成构造片岩。在岩体西缘的龙门口地区红庙岭组泥岩和砂岩也多变成各种构造片岩,岩石具有明显的片理定向结构。剪切带中的蓟县系和古生界均为碳酸盐地层,即使在角闪岩相

体的刺穿构造能比较好地反映在地质图上。在岩体

下遭受强烈的韧性变形作用,也极易恢复成大理岩,因此,岩石的变形特征不易确定.另外,研究发现,房山岩体热接触变质带比高温剪切带宽.

高温剪切带遭受了角闪岩相的区域变质、高温热接触变质和混合岩化作用(Wang and Chen, 1996).岩体南北缘出露的太古宙杂岩遭受到中到强的混合岩化作用,而形成各种类型的混合岩.在某些地段甚至成为混合花岗岩,其中正、反条纹长石的存在代表了区域变质作用时混合岩化的特点.从图 4 剖面④可以看出岩体与杂岩呈现出交代式接触关系.然而由于对这期混合岩化的年龄和机制还没有确定,因此不能推断岩体上升侵位时杂岩的岩石状态,从关坨杂岩的空间分布、变质作用及其与岩体的接触关系等方面推测:杂岩在岩体侵位时可能发生了部分熔融,但这个课题有待进一步研究.

4.1.4 高温剪切带运动学标志 岩体边缘高温剪切带内运动学标志丰富.不对称褶皱、鞘褶皱、矿物拉伸线理、构造透镜体等极为发育,构造片麻岩或变余糜棱岩具有明显的 S-C 结构,据这些伴生构造及指向标志判断,此剪切带的运动方向为岩体向上围岩向下,属于正断型.剪切带上下的地层效应也说明运动方向正断型(宋鸿林,1996).这些围绕岩体分布的正断型韧性断层用剥离断层(由 NW 向 SE 滑移)难以解释,岩体气球膨胀式侵位的水平压扁成因机制就更不合理.

4.2 围岩同定位变形型式和应变变量

围岩的应变分析对于研究岩体的侵位方式至关重要(Paterson and Flower, 1993).然而由于围岩中通常缺乏良好的岩体定位时的应变标志,应变测量十分困难.Wang *et al.* (2000)用同定位花岗质脉的变形来测定同定位时的应变,取得了很好的研究成果,他们进一步指出用宏观的应变标志估算应变变量通常具有更好的研究效果.尽管北京周口店地区前中生代地层普遍发生了顺层固态流变剪切作用,但地层的厚度远离岩体地带并没有发生显著的变化.房山岩体边缘热动力变质带中地层厚度的变化是由于岩体上升侵位造成的.尤其是房山岩体南北缘关坨杂岩的出露,使得计算地层减薄或缺失的厚度有了可能.

本区元古界到下古生界地层的总厚度大于 2 km(北京市地质矿产局,1991),而在房山岩体南北缘太古宙到奥陶系地层厚度分别为 0 和 500 m(图 4),因此,地层的减薄或缺失在 2 km 和 1.5 km

以上.这也就是说明地层的流变为岩体的就位提供了 3.5 km 水平位移,这相当于 Paterson 的近场物质迁移作用(Paterson and Flower, 1993; Paterson and Vernon, 1995).房山岩体的远场迁移作用主要表现在岩体周围的周缘向斜的水平缩短(下节详述).根据平衡剖面原理,初步估计太平山和凤凰山向斜的水平缩短为 3.5 km.这样房山岩体围岩在近南北方向的 7 km 的总缩短量与岩体南北向的宽度相当,表明岩浆底辟可以为岩体的就位提供空间.

前人在房山岩体周围做过一些应变分析工作.如彭少梅和宋鸿林(1991)对房山岩体周围石炭系—二叠系的砾石、石英碎屑颗粒进行了应变测量.结果发现大部分样本落在斜率 k (即付林常数)为 1 的直线附近,表明地层变形主要为简单剪切应变.这从应变的角度说明地层的偏转或向斜的成因主要为岩体底辟上升产生的简单剪切作用,而非岩体气球膨胀压扁作用.

4.3 岩体周围发育的周缘向斜

房山岩体周围发育一系列向斜构造.前人认为是印支期的东西向褶皱被房山岩体侵位时改造所致(宋鸿林,1987;单文琅等,1990).通过对其形态、变形和空间分布规律等研究后,认为这些向斜是岩体底辟上升时发育的周缘向斜,现分别简述如下:

凤凰山向斜,位于房山岩体北缘,东西向延伸,东端为南大寨断层所切.其剖面形态北翼较缓,南翼陡倾甚至倒转,核部紧闭(图 5 剖面⑥).向斜核部的轴面劈理走向稳定,由西部的 EW 向,向东变成 SEE 走向,有环绕房山岩体之趋势,向斜东端枢纽向西倾.

太平山向斜,位于房山岩体南缘,核部由石炭系—二叠系地层组成,翼部由下古生界至元古界地层组成,在北翼可明显看到靠近岩体的马家沟组以下各组地层高度减薄(图 5 剖面⑤).北翼产状较陡,约 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,局部出现地层的倒转;南翼倾角较缓,约 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$;向斜东北端枢纽向西倾.

北岭向斜,位于房山岩体西缘,主要由侏罗系地层组成.在向斜北端枢纽从东西向—转为近南北向—再转为北西向,在房山岩体西缘构成新月型的向斜(图 1).向斜为不对称,东翼地层减薄,产状较陡,倾角为 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,西翼倾角较缓,为 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$.

上述几个向斜具有以下几个共同特征:(1)围绕在房山岩体周围,向斜枢纽或轴面劈理随岩体的边缘发生变化,呈弧形延伸(图 1);(2)为不对称向斜,

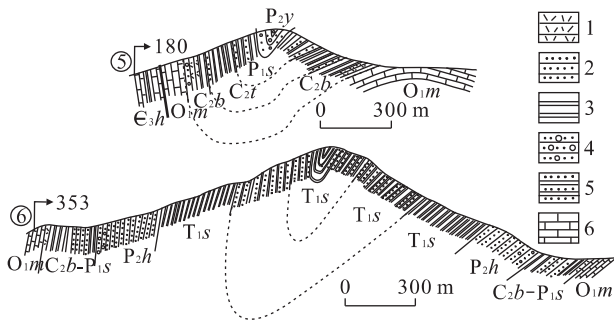


图 5 房山岩体围岩周缘向斜联合剖面(据 1:5 万周口店地区地质调查报告修改)

Fig. 5 Ring synclines of country rock around the Fangshan pluton

1. 角岩; 2. 砂岩; 3. 千枚岩或板岩; 4. 砾岩; 5. 变质砂岩; 6. 灰岩; E_{3h}. 黄院组; O_{1m}. 马家沟组; C_{2b}. 本溪组; C_{2t}. 太原组; P_{1s}. 山西组; P_{2y}. 杨家屯组; P_{2h}. 红庙岭组; T_{1s}. 双泉组

靠岩体一侧岩层产状近于直立, 甚至倒转, 且地层厚度发生高度减薄和缺失. 而远离岩体的另一侧岩层产状较缓, 厚度没有明显减薄(图 5); (3) 没有与其相对应的背斜, 这表明向斜的成因不是水平方向的挤压作用, 而是垂直方向的拖曳作用; (4) 这几个向斜共同组成一个环状的周缘向斜(ring syncline). 以上特征充分表明这些向斜主要是房山岩体底辟上升过程中围岩相对下降作用下形成的周缘向斜. 有意义的是太平山和凤凰山向斜的东北端枢纽向西倾, 可能表明岩浆上升的方向来自东南, 与从岩体内部变形得出的结论一致(张吉顺和李志忠, 1990).

5 讨论

5.1 房山岩体岩浆底辟的特征及形成条件

将房山岩体同岩浆底辟的鉴定特征进行对比, 发现房山岩体围岩构造具有岩浆底辟几乎所有的特征. 图 6 是房山岩体岩浆底辟的构造模型, 从图中可以看出: 房山岩体具有高温剪切带(运动方向为岩体向上, 围岩向下); 岩体与围岩接触带发生了部分熔融; 岩体周围发育周缘向斜和刺穿构造等, 这些特征表明房山岩体为一典型的岩浆底辟. 国外一些学者如 Marsh (1982)、Clemens (1998) 将这类底辟称之为 hot-stokes 底辟, 它不同于由上升侵位和区域变形共同作用下形成的所谓“粘弹性底辟”(viscoelastic diapirs) (Miller and Paterson, 1999). 房山岩体岩浆底辟的确定说明了岩浆底辟仍然是花岗质岩浆运移、上升和侵位的一种重要机制, 这为花岗岩

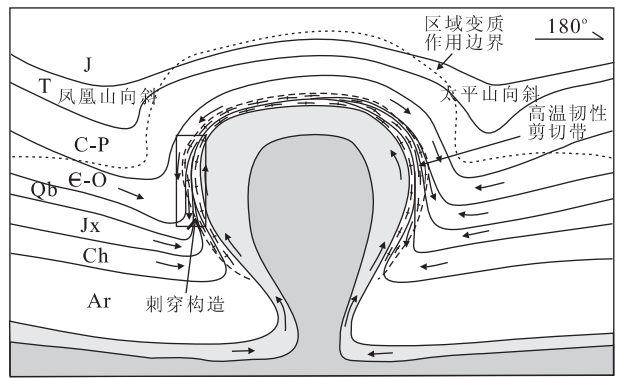


图 6 房山岩体岩浆底辟模型图

Fig. 6 Model of magmatic diapir of Fangshan pluton

构造学提供了实例; 同时由于房山岩体具有气球膨胀模式的一些特征, 为研究这 2 种上升侵位模式的关系提供了可能. 前人根据岩体形态、岩体内部带和内部变形得出气球膨胀侵位(张吉顺和李志忠, 1990)或底辟式膨胀(马昌前, 1988). 从讨论中可以看出二者之间并不存在矛盾, 房山岩体同时具有底辟和膨胀侵位模型的特征(表 1)表明这 2 种机制存在成因联系.

Grout (1954) 的岩浆底辟说曾一直是花岗岩构造学研究的基础(王涛, 1999). 然而迄今为止世界上并没有典型岩浆底辟构造的报道(Clemens, 1998). 究其原因可能是岩浆底辟的发育需要十分苛刻的地质条件: (1) 需要较高的地壳温度. Marsh (1982) 认为岩体边缘围岩需达到流动变形的温度, 如混合岩化和部分熔融, 因此, 多数地质学家认为岩浆底辟通常发生在中下地壳和地幔中; (2) 由于岩浆底辟多发生在地壳深部, 围岩处于韧性或塑性状态, 极易变形, 因此往往难以区分是岩浆底辟的变形还是区域构造变形的产物, 尤其是在造山带或火山弧, 岩浆侵位前后的构造变形往往掩盖了岩体上升和侵位构造; (3) 大多数岩体保留的是最终的就位运动变形信息, 而不是上升行迹. 特别是一些刺穿性岩浆底辟的岩体, 认识底辟构造侵位十分困难. 分析周口店地区的地质背景, 基本具备了上述几个条件: (1) 房山岩体侵位前, 本区前中生代地层经历了不同程度的区域变质和变形作用, 区域变质作用达到了低角闪岩相(Wang and Chen, 1996), 表明具有较高的地壳温度. 宋鸿林(1996) 通过计算得出区域变质温度为 300~500 °C. 古地温异常范围分布在以房山岩体为中心、半径为 25 km 的半圆形内. 这样的地质背景为岩浆底辟的产生创造了有利的条件; (2) 周口店地区

盖层地层发育齐全,且地层主要为碳酸盐,这些地层易于流动和变形,为高温剪切带中地层减薄和缺失提供了物质基础;(3)研究区处于华北地台中部,岩浆侵位前后的构造变形相对简单,有利于将岩浆上升侵位构造与区域构造变形区分开。

5.2 房山岩体岩浆底辟厘定对认识西山地区的地质构造演化的意义

5.2.1 关坻杂岩是变质核杂岩之上基底剥离断层的构造剥露还是岩浆底辟上升

房山岩体边缘零星出露的由混合片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩组成的高级片麻岩(简称关坻杂岩)。前人通过岩石学、岩石化学、副矿物及稀土元素分配特征的研究,将关坻杂岩的时代定为太古宙(韦必则和宋鸿林,1990),最近杂岩中锆石年龄(2 449 Ma, Wang and Chen, 1990; 2 489 Ma, 颜丹平, 个人交流, 2004)进一步证实了这一认识。然而太古宙杂岩如何孤立地出露于地表就成为一个十分困惑的地质难题。韦必则和宋鸿林(1990)对岩体周边地区进行了详细的构造解析,提出房山岩体未侵入前在印支期为一变质核杂岩,关坻杂岩是由于基底剥离断层(低角度正断层)的大规模正断滑动而产生的构造剥露。燕山期侵入的花岗岩是对房山变质核杂岩的改造(宋鸿林,1996)。然而仔细分析房山岩体和周口店地区的地质构造特征后,不难发现上述模式很难解释以下地质现象:(1)同一般变质核杂岩脆性盖层不同,房山变质核杂岩的盖层古生代地层也发生了韧性变形和区域变质作用;(2)地层的减薄和缺失仅发生在岩体边缘;远离岩体前古生代地层虽然也发生了固态流变和韧性变形,但地层的厚度变化不明显,如周口店地区的“剥离断层”仅分布在房山岩体的周缘和南窖隐伏岩体的上部,这同大量底辟模拟提出的底辟顶部和边缘的应变最大是一致的(Berner *et al.*, 1972; Dixon, 1975; Ramberg, 1981; Schmeling *et al.*, 1988);(3)韦必则和宋鸿林(1990)推断太古宙杂岩是通过“剥离断层”剥露到奥陶系,基底“剥离断层”的水平位移估计大于 28 km,然而构造剥露所需要的大规模伸展作用(如裂隙、沉积和脆性正断层)在北京西山地区印支期并没有显现(北京市地质矿产局, 1991);(4)与近水平伸展作用相关的变质作用不仅影响到二叠系,而且侏罗系地层也发生了变质作用,这表明近水平伸展作用发生的时间应在侏罗纪之后;(5)房山岩体为典型的燕山期岩体,大量的同位素定年表明其形成于时间为 130 Ma 左右,而韦必

则和宋鸿林(1990)定为印支期的变质核杂岩的证据不够充分。通常变质核杂岩中岩体的形成时代与伸展事件时间相同,因为它们在同一构造体制下形成的。综上所述,用变质核杂岩和“剥离断层”的构造剥露来解释关坻杂岩的出露存在众多的问题和矛盾,而用岩浆底辟解释上述现象十分合理。根据大量的模拟试验,岩浆底辟上升过程通常在岩体边缘形成一个高温流变带,深部的岩石可能随底辟上升被带到地壳浅部;因此,房山岩体岩浆底辟构造的厘定表明房山地区可能不存在印支期变质核杂岩构造,关坻杂岩是岩浆底辟时基底岩石随岩体韧性流动上升到浅部的。

5.2.2 周口店地区“剥离断层”的形成机制和时间

前人在研究周口店地区地质构造时,已认识到周口店地区前中生代地层的减薄和缺失,并将地层缺失的边界定为剥离断层(宋鸿林,1996)。然而从“剥离断层”的空间分布规律来分析,周口店地区的“剥离断层”只发生在房山岩体的边缘和南窖隐伏岩体的上部(图 1),远离岩体不仅没有“剥离断层”,地层厚度也没有发生显著变化。这表明“剥离断层”的形成与岩体上升侵位有关,可能是岩体边缘高温韧性剪切流动造成的,属于岩体构造的一部分,而不是区域上顺层固态流变或剥离断层的产物。前面已经指出房山岩体北缘的“基底剥离断层”是岩浆底辟的刺穿构造(图 6);岩体南缘的“剥离断层”是岩体边缘高温韧性剪切流动造成的地层缺失(图 6),其形成时间与房山岩体基本一致。

5.2.3 太平山和北岭等向斜的成因

前人将周缘向斜归入印支期近东西向褶皱的认识值得商榷。因为:(1)北京西山近东西向褶皱,岩层产状十分平缓,甚至为近水平状态,轴面劈理不发育;(2)周缘向斜的枢纽是弧形的,3 个向斜共同结成一个近似完美的围绕房山岩体分布的周缘向斜;(3)近东西向褶皱形成时代为印支期与近年来构造年代学研究结果也相矛盾。北京西山地区区域变质矿物云母的 Ar-Ar 年龄在 120 Ma 左右(王瑜, 个人交流),南窖片理化的闪长岩的 K-Ar 年龄在 128 Ma (Davis *et al.*, 2001),由此可以认为北京西山顺层固态流变和区域变质作用可能发生在燕山中期 130 Ma 左右。近东西向褶皱的形成时间晚于顺层固态流变和区域变质作用,因此可能不是印支期的产物。用岩浆底辟作用下围岩向下的拖曳作用可以比较合理地解释向斜的形态特征和空间分布。

5.2.4 对西山构造演化序列的重新认识 本文将房山岩体的周边的地层缺失(或“剥离断层”)解释为岩浆底辟的刺穿构造(房山岩体北缘东岭子一带)和岩体边缘的高温韧性剪切作用下的地层缺失(房山岩体南缘一条龙一带)。与房山岩体底辟侵位有关的周缘向斜如凤凰山、太平山和北岭向斜,很显然是燕山期(132 Ma)的产物,再加上区域顺层固态流变和变质作用也为燕山期,因此,本区的构造变形主要形成于燕山期。根据其相互的叠加关系,构造变形序列为:地幔热异常下的区域水平顺层韧性伸展(直径为50 km圆形区域内的变质作用和NW-SE伸展作用)—房山岩体底辟式侵入—脆韧性逆冲断层或脆性逆冲断层。以上分析表明房山岩体的岩浆底辟构造是认识周口店地区构造格架和序列的关键。

6 结论

(1)北京西山房山岩体边缘发育高温剪切带、周缘向斜、呈穹状分布陡倾的线理和面理,具有典型的岩浆底辟构造特征,这是世界上首次报道的具有hot-stokes岩浆底辟,它对研究花岗岩岩浆在地壳中上升侵位机制具有重要的理论意义;(2)房山岩体底辟构造的厘定对理清周口店地区的地质构造格架和演化具有重要的意义。本研究表明:房山地区可能不存在变质核杂岩;关坨太古宙杂岩是岩体底辟时基底岩石随岩体韧性流动上升到浅部的;原先确定的“剥离断层”是岩浆底辟的刺穿构造和围岩韧性剪切带中的地层缺失;太平山和凤凰山等向斜是房山岩体底辟侵位时发育的周缘向斜。

致谢:本文研究成果是在中国地质大学(武汉)地球科学学院师生长期对周口店地区研究的基础上取得的,在研究过程中得到了宋鸿林教授的精心指导和富有建设性的启发,文章引用了1:5万周口店幅区域地质调查报告的部分资料,本文的审稿者也提出了很好的修改意见,在此一并致谢。

References

Bateman, R., 1984. On the role of deformation in the segregation, ascent and final emplacement of granitoids: The Cannibal Greek granite. *Tectonophysics*, 10: 211—231.
 Berner, H., Ramberg, H., Stephansson, O., 1972. Diapirism in theory and experiment. *Tectonophysics*, 15: 197—218.
 Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing, 1991.

Regional geology of Beijing. Geological Publishing House, Beijing, 598 (in Chinese).
 Brown, M., 1994. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: The migmatite-to-crustally-derived granite connection in the thickened orogens. *Earth Science Reviews*, 36: 83—100.
 Castro, A., 1987. On granitoid emplacement and related structures, a review. *Geol. Rundsch.*, 76(1): 101—124.
 Clemens, J. D., 1998. Observations on the origins and ascent mechanisms of granitic magmas. *J. Geol. Soc. London*, 155: 843—851.
 Carlson, C., 1984. Stratigraphic and structural significance of foliated serpentinite breccias, Wilber Springs. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Field Guild 3, 108—112.
 Davis, G. A., Zheng, Y. D., Wang, C., et al., 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hedrix, M. S., Davis, G. A., eds., Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia; From continental assembly to intracontinental deformation; Boulder, Colorado. *Geological Society of America Memoir*, 194: 171—197.
 Dixon, J. M., 1975. Finite strain and progressive deformation in models of diapiric structures. *Tectonophysics*, 28: 89—124.
 England, R. W., 1990. The identification of granitic diapirs. *J. Geol. Soc. London*, 147: 931—933.
 Grout, F. F., 1945. Scale models of structures related to batholiths. *American Journal of Science*, 243A: 260—284.
 Jackson, M. P. A., Talbot, C. J., 1986. External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. *GSA Bulletin*, 97: 305—323.
 Johnson, S. E., Fletcher, J. M., Fanning, C. M., et al., 2003. Structure, emplacement and lateral expansion of the San Jose tonalite pluton, Peninsular Ranges batholith, Baja California, Mexico. *J. Struct. Geol.*, 25: 1933—1957.
 Lu, F. X., Sang, L. K., 2002. Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 399 (in Chinese).
 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 (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. Geological Publishing House, Beijing.

- Marsh, B. D., 1982. On the mechanics of igneous diapirism, stoping and zone melting. *American Journal of Science*, 282: 808—855.
- Miller, R. B., Paterson, S. R., 1999. In defense of magmatic diapirs. *J. Struc. Geol.*, 21: 1161—1173.
- Mrazec, M. L., 1915. Les plis diapirs et le diapirisme en general. *Rumania Institute de Geologie Comptes Rendus*, 4: 226—270.
- Paterson, S. R., Flower, T. R. Jr., 1993. Re-examining pluton emplacement processes. *J. Struc. Geol.*, 15: 191—206.
- Paterson, S. R., Vernon, R. H., 1995. Bursting the bubble of ballooning plutons: A return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 107: 1356—1380.
- Peng, S. M., Song, H. L., 1991. The finite strain analysis and its significance in the Beijing syncline, Xishan, Beijing. *Journal of Guilin College of Geology*, 11(3): 260—268 (in Chinese with English abstract).
- Petford, N., 1996. Dykes and diapirs? Transactions of the Royal Society of Edinburgh. *Earth Sciences*, 87: 105—114.
- Ramberg, H., 1981. Gravity, deformation and the Earth's crust. In: Theory, experiments and geological application. Academic Press, London.
- Schmeling, H., Cruden, A. R., Marquart, G., 1988. Finite deformation in and around a fluid sphere moving through a viscous medium: Implication for diapiric ascent. *Tectonophysics*, 149: 17—34.
- Shan, W. L., Zhang, J. S., Song, H. L., et al., 1990. The tectonic evolution in the southern part of western-hill, Beijing. In: Zhang J. S., Shan, W. L., eds., The geological study of Xishan, Beijing. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—8 (in Chinese).
- Song, H. L., 1987. A primary analysis on the tectonic sequence in the southern part of the west hill, Beijing. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 12(1): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. L., 1996. Characteristics of Fangshan metamorphic core complex, Beijing and a discussion about its origin. *Geoscience*, 10(2): 147—158 (in Chinese with English abstract).
- 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. Geological Publishing House, Beijing.
- Wang, T., Wang, X. X., Li, W. P., 2000. Evaluation of multiple emplacement mechanisms: The Huichizi granite pluton, Qinling orogenic belt, central China. *J. Struc. Geol.*, 22: 505—518.
- Wang, T., Wang, X. X., Li, W. P., 1999. Multiple emplacement mechanism and space of granitoid plutons. *Geological Review*, 45(2): 142—150 (in Chinese with English abstract).
- Wei, B. Z., Song, H. L., 1990. Fangshan metamorphic core complexes structure, Beijing. In: Zhang, J. S., Shan, W. L., eds., The geological study of Xishan, Beijing. China University of Geosciences Press, Wuhan, 42—47 (in Chinese).
- Weinberg, R. F., 1994. Re-examining pluton emplacement processes; Discussion. *J. Struc. Geol.*, 16(5): 743—746.
- Weinberg, R. F., Podladchikov, Y., 1994. Diapiric ascent of magmas through power law crust and mantle. *J. Geophys. Res.*, 99: 9543—9560.
- Whitehead, J. A., Helfrich, K. R., 1991. Instability of flow with temperature-dependent viscosity: A model of magma dynamics. *J. Geophys. Res.*, 96: 4145—4155.
- 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).

附中文参考文献

- 北京市地质矿产局, 1991. 北京市区域地质志. 北京: 地质出版社, 598.
- 路凤香, 桑龙康, 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 399.
- 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.
- 彭少梅, 宋鸿林, 1991. 北京西山北岭向斜的有限应变分析及其意义. *桂林冶金地质学院学报*, 11(3): 260—268.
- 单文琅, 张吉顺, 宋鸿林, 等, 1990. 北京西山南部的构造演化. 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, 1—8.
- 宋鸿林, 1987. 北京西山南部构造序列初探. *地球科学——武汉地质学院学报*, 12(1): 15—20.
- 宋鸿林, 1996. 北京房山变质核杂岩的基本特征及成因探讨. *现代地质*, 10(2): 147—158.
- 王涛, 王晓霞, 李伍平, 1999. 试论花岗质深成岩体的复合定位机制及定位空间问题. *地质论评*, 45(2): 142—150.
- 韦必则, 宋鸿林, 1990. 北京房山变质核杂岩构造. 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, 42—47.
- 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.