

凤凰山花岗岩体构造系统分析及侵位机制*

李东旭

(中国地质大学,北京)

张 达

(中国地质科学院地质力学研究所)

刘文灿 杜子图

(中国地质大学,北京)

摘 要 本文从宏观上对凤凰山岩体的区域构造位置、岩体侵位前后的构造演化过程及岩浆侵位时的动力学条件进行了论述;对岩体内部及接触带的面理、线理进行了磁组构测量、显微构造观察、包体应变测量及X光组构分析等系统研究,最终获得如下结论:该岩体侵位除有膨胀作用外,在岩体侵位后期还有过旋转运动,而且岩体侵位受到NNE向左旋剪切作用控制。

关键词 凤凰山 岩体内部构造 接触带构造 侵位机制

0 前言

从70年代以来,关于花岗岩类岩体构造的研究与30年代Cloos和Balk^[1]所建立的模式相比发生了根本性变化,出现了一系列新认识。有关国外进展,洪大卫、肖庆辉等(1988)^①作过系统介绍。实际上,与国外大体同时(70年代)^[2],国内有些学者在野外考察时发现了有关岩体变形现象,只是由于众所周知的原因未见诸于公开报导。岩体构造理论最重要的进展是发现岩体内部的面理与线理并不都是牛顿流体运动的遗迹,还有非牛顿流体或固态流变的产物^[3-7];二是岩体内部脆性破裂也并不都是岩浆冷凝的结果,还有大量后期构造运动的产物。与此相关的岩体侵位机制问题,岩浆侵位动力学问题也出现了许多新的认识,诸如气球膨胀机制、区域构造水平应力作用的提出等等。

所有这些新认识都是建立在对自然露头的认真构造研究和详细构造图的制作基础上,也就是说,岩体侵位机制研究的前提是岩体内部构造、接触带围岩构造及岩体与区域构造空间格局和时间演化之间关系等进行较全面和较详细的系统研究,否则在进行岩体侵位机制模拟实验和数值模拟时,就不可能提出符合实际的边界条件和协调条件。

就方法论的角度而言,对于深成侵入体的构造系统研究(Systematic study)^[8]应考虑如下研究内容和工作程序(图1)。

* 本文得到地矿部地质力学开放研究实验室资助。

① 肖庆辉等,国外花岗岩体构造研究。地矿部情报研究所(内部交流),1988。

1 岩体侵位的地质时空位置

岩体侵位不是孤立的地质现象,它们是区域构造运动表现的一个方面,也是区域构造演化历史中的一个阶段。因此要查明岩体构造规律及有关侵位机制及动力学问题,不仅要了解岩体所在的区域构造位置和环境,还应了解岩体侵位前后的构造演化历史^[8-9]。

凤凰山岩体位于走向北东的复式向斜核部,该向斜是印支期下扬子构造带中一系列 S 状隔挡式褶皱中的一个,这套构造系统是本区沉积盖层最早的一期变形(D₁)。该向斜两翼主要由晚古生代地层组成;核部由三叠纪碳酸盐岩类组成,它们是岩体的主要围岩。岩体南北两侧及周缘发育走向东西断裂的小褶皱,对岩体侵位有控制作用,为侵位前构造(D₂)。通过构造变形复合分析,发现本区燕山期构造主要发育 NNE 向构造(D₃)及 NW 向伴生构造,是与岩浆侵位同时的构造脉动产物。经同位素年龄测定,该岩体为 113-133Ma,岩体侵位后,NNE 向构造应力场仍有持续活动(D₄),并相继出现 NNE 向构造(D₅)及晚期 EW 向构造(D₆)和 SN 向构造(D₇)。这些侵位后构造对岩体有不同程度的改造和破坏作用(图 2、表 1)。

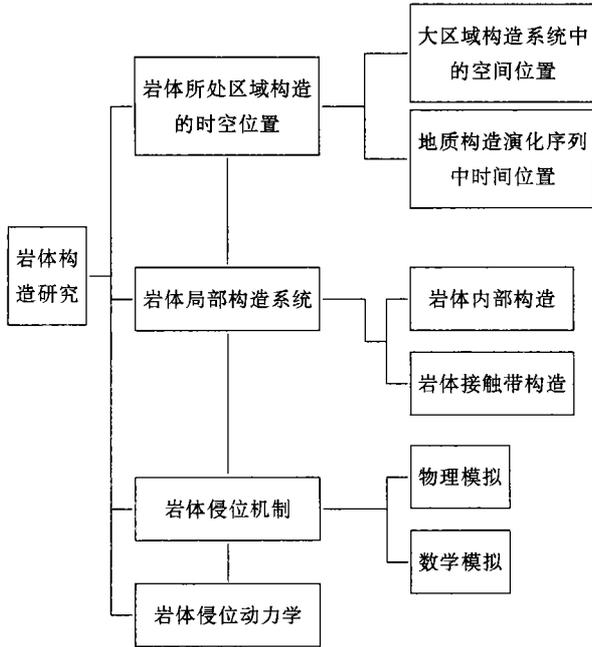


图 1 岩体构造研究内容和工作程序

Fig. 1 Diagram showing the content and research program of pluton tectonic study

2 岩体内部构造

凤凰山岩体是由钙碱系列的花岗闪长岩、石英二长闪长岩组成。岩体边缘酸度偏低,铁镁质矿物增高^[10]。岩体地表出露面积约 10km²,呈 EW 向椭圆形,是铜陵地区最大岩体,沿周缘赋存接触交代型铜矿,岩体接触带局部不规则,北部和东部边界较陡,西部及南部边界产状较缓。由于第四系覆盖,基岩出露不全,但在基岩裸露地段可见有糜棱面理、线理、包体、断裂发育。此次研究着重对糜棱岩进行显微构造研究。由于面理和线理表现不明显或难于直接测量,

采用了视磁化率测量方法确定^[11],对包体进行了有限应变测量,从而对岩体侵位机制获得可靠依据。

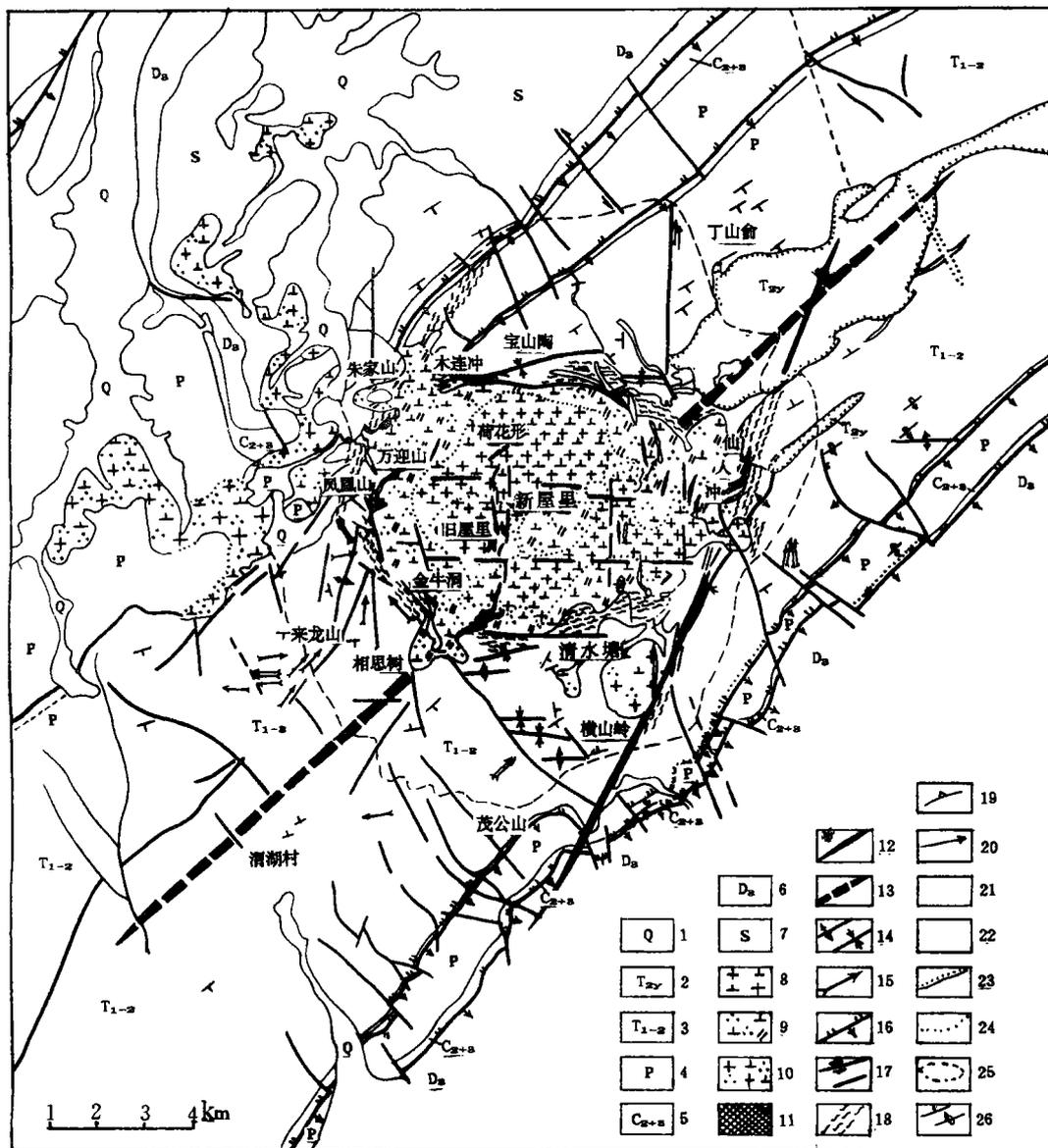


图2 凤凰山矿田构造地质略图

Fig. 2 Map of structural geology of Fenghuangshang ore field

1. 第四系; 2. 三叠系中统月山组; 3. 三叠系中下统; 4. 二叠系; 5. 石炭系中上统; 6. 泥盆系上统; 7. 志留系; 8. 花岗闪长岩; 9. 石英二长闪长岩; 10. 花岗闪长玢岩; 11. 砂卡岩; 12. 铁帽; 13. 复式向斜轴迹; 14. 中型背向斜轴迹; 15. 流变褶皱枢纽; 16. 层间滑脱层; 17. 平移断层、断层; 18. 韧性剪切带; 19. 面理; 20. 线理; 21. 辉绿岩脉; 22. 正长斑岩脉; 23. 层间不整合; 24. 岩相界线; 25. 侵入体突变界; 26. 产状、倒转产状

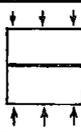
2.1 流变构造形迹

凤凰山岩体边缘内接触带断续可见糜棱岩带,露头宽度10—40m,糜棱面理产状大体与岩

体边界一致,同时也平行于岩体边缘的韧性剪切带。岩体北部木莲冲至宝山陶一带,总体走向为 EW 向。岩体西部朱家山至药园山一带和岩体东部仙人冲至大元岭一线断续出现 NNE 向韧性剪切带。岩体南部江家冲糜棱面理由 EW 向往西转为 NW 向。

表 1 凤凰山矿田构造时序

Table. 1 Tectonic compounding sequence of Fenghuangshang ore field

构造期	构造序列	变形特征	构造应力场	与成岩成矿关系
喜马拉雅期	D ₇	SN向压剪断裂		成岩成矿期后
	D ₆	岩体内部EW向压剪断裂		成岩成矿期后
燕山期	D ₅	相思树NW向压剪裂		中粗粒花岗闪长二长岩侵位
	D ₄	NNE向剪切断裂带、岩体接触带流变构造		中粗粒花岗闪长二长岩侵位
	D ₃	NNE向褶皱、岩体东西两侧NNE向韧性剪切带		中细粒石英闪长岩侵位
	D ₂	EW向小褶皱及岩体南北两侧断裂		成岩成矿前构造
印支期	D ₁	NE向S状凤凰山向斜		成岩成矿前构造

上述糜棱岩带中石英、长石、黑云母、角闪石等矿物普遍发生晶内变形,细粒化及动态重结晶,以至出现一系列的中低温矿物组合。镜下可见石英变形的波状消光、晶体破裂、亚颗粒及晶格位错现象。在岩体西部朱家山—药园山走向 NEE 陡立压剪性片理带中可见石英具有较强的动态重结晶,定向排列明显,还含有黄铜矿颗粒。在南部江家冲糜棱化花岗岩石中的石英颗粒见有清楚的变形纹,石英细粒化强烈,残留的石英斑晶有左旋转动的特点。北部木莲冲糜棱岩中的斑晶也有左旋转动迹象。黑云母除较普遍的波状消光,还有扭折,褶皱乃至微破裂现象;在变形强裂部位尚可出现细粒化现象,细粒化后的残留物显示出受左旋剪切作用。角闪石相对黑云母变形较弱,主要表现为波状消光及扭折,在剪切力作用下晶体边缘发生破裂,细粒化、残斑呈 δ 或 σ 拖尾,指示左旋转动,以上两种矿物在中低温及应力作用下均形成绿泥石、绿帘石及榭石组合。

斜长石在弱变形域很少显示变形,但在较强的应变带中可见扭折、砂钟等现象,最终演化为绢云母+绿帘石中低温矿物组合。从以上糜棱岩中的矿物应变特征说明,凤凰山岩体侵位晚期曾发生近固态的流变变形,而在岩体的东西两侧附近有 NNE 向的直线剪切作用。

2.2 磁组构研究

鉴于凤凰山岩体内部的面理和线理表现不甚清楚,多半难于测量,故可利用岩石磁化率各向异性特点辅以测定。限于第四系及农田覆盖,仅能在新鲜露头取样,大体均布 37 个取样点,每个点取 4—6 个岩芯。经室内加工后,用 Minisep 旋转磁力仪测量磁化率主值及主方向,然后据样品野外产状转换到地理坐标系中,并用 Fisher 统计法求出平均磁化率高值,主方向及有关磁组构参数,最大磁化率为主轴 K_1 ,中间磁化率主轴 K_2 ,最小磁化率主轴 K_3 ,磁面理值($F=K_2/K_3$),磁线理值($L=K_1/K_2$),各向异性度($P=K_1/K_3$),磁椭球扁率($E=K_2^2/K_1 \cdot K_3$)。据上述参数作出磁线理及磁面理分布图(图 3、图 4)。

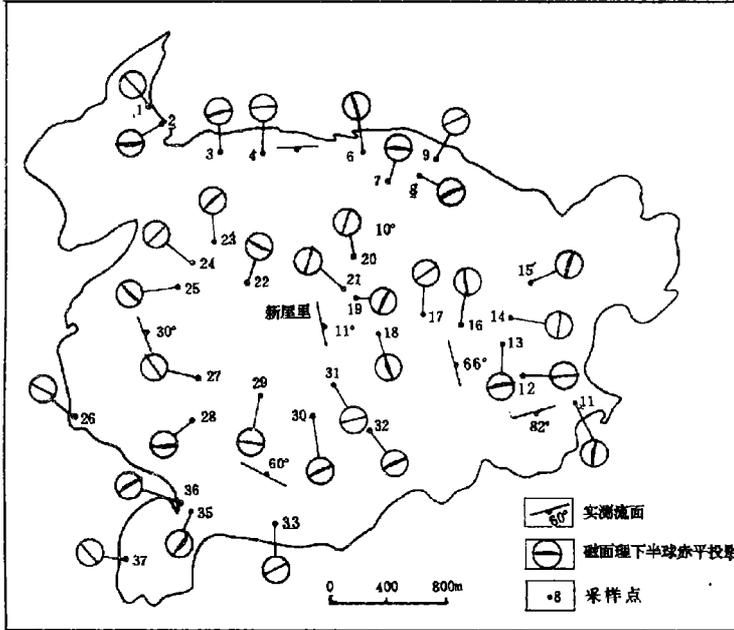


图 3 凤凰山岩体磁面理分布图

Fig. 3 Map showing magnetic foliations of Fenghuangshan pluton

从磁化率测量及野外直接地质观测,不难看出凤凰山岩体内面理多为陡倾角,且走向多为平行岩体接触带。据磁化率各向异性值数据作出的 Flinn(图 5),磁化率量值椭球以压扁型为主。在岩体中央偏西磁面理呈环形分布。而磁线理由于岩体西南边缘被第四系覆盖,缺少数据。岩体北部边缘及东部零星数据看,线理走向与接触带基本平行,值得注意的是岩体内多数线理倾角较缓,反映出岩浆侵位同时或侵位之后曾有水平方向的运动。

2.3 包体应变测量

凤凰山岩体中包体含量不多,大体有二类,一类是浅源的围岩捕虏体,另一类是深源的镁铁质及微晶暗色闪长岩质包体。这些包体多数分布在岩体边缘,向岩体中央更加稀少。且深源包体向酸性过渡。这些包体个体体积不大,直径仅为数十厘米到数米,但多被变形为椭球体。镜下观察也可见包体中矿物发生变形,说明至少在岩浆侵位晚期及期后岩体曾受应力作用,从而确定了进行包体主应变测量的可行性,也可设定包体初始形态为圆球状。为得到可靠结论,此次分别采用形态几何平均值及 R_i/Φ' 两种方法,以便相互验证。

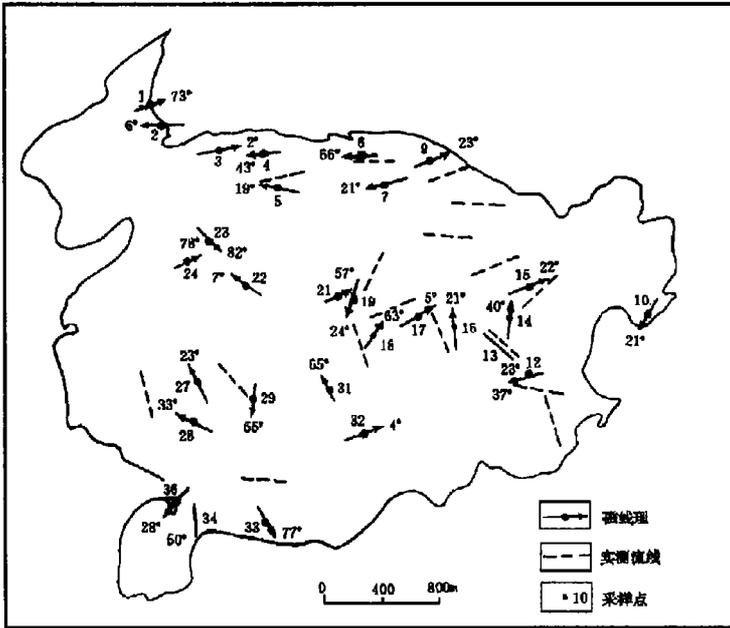


图 4 凤凰山岩体磁线理分布图

Fig. 4 Map showing magnetic lineations of Fenghuangshan pluton

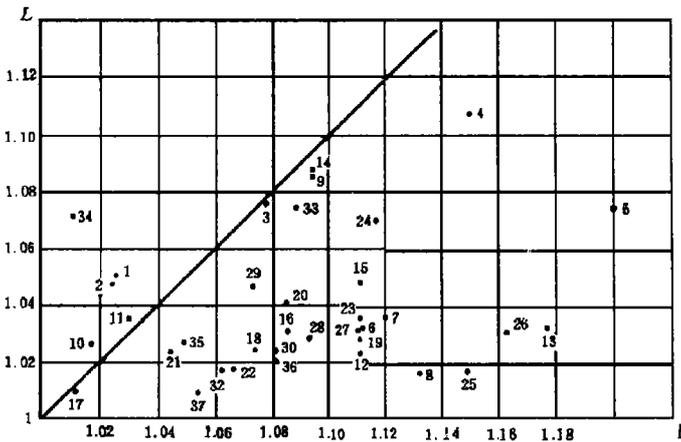


图 5 凤凰山岩体磁化率各向异性数据 Flinn 图解(1、2、3……取样点编号)

Fig. 5 Flinn diagram showing susceptibility of magnetic anisotropy dates of Fenghuangshan pluton (1、2、3……number of sample points)

(1)形态几何平均值法应变测量,由于凤凰山岩体剥蚀程度较低,可将现在地表近似地貌视为应变椭圆 XZ 面,通过测量岩体内不同部位 23 个点包体的长短轴比(R_i),其中每个测点统计 10—40 组数据,取得几何平均值,最大值 2.9,说明总体应变程度不高,与显微构造得出的中等应变结论一致,但应变程度并不均一,靠岩体中央 R_i 值偏小,靠边缘增高,特别是最大值落在岩体东西两侧边缘 NNE 韧性剪切带中(图 6)。

(2) R_i/Φ' 法,在凤凰山岩体 23 个测点中选出 13 个包体长轴 Φ' 值较为准确,算出长短轴

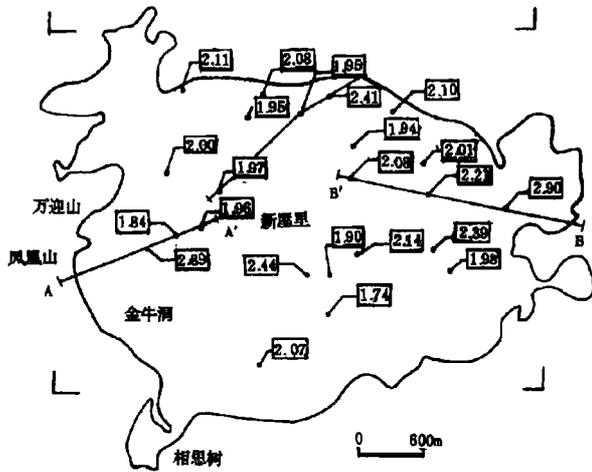


图 6 凤凰山岩体实测包体形态几何平均值
Fig. 6 Map showing geometry average value of enclosure shape in Fenghuangshan pluton

二长比 R_f 曲线图上投点, 得出应变值 R_s , 如图 7、图 8 所示仙人冲及木莲冲南的 R_f/Φ 图, 从最佳拟合包络线分别得出 $R_s = 2.0, \Phi = 88^\circ$ $R_s = 1.65, \Phi = 178^\circ$ 。图 9 即为用 R_f/Φ 法所得的应变值平面分布图。与形态几何平均值图比较, 除应变绝对值较小, 其他规律两种方法基本一致, 都反映出岩体边缘压扁率较高, 向中心减弱。

3 岩体接触带构造

由于岩体主动侵位, 不仅叠加在围岩上局部应力场, 而且温度也随之升高, 甚至增补了水溶液, 从而在岩体围岩中形成一套独特的构造变形变质现象, 这些构造形迹与大区域构造系统既有联系, 又有差别,

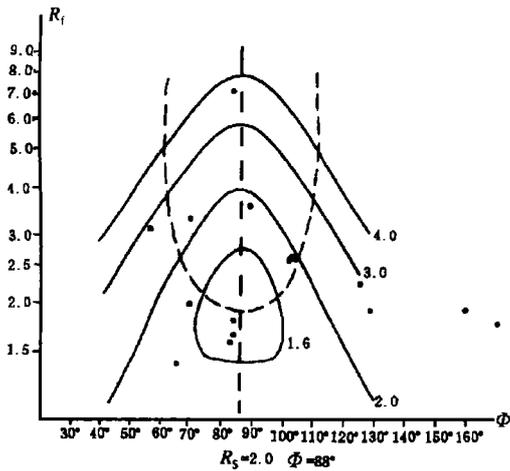


图 7 仙人冲包体测量点 R_f 图
Fig. 7 Map showing R_f of enclosure measurement at Xianrenchong

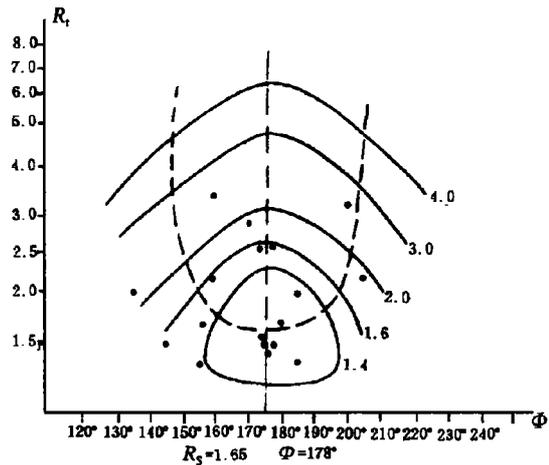


图 8 木莲冲南包体测量 R_f 图
Fig. 8 Map showing R_f of enclosure measurement at South of Mulianchong

可称之为岩体接触带构造系统, 对于岩体接触带构造系统全面认识是确定岩体侵位机制和动力条件的重要依据, 现将凤凰山岩体接触带变质变形特征作如下简要介绍。

3.1 接触热变质带

凤凰山岩体围岩主要是三叠纪和二叠纪碳酸岩类岩石, 易受岩体侵位升温影响, 发生热变质作用。变质晕圈大体以岩体为中心成环带状, 但从图面上不难看出变质晕圈的常轴与岩体露头长轴不一致, 前者为 NNE 向, 后者为 EW 向, 实际为热变质的最大延伸方向与凤凰山向斜轴线也不一致, 而是受岩体两侧的韧性剪切带所控制。在此变质晕圈范围内变质程度并不均

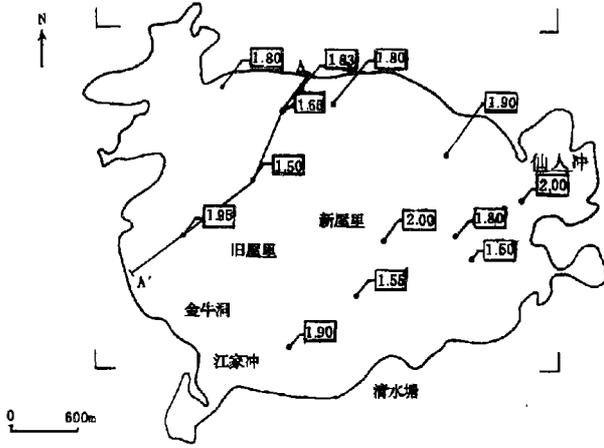


图9 凤凰山岩体包体 R_f 法得到的应变值

Fig. 9 Map showing the strain according to R_f of enclosure measurement in Fenghuangshan pluton

中,褶皱轴线大体平行接触带,但褶皱枢纽产状多为倾竖,一般多大于 50° (图 10)。从宝山陶、金牛洞和药园山 3 点分别根据数十个测量数据所做的极点投影可明显看出(图 11),这一现象反映了围岩相对岩体曾发生左旋转动,而岩体相对围岩则是右旋转动,而且是螺旋式上升,由于这种旋扭作用卷入褶皱的南陵湖组的灰岩层理缝合线也呈歪斜状,远离岩体接触带则恢复正常。

靠近凤凰山岩体接触带两侧还发育有韧性剪切带,主要表现为钙质糜棱岩,方解石颗粒被压扁拉长具明显定向排列,镜下可见方解石机械双晶,扭折变形现象,同时也可见静态重结晶 3 结点结构。显然与岩体侵位温度升高有关。总体看,糜棱面理在区内大体平行于岩体接触带分布,但是总体东西两侧糜棱面理沿 NNE 向韧性剪切带向南北两侧断续直线延伸,糜棱面理产状多为陡倾,置换了原来灰岩的层理。拉伸线理多近水平,据 S-C 组构及残留在糜棱岩带中少量的雁列状透镜体可判断区内的韧性剪切带为左旋剪切。这些现象表明在岩体侵位晚期或侵位之后,岩体与围岩之间曾发生相对旋转剪切作用,而导致旋转剪切的动力条件是岩体两侧 NNE 向韧性剪切带。在仙人冲系统采集的岩组标本,通过 X 光衍射白云石所做的组构图属三斜对称类型,没有完整环带,表现出一运动叠加,即岩体与围岩的韧性旋剪带与新华夏系 NNE 韧性直剪带复合结果。在宝山陶、金牛洞、清水塘三处韧性剪切带中对方解石所做 X 光岩组(1120)极图,组构类型为单斜对称,皆为中心极密大圆环带,反映为左旋剪切作用。

除上述流变褶皱和韧性剪切带外,在岩体接触带还有二种构造形迹较为特征,一是三叠系地层产状靠近岩体倾角陡立,远离岩体则变缓。其二是由于岩石强度的差异,局部发育石香肠构造或透镜状构造。

4 结论与讨论

从上述岩体所处的区域构造大系统中的时空位置,岩体内部及接触围岩构造的系统研究,可以明显看出有关岩体侵位机制及动力有如下特点:

一,靠近岩体的透辉石钙铝榴石角岩的矿物组合为石英、钾长石、透辉石、钙铝榴石、方解石。透辉石、钙铝榴石大理岩的矿物组合以方解石为主含少量透辉石及钙铝榴石。反映温度范围为 $500-650^\circ\text{C}$ 。远离岩体的大理岩则以方解石为主,含少量透闪石,反映温度范围为 $300-500^\circ\text{C}$ 。

3.2 接触带构造变形

靠近岩体的周围普遍发育流变变形(Rheologic deformation),诸如流变褶皱(Rheologic fold),歪斜缝合线,韧性剪切带,岩层陡立带和透镜状构造等。根据这些构造形迹的产状可推导接触带构造应力状态和动力条件。

流变褶皱主要发育在三叠纪灰岩

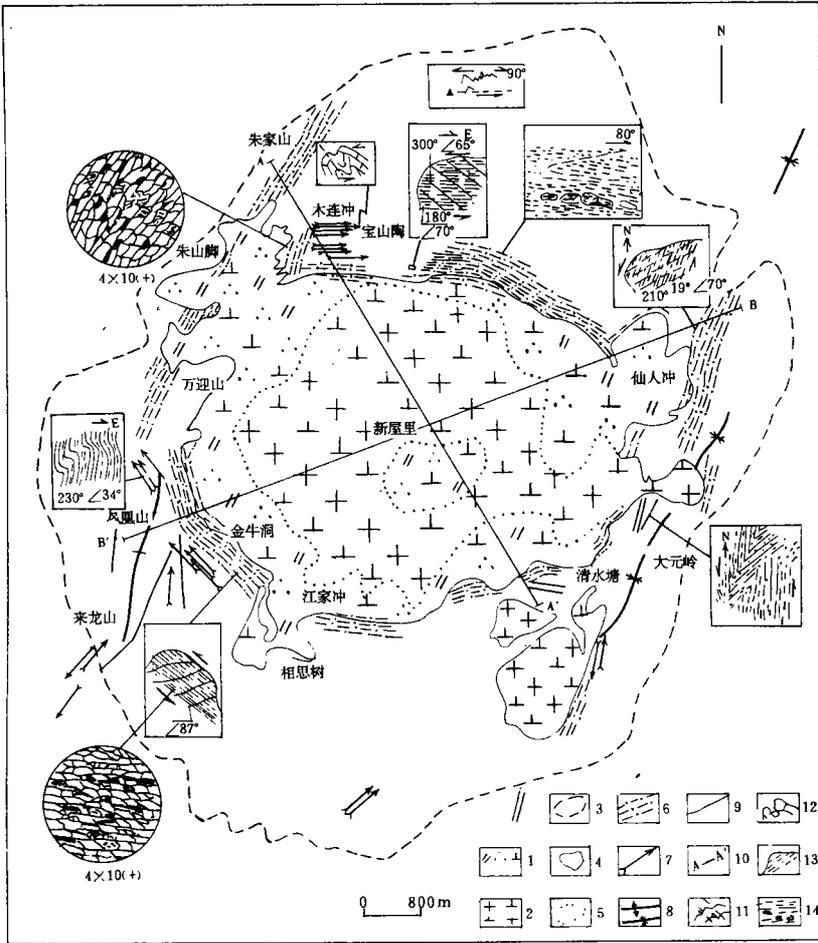


图 10 凤凰山岩体接触带构造略图

Fig. 10 Sketch map showing Fenghuangshan pluton contact structure

1. 石英二长闪长岩; 2. 花岗闪长岩; 3. 接触变质晕界线; 4. 岩体边界; 5. 岩相分界线; 6. 韧性剪切带; 7. 流变褶皱;
8. 中型脊/向斜轴迹; 9. 断裂; 10. 剖面位置; 11. 压溶缝合线; 12. 流变褶皱素描; 13. 剪切流劈理素描; 14. 石香肠构造

(1) 岩体内部磁面理产状与分布, 包体的应变率表明岩体边界曾受到来自岩体中央向外的近水平侧向挤压; 靠近接触带的岩层产状由缓倾变陡立, 挤压透镜体及 X 光组构图解等也表明围岩由于岩体侵位而受到局部近水平侧向强力挤压, 从而可以证明凤凰山岩体侵位具有气球膨胀机制。

(2) 岩体内部边缘的糜棱岩显微构造观察发现石英、长石、黑云母、角闪石等矿物都发生了变形, 说明凤凰山岩体侵位晚期或后期发生固态流变, 也就是说岩体内部面理和线理并不是牛顿流体的产物。

(3) 环绕凤凰山岩体接触带三叠纪灰岩普遍存在倾竖褶皱, 歪斜缝合线; 岩体内外的糜棱岩近水平线理、S-C 组构、雁列式透镜体及旋扭残斑等一系列迹象表明该岩体侵位晚期曾发生过右旋转动, 围岩相对为左旋转动。

(4) 凤凰山岩体虽然位于印支期凤凰山向斜核部, 但它的侵位动力作用却与印支褶皱作用无关, 因此, 岩体是燕山期形成; 此期构造形变以 NNE 向左旋压剪性断裂为主, 从凤凰山岩体

东西两侧韧性剪切带向南北直线延伸可看出：凤凰山岩体侵位与 NNE 向韧性剪切具有密切关系。岩体的固态扭转也可相互证明。实际上，如果用此论点详细审查中国大陆众多岩浆岩带，将不难发现有不少类似的现象，国外也发现有类似现象。

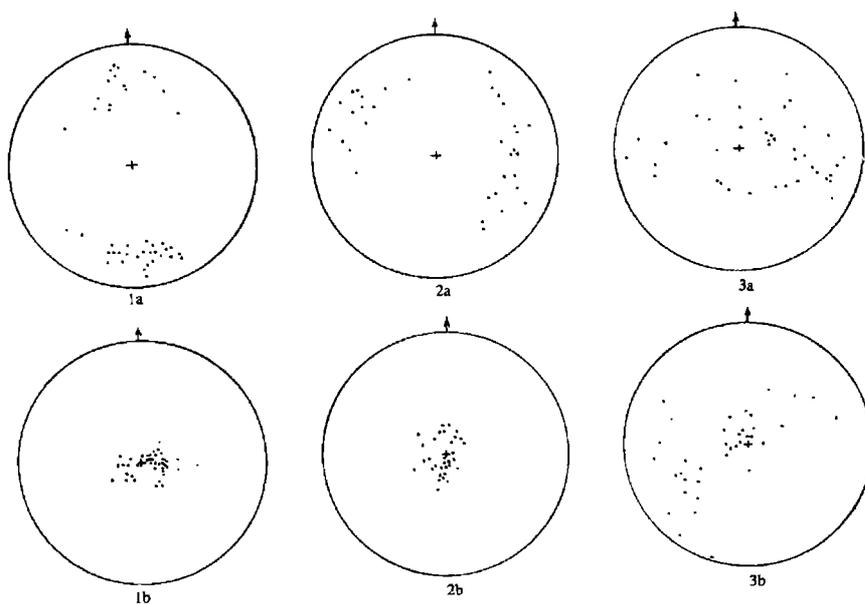


图 11 接触带褶皱轴面极点(a)及枢纽产状(b)吴氏网投影

Fig. 11 Polo diagram of axial plane(a) and hinge attitudes(b) of contact fold

1a、1b. 宝山陶; 2a、2b. 金牛洞; 3a、3b. 药园山

以上几点结论不难看出，当今流行的岩体侵位机制的模式(底辟作用、气球膨胀作用以及岩墙扩展作用)与众多地质事实不完全一致，在新的机制中要考虑以下 3 个问题：剪切动力、旋转运动和流变效应，有关这些问题将在另文讨论。

此项研究工作得到地矿部地质力学开放研究实验室的支持和帮助，野外工作得到安徽省 321 地质队的支持，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Balk R. Structural behaviour of igneous rocks. Mem. Geol. Soc. Am. 1937, 5: 177.
- 2 Berger A R, Pitcher W S. Structures in granitic rock. A commentary and critique on granite tectonics. Proc. Geol. Ass. Lond. 1970, 81: 441-461.
- 3 Bateman R. Aureole deformation by flattening around a diapir during in site balloning: The cannibal creek granite. J. Geol. 1985, 93: 292-310.
- 4 Castro A. On granitoid emplacement and related structures. A. review. Geol. Ruvd. , 1987, 76: 101-124.
- 5 Davis B K. Mechanism of emplacement of the cannibal creek Granite with Special reference to timing and deformation history of the aureole. Tectonophysics, 1993, 224: 337-362.
- 6 Hippertt J F. Structures indicative of helicoidal flow in a magmatic diapir (Bacao Complex, southeastern Brazil). Tectonophysics, 1994, 234: 169-196.
- 7 Hutton DHW, A tectonic model for the emplacement of the Main Donegal granite, NW Ireland. J. Geol. Soc. land. 1982, 139: 615-631.

- 8 李东旭、刘文灿,花岗岩类岩体构造及其侵位机制研究。中国地质学会“七·五”地质科技重要成果学术交流会论文集,北京:科学技术出版社,1992。
- 9 刘文灿、李东旭,安徽铜陵凤凰山岩体的岩石磁组构及侵位机制探讨。中国地质大学校庆40周年学术论文集,北京:海洋出版社,1993。
- 10 闻广、吴思本,安徽铜陵凤凰山岩体若干特征及成矿关系。中国地质科学院院报(7),北京:地质出版社,1983。
- 11 Olivier, Archanjo CJ. Magentic and magmatic structures of the Emas granodioretic pluton(Cachoeirinha belt, NE Brazil). relationships with Pan-African strike-slip fault systems. Tectonophysics, 1994, 229: 239—250.

TECTONIC SYSTEM ANALYSIS OF THE FENGHUANG SHAN INTRUSIVE AND ITS EMPLACEMENT

Li Dongxu

(China University of Geosciences Beijing)

Zhang Da

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Liu Wengcan Du Zitu

(China University of Geosciences Beijing)

Abstract In this paper, a discussing is made of the location of the Fenghuangshan pluton, in the regional tectonic regime, tectonic evolution before and after the emplacement and the dynamic conditions for the magma emplacement. The foliations and lineations both in the pluton and in the contact zone are systematically studied by measuring their magnetic fabrics, microstructures, strained inclusions and X-ray analysis of rock fabrics. As a result, it leads to the conclusion that there occurred not only dilatation due to the emplacement but also rotation of the intrusive in the late stage of the emplacement, which was controlled by the NNE sinistral shear.

Key words Emplacement of the Fenghuangshan pluton, magnetic fabrics

第一作者简介

李东旭,男,1933年生,教授。1956年毕业于北京地质学院。主要从事区域构造、地质力学、矿田构造方面的研究。通讯地址:北京市海淀区学院路29号中国地质大学区调所,邮政编码:100083。