

南桑威奇俯冲带大地水准面异常及其地幔对流特征分析

刘心哲^{1,3}, 陈文文², 邢军辉^{1,3}, 吴晓阳^{1,3}, 安 隆^{1,3}, 张 浩^{1,3}, 彭树聪^{1,3}

(1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学学报(英文版)编辑部, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 以南桑威奇俯冲带为例, 根据 EGM2008 超高阶地球重力场模型、卫星重力数据为基础, 利用移去-恢复原理计算了研究区大地水准面, 实现了研究区不同场源深度大地水准面异常信息的分离, 根据 Runcorn 模型计算了研究区小尺度地幔对流应力场, 并结合天然地震空间展布和前人研究成果, 对俯冲带结构特征与地幔对流模式进行了探讨。结果表明: 南桑威奇俯冲带具有俯冲倾角较大、地震震级较低、弧前侵蚀明显等典型的马里亚纳型俯冲带特征, 俯冲带南北部俯冲深度存在明显差异, 中段偏北俯冲深度可达 500 km; 受到软流圈与上地幔上部物质密度差异的控制, 东斯科舍海脊下存在沿海脊轴向南流动强地幔流; 俯冲带结构与小尺度地幔对流应力场具有很强的相关性。本研究对于搞清南桑威奇俯冲带深部构造特征, 理解俯冲运动、地幔对流方向及其动力控制机制提供了新的研究思路和方法。

关键词: 南桑威奇俯冲带; EGM2008 地球重力场模型; 大地水准面异常; 地幔对流

中图分类号: P738.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)09-0054-10

DOI: 10.11759/hyxx20181019001

俯冲带研究作为板块构造理论的重要组成部分, 一直是地球科学研究的热点问题^[1]。由于俯冲带中俯冲角度、俯冲速度以及周边地质条件等的不均一性, 其不同区域内的动力过程存在明显的区别, 这种差异性能够直接控制俯冲带内的岩浆系统, 进而影响俯冲带深部区域中的地幔对流模式。因此俯冲带构造动力机制研究对于精确理解俯冲带结构特点、岩浆作用和板块运动的演化过程具有重要意义^[2]。南桑威奇俯冲带是南美洲板块向桑威奇板块西缘俯冲而形成的汇聚型板块边界, 其发育有全世界最典型的沟-弧-盆构造体系, 为研究俯冲带构造特征和地幔对流模式中的动力控制因素提供了极具代表性的实验区域^[3]。自 21 世纪以来, 国外学者通过多波束测深、浅地层剖面、反射地震和地球化学等手段对南桑威奇俯冲带的构造特征和岩浆活动进行了探讨, 但是由于地震层析成像等数据的缺失, 未能对俯冲带深部构造和动力机制进行系统研究^[4-8]。

近年来, 随着卫星测高、空间探测等基础理论研究和手段的发展, 卫星重力数据和高精度地球重力场模型在地学资料稀少地区的研究中取得了良好的应用效果^[9-10]。大地水准面作为确定地球形状连续光滑闭合重力等位面, 其频谱主要由长波长大尺度深部信息控制, 其中 2—6 阶大地水准面信息约

占整个大地水准面的 80%, 克服了重力异常因能量随深度衰减过快而在深部构造解释中存在的局限性, 大地水准面异常形态能够刻画地球内部物质分布和运动过程^[11-13]。目前, 高精度大地水准面主要应用于俯冲带结构分析、地幔对流模式研究以及地球内部密度结构反演等方面^[14-19]。小尺度地幔对流作为一种特殊的对流形态, 能够反映区域性构造、地震和动力过程^[20], 一部分重力位差异和俯冲运动等产生的合力及能量被地幔吸收, 其余部分则以重力异常信息反应, 因此根据 Runcorn 模型基于重力异常计算地幔对流应力场在理论上是可行的^[21]。随着地球重力场模型精度的提高, 小尺度地幔对流应力场的计算逐渐精细化, 为理解区域动力格局提供了一种极具价值的方法。

本文基于 EGM2008 高阶地球重力场模型和卫星重力数据, 计算了南桑威奇俯冲带 320 阶、213 阶、80 阶、33 阶、13 阶、9 阶剩余大地水准面异常(对应

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41606044); 国家科技重大专项项目(2016ZX05027-002)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41606044; National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05027-002]

作者简介: 刘心哲(1994-), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事海洋应用地球物理研究, E-mail: lxzwork@163.com; 陈文文, 通信作者, 电话: 0532-66782408, E-mail: wenwenchen@ouc.edu.cn

场源深度分别为 20、30、0、200、500、800 km)和反映软流圈、岩石圈动力特征的小尺度地幔对流应力场,并结合天然地震等地球物理资料对南桑威奇俯冲带俯冲运动特征、地幔对流方向及其动力控制机制进行了探讨。

1 区域地质概况

南桑威奇俯冲带位于斯科舍海东侧,南极洲板块与美洲板块交界处。自北侧的南乔治亚岛东缘至南侧的南桑威奇断裂带,延伸距离长达约 1 500 km。南桑威奇俯冲带构造体系相对简单,包括南桑威奇海沟、一系列小型弧前地块、南桑威奇岛弧和东斯科舍海脊,属于典型的洋内沟-弧-盆俯冲构造体系^[3]。据研究区地形图(图 1a),研究区海拔基本位于海平面以下,最深水深位于南桑威奇海沟北部(约 24.8°W, 56.2°S),可达 8 185 m。

综合以往研究可知,约 15 Ma 前,研究区构造体系已经确定^[3]。更古老的南美洲板块向桑德维奇板块下俯冲,俯冲角度随深度增加而逐渐增大,深度到达 60 km 以下时,俯冲角度增大至约 75°,且俯冲带南部俯冲角度总体上小于北部俯冲角度^[22]。俯冲地壳在南桑威奇海沟中呈现北部老(83 Ma)南部新(27 Ma)的分布特点^[23],且俯冲板块的会聚速度存在明显差异,俯冲带北部会聚速度约为 67 mm/a,南部速度可达 79 mm/a^[24]。该俯冲系统的几何结构使得俯冲带北端的南美洲板块向北发生撕裂从而形成地震活动的主要区域,而俯冲带南端因南极洲-南美洲板块转换板块边缘的存在,未发生撕裂^[25]。南桑威奇岛弧位于桑德维奇板块东缘西 80 km 处,主要由桑德斯岛等 7 个主要岛屿和若干小型岛屿、浅滩构成。岛弧由南美洲板块向桑德维奇板块下俯冲运动形成,是一个构造简单、构造运动活跃的洋内岛弧,岛弧主要位于东斯科舍海脊弧后扩张中心所产生的海洋地壳之上^[26]。东斯科舍海脊是一个活跃的扩张中心,目前以 65~70 mm/a 的速度扩张。其东侧为桑德维奇板块,西侧为斯科舍板块,北端与南桑威奇海沟相连。9 Ma 以来,其北端在南美洲板块板块撕裂所导致的应力场变化作用下,位置、形态发生显著变化^[27]。

2 数据和理论

2.1 数据来源

本文所采用的和地形数据和卫星重力数据均来自于加利福尼亚大学圣地亚哥分校斯克里普斯海洋研

究所(网址 <https://topex.ucsd.edu>)。本文所使用的地球重力场模型(EGM2008)来源于美国国家地理空间情报局(NGA 网址 <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Toolbox/EGM2008-anomaly-maps-visualization>),模型最高阶数为 2 190 和 2 159,模型分辨率为 5'×5'。本文所采用的天然地震数据来源于美国地震信息中心(USGS 网址 <https://earthquake.usgs.gov>),选取时间跨度为 1990 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日,地震震级大于 4.5 级的天然地震数据进行了统计。

2.2 计算理论

2.2.1 大地水准面计算

为计算研究区的大地水准面,需要获得研究区重力数据和 GPS 水准数据。但是研究区大部分位于海上,无法获得 GPS 水准数据。Pavlis 等^[28]通过计算指出 EGM2008 重力场模型已达到厘米级精度,全球范围内其数据误差在 10 cm 之内。本文根据总阶数 2190 EGM2008 地球重力场模型,利用经典 Stokes 理论计算大地水准面高度异常:

$$N = \frac{R}{4\pi a} \iint gS(\psi) d\sigma, \quad (1)$$

式中, $S(\psi)$ 表示斯托克斯核函数, ψ 为计算点到积分面元之间的球面角距, N 为大地水准面异常, R 和 a 分别表示地球平均半径和表面半径, g 表示重力异常, σ 为积分微元为了改进局部积分对式(1)的精度影响,在计算中首先将大地水准面分为两部分:

$$N = N_m + N_r, \quad (2)$$

式中 N_r 表示剩余重力异常产生的大地水准面剩余异常分量,因为其数量级很小,计算误差可以忽略不计,所以可以根据剩余重力异常利用式(1)中的斯托克斯公式直接计算获得:

$$g_r = g - g_m, \quad (3)$$

N_m 表示利用 EGM2008 地球重力场模型计算得到的大地水准面异常,由以下公式计算得到:

$$N_m = \frac{GM}{ar} \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C} \cos m\lambda + \bar{S} \sin m\lambda) \bar{P}(\sin \varphi), \quad (4)$$

式中, G 为万有引力常数, M 为地球质量, a 表示地球表面半径, r 为地球平均半径, n_{\max} 为计算的最高阶数, φ 和 λ 分别表示计算点处的地心余纬和经度, \bar{C} 和 \bar{S} 为地球重力场扰动位球谐系数, $\bar{P}(\sin \varphi)$ 表示勒让德函数。

2.2.2 剩余大地水准面计算

Bowin 等^[11]提出等效点源质量计算公式,建立

了场源深度、波长以及地球重力位阶数间的关系:

$$Z_n = \frac{r}{n-1}, \tau = \frac{2\pi r}{n}, \quad (5)$$

上式中 Z_n 为场源深度, n 为重力场阶数, τ 为波长。为了突出浅部异常场源产生的中短波信息, 实现不同深度范围内异常信息的分离研究, 计算大地水准面与不同阶窗内截断大地水准面的差值, 即可获得反映某一场源深度以上深度范围内异常信息的剩余大地水准面。

2.2.3 小尺度地幔对流位场计算

根据 Runcorn 等^[29]提出的地幔对流作用在岩石圈底部的应力方程, 计算地幔流位场 V , 位场的水平梯度即为地幔流应力:

$$V = \frac{Mg}{4\pi a} \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{r}{a}\right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n+1}\right) \sum_{m=0}^n (\bar{C} \cos m\lambda + \bar{S} \sin m\lambda) \bar{P}(\sin \varphi), \quad (6)$$

上式中 (a, φ, λ) 为地幔对流体系外界面上流动点的球

坐标。

3 讨论与分析

3.1 研究区大地水准面形态特征

研究区大地水准面整体位于参考椭球体之上(图 1b), 范围约为 0~25 m, 最高点位于东斯科舍海脊中部, 最低点位于南桑威奇海沟东北部。研究区中部存在一个向东凸出的近 N-S 向的条带状大地水准面低值圈闭, 与南桑威奇海沟对应, 大地水准面自中部圈闭向东、西两方向迅速抬升, 并在研究区西部形成一个与东斯科舍海脊相对应的大地水准面高值圈闭。与研究区地形图对比, 大地水准面形态与地形具有很强的相关性: 地形起伏较大区域, 如南桑威奇俯冲带的沟-弧系统处, 大地水准面变化剧烈; 在地形起伏较小区域, 如东斯科舍海脊西部区域, 大地水准面变化则对平缓。

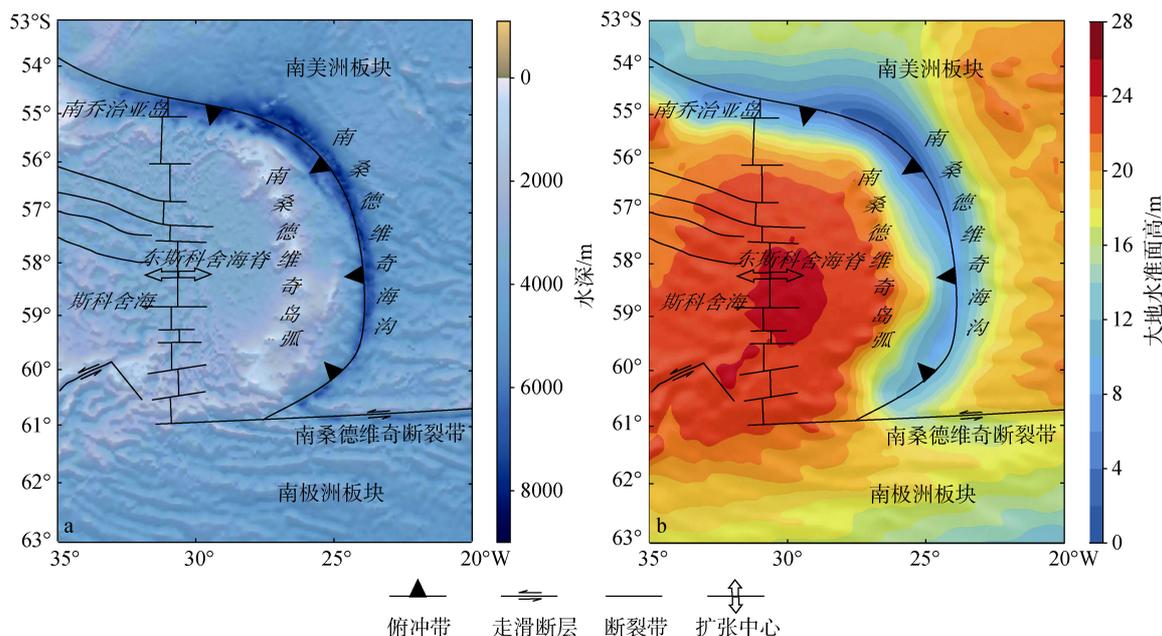


图 1 南桑威奇俯冲带地形图、大地水准面分布图

Fig. 1 Topographic map (a) and geoid distribution map (b) of South Sandwich subduction zone

注: a: 地形图; b: 大地水准面分布图

3.2 剩余大地水准面异常的综合解释

图 2a 代表研究区 320 阶剩余大地水准面异常, 场源深度 $Z \leq 20$ km; 图 2b 代表研究区 213 阶剩余大地水准面异常, $Z \leq 30$ km, 异常图包含了海底地形、地壳及壳幔边界附近的异常信息。图 2a 和图 2b 中剩余大地水准面异常值受研究区地形影响, 皆以不

连续条带状分布, 陆洋认为虽然高阶剩余大地水准面异常会对陆地异常信息研究造成干扰, 但其对海底地形提取具有一定的应用价值^[30]。与图 1c 对比可知, 320 阶剩余大地水准面异常幅值较低, 反应了浅层短波信息相对较弱的特点。南美洲板块与桑威奇板块边缘存在向东凸出且正负相间的条带状异常,

与南桑威奇海沟的主构造形态基本一致,这种分布特点可能与板块俯冲消减在地壳内部引起的受力形变有关。与南桑威奇岛弧对应的7个珠状正异常与该岛弧中的桑德斯岛等主要岛屿位置一致,反映了压性构造引起的质量过剩。该正异常东侧的负异常条带反映了弧前盆地沉降作用所产生的质量亏损。研究区东南部存在一条近E-W向条带状负异常,该负异常位于南美洲板块与南极洲板块转换板块边界处,与南桑威奇断裂带对应。断裂带内岩石破碎、错断,低密度物质填充产生负异常重量,密度降低,表现为大地水准面异常值的突降^[31]。图2b中研究区西部(31°W)附近存在一条近N-S向的弱条带状正异常,与东斯科舍海脊吻合。东斯科舍海脊属于中慢速扩张系统,若干近E-W向断层与该海脊正交。在中慢速扩张系统中,转换断层处的地壳变薄^[32]。这种构造特点加强了东斯科舍海脊区域的正异常。

图2c代表研究区80阶剩余大地水准面异常, $Z \leq 80$ km, 主要反映岩石圈底部异常信息。与图2a、图2b相比,南桑威奇海沟所对应的负异常延伸范围减小,体现出沿海沟轴向俯冲强度的差异性,北端俯冲深度小于80 km,中部和南部俯冲深度到达岩石圈底部。研究区中部大规模正异常与东斯科舍海脊对应,两个高值圈闭分别位于海脊北端与海脊中南部。活跃扩张中心下的地幔上涌导致了这种正异常的产生。Livermore等^[27]根据地形和地震资料研究提出东斯科舍海脊中部存在局部地幔熔融异常,因此我们推断海脊中南部的高异常值圈闭与地幔横向密度结构差异有关^[33]。东斯科舍海脊两侧异常值对称分布,自中部向两侧异常值逐渐减小,反映出地幔富集程度与距扩张中心距离的反比关系。南桑威奇岛弧正异常幅值相对降低,说明地形对剩余大地水准面异常值的影响进一步减弱,岛弧南端存在一个小型正异常圈闭,可能与东斯科舍海脊地幔流和沿俯冲带南端的地幔流入共同作用有关^[34]。南桑威奇断裂带所对应的条带状负异常增强,认为该断裂带切穿地壳,深度可达30 km以上;沿断裂自西向东负异常幅值逐渐增大,可以解释为该走滑断层断裂深度由西向东递增。

图2d代表研究区33阶剩余大地水准面异常, $Z \leq 200$ km, 主要反映软流圈异常信息。异常值幅值范围扩大,深部构造对异常值的影响更加明显。南桑威奇海沟所对应的负异常范围进一步缩小。海沟南端负异常形态特点与俯冲运动所产生的条带状异常不同,可以推断该区域俯冲运动停止于200 km以上。东斯科舍海脊正异常区明显,但其南部正异常规模减小,

沿该海脊异常值具有清晰的北高南低的分布特点,反映地幔密度及黏度存在横向变化。当地幔黏度存在横向变化,会同时产生地幔极型对流场和地幔环型对流场^[35]。在球体模型中极型对流场对应径向运动,环型对流场对应水平方向运动,图2d中沿海脊异常值梯度方向近N-S向,因此可以认为东斯科舍海脊下软流圈底部存在向南流动的地幔流,这与Livermore等^[27]提出的观点相符。

图2e代表研究区13阶剩余大地水准面异常, $Z \leq 500$ km, 主要反映上地幔上层异常信息。图2f代表研究区9阶剩余大地水准面异常, $Z \leq 800$ km, 主要反映上地幔下层异常信息。与图2d相比,图2e中南桑威奇海沟所对应的负异常幅值减小,俯冲带俯冲强度降低,图2f中,南桑威奇海沟区域负异常消失,反映出俯冲运动未达上地幔下层,板块最大俯冲深度小于800 km。图2e中东斯科舍海脊所对应的正异常幅值减小,依然具有北高南低的分布特点,而图2f中沿斯科舍海脊轴向的异常分布特征改变,海脊中南部出现一个低幅值正异常圈闭。这种差异性分布反映了沿斯科舍海脊轴向流动的南向地幔流在上地幔上层中依然存在,而上地幔下层中该南向地幔流消失。

3.3 研究区地震信息

图3为研究区震源平面分布图以及震源在沿经度和纬度方向的投影。为配合剩余大地水准面的研究,将震源信息分为对应深度范围进行统计。根据震源平面图可以发现,由俯冲带构造应力变化导致的浅层地震分布范围较广,主要沿海沟、弧前等俯冲前缘地带分布。而中、深源地震则普遍分布于俯冲板内,其分布位置主要受俯冲运动影响^[36-38]。因此,震源分布范围能够在一定程度上指示俯冲带构造运动情况。根据图3b,0~20 km与20~30 km深度范围内的浅层震源沿南桑威奇海沟均匀分布,与图2a、2b中沿海沟均匀分布的负异常对应。30~80 km范围内震源分布范围减小,与根据图2c分析得出的“俯冲带北端俯冲深度小于80 km”相符。80~200 km范围内震源分布密度出现明显区域性差异,俯冲带中部偏北处震源密度较高,与图2d中极大负异常值区域对应;60.5°S以南区域震源分布稀少,再次证明了俯冲带南部俯冲活动未达到200 km深度。根据图4c,对于俯冲角度变化不大的俯冲带,可以大致推断板块俯冲角度随深度的变化趋势,南桑威奇俯冲带俯冲角度较大,且随深度的增加,俯冲角度逐渐增大。

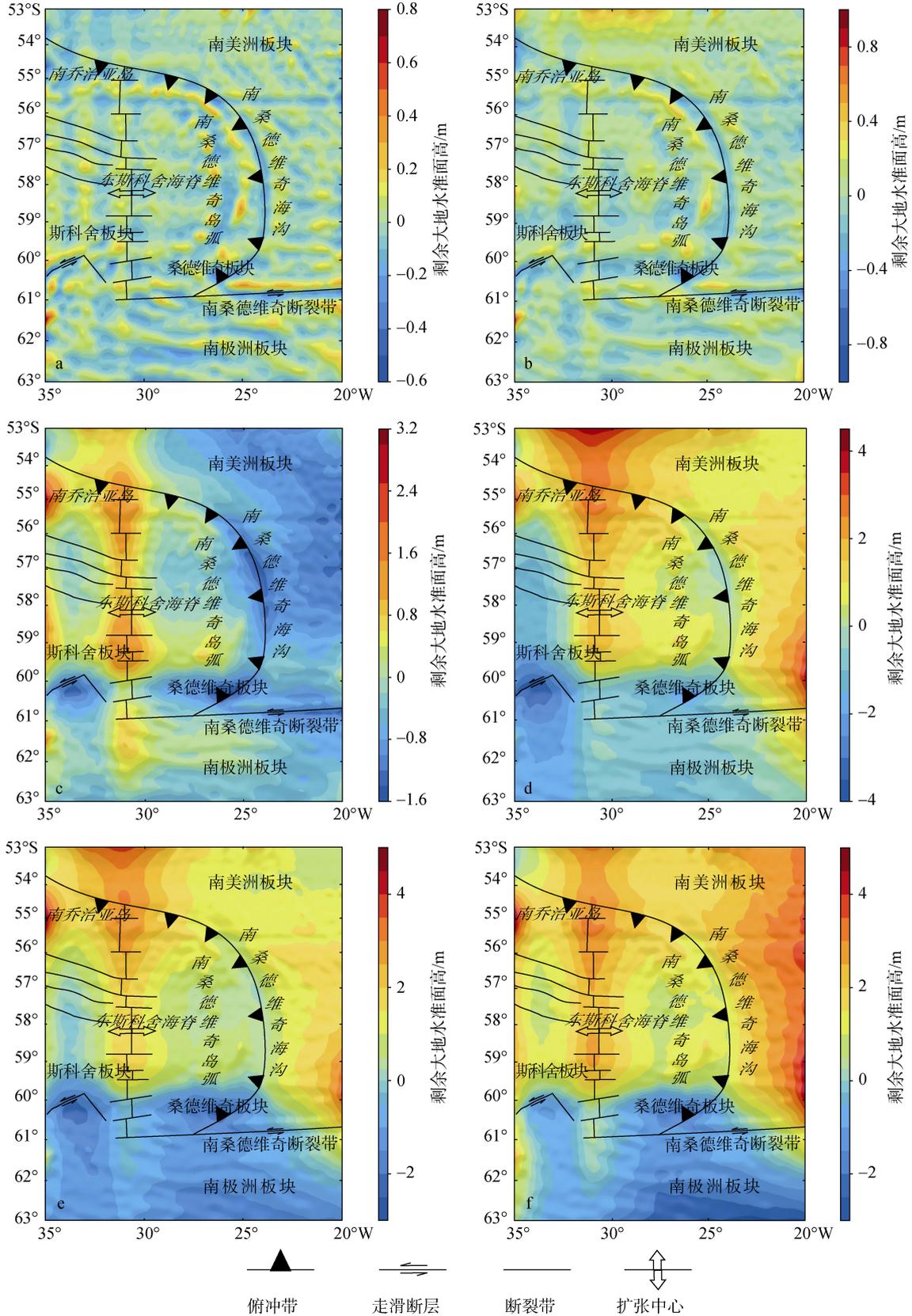


图2 研究区不同阶次剩余大地水准面异常分布图

Fig. 2 Residual geoid anomalies in different orders used in the South Sandwich subduction zone

注: a: 320阶异常; b: 213阶异常; c: 80阶异常; d: 33阶异常; e: 13阶异常; f: 9阶异常

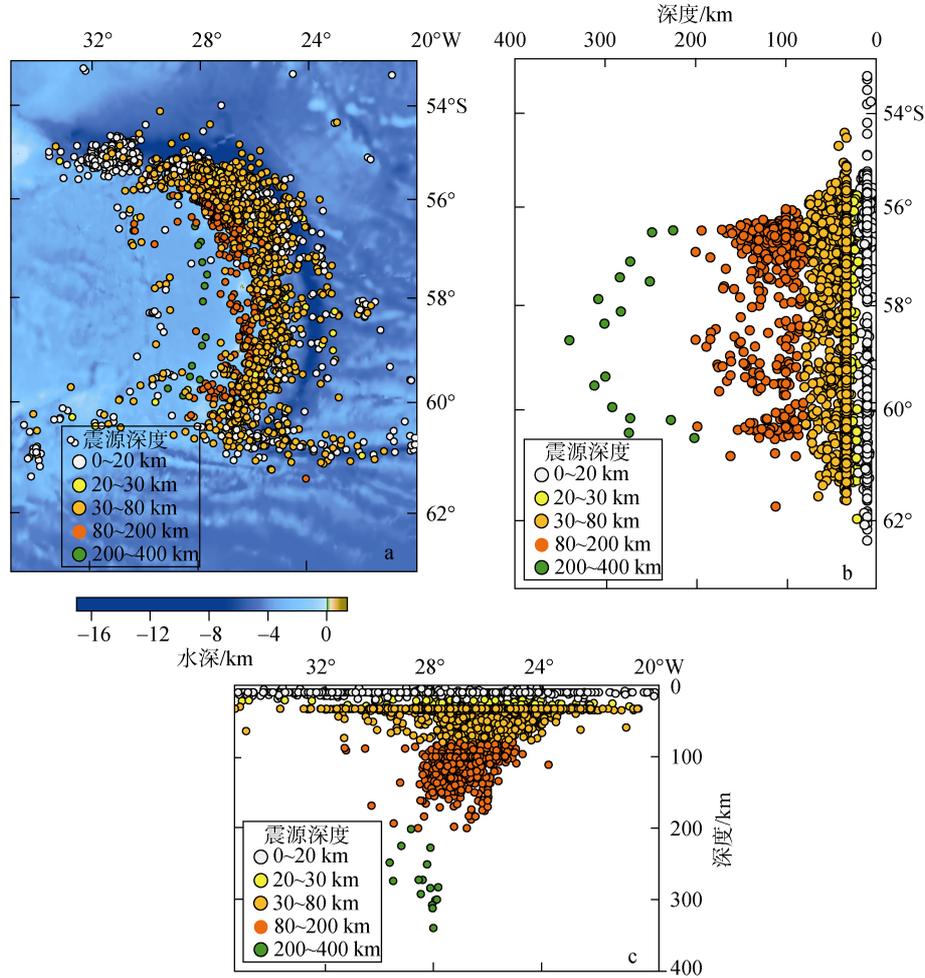


图3 南桑威奇俯冲带地震分布图

Fig. 3 Distribution of seismic data obtained in the South Sandwich subduction zone

注: a: 地震平面分布图; b: 震源沿纬度方向投影; c: 震源沿经度方向投影

3.4 小尺度地幔对流位场与俯冲带结构

图4为根据Runcorn模型计算的研究区小尺度地幔对流位场,主要反映深度约为80 km(软流圈上部)的地幔对流位场分布。图中正应力分布与应力汇聚带对应,负应力分布与应力发散带对应。应力汇聚带主要表示岩石圈和软流圈受到地幔下降流作用产生的挤压应力,而应力发散带主要表示岩石圈和软流圈受到地幔上升流作用而产生的张应力^[39]。南桑威奇俯冲带应力分布特征与沟-弧-盆体系小尺度地幔对流应力场特征相吻合。东斯科舍海脊软流圈地幔上升,表现为应力发散带,南桑威奇海沟外侧区域与南桑威奇岛弧表现为应力汇聚带,海沟外侧与海沟间的应力差异导致整个俯冲带普遍存在俯冲板片的向东回撤^[24]。海沟外侧区域、海沟以及岛弧沿海沟轴向应力分布均存在差异,北部应力汇聚和

应力发散强度强于南部。这与根据80阶剩余大地水准面异常所解释出的南桑威奇俯冲带北强南弱的俯冲强度分布特点具有很好的一致性。东斯科舍海脊中部为较弱的应力发散带,受到地幔上升流作用,该区域软流圈与上地幔上部产生质量亏损;而斯科舍海脊北端则为强应力汇聚带,地幔下降流引起质量过剩。海脊北端与中部在上地幔至软流圈这一深度范围内地幔密度存在差异,引发地幔极型对流,产生由北向南流动的地幔流。斯科舍海脊作为南桑威奇俯冲带的弧后区域,岩石圈的构造活动性对弧后盆地起始阶段的演化具有重要意义。南桑威奇岛弧处应力汇聚强度很大,伴随着岛弧的挤压隆升,东斯科舍海脊在剪张性调节作用下沿垂直于海脊轴向方向错段,形成大量走滑断层,弧后中心部分错段最为明显^[40-41]。研究区西南部小型走滑断层西北

侧应力场强度沿断层走向由 NE 向 SW 逐渐增大, 构造动力能量向西南聚集, 斯科舍板块运动在该构造体系中产生左旋拉张作用, 导致左旋走滑断层形成。走滑断层东南部区域内应力基本为 0, 证明该深度范围内地幔对流对该区域构造影响较小。综合图 2c 中小型负异常圈闭的分布特征可以推断, 该区域大地水准面剩余异常值凹陷与岩石圈底部和软流圈顶部深度范围内存在低速、低阻塑性体对应。

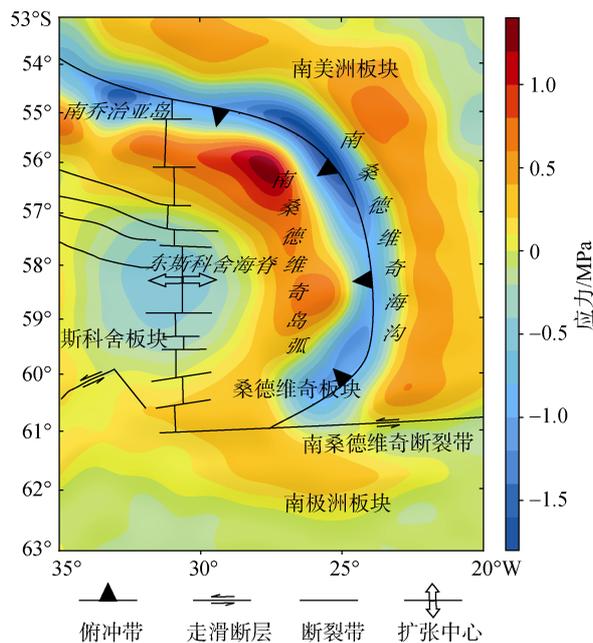


图 4 南桑威奇俯冲带小尺度地幔对流位场

Fig. 4 Stress field from small-scale mantle convection in the South Sandwich subduction zone

图 4 中东斯科舍海脊南北端应力场存在明显差异, 北端经历了由强应力汇聚区向强应力发散区的突变, 而南端应力变化相对平缓。该海脊北端位于俯冲板块西侧, 俯冲带的俯冲运动对海脊北端区域造成的直接影响较小, 图 4 中该区域对应的强应力发散带主要由南美洲板块撕裂引起的板块下倾翘曲产生^[3]。板块下倾翘曲引起地幔岩浆熔融分异上升, 引发岩浆底劈和喷发以及地壳、岩石圈减薄, 逐渐演变为地幔流发散区^[42]。斯科舍海脊南端与南美洲-南极洲转换板块边界相连, 剪张性调节作用于走滑断层, 构造动力能量难以聚集, 应力强度较弱, 地幔不受限制地从俯冲板片边缘和南极洲板块下方流入弧后区域^[23, 43]。

4 结论

1) 研究表明, 南桑威奇俯冲带沿海沟轴向

俯冲强度和深度均存在明显差异。海沟最北端板块俯冲深度最小, 未到达岩石圈底部。沿海沟向南, 俯冲深度逐渐增大, 至海沟 56°~60°S 区域, 俯冲深度达到最大, 略大于 500 km, 该区域北部构造运动强度明显强于南部。海沟 60°S 以南区域, 俯冲深度减小至 200 km 以上。

2) 南桑威奇俯冲地震震级较低, 大部分小于 5.5 级, 反应俯冲板块与上覆板块间耦合程度较低, 以低应力状态为主; 俯冲板块俯冲角度较大, 最大可达 75°左右, 弧前侵蚀作用明显, 增生楔发育不良, 具有典型的马里亚纳型俯冲带特征。

3) 根据研究区小尺度地幔对流位场和剩余大地水准面异常的综合解释结果, 东斯科舍海脊中部岩石圈中的地幔上升流与北端岩石圈中的地幔下降流导致该区域内出现地幔横向密度差异, 引发地幔环型对流场。除海脊内普遍存在的极型地幔对流外, 东斯科舍海脊软流圈与上地幔上部内还存在很强的环型地幔流, 流动方向近 N-S 向。

4) 大地水准面异常主要通过横向密度差异反映地幔环型对流场的分布情况, 而小尺度地幔对流位场主要通过应力分布反映地幔极型对流场的分布情况。两者互为补充, 从应力和密度角度实现对不同深度异常信息的综合解释, 为地球物理资料稀少地区提供了一种有效的研究方法。

参考文献:

- [1] Stern R J. Subduction Zones[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(4): 1012.
- [2] 张继, 李海平, 陈青, 等. 俯冲带研究进展与问题[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(1): 18-27.
Zhang Ji, Li Haiping, Chen Qing, et al. Review on the research of subduction zone[J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(1): 18-27.
- [3] Leat P T, Pearce J A, Barker P F, et al. Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: the South Sandwich arc-basin system[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2004, 227(1): 17-35.
- [4] Tonarini S, Leeman W P, Leat P T. Subduction erosion of forearc mantle wedge implicated in the genesis of the South Sandwich Island (SSI) arc: Evidence from boron isotope systematics[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 301(1-2): 275-284.
- [5] Lindeque A, Martos Y M, Gohl K, et al. Deep-sea pre-glacial to glacial sedimentation in the Weddell Sea and southern Scotia Sea from a cross-basin seismic transect[J]. *Marine Geology*, 2013, 336(1): 61-83.

- [6] Nerlich R, Clark S R, Bunge H P. The Scotia Sea gateway: No outlet for Pacific mantle[J]. *Tectonophysics*, 2013, 604(5): 41-50.
- [7] Leat P T, Day S J, Tate A J, et al. Volcanic evolution of the South Sandwich volcanic arc, South Atlantic, from multibeam bathymetry[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2013, 265(5): 60-77.
- [8] Maldonado A, Dalziel I W D, Leat P T. The global relevance of the Scotia Arc: An introduction[J]. *Global & Planetary Change*, 2015, 125(4): A1-A8.
- [9] Evariste N H, Genyou L, Tabod T C, et al. Crustal structure beneath Cameroon from EGM2008[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2014, 5(1): 1-10.
- [10] Tamay J, Galindo-Zaldívar J, Martos Y M, et al. Gravity and magnetic anomalies of ecuadorian margin: Implications in the deep structure of the subduction of Nazca Plate and Andes Cordillera[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2018, 10(85): 68-80.
- [11] Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the earth's geoidal undulations and gravity anomalies?[J]. *Marine Geodesy*, 1983, 7(1-4): 61-100.
- [12] 柯小平, 王勇, 许厚泽. 基于变密度模型的位场界面反演[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(3): 825-829.
Ke Xiaoping, Wang Yong, Xu Houze. Interface depths inversion of potential field data with variable density model[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(3): 825-829.
- [13] 林淼, 朱建军, 田玉淼, 等. 大地水准面异常在湖南地区的地球物理解释[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 472-483.
Lin Miao, Zhu Jianjun, Tian Yumiao, et al. On the use of geoid anomalies for geophysical interpretation over the area of Hunan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(2): 472-483.
- [14] Doin M P, Fleitout L, Dan M K. Geoid anomalies and the structure of continental and oceanic lithospheres[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1996, 101(B7): 16119-16135.
- [15] Kiefer W S, Kellogg L H. Geoid anomalies and dynamic topography from time-dependent, spherical axisymmetric mantle convection[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1998, 106(3-4): 237-256.
- [16] Cadio C, Panet I, Davaille A, et al. Pacific geoid anomalies revisited in light of thermochemical oscillating domes in the lower mantle[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 306(1): 123-135.
- [17] Mishra D C, Kumar M R, Arora K. Long wavelength satellite gravity and geoid anomalies over Himalaya, and Tibet: Lithospheric structures and seismotectonics of deep focus earthquakes of Hindu Kush – Pamir and Burmese arc[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(6): 93-110.
- [18] Sreejith K M, Rajesh S, Majumdar T J, et al. High-resolution residual geoid and gravity anomaly data of the northern Indian Ocean: An input to geological understanding[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62(62): 616-626.
- [19] Yadav R, Tiwari V M. Lithospheric density structure of andaman subduction zone from joint modelling of gravity and geoid data[J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2018, 47(5): 931-936.
- [20] 傅容珊, 常筱华, 黄建华, 等. 区域重力均衡异常和上地幔小尺度对流模型[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(S2): 249-258.
Fu Rongshan, Chang Xiaohua, Huang Jianhua, et al. Regional gravity isostatic anomaly and small scale convection model in upper mantle[J]. *Acta Geophysical Sinica*, 1994, 37(S2): 249-258.
- [21] 宋世荣, 卢贵清, 方剑. 欧亚板块均衡大地水准面异常及其动力学特征[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(3): 1029-1033.
Song Shirong, Lu Guiqing, Fang Jian. Isostatic geoid anomalies of Eurasia plate and its geodynamical feature[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1029-1033.
- [22] Brett C P. Seismicity of the South Sandwich Islands region[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 51(2): 453-464.
- [23] Vanneste L E, Larter R D. Sediment subduction, subduction erosion, and strain regime in the northern South Sandwich forearc[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, 107(B7): 2149.
- [24] Thomas C, Livermore R, Pollitz F. Motion of the Scotia Sea plates[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 155(3): 789-804.
- [25] Forsyth D W. Fault plane solutions and tectonics of the South Atlantic and Scotia Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(11): 1429-1443.
- [26] Larter R D, Vanneste L E, Morris P, et al. Structure and tectonic evolution of the South Sandwich arc[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2003, 219(1): 255-284.
- [27] Livermore R, Cunningham A, Vanneste L, et al. Subduction influence on magma supply at the East Scotia Ridge[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1997, 150(3-4): 261-275.
- [28] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. Correction to “The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)”[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2013, 118(5): 2633-2633.
- [29] Runcorn S K. Flow in the mantle inferred from the low degree harmonics of the geopotential[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 141(1-4): 375-384.

- [30] 陆洋. 中国南海高分辨率大地水准面及海底地形特征[J]. 自然科学进展, 2002, 12(7): 767-770.
Lu Yang. Characteristics of high resolution geoid and seafloor topography in the South China Sea[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(7): 767-770.
- [31] 张赤军, 骆鸣津, 方剑, 等. 青藏高原大地水准面异常的解释与场源效应初探[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1126-1133.
Zhang Chijun, Luo Mingjin, Fang Jian, et al. The interpretation of Qinghai-Tibet Plateau geoid anomaly and primary research in its field effect[J]. Scientia Sinica Terrae, 2011, 41(8): 1126-1133.
- [32] Lagabrielle Y, Godd ris Y, Donnadiou Y, et al. The tectonic history of Drake Passage and its possible impacts on global climate[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2009, 279(3): 197-211.
- [33] Bruguier N J, Livermore R A. Enhanced magma supply at the southern East Scotia Ridge: Evidence for mantle flow around the subducting slab?[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2001, 191(1): 129-144.
- [34] Leat P T, Livermore R A, Millar I L, et al. Magma Supply in Back-arc Spreading Centre Segment E2, East Scotia Ridge[J]. Journal of Petrology, 2000, 41(6): 845-866.
- [35] 叶正仁, 王建. 上地幔变黏度小尺度对流的数值研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 335-339.
Ye Zhengren, Wang Jian. A numerical research on the small-scale convection with variable viscosity in the upper mantle[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 335-339.
- [36] 张克亮, 魏东平. 环太平洋俯冲带内双地震带及其成因机制研究进展[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 31-39.
Zhang Keliang, Wei Dongping. Progresses of the researches and the causing mechanisms on the double seismic zones within the subduction zones around the Pacific Ocean[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 31-39.
- [37] 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 711-735.
Zheng Yongfei, Chen Yixiang, Dai Liqun, et al. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to collisional orogens[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45(6): 711-735.
- [38] 邢健, 郝天玢, 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.
Xing Jian, Hao Tianyan, Hu Litian, et al. Characteristics of the Japan and IBM subduction zones: Evidence from gravity and distribution of earthquake sources[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 116-140.
- [39] 武继峰, 杨志强, 胡洋, 等. 利用卫星重力数据计算地幔对流应力场[J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 29-32.
Wu Jifeng, Yang Zhiqiang, Hu Yang, et al. Calculate the mantle convection stress field using satellite gravity data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(5): 29-32.
- [40] 高金耀, 金翔龙. 由多卫星测高大地水准面推断西太平洋边缘海构造动力格局[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 600-608.
Gao Jinyao, Jin Xianglong. Tectonic and geodynamic pattern of marginal seas on the west Pacific inferred from multi-satellite altimetry geoid[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 600-608.
- [41] 高金耀, 李家彪, 林长松. 南冲绳海槽岩石圈构造动力作用机制探讨[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 349-355.
Gao Jinyao, Li Jiabiao, Lin Changsong. Probing into lithospheric tectonic mechanics of southern Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 349-355.
- [42] Fretzdorff S, Livermore R A, Devey C W, et al. Petrogenesis of the Back-arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. Journal of Petrology, 2002, 43(8): 1435-1467.
- [43] Dvorkin J, Nur A, Mavko G, et al. Narrow subducting slabs and the origin of backarc basins[J]. Tectonophysics, 1993, 277(1-4): 63-79.

Analysis of geoid anomalies and mantle convection features in the South Sandwich subduction zone

LIU Xin-zhe^{1, 3}, CHEN Wen-wen², XING Jun-hui^{1, 3}, WU Xiao-yang^{1, 3}, AN Long^{1, 3}, ZHANG Hao^{1, 3}, PENG Shu-cong^{1, 3}

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Editorial Office of Journal of Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Oct. 19, 2018

Key words: the South Sandwich subduction zone; EGM2008 gravity field model; geoid anomaly; mantle convection

Abstract: In this paper, the South Sandwich subduction zone is investigated as an example for applications involving gravity anomalies. Based on the EGM2008 ultra-high-order gravity field model, satellite gravity data, and the remove-restore method, we calculated the geoids and the separation of geoid anomalies at different field source depths. Then, we calculated the stress field from small-scale mantle convection based on the Runcorn model. Finally, we obtained a comprehensive understanding of the structural characteristics and the mantle convection model of the subduction zone based on the natural seismic distribution and previous research results. The results show that the South Sandwich subduction zone is a typical Mariana type with a large subduction dip angle, low seismic magnitude, and obvious fore-arc erosion. The subduction depth differs strongly from south to north, with the maximum subduction depth of 500 km occurring in the middle-northern part. Controlled by the density difference between the asthenosphere and upper mantle, a strong southward axial mantle flow occurs beneath the East Scotia Ridge. The structure of the subduction zone is strongly correlated with the stress field from small-scale mantle convection. The research results presented in this paper provide a new research approach and method for understanding the deep tectonic characteristics of the South Sandwich subduction zone, the subduction movement, the mantle convective direction, and its dynamic control mechanism.

(本文编辑: 刘珊珊)