

辽宁庄河地区花岗岩侵位机制及岩浆动力学的初步探讨 ——以光明山花岗岩复式岩体为例

张 永,郝永利,于海峰,董万德
(辽宁省地质勘查院 辽宁 大连 116100)

摘 要 运用岩浆动力学原理探讨庄河地区光明山花岗岩复式岩体岩浆侵位的驱动力、上升通道、通道最小临界宽度和定位过程,指出光明山花岗岩复式岩体是由其岩浆在区域挤压力的作用下,沿由深大断裂所提供的最小临界宽度呈脉状上侵,并在地壳浅部以岩墙扩张的形式定位而成。

关键词 花岗岩;侵位机制;岩浆动力学;光明山复式花岗岩岩体;辽宁省

DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2014.01.010

A PRELIMINARY STUDY ON THE EMPLACEMENT MECHANISM AND MAGMA DYNAMICS OF THE GRANITE IN ZHUANGHE AREA, LIAONING PROVINCE: A Case Study of the Guangmingshan Composite Granite Body

ZHANG Yong, HAO Yong-li, YU Hai-feng, DONG Wan-de
(Liaoning Institute of Geological Exploration, Dalian 116100, Liaoning Province, China)

Abstract : Based on the theory of magma dynamics, the driving force, ascending channel and its minimum critical width for the magma emplacement of Guangmingshan composite granite body are discussed. It is suggested that the rock body was formed as a result of the granitic magma invading upwards in dikes with the minimum critical width of ascending channels, which were provided by deep faults, and emplaced in the shallow crust with expanding of the dikes.

Key words : granite; emplacement mechanism; magma dynamics; Guangmingshan composite granite body; Liaoning Province

近年来对岩浆岛弧环境中花岗岩侵位的研究强调了区域构造的重要作用。尤其是发育在地壳深部的深大断裂系统,通过上部地壳产生的张性裂隙和扩张,为花岗岩岩浆的上升提供了相对通道^[1-3]。在这些模式中,岩浆的上升和侵位基本上受断裂系统控制,即岩浆通过断裂所提供的裂隙通道从下部地壳到达最后定位时的运移过程为脉状方式运移。

本文主要侧重运用岩浆动力学原理,以辽南庄河地区光明山花岗岩复式岩体为例,利用花岗岩的岩石化学数据估算的岩浆动力学参数——岩浆黏度及密度,探讨光明山复式岩体花岗岩岩体侵位的驱动力、上升通道的最小临界宽度及岩浆上升速度和侵位过程。

1 地质概况

1.1 区域地质

研究区位于中朝板块东北部南缘,郯庐断裂带北段东侧,复州台陷的两个次级构造单元城子坦断块和永宁凹陷之上^[4],有北东向庄河-桓仁断裂带、长盛屯-城山断裂带通过区内。光明山花岗岩复式岩体则分布于研究区内的两条断裂之中,空间上呈北北东向不规则环状展布,出露面积约 326 km²。按侵入次序由先至后分别为双山侵入体(J₃S)、太平岭侵入体(J₃T)、旋城山侵入体(J₃Xc)。各侵入体(或相带)之间成分相近,结构从细至粗最后出现明显的似斑状结构,接触关系多为过渡(涌动)接触,但变化区间较窄,局部地段为侵入

收稿日期 2013-05-21,修回日期 2013-06-04。编辑 张哲。

作者简介 张永(1971—),男,地质矿产高级工程师,从事地质勘查工作,通信地址 辽宁省大连市金州区龙山路 677 号, E-mail/zy1155@125.com

(脉动)接触. 岩体侵入太古宙片麻岩、中侏罗世长岭花岗岩复式岩体、晚侏罗世老古城山花岗岩复式岩体(图 1).

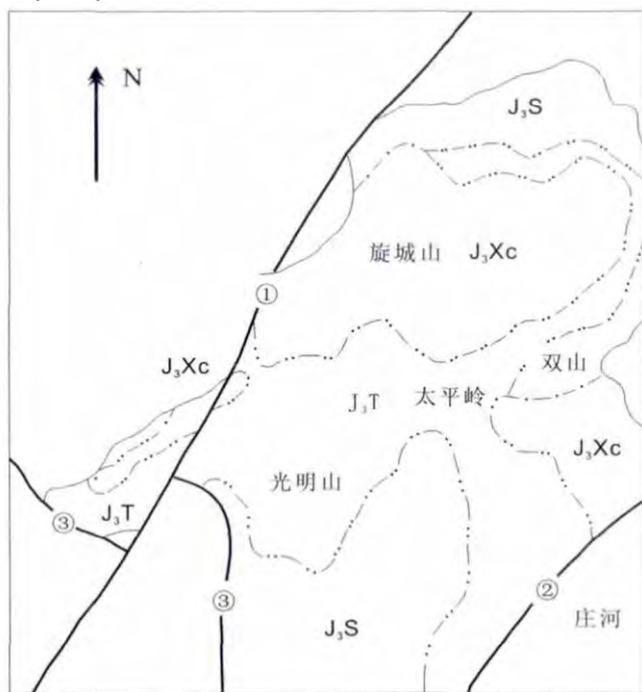


图 1 光明山花岗岩复式岩体分布略图

Fig. 1 Distribution of the Guangmingshan composite granite body J₃Xc—旋城山侵入体(Xuanchengshan intrusion) J₃T—太平岭侵入体(Taipingling intrusion) J₃S—双山侵入体(Shuangshan intrusion) ①—长盛屯—城山断裂带(Changshengtun-Chengshan fault belt) ②—庄河—桓仁断裂带(Zhuanghe-Huanren fault belt) ③—荷花山—前五间房断裂带(Hehuashan-Qianwujianfang fault belt)

复式岩体内部构造不发育, 仅在最后侵入的旋城山侵入体中局部见有微弱的岩浆流动构造, 其内部见有细—微粒闪长质深源包体, 其形态多为不规则状的次棱角状—次圆状. 侵入体与围岩的接触关系多为锯齿状、不规则状, 并切割围岩产状, 形成不协调接触, 见有侵入体呈岩枝状侵入围岩之中. 辽南地区类似的复式岩体较多, 如辽南普兰店地区的双塔花岗岩复式岩体、庄河大营子地区的靴子沟花岗岩复式岩体、盖县地区的绵羊顶子花岗复式岩体、岫岩花岗岩复式岩体等, 都与光明山花岗岩复式岩体特征相近. 光明山花岗岩复式岩体具有区域代表性, 因此, 对其解剖和深入研

究, 来揭示区域花岗岩岩浆活动规律具有重要意义.

1.2 岩石学特征

双山侵入体: 岩石类型为中细粒黑云母二长花岗岩. 花岗结构, 块状构造. 其矿物成分及平均含量为斜长石 35% 钾长石 34% 石英 24% 黑云母 6% 角闪石 1%. 矿物粒度在 1.4~4.2 mm 之间.

太平岭侵入体: 岩石类型为中细粒含斑黑云母二长花岗岩. 似斑状结构, 块状构造, 斑晶为钾长石, 半自形—自形板状, 含有斜长石、黑云母、石英等矿物包体. 粒度为(0.8~1)cm×(1.5~2)cm, 含量 5%~10%. 基质由斜长石(38%)、钾长石(31%)、石英(24%)、黑云母(6%)、角闪石(<1%)等组成, 矿物粒度在 1.5~4.5 mm 之间.

旋城山侵入体: 岩石类型为中细粒似斑状黑云母二长花岗岩. 似斑状结构, 块状构造, 斑晶为钾长石, 半自形—自形板状. 见有呈十字生长的斑晶, 斑晶内部含有斜长石、黑云母、石英等矿物包体, 粒度为(1~2)cm×(2~3.5)cm. 基质由斜长石(39%)、钾长石(29%)、石英(25%)、黑云母(6%)、角闪石(<1%)等组成, 矿物粒度在 2.4~5 mm 之间. 岩体中岩石主要副矿物有磁铁矿、榍石、褐帘石、锆石, 副矿物组合类型为榍石型.

1.3 岩石化学特征

复式岩体各侵入体岩石化学成分(表 1)与中国花岗岩值(黎彤, 1984)相比, 岩石具低硅钾贫碱、高铝钙镁的特点. 铝指数 A/KNC 和里特曼指数 δ 值显示为铝过饱和类型钙碱性岩石系列.

1.4 成岩环境及岩石成因

1.4.1 温压条件及深度

根据黑云母角闪石压力计(Перчук, 1973) 估算出复式岩体各岩体就位时的压力为: 双山岩体 0.25 GPa, 太平岭岩体 0.35 GPa, 旋城山岩体 0.45 GPa. 其相应的就位深度为 8.25 km, 11.55 km, 14.85 km. 根据黑云母角闪石温度计(Симонва, 1979) 和黑云母温度计(Wones, 1973)估算出各岩体的平均结晶温度为: 双山岩体 630 °C, 太平岭岩体 627 °C, 旋城山岩体 602 °C.

从 Kukowskis 等(1990)所作的并得到大多数地质学家承认的岩浆上升侵位深度简图^[3](图 2)中, 可见

表 1 光明山花岗岩复式岩体岩石化学平均含量、岩浆黏度及密度

Table 1 Chemical composition of the Guangmingshan granite with viscosity and density of magma

岩体	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	黏度/(Pa·s)	密度/(kg·m ⁻³)
旋城山	6	69.6	0.34	14.98	0.55	2.61	1.05	2.22	3.44	3.81	0.75	2394	9.298×10 ⁸
太平岭	6	69.5	0.28	15.10	0.49	2.08	1.05	2.27	3.55	4.26	0.74	2390	9.205×10 ⁸
双山	7	70.8	0.24	15.23	0.60	0.60	0.68	1.77	3.82	3.77	0.89	2374	1.629×10 ⁹

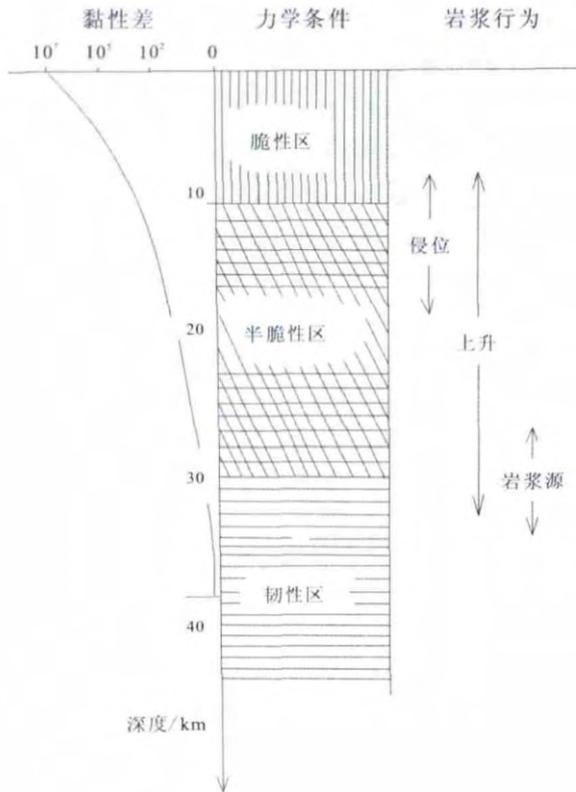


图2 岩浆力学行为与岩浆上升侵位深度简图
(据 Kukowski 等, 1990, 简化)

Fig. 2 Sketch of the mechanics of magma and emplacement depth
(simplified from Kukowski et al., 2000)

岩浆源深度在 30 km 左右, 上升定位深度为 5~15 km. 根据辽宁省莫氏面等深度^[4]推断, 庄河地区的莫氏面在 30~35 km. 花岗岩复式岩体的岩浆源区应在 30 km 左右.

1.4.2 构造环境分析

将复式岩体岩石化学成分投于 R_1-R_2 图解 (Batchelor 等, 1985) 及 $F-A-M$ 图解 (Bowden 等, 1982 资料圈定) 中, 其投影点绝大多数落入大陆活动边缘区 (科迪勒拉 I 型花岗岩区). 综合区内构造环境分析认为, 光明山花岗岩复式岩体形成的构造环境为太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中的压性环境——活动陆缘 (大陆边缘) 挤压构造环境.

1.4.3 岩石成因

根据复式岩体岩石矿物学、岩石地球化学特征及岩石化学成分在 Na_2O-K_2O 图解 (Cullist 等, 1982) 和 $(Al-K-Na)-Ca-(Fe^{2+}+Mg)$ 图解 (Rhine 等, 1978) 中的投点显示, 岩体岩石为下地壳物质熔融形成的 I 型花岗岩.

2 岩浆的黏度和密度

岩浆的黏度和密度是影响硅酸盐熔体动力学的基本参数, 它对探讨岩浆的起源、运移、上升及侵位机制具有重要意义. 本文采用复式岩体的岩石化学成分经过计算方法获得.

岩浆黏度采用 Shaw (1974) 根据实验资料经验拟合的常压下岩浆黏度与温度的关系式:

$$\ln \eta = S \cdot (10^4/T) - 1.5S - 8.7 \quad (1)$$

式中 η 为岩浆的黏度 ($Pa \cdot s$), T 为温度 (K), S 为阿累尼乌斯斜率. S 与硅酸盐熔体的化学成分有关:

$$S = \sum X_i (S_i^0 X_{SiO_2}) / (1 - X_{SiO_2}) \quad (2)$$

式中 X_i 为第 i 种氧化物的分子百分数, S_i^0 为第 i 种氧化物的阿累尼乌斯截距, 常见氧化物 S_i^0 值根据马昌前^[5]方法获得.

岩浆密度采用 Battanga (1970) 的关系式:

$$\rho = \sum X_i M_i / \sum X_i V_i \quad (3)$$

式中 ρ 为岩浆熔体密度 ($kg \cdot m^{-3}$), M_i 为第 i 种氧化物的分子量, V_i 为第 i 种氧化物的体积, X_i 为第 i 种氧化物的分子百分数. 文中采用的氧化物的体积数为莫宣学^[6]方法获得.

岩体的化学成分、岩浆黏度、密度的计算结果见表 1.

3 岩浆的侵位机制

被动就位机制—岩墙扩张理论认为, 岩浆是在其形成过程中沿深大断裂上升并定位于与深大断裂相关的张性裂隙之中.

研究区位于中国东部大陆的北东部, 燕山运动时期, 太平洋板块对欧亚板块的俯冲挤压作用导致地壳活动加剧, 使大量的北东向逆冲、压扭性深大断裂开始活动, 并引发出一系列的近东西向张性裂隙, 研究区内的庄河—桓仁断裂带、长盛屯—城山断裂带是多期次活动的深大断裂带, 晚侏罗世的构造应力场为北东向左行剪切, 进而诱导出北东东向张性裂隙 (图 3), 使地壳深部熔融形成的花岗岩岩浆在区域挤压力及密度倒置的作用下沿深部断裂作用产生的张性裂隙上升就位于地壳浅部.

3.1 岩浆侵位的驱动力

岩体的侵位机制包括岩浆上升、定位、占据空间的全部岩浆动力学过程, 它主要受岩浆本身的动力学性质、围岩性质、构造应力等多种因素控制. 以往认为, 岩浆从岩浆房上升侵位到地表浅部的驱动力是由密度倒置 (岩浆密度 < 围岩密度) 而引起的岩浆上升侵位. 研究计算表明, 即使是岩体半径为 5000 m 的岩浆囊, 在密度倒置绝热条件下其上升的高度仅为 3.2~4.09 km^[7]. 而

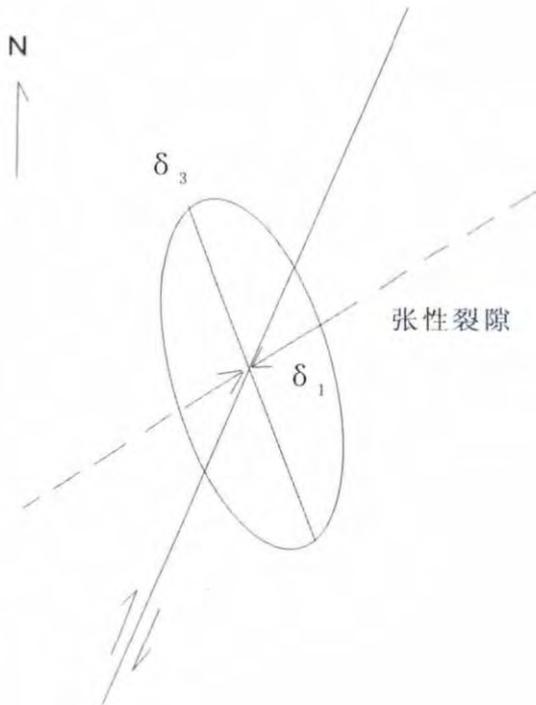


图 3 构造应力场分析

Fig. 3 Analysis of tectonic stress field

光明山花岗岩复式岩体的围岩多数是以花岗质岩石为主(包括太古宙片麻岩),其岩石的密度相差不大^[8],因此其岩体从下地壳上升到上部地壳,仅靠密度倒置是难以实现的。

近年来的野外调查、力学研究及实验模拟表明,区域水平挤压对岩浆上升起着重要作用。在一些强烈挤压造山带、地台褶皱带内,强烈挤压的水平应力不仅使部分熔融形成的岩浆从源区运移,同时也为岩浆上升提供了主要驱动力^[9-10]。辽南地区地质构造的研究表明,燕山期辽南地区主要处于水平挤压力的作用下(太平洋板块向欧亚板块俯冲过程)。显然,水平挤压力的存在为区内花岗岩浆上升侵位提供了主要的驱动力,而密度倒置则为岩浆上升侵位的辅助作用力。区域性的张性断裂的存在为岩浆的运移和上升侵位提供了必要的通道。

3.2 岩浆侵位的上升通道

花岗质岩浆以底辟形式侵位的看法已受到岩石学家和构造学家们的怀疑,特别是沿深大断裂分布的花岗岩体的侵位。断裂不仅控制了岩体的分布,同时也为岩浆上升侵位提供了相应的通道。

光明山花岗岩复式岩体分布于庄河-桓仁、长盛屯-城山近北东向展布的两条深大断裂之中,显而易见,这些北东向的断裂为岩浆上升侵位提供了相应通道。通过对光明山花岗岩复式岩体的分布特征分析,尤

其是岩体的最后侵入阶段呈椭圆形近东西向展布,显示了岩体在地壳浅部定位时的岩浆供应通道之特点。该方向与区域性存在的深大断裂构造所导致的次级张性构造的产出部位和延伸方向近一致。由此可见,形成光明山花岗岩复式岩体的岩浆是沿北东向深大断裂所导致的近东西向次级张性断裂上升定位。

3.3 岩浆上升通道的宽度

由前文及研究得知,光明山花岗岩复式岩体的岩浆是通过地壳深大断裂作用而引发的裂隙上升侵位而形成的。根据 Bruce 和 Huppert(1989)、Wada(1994)研究,岩浆上升的裂隙宽度与其黏度有关,并可通过与岩体中心相延伸方向相同、性质相同的脉体的宽度估算。Petford 等(1994)根据岩浆上升的热力学和流体力学原理建立了花岗质岩浆沿裂隙上升的热力学模式^[11]。根据此模式,本文对光明山花岗岩复式岩体岩浆上升裂隙的最小临界宽度 $W_c(m)$ 进行了计算:

$$W_c = 1.5 (S_m / S_\infty^2)^{3/4} \cdot [\eta \cdot K \cdot H / (g \cdot \Delta\rho)]^{1/4} \quad (4)$$

式中 η 的为岩浆侵位时的黏度, H 为断裂带(上升裂隙)的深度(m), K 为岩浆的热扩散系数($m^2 \cdot s^{-1}$), g 为重力加速度, $\Delta\rho$ 为围岩与岩浆之间的密度差, S_m 和 S_∞ 为 Stefan 数:

$$S_m = L / [C \cdot (T_i - T_f)] \quad (5)$$

$$S_\infty = L / [C \cdot (T_f - T_\infty)] \quad (6)$$

式中的 T_i 为岩浆侵位时的温度($^\circ C$), T_f 为岩浆结晶时的温度($^\circ C$), T_∞ 为岩浆浅部定位时的围岩温度($^\circ C$), L 为花岗质岩浆的结晶潜热($L=300 J \cdot kg^{-1}$), C 为岩浆比热($C=1.2 J \cdot kg^{-1}$)。

根据区内花岗岩的研究程度取 T_i 值为 $850^\circ C$, 岩浆的定位深度及结晶温度由前文的温度计所得,地壳的密度为 $2730 kg \cdot m^{-3}$ ^[12], 花岗质岩浆的热扩散系数 $K=8 \times 10^{-3} m^2/s$, 考虑地热梯度及构造影响取岩浆定位时围岩温度为 $500^\circ C$ 。采用上述数据计算出光明山复式花岗岩体的岩浆上升裂隙(通道)的最小临界宽度在 $3.38 \sim 5.21 m$ 之间(表 2)。

3.4 岩浆上升速度

当岩浆在一定的压力梯度作用下,从岩浆源区沿宽度一定的通道上升,其上升速度(V)可用下式估算^[13]:

$$V = D^2 \cdot \Delta P \cdot 10^{-3} / (\eta \cdot L) \quad (7)$$

式中的 D 为岩浆通道宽度(m), ΔP 为岩浆通道两端的压力差, η 为岩浆黏度, L 为岩浆通道长度。根据前文所估算的数据,估算出光明山复式花岗岩岩体岩浆上升速度(表 3)。

表 2 光明山花岗岩复式岩体各侵入体岩浆上升通道
最小临界宽度

Table 2 The critical width of magma channel of the
Guangmingshan granite

侵入体	$\Delta\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$T_i/^\circ\text{C}$	$(T_i-T_f)/^\circ\text{C}$	S_m	S_∞	W_c/m
旋城山	336	630	220	1.12	1.92	5.21
太平岭	340	627	223	1.12	1.97	4.72
双山	356	602	248	1.01	2.45	3.38

表 3 光明山复式花岗岩岩体岩浆上升速度

Table 3 Upward invading velocity of magma of the
Guangmingshan granite

岩体	D/m	$\Delta P/10^8\text{Pa}$	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	L/km	$V/(\text{m/s})$
旋城山	5.21	6.59	9.298×10^8	21.75	8.845×10^{-7}
太平岭	4.72	5.59	9.205×10^8	18.45	7.333×10^{-7}
双山	3.38	4.59	1.659×10^9	15.15	2.125×10^{-7}

4 结论

前文论述及估算的各项数据表明,庄河光明山花岗岩复式岩体是由深部地壳熔融的花岗岩岩浆在区域挤压压力为主驱动力,密度倒置为辅助动力的作用下,沿由

深大断裂作用所提供的 3.38~5.21 m 的最小临界宽度为上升通道,以 $2.125\times 10^{-7}\sim 8.845\times 10^{-7}$ m/s 的速度呈脉状上侵,并以岩墙扩张的就位方式定位于地壳 8.25 km 以下深度(图 4).

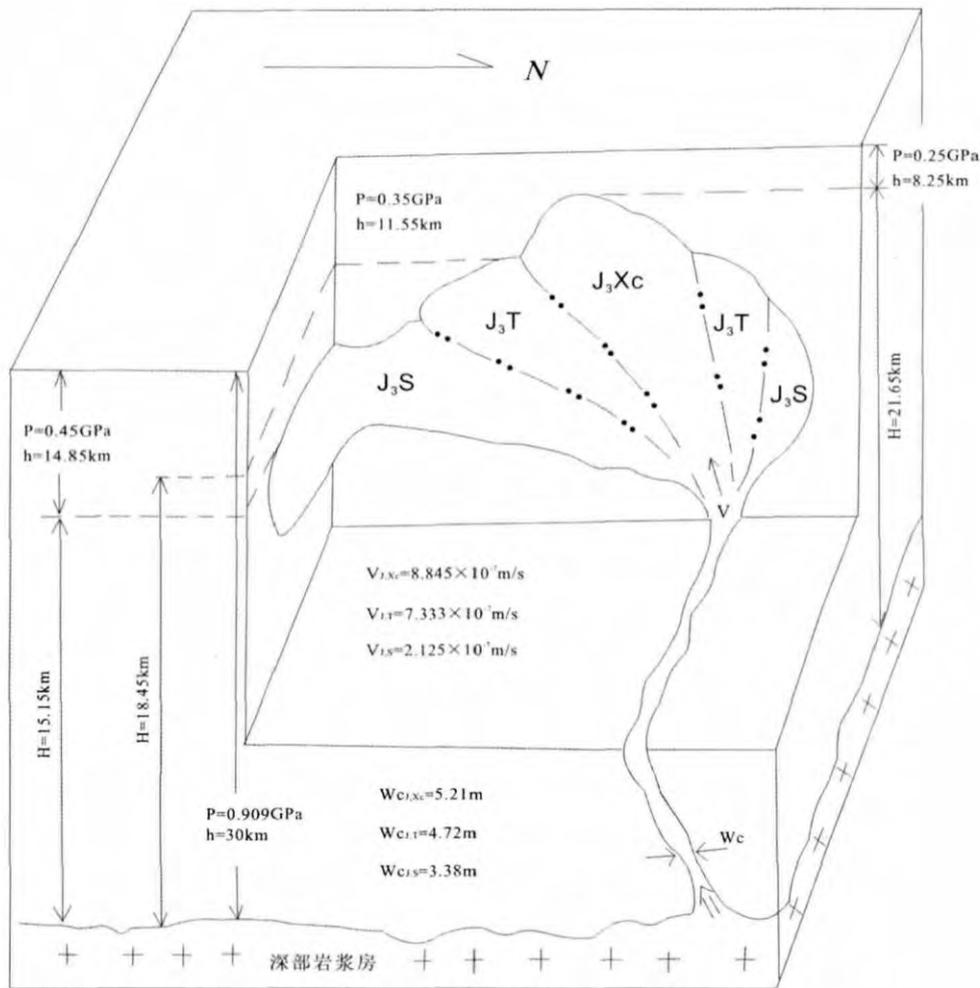


图 4 光明山花岗岩复式岩体就位模式及岩浆动力学模式图

Fig. 4 Model of emplacement and dynamics of the magma of Guangmingshan composite granite body

J_3Xc —旋城山侵入体(Xuanchengshan intrusion) J_3T —太平岭侵入体(Taipingling intrusion) J_3S —双山侵入体(Shuangshan intrusion) P —岩浆房压力 (pressure of magma chamber) h —岩浆房深度(depth of magma chamber) H —岩浆通道长度(length of magma channel) W_c —岩浆上升通道的最小临界宽度(minimum critical width of magma channel) V —岩浆上升速度(upward invading velocity of magma)

(下转第 61 页 /Continued on Page 61)

断裂西侧发育一系列与之平行的次级断裂构造, 这些次级断裂为该区银矿的形成提供了良好的存储空间. 在两条大型断裂带之间, 小型断裂比较发育, 并以北东向、北北东向和北西向为主, 近东西向次之, 局部见近南北向小型断裂. 小型断裂密集区以及不同方向小型断裂交汇部位, 环形构造密集分布, 形成龙王屯、孟家岭镇、前乌拉脚沟、山门镇、吴家屯、叶赫镇西等环形构造群. 四平市山门银矿卧龙段、四平市山门镇营盘村银矿形成于吴家屯环形构造群内, 梨树团山子矿段银矿分布于叶赫镇西北环形构造的边部. 在依兰-伊通断裂带西侧, 发育与断裂带平行、宽度大于 2 km 的北东向脆韧性变形构造带. 另处, 本区色调异常发育, 为绢云母化、硅化引起. 空间上与断裂构造及环形构造有关. 在北东向断裂带上与其他方向断裂交汇部位以及环形构造集中区, 色调异常呈不规则状分布(图 3).

3 遥感矿产预测分析

根据本区已知矿床遥感地质特征及远景区遥感地质特征, 区内共圈出 7 处遥感最小预测区. 预测矿种为银、金和镍(表 1).

综上所述, 从山门 Ag-Au-Ni 找矿远景区所处的大地构造部位、区域地质构造特征以及区域遥感影像特征看, 本区均具有良好的找矿远景. 尤其多处与山门银矿遥感地质特征相似地段, 是找寻 Ag-Au-Ni 矿产的重要地段.

参考文献:

- [1] 田维盛, 邵俭波. 吉林省四平山门银矿床地质特征[J]. 吉林地质, 1992(1): 1—9.
- [2] 孙丰月, 刘洪文. 吉林省东部韧性剪切带特征及其与金银成矿关系[J]. 地质与勘探, 2004, 40(2): 7—11.
- [3] 杨贵林, 刘志和. 山门银矿床物化探勘查效果及标志[J]. 吉林地质, 1992(1): 81—87.
- [4] 李子良, 李岩, 刘炳战. 四平山门银矿地质特征及深部-外围找矿潜力分析[J]. 吉林地质, 2009, 28(4): 40—44.
- [5] 冯守忠. 吉林山门金银矿床地质特征及成矿模式[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 10—13.
- [6] 冯明, 郭华. 吉林四平山门银矿区韧性剪切带构造变形特征及研究意义[J]. 现代地质, 1995, 9(3): 337—342.
- [7] 傅树德. 山门银矿成矿特征[J]. 吉林地质, 1992(1): 10—19.
- [8] 赵英时. 遥感应用分析原理及方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 166—279.

(上接第 72 页 /Continued from Page 72)

参考文献:

- [1] Castro A. 花岗岩侵位及其相关构造的述评[J]. 吕贻峰, 译. 地质科学译丛, 1989(2): 27—35.
- [2] Hutton. 爱尔兰北部多内加尔花岗岩侵位构造模式[A]. 国外花岗岩体构造研究, 1988(5): 219—234.
- [3] 肖庆辉, 周玉泉, 李晓波, 等. 国外花岗岩体构造研究的新进展[A]. 国外花岗岩体构造研究, 1988(5): 1—25.
- [4] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [5] 马昌前. 硅酸盐熔体的粘度、密度及其计算方法[J]. 地质科技情报, 1987, 6(2): 144—152.
- [6] 莫宣学. 岩浆中氧化物组分的偏摩尔体积及岩石学意义[J]. 地球科学, 1984(1): 31—42.
- [7] 杨富贵, 王中刚, 侯鸿泉, 等. 西准噶尔东部碱性花岗岩体侵位机理的岩浆动力学初步探讨[J]. 矿物学报, 1998, 18(4): 411—416.
- [8] 戴军. 辽宁省地层、侵入岩及混合岩密度特征[J]. 辽宁地质, 2000, 17(1): 39—46.
- [9] 马昌前. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理[J]. 地质学报, 1988, 62(4): 329—341.
- [10] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
- [11] Petford N, Kerr R C, Lister J R. Dike transport of granitoid magmas [J]. Geology, 1993, 21: 845—848.
- [12] 侯增谦. 岩浆密度及其重要意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(4): 309—319.
- [13] 莫宣学. 关于岩浆上升速度计算的新探讨[J]. 现代地质, 1990, 4(4): 85—88.