

洋中脊与地幔柱热点相互作用研究进展

鄢全树^{1,2,3}, 石学法²

(1 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2 国家海洋局海洋沉积与环境地质重点实验室, 青岛 266061;
3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:地表热点是认识地幔柱假说以及地幔柱动力学的窗口, 发生在洋脊与热点之间的相互作用则是了解地球上两大动力系统(板块构造和地幔柱)的直接联系的最有利地区。研究洋脊-热点之间的相互作用对于揭示地幔动力学、热点附近洋壳构造的演变以及与热点密切相关的洋中脊处的岩浆热液活动具有重要的意义。在肯定地幔柱假说的基础上, 对洋脊-地幔柱(热点)的模拟实验以及三大洋中不同扩张脊与热点相互作用的最新研究作了系统的介绍和评述, 指出室内模拟实验以及地质学、岩石学、地球化学和地球物理学(特别是高分辨率的地震技术)的结合研究将是本领域研究的发展趋势。

关键词:地幔柱; 洋中脊; 热点; 热点-洋中脊相互作用

中图分类号:P736.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2006)05-0131-08

20世纪60年代后期诞生的板块构造学说引起了地球科学的巨大变革, 但随着研究的深入, 科学家发现板块构造理论虽然能成功地解释大多数全球火山作用和地震现象, 但是不能很好地解释 Wilson 的有关板内火山作用的形成过程^[1]。Morgan 指出这些板内火山形成过程有别于板块边界的火山, 并指出板内火山热点的源区是产生于下地幔的深地幔柱^[2]。随后, Morgan 在美国地球物理学杂志上又介绍了另外一种热点类型^[3], 一时间学者们普遍接受了 Morgan 的观点。但是 Anderson 认为 Morgan 的源于下地幔的地幔柱模型存在片面性^[4], 同时认为所有的非板块边界的火山作用都可以从与板块相联系的浅部应力中得到解释。板内火山热点起源于地幔热物质上涌而成的地幔柱, 接近汇聚板块边缘处地幔柱几乎没有, 大量的地幔柱位于离散板块边缘附近, 同时许多地幔柱是与洋中脊轴部一致或接近一致。那么, 作为地球两个主要的动力系统——板块构造和地幔柱之间是否存在某种联系呢? 大量的研究证据表明, 全球大洋中脊系统的大部分地区都遭受过或正在遭受热点的影响。因此, 在目前的技术条件下, 通过对热点及其与洋中脊之间相互作用的研究有助于我们了解地球两大动力系统的内在联系。2003年日本东京大学海洋研究所大洋中脊办公室撰文指出洋中脊-热点相互作用是未来10年

大洋中脊地质研究的必然趋势^[5]。

1 洋中脊与热点

1.1 洋中脊

大洋中脊一直是国际海洋地质学界深海研究的重点。洋中脊构造是强大的上升地幔流不断作用于岩石圈板块底部并使之继续离散而形成的。洋中脊的不同扩张速率在脊轴部位形成不同的地形, 这种地形上的差异现在被认为是由于其扩张动态过程的不同而造成的, 而这种差别则对应于不同扩张速率下大洋岩石圈的流变性质的差异^[6]。洋中脊的动力学系统相当复杂, 并受到热点不同程度的影响。目前尚存在几个突出的问题^[7]: (1) 上涌地幔内部分熔融物的运移和横向集合效应; (2) 快速扩张下东太平洋洋隆存在多个熔融透镜体? (3) 洋中脊处的热液循环系统。

1.2 热点

热点是指以羽状物形态从地幔深处升至岩石圈表面的炽热岩石露头, 大部分位于洋脊的拐点或三联点处。热点通常是与巨大的地球物理和地球化学异常相伴生的。Wilson 在研究夏威夷-皇帝海岭的文章中首次提出了“热点”的概念, 并认为地球上共有16个热点^[8]。对于地球上的热点数量可谓仁者见仁, Morgan 指出大约有19个热点源于深部地幔柱^[9]; Burke 和 Wilson 识别出117~127个^[10]; Crough 和 Jurdy 认为地球上的热点只有42个^[11];

基金项目:中国大洋协会“十五”计划项目(DY105-01-04-02); 科技基础性工作和社会公益研究专项项目(2003DIB3J114)

作者简介:鄢全树(1976—), 男, 博士生, 主要从事海洋地质学及地球动力学研究, E-mail: yanquanshu@163.com

收稿日期:2006-02-15; **改回日期:**2006-06-12. 文凤英编辑

Courtillot 等根据 5 个标准提出地球表面存在 49 个热点(图 1)^[12], 并指出这些热点的源区有 3 类: (1) 下地幔底部(可称作“Morgan 型”^[21]), 也许是源于“D”层(位于核-幔边界正上方厚 200~300 km、组分不均一的区域)。(2) 与超级上涌相对应的巨大穹隆的顶端处。(3) 上地幔, 在某种意义上说是属于“Anderson 型”^[4]。所依据的 5 个标准为^[12]: (1) 存在年龄单调增长的线性火山链; (2) 线性火山链的初始端存在溢流玄武岩; (3) 巨大的浮力通量; (4) 高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值; (5) 下伏地幔中存在显著低的剪切波速(V_s)。需要指出的是, 在按这 5 个标准进行分类的时候, 并没有一个热点完全符合所有标准。

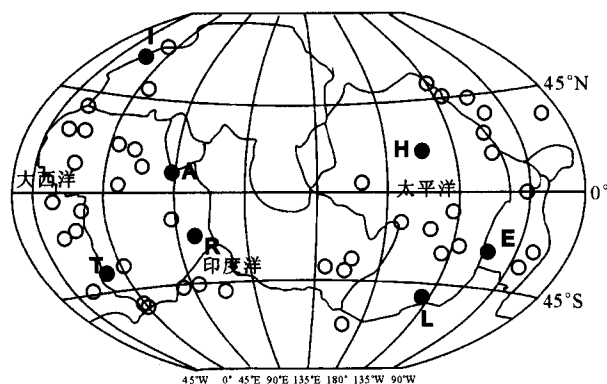


图 1 全球热点分布

- 代表 7 个可能源于下地幔的热点;
- 代表源区在下地幔与地表之间的热点。
- (图中相互连通的曲折线为洋中脊)

Fig. 1 Distribution of hotspots in global oceans

H—Hawaii; E—Easter; L—Louisville;

R—Reunion; T—Tristan; A—Afar; I—Iceland

2 洋中脊与热点相互作用

Morgan 首先提出热点与洋中脊之间的相互作用, 并指出洋脊与热点的关系不仅仅是几何学上的, 也是物理学和化学上的^[2]。洋中脊-热点相互作用的地表表现形式为地球化学异常、抬升的洋脊地形、重力负异常、轴旁火山链以及洋脊重新就位事件。受热点影响的洋中脊呈现了热点专有的地球化学特征, 而地球化学的异常程度指示了洋中脊-热点相互作用的规模和性质^[13]。在对众多的洋脊-热点相互作用的个案进行研究后, Mara^[14]总结性地提出了两种热点-洋中脊相互作用类型: (1) 轴上热点的物质流顺着洋中脊轴流动; (2) 轴旁热点处的物质向附近洋中脊的迁移。洋中脊与热点相互作用在测深学、重力、岩石学以及地球化学方面的特征明显, 如

Zhang 等研究指出全球 S 波波速模型显示洋脊与热点在阿法和圣赫勒拿岛处可能发生了相互作用^[15]; 洋脊-热点相互作用的重要参数之一是两者之间的距离, 距离的远近在熔岩地球化学特征上有着明显体现, 同时相互作用强度随距离的增大而逐渐减小, 最终趋于消失^[16]。总之, 热点-洋中脊相互作用大致经历以下 3 个阶段: (1) 洋中脊扩张接近热点(如太平洋-南极脊/路易斯维尔热点); (2) 穿越或被热点捕获(大西洋洋中脊/修纳-发现热点); (3) 最终移离洋中脊(东南印度洋洋中脊-克尔盖伦热点)^[17]; 通过以上 3 个阶段, 热点对洋中脊几何学进行了强烈的修整^[18]。

由于目前的技术手段根本不可能达到下地幔(核幔边界)甚至是上地幔的部分区域, 因此, 研究洋脊与热点的关系是揭示地幔柱动力学的一个突破口。为了完整地揭示洋脊-热点的相互作用, 不同学者从不同侧面对三大洋中的脊上或脊旁热点与洋脊的相互作用进行了研究^[19-51]。

2.1 模拟实验

受地震分辨技术的制约, 目前很难实地考察洋脊-地幔柱之间的相互作用。但是, 过去 10 年所进行的数字模型及实验室研究分别讨论了以洋脊为中心及洋脊轴旁的地幔柱与固定洋中脊之间相互作用的动力学和运动学特征。

对于以洋脊为中心的地幔柱(图 2a), 在容器实验中首次探索了沿洋脊轴部运移的地幔柱的宽度 W 与地幔柱体积通量 Q 及洋脊全扩张速率 U 三者之间关系式的缩尺规律^[19], 其关系式为 $W = 2.10 (Q\eta_r/U)^{1/2}$, 式中 η_r 代表参照体流体黏度与地幔柱流体黏度的比值。该式表明, 宽度与地幔柱的长度规模是成比例的, 它随着地幔柱体积通量的平方根及地幔-地幔柱黏度比值的增加而增加, 同时随着板块扩张速率的平方根减小而减少。与此同时, 在数字模型中对其进一步作了研究^[20-21], 建立了三维黏度变化(增加了温度和压力两个变量)的数字模型并将其运用到实例(如冰岛)中去验证。

对位于洋脊轴旁的地幔柱的动力学也首次进行了实验室和 2D 数字研究^[22-23](图 2b), Ribe 对轴旁地幔柱及固定洋脊的研究建立了一个缩尺规律, 即沿洋脊轴部运移的地幔柱的宽度 W 与几个变量(包括如地幔柱体积通量 Q 、洋脊扩张速率 U 、柱-脊距离 x_p)以及随年龄增长的岩石圈加厚作用之间的关系式^[23]。以上的研究结果都是建立在固定板片这一前提下, 对于更实际的迁移脊情况, 岩石圈的加热

减薄作用很重要,同时相对于地幔柱来说,被迁移卷拖动的板片的运动比引导洋中脊轴部的板片的运动还要慢,因此,把热量扩散及地幔流变学等概念引进数字模型尤为重要^[24]。

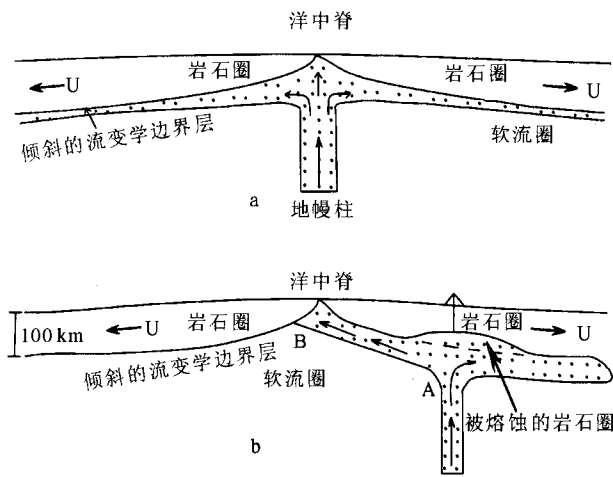


图 2 地幔柱-洋中脊相互作用的概念性模型(据文献[19-20,22])

(a)以洋脊为中心的地幔柱上升及侧向运移的情况, U 为板片扩张速率;(b)洋脊轴旁的地幔柱上升及侧向运移情况,在地幔柱到达岩石圈底部时,一方面高温地幔柱的热量可以熔蚀掉一部分的岩石圈,另一方面,地幔柱物质流主要是沿着倾斜的流变学边界层底部由 A 处流向 B 处

Fig. 2 Conceptual model of ridge-plume (ridge-centered plume or off-axis plume) interaction

此外,Mara 等^[14]建立了一个软流圈流的数字模型。此模型中的流体动力学受控于热点与洋中脊的相对位置、板片的绝对速度、岩石圈和软流圈流变学以及构造边界条件。此模型既能解释沿洋脊轴部的地幔柱物质流,又能解释洋脊轴旁的地幔柱物质流向附近洋中脊发生扩散迁移的现象。

虽然在模拟实验和数字模型的研究中已经取得了一定的进展,但还存在一些问题,如地幔柱物质向洋中脊迁移或沿洋脊轴部流动是呈狭窄的管状槽道还是以宽广的膨胀重力流形式运移?沿脊处所观察到的地球化学混合趋势的源区在哪里^[24]?在 2D 模型中已经对岩石圈应力进行了成功模拟^[25],那么如何通过增加参数而建立起更实际的 3D 数字模型呢?

2.2 实例

2.2.1 太平洋中的洋中脊-热点相互作用

胡安德富卡洋脊(JdFR)-库伯(Cobb)热点 库伯-艾克伯格(CE)海山链东端的胡安德富卡洋脊轴部海山是库伯热点现在的中心位置(图 3a)。Rhodes 等^[26]研究指出轴部海山熔岩属于 N-MORB 与 E-MORB 的过渡类型。地震和岩石学观察资料表明,洋脊和热点火山保留了各自独特的地壳岩浆系统。地球化学等证据表明库伯热点在对胡安德富卡洋脊中段的岩浆供应上扮演了一个非常重要的角色。West 等指出热点岩浆渗透进地壳后通过侧向岩脉贯入和地表喷发的方式达到重新分布^[27]。这些岩浆导致了沿着洋脊的宽广地区出现增生地壳。远离热点区域,岩浆供应机制过渡为由被动洋脊上涌所产生的局部岩浆源。

太平洋-南极脊(PAR)-Foundation 热点 在太平洋板块上,从 32°S,127°W 到太平洋-南极扩张脊轴处(38°S,111°W)形成了一条长约 1 400 km 的 Foundation 海山链(图 3b)。此处是研究快速扩张脊-热点相互作用理想地区。海山熔岩地球化学研究表明,125°W 以西很少受到地幔柱的影响,125°~115°W 之间区域的熔岩是源于地幔柱的,而 115°W 东部的 E-W 走向的火山脊处熔岩则揭示了 Foundation

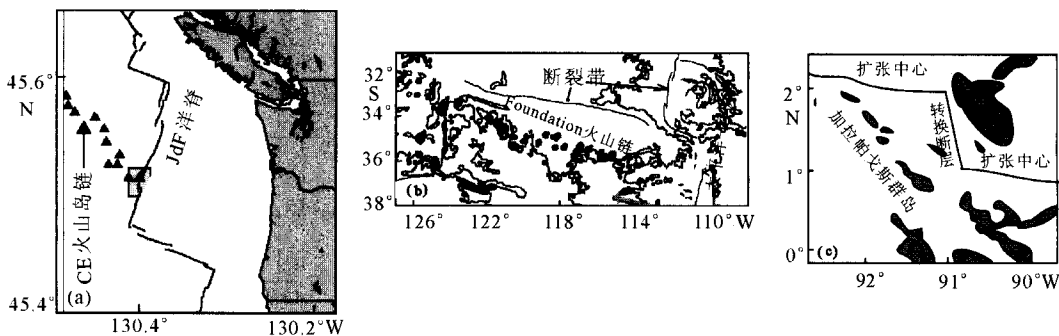


图 3 太平洋中主要的洋脊-热点相互作用位置(据文献[25,27,30])

(a) 胡安德富卡洋脊(JdFR)-库伯(Cobb)热点;(b) 太平洋-南极脊(PAR)-Foundation 热点;
(c) 加拉帕戈斯扩张中心(GSC)-加拉帕戈斯热点

Fig. 3 Locations of main ridge-hotspot interactions in the Pacific Ocean

地幔柱与太平洋-南极脊之间的相互作用^[28]。岩石化学证据表明, PAR 与 Foundation 海山之间的火山锥上的玄武岩属于 E-MORB 和 T-MORB, 越往 PAR 轴部岩石类型更趋向于 T-MORB^[29]。已有研究表明, PAR 与 Foundation 热点之间发生着较微弱的相互作用^[30]。由此可见, 洋脊的快速扩张速率与洋中脊-热点之间快速的相对运动的累积效应是这个地幔柱-洋中脊流表现为微弱的主要原因。

加拉帕戈斯扩张中心(GSC)-加拉帕戈斯热点

加拉帕戈斯扩张中心西端就是加拉帕戈斯地幔柱现在的位置(图 3c)。沿洋中脊轴部的地壳厚度、熔岩地球化学、地貌上的变化以及多道地震反射剖面反映了加拉帕戈斯扩张中心受地幔柱的影响^[24,31]。Hoernle 等认为加拉帕戈斯热点源区为下地幔^[32]。沿扩张中心轴部同位素资料反映加拉帕戈斯地幔柱与北东向迁移脊轴部之间的地壳之下存在物质流槽道^[33]。总之, 沿着洋脊轴部的熔岩地球化学、地壳厚度以及地形等方面变化的特征表明, 加拉帕戈斯扩张中心与附近加拉帕戈斯地幔柱确实存在着相互作用^[34]。

此外, 太平洋中复活岛(Easter)微板块扩张轴与复活岛热点之间也存在着相互作用^[35]。

2.2.2 大西洋中的热点-洋中脊相互作用

大西洋洋中脊(MAR)-冰岛(Iceland)热点 冰岛是以洋脊为中心的热点^[14](图 4a), 地壳厚度多变, 平均约为 29 km^[36]。Schilling 等指出冰岛之下存在非连续的地幔柱, 其源区很浅并非深部地幔^[37]。Sigmundsson 指出, 冰岛的裂谷区的活跃部分相对于地幔柱的直径来说很窄, 从而使岩浆从地幔柱向裂谷轴部发生侧向流动。冰川的消失触发了

冰岛全新世开始时岩浆活动的高峰期, 冰的卸载造成侧向物质流的减少。响应冰卸载的下地壳中的广泛的“流”模型容许地幔的黏度大于 $10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[38], 这与地球动力学模型一致。

大西洋洋中脊(MAR)-亚速尔(Azores)热点

亚速尔热点是个洋脊轴旁热点, 对应于一个广泛的 S 波速异常低的区域。大西洋洋中脊轴部深度从 40°N 附近的亚速尔群岛向南到大约 26°N 处逐渐加深^[39](图 4b), 此测深梯度与重力异常和玄武岩地球化学研究相一致。Schilling 等的研究结果反映了洋脊的源区物质与源于地幔柱的物质之间发生了相互作用^[40], 同时亚速尔群岛的玄武质玻璃记录了源区的富地球化学特征^[13]。Yu 等的 Nd 同位素地球化学证据指示亚速尔群岛下方的不相溶元素富集源区具有长期性^[41], 也在一定程度上反映了柱-脊相互作用的长期性。

大西洋洋中脊(MAR)-Ascension、St. Helena

和 Tristan 热点 南大西洋中的热点有阿森松、圣赫勒拿和特里斯坦等(图 4c)。Schilling 等^[42]研究指出这些离轴热点影响着附近的洋中脊。Pb 同位素地球化学证据揭示了南大西洋下的上地幔在化学成分上的高度不均一性^[43], 表明此处上地幔源区性质明显受地幔柱与迁移脊之间存在的物质流槽道的主导。在洋脊位于地幔柱正上方之前, 在圣赫勒拿和特里斯坦地幔柱处的物质流就已经影响软流圈的组分。南太平洋的 Nd-Sr-Pb 同位素的空间变化全面证实了地幔柱-洋脊相互作用^[44]。

2.2.3 印度洋中的热点-洋中脊相互作用

中印度洋洋中脊(CIR)-Réunion 热点 Réunion

热点位于中印度洋脊处(图 5a)。对热点熔岩地球

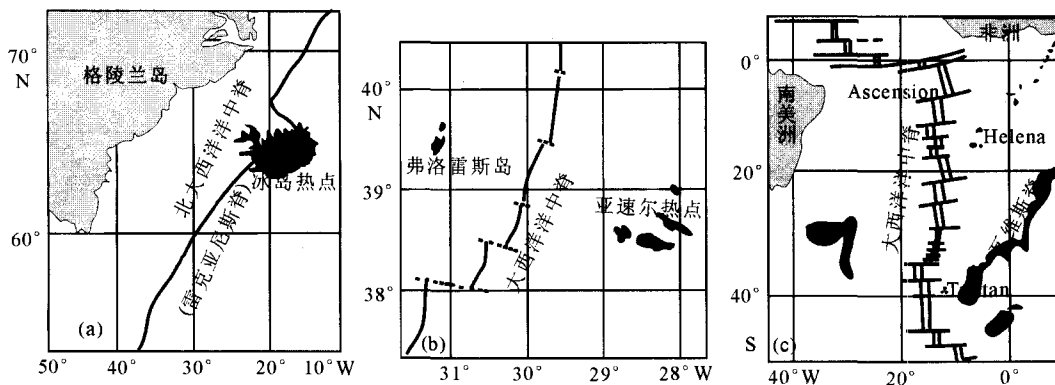


图 4 大西洋中主要的洋脊-热点相互作用位置(据文献[12-13,44])

(a) 大西洋洋中脊-冰岛(Iceland)热点; (b) 大西洋洋中脊-亚速尔(Azores)热点;
(c) 大西洋洋中脊(MAR)-Ascension、St. Helena 和 Tristan 热点

Fig. 4 Locations of main ridge-hotspot interactions in the Atlantic Ocean

化学研究表明, 热点熔岩的混染既可以是由被 Rodrigues 三联点混染了的源于上地幔的部分熔融体所造成, 又可以由大约在 55 Ma 时 Réunion 地幔柱头部出现的混染地幔岩浆产生^[45]。虽然来自中印度洋脊(CIR)的所有样品都记录了 Réunion 热点的影响, 但其中一条 E-W 向脊上的玄武岩微量元素特征表明其源区为亏损地幔(DMM), 并没有显示 CIR 与 Réunion 热点之间直接的相互作用的证据, 也许这个熔融事件是与转换伸展岩层断裂相联系的^[46]。

西南印度洋洋中脊(SWIR)-Marion、Bouvet 热点 超慢扩张的西南印度洋脊(SWIR)是惟一能研究热点与几何学上高度分段的洋中脊之间相互作用的地区。Marion 岛位于离 SWIR 大约 250 km、年龄为 28 Ma 的地壳上。Bouvet 热点位于离 SWIR 最近处约有 55 km、年龄为 7 Ma 的地壳上^[25](图 5b)。Georgen 等^[47]利用自由空间重力异常和测深数据分析指出, Bouvet 热点岩浆作用在靠近扩张中心处可能得到了加强, 沿轴地球物理异常揭示了 Marion 热点对于 SWIR 的中心部分处的增生现象有着重要的影响, 同时指出转换断层的错断对于高度分段的超慢扩张脊处的地幔柱物质分配起着重要作用。

东南印度洋洋中脊(SEIR)-克尔盖伦-赫德(Kerguelen-Heard)热点 克尔盖伦-赫德群岛建造在古老的 Kerguelen 台地的北半部(图 5c), 较高的大地水准面指示存在地幔物质上涌现象。其上的玄武岩有着强烈的 DUPAL 特征(即与大多数 MORB 相比, 它们有着很高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 以及²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 比值)。Graham 等^[48]报道了在 77°~88°E 之间的东南印度洋洋中脊之上覆盖的玄武玻璃的 He 同位素分析数据, 结果表明具有高³He/⁴He 比值的地幔柱供应着流向 SEIR 邻近部分的北东向

的浅地幔流, 与软流圈物质流模型的结果一致^[14]。

2.2.4 其他地区的热点-洋中脊相互作用

亚丁湾扩张中心(ASC)-Afar、New Century 热点 亚丁湾是一个年轻的洋盆, 亚丁湾扩张系统向西增生进阿拉伯-非洲大陆, 在 10 Ma 时到达 Afar 热点区域, 扩张系统不断地与热点产生相互作用直到现今^[49](图 6)。Tamaki 指出亚丁湾的扩张系统以倾斜的、超慢扩张系统为特征。New Century 热点处的岩石化学特征表明热点与洋中脊发生了相互作用。测深和 La/Sm 比值的 REE 异常的沿轴剖面展示了热点与洋中脊相互作用的典型模式^[50]。

3 讨论

板块构造学解释不了板内火山作用, 因此地幔柱概念被适时提出^[2]。自从地幔柱概念诞生以来就引起了不少的争论, 利用目前的地球物理手段很难探测地球深部的物质状况。地幔柱存在与否这个命题是一切有关地幔柱假说衍生而来的如地幔柱动力学、热点以及热点-洋脊相互作用等等存在的前提。最近 Anderson 撰文指出, 我们应该用哲学上证伪的思想去探讨地幔柱的存在与否^[4], 并提出应该谨慎使用以高³He/⁴He 比值作为地幔柱的标志。Niu Y L 指出^[51]如果地幔柱不存在, 那么板内火山作用是如何引起的? 板内火山源并非全来自地幔柱, 有些来自地幔柱, 有些则来自深大断裂, 岩浆或火山物质顺着深大断裂涌上来, 因此, 热幔柱能真正解释一些板内火山作用, 但是就此推断板内火山作用都起源于热幔柱是不合理的。一旦这个有关地幔柱的命题被证明是存在的, 那么我们就有必要深入研究这个占地球动力能量接近 15% 的地幔柱动力学的相关理论了。

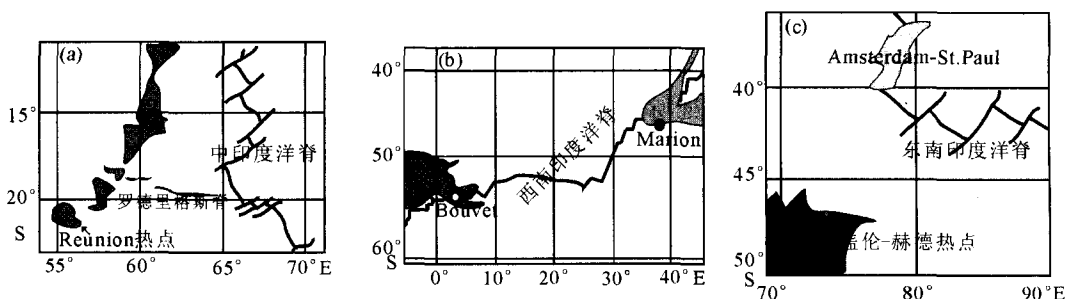


图 5 印度洋中主要的洋脊-热点相互作用位置图(据文献^[25, 47])

(a) 中印度洋洋中脊(CIR)-Réunion 热点; (b) 西南印度洋洋中脊(SWIR)-Marion、Bouvet 热点;

(c) 东南印度洋洋中脊(SEIR)-克尔盖伦-赫德(Kerguelen-Heard)热点

Fig. 5 Locations of main ridge-hotspot interactions in the Indian Ocean

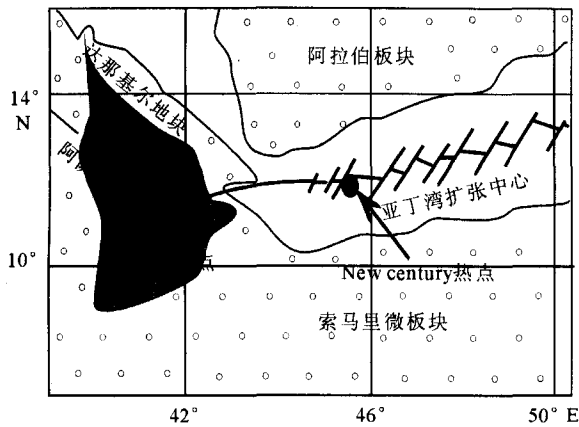


图6 亚丁湾扩张中心-热点相互作用位置(据文献[60-61])
Fig. 6 Locations of ridge-hotspot interactions
in the Gulf of Aden

地震分辨率以及钻探手段(目前最深的钻孔是位于前苏联科拉半岛处,也只有十几千米)的限制,使得室内有关地幔柱及与洋脊相互作用的模拟实验变得相当有意义,当然近来科学家所进行的是相当简单(参数不多)、近乎理想化的实验,如 Freighner 与 Richards^[19] 的实验忽略了地幔柱的热量效应,因为在他们的实验中柱流体的浮力是化学上的而非热量上的。实验只是提供了理解柱-脊相互作用的流体动力学特征的框架,有关从地幔柱到周围地幔和岩石圈的热量转移效应还需要进一步的 3D 数字模型研究。Ribe 等^[21] 和 Kincaid 等^[22-23] 虽然利用实验尝试性地讨论了位于洋脊之下及洋脊旁侧的地幔柱与洋脊的相互作用,但在实验参数的选择上还有待进一步的研究,因为实际的地幔柱的控制因素比实验室中的要复杂得多。Mara 等^[14] 在实验室中模拟了软流圈中的物质流动模型,似乎很好地解释了轴上及离轴热点与洋脊的相互作用,但是,是否只要知道热点-洋脊相互作用的几何学以及绝对的板片速度就可以确定软流圈中物质流动的行为了呢?目前还不得而知。存在的问题如向洋中脊迁移或沿洋脊轴部流动的地幔柱物质流是呈狭窄的管状槽道还是以宽广的膨胀重力流形式运移;沿脊处所观察到的地球化学混合趋势的源区在哪里^[27];在对 2 维模型中岩石圈应力的成功模拟^[28] 的基础上,如何通过增加参数而建立起更实际的 3 维数字模型。同时,目前模拟实验和数字模型主要是针对固定洋脊下地幔柱与洋脊之间的相互作用,那么地幔柱热点与移动脊之间的相互作用的地球动力学行为是怎样的呢?

本文列举的三大洋中的有关热点-洋脊之间的相互作用的典型例子^[26-51],从地球物理学(测深、地

震、重力等)、岩石学(主微量及稀土元素)以及地球化学(He、Sr、Nd、U、Th、Pb 等同位素)等角度证明了热点与洋脊之间存在着相互作用,各个热点的规模、源区深度以及化学性质上的差异决定了热点与洋中脊之间的相互作用都有着它们自身独特的动力学特征。但是在研究过程中也存在着分歧,比如在冰岛热点的源区上,有的学者认为来源于深部地幔甚至是核幔边界^[12],而有的学者则认为来源于上地幔^[34],这就要求我们在选择判别源区的因子方面要做进一步的考虑,同时在地震探测技术的研发以及地震资料的解释方面同样要引起足够的重视。沿着热点-洋脊间火山岛链上的熔岩样品的系统采集和研究是研究热点-洋脊相互作用的最直接的方式,熔岩的地球化学数据多解性有时也会成为讨论洋脊-热点相互作用的难题,因为地幔源区是一个很复杂的系统,有着各种端元的源区信息。洋脊-(地幔柱)热点在多大深度就开始发生相互作用是一个必须考虑的问题,同时岩石圈流变学结构也会影响着地幔柱向洋脊运移的物质流规模和速度。另外,截止目前三大洋之间的典型例子的对比略显不足。可以对比对来自相同源区或地球化学上存在相似性的热点进行对比分析。由于三大洋中洋中脊甚至同一大洋中的洋脊的扩张速率存在差异性,又由于扩张速率是洋脊-热点相互作用的重要控制因素,因此如何对比研究将成为一个相当重要的课题。Mara 等^[14] 的对比研究是一个很好的尝试,但也只限于实验室。

4 结语

基于板内火山(热点)是源于地幔柱这个前提,我们援引了目前国际上有关地幔柱热点-洋脊相互作用的主要文献资料,并对其作了初步的讨论。研究洋脊-地幔柱热点之间的相互作用对于了解地球动力学是一个很好的突破点,热点-洋中脊相互作用是板块构造与地幔柱构造之间的联系纽带;同时它对于了解热点附近洋壳构造的演变以及与热点密切相关的洋中脊处的岩浆热液活动具有重要的意义。对于洋脊-热点相互作用的研究,应该综合卫星遥感技术、地质学、岩石学、地球化学以及地球物理学等方面的资料,进行全面、细致、系统的研究,也可以在实验技术条件允许的情况下进行一些 3 维模拟实验研究。

参考文献 (References)

- [1] Wilson J T. Evidence from oceanic islands suggesting move-

- ment in the Earth[J]. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 1965,258,145-167.
- [2] Morgan W J. Plate motions and deep convection[J]. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 1972,132,7-22.
- [3] Morgan W J. Rodriguez, Darwin, Amsterdam;a second type of hotspot island[J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, 85, 5 355-5 360.
- [4] Anderson D L. The thermal state of the upper mantle; no role for mantle plume[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000,27;3 623-3 626.
- [5] InterRidge Office, Ocean Research Institute, University of Tokyo. A science and structure plan for ridge research (2004-2013)[R]. 2003, Data from: <http://www.intridge.org/>
- [6] Chen Y, Morgan W J. A nonlinear-rheology model for mid-ocean ridge axis topography[J]. *J. Geophys. Res.*, 1990,95; 17 571-17 581.
- [7] 陈永顺. 海底扩张和大洋中脊动力学[M]//地球的结构、演化和动力学. 高等教育出版社, 2002; 283-329. [CHEN Yongshun. Seafloor spreading and dynamics of Mid-Ocean ridges [M]//ZHANG You-xue, YIN An. Structure Evolution and Dynamics of the Earth. Higher Education Press, 2002; 283-329.]
- [8] Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian Islands[J]. *Canadian J. Phys.*, 1963 ,41; 863-870.
- [9] Morgan W J. Convective plumes in the lower mantle[J]. *Nature*, 1971, 230; 42-43.
- [10] Burke K C, Wilson J T. Hot spots on the Earth's surface[J]. *J. Geophys. Res.*, 1976,93; 7 690-7 708.
- [11] Crough S T, Jurdy D M. Subducted lithosphere, hotspots, and the geoid[J]. *EPSL*, 1980, 48; 15-22.
- [12] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth mantle[J]. *EPSL*, 2003, 205; 295-308.
- [13] Bourdon B, Langmuir C H, Zindler A. Ridge-hotspot interaction along the Mid-Atlantic Ridge between 37°30' and 40°30'N; the U-Th disequilibrium evidence[J]. *EPSL*, 1996, 142(1-2); 175-189.
- [14] Mara M Yale, Jason P M. Asthenosphere flow model of hotspot - ridge interactions; a comparison of Iceland and Kerguelen[J]. *EPSL*, 1998, 161; 45-56.
- [15] Zhang Y S, Tanimoto T. Ridges, hotspots and their interaction as observed in seismic velocity maps[J]. *Nature*, 1992, 355; 44-49.
- [16] Ito G, Lin J. Oceanic spreading center-hotspot interactions; constraints from along-isochron bathymetric and gravity anomalies[J]. *Geology*, 1995, 23(7); 657-660.
- [17] Small C. Observations of ridge-hotspot interactions in the Southern Ocean[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100; 17 931-17 946.
- [18] Mittelstaedt E, Ito G. Hotspot-ridge interaction; shaping the geometry of Mid-Ocean Ridges [J]. *AGU, Fall Meeting 2001*, abstract.
- [19] Freighner M A, Mark A R. The fluid dynamics of plume-ridge and plume-plate interactions; An experimental investigation[J]. *EPSL*, 1995a, 129; 171-182.
- [20] Ribe N M, Christensen U R, Thei ßing J. The dynamics of plume-ridge interaction, 1; Ridge-centered plumes [J]. *EPSL*, 1995, 134; 155-168.
- [21] Ito G, Lin J, Gable C W. Dynamics of mantle flow and melting at a ridge-centered hotspot; Iceland and the Mid-Atlantic Ridge[J]. *EPSL*, 1996, 144; 53-74.
- [22] Kincaid C, Ito G, Gable C. Laboratory investigation of the interaction of off-axis mantle plumes and spreading centers [J]. *Nature*, 1995, 376; 758-761.
- [23] Ribe N M. The dynamics of plume-ridge interaction, 2, Off-ridge plumes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101; 16 195-16 204.
- [24] Ito G, Lin J, Gable C W. Interaction of mantle plumes and migrating mid-ocean ridges; Implications for the Galapagos pume-ridge system[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (B7); 15 403-15 417.
- [25] Mittelstaedt E, Ito G. Plume-ridge interaction, lithospheric stresses, and the origin of near-ridge volcanic lineaments[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005, 6(6); 1-20.
- [26] Rhodes J M, Morgan C, Liiias R A. Geochemistry of axial seamount lavas; Magmatic relationship between the Cobb hotspot and the Juan de Fuca ridge [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B8); 12 713-12 733.
- [27] West M, Menke William, Tolstoy M. Focused magma supply at the intersection of the Cobb hotspot and Juan de Fuca ridge [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(14); 1 724-1 727.
- [28] Devey C W, Hekinian R, Ackermund D. The foundation seamount chain; a first survey and sampling [J]. *Marine Geology*, 1997, 137; 191-200.
- [29] Hekinian R, Stoffers P, Ackermund D, et al. Ridge hotspot interaction; the Pacific Antarctic Ridge and the foundation seamounts [J]. *Marine Geology*, 1999, 160; 199-223.
- [30] Maia M, Ackermund D, Dehghanic G A, et al. The Pacific Antarctic Ridge Foundation hotspot interaction; a case study of a ridge approaching a hotspot [J]. *Marine Geology*, 2000, 167; 61-84.
- [31] Canales J P, Ito G, Detrick R S, et al. Crustal thickness along the western Galapagos spreading center and the compensation of the Galapagos hotspot swell [J]. *EPSL*, 2002, 203; 311-327.
- [32] Hoernle K, Werner R, Morgan J P. Existence of complex spatial zonation in the Gal pagos plume [J]. *Geology*, 2000, 28(5); 435-438.
- [33] Verma S P, Schilling J G, Waggoner D G. Neodymium isotopic evidence for Galapagos hotspot-spreading centre system evolution [J]. *Nature*, 1983, 306; 654-657.
- [34] Cushman B, Sinton J, Ito G, et al. Glass compositions, plume-ridge interaction, and hydrous melting along the Gal pagos spreading center, 90.5 °W to 98 °W [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2004, 5; Q089E17, doi: 10.1029/2004GC000709.

- [35] Haase K M. Geochemical constraints on magma sources and mixing processes in Easter Microplate MORB (SE Pacific) : a case study of plume ridge interaction[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182:335-355.
- [36] Richard M A, Guust N, Morgan W J. Plume-driven plumbing and crustal formation in Iceland[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(B8)abstract.
- [37] Schilling J G, Meyer P S, Kingsley R H. Evolution of the Iceland hotspot[J]. *Nature*, 1982, 296:313-320.
- [38] Thirlwall M F. Generation of the Pb isotopic characteristics of the Iceland plume[J]. *J. Geological Soc.*, 1995, 152(6): 991-996.
- [39] Cannat M, Briais A, Deplus C. Mid -Atlantic Ridge - Azores hotspot interactions: along - axis migration of a hotspot- derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago[J]. *EPSL*, 1999, 173:257-269.
- [40] Schilling J G. Azores mantle blob: the rare earth evidence [J]. *EPSL*, 1975, 25:103-105.
- [41] Yu D Y, Fontignie D, Schilling J S. Mantle plume-ridge interactions in the Central North Atlantic--A Nd isotope study of Mid-Atlantic Ridge basalts from 30°N to 50°N[J]. *EPSL*, 1997, 146:259-272.
- [42] Schilling J G, Thompson G, Kingsley R, et al. Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic[J]. *Nature*, 1985, 313:187-191.
- [43] Hanan B B, Kingsley R H, Schilling J G. Pb isotope evidence in the South Atlantic for migrating ridge-hotspot interactions [J]. *Nature*, 1986, 322:137-144.
- [44] Fontignie D, Schilling J G. Mantle heterogeneities beneath the South Atlantic: A Nd-Sr-Pb isotope study along the Mid-Atlantic Ridge (3°S~46°S)[J]. *EPSL*, 1996, 142:209-221.
- [45] Dymont J, Hemond C, Guillou H. Central Indian Ridge and Reunion Hotspot in Rodrigues Area : Another Type of Ridge-Hotspot Interaction? [J]. *AGU, Fall Meeting 2001*, abstract.
- [46] Nauret F, Hemond C, Hofmann A W, et al. Hotspot-ridge interaction between 18°30'S and 20°S along the Central Indian Ridge[J]. *AGU, Fall Meeting 2001*, abstract.
- [47] Georgen J E, Lin J, Dick H J B. Evidence from gravity anomalies for interactions of the Marion and Bouvet hotspots with the Southwest Indian Ridge: effects of transform offsets [J]. *EPSL*, 2001, 187:283-300.
- [48] Graham D W, K Johnson T M, Priebe L D. Hotspot- ridge interaction along the Southeast India Ridge near Amsterdam and St. Paul islands: helium isotope evidence [J]. *EPSL*, 1999, 167:297-310.
- [49] Nakanishi M, Tamaki K, Fujimoto H, et al. Topographic expression of the Gulf of Aden spreading system and its tectonics; hotspots-ridge interaction in Gulf of Aden[J]. *AGU, Fall Meeting 2001*, abstract.
- [50] Tamaki K, Fujimoto H, Orihashi Y, et al. Hotspot-ridge interaction in the Gulf of Aden, East Africa[J]. *AGU, Fall Meeting 2001*, abstract.
- [51] Niu Y L. On the great plume debate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(15):1 537-1 540.

MANTLE PLUME(HOTSPOT)-RIDGE INTERACTION

YAN Quan-shu^{1,2,3}, SHI Xue-fa²

(1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, SOA, Qingdao 266061, China;

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hotspot is a window to understand mantle plume hypothesis and dynamics of mantle plume, and the area where ridge interactions with hotspot is the best place to directly find out relationship between plate tectonics and mantle plume. Based on affirming mantle plume hypothesis, the authors introduce several 2D or 3D simulation experiments about ridge-plume (hotspot) interaction and some examples of hotspot-ridge interactions existing in the three oceans. It is further pointed out that simulation experiments combined with geology, petrology, geochemistry and geophysics (especially for high resolution seismic technique) in studying mantle(hotspot)-ridge interaction will play an important role in such reseaches as plume-ridge interactions.

Key words: mantle plume; mid-oceanic-ridge; hotspot; plume-ridge interaction