大型花岗岩基形成和演化的深部动力学过程：滴水构造、钾质火山作用与地表地质过程

曾令森[1],刘 静[2], Jason B Saleeby[3]
ZENG Ling-sen[1], LIU Jing[2], Jason B Saleeby[3]

1. 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室,北京 100037;
2. 中国科学院青藏高原研究所,北京 100085;
3. 美国加州理工学院地质与行星科学系,加州 帕萨迪纳 91125

1. *Key Laboratory for Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
2. *Institute of Tibetan Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100871, *China*;
3. *Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA* 91125, *USA*

摘要:以美国内华达山脉复合岩基为例,系统评述了与大型花岗岩基的形成、演化相关的深部地球动力学过程及构造地貌学响应。在大陆岛弧环境下,基性岩浆的底侵作用促使下地壳发生角闪岩脱水部分熔融,在岩基根部形成高密度的石榴辉石岩,岩基根部最终发生重力失稳,形成滴水构造;在地貌上反映为滴水构造对应区域的沉降和相应的张性构造,在岩浆作用上则表现为软流圈地幔上涌和残余富集岩石圈地幔的低程度部分熔融,形成钾质火山岩。这种高度动态的深部动力学过程是维持大型花岗岩基地区较高高程或促使这些区域高程骤然增加的重要因素。

关键词:大型花岗岩基;滴水构造;钾质岩浆作用;地表过程
中图分类号:P588.12+1 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-2552(2006)11-1257-17

Zeng L S, Liu J, Saleeby J B. Root zone processes for the formation and evolution of a large-scale granitic batholith: drip structures, potassic volcanism and Earth surface processes. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(11):1257-1273

Abstract: Taking the Sierra Nevada batholith for example, the authors give a comprehensive review of the root zone processes and tectonogeomorphic responses during the formation and tectonic evolution of a large-scale granitic batholith. In a continental arc environment, the processes responsible for the formation and evolution of a large-scale batholith involve (1) basaltic magma underplating near the lower crust-upper mantle; (2) dehydration and partial melting of lower crustal material, production of a large volume of granitic magma and related high-density garnet pyroxenite at the root of a batholith; (3) occurrence of negative gravity instability; (4) removal of such high-density material beneath a granitic batholith as drips, either spontaneously or induced by nearby deformation; (5) potassic basaltic volcanism by low degrees of partial melting of the residual lithospheric mantle; (6) large-magnitude surface subsidence and tensional deformation directly above the drip structure; and (7) abrupt rise of mountain belts. Highly dynamic drip tectonics as imaged in the southern Sierra Nevada batholith may have been a major factor that maintains the high elevation of the Sierra Nevada mountain range.

Key words: large-scale granitic batholith; drip structure; potassic volcanism; surface processes

收稿日期:2006-05-31;**修订日期**:2006-09-11
科技项目:科技部"973"基础研究项目(2003CB716504)、国土资源部百人计划项目(A2503)和中国地质调查局项目(编号:1212010610105)资助。
作者简介:曾令森(1970-),男,博士,从事大地构造、构造地质和地球化学研究。E-mail:zeng@ccsd.org.cn

固体地球科学的研究已经进入到一个新的阶段,学科之间高质量的对话、交流和强烈的相互渗透已成为最新的发展趋势。最典型的例子是,在大型花岗岩基的研究中,如20世纪90年代中期美国自然基金会资助的南内华达山脉大陆动力学计划(Southern Sierra Continental Dynamics Project),通过综合野外地质、岩石矿物、实验岩石学、地球化学、地貌学、地球物理学等多方面的最新技术,研究大型花岗岩基形成演化过程中浅部和深部地质过程的关系、深部物理和化学过程的地表反应等,取得了多方面突破性的进展,更新了对大型花岗岩基形成演化过程中物理作用和化学作用的传统认识。通过这些研究,固体地球科学家们更关注的是如何提出更关键的、首要的、近期内可能解决或获得重大突破的问题,如正在实施的10个大学联合参加的'岩基'项目(Batholith Project),研究对象是加拿大西部中生代形成的海岸岩基(Coastal Batholith),主要回答2个问题:①定量地确定大陆岛弧底部超基性物质的数量和成分如何随时间的变化而变化。②它们是否滞留在岩石圈内部,或循环回到深部软流圈地幔,何时以何种方式进行?

大陆地壳的形成、生长和演化是地球科学最基本的科学问题之一。地球表面喷出的岩浆绝大多数为玄武质,而大陆地壳的平均成分为花岗质。如何从初始的玄武质物质形成平均成分为花岗质的大陆地壳一直是固体地球科学研究的主题之一。大量的观测结果表明大陆岛弧岩浆作用是显生宙花岗质地壳生成的最主要的机制[1,2]。大陆岛弧的一个显著特征是,长达上千公里的山系主要由大型花岗岩基组成,如太平洋东岸的科迪勒拉山系。因此,研究大型花岗岩基的物质组成、结构构造特征及其动力学过程是解决上述基本问题的关键。在大量多学科综合研究的基础之上,地球科学家们逐渐认识到要生成一个30 km厚的花岗质岩基,必须通过深部地壳(主要是基性下地壳)的部分熔融、不同压力下的岩浆分异,同时产生相等或更大厚度的超基性残留根[3~6]。这种残留根具有与高压或超高压变质作用形成的榴辉岩相似的物质组成和密度特征。这种高密度残留根的形成和演化是研究大型花岗岩基根部动力学的关键问题。对该问题的研究不仅有助于深化理解花岗质大陆地壳的成因和稳定机制,而且对探讨以花岗岩基为基底的大型山脉及其周缘盆地、地貌景观的形成演化、岩浆作用等深部和浅部动力学过程具有重要意义。例如,对近地表地质与深部地质过程之间耦合程度的确定是我们在多大程度上可以根据地表地质来反演地球深部地质和地球物理过程的基础。

在本文中,笔者将结合新的数据和观测结果,评述以美国西部内华达山脉为代表的大型花岗岩基形成过程中高密度岩基根产生的物理、化学机制和岩基形成后高密度岩基根的构造动力学过程及其效应。在此基础上,提出有关未来花岗岩基研究中重要的有待深入研究的问题。

1 高密度岩基根的产生:实验岩石学基础

高密度壳根的产生有3种过程:①岩浆分异,在大型基性岩浆房中,强烈的分异作用可以产生高密度的堆晶岩,如在许多蛇绿岩套和大型层状侵入体的底部都存在这种成因的堆晶岩。但这种岩石组合并不形成负密度梯度,堆晶岩与下伏超基性岩的密度相似或小一些。②递进变质反应,玄武质物质在俯冲作用中通过高压低温变质反应而转变成榴辉岩,如大别-苏鲁超高压榴辉岩,或干的基性大陆下地壳在水化作用下形成榴辉岩,如挪威西部片麻岩区的榴辉岩[7~9]。这种过程导致榴辉岩与围岩之间出现正密度差,这在重力上是不稳定的。③部分熔融反应,在岛弧或其他构造环境下,基性下地壳发生部分熔融,形成大规模的以石榴子石和辉石为主要组分的残留体[3,4,10~12]。这种残留体具有较高的石榴子石组分,密度高于下伏岩石圈地幔,达0.3 g/cm^3,形成负密度梯度,这在重力上也是不稳定的。由此可见,上述3种作用的时间尺度、所形成的岩石组合和所造成的构造效应很不一样。在不同的构造环境下,到底是哪一种作用起主导作用,应该通过地表地质观测或地球物理探测加以鉴别。

加州理工学院Wyllie领导的研究小组自20世纪70年代开始,进行了大量的含水基性-中性岩石组合的部分熔融实验,并在90年代初期取得了重要进展[10~13]。实验结果表明:含水基性-中性岩石组合在超过1GPa(深度大约为30 km)的压力条件下,部分熔融可形成典型的科迪勒拉型花岗质岩浆和相应的石榴子石+单斜辉石的高密度残留体(图1)。这种残留体具有和榴辉岩相似的矿物组成和密度。该实验结果在随后的一系列实验中得到证实[14~17]。这些部分熔融反应的主要形式为:

(1) Hbl+Pl+Q+H_2O→Gt+Cpx+Sph+melt

(2) Hbl+Pl+Q→Gt+Cpx+melt

其中Hbl、Pl、Q、Gt、Cpx和Sph分别为角闪石、斜长石、石英、石榴子石、单斜辉石和尖晶石。

在图1中,虚线为石榴子石出现和不出现的边界,实线是饱和水基性物质的固相线。角闪石脱水反应区间包括2部分:狭窄的低压/高温区(ABDE),辉石是主要产物;宽阔的低温/高压区(BCEF),石榴子石和含硬玉辉石是脱水部分熔融的产物。对于完全水化的角闪岩(Hbl+Pl)封闭系统,在压力大于或等于1GPa时,脱水部分熔融的固相线和饱和水基性物质固相线相吻合[12]。

这些结果证明,在大陆岛弧环境下俯冲板块的递进脱水作用导致俯冲带上盘软流圈地幔甚至岩石圈地幔发生部分熔融作用,产生玄武质岩浆。这些岩浆底侵于大陆地壳和地幔的边界附近,进一步诱发基性下地壳的部分熔融,产生高密度岩基根,同时初始基性岩浆的高压分异作用也产生石榴子石+辉石或石榴子石+角闪石的超基性岩组合,从而进一步增强了大型花岗岩基根部与下伏岩石圈地幔的负密度梯度。

2 下地壳/上地幔的重力失稳

如上所述,在固体地球内部,多种地质过程(温度差异、成分差异或相变)均可导致岩石圈内部不同深度物质之间、

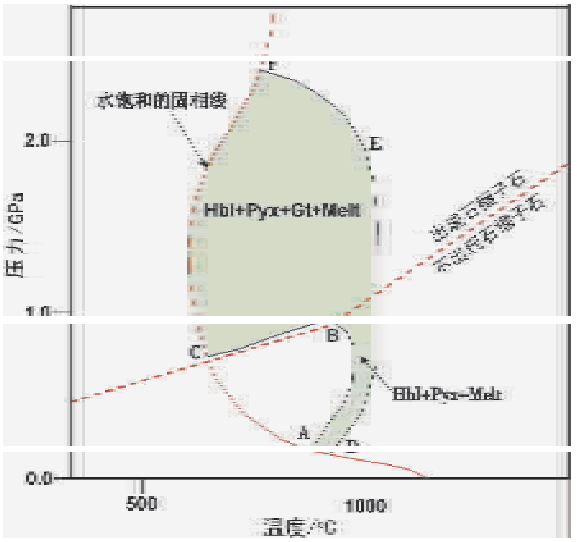


图1　含水基性－中性岩石的部分熔融反应相图

(据参考文献[11,12]修改)

Fig.1　Generalized amphibolite melting relationships as a function of pressure and temperature

Hbl—角闪石;Pyx—辉石;Gt—石榴子石

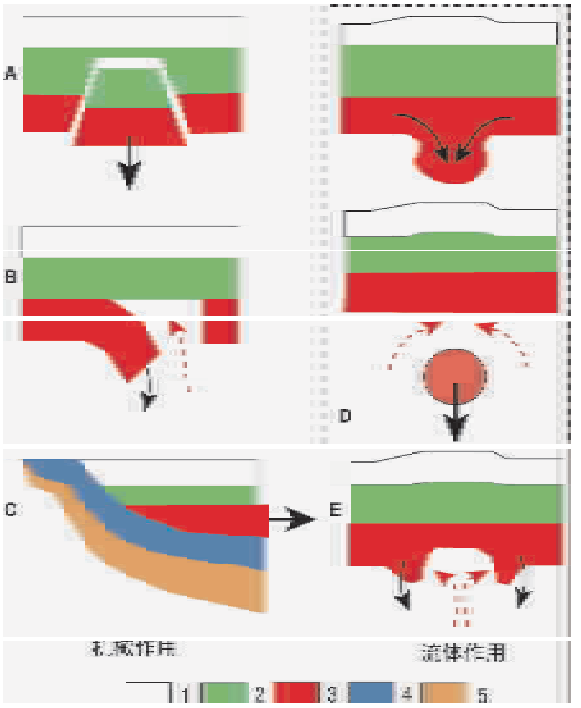


图2　下地壳或岩石圈地幔物质拆沉作用的简单图解

Fig.2　Schematic diagram showing the processes leading to the removal of continental lithospheric mantle

机械作用包括(A)分离作用、(B)剥落作用和(C)剪切作用;流体作用包括(D)沉没作用和(E)热侵蚀作用;1—大陆地壳;2—大陆下地壳;3—大陆岩石圈地幔;4—大洋地壳;5—大洋岩石圈地幔

岩石圈地幔与软流圈地幔之间的负密度梯度。在物理上,密度大的物质位于密度轻的物质之上是不稳定的,迟早密度大的物质要以一定的方式沉入到密度小的物质之中。这种过程有可能是其他构造过程触发的,如区域伸展构造;也可能是自发的,如瑞利－泰勒失稳。前人已进行了许多研究来探讨如何消减这种重力不稳定。卸除岩石圈的作用包括任何岩石圈(地幔部分±地壳)的拆离、下沉或剥离,然后进入到对流地幔中,可以分为机械的和流体的2类过程[6]。机械过程包括拆离(图2－A)、剥离(图2－B)和沿力学间断面的剪切作用(图2－C);而流体作用通过密度差异性的增强,达到重力失稳,发生下沉(图2－D)或热侵蚀作用(图2－E)。其中拆沉作用(delamination)是被普遍接受的机制之一。

拆沉作用是负浮力作用使高密度的下地壳或岩石圈地幔快速下沉到密度相对低的对流的软流圈中,温度较高的软流圈地幔上涌,导致相应的地表地质作用(图2－E)。岩石圈地幔的拆沉作用是Bird在1979年研究美国科罗拉多高原的隆升机制时提出来的[18]。该概念在随后的研究中被不断强化[19~21],在理论上详细阐述了大陆岩石圈地幔和下地壳产生拆沉作用的构造和物理条件。例如,Molnar及其合作者做了大量的理论和实验研究,提出了瑞利－泰勒型不稳定性的形成、生长及最后导致岩石圈地幔(可有可无榴辉岩质下地壳)失稳的机制和过程[22~26]。这一假说被普遍接受并用来解释造山高原快速隆升和缺乏大规模伸展构造的板内火山作用[27,28]。许多学者都曾引用卸除榴辉岩相的岩石圈地幔这样一种机制来解释如何从基性地幔中生成花岗质大陆地壳[29,30]。

3　高密度岩基根的消失

高密度壳根(或岩基根)的消失过程实质上是由不平衡结构向平衡结构转化的过程,是稳定新生大陆地壳的重要机制之一。促使高密度岩基根消失的地质过程有2种:①高速物理过程,即下地壳根部物质通过重力失稳下沉到地幔中;②缓慢化学过程,即变质同化反应,根部物质随温度和压力的变化发生变质反应,降低甚至消除与周围介质之间的密度差异。Fisher[31]研究了在长时间尺度下大陆地壳壳根对侵蚀卸载作用的反应。相对于下伏壳根的起伏程度来说,老碰撞造山带的表面地势起伏比年轻造山带的要小得多。长期的冷却作用使壳根发生变质反应、深部地壳密度增加,导致古老造山带具有相对平滑的重力梯度[31]。这一过程在地貌上反应极小,难以在地表观测到。相反地,下地壳重力失稳是一个快速过程,在深部地球物理结构、地貌景观、深部和浅部构造变形、造山带周缘的沉积作用及火山作用方面均有强烈的响应。

对流地幔的向下流动如何影响地表沉降是大地构造和地球动力学研究的重要课题之一。大地构造和地球动力学的研究揭示了2种尺度的地幔(有时包括下地壳)对流作用,即板块构造尺度的失稳和较小尺度的瑞利-泰勒失稳。瑞利-泰勒对流失稳的产生条件是,在相邻块体或岩层的温度和密度差异足够高时,高密度物质以类似于水在空气中滴落的方式向下运动,称为滴水构造(Drip Tectonics)。同时水滴状构造的生长速率足够快,维持最小的热扩散效应,使滴水构造能在较长的时间内持续进行[24~26,32]。如果水滴构造形成于近地表(<30 km)且向下运动的规模足够大,那么向下运动的滴水构造与上覆岩层之间的粘性力将对上覆岩层施加一向下的拖曳力,导致地表沉降[26]。除此之外,向下运动的滴水构造与周围介质之间的粘性力(类似于摩擦作用)也将导致周围介质的上涌,加剧滴水构造区与周缘区域的相对沉降幅度。因此,滴水构造的尺度、向下运动的速率及滴水构造与周围介质之间的粘性耦合程度是决定地表沉降空间范围和沉降速率的直接因素。

与克拉通地区相比,大陆岛弧地区的岩石圈地幔不仅温度高,而且强度小[33,34]。这种状态更加强化了年轻的大陆岛弧根部下地壳与周围亏损地幔岩石圈之间的密度差异。在大陆岛弧或大洋岛弧环境下,下地壳的部分熔融和岩浆分异作用产生由高密度基性或超基性下地壳和岩石圈地幔组成的岩基根,是大型花岗岩基形成的必然结果。Jull等[32]的数值模拟研究表明,大陆岛弧的高密度下地壳也可发生类似的拆沉作用,在理论上支持Ducea等[3,35]提出的内华达山脉南部在8.3~3.5 Ma之间经历了一次下地壳拆沉作用的观点。但拆沉作用以何种方式进行,地球物理观测在很长的一段时间内并没有提供确凿的证据,直到最近,美国亚利桑那大学Zandt及其合作者通过高分辨率宽频地震仪采集数据,进行接收函数的叠加计算,首次观测到下地壳和上地幔物质拆沉过程的细节(见下文详述)。

4 典型范例:内华达山脉岩基

美国西部的内华达山脉(Sierra Nevada),在西班牙语中意思为高高的内华达山。东部为大谷地(Great Valley),西部为盆岭省(Basin and Range Province)。大谷地在白垩纪时是内华达山脉大陆岛弧的弧前盆地,并在新生代一直是沉积中心,主要由2个相互连接的盆地组成,分别为北部的Sacramento盆地和南部的San Joaquin盆地。与美国西部的落基山脉一样,内华达山脉的最高峰近4500 m。如何产生和维持这样的高程一直是个热点问题。与喜马拉雅山不同的是,内华达山脉主要由中生代花岗岩复合岩基组成,是一残余大陆岛弧,受新生代盆岭省伸展构造的影响,整个内华达山脉向西倾斜,形成壮观的地形地貌景观(图3)。海拔从西边接近于海平面到东缘的4000 m高,造成典型的强烈的山体降水效应,西部气候较湿润,而内华达山脉以东到科罗拉多高原之间是干旱、沙漠性气候。

4.1 内华达山脉复合岩基的基本特征

美国西部的内华达山脉复合岩基是大陆岛弧型花岗岩基的典型代表,是科迪勒拉花岗岩基的一部分。该岩基在纵向和横向上都表现出规律性的变化。在纵向上,岩基的侵位深度从北到南逐渐增高,从北部优胜美地(Yosemite)的4~6 km(0.2~0.3 GPa)到最南端的25~30 km(0.8~1.0 GPa)(图4),为一倾斜的大陆地壳剖面。在横向上,岩基不仅在岩石组成、形成时代上,而且在地球化学上也呈现出有规律的系统变化。内华达山脉岩基的西部主要由英云闪长岩和少量的辉长岩组成,东部主要由花岗岩和花岗闪长岩组成。Kistler等[36]的研究揭示了内华达山脉岩基的元素(如K、Na、Rb和Sr)及Sr同位素组成从西向东呈规律性的变化,提出了著名的Sr同位素组成0.706线,成为里程碑式的研究结果。随后O同位素[37~39]、Nd同位素[40~48]、Pb同位素[49,50]的研究都证明了0.706线的重要意义。该分界线在内华达山脉以北的爱达荷岩基(Idaho Batholith)及以南的半岛岩基(Peninsular Range Batholith)中同样存在,并可往南延伸至墨西哥境内,是划分北美西部中生代花岗岩复合岩基的重要分界线,位于0.706线以西的岩基主要构建在

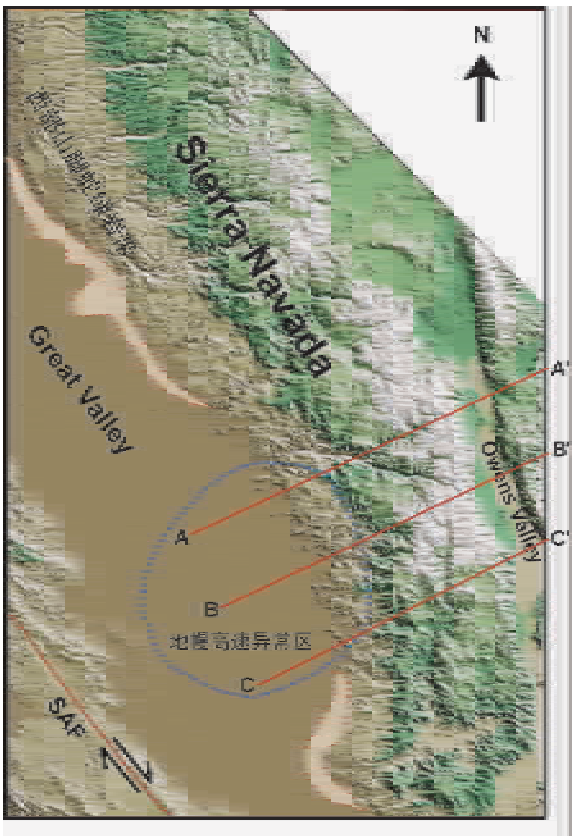


图3 美国加州内华达山脉数字化地形图

Fig.3 Shade relief digital elevation model (DEM) of the southern Sierra Nevada, California

A-A'、B-B'和C-C'对应于图10的地球物理剖面;

SAF—圣安德烈斯断裂

大洋型岩石圈之上，而以东的岩基主要构建在北美大陆岩石圈之上。其中辉长岩的Sr（$^{87}Sr/^{86}Sr(i)$=0.70338~0.70408）、Nd（$\varepsilon_{Nd}(i)$=+4.2~+6.1）和O（$\delta^{18}O$=~5.7‰）同位素地球化学特征和亏损地幔相似，而花岗闪长岩及花岗岩都不同程度地记录了下地壳和表壳岩的影响，但主要反映了下地壳部分熔融所产生熔体的同位素特征（图5）[51~53]。沿0.706线两侧还断断续续地发育I-SCR（igneous-strongly contaminated reduced pluton）岩体[54~57]，这些岩体具有相对升高的Sr和相对降低的Nd同位素组成，记录了不同程度的较还原变质表壳岩对它们的影响[50,54~59]。变质表壳岩对侵位花岗岩的影响主要通过2种方式进行：在花岗岩岩浆侵位时，表壳岩发生向下回流作用（Return Flow）并运动到地壳深部，参与深部地壳的部分熔融作用；或在与侵位花岗岩岩浆的接触部位，表壳岩发生部分熔融，产生花岗质岩浆，与侵位花岗岩岩浆混染。这2种过程都会影响最终花岗岩岩浆的地球化学特征[57~59]。

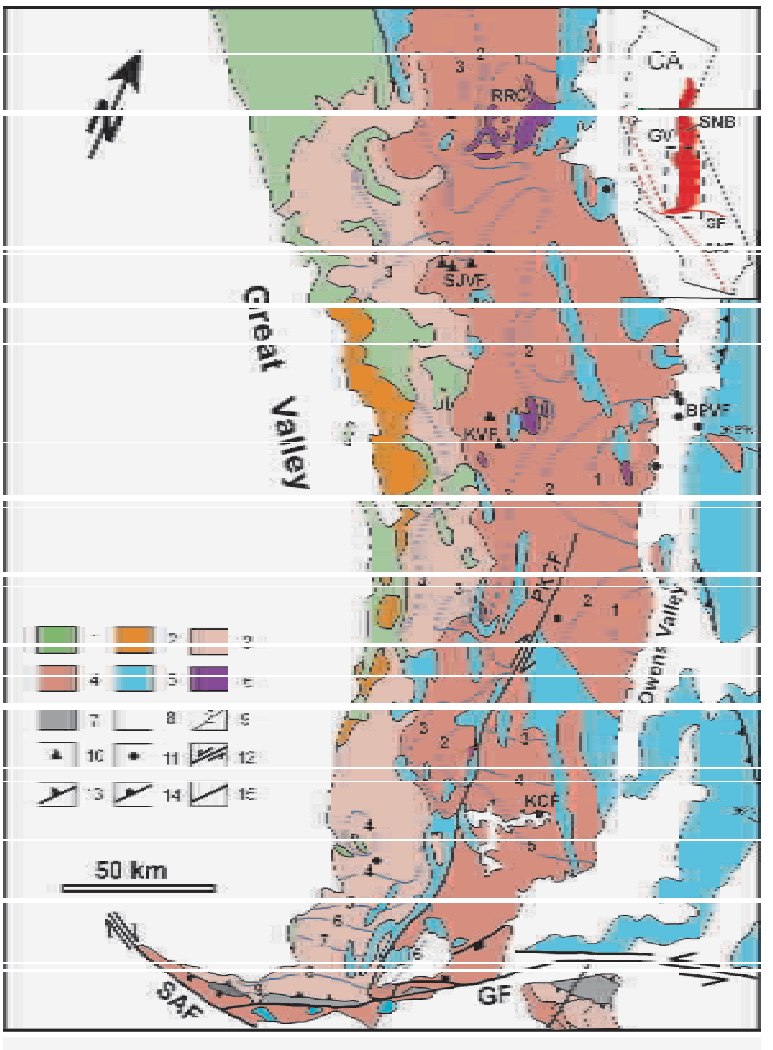


图4　南内华达山脉地质简图（据参考文献[4]修改）

Fig.4　Simplified geological map of the southern Sierra Nevada, California

1—晚古生代蛇绿岩；2—辉长岩；3—英云闪长岩/闪长岩；4—花岗岩/花岗闪长岩；5—中生代表壳岩；6—中生代火山岩/次火山岩；7—高压蓝片岩；8—第四纪沉积；9—岩体侵位深度；10—中中新世火山岩；11—上新世-第四纪火山岩；12—走滑断裂；13—逆冲推覆断层；14—正断层；15—断层；SJVF—San Juaquin火山岩区；KVF—Kings火山岩区；KCF—Kern峡谷火山岩区；BPVF—Big Pine火山岩区；RRC—Ritter Range火山口；PKCF—Pro-Kern Canyon断裂带；SAF—圣安德烈斯断裂；GF—Garlock断裂；SNB—内华达山脉岩基；GV—大谷地；CA—加利福尼亚州

4.2　内华达山脉之谜：无山根的高山

内华达山脉岩基底部是否存在低密度的山根在20世纪90年代中期以前一直存在着争议。早期的研究[60]认为内华达山脉岩基底部存在山根，可深达50~60 km。但随着地震探测技术的发展，在20世纪90年代中期，发现内华达山脉南部并不存在厚度大的山根[61~63]。内华达山脉南部的Moho面位于35~40 km深度，与高度伸展的邻区的Moho面深度相似[63~65]（图5）。这就造成了著名的“内华达山脉之谜（Sierra Paradox）”之一，即海拔高达4500 m的内华达山脉地区与海拔低达-60 m的死亡谷（Death Valley）在Moho面的深度上并不存在明显的差异性（图6）[65,66]，成为困惑地球物理学家的难题之一。由于缺少低密度的山根，长期被接受的艾里均衡（Airy Isostasy）不再是维持内华达山脉高海拔的机制。那么是什么机制导致和维持内华达山脉的高程？这成为地质和地球物理学家面临的突出问题。在地球物理探测取得一系列重大进展的同时，岩石学和地球化学研究发现，内华达山脉根部的物质组成应该是与岩基相对应的高密度残留体[3,47]。如果这些高密度的岩基根部物质通过某种方式消减，被较低密度的物质所替代，那么就可以解释内华达山脉较高的海拔。因此，一些学者提出用小规模地幔对流卸载高密度物质来解释内华达山脉高程为什么在晚新生代突然增高[64,67]。但这些早期研究并没有给出何时、以何种方式，高密度的下地壳和岩石圈地幔被消减掉。

4.3　晚新生代包体的证据

加州理工学院的Saleeby及Wernicke构造研究组在20世纪90年代中后期对内华达山脉新生代钙碱性玄武岩所携带的幔源包体的突破性研究[3,4,35,51,52,64]，揭示出8.3 Ma基性火山岩所携带的包体组合与3.5 Ma基性火山岩所携带的包体组合不

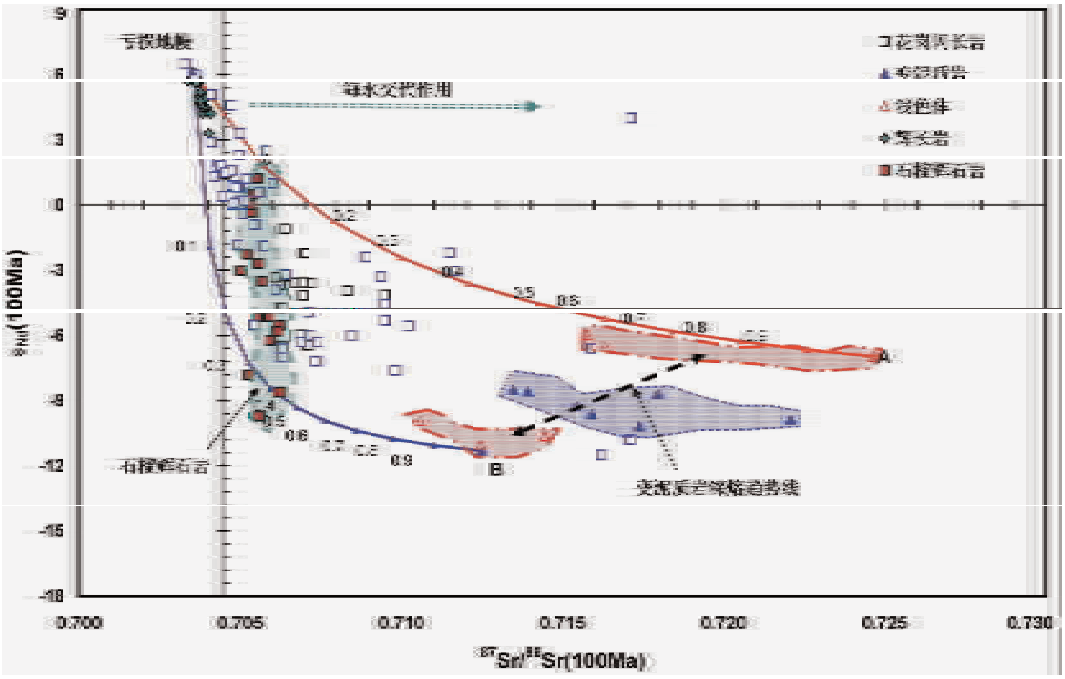
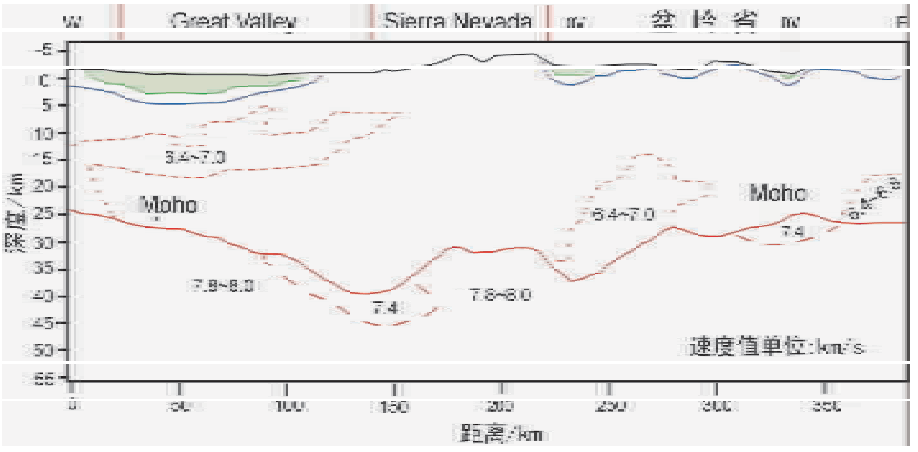


图1　内华达山脉岩基%&+'(放射性同位素组成特征

(数据来源于参考文献92:,;",;28;1,1,,12,1$81:<)

=>431　%&+'(　?@?AB*.A>6? CD& AEB 4&.F>A>6 &D6G? C&D* AEB %>B&&. 'BH.(. I.AEDJ>AE

曲线K和L分别是以浅色体为端元的混合曲线,标注为浅色体的贡献大小



图#　横穿内华达山脉中部的地球物理反射剖面

=>43#　K ?B>?*>6 &BCJB6A>DF M&D>JB .6&D?? AEB 6BFA&.J %>B&&. 'BH.(.

)N—欧文斯山谷 ;ON—死亡谷

一样，早期的包体中具有大量的榴辉岩质包体(石榴辉石岩),而后期的包体中缺少这样的岩石(图$)。元素地球化学，放射性元素(%&、'()同位素、)稳定同位素地球化学和包体全岩%*+'(等时线年龄的研究结果表明：!榴辉岩质包体(石榴辉石岩)的%*+'(等时线年龄为,"" -.,和花岗岩基的形成年龄相近;"榴辉岩质包体的稀土元素(/00)与岩基花岗岩的/00成互补关系;#榴辉岩质包体和岩基具有相似的%&、'(和)同位素地球化学特征(图1)。这些结果表明:榴辉岩质包体是花岗岩基岩浆形成时产生的高密度残留体,密度约为231 4¦6*²,比常见的地幔橄榄岩高约"32 4¦6*²;拆沉作用起始于7328231 -.之间。所推测的拆沉作用起始时间和盆岭省伸展作用逐渐向西扩张，到达内华达山脉东缘的时间相

表1 内华达山脉新生代幔源包体的Sr和Nd同位素组成

Table 1 Sr and Nd isotopic compositions of Cenozoic mantle xenoliths from the Sierra Nevada

样品号	Rb/μg·g^{-1}	Sr/μg·g^{-1}	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr(i)$	Sm/μg·g^{-1}
P-1	0.61	17.80	0.0980	0.704090	0.704078	0.28
96D-18	7.52	123.49	0.1752	0.706994	0.706973	0.30
BC98-2	1.81	115.78	0.0451	0.707723	0.707718	0.24
BC77	4.71	97.70	0.1386	0.706114	0.706098	0.39
P-10	0.90	109.83	0.0235	0.706276	0.706273	0.54
1026V	2.42	159.38	0.0437	0.706176	0.706171	0.16
P-6	4.75	113.10	0.1207	0.706354	0.706340	0.50
OK98-2	0.17	118.11	0.0406	0.707786	0.707781	
OK98-3	0.40	97.43	0.0118	0.707103	0.707102	0.59
OK98-4	0.97	87.97	0.0319	0.706466	0.706462	0.47
OK98-9	0.54	121.92	0.0128	0.706903	0.706901	0.43

样品号	Nd/μg·g^{-1}	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\varepsilon_{Nd}(0)$	$\varepsilon_{Nd}(i)$	$^{188}Os/^{187}Os$
P-1	0.66	0.2537	0.512920	5.5	5.44	0.1279
96D-18	1.61	0.1111	0.512983	6.73	6.82	0.1281
BC98-2	5.30	0.0272	0.513036	7.76	7.94	0.1219
BC77	5.80	0.0405	0.511578	-20.68	-20.52	0.1263
P-10	7.49	0.0434	0.511685	-18.59	-18.43	0.1263
1026V	2.48	0.0391	0.511478	-22.62	-22.46	0.1507
P-6	3.28	0.0922	0.512260	-7.37	-7.26	0.1288
OK98-2						0.1235
OK98-3	8.08	0.0437	0.512093	-10.62	-10.46	0.1309
OK98-4	3.70	0.0770	0.512137	-9.77	-9.65	0.1271
OK98-9	7.01	0.3685	0.512222	-8.11	-7.94	0.1297

注：Sr和Nd同位素测试在加州理工学院进行，测试方法、步骤与Zeng等[58]的相同；$\varepsilon_{Nd}(i)=\left[\frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)_{Sample}(i)}{(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}(i)}-1\right]\times10^4$，i=8.3Ma；Os同位素成分数据来源于Lee等[68]

也表现在Os同位素特征的变异上，Os同位素特征还表明内华达山脉岩石圈地幔的不均一性(表1)。随后对已测定Os同位素成分的幔源包体进行了Sr和Nd同位素分析[71](表1)，结果表明8.3 Ma这一组包体的Sr和Nd同位素组成高度不均

一(图8)。这些包体在Sr-Nd同位素组成上可分为3组：A组具有变化有限的初始Sr同位素比值，变化范围为0.7061~0.7062，ε_{Nd}为-18.4~-22.5；B组Sr和Nd同位素比值变化范围大，分别为0.7030~0.7080和+8~-10.5；C组具有相对变化小的$^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7065~0.7078) 和正ε_{Nd}(+10~+0.5)。

某些包体具有异常低的初始Nd同位素比值，低达-25.0，反映了古老地壳物质的特征。这种异常的Sr和Nd同位素组成可能来源于北美元古宙岩石圈的残余[46,72-74]或花岗岩侵位时向下回流的古老表壳岩[49,74,75]。对内华达山脉岩基的变质表壳岩中角闪岩的Sr和Nd放射性同位素的测定结果也表明相似成分存在(待发表)，这些高级变质岩有可能代表着花岗岩深部源区的主要组成。Chen等[50]对Pb同位素的研究也证明基性角闪岩或麻粒岩为下地壳部分熔融的重要物源。在基性岩浆底侵作用下，这些基性物质可发生高度部分熔融，在压力大于1 GPa下产生花岗质岩浆和相应的石榴辉石岩残留体(图1)。

Saleeby及其合作者在20多年、近10篇博士论文研究的基础之上，于2003年总结了内华达山脉岩基的形成机制及相关的浅部和深部过程(图9)。这些过程包括：①中生代以前的构造作用导致太平洋岩石圈与北美大陆岩石圈的拼合，在下地壳和上地幔顶部形成基性含水堆晶岩或角闪岩组合；②中生代洋壳俯冲和递进脱水作用导致湿冷地幔的快速底辟及水致地幔部分熔融；③地幔熔融体向上迁移，在壳幔边界附近发生基性岩浆的底侵作用；④在基性岩浆的底侵作用下，基性含水堆晶岩或角闪岩组合发生高度部分熔融，形成对应于岩基的花岗质岩浆和石榴辉石岩，同时基性岩浆的高压分异结晶也可形成石榴辉石岩，这2种不同成因的石榴辉石岩共同构成高密度的岩基根，它们的密度较下伏地幔超基性岩高大约0.3 g/cm^3；⑤与此同时，花岗质岩浆的侵位导致浅部表壳岩的部分熔融和向下回流作用，影响最终花岗岩岩体的地球化学特征。

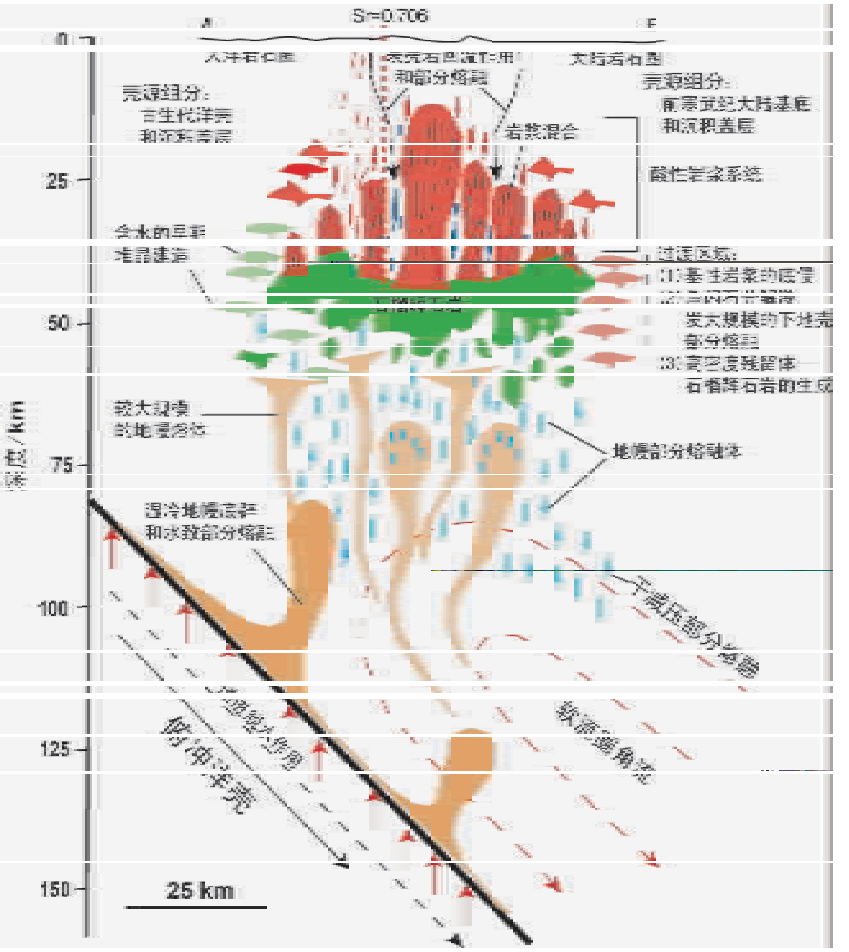


图9　内华达山脉岩基形成过程示意图(据参考文献[4]修改)

Fig.9　Schematic diagram showing the physical and chemical processes responsible for the formation of the Sierra Nevada batholith and its high-density root

4.4　钾质火山作用：下地壳和岩石圈地幔拆沉的旁证

如果根据包体组合的不同推断的下地壳和岩石圈地幔以水滴形式发生拆沉，那么在火山作用上有何反应？在内华达山脉南部及其周缘地区，自13 Ma以来，尽管规模小，但基性岩浆作用却间歇发生[76-82]。Mantley等[76]研究了13 Ma以来基性火山岩的时空和成分变化特征，随后Farmer等[77]在总结前人研究结果的基础上，对这些火山岩进行了元素和放射性同位素(Sr、Nd和Pb)特征的研究。这些研究表明：①火山岩在年龄上可以分为3组：中新世(12~8 Ma)、上新世(3~4 Ma)和第四纪(年龄小于1 Ma)[76,78]；②在内华达山脉，在13~4 Ma之间，基性火山作用一直维持低水平活动，但在3.5 Ma，钾质基性岩浆作用突然增强[83,84]，典型的有国王(Kings)和San Joaquin基性火山岩区；③与早期和晚期的火山岩相比，年龄为3~4 Ma的基性火山岩主要为钾质火山岩，它们的K_2O含量高达8.5 wt%，ε_{Nd}值较低，为-3.2~-8.1，$^{87}Sr/^{86}Sr$比值较高，为0.7060~0.7074；④大部分火山岩(不同区域、年龄和Pb含量)的Pb同位素组成位于Pb同位素北半球参考线(NHRL)之上，并且U衰变形成的^{206}Pb和^{207}Pb之间的关系也位于约1.7 b.y.的参考等时线上。这些结果反映了内华达山脉中南部地区在8~

4 Ma之间存在一基性岩浆作用的空区,3.5 Ma的基性火山作用持续的时间短,呈脉冲式,主要为钾质岩浆作用,而且集中在内华达山脉的南部,它们的岩浆源区与3.5 Ma之前和之后的都不同,为经历了钾交代作用的富集岩石圈地幔[84],这和上述的幔源包体的Sr-Nd同位素系统特征也相吻合。因此,内华达山脉的钾质火山作用代表了最底部地壳和岩石圈地幔的拆沉作用所引发的较热的软流圈上涌,激发残余岩石圈地幔的低度部分熔融的结果。

4.5 地球物理观测结果:滴水构造的厘定

海岸山脉到内华达山脉的三维P波速度模型研究结果表明,南内华达山脉岩基的地壳P波速度为5.9~6.3 km/s,低于大陆地壳的平均速率。地壳厚度与周围地区相似,并揭示了大谷地之下存在一个高速体[86-88](图2、图10)。

地球物理探测在大谷地发现2个规模较大的地幔高速体(v_p异常高达5%),其中南部的一个位于加州中部的San Joaquin谷地,以近垂直的柱状体出现,直径约为100 km,从地壳底部一直延伸到250 km处。在地质图上则表现为近环状,中心靠近加州大谷地最东缘的凹陷(图3)。该高速异常体位于由SJVF、KVF和BPVF组成的3~4 Ma钾质火山岩区的西南延伸线上。为探讨这两者之间可能的联系,Zandt等[5]利用宽频地震仪记录结果,在南内华达山脉做了3条走向为NE-SW向的高分辨率接受函数剖面(图3中A-A′、B-B′和C-C′)。在图10中,接受函数剖面显示以下特征:①高幅度、正极性到时的Moho面,Moho面深度位于30~42 km处;②在南边剖面上,Moho面是一光滑的界面,向西深度逐渐增加,但突然消失在大谷地之下;③在中间剖面中,Moho面消失位置较南边剖面往东移,位于内华达山脉西缘;④在北部剖面中,Moho面的到时较复杂,在Moho面消失之前出现雁行错位,Moho面最后消失在内华达山脉的西部矮山(western foothills)之下。通过有限差分数值模拟和计算,合成地震谱研究结果证明只要一个约50 km、宽25 km深的V型地壳楔状体切入地幔就足够导致Moho面在接收函数叠加剖面中消失,因此上述特征表明V型Moho漏斗代表的是正在进行的滴水构造,是在负密度差与剪切构造变形共同作用下,高密度岩基根和上地幔向西南方向拆沉的表现。这些观测结果揭示了基性或超基性堆晶岩组成的高密度下地壳的对流失稳过程。但这种过程与经典的拆沉作用有所不同,下地壳并不从下地壳撕开(peel off),而是以液滴状从地壳底部以非对称的形式向下滴落于密度较小的地幔中(图9),类似于水滴在风的作用下在空气中滴落的过程。

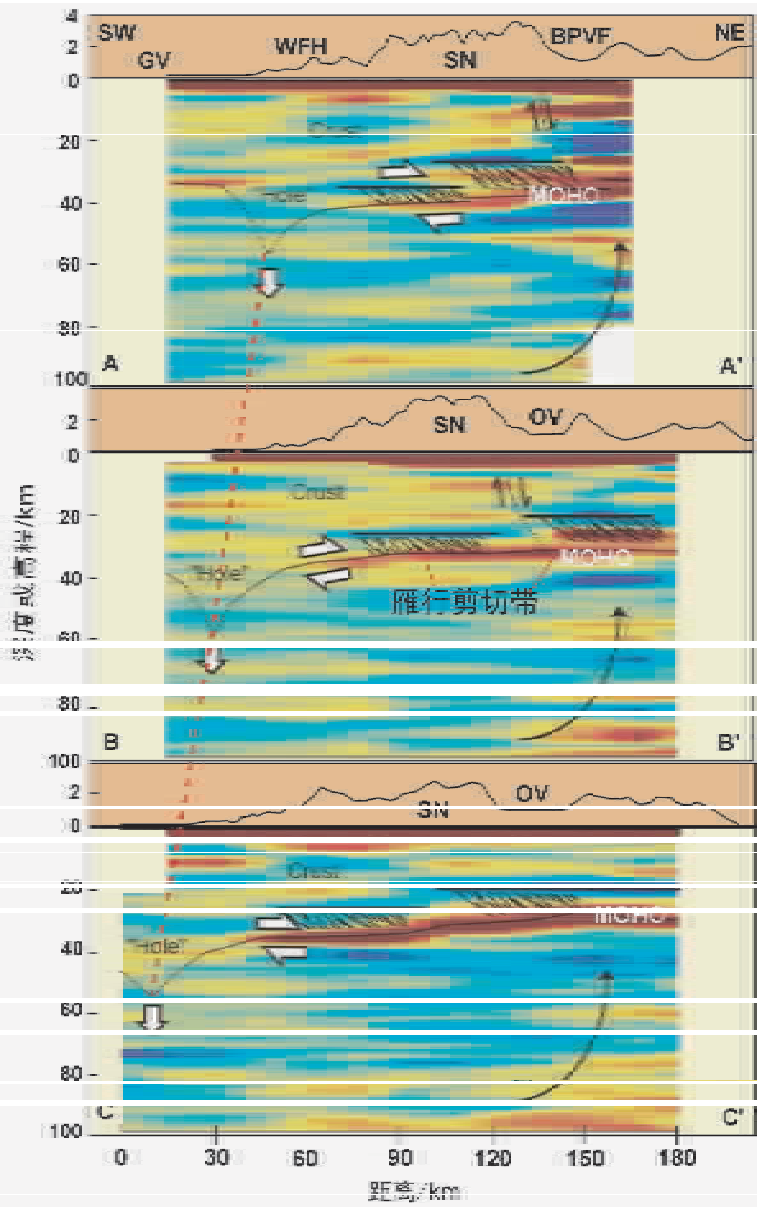


图10 穿越内华达山脉南部的3条地球物理剖面[5]

Fig.10 Seismic receiver function profiles across the southern Sierra Nevada, CA

GV-大谷地;WFH-西部矮山;SN-内华达山脉;BPVF-Big Pine火山岩区;OV-欧文斯山谷;"Hole"-Moho漏斗

4.6 地表和区域地质响应

在北纬36~37°之间,内华达山脉西缘在晚上新世-全新世之间形成异常的地形(图3)。对应于上述高密度地幔异常区的是直径约为120 km的活跃的沉降区,表现为:①洪积-河流沉积发育于内华达山脉西南部的丘陵地形之上并发育陆内湖泊盆地;②在高速异常区的南北两侧,内华达山脉向西的山前掀斜使始新世地层完整地出露,但在对应于高速异常

区的地区，该地层在地表没有出露，被洪积或冲积物覆盖[89]。这和滴水构造最活动阶段的地表响应一致，表明在内华达山脉南部，深部滴水构造动力学过程与近地表的地质过程之间存在高度动态耦合。

古近纪火山岩及其所携带的包体的岩石学和地球化学特征表明，在上新世（大约3.5 Ma），在内华达山脉岩基下发生了消减高密度榴辉岩质壳根的事件。现今的地震和大地电磁观测结果也支持浮力大的、温度高的软流圈地幔替代密度高的、较冷的榴辉岩这样一种过程[88,90,91]。这种过程不仅导致内华达山脉较高的高程，而且导致其较高的平均重力势能。重力势能的增高将改变内华达山脉周缘的构造变形速率和方式。例如，已有的数据表明，在8~3 Ma期间内华达山脉的地表高程增加了大约1000 m；同时，在内华达山脉东缘50 km范围内开始发生伸展构造变形，相应地在西边（加州海岸山脉）发生区域缩短变形[88]，这些地质过程都有可能与上述的内华达山脉岩基的深部过程相关。

尽管目前普遍认为内华达山脉的高程变化与岩石圈尺度的地球动力学过程直接相关，但对其高程演化历史的认识还存在很大的分歧。一些研究者认为内华达山脉的海拔增加发生在晚新生代[90]。如沉积学研究表明，晚新生代的块体断裂作用和向西掀斜导致内华达山脉高程增加近2000 m [90~93]。国王河（Kings River）河谷的下切速率自2.7~1.4 Ma以来增加显著，可能是河流对构造运动导致的区域平均地面海拔增加的响应[94,95]。相反地，磷灰石U+Th/He低温热年代学[95~97]、O同位素研究[98]结果则表明，自中生代以来内华达山脉的演化有2种可能性：内华达山脉至少在中中新世以前已经具有较大高程，并构成美国西部重要的山体障碍，产生明显的大气山体效应；或内华达山脉在晚白垩世已具有相当的高程，类似于现今南美安第斯山脉中的Antiplano高原，此后高程不断地减少，这与一些地质观察结果相吻合[99~101]。为进一步限定内华达山脉地形演化历史与深部构造过程之间的关系，Clark等[102]对南内华达山脉进行了进一步的构造地貌学和低温热年代学研究，认为内华达山脉是未达到平衡态的过渡型地貌。研究这种非平衡态地貌景观可解译过去和现在控制山脉地形特征的主要因素。具体地说，内华达山脉具有可以识别的2种不同地球动力学意义的地形：①缓慢剥蚀、起伏较小的老地貌或残余地形，形成时间为80~32 Ma；②近期的地形起伏增加的回春地貌。区域河流纵剖面普遍显示2期裂点（高程不同），表明从32 Ma以来至少有2期平均高程增强事件。该研究结果表明，在晚白垩世大陆岛弧型岩浆活动终止时，内华达山脉具有中等高程，约为1500 m；分别发生于32~3.5 Ma和3.5 Ma以来的2期事件的共同作用形成了现今的高程，大约为4000 m[102]。因此，起始于8~3 Ma之间的滴水构造事件可能是导致内华达山脉快速隆升和发育回春地貌的直接原因。

4.7　内华达山脉岩基晚新生代的演化历史

综合晚新生代以来基性火山岩所携带的包体的组成、地球化学、地质年代学、p–T条件、地球物理和构造地貌学信息，内华达山脉南部及其周缘地区自晚中生代以来经历了下列事件（图11）。

（1）伴随中生代的俯冲作用，在内华达山脉大陆岛弧形成内华达山脉岩基及由石榴辉石岩组成的高密度岩基根。

（2）大约在18 Ma发生的短暂的俯冲作用导致内华达山脉北部和东部的岩浆作用。

（3）大约在16~8 Ma，伴随Mendocino三联点往北迁移，形成初始圣安德烈斯断裂和俯冲板片空区（slab window），软流圈地幔上涌导致中新世基性火山作用，包体中含石榴辉石岩。

（4）大约在8~3 Ma之间，滴水构造开始形成，导致大陆岩石圈地幔低度部分熔融和钾质火山作用，包体中缺乏石榴辉石岩。

（5）3 Ma至现今，强烈的、向西南方向的滴水构造作用形成Moho面漏斗，导致大谷地南部的沉降、内华达山脉的抬升、回春地貌的形成和内华达山脉东缘的火山作用。

5　岩石圈动力学意义

以上的分析表明，在基性岩浆的底侵作用下，下地壳物质（包括回流的表壳物质）发生角闪岩的脱水部分熔融，形成密度近似于榴辉岩的熔融残留体——石榴辉石岩。这种异常高密度的花岗岩基根部在重力上是不稳定的，在花岗岩基形成后迟早要发生重力失稳，导致下地壳底部和岩石圈地幔的拆沉作用，表现为与水在空气中下滴过程相似的滴水构造。高度动态的滴水构造：①在地貌上反映为滴水构造所对应区域的沉降和相应的张性构造；②在岩浆作用上表现为热的软流圈地幔上涌，导致富集岩石圈地幔的低度部分熔融，形成钾质玄武岩。这种高度动态的深部动力学过程可能是维持大型花岗岩基地区较高高程或促使这些区域高程骤然增加的重要因素之一。

多年以来，人们就怀疑岩石圈地幔和下地壳卸除榴辉岩相的过程不仅是大陆地质的重要地球动力学过程，而且是生成花岗质大陆地壳的重要机制。尽管该理论深受欢迎，但在Zandt等的研究结果发表之前，几乎没有观测到正在进行的拆沉作用，以致一系列有趣而重要的假设从未得到应当的检验。多学科综合研究揭示内华达山脉的榴辉岩相下地壳和基性岩石圈上地幔在8~3.5 Ma之间发生了一次拆沉，现在正以滴水构造的形式向大谷地的中南部下沉。这种深部动力学构造作用有可能是：①晚新生代内华达山脉快速隆升；②西部山边沉降；③晚新生代—第四纪火山作用；④位于内华达山脉东缘的欧文斯谷（Owens Valley）的伸展作用；⑤甚至可能是圣安德烈斯断裂滑移速率降低的直接原因[87]。在南内华达山脉揭示出这种高度动态的深部动力学过程，但还存在一系列突出的问题。例如，地球物理研究揭示出内华达山脉沿走向在岩石圈结构上存在明显差异，岩基根在有些地方已拆沉，但在另一些地方还残留，造成这种差别的原因是什么？在垂向上，拆沉的岩基根现在在何处，如何到达那里

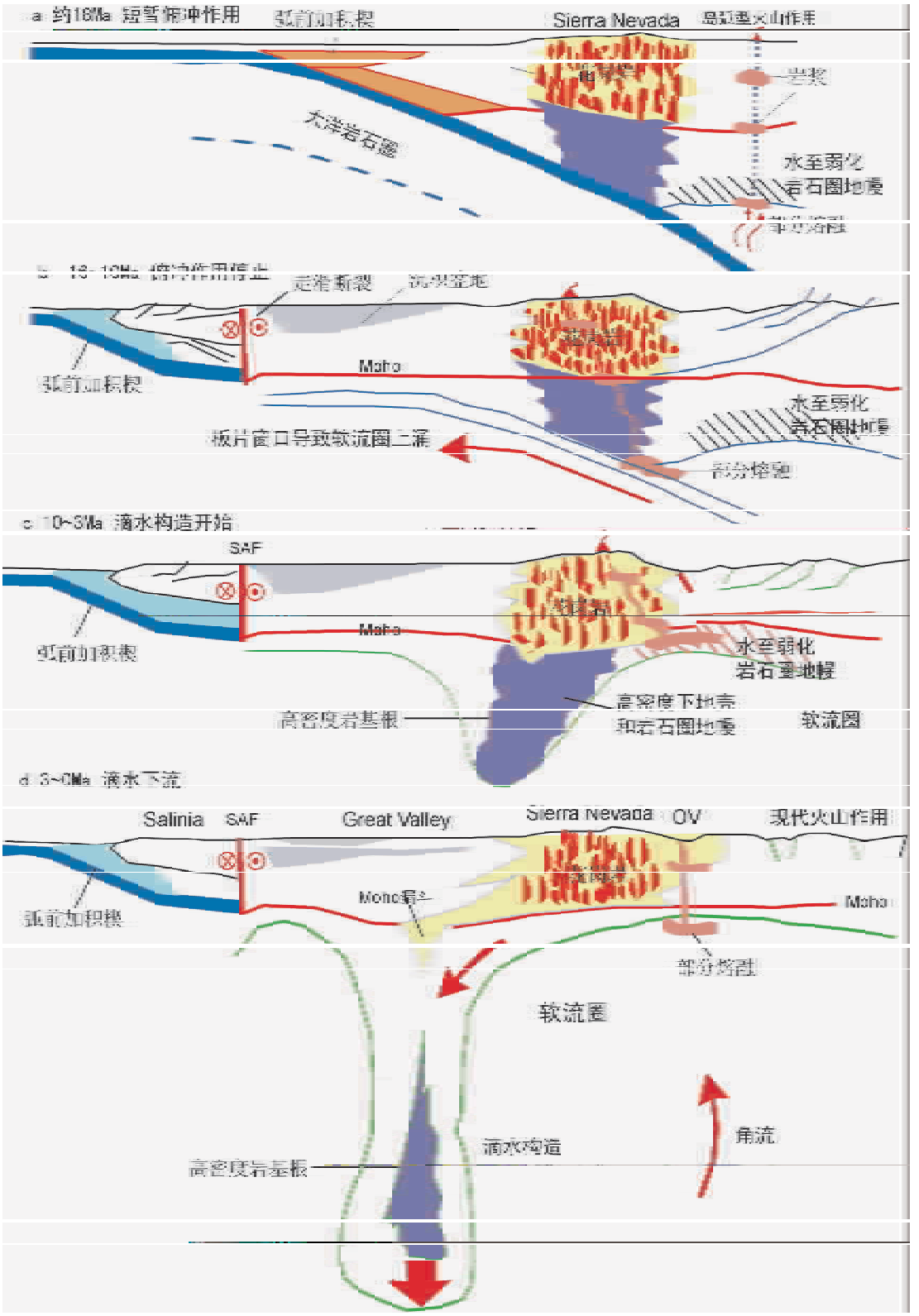


图11 中新世以来高密度内华达山脉岩基根的演化历史(据参考文献[5]修改)

Fig.11 Schematic diagrams showing the history of the foundering of the ultramafic root of the southern Sierra Nevada batholith since the Miocene

SAF—圣安德烈斯断裂;OV—欧文斯山谷

的?何种物理状态有利于岩石圈的卸载?这些问题还有待进一步的研究。

最近的实验岩石学研究结果表明,角闪岩或榴辉岩的部分熔融是太古宙花岗质大陆地壳生成的重要机制[29,103]。如果滴水构造作用是大型花岗岩基形成后的必然结果,那么这样一种作用在稳定新形成的花岗质大陆地壳方面提供了一种非常有效的机制。

地形、地貌的形成受控于构造作用和深部岩石圈的动力学过程,是地表侵蚀、气候变化、固体地球构造运动共同作用的产物。构造活动、气候变化和地貌演化之间存在强烈的相互作用及反馈关系。但这三者之间的相互作用及反馈关系到底是怎样还没有定量化的认识。后造山构造变形、气候的变化、冲积作用的调整及深部地壳对流的不稳定性是影响剥蚀量大小、地形高差及岩石圈结构变化的主要因素。其中,虽然深部地壳对流的不稳定性在地表应有所表现,但也是最难捕捉的地壳深部过程之一。通过野外地质和地球物理观测来认识这一过程,将促进对一系列构造地貌学的基本问题的认识,如造山带深部地壳结构随地表剥蚀作用的变化而变化、岩石圈根部的动力学过程及机制等。从静态的地质观转变到高度动态的动力地质观,意识到深部地球物理过程和浅部地质过程的强烈耦合关系是最近固体地球科学的重要进展之一。这种观念的更新使通过地表地质的细致观测来反演深部地质过程成为可能,例如,通过测量地表物质的冷却年龄与地表高程的关系,可以反演何种深部地壳作用在地形演化中起主控作用。

上述的滴水构造是不对称的侧向拆沉构造,并不排除滴水构造存在另一种形式,即对称的垂向滴水构造。要形成对称的滴水构造,要求大陆下地壳和上地幔不发生简单剪切作用。另外,以石榴辉石岩为代表的高密度物质的形成并不局限于大陆岛弧地区,在那些基性下地壳发生角闪石脱水部分熔融的地区,同样可以生成高密度的壳根,因此,高密度壳根的生长和消减动力学过程是大陆地质内在的、关键的过程之一,是连接近地表地质作用和更深部地球动力学过程的重要环节。许多学者都认为增厚岩石圈的拆沉作用是青藏高原隆升和广泛分布的中生代以来钾质火山作用的主要机制之一[20,28,104~106],但没有给出拆沉作用的方式、规模及对应每一次拆沉作用的浅部地质作用的响应。发生在青藏高原的拆沉作用是否也表现为滴水构造形式?如果是,是非对称的还是对称的滴水构造?回答这些问题要求高分辨率的地球物理探测及细致的地质观测。另外,大型花岗岩基不仅在青藏高原(如冈底斯岩基、东昆仑岩基等),而且在中国的东南沿海地区(浙江、福建、广东等)也都是陆壳的重要组分。武夷山以东的中生代东南沿海花岗岩基不仅在物质组成上,而且在年龄变化上可与内华达山脉相比。例如:自武夷山向东,福建省花岗岩的形成年龄逐渐年轻化[107],从160~70 Ma,与内华达山脉岩基向东年轻化的现象相似;Sr同位素初始比值减小,但Nd同位素组成增加,反映亏损地幔组分在花岗岩中的贡献逐渐增加[108];虽然对东南沿海花岗岩的形成构造背景一直存在争论[107,109],但许多学者认为东南沿海花岗岩基形成于大陆岛弧,如江博明等[110]在1976年就提出了中生代太平洋向西俯冲于南中国板块之下、东南沿海花岗岩形成于大陆岛弧的观点。但与内华达山脉相比,中国东南沿海地区主要为盆山相间的丘陵地貌,海拔要低很多,在中生代岩基形成过程中伴随有显著的伸展构造作用[108]。这种差异性到底代表什么?是大构造背景,还是岩基形成前的岩石圈组成和结构不一样?如果东南沿海花岗岩基的形成过程与内华达山脉相似,那么它也应存在高密度岩基根,但现有的地球物理数据表明东南沿海地区的Moho面深度在30 km左右[111],并不存在明显异常。因此,这种高密度岩基根在何时消减?伴随的深部和浅部地质过程是什么?在东南沿海盆山相间的丘陵地貌形成中起何种作用?有待进一步的、深入的研究来回答这些问题。

参考文献:

[1]Rudnick R L,Fountain D M. Nature and composition of the continental crust:a lower crustal perspective[J]. Reviews of Geophysics,1995,33:267-309.

[2]Martin H. The Archean gray gneisses and genesis of continental crust[A].In:Condie K ed. Archean crustal evolution[C]. Amsterdam:Elsevier,1994.205-259.

[3]Ducea M N,Saleeby J B. Buoyancy sources for a large,unrooted mountain range,the Sierra Nevada,California:Evidence from xenolith thermobarometry [J]. Journal of Geophysical Research,1996,101:8229-8244.

[4]Saleeby J B,Ducea M N,Clemens-Knott D. Production and loss of high-density batholithic root-southern Sierra Nevada,California[J]. Tectonics,2003,22(6):1064.

[5]Zandt G,Gilbert H,Owens T J,et al. Active foundering of a continental arc root beneath the southern Sierra Nevada,California[J]. Nature,2004,432:41-46.

[6]Lee A C-T,Cheng X,Horodyskyj U. The development and refinement of continental arcs by primary basaltic magmatism,garnet pyroxenite accumulation, basaltic recharge and delamination:insights from the Sierra Nevada,California[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,2006,151:222-242.

[7]Austrheim H. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones[J]. Earth and Planetary Science Letters,1987,81:221-232.

[8]Austrheim H, Boundy T M. Pseudotachylites generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust [J]. Science,1994,265:82-83.

[9]Austrheim H,Erambert M,Engvik A K. Processing of crust in the root of the Caledonian continental collision zone: The role of eclogitization[J]. Tectonophysics,1997,273:129-153.

[10]Wyllie P J. Constrains imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products [J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond.,1984,A310:439-456.

[11]Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 115: 369-383.

[12]Wolf M B, Wyllie P J. Garnet growth during amphibolite anatexis: Implications of a garnetiferous restite[J]. Journal of Geology, 1993, 101: 357-373.

[13]Wolf M B, Wyllie P J. Liquid segregation parameters from amphibolite dehydration melting experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 15611-15621.

[14]Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalts at 8-32 kbar: Implications of continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 35: 891-931.

[15]Patino-Douce A E, Beard J S. Dehydration melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 707-738.

[16]Skjerlie K P, Patino-Douce A E. 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 process[J]. Journal of Petrology, 2002, 43: 291-314.

[17]Springer W, Seck H A. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1997, 127: 30-45.

[18]Bird P. Continental delamination and the Colorado Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84: 7561-7571.

[19]Kay R W, Kay S M. Creation and destruction of the lower continental crust[J]. Geol. Rundsch., 1991, 80: 259-270.

[20]Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. Tectonophysics, 1993, 219: 177-189.

[21]Bird P. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 10275-10286.

[22]Houseman G A, McKenzie D P, Molnar P. Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergent belts [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 6115-6132.

[23]Houseman G A, Molnar P. Gravitational Rayleigh-Taylor instability of a layer with nonlinear viscosity and convective thinning of continental lithosphere[J]. Geophys. J. Int., 1997, 128: 125-150.

[24]Molnar P, Houseman G A, Conrad C P. Rayleigh-Taylor instability and convective thinning of mechanically thickened lithosphere: Effects of non-linear viscosity decreasing exponentially with depth and of horizontal shortening of the layer [J]. Geophys. J. Int., 1998, 133: 568-584.

[25]Conrad C P, Molnar P. Convective instability of a boundary layer with temperature- and strain-rate-dependent viscosity in terms of "available buoyancy"[J]. Geophys. J. Int., 1999, 139: 51-68.

[26]Conrad C P, Molnar P. The growth of Rayleigh-Taylor-type instabilities in the lithosphere for various rheological and density structures[J]. Geophys. J. Int., 1997, 129: 95-112.

[27]Molnar P, Lyon-Caen H. Some simple physical aspects of the support, structure, and evolution of mountain belts [A]. In: Clark S P Jr, Burchfiel B C, Suppe J eds. Processes in continental litospheric deformation[C]. Geological Society of America Special Paper, 1988, 218: 179-207.

[28]Turner S P, Sandiford M, Foden J D. Some geodynamic and compositional constraints on "post orogenic" magmatism[J]. Geology, 1992, 20: 931-934.

[29]Foley S F, Buhre S, Jacob D E. Evolution of the Archaean crust by delamination and shallow subduction[J]. Nature, 2003, 421: 249-252.

[30]Neil E A, Houseman G A. Rayleigh-Taylor instability of the upper mantle and its role in intraplate orogeny[J]. Geophys. J. Int., 1999, 138: 89-107.

[31]Fischer K M. Waning buoyancy in the crustal roots of old mountains[J]. Nature, 2002, 417: 933-936.

[32]Jull M, Kelemen P B. On the conditions for lower crustal convective instability[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 6423-6446.

[33]Hyndman R D, Currie C A, Mazzotti S P. Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat[J]. GSA Today, 2005, 15(2): 10: 1130/1052-5173.

[34]Lewis T J, Hyndman R D, Flück P. Heat flow, heat generation, and crustal temperatures in the northern Canadian Cordillera: Thermal controls of tectonics[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (B6): 2316, doi: 10.1029/2002JB002090.

[35]Ducea M N, Saleeby J B. A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the Sierra Nevada, California[J]. Int. Geol. Rev., 1998, 133: 78-93.

[36]Kistler R W, Peterman Z. Variations in Sr, Rb, K, Na and initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ in Mesozoic granitic rocks and intruded wall rocks in central California[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1973, 84: 3489-3512.

[37]Ross D C. The metamorphic and plutonic rocks of the southernmost Sierra Nevada, California, and their tectonic framework [J]. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1989, 1381: 1-159.

[38]Taylor H P, Silver L T. Oxygen isotope relationships in plutonic igneous rocks of the Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California[J]. U.S. Geological Survey Open File Report, 1978, 78-701: 423-426.

[39]DePaolo D J. A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 10470-10488.

[40]Allegre C J, Ben Othman D. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: a chemical approach to orogenesis[J]. Nature, 1980, 286: 335-342.

[41]Saleeby J B, Sams D B, Kistler R W. U/Pb zircon, strontium, and oxygen isotopic and geochronological study of the southernmost Sierra Nevada batholith, California[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 10443-10446.

[42]Hill M, O'Neil J R, Noyes H, et al. Sr, Nd and O isotope variations in compositionally zoned and unzoned plutons in the central Sierra Nevada batholith[J]. American Journal of Science, 1988, 288A: 213-241.

[43]Pickett D A, Saleeby J B. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of Cretaceous intrusive rocks from deep levels of the Sierra Nevada batholith, Tehachapi Mountains, California[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1994, 118: 198-205.

[44]Zeng L, Saleeby J B, Ducea M N. Limitations on mid-crustal assimilation in the Sierra Nevada Batholith (SNB), California[J]. Eos, Trans. AGU, 2001, 82(47): Fall Meet. Suppl., Abstract F1351.

[45]Clemens-Knott D. Geologic and isotopic investigations of the Early Cretaceous Sierra Nevada batholith, Tulare Co, CA and the Ivrea zone, NW Italian Alps: Examples of interaction between mantle derived magmas and continental crust [D]. Ph D thesis, Calif. Inst. of Technol., Pasadena, 1992.349.

[46]Coleman D S, Glazner A F. The Sierra crest magmatic event: Rapid formation of juvenile crust during the late Cretaceous in California [A]. In: Ernst W G, Nelson C A eds. Integrated Earth and Environmental Evolution of the Southwestern United States[C]. Columbia, Md: Bellwether, 1998.253-272.

[47]Coleman D S, Frost T P, Glazner A F. Evidence from the Lamarck Granodiorite for rapid Late Cretaceous crust formation in California[J]. Science, 1992, 258: 1026-1924.

[48]Zeng L. Non-modal partial melting of metasedimentary pendants in the Southern Sierra Nevada and implications for the deep origin of within-pluton isotopic heterogeneity[D]. Ph D thesis, California Institute of Technology, 2003.225.

[49]Chen J H, Moore J G. Uranium-lead isotopic ages from the Sierra Nevada batholith[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 4761-4784.

[50]Chen J H, Tilton G R. Applications of lead and strontium isotopic relationships to the petrogenesis of granitoid rocks, central Sierra Nevada batholith, California [J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103: 439-447.

[51]Ducea M N, Saleeby J B. The age and origin of a thick mafic-ultramafic keel from beneath the Sierra Nevada Batholith[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1998, 133: 169-185.

[52]Ducea M N. The California arc: Thick granitic batholiths, ecogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups[J]. GSA Today, 2001, 11: 4-10.

[53]Zeng L, Saleeby J B, Ducea M N. The origin of within-pluton isotopic heterogeneities in the southern Sierra Nevada Batholith (SNB): Constrains from Sr and Nd isotope studies[J]. Journal of Geophysical Research, 2006 (in review).

[54]Ague J J, Brimhall G H. Granites of the batholiths of California: Products of local assimilation and regional-scale crustal contamination[J]. Geology, 1987, 15: 63-66.

[55]Ague J J, Brimhall G H. Regional variations in bulk chemistry, mineralogy, and the composition of mafic and accessory minerals in the batholiths of California [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 891-911.

[56]Ague J J, Brimhall G H. Magmatic arc asymmetry and distribution of anomalous plutonic belts in the batholiths of California: Effects of assimilation, crustal thickness, and depth of crystallization[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 912-927.

[57]Zeng L, Ducea M N, Saleeby J B. Melting of pelitic sources and the origin of leucogranite dikes in the Isabella pendant, Southern Sierra Nevada, California [J]. Geological Society of America Bulletin, 2006 (in review).

[58]Zeng L, Saleeby J B, Ducea M N. Geochemical characteristics of crustal anatexis during the formation of migmatite at the Southern Sierra Nevada, California[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 150: 386-402.

[59]Zeng L, Saleeby J B, Asimow P. Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: A record from the Goat Ranch migmatite complex, southern Sierra Nevada batholith, California [J]. Geology, 2005, 33: 53-56.

[60]Bateman P C, Eaton J P. Sierra Nevada batholith[J]. Science, 1967, 158: 1407-1417.

[61]Fuis G S. Western margin of North America: A synthesis of recent seismic transects[J]. Tectonophysics, 1998, 288: 265-292.

[62]Fliedner M M, Klemperer S L, Christensen N I. Three-dimensional seismic model of the Sierra Nevada arc, California, and its implications for crustal and upper mantle composition[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 10899-10921.

[63]Jones C H, Kanimori H, Roecker S W. Missing roots and mantle "drips": Regional Pn and teleseismic arrival times in the southern Sierra Nevada and vicinity, California [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 4567-4601.

[64]Wernicke B P, Clayton R, Ducea M N, et al. Origin of high mountains in the continents: The southern Sierra Nevada [J]. Science, 1996, 271: 190-193.

[65]Jones C H, Phinney R A. Seismic structure of the lithosphere from teleseismic converted arrivals observed at small arrays in the southern Sierra Nevada and vicinity, California [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 10065-10090.

[66]Ruppert S, Fliedner M M, Zandt G. Thin crust and active upper mantle beneath the southern Sierra Nevada in the western United States[J]. Tectonophysics, 1998, 286: 237-252.

[67]Zandt G, Carrigan C R. Small-scale convective instability and upper mantle viscosity under California[J]. Science, 1993, 261: 460-463.

[68]Snow J K, Wernicke B P. Cenozoic tectonism in the central

Basin and Range: Magnitude, rate, and distribution of upper crustal strain[J]. American Journal of Science, 2000, 300: 659-719.

[69]Lee C-T, Yin Q, Rudnick R L, et al. Osmium isotopic evidence for Mesozoic removal of lithospheric mantle beneath the Sierra Nevada, California[J]. Science, 2000, 289: 1912-1916.

[70]Lee C-T, Rudnick R L, Brinhall G H Jr. Deep lithospheric dynamics beneath the Sierra Nevada during the Mesozoic and Cenozoic as inferred from xenolith petrology [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2001, 2, Paper number 2001GC000152.

[71]Zeng L, Lee C-T, Saleeby J B. Nd-Sr-Os systematics of mantle xenoliths from the Sierra Nevada Batholith: Structural and geochemical evolution of a subcontinental lithospheric mantle[J]. GSA Abstracts with Programs, 2001, 33(6): A-396.

[72]Ducea M. Constraints on the bulk composition and root foundering rates of continental arcs: A California arc perspective [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B11): 2304, doi: 10.1029/2001JB000643.

[73]Kistler R W. Two different types of lithosphere in the Sierra Nevada, California[J]. Geol. Soc. Am. Mem., 1990, 174: 271-282.

[74]Saleeby J B. On some aspects of the geology of the Sierra Nevada[J]. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 1999, 38: 17-184.

[75]Saleeby J B. Progress in tectonic and petrogenetic studies in an exposed cross-section of young (~100 Ma) continental crust, southern Sierra Nevada, California[A]. In: Salisbury M H ed. Exposed Cross Sections of the Continental Crust [C]. Reidel, Norwell, Mass., 1990.137-158.

[76]Manley C R, Glazner A F, Farmer G L. Timing of volcanism in the Sierra Nevada of California: Evidence for Pliocene delamination of the batholithic root? [J]. Geology, 2000, 28: 811-814.

[77]Farmer G L, Glazner A F, Manley C R. Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California? [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114: 754-768.

[78]Moore J G, Dodge F C W. Late Cenozoic volcanic rocks of the southern Sierra Nevada, California: I. Geology and petrology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1980, 91(1): 515-518.

[79]Van Kooten G K. Mineralogy, petrology, and geochemistry of an ultrapotassic basaltic suite, central Sierra Nevada, California [J]. Journal of Petrology, 1980, 21: 651-684.

[80]Van Kooten G K. Pb and Sr systematics of ultrapotassic and basaltic rocks from the central Sierra Nevada, California[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1981, 76: 378-385.

[81]Beard B L, Glazner A F. Petrogenesis of isotopically unusual Pliocene olivine leucitites from Deep Springs Valley, California [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 133: 402-417.

[82]Feldstein S N, Lange R A. Pliocene potassic magmas from the Kings River region, Sierra Nevada, California: Evidence for melting of a subduction-modified mantle[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1301-1320.

[83]Mukhopadhyay B, Manton W I. Upper-mantle fragments from beneath the Sierra Nevada batholith: Partial fusion, fractional crystallization, and metasomatism in a subduction-related ancient lithosphere[J]. Journal of Petrology, 1994, 35: 1417-1450.

[84]Beard B L, Glazner A F. Trace element and Sr and Nd isotopic composition of mantle xenoliths from the Big Pine volcanic field, California[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 4169-4179.

[85]Domenick M A, Kistler R W, Dodge F C W, et al. Nd and Sr isotopic study of crustal and mantle inclusions from beneath the Sierra Nevada and implications for batholith petrogenesis[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1983, 94: 713-719.

[86]Zandt G. The southern Sierra Nevada drip and the mantle wind direction beneath the southwestern United States[J]. International Geology Review, 2003, 45: 13-224.

[87]Jones C H, Farmers G L, Unruh J. Tectonics of Pliocene removal of lithosphere of the Sierra Nevada, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116: 1408-1422.

[88]Molar P, Jones C H. A test of laboratory based rheological parameters of olivine from an analysis of the late Cenozoic convective removal of mantle lithosphere beneath the Sierra Nevada, California[J]. Geophys. J. Int., 2004, 156: 555-564.

[89]Saleeby J B, Foster Z A. Topographic response to mantle lithosphere removal in the southwest Sierra Nevada, California [J]. Geology, 2004, 32: 245-248.

[90]Huber N K. Amount and timing of late Cenozoic uplift and tilt of the central Sierra Nevada, California—Evidence from the upper San Joaquin River basin[J]. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1981, 1197: 1-28.

[91]Huber N K. The late Cenozoic evolution of the Tuolumne River, central Sierra Nevada, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1990, 102: 102-115.

[92]Unruh J R. The uplift of the Sierra Nevada and implications for late Cenozoic epeirogeny in the western Cordillera[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103: 1395-1404.

[93]Wakabayashi J, Sawyer T L. Stream incision, tectonics, uplift and evolution of topography of the Sierra Nevada, California[J]. Journal of Geology, 2001, 109: 539-562.

[94]Small E E, Anderson R S. Geomorphically driven Late Cenozoic uplift in the Sierra Nevada, California[J]. Science, 1995, 270: 277-280.

[95]House M A, Wernicke B P, Farley K A, et al. Cenozoic thermal evolution of the central Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He thermochronometry [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1997, 151: 167-179.

[96]House M A, Wernicke B P, Farley K A. Dating topography

of the Sierra Nevada, California, using apatite (U-Th)/He ages[J]. Nature, 1998, 396:66-69.

[97]House M A, Wernicke B P, Farley K A. Paleogeomorphology of the Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He ages in apatite[J]. American Journal of Science, 2001, 301:77-102.

[98]Poage M A, Chamberlain C P. Stable isotopic evidence for a pre-middle Miocene rain shadow in the western Basin and Range: Implications for the paleotopography of the Sierra Nevada[J]. Tectonics, 2002,21(4):1034,doi:10.1029-2001TC001303.

[99]Stock G M, Anderson R S, Finkel R C. Pace of landscape evolution in the Sierra Nevada, California, revealed by cosmogenic dating of cave sediments[J]. Geology, 2004,32:193-196.

[100]Wolfe J A, Schorn H E, Forest C E, et al. Paleobotanical evidence for high altitudes in Nevada during the Miocene [J]. Science, 1997, 276:1672-1675.

[101]Wood D J, Saleeby J B. Late Cretaceous-Paleocene extensional collapse and disaggregation of the southernmost Sierra Nevada batholith[J]. Int. Geol. Rev., 1998, 39:973-1009.

[102]Clark M K, Maheo G, Saleeby J B, et al. The non-equilibrium landscape of the southern Sierra Nevada, California [J]. GSA Today, 2005, 15(9):4-10.

[103]Foley S F, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zone[J]. Nature, 2002, 417:837-840.

[104]Brandon C, Romanowicz B. A "No-Lid" zone in the central Chang-Thang Platform of Tibet: evidence from pure path phase velocity measurements of long period Rayleigh waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91:6547-6564.

[105]Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. J. Petrol., 1996, 37:45-71.

[106]Turner S, Hawkesworth C, Liu J, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks[J]. Nature, 1993, 364:50-54.

[107]Zhou X M, Li W X. Origin of late Cretaceous igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. Tectonophysics, 2000, 326:269-287.

[108]Lapierre H, Jahn B-M, Charvet J, et al. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and relationship with the tectonic activity in southeastern China[J]. Tectonophysics, 1997, 274:321-338.

[109]Gilder S A, Jill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constrains on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101:16137-16154.

[110]Jahn B-M, Chen P Y, Yen T P. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance [J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1976, 87:763-776.

[111]朱介寿,蔡学林,曹家敏,等.中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M].北京 地质出版社,2005.308.