### DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020111501

# 基于 DEM 数据的菲律宾海典型区地貌类型划分

宋维宇<sup>1,2</sup>,刘娅楠<sup>3</sup>,胡邦琦<sup>1,2</sup>,杨慧良<sup>4</sup>,陈江欣<sup>1,2</sup>,贾超<sup>3</sup>,刘森<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术国家试点实验室海洋矿产资源评价与探测功能实验室, 青岛 266071

3. 山东大学海洋研究院, 青岛 266237

4. 烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264010

摘要:深远海海底地质环境复杂,地貌形态多变,目前没有形成统一的地貌类型划分量化标准。本文主要针对这一问题,选择 菲律宾海中南部典型区作为研究区,结合已有规范、标准和区域构造演化特征,提出了海山、海丘、海底裂谷、山间谷地、山间 洼地、山间盆地6种四级地貌单元的量化划分标准。利用 ArcGIS 平台对 DEM 数据进行深度处理,提取高程、坡度、坡度变化 率、地形起伏度等关键地貌因子,对研究区海山等地貌单元进行了定量化划分,明确了其分布特征。结果显示:受控于形成时 期不同的构造背景,研究区西部与东部具有显著的构造走向差异,西部海岭呈近 EW 向雁式排列,东部海丘呈近 NS 向雁式排 列,东部海丘相较于西部海岭更为狭长;海山、海丘和山间盆地等大规模地貌单元的形成往往受控于强烈的构造、岩浆活动。 本次研究成果能够丰富深远海海底地貌类型划分和成因研究领域,为今后相关标准规范的制定奠定基础。

关键词:DEM;四级地貌;地貌因子;地貌特征;构造演化;菲律宾海

中图分类号: P737.2 文献标识码: A

#### Landform classification for the Philippine Sea based on DEM data

SONG Weiyu<sup>1,2</sup>, LIU Yanan<sup>3</sup>, HU Bangqi<sup>1,2</sup>, YANG Huiliang<sup>4</sup>, CHEN Jiangxin<sup>1,2</sup>, JIA Chao<sup>3</sup>, LIU Sen<sup>3</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resource, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China

3. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China.

4. Yantai Coastal Geological Survey Center, Yantai 264010, China

Abstract: Submarine geomorphology plays significant roles in marine environmental and engineering studies, and the deep sea is specially complex in geomorphology. Based on the existing norms, standards and regional tectonic evolution characteristics, this paper takes the Philippine sea as the research object for study of deep sea geoenvironment. Quantitative standards are proposed and six different geomorphic units are identified, which include seamounts, hills, submarine rifts, mountain valleys, intermontane depressions, and intermontane basins. Based on DEM, ArcGIS is used to extract critical geomorphological factors such as elevation, slope, slope change and relief of land surface. Following the classification, the study area is quantitatively divided into six geomorphic units. Controlled by the tectonic stresses in different periods, the west part and the east part of the survey area show significant difference in tectonic strikes. The oceanic ridges in the west are arranged in a near-EW pattern, and the hills in the east are in a near-NS direction. Ridges are narrower in the west. Large-scale geomorphic units, such as seamounts and intermontane basins are often controlled by strong geological processes, such as magmatic, hydrothermal and tectonic activities. Facts have proved that this research is helpful to submarine landform classification and the study of their genesis. It can also contribute more to the formulation of relevant standards and specifications for deep sea geomorphological studies.

Key words: DEM; fourth-grade geomorphology; geomorphic factors; geomorphological features; structural evolution; the Philippine sea

随着海洋强国战略的不断推进,海底地貌的研 究逐渐得到重视,其在国家建设、资源利用、生态 保护、维护海洋权益等方面具有重要意义。一个多 世纪以来,国内外学者对海底地形地貌的成因和分 类等开展了深入的调查研究,20世纪20—50年代, 国际上出版了一系列采用大量篇幅论述了海底地

作者简介:宋维宇(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事海洋地质研究工作,E-mail: songweiyu@21cn.com 通讯作者:刘森(1989—),男,博士,助理研究员,主要从事海洋地质环境等研究工作,E-mail: sen\_liu@sdu.edu.cn 收稿日期:2020-11-15; 改回日期:2020-12-24. 文凤英编辑

资助项目:中国地质调查局国家专项(DD20191010, DD20191003)

貌的形态和成因的专著<sup>[1]</sup>。20世纪50—60年代,中 国就已经开展了海岸地貌的调查研究工作,并对黄 海与东海重要海域的海底地貌类型与成因,以及东 海、南海海底沉积物进行了研究,为中国开展海底 地貌研究打下了良好基础<sup>[2]</sup>。在20世纪60—80年 代的海洋地质调查中,系统地采用板块构造地貌分 类方法,编制了1:50万~1:100万海底地貌图。 随着测量技术的不断更新,中国海底地貌研究是由 宏观向微观、大地貌到微地貌、形态特征到地貌过程, 同时人类活动对地貌的响应研究等将会不断深入<sup>[3]</sup>。

合理划分海底地貌类型是海洋地貌研究的重 要部分,对海洋地质工作开展大有裨益。与陆地地 貌内、外营力相互作用的形成方式不同個,海底地貌 的形成更多源于地壳大规模的构造运动,故对海底 地貌的分类方法也应与陆地不尽相同题。海底地貌 分类有以外营力、内营力、板块构造为基础进行分 类的三种观点,其中以外营力作用为基础的分类, 在地貌学界有广泛的应用,其小范围、大比例编图 对海洋工程、海岸带及近海的开发和利用具有重要 的使用价值;内营力为基础的分类能清晰地反映构 造对地貌的控制作用,适用于大范围、小比例尺的 地貌分类和制图;而以板块构造为基础的分类则为 地貌的成因机制和分布规律提出了崭新的解释。 从分类依据出发,现有的分类方法可以分为成因分 类、形态分类、形态成因分类和多指标综合分类 4种<sup>[3]</sup>。国际海底地名命名分委会(SCUFN)作为国 际海底地名惟一官方组织,其界定评判海底地理实 体类型的主要手段依赖于多波束数据反演的海底 三维地形,对于构造地质、海底沉积物等因素则考 虑较少。单纯的基于表面形态进行分类容易产生 误判,以形态和成因相结合的方式逐渐成为海底 地形地貌划分的主要依据。因此,以板块构造为 基础,形态、成因相结合,内营力、外营力相结合的 方式对海底地形地貌进行分类是一种比较合理的 分类方式。目前,对于海底地貌的分类大多按照 3个等级进行划分,划分类别不够细致,考虑的因素 不够全面,四级地貌划分缺少量化标准,不利于对 海底地貌单元进行研究。本次研究主要针对以上 不足,提出了基于 DEM 数据的菲律宾海典型区四 级地貌定量化划分标准和方案,并进行了地貌类型 划分。

菲律宾海位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块三联点海域,周围几乎全部被俯冲带 所环绕,构造作用活跃,地形地貌复杂多变,发育着 地球上最年轻的、最壮观的"海沟-岛弧-弧后盆地" 体系。由于其特殊的地理位置和现有技术手段的 限制,针对菲律宾海地形地貌分类方面的研究内容 较少,分类标准大多采用三级标准,即使采用四级 标准进行划分,由于用途、制图比例尺等因素的不 同,在分类和分级方面也存在较大差异。四级地貌 分类可以根据板块环境、板块构造要素、中型构造 地貌或地貌组合、内外营力来进行地貌划分<sup>[7]</sup>;也可 以根据板块构造环境和形态、区域构造和水深、内 外营力、形态的方式来进行划分<sup>[8]</sup>。这些分类标准 不仅相差较大,而且大多仅给出分类结果,没有提 供细致的分类依据,无法很好地对海底地貌进行深 度分析。采用四级地貌定量化划分标准对海底地 貌进行分类,并按形态特征、地貌规模大小及主从 关系,依次逐级划分,可以更好地细化海底地貌。

本文通过对前人海底地貌研究成果的总结,提 出了既具有普适性,又有针对于研究区四级地貌量 化的划分标准和方案。利用 ArcGIS 空间分析等技 术手段对 DEM(数字高程模型, Digital Elevation Model) 数据进行深度处理分析,提取了研究区微观、宏观 地貌因子,进行了四级地貌类型定量化划分。研究 成果能够丰富海底地貌类型划分和成因研究领域, 为今后相关标准规范的制定奠定基础。

# 1 研究区概况

菲律宾海盆地南北跨越 0°~35°N,东西横跨 124°~147°E,面积约为 5.4×10° km²,海底地形十分 复杂,发育有海沟、岛弧、海脊、海山、海盆、裂谷 等地形,是一个海岭与海盆并列、具有洋壳基底的大 型边缘海(图1)。海盆整体位于菲律宾海板块之上, 周边环绕岛弧与深海沟俯冲带,水深范围为 3000~ 6000 m,平均水深约为 4500 m,整体表现为"西部 深、东部浅"的特点<sup>[9]</sup>。

基于已有调查研究成果,可以将菲律宾海盆分 为不同的地貌单元:以菲律宾海盆中央南北走向的 九州-帕劳海岭为界,西部是西菲律宾海盆,东部有 四国海盆和帕里西维拉海盆等。其中,西菲律宾海 盆形成时间最早,以中央断裂为界可分为三部分: 北部的西北次海盆、南部的南次海盆以及中间的中 央裂谷盆地<sup>[10]</sup>。

九州-帕劳海岭西侧的西菲律宾海盆区,海底地 形复杂,有海岭、海台、陡崖、裂谷等地貌形态,平均 水深在5000m以上,局部地区(中央海盆裂谷轴部) 可达7900m。九州-帕劳海岭以东,海底地形自西向 东由四国-帕里西维拉海盆地形过渡为伊豆-小笠原



图 1 菲律宾海板块海底地形地貌与研究区位置图 底图 DEM 数据来源于全球水深数据,红色方框为研究区。

Fig.1 Submarine topographic and geomorphological map of the Philippine Sea plate and the location map of study area

DEM are derived from global bathymetric data.

弧,四国-帕里西维拉海盆平均水深为4500~5500m。

菲律宾海主要受太平洋板块的构造运动控制, 自约 61 Ma 以中央断裂带为扩张中心开始南北向 扩张<sup>[2]</sup>。在约 43 MaBP,太平洋板块运动方向发生 变化,由 NNW向(相对于热点运动方向)变为 NWW 向,由于俯冲板块方向的变化,使得太平洋板块西 缘的走滑带被转变成了俯冲带,并伴随着强烈的弧 后岩浆活动,形成了老的伊豆-小笠原岛弧<sup>[11-12]</sup>。约 29 MaBP,菲律宾海板块开始向西北运动(3.5 cm/a), 并发生顺时针旋转,旋转角度为 50°<sup>[13-15]</sup>,四国-帕里 西维拉海盆开始扩张,九州-帕劳海岭与老的伊豆-小笠原-马里亚纳弧裂离<sup>[16-18]</sup>。菲律宾海板块经历 多次旋转、扩张后于约 15 Ma 基本不再转动,其后 经历了小规模的运动、俯冲,最终形成了现今的构 造格局。

研究区位于西太平洋海域第一岛链和第二岛 链之间,地处菲律宾海盆,东西长 375 km,南北长 108 km(图1),横跨西菲律宾海盆、九州-帕劳海岭 和帕里西维拉海盆三大地貌单元,构造作用复杂, 地貌类型丰富,是研究的理想区域。

2 研究区深海地貌定量划分

#### 2.1 地貌类型划分方法

建立 DEM 模型, 提取典型地貌因子(图 2), 结 合深远海地貌类型划分标准, 确定研究区海底地形 地貌类型, 绘制研究区地貌分布简图, 显示不同地 貌类型分布概况。

## 2.2 数据来源和计算方法

#### 2.2.1 数据来源

本次研究选择 DEM 数据进行分析研究。DEM 即数字高程模型, 是通过有限的地形高程数据实现 对地面地形的数字化模拟, 用一组有序数值阵列形 式表示地面高程的一种实体地面模型。目前国际 上常用的开放 DEM 数据主要有 SRTM、ASTER 等, 这些数据对全球陆地表面覆盖率较高, 但是缺乏

海床数据,不利于对海底微地貌单元进行研究<sup>[19-20]</sup>。 本文基于开放数据,建立研究区 DEM,利用 ArcGIS 平台的"Spatial Analyst"、"3D Analyst Tools"、 "Create TIN"等工具建立海底 DEM 模型、计算地貌 因子等。

2.2.2 地貌因子计算

地貌因子是分析地貌的重要指标,从宏观和微观两个角度对研究区地貌因子进行提取,有利于对海底地貌进行深入研究。本文将高程、坡度、坡度 变率和地形起伏度等作为典型地貌因子(表1),其 中坡度、坡度变化率的计算选取 3×3 窗口。

2.2.3 相对高程基准面

相对高程基准面是计算相对高差、判别地貌类型的基础条件。相对高程基准面即是海底地形、地物相对高程的统一起算面。一般选取海底平原、山间台地等地形平缓(海底坡度小于5°)区域(不包括海山、海丘、海岭、深海峡谷等凹凸地)的平均水深为海底相对高程基准面。本文选取研究区坡度小于5°的地形平缓区域的平均水深为本次工作的海底相对高程基准面,为确定地貌类型和绘制地貌分布简图提供计算依据,具体数值如下:

西菲律宾海盆:该区域最大水深 6713 m, 最小

水深 3033 m, 平均水深 4953 m。基准面选取范围为 水深 5000~5999 m, 根据计算平均深度为 5443 m, 作为相对高程基准面。

九州-帕劳海岭:该区域最大水深 5334 m,最小水深 1692 m,平均水深 4131 m。基准面选取范围为水深 5334~4400 m,根据计算平均深度为 4808 m,作为相对高程基准面。

四国-帕里西维拉海盆:该区域最大水深 5669 m, 最小水深 3933 m,平均水深 4963 m。基准面选取范围 为水深 5669~4700 m,根据计算平均深度为 5000 m, 作为相对高程基准面。

#### 2.3 地貌类型划分依据及类型

本文主要依据中国现有的标准、规范,包括《海 洋区域地质调查规范(1:50000)》(DD2012-07)、《海 洋区域地质调查规范(1:100000)》(DD2012-03)、 《海洋区域地质调查规范(1:250000)》(DD2012-03)、 《地球科学大辞典基础卷》以及《海底地名命名标 准》<sup>[21]</sup>,对研究区进行到四级地貌的划分(表 2),包 括海山、海丘、海底裂谷、山间谷地、山间洼地、山 间盆地,海山根据起伏度可分为小起伏山、中起伏 山、大起伏山和极大起伏山(表 3)。



图 2 基于 DEM 数据的海底地貌类型划分技术路线

Fig.2 Technical flowchart for classification of seabed geomorphology based on DEM data

表 1	典型地貌因子概念及算》
₹ I	典型地貌因于慨念及昇;

Table 1	The concept a	nd algorithm	of typical	terrain	factors
---------	---------------	--------------	------------	---------	---------

地貌因子	概念	公式
高程 (水深)	海底到大地水准面的垂直距离	Н
坡度	反映曲面的倾斜程度,用垂直高差和水平距离的比值表示	$S_i$ =arctan (H/L)
坡度变化率	以坡度为基础,对其再做一次坡度运算即可取得坡度变率	坡度之坡度
地形起伏度	特定分析区域内,高程值与相对高程基准面之差	RF <sub>i</sub> =H-H <sub>relative</sub>

Table 2    The classification of geomorphic types in the study area							
一级地貌	二级地貌	三级地貌	四级地貌				
大洋地貌		盆内海岭					
	十光分址 (五花独字海分)	深海海山群	山间谷地海山海底裂谷				
	入汗盆地(四非律兵海盆)	中央裂谷					
		深海海岭(九州-帕劳海岭)	山间洼地海山山间盆地				
	弧后盆地(帕里西维拉海盆)	深海海丘群	海丘山间谷地				

表 2 研究区地貌类型划分

表 3 基于海底起伏高程的海山类型

Table 3 The seamount type based on sea floor relief elevation

起伏高度/m 200~500 500~1000 1000~2500 >2500	
1000~3500 小起伏中山 中起伏中山 大起伏中山 极大起伏中	ıЦ
相对高度/m(相较高程基准面) 3500~5000 小起伏高山 中起伏高山 大起伏高山 极大起伏高	5山
>5000 小起伏极高山 中起伏极高山 大起伏极高山 极大起伏极高	高山

其中,海山指清晰可辨的、大体呈等维展布的 海底高山,具有圆形或椭圆形顶面,顶部水深一般 2000~2500 m,从环绕其主体周围的最深等深线算 起,顶部与周围地势起伏高差(相对高度)大于1000m, 坡度大于10°。大多由海底火山构成,部分由构造 作用形成。3个或3个以上海山呈线性排列者称海 山链;3个以上不呈线性排列者称海山群,3个以上 在海隆或洋脊上则构成海底山脉。海丘指清晰可 辨的海底隆起区,形状一般不规则,从环绕其主体周 围的最深等深线算起,顶部与周围地势起伏高差(相 对高度)小于1000 m, 坡度大于10°。海底裂谷指大 洋海底两侧以高角度正断层为边界的窄长线状凹地, 伸长、狭窄且边坡陡峭的海底洼地,深度大于6000m。 山间谷地指大洋海底山地间的纵长凹地,两侧为海 山或者海丘,坡度较缓,低于10°。山间洼地指近似 封闭比周围地面相对低洼的地形,一般低于周围海 底 200~500 m, 坡度低于 10°, 其周围为海山、海丘 环绕,其规模较山间盆地为小。山间盆地指由海山 围限的低地,一般低于周围海山 500 m,坡度低于 10°,其规模较山间洼地大。

#### 典型地貌分布特征及成因分析 3

研究区覆盖了西菲律宾海盆、九州-帕劳海岭 和帕里西维拉海盆三大地貌单元(二级地貌)。整 体上水深变化较大,最浅处水深约为1692m,最深处 水深约为6713m(图3)。海岭处水深较浅,平均水深 约为3000m。两侧水深较深,平均水深约为4500m。

研究区九州-帕劳海岭为一系列连续分布的链 状海岭,最大水深 5334 m,最小水深 1692 m,海岭 与凹地相间分布,两侧呈明显不对称,东侧陡、西侧 缓,包含海山、山间盆地、山间洼地三种不同四级 地貌单元。西部与东部具有显著的构造走向差异, 西部海岭呈近 EW 向雁式排列,东部海丘呈近 NS 向 雁式排列;东部海丘相较于西部海岭更为狭长;西 部海山规模远大于东部海山。西部西菲律宾海盆 内包含海山、海底裂谷、山间谷地三种不同四级地 貌单元,东部帕里西维拉海盆内包含海丘、山间谷 地两种不同四级地貌单元。研究区构造作用活跃, 构造运动和火山岩浆作用是多种地貌形成的主因 之一。研究区典型地貌成因分析如下:

海山:海山的成因目前仍有争议,部分科学家 认为大部分海山是在地幔柱的作用下形成的[22]。 研究区海山主要位于九州-帕劳海岭及周边,九州-帕劳海岭是在太平洋板块俯冲和火山活动的共同 作用下形成的。分析认为,研究区的海山地貌可能 与该区域的板块俯冲和火山作用引起的岩浆活动 有关。

海丘:海丘多由海底构造、岩浆作用形成,不同 构造、岩浆活动区的海丘可能是不同类型岩浆作用 的产物,也可能是多种岩浆作用的共同产物<sup>[23]</sup>。研 究区内海丘广泛分布,在东部隆起区和西部盆地区 尤为发育,这两个区域地形变化较大,分析认为其是 经历过复杂的构造作用和频繁的岩浆活动下形成。



图 3 研究区地貌图 Fig.3 Geomorphologic map of the study area

山间谷地:山间谷地通常分布在走向狭长的海 丘或海丘群之间,海丘较海山高程小,所夹持的山 间谷地相对山间盆地较浅。海丘或海丘群特殊形 态的分布,造成了山间谷地的狭长发育。

山间洼地:山间洼地主要有两种成因,一是可 能由于周围海山或海丘围绕而形成相对低洼的负 地形,二是可能由于弧后扩张的构造裂谷而形成的 低洼地<sup>(4)</sup>。研究区主要受九州-帕劳海岭影响,缺少 裂谷地貌干预,山间洼地的形成主要由正地形地貌 围限形成。

山间盆地:主要位于海山与海山之间,受海山 隆起影响而形成规模较大、深度较深、长期接受沉 积的负地形地貌。因此,其成因与海山的成因密切 相关,是在海山形成过程中由于构造作用的挤压或 拉伸造成区域相对下降而形成的。

# 4 结论

(1)本次研究提出了研究区深远海海底地貌类 型划分标准,对四级地貌划分标准进行了量化,划 分出了海山、海丘、海底裂谷、山间谷地、山间洼 地、山间盆地6种四级地貌单元。

(2)研究区水深变化较大,最浅处约为1692 m, 最深处约为6713 m,覆盖了西菲律宾海盆、九州-帕 劳海岭和帕里西维拉海盆三大地貌单元(二级地貌 单元)。受控于不同形成时期的构造应力特征,西 部与东部具有显著的构造走向差异,西部海岭呈近 EW 向雁式排列,东部海丘呈近 NS 向雁式排列;东 部海丘相较于西部海岭更为狭窄。海山、山间盆地 等大规模地貌单元的形成往往受控于强烈的岩浆、 构造等地质作用。

(3)我国暂时缺少对深远海海底地貌类型划分的相关标准、规范,应尽快进行量化标准的制定,规 范深远海海底地貌图件的绘制,本次研究是对解决 这些问题的有益尝试。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨
  [J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543. [LI Bingyuan, PAN Baotian, HAN Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 535-543.]
- [2] 张斌,李广雪,黄继锋. 菲律宾海构造地貌特征[J]. 海洋地质与第四 纪地质, 2014, 34(2): 79-88. [ZHANG Bin, LI Guangxue, HUANG Jifeng. The tectonic geomorphology of the Philippine Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(2): 79-88.]
- [3] 李四海,李艳雯,樊妙,等.基于海底地貌分类的海底地名通名分类 体系研究[J].海洋通报,2013,32(2):160-163.[LI Sihai, LI Yanwen, FAN Miao, et al. Research on the classification system for the generic names of undersea features [J]. Marine Science Bulletin, 2013,32(2):160-163.]
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 12763.10-2007 海洋调查规范第10部分:海底地形地貌调查[S].北京:中国标准出版社,2008.[General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China.
  GB/T 12763.10-2007 Specification for oceanographic survey Part 10: Submarine topography and geomorphology[S]. Beijing: China

Standards Press, 2008.]

- [5] 李学杰,王哲,姚永坚,等.西太平洋边缘构造特征及其演化[J].中 国地质,2017,44(6):1102-1114.[LI Xuejie, WANG Zhe, YAO Yongjian, et al. The tectonic features and evolution of the west Pacific margin [J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1102-1114.]
- [6] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0255-2014 海洋区域地质调查规 范(1: 50000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0255-2014 Specifications for Regional Marine Geological Survey (scale: 1: 50 000)[S]. Beijing: China Standards Press, 2014.]
- [7] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0247-2009 1: 1 000 000海洋区域 地质调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0247-2009 Specifications for regional marine geological survey (scale: 1: 1 000 000)[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.]
- [8] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0256-2014 海洋区域地质调查规范(1: 250 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0256-2014 Specifications for regional marine geological survey (scale: 1: 250 000)[S]. Beijing: China Standards Press, 2014.]
- [9] 林美华,李乃胜.菲律宾海周边的深海沟地貌[J].海洋科学,1998(6):
  29-31. [LIN Meihua, LI Naisheng The surrounding trench geomorphology of Philippine sea [J]. Marine Sciences, 1998(6): 29-31.]
- [10] 林美华,李乃胜.西菲律宾海中央断裂带地貌学研究[J].海洋地质 与第四纪地质, 1999, 19(1): 39-44. [LIN Meihua, LI Naisheng.
   Geomorphic study of the central rift zone in the west Philippine sea [J].
   Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(1): 39-44.]
- [11] 李常珍,李乃胜,林美华. 菲律宾海的地势特征[J]. 海洋科学, 2000, 24(6): 47-51. [LI Changzhen, LI Naisheng, LIN Meihua. Terrain features of the Philippine Sea [J]. Marine Sciences, 2000, 24(6): 47-51.]
- [12] Takahashi N, Suyehiro K, Shinohara M. Implications from the seismic crustal structure of the northern Izu-Bonin arc [J]. The Island Arc, 1998, 7 (3): 383-394.
- [13] Hall R, Ali J R, Anderson C D, et al. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate [J]. Tectonophysics, 1995, 251 (1-4): 229-250.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] ARK J O, HORI T, KANEDA Y. Seismotectonic implications of the Kyushu-Palau Ridge subducting beneath the westernmost Nankai Forearc [J]. Earth, Planets and Space, 2009, 61 (8): 1013-1018.
- [17] NISHIZAWA A, KANEDA K, KATAGIRI Y, et al. Variation in crustal structure along the Kyushu Palau Ridge at 15-21 N on the Philippine Sea plate based on seismic refraction profiles [J]. Earth, Planets and Space, 2007, 59 (6): e17-e20.
- [18] Yamashita M, Tsuru T, Takahashi N, et al. Fault configuration produced by initial arc rifting in the Parece Vela Basin as deduced from seismic reflection data [J]. The Island Arc, 2007, 16 (3): 338-347.
- [19] 郭华东, 王长林. 全天候全天时三维航天遥感技术: 介绍航天飞机雷达地形测图计划[J]. 遥感信息, 2000(1): 47-48. [GUO Huadong, WANG Changlin. All weather and all day 3D space remote sensing technology: instruction of shuttle radar topography mission [J]. Remote Sensing Information, 2000(1): 47-48.]
- [20] Aster G Validation Team: METI/ERSDAC, NASAJLPDAAC, USGS/ EROS, 2009: ASTER Global DEM Validation, Summary Report. 2010.
- [21] IHO. Standardization of Undersea Feature Names: Guidelines Proposal form Terminology[M]. 4th ed. Monaco: International Hydrographic Organisation and Intergovernmental Oceanographic Commission, 2008.
- [22] Tarduno J, Bunge H P, Sleep N, et al. The bent hawaiian-emperor hotspot track: inheriting the mantle wind [J]. Science, 2009, 324 (5923): 50-53.
- [23] 尚鲁宁,陈磊,张训华,等. 冲绳海槽南部海底热液活动区地形地貌 特征及成因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(4): 12-22. [SHANG Luning, CHEN Lei, ZHANG Xunhua, et al. Topographic features of the hydrothermal field and their genetic mechanisms in southern Okinawa Trough [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(4): 12-22.]