

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

# 从中亚正 $\epsilon_{Nd}$ 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系

洪大卫<sup>1)</sup> 王式洸<sup>2)</sup> 谢锡林<sup>3)</sup> 张季生<sup>1)</sup> 王 涛<sup>1)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所,北京,100037; 2) 北京大学地质学系,100871

3) 中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037

**内容提要** 超大陆演化着重研究超大陆的聚合和裂解、离散,大陆地壳生长着重探索大陆地壳的生长和消亡。长期以来,人们都是如此将两者割裂开来研究的。本文从中亚造山带显生宙花岗岩同劳亚大陆的关系出发,进一步探讨超大陆演化、大陆地壳生长和地幔中俯冲板片雪崩事件(slab avalanche events)三者之间的关系,强调在超大陆形成时伴随大陆地壳急剧生长,在超大陆裂解、离散时大陆地壳的生长和消亡大体上保持平衡。无论超大陆演化或是大陆地壳生长都同地幔对流形式的变化有着密切的联系。

**关键词** 大陆地壳生长 超大陆 中亚造山带 花岗岩

超大陆演化和大陆地壳生长是地学上最基础性的科学问题,也是当前地学研究中的热点。前者着重研究超大陆的聚合和裂解、离散,后者着重探索大陆地壳的生长和消亡。长期以来,人们都是将两者割裂开来研究的,虽然又普遍认为,无论超大陆的聚散或是大陆地壳的急剧消长都同地幔的演化有密切的联系(Hoffman, 1989; Stein et al., 1994; Condie, 1998)。既然如此,三者之间究竟有什么关系?20世纪90年代以来人们开始注意到这个问题。

现在人们愈来愈趋近于一种共识,在地质历史上全球大部分或全部大陆地壳曾周期性地聚合成一个或两个超大陆,然后又裂解和离散。超大陆演化就是一个聚合和裂解、离散的过程。现在已经识别出来的超大陆,主要出现在晚太古代(2.7 Ga)、古元古代(2.1 Ga和1.8 Ga)、新元古代(1.0 Ga和0.6 Ga)和晚古生代(0.3 Ga左右)(Nance et al., 1988; Hoffman, 1992)。

关于大陆地壳生长虽然现在众说纷纭,概括起来却主要有两种看法(图1)。一种观点认为地壳现在的质量是在地球历史的极早时期形成的,以后就以稳步降低的方式重循环进入地幔,结果新增加的地壳同消失的地壳保持平衡,导致一种稳定不变的体系(Armstrong, 1968; Bowring et al., 1995)。另一种观点认为,地壳是随着地质时间不断增长的。在地

质历史上均匀的慢速生长和阵发性快速生长多幕式交替出现。生长的高峰期集中在3.6~3.5 Ga、2.7~2.6 Ga、2.0~1.8 Ga、1.2~1.0 Ga和0.5~0.3 Ga左右(McCulloch et al., 1994; Taylor et al., 1995; Condie, 1998)。

由此可见,除早太古代外,超大陆聚合事件同地壳生长高峰期十分接近,说明超大陆演化可能同大陆地壳生长有重要的联系(Taylor et al., 1995)。Condie(1998, 2000)认为大陆地壳生长同地幔中的大洋板片雪崩事件(slab avalanche events)有关。而超大陆演化则独立于板片雪崩进行。由于超大陆的形成,在板片雪崩时地壳重循环的速率大大低于地壳生长速率,因而超大陆可以捕获新生地壳,起了保存大量新生地壳的屏蔽作用。Hong等(2001)认为,超大陆演化同大陆地壳生长之间有密切的关系。超大陆聚合伴随着大陆地壳迅速增长,超大陆裂解则伴随着大陆生长和消亡大体保持平衡。本文将以中亚造山带显生宙花岗岩同劳亚大陆演化的关系为例,探讨超大陆演化同大陆地壳生长之间的关系。

## 1 中亚造山带显生宙正 $\epsilon_{Nd}$ 值花岗岩和劳亚大陆演化

近年来对中亚造山带古生代—中生代花岗岩的Sm-Nd同位素研究证明,该区发育大规模正 $\epsilon_{Nd}$ 值

注:本文为国家自然科学基金项目(编号49772105,40072023)和中国地质调查局项目(编号2001139000018)资助的成果。

收稿日期:2002-03-29;改回日期:2002-12-12;责任编辑:刘淑春。

作者简介:洪大卫,男,1938年生。研究员,长期从事花岗岩岩石学和地球化学研究。通讯地址:100037,中国地质科学院地质研究所。

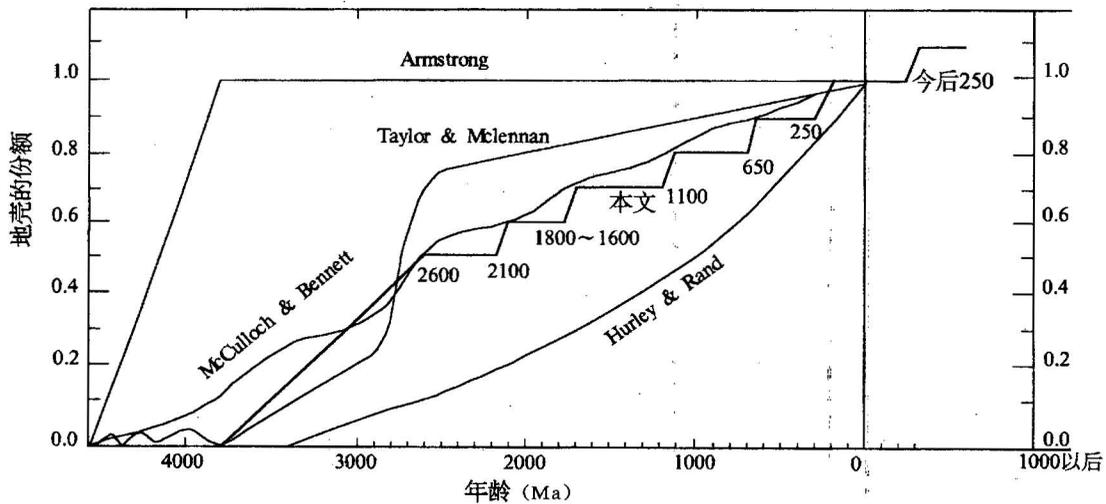


图1 地壳生长模式

Fig. 1 A selection of crustal growth models

[仅选择了代表性的 Armstrong(1968); Hurley 等(1969); McCulloch 等(1994); Taylor 等(1995)和本文]

[Models shown are those of Armstrong (1968); Hurley et al., (1969); McCulloch et al., (1994); Taylor et al., (1995) and this paper]

花岗岩,并且随着时代逐渐变新,花岗岩的  $\epsilon_{Nd}$  值逐渐降低,尤其是200 Ma 以后的中生代花岗岩,  $\epsilon_{Nd}$  值更趋近于零(Jahn et al., 2000a, 2000b; 洪大卫等, 2000)。众所周知,在初始 Nd 同位素成分的基础上大陆地壳一般可以分成地幔来源的新生(juvenile)地壳和至少有部分古老地壳来源的进化(evolved)地壳。前者具有正  $\epsilon_{Nd}$  值,类似亏损地幔来源;后者具

有负  $\epsilon_{Nd}$  值,类似古老地壳来源(Bowring et al., 1995)。因此,上地幔来源的新生物质在中亚造山带显生宙花岗岩的来源中显然将占压倒优势,因而同世界其他地区地壳来源的显生宙花岗岩形成鲜明的对比(图2)。中亚造山带如此大量的幔源物质通过花岗岩定位到陆壳中,自然将导致陆壳的大规模生长。中亚地区从古生代以来可能就是地球上大陆地

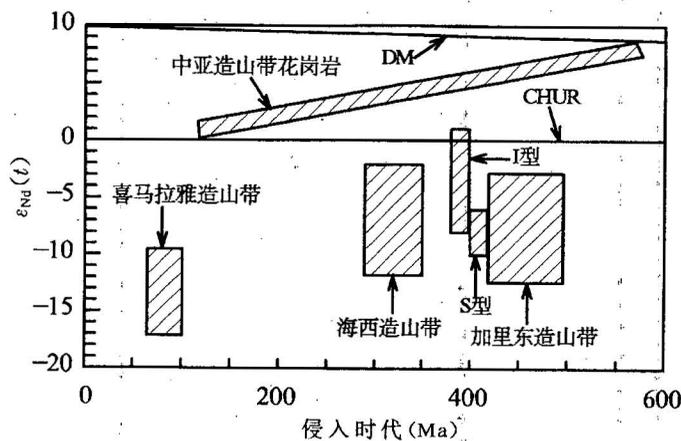


图2 显生宙花岗岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  与侵入时代的关系

Fig. 2  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs intrusive age plot for Phanerozoic granites

中亚造山带据洪大卫等(2000);加里东、海西和喜马拉雅造山带据 Patchett(1992);澳大利亚拉克兰褶皱带的S型和I型花岗岩据 McCulloch 等(1982)

Data from the following areas: CAOB, from Hong et al. (2000); Caledonides, Hercynides and Himalaya from Patchett (1992); S- and I-type granites from the Lachlan fold belt, Australia from McCulloch et al. (1982)

壳生长最重要的地带。为什么中亚地区会出露现今世界上面积最大的一片花岗岩?为什么显生宙正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩会集中形成于中亚造山带?为什么中亚地区会成为显生宙大陆生长最重要的地带?我们认为,这可能同超大陆的聚合,特别是同超大陆聚合过程中板块构造活动最活跃、大陆拼合最频繁、板块缝合带最密集的地区有关。

显生宙出现的唯一一次、也是人们普遍认同的一次超大陆 Pangea, 在形态构造上由两个明显的部分组成。南部露出水面的冈瓦纳大陆整个古生代至三叠纪是一个较完整的整体。而同一时期内北部的劳亚大陆则大部分时间处于水下,并由多个大陆块体逐渐拼合成一个巨型大陆。Pangea 的起始时间为中石炭世(320 Ma),其标志是劳亚大陆与冈瓦纳大陆在海西运动期的碰撞。到三叠纪(230 Ma)最后形成一个统一的露出水面的超大陆。联合古陆的破裂则始于中侏罗世(160 Ma, Veevers, 1994)。由此可见,在 Pangea 超大陆的整个聚合过程中,构造活动最强烈的地区是北部的劳亚大陆。而中亚造山带的演化恰好是劳亚大陆形成的关键。

中亚造山带位于西伯利亚和中朝—塔里木地台之间。作为中亚造山带形成背景的古亚洲洋,大约在 1000 Ma 前开始张开,大规模扩张在 700~600 Ma。在经历过若干微陆块之间、微陆块与南北大陆之间的碰撞之后,直至晚泥盆世—早石炭世最终封闭(Dobretsov et al., 1995; Khain et al., 2002)。值得注意的是,该区花岗岩的钨模式年龄  $T_{\text{DM}}$  同由蛇绿岩和岛弧杂岩时代所记录的古亚洲洋大规模扩张的时间十分接近(洪大卫等, 2000)。由此或可推断,在中亚造山带的花岗岩中至少有一部分(例如某些加里东期和海西早期的花岗岩)的形成可能同古亚洲洋消减时的板块俯冲作用(地壳水平生长)有关,花岗岩的来源可能是俯冲的洋壳及其上伏的地幔楔(Martin, 1986; Defant et al., 1990)。而晚泥盆世—早石炭世的碰撞事件及其后引发的大规模拉伸体制,则可能为地幔来源物质的底侵作用、碰撞后的拆沉作用提供了有利的条件,导致由先存洋壳转化成的年轻下地壳发生部分熔融,形成大面积的晚古生代—中生代正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩(洪大卫等, 2000)。总之,中亚造山带的显生宙花岗岩是在俯冲、碰撞及碰撞之后的拉伸机制下形成的。因此,中亚造山带的正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩正是劳亚大陆形成过程中的产物,在时空分布上同劳亚大陆的聚合完全同步。

Engebreston 等(1992)根据古火山相对现代热

点的位移及海底地磁条带的年代分布,计算出代板块运动的速度和方向,同时也可估计出过去 180 Ma 大洋板片插入地幔后积聚的位置(所谓古俯冲板块的坟场)和数量。结果发现过去 180 Ma 间大洋板片沉入海沟深部最多的地区(总长度超过 8000 km),是在亚洲东部。近年来的全球地震层析成像研究(Fukao et al., 1994; Grand et al., 1997; van der Voo et al., 1999; van der Hilst et al., 1999)发现  $P$  波高速异常同 Engebreston 等(1992)计算的俯冲板片积聚的位置十分一致。这种空间上的一致性说明,高速异常体标志着在过去 180 Ma 间在消减板块边界上积聚的俯冲板片。但是在亚洲东部核幔边界上的高速异常比在 700~1700 km 深处的高速异常及计算获得的过去 180 Ma 间俯冲板片的分布都要宽得多。为了解释这种异常,必须回溯到更早的地质历史时期。实际上,上述核幔边界上的高速异常大致同亚洲大陆上二叠纪、三叠纪和侏罗纪消减板块边界集中的地区重叠(图 3)。那里是当时全球板块构造活动最活跃、大陆拼合最频繁、板块缝合带最密集的地区。况且,根据地质和古地磁资料,西伯利亚地台在整个显生宙都位于北半球中纬度至高纬度位置,只发生过原地的顺时针旋转,未有任何大规模的漂移(Yarmolyuk et al., 2000; Kovalenko et al., 2002)。因此,在亚洲大陆之下核幔边界上的最大  $P$  波高速异常可能反映了许多大陆块体在 300~200 Ma 期间碰撞、拼合组成劳亚超大陆的过程中俯冲和积聚的大洋板片。可惜对于 200 Ma 前俯冲板片的数量现在还很难作出定量的估计(Fukao et al., 1994)。

有趣的是,东亚大陆之下核幔边界上见到的世界最大的  $P$  波高速异常恰好同中亚造山带的正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩分布区重叠。这就进一步证实,至少从 300 Ma 以来亚洲东部就是世界上板块构造活动最活跃、大陆拼合最频繁的地区,才会在劳亚大陆形成的 300~200 Ma 前有大量的大洋板片下插到亚洲大陆之下。因而该区自然也就是地幔来源的岩浆活动最强烈、显生宙花岗岩最发育、大陆地壳生长最活跃的地区。实际上,在每一个地质历史时期大规模地壳生长都不是全球性普遍进行的,总是局限在地球上的某些局部地带,主要是板块缝合带或古板块缝合带(Boher et al., 1992; Albareda, 1998)。

不仅如此,二叠纪末同上述超大陆聚合相应,还爆发了全球范围最大规模的一次生物集群绝灭事件、全球性缺氧事件、海平面变化和气候变化

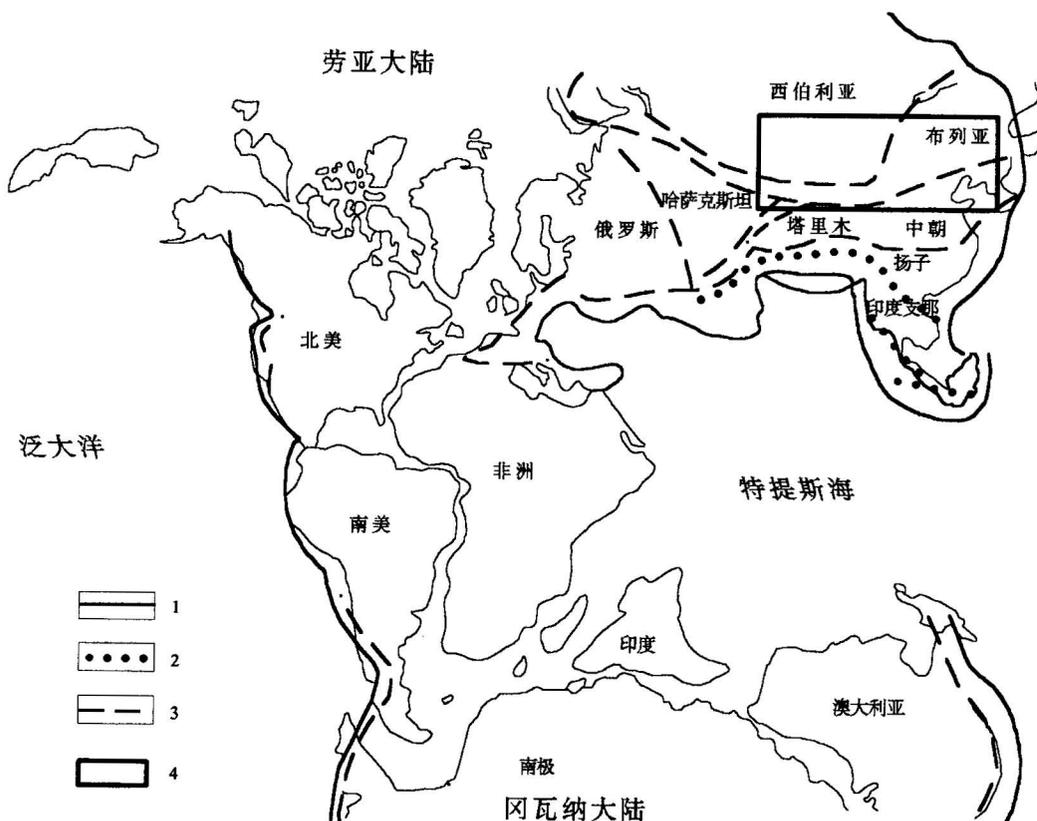


图3 二叠纪、三叠纪和侏罗纪时汇聚板块边界的全球分布(据 Fukao 等,1994)

Fig. 3 World distribution of consuming plate boundaries during the Jurassic, Triassic and Permian time  
(after Fukao et al., 1994)

1—侏罗纪俯冲带;2—中三叠世—晚三叠世俯冲带;3—二叠纪—早三叠世俯冲带;4—本文研究区

1—Jurassic subduction zone; 2—Middle—Late Triassic subduction zone; 3—Permian—Early Triassic subduction zone; 4—research area

(Veevers, 1994)。可能是因为在超大陆聚合的过程中,古老洋壳的俯冲将达到最大程度,导致广泛的岛弧岩浆活动,影响着化学元素和同位素地球化学的变化。在大洋板块最终消失、大陆板块碰撞的过程中更会促使地壳增厚、壳内熔融和分异、麻粒岩相变质作用、玄武岩浆的底侵作用和岩石圈地幔的拆沉作用,进一步引起大规模的后造山岩浆活动。从而不仅导致大规模大陆地壳生长,还将引发全球性缺氧事件、气候变化和海平面变化,最终导致大规模的生物集群绝灭。由此可见,晚古生代一系列相关事件的发生不是偶然的,适可为显生宙发生过超大陆聚合和大规模大陆地壳生长提供了更多方面的佐证。

前曾指出,一般认为大陆地壳生长的高峰期都同超大陆的聚合相对应。因此在超大陆裂解、离散时应当没有明显的大陆地壳生长。但是在超大陆裂解、离散时通常伴随着大规模的大陆溢流(高原)玄武岩喷发和大洋高原形成,为了保持大陆地壳生长的均

衡,必将有类似数量的大陆地壳重循环进入地幔,同大陆溢流(高原)玄武岩喷发和大洋高原形成所导致的地壳生长适好互相抵消。例如如今在南半球以30°S为中心,在南大西洋、印度洋和南太平洋的洋岛玄武岩中存在一个Pb同位素异常的Dupal带(Dupre et al., 1983; Hart, 1984),它可能就是由于冈瓦纳大陆从中侏罗世末(160 Ma)以来裂解、离散和南大西洋、印度洋张开过程中陆壳重循环沉入地幔导致地幔成分改变的结果(Anderson, 1985; Hawkesworth et al., 1986; Condie, 2000)。只是由于地质历史上这种显示Pb同位素异常的洋岛玄武岩伴随着大洋扩张而被带入俯冲带,因俯冲而消亡,不易被人们察觉。类似地,中亚造山带200 Ma以后的中生代花岗岩 $\epsilon_{Nd}$ 值趋近于零,就可能是因为在200 Ma以后Pangea超大陆开始裂解、离散,大陆地壳重循环作用增强的结果。

因此,从Pangea超大陆演化看,大陆地壳的演

化不仅有聚散,还有生长和消亡(重循环)。中亚地区在显生宙既然有大规模地壳生长,就说明当时大陆地壳的生长速率超过地壳重循环速率。这可能是因为在超大陆形成时,由于各个大陆碎块逐渐拼合,在大陆总面积不变的情况下,大陆的总周长减少,流入海洋的河流总数也减少,这样,因俯冲和碰撞导致的陆壳重循环的速率将减小(Condie, 2000)。同时由于地幔对流速率的增加以及大洋中脊系总长度增加,将导致俯冲速率增加,因而产生洋壳的速率以及在岛弧系中新生地壳的生长速率都将会增加(Larson, 1991),因而大陆地壳迅速地生长;而在超大陆裂解、离散的过程中一方面由于大洋高原形成、

大陆溢流玄武岩喷发将导致大规模的地壳生长;另一方面在大陆总面积不变的情况下,随着大陆总周长增加,流入海洋的河流的总数增加,地壳重循环的速率也将增加。消亡(重循环)的大陆地壳同新生的大陆地壳大致保持平衡,实现了大陆生长的均衡状态。情况如果是这样,大陆地壳生长曲线大致将保持一种阶梯状的形态(图1)。目前正好处于 Pangea 超大陆裂解、离散的阶段(Hoffman, 1992),因此大陆生长基本上处于均衡的状态(Larson, 1991)。按照超大陆演化周期为 0.4~0.5 Ga(Nance et al., 1988),预计 250 Ma 以后还将有一次超大陆形成(Maruyama, 1994),大陆地壳也将继续生长。

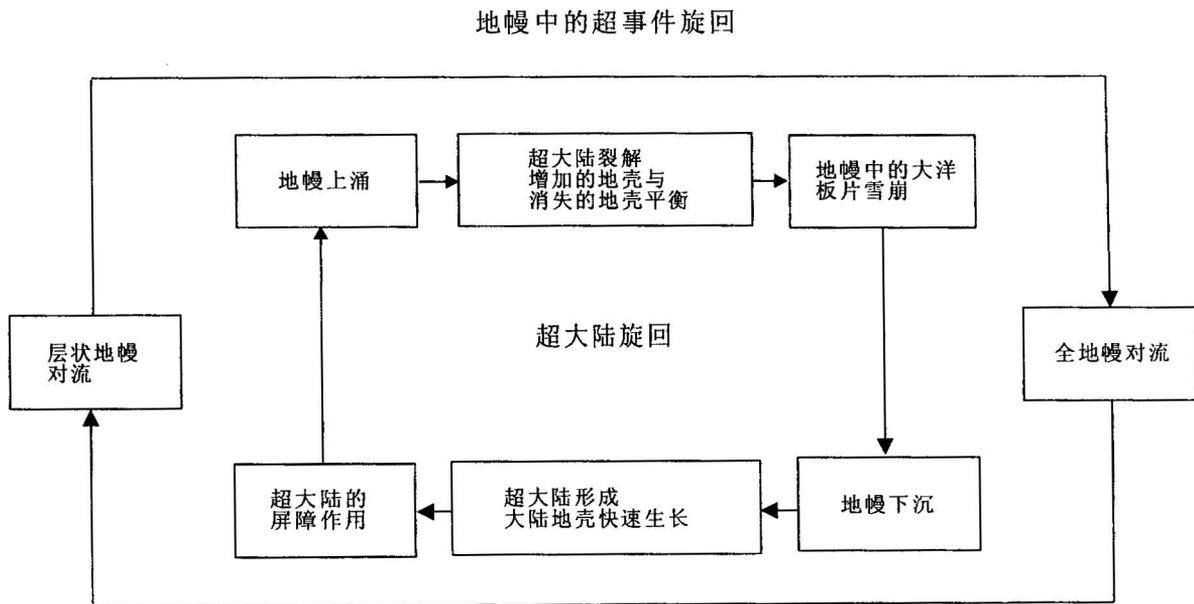


图 4 超大陆演化和地幔超事件演化模式(据 Condie, 1998, 2000 修改)

Fig. 4 The supercontinental cycle and superevent cycle (modified after Condie, 1998, 2000)

## 2 超大陆演化和大陆地壳生长的机制

在探讨超大陆演化和大陆地壳生长的机制时,现有的大部分模式都强调,660 km 深处的地震不连续面周期性地不稳定或是控制了大陆地壳生长(Stein et al., 1994; Breuer et al., 1995)或是控制了超大陆演化(Fukao et al., 1994; Maruyama, 1994; Peltier et al., 1997)。大洋板块俯冲时俯冲的大洋板片插入地幔,一直可以下插到660 km 不连续面,并沿此界面平伸加厚。聚积在660 km 不连续面上的大洋俯冲板片累积到一定程度后将发生雪崩,穿过660 km 不连续面下沉到下地幔。这时地幔对流的形式就从层状对流在短期内灾变性地转变为全地幔对

流。当俯冲板片下沉到核幔边界上方的 D' 层时,将在那里受热产生大型地幔柱,后者迅速上升到岩石圈底部,直接或间接地导致地壳生长,或是导致超大陆裂解、离散。

根据上述对中亚造山带古生代—中生代正  $\epsilon_{Nd}$  值花岗岩和 Pangea 超大陆演化的讨论,或许可以初步认为,超大陆演化、大陆地壳生长和地幔对流形式的变化三者之间有密切的关系,并可推论如下(图4):自中元古代以来,超大陆裂解过程伴随着新生地壳生长速率同地壳重循环速率大致保持均衡,同时导致在660 km 不连续面积聚的大洋板片灾变性雪崩,引发冷地幔下沉,地幔对流形式由层状对流转变为全地幔对流(Fukao et al., 1994; Maruyama, 1994;

Stein et al., 1994)。地幔下沉吸引大陆岩石圈碎块向其集中,从而导致形成超大陆(Hoffman, 1989; Maruyama, 1994; Peltier et al., 1997)。超大陆聚合过程伴随着大规模的板块俯冲作用和碰撞作用以及碰撞之后的伸展机制,导致大规模的地幔来源岩浆添加到大陆地壳中。新生地壳的生长速率大大超过地壳重循环的速率,因而发生显著的大陆地壳生长。在超大陆形成之后,地幔对流的形式又从全地幔对流恢复到层状对流。由于超大陆的屏蔽作用,远离俯冲边缘,岩石圈下部放射性热能聚积,使得超大陆之下的地幔受热,继而发生热地幔上涌,最终导致新一轮超大陆裂解(Gurnis, 1988; Hoffman, 1989; Fukao et al., 1994)。

### 3 结论

中亚造山带正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩的发育,说明该区在显生宙发生过显著的大陆地壳生长。在时空配置上它们正好同劳亚超大陆聚合完全一致,也同地球物理资料反映的深部情况在空间上重叠。显生宙大陆地壳生长集中出现在劳亚超大陆聚合过程中板块构造活动最活跃、大陆拼合最频繁、板块缝合带最密集的地区。据此实例进一步推论,自中元古代以来的地质历史上,超大陆裂解过程中,新生地壳的生长速率同地壳重循环的速率大体保持平衡,同时导致660 km 不连续面上积聚的大洋板片发生雪崩,引发冷地幔下沉,地幔对流形式由层状对流灾变性转变为全地幔对流。大量的地幔下沉导致超大陆聚合,伴随新生地壳迅速生长。由于超大陆的热屏蔽作用,地幔对流从全地幔对流返回到层状对流。岩石圈下部放射性热能聚积,导致热地幔上涌,最终引起新一轮超大陆裂解。

致谢:美国新墨西哥矿业工程学院 K. C. Condie 教授和英国 Leicester 大学 B. F. Windley 教授审阅过本文初稿,并提出了十分宝贵的意见;国家自然科学基金委员会从1990年以来一直资助本项研究,一并在在此表示感谢。特别要指出的是,张炳熹院士生前指导过本项研究,谨以此文表示对张炳熹先生的深切怀念和敬意。

### 参 考 文 献

洪大卫,王式 光,谢锡林,张季生. 2000. 兴蒙造山带正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地质学前沿, 7: 441~456.

### References

Albarede F. 1998. The growth of continental crust. *Tectonophysics*,

296:1~14.

Anderson D L. 1985. Hotspot magmas can form by fractionation and contamination of mid-ocean ridge basalts. *Nature*, 318: 145~149.

Armstrong R L. 1968. A model for Sr and Pb isotope evolution in a dynamic earth. *Rev. Geophys.*, 6:175~199.

Boher M, Abouchami W, Michard A, Albarede J, Arndt N T. 1992. Crustal growth in West-Africa at 2.1 Ga. *J. Geophys. Res.*, 97: 345~369.

Bowring S A, Housh T. 1995. The Earth's early evolution. *Science*, 269:1535~1540.

Breuer D, Spohn T. 1995. Possible flush instability in mantle convection at the Archean-Proterozoic transition. *Nature*, 378: 608~610.

Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents; a mantle avalanche connection? *Earth Planet Sci. Lett.*, 163:97~108.

Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322: 153~162.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.

Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian ocean. *International Geol. Rev.*, 37: 335~360.

Dupre B, Allegre C. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303: 142~146.

Engelbreton D C, Kelley K P, Cashman H J, Richards M A. 1992. 180 million years of subduction. *GSA Today*, 2: 93~95, 100.

Fukao Y, Maruyama S, Obayashi M, Inoue H. 1994. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. *J. Geol. Soc. Japan*, 100(1): 4~23.

Grand S P, van der Hilst R D, Widiyantoro S. 1997. Global seismic tomography: a snapshot of convection in the earth. *GSA, today*, 7(4):1~7.

Gurnis M. 1988. Large scale mantle convection and aggregation and dispersal of supercontinents. *Nature*, 332: 695~699.

Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753~757.

Hawkesworth C J, Mantovani M S M, Taylor P N, Palacz Z. 1986. Evidence from the Parana of south Brazil for a continental contribution to Dupal Basalts. *Nature*, 322: 356~358.

Hoffman P F. 1989. Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 to 1.0 Ga). *Geology*, 17:135~138.

Hoffman P F. 1992. Supercontinents, in *Encyclopedia of Earth system science*. Academic, San Diego, Calif., 4: 323~328.

Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xinlin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive  $\epsilon_{\text{Nd}}$  granitoids in the Da Hinggar Mts-Mongolia orogenic belt and continental crustal growth. *Earth Science Frontiers*, 7: 441~456 (in Chinese with English abstracts).

Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2001. The Phanerozoic continental growth in central Asia and the evolution of Laurasia supercontinent. *Gondwana Res.*, 4: 632~633.

Hurley P M, Rand J R. 1969. Pre-drift continental nuclei. *Science*, 164: 1229~1242.

Jahn B M, Wu F, Hong D. 2000a. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 109(1): 5~

- 20.
- Jahn B M, Wu F, Chen B. 2000b. Massive granitoid generation in central Asia; Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23; 82~92.
- Khain E V, Bibikova E V, Kroner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt; U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 199; 311~325.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Vladikin N V, Ivanov V G, Kovach V P, Kozlovsky A M, Kostititsin Yu A, Kotov A B, Salnikova E B. 2002. Epoch of formation, geodynamic setting and sources of bearing rare metal magmatism in Central Asia. *Petrology*, 10(3): 227~253 (in Russian).
- Larson R L. 1991. Latest pulse of Earth; evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 19; 547~550.
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction zone magmas. *Geology*, 14; 753~756.
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. *J. Geod. Soc. Japan*, 100(1): 24~49.
- McCulloch M T, Chappell B W. 1982. Nd isotopic characteristics of S- and I-type granites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 58; 51~64.
- McCulloch M T, Bennett V C. 1994. Progressive growth of the earth's continental crust and depleted mantle; Geochemical constraints. *Geochim. et Cosmochim.*, 58; 4717~4738.
- Nance R D, Worsley T R, Moody J B. 1988. The supercontinent cycle. *Sci. Amer.* 256(July); 72~79.
- Patchett P J. 1992. Isotopic studies of Proterozoic crustal growth and evolution. In: Condie K C, ed. *Proterozoic Crustal Evolution*. Amsterdam; Elsevier, 481~508.
- Peltier W R, Butler S P, Solheim L P. 1997. The influence of phase transformations on mantle mixing and plate tectonics. In: Crossley D J, ed. *Earth's Deep Interior*. Amsterdam; Gordon and Breach, 405~430.
- Stein M, Hofmann A W. 1994. Mantle plumes and episodic crustal growth. *Nature*, 372; 63~68.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33; 241~265.
- van der Hilst R D, Karason H. 1999. Compositional heterogeneity in the bottom 1000 kilometers of earth's mantle; toward a hybrid convection model. *Science*, 283; 1885~1888.
- van der Voo R, Sparkman W, Bijwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. *Nature*, 397; 246~249.
- Veevers J J. 1994. Pangea; evolution of a supercontinent and its consequences for earth's paleoclimate and sedimentary environments. In: Klein G D, ed. *Pangea, Paleoclimate, Tectonics, and Sedimentation during Accretion, Zenith, and Breakup of a Supercontinent*. Boulder, Colorado, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 288; 13~23.
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Kuzmin M I. 2000. North Asia superplume in the Phanerozoic; magmatism and geodynamics. *Geotectonics*, (5); 3~29 (in Russian with English abstract).

## Correlation between Continental Crustal Growth and the Supercontinental Cycle: Evidence from the Granites with Positive $\epsilon_{Nd}$ in the Central Asian Orogenic Belt

HONG Dawei<sup>1)</sup>, WANG Shiguang<sup>2)</sup>, XIE Xilin<sup>3)</sup>, ZHANG Jisheng<sup>1)</sup>, WANG Tao<sup>1)</sup>

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*; 2) *Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871*; 3) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

### Abstract

Studies of the supercontinental cycle are mainly concentrated on the assembly, breakup and dispersal of supercontinents, and studies of the continental crustal growth largely on the growth and loss (recycling) of the crust. These two problems have long been studied independently from each other. Paleozoic-Mesozoic granites in the Central Asian orogenic belt have commonly positive  $\epsilon_{Nd}$  values, implying large-scale continental crustal growth in the Phanerozoic. They coincided temporally and spatially with the Phanerozoic Pangea supercontinental cycle, and overlapped in space the *P*-wave high-*V* anomalies and calculated positions of subducted slabs for the last 180 Ma. All these suggest that the Phanerozoic Laurasian supercontinental assembly was accompanied by large-scale continental crustal growth in Central Asia. Based on these observations, this paper proposes that there may be close and original correlations among the supercontinental cycle, continental crustal growth and catastrophic slab avalanches in the mantle. In this model we suggest that a rapid continental crustal growth occurred during the supercontinent assembly, whereas during its breakup and dispersal growths of the crust were balanced by losses, resulting in a steady-state system. The supercontinental cycle and the continental crustal growth are both governed by the changing patterns of mantle convection.

**Key words:** continental crustal growth; supercontinent; Central Asian orogenic belt; granite