

doi:10.3799/dqkx.2010.078

中西太平洋海山区的岩石圈有效弹性厚度及其地质意义

赵俐红^{1,2}, 金翔龙¹, 高金耀¹, 李家彪¹, 初凤友¹

1. 国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

2. 山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266510

摘要: 中西太平洋海山区是太平洋板块上洋壳年龄最老、磁条带异常最复杂、海山分布最密集、地质构造最独特、构造活动最强烈的一个区域, 为探讨区内众多海山的构造成因, 以板块构造理论为指导运用弹性板挠曲理论计算了中西太平洋海山区岩石圈的有效弹性厚度。结果显示, 研究区的有效弹性厚度总体上表现为北西高南东低的趋势, 西边的麦哲伦海山链表现出南北低中间高的趋势, 东边的中太平洋海山群呈现出由西往东厚度递减的现象, 且这 2 个典型区域的岩石圈有效弹性厚度与现今法属玻利尼西亚群岛处的比较接近。据此推测它们是在白垩纪期间(约 130~90 Ma)形成于现今法属玻利尼西亚群岛处的大规模热点群附近, 且受到了后期火山岩浆活动的改造作用。

关键词: 中西太平洋; 弹性板挠曲; 有效弹性厚度; 构造地质; 地球物理。

中图分类号: P541; P631

文章编号: 1000-2383(2010)04-0637-08

收稿日期: 2009-10-20

The Effective Elastic Thickness of Lithosphere in the Mid-West Pacific and Its Geological Significance

ZHAO Li-hong^{1,2}, JIN Xiang-long¹, GAO Jin-yao¹, LI Jia-biao¹, CHU Feng-you¹

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2. College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

Abstract: The Mid-West Pacific region is featured with the oldest oceanic crust, the most complicated magnetic anomaly lineation, the densest seamounts, the most peculiar geological feature and the strongest tectonic activity. To research tectonic genesis of these intraplate seamounts, this paper calculates the effective elastic thickness of the lithosphere (T_e) with the elastic plate flexure based on the plate tectonic theory in the Mid-West Pacific. As a whole, T_e slowly drops from the northwest part to the southeast part in the region. T_e of the MST is higher in the middle of the trail than that in the north and the south parts. T_e of the MPM is higher in the west part of the mountains than that in the east part. Furthermore, T_e of these two typical areas is close to that of the present French Polynesia region. Thus, these seamounts were formed by the large volcanism which was produced by several hotspots during Cretaceous in the present French Polynesia region. And then these seamounts underwent some tectonic activities.

Key words: Mid-West Pacific; elastic plate flexure; effective elastic thickness; tectonics; geophysics.

尽管通过大洋条带状磁异常和深海钻探(DSDP)、大洋钻探(ODP)得到的资料已经对太平洋底洋壳的年龄了解得比较详细, 但有关其上海山的年龄和起源目前研究还很不够, 对于区内海山的形成

也尚无一个统一的说法。中西太平洋海山区位于太平洋海山密集分布的区域, 不但其海山分布独具特色, 或排列成线状或聚集成群(Menard, 1964; Heezen *et al.*, 1973; Winterer, 1976), 而且周围的磁

基金项目: 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助(No. JB0701); 山东省教育厅科技计划项目(No. J08LB53); 浙江省博士后科研项目择优资助资金项目。

作者简介: 赵俐红(1976-), 女, 博士后, 从事海洋地球物理与构造地质研究。E-mail: zhaolih751225@163.com

异常条带分布、断裂分布和火成岩省分布也极为复杂,这些因素对该区的研究造成了困难,但也为我们的研究提供了丰富的素材。Watts *et al.* (1980)曾运用板块挠曲理论对广泛分布于太平洋洋底的板内海山的起源进行过研究,并根据计算得到的有效弹性厚度将其上的众多板内海山分为“on-ridge”型海山和“off-ridge”型海山两类。本文拟以板块构造和地壳均衡理论为指导,计算研究区的岩石圈有效弹性厚度,尤其是典型海山下岩石圈的有效弹性厚度,通过对比太平洋中两大典型中生代磁静区(研究区所在的中、西太平洋和现今南太平洋的法属玻利尼西亚群岛)的岩石圈强度情况,进一步分析研究区众多远离板块边缘的板内海山的可能形成机制。

1 岩石圈有效弹性厚度的概念及其地质意义

岩石圈有效弹性厚度(effective elastic thickness, T_e)源于岩石圈的挠曲和均衡理论,这个概念的提出最初是为了研究广泛分布于大洋底的海山或火山引起的其下大洋岩石圈发生的挠曲变形情况(Walcott, 1970; Watts and Cochran, 1974)。伴随着板块构造理论的出现,对这一基于区域均衡补偿和弹性板挠曲理论的岩石圈有效弹性厚度的研究,成了理解岩石圈动力学性质的一个重要内容,也成了岩石圈动力学研究的一个热点。

所谓有效弹性厚度 T_e 即为与岩石圈板块中的实际应力所产生的弯距相等的理论弯曲弹性薄板的厚度(Forsyth, 1985; 付永涛等, 2000),标志着在地质时间尺度内岩石承受超过 100 MPa 压力时发生弹性行为和流体行为转变的深度(McNutt and Judge, 1990)。通常认为,在地质时间尺度上施加的负载会使大洋岩石圈产生薄的弹性板变形,进而可应用重力与海底地形之间的均衡响应函数来进行海山下岩石圈挠曲刚度和有效弹性厚度的计算(Walcott, 1970; Watts and Cochran, 1974)。大洋岩石圈的 450 ± 150 °C 等温面限定了岩石圈的有效弹性厚度,并且岩石圈有效弹性厚度随加载时岩石圈的年龄平方根的增加而增加,这显然是大洋岩石圈的挠曲刚度强烈地依赖于岩石圈的温度结构(Watts *et al.*, 1980; Watts *et al.*, 1982; Calmant and Cazenave, 1987)所致,这个关系类似于大洋岩石圈的沉降与岩石圈的年龄之间的关系(Parsons and

Sclater, 1977)。这种有效弹性厚度和板块加载时年龄之间的简单关系,目前已经被更多的研究和数据所证实了(Goodwillie and Watts, 1993; Filmer *et al.*, 1993; Kruse *et al.*, 1997)。这样通过洋壳年龄和海山负荷加载时的年龄便可得到海山的年龄,再结合板块的演化史和运动史便可得到海山形成的大致区域。

通过有效弹性厚度研究不仅可以得到岩石圈大规模构造及板块内的均衡补偿机制,而且还可以获得不同地区、不同构造单元岩石圈的挠曲刚度以进行区域间的比较;另外结合地热流参数还可以了解岩石圈板块的历史、热状态、热年龄和耦合关系等(付永涛等, 2000)。岩石圈有效弹性厚度的大小很大程度上受岩石圈热结构和热年龄的控制(Karner *et al.*, 1983; Bechtel *et al.*, 1990)。热年龄越小, T_e 值越低;热年龄越高, T_e 值越大(Zuber *et al.*, 1989)。一般来说,挠曲刚度降低(有效弹性厚度低值)的地方通常伴随有高的大地热流值、高的地幔电导率、低的 P_n (折射 P 波)速度及地震走时延迟等(袁炳强等, 2002)。大地热流与岩石圈构造演化之间的关系主要表现在构造活动性和最后一次构造—热事件年龄的关系上。研究发现,板内火山下的大洋岩石圈弹性厚度与加载时板块年龄的平方根成线性关系(Watts, 1978; Watts *et al.*, 1980)。Calmant and Cazenave(1987)和 Calmant(1987)对太平洋、大西洋、印度洋中 60 个火山岛屿下的大洋岩石圈的挠曲强度进行研究后,发现在海山下的岩石圈弹性厚度随着板块承受载荷时的年龄的增加而增加。因此,岩石圈弹性厚度在某些情况下也可以被用来预测火山或洋壳的年龄(Calmant *et al.*, 1990)。

2 岩石圈有效弹性厚度的计算

本文首先在整个研究区选择了 9 个剖面(图 1 中黑线),沿着剖面线在二维频率域运用弹性板挠曲理论对它们所在处大洋岩石圈的有效弹性厚度 T_e 进行了计算。计算时先假定一个 T_e 值,由地形数据通过地形—重力关系式得到各剖面相应的理论空间重力异常,并与实际测得的空间重力异常进行比较,得到剩余空间重力异常,然后根据剩余重力异常的均方根调整大洋岩石圈的 T_e ,最后得到最佳拟合(最小剩余重力异常)下的大洋岩石圈的有效弹性厚度。模型计算中用到的参数见表 1,表 2 列出了这 9 个剖面的计算结果。计算结果显示,该区岩石圈的有

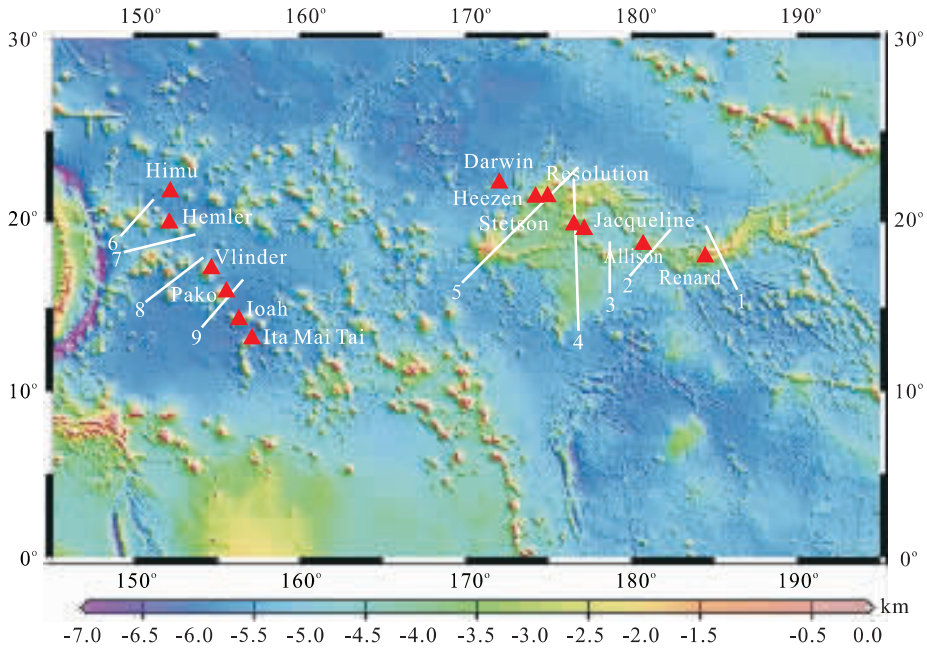


图 1 中西太平洋海山区地形

Fig. 1 Topography of the Mid-West Pacific seamount region

表 1 模型计算中用到的参数

Table 1 Parameters used by the flexural model

参数	定义	值/单位
$w(x)$	板块挠曲	m
D	挠曲刚度	$N \cdot m$
T_e	有效弹性厚度	m
ρ_w	海水密度	$1\ 025\ kg/m^3$
ρ_c	洋壳密度	$2\ 800\ kg/m^3$
ρ_m	地幔密度	$3\ 330\ kg/m^3$
g	重力加速度	$9.82\ m \cdot s^{-2}$
E	杨氏模量	$6.5 \times 10^{10}\ Pa$
ν	泊松比	0.25

$$D = ET_e^3 / 12(1 - \nu^2).$$

表 2 剖面计算结果

Table 2 Calculation result of nine profiles

剖面	起点经度 (°)	起点纬度 (°)	终点经度 (°)	终点纬度 (°)	T_e (km)	均方根
剖面 1	184.30	19.70	186.20	16.0	7	0.582 2
剖面 2	182.20	19.50	179.70	16.8	6	0.444 3
剖面 3	178.50	18.80	178.50	15.8	7	0.398 1
剖面 4	176.33	22.34	176.63	13.6	11	0.507 8
剖面 5	176.60	23.00	169.60	16.4	11	0.527 8
剖面 6	151.00	21.20	149.00	19.1	15	0.842 7
剖面 7	153.50	19.20	149.20	18.2	16	0.530 9
剖面 8	154.00	17.90	150.50	15.3	14	0.765 9
剖面 9	156.40	16.60	153.90	13.8	17	0.397 8

效弹性厚度 T_e 总体上表现出西边大东边小且越往东越小的趋势; 麦哲伦海山区内海山的 T_e 大而中

太平洋海山群地区海山的 T_e 小; 中太平洋海山群西部大东部小. 数值上, 中太平洋海山群处岩石圈的 T_e 介于 6~11 km 之间, 而麦哲伦海山区的 T_e 介于 14~17 km 之间.

继而参照上述由二维剖面得到的结果, 将研究区 150°E 以东的区域划分成 12 个矩形区域(图 2), 以弹性板挠曲理论为指导在三维频率中通过地形—重力关系式由各区块的地形数据计算其相应的理论空间重力异常, 再将它们与各自实测的空间重力异常值进行比较, 根据得到的剩余重力异常调整有效弹性厚度 T_e , 直到得到的剩余重力异常的均方根值为最小时为止, 此时的 T_e 即为我们所需的各区块的最佳值, 表 3 列出了通过上述方法得到的各区块的 T_e 值和相应的均方根. 对照图 2 和表 3, 在这 12 个矩形区块中夏威夷海山链所在的区块 3 的大洋岩石圈的 T_e 值为最大, 达到了 32 km, 远大于该研究区其他区块的 T_e 值, 这个值与 Wessel(1993) 采用的将建立在流变学基础上的屈服强度和新的三维挠曲计算结合起来得到的结果相近; 而其他区块的大洋岩石圈的 T_e 均要小于 20 km, 且 T_e 值最小的为中太平洋海山群东部所在的区块 6, 计算得到的结果只有 5 km 左右. 再看麦哲伦海山链和中太平洋海山群所在的中部区块(包括区块 4、5、6、7、8、9), 可以发现在这个区域总体上也是呈现出东部的 T_e 要小于西部的 T_e , 以 170°E 为界, 两边的 T_e 值变化比

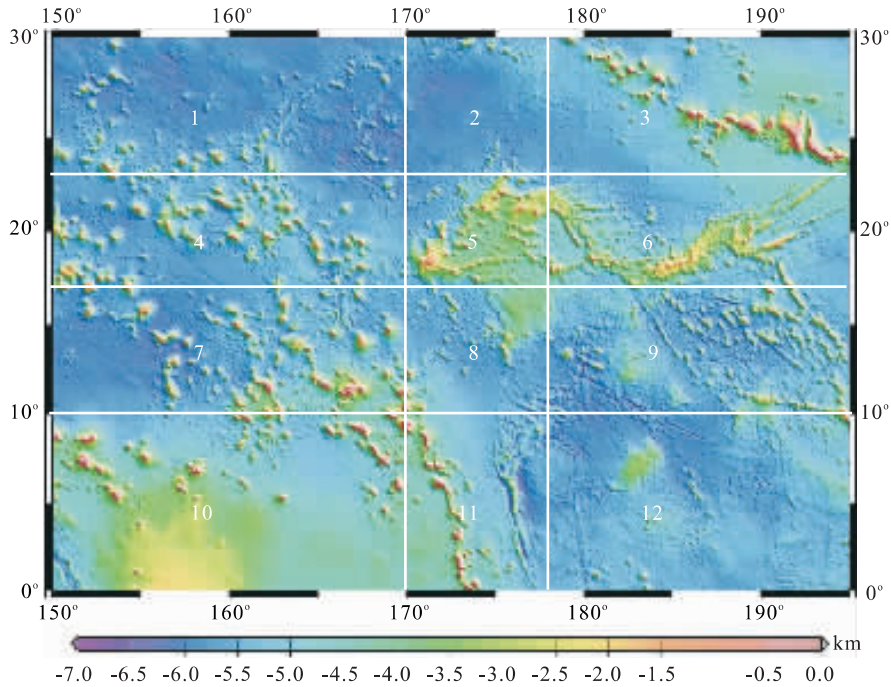


图 2 研究区 12 个区块划分

Fig. 2 Twelve blocks of the study region

表 3 研究区各区块 T_e 值Table 3 T_e of twelve blocks in the study region

区块	1	2	3	4	5	6
T_e (km)	16.0	6.0	32.0	17.0	10.2	5.0
均方根	0.079 5	0.092 5	0.122 2	0.113 7	0.129 2	0.094 9
区块	7	8	9	10	11	12
T_e (km)	17.0	6.5	8.5	16.0	15.0	10.0
均方根	0.091 4	0.099 5	0.081 5	0.089 4	0.118 2	0.052 6

表 4 中太平洋海山群 7 座海山的 T_e Table 4 T_e of seven seamounts in the Mid-Pacific Mountain

海山	经度(°)	纬度(°)	T_e (km)	均方根
Darwin	171.6	22.0	4.5	0.128 6
Heezen	173.8	21.2	4.0	0.265 0
Resolution	174.5	21.2	11.0	0.243 2
Stetson	176.1	19.6	8.0	0.178 3
Jacqueline	176.7	19.4	7.5	0.193 4
Allison	180.3	18.5	4.5	0.282 1
Renard	184.0	17.8	4.0	0.299 4

较大,西边的 T_e 为 17 km,而越过这条线往东突然降至 10 km.

显然,无论是在二维频率域沿剖面线计算得到的结果,还是在三维频率域得到的各矩形区块的结果均显示,研究区所在大洋岩石圈的有效弹性厚度 T_e 总体上表现为由北西向南东逐渐减小且越往东越小的趋势(除夏威夷海山链所在的区块 3 外),麦哲伦海山链海山下岩石圈的 T_e 大而中太平洋海山群地区海山的 T_e 小.

3 典型海山的有效弹性厚度计算

(1)中太平洋海山群典型海山的有效弹性厚度.以国外在中太平洋海山群研究较多的 7 座海山(Darwin、Heezen、Resolution、Stetson、Jacqueline、Allison 和 Renard 海山)为研究对象(图 1),在三维

频率域运用上述弹性板挠曲模型计算了它们所在处大洋岩石圈的有效弹性厚度 T_e ,计算结果见表 4.根据表 4 给出的大洋岩石圈有效弹性厚度 T_e 值的大小,中太平洋海山群的 7 座海山大致可以分为三类,Darwin、Heezen、Allison 和 Renard 为一类,Stetson 和 Jacqueline 为一类,Resolution 为一类.

(2)麦哲伦海山链典型海山的有效弹性厚度.麦哲伦海山链主要由十多座 NE 走向的海山组成,它们呈北西方向展布成一大规模的海山链.选择其中研究较多的 6 座海山(Himu、Hemler、Vlinder、Parko、Ioah 和 Ita Mai Tai 海山)为研究对象(图 1),在三维频率域运用上述弹性板挠曲模型计算了它们所在处大洋岩石圈的有效弹性厚度 T_e ,计算结果见表 5.根据表 5 给出的大洋岩石圈有效弹性厚度 T_e 值的大小,可将麦哲伦海山链的 6 座海山分为三类,

表 5 麦哲伦海山链 6 座海山的 T_e Table 5 T_e of six seamounts in the Magellan seamount trail

海山	经度(°)	纬度(°)	T_e (km)	均方根
Himu	151.78	21.50	7.5	0.1153
Hemler	151.70	19.70	15.0	0.1653
Vlinder	154.30	17.12	16.5	0.1655
Pako	155.10	15.70	21.0	0.1726
Ioah	155.90	14.15	23.0	0.1824
Ita Mai Tai	156.70	13.00	19.0	0.2151

Himu 为一类, Hemler 和 Vlinder 为一类, Pako、Ioah 和 Ita Mai Tai 为一类。

4 岩石圈有效弹性厚度的地质意义

以地壳均衡为理论背景,我们分别在二维和三维频率域对研究区海山下的岩石圈有效弹性厚度进行了计算,结果显示,整个区域的 T_e 值总体上呈现出北西高南东低的趋势,麦哲伦海山链本身又呈现出南北低中间高的趋势,中太平洋海山群则呈现出由西往东递减的现象。我们知道该区域洋壳年龄由西往东逐渐减小,即麦哲伦海山链底下洋壳的年龄要老于中太平洋海山群底下洋壳的年龄, Watts *et al.* (1980) 通过总结各个地区岩石圈的 T_e 值,认为通常情况下形成于年轻洋壳处海山下岩石圈的 T_e 要小于形成于年老洋壳处海山下岩石圈的 T_e ,显然我们上述的计算结果是合理的。由麦哲伦海山链处海山的年龄,我们就可以很好地解释这里出现的 T_e 值南北低中间高的现象,这正好与该区海山年龄表现出来的南北老中间新相一致,这一现象显然是断裂成因说和单热点成因解释不通的。由此我们认为这些海山可能是由太平洋板块上多个热点的活动形成的,这正好与 Watts *et al.* (1980) 在解释“off-ridge”型海山(包括了麦哲伦海山链的一部分)成因时提出的观点相一致。中太平洋海山群表现出的 T_e 值西高东低现象就更容易理解了,首先整个构造近东西走向,其次洋壳年龄由西向东逐渐年轻,再加上这些海山年龄也大致呈西高东低的趋势。另外该区域岩石圈的 T_e 值总体上呈现出小于 10 km 的趋势,显然与 Watts *et al.* (1980) 用端元模型得出的该区 5 km 左右的 T_e 值比较接近,属多热点成因的“on-ridge”型海山。

大洋岩石圈的有效弹性厚度随加载时岩石圈年龄的增加而增加(Watts, 1978; Watts and Steckler, 1979; Watts *et al.*, 1980, 1982; Calmant and

Cazenave, 1987)。以 Seasat 卫星的大地水准面高度数据为约束,应用弹性板挠曲理论通过对太平洋、大西洋、印度洋中总共 60 座海山(或岛屿)下的岩石圈有效弹性厚度的研究给出了一个岩石圈有效弹性厚度与负荷加载时岩石圈年龄(简称加载年龄 t)之间的简单的关系式: $T_e = (2.70 \pm 0.15)t^{1/2}$ (T_e 的单位为 km, t 的单位为 Ma),指出大洋岩石圈弹性层的厚度遵循半空间冷却模型的 450 ± 150 °C 等温面。这里提到的负荷加载时岩石圈的年龄可由洋底年龄减去负荷年龄来得到。这样我们只要知道洋底年龄和海山年龄便可得出海山下岩石圈的有效弹性厚度值,用 T_{e_1} 表示;用 T_{e_2} 表示用弹性板模型计算得到的有效弹性厚度,这两者之间的差值用 ΔT_e 表示,即 $\Delta T_e = T_{e_1} - T_{e_2}$,这个值很好地表示了用这 2 种模型计算得到的有效弹性厚度间的吻合程度,从另一个侧面也反映了加载时岩石圈的年龄并不是影响 T_e 的唯一因素(Calmant and Cazenave, 1987),后期岩石圈的热活化、断裂作用、洋底抬升等均会影响 T_e 值的大小。Calmant and Cazenave(1987) 通过统计三大洋中 60 座海山的 ΔT_e 后认为,介于 $-5 \sim 5$ km 间的 ΔT_e 值均属于正常情况,还发现中南太平洋中的一些海山的 ΔT_e 大于 5 km。关于这个现象的解释目前主要有 2 种观点,一种观点认为其下热点活动产生的热活化效应重新将该处岩石圈的温度调回年轻板块时的状态(Menard and McNutt, 1982),从而引起 ΔT_e 的增大;另一种观点认为该处岩石圈的大规模减薄引起了 ΔT_e 的增大(McNutt and Fischer, 1987)。表 6 给出了研究区 13 座海山的洋壳年龄 T_1 、海山年龄 T_2 、加载年龄 t 、 T_{e_1} 、 T_{e_2} 、 ΔT_e 、现今基底水深 H_1 、Sclater 公式计算水深 H_2 、水深差 $\Delta H = H_1 - H_2$ 。

以上计算结果显示,只有 Pako、Ioah、Ita Mai Tai 和 Resolution 这 4 座海山的 ΔT_e 值介于 $-5 \sim 5$ km 之间,其他海山的 ΔT_e 均大于 5 km,说明这些海山用弹性板模型得到的 T_e 值均小于由经验公式求得的 T_e 值(Watts *et al.*, 1980; Calmant and Cazenave, 1987),这一点与中南太平洋现今法属玻利尼西亚热点群的结果相近(Calmant and Cazenave, 1987)。由表 6 中给出的现今基底水深和由 Sclater 公式得到的水深来看,这些海山处的岩石圈从洋中脊形成后并不单单随着洋中脊的扩张向两边运动发生沉降,同时还发生过一定规模的抬升,具体抬升幅度视海山而有所不同。从 ΔT_e 和抬升幅度来看,麦哲伦海山链海山与中太平洋海山群海山表

表 6 研究区 13 座海山的 ΔT_e Table 6 ΔT_e of thirteen seamounts in the study region

海山	T_1 (Ma)	T_2 (Ma)	t (Ma)	T_{e1} (km)	T_{e2} (km)	ΔT_e (km)	H_1 (m)	H_2 (m)	ΔH (m)
Himu	160.78	119.67	41.11	~17.3	10.0	7.3	-5 887.7	-6 938.1	1 050.4
Hemler	162.12	99.99	62.13	~21.3	15.0	6.3	-5 815.7	-6 956.4	1 140.7
Vlinder	165.94	94.13	71.81	~22.9	16.5	6.4	-5 909.4	-7 008.6	1 099.2
Pako	166.66	92.00	74.66	~23.3	21.0	2.3	-6 194.3	-7 018.4	824.1
Ioah	162.97	86.50	76.47	~23.6	23.0	0.6	-6 544.4	-6 968.1	423.7
Ita Mai Tai	159.93	116.90	43.03	~17.7	19.0	-1.3	-6 296.4	-6 926.2	629.8
Darwin	152.46	119.00	33.46	~15.6	4.5	11.1	-5 879.2	-6 821.6	942.4
Heezen	150.69	123.10	27.59	~14.2	4.0	10.2	-5 155.8	-6 796.5	1 640.7
Resolution	150.33	127.60	22.73	~12.9	11.0	1.9	-4 055.5	-6 791.4	2 735.9
Stetson	142.46	98.50	43.96	~17.9	8.0	9.9	-3 802.5	-6 677.4	2 874.9
Jacqueline	138.69	98.50	40.19	~17.1	7.5	9.6	-4 313.9	-6 621.8	2 307.9
Allison	124.87	101.20	23.67	~13.1	4.5	8.6	-4 927.1	-6 411.0	1 483.9
Renard	119.76	88.50	31.26	~15.1	4.0	11.1	-4 832.2	-6 330.2	1 498.0

现出不同的规律性,前者 ΔT_e 值大小与抬升幅度呈正相关,而后者却表现为负相关.至于麦哲伦海山链表现出来的这种正相关比较好解释,因为抬升幅度的大小一定程度上反映该区经历的构造活动的强烈程度,即抬升幅度大的构造活动就相对强一点,而构造活动的强烈程度又会直接影响到岩石圈的 T_e 值,所以说这种正相关是合理的.而中太平洋海山群表现出的负相关现象就不容易解释了,但也正是这一点反映出中太平洋海山群自形成以来相比麦哲伦海山链可能经历过更复杂的改造作用,从而造就了它今天比麦哲伦海山链复杂得多的展布状态. Smith *et al.* (1989) 通过从深度异常、 T_e 异常和同位素异常这 3 个方面对麦哲伦海山链上 Himu 海山、Hemler 海山与法属玻利尼西亚群岛的比较,并配以海山热点源追踪后认为,这 2 座海山是在白垩纪期间(约 120~90 Ma)由中南太平洋的法属玻利尼西亚热点群的活动形成的. Koppers *et al.* (1998) 对麦哲伦海山链上的 Vlinder、Pako、Ioah、Ita Mai Tai 这 4 座海山进行研究后也认为这 4 座海山是由上述热点群形成的. Wilson *et al.* (1998) 通过对太平洋中淹没的碳酸盐台地的研究,得到了其中 6 座海山(其中 2 座为中太平洋海山群的海山)的古纬度和下沉淹没时间(表 7),结果显示这 6 座海山最初均形成于南纬 $5^\circ \sim 15^\circ$ 之间的水域,大约在形成后的 7~29 Ma 之间在其形成位置北侧近赤道附近的南太平洋处下沉并淹没,这 6 座海山的沉降分别是在 110 Ma、100 Ma、70 Ma 和 50 Ma 这 4 个时期发生的. 结合 Watts *et al.* (1980) 用端元模型得到的结果来看,麦哲伦海山链可能主要是由法属玻利尼西亚热点群西侧的几个热点形成的,而对于中太平洋海山群来说,

表 7 研究区 6 座海山的古纬度研究情况(Wilson *et al.*, 1998)

Table 7 Paleolatitude of six seamounts in the study region

平顶海山	年龄 (Ma)	古纬度 ($^\circ$)
Limalok		
Initiation	~57.5 \pm 2.5	10.80 \pm 2.50S
Drowning	~48.0 \pm 2	8.15 \pm 2.75S
Present		5.55N
Wodejebato		
Initiation	~76 \pm 1	11.60 \pm 3.20S
Drowning	~69 \pm 1	6.20 \pm 2.20S
Present		11.90N
MIT		
Initiation	~119 \pm 2	11.55 \pm 3.45S
Drowning	~101 \pm 2	8.35 \pm 3.35S
Present		27.30N
Takuyo-Daisan		
Initiation	~118 \pm 2	4.80 \pm 3.50S
Drowning	~111 \pm 2	3.40 \pm 3.50S
Present		34.15N
Allison		
Initiation	~111 \pm 2	13.00 \pm 3.30S
Drowning	~99 \pm 2	11.75 \pm 3.25S
Present		18.45N
Resolution		
Initiation	~128 \pm 2	14.50 \pm 3.30S
Drowning	~99 \pm 2	10.70 \pm 3.30S
Present		21.35N

热点群东部几个热点对其形成的贡献可能更大一点.

综上所述,无论是整个研究区岩石圈的有效弹性厚度的大小还是两典型海山区(麦哲伦海山链和中太平洋海山群)海山下岩石圈的有效弹性厚度大小,均表明麦哲伦海山链和中太平洋海山群是在白垩纪期间(约 130~90 Ma)形成的. 根据太平洋板块的演化史,这 2 个海山区在这期间恰好位于南太平洋的现今法属玻利尼西亚群岛处,因而认为它们的

形成可能与当时发生在现今法属玻利尼西亚群岛处的大规模热点群喷发活动有关, 而且形成后还受到了后期火山岩浆活动的改造作用。但两典型海山区又各具特点, 根据有效弹性厚度的大小麦哲伦海山链海山属“off-ridge”型海山, 而中太平洋海山群属“on-ridge”型海山, 即形成前者海山的热点位置相比后者的要离洋中脊更远一些。

致谢: 文中图件的绘制使用 GMT, 在此对 GMT 的创作者 Wessel P. 和 Smith W. H. F. 表示感谢!

References

- Bechtel, T. D., Forsyth, D. W., Sharpton, V. L., et al., 1990. Variations in effective elastic thickness of the North American lithosphere. *Nature*, 343: 636—638. doi:10.1038/343636a0
- Calmant, S., 1987. The elastic thickness of the lithosphere in the Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 85: 277—288. doi:10.1016/0012-821X(87)90038-0
- Calmant, S., Cazenave, A., 1987. Anomalous elastic thickness of the oceanic lithosphere in the South-Central Pacific. *Nature*, 328: 236—238. doi:10.1038/328236a0
- Calmant, S., Francheteau, J., Cazenave, A., 1990. Elastic layer thickening with age of the oceanic lithosphere: a tool for prediction of the age of volcanoes or oceanic crust. *Geophysical Journal International*, 100 (1): 59—67. doi:10.1111/j.1365-246X.1990.tb04567.x
- Filmer, P. E., McNutt, M. K., Wolfe, C. J., 1993. Elastic thickness of the lithosphere in the Marquesas and Society Islands. *J. Geophys. Res.*, 98(B11): 19565—19577. doi:10.1029/93JB01720
- Forsyth, D. W., 1985. Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 90 (B14): 12623—12632. doi:10.1029/JB090iB14p12623
- Fu, Y. T., Li, J. L., Zhou, H., et al., 2000. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere. *Geological Review*, 46 (2): 149—159 (in Chinese with English abstract).
- Goodwillie, A. M., Watts, A. B., 1993. An altimetric and bathymetric study of elastic thickness in the Central Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1—4): 311—326. doi:10.1016/0012-821X(93)90175-9
- Heezen, B. C., Matthews, J. L., Catalano, R., et al., 1973. Western Pacific guyots. *Init. Rpts. DSDP*, 20: 653—723.
- Karner, G. D., Steckler, M. S., Thorne, J. A., 1983. Long-term thermo-mechanical properties of the continental lithosphere. *Nature*, 304: 250—253. doi:10.1038/304250a0
- Koppers, A. A. P., Staudigel, H., Wijbrans, J. R., et al., 1998. The Magellan seamounts trail: implications for Cretaceous hotspot volcanism and absolute Pacific plate motion. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1—4): 53—68. doi:10.1016/S0012-821X(98)00175-7
- Kruse, S. E., Liu, Z. J., Naar, D. F., et al., 1997. Effective elastic thickness of the lithosphere along the Easter seamount chain. *J. Geophys. Res.*, 102 (B12): 27305—27317. doi:10.1029/97JB02158
- McNutt, M. K., Fischer, K. M., 1987. The South Pacific superswell. In: Keating, B. H., Fryer, P., Batiza, R., et al., eds., Seamounts, islands, and atolls. *Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, DC*, 43: 25—43.
- McNutt, M. K., Judge, A. V., 1990. The superswell and mantle dynamics beneath the South Pacific. *Science*, 248 (4958): 969—975. doi:10.1126/science.248.4958.969
- Menard, H. W., 1964. *Marine geology of the Pacific*. McGraw-Hill, New York.
- Menard, H. W., McNutt, M., 1982. Evidence for and consequences of thermal rejuvenation. *J. Geophys. Res.*, 87 (B10): 8570—8580. doi:10.1029/JB087iB10p08570
- Parsons, B., Sclater, J. G., 1977. An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age. *J. Geophys. Res.*, 82: 803—827.
- Smith, W. H. F., Staudigel, H., Watts, A. B., et al., 1989. The Magellan seamounts: Early Cretaceous record of the South Pacific isotopic and thermal anomaly. *J. Geophys. Res.*, 94(B8): 10501—10523.
- Walcott, R. I., 1970. Flexural rigidity, thickness, and viscosity of the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 75(20): 3941—3954. doi:10.1029/JB075i020p03941
- Watts, A. B., 1978. An analysis of isostasy in the world's oceans; 1. Hawaiian-Emperor seamount chain. *J. Geophys. Res.*, 83 (B12): 5989—6004. doi:10.1029/JB083iB12p05989
- Watts, A. B., Bodine, J. H., Ribe, N. M., 1980. Observations of flexure and the geological evolution of the Pacific Ocean basin. *Nature*, 283: 532—537. doi:10.1038/283532a0
- Watts, A. B., Cochran, J. R., 1974. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere along the Hawaiian-Emperor seamount chain. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 38 (1): 119—141. doi:10.1111/j.1365-246X.1974.tb04112.x
- Watts, A. B., Karner, G. D., Steckler, M. S., 1982. Lithos-

- pheric flexure and the evolution of sedimentary basins. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 305 (1489): 249 — 281. doi: 10. 1098/rsta. 1982. 0036
- Watts, A. B. , Steckler, M. S. , 1979. Subsidence and eustasy at the continental margin of eastern North America. In: Talwani, M. , Hay, W. , Ryan, W. B. F. , eds. , Deep sea drilling results in the Atlantic Ocean; continental margins and paleoenvironment. *American Geophysical Union, Washington, DC, Maurice Ewing Series*, (3): 218—234.
- Wessel, P. , 1993. A reexamination of the flexural deformation beneath the Hawaiian Islands. *J. Geophys. Res.* , 98 (B7): 12177—12190. doi: 10. 1029/93JB00523
- Wilson, P. A. , Jenkyns, H. C. , Elderfield, H. , et al. , 1998. The paradox of drowned carbonate platforms and the origin of Cretaceous Pacific guyots. *Nature*, 392: 889—894. doi: 10. 1038/31865
- Winterer, E. L. , 1976. Bathymetry and regional tectonic setting of the line islands chain. In: Schlanger, S. O. , Jackson, E. D. , Boyce, R. E. , et al. , eds. , *Repts of DS-DP*, 33: 731—747.
- Yuan, B. Q. , Yvette, H. P. D. , Cheng, S. Y. , et al. , 2002. The estimation of the effective elastic thickness of the continental lithosphere and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 269—272 (in Chinese with English abstract).
- Zuber, M. T. , Bechtel, T. D. , Forsyth D. W. , 1989. Effective elastic thicknesses of the lithosphere and mechanisms of isostatic compensation in Australia. *J. Geophys. Res.* , 94(B7): 9353—9367. doi: 10. 1029/JB094iB07p09353

附中文参考文献

- 付永涛, 李继亮, 周辉, 等, 2000. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究综述. *地质论评*, 46(2): 149—159.
- 袁炳强, Yvette, H. P. D. , 程顺有, 等, 2002. 大陆岩石圈有效弹性厚度的计算及其地质意义. *地球学报*, 23(3): 269—272.