

# Dupal 异常研究的现状与趋势<sup>①</sup>

张 旗 周德进 沈丽璞

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

## 摘 要

Dupal 异常是迄今为止在地球表面出现并反映地幔地球化学特征的最大同位素异常域。首先是在南半球现代大洋玄武岩中发现了以南纬 30° 为中心近环球分布的 Dupal 异常域, 近年又在北半球的中国东部、日本海等非大洋玄武岩中发现了 Dupal 异常。现在认为 Dupal 异常源区既可赋存于岩石层地幔, 亦可源自深部软流层地幔或更深, 但对 Dupal 异常源形成机制仍无定论。对北半球的 Dupal 异常其源区是否来自南半球地幔还有不同认识。Dupal 异常源可能是多成因的, 不能排除星外物质冲击的可能性。南半球大洋地幔大规模同位素异常的存在对模拟地幔对流提出了制约, 也为探索地幔地球化学特征提供了新途径。

关键词 Dupal 异常, Pb 同位素。

## 一、Dupal 异常的发现及其判别

80 年代初由 Dupre 和 Allegre<sup>[1]</sup>发现的南半球大规模地幔 Pb、Sr 同位素异常, 引起地球化学家和地球物理学家的共同兴趣。Dupal 异常首先是在研究印度洋玄武岩时识别出来的, 后由 Hart 加以命名。就现代大洋玄武岩而言, 该异常在南半球广泛出现, 以南纬 30° 为中心并几乎连续地环球分布(图 1)<sup>[2]</sup>。

Hart 将 Tatsumoto<sup>[3]</sup>鉴别出来的北半球大洋玄武岩趋势线作为判别 Dupal 异常的北半球参考线(NHRL)<sup>[4]</sup>, 由此给出了两条判别 Dupal 异常的标准, 即在 Pb—Pb 图上(图 2), 具 Dupal 异常样品的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  相对于对应的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  垂直向上偏离 NHRL 线, 且具异常  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (比值)。此后, Hart<sup>[5]</sup>建议以  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.705$  和  $\Delta 8/4 > 60$  作为判别标准

$$\Delta 8/4 = \left[ \left( \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{样品}} - \left( \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{NHRL}} \right] \times 100$$

$$\Delta 7/4 = \left[ \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{样品}} - \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{NHRL}} \right] \times 100$$

①本文1992年6月17日收到, 同年9月25日收到修改稿。

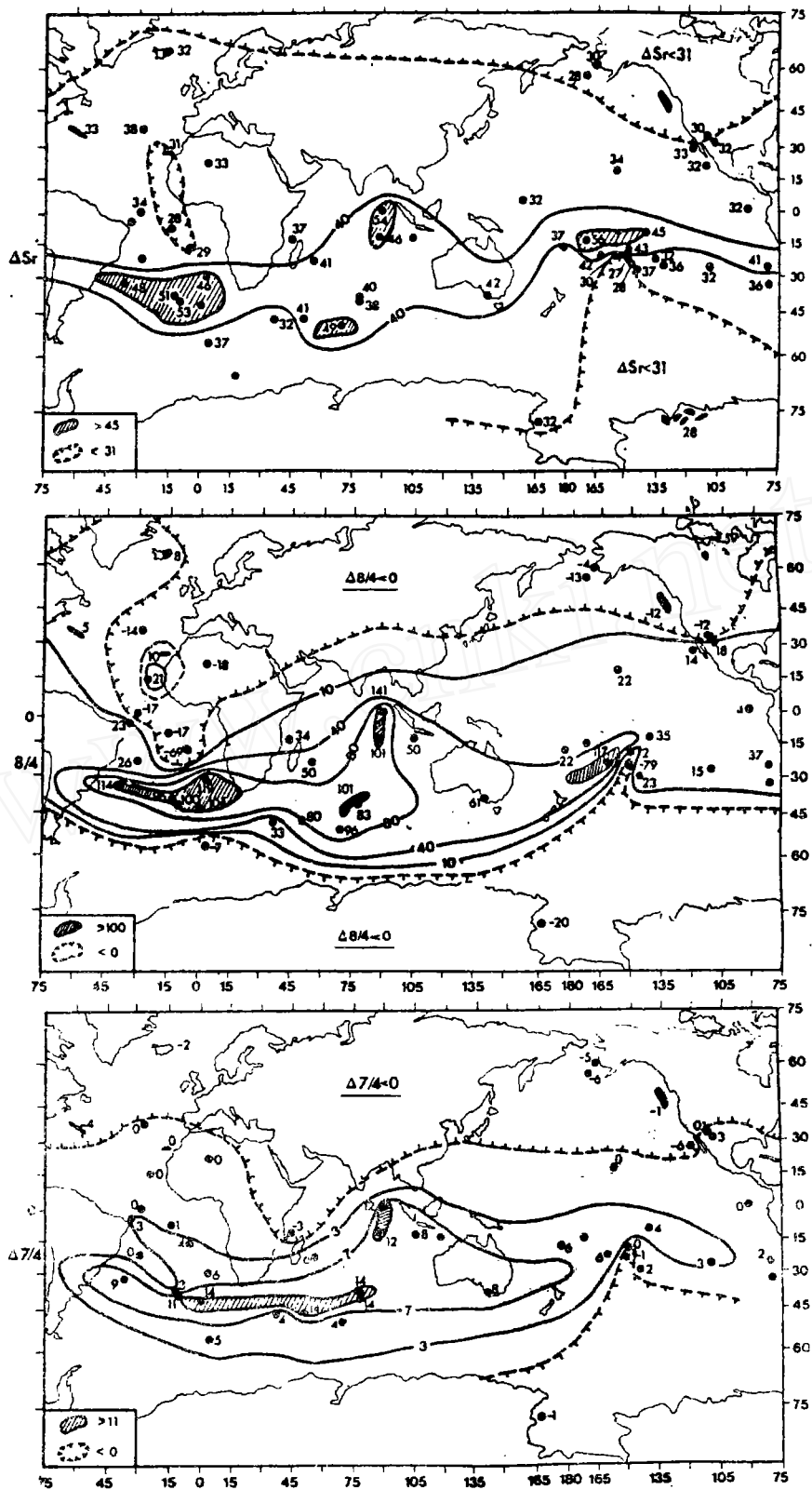


图1 全球 $\Delta Sr$ 、 $\Delta 8/4$ 、 $\Delta 7/4$ 异常分布图(据 Hart, 1984)  
(a) 阴影区  $\Delta Sr > 45$ , (b) 阴影区  $\Delta 8/4 > 100$ , (c) 阴影区  $\Delta > 11$ .

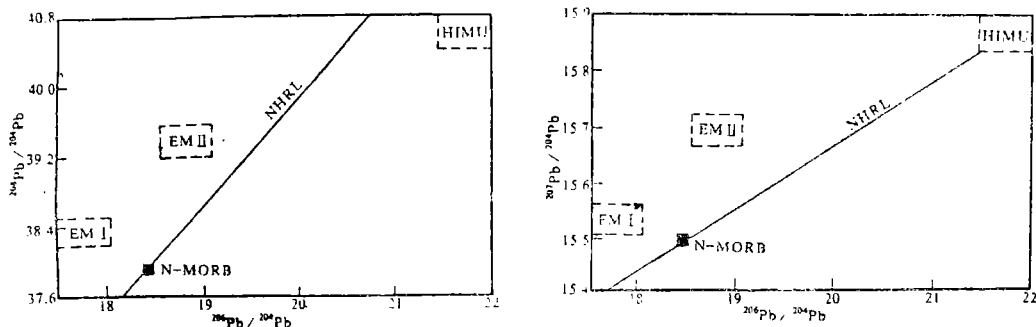


图2 Dupal 异常 Pb—Pb 判别图 (据 Hart, 1984)

这里有一点值得强调指出, Dupal 异常的研究对象是幔源玄武岩, 如此才能揭示地幔地球化学特征, 而 NHRL 只是当前标准, 对于古代玄武岩的同位素比值应作对应的时间校正。

## 二、Dupal 异常成因机制

Dupal 异常在地球早期即已存在, 而且现代大洋玄武岩只在南半球发现了 Dupal 异常<sup>[2]</sup>。自 Dupal 异常发现以来, 已引发了诸多讨论, 如: 该异常是否仅限于南半球并全球出现<sup>[2]</sup>? 其源区赋存于深部软流层地幔还是浅部岩石层地幔, 抑或是两者都有可能<sup>[2,6-8]</sup>? 又是什么机制形成了 Dupal 异常源区<sup>[2,9]</sup>?

成因机制与源区赋存位置是紧密相关的两个问题, 争论的焦点是对 Dupal 异常源区的认识还不一致。

大多数人认为 Dupal 异常源于下地幔靠近 670 km 的不连续面, 是由消减作用带入到深部地幔中的组分所引起的。该组分可以是消减的大陆壳或大洋沉积物, 也可以是参加再循环的大陆岩石层<sup>[10,11]</sup>。问题是北半球也有消减作用, 为何无 Dupal 异常? 朱炳泉<sup>①</sup>认为, 从质量平衡观点来看, 由俯冲作用带入的地壳物质与地幔的质量相比是微不足道的, 难以引起大规模的异常。一般认为, 大洋岩石层在长期地质演化中被消减到地幔中, 在 670 km 附近形成一个下地幔界面层即为 Dupal 异常的源区<sup>[2,5,8,12]</sup>(图 3)。地表 Dupal 异常即可能是这热的下地幔低速区对应的上隆区域<sup>[8]</sup>。这种热异常对于来自上地幔源区的 Dupal 异常也是必不可少的<sup>[9]</sup>。

大陆玄武岩地幔包体的研究表明, 包体的  $^{108}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  没有大陆玄武岩的高<sup>[5]</sup>。中国东部新生代玄武岩幔源包体的研究证实了这一点, 宽甸、汉诺坝和明溪的地幔橄榄岩包体和巨晶的  $\Delta 8/4$  比其寄主玄武岩的要低<sup>[4]</sup>。这些包体来自大约 100 km 深处, 暗示中国东部大陆岩石层地幔的浅部(100—150 km)含 Dupal 异常组分的 EM I (第 I 类富集地幔)<sup>[13]</sup>组

①私人通讯

分是很少的, 而岩石层地幔下部有较高的  $\text{Th}/\text{U}$ , 相应的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  亦高<sup>[12]</sup>, 是玄武岩 Dupal 异常组分的源区.

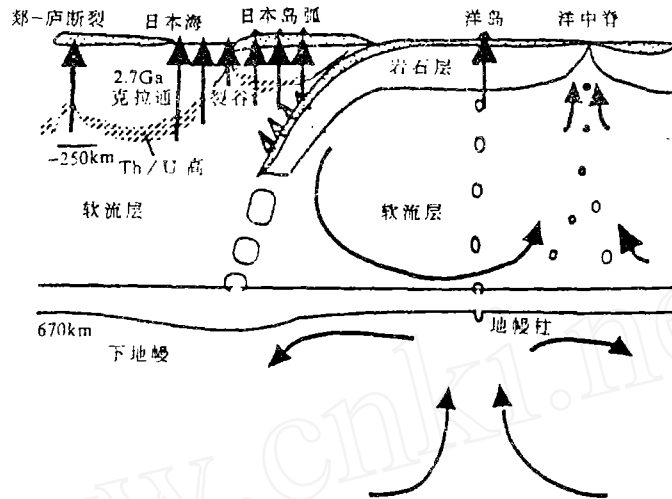


图 3 板块再循环示意图 (据 Tatsumoto, 1991)

此外, 世界上两个大洋玄武岩 Dupal 异常最大值区域与下地幔中两个大规模地震低速区相伴, 而低速区是位于核-幔界面层内 (core-mantle boundary layer), 这种关系暗示 Dupal 异常可能是下地幔大范围构造特征在地球表面的地球化学标志<sup>[8]</sup> (图 4).

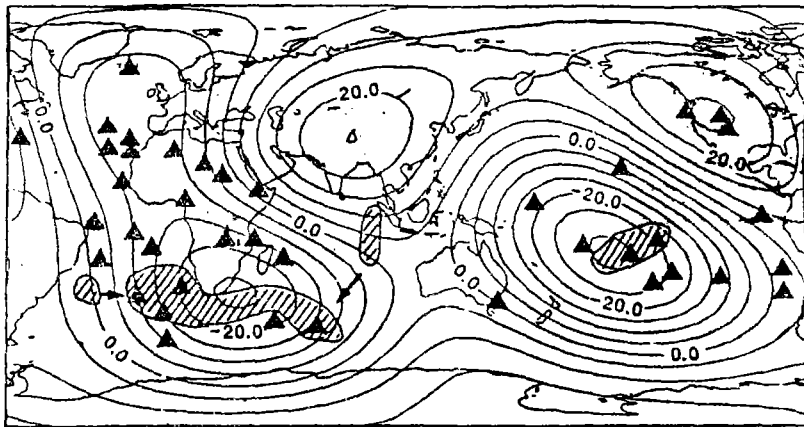


图 4 全球 Dupal 异常、三维 P 波等值线及热点分布图 (Castillo, 1988)

三角代表热点, 阴影区代表 Dupal 异常最大值域.

近来, 越来越多的资料表明, Dupal 异常也可源自浅部地幔<sup>[14,15]</sup>. 具 Dupal 异常的大陆溢流玄武岩和具 Dupal 异常的洋岛玄武岩有类似的 Pb 同位素特征, 而且与消减作用有关的岩浆岩 (如安第斯) 也具有类似的 Pb 同位素特征, 这表明受到消减作用影响的地幔也

是大陆溢流玄武岩的源区之一。哥伦比亚河玄武岩的 Pb 同位素资料即可这样解释, 它形成于硅铝壳内的弧后拉张盆地<sup>[14,15]</sup>。有些作者认为北半球南中国海、菲律宾海的 Dupal 异常是浅源的, 也与消减作用有关<sup>[16,17]</sup>。实际上, 许多热点玄武岩也并不需要一个下地幔来源<sup>[9]</sup>。

Hawkerworth<sup>[18]</sup>认为: Dupal 标志是一个相对浅源的现象, 可在大陆岩石层内部形成并演化。总之, 最近的研究结果表明 Dupal 异常也可来自上地幔; 但大多数人都同意与 EM I 组分有关的 Dupal 异常是来自下地幔的, 因为通常承认 EM I 的来源在核-幔界面层内<sup>[5]</sup>。

可喜的是近来在北半球相继发现了若干 Dupal 异常域, 如北大西洋亚速尔群岛和北美阿巴拉契亚早侏罗世(180 Ma)的大陆溢流玄武岩<sup>[19]</sup>, 其中规模最大、最重要的当是中国东部及周边地区, 如菲律宾海、环南中国海、台湾及日本海等地<sup>[4,12,16,17,20,21]</sup>①。此外, 我们在云南古特提斯大陆玄武岩、洋岛玄武岩和蛇绿玄武岩中也发现了 Dupal 异常特征(张旗等, 待刊)。Tatsumoto<sup>[12]</sup>认为欧亚大陆东缘(从南海到日本海)的 Dupal 异常源区是接近大陆岩石层地幔之下的 EM I, 是大陆碰撞加厚的结果。

岩石层是一个相对较冷的层并浮在对流的软流层地幔之上, 根据大洋和大陆玄武岩同位素的相似性, 通常认为大洋和大陆软流层仅有微小的成分差异, 据此提出了地幔分层说<sup>[12]</sup>。若认为 Dupal 异常源自下地幔, 亦可由地幔上涌底辟作用, 而在上地幔中留下标志<sup>[11]</sup>。用该模式解释北半球的 Dupal 异常在构造上很有吸引力。南半球冈瓦纳大陆岩石层折离北移时, 具 Dupal 异常的陆壳岩石层作为木筏将 Dupal 异常带至北半球, 由此可解释南中国海及其周边地区的 Dupal 异常②。

若干地区大陆溢流玄武岩的研究表明, Dupal 异常可能与一系列地质事件有关<sup>[19]</sup>, 如阿巴拉契亚中生代具 Dupal 异常的拉斑玄武岩, 在时间和空间上均与大西洋的裂开有关。Pegram<sup>[19]</sup>将其形成过程总结为: (1) 在 1000 Ma 之前发生的消减事件使地幔楔中混杂了来自消减岩片的物质; (2) 大约 1000 Ma 时的陆-陆碰撞使弧下地幔残片合并到大陆岩石层内; (3) 约 180 Ma 前的大陆裂开产生了这套大陆溢流玄武岩, 它来自上述大陆岩石层地幔。

对于南半球大规模的 Dupal 异常, Pringle<sup>[9]</sup>认为并不象 Hart(1984)所说在南半球呈环状分布, 而只是限制在若干个区域。他认为南半球的 Dupal 异常与南半球早白垩世(约 120 Ma)4 次大规模热点玄武岩活动有关, 即 Parana(巴西)/Etendeka(纳米比亚)、Kerguelen(印度洋)、Ontony Java 和 Manihiki(南太平洋)。这 4 次玄武岩都具有 EM I 的同位素特征, 来自软流层地幔下部。他还认为在南大西洋和印度洋内与大陆裂开伴生的 EM II(第二类富集地幔)<sup>[13]</sup>组分的发育, 也与早白垩世的事件相关。

迄今为止, 已提出多种 Dupal 异常源区及形成机理的假说。消减组分被带入地幔深部

① 钟孙霖, 1990, 台湾西部碱性玄武岩中巨晶和包体的地球化学研究——兼论晚新生代中国东南沿海板块内部玄武岩的岩石成因, (博士论文)。

② 钟孙霖, 博士论文。

并加入地幔再循环的假说不能解释北半球的消减作用为何不形成 Dupal 异常源, 而且消减组分在质量上也是极其微小的, 不足以形成异常. 地幔分层假说在构造上有十分重要的意义, 但仍是以源于下地幔并上升印记到岩石层地幔为前提的. Hawkerworth<sup>[18]</sup>的解释不能回答北半球的大陆岩石层内部的演化为何不形成 Dupal 异常源. 至今尚未探索出北半球现代大洋玄武岩无 Dupal 异常的原因.

既然 Dupal 异常在地球早期即已存在, 而且与冈瓦纳大陆同时代的北半球劳亚大陆不具该异常, 那么用消减作用来解释 Dupal 异常的形成似乎不甚合理. Prigle<sup>[9]</sup>的建议使我们推测也许 Dupal 异常是因为地球早期南半球遭受了大量的既广泛分布又相对集中的陨石冲击, 从而带进了明显的同位素异常标志, 在经历了漫长地质历史演化后仍保留至今. 从现有资料看很难用一种模式来解释该异常的形成. 就同位素演化规律而言, 存在着多种产生 Dupal 异常的地质作用, 推测 Dupal 异常可能是多成因的.

### 三、Dupal 异常研究的意义

Dupal 异常一经发现即为地球化学家和地球物理学家所注目. 首先, 它为地球化学研究提供了新的方向和判别标准. 通常认为蛇绿岩中的 MORB 和现代洋脊 MORB 均来自亏损的上地幔, 而现代印度洋 MORB 的 Pb 同位素组成不同于北大西洋中脊和东太平洋中隆, 暗示印度洋 MORB 是由 SHC 组分(St. Helena 组分<sup>[13]</sup>)与比正常的 NMORB 源区(DMM, 亏损地幔物质)更富集放射成因 Pb 的软流层地幔组分(AC)混合所造成的<sup>[5]</sup>. 印度洋 MORB 显示明显的 Dupal 异常是由这一种混合地幔组分广泛的部分熔融所致<sup>[14,15]</sup>.

Dupal 异常也为探索地幔地球化学提供了新的途径. 现已广泛承认地幔同位素组成上是不均一的, 但这种不均一性的分布、规模及其形成机理还不甚了解. Dupal 异常之所以重要, 就在于它是地球表面出现的反映了地幔地球化学特征的最大的同位素异常域, 而且被认为在地球早期即已存在. 该异常的存在是对地幔对流模式、地幔结构和演化等问题研究的有力制约, 对该异常的研究有助于人类探索深部地幔的物理、化学特征.

### 四、Dupal 异常研究趋势

Dupal 异常发现至今还不足十年, 有关报道愈来愈多. 早先认为 Dupal 异常仅限于南半球的认识已为北半球(尤其是中国东部及其周边)的众多发现所改变. 事实证明, 该异常的源区既可来自下地幔, 亦可源于上地幔. 大洋岩石层的长期消减作用是使壳-幔界面层成为其异常源区的一个重要因素. 目前有关对流层之下(大约 670 km 深处)的对流作用对 Dupal 异常源形成的贡献还不清楚. 人们正着手研究该异常在微量元素及其比值上的特征, 许多其它标志性同位素研究为回答上述问题提供了有益的启示. 现在困难的问题是: 在地球化学上如何区分上、下地幔组分; 下地幔的地球物理结构与喷出岩之间的关系也不甚明了; Dupal 异常形成的机制还有待进一步探索.

在 Dupal 异常研究中, 中国具有良好的地质条件. 据目前的报道, 北半球的 Dupal

异常域主要分布在中国东部及其周边地区. 在云南, 我们也发现了泥盆纪—二叠纪(385—150 Ma)的 Dupal 异常. 推测在与冈瓦纳古陆有关的块体中还会发现新的 Dupal 异常域. 但 Dupal 异常有什么特征、其来源等问题还待进一步研究. 这些问题的解决不仅对全球 Dupal 异常的研究是一个有力的推动, 而且会促进地幔化学动力学研究.

### 参 考 文 献

- [1] Dupre, B., and Allegre, C. J., Pb-Sr isotopic variation in India Ocean basalts and mixing phenomena, *Nature*, 1983, 303: 142-169.
- [2] Hart, S. R., A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle, *Nature*, 1984, 309: 753-757.
- [3] Tatsumoto, M., Isotopic composition of lead in oceanic basalts and its implication to mantle evolution, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 38: 63-87.
- [4] Basu, A. R. Wang, J. Huang, W. Xie, G. Tatsumoto, M., Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rock of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 105: 149-169.
- [5] Hart, S. R., Heterogeneous mantle domains, signatures, genesis and mixing chronologies, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, 90: 273-296.
- [6] Hamelin, B., Dupre, B., and Allegre, C. J., Pb-Sr-Nd isotopic data of India Ocean ridge: New evidence for large-scale mapping of mantle heterogeneities, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, 76: 288-298.
- [7] Tatsumoto, M. Hegner, E., and Unruh, D. M., Origin of the west Mani volcanics inferred from Pb, Sr, and Nd isotopes and a multi-component model for oceanic basalts, *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, 1987, 1350: 723-744.
- [8] Castillo, P., The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle, *Nature*, 1988, 336: 667-670.
- [9] Pringle, M.S., Early cretaceous plateau basalts, EMI from the lower mantle, and the origin of the Dupal anomaly, (abs.) In: *Mantle plume symposium, in U. S. A., 1991.*
- [10] Le Roex, A. P. Dick, H. J. B., and Fisher, **Petrology and geochemistry of MORB from 25° E to 46° E along the southwest India Ridge: Evidence for contrasting styles of mantle enrichment**, *J. Petrol.*, 1989, 30: 947-986.
- [11] Weis, D., et al., Ninetyeast Ridge (India Ocean): a 5000 km record of a Dupal mantle plume, *Geology*, 1991, 19: 99-102.
- [12] Tatsumoto, M., Dupal anomaly in the Sea of Japan: a plate recycling model for OIB sources, (abs.) In: *Mantle plume symposium in U.S.A., 1991.*
- [13] Zindler, A., and Hart, S. R., Chemical geodynamics, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, 14: 493-571.
- [14] Weis, D., et al., Kerguelen archipelago: geochemical evidence for recycling material, In: Hart, S.

- R., and Gulen, L. (eds.) Crust / mantle recycling at convergence zones: Amsterdam, Kluwer Academic Press, NATO ASI Series, 1989: 59–63.
- [15] Weis, D., et al., Dupal anomaly in existence 115 Ma ago: evidence from isotopic study of the Kerguelen Plateau (South India Ocean): *Geochimica and Cosmochimica Acta.*, 1989, 57: 2125–2131.
- [16] Tu, K., et al., Dupal Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (South China): Implications for a subcontinental lithosphere Dupal source, *Geology*, 1991, 19: 567–569.
- [17] Gill, An OIB–BABB–subcontinental lithosphere connection, (abs.) In: Mantle plume symposium, in U. S. A., 1991.
- [18] Hawkesworth, C. J., et al., Evidence from the Parana of south Brazil for a continental contribution to Dupal basalts, *Nature*, 1986, 332: 356–359.
- [19] Pegram, W. J., Development of continental lithospheric mantle as reflected in the chemistry of the Mesozoic Appalachian Tholeiites, U. S. A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 97: 316–331.
- [20] Tu, K. Flower, M. F. J., and Carlson, R. W., Isotopic evidence for the Dupal anomaly in postspreading magmas from the south China basin, *Chem. Geol.*, 1988, 70: 57–76.
- [21] 解广袁、涂勤、王俊文、张明、Flower, M. F. J., 中国东部新生代玄武岩铅同位素组成的地理分布特征和成因意义, *科学通报*, 1989, 34: 772–775.

## THE REVIEW ON DUPAL ANOMALY

Zhang Qi Zhou Dejin Shen Lipu

(Institute of Geology, CAS, Beijing 100029)

### Abstract

Dupal anomaly was firstly discovered by Dupre and Allegre in 1983 when they studied on Indian Oceanic basalts, then Hart (1984) named it after them. It is mantle Pb, Sr isotope geochemical anomaly, which was the biggest geochemical anomaly domain on the earth surface and reflects mantle heterogeneity. The Northern Hemisphere Reference Line (NHRL) was used as its criteria, and then Hart (1988) suggested two criteria for Dupal anomaly, i.e.  $\delta 8 / 4\text{Pb} > 60$  and  $87\text{Sr} / 86\text{Sr} > 0.705$ . For modern oceanic basalts, the anomaly only formed in south hemisphere and concentrated at 30 south latitude and nearly continuously distributed around the earth. Recently many other Dupal anomaly domain in northern hemisphere were found, such as Eastern China and its environs, Japan Sea.

It was considered that Dupal anomaly occurred in the early history of the earth. Now, geochemists try to discover where the Dupal anomaly origin is (in shallow continental lithosphere mantle? or deep convecting asthenosphere mantle?), forming mechanisms the Dupal anomaly. Whether the primary origin of Dupal anomaly only located at southern hemisphere mantle or not, and how the Dupal anomaly drifted to north-



ern hemisphere. It was suggested that the origin of Dupal anomaly may be existed within continental lithosphere mantle and also within deep asthosphere mantle. There are several suggestions on the mechanism of Dupal anomaly origin, such as crust material subducted deeply into asthosphere mantle and saddled to its cycling; the evolution of intra-continental lithosphere mantle. We suggested that the ancient extraterrestrial meteorite might brought the anomaly Pb isotope component to southern hemisphere mantle.

The discovery of Dupal anomaly gave a new approach to research of magmatic evolution, and a new chance to investigate the mantle geochemistry. Besides, the existence of Dupal anomaly in southern hemisphere oceanic basalts put some constrains on the research of modeling mantle convection. For further study on it, geochemists try to reveal the trace elements and other element isotope features of Dupal anomaly.

**Key words** Dupal anomaly, Pb isotope.

## 构造地震是岩石破裂的非平衡热力学过程

**【摘要】** 引进岩石破裂的热力学机制,使人们对构造地震震源处以破裂方式突然释放能量时的物理过程本质有新的认识。

热力学的机制与弹性回跳的力学机制不同。根据热力学机制,在震源处释放的能量是固体介质变形时内能不可转换的结果。转换过程形式上类似于链锁式局部化学反应,其速度取决于进行反应的空间尺度。

与岩石矿物成分破坏的速度有关,可能形成强度上有差异的能量辐射通量,与此同时发生弱震、强震以及很强的地震。当破坏速度不超过弹性波传播速度  $V_p$  时,主要以弹性波的形式释放能量。此类释放是弱地震的特征,它出现在震源区压力不高,局部破坏的形式是裂缝型线性破裂的条件下。强震则是由于破裂速度超过  $V_p$  而发生大范围破裂的过程。此时震源区的压力高,因而以冲击波的形式进行较强的能量辐射。很强的地震与均匀的强受压介质在大范围内发生的爆炸性破坏过程有关。破坏的爆炸状态受控于固态化学反应,反应时能量在很短时间内(毫微秒级)释放,并在破坏区形成高温高压,以保证冲击波在介质里进一步传播。

摘译自:《Физика Земли》,1992, 5: 121.

Шаров В. И. 著 肖蔚文 摘,王广福 校.