

文章编号: 1000-4734(2015)01-0044-07

大陆地壳熔融和酸性岩浆起源的热源问题

章清文^{1,2}, 朱丹^{1*}, 许英奎^{1,2}

(1. 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, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 地壳的熔融受控于地壳的岩石成分、减压作用、外来水的加入和地壳内部的地温条件等众多因素, 其中确定熔融所需热量的来源至关重要。本文简要回顾了板内环境下地壳熔融和酸性岩浆起源的相关研究, 总结了引发地壳熔融热源的热源问题。目前一般认为地壳熔融是由底侵的高温幔源岩浆引发的, 这种观点得到多学科资料的支持。不过底侵观点未能很好地解释大规模基性和酸性岩浆作用之间存在的显著不相关性和S型花岗岩的成因, 相关数值模拟结果也高估了岩浆侵入所能引发的地壳熔融规模。本文提出岩石圈的不均一拉张和地表拉张裂谷内沉积物的快速加积可使地壳内部形成较高的地温梯度, 进而造成以变沉积岩为主要成分的上地壳的大规模熔融和相关S型酸性岩浆作用的发生。

关键词: 地壳熔融; 板内环境; 底侵作用; 酸性岩浆起源; 不均一拉张; 沉积补偿

中图分类号: P581; P311.2

文献标识码: A

作者简介: 章清文, 男, 1987年生, 硕士, 地球化学专业. E-mail: zhangqingwen@live.cn

Heat source for continental crust melting and silicic magma generation

ZHANG Qing-wen^{1,2}, ZHU Dan¹, XU Ying-kui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Crustal melting is dominated by the factors of rock type, water content and decompression melting. It requires a high geothermal gradient within the crust and its heat source is therefore the key to understanding the crustal anatexis and generation of silicic magma. This paper reviews studies on crustal melting and tries to summarize the proposed heat source that induces crustal anatexis. In most cases, heat has been believed to originate from the hot, mantle-derived mafic magma underplated into the crust or at the Mohorovic Discontinuity level. However, the underplating model, to some extent supported by certain evidence, has difficulty explaining the irrelevant occurrence between massive silicic and mafic magmatism and the fact that the genesis of S-type granite magma is closely related to melting of the upper crust. Moreover, extant results of underplating simulation overestimate the potential effect of basaltic magma intrusion on the crustal melting. A hypothesis is proposed as an alternative explanation of the large-scale crustal melting: the combined effects of the depth-dependent lithospheric extension and crustal thickness compensation of the rapidly-deposited sediments leads to an abnormally high geothermal gradient inside the crust, resulting in extensive melting of the upper crust consisting of meta-sedimentary rock and the generation of S-type silicic magma.

Keywords: crustal melting; intraplate setting; underplating; depth-dependent extension; depositional compensation

* 通信作者, E-mail: zhudan@vip.gyig.ac.cn

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 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创新项目 (编号: SKLODG-ZY125-06)

与酸性岩浆起源密切相关的地壳熔融及其热量来源问题一直以来受到众多学者的广泛关注。一般认为,酸性岩浆主要来自中-基性岩浆的结晶分异作用、古老地壳的熔融、地壳对基性岩浆的同化混染作用以及先前侵入地壳岩石的重熔^[1-4]。从能量角度来说,引发地壳熔融的热量可能来自地壳从地幔获得的传导热、岩石在构造运动过程中生成的剪切热及富集于地壳的放射性元素的衰变热等^[5-8]。目前基性岩浆的底侵作用被认为是引发大陆地壳熔融的首要方式,并且在岩石部分熔融、玄武岩浆结晶分异和岩浆混合等一系列岩浆复杂演化过程中,底侵作用可生成数量众多、种类齐全的中、酸性岩浆岩^[1, 9-12]。一些地质、地球物理和地球化学方面的资料被认为可直接证明底侵作用的存在。

本文将列举支持底侵观点的相关证据,同时指出底侵不能解释的一些地质现象,还将总结前人与底侵相关的模拟结果并指出其存在的问题。本文认为侵入壳幔边界或地壳内部的高温玄武岩浆所释放的热量不足以引发大规模地壳熔融和相应的中、酸性岩浆作用,并提出板内大规模酸性岩浆岩可能的成因模式。

1 拉张条件下板内地壳熔融和酸性岩浆起源的研究进展

1.1 基性岩浆分异与酸性岩浆起源

有证据表明,大陆溢流玄武岩浆的分异及相关基性侵入岩的重熔可生成酸性岩浆。例如,峨眉山基性大火成岩省内发育的绝大多数流纹岩-粗面岩^[13]以及花岗岩^[14]的微量元素和同位素特征表明,这些岩石是由底侵的峨眉山玄武岩岩浆经过极端结晶分异形成的;非洲南部 Karoo 基性大火成岩省内的 Lebombo 地区发育有玄武岩浆分异和地壳基性岩部分熔融形成的流纹火山岩^[15-17],而印度西部 Salsette 岛的流纹岩和粗面岩也被认为是经德干玄武岩经历类似的演化过程形成的^[3]。实验研究表明地壳深部的榴辉岩经部分熔融可生成少量酸性熔体^[18]。不过单纯的基性岩浆分异不可能形成目前大量存在的花岗岩和流纹质火山岩,因为要生成一份流纹岩需要 6~8 份基性母岩浆发生结晶分异才能实现^[16],因此,大规模的酸性岩浆不可能直接来源于地幔的部分熔融。

1.2 造山带加厚地壳的熔融

正常稳定大陆地壳由于其内部较低的地温梯度(约 15 °C/km)不会发生熔融。如果地壳由于挤

压、推覆运动而加厚,那么其地温梯度会因受地幔加热及放射性元素衰变热、岩石剪切热等因素的影响而增加,造成地壳发生大规模变质作用甚至深熔作用^[5, 19-20]。以青藏高原南部地区为例,地震资料表明由于碰撞作用该地区地壳的最大厚度可达 80 km,为双倍厚度的地壳,同时地壳内部存在厚约 20 km 的低速带,这一低速带被认为是地壳岩石的部分熔融层^[21]。另外该地区还广泛发育新生代强过铝质淡色花岗岩,它们具有高硅高钾、铝过饱和、较高的初始锶和氧同位素比值以及没有发育伴生的中、基性岩浆岩等特征,被认为是由中、上地壳内部的泥质岩石熔融形成的^[22-25]。上述观点还得到实验研究的支持:在 0.6~0.8 GPa、750~770 °C 的条件下,富铝淡色花岗岩岩浆可由变泥质岩(如云母片岩)经脱水熔融形成^[26]。

然而,造山过程中地壳加厚造成的地壳增温效应是有限的。模拟表明,如果没有外来热量的加入,加厚地壳内部的温度不会进一步升高(如大大超过黑云母的脱水熔融温度),岩石的最大熔融度仅能达到 25% (图 1),生成的少量熔体往往停留原地形成混合岩^[7-8]。放射性元素(如 U、Th)的异常富

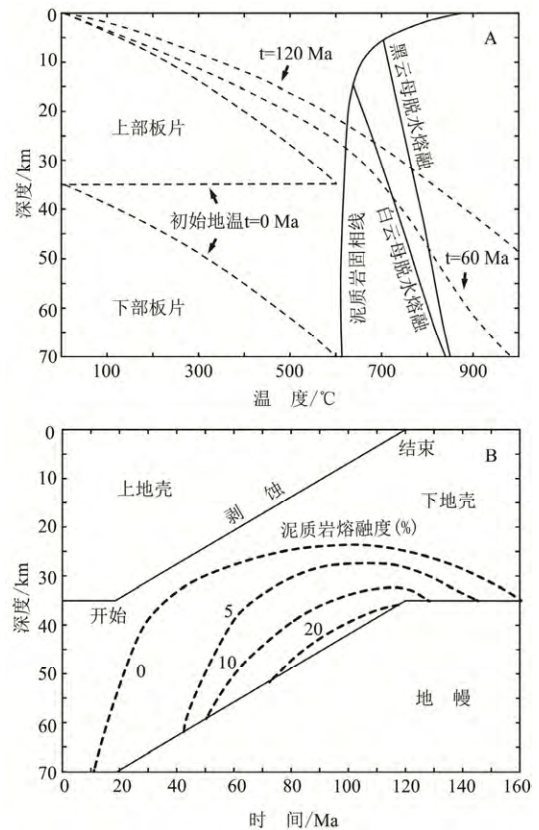


图 1 加厚地壳内部温度 (A) 和熔融状况 (B) 示意图 (据文献[8])

Fig. 1. Schematic diagram for internal thermal (A) and melting state (B) of tectonic thickened crust in orogenic belt.

集生热也被认为可显著提高地壳的地温梯度^[5,19],但要使这类元素在指定位置和时间内富集并积累大量热量是很困难的。因此,在造山带背景下加厚地壳在没有大量外来热量加热(如高温软流圈上涌、幔源岩浆侵入)的条件下不会大规模熔融。

1.3 幔源岩浆底侵与地壳熔融

一直以来,底侵作用被认为是地壳和地幔之间进行能量和物质交换的主要方式,即来自地幔的高温玄武岩浆上升到陆壳底部后,由于其相对密度较高而发生横向迁移并在冷却结晶过程中并释放热量,使地壳发生熔融(图2)。底侵观点之所以被广为接受是因为一些地质、地球物理和地球化学等方面的资料显示,在不同构造背景下,玄武岩浆侵入下地壳的地质事实确实存在:

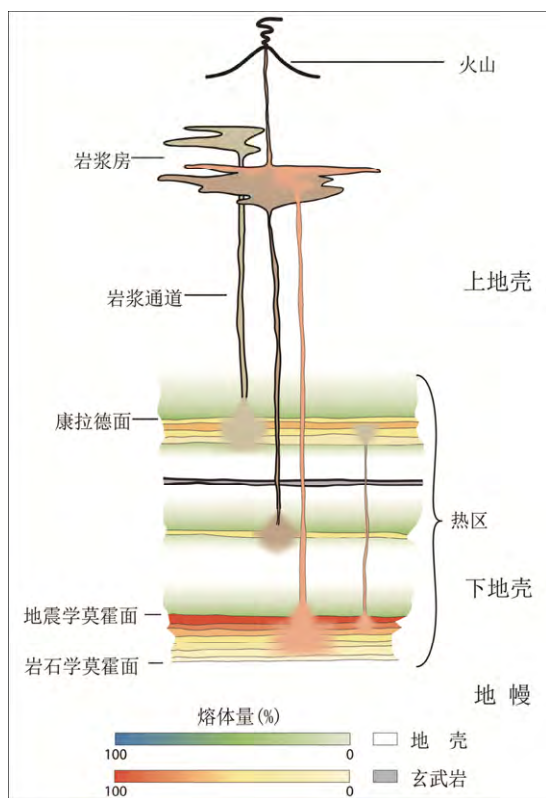


图2 基性幔源岩浆底侵引发地壳熔融示意图,据文献[9]
Fig. 2. Schematic diagram for crustal melting induced by intrusion of mantle-derived mafic magma.

(1) 地震资料显示下地壳由铁镁质岩石组成,这些岩石被认为是由基性岩浆侵入形成的^[27-29],一些火山岩携带的镁铁质捕虏体内发现高压矿物组合,指示其来自较深的下地壳,其形成也被认为与岩浆底侵作用有关^[30,31];

(2) 直接观察下地壳岩石可发现底侵的痕迹,如意大利北部 Ivrea-Verbano 地区出露有海西期侵入

下地壳、后因阿尔卑斯造山运动抬升、剥蚀而暴露地表的巨大基性杂岩体^[32];

(3) 某些岩浆岩组合的地球化学特征被认为是与底侵相关的壳-幔相互作用的结果,如 Zhou 等通过研究微量元素特征认为中国华南燕山晚期($K_1 \sim K_2$)的钙碱性 I 型花岗岩是该地区在洋-陆消减过程中,地壳内部的变质火成原岩被来自含水地幔楔的玄武岩浆底侵后熔融形成的^[12,33]。

上述证据不能从能量角度定量研究岩浆侵入对地壳温度结构的影响,因而一些学者根据底侵理论的基本观点,通过设定一定的岩浆侵入方式、岩浆或围岩成分、岩浆温度和初始地温等条件,运用地球动力学模拟的手段究底侵作用。表1总结了部分相关研究和结论,在此进行简要回顾。

首先,对于玄武岩浆侵入引起的地壳升温幅度大小和底侵热效应持续时间长短的问题,已有研究得到的结果相差很大。早期对单层玄武岩浆侵入地壳进行的简单实验模拟和计算表明,高温基性岩浆($1200\text{ }^\circ\text{C}$)侵入地壳(温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$)后可以在短时间内($10^2 \sim 10^3$ 年)引起围岩的大量熔融^[11]。Annen 等的多层多期基性岩浆侵入(岩床)模型的模拟结果表明,基性岩浆侵入后虽然地壳内部显著升温,但从岩浆侵入到地壳岩石开始熔融之间存在至少 0.34 Ma 的“潜伏期”,岩浆侵入 1.6 Ma 后地壳大幅升温(可使被侵入岩石熔融且熔融度最高达 65%),侵入停止后,地壳的升温区域(图2中的“热区”)会立即降温,熔融岩石会在 0.5 Ma 后重新固化^[34]。Pedersen 等的模拟也得出了类似的结论^[35]。总之,上述研究总体上得出岩浆底侵对地壳加热效应显著但持续的时间较短的结论。

已有模拟研究对于底侵所能引起的地壳熔融规模的问题也存在分歧。据 Huppert 等的计算,在 500 m 厚的单层基性岩床岩床侵入地壳后(不考虑岩床底部的热量散失),熔体的热对流可引起顶部围岩熔融并可生成厚达 300 m 的流纹熔体^[11]。如果仅考虑热传导因素,岩浆侵入引起的地壳熔融规模将显著减小: Petford 和 Gallagher 的模拟结果表明, 1000 m 的基性岩浆一次性侵入地壳。那么地壳熔融生成的熔体厚度很小以致可忽略不计(17 m),但如果这些岩浆分多期侵入地壳则生成的相应熔体厚度也不超过 100 m ^[36]。Pedersen 等的模拟结果^[35]与之接近。在考虑玄武岩浆结晶分异的因素后,Annen 等得到较高的酸性熔体生成量:总厚度为 8 km 的玄武岩浆分多次侵入地壳后最多可生成 1.9 km 的酸性熔体,且其中由玄武岩浆分异形成的酸性熔体比例较高(表2)^[34]。

表 1 底侵相关模拟研究汇总
Table 1. Compiled results of underplating modeling

作者和年代	Huppert 等 (1988)	Pedersen 等 (1998)	Petford 等(2001)	Annen 等 (2002)	Dufek 等(2005)	
模型类型	一维热传导 - 对流	一维热传导	一维热传导	一维热传导	二维热传导-对流	
地壳初始地温	恒定温度: 500 °C	稳态地温: 12.9 °C/km	稳态地温: 13.5 °C/km	稳态地温: 10, 20, 30 °C/km	稳态地温: 18 °C/km	
侵入岩浆温度(°C)	1200	1250	1100, 1300	1100, 1300	~1200	
侵入岩浆总厚度 (m)	500	20000	1000	8000	5000	
侵入深度(km)	未指定	28	21~48	20, 30	34, 38, 42	
侵入方式	单层岩床侵入	未说明	单层单次岩床侵入	多层多期岩床侵入	岩墙群随机侵入	
侵入频率 (厚度/直径和次数)	500 m×1 次	未说明	1000 m×1 次	20 m×50 次	50 m×160 次	1~10 m, 多次
侵入持续时间 (Ma)	0.0001	未说明	0.015	0.01	1.6	10
地壳熔融生成的最大熔体厚度 (m)	300	850	17	92	975	1157
玄武岩浆分离结晶生成的最大熔体厚度 (m)	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	880	1139
侵入-熔融比例*	0.600	0.008	0.017	0.092	0.123	0.286

注: *指侵入的玄武岩总厚度与地壳熔融生成熔体厚度之比。

表 2 玄武岩浆底侵代表性模拟结果 (引自文献[34])
Table 2. Representative results of the underplating modeling

侵入位置 (深度)	被侵入的壳-幔组合	被侵入壳幔岩石类型 (w(H ₂ O)/%, 固液相线温度/°C)		
上-下地壳边界(20 km)	干上地壳-干下地壳 (DC-DB)	上地壳: 花岗闪长岩 (0.3,800/1210); 下地壳: 麻粒岩 (0,1090/1250)		
	干上地壳-湿下地壳 (DC-WB)	上地壳: 花岗闪长岩 (0.3,800/1210); 下地壳: 角闪岩 (0.6,1010/1080)		
	湿上地壳-干下地壳 (WC-DB)	上地壳: 泥质岩 (1.7,700/1210); 下地壳: 麻粒岩 (0,1090/1250)		
	湿上地壳-湿下地壳 (WC-WB)	上地壳: 泥质岩 (1.7,700/1210); 下地壳: 角闪岩 (0.6,1010/1080)		
壳-幔边界 (30 km)	湿下地壳-地幔	下地壳: 角闪岩 (0.6,1010/1080); 地幔: 玄武岩 (0.3,1010/1080)		
侵入位置 (深度)	侵入玄武岩温度/°C, w(H ₂ O)/%	玄武质岩浆分离结晶生成的酸性熔体厚度/m	地壳部分熔融生成的酸性熔体厚度/m	酸性熔体总厚度/m
上-下地壳边界(20 km)	1300, 0.3	530	300	830
	1100, 2	880	20	900
	1300, 0.3	470	975	1445
	1100, 2	800	400	1200
壳-幔边界 (30 km)	1300, 0.3	1400	390	1790

注: 表中玄武质岩浆侵入频率为 5.0 m/ka, 总厚度为 8 km, 初始地温梯度为 20 °C/km, 持续时间为 1.6 Ma.

2 底侵存在的问题

2.1 底侵模式不能解释的岩浆岩分布特征

按照底侵观点, 地壳熔融的热量来自底侵的高温幔源基性岩浆。然而大规模的基性和酸性岩浆作用相对独立的分布特征并不能用底侵作用进行合理的解释。一方面, 虽然基性大火成岩省内存在强烈的玄武岩底侵作用, 但同时代伴生的酸性岩规模十分有限 (其中西伯利亚暗色岩系几乎没有发育酸性岩^[37]) 且主要由基性岩浆分异或先前侵入地壳的基

性岩重熔生成^[3,16,38] (表 3), 而按照底侵观点^[9,34], 基性大火成岩省应该发育大量与底侵作用相关的中、酸性岩浆作用。另一方面, 酸性岩浆岩占绝对优势的酸性大火成岩省 (如澳大利亚东部 Whitsunday 大火成岩省主要发育流纹质熔结凝灰岩, 见表 4) 伴生的基性岩数量很少, 而按照底侵成因观点, 地壳深处存在大量基性岩浆侵入是上述酸性大火成岩省形成的前提条件, 这是底侵观点难以解释的又一难题。

另外, 底侵模式不能解释与地壳熔融密切相关的 S 型花岗岩的成因。S 型花岗岩由于具有富铝、

表 3 主要基性大火成岩省及相关的中、酸性岩浆作用

Table 3. Representative mafic large igneous provinces (LIP) and their associated intermediate and silicic magmatism

名称	基性岩浆岩	年代/Ma	伴生岩浆岩类型	酸性岩比例	酸性岩成因	文献
德干	大陆溢流玄武岩	61.5±1.9	粗面英安质、流纹质火山岩、正长岩、花岗岩	1%	AFC+重熔	[3,37,41]
Karoo-Ferrar	大陆溢流玄武岩	约 183	英安质、流纹质火山岩和火山碎屑岩、正长岩、花岗岩	2%	AFC+重熔	[15,17,37,42]
北大西洋	大陆溢流玄武岩	62~53	流纹岩、花岗岩	低	AFC	[37]
哥伦比亚河	大陆溢流玄武岩	17.5~6	流纹岩、玄武质安山岩	低	不详	[2,37,41]
峨眉山	大陆溢流玄武岩	约 260	粗面岩、流纹岩、花岗岩、正长岩	低	AFC+重熔	[38,43,44]
西伯利亚	大陆溢流玄武岩	250.3±1.1	不详	极低	不详	[37,45]
Paraná-Etendeka	大陆溢流玄武岩	130	英安质、流纹质火山岩、安粗岩	3%	AFC	[37]
埃塞俄比亚	玄武岩	30.9~26.5	过碱性流纹质火山岩、粗面岩	低	部分熔融、AFC	[46, 47]

表 4 主要酸性大火成岩省及相关的中、基性岩浆作用

Table 4. Representative silicic large igneous provinces (LIP) and their associated intermediate and mafic magmatism

名称	酸性岩浆岩	年代/Ma	伴生岩浆岩类型	基性岩比例	酸性岩成因	文献
Whitsunday	英安质-流纹质熔凝灰岩	105~120	安山、玄武岩	低	结晶分异、部分熔融	[41,48]
Sierra Madre Occidental (SMO)	英安质-流纹质熔凝灰岩	27~34	玄武岩	低	结晶分异、部分熔融	[37,41]
Chon Aike-Antarctic Peninsula	流纹质熔凝灰岩	140~188	玄武质安山岩、安山岩	低	部分熔融	[49,50]
Taupo Volcanic Zone (TVZ)	流纹质熔凝灰岩	0~2	安山岩、玄武岩	<20%	结晶分异、部分熔融、AFC	[51-53]

低 Ca 和 Na、高 K/Na 和 Rb/Sr 比值、高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值，以及局部常含变沉积岩包体等特征^[23, 39-40]，反映其原岩为中、上地壳的变沉积岩，其形成过程中没有幔源物质的参与。而玄武岩浆底侵必定会使地幔物质加入到地壳中来，形成的花岗岩常表现出有别于 S 型花岗岩的准铝质、高 Ca 和 Na、低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 等特征。

2.2 底侵相关模拟存在的问题

虽然底侵的相关计算和模拟定量地研究了岩浆底侵引发的地壳熔融规模等问题，有助于加深对岩浆侵入和地壳熔融之间关系的认识，然而其中某些研究还存在一定问题。以 Annen 等的研究^[34]为例，如果考虑酸性熔体形成岩浆的过程中熔体分离不彻底的因素，那么其结果可能高估了基性岩浆底侵生成的可分离岩浆量。流变学研究表明，由于酸性熔体粘度较大，酸性岩浆源区的岩石熔融度需要大于 20%~25% 才能分离出可迁移的岩浆^[11,54]，此时得到的实际可分离的酸性岩浆量将大大减少。如果不加以更正，根据这一计算结果容易得出大规模地壳熔融可由玄武岩浆底侵产生的结论。

3 板内拉张条件下地壳熔融的可能模式

为了解释大规模的酸性岩浆作用（如增生造山带内）的成因，本文提出了以下观点（图 3）：在不均一拉张条件下，岩石圈发生局部变窄（necking）

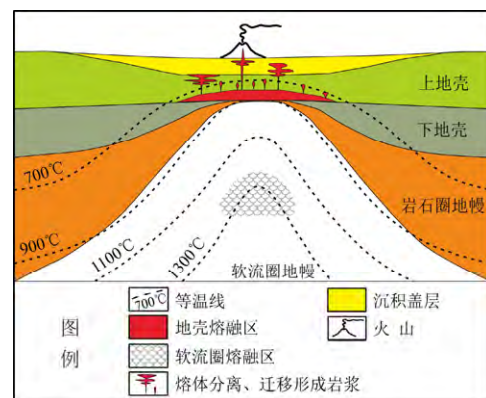


图 3 岩石圈不均一拉张和地表沉积快速加积作用下的地壳熔融示意图

Fig. 3. Schematic diagram for crustal melting induced by combined effects of the depth-dependent extension of the lithosphere and the rapid syn-rift deposition on Earth's surface.

和软流圈物质的被动上涌^[6,55-56],同时岩石圈由于重力均衡作用在地表形成负地形(如断陷盆地、裂谷),这些负地形内部会发生显著的同拉张沉积作用并积累巨厚的沉积物^[57],这些沉积物将补偿上地壳因拉张而减小的厚度。在上述因素的共同作用下,拉张后残余上地壳底部可能会被高温软流圈直接加热并达到岩石的熔融条件,进而发生深熔作用并生成酸

性熔体。这些熔体在熔融度达到酸性熔体的分离阈值后开始从源区分离并向上迁移,接着侵入地壳浅部或喷出地表。该过程伴随基性岩浆(由软流圈岩石减压熔融生成)的分离、迁移、侵入以及可能发生的分离结晶、与地壳的同化混染作用(AFC)。虽然岩浆底侵作用对地壳熔融的促进作用不可否认,但本文未将其视为造成地壳酸性岩浆的主要来源。

参 考 文 献:

- [1] Bryan S E, Ferrari L, Reiners P W, et al. New insights into crustal contributions to large-volume rhyolite generation in the mid-Tertiary Sierra Madre Occidental province, Mexico, revealed by U-Pb geochronology [J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49(1): 47-77.
- [2] Chesley J T, Ruiz J. Crust-mantle interaction in large igneous provinces: Implications from the Re-Os isotope systematics of the Columbia River flood basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154(1-4): 1-11.
- [3] Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Sethna S F. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(1): 44-54.
- [4] 莫宣学. 青藏高原岩浆岩成因研究: 成果与展望 [J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1693-1703.
- [5] Douce A E P, Humphreys E D, Johnston A D. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland, western North America [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(3-4): 290-315.
- [6] Stratford W, Thybo H. Crustal structure and composition of the Oslo Graben, Norway [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3-4): 431-442.
- [7] Thompson A B. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths (Special Publications) [J]. *Geological Society*, 1999, 168(1): 7-25.
- [8] Thompson A B, Connolly J A. Melting of the continental crust: some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B8): 15565-15579.
- [9] Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 505-539.
- [10] Dufek J, Bergantz G W. Lower crustal magma genesis and preservation: a stochastic framework for the evaluation of basalt-crust interaction [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(11): 2167-2195.
- [11] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental-crust [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 29(3): 599-624.
- [12] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [13] Xu Y-G, Chung S-L, Shao H, et al. Silicic magmas from the Emeishan large igneous province, Southwest China: Petrogenesis and their link with the end-Guadalupian biological crisis [J]. *Lithos*, 2010, 119(1-2): 47-60.
- [14] Zhong H, Campbell I H, Zhu W-G, et al. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(5): 1374-1395.
- [15] Cleverly R W, Betton P J, Bristow J W. Geochemistry and petrogenesis of the Lebombo rhyolites [J]. *Geological Society of South Africa Special Publication*, 1984, 13(1): 171-195.
- [16] Cox K G. Continental magmatic underplating [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Physical and Engineering Sciences*, 1993, 342(1663): 155-166.
- [17] Miller J A, Harris C. Petrogenesis of the Swaziland and northern Natal rhyolites of the Lebombo rifted volcanic margin, South East Africa [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(1): 185-218.
- [18] Skjerlie K P, Douce A E P. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa; Implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(2): 291-314.
- [19] Sandiford M, Hand M. Australian Proterozoic high-temperature, low-pressure metamorphism in the conductive limit [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 138(1): 109-120.
- [20] Thompson A B, England P C. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 929-955.
- [21] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results [J]. *Science*, 1996, 274(5293): 1684-1688.
- [22] Lefort P. Manaslu leucogranite: A collision signature of the Himalaya: a model for its genesis and emplacement [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(NB11): 545-568.
- [23] 莫宣学. 青藏高原新生代碰撞: 后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [24] 莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(3): 351-367.

- [25] 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等. 西藏曲珍过铝花岗岩地球化学特征及地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 845-854.
- [26] Douce A E P, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(4): 689-710.
- [27] Ducea M N, Kidder S, Zandt G. Arc composition at mid-crustal depths: insights from the Coast Ridge Belt, Santa Lucia Mountains, California [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1703.
- [28] Rudnick R. Growing from below [J]. *Nature*, 1990, 347(6295): 711-712.
- [29] Wendlandt R F, Baldrige W S, Neumann E R. Modification of lower crust by continental rift magmatism [J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(9): 1759-1762.
- [30] Ducea M N, Saleeby J B. The age and origin of a thick mafic-ultramafic keel from beneath the Sierra Nevada batholith [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 133(1-2): 169-185.
- [31] Lee C T, Rudnick R L, Brimhall G H. Deep lithospheric dynamics beneath the Sierra Nevada during the Mesozoic and Cenozoic as inferred from xenolith petrology [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2001, 2(12): 1-27.
- [32] Peressini G, Quick J E, Sinigoi S, et al. Duration of a large mafic intrusion and heat transfer in the lower crust: a SHRIMP U-Pb zircon study in the Ivrea-Verbano Zone (Western Alps, Italy) [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(6): 1185-1218.
- [33] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3-4): 269-287.
- [34] Annen C, Sparks R S J. Effects of repetitive emplacement of basaltic intrusions on thermal evolution and melt generation in the crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(3): 937-955.
- [35] Pedersen T, Heeremans M, Der Beek V. Models of crustal anatexis in volcanic rifts: applications to southern Finland and the Oslo Graben, southeast Norway [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 132(2): 239-255.
- [36] Petford N, Gallagher K. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(3-4): 483-499.
- [37] Bryan S E, Riley T R, Jerram D A, et al. Silicic volcanism: An undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2002, 362: 97-118.
- [38] Zhong H, Zhu W-G, Chu Z-Y, et al. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(1-2): 112-133.
- [39] Chappell B W, White A J R. I- and S-type Granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 1992, 83(1-2): 1-26.
- [40] Clemens J D. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 61(1-2): 1-18.
- [41] Bryan S E, Peate I U, Peate D W, et al. The largest volcanic eruptions on Earth [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 102(3-4): 207-229.
- [42] Encarnacion J, Fleming T H, Elliot D H, et al. Synchronous emplacement of Ferrar and Karoo dolerites and the early breakup of Gondwana [J]. *Geology*, 1996, 24(6): 535-538.
- [43] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan Flood Basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889-892.
- [44] Xu Y-G, Luo Z-Y, Huang X-L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(13): 3084-3104.
- [45] Reichow M K, Pringle M S, Al'mukhamedov A I, et al. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1-2): 9-20.
- [46] Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G, et al. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(11): 2003-2032.
- [47] Baker J, Snee L, Menzies M. A brief Oligocene period of flood volcanism in Yemen: implications for the duration and rate of continental flood volcanism at the Afro-Arabian triple junction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 138(1-4): 39-55.
- [48] Bryan S E, Ewart A, Stephens C J, et al. The Whitsunday Volcanic Province, Central Queensland, Australia: lithological and stratigraphic investigations of a silicic-dominated large igneous province [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 99(1-4): 55-78.
- [49] Pankhurst R J, Leat P T, Sruoga P, et al. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1998, 81(1-2): 113-136.
- [50] Riley T R, Leat P T, Pankhurst R J, et al. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(6): 1043-1065.
- [51] Charlier B L A, Wilson C J N, Lowenstern J B, et al. Magma generation at a large, hyperactive silicic volcano (Taupo, New Zealand) revealed by U-Th and U-Pb systematics in zircons [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(1): 3-32.
- [52] Deering C D, Bachmann O, Dufek J, et al. Rift-related transition from andesite to rhyolite volcanism in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand) controlled by crystal-melt dynamics in mush zones with variable mineral assemblages [J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(11): 2243-2263.
- [53] Wilson C J N, Houghton B F, McWilliams M O, et al. Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New-Zealand: a review [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 68(1-3): 1-28.
- [54] Vigneresse J L, Barbey P, Cuney M. Rheological transitions during partial melting and crystallization with application to felsic magma segregation and transfer [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6): 1579-1600.
- [55] Huisman R, Beaumont C. Depth-dependent extension, two-stage breakup and cratonic underplating at rifted margins [J]. *Nature*, 2011, 473(7345): 74-U85.
- [56] Wilson D, Aster R, West M, et al. Lithospheric structure of the Rio Grande rift [J]. *Nature*, 2005, 433 (7028): 851-855.