

doi:10.3799/dqkx.2014.157

菲律宾海岩石圈磁异常特征

胡正旺^{1,2}, 陈超^{1,2*}, 王秋革¹, 杜劲松¹, 张双喜¹, 王林松¹, 王浩然¹, 李端¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 利用 NGDC720 地磁模型提供的磁异常数据, 分析了菲律宾海板块磁异常特征, 进而对磁异常进行多尺度分解, 给出了研究区岩石圈深部和浅部磁异常。结合热流分布特点和磁异常信息, 进一步分析了研究区引起磁异常成因。菲律宾海板块区域的磁异常既反映了该区域岩石圈浅部的构造特征, 也隐含深部构造信息。在西菲律宾海盆以及大东脊构造区, 浅部构造磁异常信息较好地继承了深部构造特征, 反映这些区域岩石圈的整体性特征。四国海盆与帕里西维拉海盆浅部磁异常信息显示了与近代(约 10 Ma)扩张轴一致的特征, 且磁异常与海底构造走向不一致; 而深部异常显示的帕里西维拉海盆磁异常走向与西菲律宾海盆一致的信息, 可能指示帕里西维拉海盆岩石圈曾与西菲律宾海盆有过类似的演化史。

关键词: 菲律宾海板块; 岩石圈磁异常; 大地构造; 地球物理。

中图分类号: P318 **文章编号:** 1000-2383(2014)11-1635-09 **收稿日期:** 2014-05-05

Characteristics of Magnetic Anomalies in the Philippine Sea Plate Lithosphere

Hu Zhengwang^{1,2}, Chen Chao^{1,2*}, Wang Qiuge¹, Du Jinsong¹, Zhang Shuangxi¹,
Wang Linsong¹, Wang Haoran¹, Li Duan¹

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Hubei Subsurface Multi-Scale Imaging Lab (SMIB), China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper, we analyze characteristics of magnetic anomalies calculated from NGDC720 geomagnetic model in the Philippine Sea plate and then decompose magnetic anomalies into the shallow and the deep components. Further, we interpret the causes of magnetic anomalies in the study area. Magnetic anomalies in the Philippine Sea plate not only show tectonic features in the shallow part of the lithosphere, also imply the deep structure information. In the Philippine basin and Daito tectonic zone, shallow magnetic anomalies inherit deep structural features better and magnetic characteristics in these regions reflect the integrity of the lithosphere. The shallow magnetic anomalies in Shikoku and Parece Vela basin show the characteristics corresponded with spreading axis during about 10 Ma and magnetic anomaly trends do not agree with those of the seafloor structures. In the Parece Vela basin, the deep anomalies show a consistency with those in Philippine basin, which indicates that Parece Vela basin might have undergone a similar evolution of the Philippine basin.

Key words: the Philippine Sea plate; lithospheric magnetic anomaly; tectonics; geophysics.

菲律宾海板块又称“菲律宾板块”, 位于西太平洋边缘, 东海、南海与西太平洋之间, 被岛弧和海沟包围, 西北侧与欧亚大陆板块连接, 介于 120°~150°E 和 0°~37°N 之间, 其形状略呈菱形(图 1)。东亚大陆边缘的俯冲带是欧亚板块和菲律宾板块的相互作用带。板块构造边界自南向北分别是马尼拉俯冲带和琉球海沟俯冲带。板块间的俯冲增生、碰撞和岩石圈动力学控制着俯冲带的构造演化和变形特征。菲律宾板块西缘与欧亚板块的构造关系十分复杂, 吕宋岛以西的马尼拉海沟表现为欧亚板块向菲律宾板块俯冲增生, 在其北端则发生弧陆碰撞, 菲律宾列岛以东的菲律宾海沟表现为菲律宾板块向西俯

基金项目: 科技部国际科技合作专项(No. 2010DFA24580); 国家自然科学基金项目(Nos. 40730317, 40774060); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2012069085)。
作者简介: 胡正旺(1979—), 男, 讲师, 主要从事海洋重磁数据处理与解释等研究。E-mail: hzw@cug.edu.cn
* 通讯作者: 陈超, E-mail: chenchao@cug.edu.cn

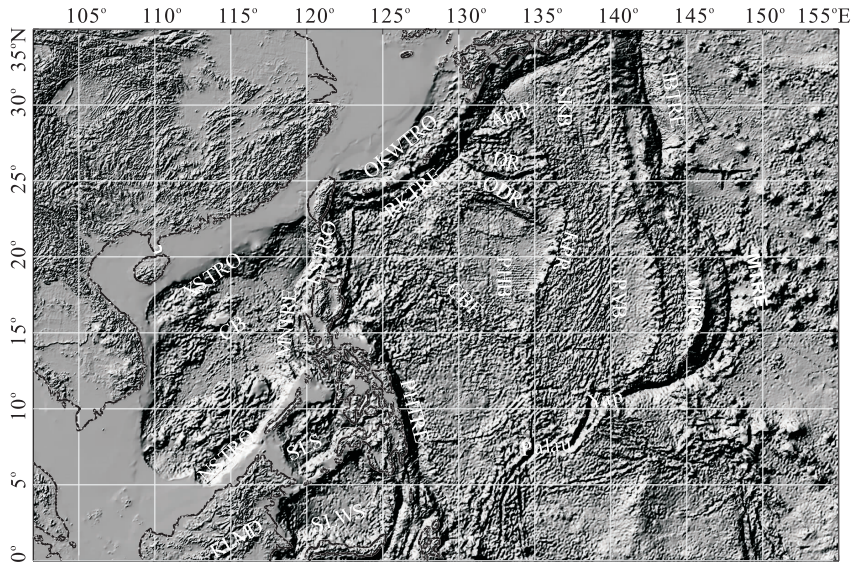


图 1 研究区地形及主要构造示意(数据来源:ETOPO1)

Fig. 1 The sketch map of the topography and the main structure in the study area

构造及地名:IBTRE. 伊豆一小笠原海沟;MTRE. 马里亚纳海沟;MTRO. 马里亚纳海槽;PVB. 帕里西维拉海盆;SKB. 四国海盆;KPR. 九州—帕劳海岭;Yap. 雅浦;Palau. 帕劳;CBF. 菲律宾海中央断裂带;PhB. 西菲律宾海盆;ODR. 冲大东海岭;DR. 大东海岭;AmP. 奄美台地;SLS. 苏禄海;PHTRE. 菲律宾海沟;LSTRO. 吕宋海槽;MNTRE. 马尼拉海沟;XSTRO. 西沙海槽;OKWTRO. 冲绳海槽;NSTRO. 南沙海槽;CB. 南海中央海盆;KLMD. 加里曼丹岛;RKTRE. 琉球海沟;SLWS. 苏拉威西海

冲;而在西北边界的琉球海沟则是菲律宾板块向欧亚板块之下俯冲. 研究菲律宾板块西部边缘及其内部构造单元的岩石圈结构特征,不仅有助于揭示板块俯冲对弧后地区的影响,剖析边缘海盆的张裂和扩张过程及地球动力学机制,同时也是探究南海构造演化背景的重要窗口.

关于菲律宾海板块的形成与演化模式,几十年来一直有不同的看法,Karig(1971)、Hilde and Lee (1984)对其演化模式进行了解析. Hall(1997)和 Hall *et al.* (1995a, 1995b)在前人基础上结合周边区域古地磁、海底取样等新证据,系统地给出了 50 Ma 至今的演化模式. 吴时国和刘文灿(2004)、臧绍先和宁杰远(2002)对这些模式提出了自己评述. 尽管许多细节还需要甄别,但随着调查和研究的深入,尤其是深海钻探计划(Deep Sea Drilling Project, DSDP)及大洋钻探计划(Ocean Drilling Project, ODP)所取得的证据,地学界对其 50 Ma 以来的演化历程已趋于共识. Hall(2012)在对晚侏罗以来印度尼西亚—印度洋区域板块构造历史重建的论述中,对菲律宾板块西部边缘及其邻近的构造单元演化作了进一步论证.

大洋岩石圈的磁性结构与大陆不同,随着远离洋中脊或随着洋壳年龄增大,大洋岩石圈的磁性层厚度逐渐增大(Stein and Stein, 1992; Fowler,

2005). 通常为 3 层结构,即沉积层、玄武岩层和辉长质及橄榄岩类岩层. 由于沉积层磁性较弱可以忽略,第 2 层磁性具有一定的强度但极不均匀(Tivery, 1996). 第 3 层底部可能存在橄榄岩(Janecky and Seyfried, 1986). 而下地壳岩石可能由于蛇纹石化作用形成磁铁矿,并被认为是海洋长波长磁异常的重要场源部分(Arkani-Hamed, 1988). 由于菲律宾海板块区域广泛分布板块边界、扩张脊和岛弧,其岩石圈磁性特征独特,因此研究该区域岩石圈磁性特征,对认识现今岩石圈结构及其演化具有重要意义.

本文利用美国地球物理数据中心(National Geophysical Data Centre, NGDC)提供的磁异常数据,分析了菲律宾及周边海域的磁异常与地质构造特征,并通过多尺度分解方法,对研究区岩石圈不同深度尺度磁性特征进行了分析. 在此基础上,利用洋壳热流模型 IHFC2011 数据,分析了热流分布特点及其与磁异常成因的关系. 因此,本文将给出岩石圈的整体磁性特征及其不同尺度磁性特征的分析结果,可为菲律宾海板块的形成与演化历史提供重要约束.

1 菲律宾海磁异常特征

1.1 数据来源

NGDC720 模型是最新的高精度地壳磁场模型

之一,是由卫星磁测、航空磁测、海洋磁测和地面磁测数据联合解算得到的地磁模型,其波长覆盖范围 28~2 500 km,相比以往的地磁模型,如 CM4 和 MF6 两种磁异常模型,NGDC720 具有更高的空间分辨率.因此,应用该模型解算出的地磁异常各个分量,不仅可以用于全球岩石圈磁场研究,也可应用于区域地质构造的特征及组构分析(Maus *et al.*, 2008, 2009; Maus, 2010).本文所采用的数据是应用 NGDC720 模型计算出的近海平面(半径 6 371.2 km)的地磁总场异常 ΔT 数据.

1.2 主要大地构造单元

菲律宾海板块边界主要由以下及部分组成:西北部为琉球海沟,西部为菲律宾海沟,东部为伊豆一小笠原海沟和马里亚纳海沟,南部则为雅浦海沟和帕劳海沟.西北部琉球海沟和菲律宾海沟被认为是菲律宾海板块向欧亚板块俯冲地带,即板块消减带;而琉球海沟和菲律宾海沟之间一个小的盆地即花东盆地,被加瓜海脊阻隔而成;菲律宾海沟在贝哈姆隆起附近被分为 2 段,其中北段位于贝哈姆隆起北面,在贝哈姆隆起西部的部位,地震活动较为频繁,而菲律宾海沟南段为俯冲作用较强部位,为菲律宾板块向西俯冲的主要场所;菲律宾板块与欧亚板块在台湾附近进行碰撞并沿着西北部的琉球海沟汇聚俯冲.

研究区主要大地构造单元为:西菲律宾海盆及海盆北部的大东脊海区,西部主要有琉球海沟及菲律宾海沟,东部的四国盆地和帕里西维拉海盆,周边有岛弧和海岭.西部的菲律宾海海盆区,主要有乌尔达内塔隆起、贝哈姆隆起及中央断裂带组成;海盆中央断裂为菲律宾海盆的海底扩张中心,走向为北西向;而贝哈姆隆起位于海盆的西南面,将菲律宾海沟分为南北两段;位于海盆北部的大东脊海构造区主要组成为冲大东脊、大东脊和奄美隆起(台地),其中冲大东脊和大东脊走向亦为近北西向,根据前人地质与地球物理证据研究(陶国保,1987),大东脊海区被解释为残余弧和大陆碎块,主要是由于该地区地壳性质与岛弧地壳类似.菲律宾海盆东部海盆为四国海盆及帕里西维拉海盆,其中四国海盆走向为北北西向,在海盆中央有一条海山链,即纪南海山链,海盆南部地形崎岖,还有多个海槽和海脊,地形起伏较大,而北部地形平缓;而南部的帕里西维拉海盆中央有一条中央裂谷系,即帕里西维拉裂谷,被认为是一条扩张中心(吴时国等,2013),海盆西半部地形崎岖,东部平缓.

1.3 构造单元磁异常特征

1.3.1 研究区磁异常特征 从图 2 可以看出,磁异常 ΔT 在板块中部、西部和北部磁异常较强,东部和南部磁异常较弱,不同构造单元内特征各异.研究区

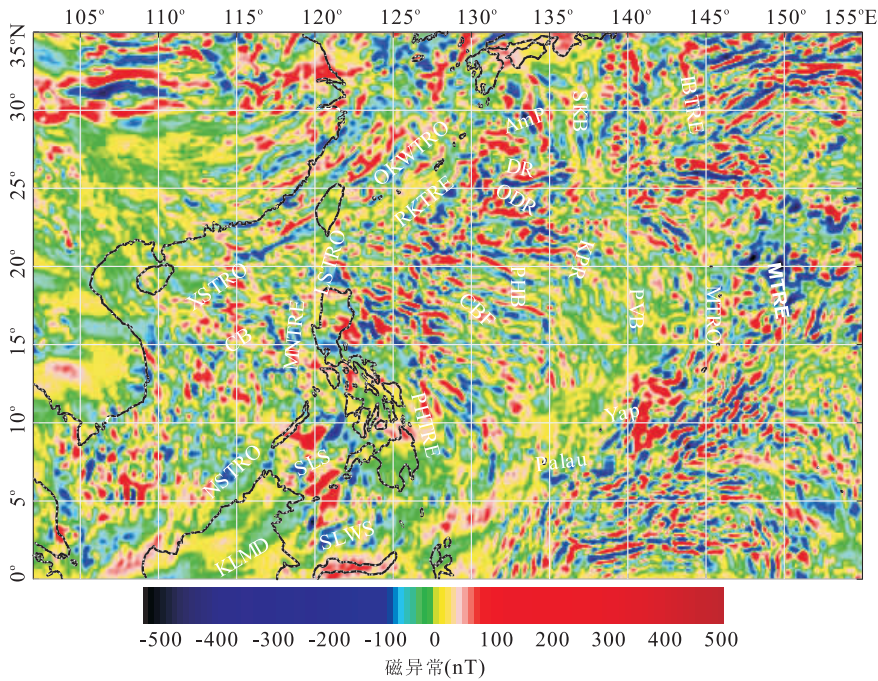


图 2 菲律宾海及周边区域总场磁异常(数据来源:由 NGDC720 模型计算而来)
Fig. 2 The magnetic anomaly map of Philippine Sea and adjacent area

域中海区磁异常特征具有明显的异常条带特征,且分带性十分显著,在西菲律宾海,异常条带特征极为明显。

根据菲律宾海区的构造单元磁异常特征,可以将其分为以下几个区域:

(1)西菲律宾海盆区:区内磁异常较强,幅值在 300 nT 以上,局部达到 500 nT,主要呈现明显的异常条带特征,走向近 NWW 向,其成因可推断为海盆中央断裂的海底扩张的洋壳岩石所致, Hilde and Lee(1984)据此提出了菲律宾海盆的演化模式,此外,该海盆区西南部的贝哈姆隆起西侧,磁性相对较弱,幅值约在 100 nT 以内,可能是基性岩浆活动减弱的显示,在这隆起上的 DSDP292 号钻孔结果对地层岩性验证这一点(陶国保,1987)。

(2)北部大东脊区:区内奄美隆起地区具有与西菲律宾海盆走向近似相同的一组走向 NWW 的磁异常条带;大东脊以及冲大东脊 2 个区段磁异常走向复杂,除了有与奄美隆起区域一致的磁异常条带外,另有一组近 NE 向的磁异常条带,可能是上部地壳的一些断裂构造引起的异常。该地区显示磁性较强,幅值达到 300~500 nT, Isse *et al.* (2009)认为它是较厚的古老岩石圈的残余部分。

(3)东部四国海盆及帕里西维拉海盆区:区内整体磁异常不强,可分北面四国海盆和南部帕里西维拉海盆区,南部帕里西维拉海盆地区稍弱,四国海盆磁异常稍强且具有明显的条带状,其东北角区域异常条带走向为 NW 向,大部分区域走向为 NNW 向,与西面的大东脊区磁异常条带几近正交;帕里西维拉海盆磁异常较弱,平均幅值为 50 nT 左右,与北部四国海盆显著不同的是异常形态宽缓,但具有近 NNW 向的分带现象,而局部异常多呈凌乱形状。

(4)伊豆一小笠原—马里亚纳岛弧区:四国—帕里西维拉海盆以东区域的磁异常明显受到构造影响,异常凌乱且幅值变化较大;西部九州—帕劳海岭带磁异常北强南弱,但具有明显的近 EW 向条带;且整个伊豆一小笠原—马里亚纳岛弧带都具有类似的特征,磁异常条带与东部太平洋板块的条带有衔接的迹象,并呈现出与岛弧走向垂直的特点;区内仅马里亚纳海槽区的磁异常条带与两侧海岭走向平行。

(5)琉球—台湾—菲律宾弧沟区:琉球群岛和菲律宾岛磁异常分布形态与岛弧的走向相似,异常幅值在菲律宾岛弧处较大,其他区带异常较弱;琉球群岛磁异常延伸方向大致呈东西向,花东盆地内磁异

常走向为 NW 向,与菲律宾海磁异常条带走向基本一致,但在边缘即加瓜海脊附近转为 NE 向,这可能由于加瓜海脊向北走滑冲入琉球海沟,导致花东盆地形成错动的断层,以至于磁异常条带与海盆内磁异常条带走向不一致。

1.3.2 岩石圈磁性结构 岩石圈磁异常有多种成因,岩石圈深部磁性可能与浅部洋壳磁性特征不同。为了进一步了解菲律宾海及周边区域磁异常成因,本文对磁异常进行了多尺度分解。所用方法为经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD), EMD 是 Huang *et al.* (1998)提出的一种分析非线性、非平稳信号并具有自适应性的方法,它从原始信号中分解出有限个不同的固有模态函数,每个模态函数对应着不同尺度的信号。论文中多尺度分解选定分解终止阈值为 0.1。

分解后的磁异常信号分成 2 个部分,分别为短波长分量和中—长波长分量,如图 3 和图 4 所示。

根据磁异常及 EMD 分解后磁异常频谱分析,对场源深度进行估计,可以认为短波长异常图对应浅部岩石圈,而中场波长异常图对应深部岩石圈。

图 3 给出了研究区浅部磁异常,主要反映了岩石圈上部洋壳的磁性结构特点。西菲律宾盆中—北部的浅部磁异常走向为 NWW 向且较为规律,显示了西菲律宾海海盆以中央断裂为海底扩张轴的特性,表明了这部分稳定古洋壳的特点。菲律宾海盆南部区域浅部磁异常分布有 2 组走向,其北区主要为 NW 向,与海盆中央扩张轴走向有差异,南区(帕劳海盆)为近南北(NS)向,有被 NW 向异常截断的迹象,即由 NW 转向 NS。北部的大东脊海区浅部磁异常仍然显示 2 组条带(NW 和 NE 向),反映大东脊海区在古洋壳的基础上后期又经历了构造运动形成北东向断裂的特点,而奄美隆起却没有受到这些运动的影响,依然呈现较为规律的 NNE 向异常条带特征。东部四国—帕里西维拉海盆浅部磁异常则呈现出较为规则且与海底扩张轴走向一致的近南北向条带,但条带不连续,帕里西维拉海盆西部浅部磁异常主要为 NNW 向。根据 Müller *et al.* (2008)全球洋壳年龄分布数据,如图 5 所示。四国—帕里西维拉海盆洋壳年龄为 10~30 Ma,浅部磁异常条带显然是年轻洋壳的反映,而菲律宾海盆为较古老的洋壳,年龄在 40~100 Ma 之间,浅部磁异常特征差异反映了二者的新老洋壳磁性的差异。板块西部边界的菲律宾海沟和琉球海沟区域浅部磁异常走向相对凌乱,东部边界马里亚纳弧盆系区域,除马里亚纳海槽

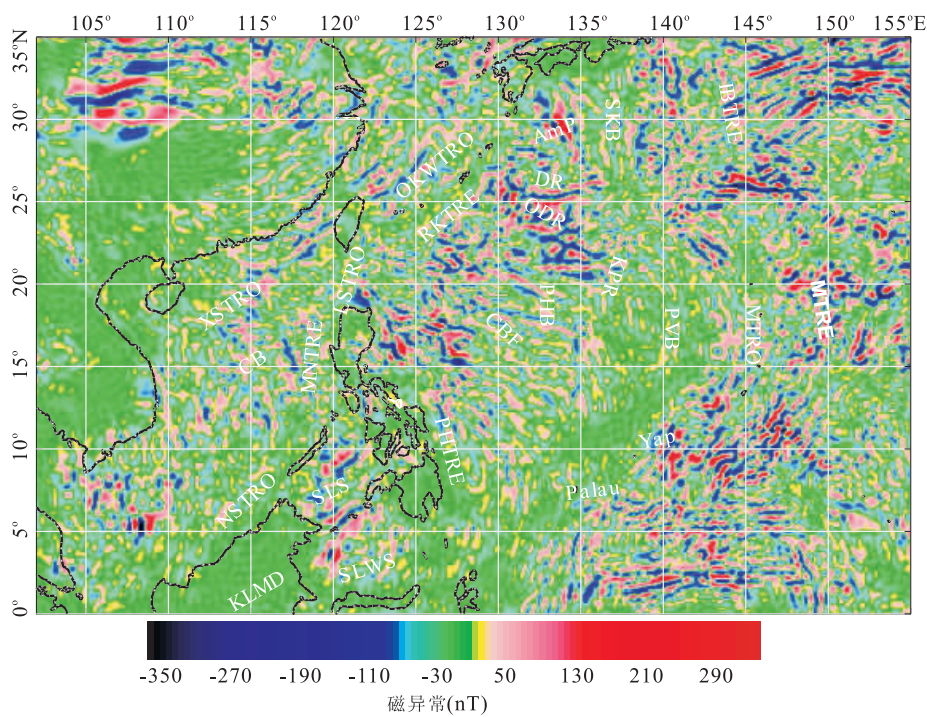


图 3 菲律宾海及周边区域浅部磁异常(短波长)(数据来源:由 NGDC720 模型计算及分离而来)
Fig. 3 The shallow magnetic anomaly map of Philippine Sea and adjacent area

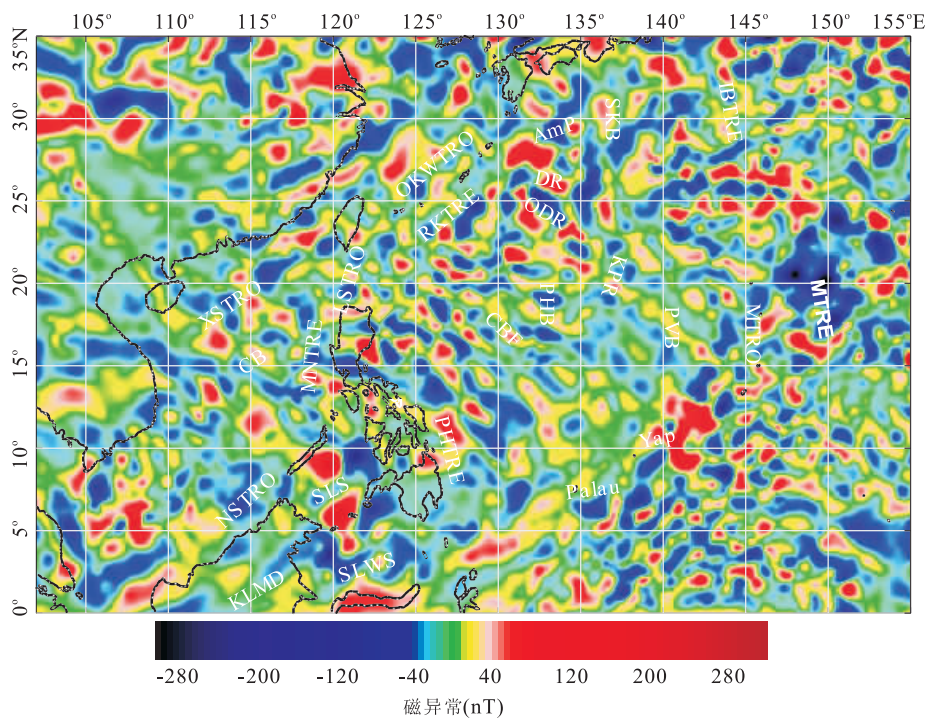


图 4 菲律宾海及周边区域深部磁异常(长波长)(数据来源:由 NGDC720 模型计算及分离而来)
Fig. 4 The deep magnetic anomaly map of Philippine Sea and adjacent area

磁异常与海沟走向一致以外,其他地带异常走向相对比较复杂。

图 4 给出的磁异常可视为深部异常,反映了岩石圈下部磁性特征。从整个板块区域来看,一个明显

的特征就是磁异常呈 NW-NWW 走向,尤其是帕里西维拉海盆及雅浦一带,与浅部异常走向有显著差异。四国海盆深部磁异常具有 NEE 向特征,而九州—帕劳海岭北段则为断续的近 NS 向异常。菲律

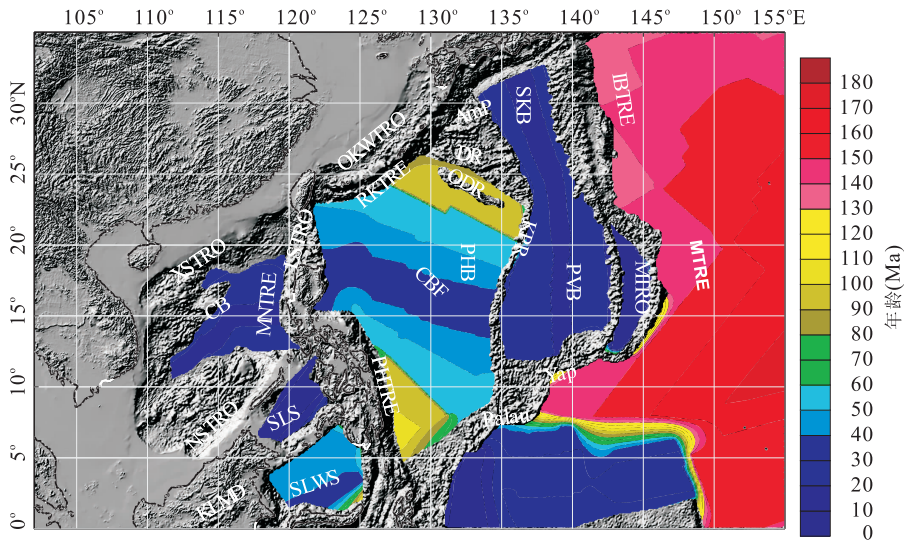


图 5 菲律宾海及其周边海洋岩石圈年龄(据 Müller *et al.* , 2008)
Fig. 5 Age of oceanic lithosphere

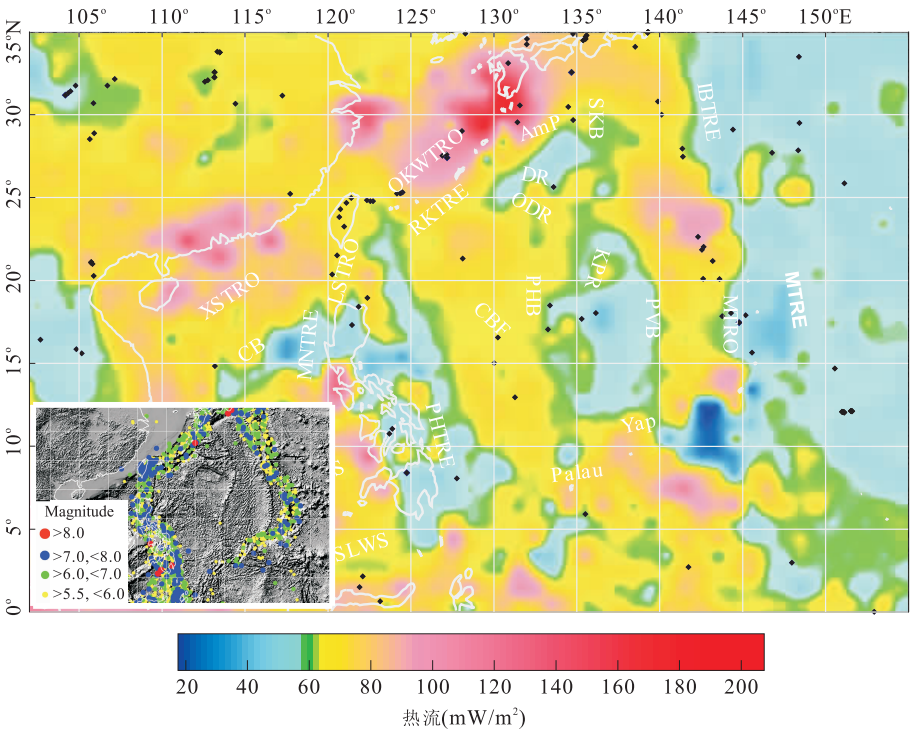


图 6 菲律宾区域热流分布(热流数据来源: IHFC2011; 震中数据来源: USGS)
Fig. 6 The heat flow distribution of the Philippine Sea

◆ 实测热流点

宾海盆深部磁异常与浅部异常的特征一致, 可以认为基本继承了浅部异常的特征.

2 菲律宾海热流分布特征

大地热流是表示地球内部热状态的一项物理量, 作为研究区域地温场的基本参数, 它反映的是区

域地热状态和地质构造背景, 尤其对研究区地质构造的发展、深部地壳结构特征具有重要意义. 同时, 岩石圈的热状态又能够影响到其相应的磁异常特征分布.

基于热流强烈依靠其周边动力学环境的前提, 人们可以将过去全球地质和地球物理数据进行整合, 用以更好地获得现今的热参数设置. 这个思想可

以通过 2 种经验方法进行实现, Goutorbe *et al.* (2011) 利用这 2 种方法进行了全球的热流数据建模, 本文使用的是其对比分析后较好的一个方法所得的全球热流模型, 即基于相似法得到的热流模型 ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 模型), 绘制了热流分布图, 如图 6 所示。

同时, 根据 IHFC2011 数据库提供的模型所用实测热流数据点绘制了本区域的热流实测散点图, 如图 6 中蓝色方点所示。结合研究区热流分布特点, 可以进一步认识该区域的岩石圈磁性分布特点。

热流的分布大致体现了洋壳的活动性。在板块边界海沟热流值较小, 如西部的菲律宾海沟、马尼拉海沟, 东部的伊豆—小笠原海沟及马里亚纳海沟热流值较低, 低于 40 mW/m^2 ; 仅西北部边界的琉球海沟热流略高, 但也基本为 60 mW/m^2 左右。区内海盆中扩张脊并没有显示出高热流值, 反映这些扩张脊活动性并不强。西菲律宾海盆区域, 热流值大约 60 mW/m^2 , 局部略高, 而磁异常呈高幅值条带且走向规则, 显示出古老洋盆的特征。大东脊海区热流值低于海盆的正常范围, 但磁异常幅值较高。四国—帕里西维拉海盆东部热流较高而西部热流低, 反映该区带东西构造活动性的差异, 距俯冲带越近活动性越强。

研究区内高热流值并没有明显的区带性, 仅在冲绳海槽、伊豆—小笠原海沟与马里亚纳海沟交汇处, 帕里西维拉海槽北段以及马尼拉海沟那端等几个区域, 具有较高的热流值, 表明这些区域火山及岩浆活动频繁, 而且强地震频繁发生, 表明是俯冲带压应变很强的区域。

3 讨论与结论

高热流往往反映洋壳活动性较强, 并伴有频繁地震、火山活动, 来自深部的基性岩浆活动会使是磁性物质聚集在洋壳表层, 通常这些地带具有较强的磁异常, 如琉球—冲绳海槽、马里亚纳海槽的高热流。另一方面, 洋壳温度升高会导致磁性层厚度减薄, 有可能使磁异常强度变小, 而一些古老的洋盆, 虽然已经停止了扩张且逐渐变冷, 但扩张期洋壳已累积形成的大量的基性岩浆岩, 往往也会引起幅值较大磁异常, 如西菲律宾海盆。

菲律宾海板块区域的磁异常既反映了该区域岩石圈浅部的构造特征, 也隐含着深部岩石圈构造信息。西菲律宾海盆中一北部的浅部磁异常条带与深部异常走向一致, 反映了该区域洋壳 40 Ma 以来可

扩张历程始终以中央断裂带的轴线, 其岩石圈磁性结构的完整性是很好的佐证。菲律宾盆南部区帕劳海盆也就有这种现象, 这是稳定古洋壳的特征。

四国—帕里西维拉海盆东部是伊豆—小笠原—马里亚纳弧盆系统, 四国—帕里西维拉海盆被认为形成于始新世—中新世, 属于典型的弧后扩张盆地, 已停止扩张 (Okino *et al.*, 1998, 2009)。

四国海盆扩张脊总体走向为 NNW, 邻近扩张脊的海底结构走向为 NW, 远离扩张脊的海底结构表现为一列走向为 NNW 或 NW 的海脊和海槽。从海底地形数据中可以识别出洋脊附近的“S”形断裂带。这些特征与海盆浅部磁异常特征基本对应。然而深部磁异常却具有 NEE 向特征, 与其北面的俯冲带方向一致, 这可能是海底扩张结束后发生的火山活动以及岩石圈俯冲的产物 (Okino *et al.*, 1998; 吴时国等, 2013)。

帕里西维拉海盆的扩张海脊, 也称帕里西维拉裂谷, 该裂谷在海底地形和重力异常上表现为高度分段性以及重力低。这可能是由于扩张脊从初始的 NS 走向, 随后发生 NW 向的旋转, 导致洋中脊的转向 (Okino *et al.*, 1998, 2009)。由帕里西维拉裂谷向东西两侧发育一系列的“S”形断裂带, 走向为 NE, 这些“S”形的断裂带随着离洋脊距离的增加逐渐变化到 EW 走向。帕里西维拉海盆浅部磁异常较好地描述了上述特征, 且帕里西维拉海盆西部 NS 向的磁异常条带可追踪与四国海盆西部的异常条带相连, 由于西部九州—帕劳海岭的阻隔, 西部磁条带并不完整。吴时国等 (2013) 认为这一现象表明两者可能在过去的某段时间是作为一个单元演化的, 而 2 个海盆东部并没有作为一个单元演化。帕里西维拉海盆深部磁异常呈 NWW 走向, 异常宽缓且幅值不大, 宽缓磁异常可延伸至其西部, 与菲律宾海盆磁异常条带衔接, 这种现象或许表示帕里西维拉海盆与西菲律宾海盆深部岩石圈磁性结构类似。若存在这种情况, 笔者就有理由认为, 大约 40 Ma 以前, 帕里西维拉海盆尚未形成时期, 其下部岩石圈曾经与菲律宾海盆一同方式扩张, 其扩张方向与菲律宾海盆一致。扩张活动大约在四国海盆的开始扩张之前 (晚渐新世约 30 Ma) 停止, 之后约 20 Ma 随四国海盆一起开始扩张, 形成现在的构造格局。

综上所述, 西菲律宾海盆区域高热流区域主要集中在板块俯冲带附近, 具有较低的磁异常, 频繁火山活动和地震印证这些区域洋壳活动性。西菲律宾海盆磁异常反映了其岩石圈磁性结构的完整性, 说

明在板块的演化过程中,西菲律宾海盆岩石圈保持的相对完好,后期改正影响有限。四国一帕里西维拉海盆西部浅部磁异常表明两者可能在某段时间是作为一个单元演化,而深部异常显示的帕里西维拉海盆磁异常走向与菲律宾海盆的一致,可能指示帕里西维拉海盆岩石圈曾与菲律宾海盆有过类似的演化史。

致谢:所用的岩石圈磁异常模型和海底地形由美国国家地球物理数据中心 National Geophysical Data Center (NGDC)提供,热流数据由 the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)提供,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Arkani-Hamed, J., 1988. Remanent Magnetization of the Oceanic Upper Mantle. *Geophys. Res. Lett.*, 15(1): 48—51. doi:10.1029/GL015i001p00048
- Fowler, C. M. R., 2005. *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press, New York.
- Goutorbe, B., Poort, J., Lucazeau, F., et al., 2011. Global Heat Flow Trends Resolved from Multiple Geological and Geophysical Proxies. *Geophys. J. Int.*, 187(3): 1405—1419. doi:10.1111/j.1365—246X.2011.05228.x
- Hall, R., 1997. Cenozoic Plate Tectonic Reconstructions of SE Asia, in *Petroleum Geology of Southeast Asia* (Edited by Matthews and Murphy). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 126: 11—23.
- Hall, R., 2012. Late Jurassic-cenozoic Reconstructions of the Indonesian Region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570—571: 1—41.
- Hall, R., Ali, J. R., Anderson, C. D., et al., 1995a. Origin and Motion history of the Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, 251(1—4): 229—250. doi:10.1016/0040—1951(95)00038—0
- Hall, R., Ali, J. R., Anderson, C. D., 1995b. Cenozoic Motion of the Philippine Sea Plate; Paleomagnetic Evidence from Eastern Indonesia. *Tectonics*, 14(5): 1117—1132. doi:10.1029/95TC01694
- Hilde, T. W. C., Lee, C. S., 1984. Origin and Evolution of the West Philippine Basin: A New Interpretation. *Tectonophysics*, 102(1—4): 85—104. doi:10.1016/0040—1951(84)900009—X
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., et al., 1998. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 454(1971): 903—995. doi:10.1098/rspa.1998.0193
- Isse, T., Shiobara, H., Tamura, Y., et al., 2009. Seismic Structure of the Upper Mantle beneath the Philippine Sea from Seafloor and Land Observation: Implications for Mantle Convection and Magma Genesis in the Izu-Bonin-Mariana Subduction Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1—2): 107—119. doi:10.1016/j.epsl.2008.11.032
- Janecky, D. R., Seyfried Jr, W. E., 1986. Hydrothermal Serpentinization of Peridotite within the Oceanic Crust: Experimental Investigations of Mineralogy and Major Elements Chemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50(7): 1357—1378. doi:10.1016/0016—7037(86)90311—X
- Karig, D. E., 1971. Origin and Development of Marginal Basins in the Western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 76(11): 2542—2561. doi:10.1029/JB076i011P02542
- Maus, S., 2010. An Ellipsoidal Harmonic Representation of Earth's Lithospheric Magnetic Field to Degree and Order 720. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(6): Q06015. doi:10.1029/2010GC003026
- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., et al., 2009. EMAG2: A 2-Arc Min Resolution Earth Magnetic Anomaly Grid Compiled from Satellite, Airborne, and Marine Magnetic Measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(8): Q08005. doi:10.1029/2009GC002471
- Maus, S., Yin, F., Luhr, H., et al., 2008. Resolution of Direction of Oceanic Magnetic Lineations by the Sixth Generation Lithospheric Magnetic Field Model from CHAMP Satellite Magnetic Measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(7): 7021. doi:10.1029/2008GC001949
- Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., et al., 2008. Age, Spreading Rates, and Spreading Asymmetry of the World's Ocean Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): 18—36. doi:10.1029/2007GC001743
- Okino, K., Ohara, Y., Fujiwara, T., et al., 2009. Tectonics of the Southern Tip of the Parece Vela Basin, Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, 466(3—4): 213—228. doi:10.1016/j.tecto.2007.11.017
- Okino, K., Kasuga, S., Ohara, Y., 1998. A New Scenario of the Parece Vela Basin Genesis. *Marine Geophysical Researches*, 20(1): 21—40.
- Stein, C. A., Stein, S., 1992. A Model for the Global Variation in Oceanic Depth and Heat Flow with Lithospheric Age. *Nature*, 359: 123—129. doi:10.1038/359123a0

Tao, G. B. , 1987. The Philippine Sea Plate Tectonic Research. *Marine Oil*, 1(1): 1—22 (in Chinese with English abstract). doi:10. 1029/96JB01307

Tivery, M. A. , 1996. Vertical Magnetic Structure of Ocean Crust Determined from Near-Bottom Magnetic Field Measurements. *J. Geophys. Res.* , 101 (B9): 20275 — 20296.

Wu, S. G. , Fan, J. K. , Dong, D. D. , 2013. Discussion on the Tectonic Division of the Philippine Sea Plate. *Chinese Journal of Geology*, 48(3): 677—692 (in Chinese with English abstract).

Wu, S. G. , Liu, W. C. , 2004. Tectonics of Subduction Zone in the East Asia Continental Margin. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 15 — 21 (in Chinese with English abstract).

Zang, S. X. , Ning, J. Y. , 2002. Interaction Between Philip-

pines Sea Plate (pH) and Eurasian Eu Plate and Its Influence on the Movemet Eastern Asia. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2): 188—197 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陶国保, 1987. 菲律宾海板块构造研究述评. 海洋石油, 1(1): 1—22.

吴时国, 范建柯, 董冬冬, 2013. 论菲律宾海板块大地构造分区. 地质科学, 48(3): 677—692.

吴时国, 刘文灿, 2004. 东亚大陆边缘的俯冲带构造. 地质前缘, 11(3): 15—21.

臧绍先, 宁杰远, 2002. 菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用及其对东亚构造运动的影响. 地球物理学报, 45(2): 188—197.

(上接 1598 页)

刘波, 罗先启, 张振华, 2007. 三峡库区千将坪滑坡模型试验研究. 三峡大学学报(自然科学版), 29(2): 124—128.

刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等, 2011. 采用不同滑面材料的滑坡模型试验研究. 灾害学, 26(1): 10—13, 35.

罗先启, 程圣国, 牛恩宽, 2009. 滑坡物理模型试验畸变修正及应用研究. 岩石力学与工程学报, 28(增刊 1): 3082—3088.

罗先启, 刘德富, 吴剑, 等, 2005. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 24(14): 2476—2483.

石崇喜, 黄英, 甄祯, 等, 2011. 滑坡模型试验研究现状. 云南水利发电, 27(5): 7—10.

吴剑, 张振华, 王幸林, 等, 2012. 边坡物理模型倾斜加载方式的研究. 岩土力学, 33(3): 713—718.

肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等, 2010. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 29(5): 1023—1030.

肖先煊, 夏克勤, 许模, 等, 2013. 三峡库区某滑坡稳定性模型试验研究. 工程地质学报, 21(1): 45—52.

殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等, 2012. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验. 地球科学——中国地质大学学报, 37(5): 1067—1074.