

岩体生长过程的传热学制约及其岩浆熔融效应

白俊豪^{1,2}, 朱丹¹, 黄智龙¹

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, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

摘要:研究岩体生长过程的传热学制约及其引起的岩浆熔融效应能为我们认知地壳演化提供新的思路 and 手段。本文从年代学和测量技术两个方面综述岩体(或者岩浆房)逐渐长大的证据,然后运用 Heat-3D 程序简单模拟了 Mount Stuart 和 Tenpeak 岩体逐渐长大过程的传热学制约,结合年代学证据证明 Mount Stuart 岩体是逐渐长大的,并且每期次岩浆之间有很长的时间间隔,而 Tenpeak 岩体的长大可能是岩浆连续不断侵入或者各期次岩浆的短时间间隔所致。岩体逐渐长大过程引起的岩浆熔融效应是很明显的,模拟实验表明,岩浆多期次侵入地壳时生成的酸性熔体量更接近于地质观察事实。

关键词:岩体;岩体生长;传热学;岩浆熔融效应

中图分类号:P588.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2011)02-0204-06

Constrains of Heat Transfer in Pluton Growth and Corresponding Magma Melting Effects

BAI Jun-hao^{1,2}, ZHU Dan¹, HUANG Zhi-long¹

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

Abstract: The research on constrains of heat transfer in the pluton growth and their corresponding magma melting effects provides new thoughts and methods for recognizing the crust evolution. This paper reviewed evidences of the incremental growth of pluton (or magma chamber) from the both perspectives of the geochronology and the measuring technique and roughly simulated the constrains of heat transfer in the growing processes of the Mount Stuart and the Tenpeak pluton by Heat-3D program. On the basis of the geochronology evidences, this study proved that the magmatic intrusions with long intervals caused the incremental growth of the Mount Stuart pluton and that the continuous magmatic intrusions or intrusions with short time intervals caused the growth of the Tenpeak pluton. This study found that the corresponding magma melt effects resulted from the incremental growth of pluton are notable. The simulated experiments indicated that the amount of granitic melts generated by multiple magma intrusions is very close to that of the geological observation.

Key words: pluton; incremental growth; evidences; heat transfer

地壳垂直增生的一种重要方式是大量幔源岩浆侵入地壳或喷出地表,这个过程涉及岩浆的运移、聚集和分异,以及岩体或者岩浆房的生长过程。许多学者通过地球化学方法来了解这一过程。而由地球化学方法建立的模型大多数不能解释具体的物理和地质过程;这些具体过程属于地球动力学问题,即岩浆动力学的问题^[1]。岩浆动力学研究认为岩体(或

者岩浆房)是逐渐长大的。本文将在这样的认识基础上讨论岩体长大过程的传热学制约及由此引起的岩浆熔融效应。

1 岩体(或者岩浆房)逐渐长大的证据

很多证据证实了在漫长的地质过程中玄武质岩浆不断侵入地壳使得岩体逐渐长大,这些证据源自于

收稿日期:2010-07-15 收到,09-13 改回

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411401);中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-06);国家自然科学基金资助项目(40772059);矿床地球化学国家重点实验室自主研究科研课题(2007KJJBZ-2)

第一作者简介:白俊豪(1986—),男,硕士研究生,从事计算地球动力学研究。E-mail:bjh721@yahoo.cn.

通讯作者:朱丹。E-mail:zhudan@vip.gyig.ac.cn.

地质学、年代学、地层学和岩石学资料^[2~11]。如文献[12]作者用岩石学、地球化学和年代学的数据证明加拿大北部科迪勒拉 Emerald 湖岩体是由岩浆以薄岩床的形式多期次侵入而成的。先进的测量技术为岩体逐渐长大提供了更直接的证据^[13,14]。地球物理数据显示下地壳是多层次的,这可能是由于幔源玄武质岩浆多期次侵入中下地壳^[15,16]所致。下面将从年代学和大地测量学两个方面介绍岩体逐渐长大的证据。

1.1 测量技术为岩体逐渐长大提供的证据

利用先进的测量技术能观测到地表是不断抬升的,这种现象可以解释岩浆不断侵入地壳使地表抬升,为新注入的岩浆提供占位空间。如用全球定位系统和干涉合成孔径雷达测量黄石火山口地表表明,2004年黄石火山口地表快速抬升,速度达7 cm/a,远高于以前观测的结果。估计这是由一个体面达1200 km³的岩床侵入于火山口下部10 km处所致;岩浆侵入量为0.1 km³/a^[14]。文献[13]的作者用测量技术监测美国加利福尼亚 Long valley 中心区的地表,数据显示在30 a中该区地表抬升了75 cm。大地测量学数据显示,1992~2006年玻利维亚西南部 Uturuncuv 火山中心地区地表抬升速度为2 cm/a^[17]。雷达数据显示,2003~2006年南美洲 Lazufre 火山区的抬升速率为3 cm/a^[18]。以上数据虽说时间尺度比较小,但可以作为岩体不断长大的证据,因为岩体长大过程是很漫长的,这些现象表征的就是这漫长过程中的一个很小的时段。

1.2 岩体逐渐长大的年代学证据

从时间尺度上来讲,测量技术证据是短尺度的,它测量的时间区段有可能是单期(次)岩浆侵入地壳所持续的时间,甚至更短。而年代学证据是长尺度的。一个岩体不同岩层的年龄差别能够证明岩浆侵入的多期性,并且能准确地厘定岩浆各个侵入期次的时间间隔^[19]。如智利南部 Andean Patagonian 岩体的 Rb-Sr 和 K-Ar 定年数据表明,在其长大的150 Ma 间至少有三期岩浆侵入,持续的时间约为25~40 Ma^[20]。Emerald Lake 岩体的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄的表明该岩体生长时间小于1 Ma,约为70±5 ka,结合地球化学数据认为岩体是岩浆多次侵入而不断长大的结果^[12]。同样,加利福尼亚 Tuolumme 岩基的 U/Pb 年龄数据表明它的长大是由于不同期次岩浆的侵入,并且愈往中心区岩体年龄愈小,但是不同期次岩浆的锆石结晶年龄相差达数百万年,这远远大于热传导估算的冷却年龄^[21],很可能是由于岩浆多

期次侵入地壳并且各期次之间有时间间隔所致。Matzel^[19]测定的华盛顿北瀑布 Mount Stuart 岩基锆石 U/Pb 年龄表明其生长时间为5.5 Ma,并且其间4次高流量岩浆事件持续的时间都比较短,这个结果与岩体的构造和地质接触关系相符合。他测定同一地区 Tenpeak 岩体的生长时间为2.6 Ma,岩浆的侵入没有明显的期次区别,他认为是岩浆不断侵入的结果^[19,21]。

Michel 等^[22]用热表面电离同位素稀释质谱法(ID-TIMS)测得智利南部 Torres del Paine 杂岩体比较精确的 U/Pb 年龄;数据表明其上层顶板年龄为12.59±0.02 Ma,底板年龄为12.50±0.02 Ma,这与其他学者的研究结果相吻合。他又结合地质观察证明该岩体系岩浆多期次侵入的产物,并且是从上而下逐渐长大的。这个杂岩体的锆石年龄是有效的,因为杂岩体的热传导数据表明,每次岩浆侵入后在下一期次到来之前就已经固化;各期岩浆的锆石不具同源性,而且在与地壳混染的过程中岩浆中的锆石可能不饱和,使每期锆石的生长过程中没有混入前期锆石的晶体^[23]。

总之,以上证据表明,许多火成岩岩体是逐渐长大的,而不是一蹴而就的。因而岩体的热演化过程比因单期次侵入而长大的要复杂得多,所引起的岩浆熔融效应也更加明显。

2 热传递过程对岩体生长过程的制约

岩体逐渐长大过程的热学制约研究是要从传热学的角度用热模拟方法探讨限定岩体生长的过程。热模拟方法是以数学、物理和传热学为理论依据建立相应的模型,编制程序进行计算;主要计算岩体的温度变化,因为温度影响岩石的熔融程度和熔体的粘度^[24]。温度主要分为侵入岩浆的固液相温度和地壳岩石的固液相温度,选择的温度不同,热模拟出来的结果也会有所不同^[25]。

2.1 热模拟的理论基础

热模拟问题是一个一维或者多维的瞬态传热问题。其理论基础是,导入系统的总热量+内部热源发热量=导出系统的总热量+内能增加。这里仅介绍一维的状况:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \rho L = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial X^2},$$

式中, ρ 为密度; T 为温度; C_p 为热容; X 为熔融度(岩浆刚刚侵入时 $X=1$,完全固化后为 $X=0$;上地壳或下地壳发生熔融时,比如15%的质量熔融变成了岩浆,则 $X=0.15$); t 为时间; L 为熔化潜热(la-

tent heat of fusion); κ 为导热系数(thermal conductivity)。方程在液相线和固相线之间的有限差分变换为:

$$\rho C_p \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t} + \rho L \frac{X_i^{P+1} - X_i^P}{\Delta t} = \kappa \frac{X_{i-1}^P - T_i^P}{\Delta x^2} + \kappa \frac{T_{i+1}^P - T_i^P}{\Delta x^2}。$$

式中, Δt 是时间步长(时间 $P, P+1$ 的时间间隔); Δx 是空间间隔, 单元 $i-1$ 和 $i+1$ 分别在单元 i 的下面和上面。高于液相线和低于固相线时, 熔化潜热为零, 因此单元 i 在时间 $P+1$ 的温度为:

$$T_i^{P+1} = \frac{\Delta t}{\rho C_p} \left(\kappa \frac{T_{i-1}^P - T_i^P}{\Delta x^2} + \kappa \frac{T_{i+1}^P - T_i^P}{\Delta x^2} \right) + T_i^P。$$

2.2 岩体逐渐长大的传热学制约

2.2.1 不同厚度岩体的冷却时间

不同厚度岩体的冷却时间是不同的。用 Heat-3D 软件模拟岩浆在上地壳中的温度变化(<http://geodynamics.lanl.gov/Wohletz/Heat.htm>), 同时证明岩体是不断长大的。首先假设要模拟的地壳厚度为 30 km, 岩浆的侵入深度是 10 km。单次侵入岩浆的厚度分别为 0.5、1、2、3、4 和 5 km, 地表温度 25°C, 地温梯度 20°C/km, 侵入玄武岩浆的温度是 1250°C^[26,27]。其他参数如表 1。计算结果见表 2。

表 1 模拟计算所用到的主要物理参数值

Table 1 Values of some major physical parameters used in the model calculation

参 量		单 位	参 考 文 献
密度(ρ)	上地壳	2650 kg/m ³	[28]
	玄武岩浆	2800 kg/m ³	[29],[30,31]
热容(C_p)	上地壳	1370 J/kg	[32]
	玄武岩	1480 J/kg	[30],[32]
热导率(k)	上地壳	3.0 J/s·m·K	[33]
	玄武岩浆	2.6 J/s·m·K	[33]

表 2 模拟计算结果

Table 2 The model results

岩体厚度/km	冷却时间/Ma	最高温度/°C
0.5	0.024	457
1	0.024	686
2	0.096	693
3	0.21	700
4	0.41	698
5	0.67	701

由上表可知, 侵入岩浆愈厚其冷却时间愈长, 这从时间尺度上解释了岩体是不断长大的。从冷却时间的长短及最高温度可以推断侵入岩浆愈薄, 产生

的熔体量就愈少, 这是因为薄层岩浆的热量很快传给了冷的地壳, 在扩散的过程中只能熔掉很少一部分地壳, 厚的岩体能不断地向围岩输入热量, 足以“积聚”而加热围岩。总之, 厚层岩浆能比较充分地利用热去熔融围岩, 而薄层岩浆的热大部分用来加热围岩, 熔融围岩的热量就有限了。

2.2.2 岩体长大过程的传热学制约

以 Mount Stuart 和 Tenpeak 岩体为例, 两岩体分别简称为 MS 岩体和 T 岩体, 均为长英质-花岗质侵入体, 产于加拿大山脉 Coast Plutonic Complex 南部边缘角闪相的 North Cascades 变质地体中。晚中生代至早新生代期间该区发生岛弧岩浆作用, 形成 MS 和 T 两岩体。North Cascades 变质地体的厚度超过 30 km, 岩石主要是片岩和片麻岩^[17]。

MS 岩体的模拟参数: 结晶时的压力为 0.2~0.4 GPa^[34,35], 以 0.1 GPa=3.3 km 计算, 岩浆的侵位深度为 6.6~13.2 km。假设侵入深度是 10 km, 保守的估计厚度为 5 km, 因为岩体的厚度大于 2.5 km, 小于 6.6 km^[19], 岩体长大过程中不可避免会发生壳熔, 因此岩体的厚度要大于侵入岩浆的厚度^[25,36]。地表温度 25°C, 地温梯度 20°C/km, 地壳厚度 30 km。其他各种参数采用表 2。按这样的条件, 模拟对象应是 5 km 厚的岩浆单次侵入地壳, 离地表 10 km 处(上地壳)。

计算结果表明, 岩浆侵入 0.67 Ma 后, 最高温度降低到 701°C, 由 U/Pb 定年得到的岩体长大年龄约为 5.5 Ma, 这可证明岩体不是单次侵入的, 而是多期次侵入。需要强调的是岩体的温度达 700°C 左右时, 其中锆石 Pb 的封闭温度早已达 900°C 以上^[37]。

如果把 5 km 厚的岩浆分成 5 次(每期次 1 km) 侵入地壳(假设下期岩浆到来之前这一期刚好固化), 采取下增生方式(后来岩浆侵入在前者之下); 计算表明岩浆侵入于地壳 14~15 km 处时, 冷却到 620°C 约需 48000 a。由此保守的估算, 每期岩浆的冷却时间约为 48000 a, 5 次侵入岩浆的冷却时间约为 0.24 Ma。这比单次侵入岩浆 0.67 Ma 的冷却时间小得多; 如果侵入的次数更多, 这个时间应该更少, 可见岩浆也不能以这种方式侵入。推测岩浆可能有两种侵入方式: 各期次间有一定的时间间隔, 或者为无间隔的连续侵入。U/Pb 年龄数据表明, 岩体形成的过程中有 4 个高岩浆流量事件, 持续时间小于 1 Ma, 由此推断岩浆各期次间是有时间间隔的并且间隔比较大

对 T 岩体用同样的方法计算其单次岩浆侵入

的冷却时间。该岩体厚约 3 km, 结晶时的压力为 0.7~1 GPa^[38,39], 换算成深度为 23.1~33 km; 如取岩浆侵入深度 25 km, 其他参数与上例相同。计算表明, 岩体冷却到 742℃ 约需花 1 Ma; 这时岩体温度早已到了锆石 Pb 的封闭温度。然而, 岩体 U/Pb 年龄为 2.4 Ma, 且岩浆侵入过程中没有高岩浆流量事件^[19]。这说明岩体的长大不是岩浆单次侵入的结果, 而系多期次的, 且可能是岩浆连续不断侵入或各期次的时间间隔较短。

3 岩体逐渐长大过程中引起的岩浆熔融效应

玄武质岩浆侵入地壳并重新熔融生成酸性岩浆, 岩浆还为其提供热量^[2,26,36,40,41]。其实没有玄武质岩浆的侵入也能生成酸性岩浆, 如造山带地壳加厚时产生的放射热^[40,42]。本文只讨论玄武质岩浆侵入地壳后自身结晶分异并引起壳熔的情况。

为了说明岩体逐渐长大过程引起的岩浆熔融效应, 假设岩体是单期次侵入长大的, 再用前人得到的酸性岩浆量与实际地质观察相比较。模拟 1 km 厚的岩浆单次侵入下地壳(约 21~48 km), 经 3000 a 生成的酸性岩浆的最大厚度为 17 m(图 1)^[27]。这个结果与许多地质观察不相符, 如 Ivrea-verbano 带的一个基性杂岩体的厚约 10 km, 生成的酸性岩浆有 1 km 厚^[43]。这个岩体的侵入深度为 20 ± 5 km^[44,45], 与文献^[27]作者的结果很接近。

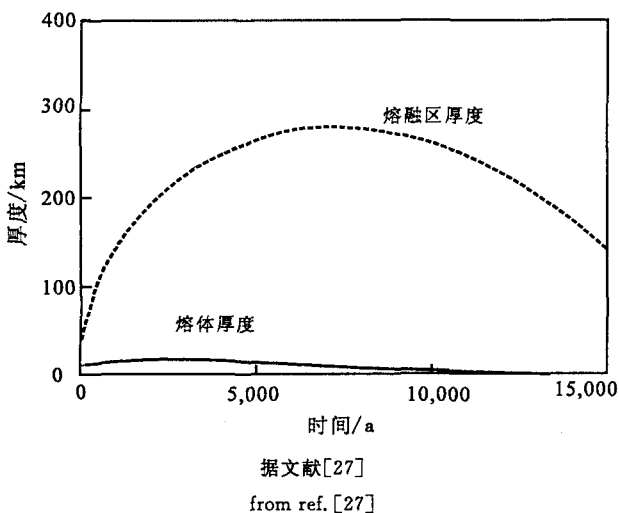


图 1 1 km 厚的岩浆单次侵入地壳形成的熔融区域厚度和生成的酸性熔体量

Fig. 1 The thickness of granitic melt column (dotted line) and compacted granitic melt (solid line) formed by one instantaneous intrusion of 1 km thickness of magma into the crust

同时, 文献^[27]的作者假设, 岩体是岩浆多期次侵入长大的, 他把 1 km 厚的岩浆分成 5 次侵入, 时间间隔为 200 a, 模拟结果生成酸性熔体的最大厚度为 45 m(图 2)。可见多期次侵入地壳的岩浆所产生壳熔体的量比单次的大得多, 如果把 1 km 厚的岩浆合理地再多分几次侵入, 并且时间间隔控制好, 应该能得到更多的熔体。

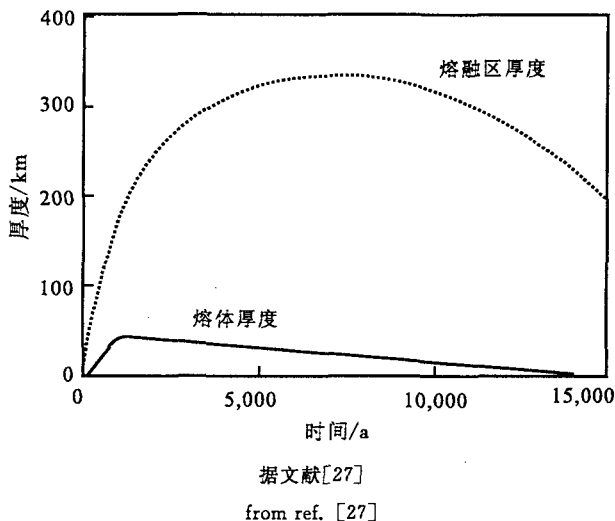


图 2 1 km 厚的岩浆多次侵入地壳形成的熔融区厚度和生成的酸性熔体量

Fig. 2 The thickness of granitic melt column (dotted line) and compacted granitic melt (solid line) formed by five intrusions of 1 km thickness of magma into the crust

更具说服力的是 Annen 建立的模型。挥发份(如地壳的水和岩浆的水)的加入使模拟过程更接近于地质体的演化过程^[46]。假设总厚 8 km 的岩浆分 160 期(次)侵入地壳 20 km 处, 每次侵入的厚度为 50 m, 时间间隔为 10 000 a, 持续时间为 1.6 Ma。结果表明, 当含水量很小, 温度为 1300℃ 的玄武质岩浆侵入富水的地壳时, 因地壳熔融和玄武质岩浆结晶分异得到的酸性熔体分别为 1150 m 和 540 m(图 3)^[25]。这时产生的酸性岩浆量相当可观, 基本符合地质观察结果, 也证明了岩体的长大不是一蹴而就, 而是慢慢生长的。

4 小 结

(1) 本文讨论的岩体以水平岩床侵入为主, 这只是理想化了的结果, 因为岩浆的侵入形态各有差异^[47]。

(2) 岩体的长大过程是一个动态过程, 因此有必要综合考虑岩浆流动的速度场、物质密度和能量守恒问题(尤其是对岩浆房而言)。

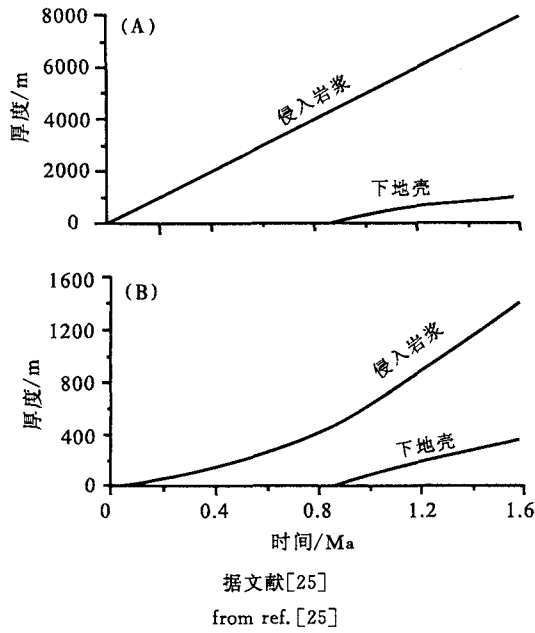


图3 地壳熔融和玄武质岩浆结晶分异而形成的部分熔融区厚度(图A)及生成的酸性熔体厚度(图B)
Fig. 3 The thickness of partially melted zone and compacted granitic melt formed by basalt intrusion and by partial melting of the upper crust

(3) 岩体长大过程的热学制约必须与其他传统方法相结合,因为热模拟方法存在不确定性。

(4) 大陆地壳的大部分花岗岩体是地壳重熔的结果^[40],所以模拟岩体逐渐长大过程引起的岩浆熔融效应很有意义。而建立模拟模型必须综合考虑岩浆的侵入方式、期次和时间间隔,因此有必要搞清楚岩体是逐渐长大还是单次侵入生成的。

参考文献 (References):

- [1] Zellmer G F, Annen C. An introduction to magma dynamics [J]. Geol. Soci., London, Special Publications, 2008, 304 (1): 1—13.
- [2] Hildreth W. gradients in silicic magma chambers-implications for lithospheric magmatism[J]. J. Geophys. Res., 1981, 86 (NB11): 153—192.
- [3] Shaw H R. Links Between Magma-Tectonic Rate Balances, Plutonism, and Volcanism[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90 (B13): 11275—11288.
- [4] Lipman P W. The Roots of Ash Flow Calderas in Western North America; Windows Into the Tops of Granitic Batholiths [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(B10): 8801—8841.
- [5] Bailey R A, Dalrymple G B, Lanphere M A. Volcanism, Structure, and geochronology of Long Valley Caldera, Mono County, California[J]. J. Geophys. Res., 1976, 81(5): 725—744.
- [6] Pasquare F, Tibaldi A. Structure of a sheet-laccolith system revealing the interplay between tectonic and magma stresses at Stardalur Volcano, Iceland[J]. J. Volcan. Geother. Res., 2007, 161(1—2): 131—150.
- [7] Cruden A R, Tobisch O T, Launeau P. Magnetic fabric evidence for conduit-fed emplacement of a tabular intrusion; Dinkesby Creek Pluton, central Sierra Nevada batholith, California [J]. J. Geophys. Res.-Solid Earth, 1999, 104(B5): 10511—10530.
- [8] Brown E H, McClelland W C. Pluton emplacement by sheeting and vertical ballooning in part of the southeast Coast Plutonic Complex, British Columbia [J]. Geol. Soc. America Bull., 2000, 112(5): 708—719.
- [9] Cruden A R. On the emplacement of tabular granites [A]. William Smith discussion meeting on granitic magma dynamics [C]. London, England, 1997.
- [10] Michel J, Baumgartner L, Cosca M, Ovtcharova M, Putlitz B, Schaltegger U. High precision ages from the Torres del Paine Intrusion, Chile [J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 2006, 87(Fall Meeting Suppl.).
- [11] Brown M, Solar G S. Granite ascent and emplacement during contractional deformation in convergent orogens [J]. J. Str. Geol., 1998, 20(9—10): 1365—1393.
- [12] Coulson I M, Villeneuve M E, Dipple G M, Duncan R A, Russell J K, Mortensen J K. Time-scales of assembly and thermal history of a composite felsic pluton: constraints from the Emerald Lake area, northern Canadian Cordillera, Yukon [J]. J. Volcan. Geother. Res., 2002, 114(3—4): 331—356.
- [13] Tizzani P, Battaglia M, Zeni G, Atzori S, Berardino P, Lanari R. Uplift and magma intrusion at Long Valley caldera from InSAR and gravity measurements [J]. Geology, 2009, 37(1): 63—66.
- [14] Chang W L, Smith R B, Wicks C, Farrell J M, Puskas C M. Accelerated uplift and magmatic intrusion of the Yellowstone caldera, 2004 to 2006 [J]. Science, 2007, 318(5852): 952—956.
- [15] Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. The seismic velocity structure of the deep continental crust, in: Fountain D M, Arculus R, Kay R W. (Eds.) Continental Lower Crust [J]. Continental Lower Crust, Developments in Geotectonics, 1992, 23: 1—43.
- [16] Wenzel F, Brun J P. A deep reflection seismic line across the Northern Rhine Graben [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 104(2—4): 140—150.
- [17] Sparks R S J, Folkes C B, Humphreys M C S, Barford D N, Clavero J, Sunagua M C, McNutt S R, Pritchard M. EUturuncu volcano, Bolivia; Volcanic unrest due to mid-crustal magma intrusion [J]. American J. Sci., 2008, 308(6): 727—769.
- [18] Ruch J, Anderssohn J, Walter T R, Motagh M. Caldera-scale inflation of the Lazufre volcanic area, south America: Evidence from InSAR [J]. J. Volcan. Geother. Res., 2008, 174(4): 337—344.
- [19] Matzel J E P, Bowring S A, Miller R B. Time scales of plu-

- ton construction at differing crustal levels: Examples from the Mount Stuart and Tenpeak intrusions, North Cascades, Washington[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 2006, 118(11—12): 1412—1430.
- [20] Halpern M. Regional geochronology of Chile south of 50 degrees latitude[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1973, 84(7): 2407—2422.
- [21] Coleman D S, Gray W, Glazner A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California[J]. *Geol.*, 2004, 32(5): 433—436.
- [22] Michel J, Baumgartner L, Putlitz B, Schaltegger U, Ovtcharova M. Incremental growth of the Patagonian Torres del Paine laccolith over 90 ka[J]. *Geol.*, 2008, 36(6): 459—462.
- [23] Miller J S. Assembling a pluton... one increment at a time[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 511—512.
- [24] Annen C, Pichavant M, Bachmann O, Burgisser A. Conditions for the growth of a long-lived shallow crustal magma chamber below Mount Pelee volcano (Martinique, Lesser Antilles Arc) [J]. *J. Geophysical Res. — Solid Earth*, 2008, 113: B07209.
- [25] Annen C, Sparks R S J. Effects of repetitive emplacement of basaltic intrusions on thermal evolution and melt generation in the crust[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 203(3-4): 937—955.
- [26] Bergantz G. Underplating and partial melting; implication for melt generation and extraction[J]. *Sci.*, 1989, 245: 1093—1095.
- [27] Petford N, Gallagher K. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, 193(3-4): 483—499.
- [28] Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. The seismic velocity structure of the deep continental crust[A]. D M Fountain, Arculus R, Kay R W. *Continental lower crust [M]. Developments in Geotectonics*, 1992, 23: 1—43.
- [29] Kay R W, Kay S M, Arculus R J. Magma genesis and crustal processing[A]. Fountain D M, Arculus R, Kay R W. *Continental Lower Crust [M]. Developments in Geotectonics*, 1992, 23: 423—445.
- [30] Laube N, Springer J. Crustal melting by ponding of mafic magmas: A numerical model[J]. *J. Volcan. Geother. Res.*, 1998, 81(1—2): 19—35.
- [31] Singer B S, Myers J D, Linneman S R, Angevine C L. The thermal history of ascending magma diapirs and the thermal and physical evolution of magmatic conduits[J]. *J. Volcan. Geother. Res.*, 1989, 37(3—4): 273—289.
- [32] Bohron W A, Spera F J. Energy-constrained open-system magmatic processes II: Application of energy-constrained assimilation-fractional crystallization (EC-AFC) model to magmatic systems[J]. *J. Petrol.*, 2001, 42(5): 1019—1041.
- [33] Chapman D S, Furlong K P. Thermal state of the continental lower crust[A]. Fountain D M, Arculus R, Kay R W. *Continental Lower Crust [M]. Developments in Geotectonics*, 1992, 23: 179—199.
- [34] Plummer C C. Dynamothermal contact metamorphism superposed on regional metamorphism in the pelitic rocks of the Chiwaukum Mountains area, Washington Cascades: Summary[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1980, 91(7): 386—388.
- [35] Evans B W, Berti J W. Revised metamorphic history for the Chiwaukum Schist, North Cascades, Washington[J]. *Geol.*, 1986, 14(8): 695—698.
- [36] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental-crust[J]. *J. Petrol.*, 1988, 29(3): 599—624.
- [37] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. *Chem. Geol.*, 2001, 172(1—2): 5—24.
- [38] Dawes R L. Mid-crustal, Late Cretaceous plutons of the North Cascades: Petrogenesis and implications for the growth of continental crust[J]. *Seattle, Univ. of Washington*, 1993: 272.
- [39] Zen E A, Hammarstrom J M. Magmatic epidote and its petrologic significance[J]. *Geology*, 1984, 12(9): 515—518.
- [40] Pitcher W S. Granites and yet more granites forty years on [J]. *Geo. Rundschau*, 1987, 76: 51—79.
- [41] Fountain J C, Hodge D S, Shaw R P. Melt segregation in anatectic granites: A thermomechanical model[J]. *J. Volcanol. Geother. Res.*, 1989, 39: 279—276.
- [42] England P C, Thompson A B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism; I, Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. *J. Petrol.*, 1984, 25(4): 894—928.
- [43] Sinigoi S Q, James E, Mayer A, Demarchi G. Density-controlled assimilation of underplated crust, Ivrea-Verbania Zone, Italy[J]. 1995, 129(1—4): 183—191.
- [44] Sills J D. Granulite facies metamorphism in the Ivrea Zone, N. W. Italy, Schweiz. *Mineral [J]. Petrogr. Mitt.*, 1984, 64: 169—191.
- [45] Rivalement G, Garuti G, Rossi A, Siena F, Sinigoi S. Existence of Different Peridotite Types and of a Layered Igneous Complex in the Ivrea Zone of the Western Alps[J]. *J. Petrol.*, 1981, 22(1): 127—153.
- [46] Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *J. Petrol.*, 2006, 47(3): 505—539.
- [47] Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, Gray W, Taylor R Z. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? [J]. *GSA Today*, 2004, 14(4—5): 4—11.