

# 玲珑花岗质杂岩的时代、 空间形态 源岩及其数学模拟\*

林文蔚 赵一鸣 赵国红 彭 聪

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

赵维刚

(山东地质矿产局第四地质队, 山东高密)

**主题词** 胶东 玲珑花岗岩 重熔作用 金矿床 数学模拟 水的浓缩作用

**提 要** 玲珑花岗质杂岩体是一个具有长期演化历史, 多次改造重熔的复式岩体, 与金矿化有关的郭家店型、郭家岭型岩体分别定位于燕山早期及燕山晚期。通过 16 条重磁剖面反演获知, 玲珑花岗质杂岩体是一个以郭家店为重熔中心, 向北呈低角度超覆, 向南与围岩呈高角度接触的箕状岩体, 86% 以上的金矿赋存在岩体厚度小于 4km 的区域中。玲珑花岗质杂岩体不同部位其源岩组成不同。依据岩体空间形态、源岩和区域构造格架, 划分 3 个具有不同成岩、成矿特征的岩区。玲珑花岗质杂岩形成过程的数学模拟, 揭示出在重熔过程中, 金在流体相中的富集及嗣后在热驱动下的流体循环, 是本区金矿化得以发育的根本原因。

胶东西北部是我国重要黄金产区, 数以百计的大中型金矿产于玲珑花岗质杂岩体及与之毗邻的太古界(部分为元古界)的围岩中。玲珑花岗质杂岩体是一个经历漫长历史演化的多期次形成的复式岩体, 包括太古宙英云闪长岩-奥长花岗岩组合、早元古代花岗闪长岩-二长花岗岩(19Ga-21Ga)、晚元古代云山岩体、海西期崔召岩体、旧店岩体、燕山期玲珑片麻状花岗岩及郭家店、郭家岭等岩体。其中云山、崔召、旧店、郭家店、郭家岭等岩体构成玲珑花岗岩之主体。金的成矿作用主要与郭家店岩体, 特别是与郭家岭岩体生成作用的热事件有关。

## 1 主要岩体的形成时代

(1) 云山岩体: 位于云山、周家大山等地, 出露面积约 214km<sup>2</sup>。云山岩体显著特征是岩石组构极不均一, 具有明显的片麻状构造, 内部存在大量的与区域构造线一致的荆山群、粉子山群残留体, 花岗岩与残留体间见到广泛渐变过渡现象, 说明云山岩体浅部是由荆山群、粉子山

\* 地质矿产部定向基金资助项目(八·五, G35)。  
本文于 1996 年 11 月收到, 1997 年 3 月改回。

群经交代重熔而成。该岩体南北两侧分别有崔召及郭家店岩体侵入。安郁宏在龙山采 Rb-Sr 样品, 获得 996Ma 的等时线年龄, 由于云山岩体曾遭受多次热事件的影响, 这一年龄值可能偏低。燕山期热事件影响本区, 云山岩体中出现了星点状、细脉状铁质黑云母, 其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为  $126.40 \pm 1.09\text{Ma}$  (表 1, 图 1)。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线年龄为  $126.44 \pm 2.76\text{Ma}$ , 等时线年龄与坪年龄十分吻合。此种黑云母约形成于  $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>①</sup> 的低温环境, 说明在玲珑花岗质杂岩体的南部地区, 燕山期热事件影响较弱。

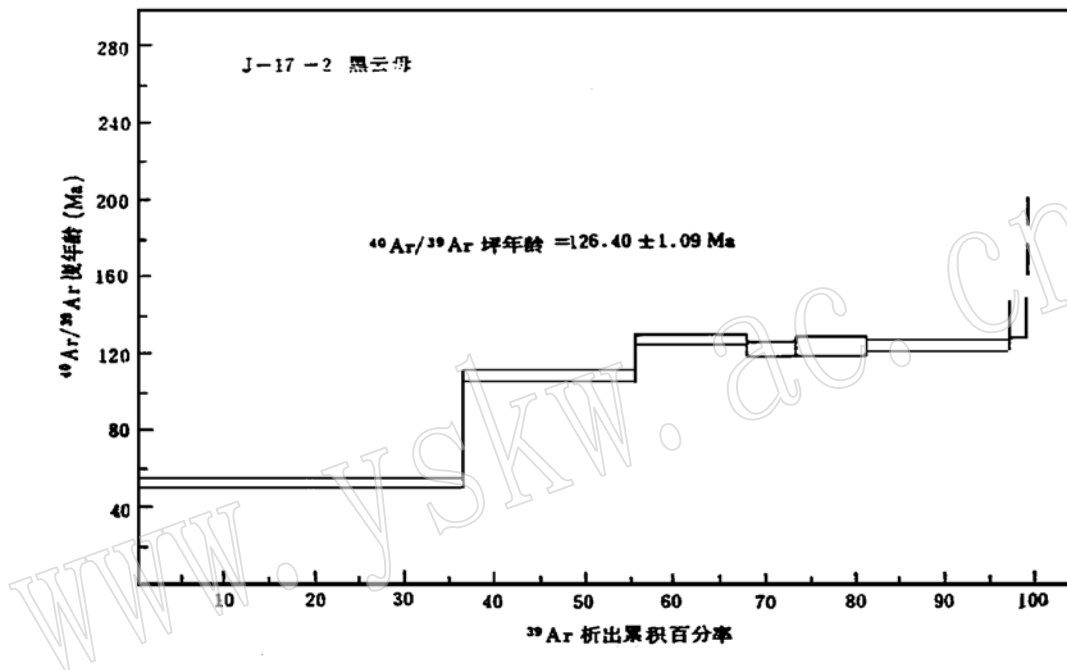


图 1 J-17-2 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段加热年龄谱

Fig. 1 Heating age spectrum of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  stage of J-17-2 biotite

(2) 崔召中细粒黑云母二长花岗岩: 崔召、旧店岩体呈岩株状侵入云山岩体中, 岩性以中细粒黑云二长花岗岩为主, 内部有荆山群、粉子山群残留体。林润生在金果山取样获得 285Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄, 徐金方<sup>[1]</sup> 在旧店西磨石山采石场取样, 获得 294.32Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄(表 2)。笔者在金花山采黑云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测试, 其结果(表 3, 图 2)显示它是受扰动的同位素体系, $^{40}\text{Ar}$  丢失, 对应  $460\text{ }^{\circ}\text{C}$  温阶 $^{39}\text{Ar}$  析出为 40.87%, 视年龄  $60.09 \pm 1.25\text{Ma}$ , 显示出岩体可能受到喜山期热事件的影响,  $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$  温阶氩析出量很少, $^{39}\text{Ar}$  仅 1.33%, 这一温阶对应的视年龄无地质意义,  $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$  温阶的视年龄与高温条件下实验本底贡献大有关。因此样品给出的 195.9Ma 应为岩体年龄下限, 实际年龄应高于此值。

(3) 片麻状玲珑花岗岩: 狭义的片麻状玲珑花岗岩指分布于灵山—招远以北, 以黑云二长花岗岩为主体的花岗质杂岩, 与前震旦系变质岩多为渐变过渡, 局部地段呈侵入接触。岩体内

① 由石榴石-黑云母温度计计算获得。

部广泛存在胶东岩群<sup>[2]</sup>残留体、残影体, 反映出玲珑片麻状花岗岩之源岩为胶东岩群, 胡世玲<sup>[3]</sup>在招远县城西北采氩同位素样品, 获得  $164.2 \pm 0.69\text{Ma}$  的坪年龄和  $134.9 \pm 3.9\text{Ma}$  的热扰动年龄(图3)。

表1 云山岩体晚期黑云母氩同位素分析数据

Table 1 Ar isotope analytical data of late stage biotite from Yunshan rock body

阶段 $t/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}$ ( $10^{-14}\text{mol}$ )	$^{39}\text{Ar}$ 累计百分数	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	视年龄(Ma)
1/460	3.52	0.0052	7.8921	724.50	36.44	2.5452	$53.60 \pm 1.99$
2/570	11.7378	0.0228	3.8166	379.46	55.52	5.2837	$109.56 \pm 3.05$
3/670	7.7437	0.0051	0.2362	249.29	68.06	6.2514	$128.92 \pm 2.27$
4/750	9.3022	0.0112	0.3134	110.02	73.60	6.0176	$124.26 \pm 3.67$
5/850	7.8560	0.0060	0.2204	157.36	81.51	6.0839	$125.58 \pm 4.62$
6/960	7.0163	0.0032	0.0206	316.93	97.45	6.0705	$125.32 \pm 1.92$
7/1100	9.5739	0.0094	0.6338	41.42	99.53	6.8349	$140.50 \pm 10.02$
8/1420	19.5383	0.0324	1.3701	9.27	100.00	10.0786	$203.53 \pm 73.81$

表2 崔召中细粒二长花岗岩 Rb-Sr 同位素数据

Table 2 Rb-Sr isotopic data of medium-fine grained adamellite from Cuizhao rock body

样号	测试对象	$^{87}\text{Sr}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	年龄(Ma)
J86508	全岩	0.2963	1.0928	0.27116	0.70983	$t = 294.32 \pm 4.257$
J86509	全岩	0.1985	0.9375	0.21172	0.70943	$R = 0.99983$
J86510	全岩	0.2809	0.9295	0.30224	0.70992	$A = 0.7087$
J86512	全岩	0.2931	0.8904	0.32923	0.71004	$B = 0.004188 \pm$
J86515	全岩	0.4796	0.6439	0.74477	0.71177	$0.000121$

据徐金方(1989)资料计算。

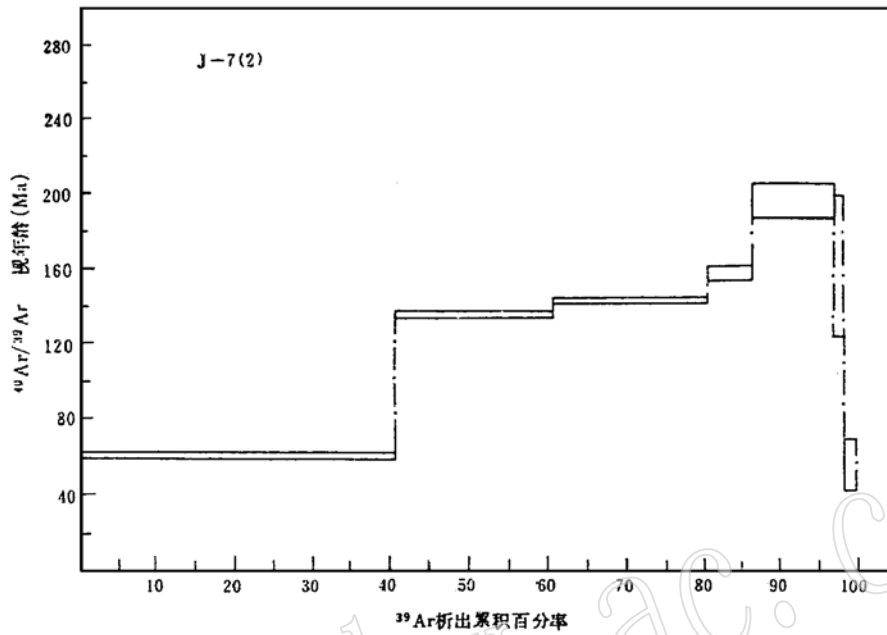
表3 崔召岩体黑云母氩同位素数据

Table 3 Ar isotopic data of biotite from Cuizhao rock body

阶段 $t/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}$ ( $10^{-14}\text{mol}$ )	$^{39}\text{Ar}$ 累计百分数	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	视年龄(Ma)
1/460	2.8685	0.0005	2.2350	567.06	40.87	2.8680	$60.09 \pm 1.25$
2/600	7.1206	0.0020	1.2998	275.70	60.75	6.6148	$135.70 \pm 2.61$
3/700	7.3786	0.0015	0.6109	277.98	80.78	6.9634	$142.57 \pm 2.06$
4/800	7.8579	0.0009	1.5029	80.64	86.60	7.7125	$157.26 \pm 4.35$
5/1025	10.2545	0.0019	0.2377	144.16	96.99	9.7150	$195.94 \pm 8.44$
6/1140	33.3784	0.0855	1.0062	18.50	98.32	7.8945	$161.59 \pm 37.54$
7/1420	4.0093	0.0047	0.5336	23.30	100.00	2.6485	$55.56 \pm 14.4$

测定人: 富云莲、郑宝英

(4) 郭家店、滦家河、岗山、毕廓岩体中粗粒二长花岗岩(统称为郭家店型花岗岩): 分布于郭家店、岗山、滦家河一带, 侵入于胶东岩群中, 与片麻状花岗岩呈侵入、渐变、构造接触等三种形式。迄今为止, 郭家店岩体所有的 K-Ar、Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、U-Th-Pb 等同位素数据, 都

图2 J-7(2)黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热年龄谱Fig. 2 Heating age spectrum of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  stage of J-7(2) biotite

说明了它是燕山早期的产物。笔者在南宿之东采黑云母, 获得  $165.12 \pm 0.69\text{Ma}$  的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄和  $164.67 \pm 1.86\text{Ma}$  的等时线年龄(表4、图4、图5)。徐金方<sup>[1]</sup>在焦家金矿东磨石山采黑云母, 得到  $155.9 \pm 2\text{Ma}$  的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄, 第二阶段给出的视年龄为  $124.8 \pm 2.1\text{Ma}$ , 其  $^{39}\text{Ar}$  析出量为 10%, 指示出样品在 125Ma 曾受到热扰动。

对滦家河岩体 Rb-Sr 同位素年代研究得到  $150.51 \pm 14.58\text{Ma}$  的年龄(本文),  $I_{\text{sr}} = 0.7096$ , 文子中<sup>[4]</sup>、王鹤年<sup>[5]</sup>分别得到  $150.12 \pm 3.65\text{Ma}$  和  $152.47 \pm 7.15\text{Ma}$  的 Rb-Sr 全岩等时线年龄。证实了滦家河岩体是燕山早期产物。

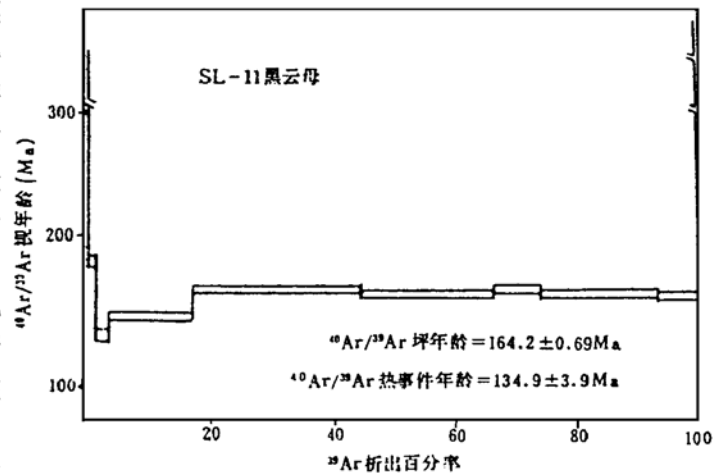
图3 玲珑岩体黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热年龄谱  
(胡世玲等, 1987)Fig. 3 Heating age spectrum of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  stage of biotite from Linglong rock body

表 4 郭家店岩体中粗粒二长花岗岩黑云母氩同位素数据

Table 4 Ar isotopic data of biotite in medium coarse grained adamellite

from Guojiadian rock body (样号: J- 20 J= 0.011810, W= 66.3mg)

阶段 <i>t</i> °C	( <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	<sup>39</sup> Ar (10 <sup>-14</sup> mol)	<sup>39</sup> Ar 累计百分数	<sup>40</sup> Ar* / <sup>39</sup> Ar	视年龄(Ma)
1/ 670	4.5337	0.0017	1.7065	629.52	28.24	4.1140	86.20 ± 3.05
2/ 750	7.4399	0.0006	0.3977	226.18	38.39	7.2827	148.85 ± 2.56
3/ 830	9.2604	0.0040	1.6107	110.50	43.35	8.2039	166.83 ± 5.48
4/ 930	8.3749	0.0016	1.1054	190.26	51.88	7.9896	162.66 ± 5.83
5/ 1000	8.1541	0.0001	0.0077	951.47	94.57	8.1189	165.18 ± 5.64
6/ 1075	8.3074	0.0007	0.4404	82.55	98.28	8.1324	165.44 ± 4.94
7/ 1420	238.1837	0.7873	4.2836	38.45	100.00	5.8475	120.47 ± 20.06

等时线数据				
<sup>39</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	误差 X	Y = <sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	误差 Y	相关系数
277.7747	55.6928	2574.3300	514.8684	0.96350
761.3071	159.7191	6382.0999	1345.6070	0.89378
9684.3288	584.4747	78921.1672	3966.5326	0.61100
1707.2125	786.6210	14179.3188	46.0800	0.97033

测定人: 富云莲, 郑宝英

(5) 郭家岭斑状花岗闪长岩: 由郭家岭、南围山、上庄、从家、三山岛等岩体组成, 面积约 620km<sup>2</sup>, 它们形成时代相近, 地质特征一致, 故统称之为郭家岭型岩体。

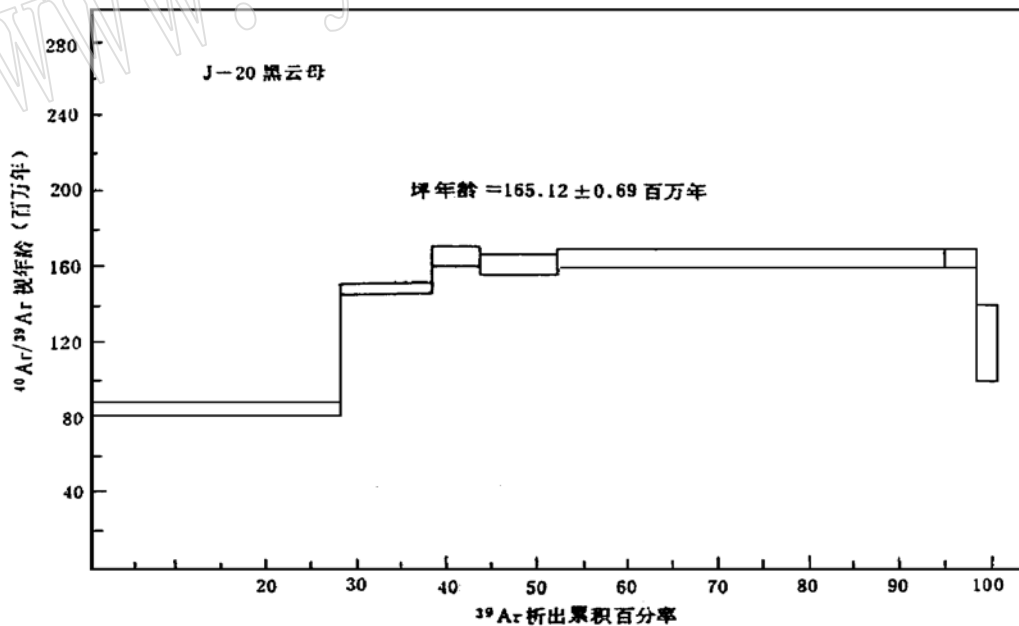


图 4 J- 20 黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 阶段加热年龄谱

Fig. 4 Heating age spectrum of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar stage of J- 20 biotite

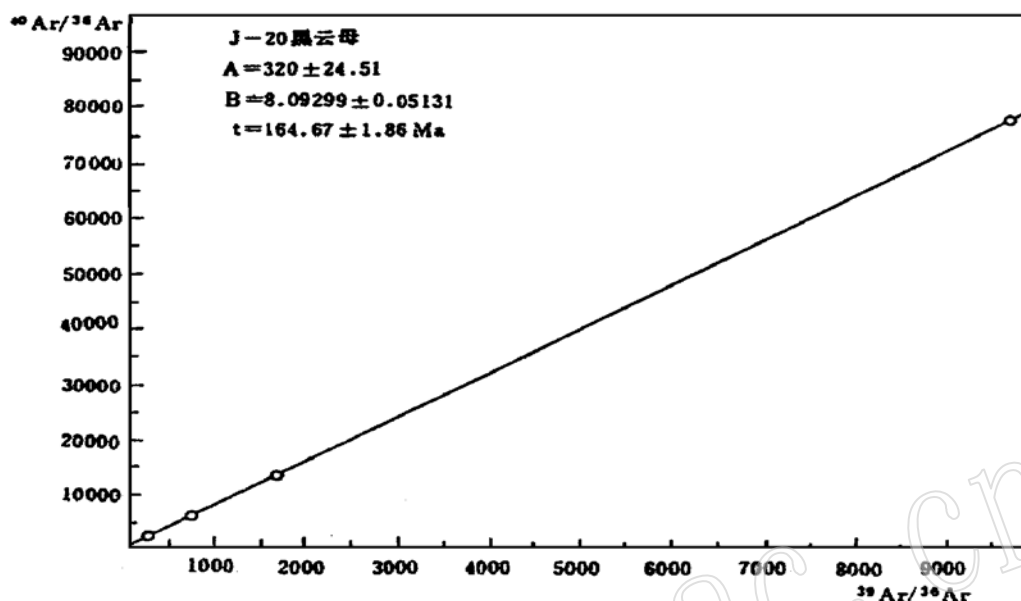


图5 郭家店二长花岗岩黑云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄图

Fig. 5  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isochron diagram of biotite from Guojiadian adamellite

郭家岭岩体大致呈东西向展布,被艾山岩体所截,其岩枝穿入片麻状玲珑花岗岩中,或在片麻状花岗岩中形成巢状、不规则状脉体。表明岩体侵位发生在片麻状玲珑花岗岩之后。岩体成分不均一,矿物含量变化很大,且以出现较多的黑云母(3.49%—6.15%)、角闪石(6.1%—7.2%)为特征,斜长石多为更一中长石( $An_{20}$ — $An_{33}$ ;平均为 $An_{26}$ ),少数样品中斜长石牌号大于 $An_{35}$ 。

胡世玲<sup>[3]</sup>、徐金方<sup>[1]</sup>对郭家岭花岗岩进行了K-Ar稀释法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定(表5),K-Ar稀释法获得102.5Ma—133.8Ma的年龄值, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分别得到136.8Ma、134.8Ma(图6)、118Ma的坪年龄。徐金方采Rb-Sr样品,得到 $137.9 \pm 8.76\text{Ma}$ 的年龄值, $I_{\text{sr}} = 0.7107$ 。以上所有数据都说明了郭家岭花岗岩形成于燕山晚期,位于郭家店型花岗岩之后,反映出本区燕山期花岗岩由酸性(二长花岗岩)向基性(花岗闪长岩)演化的历史。

由上可见,玲珑花岗质杂岩体的形成经历了多期叠加改造作用,在元古代区域变质的晚期减压熔融中,形成广泛的混合岩和混合花岗岩,玲珑花岗质杂岩的雏形得以形成,嗣后,经元古代至中生代乃至喜山期的多次热事件,使云山、崔召、郭家店、郭家岭花岗岩依序生成,特别是在燕山晚期,随重熔作用的发展,导致较基性组分的重熔,形成以富含角闪石为特点的郭家岭型花岗岩。其后开始了以重熔岩浆热液、天水热循环流体为主要特征的中-低温金成矿过程。

以郭家岭型花岗岩形成为主要标志的燕山晚期热事件对本区成岩成矿发生了深刻影响,郭家岭型花岗岩形成于137Ma—118Ma,主要集中在130Ma—137Ma,同位素年龄数据揭示了此期间所发生的一系列热事件,如在片麻状玲珑花岗岩、云山岩体、郭家店岩体分别测得134.9Ma、126.44Ma、124.8Ma的热扰动年龄,招平断裂在中生代活化年龄为134.26Ma。所有这些都意味着燕山晚期花岗岩的形成作用是由一系列频发的热事件构成的,每次热事件均可能

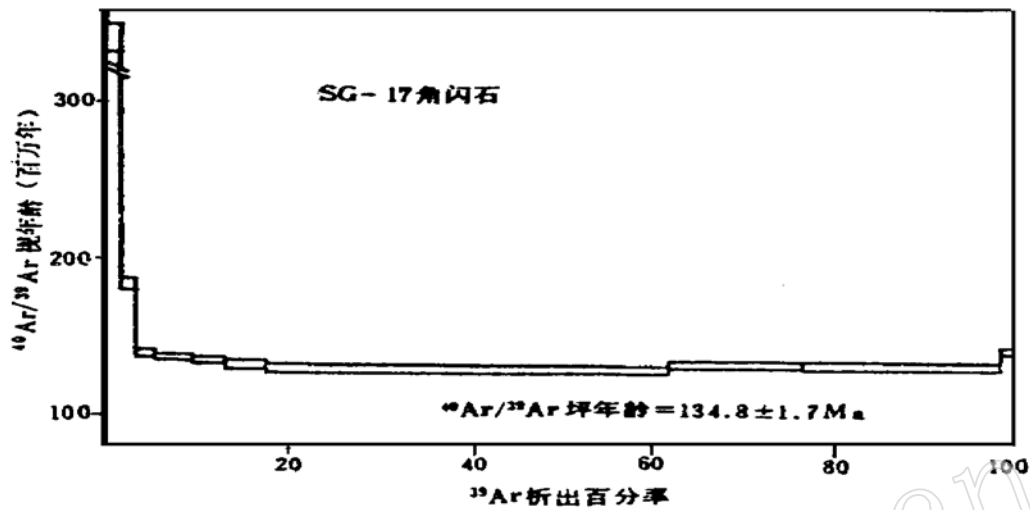


图6 郭家岭岩体角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热年龄谱

(胡世玲等, 1987)

Fig. 6 Heating age spectrum of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  stage of amphibole from Guojialing rock body

引发重熔岩浆作用和金的富集作用。本区金成矿年龄的测试资料<sup>[8]</sup>佐证了这一结论: 焦家金矿石英流体包体 Rb-Sr 等时线年龄为  $134 \pm 8 \text{ Ma}$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7014$ ; 马家窑金矿为  $137.6 \pm 7.1 \text{ Ma}$ ; 玲珑西山金矿为  $126.5 \pm 5.7 \text{ Ma}$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7111$ 。这些数据可以说明胶东主要金矿成矿期与燕山晚期重熔岩浆岩体的形成作用是一致的, 佐证了岩体的形成和矿液的分异富集缘于同期地质作用。不仅如此, 玲珑花岗岩与金矿石英流体包体  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  的一致性, 更佐证了它们物质来源的一致性。鉴于上述情况, 我们认为胶东金的主要成矿时代当属燕山晚期。

## 2 玲珑花岗质杂岩体的空间形态

笔者以 16 条重磁剖面的反演, 确定岩体下底界的埋深。在 1: 20 万布伽重力  $\Delta G$  等值线平面图中, 玲珑花岗质杂岩体表现为明显的重力低值区, 并呈现平静的弱磁场, 根据各类岩石的物性测定结果, 获得玲珑花岗质杂岩的平均密度为  $2.58 \text{ g/cm}^3$ , 新太古代胶东岩群和古元古代荆山群的密度值介于  $2.70 \text{ g/cm}^3 - 2.74 \text{ g/cm}^3$  之间, 花岗岩与其变质围岩间存在  $(0.12 - 0.16) \text{ g/cm}^3$  的密度差。全区磁性较强的岩石为胶东岩群的唐家庄组、英庄乔组和齐山组, 其它群组中的斜长角闪岩仅能形成局部的高磁场。据此建立反演花岗岩底界面的地质-地球物理模型, 以矿床地质研究所开发的 IGGM 人机交互重磁图形编辑、重磁反演系统反演花岗岩底界面埋深, 计算中取花岗岩与围岩的密度差为  $0.15 \text{ g/cm}^3$ 。在对 16 条重磁剖面反演的基础上, 绘制出花岗岩等厚线图(图 7), 由图可见:

(1) 玲珑花岗质杂岩体在整体上呈北东向延伸, 在朱桥、招远、寺口一带岩体底界面等值

表5 郭家岭花岗岩闪长岩氩同位素测定结果

Table 5 Ar isotopic age determination of Guojialing granodiorite

样品号	测试矿物	阶段/ $t(^{\circ}\text{C})$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{39}\text{Ar}$ ( $10 \times 10^{-14} \text{mol}$ )	$^{39}\text{Ar}$ 累计百分数	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	视年龄 (Ma)	坪年龄 (Ma)	备注
SG-17	角闪石	1/530	44.77	7.78	0.0023	20.64	2.32	44.92 ± 0.44	701.4 ± 8.2	134.8 ± 1.7	J = 0.01063, W = 0.51821g 胡世玲(1987)
		2/600	14.61	25.70	0.0231	6.24	3.02	10.03 ± 8.14	182.8 ± 3.1		
		3/680	15.00	6.68	0.0272	24.00	5.72	7.60 ± 0.15	140.2 ± 3.0		
		4/780	11.71	4.77	0.00143	33.60	9.49	7.51 ± 0.11	138.6 ± 2.2		
		5/880	10.62	5.138	0.0015	31.20	12.99	7.43 ± 0.11	137.3 ± 2.3		
		6/980	12.21	4.34	0.0013	36.96	17.14	7.36 ± 0.12	135.9 ± 2.5		
		7/1050	9.397	0.402	0.0082	398.40	61.87	7.03 ± 0.09	130.1 ± 2.1		
		8/1120	8.910	1.215	0.00655	132.00	76.69	7.04 ± 0.08	131.1 ± 2.0		
		9/1250	10.445	0.851	0.0117	188.40	97.84	7.09 ± 0.11	131.0 ± 2.3		
		10/1430	10.25	8.35	0.0025	19.20	99.99	7.72 ± 0.10	142.3 ± 2.3		
G-5		1/600	20.00	3.894	0.263	0.0826	3.24	17.9 ± 0.2	444.7 ± 5.9	118.9 ± 1.3	J = 0.01557 W = 0.4g 徐金方(1989)
		2/750	19.20	0.150	0.054	1.030	7.27	2.6 ± 0.07	72.6 ± 5.2		
		3/900	6.69	0.112	0.008	2.310	16.66	4.4 ± 0.07	118.3 ± 2.1		
		4/1000	7.10	0.108	0.009	1.580	22.89	4.3 ± 0.07	117.4 ± 2.1		
		5/1150	5.69	0.074	0.004	15.30	82.69	4.5 ± 0.05	121.3 ± 1.9		
		6/1420	5.74	0.096	0.0049	4.30	99.59	4.2 ± 0.05	115.3 ± 1.9		
S-1	黑云母	1/600	12.67	0.052	0.039	2.11	2.2	0.9 ± 0.1	24.9 ± 3.5	136.8 ± 1.3	J = 0.01557 W = 0.3g 徐金方(1989)
		2/750	17.39	0.108	0.045	1.964	4.2	3.7 ± 0.02	100.3 ± 4.7		
		3/840	6.029	0.115	0.0032	15.177	20.0	5.0 ± 0.06	136.4 ± 2.0		
		4/960	5.817	0.069	0.0021	23.21	44.1	5.2 ± 0.05	140.0 ± 2.0		
		5/1100	5.398	0.080	0.0015	37.83	83.4	4.9 ± 0.05	133.9 ± 1.9		
		6/1400	5.817	0.102	0.0018	15.84	99.9	5.0 ± 0.06	137.4 ± 2.0		



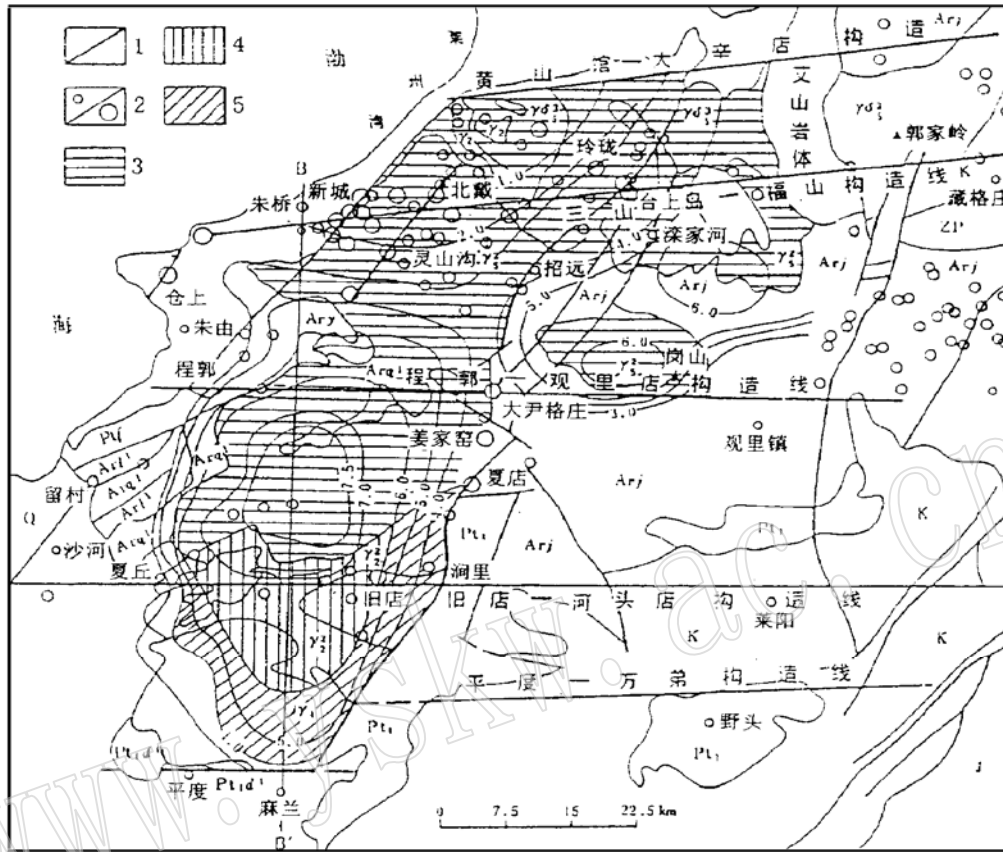


图7 胶东西北部地区地质略图

Fig. 7 Geological sketch map of northwestern Jiaodong

Q—第四系; K—白垩系;  $Pt_1$ —古元古代荆山群;  $Pt_{1d}$ —荆山群陡崖组; Arj—太古宙胶东岩群; Arl—胶东岩群林家寨组; Arg—胶东岩群齐山组; Ary—胶东岩群英庄介组; Art—胶东岩群唐家庄组;  $\gamma$ —花岗岩;  $\gamma\delta$ —花岗闪长岩; 1—断裂、构造带(线); 2—金矿床(矿点); 3—花岗岩熔融底界面为胶东岩群下部唐家庄组; 4—花岗岩熔融底界面为齐山组; 5—花岗岩熔融底界面为胶东岩群上部(林家寨组);  $Pt_f$ —元古宙粉子山群,  $Z_p$ —元古宙蓬莱群, 图中等值线表示岩体厚度

线渐呈东西向, 这种特征反映出玲珑花岗质杂岩体的形成受北东向及东西向构造的双重控制;

(2) 岩体重熔中心在郭家店一带, 重熔深度现存约为 7.5km, 并向南北两侧超覆于基底岩石之上, 向北侧下底界坡度平缓, 呈岩被状覆盖于胶东岩群之上, 在岩体南部由中心至边缘, 岩体厚度减薄不明显, 与围岩呈高角度接触, 岩体东侧沿招平断裂通过一狭长重力梯度带与胶东岩群、荆山群接触。在岗山、深家河一带形成深约 6km 的局部重熔中心。

值得说明的是, 山东地矿局物探大队<sup>①</sup>也报导过玲珑花岗质杂岩体平均厚度约 7km, 向北超覆部分厚度在 2km, 这在总体上与本文的反演结果一致, 佐证了玲珑花岗质杂岩体是由本区基底岩系经交代、重熔而成。

① 山东地矿局物探大队, 1989, 山东省胶东地区综合地球物理地球化学信息编图与金成矿预测。

### 3 玲珑花岗质杂岩的源岩

在玲珑花岗质杂岩体空间形态研究的基础上,依据岩体中不同地段变质岩残留体的分布、岩石组合、隶属层位以及各组、段的地层厚度,在每一剖面中逐一确定花岗质岩石的熔融源岩(图8)。最终得到岩体厚度等值线图 and 不同地段下底界之源岩层系(参见图7)。由图可见玲珑花岗质杂岩之源岩组成特点是:

(1)夏店—夏丘以北地区花岗岩底界面为胶东岩群底部的唐家庄组。其中在程廓—观里店构造线以北玲珑花岗质杂岩之源岩为胶东岩群的中、下部岩系,包括唐家庄组、英庄乔组和齐山组下段。在程廓—观里店构造线之南,除上述岩系外,尚有齐山组二段。

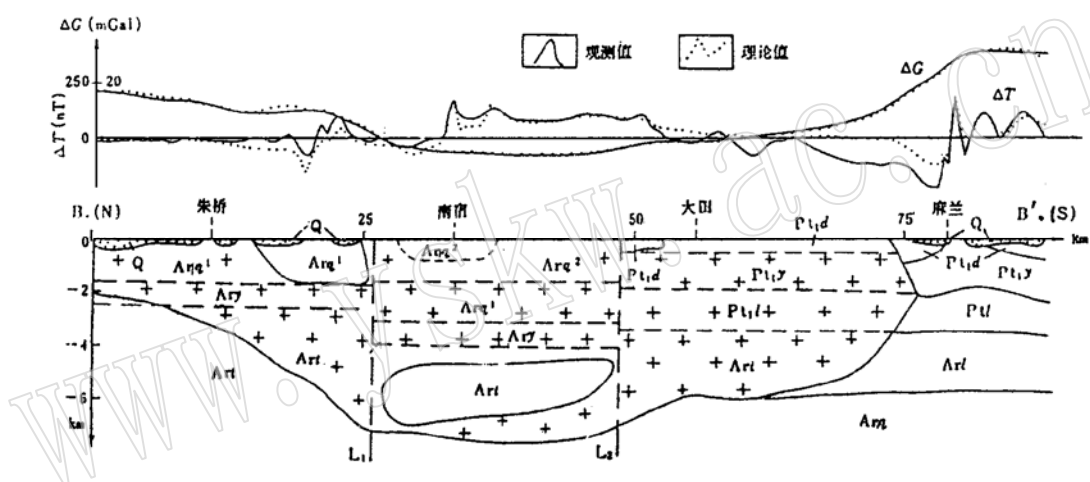


图8 朱桥—麻兰地质-地球物理综合剖面图

Fig. 8 Geologic-geophysical synthetic section from Zhuqiao to Malan

(2)夏店—夏丘以南的地区,由于各处岩体厚度的不同,其源岩各异。在岩体内部重熔底界面可达胶东岩群之齐山组,而岩体边部仅达胶东群上部林家寨组。因此随地理位置的不同,源岩组成各异。总的看,本区由北而南岩体熔融深度由胶东岩群的唐家庄组变为齐山组和林家寨组。在旧店—河头店构造线之南,花岗岩则主要是胶东岩群上部层系和荆山群熔融而成,这种格局必然导致玲珑花岗质杂岩体由北向南有由基性至酸性的变化。特别是由于源岩组成的不同,重熔岩浆热液中将有不同的金含量,造成本区不同地段金的成矿潜能存在差异,在总体上这种潜能由北向南减小。

## 4 玲珑花岗质杂岩体形成的数学模拟和金的富集

### 4.1 基础数据

在玲珑花岗质杂岩体空间形态和源岩研究的基础上, 可以通过一定的数学方法来模拟重熔岩浆的生成、熔融过程中金的迁移、分配及在流体相中的富集。大量事实佐证了玲珑花岗岩是由胶东岩群和荆山群选择熔融而成, 本文仅对与金矿化关系最密切的郭家店、郭家岭花岗岩进行模拟, 以胶东岩群中分布最广、厚度最大、基性程度不一的四类岩石: 斜长片麻岩、黑云变粒岩、二长变粒岩、斜长角闪岩作为源岩, 这四类岩石约占胶东岩群 95% 以上<sup>[6]</sup>, 在重熔过程中不仅生成了玲珑花岗质杂岩中诸岩体, 也形成了与之同源的中基性脉岩、熔融残留体、析离体和伟晶质脉体等。刘连登等的研究佐证了这一认识<sup>[7]</sup>。这些产物均需作为熔融产物予以计算(表 6)。对金在残余流体相中含量的计算最为重要的是熔浆的含水量, 我们在解析出各岩体的  $f_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$  后, 以 Burnham(1979) 的方法求出熔浆中摩尔含水量及百分含水量, 其部分结果列入表 6。

表 6 玲珑花岗质杂岩数学模拟的基本数据

Table 6 Basic data obtained from mathematic modeling of Linglong complex

类别	岩石或生成物名称	化学成分 (%)							H <sub>2</sub> O	熔浆中水含量 (%)	Au 含量 (10 <sup>-9</sup> )
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O			
源岩	(二长)变粒岩	65.21	15.09	1.51	0.35	1.75	3.45	3.63			
	黑云变粒岩	65.88	16.38	4.46	4.92	1.50	3.06	1.40			
	斜长角闪岩	49.71	13.804	12.82	6.032	11.328	2.54	1.66			20
	斜长片麻岩	64.08	15.45	4.42	1.94	2.192	3.46	3.0			
熔融产物	玲珑花岗岩	71.33	14.89	2.051	0.46	2.04	4.19	3.56	0.81	6.50	4.12
	郭家店花岗岩	73.11	14.36	1.799	0.33	1.59	4.04	3.67	0.73	7.10	5.87
	郭家岭花岗岩	67.0	15.23	3.228	1.57	3.16	4.09	3.65	0.85	9.38	6.04
	辉绿岩	47.25	13.02	7.382	9.76	8.82	2.26	1.797	3.73		35.5 <sup>a</sup>
	辉绿玢岩	47.29	13.93	7.508	8.41	7.96	2.13	2.13			35.5
	辉石闪长岩	58.02	15.816	6.418	4.975	6.823	3.375	1.822	1.80		15.0
	黑云母	34.175	18.63	19.08	9.12	0.173	0.215	8.72	4.30		5.0
	角闪石(闪长质暗色包体)	48.46	4.15	14.09	14.71	11.68	1.09	0.58	1.80		34.67
	角闪石(胶东岩群残留体)	45.69	10.16	16.228	9.82	12.52	0.852	0.87	1.80		34.67
	钙长石	43.194	36.649			20.157					5.4
	石英	100									1.3
磁铁矿			93.09							31.29	

根据刘连登(1990)资料

### 4.2 数学模型

依据质量作用定律, 在重熔花岗岩形成过程中, 重熔物质质量之和应等于各重熔产物(花岗岩、伴生脉岩、析离体、熔融残留体、残影体...)的质量之和。设花岗岩的形成是由  $n$  种岩石  $S_1, S_2, \dots, S_n$  经不同比例的重熔而成, 每种岩石包含  $m$  种元素(以氧化物为单位, 如  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \dots$ ), 设第  $j$  种岩源中第  $i$  种组分的含量为  $S_{ij}$  ( $i = 1, m; j = 1, n$ ), 每一种岩源的熔融分数为

$Y_i$ 。由源岩熔融形成  $P$  种产物,每一种产物由  $m$  种组分构成,其含量为  $a_{ik}$  ( $i = 1, m; k = 1, p$ ), 设第  $k$  种产物的量比为  $X_k$ , 依据质量守恒原理有:

$$\sum_{j=1}^n S_{ij} Y_j = \sum_{k=1}^P a_{ik} X_k \quad (i = 1, m)$$

这是一个常数项( $\sum_{j=1}^n S_{ij} Y_j$ )未知,在给定的约束条件下,求目标函数  $S = \sum_{k=1}^P X_k$  的极大问题,这一问题在数学上称为满足( $AX = b, X \geq 0$ )求  $\text{Max} = \sum_{k=1}^P X_k$  的线性规划,由于常数项未知,不能用一般的线性规划方法求解,引入补充约束  $S_1 = \sum_{i=1}^m a_{i1} = \text{Max}$ , 它限定在地层重熔过程中最大限度地生成最主要的熔融产物(这里指花岗岩类),以动态寻优编制程序,程序同时给出各岩体重熔源岩的百分构成、各熔融产物量比(表7)。

表7 玲珑花岗质杂岩数学模拟结果  
Table 7 Mathematic modeling of Linglong granitic complex

类别	岩石及生成物名称	玲珑片麻状花岗岩				郭家店、漆家河岩体				郭家岭岩体			
		模拟方案 I		模拟方案 II*		模拟方案 I		模拟方案 II		模拟方案 I		模拟方案 II	
		组成	Au 分配	组成	Au 分配	组成	Au 分配	组成	Au 分配	组成	Au 分配	组成	Au 分配
源岩	(二长)变粒岩			73		40		27		73		68	
	黑云变粒岩	20		2	20	2	20	2	20	2	20	12	20
	斜长角闪岩		( $10^{-9}$ )	9	( $10^{-9}$ )	2	( $10^{-9}$ )	8	( $10^{-9}$ )	11	( $10^{-9}$ )	18	( $10^{-9}$ )
	斜长片麻岩	100		16		56		63		14		2	
熔岩	主岩体	81.35	3.257	74.48	3.045	81.93	4.708	74.54	4.235	81.745	4.768	78.107	4.464
	辉绿岩					0.63	0.219						
	辉绿玢岩			7.05	2.483	1.87	0.650	7.78	2.673				
	辉石闪长岩								4.53	0.658			
	黑云母	0.89	0.043	2.85	0.141	1.17	0.057			0.0617	0.003	0.409	0.019
	角闪石	4.55	1.533			5.78	1.962						
	胶东岩群残留体			1.25	0.430			5.40	1.812			7.10	2.329
熔融产物	磁铁矿	2.09	0.635			0.78	0.239	1.305	0.395	0.612	0.185	0.229	0.068
	斜长石			2.38	0.128					1.375	0.072	0.007	0.0004
	石英	3.55	0.0045	4.72	0.061					7.976	0.10	6.60	0.081
	其它	3.80	0.738	1.50	0.298	2.73	0.535	2.429	0.470	2.08	0.398	3.325	0.629
	合计	96.23	6.210	94.23	6.586	94.89	8.37	95.984	10.243	93.83	5.526	95.78	7.59
流体	熔浆中水含量(%)	6.50		6.50		7.10		7.10		9.38		9.38	
	残余流体量(%)												
	及金含量( $10^{-9}$ )	5.74	13.79	5.50	13.414	6.27	11.63	5.99	9.757	8.71	14.47	8.61	12.41
	流体中金“浓度”( $10^{-9}$ )		240.24		243.89		185.49		162.89		166.13		144.13
中金													
	流体中金的富集系数												
	(流体中金/原岩中金)	12.01		12.19		9.27		8.14		8.31		7.21	

\* 见正文。

### 4.3 模拟结果

表7中展示出玲珑花岗岩重熔作用的模拟结果,表中对每一岩体列出两种方案(模拟方案I及II),玲珑片麻状花岗岩体及郭家店岩体的第II方案是以胶东岩群残留体角闪石做为组成计算的,郭家岭岩体的第II方案是按郭家岭型岩体35个样品平均值计算的,第I方案取自上庄岩体化学成分的平均值。由模拟结果可以看出:

(1)玲珑片麻状花岗岩体及郭家店、漆家河等岩体之源岩主要为变粒岩及片麻岩,并有少量基性组分加入,郭家岭花岗岩的源岩以变粒岩为主,并有较多的斜长角闪岩熔融。这反映出随熔融温、压条件的增高,最终形成胶东西北部地区的由酸性—基性的重熔花岗岩系列;

(2)在熔融产物中,玲珑片麻状花岗岩体的形成伴有较多的胶东岩群残留体及黑云母、角闪石的析离体,郭家店型岩体的生成伴有各种中基性脉岩,随重熔作用的增强形成基性程度较高的郭家岭型花岗闪长岩,伴有大量硅质富金溶液,促成含金绢英岩带的形成。由模拟结果不难理解,随玲珑花岗岩诸岩体的形成,将伴有中基性脉岩、含金石英脉、含金硫化物矿体的生成,由于多次构造脉动,造成了金矿脉与中基性脉岩间复杂的穿切关系和不同类型金矿脉在空间上的叠加;

(3)在重熔花岗岩形成过程中,源岩中1/2以上的金转移到流体相中,特别是在形成郭家岭花岗岩时,流体相中的金占源岩金62%—72%,流体相中金“浓度”(流体中金量/流体重量)约在 $(100-200) \times 10^{-9}$ ,金的富集系数高达7—12倍。因此在重熔花岗岩形成过程中,金在流体相中的大规模富集是本区金矿得以发育的根本原因之一。经计算这些重熔流体中的金足可形成胶东西北部的金矿带。

## 5 主要结论

(1)玲珑花岗质杂岩体是一个多期次形成的复式岩体,经历了复杂的地质历程和多次叠加改造,古元古代的区域变质和混合岩化中形成玲珑花岗岩的雏体,嗣后有云山、崔召、郭家店、郭家岭等岩体的依次定位,随重熔作用的增强,形成本区占主要地位的二长花岗岩—花岗闪长岩的岩石序列,与本区金矿化关系密切的郭家店型、郭家岭型花岗岩分别形成于燕山早期和燕山晚期,燕山晚期本区的成岩成矿作用达到高潮;

(2)玲珑花岗质杂岩体在总体上是以郭家店为重熔中心的原地—半原地型花岗岩,向北以低角度超覆于胶东岩群之上,向南、向东分别呈高角度或断裂与围岩接触。岩体厚度、空间形态对本区金矿化有重要控制作用,86%的金矿赋存于岩体厚度小于4km的区段中。图7中4km等厚线所圈闭的区域是本区矿源、水源、热源最优区域;

(3)玲珑花岗质杂岩体由北而南其源岩组成不同,总体上由胶东岩群的中、下部层位向荆山群、粉子山群过渡。由于源岩组成的不同,成矿潜能各异。依据岩体的空间形态、厚度、源岩及与区域构造的关系,把玲珑花岗质杂岩分布区由北而南划分三个构造—岩区,每一区段的地质特征、岩体地质及成矿作用各具特色(表8);

(4)通过玲珑花岗质杂岩形成作用的数学模拟,揭示出在源岩重熔过程中,大量金转入溶液,造成金的显著富集,这种重熔流体完全可形成现今所见的招掖矿带。数学模拟还进一步指出,伴随郭家岭型花岗闪长岩的生成,形成了大量的富金流体,燕山晚期是胶东最重要成矿期;

(5)在含金流体的生成、演化和热液循环中,通过水—岩反应和形成蚀变带的过程中,流体

中水的浓缩(收缩)作用是导致本区金矿生成的又一重要原因,郭家岭花岗岩的热流体中,水的强烈浓缩(收缩)作用是郭家岭花岗岩与金矿生成有密切联系的重要因素。成矿作用中,水的浓缩(收缩)作用是值得深入研究的课题,笔者将在另文中予以论述。

表8 胶东西北部构造-岩区的划分

Table 8 Division of tectonic rock areas in northwestern Jiaodong

“断块”	位置	地层	花岗岩岩体				燕山期热事件强度	矿床(点)分布及其特点	矿床规模、成矿潜能
			岩体	岩体下底界	岩体厚度	岩源			
I (1-1 1-2)	北抵黄山,南抵辛店,西至里店,东以福岛为中心。分两小区1-1,1-2,(仓上一招远之南)	胶唐英齐系,唐家庄组,大向山组,西层。	该地段北部出露郭家岭型及片麻状花岗岩,向南消失。	唐家庄组(逢组)。	此区岩体厚1-6km,北部1-3km,南部3-6km。	由家庄组、唐家庄组、英齐组组成。	强烈	本区多数大型矿床,包括大、中、小型矿床。矿床均向中、南集中。	矿床规模、成矿潜能
II	北抵里店,南抵程店,东以里店为中心。	招平断裂,唐家庄组,西层。	见郭家庄组,唐家庄组,英齐组,西层。	唐家庄组(逢组)。	3.5-7km	由家庄组、唐家庄组、英齐组组成。	强烈	本区多数大型矿床,包括大、中、小型矿床。矿床均向中、南集中。	矿床规模、成矿潜能
III	位于旧店、店构、万带之间。	荆山群及粉子山群	元古代混合花岗岩体。	林家寨组	4-7km	东群、山部粉子山。	弱,形成完整的山体。区内燕山期事件显示。	本区多数大型矿床,包括大、中、小型矿床。矿床均向中、南集中。	矿床规模、成矿潜能

## 参 考 文 献

- 1 徐金方. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类的研究. 山东地质, 1989, 5(2): 5—118.
- 2 程裕淇主编. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994, 517.
- 3 胡世玲、王松山、桑海清等. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 1987, (3): 83—88.
- 4 文子中. 玲珑花岗岩同位素年代学问题讨论. 山东地质, 1985, (2): 1—8.
- 5 王鹤年、陈骏、汪耀. 胶东金矿含金建造的地球化学研究. 地球化学, 1988, (3): 195—207.
- 6 王炳成. 胶西北金矿的控矿因素与找矿的关系. 山东地质, 1991, 7(1): 74—87.
- 7 姚凤良、刘连登、孙庆存等. 胶东西北部脉状金矿. 吉林科学技术出版社, 1990, 234.
- 8 李华芹、刘家齐、魏林. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 地质出版社, 1993, 120.

## Ages, Spatial Forms, Source Rocks and Mathematical Modeling of Linglong Granitic Complex

Lin Wenwei Zhao Yiming Zhao Guohong Peng Cong

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

**Key words** Jiaodong, Linglong granite, remelting, gold deposit, mathematical modeling

### Abstract

Linglong granitic complex is a compound rock body characterized by long evolutionary history and multiple reformation and remelting, with Guojiadian type and Guojialing type rock bodies being of Early Yanshanian and Late Yanshanian respectively. Inversion of 16 gravity and magnetic profiles shows that Linglong granitic complex is a rock body in the form of winnowing pan, with Guojiadian as the remelting center. It assumes low-angle overlap northward and high-angle contact with wall rocks southward, and over 86% gold deposits occur in places with the rock body thickness less than 4km. Different positions of Linglong granitic complex have different source rock compositions. According to spatial forms, source rocks and tectonic frameworks of the rock body, the Linglong granitic complex was divided into different rock areas with different rock-forming and ore-forming characteristics. The mathematic modeling of the formation of Linglong granitic complex revealed that in the remelting process, the enrichment of gold in fluid facies and the circulation of fluids driven by heat of the rock body constituted the basic factors responsible for the development of gold mineralization.