

# 胶南花岗岩锆石饱和温度及其地质意义

王 涛<sup>1,2</sup>, 刘 燊<sup>3</sup>

1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059; 2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 西北大学 地质系 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

**摘 要:** 本文通过对花岗岩锆石饱和温度的计算, 反演了胶南晚中生代花岗岩浆的起源温度, 以期对花岗岩的形成条件和构造背景做出合理的解释。胶南花岗岩的锆石饱和温度介于 815~899℃, 属于高温花岗岩, 高热的产生与软流圈地幔上涌有关。胶南花岗岩形成于苏鲁造山带燕山晚期岩石圈拉张减薄的构造环境, 岩石圈下部发生(下地壳和岩石圈地幔)拆沉是导致拉张减薄的主因。拆沉作用也是苏鲁带壳-幔物质交换的主要机制, 并引起了苏鲁造山带山脉的隆升、大规模岩浆作用、岩石圈的伸展减薄、盆地的形成和山根的消失。

**关 键 词:** 锆石; 饱和温度; 地质意义; 花岗岩; 胶南

中图分类号: P584; P595 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2013)05-0619-06

## Zircon Saturation Temperatures of Granites in the Jiaonan Area and their Geological Significations

WANG Tao<sup>1,2</sup>, LIU Shen<sup>3</sup>

1. College of earth sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. State Key Laboratory of Continental dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

**Abstract:** This paper acquired original temperatures of Jiaonan granites by calculating their zircon saturation temperatures, which imply forming conditions and tectonic settings of the granites. The result indicated that zircon saturation temperatures for Jiaonan granites range from 815℃ to 899℃. The Jiaonan granites are high temperature granites and the high heat may relate to asthenosphere upwelling. The Jiaonan granites were formed by intensely thinning of lithosphere beneath the Sulu orogenic belt in eastern China during the Yanshanian stage. This process caused material exchanging between the crust and the mantle, and caused mountain rising and voluminous magmatic activities, which formed the Jiaolai basin and the disappearance of Yamane in the Sulu orogenic belt.

**Key words:** zircon; saturation temperature; geological signification; granites; Jiaonan

花岗岩由于其形成的特定地质背景和大地构造意义, 是重塑地壳地质演化的重要研究对象。但花岗岩形成的机制和构造背景比较复杂, 需要采用地质学、岩石学和地球化学等多种方法进行综合研究<sup>[1]</sup>。近来, 一些地质工作者利用花岗岩浆的起源温度对其形成条件和构造背景进行了研究<sup>[1~6]</sup>。由于花岗岩浆的起源温度及其形成时的流体的多少

和热量的加入有直接关系, 而流体及热量的特征明显受大地构造背景的限制。因此, 花岗岩浆的形成温度在一定条件下反映了其所在大地构造背景的地热和流体条件等。本文选择山东省胶南隐珠山地区的花岗岩为研究对象, 拟从锆石饱和温度方面对其进行初步研究, 以期对岩浆源区温度提出定量的约束, 并探讨其形成时的构造背景。

收稿日期: 2013-05-03 收到, 05-23 改回

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCXZ-YW-QN105 国家自然科学基金资助项目(41103017); 矿床地球化学国家重点实验室开放基金资助项目(201105); 四川省重点学科基金资助项目(SZD0407)

第一作者简介: 王 涛(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 岩石地球化学研究和岩石学。E-mail: wangtao10@cdu.cn

## 1 地质背景和岩石学特征

山东胶南地区位于苏鲁造山带中部,苏鲁造山带是三叠纪扬子板块向北俯冲与华北板块碰撞的结果,它位于郯庐断裂带以东,是秦岭—大别造山带的东延部分,以发育花岗片麻岩—榴辉岩—大理岩组成的超高压变质杂岩为特征<sup>[7,8]</sup>。苏鲁地块内广泛发育中生代岩浆岩,岩石类型多样,镁铁质—超镁铁质岩、中性岩、碱性岩和酸性岩都有出露。沂沭断裂带(郯庐断裂带山东段)和由它派生的旋卷构造对研究区内中生代地层和岩浆活动(特别是青山组和王氏组)有着极明显的制约作用。由于它的长期左行扭动,因此派生了苏鲁造山带“入”字型构造,该构造由胶北隆起、胶莱拗陷和胶南隆起

组成。研究区地层分区的最大特点是发育前寒武纪和中、新生代的地质,缺失古生代沉积。

研究对象位于苏鲁带的胶南市大村镇(JN<sub>1</sub>)和寨子山(JN<sub>2</sub>)地区。岩性为中细粒二长花岗岩,其主要侵入于太古—下元古代地层中的片麻岩内,出露面积约 60 km<sup>2</sup>,并与燕山晚期碱性杂岩体(120 Ma)<sup>[9]</sup>相伴生(图 1)。岩石手标本总体呈肉红色,具细粒花岗结构,块状构造。经镜下鉴定,主要矿物组成为石英(20%~30%)、正长石(25%~30%)发育具卡斯双晶,斜长石(20%~30%)主要为钠长石,普遍发育聚片双晶,石英与正长石相互交生,发育显微文象结构;次要矿物有黑云母和角闪石(约 10%);副矿物有锆石、磁铁矿、磷灰石、褐帘石和榍石等。

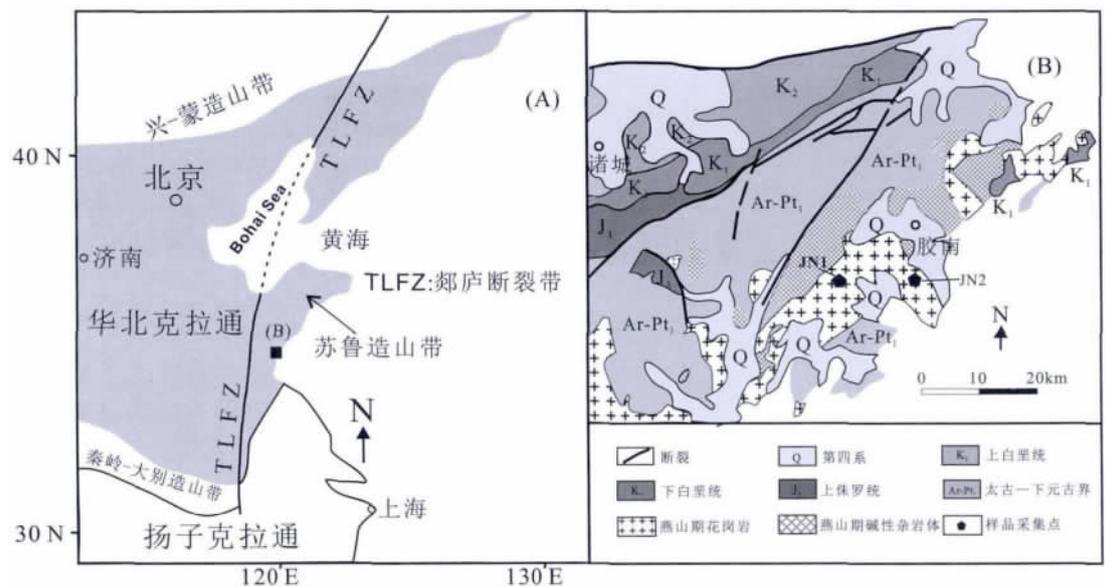


图 1 华北克拉通构造简图和研究区地质图

Fig. 1 Simplified tectonic map of the NCC (A) and geological map of the study area (B)

## 2 分析方法

胶南花岗岩的主量元素和微量元素 Zr 是在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分别采用 Axios PW 4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)(精度优于 3%)和电感耦合等离子质谱(POEMS 型 ICP-MS)完成(精度优于 5%<sup>[10]</sup>)。

## 3 锆石饱和温度的计算

由于岩浆在冷却过程中,矿物会和残余熔浆又达到热平衡,再者缺乏有关花岗岩起源温度的实验岩石学资料和足够灵敏的矿物温度计,所以对花岗岩岩浆初始温度的计算一直存在着困难。花岗岩岩浆大多是绝热式上升侵位的,岩浆早期结晶的温

度近似代表岩浆形成时的温度<sup>[1,11]</sup>。因此可以计算岩浆的早期结晶温度来近似获得其初始温度<sup>[1]</sup>。锆石温度计为估算岩浆初始温度提供了可能,这是因为锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物,它通常被镁铁质矿物、长英质矿物所包裹,其晶体能够在很长的地质时间上保持稳定,锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感,而其它因素对其没有明显影响<sup>[3]</sup>,因此可以认为锆石饱和温度近似代表花岗质岩石近液相线的温度,能作为一种简单有效的方法来估算岩浆结晶温度<sup>[6]</sup>。Watson 等<sup>[5]</sup> 给出一个锆石饱和温度计。温度在 750~1020℃ 范围内的水热实验,详细说明了深源熔体中的锆石的饱和行为是温度和组分的函数。该结果提供了一个锆石溶解度模型:

$$\ln D_{Zr}^{Zircon/melt} = \{-3.80 - [0.85(M-1)]\} + 12900/T,$$

式中： $D_{Zr}^{Zircon/melt}$  是化学计量的锆石中的 Zr 与熔体中的 Zr 的浓度比， $T$  为绝对温度(K)，全岩岩石化学参数  $M = (Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$  (阳离子比率)。这个关系适用于大多数的中性到长英质岩浆。由上述公式转换可得锆石饱和温度计算的关系式为：

$$t_{Zr}(^{\circ}C) = \{129000 [\ln D_{Zr}^{Zircon/melt} + 0.85M + 2.95]\} - 273.5.$$

若不做锆石中 Zr、Hf 的校正，纯锆石中 Zr 的含量为  $496000 \times 10^{-6}$ ，由于锆石在花岗质岩石中是副矿物，因此可用全岩 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。根据本文分析的花岗岩样品的主量元素组成和 Zr 的含量，计算了锆石饱和温度，结果列于表 1，由此可得该区花岗岩饱和温度为 815~899℃。

表 1 胶南花岗岩锆石饱和温度计算结果

Table 1 The results of zircon saturation temperatures for Jiaonan granites

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI	Total	t/℃	Ti	Zr	M ln D <sub>Zr</sub> <sup>Zircon/melt</sup>	
JN1-1	67.7	15.4	3.11	1.32	2.39	4.23	4.34	0.05	0.18	0.48	0.54	99.67	885	2872	302	0.92	7.41
JN1-2	67.2	15.1	3.21	1.28	2.42	3.95	4.17	0.06	0.18	0.49	0.23	98.27	892	2926	319	0.91	7.35
JN1-3	66.8	15.3	3.16	1.35	2.40	4.28	4.24	0.05	0.18	0.49	1.04	99.35	899	2944	352	0.94	7.25
JN1-4	65.7	14.9	2.92	1.21	2.21	3.89	4.21	0.05	0.18	0.47	4.79	100.56	875	2800	274	0.92	7.50
JN1-5	67.3	15.1	3.00	1.23	2.28	3.80	4.43	0.05	0.18	0.46	2.34	100.18	886	2752	299	0.90	7.42
JN1-6	67.0	15.2	3.08	1.22	2.37	3.73	4.21	0.05	0.18	0.47	1.24	98.69	869	2812	252	0.89	7.59
JN2-1	75.8	12.4	0.84	0.09	0.40	4.11	4.54	0.04	0.02	0.11	0.31	98.65	846	665	184	0.79	7.90
JN2-2	76.8	12.6	0.86	0.07	0.46	3.92	4.57	0.03	0.02	0.12	0.62	100.08	849	719	184	0.76	7.90
JN2-3	75.1	12.7	0.83	0.33	0.61	3.90	4.64	0.03	0.02	0.12	1.72	100.01	836	695	165	0.79	8.01
JN2-4	76.1	12.3	0.97	0.10	0.42	3.89	4.54	0.04	0.03	0.12	0.77	99.29	847	731	182	0.77	7.91
JN2-5	75.6	12.5	0.80	0.07	0.44	3.83	4.63	0.03	0.02	0.11	0.58	98.56	846	665	180	0.77	7.92
JN2-6	76.4	12.7	0.90	0.19	0.54	4.08	4.59	0.03	0.02	0.12	0.32	99.92	815	719	131	0.78	8.24

注：氧化物含量为质量百分数%，Ti、Zr 为 μg/g

### 4 讨论

由花岗岩中选出的锆石阴极发光照片可以看出(图 2)，多数锆石颗粒含有明显的内核，最近对该花岗岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年研究表明，这些锆石的内核中存在较老的年龄，同时还得出 116 Ma 的成岩年龄信息(待刊资料)，这些数据都能证明花岗岩中确实存在古老继承性锆石残留核，表明在花岗岩的源区 Zr 是饱和的，因此，计算出的锆石饱和温度大致可以代表岩浆源区的初始温度<sup>[3]</sup>。在地球化学图解 SiO<sub>2</sub>-A. R(图 3)可以看出，胶南二长花岗岩为碱性花岗岩，而碱性岩通常形成于岩石圈拉张构造背景，它主要来源于上地幔。苏鲁造山带晚侏罗世以来的拉张构造背景为源区岩石的部分熔融提供了减压条件。实验岩石学研究表明，熔融需要一定的流体，这可由锆石寄主岩石所含白云母脱水反应获得，而研究区软流圈上涌带来的含水矿物脱水产生的流体应为主要来源。胶南二长花岗岩的锆石饱和温度为 815~899℃，其岩石具有明显的花岗结构、SiO<sub>2</sub> 含量变化窄、Th/U>0.4 和副矿

物的特征，表明其为岩浆成因的花岗岩。根据吴福元等<sup>[1]</sup>的研究，属于高温花岗岩。对于高温花岗岩的成因，前人研究认为可能源区物质成分有关，高温花岗岩来源于镁铁质源岩<sup>[2]</sup>。另外，高温花岗岩的形成可能还与外来热的加入有关<sup>[3]</sup>。结合苏鲁造山带地区中生代的大地构造演化特征，推测岩浆的产生与软流圈上涌导致岩石圈减薄有关。苏鲁造山带燕山期 A 型花岗岩和石英二长岩的锆石饱和温度分别为 876~961℃<sup>[12]</sup>和 830~924℃<sup>[13]</sup>，与胶南二长花岗岩的锆石饱和温度接近。胶南花岗岩与它们形成时代基本相当，应具有与它们相同的构造背景。

中晚侏罗纪到白垩纪初，为古太平洋动力演化时期，中国东部处于以挤压和挤压—剪切为主的动力学状态中，白垩纪中期(约 110±5 Ma)以来为太平洋动力演化阶段，中国东部转入以拉张为主的构造背景<sup>[14]</sup>。苏鲁带基性超基性岩墙群的大量出露<sup>[15~17]</sup>和燕山期大规模强烈的岩浆作用<sup>[18,19]</sup>也表明白垩纪中期以来苏鲁带岩石圈处于拉张背景之下。另外，该地区晚侏罗世至晚白垩世形成的断陷

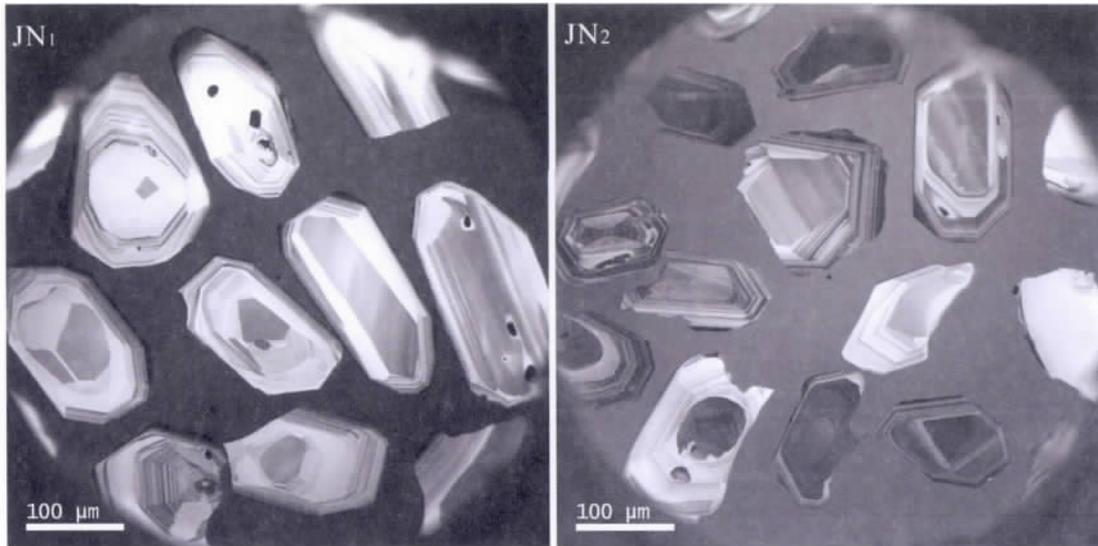
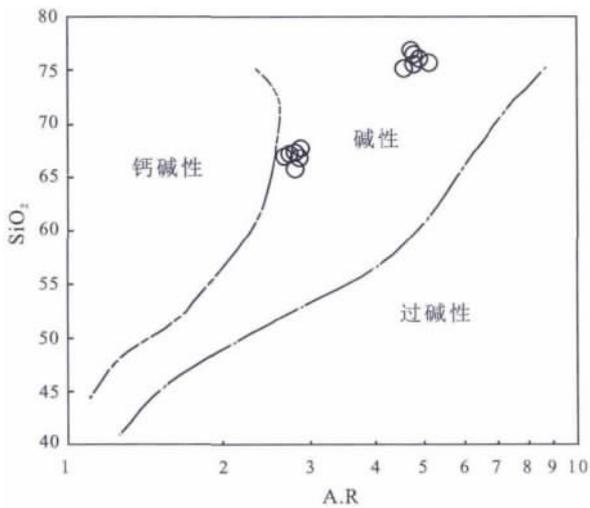


图2 胶南花岗岩中锆石阴极发光图像

Fig. 2 Zircon cathodoluminescence picture for Jiaonan granites



分子式代表重量百分比含量;  $A.R. = (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O) / (Al_2O_3 + CaO - K_2O - Na_2O)$

图3 胶南花岗岩  $SiO_2$ -A.R. 图解Fig. 3  $SiO_2$  vs. A.R. diagram of the granites from Jiaonan

盆地—胶莱盆地可作为苏鲁造山带岩石圈拉张最直接的证据之一<sup>[19]</sup>。

中国东部燕山期岩浆活动非常发育, 岩浆的分布面积达  $22.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全国岩浆岩出露总面积的 1/4。然而, 岩浆的热源从哪里来的呢? 通常认为有两个途径: 板块消减作用和岩石圈的拆沉作用<sup>[20]</sup>。拆沉作用可以导致软流圈上涌, 加热地壳使之熔融形成岩浆, 并导致地壳减薄和上隆<sup>[21]</sup>。张旗等<sup>[22]</sup>对中国东部燕山期与地壳拉张环境的埃达克岩研究, 推测中国东部燕山期大规模岩浆活动可能与地壳拉张环境下岩石圈减薄导致的软流圈地幔上涌及其引发的玄武岩底侵作用有关, 而与古太平

洋板块的俯冲作用无关。但岩石圈减薄和拆沉作用发生的原因、时间和机制依然存在争议。与此相反, 张宏福等<sup>[23]</sup>通过对华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及形成机理的研究, 认为太平洋板块的俯冲和扩张以及印度洋上的地幔柱引起的区域性热异常为华北东部中生代岩浆活动提供了热源, 但岩浆活动中无明显的古太平洋俯冲板片物质成分贡献。孙丰月<sup>[24]</sup>、王登红等<sup>[25]</sup>和徐贵忠等<sup>[19]</sup>通过对胶东地区广泛分布的燕山期基性岩墙群、碱性岩、花岗岩的成因以及金矿化研究认为与地幔柱的活动有关; 但至于中国大陆东部在中生代时期是否存在过地幔柱的问题, 从现有的资料来看, 似乎还都缺乏证据<sup>[26]</sup>。

华北克拉通破坏的拆沉模型首先由邓晋福等<sup>[27]</sup>提出, 他们认为下部岩石圈地幔的拆沉导致了华北岩石圈的减薄拉张, 并用此模型解释我国东部燕山期大规模岩浆活动的原因。Gao 等<sup>[28]</sup>根据对中国东部地壳成分和地壳结构的研究, 指出下地壳与岩石圈地幔的整体拆沉作用可能是中国东部岩石圈减薄的机制。近来, 吴福元等也提出下地壳与岩石圈地幔一起发生拆沉的观点<sup>[21, 28~31]</sup>。邓晋福等<sup>[32, 33]</sup>也修改了早先提出的模型, 提出了类似的想法。高山等<sup>[34]</sup>认为拆沉作用是指由于重力不稳定导致大陆下地壳或大洋地壳、岩石圈地幔沉入下伏的软流圈或地幔的过程。其中, 重力不稳定是拆沉作用的驱动力, 结果是造成岩石圈地幔和下地壳沉入软流圈, 热的软流圈物质上涌至地壳下部置换冷的上地幔。岩石圈加厚是大陆岩石圈和下地壳拆沉的前奏。岩石圈加厚的作用包括两方面: 一是促

使基性下地壳转变为榴辉岩;二是迫使冷的、密度大的岩石圈地幔沉入热的、浮力更大的软流圈中。

作者认为岩石圈拆沉作用是导致苏鲁带岩石圈拉张减薄构造背景的最可能的一种模式。在早侏罗世(205~185 Ma)由于华北板块和扬子板块可能发生了板内挤压,这就导致了苏鲁地壳的进一步加厚和加厚下地壳的榴辉岩化,榴辉岩具有独特物理和化学特性的,其密度比地幔橄榄岩的密度高 $0.2\sim 0.4\text{ g/cm}^3$ <sup>[35~37]</sup>,这就导致了重力的不平衡,随着重力的不平衡累积,在中侏罗世(185~165 Ma)苏鲁带榴辉岩化的部分下地壳与下伏的岩石圈地幔一起通过拆沉作用进入软流圈地幔中<sup>[38]</sup>,并引发了软流圈的上涌、苏鲁带的快速隆升、造山带的垮塌及岩石圈的拉张和减薄;由于榴辉岩的熔解温度低于地幔橄榄岩的熔解温度约 $300^\circ\text{C}$ <sup>[39]</sup>,随着榴辉岩进入软流圈地幔后被加热,玄武质的榴辉岩发生部分熔融产生了长英质的英云闪长—奥长花岗—花岗闪长质或埃达克质岩浆,并与上覆地幔橄榄岩发生大规模交代作用,这就产生了交代富集的岩石圈地幔<sup>[39]</sup>。之后交代富集的岩石圈地幔得到减压并发生部分熔融(130~110Ma<sup>[38]</sup>),这就产生了原始岩浆,原始岩浆在底侵上升成岩的过程中发生了分离结晶作用,最后在造山带的有利位置生成了花岗岩。可见,软流圈的上涌是岩浆热源的主要来源,同时苏鲁造山带壳—幔物质的交换主要是通过拆沉作用实现的,拆沉作用导致了苏鲁造山带山脉的隆升、大规模岩浆作用、岩石圈的伸展减薄、盆地的形成和山根消失等一系列地质现象。

## 5 结 论

(1) 胶南碱性花岗岩的锆石饱和温度介于 $815\sim 899^\circ\text{C}$ 。

(2) 胶南碱性花岗岩可能形成于由苏鲁造山带岩石圈下部发生(下地壳和岩石圈地幔)拆沉所导致拉张减薄的构造背景,岩浆形成的热源主要来源于上涌的软流圈地幔。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室胡晓燕、杨淑琴、胡静、包广萍老师的指导和帮助。

### 参考文献 (References):

[1] 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.  
 [2] Chappel B W, White A J R. Two contrasting granite types

[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-174.  
 [3] Calvin F M, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold Granites? Implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. Geology, 2003, 31(6): 529-532.  
 [4] Claiborne L L, Miller C F, Walker B A, Wooden J L, Mazdab F K, Bea F. Tracking magmatic processes through Zr/Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada [J]. Mineralogical Magazine, 2006, 70: 517-543.  
 [5] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 64: 295-304.  
 [6] King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia [J]. J. Petrol., 1997, 38: 371-391.  
 [7] Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime [J]. Earth Science Review, 2003, 62: 105-161.  
 [8] Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, Zhang S B, Liu X M, Wu F Y. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen [J]. Chem. Geol., 2006, 25: 267-283.  
 [9] Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi Y Q, Wang T, Feng G Y, Coulson I M. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China [J]. Lithos, 2008, 106, 365-379.  
 [10] Qi L, Gregoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards Newslett, 2000, 24: 51-63.  
 [11] 秦江锋,赖绍聪,李永飞. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. 西北地质, 2005, 38(3):1-6.  
 [12] 王涛,刘燊,胡瑞忠,冯彩霞,齐有强,冯光英,王长华. 苏鲁造山带 A 型花岗岩的元素地球化学特征及其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 676-688.  
 [13] 王涛,刘燊,胡瑞忠,冯彩霞,齐有强,冯光英,杨毓红. 苏鲁造山带碱性岩的成因研究——主微量元素地球化学证据[J]. 矿物学报, 2010, 30(2): 194-206.  
 [14] 任纪舜. 中国及邻区大地构造图(1:5000 000) [M]. 北京:地质出版社, 1999.  
 [15] Liu S, Zou H B, Hu R Z, Zhao J H, Feng C X. Mesozoic mafic dikes from the Shandong Peninsula, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Geochem. J., 2006, 40: 181-195.  
 [16] Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi Y Q, Wang T, Feng G Y, Ian M. Coulson. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China [J]. Lithos, 2008, 106: 365-379.  
 [17] Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Yu B B, Feng G Y, Qi Y

- Q, Wang T, Ian M. Coulson. Petrogenesis of late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong peninsula, eastern North China Craton and implications for the foundering of lower crust [J]. *Lithos*, 2009, 113 (3-4): 621-639.
- [18] Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G, Zhang M. Postorogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, 26: 733-746.
- [19] 徐贵忠, 周瑞, 闫臻, 余宏全, 王艺芬, 杨茂森, 李兵. 论胶东地区中生代岩石圈减薄的证据及其动力学机制 [J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(4): 368-380.
- [20] 张旗, 赵太平, 王焰, 王元龙. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 273-292.
- [21] 吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. *高校地质学报*, 2000, 6: 379-388.
- [22] 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 中国东部燕山期埃达克质岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236-244.
- [23] 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 孙敏, 郭锋, 英基丰, 汤艳杰, 张瑾, 牛利锋. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1271-1280.
- [24] 孙丰月. 胶东地区中生代区域构造演化与成矿[J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(4): 378-384.
- [25] 王登红, 林文蔚, 杨建民, 阎升好. 试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义[J]. *地球学报*, 1999, 20(2): 157-162.
- [26] 万天丰. 侏罗纪地壳转动与中国东部岩石圈转型[J]. *地质通报*, 2004, 23(9-10): 966-972.
- [27] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划[J]. *现代地质*, 1994, 8: 349-356.
- [28] Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y M, Zhao Z D, Hu Y K. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, 62: 1959-1975.
- [29] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. *长春科技大学学报*, 1999, 29: 313-318.
- [30] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 中国东部岩石圈减薄的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 51-60.
- [31] Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, Yuan H L, Yang J H. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, 70: 5013-5034.
- [32] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 赵兴国, 周肃, 吴宗絮. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代?[J]. *地学前缘*, 2006, 13: 105-119.
- [33] Deng J F, Su S G, Niu Y L, Liu C, Zhao X G, Zhou S, Wu Z X. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism [J]. *Lithos*, 2007, 96: 22-35.
- [34] 高山, 章军锋, 许文良, 刘勇胜. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 1962-1973.
- [35] 高山, 金振民. 拆沉作用(Delamination)及其壳-幔演化动力学意义[J]. *地质科技情报*, 1997, 16(1): 1-9.
- [36] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Review Geophysics*, 1995, 33: 267-309.
- [37] Levander A, Niu F, Lee C T A, Cheng X. Imaging the continental lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 2006, 416: 167-185.
- [38] Li S G, Huang F, Li H. Post-collisional delamination of the lithosphere beneath Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 46: 1487-1490.
- [39] Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts [J]. *Science*, 2007, 316: 412-417.