# 印度洋DUPAL异常

余星

（自然资源部第二海洋研究所）

**摘 要**：

**关键词**：

## DUPAL异常的概念及发展史

### 1.1 Dupal异常概念及研究意义

Dupal异常最早由Dupré and Allègre (1983)研究印度洋的洋岛和洋中脊玄武岩Pb-Sr同位素时发现，经Hart(1984)进一步研究正式提出，并以两位发现者的姓氏命名。

Dupal异常具体指：在南半球赤道至60°S区域，如南大西洋和印度洋区，其玄武岩具有相对北大西洋和东太平洋海隆更高的87Sr/86Sr(>0.7035)，以及在相同206Pb/204Pb比值条件下更高的207Pb/204Pb和 208Pb/204Pb比值特征。因此，Dupal异常本质上是一种地幔不均一性，而围绕地幔不均一性及成因问题的研究一直是地学关注的热点(e.g. Doucet et al., 2020; Richter et al., 2020; Urann et al., 2020; Yang et al., 2020)。

Dupal异常是全球最大尺度的地幔地球化学异常，其分布面积约1亿km2。Castillo(1988)、Wen(2006)和White(2015)等认为Dupal异常的核心区有两个：印度洋-南大西洋区和中太平洋区，分别对应下地幔中的两个超大型地震波低速区(即LLSVPs)，同时对应全球两个最主要的活动热点聚集区。由此，为Dupal异常赋予了新的物理内涵，其形成和分布可能与地幔深部的地质作用密切相关。通过Dupal异常的研究，将有助于理解大尺度地幔不均一性、壳幔相互作用、板块运动规律、地球深部结构和动力学过程。

### 1.2 Dupal异常研究现状及问题

Dupal异常概念的提出意义深远，但也存在一些不足。

#### 1.2.1 Dupal异常概念的模糊性和不确定性。

Dupal异常概念是基于小样本大洋玄武岩数据提出的一类Sr-Nd-Pb同位素异常，最初更多是定性层面的，缺少明确的量化判别指标，因此影响了判别的难度和可靠性，从而为更深入讨论其成因制造了障碍。

Hart(1984)提出了异常判别指标(Δ7/4, Δ8/4, ΔSr, 计算方法见公式)，但未明确判别值。Hart(1988)认为典型Dupal异常应该满足Δ8/4>60，ΔSr>50。

|  |
| --- |
| Δ7/4 =[ (207Pb/204Pb)样品-0.1084×(206Pb/204Pb)样品-13.491]×100 |
| Δ8/4 =[ (208Pb/204Pb)样品-1.209×(206Pb/204Pb)样品-15.627]×100 |
| ΔSr =[ (87Sr/86Sr)样品- 0.7] ×104 |
| 注：Δ7/4和Δ8/4表示样品207Pb/204Pb、208Pb/204Pb比值与北半球参考线(NHRL)的相对偏差，ΔSr表示样品87Sr/86Sr比值的绝对偏差 |

邢光福(1997)和魏启荣等(2003)认为Dupal异常的边界条件是Δ7/4>3, Δ8/4>10，ΔSr>40。Nishio et al. (2007)认为边界条件为Δ7/4>2.5，Δ8/4>15。邢光福等(1997)在研究南极乔治王岛的Dupal异常时划分了广义Dupal异常和狭义Dupal异常，前者Δ8/4>10，后者Δ8/4>60。

#### 1.2.2 Dupal异常的全球分布范围和界线仍不明确。

由于Dupal异常是全球尺度的地幔异常特征，目前已有的大洋玄武岩样品资料远不足以精确限定其分布范围。同时，加之判别条件的模糊性和不确定性，目前对全球Dupal异常的分布有多种观点。

最初认为Dupal异常限定于南半球(Hart, 1984)，但后续研究报道了众多北半球的Dupal异常，如日本海和菲律宾岛弧(Tatsumoto and Nakamura, 1991;张旗等, 1992)、南海(鄢全树等, 2008; 徐义刚等, 2012; Zhang GL et al., 2018; Qian et al., 2020)、北极加克洋脊7°W-15°E洋脊段(Richter et al.，2019)，此外，在冲绳海槽、滇西哀牢山、三江地区、西藏冈底斯，以及内陆的缝合带或造山带中，如天山、祁连山、秦岭等也有Dupal异常的报道(Zhang YX et al., 2018; 周德进等,1995; 魏启荣等,2003; 耿全如等, 2007; 刘希军等，2013；Zhang et al., 2016)。

不过，由于陆壳本身一般具有类似Dupal异常的同位素特征，形成于陆壳背景的Dupal异常岩浆岩需要考虑陆壳混染的影响。另一方面，某些发现于北半球的Dupal异常岩浆岩形成时位于南半球，研究时需要进行板块恢复。

#### 1.2.3 Dupal异常成因及其与EMI、EMII等地幔端元之间的关系问题仍有待进一步研究。

由于Dupal异常界线不清、概念的物理意义不明确以及研究尺度过大，对Dupal异常的成因认识仍然不足。目前主要的成因模式包括：

**(1)来自核幔边界的热上涌，即地幔柱(Hart, 1984; Castillo, 1988)；**

**(2)古老俯冲作用，包括俯冲的洋壳和沉积物(Rehkämper and Hofmann,1997; Richter et al., 2019; Saha et al., 2020)；**

**(3)大陆裂解时大陆岩石圈地幔(SCLM)拆沉进入MORB源区(Hawkesworth et al., 1986; Class and le Roex, 2011)；**

**(4)大陆下地壳拆离进入地幔源区(Escrig et al., 2004; Regelous et al., 2009)。**

目前对于Dupal异常的起源是深源还是浅源，是古老还是现代，是自上而下还是自下而上仍无定论。

EMI、EMII等地幔端元是Zindler and Hart(1986)提出的更小尺度的地幔组分，其与Dupal异常属于不同分类体系，具体关系仍不清楚，但两者的研究具有相通性和关联性。

两个富集地幔端元EMI、EMII以低143Nd/144Nd、高Δ7/4和Δ8/4为特征，可以视为Dupal异常的特例，亏损地幔DMM、高U/Pb比值地幔HIMU本身不具有Dupal异常特征，但可以与EMI、EMII混合。

一般认为EMI与洋壳和古老下地壳有关，EMII与大陆上地壳和陆源沉积物有关(黄士春等, 2017)。Zhang et al.(2016)认为东亚大陆边缘的Dupal异常与EMII有关(俯冲作用影响)，而太平洋的Dupal异常是HIMU和EMI的影响(太平洋超级地幔柱)，而印度洋和南大西洋的Dupal异常是EMI和EMII的混合(非洲超级地幔柱，循环的冈瓦纳陆下地幔或大陆地壳)。

通过EMI、EMII等地幔端元的研究，可以增进对Dupal异常的认识，但两者的成因联系仍有待进一步研究。

#### 1.2.4 Dupal异常与地球物理观测的联系仍不清楚。

地球物理异常与Dupal异常的潜在关联性为Dupal异常研究注入了新的活力，提供了新的地质意义。但能否清晰地证明两者的关联性，仍面临很大挑战。

通常认为与Dupal异常对应的大型剪切波低速带位于2900km深处的核幔边界(White, 2015)，而Dupal异常是基于地表获得的岩浆岩观测而识别的异常，将两者建立联系理论上可行，但不确定性极大，需要从地表到核幔边界全深度更高精度的地震层析成像等地球物理观测资料以及更多幔源岩浆岩的地球化学数据支撑。

## 印度洋洋中脊DUPAL异常信号及边界

印度洋是Dupal异常概念的发源地，也是已知Dupal异常最显著的区域(图1)。了解印度洋的Dupal异常分布及成因将是解决全球Dupal异常问题的关键。

目前已发现的具有明显Dupal异常的板内火山作用包括马达加斯加海底高原、莫桑比克海底高原、厄加勒斯海底高原、凯尔盖朗海台、Broken海脊、东经90度海岭、圣诞岛等 (Saunders et al., 1991; Mahoney et al., 1995; Weis, 2002; Taneja, 2016；Zhang et al., 2016; Jacques et al., 2019) (图1)。

除了板内火山，印度洋洋中脊也广泛发育Dupal异常，其中西南印度洋中脊和东南印度洋中脊已明确了异常边界，而西北印度洋的界线比较模糊，特别是靠近索马里海盆的卡尔斯伯格脊由于过去缺少调查数据，其Dupal异常分布状况仍不清楚。

西南印度洋中脊Andrew Bain转换断层(26°E)以东洋脊段显示有Dupal异常(图1和图2a)，且Andrew Bain转换断层至Gallieni转换断层间的洋脊段具有最高的Δ7/4和Δ8/4，分别可达+18.1和+122.8 (余星等, 2020)。Yu and Dick (2020)认为西南印度洋中脊中段的Dupal异常属EMII型，与大陆裂解时大陆岩石圈拆沉进入软流圈有关。

东南印度洋中脊的Dupal异常边界在澳大利亚-南极错乱带，具体界线位于127°E附近，界线以西显示Dupal异常(Δ7/4和Δ8/4分别可达+13.1和+135.8)，以东洋脊段具有太平洋型MORB特征(图1和图2b)。东南印度洋中脊上最强烈的Dupal异常信号位于Amsterdam-St.Paul海底高原一带(余星等，2019a)。

西北印度洋中脊的Dupal异常界线仍不清楚。西北印度洋中脊(包括卡尔斯伯格脊和中印度洋脊)以及西北部亚丁湾的希贝洋脊(Sheba Ridge)和红海均显示有广义的Dupal异常特征(Δ8/4>+10)，但只有中印度洋脊存在典型Dupal异常(Δ8/4>+60)，其中罗德里格斯三联点处的异常最明显(Δ8/4可达+71.4)。Nishio et al.(2007)通过Li, Sr Nd同位素分析，认为印度洋罗德里格斯三联点的Dupal异常主要是由于循环的大陆下地壳引起。从罗德里格斯三联点由南往北Dupal异常逐渐减弱，希贝洋脊(Sheba Ridge)和红海均不具有典型Dupal异常特征(表1，图2c)。

|  |
| --- |
|  |

图1 印度洋DUPAL异常分布界线推测图(余星, 2021 未发表)

白色阴影区为基于Hart(1984)绘制的Δ8/4>40范围以及公开洋中脊玄武岩数据绘制的Dupal异常范围，其中西南印度洋中脊及东南印度洋中脊的Dupal异常界线已比较明确，而卡尔斯伯格脊的异常界线仍不清楚。卡尔斯伯格脊上红色圆点为已发表的同位素数据，绿色十字符号为本研究采用的我国大洋调查航次样品。黄色虚线为印度大陆相对南极的移动轨迹。MAR—大西洋中脊，SAAR—南美洲-南极洲洋中脊，CR—卡尔斯伯格脊，CIR—中印度洋脊，BTJ—布维三联点，RTJ—罗德里格斯三联点.MADP—马达加斯加海底高原，MOZP—莫桑比克海底高原，AGP—厄加勒斯海底高原，KP—凯尔盖朗海底高原，ASP—Amsterdam-St.Paul海底高原，BR—Broken海脊，NER—东经90度海岭。

|  |
| --- |
|  |

图2 印度洋三大洋脊的Pb同位素特征及Dupal异常指标  
（余星等, 2019a,2019b,2020）

SWIR—西南印度洋中脊，SEIR—东南印度洋中脊, NWIR—西北印度洋中脊, CR—卡尔斯伯格脊, CIR—中印度洋脊, ASP—Amsterdam-St.Paul海底高原, AAD—澳大利亚-南极错乱带

## 印度洋板内火山（海底高原和海山）的DUPAL异常特征

### 3.1 卡尔斯伯格脊是西北印度洋Dupal异常的过渡区域

卡尔斯伯格脊在空间上位于希贝洋脊和中印度洋脊之间，一侧存在广义Dupal异常，一侧存在狭义的典型Dupal异常(表1)，作为过渡区域的卡脊，是否存在典型Dupal异常组分以及异常界线的位置仍不明确。相对邻近洋脊，卡尔斯伯格脊已有的同位素数据明显不足，目前可能无法准确反映该洋脊段的Dupal异常分布状况，亟待进一步研究解决。

表1 卡尔斯伯格脊及周边洋脊Dupal异常指标统计表(余星，2021 未发表)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **洋脊段** | **经度范围** | **纬度范围** | **Dupal异常指标** | | **已发表数据量** |
| **Δ7/4** | **Δ8/4** |
| **红海** | 34.3-43.5°E | 27.5 -12.5°N | -1.4 ~+2.7 | +10.0~+34.8 | 16 |
| **希贝洋脊** | 43.5 -60.0°E | 12.5-15.0°N | -5.9 ~+3.4 | +10.1~+46.2 | 30 |
| **卡尔斯伯格脊** | 57.0-66.3°E | 10.1-2.5°N | -2.8 ~+9.6 | +13.1~+58.3 | 6 |
| **中印度洋脊** | 66.3-70.0°E | 2.5°N ~25.5°S | -0.8~+16.4 | +16.8~+71.4 | 87 |

注：广义Dupal 异常Δ8/4>10, 狭义Dupal 异常Δ8/4>60，供参考。数据来源于PetDB。

### 3.2 卡尔斯伯格脊的独特区位性和区域地质构造特征

卡尔斯伯格脊处于独特的区域位置，属于多个威尔逊旋回阶段的集中部位，中印度洋中脊和卡尔斯伯格脊属于旋回的主成熟期，东北部紧邻的亚丁湾希贝洋脊和红海裂谷则属于幼年期，红海和亚丁湾交接部位的东非大裂谷则属于胚胎期(图1)。因此这一区域是研究大陆裂解和板块扩张历史的最佳场所，也是研究可能与大陆裂解有关的Dupal异常问题的重要基地。

卡尔斯伯格脊和中印度洋脊可以合称为西北印度洋中脊，两者分界线为郦道元断裂带(余星等，2019b)。整个洋中脊最显著的特征是存在两处洋脊转向的弯折带，北部弯折带位于宝船断裂带至郦道元断裂带之间(3°-1.5°N)，洋脊走向从北部卡尔斯伯格脊的NW-SE向转变为南部中印度洋中脊的近南北向；南部弯折带位于玛丽·塞莱斯特断裂带与20°18′S断裂带之间(17°-20°S)，洋脊从近南北向转变为南侧北北西向(图1)。

不同于整个洋脊段的阶梯式右行错断特征，两个弯折带受边界转换断层控制呈挤出状态，北部弯折带朝北东方向挤出，南部弯折带朝西南方向挤出(图1)。两个弯折带均对应一定的地球化学异常，如南部弯折带显示明显的Sr同位素异常，北部弯折带也有类似特征(余星等, 2019b)。独特的构造部位最有可能成为Dupal异常分布的边界。

卡尔斯伯格脊和中印度洋脊的总体地形特征是南北两端断裂较少，中间转换断层密集分布。横向上，洋脊南北两端的离轴洋壳水深变化较大，而中间段相对平缓，裂谷落差减小。重力异常在沿脊轴方向上呈现两端高中间低的特征，且两端高值区向离轴方向延伸更宽，表明一段时间以来持续且充足的岩浆供给，而中间断层密集区岩浆量少。

西北印度洋区的磁异常具有分带性，表明多阶段的洋脊扩张历史。卡尔斯伯格脊于65~62Ma开始扩张, 使印度与塞舌尔分离(Chatterjee et al., 2013;李三忠等, 2015；李江海等, 2015)。大约在45Ma, 受印度与欧亚板块碰撞的影响, 卡尔斯伯格脊和中印度洋中脊的扩张方向发生改变, 从近南北向扩张转变为北东-南西向扩张(Collier et al.,2008)。

在同一时期，西北印度洋中脊的扩张速度有明显减慢的趋势，反映了印度与欧亚碰撞的远距离效应。

在45~30Ma，查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊开始与马斯克林海底海台分离，基本形成了现今的西北印度洋中脊形态。45~0Ma，西北印度洋中脊南北段呈现不同的扩张速率变化趋势，6°12′S以北的洋脊段扩张速率先变慢后加快，而6°12′S以南的洋脊扩张速率先变快后减慢，而这一边界正好位于查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊马斯克林海台的分离点附近，暗示了扩张速率变化与块体分离之间的内在关系(余星等，2019b)。这些独特的地质构造特征为研究西北印度洋中脊的Dupal异常分布及成因解释提供了支撑。

## 总结印度洋整体的DUPAL异常范围及可能的成因

## 参考文献

淳明浩,于增慧,李怀明, 等, 2016. 西北印度洋中脊玄武岩源区地幔特征. 海洋科学, 40, 108-118.