

中国富钴结壳合同区维嘉海山漂移历史和沉降过程

韦振权^{1,2}, 杨永^{1,2}, 何高文^{1,2}, 杨胜雄^{1,2}, 姚翔^{1,2}

WEI Zhenquan^{1,2}, YANG Yong^{1,2}, HE Gaowen^{1,2}, YANG Shengxiong^{1,2}, YAO Xiang^{1,2}

1.自然资源部海底矿产资源重点实验室/广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075;

2.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458

1.Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources/Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China;

2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China

摘要:应用全球板块构造-水深模型,对西太平洋中国富钴结壳合同区海山——维嘉海山的水平漂移轨迹和垂向沉降过程进行反演,获取海山各个历史时期的水深和古纬度信息,探讨海山演化过程中热点作用的影响。结果表明,维嘉海山最初形成于南太平洋同位素和热异常区,之后向NW向漂移约7500 km至现今位置。维嘉海山初始位置与其附近热点尚有一定的距离(约为200 km),随板块漂移过程中也未经过热点,与热点最近距离为150 km,结合海山现今的构造特征分析,推测热点作用并非形成海山的唯一成因,但在海山形成及漂移过程中为其打上“热点”烙印。

关键词:漂移历史;沉降过程;维嘉海山;西太平洋;富钴结壳合同区

中图分类号:P618.62;P5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0260-07

Wei Z Q, Yang Y, He G W, Yang S X, Yao X. Drift history and subsidence process of Weijia Guyot, China contract area of Co-rich crust. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 260-266

Abstract: Based on the global plate tectonic-bathymetric model, the horizontal drift track and vertical subsidence process of the Weijia Guyot, also known as the cobalt-rich nodule contract area of China in the Western Pacific Ocean, are inverted to obtain the palaeobathymetry and palaeolatitude of seamounts in different historical periods and to discuss the influence of hot spots in the evolution process of the seamount. The results show that the Weijia Guyot was formed initially in the isotopic anomaly and thermal anomaly area of South Pacific, and then drifted northeastward about 7500 km to the present position. There is a certain distance (about 200 km) between the initial location of the Weijia Guyot and its adjacent hot spots. The Weijia Guyot did not pass through these hot spots in the process of drift, and its closest distance to them is 150 km. Combined with the analysis of the present structure of the Weijia Guyot, it is speculated that these hot spots are not the only cause of the Weijia Guyot formation, but the Weijia Guyot was branded as "hot spots" in its formation and drift process.

Key words: drift history; subsidence process; Weijia Guyot; Western Pacific Ocean; contract area of Co-rich crust

维嘉海山是中国富钴结壳勘探合同区块之一,位于西太平洋的麦哲伦海山区。该海山所处的西太平洋因其基底洋壳的年龄较老,构造历史复杂,

成为太平洋中海山集中发育的地区,从而造就了著名的西太平洋富钴结壳成矿带^[1]。国内外学者对该海山的形成时代、成因、富钴结壳分布规律等开展

收稿日期:2020-05-06;修订日期:2020-11-27

资助项目:中国大洋矿产资源研究开发协会“十三五”课题《合同区海山形成演化及铁锰矿床成矿模型研究》(编号:DY135-C1-1-06)、中国地质调查局项目(编号:DD20190629-SP01)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)项目《西太平洋富稀土沉积物、富钴结壳成矿机制及其时空关系研究》(编号:GML2019ZD0106)

作者简介:韦振权(1978-),男,博士,高级工程师,从事大洋矿产资源调查与研究。E-mail:wei_zhenquan@163.com

了不同程度的研究。研究表明,维嘉海山形成于118~120 Ma^[2],多数研究者认为维嘉海山属地幔柱热点成因,它的起源与法属波利尼西亚群岛的南太平洋同位素和热异常区(SOPITA)热点在白垩纪的活动有关^[3-5]。但目前对维嘉海山自形成后如何随着太平洋板块漂移到现今位置,以及海山在漂移过程中的沉降过程尚不清楚。本文基于多种全球构造演化-水深模型,对维嘉海山在水平方向上的漂移轨迹及垂向上的沉降过程进行反演,获取海山各个历史时期的水深和古纬度信息,探讨海山演化过程中热点作用的影响,为该海山富钴结壳成矿过程的研究提供重要依据。

1 地质概况

太平洋板块诞生以来,经历了漫长的演化过程,根据大洋钻探和磁条带推算的太平洋最老洋壳年龄约为190 Ma^[6]。根据全球板块构造重建研究结果,在中生代之前,各大陆被聚合成一个大的超级大陆——Pangea 超大陆(盘古大陆),其周围是泛大洋和特提斯洋。早中生代—中生代中期,超级大陆经历了缓慢的大陆裂离。在泛大洋内部,太平洋板块于190 Ma 诞生于伊泽奈崎、法拉隆和菲尼克斯板块三联点处。中侏罗世,太平洋板块加速增长,俯冲位置发生跃迁,俯冲极性发生倒转,形成法拉隆俯冲带。晚侏罗世—早白垩世早期,太平洋板块扩张速率逐渐加快,沙茨基隆起喷发事件导致了三联点中心的重大调整。早白垩世中晚期,泛大洋发生超快速海底扩张,并伴随 Ontong-Jave、Manihiki 等一系列大火成岩省的喷发。103~100 Ma 大洋扩张方向发生改变,太平洋漂移方向从SWW 向变为NW 向。晚白垩世晚期,库拉板块从法拉隆板块裂离出来,太平洋开始沿EW 向库拉—太平洋脊和NE—SW 向库拉—法拉隆脊扩张。始新世早期,太平洋—伊泽奈崎脊开始向东亚边缘俯冲,伊泽奈崎板块消亡。库拉—太平洋板块之间的扩张方向发生了巨大变化,由SN 向变为NW—SE 向。库拉—太平洋和库拉—法拉隆之间的扩张于40 Ma 停止。23 Ma,法拉隆板块进一步分裂,形成Cocos 和Nazca 板块,东太平洋隆、加拉帕戈斯扩张中心和智利脊开始形成。中新世之后,鲍尔微板块沿东太平洋洋隆形成,并持续到6 Ma,之后扩张位置跃迁至东太平洋隆;由于汤加—克马德克和伊

豆—小笠原—马里亚纳海沟的俯冲带的后撤,西太平洋主要受控于一系列弧后盆地的打开^[6]。

维嘉海山位于西太平洋马里亚纳东侧的东马里亚纳海盆东北缘,与Vlinder、Loah、采薇等海山构成整体呈NW 向链状分布的麦哲伦海山区,而海山区单座海山的走向为NE 向(图1)。整个海山区属大型断块状隆起,延长近1200 km,海山区的海山年龄在80~120 Ma 之间^[2,7-9],海山区的火山活动表现为3个主要阶段:先形成火山基底,然后盾形海山形成,海山被侵蚀、淹没后再次的火山活动形成火山锥^[5]。根据该海山区历年的航次调查结果,海山地层明显分为基底和沉积盖层双层构造,两者之间呈明显的角度不整合接触关系。海山基底岩石主要由早白垩世拉斑玄武质枕状熔岩组成,其次为早白垩世—古近纪亚碱性玄武岩及新近纪碱性玄武岩和火山碎屑岩;海山沉积盖层主要为早白垩世—古新世生物礁灰岩、泥岩,始新世—早中新世有孔虫灰岩及古近纪—全新世有孔虫砂、软泥等钙、泥质沉积物等,沉积厚度不等^[1]。经浅层剖面调查,上覆沉积层的厚度为25~100 m^[10]。

2 反演方法

全球板块重建模型为地质数据提供了时空框

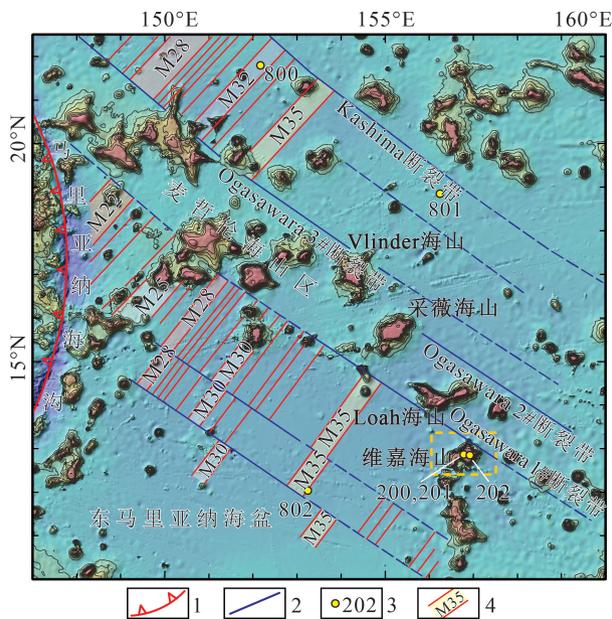


图1 麦哲伦海山区构造简图(据参考文献[2]修改)

Fig. 1 Simplified structural map of the Magellan Seamounts
1—俯冲带;2—转换断层;3—ODP 钻孔;4—磁条带及编号

架,是探索地球表面过程的有效工具^[6]。板块重建是全球构造研究的核心和前沿,随着重建采用的技术不断更新,多学科成果不断综合和相互验证,新成果、新发现、新学科和高精尖技术不断融入,重建结果也越来越精细^[11]。目前,板块重建可分为三大类:①基于GPS测量的现今板块运动^[12]、基于空间大地测量学(如GEODVEL^[13])、基于伸展率、断层方位角和GPS测量组合(如NUVEL-1^[14])的“地质流(Geologically current)”模型;②基于海底扩张记录和/或古地磁数据解释的传统板块构造模型,以在绝对参考框架内重建海洋盆地、大陆和地体^[15-16];③耦合地球动力学-板块模型,其模拟板块边界位置和地幔密度呈异质性,以预测过去和/或现在的板块运动^[17]。

经过多年研究,目前已建立的全球板块模型数目繁多。不同研究团队在板块重建领域表现出某方面的积累和特色^[11]。例如,Scotese等^[18]最早利用计算机从事板块的重建研究,以地球系统为基本理念开展重建,涉及板块构造、古地理、古气候等;Müller等^[19]以海底磁条带和古水深重建为特色;Piper等^[20]则仅依据古地磁极移为依据进行重建等。

GPlates是由悉尼大学EarthByte项目开发的、用于板块构造交互式可视化的开源软件,利用该软件可实现地史时期内板块构造重建和相关数据的可视化与操控。GPlates软件极大地提高了地质学和地球物理学家生成下一代板块重建模型^[21-22]及其相关地质信息模型^[23]的能力,不但支持构建全局板块层次结构和旋转文件,而且允许测试可选的板块运动模型,还包含构建连续闭合板多边形的功能^[24]。本文利用GPlates软件,基于Seton等^[6]、Müller等^[19]和Scotese等^[18]3个代表性的全球板块重建模型,对研究区水平方向上的漂移轨迹和垂向上的沉降过程进行反演。

其中,Seton等^[6]的模型由一组具有相关板块边界和板块速度的连续闭合拓扑板块多边形组成,以重建洋盆海底扩张历史和大陆运动的板块运动为基础,采用混合绝对参考框架,基于过去100 Ma的移动热点模型,以及200~100 Ma的真极移校正古地磁模型,并利用详细的区域地质和地球物理观测数据限制板块边界的出现、消失,以及不同时间的几何形态。该模型是新一代地球动力学研究的参考模型。

Müller等^[19]的模型是基于Seton等^[6]的工作基础建立的,但包括许多区域更新和改进,尤其是对太平洋重建进行了一次重大的更新,利用了大量的磁异常数据汇编^[25],以及太平洋断裂带轮廓^[26-27],大大降低了太平洋板块运动的不确定性。Dutkiewicz等^[28]按照Müller等^[6]描述的方法,基于Müller等^[19]的构造重建模型,通过转换洋壳古年龄至基底深度,构建海洋古深度图,其中还包含主要大型火成岩省的高程。

Scotese等^[18]的模型是一个兼具构造和古高程的模型。其构造模型依据Scotese等^[29]的方法,主要利用10类证据进行了板块构造重建:洋盆年龄、综合等时线、热点和大型火成岩省、俯冲坟场(Subduction Graveyards)、古地磁、真极移(TPW)、古生物地层学、古气候、大陆地质和构造、板块构造。由于每类证据在不同时期对于模型重建的重要性不同,而且有的证据明显有时间范围限制(如洋盆年龄、综合等时线和俯冲坟场),因此在模型重建时,随时间推移这些证据权重也应随之调整,以便评估构造模型的准确性。而古高程模型主要是依据Stein等^[30]发表的深度/年龄关系建立的。

3 反演结果及讨论

基于前述3种全球板块重建-水深模型,获得西太平洋维嘉海山漂移轨迹、古水深等相关信息,如表1、图2、图3所示。结果显示,通过不同构造模型反演获得的海山初始位置总体位于南太平洋同位素和热异常区,但具体位置差别较大。通过不同构造模型获得的维嘉海山漂移轨迹在120~50 Ma之间差别较大,但在50 Ma以来趋于一致。海山总体漂移方向为NW向,漂移距离约7500 km,海山于60~70 Ma由南半球漂移至北半球。对于板块重建而言,年代越老,不确定因素越多,反演误差也会越大。不同模型由于方法、参数及引用资料的不同,也会得到不同的反演结果。这是不同模型在50 Ma之前的反演结果差别较大的主要原因。

有关麦哲伦海山区海山的成因目前主要有2种观点,断裂成因和热点-地幔柱成因,而多数学者支持热点-地幔柱成因^[5,32-33]。根据Seton等^[6]、Müller等^[19]和Scotese等^[18]的模型获得的海山初始位置与最近热点的距离分别为215 km、235 km和630 km,海山随大洋板块漂移过程中距离热点最近的距离

分别为 180 km、150 km 和 240 km。虽然海山初始位置均落入南太平洋同位素和热异常区,但无论是海山初始形成时,还是海山漂移期间,都与该区最近的热点有一定的距离。而海山目前整体属于断隆区,推测维嘉海山可能并非单一热点成因,而是断裂和热点共同作用的结果。

大洋岩石圈产生于洋中脊,当远离扩张脊时,大洋岩石圈冷却并下沉,其热沉降量与海洋地壳年龄的平方根成反比^[34],各种水深模型主要根据这一关系推算洋底古水深。Dutkiewicz 等^[28]的古水深模型是基于 Müller 等^[19]构造模型和洋壳年龄数据建立的,仅对大洋盆地和大火成岩省的古深度进行了恢复,其古水深网格分辨率为 0.1°,时间范围为 120

Ma 至现今,间隔 10 Ma。因此利用该模型只能获取维嘉海山所处洋盆的古水深数据。通过洋盆古水深减去维嘉海山相对于周围洋盆的高度(4650 m)获得了该海山的古深度曲线(图 3-A)。根据反演结果,维嘉海山 120 Ma 时初始水深约为 490 m,之后随大洋板块漂移并沉降,至 40 Ma 时沉降至约 850 m,之后沉降趋于稳定,垂向水深变化很小。总体上,古水深反演结果较好地反映了海山总体沉降趋势。OIDP20 航次在维嘉海山上打了 3 个孔,其中 202 孔钻遇鲕粒灰岩,鲕粒灰岩之下为含珊瑚碎屑的钙质泥,指示与边缘礁有关的潟湖沉积,说明海山曾出露海面,之后才沉入海底。海山现今最浅的水深约为 1400 m。由此看,据 Dutkiewicz 等^[28]获

表 1 维嘉海山古位置及其古水深信息

Table 1 Information of paleolocation and palaeobathymetry of the Weijia Guyot

年龄 /Ma	Seton 等 ^[6]			Müller 等 ^[19]				Scotese 等 ^[18]			
	经度/°	纬度/°	距热点距离	经度/°	纬度/°	距热点距离	水深/m *	经度/°	纬度/°	距热点距离	水深/m
120	-131.48	-22.38	120 Ma 距 Pitcairn 热点约 215 km	-146.31	-14.78	120 Ma 距 Society 热点约 235 km, 115 Ma 时距 Society 热点约 150 km	5143	-158.52	-10.62	距 Samoa 热点约 650 km;	4560
110	-136.02	-18.07		-152.16	-16.65		5244	-158.52	-10.62	距 Rarotonga 热点约 630 km;	4120
100	-141.65	-17.25		-158.42	-16.81		5318	-158.52	-10.62	距 Society 热点约 700 km	4920
90	-146.81	-15.54	90 Ma 距 Society 热点约 180 km	-163.36	-14.99		5375	-158.52	-10.62		5320
88	-147.66	-14.97		-164.16	-14.41			-158.52	-10.62		
86	-148.40	-14.41		-164.83	-13.80			-158.10	-9.88		
84	-149.15	-13.86		-165.49	-13.32			-157.35	-8.37		
82	-150.68	-12.52		-166.22	-12.22			-158.45	-6.44		
80	-152.45	-10.89		-166.98	-10.86	82 Ma 距 Samoa 热点约 235 km	5418	-159.99	-4.78		1360
70	-158.89	-4.38		-169.41	-5.63		5450	-167.65	-0.74		5240
60	-163.45	0.75	10 Ma 距 Caroline 热点约 320 km	-171.20	-2.21		5473	-173.86	3.28		5920
50	-169.80	4.16		-173.19	2.90		5489	-175.38	4.75		6000
40	-174.84	5.57		-178.35	5.37		5499	-179.47	5.43		5594
30	178.07	7.91		177.62	6.65		5503	175.91	6.89		5880
20	171.38	10.01		171.46	8.67		5501	170.61	7.77		5880
10	164.51	10.90		164.30	10.01	10 Ma 距 Caroline 热点约 280 km	5492	164.63	9.42	10 Ma 距 Caroline 热点约 240 km	5800
0	156.87	12.88		156.87	12.88		5473	156.87	12.88		3000

注: * 表示 Müller 等^[19]的模型为构造重建模型,水深数据据参考文献[28],为海山所处洋盆位置的古水深

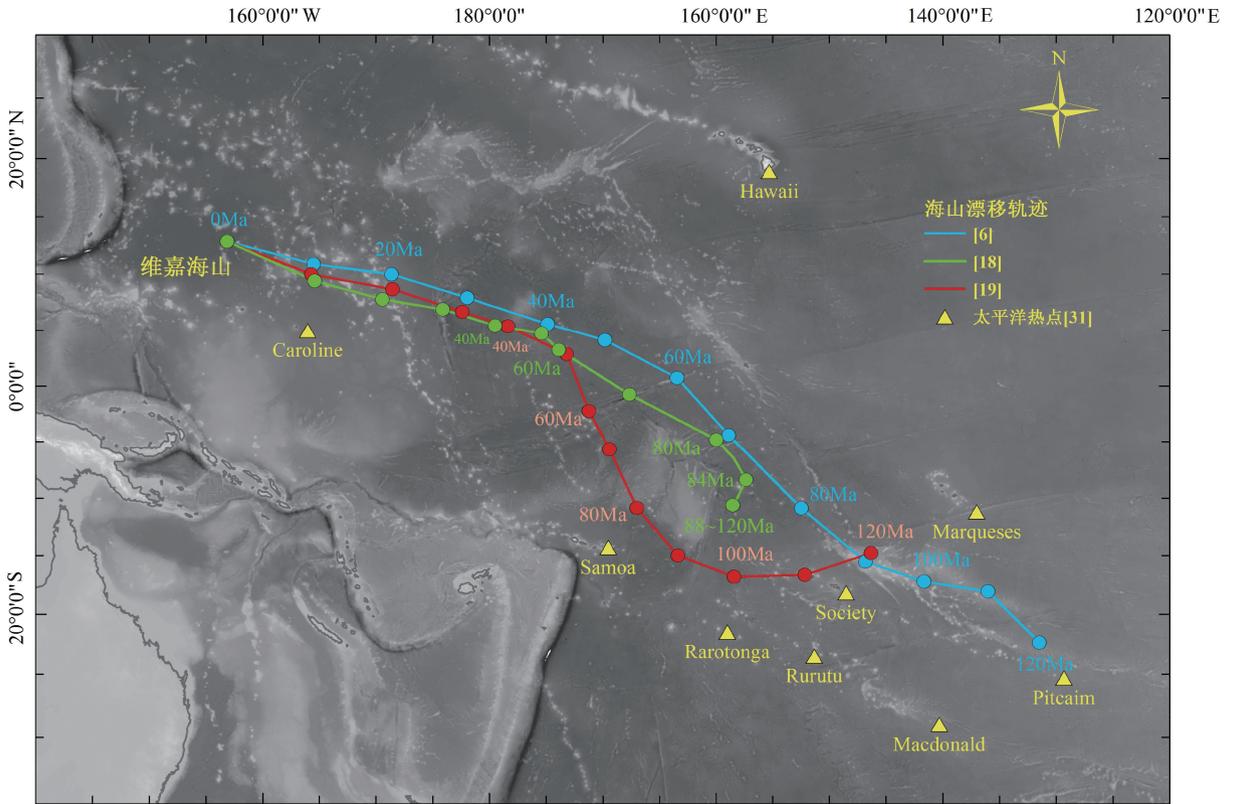


图2 维嘉海山形成以来的漂移轨迹

Fig. 2 The drift track of the Weijia Guyo since its formation

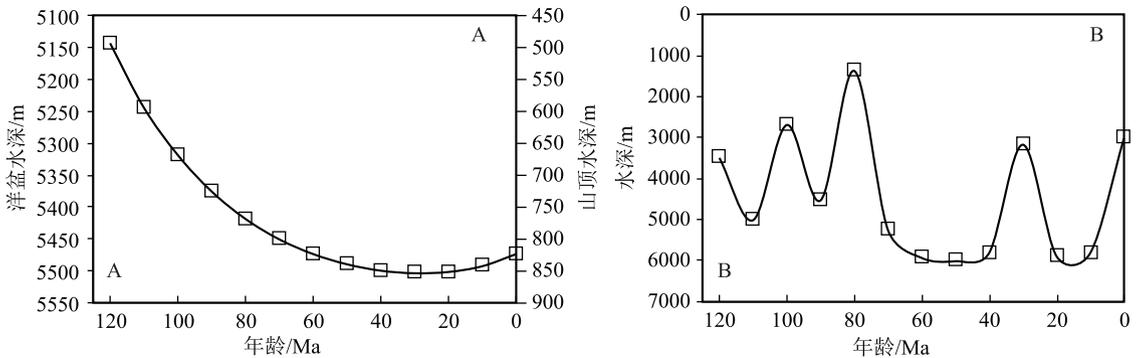


图3 维嘉海山中心点古水深变化曲线(A据参考文献[19,28];B据参考文献[18])

Fig. 3 Curve of palaeobathymetry at the center of the Weijia Guyot

得的古水深与现今实际水深与地质认识存在一定的误差,表现为初始水深偏大,因此在利用这些数据开展精细研究时需谨慎。

Scotese 等^[18]的古高程模型描述了过去 540 Ma 深海、浅海、低地、山区等各类地形以 5 Ma 间隔变化的分布特征,分辨率为 1°。图 3-B 是根据 Scotese 等^[18]的模型获得的维嘉海山中心点古水深变化曲

线,其中维嘉海山古水深忽深忽浅,显然是不合理的。正如 Scotese 等^[18]所述,该模型是一个初步成果,仍需进行修正,如一些地理特征出现、消失、再出现。深入分析发现,由于古高程网格精度低,相邻网格数值突变明显;构造模型与高程模型没有完好匹配,如维嘉海山所处位置,有时落入海山高值区,有时落入洋盆低值区(图 4);88~120 Ma,维

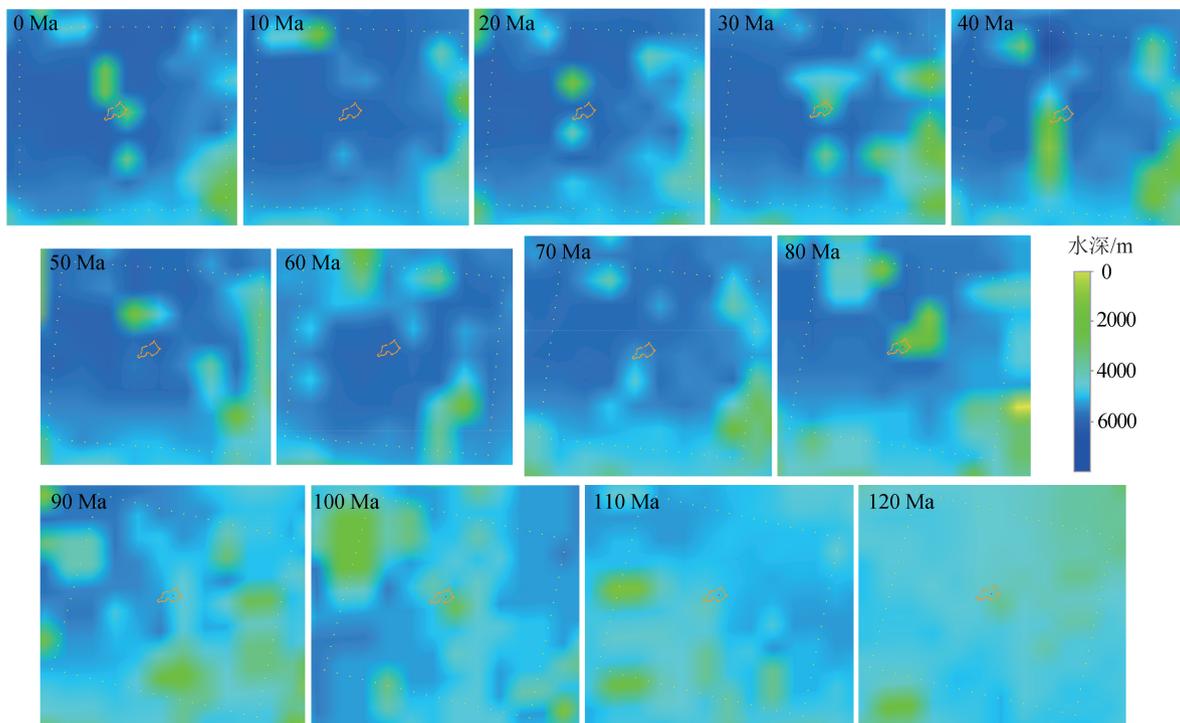


图 4 维嘉海山及邻域古水深图

Fig. 4 Palaeobathymetry diagram of the Weijia Guyot and its adjacent areas

嘉海山所处位置构造模型固定不变,但高程模型一直在变化(表 1)。鉴于该古高程模型存在较多问题,在改进之前不适用于与古水深有关的精细研究。

综上所述,利用全球构造模型可以较好地获取海山的漂移轨迹,为海山的成因及海山富钴结壳成矿过程研究提供相关依据。本文利用全球水深模型开展海山沉降过程研究,效果不理想,与重建洋底的古水深模型极具挑战性有关。根据洋壳年龄-深度曲线获得的古水深指一定区域的平均水深,且需对沉积层荷载引起的均衡调整作用予以矫正;对于较大的洋壳年龄(70~80 Ma),地壳深度随时间的变化率很小,所以这种关系并不适用。此外,沉积物厚度、沉积物负荷、初始深度变化等影响因素到目前为止还没有很好理解;海底火山和高地、断裂带、巨厚的沉积区、岛弧-海沟系等属于异常区,也不符合上述深度-年龄关系。因此,目前的全球水深模型仅能反映总体沉降趋势,适用于区域性构造尺度的研究。而用于精细研究的高分辨率、高精度、与地质认识相吻合的全球水深模型尚待开发。

4 结 论

(1) 维嘉海山最初形成于南太平洋同位素和热异常区,之后向 NW 漂移约 7500 km 至现今位置。

(2) 基于全球构造模型反演的维嘉海山初始位置与其附近热点有一定的距离(约 200 km),随板块漂移过程中也未经过热点,与热点最近距离为 150 km。结合海山现今构造特征,推测热点作用并非海山的唯一成因,但在海山形成及漂移过程中为其打上“热点”烙印。

(3) 利用全球水深模型获得海山古深度,较好地反映了维嘉海山总体沉降过程。但鉴于目前模型自身的局限性,导致反演结果与现今实际水深和地质认识存在一定误差,因此,在利用全球水深模型开展精细研究时需谨慎。

参考文献

- [1] 任向文. 西太平洋富钴结壳成矿系统[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2005: 64-67.
- [2] Koppers A A P, Staudigel H, Pringle M S, et al. Short-lived and discontinuous intraplate volcanism in the South Pacific: Hot spots or

- extensional volcanism? [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4(10): 1–49.
- [3] Staudigel H, Park K H, Pringle M, et al. The longevity of the South Pacific Isotope and Thermal Anomaly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102(1): 24–44.
- [4] Koppers A A P, Staudigel H, Christie D M, et al. Sr–Nd–Pb Isotope Geochemistry of Leg 144 West Pacific guyots: implications for the geochemical evolution of the ‘SOPITA’ mantle anomaly [C]// Haggerty JA, Premoli Silva I, Rack F, et al (Eds.). *Proc. ODP Leg 144*, 1995: 535–545.
- [5] Koppers A A P, Staudigel H, Wijbrans J R, et al. The Magellan seamount trail: implications for Cretaceous hotspot volcanism and absolute Pacific plate motion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163(1/4): 53–68.
- [6] 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.
- [7] Epp D. Possible perturbations to hotspot traces and implications for the origin and structure of the Line Islands [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B13): 11273–11286.
- [8] Lonsdale P. Geography and history of the Louisville hotspot chain in the Southwest Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93 (B4): 3078–3104.
- [9] Wessel P, Kroenke L. A geometric technique for relocating hotspots and refining absolute plate motions [J]. *Nature*, 1997, 387: 365–369.
- [10] 何高文, 赵祖斌, 朱克超, 等. 西太平洋富钴结壳资源 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 10–15.
- [11] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 超大陆与全球板块重建派别 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 97–117.
- [12] Argus D F, Heflin M B. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(15): 1973–1976.
- [13] Argus D F, Gordon R G, Heflin M B, et al. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth’s centre from space geodesy [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 180(3): 913–960.
- [14] Demets C, Gordon R G, Argus D F. Geologically current plate motions [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(1): 1–80.
- [15] Scotese C R. Jurassic and Cretaceous plate tectonic reconstructions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, 87 (1/4): 493–501.
- [16] Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Long-term sea level fluctuations driven by ocean basin dynamics [J]. *Science*, 2008, 319 (5868): 1357–1362.
- [17] Stadler G, Gurnis M, Burstedde C, et al. The dynamics of plate tectonics and mantle flow: From local to global scales [J]. *Science*, 2010, 329(5995): 1033–1038.
- [18] Scotese C R, Wright N. PALEOMAP Paleodigital Elevation Models (PaleoDEMS) for the Phanerozoic PALEOMAP Project [M]. <https://www.earthbyte.org/paleodem-resource-scotese-and-wright-2018>.
- [19] Müller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangeabreakup [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2016, 44(1): 107–138.
- [20] Piper J D A. A planetary perspective on Earth evolution: Lid Tectonics before Plate Tectonics [J]. *Tectonophysics*, 2013, 589: 44–56.
- [21] Boyden J A, Müller R D, Gurnis M, et al. Next-generation plate-tectonic reconstructions using GPlates [C]// Keller G R, Baru C. *Geoinformatics: Cyberinfrastructure for the Solid Earth Sciences*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2011: 95–114.
- [22] Cannon J, Lau E, Müller R D. Plate tectonic raster reconstruction in GPlates [J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2): 741–755.
- [23] Qin X, Müller R D, Cannon J, et al. The GPlates Geological Information Model and Markup Language [J]. *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.*, 2012, 2: 365–428.
- [24] Gurnis M, Turner M, Zahirovic S, et al. Plate tectonic reconstructions with continuously closing plates [J]. *Comput. Geosci.*, 2012, 38(1): 35–42.
- [25] Seton M, Whittaker J M, Wessel P, et al. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2014, 15(4): 1629–1641.
- [26] Matthews K J, Müller R D, Wessel P, et al. The tectonic fabric of the ocean basins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: B12109.
- [27] Wessel P, Matthews K J, Müller R D, et al. Semiautomatic fracture zone tracking [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2015, 16: 2462–2472.
- [28] Dutkiewicz A, Müller R D, Cannon J, et al. Sequestration and subduction of deep-sea carbonate in the global ocean since the Early Cretaceous [J]. *Geology*, 2019, <https://doi.org/10.1130/G45424.1>.
- [29] Scotese C R. Atlas of Oceans & Continents: Plate Tectonics, 1.5 by – Today, PALEOMAP Project Report 112117A [M]. <https://www.researchgate.net/publication/321197460.2017>.
- [30] Stein C A, Stein S A. A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age [J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 123–129.
- [31] Clouard V, Bonneville A. How many Pacific hotspots are fed by deep-mantle plumes? [J]. *Geology*, 2001, 21(8): 695–698.
- [32] Sager W W, Handschumacher D W, Hilde T W C, et al. Tectonic evolution for the northern Pacific plate and Pacific–Farallon–Izanagi triple junction in the Late Jurassic and Early Cretaceous (M21–M10) [J]. *Tectonophysics*, 1988, 155(1/4): 345–364.
- [33] Smith W H F, Staudigel H, Watts A B, et al. The Magellan seamounts: early Cretaceous record of the south Pacific isotopic and thermal anomaly [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(B8): 10501–10523.
- [34] Parsons B, Sclater J G. An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(5): 803–827.