

# 板块构造学说面临的挑战

朱炳泉, 崔学军

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 板块构造学说揭示了海底扩张和板块的水平运动现象, 阐明了与板块边界相联系的岩浆活动。但大量资料表明地球历史上岩石圈板块与软流圈是同步耦合运动的, 而不是在软流圈上滑移。全球扩张与俯冲的不对称性现象也是不吻合于板块构造理论所期望的。安第斯弧作为洋陆俯冲的典范在地球物理和地球化学上均缺少证据。对于与俯冲带相关的弧后引张、大陆增生、地壳物质返回地幔和成矿作用方面均存在较多的问题。大火成岩省所揭示的岩浆活动现象超越了板块构造的格局, 并发生在整个地质历史时期和更广泛的地域范围。大火成岩省学说所解释的大陆增长、地壳物质返回地幔和成矿作用过程完全不同于板块构造学说。驱动地幔柱的深地幔对流假说允许岩石圈板块与下伏软流圈一起运动, 吻合铅同位素所揭示的岩石圈与软流圈长期耦合的规律。

**关键词:** 板块构造学说; 大火成岩省; 大陆增长; 壳幔耦合

**中图分类号:** P542<sup>+</sup>. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2006)03-0265-10

在 1910 年魏格纳提出大陆漂移说后, 由于 20 世纪 50 ~ 60 年代海底扩张的发现以及得到部分热动力模式支持, 使大陆漂移说发展成板块构造学说。近 30 年以来, 这一学说在地球科学领域内占有统治地位。但长期以来国内外非板块构造的少数派一直存在, 如地体说、膨胀说、减压说、槽台说、地洼说、超级地幔柱说等等。在许多基本上认同板块构造学说的文章中也常常提到一些地质观察不是板块构造学说所能解释和预测的。中国地质学界自 20 世纪 80 年代以来已全面接受板块构造学说, 并很少听到少数学派的观点 (陈国达, 2005; 陈国达等, 2005), 更没有批评板块构造学说的文章出现。这是一种不正常的现象。板块构造学说的基本观点认为: 岩石圈板块像木块漂浮在水面上一样在软流圈上漂移, 它们的运动是不同步的。海洋岩石圈通过洋中脊扩张不断增长, 老的岩石圈则又通过俯冲带被削减并返回到软流圈中。通过俯冲带的岛弧和大陆边缘火山作用可产生新的地壳, 在弧后则产生弧后引张和弧后

盆地火山作用。这样一种运动是通过软流圈的浅地幔对流所驱动。

然而自 80 年代以来, 地球科学的研究成果表明许多地质观察事实是板块构造学说不能解释的, 在一些基本假设前提上存在着疑问。本文从以下几个方面对板块构造学说的正确性提出质疑。

## 1 岩石圈板块是在软流圈上漂移吗?

“岩石圈在软流圈上漂移”是为了满足“大陆漂移说”前提而建立的一种假设, 并没有得到具有充分必要条件的观察事实和理论模式支持。软流圈物质的粘滞性能否允许岩石圈在上面滑移在地球动力学研究上一直没有得到肯定的结论, 而且多数文章的结论是否定的。一些岛链 - 海山链火山喷发的时间 - 空间线性变化是这一假说的基本依据。位于太平洋板块上具 NWW-NW 走向的皇帝 - 夏威夷火山

收稿日期: 2006 - 02 - 17; 改回日期: 2006 - 04 - 11

基金项目: 中国科学院重大 B (KZ951-B1-413) 资助。

作者简介: 朱炳泉 (1940 - ), 男, 研究员, 博士生导师, 从事地球化学、地球动力学与成矿作用研究。

链是具有时间 - 空间线性变化的典型岛链,也是全球唯一的例证。但这种观察事实仍然是依赖于另一个假设,即在软流圈产生火山作用的热点是不动的点;板块在上面滑移产生了火山喷发的时间 - 空间线性变化。地幔柱的观点认为热点火山作用来自下地幔或核幔边界,而非软流圈。同时在太平洋板块上存在许多 NWW-NW 走向岛链与海山链。其中绝大部分岛链与海山链的火山作用年龄在线性链上是随机分布的。如位于南太平洋的 Cook-Austral 火山链在同一地点可存在 0~39 Ma 的火山作用 (Lassiter *et al*, 2003),均表现出 H MU 端员的地幔特征。按夏威夷火山链所假设的板块漂移速率计算,太平洋板块已向 NWW 漂移了近 4000km。那么, Cook-Austral 火山链岩石圈之下的地幔则早应发生了改变。然而,这一火山链岩浆作用的地幔源性质在 39Ma 中并没有改变。Pitcairn-Gambier 链的火山作用持续了达 13Ma,一直保持了 EM<sub>1</sub> 地幔源特征 (Dostal *et al*, 1998)。Kerguelen 群岛在同一地点可出现持续 115Ma 的火山作用,均具有 EM<sub>2</sub> 地幔源特征 (Frey *et al*, 2000)。这表明岩石圈与提供岩浆的幔源是同步运动的。因此“岩石圈在软流圈地幔上漂移”的假说并没有充分的依据。

近二十年来关于地幔组成不均一性的研究取得了长足进展。相关成果表明在不同构造域派生的幔源岩,其主、微量元素和同位素组成在地质历史的相当长时间内是具有相互区别的固有特征。由这些幔源岩演化而来的地壳岩石也相当程度上继承了这些特征。大规模的幔源岩浆活动必须要有岩石圈以下的地幔物质的参与。这一方面最具有代表性的成果是地幔 DUPAL“异常”的发现和广泛的深入研究。进一步的研究表明,DUPAL 异常实际上代表了印度洋和特提斯域软流圈地幔的同位素信息。DUPAL 异常虽是根据 MORB 同位素特征区划的区域性异常,但大量 OB、AB 和大部分的海洋高原玄武岩同位素组成 (除少量与下地幔有关地幔柱岩浆活动外)变化也是与相应的 MORB 是同步变化的。即太平洋域与印度洋自晚侏罗世来存在明显的差别。它们的地球化学特征区别包括 Fe、Na、Ti 等主元素和 Pb、Nd、Sr 同位素。大量的同位素证据表明 DUPAL 异常存在以下的明显边界: (1) 位于南极与澳洲之间近于东经 126°E 的南北向边界 (AAD); (2) 位于太平洋与菲律宾洋之间小笠原 - 马利亚纳弧的南北向边界 (BMD); (3) DUPAL 异常也延伸至南大西洋南纬 25°S 至 50°S 之间; (4) 位于地中海西部撒丁

岛附近的南北向边界。因此 DUPAL 异常域应包括从东亚边缘海 (菲律宾洋、南海、苏拉威西海和苏禄海)、印度洋、大西洋南部、地中海中东部至太平洋东南角。在亚洲大陆上 DUPAL 异常则广泛存在于秦岭 - 祁连 - 天山以南的后古生代幔源岩中。位于阿尔卑斯 - 中东 - 青藏 - 华南的古、新特提斯洋的 MORB 是典型的代表。因此古生代以来在整个特提斯 - 印度洋构造域保持了岩石圈与软流圈的耦合 (Pyle *et al*, 1992; Xu and Han, 1996; Mahoney *et al*, 1998; Zhu *et al*, 2004; Zhang *et al*, 2005)。中国东部壳源与幔源岩石 Pb 同位素示踪与填图资料也表明至少自中生代以来华北、扬子与华夏块体均保持了壳幔的同步耦合变化,而且它们的地球化学差异表现得十分清晰 (张理刚, 1995; 朱炳泉, 2001)。张本仁等对华北块体南缘和秦岭地区的详细地球化学研究,表明自太古宙以来华北与北秦岭的幔源岩石在主微量元素与同位素组成上均存在明显的差异,表明华北与北秦岭块体自形成以来它们的岩石圈与软流圈地幔就一直保持着各自的耦合关系 (张本仁等, 1994; 1996)。因此大量的证据表明岩石圈与软流圈地幔在地质历史上是耦合在一起同步运动的。

## 2 为什么全球板块出现不对称的扩张与俯冲体系?

按照板块构造的观点,被扩张的岩石圈应在与扩张方面产生俯冲削减 (即俯冲带应与洋中脊平行),并且扩张的速率应与俯冲削减的速率相平衡。然而全球板块出现的扩张与俯冲体系是不对称、不平衡的,主要表现在扩张与俯冲在方向上和速率上不一致。全球海底扩张的洋中脊走向总体上是南北向,表明海底扩张主要是 E-W 向。同时洋脊的分布密度在南半球高于北半球。按板块构造的观点,扩张的洋壳也应在近 E-W 方向上削减,即具有 S-N 走向的俯冲带。判别现代俯冲带是否存在,在地球物理上则要依据于是否有贝尼霍夫带和 S 波层析成像在软流圈中是否有连续下插刚性板片的存在。如阿留申弧、日本弧、汤加弧、苏门答腊弧、北美西海岸 Cascade 弧等具有这一方面的证据 (Spicak *et al*, 2004; Gorbatoov & Kennett, 2003)。这些弧除了汤加弧位于南半球并具有 N-S 走向外,其它均位于或接近于北半球,在走向上则是近 E-W 向。具 N-S 走向的马利亚纳弧和安第斯弧则缺少现代俯冲带存在

的地球物理和地球化学证据(下面将进一步讨论)。大西洋的两侧则完全没有俯冲带出现。因此大洋板块的削减主要是沿着洋中脊走向,而不是扩张方向,如东太平洋中脊正在俯冲到北美大陆之下。

按板块学说观点,地质历史上的板块俯冲带则主要依据于蛇绿岩套。全球蛇绿岩套也只分布于或接近于北半球的有限区域内(图 1),且基本上也是呈近 E-W 走向。同时极大部分的蛇绿岩套只反映了微陆块与小洋盆的接触关系,表明俯冲的规模不大。如东南亚安达曼群岛、苏拉威西中部与东南部,

加里曼丹东北与西北部和巴拉望等地的新生代蛇绿岩套主要反映了东亚边缘海盆之间的关系(Pubellier *et al*, 2004)。中国大陆上位于南秦岭与南祁连山的古生代蛇绿岩套,以及赣东北-皖南的新元古代蛇绿岩套也均反映微陆块与小洋盆的接触关系,没有反映出华北与扬子块体的直接碰撞关系(Zhang *et al*, 1996)。以研究科迪勒拉造山带基础上发展起来的地球物理学(Ben-Avraham *et al*, 1981)和以增生弧观点研究古亚洲构造域(Altaids)(Senger, 1993)的学者均认为蛇绿岩套没有块体边界的指示意义。

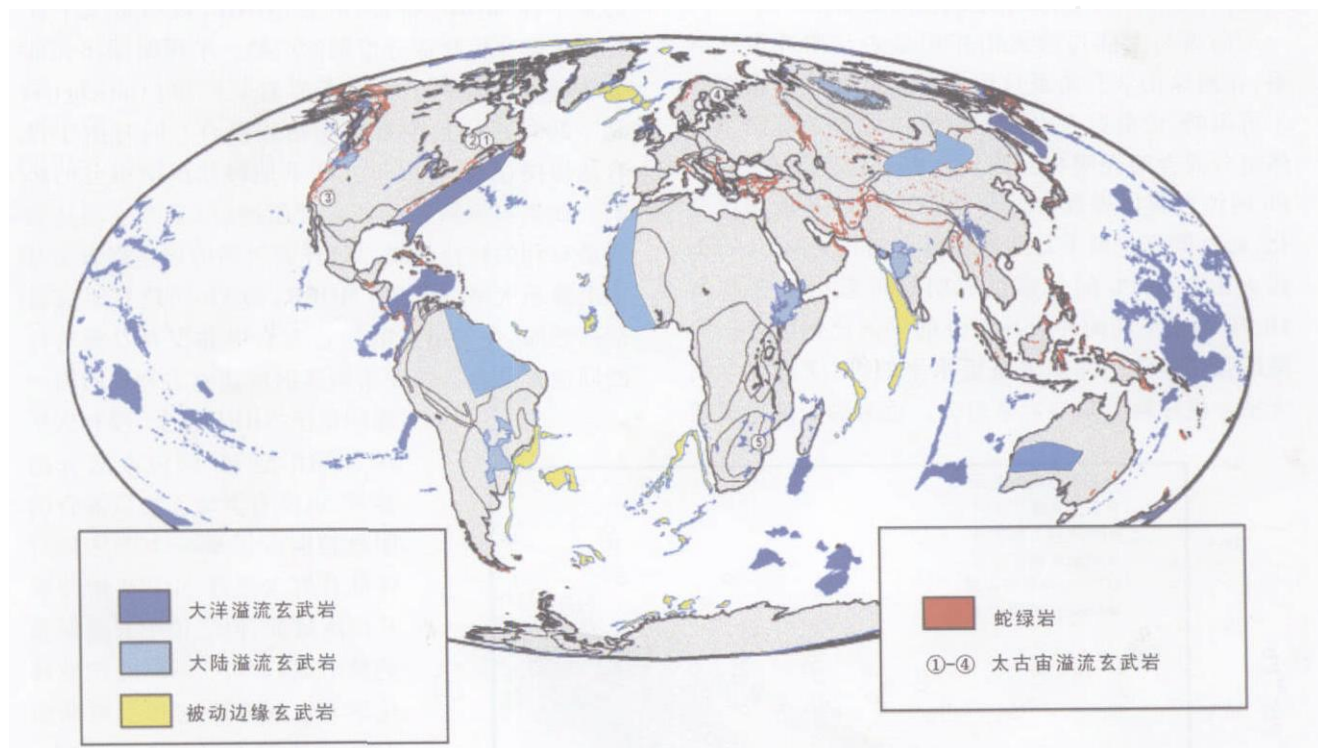


图 1 全球大火成岩省和蛇绿岩的分布(参考 Mann and Taira, 2004)

Fig 1 Global distribution of large igneous provinces and ophiolite zones

上述事实表明东西向的洋底扩张并没有完全通过俯冲带被削减,特别是南半球。这些观察事实也得到大地测量资料的支持。自 1976 年由 NASA 开展卫星激光大地测量以来,无论是前期的 LAGEOS 的测量资料,还是后来由两个新的激光卫星测距系统(VBI 与 SRL)得到的大地测量资料,均表明在太平洋地区板块削减的速率明显小于海底扩张的速率。因此地球不是一个对称的椭球体,而是南半球比北半球更突出的不对称椭球体。Robaudo & Harrison(1993)根据 VBI 与 SRL 的测量数据得出地球半径以 18 mm/a 的速率在增长。根据海底扩张的速率,如果扩张的大洋板块没有被削减,则地球半径

应每年增加 21 mm,只略高于大地测量的值。这表明削减去的大洋岩石圈很少。但后来报导的数据只有 4.3 mm/a(Gerasimenko & Kato, 2000)。显然激光卫星测距的精度还不够高,有待于增加观察台网,获得更精确的数据来进一步确证上述结论是否正确。

### 3 安第斯弧是洋陆俯冲的典范吗?

由于安第斯造山带存在自侏罗纪至新生代的大规模大陆边缘火山作用,并且大体平行于南太平洋中脊,因此自板块构造学说问世以后,安第斯弧就被视为洋陆俯冲的典范。安第斯边界(或 A 型俯冲)已成为洋陆俯冲的代名词。但实际上这个典型一直树

不起来。安第斯火山作用几乎都是安山岩,在全球罕见,因此不具有普遍性和典型性,而是具有特殊性。安第斯弧的地震均为震源在 100km 以上的浅源地震,看不出明显的贝尼霍夫带,或者勉强能解析出近水平的“贝尼霍夫带”(Ramos, 1999)。地震成析成像只表明俯冲的岩石圈板片存在于 80km 以上(The AN-CORP group, 1999),只是反映了岩石圈厚度的起伏变化。因此关于安第斯弧的洋陆俯冲多数学者认为是近 0 的平缓俯冲。水平俯冲在力学机制上能解释吗?另一个可能是在俯冲的同时即发生了拆层作用。但这样快的拆层作用要求地幔柱的上涌。

岛弧与大陆边缘火山作用是否与俯冲带相联系,在地球化学上如果只用元素构造环境判别图是不可靠的,应根据火山岩同位素组成是否有两个块体组分混合的壳幔相互作用。在有俯冲带存在时,Pb 同位素变化表现为两个块体之间的平缓梯度变化,而急剧变化则不是俯冲环境。如北美的 Cascade 弧火山岩的 Pb 同位素组成明显可看出存在着贫 Th-Pb 的太平洋俯冲板片组分不同比例混合。安第斯弧的洋陆俯冲如果是近水平的,则应有更多的太平洋板片物质参与岩浆组分。近来沿安第斯弧的

大范围 Pb 同位素填图已完成(Chiaradia & Fontbote, 2002; Mamani *et al*, 2005)。数据表明安第斯弧火山岩 Pb 同位素组成表现出纬向的平缓变化,并可分出四个块体,看不出有太平洋板块参与岩浆作用,因此存在洋陆之间的 Pb 同位素急变带。图 2 是无明显俯冲带地球物理证据的安第斯弧火山岩 Pb 同位素  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解,并与具有明显地球物理证据的俯冲带岛弧(阿留申弧)和大陆边缘弧(Cascade 弧)作比较。阿留申弧和 Cascade 弧火山岩(特别是埃达克岩)的 Pb 同位素组成具明显的太平洋 MORB 特征,吻合 NHRL,说明是太平洋 MORB 俯冲板片部分熔融的产物。平缓俯冲洋壳部分熔融应最有利于埃达克岩岩浆产生(Gutscher *et al*, 2000),且很少有地壳物质混合。同时由于没有地幔楔存在,可以不受陆下地幔软流圈组分的影响。如果安第斯弧存在平缓俯冲,应是产生埃达克岩最有利的构造环境。这样安第斯的埃达克岩会基本上继承太平洋洋壳(MORB)的 Pb 同位素组成特征。然而,在安第斯的埃达克岩中并没有发现这样的同位素信息。而安第斯弧的埃达克岩和安山岩一样均位于 NHRL 以上,没有太平洋 MORB 型 Pb 同位素组分的参与,也没有下地壳物质混合的明显趋向。仅有一个埃达克岩样品具有太平洋 MORB 俯冲板片熔融特征,但它位于安第斯弧的最南端(55°S)。因此在地球化学上也同样否定在安第斯弧下有俯冲的太平洋板片存在。从同位素组成看似存在印度洋型板块的俯冲,但安第斯大部分埃达克岩的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值比印度洋 MORB 明显还要高,可能反映了西冈瓦纳大陆地幔的同位素特征。

在北安第斯(Golfo de Guayaquil 以北)已发现有侏罗纪、白垩纪和老第三纪的“蛇绿岩套”(Ramos, 1999)。这些蛇绿岩套中的玄武岩是否代表了古老太平洋 MORB? 但同样没有得到 Pb 同位素组成的证实。因此安第斯造山带像北美科迪勒拉。在地球化学上看,安第斯

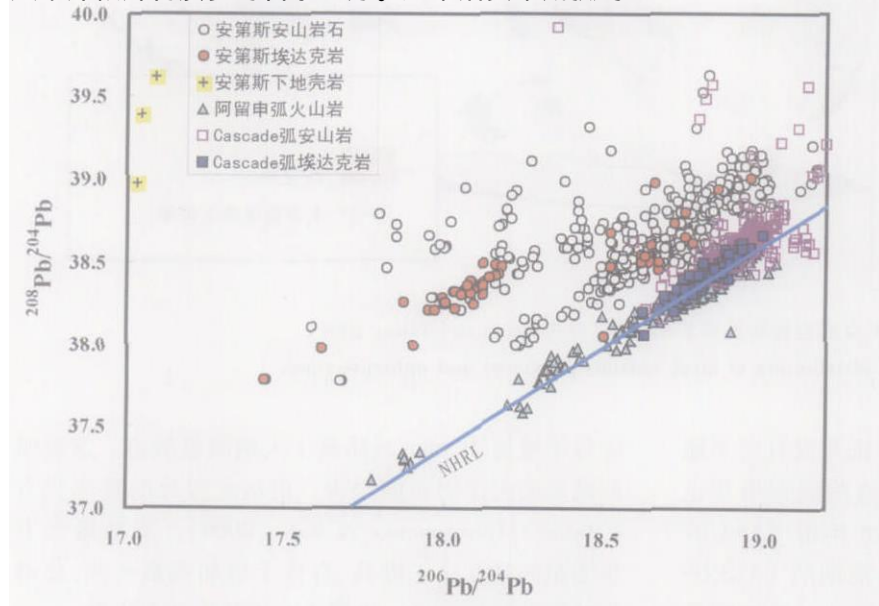


图 2 安第斯弧、阿留申弧与 Cascade 弧 Pb 同位素

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解

(资料来源于 GEOROC 数据库的 82 篇参考文献)

代表性文献: Johnson K E, 1996; George R M, 2003;

Borg L E, 1997; Conrey R M, 2001; Kraemer B, 1999;

Lucassen F, 2002; Chiaradia & Fontbote, 2002 等)

Fig 2 A  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  plot for lead isotopes from Andean, Aleutian and Cascade arcs



更像是一个发育在被动陆缘的大火成岩省;其中的埃达克岩-安山岩可能派生于早期溢流玄武岩的重熔岩浆。

#### 4 哪些是弧后盆地?

板块学说的观点认为俯冲带的弧后可以出现引张带,产生弧后盆地的火山作用。早期一些学者将东亚边缘海视为太平洋板块向西俯冲的弧后盆地(Hawkins *et al*, 1990)。然而,作为西太平洋的重要南北向弧-小笠原-马利亚纳弧同样也不存贝尼霍夫带。地震层析资料则可见到近垂直的不连续冷体。因此不少学者认为马利亚纳弧下存在近垂直的俯冲带。近垂直的俯冲在力学上也难于解释。同时垂直俯冲难于产生弧后引张。从晚侏罗世到新第三纪玄武岩的 Pb-Sr-Nd 同位素示踪填图表明沿小笠原-马利亚纳弧两侧的地幔源则存在截然差别,边缘海盆地的地幔具有 DUPAL 异常,属印度洋-特提斯范畴,与太平洋一侧 MORB 的 NHRL 特征明显相区别,出现了小笠原-马利亚纳弧存在 Pb 同位素急变带。因此东亚边缘海不是太平洋板块向西俯冲产生的弧后盆地(Hickey-Vargas, 1998; Zhu *et al*, 2004)。Ongtong Java 海洋高原玄武岩周边的弧后盆地也是受争议的(如 Nauru 盆地是溢流玄武岩充填)(Mann & Taira, 2004)。Okhotsk 海曾被认为是典型的弧后盆地,但新的研究资料表明是捕获的海洋高原玄武岩(Bogdanov & Dobretsov, 2002)。

大西洋两侧被认为是弧后盆地的有加勒比海盆。但现在的资料表明加勒比海充填的是溢流玄武岩,因此不是弧后盆地(Thompson *et al*, 2004)。在没有出现俯冲带的大西洋两侧出现了大量海洋高原玄武岩和大陆溢流玄武岩,包括北大西洋(大洋与大陆)、中大西洋(大洋与大陆)以及 Parana 和 Koo 大陆等大火成岩省(图 1),与地幔柱相联系。在现在和地球历史上的大洋两侧俯冲带被溢流玄武岩所取代,发育成地幔柱是很普遍的。大西洋板块向北美大陆的俯冲基础上出现了哥伦比亚溢流玄武岩省;在印度洋边缘发育了被动裂谷和德干高原溢流玄武岩;中国西南地区的峨眉山溢流玄武岩是在古特提斯洋俯冲的基础上发展起来的(Zhu *et al*, 2005)。

目前没有争议的现存弧后盆地大概只有汤加弧后的 Lau 盆地了。地球历史上的弧后盆地火山作用,从地球化学上更难于鉴别出。因为弧后盆地玄

武岩具有洋中脊和岛弧玄武岩过渡特征,而溢流玄武岩具有洋中脊、岛弧和板内玄武岩三重过渡特征。

#### 5 大陆增长的主要方式是什么?

对于大陆增长的解释是板块构造理论中最薄弱的环节。按板块构造观点,大陆增长主要通过岛弧俯冲带的安山质岩浆活动来实现。但大量资料表明大陆通过大火成岩省来增长是主要的形式。太古宙时期大陆的形成主要通过绿岩带(溢流玄武岩)为主体的大火成岩省。全球至少有 14 个属大洋高原玄武岩的绿岩带,形成了太古宙的古陆核克拉通。现有的资料表明全球有 100 个以上的元古宙大火成岩省使太古宙陆核进一步连接、扩大或出现独立的古陆,使之形成了现存古大陆的基本构形(Tomlinson & Buchan, 2001; Emst & Buchan, 2001, 2003; Emst *et al*, 2005)。如出现在澳洲中西部的中元古 Warakura 大火成岩省连接了 Pilbara 和 Yilgarn 克拉通(Wingate *et al*, 2004)。中国以熊耳群为代表,中元古大火成岩省连接了华北东部和西部两个太古宙克拉通(Kusky & Li, 2003)。Keweenaw 溢流玄武岩省则将加拿大太古宙地盾与中元古格林威尔地块连接在一起(Ojakangas *et al*, 2001)。这些大陆增长事件已超出了板块构造学说的解释范畴。古生代以来相当部分的大陆仍然通过溢流玄武岩省拼接到岛弧、大陆边缘或大陆裂谷焊接来完成。这与地体拼接说所解释的大陆增长有相似性。溢流玄武岩省吸积产生的大陆增长速率达  $3.7 \text{ km}^3/\text{a}$ , 要比通过岛弧的大陆增长速率( $1.1 \text{ km}^3/\text{a}$ )高三倍以上(Schubert & Sandwell, 1989)。

地幔柱的作用一方面使古大陆裂解,如冈瓦纳大陆的裂解与 183、145、135、90 和 65 Ma 的地幔柱头的活动相联系。但有些地幔柱活动并没有使大陆裂解,特别是 500 Ma 与 250 Ma 左右的地幔柱活动(Emst and Buchan, 2003)。相反这些大火成岩省使分离的大陆连接。泛大陆的形成并不是完全通过大陆块体的汇聚,通过溢流玄武岩省的焊接也起着重要作用。晚石炭至早三叠世与地幔柱或裂谷相联系的溢流玄武岩省可能对 Pangea 泛大陆形成起了重要作用。在亚洲大陆这一时期的大火成岩省包括著名的西伯利亚(249 ~ 251 Ma)和峨眉山(263 ~ 253 Ma)溢流玄武岩(Sharma M, 1997; Chung and Jahn, 1995)。从新西伯利亚 Kuznetsk 盆地至西阿尔泰地区(240 ~ 264 Ma, Dobretsov, 2005)以及准噶尔

盆地周边 (225 ~ 282.4 Ma, 戴木童谟等, 1985), 一直至塔里木盆地北缘库鲁克塔干地区 (280 Ma, Zhang *et al*, 1996) 和西缘已广泛发现出露和隐伏的溢流玄武岩和基性岩墙群。从穿贝加尔至蒙古 (220 ~ 269 Ma, Dobretsov, 2005) 和中国北山地区则大规模出露二叠 - 早三叠世的大陆裂谷与大洋溢流玄武岩。藏南地区也存在这一时期的溢流玄武岩 (Garzanti *et al*, 1999)。这些溢流玄武岩省总面积达 1200 万  $\text{km}^2$  (图 3)。它们使西伯利亚、华北、扬子、华夏和塔里木的前寒武纪陆块结合在一起。上述地区地壳的低 Nd 模式年龄也说明了有相当多新陆壳增生。北美阿拉斯加 - 加拿来沿海的 Wrangellia 溢流玄武岩省和科迪勒拉造山带从加拿来至加利福尼亚的 Cache Creek 溢流玄武岩也是同时期形成的。这些溢流玄武岩导致了北美地壳的拼贴增生。它们有可能与亚洲大陆的溢流玄武岩省相连接 (Tardy *et al*, 2001)。

## 6 大陆地壳物质返回地幔的主要过程是什么？

板块构造学说提出了板块俯冲带是大陆地壳物质返回地幔的主要过程。这从岛弧和大陆边缘火山作用反映的地幔地球化学特征得到了证实 (如蛛网

图上的 Nb-Ta 负异常)。然而大火成岩省中广泛存在的富集地幔源信息 ( $\text{EM}_2$  与  $\text{EM}_1$ ), 不是板块俯冲所能解释的, 特别是大洋中大面积存在的  $\text{EM}_2$  地幔源。与大火成岩省相联系的地壳物质返回地幔存在着不同于板块俯冲的方式。大火成岩省省岩石圈可以通过拆层和拆离方式使下地壳和壳下岩石圈物质返回软流圈 (Schott and Schmel, 1998; Lustrino M, 2005)。拆层和拆离作用可以在以下条件下发生: (1) 受到地幔柱等地幔上涌热作用产生减压熔融 (大火成岩省形成初期阶段); (2) 岩石圈受到挤压增厚时玄武质下地壳变成更重的榴辉岩而拆离 (大火成岩省演化至后期阶段); (3) 具有正常上地壳结构的大陆岩石圈受到挤压增厚时, 上地壳物质放射成因热导致的温度梯度升高可以使下地壳和壳下岩石圈熔融。大火成岩省的巨量岩浆也可以大面积的覆盖大洋沉积物或大陆地壳。玄武岩的厚度可达到 20 ~ 30 km, 如 Ongtong Java 海洋高原玄武岩和 Keweenaw 的大陆溢流玄武岩。大陆溢流玄武岩喷发后下沉而产生的构造盆地可以形成巨厚的沉积物, 如 Keweenaw 裂谷达到 9 km (Ojakangas *et al*, 2001)。这样的埋藏作用可以使被溢流玄武岩覆盖大洋沉积物或大陆地壳进入下地壳。因此上地壳物质也可以通过拆层和拆离卷入软流圈。一些学者认为岩石圈拆离作用是大洋高原玄武岩隆升成为大陆

的直接原因。不少学者提到超级地幔柱发育时期也是大陆地壳物质返回地幔速率最高的时期。与超级地幔柱相联系的大面积大洋溢流玄武岩具有比一般的洋壳更厚的岩石圈的地壳厚度, 因此板块俯冲也变得更加困难。因此拆层和拆离作用将成为地壳物质返回地幔的主要形式。

## 7 成矿的主要地质作用是什么？

板块构造学说认为俯冲带的地质与地球化学过程对成矿起着重要控制作用, 巨型安第斯斑岩 Cu-Au-Mo 矿带成为这种认识的主要依据。随着“板块构造学王国中安第斯殿堂的倾倒”, 安第斯斑岩铜矿带可能和北美的斑岩铜矿带一样具有科迪勒拉造山带性质。加拿大 - 科迪勒拉的斑岩铜矿带

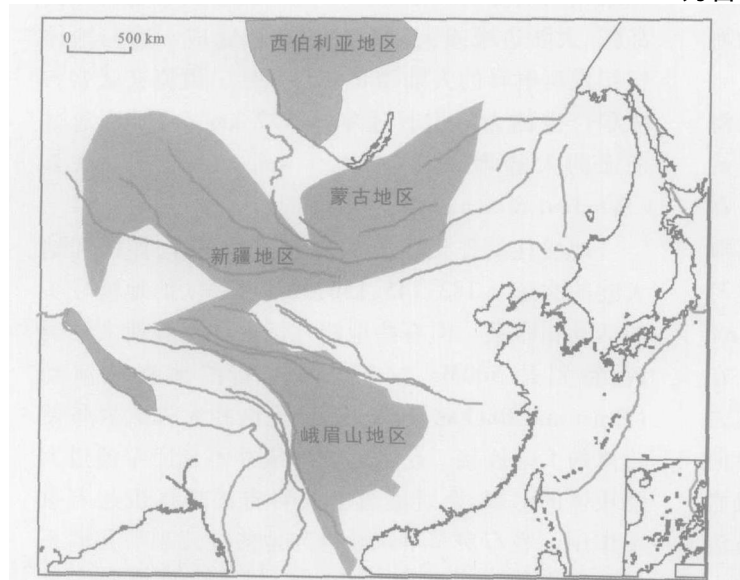


图 3 亚洲大陆上的二叠纪大陆和大洋溢流玄武岩分布范围

Fig 3 A sketch map showing distribution of the continental and oceanic flood basalts of Permian ages in Asia

则与二叠纪 Cache Creek 溢流玄武岩省有着密切关系 (Tardy *et al*, 2001)。近来在阿拉斯 - 加拿大的 Wrangellia 溢流玄武岩省中则发现了不少的 PGE 矿床。而在位于两者之间, 与板块俯冲密切相关的 Cascade 弧恰没有发现有经济价值的成矿作用。中国的斑岩型矿床与板块俯冲的关系也不密切。如位于北秦岭和华北块体之间的大型斑岩型钼金矿集区也没有与板块俯冲有关的证据。因此板块俯冲带在成矿作用中的地位将要大大下降。相反, 全球大火成岩省及其成矿作用的研究表明, 巨大储量的 Cu-Ni-Co-PGE 硫化矿床 (如 Noril'sk, Bushveld) (Naldrett *et al*, 1992, Pirajno *et al*, 2000; Schissel and Smail, 2001)、Fe-Ti-V-Cr 氧化矿床 (如攀枝花, Bushveld) (Zhou *et al*, 2005)、VHMS (如中越边境的生权 - 龙脖子) (Zou *et al*, 1997, Pirajno *et al*, 2000)、条带状铁建造 (如 Hamersley) (Barley *et al*, 1997)、Pb-Zn 矿床 (如会泽) (Huang *et al*, 2004)、以自然铜为主的火山 - 红层铜矿 (如 Keweenaw 与滇东北) (Cannon and Suzanne, 1999; Zhu *et al*, 2003) 均与大火成岩省有关。现在看来, 斑岩型矿床也可能与大火成岩省关系也有着密切关系。

## 8 什么是“后板块时代”?

板块构造学说所揭示的海底扩张和板块的水平运动现象应是客观的事实, 它阐明了与板块边界相联系的岩浆活动。但是板块构造只是地球历史上有限时间, 有限区域发生的地球动力学现象。关于板块是否在软流圈上滑移没有事实依据; 扩张与俯冲的不对称性现象也不好解释。对于俯冲带的确定及其相关的弧后引张、大陆增生、地壳物质返回地幔和成矿作用方面均存在较多的问题。虽然大火成岩省的产生是否与地幔柱有关, 以及地幔柱假说是否正确还存在着相当多的争议, 但是大火成岩省所揭示的岩浆活动现象超越了板块构造的格局, 并发生在整个地质历史时期和更广泛的地域范围, 这也是客观的事实。大火成岩省学说所解释的大陆增长、地壳物质返回地幔和成矿作用过程完全不同于板块构造学说。驱动地幔柱的深地幔对流假说允许岩石圈板块与下伏软流圈一起运动, 吻合铅同位素所揭示的岩石圈与软流圈长期耦合的规律。在大地构造上, 大火成岩省所描述的地质现象更接近于地体说和膨胀说。不少学者提出了 21 世纪是“后板块时

代”。后板块时代应建立的发展更高层次的大地构造和地球动力学理论, 兼容解释板块构造和大火成岩省所揭示的地质现象。一个不均一组成的地球的膨胀作用将导致超级地幔柱活动, 这可能是产生地球表层构造 - 岩浆活动的主要机理。

## 参考文献:

- 陈国达. 2005. 自主创新研究亚洲陆海大地构造与成矿学之必要. 大地构造与成矿学, 29(1): 5 - 6
- 陈国达, 彭省临, 戴塔根. 2005. 亚洲大陆中部壳体东、西部历史 - 动力学的构造分异及其意义. 大地构造与成矿学, 29(1): 7 - 16
- 黄智龙, 陈进, 韩润生. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌矿的关系. 北京: 地质出版社.
- 张本仁. 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张理刚. 1995. 东亚岩石圈地体地质. 北京: 科学出版社.
- 朱炳泉. 2001. 地球化学省与地球化学急变带. 北京: 科学出版社.
- 邹日, 朱炳泉, 孙大中, 常向阳. 1997. 红河成矿带壳幔演化与成矿作用的地质年代学研究. 地球化学, 26(2): 46 - 56

## References:

- Barley M E, Pickard A L and Sylvester P J. 1997. Emplacement of a large igneous province as a possible cause of banded iron formation 2.45 billion years. *Nature*, 385: 55 - 58
- Ben-Avraham Z, Nur A, Jones D *et al*. 1981. Continental accretion: from oceanic plateau to allochthonous terranes. *Science*, 213, 47 - 54
- Bogdanov N and Dobretsov N. 2002. The Okhotsk volcanic oceanic plateau. *Russian Geology and Geophysics*, 43: 87 - 99
- Borg L E, Clyne M A and Mcmillan N J. 1997. The variable role of slab-derived fluids in the generation of a suite of primitive calc-alkaline lavas from the southernmost Cascade, California. *Can Mineral*, 35: 425 - 452
- Cannon W F and Suzanne W N. 1999. Geology and mineral deposits of the Keweenaw Peninsula, Michigan. *U S Geological Survey Open-File Report*, 99 - 149
- Chen Guoda. 2005. On the necessity of initiating geotectonics and metallogeny study in Asian land and sea areas. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 5 - 6 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guoda, Peng Shenglin and Dai Tegen. 2005. Historic-

- dynamic tectonic differentiation of E-W of central Asia continental crust body and its significance *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 7 - 16 (in Chinese with English abstract).
- Chiaradia M and Fontbote L. 2002. Lead isotopic systematics of Late Cretaceous-Tertiary Andean arc magmas and associated ores between 8°N and 40°S: evidence for latitudinal mantle heterogeneity beneath the Andes *Terra Nova*, 14: 337 - 342.
- Chung S L and Jahn B M. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary *Geology*, 23: 889 - 892.
- Conrey R M, Hooper P R, Larson P B *et al*. 2001. Trace element and isotopic evidence for two types of crustal melting beneath a high Cascade volcanic center *Contrib Mineral Petrol*, 141: 710 - 732.
- Dobretsov N L. 2005. 250 Ma large igneous provinces of Asia: Siberian and Emeishan traps (plateau basalts) and associated granitoids *Russian Geol Geophys*, 46(9): 847 - 868.
- Dostal J, Cousens B and Dupuy C. 1998. The incompatible element characteristics of an ancient subducted sedimentary component in ocean island basalts from French Polynesia *J Petrol*, 39: 937 - 952.
- Ernst R E and Buchan K L. 2003. Recognizing mantle plume in the geological record *Ann Rev Earth Planet Sci*, 31: 469 - 523.
- Ernst R E, Buchan K L and Campbell I H. 2005. Frontier in large igneous province research *Lithos*, 79: 271 - 297.
- Frey F A, Coffin M F, Wallace P J *et al*. 2000. Origin and evolution of a submarine large igneous province: the Kerguelen Plateau and Broken Ridge, southern Indian Ocean *Earth Planet Sci Lett*, 28: 73 - 89.
- Garzanti E, Le Fort P and Sciunnach D. 1999. First report of Lower Permian basalts in South Tibet: Tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys *J Asian Earth Sci*, 17: 533 - 546.
- George R M, Turner S P and Hawkesworth C J. 2003. Melting processes and fluid and sediment transport rates along the Alaska-Aleutian arc from an integrated U-Th-Ra-Ba isotope study *J Geophys Res*, B108(5): ECV 6-1-ECV 6-25.
- Gerasimenko M D and Kato T. 2000. Establishment of the three-dimensional reference frame by space geodetic measurements *Earth Planets Space*, 52: 959 - 963.
- Gorbatov B L and Kennett N. 2003. Joint bulk-sound and shear tomography for Western Pacific subduction zones *Earth Planet Sci Lett*, 210: 527 - 543.
- Gutscher M A, Maury R C, Eissen J P *et al*. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535 - 538.
- Hawkins J W, Lonsdale P F, Macdougall J D and Volpe A M. 1990. Petrology of the axial ridge of the Mariana Trough backarc spreading center *Earth Planet Sci Lett*, 100: 226 - 250.
- Hickey-Vargas R. 1998. Origin of the Indian Ocean type isotopic signature in basalts from Philippine Sea plate spreading centers: An assessment of local versus large-scale processes *J Geophys Res*, 103(B9): 20963 - 20979.
- Huang Z L, Cheng J and Han R S. 2004. Geochemistry and ore formation of the Huize super-large lead-zinc deposit, Yunnan province, China: Discussion on the relationship between Emeishan flood basalts and lead-zinc mineralization Beijing: Geological Press (in Chinese).
- Johnson K E, Hamon S, Richardson M *et al*. 1996. Isotope and trace element geochemistry of Augustine volcano, Alaska: Implications for magmatic evolution *J Petrol*, 37: 95 - 115.
- Kraemer B. 1999. A geochemical traverse across the Middle Miocene magmatic arc in the southern part of the central volcanic zone of the Andes (25°S ~ 26°S, 67° ~ 69°W). Berlin: Geowiss ABH.
- Kusky T M and Li J-H. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton *J Asian Earth Sci*, 22: 383 - 397.
- Lassiter J C, Blichert-Toft J, Hauri E H *et al*. 2003. Isotope and trace element variations in lava from Raivavae and Rapa, Cook-Austral islands: Constraint on the nature of H MU and EM mantle and the origin of mid-plate volcanism in French Polynesia *Chem Geol*, 202: 115 - 138.
- Lucassen F, Escayola M, Romer R L *et al*. 2002. Isotopic composition of Late Mesozoic basic and ultrabasic rocks from the Andes 23°S ~ 32°S: Implications for the Andean mantle *Contrib Mineral Petrol*, 143: 336 - 349.
- Lustrino M. 2005. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism *Earth Sci Rev*, 72: 21 - 38.
- Mahoney J J, Frei R, Tejada M L G, Mo X X, Leat P T and Nagler T F. 1998. Tracing the Indian Ocean mantle domain through time: Isotopic results from old west Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor *J Petrol*, 39: 1285 - 1306.
- Mamani M, Wömer G, Hartmann G *et al*. 2005. A GIS-based isotopic map of the central Andes (13°S ~ 28°S) and implications for ore formation *6th International Symposium on Andean Geodynamics (Barcelona)*, extended Abstract. 464 - 467.
- Mann P and Taira A. 2004. Global tectonic significance of the



- Solomon Islands and Ontong Java Plateau convergent zone. *Tectonophysics*, 389: 137 - 190.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, Doherty W and Gorbachev N S. 1992. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalt of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores. *Ecol Geol*, 87: 975 - 1004.
- Ojakangas R W, Morey G B and Green J C. 2001. The Mesoproterozoic midcontinent rift system, Lake Superior region, USA. *Sedimentary Geology*, 141 - 142: 421 - 442.
- Pirajno F. 2000. Ore deposits and mantle plumes. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Pubellier M, Monnier C, Maury R *et al*. 2004. Plate kinematics, origin and tectonic emplacement of supra-subduction ophiolites in SE Asia. *Tectonophysics*, 392: 9 - 36.
- Pyle D G, Christie D M and Mahoney J J. 1992. Resolving an isotopic boundary within the Australian Antarctic discordance. *Earth Planet Sci Lett*, 112: 161 - 178.
- Robaudo S and Harrison C. 1993. Plate tectonics measured from SLR and VLB I global data. In: Smith D and Turcotte D (eds). Contributions of space geodesy to geodynamics: Crustal dynamics. 51 - 72, AGU, Washington D C.
- Romas V A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, 22: 183 - 190.
- Schissel D and Smail R. 2001. Deep mantle plumes and ore deposits. In: Emst R E and Buchan K L (eds). Mantle plume: Their identification through time. *GSA Am Spec Pap*, 352: 291 - 322.
- Schott B and Schmel H. 1998. Delamination and detachment of a lithospheric root. *Tectonophysics*, 296: 225 - 247.
- Schubert G and Sandwell D. 1989. Crustal volumes of the continents and of oceanic and continental submarine plateaus. *Earth Planet Sci Lett*, 92: 234 - 246.
- Sengor A M. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 298 - 306.
- Sharma M. 1997. Siberian traps. In: Mahoney J J and Coffin M F (eds). Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism. *American Geophysical Union Geophysical Monograph*, 100: 273 - 295.
- Spicak A, Hanus V and Vanek J. 2004. Seismicity pattern: an indicator of source region of volcanism at convergent plate margins. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 141: 303 - 326.
- Tardy M, Lapierre H, Struik L C *et al*. 2001. The influence of mantle plume in the genesis of the Cache Creek oceanic igneous rocks: implications for the geodynamic evolution of the inner accreted terranes of the Canadian Cordillera. *Can J Earth Sci*, 38: 515 - 534.
- The ANCORP working group. 1999. Seismic reflection image revealing offset of Andean subduction-zone earthquake locations into oceanic mantle. *Nature*, 397: 341 - 344.
- Thompson P M E, Kempton P D, White R V *et al*. 2004. Hf-Nd isotope constraints on the origin of the Cretaceous Caribbean plateau and its relationship to the Galapagos plume. *Earth Planet Sci Lett*, 217: 59 - 75.
- Tomlinson K Y and Condie K C. 2001. Archean mantle plumes: evidence from greenstone belt geochemistry. In: Emst R E and Buchan K L (eds). Mantle plumes: Their identification through time, special paper. *Geological Society of America*, 352: 341 - 357.
- Wingate M T D, Pirajno F and Morri P A. 2004. Warakurna large igneous province: A new Mesoproterozoic large igneous province in west-central Australia. *Geology*, 32: 105 - 108.
- Xu J and Han Y. 1996. High radiogenic Pb-isotope composition of ancient MORB-type rocks from Qinling area-Evidence for the presence of Tethyan-type oceanic mantle. *Science in China (D)*, 39 (Supp): 33 - 42.
- Zhang B L. 1994. Geochemical study of the lithosphere, tectonism and metallogenesis in the Qinling-Dabashan region. Wuhan: Press of China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhang B L, Zhang H F, Zhao Z D and Ling W L. 1996. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions-implications for tectonics. *Science in China (D)*, 39 (3): 245 - 255.
- Zhang G W, Meng Q G and Yu Z P. 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (D)*, 39: 225 - 234.
- Zhang L G. 1995. Block-geology of eastern Asia lithosphere. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang S Q, Mahoney J J, Mo X X, Ghazi A M, Milani L, Crawford A J, Guo T Y and Zhao Z D. 2005. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-Ocean-type isotopic characteristics. *J Petrol*, 21: 1 - 30.
- Zhang Z C, Guo Z J and Liu S W. 1996. The geochemical characteristics and tectonic significance of the mafic dyke swarm in the Kurtag, Xinjiang. In: Collected Works of International Symposium on Geological Sciences. Beijing: Seismological Press, 124 - 131.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C - J and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China. *J Petrol*, 46 (11): 2253 - 2280.

- Zhu B Q. 2001. Geochemical provinces and geochemical steep zones Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu B Q, Hu Y G, Chang X Y, Xie J and Zhang ZW. 2005. The Emeishan large igneous province originated from magmatism of a primitive mantle plus subducted slab *Russian Geol Geophys*, 46(9): 904 - 921.
- Zhu B Q, Hu Y G, Zhang ZW and Chang X Y. 2003. Discovery of the copper deposits with features of the Keweenaw type in the border area of Yunnan-Guizhou Provinces *Science in China (D)*, 46(supp): 60 - 72.
- Zhu B Q, Wang H F, Chen YW *et al* 2004. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia *J Asian Earth Sci*, 24: 163 - 175.
- Zou R, Zhu B Q, Sun D Z and Chang X Y. 1997. Geochronological study on crustal-mantle evolution and mineralization in the Red River zone *Geochimica*, 26(2): 46 - 56 (in Chinese with English abstract).

## PLATE TECTONIC THEORY: A SERIOUS CHALLENGE

ZHU Bingquan and CUI Xuejun

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, GD 510640, China)

**Abstract:** The plate tectonic theory reveals the seafloor spreading and plate lateral movement, and illustrates magmatism related to plate boundaries. However, a great number of studies indicate that plate movement is tightly coupled with asthenosphere, instead of sliding on asthenosphere. Globally, an asymmetrical system of spreading and subduction is not expected from the plate tectonic theory, since evidences are rather scarce from geophysics and geochemistry for the Andes arc to be taken as a paradigm for ocean-continent subduction. Problems also arise from geologic phenomena that are associated with subduction zones including back arc opening, continental growth, recycling of crustal materials and metallogenesis. Magmatic activation involved in large igneous provinces surpasses the network established by the plate tectonic theory, and occurs during the entire earth history and in more extensive areas than those covered by plate tectonic theory. The academic opinions related to large igneous provinces propose a set of mechanisms to explain continental growth, recycling of crustal materials and metallogenesis, and these mechanisms are entirely different from those of the plate tectonic theory. The hypothesis of mantle plume driven by deep mantle convection holds lateral movement of lithosphere in coupling relationship with its underlying asthenosphere, and this is in agreement with the opinion of long term coupling between lithosphere and asthenosphere as was revealed by Pb isotope study.

**Keywords:** plate tectonic theory; large igneous province; continental growth; crust-mantle coupling