

中国南海高分辨率大地水准面及海底地形特征*

陆 洋^{1,2}

1. 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量开放研究实验室, 武汉 430077; 2. 中国科学院天文地球动力学联合研究中心

摘要 利用高分辨率的海洋卫星测高资料, 构制中国南海及邻近海域完整到 3600 阶次的甚高阶大地水准面数值模型, 使其表示大地水准面起伏的空间分辨率好于 5.5 km; 对大地水准面进行滤波和平滑, 滤除相关的波长, 得到了中国南海及邻近海域高分辨率的海底地形图像, 清晰地勾画出中国南海及邻近海域海底地貌、构造特征及动力学事件, 可作为海洋测深预报和构造的重新构成等之参考。

关键词 中国南海 卫星测高 大地水准面 海底地形

作为海洋学、海洋地质学、海洋地球物理学和海洋生物学等研究的基础资料, 海底地形图或海底数字地形模型的构造尤为重要。由于海洋卫星测高的出现, 利用卫星测高资料反演高分辨率的海底地形成为国内外关注的研究工作之一。自 20 世纪 80 年代以来, 由卫星测高得到的大地水准面数据被成功地用于大尺度的无图海域海洋测深预报和构造探测, 发现了许多未预料到的海山的存在, 在一些地区还发现了断裂带、甚至消减带^[1~3]。近 10 年来, 随着卫星测高技术的迅速发展, 获得了大量高精度、高分辨率的卫星测高资料, 被应用于反演高分辨率的海底地形。大量的工作是基于响应函数法, 利用卫星测高资料所推求的海洋重力异常并参考海洋测深资料反演高分辨率海底地形^[4~6]。

本文试图利用卫星测高资料计算的高分辨率大地水准面, 在中国南海及其邻近海域进行高分辨率的无图海底地形预报和构造探测。

1 南海大地水准面

海洋大地水准面是海洋大地测量和海洋研究等重要的参考基准, 其作为重力场的一种表现, 隐含着丰富的构造动力学信息。数千公里波长的长波长大地水准面起伏, 通常被认为是由下地幔或核幔边界的密度变化所造成的, 其与表面构造要素的相关

较弱; 而短波长大地水准面起伏则源于浅层作用, 与海底地形有着很强的相关性, 包含了相当多的海底构造信息, 使得利用大地水准面资料反演海底地形和构造探测成为可能。目前, 卫星测高尚未能直接提供可靠的高精度、高分辨率大地水准面数据, 为此首先构制高分辨率的大地水准面模型。

1.1 甚高阶次大地水准面模型

大地水准面的数值模型可由重力位模型表示。目前国际上公认的优势模型当数全球重力位模型 EGM96, 该模型由美国 NASA-GSFC (NASA Goddard Space Flight Center), NIMA (National Imagery and Mapping Agency) 和 OSU (the Ohio State University) 联合研制^[7], 展开至 360 阶次, 相当于 55 km 的空间分辨率。对于本研究来说, 远远不够, 因此, 建立区域性的高分辨率的重力位模型是有益的。

建模主要采用局部积分改进法, 该方法最初用于构制高阶模型 (360 阶次)^[8,9], 近年被发展用于构制超高阶模型^[10,11], 本文将用于构制甚高阶模型。主要思想: 全球重力位模型相对于局部地区的重力异常存在着一定的差异, 定义为局部地区的剩余重力异常。对剩余重力异常进行局部积分计算, 修正全球参考模型的中高阶部分, 并增补超高阶以上部分的系数, 即得到符合于该地区的新的甚高阶模型。

2001-07-17 收稿, 2001-11-19 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 49634140)及中国科学院资助项目(KZCX2-106)

E-mail: Luyang@asch.whigg.ac.cn

首先,选择参考模型(本文为 EGM96 模型),计算局部剩余重力异常(对于 3600 阶模型要求的子块格网为 $3' \times 3'$), 剩余异常所包含的信息频段主要为 $30' \sim 3'$ 的高频部分(即 360~3600 阶次)和中、低频残差(小于 360 阶次), 由此计算的系数修正值也含有相应的信息. 然后, 计算 2~3600 阶次的剩余重力异常所引起的模型系数修正值, 记为 $\Delta\bar{C}_{nm}^R$. 最后局部模型的位系数可表示为

$$\begin{cases} \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm}^s + \Delta\bar{C}_{nm}^R w, & n, m \text{ 为 } 2 \sim 360, \\ \bar{C}_{nm} = \Delta\bar{C}_{nm}^R w, & n, m \text{ 为 } 361 \sim 3600, \end{cases} \quad (1)$$

式中 \bar{C}_{nm}^s 为参考模型系数; w 为权函数^[9].

本文的研究区域为中国南海及其邻近海域 ($0^\circ \sim 25^\circ\text{N}$, $105^\circ \sim 122^\circ\text{E}$), 计算模型所用的数据源于 Sandwell 提供的全球海洋 $2' \times 2'$ 空间重力异常^[12], 其与船测重力异常比较偏差为 $\pm(4 \sim 7) \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$. 由此数据组构成中国南海及邻域 $3' \times 3'$ 测高平均重力异常, 计算得到完整到 3600 阶次的甚高阶局部重力位模型, 命名为 IGG-SCS00A (the geopotential model of the Institute of Geodesy and Geophysics in the South China Sea 2000A).

表 1 给出了新模型 IGG-SCS00A 和参考 EGM96 模型计算的重力异常分别与 $3' \times 3'$ 测高平均重力异常进行比较的结果. 表中最后一行表示较大误差(取两倍均方差)占误差总数的百分比. 可见, 新模型的较大误差比率明显降低; 最大和最小误差值降低了 2~3 倍; 新模型恢复重力异常的精度为 $\pm 3.3 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, 明显好于 EGM96 模型, 且分辨率提高了 10 倍. 与 EGM96 模型相比, 新模型 IGG-SCS00A 描述重力场精细结构的能力和精度得到了明显提高.

表 1 模型计算值与 $3' \times 3'$ 测高重力异常比较结果
(单位: 10^{-5}ms^{-2})

模型	EGM96	IGG-SCS00A
阶次	360	3600
分辨率	$30'$	$3'$
平均值	0.9	0.7
均方差	± 15.5	± 3.3
最小值	-132	-64
最大值	132	48
误差 $\geq 6.6 $	55.36%	4.60%

1.2 高分辨率大地水准面计算

大地水准面起伏 N 可由重力位系数 \bar{C}_{nm} 根据

球谐展式计算

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{3600} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{C}_{nm} \begin{pmatrix} \cos|m|\lambda \\ \sin|m|\lambda \end{pmatrix} \bar{P}_{n|m|}(\cos\theta), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m &\geq 0 \\ m &< 0, \end{aligned}$$

GM 为地心引力常数与地球质量的乘积, r 是地面点的地心向径, γ 是该点的正常重力, θ 是地心余纬, λ 是经度, a 为椭球长半径, \bar{C}_{nm} 为完全正则化的位系数, $\bar{P}_{n|m|}$ 为完全正则化的 Legendre 函数, 下标 n, m 表示展开的阶次.

据此, 由新模型 IGG-SCS00A 可计算得到南海 $3' \times 3'$ 大地水准面起伏(图 1), 平均空间分辨率为 5.25 km. 由于目前尚无标准的大地水准面可供使用, 仅以 EGM96 模型计算的海洋大地水准面起伏作为参考, 根据 Lemoine 等的报道^[7], 由 EGM96 模型计算的大地水准面起伏与由 2 年 TOPEX 测高数据和海流模型归算的起伏比较, 在一般的海洋区域其差值的均方根为 $\pm 0.11 \text{m}$. 这意味着 EGM96 模型计算的长波长海洋大地水准面达到了分米级水平.

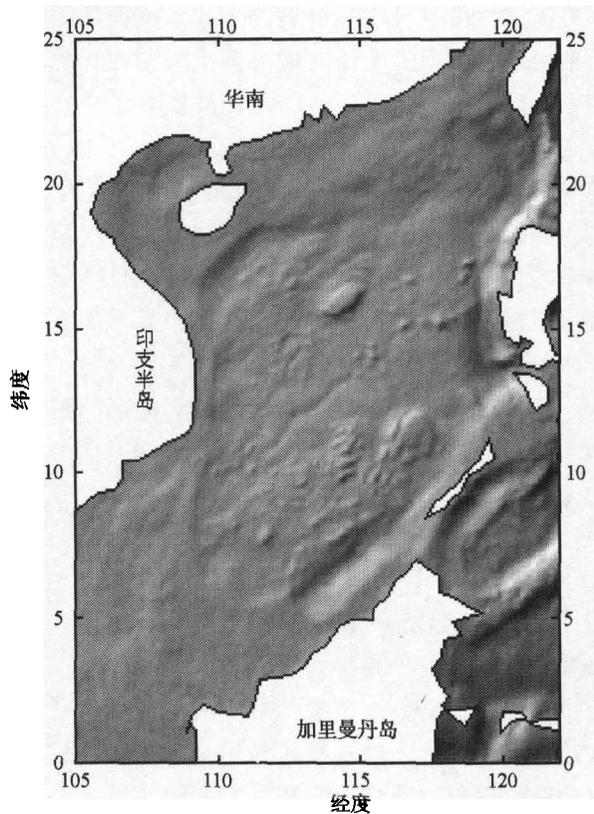


图 1 IGG-SCS00A 模型计算的南海区域 $3' \times 3'$ 大地水准面立体图

比较新模型与 EGM96 模型计算的大地水准面起伏, 结果绘于图 2. 其差值在 $-1.6 \sim +1.7 \text{ m}$ 之间, 均方根为 $\pm 0.24 \text{ m}$; 绝对值大于 0.24 m 的差值占总数的 12.5%; 绝对值大于 0.48 m (2 倍均方根) 的差值占总数的 5.9%, 这部分差值基本上散布于地形变化较大之处, 主要是由于 EGM96 模型分辨率较低, 不足以描述重力场精细结构; 根据图 2 和差值分布情况分析, 新模型计算的大地水准面没有出现变形和扭曲. 同时, 图 2 描绘了新模型所增补的超高频部分 (即 361~3600 阶次) 以及修正的高、中频部分 (≤ 360 阶次) 信息总况, 显而易见, 新模型所表示的大地水准面包含了更多的高频信息, 更有利于描述海底构造及地貌特征.

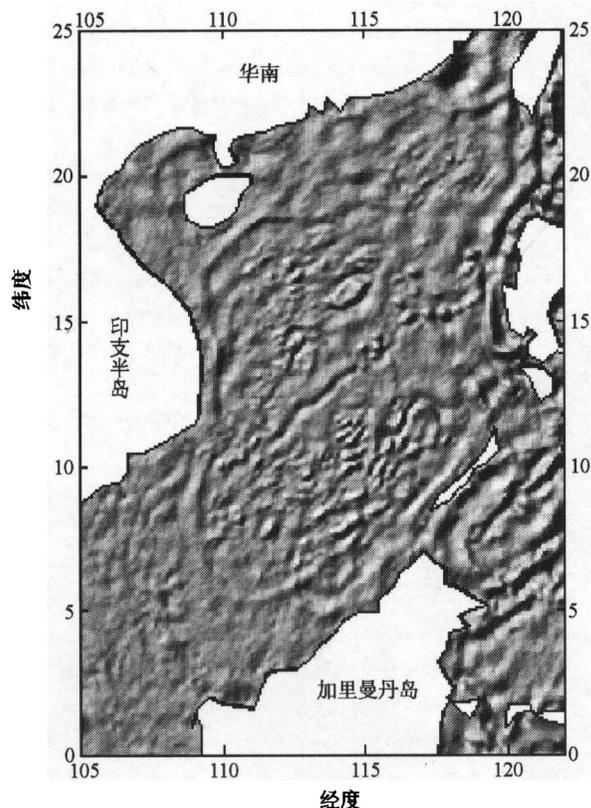


图 2 新模型与参考模型计算的大地水准面起伏之差立体图

2 南海海底地形及构造分析

可以看到南海大地水准面起伏 (图 1) 已经描绘了该区域海底地形的大致情况, 各种地貌依稀可见. 根据大地水准面的频谱特性, 海洋大地水准面的长波部分 (大于 4000 km) 处于支配地位, 主要是

由地幔中宽阔的对流来保持的, 短波长起伏 (小于 1000 km) 主要起源于海底岩石圈内和紧靠其下的密度异常. 由于海水密度与海底地壳密度的显著差异, 海底成为最显著的浅密度边界, 所以短波长起伏与海底地形强相关, 也与莫霍面基层强相关.

为了更清楚地了解南海海底地形构造特征, 采用滤除地球位场的累加波段贡献的方法, 去掉独立的相应波长的地球位场起伏以增强这些构造特征. 一般地, 球谐函数展开式的每个 n 阶函数对应于一个 $2\pi R/n$ 的特殊波长 (R 为地球的平均半径), 且各阶次 n 的场值所对应的场源深度 D 可大致由 $D = R/(n - 1)$ 式估算^[13].

从南海 $3' \times 3'$ 大地水准面滤除 10 阶次以内的地球位场 (相当于滤除大于 4000 km 的波长, 相应的场源深度为海洋下地幔顶部), 平滑后剩余大地水准面 (图 3) 描绘了轮廓更为清晰的南海地貌形态, 与鲍才旺的南海地貌图^[14]吻合很好, 各种地貌如大陆架和岛架、大陆坡和岛坡、陆坡盆地、海盆、海台、海山、海槽、海沟等清晰可见, 惟北吕宋海槽显现模糊. 特别地与地貌图明显不同的是: 在南海西南海盆处 (约从 10.7°N , 111.4°E 到 14.8°N , 116.4°E) 呈现一条南西-北东走向的“海沟”, 实际上是破裂带所在, 这个破裂带在文献 [14] 中的南海地貌图以及以往的海底地形图中没有被显示, 它首次被 Taylor 等^[15] 在南海磁条带异常中发现, Hwang 和王勇的工作也得到同样的结果^[5,6], Briais 等^[16] 认为可能是由于印度板块与欧亚板块碰撞所产生的“海岭跳跃”. 据姚伯初^[17] 的南海断裂分布示意图, 此破裂带所处为停止扩张中心. 图 3 不但反映了高分辨率的中国南海及邻近海域的海底地貌, 同时也揭示了较为详尽的海底构造特征, 可作为海深探测以及研究海底构造的演化和动力学事件的参考.

进一步地, 滤除 110 阶次以内的地球位场 (相当于滤除大于 360 km 的波长, 相应的场源深度为海洋岩石圈底部), 剩余大地水准面描绘的各种地貌特征显示如故, 惟北吕宋海槽跃然而出, 格外醒目 (图 4(b)), 隐示着北、西吕宋海槽构造特性有所差异. 另外, 图 2 实际上是滤除了 360 阶次的剩余大地水准面起伏图 (参考于 EGM96 模型, 相当于滤除大于 110 km 的波长), 各类海山、海槽和海沟更为突出和清晰, 显示了海底地貌的局部特征.

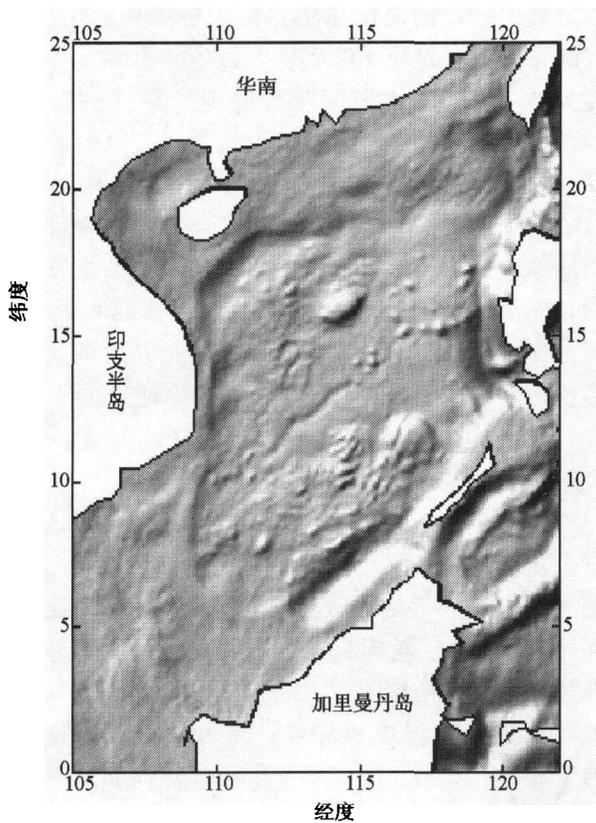


图3 滤除大于4000 km的波长后南海区域3'×3'大地水准面立体图

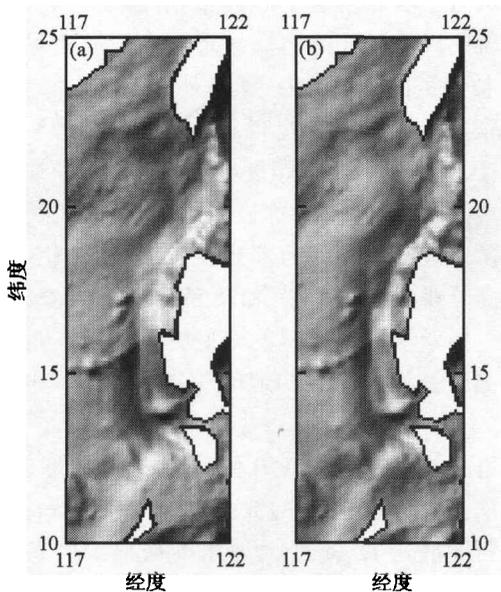


图4 北、西吕宋海槽和马尼拉海沟

(a) 波长小于4000 km之剩余大地水准面; (b) 波长小于360 km之剩余大地水准面

3 结论

本文利用卫星测高资料构制的中国南海及邻近海域大地水准面的空间分辨率好于5.5 km, 可描述

平均尺度大于5.25 km的海底地貌及有关构造. 在未参考任何海洋测深资料的情况下, 利用卫星测高资料计算的高分辨率大地水准面构造了中国南海及邻近海域高分辨率的海底地形图像, 清晰地勾画出中国南海及邻近海域海底地貌、构造特征及一些动力学事件, 可作为海洋测深预报和构造的重新构成等之参考.

参 考 文 献

- 1 Lazarewicz A R, et al. Detection of uncharted seamounts using satellite altimetry. *Geophys Res Lett*, 1982, 9: 385
- 2 Cazenave A, et al. Geoid heights over the Louisville Ridge (South Pacific). *J Geophys Res*, 1984, 89: 11171
- 3 Ruff L J, et al. SEASAT geoid anomalies and the Macquarie Ridge complex. *Phys Earth Planet Inter*, 1985, 38: 59
- 4 Smith W H, et al. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 1997, 277: 1956
- 5 Hwang C. A bathymetric model for the South China Sea from satellite altimetry and depth data. *Marine Geodesy*, 1999, 22: 37
- 6 王 勇, 等. 中国海及其邻近海域高分辨率海底地形. *科学通报*, 2001, 46(11): 956
- 7 Lemoine F G, et al. The development of the joint NASA GSFC and the NIMA geopotential model EGM96. NASA/TP - 1998 - 206861, GSFC, Greenbelt, MD, 1998
- 8 Weber G, et al. Regional geopotential model improvement for the Iranian geoid determination. *Bulletin Geodesique*, 1988, 62: 125
- 9 陆 洋, 等. 区域高阶重力场模型与青藏地区局部位系数模型. *地球物理学报*, 1994, 37(2): 487
- 10 陆 洋, 等. 720阶高分辨率重力场模型 IGG97L 研究. *地壳形变与地震*, 1998, 18(增刊): 1
- 11 Wenzel G. Ultra high degree geopotential model GPM3E97A to degree and order 1800 tailored to Europe. *Proceedings of the 2na Continental Workshop on the Geoid in Europe, Budapest, March 10 - 14, 1998b*
- 12 Sandwell D T, et al. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. *J Geophys Res*, 1997, 102 (B5): 10039
- 13 Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the earth's geoidal undulation and gravity anomalies. *Marine Geodesy*, 1983, 7: 61
- 14 鲍才旺. 南海西部陆坡的海岭及其特征. 见: 姚伯初等编. *南海西部海域地质构造特征和新生代沉积*, 北京: 地质出版社, 1999. 11
- 15 Taylor B, et al. The tectonic evolution of the South China Basin. In: Hayes E eds. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asia and Islands*. Washington D C: 1983. 89~104
- 16 Briaux A, et al. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implication for the tertiary tectonics of Southeast Asia. *J Geophys Res*, 1993, 98: 6299
- 17 姚伯初. 南海断裂特征及其构造意义. 见: 姚伯初等编. *南海西部海域地质构造特征和新生代沉积*, 北京: 地质出版社, 1999. 32~43