

# Dupal 同位素异常的概念、成因及其地质意义

邢光福<sup>①</sup>

(南京地质矿产研究所, 南京 210016)

**内容提要** Dupal 异常最初发现于南半球并被认为仅局限于南半球, 且主要是古老地幔成因; 近年来在北半球等地也陆续发现了 Dupal 异常, 且与南半球 Dupal 异常既相似又有区别, 成因也不尽相同。本文回顾了 Dupal 异常的研究历史, 讨论了它与地幔端员之间的关系, 并结合实例解剖探讨了其可能成因及地质意义。

**关键词** 地幔端员 Dupal 异常 成因 地质意义

## 1 概念的提出

Dupre 和 Allegre<sup>[1]</sup> 在研究中印度洋脊 (Central Indian Ridge, 简称 CIR) 的玄武岩时发现, CIR 的大洋中脊玄武岩 (MORB) 不同于通常意义上亏损的 MORB, 而是富放射性成因铅和锶 (尤其是  $^{207}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}$ ), 表明印度洋中存在 Pb、Sr 同位素组成异常的地幔。Hart<sup>[2]</sup> 总结了世界范围内已有的有关资料, 进一步指出这种 Pb、Sr 同位素组成异常的地幔在南半球各大洋中普遍存在, 它们在赤道和南纬  $60^\circ$  之间构成一大致连续的 (大陆地幔资料不足, 仅作推断) 环南半球分布的巨型异常带, 并借用上述两位研究者的姓氏开头字母将其命名为南半球 Dupal 同位素异常 (图 1), 它们是由古老地幔产生的, 主要分布于南半球, 在北半球及两极地区基本上不存在。

## 2 Dupal 同位素异常的判别

既然 Dupal 同位素异常 (以下简称 Dupal 异常) 指的是地幔具有异常富集的 Pb、Sr 同位素组成, 因而在选择进行 Dupal 异常研究的样品时必须注意以下前提: (1) 样品直接源自地幔; (2) 未受地壳混染, 也未受足以影响其同位素组成的后期地质作用的影响 (如变质、蚀变、风化等); (3) 若样品时代较老, 必须对其同位素组成作时间校正。

Hart<sup>[2]</sup> 给出了 Dupal 异常的边界条件:  $\Delta 7/4\text{Pb} > 3$ ,  $\Delta 8/4\text{Pb} > 10$  和  $\Delta \text{Sr} > 40$ , 其中  $\Delta 7/4\text{Pb}$  和  $\Delta 8/4\text{Pb}$  分别指示样品在一定的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  时  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在 Pb-Pb 同位素相关图上垂直偏离北半球铅参考线 (NHRL) 的程度; NHRL 是被认为正常亏损的

<sup>①</sup> 收稿日期: 97-08-22

作者简介: 邢光福, 男, 1965 年生, 副研究员, 主要从事火成岩岩石学及地球化学研究。

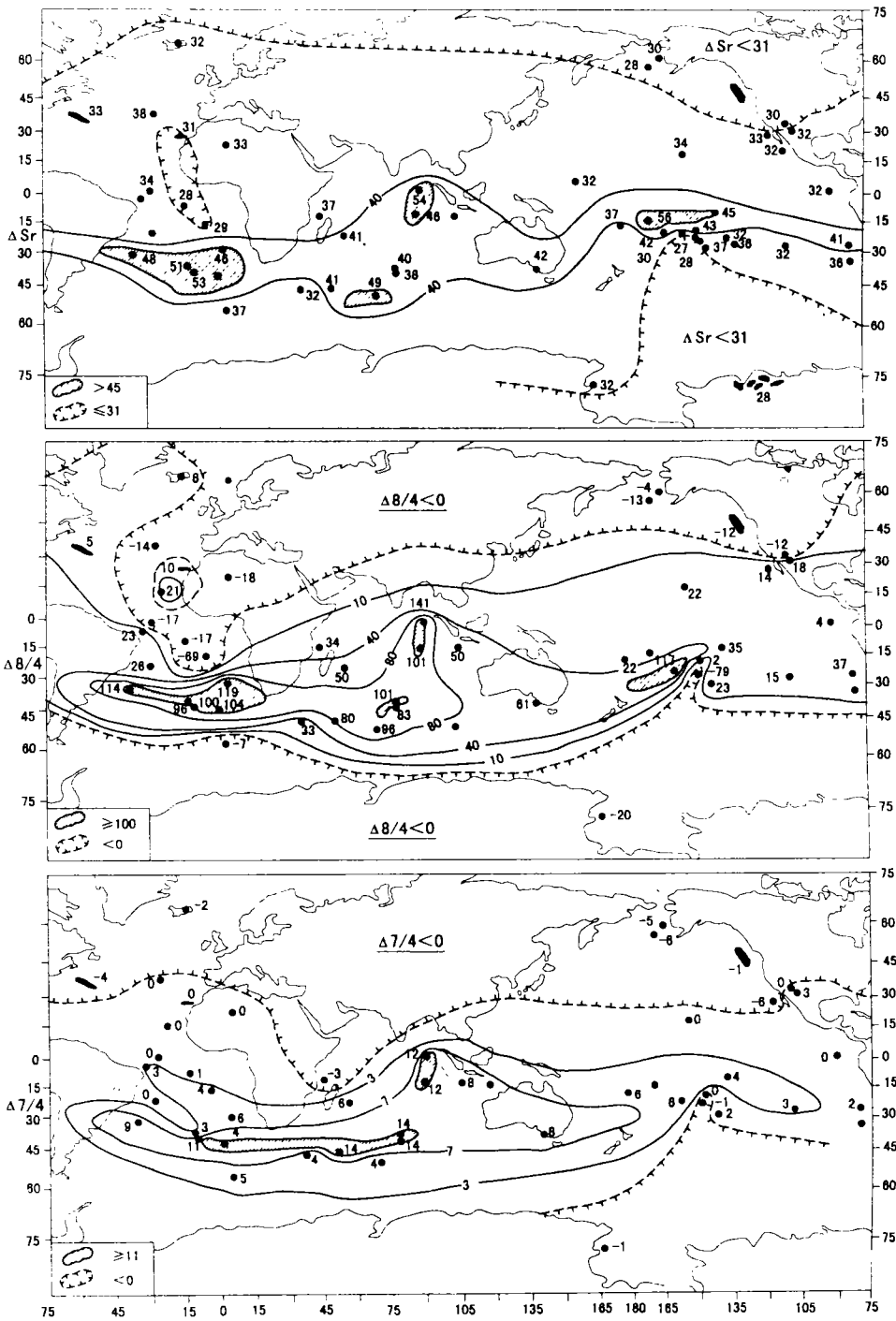


图1 南半球 Dupal 异常带 (据 Hart<sup>[2]</sup>) (图中数字为纵坐标  $\Delta Sr$ 、 $\Delta 8/4Pb$  和  $\Delta 7/4Pb$  值)

Fig.1 Dupal anomaly zone of Southern Hemisphere (after Hart<sup>[2]</sup>)

(Numbers in the diagram are  $\Delta Sr$ ,  $\Delta 8/4Pb$  and  $\Delta 7/4Pb$  values at the longitudinal axes)

北半球 MORB 和 OIB 在 Pb-Pb 同位素相关图上的一条主要相关线。因此  $\Delta 7/4\text{Pb}$  和  $\Delta 8/4\text{Pb}$  实质上是衡量地幔 Pb 同位素组成是否富放射性成因铅以及富集程度的两个参数。它们的计算公式如下<sup>[2]</sup>：

$$\Delta 7/4\text{Pb} = [({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 0.1084({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 13.491] \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta 8/4\text{Pb} = [({}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 1.209({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 15.627] \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta \text{Sr}$  的计算较简单,其公式为:

$$\Delta \text{Sr} = [({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{样品}} - 0.7] \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

一般情况下,由于<sup>235</sup>U 和<sup>232</sup>Th 的半衰期相当长,故 Pb 同位素组成不须作时间校正;但对  $\Delta \text{Sr}$  而言,若样品年代较老,则不作时间校正会对其产生较大影响。

此后 Hart<sup>[3]</sup> 在将 Dupal 异常与地幔端员作比较时,又强调典型的 Dupal 异常应满足  $\Delta 8/4\text{Pb} > 60$ ,  $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{样品}} > 0.7050$  (即  $\Delta \text{Sr} > 50$ ) 的条件。

在 Pb-Pb 同位素相关图上,具有 Dupal 异常的样品必定投影于零等时线右侧、NHRL 上方的印度洋 MORB 范围内,而较明显地偏离太平洋和大西洋 MORB 范围。

### 3 Dupal 异常与地幔端员的关系

Zindler 和 Hart<sup>[4]</sup> 根据多达 300 余件大洋玄武岩样品的 Sr、Nd、Pb、He 同位素组成的研究,确定出 6 种地幔端员 (DMM, EM I, EM II, HIMU, PREMA, BSE 或 PUM), 他们及 Hart<sup>[3]</sup> 都认为其中的四种基本地幔端员,即亏损的 MORB 型地幔 DMM、高 U/Pb 地幔 (HIMU)、及两种富集地幔 (EM I 和 EM II) 即足以解释所有地幔的同位素组成,换句话说,其它地幔端员可由这四种基本地幔端员不同组合而形成,进而所有幔源岩石均起源于该四种基本地幔端员中的一种或几种混合源区。

DMM 相当于 N 型 MORB,以高<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd、低<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和低<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 为特征,其同位素组成相当均一,最亏损的同位素组成为:<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.7022, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.5133, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 17.3。HIMU 以极高的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、低<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr、中等<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 以及 U、Th 相对于 Pb 特别富集为特征,同位素组成也很均一。EMI 有相当低的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 和最低的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd, 同位素组成的均匀性不明确,EM II 则有最高的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 及中等的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 和<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd, 而且其同位素组成的均一性在这四种地幔端员中最差,在一定的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 时有变化最大的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 或<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd。

四种基本地幔端员中除 DMM 外其它三种被认为主要分布于南半球<sup>[3]</sup>。关于它们的成因,要数 DMM 最简单,是由于岩浆不断萃取导致陆壳增生、地幔日趋亏损而形成的。Hart<sup>[3]</sup> 指出, DMM 亏损 LILE 和不相容元素,只能位于地幔最上部。HIMU 有多种成因,如地核中 Pb 的萃取、古老的蚀变洋壳之再循环、古老陆壳再循环及地幔内部交代作用等, Hart<sup>[3]</sup> 认为最可能的是交代成因, Chauvel et al<sup>[5]</sup> 则认为再循环的洋壳是 HIMU 不可忽视的重要形成因素,这种洋壳的 Pb 在洋脊处即由于高温热液蚀变而大量淋滤掉了, HIMU 型火山岩即是古老洋壳与周围地幔混合形成的源区部分熔融的产物。EMI 的成因争议最大, Richardson et al<sup>[6]</sup> 将后来 Zindler 和 Hart<sup>[4]</sup> 确定为最具典型的 EMI 特征的 Walvis Ridge 玄武岩看作是来源于交代成因的富集地幔;刘丛强等<sup>[7]</sup> 根据中国东部新生代玄武岩 Sr、Nd、Ce 同位素的研究证明中国东部地幔中也存在 EMI 组份,而且与俯冲板块来源的流体交代作用

有关;Paluze et al.<sup>[8]</sup>则提出 EMI 是由大陆岩石圈地幔底部拆沉(delamination)进入软流圈地幔而形成;Weaver et al.<sup>[9]</sup>将 EMI 组份归结为板块俯冲将深海(pelagic)沉积物带入地幔并与大洋岛屿玄武岩(OIB)的源区混合的结果;Hart<sup>[10]</sup>也提出 EMI 与俯冲深海沉积物有关;Chauvel et al.<sup>[5]</sup>认为 EMI 相当于俯冲深海沉积物 + 洋壳,其中深海沉积物年龄 $\approx 1.5\text{Ga}$ ;Zindler 和 Hart<sup>[4]</sup>及 Hart<sup>[3]</sup>认为 EMI 是形成于核—幔边界的原始(primary)地幔,它们的同位素组成相当于稍有变化的原始地幔或整体地球(bulk-earth)地幔,但也极有可能是交代成因的。Hart<sup>[3]</sup>并指出 EMI 与 HIMU 是同一交代事件的两个互补部分,即渗滤(infiltration)部分和残余(residue)部分;Chauvel et al.<sup>[5]</sup>同样也提出 HIMU 与 EM(EMI 和 EM II)不是相互独立的岩浆源,它们应是地幔源区中在空间上密切相关的几种组份;Honda<sup>[11]</sup>则认为 EMI 不仅仅与原始地幔有关,还应加上俯冲洋壳。EM II 则最可能是俯冲的及再循环的大陆壳物质,因为其同位素组成( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.710$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.5120$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.5 \sim 19.2$ )相当于上地壳或陆源沉积物<sup>[4]</sup>。

与上述四种基本地幔端员的同位素组成作一比较便可知,Dupal 异常不可能直接形成于 DMM、HIMU 或 EM II 型地幔中,但可与 EMI 有直接成因关系,Hart<sup>[3]</sup>也指出 Dupal 异常与 EMI 有相当的 $\Delta 8/4\text{Pb}$ ;另一方面,若 Dupal 异常产生于上述地幔端员的混合源区,则 HIMU 因有极高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和极低的 $\Delta 8/4\text{Pb} (< -20)$ <sup>[4]</sup>而不可能成为混合源区中的端员组份;DMM 与 EM II 一定程度的混合也是可以产生 Dupal 异常的。因此 Dupal 异常可直接产生于 EMI 或 EM(EMI 和/或 EM II)与 DMM 的混合源区,但最不可能形成于存在 HIMU 组份的独立源区中。当然 Dupal 异常也可与 EM 组份无关而单独形成,因为在 Dupal 异常区内有时并不含 EM 组份<sup>[3]</sup>。此外,由以上讨论也可知,实际上 Dupal 异常与地幔端员如 EM I 在某些情况下具有相同成因,因而它们在时空上密切相关是不足为奇的。

#### 4 Dupal 异常成因类型

作为一种客观存在的地质现象,Dupal 异常从一开始提出便引起了对其成因的广泛争论。Dupre 和 Allegre<sup>[1]</sup>认为是洋壳或沉积物再循环进入地幔造成了印度洋 MORB 和 OIB 的高 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,McKenzie 和 O'Nions<sup>[12]</sup>则提出另一种可能成因,即古老且相对不亏损的陆下岩石圈。Hart<sup>[2]</sup>最初认为要产生 $\Delta 7/4\text{Pb}$ 和 $\Delta 8/4\text{Pb}$ 都是正值的 Dupal 异常,必须存在高 Rb/Sr、高 $^{235}\text{U}/\text{Pb}$ 和 Th/U 的源区,而且这些高的元素比值应稳定地存在相当长一段时间(至少 $10^8$ 年甚至数十亿年),但若南半球存在如此大规模的古老地幔,则显然与地幔对流学说相矛盾。Allegre 和 Turcotte<sup>[13]</sup>将沉积物再循环和大陆岩石圈拆沉视为 Dupal 异常形成的可能原因。Hamelin et al.<sup>[4]</sup>认为持续数亿年的上地幔多次部分熔融引起的 U-Th 分馏或 OIB 源区对 MORB 源区的混染均可导致 Dupal 异常。Hawkesworth<sup>[15]</sup>则提出 Dupal 异常的浅源热侵蚀的陆下岩石圈成因说。Hart<sup>[3]</sup>进一步强调说 Dupal 异常产于核/幔边界层(CMBL),因为交代形成的 EMI 和 HIMU 可储存于 CMBL,而 Dupal 异常正是由于 CMBL 的不稳定性产生的热点(hotspot)喷发而形成的,由于 EMI 和 HIMU 主要分布于南半球,因而 Dupal 异常也仅存于南半球,这实质上已是地幔柱的概念了。Castillo<sup>[16]</sup>的观点与 Hart<sup>[2,3]</sup>相同。

## 5 研究实例

自 Hart<sup>[2,3]</sup> 提出 Dupal 异常以及 EMI 和 HIMU 都基本上只存在于南半球以来,他所划定的南半球 Dupal 异常带轮廓(图 1)至今没有什么重大改变。但此后在北半球、尤其是西太平洋地区也陆续发现了多处明显的 Dupal 异常,现对这地区 Dupal 异常的研究作一介绍。

### 5.1 菲律宾岛弧

菲律宾岛弧地区是北半球最早发现 Dupal 异常的地区。最近十几年来关于菲律宾岛弧火山岩已积累了相当丰富的同位素资料。Mukasa et al.<sup>[17]</sup> 首次提出东、西菲律宾岛弧火山岩均起源于 Dupal 异常型地幔,它们以低<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb ( $\Delta 7/4\text{Pb} = 1.5 \sim 5.2$ ) 和高<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb ( $\Delta 8/4\text{Pb} = 18.1 \sim 86.9$ ) 为特征, Dupal 异常形成的原因是该地区存在保存长达数亿年的高 Th/U 地幔源区,低的<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 表明不存在沉积物混染;虽然该古老的地幔源区与印度洋的 Dupal 异常源区很相似,但它并不是从南半球 Dupal 异常带迁移来的,而是一直处于北半球的。Vidal et al.<sup>[18]</sup> 对菲律宾群岛中的巴坦岛(Batan)含幔源包体的新生代玄武岩作了 Sr、Nd、Pb 同位素研究,笔者根据他们的 Pb 同位素数据计算出的 $\Delta 7/4\text{Pb} = 8.9 \sim 14.8$ ,  $\Delta 8/4\text{Pb} = 69.3 \sim 89.5$ , 显然也存在典型 Dupal 异常;他们还发现这些 Pb 同位素组成与台湾玄武岩相当一致,而根据 Sr、Nd 同位素组成及橄榄岩捕虏体 U 型稀土配分型式及其富 LREE 特征等,推断火山岩起源于富 H<sub>2</sub>O 流体交代过的地幔源区,而流体来自俯冲岩石圈(沉积物或沉积物+洋壳),这些沉积物则源自台湾和中国大陆的古老麻粒岩相基底,因而具有高 Th/U。由此看来巴坦岛地区的 Dupal 异常应是富 H<sub>2</sub>O 的流体交代成因的,但深部的古老变质基底怎样才能成为俯冲沉积物则是个问题。实际上在 Sr、Nd 同位素相关图上<sup>[18]</sup>, 巴坦岛的橄榄岩包体及其寄主岩之投影点均位于地幔系列之下,这相当于 Hart<sup>[3]</sup> 定义的 LoNd 系列,而 LoNd 系列是大陆岩石圈拆沉后循环进入大洋地幔产生的;另一方面,笔者的研究表明富 H<sub>2</sub>O 流体的交代作用并不利于 Dupal 异常之产生(见后面 5.4 部分),因而巴坦岛地区的 Dupal 异常更可能是大陆岩石圈拆沉的结果<sup>[19]</sup>。Chen et al.<sup>[20]</sup> 对从台湾东部延伸到菲律宾吕宋岛的吕宋弧火山岩的研究也表明该地区存在典型的流体交代作用形成的 EMI 组份,流体不仅来自俯冲板块,还受到邻近的欧亚大陆岩石圈的影响。因而大陆岩石圈在该地区的作用是不应忽略的。

McDermott et al.<sup>[21]</sup> 曾提出台湾与北吕宋一带岛弧火山岩源区由三部分组成:① Dupal 异常型地幔楔;② 俯冲板块来源的含 H<sub>2</sub>O 流体,具有高 LITE/HFSE;③ 同位素富集组份,为 <5% 的陆源沉积物。他们认为在沉积物俯冲和富 H<sub>2</sub>O 流体交代之前地幔存在 Dupal 异常,再加上北吕宋火山岩的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 明显高于 Zindler 和 Hart<sup>[4]</sup> 定义的 EMI 而否定 Chen et al.<sup>[20]</sup> 认为该地区存在 EMI 的观点。但 EMI 组成并不很均一,因而仅根据 Pb 同位素组成并不能轻易否认 EMI 的存在,而且富 H<sub>2</sub>O 流体的交代作用很有利于地幔<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 的增加,特别是当这种流体主要来自俯冲的陆源沉积物时尤其如此,因为陆源沉积物富 U<sup>[22]</sup>;另外,由上述第 3 部分关于地幔端员成因的讨论也可知,若存在既有 Dupal 异常又经历过流体交代的富集地幔,则这种富集地幔基本上可肯定为 EMI,因此,他们提出存在第三种组份即同位素富集的陆源沉积物(实质上即 EM II) 的混合也是值得商榷的,正如 Castillo<sup>[23]</sup> 所言,这与火山岩低的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 相矛盾。笔者以为实际上可将他们提出的第二、三种组份合而为一,即富 H<sub>2</sub>O 流体(至少其中的一部分)正是由于俯冲的陆源沉积物脱水形成的,因为这

地区俯冲洋壳较新鲜<sup>[21]</sup>,而只有受到海水较强烈蚀变的洋壳才会产生相当多的含水矿物,并在俯冲时因T、P之变化导致含水矿物分解而释放出大量H<sub>2</sub>O来,而新鲜的洋壳不可能大量脱水。至于地幔楔的Dupal异常依然归因于大陆岩石圈拆沉,因为在McDermott et al.<sup>[21]</sup>的Sr-Nd同位素相关图上有相当部分投影点落在地幔系列左下方而构成LoNd系列,可较好地由DMM+EMI的混合来拟合,而并不存在趋于EM II的趋势。

实际上菲律宾岛弧火山岩的同位素组成相当复杂,上述分析并不能一概否定EM II组分的存在,因为有些地区的火山岩具有相当高的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr和低的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd,暗示着EM II的存在。如Hickey-Vargas et al.<sup>[24,25]</sup>即发现东菲律宾岛弧东侧的菲律宾海地幔中既存在Dupal异常又存在EMI和EM II,并提出它们都是从南半球迁移来的。菲律宾海的Dupal异常被认为与北吕宋弧很类似<sup>[21]</sup>。Castillo<sup>[23]</sup>也认为菲律宾岛弧地区具有类似于菲律宾海的Dupal异常,并将它们(包括巴拉望碰撞带)的Dupal异常都归因于地幔是迁移自南半球Dupal异常带的古老地幔,本身同位素组成不均一,只是近来才受到源自欧亚大陆岩石圈沉积物的混染、或更可能地是受到了俯冲板块(包括沉积物)脱水释放流体之交代作用;他进而认为菲律宾岛弧火山岩的地幔源区相当于印度洋MORB端员+富集OIB端员混合的产物,而应该基本上没受到俯冲沉积物的混染。但Mukasa et al.<sup>[26]</sup>指出巴拉望碰撞带异常的Pb、Sr同位素组成主要由源自欧亚大陆的南海陆源沉积物混染所产生。由此可见,对菲律宾岛弧地区Dupal异常成因的解释争议相当大,有的观点甚至相互矛盾。笔者认为,如Castillo<sup>[23]</sup>那样将俯冲陆源沉积物混染改为由这些沉积物释放的含H<sub>2</sub>O流体交代富集作用不失为一种较妥的折衷方案,它可以较好地解释存在富集型地幔而<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr又不是太高的现象,但问题是依然不能仅仅用富H<sub>2</sub>O流体之交代作用来解释Dupal异常的成因。由于菲律宾海板块是新生代以来才由南半球北移而来,并因南海板块俯冲等而导致菲律宾岛弧之生成,因而大陆岩石圈拆沉和存在古老富集地幔都有可能是产生菲律宾岛弧地区Dupal异常的原因,但通过下面关于南海地区Dupal异常的讨论,且毕竟菲律宾岛弧火山岩相当一部分的Sr、Nd同位素的富集程度还远未达到古老富集地幔的程度,笔者更倾向于上述两种可能中大陆岩石圈拆沉是主因。

## 5.2 南海地区

近年来我国学者在南海地区也发现了Dupal异常并做了卓有成效的研究。早在1988年涂勤等就提出南海存在区域性Dupal异常地幔域。此后Flower et al.<sup>[27]</sup>、涂勤等<sup>[28,29]</sup>及张明等<sup>[30]</sup>经比较得出菲律宾岛弧、南海海山、海南岛、中国大陆东南沿海(包括福建、澎湖列岛及台湾北部)等地的新生代板内玄武岩具有相同的同位素特征,由此明确指出环南海盆地(SCB)存在EM II型Dupal异常地幔域,它是地幔自生成因的(endogenous),即由浅部岩石圈地幔+近来的俯冲沉积物形成,而并不是通过深部地幔对流从南半球的印度洋Dupal异常型地幔迁移来的。SCB的EM II组分是南海张开前太平洋板块俯冲活动带入的,在EM II加入之前SCB已有了Dupal异常型富集地幔,后者由印度洋MORB型软流圈对次大陆岩石圈地幔(SCML)混染而产生。这一观点有与McDermott et al.类似的地方。他们并提出,整个SCB周边地区Dupal异常都相似,表明它们都应是地幔自生作用成因的。SCB和海南岛的板内玄武岩与吕宋岛弧火山岩的源区不同之处在于,尽管它们有相似的同位素组成,但前者没有近期的俯冲沉积物影响。但笔者注意到,SCB火山岩的微量元素和低<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr等特征与俯冲陆源沉积物(EM II)的混染(混合)有矛盾,而极有可能与菲律宾岛弧地区情况

一样,这里的俯冲陆源沉积物参与也主要是以派生的流体交代方式进行而不是以全岩或熔融体形式对地幔源区的混染(混合)。若如此,则南海地区的 EM II 型 Dupal 异常还应称为 EMI 型异常为好。

Chung 和 Sun<sup>[31]</sup>发现东台湾蛇绿岩(ETO)的玄武岩具有和 SCB 海山玄武岩类似的 Dupal 异常(其 $\Delta 8/4\text{Pb}=31\sim 74$ ),进而提出 ETO 起源于南海,而后的 EM II 型 Dupal 异常是大陆岩石圈热侵蚀和拆沉作用形成的,这与前面几位研究者关于 SCB 的 Dupal 异常成因的看法基本一致,也与笔者对菲律宾岛弧地区 Dupal 异常成因的推论相吻合。最近 Chung et al.<sup>[32]</sup>通过对台湾西北部中新世玄武岩的研究也提出该地区地幔存在 EMI 和 EM II 组分,根据他们提供的 Pb 同位素组成也可断定存在 Dupal 异常。古地磁和古生物学资料<sup>[33,34]</sup>已证明华南为冈瓦纳大陆的一部分,从晚古生代以来才漂移到北半球,因而其地幔的 Dupal 异常由冈瓦纳型大陆岩石圈拆沉而产生<sup>[35]</sup>是完全可能的。Chung 和 Sun<sup>[31]</sup>也指出,如果 EM II 组分可通过沉积物俯冲改造岩石圈地幔而获得,则它可出现于地球上任何合适的地方。但世界上俯冲带地区发生沉积物俯冲虽极常见,EM II 组分却并不多见,这是因为相当一部分情况下俯冲沉积物并不以全岩或熔融体与地幔源区混染或混合的形式影响地幔的同位素组成,即并不总是表现为 EM II 组分,而有可能通过其释放的流体交代作用影响地幔,即表现为地幔源区中存在 EMI 组分。另外,大陆岩石圈拆沉也只能产生 EMI 而不能产生 EM II,因而笔者认为 SCB 的 Dupal 异常应属于 EMI 型而不是 EM II 型,这也与 Chen et al.<sup>[20]</sup>和刘从强等<sup>[7]</sup>认为的中国东部地区地幔中存在 EMI 组分的看法相一致。

### 5.3 日本海地区

日本海地区近年来也成了研究 Dupal 异常的热点地区。早在 1985 年 Nakamura et al.<sup>[36]</sup>就报道过日本海 Ulungdo 岛白榴岩具极高的 $\Delta 8/4\text{Pb}$ (约 150),Nakamura et al.<sup>[37]</sup>还测定了它们的 Sr、Nd 同位素组成,分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\approx 0.705$ , $\epsilon\text{Nd}=-2$ ,因而提出日本海 Dupal 异常是地幔柱成因。但此后 Sun<sup>[38]</sup>、Tatsumoto<sup>[39]</sup>和 Tatsumoto et al.<sup>[40]</sup>确认日本海 Dupal 异常实际上应与 EMI 型岩石圈地幔有关。Tatsumoto et al.<sup>[40]</sup>还进一步指出,欧亚大陆东缘(从西南日本、日本海、朝鲜半岛一直到我国华北地区)的幔源火山岩的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 均高于 NHRL 的相应值,绝大多数 $\Delta 8/4\text{Pb}=60\sim 140$ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7035\sim 0.7060$ 。Basu et al.<sup>[41]</sup>也指出东北五大连池白榴石玄武岩 $\Delta 8/4\text{Pb}=70\sim 80$ 。根据 Tatsumoto et al.<sup>[40]</sup>的总结,以上地区的 Dupal 异常及 Sr 同位素组成均有一定相似性,因而应具有相同成因,即是因为欧亚大陆东缘的次大陆岩石圈下部存在 EMI 组分,这种 EMI 是在元古代以前( $>1\text{Ga}$ )发生的来自俯冲板块的流体交代作用的产物,交代作用使得地幔在相当长时期内保持了高 Th/U 比值,经放射性累积而具有了高的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,并由此产生 Dupal 异常,但地幔的高 U/Th 是不均匀的,因而不同地区 Dupal 异常表现也不一样。笔者以为,将日本海地区(包括华北地区)等的 Dupal 异常成因归结为流体对地幔的交代(即存在 EMI 组分)是可信的,但这一流体交代事件不一定必然发生得这么早,诚然如果没有时间累积因素则高的 Th/U 并不一定就意味着高的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,但如果流体的源区(如俯冲沉积物)在俯冲之前已保持了相当长时间的高 Th/U,则它们在俯冲时就可以具备了较高的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,换句话说,这种来源的流体之交代作用即使较晚发生也同样可产生 Dupal 异常。

### 5.4 南极乔治王岛地区

笔者等<sup>[19]</sup>在研究南极南设得兰群岛(South Shetland Islands)中的乔治王岛(King

George Island) 中新代岩浆岩时,发现这些未受地壳混染的岛弧岩类也具有 Dupal 异常特征( $\Delta 7/4Pb = 4.2 \sim 10.4$ ,  $\Delta 8/4Pb = 25.5 \sim 75.0$ )。通过 Sr、Nd、Pb 同位素及微量元素、稀土元素等的综合研究,如低的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i (< 0.7040)$ 、正的  $\epsilon Nd_{(t)}$  (3.02~6.72)、富 LREE、高 LILE/HFSE 及负的 Ce 异常、负的  $\Delta Nd$  值等,明确提出乔治王岛地区地幔存在 EMI 组分,岩浆岩的地幔源区由 DMM + EMI 混合而成,不存在 EM II 或 HIMU 组分。Hole et al. [42] 业已证明研究区俯冲板块之下的软流圈地幔相当亏损(即无 EM 组分)、不存在 Dupal 异常(大多数起源于软流圈的碱性玄武岩之  $\Delta 8/4Pb < 0$ )、也不存在地幔柱构造;此外研究区地壳成熟度低,最老地壳岩石为晚石炭世角闪岩相岩类[43],既不存在 U、Th 富集的上地壳、也缺乏 U 亏损的古老变质基底[44],显然这里的 EMI 组分和 Dupal 异常不可能有深部古老地幔、地幔柱、大陆岩石圈拆沉等成因类型,而只能由浅部地幔(即上地幔楔)内的流体交代作用产生。再根据火山岩中矿物熔融包裹体成分富  $CO_2$  而贫  $H_2O$  的特点、深海沉积物 (pelagic) 和陆源沉积物 (terrigenous) 的成分差异(即前者富  $CaCO_3$ 、有高的 Th/U 而后者成分相当于上地壳,有高的 U/Th 和 U/Pb)、以及它们派生流体不同的性质(分别富  $CO_2$  和富  $H_2O$ )、推断 Dupal 异常和 EMI 组份由俯冲深海沉积物脱碳酸盐化释放的富  $CO_2$  流体交代上地幔楔而形成,而且这种富  $CO_2$  流体具有高 Th/U 和 Pb/U 的特点。图 2 是乔治王岛第三纪火山岩的 Pb - Pb 同位素相关图,其投影点均位于零等时线右侧、NHRL 上方的印度洋 MORB 区域内,而大部分(尤其是在图 2b 的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  与  $^{208}Pb/^{204}Pb$  相关图上)明显偏离亏损的太平洋和大西洋 MORB 区域,而且这些点构成大致平行于 NHRL 的趋势趋于 EMI,而并不在南太平洋沉积物和亏损 MORB 之间构成较陡的趋势,一方面说明存在 EMI 组份,另一方面也说明岩石在形成过程中未受到沉积物的混染(混合),即不存在 EM II 组分。

前文关于 Dupal 异常及

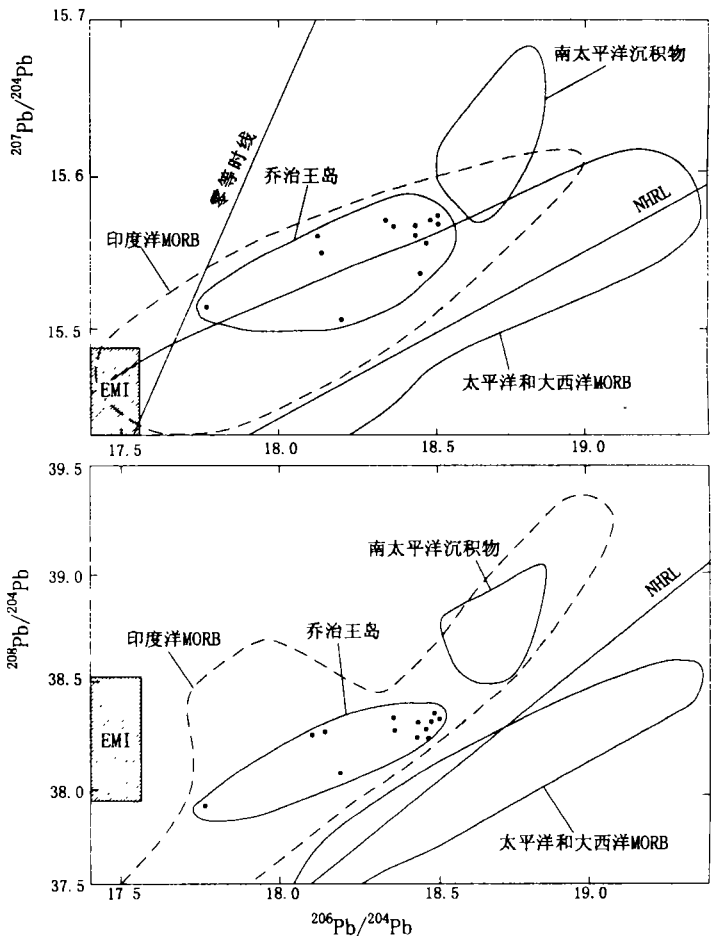


图 2 乔治王岛第三纪火山岩 Pb - Pb 同位素相关图  
 Fig. 2 Pb - Pb isotopic correlation diagram of Tertiary volcanics from King George Island



EMI 组分成因观点的评述中可知, 已有许多研究者将它们归因于深海沉积物的参与, 但主要是根据同位素组成推断的。笔者等根据测得的矿物熔融包裹体成分、区域地质资料以及 U、Th、Pb 三元素在不同环境中的地球化学活性等, 并结合同位素资料详实论证了俯冲深海沉积物释放的富 CO<sub>2</sub> 流体的交代作用才是 Dupal 异常和 EMI 形成的关键因素。另外, Hart<sup>[2]</sup> 考虑到大陆火山岩常受到地壳混染, 其同位素组成并不能如实反映地幔源区的同位素组成, 因而他给出环南半球 Dupal 异常在非洲、南美洲、澳洲诸大陆上的分布只是一种大趋势, 并无多少数据支持, 也就是说, 这个巨大的环形南半球 Dupal 异常带实际上并不连续。我们在乔治王岛地区发现 Dupal 异常的意义在于: 它不仅是南极地区第一例 Dupal 异常, 而且由于乔治王岛所处的特殊地理位置, 即太平洋、大西洋和南美大陆三者交界处, 从而使得太平洋和大西洋中的 Dupal 异常可籍此连接起来, 这样一来我们就会发现, 南半球 Dupal 异常的主要分布区往往就是古冈瓦纳大陆最初解体的地区, 因此可合理地推测南半球规模巨大的 Dupal 异常极可能与古冈瓦纳大陆解体之间存在某种内在成因联系, 因而进一步加强全球范围内 Dupal 异常的研究将有助于加深对大陆解体的认识。

最后值得一提的是, 北半球和南极地区的 Dupal 异常都不能完全符合 Hart<sup>[3]</sup> 强调的典型 Dupal 异常条件 ( $\Delta 8/4\text{Pb} > 60$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7050$  即  $\Delta \text{Sr} > 50$ ), 主要是它们的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  普遍较低。我们注意到, 若要使图 1 上据  $\Delta 7/4\text{Pb}$ 、 $\Delta 8/4\text{Pb}$  和  $\Delta \text{Sr}$  三参数分别划定的南半球 Dupal 异常带在地理分布上一致起来, 则  $\Delta \text{Sr}$  既可  $> 60$  也可  $< 40$ ; 另外, 日本海地区具极高  $\Delta 8/4\text{Pb}$  ( $> 100$ ) 的 Dupal 异常之样品中相当一部分的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7050$ , 甚至小于  $0.7040$ <sup>[40]</sup>, 因此笔者等<sup>[19]</sup> 提出  $\Delta \text{Sr}$  并不能作为判别 Dupal 异常的必要条件, 为了既强调地幔具有异常 Pb 同位素组成而有所区别, 可将  $\Delta 8/4\text{Pb} > 60$  者称为狭义 Dupal 异常, 而凡符合南半球 Dupal 异常条件者 ( $\Delta 7/4\text{Pb} > 10$ ) 称为广义 Dupal 异常。

## 6 参考文献

- 1 Dupre B, Allegre C J. Pb - Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 1983, 303: 142 - 146
- 2 Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 1984, 309: 753 - 757
- 3 Hart S R. Heterogenous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, 90: 273 - 296
- 4 Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1986, 14: 493 - 571
- 5 Chauvel C, Hofmann A W, Vidal P. HIMU - EM: the French Polynesian connection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, 110: 99 - 119
- 6 Richardson S H, Erlank A J, Duncan A R, et al. Correlated Nd, Sr and Pb isotope variation in Walvis Ridge basalts and implications for the evolution of their mantle source. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, 59: 327 - 342
- 7 刘丛强, 解广袁, 增田彰正. 中国东部新生代玄武岩的地球化学(II) Sr, Nd, Ce 同位素组成. *地球化学*, 1995, 24: 203 - 213
- 8 Palacz I N, Saunders A D. Coupled trace element and isotope enrichment in the Cook-Austral-Samoa island, Southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, 79: 270 - 280
- 9 Weaver B L, Wood D A, Tarney J. Role of subducted sediment in the genesis of ocean-island basalts: geochemical evidence from South Atlantic Ocean islands. *Geology*, 1986, 14: 275 - 278
- 10 Hart S R, Gerlach D C, White W M. A possible new Sr - Nd - Pb mantle array and consequences for mantle mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, 50: 1551 - 1557

- 11 Honda M, Woodhead J D, McDougall I, et al. . Correlation between mantle neon, oxygen and radiogenic isotopes in Ocean island basalts from the Pitcairn Seamounts, southeast Polynesia. U. S. G. S. Circular, 1994, 1107:142
- 12 McKenzie D, O'Nions R K. Mantle reservoirs and ocean island basalts. Nature, 1983, 301:229 - 231
- 13 Allegre C J, Turcotte DL. Geodynamic mixing in the mesosphere boundary layer and the origin of oceanic islands. Geophys. Res. Lett., 1985, 12:207 - 210
- 14 Hamelin B, Depre B, Allegre C J. Pb - Sr - Nd isotopic data of Indian Ocean ridges: new evidence of large-scale mapping of mantle heterogeneities. Earth Planet. Sci. Lett., 1986, 76:288 - 298
- 15 Hawkesworth C J, Mantovani M S M, Taylor P N, et al. . Evidence from the Parana of south Brazil for a continental contribution to Dupal basalts. Nature, 1986, 322:356 - 358
- 16 Castillo P R. The Dupal anomaly as a trace of upwelling lower mantle. Nature, 1988, 336:667 - 670
- 17 Mukasa S B, McCabe R, Gill J B. Pb - isotopic compositions of volcanic rocks in the West and East Philippine island arcs: presence of the Dupal isotopic anomaly. Earth Planet. Sci. Lett., 1987, 84:153 - 164
- 18 Vidal P, Dupuy C, Maury R et al. . Mantle metasomatism, above subducted zones: trace-element and radiogenic isotope characteristics of peridotite xenoliths from Batan Island (Philippines). Geology, 1989, 17:1115 - 1118
- 19 邢光福, 沈渭洲, 王德滋等. 南极乔治王岛中- 新生代岩浆岩 Sr - Nd - Pb 同位素组成及其源区特征. 岩石学报, 1997(印刷中)
- 20 Chen C - H, Shieh Y - N, Lee T, et al. . Nd - Sr - O isotopic evidence for source contamination and unusual mantle component under Luzon Arc. Geochim. Cosmochim. Acta, 1990, 54:2473 - 2483
- 21 McDermott F, Defant M J, Hawkesworth C J, et al. . Isotope and trace element evidence for three component mixing in the genesis of the North Luzon arc lavas (Philippines). Contrib. Mineral. Petrol., 1993, 113:9 - 23
- 22 McCulloch M T. The role of subducted slabs in an evolving earth. Earth Planet. Sci. Lett., 1993, 115:89 - 100
- 23 Castillo P R. Origin and geodynamic implication of the Dupal isotopic anomaly in volcanic rocks from the Philippine island arcs. Geology, 1996, 24(3):271 - 274
- 24 Hickey-Vargas R, Hergt J M, Spadea P. The Indian Ocean-type isotopic signature in western Pacific marginal basins: origin and significance. In : Taylor B and Natland J eds. , Active margins and marginal basins of the Western Pacific. American Geophysical Union Monograph, 1995, 88:175 - 197
- 25 Hickey-Vargas R. Isotope characteristics of submarine lavas from the Philippine Sea : implications for the origin of arc and basic magmas of the Philippine tectonic plate. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 107:290 - 304
- 26 Mukasa S B, Flower F J, MiRlius A. The Nd - , Sr - and Pb - isotopic character of lavas from Taal, Laguna de Bay and Arayat volcanoes, S. W. Luzon, Philippine: implications for arc magma petrogenesis. Tectonophysics, 1994, 235:205 - 221
- 27 Flower M F J, Tu K, Zhang M et al. . The South China Basin domain: a common source for recent mid-plate and covergent margin magmas. Abstr. Symp. Geology and Geophysics of the South China Sea, Guangzhou, China, 1989
- 28 Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. . Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (South China): implications for a subcontinental lithosphere Dupal source. Geology, 1991, 19:567 - 569
- 29 涂勤, 解广袁, Flower M F J 等. 南海海盆新生代玄武岩的地球化学特征与 Dupal 型同位素异常区的成因讨论. 见: 刘若新编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1992, 269 - 284
- 30 张明, 涂勤, 解广袁等. 海南岛新生代玄武岩微量元素和同位素地球化学. 见: 刘若新编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1992, 246 - 268
- 31 Chung S - L, Sun S - S. A new genetic model for the East Taiwan Ophiolite and its implications for Dupal domains in the Northern Hemisphere. Earth Planet. Sci. Lett., 1992, 109:133 - 145
- 32 Chung S - L, Jahn B - M, Chen S - J, et al. . Miocene basalts in northwestern Taiwan: evidence for EM - type mantle sources in the continental lithosphere. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59(3):549 - 555
- 33 Lin J L, Fuller M, Zhang W Y. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. Nature, 1985, 313:444 - 449
- 34 Hsu K J, Li J L, Chen H H, et al. . Tectonics of South China: key to understanding west Pacific geology Tectonophysics, 1990, 183:9 - 39

- 35 Mahoney J J, Natland J H, White W M, et al. . Isotopic and geochemical provinces of the western Indian Ocean spreading centers. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94:4033 - 4052
- 36 Nakamura E, Campbell I H, Sun S - S. The influences of subduction processes on the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, 1985, 316:55 - 58
- 37 Nakamura E, Campbell I H, McCulloch M T, et al. . Chemical geodynamics in a back-arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea and China. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94:4634 - 4654
- 38 Sun S - S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A D Saunders and M J Norry eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 1989, 42:313 - 345
- 39 Tatsumoto M. Dupal anomaly in the Sea of Japan: a plate recycling model of OIB sources. *Caltech Plume Symp. Abs.*, 1991, 2 - 4
- 40 Tatsumoto M, Nakamura Y. Dupal anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian Continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55:3697 - 3708
- 41 Basu A R, Wang J - W, Huang W - K, et al. . Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of Eastern China: implications for origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 105:149 - 169
- 42 Hole M J, Kempton P D, Millar I L. Trace element and isotopic characteristics of small-degree melts of the asthenosphere: evidence from the alkalic basalts of the Antarctic Peninsula. *Chemical Geology*, 1993, 109:51 - 68
- 43 Trouw R A J, Pankhurst R J, Kawashita K. New radiometric age data from Elephant Island, South Shetland Islands. In H Miller ed., *Workshop on Antarctic geochronology: Zentralblatt fur Geologie und Palaotologie, Teil*, 1990, 105 - 118
- 44 Willan R C R, Swainbank I G. Galena lead isotopic variations in a Mesozoic-Cenozoic Andean arc, Antarctic Peninsula. *J. Geol. Soc. London*, 1995, 152:767 - 778

## THE DUPAL ISOTOPE ANOMALY: ITS CONCEPT, CHARACTER, GENESIS AND GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

*Xing Guangfu*  
(IGMR, Nanjing, 210016)

### Abstract

The Dupal anomaly was initially discovered and thought to be limited in the Southern Hemisphere and belongs mainly to old mantle origin. Recently in the Northern Hemisphere some Dupal anomaly areas have also been found, which are not only similar to but also somewhat different in character and genesis from the former. In this paper the author reviews the study history of the Dupal anomaly, discusses its relation with mantle end members, and further probes into its possible geneses and geological implication by case analyses.

**Key words** mantle end member the Dupal anomaly genesis