

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.01.004

菲律宾海盆磁条带特征及 61 Ma 以来的海底扩张过程重建

夏成龙^{1,2}, 郑彦鹏^{1,2}, 董冬冬^{2,3}, 瞿洪宝⁴, 张学贤^{1,2}, 李先锋^{1,2}, 华清峰^{1,2}

(1. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;

3. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;

4. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206)

摘要: 菲律宾海盆是西太平洋最大的边缘海盆地, 作为地球上最壮观的“沟-弧-盆”体系的重要组成部分, 其成因及构造演化可有效约束西太平洋洋陆过渡带的复杂动力学过程。海底磁异常条带是海底扩张的重要依据, 其几何形态能够反映海底扩张的时间、方向及速率, 为研究海盆的海底扩张过程提供重要信息。菲律宾海盆的次级海盆—西菲律宾海盆、四国海盆地磁异常表现为明显的条带状异常特征, 帕里西维拉海盆内的磁条带特征虽不明显, 但仍能看出南北向的分带现象。对海盆内的磁异常条带进行系统的分析、对比与解释, 将菲律宾海盆划分为 7 个扩张阶段, 构建了菲律宾海盆 61 Ma 以来的阶段性扩张模型。揭示了边缘海盆构造演化的一般规律及扩张过程为岛弧裂解、高速弧后扩张、慢速弧后扩张和扩张后作用 4 个阶段。

关键词: 磁条带; 海底扩张模型; 构造演化; 菲律宾海盆

中图分类号: P736.12

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)01-0030-11

菲律宾海板块位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇处^[1] (图 1), 晚中生代以来经历了三大板块的多期俯冲、碰撞, 又经历了走滑断裂作用以及岛弧的形成和弧后扩张作用^[2-5]。菲律宾海盆位于菲律宾海板块之上, 海底地形复杂, 区域地貌特征显著, 地质内涵丰富, 因此被认为是研究海底地形地貌特征和边缘海盆构造演化机制的理想场所。

海底磁异常条带是洋底岩石磁化方向不同所引起的呈条带状平行分布在大洋中脊轴两侧的磁异常, 是海底扩张的重要证据。能够记录海底扩张的时间、方向以及速率, 反映弧后盆地的海底扩张特征和构造演化历史, 可有效约束海盆的形成机制, 构建海底扩张模型。

菲律宾海盆内的磁异常条带具有对称性好和易识别等特点, 前人对该区的磁条带识别做了诸多研

究, 但缺乏菲律宾海盆整体磁异常条带特征及其与海盆时空演化关系的研究。本文基于前人在此地区获得的磁异常资料, 结合水深、重力以及 DSDP、ODP、IODP 等钻探数据, 对菲律宾海盆的磁条带特征以及海底扩张过程进行了深入的探讨, 为研究菲律宾海板块乃至西太平洋地区的构造演化过程提供重要的理论依据。

1 构造地质背景

菲律宾海地处西太平洋两大弧沟系——日本-琉球-台湾-菲律宾弧沟系和伊豆-小笠原-马里亚纳-雅浦弧沟系之间, 是全球唯一同时发生板块消减和增生的区域^[6]。近南北向的九州-帕劳海脊将菲律宾海盆分割为两部分——西菲律宾海盆、四国-帕里西维拉海盆, 它们的形成年代、扩张方向以及构造演化过程等都有所差异。

边缘海盆地是位于大陆边缘, 以岛弧或其他海底脊岭与大洋分隔的海盆。自 Karig^[7] 提出马里亚纳海槽的弧后扩张起源以来, 随着菲律宾海地区地质与地球物理资料的不断丰富, 越来越多的研究工作表明西菲律宾海盆、四国海盆以及帕里西维拉海盆都是弧后扩张形成的边缘海盆地^[7-11]。菲律宾海盆内次级海盆的磁条带年龄由西向东总体变年轻^[12-16],

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41176058); 国家基金委-山东省联合基金项目-海洋地质过程与环境 (U1606401)

作者简介: 夏成龙 (1990—), 男, 研究生, 专业方向为海底构造, E-mail: xiaclfio@163.com

通讯作者: 郑彦鹏 (1972—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋地球物理探测技术与海底构造研究, E-mail: zhengyp@fio.org.cn

收稿日期: 2016-09-19; **改回日期:** 2016-10-26. 周立君编辑

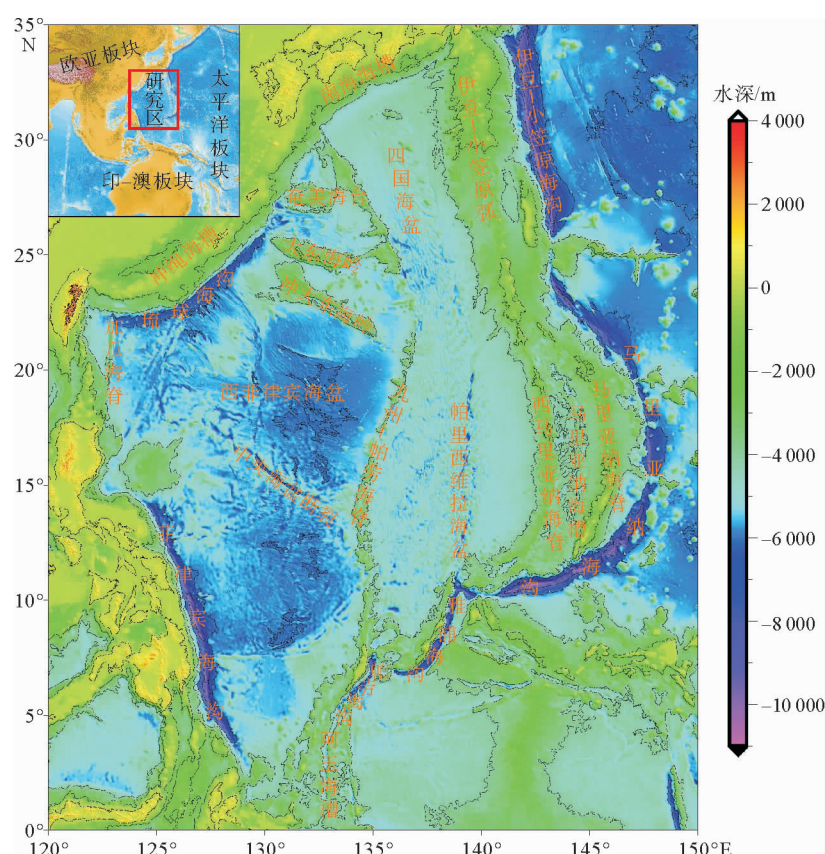


图 1 菲律宾海的地理位置(水深数据来自 <http://www.gebco.net/>)

Fig. 1 Location of the Philippine Sea(bathymetric data from <http://www.gebco.net/>)

这些磁条带记录了新生代以来菲律宾海盆地的演化历史(图 2):61~33 Ma, 菲律宾海板块先后经历了菲律宾弧边缘的海沟向南后撤和古伊豆-小笠原海沟向北后撤, 西菲律宾海盆以中央海盆断裂带为中心向两侧扩张, 并伴随扩张轴逆时针旋转;33 Ma 左右, 伊豆-小笠原海沟持续地向海迁移导致古伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧裂解, 新生的四国-帕里西维拉海盆开始扩张, 期间菲律宾海板块发生顺时针旋转;15 Ma 左右, 菲律宾海板块基本停止转动, 四国海盆和帕里西维拉海盆弧后扩张停止, 九州-帕劳海脊演化为残留弧。

2 菲律宾海盆的磁异常特征

2.1 西菲律宾海盆

海盆内磁异常较强, 幅值在 300 nT 以上, 局部地区达到 500~550 nT。海盆内条带磁异常特征显著, 延伸方向与中央海盆断裂基本平行^[22]。Hilde 和 Lee^[23]在海盆内识别出 26-13 号磁条带, 海盆南部和北部的 26-20 号磁条带沿 NW—SE 向延伸, 海

盆中部的 13-19 号磁条带呈 E—W 向延伸并被数条近南北向的转换断层错断, 表明西菲律宾海盆经历了 NE—SW 和 N—S 向两个扩张阶段, 推测扩张方向的改变与太平洋板块运动方向的改变有关。

磁条带沿中央海盆断裂南北对称分布, 表明中央海盆断裂就是古扩张中心, 裂谷两侧狭长的高热流值条带也证实了这一点^[24]。从图 3 可以看出, 海盆内地磁异常场与海底地形存在一定的对应关系, 特别是大东海岭、冲大东海岭等在地磁异常图上显示为明显的线状异常, 且主要为负磁异常带, Vargas^[25]等认为大东盆岭区是古老洋壳的残余。本哈姆海台及乌尔达内塔海台也呈现出负磁异常特征, DSDP 在本哈姆海台发现了年龄为 37 Ma 的似洋岛玄武岩(OIB), 推测受地幔柱的影响。海盆中部 N—S 向的转换断层发育, E—W 向延伸的条带磁异常发生了明显的错动。海盆北部最老的磁条带为 24 号, 而海盆南部最老的磁条带为 26 号, 说明海盆最北部可能已经俯冲到冲大东海岭之下^[23,26,27]。位于中央海盆断裂附近的 13 号磁条带表明扩张止于 33 Ma 左右。

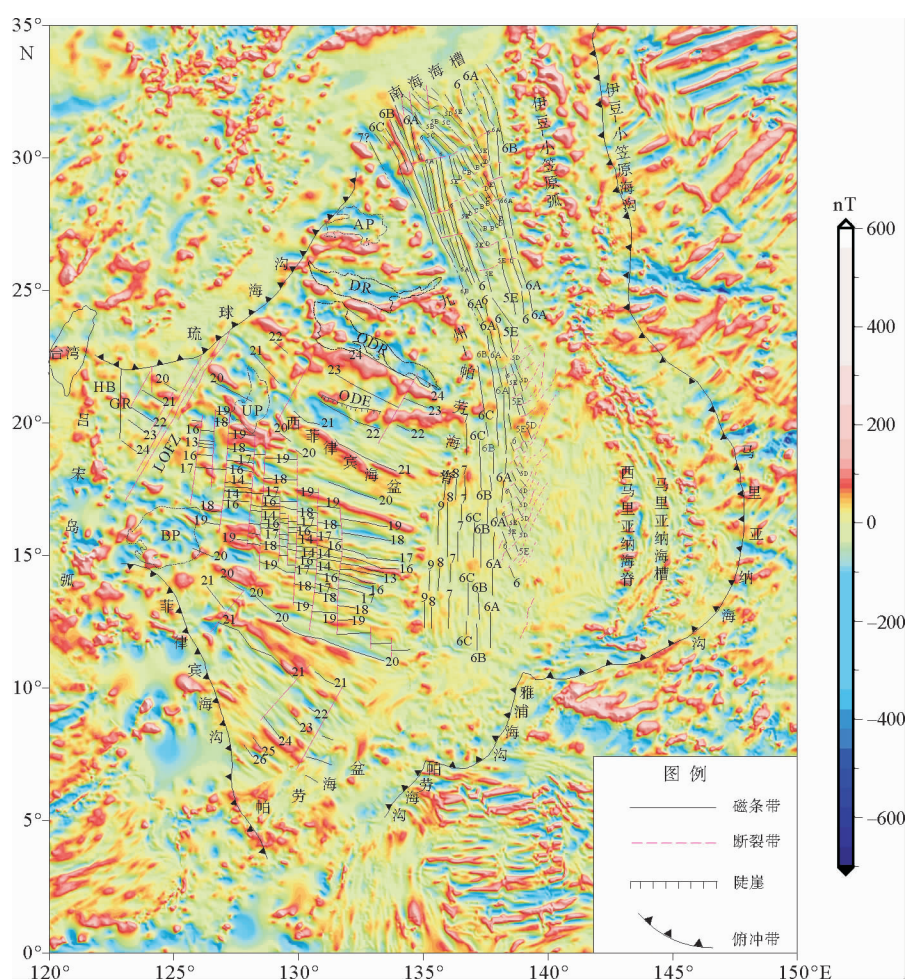


图 3 菲律宾海盆磁异常特征图

AP-奄美海台;DR-大东海岭;ODR-冲大东海岭;ODE-冲大东陡崖;HB-花东盆地;
GR-加瓜海脊;LOFZ-吕宋-冲绳断裂带;UP-乌拉达内塔海台;BP-本哈姆海台
(磁力数据源自 <http://www.ngdc.noaa.gov>, 磁条带据文献[14,23,28,29])

Fig. 3 Characteristics of geomagnetic anomaly of the Philippine Sea Basin

(magnetic data from <http://www.ngdc.noaa.gov>, magnetic lineations from reference[14,23,28,29])

续,且局部异常形状凌乱。Okino 等^[31]认为海盆内 N—S 向条带状磁异常不明显的原因是 E—W 向扩张期间,海盆位于磁赤道附近。Seno 等^[32]利用古地磁数据判定帕里西维拉海盆 30~25 Ma 位于现在的位置以南 10°~15°,印证了 Okino 的观点。

海盆西部存在一套低幅值、南北向的磁条带 9-5D,其中 9-6A 磁条带近 N—S 向展布,6-5D 呈 NW—SE 向延伸,说明 20 Ma 左右帕里西维拉海盆扩张方向发生改变,Sdrolias 等^[29]认为扩张方向的改变是菲律宾海板块的旋转造成的。海盆开始扩张的年龄从南向北由老变新,从南部的 9 号(28 Ma),到中部的 7 号(25 Ma),再到北部的 6B(22.5 Ma),且 9-6C 磁条带向北尖灭于九州-帕劳海脊,表明海盆是由南向北渐进式扩张形成的。海盆内能够识别出最年轻的磁条带是位于帕里西维拉裂谷附近的

5D,意味着扩张停止于 17 Ma 左右。海盆中、东部难以辨别出条带状磁异常,Mrozowski 等^[33]将其归因于巨厚沉积及磁异常太微弱。这也可能是扩张停止后海盆东部的火山活动造成的,因为西马里亚纳海脊的火山活动多发生于 20~9 Ma,通过重力 and 地震折射数据得到的地壳厚度以及 DSDP 数据证实了该时期火山活动频繁^[34]。

3 讨论

3.1 扩张阶段及扩张时间

Hilde 和 Lee^[23]根据磁条带特征提出了西菲律宾海盆的两阶段扩张模式;Deschamps 等^[35]根据磁条带特征,结合多波束资料揭示的海底精细构造,认

为西菲律宾海盆 50 Ma 以前存在一个不同于中央海盆断裂且平行于菲律宾弧的扩张轴,并提出了三阶段扩张模式。前人对四国和帕里西维拉海盆扩张阶段划分的观点较为一致,认为其存在两个阶段的扩张^[14,15]。本文根据磁条带分布特征,结合水深、重力以及洋壳年龄等数据(表 1,图 1,3,4),按照构造演化程度和扩张特征的差异性,将西菲律宾海盆

划分为 3 个扩张阶段,将四国-帕里西维拉海盆划分为 4 个扩张阶段。

DSDP、ODP 和 IODP 在菲律宾海盆开展了多次钻探研究,获得了丰硕的研究成果。这些钻探所获得的基底岩石或沉积物的测定年龄与磁条带所示的年龄基本吻合(表 2),二者之间良好的相关性为正确揭示菲律宾海盆的扩张时间提供了重要依据。

表 1 菲律宾海盆地各构造单元的地质与地球物理特征^[1,16,23,28,34,36]
Table 1 Geological and geophysical characteristics of the Philippine Sea Basin

构造单元	西菲律宾海盆	九州-帕劳海脊	四国海盆	帕里西维拉海盆
磁力异常/nT	-460~560	/	-300~430	-450~420
磁条带走向	NW—SE,E—W	/	NWN—SES,NW—SE	N—S,NW—SE
扩张方向	E—W→NE—SW→N—S	/	ENE—WSW→ NE—SW	E—W→ NE—SW
半扩张速率/(mm/a)	18~44	/	28~61	24~58
平均水深/m	5 000~6 500	3 000~5 000	4 000~5 500	4 500~5 500
布格重力异常/mgal	400~600	200~300	300~400	350~400
洋壳年龄/Ma	61~33	55/50~26	30~12	30~15
地壳厚度/ km	平均 5	8~20	5~10	平均 8

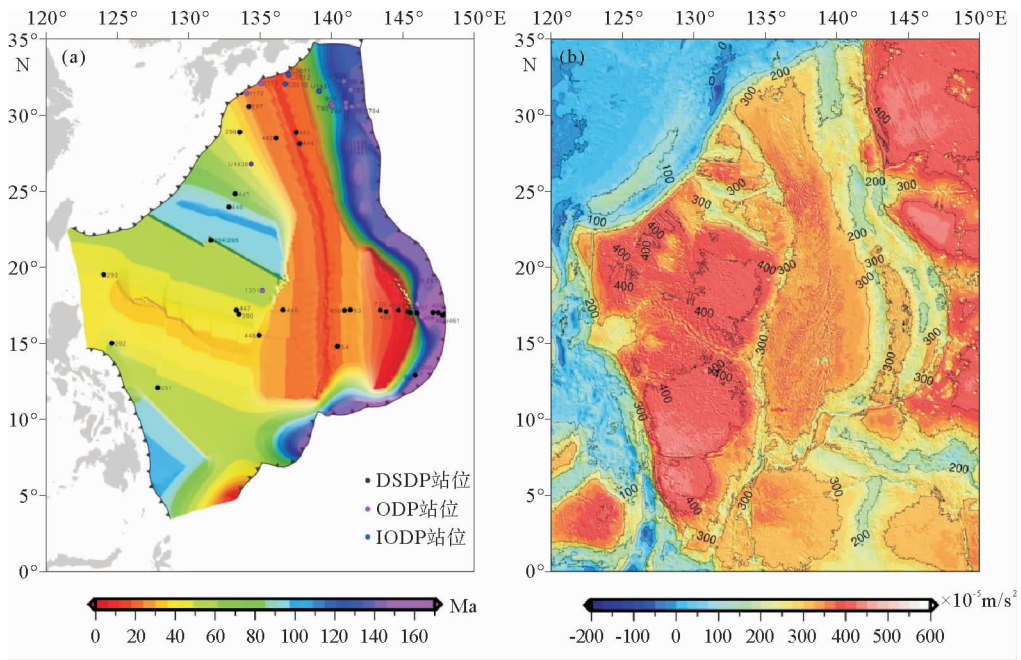


图 4 研究区洋壳年龄及布格重力异常特征

(a)洋壳年龄及钻探站位分布图 (b)布格重力异常图

(洋壳年龄数据源自 <http://www.ngdc.noaa.gov>;大洋钻探站位数据源自 <http://www.iodp.org>;重力数据源自 <http://topex.ucsd.edu>)

Fig. 4 Characteristics of crustal age and Bouguer gravity anomalies in research area

(a)Crustal age and drill sites distribution;(b)Characteristic of the Bouguer gravity anomaly(data of crustal age from <http://www.ngdc.noaa.gov>; data of drill sites distribution from <http://www.iodp.org>; data of gravity anomaly from <http://topex.ucsd.edu>)

表 2 菲律宾海盆磁条带与岩石测年数据对比

Table 2 The comparison between magnetic lineations and age of the rocks in Philippine Sea Basin

区域	磁条带(年代/Ma)	大洋钻探数据		
		站位	岩石测年结果/Ma	来源
西菲律宾海盆	20(43~45)	290	晚始新世	[7]
	21(47~48)	291	48	[37]
	21(47~48)	292	$49.4 \pm 2(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})$	[38]
	20~21(43~48)	293	$42(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})$	[38]
	23(50~52)	294/295	$48.8 \pm 2(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})$	[38]
四国海盆	6(20)	442	18~21	[39]
	6b(22)	297	早渐新世—中新世	[40]
	6c(23)	443/444	$17.2 \pm 3.2(\text{K-Ar})$	[41]
帕里西维拉海盆	7(24)	449	24	[42]

Hilde 和 Lee^[23] 根据条带状磁异常及岩石定年数据认为,西菲律宾海盆的扩张始于 61 Ma(按照新的时间尺度—Gradstein 的地磁极性年表^[43])。可研究发现,尽管西菲律宾海盆的磁条带定年记录只能追溯到 61 Ma,但是早期形成的西菲律宾海盆洋壳显然已经俯冲到菲律宾、琉球甚至可能俯冲至西南日本之下^[27],因此扩张活动可能在那之前就已经存在。Hall 等^[44] 基于印尼东部哈马黑拉等岛屿上岩性数据的分析认为,海盆北部的大东海岭与菲律宾海南部地区在海盆张开之前属于同一岛弧系统。根据 Hilde 等^[23] 的磁异常解释,并以相同的扩张速率计算,西菲律宾海盆的弧后扩张应始于 70 Ma 左右,这个估算与该地区的弧火山记录相符^[44]。根据磁异常条带、岩石定年数据推算,西菲律宾海盆于 33~30 Ma 停止扩张。

根据磁异常条带,帕里西维拉海盆开始扩张的时间要比四国海盆早 5~6 Ma^[45-47],但是四国海盆初始扩张阶段是呈楔形由北向南渐进式扩张的,并且根据古地磁数据,菲律宾海板块一直存在 NWN—WNW 向的运动,海盆北缘在过去的 15 Ma 里向北俯冲到南海海槽之下。按照菲律宾海板块沿南海海槽的俯冲速度 61~65 mm/a 计算^[48],四国海盆至少有 915 km 的洋壳在南海海槽俯冲潜没,这与 Jonny 等^[27] 利用俯冲板片重建所得出的结论一致。因此,有理由认为四国海盆过去存在更老的洋壳。此外,九州-帕劳海脊的火山岩年龄及沉降研究表明海脊北段在 30 Ma 存在张裂作用^[49],因此,本文推测四国海盆与帕里西维拉海盆在 30 Ma 左右同时开始扩张。16 Ma 左右,向北移动的澳大利亚板块与东南亚大陆边缘碰撞^[50],东南亚发生板块重组作用^[51,52],13 个微板块融合成三板块系统,

推测是导致四国海盆、帕里西维拉海盆以及南海、苏禄海等停止扩张的主要原因。

3.2 菲律宾海盆的阶段性扩张模型

根据海盆的形成时间,西菲律宾海盆和四国-帕里西维拉海盆分别对应西太平洋边缘海扩张幕中的始新世扩张幕和渐新世-中新世扩张幕。

3.2.1 始新世扩张幕

(1) E—W 向扩张阶段(61~50 Ma)

61 Ma 或以前,海盆以第一扩张轴为扩张中心沿 E—W 向或 ENE—WSW 向扩张(图 5a)。由于热点的存在^[53,54],岩浆作用强烈,导致该阶段产生的海底相对较浅。岩石学通常认为,玻安岩的产生与俯冲带的初始俯冲有关,K-Ar 和⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果表明古伊豆-小笠原弧的玻安岩质火山活动在 50 Ma 左右就已经开始^[55-57],板块重建也认为古伊豆-小笠原弧的俯冲作用始于 50 Ma 以前^[58,59]。但是,50 Ma 以前太平洋板块相对于热点向 NWN 运动,古伊豆-小笠原俯冲带的俯冲作用很微弱,很难为海盆扩张提供驱动力。而岩石年代测定表明,菲律宾弧的岛弧火山活动自晚白垩世时期就已经开始^[60],因此,西菲律宾海盆的扩张可能与澳大利亚板块北部的边缘海盆沿菲律宾弧的北向俯冲有关^[35]。而 Macpherson 等^[61,62] 通过研究西菲律宾海盆火山岩浆的地球化学特征,提出西菲律宾海盆的地幔柱成因。Jonny 等^[27] 也认为 52 Ma 菲律宾海板块主体位于马努斯地幔柱之上,西菲律宾海盆内的洋岛玄武岩同位素特征也支持地幔柱成因^[63]。因此,本文认为西菲律宾海盆的形成与演化受控于板块俯冲与地幔柱联合作用。

(2) NE—SW 向扩张阶段(50~45 Ma)

新的扩张轴形成后自东向西迁移,与最初的扩张轴形成 R-R-R 型三联点。三联点南东侧平行于菲律宾弧的扩张轴逐渐停止活动,海盆沿着新形成的扩张轴呈 NE—SW 向对称性扩张(图 5b)。50 Ma 左右,太平洋板块的运动方向由 NWN 逐渐变为 WNW^[17],太平洋板块开始向菲律宾海板块猛烈俯冲,弧火山开始活动。根据古地磁数据和岩石年代测定结果^[64-66],菲律宾弧边缘的海沟向南后撤,古伊豆-小笠原俯冲带也在向北后撤,因此,此期间西菲律宾海盆扩张的驱动力是两个俯冲带的共同作用。两个俯冲带的共同活动导致该阶段具有相对较高的扩张速度,半扩张速率约为 44 mm/a^[23]。由于热点的存在,乌尔达内塔海台和本哈姆海台该时期相继形成于扩张轴处。

(3) N—S 向扩张阶段(45~33 Ma)

NE—SW 向扩张阶段之后,扩张方向持续地逆时针旋转,推测与太平洋板块运动方向的改变有关。Taylor 等^[67]认为在 49~33 Ma 扩张轴逆时针旋转了 100°,从而为古扩张轴与九州-帕劳海脊之间的高角度夹角提供了解释。45/43 Ma 以后,海盆沿着古扩张轴呈 N—S 向扩张(图 5c),扩张速率降为 18 mm/a。扩张速度降低的原因有二:其一,东南亚、西太平洋以及澳大利亚东部边缘地区在 45 Ma 左右发生了板块重组^[62],此后沿菲律宾岛弧的北向俯冲停止(图 5d),海盆扩张失去了南部的驱动力。其二,太平洋板块的运动方向由 NNW 转变为 NWW,俯冲导致的板块张裂使得西菲律宾海盆从太平洋扩张系统中分离出来^[68],剩余板块的牵引力变得比之前小得多,导致扩张速度降低,并且方向改变。菲律宾弧的弧火山从 36 Ma 开始重新活动,表明向南的俯冲再次进行(图 5e),但是古地磁数据显示海沟没有向南迁移,因此并没有为菲律宾海盆的扩张提供驱动力。由于卡罗琳板块与菲律宾海板块的持续碰撞,菲律宾海板块逐渐远离马努斯地幔柱^[27],西菲律宾海盆于 33~30 Ma 停止扩张。同时,菲律宾海板块持续向 WNW 运动,Honza 等^[69]认为西菲律宾海盆古扩张脊的靠近引发了南海海盆的扩张。

中央海盆裂谷深度巨大,局部可达到 7 900 m,且先前形成的深海丘陵被深大裂谷切割。这些海底构造特征及年代测定表明,海盆停止扩张之后(30~26 Ma)还存在一个近 NE—SW 向的非岩浆扩张作用,并沿裂谷产生右旋走滑断裂^[35]。

3.2.2 渐新世—中新世扩张幕

(1) 岛弧裂解作用阶段(30~27 Ma)

30 Ma 以前,四国海盆、帕里西维拉海盆以及马

里亚纳海槽尚未形成,九州-帕劳海脊、西马利亚纳海脊和伊豆-小笠原-马利亚纳岛弧连在一起,构成古伊豆-小笠原-马利亚纳岛弧。太平洋板块的持续俯冲和伊豆-小笠原-马利亚纳海沟向东后撤为边缘海盆的张裂提供了动力,海沟后撤为边缘海盆的形成提供了空间,同时沿岛弧的弧火山活动带提供了便于海盆张开的薄弱带(图 5f)。因此,多种因素导致岛弧岩石圈拉张、减薄,30 Ma 左右开始裂解,岛弧火山活动逐渐停止(图 5g)。随后,弧内裂谷阶段向弧后扩张阶段转变,扩张速率较低,约为 30~26 mm/a^[41]。

(2) 高速扩张阶段(27~20 Ma)

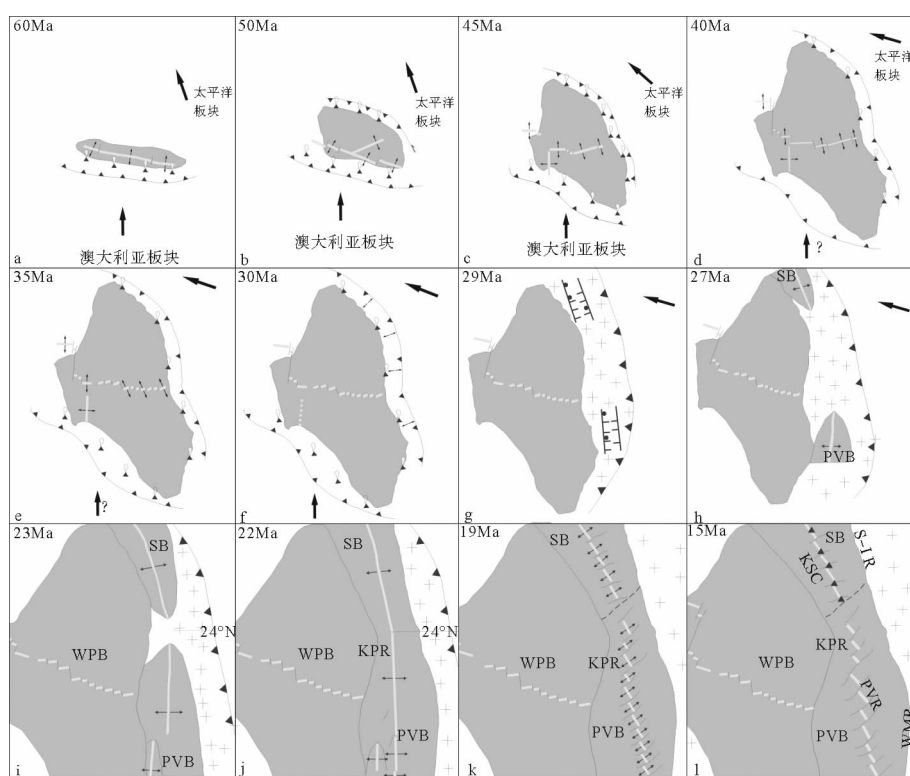
海底构造及磁条带特征表明,四国海盆和帕里西维拉海盆该阶段的扩张方向分别为 ENE—WSW 和 E—W 向(图 5h),扩张速率较弧内裂谷阶段稍高。根据磁条带的展布特点,四国海盆的张裂始于海盆北部边缘且呈楔形扩张,扩张中心大致以 27~30 cm/a 的速度由北向南延伸^[14,29],造成了现今北宽南窄的构造形态;相反,帕里西维拉海盆的扩张中心由南向北传播(图 5i)。随着扩张中心的南、北向延展,22 Ma 左右,两海盆的扩张中心在 24°N 交汇(图 5j)。此后,两个海盆形成一个统一的弧后扩张系统,四国海盆西部与帕里西维拉海盆内 6A 和 6B 磁条带的连续性印证了这一点^[31],但是两个海盆仍保持各自的扩张方向,扩张速率在扩张中心交汇后急剧增大,最高可达 60 mm/a。随后,四国海盆的扩张轴顺时针旋转了 10°~15°,大致呈近 N—S 向延伸,扩张速率随之降低。

(3) 低速扩张阶段(20~15 Ma)

帕里西维拉海盆的扩张方向于 20 Ma 左右由 E—W 变为 NE—SW,张应力场的方向逆时针旋转,扩张轴被高度分割,断裂带发育(图 5k)。四国海盆的扩张轴在 19 Ma 左右逆时针旋转了近 40°,海盆开始沿 NE—SW 向扩张,整个扩张中心向东北方向移动至当前位置,扩张以较低的速率一直持续到 15 Ma。该阶段整个扩张系统的扩张速率相对较低,扩张速率降低和扩张方向改变是菲律宾海板块旋转的表现^[29],此外,两个海盆扩张方向改变的时间不同可能是由于旋转极相对于两个海盆的位置造成的^[62]。16 Ma 左右,澳大利亚板块与东南亚大陆边缘碰撞,东南亚发生板块重组作用^[51],四国海盆和帕里西维拉海盆停止扩张。

(4) 弧后作用阶段(15~12 Ma)

15 Ma 左右,菲律宾海板块以 60 mm/a 的速度向北俯冲至欧亚板块之下^[70]。俯冲作用使四国海

图 5 菲律宾海盆的构造演化模式^[31,35]

KPR-九州-帕劳海脊;WPB-西菲律宾海盆;SB-四国海盆;PVB-帕里西维拉海盆;PVR-帕里西维拉裂谷;
KSC-纪南海山链;S-IR-Shichito-Iwojima 海脊;WMR-西马里亚纳海脊

Fig. 5 Evolutionary model of the Philippine Sea Basin

盆火山作用强烈,岩浆沿断层侵入,纪南海山链沿古扩张轴形成,Kobayashi 等^[49]认为纪南海山链的火山活动一直持续到 12 Ma。相反,帕里西维拉海盆演化末期岩浆匮乏^[71],导致扩张轴处的地貌形态与四国海盆的纪南海山链迥然不同,其为一系列呈雁列状分布的深大拗陷构成的裂谷(图 5l)。

4 结论

(1) 菲律宾海盆形成和演化过程中形成的条带状磁异常是研究构造演化的重要依据,其能够反映海底扩张时间、扩张方向以及扩张速率。磁异常条带、水深及重力异常等特征表明菲律宾海盆经历了多期弧后扩张和多次构造旋转,按照其扩张特征及演化程度,将菲律宾海盆划分为 7 个扩张阶段。

(2) 菲律宾海盆的阶段性扩张是板块俯冲与地幔柱联合作用的结果。沿菲律宾弧和伊豆-小笠原-马里亚纳弧俯冲的海沟持续后撤为菲律宾海盆的形成提供了驱动力。西菲律宾海盆、四国海盆和帕里西维拉海盆都是海沟向海方向迁移引起的岛弧周期性裂解和弧后扩张形成的产物,不同的形成时代构

成了菲律宾海盆多期弧后扩张的时间序列。

(3) 总结各个次级海盆的扩张特征,得出了这些边缘海盆地的一般演化过程:岛弧裂解、高速弧后扩张、慢速弧后扩张以及扩张后作用。弧后扩张前的裂解作用是弧后盆地形成的第一个阶段,该阶段的主要特征是岩石圈拉张减薄,继而断裂,扩张脊延伸,岛弧的裂解作用阶段一般不会超过 3 Ma;洋壳在弧后高速形成是弧后盆地形成的第二个阶段,该阶段的弧后扩张速率相对较高;慢速扩张是弧后盆地形成的第三个阶段,该阶段扩张速率较第二阶段减慢,直至扩张停止;海盆完全形成后往往存在弧后构造活动,根据扩张轴处的岩石地球化学特征和定年数据,扩张后岩浆作用是扩张末期或者弧后扩张停止后一个普遍的阶段。

参考文献 (References)

- [1] 吴时国,范建柯,董冬冬. 论菲律宾海板块大地构造分区[J]. 地质科学, 2013, 48(3): 677-692. [WU Shiguo, FAN Jianke, DONG Dongdong. Discussion on the tectonic division of the Philippine Sea Plate[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(3): 677-692.]

- [2] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(3): 65-94. [LI Sanzhong, YU Shan, ZHAO Shujuan, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian Continental Margin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(3): 65-94.]
- [3] Zhang Y, Li S Z, Suo Y H, et al. Origin of transform faults in back-arc basins: examples from Western Pacific marginal seas [J]. Geological Journal, 2016, 51(1): 490-512.
- [4] Xu S, Ye Q, Li S, et al. Sequential patterns in Cenozoic marginal basins of the Northwest Pacific[J]. Geological Journal, 2016, 51(1): 387-415.
- [5] 王霄飞, 余珊, 李三忠, 等. 板缘与板内活动构造与地震触发机制对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(2): 159-175. [WANG Xiaofei, YU Shan, LI Sanzhong, et al. Comparison of active tectonics and earthquakes triggering mechanism along plate boundary and within intraplate [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(2): 159-175.]
- [6] 秦蕴珊, 尹宏. 西太平洋—我国深海科学研究的优先战略选区[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 245-248. [QIN Yunshan, YIN Hong. Western Pacific: The strategic priority in China deep-sea research[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(3): 245-248.]
- [7] Karig D E. Origin and Development of Marginal Basins in the Western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [8] Okino K, Ohara Y, Kasuga S, et al. The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(15): 2287-2290.
- [9] Okino K, Ohara Y, Fujiwara T, et al. Tectonics of the southern tip of the Parece Vela Basin, Philippine Sea Plate[J]. Tectonophysics, 2009, 466(3-4): 213-228.
- [10] Honza E. Spreading mode of backarc basins in the western Pacific[J]. Tectonophysics, 1995, 251(251): 139-152.
- [11] 石学法, 鄢全树. 西太平洋典型边缘海盆的岩浆活动[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 737-750. [SHI Xuefa, YAN Quanshu. Magmatism of typical marginal basins (or back-arc basins) in the West Pacific[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 737-750.]
- [12] Loudon K E. Paleomagnetism of DSDP sediments, phase shifting of magnetic anomalies, and rotations of the West Philippine Basin [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1977, 82(20): 2989-3002.
- [13] Sasaki T, Yamazaki T, Ishizuka O. A revised spreading model of the West Philippine Basin[J]. Earth Planets & Space, 2014, 66(1): 1-9.
- [14] Chamot-Rooke N, Renard V, Pichon X L. Magnetic anomalies in the Shikoku Basin: a new interpretation[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1987, 83(1-4): 214-228.
- [15] Kasuga S, Ohara Y. A new model of back-arc spreading in the Parece Vela Basin, northwest Pacific margin[J]. Island Arc, 2006, 6(3): 316-326.
- [16] Seama N, Okino K. Asymmetric seafloor spreading of the southern mariana trough Back-Arc Basin[M]// Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems. Springer Japan, 2015: 253-260.
- [17] Sharp W D, Clague D A. 50-Ma initiation of Hawaiian-Emperor Bend records major change in Pacific Plate motion[J]. Science, 2006, 313: 1281-1284.
- [18] Haraguchi S, Ishii T, Kimura J I, et al. Formation of tonalite from basaltic magma at the Komahashi-Daini Seamount, northern Kyushu-Palau Ridge in the Philippine Sea, and growth of Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana arc crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145: 151-168.
- [19] Haraguchi S, Ishii T. Simultaneous boninitic and arc-tholeiitic volcanisms in the Izu forearc region during early arc volcanism, based on ODP Leg 125 Site 786[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2007, 153(153): 509-531.
- [20] Zeitlin S. Interaction between Philippine Sea Plate (PH) and Eurasia (EU) Plate and its influence on the movement of eastern Asia[J]. Jewish Quarterly Review, 2002, 45(2): 263-273.
- [21] 臧绍先, 宁杰远. 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[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 188-197. [ZANG Shaoxian, NING Jieyuan. Interaction between the Philippine Sea Plate and the Eurasia Plate and its Influence on the Tectonics of Eastern Asia[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 188-197.]
- [22] 郑彦鹏, 刘保华, 吴金龙, 等. 台湾岛以东海域加瓜楔形带对冲绳海槽南段的构造控制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(1): 88-95. [ZHENG Yanpeng, LIU Baohua, WU Jinlong, et al. The topographical characteristics in the area off eastern Taiwan Island and their tectonic implication[J]. Science China D: Earth Science, 2005, 35(1): 88-95.]
- [23] Hilde T W C, Chao-Shing L. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation[J]. Tectonophysics, 1984, 102(1): 85-104.
- [24] 林美华, 李乃胜. 菲律宾海周边的深海沟地貌[J]. 海洋科学, 1998, 22(6): 29-31. [LIN Meihua, LI Naisheng. The surrounding Trench geomorphology of Philippine Sea[J]. Marine Sciences, 1998, 22(6): 29-31.]
- [25] Hickey-Vargas R, Ishizuka O, Bizimis M. Age and geochemistry of volcanic clasts from DSDP Site 445, Daito Ridge and relationship to Minami-Daito Basin and early Izu-Bonin arc magmatism[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 57(1): 193-208.
- [26] Cao L, Wang Z, Wu S, et al. A new model of slab tear of the subducting Philippine Sea Plate associated with Kyushu-Palau Ridge subduction[J]. Tectonophysics, 2014, 636: 158-169.
- [27] Wu J, Suppe J, Lu R, et al. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2016, 121(6): 4670-4741.
- [28] Doo W B, Hsu S K, Yeh Y C, et al. Age and tectonic evolu-

- tion of the northwest corner of the West Philippine Basin[J]. Marine Geophysical Research, 2014, 36(2-3):1-13.
- [29] Sdrolias M, Roest W R, Müller R D. An expression of Philippine Sea plate rotation: the Parece Vela and Shikoku Basins[J]. Tectonophysics, 2004, 394(1-2):69-86.
- [30] 许淑梅, 张晓东, 翟世奎. 四国海盆起源与沉积环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2):119-123. [XU Shumei, ZHANG Xiaodong, ZHAI Shikui. The origin and sedimentary environment evolution of the Shikoku Basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(2):119-123.]
- [31] Okino K, Kasuga S, Ohara Y. A New Scenario of the Parece Vela Basin Genesis[J]. Marine Geophysical Researches, 1998, 20(20):21-40.
- [32] Seno T, Maruyama S. Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea[J]. Tectonophysics, 1984, 102(1-4):53-84.
- [33] Mrozowski C L, Hayes D E. The evolution of the Parece Vela Basin, eastern Philippine Sea[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1979, 46(1):49-67.
- [34] Yen H Y, Lo Y T, Yeh Y L, et al. The crustal thickness of the Philippine sea plate derived from gravity data[J]. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences, 2015, 26(3):253-259.
- [35] Deschamps A, Lallemand S. The West Philippine Basin: An Eocene to early Oligocene back arc basin opened between two opposed subduction zones[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(B12):85-102.
- [36] Tomoda Y, Kobayashi K, Segawa J, et al. Linear magnetic anomalies in the Shikoku Basin northeastern Philippine Sea[J]. Journal of Geomagnetism & Geoelectricity, 1975, 27(1):47-56.
- [37] Loudon K E. Magnetic anomalies in the West Philippine Basin[M]// The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and Its Margin. American Geophysical Union, 1976:253-267.
- [38] Ozima M, Kaneoka I, Saito M, et al. Summary of Geochronological Studies of Submarine Rocks from the Western Pacific Ocean[M]// Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian Region. American Geophysical Union, 1983:137-142.
- [39] Klein G D, Kobayashi K, White S M. Introduction and explanatory notes, Deep Sea Drilling Project Leg 58[C]// Initial Reports of Deep Sea Drilling Project. US Government Printing Office, Washington D C, 1980.
- [40] Ingle J C. Summary of Late Paleogene-neogene Insular Stratigraphy, Paleobathymetry, and Correlations, Philippine Sea and Sea of Japan Region[C]// Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 1975.
- [41] Okino K, Shimakawa Y, Nagaoka S. Evolution of the Shikoku Basin. [J]. Earth Planets & Space, 1994, 46(6):463-479.
- [42] Scott R B, Kroenke L, Zakariadze G, et al. Evolution of the south Philippine Sea: Deep Sea Drilling Project Leg 59 results [C]// Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, V59, U. S. Gov. Printing Office, 1981:803-815.
- [43] Gradstein F M. A Geologic Time Scale [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [44] Hall R, Ali J R, Anderson C D, et al. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate[J]. Tectonophysics, 1995a, 251(1-4):229-250.
- [45] Taylor B. Rifting and the volcanic-tectonic evolution of the Izu-Bonin-Mariana arc. Proceedings ODP[C]// Scientific Results, 1992, 126:627-651.
- [46] Watts A B, Weissel J K. Tectonic history of the Shikoku marginal basin [J]. Earth & Planetary Science Letters, 1975, 25(3):239-250.
- [47] Shih T C. Marine magnetic anomalies from the western Philippine Sea: implications from the evolution of marginal basins [M]//Tectonic and geologic evolution of southeast Asia seas and islands. American Geophysical Union, 1980, 23:49-75.
- [48] Sella G F, Dixon T H, Mao A. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2002, 107(B4):ETG 11-1-ETG 11-30.
- [49] Kobayashi K, Kasuga S, Okino K. Shikoku Basin and Its Margins[M]// Backarc Basins. 1995:381-405.
- [50] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6):55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.]
- [51] Sibuet J C, Hsu S K, Pichon X L, et al. East Asia plate tectonics since 15 Ma: Constraints from the Taiwan region[J]. Tectonophysics, 2002, 344(1):103-134.
- [52] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. Tectonophysics, 2010, 488(1-4):293-325.
- [53] Macpherson C G, Hilton D R, Sinton J M, et al. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Manus backarc basin: Implications for mantle mixing and the origin of plumes in the western Pacific Ocean[J]. Geology, 1998, 26(11):1007-1010.
- [54] Ishizuka O, Taylor R N, Ohara Y, et al. Upwelling, rifting, and age-progressive magmatism from the Oki-Daito mantle plume[J]. Geology, 2013, 41(9):1011-1014.
- [55] Arculus R J, Ishizuka O, Bogus K A, et al. A record of spontaneous subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana arc[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(8):728-733.
- [56] Ishizuka O, Tani K, Reagan M K, et al. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011, 306(3):229-240.
- [57] Lallemand S, Deschamps A. Geodynamic setting of Izu-Bonin-Mariana boninites[J]. Geological Society London Special Publications, 2003, 219(1):163-185.
- [58] Whittaker J M, Müller R D, Leitchenkov G, et al. Major Australian-Antarctic plate reorganization at Hawaiian-Emperor Bend time[J]. Science, 2007, 318:83-86.
- [59] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental

- and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3-4):212-270.
- [60] Hall R. Cenozoic plate tectonic reconstructions of SE Asia [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1997, 126(1):11-23.
- [61] Macpherson C G, Hall R. Tectonic setting of Eocene boninite magmatism in the Izu-Bonin-Mariana forearc[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2001, 186(2):215-230.
- [62] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4):353-431.
- [63] Hickey-Vargas R. Origin of the Indian Ocean-type isotopic signature in basalts from Philippine Sea plate spreading centers: An assessment of local versus large-scale processes[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 1032(9):20963-20980.
- [64] Hall R, Ali J R, Anderson C D. Cenozoic motion of the Philippine Sea Plate: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia[J]. *Tectonics*, 1995, 14(5):1117-1132.
- [65] Tsunakawa H. K-Ar dating on volcanic rocks in the Bonin Islands and its tectonic implication [J]. *Tectonophysics*, 1983, 95(s 3-4):221-232.
- [66] Cosca M, Arculus R, Pearce J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar geochronological age constraints for the inception and early evolution of the Izu-Bonin-Mariana arc system [J]. *Island Arc*, 1998, 7(3):579-595.
- [67] Taylor B, Goodliffe A M. The West Philippine Basin and the initiation of subduction, revisited[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 311(12):81-84.
- [68] O'Connor J M, Hoernle K, Müller R D, et al. Deformation-related volcanism in the Pacific Ocean linked to the Hawaiian-Emperor bend[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5):393-397.
- [69] Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and backarc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. *Tectonophysics*, 2004, 384(1-4):23-53.
- [70] Watanabe Y. Late Cenozoic evolution of epithermal gold metallogenic provinces in Kyushu, Japan[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40(3):307-323.
- [71] Ohara Y, Kasuga S, Ishii T. Peridotites from the Parece Vela Rift in the Philippine Sea[C]// *Upper Mantle Material Exposed in an Extinct Back-arc Basin*. *Proceedings of the Japan Academy*, 1996, 72:118-123.

CHARACTERISTICS OF MAGNETIC LINEATIONS AND RECONSTRUCTION OF SEAFLOOR SPREADING PROCESSES OF THE PHILIPPINE SEA BASIN SINCE 61 MA

XIA Chenglong^{1,2}, ZHENG Yanpeng^{1,2}, DONG Dongdong^{2,3}, QU Hongbao⁴,
ZHANG Xuexian^{1,2}, LI Xianfeng^{1,2}, HUA Qingfeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;

3. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071;

4. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China)

Abstract: The Philippine Sea Basin is the largest marginal basin in the Western Pacific. As an important part of the most spectacular trench-arc-basin system in the world, the formation and tectonic evolution of the Philippine Sea Basin can constrain the complex kinetic process of the ocean-continent transitional zone in the Western Pacific effectively. Magnetic lineations are an important evidence of seafloor spreading and their geometrical morphology can reflect the time, direction and speed of the seafloor spreading, which provide crucial information for reconstruction of the opening history of ocean basins. The magnetic anomalies in the West Philippine Basin and Shikoku Basin occur in an obvious banded pattern and the north-south zonation can be recognized in the Parece Vela Basin, although the characteristics of magnetic lineations are not distinct. Based on the analysis, comparison and interpretation of these magnetic lineations, the Philippine Sea Basin has passed seven spreading stages and a scenario of evolution from 61 Ma to present was proposed. Furthermore, the tectonic evolution and general opening processes of the marginal basins starts from rifting, and is followed by back-arc spreading with high speed, back-arc spreading with low speed, and the tectonic activities after opening.

Key words: magnetic lineations; seafloor spreading model; tectonic evolution; Philippine Sea Basin