

彭祎辉, 赵俐红, 凌子龙, 等. 基于俯冲倾角的马里亚纳海沟挠曲模拟[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 23-32.

PENG Yihui, ZHAO Lihong, LING Zilong, et al. Deflection simulation of the Mariana Trench based on subduction dip angle[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 23-32.

基于俯冲倾角的马里亚纳海沟挠曲模拟

彭祎辉^{1,2}, 赵俐红^{1,2*}, 凌子龙^{1,2}, 李沐洁^{1,2}, ENN Shinn Hway^{1,2}

(1 山东科技大学, 青岛 266590; 2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237)

摘要: 马里亚纳海沟是西太平洋“沟-弧-盆”构造体系的重要区域, 对马里亚纳海沟特征的研究有助于了解海沟各部分间的形成演化差异。基于研究区的沉积物与水深数据, 计算了海沟的初始俯冲倾角 (β_0) 与轴线的挠曲 (w_0), 模拟了马里亚纳海沟岩石圈的挠曲, 得到了马里亚纳海沟各段的岩石圈有效弹性厚度 (Te)。模拟结果显示, 马里亚纳海沟的挠曲位置约在 40~125 km, 挠曲幅度 w_b 约为 60~840 m, 有效弹性厚度约为 5~40 km, 初始俯冲倾角 β_0 约为 $0.5^\circ\sim 5^\circ$, 轴线的挠曲 w_0 约为 1.3~4.7 km, 整体变化幅度较大; 海沟中段的有效弹性厚度最高, 南段的有效弹性厚度相对北段略高; 海沟中段被大量不同规模的海山侵入, 其挠曲幅度、有效弹性厚度、初始俯冲倾角与轴线的挠曲变化幅度都非常大; 海沟南段的轴线挠曲很大, 明显高于北段与中段, 可能与 Caroline 洋脊的俯冲作用与 Caroline 热点的影响有关; 俯冲初始倾角与有效弹性厚度、挠曲位置、轴线挠曲没有明显的相关关系。

关键词: 初始俯冲倾角; 挠曲; 有效弹性厚度; 马里亚纳海沟

中图分类号: P313

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.213

0 引言

深渊海沟是深海的极端环境, 通常指超过 6 000 m 深的槽型深海地貌, 是地球上独有的地貌单元^[1]。马里亚纳海沟位于菲律宾海板块和太平洋板块交界处(图 1), 深度达 11 034 m(挑战者深渊, $11^\circ 11' 30''\text{N}$, $142^\circ 20' 54''\text{E}$), 被誉为地球的“第四极”, 因其所在区域拥有世界上最独特的双俯冲系统、最完整的“沟-弧-盆”体系、最大的边缘海、最深的海沟、最老的洋壳、多成因的复杂海山群等而成为全球地学关注的焦点^[2]。马里亚纳海沟整体呈现为半月状, 北端始于小笠原海台, 南端延伸至西马里亚纳岛弧, 长约 2 550 km, 平均宽约 70 km。马里亚纳

海沟的形成与演化最早可追溯到晚始新世至渐新世早期。在大约 50 Ma 前, 太平洋板块俯冲到菲律宾板块下形成古马里亚纳-雅浦海沟, 之后随着太平洋板块向菲律宾板块的俯冲、挤压等构造运动使得古马里亚纳-雅浦海沟向东发生后撤。晚渐新世以来 Caroline 海脊向菲律宾板块俯冲、碰撞将古马里亚纳-雅浦海沟一分为二, 其中的一部分一直向东后撤, 发育成现在的马里亚纳海沟^[3-5]。在发育过程中, 由于菲律宾海板块的旋转造成海沟的形状和位置不断发生变化, 海沟不断向北推进并伴随着顺时针旋转, 展布方向也由近 EW 向变为现今的近 SN 向^[6]。

岩石圈板块通常被认为是在地质时间上 >1 Ma 并且漂浮在软流圈上的弹性外层。岩石圈的弯曲模型假定薄弹性板漂浮在液态的软流圈之上而且由于地表及地下负载作用而挠曲, 弹性板挠曲的振幅和波长取决于板的强度和负载的分布, 这种强度特性可以用有效弹性厚度(effective elastic thickness, Te)或者抗弯刚度 D 来定量衡量, 它与温度、岩石圈的密度、应力状态等幂律蠕变参数有关, 可以为岩石圈强度变化和标定屈服强度提供必要依据。海洋岩石圈最大的挠曲发生在俯冲带。板块在俯冲

收稿日期: 2021-08-13

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“北冰洋美亚海盆岩石圈的挠曲形变特征”(41676039)

作者简介: 彭祎辉(1997—), 男, 在读硕士, 主要从事构造动力学方面的研究工作. E-mail: 1127665459@qq.com

* 通讯作者: 赵俐红(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事海洋地球物理方面的研究工作. E-mail: zhaolih@sina.com

的过程中,随着下沉板块的负浮力(板块拉力)、海沟轴的垂直载荷、沉积物的重力效应和水平应力(如来自扩张的洋中脊的脊推)的响应都可能向下弯曲^[7-8]。挠曲变形会引起海底向海沟轴线倾斜,以及在海沟的外隆起区域出现明显的隆起现象^[8-12]。因此,计算俯冲板块的挠曲可以为海沟的岩石圈强度提供一定的约束^[13-15]。

海洋岩石圈的挠曲已经有不少学者做过计算^[7,8,16-24]:1984年,MCADOO和MARTIN^[16]发现去除48阶长波长的大地水准面起伏可以模拟海沟洋坡岩石圈的挠曲,先后模拟了俯冲带海沟的挠曲起伏^[16-17],并发现板块的有效弹性厚度与年龄的平方根近似成正比,陈美等^[18]模拟了琉球海沟的挠曲,结论和其一致;2010年,CONTRERAS-REYES和OSSES^[7]利用两段板块弯曲模型,并基于可变的有效弹性厚度模拟了智利海沟沿大洋方向的挠曲,分析发现俯冲带的有效弹性厚度主要与板块俯冲和水压导致的弱化有关;ZHANG等基于该方法模拟了马里亚纳海沟整段挠曲及其剪切力(V_0)以及弯矩(M_0)变化,后续模拟了全球俯冲带海沟的挠曲,分析发现俯冲带海沟的挠曲幅度与宽度主要受到海沟轴上有效弹性厚度的影响,海沟的深度与挠曲有着一定的联系^[8,19-20];ZHANG^[21]提出了一种三维有限差分挠曲模型,模拟了马尼拉海沟北部俯冲板块的挠曲,分析发现有效弹性厚度发生剧烈变化的区域,三维挠曲模型与二维挠曲模型的误差可达30%;ZHOU等^[22]利用弹塑性板块模型,发现水平拉张力与海沟正断层的平均落差有正相关关系;ZHANG等^[23]则是发现洋侧到海沟的有效弹性厚度衰减的绝对值随板块年龄的增大而增大,而衰减的比例与板块年龄没有明显关系,此外板块年龄越大,与有效弹性厚度对应的等温线就越低。上述研究主要计算了俯冲带区域的有效弹性厚度、剪切力以及弯矩,分析了它们与年龄、深度等参数的相关性,并讨论了可能影响挠曲参数变化的地质因素,但是对于板块俯冲初始倾角的研究较少。本文拟选出可以为海沟研究提供更多信息的挠曲模型和模拟方法。

1 挠曲模型与模拟方法

目前,海洋岩石圈弯曲模型的计算参数通常采用有效弹性厚度、剪切力以及弯矩,EDUARDO和JEREMÍAS^[25]提出了一种替代经典模型的方法计

算海沟挠曲,该方法利用海沟轴线的挠曲(the flexural amplitude at the trench axis, w_0)、俯冲初始倾角(initial subduction dip angle, β_0)以及有效弹性厚度(Te)作为参数进行挠曲的模拟。该方法参数识别较为简便,并且可以模拟得到海沟的俯冲初始倾角。

1.1 挠曲模型

海沟外缘隆起的弯曲波长和幅值大小是利用弹性岩石圈叠加在一个较弱的岩石圈上模拟得到的。在该模型中,岩石圈在岛弧一侧受到剪应力 V_0 和弯矩 M_0 的作用(图1a)^[7-8,12,26-29]。有效弹性厚度 Te 是板块抵抗弯曲变形能力的一种指标,与抗弯刚度 D 有关:

$$D = \frac{ETe^3}{12(1-\nu^2)}$$

式中: E 和 ν 分别为杨氏模量与泊松比,计算时通常作为常数来处理。在这种假设下,板块抵抗弯曲变形能力强, Te 就大,反之,板块抵抗弯曲变形能力弱, Te 就小。传统方法通常利用 V_0 、 M_0 和 Te 为独立参数模拟海洋岩石圈的挠曲,早期由从水深剖面中提取的挠曲幅度和隆起的半宽度替代(图1b)^[30-31],改良后通过降低观测与模拟的RMS值来获取3个参数的最佳匹配^[12,32]。CONTRERAS-REYES和GARAY^[25]提出了一种替代传统模型的方法计算海沟挠曲,该方法以海沟轴上的挠曲 w_0 (海沟轴高差)、海沟轴上俯冲初始倾角 β_0 和弹性厚度 Te 作为独立参数,与传统方法相比,海沟轴的挠曲与俯冲初始倾角更容易识别与获得,本文采用该方法进行挠曲的模拟。

1.2 模拟方法

海沟处海洋岩石圈的挠曲被模拟为作用在弹性板块上的流体静力恢复力 $g(\rho_m - \rho_w)w$

式中: w 为板块挠曲力;

g 为重力加速度;

ρ_m 和 ρ_w 分别为地幔密度和水密度^[7,12,28-31]。

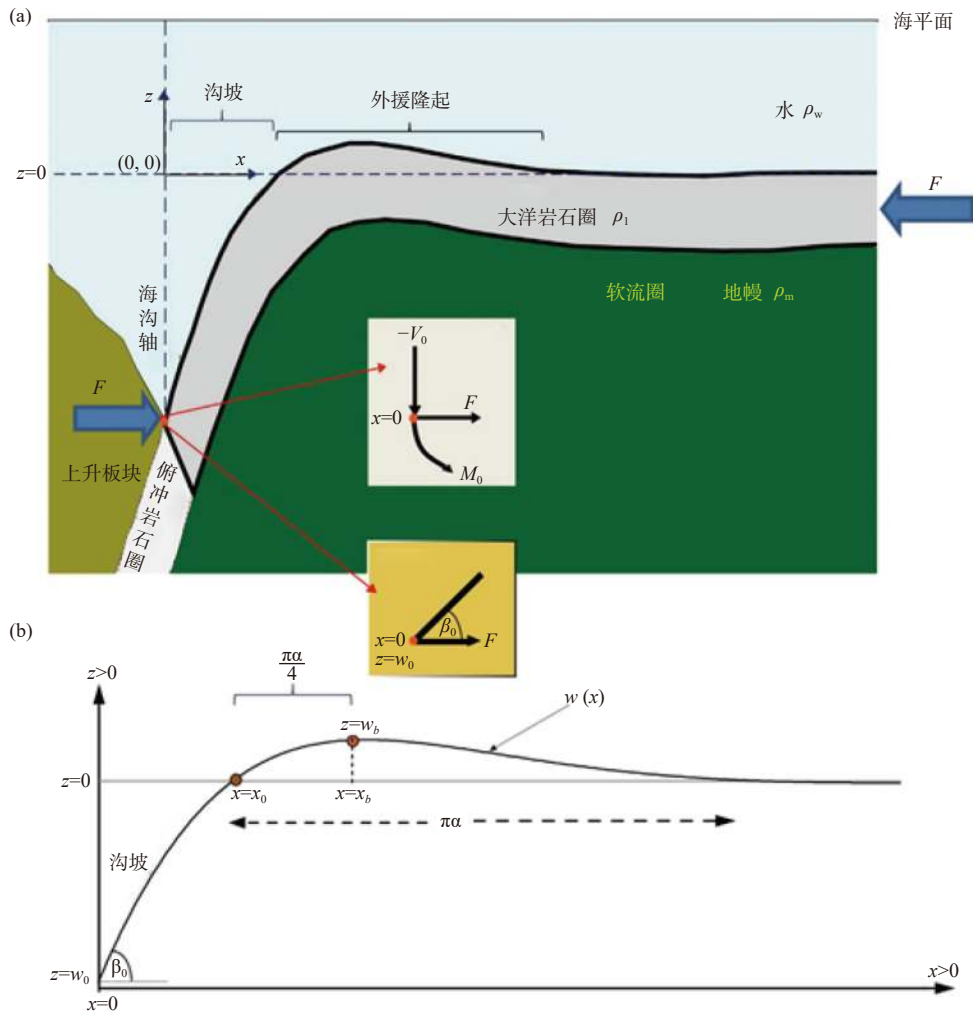
假设施加荷载为水平力 F ,弯矩 M ,则板的挠度 w 由以下微分方程决定:

$$-\frac{d^2M}{dx^2} + \frac{d}{dx}\left(F\frac{dw}{dx}\right) + \Delta\rho g = q(x) \quad (1)$$

式中: $q(x)$ 为作用在板块上的垂直荷载;

$\Delta\rho$ 为地幔与海水的密度差。

弯矩(式(2))和剪应力(式(3))与板块的曲率



岩石圈在海沟处受到垂直剪切力 V_0 、水平力 F 和弯矩 M_0 的作用发生弯曲, ρ_m 、 ρ_1 和 ρ_w 分别为地幔密度、岩石圈密度和水密度定义曲线 $w(x)$ 图像与 (x_0, x_b, w_b, α) 参数有关, 点 (x_b, w_b) 对应了 $w(x)$ 最大振幅或者是外缘隆起最高的位置, $(0, w_0)$ 对应了海沟最大的负幅值, β_0 是海沟轴线上俯冲的初始角度, 与 $w(x)$ 有关, 即 $\tan\beta_0 = dw/dx|_{x=0}$

(a) 洋壳的挠曲模型示意图; (b) 基于俯冲倾角的挠曲计算模型

图 1 洋壳挠曲模型与挠曲计算模型^[25]

Fig.1 Flexural model of oceanic crust and calculation

$\kappa = -d^2w/dx^2$ 和板块的刚度 D 有关。

$$M(x) = -D \frac{d^2w}{dx^2} \quad (2)$$

$$V(x) = \frac{dM}{dx} - F \frac{dw}{dx} \quad (3)$$

结合公式(1)~(3), 有

$$D \frac{d^4w}{dx^4} + F \frac{d^2w}{dx^2} + \Delta\rho g = 0 \quad (4)$$

假设 $q(x) = 0$, 公式(4)在不考虑荷载的边界条件 ($w \rightarrow 0$ 时 $x \rightarrow \infty$) 的通解为:

$$w(x) = e^{-\eta \frac{x}{\alpha}} \left[C_1 \cos\left(\zeta \frac{x}{\alpha}\right) + C_2 \sin\left(\zeta \frac{x}{\alpha}\right) \right] \quad (5)$$

式中: $\alpha = (4D/\Delta\rho g)^{1/4}$ 是定义弹性岩石圈弹性波长的弯曲参数 (板块的刚度越大, 波长越长)。研究计

算板块挠曲时不考虑水平方向的力 F ^[27,31], 式(5) 即可以表示如式(6):

$$w(x) = e^{-\frac{x}{\alpha}} \left[C_1 \cos\left(\frac{x}{\alpha}\right) + C_2 \sin\left(\frac{x}{\alpha}\right) \right] \quad (6)$$

利用俯冲板块在海沟轴的初始倾角 β_0 、海沟轴的挠曲 w_0 和弹性厚度 Te 进行求解, 根据边界条件 $w(x=0) = w_0$ 和 $\frac{dw}{dx}|_{x=0} = \tan\beta_0$, 板块的弯曲计算公式结果为^[25]:

$$w(x) = e^{-\frac{x}{\alpha}} \left[w_0 \cos\left(\frac{x}{\alpha}\right) + (\alpha \tan\beta_0 + w_0) \sin\left(\frac{x}{\alpha}\right) \right] \quad (7)$$

通过迭代法可以求解出各条剖面使用不同参数的挠曲示意图 (计算所用参数见表 1), 并通过计算各条剖面的均方根 (RMS) 来获得最佳有效弹性

厚度。均方根公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^N |w_i - z_i|^2} \quad (8)$$

式中： N 为剖面点数；
 w_i 为预测的地形；
 z_i 为实际观测的地形。

表 1 计算所用参数

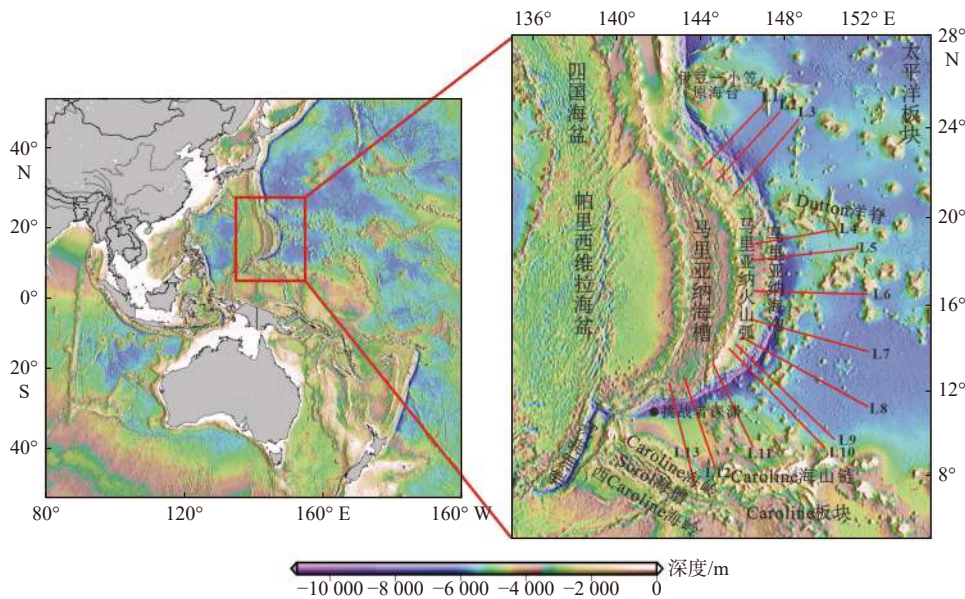
Table 1 Parameters used in calculation

参数	定义	数值
ρ_m	地幔密度, kg/m ³	3 300
ρ_w	海水密度, kg/m ³	1 030
g	重力加速度, m/s ²	9.81
E	杨氏模量, Pa	7×10^{10}
ν	泊松比	0.25

2 数据来源

区域内的地形数据采用全球海陆地形数据库

(General Bathymetric Chart of Oceans, GEBCO) 2019年发布的网格数据, 网格间距为 15"。沉积物数据来源于 STRAUME 等^[33] 2019年发布的 5'×5' 的网格数据, 该数据在远离大陆区域的精度较高。本文选取了 13 条垂直俯冲带的剖面(图 2, 其中剖面 L8、L10、L13 位置与文献^[34] 相同), 根据式 (7) 模拟了这些剖面的挠曲。由于海山在挠曲模拟时会影响 w_0 的取值, 造成 w_0 存在过大或者过小的误差, 使模拟结果不准确, 因此本文在选择剖面时尽可能避免从大型海山穿过。此外, 剖面长度的选取也是影响挠曲模拟结果的重要因素, 剖面过短会降低模拟结果的准确性, 剖面过长则会增加计算量, 影响计算效率, 因此本文所选取剖面的长度基本都 > 300 km^[18] (其中剖面 13 由于 250 km 外为 Caroline 海岭区域, 只选取了前 250 km), 这些剖面足够显示出海沟洋侧的变化趋势。其中 1~3 剖面位于海沟北段, 4~10 剖面位于海沟中段, 11~13 剖面位于海沟南段。



底图数据来源于全球水深数据 (www.gebco.net), 右图中的红线代表剖面位置

图 2 马里亚纳海沟的区域位置和水深地形图

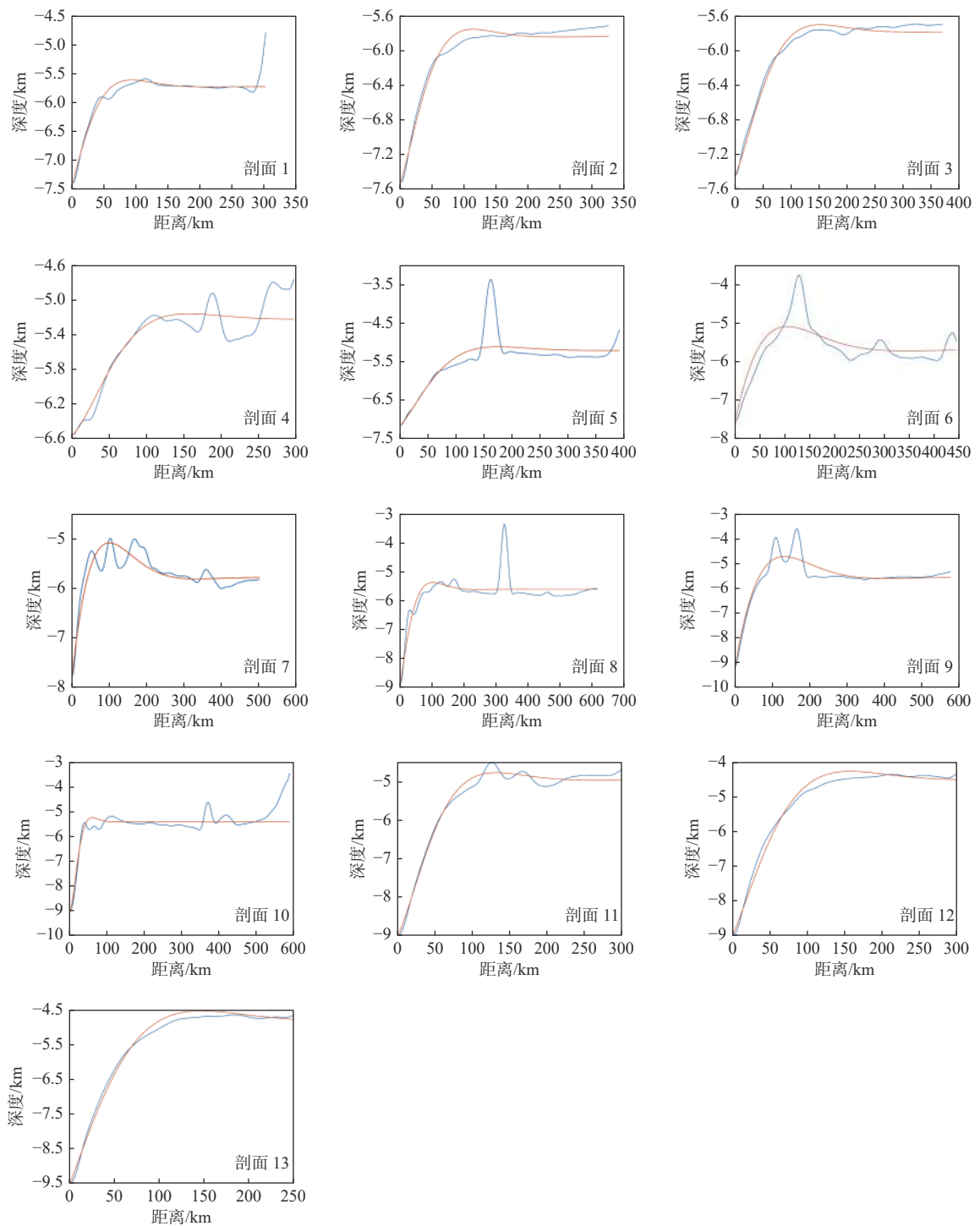
Fig.2 The location and bathymetry map of Mariana Trench

3 模拟结果

本研究先对水深数据进行沉积物校正, 低通滤波以及平滑处理, 然后利用式 (7) 和式 (8) 进行剖面模拟, 最终得到各条剖面的最佳模拟示意图(图 3), 其中剖面 5、6、8、10 的 RMS 效果略差, 整体 RMS

都 > 0.3, 其他剖面的效果都比较好。此外, 各条剖面示意图的坐标起始点为海沟最深点, 各条剖面的模拟参数见表 2, 模拟参数沿海沟走向的变化如图 4 所示。

从模拟结果来看, 海沟北段的 RMS 保持在 0.13 以下, 海沟中段的 RMS 约为 0.18~0.41, 海沟



蓝线为经过沉积物改正、低通滤波与平滑处理后的实际地形, 红线为模拟地形

图 3 马里亚纳海沟各条剖面的实际地形与模拟地形图

Fig.3 Topography and simulation results of each section of the Mariana Trench

南段的 RMS 约为 0.13~0.15, 明显北段的模拟效果最好, 南段略低于北段, 中段的拟合效果差距较大, 可能与其被大规模的海山侵入有关; 从挠曲幅度来看, 海沟北段的挠曲幅度约为 60~120 m, 海沟中段的挠曲幅度约为 60~840 m, 海沟南段的挠曲幅度约为 190~280 m; 海沟北段的有效弹性厚度约为

13~20 km, 中段约为 5~40 km, 南段则是 16~22 km, 与前人的研究结果基本一致^[34-35]; 北段的轴线挠曲约为 1.6~1.7 km, 中段约为 1.3~3.6 km, 南段则是 4.0~4.7 km; 挠曲位置总体在 40~125 km, 与 ZHANG 等^[8]的结果基本一致。

表2 马里亚纳海沟岩石圈弹性薄板模拟结果

Table 2 Simulation results of lithospheric elastic thin plate in Mariana Trench

剖面	有效弹性厚度/km	海沟轴挠曲 w_0 /km	初始俯冲倾角 β_0 ($^\circ$)	挠曲幅度 w_b /m	挠曲位置/km	RMS/km	
北段	1	13	-1.672	2.5	116	62	0.125
	2	14	-1.679	1.5	85	81	0.078
	3	20	-1.656	1	81	109	0.063
中段	4	19	-1.337	0.5	60	114	0.182
	5	24	-1.945	1	94	125	0.373
	6	31	-1.845	3.5	604	45	0.368
	7	30	-1.986	4	696	42	0.203
	8	15	-3.264	4.5	233	68	0.412
	9	37	-3.566	5	839	64	0.297
	10	5	-3.620	0.5	156	46	0.396
南段	11	16	-4.000	2.5	189	95	0.135
	12	22	-4.449	3	231	111	0.153
	13	18	-4.671	4	280	100	0.131

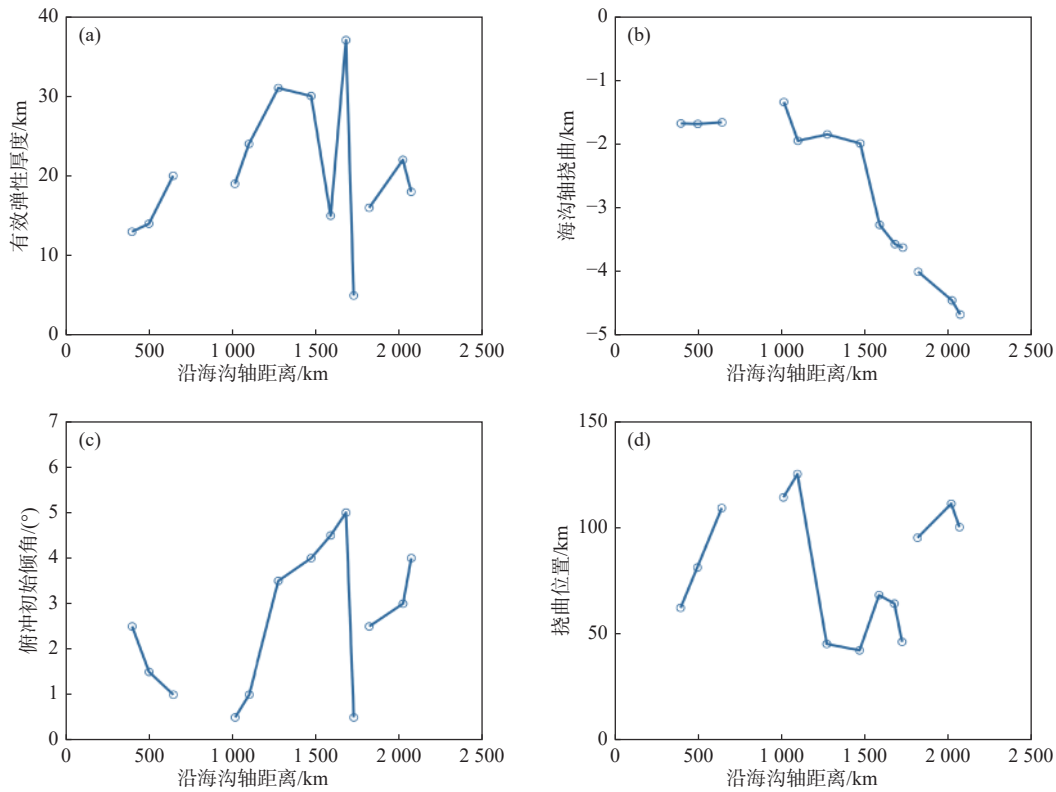


图4 沿马里亚纳海沟走向(自北向南)的挠曲参数变化

Fig.4 Schematic diagram of deflection parameters along the Mariana Trench strike (from north to south)

4 讨论与分析

4.1 模拟方法对结果的影响

传统方法利用 V_0 、 M_0 和 T_e 为参数模拟海洋岩石圈的挠曲,主要利用外部隆起的向沟部分(特别是前隆起的半宽度)的形态信息,当外部隆起呈现

海山、弯曲断层等其他大型地形时,会覆盖海沟和外部隆起特征,这些特征与岩石圈的长波长特性无关,可以判断为噪声。传统方法建模的基本要求是识别出隆起的特征,但是在地形噪音的影响下,精确识别是很难的,而地形噪音有时与 w_b 振幅相同,在这种情况下,传统方法对弯曲参数的估计可能很差。本文使用的方法需要沟槽轴 (β_0 和 w_0) 的信息,而 w_0 值往往比 w_b 要高得多(通常超过 5 倍),比精

确识别前凸的半宽度要更加简单, 但是该方法对海沟的俯冲初始倾角非常敏感, 当 β_0 值过高时, 该方法变得不稳定, 因此该方法仅能适用于 $\beta_0 < 15^\circ$ 的海沟。对于可以明显观察到前凸的水深剖面, 二者的结果差异较小, 而对于前凸不明显的剖面, 传统方法可能出现较大的误差^[25]。另外, 传统方法进行模拟时, 在海沟的向沟部分板块弱化会使有效弹性厚度减小, 这会导致 T_e 不是一个固定值, 不利于进行板块强度比较, 而本文可以通过沿水深剖面的加权平均值获得 T_e , 该方法获得的 T_e 是一个固定值, 可以直观反映板块的综合强度, 便于进行分析比较。

太平洋板块虽然是一个较老的板块, 但它的岩石圈流变强度并不是均一的, 前人计算过西太平洋俯冲带的有效弹性厚度^[35-40], 本文结果与前人基本一致^[36-39], 但是低于部分学者的结果^[40], 这是因为在计算俯冲带附近 T_e 时应该同时考虑垂向加载以及板片拖曳力的横向变化对 T_e 的影响, 高值异常可能是因为: ①动力地形和板片拖曳力的横向变化对 T_e 有影响。BAI 等^[39]通过对俯冲过程引起的动力地形挠曲及俯冲板片自身重力密度产生的负浮力的校正, 显示马里亚纳海沟附近 $T_e < 40$ km; ②俯冲外缘隆起处岩石圈的向上挠曲引起底部地幔物质上涌, 这种高密度地下载荷的垂向加载也使得该地区的 T_e 被高估^[40]。

4.2 海沟各段的差异性特征

马里亚纳海沟是太平洋板块与菲律宾海板块的汇聚边界, 当太平洋板块向菲律宾海板块下面俯冲时, 由于海沟各段抵抗挠曲变形能力差异及后期受到的构造作用不同, 海沟的各段体现出不同的特征。

(1) 海沟北段

海沟北段的海沟轴挠曲 w_0 约为 1.6~1.7 km, 整体变化较小, 初始俯冲倾角约为 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$, 挠曲幅度 w_b 约为 60~120 m, 挠曲位置约为 60~110 km, T_e 约为 13~20 km。海沟北段选取剖面的洋侧为典型海底高原地貌, 只有少量的海山存在, 没有受到局部地形的影响, 俯冲作用比中段与南段要弱, 板块抗变形能力较强, 因此北段整体的挠曲幅度、有效弹性厚度、初始俯冲倾角大小与变化比中段和南段都要小。

(2) 海沟中段

海沟中段的海沟轴挠曲 w_0 约为 1.3~3.6 km, 初始俯冲倾角约为 $0.5^\circ \sim 5^\circ$, 挠曲幅度 w_b 约为 60~

840 m, 挠曲位置约为 40~125 km, 有效弹性厚度约为 5~40 km, 很明显, 与海沟的北段相比, 中段的挠曲幅度、有效弹性厚度大小与变化和初始俯冲倾角大小与变化明显大得多。剖面 4、5 位于 Dutton 洋脊南侧, 剖面 6~9 的洋侧有许多规模较小的海山, 除去剖面 8, 中段自北向南的初始俯冲倾角、挠曲幅度、有效弹性厚度表现为逐渐增大的趋势。这可能与海沟中段被大规模的海山侵入有关, 张斌^[41]发现, 当相对孤立的大型海山随板块运动至海沟洋侧后, 会减弱周围区域的板块俯冲作用。海沟中段从北到南被不同程度的海山侵入, 北部有 Dutton 洋脊, 南部有许多孤立的不同规模的海山, 这些海山侵入到海沟的洋侧, 能有效减弱海沟的俯冲, 加强板块的稳定性, 从而体现出较高的有效弹性厚度, 但是同时也引发了海沟向洋侧的迁移, 这种迁移过程会逐渐增大海沟的初始俯冲倾角, 并导致海沟中部有明显的非连续性以及部分区域的水深明显变浅的现象^[41]。剖面 8 处有效弹性厚度较小, 可能与其海沟轴被小规模的海山侵入有关, 这些侵入的小规模海山无法减弱海沟的俯冲作用, 因此该处的岩石圈强度较弱。此外, 剖面 10 处的有效弹性厚度异常的低, 推测是该剖面位于 Caroline 板块、太平洋板块与菲律宾海板块的交界处附近, 三大板块碰撞导致该处的岩石圈强度也非常弱。

(3) 海沟南段

海沟南段的海沟轴挠曲 w_0 约为 4.0~4.7 km, 初始俯冲倾角约为 $2.5^\circ \sim 4^\circ$, 挠曲幅度 w_b 约为 190~280 m, 挠曲位置约为 90~120 km, 有效弹性厚度约为 16~22 km。南段的海沟轴挠曲是最高的, 而挠曲幅度、初始俯冲倾角与有效弹性厚度是略高于北段的, 但是依旧小于中段。海沟南段是世界上最深的地方, 并且海沟轴挠曲也非常的大, 这可能与其洋侧的俯冲板块被 Caroline 海岭与 Caroline 海山链切割有关, 海山链与海岭的切割会有利于海沟的俯冲, 造成海沟水深加大, 而外侧水深不变, 海沟轴挠曲变得非常大。南段较小的有效弹性厚度, 可能与海沟南段的构造活动有关, 比如大范围的正断层作用、Caroline 洋脊的俯冲作用与 Caroline 热点的影响^[42]。正断层的滑动^[16,43-44]与 Caroline 热点的影响都能减弱岩石圈的强度, 因此海沟南段表现为较弱的有效弹性厚度。

4.3 初始俯冲角度的讨论

初始俯冲角度是影响俯冲板块和上覆板块之

间耦合程度的主要因素之一。俯冲的初始角度直接控制着两板块间接触面积的大小,而接触面积又是板块之间耦合作用的直接体现^[45]。如果俯冲的初始角度较小,则板块间的初始耦合作用也较强,俯冲时不容易发生断裂,有效弹性厚度应该表现为较高的值。马里亚纳海沟的俯冲初始倾角分布特征为北段小于南段,中段变化幅度较大,且有着最大与最小的俯冲初始倾角,但是从图4可以发现,俯冲初始倾角并没有和任意一个参数有着明显的相关关系。影响大洋俯冲演化过程的动力学参数总体上可以分为如下4类:与俯冲大洋板片浮力相关、与板间耦合作用程度相关、与板块汇聚速率相关和与俯冲带流变性质相关。而板片的正浮力作用、俯冲板块和上覆板块之间的强耦合作用、较大的上覆大陆向洋绝对逆冲速率和大洋绝对俯冲速率之比、以及有利于板片弯折的俯冲带流变性质等都是能导致大洋低角度俯冲有利因素^[45]。

5 结论

本文基于水深、和沉积物数据,通过计算海沟俯冲初始倾角,模拟得到了马里亚纳海沟由北到南共13条剖面的有效弹性厚度以及挠曲特征,进而研究了马里亚纳海沟各段之间的差异性特征,获得了以下4点认识:

(1) 马里亚纳海沟的挠曲位置约在40~125 km,挠曲幅度约为60~840 m,初始俯冲倾角约为0.5~5°,有效弹性厚度约为5~40 km,轴线挠曲约为1.3~4.7 km;其中海沟中段的有效弹性厚度最高,北段与南段相比,南段略高于北段。

(2) 海沟中段受到大规模的海山侵入,有效弹性厚度、挠曲幅度、轴线挠曲与初始俯冲倾角的变化都非常大。

(3) 海沟南段的海沟轴挠曲非常大,有效弹性厚度则较小,Caroline洋脊的俯冲作用与Caroline热点的影响有关。

(4) 俯冲初始倾角与有效弹性厚度、挠曲位置、轴线挠曲没有明显的相关关系。

参考文献:

- [1] STERN R J. Subduction zones[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40: 1012.
- [2] 刘新华. 西太平洋地区的海洋安全形势与中国的地区性海权[J]. *太平洋学报*, 2011, 19(2): 83-92.
- [3] HALL R, ALI J R, ERSON C D, et al. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 229-250.
- [4] STERN R J, FOUCH M J, KLEMPERER S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory[J]. *Inside of Subduction Factory*, 2003, 138: 175-222.
- [5] 瞿洪宝, 郑彦鹏, 刘晨光, 等. 晚始新世以来雅浦海沟-岛弧构造演化模式[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 249-257.
- [6] 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.
- [7] CONTRERAS-REYES E, OSSES A. Lithospheric flexure modeling seaward of the Chile Trench: i implications for oceanic plate weakening in the trench outer rise region[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182: 97-112.
- [8] ZHANG F, LIN J, ZHAN W. Variations in oceanic plate bending along the Mariana Trench[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401: 206-214.
- [9] HANKS T C. The Kuril Trench-Hokkaido Rise system: large shallow earthquakes and simple models of deformation[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1971, 23: 173-189.
- [10] BODINE J H, WATTS A B. On the lithospheric flexure seaward of the Bonin and Mariana trenches[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 43: 132-148.
- [11] HARRIS R, CHAPMAN D. A comparison of mechanical thickness estimates from trough and seamount loading in the southeastern Gulf of Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 95: 9297-9317.
- [12] BRY M, WHITE N. Reappraising elastic thickness variation at oceanic trenches[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007: 112.
- [13] MUELLER S, PHILLIPS R J. On the reliability of lithospheric constraints derived from models of outer-rise flexure[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 123: 887-902.
- [14] CAPITANIO F A, MORRA G. The bending mechanics on a dynamic subduction system: Constraints from numerical modeling and global compilation analysis[J]. *Tectonophysics*, 2012: 522-523,224-234.
- [15] CAPITANIO F A, MORRA G, GOES S. Dynamics of plate bending at the trench and slab-plate coupling[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(4): 4002-4016.
- [16] MCADOO D, MARTIN C F. Seasat observations of lithosphere flexure seaward of trenches[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B5): 3201-3210.
- [17] MCADOO D, MARTIN C F, Poulouse S. Seasat observations of flexure: evidence for a strong lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1985, 116(3/4): 209-222.
- [18] 陈美, 高金耀, 金翔龙, 等. 利用大地水准面起伏模拟琉球海沟洋坡岩石圈的挠曲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 55-59.
- [19] ZHANG F, LIN J, ZHOU Z Y, et al. Intra- and inter-trench vari-

- ations in flexural bending of the Manila, Mariana and global trenches: implications on plate weakening in controlling trench dynamics[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212: 1429-1449.
- [20] ZHANG F, LIN J, ZHOU Z Y, et al. Intra-trench variations in flexural bending of the subducting Pacific Plate along the Tonga-Kermadec Trench[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38: 81-90.
- [21] ZHANG J Y, SUN Z, XU M, et al. Lithospheric 3-D flexural modelling of subducted oceanic plate with variable effective elastic thickness along the Manila Trench[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3): 2071-2092.
- [22] ZHOU Z Y, LIN J, ZHANG F. Modeling of normal faulting in the subducting plates of the Tonga, Japan, Izu-Bonin and Mariana Trenches: implications for near-trench plate weakening[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37: 53-60.
- [23] ZHANG J Y, MIN X, ZHEN S. Lithospheric flexural modelling of the seaward and trenchward of the subducting oceanic plates[J]. *International Geology Review*, 2020, 62(7/8): 908-923.
- [24] CONTRERAS-REYES E, CORTÉS-RIVAS V, MANRÍQUEZ P, et al. The silent bending of the oceanic Nazca Plate at the Peruvian Trench[J]. *Tectonophysics*, 2021: 807.
- [25] CONTRERAS-REYES E, GARAY J. Flexural modeling of the elastic lithosphere at an ocean trench: a parameter sensitivity analysis using analytical solutions[J]. *Journal of Geodynamics*, 2018, 113: 1-12.
- [26] WATTS A B, TALWANI M. Gravity anomalies seaward of deep-sea trenches and their tectonic implications[J]. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 1974, 36: 57-92.
- [27] PARSONS B, MOLNAR P. The origin of outer topographic rises associated with trenches[J]. *Geophysical Journal International*, 1978, 1(4): 707-712.
- [28] LEVITT D A, SANDWELL D T. Lithospheric bending at subduction zones based on depth soundings and satellite gravity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 379-400.
- [29] HUNTER J, WATTS A B. Gravity anomalies, flexure and mantle rheology seaward of circum-Pacific trenches[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 207: 288-316.
- [30] CALDWELL J G, HAXBY W F, KARIG D E, et al. On the applicability of a universal elastic trench profile[J]. *Earth Planet Science Letter*, 1976, 31: 239-246.
- [31] TURCOTTE D, SCHUBERT G. Geodynamics-applications of continuum physics to geological problems, 3rd ed[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [32] HUNTER J, WATTS A B. Gravity anomalies, flexure and mantle rheology seaward of circum-Pacific trenches[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 207(1): 288-316.
- [33] STRAUME E O, GAINA C, MEDVEDEV S, et al. GlobSed: updated total sediment thickness in the world's oceans[J]. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(4): 1756-1722.
- [34] 邢健, 郝天珧, 胡立天, 等. 对日本俯冲带与IBM俯冲带俯冲特征的地球物理研究: 来自重力与震源分布数据的启示[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(1): 116-140.
- [35] 凌子龙, 赵俐红, 彭祎辉, 等. 基于滑动窗口导纳技术反演西太平洋中部岩石圈的有效弹性厚度[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(1): 138-146.
- [36] YANG A, FU Y T. Estimates of effective elastic thickness at subduction zones[J]. *Journal of Geodynamics*, 2018, 117: 75-87.
- [37] 杨安, 付永涛, 李安春. 卡罗琳板块及其附近地区的岩石圈有效弹性厚度[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3280-3290.
- [38] KALNINS L M, WATTS A B. Spatial variation in effective elastic thickness in the Western Pacific Ocean and their implications for Mesozoic volcanism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(1/2): 89-100.
- [39] BAI Y L, DONG D D, KIRBY J F, et al. The effect of dynamic topography and gravity on lithospheric effective elastic thickness estimation: a case study[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 214(1): 623-634.
- [40] 刘文潇, 李春峰, 朱熹, 等. 西太平洋岩石圈有效弹性厚度的空间分布与控制因素[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6): 1975-1986.
- [41] 张斌. 马里亚纳俯冲带分段性及其成因研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [42] ZHANG Z Y, DONG D D, SUN W D, et al. Investigation of an oceanic plateau formation and rifting initiation model implied by the Caroline Ridge on the Caroline Plate, western Pacific[J]. *International Geology*, 2020, 63(1): 1-15.
- [43] RUPKE L H, MORGAN J P, HORT M, et al. Serpentine and the subduction zone water cycle[J]. *Earth Planet Science Letter*, 2004, 223: 17-34.
- [44] FACCENDA M, GERYA T V, BURLINI L. Deep slab hydration induced by bending-related variations in tectonic pressure[J]. *Nature Geoscience*, 2009(2): 790-793.
- [45] 皇甫鹏鹏. 大洋俯冲和大陆碰撞模式的数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

Deflection simulation of the Mariana Trench based on subduction dip angle

PENG Yihui^{1,2}, ZHAO Lihong^{1,2*}, LING Zilong^{1,2}, LI Mujie^{1,2}, ENN Shinn Hway^{1,2}

(1 Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2 Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The Mariana Trench is an important area in the evolution of the trench arc basin tectonic system in the Western Pacific Ocean. The study of the characteristics of the Mariana Trench is helpful to understand the differences in the formation and evolution of the trench parts. Based on the sediment and water depth data in the study area, the initial subduction dip angle (β_0) and the axis flexion (w_0) of the trench were calculated, the lithospheric flexion of the Mariana Trench was simulated, and the lithospheric effective elastic thickness (Te) of the Mariana Trench was obtained. The results show that the flexural position of the Mariana Trench is about 40~125 km, the flexural amplitude w_b is about 60~840 m, the effective elastic thickness is about 5~40 km, the initial subduction Angle β_0 is about $0.5^\circ\sim 5^\circ$, and the flexural w_0 of the axis is about 1.3~4.7 km. The effective elastic thickness of the middle trench is the highest, and the effective elastic thickness of the northern trench is slightly higher than that of the southern trench. The middle part of the trench is invaded by a large number of seamounts of different sizes, and the range of deflection, effective elastic thickness, initial subduction dip angle and deflection of axis are very large. The axial flexure of the southern segment of the trench is much higher than that of the northern segment and the middle segment, which may be related to the effect of the subduction of Caroline ridge and Caroline hot spot. There is no obvious correlation between the initial subduction dip angle and effective elastic thickness, deflection position and axis deflection.

Key words: initial subduction dip angle; flexure; effective elastic thickness; Mariana Trench