



申请代码	D0211
接收部门	
收件日期	
接收编号	4217020430



国家自然科学基金 申 请 书

(2021 版)

资助类别：	面上项目		
亚类说明：			
附注说明：			
项目名称：	卡尔斯伯格脊Dupal异常界线的厘定及成因研究		
申 请 人：	余星	电 话：	0571-81963165
依托单位：	自然资源部第二海洋研究所		
通讯地址：	浙江杭州保係北路36号		
邮政编码：	310012	单位电话：	0571-81961258
电子邮箱：	yuxing@sio.org.cn		
填写日期：	2021年02月08日		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	余星	性别	男	出生年月	1981年09月	民族	汉族
	学位	博士	职称	研究员	每年工作时间（月）		5	
	是否在站博士后	否		电子邮箱	yuxing@sio.org.cn			
	电话	0571-81963165		国别或地区	中国			
	个人通讯地址	浙江杭州保俶北路36号						
	工作单位	自然资源部第二海洋研究所/海底科学实验室						
	主要研究领域	岩石大地构造，地球化学，洋中脊岩浆作用						
依托单位信息	名称	自然资源部第二海洋研究所						
	联系人	韩正兵		电子邮箱	hzbing@sio.org.cn			
	电话	0571-81961258		网站地址	www.sio.org.cn			
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	卡尔斯伯格脊Dupal异常界线的厘定及成因研究						
	英文名称	Delineation of the limits of Dupal anomaly along the Carlsberg Ridge and its origin						
	资助类别	面上项目				亚类说明		
	附注说明							
	申请代码	D0211. 大地构造学与构造地质学				D0204. 岩石学		
	基地类别	自然资源部海底科学重点实验室						
	研究期限	2022年01月01日 -- 2025年12月31日				研究方向：岩石大地构造		
	申请直接费用	73.4900万元						
中文关键词		卡尔斯伯格脊；Dupal异常；地球化学特征；大地构造；洋中脊玄武岩						
英文关键词		Carlsberg Ridge; Dupal anomaly; Geochemical characteristic; geotectonics; mid-ocean ridge basalts						



科学问题属性

- ☐ “鼓励探索，突出原创”：科学问题源于科研人员的灵感和新思想，且具有鲜明的首创性特征，旨在通过自由探索产出从无到有的原创性成果。
- ☒ “聚焦前沿，独辟蹊径”：科学问题源于世界科技前沿的热点、难点和新兴领域，且具有鲜明的引领性或开创性特征，旨在通过独辟蹊径取得开拓性成果，引领或拓展科学前沿。
- ☐ “需求牵引，突破瓶颈”：科学问题源于国家重大需求和经济主战场，且具有鲜明的需求导向、问题导向和目标导向特征，旨在通过解决技术瓶颈背后的核心科学问题，促使基础研究成果走向应用。
- ☐ “共性导向，交叉融通”：科学问题源于多学科领域交叉的共性难题，具有鲜明的学科交叉特征，旨在通过交叉研究产出重大科学突破，促进分科知识融通发展为知识体系。

请阐明选择该科学问题属性的理由（800字以内）：

地幔地球化学的不均一性及成因一直是地学研究的前沿。地幔不均一存在多种尺度，从微米-亚微米的包裹体级别，到厘米的矿物级别，到公里的区域级别直到数千公里的板块级别，目前最大尺度的地球化学异常为Dupai异常。Dupai异常概念提出较早，但从未过时，随着全球地幔地球化学研究的深入、地球化学数据的不断积累以及地球物理观测手段的不断提升，为这一概念持续注入了新的活力和内涵。已有的低分辨率Dupai异常分布界线似乎显示与超大型地幔地震波低速带（LLSVP）、地幔热点的分布区域存在一定的联系，这引起了地球物理学家和地球化学家更浓厚的兴趣，成为新时期的地学研究热点。本项目将聚焦这一热点和前沿问题。

不过，由于Dupai异常覆盖范围广，尺度大，异常边界的确定仍存在很多争议，限制了对其物理意义的阐释及其成因的合理解释。泛泛地基于大尺度低分辨率资料来讨论全球Dupai异常成因，效果往往差强人意。本项目独辟蹊径，从Dupai异常的核心区印度洋入手，以卡尔斯伯格脊为突破口，基于我国历年大洋航次在卡脊获得的玄武岩样品，采用岩石地球化学和大地构造学方法，厘定卡脊Dupai异常的分布界线，结合区域地质构造背景，探讨冈瓦纳大陆裂解过程大陆地壳/岩石圈拆沉、古老俯冲残留以及地幔柱活动等对卡脊Dupai异常形成的影响，建立卡脊Dupai异常成因模式。本项目的创新点在于：将地球化学异常与板块活动历史相联系，以动态演化的视角探究现今地幔地球化学异常的成因。研究思路新颖、独辟蹊径解决国际科学前沿热点问题。研究成果将为认识整个印度洋以及全球的Dupai异常分布提供基础数据资料，为了解全球大尺度地幔不均一性、亏损地幔富集改造、超大陆裂解过程陆洋岩石圈转换和地球深部动力学过程等提供帮助。基于多年在印度洋的调查研究积累，有望实现科学突破，产出原创性和开拓性的成果，提升我国在大洋大尺度地幔不均一性研究方面的贡献和话语权。



中文摘要	<p>Dupal异常是全球最大尺度的地幔地球化学异常，其分布和成因一直是地质学研究的重要科学问题。地球物理观测显示该异常可能与地幔地震波速异常、地幔热点起源等问题密切相关。印度洋是该异常的核心区域，由于调查研究程度有限，对于该异常在西北印度洋区域的展布情况及界线仍不明确。本项目基于我国历年大洋航次在卡尔斯伯格脊调查获得的洋中脊玄武岩样品，通过岩石地球化学研究，并结合大地构造学分析，厘定卡尔斯伯格脊Dupal异常的分布界线；根据邻近区域Dupal异常的特征及其地质构造背景，探讨卡尔斯伯格脊Dupal异常对冈瓦纳大陆裂解过程大陆地壳/岩石圈拆沉、古老俯冲物质残留以及地幔柱活动等因素的可能响应，并建立成因模式。本项目有助于全面刻画印度洋Dupal异常的分布及成因，为认识全球大尺度地幔不均一性、亏损地幔富集改造、超大陆裂解过程陆洋岩石圈转换和地球深部动力学过程等提供帮助。</p>
英文摘要	<p>Dupal anomaly is the largest-scale mantle geochemical anomaly in the world. It has always been an important scientific target studying its distribution and origin. The geophysical observations show that this anomaly may be closely related to the anomaly of mantle seismic wave velocity as well as the location of mantle hot spots. While Indian Ocean is the core area of Dupal anomaly, the distribution and boundary of this anomaly along the Northwest Indian Ocean are still not clear due to the limited investigation. This project tries to delineate the limits of the Dupal anomaly along the Carlsberg Ridge by studying the geochemistry of the mid-ocean ridge basalt samples obtained by the Chinese research cruises over the years in Northwest Indian Ocean. With tectonic analysis of this region and the Dupal anomalies from adjacent ridges, the potential influences of the mantle source from the continental crust/lithospheric detachment during the Gondwanaland breakup, residue of the ancient subduction material, and mantle plume activity will be discussed. And the and the genetic models for Dupal anomaly along the Carlsberg Ridge will be proposed. This project will benefit the understanding of the distribution and genesis of Dupal anomaly in the Indian Ocean, and it will also provide further information to global large-scale mantle heterogeneity, the enrichment and transformation of the depleted mantle, the transformation between continental and oceanic lithosphere during the breakup of supercontinent, and deep geodynamic processes.</p>



项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作 时间（月）
1	李洪林	1988-12-24	男	助理研究员	博士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81061785	lih1@sio.org.cn	3*****4	3
2	周久龙	1987-09-01	男	助理研究员	博士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81963635	zhoujl_geo@126.com	3*****9	3
3	周鹏	1991-11-06	男	博士生	硕士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81963120	394953496@qq.com	3*****0	3
4	胡航	1997-03-29	男	硕士生	学士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81963162	1369217499@qq.com	3*****5	5
5	党牛	1997-05-23	男	硕士生	学士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81963162	1807670334@qq.com	4*****8	4
6	许绪成	1995-01-09	男	硕士生	学士	自然资源部第二海洋研究所	0571-81963120	649163271@qq.com	3*****1	4

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
7	1	2			1	3



国家自然科学基金项目资金预算表（定额补助）

项目编号：4217020430

项目负责人：余星

金额单位：万元

序号	科目名称	金额
	(1)	(2)
1	项目直接费用合计	73.4900
2	1、设备费	3.0000
3	(1)设备购置费	3.00
4	(2)设备试制费	0.0000
5	(3)设备升级改造与租赁费	0.0000
6	2、材料费	6.00
7	3、测试化验加工费	30.50
8	4、燃料动力费	1.00
9	5、差旅/会议/国际合作与交流费	16.87
10	6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	4.00
11	7、劳务费	10.20
12	8、专家咨询费	1.92
13	9、其他支出	0.0000



预算说明书（定额补助）

（请按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》等的有关要求，对各项支出的主要用途和测算理由，以及合作研究外援资金、单价 ≥ 10 万元的设备费等内容进行必要说明。）

本课题直接经费总预算 73.49 万元，各科目支出说明如下：

（一）设备费：3 万元。

本研究涉及板块重建以及大地构造分析等图形处理和计算，拟购置图形工作站 1 台，费用 3 万元。

（二）材料费：6 万元。

主要用于购买样品采集、运输、预处理和实验分析过程中的耗材等，包括样品袋、样品箱、环氧树脂、玻璃片、砂轮片、金刚砂、抛光粉等，盐酸、硝酸等样品消解试剂等。预算每年消耗 1.5 万元，4 年共计 6 万元。

（三）测试化验加工费：30.5 万元。

测试费用主要用于地质样品的分析测试。其中 Sr/Nd/Pb 同位素及 He-Os 同位素将送往外单位测试。根据目前拥有的样品情况 and 研究需要，需要测试约 50 件玄武岩样品的矿物化学和全岩化学，约 30 件进行 Sr/Nd/Pb/同位素测试，选择 20 件样品进行 He 同位素测试，10 件进行 Os 同位素测试，电子探针分析按小时计费，每件样品预计 2 小时，共计 100 小时工作量，各类测试费用清单如下：

样品预处理费用：200 元/件 $\times 50$ 件=1 万元

EMPA 电子探针分析：400 元/小时 $\times 100$ 小时=4 万元

XRF 主量元素分析：300 元/件 $\times 50$ 件=1.5 万元

ICP-MS 微量元素分析：400 元/件 $\times 50$ 件=2.0 万元

Sr/Nd/Pb 同位素分析：3000 元/件 $\times 30$ 件=9 万元

He 同位素分析：585 美元/件 $\times 20$ 件 $\times 6.8$ 元人民币/美元=8 万元

Os 同位素分析：5000 元/件 $\times 10$ 件=5 万元

合计 30.5 万元。

（四）燃料动力费：1 万元。

支付在本单位测试和样品处理过程中仪器设备所耗费的水、电费用，预算每年 0.25 万元，4 年共计 1 万元。

（五）差旅/会议/国际合作与交流费：16.87 万元。

主要用于支付课题研究过程中课题交流、调研、参加相关学术会议、学术交流以及异地实验测试等涉及的外埠差旅费和市内交通费等费用。用于支付组织课题有关的研讨交流会以及参加学术会议等费用。用于支付出国开展样品分析、学术交流及短期访问研究发生的相关费用，包括往返机票、公杂费、伙食费及住宿费等。



国内差旅(包括参加学术会议)每次的交通费用约 3000 元,公杂费和伙食费每天 180 元,住宿费用平均 400 元,平均每年出差 3 人次,平均每次出差 3 天。项目执行期间计划去美国伍兹霍尔海洋研究所交流访问三个月,并开展 He 同位素分析测试工作,国际往返机票按 1 万元计算,公杂费和伙食费每天 100 美元,住宿每月 1500 美元(平均每天 50 美元)。

国内差旅费用: $(3000 \text{ 元} + (400 + 180) \text{ 元/人次/天} \times 3 \text{ 天}) \times 3 \text{ 人次/年} \times 4 \text{ 年} = 5.688 \text{ 万元}$

国际差旅费用: $10000 \text{ 元} + (100 + 50) \text{ 美元/天} \times 6.8 \text{ 元人民币/美元} \times 90 \text{ 天} = 10.18 \text{ 万元}$

参加学术会议注册费: $2500 \text{ 元/次} \times 1 \text{ 次/年} \times 4 \text{ 年} = 1 \text{ 万元}$

合计为 16.87 万元。

(六) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费: 4 万元。

指在课题实施过程中,需要支付的出版费、资料费、专用软件购买费、文献检索费、专业通信费、专利申请及其他知识产权事务等费用。论文版面费 5000 元/篇计算,预计发表论文 3~4 篇 $5000 \text{ 元} \times 4 = 2 \text{ 万元}$ 。专用制图软件和板块重建软件购置约 2 万元。

合计 5 万元。

(七) 劳务费: 10.2 万元。

指在课题研究过程中支付给课题组成员中没有工资性收入的相关人员(如在校研究生)和课题组临时聘用人员等的劳务性费用。本项目中有博士研究生 1 名,每年工作 3 个月;硕士研究生 3 名,合计 13 个月/年。

博士研究生劳务费: $2000 \text{ 元/月/人} \times 1 \text{ 人} \times 3 \text{ 月/年} \times 4 \text{ 年} = 2.4 \text{ 万元}$

硕士研究生劳务费: $1500 \text{ 元/人月} \times 13 \text{ 人月/年} \times 4 \text{ 年} = 7.8 \text{ 万元}$

共讲 10.2 万元

(八) 专家咨询费: 1.92 万元。

指在课题实施过程中支付给临时聘请的咨询专家的费用。计划每年请 1-2 名专家对课题研究过程中存在的问题和难点进行指导 2 次,即平均每年 3 人次,每次 1 天, $1600 \text{ 元/人天} \times 1 \text{ 天/人次} \times 3 \text{ 人次/年} \times 4 \text{ 年} = 1.92 \text{ 万元}$ 。

(九) 其他支出无



报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

(一) 立项依据与研究内容（建议 8000 字以下）：

1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (>0.7035)，以及在相同 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值条件下更高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 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 km^2 。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。

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。

第一，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($\Delta 7/4$, $\Delta 8/4$, 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 $\Delta 8/4 > 60$,



$\Delta\text{Sr}>50$ 。邢光福(1997)和魏启荣等(2003)认为 Dupal 异常的边界条件是 $\Delta 7/4>3$, $\Delta 8/4>10$, $\Delta\text{Sr}>40$ 。Nishio et al. (2007)认为边界条件为 $\Delta 7/4>2.5$, $\Delta 8/4>15$ 。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 $\Delta 8/4>10$, 后者 $\Delta 8/4>60$ 。

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

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

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

注: $\Delta 7/4$ 和 $\Delta 8/4$ 表示样品 ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ 、 ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ 比值与北半球参考线(NHRL)的相对偏差, ΔSr 表示样品 ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ 比值的绝对偏差

第二, 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。

第三, 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 ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$ 、高 $\Delta 7/4$ 和 $\Delta 8/4$ 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。

第四, 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。

3. 印度洋是 Dupal 异常的核心区域

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 $\Delta 7/4$ 和 $\Delta 8/4$, 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($\Delta 7/4$ 和 $\Delta 8/4$ 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



白色阴影区为基于 Hart(1984)绘制的 $\Delta 8/4 > 40$ 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。

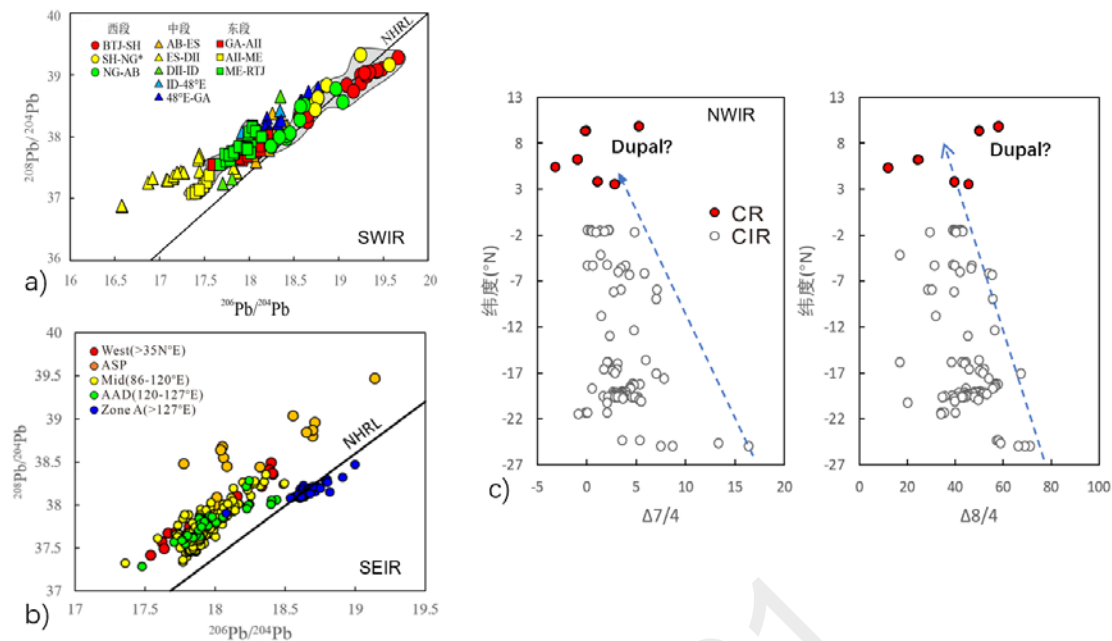


图 2 印度洋三大洋脊的 Pb 同位素特征及 Dupal 异常指标
(余星等, 2019a,2019b,2020)

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

4. 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
			$\Delta 7/4$	$\Delta 8/4$	
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 $\Delta 8/4 > 10$, 狭义 Dupal 异常 $\Delta 8/4 > 60$, 供参考。数据来源于 PetDB。

5. 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，两者分界线为郿道元断裂带(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郿道元断裂带之间(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 $20^{\circ}18'S$ 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， $6^{\circ}12'S$ 以北的洋脊段扩张速率先变慢后加快，而 $6^{\circ}12'S$ 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。

6. 卡尔斯伯格脊的调查研究基础

近十年来在 InterRidge 计划和国际海底硫化物资源勘探的推动下，印度、法国、德国、英国、日本等对西北印度洋及周边开展了一系列的地质地球物理调查和研究(Mudholkar, 2002; Kamesh Raju et al., 2008, 2012; Yi et al., 2014; Nauret



et al., 2006; Saha et al., 2020)。我国从 2012 年以来积极投入对卡尔斯伯格脊的海底调查,特别是海底多金属硫化物调查,取得了一系列重要发现和研究成果(韩喜球等, 2012; 淳明浩等, 2016; Chen et al., 2016; Wang et al., 2017)。通过申请人及所在团队前期在卡尔斯伯格脊的多个航次调查和研究,包括大洋 26、28、33、38、43、49 及 57 航次,获取了整个卡尔斯伯格脊的代表性玄武岩样品(图 1 和图 4),明确了西北印度洋中脊的地质构造特征,发现了两个弯折带对应的地球化学异常,并对其成因机制开展了初步的研究和讨论(余星等, 2019b)。对洋脊玄武岩的分离结晶过程以及玄武岩中的水含量及其意义也开展了相关研究(Zong et al., 2019, 2020)。

Dupal 异常概念的提出已近四十年,而我国受制于过去海洋调查工作的限制,对这一问题的实地性和系统性研究仍然很少。本项目拟从 Dupal 异常的核心区印度洋入手,以卡尔斯伯格脊为突破口,独辟蹊径,采用岩石地球化学和大地构造学方法,厘定卡脊 Dupal 异常的分布界线,结合区域地质构造背景,探讨冈瓦纳大陆裂解过程大陆地壳/岩石圈拆沉、古老俯冲残留以及地幔柱活动等对卡脊 Dupal 异常形成的影响,建立卡脊 Dupal 异常成因模式。希望通过卡脊 Dupal 异常的重点剖析,重新审视 Dupal 异常在特定区域的表现形式,理解 Dupal 异常的概念内涵、本质和成因模式,提升我国在这一领域的基础研究水平和话语权。同时,研究成果将为认识整个印度洋以及全球的 Dupal 异常分布提供基础数据资料,为了解全球大尺度地幔不均一性、亏损地幔富集改造、超大陆裂解过程陆洋岩石圈转换和地球深部动力学过程等提供帮助。

附主要参考文献:

- 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.
- 耿全如. 2007. 西藏冈底斯晚古生代火山岩岩石学、地球化学及其大地构造意义. 中国地质大学, 博士学位论文.
- 韩喜球, 吴招才, 裘碧波. 2012. 西北印度洋 Carlsberg 脊的分段性及其构造地貌特征——中国大洋 24 航次调查成果介绍.
- 黄士春, 郑永飞. 2017. 地幔地球化学: 洋岛玄武岩制约. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1125-1152.
- 李江海, 张华添, 李洪林. 2015. 印度洋大地构造背景及其构造演化——印度洋底大地构造图研究进展. 海洋学报, 37(7):1-14.
- 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 2015. 印度洋构造过程重建与成矿模式: 西南印度洋洋中脊的启示. 大地构造与成矿学, 39 (1): 30-43.
- 刘希军, 肖文交, 许继峰, 时毓. 古亚洲洋地幔域 Dupal 同位素异常. 2013 年全国岩石学与地球动力学研讨会: 599-600.
- 魏启荣, 沈上越, 莫宣学, 路凤香. 2003. 三江中段 Dupal 同位素异常的识别及其意义. 地质地球化学. 31(1):36-41.
- 邢光福, 沈渭洲, 王德滋, 陶奎元, 金庆民. 1997. 南极乔治王岛中一新世代岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成及源区特征. 13(4): 473-487
- 邢光福. 1997. Dupal 同位素异常的概念, 成因及其地质意义. 火山地质与矿产, 18(4):281-291.
- 徐义刚, 魏静娴, 邱华宁, 张辉煌, 黄小龙. 2012. 用火山岩制约南海的形成演化: 初步认识



- 与研究设想. 科学通报, 57(20), 1863-1878.
- 鄢全树, 石学法, 王昆山, 卜文瑞, 肖龙. 2008. 南海新生代碱性玄武岩主量、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素研究. 中国科学:地球科学, 038(1):56-71.
- 余星, 韩喜球, 唐立梅, 等. 2019a, 东南印度洋中脊地质构造特征及研究进展. 科学通报, 64: 1799-1816.
- 余星, 韩喜球, 邱中炎, 王叶剑, 唐立梅. 2019b. 西北印度洋脊的厘定及其地质构造特征. 地球科学. 44(2):626-639.
- 余星, 迪克·亨利, 李小虎, 等. 2020. 西南印度洋中脊地质构造特征及其地球动力学意义. 地球物理学报. 63(10):3585-3603.
- 张旗, 周德进, 沈丽璞. 1992. Dupal 异常研究的现状与趋势. 地球物理学进展. (4):63-71.
- 周德进, 沈丽璞, 张旗, 许荣华, 周云生, 乔广生. 1995. 滇西古特提斯构造带玄武岩 Dupal 异常. 地球物理学进展. 10(2):39-44.
- Castillo, P., 1988. The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle. *Nature*, 336(6200): 667-670.
- Chatterjee, S., Goswami, A. and Scotese, C.R., 2013. The longest voyage: Tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia. *Gondwana Research*, 23(1): 238-267.
- Chen, L., Tang, L.M., Yu, X., et al., 2017. Mantle source heterogeneity and magmatic evolution at Carlsberg Ridge (3.7°N): constraints from elemental and isotopic (Sr, Nd, Pb) data. *Mar Geophys Res*, DOI 10.1007/s11001-016-9292-1.
- Class, C. and le Roex, A., 2011. South Atlantic DUPAL anomaly — Dynamic and compositional evidence against a recent shallow origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(1-2): 92-102.
- Collier, J. S., Sansom, V., Ishizuka, O., Taylor, R. N., Minshull, T. A., Whitmarsh, R. B., 2008. Age of Seychelles–India break-up. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 264-277.
- Doucet, L.S., Li, Z.-X., Gamal El Dien, H., Pourteau, A., Murphy, J.B., Collins, W.J., Mattielli, N., Olierook, H.K.H., Spencer, C.J. and Mitchell, R.N., 2020. Distinct formation history for deep-mantle domains reflected in geochemical differences. *Nature Geoscience*, 13(7): 511-515.
- Dupré, B. and Allègre, C.J., 1983. Pb–Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303(5913): 142-146.
- Escrig, S., Capmas, F., Dupre, B. and Allegre, C.J., 2004. Osmium isotopic constraints on the nature of the Dupal anomaly from Indian mid-ocean-ridge basalts. *Nature*, 431(7004): 59-63.
- Hart, S.R., 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309(5971): 753-757.
- Hart, S.R., 1988. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 273-296.
- Hawkesworth, C., Mantovani, M., Taylor, P. and Palacz, Z., 1986. Evidence from the Parana of south Brazil for a continental contribution to Dupal basalts. *Nature*, 322(6077): 356-359.
- Jacques, G., Hauff, F., Hoernle, K., Werner, R., Uenzelmann-Neben, G., Garbe-Schönberg, D. and Fischer, M., 2019. Nature and origin of the Mozambique Ridge, SW Indian Ocean. *Chemical Geology*, 507: 9-22.
- Kamesh Raju, K. A. and K. Samudrala, et al. 2012. Segmentation and morphology of the Central Indian Ridge between 3°S and 11°S, Indian Ocean. *Tectonophysics* 554-557: 114-126.
- Kamesh Raju, K. A., Chaubey, A. K., Amarnath, D. & Mudholkar, A., 2008. Morphotectonics of the Carlsberg Ridge between 62°20' and 66°20'E, northwest Indian Ocean. *Marine Geology*, 252, 120-128.
- Mahoney, J., Jones, W., Frey, F., Salters, V., Pyle, D. and Davies, H., 1995. Geochemical characteristics of lavas from Broken Ridge, the Naturaliste Plateau and southernmost Kerguelen Plateau: Cretaceous plateau volcanism in the southeast Indian Ocean. *Chemical Geology*, 120(3-4): 315-345.
- Mudholkar, A., Kodagali, V. N., Kamesh Raju, K. A., Ranade, G. H. & Ambre, N. V., 2002. Geomorphological and petrological observations along a segment of slow-spreading Carlsberg Ridge. *Current Science*, 82, 982-989.
- Mukasa, S.B., McCabe, R., Gill, J.B. 1987. Pb-isotopic compositions of volcanic rocks in the West and East Philippine island arcs: presence of the Dupal isotopic anomaly. *Earth and*



- Planetary Science Letters 84,153–164.
- Nauret, F., Abouchami, W., Galer, S., Hofmann, A., Hemond, C., Chauvel, C. & Dymant, J., 2006. Correlated trace element-Pb isotope enrichments in Indian MORB along 18–20°S, Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 137-152.
- Nishio, Y., Nakai, S.i., Ishii, T. and Sano, Y., 2007. Isotope systematics of Li, Sr, Nd, and volatiles in Indian Ocean MORBs of the Rodrigues Triple Junction: Constraints on the origin of the DUPAL anomaly. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(3): 745-759.
- Qian, S., Zhou, H., Zhang, L. and Cheng, R., 2020. Mantle heterogeneity beneath the South China Sea: Chemical and isotopic evidence for contamination of ambient asthenospheric mantle. *Lithos*, 354-355.
- Regelous, M., Niu, Y., Abouchami, W. and Castillo, P.R., 2009. Shallow origin for South Atlantic Dupal Anomaly from lower continental crust: Geochemical evidence from the Mid-Atlantic Ridge at 26°S. *Lithos*, 112(1-2): 57-72.
- Rehkämper, M. and Hofmann, A., 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Science Letters*, 147(1-4): 93-106.
- Richter, M., Nebel, O., Maas, R., Mather, B., Nebel-Jacobsen, Y., Capitanio, F.A., Dick, H.J.B. and Cawood, P.A., 2020. An Early Cretaceous subduction-modified mantle underneath the ultraslow spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean. *Science Advances*, 6(44): eabb4340.
- Richter, M., Nebel, O., Maas, R., Nebel-Jacobsen, Y. and JB, H., 2019. Elucidating the peculiar Dupal isotope signatures of Arctic mid-ocean ridge basalts. *Chemical Diversity in Mid-Ocean Ridge Basalts*: 73.
- Saha, A., Sensarma, S., Hazra, A., Ganguly, S., Peketi, A., Doley, B. and Mudholkar, A.V., 2020. Imprints of ancient recycled oceanic lithosphere in heterogeneous Indian Ocean mantle: Evidence from Petrogenesis of Carlsberg Ridge basalts from Northwest Indian Ocean. *Gondwana Research*, 86: 60-82.
- Saunders, A., Storey, M., Gibson, I., Leat, P., Hergt, J. and Thompson, R., 1991. Chemical and isotopic constraints on the origin of basalts from Ninetyeast Ridge, Indian Ocean: results from DSDP Legs 22 and 26 and ODP Leg 121, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Ocean Drilling Program College Station, TX, pp. 559-590.
- Taneja, R., Rushmer, T., Blichert-Toft, J., Turner, S. and O'Neill, C., 2016. Mantle heterogeneities beneath the Northeast Indian Ocean as sampled by intra-plate volcanism at Christmas Island. *Lithos*, 262: 561-575.
- Tatsumoto, M., Nakamura, Y. 1991. Dupal anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 3697–3708.
- Urann, B.M., Dick, H.J.B., Parnell-Turner, R. and Casey, J.F., 2020. Recycled arc mantle recovered from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature Communications*, 11(1): 3887.
- Wang, Y. and X. Han, et al. 2017. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews* 84: 1-19.
- Weis, D., Frey, F.A., Schlich, R., Schaming, M., Montigny, R., Damasceno, D., Mattielli, N., Nicolaysen, K.E. and Scoates, J.S., 2002. Trace of the Kerguelen mantle plume: Evidence from seamounts between the Kerguelen Archipelago and Heard Island, Indian Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(6): 1-27.
- Wen, L., 2006. A compositional anomaly at the Earth's core–mantle boundary as an anchor to the relatively slowly moving surface hotspots and as source to the Dupal anomaly. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(1): 138-148.
- White, W.M., 2015. Isotopes, Dupal, LLSVPs, and Anekantavada. *Chemical Geology*, 419: 10-28.
- Yang, S., Humayun, M. and Salters, V.J.M., 2020. Elemental constraints on the amount of recycled crust in the generation of mid-oceanic ridge basalts (MORBs). *Science Advances*, 6(26): eaba2923.
- Yi, S.B., Oh, C.W. Pak, S.J., et al. 2014. Geochemistry and petrogenesis of mafic-ultramafic rocks from the Central Indian Ridge, latitude 8°–17°S: denudation of mantle harzburgites and gabbroic rocks and compositional variation of basalts. *International Geology Review*, 56 (14): 1691-1719.
- Yu, X. and Dick, H.J., 2020. Plate-driven micro-hotspots and the evolution of the Dragon Flag



- melting anomaly, Southwest Indian Ridge, Earth and Planetary Science Letters, 531, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116002>.
- Zhang, G.-L., Luo, Q., Zhao, J., Jackson, M.G., Guo, L.-S. and Zhong, L.-F., 2018. Geochemical nature of sub-ridge mantle and opening dynamics of the South China Sea. Earth and Planetary Science Letters, 489: 145-155.
- Zhang, Y.X., Zeng, Z., Li, X., Yin, X., Wang, X., Chen, S. and Li, S., 2018. High-potassium volcanic rocks from the Okinawa Trough: Implications for a cryptic potassium-rich and DUPAL-like source. Geological Journal, 53(5): 1755-1766.
- Zhang, Z., Li, S., Suo, Y., Somerville, I.D. and Li, X., 2016. Formation mechanism of the global Dupal isotope anomaly. Geological Journal, 51: 644-651.
- Zindler, A., Hart, S.R. 1986. Chemical geodynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 14, 493-571.
- Zong, T., Han, X., Liu, J., Wang, Y., Qiu, Z., Li, H. and Yu, X., 2019. H₂O in basaltic glasses from the slow-spreading Carlsberg Ridge: Implications for mantle source and magmatic processes. Lithos, 332-333: 274-286.
- Zong, T., Han, X., Liu, J., Wang, Y., Qiu, Z. and Yu, X., 2020. Fractional crystallization processes of magma beneath the Carlsberg Ridge (57°-65°E). Journal of Oceanology and Limnology, 38(1): 75-92.

2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题 (此部分为重点阐述内容);

项目研究目标与内容:

以卡尔斯伯格脊(简称卡脊)洋中脊玄武岩(MORB)为重点研究对象, 揭示其元素地球化学特征和放射性同位素组成, 探讨卡脊的岩浆演化和地幔源区不均一性, 遴选已有的判别指标, 厘定卡脊的 Dupal 异常分布界线和规律, 结合区域地质构造特征和演化历史, 探讨该区异常形成的原因及控制机制, 建立卡脊 Dupal 异常的成因模式。研究将有助于增进对印度洋乃至全球 Dupal 异常分布的了解, 对地幔大尺度不均一成因的认识, 进一步明确 Dupal 异常的物理意义和大地构造意义。

具体研究内容包括:

1)卡脊 MORB 的岩浆演化过程

- ① 选择卡脊(10°N-1.5°N)之间的代表性玄武岩样品, 开展岩石学、矿物学和地球化学分析, 揭示该洋脊段在岩相上、矿物组成及全岩化学组成等方面的基本特征;
- ② 利用主量元素、微量元素模拟, 揭示结晶分异、部分熔融等岩浆演化过程对 MORB 地球化学组成的影响;
- ③ 结合样品分布的构造部位、水深条件、洋脊段位, 讨论控制其地球化学特征的潜在影响因素, 为研究地幔源区不均一性提供基础。

2)卡脊地幔不均一性及 Dupal 异常分布

- ① 基于样品主微量元素特征, 选择代表性样品开展 Sr-Nd-Pb 同位素分析, 揭示卡脊的同位素分布特征及地幔不均一性;
- ② 基于已有的 Dupal 异常判别指标, 包括广义 Dupal 异常和狭义 Dupal 异常, 结合全岩主微量元素、特征元素比值、同位素比值及衍生参数, 遴选有效的 Dupal 异常判别指标;



③根据综合判别指标了解卡脊的 Dupal 异常分布,识别其界线,并与邻近希贝洋脊、红海裂谷及中印度洋脊进行对比,探讨卡脊的 Dupal 异常分布规律。

3)卡脊 Dupal 异常的成因模式

①分析卡脊异常区和非异常区典型样品的 He 同位素组成,筛查深部原始地幔(如热点,高 $^3\text{He}/^4\text{He}$)对浅层地幔的影响,同时判别是否存在陆壳物质的混染(低 $^3\text{He}/^4\text{He}$);

②尝试开展代表性样品的 Os 同位素分析,识别大陆岩石圈地幔(低 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)和大陆下地壳(高 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)对地幔源区的影响;

③通过搜集印度西南缘、Laxmi 脊、塞舌尔以及马达加斯加等周边陆块的岩石圈组分,结合卡脊的正常亏损地幔组分,开展两端元的混合模拟,探讨拆沉大陆岩石圈对 Dupal 异常源区形成的影响。

④基于上述研究,结合卡脊的扩张演化历史和邻近洋脊及板内火山作用特征,综合讨论卡脊 Dupal 异常的形成机理和控制因素,建立成因模型。

拟解决的关键科学问题:

1)Dupal 同位素异常的判别指标是什么?已有的判别指标包括 $\Delta 7/4$ 、 $\Delta 8/4$ 、 ΔSr 等,但其具体的判别值存在争议,并具有广义和狭义 Dupal 异常之分。本研究将注重地质现象本身,包括地形地貌、构造边界、地球物理和地球化学指征等,经过反复试验,遴选最能符合地质现象的判别指标,确定最合理的判别值(如 $\Delta 7/4$ 、 $\Delta 8/4$ 、 ΔSr),同时寻找新的地化指标,包括主微量元素及其特征比值,同位素比值及其衍生参数等,充实 Dupal 异常概念的内涵及其地质意义。

2)Dupal 异常的成因及控制因素是什么? Dupal 异常的成因主要归结为 4 个模式:地幔柱、俯冲洋壳/沉积物、大陆岩石圈地幔、大陆下地壳。本研究利用主微量元素特征和 Sr-Nd-Pb-He-Os 同位素来讨论不同模式和不同混合端元的适用性及可能性,同时结合区域地质构造背景和洋脊演化历史以及地球物理观测结果,综合讨论 Dupal 异常的控制因素。

3. 拟采取的研究方案及可行性分析(包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明);

1、研究方法:

本研究主要采用岩石地球化学和大地构造学分析方法,以已有的自主调查样品进行室内分析为主,结合已有公开数据资料与外业补充调查,综合开展围绕卡尔斯伯格脊 Dupal 异常的地球化学、地球物理和地质学交叉研究。

具体研究方案如下:

1)样品及数据资料的获取

目前卡尔斯伯格脊已发表的 Sr-Nd-Pb 同位素很少,本研究将在搜集已有公开数据的基础上,利用我国历年航次在卡脊(10°N - 1.5°N)获得的玄武岩样品,补



充相关地球化学数据。同时将利用未来的外业航次调查，在卡脊补充采样，获取更多的样品。玄武岩样品的选择将尽量覆盖整个洋脊段，并具有区域代表性。公开数据可以通过文献及数据库(如 GEOROC, PetDB 等)获取。

2)卡脊 MORB 的岩浆作用过程

源区熔融和熔融后的分离结晶过程可以影响 MORB 的化学组成，为区分源区特征和岩浆过程的改造作用，需系统研究部分熔融和分离结晶作用。根据主量元素哈克图解及斑晶矿物的化学成分，定性判断玄武质岩浆的结晶分异程度，利用岩浆熔体的液相线模拟(LLD)，定量估算分离结晶过程，从而判断玄武岩特征元素在分离结晶过程中的变化。利用指示源区的同位素与指示熔融过程的不相容元素或比值作相关图解，可以判别是源区特征还是熔融作用导致的不相容元素变化。利用经分离结晶校正的主量元素指标 Fe_8 和 Na_8 ，可以定性判断熔融作用的深度和程度；利用稀土元素熔融模拟，估算在假定源区组成的前提下洋脊玄武质岩浆的熔融程度。

3)卡脊地幔源区不均一性及 Dupal 异常界线

在考虑岩浆演化的基础上，利用 Sr-Nd-Pb 同位素考察卡脊沿脊轴的地幔不均一性特征，计算 Dupal 异常判别指标，了解 Dupal 异常的分布规律，综合构造边界、深部地震层析成像结构、演化历史、扩张前的共轭陆块位置等，厘定 Dupal 异常的边界。按判别指标勾勒的 Dupal 异常分布可能是渐变式的，但 Dupal 异常的边界有可能对应地表的构造边界，或者是深部结构异常的边界。对应浅部的地质特征则暗示 Dupal 异常具有浅层成因或浅层控制，对应深部异常则指示 Dupal 异常的深成特点，如与 LLSVP 的可能联系。

4)卡脊 Dupal 异常的成因模式分析

Dupal 异常的成因主要归结为 4 个模式：地幔柱、俯冲洋壳/沉积物、大陆岩石圈地幔、大陆下地壳。目前卡尔斯伯格脊的地质和地理分布特征基本可以排除热点和俯冲的影响，并且利用异常玄武岩玻璃或斑晶矿物的 He 同位素组成，可以进一步筛查深部原始地幔和俯冲组分对卡脊地幔的影响，同时低 $^3He/^4He$ 可以用于判别陆壳物质的混染。尝试分析异常玄武岩的 Os 同位素特征，判别是否存在大陆岩石圈地幔($^{187}Os/^{188}Os$ 较低)或大陆下地壳(高 $^{187}Os/^{188}Os$)对地幔源区的影响；搜集印度西南缘、Laxmi 脊、塞舌尔以及马达加斯加等周边陆块的岩石圈组分，讨论大陆裂解过程拆沉大陆岩石圈对 Dupal 异常源区形成的影响；结合卡脊的地质构造背景综合讨论卡脊 Dupal 异常的形成机理和控制因素，建立成因模型。

2、技术路线

本项目研究的技术路线如下图：

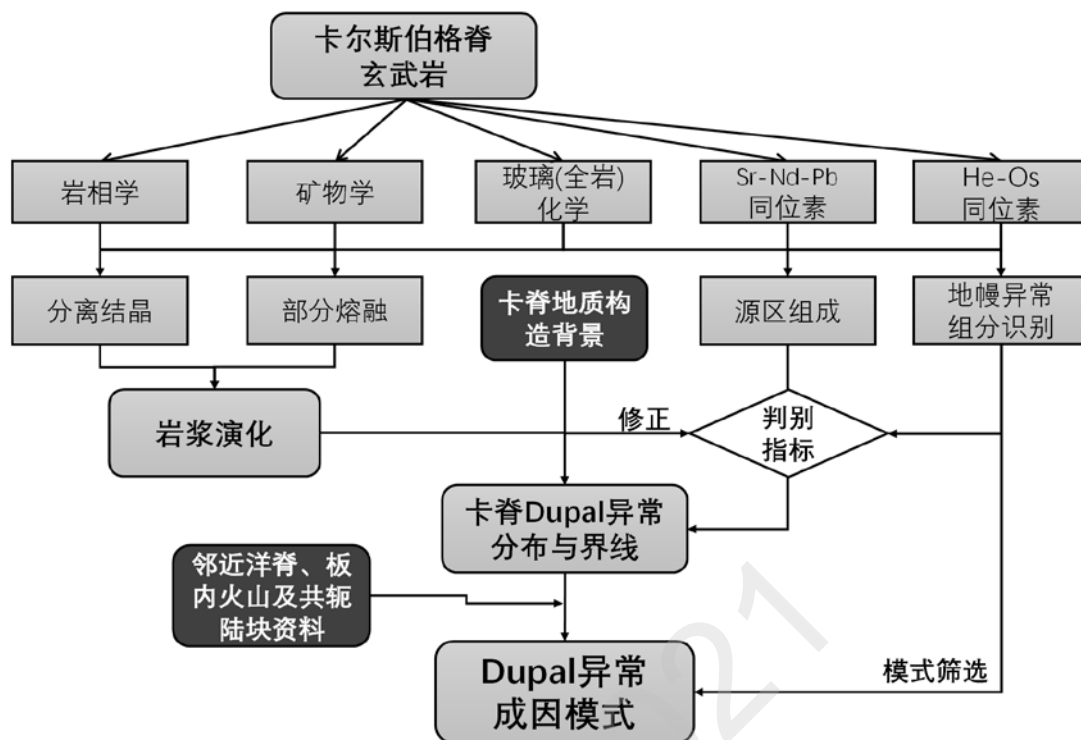


图3 项目实施的技术路线图

其中关键技术和实验手段如下：

1) **洋脊扩张历史和共轭陆块的确定。**卡脊演化背景将基于海底磁条带以及地形、重力和断裂带展布做板块重建，恢复各地质时期的洋脊面貌，确定不同洋脊部位所对应初始裂解陆块。板块重建使用 GPlate 软件开展。

2) **He 同位素分析测试。**利用采集的卡尔斯伯格脊 MORB 样品，选取玄武岩玻璃，对于没有玻璃的样品，可以尝试橄榄石斑晶和斜长石斑晶，用压裂法和熔融法开展 He 同位素测试。具体预处理方法和测试流程参照 Georgan et al. (2013)，使用压裂法获得玻璃气泡中 He 浓度和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。注意检验 He 浓度，过低的浓度(如 $^4\text{He} < 0.4 \times 10^{-6} \text{ccSTP/g}$)则易使 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值受到去气作用和岩浆期后放射性衰变的影响，而不能代表地幔岩浆的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。将 He 同位素分析结果与 N-MORB 平均值(约为 8Ra)相对照，判断其是否存在异常特征。He 同位素测试将在美国伍兹霍尔海洋研究所 Mark Kurz 博士的稀有气体实验室进行。申请人在该所访学期间已在该实验室开展过试验性地 He 同位素分析，为后续的补充测试奠定了合作基础。

3) **Os 同位素示踪尝试。**Os 同位素在地幔与地壳中的分布明显不同，因此可用于示踪大陆地壳或大陆岩石圈地幔(Alard, 2002; Ingles et al., 2004; 杨红梅等, 2006)。尽管玄武岩中的 Re-Os 含量较低，但目前的分析测试技术可以满足玄武岩 Re-Os 同位素的分析要求(Escrig et al., 2004)。本次研究 Re-Os 同位素测定将在中国科学院广州地球化学研究所进行，采用 Carius 管(卡洛斯管)溶样，Os 用四氯化碳萃取分离，纯化后，用 N-TIMS 进行测定。

4) **Dupal 异常判别指标修正。**Dupal 异常的判别指标目前尚未统一，并且异



常的物理意义也不明确。本次研究将尝试选择不同的判别标准去划定 Dupal 异常的边界，并与地表构造边界、深部地震层析成像结构、演化历史、扩张前的共轭陆块位置等物理边界对比，尽可能地寻找 Dupal 异常的物理意义，反过来按地质现象去尝试修正 Dupal 异常的判别指标，如广义 Dupal 异常($\Delta 8/4 > 10$)和狭义 Dupal 异常($\Delta 8/4 > 60$)的筛选，或者其他更优指标的提出。

3、可行性分析：

Dupal 异常的概念提出较早，但围绕这一问题相关研究一直经久不息。该异常概念发源于印度洋，目前在西南印度洋中脊和东南印度洋中脊均明确了异常边界，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。随着卡脊调查资料的丰富和全段样品的积累，参考西南印度洋中脊和东南印度洋中脊的研究进展，可以通过系统研究厘定卡脊 Dupal 异常的分布界线。结合区域地质构造背景以及已有的异常成因模型和合理的示踪指标，可以开展卡尔斯伯格脊 Dupal 异常成因的探讨。因此本研究在思路上和理论上是可行的。

从资料样品收集来看，项目组所在团队长期从事卡尔斯伯格脊的调查研究，申请人和项目组成员多次参加大洋航次，收集和积累了丰富的样品和研究资料(截至 2020 年底自主获取的样品达 72 站，图 4)，对区域地质背景非常熟悉，可以满足项目的顺利开展。并且，未来几年将有新的调查航次，可以进行研究区的补充采样和数据更新。

在实验条件方面，项目组成员所在海底科学重点实验室拥有岩矿分析所需主要实验设备，能完成样品的前期处理和主要分析测试工作。其他分析测试工作(如 Sr-Nd-Pb 同位素和 He-Os 同位素分析等)可在已建立良好合作关系的相关实验室完成，保证分析测试的顺利完成。

在人员构成方面，申请团队具有构造地质学、岩石学、矿物学、地球化学、等不同的专业背景，专业基础扎实，知识结构合理，团结合作力强。团队在海底构造、岩石、矿物和地球化学等方面均开展过相关研究工作，掌握岩石学、矿物学和地球化学相关分析测试方法，熟悉相关分析仪器和操作，具有比较丰富的研究经验和良好的科研素质，可以保证项目的顺利进行并达到预期成果。

4. 本项目的特色与创新之处：

1)对经典的 Dupal 异常概念提出了判别指标上的质疑，并希望通过具体案例(卡尔斯伯格脊)的研究，完善这一概念和判别指标，同时通过成因研究尝试赋予 Dupal 异常更具体的物理意义和地质意义。

2)利用地质、地球物理和地球化学等多学科交叉的方法，利用多种同位素示踪及微量元素地球化学相结合的方法，利用岩石地球化学和大地构造学相结合的方法，利用多源数据综合的大数据分析方法揭示卡尔斯伯格脊 Dupal 异常的分布规律及成因。



5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

2022 年度：选择研究区代表性的玄武岩样品，进行样品预处理和镜下观察，完成斑晶矿物化学分析，全岩(玻璃)主量元素、微量元素分析，利用主量元素和微量元素模拟，讨论岩浆分离结晶和部分熔融过程，定量估算分离结晶程度和部分熔融程度，讨论岩浆演化对 MORB 成分的影响。选取样品开展同位素分析。

2023 年度：完成样品 Sr-Nd-Pb 同位素测试，获得源区组成和地幔不均一性特征。迭代 Dupal 异常判别指标，最终厘定卡脊 Dupal 异常边界，并获得西北印度洋区的异常分布规律。参加一次国内学术会议并做报告。

2024 年度：选择代表性的异常样品开展 He-Os 同位素测试，筛查原始地幔物质和俯冲组分，判断陆壳组分和大陆岩石圈地幔等的影响。进行板块重建，弄清区域的地质构造演化历史，搜集周边大陆的岩石圈组成信息。

2025 年度：综合各种信息，开展卡脊 Dupal 异常成因的讨论，同时推荐适用于卡脊的 Dupal 异常判别指标，明确异常的物理意义和地质意义。撰写相关论文，提交结题报告及各项研究成果，并参加一次国际会议。

研究结果主要以研究论文形式发表，预期可以发表 SCI 论文 3~4 篇，其中至少 1 篇国际 SCI，内容包括：

- (1)卡尔斯伯格脊的地幔不均一性及其影响因素；
- (2)卡尔斯伯格脊是否存在地幔柱或俯冲物质影响？
- (3)卡尔斯伯格脊 Dupal 异常分布及成因；
- (4)Dupal 异常概念的地质意义及判别指标。

人才培养：在基金的支持下，培养博士生 1 名，硕士生 1 名。

（二）研究基础与工作条件

1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

本项目基于申请人所在研究团队多年来在卡尔斯伯格脊的调查和研究工作积累。中国大洋 24 航次首先在整个卡尔斯伯格脊进行多波束测深调查和重力磁力异常调查，大洋 26、28、33、38、43、49 和 57 航次先后在卡尔斯伯格脊不同洋脊段开展了岩石采样(图 4)，其中 38 航次为“蛟龙”号载人深潜航次，申请人作为下潜科学家参加了第 127 潜次的研究区海底调查，沿火山脊剖面采集了一系列 MORB 样品。历年航次的调查和研究工作积累了丰富的样品和基础数据，目前对卡尔斯伯格脊的地形地貌特征、构造发育情况、洋脊分段、扩张速率、岩性分布等都有了基本的了解。各航次均编写了航次报告，成为研究区重要的背景资料，极大地便利了本项目的开展。未来，项目组将在“十四五”期间继续择



机组织航次前往卡尔斯伯格脊开展补充地质调查，有望获得更丰富的资料和样品，进一步为研究提供便利。

申请人在印度洋区域，包括西南印度洋中脊(余星等，2020; Yu and Dick, 2020)、东南印度洋中脊(余星等，2019a)、西北印度洋中脊(余星等，2019b)做了大量的岩石地球化学和大地构造学研究工作，发表了一系列的研究论文。期间参加了一系列的学术会议，并做报告，如“西北印度洋海底岩石特征”的报告，回顾了整个西北印度洋脊的岩石分布、类型、地球化学特征以及与西南印度洋脊的对比；“印度洋及周边的 LIPs 与冈瓦纳大陆裂解”的报告，总结了印度洋及周边大火成岩省的时代、分布、演化特征，并同时回顾了冈瓦纳大陆裂解的历史，各块体分离的时间，各洋脊发育顺序及持续时间等；“卡尔斯伯格脊南端构造特征及岩浆演化”的报告，关注卡尔斯伯格脊南端的特殊构造位置和地球化学异常。通过持续研究和对相关问题的梳理、交流，对卡尔斯伯格脊及周边区域的地质构造演化有了比较深刻的认识，为本项目的研究和讨论奠定了良好的基础。

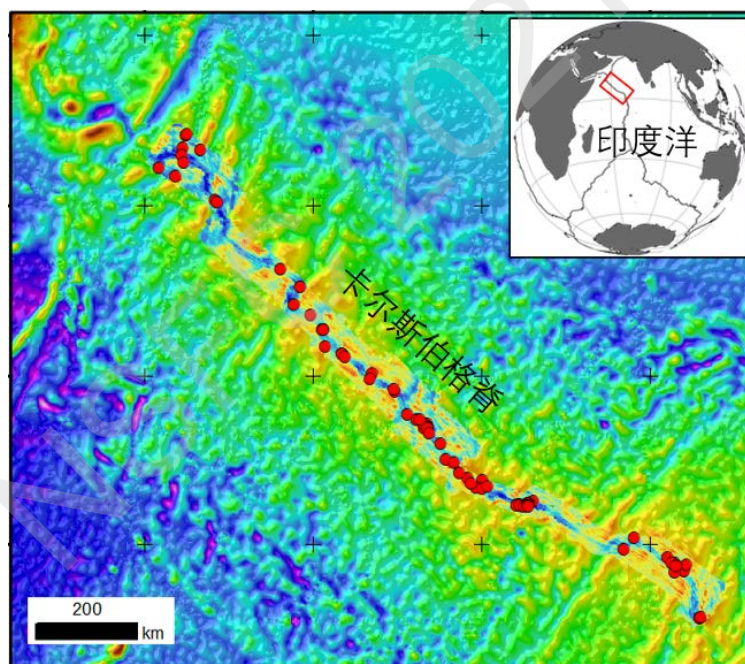


图 4 我国大洋调查航次在卡脊获得的玄武岩样品站位(余星, 2021 未发表)

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

本项目重点依托国家海洋局海底科学重点实验室的实验平台。实验室可完成样品的磨片、碎样、单矿物挑选、镜下鉴定、矿物化学分析和微量元素测试等工作。实验室中配备精密的岩石切割设备和研磨抛光设备，能够自动完成岩石薄片、探针片或包裹体薄片的加工。岩矿分析实验室还配备了各种显微镜，用于岩相观察和矿物鉴定。矿物显微结构分析和矿物成分分析可以在 JEOL



JXA-8100 型电子探针上进行。X 射线荧光光谱仪(XRF)和带 CETAC 213 nm 激光器的 Elan DRC-e 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)，可以满足全岩主量元素和微量元素的分析。

Sr-Nd-Pb-Os 同位素可以在中科院广州地化所、中国地质大学或中科院地质与地球物理研究所进行测试，申请团队与这些单位保持有良好合作关系，可以保证在相关单位完成分析测试工作。He 同位素分析工作将在美国伍兹霍尔海洋研究所的稀有气体同位素实验室进行，申请人在前期访问美国伍兹霍尔海洋研究所期间曾开展过相关的稀有气体分析测试工作，建立了良好的合作关系。并已获得海洋二所特支人才项目(出国项目)资助，计划将前往美国伍兹霍尔海洋研究所开展合作研究 6 个月，同时完成相关的 He 同位素测试工作。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

2018 年 1 月-2020 年 12 月，主持大洋“十三五”资源环境类项目“多金属硫化物资源勘查—印度洋靶区”所属课题“印度洋靶区基岩蚀变特征及其找矿指示”(DY135-S2-1-02)，经费来源于中国大洋矿产资源研究开发协会。作为课题承担单位，申请人将负责课题的整体实施、协调协作单位中国地质科学院地质研究所、河海大学的合作研究，以及洋脊玄武岩蚀变特征和找矿标志研究的具体工作。该课题是本项目研究的重要支撑，为项目提供基础数据和样品。课题本身侧重应用目的，而不强调机理研究，可以作为本项目的应用拓展。

2019 年 1 月-2022 年 12 月，主持国家自然科学基金面上项目“卡尔斯伯格脊南段 E-MORB：微陆块残留遗迹？”(41872242)，经费来源于国家自然科学基金委。该项目重点研究卡尔斯伯格脊南段发育 E-MORB 的成因机理，在研究中发现该洋脊段存在明显的 Dupal 异常，这是本项目的立项依据之一。本项目是原在研项目的延续，在研项目为本项目提供研究基础。目前在研项目进展顺利，已资助发表相关论文 6 篇，包括 SCI 4 篇(Yu & Dick, 2020; Zong et al., 2020; Zong et al., 2019; 余星等, 2020)，EI 2 篇(余星等, 2019a, 2019b)，另投稿一篇(Zong et al., 2021)。在项目资助下，培养研究生 3 人，预计该项目将按时顺利结题。论文列表如下：

1. Zong, T., Han, X., Yu, X*. Liu, J., Wang, Y., Qiu, Z. 2021. Origin of Enriched MORBs from the hotspot-free Segment V, Carlsberg Ridge, Indian Ocean. Lithos, in submission.

2. Yu, X. Dick, H.J.B. 2020. Plate-Driven Micro-Hotspots and the Evolution of the Dragon Flag Melting Anomaly, Southwest Indian Ridge. Earth and Planetary Science Letters, 531:116002. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116002>.

3. 余星, 迪克·亨利, 李小虎, 等. 2020. 西南印度洋中脊地质构造特征及其地球动力学意义. 地球物理学报. 63(10):3585-3603.

4. Zong, T., Han, X., Liu, J., Wang, Y., Qiu, Z. and Yu, X., 2020. Fractional



crystallization processes of magma beneath the Carlsberg Ridge (57°–65°E). *Journal of Oceanology and Limnology*, 38(1): 75-92.

5. Zong, T., Han, X., Liu, J., Wang, Y., Qiu, Z., Li, H. and Yu, X., 2019. H₂O in basaltic glasses from the slow-spreading Carlsberg Ridge: Implications for mantle source and magmatic processes. *Lithos*, 332-333: 274-286.

6. 余星, 韩喜球, 唐立梅, 等. 2019a, 东南印度洋中脊地质构造特征及研究进展. *科学通报*, 64: 1799 – 1816.

7. 余星, 韩喜球, 邱中炎, 等. 2019b. 西北印度洋脊的厘定及其地质构造特征. *地球科学*. 44(2):626-639.

4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已结题科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）。

无

（三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无



余星 简历

自然资源部第二海洋研究所，海底科学实验室，研究员

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- (1) 2004-9至2009-6，浙江大学，构造地质学，博士，导师：杨树锋
- (2) 2000-9至2004-6，浙江大学，地质学，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序：如为在站博士后研究人员或曾有博士后研究经历，请列出合作导师姓名）：

- (1) 2021-1至现在，自然资源部第二海洋研究所，海底科学实验室，研究员
- (2) 2019-12至2020-2，意大利帕多瓦大学，地球科学系，访问学者
- (3) 2018-3至2018-6，美国伍兹霍尔海洋研究所，地质与地球物理系，访问学者
- (4) 2015-6至2016-7，美国伍兹霍尔海洋研究所，地质与地球物理系，访问学者
- (5) 2013-1至2020-12，自然资源部第二海洋研究所，海底科学实验室，副研究员
- (6) 2009-7至2012-12，国家海洋局第二海洋研究所，海底科学实验室，助理研究员

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

主持或参加科研项目（课题）（按时间倒序排序）：

- (1) 国家自然科学基金委员会，面上项目，41872242，卡尔斯伯格脊南段E-MORB：微陆块残留遗迹？2019-01至2022-12，66万元，在研，主持
- (2) 自然资源部第二海洋研究所，所基本科研业务费专项项目，JG2001，西北印度洋中脊中段弯折带的构造-岩浆耦合关系，2020-01至2021-12，17万元，在研，主持
- (3) 自然资源部第二海洋研究所，所创新人才特支项目（B类），JT2001，印度洋洋中脊演化合作研究，2020.1至2021.12. 10.4万，在研，主持
- (4) 中国大洋协会，大洋“十三五”资源环境类项目，DY135-S2-1-02，印度洋靶区基岩蚀变特征及其找矿指示，2018-01至2020-12，115万元，在研，主持
- (5) 浙江省自然科学基金会，面上项目，LY17D020001，超慢速扩张洋脊-热点相互作用的He同位素示踪，2017-01至2019-12，8万，结题，主持

代表性研究成果和学术奖励情况

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加



以说明)；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。)

按照以下顺序列出：

一、代表性论著(包括论文与专著，合计5项以内)

(1) Yu, Xing^{*}; Dick, H. J. B.; Plate-Driven Micro-Hotspots and the Evolution of the Dragon Flag Melting Anomaly, Southwest Indian Ridge, *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 531: 116002. (期刊论文)

(2) Yu, Xing^{*}; The petrogenetic interrelationship of Wajilitag complex components in the early Permian Tarim large igneous province, NW China, *International Geology Review*, 2020, 62(10): 1343-1357. (期刊论文)

(3) Yu, Xing^{*}; Yang, Shu-Feng; Chen, Han-Lin; Chen, Zhong-Qiang; Li, Zi-Long; Geoffrey E. Batt; Li, Yin-Qi; Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics, *Gondwana Research*, 2011, 20(2-3): 485-497. (期刊论文)

(4) Yu, Xing^{*}; Yang, ShuFeng^{*}; Chen, HanLin; Li, ZiLong; Li, YinQi; Petrogenetic model of the Permian Tarim Large Igneous Province, *Science China-Earth Sciences*, 2017, 60(10): 1805-1816. (期刊论文)

(5) 余星^{*}; 韩喜球; 唐立梅; 刘吉强; 张平萍; 东南印度洋中脊地质构造特征及研究进展, *科学通报*, 2019, (17): 1799-1816. (期刊论文)

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励(包括专利、会议特邀报告等其他成果和学术奖励，请勿在此处再列论文和专著；合计10项以内)

(1) 余星(5/5); 塔里木早二叠世大火成岩省与地幔柱, 浙江省人民政府, 自然科学, 省部二等奖, 2016(杨树锋; 陈汉林; 厉子龙; 励音骐; 余星). (科研奖励)



李洪林 简历

自然资源部第二海洋研究所,海底科学实验室,助理研究员

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- （1）2010-09至2015-07，北京大学，地球与空间科学学院，博士，导师：李江海
- （2）2006-09至2010-07，北京科技大学，土木与环境工程学院，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾有博士后研究经历，请列出合作导师姓名）：

- （1）2015-08至现在，自然资源部第二海洋研究所,海底科学实验室,助理研究员

曾使用其他证件信息（应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）情况（按时间倒序排序）：

- 1) 浙江省自然科学基金/青年基金项目，LQ19D060006，海洋核杂岩构造演化过程：卡尔斯伯格脊5° N地质填图研究，2019.01-2021.12，10万元，在研，主持
- 2) 国家重点研发计划子课题，2018YFC0309903，拆离断层的演化过程及其对热液循环系统的控制机理研究，2018.08-2021.12，200万元，在研，参加
- 3) 中国大洋“十三五”项目子课题，DY135-S2-1-01，印度洋靶区断裂系统及其控矿作用研究，2018.01-2020.12，65万元，在研，主持

代表性研究成果和学术奖励情况

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：



一、代表性论著（包括论文与专著，合计5项以内）

- (1) **Honglin Li**; Tao He*; George D. Spence; North Cascadia heat flux and fluid flow from gas hydrates: Modeling 3-D topographic effects, Journal of Geophysical Research - B: Solid Earth and Planets, 2013, 119(1): 99-115. (期刊论文)
- (2) **李洪林**; 李江海*; 王洪浩; 张华添; 海洋核杂岩形成机制及其热液硫化物成矿意义, 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(2): 53-59. (期刊论文)
- (3) He Tao*; **Li Hong-Lin**; Zou Chang-Chun; 3D topographic correction of the BSR heat flow and detection of focused fluid flow, Applied Geophysics, 2014, 11(2): 197-206. (期刊论文)
- (4) 李江海; **李洪林**; 韩喜球; 印度洋底大地构造图, 北京: 地质出版社, 2015. (学术专著)

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励（包括专利、会议特邀报告等其他成果和学术奖励，请勿在此处再列论文和专著；合计10项以内）

无



参与者 简历

周久龙, 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学实验室, 助理研究员

教育经历(从大学本科开始, 按时间倒序排序; 请列出攻读研究生学位阶段导师姓名):

(1) 2012-09至2016-01, 中国地质大学(北京), 矿物学、岩石学、矿床学, 博士, 导师: 罗照华

(2) 2009-09至2012-07, 中国地质大学(北京), 矿物学、岩石学、矿床学, 硕士, 导师: 罗照华

(3) 2005-09至2009-07, 中国地质大学(北京), 地质学理科基地班, 学士

科研与学术工作经历(按时间倒序排序; 如为在站博士后研究人员或曾有博士后研究经历, 请列出合作导师姓名):

(1) 2021-01至现在, 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学实验室, 助理研究员

(2) 2019-12至2020-07, 南京大学, 地球科学与工程学院, 博士后, 合作导师: 杨经绥

(3) 2018-09至2019-11, 中国地质调查局发展研究中心, 战略与情报研究室, 助理研究员

(4) 2016-01至2018-08, 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化研究室, 博士后, 合作导师: 李献华

曾使用其他证件信息(应使用唯一身份证件申请项目, 曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的, 应当在此列明)

主持或参加科研项目(课题)情况(按时间倒序排序):

(1) 国家自然科学基金委员会, 青年基金项目, 41703040, 马达加斯加北部 Bemarivo 地体新元古代岩浆作用: 从罗迪尼亚裂解到冈瓦纳聚合?, 2018-01至2020-12, 25万元, 已结题, 主持

(2) 中国博士后基金, 面上一等资助, 2016M600125, 马达加斯加中北部“新元古代阿拉斯加型岩体”的再研究, 2016-08至2018-07, 8万元, 已结题, 主持

(3) 岩石圈演化国家重点实验室, 自选开放课题, K201709, 塞舌尔新元古代花岗质岩石的再研究, 2017-12至2019-12, 25万元, 已结题, 主持

(4) 中国科学院, 战略先导专项B类, XDB18030301, 新元古代-古生代转折期重大地质事件和生物演化的高精度同位素年代学, 2016-06至2021-06, 350万元, 在研, 参加

(5) 国家自然科学基金委员会, 面上项目, 41673018, 华夏陆块地壳演化的



微区原位碎屑独居石U-Th-Pb年龄和Nd-O同位素制约, 2017-01至2020-12, 73万元, 已结题, 参加

代表性研究成果和学术奖励情况

(请注意: ①投稿阶段的论文不要列出; ②对期刊论文: 应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷(期)及起止页码(摘要论文请加以说明); ③对会议论文: 应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间; ④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况: 所有共同第一作者均加注上标“#”字样, 通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样, 唯一第一作者且非通讯作者无需加注; ⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。)

按照以下顺序列出:

一、代表性论著(包括论文与专著, 合计5项以内)

(1) **Zhou, J.L.***; Li, X.H.*; Tucker, R.D.; New insights into the genesis of Neoproterozoic low- $\delta^{18}\text{O}$ granitoids in the Seychelles: Crustal cannibalization within an intra-plate extensional setting, *Science Bulletin*, 2020, 65: 1880-1883.

(2) **Zhou, J.L.**; Li, X.H.*; Tang, G.Q.; Liu, Y.; Tucker, R.D.; New evidence for a continental rift tectonic setting of the Neoproterozoic Imorona-Itsindro Suite (central Madagascar), *Precambrian Research*, 2018, 306: 94-111.

(3) **Zhou, J.L.**; Li, X.H.*; Tang, G.Q.; Gao, B.Y.; Bao, Z.A.; Ling, X.X.; Wu, L.G.; Lu, K.; Zhu, Y.S.; Liao, X.; Ca. 890 Ma magmatism in the northwest Yangtze block, South China: SIMS U-Pb dating, in-situ Hf-O isotopes, and tectonic implications, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 101-111.

(4) **Zhou, J.L.**; Shao, S.; Luo, Z.H.*; Shao, J.B.; Wu, D.T.; Rasoamalala, V.; Geochronology and geochemistry of Cryogenian gabbros from the Ambatondrazaka area, east-central Madagascar: Implications for Madagascar-India correlation and Rodinia paleogeography, *Precambrian Research*, 2015, 256: 256-270.

(5) 周久龙; 邵帅; 吴大天; 罗照华*; 邵检波; 王奎良; 赵院冬; Rasoamalala, V.; 新元古代地幔柱事件在Rodinia超大陆西缘的响应: 来自马达加斯加的初步证据, *岩石学报*, 2014, 30: 3366-3374.



二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励（包括专利、会议特邀报告等其他成果和学术奖励，请勿在此处再列论文和专著；合计10项以内）

NSFC 2021



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	代表性论著首页1		代表性论著
2	代表性论著首页2		代表性论著
3	浙江省自然科学奖		科技奖励

NSFC 2021



项目名称： 卡尔斯伯格脊Dupal异常界线的厘定及成因研究

资助类型： 面上项目

申请代码： D0211. 大地构造学与构造地质学

国家自然科学基金项目申请人和参与者科研诚信承诺书

本人**在此郑重承诺**：严格遵守中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》规定，所申报材料和相关内容真实有效，不存在违背科研诚信要求的行为；在国家自然科学基金项目申请、评审和执行全过程中，恪守职业规范和科学道德，遵守评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

- （一）抄袭、剽窃他人科研成果或者伪造、篡改研究数据、研究结论；
- （二）购买、代写、代投论文，虚构同行评议专家及评议意见；
- （三）违反论文署名规范，擅自标注或虚假标注获得科技计划等资助；
- （四）购买、代写申请书；弄虚作假，骗取科技计划项目、科研经费以及奖励、荣誉等；
- （五）在项目申请书中以高指标通过评审，在项目计划书中故意篡改降低相应指标；
- （六）以任何形式打听尚未公布的评审专家名单及其他评审过程中的保密信息；

（七）本人或委托他人通过各种方式及各种途径联系有关专家进行请托、游说，违规到评审会议驻地游说评审专家和工作人员、询问评审或尚未正式向社会公布的信息等干扰评审或可能影响评审公正性的活动；

（八）向评审工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包，或提供宴请、旅游、娱乐健身等任何可能影响评审公正性的活动；

（九）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于撤销科学基金资助项目，追回项目资助经费，向社会通报违规情况，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及接受相应的党纪政纪处理等。

申请人签字：

编号	参与者姓名 / 工作单位名称（应与加盖公章一致） / 证件号码	签字
1	李洪林 / 自然资源部第二海洋研究所 / 3*****4	
2	周久龙 / 自然资源部第二海洋研究所 / 3*****9	
3	周鹏 / 自然资源部第二海洋研究所 / 3*****0	
4	胡航 / 自然资源部第二海洋研究所 / 3*****5	
5	党牛 / 自然资源部第二海洋研究所 / 4*****8	
6	许绪成 / 自然资源部第二海洋研究所 / 3*****1	
7		
8		
9		



项目名称： 卡尔斯伯格脊Dupal异常界线的厘定及成因研究

资助类型： 面上项目

申请代码： D0211. 大地构造学与构造地质学

国家自然科学基金项目申请单位科研诚信承诺书

本单位依据国家自然科学基金项目指南的要求，严格履行法人负责制，**在此郑重承诺**：本单位已就所申请材料内容的真实性和完整性进行审核，不存在违背中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》规定和其他科研诚信要求的行为，申请材料符合《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规，在项目申请和评审活动全过程中，遵守有关评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）采取贿赂或变相贿赂、造假、剽窃、故意重复申报等不正当手段获取国家自然科学基金项目申请资格；

（二）以任何形式打听未公开的项目评审信息、评审专家信息及其他评审过程中的保密信息，干扰评审专家的评审工作；

（三）组织或协助项目团队向评审工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包等；宴请评审组织者、评审专家，或向评审组织者、评审专家提供旅游、娱乐健身等任何可能影响科学基金评审公正性的活动；

（四）包庇、纵容项目团队虚假申报项目，甚至骗取国家自然科学基金项目；

（五）包庇、纵容项目团队，甚至帮助项目团队采取“打招呼”等方式，影响科学基金项目评审的公正性；

（六）在申请书中以高指标通过评审，在计划书中故意篡改降低相应指标；

（七）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本单位愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于停拨或核减经费，追回项目经费，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及主要责任人接受相应党纪政纪处理等。

依托单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日